

平成 25 年度 博士学位論文

乾燥地大規模植林のための
水制御技術に関する検討

成蹊大学大学院理工学研究科 理工学専攻
プロセスシステム研究室
D115102 横佩 おさむ
(指導教授：小島 紀徳)

目次

乾燥地大規模植林のための水制御技術に関する検討

本論文の概要と構成	3
第一部 序論	5
第一章 緒言：乾燥地植林による炭素固定の重要性	5
第二部 ミクロな水制御技術：技術開発と測定	21
第二章 新規保水材の開発	22
第三章 土壌透水性の測定と浸透速度の定式化	32
第三部 メソスケールでの水制御技術：表面流出モデルの構築	44
第四章 西豪州における対象地の概要と測定	45
第五章 表面流出モデルの構築	55
第六章 降雨パターンの影響	61
第七章 浸透速度式の影響	71
第八章 植生の影響および植生分布を考慮したパラメータ決定	79
第四部 マクロスケールへの展開：流出モデルの適用	86
第九章 広域展開による計算結果の評価	87
第十章 植林地の選択と影響評価	100
第五部 結論	111
第十一章 結言：乾燥地植林による炭素固定における本研究成果の活用	111
補遺 植林前後を想定した植生分類ごとの浸透水量	113
補遺 プログラムリスト	331
論文リスト	364
学会発表リスト	365
謝辞	367

本論文の概要と構成

地球温暖化の原因物質である CO₂ の削減技術として乾燥地での大規模植林が検討されている。研究対象地として西オーストラリア州の乾燥地が選択され、実証植林と植林技術開発が行なわれている。乾燥地での植林を成功させるためには、少ない降水量を有効に利用することが重要である。そこで、本研究では、乾燥地大規模植林のための水制御技術に関する研究として、個々の植林サイト内のマイクロな水制御、集水池を中心としたメソスケールでの水移動解析モデルの構築、最終的な目標である広域での植林地の選択と影響評価を行なった。

本論文は五部構成となっており、第一部は序論、第二部はマイクロな水制御、第三部はメソスケールでの水制御、第四部は広域への展開、第五部は結論となっている。

序論では、本論文の目的と意義を明確にする。はじめに地球温暖化問題の主要原因物質である CO₂ の多様な削減技術の内での乾燥地での植林の重要性について述べた。特に水制御技術開発の重要性に基づき、本研究の必要性、新規性について述べた。

第二部では個々の植林対象地域内のマイクロなスケールでの水制御技術開発に関する研究内容をまとめている。第二章では植物の成長に対する土壌の保水性の重要性を述べた上で、保水材利用による水の有効利用、土壌の保水性を向上させるための新規な保水材の開発についてまとめている。第三章では、土壌の透水性、透水性試験であるシリンダーインタープレート法による現地での測定結果について述べた。

第三部では乾燥地での大規模植林地選定に利用可能な表面流出モデルの構築について検討した結果をまとめている。第四章では研究対象地として選択した集水池である Jim's pool について、その概要についてまとめるとともに、降雨量の測定、集水池内水位測定の方法とその実測データを報告している。第五章では、現地での実測データに基づく表面流出モデルの構成、特に降雨、浸透、蒸発、表面流出のそれぞれのモデル化手法について述べている。浸透速度式について浸透試験結果と現実の降雨時の浸透速度との相違を補正する浸透補正係数 PR を、表面流出についてはメッシュ内均一の条件で計算を行なうことによる実際の水の流れとの相違を補正する等価粗度係数 N をフィッティングパラメータとして導入した。第六章以下では Jim's pool 内での水位データの実測値とモデル計算結果の水位データを比較することで、モデルの評価とフィッティングパラメータの選定を行なった。第六章では、降雨パターン、第七章では浸透速度式の影響について議論し、これらの結果をふまえて、第八章では植生の影響および植生分布を考慮した、広域に展開可能なパラメータを決定した。

第四部では第三部で構築した表面流出モデルを広域に適用した。第九章では広域展開を行なうためのモデルの再構築を行なった上で計算を行ない、現地での植生分布とモデルによる土壌浸透水量との比較からモデルの妥当性の議論を行なった。自然植生のある場所の浸透量を確認することで植林木が成長するのに必要な浸透水量を検討した。第十章では現在裸地である部分に植林を行なうことを想定し、その場所の浸透速度が裸地相当から森林相当へと変化するものと仮定し、このことが現状の自然植生特に森林生態系での流入水量、ひいては浸透水量に与える影響を評価した。

第五部では本論文の結論を述べた。

第一部 序論

第一章 緒言：乾燥地植林による炭素固定の重要性

1.1 背景

1.1.1 地球温暖化問題

温暖化は、大気中に含まれる温室効果ガスによって生じる。原因となる大気中の温室効果ガスは近年どのように推移してきたのだろうか。**Figure 1-1** は代表的な温室効果ガスである CO₂ の大気中の濃度である。これを見ると 18 世紀以降、産業革命後の化石エネルギー利用の増大により人為的な二酸化炭素排出量が増加している。20 世紀に入ってから 1950 年以降さらに急激に二酸化炭素排出量の増加がみられ、現在では 400 ppm 近くにまで大気中の濃度は増加している。

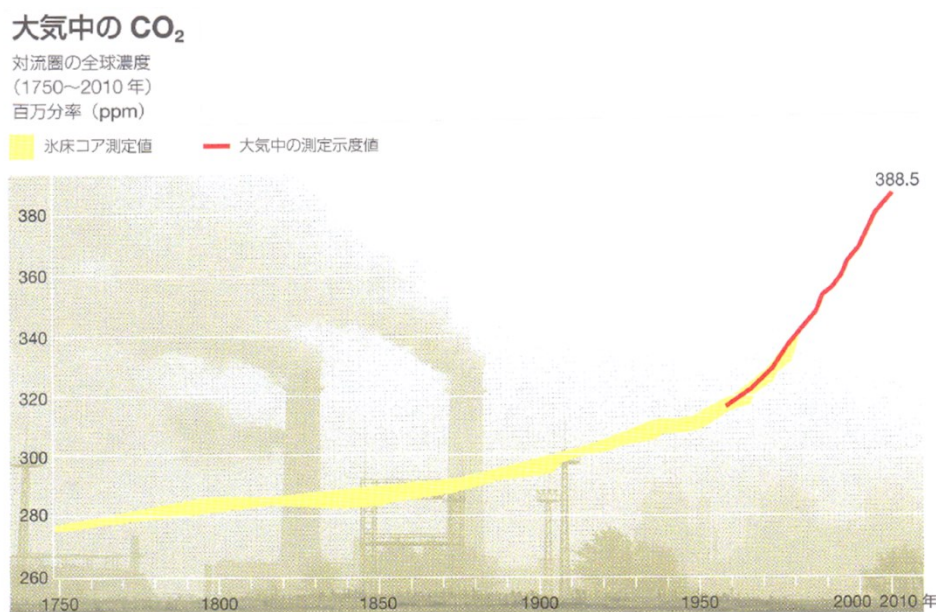


Figure 1-1 大気中の CO₂ 濃度推移 (Kirstin and Thomas (2011))

この結果、将来的には、地球上の気温上昇、それに伴う気候変動、生態系や農業党への深刻な影響をもたらす可能性があるかと懸念されている。こういった気候変動に関する世界的な関心の高まりから、1988 年に世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)の協力のもとに、知見を集約する国際的枠組みとして気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が設立された。以来、1990 年に第一次評価報告書(FAR)、1995 年に第二次評価報告書(SAR)、2001 年に第三

次評価報告書(TAR)、2007年に第四次評価報告書(AR4)が公表され、気候変動に関するその時点での最先端の知見を評価報告書として集約・評価してきた。(塚本・深見 2010)(近藤 2012)

現在は第5次評価報告書が作成中である。1992年にはリオ・デ・ジャネイロで「環境と開発に関する国際連合会議」いわゆる地球サミットが開かれ、そこで「気候変動に関する国際連合枠組条約」が採択された。それを受けて、締約国会議(COP)が開かれ、その第3回の1997年12月には161ヶ国の政府関係者やNGOが参加し京都会議(COP3)が開催された。その際に、先進国の温室効果ガス排出抑制・削減の数値目標が提案され採択された。(小島 2011) この中で、日本は1990年を基準年として2008~2012年の第1約束期間の間に年間平均6%の削減を数値目標とされた。(亀山, 高村 2002)(小島 2011)(田森 2009)

1.1.2 京都議定書 (小島 2011)

京都会議(COP3)で決まったことは以下のとおりである。

- 1990年基準で2010年までに、厳密には2008~2012年の平均値として以下を達成する必要がある。ただし、第一世代、第二世代フロンが、オゾン層破壊防止を目的としたモントリオール議定書で逐次生産できなくなったことによる代替フロン類であるHFC,PFC,SF₆に限っては、1995年基準である。
- 先進国5.2%減：日本6%, 米国7%, EU8%減。
- 単位モル(分子数)当たりの温暖化効果を、CO₂を1としたときに、メタンは21倍、N₂Oは310倍、代替フロン類が1300倍、PFCが6500倍、SF₆が23900倍として与える。
- 京都メカニズムと呼ばれる、共同実施、排出権取引、CDM(Clean Development Mechanism)。さらに、1990年以降の土地利用変化による吸収もカウントされることとなった。

1.1.3 京都メカニズム

COP3では各国の温室効果ガス削減目標を達成するための補助的手段として市場原理を活用する京都メカニズム(共同実施、クリーン開発メカニズム(CDM)、排出量取引)が導入されることになった。共同実施とは先進国間で温室効果ガス削減事業を実施し、その結果生じた温室効果ガス削減量を投資国側の削減分に移転する仕組みである。またクリーン開発メカニズムは先進国が途上国で実施された温室効果ガス削減事業を実施し、その結果生じた温室効果ガス削減量を先進国側の削減分に移転することを認める制度である。排出量取引は先進国間で排出枠を排出権として取引し移転できる仕組みのことである。

1.1.4 地球温暖化対策技術 (金島, 2007)

温室効果ガス削減に対してどのような対策技術があるか、以下に挙げた。

省エネルギー技術

- コージェネレーションシステム
- 省エネルギー建築
- ヒートポンプ
など

新エネルギー技術

- 太陽光
- 風力
- 水力
- 地熱
- バイオマス
など

炭素固定

- 植林
- 地中貯留

個々の項目について以下でもう少し詳しくまとめた。

1.1.4.1 省エネルギー技術 (金島, 2007)

コージェネレーションシステム

コージェネレーションシステムとはガスや石油を燃料として電気と熱とを同時に取り出すシステムをいう。燃料でエンジンやタービンを駆動して発電すると同時に排熱を給湯や空調、蒸気などの形で活用するので、エネルギー効率が良く、省エネルギー性に優れたシステムである。

省エネルギー建築

断熱性を高めることで室内の温度を安定させ空調に投入するエネルギーを削減する、また窓の位置や窓ガラスなどを工夫することで日射を制御し、室内温度への影響をコントロールする。

ヒートポンプ

ヒートポンプとは、冷媒を熱移動の媒体として活用し、大気中の熱から圧縮機（コンプ

レッサー) を利用して効率良く熱を汲み上げ、移動することにより冷却や加熱を行なうシステムである。

1.1.4.2 新エネルギー技術 (金島, 2007)

新エネルギーとは、「技術的に実用段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの」として新エネルギー法 (2002 年 1 月 25 日改正公布・施行) では定義されている。すでに実用段階にあり、温暖化防止技術に直接効果のある水力発電や地熱発電、研究開発段階にある波力発電や海洋温度差発電などの自然エネルギーは新エネルギーとして定義されていない。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災後、新エネルギー法 (電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法) は廃止され、新たに電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法 (2012 年 7 月 1 日施行) が制定された。

この法律では、電気事業者による再生可能エネルギー電気の固定価格での全量買い取りを義務付けている。対象となる再生可能エネルギー電気は以下に示した。

- 太陽光
- 風力
- 水力(3 万 kW 未満)
- 地熱
- バイオマス (動植物に由来する有機物であってエネルギー源として利用することができるもの (原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭並びにこれらから製造される製品を除く。))
- その他、原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭並びにこれらから製造される製品以外のエネルギー源のうち、電気のエネルギー源として永続的に利用できると認められるものとして政令で定めるもの

1.1.5 炭素固定

植林

CO₂ 吸収源拡大技術として植林により植物の光合成により大気中の二酸化炭素を吸収・固定し減少させる。

地中貯留

発電時に化石燃料を燃焼させることで発生した二酸化炭素を分離し地中に隔離・貯蔵することで大気中の二酸化炭素濃度の増加を防ぐ。

以上のようなさまざまな対策技術がある中で本研究では植林、特に乾燥地、半乾燥地での植林に注目した。以下に乾燥地、半乾燥地での植林の意義を示した。

1.1.6 炭素循環 (小島 2011)(近藤 2009)

Figure 1-2 は IPCC 第四次評価報告書にある地球の炭素バランスである。ここで、矢印で表わされている数字はフラックス、すなわち各ボックス間の移動量である。また、ボックス内の数字はリザーバ、すなわち各ボックス内の炭素保持量である。産業革命以前の地球がほぼ定常状態であったときの数字は、フラックスについては、下に点線のある数字、リザーバについては+/-前の数字である。化石燃料の使用など人為的な活動によりもたらされた付加的な数字は、フラックスについては現在の値を下に実線をつけて表わし、リザーバについてはこれまでの積算量を+/-の後ろに記載している。

ここで、植物、土壌・遺体とあるのはいわゆる生態系内のことであり、増大分は CO₂ 濃度の増加により「植物が太った」ことを意味し、減少分は森林破壊によるものである。これまでの化石燃料使用量 244 Gt-C に匹敵する 140 Gt-C が森林破壊により大気に放出されたと見積もられている。一方、大気中の CO₂ 濃度の増大分は 165 Gt-C である。つまり、過去の森林破壊分程度を植林するだけで、大気中の CO₂ 濃度の増大分(100 ppm)近くを吸収できることになる。ただし、現在でも土地利用変化(主として森林破壊)による炭素排出量は 1.6 Gt-C であり、化石燃料などの排出量 6.4Gt-C を含めた全排出量の 2 割を占めており、これをゼロにすることがまずは必要である。

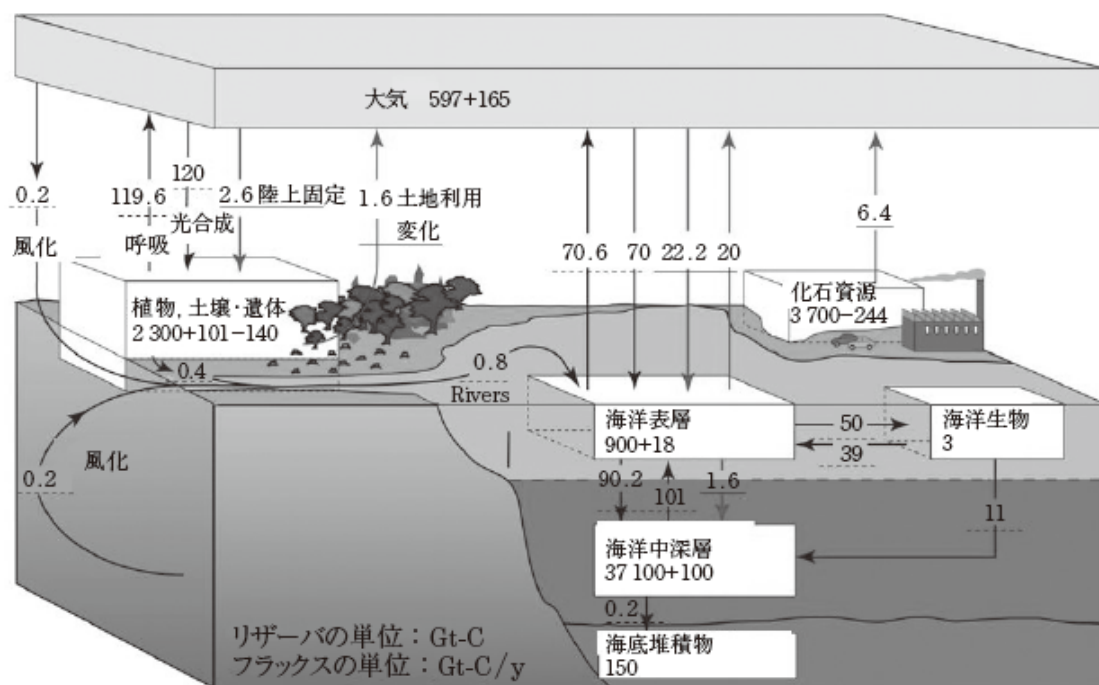


Figure 1-2 地球の炭素バランス

(炭素換算 Pg=Gt=10 億 t, IPCC 第四次評価報告書の図に一部加筆)(小島 2011)

1.1.7 植林 (小島 2011)

京都議定書では土地利用変化による CO₂ の吸収ばかりではなく、森林管理による吸収量として(日本に課せられた 6%減のうち)3.7~3.9%分まで認められることになっているが、どこまで信頼性のある数字が出せるのかは疑問である。また植林などによる吸収量の数字を見積もる場合の精度も問題になる。しかし、見積もりに十分な精度がないとしても、以下のように元々何もないところに樹木が育てば、炭素が固定されていることは明らかである。見積もりの精度を高めることはもちろん必要だが、精度の範囲内で内輸の数字として見積もっておくだけでも十分だろう。植林が化石燃料からの二酸化炭素排出抑制と双璧をなす重要な温暖化対策であると強く認識しておく必要がある。

1.1.8 乾燥地・半乾燥地での植林 (小島 2011)

Table 1-1 にさまざまな生態系が保持する炭素量を示した。**Figure 1-2** の中から生態系だけを切り出し、詳しく分類した表である。出展が異なるので、必ずしも数字には整合性はない。ここで、生体とは生きている生物中の炭素であり、遺体とは土中などの有機物である。有機物[Gt-C]と書いてある数字が、**Figure 1-2** の「植物、土壌・遺体」のリザーバに相当する。密度[t/ha]は単位面積当たりの有機物量を炭素換算したものである。一方、フローは生態系の純一次生産速度を表わしている。同様にその横には面積当たりの値を示した。また、右端の列に時定数[y]として、生体密度および総計の炭素密度を純生産速度で割った値を示した。この値は、生態系が形成されるための時間の目安となる。

全陸域の 3 分の 1 を占める森林生態系が、生体では陸域全体の約 9 割を占めている。一方、沙漠・半沙漠に放棄地を加えれば、こちらの合計もやはり全陸域の 3 分の 1 を占めている。これをもし森林に変えることができるとするならば 1 兆 t(1000 Gt)の炭素が新たに陸上に蓄積されることになる。

Figure 1-2 から大気中に蓄積される炭素は、毎年、6.4 (化石燃料) + 1.6 (土地利用変化(森林破壊)) - 2.6 (陸上固定) - 2.2 (海洋吸収) = 3.2 Gt であり、ちょうど化石燃料から排出される CO₂ の半分である。上述の 1000 Gt を 3.2 で割れば 300 年分の対策になるということである。さらに森林破壊をストップできたならば大気中の CO₂ 増加は年間 1.6 Gt となり、600 年分の対策となる。もちろん沙漠・半沙漠のすべてが植林可能というわけではないが、それでも非常に大きな可能性を持っている。これが、大部分が乾燥地、半乾燥地にある沙漠・半沙漠、放棄地を植林対象地として注目する最も大きな理由である。(近藤 2009)

Table 1-1 生態系の保持炭素量 一次生産得度と時定数(炭素量/純生産)(小島 2011)

	面積 [億 ha]	有機物[Gt-C]		密度 [t/ha]		純生産量 生産密度		時定数 [y]	
		(ストック)				(フロー)			
		生体 , 遺体	生体 , 遺体 (総計)	[Gt-C/y][t/(ha·y)]	生体 (総数)				
熱帯林	18	270 , 126	150 , 70 (220)	13.6	7.5	20	(29)		
温帯林	12	130 , 153	110 , 130 (240)	7.1	5.9	19	(40)		
亜寒帯林	13	110 , 225	85 , 175 (260)	4.25	3.3	26	(79)		
低木林	8	40 , 80	50 , 100 (150)	2.4	3.0	17	(50)		
淡水湿原	4	4 , 80	10 , 200 (210)	1.25	3.1	3.2	(67)		
熱帯草原	13	7 , 104	5 , 80 (85)	1.95	1.5	3.6	(57)		
温帯草原	9	9 , 135	10 , 150 (160)	2.25	2.5	4.0	(64)		
農耕地	14	14 , 84	10 , 60 (70)	4.2	3.0	3.3	(23)		
ツンドラ	8	4 , 160	5 , 200 (205)	0.4	0.5	10	(410)		
(半) 沙漠	45	5 , 26	1 , 6 (7)	0.9	0.2	5.5	(35)		
放棄地	5	15 , 40	30 , 80 (110)	1.25	2.5	12	(44)		
全陸域	149	608 , 40	30 , 80 (110)	1.25	2.5	12	(44)		
全海域	361	608 , 1 213	41 , 81 (122)	39.6	2.7	15.4	(45)		
全地球	510	828 , 2 100	16 , 41 (57)	64.4	1.26	12.9	(45)		

1.1.9 沙漠の雨 (森 1994)(篠田 2009)

沙漠といっても雨が全く降らないわけではない。(篠田 2002) 絶対量は少ないが、極乾燥の極沙漠でも 100 mm 近く、乾燥地の真沙漠では 250 mm、半乾燥地の半沙漠では 500 mm の年平均降水量がある。また、一般的に沙漠の降水は不規則であるといわれる。沙漠内部では、毎年、定期的に降水があるわけではなく、何年に一度という頻度で突発的な降水がある地域もある。世界の乾燥地域の分布図を **Figure 1-3** に、世界の沙漠の分布図を **Figure 1-4** に、年間降水量の変動係数の分布を **Figure 1-5** に示す。変動係数とは

$$\text{年間降水量変動係数} = \frac{\text{年間降水量からの偏差}}{\text{年間降水量}}$$

で示される値である。(Goudie and Wilkinson 1977)(Shinoda 1989)

Figure 1-3 と **Figure 1-5** を比べると乾燥地、半乾燥地では変動係数が大きく、降雨の不規則性が大きいことがわかる。このため、乾燥地、半乾燥地では一旦雨が降った後、数か月全く雨が降らないということがよくある。また、年平均降水量というのは何年間の間に降った雨を年数で割った値なので、ある年は 400 mm の雨が降って次の年は 1 年間全く雨が降らなくても、年平均降水量は 200 mm になる。少ない降水量でも短い時間に降ることで集中豪雨が発生し、洪水となって川に流入し、あふれた水は沙漠地帯を水で覆ってしまい、時には人や家畜が水死する被害も生じる。こういう川はワジと呼ばれ、「通常は水は流れていないが、時に土砂を伴う大出水が生じると水路となるもの」と定義されている。降雨が

あった時、水の通路となる凹地部がワジである。(篠田 2002)

集中豪雨でなくても短期間に降雨が集中すると土壤に浸透する雨は少なくなり、多くが流出してしまう。乾燥地、半乾燥地では地表面に植生が少ないため表土に有機物が乏しく構造的に貧弱である。森林地帯では植生や土壤有機物の豊富さによって、莫大な量の雨水を貯め込む機能を持ち、「緑のダム」と称せられることと対極をなす。

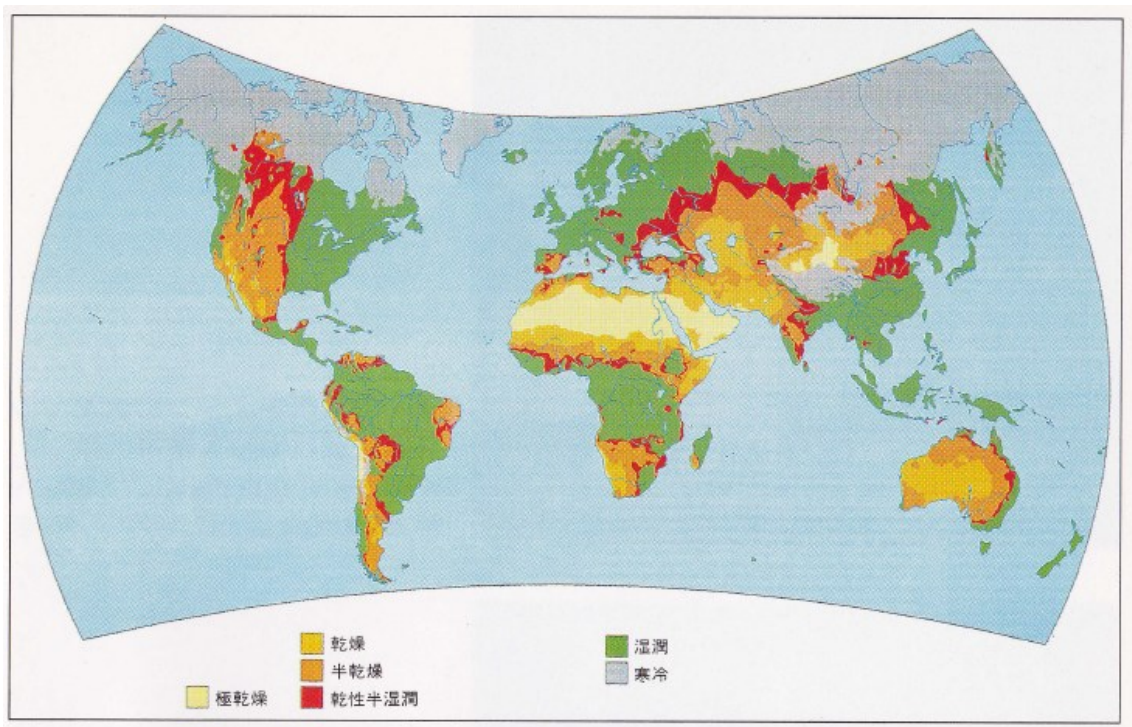


Figure 1-3 世界の乾燥地域分布図 (UNEP 1997) (篠田 2002)

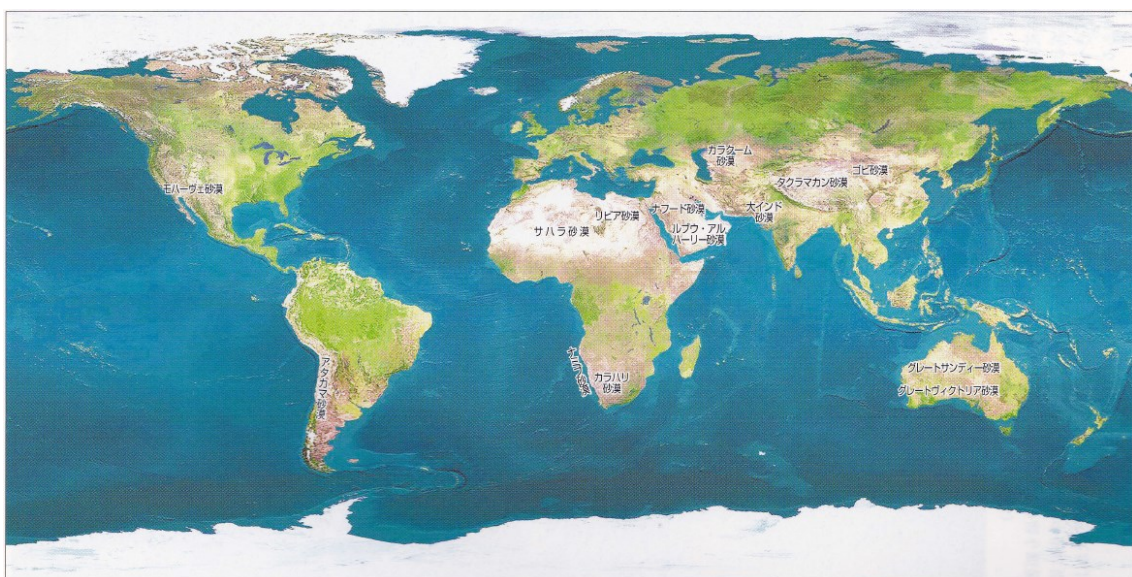


Figure 1-4 世界の沙漠の分布 (Planetary Map による CG 画像より作成) (堀・菊池 2007)

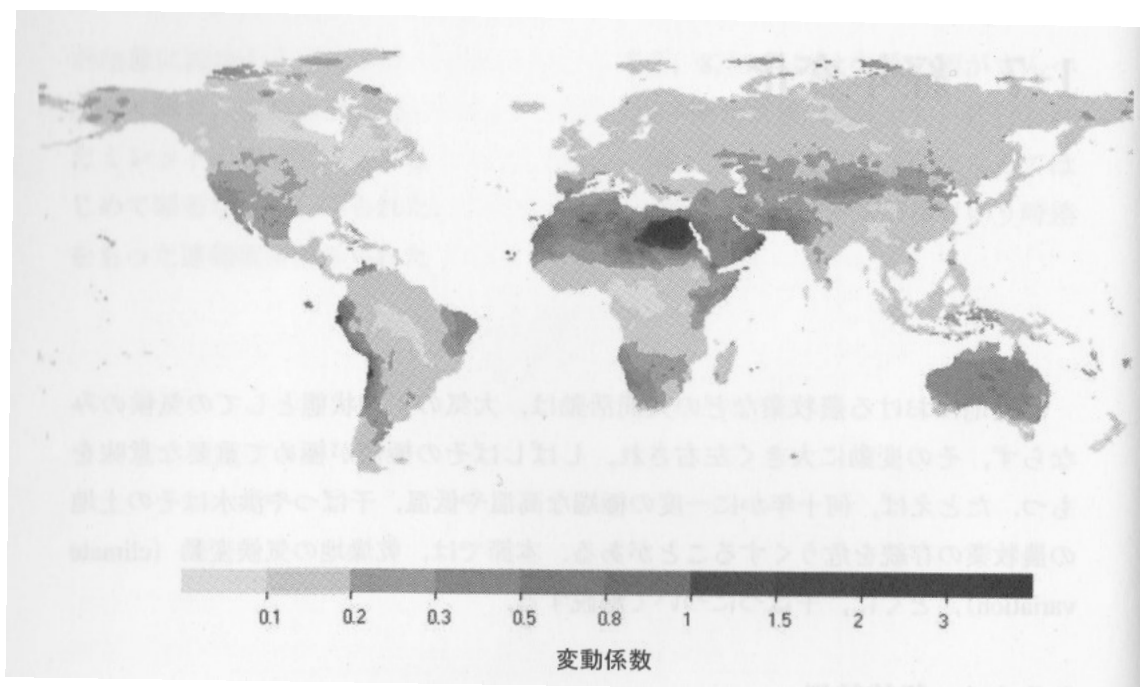


Figure 1-5 年間降水量の変動係数の分布 (篠田 2009)

1.1.10 水制御技術

次に乾燥地で植林を行なう際には、雨水を主な水の供給元と考えて有効利用するための方策を考える必要がある。既存の技術としてはさまざまな灌漑技術が利用されてきた。また、近年では、植林木周辺の土壤に保水材を混ぜることで、少ない降雨を有効利用することも検討されてきた。

1.1.11 ウォーターハーベスティング (高橋 1998)

自然条件を有効利用し環境に大きなインパクトを与えないことからウォーターハーベスティングは雨水利用農業で世界の沙漠地帯の緑化・開発技術の1つとして注目され期待されている。ウォーターハーベスティングは、「灌漑のための農業用水(流出または河川流)の収集と貯蔵」と定義されている。具体的には耕地や作物を畦畔でかこみ、表面流出を貯留するものやワジに長大な堰を築造して耕地に洪水流を導くものなどと説明されている。ウォーターハーベスティングの技術そのものの歴史は古く、紀元前10世紀以前から中東や北アフリカの年平均降水量100 mm以下の極乾燥地を中心に営まれていた。

1.1.11.1 ウォーターハーベスティングの種類 (高橋 1998)

ウォーターハーベスティングは地表流出の収集方法、構成要素によりいろいろ分類され

ている。そのうち代表的なものとして地形的要素に基づく分類がある。この分類は規模の小さなシステムから大きなシステムへと5種類のシステムに区分される。

1.小集水域システム 流出が発生する地域から、それを利用しようとする地域までの流出距離が150 m未満のシステムであり、その形状によりさらに、植物の周りを畦畔で囲む水盤法、等高線畦畔または溝、階段畑、マイクロキャッチメントに分類される。イスラエルを始め西アフリカ各地では **Figure 1-6** に示す Neguin マイクロキャッチメントがよく知られている。

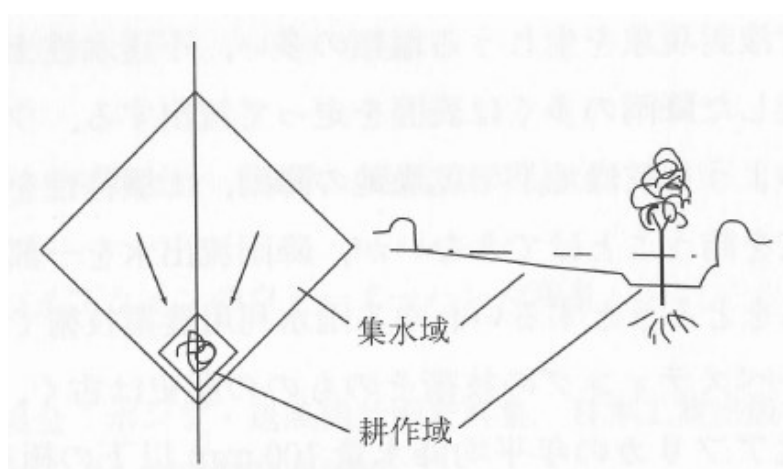


Figure 1-6 Neguin マイクロキャッチメント (高橋 1998)

チュニジア(年降水量200~400 mm)の果樹地域では **Figure 1-7** に示す Meskat システムが行なわれ、「耕作域：集水域」比(CCR)が1：0.7である。

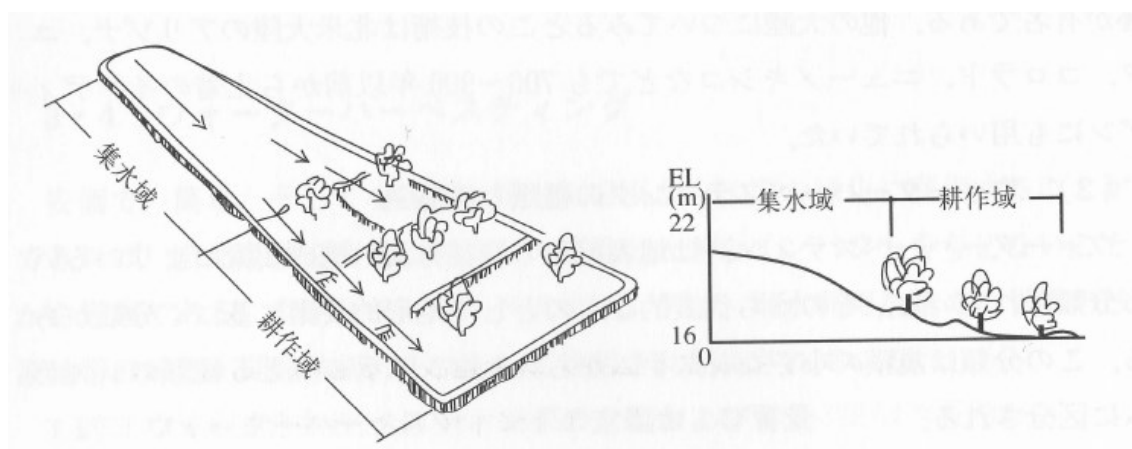


Figure 1-7 チュニジアの Meskat システム (高橋 1998)

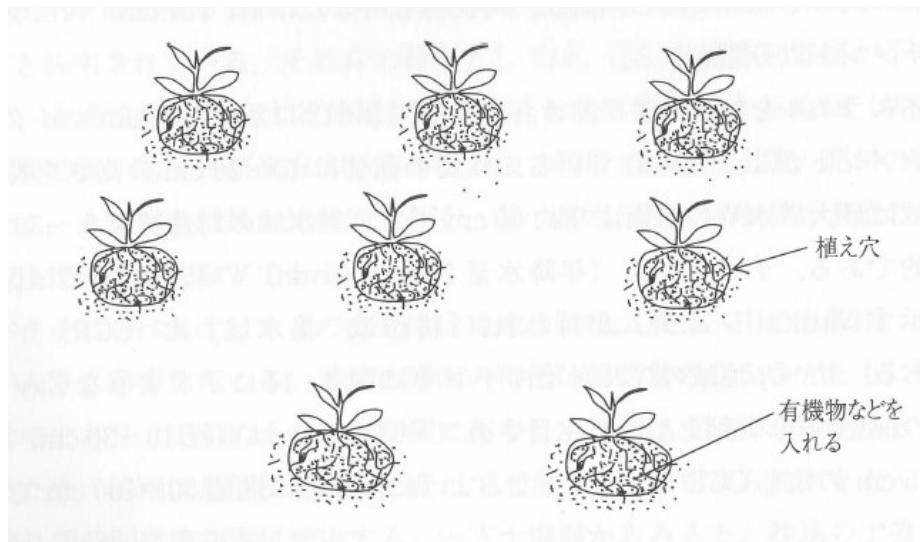


Figure 1-8 ブルキナファソの Zay (高橋 1998)

サヘル地域のブルキナファソでは Figure 1-8 に示すような Zay が荒廢地の植生回復手段として注目されている。Zay は直径 10~30 cm、深さ 5~15 cm の穴を CCR が 1~3 になるように、中心間隔 50~100 cm で作られる。このような短斜面流域を持つウォーターハーベスティングは CCR が重要なパラメータとなる。Table 1-2 に年間降水量別の CCR をまとめた。

Table 1-2 各地域の年間降水量別 CCR (高橋 1998)

	CCR
年間降水量80~120mm	
水盤の微小集水域 (イスラエル)	10 : 1
等高線方向の条地 (イスラエル)	4 : 1~20 : 1
年間降水量150~300mm	
Meskat (チュニジア)	2 : 1
アリゾナ (米国)	12 : 1
年間降水量300~600mm	
バリンゴ地方 (ケニア)	1 : 1~2 : 1
テキサス (米国)	2 : 1
アリゾナ (米国)	3 : 1~5 : 1

1.1.12 乾燥地植林のメリット・デメリット

乾燥地で植林を行なう際のメリットとデメリットをまとめた。

メリット

- 乾燥地では現在食糧生産を行なっていないため、植林を行なう際に食糧生産と競合し

ない。

- 面積が広大。

デメリット

- 元々の降雨量が少ないことで乾燥地となっているため植林木が成長するのに十分な水を確保することが難しい。
- 降雨時にほとんど雨水が浸透せずに表面流出してしまう。

以上のことから面積が広大ではあるものの、植林木の成長に必要な水を確保することが困難である場所が現在乾燥地となっている。植林木の成長に必要な水の確保ができれば、植林対象地としての可能性は大きく広がる。

1.1.13 乾燥地での水移動シミュレーション

上記の理由から、植林対象地の水移動がどのようになっているかを把握することが植林対象地選定には重要である。はじめに既存のシミュレーションモデルを利用できるか検討した。既存のモデルとして、HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)、Hydro-BEAM(Hydrological River Basin Assessment Model)などがあつた。しかしこれらのモデルは主に河川流域の洪水予想などに使用されるもので普段河川のない乾燥地での水移動シミュレーションは対象としていなかった。またモデルを動かすのに必要なパラメータも、降雨量、気温、露天温度、風向、日射量、湿度、雲量、植生など多くのものが必要であつた。またメッシュサイズ(空間解像度)が 100 m~1 km 以上と大きく、これらのモデルを植林地選定に利用することはできないと判断した。

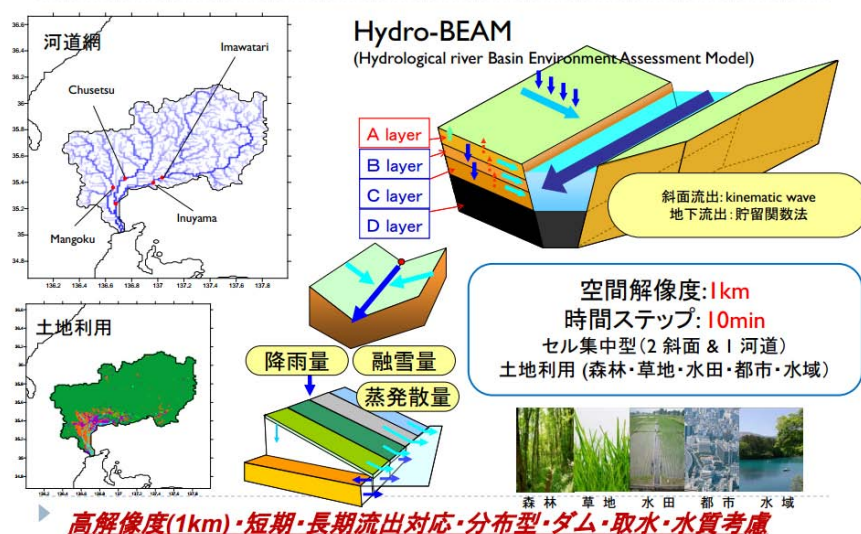


Figure 1-9 Hydro-BEAM の概要 (佐藤 2013)

1.2 本研究の目的と意義

以上のような背景から、本研究では地球温暖化対策として乾燥地での大規模な植林を成功させるための水制御技術について検討した。個々の植林サイト内のミクロな水制御技術から広域での植林のための水移動シミュレーションモデルの構築まで行なった。最終的な目的は水移動シミュレーションモデルにより、広域での植林地選定を可能にすることである。本研究により構築された水移動シミュレーションモデルは乾燥地を対象にしたもので、既存の洪水予想のためのモデルなどと比較して、簡素な入力パラメータによってシミュレーションが可能になったことがこれまでにない特徴である。また広域での自然植生場所の水移動を明らかにすることで、沙漠、半沙漠のような場所から植林対象地を選定することが可能になった。

1.3 研究プロジェクト

本研究での研究対象地について、詳細は第三部の第四章で述べるが、概要をここであげておく。本研究室では植林による炭素固定システムの構築を目的としたプロジェクトに参加しており、プロジェクトの植林対象地として年間平均降水量 200 mm 前後の半乾燥地である西オーストラリア州内陸に位置するレオノラ近郊の約 50 km 四方の Sturt meadows (STM) 地区を挙げている。(Kojima *et al.*, 2006) この地域は山に囲われていて、大雨が降ると中心に存在する塩湖へと雨水が流入する。**Figure1-10** に西オーストラリア州全体図を、**Figure 1-11** に Sturt Meadows (STM) 地域の全体図を示した。この地域では、降雨が少なく、降雨時にも表面流出による水損失が多く、植物成長に雨水が利用されにくいという特徴がある。



Figure 1-10 Western Australia (オーストラリア気象局ホームページより)



Figure 1-11 Sturt Meadows (STM)

引用文献

- 金島 正治, (2007): 地球温暖化防止技術読本, オーム社, p.33, p.41, p.50, p.58
- 亀山 康子, (2002): 1 気候変動問題の国際交渉の展開 高村 ゆかり, 亀山 康子 編著 京都議定書の国際制度, 信山社, pp.10-18
- 小島 紀徳 (2011): 序章 小島 紀徳, 江頭 靖幸 編著 沙漠を森に—温暖化への処方箋—, コロナ社, pp.1-6
- 近藤 裕昭 (2009): 6章 山地 憲治 監修 田森 行男, 北村 興二, 横山 伸也, 山崎 正和 共編 新・地球温暖化対策教科書, オーム社, pp.125-127
- 佐藤 嘉展 (2013): 流域環境評価モデル(Hydro-BEAM)実行支援システムと流域モデル化ツールについて, 日本気象協会 技術研究会発表資料(2013.12.26 閲覧)
http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/file/130508JWA_sato.pdf
- 篠田 雅人 (2002): 気象ブックス 014 砂漠と気候, 成山堂書店, 口絵 9
- 篠田 雅人 (2009): 乾燥地科学シリーズ第2巻 乾燥地の自然, 古今書院, p.32
- 高橋 悟 (1998): 3・4 ウォーターハーベスティング 遠藤 勲, 安部 征雄, 小島 紀徳 編, 沙漠工学, 森北出版, pp.82-88
- 田森 行男 (2009): 8章 山地 憲治 監修 田森 行男, 北村 興二, 横山 伸也, 山崎 正和 共編 新・地球温暖化対策教科書, オーム社, pp.183-187
- 塚本 直也 深見 正仁 (2010): 1章 吉田 文和, 池田 元美, 深見 正仁, 藤井 賢彦 編著 持続可能な低炭素社会Ⅱ—基礎知識と足元からの地域づくり—, 北海道大学出版会, pp.3-4
- 堀 信行, 菊池 俊夫 (2007): めぐろシティカレッジ叢書7 世界の砂漠—その自然・文化・人間—, 二宮書店, 口絵 1
- 森 忠保 (1994): 第1話 3 降れば土砂降り、その雨はどこへ 安部 征雄, 小島 紀徳, 遠山 柁雄 編著 沙漠物語, 森北出版, pp.10-12
- Goudie A, Wilkinson J (1977): The Warm Desert Environment, Cambridge: Cambridge Press, p.95
- Kirstin Dow, Thomas E Downing (2011): The Atlas of CLIMATE CHANGE Mapping the World's Greatest Challenge Third Edition, Myriad Editions, 近藤 洋輝 訳, (2012): 温暖化の世界地図 第2版, 丸善出版, p.4, p.46
- Shinoda M (1989): Annual rainfall variability and its interhemispheric coherence in the semi-arid region of tropical Africa: Data updated to 1987, Journal of the Meteorological Society of Japan, 67: 555-564

UNEP (1997): World Atlas of Desertification, Arnold, London オーストラリア気象局
(2013年12月17日閲覧) <http://www.bom.gov.au/wa/observations/map.shtml>

第二部 ミクロな水制御技術：技術開発と測定

ミクロな水制御技術として、第二章では植林を行なう際の植林木の近傍の土壌の保水性、植林木の成長に必要な水を確保するための保水材について、その開発の必要性と結果を述べた。第三章では土壌の透水性と透水性試験の一つであるシリンダーインテークレート法についてその測定の必要性と結果を述べた。

第二章 新規保水材の開発

2.1 緒言

2.1.1 土壌の保水性

土には長期間にわたって水分を保持できるというすばらしい性質がある。降雨や灌漑によって大地に浸入した水は、絶え間なく重力が下向きに働くにもかかわらず、根が植物体の生存のために必要な水を吸引するのに十分に長い期間、地表近くに留まる。さらにこの水は、酸素が気相を通過して根に到達できるような形態で土に保持されている。土は、こうした貯水容器としての機能だけでなく、理想的な生長培地としても機能する。(Jury and Horton, 2006)

2.1.2 沙漠の土壌の保水性

沙漠が植物の生育を制限しているのは、少雨、乾燥、高温、塩分集積などの気象条件や土壌の物理性、化学性である。土壌中の粘土や有機物含有量が少ないと保水性が悪くなり、灌水された水は植物が利用する前に流亡することになる。乾燥地での作物栽培や植林を実施するには、限定された水の有効利用が喫緊の課題である。(加藤 2011)

2.1.3 保水材の種類

保水材には大きく分けて無機系保水材と有機系保水材がある。無機系保水材として、パーライト、ベントナイトなどがある。また低品位のボーキサイトを焼成した保水材も検討されている。(加藤ら 2001) (濱野ら 2006)

乾燥地に適合した保水材の開発が進んでいる。保水材とは、土壌改良剤の一つであり、乾燥地に用いることで、雨量が少ない中でも土壌の水分を保持し、植物が育つ環境にすることを可能とする材料である。しかし、使用後は土中に残留する。

高吸水性ポリマー (SAP) は高度に水を吸収して膨張しゲルとなる高分子である。SAPはミクロな分子の網目の中に水を取り込むため、そのゲルを押しても水は出てこない。

またSAPは水に溶解する水溶性ポリマーを分子間で架橋したものとも表現できる。

(Shimomura, 2007) この特性を生かし、乾燥地の保水材だけではなく、紙おむつ、災害防止具、家庭用品、土木工事などあらゆるところで使用されている。ここでもその使用後の処理が問題となっている。

SAPの場合、一般に使用後は汚物を大量に含み、簡単に水分を除去することができない

ため、再使用やリサイクルは困難である。したがって、資源や環境の問題を解決する手段として、以下の特徴を有する新規SAPが求められる。

- ①植物などの天然物を原料とすること（枯渇資源から再生資源への転換）
- ②廃棄物となったときの環境負荷が低いこと（生分解性が一つの解決策）
- ③安価な原料を用い、効率的な生産および加工プロセスを有すること。

また、焼却以外のSAPの処理方法としてコンポストなどによって処理することができる、生分解性SAPが望まれている。

高い吸水性を実現するためには、SAPの分子構造として、以下の3要素を有することが重要である。

- ①十分に長い高分子鎖（分子量100万程度）
- ②親水性基（通常はカルボン酸ナトリウム）
- ③低架橋密度（水中で高分子鎖が十分に広がる）

したがって、天然物由来で生分解性を有するSAPを用いるには

- ①天然物由来の高分子
- ②天然物由来の原料から高分子ポリマーを得る
- ③ ①, ②, を満足するものに架橋構造を導入することが必要となってくる。（Yoshimura and Fujioka, 2007）

そこで本研究では、生分解できるように天然物の多糖類から保水材の合成を行い、その生分解性保水材の吸水性、生分解性を評価した。

このような性質を有する保水材合成を可能とする手法として、本研究ではグラフト重合法を考えた。グラフト重合とは、主鎖とよばれる直鎖状のポリマーに複数の直鎖状の側鎖が結合する分岐ポリマーの重合物を得る手法であり、主鎖と側鎖の両ポリマーの性質を併せ持つことを可能とする。（The Society of Polymer Science Japan, 2006）すなわち、多糖類は生分解性を有し、これに保水性を有するアクリル系物質をグラフト重合することにより、生分解性保水材が合成できる。

Nayak and Singh(2001), Mahdavinia *et al.*(2004)はグラフト重合法により保水材が合成されることを示している。また、合成物の物性評価、塩濃度、pHの吸水性に対する影響についても検討されているが、従来のアクリル系保水材との吸水力比較、高温での乾燥後の繰り返し吸水性、さらに本研究のようにキトサンを基材としたときの生分解性についてはこれまで評価は行われていない。また、多糖類に対するアクリルモノマーのグラフト重合法として Haofeng Yu, Guoqi Fu and Binglin He(2007), M. Gurruchaga *et al.*(1989)を参考に、CAN(Ammonium cerium(IV) nitrate)を開環剤として用いた。そこで本研究では、可溶性多糖

類（キトサン）を用い、均一系かつ単純系（キトサンとアクリル系物質のみ）で反応を行い、合成した保水材の吸水性評価、熱耐久性評価及び生分解性評価を行なった。

2.2 実験方法

2.2.1 保水材の合成

キトサン(以下 CTS と略記、東京化成工業(株)製 C2395) 1 g を 1%酢酸 90 ml に完全に溶解させた後セパラブルの三口フラスコに入れ、湯浴の温度を 55-60 °C に設定し、20 分程度保持後合成を開始した。N₂ 雰囲気下、スターラーで十分に攪拌し、開環剤として CAN(Ammonium cerium(IV) nitrate、Nayak and Singh(2001))0.15 g を蒸留水 5 ml に溶かし加えた。30 分後、重合開始剤として APS(Ammonium peroxodisulfate)0.10 g を CAN と同じ要領で加えた。さらに 30 分後、アクリル酸 (A) 10.08 g に水酸化ナトリウム(NaOH)を加え、水溶液 50 ml としてこれを加えた。次に湯浴の温度を 60°Cまで上げ、30 分後、架橋剤として MBA (N,N'-Methylenebisacrylamide) 5 mg を CAN、APS と同じ要領で加えた。湯浴の温度を 60-65 °C に保ち、30 分後窒素置換を停止した。さらに 2 時間後に合成反応を停止するため氷浴で冷却、その後 12 時間以上放置した。以後この得られた物質を分離せずにそのまま用いた。以下ではこれを合成保水材 SAM (Super Absorbent Material)と表記した。

前報(Kishiro *et al.* 2007)で行ったチェリーガムを基体とする同様の反応生成物の分析結果から予測される、キトサンの一部が開環しアクリル酸とグラフト重合する際の反応機構を

Figure 2-1 に示した。

2.2.2 保水材の回収

合成反応の後フラスコ内に存在するゲル状物質のみをスパチュラで取り出し、テフロンビーカーに入れた。JK ワイパー（日本製紙クレシア(株)製）で蓋をし、輪ゴムで止め、減圧乾燥機で 65°C に加熱乾燥し乾燥保水材を得た。得られた乾燥保水材はテフロンビーカーの壁面に付着しているので、スパチュラなどで壁面からはがして回収した。

2.2.3 簡易法による保水材の吸水性評価

SAM 合成後、吸水性の評価を簡易法を用いて行なった。SAM0.1g を秤量瓶に入れ、蒸留水 30ml を加えて 24 時間放置し十分に吸水させた。秤量瓶にろ紙で蓋をし、シャーレを重ね上下反転させ保水材に吸水されていない水を重力排水した。24 時間放置後、秤量瓶を元に戻し、ろ紙を剥がし重量を測定し吸水後の重量とした。吸水後の重量と吸水前の重量か

ら吸水倍率を計算した。

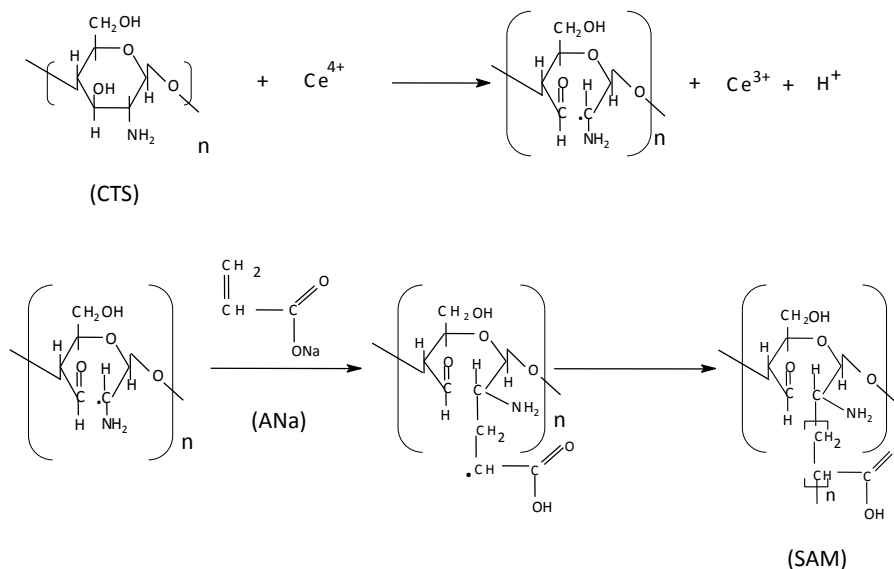


Figure 2-1 Expected reaction mechanism of SAM (保水材の反応機構予測)

2.2.4 JIS 法に準ずる保水材の吸水性評価

次に、NaOH：アクリル酸のモル比を変えて合成した保水材 3 種類(各 5 サンプル)については JIS K7223(高級水性樹脂の吸水量試験方法)に準ずる形で行ない、簡易法の結果と比較した。ナイロンメッシュの布を 10×40 cm の長方形に切り半分に折り、左右を熱でシールしティーバッグ状にした。作成した袋には穴を開け吊るすための紐を取り付けた。合成した乾燥保水材をミルで砕いた後ふるい分けし、200 μm 以下のものを測定に用いた。作成した袋に乾燥保水材 0.1g を入れ袋ごと重量測定を行ない吸水前重量とした。pH、EC(電気伝導度)を測定した蒸留水 1 L を入れたビーカー中に袋を浸し、規定時間浸漬した。規定時間経過後袋を水から出し 10 分間紐で吊るし、吸水されていない余分な水を重力排水した。重力排水後袋ごと重量を測り吸水後の重量とした。吸水後、吸水前の重量から保水材の吸水倍率を計算した。

2.2.5 保水材の熱耐久性評価

簡易吸水力測定法で吸水力を測定した後、秤量瓶を室温、50℃、60℃、80℃、100℃で乾燥させ再度同様の方法で吸水させた。吸水倍率を測定し乾燥時の熱に対する耐久性を測定した。一部の耐久性が認められたサンプルについては繰り返し測定を行なった。なお、保水材使用の対象として考えられる乾燥地では、日射により土壌温度はここで用いた条件以

上の温度となることが多々みられることから、80℃以上の温度についても試験を行った。

2.2.6 保水材の生分解性評価

キトサンの生分解性については、土壌中での分解やキトサン分解菌を用いた試験 (Nakashima *et al.*, 2005)などが行われているが、本研究ではより簡易的な以下の方法を用いた。生分解性評価は攪拌振とう槽で 35 ℃,65rpm の条件の下、キトサン分解酵素であるキトサナーゼ (起源生物 *Streptomyces griseus*, Sigma-Aldrich Co.製 C9830-10UN) を用いて分解生成される D-グルコサミンを Blix 法(Fukui, 1969)により定量することで行なった。試料としてキトサン、合成保水材、市販保水材を用意し、それぞれに pH5.6 酢酸ナトリウム緩衝液 20ml を加え、吸水させた後、キトサナーゼ 2.5unit を加え生成される D-グルコサミン量を定量した。

2.3 結果および考察

2.3.1 合成された SAM の概要

SAM の合成を行なうと肌色のゲル状物質と酢酸臭の液体が得られた。ゲル状物質のみをスパチュラで取り出しテフロンビーカーで減圧乾燥し、乾燥保水材が得られた。乾燥保水材を薬包紙に載せたものの写真を **Figure 2-2** に示した。

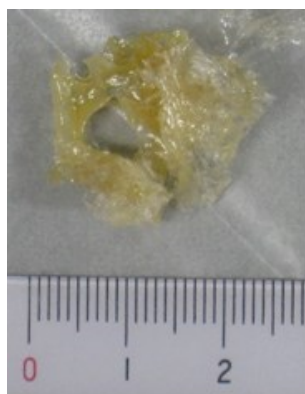


Figure 2-2 Picture of SAM(乾燥させた合成保水材)

2.3.2 吸水性に及ぼす NaOH/アクリル酸比の影響

合成した保水材は添加した NaOH 量の増加とともに吸水量が増加した。NaOH : アクリル酸のモル比が 1:1 の保水材では吸水後 3 時間の吸水倍率は 300 倍程度、24 時間後の吸水倍率は 500 倍程度となり市販保水材と同等 (市販品のカタログ値による) の吸水力を持つことが分かった。NaOH 量をアクリル酸に対して 1.3 以上添加すると、反応溶液が大きく、ア

ルカリ性になり、反応がうまく進まず、保水材が合成できなかった。このため以下では、市販の保水材と同等でかつ安定した保水性を示した NaOH : アクリル酸比 1:1 を採用した。

2.3.3 JIS 法と簡易吸水性評価法との比較

簡易吸水力測定法の結果を JIS 法による結果と比較して **Figure 2-3** に示す。吸水倍率は JISK7223 の測定法の方が大きくなるが、NaOH 量に比例して吸水力が増加する傾向はどちらも変わらなかった。むしろ、NaOH とアクリル酸との比の影響は簡易法の方が顕著に見られることから、以下では簡易法を用いて測定した。

測定方法は JISK7223 の方が煩雑なので今回用いた簡易吸水力測定法でも十分に保水材の吸水力測定は行えるのではないかと考えた。

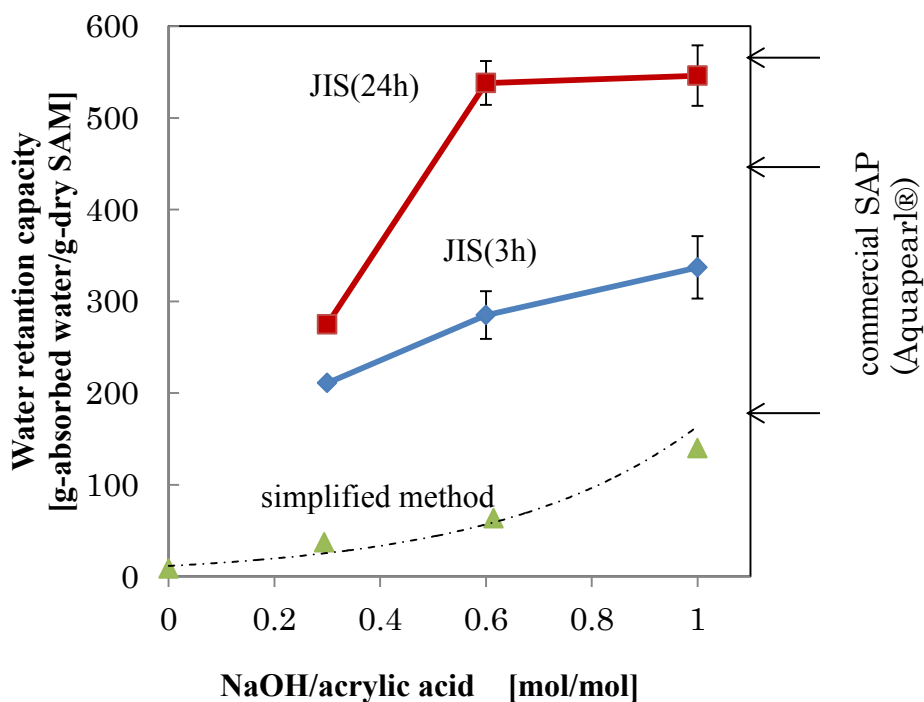


Figure 2-3 Effect of added amount of NaOH on water retention capacity (NaOH 添加量の吸水倍率に対する影響) (three arrows from the top are respectively data at JIS(24h), JIS(3h) and simplified method of commercial SAP)

2.3.4 熱耐久性評価

簡易吸水力測定で吸水倍率を測定した後、恒温槽の温度を変えて乾燥させ、再度吸水させ吸水倍率を測定し、乾燥時の熱耐久性を測定した。結果は **Table 2-1** に示す。市販の保水材は室温での吸水倍率は SAM より高かったが、50℃、60℃で乾燥させると吸水倍率が 6 割から 7 割程度まで減少した。

一方 SAM は吸水倍率がほとんど変化しなかった。80℃、100℃で乾燥させると市販保水材は焦げてしまい全く吸水しない状態になった。SAM は吸水倍率が7割程度まで減少したものの繰り返し吸水でき乾燥時の熱耐性があることが確認できた。

Table 2-1 Water retention capacity with heat resistance

Super absorbent polymers (SAP)		treatment temperature (24H in a temperature control oven)				
		without heating	50 °C	60 °C	80 °C	100 °C
Aqua pearl® (Mitsubishi Chemical Co.,Ltd)	AP-100	200	120~140	100~120	×	×
	AP-250	200	120~140	100~120	×	×
Aqua reserve® (Nippon Synthetic Chemical Industry Co., Ltd)	AP-200	200	120~140	100~120	×	×
	AP-300	200	120~140	100~120	×	×
This work (Grafted on chitosan)		140	120~140	120~140	100~110	100~110

Water retention capacity (g-absorbed water /g-dry SAP):measured at room temperature by simplified method after 1~4 times heat treatment
 ×: No suction force after only once treatment

2.3.5 生分解性評価

キトサン分解酵素であるキトサナーゼを加えて生成した D-グルコサミン量を測定した。結果は **Figure 2-4** のようになった。

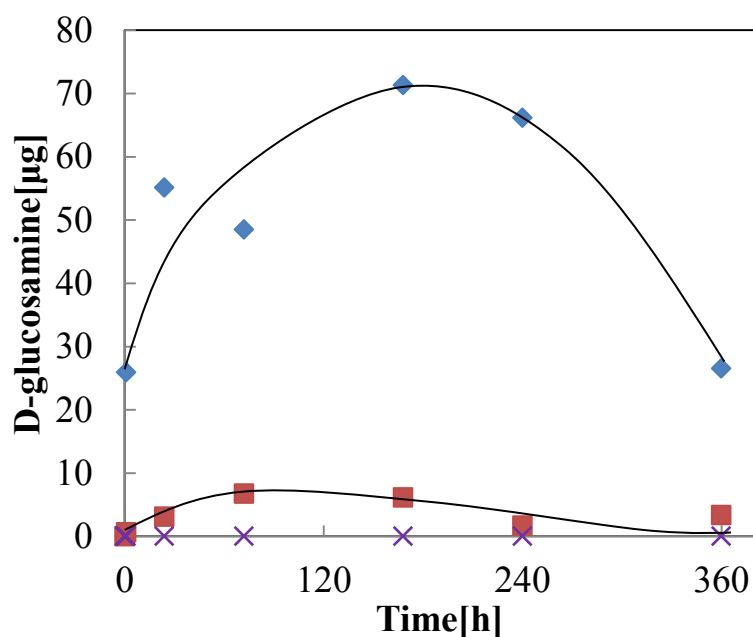


Figure 2-4 Results of biodegradability test (生分解性実験結果): pH 5.6, buffer 90ml, chitosanase 2.5unit; ◆, chitosan 0.1g; ■,This work 1.56g(chitosan 0.1g); ×, Aqua pearl 1.56g

ある時点からグルコサミン量の減少がみられる理由については明らかではないものの、最大生成量で比べると、キトサンにキトサナーゼを加えたものから最も多くの D-グルコサミンが生成した。また合成した保水材中にもキトサンが同量含まれているが、吸水した保水材が膨張することでキトサナーゼが反応するのを妨げ分解反応を阻害しているためキトサンと比べると D-グルコサミンが数分の一程度しか生成していないのではないかと考えた。市販保水材からはグルコサミンが生成されなかった。グルコサミンの生成量は少なかったが、本保水材からはグルコサミンの生成が確認できたので今回合成した保水材は生分解性を有していると考えた。

2.4 結言

新規生分解性保水材(SAM)の保水性は市販保水材と同程度であった。合成した保水材は NaOH 添加量の増加と共に吸水力が増加した。また JISK7223 と比較し簡便な吸水力測定法でも同様に NaOH 量に比例して吸水力が増加する傾向が見られた。吸水後の乾燥時に高温で乾燥し繰り返し吸水させると従来の市販保水材では吸水力が減少、もしくは吸水力が失われたが、合成した保水材では吸水力がほとんど減少せず高温での熱耐久性があることが分かった。生分解性についても従来の保水材と比較すると生分解性の期待できるものが合成できた。

引用文献

- 加藤 茂 (2011) 保水材 小島 紀徳,江頭 靖幸 編著 沙漠を森に—温暖化への処方箋
— コロナ社 p118
- 加藤 茂, 濱野 裕之, 上宮成之, 小島 紀徳, 山田 興一 (2001): 焼成ボーキサイトの保
水能評価, 化学工学論文集, **27**, 1, pp.50-56
- 濱野 裕之, 小島 紀徳, 河原崎 里子, 高橋 伸英, 田原 聖隆, 田内 裕之, 江頭 靖
幸, 斉藤 昌宏, 安部 征雄, 山田 興一 (2006): 乾燥地における焼成ボーキサイトの
土壌改良材としての利用, 沙漠研究, **16**, 1, pp.31-38
- Fukui, S., “Experimental Method in Biological Chemistry A- Quantitative Analyses of Reducing
Sugar (Seibutsu Kagaku JikkennhouA- Kangentou no Teiryuu)”, pp.112-134, Tokyo Univ. Pub.
(1969)
- Haofeng Yu, Guoqi Fu and Binglin He; “Preparation and adsorption properties of PAA-grafted
cellulose adsorbent for low-density lipoprotein from human plasma,” *Cellulose*, **14**, (2) 99-107
(2007)
- Jury, W. A. and Horton, R. (2006): 土壌物理学-土中の水 熱 ガス 化学物質移動の基礎と応用
— (取出伸夫 監訳: 井上光弘, 長裕幸, 西村拓, 諸泉利嗣, 渡辺晋生訳) , pp.154-157
- Kishiro, F., Y. Shimoda, P. S. Vijayanand, S. Kato, S. Satokawa, T. Kojima; “Synthesis of Novel
Biodegradable Superabsorbent Material for Desert from Natural Polymer Using Graft
Polymerization, Proc. Malaysia-Japan Intern. Symp. on Advanced Technol. 2007 (MJISAT
2007), 154, 12-15th November Kuala Lumpur, Malaysia (2007)
- Mahdavinia, G.R., A.Pourjavadi, H.Hosseinzadeh and M.J.Zohuriaan; “Modified Chitosan
4.Superabsorbent Hydrogels from Poly (acrylic acid-co-acrylamide) Grafted Chitosan with
Salt- and pH-responsiveness Properties,” *European Polymer Journal*, **40**, 1399-1407 (2004)
- M. Gurruchaga, I. Goni, M. B. Vazquez, M. Valero and G. M. Guzman; “An approach to the
knowledge of the graft polymerization of acrylic monomers onto polysaccharides using Ce(IV)
as initiator,” *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters*, **27**, (5) 149-152 (1989)
- Nayak, B.R. and R.P.Singh; “Synthesis and Characterization of Grafted Hydroxylpropyl Guar Gum
by Ceric Ion Induced Initiation,” *European Polymer Journal*, **37**, 1655-1666 (2001)
- Shimomura, T.; “Super Absorbance Polymers” (in Japanese), *Kagaku to Kyouiku*, **55**, 296 (2007)
- The Society of Polymer Science Japan; “Fundamental of Polymer Science”, Kiso Koubunshi-Kagaku,
p. 373, Tokyo Kagaku Doujin, Tokyo (2006)

Yoshimura, T. and R. Fujioka; "Manufacture of Environmental Friendly Super Absorbent Polymer,"
Kemikaru Enjiniaringu, 52, Vol.7, 65 (2007)

第三章 土壤透水性の測定

3.1 緒言

3.1.1 土壤 (中野ら 1995)

土は固相部分と間隙部分とから成りたっており、間隙部分にはガスと土壤水分が存在している。土は、固相部分の体積がおおよそ 50~60%以上になると、硬くて排水性が悪くなり、植物が生育しにくい。

3.1.2 土の透水性 (中野ら 1995)

土壤中の水の流れには、大きく分けて、間隙を満たして流れるような飽和流と少し乾いた状態で水が濡れているところから乾いている方へと移動する不飽和流の2つがある。雨水の地中への浸入、水田、水路、ダムからの漏水、湛水域の地下排水、地下水排水などはどちらかといえば飽和流である。飽和流は、水の圧力勾配や位高差によって生じる。一方、土壤は水の流れを抑えようとする抵抗を働かせる。飽和透水係数は、飽和流におけるこうした土壤の抵抗を表わすものである。透水係数の代表的な値を **Table 3-1** に示す。土壤が飽和流に及ぼす抵抗は、水の粘性によるものが大きい。また、飽和透水係数は、間隙の大きさや間隙の網目模様の形状に影響されるため、粒径組成と定性的な関係がある。

Table 3-1 透水係数の代表的な値 (中野ら 1995)

土壤	K (cm s ⁻¹)
純礫	1以上
純砂	1~10 ⁻²
混合砂	10 ⁻² ~10 ⁻³
細砂	10 ⁻³
シルト質砂土	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴
シルト	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵
粘土	10 ⁻⁶ 以下

通常用いられている飽和透水係数の測定法については **Table 3-2** に示す。それぞれの方法には特徴があり、目的に応じて使い分ける必要がある。詳細は第三部の表面流出モデルの構築の部分で述べるが、モデルの計算過程で土壤への浸透は重要なものとなる。そのため、植林地選定対象地の土壤浸透速度を測定する必要がある。研究対象地では複雑な測定装置

の持ち込みは困難であるためシリンダーインテークレート法で測定を行なうことにした。

Table 3-2 飽和透水係数の測定法 (中野ら 1995)

	測定法	特徴
室内測定法	変水頭法 定水頭法	透水性の比較的小さい場合に用いられる 透水性の大きい場合に用いられる
現場測定法	シリンダーインテークレート法 ゲルフパーミアメーター法 オーガーホール法	現場における水の浸入能(畑地浸入能)の測定に用いられる 定水位井透水計、地下水位が低い場合に適する 帯水層の透水性の測定に用いられる

3.1.3 シリンダーインテークレート試験 (駒村 2002)

灌漑水または降雨が圃場面から土壤中に浸入する速度をインテークレートと呼ぶ。単位時間あたりに浸入した水量を水深で表わし、一般に mmh^{-1} の単位が使われる。測定法は円筒法と畦間法^{うねま}があり、円筒法であるシリンダーインテークレート試験は直径 30 cm の鉄製円筒を 20 cm 程度土壌中に打ち込み、円筒内の水位が一定になるように給水して測定する。このとき、円筒内部の浸入を鉛直方向に保つために周囲に緩衝溜を設け、円筒内外の水位差が小さくなるよう配慮する。現場の状況によっては、外円筒の代用として、内円筒の周囲を盛り土で囲む場合もある。(中野ら 1995)

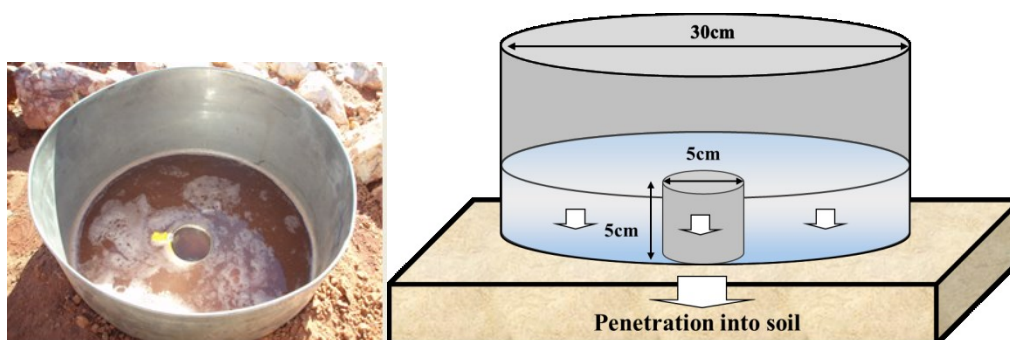


Figure 3-1 シリンダーインテークレート試験装置

3.2 測定 (中野ら 1995)

緩衝池に水を注ぐと同時に測定を開始する。

マリOTT管がある場合は、内円筒内、緩衝池ともそれぞれ別々のマリOTT管で一定水位になるように給水し、マリOTT管内の水位変化から内円筒への給水量を測定する。

マリOTT管がない場合は、水位ゲージもしくはものさしで測定した内円筒内の水位の時間変化から浸入速度を求める。このときは、所定の水位から 1~2 cm 水位が下がったら、内円筒内へ静かに給水して一定幅の水位変動を保つようにする。

浸潤開始後 10 分間は、30 秒から 1 分おきに、その後 2 時間までは 5~10 分おきに、その後は 30 分おきくらいの間隔で水位変化を測定し、浸入速度が一定になるまで測定を続ける。

本研究では上記の測定法をもとに、簡易的な測定を行なった。シリンダーインテークレート試験装置を **Figure 3-1** に示す。

インテークレートは、給水時間の経過と共に減少し、ほぼ一定に近づく。このときの値をベーシック・インテークレートと呼び、灌漑方式や灌漑強度を決定する時の指標として用いられる。実際には、この値に達するまでに長時間を要するので浸入強度の時間変化率がその時点で浸入強度の 10%に低下したときの値として定めることが多い。

実際の測定では、各サイトにおいて、サイトの土壌状態を代表する水平な地点を選定した。地表面の有機物を取り除いた後、ハンマーで地面にシリンダー(直径 30 cm, 高さ 20 cm)を 10 cm 打ち込んだ(島田, 1988)。その際、乾燥地特有のクラスト構造を破壊しないよう慎重に作業を進めた。次にシリンダーの外周 10 cm の所に土手を設け、水の浸入を鉛直方向に保つための緩衝溜とした。シリンダーの設置後、シリンダーおよび緩衝溜に灌水を行なった。攪乱による土壌の泥濁化を防ぐため、ビニールシート上に灌水を行ない、それを速やかに抜き去るという灌水方法をとった。灌水直後から 1 分ごとにシリンダー内の水位を測定し、その低下量から土壌への浸透量を算出した。また水位の低下に応じて適宜吸水を行ない、できるだけ水位を一定に保った。水位の低下速度が安定した時点で測定を終了した。(安部ら, 2001)

3.3 測定結果

集水池 Jim's pool 周辺での測定結果および研究対象地 Sturt Meadows station 内の植林サイト周辺での測定結果(齊藤, 2011)を **Table 3-3, 3-4, 3-5** にまとめた。

Table 3-3 中の空白部分は測定を行っていない時間である。**Table 3-3** は集水池 Jim's pool 周辺での測定結果、**Table 3-4, Table 3-5** は STM 内の植林サイト周辺の裸地と草地での測定結果である。集水池 Jim's pool および STM については第三部の第四章に詳しい説明を記述してある。

Table 3-3 シリンダーインテークレート法 測定結果 (Jim's pool 周辺)

	1	2	3		1	2	3
min	mm	mm	mm	min	mm	mm	mm
0	0	0	0	52	40.8	58	53
2	1.5	2	0	53	40.8	58	53
4	5.6	5	4	58	44.9	64	59
6	8.4	8	6	59	44.9	64	59
8	8.4	10	9	64			64
10		13	12	65	50.4	70	64
11		13	12	66		70	
13	14.5			67	50.4		
14	14.5			70			70
16		19	18	71		76	70
17		19	18	72		76	
19	19.3			73	55.5		
21	19.3			75	55.5		
22		26	24	77		81	77
23		26	24	78		81	77
26	24			80	64.1		
28	24	32	28	82	64.1		
29			28	83		87	83
33	28.1			84		87	83
34	28.1	42	34	87	69.1		
35		42	34	89	69.1	92	88
39	32.2			90			88
40	32.2	48	41	94	75.2		
41		48	41	95			94
45	36.5			97	77.5		
46		53	47	99	81.2		
47	36.5	53	47				

例として **Table 3-3** の地点 3 の測定結果を横軸に時間[min]、縦軸に浸透速度[mm/min]にとってグラフにしたものを **Figure 3-2** に示した。

Table 3-4 シリンダーインテークレート法 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 裸地)

	1	2	3	4	5
min	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	0	0	0
1	4	1	1	1	2
2	6	3	2	2	3
3	10	6	3	2	3
4	10	8	4	3	3
5	10	10	5	4	4
6	11	11	6	5	5
7	14	12	7	6	5
8	14	14	8	6	6
9	15	15	8	7	6
10	16	17	9	8	7
11	18	18	10	9	7
12	19	19	11	9	8
13	21	21	12	10	8
14	22	22	13	10	9
15	24	24	14	11	9
16	25	25	16	12	10
17	26	26	17	12	10
18	27	28	18	13	10
19	28	29	18	13	11
20	30	31	19	14	11
21	31	32.5	20	14	12
22	33	34	21	15	12
23	35	35.5	22	15	13
24	36	37	23	15	13
25	37	38.5	24	16	13
26	39	40	25	17	14
27	40	41.5	26	18	14
28	41	43	26	18	15
29	42	44	27	19	15
30	43	45	28	19	15
31	45	46.5	29	20	16
32	46	48	30	20	16
33	47	49.5	30	21	16
34	48	51	31	21	17
35	49	52	32	22	17
36	50	53	33	23	18
37	52	54	33	23	18
38	53	55	34	24	18
39	54	56.5	34	24	19
40	56	58	35	25	19
41	57	59	36	26	19
42	58	60	37	26	19
43	59	61	37	26	20
44	61	62	38	27	20
45	62	63	39	27	20

Table 3-4 シリンダーインテークレート法 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 裸地)

	1	2	3	4	5
min	mm	mm	mm	mm	mm
46	63	64	39	28	21
47	64	65	40	28	21
48	65	66	41	29	21
49	66	67	42	30	22
50	67	68	43	31	22
51	68	69.5	44	31	22
52	69	71	45	31	23
53	70	72.5	46	32	23
54	71	74	47	32	23
55	72	75	48	33	24
56	73	76	48	33	24
57	74	77.5	49	34	25
58	75	79	50	34	25
59	76	80	51	35	25
60	77	81	52	35	26
61	78	82.5	52	36	26
62	79	84	53	36	26
63	80.5	85	54	36	26
64	82	86	54	37	27
65	82.5	87	55	37	27
66	83	88	56	38	28
67	84.5	89	57	38	28
68	86	90	58	38	28
69	87	91	59	39	29
70	88	92	60	40	29
71	89	93.5	61	41	30
72	90	95	62	42	30
73	91	96.5	63	42	30
74	92	98	63	43	31
75	93	99	64	43	31
76	94	100	65	43	32
77	95	101	65	43	32
78	96	102	66	44	33
79	97	103	67	44	33
80	98	104	67	45	33
81	99	105	68	45	33
82	100	106	69	46	34
83	101	107	70	47	34
84	102	108	71	47	35
85	104	109	71	47	35
86	106	110	72	48	35
87	106.5	111	73	48	36
88	107	112	73	48	36
89	107.5	113	74	49	37
90	108	114	75	49	37

Table 3-5 シリンダーインテークレート法 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 草地)

	1	2		1	2
min	mm	mm	min	mm	mm
0	0	0	46	96	125
1	6	4	47	98	127
2	10	8	48	99	129
3	13	11	49	100	132
4	15	14	50	101	135
5	18	17	51	103	138
6	20	20	52	105	140
7	22	22	53	107	143
8	24	24	54	108	146
9	27	28	55	110	149
10	29	31	56	112	152
11	31	34	57	114	155
12	33	36	58	116	157
13	34	39	59	117	160
14	36	41	60	119	162
15	39	43	61	121	165
16	41	47	62	122	167
17	43	50	63	124	169
18	45	53	64	126	171
19	48	56	65	127	173
20	49	59	66	129	176
21	52	61	67	131	178
22	55	64	68	132	180
23	56	66	69	135	182
24	58	69	70	137	185
25	60	71	71	139	188
26	61	74	72	140	190
27	63	77	73	142	192
28	65	79	74	143	195
29	67	82	75	145	198
30	68	84	76	147	200
31	70	86	77	149	202
32	72	88	78	152	205
33	74	90	79	153	207
34	75	92	80	154	209
35	77	95	81	156	212
36	79	97	82	158	215
37	81	100	83	160	217
38	83	103	84	161	219
39	84	106	85	162	221
40	86	109	86	164	223
41	88	112	87	166	225
42	90	115	88	167	227
43	91	118	89	168	230
44	93	120	90	169	232
45	95	123			

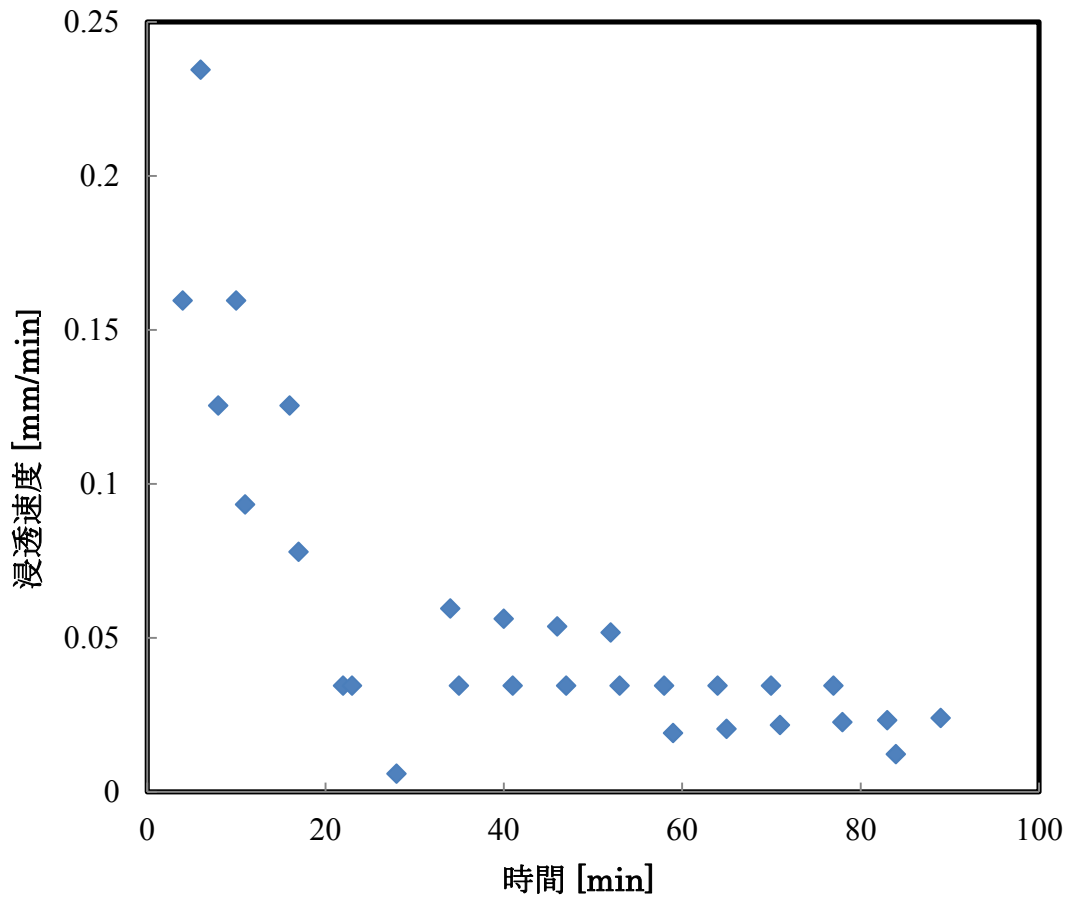


Figure 3-2 シリンダーインテークレート試験測定結果(Jim's pool 周辺 地点 3)

3.4 浸透速度式

測定結果を用いて各測定地点の浸透速度式を Horton 式 (Horton, 1939), Kostiakov 式 (Kostiakov, 1932), Philip 式 (Philip, 1957)の形で作成した。

3.4.1 Horton 式

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-Kt} \quad (1)$$

f_c : 定常浸透速度 (飽和透水係数) [mm/min]

f_0 : 初期浸透速度 [mm/min], t : 積算浸透時間 [min], K : 定数[min^{-1}], f_t : 時間 t の浸透速度 [mm/min]

3.4.2 Kostiakov 式

$$I=kt^m \quad (2)$$

I : 浸透量 [mm], k : 経験定数[mm/min^m], m : 経験定数[-]

3.4.3 Philip 式

$$I=St^{0.5}+At \quad (3)$$

I : 浸透量 [mm], S : 吸水度 [mm/min^{0.5}], A : 最終浸透速度 [mm/min]

Horton 式 (Horton, 1939), Kostiakov 式 (Kostiakov, 1932), Philip 式 (Philip, 1957) は測定結果から、時間に対する浸透速度を **Figure 3-2** のようにプロットし、近似式を求めてそれぞれの式の形にした。 **Table 3-4, 3-5** の測定結果から上記の3つの浸透式に定式化したものを **Table 3-6, 3-7** に示す。同様に **Table 3-3** の測定結果から Horton 式の形で定式化したものを **Table 3-8** に示す。

Table 3-6 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 裸地)から作成した浸透速度式

	<i>Kostiakov</i>	<i>Philip</i>	Horton
	$I=kt^m$	$I=St^{0.5}+At$	$f_t=f_c+(f_0-f_c)e^{-Kt}$
1	$I=3.03t^{0.82}$	$I=2.82t^{0.5}+0.92t$	$f_t=1.20+(1.363)e^{-0.0541t}$
2	$I=1.89t^{0.92}$	$I=2.44t^{0.5}+1.03t$	$f_t=1.27+(1.077)e^{-0.0516t}$
3	$I=1.09t^{0.94}$	$I=0.87t^{0.5}+0.75t$	$f_t=0.83+(0.285)e^{-0.0447t}$
4	$I=1.01t^{0.87}$	$I=1.13t^{0.5}+0.44t$	$f_t=0.54+(0.459)e^{-0.0486t}$
5	$I=1.37t^{0.72}$	$I=1.28t^{0.5}+0.27t$	$f_t=0.41+(0.722)e^{-0.0657t}$

I : Permeation [mm], k : Coefficients [mm/min^m], t : Time [min], m : Coefficients [-] S : Water absorbency [mm/min^{0.5}], A : Final infiltration rate [mm/min], f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min⁻¹], t : Time [min]

Table 3-7 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 草地)から作成した浸透速度式

	Kostiakov	Philip	Horton
	$I=kt^m$	$I=St^{0.5}+At$	$f_t=f_c+(f_0-f_c)e^{-Kt}$
1	$I=3.53t^{0.90}$	$I=3.40t^{0.5}+1.83t$	$f_t=3.74+(1.161)e^{-0.0506t}$
2	$I=4.92t^{0.78}$	$I=4.81t^{0.5}+1.38t$	$f_t=1.88+(2.480)e^{-0.0579t}$

I : Permeation [mm], k : Coefficients [mm/min^m], t : Time [min], m : Coefficients [-] S : Water absorbency [mm/min^{0.5}], A : Final infiltration rate [mm/min], f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min⁻¹], t : Time [min]

Table 3-6 の 1, 2 は Kostiakov 式の k , Philip 式の S Horton 式の f_c の値が大きく浸透速度の速い地点、3, 4, 5 は浸透速度の遅い地点のものである。

Table 3-8 測定結果(Jim's pool 周辺)から作成した浸透速度式

	Horton
	$f_t=f_c+(f_0-f_c)e^{-Kt}$
1	$f_t=0.74+(0.375)e^{-0.0409t}$
2	$f_t=1.03+(0.970)e^{-0.0711t}$
3	$f_t=0.97+(0.109)e^{-0.0214t}$

f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min⁻¹], t : Time [min]

Table 3-5 の測定結果から定式化したものが Horton 式のみである理由は第三部の第七章で詳しく述べる。

3.5 結言

同じ裸地条件の土壌であっても浸透速度の速い場所と遅い場所があることがわかった。また、裸地と草地を比較すると草地の方が浸透速度は速いことも確認できた。表面流出モ

デルで実際に計算を行なう際にどのような影響が出るかは第 5 章で詳細に述べる。

引用文献

- 安部征雄, 齊藤忠臣, 内藤大嗣, 小島紀徳, 山田興一 (2001): 西オーストラリアの乾燥地における土壌透水性と植生量の関係, 沙漠研究, Vol.11, No.2, pp.131-140.
- 駒村 正治 (2002): 土壌物理学会編 新編土壌物理用語辞典, 養賢堂, p.143
- 齊藤忠臣 (2011) : 乾燥地における表面流出水捕集と土壌侵食防止に関する研究, 日本沙漠学会第 22 回学術大会講演要旨集, pp2~pp3, 2011 年 5 月
- 島田清 (1988) : シリンダーインテークレート試験における水平浸透と緩衝池について, 農業土木学会論文集, No.133, pp.87-92
- 中野 政詩, 宮崎 毅, 塩沢 昌, 西村 拓 (1995): 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, p.17 pp.89-91, pp103-104
- Horton R.E. (1939): Analysis of Runoff-plot Experiments with Varying Infiltration-capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Vol 20. pp. 693-711.
- Kostiakov A.N. (1932): On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transaction of 6th Congress of International Soil Science Society part A*, pp17-21
- Philip J.R. (1957): The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations, *Soil Sci.*, Vol. 84: 257-264

第三部 メソスケールでの水制御技術：表面流出モデルの構築

第三部では乾燥地での大規模植林地選定に利用可能な表面流出モデルの構築について検討した結果をまとめている。第四章では研究対象地として選択した集水池である Jim's pool について、その概要についてまとめるとともに、降雨量の測定、集水池内水位測定の方法とその実測データを報告している。第五章では、現地での実測データに基づく表面流出モデルの構成、特に降雨、浸透、蒸発、表面流出のそれぞれのモデル化手法について述べている。浸透速度式について浸透試験結果と現実の降雨時の浸透速度との相違を補正する浸透補正係数 PR を、表面流出についてはメッシュ内均一の条件で計算を行なうことにより実際の水の流れとの相違を補正する等価粗度係数 N をフィッティングパラメータとして導入した。第六章以下では Jim's pool 内での水位データの実測値とモデル計算結果の水位データを比較することで、モデルの評価とフィッティングパラメータの選定を行なった。第六章では、降雨パターン、第七章では浸透速度式の影響について議論し、これらの結果をふまえて、第八章では植生の影響および植生分布を考慮した、広域に適用可能なパラメータを決定した。

第四章 西豪州における対象地の概要と測定

4.1 緒言

4.1.1 研究対象地 (Sturt Meadows)

研究対象地は、温暖化対策植林システムの構築を目的として研究が行われてきた西豪州レオノラ Sturt Meadows であり、州都 Perth から北東へ約 600 km に位置する(28°40'S,120°58'S)、約 50 km 四方の地域である。(Kojima *et al.*, 2006) Sturt Meadows の位置を **Figure 4-1** に示した。



Figure 4-1 研究対象地 (Google maps)

また、対象地内の各植林サイトの位置を **Figure 4-2** に示した。

Sturt Meadows の年降水量は約 200 mm の乾燥地で、年降水量の変動係数が大きく年降水量の変動が激しい。(安田ら 2001)(安田ら 2002)(安田ら 2003) Sturt Meadows の年降水量を **Figure 4-3** に、月ごとの平均降水量と変動係数を **Figure 4-4** に示した。現地での連続無降水日数の上位 20 までを **Table 4-1** に示した。年降水量の変動係数とは

年降水量変動係数 = 平年降水量からの偏差 ÷ 平年降水量

で示される値である。(Goudie and Wilkinson 1977) (Shinoda 1989) これらの値から 1 年を通じ

てほとんどが雨の降らない乾燥した状態で、降雨は短い期間に集中していることがわかる。

自然植生は *Acacia aneura* のような乾燥低木林である。水条件の良い所では *Eucalyptus* 属の森林も見られるが、基本的には植生の乏しい土地である。これは Wiluna hardpan (Bettenay and Churchward, 1974) (Teakle, 1950) と呼ばれる難透水性の硬い地層が浅く分布するために植物の根の成長を妨げ、土壌中の水分保持量を制限していることが大きな原因である。また、オーストラリア（古大陸）特有の平均勾配が 1% にも満たない平坦な土地が広がり、流域を区切ることは困難である。

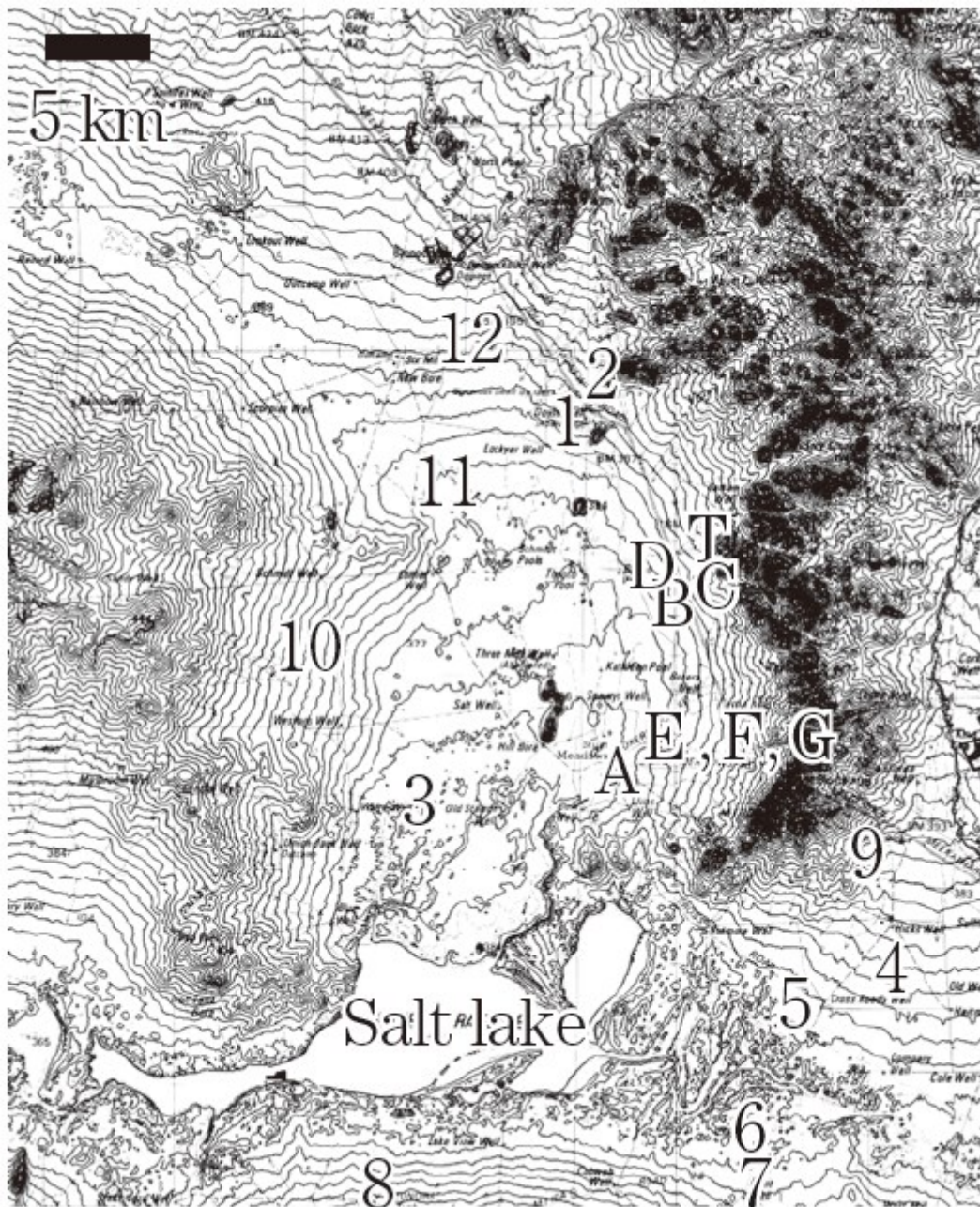


Figure 4-2 STM 内植林サイトの場所(高橋 2011)

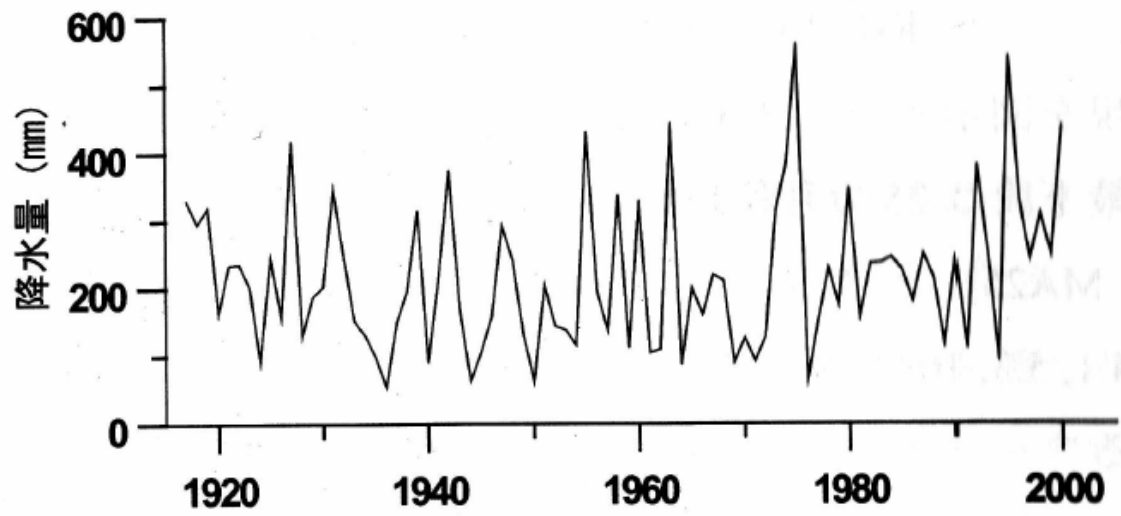


Figure 4-3 Sturt Meadows の年降水量時系列(安田 2008)

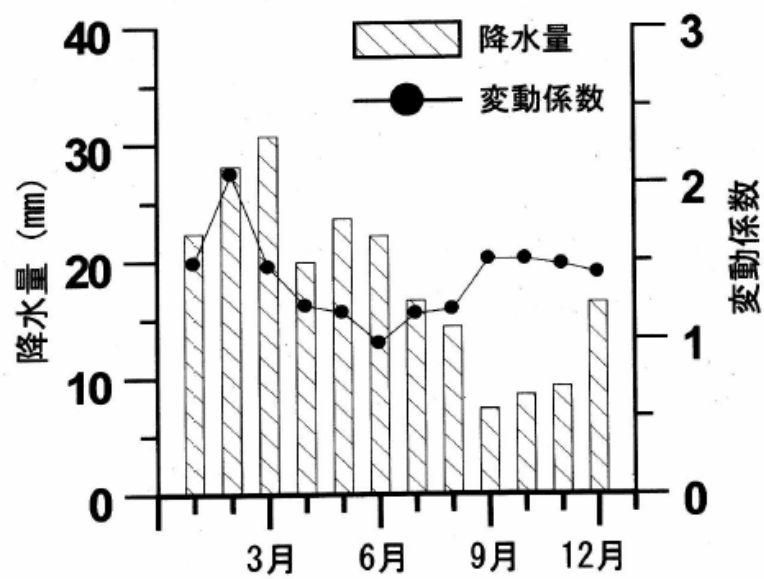


Figure 4-4 Sturt Meadows の月別平均降水量と変動係数(安田 2008)

Table 4-1 Sturt Meadows の連続無降水日数(安田 2008)

順位	期間 (年 / 月 / 日)	日数
1	1952/ 7/29 - 1953/ 3/ 2	217
2	1950/ 7/ 1 - 1951/ 1/ 1	185
3	1949/11/ 6 - 1950/ 4/29	175
4	1955/11/18 - 1956/ 5/ 7	172
5	1976/10/12 - 1977/ 3/13	153
6	1951/ 7/31 - 1951/12/26	149
7	1972/ 8/15 - 1973/ 1/ 8	147
8	1995/ 9/30 - 1996/ 2/21	145
9	1976/ 4/ 4 - 1976/ 8/16	135
10	1943/11/15 - 1944/ 3/20	127
11	1923/ 7/28 - 1923/11/30	126
12	1918/ 8/20 - 1918/12/22	125
13	1997/11/15 - 1998/ 3/10	116
14	1979/ 4/12 - 1979/ 8/ 1	112
15	1989/ 7/22 - 1989/11/10	112
16	1971/11/11 - 1972/ 2/28	111
17	1942/ 8/12 - 1942/11/30	111
18	1988/ 8/14 - 1988/11/29	108
19	1990/12/ 6 - 1991/ 3/21	106
20	1990/9/8 -1991/3/21	106

4.1.2 研究対象地 (Sturt Meadows 内 Jim's pool)

Sturt Meadows 内に存在する近辺の地域の集水池である Jim's pool を含む 6 km×4.8 km の流域を対象流域に選び **Figure 4-4** に示した。モデルの検証に広域を用いると、実測データの入手が困難であるため、本研究では、流域設定がしやすく、実測データが入手可能な数 km 四方の中規模流域を設定し、実測データとの比較によって表面流出モデルの開発・検証を行ってきた。標高データは Kevron Aerial Surveys Pty Ltd. から購入した 10 m mesh の DEM (Digital Elevation Model) を用いた。この流域の設定についての詳細は前報(Hamano *et al.*, 2010)に記載されている。

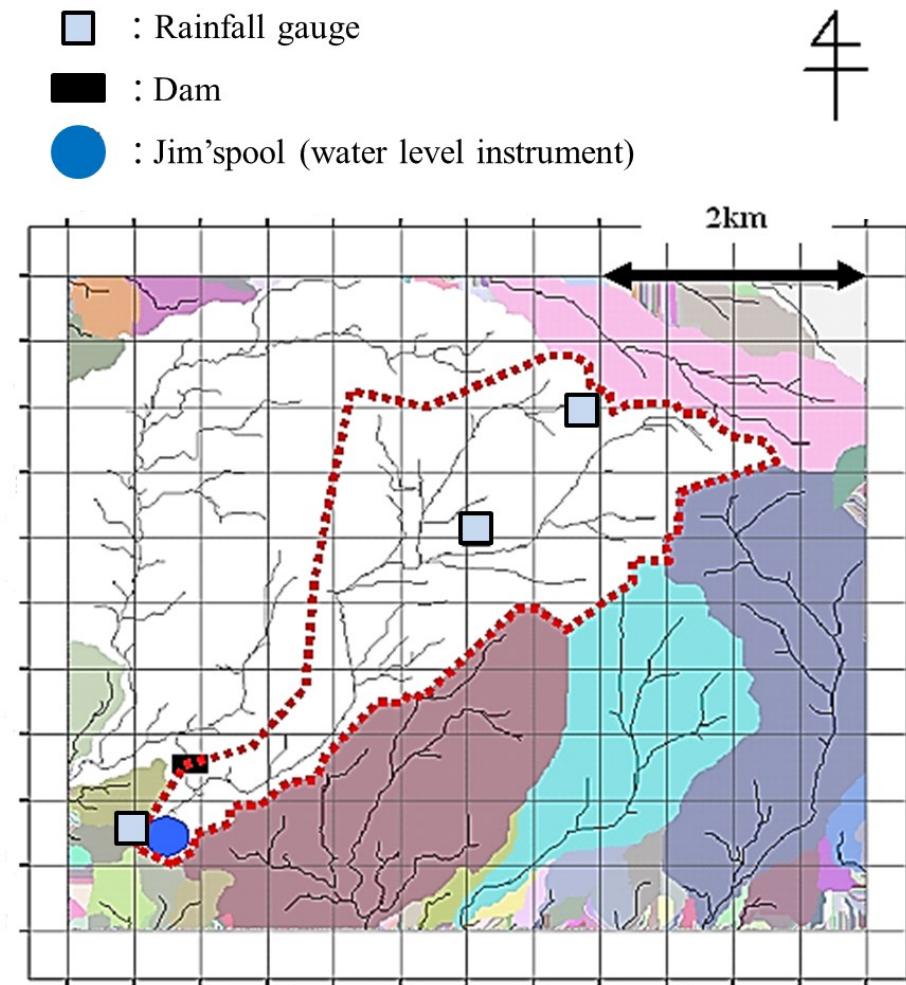


Figure 4-4 対象流域 Jim's pool と測定装置設置箇所

4.2.1 測定(Sturt Meadows)

水移動解析のモデル開発のためには実測値とモデル計算結果の比較を行なう必要がある。そこで現地での測定を行なった。まず Figure 4-2 に示した STM 内の自然植生サイト 3 近辺の Blue well からアプローチできる塩湖内での、水位測定を行なったが、土層が厚く、地下水水位の変動を測定できたのみであった。また、その付近の塩湖に流入する流路となる塩性植生域に流量計を設置も検討したが、降雨時の実測の困難さから測定を断念せざるをえなかった。

4.2.2 測定(Sturt Meadows 内 Jim's pool)

上記のようにさまざまな方法で実測値を計測しようと試みたがモデル開発に必要な実測

値は得られなかった。そこで STM 内の塩湖付近にある集水池の Jim's pool に降雨時には周囲の降水が集まってくると仮定し、降雨と集水池水位変化について計測することにした。Jim's pool 内に水位計を設置し、水位変化を計測、集水池周辺の降雨量を降雨計で測定することで降雨データを計測し、降雨と水位変化の実測値を得た。そこで得られた実測値とモデル計算によって求められた集水池の水位変化を比較することでモデルの妥当性を検証することにした。同時に **Figure 4-4** の Dam の場所に堰を作り、降雨時にそこからあふれる水の流量を測定することも試みた。しかし継続的な流量測定データは得られなかったため、降雨計と水位計の測定から得られる実測値のみをモデル計算結果との比較に利用することとした。測定は 2002 年 11 月 15 日から 2005 年 6 月 28 日まで継続的に行なった。

4.2.2.1 測定方法 降雨量

集水池 Jim's pool 周辺の降雨量を計測するため上流、中流、下流に転倒升式の降雨計 (CEM-TBRG, クリマテック社) を設置し測定を行なった。

4.2.2.2 測定方法 水位計

集水池 Jim's pool 内に水位計 (Model 6541, Unidata Pty Ltd.) を設置し測定を行なった。

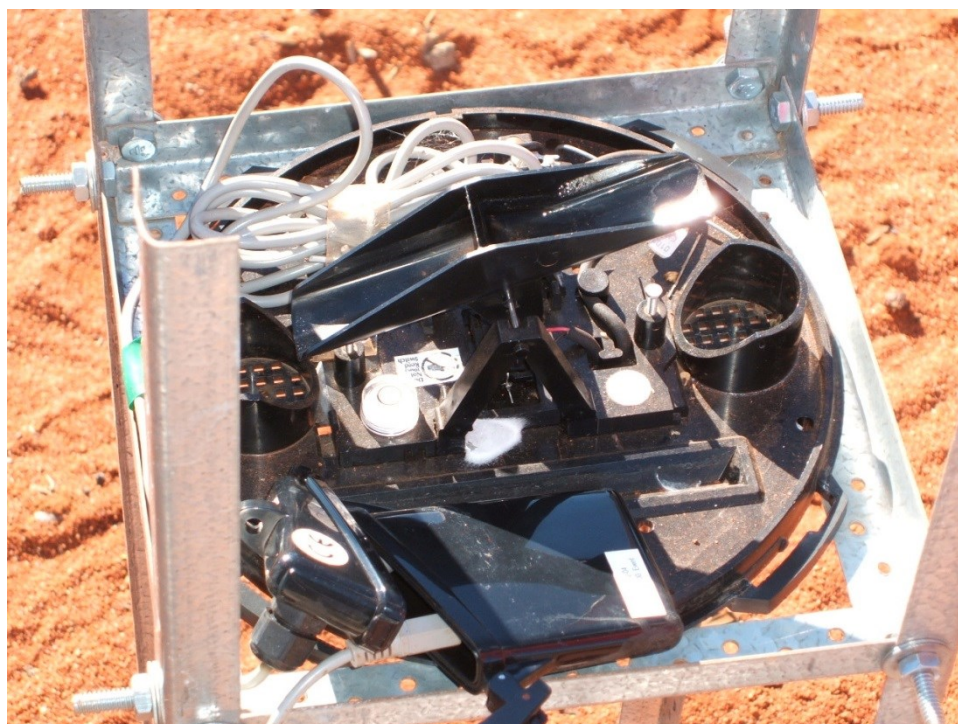


Figure 4-5 設置した降雨計



Figure 4-6 設置した水位計

4.3 測定結果

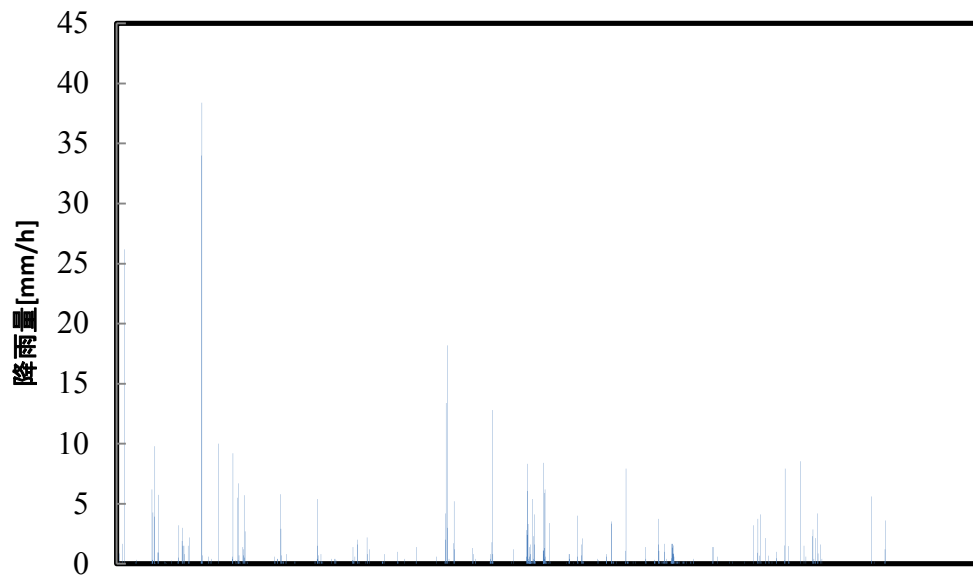
4.3.1 降水量測定結果

3か所の降雨データ測定結果はそれぞれ測定期間中にデータが取れなかった欠損期間があった。また3か所の降雨データは同じ日時でもばらつきがみられた。

Jim's poolでの降水量測定結果(3か所の平均)を **Figure 4-7** に示した。測定期間は2002年11月15日から2005年6月28日までである。連続して降雨のない期間はそれほど長くないが、一度に30 mmを超える降雨があることもあり、変動が大きいことが分かった。

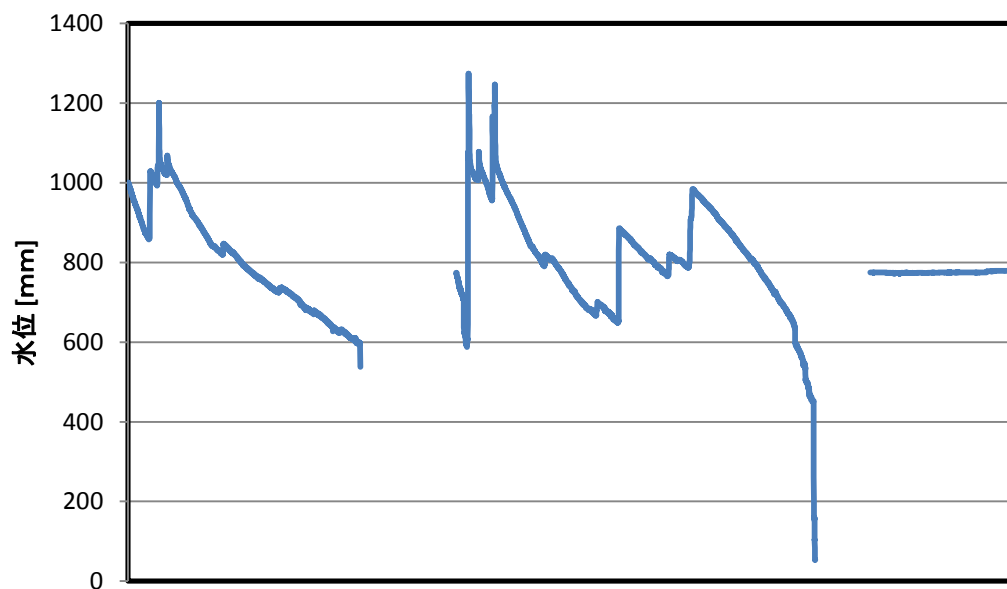
4.3.2 集水池水位測定結果

Jim's poolでの水位変化の測定結果を **Figure 4-8** に示した。集水池での水位測定結果にもデータが得られなかった欠損期間があった。またずっと水位の変化の無いところは、水位計が正常に作動せずに記録されたものと考えられる。



日 (2002/11/15~2005/6/28)

Figure 4-7 降水量測定結果(3 か所の降雨計の平均 測定期間 2002.11.15~2005.6.28)



日(2003/3/8~2005/3/15)

Figure 4-8 水位計測定結果(測定期間 2003.3.8~2005.3.15)

4.4 結言

モデル開発に必要な実測値として降水量、水位データを得られた。一部の期間で欠測値が出るなどの問題もあったが、モデル計算に利用可能なデータが得られた。

引用文献

- 高橋 伸英 (2011): 3 章 小島 紀徳,江頭 靖幸 編著 沙漠を森に—温暖化への処方箋—, コロナ社, pp.27-30
- 安田 裕・安部 征雄・山田 興一: 西オーストラリア州スタアトメドー地区における年降雨量時系列の周期変動について(2001): Vol. 11, No.1, pp. 71-74
- 安田 裕・川戸 渉・安部 征雄・山田 興一: 西オーストラリア州スタアトメドー地区における植生指数時系列と降雨量時系列の関係について(2002): Vol.12, No.1, pp. 27-30
- 安田 裕・川戸 渉・安部 征雄・山田 興一: 乾燥地月降雨量時系列と海水面温度,南方振動及び太陽黒点周期変動との関係について(2003): Vol.13, No.2, pp. 131-138
- 安田 裕 (2008): 乾燥地科学シリーズ第 3 巻 乾燥地の土地劣化とその対策, 古今書院, pp. 98-100
- Bettenay, E. and Churchward, H.M. (1974): Morphology and stratigraphic relationships of the Wiluna hardpan in arid Western Australia, Journals of the Geological Society of Australia, Vol.21, pp. 73-80
- Goudie A, Wilkinson J (1977): The Warm Desert Environment, Cambridge: Cambridge Press, p.95
- Hiroyuki HAMANO, Nobuhide TAKAHASHI, Koichi YAMADA, Toshinori KOJIMA, John LAW. (2010): Measurement of Runoff Ratio in a Medium-scale Watershed for Afforestation of Arid Land, Kagaku Kogaku Ronbunshu, Vol. 36, No. 4, pp. 351-354
- Shinoda M (1989): Annual rainfall variability and its interhemispheric coherence in the semi-arid region of tropical Africa: Data updated to 1987, Journal of the Meteorological Society of Japan, **67**: 555-564
- Teakle, L.J.H. (1950): Red and brown hardpan soils of Western Australia. *J. Aus. Inst. Agr. Sci.*, 16: 15-17.
- Toshinori KOJIMA, Hiroyuki HAMANO, Yukuo ABE, Hiroyuki TANOUCHI, Yasuyuki EGASHIRA, Masahiro SAITO, John LAW, Nobuhide TAKAHASHI, Koichi YAMADA. (2006): Basic Data of Research Project on Large Scale Afforestation of Arid Land for Carbon Fixation near Leonora in Western Australia, Arid Land Studies, Vol.16, No.3, pp. 167-174

第五章 表面流出モデルの構築

5.1 緒言

5.1.1 表面流出モデル

1章でも述べたようにこれまでに乾燥地での水移動を解析するのに適したモデルは存在していない。そこで、広域での植林地選定を目的としたオリジナルの表面流出モデルを構築することにした。ここでは、モデルの概要について説明する。

5.1.2 入力パラメータ

モデルの入力パラメータとして DEM(Digital Elevation Model)、ハードパン深さ、土壤含水率、降雨を与える。DEM データは Jim's pool では Kevron Aerial Surveys Pty Ltd.から購入した 10 m mesh の詳細なデータを用いた。標高データは UTM 座標、投影法として WGS84 (South) Zone51 の X が 301990~307980(6 km)、Y が 6818881~6823671(4.8 km)の範囲を計算に用いた。モデル完成後、広域での植林地選定を行なう際は、無料で配布されている 30 m mesh の DEM データを用いることにした。降雨データは実測値を元に 1 分間の積算降雨として与えた。3 か所の計測値が全く同一になることは無かったが、欠測値の無いデータや、3 か所で大きく異なることの無い測定データを元にした。ハードパン深さは場所により十数 cm から数 m あるところまで差が大きい、モデル中では全域で一律 15 cm とした。土壤含水率は、TDR (Time Domain Reflectometry) により得られた土壤含水率データの最小値を平均した値で決定した。降雨後すぐか、降雨がない状態が長く続いた後かで差があるが、絶乾状態でも $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ だったので、最小値は $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、最大値は土壤の空隙率から $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ とした。降雨データは Jim's pool 内の上流、中流、下流 3 か所に設置した降雨計の測定結果を元に決定した。

5.1.3 モデル計算過程

モデル内の計算過程は **Figure 5-2** のようになっている。入力パラメータとして標高データ、降雨データ、ハードパン深さ、土壤含水率を与えた。計算過程はまず降雨があり、土壤浸透、液面蒸発、土壤面蒸発、表面流出の順に計算を進めていき、全メッシュの計算が終わると次に進むようになっている。

1.4 タイムステップ(時間差分)

モデル内の計算ではタイムステップ(時間差分)方式で計算を進めている。浸透、蒸発表面流出の一連の計算が終わると次のタイムステップに進む。ここでタイムステップの幅をどの程度にするかが問題になるが、これについては小島ら(2010)での検討結果を元に 10 m mesh で計算を行なう場合は 0.5 s 刻みで、30 m mesh で計算を行なう場合は 1 s 刻みで計算を行なうのが妥当であると判断した。

5.1.5 降雨

降雨データは、実測値では 0.2 mm の降雨ごとに降雨がカウントされるがこれを 1 分間の積算値にしたものを降雨データの入力データにした。

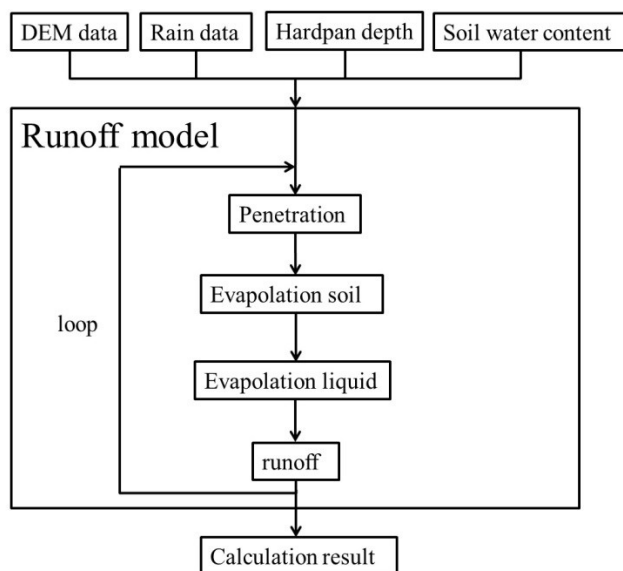


Figure 5-2 オリジナル表面流出モデルの計算の流れ

5.1.6 土壌浸透

土壌浸透は3章で説明したように Horton 式 (Horton, 1939), Kostiakov 式 (Kostiakov, 1932), Philip 式 (Philip, 1957)の形で作成した。作成した浸透式は Table 3-6、3-7、3-8 に示した。ここで浸透試験による浸透速度と実際の降雨では浸透速度が 5~6 倍遅くなるという報告(Rao *et al.*, 1998)があることから、計算中の浸透速度を浸透補正係数 (PR) で除して調整した。また、モデル中では計算メッシュの利用により、実際の地形の標高の凸凹が平均化されることによって、水位も平均化される上に、実表面湛水や表面流出水の流路も実際のサイズではなくメッシュサイズとして表現されるため、水挙動がメッシュサイズの影響を大きく

受ける。よってこの PR は単なる浸透補正係数ではなく、計算メッシュ利用による現実とモデルの乖離の補正も含むフィッティングパラメータであると考えている。

5.1.7 蒸発式

蒸発は表層水が存在する場合に起きる液面蒸発とない場合の土壌蒸発の2つに分かれる。液面蒸発速度(E_L)には実験対象地で実測したパン蒸発速度の年間平均値を用いた。

$$E_L = 7.67 \times 10^{-8} \text{ m/s} \quad (= 6.63 \times 10^{-3} \text{ m/day}) \quad (5-1) \quad (\text{Kojima } et \text{ al.}, 2010)$$

土壌蒸発は、各種条件（気温や風速など）から決定される可能蒸発速度で蒸発がおこる恒率蒸発段階と蒸発面への水供給が可能蒸発速度を下回り、蒸発速度が減少していく減率蒸発段階に分かれる。（The Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering, 1989）（Jury and Horton, 2006）本研究では、恒率蒸発速度（ E_{S1} ）=可能蒸発速度（ E_p ）=液面蒸発速度（ E_L ）とした。

減率段階の土壌蒸発速度については Kojima *et al.*, (2010) の実験結果から、
臨界水分量: $\theta_c = 0.2754$ が得られた。

$$E_n = E_{S2} / E_{\max} \quad (5-2)$$

E_{S2} : 土壌含水率に対する減率蒸発速度 [m/s]

E_{\max} : 測定時の最大蒸発速度 [m/s]

E_n : 蒸発比 [-]

また、臨界水分量以上では恒率蒸発段階、臨界水分量より土壌含水率が小さい時は減率蒸発段階として土壌蒸発の計算を行なった。

臨界水分量: $\theta_c = 0.2754$

$\theta_c \leq \theta \leq 0.4$: 恒率蒸発段階

$$E_{S1} = E_L$$

$0.05 < \theta < \theta_c$: 減率蒸発段階

$$E_{S2} = E_L \times E_n = E_L \times 54.0 \times (\theta - 0.05)^{2.677} \quad (5-3)$$

Table 3-6 の 1, 2 は浸透速度の速い地点、3, 4, 5 は浸透速度の遅い地点のものである。

5.1.8 表面流出

表面流出は計算対象となるメッシュと隣接した4方向のメッシュで標高+水深の値の差が低い方へのみ起こるとした。メッシュ間の流速は、メッシュ幅を川幅とした一本の川として、最も多用される代表的な等流式である Manning 式(Ven Te Chow, 1959)を利用して求め

た。

$$v=1/n \times R^{2/3} \times I^{1/2} \quad (5-4)$$

$$R=A/P$$

v : 流速 [m/s], n : 粗度係数 [$m^{-1/3}s$], I : 水位 (標高+水深) 差より求めた水面勾配 [m/m]

R : 径深 [m], A : 通水断面積 [m^2], P : 潤辺 [m]

Manning 式での粗度係数 (n) は、川における壁面の流水抵抗を表す係数であり、経験的に決定されるパラメータである。しかし本モデルでは計算メッシュを用いる関係で擬似的にメッシュサイズを川幅とし、メッシュ上の流れを均一化させたため、本来 Manning 式で表現される川の流れとは異なる。さらに、隣接している四方のメッシュへ流れるとしており、 n は Manning 式で本来想定している粗度係数 n とは異なるメッシュサイズや現実の地形による川幅と計算上の川幅の違いなどを内包したものになるため、等価粗度係数と呼ぶことにした。以下では記号 N を用い、フィッティングパラメータとして扱う。

5.1.9 フィッティングパラメータ

5.1.6、5.1.8 で述べたが、浸透速度試験と実際の降雨での浸透速度の違いやメッシュで計算を行なうことによる現実との差異の影響を補正するための浸透補正係数 PR 、メッシュでの計算を行なうことによる流れの均一化や計算上の川幅の違いなど本来の Manning 式の粗度係数 n との違いを含む等価粗度係数 N 、この 2 つの値をフィッティングパラメータとしてモデル計算の際に変化させた。

5.2 計算

5.2.1 計算条件

現地では乾燥地特有の短期集中降雨のため、全域に均一な降雨があることは稀であり、三つの降雨計がほぼ同じ値を示すパターンはほとんど存在しなかった。これらが異なる場合には、モデル計算の対象地全域にわたり、3ヶ所の降雨データのいずれを用いるかをあらかじめ検討する必要がある。そこで本報告では流域内に均一な降雨 (三つの降雨計の総降雨量の誤差 ± 0.2 mm 以内) があつた 2003/3/24 総降雨量 13.4 mm の降雨データをモデルの入力データとし、計算結果を 167 mm の水位変化の経時変化と比較した。計算にあたって、計算流域内から最外側へ流れてきた水は全て流域外へと流出し、再流入しないものとしてタイムステップごとに計算から除去するよう境界条件を与えた。今回検証したモデルでは 6 km \times 4.8 km の対象箇所を 10 m mesh に区切った標高データを用いてタイムステップ 0.5 s

で 10 h の計算を行なった。

5.2.2 計算手順

集水池の初期水位として、降雨前の実測値 0.662 m を与えた。また検証で用いる降雨日の直前の十数日間にはほぼ降雨が無く最高気温 30 度~40 度の日が続いたため(Climata Data online, Bureau of Meteorology, Australia)、土壌はほぼ乾燥状態だと考えられた。そこで初期土壌含水率 (θ_0) には最低値の 0.05 を与えた。1Time step の計算手順は **Figure 5-2** のようになっており以下に説明を示す。まず降雨前の 1 時間は集水池以外の表層水が無い条件で計算を行なった。その後、降雨があった Time step ごとに 0.2 mm の降雨を mesh 全域に降らせ、その時点での土壌含水率を用いて土壌浸透速度式で推定される浸透水量分の水位を低下させる。表層水が存在するときは浸透計算の後、液面蒸発による水位低下を計算、表層水が無い場合は土壌蒸発について計算を行ない土壌含水率に応じて恒率、減率蒸発で土壌水分を変化させた。さらに表層水が残った場合は、Manning 式で決定された流速で、メッシュ間を水が移動し水位変化が起きる。メッシュ間の水移動時にエラートラップ条件 (水の移動元の水位が移動先の水位よりも低くなってしまった場合) では水移動量に補正を加え、振動 (2つのメッシュ間で移動が繰り返される) 現象が起きないようにした。エラートラップの原理については前報に詳細を記述してある。(Kojima *et al.*, 2010) Time step ごとに各計算を繰り返して水移動を表現した。

5.2.3 評価手法

今回のシミュレーションでは N を 0.001 刻みで変化させ、それぞれの N に対して PR を 0.1 刻みで変化させ、実測値の集水池水位変化とモデル計算結果の差異を RMSE (平均二乗誤差) で表した。最も実測値の水位変化を模擬できる RMSE 値が最小の最適な N と PR の組み合わせを求めた。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(X-x_i)^2}{n}}$$

X : Observation data, x_i : Calculation results, n : Sample number

5.3 結言

オリジナルの表面流出モデルが構築できた。次章以降ではこのモデルを利用し計算を行ない、実測値との比較から広域へ展開可能なモデルに必要なフィッティングパラメータの検討を行なっていく。

引用文献

- 小島紀徳, 小柳卓, 田淵宏典, 菅沼秀樹, 黒澤勝彦, 高橋伸英, 濱野裕之. (2010): 西豪州乾燥地における植林地選定を目的とした表面流出モデルの開発, 化学工学論文集, Vol. 36, No. 5, pp. 532-538.
- 高橋 伸英 (2011): 3 章 小島 紀徳,江頭 靖幸 編著 沙漠を森に—温暖化への処方箋—, コロナ社, pp.27-30
- Horton R.E. (1939): Analysis of Runoff-plot Experiments with Varying Infiltration-capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Vol 20. pp. 693-711.
- Kostiakov A.N. (1932): On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transaction of 6th Congress of International Soil Science Society part A*, pp17-21
- Philip J.R. (1957): The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations, *Soil Sci.*, Vol. 84: 257-264
- Rao K.P.C., Steenhuis T.S., Cogle A.L., Srinivasan S.T., Yule D.F., Smith G.D. (1998): Rainfall Infiltration and Runoff from an alfisol in Semi-arid Tropical India. I. No-till System. *Soil& Tillage Research*, 48: 51-59
- Ven Te Chow (1959): Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 98-123.

第六章 降雨パターンの影響

6.1 緒言

まず、2003年3月24日の実測値を用いてモデル計算を行なった。ここでのモデル計算は小島ら(2010)で作成された浸透式を基に行なった。降雨データの入力を1時間の積算値と1分間の積算値で比較した。また2003年3月24日の実測値とモデル計算結果の比較により最適なフィッティングパラメータの組み合わせを決定した。このフィッティングパラメータを用いて別の降雨日である2004年6月1日の実測値とモデル計算結果の比較をした。

この章での検討結果は2011年5月時点のもので、その後、浸透速度式の変更などがあったため、再度2003年3月24日の実測値とモデル計算の比較を行ない最適なフィッティングパラメータを変更した。また、2004年6月1日の実測値との比較も再度行なった。

6.2 計算

モデル計算には以下の式を用いた。詳細は5章に記載した。

6.2.1 浸透速度式

Horton式(Horton, 1939)を作成しモデル計算に用いた。実際の降雨とモデル上の降雨の差異(Rao *et al.*, 1998)を補正するための浸透補正係数 PR を導入した。

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c) \times \exp(-K_f t) = 2.00 \times 10^{-5} + 3.06 \times 10^{-5} \times \exp(-3.42 \times 10^{-3} \times t) \quad (6-1)$$

$$f_\theta = -1.530 \times 10^{-3} \times \theta^3 + 1.487 \times 10^{-3} \times \theta^2 - 4.782 \times 10^{-4} \times \theta + 7.115 \times 10^{-5} \quad (6-2)$$

$$\theta = W/0.15$$

$$F_\theta = f_\theta / PR \quad (6-3)$$

f_t : Permeation rate at time, t [m/s], f_0 : Initial permeation rate [m/s], f_c : Saturated hydraulic conductivity [m/s], K_f : Constant value [s^{-1}], t : Time [s], f_θ : Permeation rate at volumetric water content of soil, θ [m/s], θ : Volumetric water content of soil [-], W : penetrated water depth [m], F_θ : Corrected permeation rate [m/s], PR : Correction factor for f_θ [-]

6.2.2 蒸発式

液面蒸発と土壌面蒸発の2つの過程に分けて計算を行なった。

$$E_L = 7.67 \times 10^{-8} \quad (6-4)$$

$$E_{S1} = E_L \quad (6-5)$$

$$E_{S2} = E_L \times 54.0 \times (\theta - 0.05)^{2.677} \quad (6-6)$$

E_L : Water surface evaporation rate [m/s], E_{S1} : Constant evaporation rate [m/s],

E_{S2} : Decreasing evaporation rate [m/s]

6.4 表面流出

Manning 式(Ven Te Chow, 1959)を元にメッシュサイズの影響等を考慮するために等価粗度係数 N を導入した。

$$v = \frac{1}{N} R^{2/3} I^{1/2} \quad (6-7)$$

v : Velocity [m/s], N : Equivalent roughness coefficient [$\text{sm}^{-1/3}$] I : Water surface inclination [m/m],

R : Hydraulic radius [m]

6.2 計算結果

6.2.1 降雨パターンの影響

2003年3月24日の降雨データを用いて1時間積算値を入力データとして使用したときの最適なフィッティングパラメータの組み合わせは $N=0.011$ 、 $PR=24.5$ だった。この値を用いて1分間の積算値を入力データとして使用したときのモデル計算結果と比較したものを **Figure 6-1** に示した。入力データとして使用した降雨データの積算値と比較したものを **Figure 6-2** に示した。積算降雨については5時間後以降の降雨が無いので5時間後までのものになっている。1時間積算降雨と1分間積算降雨の最大降雨強度について比較したものを **Table 6-1** に示した。1分間積算値を降雨データの入力に使用した方が実際の降雨に近い状態を再現できる。1時間積算値を使用すると降雨強度が弱いため現実の降雨状態に近づけるために今後は1分間積算値を降雨データの入力に使用することにした。1分間積算値を用いた場合の最適なフィッティングパラメータの組み合わせは $N=0.014$ 、 $PR=21.0$ だった。実測値との比較を **Figure 6-3** に示した。

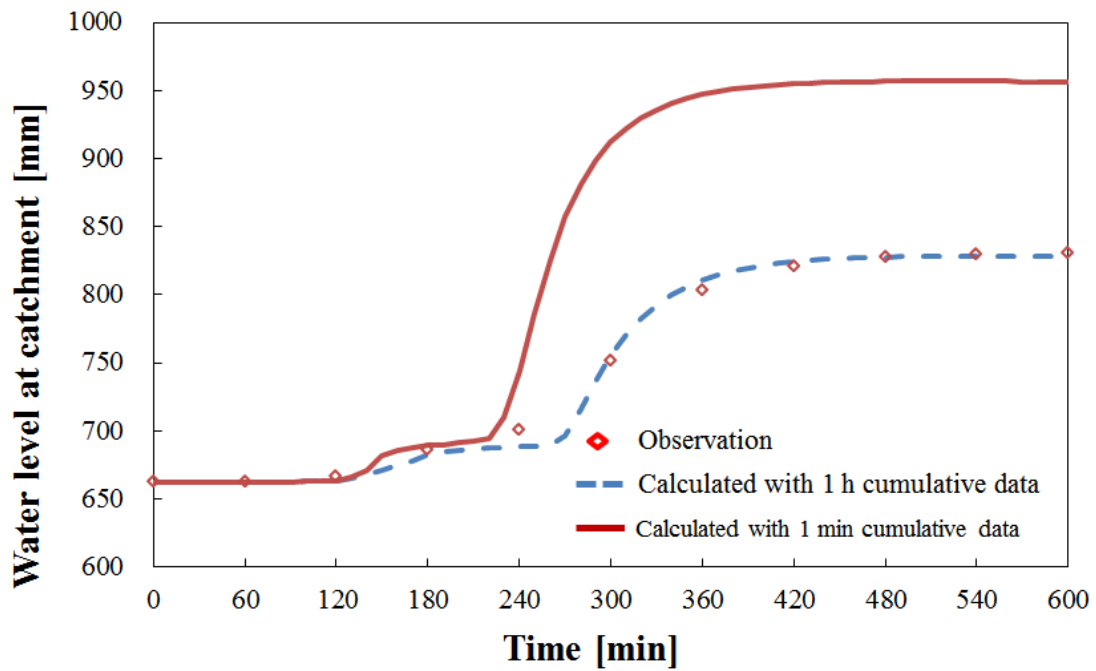


Figure 6-1 降雨パターン比較(1 h 積算降雨と 1 min 積算降雨) $N = 0.011 \text{ s m}^{-1/3}$, $PR = 24.5$

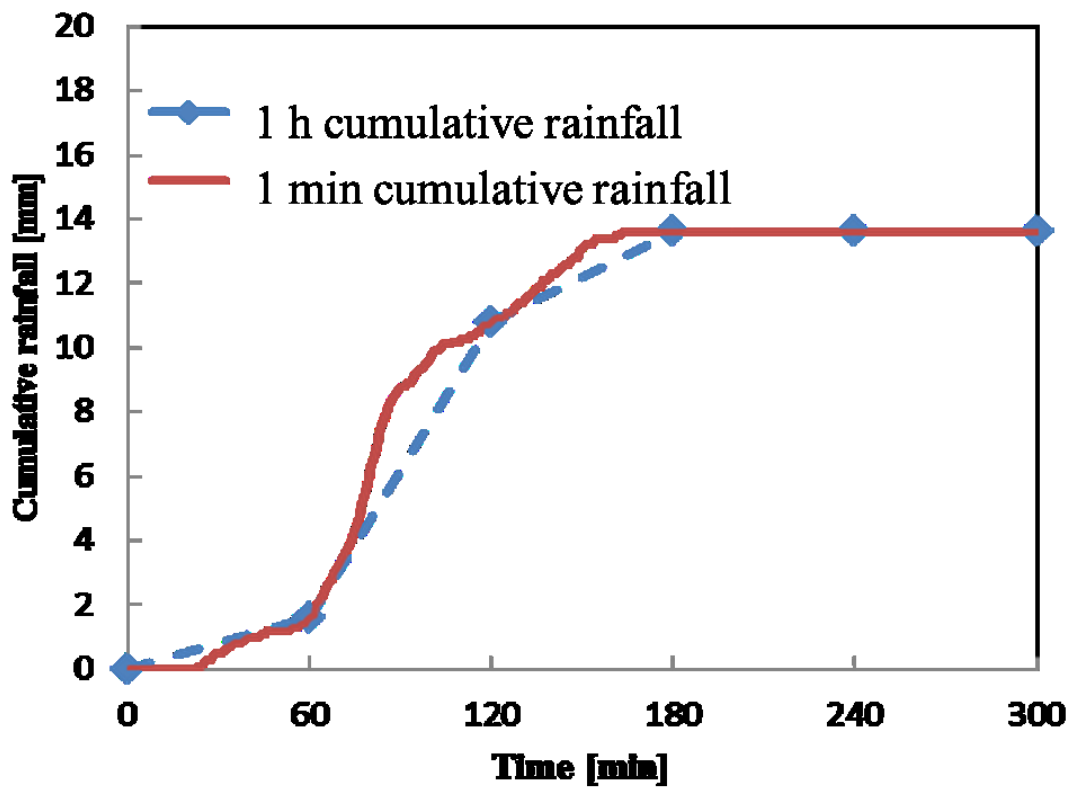


Figure 6-2 積算降雨データ比較

Table 6-1 最大降雨強度比較

Max Rainfall intensity [mm/s]	
1 hour cumulative	0.00256
1 min cumulative	0.00667

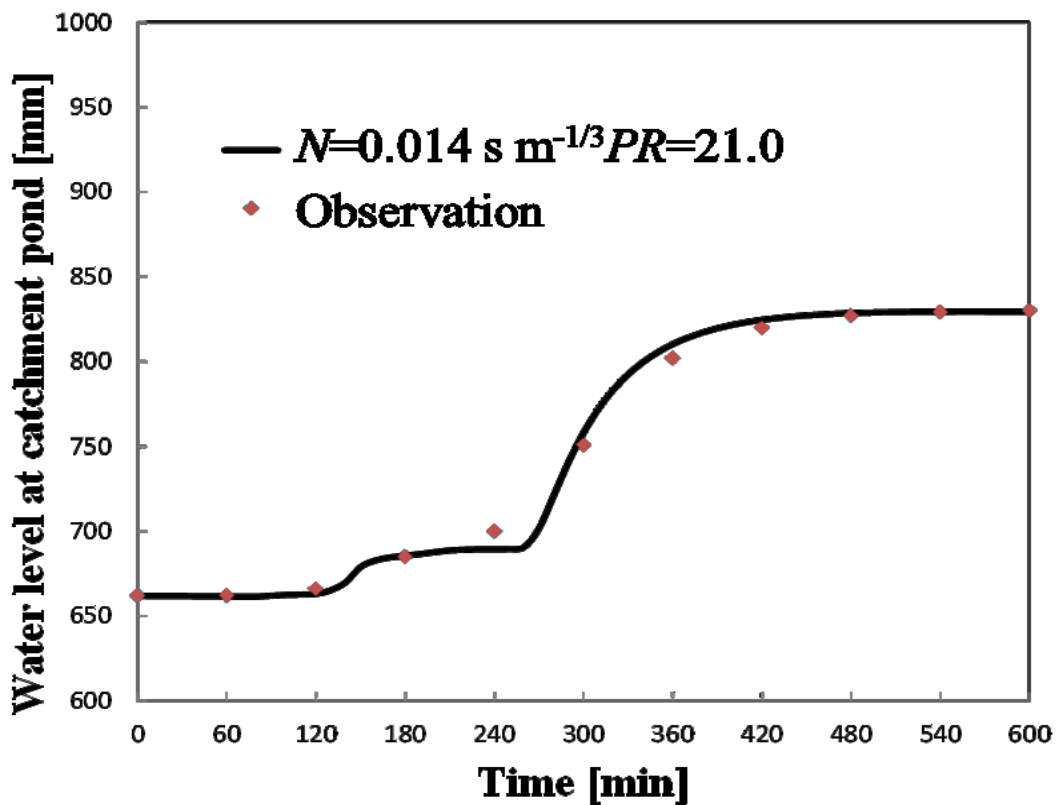


Figure 6-3 1 min 積算降雨の計算結果 $N = 0.014 \text{ s m}^{-1/3}$, $PR = 21.0$

6.2.2 別降雨日での検討(2004.6.1の降雨データ)

2003年3月24日の降雨データを用いたモデル計算では実測値と近い計算結果が得られた。そこで別の降雨データを用いてモデル計算を行ない検証した。

降雨データと水位変化データ両方が欠測なしに計測できているものがほとんどなかったが、2004年6月1日の降雨データは3か所の降雨データの差が少なく、水位変化データも計測できていたのでこの日の実測値を基に検証を行なった。

降雨データとして入力したものを1時間積算値に直したものを **Table 6-2** に示した。2004年6月1日の降雨は総降雨量 11.4 mm で 2003年3月24日の総降雨量 13.4 mm と近い値で

降雨日直前の十数日間は降雨が無く、土壌は絶干状態であったと考えられる。集水池の初期水位として、降雨前の実測値 0.455 m を与えた。計算結果は **Figure 6-4** のようになった。2003 年 3 月 24 日の降雨データを用いた場合では $N=0.014$ 、 $PR=21.0$ の組み合わせが実測値に近い最適なフィッティングパラメータの値だった。しかし $N=0.014$ 、 $PR=21.0$ の組み合わせで 2004 年 6 月 1 日の降雨データを用いた計算では **Figure 6-5** のようになり、実測値と全く合わなかった。

Table 6-2 降雨データ(1 時間積算値)比較

Time[h]	Rainfall [mm]	
	2003/3/24	2004/6/1
0-1	0	0
1-2	1.2	1.8
2-3	9.4	8.4
3-4	2.8	0.8
4-5	0	0
5-6	0	0.4
6-7	0	0
7-8	0	0
8-9	0	0
9-10	0	0

N 、 PR の組み合わせを変えて最適な値を探したが、もっとも実測値に近い $N=0.016$ 、 $PR=26.0$ の結果でも 2003 年 3 月 24 日の結果のように実測値を再現しているような結果は得られなかった。特に 180 分以降の 240 分の水位の値は実測値とかけ離れていた。本来は集水池から水があふれるような状態でなければ、降雨日が異なっても同じ場所であれば、最適なフィッティングパラメータの組み合わせは、ほぼ変化しないはずである。集水地に設置されている水位計は、本来、研究対象地のような泥水の水位を測る水位計ではないため、計測期間中にも何度か欠測期間が生じ、降雨があったにも関わらず水位計が反応しないなどのトラブルもあった。2004 年 6 月 1 日の実測値にもこのような問題があった可能性も否定できないが、この計算結果から、現時点では別の降雨日では実測値を再現できないことが分かった。モデルとしては不完全ではあるが、再度実測値を計測することは難しいため、今後の検討は 2003 年 3 月 24 日の降雨データのみを利用して行なうことにした。単一の降雨日データのみではあるが、浸透補正係数 PR の変化に対するモデル計算結果の差異を見る

ことによる感度分析を行なうことでモデルの妥当性を判断した。

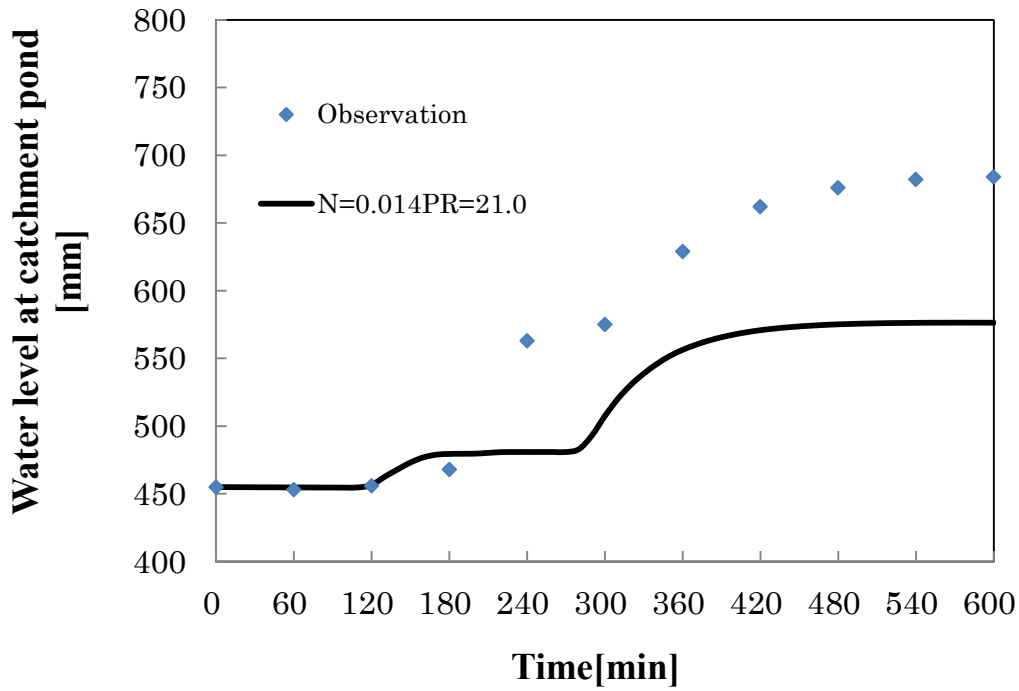


Figure 6-4 集水池水位実測値とモデル計算結果の比較(2004年6月1日降雨データ使用

$N = 0.014 \text{ s m}^{-1/3}$, $PR = 21.0$)

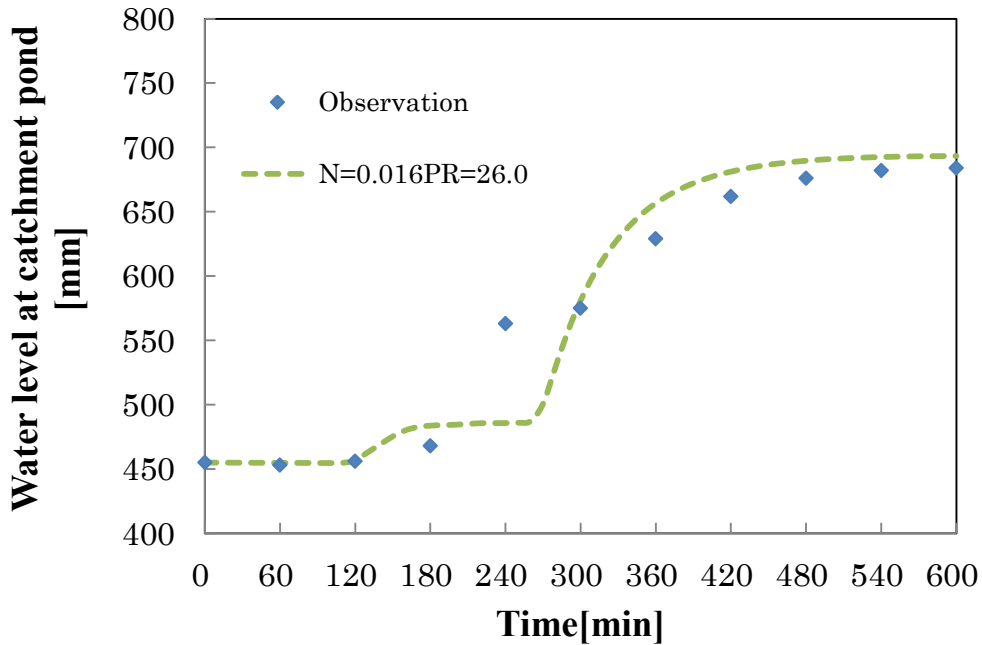


Figure 6-5 集水池水位実測値とモデル計算結果の比較(2004年6月1日降雨データ使用

$N = 0.016 \text{ s m}^{-1/3}$, $PR = 26.0$)

6.3 再検討(浸透速度式の変更)

7章で浸透速度式の比較検討などを行ない、浸透速度式を新たなものに変更した。そこで、その式を用いて再度2004年6月1日の実測値とモデル計算結果が合うようなフィッティングパラメータの組み合わせがあるか再度検討した。Table 3-8に示した浸透速度式を用い、2003年3月24日の実測値でモデル計算を行なった所、最適なフィッティングパラメータの組み合わせはTable 6-3のようになった。

Table 6-3 最適なフィッティングパラメータ(Table 6-1の浸透速度式)

	N	PR	RMSE
1	0.015	9.1	5.52
2	0.015	15.2	4.87
3	0.016	9.4	5.16

等価粗度係数 N の値は3つの式ともに0.015,0.016と差が大きくなかった。一方、浸透補正係数 PR には大きな差があった。計算結果の例としてTable 6-3の2の結果をFigure 6-6に示した。次に $N=0.015$ 、 $PR=15.2$ の組み合わせで2004年6月1日の降雨データを用いた計算ではFigure 6-7のようになり、実測値と合わなかった。浸透速度式を変更したが、やはり別降雨日のデータでは実測値とモデル計算結果は合致しなかった。この点はこのモデルの問題点として残されてしまったが、次章でモデルの感度についての検討を行なうことにした。

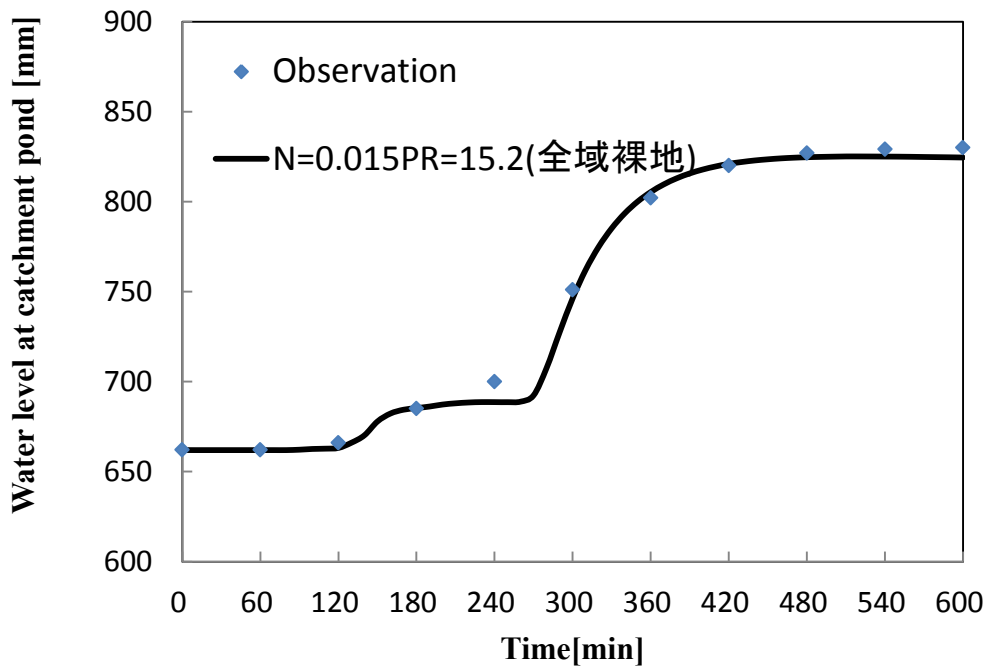


Figure 6-6 集水池水位実測値とモデル計算結果の比較(2003.3.24 の降雨データ使用
 $N = 0.015 \text{ s m}^{-1/3}$, $PR = 15.2$)

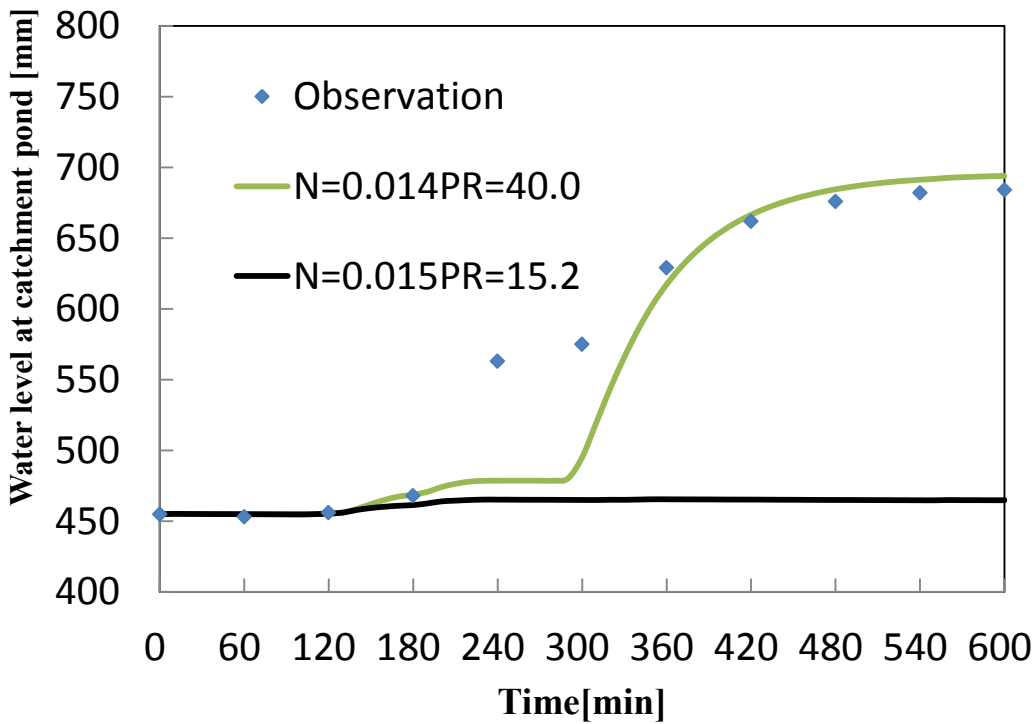


Figure 6-7 集水池水位実測値とモデル計算結果の比較(2004.6.1 の降雨データ使用
 $N = 0.014 \text{ s m}^{-1/3}$, $PR = 40.0$)

6.4 結言

2003.3.24 の降雨データを元にした計算では水位データの実測値の再現性が得られた。しかし別の降雨日である 2004.6.1 の降雨データを用いた計算では実測値の再現性は得られなかった。これは降雨データの実測値に欠測データがあり、実際の降雨では全域に対する降雨では無く下流域でより多くの雨が降っていたためだと考えられる。2004.3.24 の降雨データでのみ水位データの再現性が得られるモデルではあり、この点はこのモデルの問題点として残されてしまったが、次章でモデルの感度についての検討を行なうことにした。

引用文献

- 小島紀徳, 小柳卓, 田渕宏典, 菅沼秀樹, 黒澤勝彦, 高橋伸英, 濱野裕之. (2010): 西豪州乾燥地における植林地選定を目的とした表面流出モデルの開発, 化学工学論文集, Vol. 36, No. 5, pp. 532-538.
- Horton R.E. (1939): Analysis of Runoff-plot Experiments with Varying Infiltration-capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Vol 20. pp. 693-711.
- Rao K.P.C., Steenhuis T.S., Cogle A.L., Srinivasan S.T., Yule D.F., Smith G.D. (1998): Rainfall Infiltration and Runoff from an alfisol in Semi-arid Tropical India. I. No-till System. *Soil & Tillage Research*, 48: 51-59
- Ven Te Chow (1959): *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 98-123.

