

モンゴル北部・永久凍土地帯における
火災後のカラマツ林再生メカニズムの解明

平成 21 年 1 月
(2009 年)

帯広畜産大学大学院畜産学研究科
修士課程 畜産環境科学専攻

伊藤 潤哉

Clarification of regeneration mechanism
of burnt larch forest in the permafrost
region of northernmost Mongolia

January 2009

Junya ITO

Master Course of
Agro-Environmental Science
GRADUATE SCHOOL OF
OBIHIRO UNIVERSITY

目 次

1. はじめに	1
2. 試験・調査方法	
2-1 室内試験	
2-1-1 試験概要	7
2-1-2 水分に関わる試験	12
2-1-3 光に関わる試験	14
2-1-4 温度に関わる試験	17
2-2 現地調査	
2-2-1 調査地の概要	20
2-2-2 母樹調査	29
2-2-3 更新木調査	29
2-2-4 種子・草本・土壌水分調査	29
3. 結 果	
3-1 再生メカニズムの因子	
3-1-1 種子供給	32
3-1-2 発芽・定着	35
3-1-3 生育	47
3-2 再生の状況	53
4. 考 察	
4-1 再生メカニズムの因子	
4-1-1 種子供給	66
4-1-2 発芽・定着	66
4-1-3 生育	66
4-2 再生と母樹との関係	68

5. まとめ	71
謝辞	72
参考文献	73
Summary	75

1. はじめに

モンゴル北部・フブスグル地域は、東シベリアの連続永久凍土地帯およびタイガ地帯の南端であり、北緯 51 度、東経 99 度、標高 1,600m 付近に位置する (図 - 1) ¹⁾。現地気象台 ²⁾ (ツァガノール) によると、年平均気温 -6°C、年平均降水量 210mm と寒冷で乾燥な気候であるため、本来なら連続した森林は形成されにくい。丘陵の南向き斜面では、高緯度であるため受ける日射量が多く、夏季には土壌の凍結が深くまで融ける。このため、夏の降雨による侵食を受けやすく急斜面となり、融けた土層から水が排出され土壌が乾燥し、樹木が生育できず草原となる ³⁾。一方、北向き斜面では、日射量が少なく緩斜面となり、連続した森林が形成される (図 - 2)。樹種は高山帯をのぞき、ほぼ全面的に落葉針葉樹であるシベリアカラマツ (*Larix sibirica*) ⁴⁾ で覆われている。これは、年間蒸発散量が少なく凍結に強いカラマツが優占すると考えられるためである ³⁾。また、夏季の厳しい早ばつ時には、表層の凍土が融解し、水の供給源となることや、余剰の水は土壌中に保持・貯留されるため、降水量が少なく乾燥した地域でも森林が維持されている ⁵⁾。同様の気候下での森林は、アラスカやカナダ北部でもみられ、丘陵の南向き斜面に常緑針葉樹の高木林が、北向き斜面に湿地低木林が形成されている ⁶⁾。この斜面による植生の違いは、丘陵の南向き斜面で土壌が乾燥し、北向き斜面で土壌の排水が悪いため生じたものである。両地域は、永久凍土地帯で年降水量が 250mm 程度と乾燥気候であり、温量指数 ³⁾ も 30 前後とほぼ同じだが、モンゴル・フブスグル地域のほうが冬の平均気温 (12~2 月) が -29.4°C と低いため、落葉針葉樹のカラマツ林が優占し、厳しい環境条件であることを意味する ⁶⁾。また現地の発芽・生育状況は、9 月中旬頃に種子が落下し、その上にカラマツの枯れ葉であるリターが覆い、その状態で越冬し、翌年の 6 月上旬頃に発芽がみられ、8 月下旬まで生育する。1992 年以降の現地気象台による発芽・生育時期の気象データ ⁷⁾ は、6 月の日最低気温が -5.5~0.9°C、月降水量が 11.4~70.4mm、6~8 月の降水量の合計が 71.3~197.1mm である。6~8 月の最も長く降水のなかった期間は 16 日間である。こうした気象データを踏まえて、発芽直後の更新木に及ぼす低温や発芽・生育時の降水の影響も懸念され、モンゴル北部地域は森林形成に厳しい環境条件であるといえる。

一方、同地域では、現地の人々による狩猟など主に人為的な原因により森林火災が多発している (図 - 3)。遊牧を主とする現地では、森林との共生が必要であり、火災

後の自然再生が大きな問題となっている。近年モンゴルでは、森林管理機関を中心に育苗・植林事業がおこなわれてきているが、広大な森林火災跡地を植林だけで再生させることは、厳しい環境・多大な費用・労働力を考えると現実的ではない。また、自然再生は、段階的に長い時間を必要とする過程であり、火災後数年を経ても再生していない場所が多く見られる。人為的に森林再生の促進方法を見出すことができれば、他の自然環境や生態系への影響も軽減できると考えられる。

一般に森林火災後の再生過程は、火災により母樹が減少・消失した後、種子の供給、発芽・定着、生育を経て森林回復に至る（図 - 4）。ここで、火災後、樹冠が残って種子を付けている樹木を母樹、発芽・生育した樹木を更新木とする。永久凍土地帯における森林火災後の研究は、主に東シベリアやカナダでおこなわれているが、モンゴル北部地域での研究は少ない。また、世界的に森林火災による永久凍土の融解や活動層の熱・水収支特性⁸⁾などの研究はあるが、森林の再生に関わる研究も少ない。東シベリアの樹種は、山火事により初めて球果を開き、多量の種子を散布し更新を図るダフリアカラムツ (*Larix dahurica*) であり⁹⁾、世界各地の針葉樹の形態や気象環境の違いからも、モンゴル北部での研究は重要である。

本研究は、火災後のシベリアカラムツ林再生メカニズムの解明を目的に、発芽・定着・生育に関わる水分・光・温度を調べるため日本で室内試験を、火災後十数年を経た現地の再生状況・種子の供給・光・水分環境を調べるためモンゴルで現地調査をおこなった。



図 - 2 モンゴル北部の典型的な丘陵



図 - 3 火災直後の森林（2008 年 8 月）

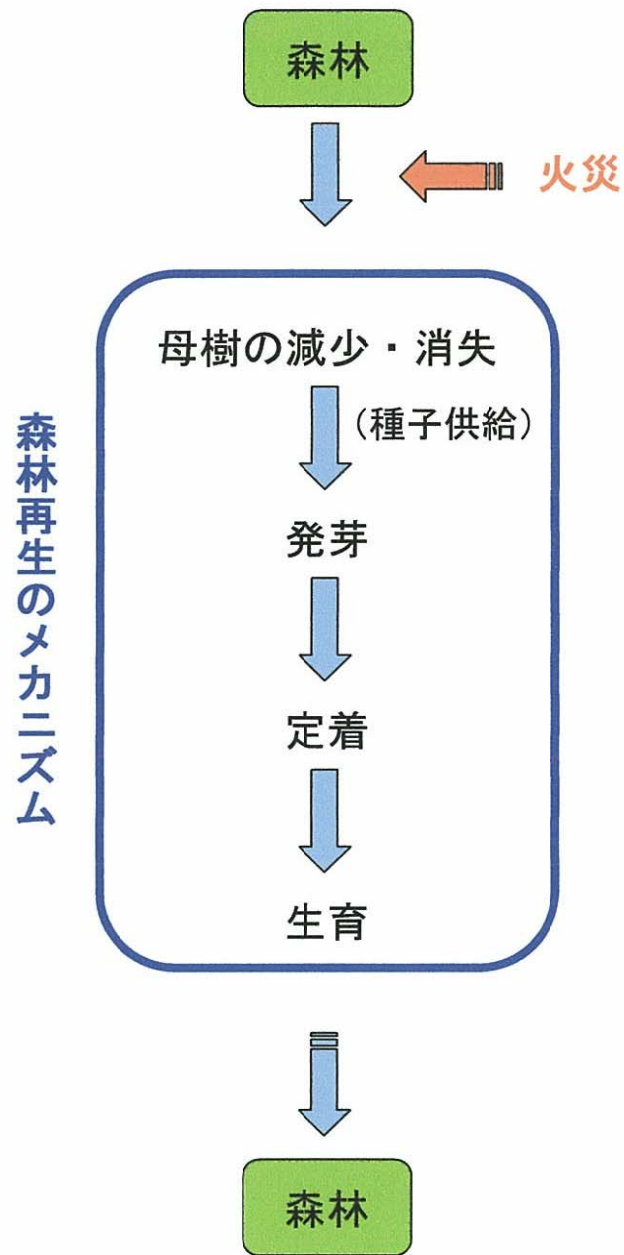


図 - 4 森林火災後の再生過程

2. 試験・調査方法

2-1 室内試験

2-1-1 試験概要

試験は、帯広畜産大学構内（北海道帯広市）のビニールハウス内でおこなった（図 - 5.1）。ビニールハウスには、現地の北向き斜面や森林内の光量を想定して直射光を和らげるため、全体に緑のネットをかけた。試験項目は、現地における発芽・生育時期の気象条件を踏まえて、水分・光・温度に着目して設定した（表 - 1）。2007年6月中旬～9月上旬に乾燥試験，低温試験を，2008年9月下旬～10月下旬に水分 - リター試験，散水間隔試験，光量子試験，光量子 - リター試験，温度 - リター試験をおこなった。水分は，水分 - リター試験で水分量が発芽・定着に及ぼす影響と，散水間隔試験と乾燥試験で散水間隔が発芽に及ぼす影響について調べた。光は，光量子試験で光量子量が発芽に及ぼす影響について調べた。また温度は，低温試験で負温度が定着直後の更新木に及ぼす影響について調べた。試験環境を把握するために，ビニールハウス内の温度と湿度を，自記温湿度計（ティアンドデイ社のRTR - 53）を使用して1時間毎に測定した（図 - 5.2～4）。

供試体は，底にネットを敷いたプランター（縦270mm，横105mm，高さ85mm）に，4.75mmふるいを通し体積含水率15%程度になるよう調整した緑化用客土¹⁰⁾を，現地土壌の乾燥密度（0.8g/cm³）を目安に3層に分けて締め固めて作成した。また，水分量の変化を測定できるようにプランターを含めた全重量を2,000g以下とした。つぎに，試験前年の秋に現地で採取しエタノールに沈下したシベリアカラマツの種子を，冷蔵庫（5℃前後）で保存し，播種前に約24時間水に浸して試験に使用した。1供試体あたり50粒を土壌表面に均等に播種し，これを試験開始とした。試験結果は，統計的に処理するため，1条件につき3供試体を準備し，3つの平均値を使用した。



図 - 5.1 室内試験に使用したビニールハウス

表 - 1 室内試験項目

分類	試験名
1. 水分に関わる試験	(a) 水分-リター試験
	(b) 散水間隔試験
	(c) 乾燥試験
2. 光に関わる試験	(a) 光量子試験
	(b) 光量子-リター試験
3. 温度に関わる試験	(a) 低温試験
	(b) 温度-リター試験



図 - 5.2 ビニールハウス内で使用した自記温湿度計

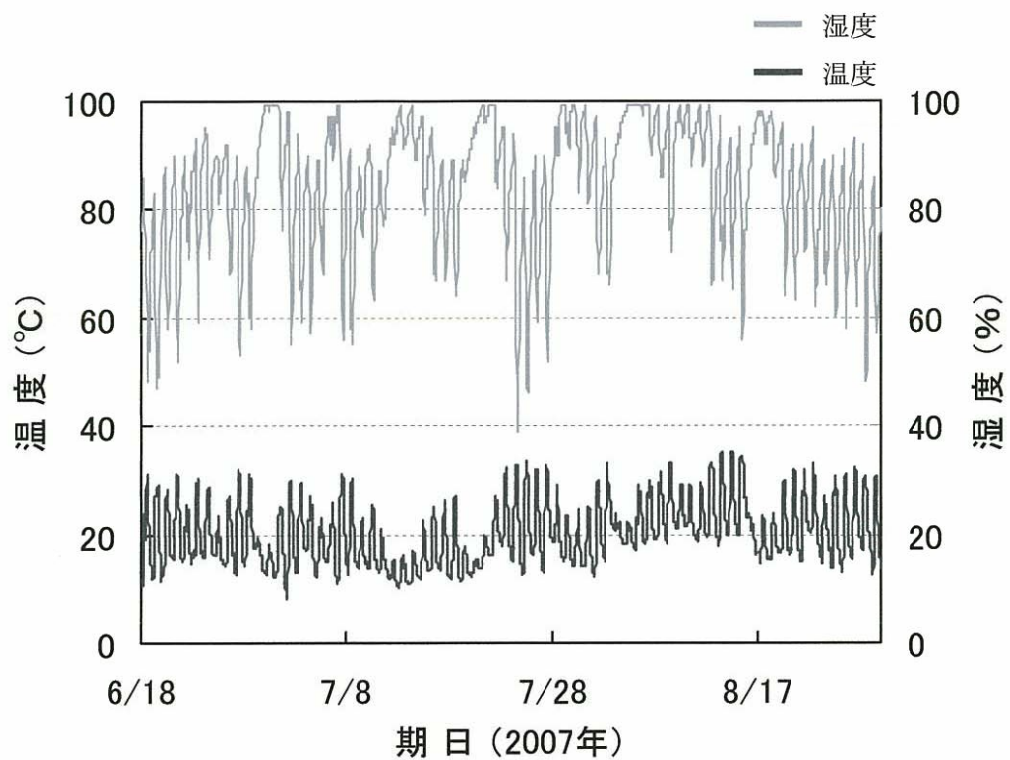


図 - 5.3 ビニールハウス内の温度・湿度（2007年実施の試験）

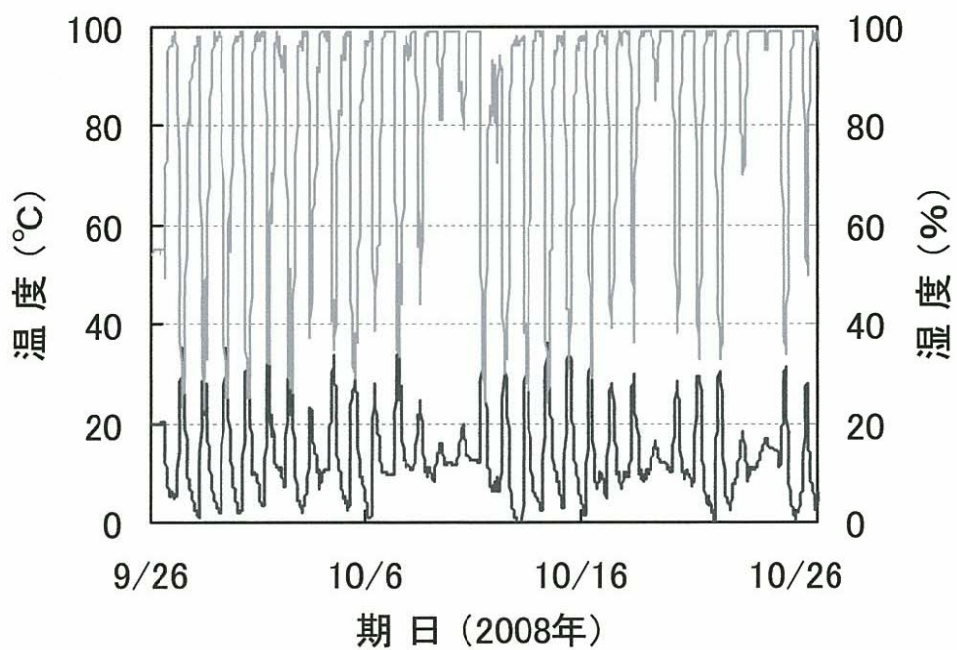


図 - 5.4 ビニールハウス内の温度・湿度（2008年実施の試験）

2-1-2 水分に関わる試験

水分一リター試験は、水分量とリターが発芽・定着に及ぼす影響について調べた。散水量は、現地の発芽時期（6月）の降水量を目安に15, 20, 25, 30, 45, 60, 75mm/月の7段階に設定し、各々に相当する水量43, 57, 71, 85, 128, 170, 213mlをメスシリンダーで量り、均一になるように洗浄びんを使用して3日おきに散水した。リターは、播種後4段階の厚さ0, 0.4, 0.8, 1.3cmで表面に被覆した。試験条件は、散水量とリター厚の組み合わせで28種類である。結果は、発芽後リターの上に出現したものを定着数とし、試験開始1ヶ月後の播種数に対する定着数の割合を定着率として試験条件別に求めた。この間、散水量の少ない15, 20, 25mm/月の3段階は、土壤水分計（ロガー：Onset社のHOBOマイクロステーション、センサー：Decagon Devices社のECH₂O EC-5）を使用して、土壤の深さ0~5cmにおける体積含水率を1時間毎に自動測定した（図-6）。

散水間隔試験は、所定の散水量を1回または複数回に分けて散水することで、発芽に及ぼす影響について調べた。種子を約1cm厚に土で被覆し、30mm/月に相当する散水量を5段階の間隔3, 9, 15, 21, 27日に1回の割合で同様に散水した。結果は、発芽したものを発芽数とし、試験開始1ヶ月後の播種数に対する発芽数の割合を発芽率として散水間隔別に求めた。