第七章 浸透速度式の影響

7.1 緒言

研究対象地である Sturt Meadows 内の Jim's pool 周辺および Sturt Meadows の植林サイト周辺でのシリンダーインタークレート試験の実測値(齊藤, 2011)から Horton 式 (Horton, 1939), Kostiakov 式 (Kostiakov, 1932), Philip 式 (Philip, 1957)で表わされる3種類の浸透式を作成し、式の違いによるモデル内のフィッティングパラメータに対する影響の比較を行なった。

7.2 研究対象地

7.2.1 植林サイト

研究対象地は炭素固定システムの構築を目的として研究が行われてきた西オーストラリアのアレオノラ Start Meadows の 50 km 四方の地域である(Kojima et al., 2006)。現地には地表近くに数十 cm-数 m の厚みのハードパンと呼ばれる不透水層が全域に存在する。また平均勾配が 1%にも満たない平坦な土地が広がり、流域を区切るとは困難である。モデルの検証に広域を用いると、実測データの入手が困難であるため、一連のモデル開発では流域設定がしやすく、実測データが入手可能な数 km 四方の対象流域を設定し、実測データとの比較によって表面流出モデルの開発・検証を行なってきた(小島ら, 2010)。植林サイトの位置については **Figure 4-2** に示した。数字およびアルファベットで示されている各植林サイト周辺でインタークレート試験を行なった。

7.2.2 対象流域

モデル計算を行なう対象流域には、対象地内に存在する近辺の地域の集水池である Jim's pool を含む 6 km×4.8 km の流域を選び、**Figure 4-4** に示した。標高データは Kevron Aerial Surveys Pty Ltd.から購入した 10 m mesh の DEM(Digital Elevation Model)を用いた。UTM 座標、投影法として WGS84 (South) Zone51 の X が 301990~307980(6 km)、Y が 6818881~6823671(4.8 km)の範囲を計算に用いた。この流域の設定についての詳細は 濱野ら(2010)および本論文の第 4 章に記載されている。

7.3 シリンダーインタークレート試験結果

集水池 Jim's pool 周辺での測定結果および研究対象地 Sturt Meadows station 内の植林サイト周辺での測定結果を **Table 3-4** にまとめた。**Table 3-4** は STM 内の植林サイト周辺の裸地での測定結果である。**Table 3-4** 中の 1 から 5 の地点は **Figure 4-2** の植林サイト名の数字とは関係なく付けた数字である。また Jim's pool の降雨計設置場所周辺で測定を行なったインタークレート試験結果を **Table 3-3** にまとめた。

7.3 浸透速度式

浸透速度の異なる 5 地点のインタークレート試験結果により得た実測値(齊藤, 2011)から Horton 式 (Horton, 1939), Kostiakov 式 (Kostiakov, 1932), Philip 式 (Philip, 1957) で表わされる浸透式を作成し、その影響を評価した。3 種類の浸透速度式について以下に示した。それらの試験結果から 3 種類の浸透速度式を作成しモデル内のフィッティングパラメータ N 、 PR に対する影響について検討した。

7.3.1 Horton 式(Horton, 1939)

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-Kt} \quad (7-1)$$

f_c : 定常浸透速度 (飽和透水係数) [mm/min]

f_0 : 初期浸透速度 [mm/min], t : 積算浸透時間 [min], K : 定数[min^{-1}], f_t : 時間 t の浸透速度 [mm/min]

7.3.2 Kostiakov 式(Kostiakov, 1932)

$$I = kt^m \quad (7-2)$$

I : 浸透量 [mm], k : 経験定数[mm/min^m], m : 経験定数[-]

7.3.3 Philip 式(Philip, 1957)

$$I = St^{0.5} + At \quad (7-3)$$

I : 浸透量 [mm], S : 吸水度 [$\text{mm}/\text{min}^{0.5}$], A : 最終浸透速度 [mm/min]

Table 3-4 の測定結果から上記の 3 つの浸透式に定式化したものを **Table 3-6** に示した。**Table 3-6** の 1, 2 は Kostiakov 式の k 、Philip 式の S 、Horton 式の f_c の値が大きく浸透速度の速い地点、3, 4, 5 は浸透速度の遅い地点のものである。

作成した浸透速度式を用いて、流域内に比較的均一な降雨（三つの降雨計の総降雨量の誤差が±0.2 mm 以内）があった 2003/3/24 の総降雨量 13.4 mm の時の降雨パターンをモデルの入力データとし、計算結果を 167 mm の水位変化の経時変化と比較した。

7.4 計算結果

7.4.1 Sturt Meadows 内植林サイト周辺のインタークレート試験結果から作成した浸透式の比較

モデル計算結果の例として、浸透速度の速いものから地点 1 の Kostiakov 式を用いたもの ($N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$) を **Figure 7-3** に示した。浸透速度の遅いものとして地点 5 の Philip 式を用いたもの ($N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$) を **Figure 7-5** に示した。

最適なフィッティングパラメータの組み合わせを見つけるために N を 0.001 刻みで、 PR を 0.1 刻みで変化させてモデル計算を繰り返し行なった。計算結果は実測値と比較して RMSE の値を求め最小になった N と PR の組み合わせを最適なフィッティングパラメータの組み合わせとして決定した。地点 1 の Kostiakov 式を用いたもの ($N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$) の実測値との RMSE 値での比較を **Figure 7-4** に示した。また、地点 5 の Philip 式を用いたもの ($N=0.014 \text{ sm}^{-1/3}$) の実測値との RMSE 値での比較を **Figure 7-6** に示した。地点 1 の浸透試験結果で Kostiakov 式を用いた場合の最適なフィッティングパラメータの組み合わせは $N=0.015$ 、 $PR=19.6 \text{ sm}^{-1/3}$ だった。また、地点 5 の浸透試験結果で Philip 式を用いた場合の最適なフィッティングパラメータの組み合わせは $N=0.014$ 、 $PR=4.5 \text{ sm}^{-1/3}$ だった。他の地点の浸透試験結果から作成した各式についても同様にモデル計算を行ない、RMSE 値で最適なフィッティングパラメータの組み合わせを決定した。最適なフィッティングパラメータの組み合わせを **Table 7-1** にまとめた。**Figure 7-4**、**7-6** から最適なフィッティングパラメータの組み合わせ以外の値での RMSE 値の比較ができ、フィッティングパラメータに対する感度解析となっている。浸透補正係数の値に最適値を用いるだけでなく、若干前後した値を用いたモデル計算も行なうことで、植林に最適な場所を選択するという本研究の目的には十分活用可能であると判断できた。

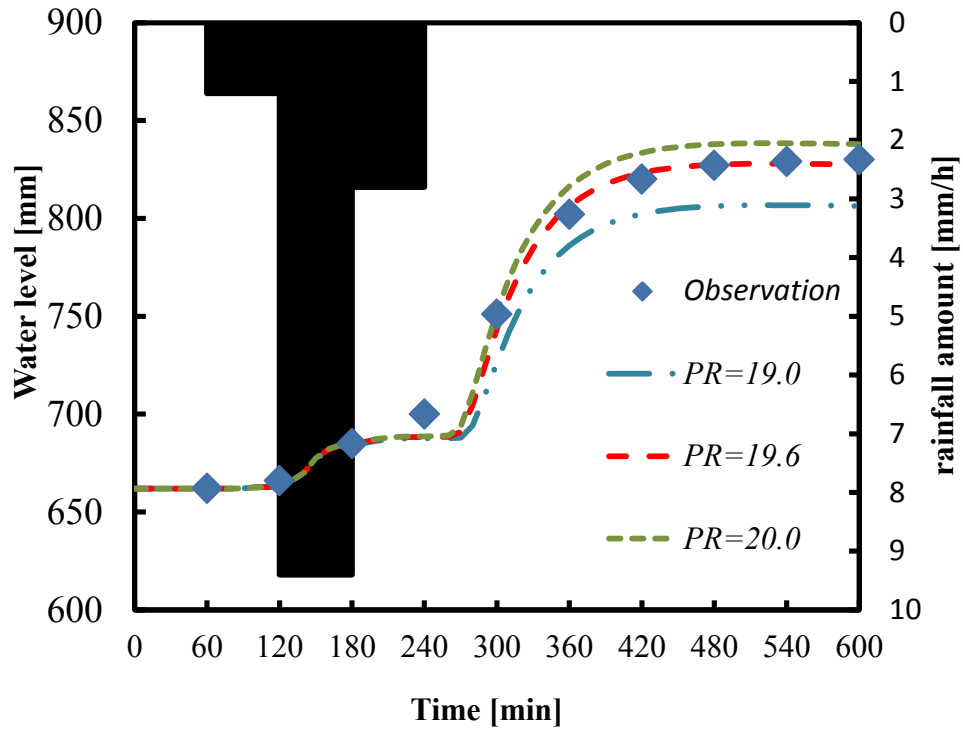


Figure 7-3 モデル計算結果と実測値の比較(Kostiakov 式 地点 1 $N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$)

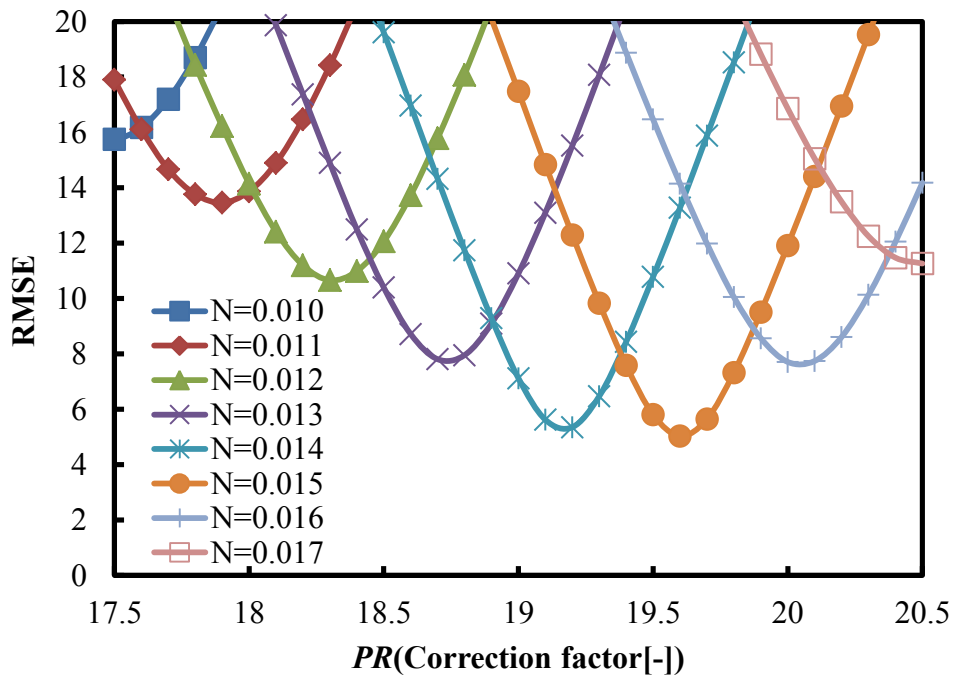


Figure 7-4 モデル計算結果の RMSE による評価(Kostiakov 式 地点 1 $N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$)

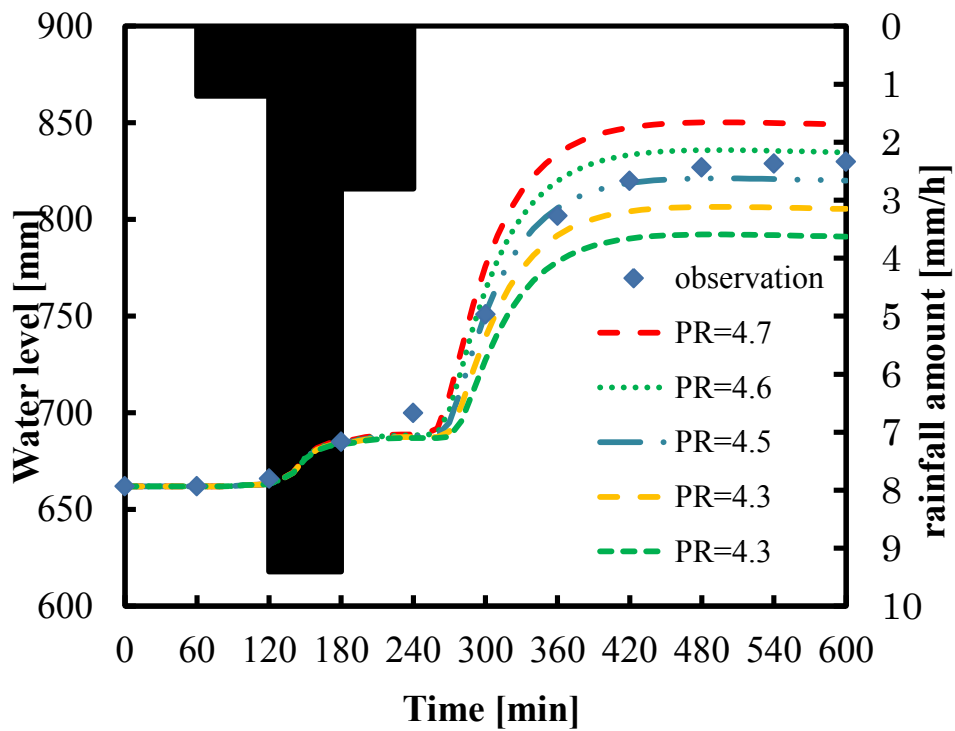


Figure 7-5 モデル計算結果と実測値の比較(Philip 式 地点 5 $N=0.014 \text{ sm}^{-1/3}$)

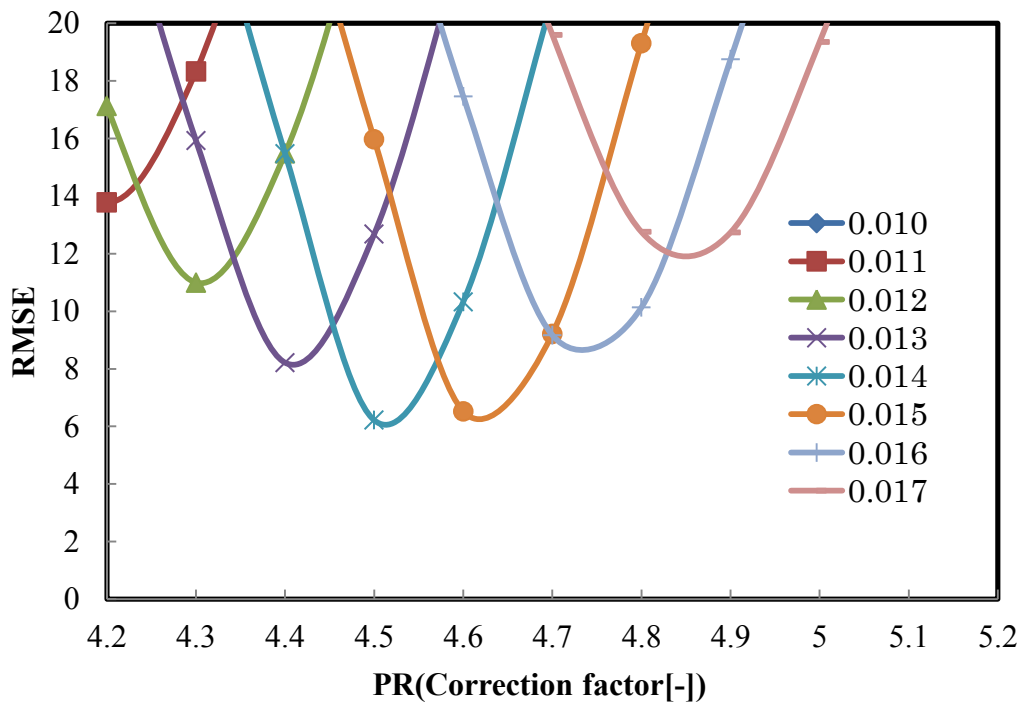


Figure 7-6 モデル計算結果の RMSE による評価(Philip 式 地点 5 $N=0.014 \text{ sm}^{-1/3}$)

**Table 7-1 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ
(Sturt Meadows 内各植林サイト周辺)**

	Kostiakov			Philip			Horton		
	<i>N</i>	<i>PR</i>	RMSE	<i>N</i>	<i>PR</i>	RMSE	<i>N</i>	<i>PR</i>	RMSE
1	0.015	19.6	5.04	0.014	18.2	4.96	0.015	20.6	4.78
2	0.015	13.7	5.13	0.014	15.7	5.19	0.015	17.5	4.81
3	0.015	7.9	5.40	0.015	8.2	5.82	0.015	8.9	5.66
4	0.015	5.6	4.77	0.015	5.5	6.40	0.015	7.2	5.12
5	0.014	4.9	5.05	0.014	4.5	6.22	0.014	7.3	4.68

この結果から、浸透速度の速い場所と遅い場所では浸透補正係数 *PR* の値に大きな差異が見られた。しかし等価粗度係数 *N* の値は浸透速度、浸透式の種類が異なっても大きな違いはなく、0.014 もしくは 0.015 という値であった。*PR* は浸透が遅い地点では浸透式が異なっても 4~9 程度の値で、浸透が速い地点では 20 前後のものまであり大きな補正が必要となった。浸透速度式の種類によらず等価粗度係数 *N* はほぼ一定であること、浸透補正係数 *PR* のバラつきは大きいものの浸透速度の速さの違いは区別できることなどから、本研究の目的である植林地選定のためのモデル開発に関しては 3 種類どの浸透式を使用しても問題は無いと判断できた。3 種類の浸透式のうち、インテークレート試験結果からの定式化が最も容易であったため、Horton 式を今後は主に使用していくこととした。

7.4.2 Jim's pool 降雨計設置場所周辺のインテークレート試験結果から作成した浸透式

Horton 式の形で定式化したものを **Table 3-8** にまとめた。7.4.1 同様に最適なフィッティングパラメータの組み合わせを求めたものを **Table 7-2** にまとめた。Jim's pool 周辺という狭い範囲内であったが、浸透補正係数 *PR* の値には大きな差異が見られた。今回用いたインテークレート試験結果はいずれも裸地条件の場所で測定を行なった結果である。同じ裸地条件でも浸透速度には大きな差があり浸透補正係数が大きな値となるものもあった。集水池 Jim's pool のような狭い範囲の同じ裸地条件の土壌でも浸透速度には大きな差が見られた。そのため最終的な目的である広域での植林対象地を選定するためにはモデル計算を行なう場所の土壌性状について考慮する必要があることが分かった。広域では全域が裸地ではなく、草地や森林のような土壌性状の場所も含まれてくるため、モデル計算のメッシュごと

に植生などの土壌性状を考慮した浸透速度式の当てはめが必要となる。そのことによって、より詳細な水移動予測が可能になり植林地選定可能なシミュレーションモデルが構築できる。植生などの土壌性状が浸透式に与える影響については次章で検討する。

**Table 7-2 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ
(Jim's pool 周辺)**

	N	PR	RMSE
1	0.015	9.1	5.52
2	0.015	15.2	4.87
3	0.016	9.4	5.16

7.5 結言

Horton 式、Kostiakov 式、Philip 式の 3 種類の土壌浸透速度式でモデル計算を行なったが、どの式を用いても等価粗度係数 N はほぼ一定であること、浸透補正係数 PR のバラつきは大きいものの浸透速度の速さの違いは区別できることなどから、本研究の目的である植林地選定のためのモデル開発に関しては 3 種類どの浸透式を使用しても問題は無いと判断できた。3 種類の浸透式のうち、インタークレート試験結果からの定式化が最も容易であったため、Horton 式を今後は主に使用していくこととした。

また、集水池 Jim's pool のような狭い範囲の同じ裸地条件の土壌でも浸透速度には大きな差が見られた。そのため最終的な目的である広域での植林地対象地を選定するためにはモデル計算を行なう場所の土壌性状について考慮する必要があることが分かった。広域では全域が裸地ではなく、草地や森林のような土壌性状の場所も含まれてくるため、モデル計算のメッシュごとに植生などの土壌性状を考慮した浸透速度式の当てはめが必要となる。植生などの土壌性状が浸透式に与える影響については次章で検討する。

引用文献

- 小島紀徳, 小柳卓, 田淵宏典, 菅沼秀樹, 黒澤勝彦, 高橋伸英, 濱野裕之. (2010): 西豪州乾燥地における植林地選定を目的とした表面流出モデルの開発, 化学工学論文集, Vol. 36, No. 5, pp. 532-538.
- 齊藤忠臣(2011): 乾燥地における表面流出水捕集と土壌侵食防止に関する研究, 日本沙漠学会第22回学術大会講演要旨集, pp2~pp3, 2011年5月
- 濱野裕之, 高橋伸英, 山田興一, 小島紀徳, Law John. [2010]: 乾燥地植林を目的とした中流域における表面流出率の測定, 化学工学論文集, vol.36, No.4, pp. 351-354.
- Horton R.E. (1939): Analysis of Runoff-plot Experiments with Varying Infiltration-capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Vol 20. pp. 693-711.
- Kostiakov A.N. (1932): On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transaction of 6th Congress of International Soil Science Society part A*, pp17-21
- Philip J.R. (1957): The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations, *Soil Sci.*, Vol. 84: 257-264
- Rao K.P.C., Steenhuis T.S., Cogle A.L., Srinivasan S.T., Yule D.F., Smith G.D. (1998): Rainfall Infiltration and Runoff from an alfisol in Semi-arid Tropical India. I. No-till System. *Soil& Tillage Research*, 48: 51-59
- Ven Te Chow (1959): *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 98-123.

第八章 植生分布を考慮したパラメータ決定

8.1 緒言

前章で植生による土壌浸透速度の違いを考慮する必要があることが分かった。そこで本章では、植生の異なる場所(草地、森林)でのインタークレート試験結果から Horton 式の形で浸透速度式を作成し、モデル計算を行ない最適なフィッティングパラメータの組み合わせを探した。Jim's pool 全域を草地、森林とした場合の最適なフィッティングパラメータを決定した後、実際の植生分類に浸透速度式を合わせた形でモデル計算を行ない、最適なフィッティングパラメータの組み合わせを見つけた。

8.2 対象地の植生分布

対象地の Jim's pool の航空写真を **Figure 8-1** に、植生を **Figure 8-2** に示した。各植生のモデル内のメッシュ数を **Table 8-1** に示した。

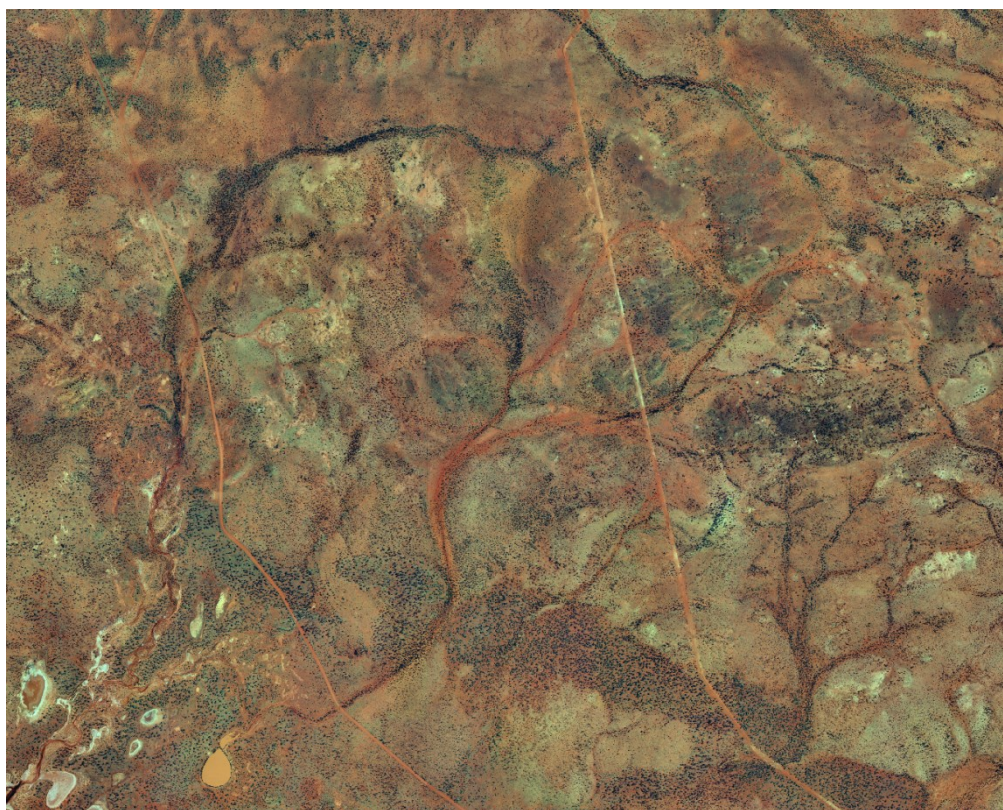


Figure 8-1 対象地 Jim's pool 航空写真

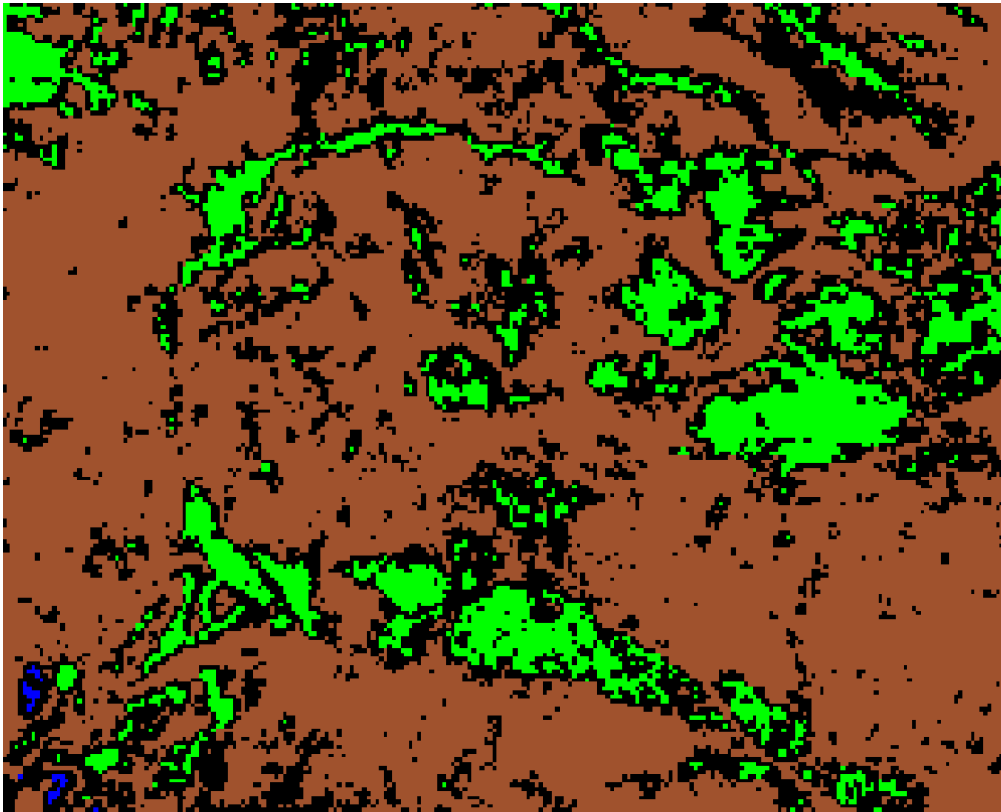


Figure 8-2 対象地 Jim's pool 植生分類

茶：裸地 黒：草地 緑：アカシア林 青：湛水および水分の多い土壌

Table 8-1 対象地 Jim's pool の植生分類

色		植生	メッシュ数
黒	0	草地	79943
青	1	湛水or水分の多い土	230
茶	2	裸地	178915
緑	3	アカシア林	28912
深緑	4	ユーカリ林	0
紫	5	塩類植生	0
全体			288000

Figure 8-2 を見ると全域が裸地ではなく草地やアカシア林も一定の面積を占めていることがわかる。Table 8-1 から草地は全体の約 28%、アカシア林は約 10%を占めており、裸地は約 62%である。これまで全域を裸地としていたモデル計算と浸透速度式を実際の植生に合わせたモデル計算では最適となるフィッティングパラメータの組み合わせは異なることは明白である。広域でのモデル利用には実際の植生に合わせた形で決定されたフィッティングパラメータを使用すべきであり、草地、森林のシリンダーインテークレート試験結果から浸透速度式を作成した。

Table 8-2 シリンダーインテークレート法 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 森林)

	1	2	3		1	2	3
min	mm	mm	mm	min	mm	mm	mm
0	0	0	0	46	109	86	186
1	3	7	11	47	111	88	191
2	9	7	16	48	112	89.5	194
3	13	7	20	49	114	91	201
4	16	9	24	50	115	93	204
5	18	11	28	51	117	95	208
6	21	13	32	52	118	97	213
7	24	16	35	53	120	99	216
8	27	17	37	54	122	101	220
9	30	19	42	55	123	102.5	224
10	32	22	44	56	125	104	229
11	35	24	47	57	126	106	233
12	37	26	51	58	128	108	236
13	40	28	55	59	129	109	241
14	42	29	61	60	131	110	244
15	46	31	64	61	133	111.5	251
16	48	33	68	62	134	113	255
17	51	33	72	63	135	115.5	259
18	52	35	76	64	137	118	263
19	55	37	79	65	139	119	268
20	56	38	83	66	140	120	271
21	59	40	87	67	141	121.5	275
22	61	42	91	68	142	123	280
23	64	44	96	69	144	125	284
24	66	46	99	70	145	127	288
25	68	48	103	71	147	128.5	293
26	70	50	107	72	148	130	297
27	72	52	111	73	149	131.5	301
28	74	53	115	74	150	133	305
29	76	55	119	75	152	134	310
30	78	57	124	76	153	135	314
31	80	58	128	77	155	136.5	319
32	82	60	132	78	156	138	322
33	84	62	136	79	158	140	326
34	87	63	140	80	159	142	331
35	88	65	142	81	160	143.5	336
36	90	67	146	82	162	145	341
37	92	69	151	83	164	147	345
38	94	71	155	84	165	148	350
39	96	73	159	85	166	149	353
40	98	75	163	86	168	151	358
41	101	76	167	87	169	152	361
42	102	78	172	88	171	153	364
43	104	80	176	89	172	155	368
44	106	82	180	90	173	156	373
45	107	84	184				

8.3 シリンダーインテークレート法 測定結果

裸地条件での測定として集水池 Jim's pool 周辺での測定結果を **Table 3-3** に、STM 内植林サイト周辺の草地、森林の測定結果を **Table 3-5**、**Table 8-2** にまとめた。**Table 3-3**、**Table 3-5**、**Table 8-2** の測定結果から Horton 式の形で定式化したものを **Table 8-3**、**Table 8-4**、**Table 8-5** に示した。

Table 8-3 測定結果(Jim's pool 周辺 裸地)から作成した浸透速度式

Horton	
$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$	
1	$f_t = 0.74 + (0.375)e^{-0.0409t}$
2	$f_t = 1.03 + (0.970)e^{-0.0711t}$
3	$f_t = 0.97 + (0.109)e^{-0.0214t}$

f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min^{-1}], t : Time [min]

Table 8-4 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 草地)から作成した浸透速度式

Horton	
$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$	
1	$f_t = 3.74 + (1.161)e^{-0.0506t}$
2	$f_t = 1.88 + (2.480)e^{-0.0579t}$

f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min^{-1}], t : Time [min]

Table 8-5 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 森林)から作成した浸透速度式

Horton	
$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$	
1	$f_t = 1.92 + (3.587)e^{-0.0551t}$
2	$f_t = 1.73 + (0.851)e^{-0.0459t}$
3	$f_t = 4.04 + (0.231)e^{-0.0229t}$

f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min^{-1}], t : Time [min]

8.4 モデル計算結果および最適なフィッティングパラメータの決定

はじめに Jim's pool 全域を裸地、草地、森林のみとした設定でそれぞれの浸透速度式を用いてモデル計算を行ない、最適なフィッティングパラメータの組み合わせを求めた。結果は Table 8-6、Table 8-7、Table 8-8 のようになった。

等価粗度係数 N の値は $0.015 \text{ sm}^{-1/3}$ もしくは $0.016 \text{ sm}^{-1/3}$ とほぼ一定の値であった。一方、浸透補正係数 PR は裸地条件でも 9~15 と幅があった。草地は 32~35 程度であったが、森林では 20 から 40 前後までかなりバラつきが大きかった。

Table 8-6 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ(裸地)

	N	PR	RMSE
1	0.015	9.1	5.52
2	0.015	15.2	4.87
3	0.016	9.4	5.16

Table 8-7 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ(草地)

	N	PR	RMSE
1	0.016	32.2	4.96
2	0.015	35.4	4.89

Table 8-8 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ(森林)

	<i>N</i>	<i>PR</i>	RMSE
1	0.015	44.1	4.68
2	0.015	20.8	5.11
3	0.016	37.5	5.01

次に Jim's pool の実際の植生に合わせ、メッシュごとに浸透速度式を変えてモデル計算を行ない、最適なフィッティングパラメータの組み合わせを求めた。

裸地、草地、森林それぞれ測定結果から作成した浸透速度式が 3 種類、2 種類、3 種類あり、それらの組み合わせを変更して最適なフィッティングパラメータの組み合わせを求めた。浸透速度式の組み合わせと最適なフィッティングパラメータは **Table 8-9** のようになった。

Table 8-9 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ(植生分類後)

裸地	草地	森林	<i>N</i>	<i>PR</i>	RMSE
1	1	1	0.015	17.3	4.15
		2	0.015	16.0	4.40
		3	0.015	17.1	4.18
	2	1	0.015	17.8	3.98
		2	0.015	16.5	4.26
		3	0.015	17.6	4.06
2	1	1	0.015	22.7	4.32
		2	0.015	20.5	4.63
		3	0.015	22.3	4.37
	2	1	0.015	23.7	4.26
		2	0.015	21.4	4.66
		3	0.015	23.2	4.39
3	1	1	0.015	17.3	4.38
		2	0.015	16.0	4.64
		3	0.015	17.1	4.40
	2	1	0.015	17.8	4.11
		2	0.015	16.5	4.38
		3	0.015	17.6	4.18

等価粗度係数 N は $0.015 \text{ sm}^{-1/3}$ で一定であった。一方、浸透補正係数 PR は 16~24 の範囲で異なった。この結果から、広域でのモデル計算に使用するフィッティングパラメータを等価粗度係数 N は $0.015 \text{ sm}^{-1/3}$ 、浸透補正係数 PR を 20.0 とすることにした。

8.5 結言

全域を裸地、草地、森林とした場合に同じ裸地、草地、森林の条件であっても、最適なフィッティングパラメータは異なることが分かった。

実際の植生に合わせて浸透速度式を変えて計算を行なった結果、18 種類の組み合わせから最適なフィッティングパラメータの組み合わせが得られた。広域でのモデル計算では等価粗度係数 N は $0.015 \text{ sm}^{-1/3}$ 、浸透補正係数 PR を 20.0 とすることにした。この値を用いて第 4 部では広域でのモデル計算を行なっていく。

第四部 マクروسケールへの展開：流出モデルの適用

第四部では第三部で構築した表面流出モデルを広域に適用した。第九章では広域展開を行なうためのモデルの再構築を行なった上で計算を行ない、現地での植生分布とモデルによる土壌浸透水量との比較からモデルの妥当性の議論を行なった。自然植生のある場所の浸透量を確認することで植林木が成長するのに必要な浸透水量を検討した。第十章では現在裸地である部分に植林を行なうことを想定し、その場所の浸透速度が裸地相当から森林相当へと変化するものと考え、このことが現状の自然植生特に森林生態系での流入水量、ひいては浸透水量に与える影響を評価した。

第九章 広域展開による計算結果の評価

9.1 緒言

前章までは集水池 Jim's pool での実測値との比較により、モデルの構築を行なってきた。

本章では最終的な目的である広域での植林地選定のための広域でのモデル利用を可能にするためにメッシュサイズの拡大について、前章までで決定したフィッティングパラメータを用いたモデル計算結果から浸透水量について自然植生の場所との比較を行なった。

9.2 研究対象地

対象地の Sturt Meadows Station (STM)の航空写真を **Figure 9-1** に、植生を **Figure 9-2** に示した。各植生のモデル内のメッシュ数を **Table 9-1** に示した。**Figure 9-2** を見ると緑の草地と茶色の裸地の場所が広く分布していて草地の中もしくは周辺に黒で表示されているアカシア林が広がっている。また、下部に青で表示されている大きな塩湖がある。広さは縦が約 52 km、横が約 44 km で面積は約 230,000ha である。植生割合で、裸地は約 66,000 ha、草地が約 74,000 ha、アカシア林が約 39,000 ha、塩湖を含む湛水および水分の多い土壌が約 56,000 ha となっている。

9.3 モデル設定

浸透速度式は前章で検討した結果から裸地、草地、森林それぞれの地点 2 でのインタークレート試験結果から作成した浸透速度式を使用した。それぞれの式については **Table 9-2** にまとめた。降雨は Jim's pool を対象にモデル開発を行なう際に利用した 2003 年 3 月 24 日の 1 分間積算降雨データを用いて、10 時間分の計算を行なった。Jim's pool での計算との違いは初期水位を与えず表面上には水が無い状態で計算を開始している。メッシュサイズは Jim's pool の 10 m から 30 m に拡大している。その他蒸発、表面流出などは変更せずに使用している。

9.4 メッシュサイズ

モデル中のメッシュサイズは 10 m から 30 m に拡大している。これはモデル開発時には

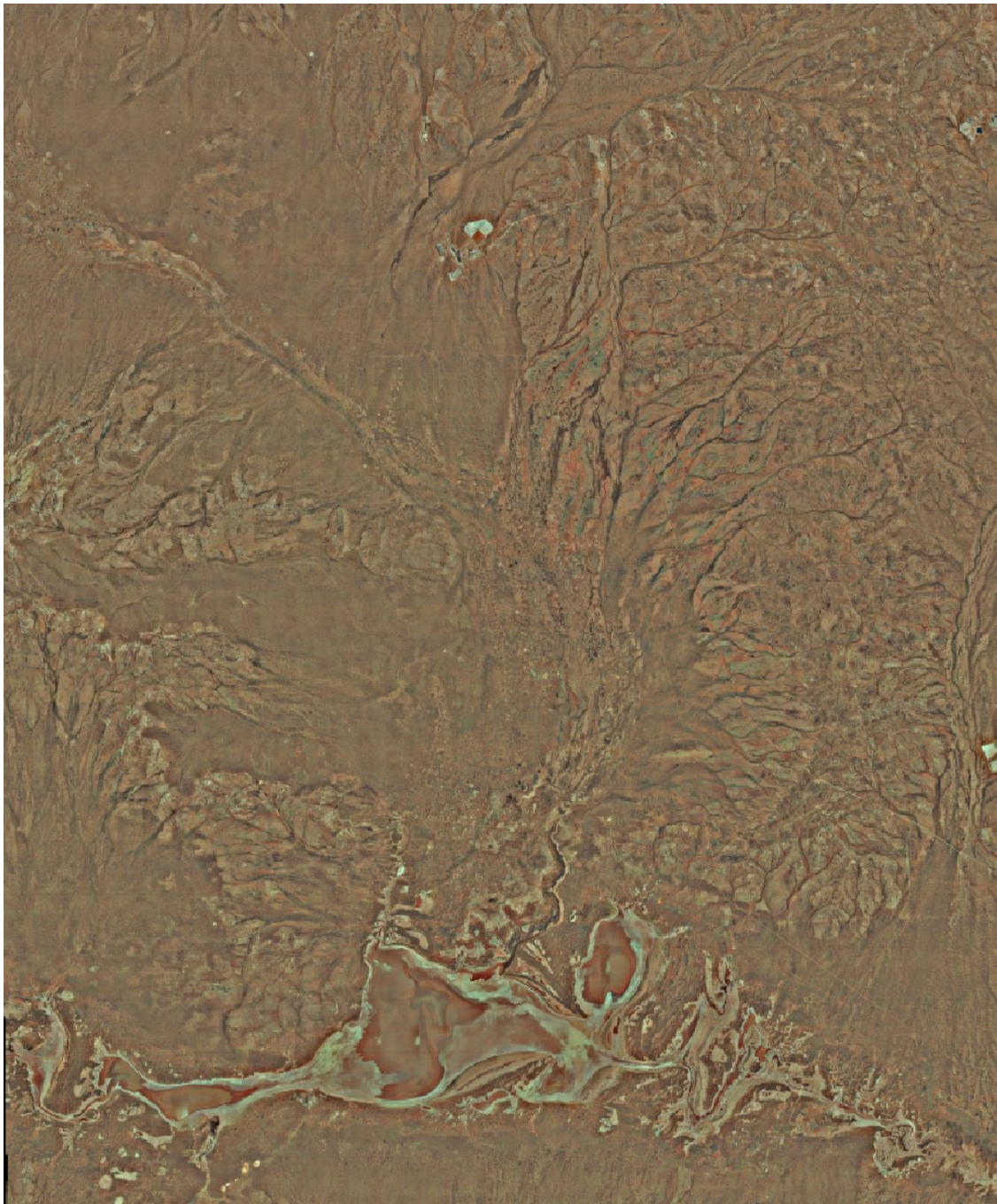


Figure 9-1 対象地 Sturt Meadows Station 航空写真

詳細な標高データを利用していたが、広域での計算には ASTER-GDEM で平均解像度 30 m の画像が無料で入手可能なためである。これまで解像度 10 m で開発を行ってきたモデルを 30 m のメッシュサイズに拡大して適用することが可能かどうかの検証を行なった。

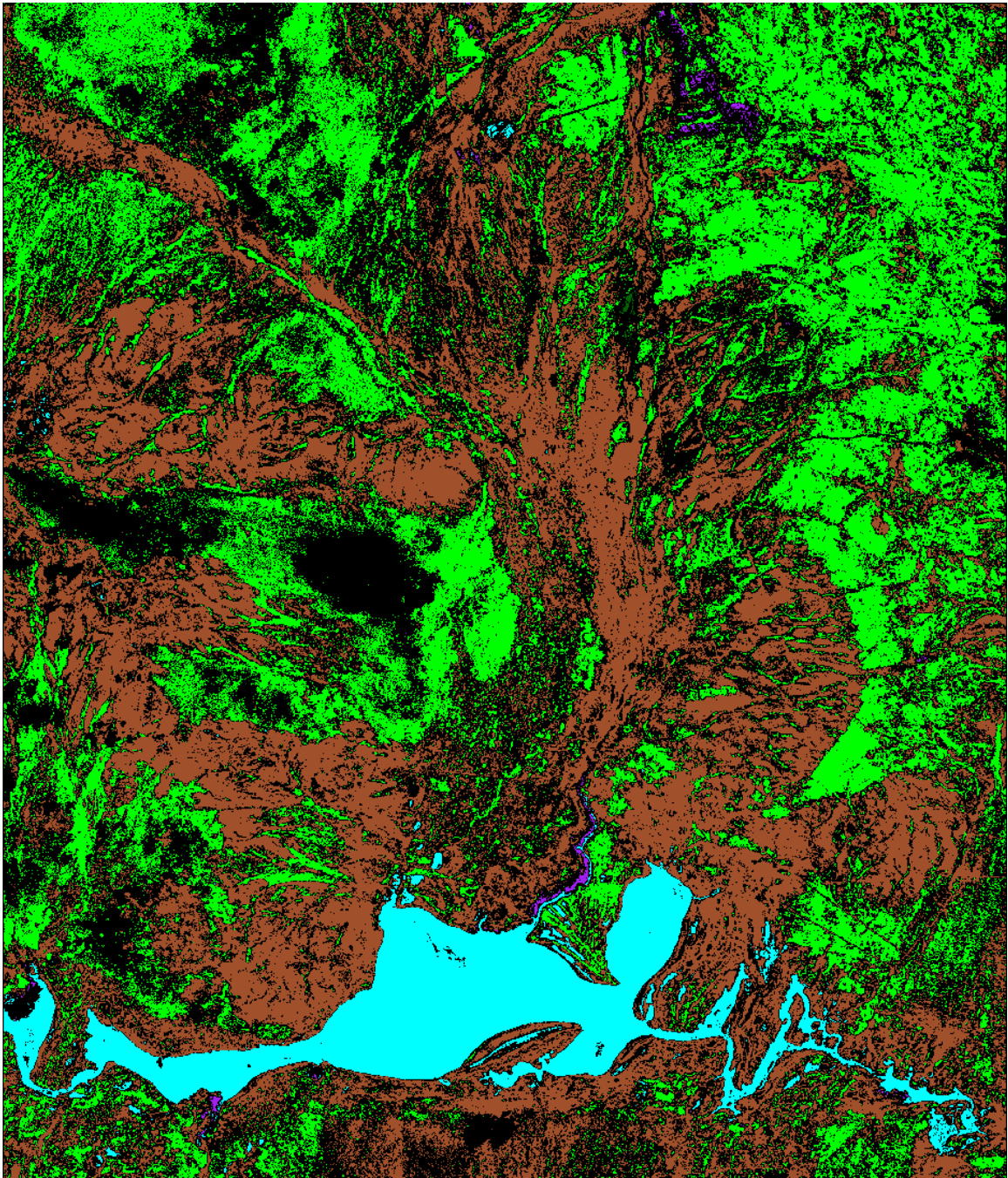


Figure 9-2 対象地 Sturt Meadows Station 植生分類

茶：裸地 黒：草地 緑：アカシア林 青：湛水および水分の多い土壌 紫：塩生植物

9.4.1 メッシュサイズ拡大の影響についての検討

10 m から 30 m にメッシュサイズを拡大してモデル計算を行なうと 10 m で最適なフィッティングパラメータでも水位変化は実測値と一致しなかった。この原因はメッシュサイズが変化することで、集水池の Jim's pool の凸凹も変化し、集水量が変化しているためだった。

Table 9-1 対象地 Sturt Meadows Station の植生分類

色		植生	メッシュ数
黒	0	草地	818193
青	1	湛水or水分の多い土	557443
茶	2	裸地	730783
緑	3	アカシア林	433270
深緑	4	ユーカリ林	615
紫	5	塩類植生	1584
		全体	2541888

Table 9-2 使用した浸透速度式

Horton	
$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$	
裸地	$f_t = 1.03 + (0.970)e^{-0.0711t}$
草地	$f_t = 1.88 + (2.480)e^{-0.0579t}$
森林	$f_t = 1.73 + (0.851)e^{-0.0459t}$

そこで、これまで水位変化の実測値とモデル計算結果を比較していたものを、水位から集水量へと変換をして実測値とモデル計算結果の比較するように変更した。はじめに 10 m での水位と集水量の相関関係を求めた。Jim's pool 内の最低標高である 368.5 m からの標高差を求め、その高さまで水位が上がってきた時の集水量を求めた。結果は **Figure 9-3** のようになり、きれいな相関関係にあった。次に 30 m メッシュでも同様に水位と集水量の関係を求めた。結果は **Figure 9-4** のようになった。こちらも相関関係にあった。次に 10 m での計算時の初期水位 0.662 m の集水量を求めると、16543.61 m³であった。30 m でこの集水量 16543.61 m³となる水位を求めると、**Table 9-3** のようになり最も近い値の 0.6964 m を 30 m の計算での初期水位とした。初期水位を 0.6964 m に変更し 30 m メッシュでの計算を行ない得られた水位変化の計算結果から集水量変化へと変換し、水位の実測値から集水量へと変換したものと比較した。使用した浸透速度式は 7 章で使用した Sturt Meadows 内各植林サイト周辺のインテークレート試験結果から作成した Horton 式で、全域裸地として計算を行なった。計算結果は **Figure 9-5** のようになった。最適なフィッティングパラメータの値は $N=0.015 \text{ sm}^{-1/3} PR=20.6$ となり、10 m で水位の実測値との比較から決定した値と同じ値になった。

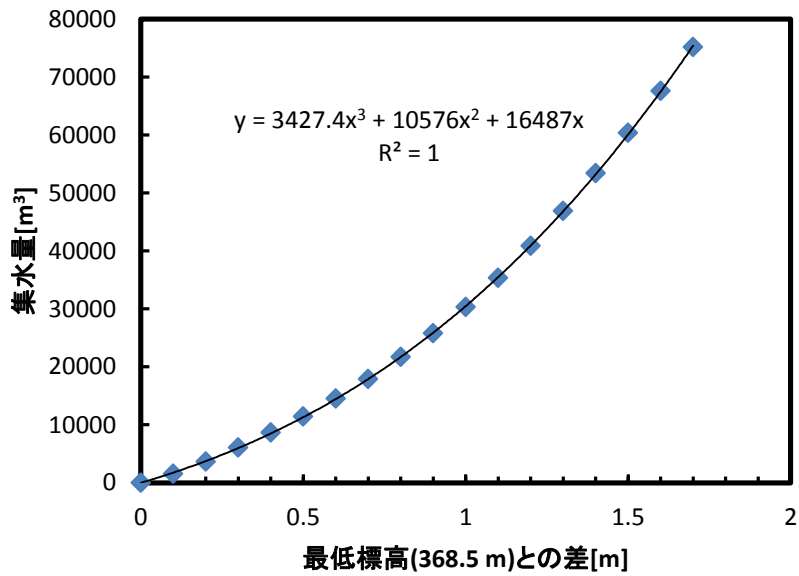


Figure 9-3 10 m メッシュ時の水位と集水量の関係

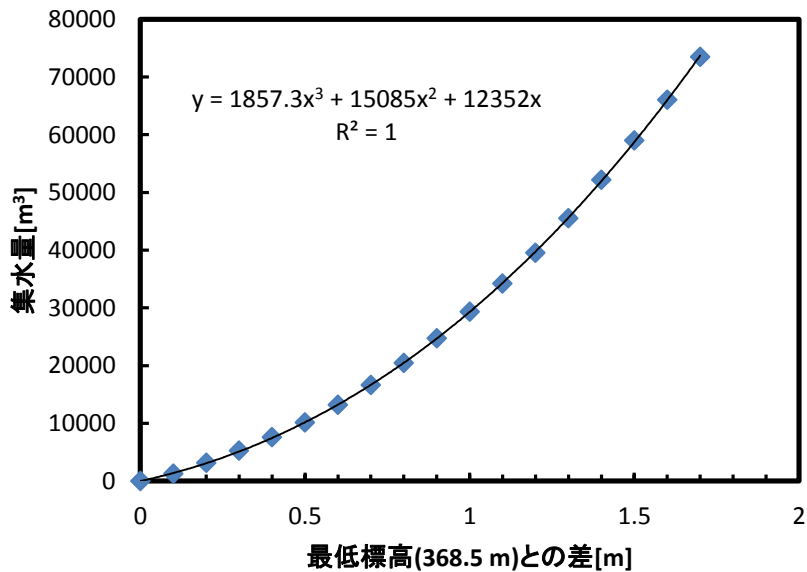


Figure 9-4 30 m メッシュ時の水位と集水量の関係

その他の浸透速度式でも同様の確認を行なったが、どれも 10 m で決定した値と同じか、*PR* が 0.1 前後するのみであった。これらの結果から、10 m で開発を行なってきた本モデルは 30 m にメッシュサイズを拡大しても結果が大きく異なることはなく、適用可能であると判断した。

Table 9-3 30 m メッシュでの水位と集水量の関係

水位[m]	集水量[m ³]
0.6962	16537.81327
0.6963	16541.42
0.6964	16545.02543
0.6965	16548.63
0.6966	16552.24

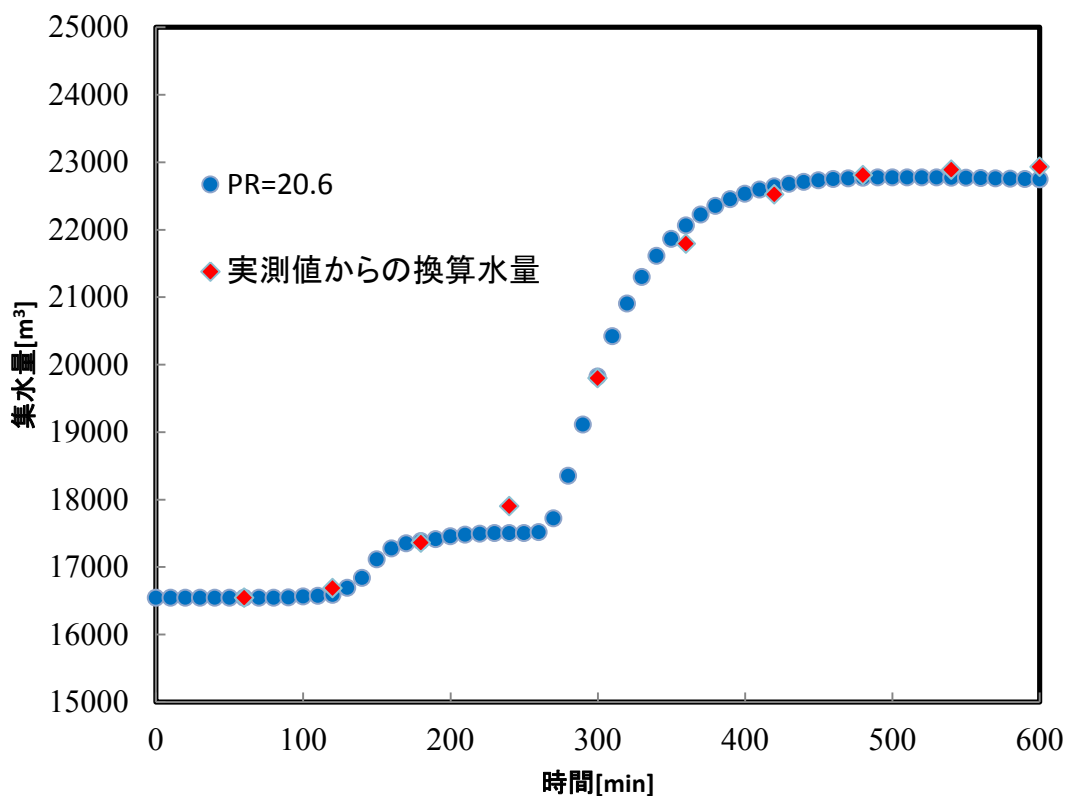


Figure 9-5 集水量での実測値との比較($N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$ $PR=20.6$,
Table 7-3 の地点 1 の Horton 式で計算)

9.5 広域でのモデル計算

9.5.1 計算条件

標高データは UTM 座標、投影法として WGS84(South)Zone 51 の X が 272778~316878(約 44 km)、Y が 6805078~6856858(約 52 km)の範囲を計算に用いた。その他、初期水位は与えず計算開始時には表層には水が無い状態で計算を開始している。浸透速度式はメッシュご

とに植生分類によって変更した。使用した浸透速度式は **Table 9-2** のようになっていて、湛水、塩生植生の場所では浸透は 0 とした。またユーカリ林の面積は少ないことからアカシア林と同様の浸透速度式を適用した。フィッティングパラメータは前章で決定した $N=0.015 \text{ sm}^{-1/3}$ 、 $PR=20.0$ とした。ただし、これまでの検討結果から、 PR については一定の範囲で変更したものでモデル計算を行なう必要があるため、 $PR=10.0$ 、 20.0 、 40.0 の 3 パターンで計算を行なった。これは Jim's pool での全域を裸地、草地、森林とした時の最適な PR の値が 10~40 程度の範囲にあったためである。タイムステップは 30 m メッシュへの拡大に伴い 1 s とした。その他の条件は **5.1.2** の条件と同様である。

9.6 計算結果

9.6.1 総浸透水量についての検討

$PR=10.0$ 、 20.0 、 40.0 でのモデル計算結果から各植生分類の総浸透量について **Figure 9-6** に、モデル中の全水量に対する植生分類ごとの総浸透水量の割合を **Table 9-4** に示した。

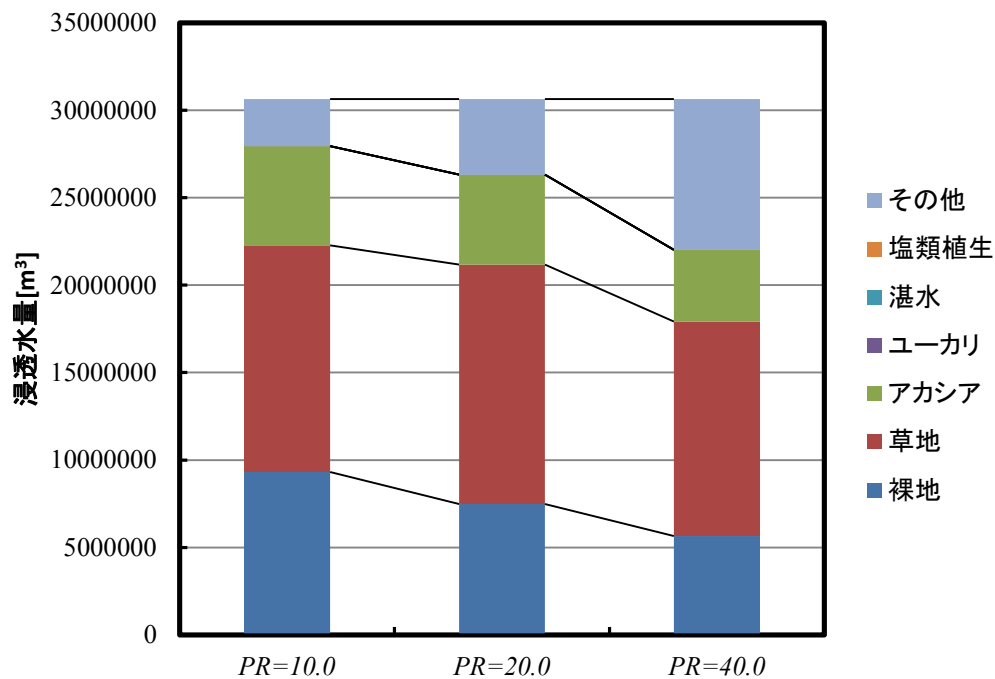


Figure 9-6 植生分類ごとの総浸透水量

Table 9-4 全水量に対する浸透水量の割合[%]

	PR=10.0	PR=20.0	PR=40.0
裸地	30.4	24.4	18.5
草地	42.3	44.7	40.0
アカシア	18.5	16.8	13.4
ユーカリ	0.0	0.0	0.0
湛水	-	-	-
塩類植生	-	-	-
その他	8.8	14.1	28.1

Figure 9-6、Table 9-4 から浸透補正係数 PR が大きくなると浸透速度が遅くなるため、どの植生においても総浸透水量は減少していることがわかる。また、その他が増加しているのは浸透せずに表面流出して表層に残っているもの、土壤に浸透せずに表層に残ったために液面蒸発したもの、表面流出してモデル外へと流出して除去された水量が増加したためである。これらの結果から、広域にモデル展開して計算を行なっても問題なく水移動状況を再現出来ているものと判断できた。

9.6.2 植生分類ごとの浸透水量の差異

植生分類ごとに浸透水量の分布について検討した。**Figure 9-7、9-8、9-9** に $PR=10.0$ の時の裸地、草地、森林（アカシア林）の浸透水量の分布を、**Figure 9-10、9-11、9-12** に $PR=20.0$ の時の裸地、草地、森林（アカシア林）の浸透水量の分布を、**Figure 9-13、9-14、9-15** に $PR=40.0$ の時の裸地、草地、森林（アカシア林）の浸透水量の分布を示した。浸透補正係数 PR の小さな条件($PR=10.0$)では裸地も草地や森林とそれほど変わらず浸透しているが、 PR を大きくしていき、浸透速度が遅い条件になってくると裸地は浸透水量の分布が全体に左側の少ない方にシフトしてくる。一方草地や森林では最も浸透量の少ない所に見えていたピークはなくなるものの、裸地と比較して左にシフトする量は少ない。これらの結果から、裸地の浸透量を草地や森林の浸透量まで増加させることができれば、その場所でも草地や森林が育つのに十分な水量を確保できるのではないかと考えた。次章で、裸地に植林を行ない森林が形成された場合の水移動状況の変化について検討を行なった。

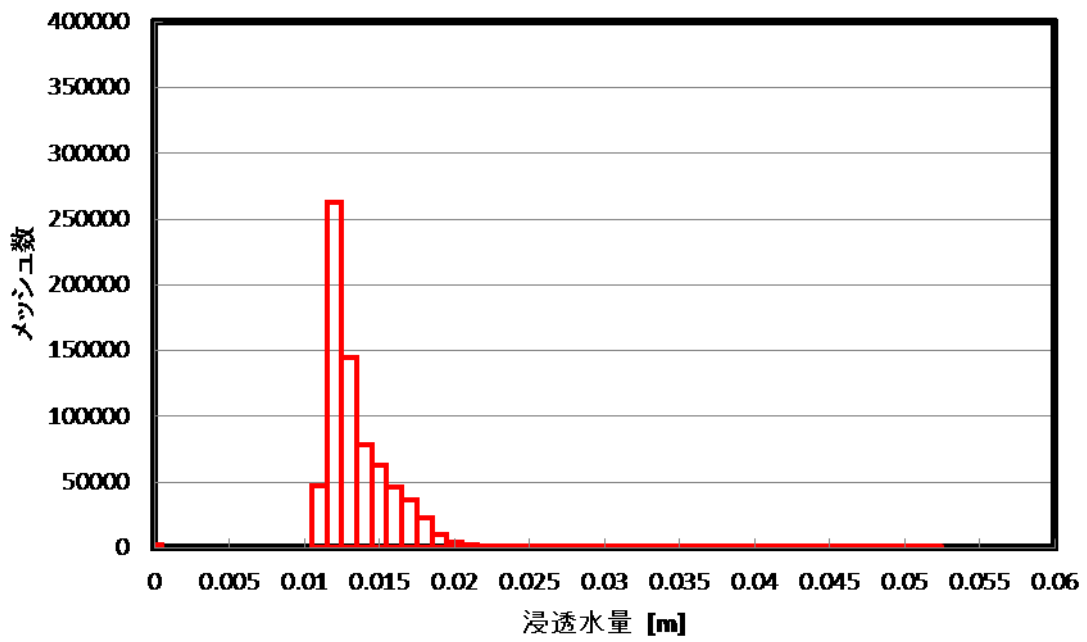


Figure 9-7 裸地の浸透水量分布図($PR=10.0$)

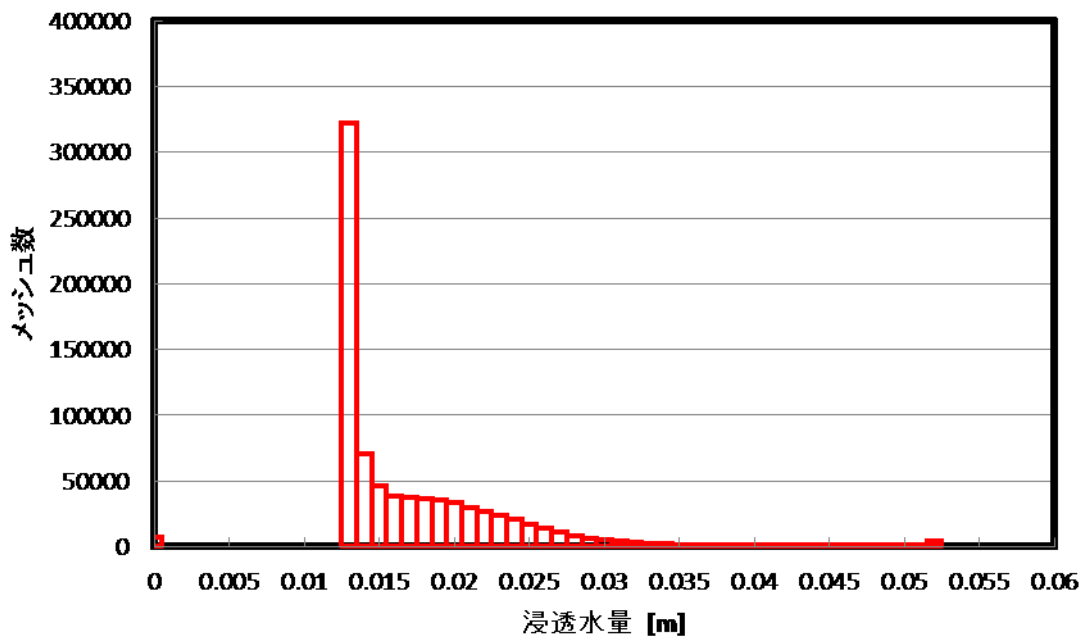


Figure 9-8 草地の浸透水量分布図($PR=10.0$)

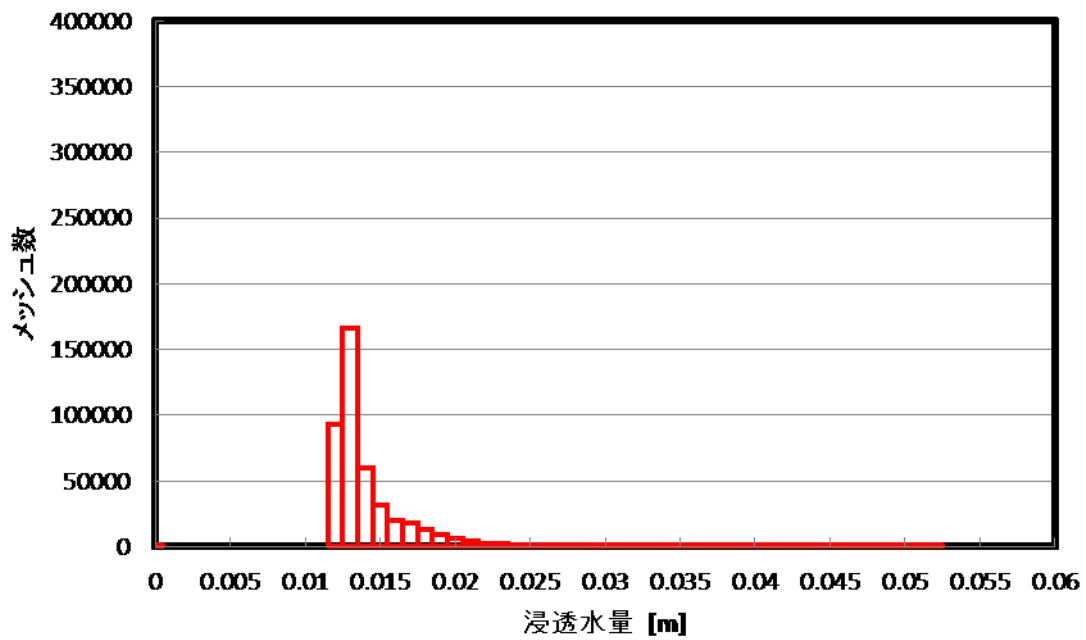


Figure 9-9 森林(アカシア林)の浸透水量分布図($PR=10.0$)

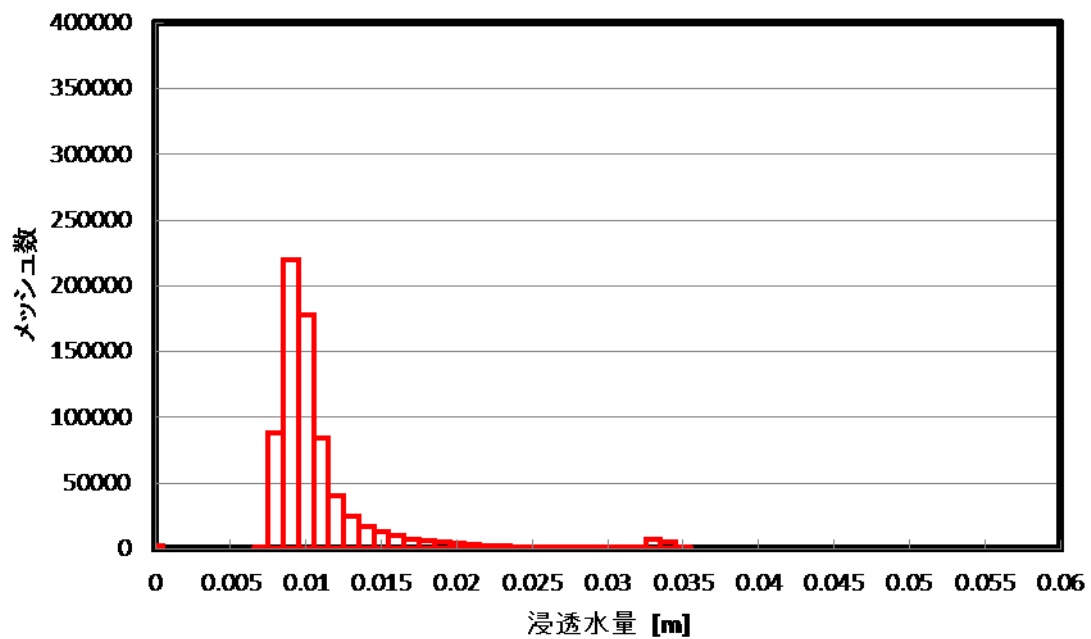


Figure 9-10 裸地の浸透水量分布図($PR=20.0$)

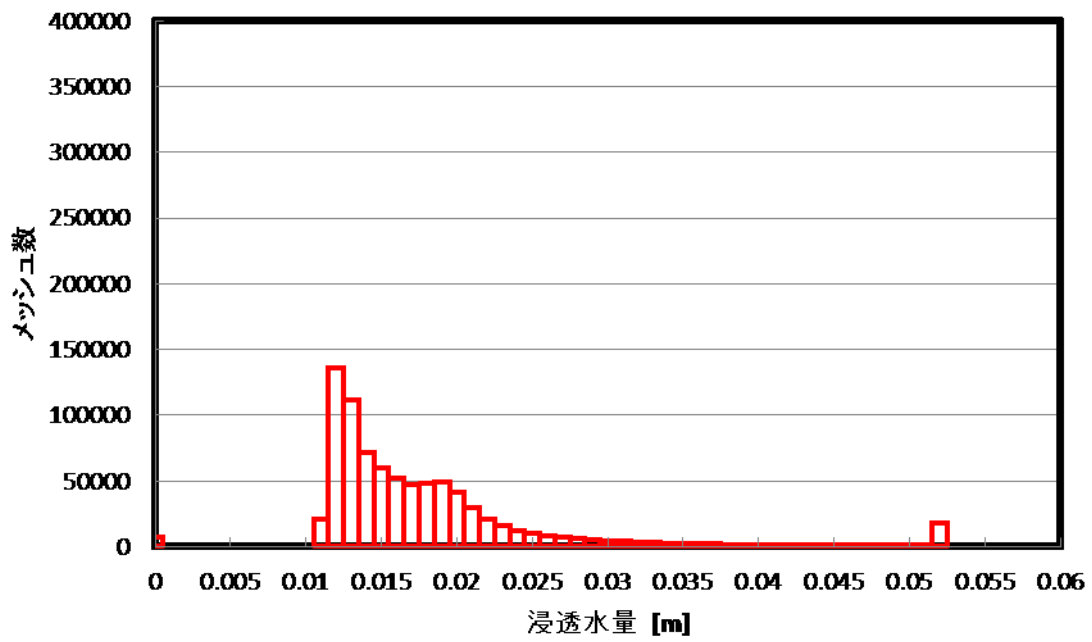


Figure 9-11 草地の浸透水量分布図($PR=20.0$)

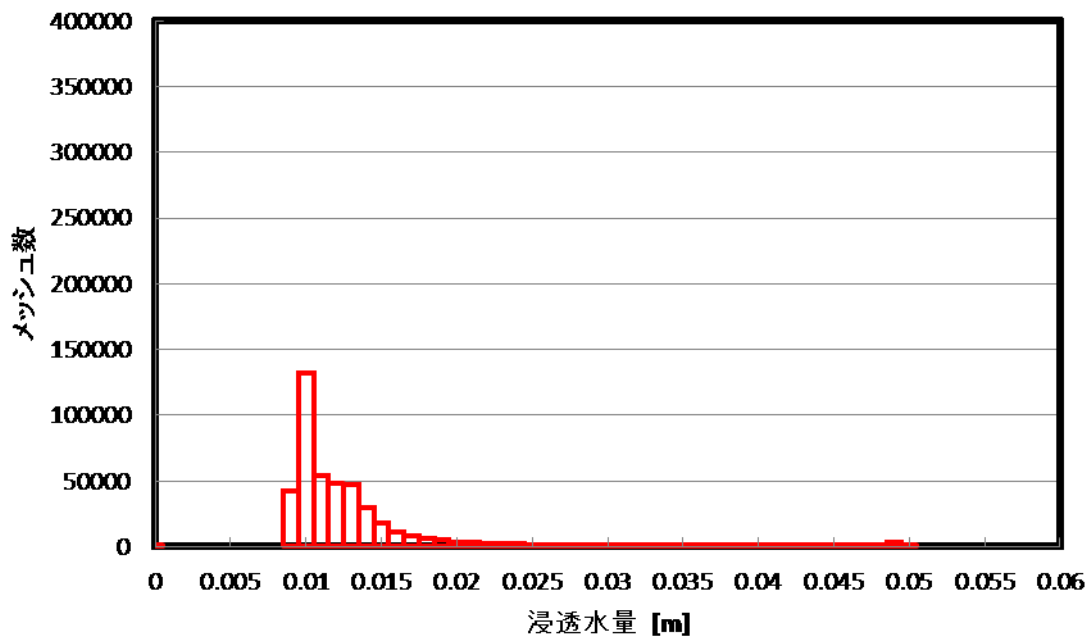


Figure 9-12 森林(アカシア林)の浸透水量分布図($PR=20.0$)

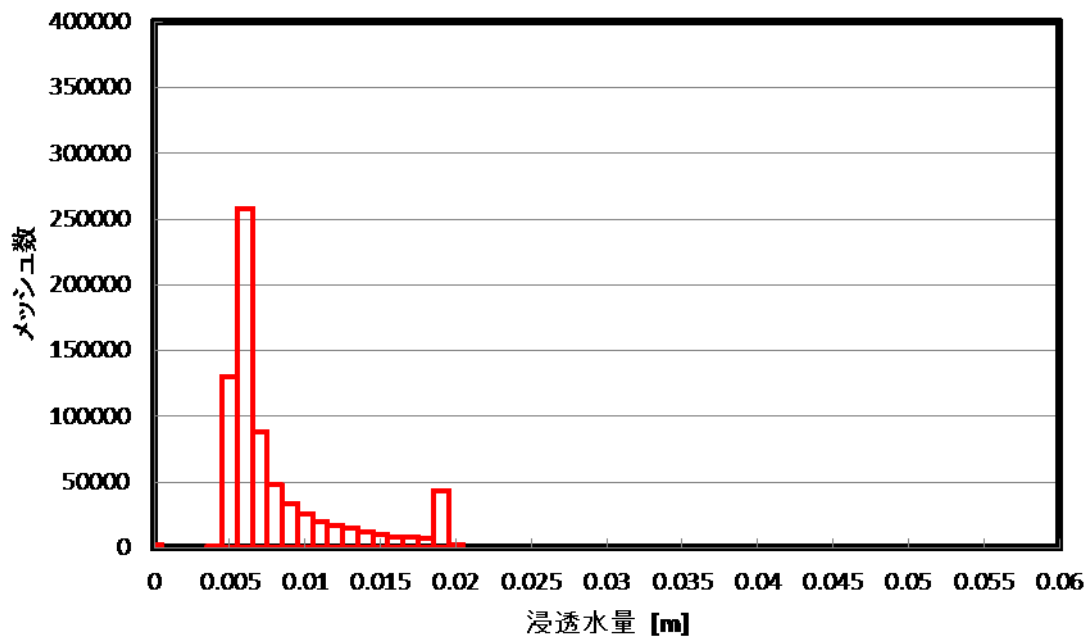


Figure 9-13 裸地の浸透水量分布図($PR=40.0$)

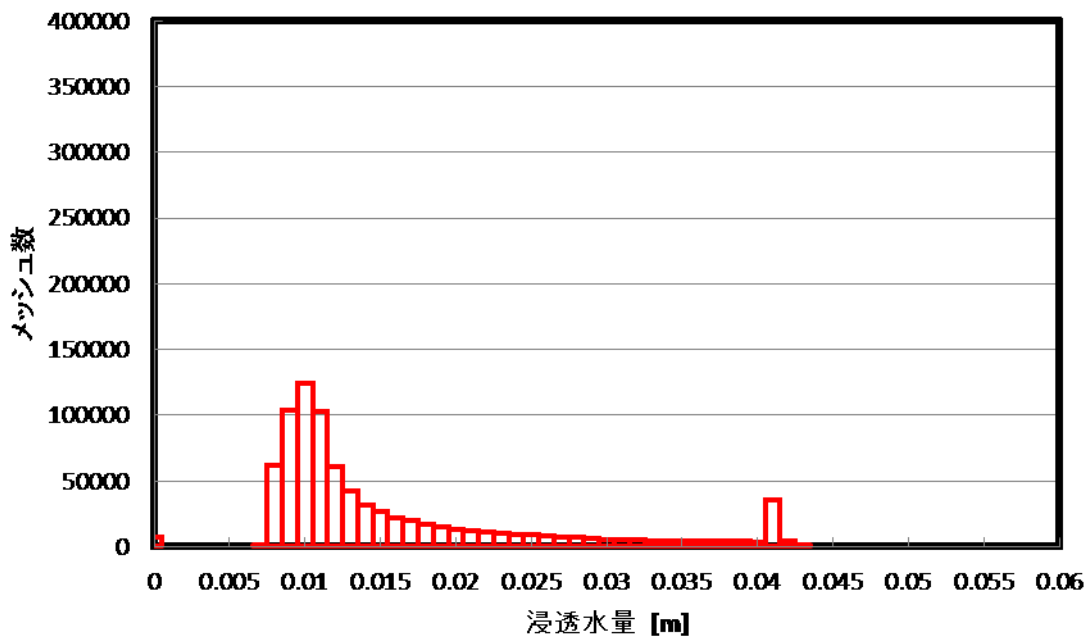


Figure 9-14 草地の浸透水量分布図($PR=40.0$)

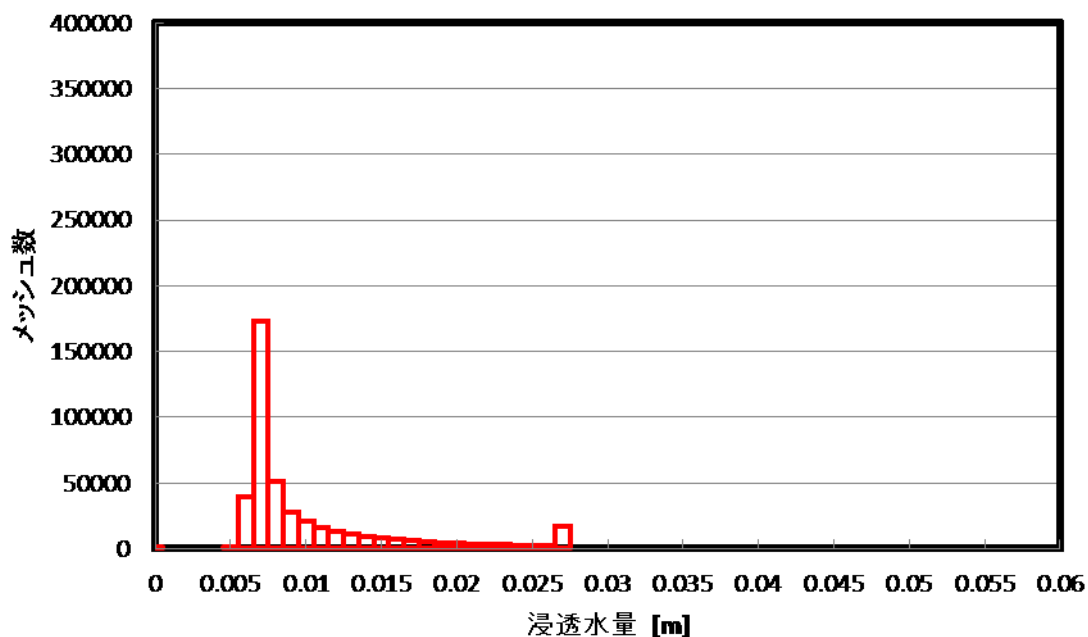


Figure 9-15 森林(アカシア林)の浸透水量分布図(PR=40.0)

9.7 結言

広域への展開ではメッシュサイズを 10 m から 30 m に拡大しても問題がないことが確認できた。また、浸透水量の変化から、広域のモデル計算も実際の水移動状況を十分再現できていると考えられた。次章では実際に裸地に植林を行なった結果、裸地土壌の浸透速度が森林相当の浸透速度に変化したと仮定してモデル計算を行ない、植林対象地の選定について検討する。

第十章 植林地の選択と影響評価

10.1 緒言

本章では、現在裸地である部分に植林を行なうことを想定し、その場所の浸透速度が裸地相当から森林相当へと変化するものと考え、このことが現状の自然植生、特に森林生態系での流入水量、ひいては浸透水量に与える影響を評価した。

10.2 裸地全域の浸透速度変更

裸地全域に植林を行ない成長し、森林が形成され、浸透速度が裸地相当から、森林相当へ変化したと仮定し、現状の水移動と比較することで自然植生場所の浸透水量にどのような影響を与えるのか評価した。Table 10-1 の浸透速度式を裸地にも森林のものも適用し、モデル計算を行なった。

Table 10-1 使用した浸透速度式

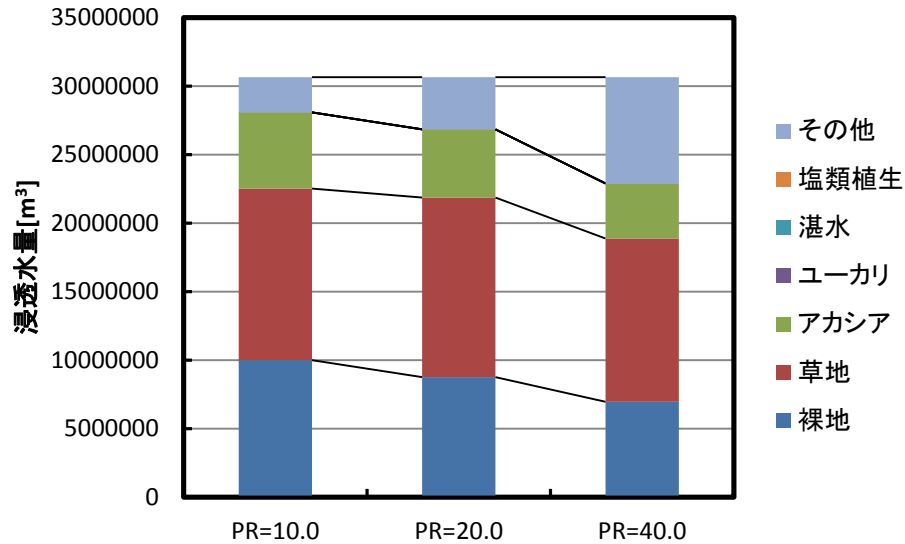
Horton	
	$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$
裸地	$f_t = 1.03 + (0.970)e^{-0.0711t}$
草地	$f_t = 1.88 + (2.480)e^{-0.0579t}$
森林	$f_t = 1.73 + (0.851)e^{-0.0459t}$

10.3 計算結果

10.3.1 総浸透水量（裸地全域を森林相当の浸透速度式に変更）

PR=10.0、20.0、40.0 でのモデル計算結果から各植生分類の総浸透量について Figure 10-1 に、またモデル中の全水量に対する植生分類ごとの総浸透水量の割合を Table 10-2 に示した。植生分類ごとの総浸透水量から、PR が大きくなると裸地、草地、森林のどの植生でも浸透水量は減少し、表層水もしくは境外流出水が増加することが分かった。Figure 9-6 と Figure 10-1、Table 10-2 と Table 9-4 を比較すると、裸地全域を森林にすることで浸透速度が速くな

り植林前と比較して浸透水量は増加するが、増加分が草地や森林の特定の場所に流入していた水であるかどうかは分からなかった。次に、植生分類ごとの浸透水量分布について検



討した。

Figure 10-1 植生分類ごとの総浸透水量

Table 10-2 全水量に対する浸透水量の割合[%]

	PR=10.0	PR=20.0	PR=40.0
裸地	32.6	28.6	22.8
草地	40.8	42.8	38.9
アカシア	18.1	16.2	13.1
ユーカリ	0.0	0.0	0.0
湛水	-	-	-
塩類植生	-	-	-
その他	8.4	12.4	25.3

10.3.2 植生分類ごとの浸透水量分布

植生分類ごとに浸透水量の分布について検討した。Figure 10-1、10-2、10-3にPR=10.0の時の裸地(植林後)、草地、森林(アカシア林)の浸透水量の分布を、Figure 10-4、10-5、10-6にPR=20.0の時の裸地(植林後)、草地、森林(アカシア林)の浸透水量の分布を、Figure 10-7、10-8、10-9にPR=40.0の時の裸地(植林後)、草地、森林(アカシア林)の浸透水量の分布を示した。裸地を森林相当の浸透速度に変化したと仮定してモデル計算を行なった結果、裸地の浸透水量はどの条件でも増加していた。一方、草地の浸透量は植林前のFigure 9-8と植林後のFigure 10-2の比較、植林前のFigure 9-14と植林後のFigure 10-8の比較、植林前のFigure 9-11と植林後のFigure 10-5の比較で、植林後浸透水量の多かった場所の浸透水量は減少していて、やや左側にシフトしている。森林(アカシア林)でも同様にFigure 9-9と植林

後の **Figure 10-3** の比較、植林前の **Figure 9-15** と植林後の **Figure 10-9** の比較、植林前の **Figure 9-12** と植林後の **Figure 10-6** の比較で、浸透水量は減少していて、こちら左側にシフトしている。以上のことから、裸地全域に植林した場合、裸地の浸透速度が速くなり、浸透水量は増加するが、植林前からの自然植生場所の浸透水量の減少は軽微であることが予想される。

次に裸地の植生部分の浸透水量が植林後どのように変化したかを **Figure 10-10** に示した。

この図では浸透水量が 0.005 m 変化するごとに 1 段階変化したとして、色分けを行なっている。増加した場合には 1 段階で青、2 段階以上で黄、減少した場合は全て赤、変化が無い場合は茶に色分けした。色分けした結果、裸地から植林を行ない森林相当の浸透速度に変化した場所では大部分で浸透水量が増加し、一部で浸透水量の減少が見られた。拡大した場所の色分けを見ると裸地(植林後)で周辺部で浸透水量が増加した場所では、中心部まで水が流れ込まず、浸透水量に変化がない状態になっていることが推定できた。また上流部分で浸透水量が増加していると下流まで十分に水が流れ込まず、浸透水量が減少しているのではないかということも推定できた。

続いて、草地、および森林の自然植生地の浸透水量の変化について **Figure 10-11** に示した。

この図でも浸透水量が 0.005 m 変化するごとに 1 段階変化したとして、色分けを行なっている。減少した場合には 1 段階で赤、2 段階以上で、減少した場合は全て紫、変化が無い場合は緑に色分けした。増加した所は無かった。色分けした結果、草地および森林では大部分で浸透水量に変化は無く、一部で浸透水量の減少が見られた。拡大した場所の色分けを見ると草地および森林で浸透水量が減少した場所は、裸地で浸透水量が増加したことにより水が流れ込まない状態になった所であると推定できた。

10.4 植林地選定

以上の結果から今回モデル計算を行なった場所では、植林後の自然植生に対する影響は少ないのではないかと考えられる。しかし、浸透補正係数には若干のずれがあることも予想されるので、もっとも浸透しにくい場合を想定した $PR=40.0$ での計算結果から浸透水量の多かった場所を優先的に植林対象地としていくことで、植林が成功する可能性が高まるものと考えられる。浸透速度が森林相当に変化したと想定した計算結果で浸透水量に変化のなかった場所は、植林の成功する可能性が低い場所であると考えられるため、植林対象地からは除外すべきであると考えられる。

しかしながら、本研究で開発したモデルでは、実際の植林で利用するウォーターハーベ

スティングなどによる表面流出水の貯留については考慮していない。また植林を行なった場合、ハードパン深さが変化することも考慮しなければならない。さらには実際に植林を行なう場合、こういった技術導入により植林サイトより下流に対して表面流出水の供給量が減少する事を考慮する必要がある。これらの検討事項が今後の課題として残されている。

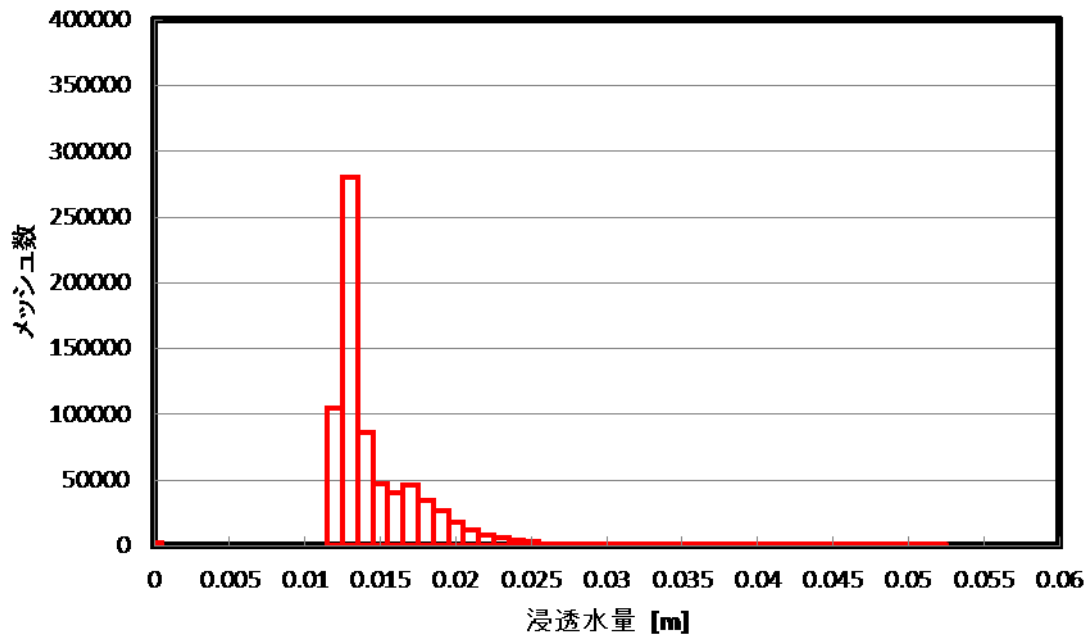


Figure 10-1 裸地(植林後)の浸透水量分布図(PR=10.0)

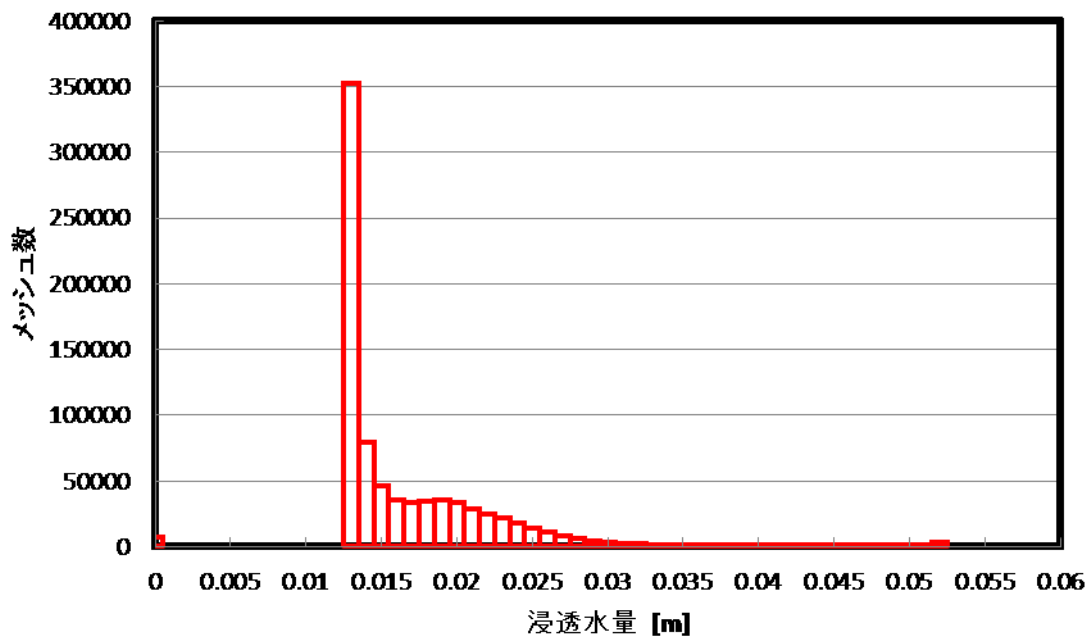


Figure 10-2 草地の浸透水量分布図($PR=10.0$)

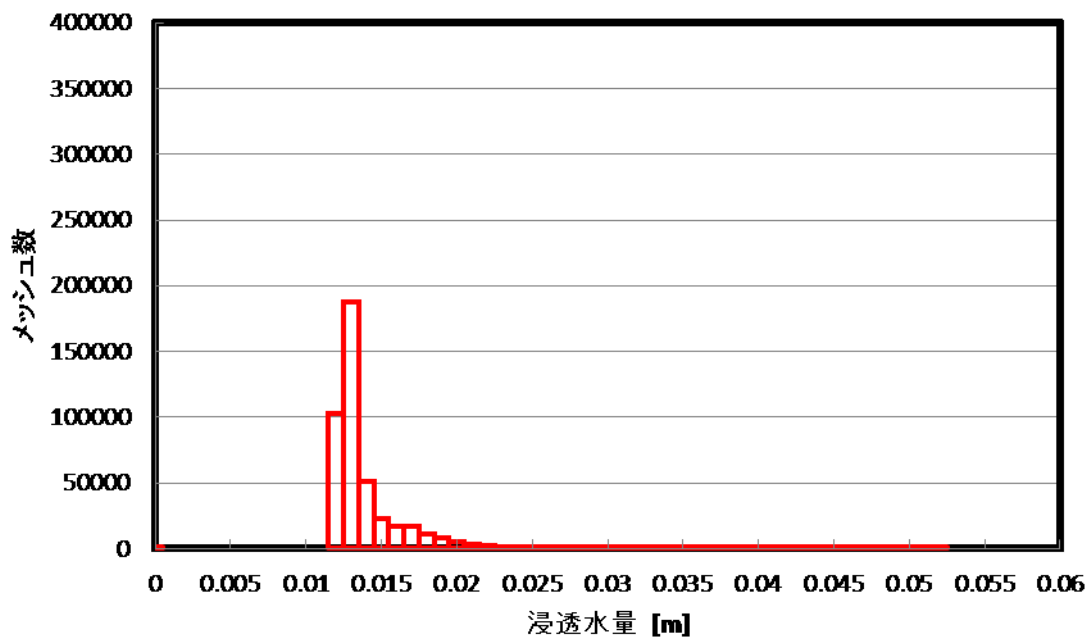


Figure 10-3 森林(アカシア林)の浸透水量分布図($PR=10.0$)

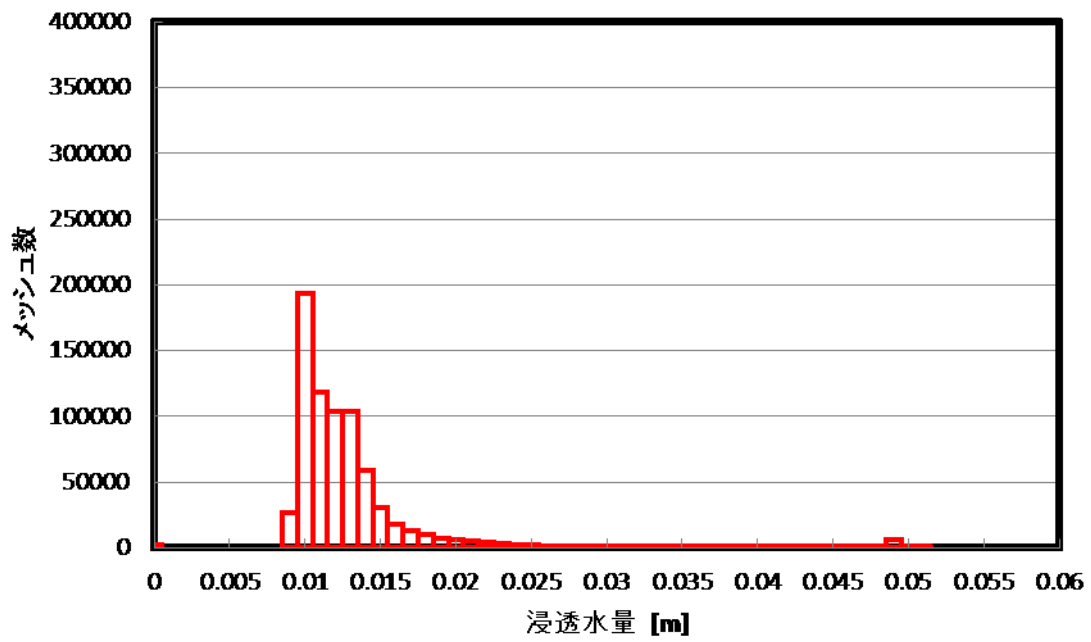


Figure 10-4 裸地の浸透水量分布図($PR=20.0$)

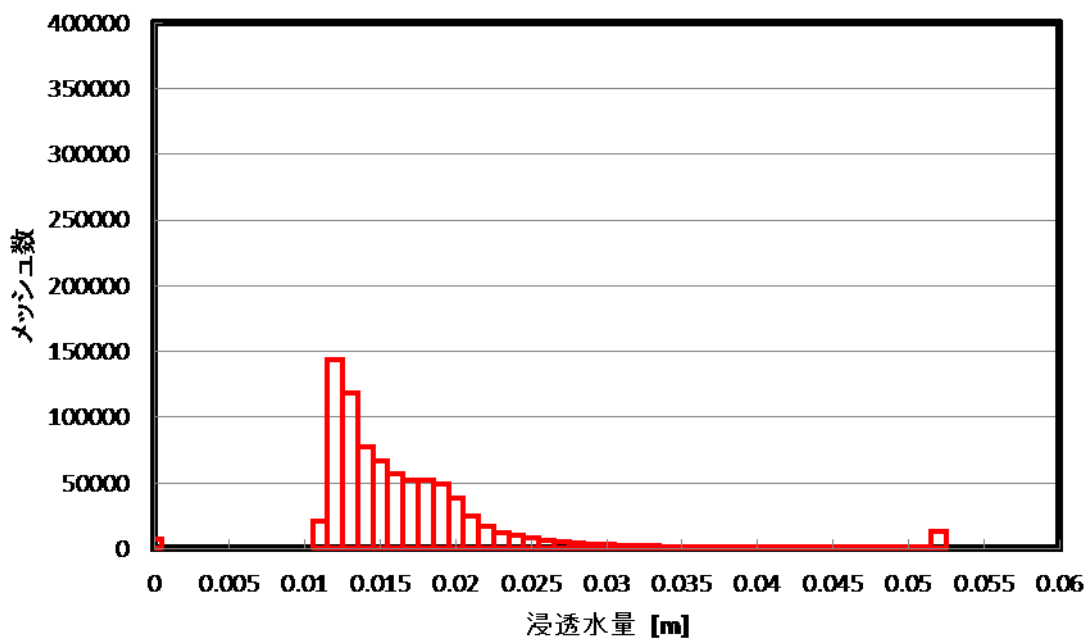


Figure 10-5 草地の浸透水量分布図($PR=20.0$)

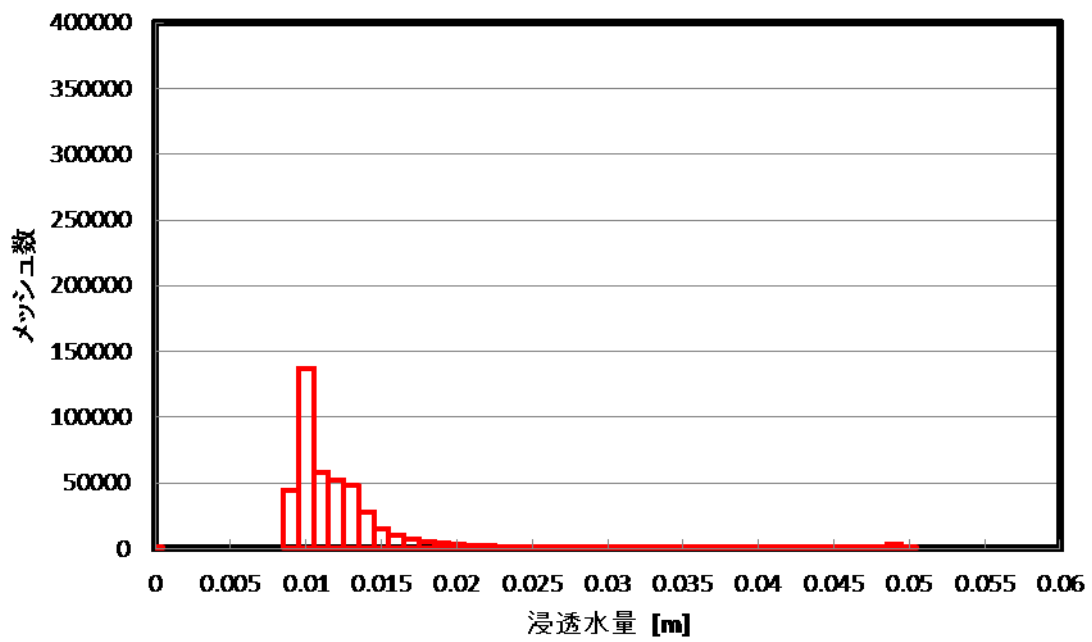


Figure 10-6 森林(アカシア林)の浸透水量分布図($PR=20.0$)

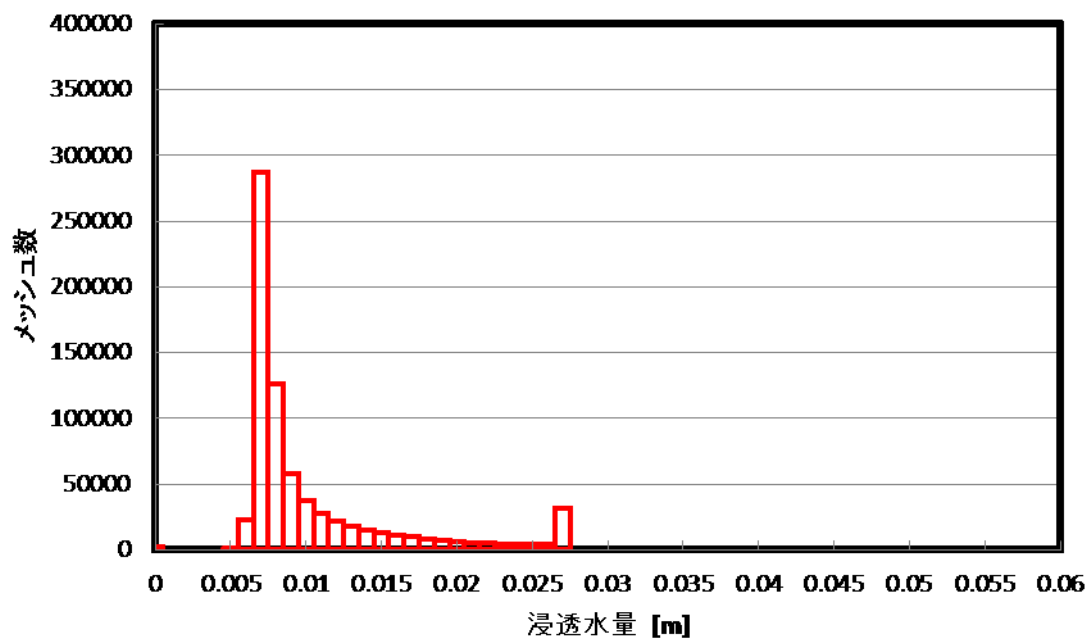


Figure 10-7 裸地の浸透水量分布図($PR=40.0$)

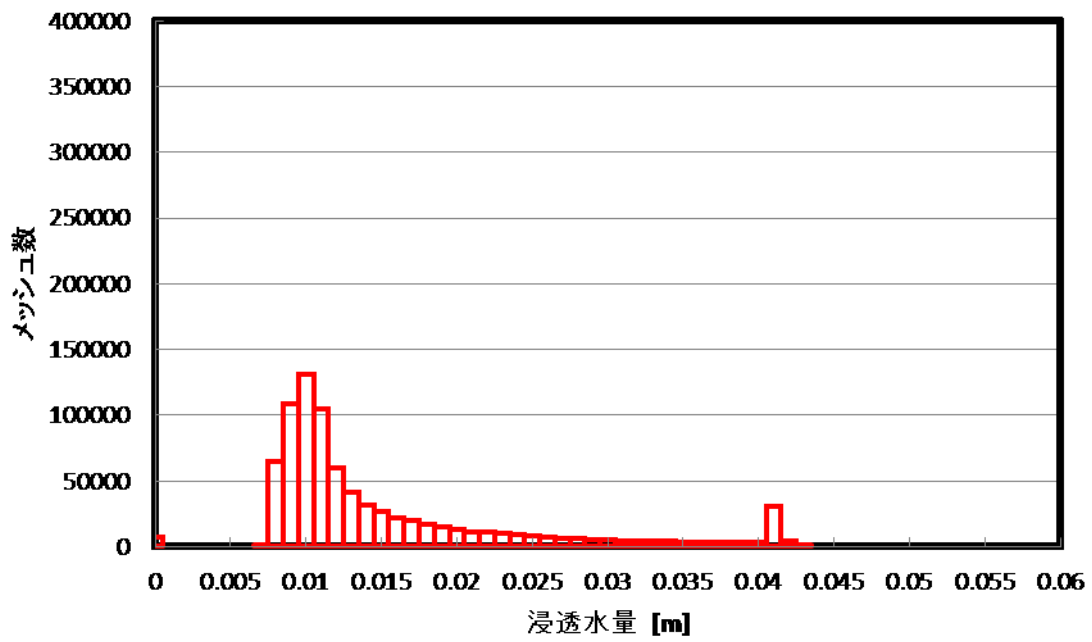


Figure 10-8 草地の浸透水量分布図($PR=40.0$)

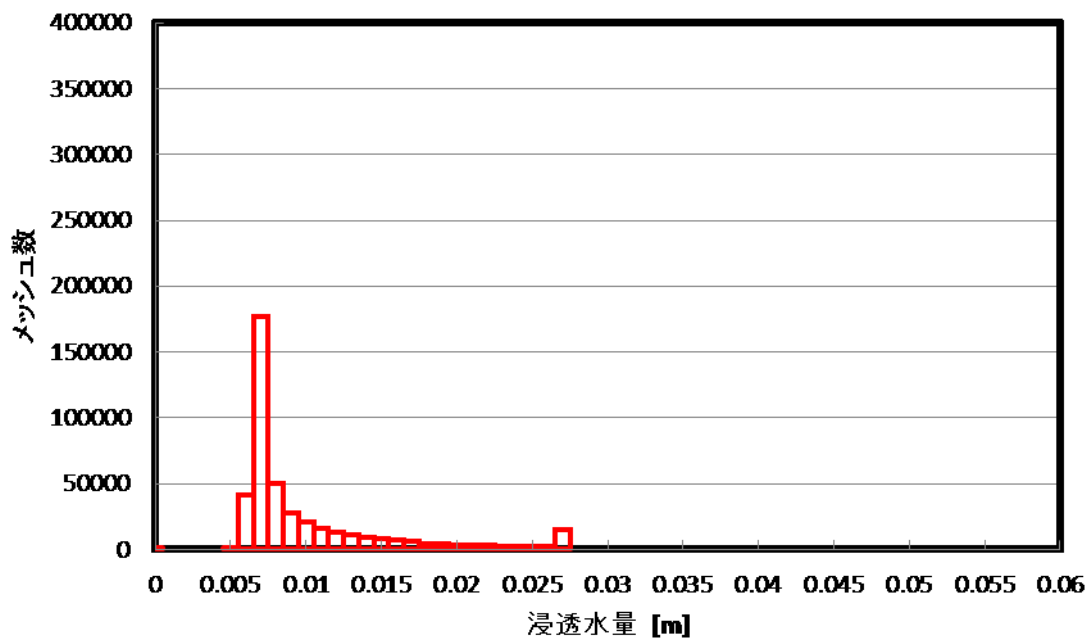


Figure 10-9 森林(アカシア林)の浸透水量分布図($PR=40.0$)

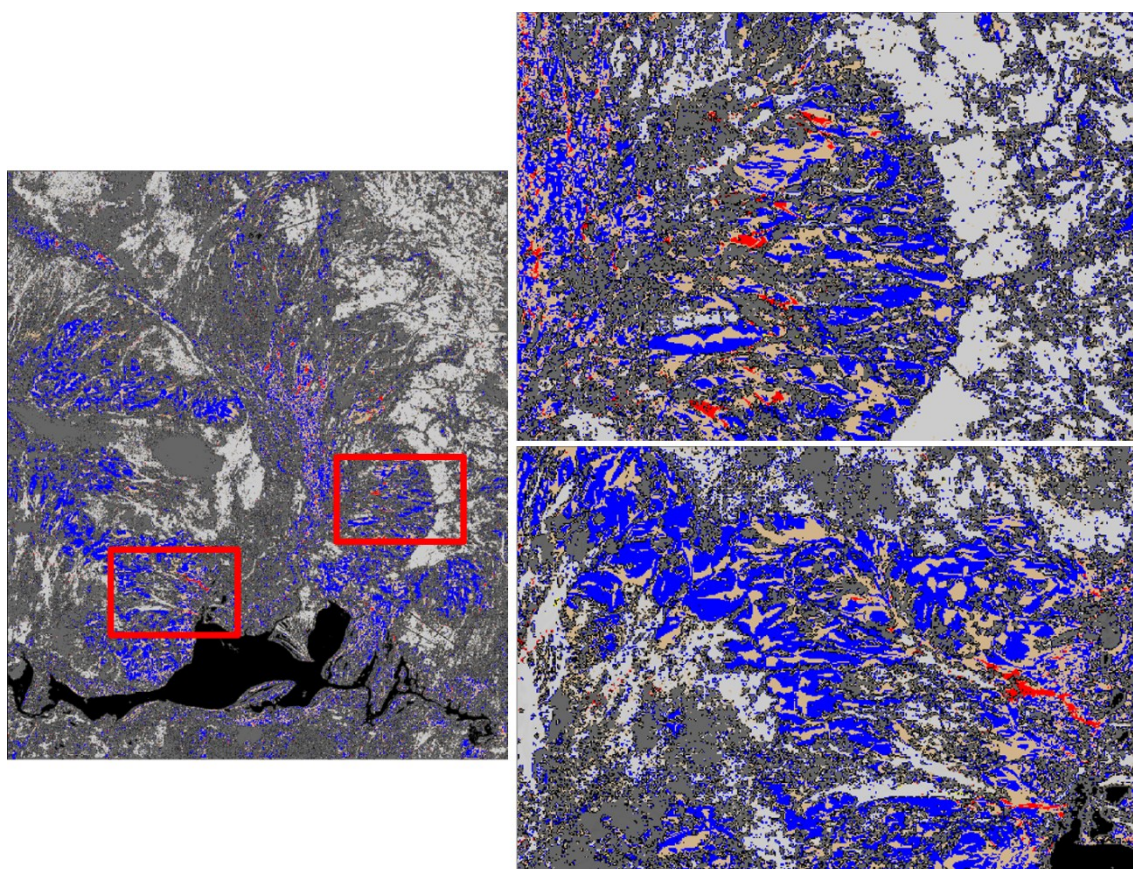


Figure 10-10 裸地（植林後）の浸透水量変化

右上は左の図中の右の赤い四角で囲んだ部分の拡大図、右下は左の赤い四角で囲んだ部分の拡大図
 青は浸透水量が1段階増加、黄は2段階以上増加、減少した所は全て赤、茶は浸透水量に変化の無かった
 場所、その他のグレースケールの部分は森林や草地などの植生部分

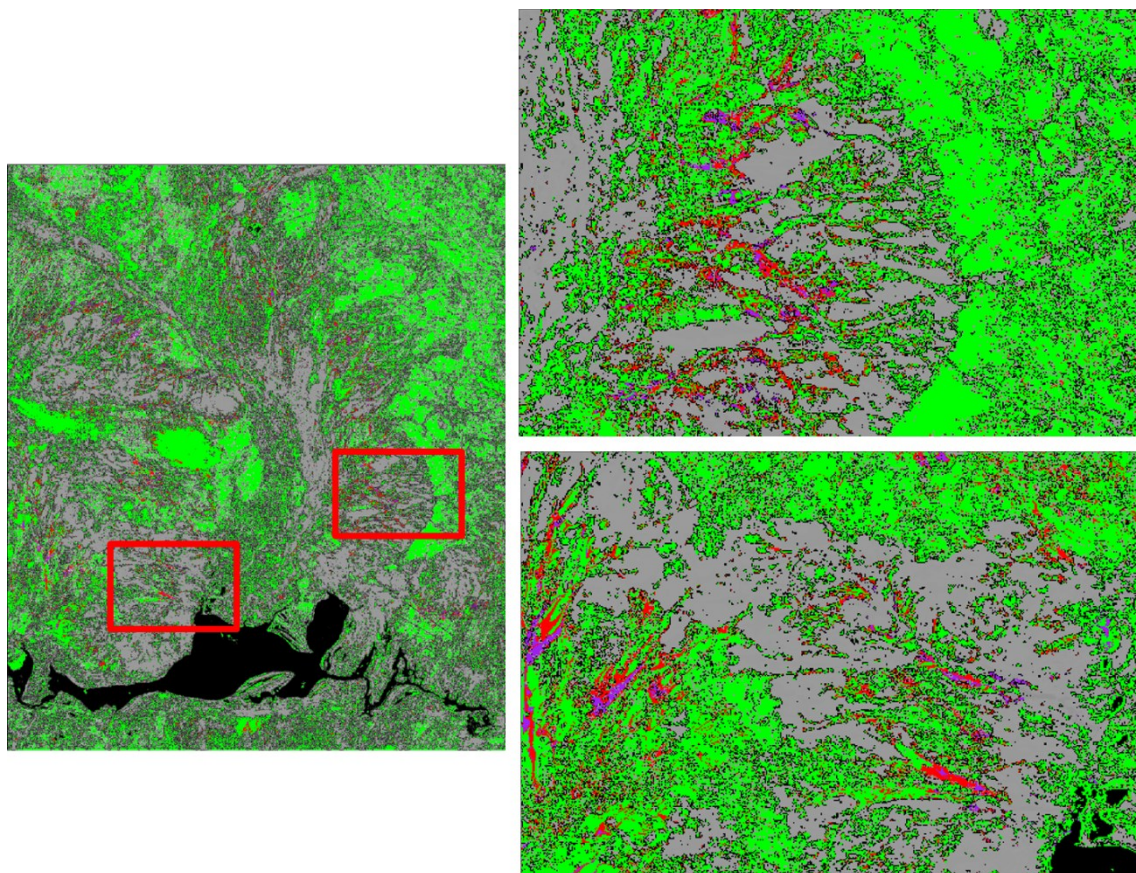


Figure 10-11 草地および森林（植林後）の浸透水量変化

右上は左の図中の右の赤い四角で囲んだ部分の拡大図、右下は左の赤い四角で囲んだ部分の拡大図
赤は浸透水量が1段階減少、紫は2段階以上減少、増加した所は全て青、緑は浸透水量に変化の無かった
場所、その他のグレースケールの部分は裸地や湛水および水分の多い土地

10.5 結言

裸地の浸透速度式を植林木が成長し森林相当に変化したと仮定したものを植林後とし、植林前後の浸透水量の変化を比較した結果、裸地ではほとんどの場所で浸透水量が増加した。一方、自然植生であった草地および森林では浸透水量の減少が見られたものの、一部の場所に限られ、その他の多くの場所では浸透水量の減少はほとんどなかった。この結果から、裸地で浸透水量の増加が見られた所を優先的に植林していくことで植林木は成長し、自然植生も維持できるのではないかと考えられた。

しかしながら本研究で開発したモデルでは、実際の植林で利用するウォーターハーベスティングなどによる表面流出水の貯留については考慮していない。実際に植林を行なう場合は、こういった技術導入により植林サイトより下流に対して表面流出水の供給量が減少することを考慮する必要がある。またハードパン破碎による浸透速度への影響についても、

今後の検討課題として残されている。

第五部 結論

第十一章 結言：乾燥地植林による炭素固定における本研究成果の活用

本論文では、乾燥地大規模植林のための水制御技術に関する研究として、個々の植林サイト内のマイクロな水制御、集水池を中心としたメソスケールでの水移動解析モデルの構築、最終的な目標である広域での植林地の選択と影響評価を行なった。

序論では、本論文の目的と意義を明確にした。地球温暖化問題の主要原因物質である CO₂ の多様な削減技術の内での乾燥地での植林の重要性について述べた。特に水制御技術開発の重要性に基づき、本研究の必要性、新規性について述べた。

第二部では個々の植林対象地域内のマイクロなスケールでの水制御技術開発に関する研究内容をまとめた。第二章では植物の成長に対する土壌の保水性の重要性を述べた上で、保水材利用による水の有効利用、土壌の保水性を向上させるための新規な保水材の開発についてまとめた。この章では生分解性保水材の合成についてと酵素を用いた生分解性の確認について述べた。

第三部では乾燥地での大規模植林地選定に利用可能な表面流出モデルの構築について検討した結果をまとめた。第三章では、土壌の透水性、透水性試験であるシリンダーインタークレート法による現地での測定結果についてまとめた。測定結果から、Horton 式、Kostiakov 式、Philip 式の 3 種類の浸透速度式へと定式化をおこなった。第四章では研究対象地として選択した集水池である Jim's pool について、その概要についてまとめた。また、降雨量の測定、集水池内水位測定の方法とその実測データについて報告した。モデルに利用するための現地の実測値の取得が困難で、試行錯誤の末、降雨データ、集水池水位データを利用することとなった。第五章では、現地での実測データに基づく表面流出モデルの構成、特に降雨、浸透、蒸発、表面流出のそれぞれのモデル化手法について述べた。浸透速度式について浸透試験結果と現実の降雨時の浸透速度との相違を補正する浸透補正係数 PR を、表面流出についてはメッシュ内均一の条件で計算を行なうことによる実際の水の流れとの相違を補正する等価粗度係数 N をフィッティングパラメータとして導入した。第六章では Jim's pool 内での水位データの実測値とモデル計算結果の水位データを比較することで、モデルの評価とフィッティングパラメータの選定を行なった。第六章では、降雨パターンの影響についての検討を行った。結果として降雨パターンを変更しての検討は現時点では不可能であるという結論に至ったが、浸透補正係数 PR の値を振ることによる感度分析で対処することにした。第七章では浸透速度式の影響について議論した。3 種類の浸透速度

式でのモデル計算結果から、どの浸透速度式を用いても、最適なフィッティングパラメータの組み合わせが大きく異なることは無いと判断でき、定式化が容易であった Horton 式の利用を決定した。これらの結果をふまえて、第八章では植生の影響および植生分布を考慮した、広域に展開可能なパラメータを決定した。モデル開発の初期段階では全域を裸地と想定していたが、実際の植生に合わせ、草地や森林である場所については浸透速度式を変更し、現実の土壌浸透に近い形へとモデルを改良した。植生分類に合わせた形でモデル計算を行ない広域に適用可能な最適なフィッティングパラメータの組み合わせを決定した。

第四部では第三部で構築した表面流出モデルを広域に適用した。第九章では広域展開を行なうためのメッシュサイズの拡大についての検討を行なった。メッシュサイズ拡大により水位と集水量の関係に変化があったため、集水池水位の実測値を標高データから計算した集水量へと変換することで対処した。その結果、メッシュサイズが拡大しても最適なフィッティングパラメータの組み合わせは変化しないことを確認できた。広域でのモデル計算では、現地での植生分布とモデルによる土壌浸透水量との比較からモデルの妥当性の議論を行なった。自然植生のある場所の浸透量を確認することで植林木が成長するのに必要な浸透水量を推定した。第十章では現在裸地である部分に植林を行なうことを想定し、その場所の浸透速度が裸地相当から森林相当へと変化するものと考え、裸地の浸透速度式を森林相当のものに変更しモデル計算を再度行なった。この結果から、現状の自然植生特に森林生態系での流入水量、ひいては浸透水量に与える影響について検討した。植生ごとの浸透水量の変化を見ることで、裸地条件の場所から植林対象地を選定する方法についての提案を行なった。

以上の成果のうち、本研究でもっとも大きな成果は、既存のモデルでは扱っていなかった乾燥地広域での表面流出モデルの展開が可能になったことである。

補遺 植林前後を想定した植生分類ごとの浸透水量

広域での計算は、浸透速度式を植生分類に合わせて行なった。裸地、草地、森林の浸透速度式はそれぞれ 3, 2, 3 種類、それぞれを組み合わせると全部で 18 通りの組み合わせがあり、それぞれ浸透補正係数 PR を 10, 20, 40, 最適値(jim's pool での計算で実測値の水位変化ともっとも近い計算結果を得られた PR)で計算を行なった。また、元の植生分類で計算したものを植林前、裸地であった所に植林を行ない植林木が十分に成長し、森林相当の浸透速度に変化したと仮定して裸地を森林相当の浸透速度式に変化させて再度計算を行なったものを植林後とした。植林前と植林後では裸地が森林相当の浸透速度式に変化した以外の条件の変更は無い。18 通りの浸透速度式の組み合わせと浸透補正係数 PR を 4 通り変化した計算から得られた植生分類ごとの浸透水量を植林前後で比較した。

この後のグラフは上部が植林前、下部が植林後のものとなっている。グラフの縦軸はメッシュ数、横軸は浸透水量で 0.001 m ごとに何メッシュ存在するかを表している。上下のグラフを比較することで植林前後の浸透水量がどのように変化したかを確認できる。各グラフの数字 (例 1-1-1) は Table 8-9 の裸地、草地、森林の浸透速度式の組み合わせが何かを表している。

Table 8-3 測定結果(Jim's pool 周辺 裸地)から作成した浸透速度式

Horton	
$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$	
1	$f_t = 0.74 + (0.375)e^{-0.0409t}$
2	$f_t = 1.03 + (0.970)e^{-0.0711t}$
3	$f_t = 0.97 + (0.109)e^{-0.0214t}$

Table 8-4 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 草地)から作成した浸透速度式

Horton	
$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$	
1	$f_t = 3.74 + (1.161)e^{-0.0506t}$
2	$f_t = 1.88 + (2.480)e^{-0.0579t}$

Table 8-5 測定結果 (STM 内植林サイト周辺 森林)から作成した浸透速度式

$$\text{Horton}$$

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt}$$

$$1 \quad f_t = 1.92 + (3.587)e^{-0.0551t}$$

$$2 \quad f_t = 1.73 + (0.851)e^{-0.0459t}$$

$$3 \quad f_t = 4.04 + (0.231)e^{-0.0229t}$$

f_t : Permeation rate at time t [mm/min], f_0 : Initial permeation rate [mm/min], f_c : Saturated permeation coefficient [mm/min], K : Coefficients [min^{-1}], t : Time [min]

Table 8-9 最適なフィッティングパラメータの組み合わせ(植生分類後)

裸地	草地	森林	N	PR	RMSE
1	1	1	0.015	17.3	4.15
		2	0.015	16.0	4.40
		3	0.015	17.1	4.18
	2	1	0.015	17.8	3.98
		2	0.015	16.5	4.26
		3	0.015	17.6	4.06
2	1	1	0.015	22.7	4.32
		2	0.015	20.5	4.63
		3	0.015	22.3	4.37
	2	1	0.015	23.7	4.26
		2	0.015	21.4	4.66
		3	0.015	23.2	4.39
3	1	1	0.015	17.3	4.38
		2	0.015	16.0	4.64
		3	0.015	17.1	4.40
	2	1	0.015	17.8	4.11
		2	0.015	16.5	4.38
		3	0.015	17.6	4.18

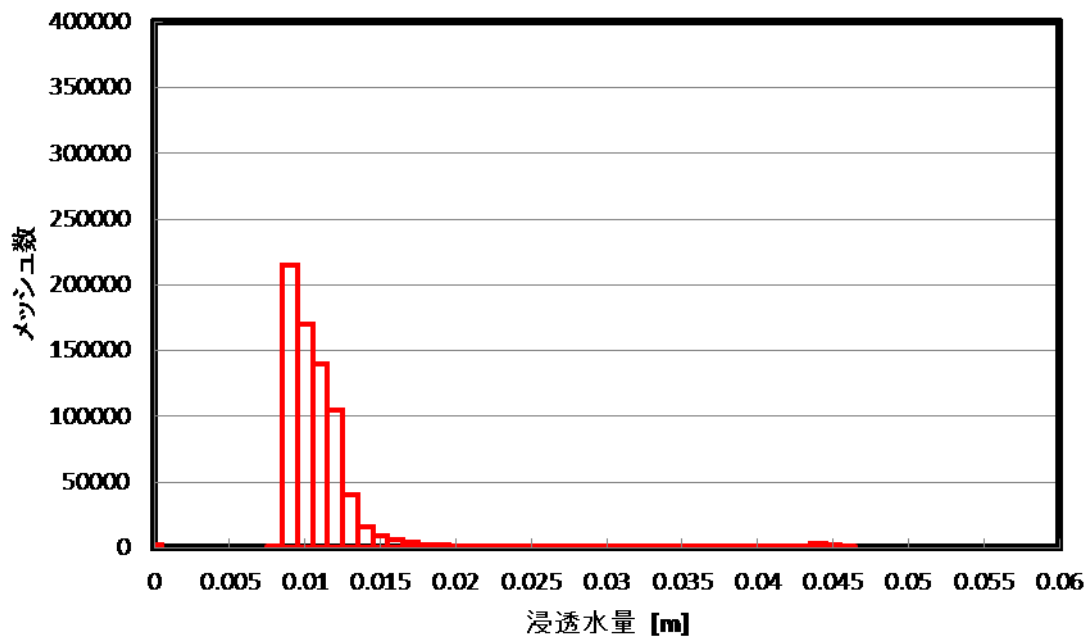


Figure A-1 植林前 裸地 浸透水量 1-1-1 $PR=10.0$

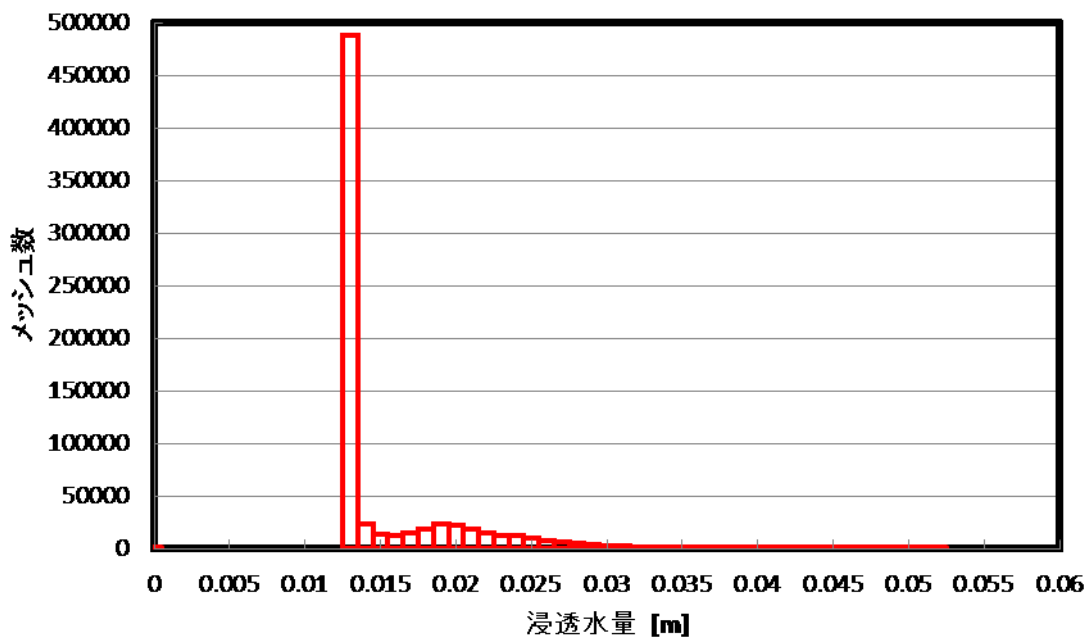


Figure A-2 植林後 裸地 浸透水量 1-1-1 $PR=10.0$

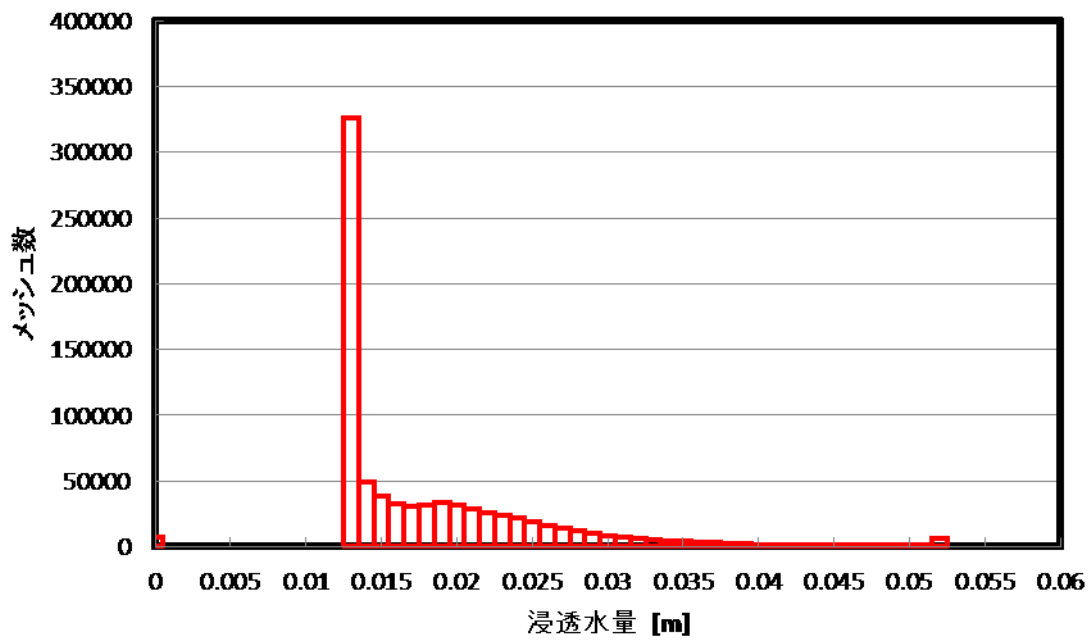


Figure A-3 植林前 草地 浸透水量 1-1-1 PR=10.0

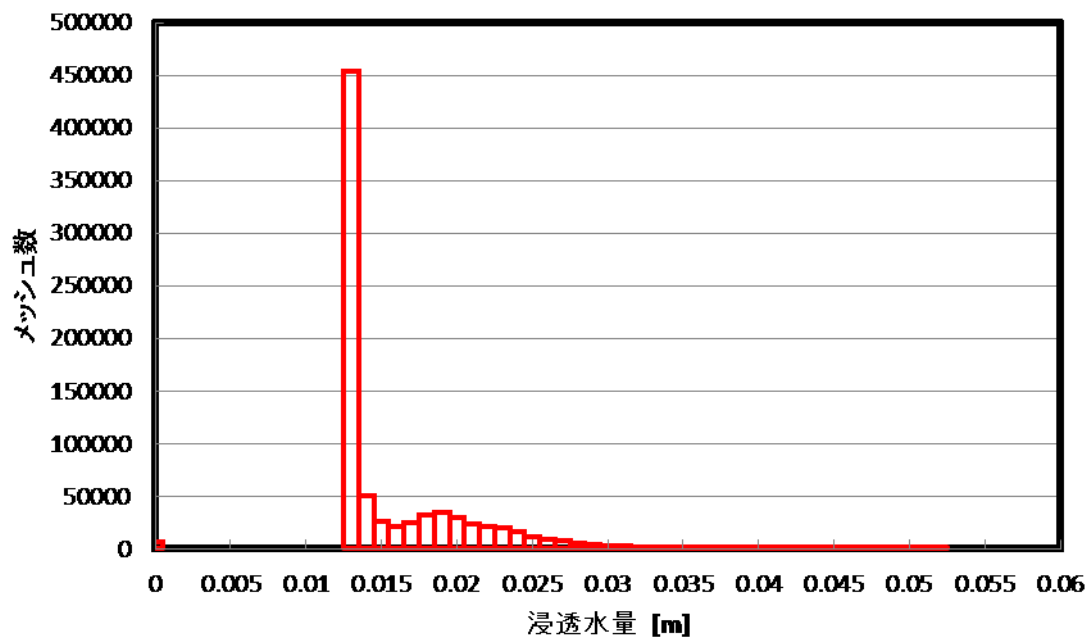


Figure A-4 植林後 草地 浸透水量 1-1-1 PR=10.0

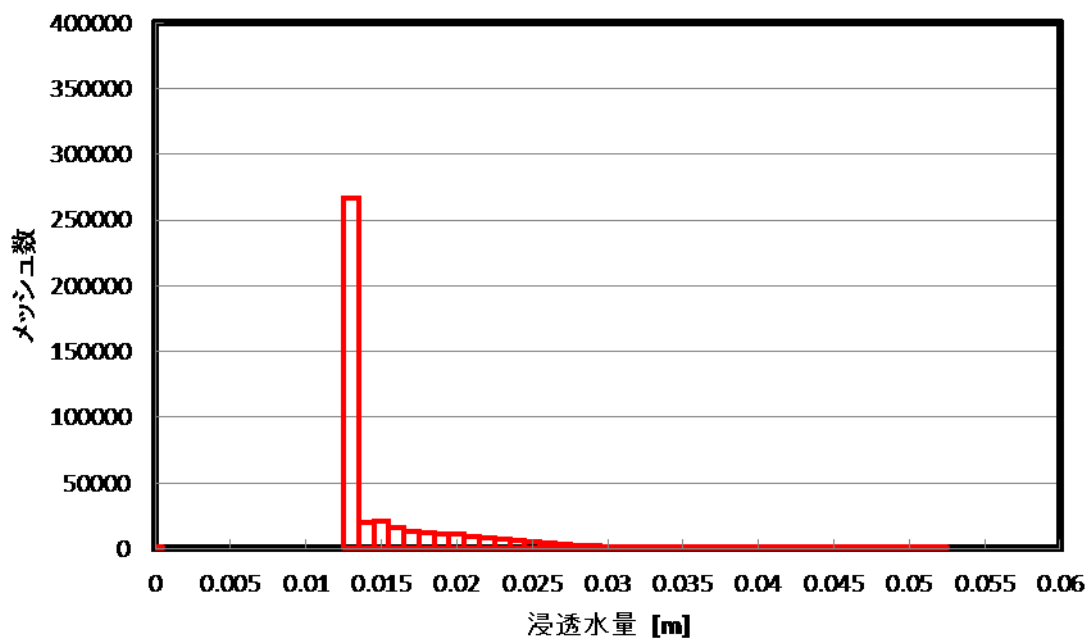


Figure A-5 植林前 森林 浸透水量 1-1-1 PR=10.0

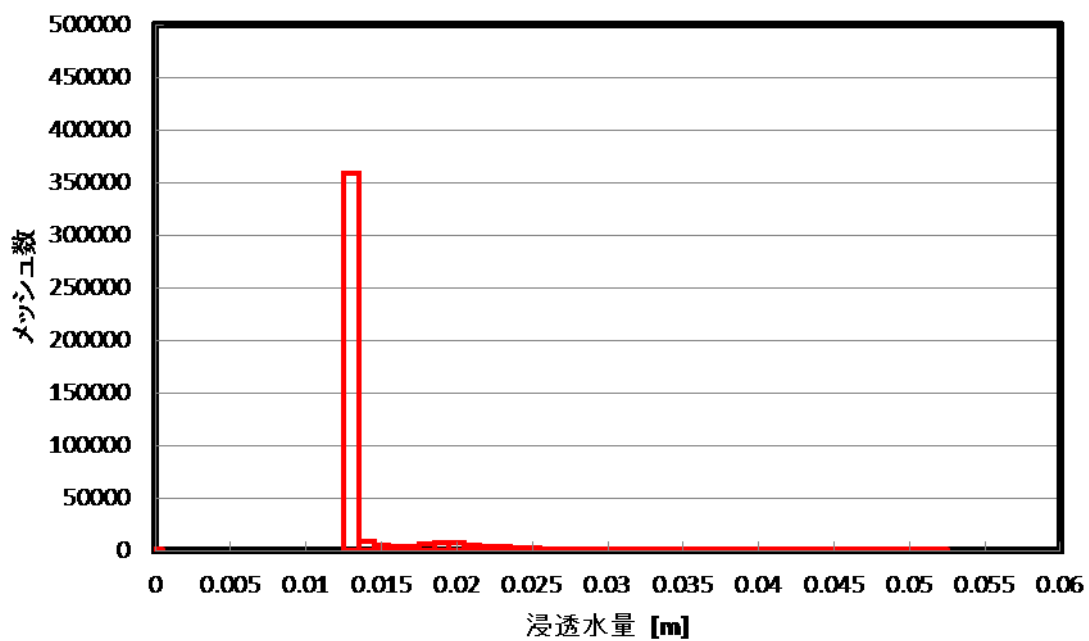


Figure A-6 植林前 森林 浸透水量 1-1-1 PR=10.0

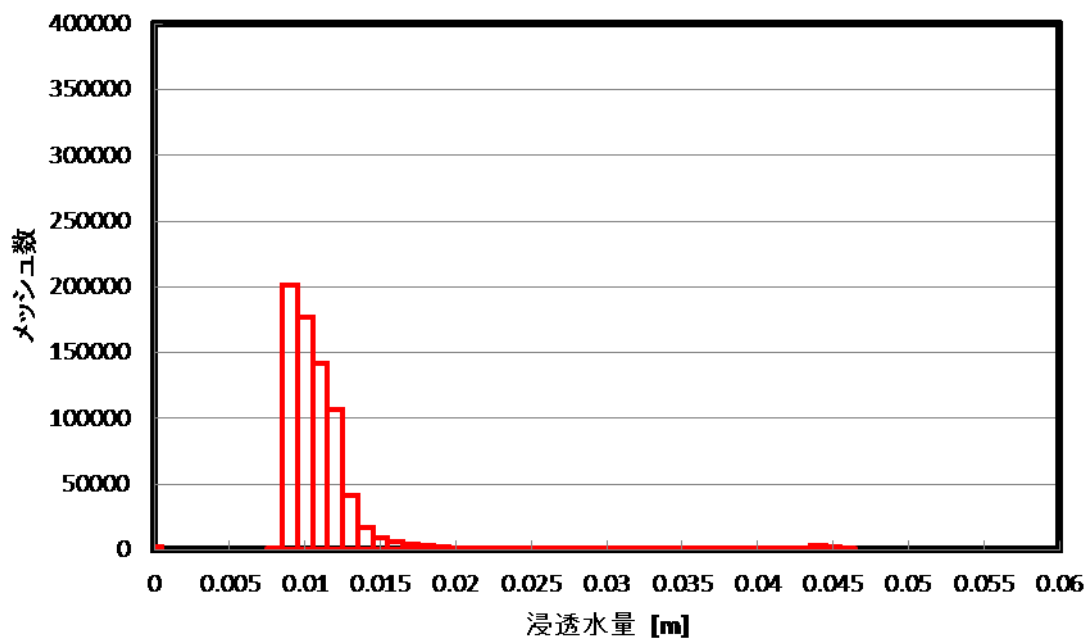


Figure A-7 植林前 裸地 浸透水量 1-1-2 PR=10.0

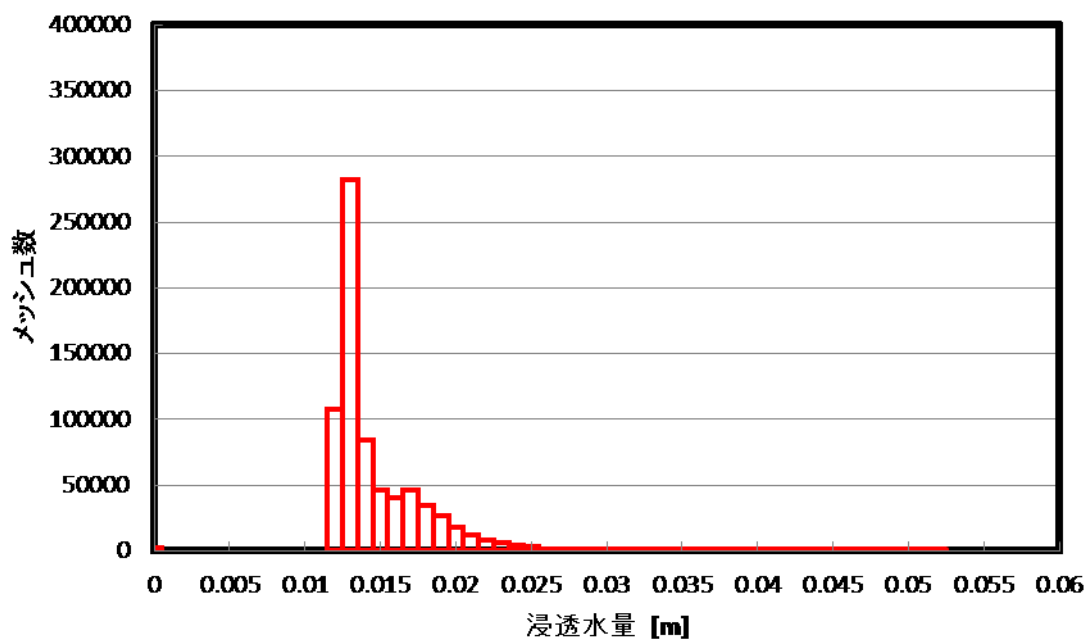


Figure A-8 植林後 裸地 浸透水量 1-1-2 PR=10.0

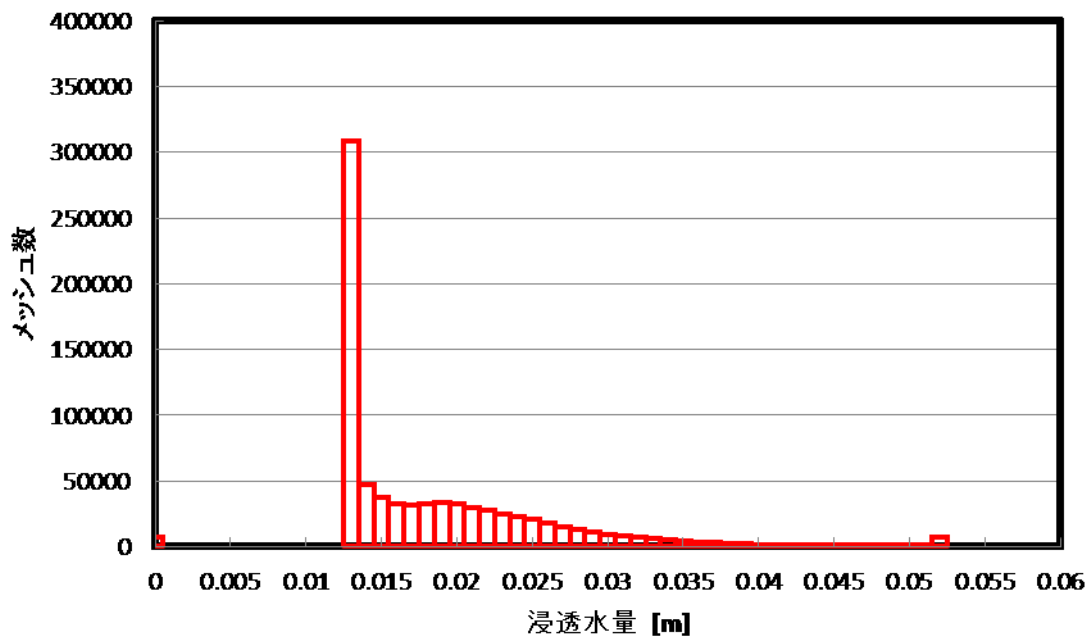


Figure A-9 植林前 草地 浸透水量 1-1-2 PR=10.0

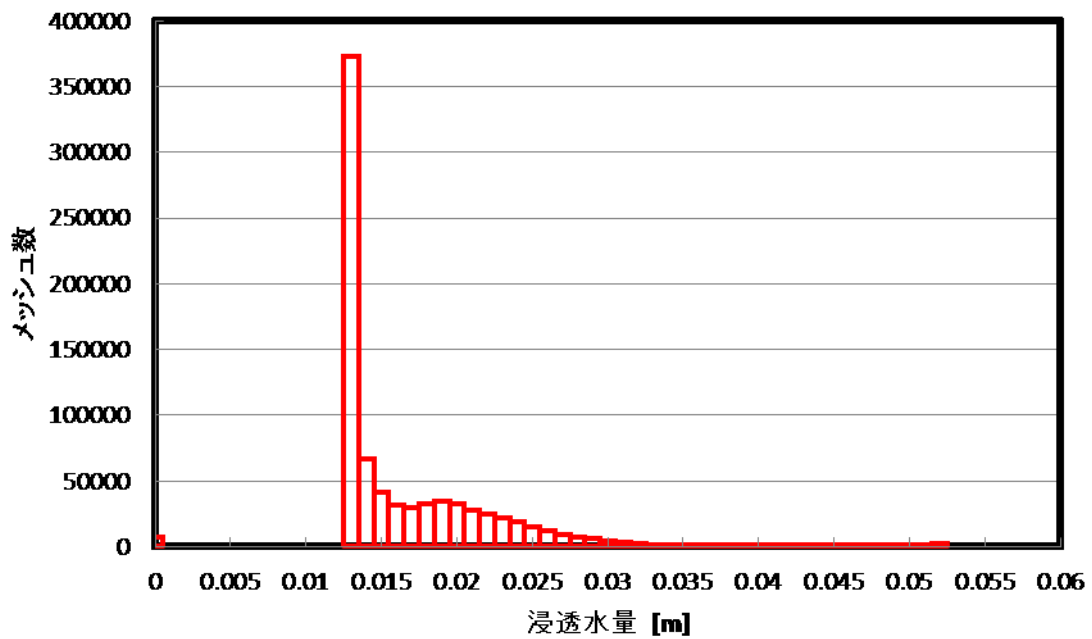


Figure A-10 植林後 草地 浸透水量 1-1-2 PR=10.0

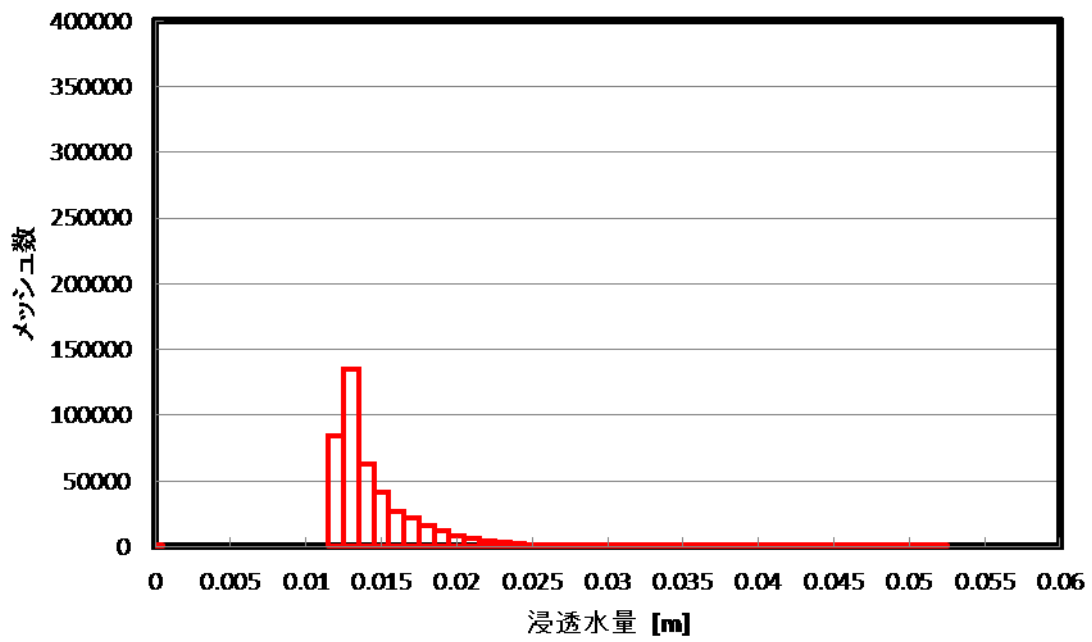


Figure A-11 植林前 森林 浸透水量 1-1-2 PR=10.0

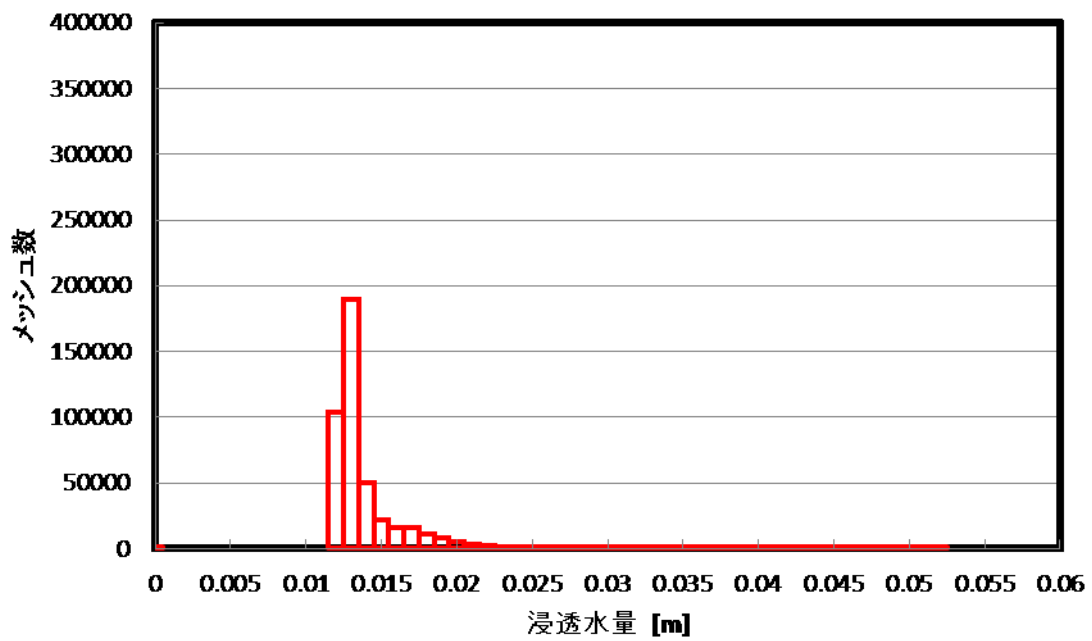


Figure A-12 植林後 森林 浸透水量 1-1-2 PR=10.0

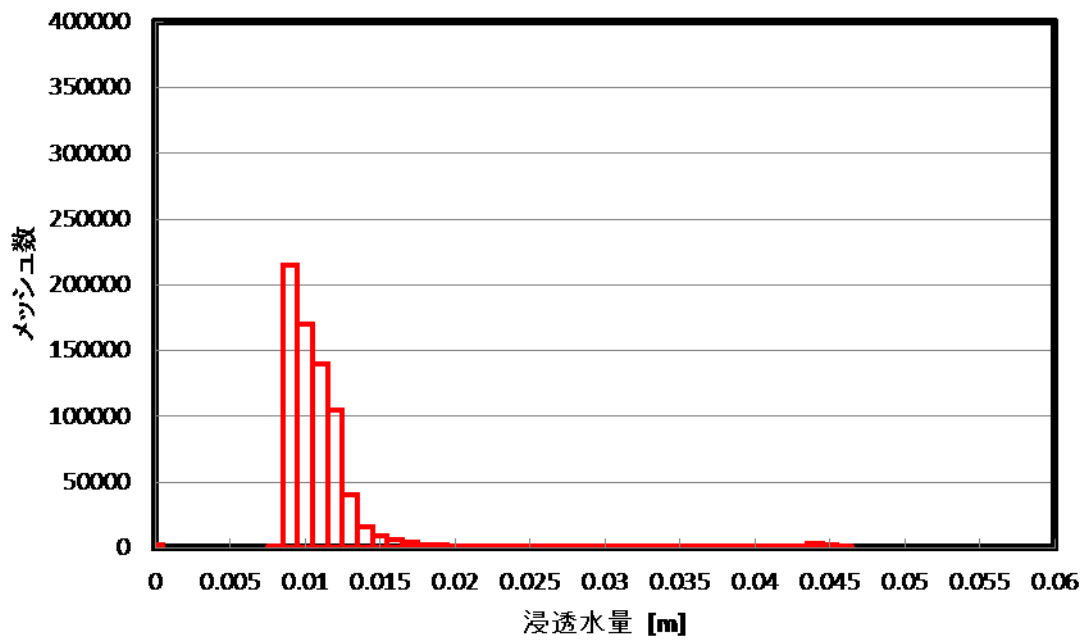


Figure A-13 植林前 裸地 浸透水量 1-1-3 $PR=10.0$

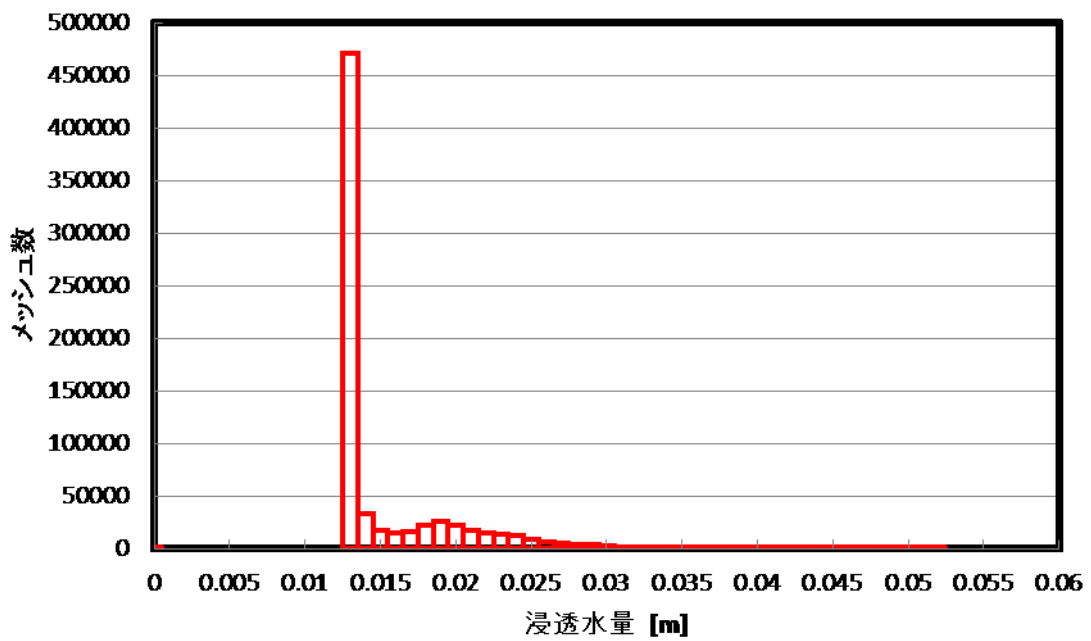


Figure A-14 植林後 裸地 浸透水量 1-1-3 $PR=10.0$

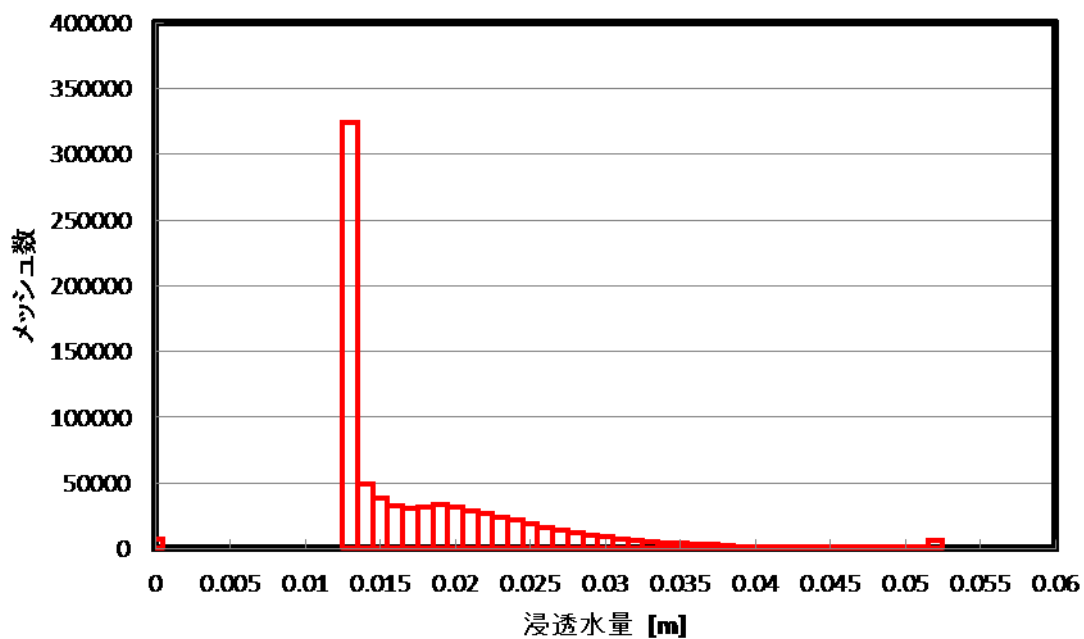


Figure A-15 植林前 草地 浸透水量 1-1-3 PR=10.0

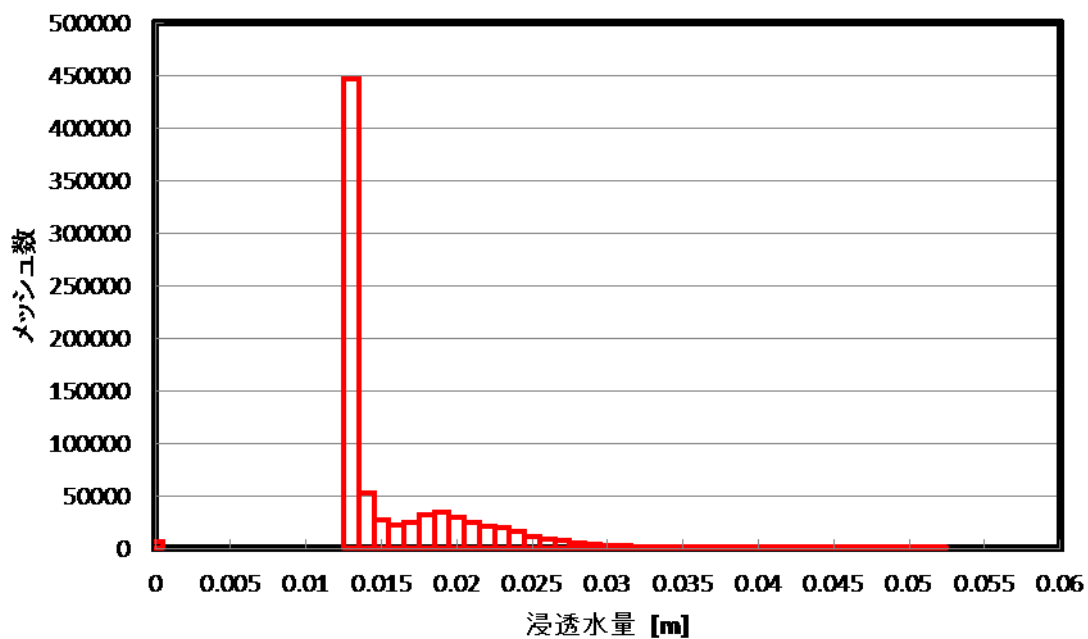


Figure A-16 植林後 草地 浸透水量 1-1-3 PR=10.0

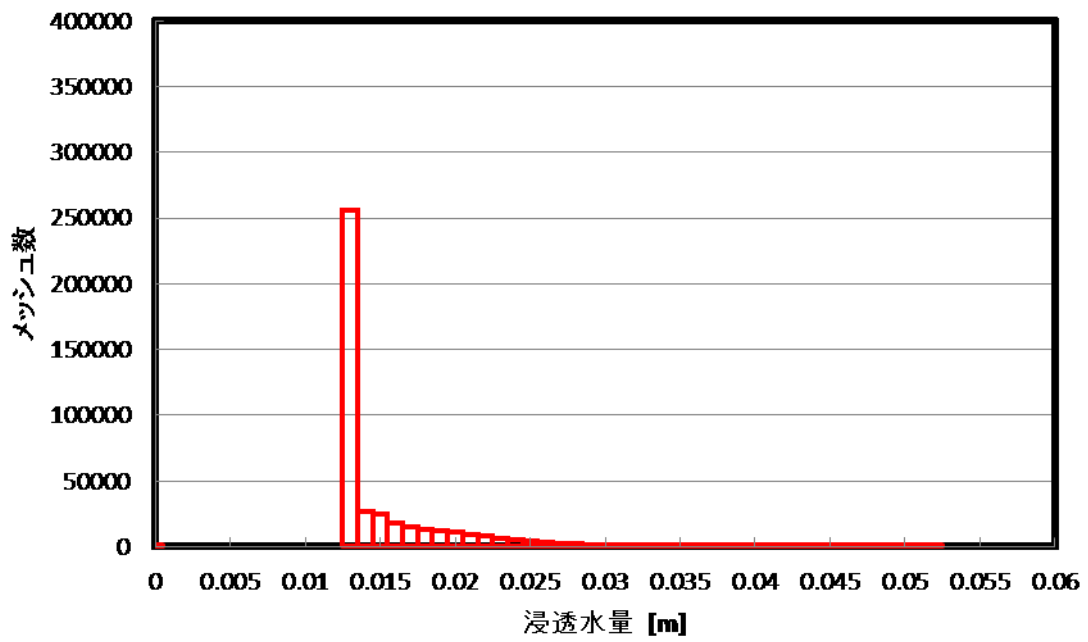


Figure A-17 植林前 森林 浸透水量 1-1-3 $PR=10.0$

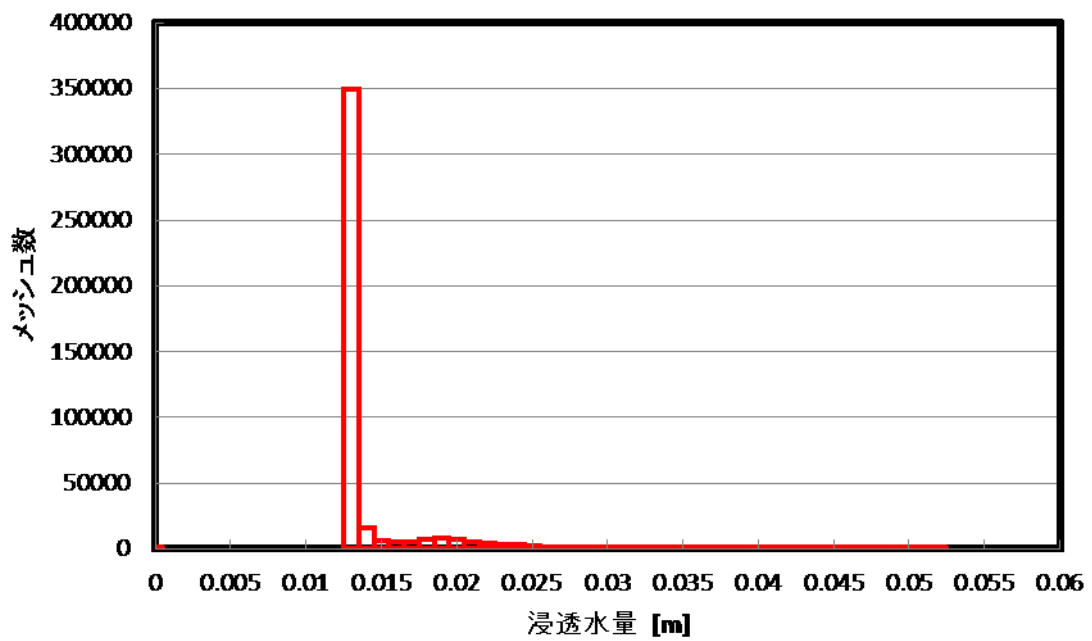


Figure A-18 植林後 森林 浸透水量 1-1-3 $PR=10.0$

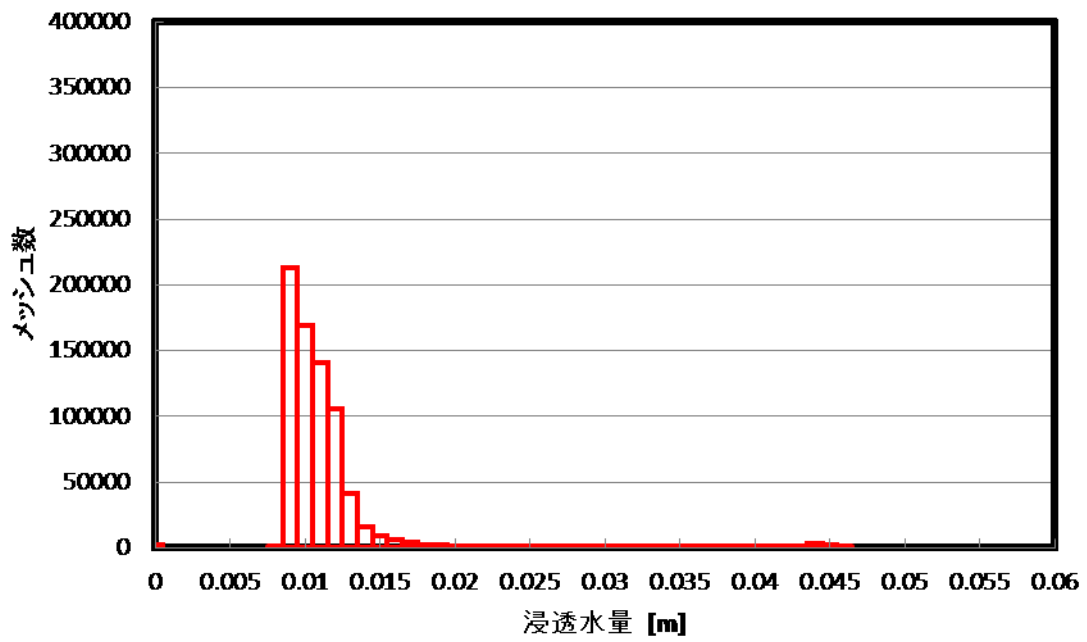


Figure A-19 植林前 裸地 浸透水量 1-2-1 $PR=10.0$

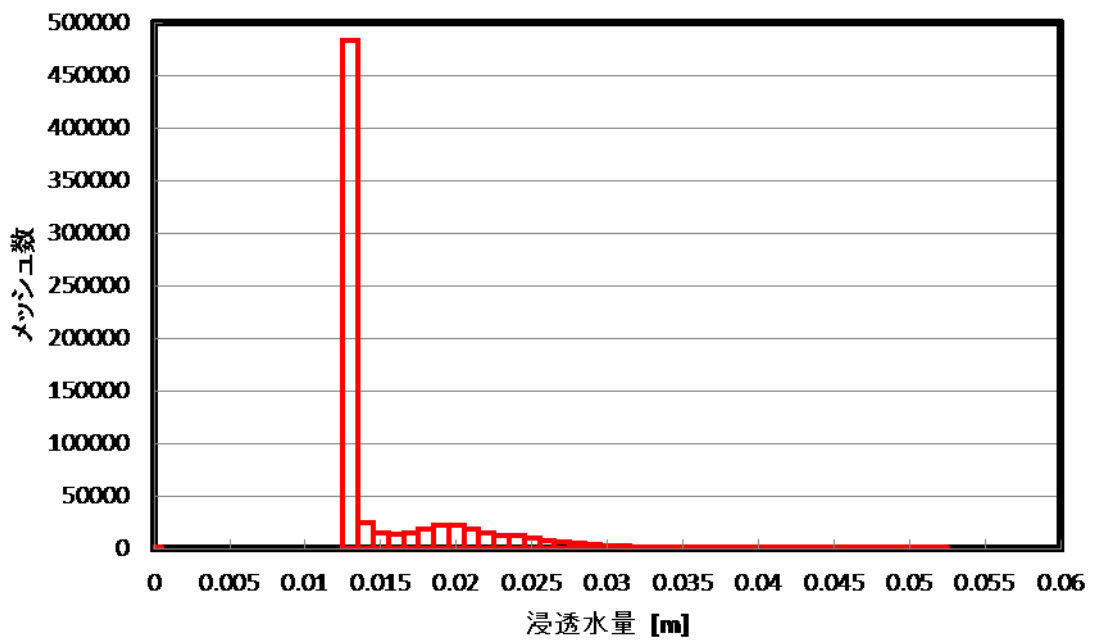


Figure A-20 植林後 裸地 浸透水量 1-2-1 $PR=10.0$

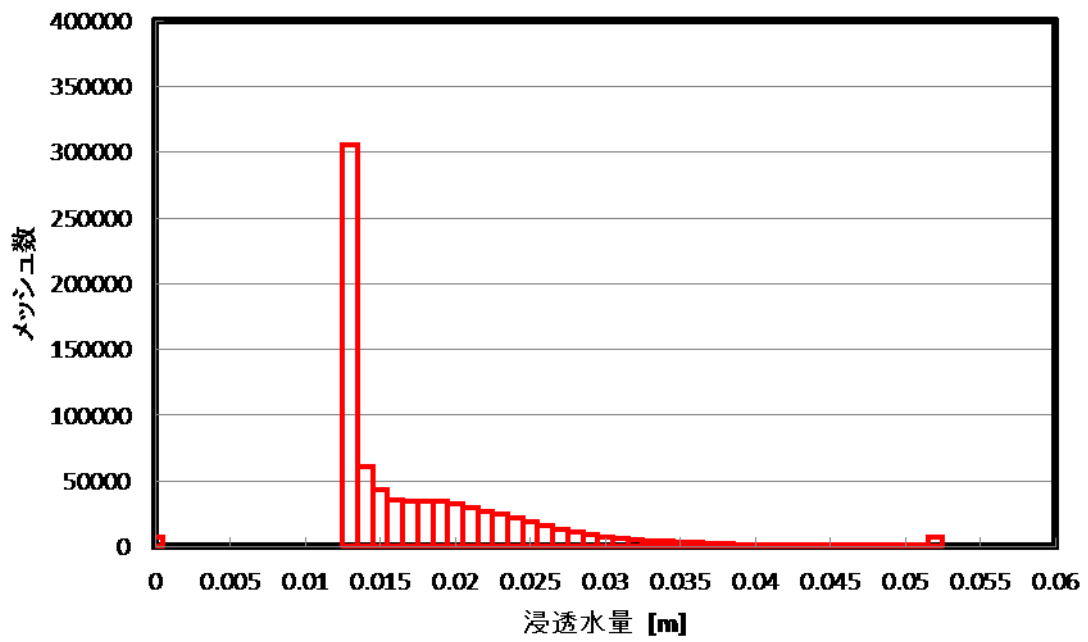


Figure A-21 植林前 草地 浸透水量 1-2-1 PR=10.0

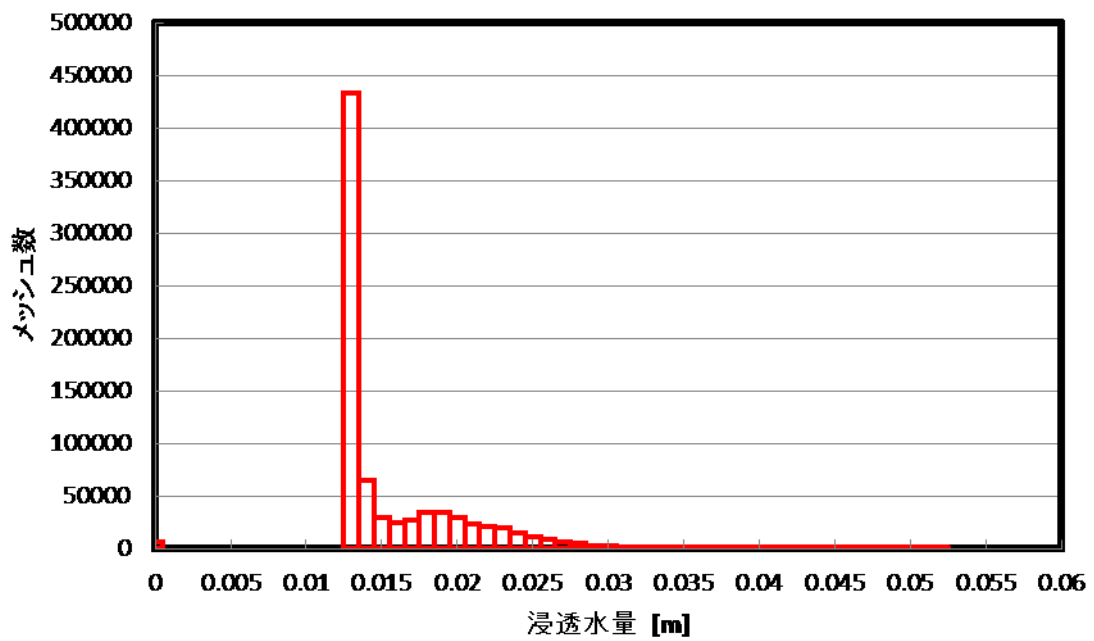


Figure A-22 植林後 草地 浸透水量 1-2-1 PR=10.0

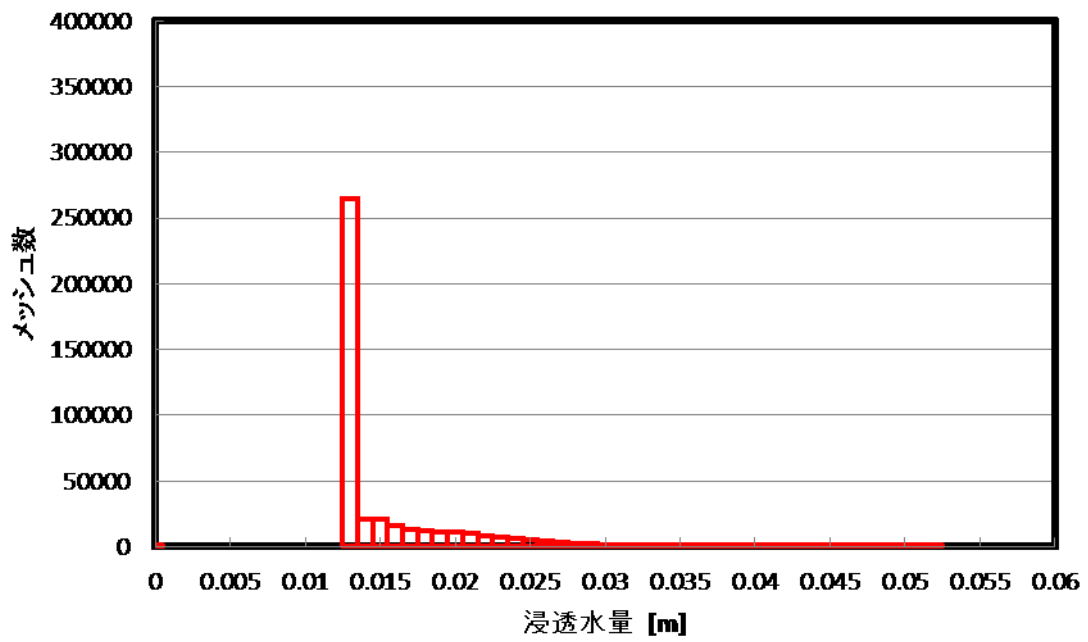


Figure A-23 植林前 森林 浸透水量 1-2-1 $PR=10.0$

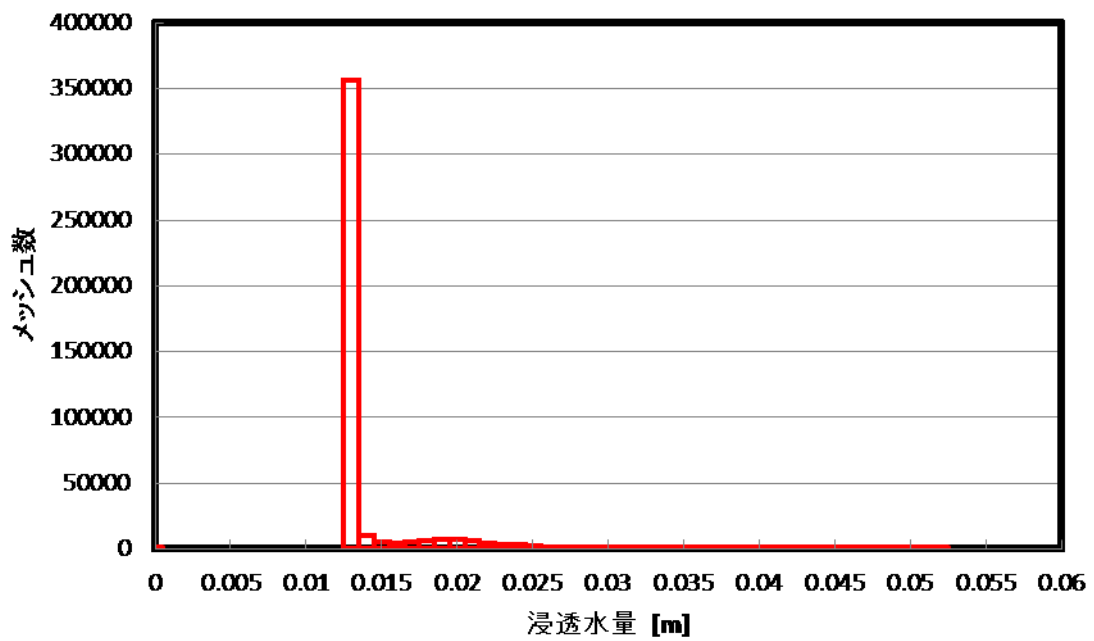


Figure A-24 植林後 森林 浸透水量 1-2-1 $PR=10.0$

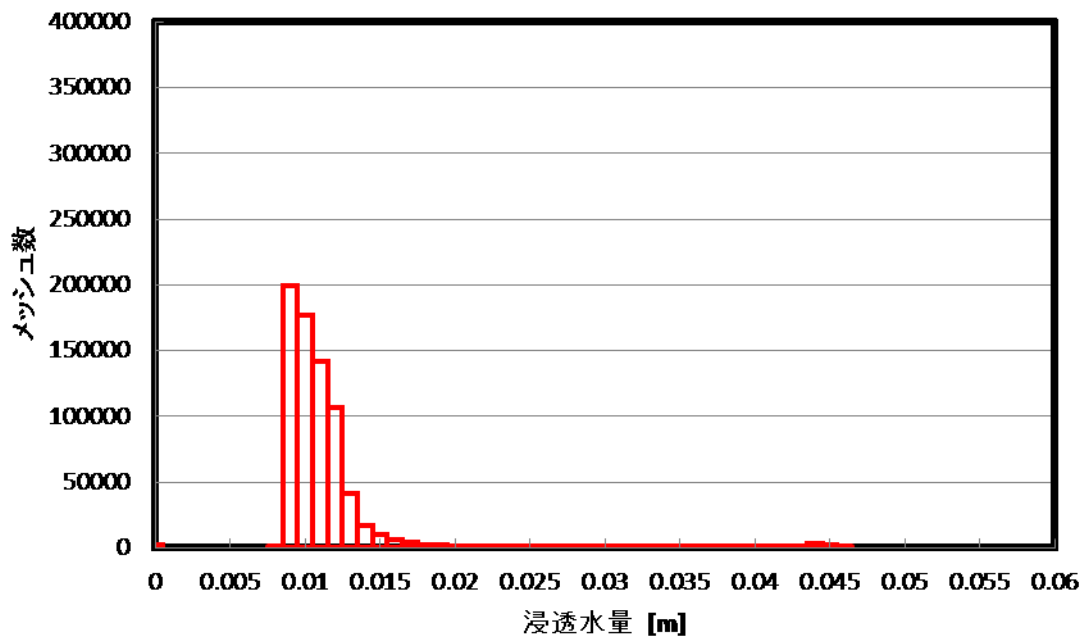


Figure A-25 植林前 裸地 浸透水量 1-2-2 $PR=10.0$

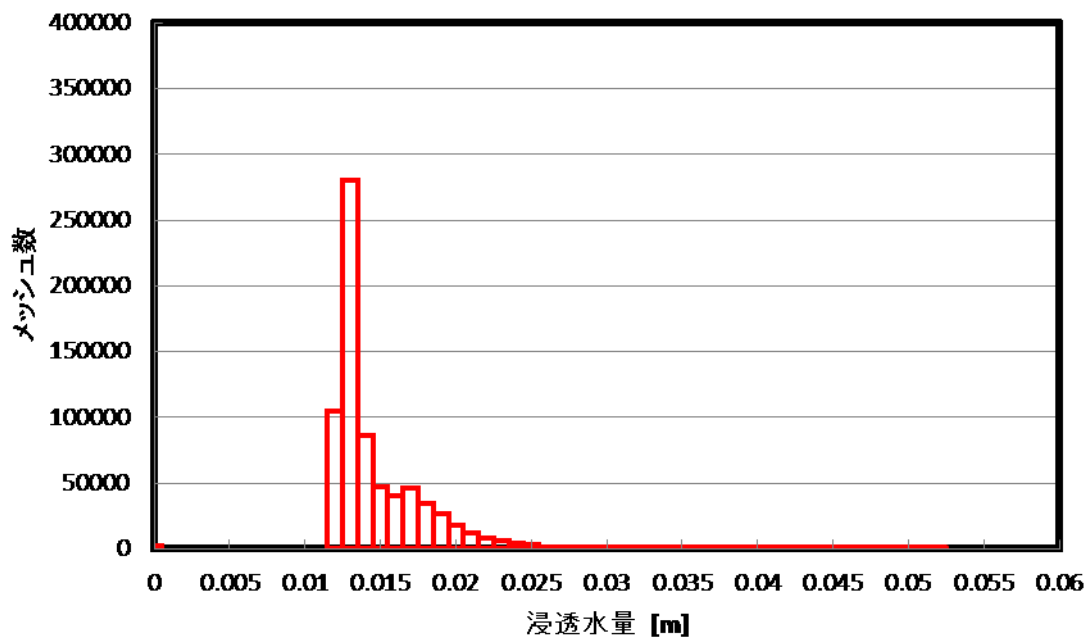


Figure A-26 植林後 裸地 浸透水量 1-2-2 $PR=10.0$

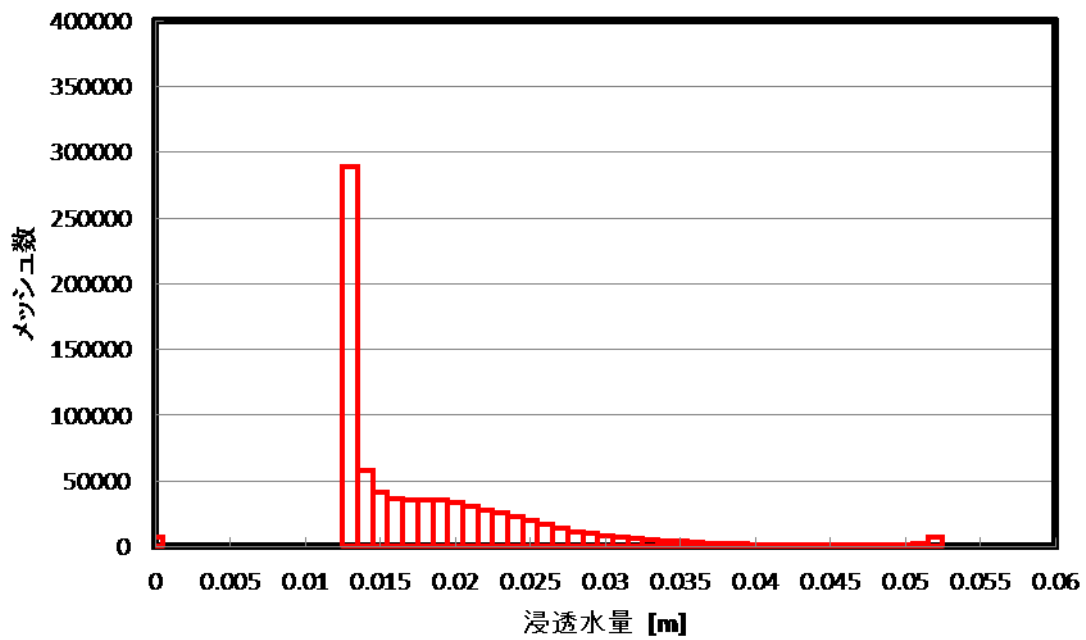


Figure A-27 植林前 草地 浸透水量 1-2-2 PR=10.0

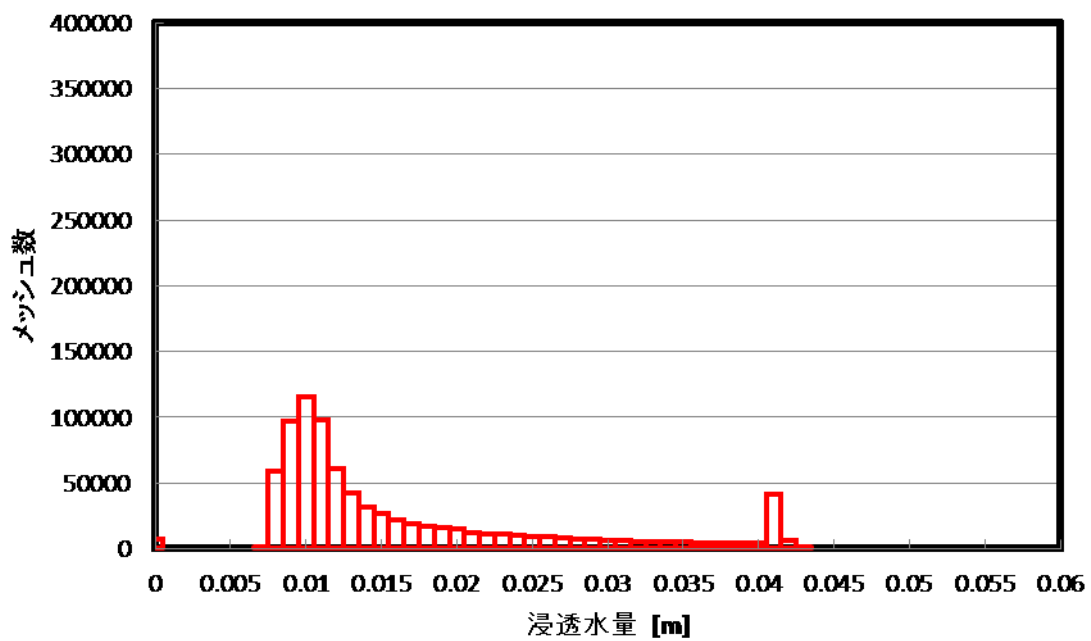


Figure A-28 植林後 草地 浸透水量 1-2-2 PR=10.0

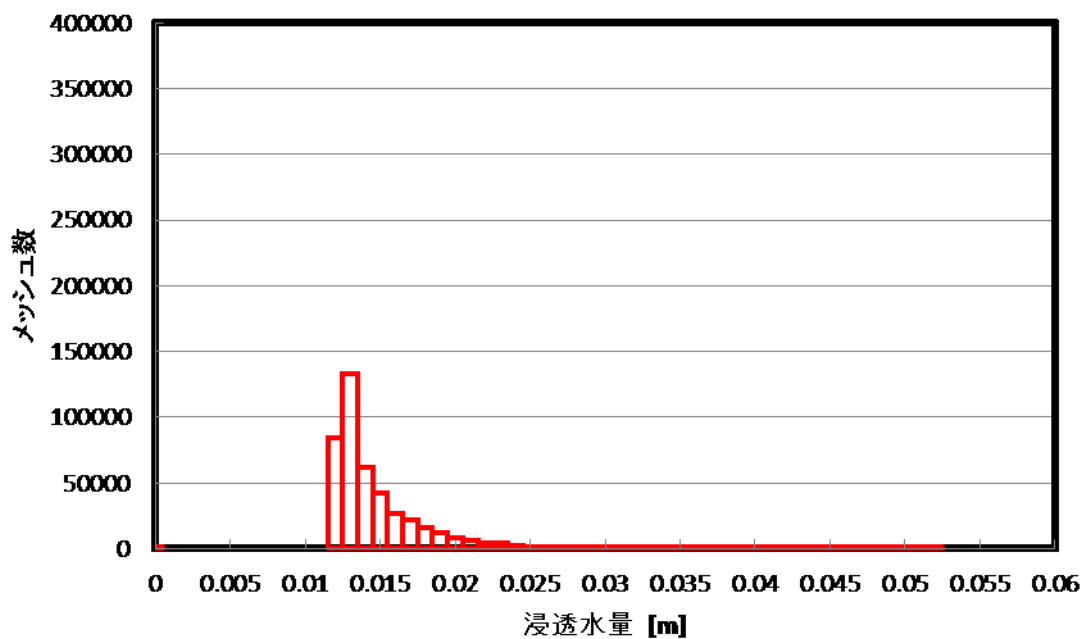


Figure A-29 植林前 森林 浸透水量 1-2-2 PR=10.0

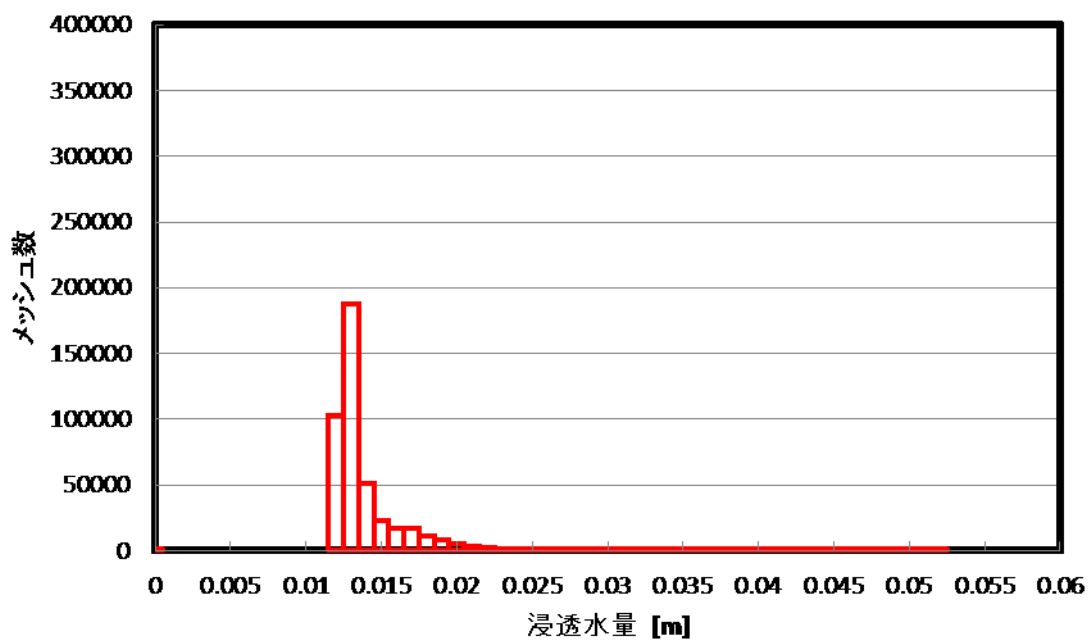


Figure A-30 植林後 森林 浸透水量 1-2-2 PR=10.0

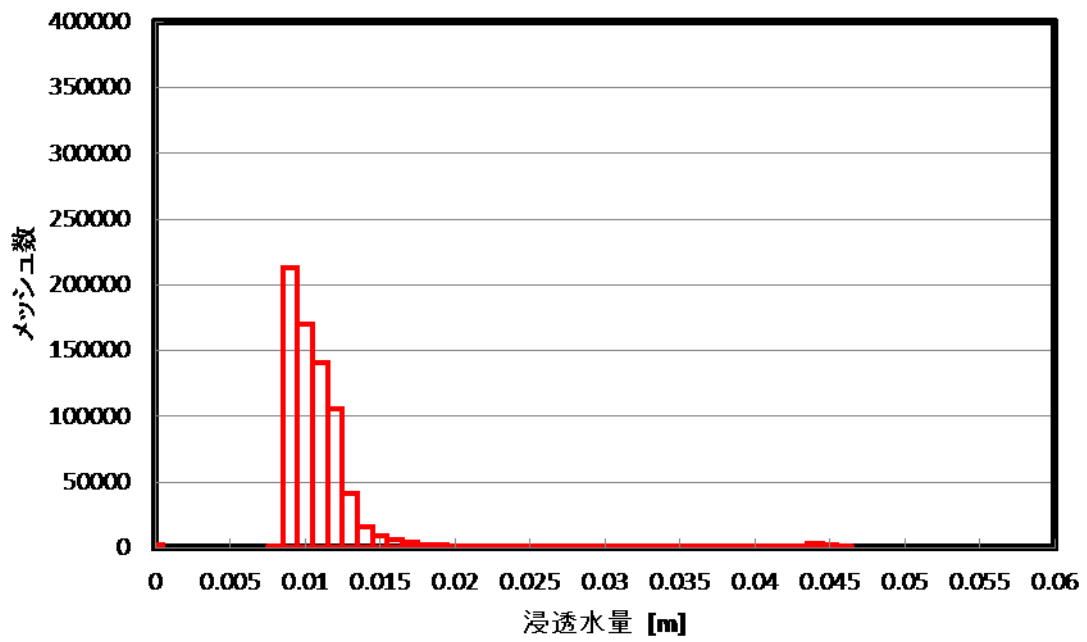


Figure A-31 植林前 裸地 浸透水量 1-2-3 $PR=10.0$

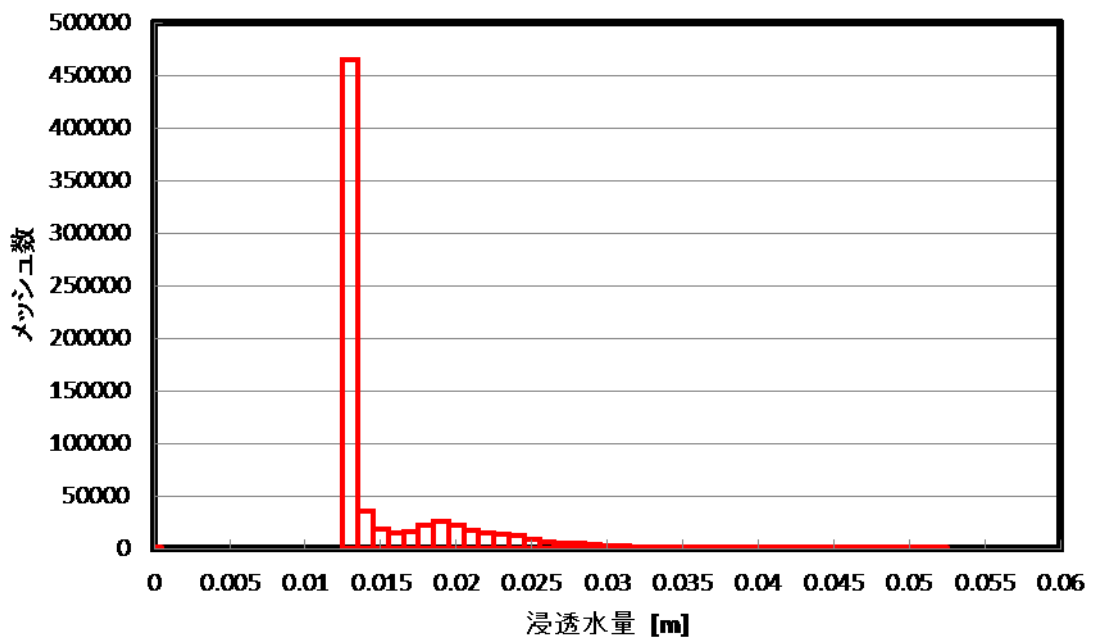


Figure A-32 植林後 裸地 浸透水量 1-2-3 $PR=10.0$

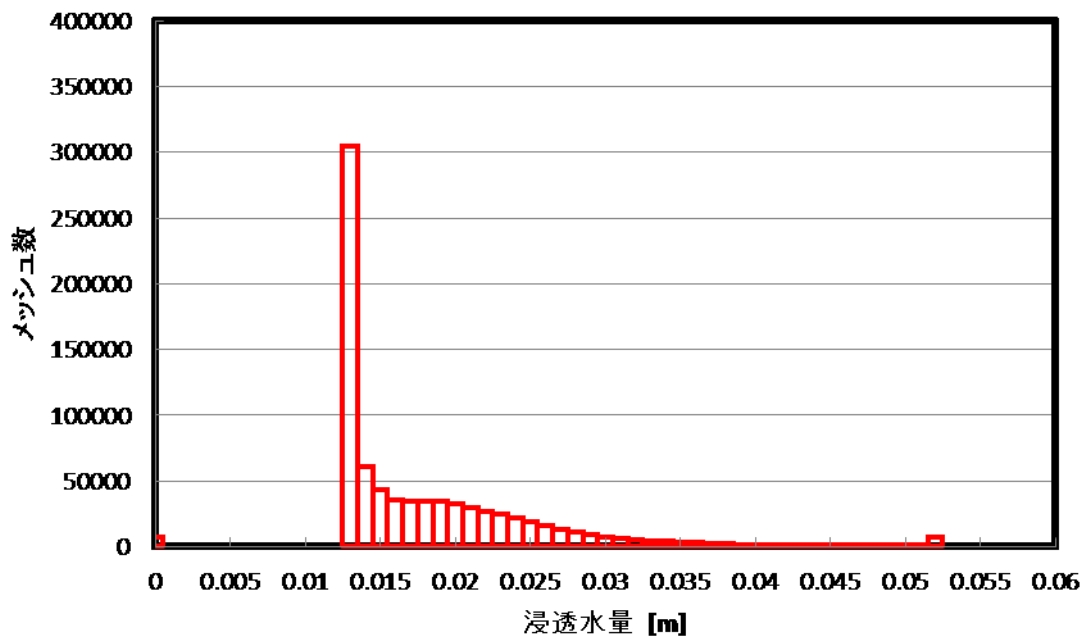


Figure A-33 植林前 草地 浸透水量 1-2-3 PR=10.0

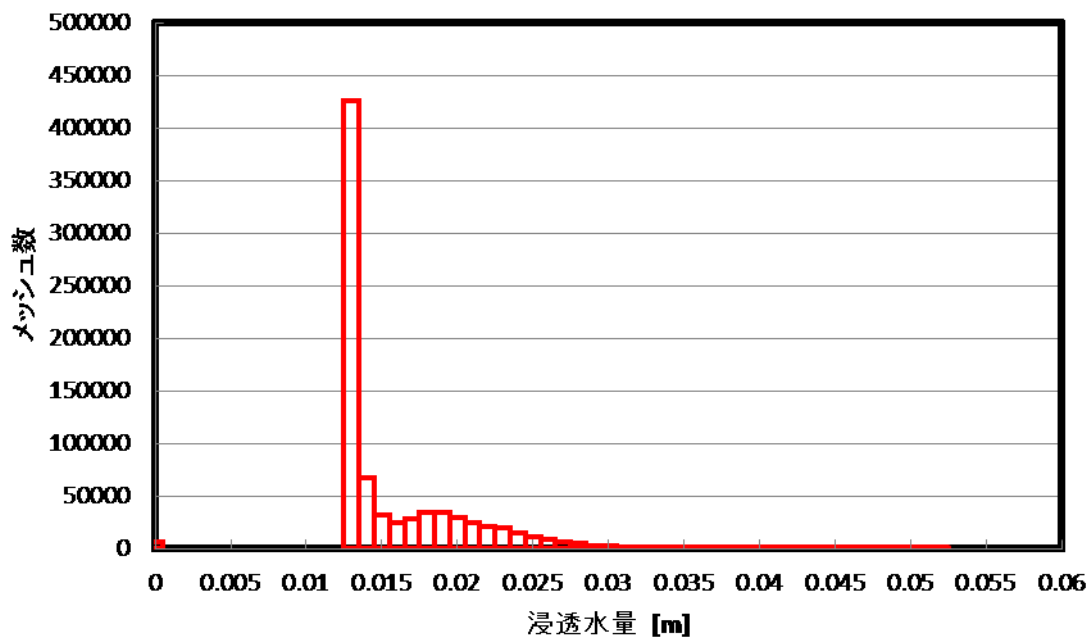


Figure A-34 植林後 草地 浸透水量 1-2-3 PR=10.0

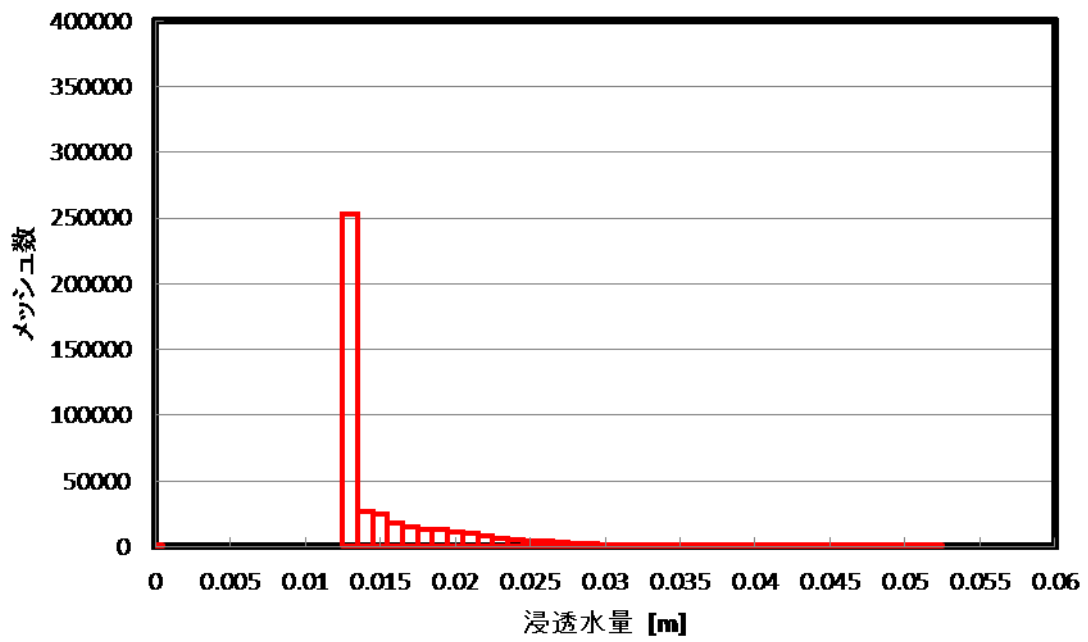


Figure A-35 植林前 森林 浸透水量 1-2-3 $PR=10.0$

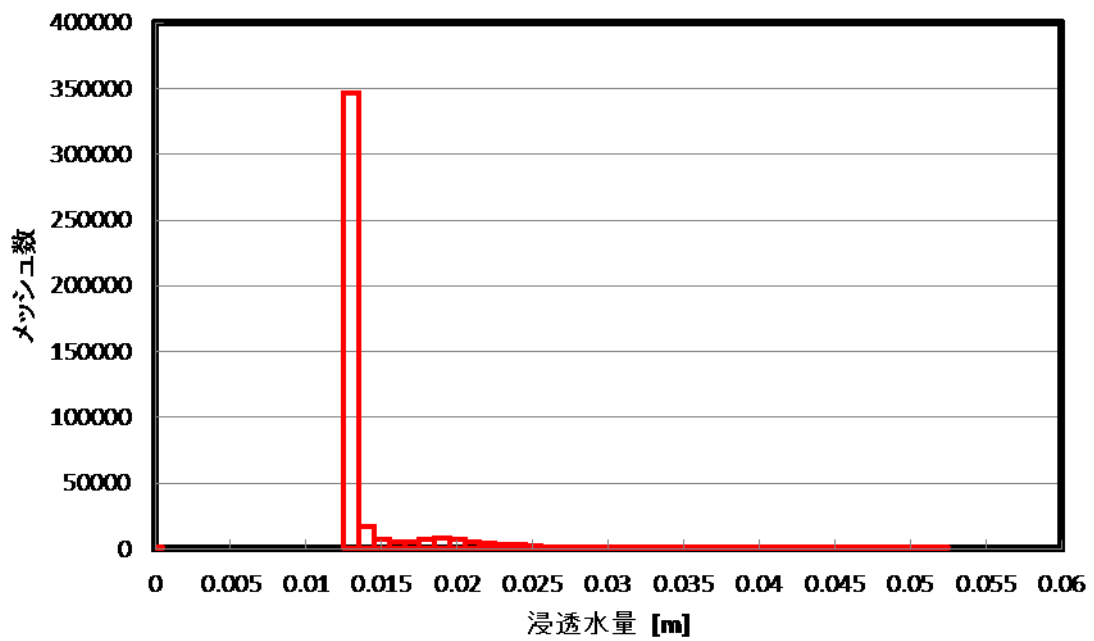


Figure A-36 植林後 森林 浸透水量 1-2-3 $PR=10.0$

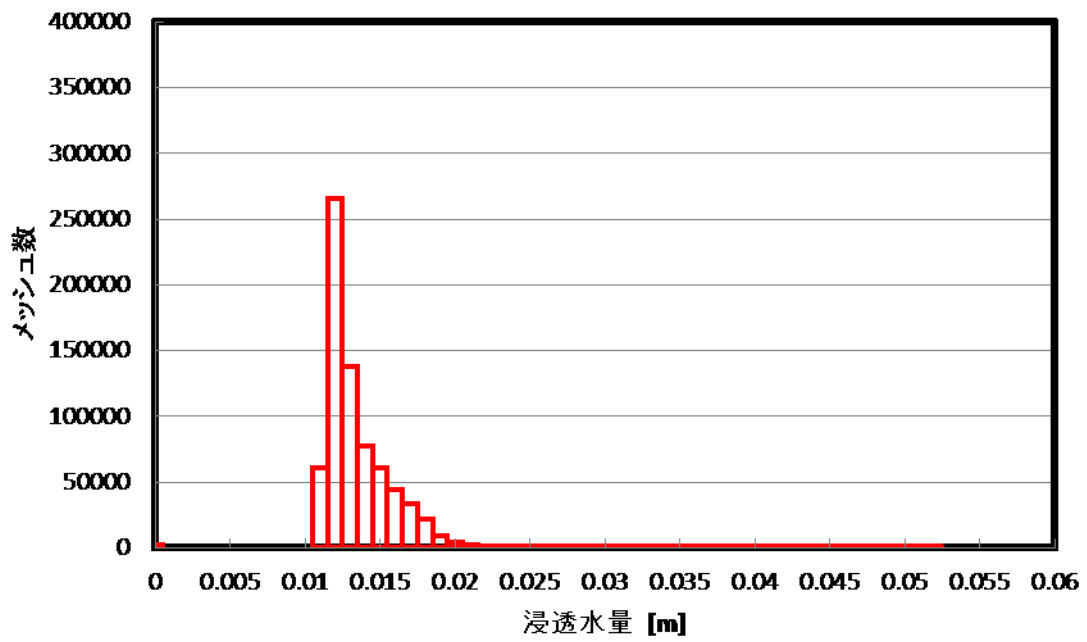


Figure A-37 植林前 裸地 浸透水量 2-1-1 $PR=10.0$

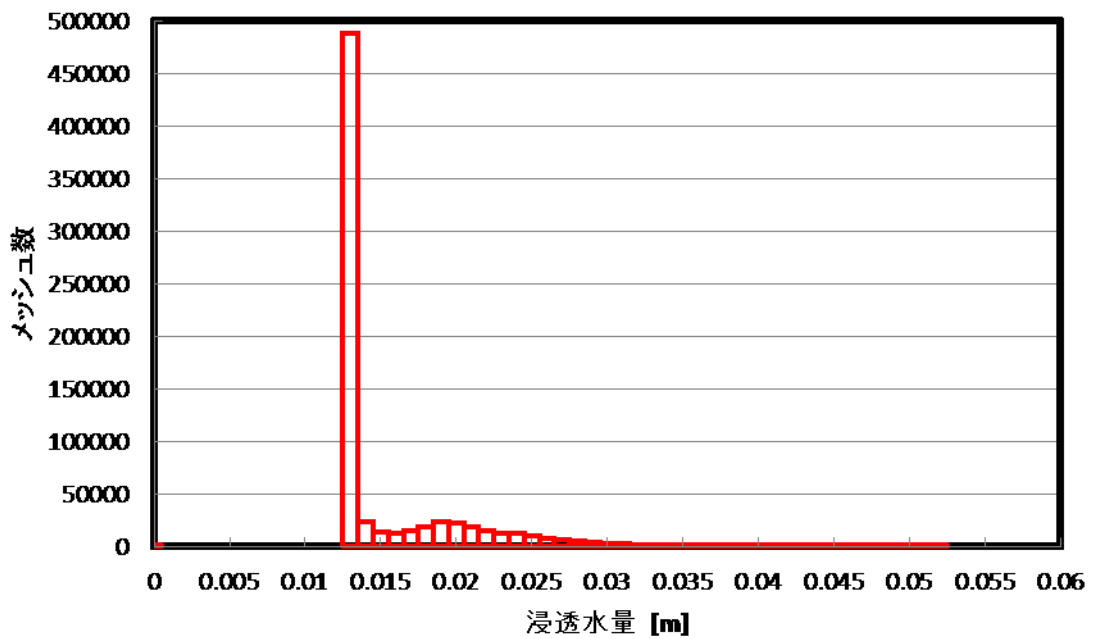


Figure A-38 植林後 裸地 浸透水量 2-1-1 $PR=10.0$

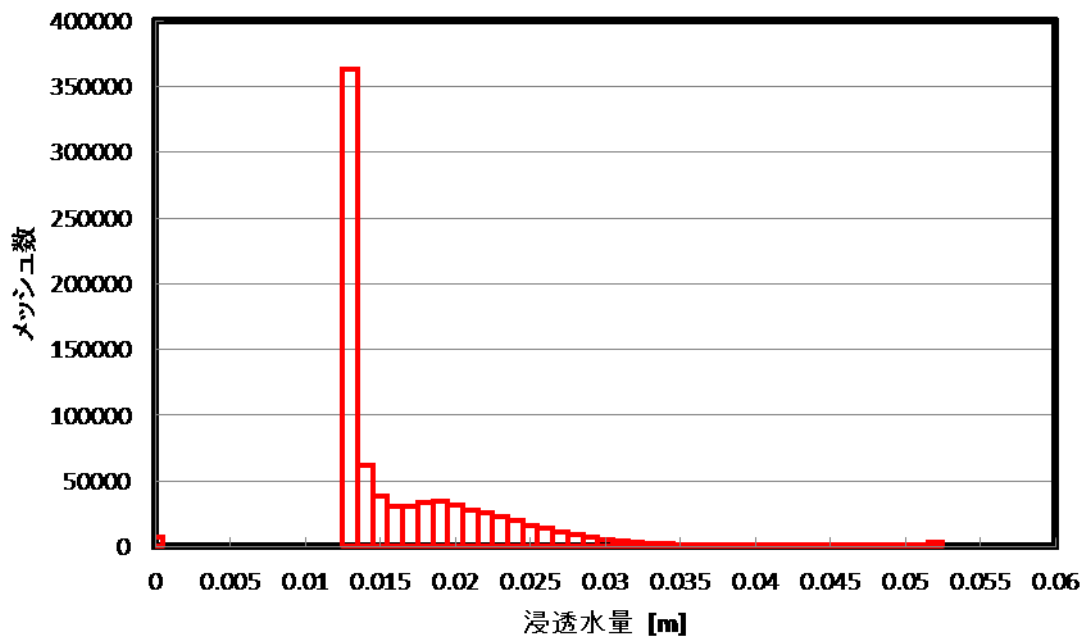


Figure A-39 植林前 草地 浸透水量 2-1-1 $PR=10.0$

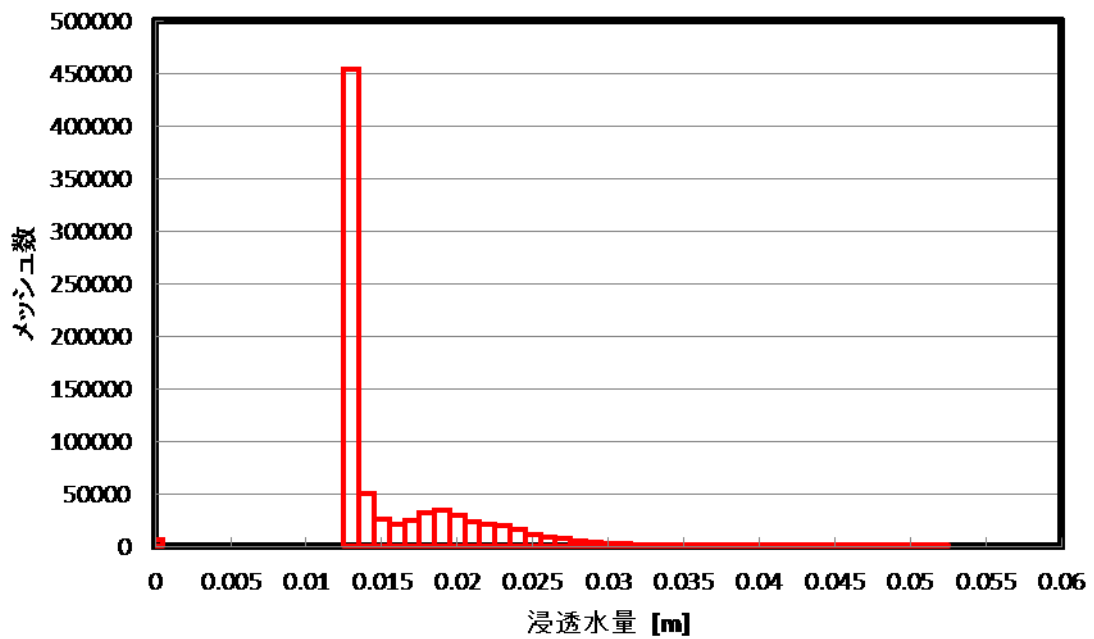


Figure A-40 植林後 草地 浸透水量 2-1-1 $PR=10.0$

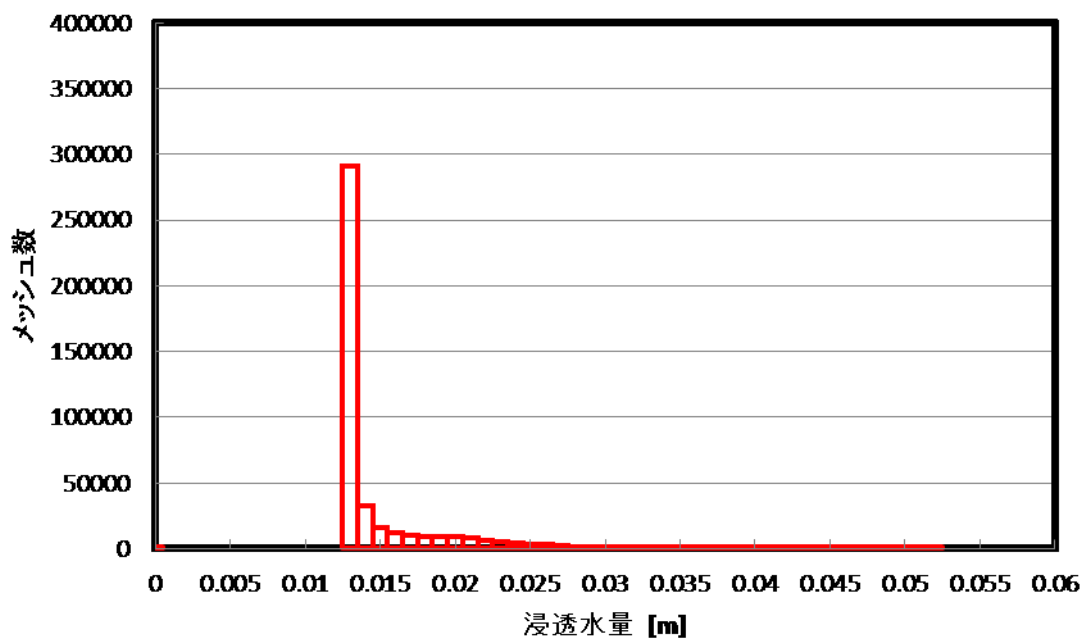


Figure A-41 植林前 森林 浸透水量 2-1-1 PR=10.0

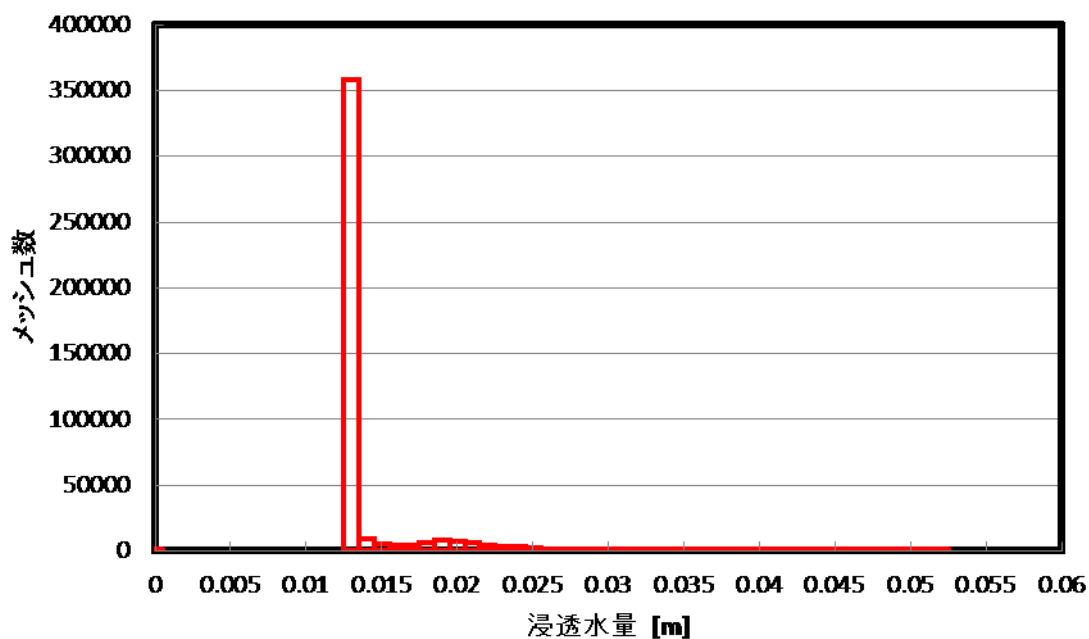


Figure A-42 植林後 森林 浸透水量 2-1-1 PR=10.0

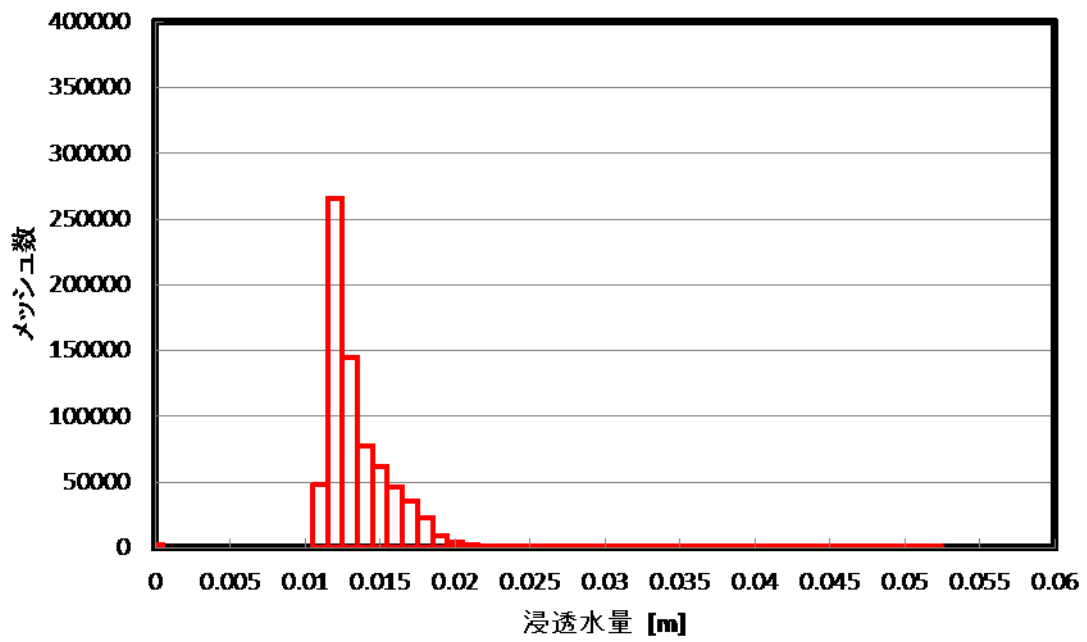


Figure A-43 植林前 裸地 浸透水量 2-1-2 $PR=10.0$

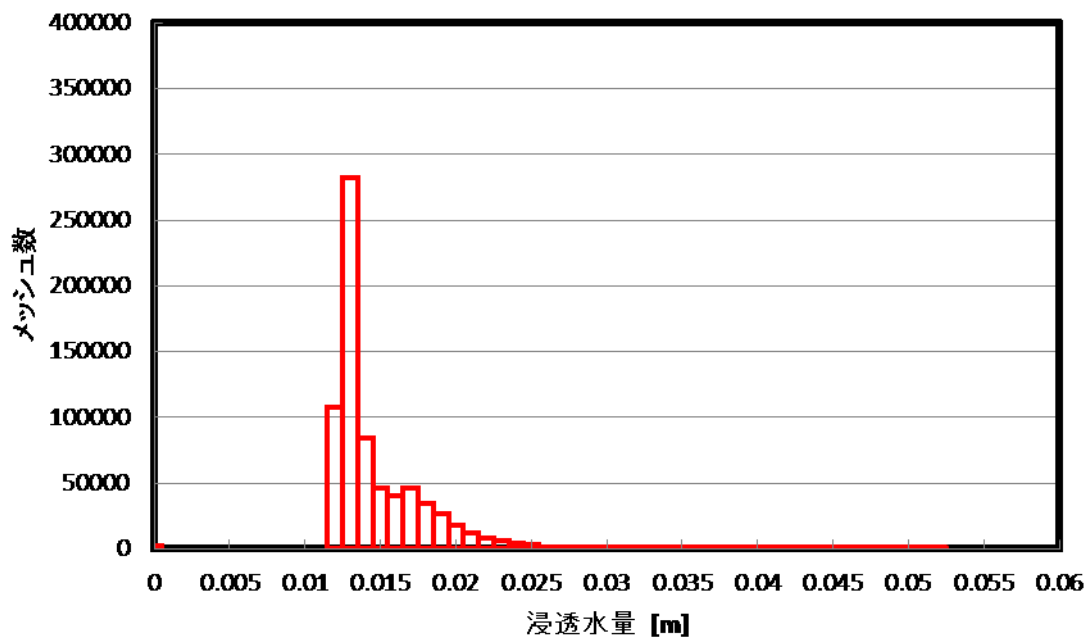


Figure A-44 植林後 裸地 浸透水量 2-1-2 $PR=10.0$

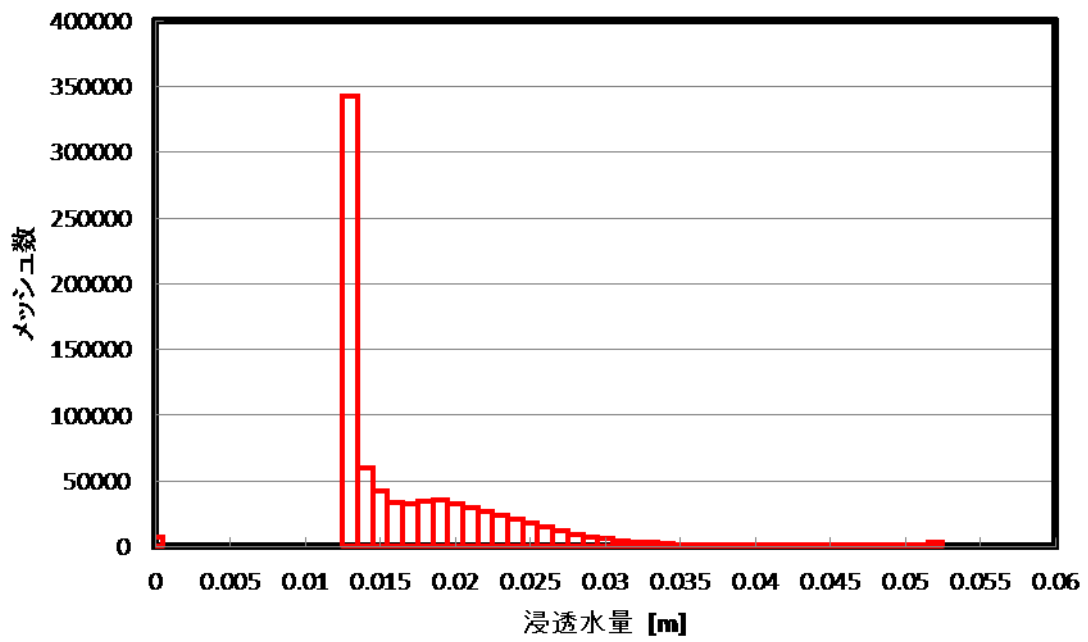


Figure A-45 植林前 草地 浸透水量 2-1-2 PR=10.0

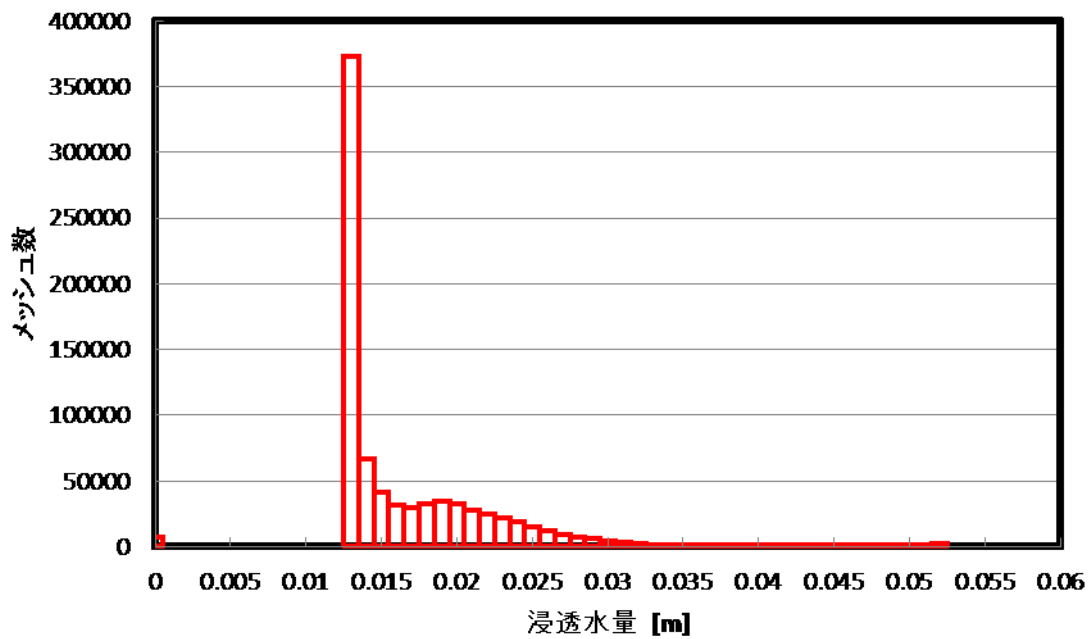


Figure A-46 植林後 草地 浸透水量 2-1-2 PR=10.0

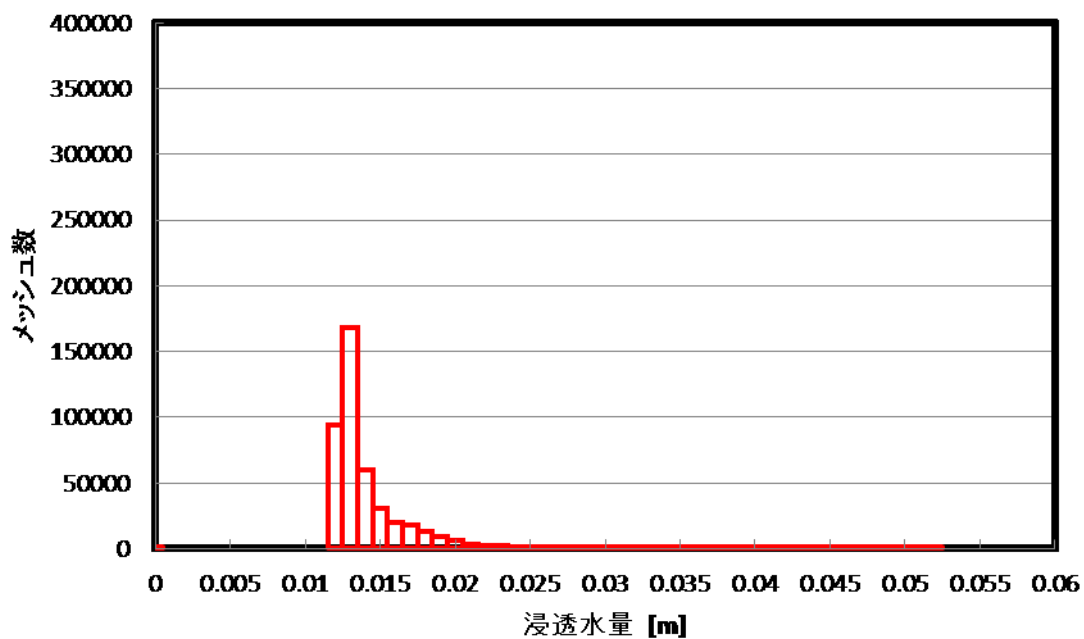


Figure A-47 植林前 森林 浸透水量 2-1-2 PR=10.0

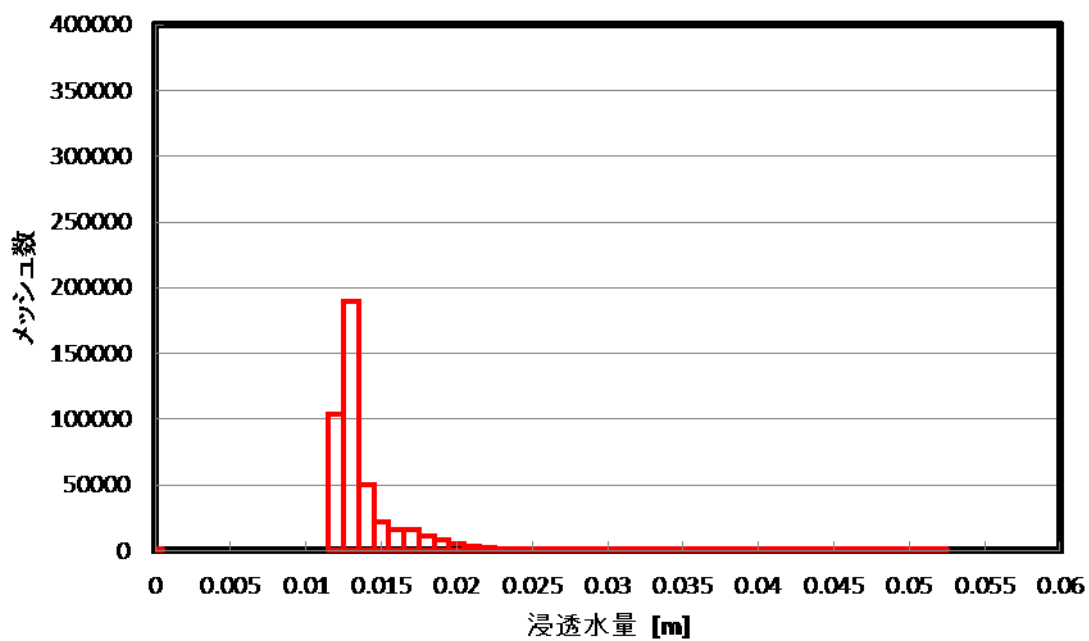


Figure A-48 植林後 森林 浸透水量 2-1-2 PR=10.0

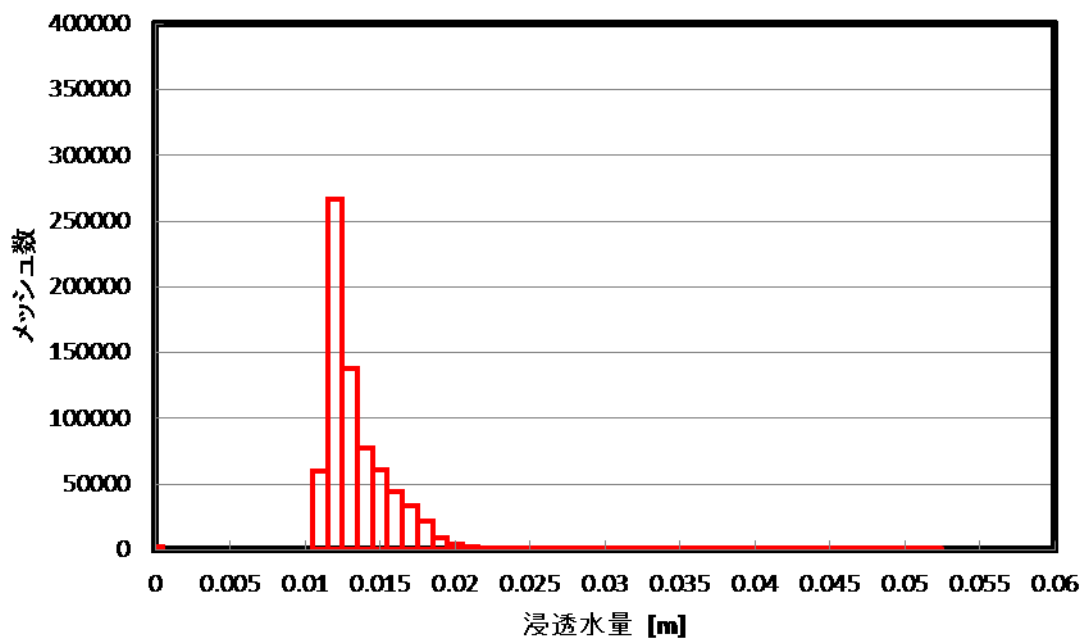


Figure A-49 植林前 裸地 浸透水量 2-1-3 PR=10.0

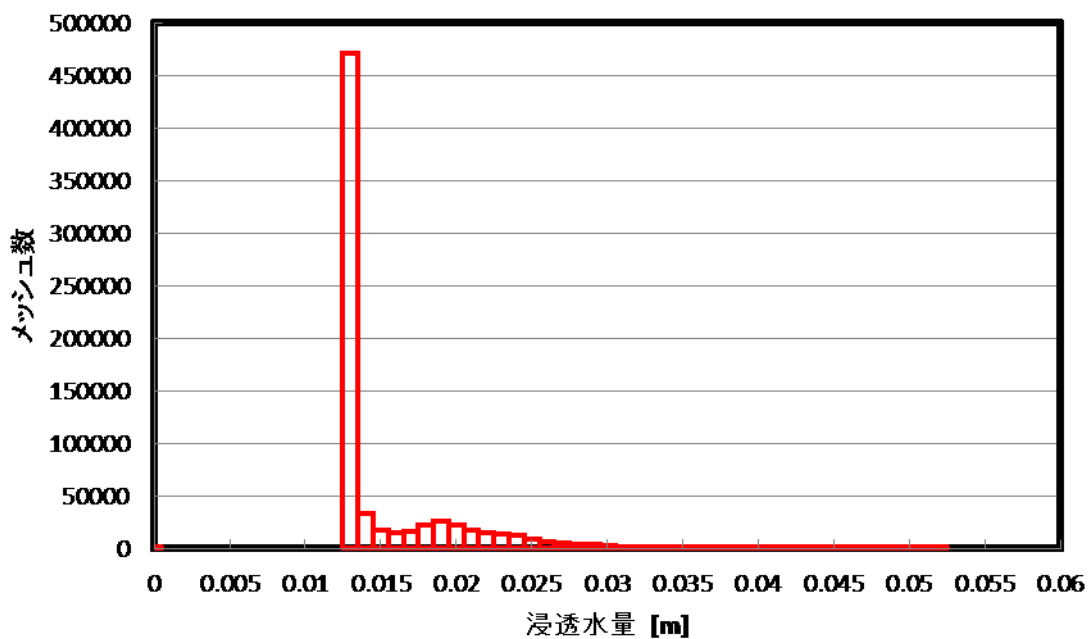


Figure A-50 植林後 裸地 浸透水量 2-1-3 PR=10.0

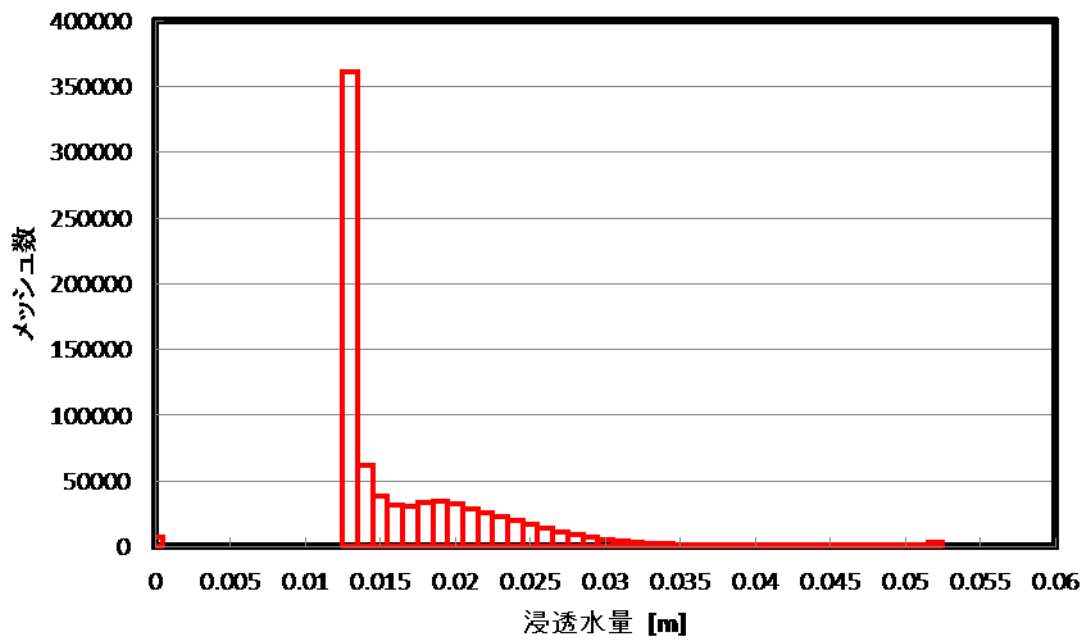


Figure A-51 植林前 草地 浸透水量 2-1-3 PR=10.0

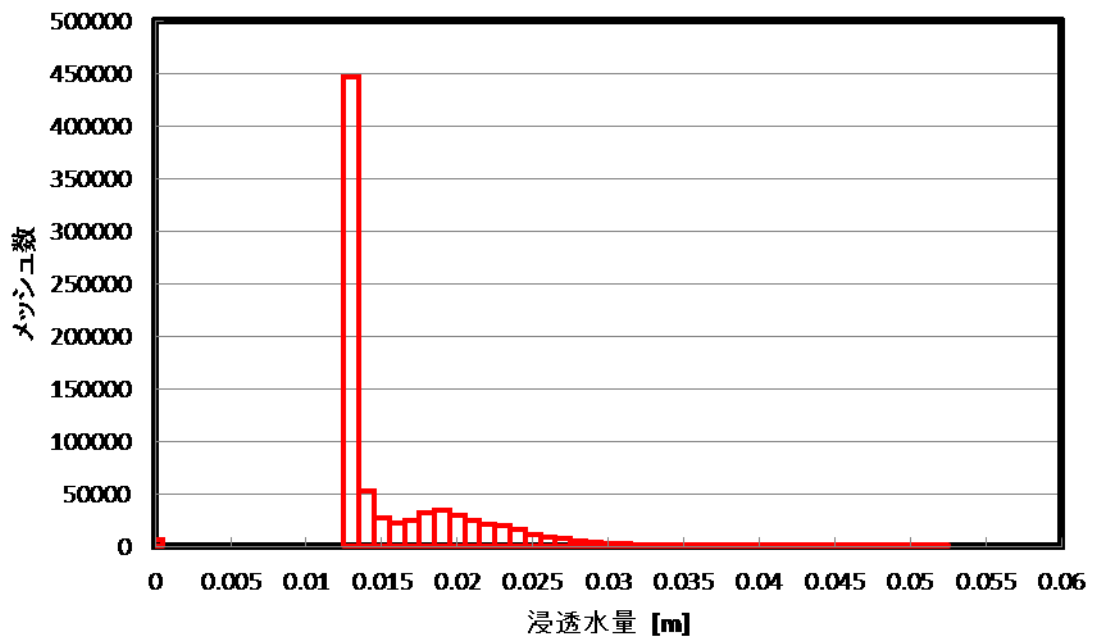


Figure A-52 植林後 草地 浸透水量 2-1-3 PR=10.0

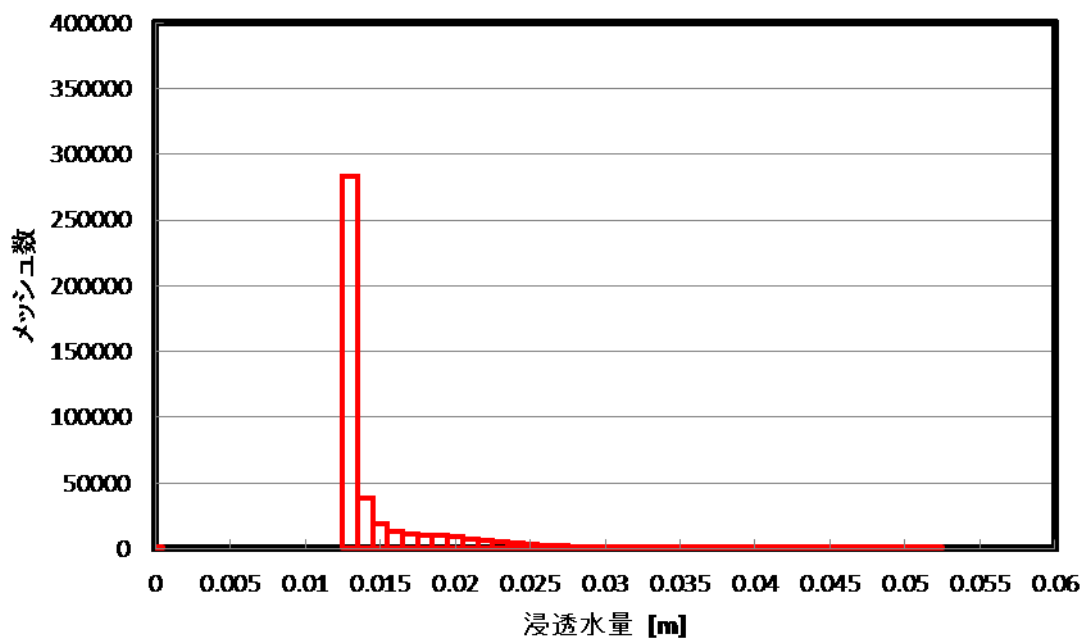


Figure A-53 植林前 森林 浸透水量 2-1-3 PR=10.0

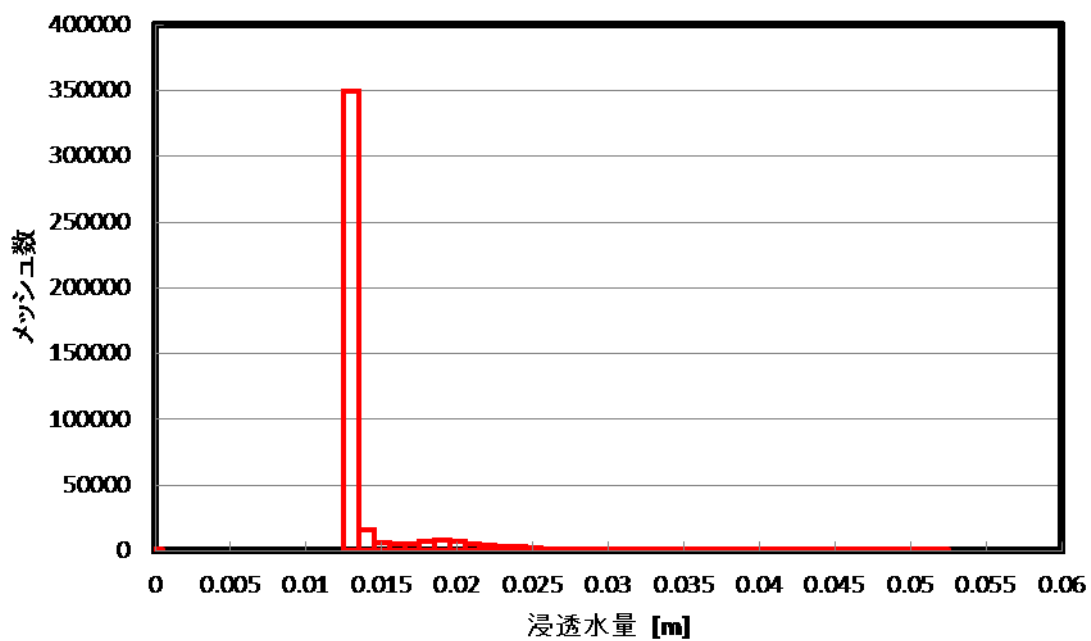


Figure A-54 植林後 森林 浸透水量 2-1-3 PR=10.0

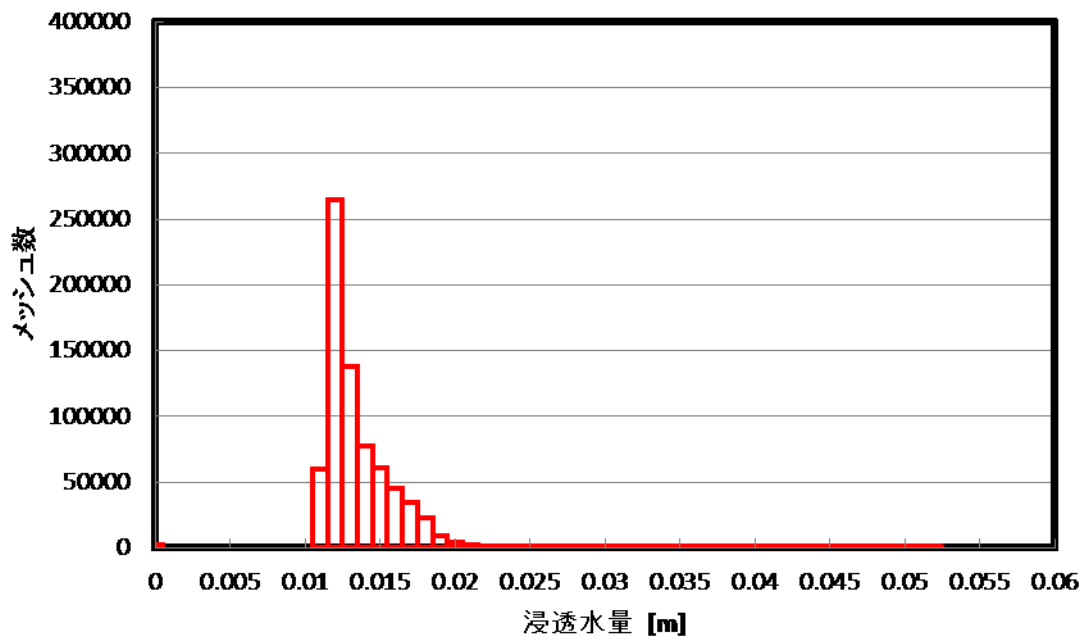


Figure A-55 植林前 裸地 浸透水量 2-2-1 $PR=10.0$

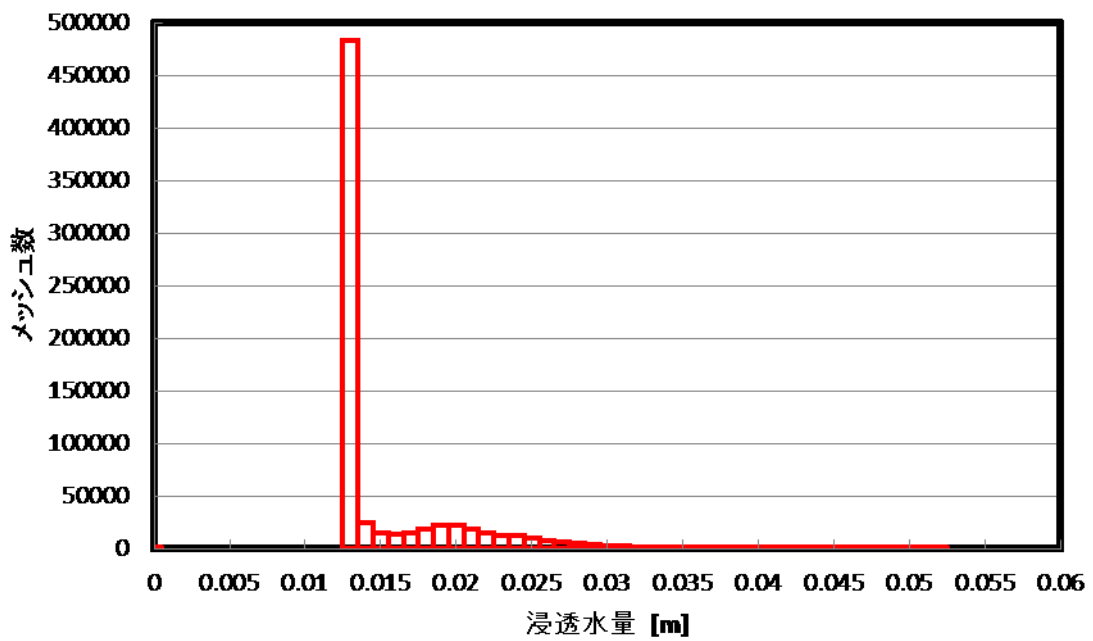


Figure A-56 植林後 裸地 浸透水量 2-2-1 $PR=10.0$

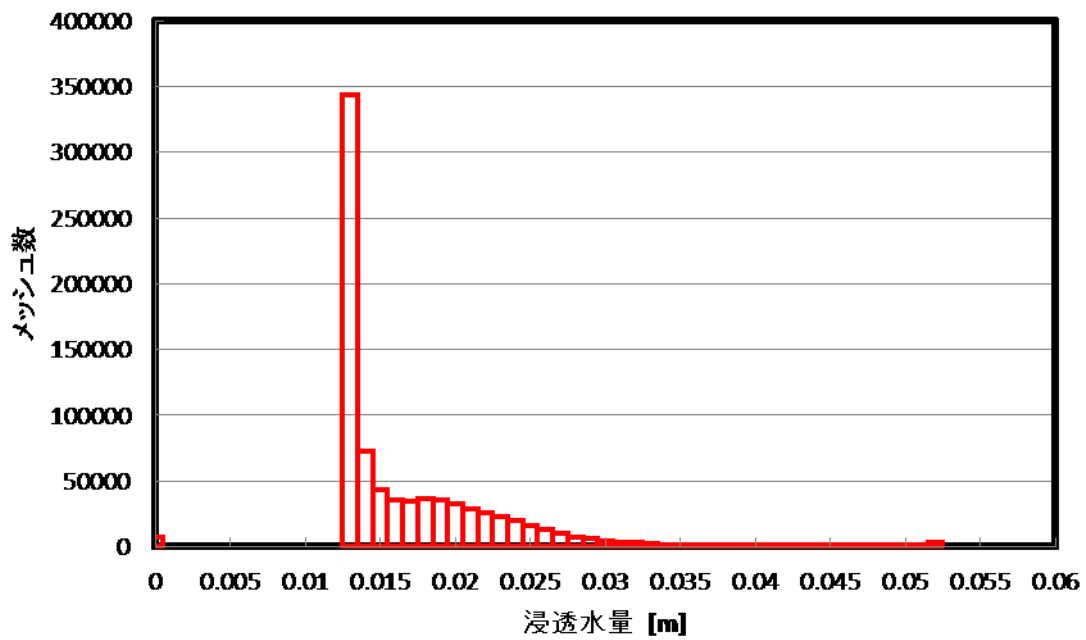


Figure A-57 植林前 草地 浸透水量 2-2-1 PR=10.0

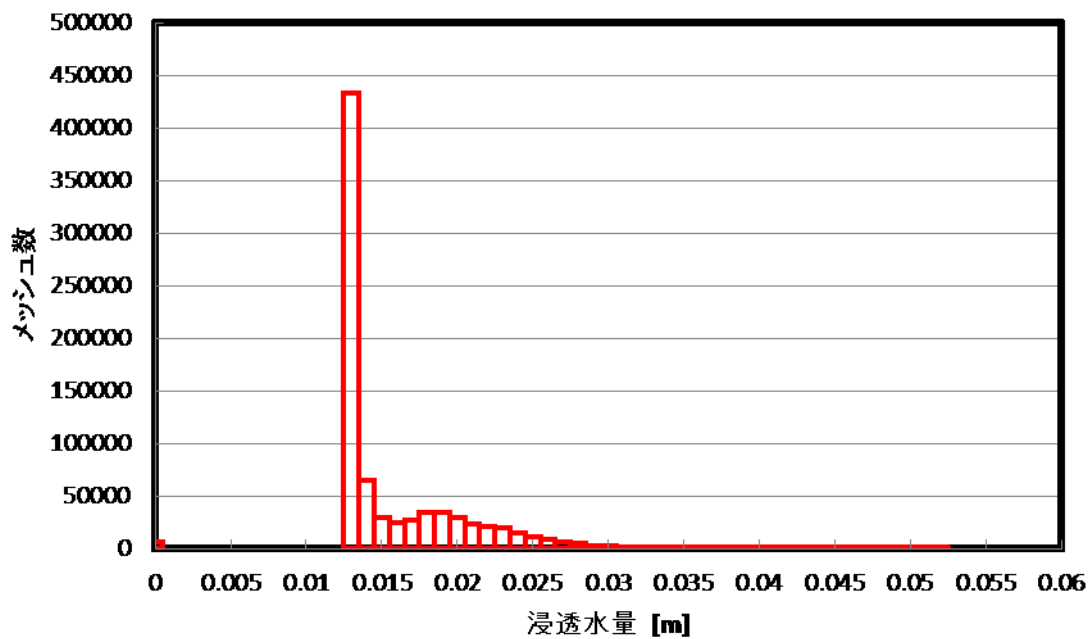


Figure A-58 植林後 草地 浸透水量 2-2-1 PR=10.0

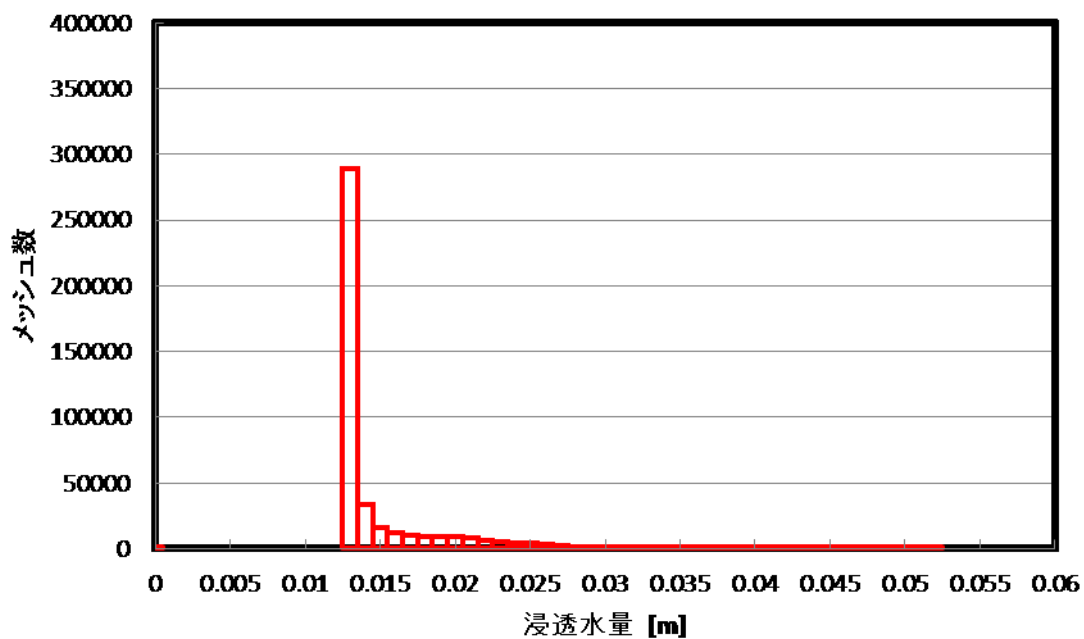


Figure A-59 植林前 森林 浸透水量 2-2-1 PR=10.0

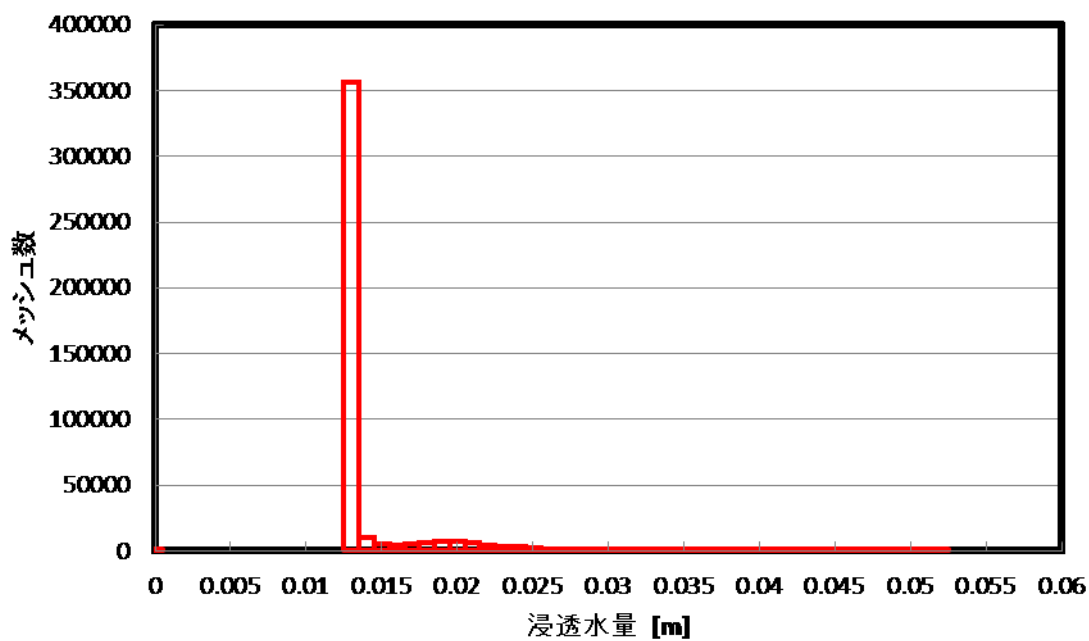


Figure A-60 植林後 森林 浸透水量 2-2-1 PR=10.0

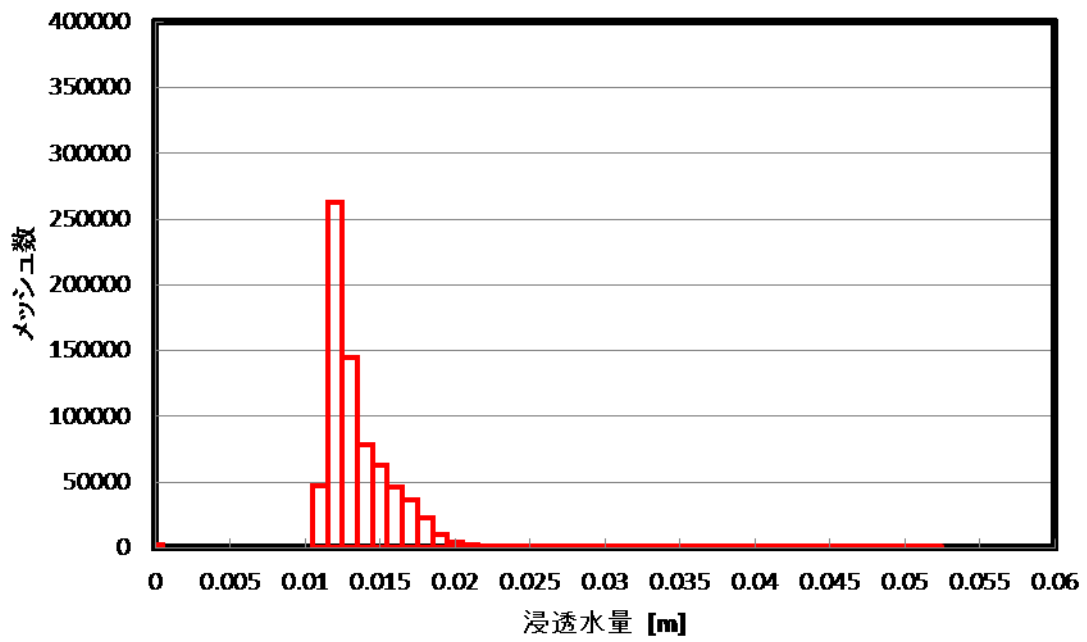


Figure A-61 植林前 裸地 浸透水量 2-2-2 PR=10.0

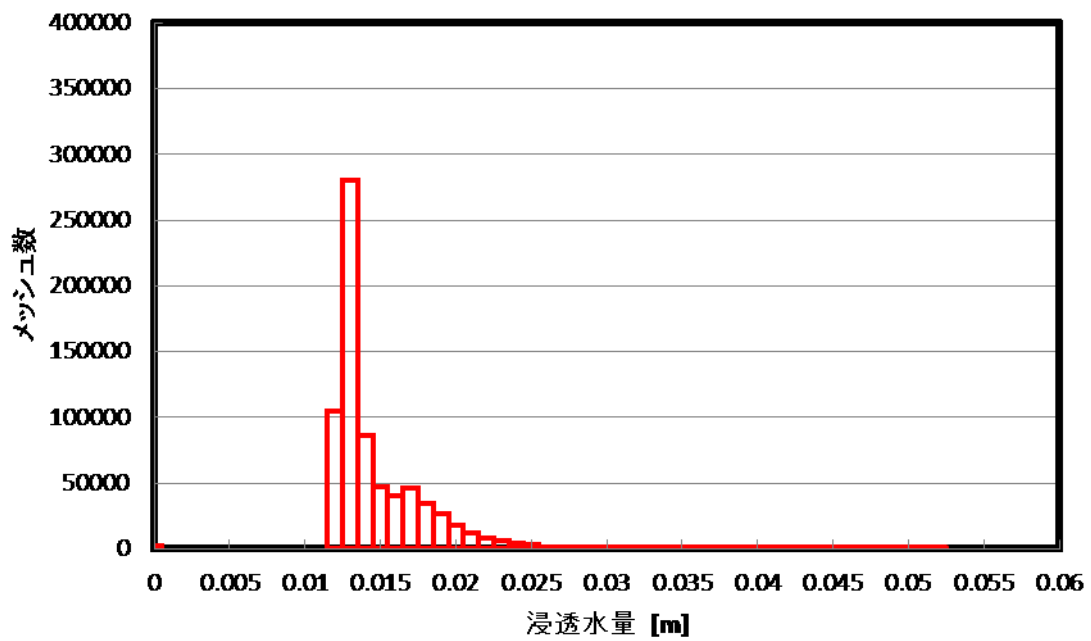


Figure A-62 植林後 裸地 浸透水量 2-2-2 PR=10.0

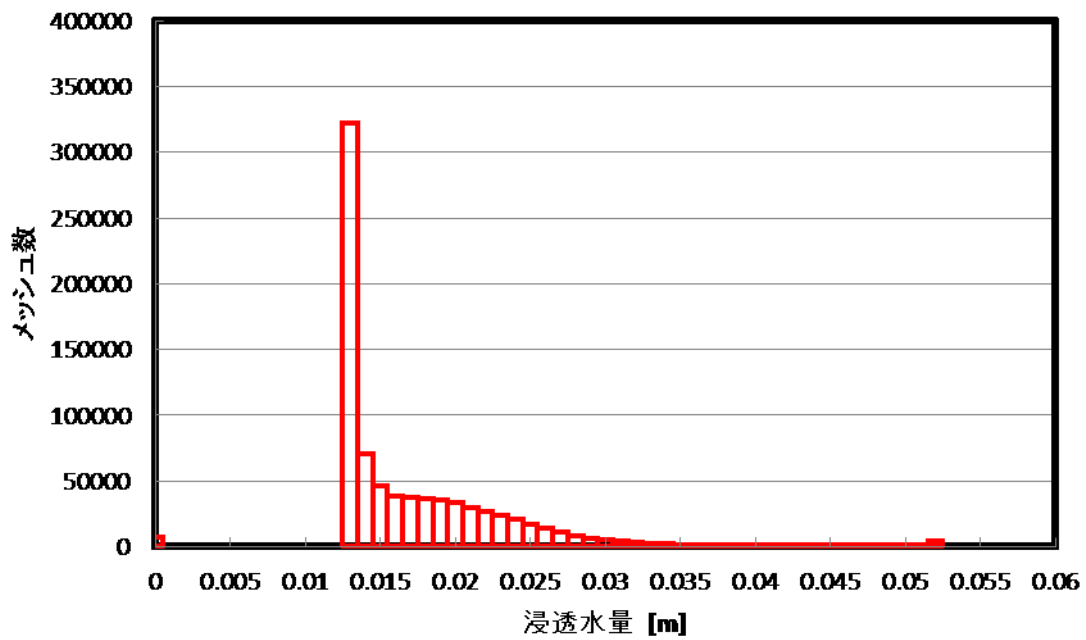


Figure A-63 植林前 草地 浸透水量 2-2-2 PR=10.0

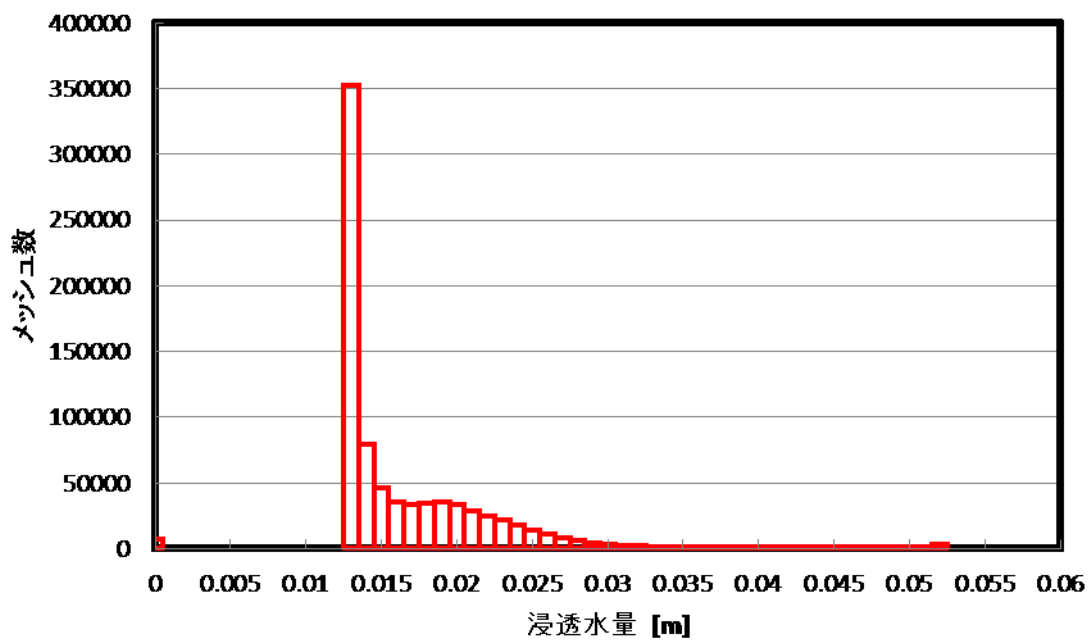


Figure A-64 植林後 草地 浸透水量 2-2-2 PR=10.0

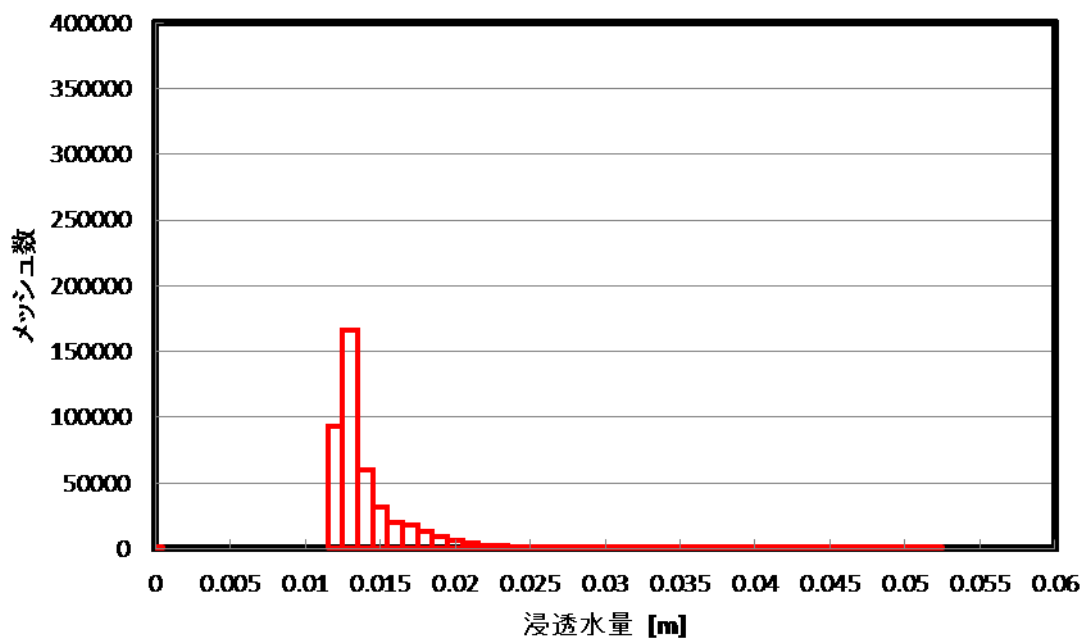


Figure A-65 植林前 森林 浸透水量 2-2-2 PR=10.0

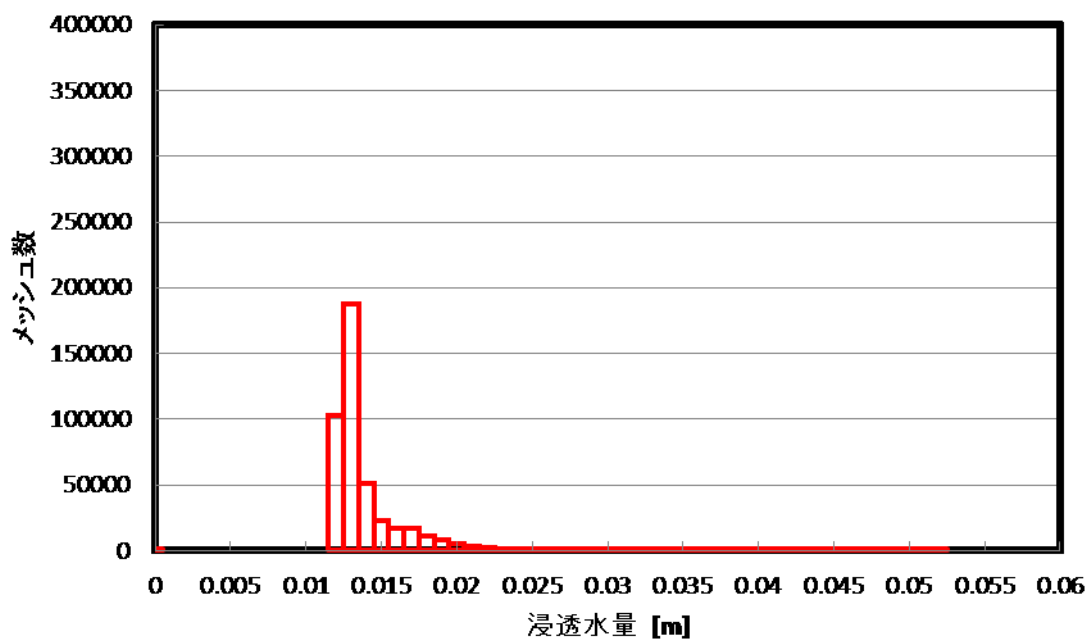


Figure A-66 植林後 森林 浸透水量 2-2-2 PR=10.0

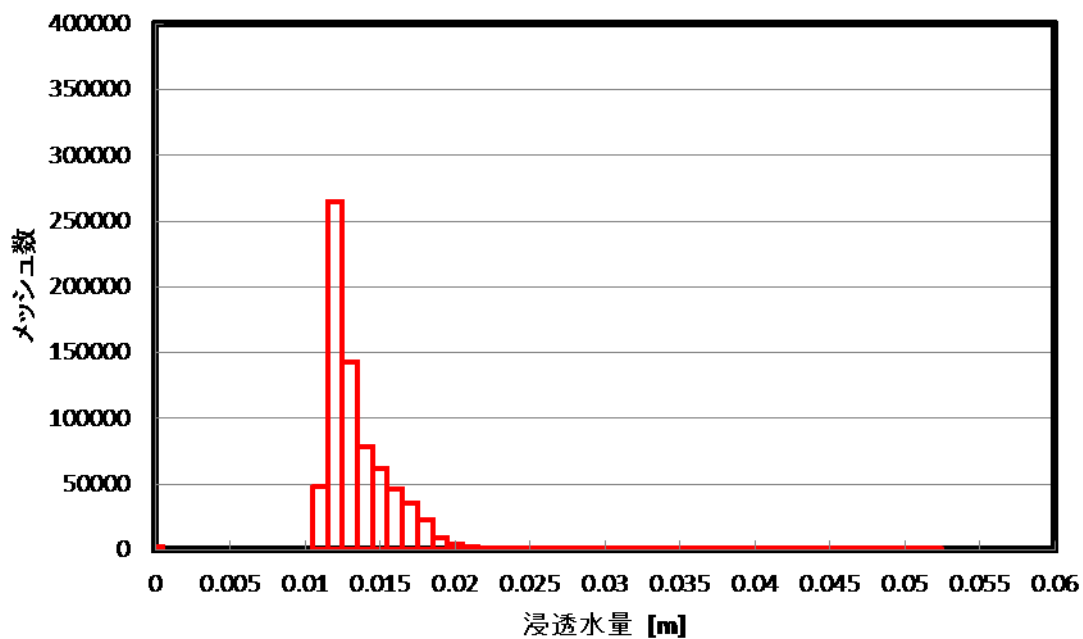


Figure A-67 植林前 裸地 浸透水量 2-2-3 PR=10.0

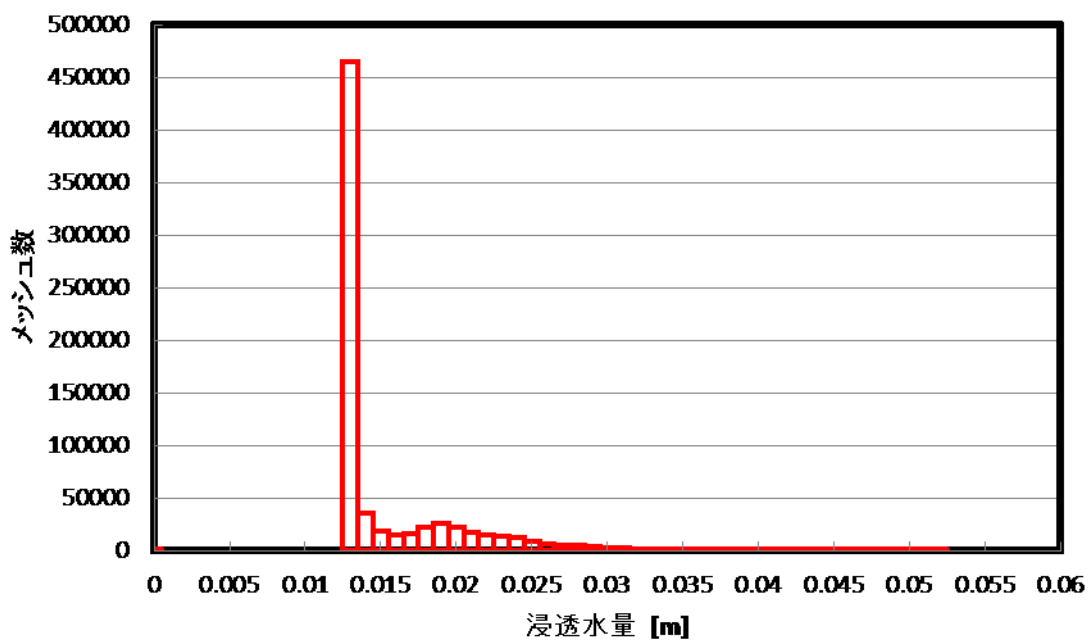


Figure A-68 植林後 裸地 浸透水量 2-2-3 PR=10.0

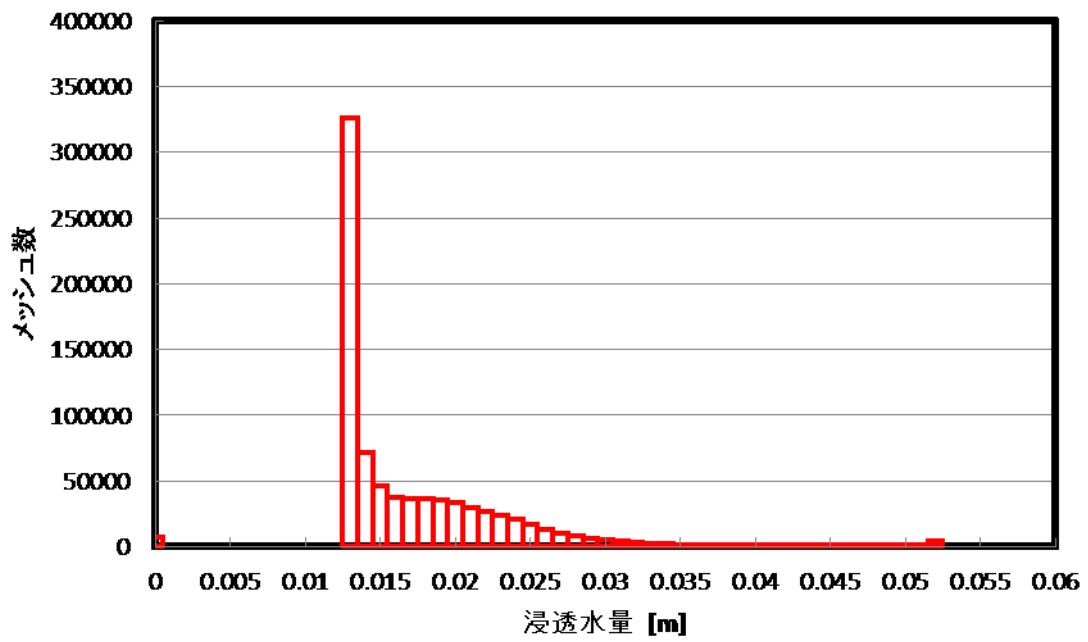


Figure A-69 植林前 草地 浸透水量 2-2-3 PR=10.0

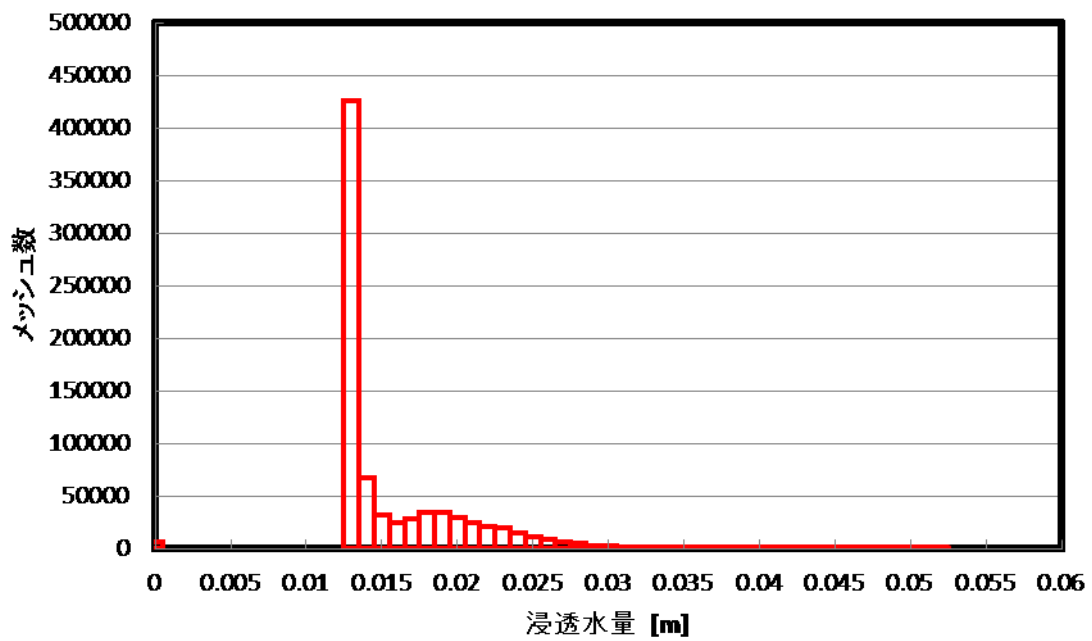


Figure A-70 植林後 草地 浸透水量 2-2-3 PR=10.0