乾燥試験は、発芽後の無散水期間が生存に及ぼす影響について調べた。種子を約1cm厚に土で被覆し、60mm/月に相当する散水量を3日おきに同様の方法で散水し発芽させた。播種1ヶ月後から散水を停止して、これを試験開始とし、葉全体が変色していないもの（生存）と、黄色に変色したもの（非生存）の数を測り、全供試体が非生存になるまで試験を継続した。結果は、生存している数を観測日の生存数とし、試験開始時の発芽数に対する生存数の割合を生存率として無散水期間5日おきに求めた。

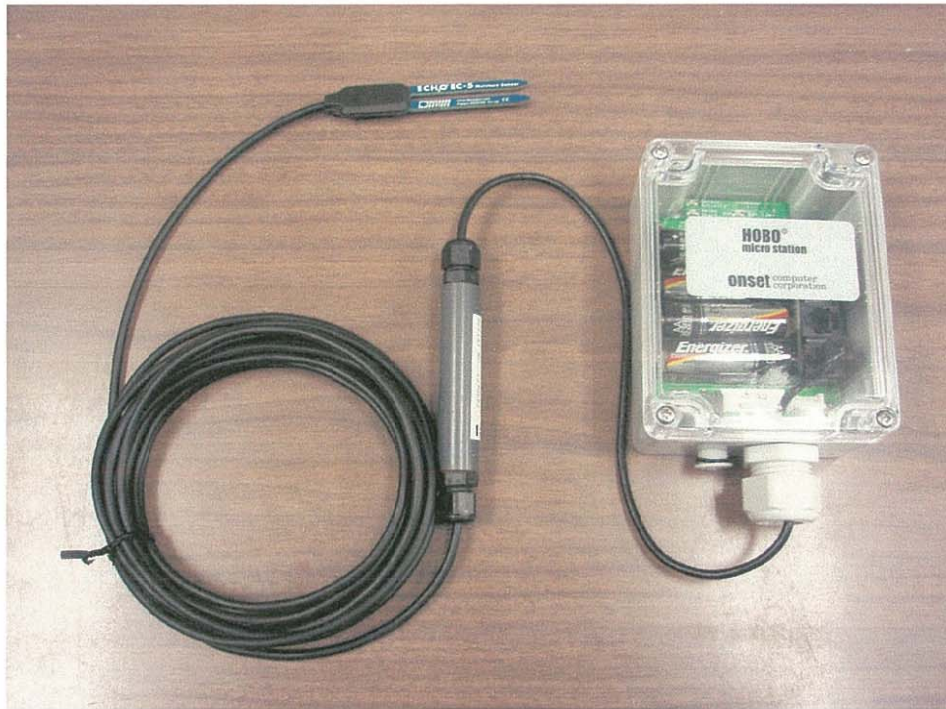


図 - 6 土壤水分計

2-1-3 光に関わる試験

光量子試験は、一定の水分条件下で光量子量が発芽に及ぼす影響について調べた。供試体は、水を入れた透明の容器（縦310mm，横225mm，高さ58mm）に発泡スチロール（縦250mm，横100mm，高さ17mm）を浮かべ、毛管現象で水が常に供給されるように、両端を水に浸した3枚のガーゼを敷き、10粒×6列で均等に播種し作成した。試験は、供試体を覆わないもの、側面がダンボールで上面が半透明のフィルム・黒いフィルム・ダンボールで覆ったものの4条件を各1供試体についておこなった（図-7.1）。ここで光量子とは、植物が光合成を行う際に必要な波長領域400～700nmの光子とし、測定単位は $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ である。光量子量は、光量子計（ロガー：タスコジャパン社のTMS 870DL(DO 9721)，センサー：LP 9021 PAR）を使用して、直射光に対する割合である相対光量子量としておのおのの値を求めた（図-7.2）。結果は、発芽したものを発芽数とし、試験1ヶ月後の播種数に対する発芽数の割合を発芽率として相対光量子量別に求めた。

光量子リター試験は、光量子量とリター厚との関係を調べた。光量子計のセンサーを入れたプランターの上部に透明なフィルムを設置し、水分リター試験で用いた厚さ0，0.4，0.8，1.3cmでリターを敷き、リター下の種子が受ける光量子量を計測した。



図 - 7.1 光量子試験の様子



図 - 7.2 光量子計

2-1-4 温度に関わる試験

低温試験は、負温度が定着直後の更新木に及ぼす影響について調べた。乾燥試験と同様の方法で作成・発芽させた供試体を、急激な温度変化を防ぐため約半日+5°C前後で予冷した後、低温恒温器 (FUKUSHIMA 社の FMU-132L) を使用して 8 段階: -1.6, -3.2, -5.5, -7.7, -9.4, -10.3, -12.5, -16.9°C (低温恒温器内の平均温度) の負温度の環境下に約 4 時間放置した (図 - 8.1)。この際、周囲からの冷却を防ぐために断熱材を詰めたダンボール内にプランターを置いた。放置後は、供試体を約半日+5°C前後の温度環境に置いてから、ビニールハウス内の常温に戻し、元の散水管理を継続した。結果は、常温に戻してから 1 週間後に葉が変色せず生存している数を生存数とし、発芽数に対する生存数の割合を生存率として負温度別に求めた。低温恒温器内の平均温度は、自記温度計 (HIOKI 社の 3633 温度ロガー) を使用して 10 分毎に測定した (図 - 8.2)。

温度—リター試験は、プランターの土壌表面にある種子に及ぼすリターの断熱効果を調べた。水分—リター試験で用いた厚さ 0, 0.4, 0.8, 1.3cm 毎に、リターの下に設置した温度センサーで温度変化を計測し、リター厚と土壌表面温度との関係を求めた。



图 - 8.1 低温恒温器



図 - 8.2 低温試験で使用した自記温度計

2-2 現地調査

2-2-1 調査地の概要

調査は、2006・2007・2008年の8月中旬～9月中旬に1回の調査2～3週間、合計3回、モンゴル北部・フブスグル県にあるダルハド盆地北西部の火災跡地2ヶ所でおこなった(図-9.1～2)。同盆地は、フブスグル湖(同国最大の淡水湖で面積2,760km²)の西方に位置し、面積は約3,000km²である。調査地は、複数の地元民の証言から、1991年6月に森林火災が発生したとされるSite A(基点:北緯51度13.707分,東経99度23.849分,標高1,563m)と、1996年5月に火災が発生したとされるSite B(基点:北緯51度23.684分,東経99度17.544分,標高1,652m)で(図-9.3)、両Siteの距離は約20kmである。調査地点は、両Siteとも丘陵の斜面下からA1, A2, A3, A4, およびB1, B2, B3, B4の各4地点であり、調査年はA1が2006年, A2, A3, A4, B1, B2, B4が2007年, B3が2008年である。調査項目は、母樹, 更新木, 種子, 草本, 土壌水分であり、コドラート法による調査をおこなった。

また、両Siteの火災範囲や丘陵の地形を調べるために、GPSを使用して緯度・経度・標高を測定した。緯度・経度の値を、緯度51°で1秒に相当する弧の長さ各々30.90m・19.49mとしてメートル単位の距離に換算し¹¹⁾、両Siteの火災範囲の全景や調査地点の位置、丘陵の斜面長や勾配を調べた。両Siteとも北向き斜面であり、Site Aは、A1からA4までの水平距離が約495mで、斜面勾配が平均12°であるのに対し、Site Bは、B1からB4までの水平距離が約3,750mで、斜面勾配が平均2°である(図-10.1～2, 11.1～2)。また、斜面に沿って母樹・更新木や草本植生の分布状況を写真で撮影した(図-10.3～6, 11.3～6)。これより、Site Aでは、火災の程度が比較的小さく、斜面上に残った母樹が多くみられ、斜面下に密生した更新木が多くみられる。一方、Site Bでは、火災の程度が大きく、斜面全体に母樹が焼失して少なく、生育した更新木も少ない状況である。



フブスグル県

調査地

図 - 9.1 モンゴル国全体の衛星画像



図 - 9.2 ダルハド盆地（写真左）の衛星画像

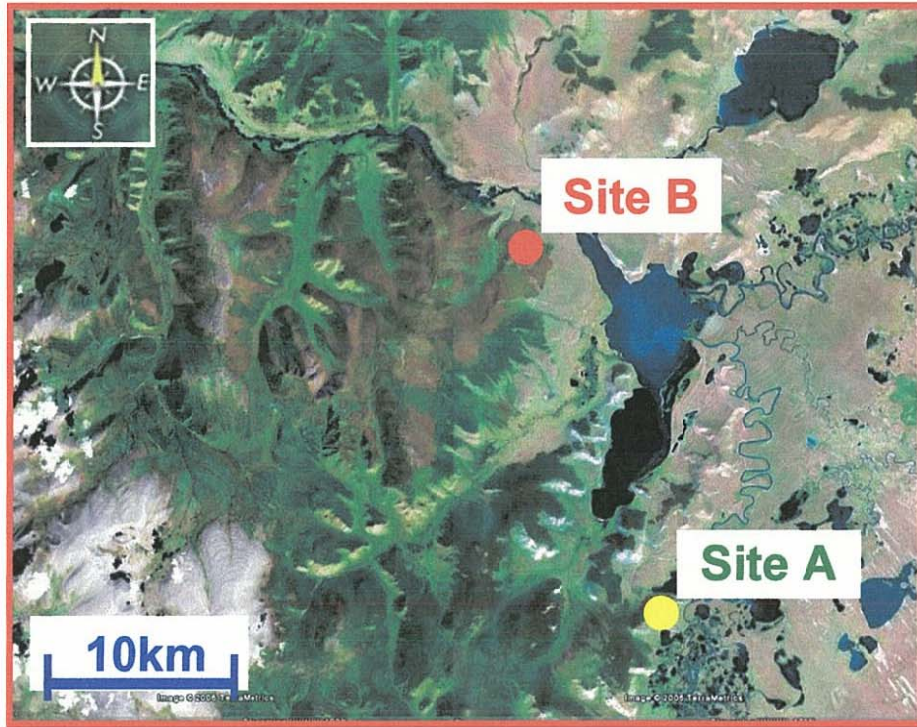


図 - 9.3 調査地点を拡大した衛星画像

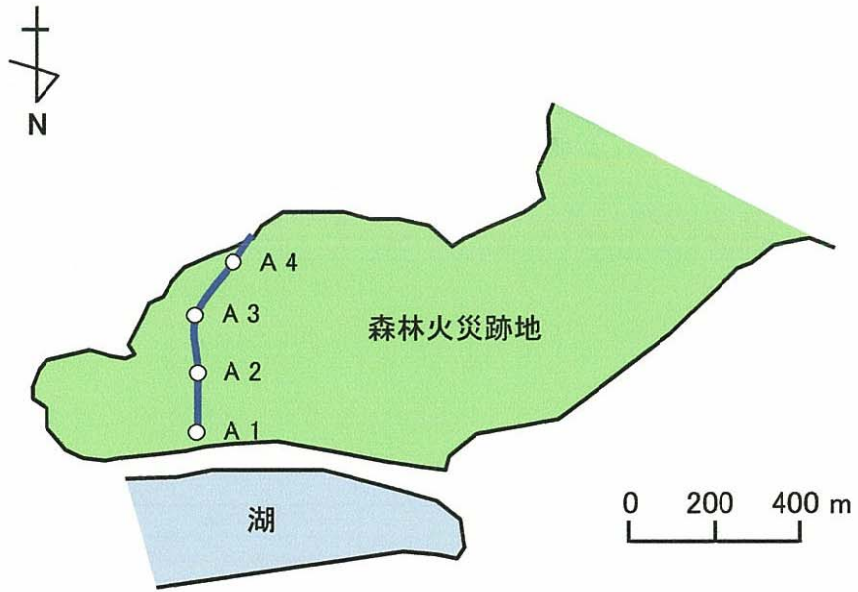


図 - 10.1 Site Aの全景図

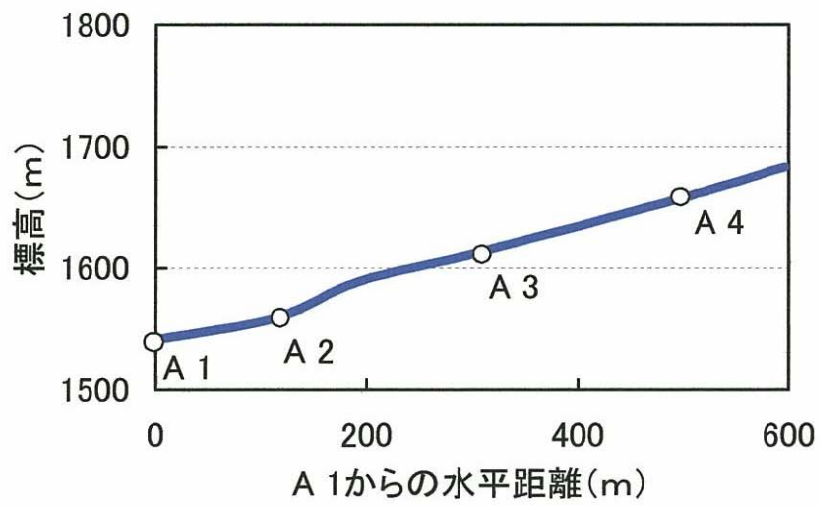


図 - 10.2 Site Aの断面図



図 - 10.3 調査地点 A1 の様子



図 - 10.4 調査地点 A2 の様子



図 - 10.5 調査地点 A3 の様子



図 - 10.6 調査地点 A4 の様子

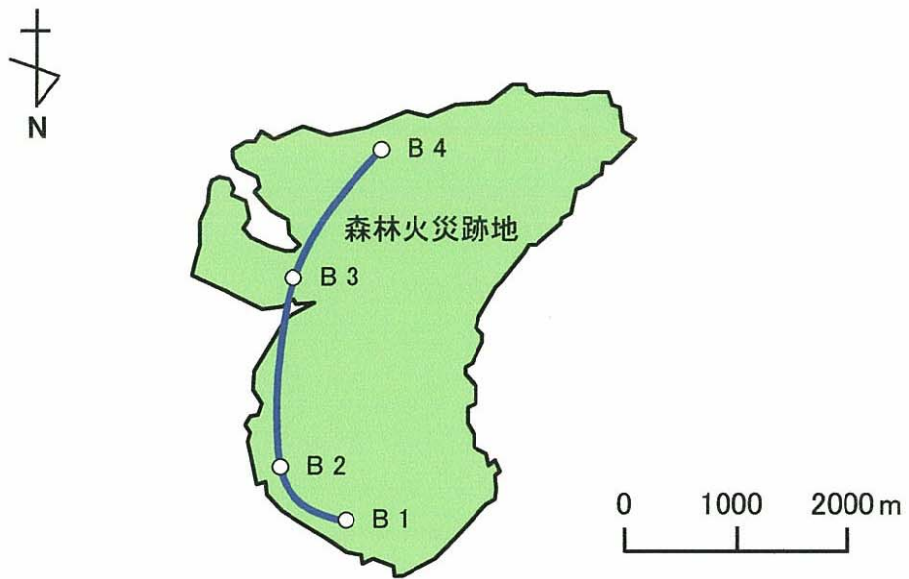


図 - 11.1 Site B の全景図

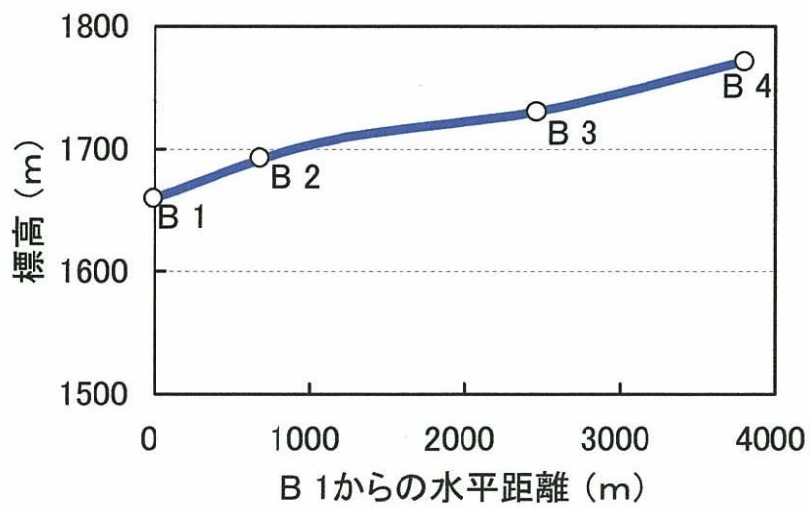


図 - 11.2 Site B の断面図



図 - 11.3 調査地点 B1 の様子



図 - 11.4 調査地点 B2 の様子



図 - 11.5 調査地点 B3 の様子



図 - 11.6 調査地点 B4 の様子

2-2-2 母樹調査

母樹の調査は、比較的母樹が残っている Site A に 30m×30m、母樹が少ない Site B に 100m×100m のコドラートを設定して、本数・胸高直径 (mm)・樹高 (m)・樹齢 (年) を測定した (図 - 12, 13)。また、Site A は 30m×30m のコドラート内で、Site B は 100m×100m のコドラート内に 30m×30m のサブコドラートを 2ヶ所設定して、枯れ木と切株の本数を測定した。結果は、本数を 1ha あたりに換算した生育密度 (本/ha)、胸高直径と樹高をコドラート内全ての平均値、樹齢を調査地点の母樹の本数によって 1～5 本の平均値で表した。測定は、胸高直径を直径巻尺、樹高を距離計とトランシット、樹齢を樹木の年輪を割り貫く機器 (Haglof 社のインクリメントボア) を使用しておこなった (図 - 14)。