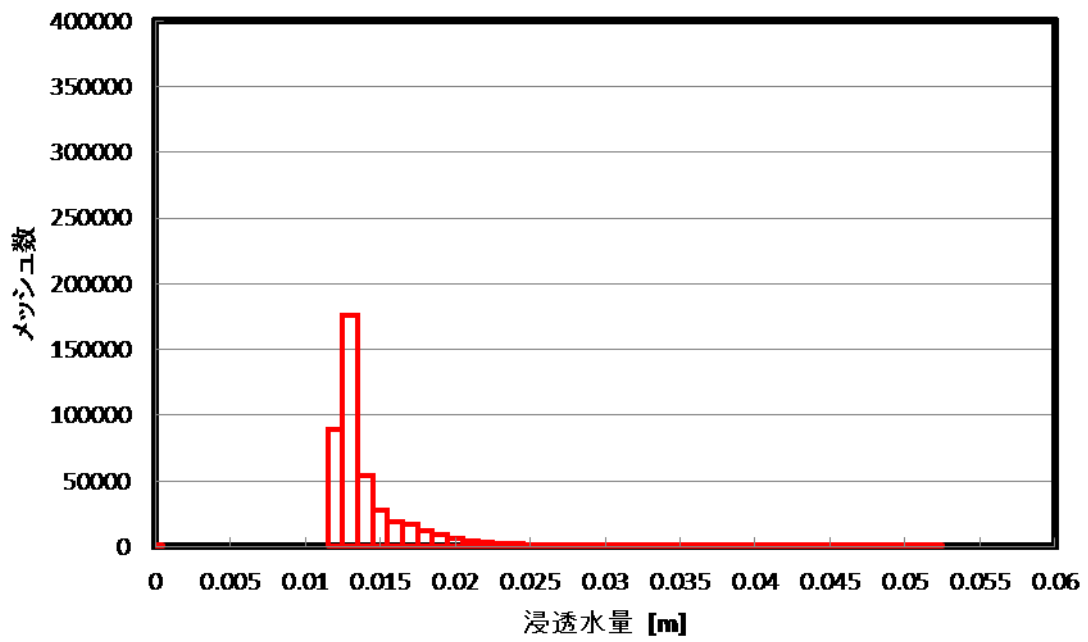


Figure A-71 植林前 森林 浸透水量 2-2-3 PR=10.0

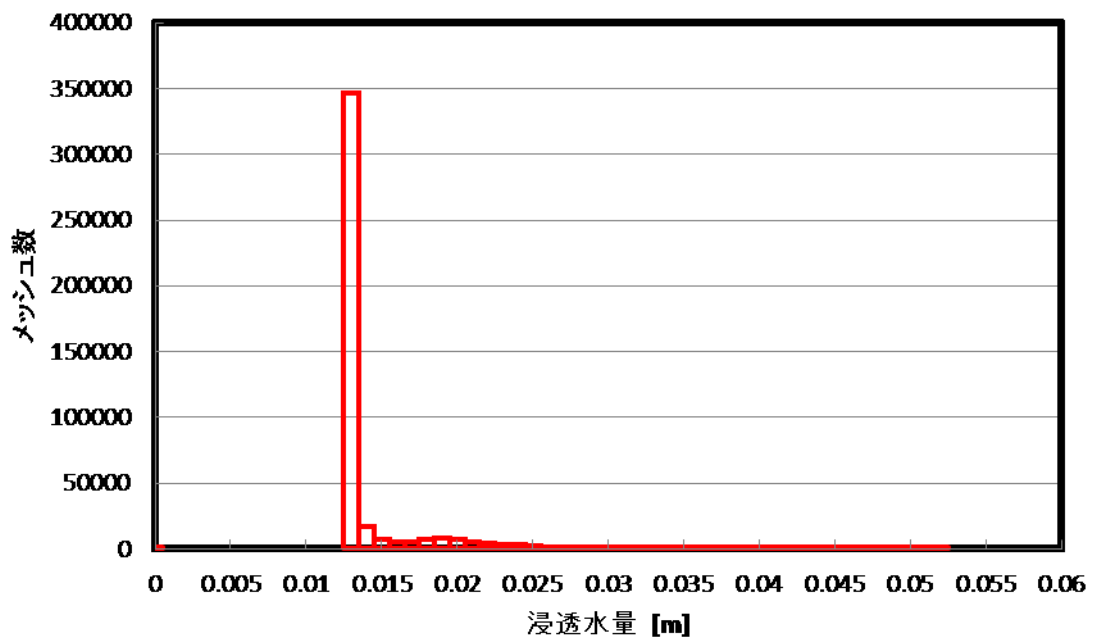


Figure A-72 植林後 森林 浸透水量 2-2-3 PR=10.0

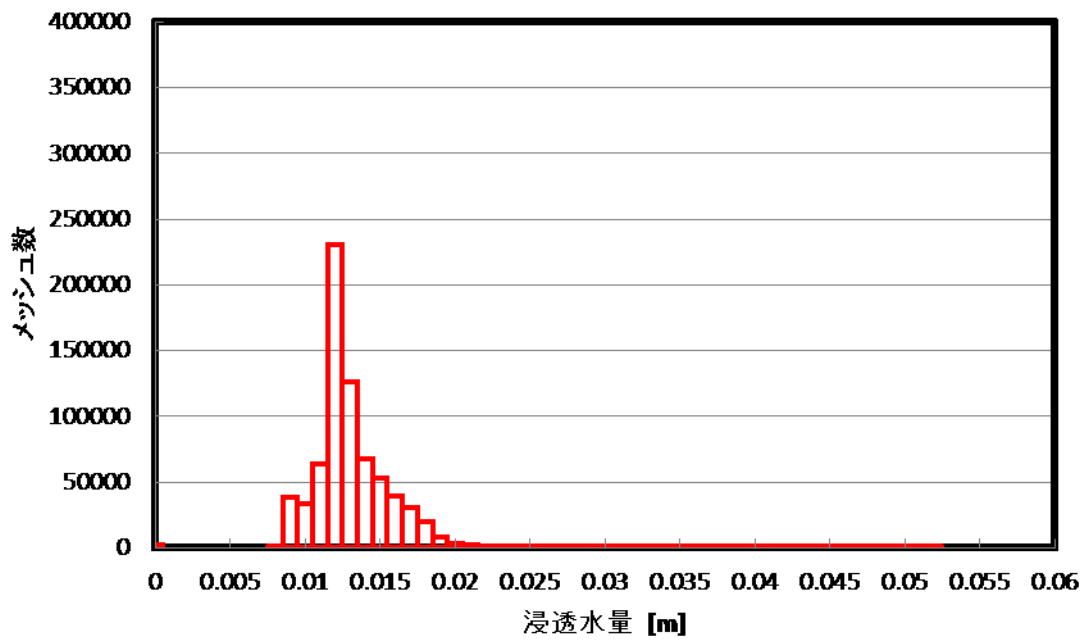


Figure A-73 植林前 裸地 浸透水量 3-1-1 PR=10.0

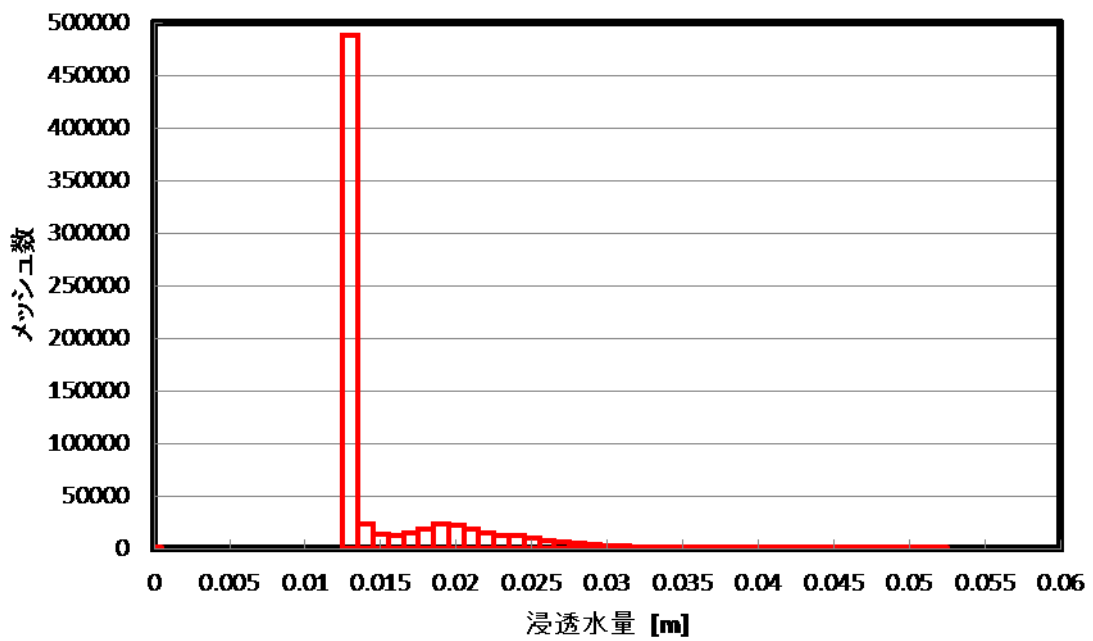


Figure A-74 植林後 裸地 浸透水量 3-1-1 PR=10.0

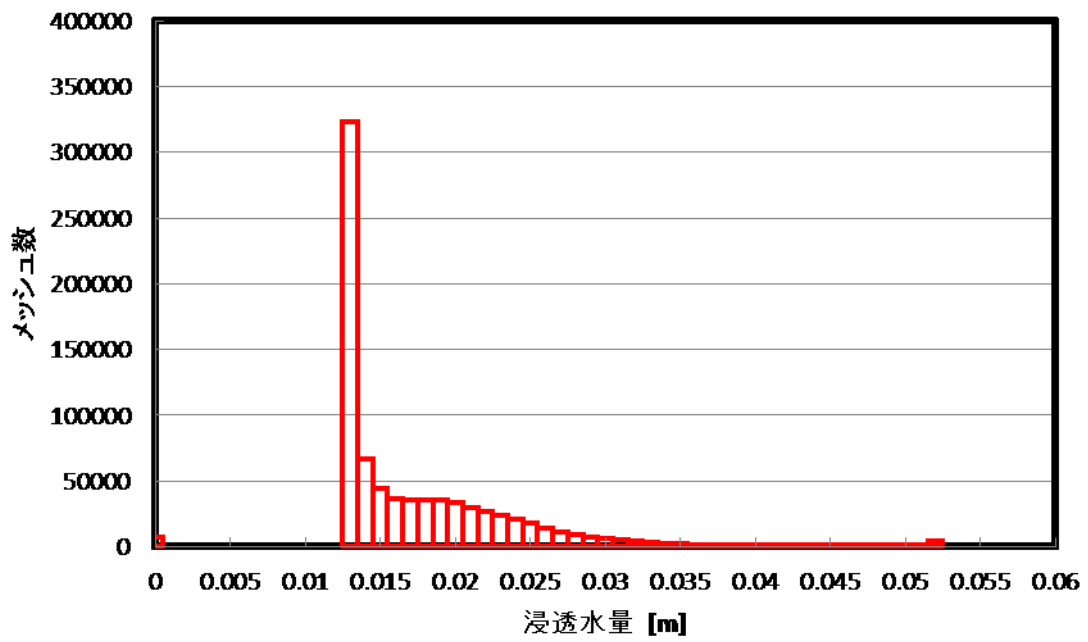


Figure A-75 植林前 草地 浸透水量 3-1-1 PR=10.0

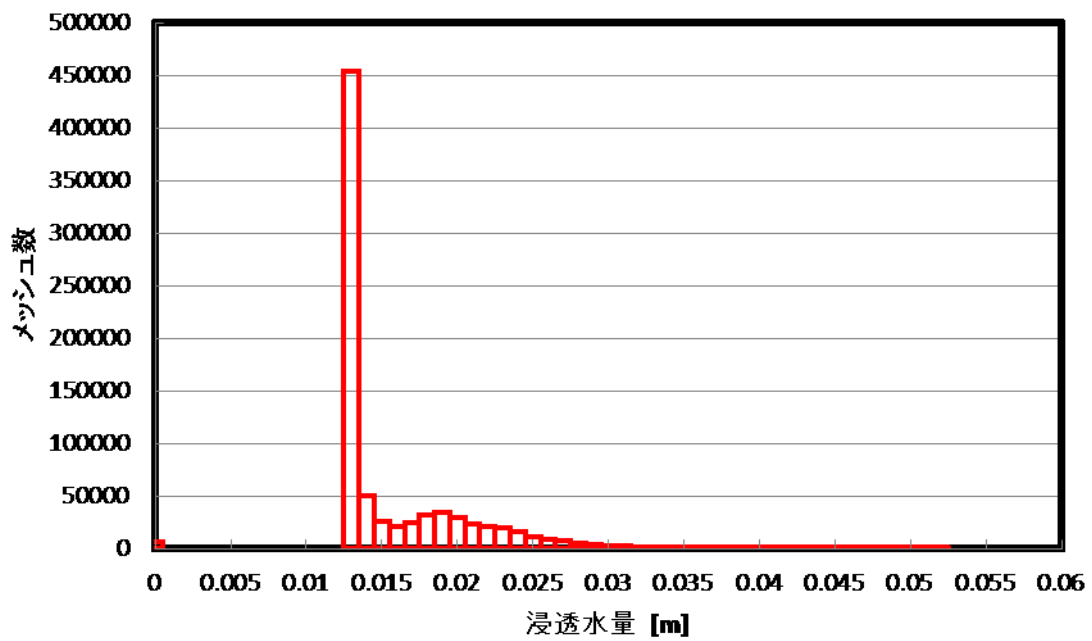


Figure A-76 植林後 草地 浸透水量 3-1-1 PR=10.0

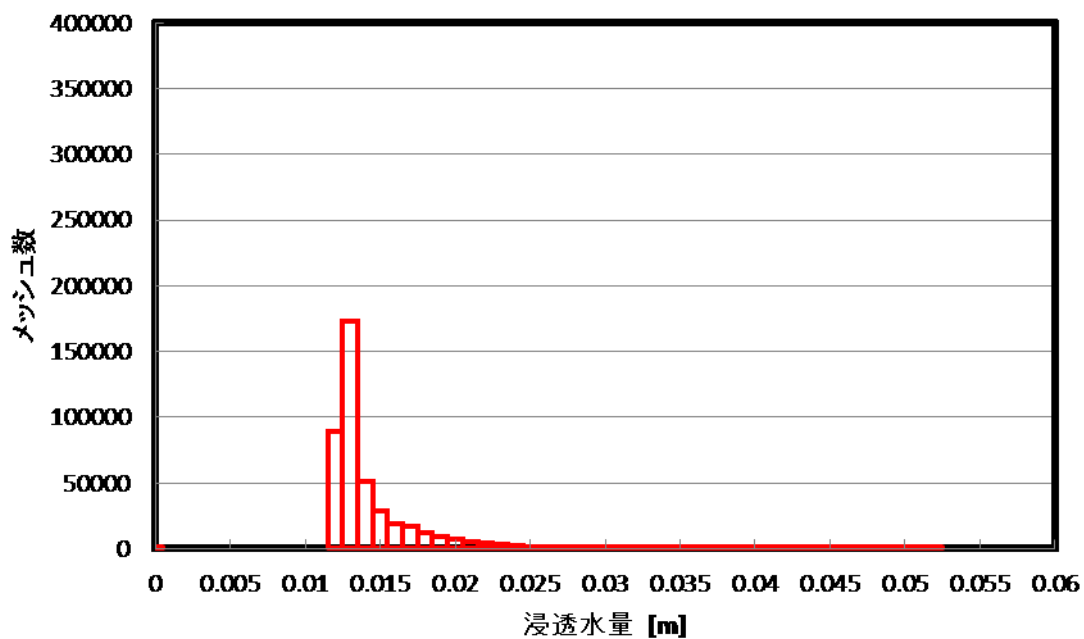


Figure A-77 植林前 森林 浸透水量 3-1-1 PR=10.0

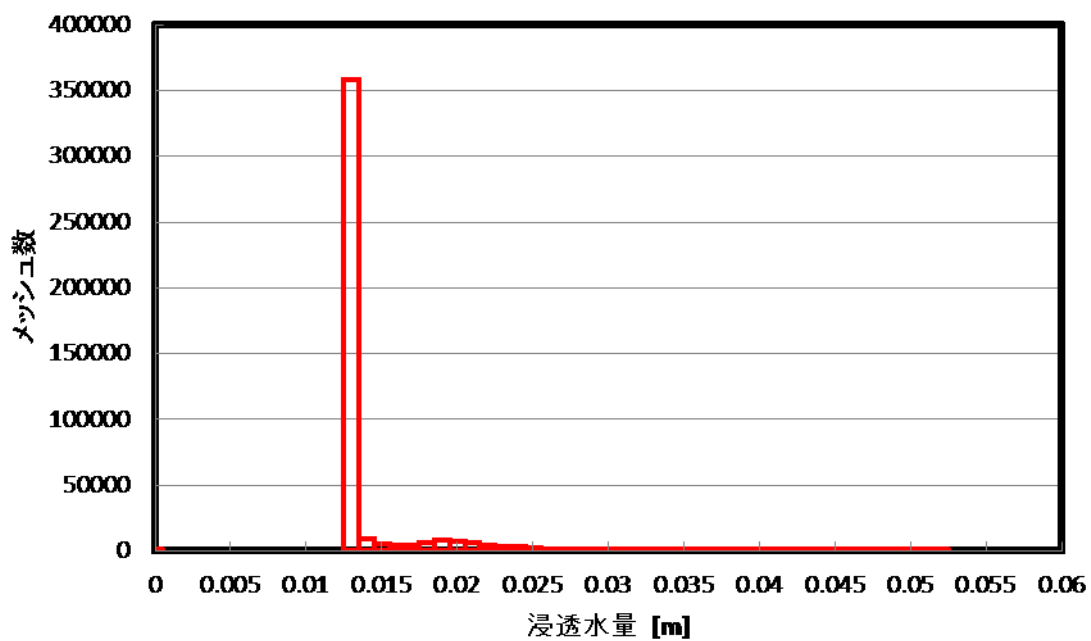


Figure A-78 植林後 森林 浸透水量 3-1-1 PR=10.0

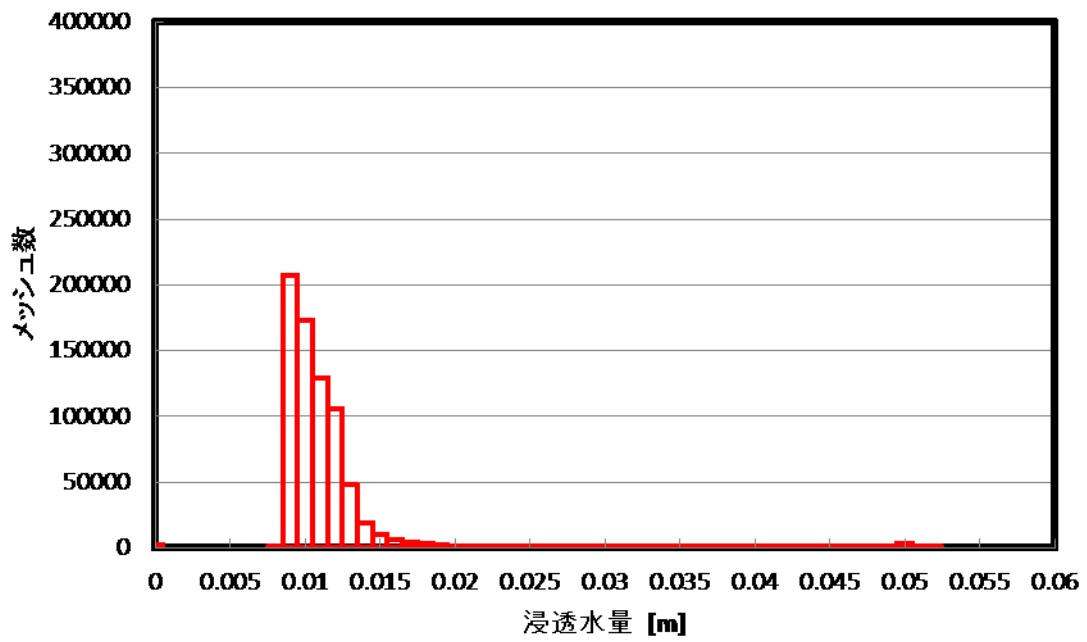


Figure A-79 植林前 裸地 浸透水量 3-1-2 $PR=10.0$

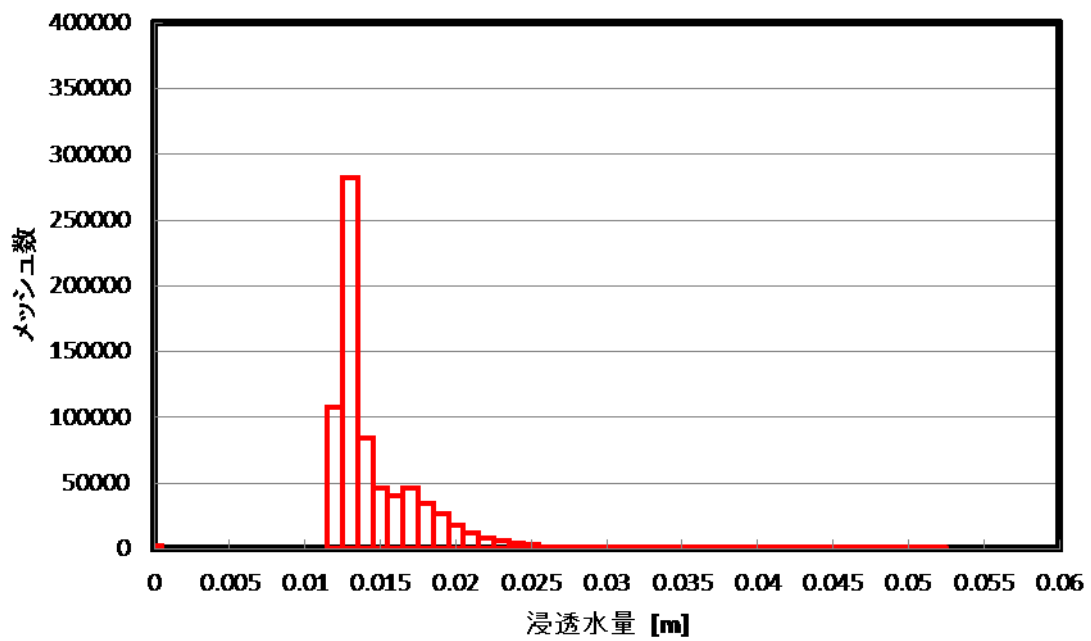


Figure A-80 植林後 裸地 浸透水量 3-1-2 $PR=10.0$

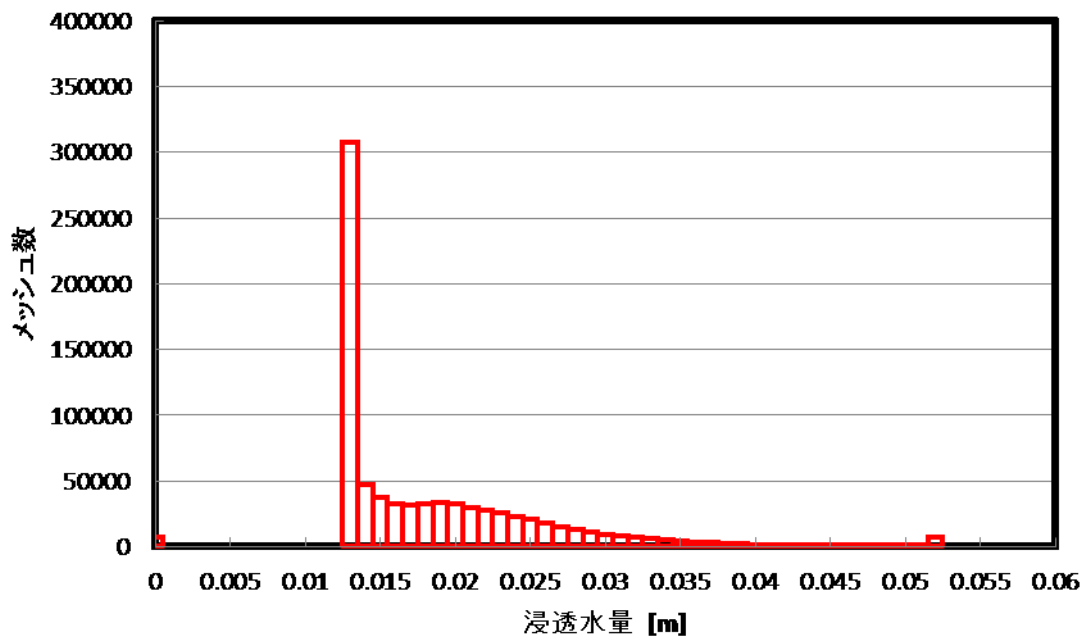


Figure A-81 植林前 草地 浸透水量 3-1-2 $PR=10.0$

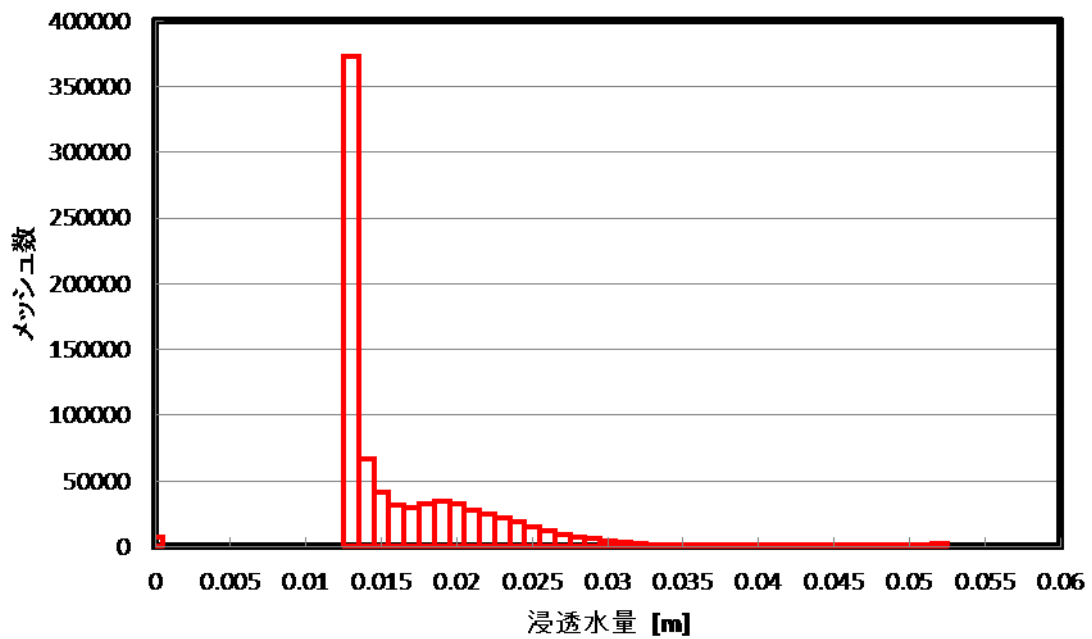


Figure A-82 植林後 草地 浸透水量 3-1-2 $PR=10.0$

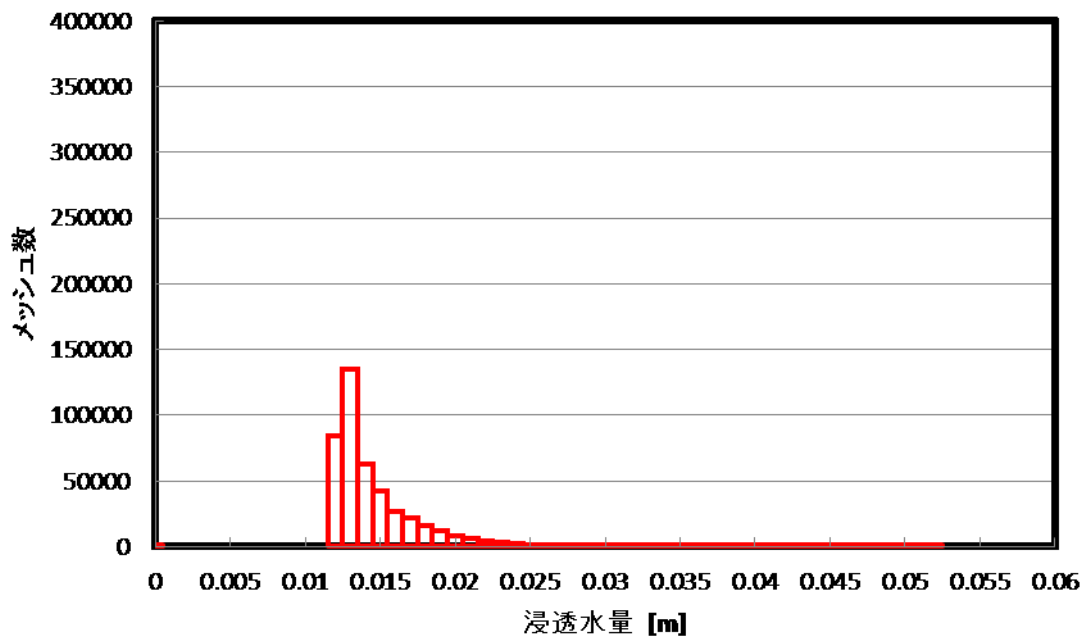


Figure A-83 植林前 森林 浸透水量 3-1-2 PR=10.0

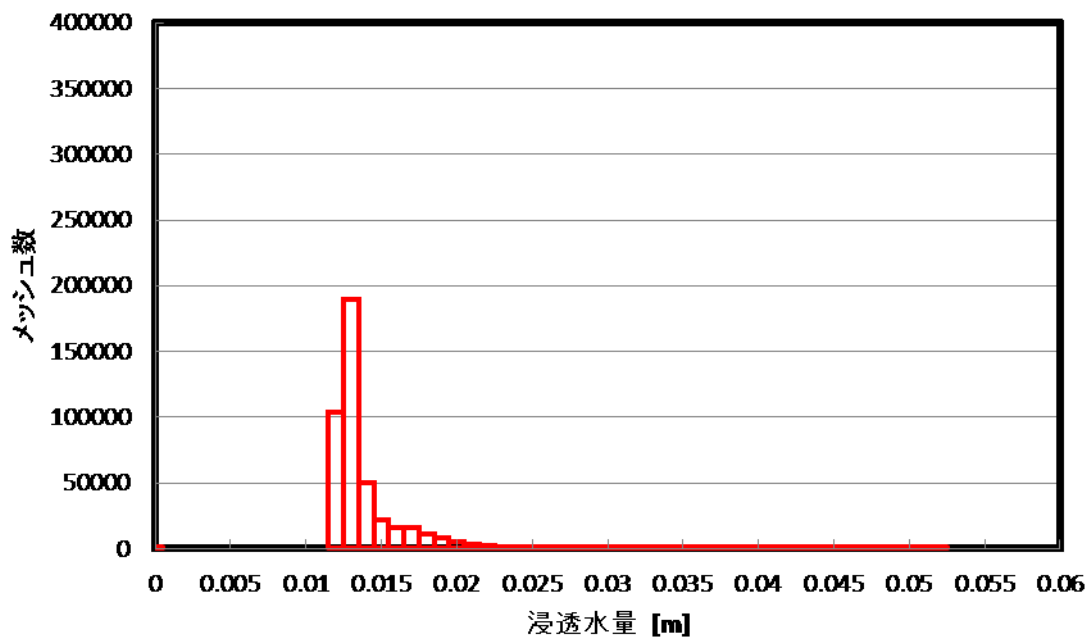


Figure A-84 植林後 森林 浸透水量 3-1-2 PR=10.0

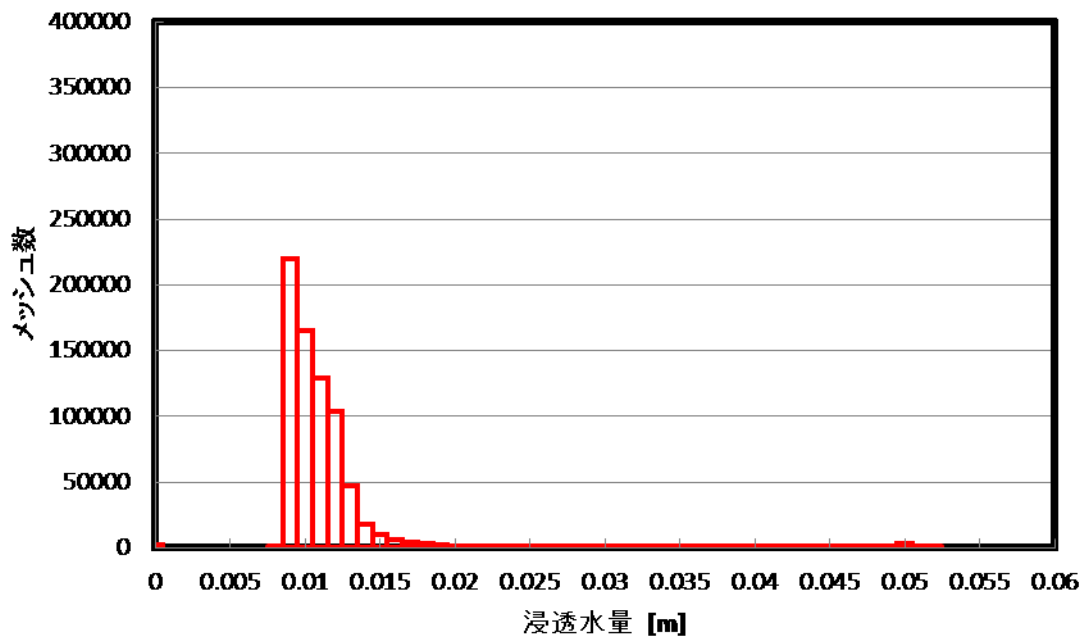


Figure A-85 植林前 裸地 浸透水量 3-1-3 $PR=10.0$

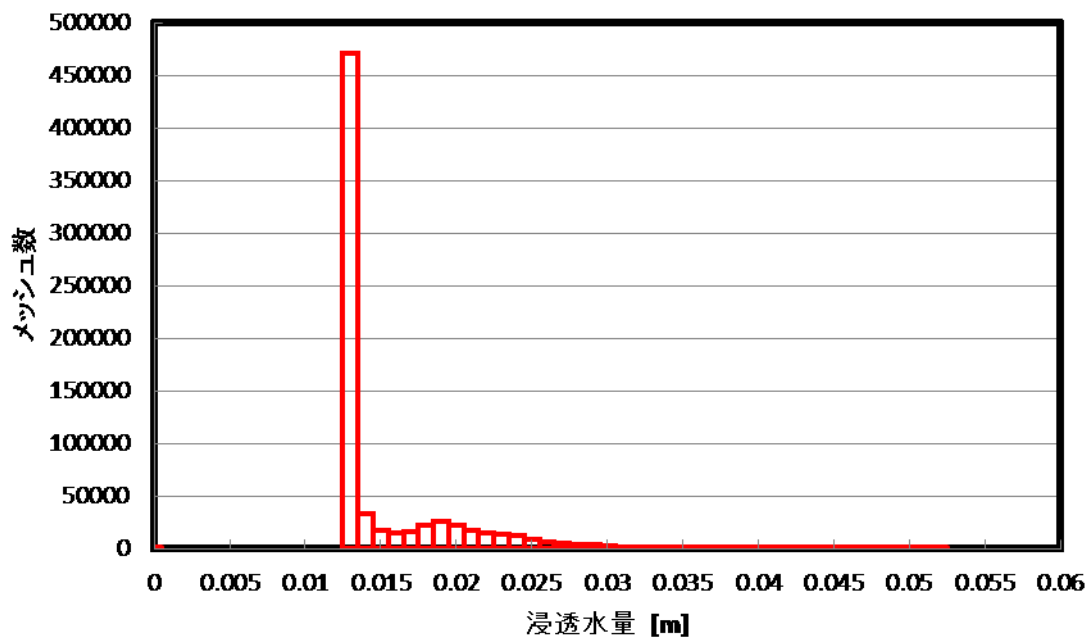


Figure A-86 植林後 裸地 浸透水量 3-1-3 $PR=10.0$

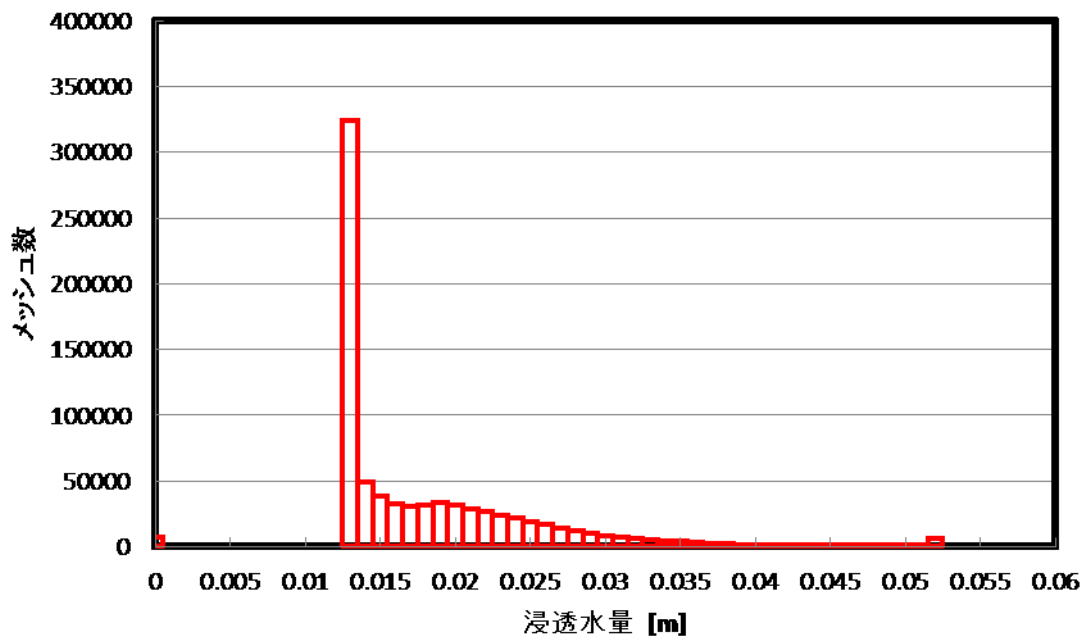


Figure A-87 植林前 草地 浸透水量 3-1-3 PR=10.0

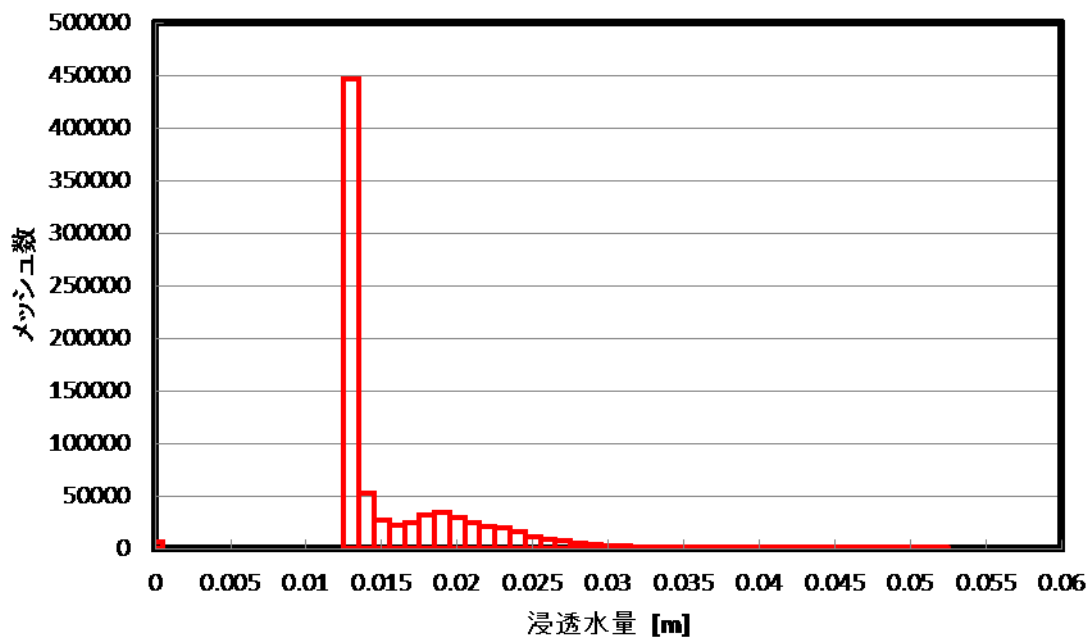


Figure A-88 植林後 草地 浸透水量 3-1-3 PR=10.0

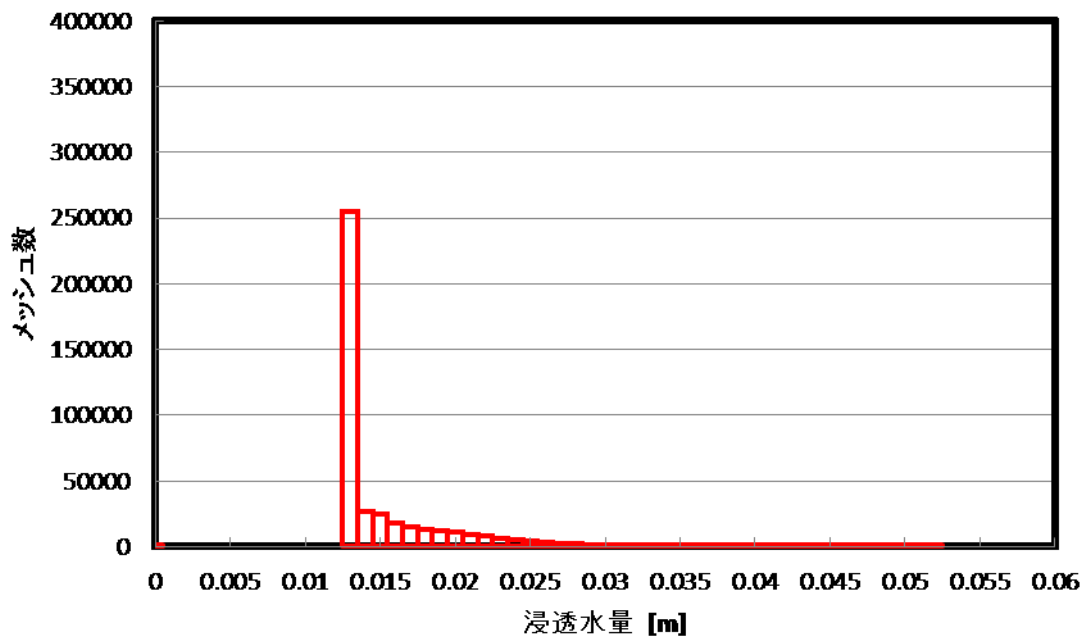


Figure A-89 植林前 森林 浸透水量 3-1-3 PR=10.0

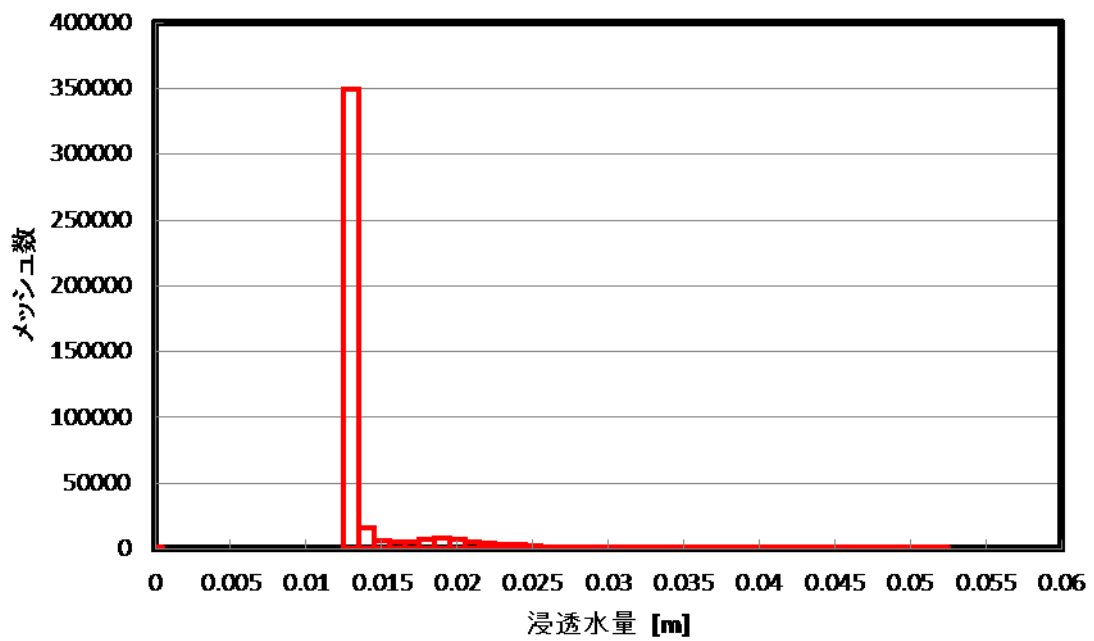


Figure A-90 植林後 森林 浸透水量 3-1-3 PR=10.0

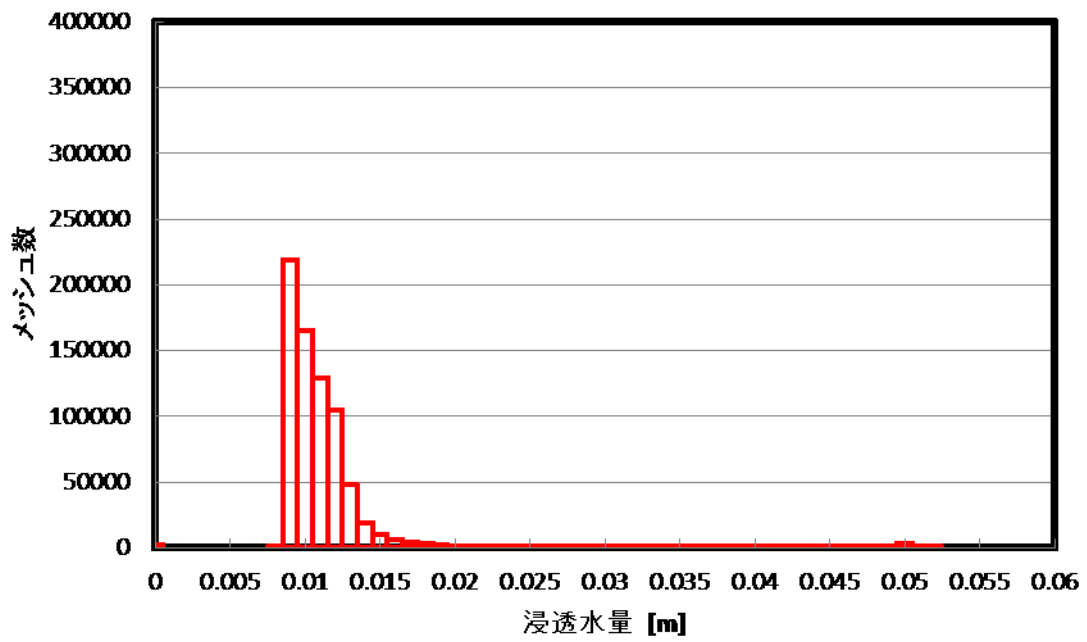


Figure A-91 植林前 裸地 浸透水量 3-2-1 $PR=10.0$

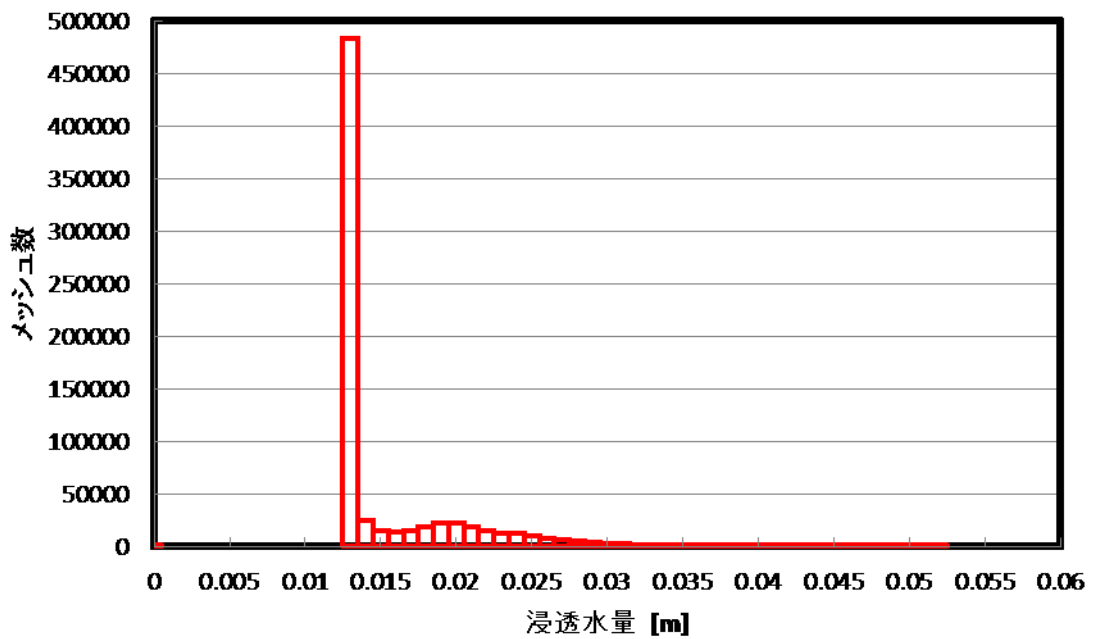


Figure A-92 植林後 裸地 浸透水量 3-2-1 $PR=10.0$

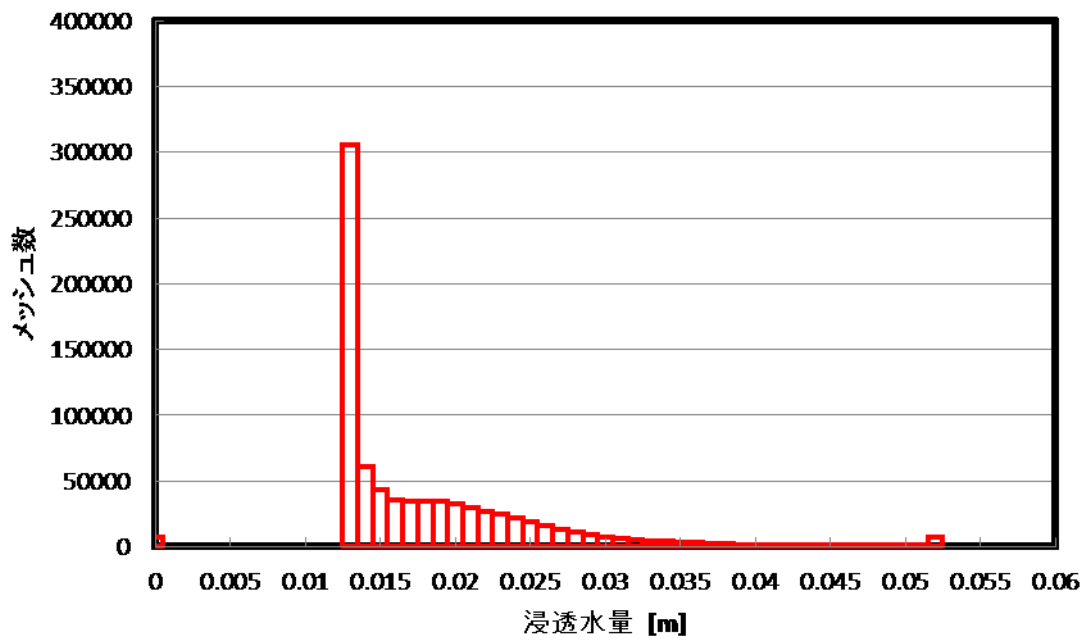


Figure A-93 植林前 草地 浸透水量 3-2-1 PR=10.0

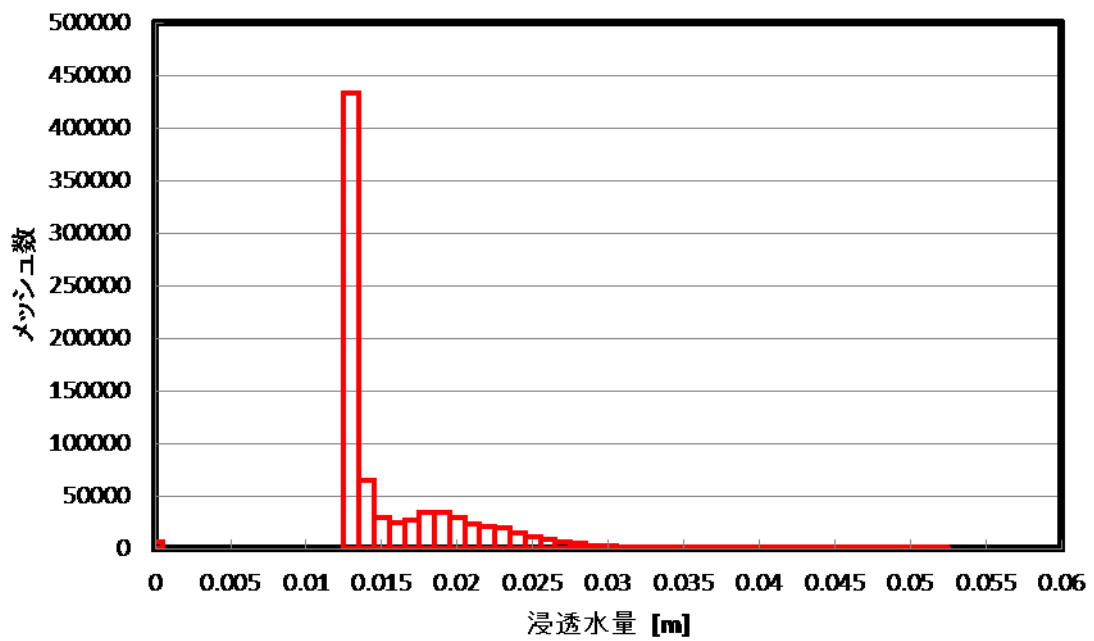


Figure A-94 植林後 草地 浸透水量 3-2-1 PR=10.0

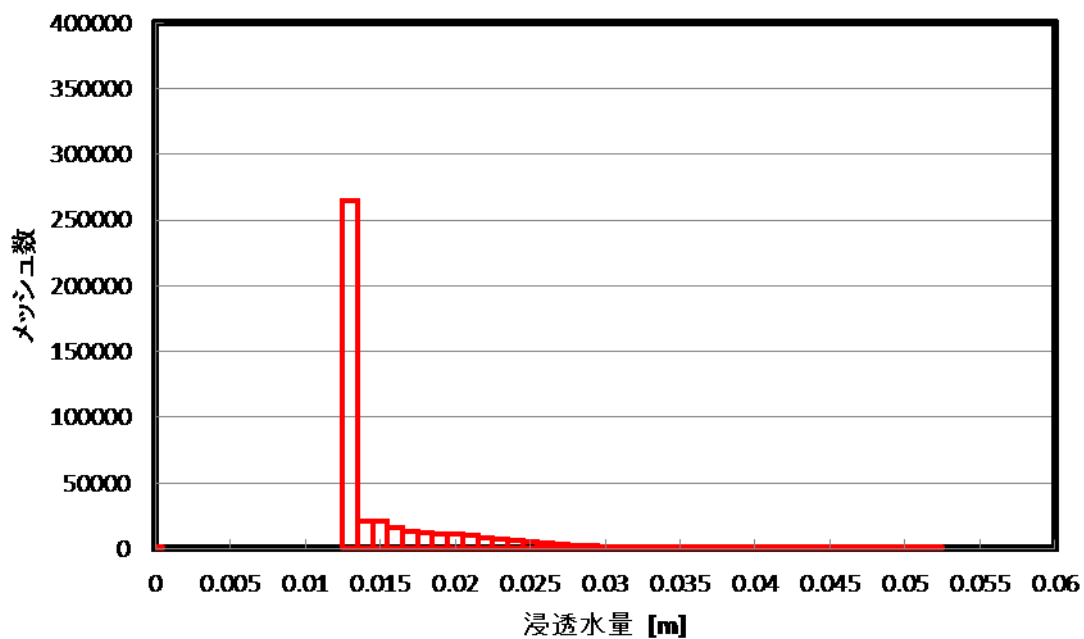


Figure A-95 植林前 森林 浸透水量 3-2-1 $PR=10.0$

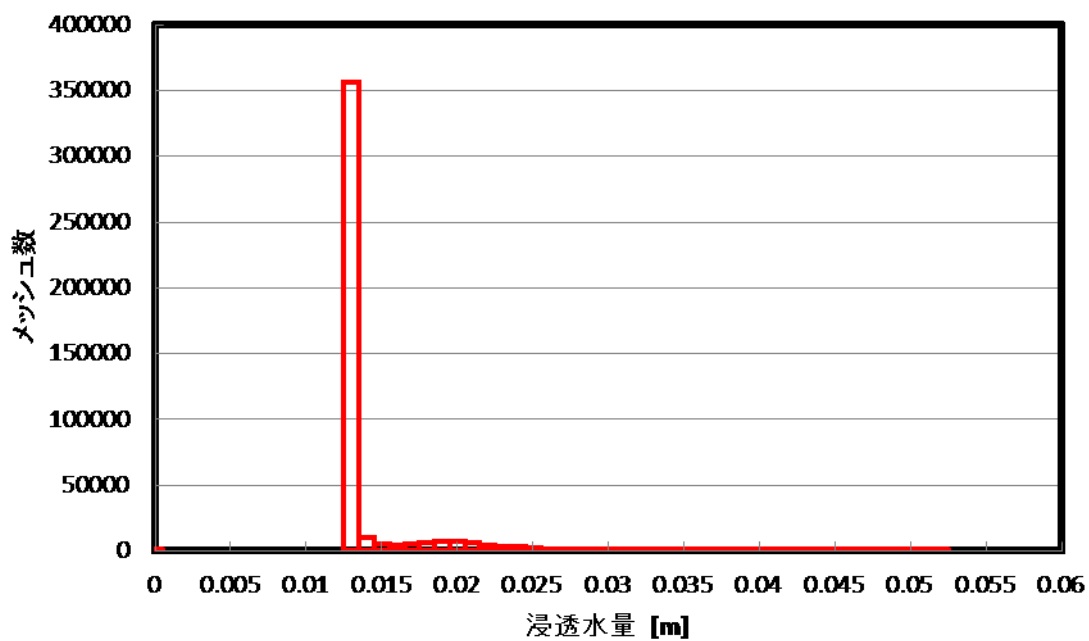


Figure A-96 植林後 森林 浸透水量 3-2-1 $PR=10.0$

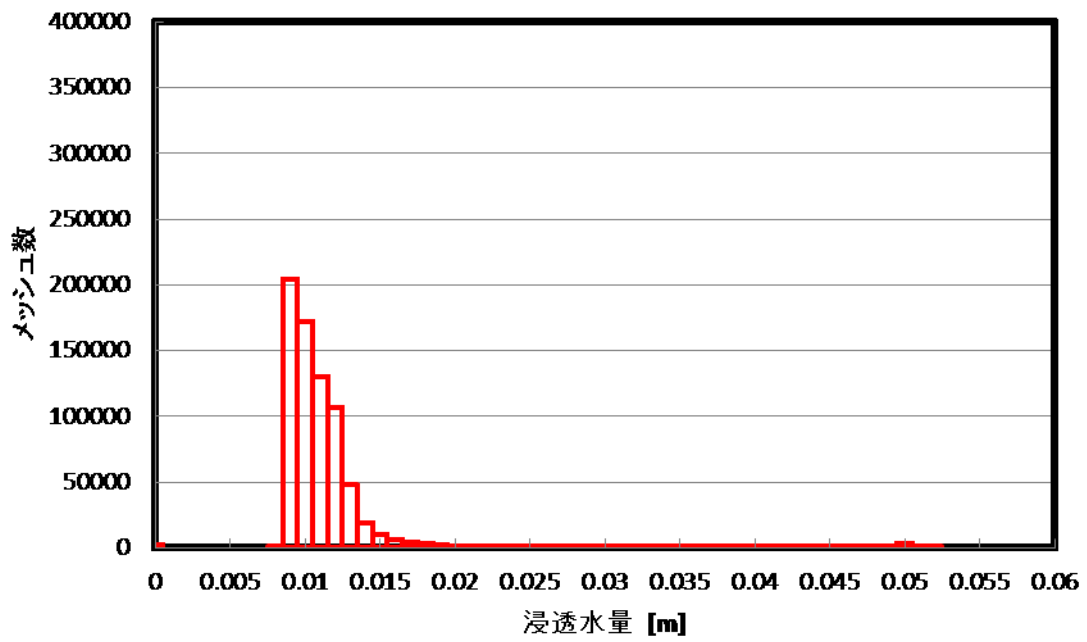


Figure A-97 植林前 裸地 浸透水量 3-2-2 PR=10.0

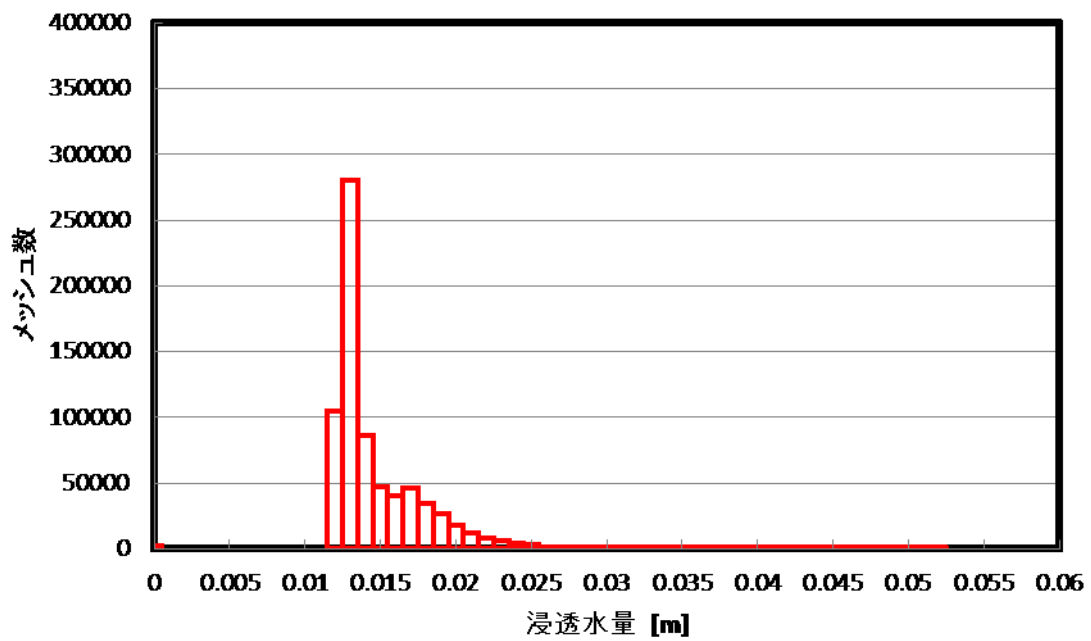


Figure A-98 植林後 裸地 浸透水量 3-2-2 PR=10.0

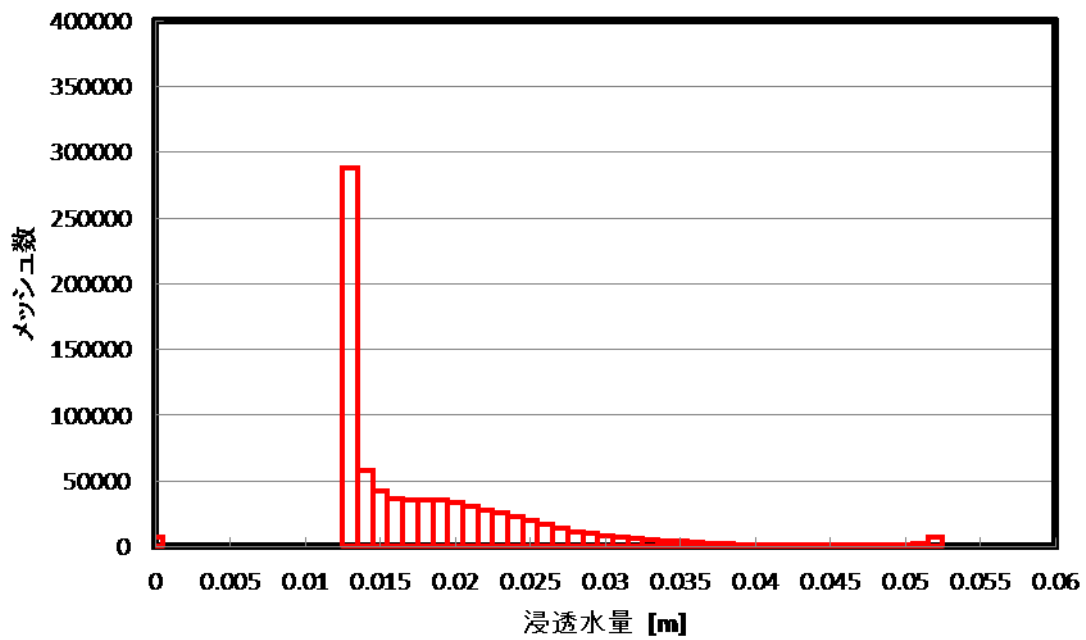


Figure A-99 植林前 草地 浸透水量 3-2-2 PR=10.0

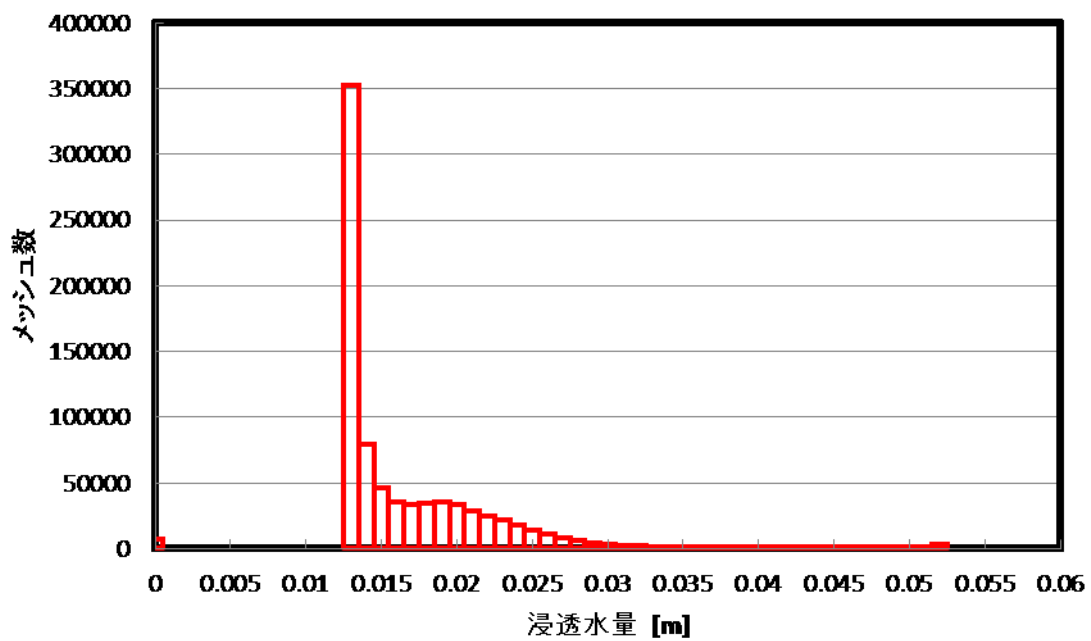


Figure A-100 植林後 草地 浸透水量 3-2-2 PR=10.0

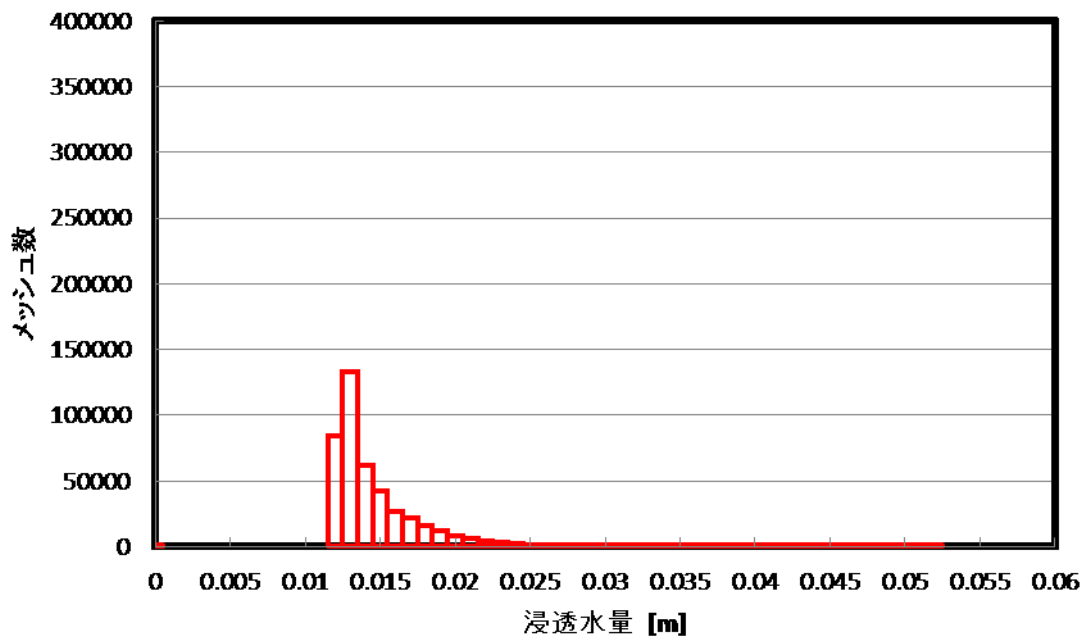


Figure A-101 植林前 森林 浸透水量 3-2-2 PR=10.0

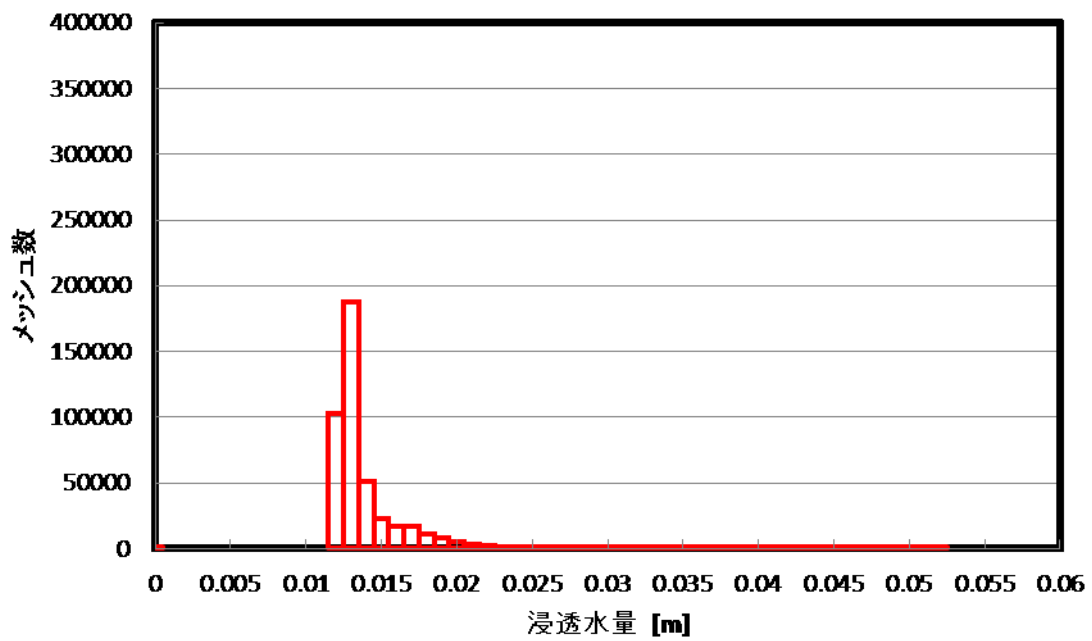


Figure A-102 植林後 森林 浸透水量 3-2-2 PR=10.0

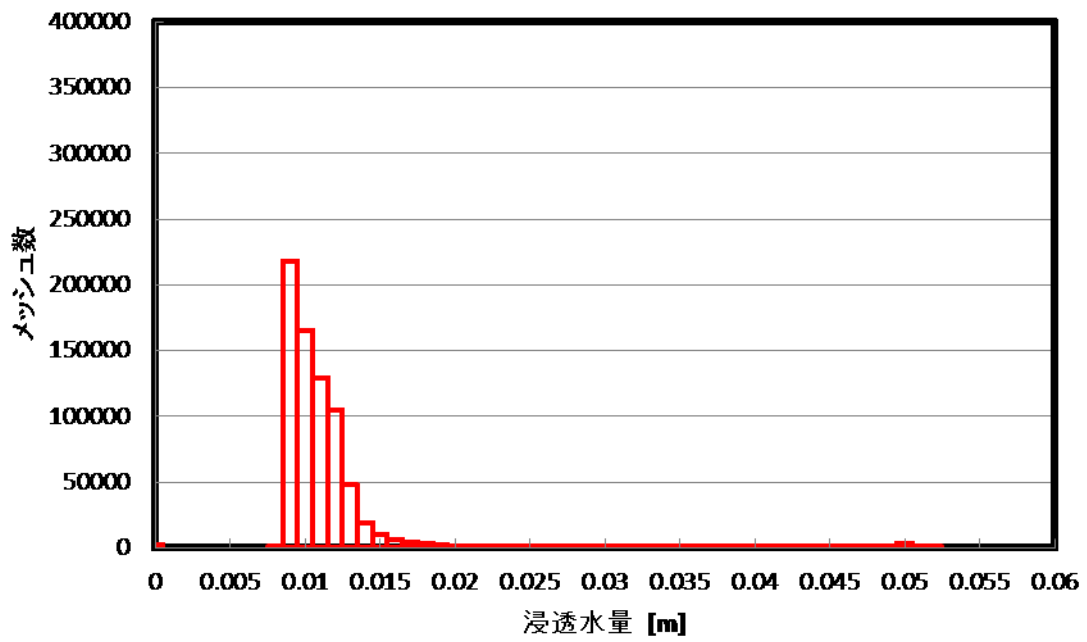


Figure A-103 植林前 裸地 浸透水量 3-2-3 PR=10.0

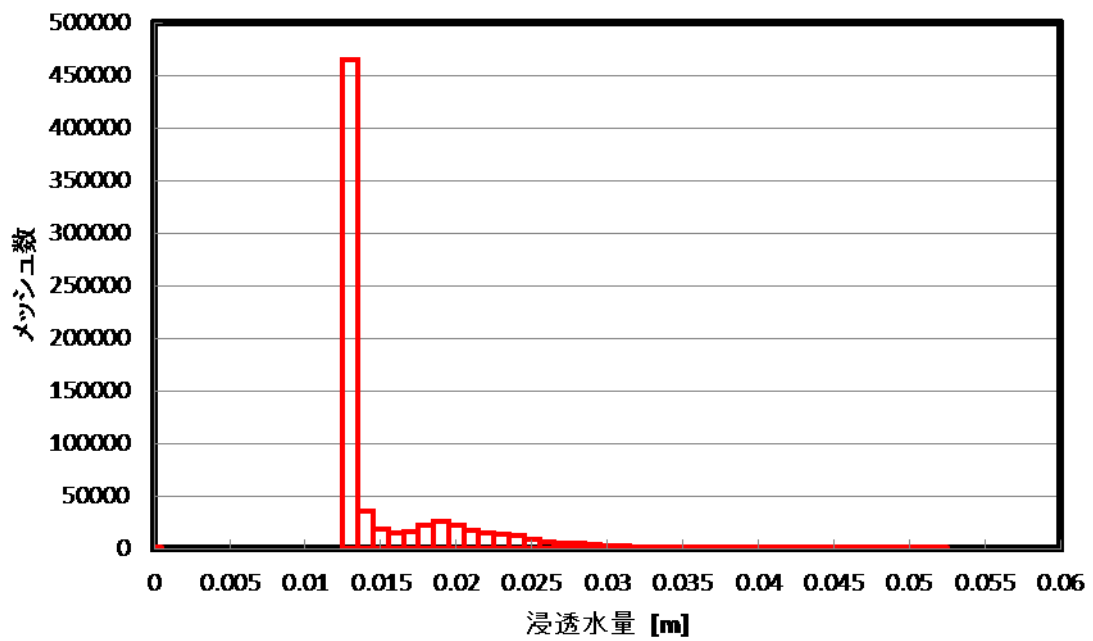


Figure A-104 植林後 裸地 浸透水量 3-2-3 PR=10.0

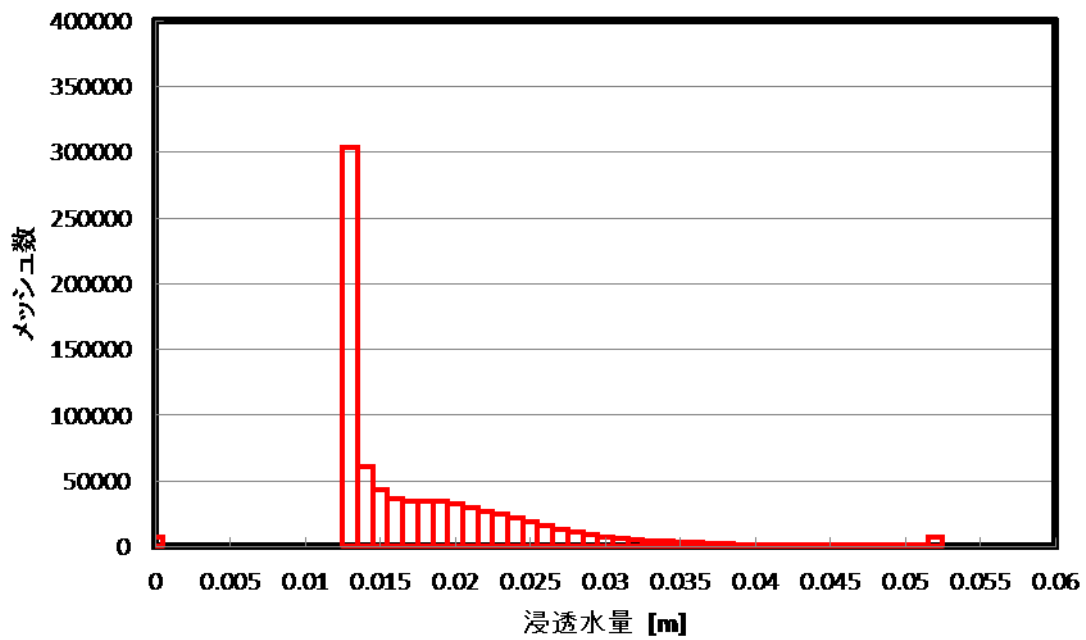


Figure A-105 植林前 草地 浸透水量 3-2-3 PR=10.0

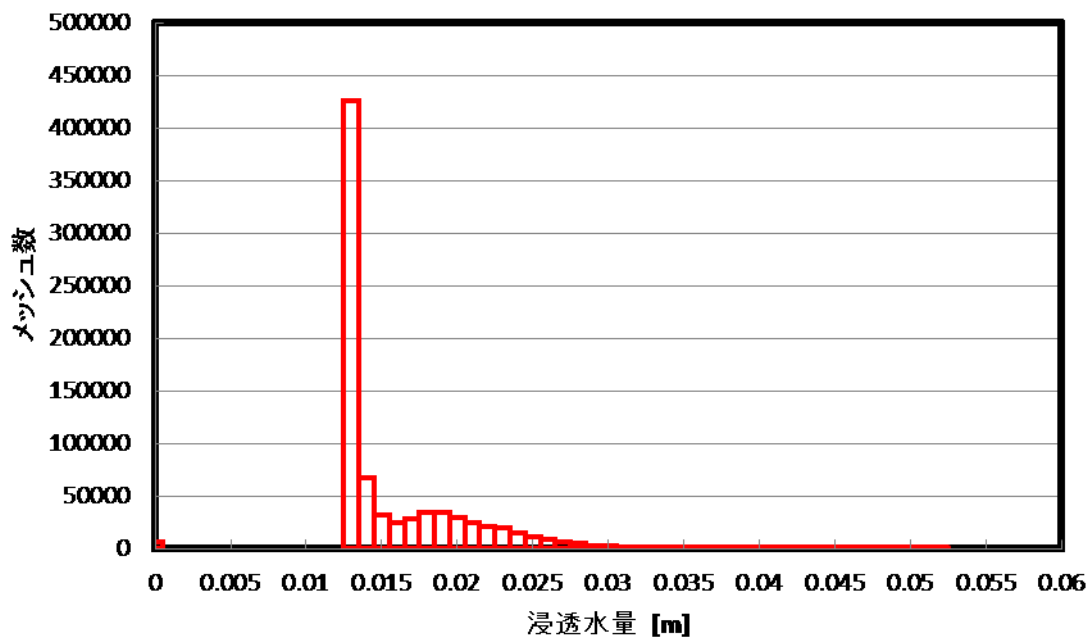


Figure A-106 植林後 草地 浸透水量 3-2-3 PR=10.0

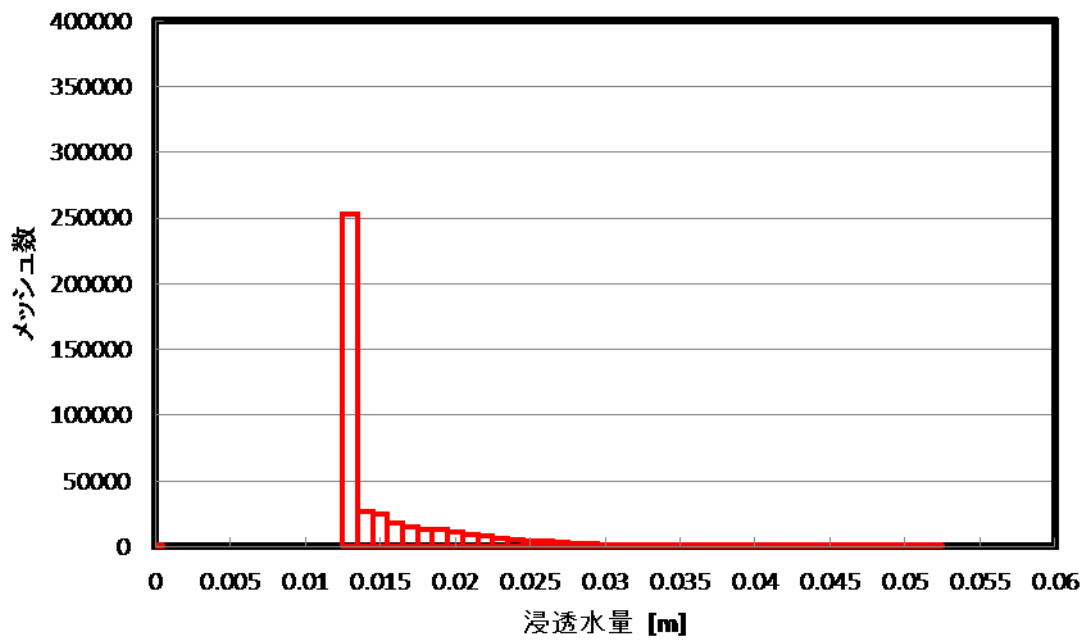


Figure A-107 植林前 森林 浸透水量 3-2-3 PR=10.0

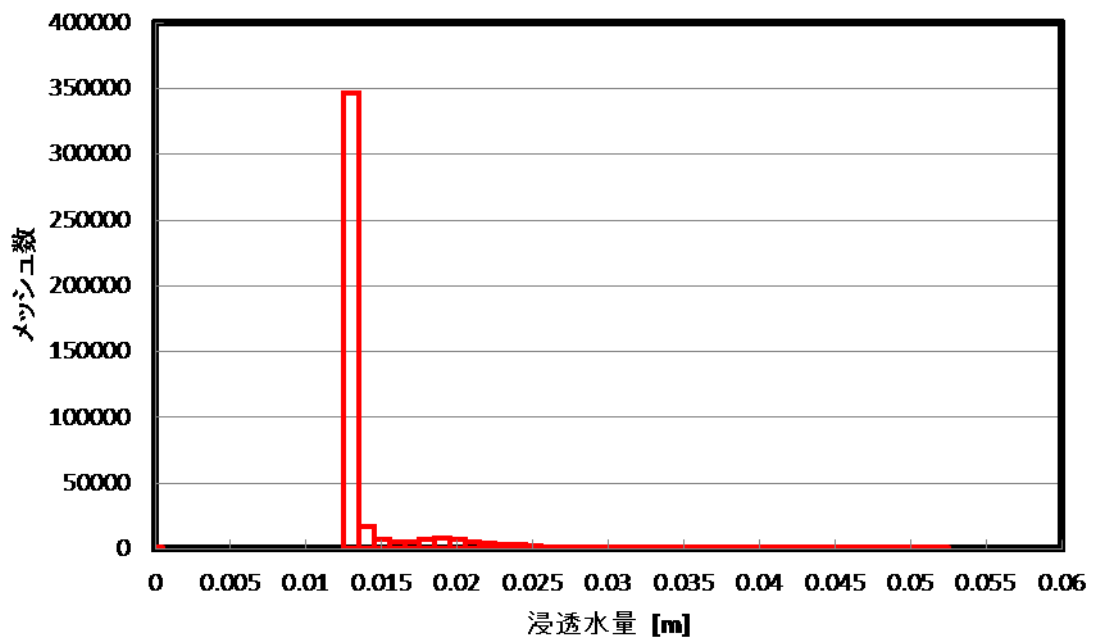


Figure A-108 植林後 森林 浸透水量 3-2-3 PR=10.0

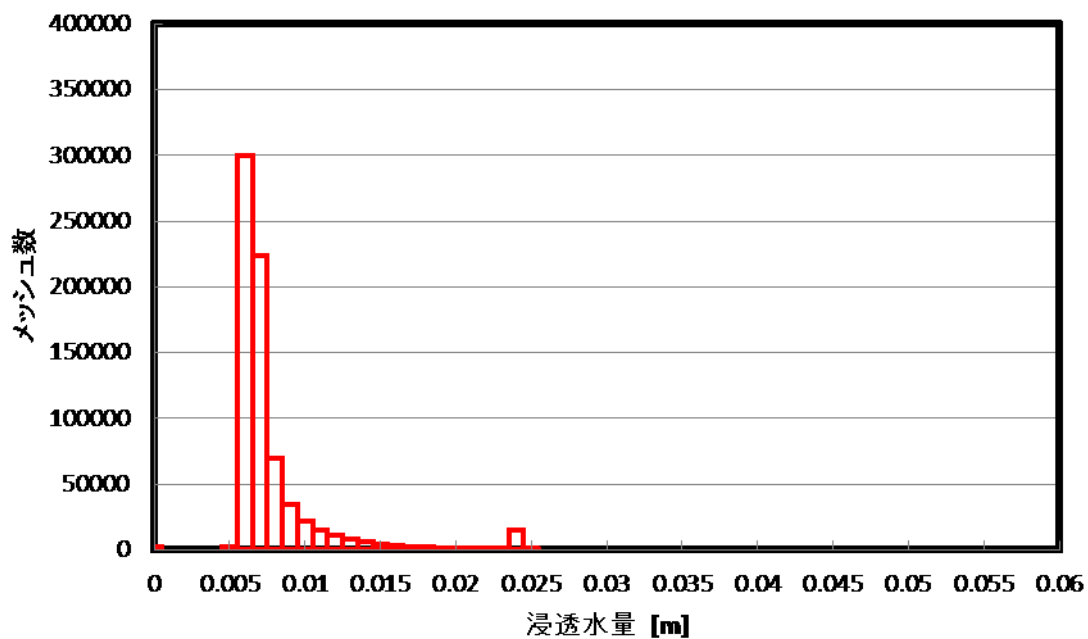


Figure A-109 植林前 裸地 浸透水量 1-1-1 PR=20.0

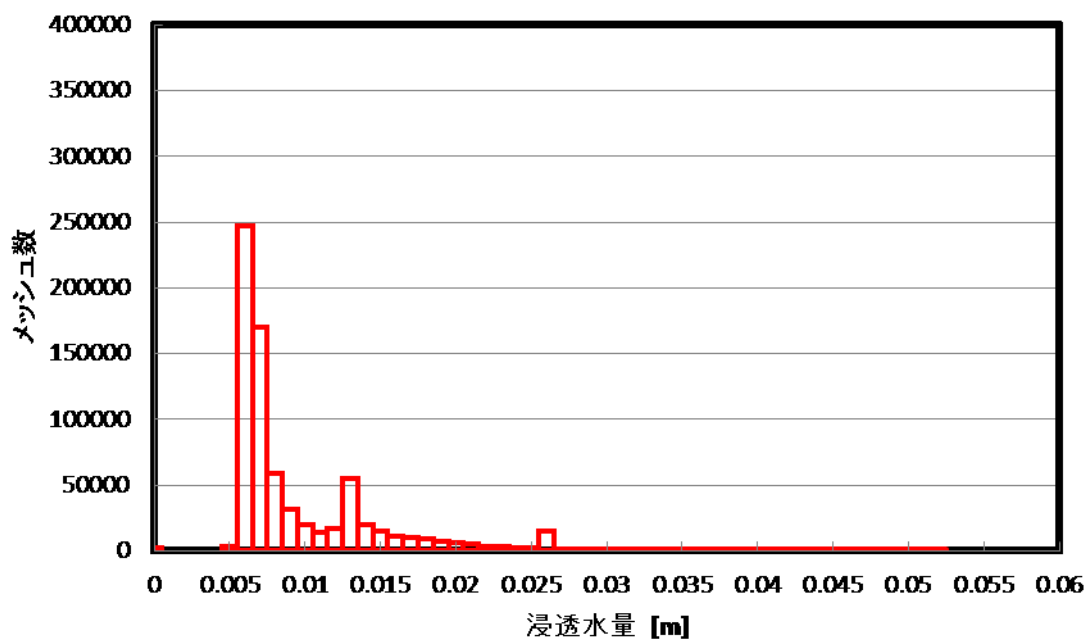


Figure A-110 植林後 裸地 浸透水量 1-1-1 PR=20.0

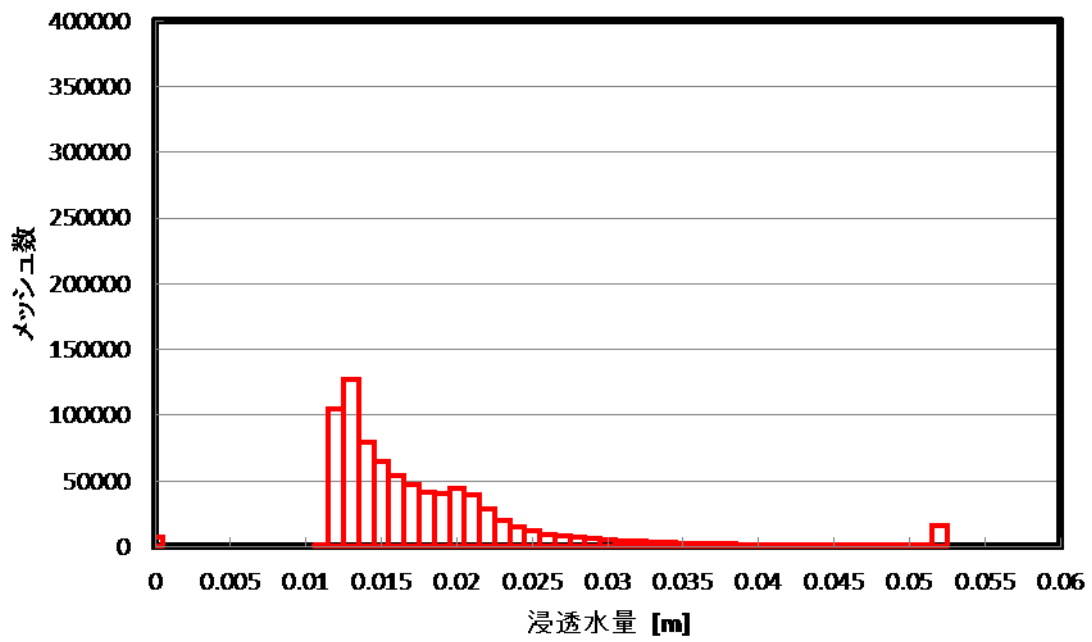


Figure A-111 植林前 草地 浸透水量 1-1-1 $PR=20.0$

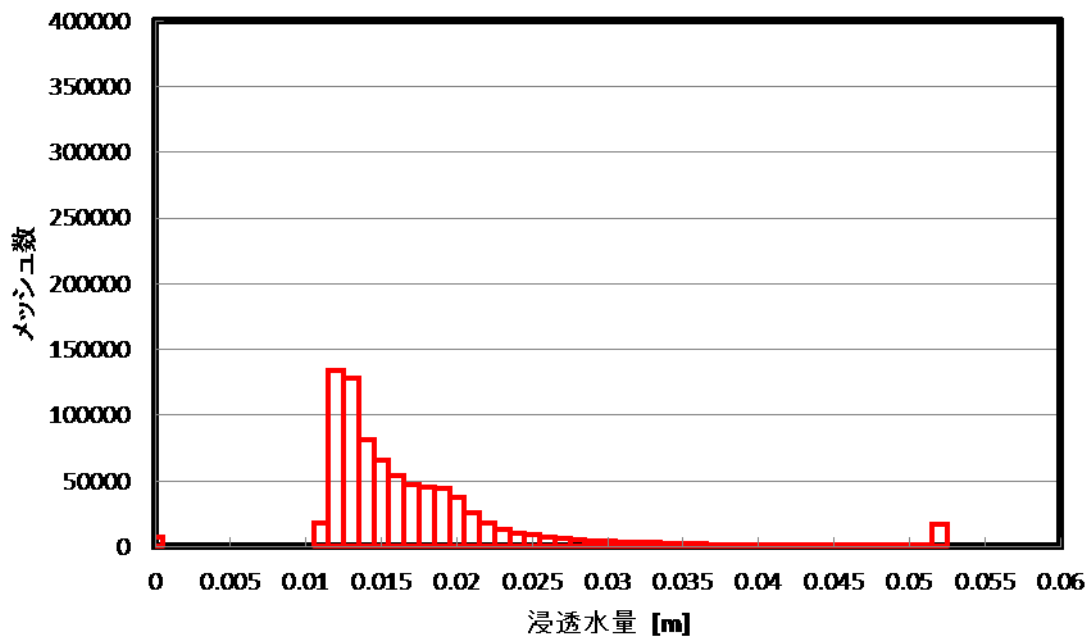


Figure A-112 植林後 草地 浸透水量 1-1-1 $PR=20.0$

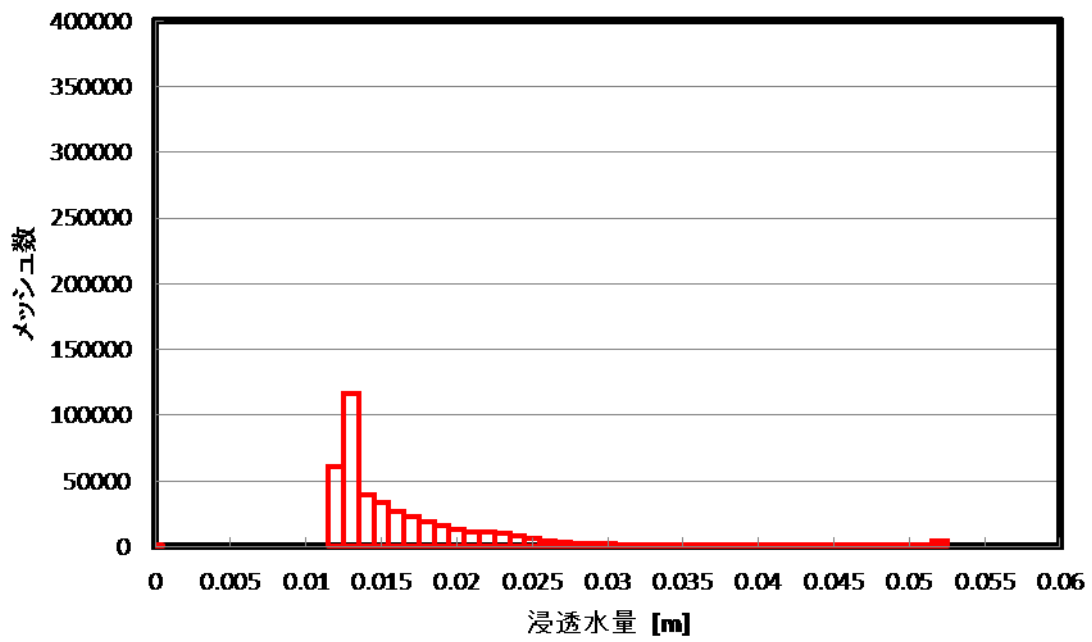


Figure A-113 植林前 森林 浸透水量 1-1-1 $PR=20.0$

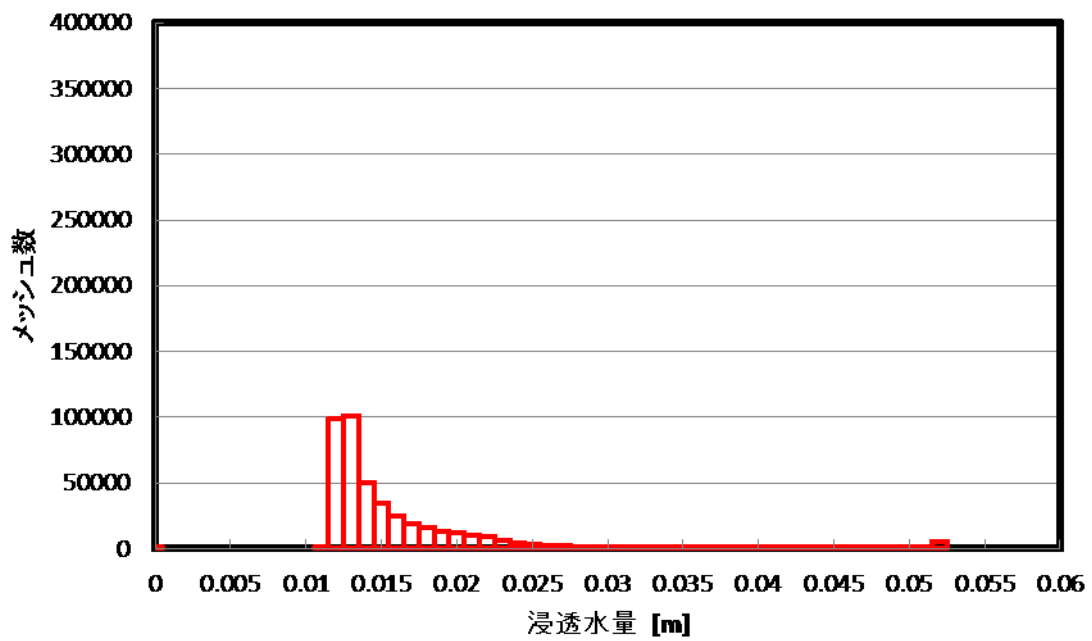


Figure A-114 植林後 森林 浸透水量 1-1-1 $PR=20.0$

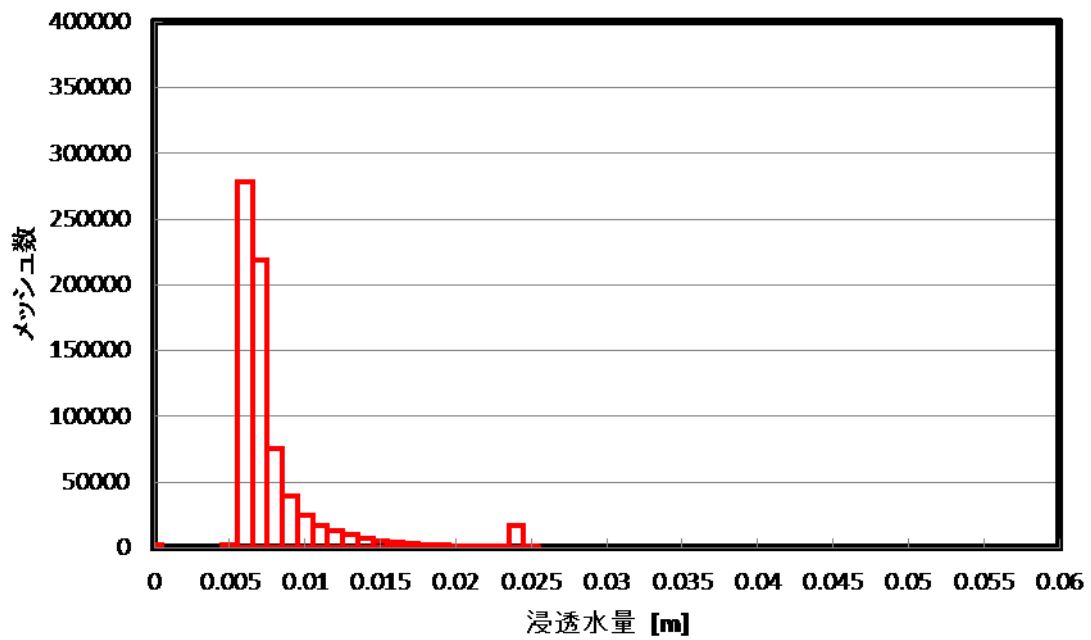


Figure A-115 植林前 裸地 浸透水量 1-1-2 PR=20.0

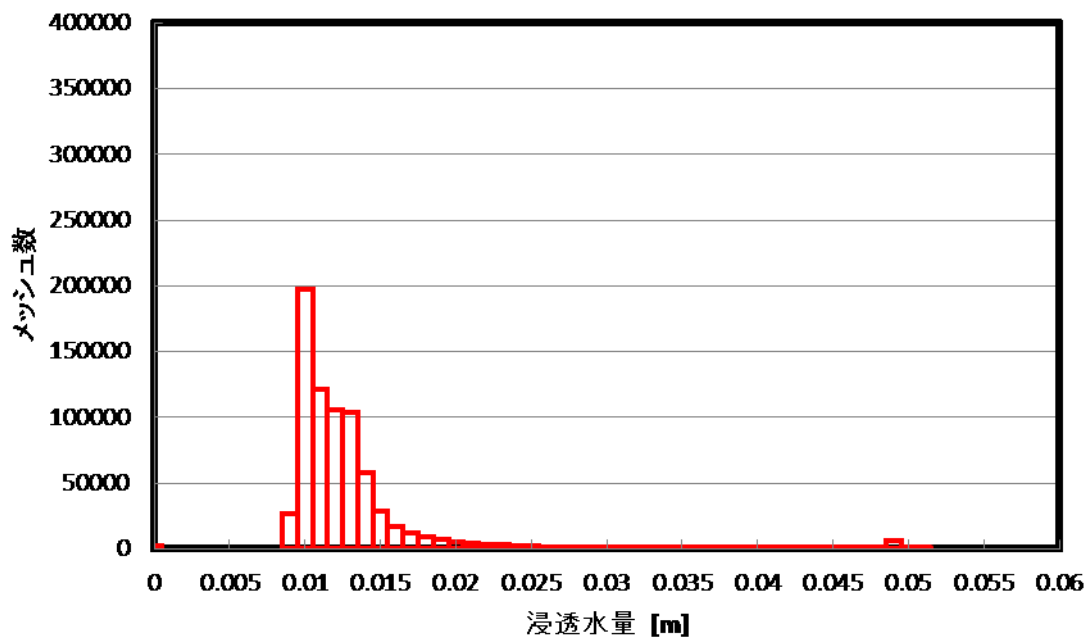


Figure A-116 植林後 裸地 浸透水量 1-1-2 PR=20.0

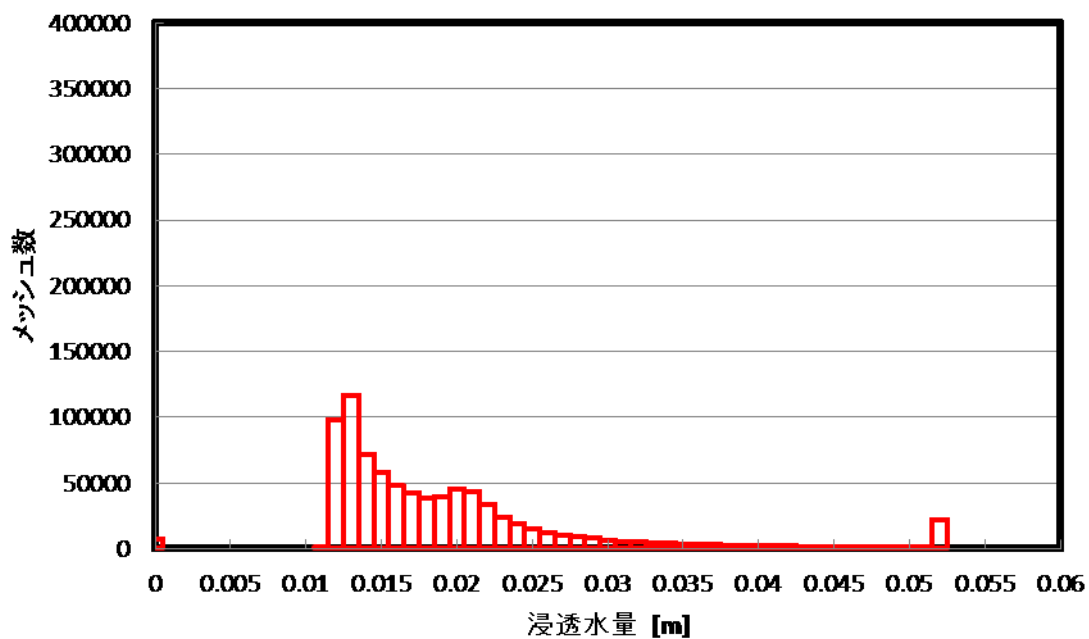


Figure A-117 植林前 草地 浸透水量 1-1-2 PR=20.0

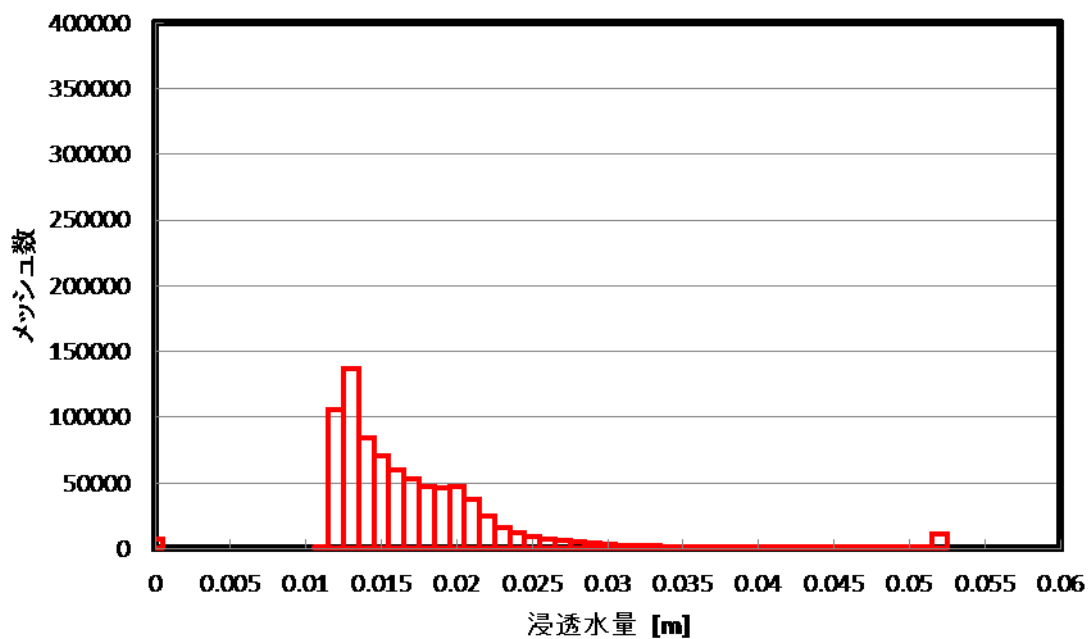


Figure A-118 植林後 草地 浸透水量 1-1-2 PR=20.0

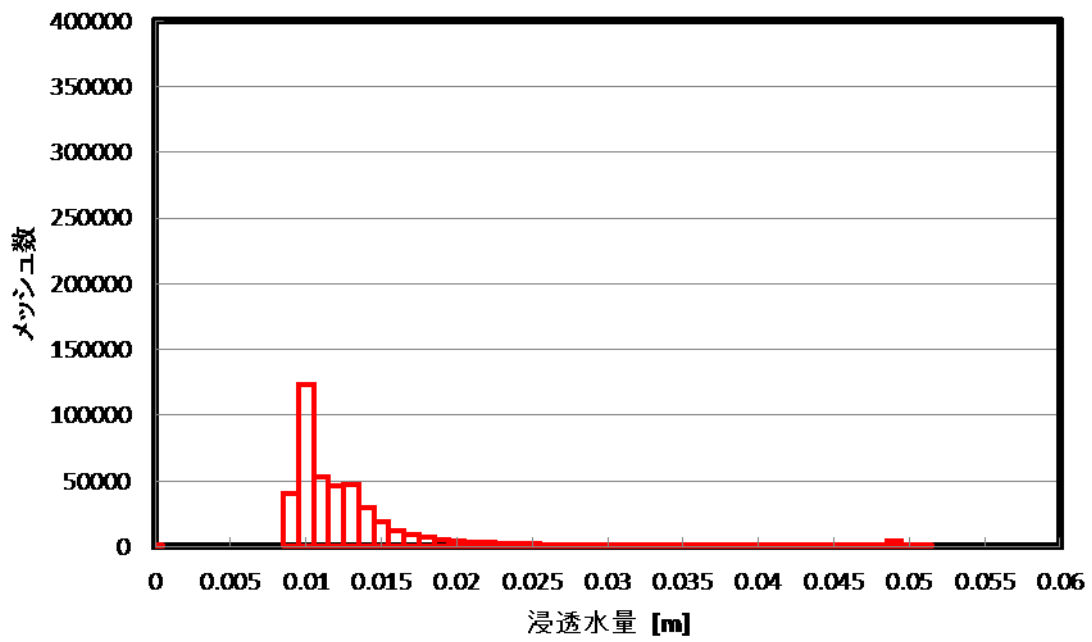


Figure A-119 植林前 森林 浸透水量 1-1-2 PR=20.0

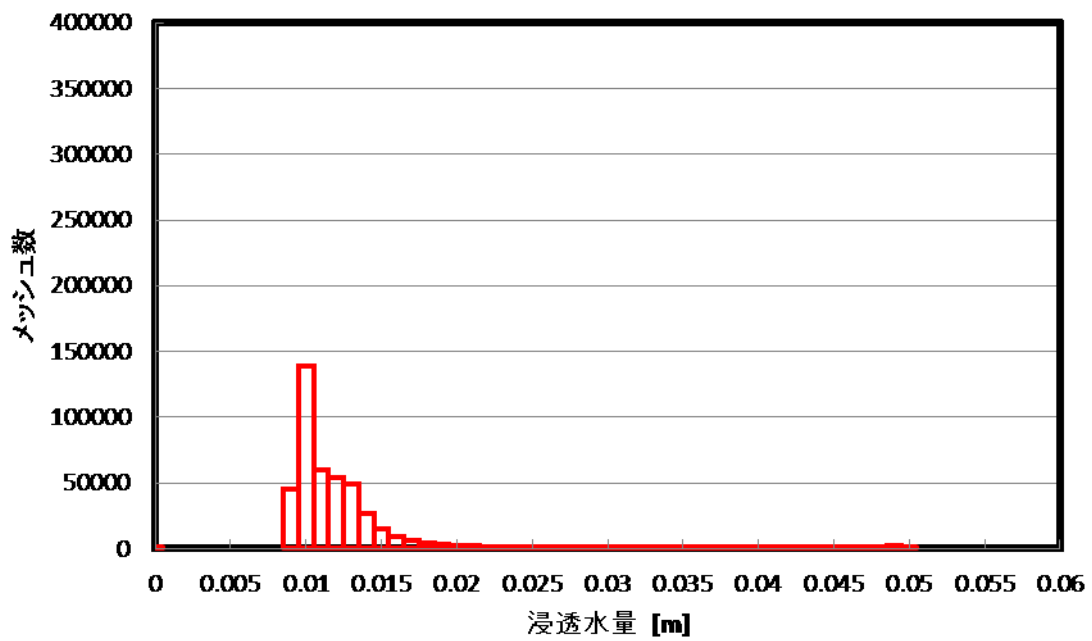


Figure A-120 植林後 森林 浸透水量 1-1-2 PR=20.0

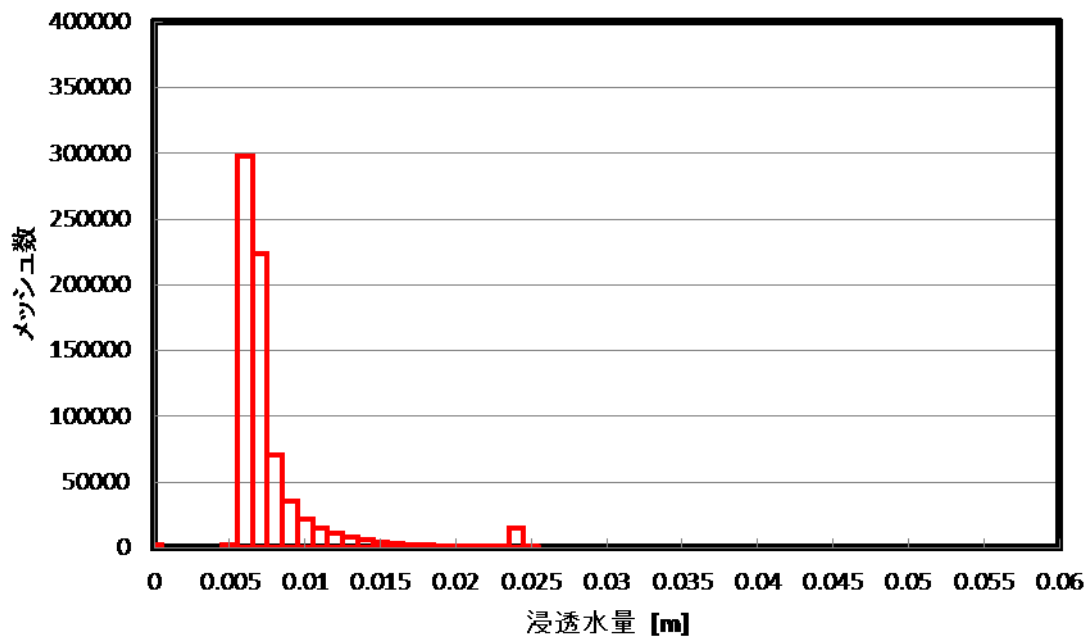


Figure A-121 植林前 裸地 浸透水量 1-1-3 PR=20.0

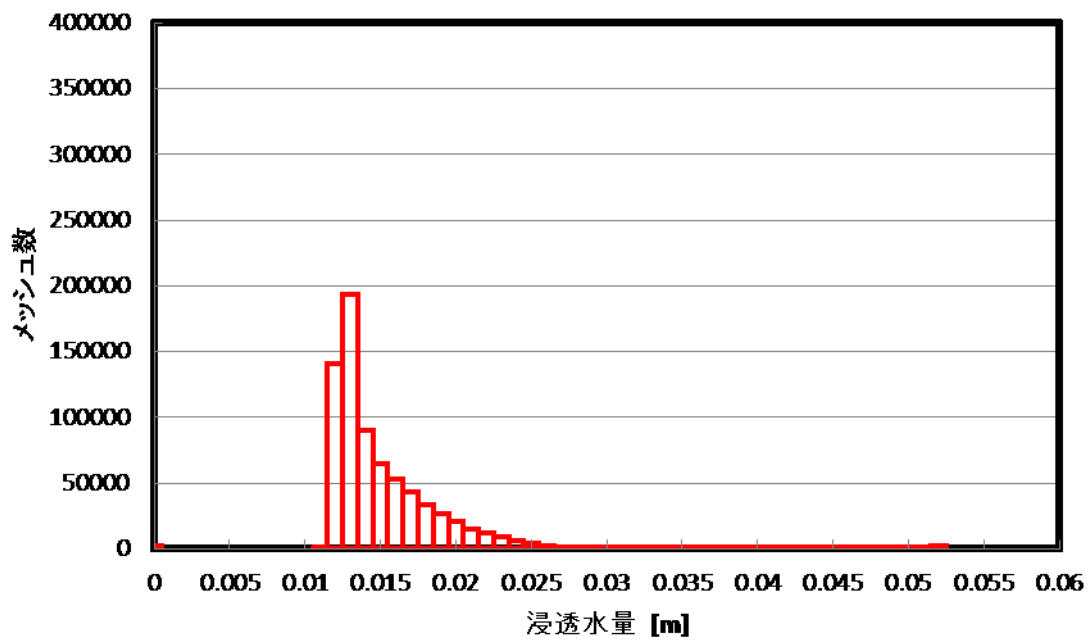


Figure A-122 植林後 裸地 浸透水量 1-1-3 PR=20.0

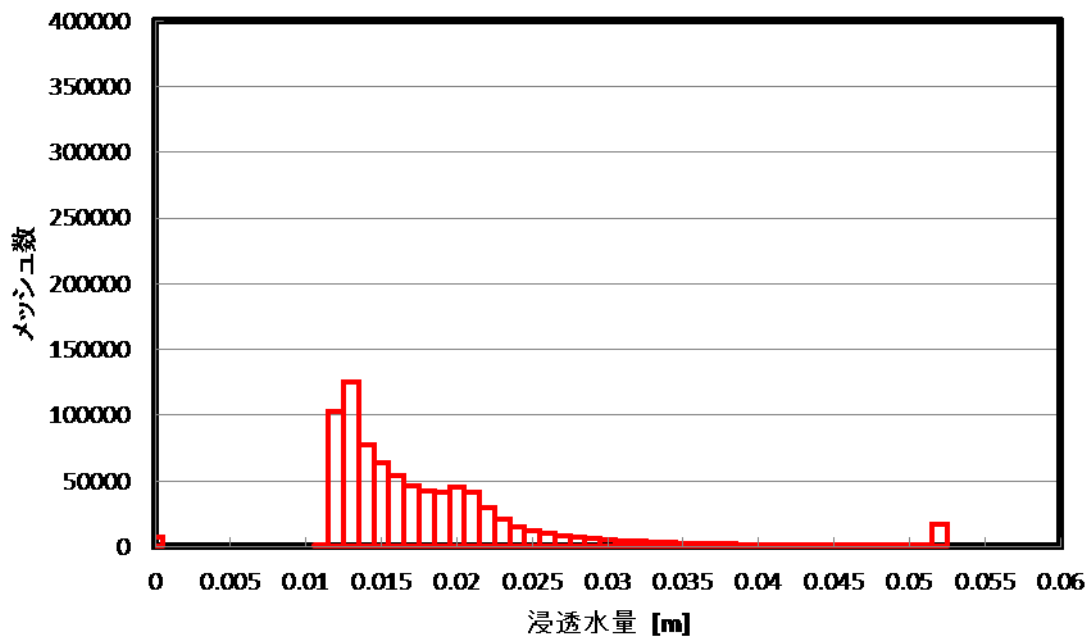


Figure A-123 植林前 草地 浸透水量 1-1-3 PR=20.0

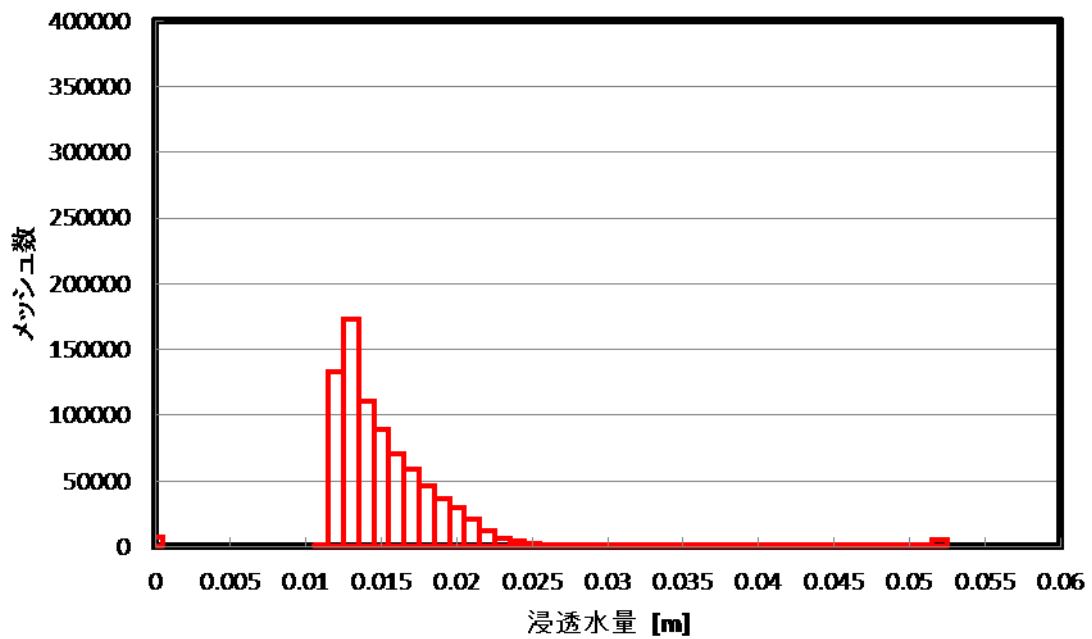


Figure A-124 植林後 草地 浸透水量 1-1-3 PR=20.0

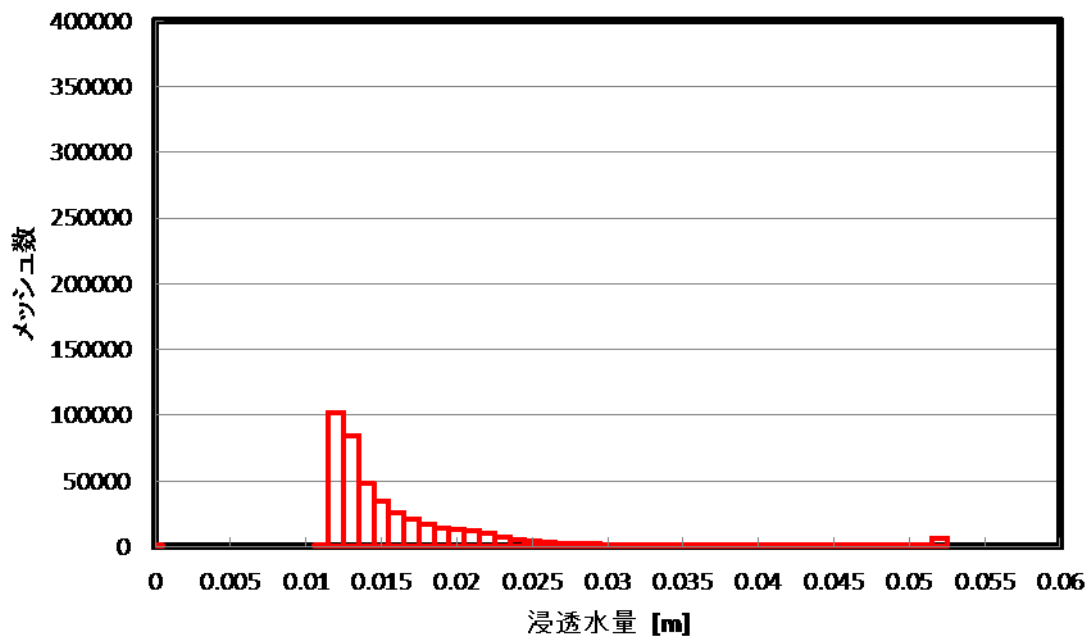


Figure A-125 植林前 森林 浸透水量 1-1-3 PR=20.0

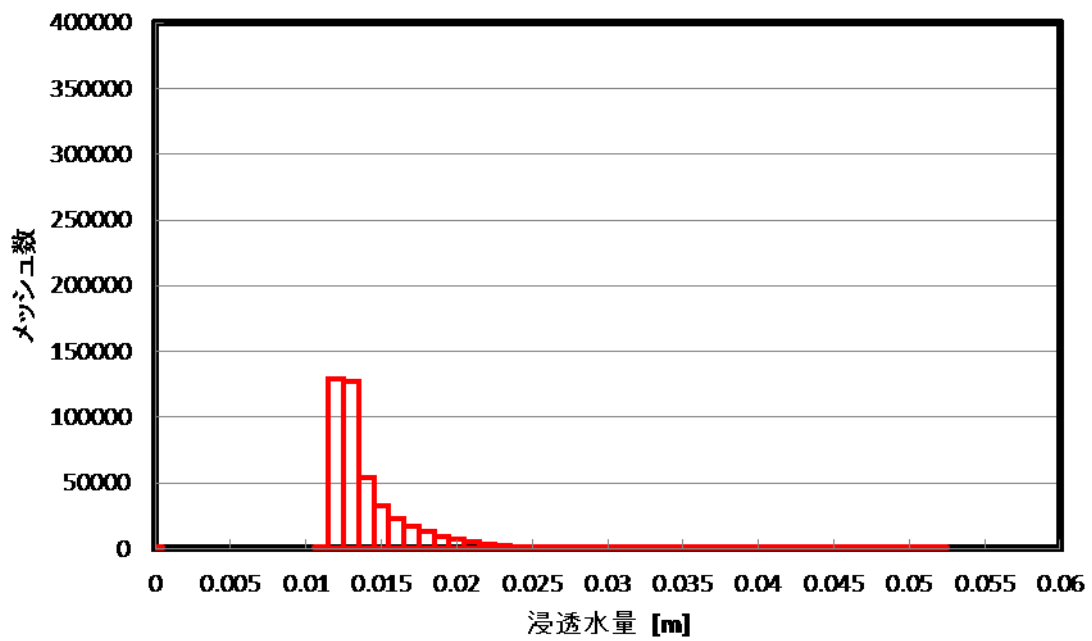


Figure A-126 植林後 森林 浸透水量 1-1-3 PR=20.0

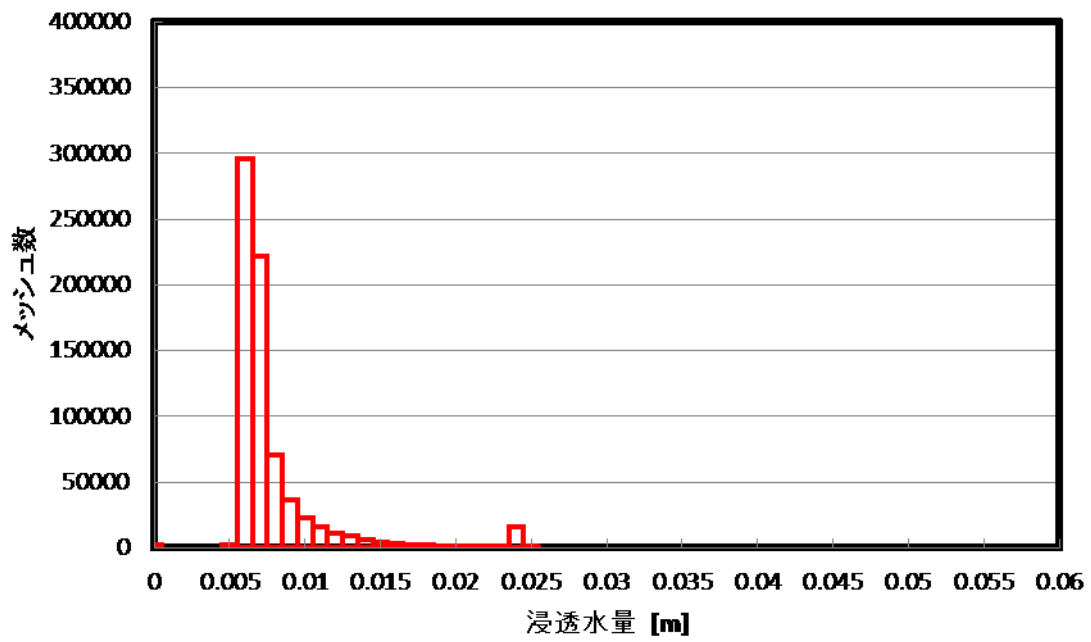


Figure A-127 植林前 裸地 浸透水量 1-2-1 PR=20.0

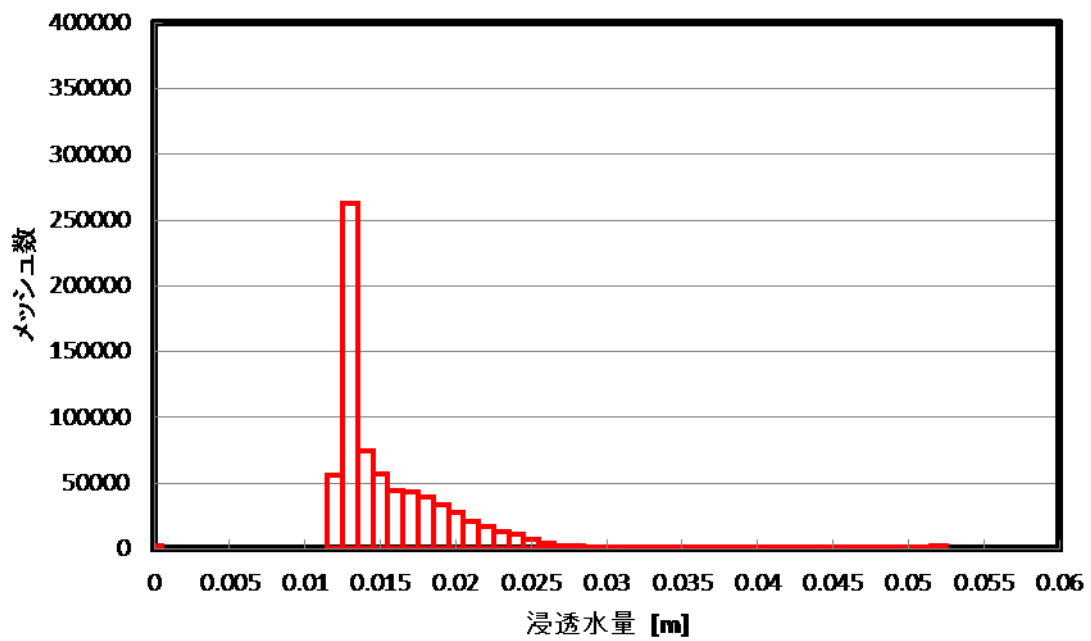


Figure A-128 植林後 裸地 浸透水量 1-2-1 PR=20.0

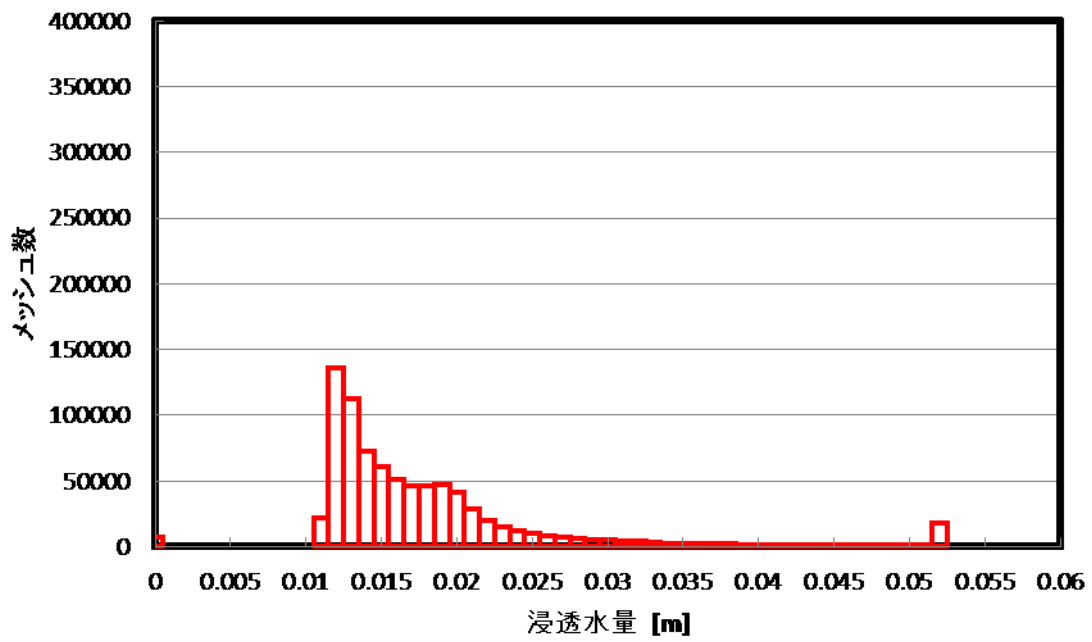


Figure A-129 植林前 草地 浸透水量 1-2-1 PR=20.0

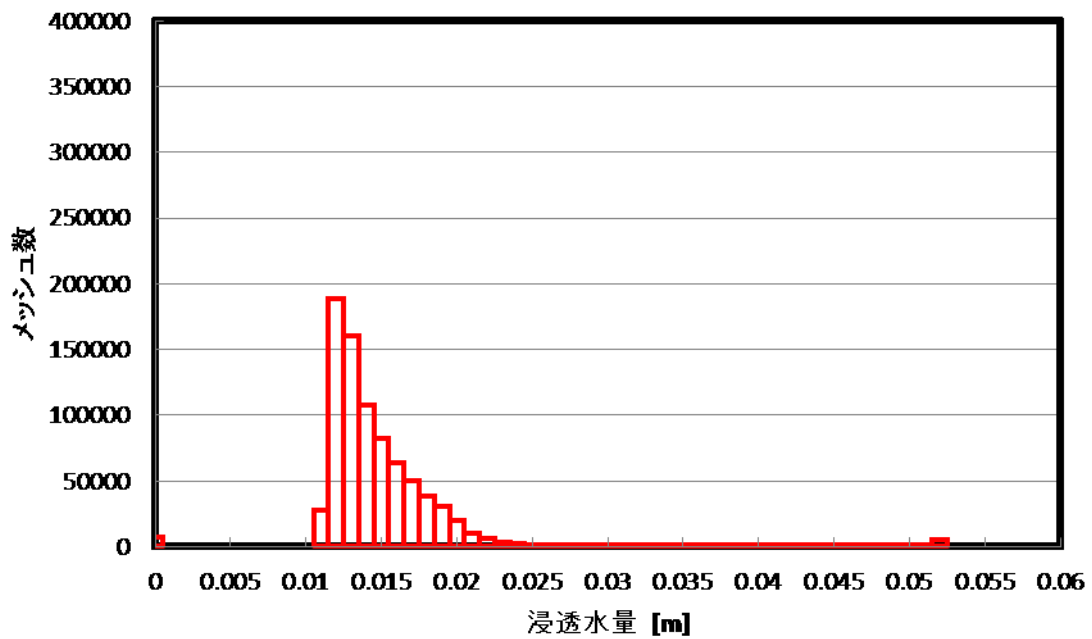


Figure A-130 植林後 草地 浸透水量 1-2-1 PR=20.0

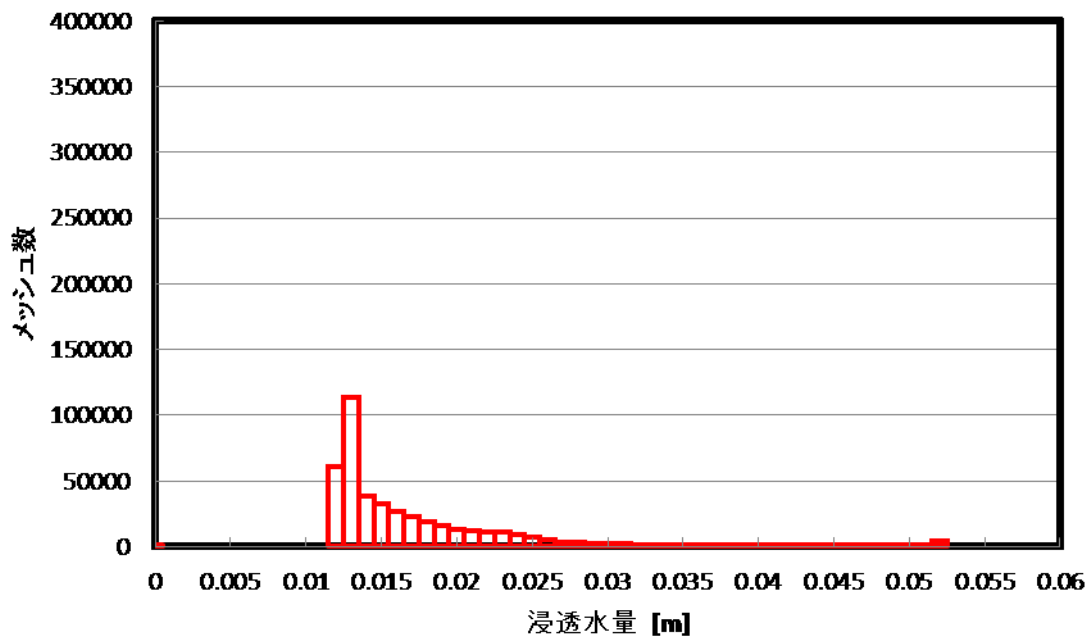


Figure A-131 植林前 森林 浸透水量 1-2-1 PR=20.0

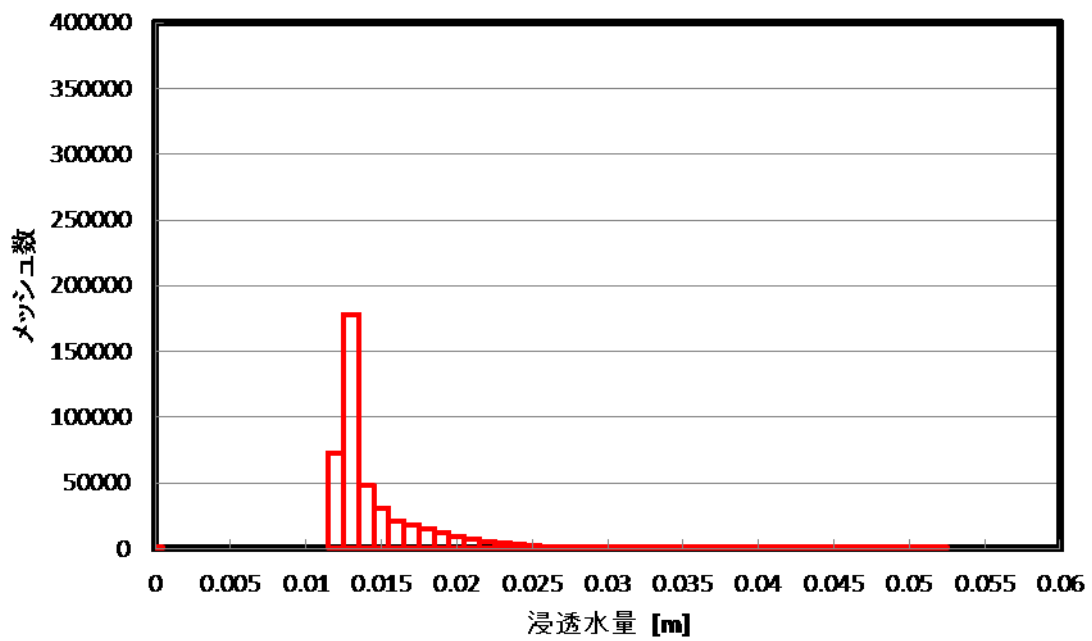


Figure A-132 植林後 森林 浸透水量 1-2-1 PR=20.0

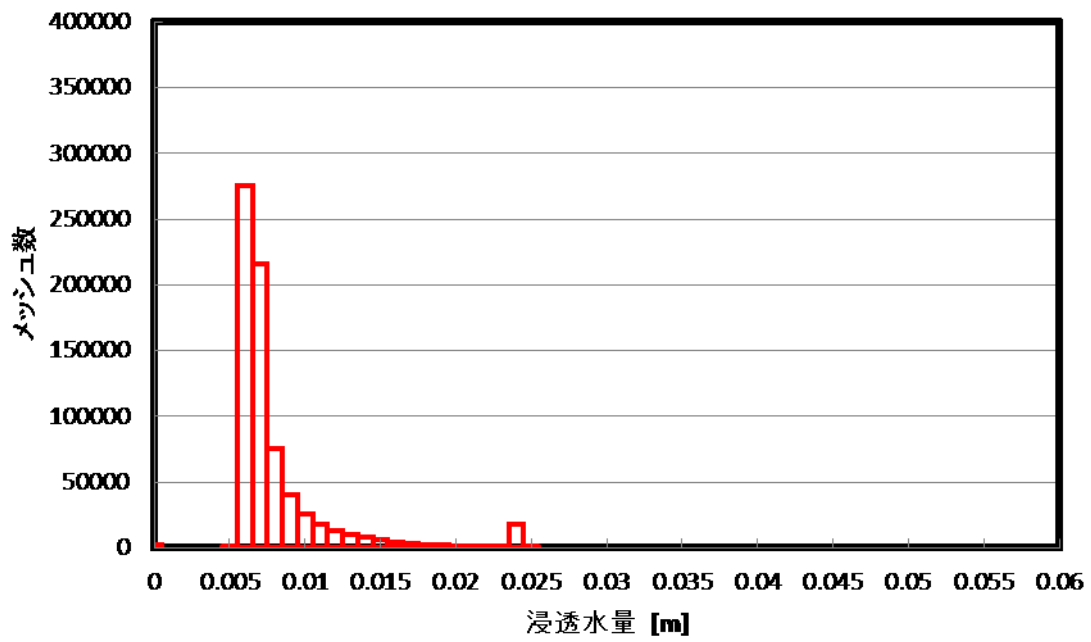


Figure A-133 植林前 裸地 浸透水量 1-2-2 PR=20.0

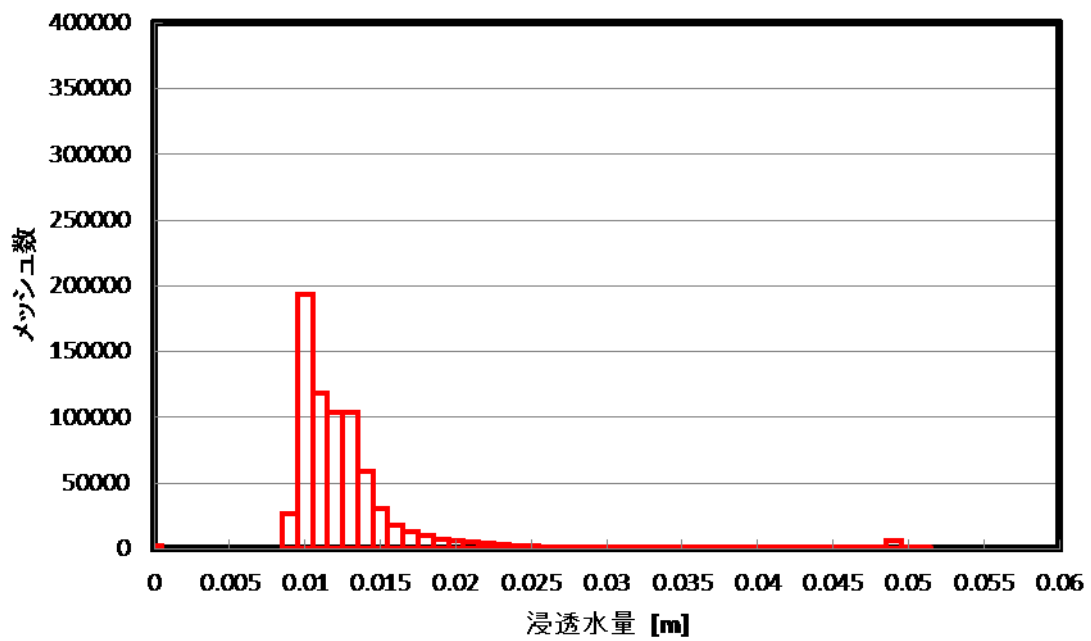


Figure A-134 植林後 裸地 浸透水量 1-2-2 PR=20.0

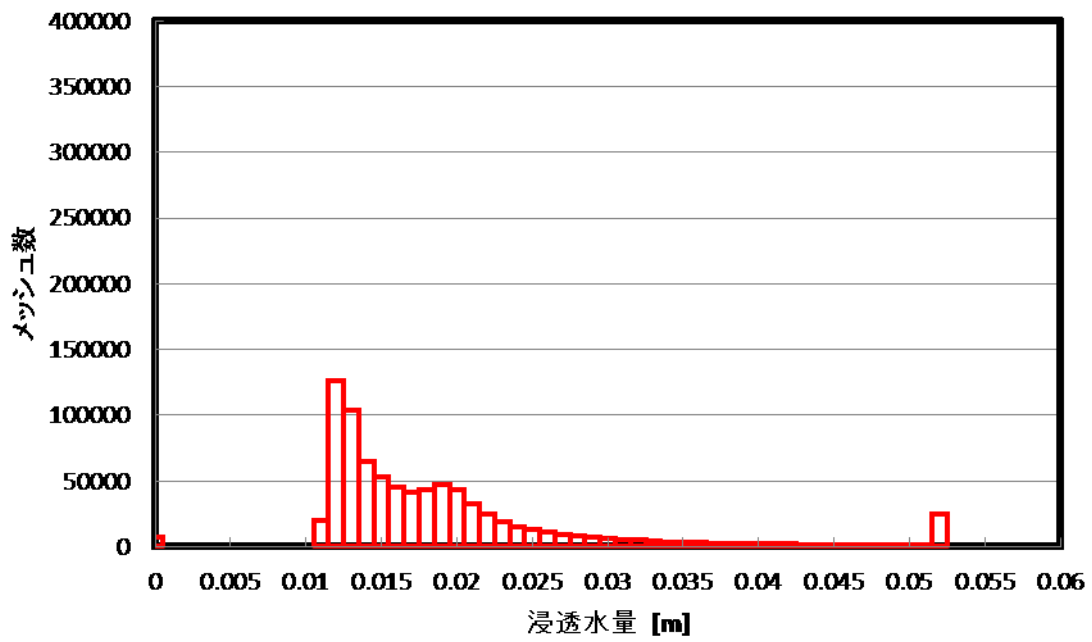


Figure A-135 植林前 草地 浸透水量 1-2-2 PR=20.0

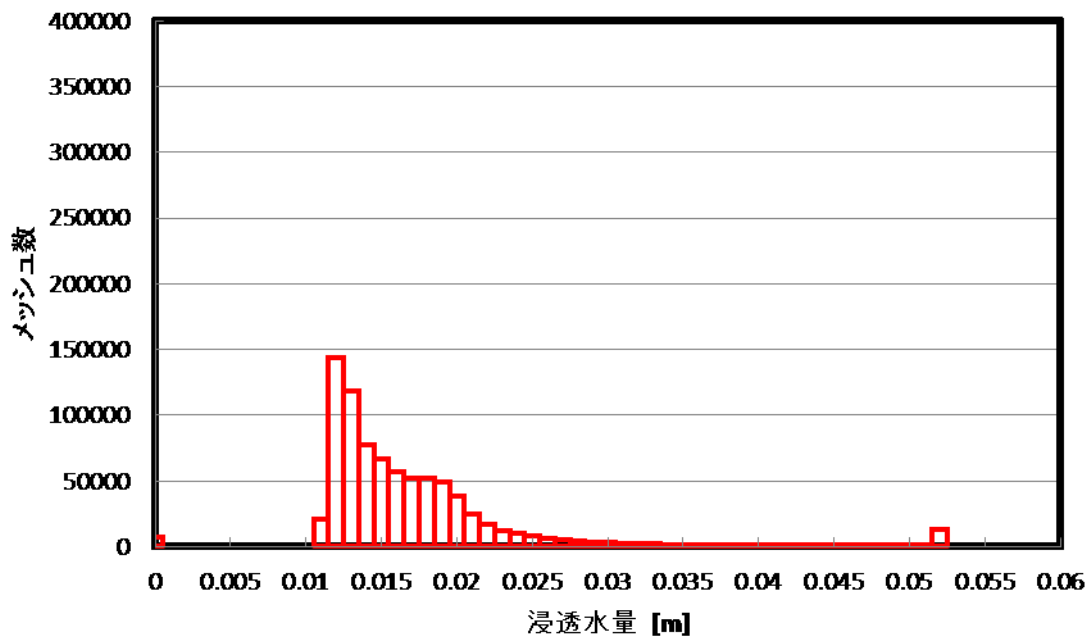


Figure A-136 植林後 草地 浸透水量 1-2-2 PR=20.0

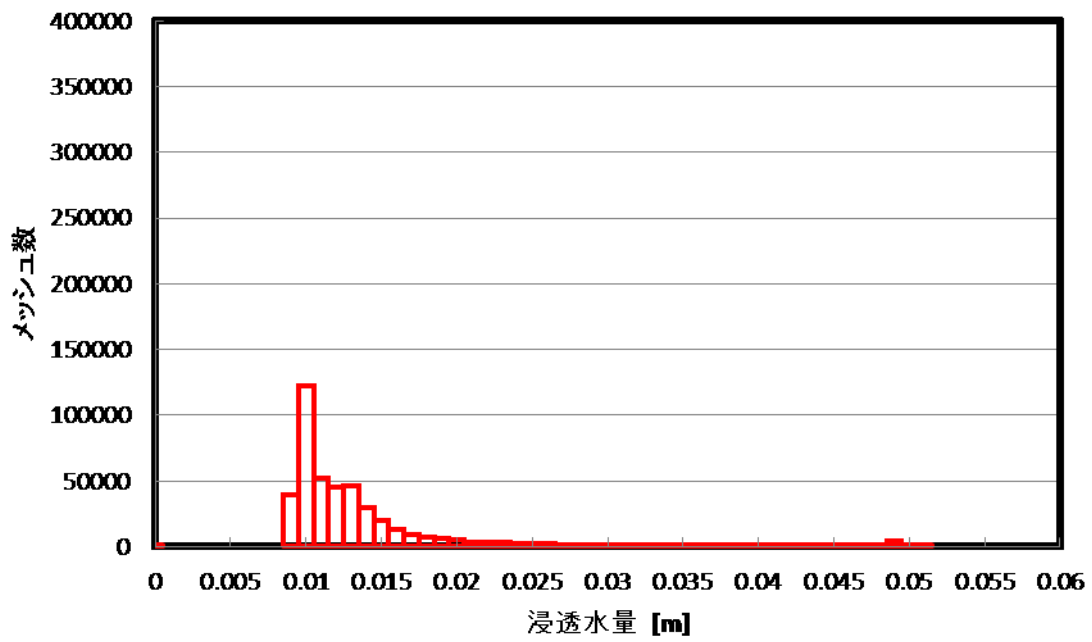


Figure A-137 植林前 森林 浸透水量 1-2-2 PR=20.0

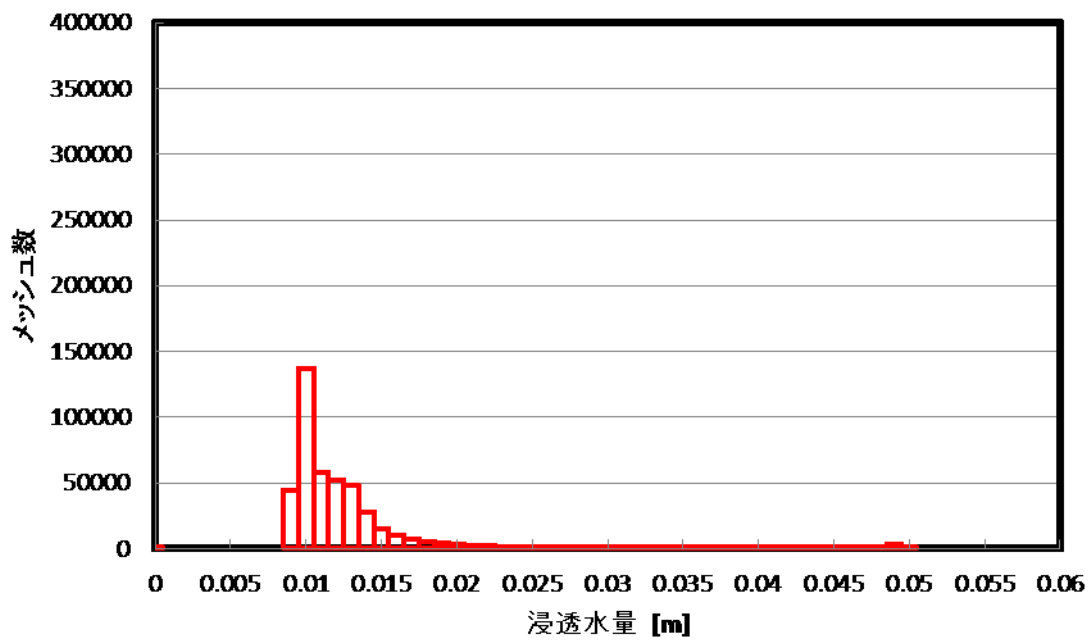


Figure A-138 植林後 森林 浸透水量 1-2-2 PR=20.0

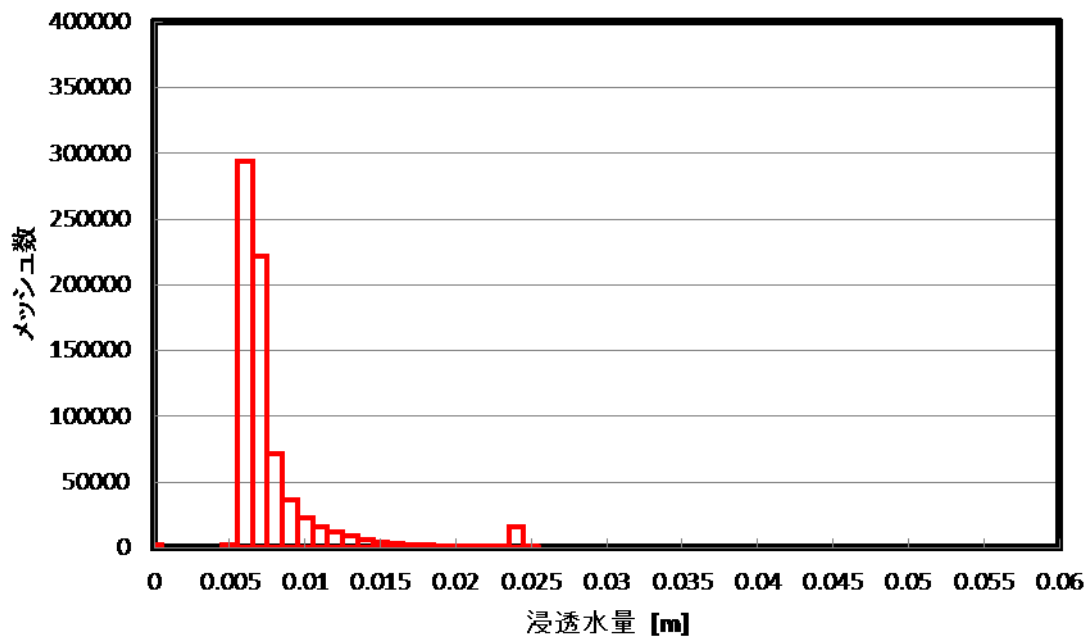


Figure A-139 植林前 裸地 浸透水量 1-2-3 PR=20.0

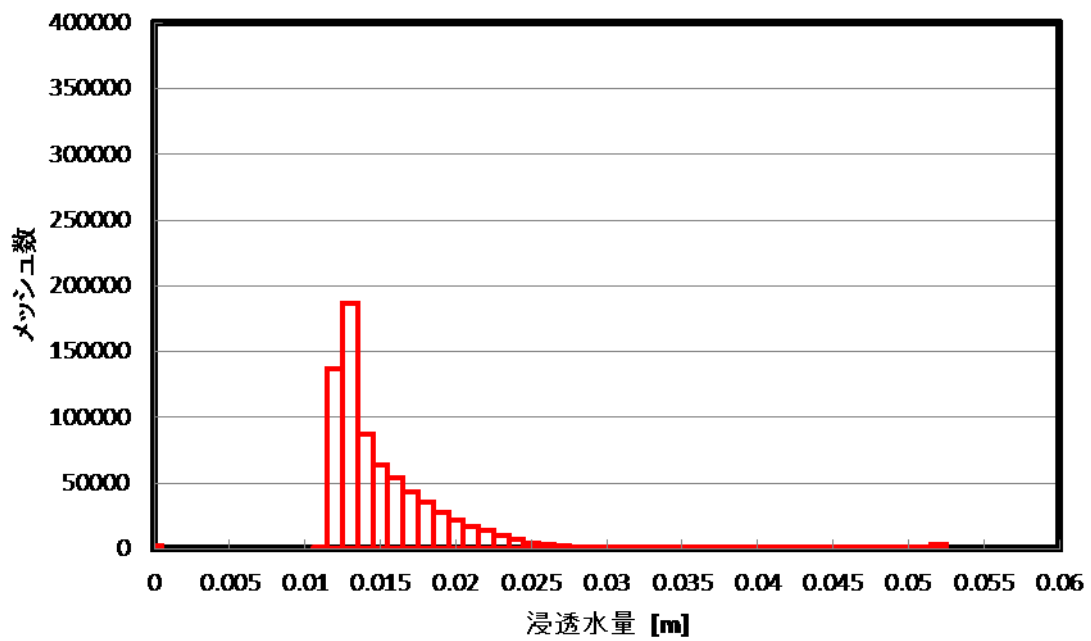


Figure A-140 植林後 裸地 浸透水量 1-2-3 PR=20.0

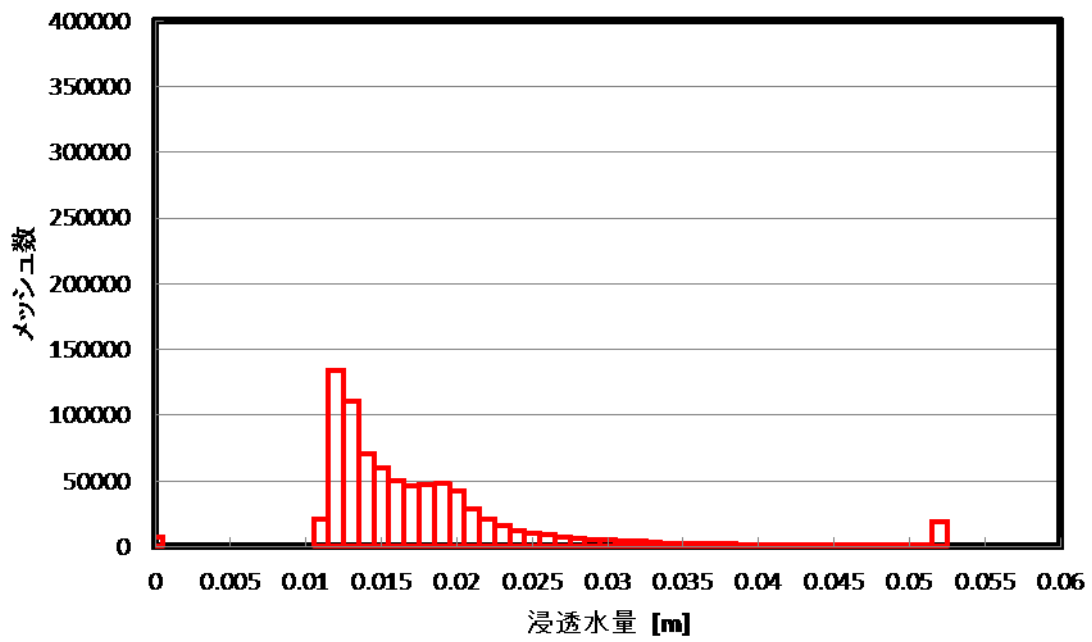


Figure A-141 植林前 草地 浸透水量 1-2-3 PR=20.0

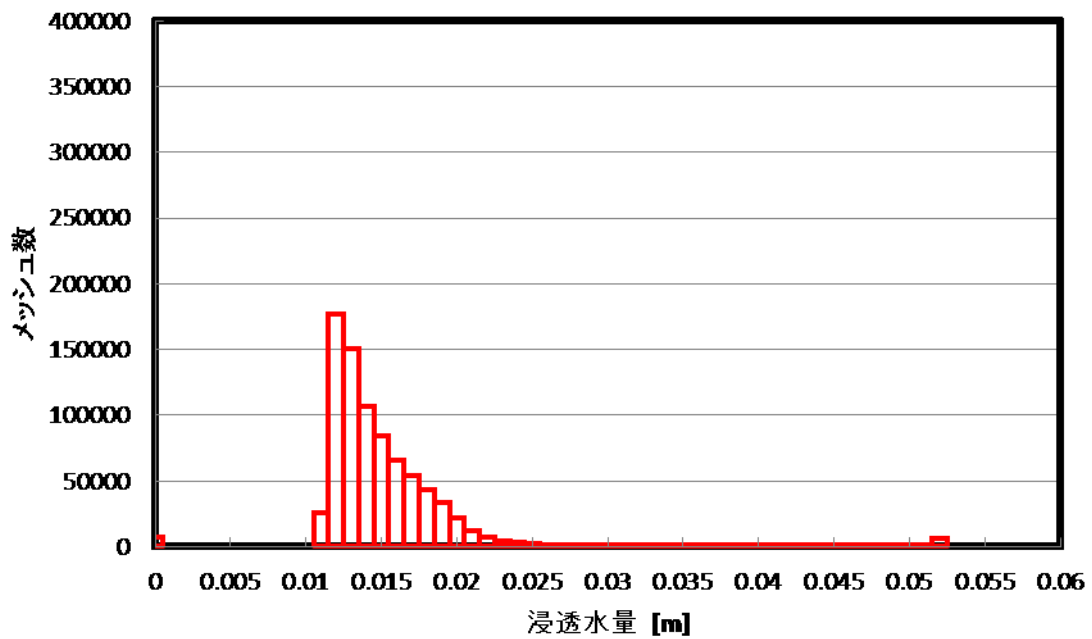


Figure A-142 植林後 草地 浸透水量 1-2-3 PR=20.0

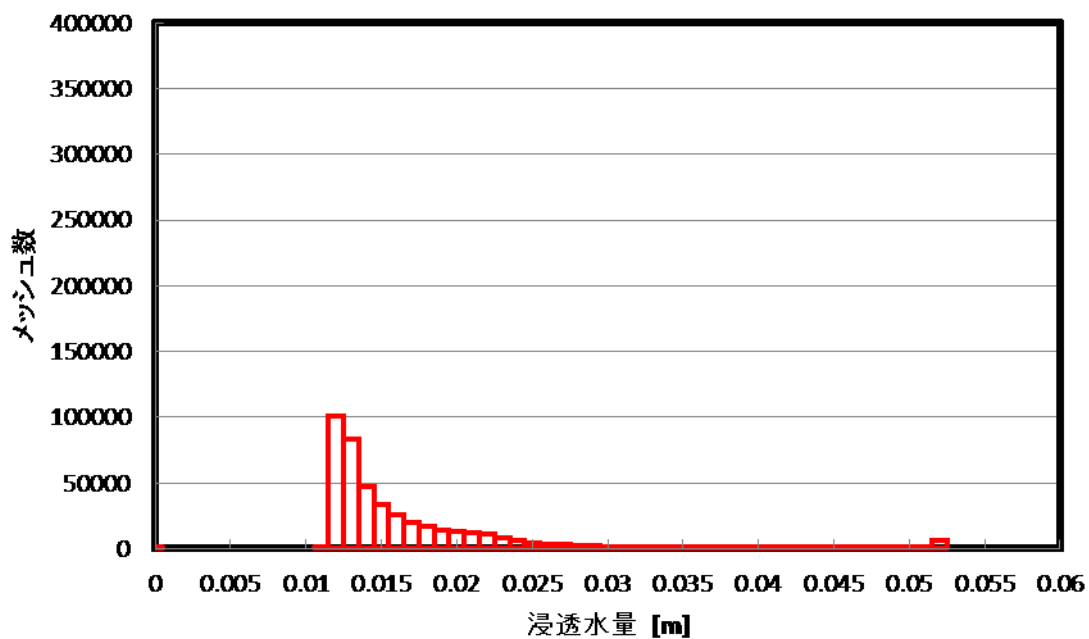


Figure A-143 植林前 森林 浸透水量 1-2-3 PR=20.0

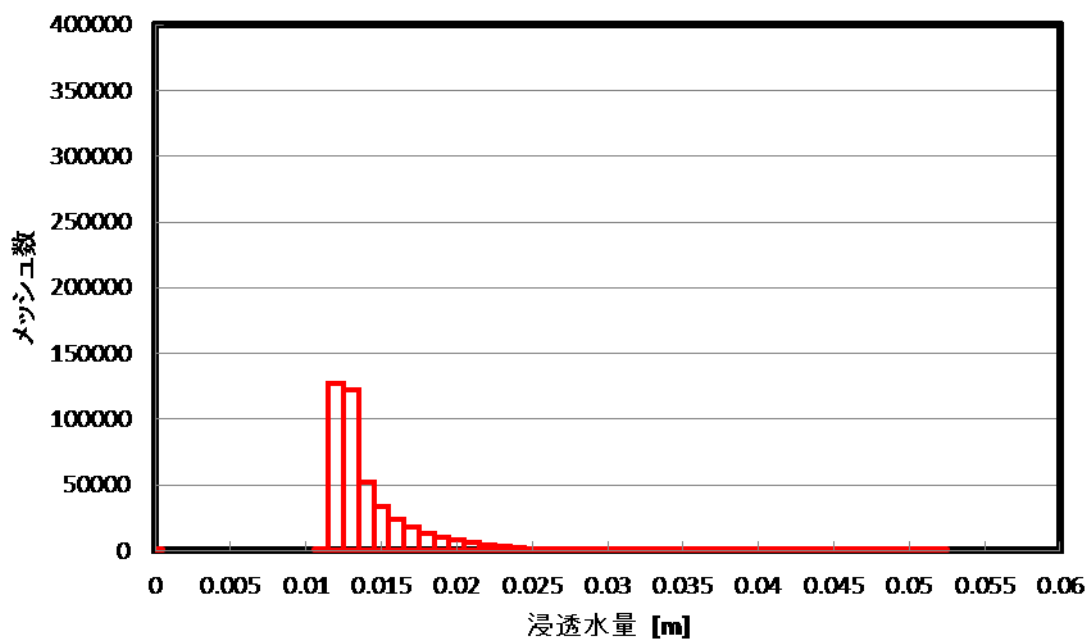


Figure A-144 植林後 森林 浸透水量 1-2-3 PR=20.0

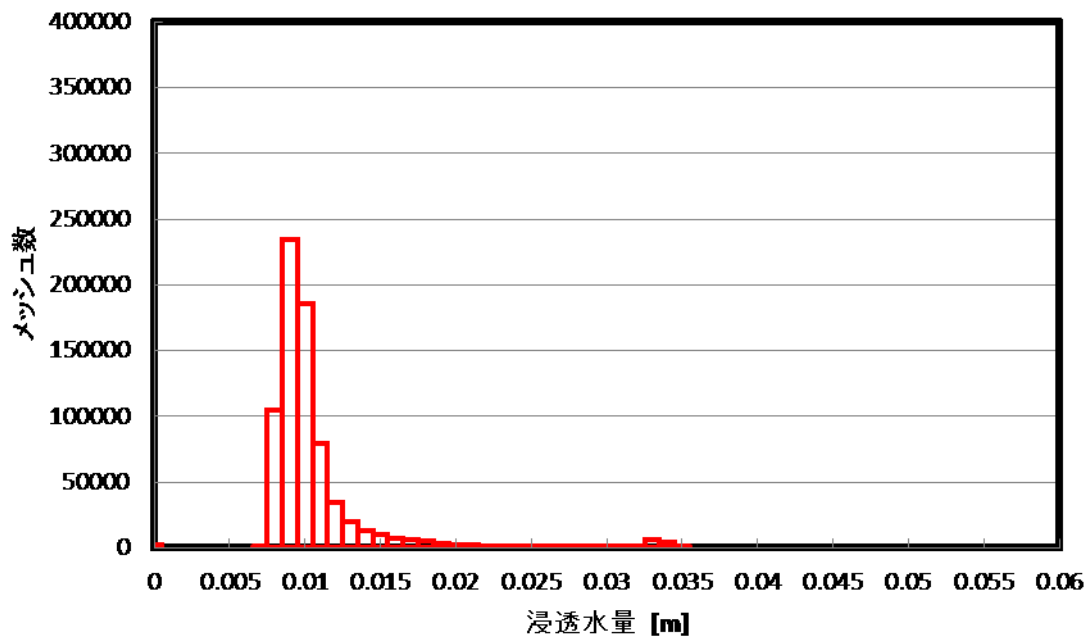


Figure A-145 植林前 裸地 浸透水量 2-1-1 PR=20.0

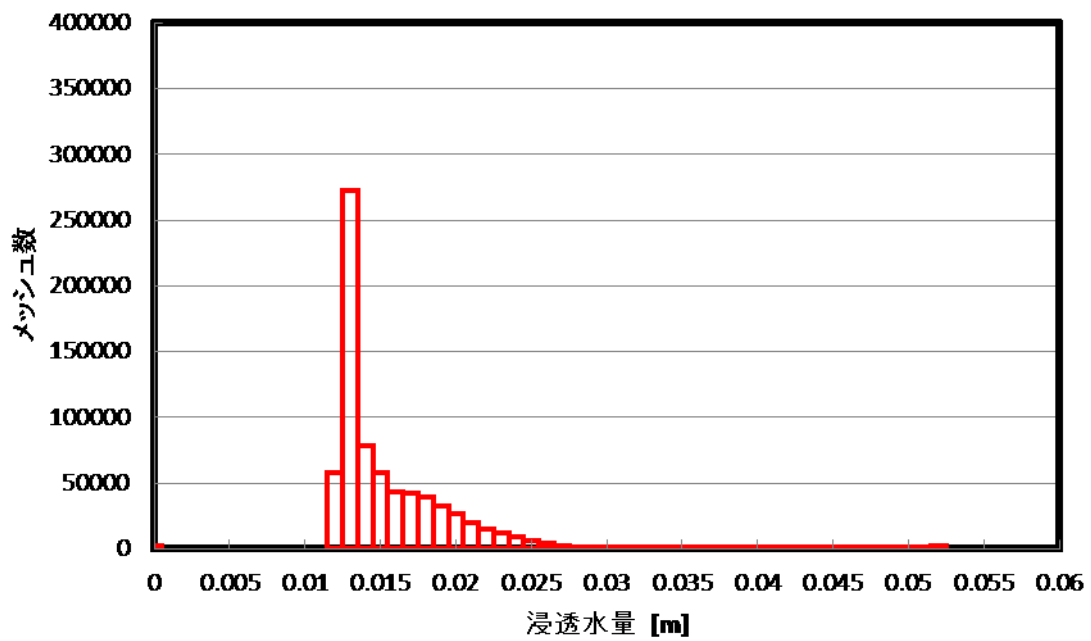


Figure A-146 植林後 裸地 浸透水量 2-1-1 PR=20.0

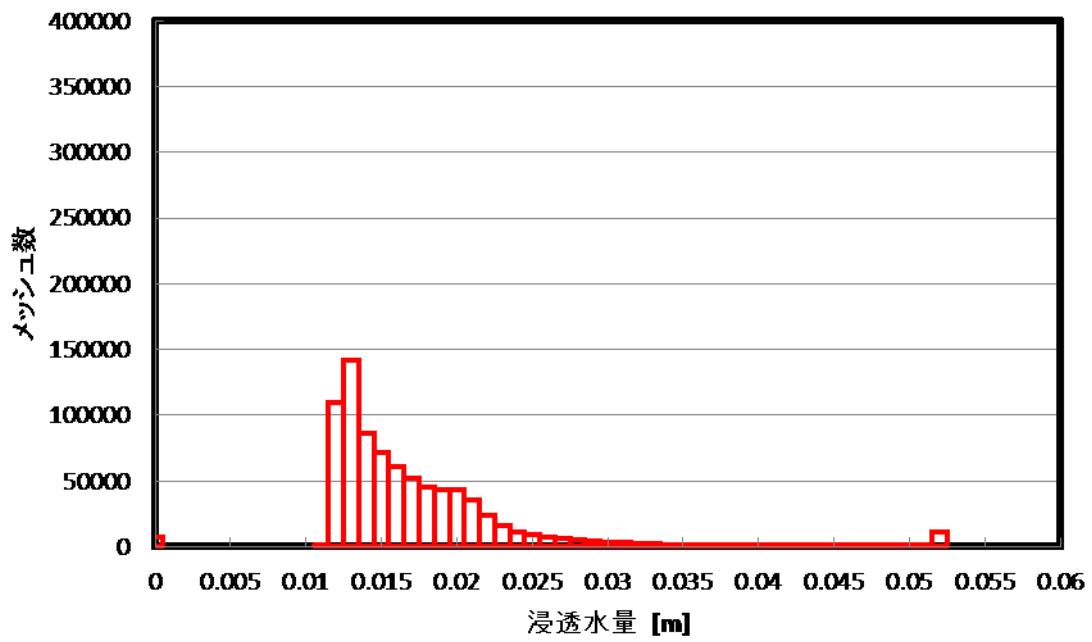


Figure A-147 植林前 草地 浸透水量 2-1-1 PR=20.0

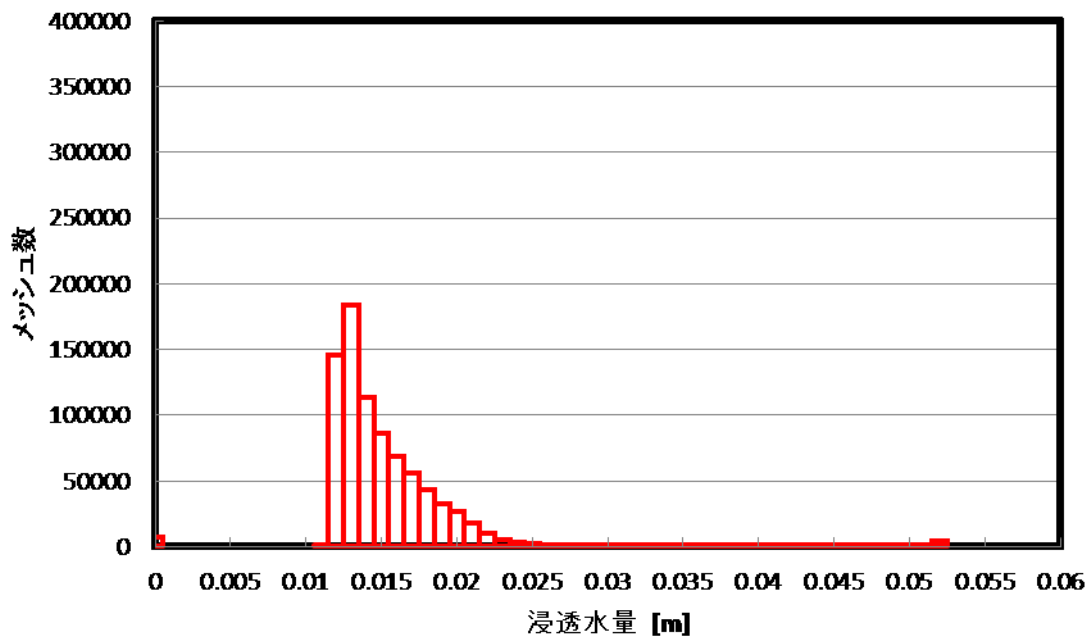


Figure A-148 植林後 草地 浸透水量 2-1-1 PR=20.0

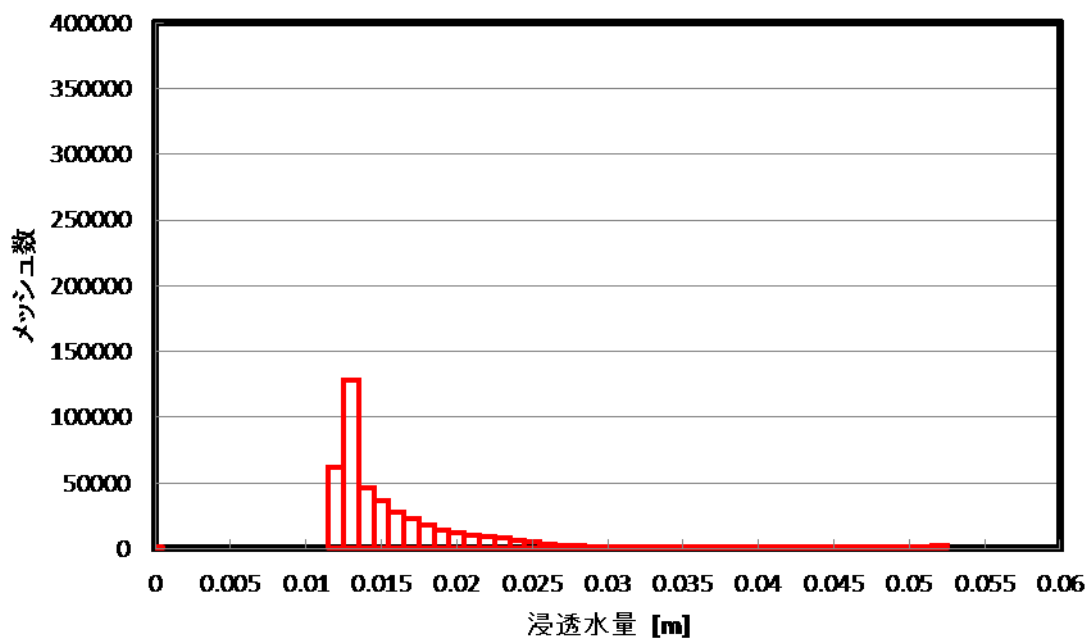


Figure A-149 植林前 森林 浸透水量 2-1-1 $PR=20.0$

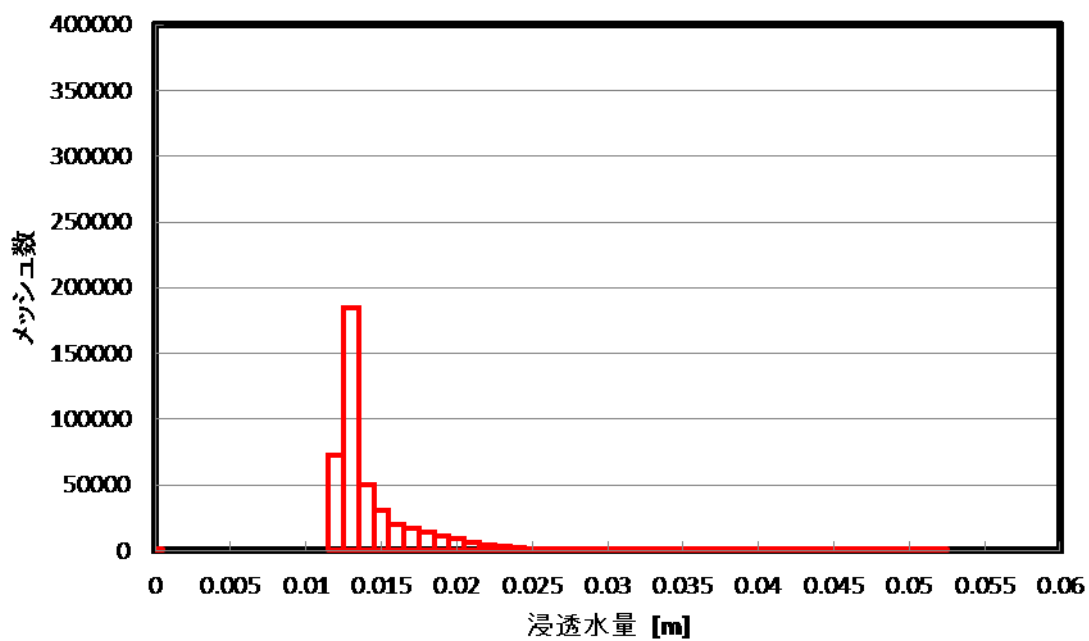


Figure A-150 植林後 森林 浸透水量 2-1-1 $PR=20.0$

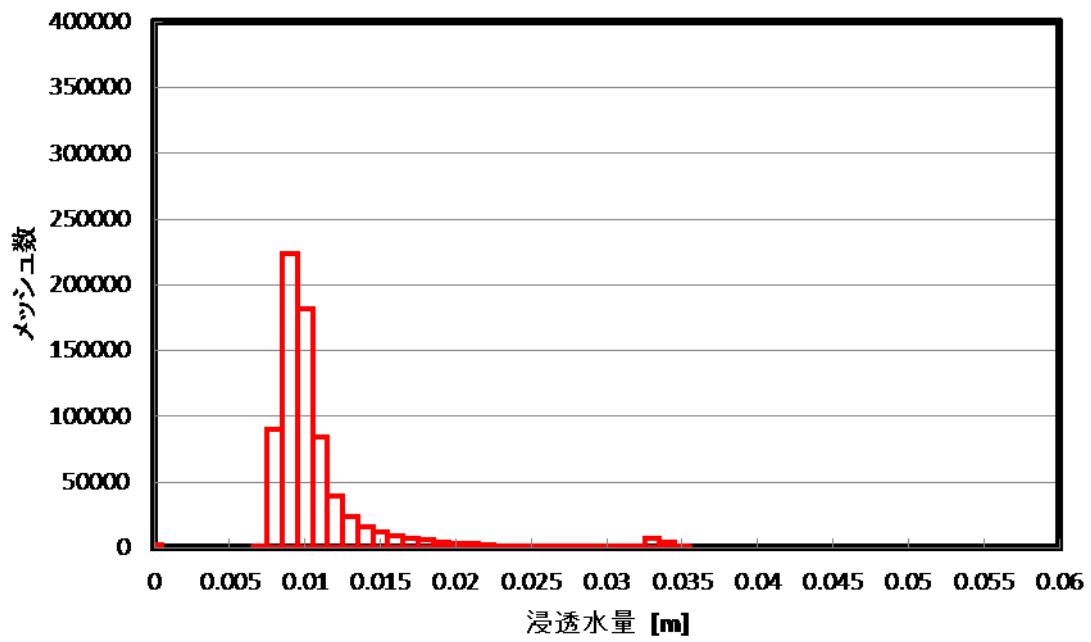


Figure A-151 植林前 裸地 浸透水量 2-1-2 PR=20.0

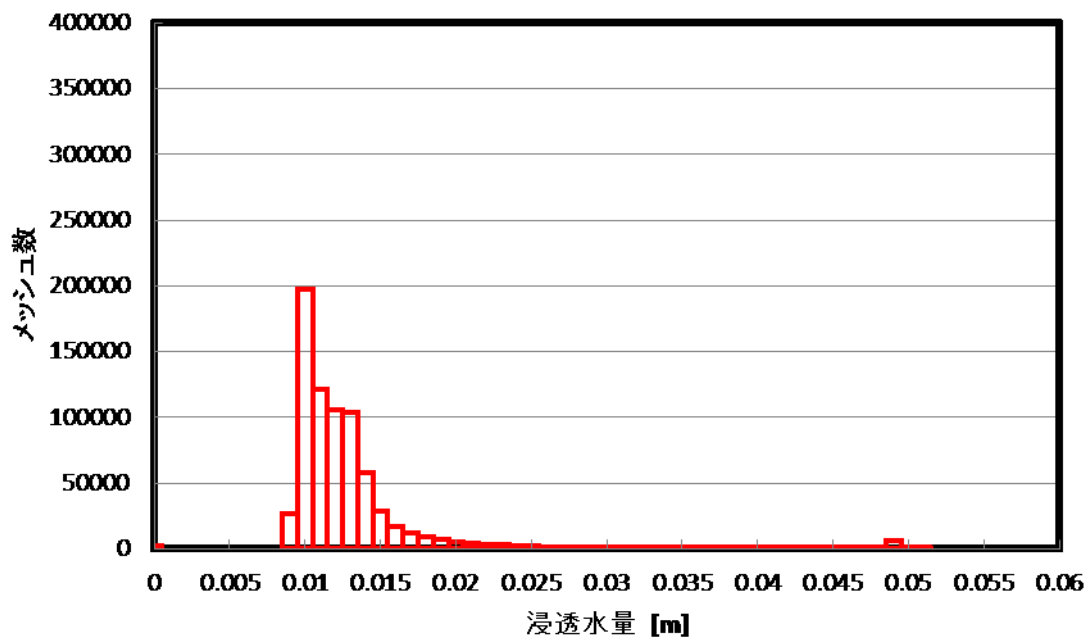


Figure A-152 植林後 裸地 浸透水量 2-1-2 PR=20.0

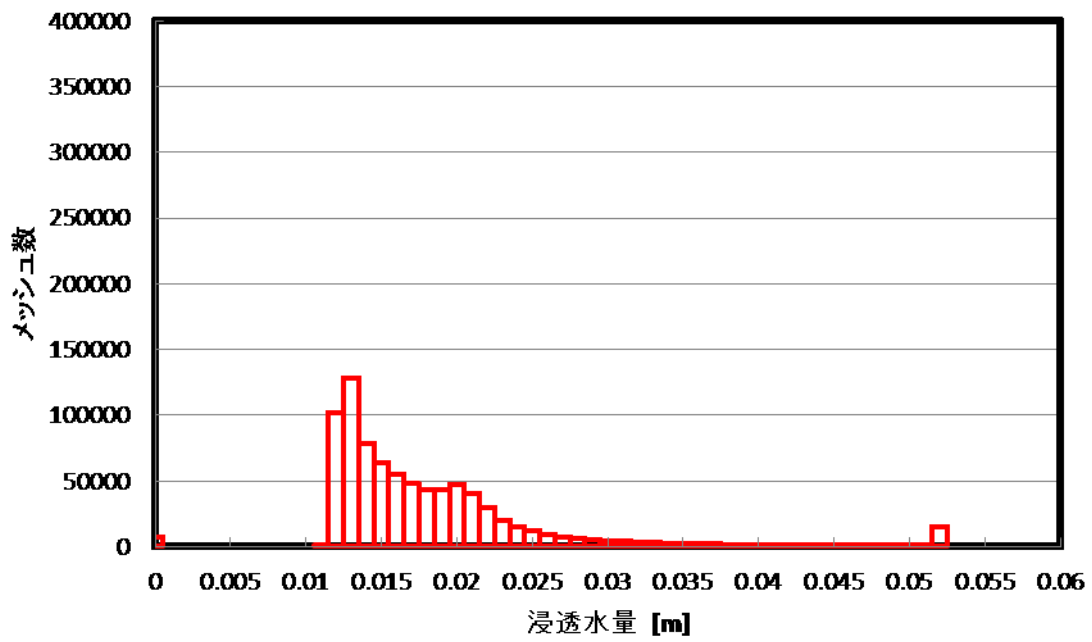


Figure A-153 植林前 草地 浸透水量 2-1-2 PR=20.0

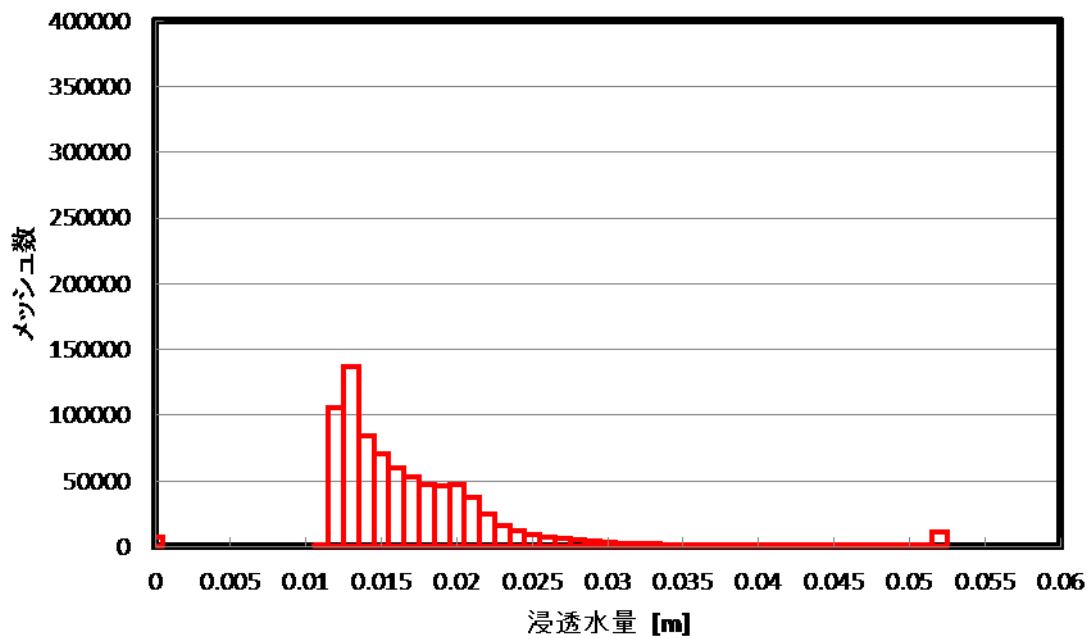


Figure A-154 植林後 草地 浸透水量 2-1-2 PR=20.0

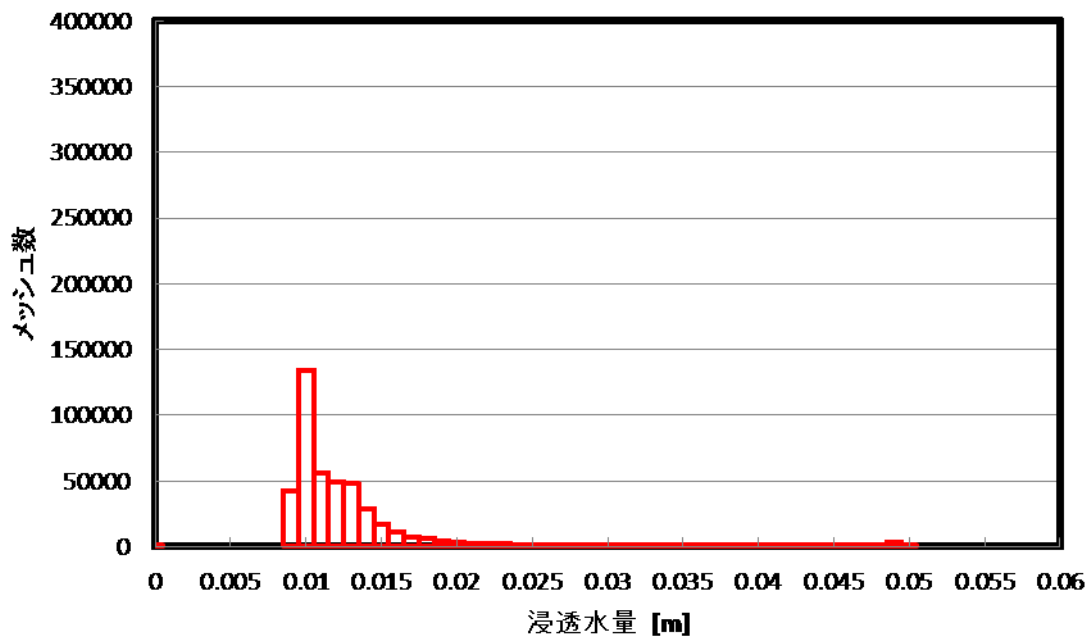


Figure A-155 植林前 森林 浸透水量 2-1-2 PR=20.0

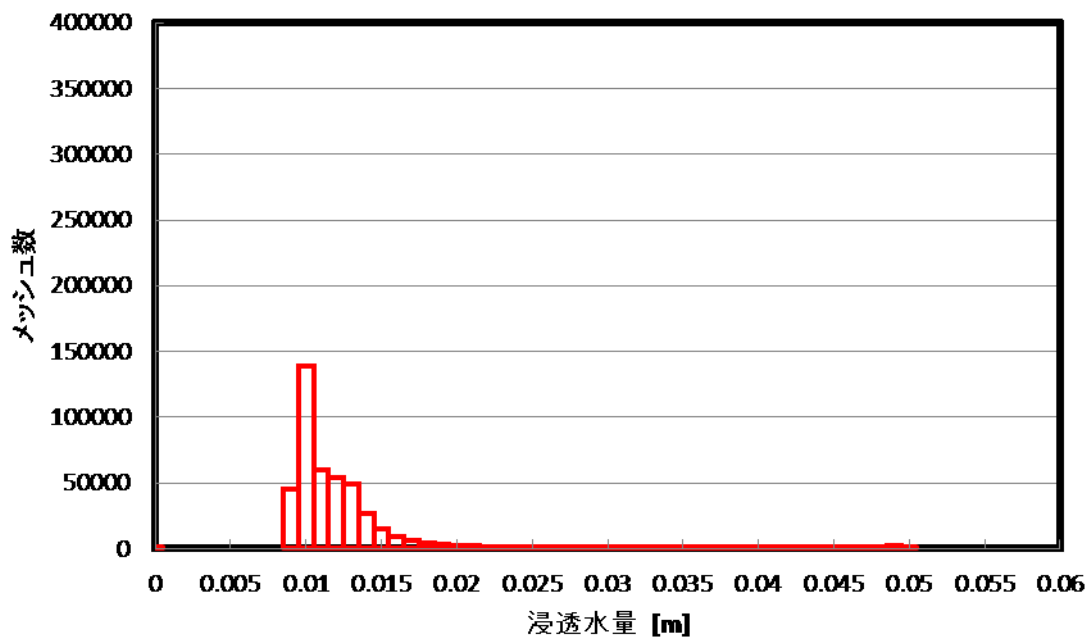


Figure A-156 植林後 森林 浸透水量 2-1-2 PR=20.0

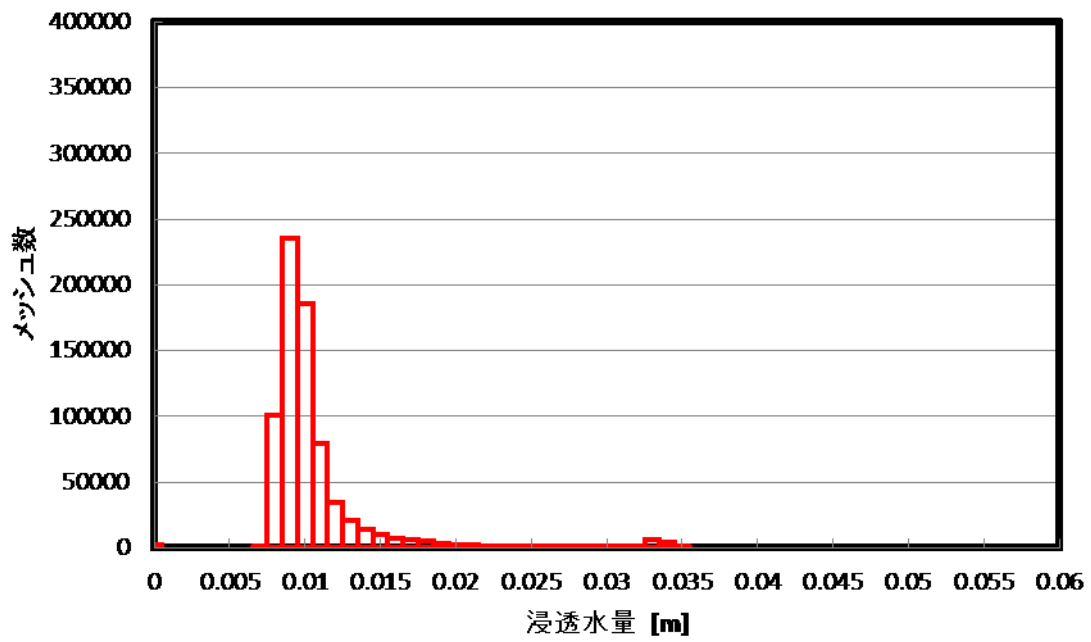


Figure A-157 植林前 裸地 浸透水量 2-1-3 PR=20.0

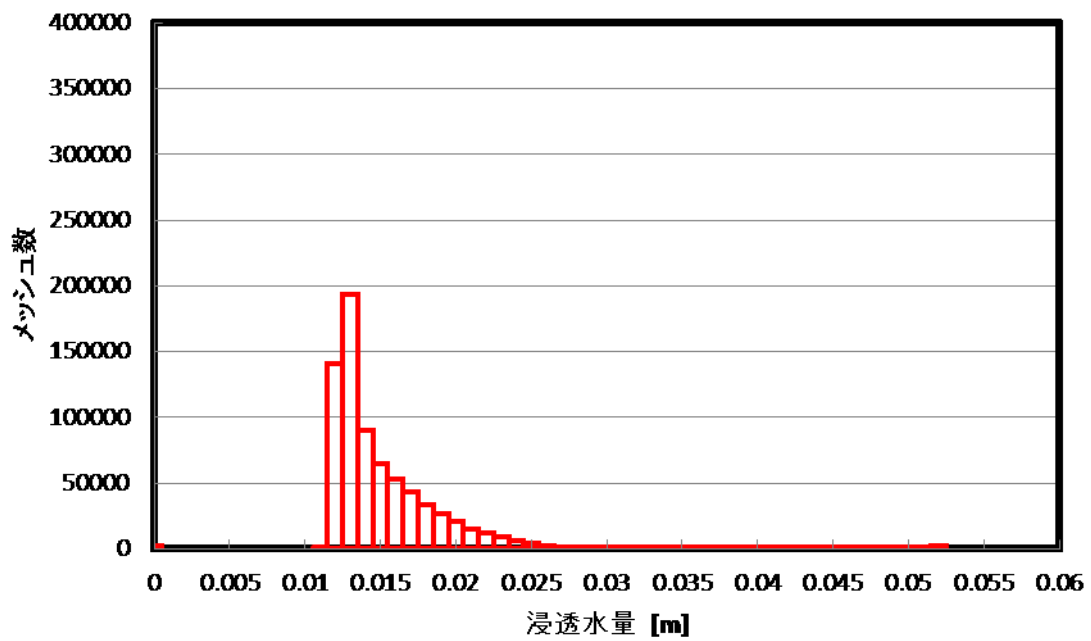


Figure A-158 植林後 裸地 浸透水量 2-1-3 PR=20.0

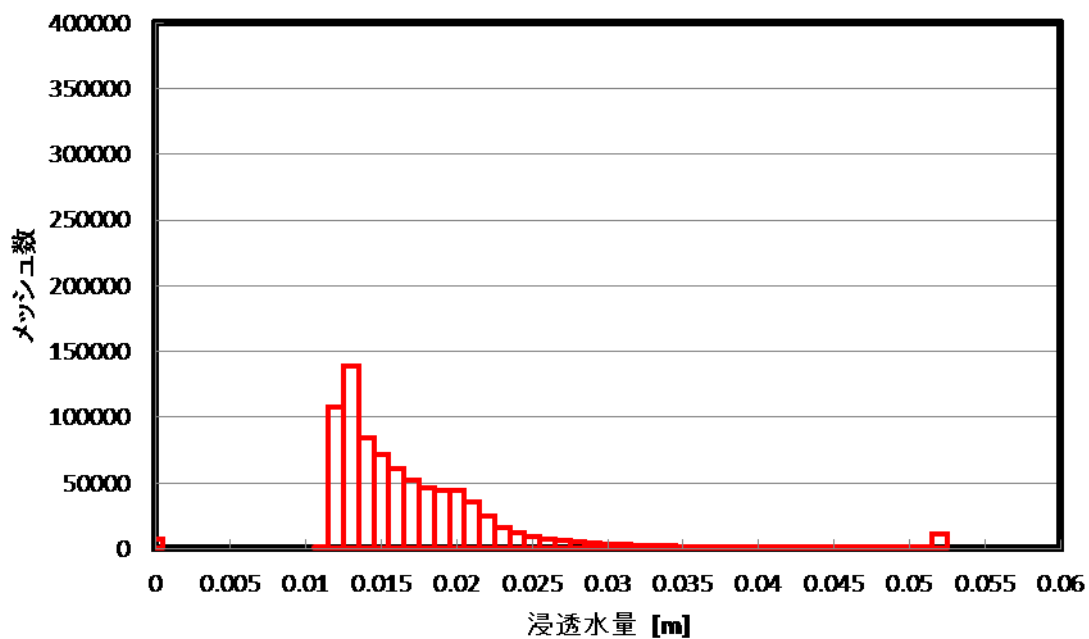


Figure A-159 植林前 草地 浸透水量 2-1-3 PR=20.0

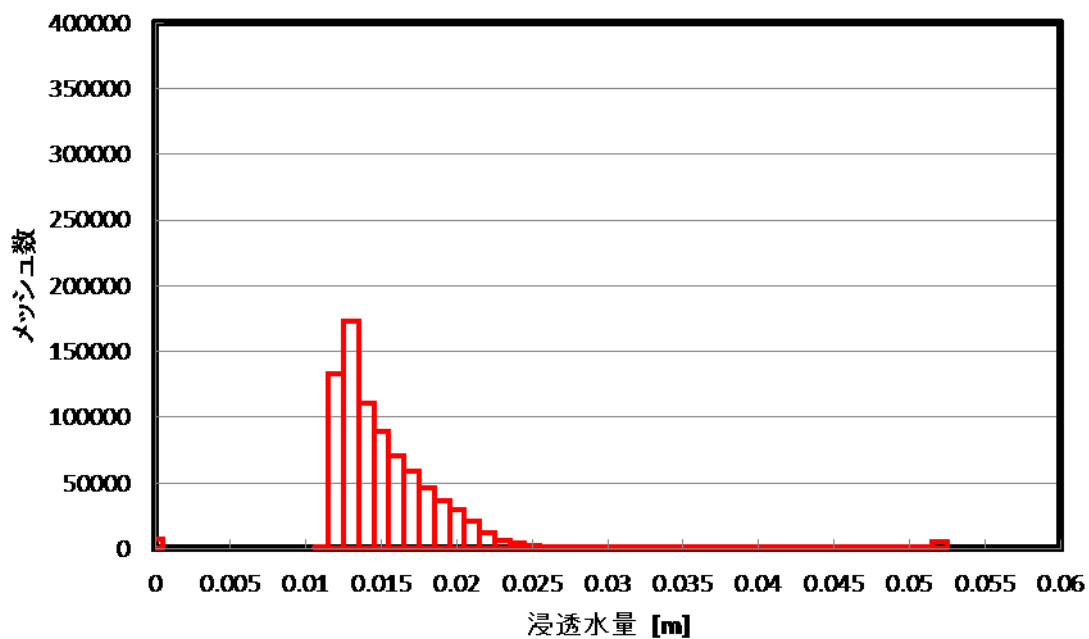


Figure A-160 植林後 草地 浸透水量 2-1-3 PR=20.0

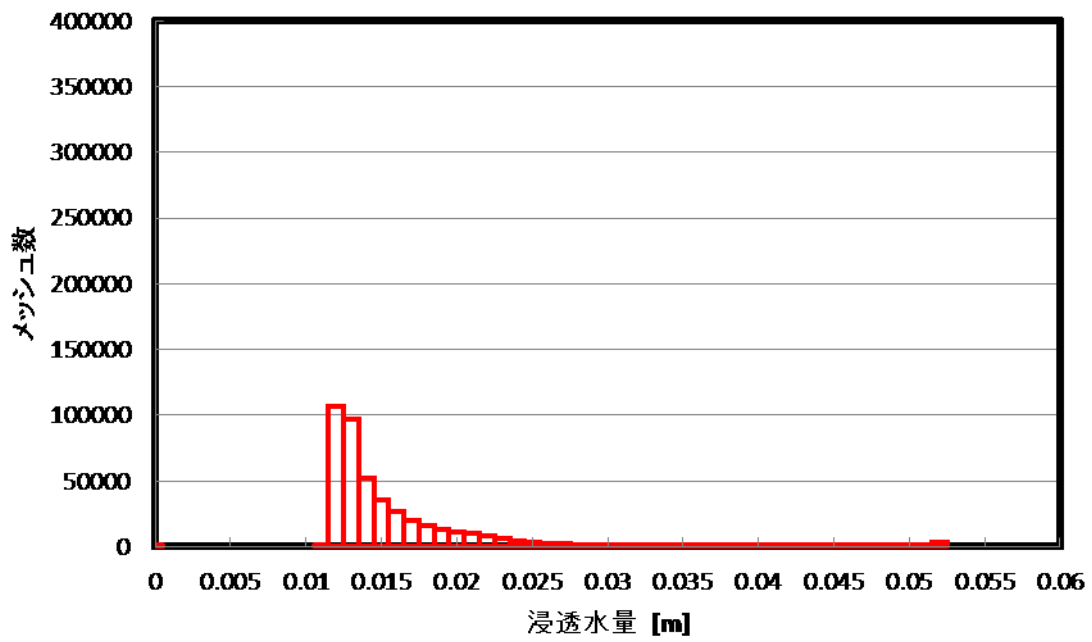


Figure A-161 植林前 森林 浸透水量 2-1-3 PR=20.0

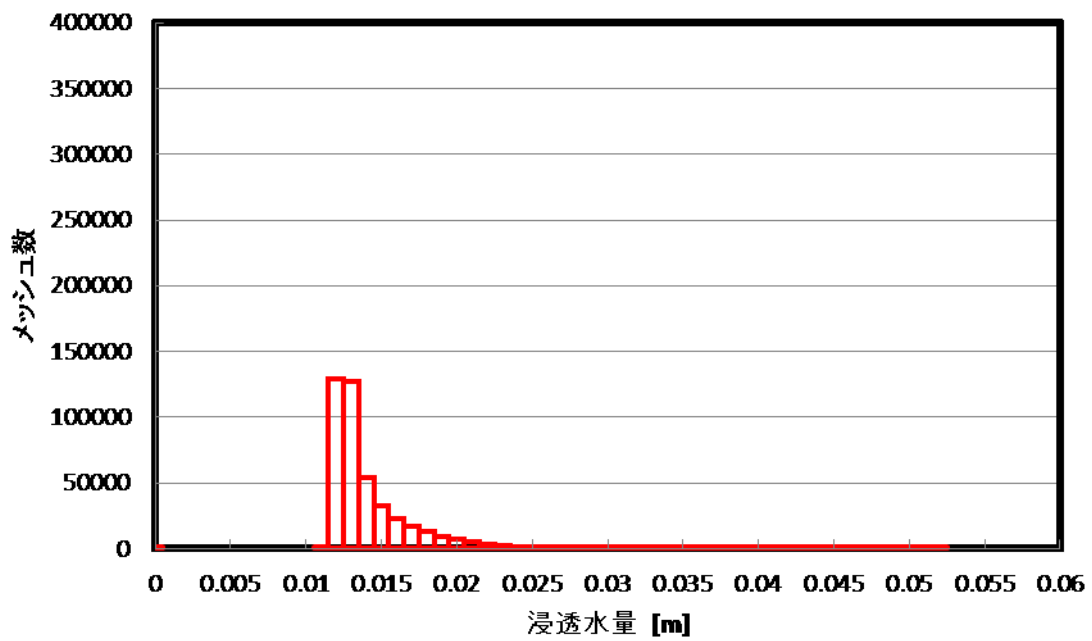


Figure A-162 植林後 森林 浸透水量 2-1-3 PR=20.0

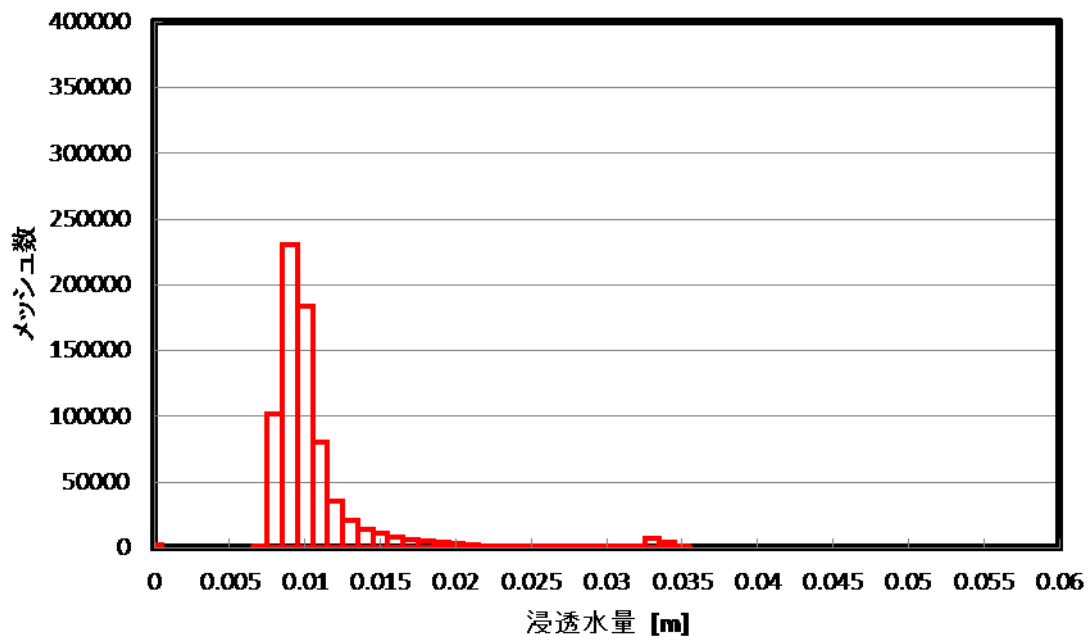


Figure A-163 植林前 裸地 浸透水量 2-2-1 PR=20.0

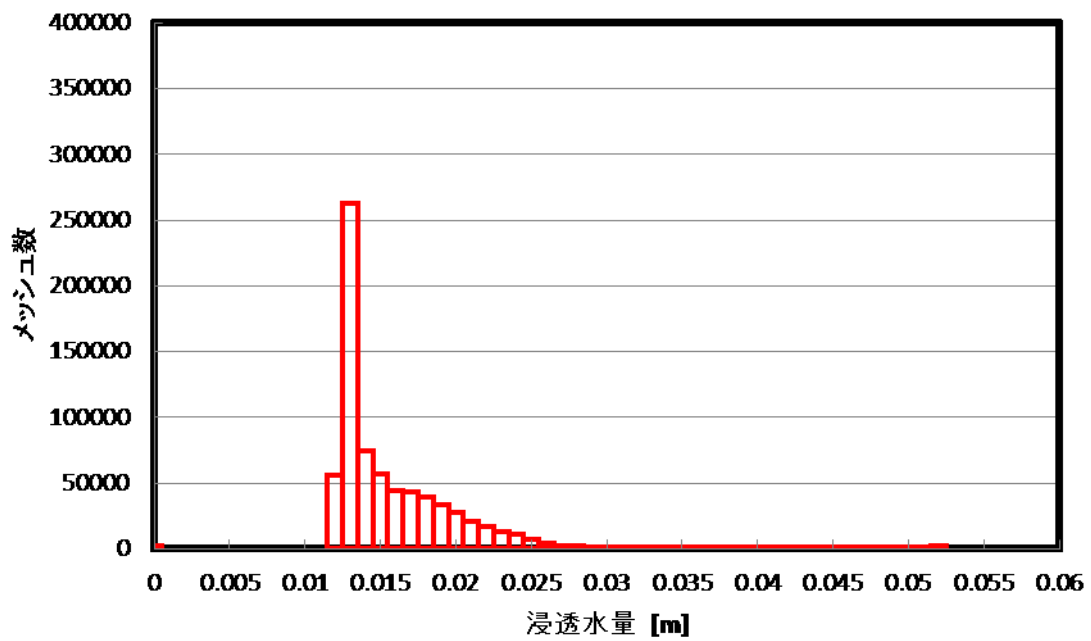


Figure A-164 植林後 裸地 浸透水量 2-2-1 PR=20.0

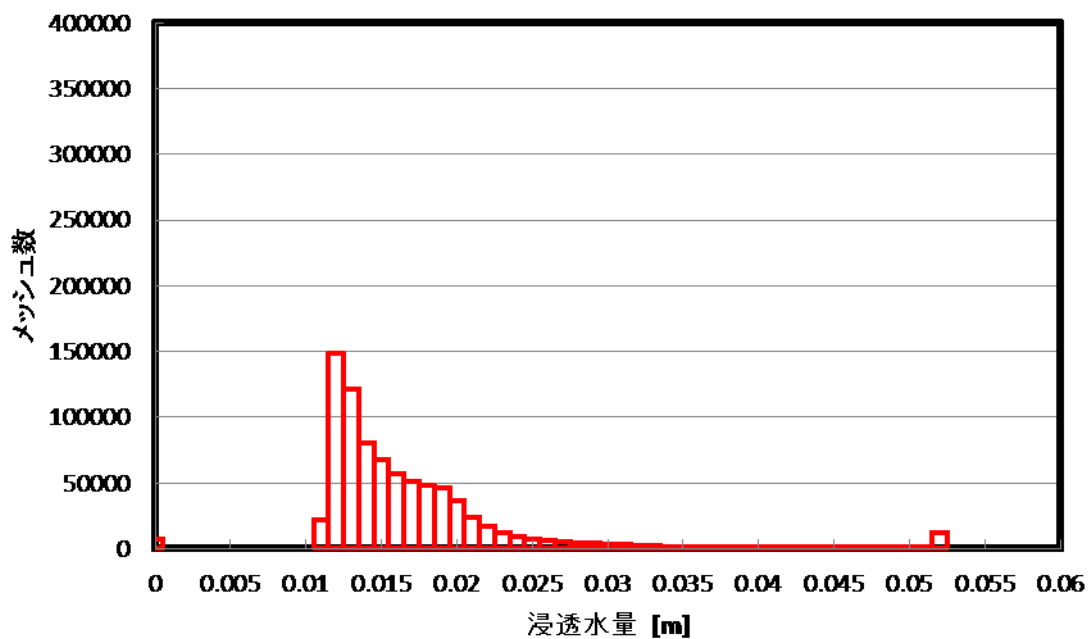


Figure A-165 植林前 草地 浸透水量 2-2-1 PR=20.0

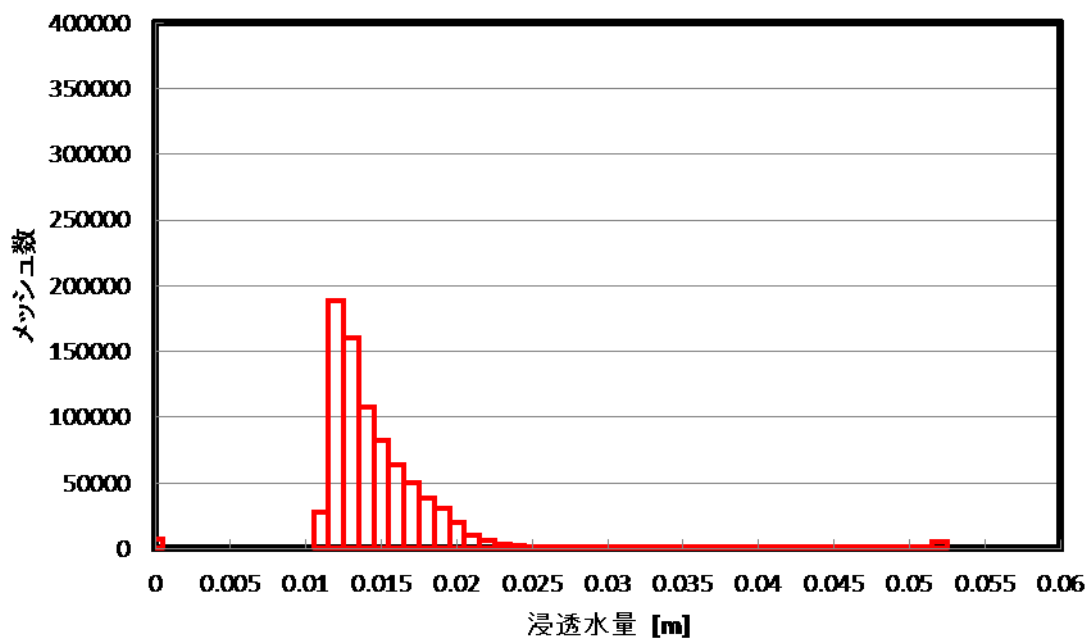


Figure A-166 植林後 草地 浸透水量 2-2-1 PR=20.0

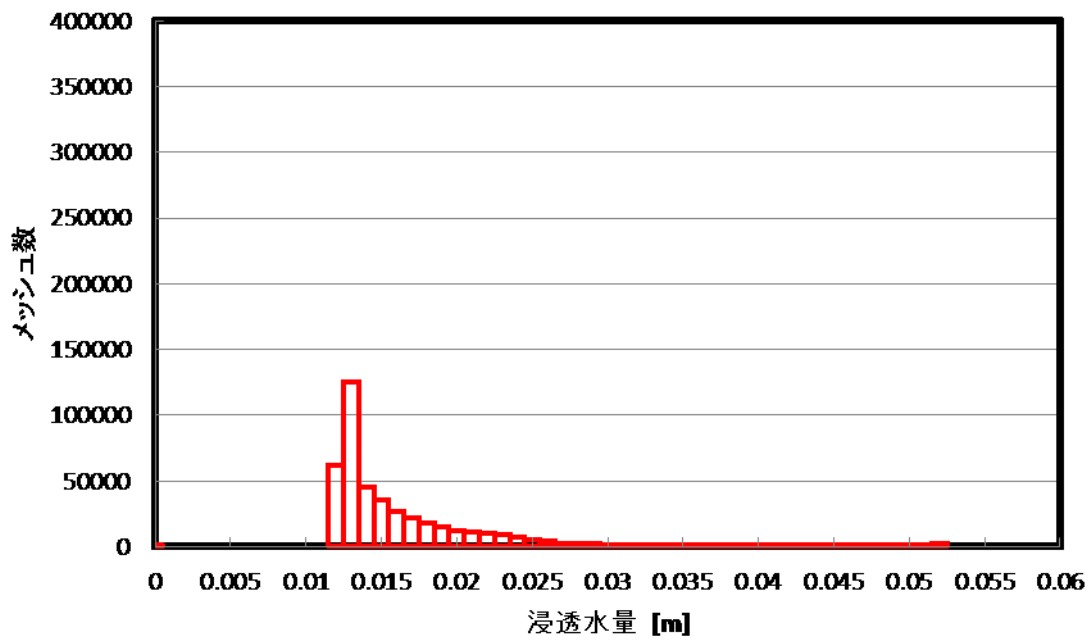


Figure A-167 植林前 森林 浸透水量 2-2-1 PR=20.0

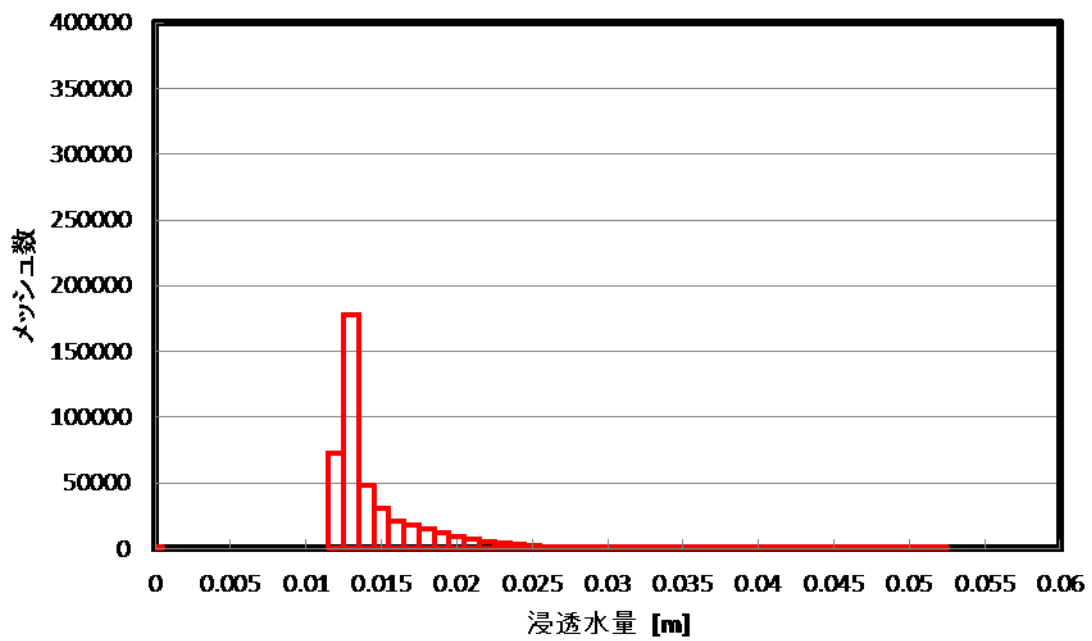


Figure A-168 植林後 森林 浸透水量 2-2-1 PR=20.0

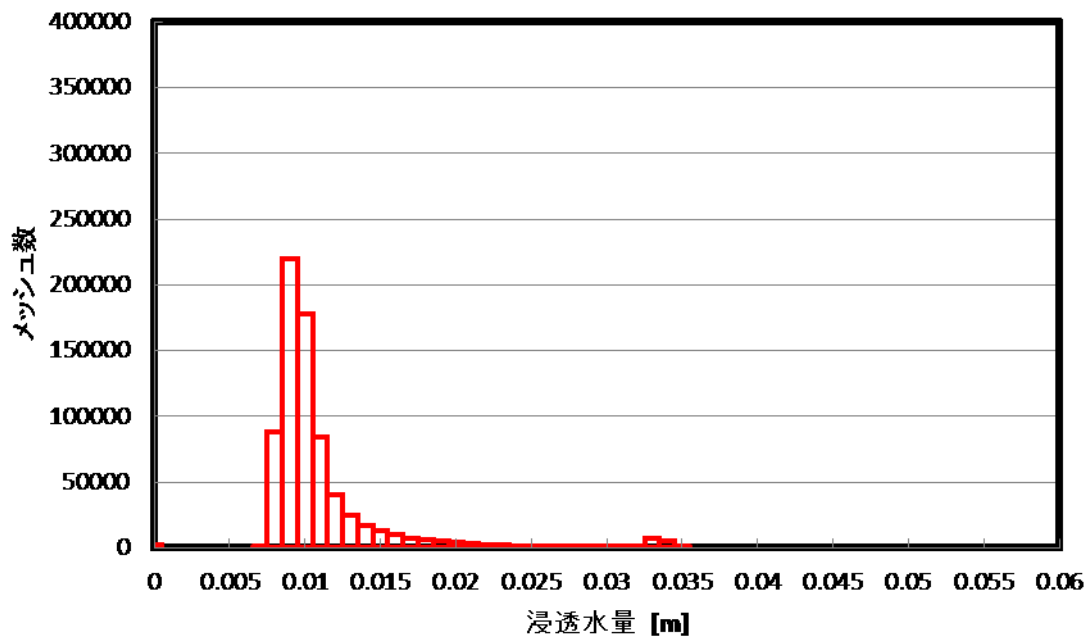


Figure A-169 植林前 裸地 浸透水量 2-2-2 PR=20.0

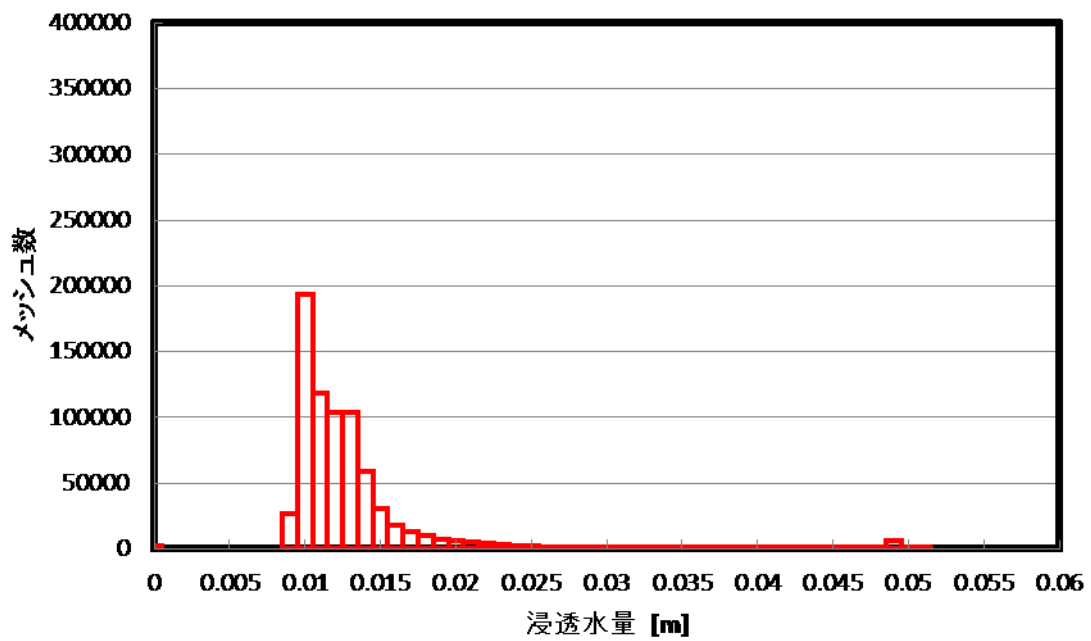


Figure A-170 植林後 裸地 浸透水量 2-2-2 PR=20.0

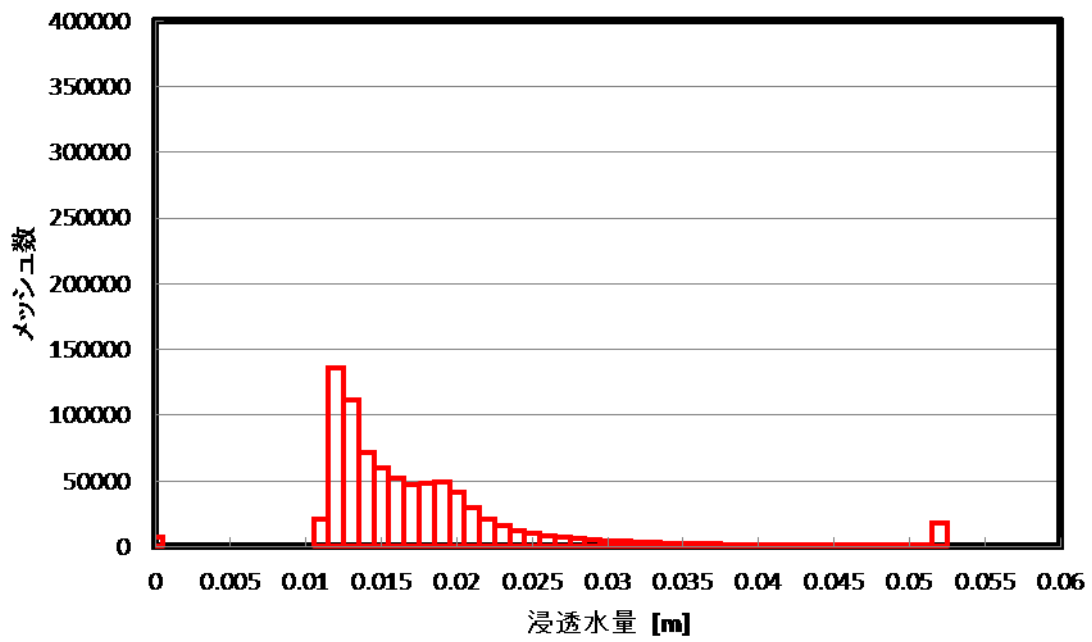


Figure A-171 植林前 草地 浸透水量 2-2-2 PR=20.0

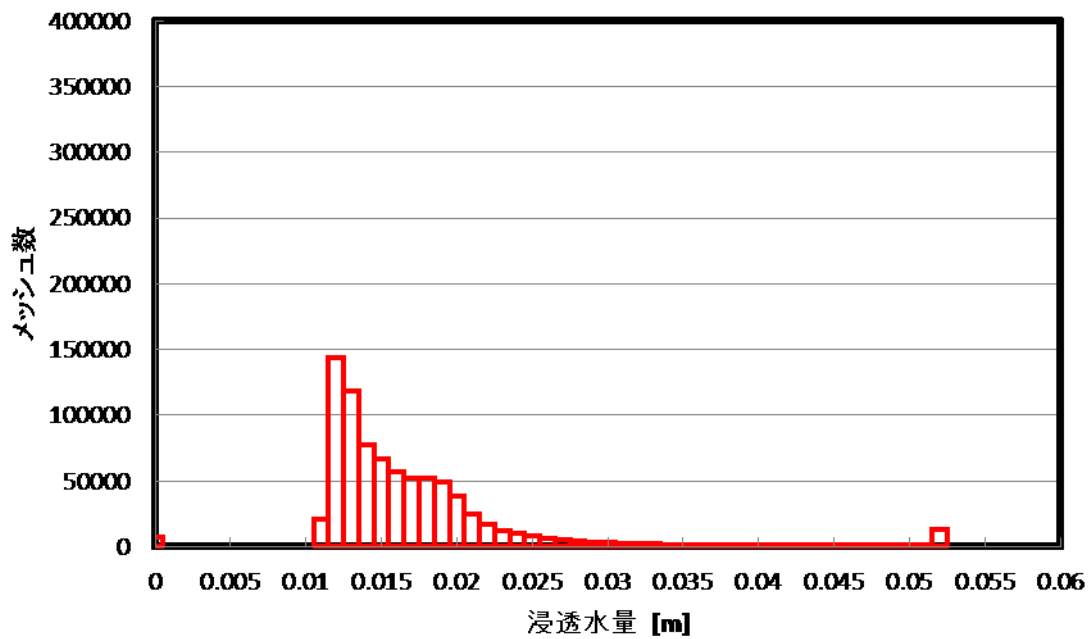


Figure A-172 植林後 草地 浸透水量 2-2-2 PR=20.0

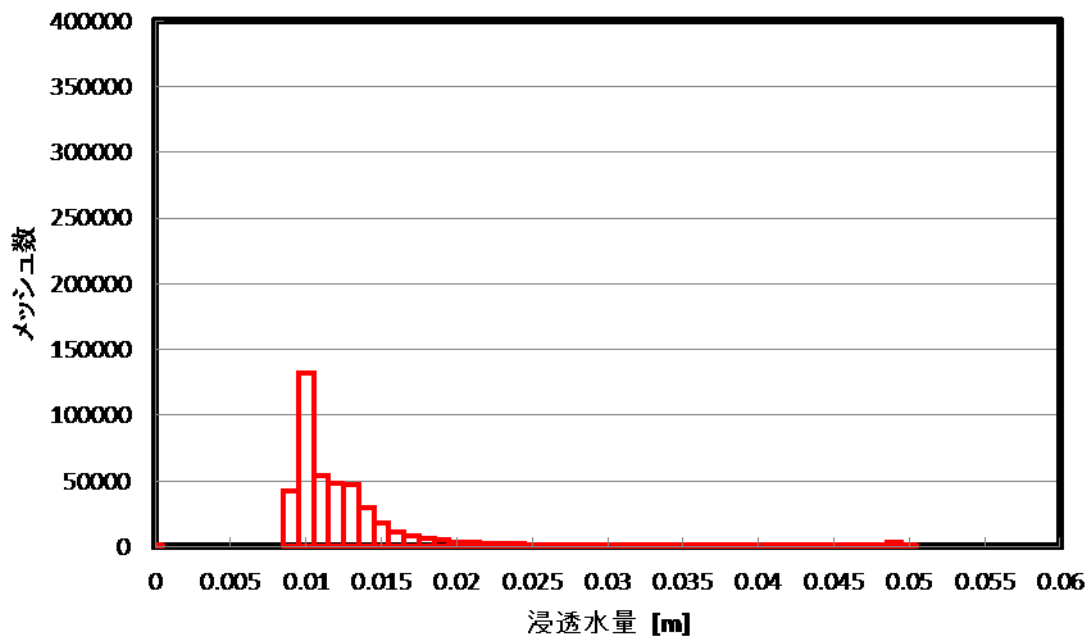


Figure A-173 植林前 森林 浸透水量 2-2-2 PR=20.0

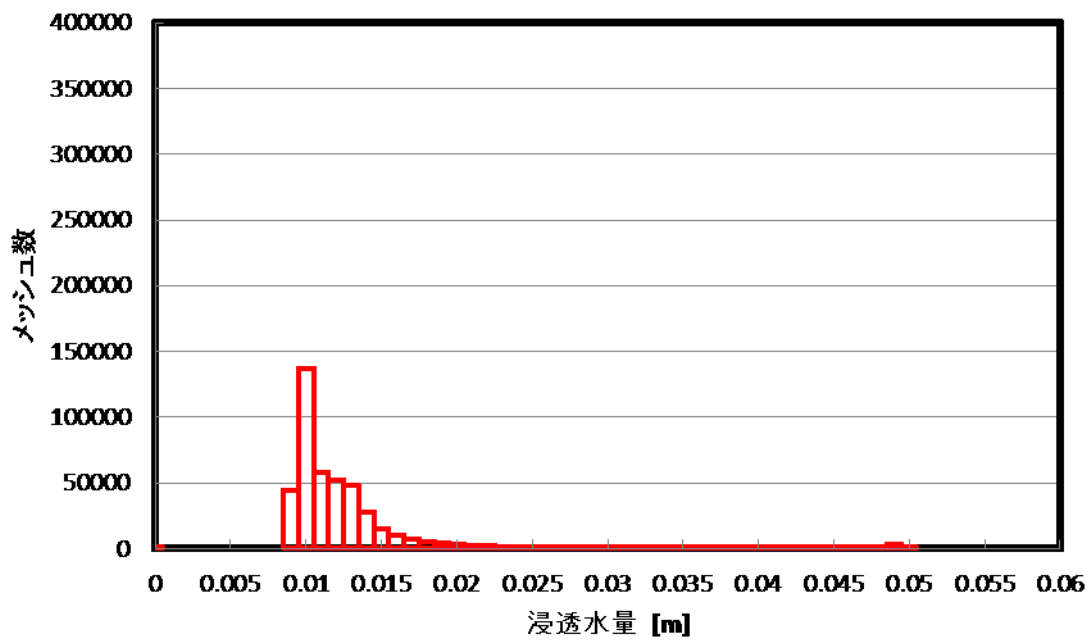


Figure A-174 植林後 森林 浸透水量 2-2-2 PR=20.0

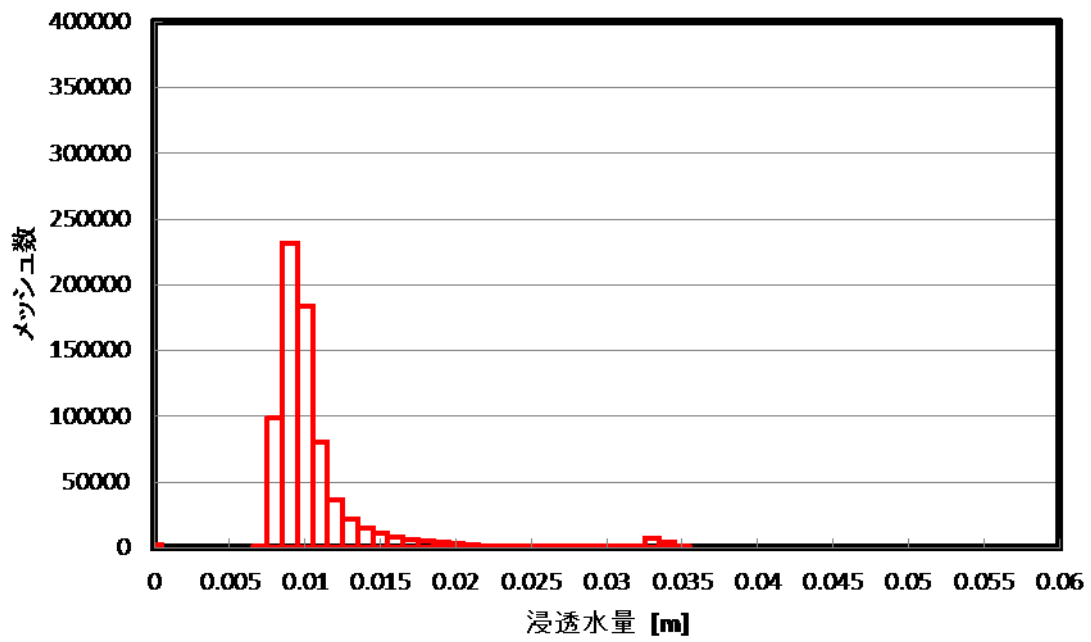


Figure A-175 植林前 裸地 浸透水量 2-2-3 PR=20.0

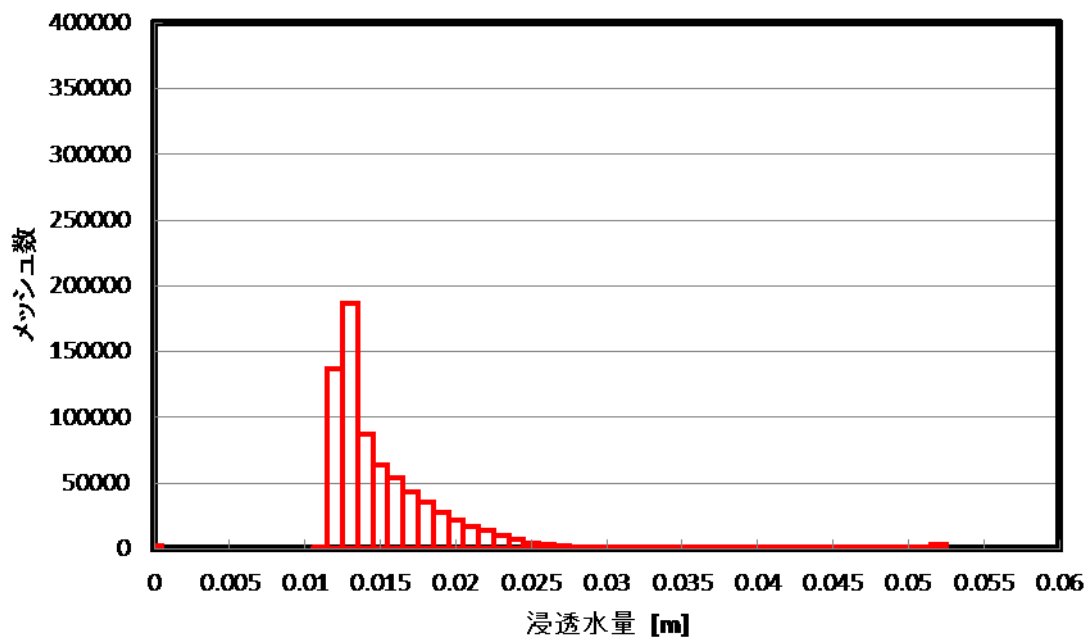


Figure A-176 植林後 裸地 浸透水量 2-2-3 PR=20.0

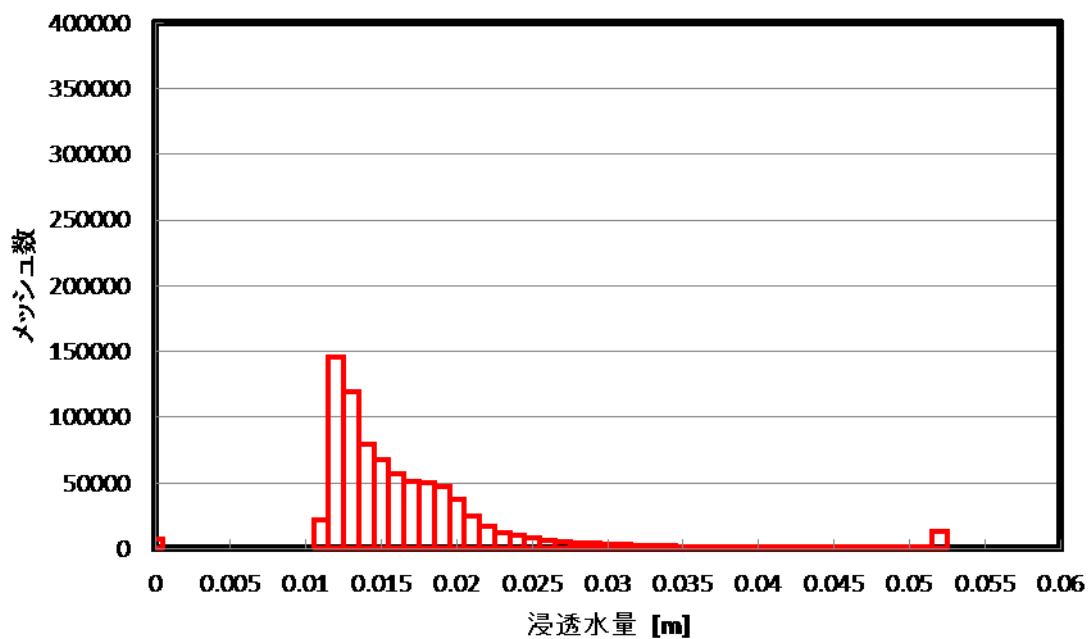


Figure A-177 植林前 草地 浸透水量 2-2-3 PR=20.0

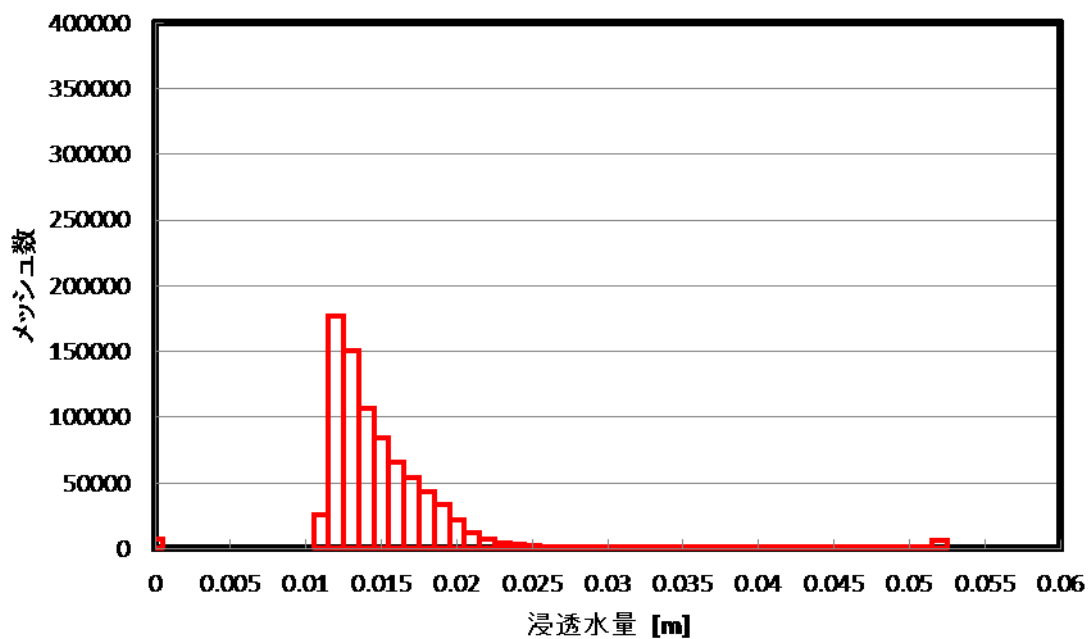


Figure A-178 植林後 草地 浸透水量 2-2-3 PR=20.0

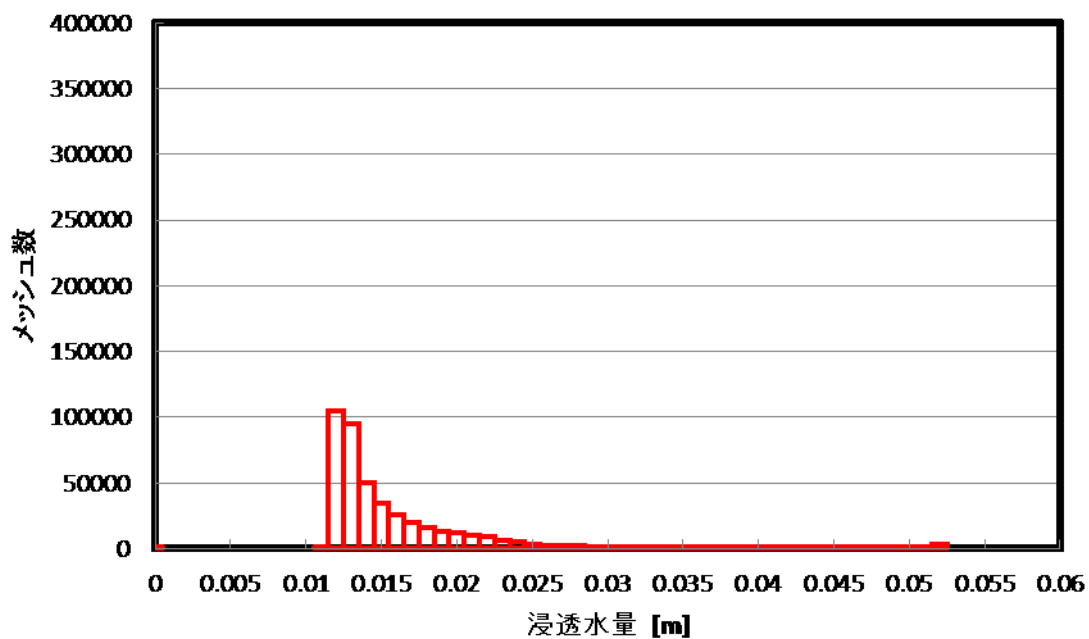


Figure A-179 植林前 森林 浸透水量 2-2-3 PR=20.0

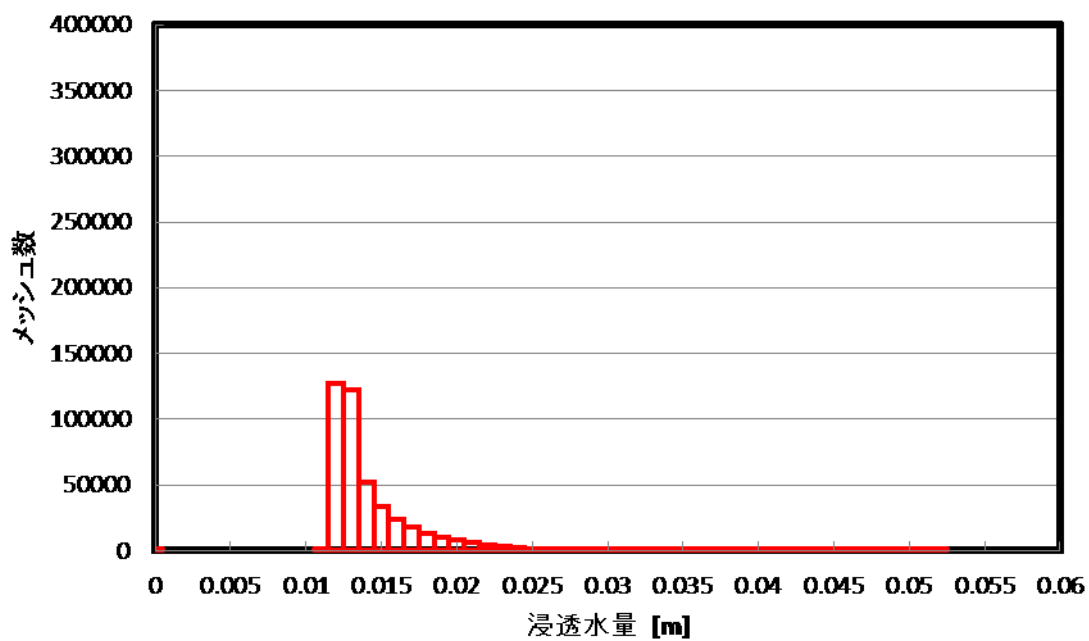


Figure A-180 植林後 森林 浸透水量 2-2-3 PR=20.0

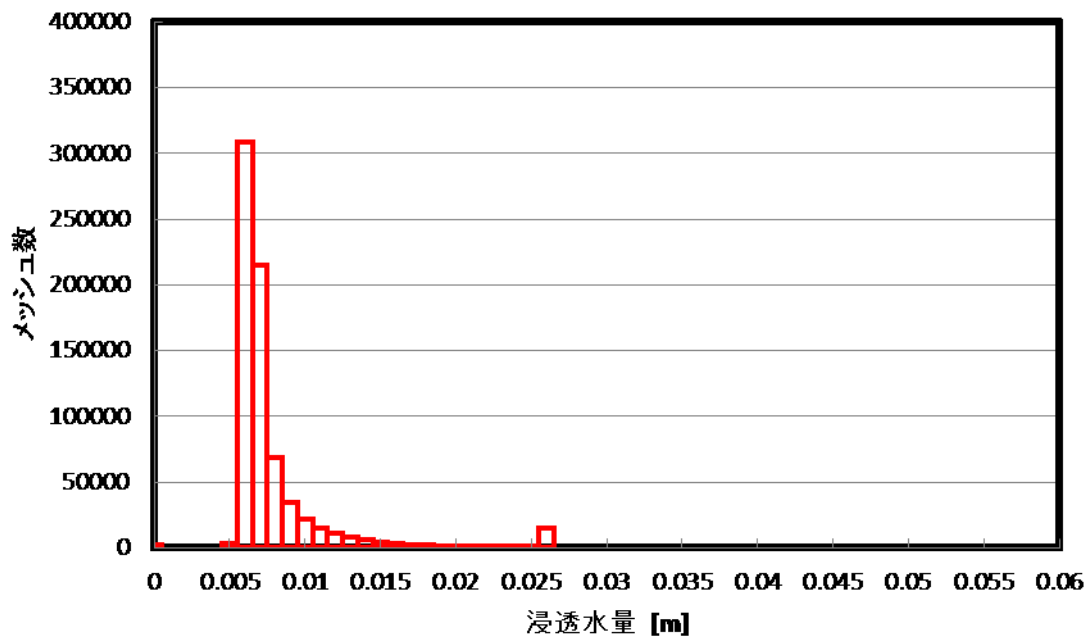


Figure A-181 植林前 裸地 浸透水量 3-1-1 PR=20.0

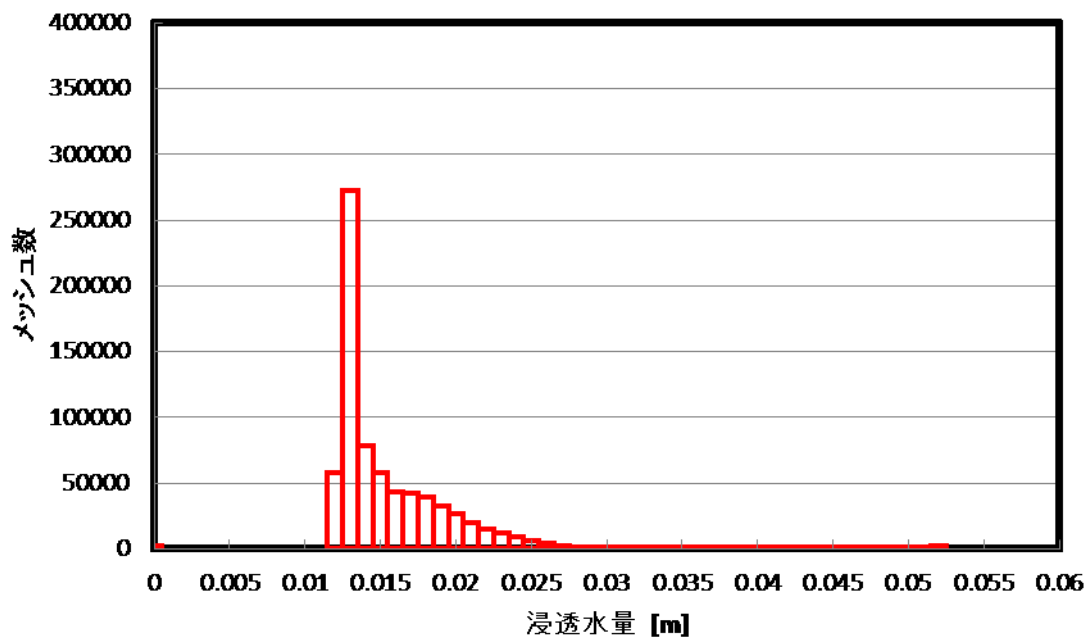


Figure A-182 植林後 裸地 浸透水量 3-1-1 PR=20.0

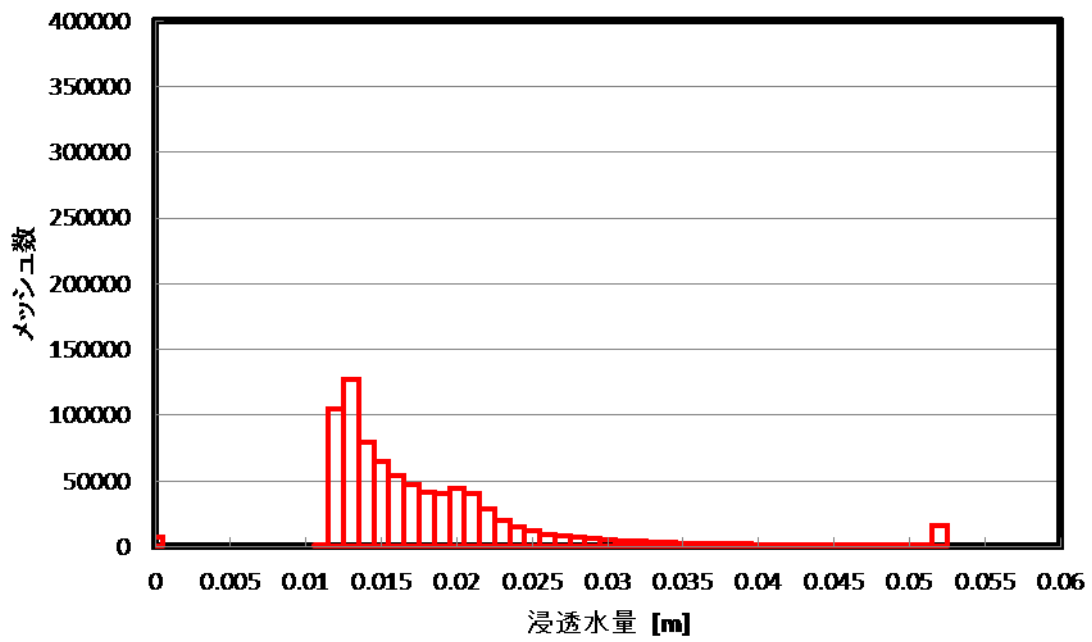


Figure A-183 植林前 草地 浸透水量 3-1-1 PR=20.0

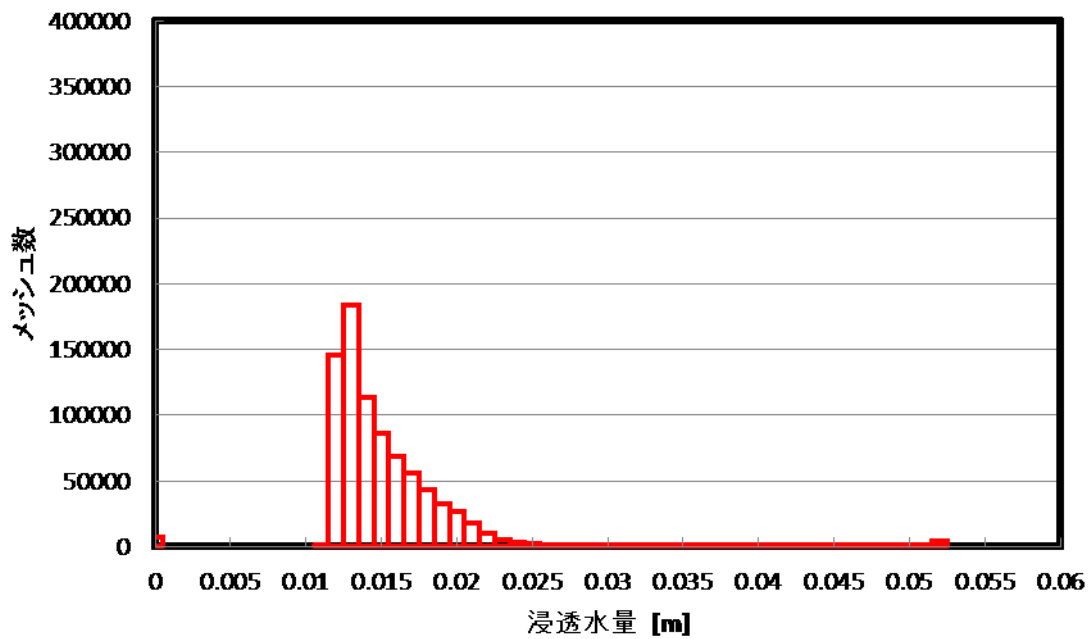


Figure A-184 植林後 草地 浸透水量 3-1-1 PR=20.0

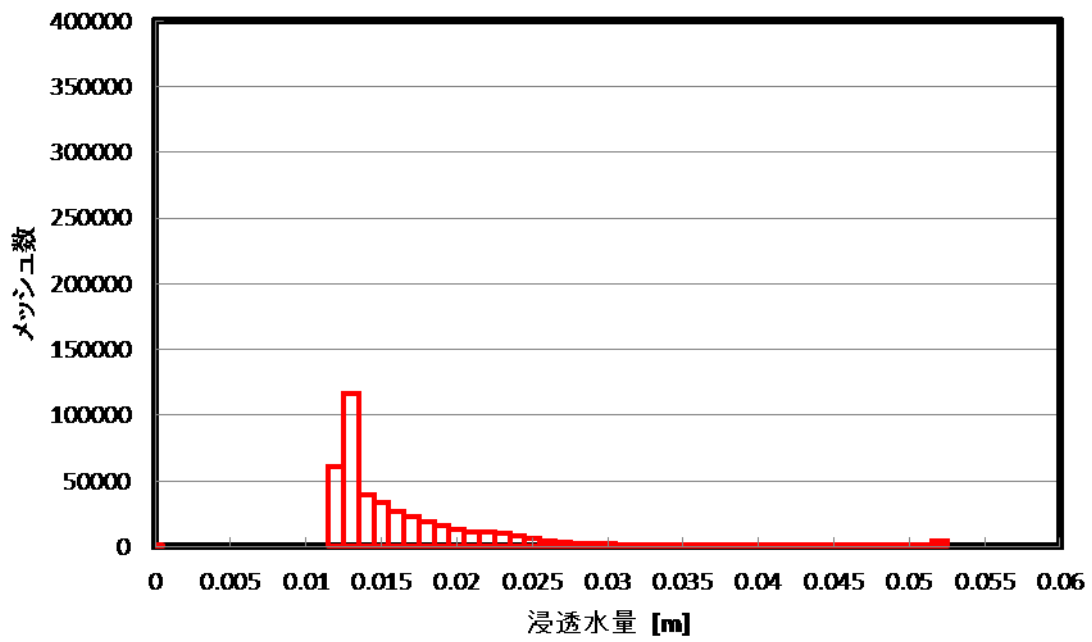


Figure A-185 植林前 森林 浸透水量 3-1-1 $PR=20.0$

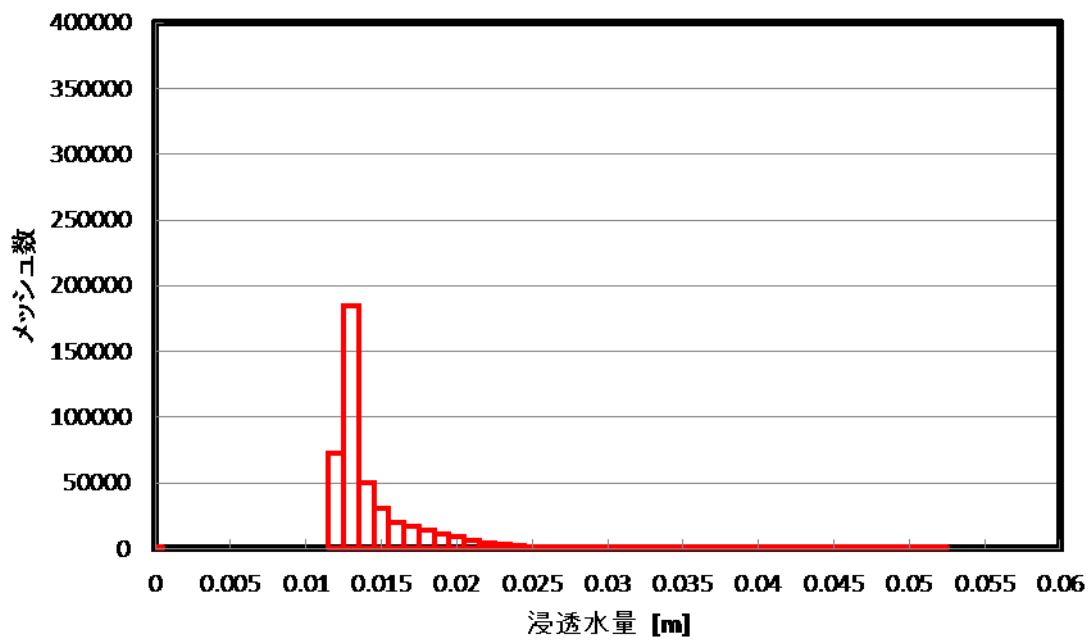


Figure A-186 植林後 森林 浸透水量 3-1-1 $PR=20.0$

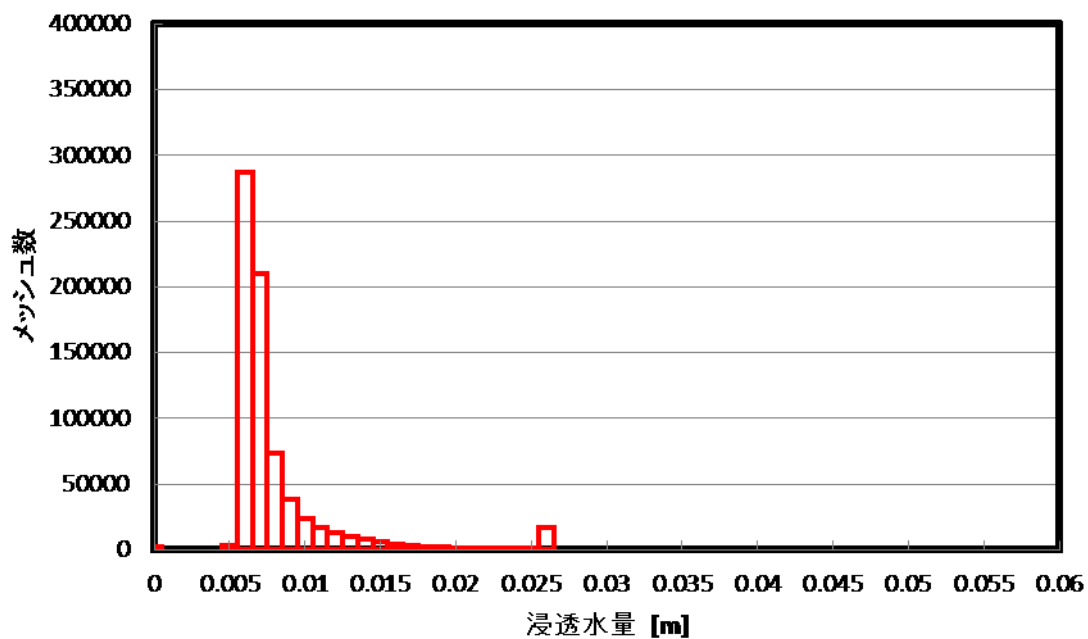


Figure A-187 植林前 裸地 浸透水量 3-1-2 PR=20.0

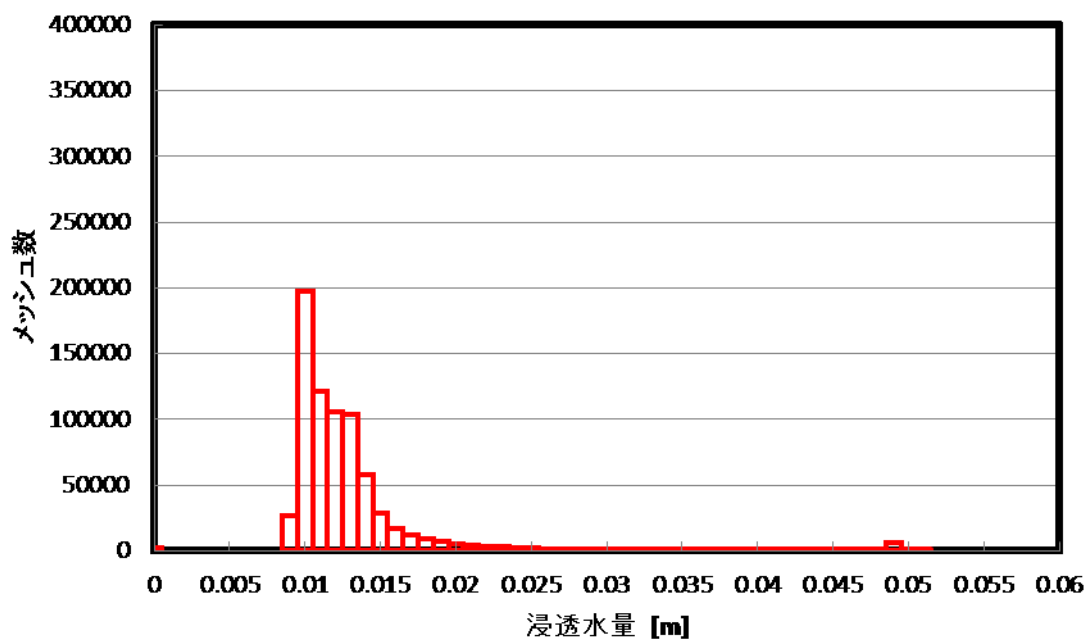


Figure A-188 植林後 裸地 浸透水量 3-1-2 PR=20.0

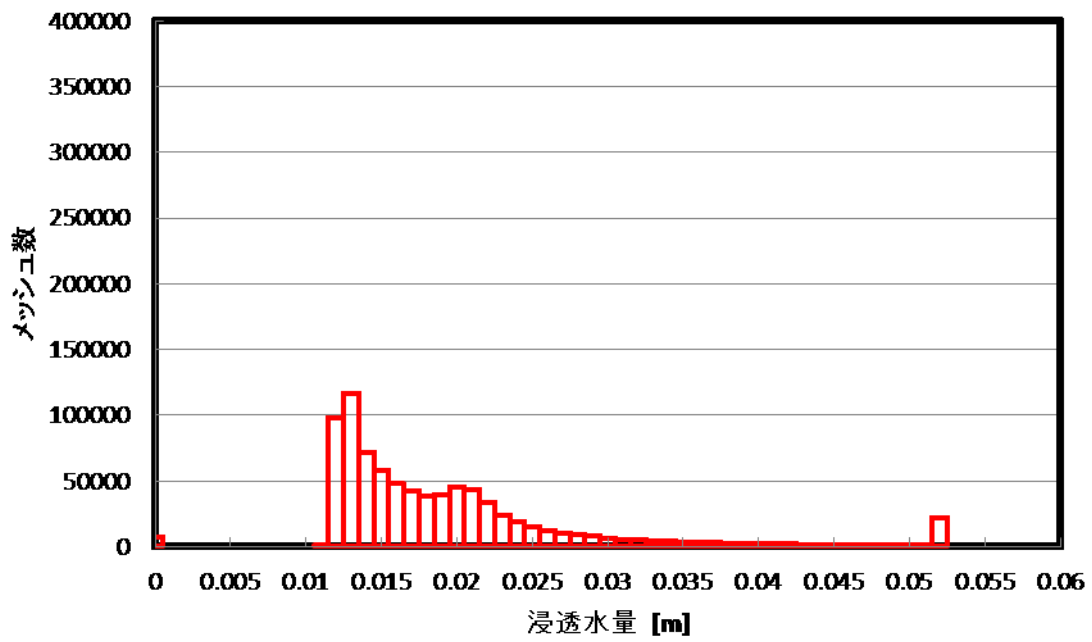


Figure A-189 植林前 草地 浸透水量 3-1-2 PR=20.0

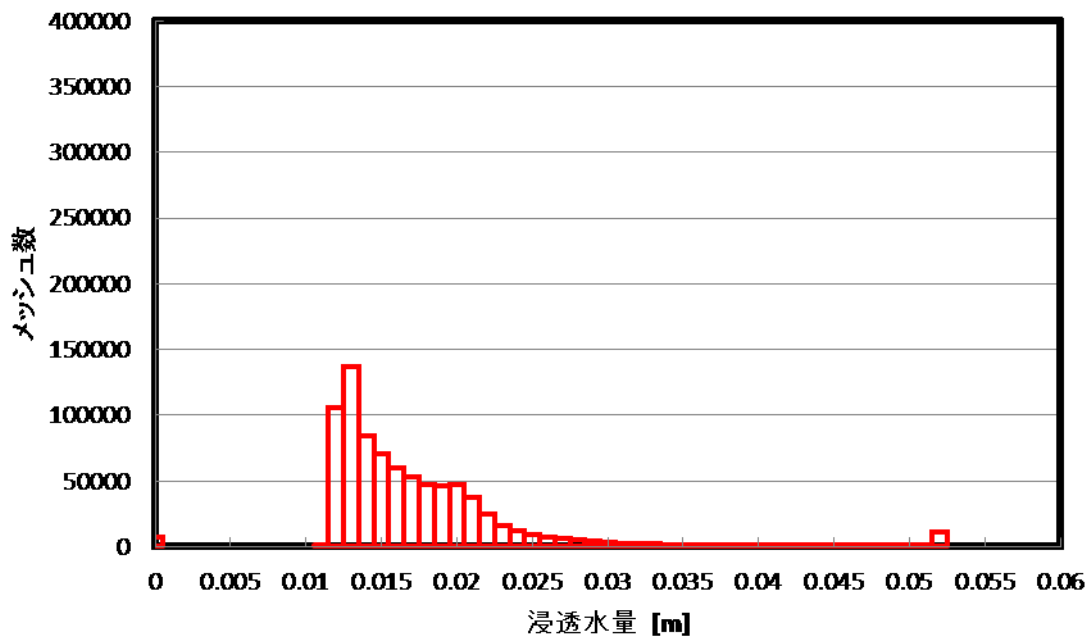


Figure A-190 植林後 草地 浸透水量 3-1-2 PR=20.0

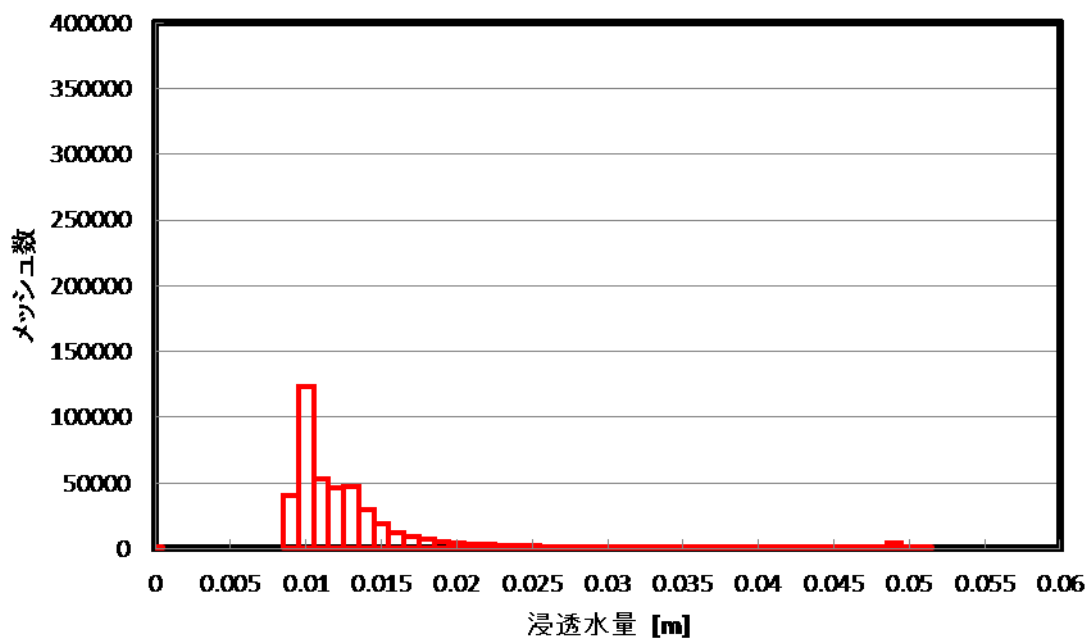


Figure A-191 植林前 森林 浸透水量 3-1-2 PR=20.0

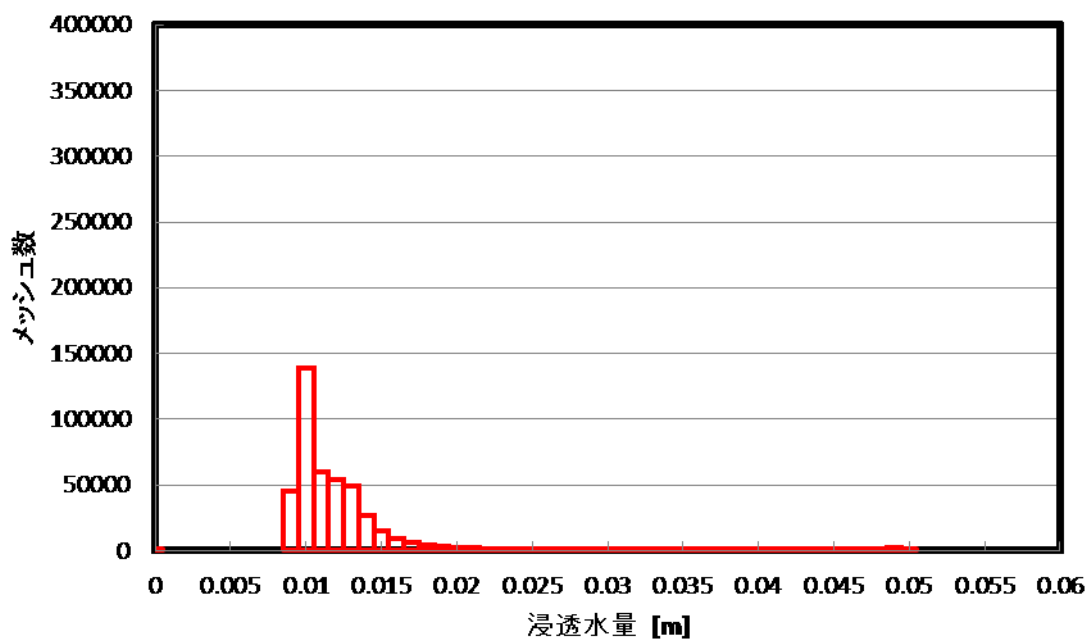


Figure A-192 植林後 森林 浸透水量 3-1-2 PR=20.0

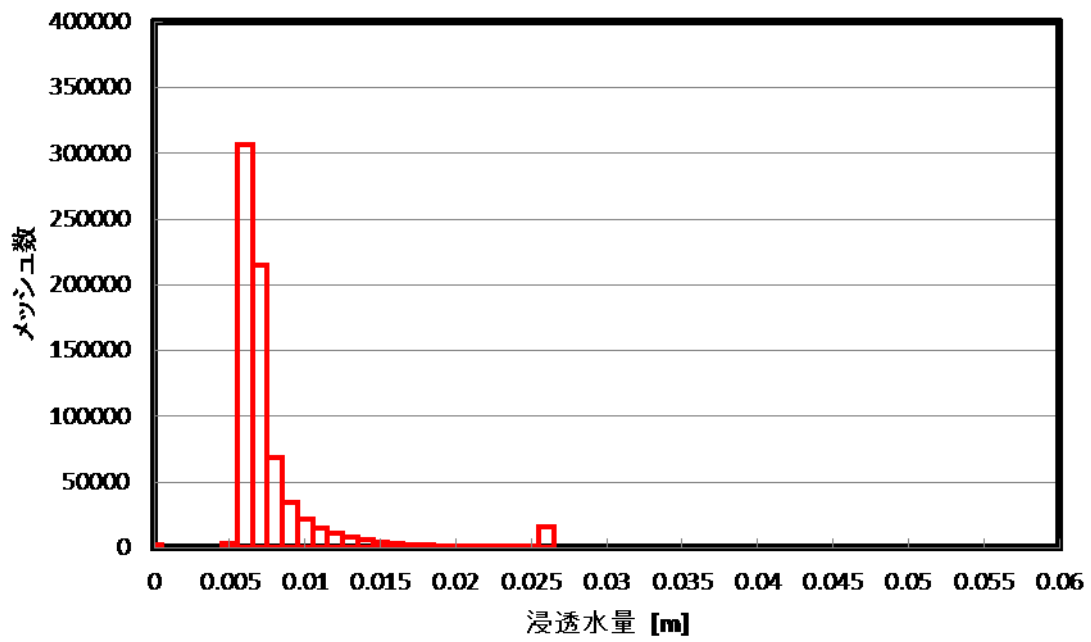


Figure A-193 植林前 裸地 浸透水量 3-1-3 PR=20.0

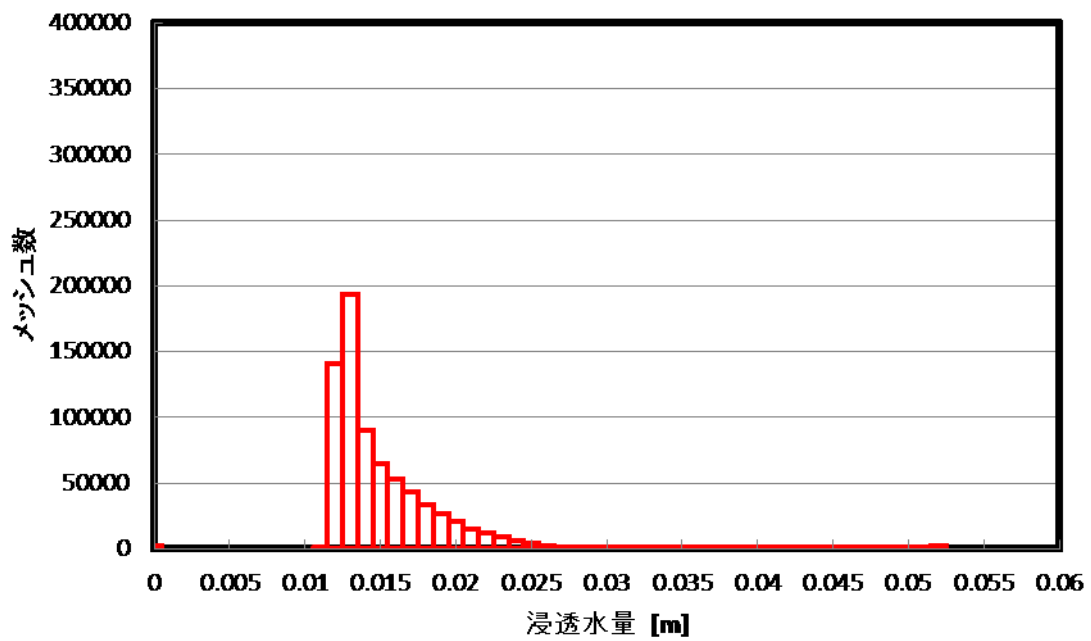


Figure A-194 植林後 裸地 浸透水量 3-1-3 PR=20.0

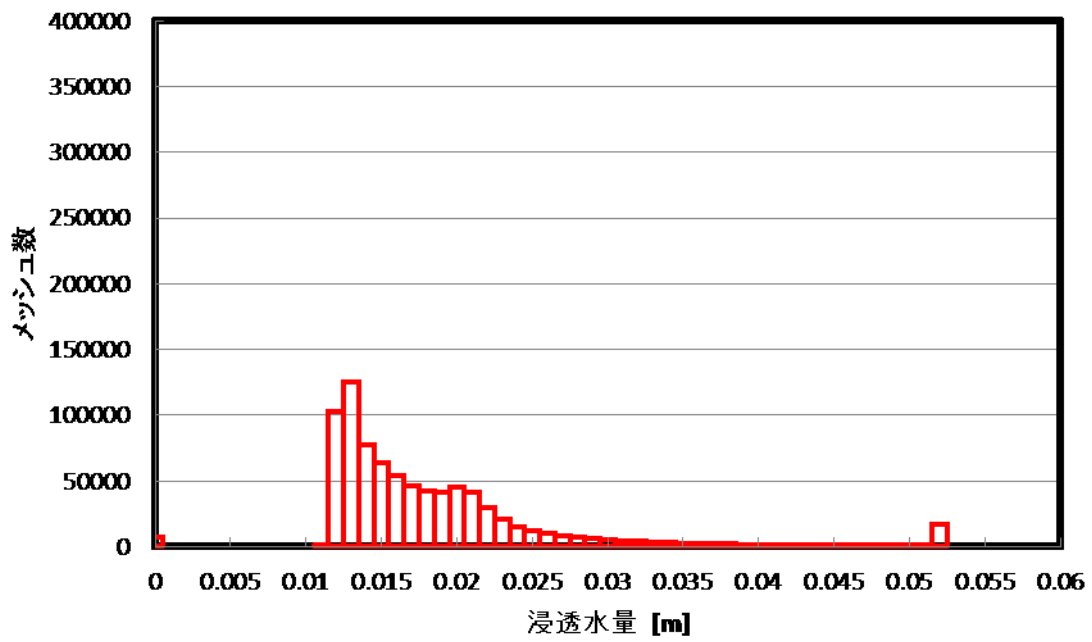


Figure A-195 植林前 草地 浸透水量 3-1-3 PR=20.0

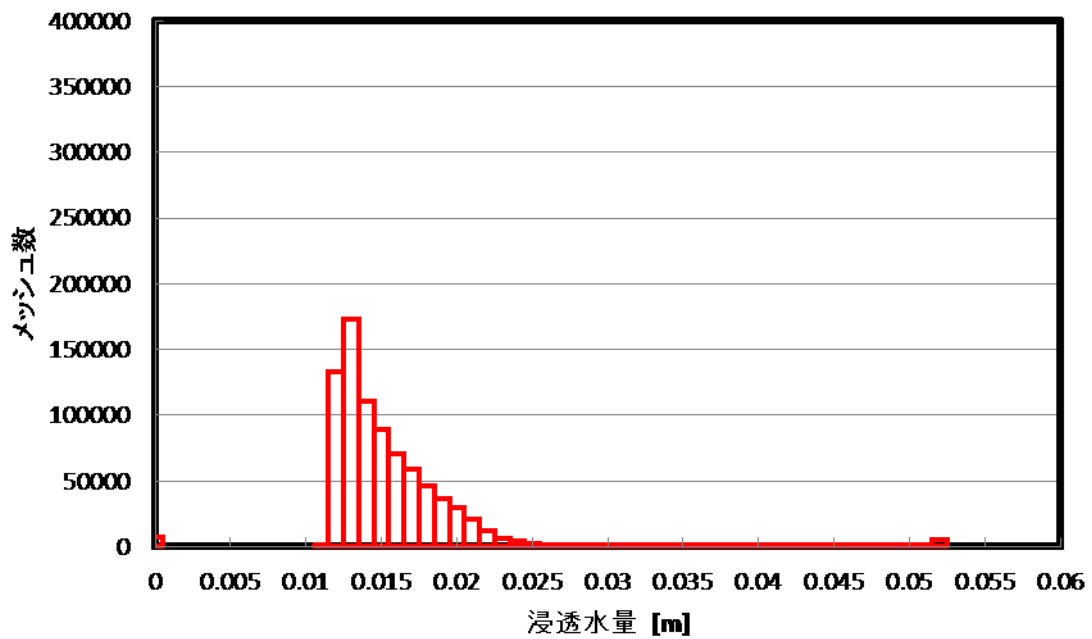


Figure A-196 植林後 草地 浸透水量 3-1-3 PR=20.0

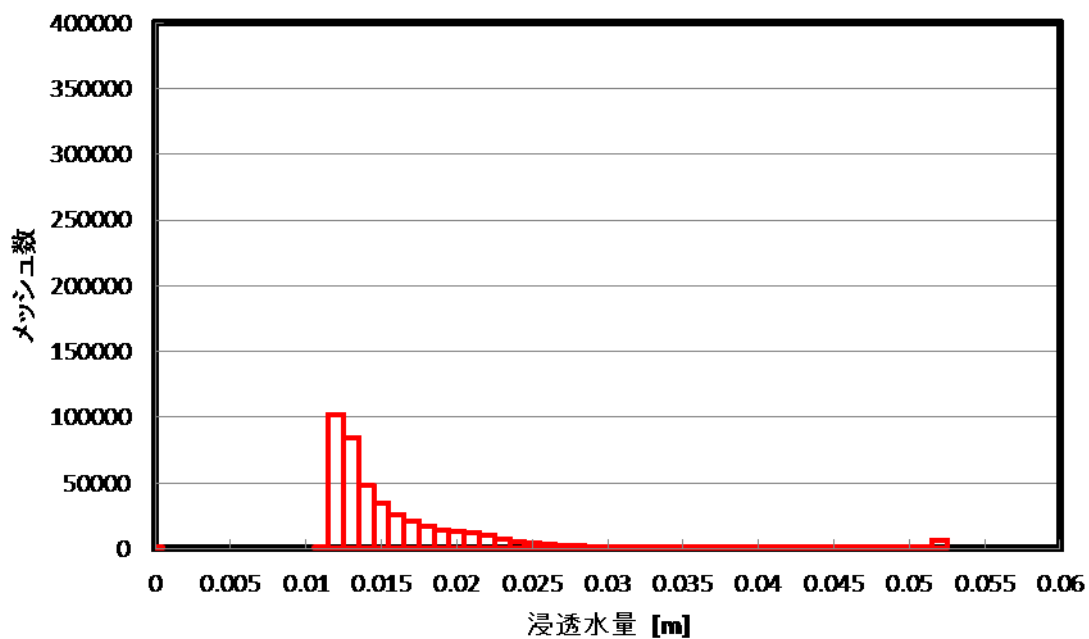


Figure A-197 植林前 森林 浸透水量 3-1-3 PR=20.0

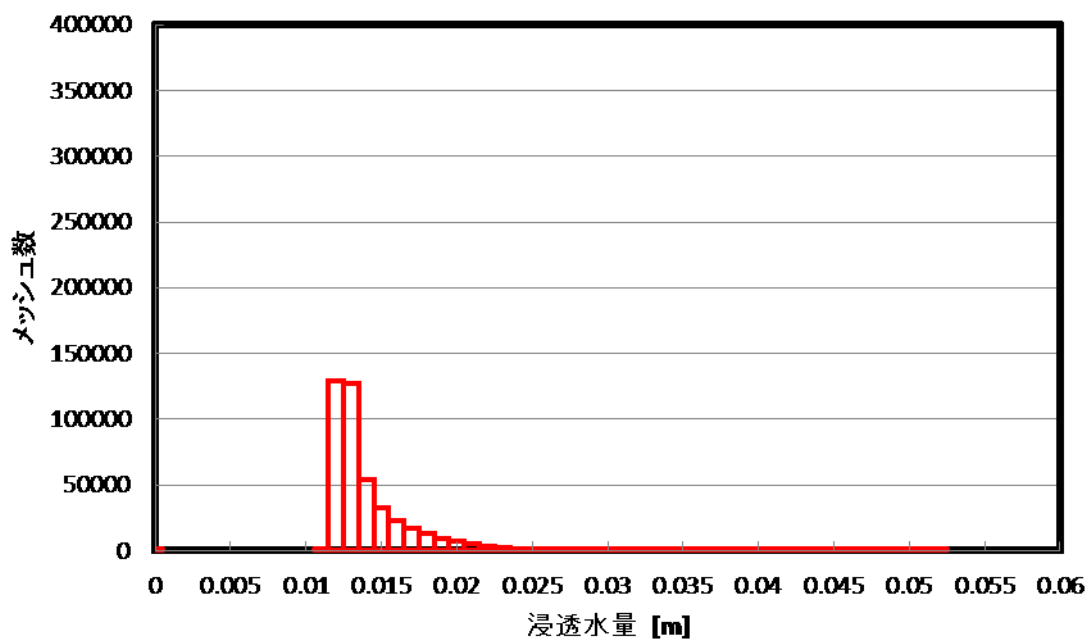


Figure A-198 植林後 森林 浸透水量 3-1-3 PR=20.0

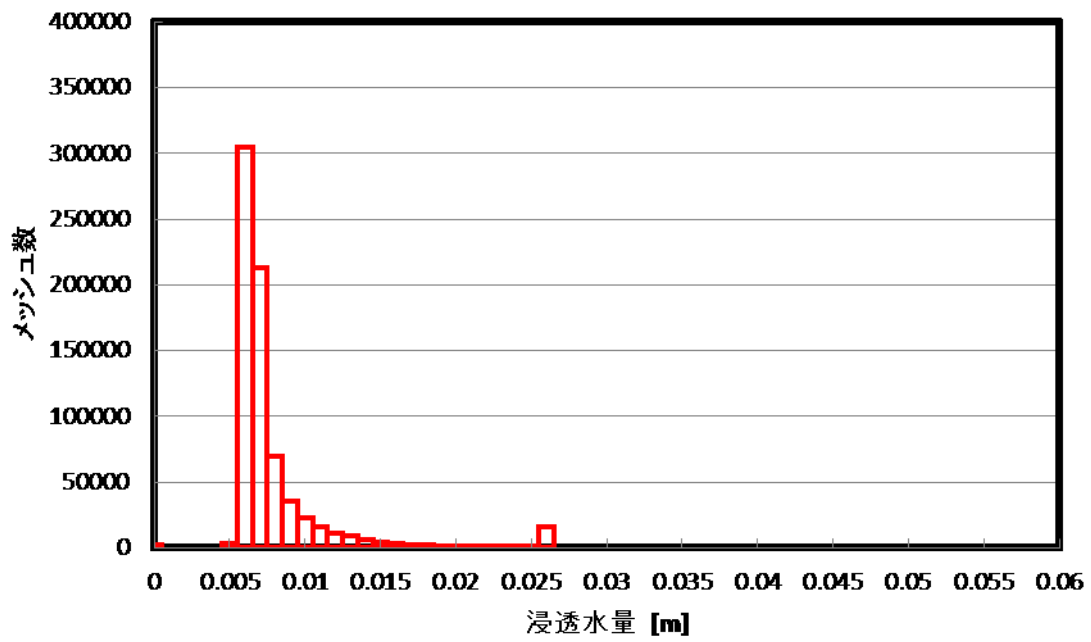


Figure A-199 植林前 裸地 浸透水量 3-2-1 PR=20.0

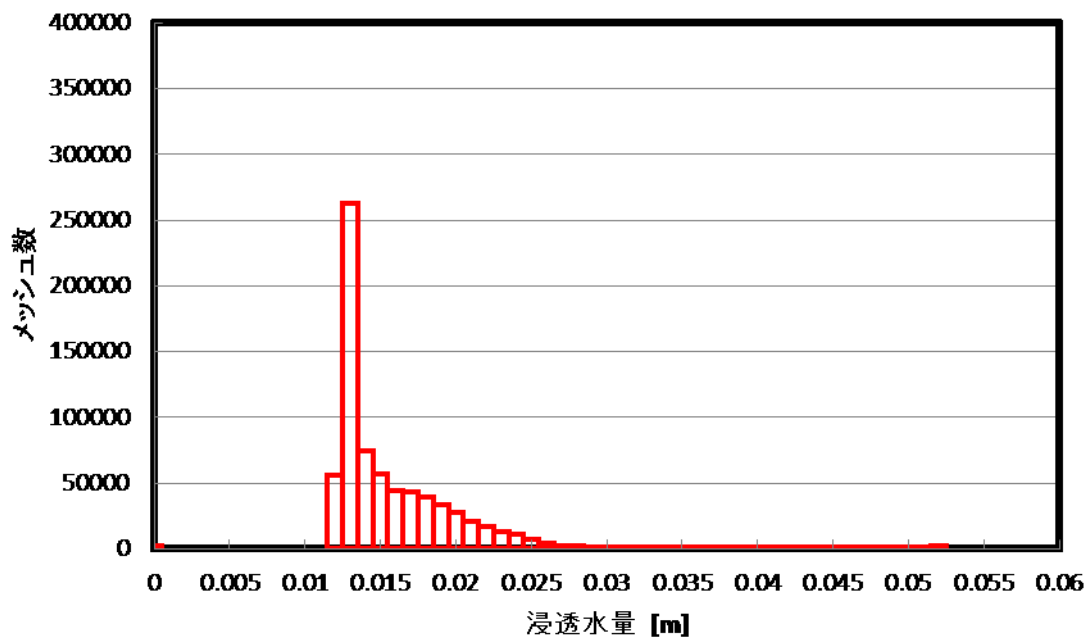


Figure A-200 植林後 裸地 浸透水量 3-2-1 PR=20.0

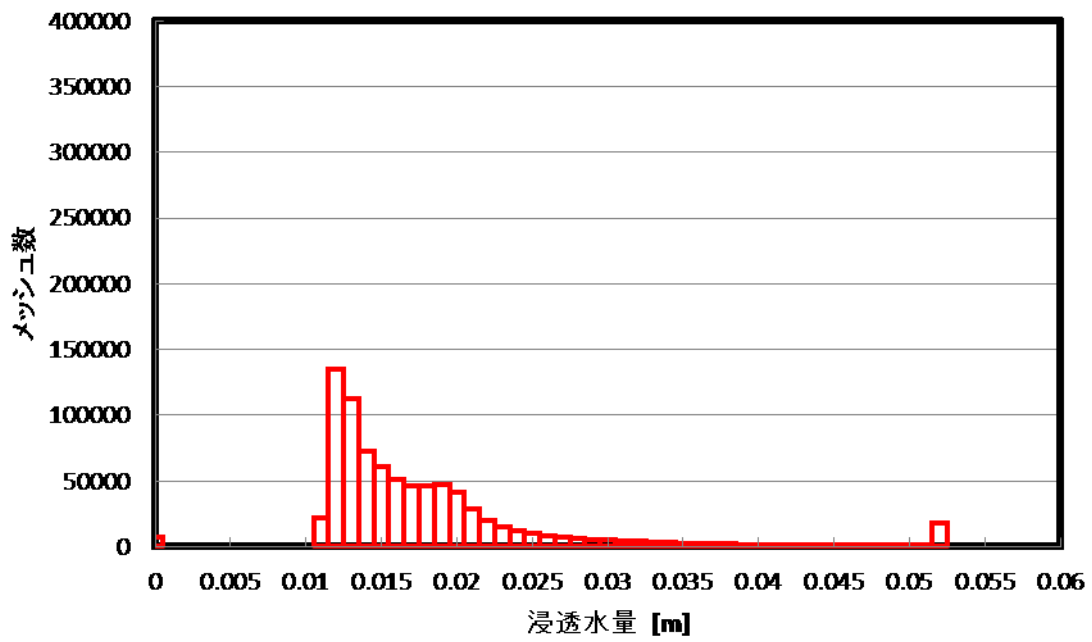


Figure A-201 植林前 草地 浸透水量 3-2-1 PR=20.0

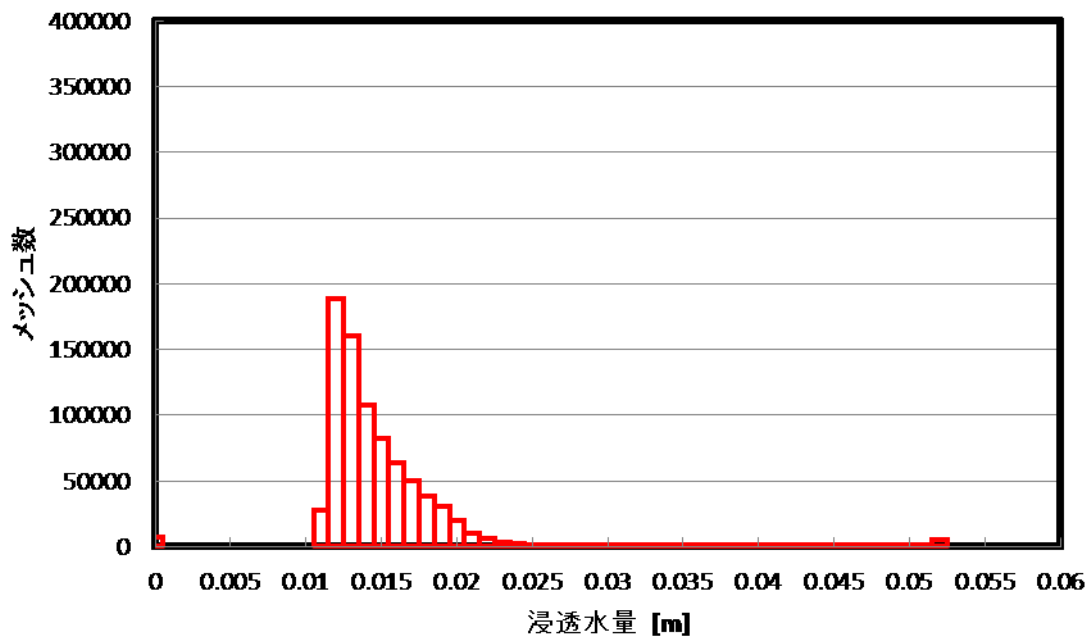


Figure A-202 植林後 草地 浸透水量 3-2-1 PR=20.0

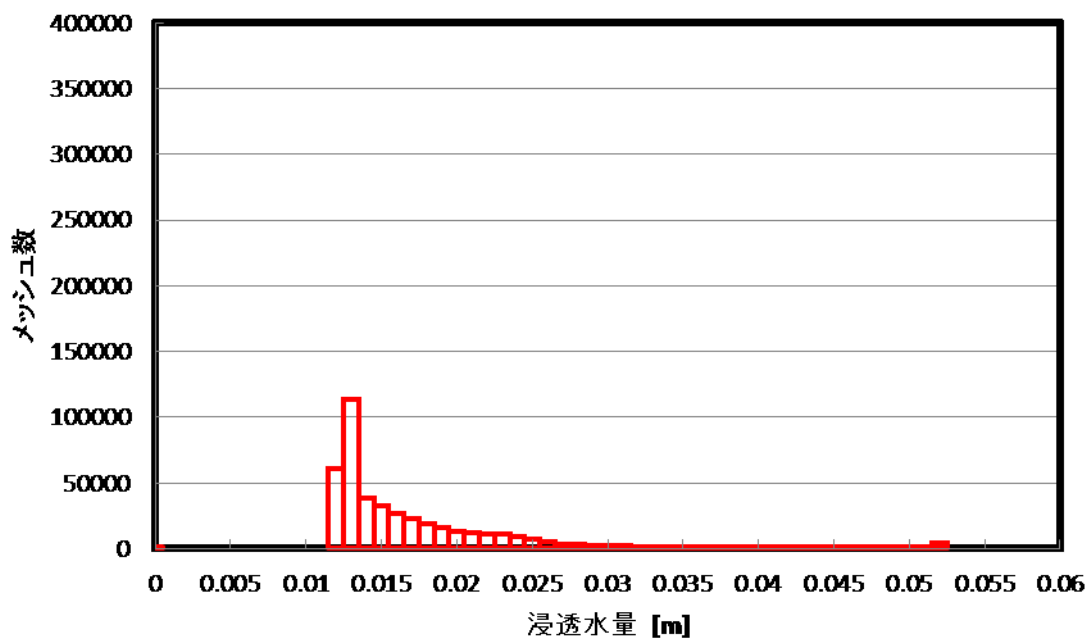


Figure A-203 植林前 森林 浸透水量 3-2-1 PR=20.0

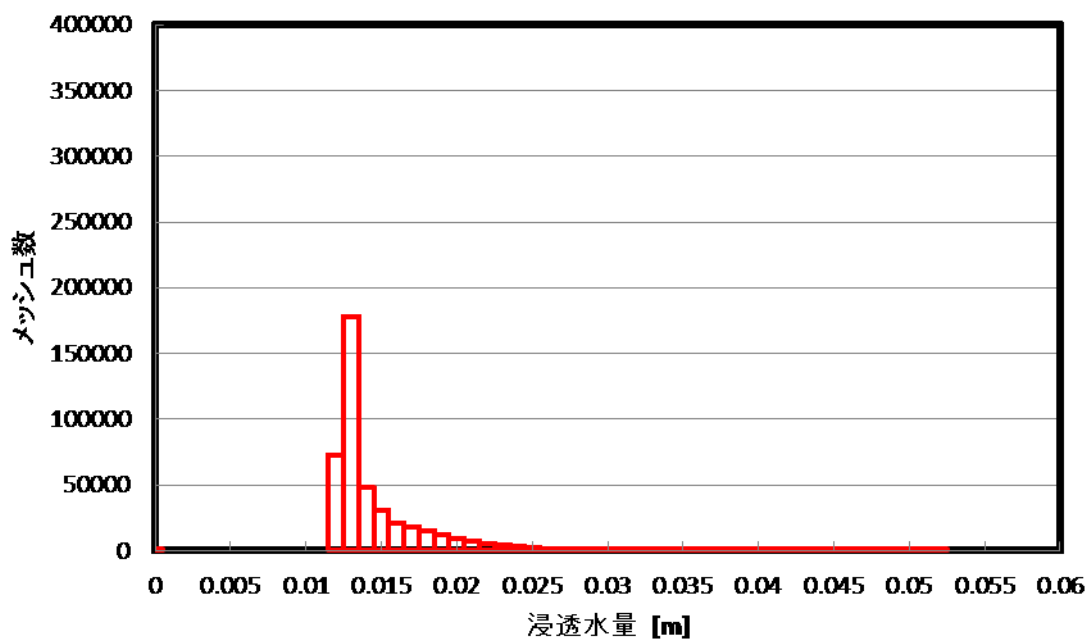


Figure A-204 植林後 森林 浸透水量 3-2-1 PR=20.0

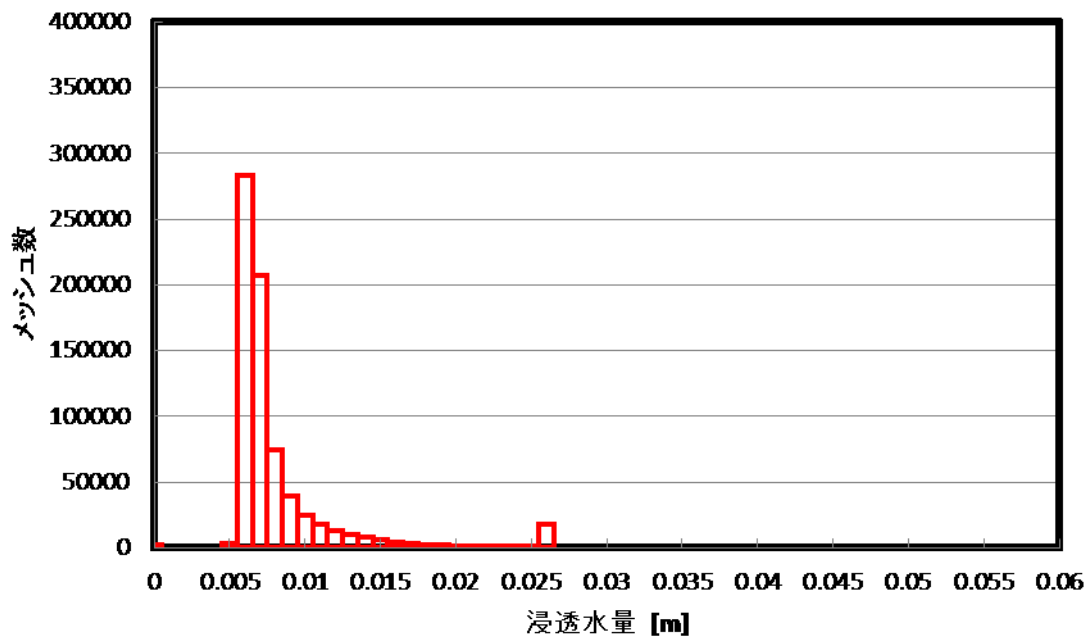


Figure A-205 植林前 裸地 浸透水量 3-2-2 PR=20.0

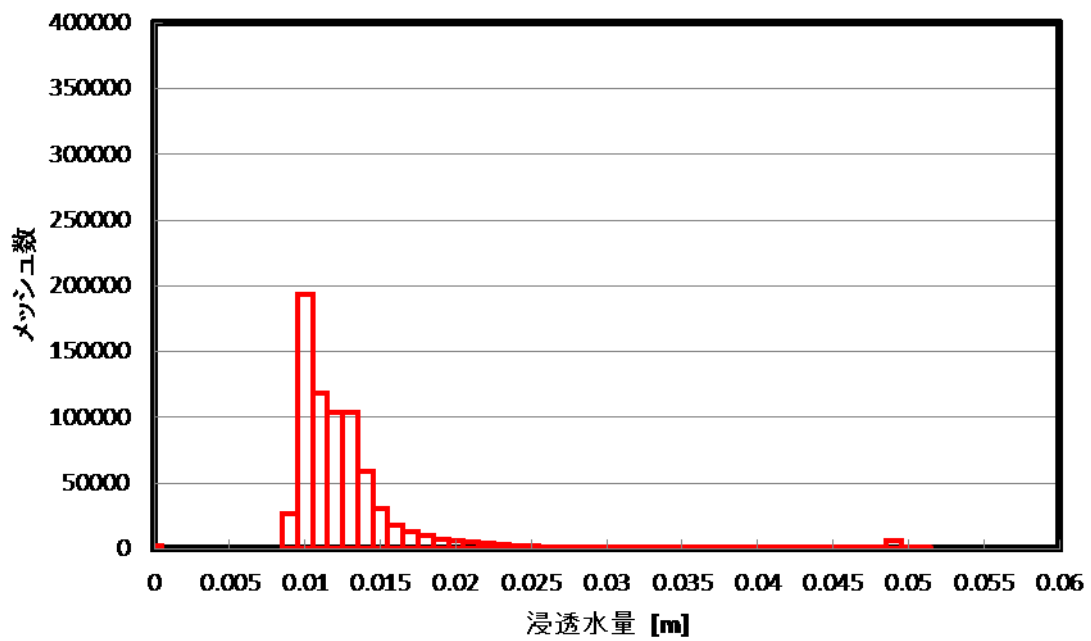


Figure A-206 植林後 裸地 浸透水量 3-2-2 PR=20.0

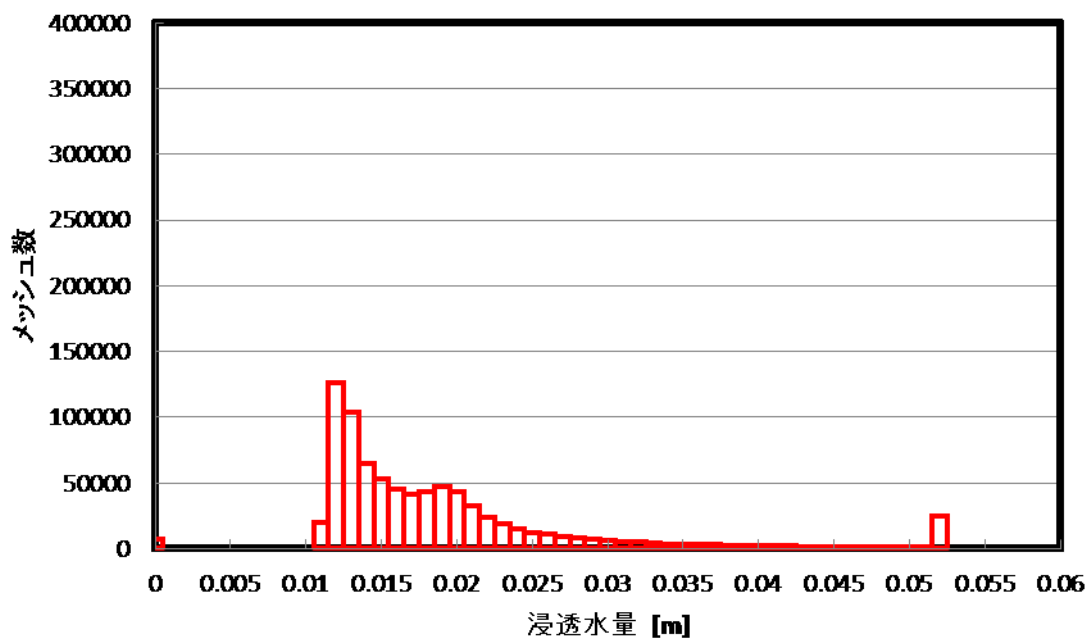


Figure A-207 植林前 草地 浸透水量 3-2-2 PR=20.0

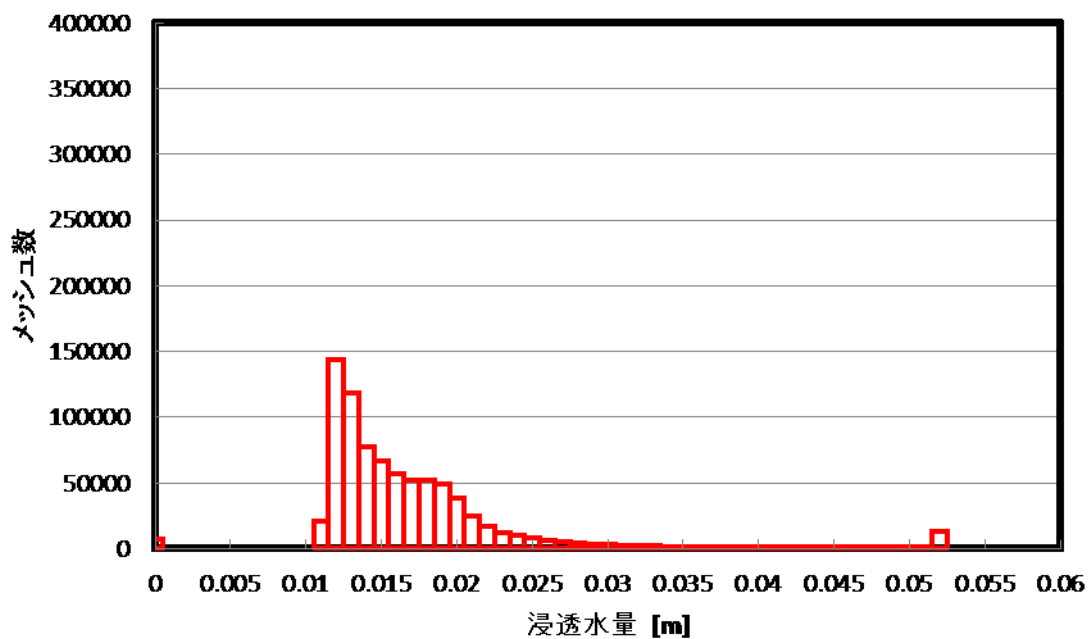


Figure A-208 植林後 草地 浸透水量 3-2-2 PR=20.0

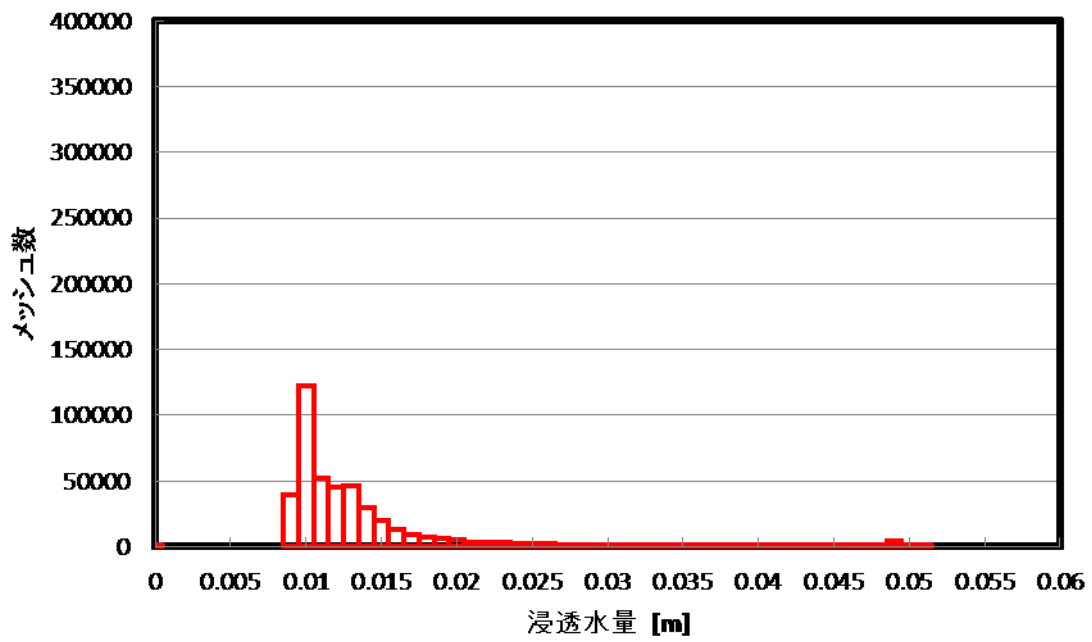


Figure A-209 植林前 森林 浸透水量 3-2-2 PR=20.0

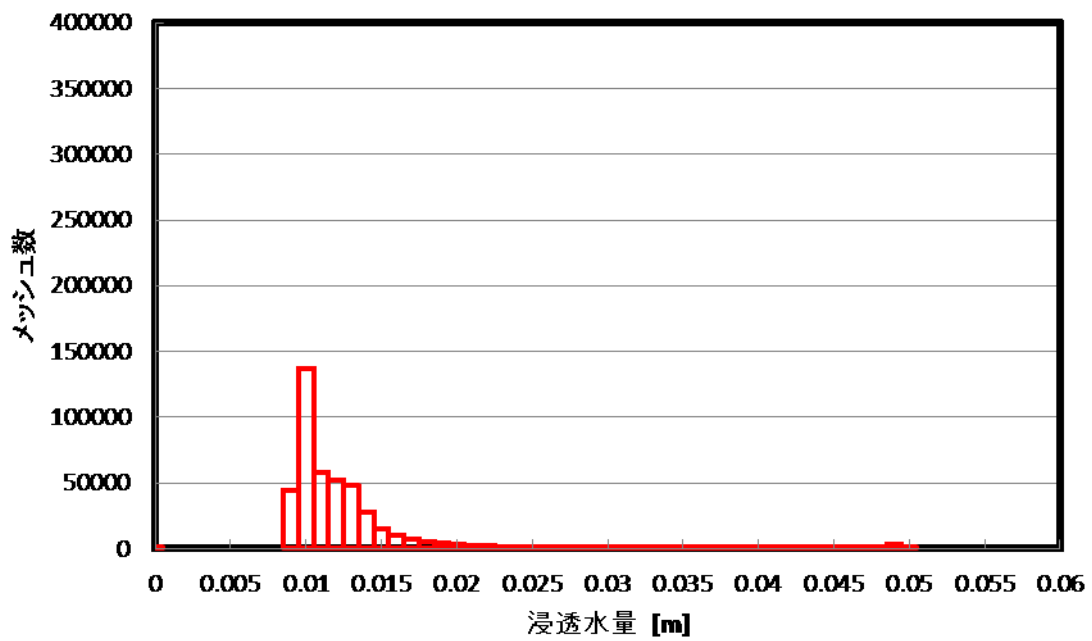