2-2-3 更新木調査

更新木の調査は、両 Site とともに各調査地点で母樹のコドラート内に 5m×5m のサブコドラートを 4ヶ所設定して、本数・根元直径 (mm)・樹高 (m)・樹齢 (年) を測定した (図 - 12, 13)。結果は母樹調査と同様に、本数を生育密度 (本/ha)、根元直径と樹高を平均値、樹齢を A1 と A2 で 20 本、他の調査地点でコドラート内全ての平均値で表した。また、各調査地点で 2007・2008 年の更新木 10 本の節間長さを測定し、各年の樹高に対する 1 年間の生長量 (cm) を求め、樹高に対する生長量の割合の平均値を生長率 (%) として求めた。測定は、根元直径をノギス、樹高を 5m のスタッフ (標尺) を使用しておこなった。発芽後数年の更新木の樹齢は、機器が使用できないため節の数から推定した。

2-2-4 種子・草本・土壌水分調査

種子・草本・土壌水分の調査は、両 Site とともに更新木のコドラート内に 1m×1m のサブコドラートを 4ヶ所設定して、新たに散布された種子数と、コドラート 2ヶ所設定して草本の被度・草丈・乾燥重量と、また 2ヶ所で深さ 5, 20cm の土壌の体積含水率を測定した (図 - 12, 13)。B3 の種子数は、2008 年 8 月下旬の調査で、その年の種子が落下していなかったため未調査である。草本の乾燥重量は、刈り取った草本をネットの袋に入れて、1ヶ月以上自然乾燥させた後に測定した。土壌水分は、100cc の採土管で採取した土壌を炉乾燥して体積含水率を求めた。

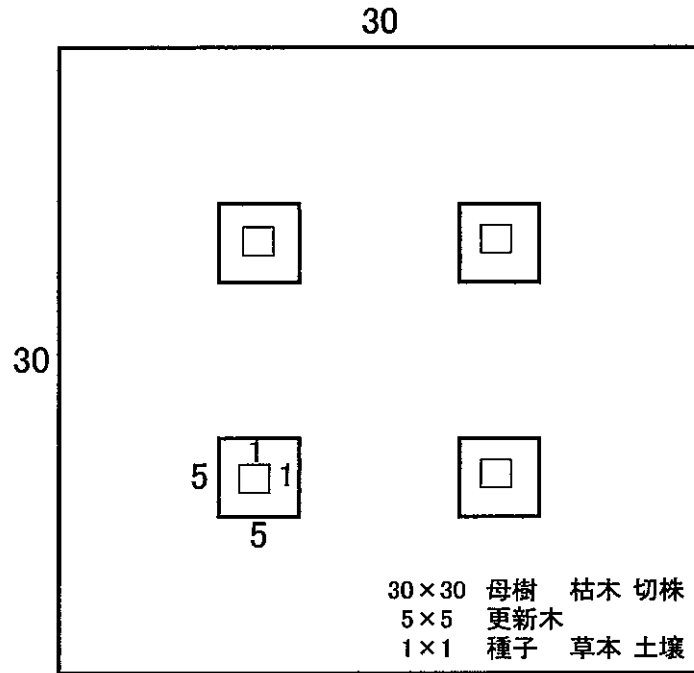


図 - 12 Site A のコドラート図 (単位 : m)

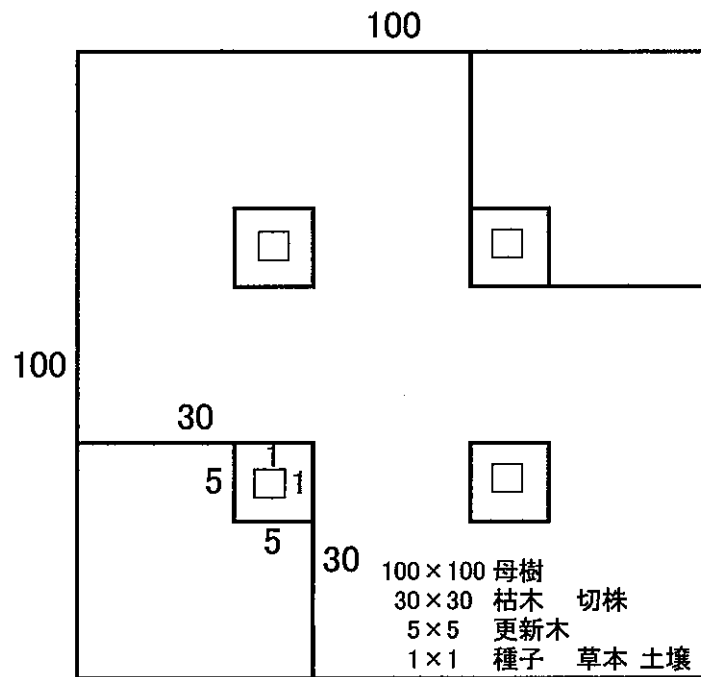


図 - 13 Site B のコドラート図 (単位 : m)



図 - 14 樹齡の測定に用いる機器

3. 結果

3-1 再生メカニズムの因子

3-1-1 種子供給

種子の調査結果を表 - 2 に示す。種子数は、A1 が 32 粒/m²、A2 が 28 粒/m²、A3 が 36 粒/m²、A4 が 59 粒/m²、B1 が 7 粒/m²、B2 が 13 粒/m²、B3 が未調査、B4 が 1 粒/m²であった。母樹の生育密度が最も大きい A4 で種子数が最も多くなり、母樹が最も小さい B4 で種子数が最も少なくなった。そこで、種子数と母樹の生育密度との関係を散布図で示した (図 - 15)。この図から、母樹の生育密度が大きいほど、種子数も多くなる傾向がみられた。

表 - 2 種子の調査結果

Site	種子数 (粒/m ²)
A1	32
A2	28
A3	36
A4	59
B1	7
B2	13
B3	-
B4	1

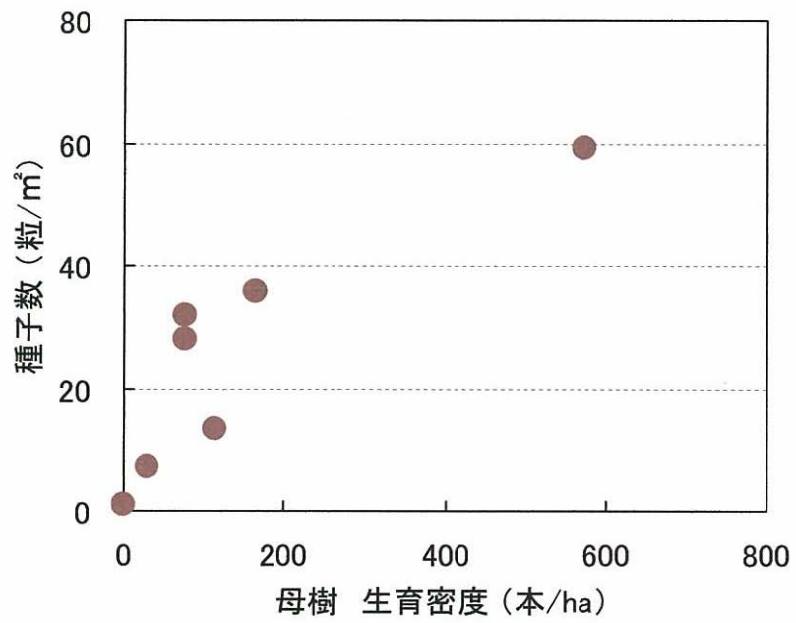


図 - 15 母樹と種子数との関係

3-1-2 発芽・定着

(a) 光

光量子試験の結果は、直射光の光量子量を 100%とした場合の相対光量子量と発芽率との関係が、相対光量子量 0%—発芽率 42%, 3%—43%, 26%—28%, 44%—27%であった (図 - 16)。光量子量が少ないと発芽率が高くなったことから、発芽には光量子量が少ないほど有利である。また、光量子—リター試験の結果は、リター厚 0cm—相対光量子量 44%, 0.4cm—4.9%, 0.8cm—1.3%, 1.3cm—0.8%であった (図 - 17)。リターが全くない場合とある場合とを比較すると、リターが少量でも被覆すると、相対光量子量が大きく減少し、リターの遮光性を確認した。

(b) 水分

水分—リター試験の結果は、リター厚 0, 0.4, 0.8, 1.3cm の順にみると、散水量 15mm/月—定着率 0, 0, 6, 7%, 20mm/月—0, 4, 9, 18%, 25mm/月—0, 7, 21, 30%, 30mm/月—0, 20, 35, 29%, 45mm/月—14, 44, 51, 31%, 60mm/月—43, 57, 40, 23%, 75mm/月—66, 53, 51, 31%であった (図 - 18.1~2)。これより、発芽・定着には散水量の下限が存在することが示された。散水量の少ない 15, 20, 25mm/月に着目すると、リター厚が大きいほど定着率が高くなった。また、播種 (9月27日) から発芽 (10月7日) までの土壌の体積含水率 (散水量 15, 20, 25mm/月) をグラフで示した (図 - 19.1~2)。これより、播種後と発芽前の体積含水率の減少した割合を、リター厚ごとに平均し水分減少率として求めると、リター厚 0cm—水分減少率 28%, 0.4cm—25%, 0.8cm—17%, 1.3cm—7%となった。リター厚が大きいほど水分減少率が小さくなり、リターの蒸発抑制効果を確認した。

散水間隔試験の結果は、散水間隔 3日—発芽率 49%, 9日—49%, 15日—45%, 21日—42%, 27日—56%であった (図 - 20)。同じ散水量では、散水間隔によらず、発芽率に大きな差はみられなかった。しかし、発芽に要する日数には多少の差がみられた。

(c) 温度

低温試験の結果は、低温恒温器内の平均温度 -1.6°C—生存率 100%, -3.2°C—100%, -5.5°C—100%, -7.7°C—94%, -9.4°C—74%, -10.3°C—69%, -12.5°C—31%, -16.9°C—

0%であった(図 - 21.1~2)。これより、定着直後の更新木は、 -10°C までの低温にさらしても69%生存することが示された。また、温度—リター試験の結果を図 - 22 に示した。リター厚1.3cmの熱伝導率は、直射光の影響をなくすため最低温度の差で補正した10月31日の日較差(リター厚0cm： $-3.5\sim 17.4^{\circ}\text{C}$ ，1.3cm： $-0.2\sim 14.1^{\circ}\text{C}$ ，)をもとに試算したところ、 $1.1\times 10^{-2}\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となった¹²⁾。これより、リターの断熱効果が確認された。なお、熱伝導率を求める際、リターの比熱は植物の葉である乾燥キャベツの値 $2.2\text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ¹³⁾を、密度は $81.4\text{ kg}/\text{m}^3$ を使用した。