Figure A-210 植林後 森林 浸透水量 3-2-2 PR=20.0

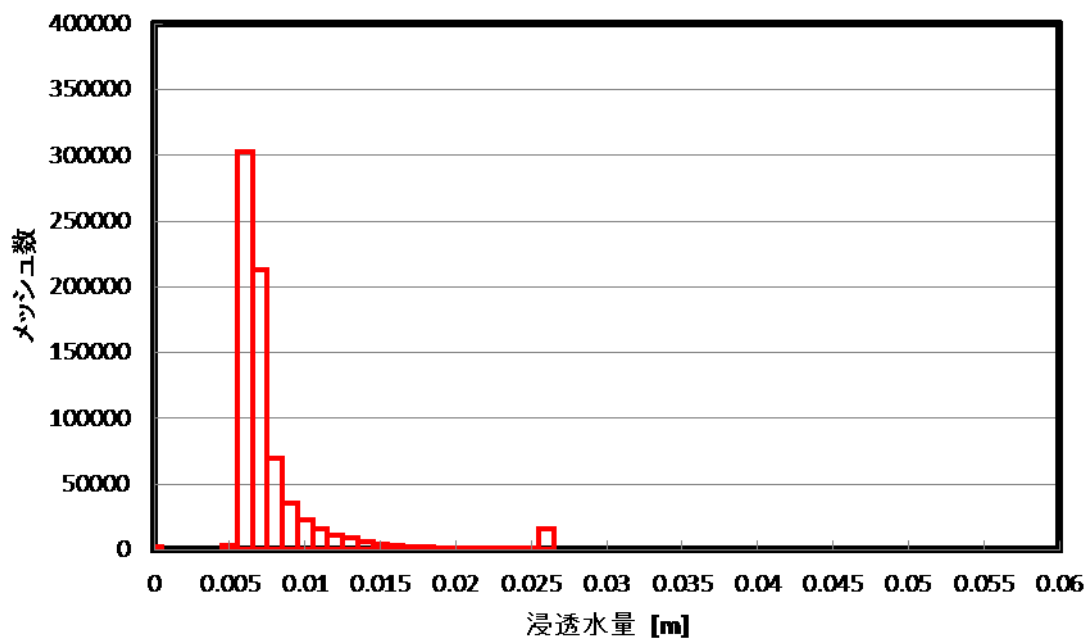


Figure A-211 植林前 裸地 浸透水量 3-2-3 PR=20.0

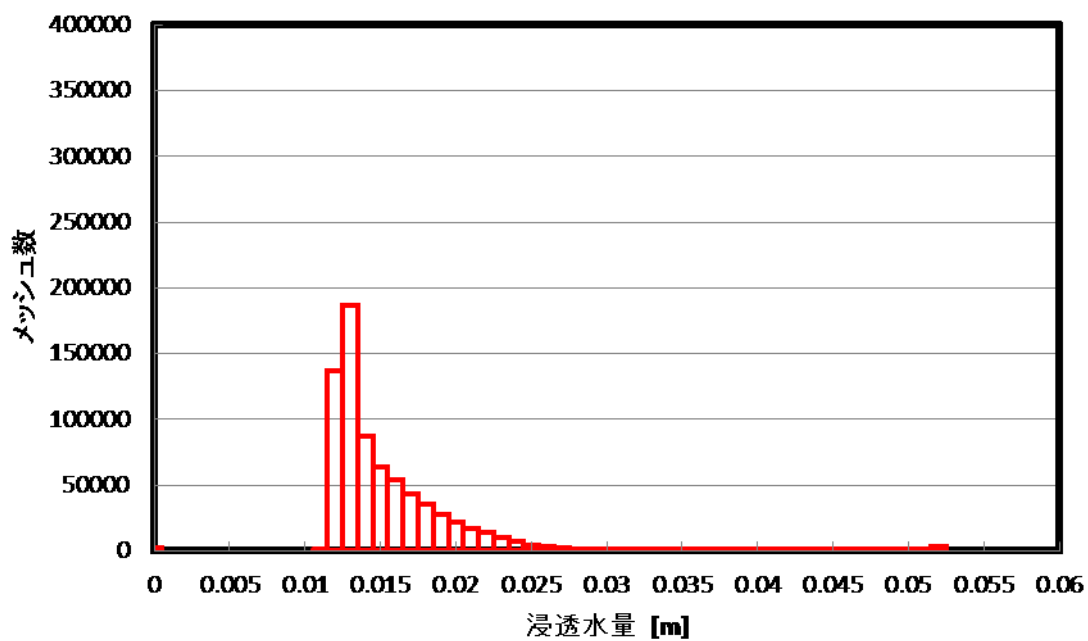


Figure A-212 植林後 裸地 浸透水量 3-2-3 PR=20.0

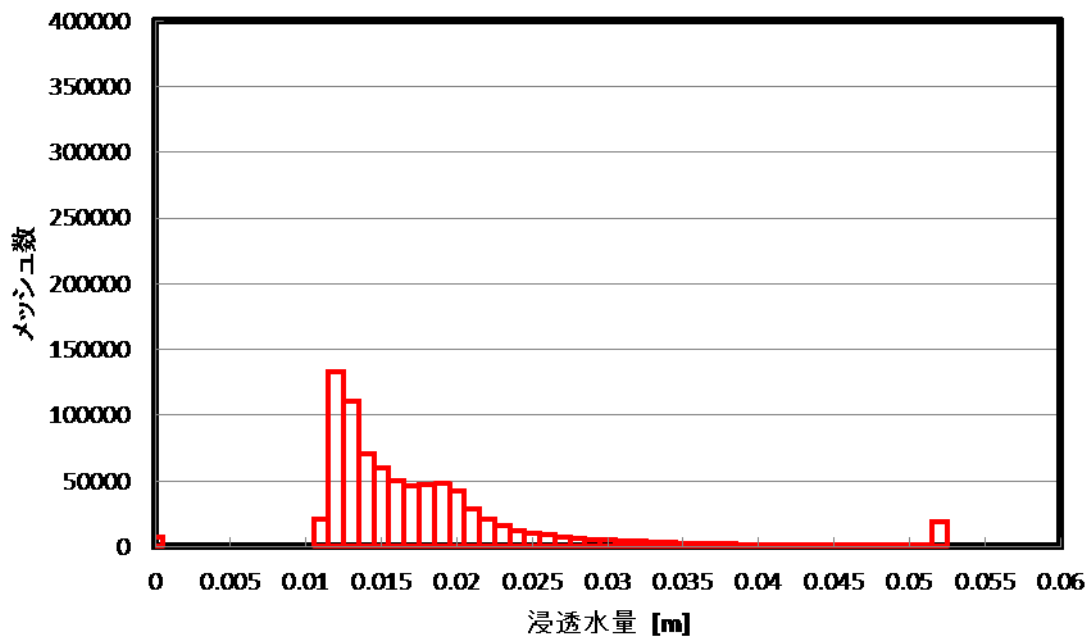


Figure A-213 植林前 草地 浸透水量 3-2-3 PR=20.0

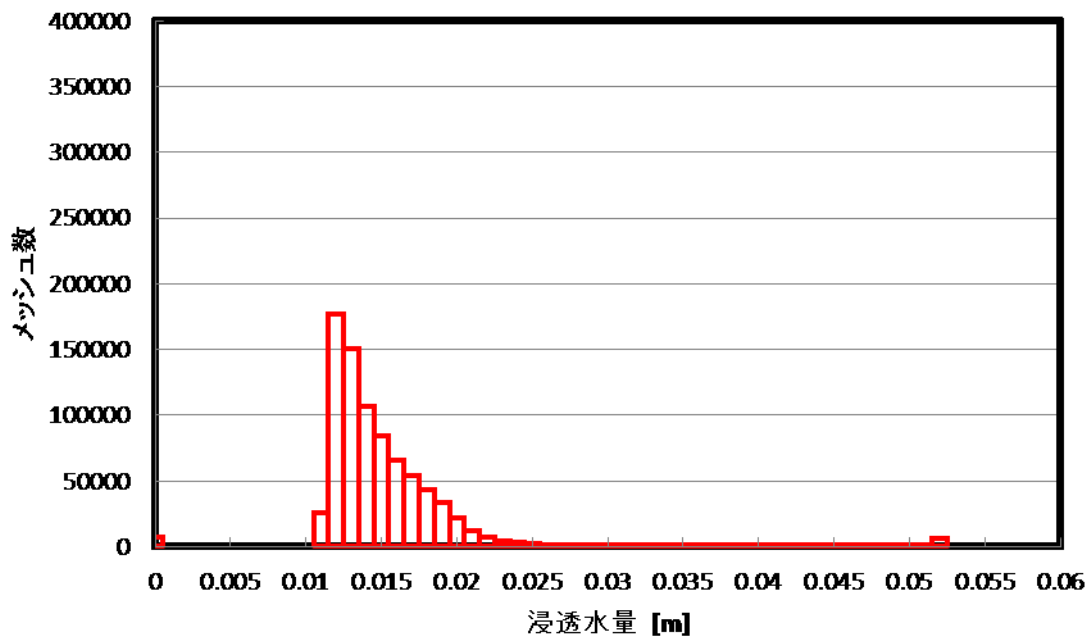


Figure A-214 植林後 草地 浸透水量 3-2-3 PR=20.0

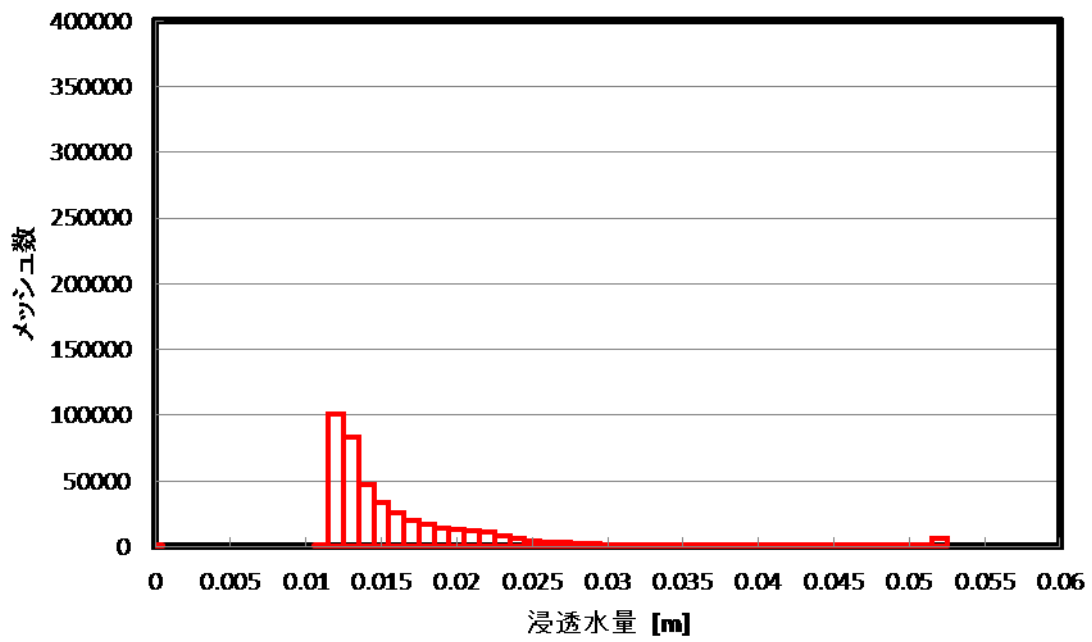


Figure A-215 植林前 森林 浸透水量 3-2-3 PR=20.0

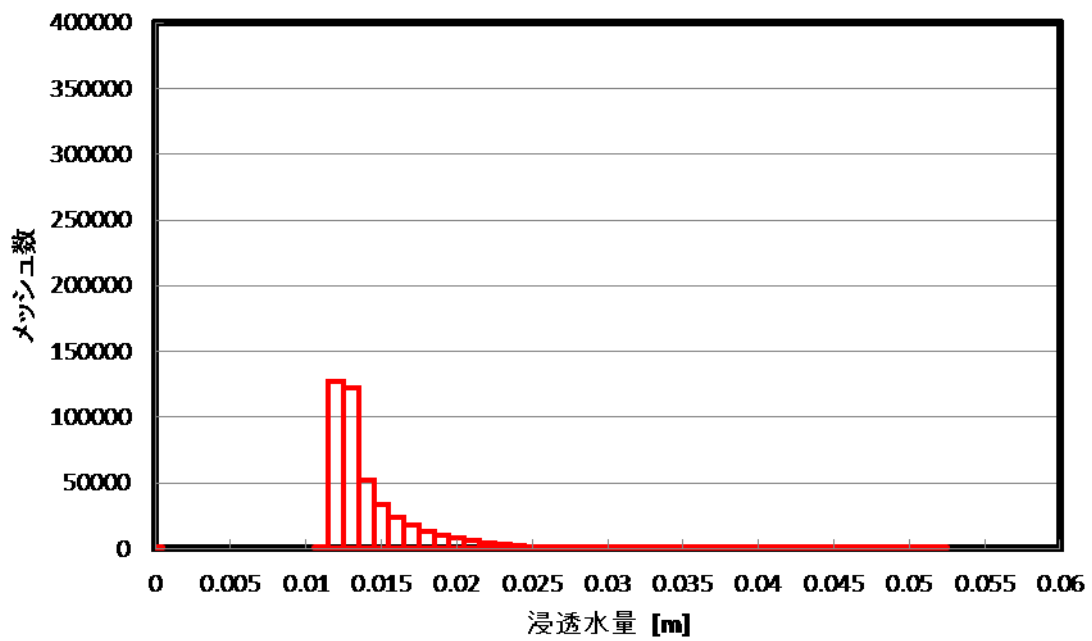


Figure A-216 植林後 森林 浸透水量 3-2-3 PR=20.0

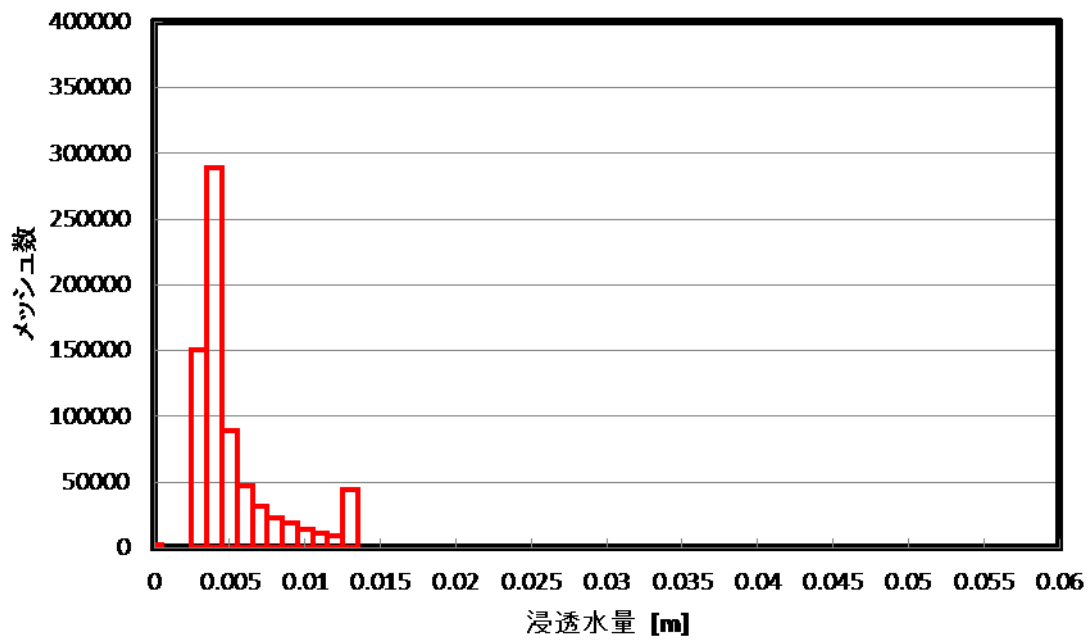


Figure A-217 植林前 裸地 浸透水量 1-1-1 PR=40.0

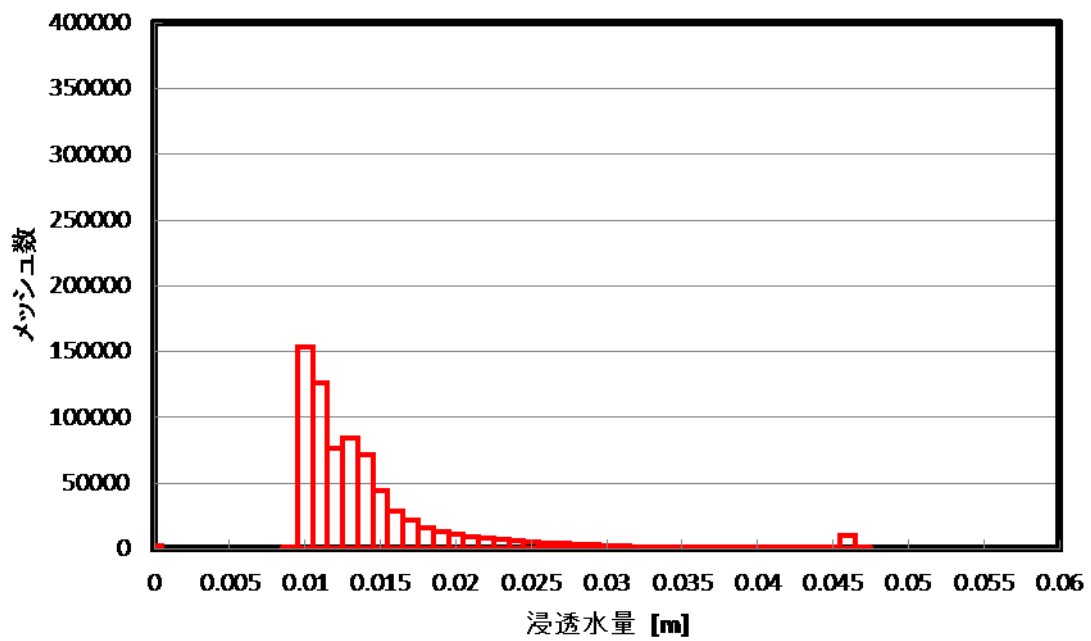


Figure A-218 植林後 裸地 浸透水量 1-1-1 PR=40.0

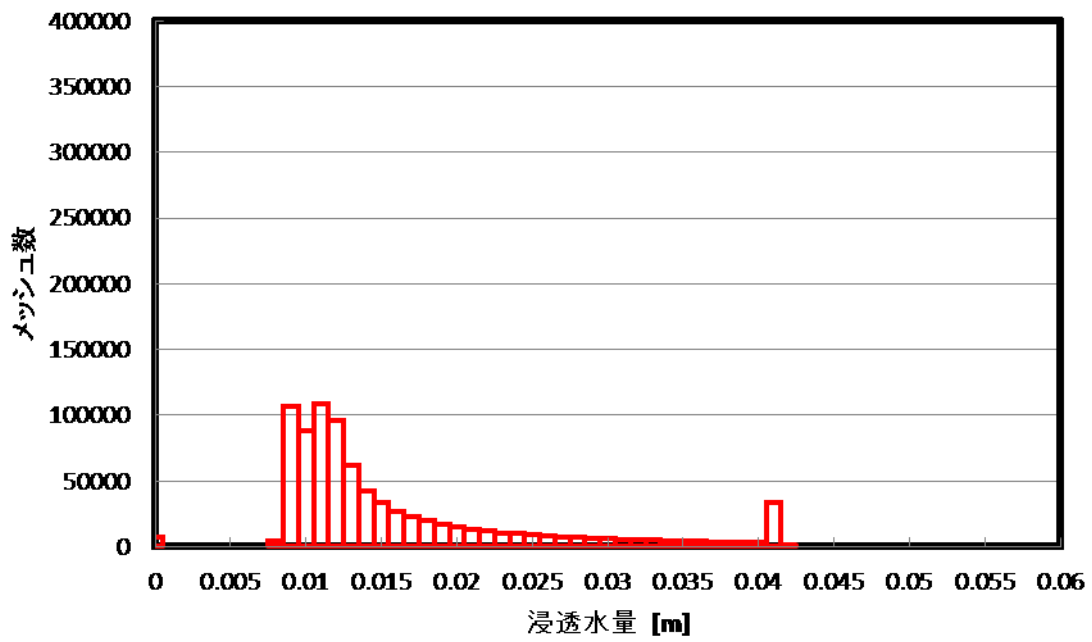


Figure A-219 植林前 草地 浸透水量 1-1-1 PR=40.0

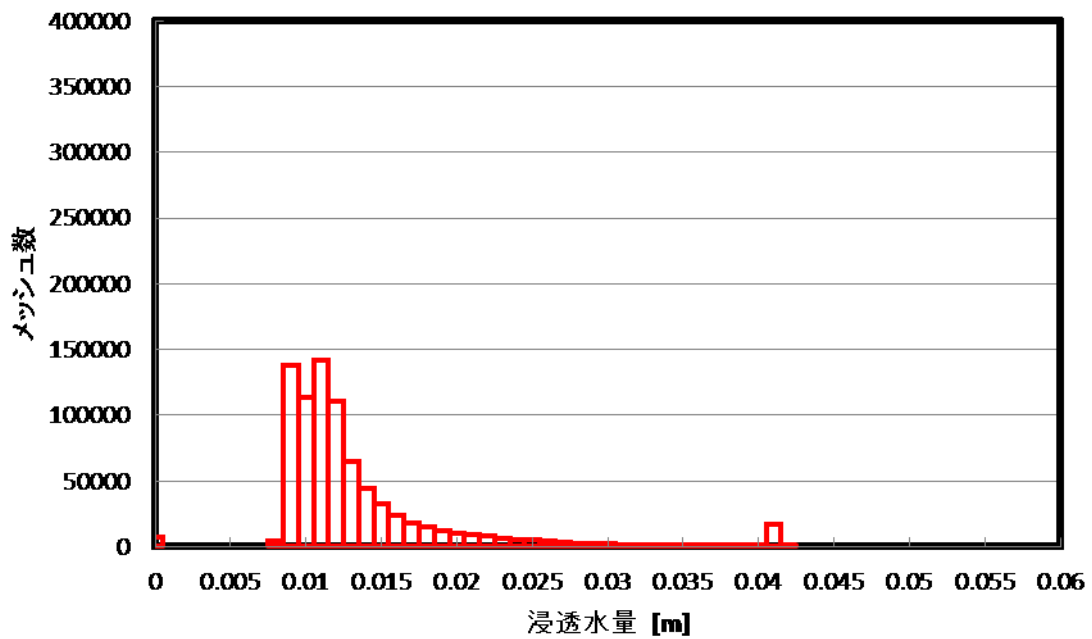


Figure A-220 植林後 草地 浸透水量 1-1-1 PR=40.0

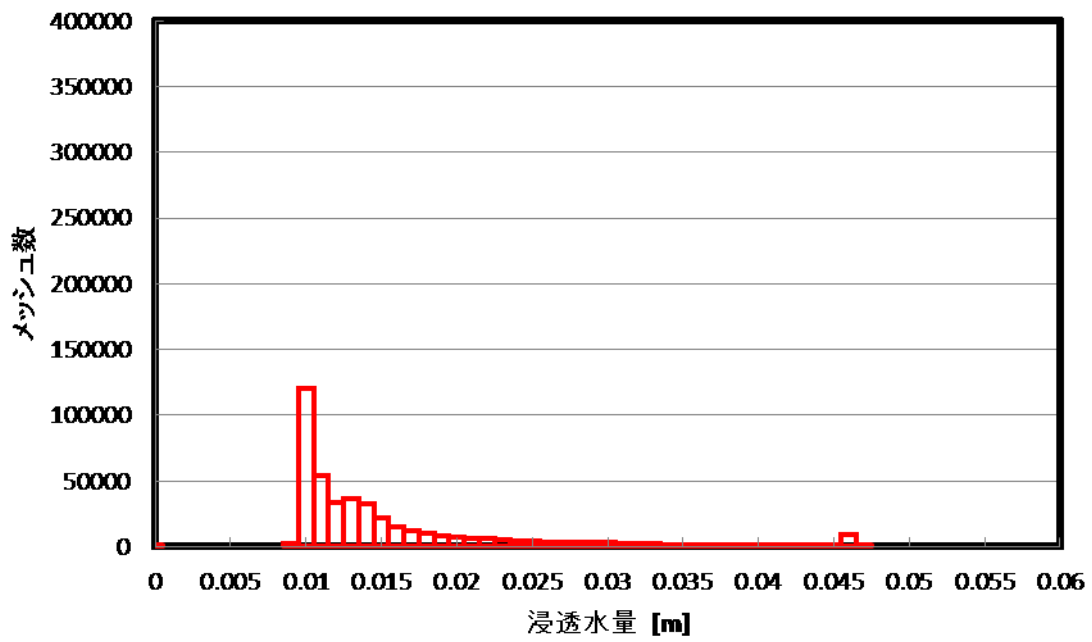


Figure A-221 植林前 森林 浸透水量 1-1-1 $PR=40.0$

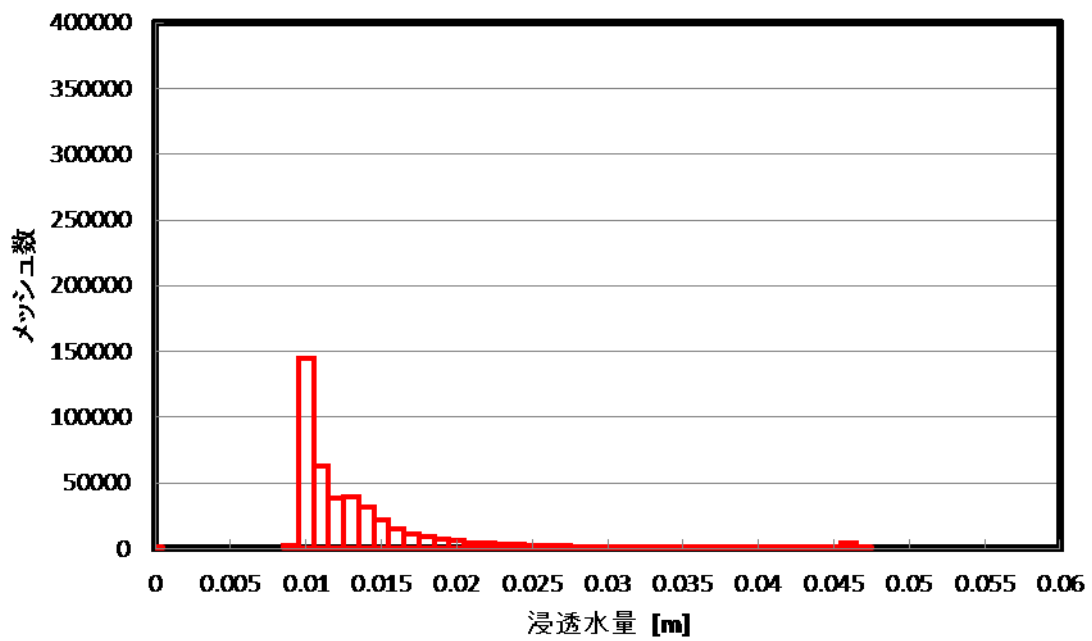


Figure A-222 植林後 森林 浸透水量 1-1-1 $PR=40.0$

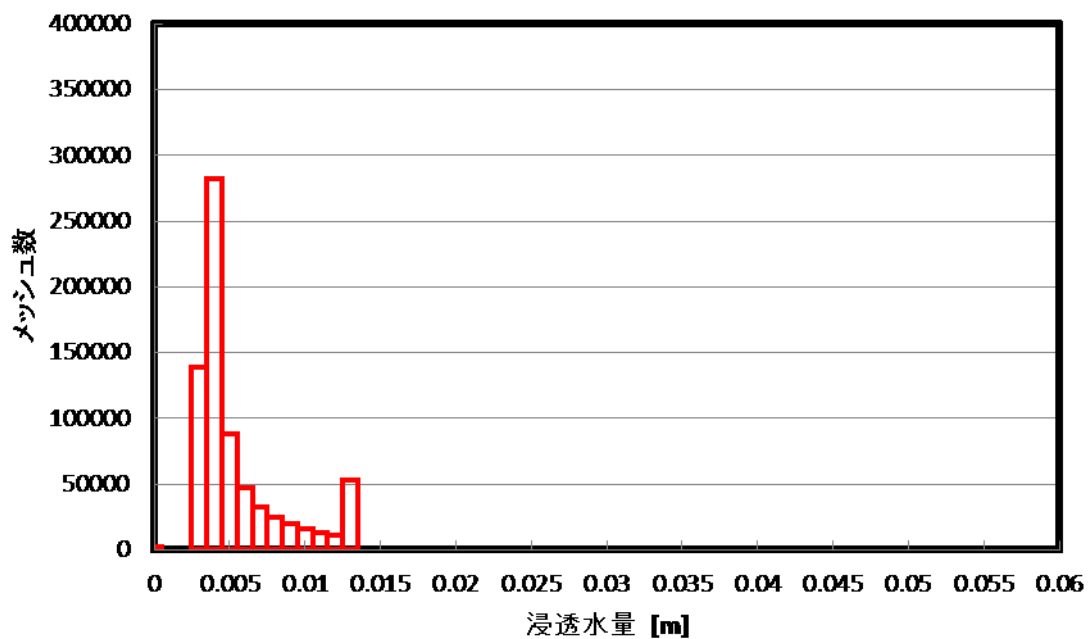


Figure A-223 植林前 裸地 浸透水量 1-1-2 $PR=40.0$

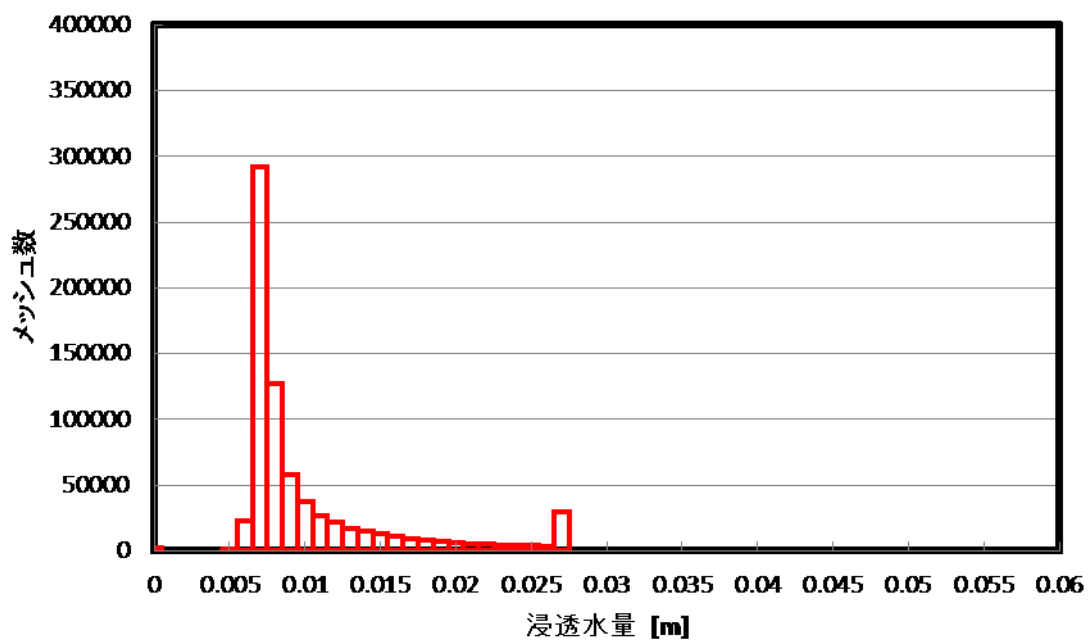


Figure A-224 植林後 裸地 浸透水量 1-1-2 $PR=40.0$

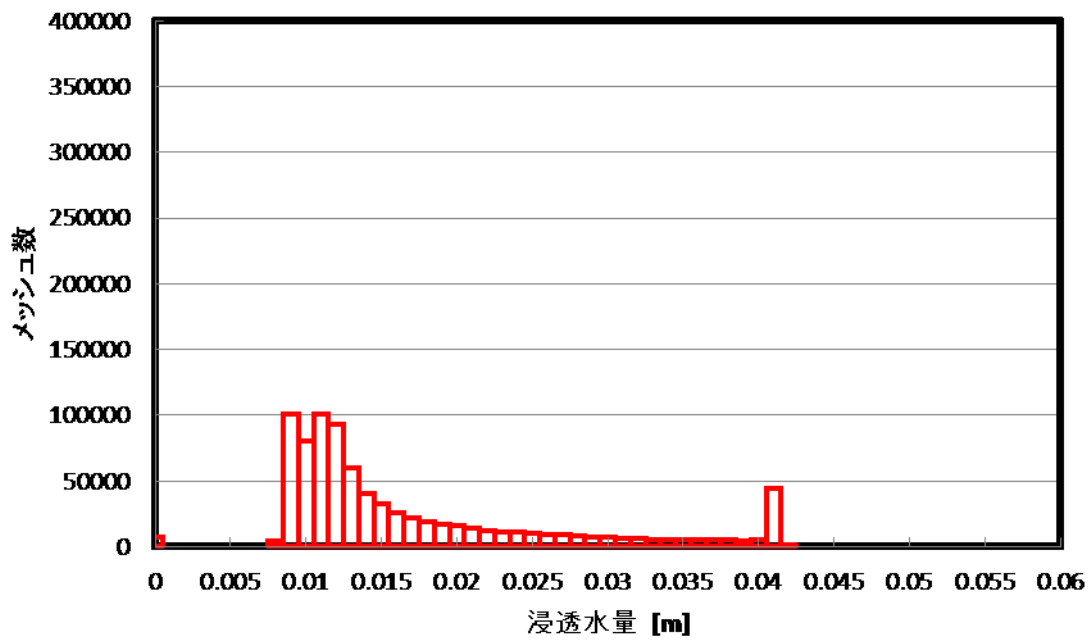


Figure A-225 植林前 草地 浸透水量 1-1-2 PR=40.0

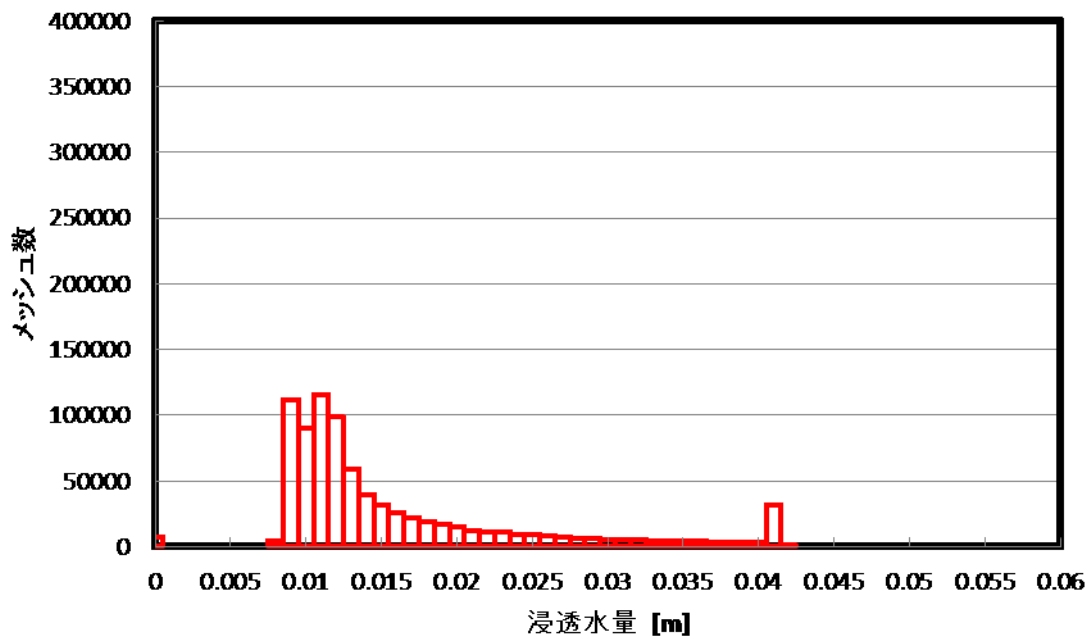


Figure A-226 植林後 草地 浸透水量 1-1-2 PR=40.0

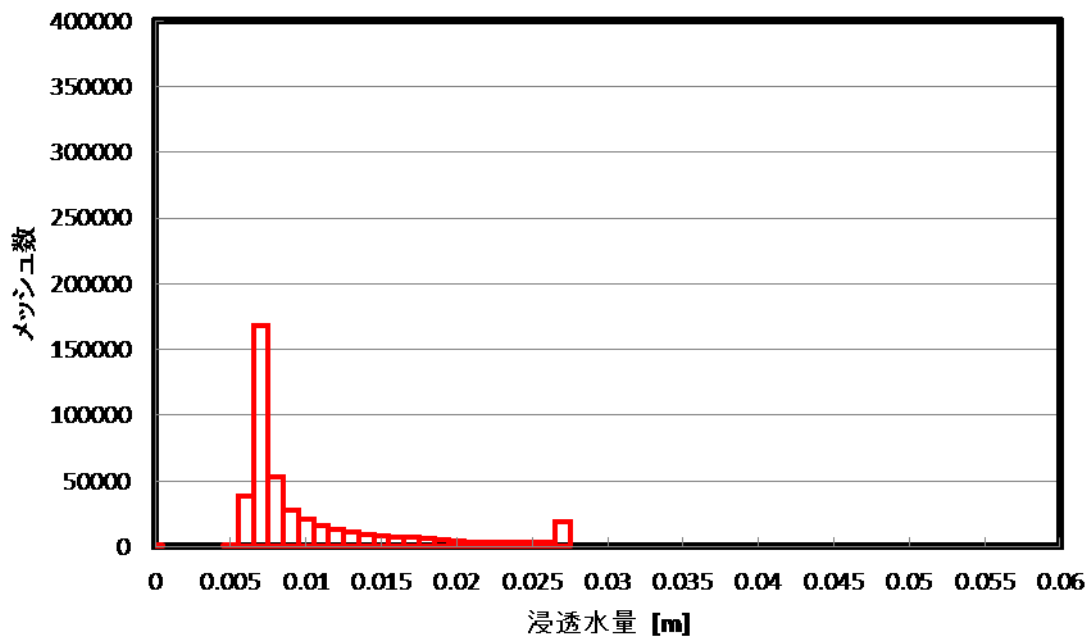


Figure A-227 植林前 森林 浸透水量 1-1-2 PR=40.0

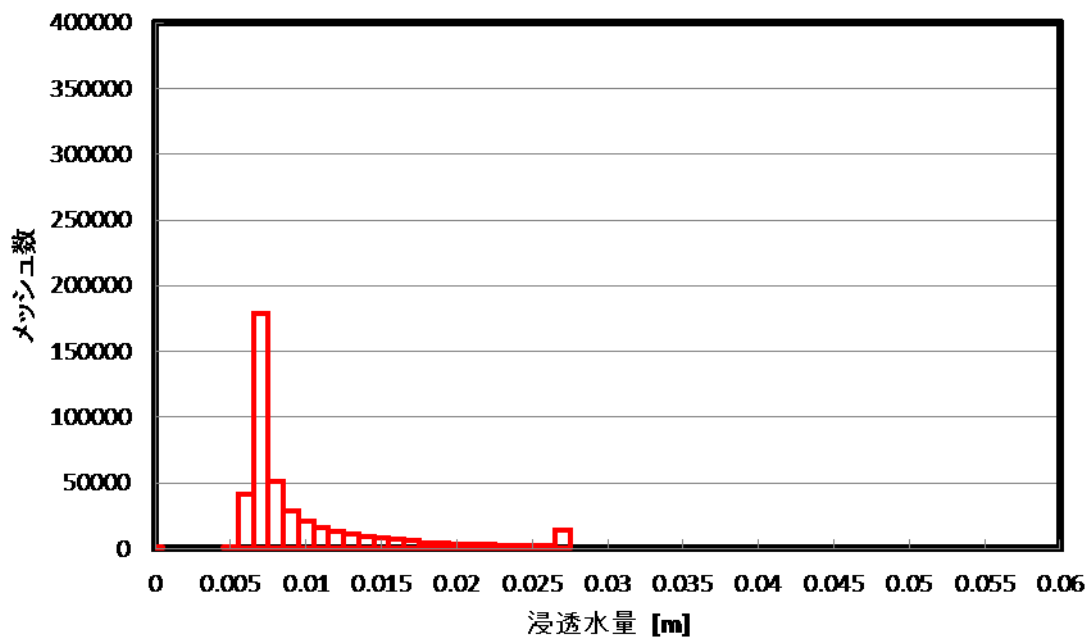


Figure A-228 植林後 森林 浸透水量 1-1-2 PR=40.0

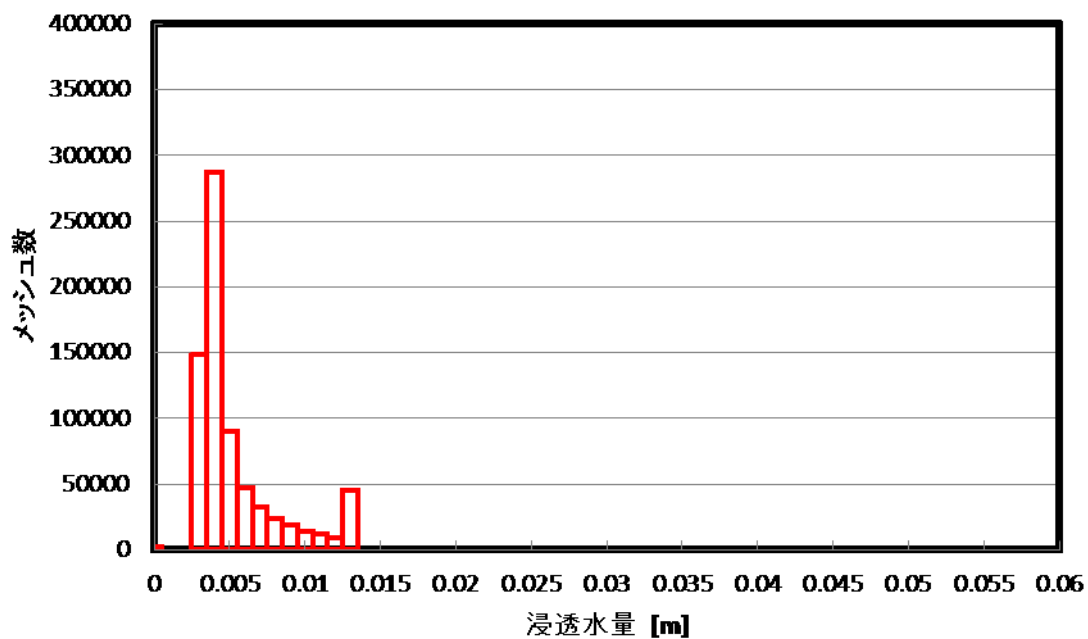


Figure A-229 植林前 裸地 浸透水量 1-1-3 PR=40.0

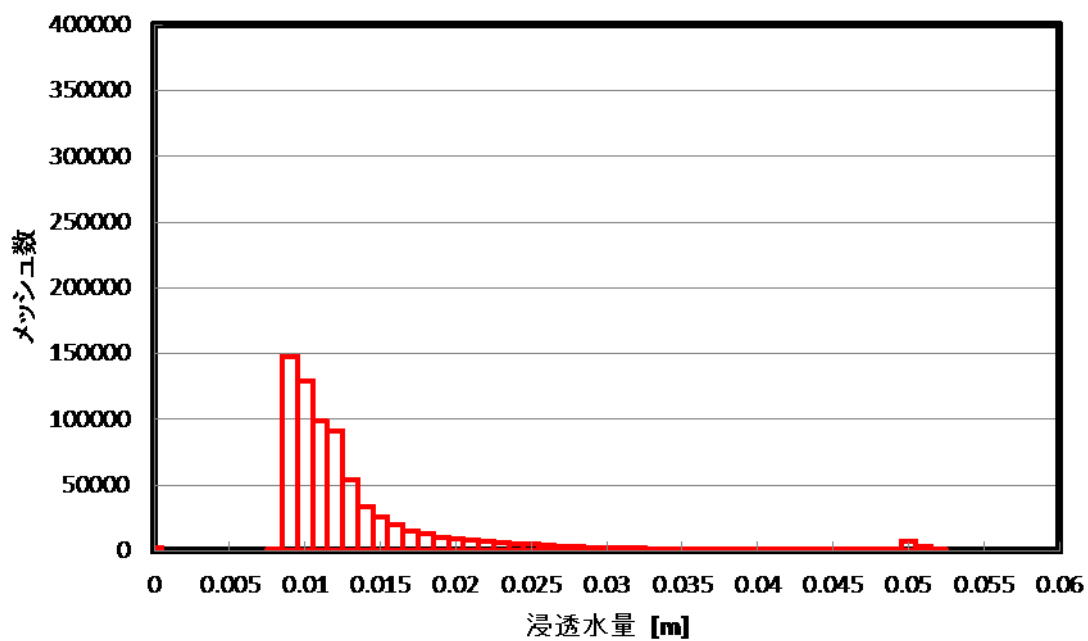


Figure A-230 植林後 裸地 浸透水量 1-1-3 PR=40.0

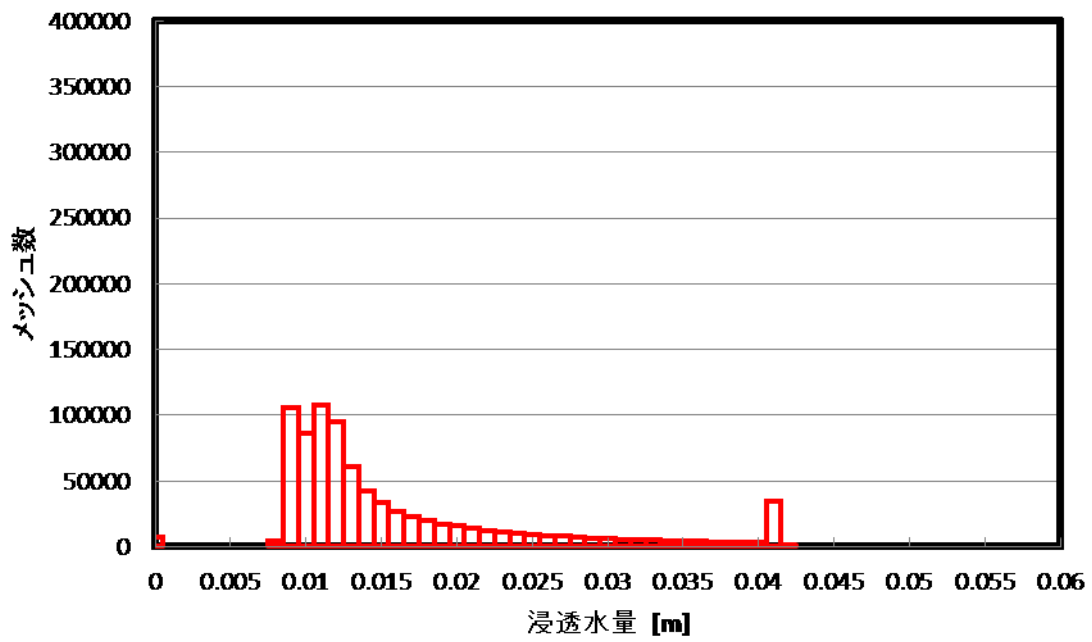


Figure A-231 植林前 草地 浸透水量 1-1-3 PR=40.0

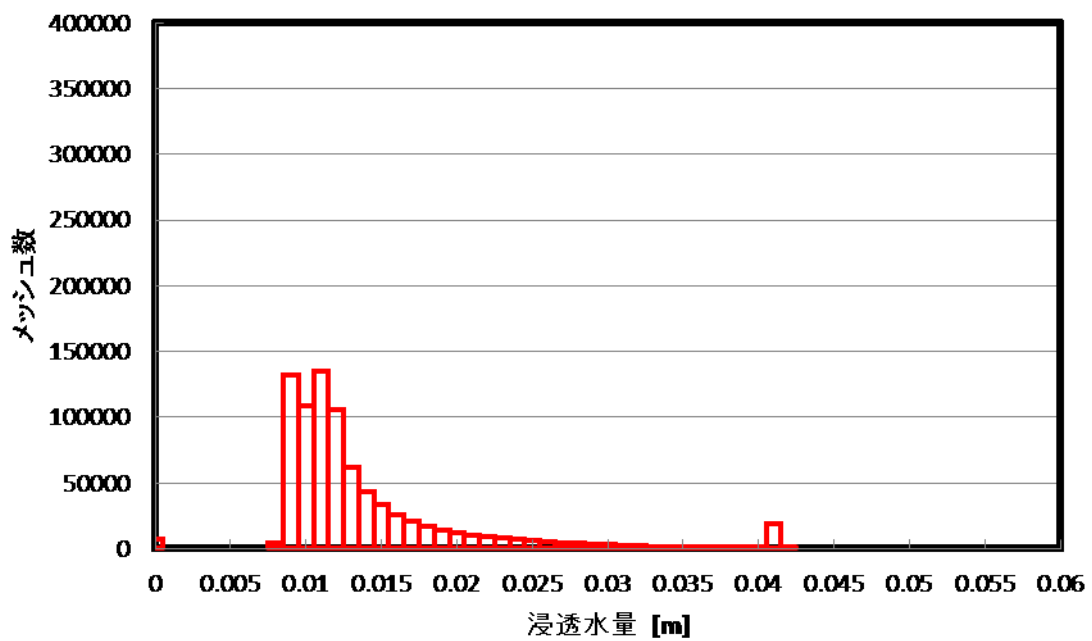


Figure A-232 植林後 草地 浸透水量 1-1-3 PR=40.0

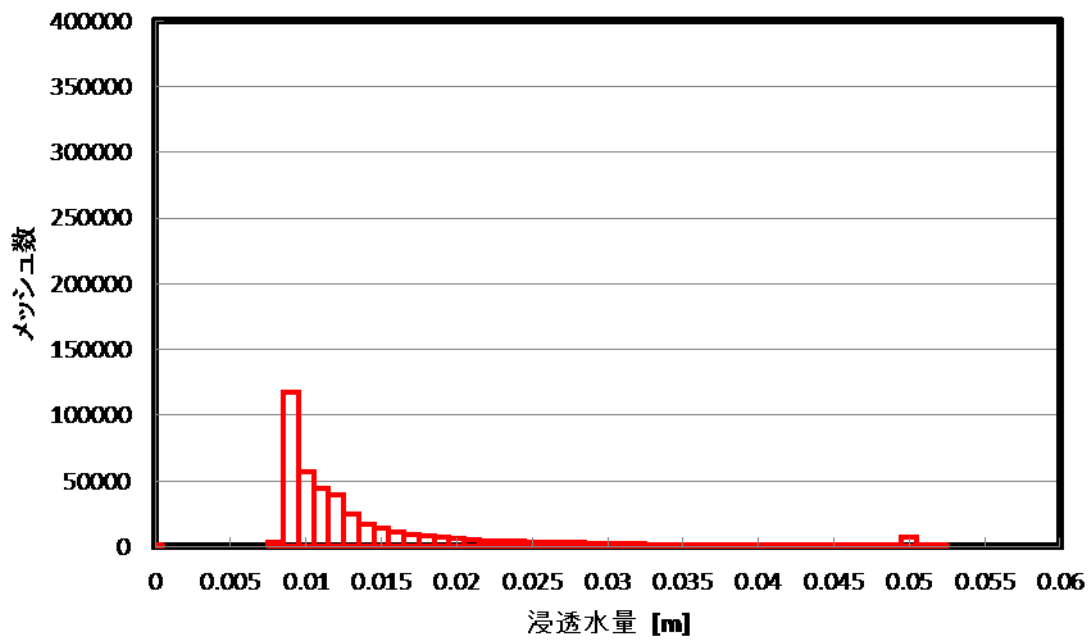


Figure A-233 植林前 森林 浸透水量 1-1-3 PR=40.0

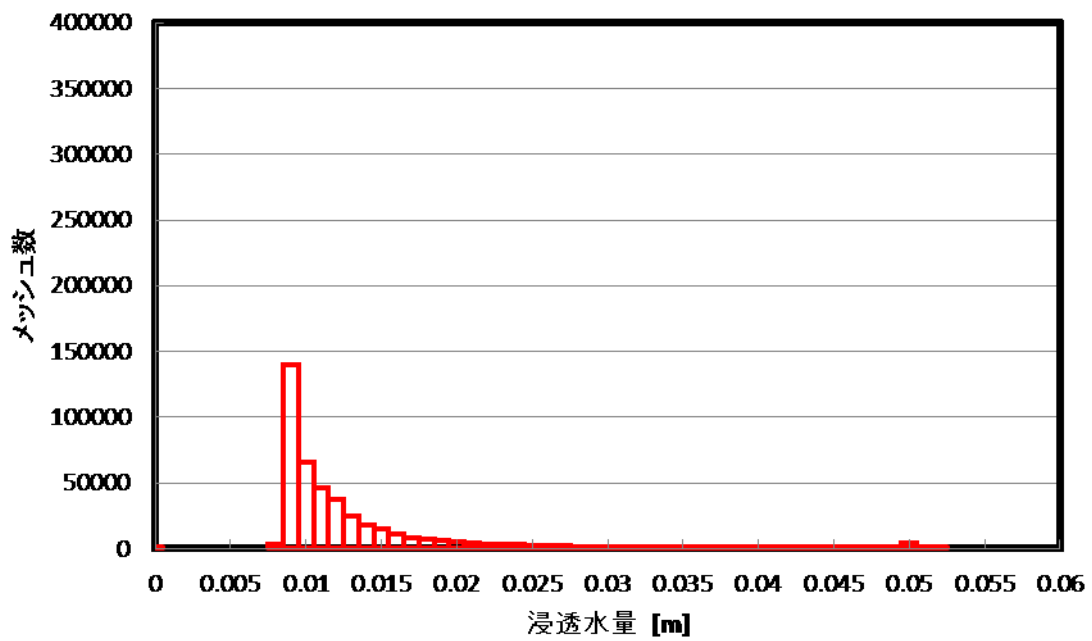


Figure A-234 植林後 森林 浸透水量 1-1-3 PR=40.0

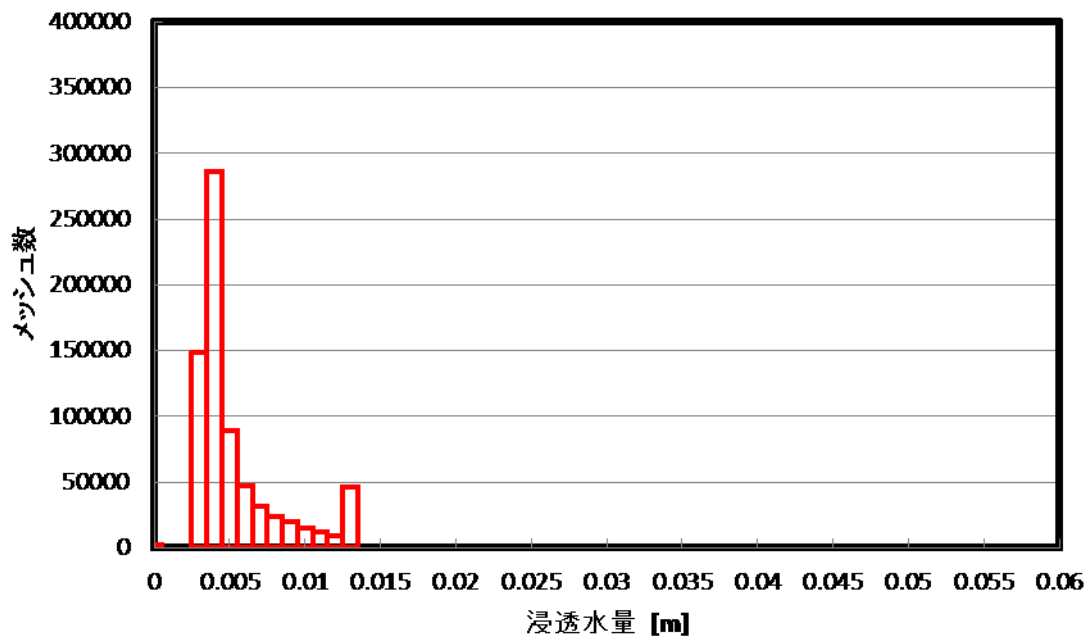


Figure A-235 植林前 裸地 浸透水量 1-2-1 PR=40.0

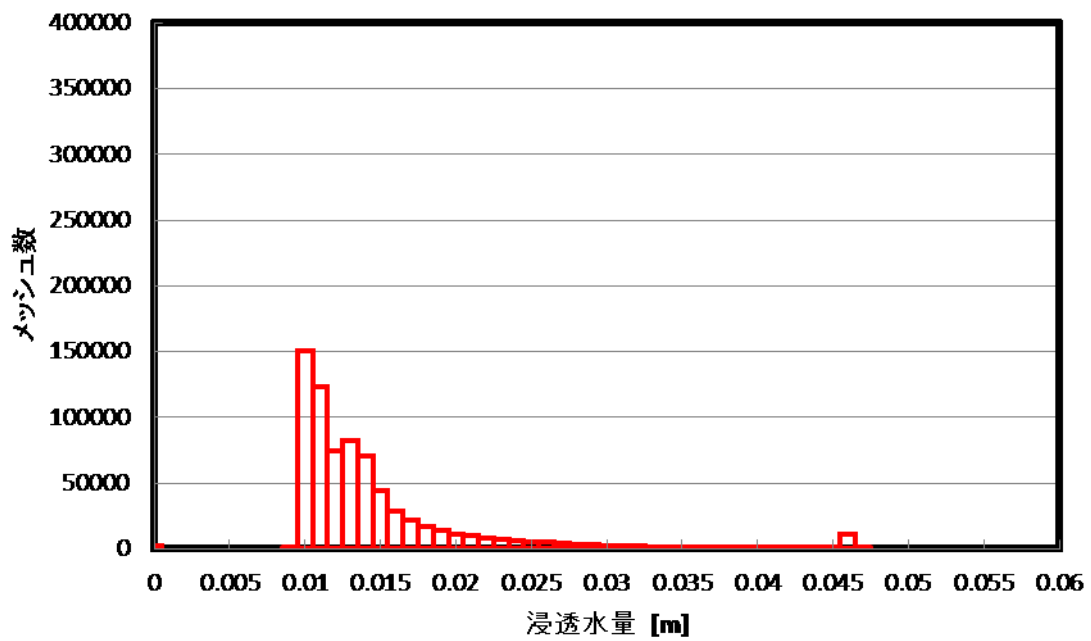


Figure A-236 植林後 裸地 浸透水量 1-2-1 PR=40.0

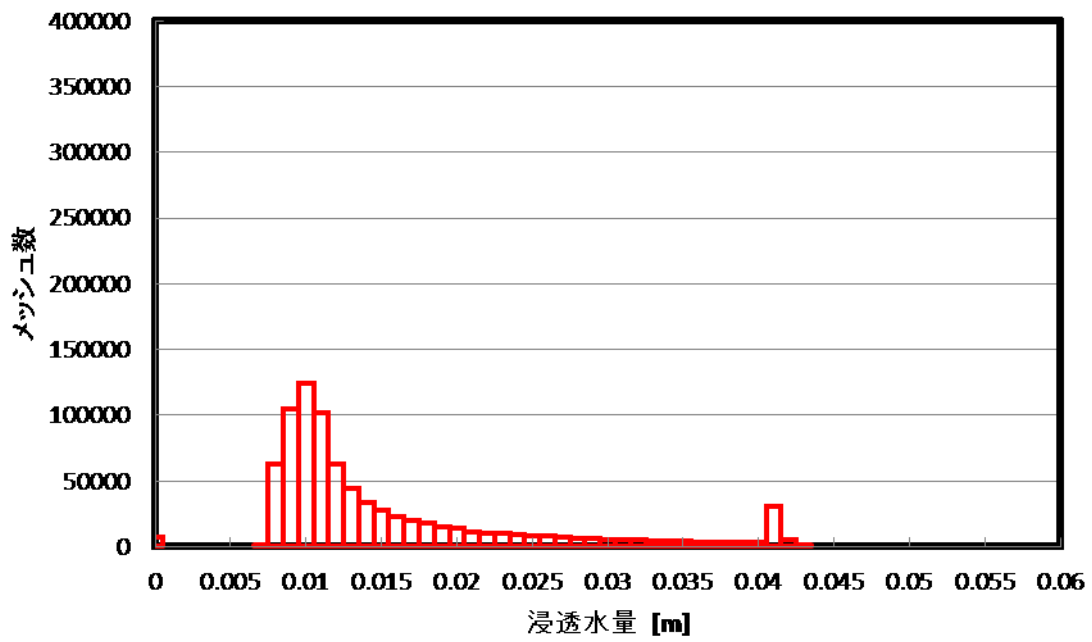


Figure A-237 植林前 草地 浸透水量 1-2-1 PR=40.0

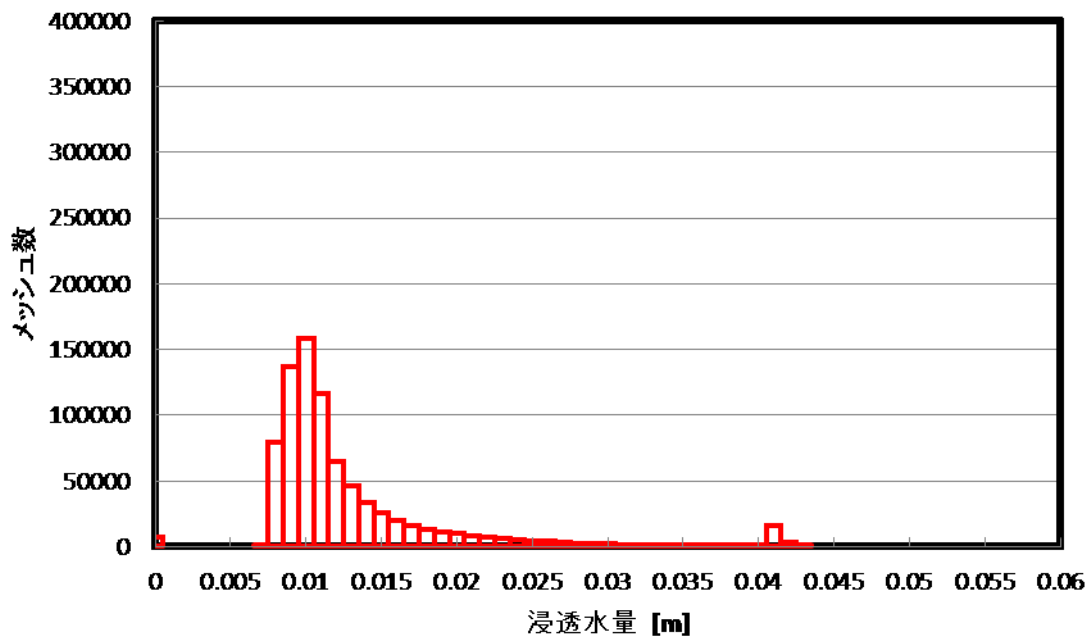


Figure A-238 植林後 草地 浸透水量 1-2-1 PR=40.0

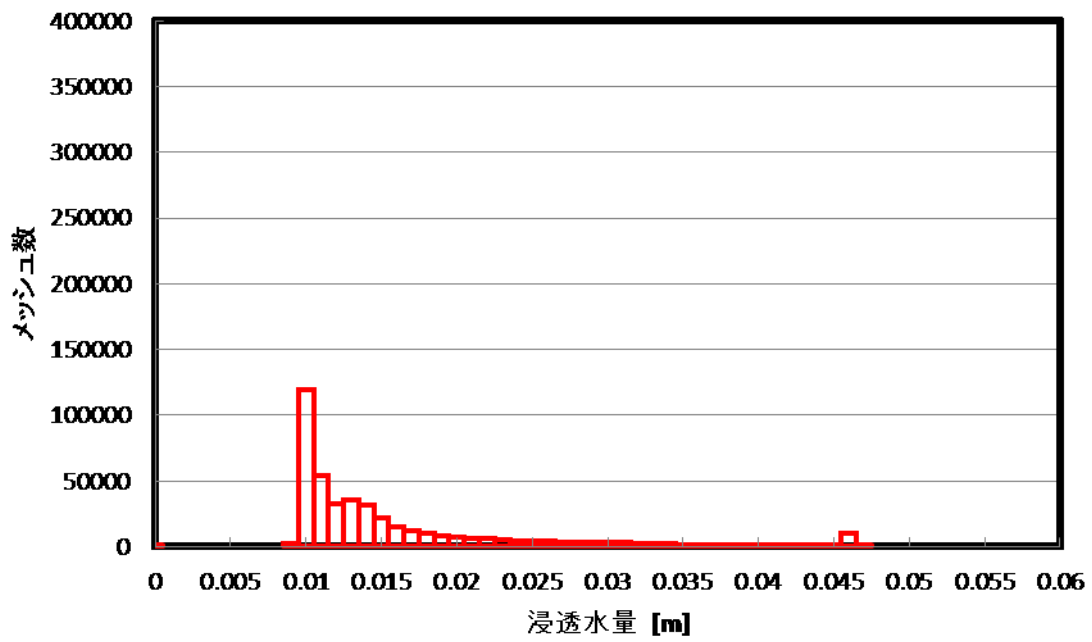


Figure A-239 植林前 森林 浸透水量 1-2-1 PR=40.0

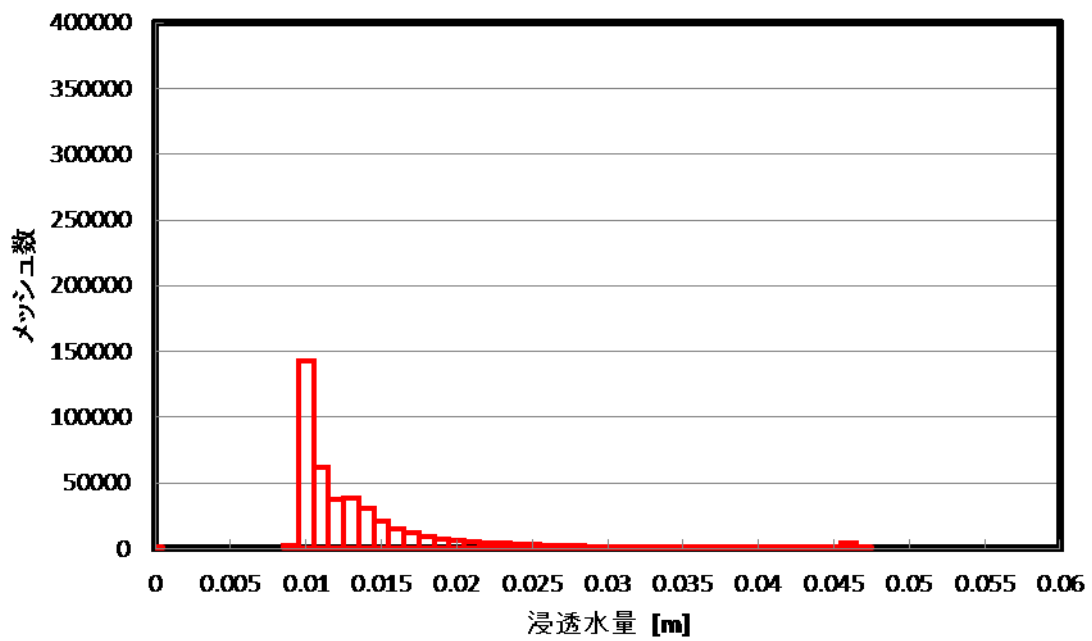


Figure A-240 植林後 森林 浸透水量 1-2-1 PR=40.0

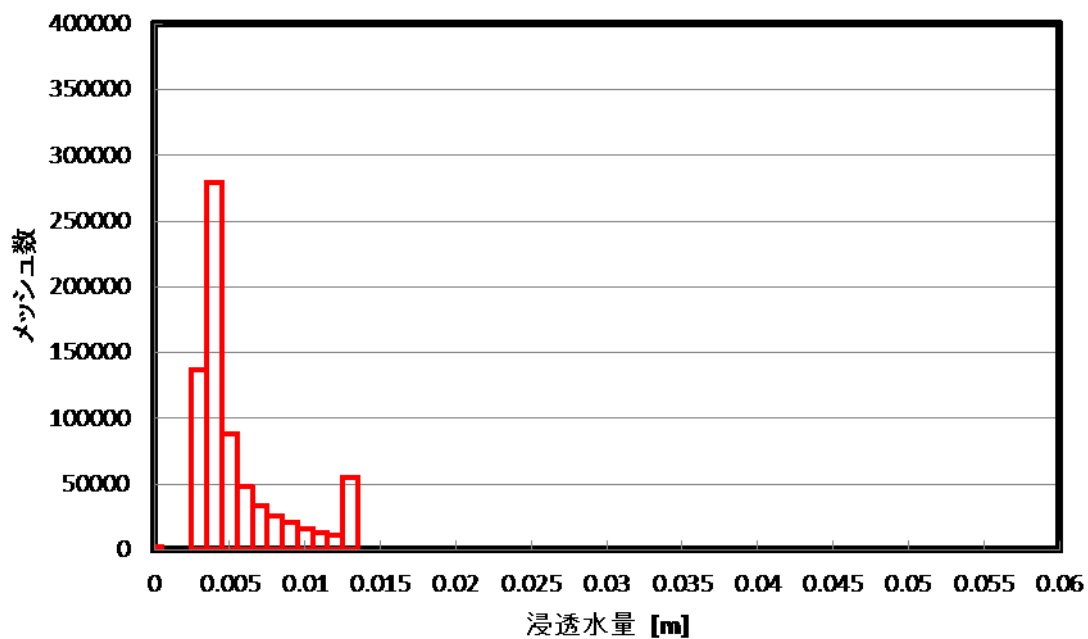


Figure A-241 植林前 裸地 浸透水量 1-2-2 PR=40.0

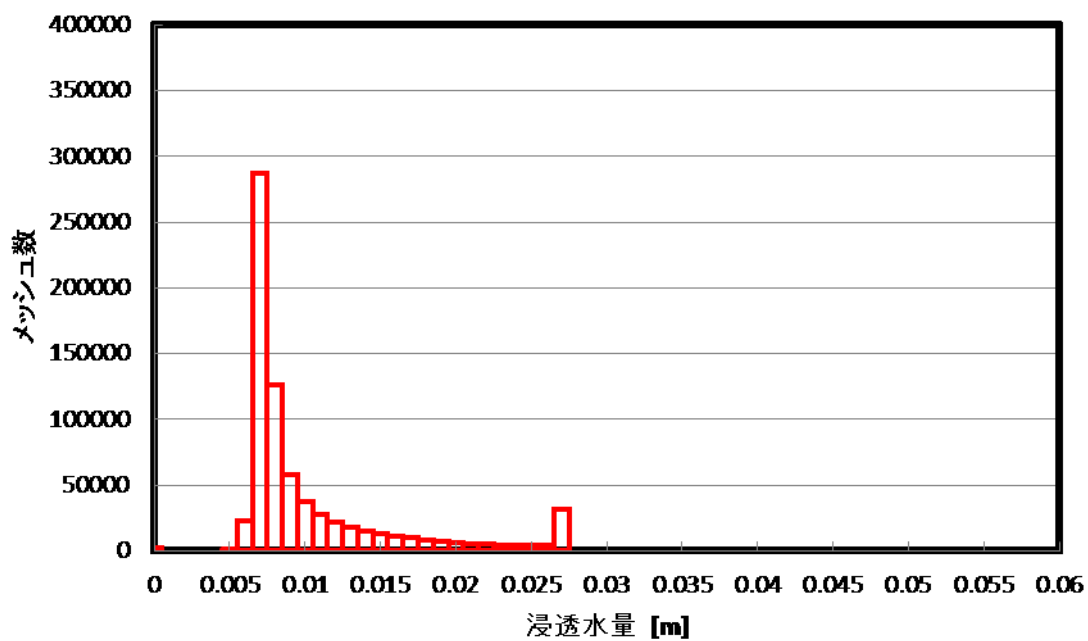


Figure A-242 植林後 裸地 浸透水量 1-2-2 PR=40.0

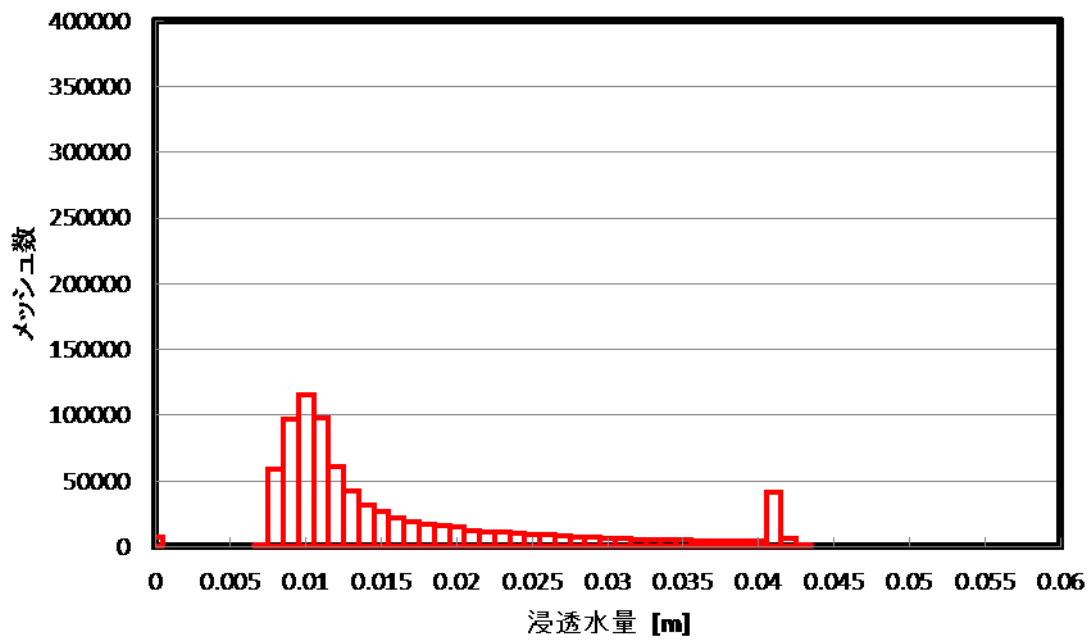


Figure A-243 植林前 草地 浸透水量 1-2-2 PR=40.0

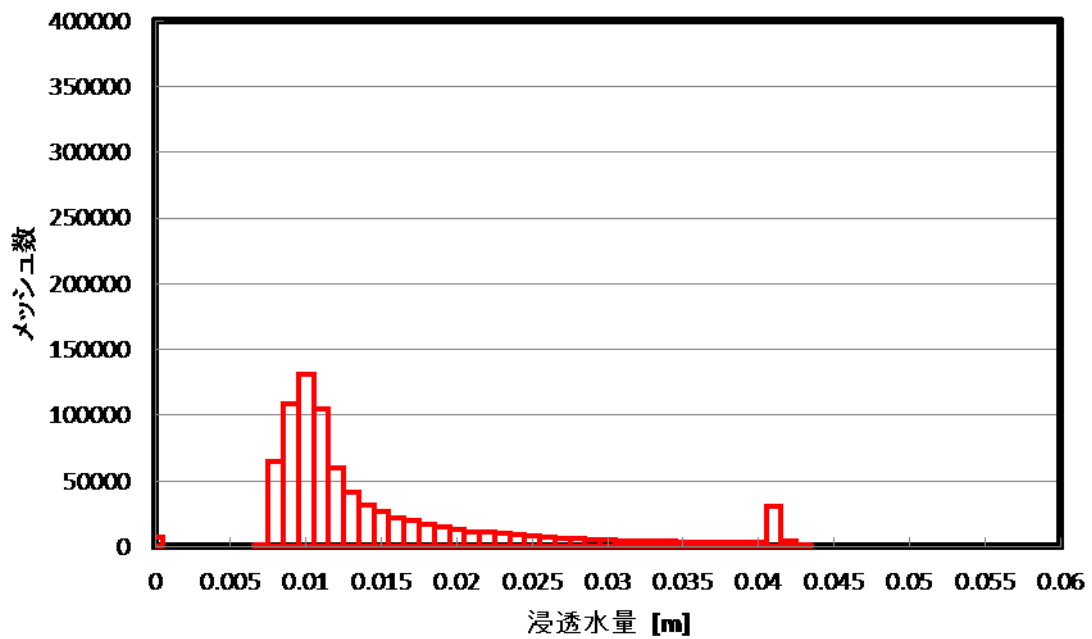


Figure A-244 植林後 草地 浸透水量 1-2-2 PR=40.0

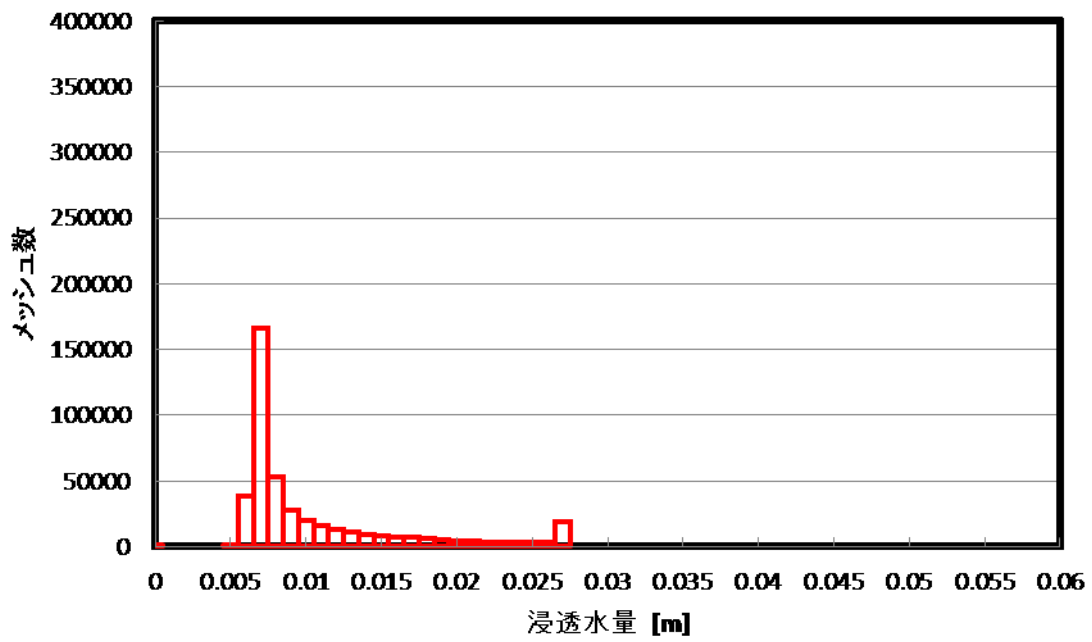


Figure A-245 植林前 森林 浸透水量 1-2-2 PR=40.0

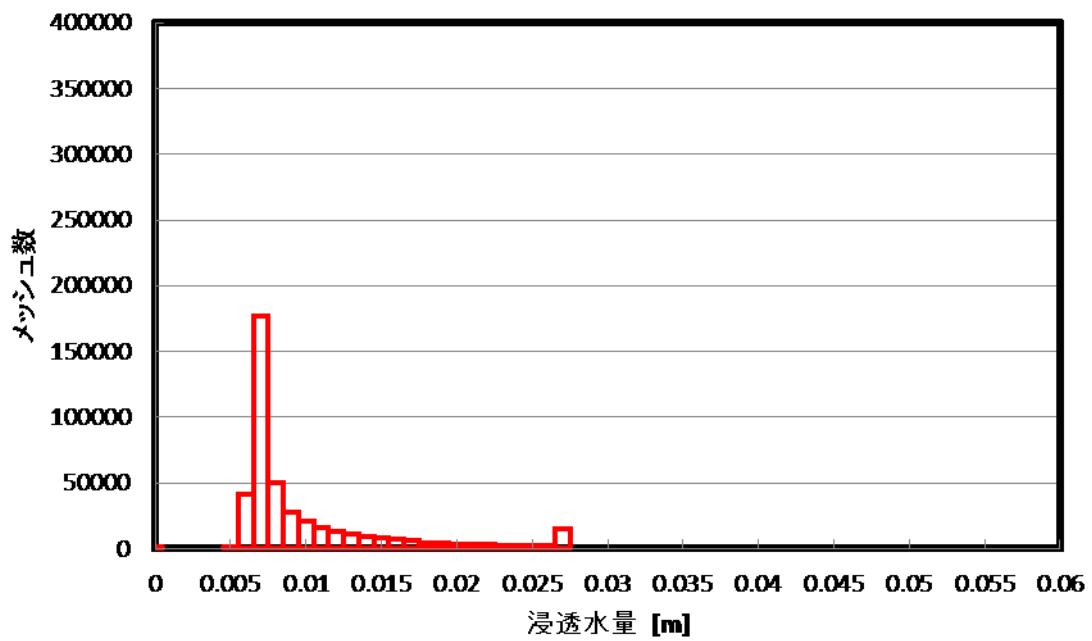


Figure A-246 植林後 森林 浸透水量 1-2-2 PR=40.0

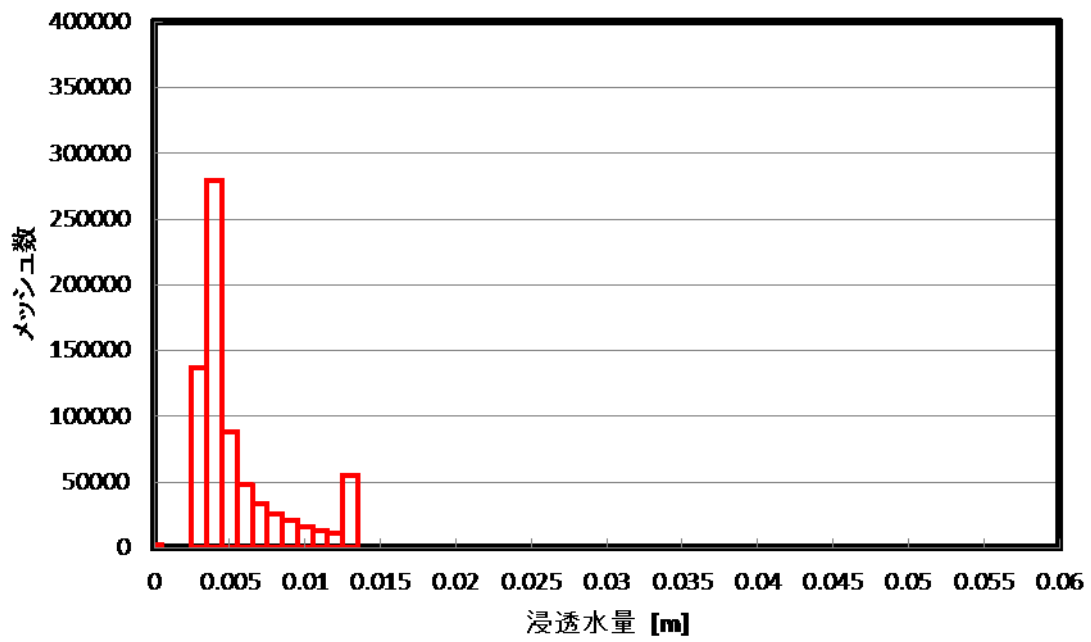


Figure A-247 植林前 裸地 浸透水量 1-2-3 PR=40.0

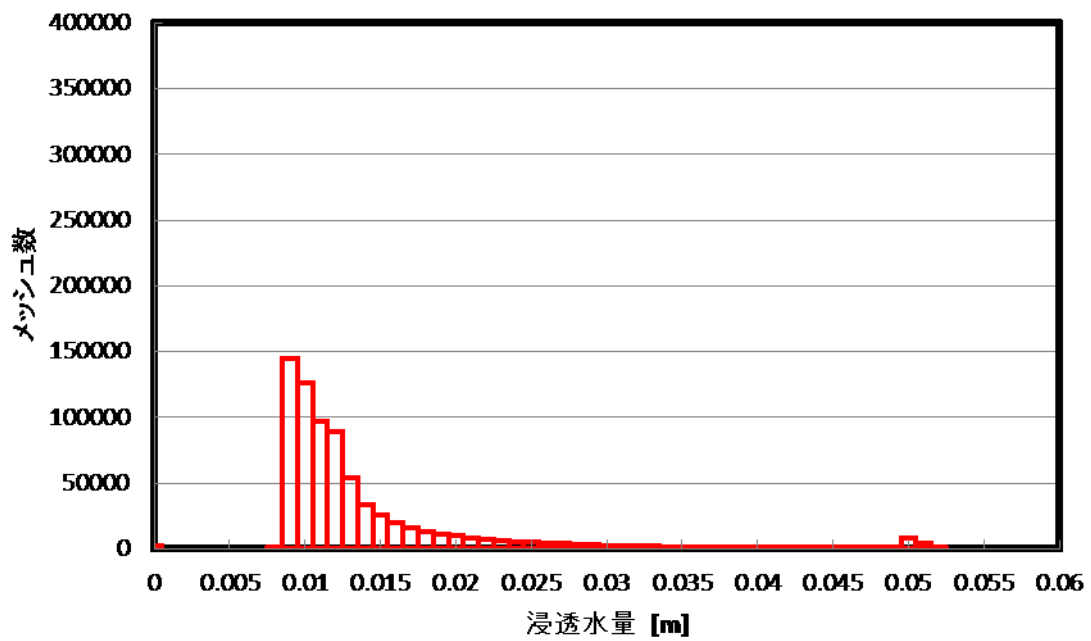


Figure A-248 植林後 裸地 浸透水量 1-2-3 PR=40.0

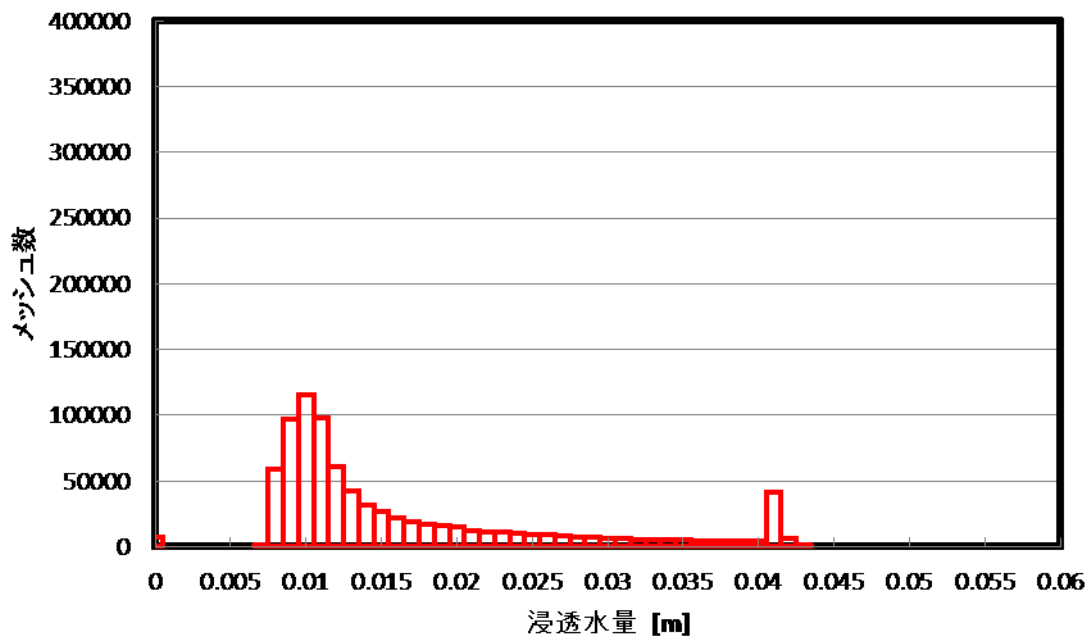


Figure A-249 植林前 草地 浸透水量 1-2-3 PR=40.0

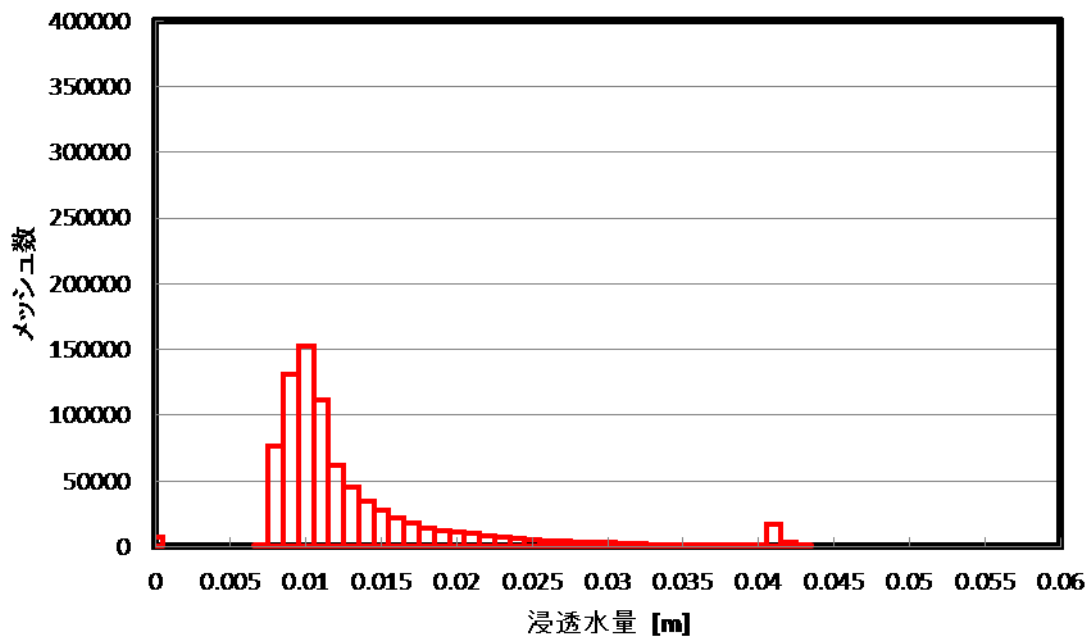


Figure A-250 植林後 草地 浸透水量 1-2-3 PR=40.0

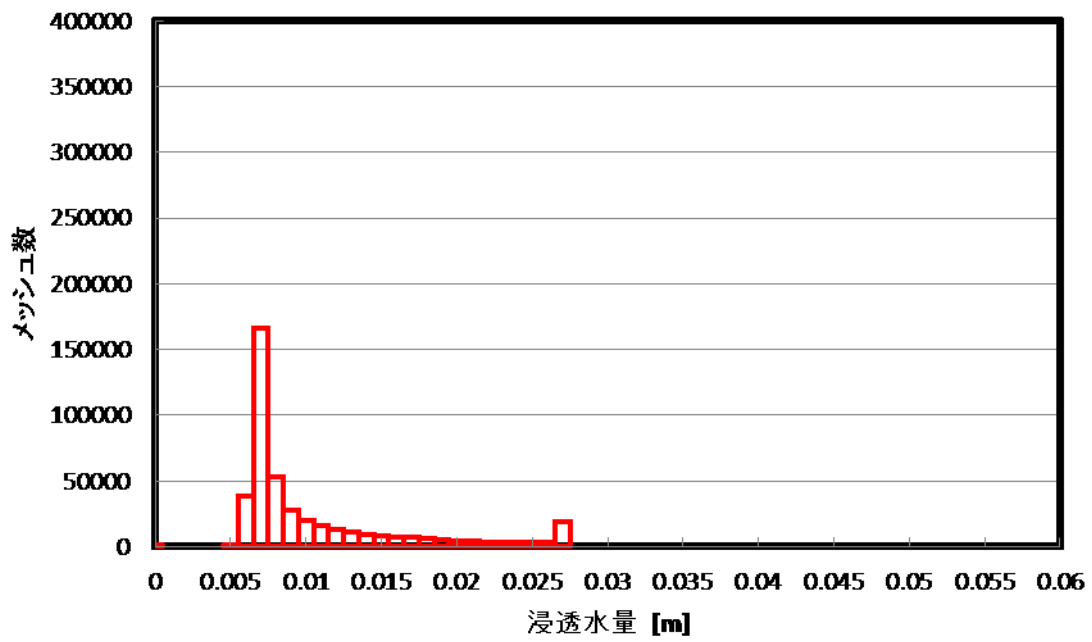


Figure A-251 植林前 森林 浸透水量 1-2-3 PR=40.0

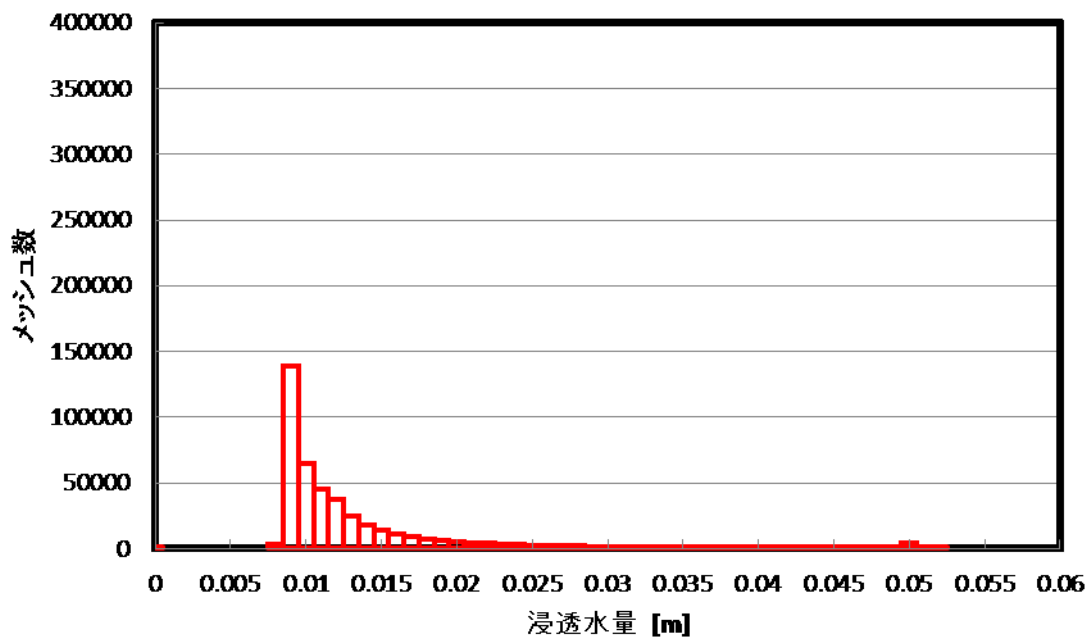


Figure A-252 植林後 森林 浸透水量 1-2-3 PR=40.0

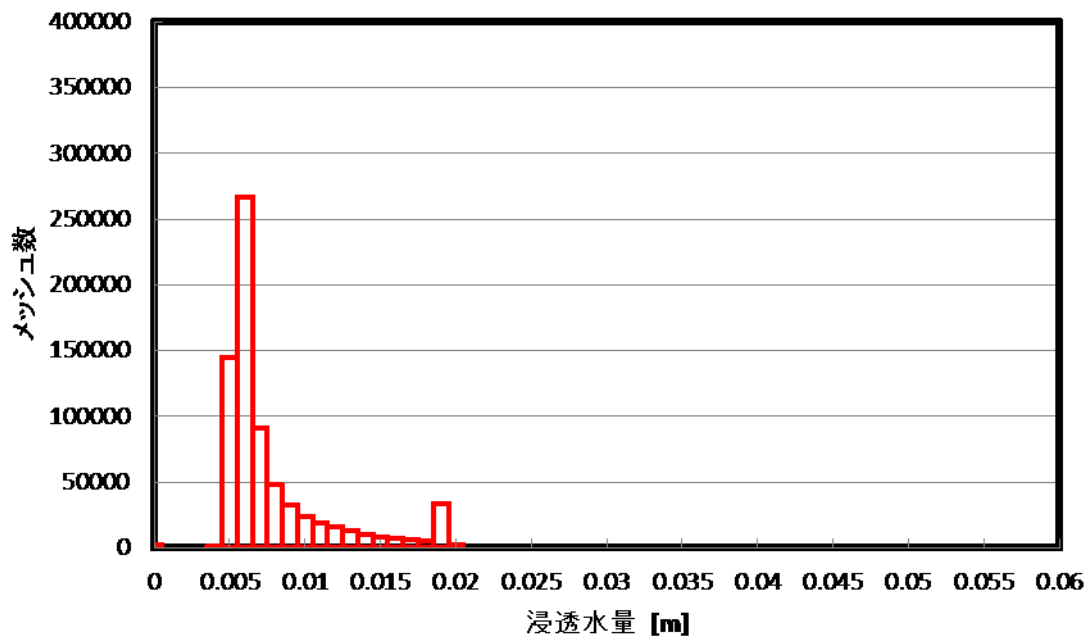


Figure A-253 植林前 裸地 浸透水量 2-1-1 PR=40.0

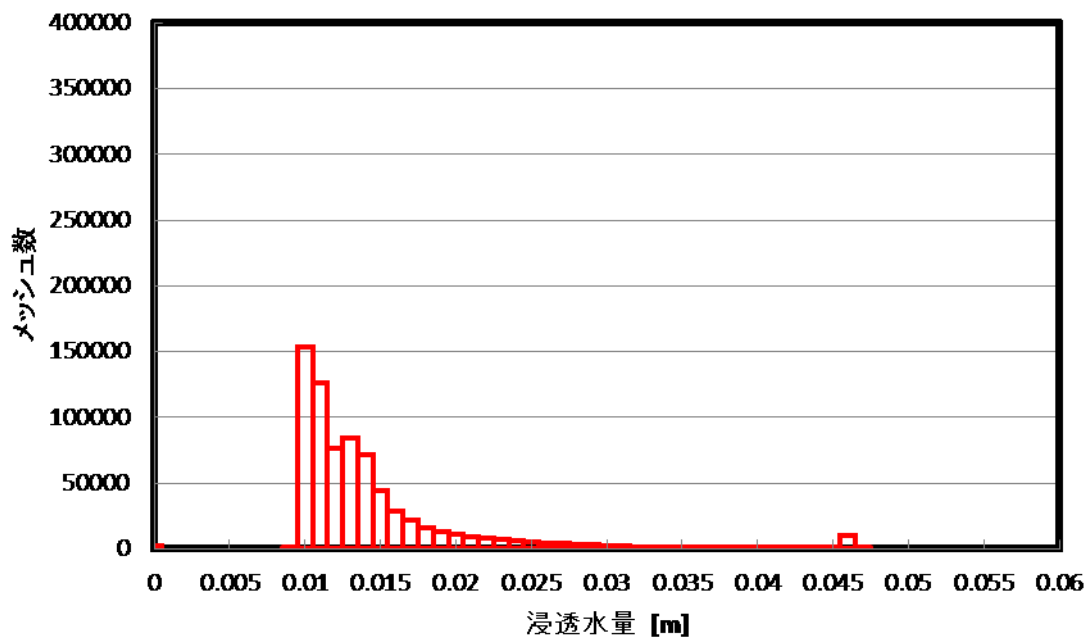


Figure A-254 植林後 裸地 浸透水量 2-1-1 PR=40.0

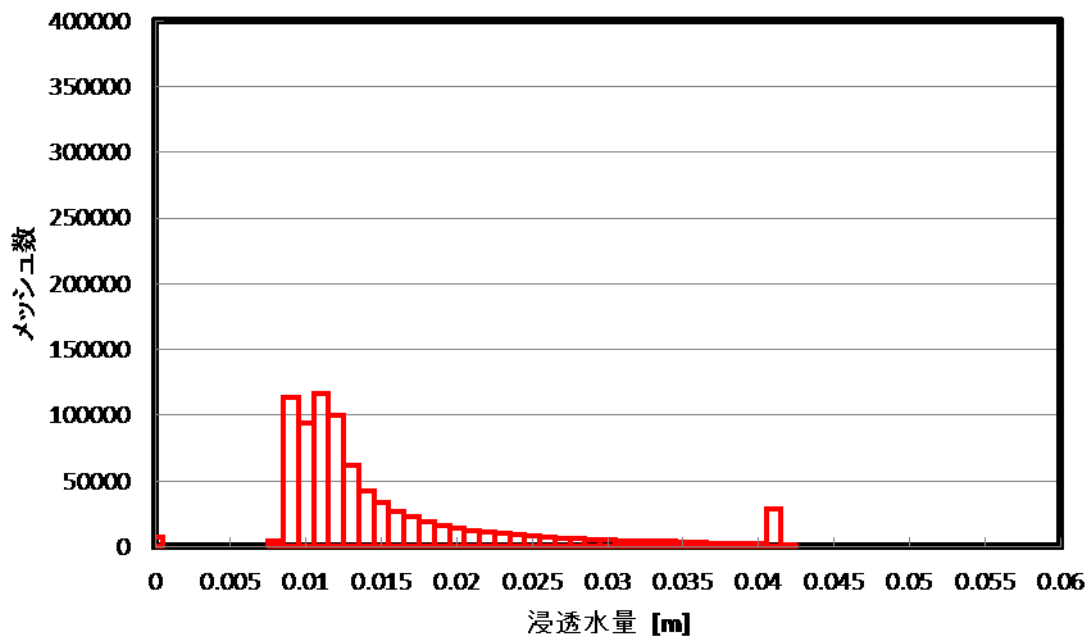


Figure A-255 植林前 草地 浸透水量 2-1-1 PR=40.0

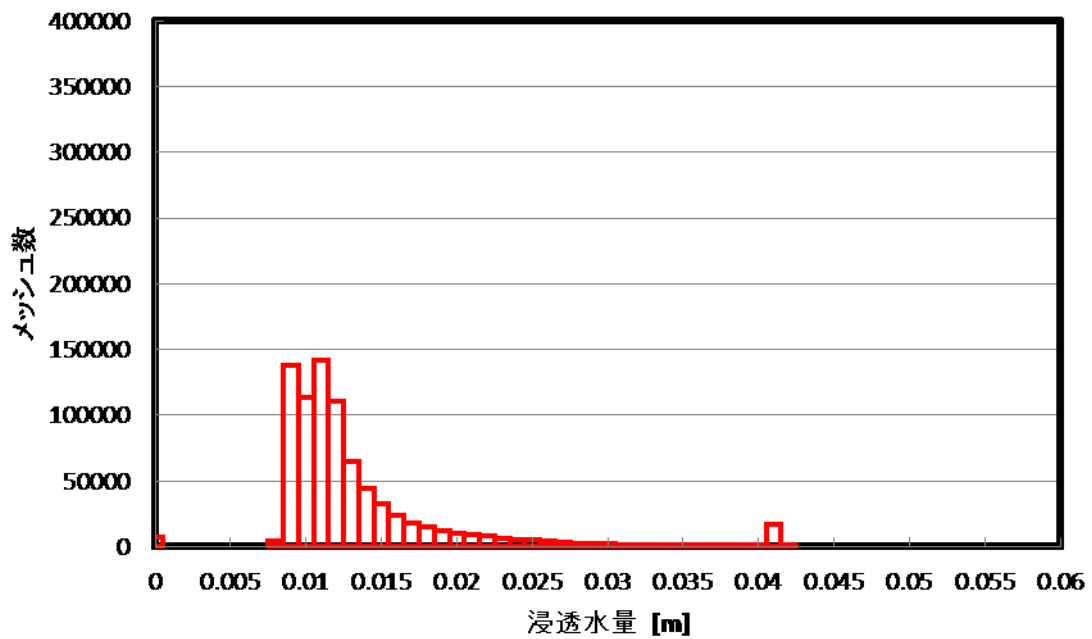


Figure A-256 植林後 草地 浸透水量 2-1-1 PR=40.0

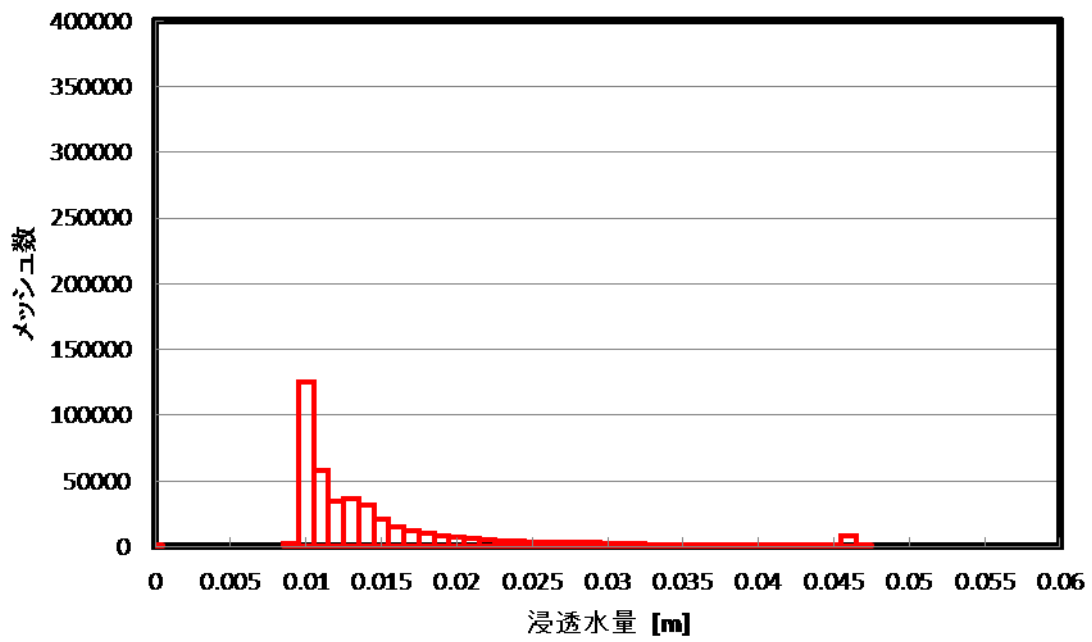


Figure A-257 植林前 森林 浸透水量 2-1-1 PR=40.0

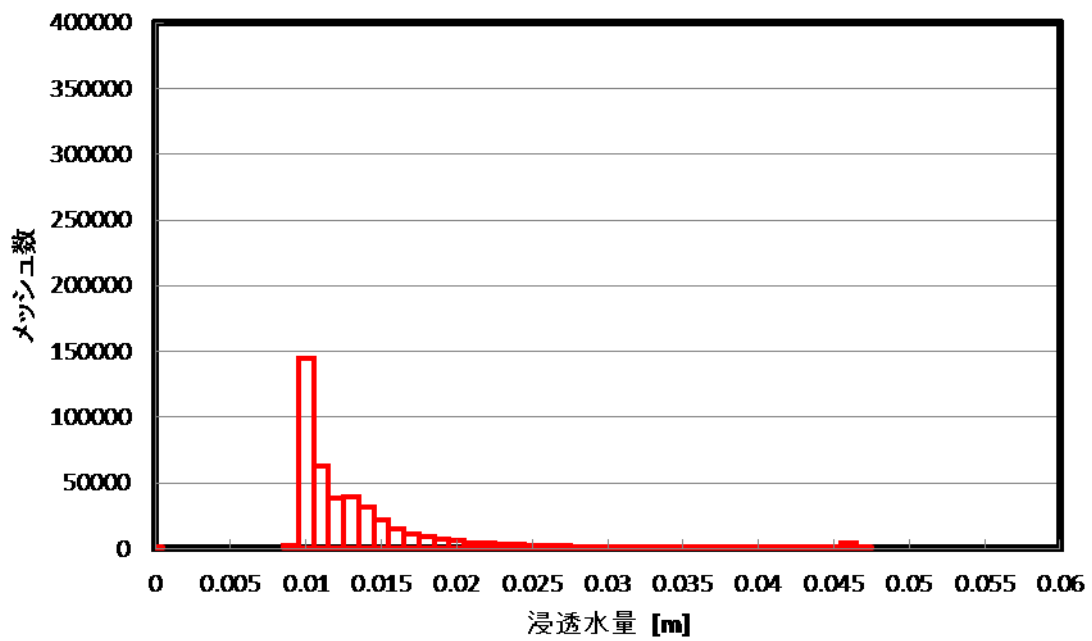


Figure A-258 植林後 森林 浸透水量 2-1-1 PR=40.0

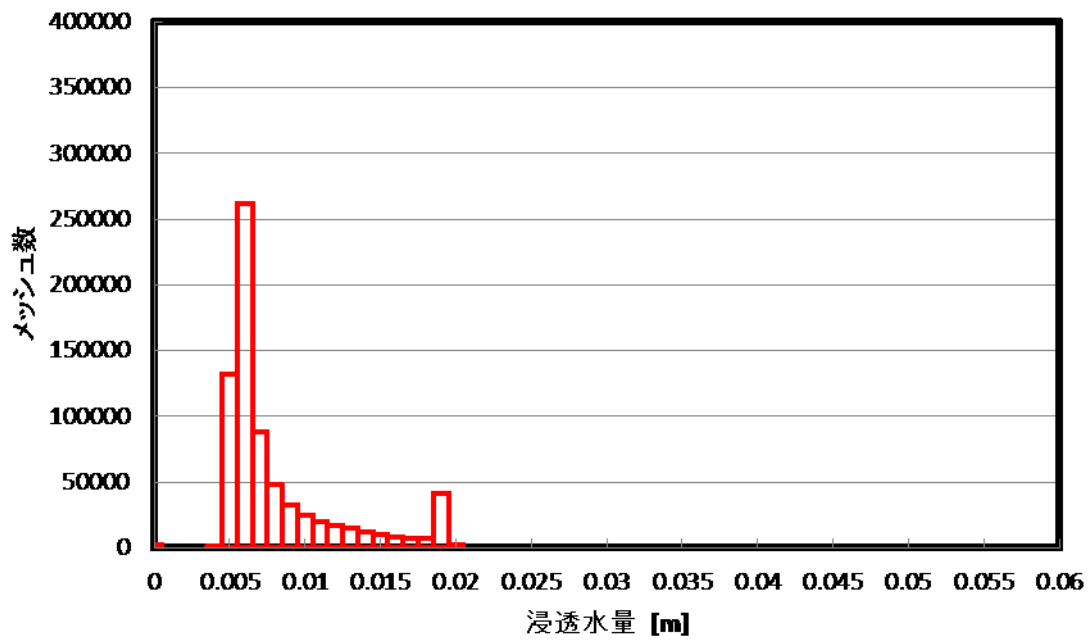


Figure A-259 植林前 裸地 浸透水量 2-1-2 PR=40.0

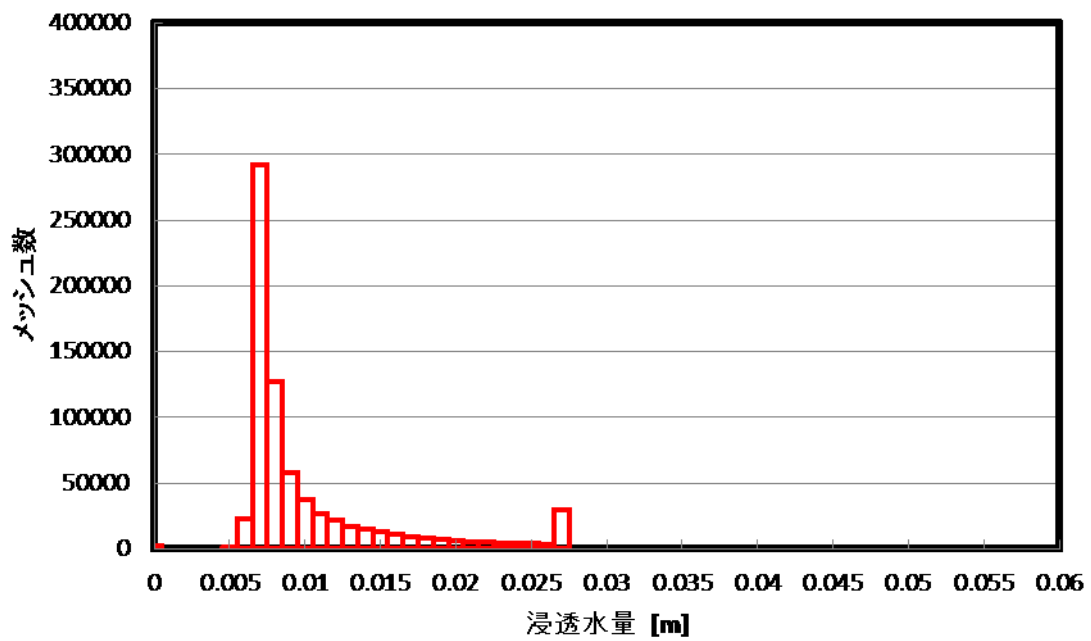


Figure A-260 植林後 裸地 浸透水量 2-1-2 PR=40.0

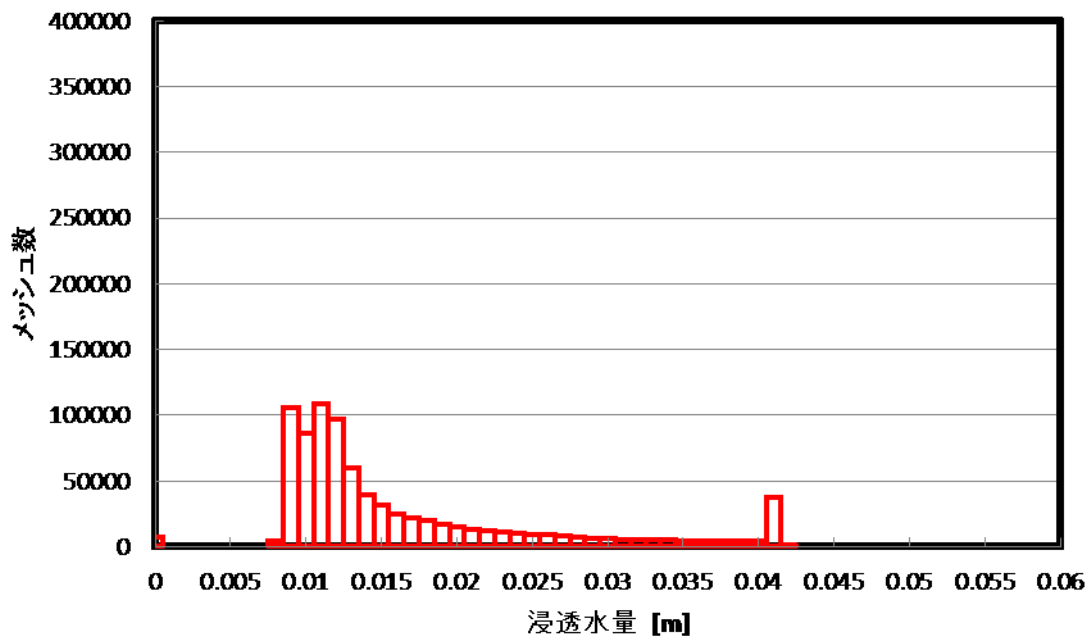


Figure A-261 植林前 草地 浸透水量 2-1-2 PR=40.0

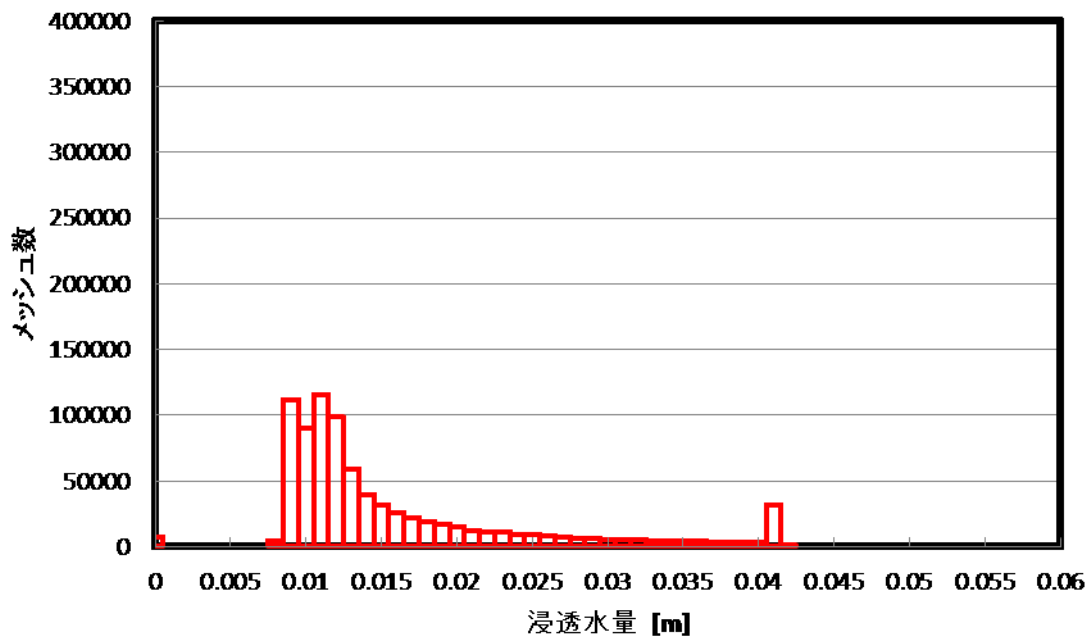


Figure A-262 植林後 草地 浸透水量 2-1-2 PR=40.0

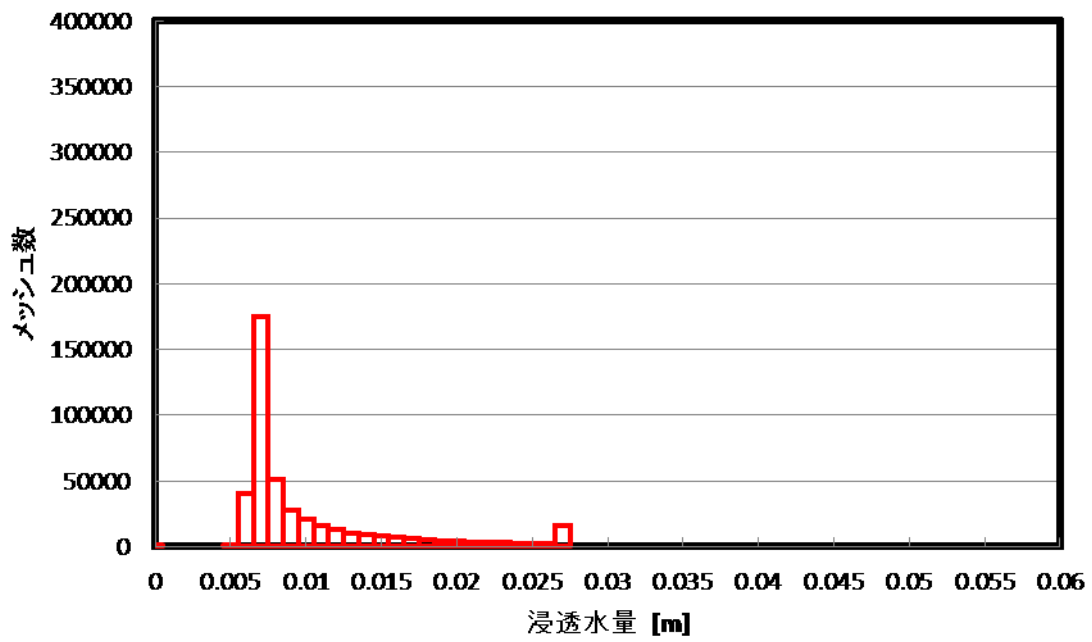


Figure A-263 植林前 森林 浸透水量 2-1-2 PR=40.0

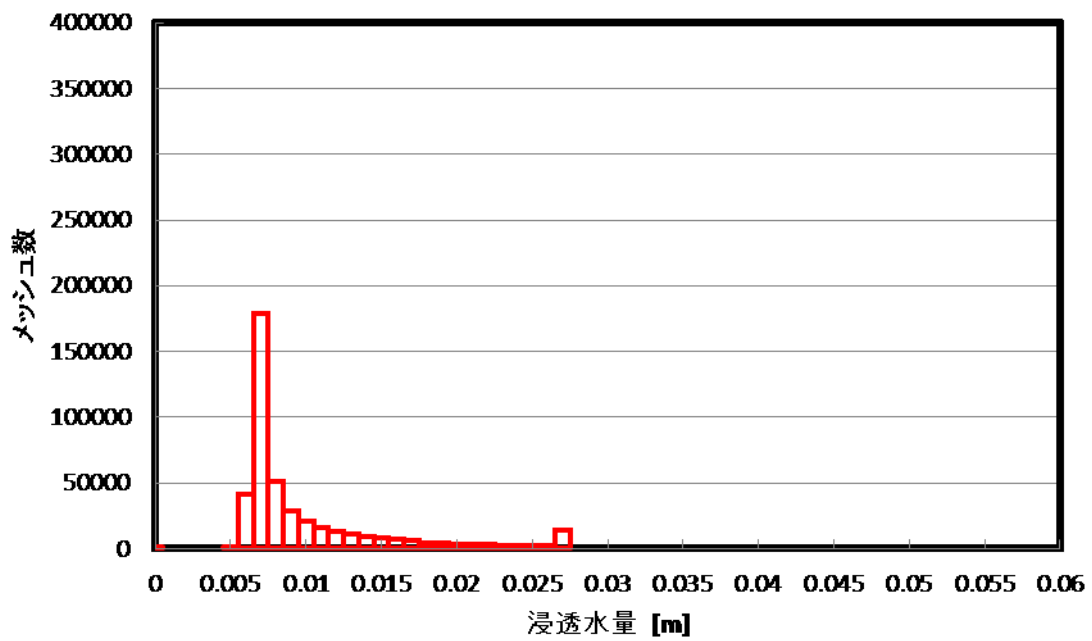


Figure A-264 植林後 森林 浸透水量 2-1-2 PR=40.0

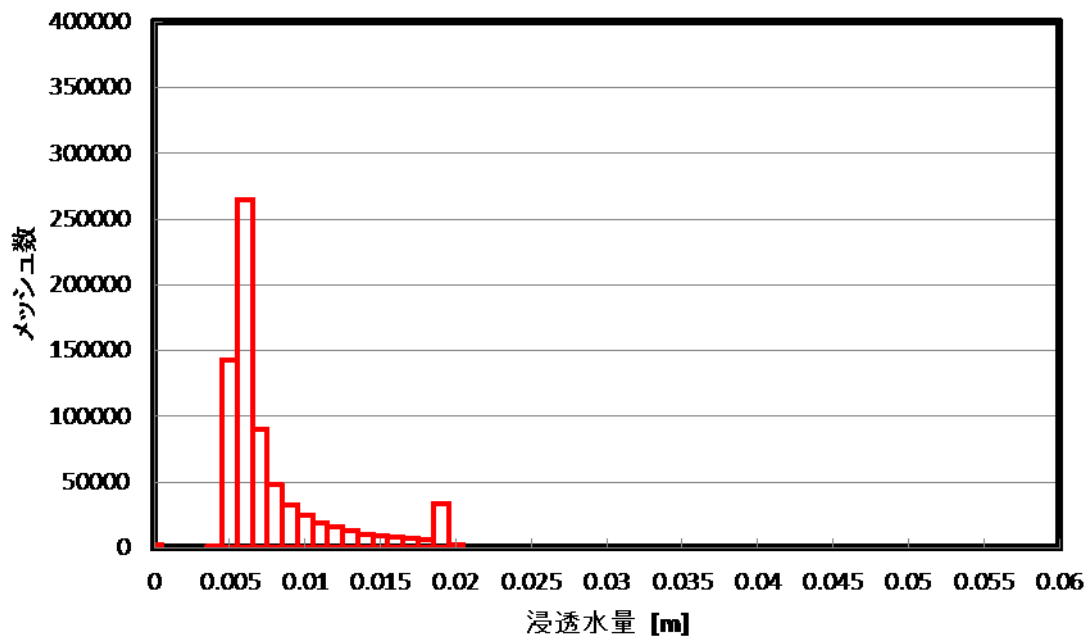


Figure A-265 植林前 裸地 浸透水量 2-1-3 PR=40.0

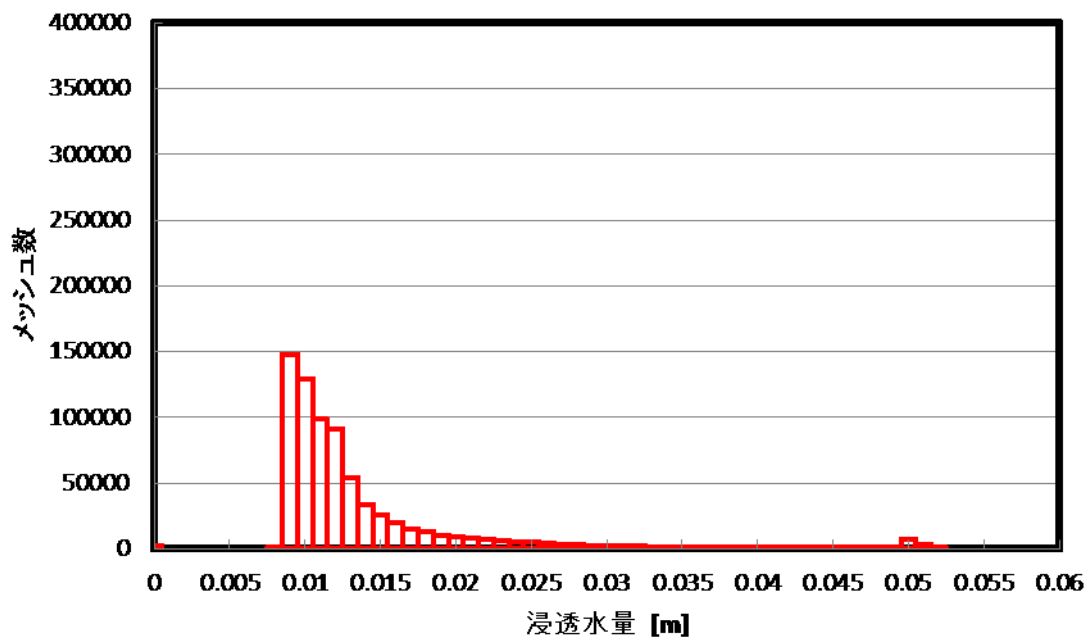


Figure A-266 植林後 裸地 浸透水量 2-1-3 PR=40.0

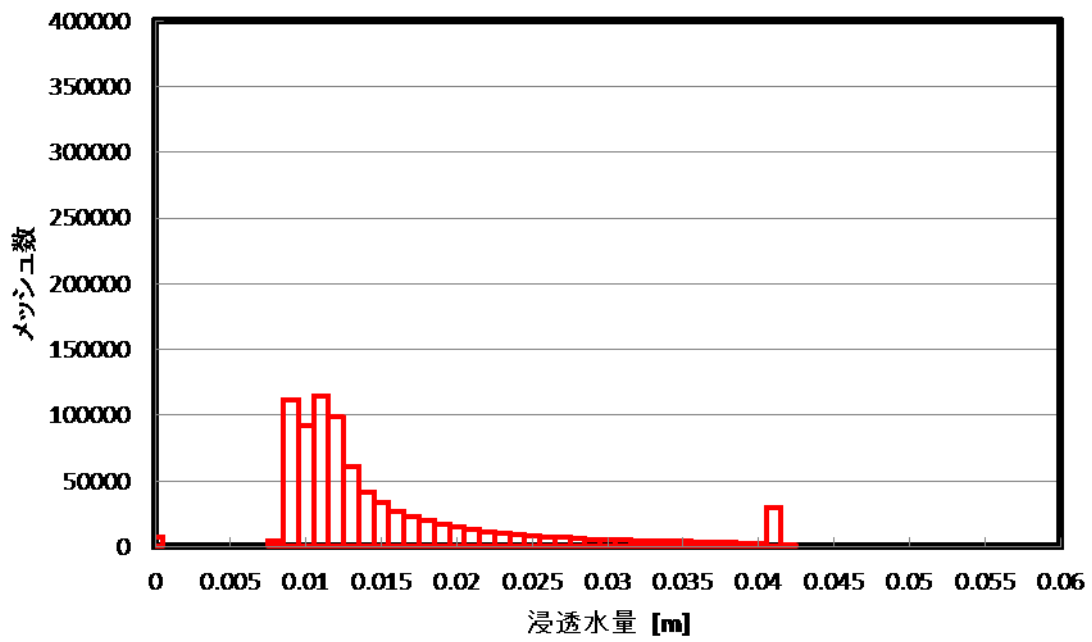


Figure A-267 植林前 草地 浸透水量 2-1-3 PR=40.0

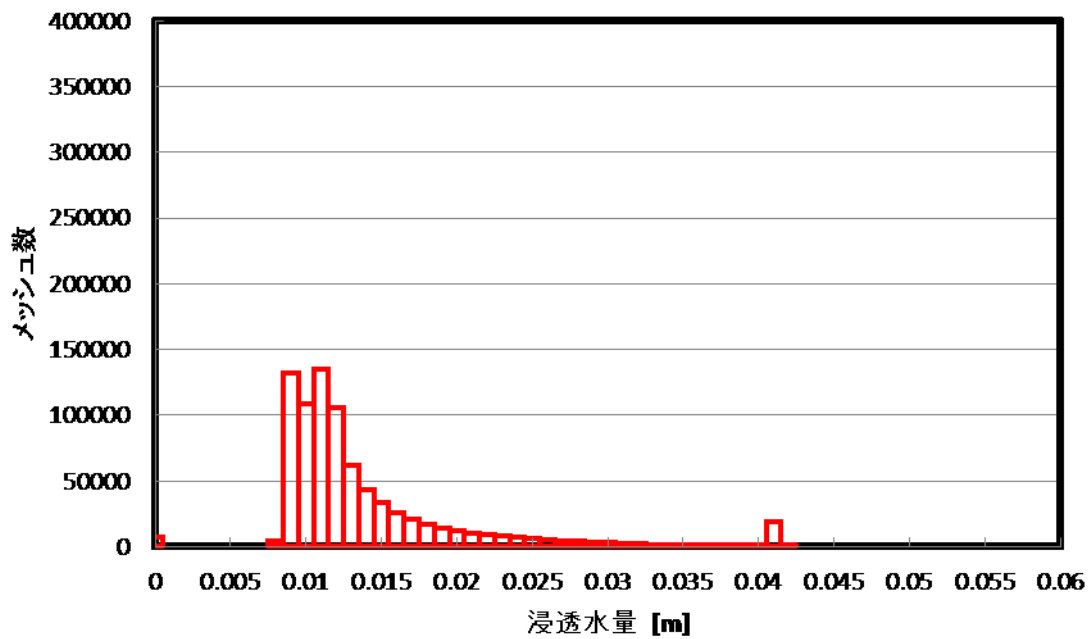


Figure A-268 植林後 草地 浸透水量 2-1-3 PR=40.0

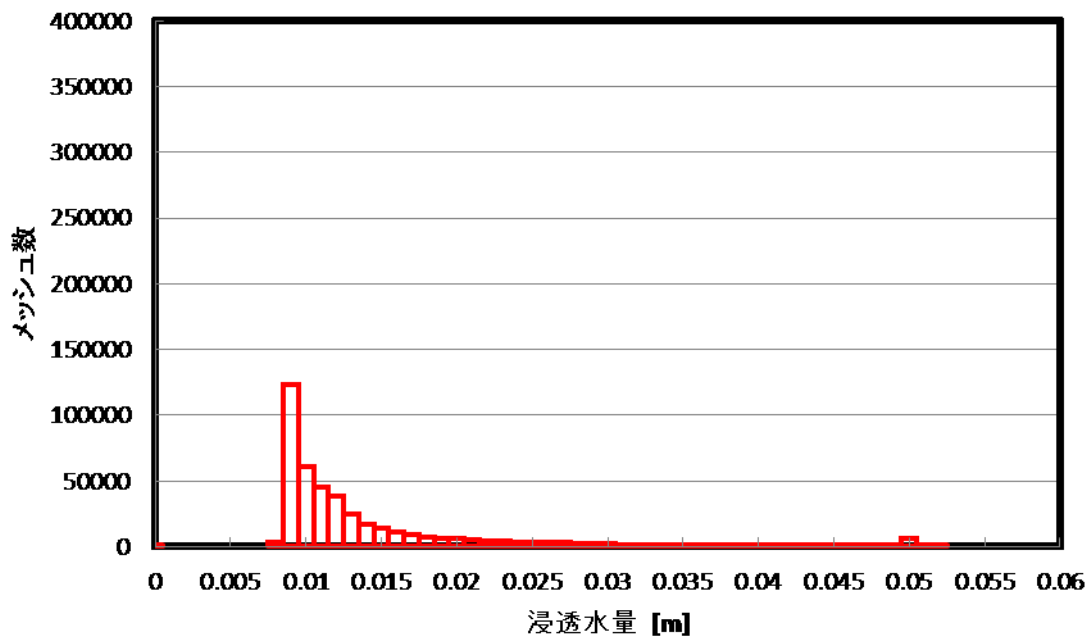


Figure A-269 植林前 森林 浸透水量 2-1-3 PR=40.0

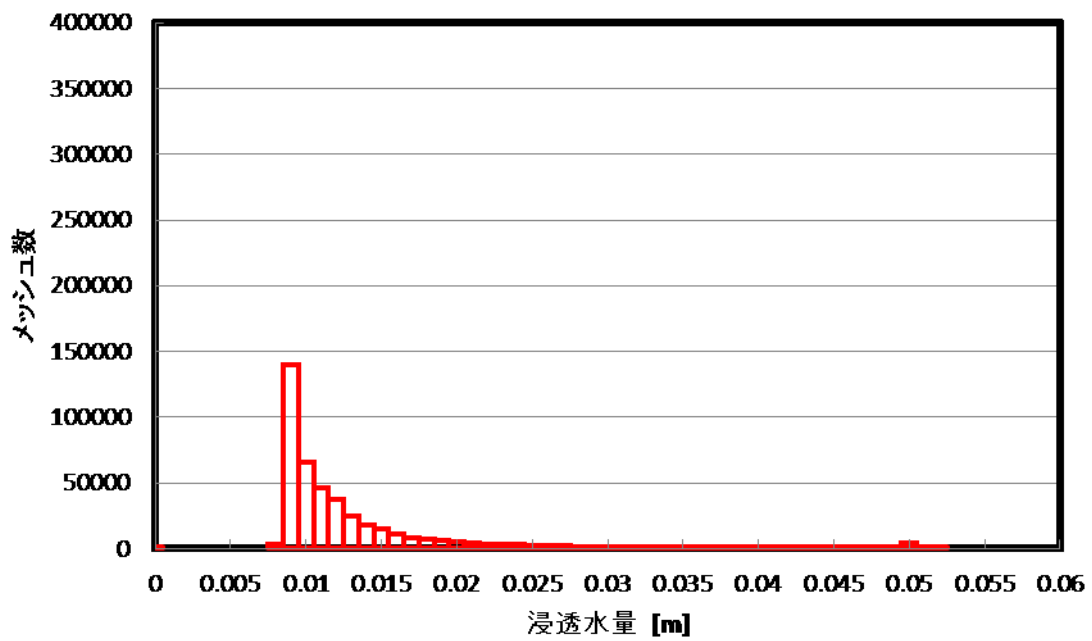


Figure A-270 植林後 森林 浸透水量 2-1-3 PR=40.0

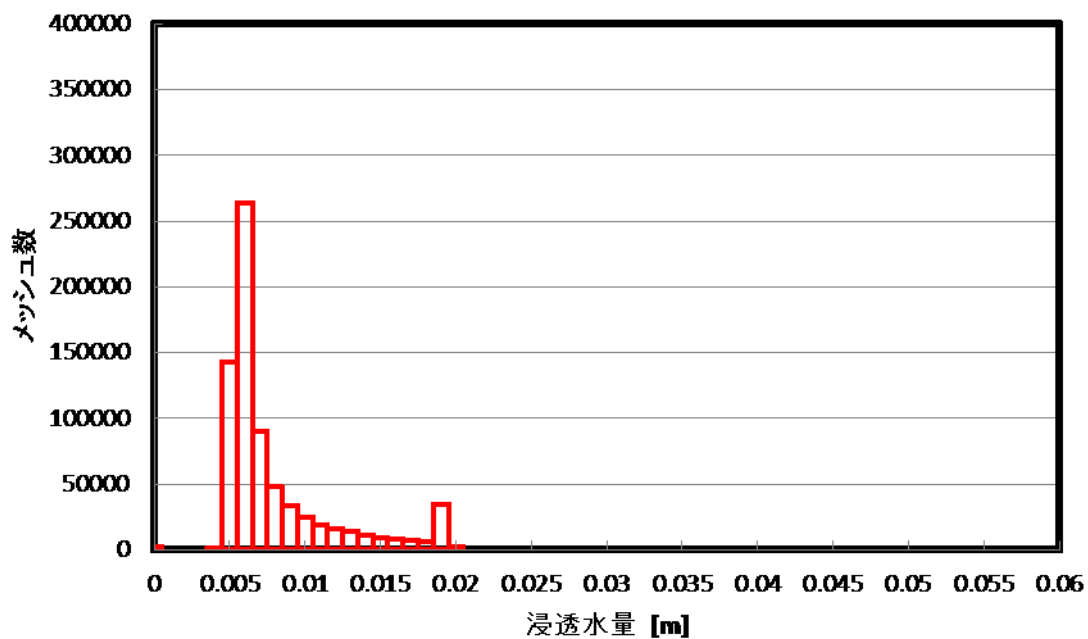


Figure A-271 植林前 裸地 浸透水量 2-2-1 PR=40.0

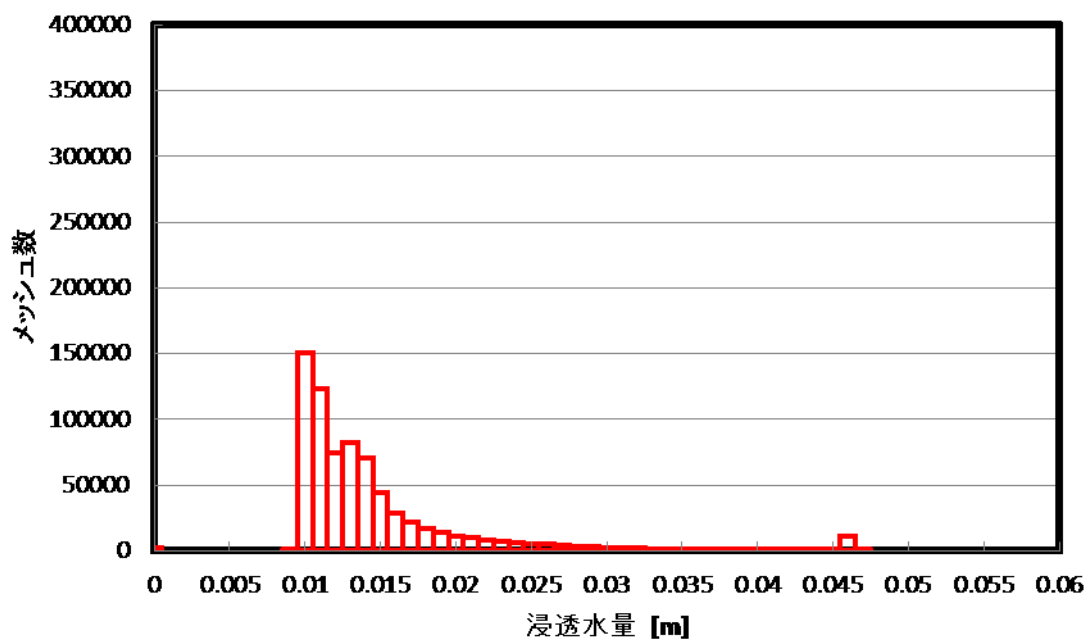


Figure A-272 植林後 裸地 浸透水量 2-2-1 PR=40.0

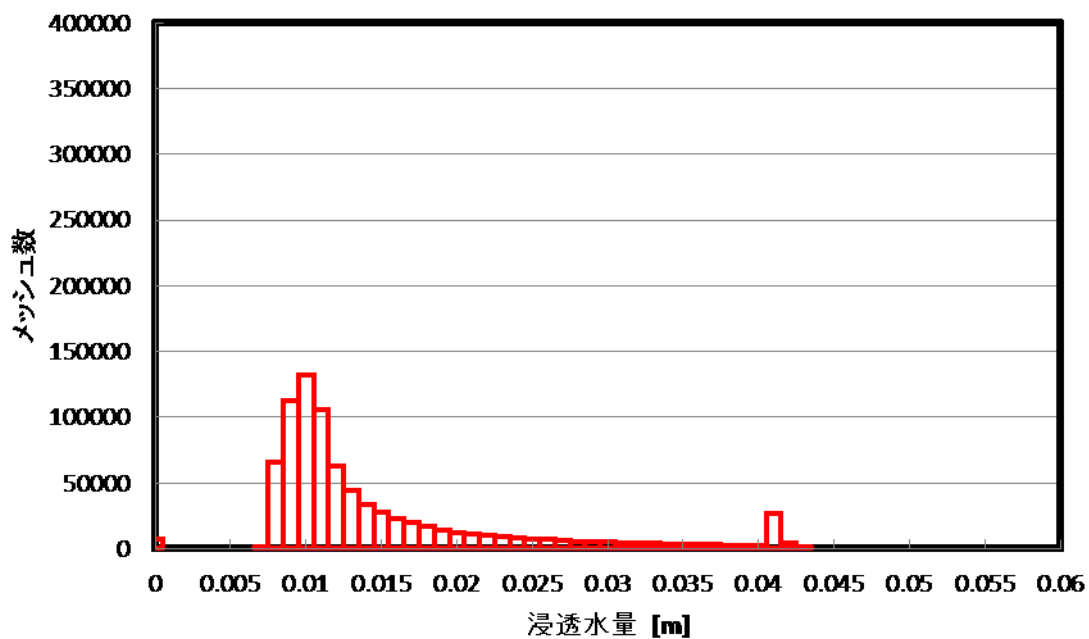


Figure A-273 植林前 草地 浸透水量 2-2-1 PR=40.0

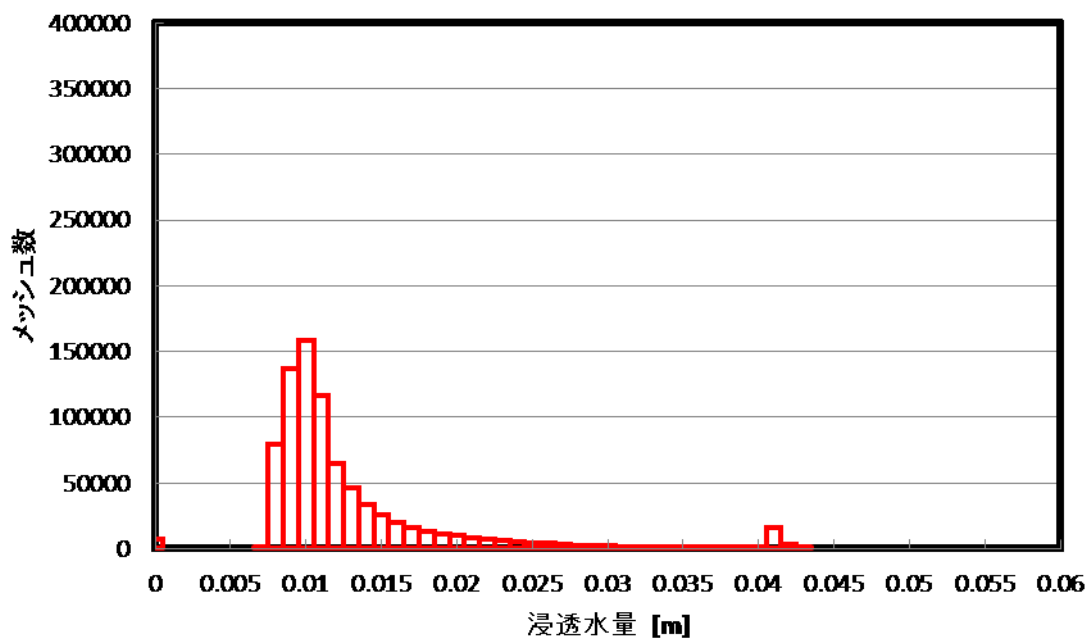


Figure A-274 植林後 草地 浸透水量 2-2-1 PR=40.0

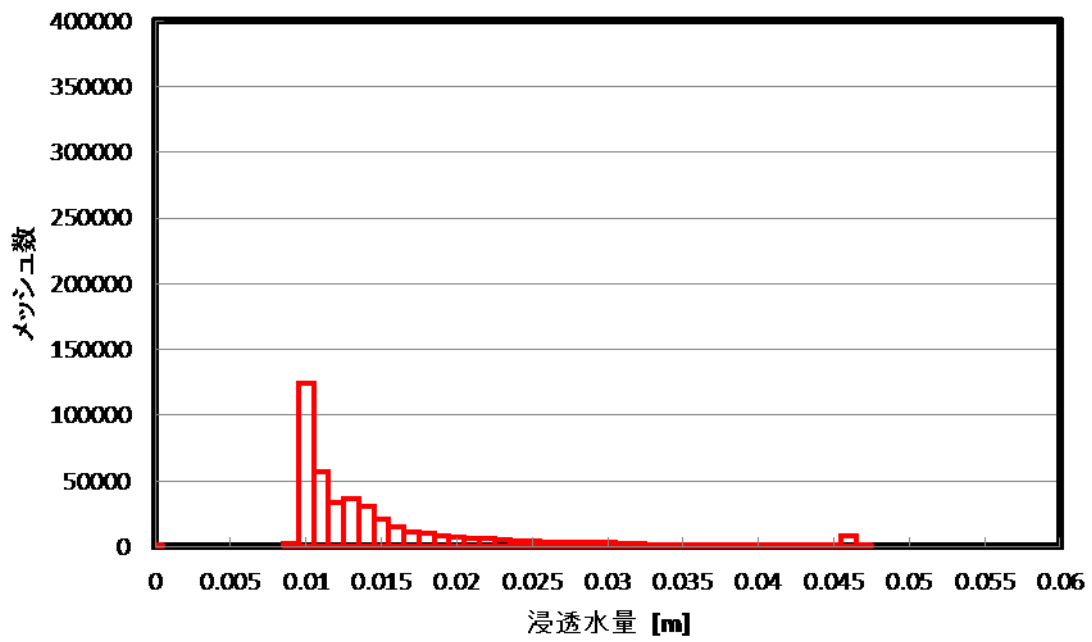


Figure A-275 植林前 森林 浸透水量 2-2-1 PR=40.0

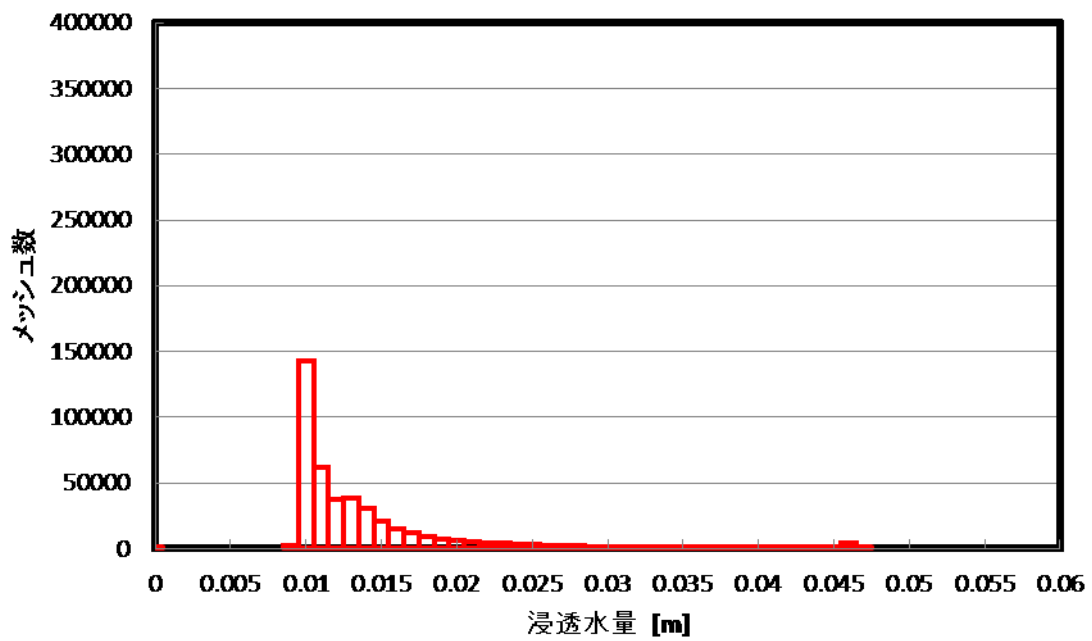


Figure A-276 植林後 森林 浸透水量 2-2-1 PR=40.0

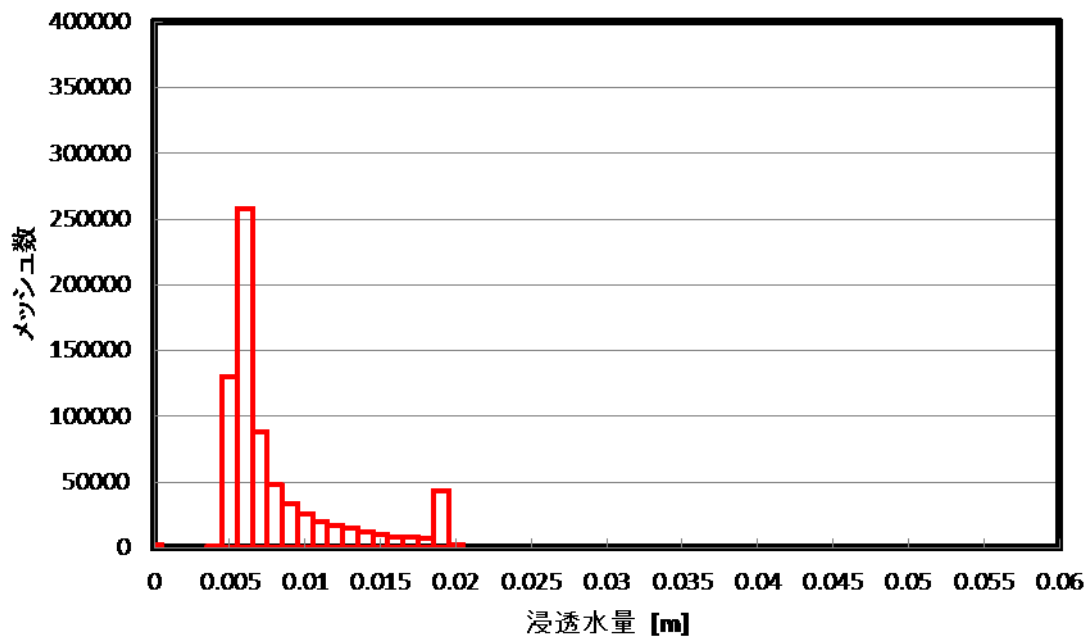


Figure A-277 植林前 裸地 浸透水量 2-2-2 PR=40.0

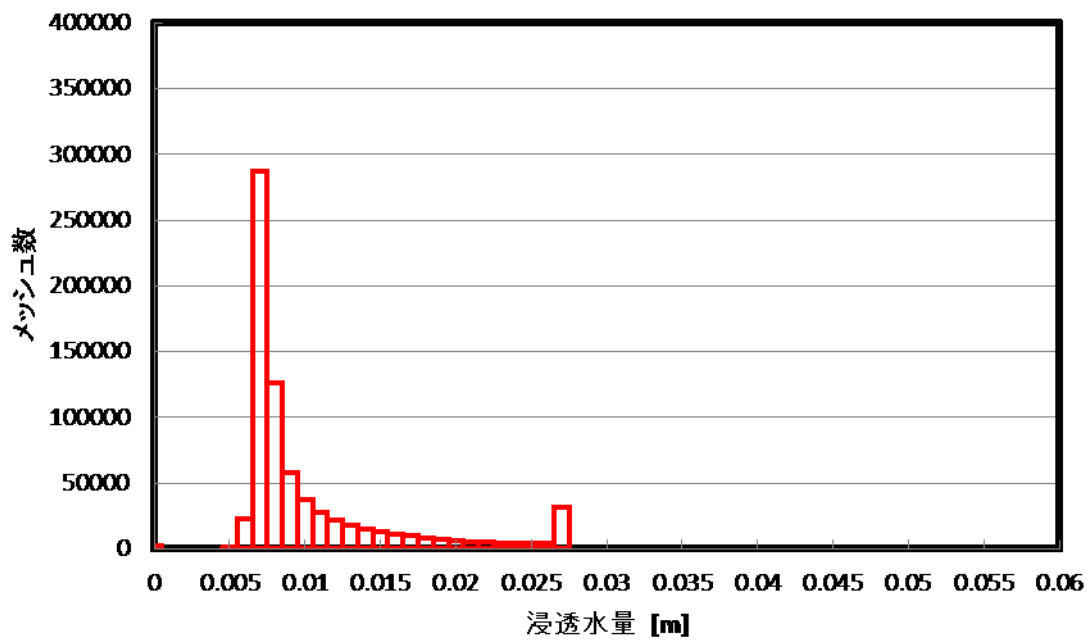


Figure A-278 植林後 裸地 浸透水量 2-2-2 PR=40.0

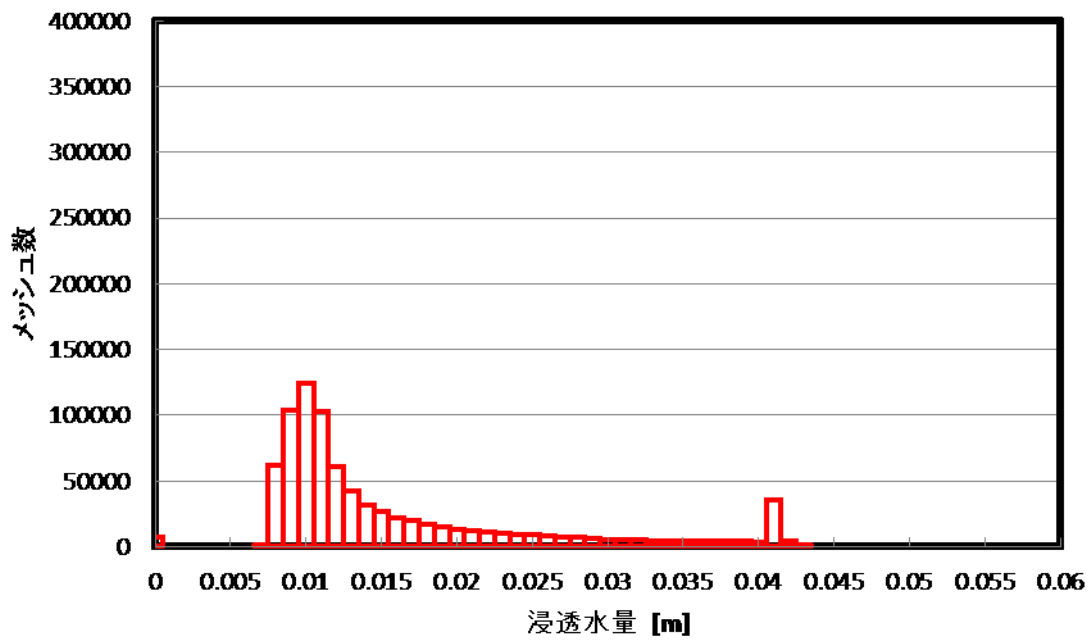


Figure A-279 植林前 草地 浸透水量 2-2-2 PR=40.0

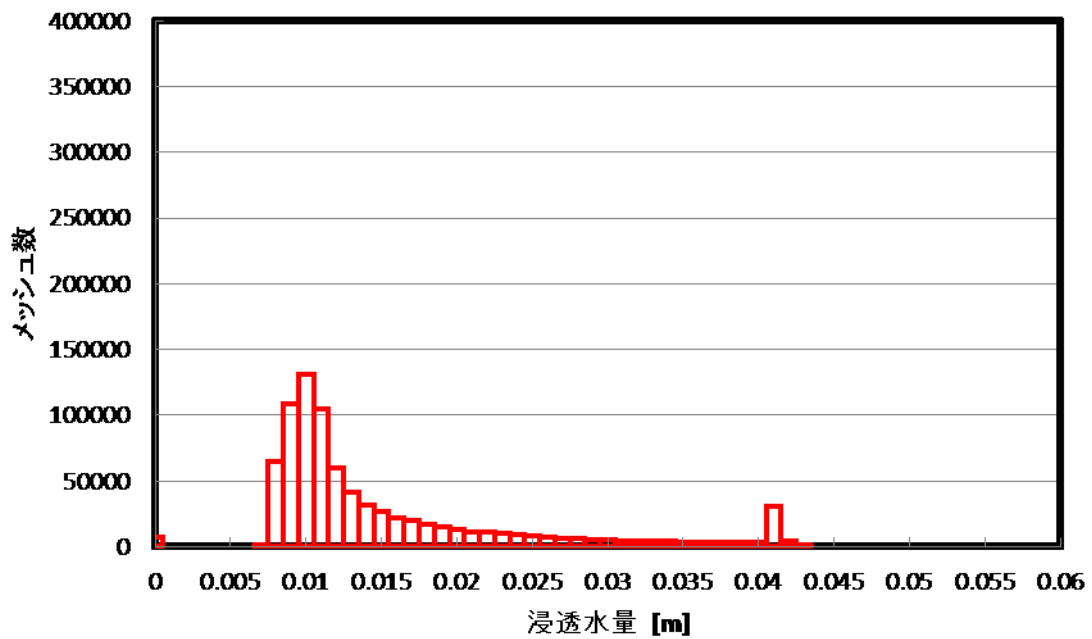


Figure A-280 植林後 草地 浸透水量 2-2-2 PR=40.0

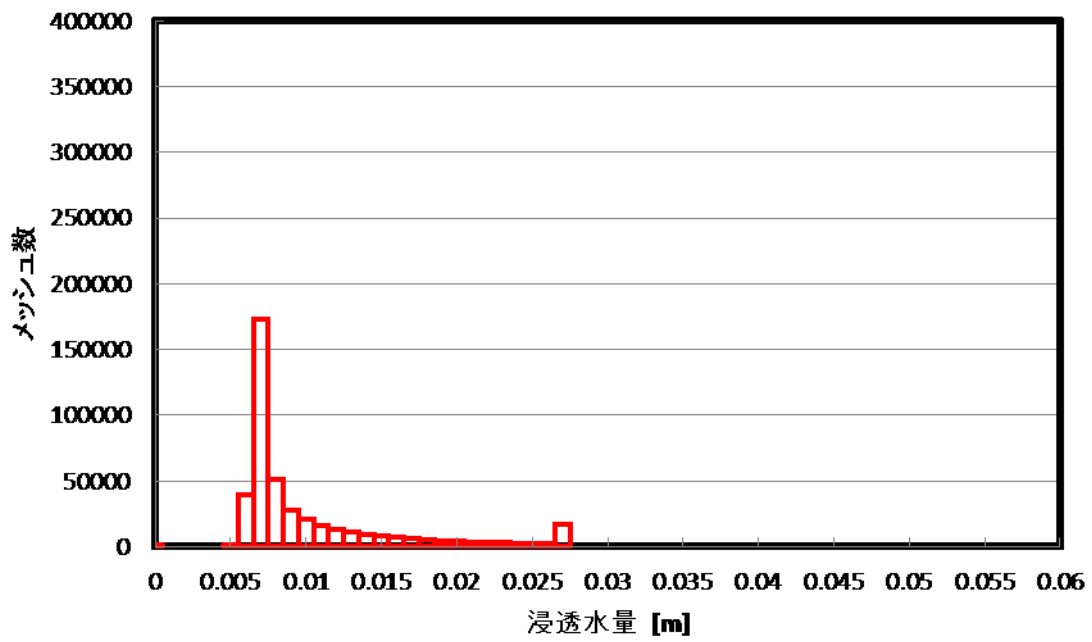


Figure A-281 植林前 森林 浸透水量 2-2-2 PR=40.0

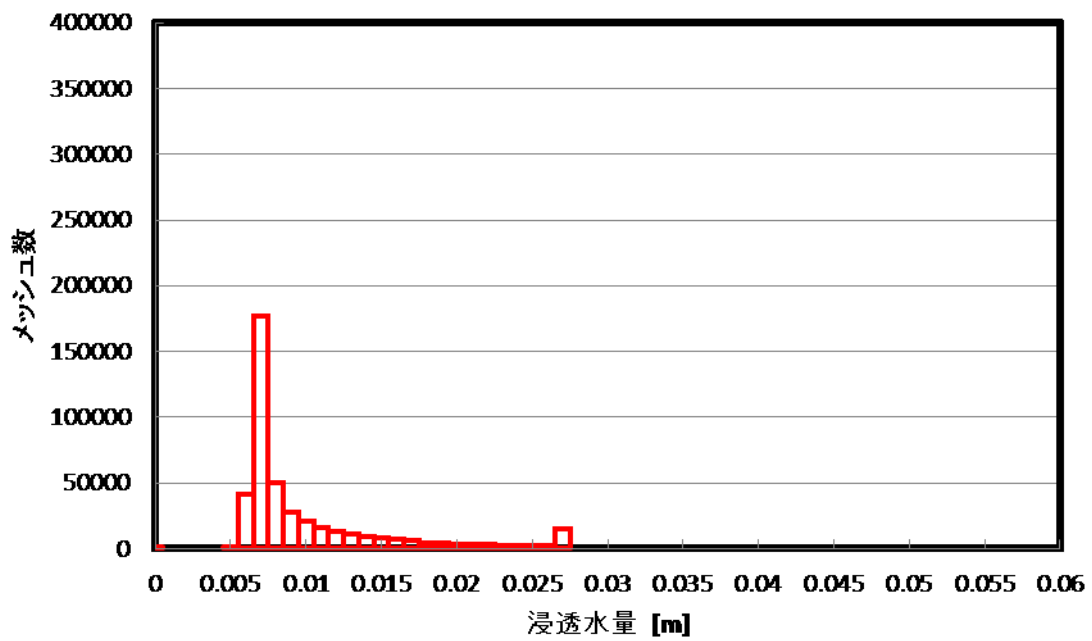


Figure A-282 植林後 森林 浸透水量 2-2-2 PR=40.0

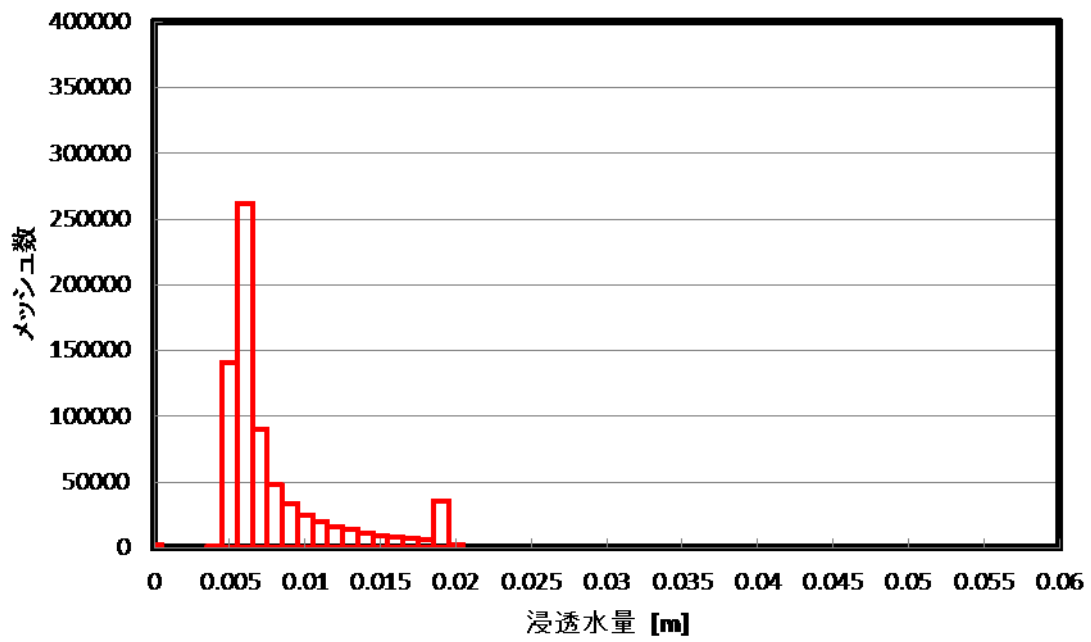


Figure A-283 植林前 裸地 浸透水量 2-2-3 PR=40.0

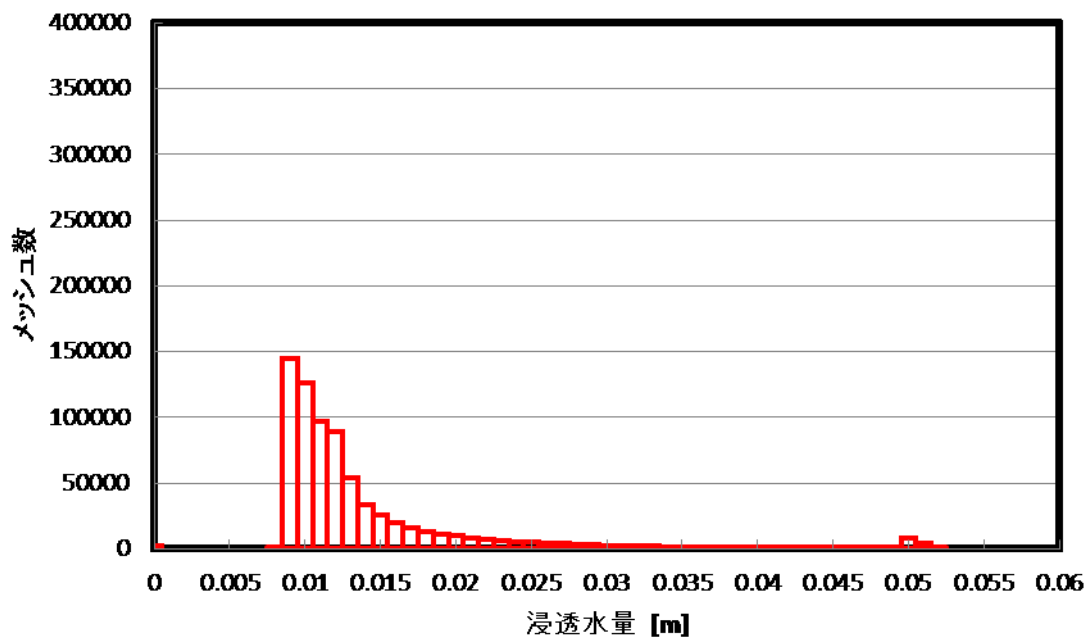


Figure A-284 植林後 裸地 浸透水量 2-2-3 PR=40.0

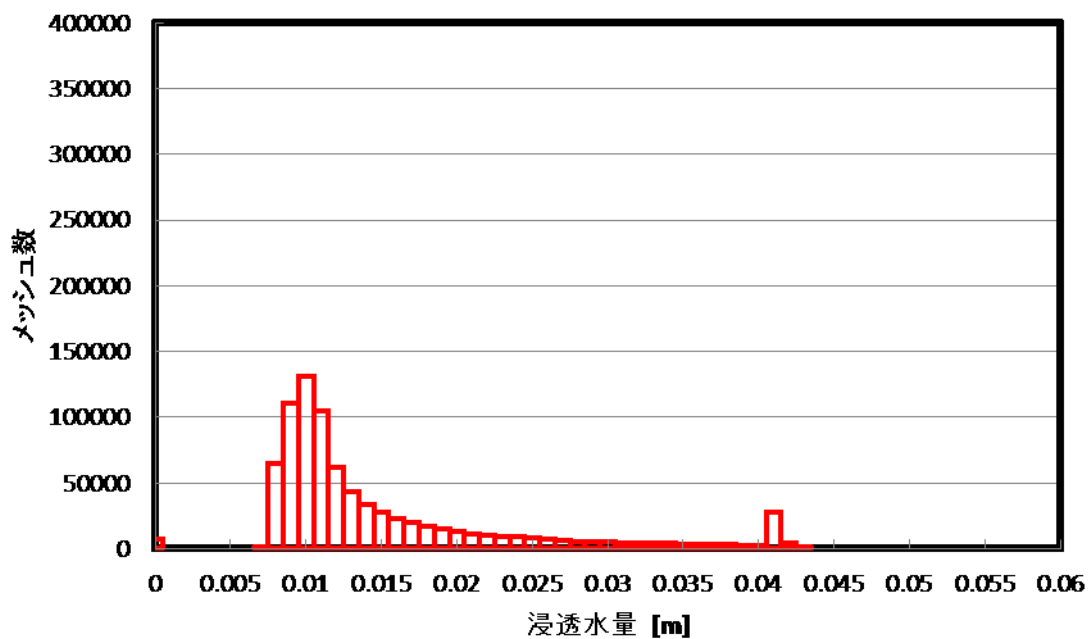


Figure A-285 植林前 草地 浸透水量 2-2-3 PR=40.0

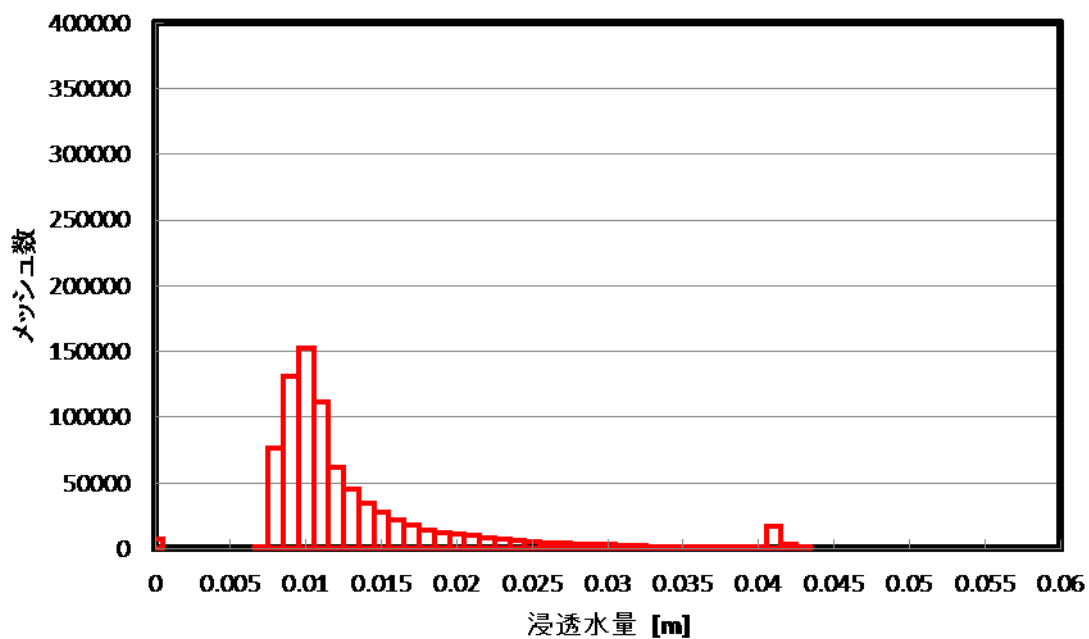


Figure A-286 植林後 草地 浸透水量 2-2-3 PR=40.0

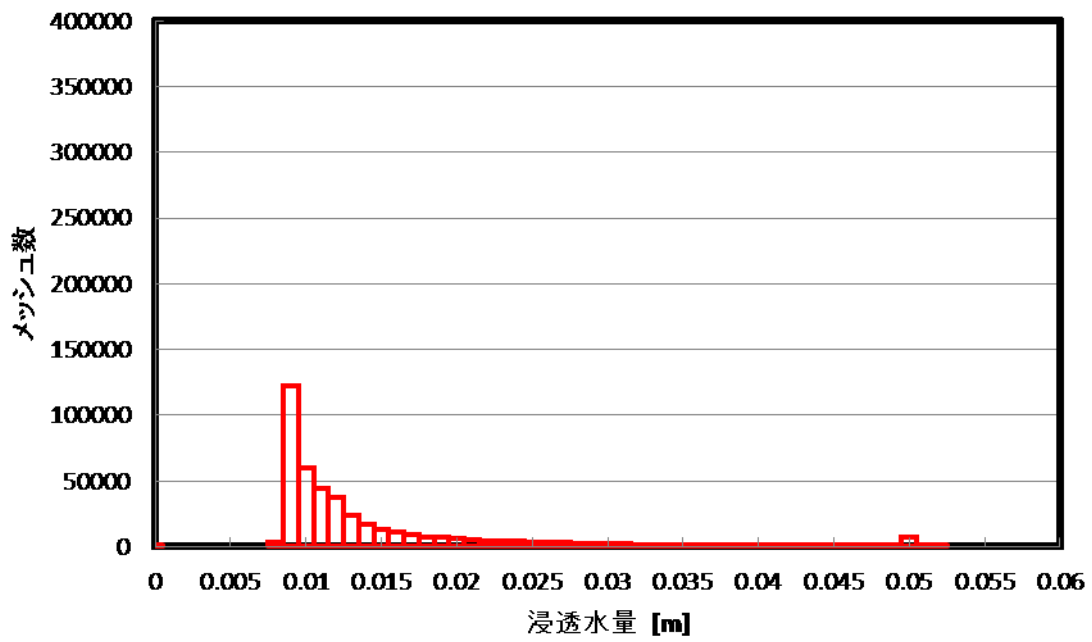


Figure A-287 植林前 森林 浸透水量 2-2-3 PR=40.0

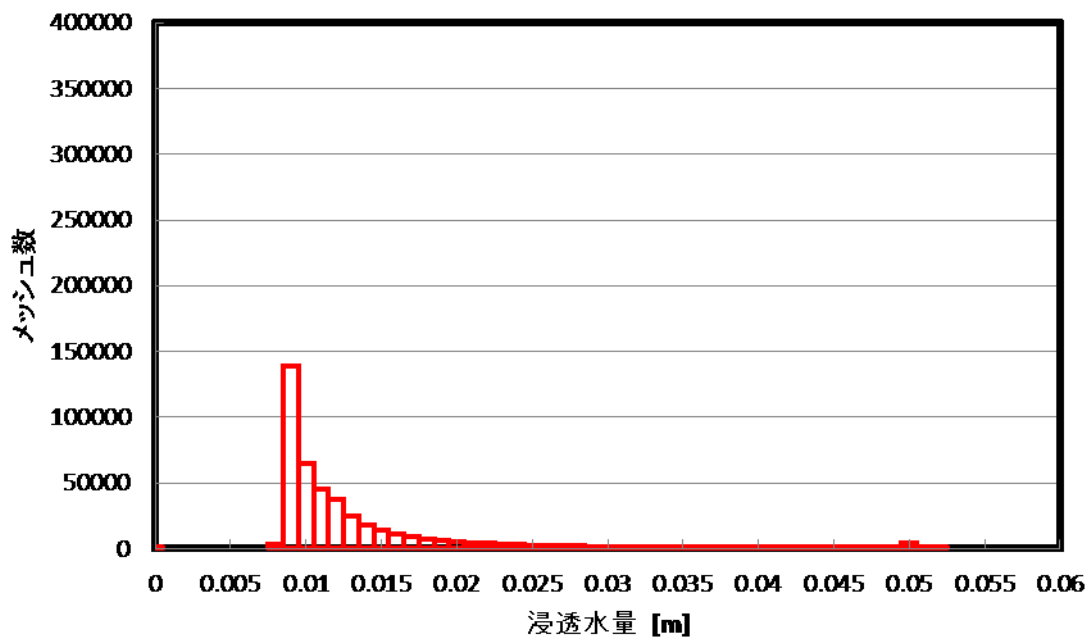


Figure A-288 植林後 森林 浸透水量 2-2-3 PR=40.0

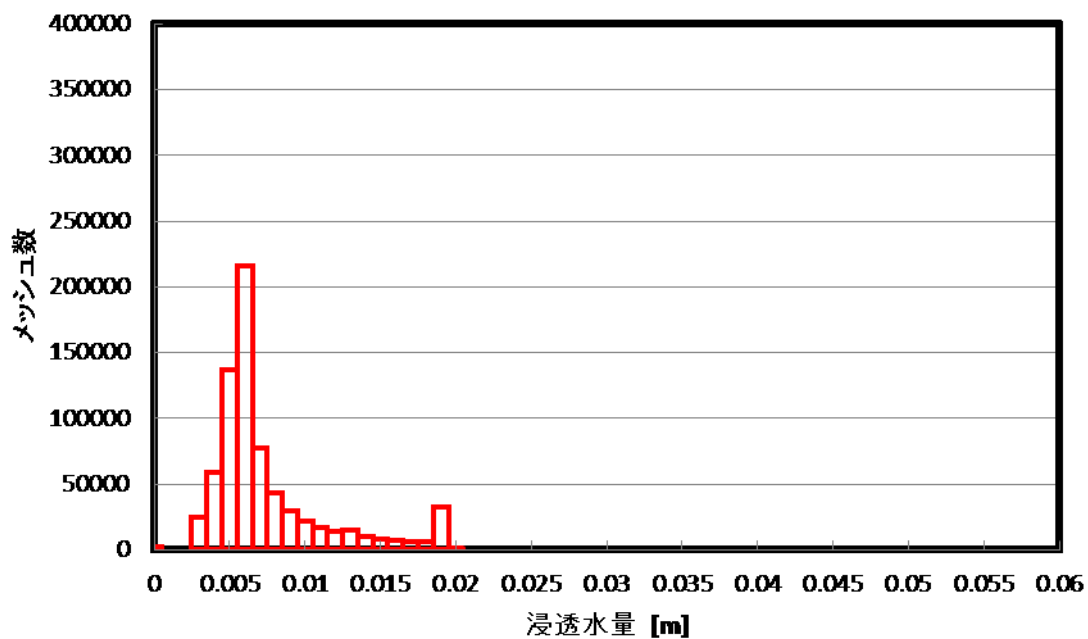


Figure A-289 植林前 裸地 浸透水量 3-1-1 PR=40.0

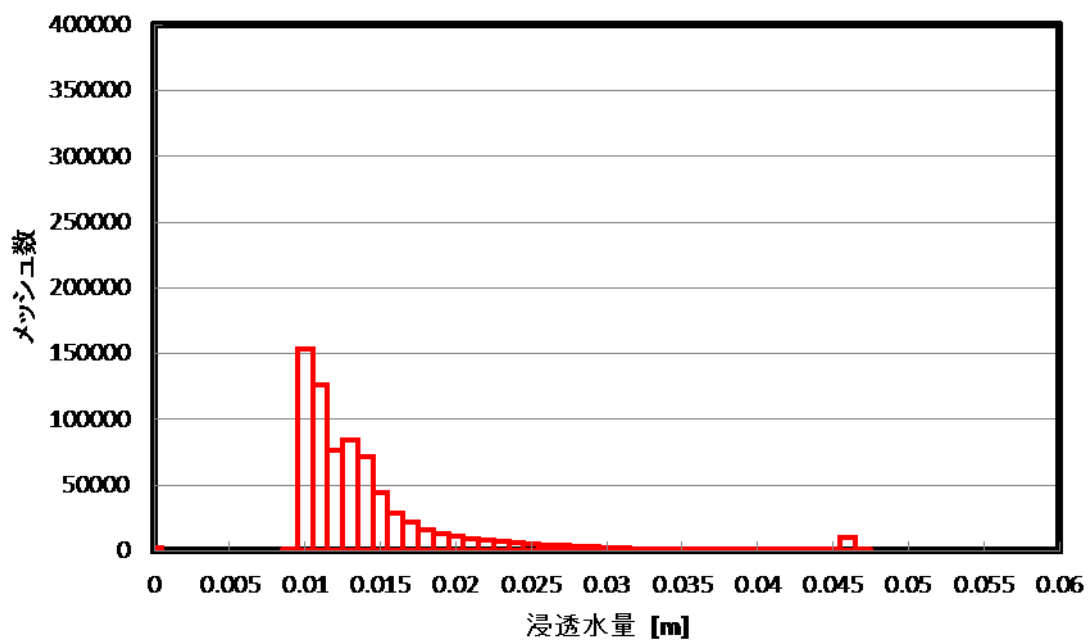


Figure A-290 植林後 裸地 浸透水量 3-1-1 PR=40.0

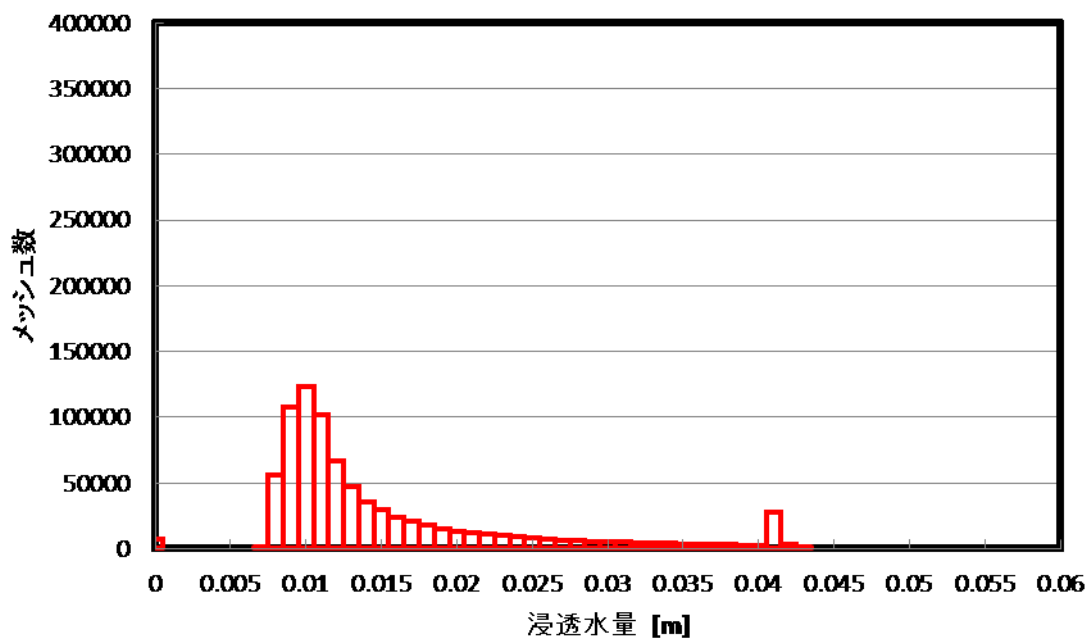


Figure A-291 植林前 草地 浸透水量 3-1-1 PR=40.0

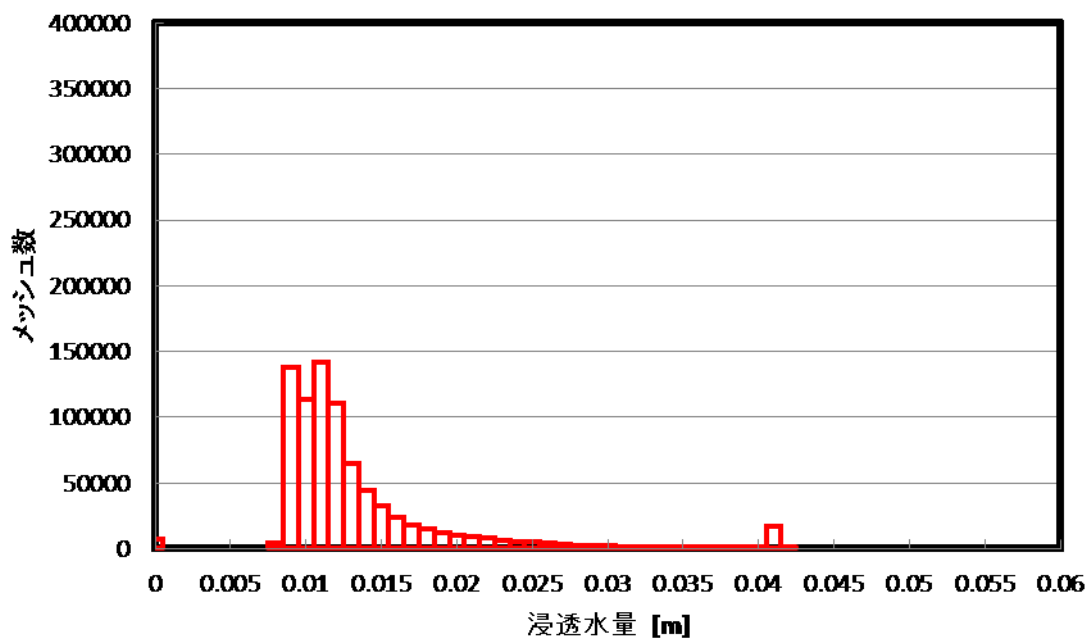


Figure A-292 植林後 草地 浸透水量 3-1-1 PR=40.0

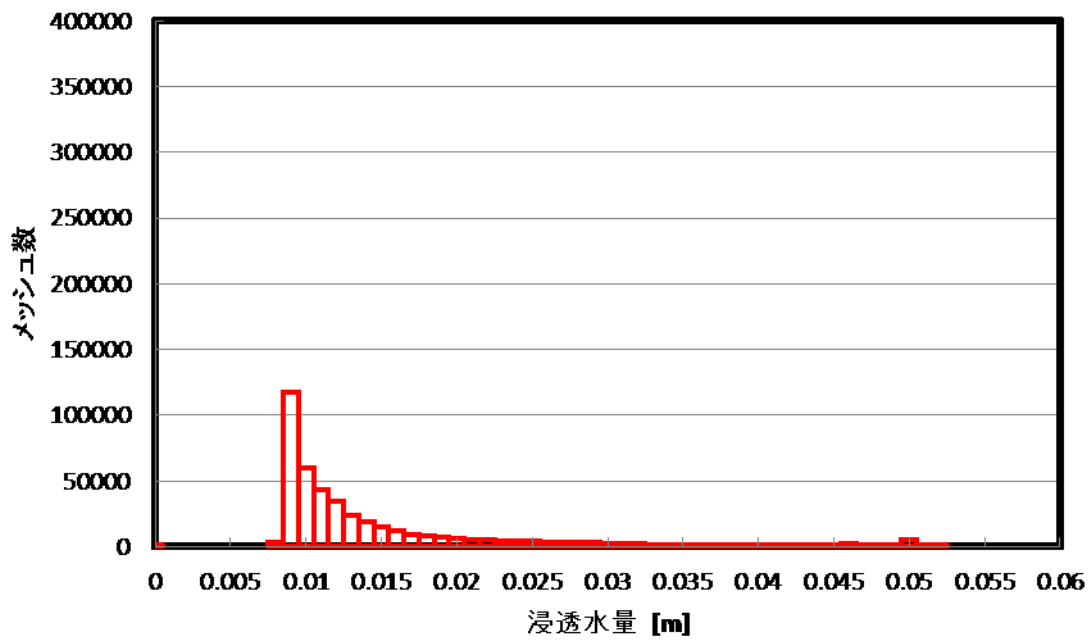


Figure A-293 植林前 森林 浸透水量 3-1-1 PR=40.0

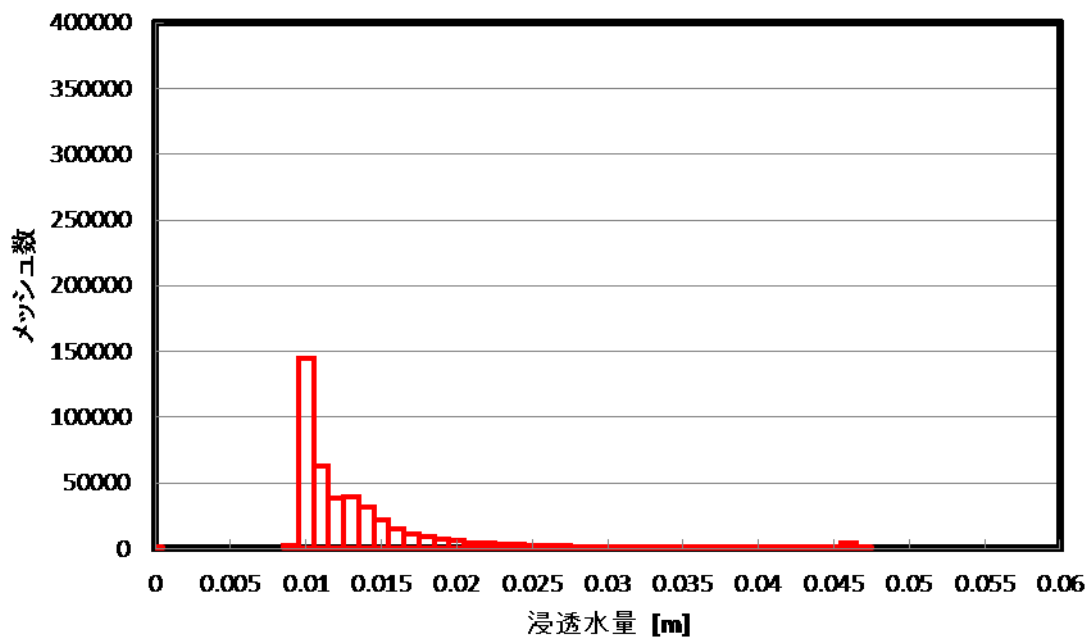


Figure A-294 植林後 森林 浸透水量 3-1-1 PR=40.0

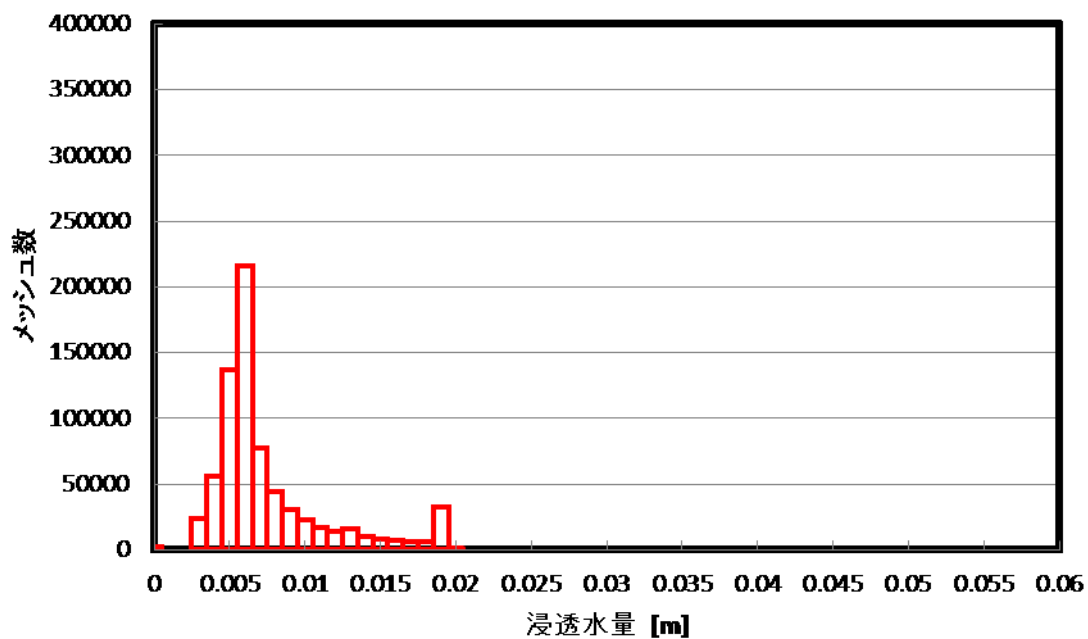


Figure A-295 植林前 裸地 浸透水量 3-1-2 PR=40.0

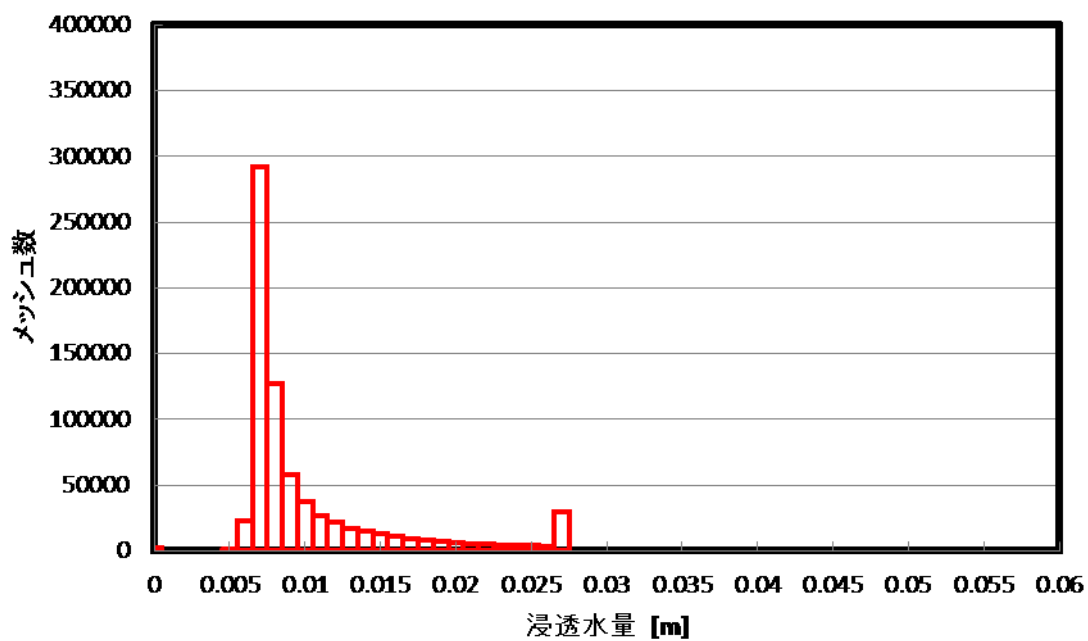


Figure A-296 植林後 裸地 浸透水量 3-1-2 PR=40.0

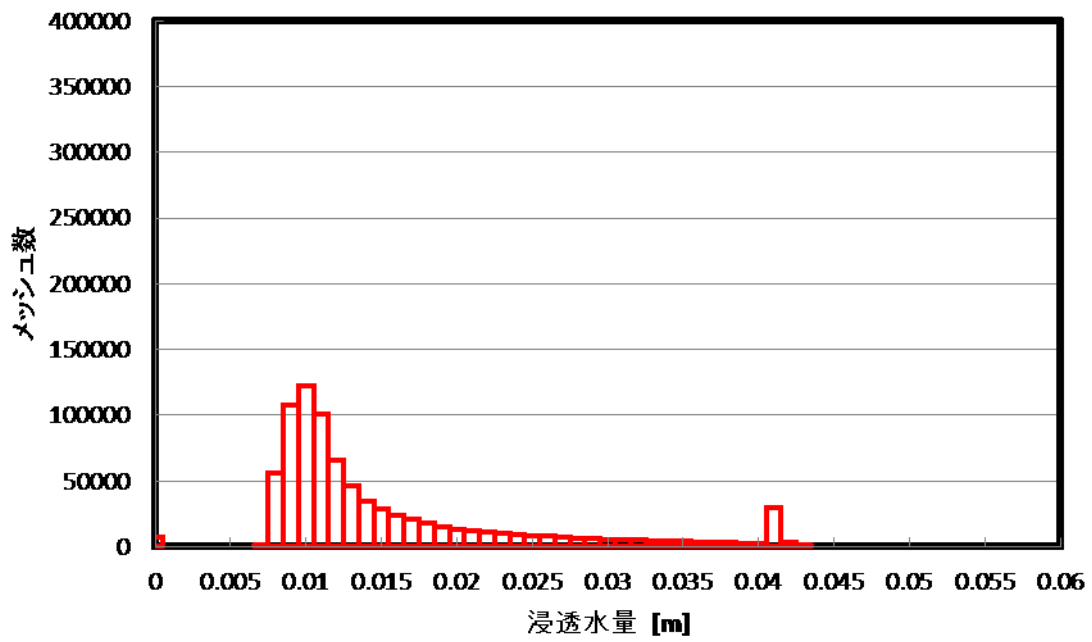


Figure A-297 植林前 草地 浸透水量 3-1-2 PR=40.0

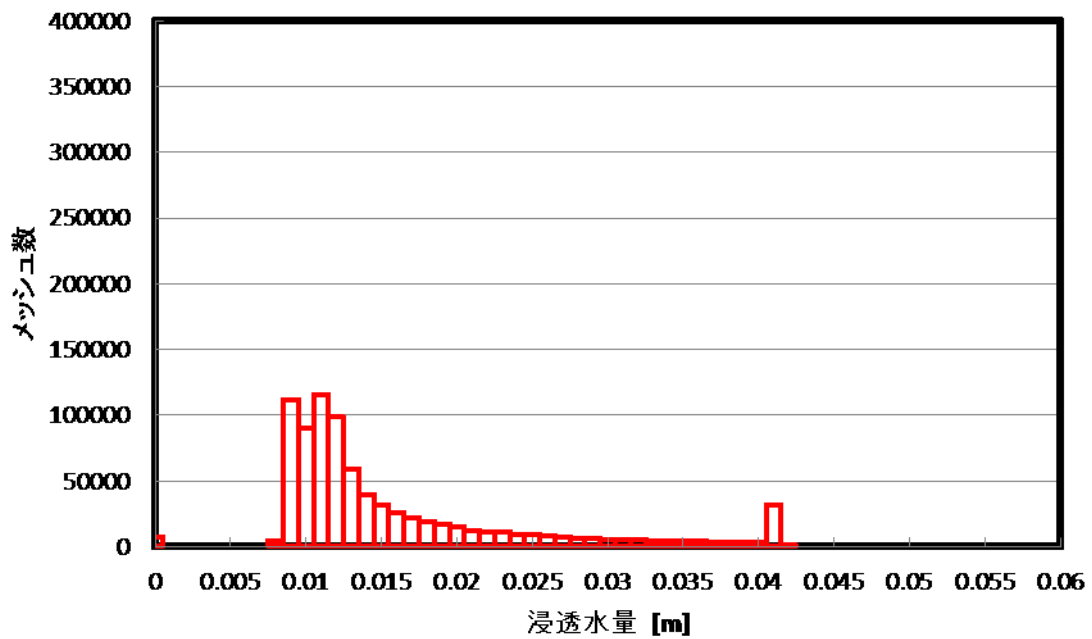


Figure A-298 植林後 草地 浸透水量 3-1-2 PR=40.0

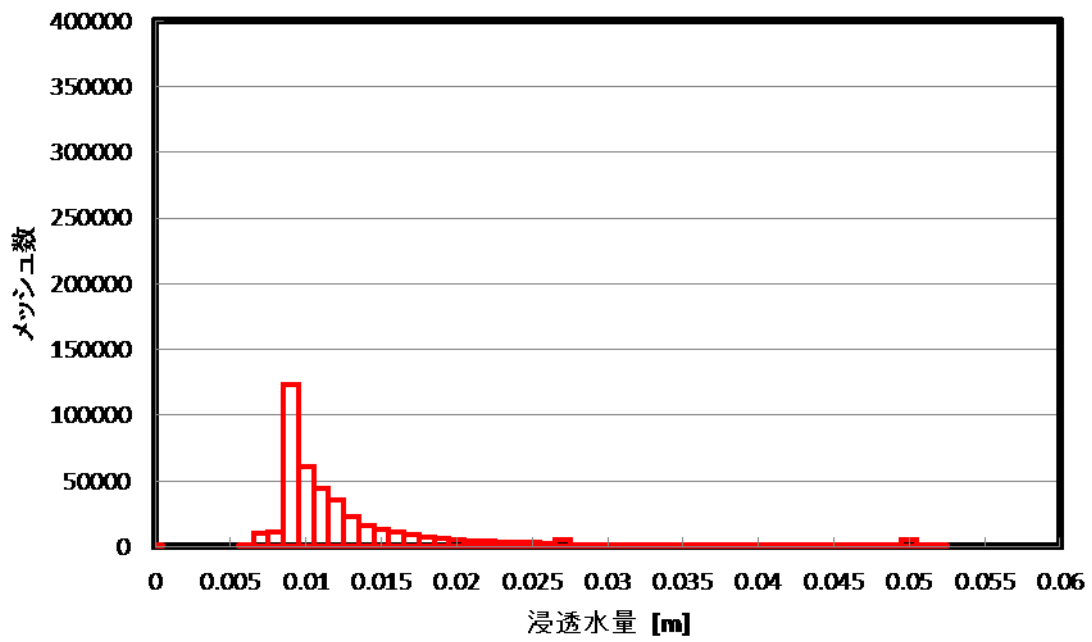


Figure A-299 植林前 森林 浸透水量 3-1-2 PR=40.0

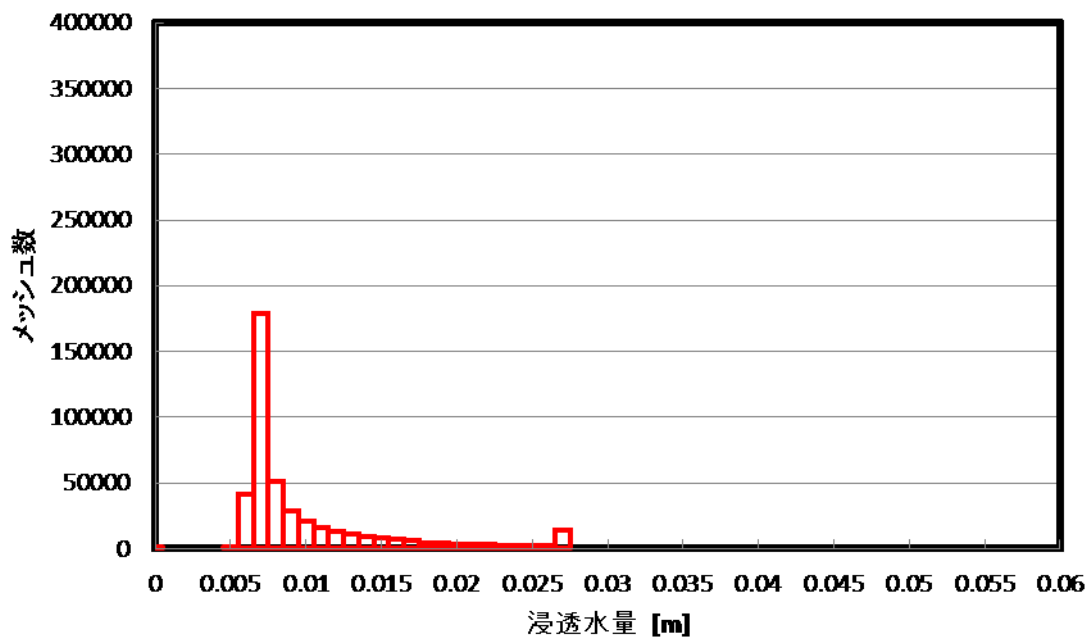


Figure A-300 植林後 森林 浸透水量 3-1-2 PR=40.0

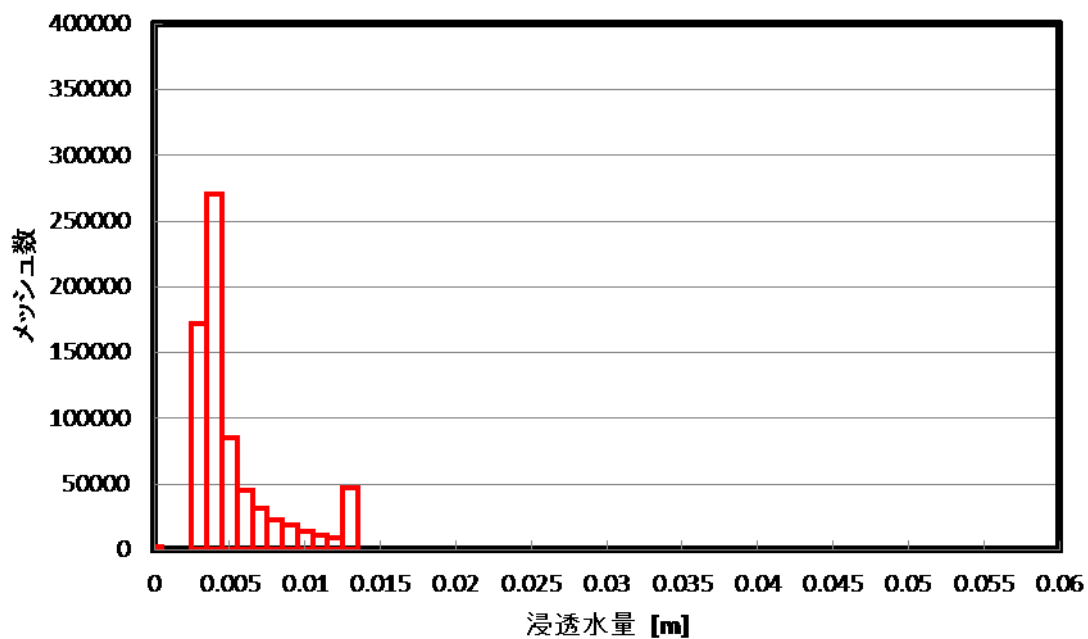


Figure A-301 植林前 裸地 浸透水量 3-1-3 PR=40.0

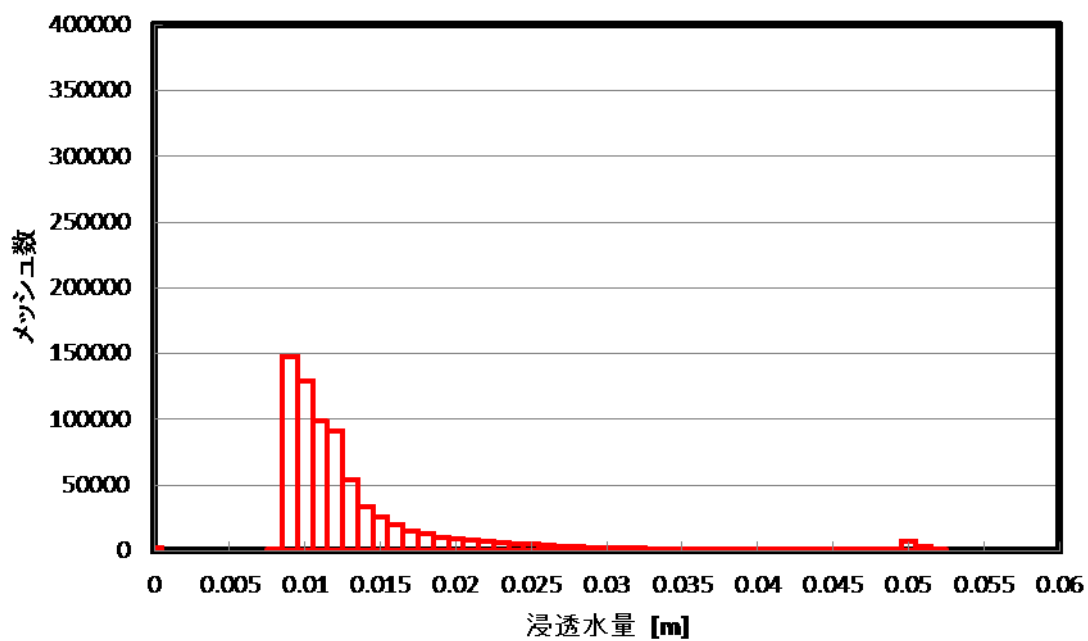


Figure A-302 植林後 裸地 浸透水量 3-1-3 PR=40.0

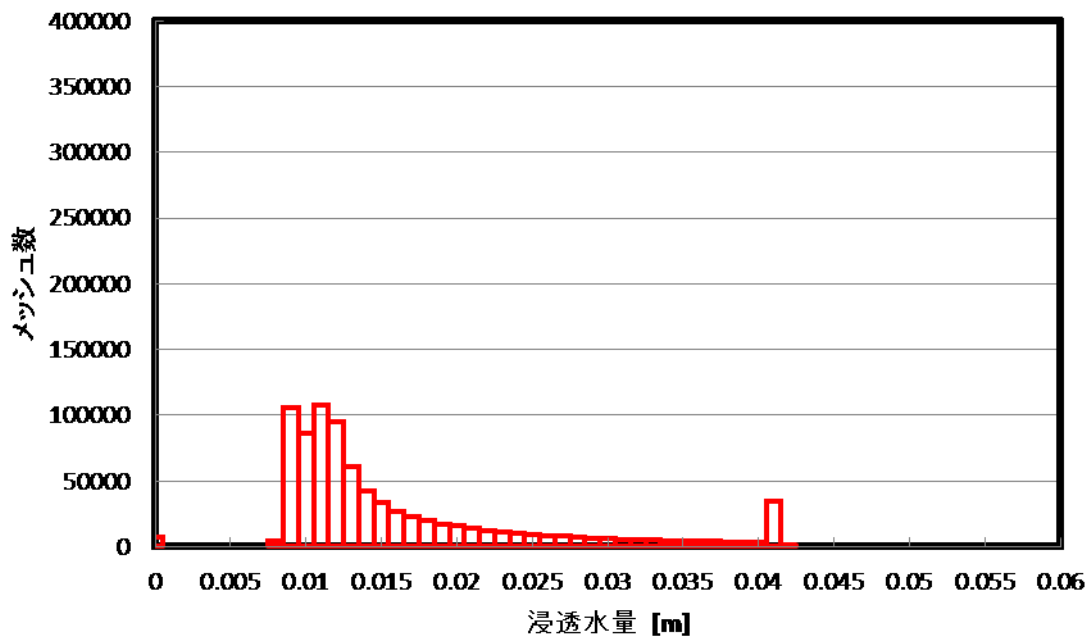


Figure A-303 植林前 草地 浸透水量 3-1-3 PR=40.0

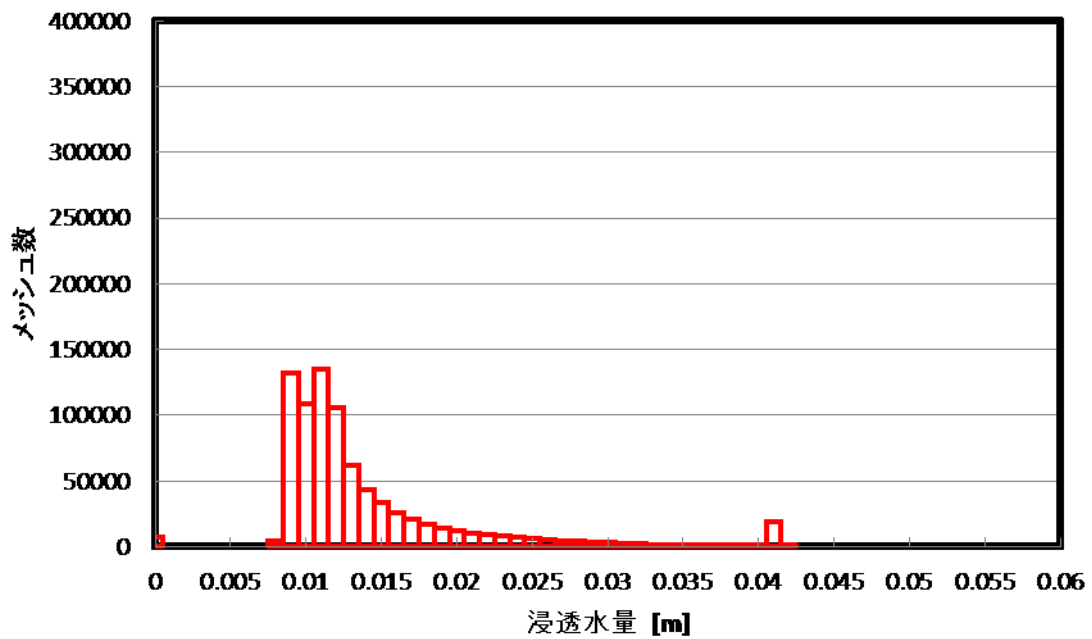


Figure A-304 植林後 草地 浸透水量 3-1-3 PR=40.0

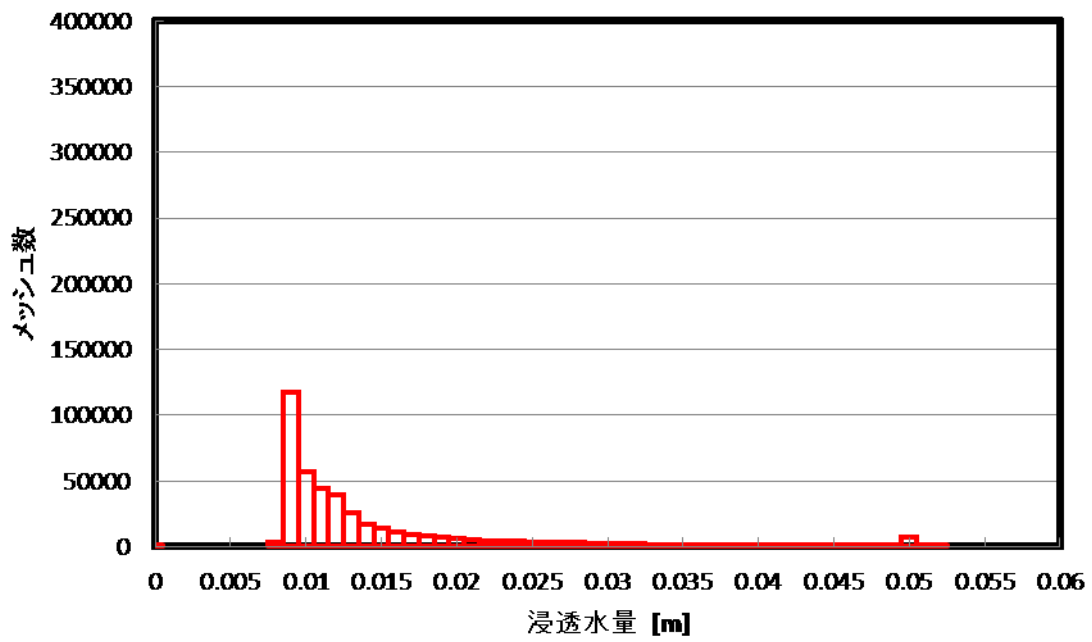


Figure A-305 植林前 森林 浸透水量 3-1-3 PR=40.0

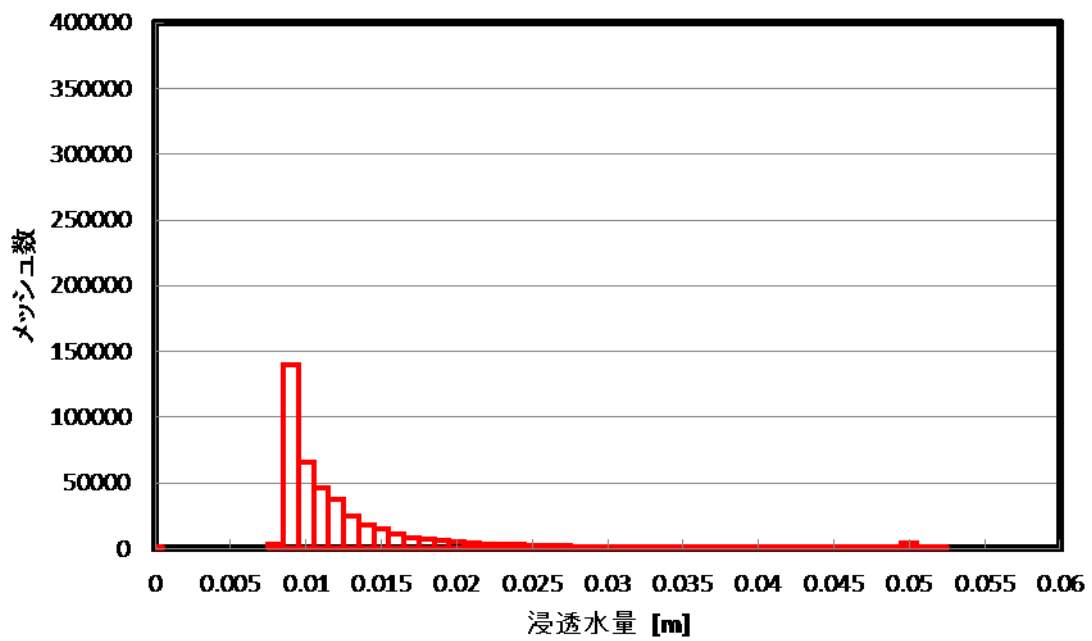


Figure A-306 植林後 森林 浸透水量 3-1-3 PR=40.0

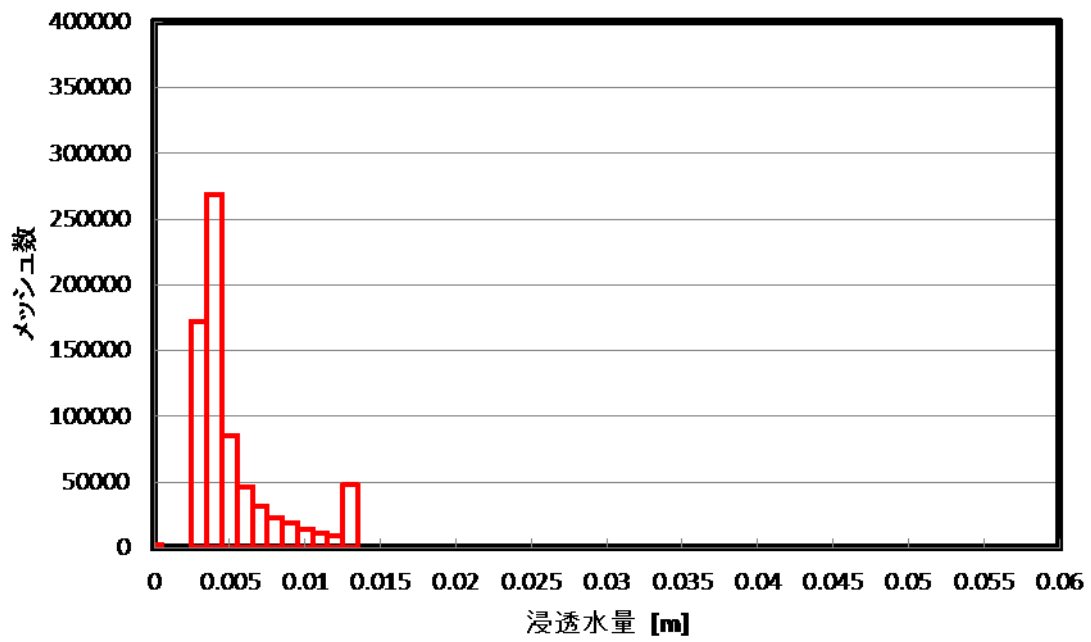


Figure A-307 植林前 裸地 浸透水量 3-2-1 PR=40.0

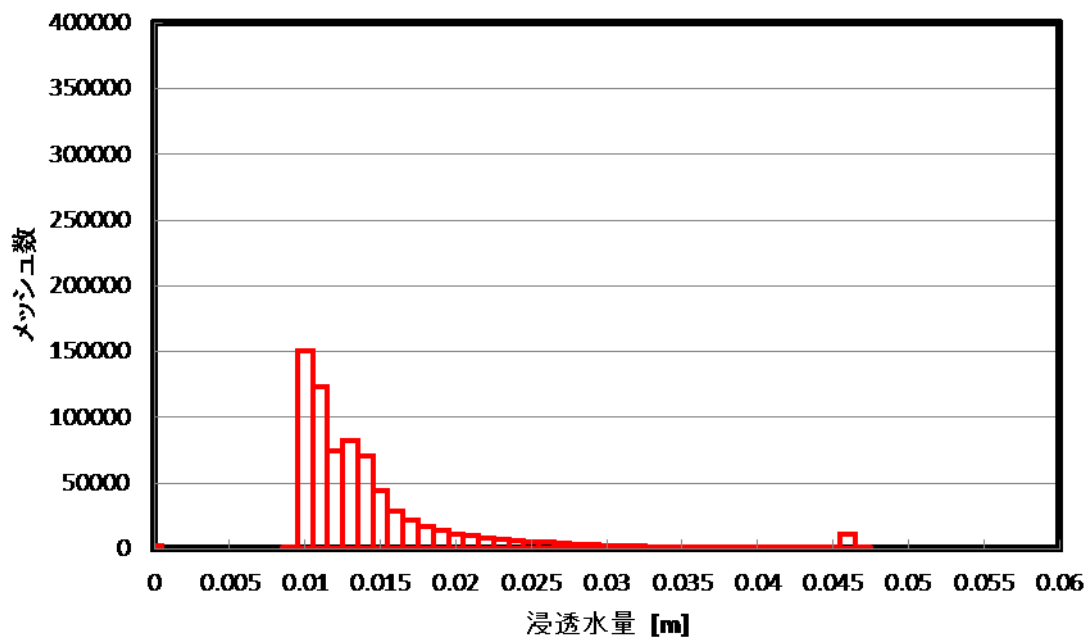


Figure A-308 植林後 裸地 浸透水量 3-2-1 PR=40.0

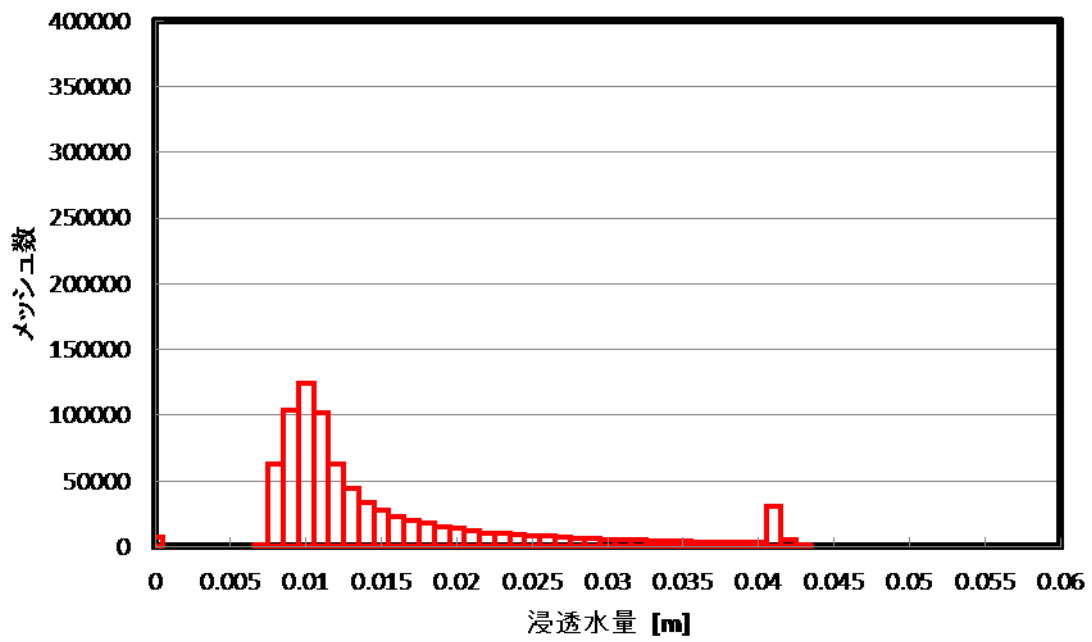


Figure A-309 植林前 草地 浸透水量 3-2-1 PR=40.0

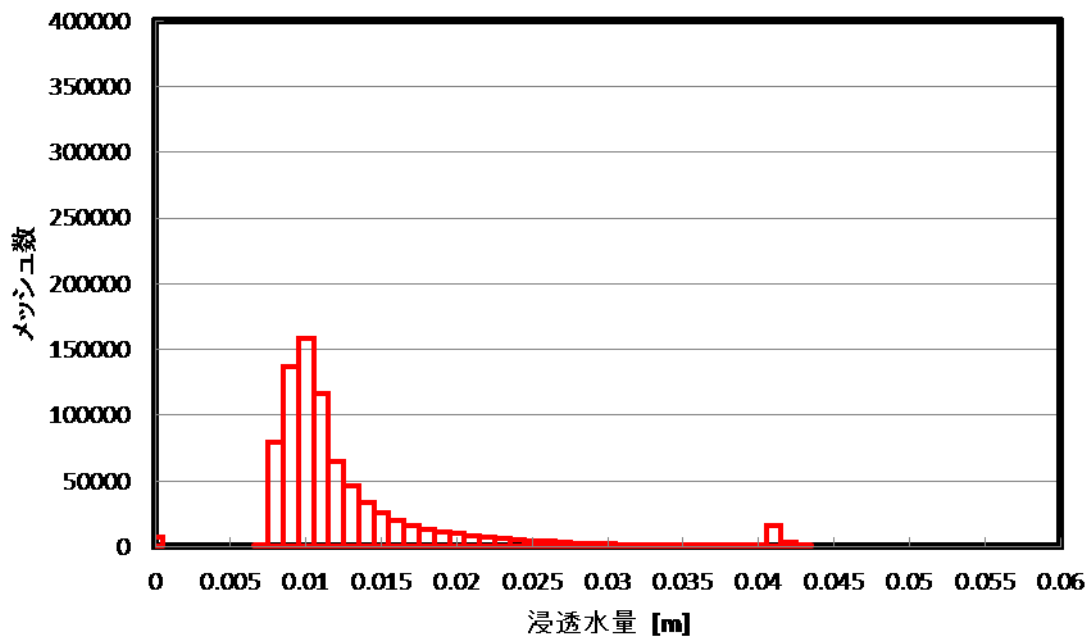


Figure A-310 植林後 草地 浸透水量 3-2-1 PR=40.0

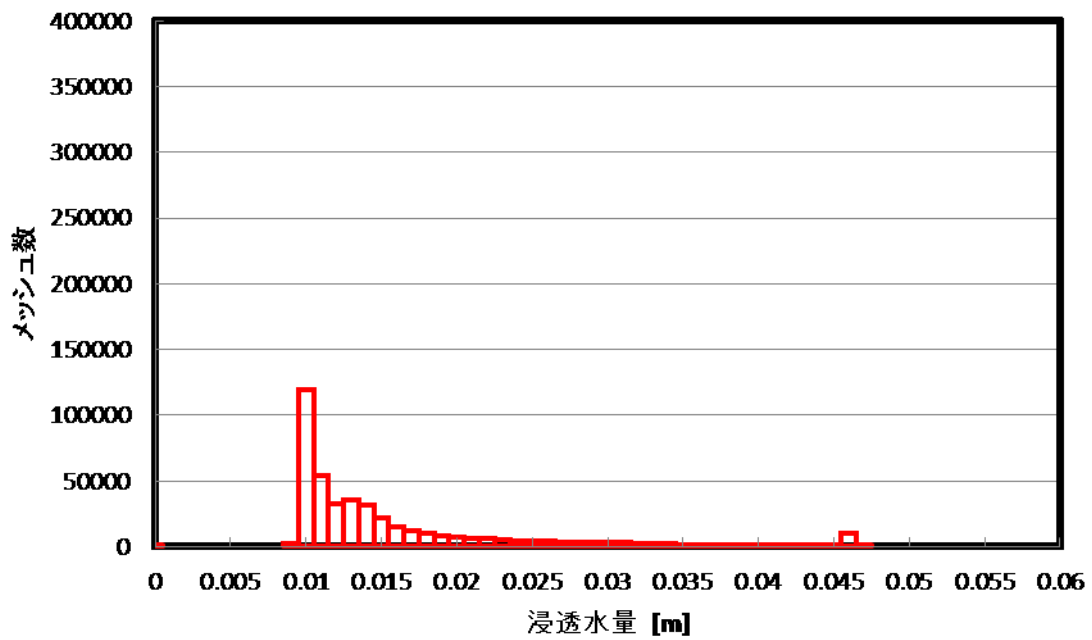


Figure A-311 植林前 森林 浸透水量 3-2-1 PR=40.0

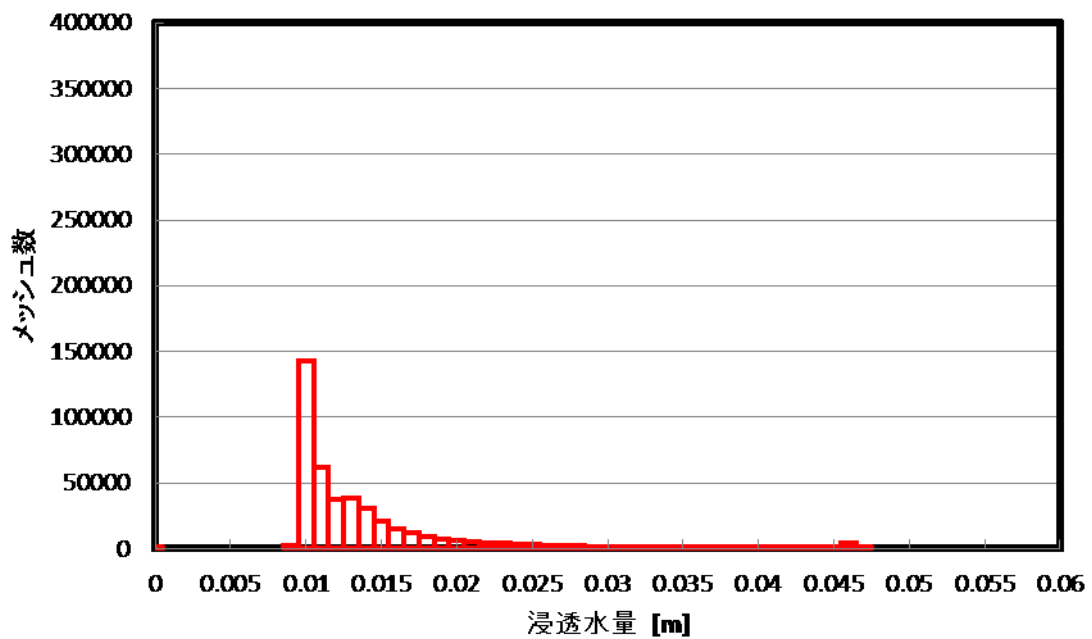


Figure A-312 植林後 森林 浸透水量 3-2-1 PR=40.0

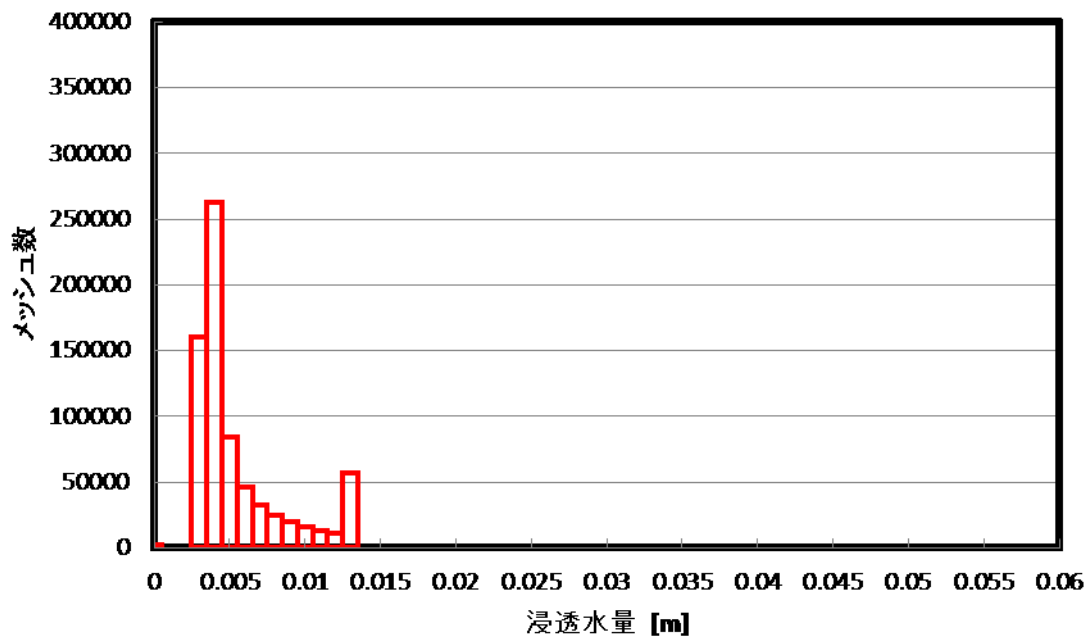


Figure A-313 植林前 裸地 浸透水量 3-2-2 PR=40.0

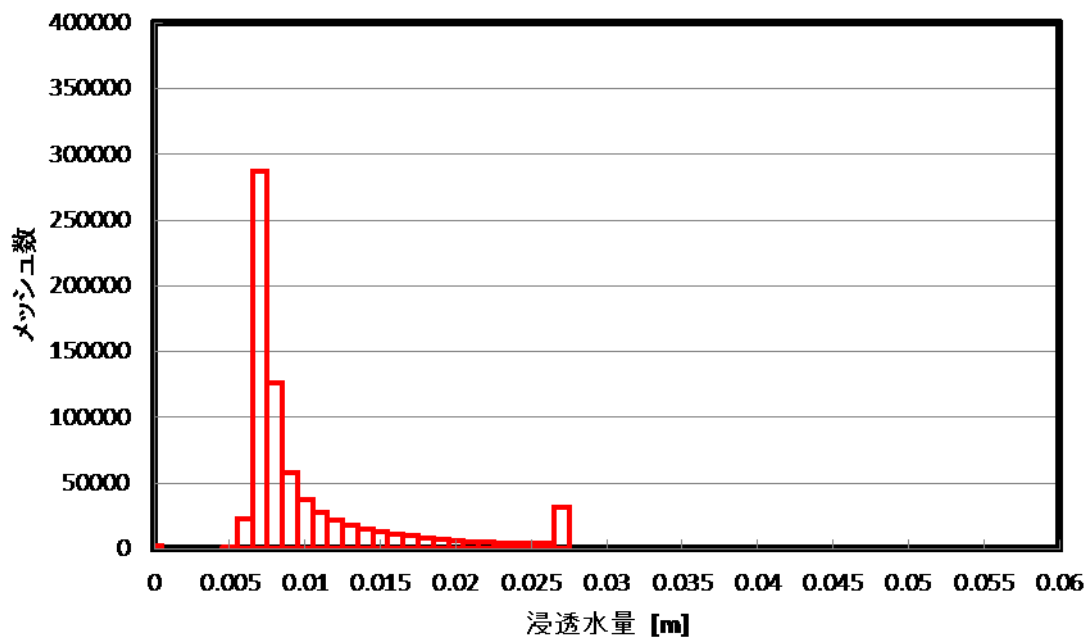


Figure A-314 植林後 裸地 浸透水量 3-2-2 PR=40.0

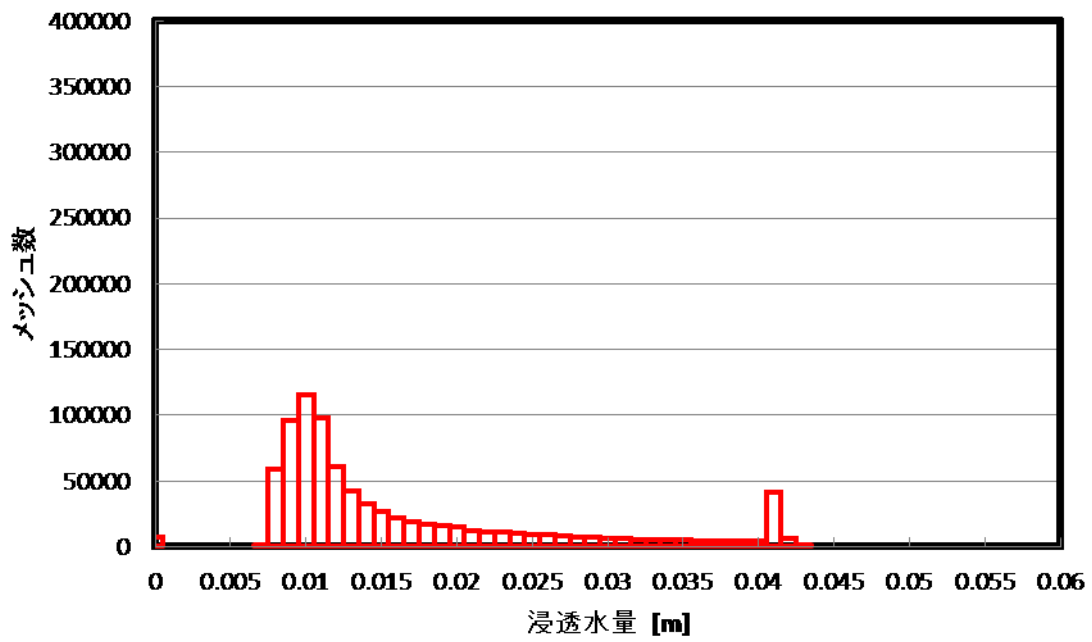


Figure A-315 植林前 草地 浸透水量 3-2-2 PR=40.0

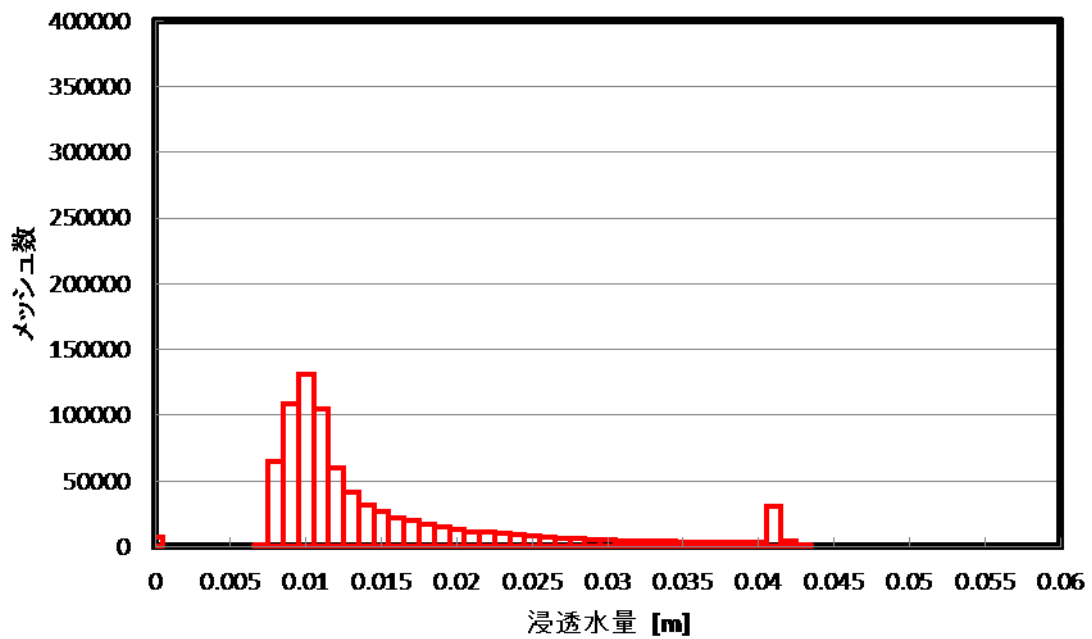


Figure A-316 植林後 草地 浸透水量 3-2-2 PR=40.0

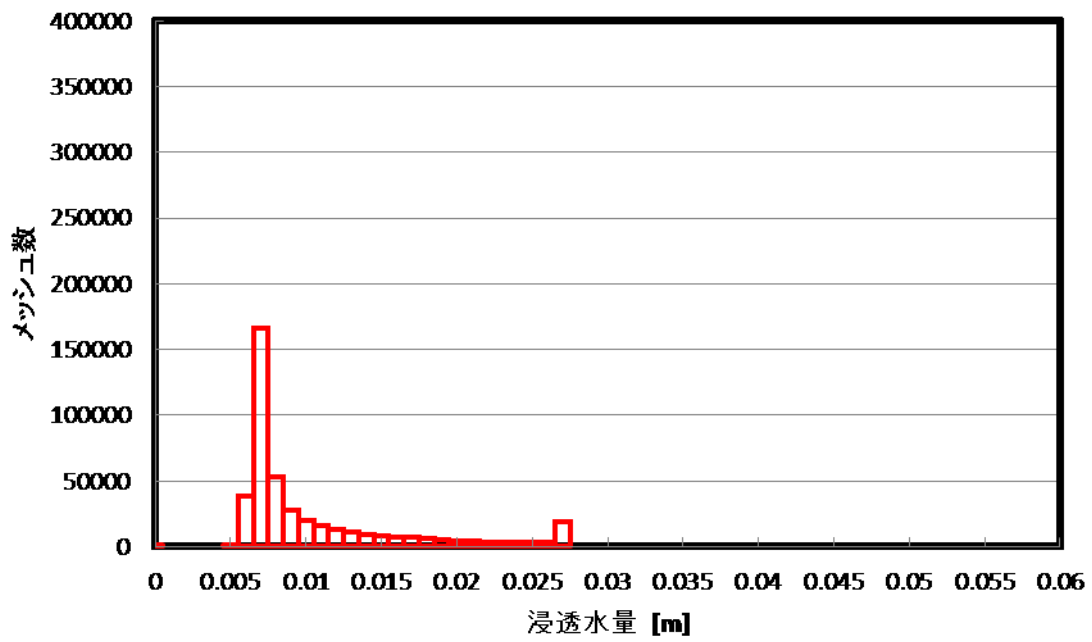


Figure A-317 植林前 森林 浸透水量 3-2-2 PR=40.0

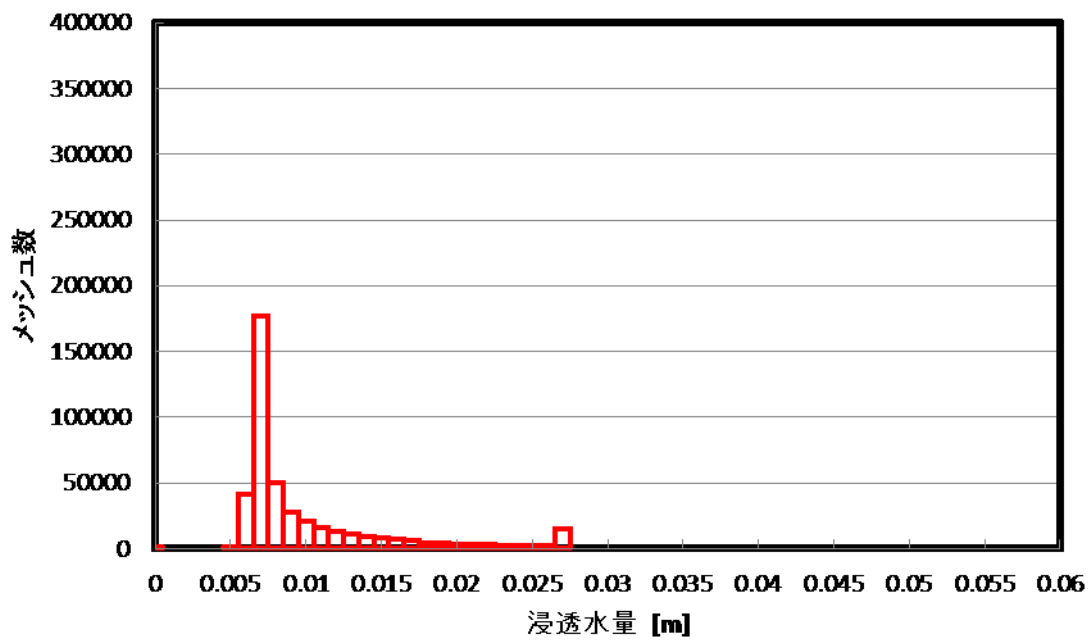


Figure A-318 植林後 森林 浸透水量 3-2-2 PR=40.0

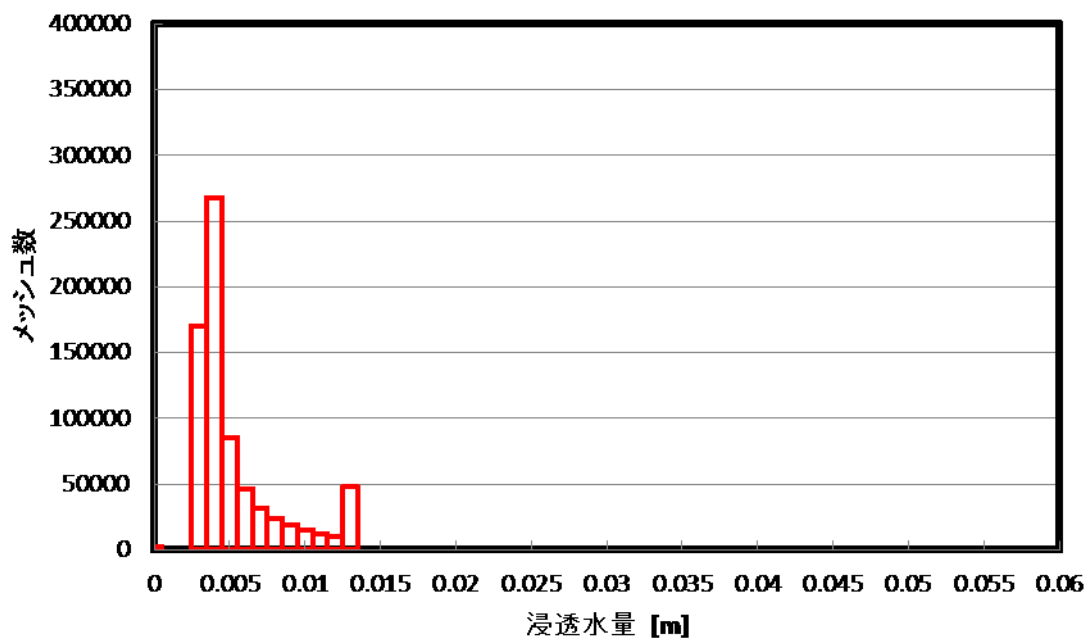


Figure A-319 植林前 裸地 浸透水量 3-2-3 PR=40.0

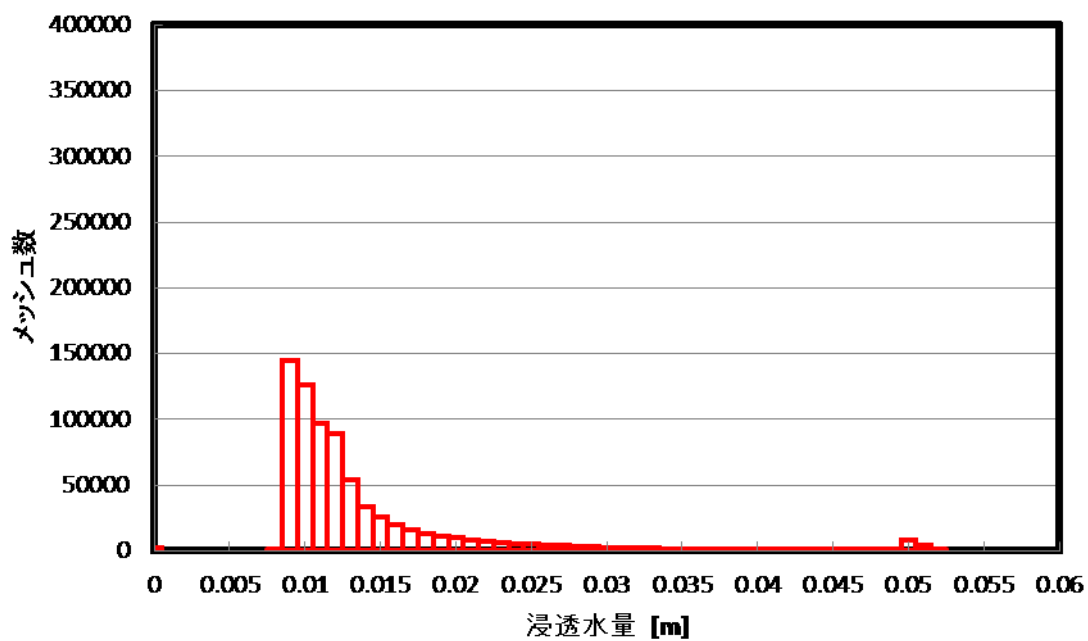


Figure A-320 植林後 裸地 浸透水量 3-2-3 PR=40.0

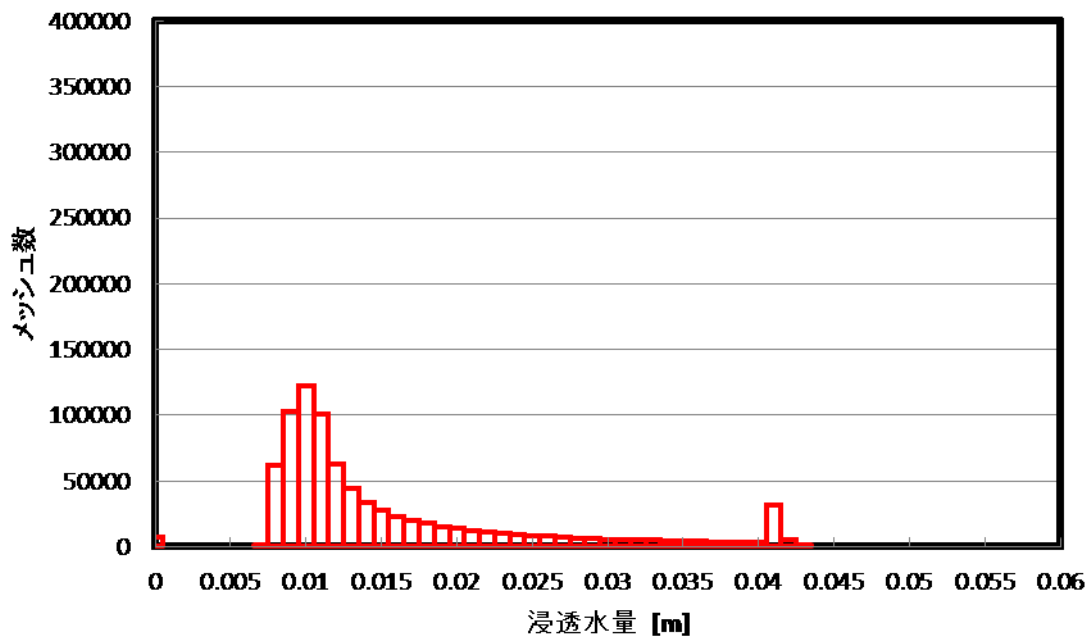


Figure A-321 植林前 草地 浸透水量 3-2-3 PR=40.0

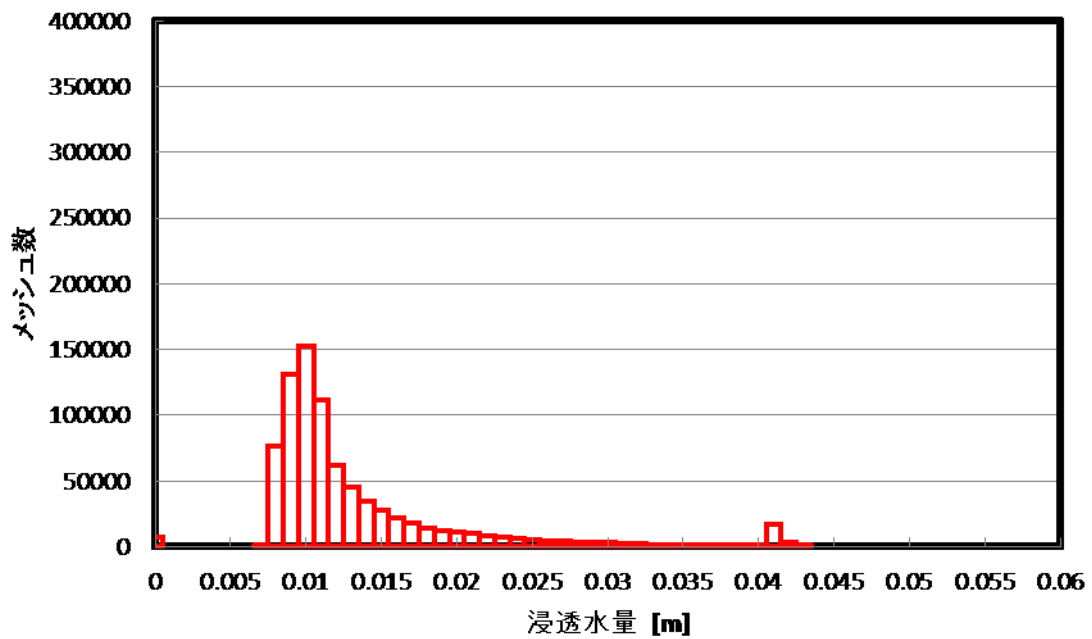


Figure A-322 植林後 草地 浸透水量 3-2-3 PR=40.0

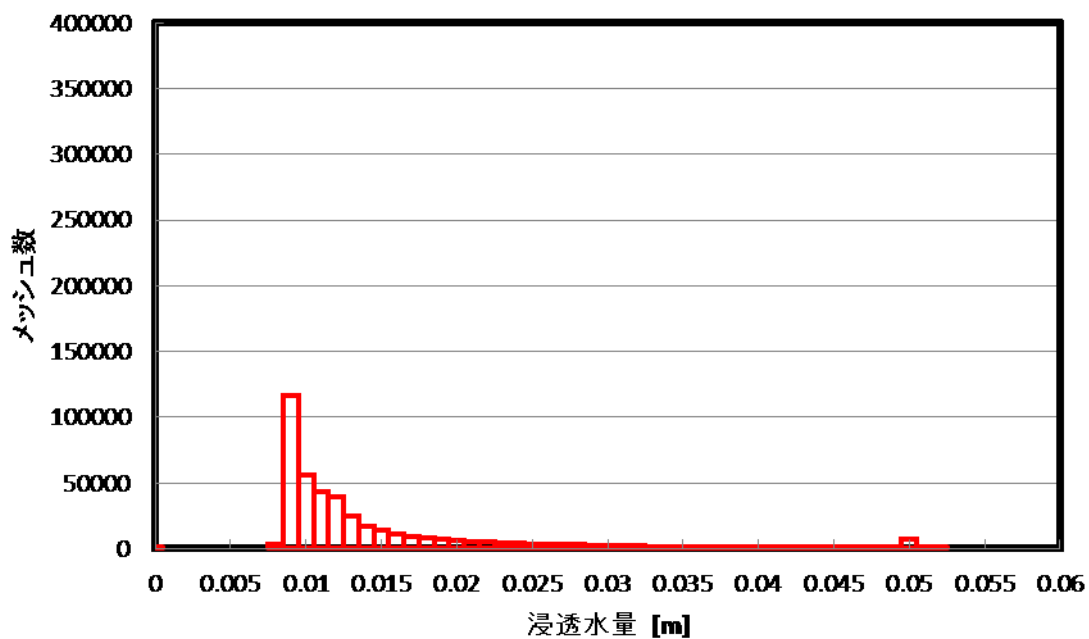


Figure A-323 植林前 森林 浸透水量 3-2-3 PR=40.0

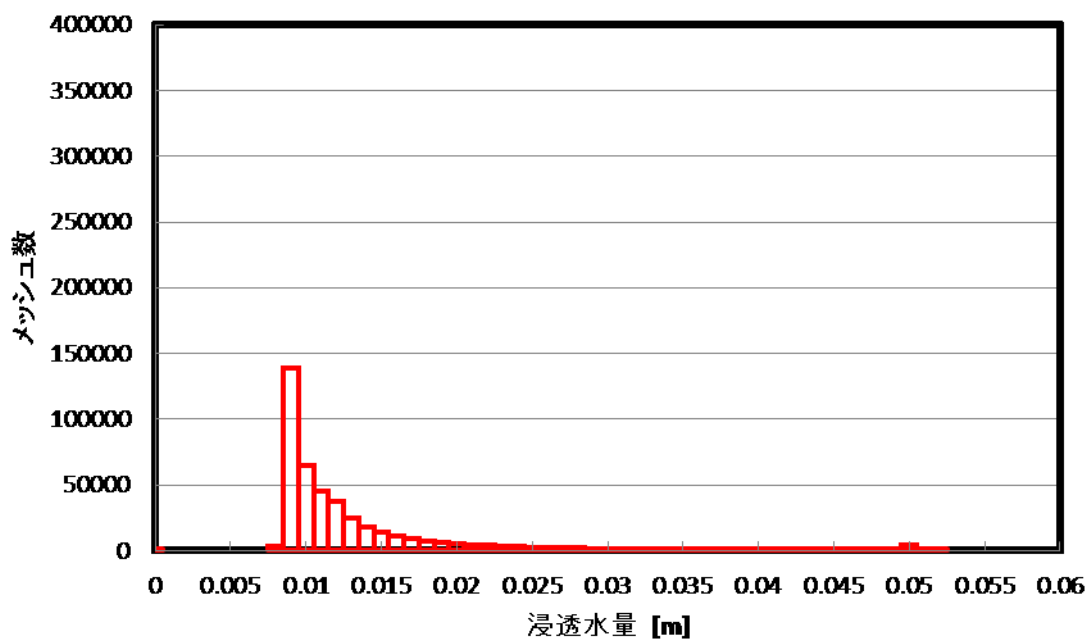


Figure A-324 植林後 森林 浸透水量 3-2-3 PR=40.0

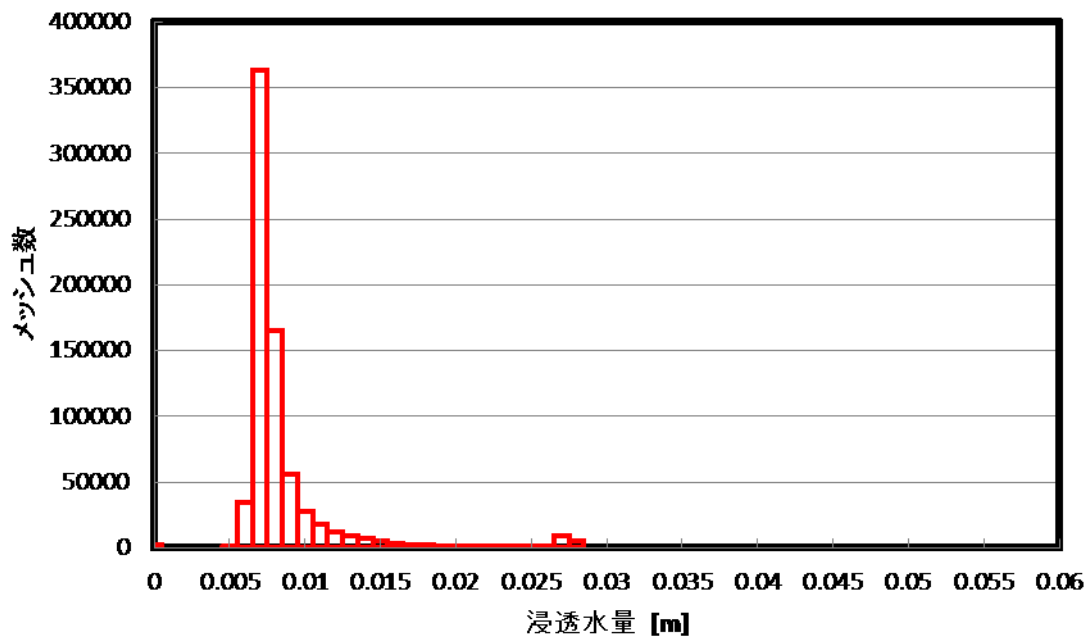


Figure A-325 植林前 裸地 浸透水量 1-1-1 PR 最適値

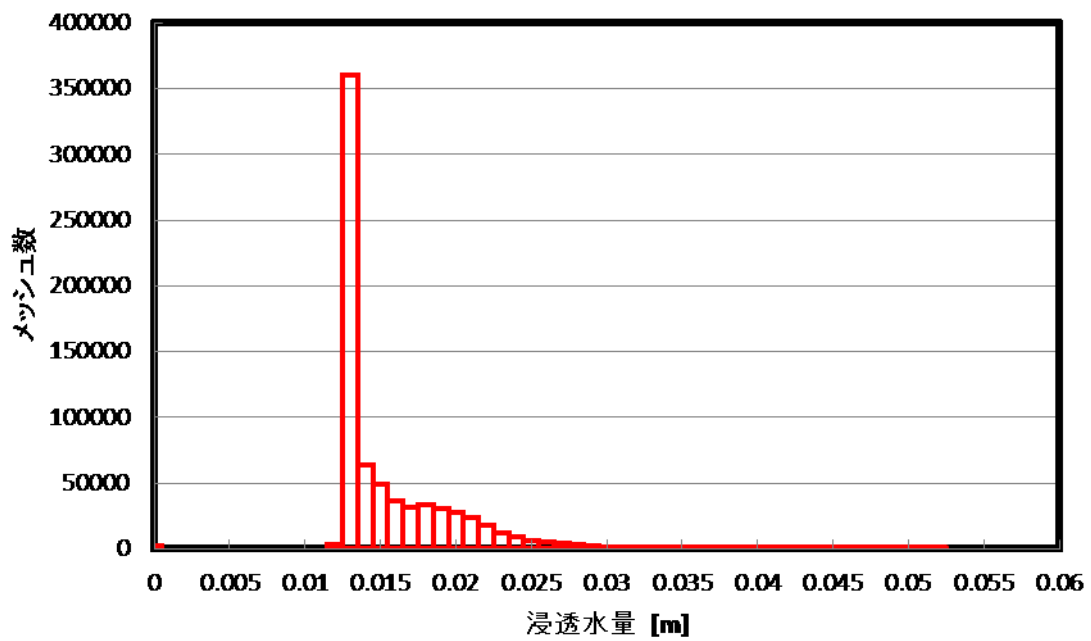


Figure A-326 植林後 裸地 浸透水量 1-1-1 PR 最適値

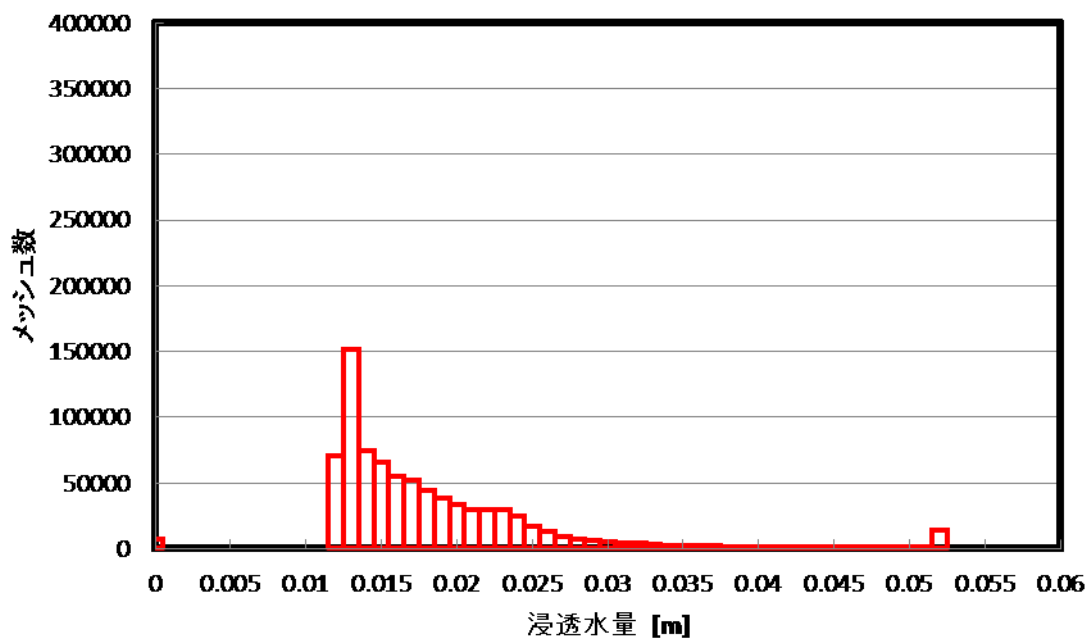


Figure A-327 植林前 草地 浸透水量 1-1-1 PR 最適値

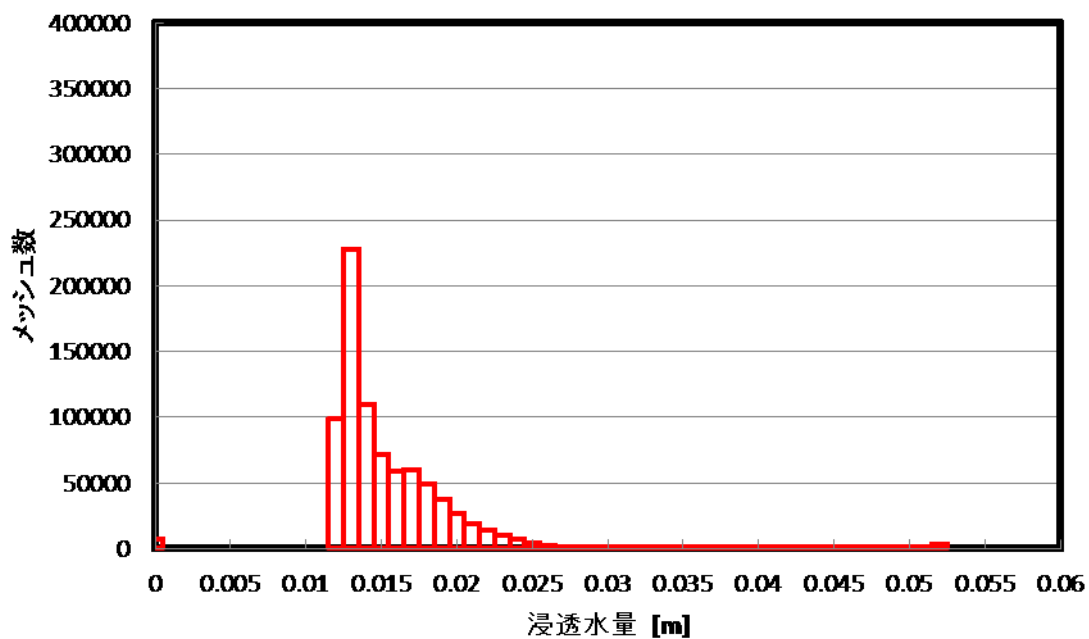


Figure A-328 植林後 草地 浸透水量 1-1-1 PR 最適値

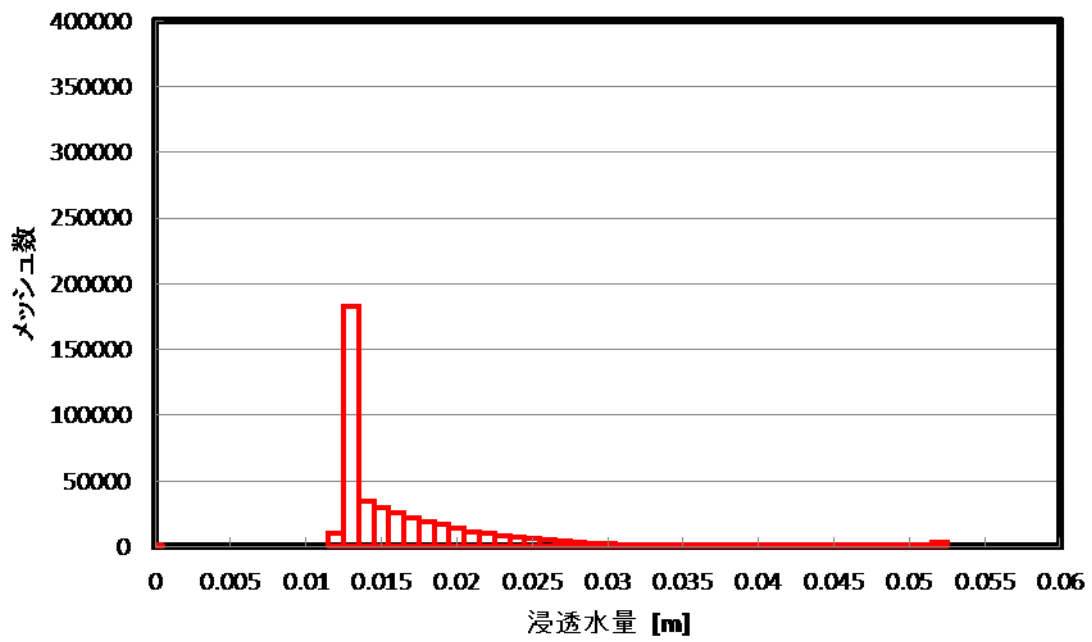


Figure A-329 植林前 森林 浸透水量 1-1-1 PR 最適値

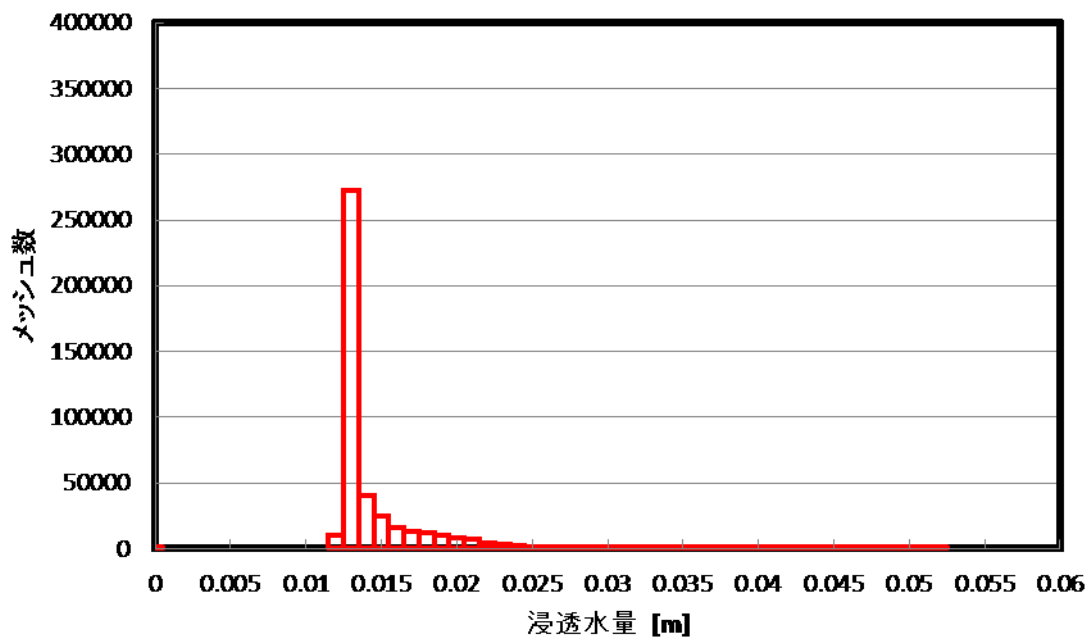


Figure A-330 植林後 森林 浸透水量 1-1-1 PR 最適値

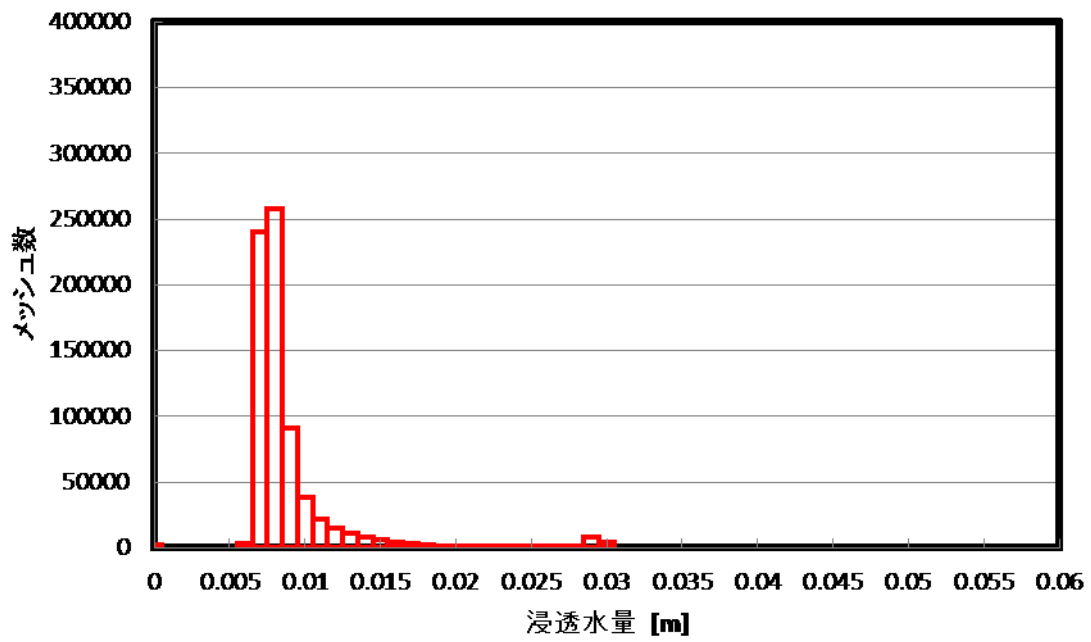


Figure A-331 植林前 裸地 浸透水量 1-1-2 PR 最適値

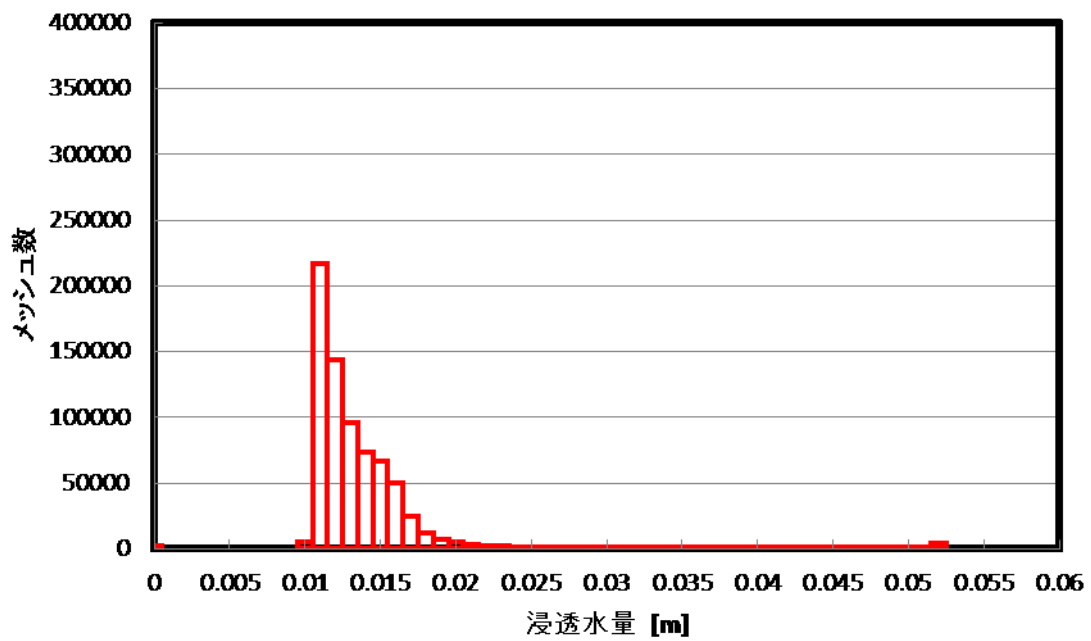


Figure A-332 植林後 裸地 浸透水量 1-1-2 PR 最適値

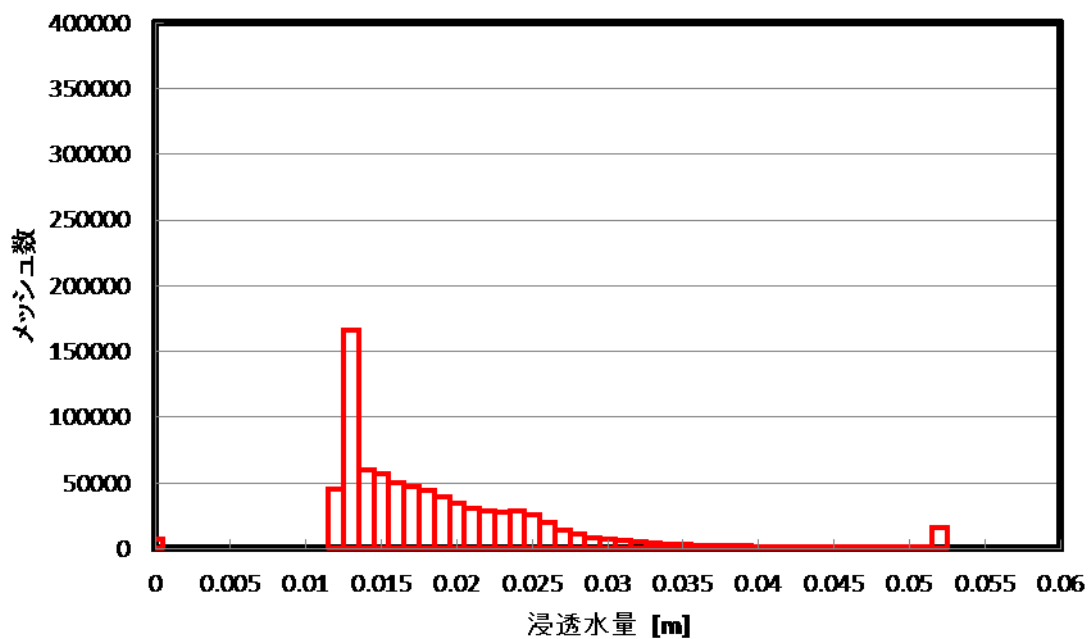


Figure A-333 植林前 草地 浸透水量 1-1-2 PR 最適値

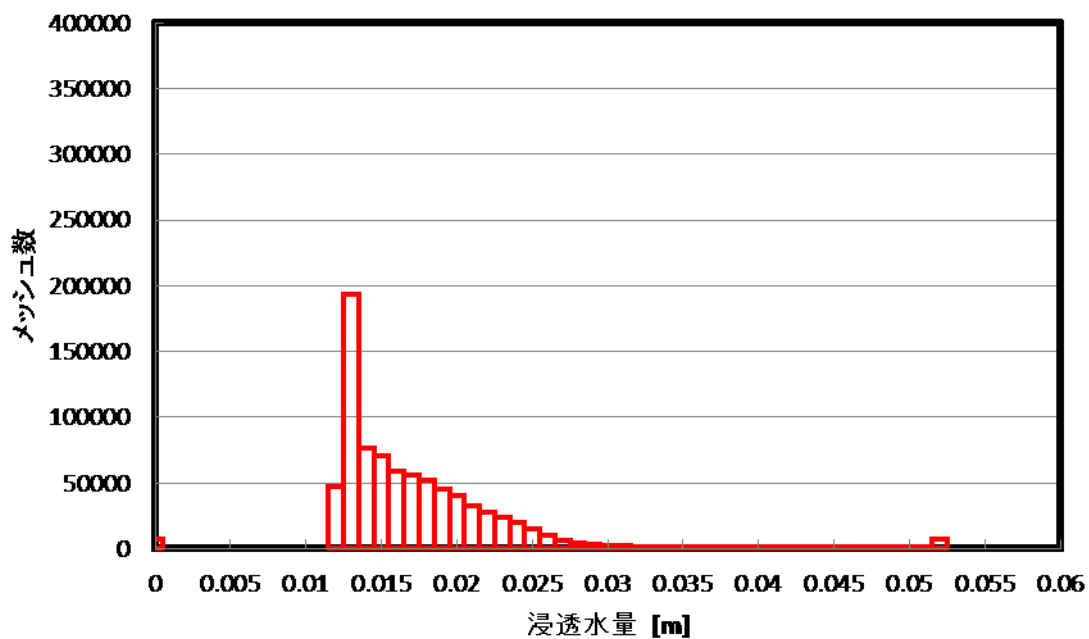


Figure A-334 植林後 草地 浸透水量 1-1-2 PR 最適値

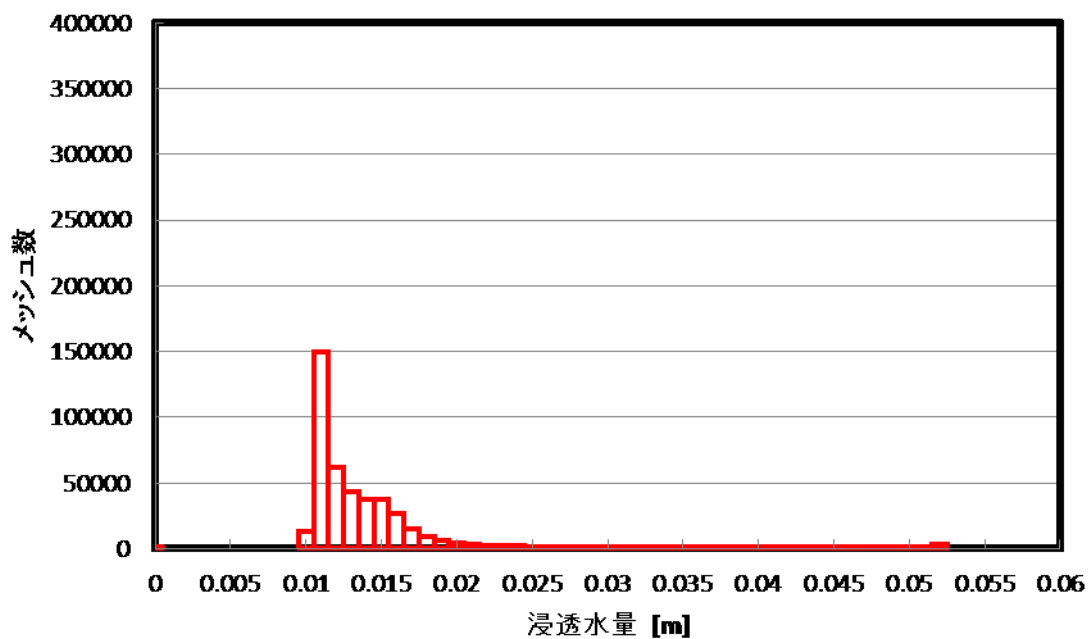


Figure A-335 植林前 森林 浸透水量 1-1-2 PR 最適値

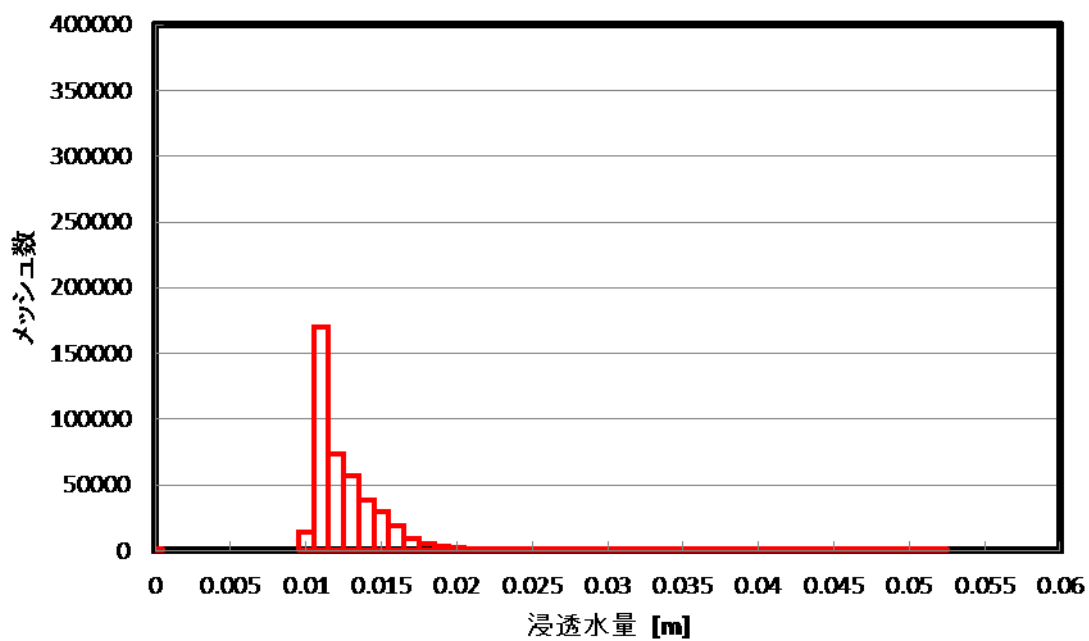


Figure A-336 植林後 森林 浸透水量 1-1-2 PR 最適値

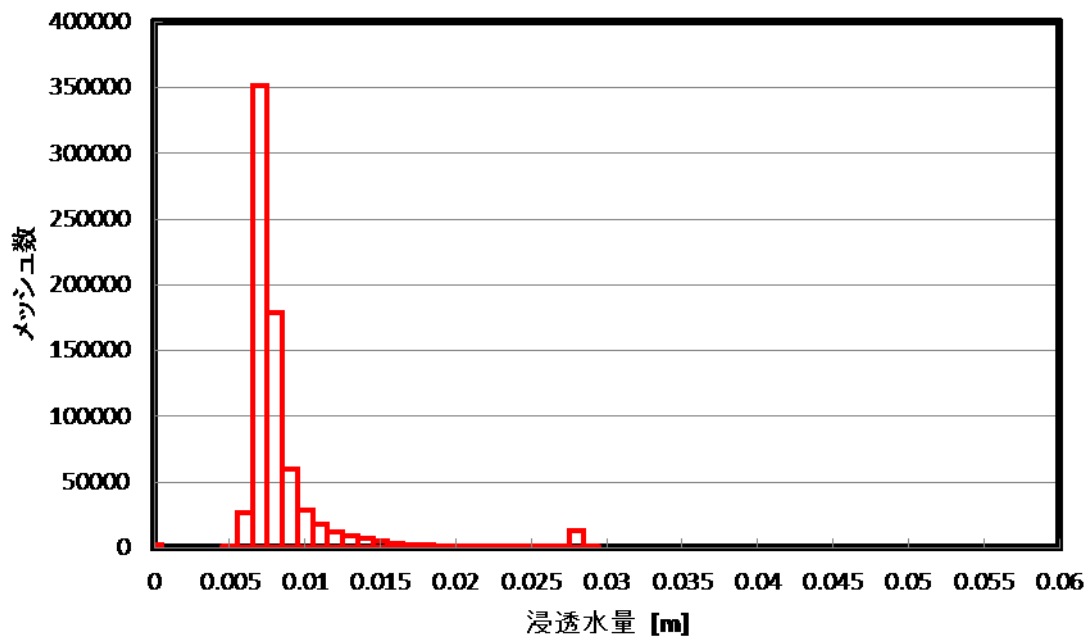


Figure A-337 植林前 裸地 浸透水量 1-1-3 PR 最適値

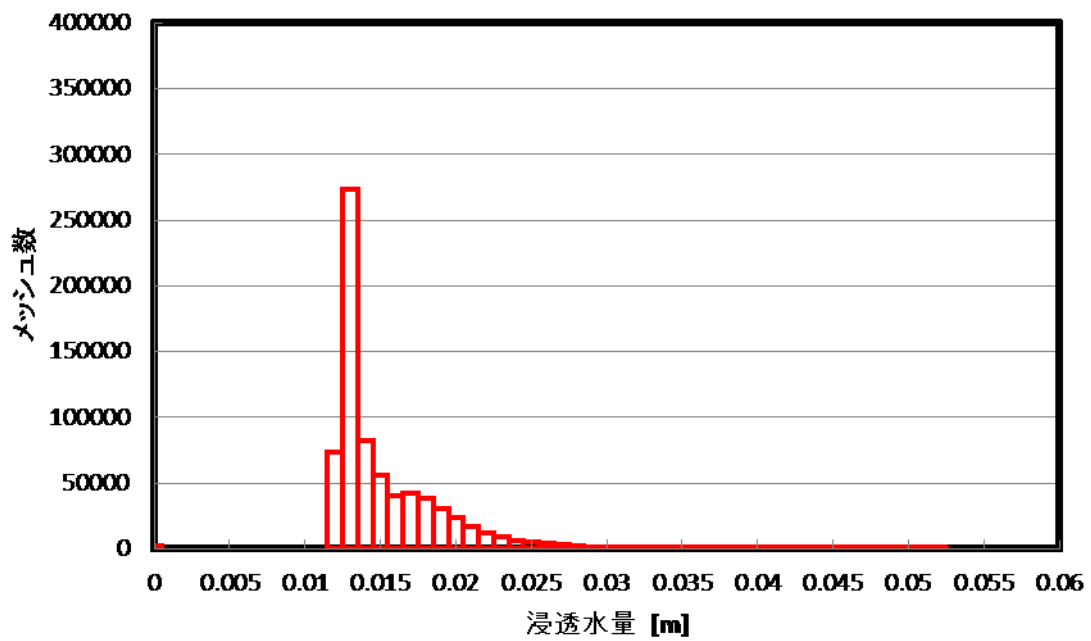


Figure A-338 植林後 裸地 浸透水量 1-1-3 PR 最適値

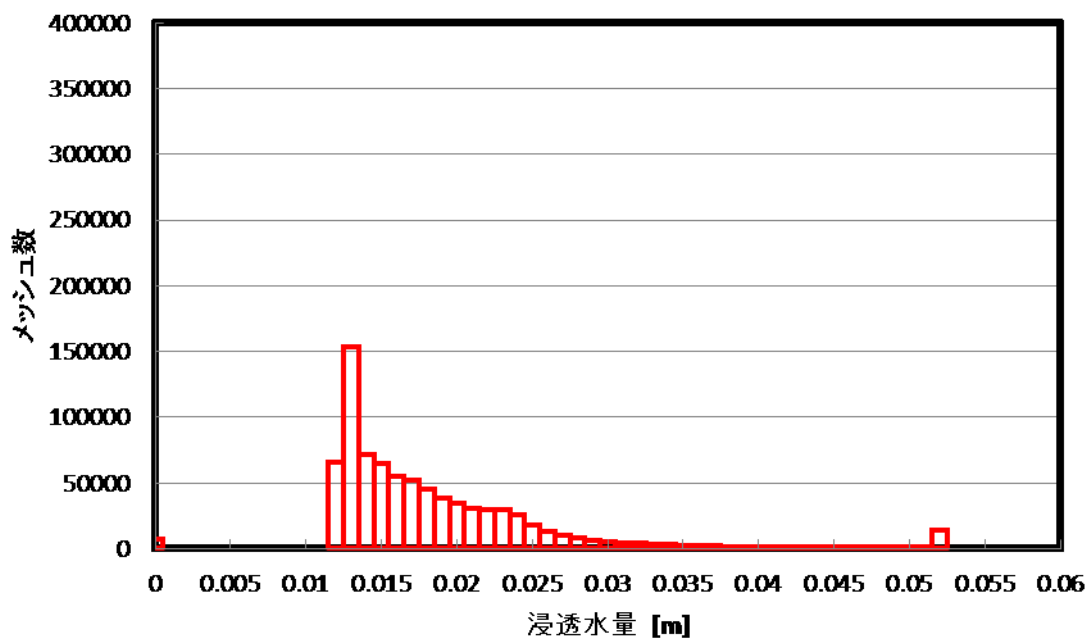


Figure A-339 植林前 草地 浸透水量 1-1-3 PR 最適値

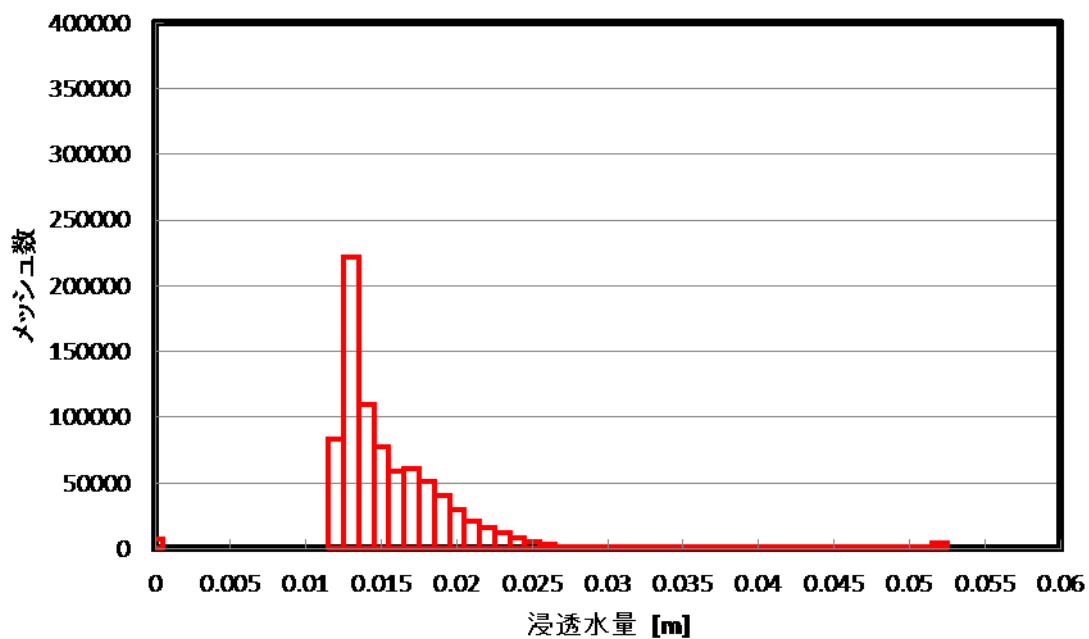


Figure A-340 植林後 草地 浸透水量 1-1-3 PR 最適値

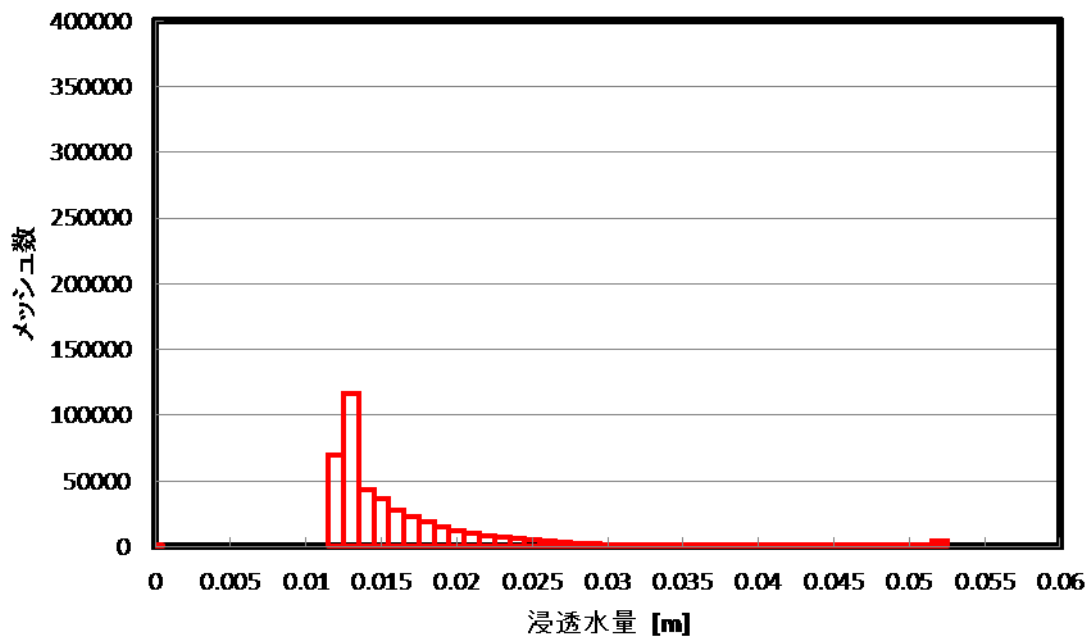


Figure A-341 植林前 森林 浸透水量 1-1-3 PR 最適値

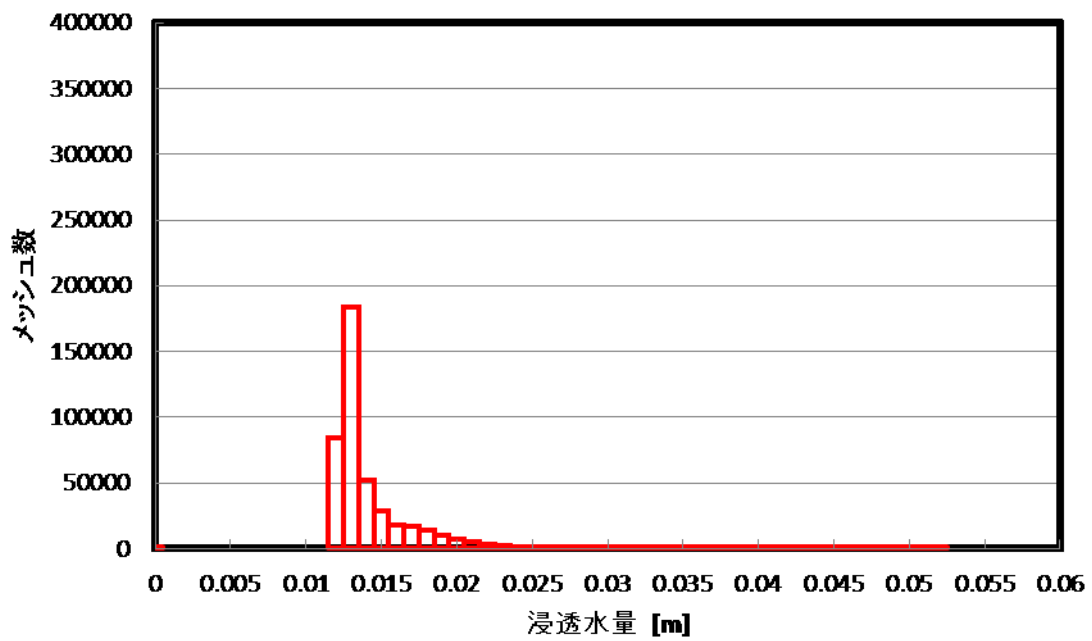


Figure A-342 植林後 森林 浸透水量 1-1-3 PR 最適値

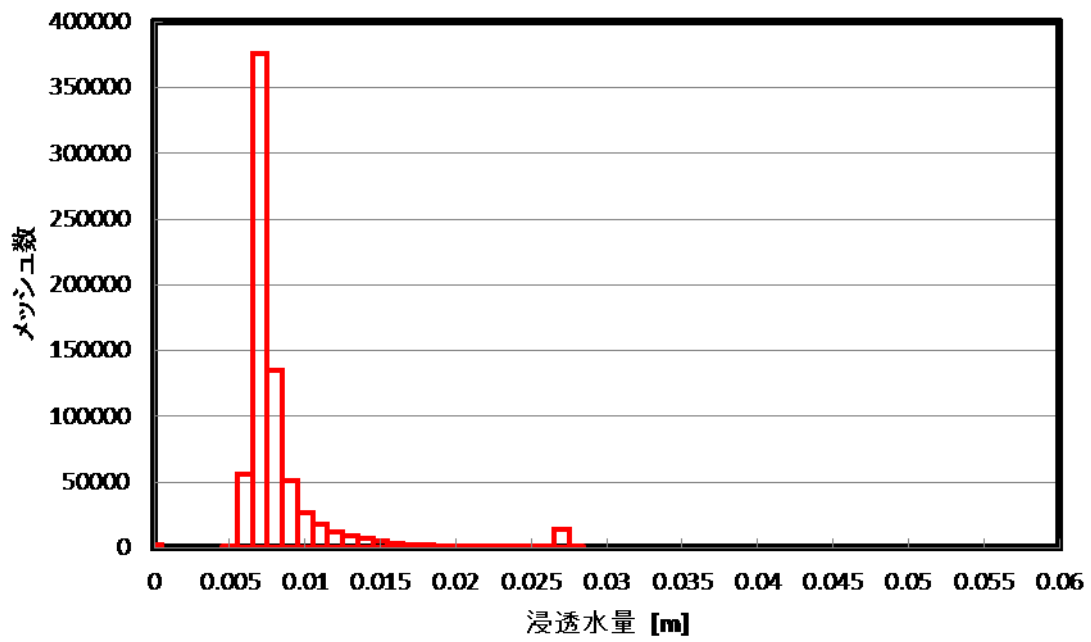


Figure A-343 植林前 裸地 浸透水量 1-2-1 PR 最適値

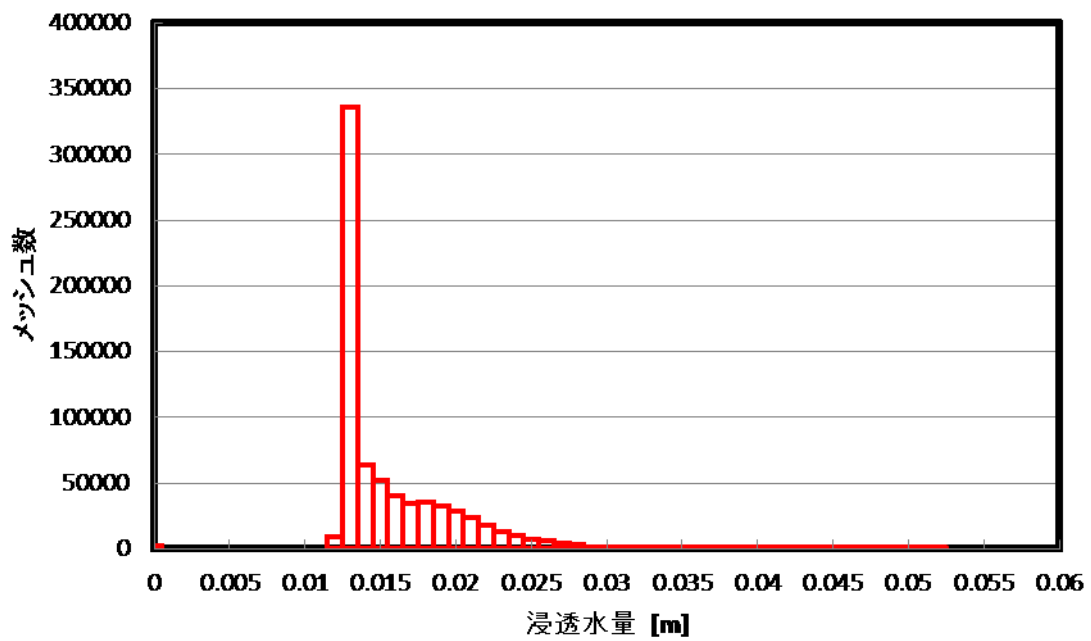


Figure A-344 植林後 裸地 浸透水量 1-2-1 PR 最適値

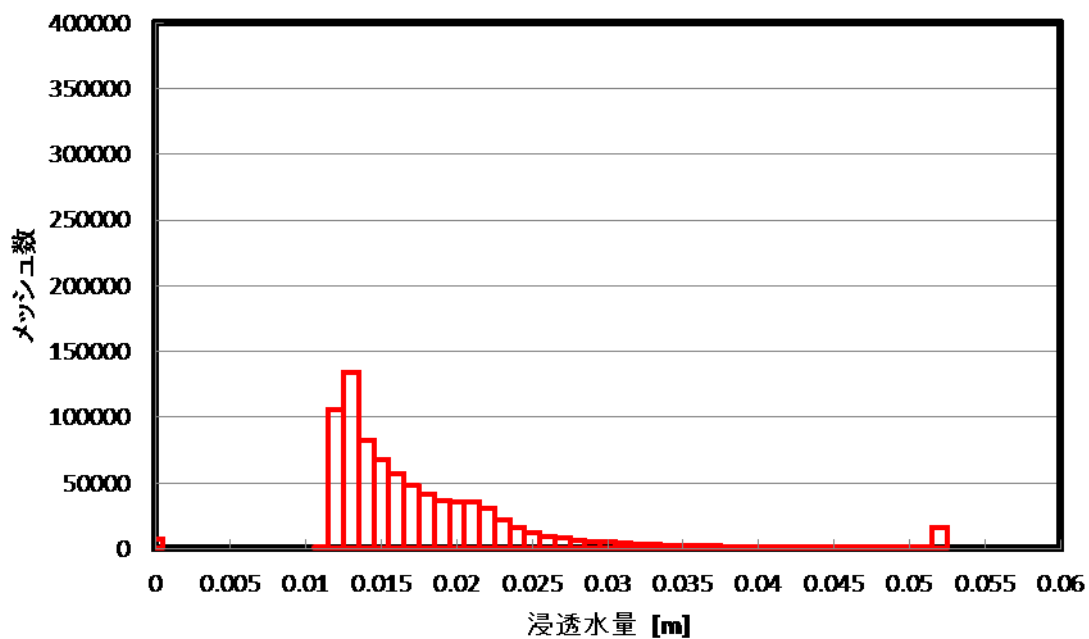


Figure A-345 植林前 草地 浸透水量 1-2-1 PR 最適値

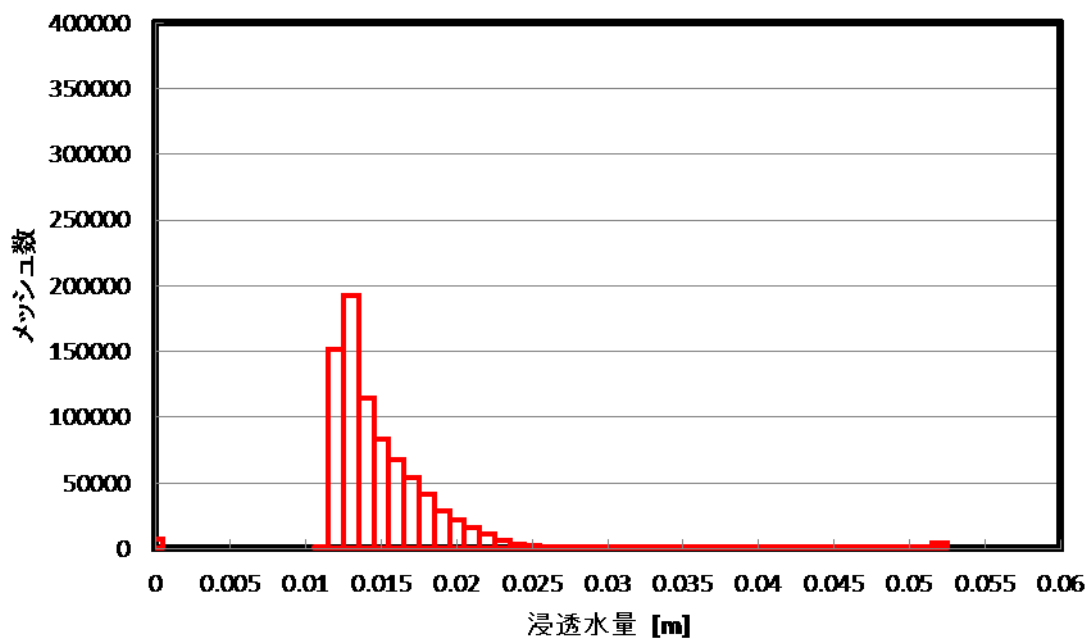


Figure A-346 植林後 草地 浸透水量 1-2-1 PR 最適値

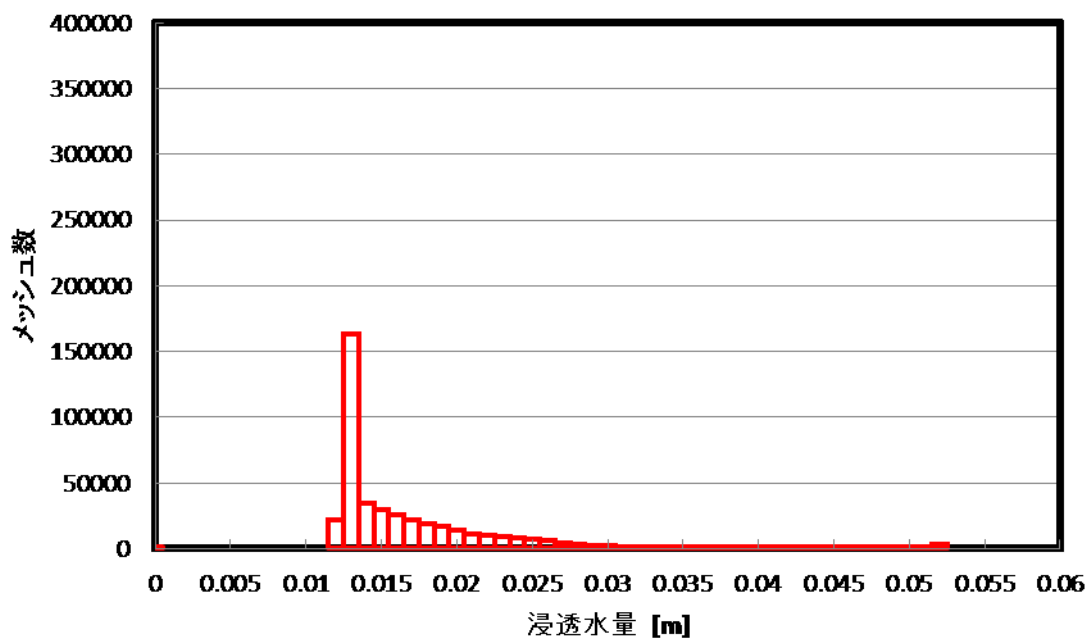


Figure A-347 植林前 森林 浸透水量 1-2-1 PR 最適値

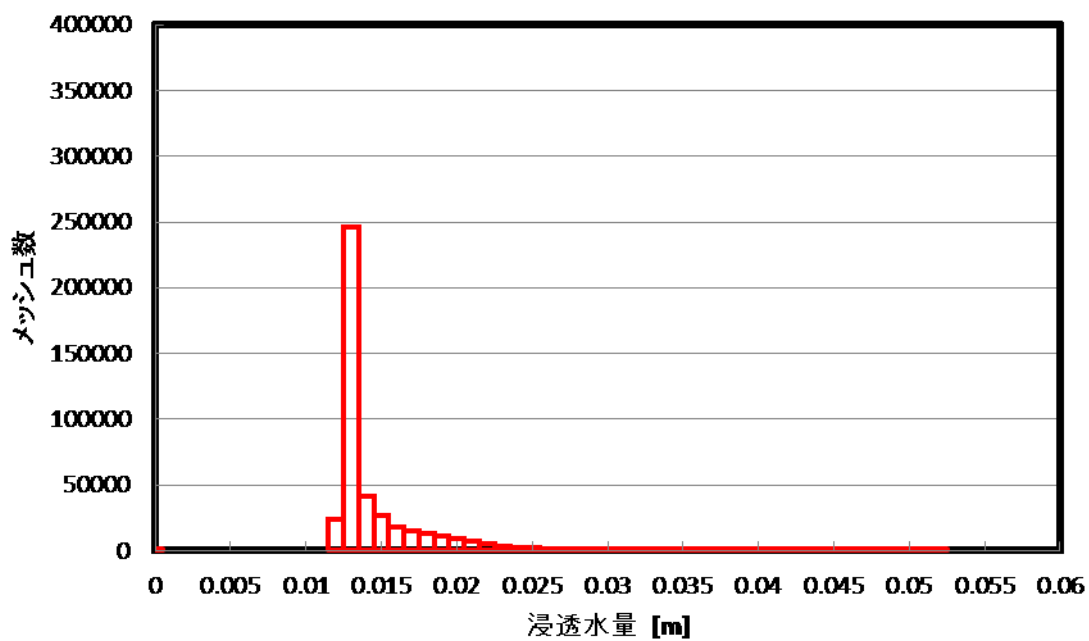


Figure A-348 植林後 森林 浸透水量 1-2-1 PR 最適値

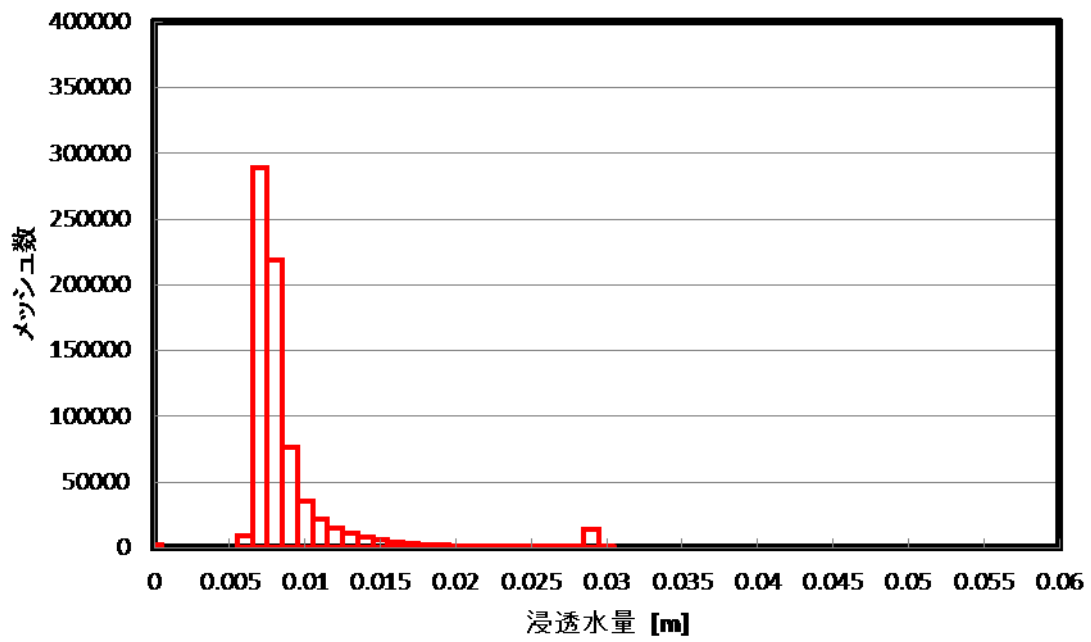
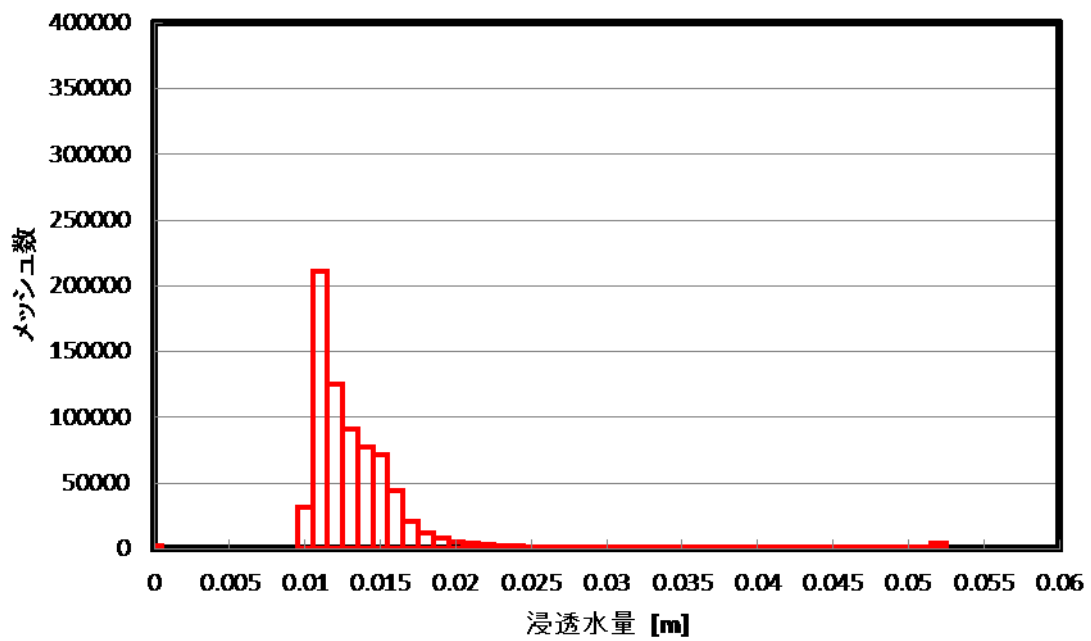