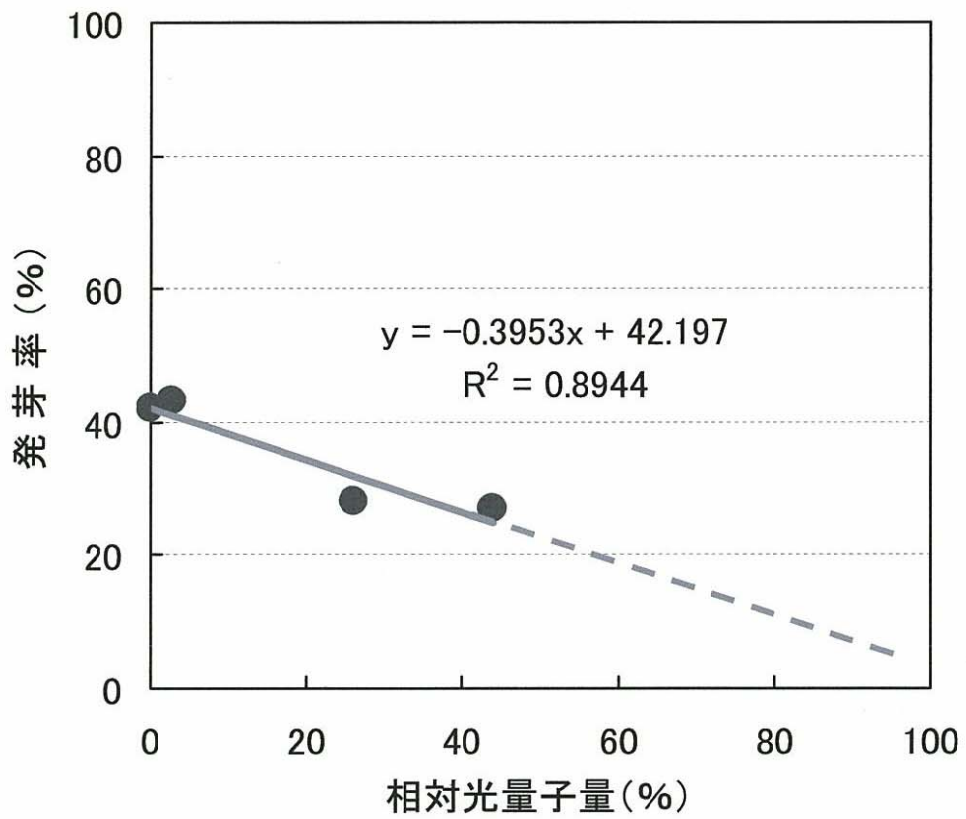


図 - 16 相対光量子量と発芽率との関係

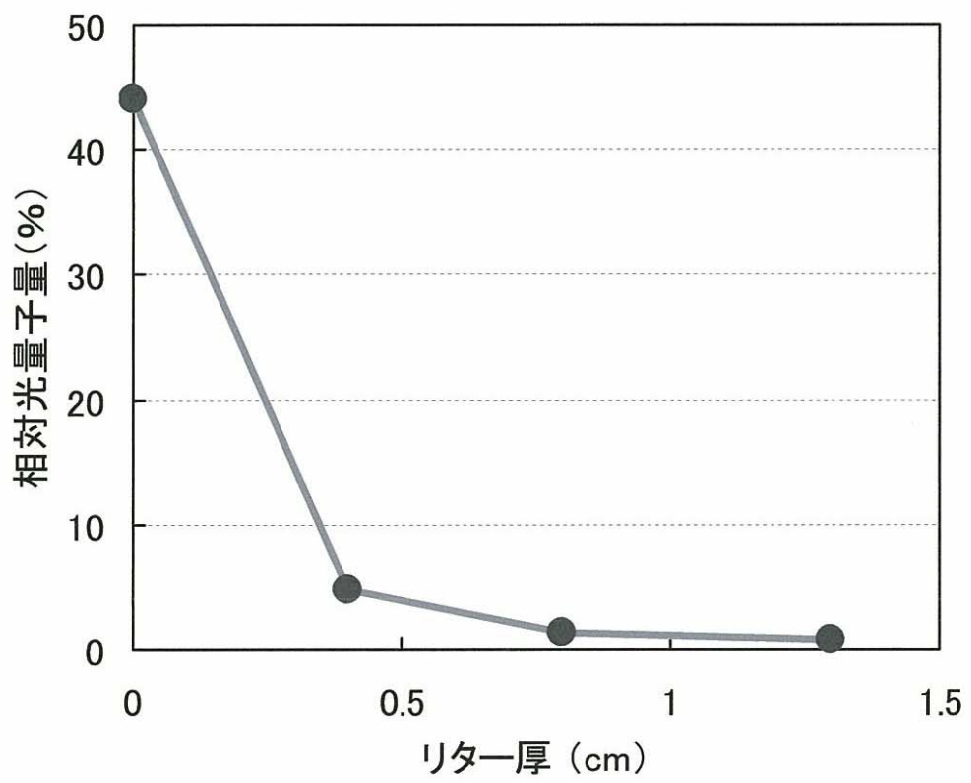


図 - 17 リター厚と相対光量子量との関係



図 - 18.1 発芽の様子（散水量 60mm/月ーリター一厚 0.8cm）

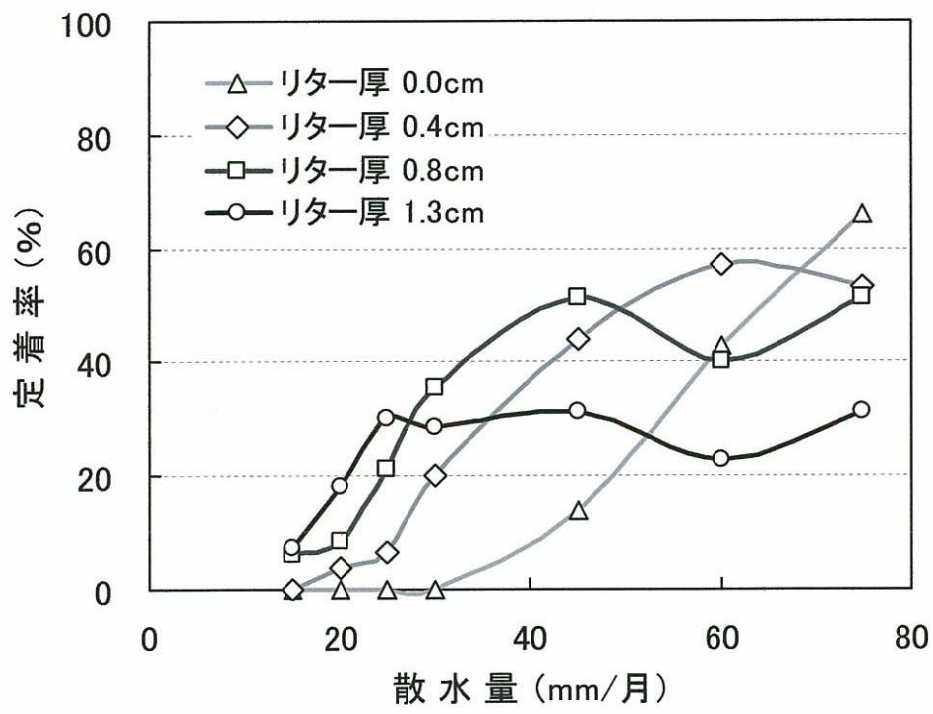


図 - 18.2 散水量と定着率との関係

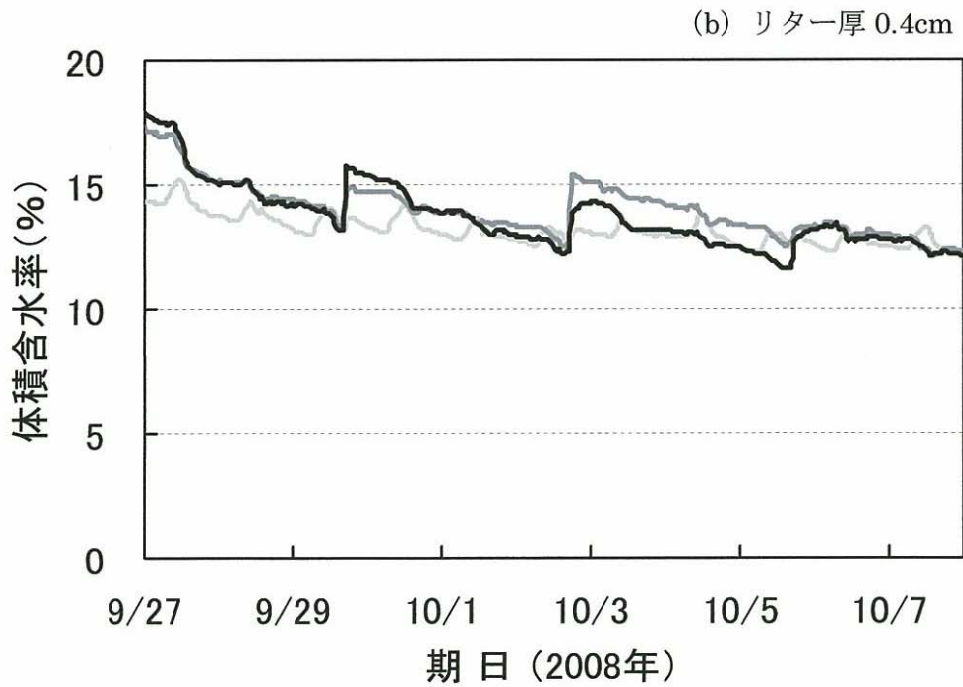
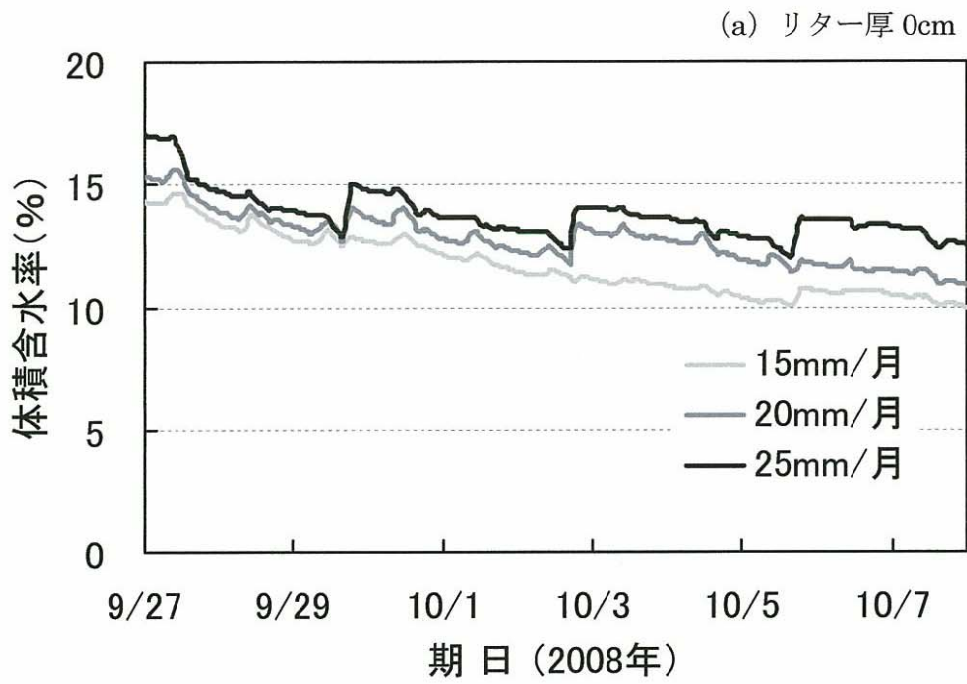


図 - 19.1 土壌の体積含水率の変化 (リター厚 0, 0.4cm)

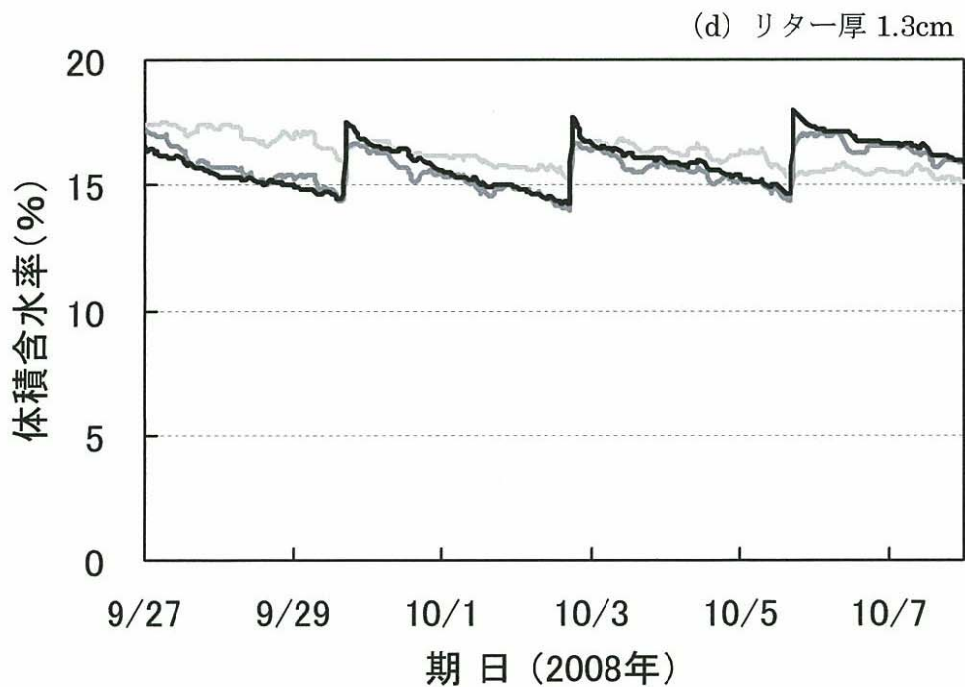
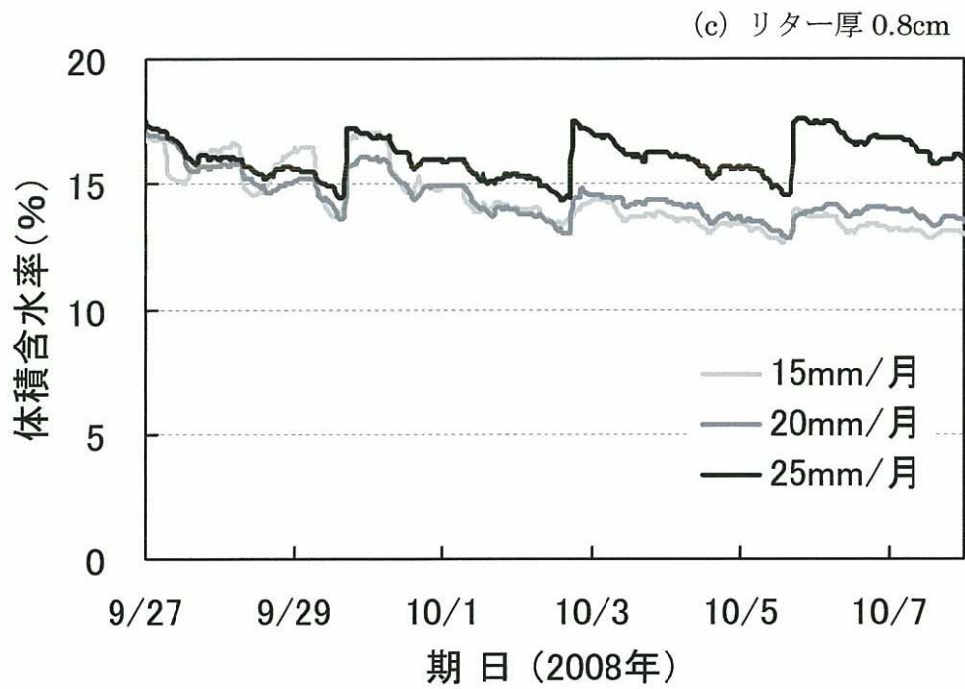


図 - 19.2 土壌の体積含水率の変化 (リター厚 0.8, 1.3cm)

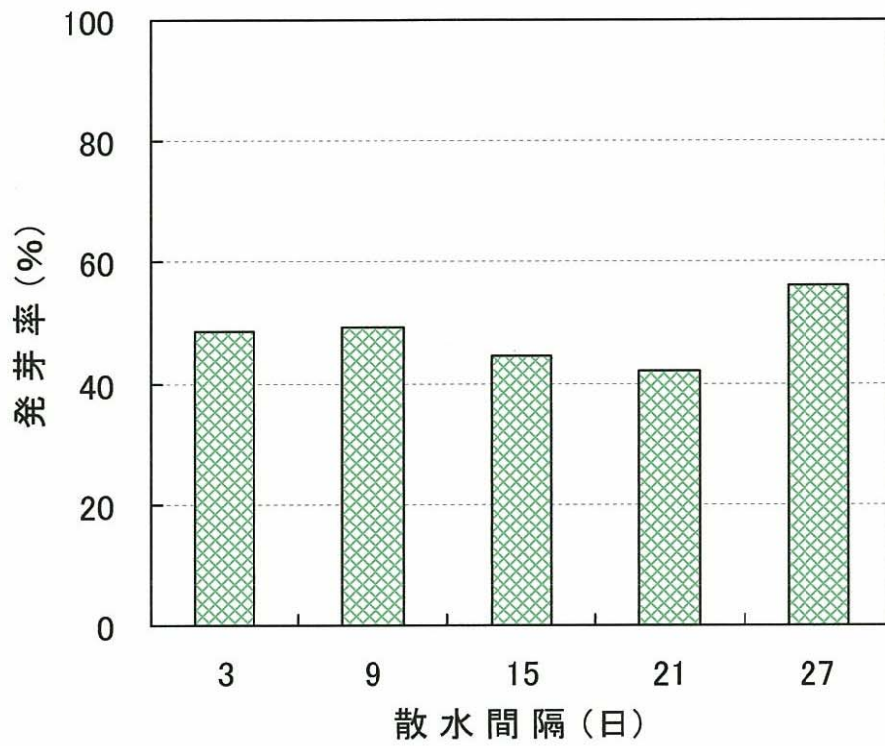


図 - 20 散水間隔と発芽率との関係



図 - 21.1 低温試験後の様子

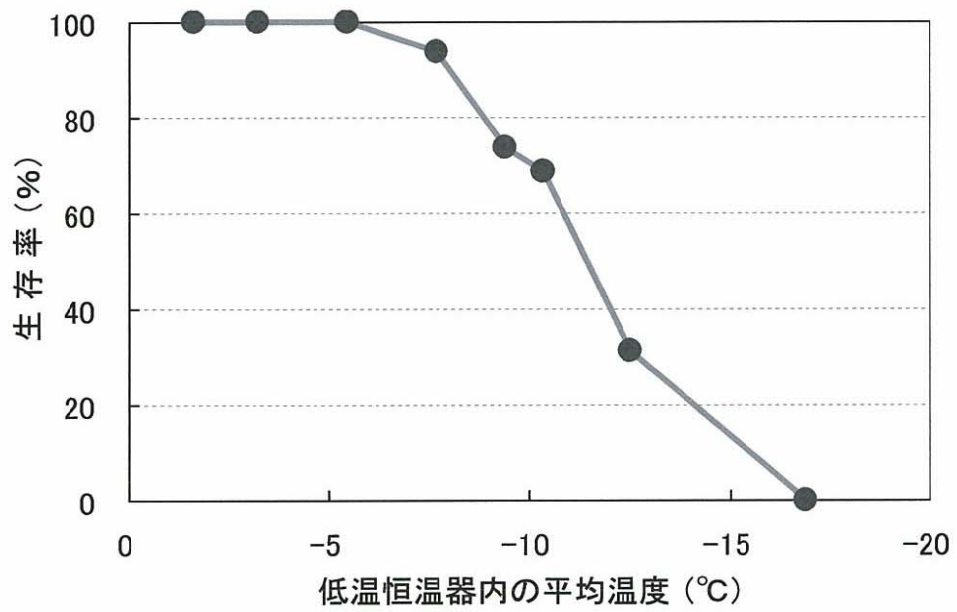


図 - 21.2 負の平均温度と生存率との関係

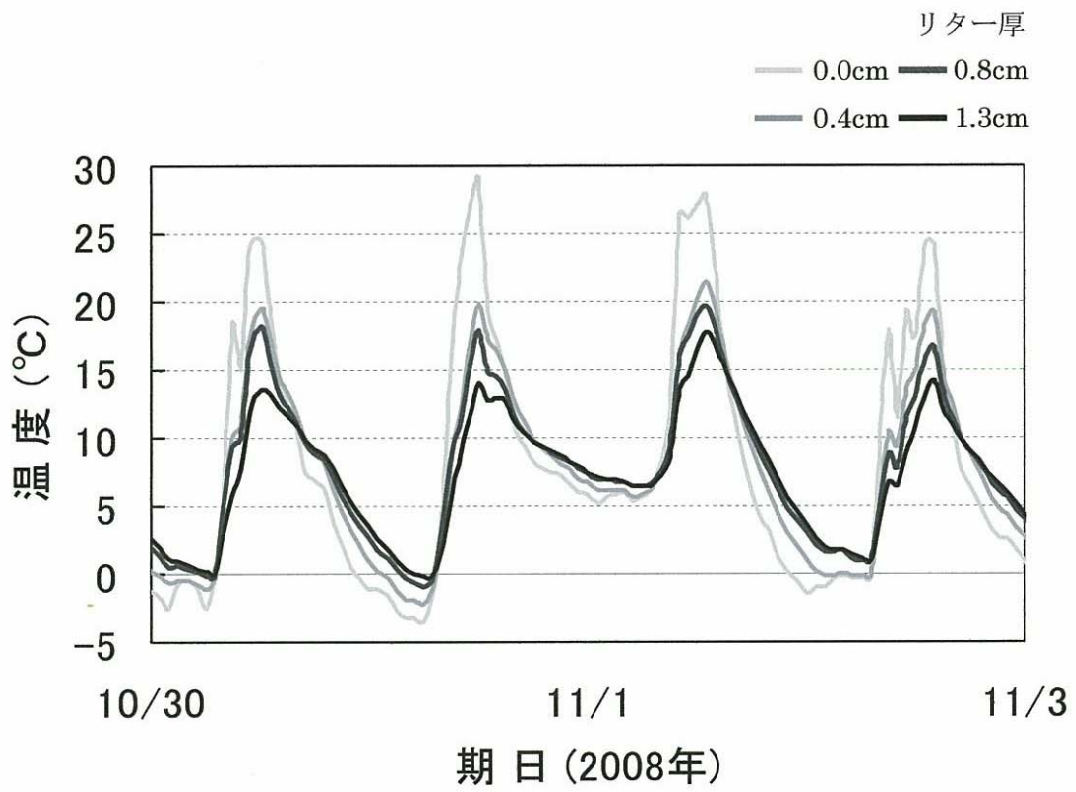


図 - 22 リター厚と土壤表面温度との関係

3-1-3 生育

(a) 光

草本の調査結果を表 - 3 に示す。被度は、母樹の生育密度が大きい A3, A4, B2 で 33~38% と小さく、他の調査地点で 63~97% と大きくなった。草丈は、B1, B2, B4 で 22.9~31.2cm と大きく、他の調査地点で 11.8~14.9cm と小さくなった。また、乾燥重量も同様に B1, B2, B4 で 200.0~315.0g/m² と大きく、他の地点で 94.3~141.7g/m² と小さくなった。そこで、草本の調査結果と母樹の生育密度との関係を散布図で示した (図 - 23)。この図から、母樹の生育密度が大きいほど、草本量は小さくなる傾向がみられた。

(b) 水分

土壌水分の調査結果を表 - 4 に示す。深さ 5cm の土壌の体積含水率は、13.7~23.3% であった。これは、土壌を採取した前の気象条件に影響されるが、いずれの調査地点でも、発芽・生育に必要なとされる 15% 程度は確保されている。また、深さ 20cm の体積含水率は、A1 が 18.0%, A2 が 11.3%, A3 が 11.3%, A4 が 8.0%, B1 が 16.5%, B2 が 11.8%, B3 が 13.5%, B4 が 10.3% であった。これを両 Site の斜面上下に着目すると、体積含水率は斜面下ほど大きい傾向がみられた。そこで、土壌水分の結果と母樹の生育密度との関係を散布図で示した (図 - 24)。この図から、母樹の生育密度と土壌水分には、明らかな相関がみられなかった。

乾燥試験の結果は、無散水期間 25 日—生存率 100%, 30 日—95%, 35 日—85%, 40 日—82%, 45 日—74%, 50 日—66%, 55 日—11%, 60 日—0% であった (図 - 25)。本試験の結果は、ビニールハウス内の温度と湿度の影響が大きいため、正確な無散水期間と生存率との関係を示すには、より現地の気象環境を再現する必要があるが、発芽・定着後の更新木は、無散水期間 30 日で 95% 生存することが示された。

表 - 3 草本の調査結果

Site	被度 (%)	草丈 (cm)	乾燥重量 (g/m ²)
A1	80	12.0	141.7
A2	63	12.6	138.3
A3	38	12.1	108.3
A4	38	11.8	88.3
B1	86	22.9	315.0
B2	33	30.7	200.0
B3	97	14.9	94.3
B4	73	31.2	283.8

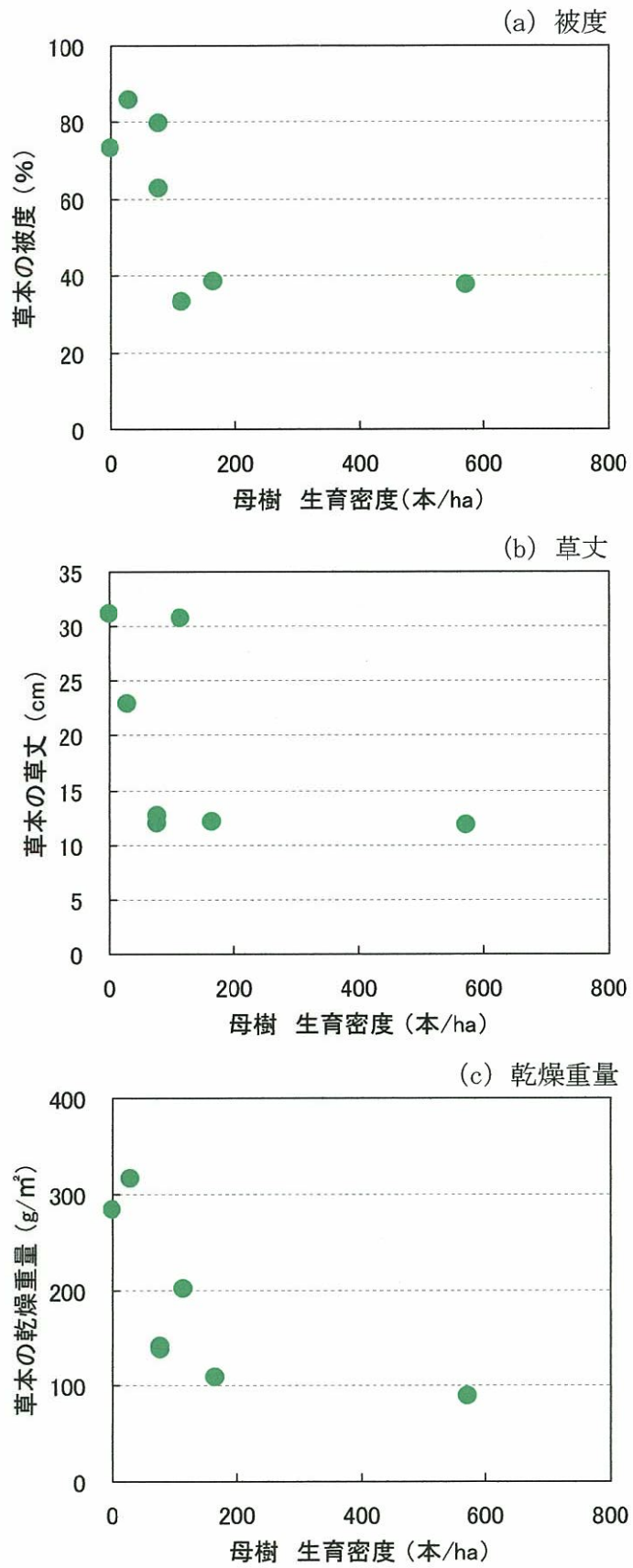


図 - 23 母樹と草本量との関係

表 - 4 土壌水分の調査結果

Site	体積含水率(%)	
	深さ 5cm	20cm
A1	20.5	18.0
A2	23.3	11.3
A3	23.0	11.3
A4	14.0	8.0
B1	13.7	16.5
B2	15.0	11.8
B3	17.9	13.5
B4	21.8	10.3

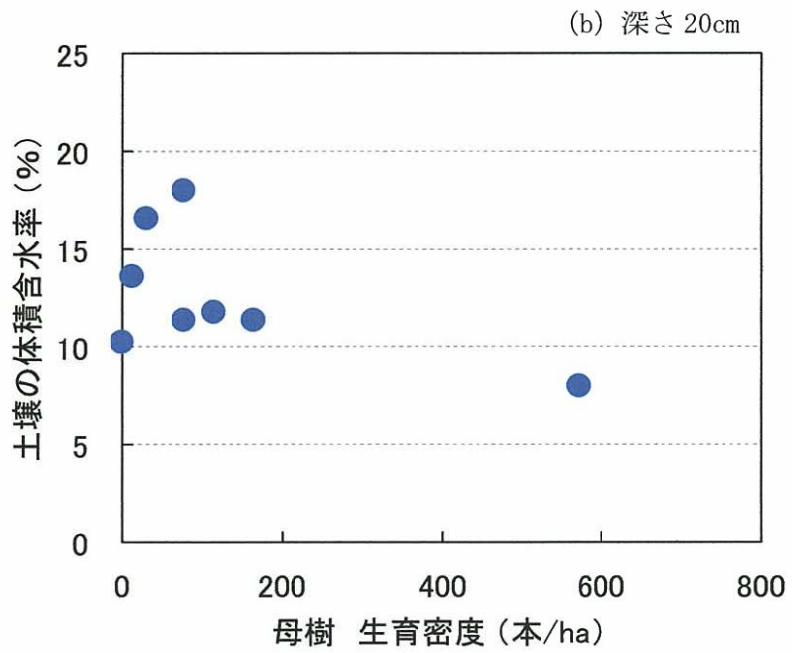
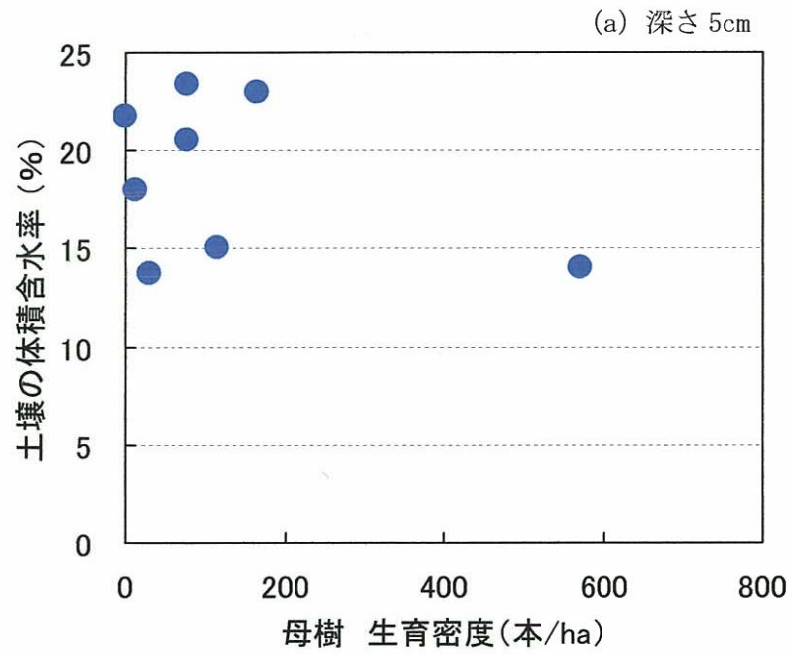


図 - 24 母樹と土壌水分との関係

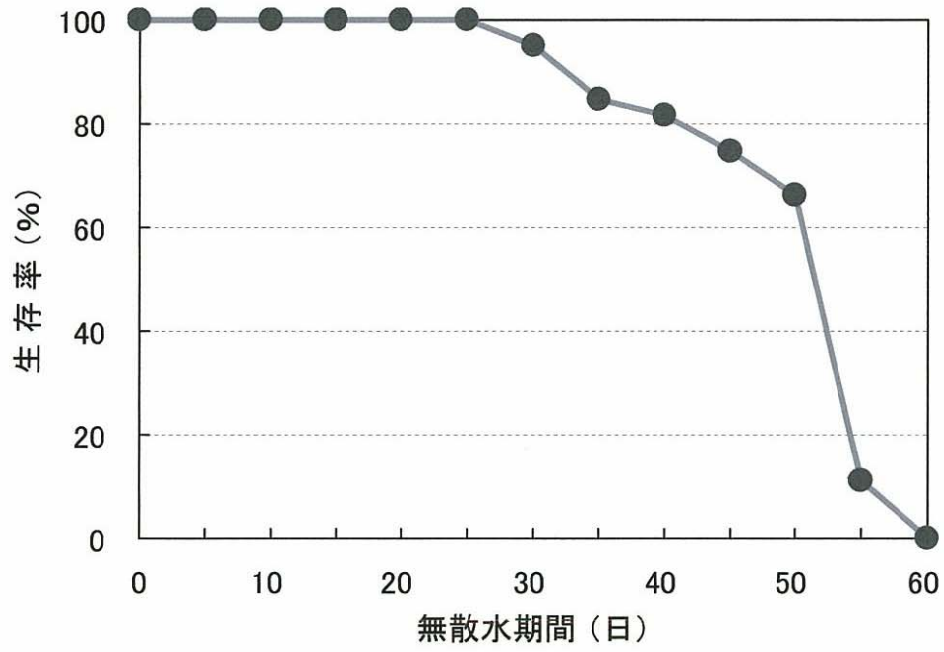


図 - 25 無散水期間と生存率との関係

3-2 再生の状況

母樹の調査結果を表 - 5 に示す。生育密度は、A1 が 77 本/ha、A2 が 77 本/ha、A3 が 165 本/ha、A4 が 572 本/ha、B1 が 31 本/ha、B2 が 115 本/ha、B3 が 13 本/ha、B4 が 1 本/ha であり、A4 で最も大きく、B4 で最も小さくなった。胸高直径は、本数の少ない B3 と B4 を除くと、Site A が 195.6~230.7mm と 200mm 程度に多く分布しているのに対し、B1 が 118.9mm、B2 が 128.7mm と 100mm 程度に多く分布し、小さい値を示した (図 - 26.1~2)。樹高も同様に、Site A が 11.1~13.3m と 10~15m の範囲に多く分布しているのに対し、B1 が 7.8m、B2 が 8.8m と 5~10m の範囲に多く分布し、胸高直径と同様に B1 と B2 において小さい値を示した (図 - 27.1~2)。また、現在の生育密度に枯れ木と切株の本数を足し合わせ、火災前の森林環境を推定すると、Site A の丘陵では、斜面下の A1 で 743 本/ha と最も小さく、斜面上の A4 で 2,159 本/ha と最も大きく、斜面上下による差が大きくなった。一方、Site B では、斜面下の B1 で 603 本/ha と最も小さく、斜面上の B4 で 767 本/ha と最も大きいですが、斜面上下による差が小さくなった。

更新木の調査結果を表 - 6 に示す。生育密度は、A1 が 42,900 本/ha、A2 が 26,300 本/ha、A3 が 18,300 本/ha、A4 が 5,800 本/ha、B1 が 1,400 本/ha、B2 が 13,500 本/ha、B3 が 3,500 本/ha、B4 が 150 本/ha であり、A1 で最も大きく、B4 で最も小さくなった。根元直径は、A1 と A2 で 17mm 程度と大きく、母樹の生育密度が大きい A4 で 1.8mm と小さく、他の調査地点で 4.4~9.8mm であった (図 - 28.1~2)。樹高も根元直径と同様に、A1 と A2 で 1.4m 程度と大きく、A4 で 0.02m と小さく、他の調査地点で 0.21~0.53m であった (図 - 29.1~2)。いずれの地点でも発芽・定着はみられたが、A4 だけは、生育した樹齢 2 年以上の更新木はみられなかった。また、生長率の結果は、前年からの生育がみられなかった A4 と本数が極端に少ない B4 を除くと、いずれの調査地点も 2007 年と 2008 年では大きな差がみられず、17~29%となった (図 - 30)。

そこで、全調査地点の更新木と母樹の生育密度との関係を散布図で示した (図 - 31)。更新木の生育密度は、母樹が 77 本/ha で 42,900 本/ha と最も大きく、1 本/ha で 150 本/ha と最も小さくなった。また、母樹が 572 本/ha と最も大きい A4 では、更新木が 5,800 本/ha であり、母樹が大きいと更新木も大きくなるとは限らず、母樹の生育密度が 100 本/ha 付近に更新木増大のピークがみられる。

表 - 5 母樹調査の結果

Site	生育密度 (本/ha)	枯木 (本/ha)	切株 (本/ha)	合計 (本/ha)	胸高直径 (mm)	樹高 (m)	樹齡 (年)
A1	77	111	555	743	199.9	12.1	101
A2	77	588	366	1,032	230.7	13.3	84
A3	165	1,132	644	1,941	200.3	11.4	117
A4	572	1,421	167	2,159	195.6	11.1	85
B1	31	289	283	603	118.9	7.8	27
B2	115	44	494	653	128.7	8.8	96
B3	13	280	364	657	269.5	19.7	94
B4	1	289	477	767	270.0	22.0	-