Figure A-349 植林前 裸地 浸透水量 1-2-2 PR 最適値



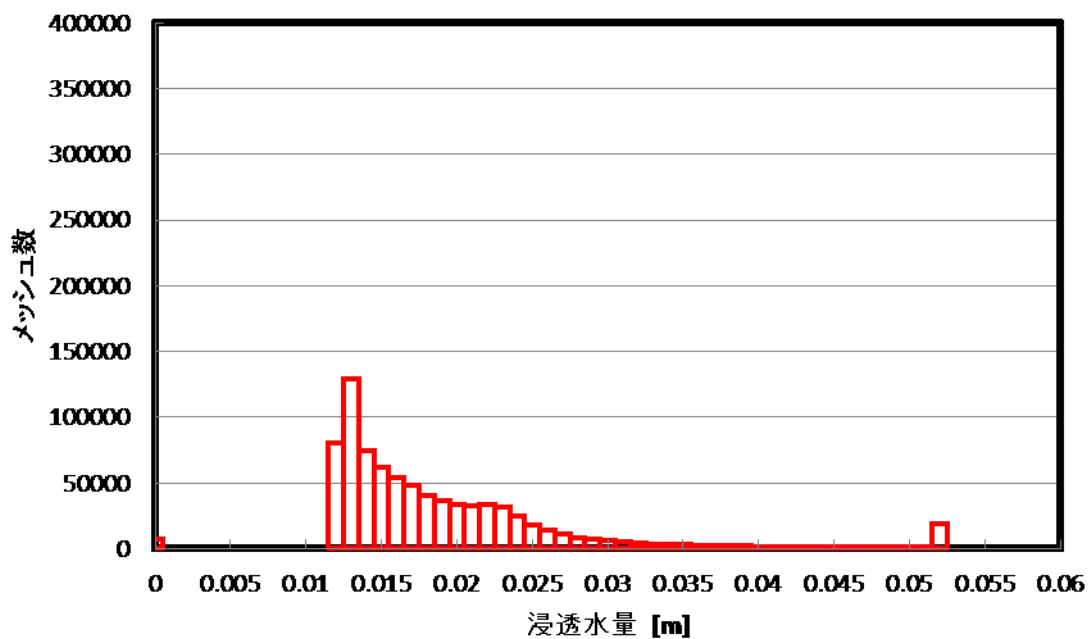


Figure A-351 植林前 草地 浸透水量 1-2-2 PR 最適値

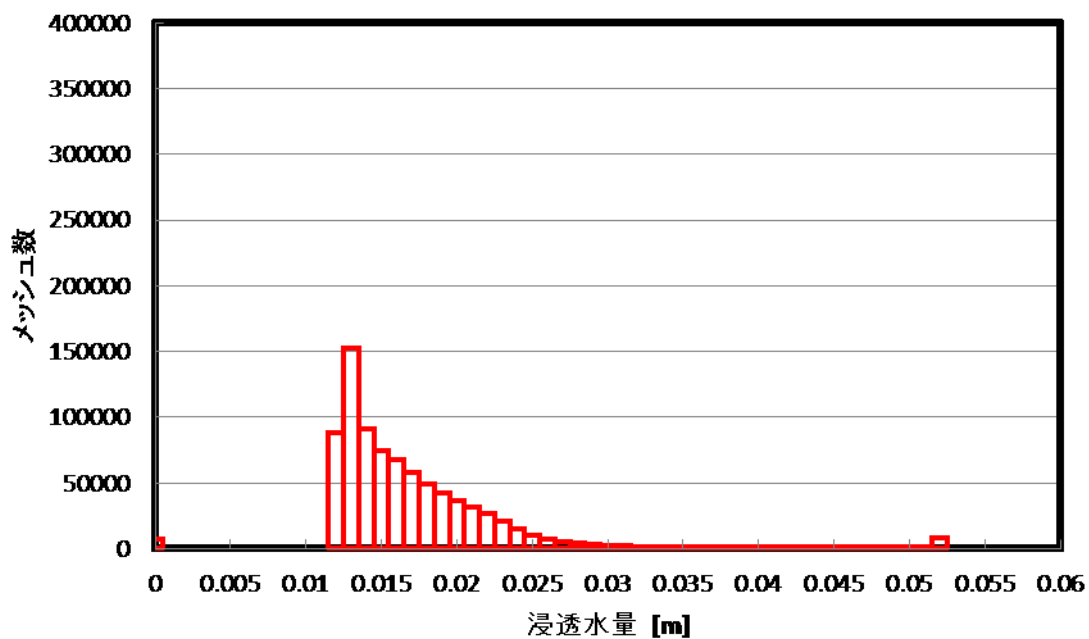


Figure A-352 植林後 草地 浸透水量 1-2-2 PR 最適値

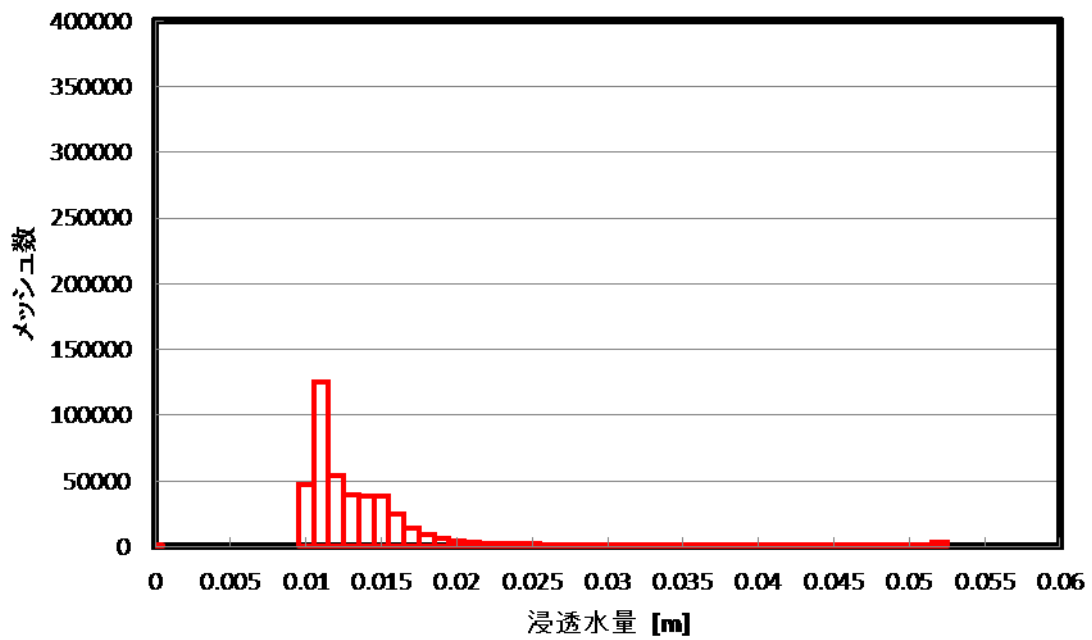


Figure A-353 植林前 森林 浸透水量 1-2-2 PR 最適値

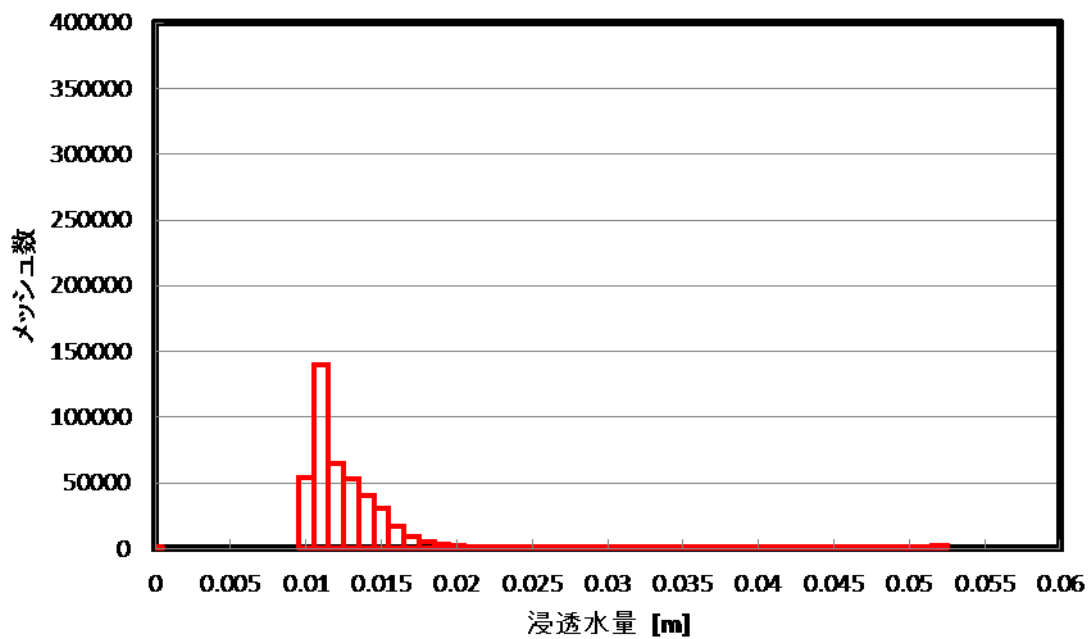


Figure A-354 植林後 森林 浸透水量 1-2-2 PR 最適値

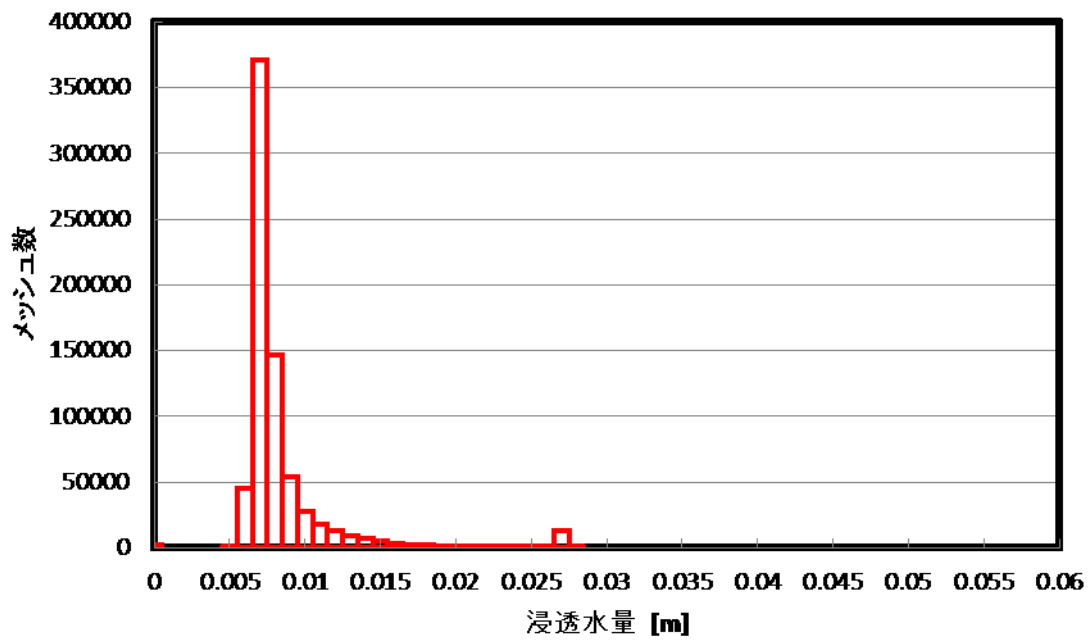


Figure A-355 植林前 裸地 浸透水量 1-2-3 PR 最適値

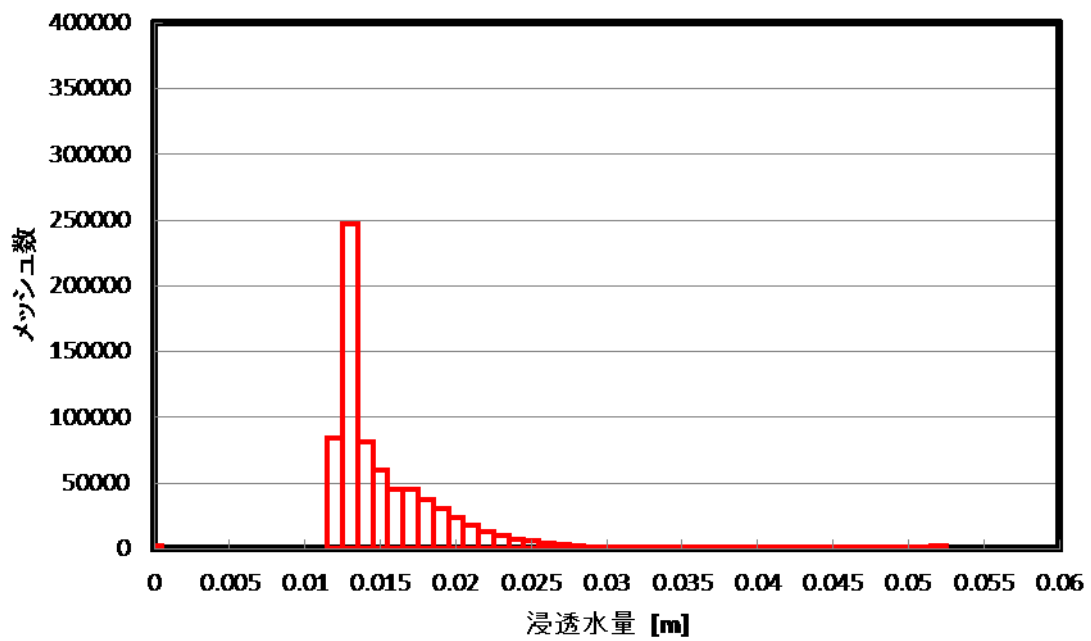


Figure A-356 植林後 裸地 浸透水量 1-2-3 PR 最適値

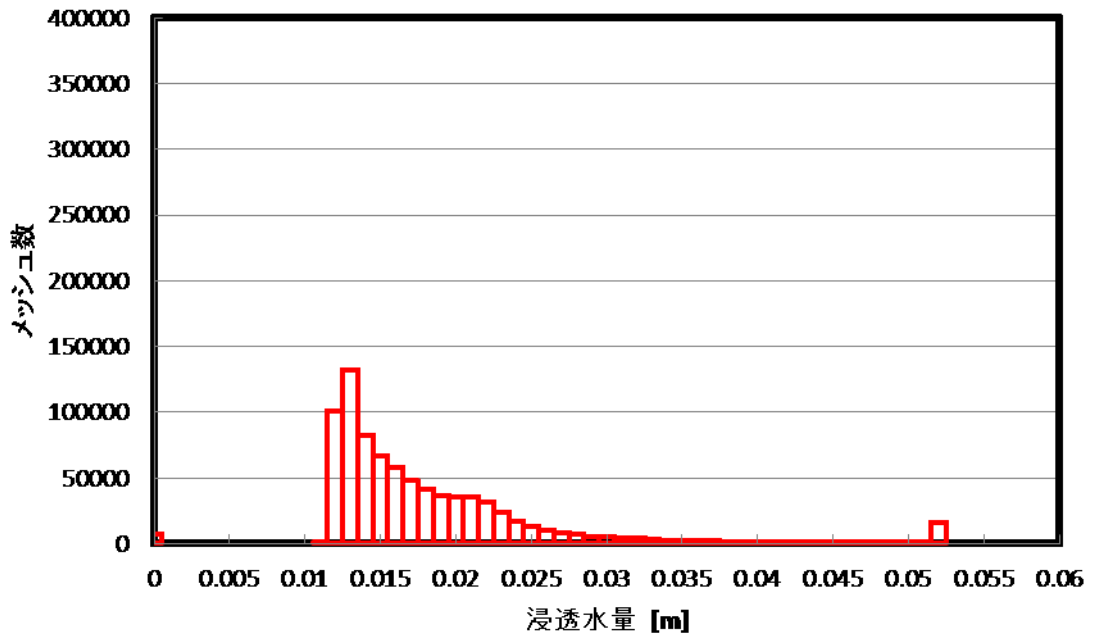


Figure A-357 植林前 草地 浸透水量 1-2-3 PR 最適値

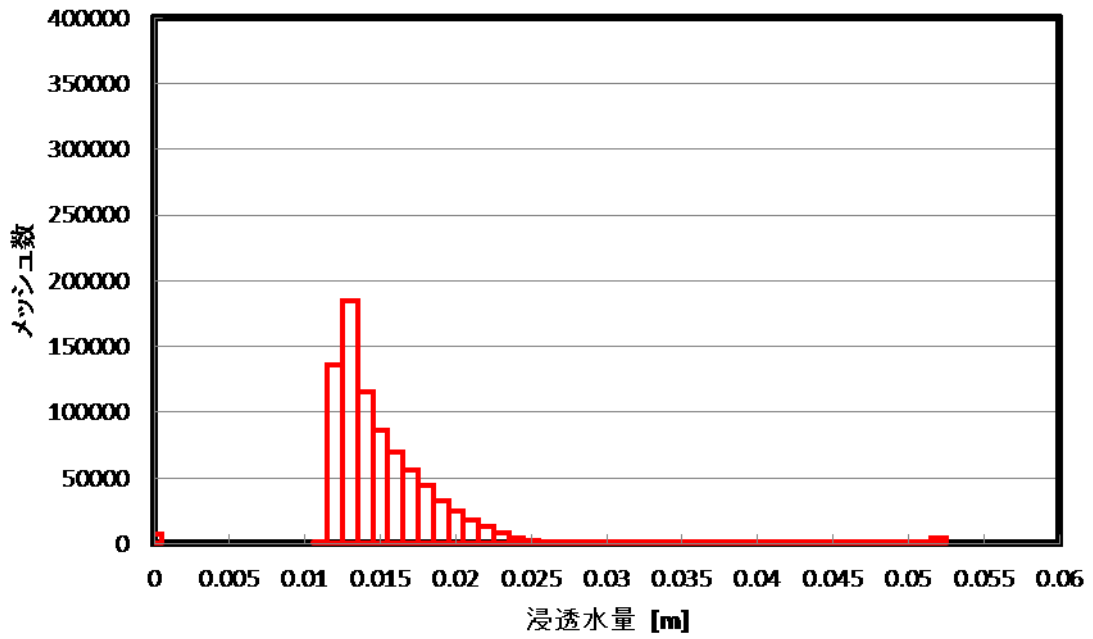


Figure A-358 植林後 草地 浸透水量 1-2-3 PR 最適値

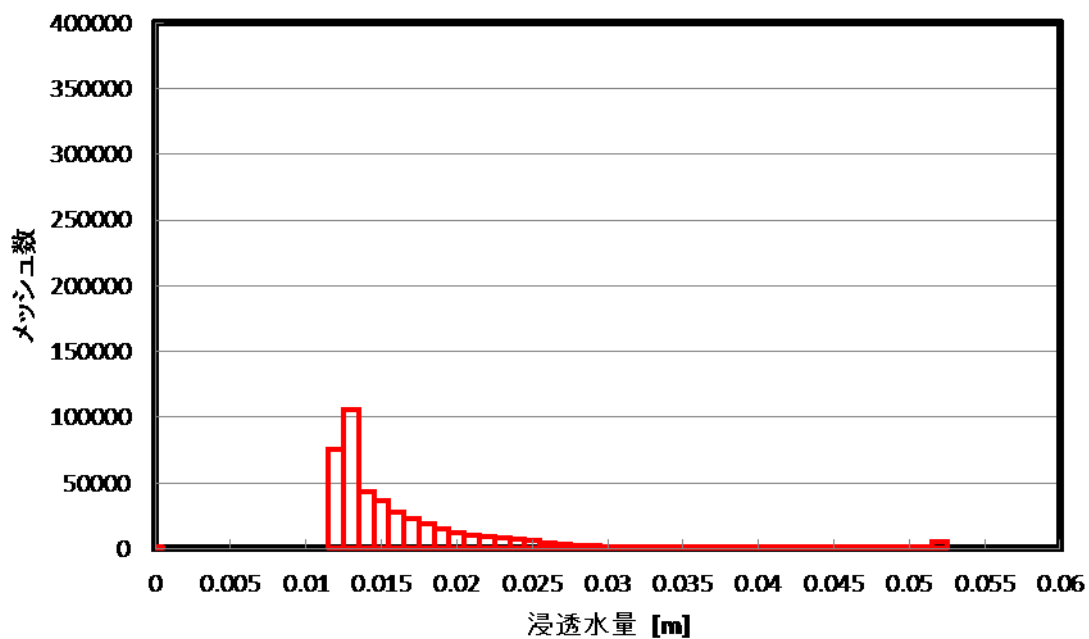


Figure A-359 植林前 森林 浸透水量 1-2-3 PR 最適値

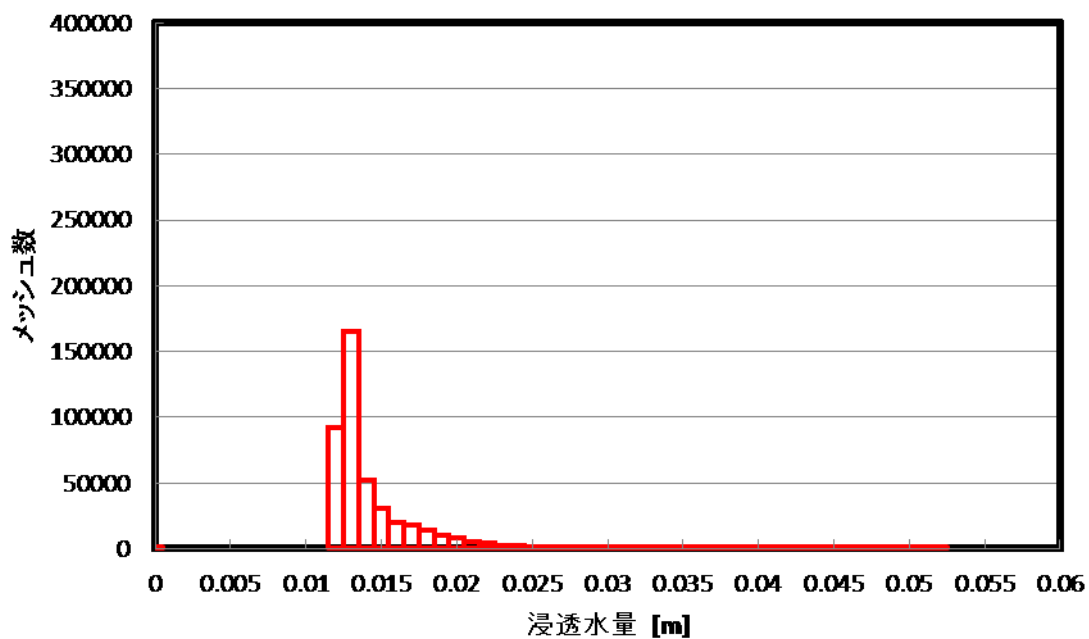


Figure A-360 植林後 森林 浸透水量 1-2-3 PR 最適値

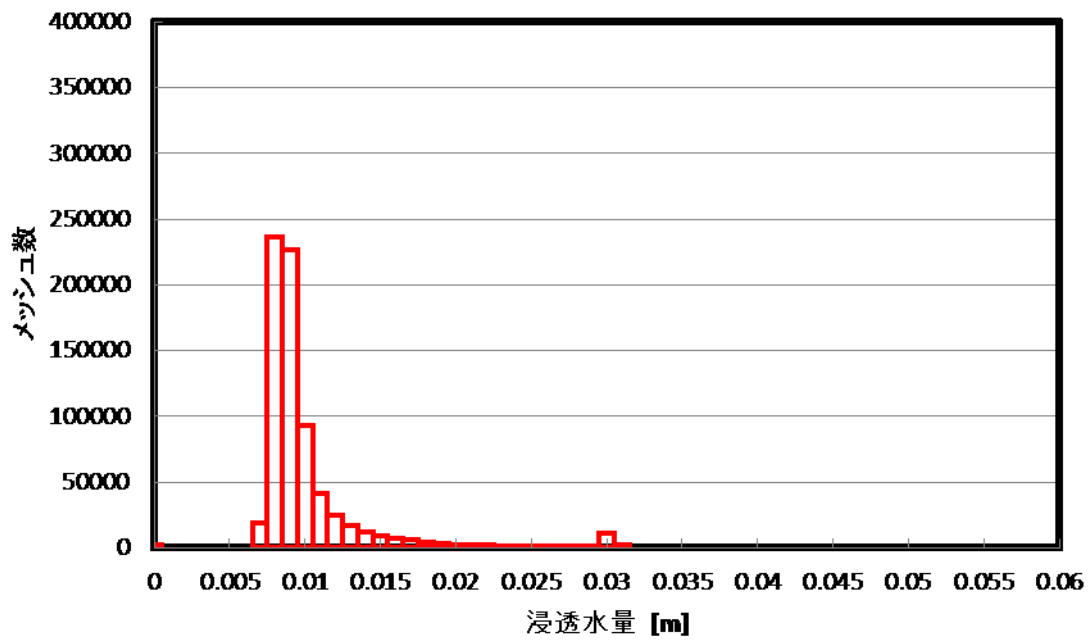


Figure A-361 植林前 裸地 浸透水量 2-1-1 PR 最適値

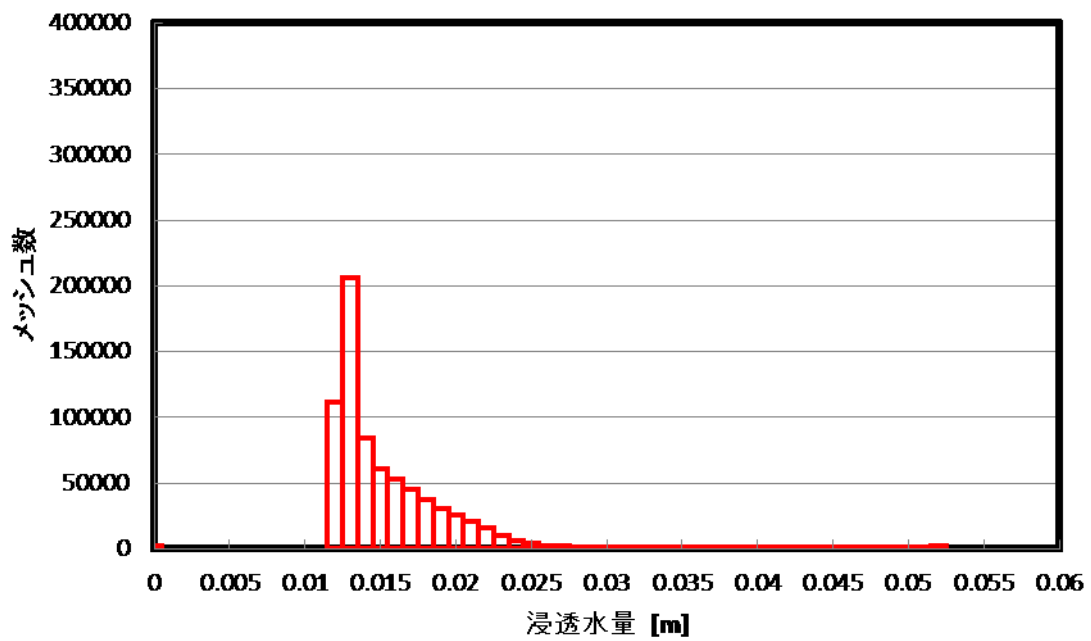


Figure A-362 植林後 裸地 浸透水量 2-1-1 PR 最適値

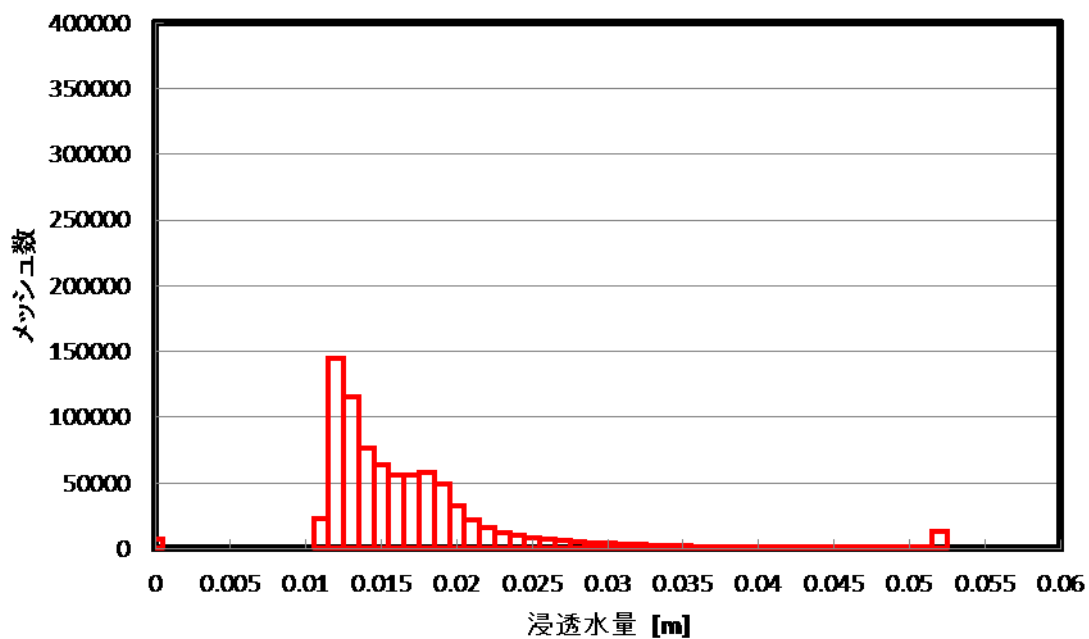


Figure A-363 植林前 草地 浸透水量 2-1-1 PR 最適値

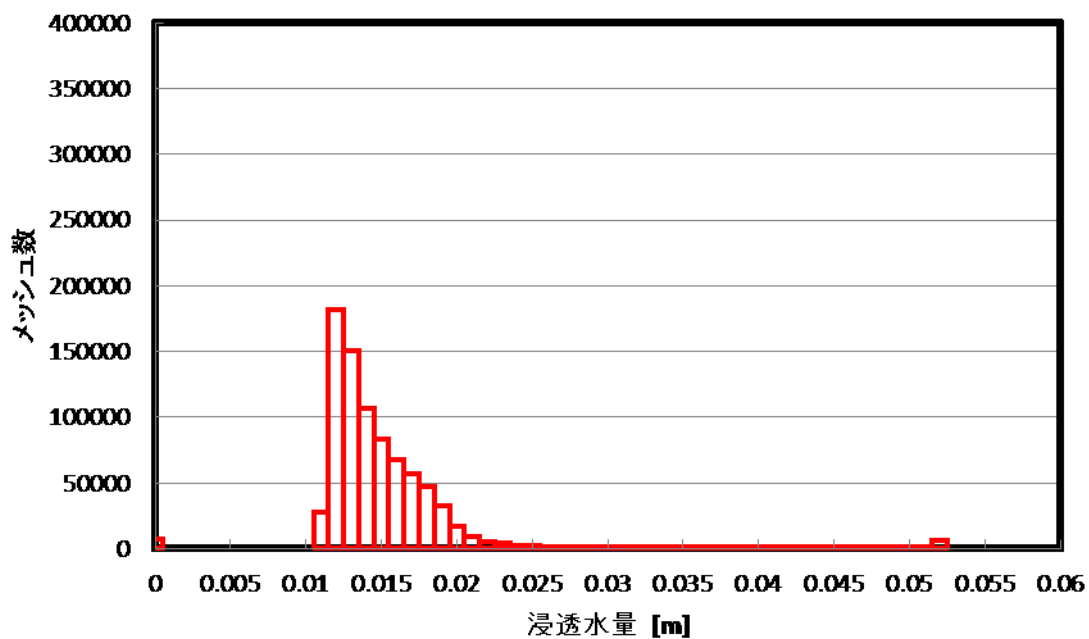


Figure A-364 植林後 草地 浸透水量 2-1-1 PR 最適値

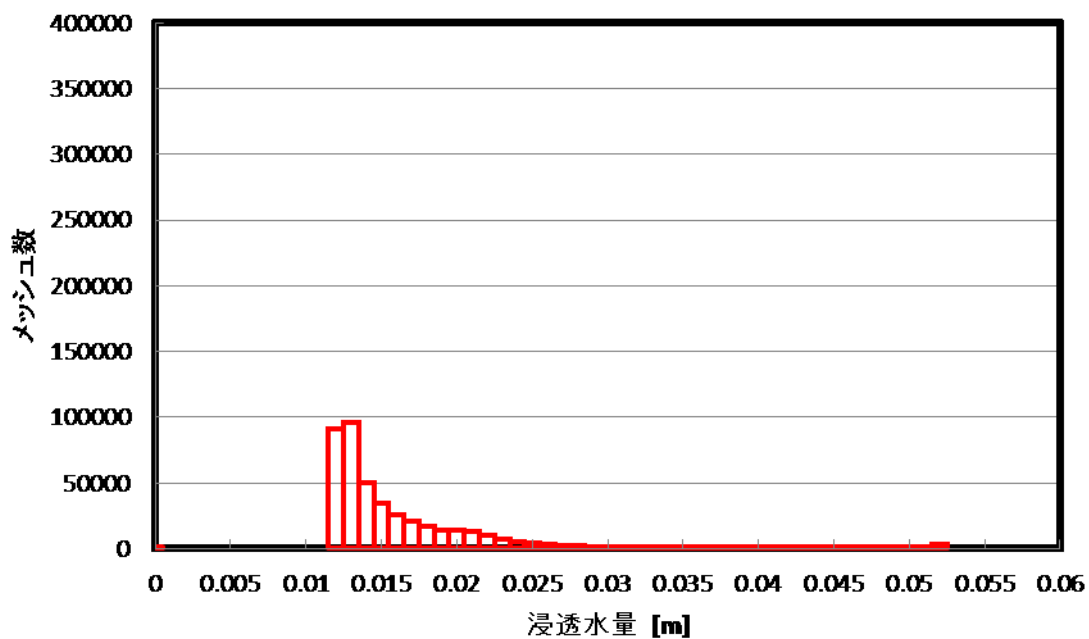


Figure A-365 植林前 森林 浸透水量 2-1-1 PR 最適値

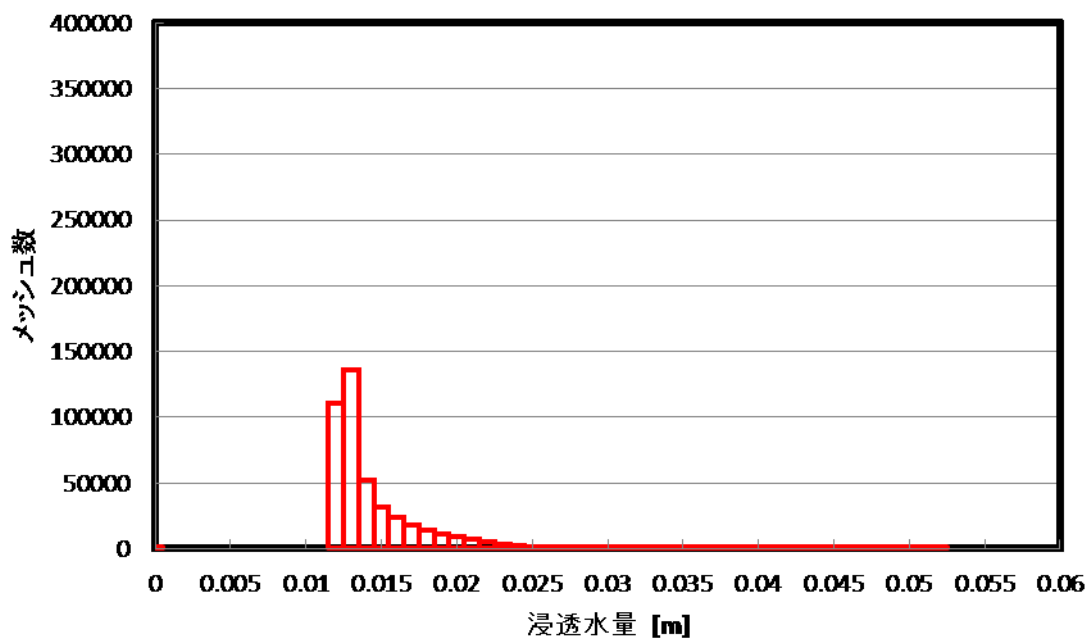


Figure A-366 植林後 森林 浸透水量 2-1-1 PR 最適値

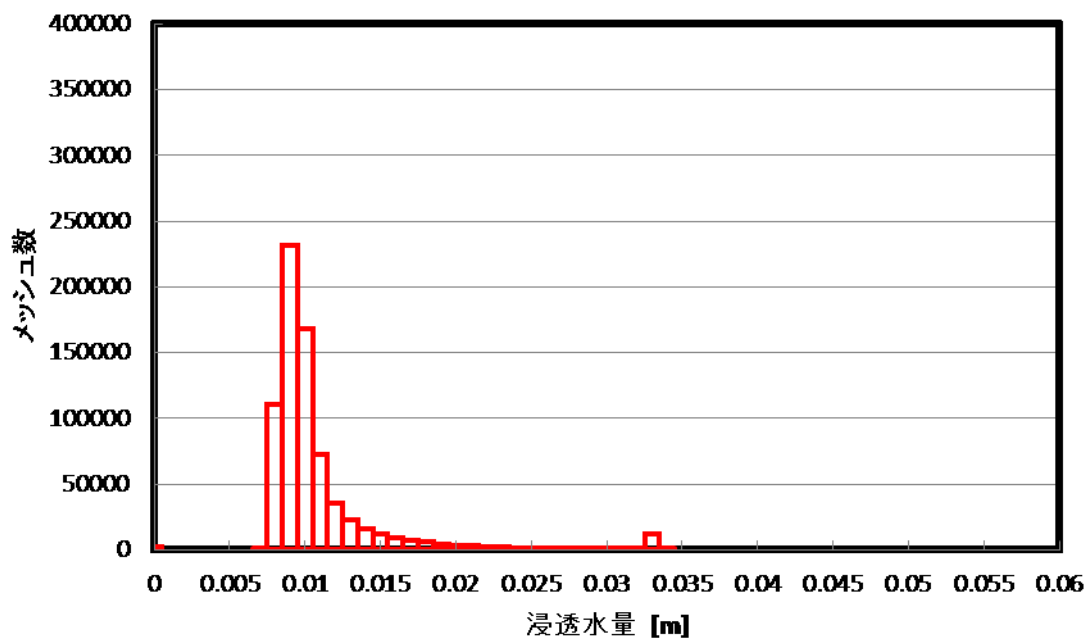


Figure A-367 植林前 裸地 浸透水量 2-1-2 PR 最適値

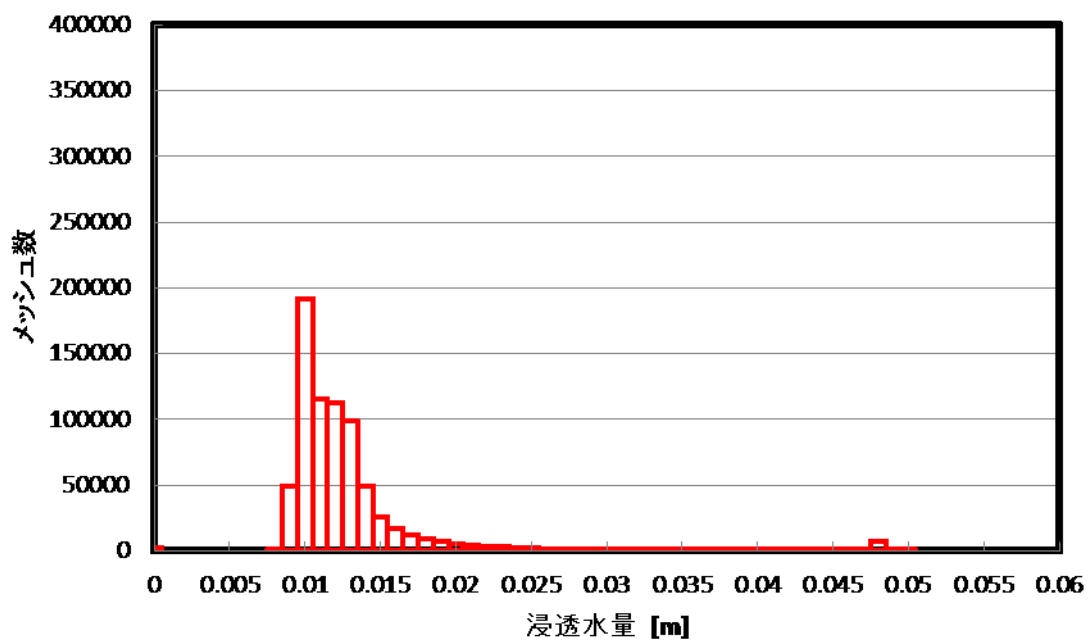


Figure A-368 植林後 裸地 浸透水量 2-1-2 PR 最適値

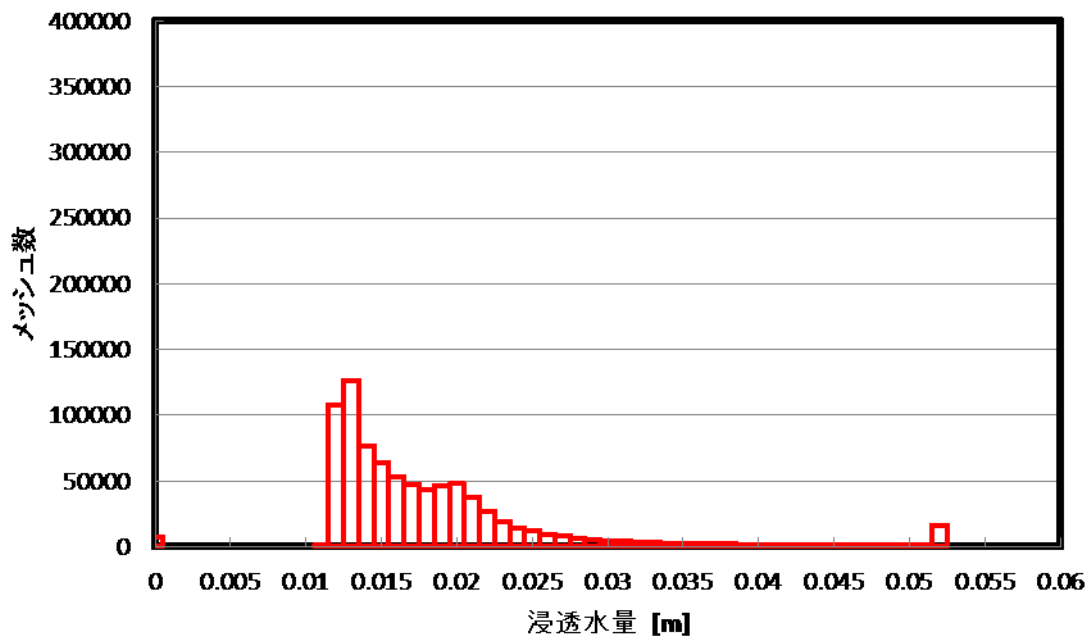


Figure A-369 植林前 草地 浸透水量 2-1-2 PR 最適値

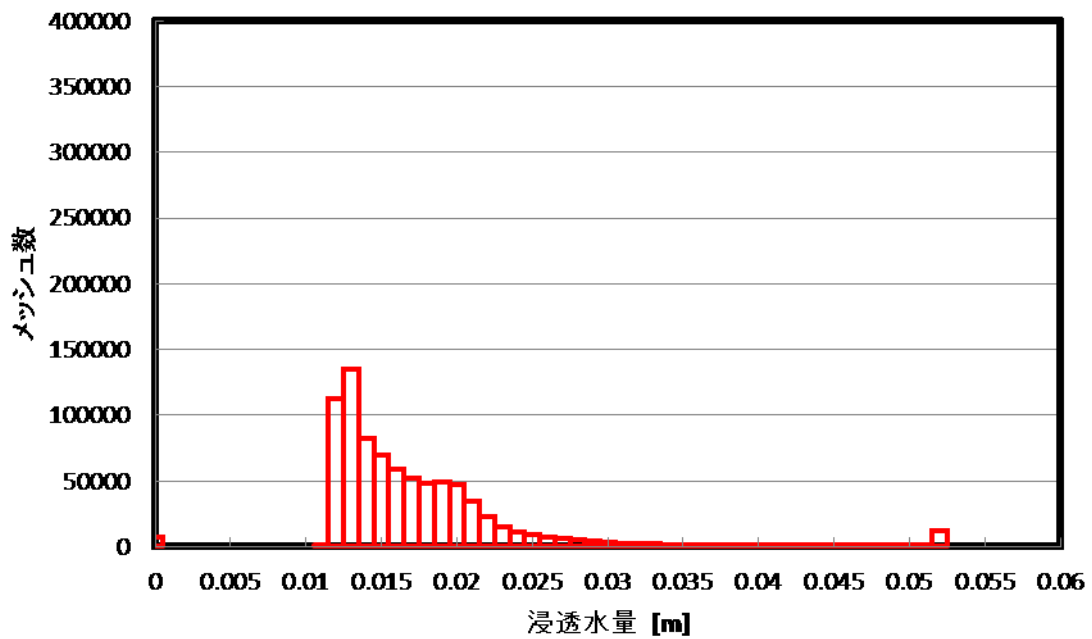


Figure A-370 植林後 草地 浸透水量 2-1-2 PR 最適値

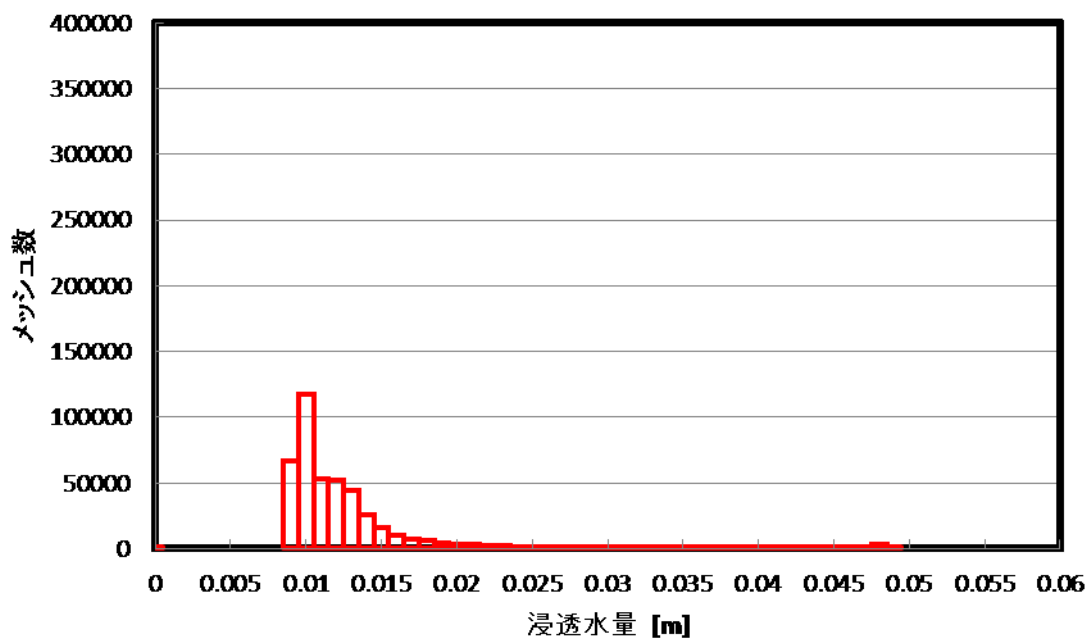


Figure A-371 植林前 森林 浸透水量 2-1-2 PR 最適値

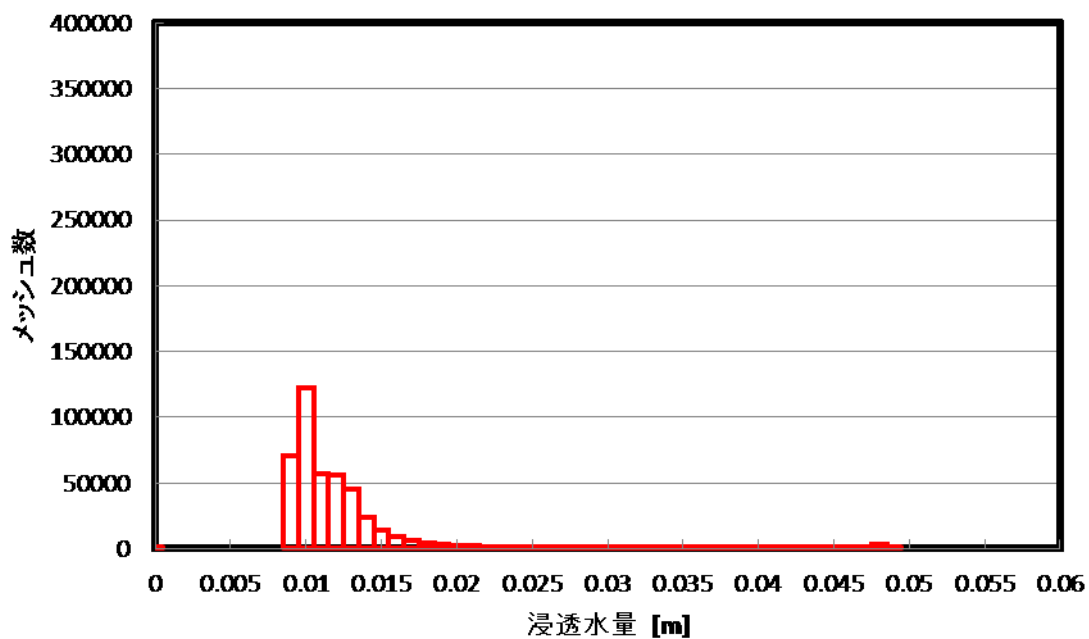


Figure A-372 植林後 森林 浸透水量 2-1-2 PR 最適値

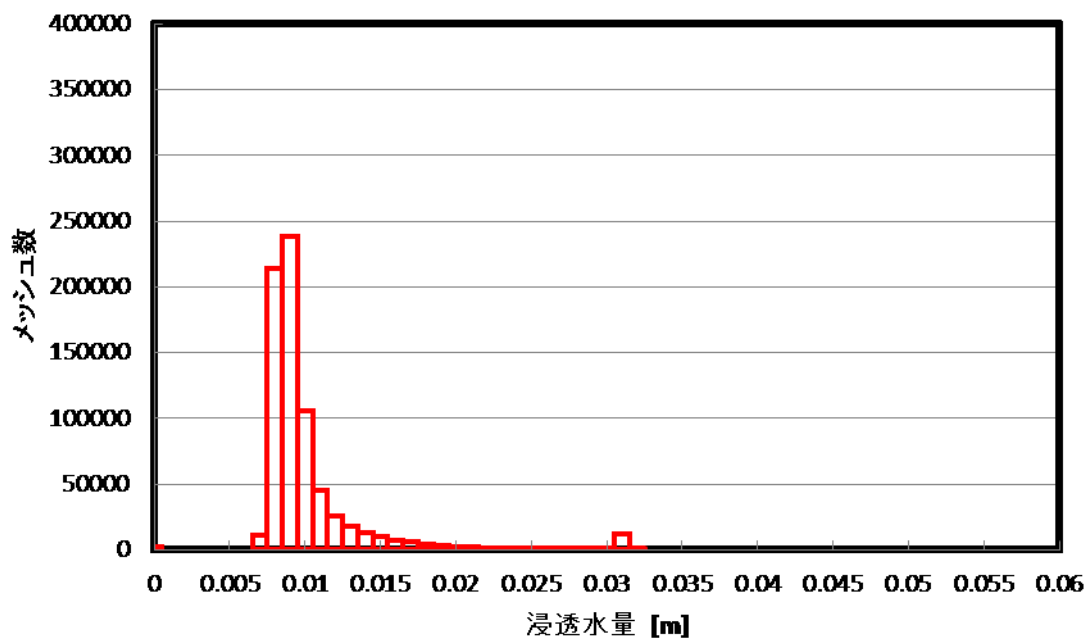


Figure A-373 植林前 裸地 浸透水量 2-1-3 PR 最適値

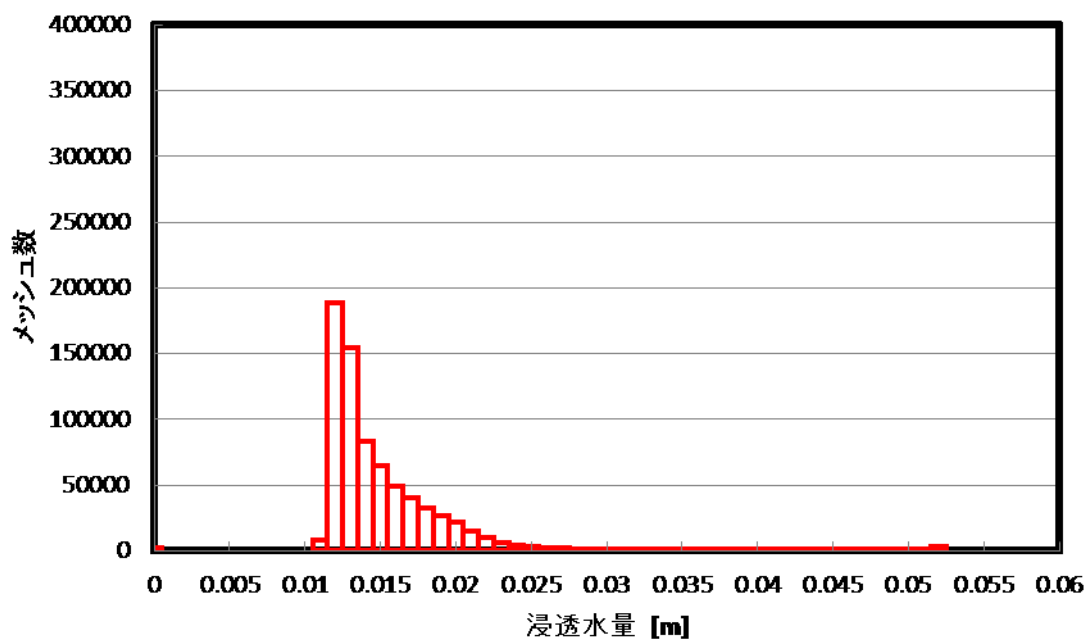


Figure A-374 植林後 裸地 浸透水量 2-1-3 PR 最適値

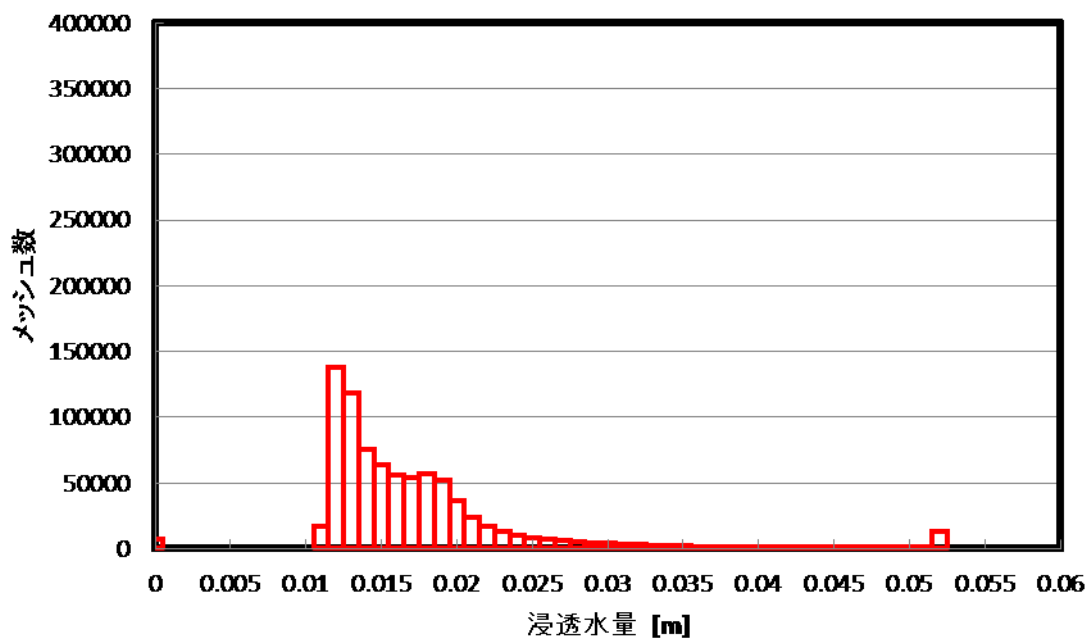


Figure A-375 植林前 草地 浸透水量 2-1-3 PR 最適値

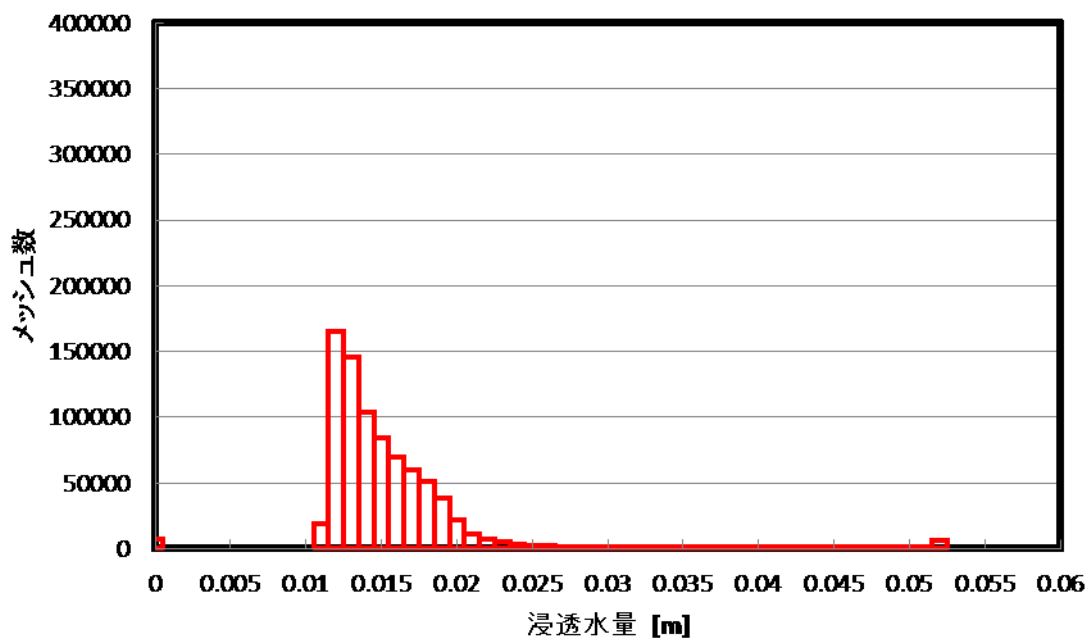


Figure A-376 植林後 草地 浸透水量 2-1-3 PR 最適値

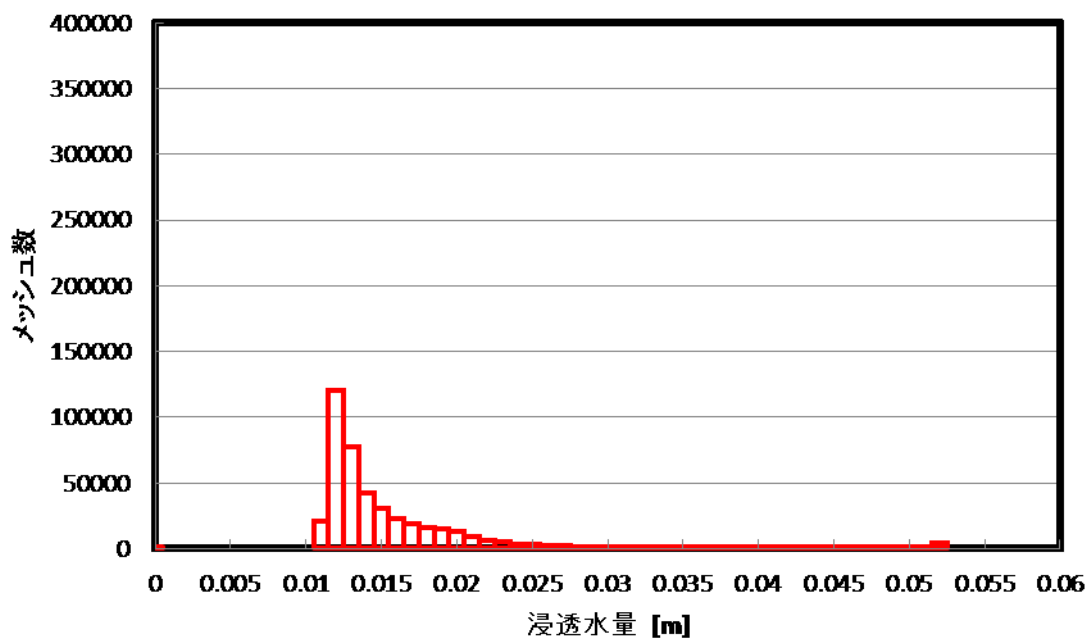


Figure A-377 植林前 森林 浸透水量 2-1-3 PR 最適値

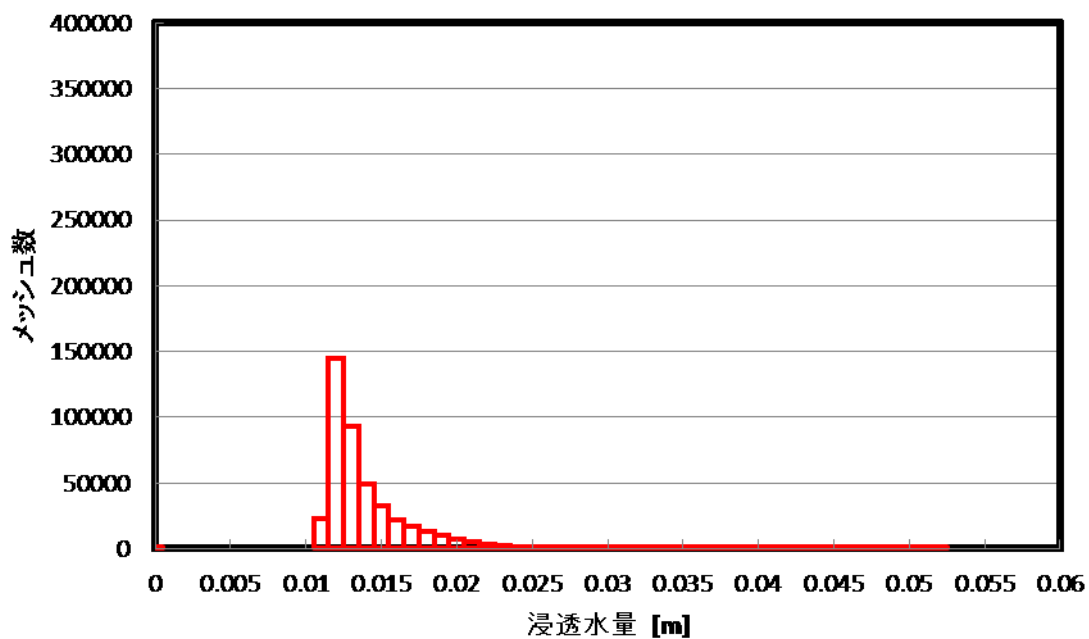


Figure A-378 植林後 森林 浸透水量 2-1-3 PR 最適値

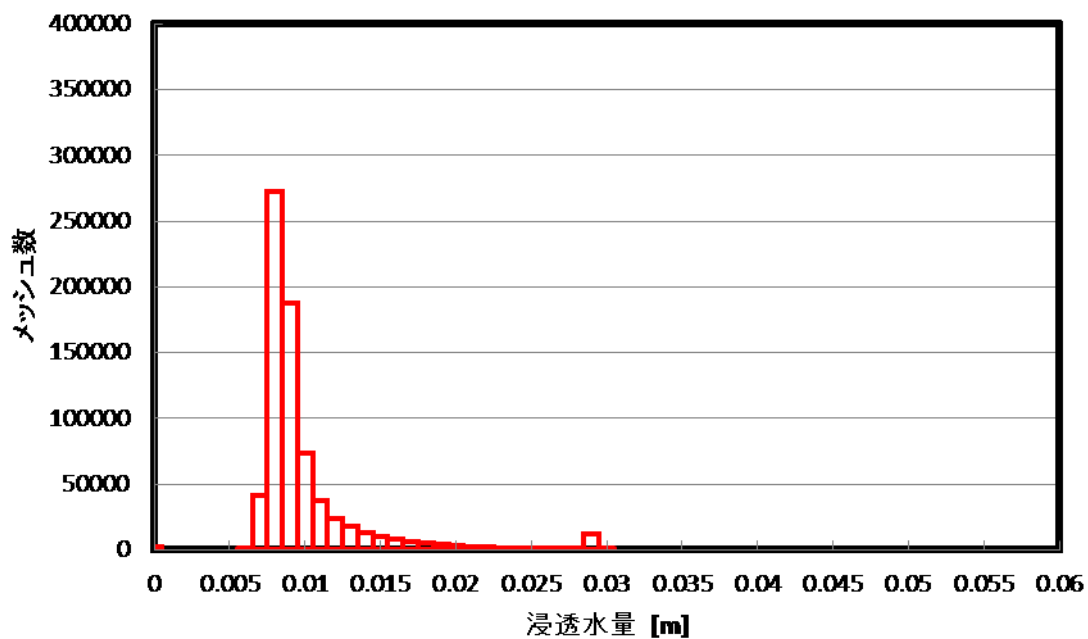


Figure A-379 植林前 裸地 浸透水量 2-2-1 PR 最適値

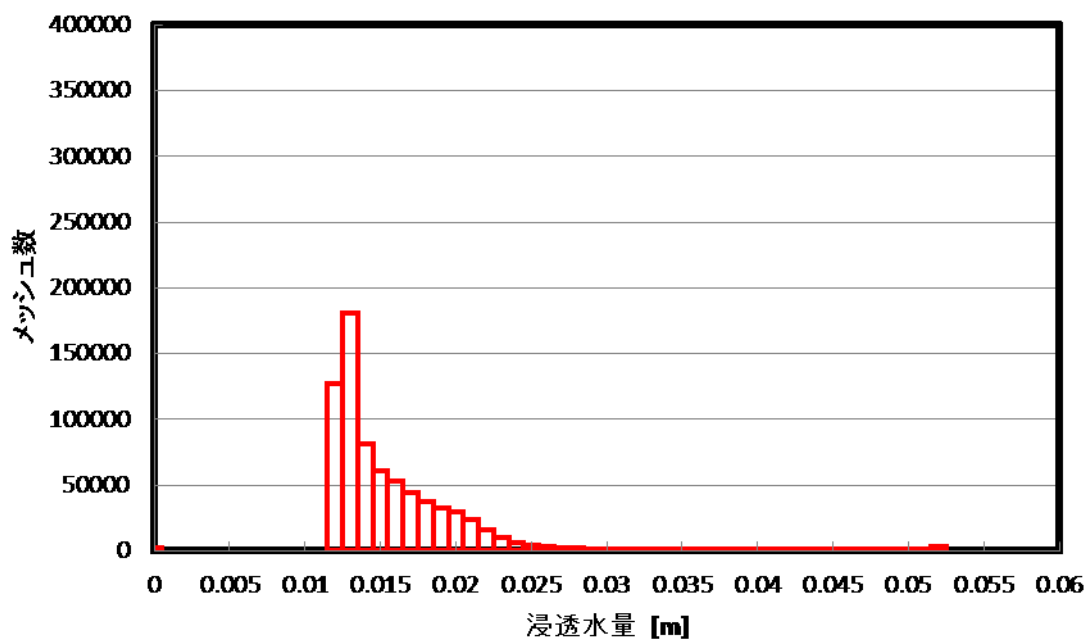


Figure A-380 植林後 裸地 浸透水量 2-2-1 PR 最適値

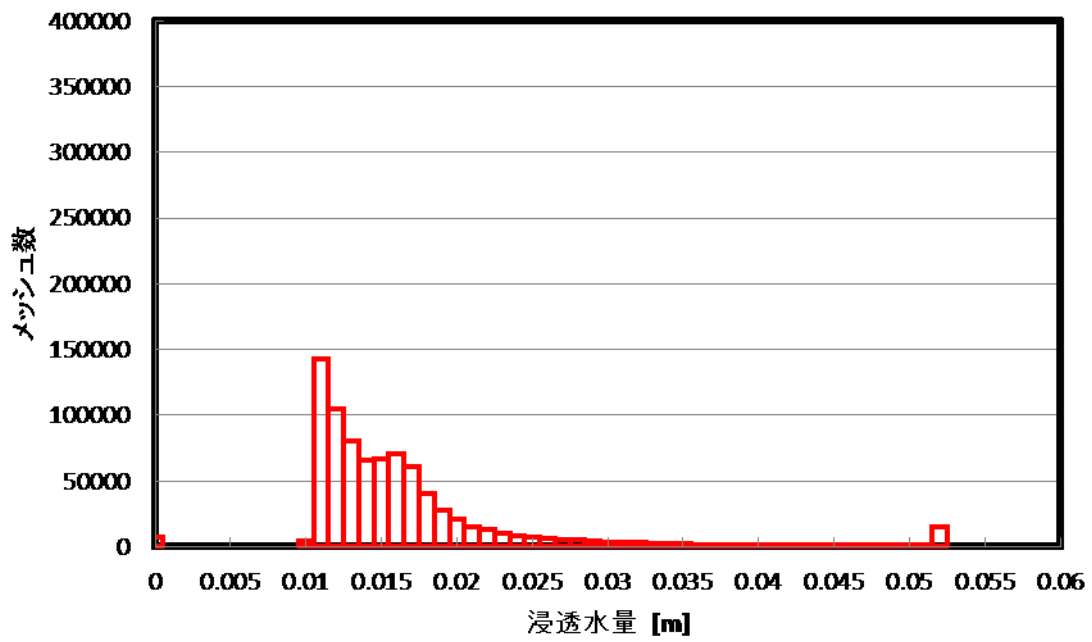


Figure A-381 植林前 草地 浸透水量 2-2-1 PR 最適値

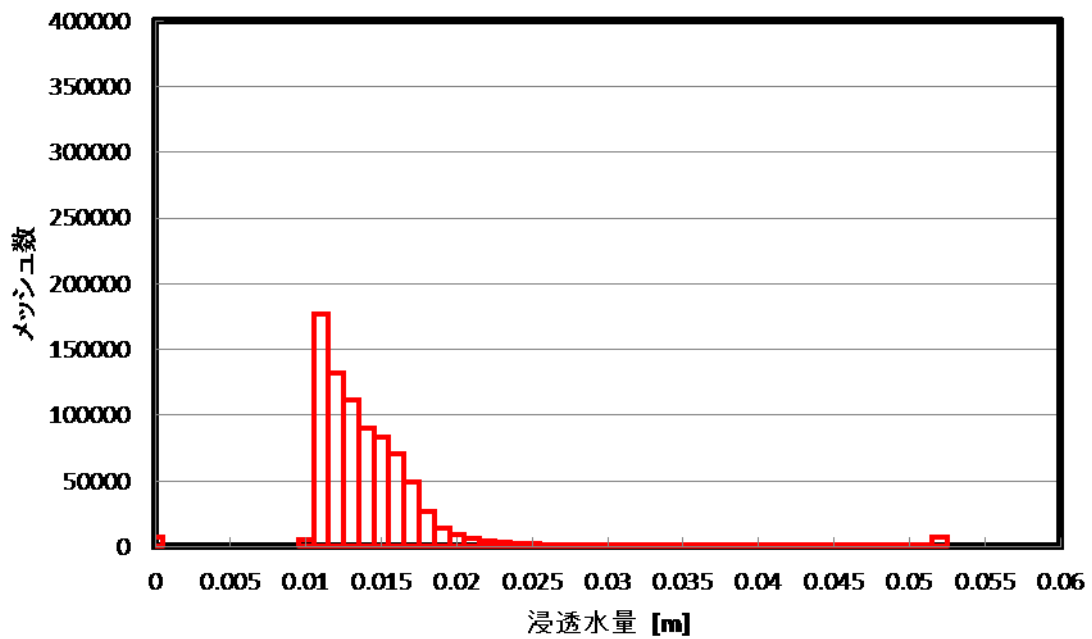


Figure A-382 植林後 草地 浸透水量 2-2-1 PR 最適値

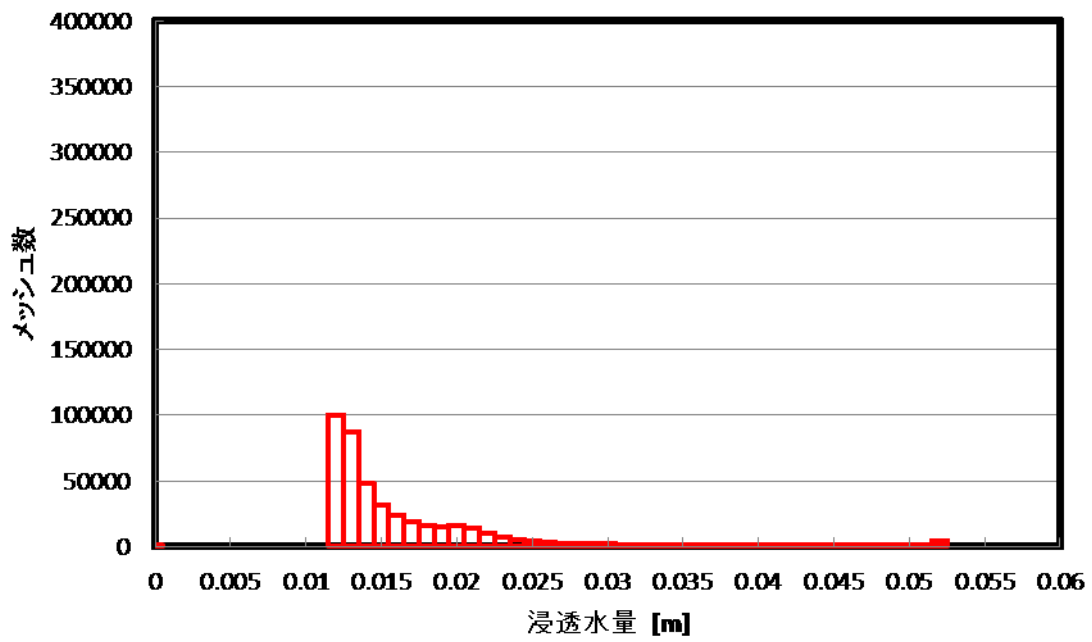


Figure A-383 植林前 森林 浸透水量 2-2-1 PR 最適値

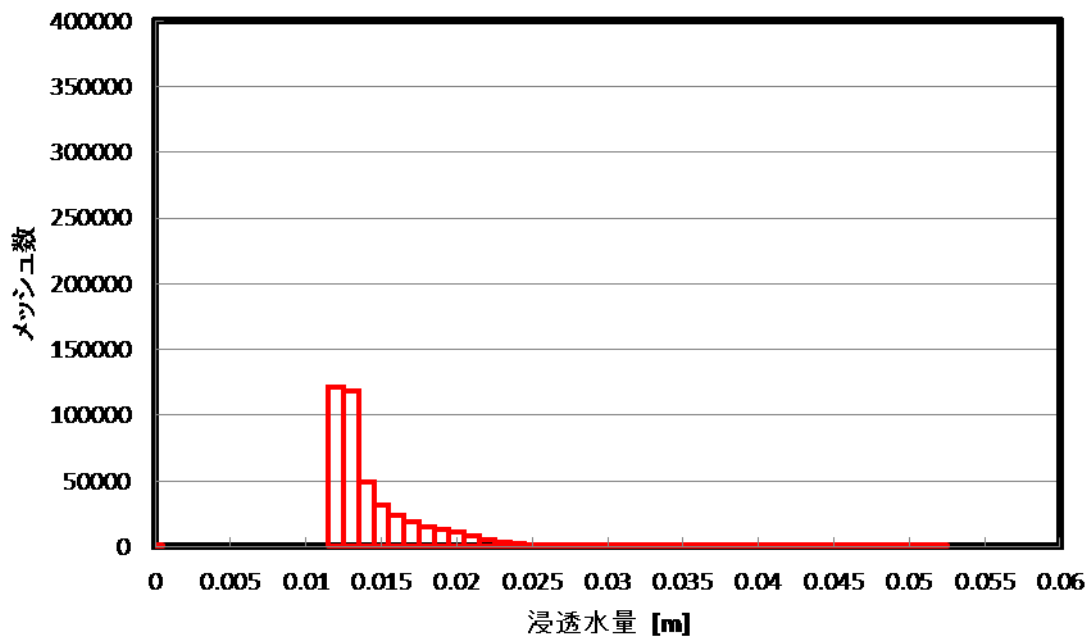


Figure A-384 植林後 森林 浸透水量 2-2-1 PR 最適値

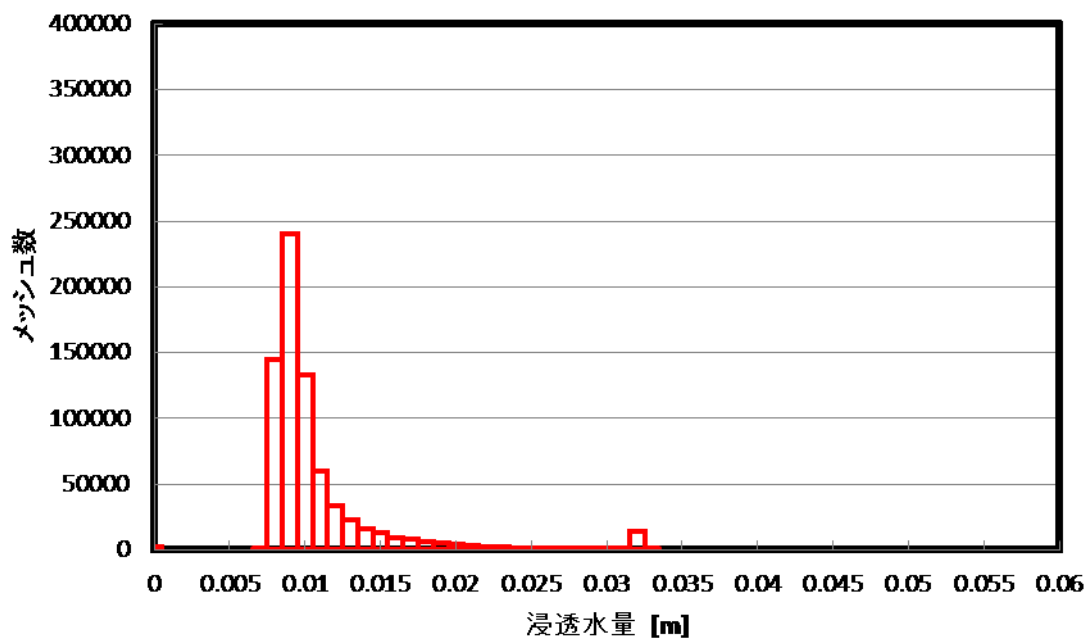


Figure A-385 植林前 裸地 浸透水量 2-2-2 PR 最適値

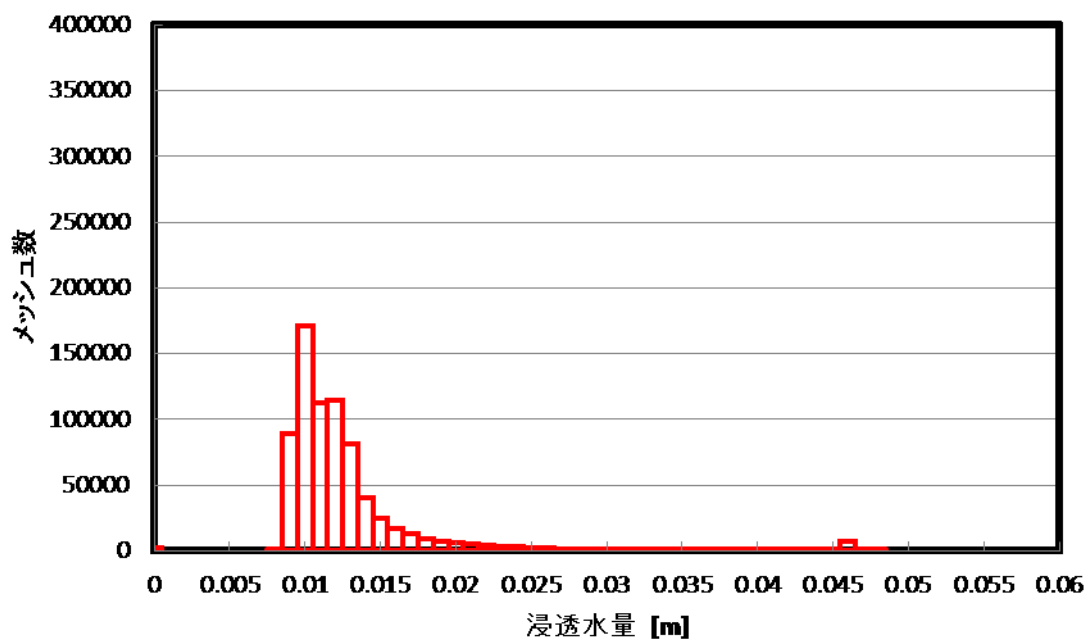


Figure A-386 植林後 裸地 浸透水量 2-2-2 PR 最適値

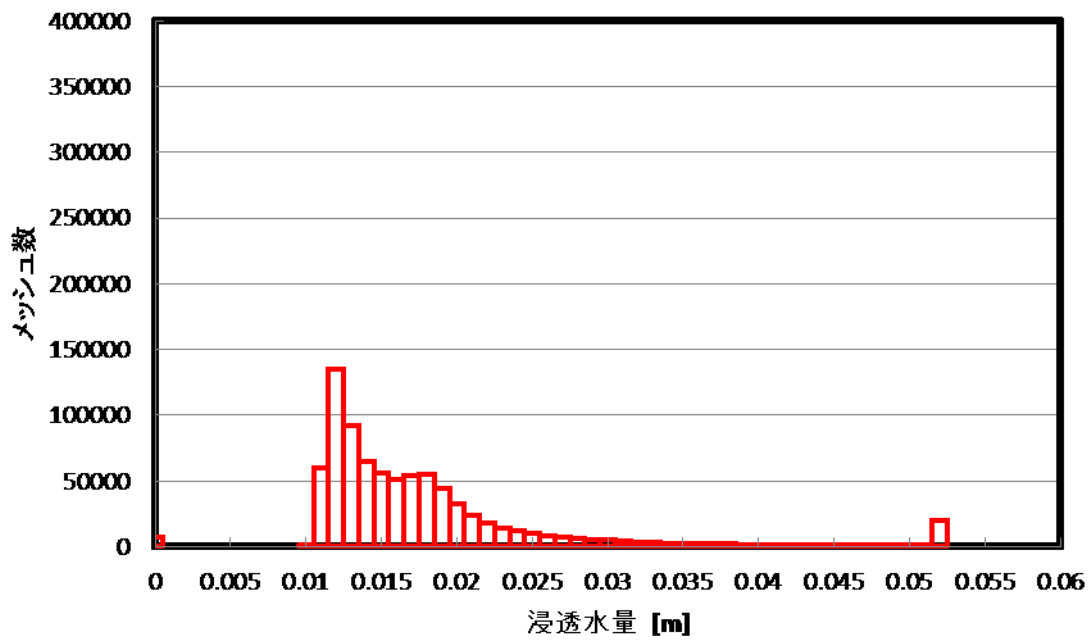


Figure A-387 植林前 草地 浸透水量 2-2-2 PR 最適値

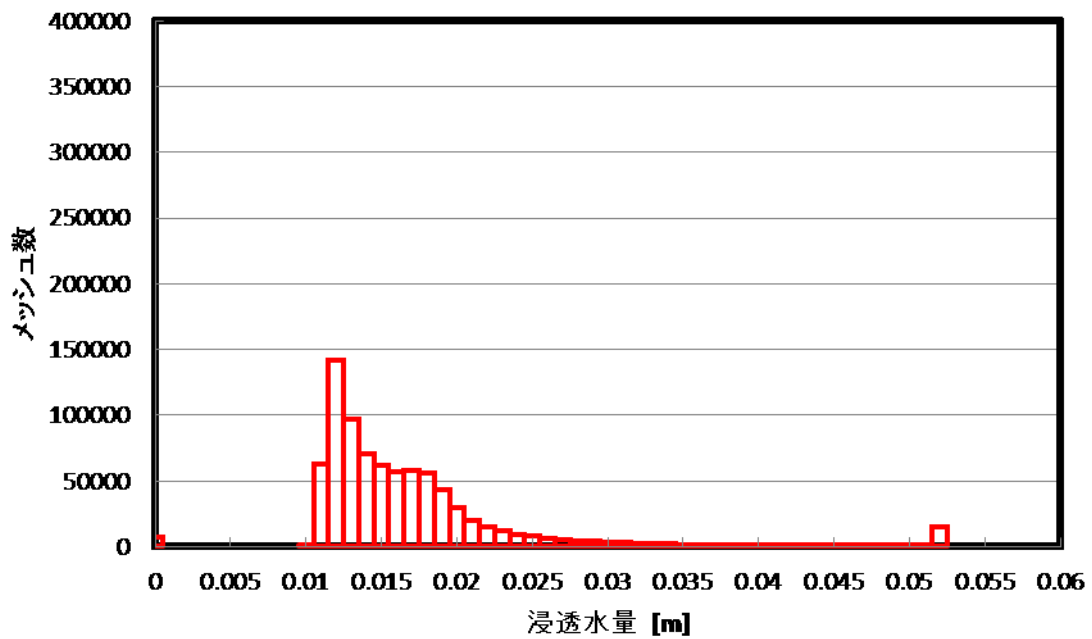


Figure A-388 植林後 草地 浸透水量 2-2-2 PR 最適値

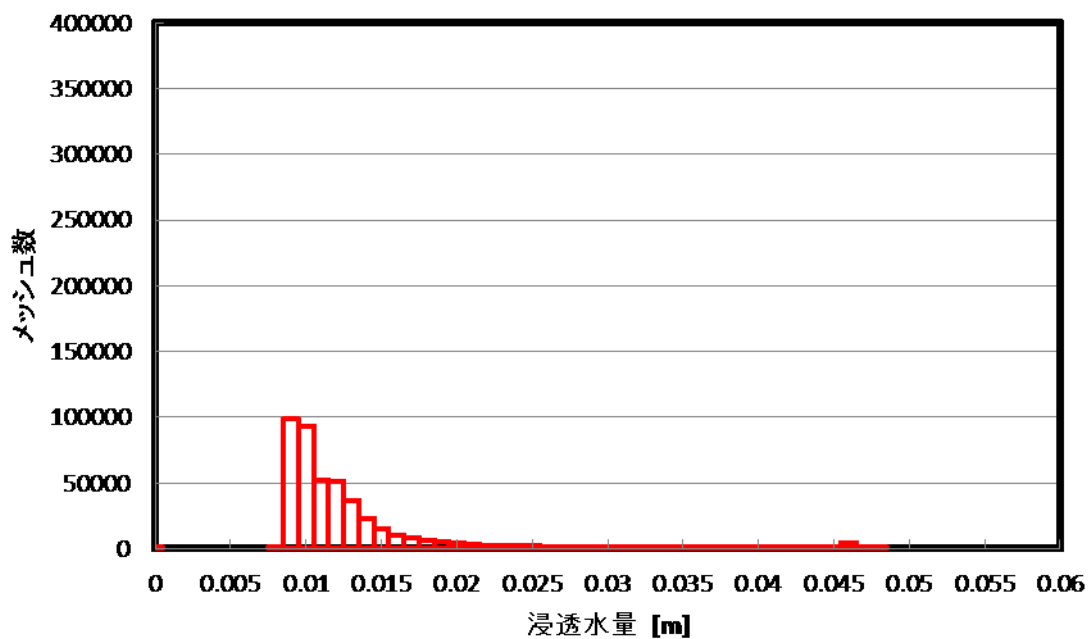


Figure A-389 植林前 森林 浸透水量 2-2-2 PR 最適値

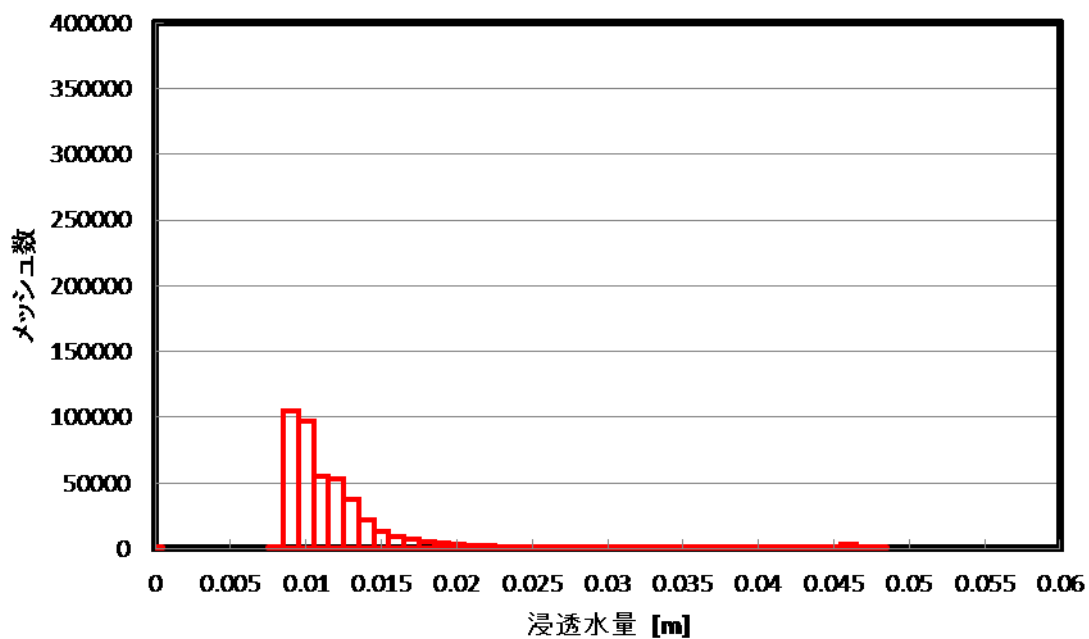


Figure A-390 植林後 森林 浸透水量 2-2-2 PR 最適値

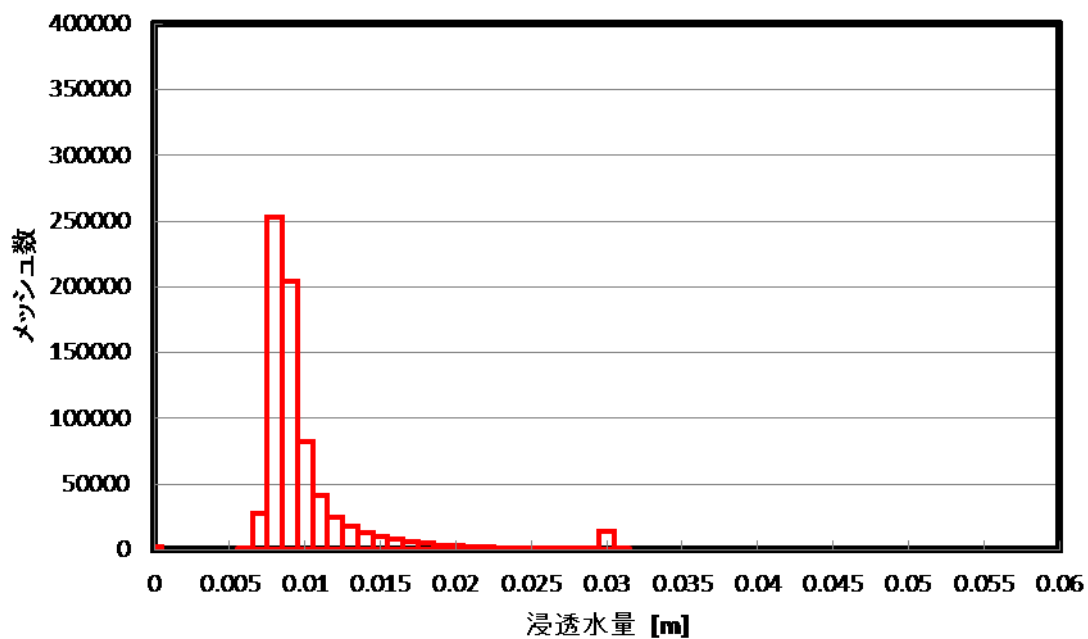


Figure A-391 植林前 裸地 浸透水量 2-2-3 PR 最適値

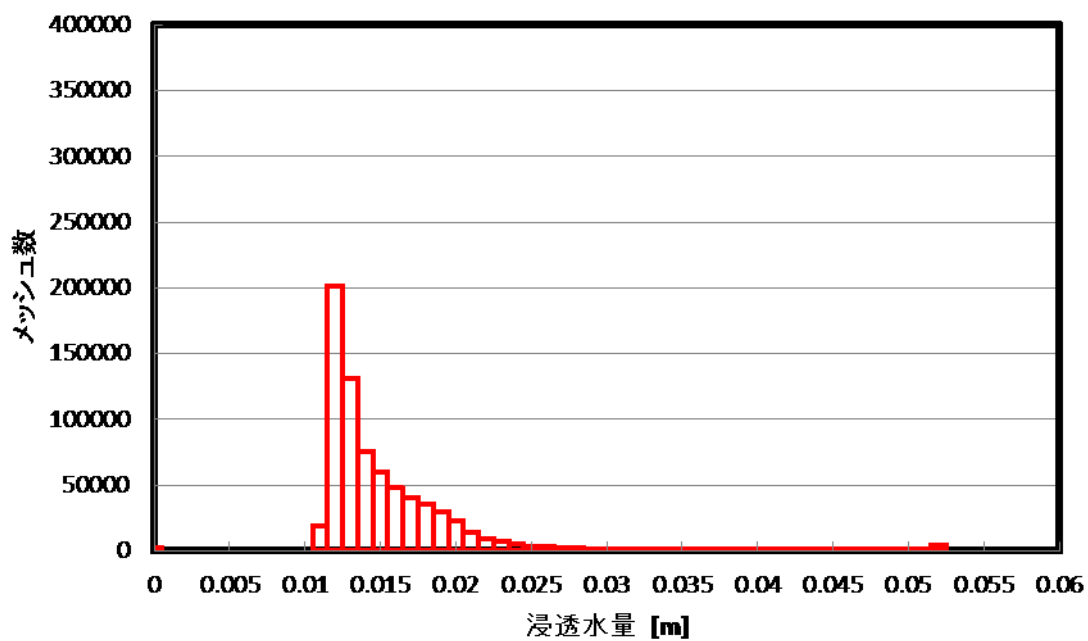


Figure A-392 植林後 裸地 浸透水量 2-2-3 PR 最適値

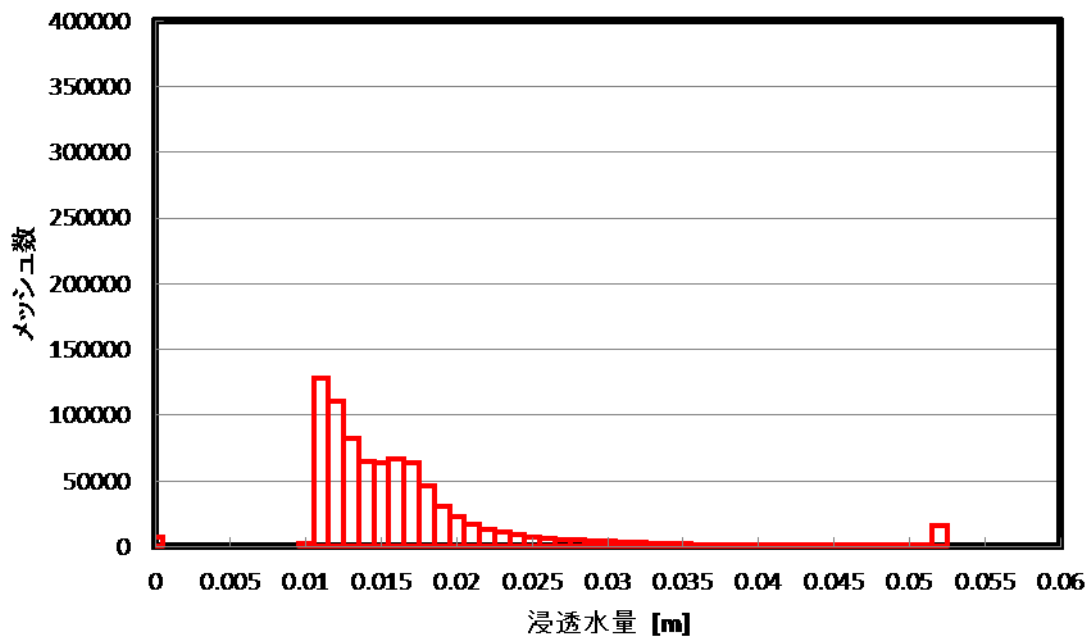


Figure A-393 植林前 草地 浸透水量 2-2-3 PR 最適値

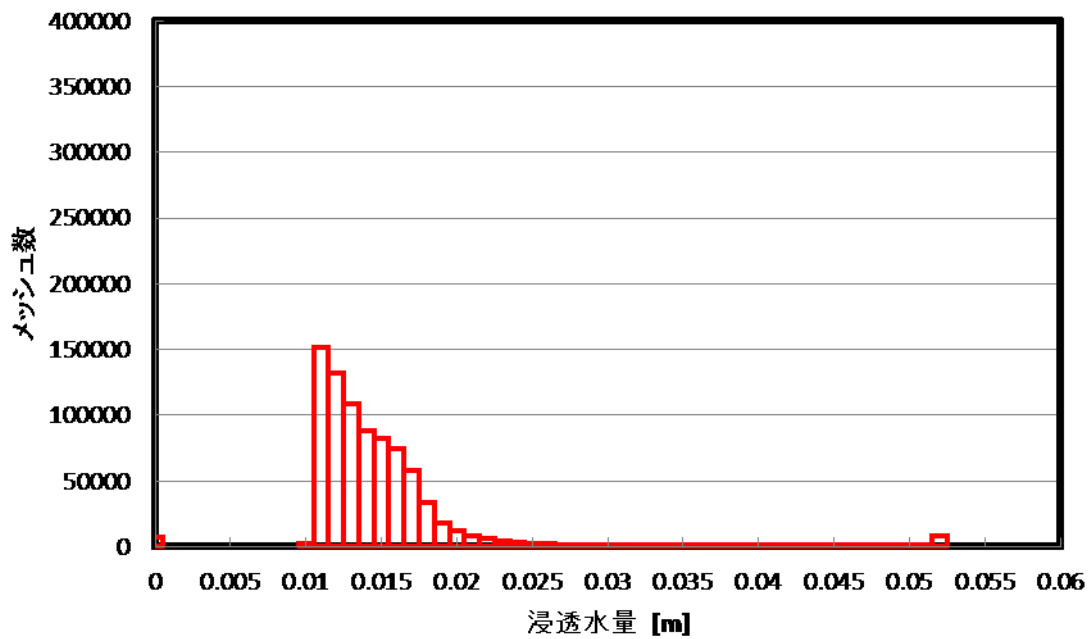


Figure A-394 植林後 草地 浸透水量 2-2-3 PR 最適値

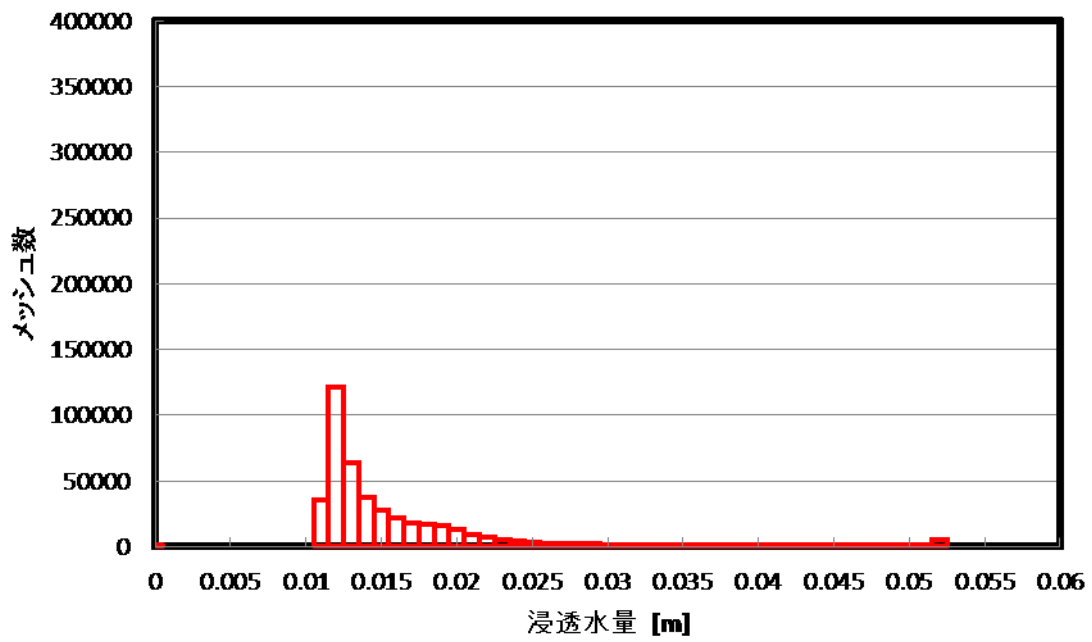


Figure A-395 植林前 森林 浸透水量 2-2-3 PR 最適値

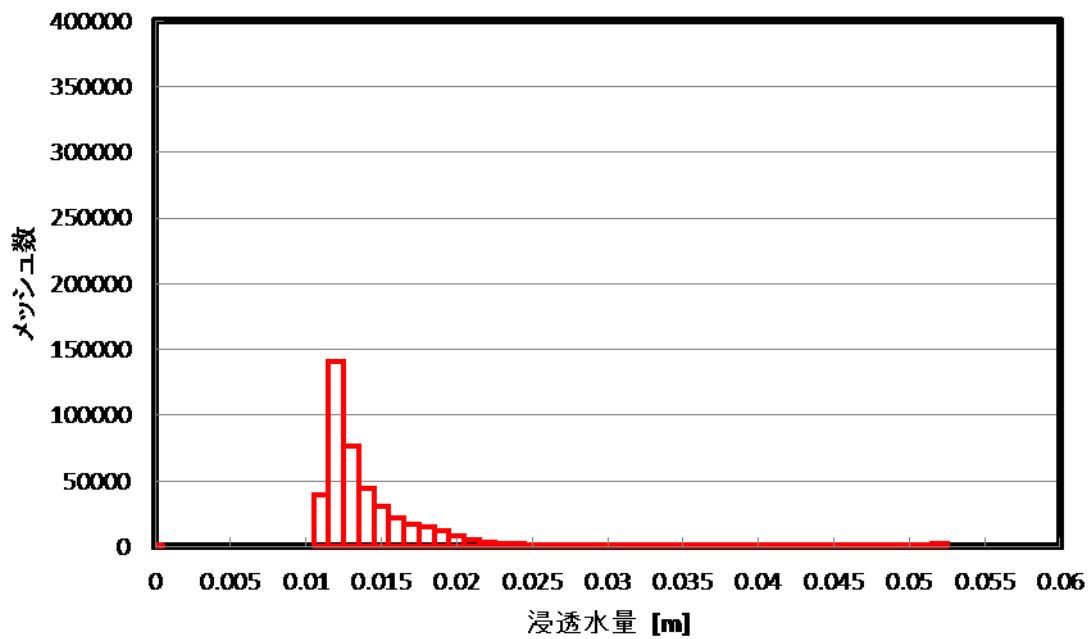


Figure A-396 植林後 森林 浸透水量 2-2-3 PR 最適値

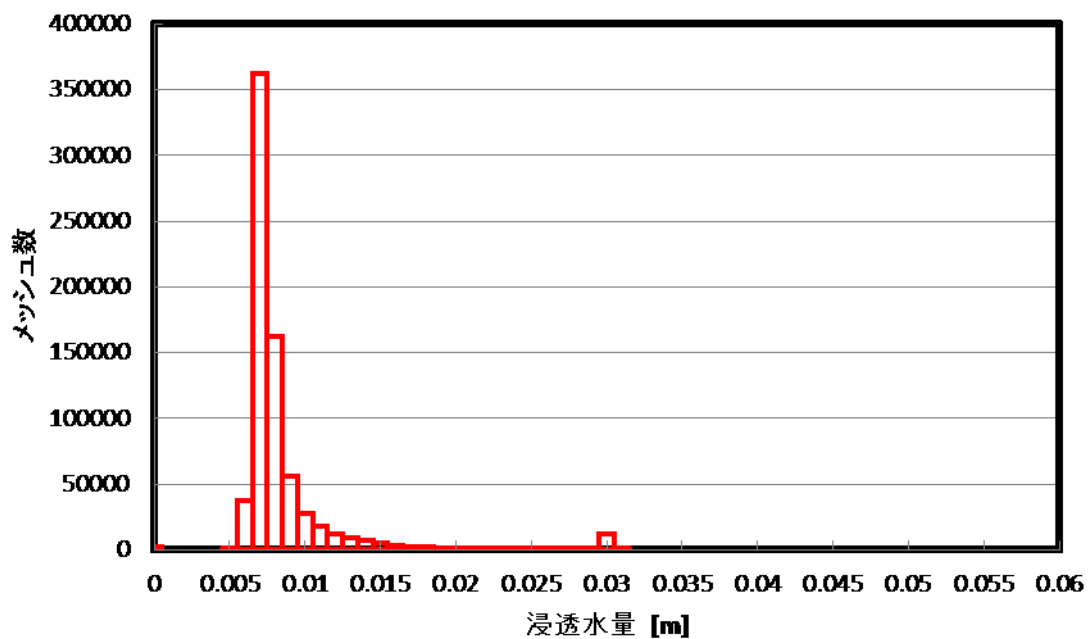


Figure A-397 植林前 裸地 浸透水量 3-1-1 PR 最適値

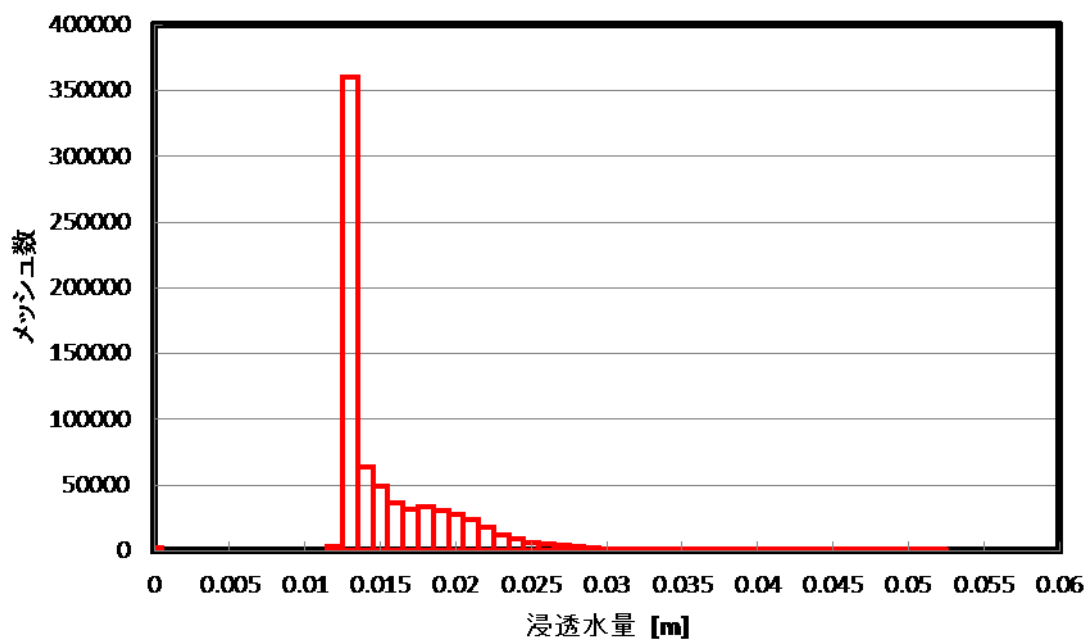


Figure A-398 植林後 裸地 浸透水量 3-1-1 PR 最適値

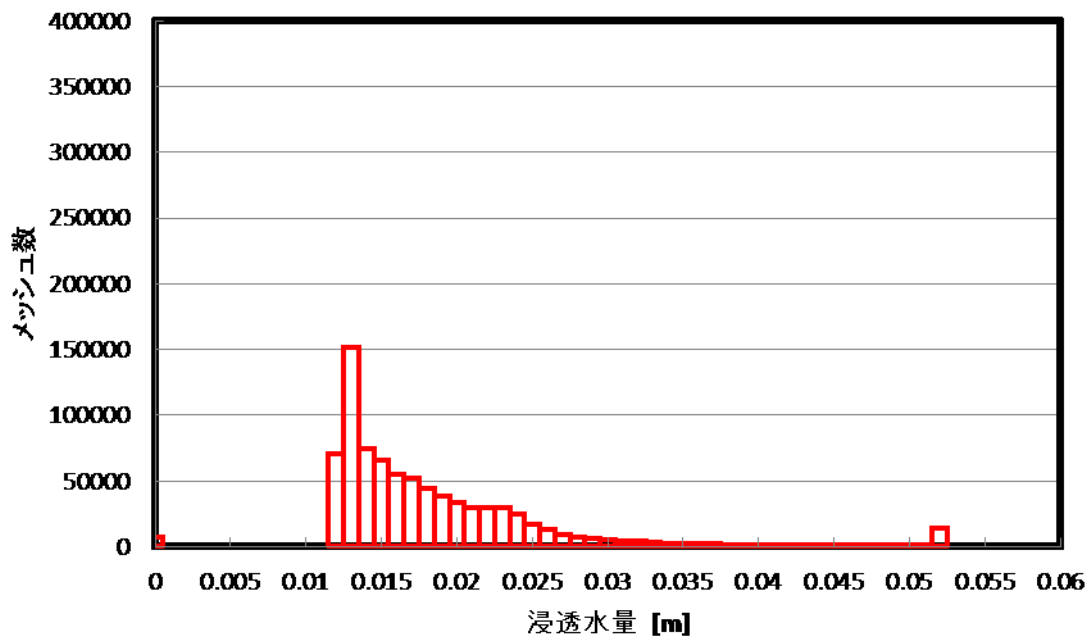


Figure A-399 植林前 草地 浸透水量 3-1-1 PR 最適値

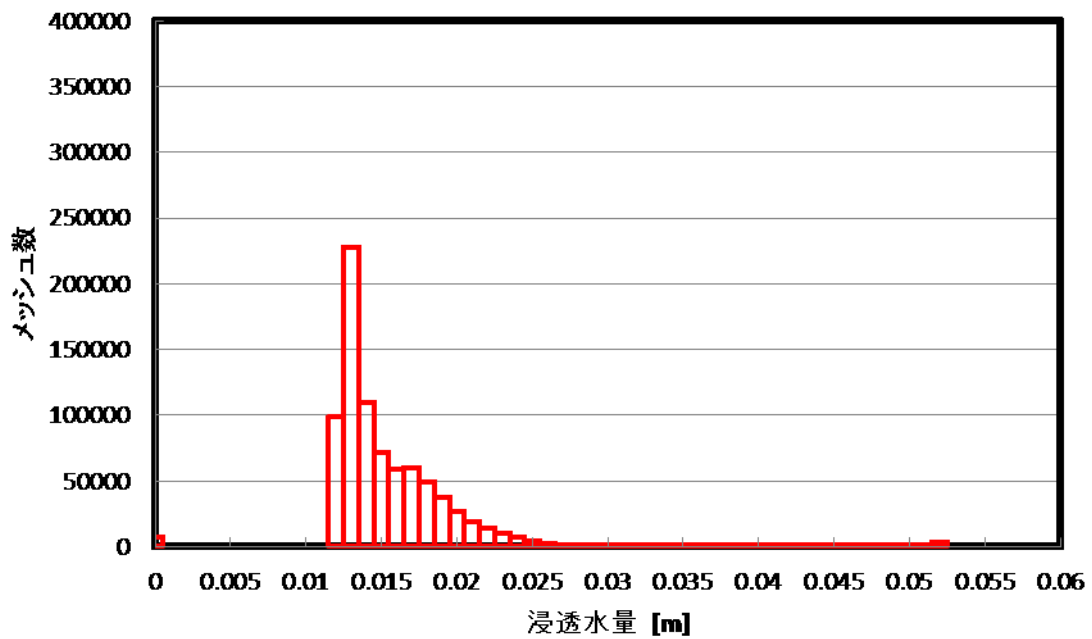


Figure A-400 植林後 草地 浸透水量 3-1-1 PR 最適値

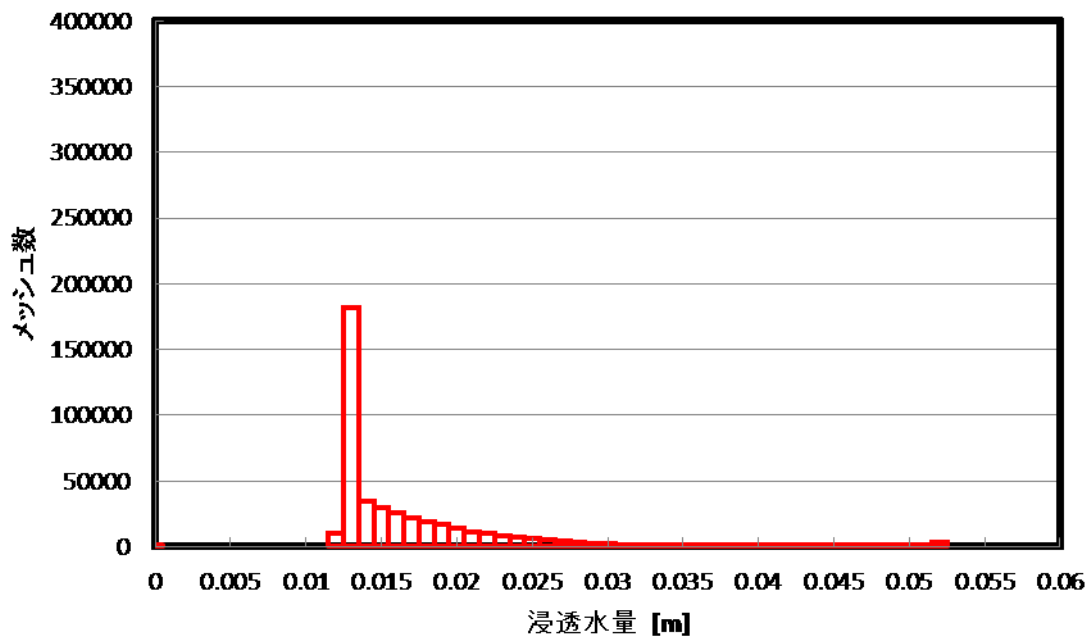


Figure A-401 植林前 森林 浸透水量 3-1-1 PR 最適値

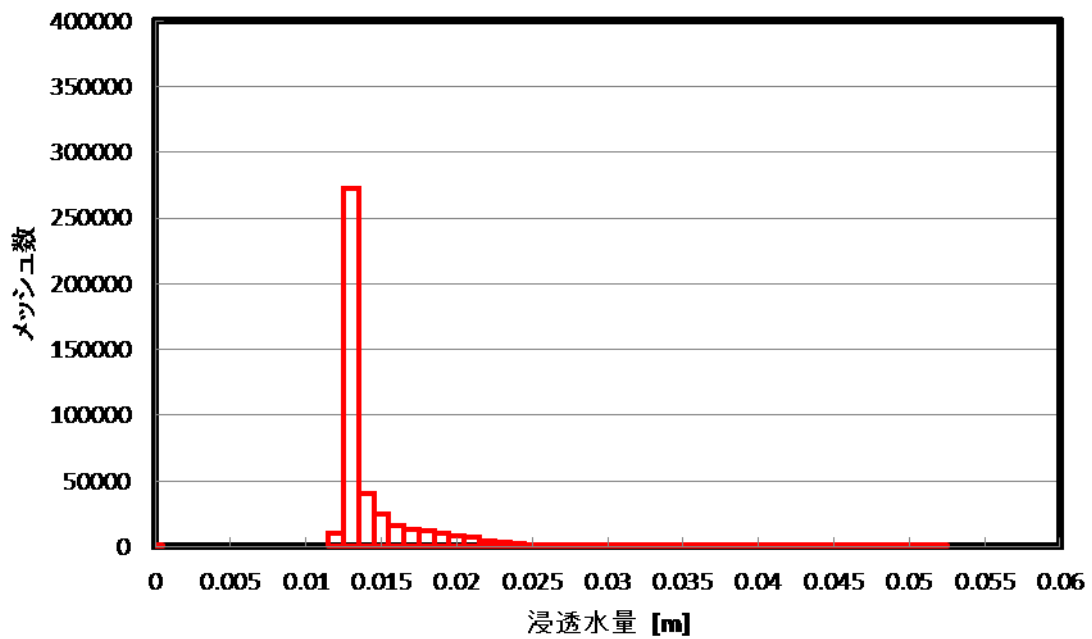


Figure A-402 植林後 森林 浸透水量 3-1-1 PR 最適値

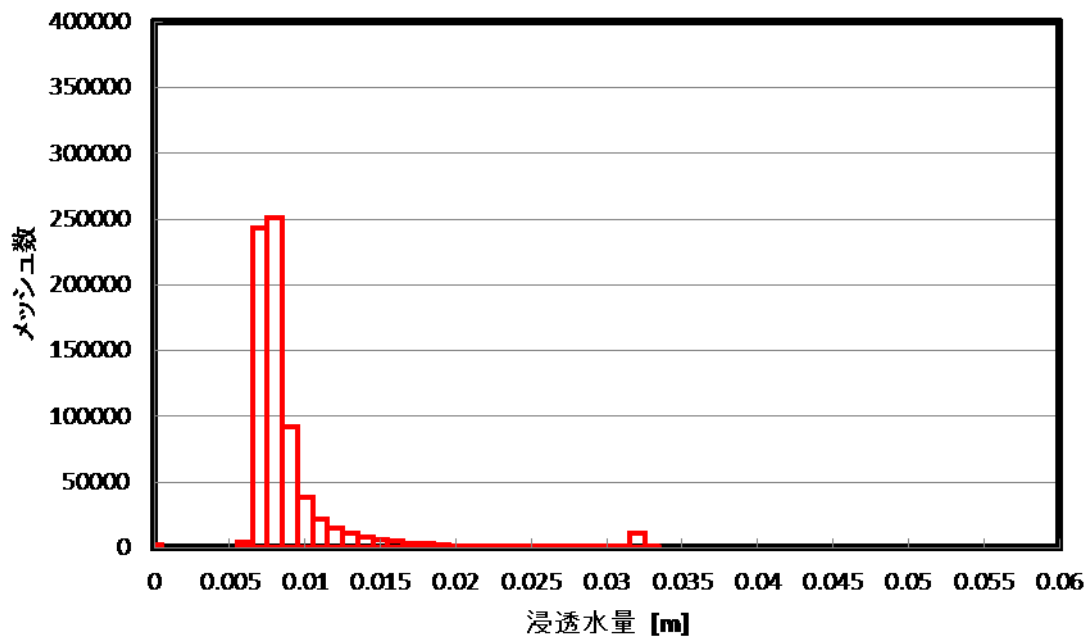


Figure A-403 植林前 裸地 浸透水量 3-1-2 PR 最適値

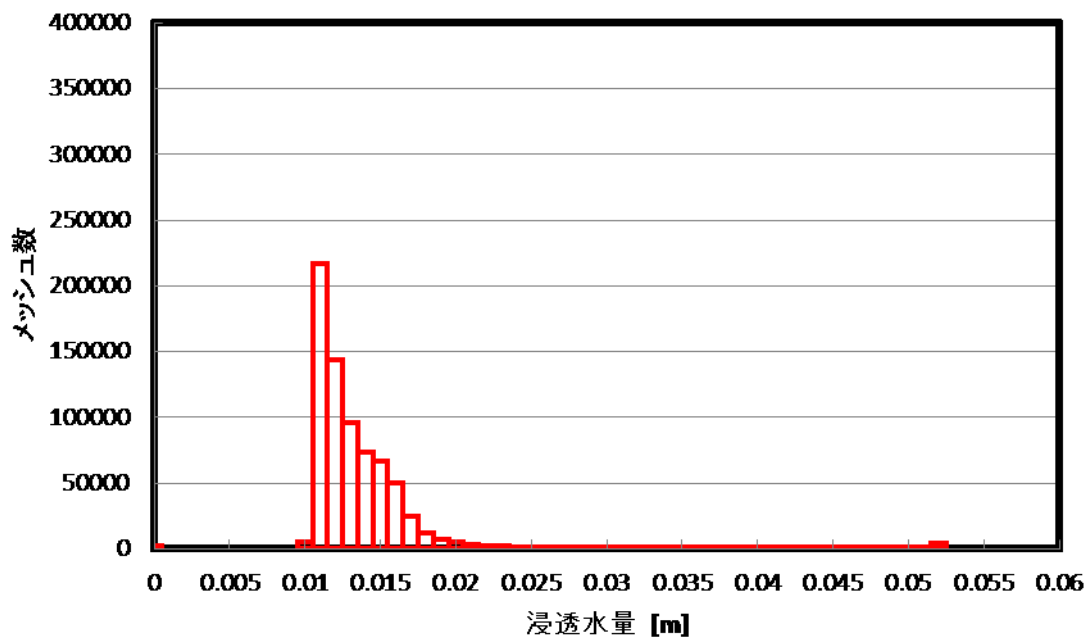


Figure A-404 植林後 裸地 浸透水量 3-1-2 PR 最適値

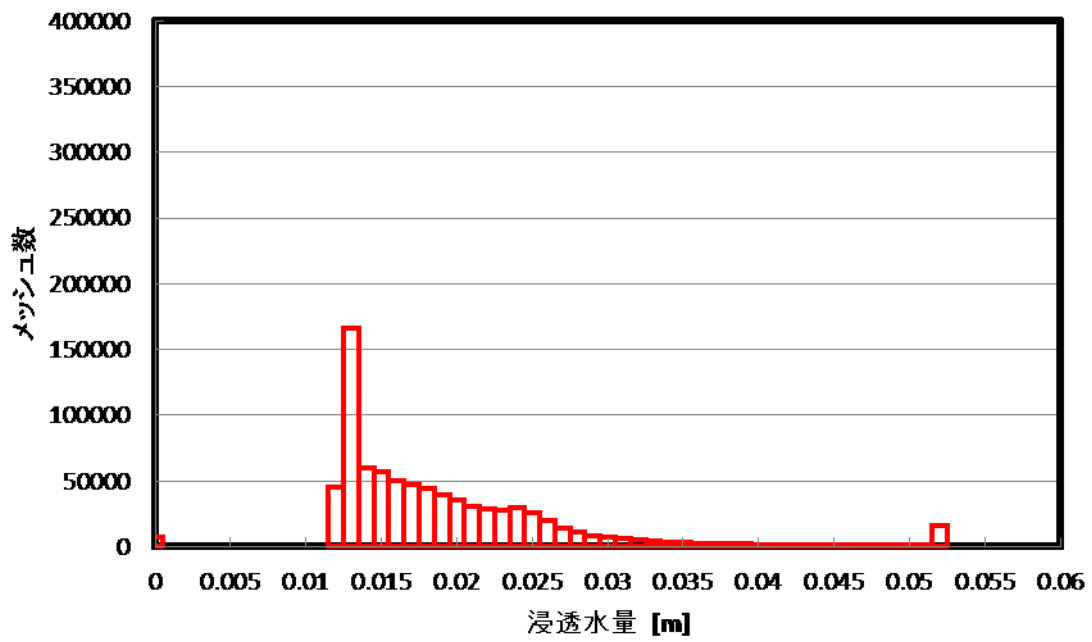


Figure A-405 植林前 草地 浸透水量 3-1-2 PR 最適値

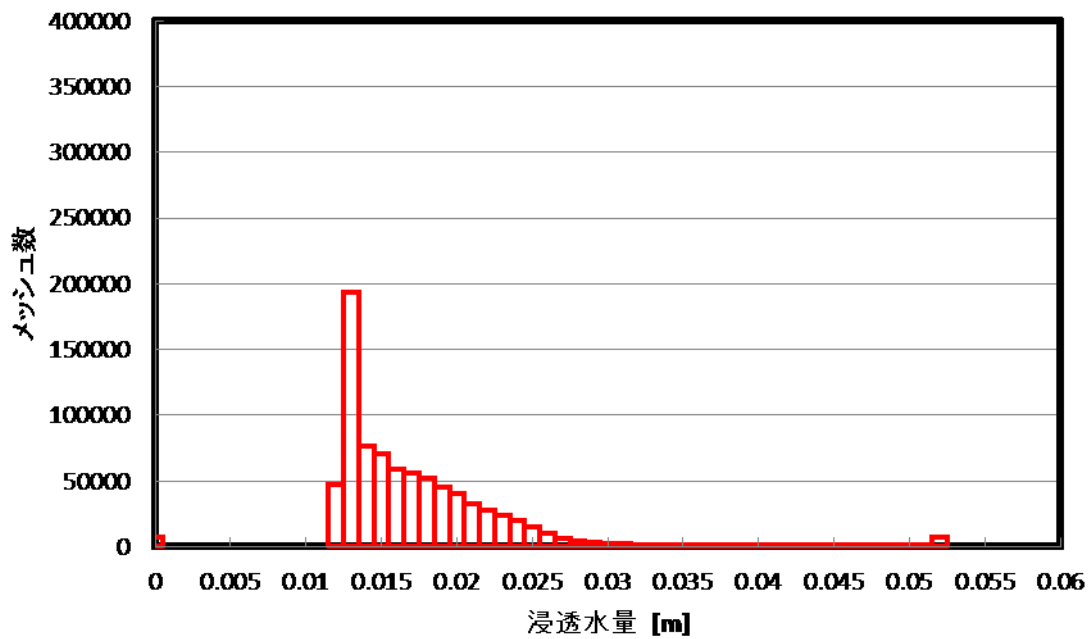


Figure A-406 植林後 草地 浸透水量 3-1-2 PR 最適値

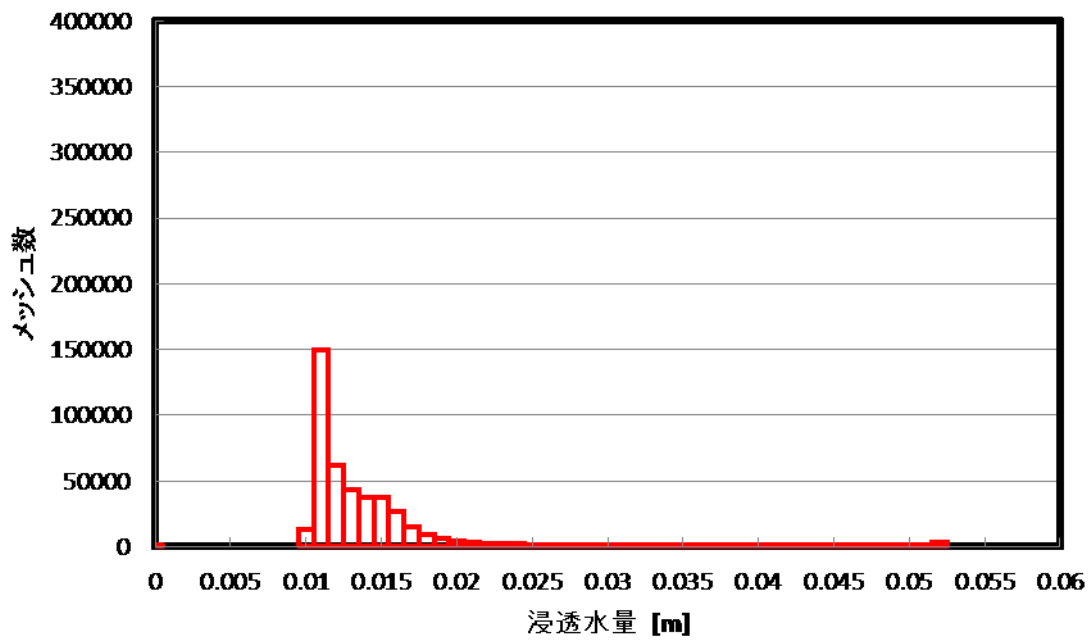


Figure A-407 植林前 森林 浸透水量 3-1-2 PR 最適値

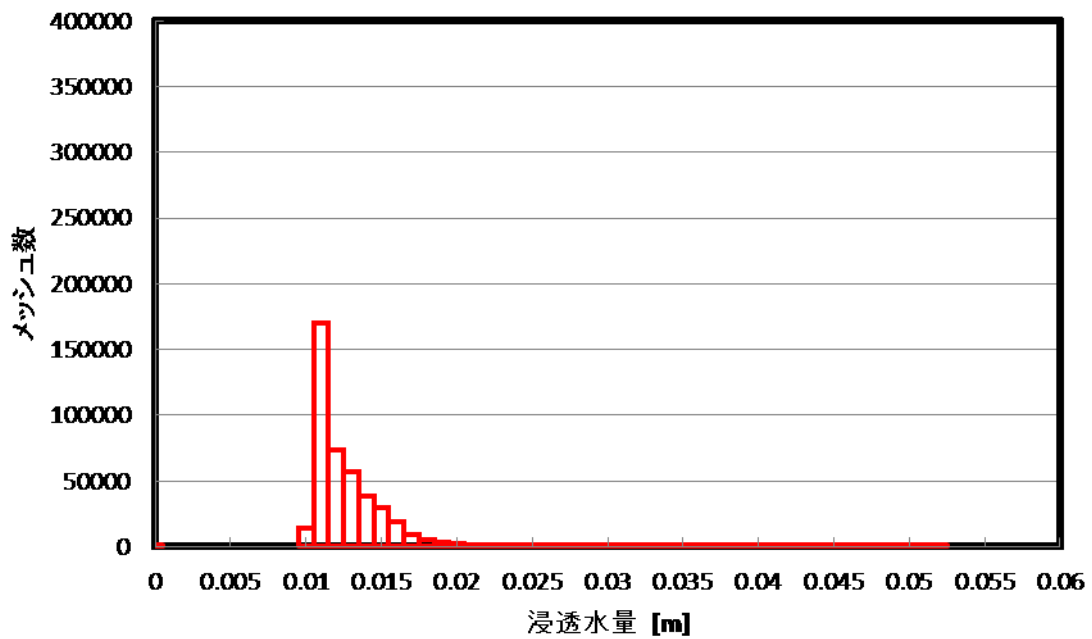


Figure A-408 植林後 森林 浸透水量 3-1-2 PR 最適値

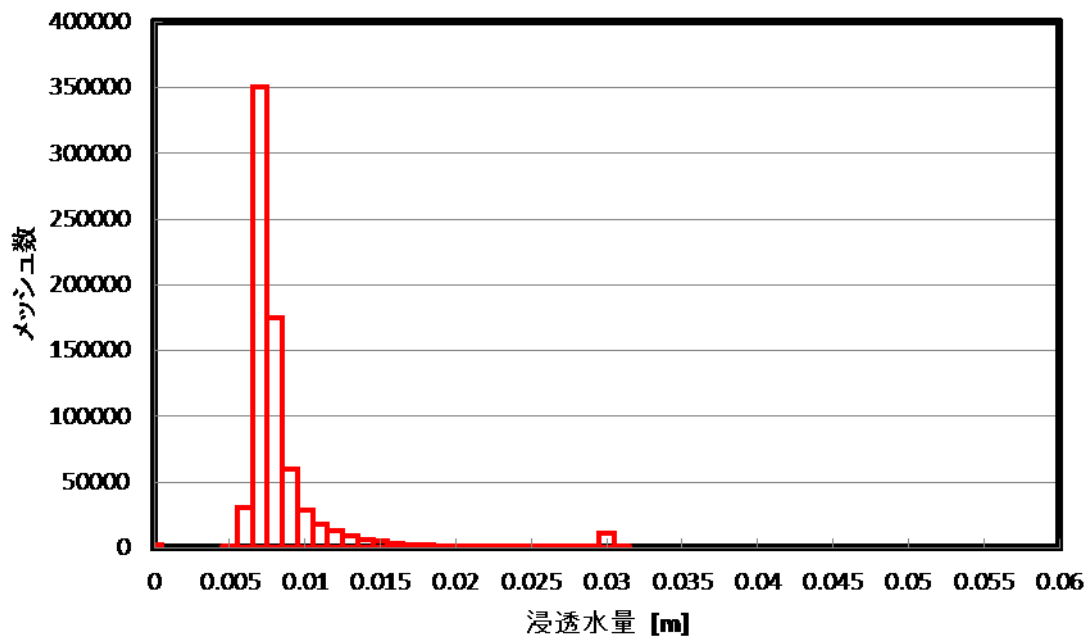


Figure A-409 植林前 裸地 浸透水量 3-1-3 PR 最適値

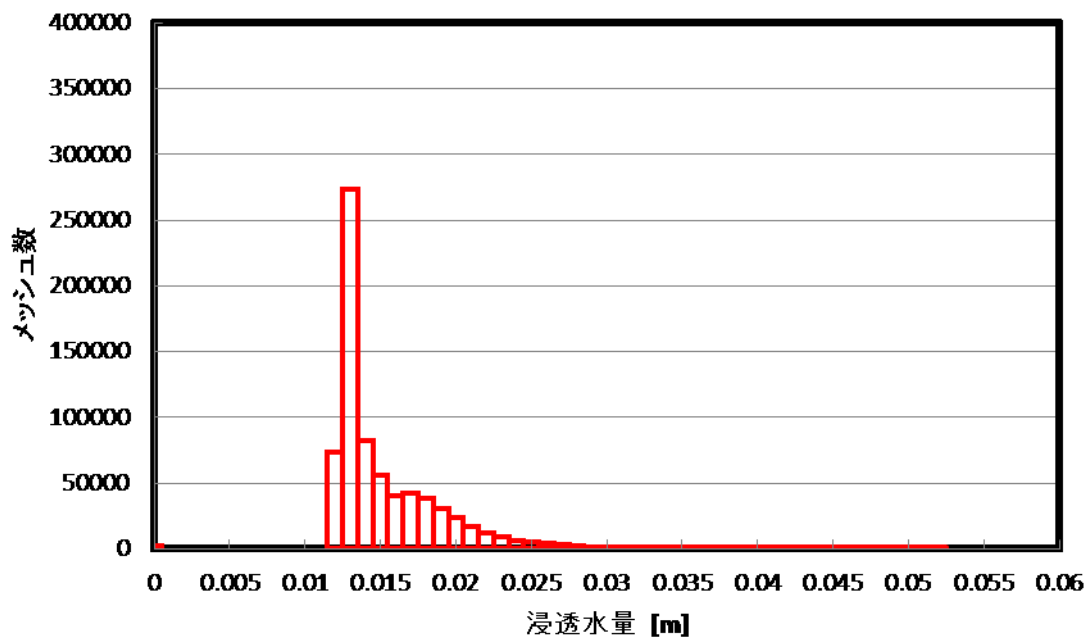


Figure A-410 植林後 裸地 浸透水量 3-1-3 PR 最適値

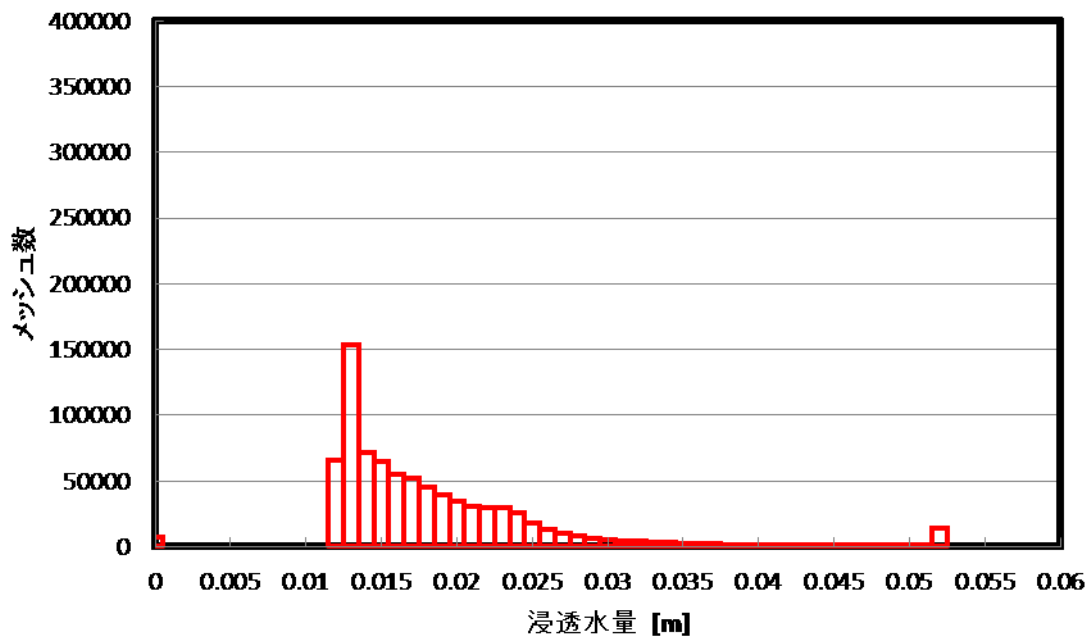


Figure A-411 植林前 草地 浸透水量 3-1-3 PR 最適値

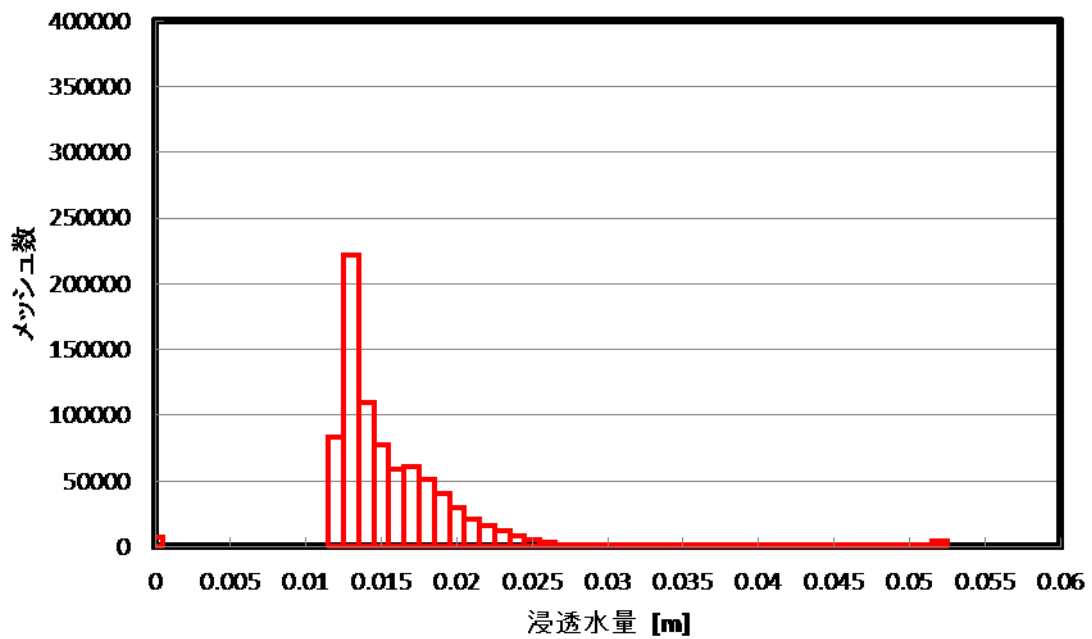


Figure A-412 植林後 草地 浸透水量 3-1-3 PR 最適値

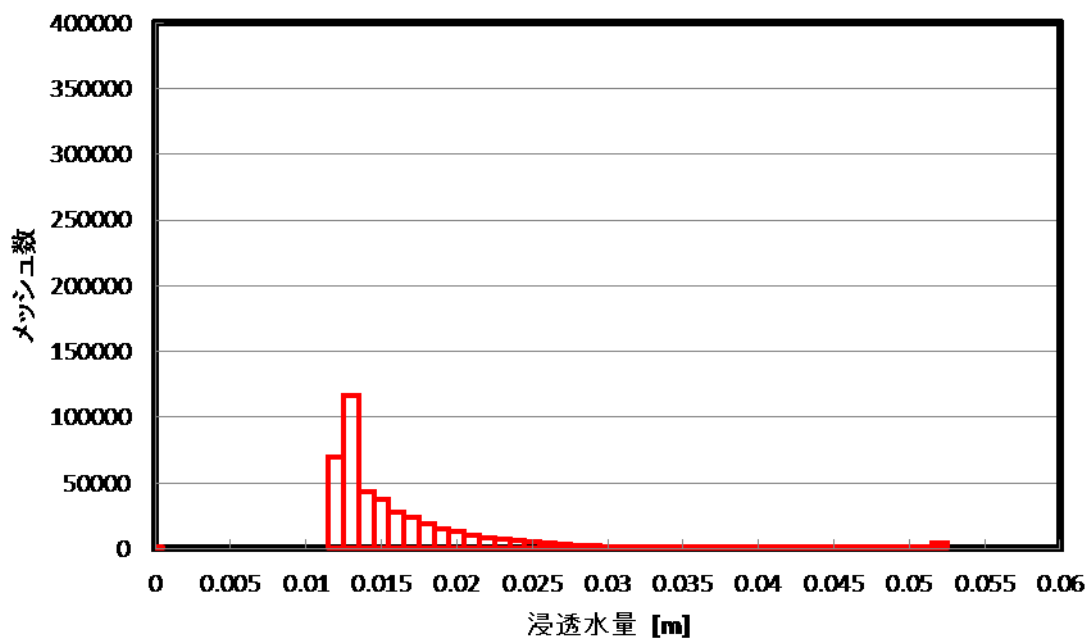


Figure A-413 植林前 森林 浸透水量 3-1-3 PR 最適値

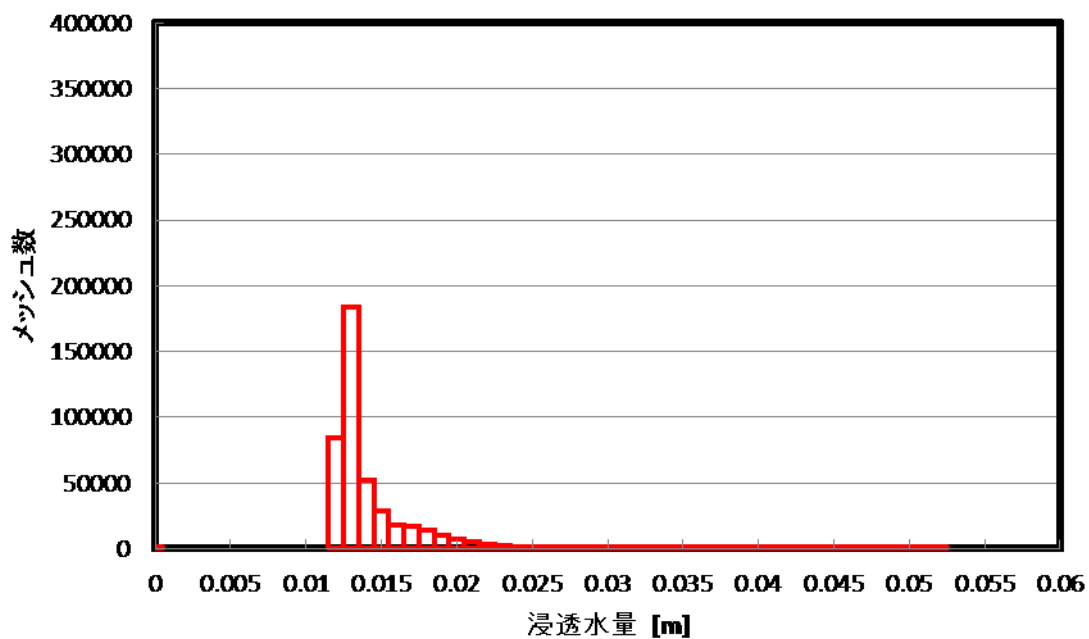


Figure A-414 植林後 森林 浸透水量 3-1-3 PR 最適値

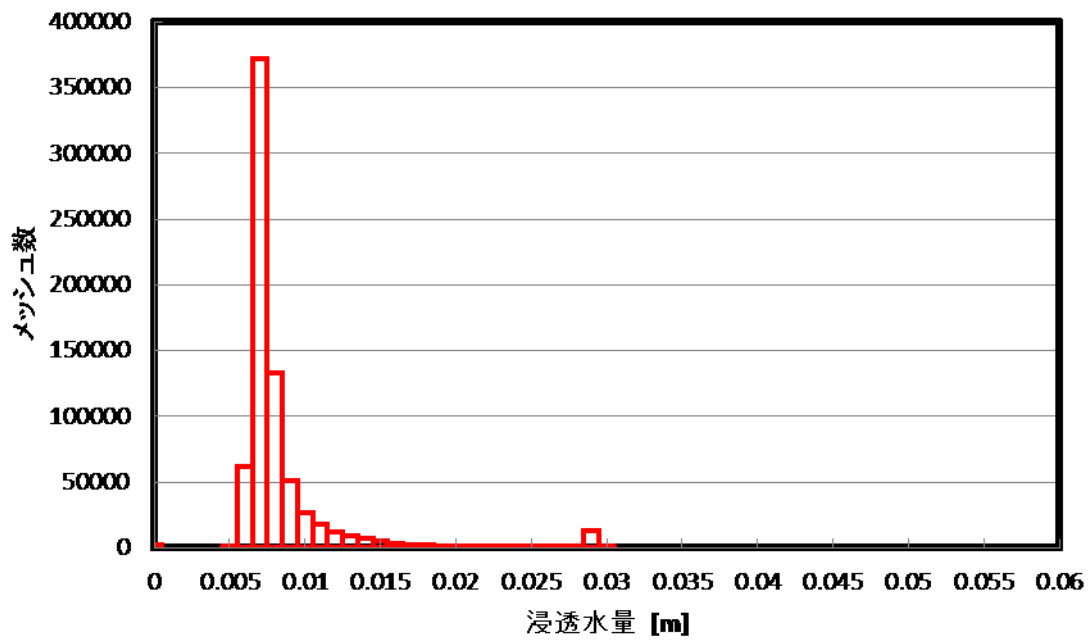


Figure A-415 植林前 裸地 浸透水量 3-2-1 PR 最適値

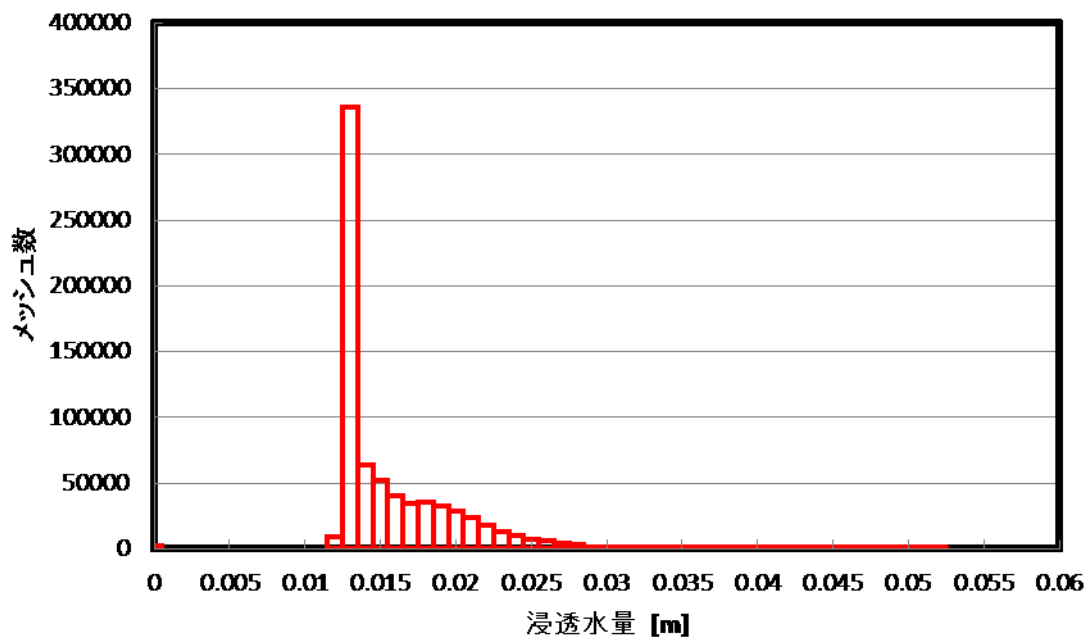


Figure A-416 植林後 裸地 浸透水量 3-2-1 PR 最適値

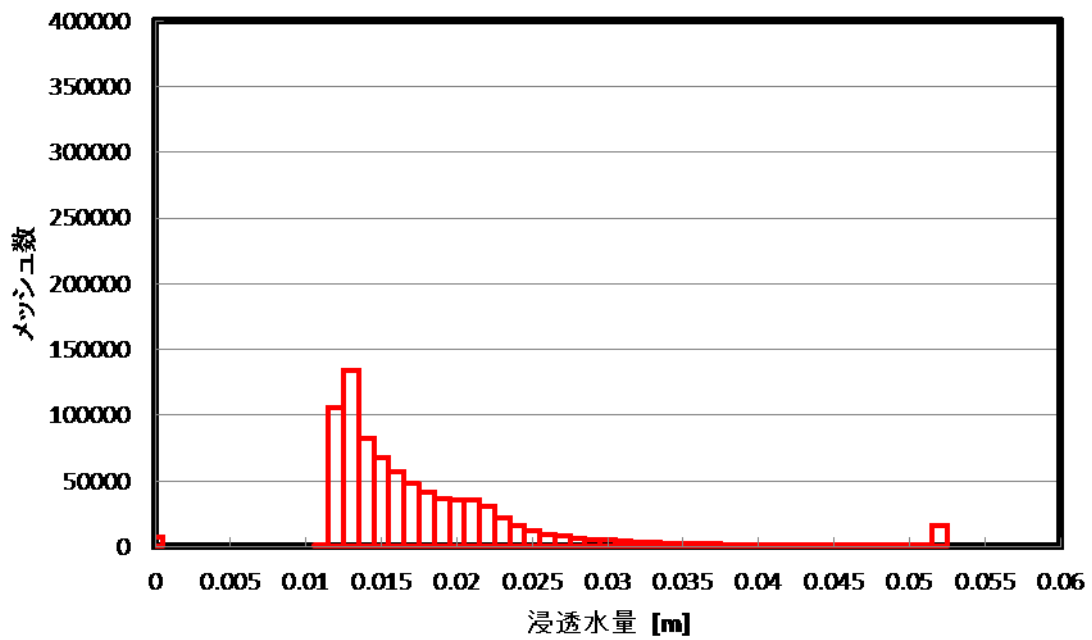


Figure A-417 植林前 草地 浸透水量 3-2-1 PR 最適値

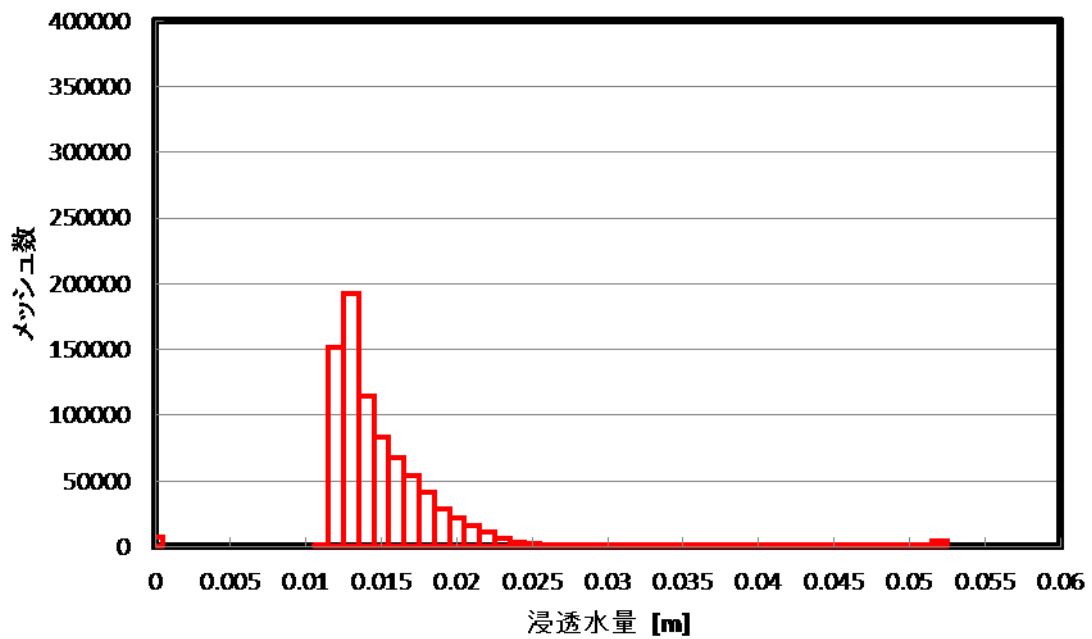


Figure A-418 植林後 草地 浸透水量 3-2-1 PR 最適値

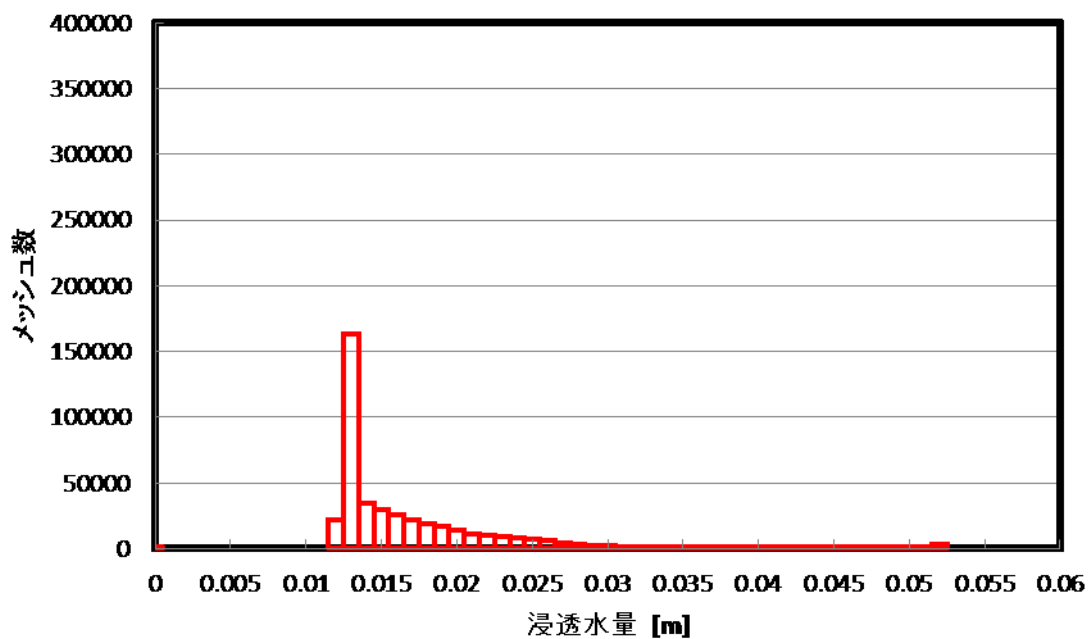


Figure A-419 植林前 森林 浸透水量 3-2-1 PR 最適値

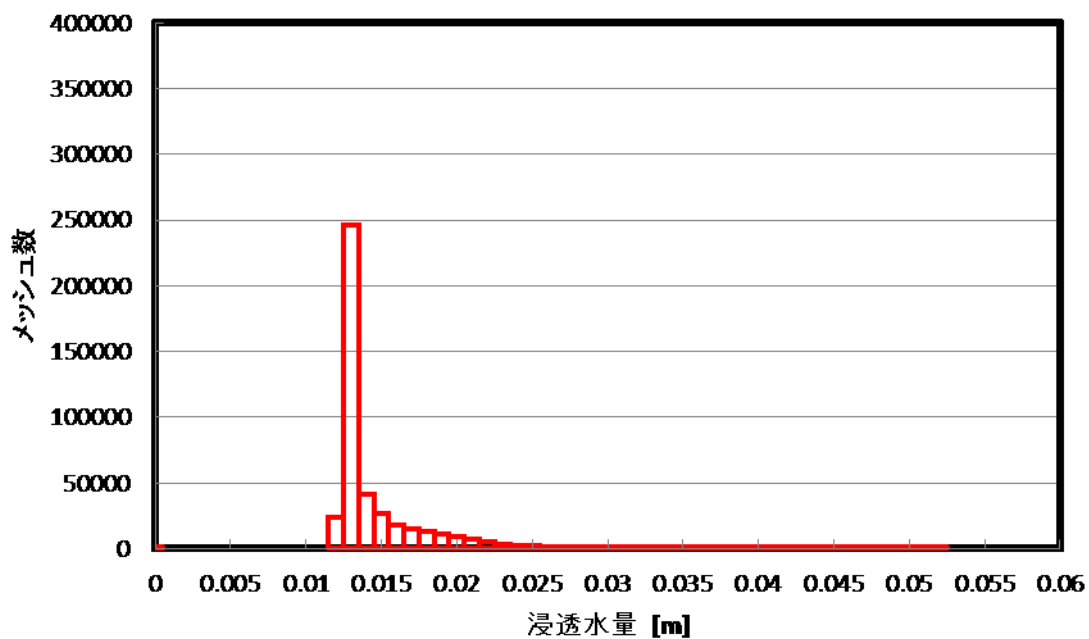


Figure A-420 植林後 森林 浸透水量 3-2-1 PR 最適値

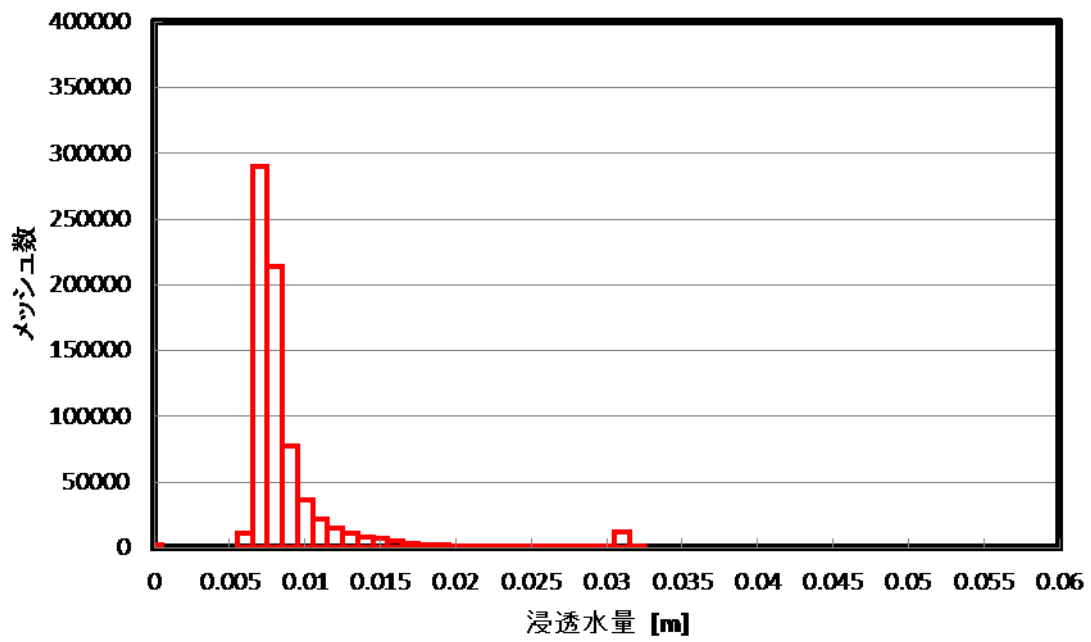


Figure A-421 植林前 裸地 浸透水量 3-2-2 PR 最適値

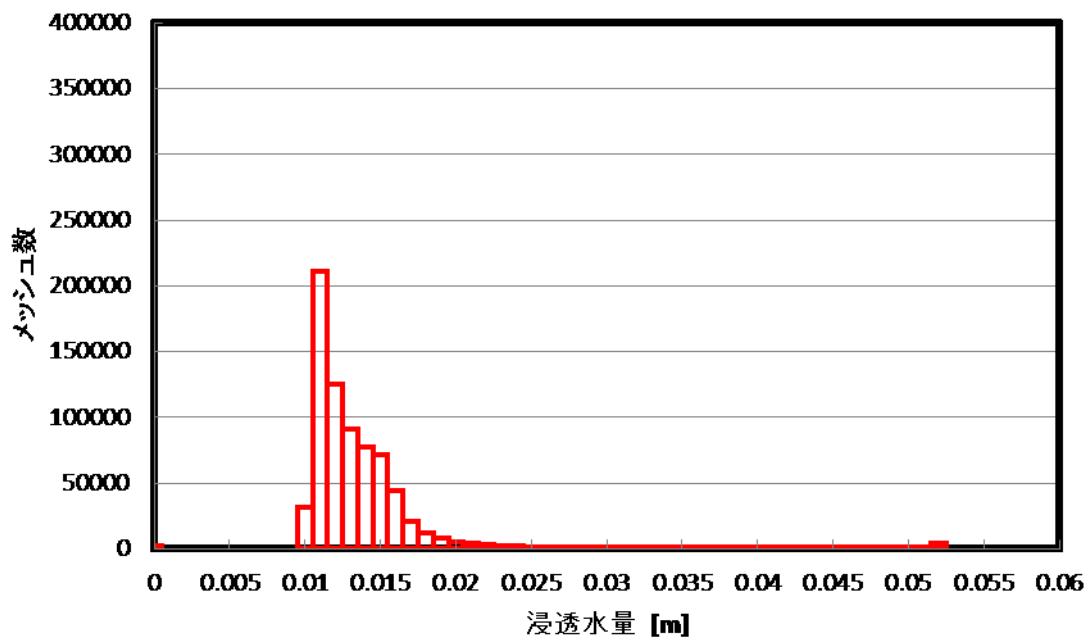


Figure A-422 植林後 裸地 浸透水量 3-2-2 PR 最適値

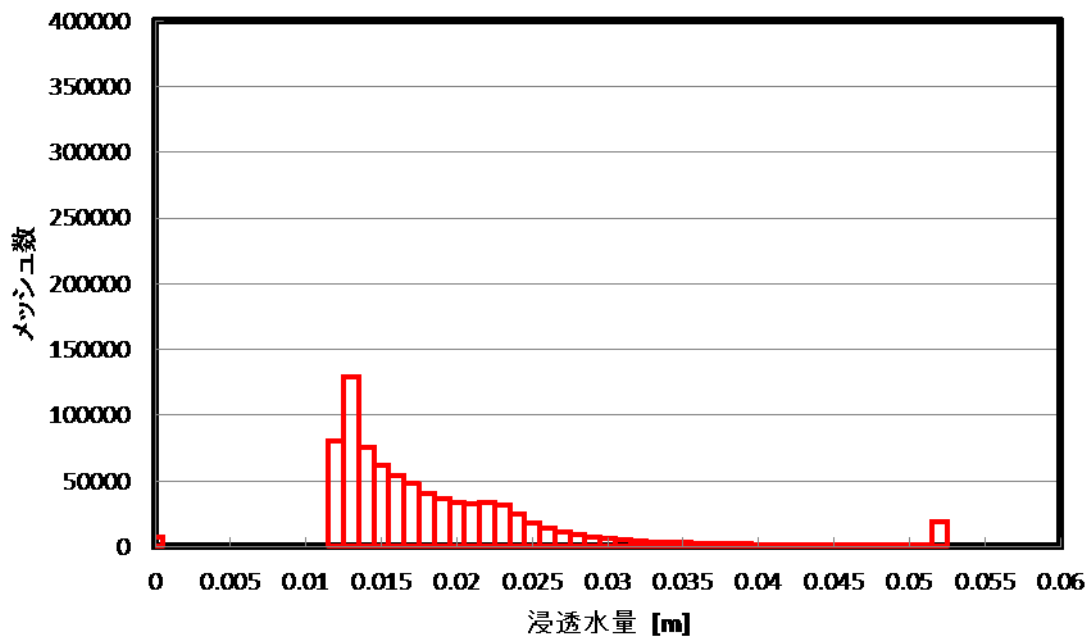


Figure A-423 植林前 草地 浸透水量 3-2-2 PR 最適値

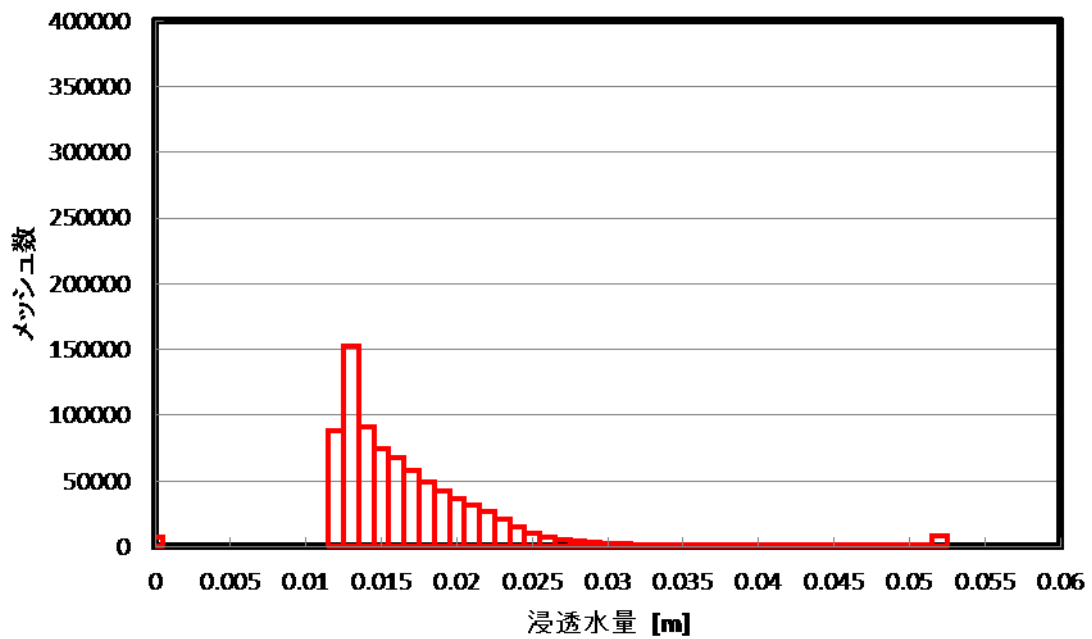


Figure A-424 植林後 草地 浸透水量 3-2-2 PR 最適値

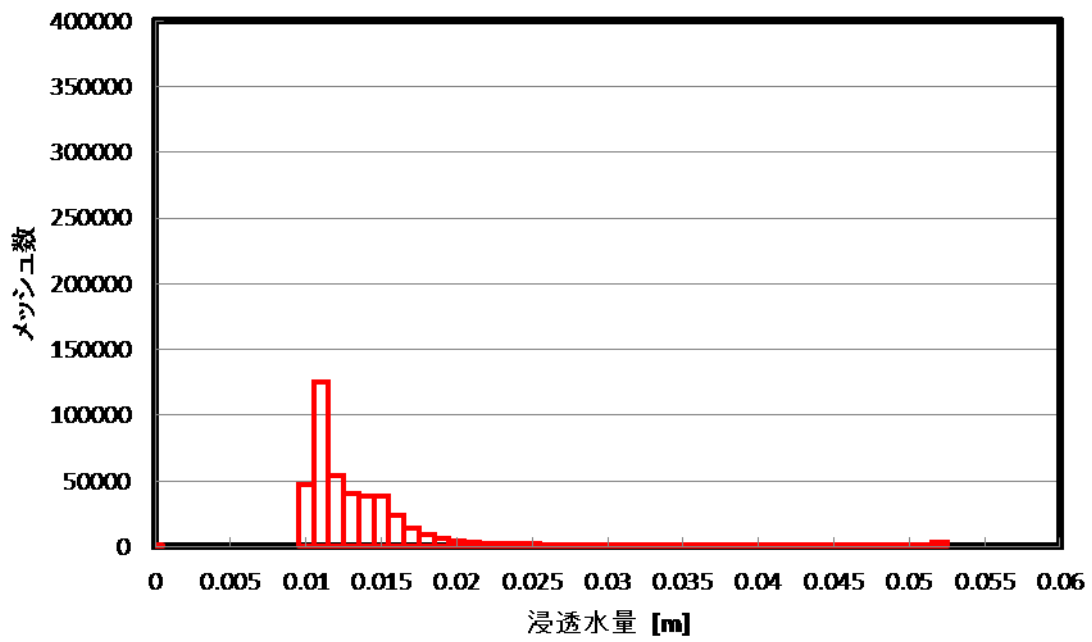


Figure A-425 植林前 森林 浸透水量 3-2-2 PR 最適値

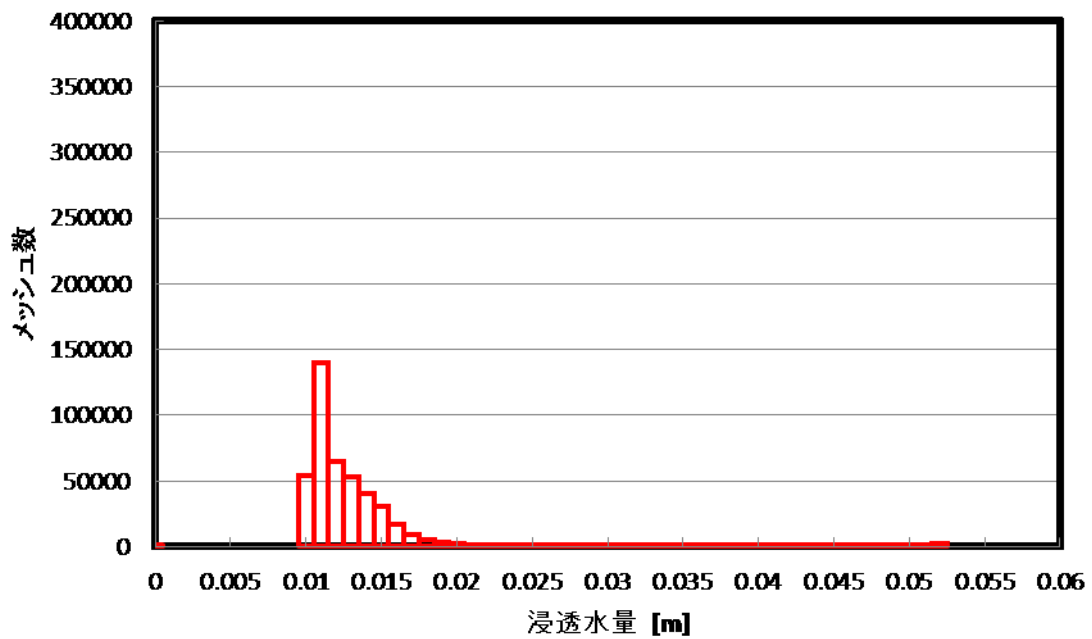


Figure A-426 植林後 森林 浸透水量 3-2-2 PR 最適値

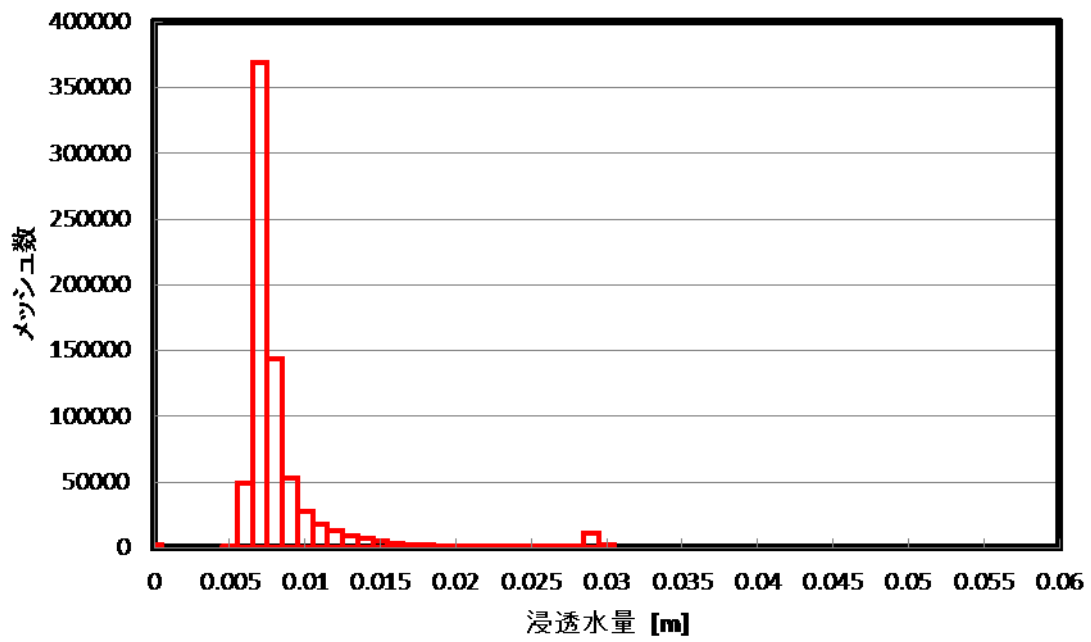


Figure A-427 植林前 裸地 浸透水量 3-2-3 PR 最適値

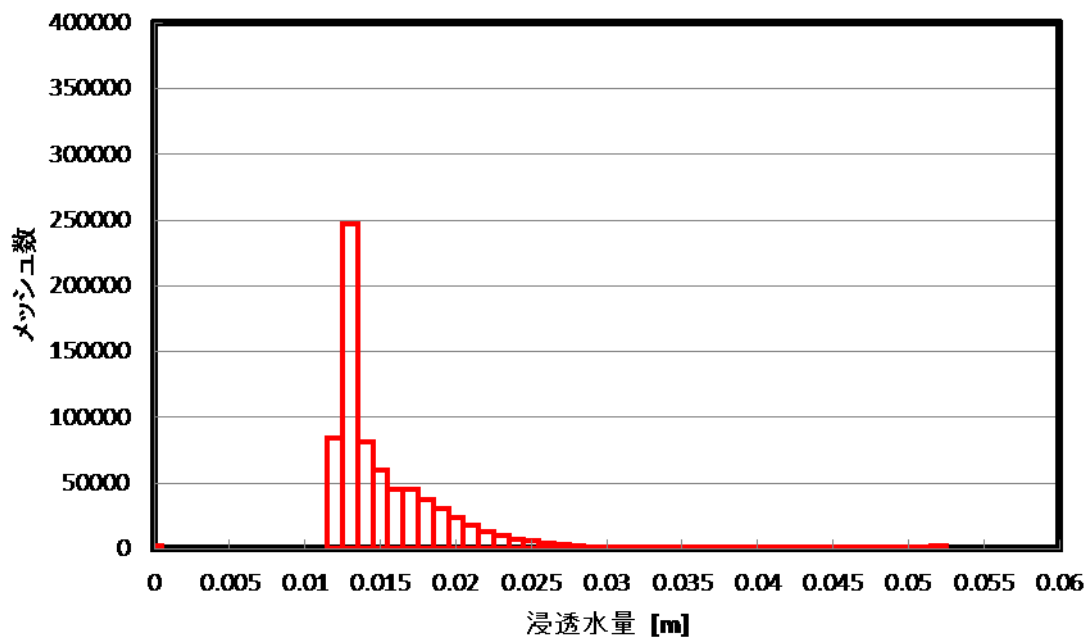


Figure A-428 植林後 裸地 浸透水量 3-2-3 PR 最適値

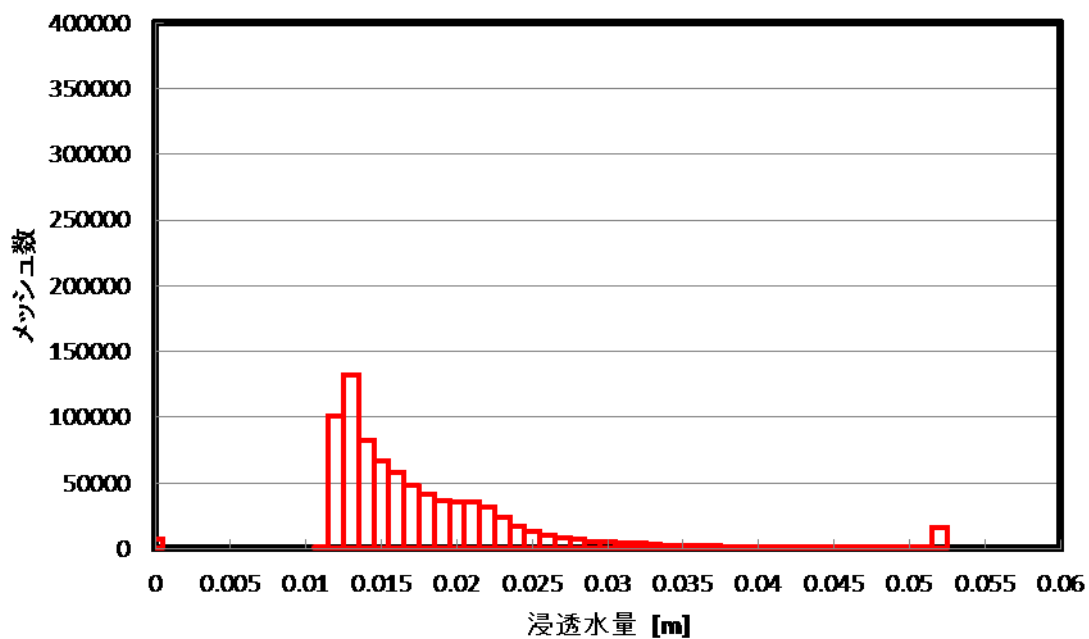


Figure A-429 植林前 草地 浸透水量 3-2-3 PR 最適値

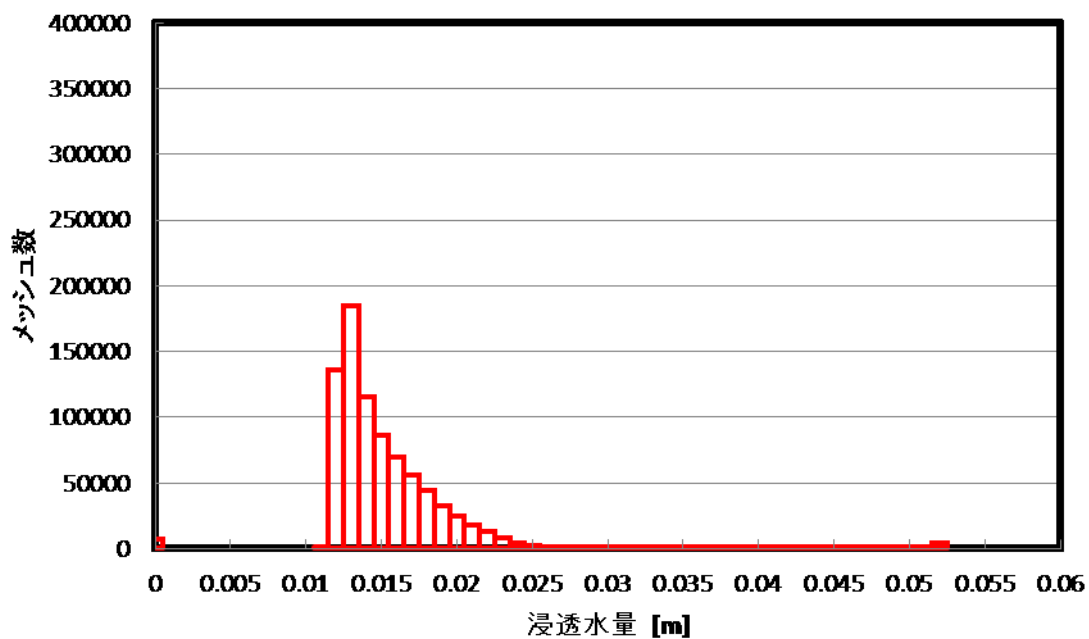


Figure A-430 植林後 草地 浸透水量 3-2-3 PR 最適値

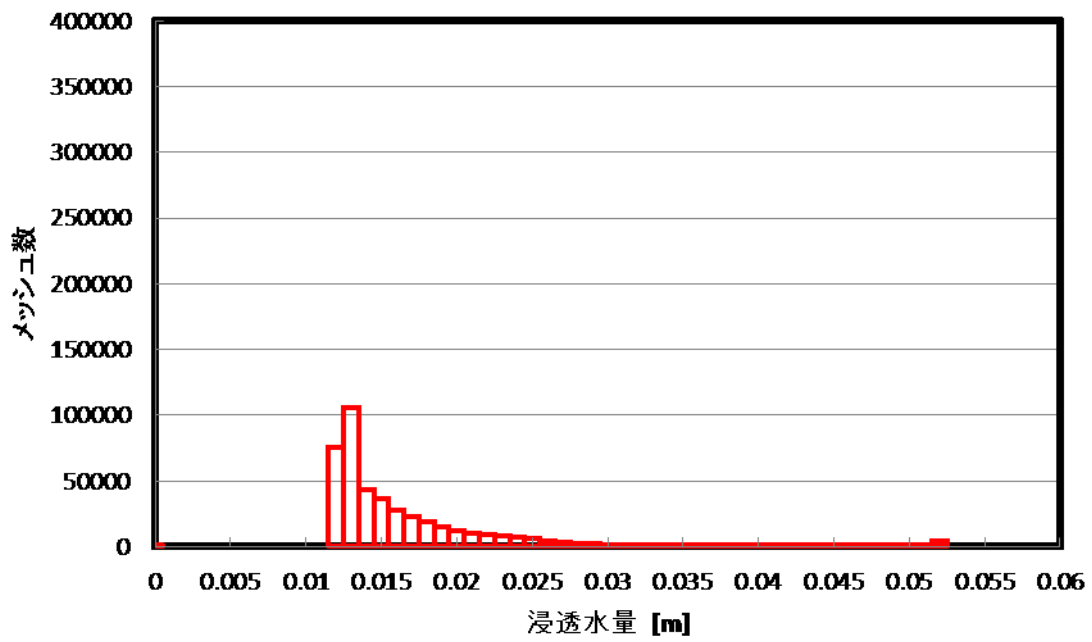


Figure A-431 植林前 森林 浸透水量 3-2-3 PR 最適値

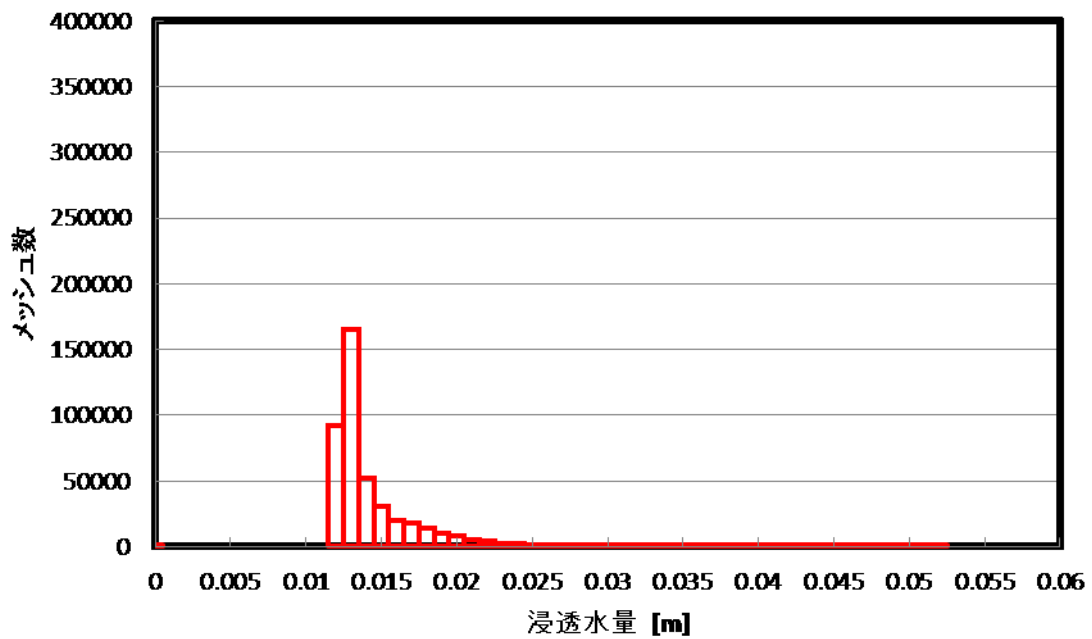


Figure A-432 植林後 森林 浸透水量 3-2-3 PR 最適値

補遺 プログラムリスト

```

!*****
module gcom
!*****
!*** . . . 入力データ
!***** 標高データ・メッシュの数 *****
!M . . . x 方向(ALTIXkm)をM個に分割 N . . . y 方向(ALTIIYkm)をN個に分割 (後に同じ数値を代入する箇所がある)
PARAMETER (M=1471,N=1727) !広域 横 1471mesh 縦 1727mesh 30m mesh
!!!! PARAMETER (M=600,N=480) !10mmesh JIMS WATERSHED(6 x 4.8 km) made by Tanaka and Tabuchi
!!!! PARAMETER (M=200,N=160) !30mmesh

REAL MESH_SIZE,MESH_AREA !MESH_SIZE(meshの大きさ),MESHAREA(meshの面積 mxm)
!! REAL ALTIX,ALTIIY !ALTIX=マップ全長(東西)X [km] ALTIIY=マップ全幅(南北)Y [km]
! --- 経時変化で降雨データを入力用パラメータ ---
! PARAMETER (NR=65)
PARAMETER (NR=700) !計算時間 10 時間 1 分間降雨入力の時の降雨データ入力用
!!!! PARAMETER (NR=72)

!RN=全降雨量計算用パラメータ(),RT=Rの数表示()パルス入力時の降雨タイミング,RD=経時変化でRAINDATA入力用(hour)
INTEGER RN,RD,RT,TOTAL !TOTAL=降雨が降る全メッシュ数
INTEGER :: FILL,VTK,JP
! ***** 流域設定 *****
INTEGER JPRMi,JPRMo,JPRNi,JPRNo !JPR=Jims 範囲を設定する by Tabuchi
REAL ALTTITUDE(M,N) !ALTTITUDE 標高データ用
REAL WAEL(M,N) !水除去 water elimination WAEL=1 水除去をおこなうメッシュ(最端メッシュから2メッシュ目)Tabuchi
! ***** 降雨量データ *****
REAL RAINDATA(NR),RAINTIME(NR),SUMRAINDATA,RAIN(M,N) !RAINDATA= 降雨データ ,RAINTIME= パルス入力の際の降雨時間,SUMRAINDATA=全降雨量,RAIN=降雨データ
INTEGER RIM !RIM=降雨データ入力方法(Rainfall Input Mean)
REAL MINALTI(M,N)!MINALTI=四方の最小標高
REAL RSUMRAIN(M,N),RSUMRAINE(M,N),RSUMRAINW(M,N),RSUMRAINN(M,N),RSUMRAINS(M,N)!RSUMRAIN=窪地貯留量
REAL NMAN(M,N) !NMAN=粗度係数(n in manning eq.)
! REAL ADRAIN(M,N)!ADRAIN=積算降雨量 add rainfall
! REAL TOTALRAINFALL!TOTALRAINFALL=全降水量(メッシュ数×計算面積 mxm x 降雨量 mm→m)(2012.8以降廃止必要ときは適宜手計算で求める)
! ***** 土壌厚みデータ *****
REAL HARDPAN(M,N)!HARDPAN=土層厚み
! ***** 標高関連データ *****
REAL ALRA(M,N)!ALRA=計算上標高+降雨データ Altitude+Rain
! ***** 浸透・蒸発共有データ (含水率など) *****
REAL SATU(M,N),SOILWC(M,N),ISOILWC(M,N)!SATU=土壌飽和 saturated,SOILWC=土壌含水率,ISOILWC=初期土壌含水率(計算開始時土壌含水率)
REAL ASOILWC !ASOILWC =出力領域全域での土壌含水率

```

```

INTEGER WCNU
! ***** サイクル計算、メイン OUTPUT データ *****
REAL SURFACE_WATER(M,N) !表層水
REAL SUMPENT(M,N) !SUMPENT=全浸透量 sum penetration
! ***** 浸透計算関連データ *****
REAL PENETRATION(M,N),PENT(M,N)!PENETRATION=推定された浸透速度,PENT=浸透式 penetration
INTEGER PENEVER !PENEVER=使用する浸透式の種類
REAL SOILPROPERTY(M,N) !土壌性状分類用(2013.10.31 追加)
! ***** 蒸発計算関連データ *****
!*土壌蒸発関連
REAL EVAPS(M,N),EN(M,N) !EVAPS=土壌からの蒸発 evaporation from soil,EN=規格化蒸発速度(意味よ、蒸発式作成データで確認する事)
!*液面蒸発関連
REAL EVAPL(M,N),EVAPORATIONLIQUID !EVAPL=液面蒸発 evaporation from liquid,EVAPORATIONLIQUID=液面蒸発速度(実測データより)
REAL SUMEVAP(M,N) !SUMEVAP=全蒸発量 sum evaporation
REAL CMBTRUNOFF,CMBTSUMPENT,CMBTSUMEVAP,TLOSTSUMRAIN !物質収支 Confirmation mass balance(CMB)のためのパラメータ
Tabuchi
! ***** 流出計算関連データ *****
INTEGER K,NCYCLE !K=繰り返し回数 経過時間,NCYCLE
REAL TIME!TIME=時間単位
REAL FLOW(M,N),INFLOW(M,N) !FLOW=流出量,INFL=流入量 Inflow
REAL SUMFLOW(M,N),SUMINFLOW(M,N) !SUMFLOW=合計流出量,SUMINFLOW=合計流入量
REAL LEVELE(M,N),LEVELW(M,N),LEVELN(M,N),LEVELS(M,N),TLEVEL(M,N)!LEVEL0,TLEVEL=各方向の水位差,その総計
REAL FLOWNO(M,N) !FLOWNO=流出方向数
! FR0=各水の流下方向,RMAN=水深・径深[m](r in manning eq.),IMAN=水面勾配[m/m](i in manning eq.),V=VMAN=平均流速[m/s],Q=QMAN=流量[m3/s]
REAL FRE(M,N),RMANE(M,N),IMANE(M,N),VMANE(M,N),QMANE(M,N)
REAL FRW(M,N),RMANW(M,N),IMANW(M,N),VMANW(M,N),QMANW(M,N)
REAL FRN(M,N),RMANN(M,N),IMANN(M,N),VMANN(M,N),QMANN(M,N)
REAL FRS(M,N),RMANS(M,N),IMANS(M,N),VMANS(M,N),QMANS(M,N)
! ----- 流出量補正用パラメータ -----
! REAL FR(M,N) !FR=流下するかしないかの判断
REAL DALRAE(M,N),DALRAW(M,N),DALRAN(M,N),DALRAS(M,N),DALRA(M,N) !DALRA0,DALRA=各方向の表層水の最大流出可能水位,流出メッシュ
の最大流出可能水位
REAL FACTOR(M,N) !FACTOR=流出量最終補正パラメータ
! ----- 八方流出計算用 -----(八方流出計算を行なうまで封印)
!! REAL FLOWOCT(M,N),INFLOCT(M,N)
!! REAL FLOWNE(M,N),FLOWNW(M,N),FLOWSE(M,N),FLOWSW(M,N)
!! REAL IMANNE(M,N),IMANNW(M,N),IMANSE(M,N),IMANSW(M,N)
!! REAL VMANNE(M,N),VMANNW(M,N),VMANSE(M,N),VMANSW(M,N)
!! REAL QMANNE(M,N),QMANNW(M,N),QMANSE(M,N),QMANSW(M,N)
! ***** Jim's pool 内計算用 *****
PARAMETER (JPM=52,JPN=72)!JPM=X 方向の Pool のメッシュ数,JPN=Y 方向の Pool のメッシュ数,10m mesh で、X=51-102,Y=379-450
! REAL PB !PB=堰以下 Jim's pool メッシュ数

```



```

REAL ALTIDAM,DAMRAIN      !ALTIDAM=最低標高+DAMRAIN,DAMRAIN=標高平均前の堰流出水位(最低標高からの)
!
***** その他入力データ *****
INTEGER REPEAT           !繰り返し計算用パラメータ
REAL LEVEL               !LEVEL=初期水位
!
***** その他出力データ *****
CHARACTER filename*128   !ファイル名連番生成
REAL TOTAL_PENETRATION(M,N),TOTAL_EVAPORATION(M,N) !TOTAL_PENETRATION 各メッシュの全浸透量、TOTAL_EVAPORATION 各メ
ッシュの全蒸発量
!
***** CPU 時間出力用 *****
REAL CLOCKSTART,CLOCKFINISH
end module gcom
!
!***** module 除去部分
!.....
! End by fortran 90 gloval variables definition for visualization by H.tominaga
!.....
!*****
! Start for f77 program
Program main
!*****
!!!!      繰り返しの設定 (REPEAT=1-200 まで可能)
use gcom      !全体のコモン変数を使う by Tomy
!! use gcom1  !変換座標テーブルを使う by Tomy
!-----
!*** Pre-Processor ***
!-----
CALL cpu_time(CLOCKSTART)      !CPU 時間スタート

DO 10000 REPEAT=1,1 !1,n 繰り返し回数1 から n まで
!! call prepro      !初期準備を整える by Tomy
!----- 表面流出結果値をエクセルに書き込む (OPEN FILE) -----
! OPEN(n,...)がプログラム中に点在するが、OPEN 文を追加する際、開きっぱなしにしないこと。
! JIMS のみで使用 (runoffresult28.csv runoffresultPOINTFLOW.csv について 2012.5.16 より全部で利用に移動)
! 全部で利用
IF(REPEAT=1)THEN
OPEN(10,FILE='runoffresult.csv',STATUS='OLD')
OPEN(40,FILE='CONFIRMATION MASS BALANCE.csv',STATUS='OLD')
OPEN(390,FILE='SUMFLOW.txt',STATUS='OLD')
OPEN(450,FILE='SUMINFLOW.txt',STATUS='OLD')
OPEN(460,FILE='TOTAL_PENETRATION.txt',STATUS='OLD')
OPEN(470,FILE='TOTAL_EVAPORATION.txt',STATUS='OLD')
END IF

```

```

WRITE (filename, ("runoffresult28(", i3.3, ")").csv") REPEAT
OPEN (280, file=filename, status='replace')
!***** 出力間隔 *****
LONGPERIOD=10 !LONGPERIOD=0→1 時間毎に出力(TIME=60 なら 60,120··CYCLE で出力),LONGPERIOD=10→10 分間毎に出力
!!!!
!***** 集約効果 八方計算 年齢計算の有無 *****
!FILL=0:通常計算、1:窪地処理標高使用、2:窪地処理標高+貯留量補正追加
!PENEVER=1:既存推定式 ver1 (PR 補正の後に推定式作成)、2:新規推定式 ver2 (推定式を作成した後に PR 補正)

!RIM=降雨データ入力方法 1:1h 時系列データ、2:1min 時系列データ、3:1s ノズルデータ

FILL=0
PENEVER=2
VTK=0 !VTK=VTK 出力 可視化 on:1, off:0

RIM=2
MESH_SIZE=30 !MESH_SIZE=10m→10 30m→30
MESH_AREA=900 !MESH_AREA=10m→100 30m→900

JP=0 !JP=Jims Pool 計算(6x4.8 km)→2 広域→0 Jims Pool 計算(6x5km)→1
OUTPUT=0 ! OUTPUT=0: OUTPUT 省略 (一部), 1:全て OUTPUT
!-----
IF(REPEAT=1)THEN
IF(JP=1)WRITE(10,*)Jims Pool 計算 6 km x 5 km'
IF(JP=2)WRITE(10,*)Jims Pool 計算 6 km x 4.8 km'
IF(JP=0)WRITE(10,*)広域計算
END IF
!----- マップデータ・メッシュの数 ----- 可視化時コメントアウト解除
!ALTIX··マップ全体の長さ X(km),ALTIY··マップ全体の幅 Y(km)
! IF(JP=2)THEN !10,20,30,50,100mmesh(30mmesh は 6 x 5km だと書けないう)
! ALTIX=6
! ALTIY=4.8
! ELSE IF(JP=0)THEN
! ALTIX=44
! ALTIY=51
! ELSE IF(JP=1)THEN !10,20,50,100mmesh
! ALTIX=6
! ALTIY=5
! END IF
!***** 降雨データの時期 *****
!使用降雨データの季節により、液面蒸発速度が変わる。
!STM2001/9/5~2002/9/1 におけるのパン蒸発速度

```

```

!SEA=降雨データの時期(SEASON)
!今までの液面蒸発→0(一週間に2.5cm)
!      春: 9~11月→1
!      夏: 12~2月→2
!      秋: 3~5月→3
!      冬: 6~8月→4
!      季節無し(長期のシミュレーションなど)→5(全ての季節の平均)
!SEA=5    現状季節ごとの液面蒸発速度の変化は考慮しない、
!!!!***** 時間単位 *****
!!!!      TIME=0.5    !10m mesh ではTime step は0.5s
!          TIME=1      !30m mesh ではTime step は1s
!***** 繰り返し回数 *****
! 計算したい時間 (TIME) に対応する CYCLE 数を指定する
!TIME    ... 4weeks~ 2weeks~ 1week~ 5days~ 3days~52hours~24hours~12hours~1hour
!CYCLE   ...2419200~1209600~ 604800~      ~259200~ 187200~ 86400~ 43200~ 3600
!計算時間の設定Time step ごとに cycle と Time の設定をチェック
!!!!
!      NCYCLE=32400/TIME !9 時間
!          NCYCLE=36000/TIME !10 時間
!      NCYCLE=43200/TIME !12 時間
!      NCYCLE=64800/TIME !18 時間
!      NCYCLE=86400/TIME !1 日
!      NCYCLE=1209600/TIME      !3 日

Write(*,*)NCYCLE

!以下 runoffresult.csv に書き込み
IF(REPEAT=1)THEN
1020    FORMAT('時間単位 1cycle (TIME)'F7.2'second')
        WRITE(10,1020)TIME
1030    FORMAT('横こ,I5,'分割 縦こ,I5,'分割 (M,N の値)')
        WRITE(10,1030)M,N
1040    FORMAT('浸透速度補正(PR) ÷',F7.2)
        WRITE(10,1040)PR
        WRITE(10,*)&=,VOID
        END IF
!----- 液面蒸発条件 -----
!現状液面蒸発条件は考慮しない、
!      IF(SEA=0)WRITE(10,*)一週間で2.5cm液面蒸発
!      IF(SEA=1)WRITE(10,*)一週間で3.5cm液面蒸発
!      IF(SEA=2)WRITE(10,*)一週間で7.30cm液面蒸発
!      IF(SEA=3)WRITE(10,*)一週間で2.02cm液面蒸発

```

```

!           IF(SEA==4)WRITE(10,*)一週間で1.77 c m液面蒸発
!           IF(SEA==5)WRITE(10,*)年間平均で4.64 c m液面蒸発
IF(REPEAT==1)WRITE(10,*)年間平均で4.64 c m液面蒸発
!***** 標高データ(m) ELEVATION DATA *****
! 境界条件
!           ALTB=999.0
IF(REPEAT==1)THEN
!           広域の時
IF(JP==0)THEN
    OPEN(1,FILE='kouiki_30m_1471_1727.txt',STATUS=OLD)
    OPEN(50,FILE='kouiki_soilproperty_1471_1727.txt',STATUS=OLD)
    READ(1,*)ALTITUDE
    CLOSE(1)
    WRITE(*,*) 'ALTITUDE Input'
    READ(50,*)SOILPROPERTY
    CLOSE(50)
    WRITE(*,*)SOILPROPERTY Input'
ELSE IF(JP==1.OR.JP==2)THEN
!           10m mesh の時 *****
IF(M==600)THEN
    IF(JP==1.AND.FILL==0)THEN
        OPEN(1,FILE='Jims Pool altitude data 10m_6x5km_nofill.txt',STATUS=OLD)!6km×5km 窪地処理なし
        OPEN(50,FILE='jims_soil_property.txt',STATUS=OLD)
    ELSE IF(JP==2.AND.FILL==0)THEN
        OPEN(1,FILE='Jims_new6x4-8_10m_mesh.txt',STATUS=OLD) !6km×4.8km 新規Jim's 窪地処理なし
        OPEN(50,FILE='jims_soil_property.txt',STATUS=OLD)
    ELSE IF(JP==2.AND.FILL==1)THEN !6km×4.8km 窪地処理あり
        OPEN(1,FILE='Jims Pool altitude data 10m_6x4-8km_fill.txt',STATUS=OLD)!全窪地を埋め立てた窪地処理データ
        OPEN(50,FILE='jims_soil_property.txt',STATUS=OLD)
    END IF!(JP== FILL==)より
    READ(1,*)ALTITUDE
    CLOSE(1)
    WRITE(*,*) 'ALTITUDE Input'
    READ(50,*)SOILPROPERTY
    CLOSE(50)
    WRITE(*,*)SOILPROPERTY Input'
ELSE IF(M==1200)THEN
    IF(JP==1.AND.FILL==0)THEN
        OPEN(1,FILE='Jims-new-10m-4timeslarge.txt',STATUS=OLD)!12km×9.6km 窪地処理なし
    ELSE IF(JP==2.AND.FILL==0)THEN
        OPEN(1,FILE='Jims_new6x4-8_10m_mesh.txt',STATUS=OLD)!6km×4.8km 新規Jim's 窪地処理なし
    END IF!(JP== FILL==)より

```

```

        READ(1,*)ALTTITUDE
        CLOSE(1)
        WRITE(*,*) 'ALTTITUDE Input'
!
30m mesh の時 *****
ELSE IF(M==200)THEN
    IF(JP==2)THEN
        OPEN(1,FILE='Jims_new6x4-8_30m_mesh.txt',STATUS='OLD')
        IF(FILL==1)THEN
            OPEN(1111,FILE='Jims Pool altitude data 30m B+Fill.txt',STATUS='OLD')
        ELSE IF(FILL==0)THEN
            OPEN(1111,FILE='Jims_new6x4-8_30m_mesh.txt',STATUS='OLD')
        END IF!(FILL=より)
        END IF!(JP=より)
    END IF !M=より

    IF(JP>=1.AND.JP<=2.AND.M<300)THEN !Jim'spool 20m mesh 以上の時は使用
        READ(1111,*)ALTTITUDE
    END IF
    CLOSE(1111)
END IF !IF(JP==)より

!
標高データ入力終了

DO 13 J=1,N
DO 13 I=1,M
    WAEL(I,J)=0!WAEL(Water elimination 用パラメータ初期化 2012.7.26)
    IF(I==2.OR.I==M-1.OR.J==2.OR.J==N-1)WAEL(I,J)=1
13 CONTINUE
!----- 空隙率 -----
    VOID=0.4!VOID=空隙率
    WRITE(*,*)VOID
END IF !IF(REPEAT==1)より
! ::::::::::::::::::::
! 計算開始 !by TOMY
        write(*,*)'Start calculation!!'
! ::::::::::::::::::::
! ***** 土壌厚み 浸透速度 *****
!!!! PR=浸透速度(÷ PR とする)PR=初めの PR+(REPEAT×増加分)に変更 (2012.6.26)
    IF(REPEAT>=1.AND.REPEAT<=100)THEN
        PR=19.9+REPEAT*0.1
    ELSE IF(REPEAT>=101.AND.REPEAT<=150)THEN
        PR=4.9+REPEAT*0.1

```

```

ELSE IF(REPEAT>=151.AND.REPEAT<=200)THEN
PR=4.9+REPEAT*0.1
ELSE IF(REPEAT>=201.AND.REPEAT<=250)THEN
PR=4.9+REPEAT*0.1
END IF
!***** 土壌厚み *****
! ハードパン距離植生はまだ入れていない(08.6)
! HPAN=1 : HARDPAN(I,J)=HARDPANMIN+(HARDPANMAX-HARDPANMIN)/9*(VEGE(I,J)-1)
! HPAN=0 : HARDPAN(I,J)=21.442*EXP(1.7137*VEGE(I,J)*0.1)*0.01
!!! HPAN=0
IF(REPEAT=1)THEN
! ----- 堰標高 JIMS では、堰標高以外の設定は浸透計算時こ -----
IF(JP=1.OR.JP=2)THEN
IF(M=600)THEN
DAMRAIN=0.8736
ALTDAM=368.5+0.662
ELSE IF(M=200)THEN
DAMRAIN=0.9050
ALTDAM=368.5+0.9050
END IF
END IF
!***** 降雨データ RAI[mm/h]→RAI*0.1*0.01[m/h]RAIN FALL DATA*****!runoff rainfall data 2001-2-22.txt を参照
IF(JP=1.OR.JP=2)THEN
!!!!
IF(RIM=2)THEN 降雨データの 1min 時系列入力
! OPEN(11,FILE='rainfall JP 2003323 ave 1min time series.txt',STATUS='OLD')!元の 2003.3.23 の降雨データ (実は 3 月 24 日の降雨データ)
OPEN(11,FILE='rainfall JP 2003323 ave 1min time original_deta.txt',STATUS='OLD')!2003.3.23 の降雨データ (実は 3 月 24 日の降雨データ)1 分間積
算 top を全域
! OPEN(11,FILE='jimspool_all_20040601_07_17_1minaverage.txt',STATUS='OLD')!2004.6.1 の降雨データ (全域の平均)
! OPEN(11,FILE='jimspool_top_20040601_07_17_1minaverage.txt',STATUS='OLD')!2004.6.1 の降雨データ (TOP のみ)
! OPEN(11,FILE='jimspool_middle_20040601_07_17_1minaverage.txt',STATUS='OLD')!2004.6.1 の降雨データ (MIDDLE のみ)
! OPEN(11,FILE='jimspool_20040601_07_17_1minaverage.txt',STATUS='OLD')!2004.6.1 の降雨データ (BOTTOM?のみ)
! OPEN(11,FILE='jimspool_rainfall20090301_1-15_middle_1minaverage.txt',STATUS='OLD')!2009.3.1 の降雨データ (MIDDLE のみ)
! OPEN(11,FILE='jimspool_rainfall20090422_0-10_middle_1minaverage.txt',STATUS='OLD')!2009.4.22 の降雨データ (MIDDLE のみ)
!!!!
ELSE IF(RIM=3)THEN !降雨データのパルス入力
OPEN(11,FILE='Pulse rainfall 2003323middle.txt',STATUS='OLD')
OPEN(12,FILE='Pulse time 2003323middle.txt',STATUS='OLD')
END IF ! (RIM=)より
ELSE IF(JP=0)THEN
IF(RIM=1)THEN
OPEN(11,FILE='runoff rainfall data Artificial2.txt',STATUS='OLD')

```

```

ELSE IF(RIM==2)THEN
    OPEN(11,FILE='rainfall JP 2003323 ave 1min time original_deta.txt',STATUS='OLD')!2003.3.23の降雨データ (実は3月24日の降雨デ
ータ)1分間積算 top を全域
ELSE IF(RIM==3)THEN
    OPEN(11,FILE='runoff rainfall data Artificial2.txt',STATUS='OLD')
    OPEN(12,FILE='runoff rainfall data Artificial2.txt',STATUS='OLD')
END IF
END IF ! (JP==)より
READ(11,*)RAINDATA
CLOSE(11)
IF(RIM==3)THEN
    READ(12,*)RAINTIME
    CLOSE(12)
END IF
1060 FORMAT('降雨データ',F5.0,'個 (時間単位:mm/hour) )!(runoffresult に出力されるデータ実数である必要は? 2012.7.10)
WRITE(10,1060)real(NR)
! -- 全降雨量計算 --
SUMRAINDATA=0
DO 14 RN=1,NR !1~R までを 1~NR までに変更
    SUMRAINDATA=SUMRAINDATA+RAINDATA(RN)
14 CONTINUE
1065 FORMAT('全降雨量',F8.2,'mm/h) )!(runoffresult に出力されるデータ小数点以下5桁必要か? 2012.7.10)
WRITE(10,1065)SUMRAINDATA
END IF
! -- 降雨データ初期化 --
DO 15 J=1,N
DO 15 I=1,M
    IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 15
    RAIN(I,J)=0
15 CONTINUE
! ***** 窪地貯留量設定 *****
IF(REPEAT==1)THEN
DO 16 J=1,N
DO 16 I=1,M
    MINALTI(I,J)=MIN(ALTITUDE(I+1,J),ALTITUDE(I-1,J),ALTITUDE(I,J-1),ALTITUDE(I,J+1))
! 堰きとめられない時
! ----- 規定貯水量 -----
RSUMRAIN(I,J)=0
RSUMRAINE(I,J)=0 !東へ
RSUMRAINW(I,J)=0 !西へ
RSUMRAINN(I,J)=0 !北へ
RSUMRAINS(I,J)=0 !南へ

```

```

! ----- 標高差による貯水量 -----
! 流出メッシュより流下メッシュの方が低い標高の場合は堰きとめられる分が窪地貯留量となる
IF(ALTITUDE(I,J)<MINALTI(I,J))RSUMRAIN(I,J)=MINALTI(I,J)-ALTITUDE(I,J)
IF(ALTITUDE(I,J)<ALTITUDE(I+1,J))RSUMRAINE(I,J)=ALTITUDE(I+1,J)-ALTITUDE(I,J)
IF(ALTITUDE(I,J)<ALTITUDE(I-1,J))RSUMRAINW(I,J)=ALTITUDE(I-1,J)-ALTITUDE(I,J)
IF(ALTITUDE(I,J)<ALTITUDE(I,J-1))RSUMRAINN(I,J)=ALTITUDE(I,J-1)-ALTITUDE(I,J)
IF(ALTITUDE(I,J)<ALTITUDE(I,J+1))RSUMRAINS(I,J)=ALTITUDE(I,J+1)-ALTITUDE(I,J)
16 CONTINUE
! ***** ハードパンまでの深さ [m] ・飽和条件 *****
DO 25 J=1,N
DO 25 I=1,M
IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 25
HARDPAN(I,J)=0.15
25 CONTINUE
END IF!(REPEAT=1 より)
!!!! ----- 粗度係数の設定 -----
DO 24 J=1,N
DO 24 I=1,M
IF(REPEAT>=1.AND.REPEAT<=200)THEN
NMAN(I,J)=0.015
ELSE IF(REPEAT>=251.AND.REPEAT<=300)THEN
NMAN(I,J)=0.030
! ELSE IF(REPEAT>=101.AND.REPEAT<=150)THEN
! NMAN(I,J)=0.031
! ELSE IF(REPEAT>=151.AND.REPEAT<=200)THEN
! NMAN(I,J)=0.032
END IF
24 CONTINUE
! ---全降雨量 土壌浸透量 全蒸発量 土壌蒸発式経時変化Parameter 水溜り区別 初期化---
DO 26 J=1,N
DO 26 I=1,M
SURFACE_WATER(I,J)=0
SUMPENT(I,J)=0
SUMEVAP(I,J)=0
SOILWC(I,J)=0
SUMFLOW(I,J)=0
SUMINFLOW(I,J)=0
26 CONTINUE
! サイクル毎に値が0になるデータの積算値の初期設定
TLOSTSUMRAIN=0
!!!! *****計算開始時の土壌含水率を入力 by Tabuchi*****
DO 27 J=1,N

```



```

DO 27 I=1,M
      IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 27
!!!!計算開始時の土壌含水率を入力
IF(REPEAT>=1.AND.REPEAT<=200)THEN
      ISOILWC(L,J)=0.05
      ELSE IF(REPEAT>=201.AND.REPEAT<=300)THEN
      ISOILWC(L,J)=0.10
      ELSE IF(REPEAT>=301.AND.REPEAT<=350)THEN
      ISOILWC(L,J)=0.10
      ELSE IF(REPEAT>=351.AND.REPEAT<=400)THEN
      ISOILWC(L,J)=0.10
END IF
      SUMPENT(L,J)=(ISOILWC(L,J)-0.05)*HARDPAN(L,J)
27    CONTINUE
! -----計算開始時の集水池水位を入力-----
      IF(JP=1.OR.JP=2)THEN
!!!! 初期水位 LEVEL の設定,368.3m からの実測データを 368.5m を底としたデータにした初期水位
!           LEVEL=0.4550           !10m メッシュ水位 2003/6/1
!           LEVEL=0.662           !10m メッシュ水位 2003/3/24
!!!!           LEVEL=0.6964           !30m メッシュ水位 2003/3/24
!!!!           LEVEL=0.252           !10m メッシュ水位 2009/3/1
!!!!           LEVEL=0.022           !10m メッシュ水位 2009/4/22
! ---- JPM と JPN を各メッシュサイズに適用させる ----
      IF(JP=2 .AND. M=600)THEN
              JM=JPM/MESH_SIZE
              JN=JPN/MESH_SIZE
      ELSE IF(JP=2 .AND. M=200)THEN
              JM=18
              JN=23
      ELSE IF(JP=1.AND. M=1200)THEN
              JM=(JPM-MOD(JPM,(1200/M)))/(1200/M)
              JN=(JPN-MOD(JPN,(960/N)))/(960/N)
      END IF
!!           WRITE(*,*)JM,JN 計算
!           JM,JN は、JIMS の X,Y の大きさを示す。
!!           WRITE(*,*)JM=,JM,JN=,JN
!           EDGE を使わずに手打ちで Jims のおおよその範囲を設定する      by Tabuchi and Tanaka
      IF(JP=2 .AND. M=600)THEN           !以下は 6x4.8km 新規 Jim's(2012.8.2)
              JPRMi=101
              JPRMo=152
              JPRNi=408
              JPRNo=479

```

```

ELSE IF(JP=2 .AND. M=200)THEN!6x4.8km 新規 Jim's30m(2012.8.15)
      JPRMi=34
      JPRMo=51
      JPRNi=136
      JPRNo=158

ELSE IF(JP=1 .AND. M=1200)THEN!12x9.6km 新規 Jim's10m(2012.8.27)
      JPRMi=101
      JPRMo=152
      JPRNi=888
      JPRNo=959

!
ELSE IF(JP=1 .AND. M=400)THEN!12x9.6km 新規 Jim's30m(2012.8.27)
!
      JPRMi=101
!
      JPRMo=152
!
      JPRNi=888
!
      JPRNo=959
!
IF(JP=2 .AND. M=600)THEN      !以下は 6x4.8km 旧 Jim's
!
      JPRMi=51
!
      JPRMo=102
!
      JPRNi=369
!
      JPRNo=440
!
ELSE IF(JP=2 .AND. M=200)THEN
!
      JPRMi=17
!
      JPRMo=34
!
      JPRNi=123
!
      JPRNo=146

      END IF

!-----
      DO 28 J=JPRNi,JPRNo
      DO 28 I=JPRMi,JPRMo
      IF(ALTITUDE(I,J)<=368.5+LEVEL)THEN
      IF(ALTITUDE(I,J)<999)THEN
      SURFACE_WATER(I,J)=368.5+LEVEL-ALTITUDE(I,J)      !配列 ALTI から ALTITUDE に変更 初期水位チェックも配列変更
2012.7.19)
!POOL内の最低標高のIとJを記録する
      IF(M=600)THEN      !10m mesh 底新規 Jim's
      III=126
      IF(JP=1)JJJ=423
      IF(JP=2)JJJ=452      !チェックの必要あり

!10m mesh 底
!
      III=76
!
      IF(JP=1)JJJ=423
!
      IF(JP=2)JJJ=413      !チェックの必要あり

```

```

ELSE IF(M==200)THEN !30m mesh 底
!
III=25
III=42      !新規 Jim's30m mesh
!
IF(JP==2)JJJ=139      !チェックの必要あり
IF(JP==2)JJJ=152      !新規 Jim's30m mesh

ELSE IF(M==1200)THEN
III=126      !新規 Jim's10m mesh 4timeslarge      !10m mesh 底
JJJ=932      !新規 Jim's30m mesh

END IF      !IF(M==)

!!
IF(SURFACE_WATER(L,J)<0)SURFACE_WATER(L,J)=0
!!
IF(ALTITUDE(III,JJJ).NE.368.5)THEN      !配列 ALTI から ALTITUDE に変更したので初期水位チェックも配列変更
2012.7.19)
!!
WRITE(*,*) "ERRORTRAP 初期水位計算"
!!
STOP
!!
END IF

END IF

END IF

28 CONTINUE
WRITE(*,*)III,JJJ
END IF      !      (JP==1)より
!
-----
! 土壌中の空隙率を 0.4 とする
DO 29 J=1,N
DO 29 I=1,M
!最小含水量=0.05 は絶対にあるとしてそれ以外の水を考える。
SATU(L,I)=HARDPAN(L,I)*(VOID-0.05)
29 CONTINUE
!
----- 液面蒸発量設定 現状液面蒸発条件については考慮しない -----
!
IF(SEA==0)EVAPORATIONLIQUID=2.5*0.01*TIME/(7*24*60*60)
!
IF(SEA==1)EVAPORATIONLIQUID=3.50*0.01*TIME/(7*24*60*60)
!
IF(SEA==2)EVAPORATIONLIQUID=7.30*0.01*TIME/(7*24*60*60)
!
IF(SEA==3)EVAPORATIONLIQUID=2.02*0.01*TIME/(7*24*60*60)
!
IF(SEA==4)EVAPORATIONLIQUID=1.77*0.01*TIME/(7*24*60*60)
!
IF(SEA==5)EVAPORATIONLIQUID=4.64*0.01*TIME/(7*24*60*60)
!
EVAPORATIONLIQUID=4.64*0.01*TIME/(7*24*60*60)
EVAPORATIONLIQUID=0.0464*TIME/604800
!
EVAPORATIONLIQUID=0.00000007671946*TIME
DO 31 J=1,N
DO 31 I=1,M
EVAPL(I,J)=EVAPORATIONLIQUID
31 CONTINUE
!!!(VTK=1 の時コメントアウト解除)

```

```

! .....
! 標高データのVTK出力 !by TOMY
!!!      call post(0)      !0:Altitude,1:Step calculation data
! 初期データのVTK出力 !by TOMY
!!!      call post(1)      !0:Altitude,1:Step calculation data
! .....
!!!!
!      WRITE(*,*) 計算条件確認
      WRITE(*,*) 'M=',M,'N=',N
      WRITE(*,*) 'JP=',JP
      WRITE(*,*) 'LEVEL=',LEVEL
      WRITE(*,*) 'Time step=',TIME
      WRITE(*,*) 'PR=',PR
      WRITE(*,*) 'NMAN=',NMAN(1,1)
      WRITE(*,*) 'FILL=',FILL
      WRITE(*,*) 'VTK=',VTK
      WRITE(*,*) 'RIM=',RIM
!      WRITE(*,*) 'ISOILWC=',ISOILWC(1,1)
! *****
! *****      K sec/min/hour CALCURATION   <スベルミス-----
! *****
      DO 5000 K=1,NCYCLE
!-----  降雨データ入力 -----
!R=降雨データの数RD=Rの数(REALで表示)
      IF(RIM==2)THEN  !1分間積算降雨入力の時 2012.7.10
! 一定時間(TIME=1であれば61,121,181,...cycle)ごとにRDの値が1増える。
          IF(K==1)RD=1
          DO 114 RT=1,NR      !1~Rまでを1~NRまでに変更
          IF(K==60/TIME*RT+1) RD=RD+1
!      IF(K==3600*10*RT+1) RD=RD+1
          114      CONTINUE
!-----  降雨領域  RAIN FALL DATA -----
! 降雨データ RAINDATA[mm/h] →RAINDATA*0.1*0.01/3600[m/s]→時間をかけてRAIN[m](mmをmに変換 2012.7.10)
          DO 115 J=1,N
          DO 115 I=1,M
              IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 115
              RAIN(I,J)=RAINDATA(RD)*0.001/60*TIME
          115      CONTINUE

      ELSE IF(RIM==1)THEN  !1時間積算降雨入力の時 2012.7.10
! 一定時間(TIME=1であれば3601,7201,10801,...cycle)ごとにRDの値が1増える。
          IF(K==1)RD=1

```

```

DO 101 RT=1,NR    !1~R までを 1~NR までに変更
                IF(K=3600/TIME*RT+1) RD=RD+1
101            CONTINUE
!----- 降雨領域 RAIN FALL DATA -----
! 降雨データ RAINDATA[mm/h] →RAINDATA*0.1*0.01/3600[m/s] →時間をかきずて RAIN[m]
                DO 102 J=1,N
                DO 102 I=1,M
                        IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 102
                        RAIN(I,J)=RAINDATA(RD)*0.001/3600*TIME
202            CONTINUE
ELSE IF(RIM=3)THEN
                IF(TIME>1)THEN
! 経過時間の単位が 1s なので、Timestep は 1s 以下でないとならない
                        WRITE(*,*) '!!!ERROR!!! Timestep が 1s より大きいため、パルスデータは使用不可'
                        STOP
                END IF
! 毎時間差分ごとに降雨量を初期化
                DO 111 J=1,N
                DO 111 I=1,M
                        IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 111
                        RAIN(I,J)=0
311            CONTINUE
                IF(K=1) RD=1
                DO 112 RT=1,NR
! モデル中の計算時間 K*TIME [s]=計算開始からの降雨があった時間 RAINTIME [s]のときに降雨を降らせる
!
                        IF(K*TIME==RAINTIME(RT) .AND. TIME<=1)THEN
                        IF(K*TIME==RAINTIME(RT))THEN
                                RD=RD+1
!----- 降雨領域 RAIN FALL DATA -----
! 降雨データ RAINDATA は瞬間降雨なので単位は[mm] →RAINDATA*0.1*0.01[m] (mm を m に変換 2012.7.10)
                                DO 113 J=1,N
                                DO 113 I=1,M
                                        IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 113
                                        RAIN(I,J)=RAINDATA(RD)*0.001
413                                CONTINUE
                                END IF
                                112            CONTINUE
                END IF    !RIM=より
! ***** 表層水+降雨の計算(雨を降らせる) *****
                DO 104 J=1,N
                DO 104 I=1,M
                        IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 104

```

```

SURFACE_WATER(L,J)=SURFACE_WATER(L,J)+RAIN(L,J)
104 CONTINUE
!***** 土壌浸透式 PENETRATION [m/s] *****
!***** HORTON 式 *****
! HORTON 式の導入 I= JPPRONE+(JPPRTWO-JPPRONE)*EXP(-Kf)
! JPPRTWO (F0) mm/h = 初期浸透速度
! JPPRONE (Fc) mm/h = 定常浸透速度 (≒飽和透水係数)
! Kf = パラメータ (実測より解算)
DO 105 J=1,N
DO 105 I=1,M
PENT(L,J)=0
EVAPS(L,J)=0
EN(L,J)=0
105 CONTINUE
!!!!
!***** 土壌浸透式 *****
! m/s 換算し、Timestep をかける。
! IF(JP=0)THEN
IF(JP=1 .OR. JP=2 .OR. JP=0)THEN
DO 107 J=1,N
DO 107 I=1,M
IF(ALTITUDE(L,J)>=998.0) GOTO 107
! 土壌含水率による浸透速度(m/s)決定 (MIDDLE を一定で使用)
! 最小含水率=0.05 分は、SUMPENT には入れていない。
! 含む必要があるので、0.05 を土壌含水率には、加える。
SOILWC(L,J)=SUMPENT(L,J)/HARDPAN(L,J)+0.05

IF(PENEVER=2)THEN! 新規推定式+Horton 式 (SiteC)

IF(SOILWC(L,J)>=0.05 .AND. SOILWC(L,J)<=0.40)THEN
IF(SOILPROPERTY(L,J)=0.OR.SOILPROPERTY(L,J)=3.OR.SOILPROPERTY(L,J)=4)THEN !土壌生状 草地 (アンテナ斜面)
PENETRATION(L,J)=(((0.0000288*SOILWC(L,J)+0.0001044)*SOILWC(L,J)-0.0001459)*SOILWC(L,J)+0.0000797)/PR*TIME
ELSE IF(SOILPROPERTY(L,J)=1.OR.SOILPROPERTY(L,J)=5)THEN !土壌生状 塩湖 浸透0
PENETRATION(L,J)=0
ELSE IF(SOILPROPERTY(L,J)=2)THEN !土壌生状 裸地 (2006 裸地)
PENETRATION(L,J)=((-0.0000345*SOILWC(L,J)+0.0000594)*SOILWC(L,J)-0.0000361)*SOILWC(L,J)+0.0000202)/PR*TIME
END IF !SOILPROPERTY

ELSE IF(SOILWC(L,J)<0.05.OR.SOILWC(L,J)>0.4)THEN
WRITE(*,*)浸透式失敗
WRITE(*,*)SOILWC(L,J),LJ
STOP

```

```

END IF      !SOILWC

ELSE IF(PENEVER=1)THEN      既存推定式
! -----PR=1 (SOILWC = 0.4 の飽和状態以下を推定式により振り分け) -----
      IF(PR=1)THEN
            IF(SOILWC(I,J)<=0.05)THEN
                  PENETRATION(I,J)=(2.028*0.1**4*(0.05)**3+8.168*0.1**4*(0.05)**2-4.008*0.1**4*(0.05)+6.857*0.1**5)*TIME

            ELSE IF(SOILWC(I,J)>0.05 .AND. SOILWC(I,J)<0.2)THEN

PENETRATION(I,J)=(2.028*0.1**4*SOILWC(I,J)**3+8.168*0.1**4*SOILWC(I,J)**2-4.008*0.1**4*SOILWC(I,J)+6.857*0.1**5)*TIME
            ELSE IF(SOILWC(I,J)>=0.2 .AND. SOILWC(I,J)<0.3)THEN

PENETRATION(I,J)=(-1.575*0.1**3*SOILWC(I,J)**3+1.430*0.1**3*SOILWC(I,J)**2-4.400*0.1**4*SOILWC(I,J)+6.601*0.1**5)*TIME
            ELSE IF(SOILWC(I,J)>=0.3 .AND. SOILWC(I,J)<=0.4)THEN

PENETRATION(I,J)=(-1.599*0.1**4*SOILWC(I,J)**3+1.911*0.1**4*SOILWC(I,J)**2-7.668*0.1**5*SOILWC(I,J)+3.035*0.1**5)*TIME
            ELSE      !      飽和以上の場合はエラー
                  WRITE(*,*)浸透式失敗
                  WRITE(*,*)SOILWC(I,J),I,J
                  STOP
            END IF
      END IF      ! PR
END IF      ! PENEVER
107 CONTINUE
END IF      ! JP=より
! ***** 浸透速度設定 *****
DO 100 J=1,N
  DO 100 I=1,M
    IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 100
    PENT(I,J)=PENETRATION(I,J)
! -----
!JIM'S POOL 内
IF(JP=1.OR.JP=2)THEN
  !Jim's pool 内に水が初期段階である場合 (LEVEL>0 の時は集水地(ALTIDAM)での浸透をなくす(KOYA))
  IF(LEVEL>0)THEN
    IF(I<=JPRMi .AND. I<=JPRMo .AND. J>=JPRNi .AND. J<=JPRNo)THEN      !手打ちで指定する場合
      IF(ALTITUDE(I,J).NE.999.0 .AND. ALTITUDE(I,J)<=ALTIDAM)PENT(I,J)=0
    END IF
  END IF
END IF
END IF      ! IF(JP=1)より
100 CONTINUE

```

```

!***** 土壤蒸発式 *****
! 単位cm/s→mにするため EVAPS(L,J)×0.01×TIME
! 蒸発量計算のところで降雨時は蒸発計算を行わないようにしてある。
! ----- 土壤含水率(SOILWC)導入 -----
! 土壤含水率(SOILWC)計算 = SUMPENT(L,J)/HARDPAN(L,J) ≤ VOID(L,J)
! 高橋さん土壤蒸発実験測定より可能土壤蒸発速度を基準に規格化された土壤蒸発速度式を使用
! SOILWC=0.1を自然界時の最小含水率、VOID=0.4を最大含水率として考え、0.1以下は蒸発しない、0.4以上は存在しないと考えた。
! SOILWC>0.1
! EVAPS=EVAPL*0.0349*EXP(21.149(SOILWC-0.1)-1)
! SOILWC≤0.1
! EVAPS=0
DO 108 J=1,N
DO 108 I=1,M
IF(ALTITUDE(L,J)=999.0)GO TO 108
! ----- 高橋さん土壤蒸発速度式使用 -----
! 可能蒸発量=EVAPLのPAN蒸発速度とし、土壤含水率に対して、実験結果による規格化土壤蒸発速度を掛ける
! JIMSのTDRより最小含水率を0.05と決定し、指数近似として求めた式(採用)
IF(SOILWC(L,J)>0.05)THEN
! EN(規格化蒸発速度≥1の時は、液面蒸発速度で蒸発が起こる。
EN(L,J)=54.0*(SOILWC(L,J)-0.05)**2.677
IF(EN(L,J)>=1)THEN
EVAPS(L,J)=EVAPL(L,J)
ELSE
EVAPS(L,J)=EVAPL(L,J)*EN(L,J)
END IF
! -----
ELSE IF(SOILWC(L,J)≤0.05)THEN !SOILWC<0.05では、蒸発が起こらない。
EVAPS(L,J)=0
ELSE
WRITE(*,*)土壤蒸発式失敗
STOP
END IF
! -----
108 CONTINUE
! 記号意味 <LT >GT ≤LE ≥GE =EQ ≠NE
! ***** 浸透量・蒸発量の計算 *****
! 表層水があるかないかで計算の仕方が変化、更に降雨中は蒸発が起こらないとしている。
DO 3000 J=1,N
DO 3000 I=1,M
IF(ALTITUDE(L,J)=998.0) GO TO 3000
IF(SURFACE_WATER(L,J)=0)THEN !表層水が存在しない⇒土壤蒸発が起こる
!***** 通常土壤蒸発 *****

```



```

IF(RAIN(I,J)>0)GO TO 3000      !雨が降っている時は、蒸発はなし
IF(SUMPENT(I,J)<=EVAPS(I,J))THEN
    SUMEVAP(I,J)=SUMEVAP(I,J)+SUMPENT(I,J)
    SUMPENT(I,J)=0
ELSE
    SUMEVAP(I,J)=SUMEVAP(I,J)+EVAPS(I,J)
    SUMPENT(I,J)=SUMPENT(I,J)-EVAPS(I,J)
END IF
!ERROR MESSAGE (2012.7.26)
    IF(SUMPENT(I,J)<0)THEN
WRITE(*,*)SUMPENT=,SUMPENT(I,J)
WRITE(*,*)SOILWC=,SOILWC(I,J)
WRITE(*,*)EVAPS=,EVAPS(I,J)
    END IF
!      土壤蒸発後の計算はしない
GO TO 3000
!      降雨中でも浸透は起こる。表層に水がある時は、浸透が起こった後に、液面蒸発が起こる。
ELSE IF(SURFACE_WATER(I,J)>=0)THEN
!***** 土壤浸透 *****
!      ここで使用する SATU(I,J)は、土壤含水率 SOILWC(I,J)の飽和値-最小含水率(0.05)である。
!      SURFACE_WATER < PENT ⇒ 表層水を全部浸透させる場合（または、あふれ出す）
IF(SURFACE_WATER(I,J)<=PENT(I,J))THEN
    SUMPENT(I,J)=SUMPENT(I,J)+SURFACE_WATER(I,J)
!      ----- 土壤飽和の状態確認 -----
!      浸透量が飽和量以上の時は、差分が表層水となる。
    IF(SUMPENT(I,J)>SATU(I,J))THEN
        SURFACE_WATER(I,J)=SUMPENT(I,J)-SATU(I,J)
        SUMPENT(I,J)=SATU(I,J)
    ELSE
        SURFACE_WATER(I,J)=0
    END IF
!      表層水を全て浸透できない時
ELSE
    SUMPENT(I,J)=SUMPENT(I,J)+PENT(I,J)
!      ----- 土壤飽和の状態確認 -----
!      浸透量が飽和量以上の時は、差分(SUMPENT-SATU)が表層水に加算される。
    IF(SUMPENT(I,J)>SATU(I,J))THEN
        SURFACE_WATER(I,J)=SURFACE_WATER(I,J)-PENT(I,J)+SUMPENT(I,J)-SATU(I,J)
        SUMPENT(I,J)=SATU(I,J)
    ELSE
        SURFACE_WATER(I,J)=SURFACE_WATER(I,J)-PENT(I,J)
    END IF

```

```

! -----
END IF
! ----- ERROR TRAP -----
IF(SUMPENT(L,J)>SATU(L,J))THEN
WRITE(*,*)浸透 > 飽和
WRITE(*,*)L,J
WRITE(*,*)SUMPENT(L,J)
WRITE(*,*)SATU(L,J)
STOP
END IF
! 浸透が起こった場合、液面蒸発を行うかどうかの判断
!! IF(EL==0)GO TO 3000!液面蒸発計算を行うのか
IF(RAIN(L,J)>0)GO TO 3000 !降雨時は蒸発しない。
IF(SURFACE_WATER(L,J)==0)GO TO 3000 !表層水が蒸発前でない時は3000に
!***** 液面蒸発 *****
! ----- 1. 液面蒸発後、表層上に水が存在しない時 -----
IF(SURFACE_WATER(L,J)<EVAPL(L,J))THEN
SUMEVAP(L,J)=SUMEVAP(L,J)+SURFACE_WATER(L,J)
SURFACE_WATER(L,J)=0 !蒸発後、水量初期化
! ----- 2. 液面蒸発後、表層上に水が存在する時 -----
ELSE
SUMEVAP(L,J)=SUMEVAP(L,J)+EVAPL(L,J)
SURFACE_WATER(L,J)=SURFACE_WATER(L,J)-EVAPL(L,J)
END IF
END IF !土壌蒸発か、浸透・液面蒸発かの判断より
3000 CONTINUE
! ***** RUN OFF CALCULATION 東西南北方向への表面流出計算*****
! マニングの式  $Q=VA=(1/N)*R^{(2/3)}*I^{(1/2)}*A$ 
! N=NMAN = 粗度係数
! R=RMAN = ALRA(L,J)-ALTTITUDE(L,J)=水深・径深(m)
! I=IMAN =(ALRA(L,J)-ALRA(I-1,J))/[M(km)*1000(m/km)]=水面勾配[m/m]
! V=VMAN =平均流速[m/s]
! Q=QMAN =流量[m3/s]→TIMEをかきつけて、単位を合わせる(×3600→m3/h)
!-FLOW & INFL- DATA
! FLOW,INFLOW 値の初期化
!!!!
DO 201 J=1,N
DO 201 I=1,M
FLOW(L,J)=0
INFLOW(L,J)=0
201 CONTINUE
!***** 表面流出式に突入 *****

```

```

300      DO 401 J=1,N
          DO 401 I=1,M
              ALRA(I,J)=0          !----表層水+標高データ 初期化----
!----流出補正用パラメータ 初期化----
          FRE(I,J)=0
          IMANE(I,J)=0
          RMANE(I,J)=0
          QMANE(I,J)=0
          FRW(I,J)=0
          IMANW(I,J)=0
          RMANW(I,J)=0
          QMANW(I,J)=0
          FRN(I,J)=0
          IMANN(I,J)=0
          RMANN(I,J)=0
          QMANN(I,J)=0
          FRS(I,J)=0
          IMANS(I,J)=0
          RMANS(I,J)=0
          QMANS(I,J)=0
401      CONTINUE
          DO 402 J=1,N
              DO 402 I=1,M
                  IF(ALTITUDE(I,J)≠999.0)GO TO 402
                      ALRA(I,J)=ALTITUDE(I,J)+SURFACE_WATER(I,J)          !表層水水位=標高+表層水水深
402      CONTINUE
!          *****表層水ベクトル*****
DO 453 J=1,N
DO 453 I=1,M
          IF(ALTITUDE(I,J)≠999.0) GO TO 453
!          各方向の水位差の初期化
          TLEVEL(I,J)=0
          LEVELE(I,J)=0
          LEVELW(I,J)=0
          LEVELN(I,J)=0
          LEVELS(I,J)=0
          FLOWNO(I,J)=0          !流下方向数の初期化
!          対象メッシュからの流出方向とその水位差を記録
          IF(ALRA(I,J)>ALRA(I+1,J))THEN
              FRE(I,J)=1
              LEVELE(I,J)=ALRA(I,J)-ALRA(I+1,J)
              FLOWNO(I,J)=FLOWNO(I,J)+1

```

```

END IF
IF(ALRA(I,J)>ALRA(I-1,J))THEN
FRW(I,J)=1
LEVELW(I,J)=ALRA(I,J)-ALRA(I-1,J)
FLOWNO(I,J)=FLOWNO(I,J)+1
END IF
IF(ALRA(I,J)>ALRA(I,J-1))THEN
FRN(I,J)=1
LEVELN(I,J)=ALRA(I,J)-ALRA(I,J-1)
FLOWNO(I,J)=FLOWNO(I,J)+1
END IF
IF(ALRA(I,J)>ALRA(I,J+1))THEN
FRS(I,J)=1
LEVELS(I,J)=ALRA(I,J)-ALRA(I,J+1)
FLOWNO(I,J)=FLOWNO(I,J)+1
END IF
! 総流下水位を積算
TLEVEL(I,J)=LEVELE(I,J)+LEVELW(I,J)+LEVELN(I,J)+LEVELS(I,J)
453 CONTINUE
! ***** 表層水流出計算 *****
! *****
! EAST側(右側)へ表面流出 ALRA(I+1,J)へ流出
! *****
DO 454 J=2,N-1
DO 454 I=2,M-2
! 判断1: 表層に流出可能な水があるか? RSUMRAIN:貯流量
IF(SURFACE_WATER(I,J)<=RSUMRAINE(I,J))GO TO 454
! 水位差が存在するか?
IF(FRE(I,J)=0)GO TO 454
! ***** 判断2: IMAN の設定 *****
! 水位差により算出 !I=動水勾配
IMANE(I,J)=(ALRA(I,J)-ALRA(I+1,J))/MESH_SIZE
! ***** 判断3: RMAN の設定 *****
! 標高または窪地によって堰きとめられる水位を除く
RMANE(I,J)=SURFACE_WATER(I,J)-RSUMRAINE(I,J)
!!! ***** 通常流出計算 *****
! MANNING 式による流速計算(RA は表面流出補正值)
VMANE(I,J)=RMANE(I,J)**0.6667*IMANE(I,J)**0.5/NMAN(I,J) !RA は廃止(2012.7.23)
! 流速に断面積、TIMESTEP をかける⇒ 流量
QMANE(I,J)=VMANE(I,J)*RMANE(I,J)*MESH_SIZE*TIME
454 CONTINUE
! *****

```

```

!      WEST 側 (左側) へ表面流出 ALRA(I-1,J)
!*****
      DO 456 J=2,N-1
        DO 456 I=3,M-1
!      判断 1: 表層に流出可能な水があるか? RSUMRAIN:貯流量
      IF(SURFACE_WATER(I,J)<=RSUMRAINW(I,J))GO TO 456
!      水位差が存在するか?
      IF(FRW(I,J)=0)GO TO 456
!      ***** 判断 2: IMAN の設定 *****
!      標高により算出される ! I=動水勾配
      IMANW(I,J)=(ALRA(I,J)-ALRA(I-1,J))/MESH_SIZE
!      ***** 判断 3: RMAN の設定 *****
!      標高または窪地によって堰きとめられる水位を除く
      RMANW(I,J)=SURFACE_WATER(I,J)-RSUMRAINW(I,J)
!!!     ***** 通常流出計算 *****
!      MANNING 式による流速計算(RA は表面流出補正值)
      VMANW(I,J)=RMANW(I,J)**0.6667*IMANW(I,J)**0.5/NMAN(I,J)      !RA は廃止(2012.7.23)
!      流速に断面積、TIMESTEP をかける⇒ 流量
      QMANW(I,J)=VMANW(I,J)*RMANW(I,J)*MESH_SIZE*TIME
456      CONTINUE
!*****
!      NORTH 側へ表面流出 ALRA(I,J-1)
!*****
      DO 458 J=3,N-1
        DO 458 I=2,M-1
!      判断 1: 表層に流出可能な水があるか? RSUMRAIN:貯流量
      IF(SURFACE_WATER(I,J)<=RSUMRAINN(I,J))GO TO 458
!      水位差が存在するか?
      IF(FRN(I,J)=0)GO TO 458
!      ***** 判断 2: IMAN の設定 *****
!      標高により算出される ! I=動水勾配
      IMANN(I,J)=(ALRA(I,J)-ALRA(I,J-1))/MESH_SIZE
!      ***** 判断 3: RMAN の設定 *****
!      標高または窪地によって堰きとめられる水位を除く
      RMANN(I,J)=SURFACE_WATER(I,J)-RSUMRAINN(I,J)
!!!     ***** 通常流出計算 *****
!      MANNING 式による流速計算(RA は表面流出補正值)
      VMANN(I,J)=RMANN(I,J)**0.6667*IMANN(I,J)**0.5/NMAN(I,J)      !RA は廃止(2012.7.23)
!      流速に断面積、TIMESTEP をかける⇒ 流量
      QMANN(I,J)=VMANN(I,J)*RMANN(I,J)*MESH_SIZE*TIME
458      CONTINUE
!*****

```

```

!      SOUTH 側へ表面流出 ALRA(L,J+1)
!*****
      DO 460 J=2,N-2
        DO 460 I=2,M-1
!      判断1: 表層に流出可能な水があるか? RSUMRAIN:貯流量
      IF(SURFACE_WATER(L,J)<=RSUMRAINS(L,J))GO TO 460
!      水位差が存在するか?
      IF(FRS(L,J)=0)GO TO 460
!      ***** 判断2: IMAN の設定 *****
!      標高により算出される ! I=動水勾配
      IMANS(L,J)=(ALRA(L,J)-ALRA(L,J+1))/MESH_SIZE
!      ***** 判断3: RMAN の設定 *****
!      標高または窪地によって堰きとめられる水位を除く
      RMANS(L,J)=SURFACE_WATER(L,J)-RSUMRAINS(L,J)
!!! ***** 通常流出計算 *****
!      MANNING 式による流速計算(RA は表面流出補正值)
      VMANS(L,J)=RMANS(L,J)**0.6667*IMANS(L,J)**0.5/NMAN(L,J)      !RA は廃止(2012.7.23)
!      流速に断面積、TIMESTEP をかける⇒ 流量
      QMANS(L,J)=VMANS(L,J)*RMANS(L,J)*MESH_SIZE*TIME
460      CONTINUE
!      ***** 最低流出水位の設定(DALRA) *****
DO 462 J=1,N
DO 462 I=1,M
      FLOW(L,J)=(QMANE(L,J)+QMANW(L,J)+QMANN(L,J)+QMANS(L,J))/MESH_AREA
!      初期化
      DALRA(L,J)=0
      DALRAE(L,J)=0
      DALRAW(L,J)=0
      DALRAN(L,J)=0
      DALRAS(L,J)=0
!      流出なしはそのまま
      IF(FLOW(L,J)=0)GO TO 462
!      流出メッシュの水位と流出メッシュと流下メッシュ(FLOWNO 数)の平均水位との差移動可能な水位を DALRA として、表現する。
      DALRA(L,J)=TLEVEL(L,J)/(FLOWNO(L,J)+1)
!      注意:この時、DALRA 下がってしまうと実際の標高以下になる時もあるので、DALRA を表層水全てとする。
      IF(ALRA(L,J)-DALRA(L,J)<ALTITUDE(L,J))DALRA(L,J)=ALRA(L,J)-ALTITUDE(L,J)
      IF(DALRA(L,J)<0)THEN
        WRITE(*,*)DALRA'
        STOP
      END IF
!      流下方向のみ計算
      IF(FRE(L,J)=1)THEN

```

```

! 更にDALRAに各方向の水位差の比をかかけたものを各方向流下可能な最大量DALRA0とする。
      DALRAE(I,J)=DALRA(I,J)*LEVELE(I,J)/TLEVEL(I,J)
!  DALRAE以上の水位移動が起こる場合
      IF(QMANE(I,J)>DALRAE(I,J)*MESH_AREA)THEN
        QMANE(I,J)=DALRAE(I,J)*MESH_AREA
      END IF
    END IF
!  流下方向のみ計算
    IF(FRW(I,J)=1)THEN
!  更にDALRAに各方向の水位差の比をかかけたものを各方向流下可能な最大量DALRA0とする。
      DALRAW(I,J)=DALRA(I,J)*LEVELW(I,J)/TLEVEL(I,J)
!  DALRA以上の水位移動が起こる場合
      IF(QMANW(I,J)>DALRAW(I,J)*MESH_AREA)THEN
        QMANW(I,J)=DALRAW(I,J)*MESH_AREA
      END IF
    END IF
!  流下方向のみ計算
    IF(FRN(I,J)=1)THEN
!  更にDALRAに各方向の水位差の比をかかけたものを各方向流下可能な最大量DALRA0とする。
      DALRAN(I,J)=DALRA(I,J)*LEVELN(I,J)/TLEVEL(I,J)
!  DALRA以上の水位移動が起こる場合
      IF(QMANN(I,J)>DALRAN(I,J)*MESH_AREA)THEN
        QMANN(I,J)=DALRAN(I,J)*MESH_AREA
      END IF
    END IF
!  流下方向のみ計算
    IF(FRS(I,J)=1)THEN
!  更にDALRAに各方向の水位差の比をかかけたものを各方向流下可能な最大量DALRA0とする。
      DALRAS(I,J)=DALRA(I,J)*LEVELS(I,J)/TLEVEL(I,J)
!  DALRA以上の水位移動が起こる場合
      IF(QMANS(I,J)>DALRAS(I,J)*MESH_AREA)THEN
        QMANS(I,J)=DALRAS(I,J)*MESH_AREA
      END IF
    END IF
462  CONTINUE
! ***** FLOW CALCULATION *****
! 各方向の流出を合計
    DO 472 J=1,N
      DO 472 I=1,M
        IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0)GO TO 472
        FLOW(I,J)=(QMANE(I,J)+QMANW(I,J)+QMANN(I,J)+QMANS(I,J))/MESH_AREA
        IF(FLOW(I,J)<0)WRITE(*,*)FLOW(I,J)=,FLOW(I,J)

```

472 CONTINUE

!***** FACTOR 計算および標高+水位による分配 (KOYA 確認) *****

! 前提条件として、前計算にて、流出量>存在水量の場合は、メッシュに存在する水が全て流出するという仮定を用いている。

! もし、計算によって算出された流出量が (ALRA-ALTI-INEF) より大きいなら、流出量< (ALRA-ALTI-INEF) になるように分配する

DO 473 J=1,N

DO 473 I=1,M

IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 473

! FLOW が 0 の時は下記は意味ない

IF(FLOW(I,J)>0)THEN

! 全計算流出水が流出可能水よりも多い場合

FACTORNO=0

474 IF(FLOW(I,J)>(SURFACE_WATER(I,J)-RSMRAIN(I,J)))THEN

WRITE(*,*)FACTOR 計算突入

! FACTOR = 流出可能水/全計算流出水

FACTOR(I,J)=(SURFACE_WATER(I,J)-RSMRAIN(I,J))/FLOW(I,J)

! FACTOR≠1 付近になると、計算誤差の影響が生じ、繰り返し計算が行われ、先に進まなくなってしまうので閾値を設定する必要がある。

IF(FACTOR(I,J)>=0.999)THEN

! FACTOR≠1 となると計算誤差が生じるため、FACTOR が 0.999 を閾値として、0.999 以上の FACTOR を 0.999 とした。これにより、流出量が若干過小評価になる。

FACTOR(I,J)=0.999

END IF

QMANE(I,J)=FACTOR(I,J)*QMANE(I,J)

QMANW(I,J)=FACTOR(I,J)*QMANW(I,J)

QMANS(I,J)=FACTOR(I,J)*QMANS(I,J)

QMANN(I,J)=FACTOR(I,J)*QMANN(I,J)

FLOW(I,J)=(QMANE(I,J)+QMANW(I,J)+QMANN(I,J)+QMANS(I,J))/MESH_AREA

FACTORNO=FACTORNO+1

END IF

! 再度判断

IF(FLOW(I,J)>(SURFACE_WATER(I,J)-RSMRAIN(I,J)))THEN

IF(FACTORNO>=2)THEN

WRITE(*,*)FACTORNO=,FACTORNO,FACTOR(I,J)

WRITE(*,*)FLOW,SURFACE_WATER,RSMRAIN,FLOW(I,J),SURFACE_WATER(I,J),RSMRAIN(I,J)

STOP

END IF

! 一回でだめならもう一回

GO TO 474

END IF

FACTORNO=0

END IF ! IF(FLOW>0)より

473 CONTINUE

!***** 流入計算 INFLOW CALCULATION *****

DO 605 J=2,N-1


```

DO 605 I=2,M-1
IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 605
INFLOW(I,J)=(QMANE(I-1,J)+QMANW(I+1,J)+QMANN(I,J+1)+QMANS(I,J-1))/MESH_AREA
605 CONTINUE
!***** 最終流入計算結果 (KOYA) *****
! 流出計算より
DO 606 J=2,N-1
DO 606 I=2,M-1
IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 606
IF(FLOW(I,J)>0 .OR. INFLOW(I,J)>0)SURFACE_WATER(I,J)=SURFACE_WATER(I,J)-FLOW(I,J)+INFLOW(I,J)
606 CONTINUE

!***** KOYANAGI 考案 水除去プログラム(Tabuchi 改良) *****
DO 607 J=1,N
DO 607 I=1,M
! 流域外の水量の確認
IF(ALTITUDE(I,J)=999.0)GO TO 607
IF(WAEL(I,J)=0)GO TO 607
TLOSTSUMRAIN=TLOSTSUMRAIN+SURFACE_WATER(I,J)+SUMPENT(I,J)+SUMEVAP(I,J)
IF(SURFACE_WATER(I,J)<0)WRITE(*,*)SURFACE_WATER ダメ'
IF(SUMPENT(I,J)<0)WRITE(*,*)SUMPENT ダメ'
IF(SUMEVAP(I,J)<0)WRITE(*,*)SUMEVAP ダメ'
SURFACE_WATER(I,J)=0
SUMPENT(I,J)=0
SUMEVAP(I,J)=0
607 CONTINUE
! ----- 最終水量積算 (surface water) 表層水確認までコメントアウト(2012.9.12) -----
!! DO 608 J=1,N
!! DO 608 I=1,M
!! IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 608
!! ALRA(I,J)=ALTITUDE(I,J)+SURFACE_WATER(I,J)
!!608 CONTINUE
!*****
!SUMFLOW,SUMINFLOW 計算 流量計算時必要
DO 609 J=1,N
DO 609 I=1,M
SUMFLOW(I,J)=SUMFLOW(I,J)+FLOW(I,J)
SUMINFLOW(I,J)=SUMINFLOW(I,J)+INFLOW(I,J)
609 CONTINUE
!***** 以下対象箇所流量出力除去部分

```

```

!***** 以上対象箇所流量出力除去部分

!*****
!***** SELECT OUTPUT CYCLES *****
!*****
IF(LONGPERIOD=10)THEN
    DO 710 KS=10,4320,10
! 72時間後までは10分間毎
        IF(K<=4320*60/TIME.AND.K=60*KS/TIME)GO TO 701
    710    CONTINUE
ELSE IF(LONGPERIOD=0)THEN
    DO 700 KS=1,72
! 72時間後までは1時間毎
        IF(K<=72*60*60/TIME.AND.K=60*KS*60/TIME)GO TO 701
!
        IF(LONGPERIOD=0.AND.K<=72*60*60*10.AND.K=60*KS*60*10)GO TO 701
    700    CONTINUE
END IF
!
! VTK 出力へ (GO TO 4990) POST(1)
GO TO 4990
!***** 積算量総流出量計算 *****
!***** 初期化 *****
!-----物質収支出力用-----
701    CMBTRUNOFF=0
        CMBTSUMPENT=0
        CMBTSUMEVAP=0
        ASOILWC=0
        TOTAL_PENETRATION(I,J)=0
        TOTAL_EVAPORATION(I,J)=0
        WCNU=0
!***** OUTPUT 計算 *****
        DO 702 J=1,N
            DO 702 I=1,M
                IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 702
!-----物質収支出力 (水除去メッシュと標高999を除く計算領域全体出力) Tabuchi 出力 MassBalance ファイル
                IF(WAEL(I,J)=0)THEN
                    CMBTRUNOFF=CMBTRUNOFF+SURFACE_WATER(I,J)
                    CMBTSUMPENT=CMBTSUMPENT+SUMPENT(I,J)
                    CMBTSUMEVAP=CMBTSUMEVAP+SUMEVAP(I,J)
                    ASOILWC=ASOILWC+SOILWC(I,J)

                    TOTAL_PENETRATION(I,J)=TOTAL_PENETRATION(I,J)+SUMPENT(I,J)! 各メッシュの全蒸発量、全浸透量
                    TOTAL_EVAPORATION(I,J)=TOTAL_EVAPORATION(I,J)+SUMEVAP(I,J)

```

```

WCNU=WCNU+1
END IF
702 CONTINUE
!***** OUTPUT *****
! ***** 計時変化 総水量 OUTPUT (runoffresult28.csv, WATER BANLANCE.csv(廃止 MassBalance ファイルに統合 2012.7.26))*****
! Jim's pool watershed の場合に利用する (集水地内の積算貯水量を見るファイル)
IF(JP=1.OR.JP=2)THEN
! runoffresult28
IF(LONGPERIOD=0)WRITE(280,1100)K*TIME/3600
IF(LONGPERIOD=10)WRITE(280,1200)K*TIME/60
WRITE(280,*)最低標高の水位[m] (WATERLEVEL)
WRITE(280,*)SURFACE_WATER(III,JJJ)
WRITE(280,*)'
END IF
! Confirmation mass balance(Tabuchi)(2012.7.26 変更)
! 手計算から求めた計算領域への降雨量とモデル結果を比較し、総量が一致することを確認 (物質収支の確認)
IF(REPEAT=1)THEN
IF(LONGPERIOD=0)WRITE(40,1100)K*TIME/3600
IF(LONGPERIOD=10)WRITE(40,1200)K*TIME/60
WRITE(40,*)CMBTRUNOFF ! 表面流出水
WRITE(40,2000)CMBTRUNOFF
WRITE(40,*)CMBTSUMPENT ! 浸透水
WRITE(40,2000)CMBTSUMPENT
WRITE(40,*)CMBTSUMEVAP ! 蒸発水
WRITE(40,2000)CMBTSUMEVAP
WRITE(40,*)TLOSTSUMRAIN ! 水除去量
WRITE(40,2000)TLOSTSUMRAIN
WRITE(40,*)ASOILWC ! 全域での土壌含水率
WRITE(40,2000)ASOILWC/WCNU
WRITE(40,*)'
1100 FORMAT('F10.2' hour)
1200 FORMAT('F10.2' minute)
2000 FORMAT(F15.5)
END IF
! 再初期化する (次のステップのため)
CMBTRUNOFF=0
CMBTSUMPENT=0
CMBTSUMEVAP=0
! *****
!!!IF(OUTPUT=1)THEN ! MESH 毎のデータを出力させる場合
! IF(JP=0)THEN

```

```

!      JP=0 内では 700 番台を利用する予定
!      現在は、300MESH 以下の計算の場合は、JIMS と同様に出力させている。
!      END IF
!      IF(JP=1.OR.JP=2.OR.JP=0)THEN
!      JP=0 内では 800 番台を利用
!          IF(M=600)THEN
!      ***** 表層水(SURFACE_WATER) *****
!!      DO 800 J=1,N
!      DO 800 I=1,M
!      ALRA(L,J)=ALTTITUDE(L,J)+SURFACE_WATER(L,J)

!***** 以下表層水出力除去部分

!!800    CONTINUE

!***** 以下 SUMRAIN 3分割出力除去部分

!***** 以下 JPALRA 出力除去部分

!***** 以下 KMAXFLOW 出力除去部分

!***** 以下蒸発水出力除去部分

!***** 以下浸透水出力除去部分

!***** 以下最大水量除去部分

!***** 以下土壌含水率出力除去部分

!***** 以下 x=6km 時 LOSTSUMRAIN 出力除去部分

!***** 以下 20m mesh 計算時出力2分割除去部分

!***** 以下 20m mesh 計算時出力一括除去部分
!      END IF    !IF(M=)より
!      END IF    !IF(JP=)より
!      END IF    !IF(OUTPUT=1)より
!      *****
!      1 日までの出力
!          IF(K<=24*3600/TIME)THEN
!          IF(K<=24*3600*10)THEN
DO 780 KS2=10,4320,10

```

```

! 72時間後までは10分間毎
      IF(K=360*KS2/TIME)WRITE(*,*)K,SURFACE_WATER(III,JJJ),(K*TIME/3600,'hour(s) 終了'
780      CONTINUE
!
!   WRITE(*,*)K,'cycle(s) (,K*TIME/3600,'hour(s) 終了',SURFACE_WATER(III,JJJ)
!
!   1日を超えた時の出力
!
!   ELSE IF(K>24*3600/TIME)THEN
!
!     MMM=K*TIME
!
!     ZZZ=MOD(MMM,86400)
!
!     ZZ=(K*TIME-ZZZ)/86400
!
!     WRITE(*,*)K,'cycle(s) (,ZZ,'day(s)',ZZZ/3600,'hour(s) 終了',SURFACE_WATER(III,JJJ)
!
!     END IF
!!!!: Added by Tomy :
4990  IF(mod(K,72000)=0) WRITE(*,*)'end' !!!!   (2012.5.16よりコメントアウト),NCYCLE,)終了,SURFACE_WATER(III,JJJ)
! :
!!!!可視化時コメントアウト解除
! ステップデータのVTK出力 !by TOMY
!!
!!   IF(VTK=1)THEN
!!
!!   IF(kFile>0) then
!!
!!     if(mod(K,KFile)=0) then
!!
!!       call post(1)   !0:Altitude,1:Step calculation data
!!
!!     endif
!!
!!   endif
!!
!!   END IF
! :
! -----
!   read break conditions by Tomy
! -----
!!!   call stpflg           !Stop flag を読む
!!!
!!!       if (ibreak>0) exit   !STOPFILEの内容が1でEXIT
!---- End search break condition-----
!!!!: Added end by Tomy :
!
!   ***** 水位 < 0 かの最終確認 *****
!!
!!   DO 900 J=1,N
!!
!!     DO 900 I=1,M
!!
!!       IF(ALTITUDE(I,J)>=998.0) GO TO 900
!!
!!         IF(SURFACE_WATER(I,J)<0) THEN
!!
!!           WRITE(*,*)SURFACE_WATER(I,J),ij,'overwater'
!!
!!           go to 99999
!!
!!         END IF
!!900  CONTINUE
!
!   *****
! -----

```

```

!----- K TIMES CALCURATION (CONTINUE) -----
!-----
5000 CONTINUE
! :-----
!!!!可視化時コメントアウト解除
! 最終データのVTK出力 !by TOMY
!! IF(VTK=1)THEN
!! call post(1) !0:Altitude,1:Step calculation data
!! END IF
! :-----
!-----PRINT OUT-----
IF(REPEAT=50)THEN
WRITE(*,*) 計算条件確認
WRITE(*,*) 'M=',M,'N=',N
WRITE(*,*) 'JP=',JP
WRITE(*,*) 'LEVEL=', LEVEL
WRITE(*,*) 'Time step=',TIME
WRITE(*,*) 'PR=', PR
WRITE(*,*) 'NMAN=',NMAN(1,1)
WRITE(*,*) 'FILL=',FILL
WRITE(*,*) 'VTK=',VTK
WRITE(*,*) 'RIM=',RIM
END IF
IF(REPEAT=1)THEN
WRITE(10,*)***** 計算結果 *****
WRITE(10,*) K-1
WRITE(10,*) 'RD'
WRITE(10,*) RD

WRITE(390,1000) SUMFLOW !!!!
WRITE(450,1000) SUMINFLOW !!!!
WRITE(460,1000) TOTAL_PENETRATION !!!!
WRITE(470,1000) TOTAL_EVAPORATION !!!!
END IF

1000 FORMAT(1471F15.10) !広域横 1471 メッシュの時
!1000 FORMAT(600,F15.10) !Jim'spool の時
! 出力ファイルの全てを閉じる
CLOSE(280)!runoffresul28

CLOSE(390)!SUMFLOW
CLOSE(450)!SUMINFLOW

```

```

CLOSE(46)!TOTAL_PENETRATION
CLOSE(47)!TOTAL_EVAPORATION

!CLOSE(20)!SOILWC
!CLOSE(35)!SURFACE_WATER
!CLOSE(55)!SUMEVAP
!CLOSE(65)!SUMPENT
!CLOSE(290)      !runoffresultPOINTFLOW (2012.5.16 追加)
!CLOSE(85)!ALRA
      IF(REPEAT==1)CLOSE(40)      !CONFIRMATIONMASS BALANCE
      IF(REPEAT==1)CLOSE(10)     !runoffresult
!!!      close(NLOG)  !LOG File number のクローズ (未使用) by TOMY
!  STOP
!      END
10000 CONTINUE
CALL cpu_time(CLOCKFINISH)
WRITE(*,*)'CPU TIME',CLOCKFINISH - CLOCKSTART,' seconds'
99999      WRITE(*,*)STOP
STOP
end program main
!***** 以下 subroutine 除去部分

```

論文リスト

印刷済み

1. 横佩おさむ・木代深・加藤茂・里川重夫・小島紀徳：「天然物由来の新規生分解性保水材の合成とその評価」 化学工学論文集, Vol.37, pp. 361-364, (2011)
→第二章
2. Osamu Yokohagi, Hironori Tabuchi, Hideki Suganuma, Katsuhiko Kurosawa, Toshinori Kojima: Effect of Difference in Rainfall Patterns and Intensities on Runoff Simulation Results in Arid Land. Journal of Arid Land Studies, Vol.22, No.1, pp.307-310. (2012)
→第六章
3. 横佩おさむ・小島紀徳：「西オーストラリア乾燥地での表面流出モデルに与える浸透速度式の影響」 MACRO REVIEW, Vol.25, No.2, pp.1-6. (2013)
→第七章

投稿中

4. Osamu YOKOHAGI, Toshinori KOJIMA, Hideki SUGANUMA, Tadaomi SAITO: Effect of Difference in Vegetation Type on Runoff Simulation Results in Arid Land Journal of Arid Land Studies
→第三章、第七章

投稿準備中

第三章、第七章

第九章、第十章

学会発表リスト

口頭発表

1. 横佩おさむ・木代深・山崎章弘・菅沼秀樹・加藤茂・小島紀徳：「天然物由来の新規保水材の合成」B14,第11回化学工学会学生発表会(郡山大会),7Sat,2009.3
2. 小島紀徳・横佩おさむ・木代深・山崎章弘・菅沼秀樹・加藤茂：「生分解性保水材の合成と評価」第20回日本沙漠学会学術大会,筑波,23-24,2009.5
3. 横佩おさむ・小島紀徳・加藤茂・山崎章弘・菅沼秀樹・木代深：「生分解性保水材の合成におけるアルカリ添加の影響と吸水量評価」, I309 化学工学会第41回秋季大会, 広島大学, 16-18, 2009.9
4. 横佩おさむ・加藤茂・山崎章弘・菅沼秀樹・木代深・星圭介・小島紀徳：「新規生分解性保水材の合成と酵素分解による生分解性評価」E218,化学工学会第42回秋季大会,京都市同志社大,6-8,2010.9
5. O. Yokohagia, H. Tabuchia, N. Tanakaa, S. Koyanagia, K. Kurosawaa, H. Hamano, H. Suganuma, T. Kojima: “Numerical Parameter Determination of Large Scale Runoff Model for Arid Land Afforestation”, A196, The 8th Asia Pacific Conference on Sustainable Energy & Environmental Technologies (APCSEET 2011), The University of Adelaide, S.A. Australia, 10–13 July 2011
6. 横佩おさむ・菅沼秀樹・齊藤忠臣・黒澤勝彦・小島紀徳：「乾燥地大規模植木の植林地選定に用いる表面流出モデルの改良」O22,日本沙漠学会・第23回学術大会,帯広畜産大学,26-27,2012.5
7. Osamu YOKOHAGI, Toshinori KOJIMA, Hideki SUGANUMA, Tadaomi SAITO: “Effect of Difference in Vegetation Type on Runoff Simulation Results in Arid Land”, Desert Technology ϕ , San Antonio, United States of America, 19-21, 2013.11

ポスター発表

8. O. Yokohagi, F. Kishiro, H. Suganuma, S. Kato, S. Satokawa and T. Kojima: “Synthesis of Novel Super Water Absorbent Material and Evaluation of its Biodegradability”, Proc. in CD, 272, The Intern. Conference on Environment 2010 (ICENV 2010), Penang, Malaysia, 13-15, 2010.12
9. Osamu Yokohagi, Hironori Tabuchi, Hideki Suganuma, Katsuhiko Kurosawa and Toshinori Kojima: Effect of Difference in Rainfall Patterns and Intensities on Runoff Simulation Results

in Arid Land Desert Technology X (First Intern. Conf. on Arid Land, ICAL 1), Toyoko Inn
Narita Kuko, 24-28, May, 2011

- 10.** Osamu YOKOHAGI, Toshinori KOJIMA, Hideki SUGANUMA, Tadaomi SAITO: “Effect of Infiltration Formula Type on Runoff Simulation Results in Arid Land”, The 9th Asia Pacific Conference on Sustainable Energy & Environmental Technologies (APCSEET 2013), Narita, Japan, 5-8, 2013.7

謝辞

本研究を進めるにあたり、多忙な中貴重な時間を割いてご指導くださいました、小島紀徳教授に厚く御礼申し上げます。また菅沼秀樹前助教、加藤茂先生にもご指導いただき感謝いたします。

モデル構築の際に土壌浸透速度の貴重な実測データを提供していただいた鳥取大学生物資源環境学科の齊藤忠臣先生にも厚く御礼申し上げます。

またモデル開発において、コンピュータやプログラムに関して、物質シミュレーション研究室の坂本昇一助教、ナノテクノロジー研究室の板村賢明助教にアドバイスをいただきましたことを感謝いたします。

学部、修士課程、博士課程の在学中に物質生命理工学科および理工学研究科の各先生には大変お世話になりました。心から感謝いたします。また小島研究室の皆様にも大変お世話になりました。

最後に長きにわたる学生生活を支えてくれた両親に感謝いたします。