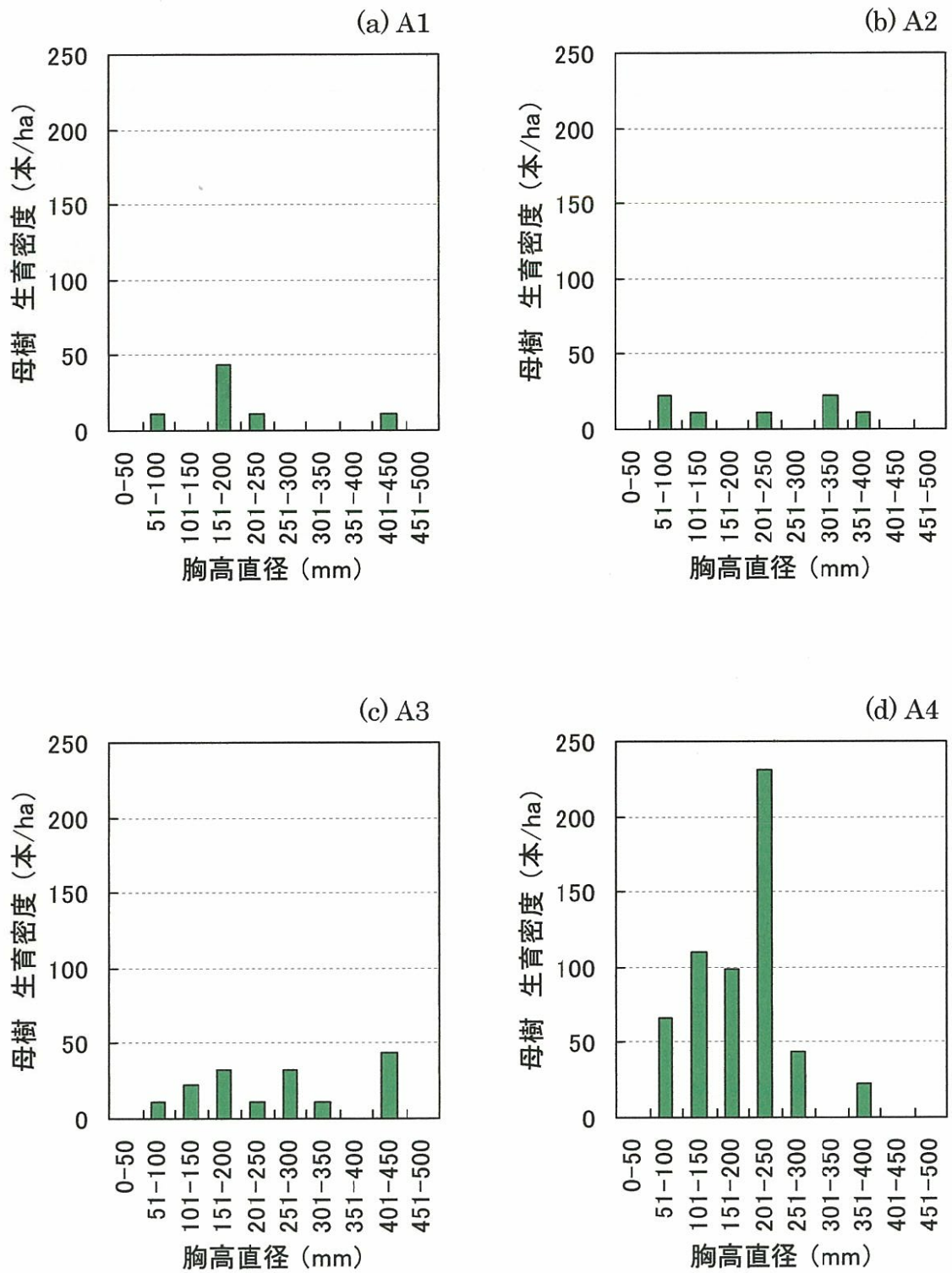


図 - 26.1 母樹 生育密度と胸高直径との関係 (Site A)

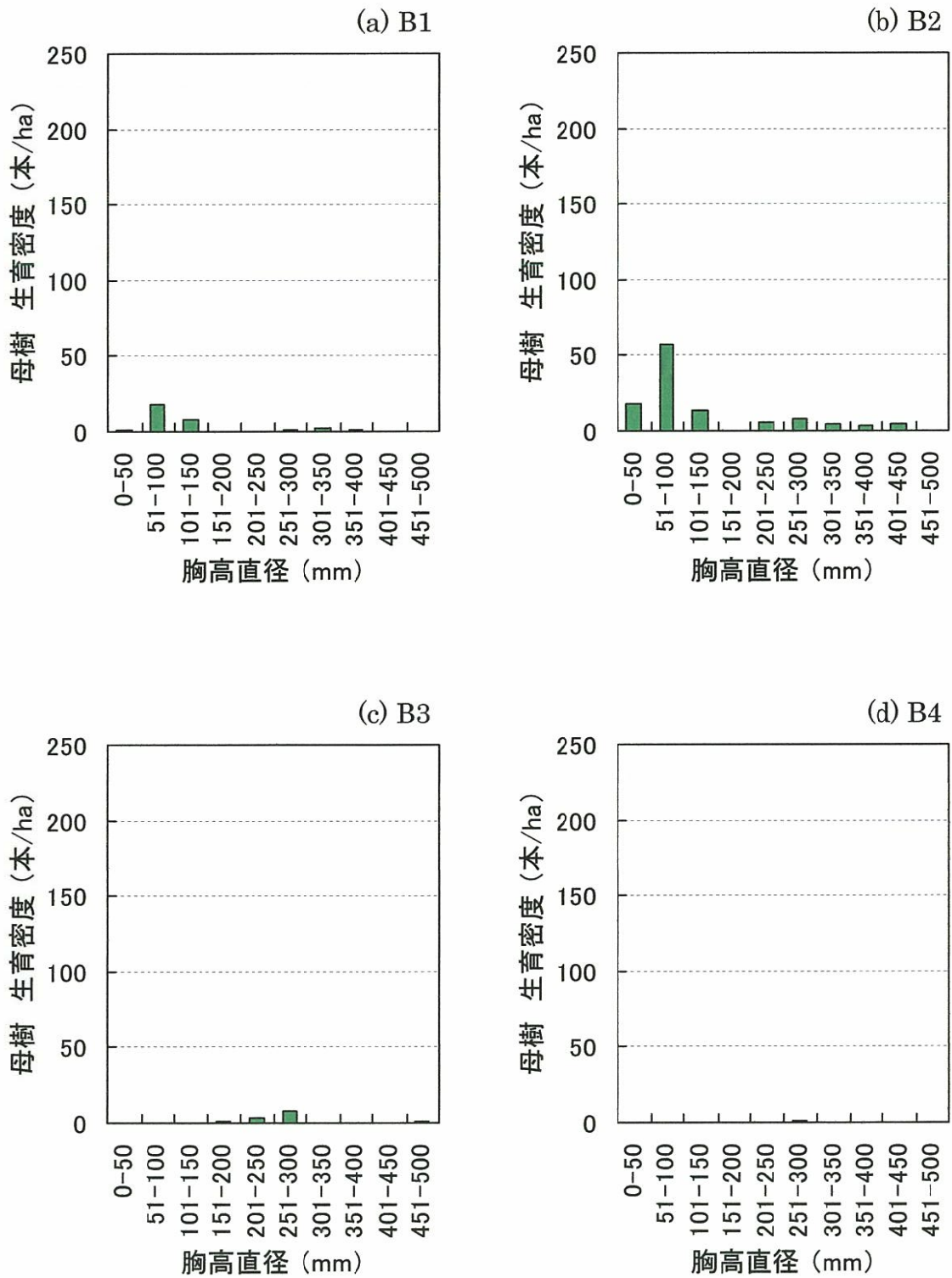


図 - 26.2 母樹 生育密度と胸高直径との関係 (Site B)

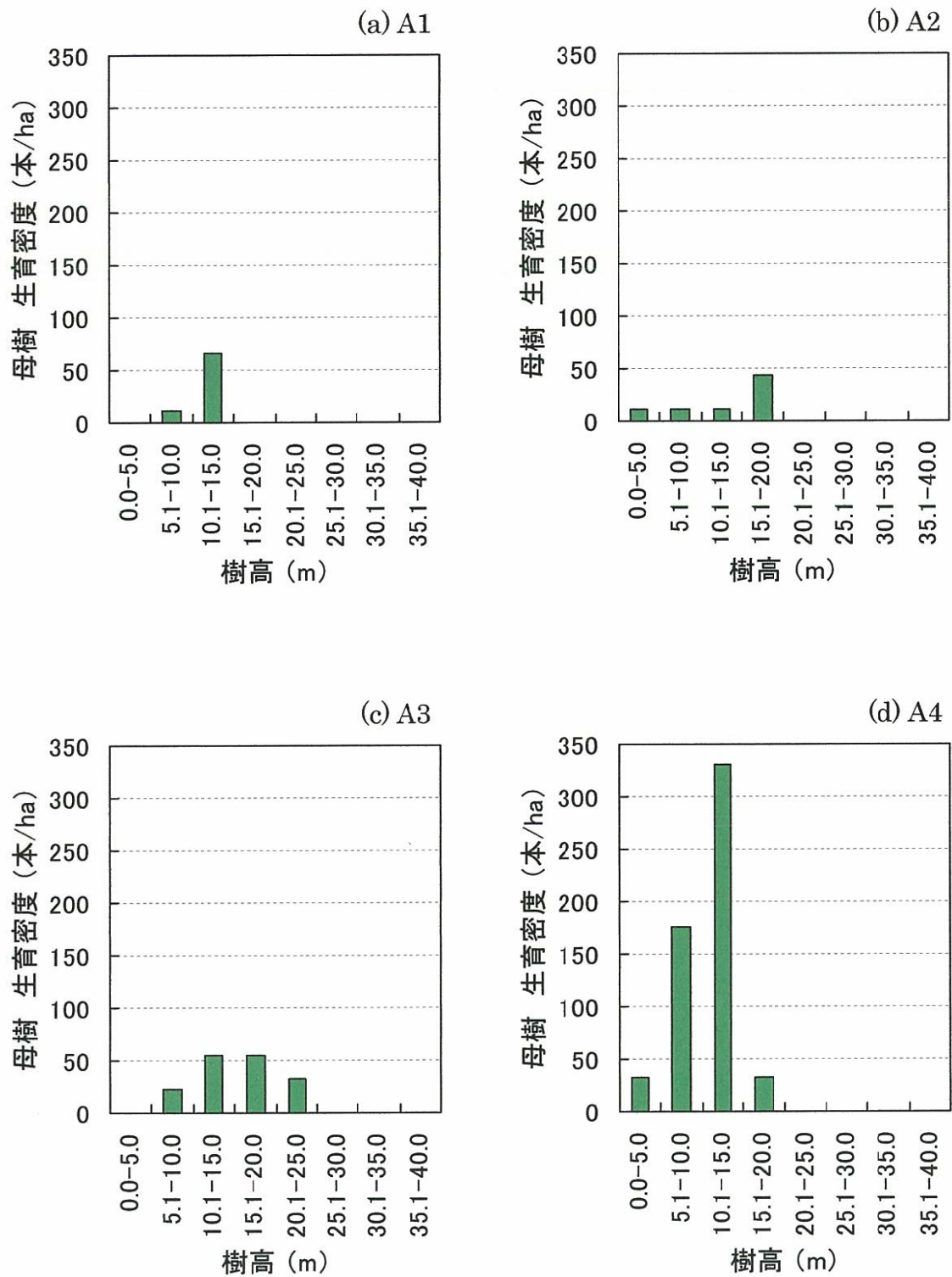


図 - 27.1 母樹 生育密度と樹高との関係 (Site A)

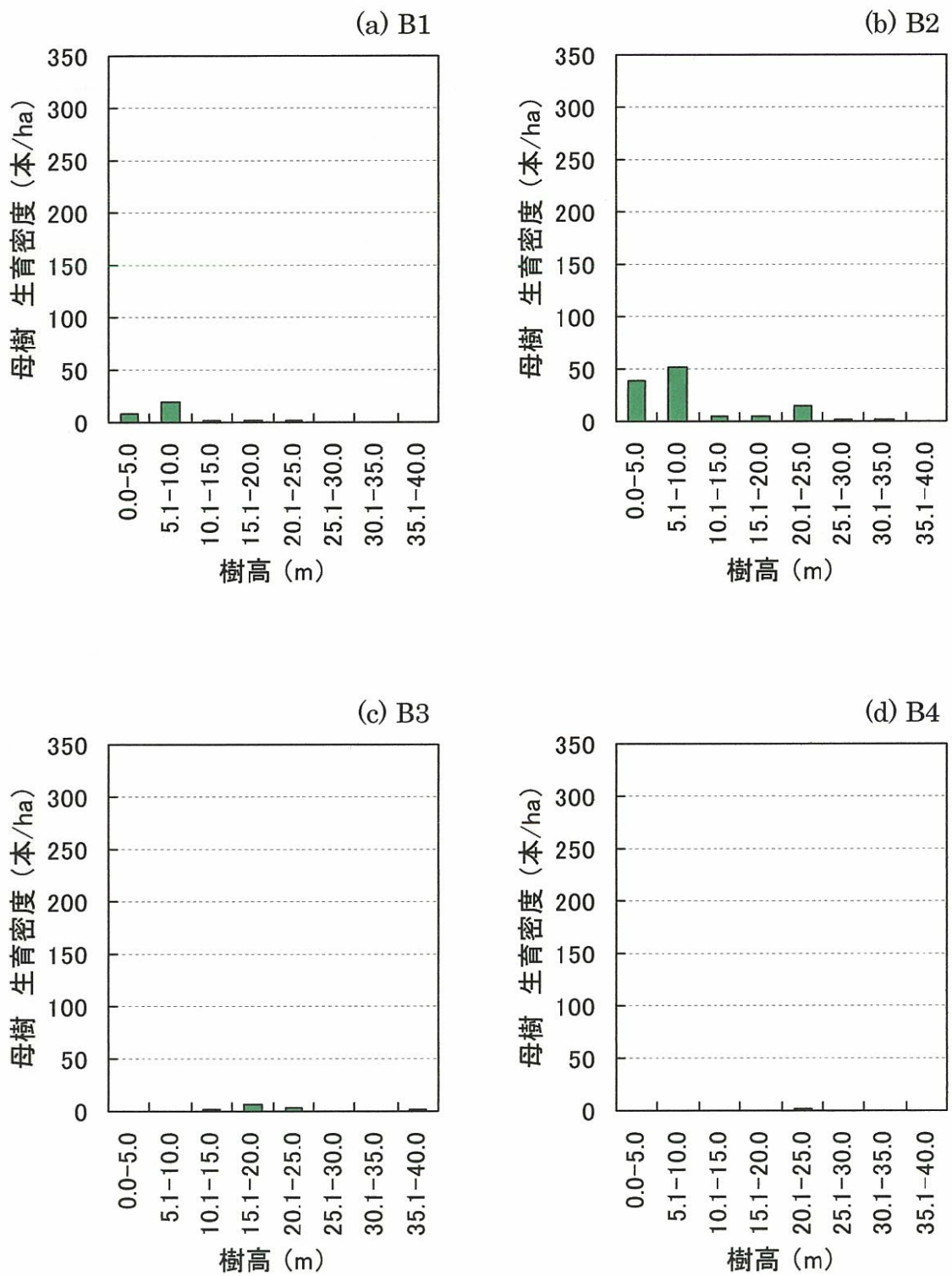


図 - 27.2 母樹 生育密度と樹高との関係 (Site B)

表 - 6 更新木調査の結果

Site	生育密度 (本/ha)	根元直径 (mm)	樹高 (m)	樹齡 (年)	樹齡範圍 (年)
A1	42,900	17.7	1.44	8	1~13
A2	26,300	17.3	1.40	7	1~12
A3	18,300	9.2	0.53	5	1~10
A4	5,800	1.8	0.02	1	1
B1	1,400	9.8	0.43	4	3~5
B2	13,500	8.1	0.43	3	1~8
B3	3,500	4.4	0.21	4	1~6
B4	150	9.1	0.46	4	2~5

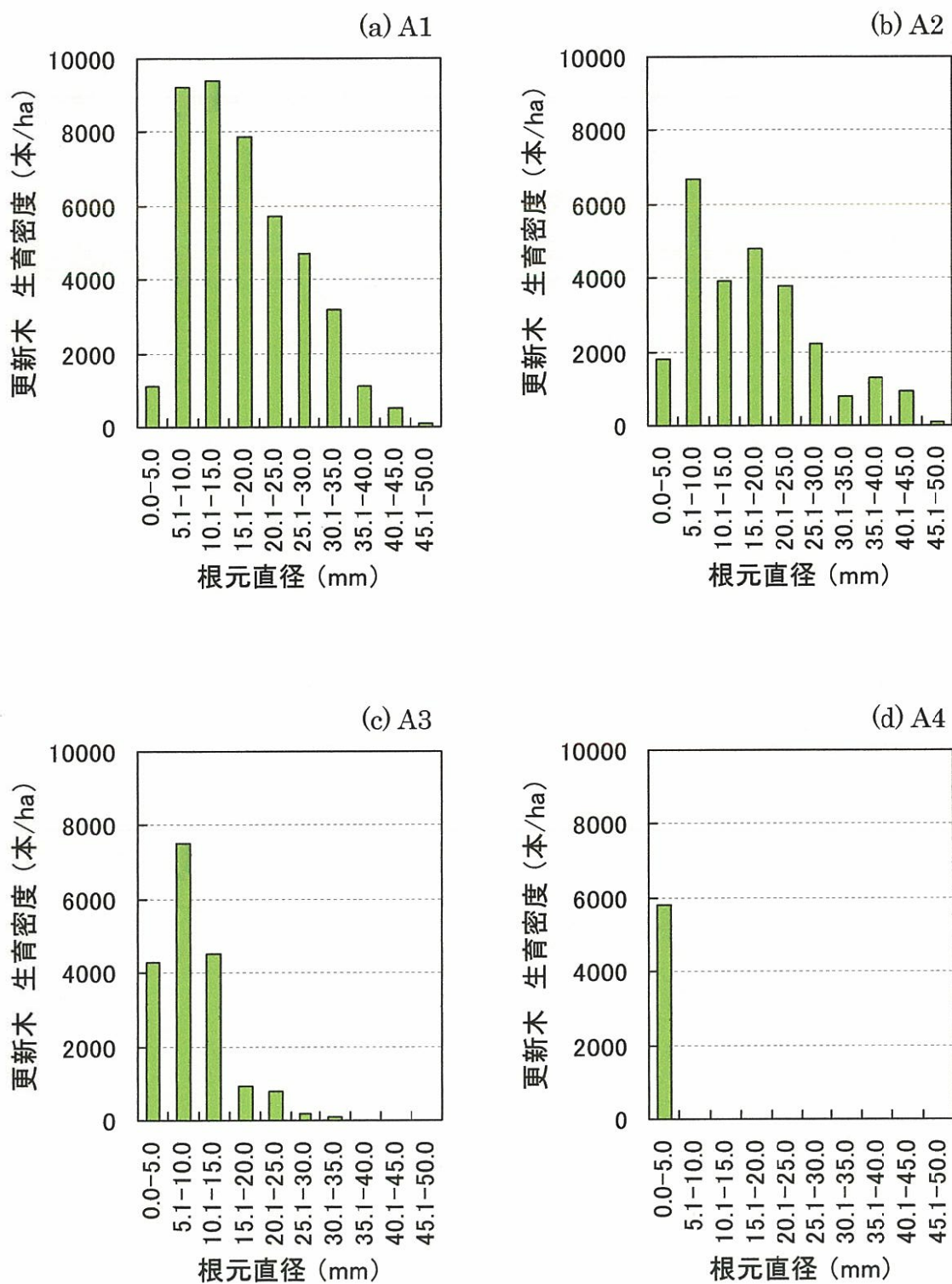


図 - 28.1 更新木 生育密度と根元直径との関係 (Site A)

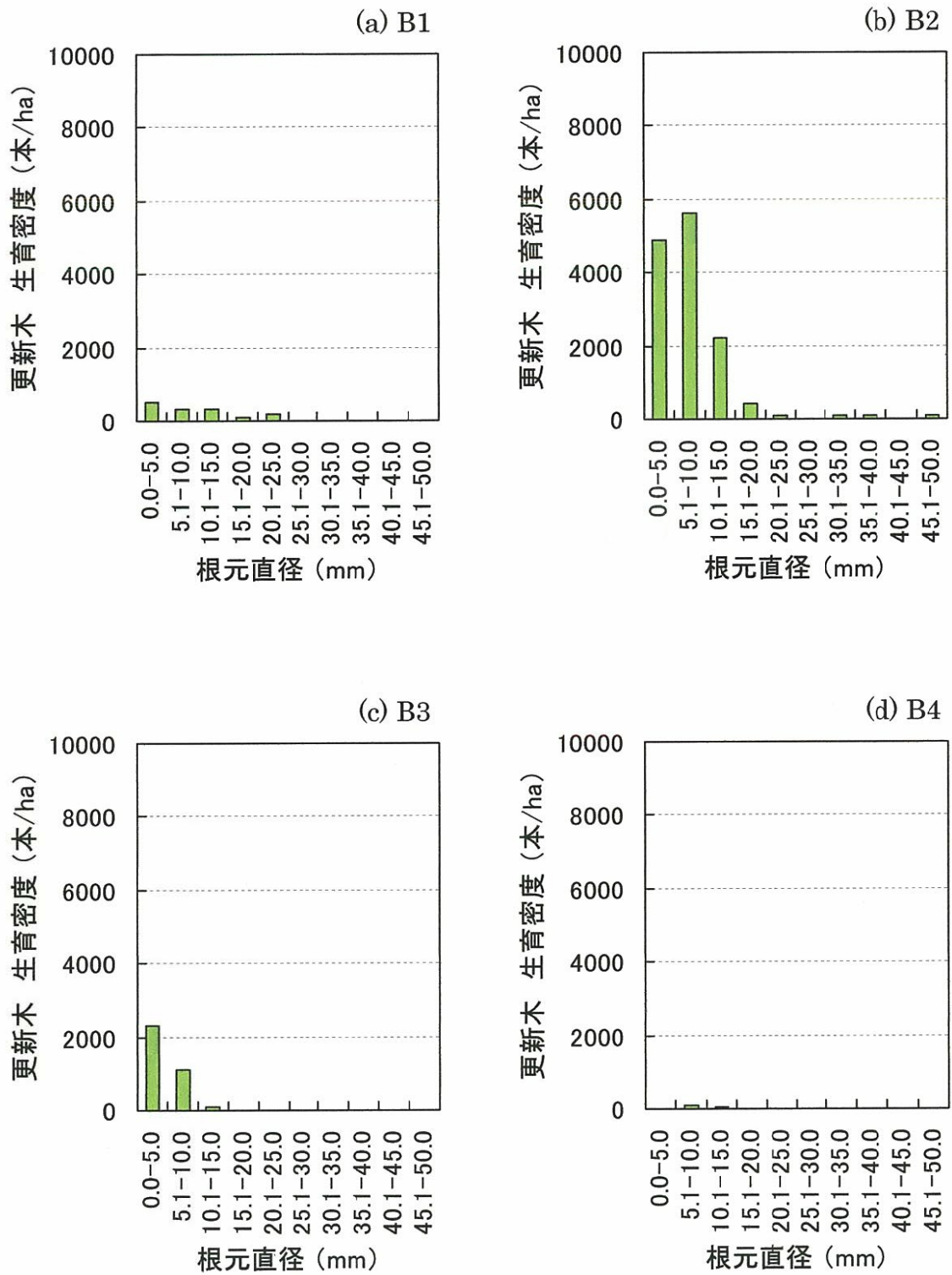


図 - 28.2 更新木 生育密度と根元直径との関係 (Site B)

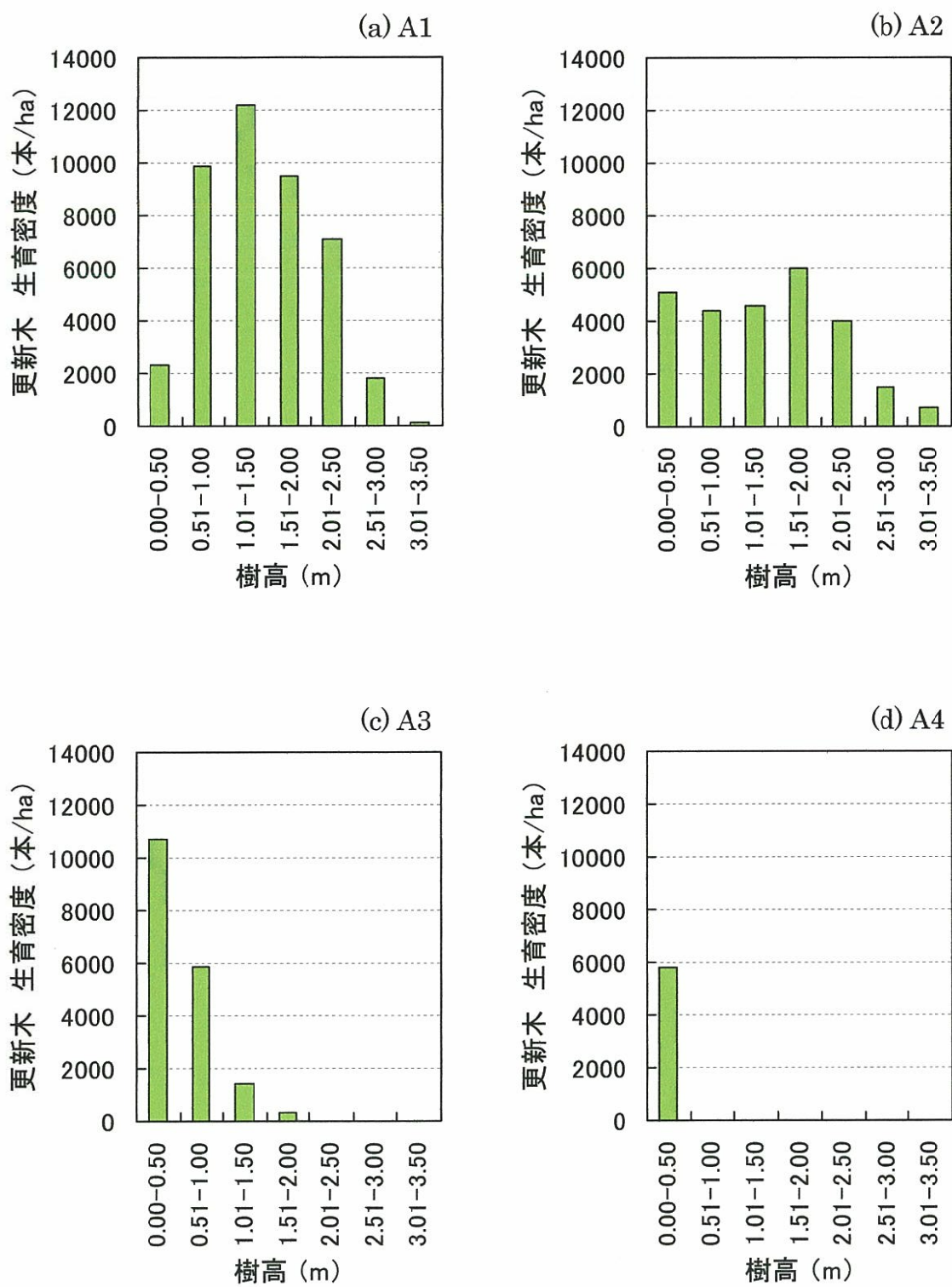


図 - 29.1 更新木 生育密度と樹高との関係 (Site A)

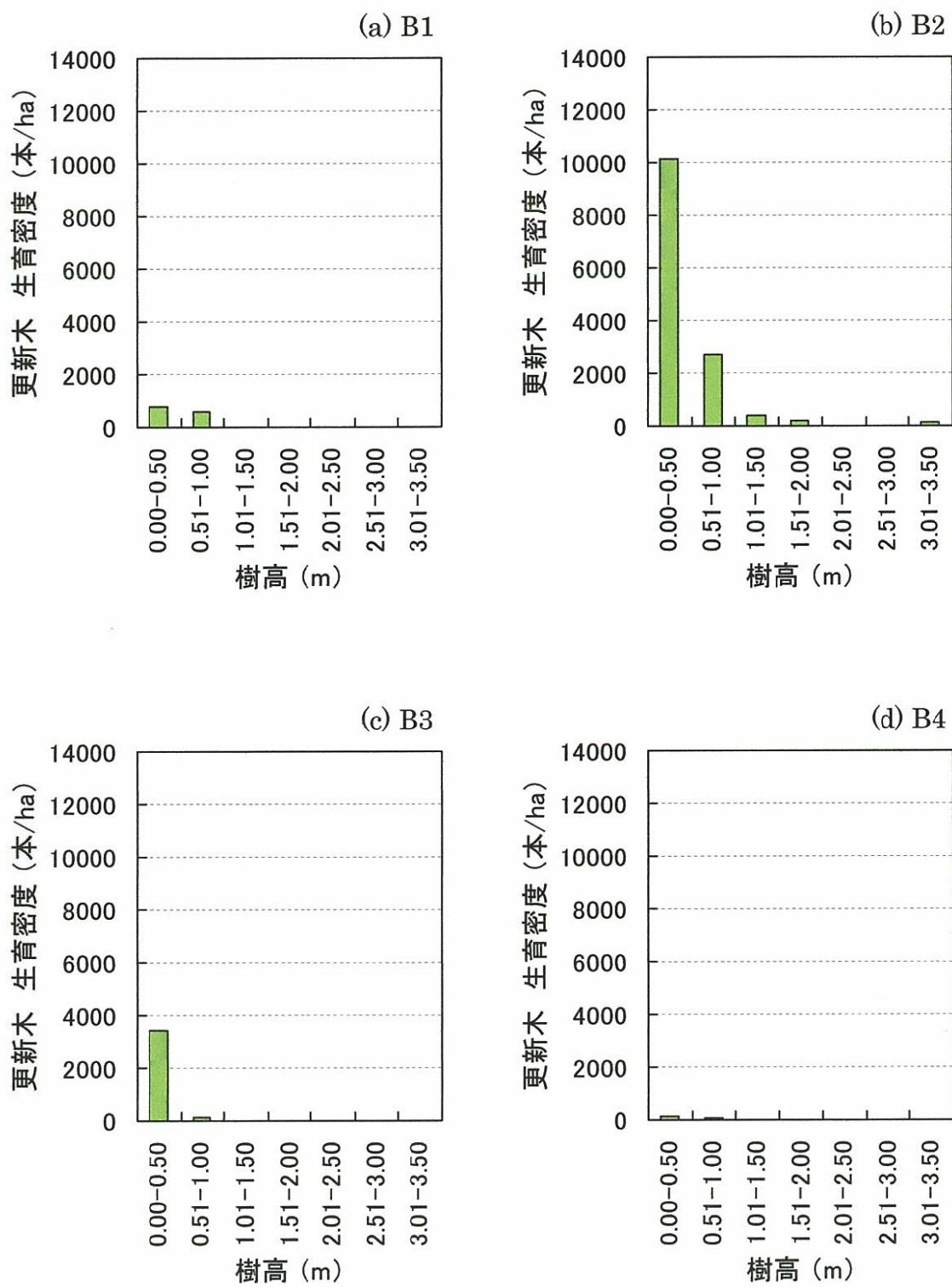


図 - 29.2 更新木 生育密度と樹高との関係 (Site B)

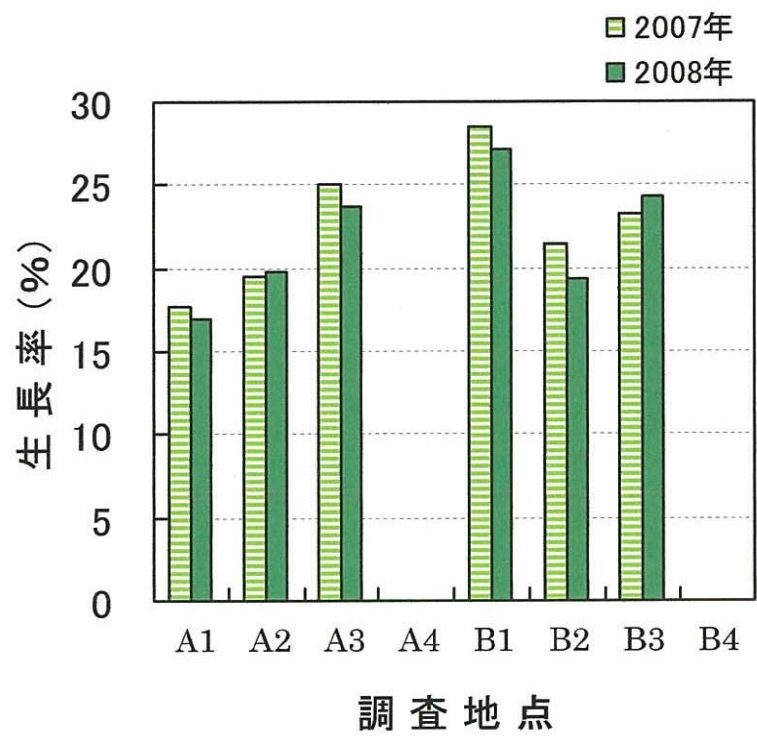


図 - 30 更新木の生長率 (2007, 2008 年)

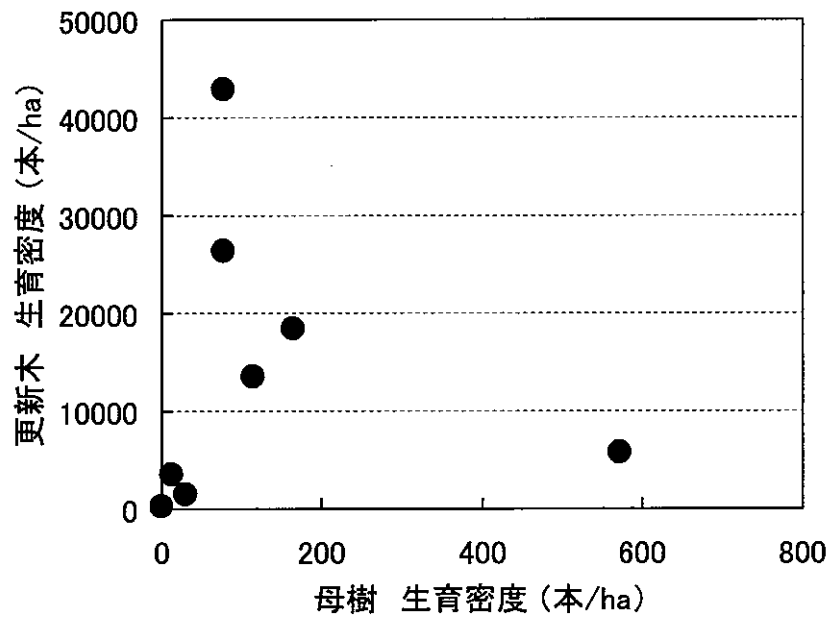


図 - 31 母樹と更新木との関係

4. 考察

4-1 再生メカニズムの因子

4-1-1 種子供給

種子数は、母樹の本数だけではなく、火災の程度や母樹の胸高直径・樹高にも影響されるが、母樹が増加すると、種子数も増加する傾向がみられた。森林火災後の再生と種子との関係は、年が経過するにつれて地表面の乾燥化や草本の繁茂がみられるため、火災後早期に種子の豊作がくるほど再生が有利におこなわれる¹⁴⁾。本研究では、種子の豊凶が再生に及ぼす影響を考慮していないが、再生には種子の絶対量も重要であり、合わせて検討する必要がある。

4-1-2 発芽・定着

発芽は、光が少ないほど有利に働くことから、リターの遮光性と合わせることで、発芽率を高くすることが可能になる。しかし、他種の発芽は、カボチャやケイトウなどの暗黒の中でないと発芽できない（暗発芽種子）ものや、タバコやイチジクなどの連続光の中でないと発芽しない（光発芽種子）もの、また、日長変化に影響を受けるものや温度帯によって光を必要・不必要とするものまで多種多様である¹⁵⁾。今後は、相対光量子量 44%以上でも試験をおこない、温度との関係についても調べる必要がある。

また、定着に至る過程で、散水量の下限 30mm/月（リターなし）が存在したことから、水分の下限条件を満たせば定着することが示された。リター厚 0.8cm 以上あれば、散水量の下限が 15mm/月まで低下したことから、リターの蒸発抑制効果が認められ、これを組み合わせると、発芽時の水分条件を緩和することが可能である。しかし、この値は、現地の永久凍土が発芽・生育に及ぼす影響を考慮していないため、直接適用できるものではない。定着直後の更新木は、-10℃の低温で生存率が 69%であったことから、現地の気象条件（日最低気温-5℃前後）では、低温が更新木に及ぼす影響は少ないといえる。

4-1-3 生育

母樹が増加すると草本量が減少する傾向から、母樹は生育時に必要な光を遮断し、

草本の生育に影響を与えていると考えられる。これは、母樹の増加が更新木の減少につながることを意味し、A4 で更新木の定着が多くみられたが、生育が全くみられなかったことから、生育には光が必要である。また、草本が増加すると、同様に更新木の生育に必要な光を遮断し、再生に影響を与えるであろう。

いずれの調査地点も、深さ 5cm の土壌の体積含水率が 15%程度あったことや、定着後の更新木が無散水期間 30 日で生存率 95%であったことから、現地の気象条件（最長無降雨期間 16 日）では、生育時の水分が更新木に及ぼす影響は少ないと考えられる。

4-2 再生と母樹との関係

再生メカニズムの因子から、母樹と更新木との関係を考察した。

試験結果から、水分と温度の条件は、更新木の発芽・生育を阻害する原因になるとはいえない。これらの因子は、必要条件ではあるが十分条件ではないため、種子と光の条件に着目して、更新木(Y)と母樹(X)との関係を予測した。はじめに、種子数を X1 とし、X1, X ともに対数を取り、 $\log_e(X1)=a \log_e(X)+b$ と仮定して回帰分析¹⁶⁾を行うと、母樹と種子数との関係は $\log_e(X1)=0.66 \log_e(X)+0.034$ ($R^2=0.91$) で表される。この式を X1 で示すと $X1=e^{0.66 \log_e(X)+0.034}$ となる (図 - 32.1)。また、草本の乾燥重量を X2 とし、X2 に対数、X に整数を取り、 $\log_e(X2)=c X+d$ と仮定すると、草本の乾燥重量と母樹との関係は $\log_e(X2)=-0.0018X+5.38$ ($R^2=0.54$) と表される。この式を X2 で示すと $X2=e^{-0.0018X+5.38}$ となる (図 - 32.2)。この結果から、更新木(Y)を種子数(X1)と草本の乾燥重量(X2)の関数 $\log_e(Y)=p \log_e(X1)+q \log_e(X2)+r$ であると仮定し、 $\log_e(X1)$, $\log_e(X2)$ に X の関数を代入して、更新木(Y)と母樹(X)との関係 $\log_e(Y)=1.22 \log_e(X)-0.0066X+4.77$ ($R^2=0.83$) を得た。この式を Y で示すと $Y=e^{1.22 \log_e(X)-0.0066X+4.77}$ となる (図 - 33)。このグラフから、種子と光の条件が満たされる、自然再生に最適な母樹の範囲が存在することが示された。この範囲では、水分や他の草本との競合などの条件が満たされれば、自然に再生が行われ元の森林に戻ると考えられる。この範囲より母樹の生育密度が小さいところでは、主に種子の供給量が少なく、また大きいところでは、母樹が多いため生育時に必要な光が不足する。そこで、母樹の生育密度を調査し、母樹の少ない範囲に人為的に播種することで、森林再生の促進が期待できる。

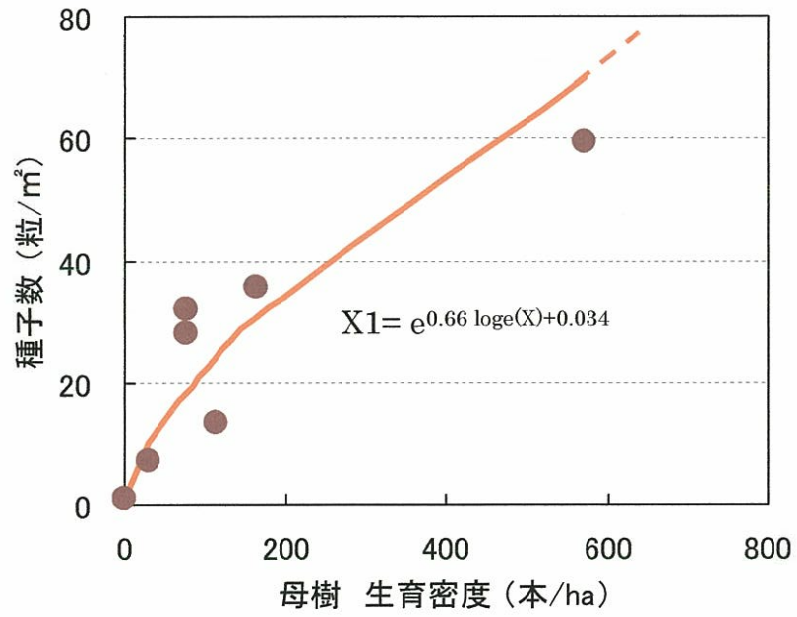


図 - 32.1 種子数(X1)と母樹(X)との関係

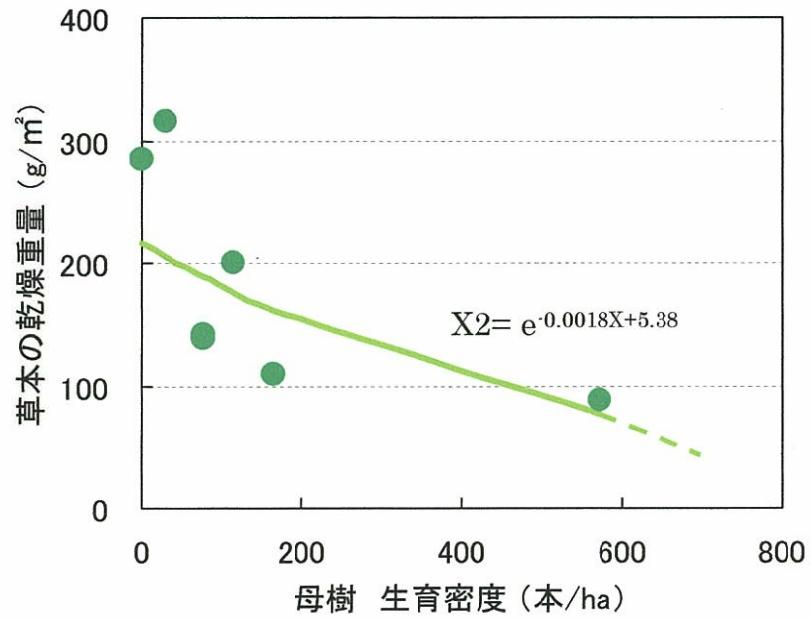


図 - 32.2 草本の乾燥重量(X2)と母樹(X)との関係

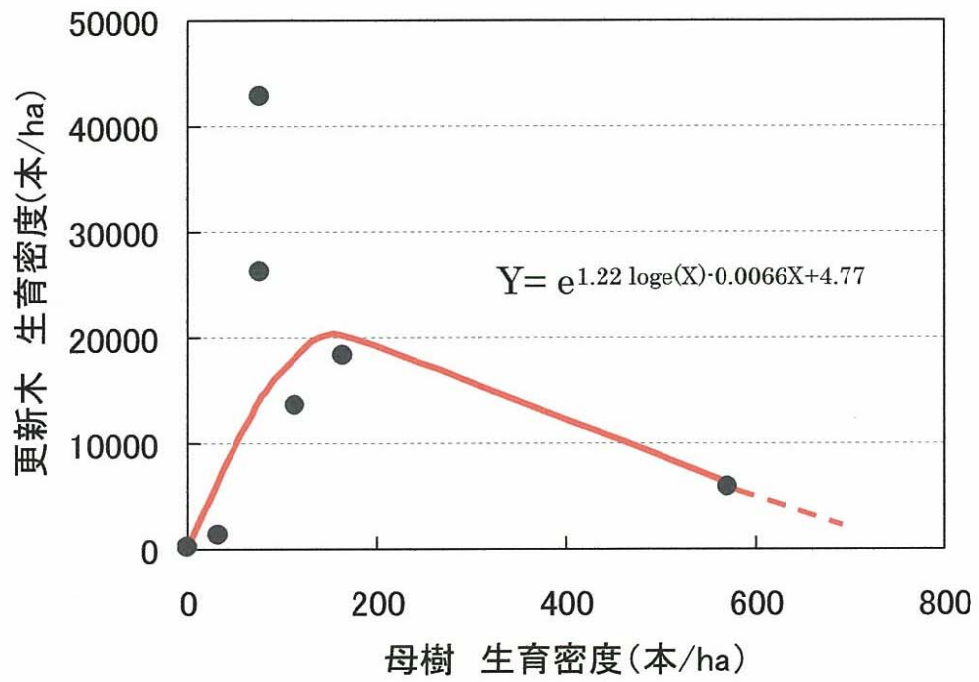


図 - 33 更新木 (Y) と母樹 (X) との関係

5. まとめ

モンゴル北部の森林火災跡地を対象に、室内試験と現地調査を通して、シベリアカラマツ林再生メカニズムの解明を試み、次の結果が得られた。

母樹の増加に伴い種子数の増加がみられ、母樹(X)と種子数(X1)との関係 ($X1=e^{0.66 \log_e(X)+0.034}$) が示された。

発芽には、相対光量子量 0%で発芽率 42%、同 44%で 27%から、光量子量が少ないほうが有利に働き、定着には、散水量 15~75mm/月で定着率が 0~66%から、散水量の下限が存在する。リター厚の増加は、下限を 30mm/月 (リター厚 0cm) から 15mm/月 (同 1.3cm) に低下させ、発芽・定着に適した環境を作り出す。また、定着直後の更新木が-10℃までの低温に耐えられることから、低温が更新木に与える影響は少ない。

母樹の増加は、生育時に必要な光を遮断するため、草本量の減少をまねき、更新木の生育にも影響を与えた。これより、生育には光が必要であり、また母樹(X)と草本量(X2)との関係 ($X2=e^{-0.0018X+5.38}$) が示された。生育時の水分条件は、現地土壌の体積含水率が 15%程度確保されていたことや、無散水期間 30 日まで耐えられたことから、更新木に与える影響は少ない。

現地調査から、母樹の生育密度 77 本/ha で更新木が 42,900 本/ha と最も多く、1 本/ha で 150 本/ha と最も少なくなった。母樹が最大の 572 本/ha では、更新木が 5,800 本/ha であり、母樹が多いと更新木が多くなるとは限らず、母樹が 100 本/ha 付近で更新木増加のピークがみられた。ここで、母樹と種子数・草本量との関係から、母樹(X)と更新木(Y)との関係 $Y=e^{1.22 \log_e(X)-0.0066X+4.77}$ を得た。この結果、火災後の自然再生には、最適な母樹の生育密度の範囲が存在することが示された。最適範囲では、自然に再生が行われ元の森林に戻ることが期待されるため、この範囲より母樹が少ないところに人為的に播種することで、森林再生の促進が可能になる。また、リターの遮光性や蒸発抑制効果は、発芽・定着に有利な環境を作り出すため、播種とリターを組み合わせることで、さらに再生の促進が期待される。今後、母樹の生育密度 165~572 本/ha の範囲で同様の調査を行い、モンゴル北部地域における森林再生のメカニズムをさらに確立することが求められる。

謝辞

本修士論文の作成にあたり、直接ご指導いただいた帯広畜産大学教授・武田一夫博士に心より感謝し、厚くお礼申し上げます。武田一夫教授には、モンゴルに4度ご同行させていただき、二度とできない調査を経験させていただきました。頑固で生意気な小生を見捨てず、最後までご指導を賜り、ここに改めてお礼申し上げます。また、同教授・土谷富士夫博士、同准教授・辻 修 博士ならびに同准教授・宗岡寿美博士には、幾度となく適切にご示唆やご助言を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

本研究を実施するうえで、北海道立林業試験場・鳥田宏行博士には、2006年の現地調査をはじめ2007・2008年の室内試験やおのおの研究結果に関わる貴重なアドバイスをいただきました。ここに深くお礼申し上げます。

また、同研究室の國貞雅生君、栗本 慧君、作田友磨君をはじめとする同輩諸兄、三品 歩君、藤原瑞穂さんをはじめとする当時の4年生諸兄、瀬町佳久君をはじめとする4年生諸兄、有馬遼子さん、佐々木達哉君、山田遥香さんをはじめとする3年生諸兄には、多くの迷惑をかけ、多大なご協力をいただきました。こうして修士課程を無事に修了することができたのも、研究生活を共にした頼もしい同輩、かわいい後輩の協力と励ましによるものであります。この場をかりて感謝し、お礼申し上げます。

最後に、本研究室事務員・大西希伊子氏にも、庶務の面でいろいろとお世話をいただきましたことに心より感謝し、ここに付記します。

参考文献

- 1) УПАН-ЪАТОР・МОСКВА (1990) МОНГОЛЪСКАЯ АРОДНАЯ ЕСПУБЛИКАНАЦИОНАЛЪНЪТЪЙ АТЛАС, p.45
- 2) ムルン气象台 (1988-2006) 月平均気温・月平均降水量, ツァガノール气象台
- 3) 吉良童夫・草加伸吾 (2006) 森林環境 2006 世界の森林はいま, 森林文化協会, pp.170-179
- 4) 杉本順一 (1987) 世界の針葉樹, 井上書店, p.44
- 5) A.SUGIMOTO, N.YANAGISAWA, D.NAITO, N.HUJITA and Trofim C.MAXIMOV (2002) Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga, Ecological Research, 17, pp.493-503
- 6) 酒井昭 (1995) 植物の分布と環境適応 - 熱帯から極地・砂漠へ -, 朝倉書店, pp.90-97
- 7) ムルン气象台 (1992-2007) 日最低気温・日降水量, ツァガノール气象台
- 8) 岩花剛, 町村尚, 小林義和, 福田正己 (2004) 東シベリア・ヤクーツク近郊のカラマツ林および森林攪乱地における活動層の熱・水収支特性, 日本雪氷学会誌, 66(2), 163-175
- 9) 酒井昭 (2003) 植物の耐寒戦略 - 寒極の森林から熱帯雨林まで, 北海道大学図書刊行会, p.148-159
- 10) 宗岡寿美 (2005) 寒冷少雪地域における冬期の気象・地盤環境が切土法面に及ぼす影響と植生を含めた斜面保全対策, 平成 17 年岩手大学博士論文, 110-111

- 11) 国立天文台 (2004) 理科年表 平成 17 年, 丸善株式会社, p.560
- 12) 土壤物理性測定法委員会 (1978) 土壤物理性測定法, 養賢堂, pp.287-289
- 13) 熱物性ハンドブック編集委員会 (1990) 熱物性ハンドブック, 養賢堂, p.443
- 14) VERNON S.PETERS,S.ELLEN MACDONALD,AND MARK R.T.DALE (2005) THE INTERACTION BETWEEN MASTING AND FIRE IS KEY TO WHITE SPRUCE REGENERATION, Ecological Society of America, 86 (7), pp.1744-1750
- 15) 沼田真 (1981) 種子の科学, 研成社, pp.81-84
- 16) 涌井良幸・涌井貞美 (2001) 図解でわかる 多変量解析, 日本実業出版社, pp.42-71

**Clarification of regeneration mechanism of burnt larch forest in the permafrost
region of northernmost Mongolia**

**Master course of Agro-Environmental Science,
Graduate School of Animal Husbandry,
Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine**

Junya ITO

Summary

To clarify the mechanism of regeneration of burnt Larch (*Larix sibirica*) forest in Hovsgol area, northernmost Mongolia, laboratory tests for the germination, establishment and growth in Japan and field investigation for the seed supply and growth in Mongolia were conducted.

As a result, sapling was observed to most grow at the site where the growth density of mother tree becomes 100 numbers/ha, after more than 10 years of fires. This mechanism was clarified by the following results; 1) *supply of seed* : The number of seed spread by mother tree increases with the growth density. 2) *germination and establishment* : Since the germination rate decreases with increases of relative amount of light quantum, the dark condition caused by a litter cover becomes favorable to the germination. The minimum precipitation required for the germination and establishment exists as 30 mm/m., and decreases to 15mm/m. owing to litter cover having 1.3cm in thickness. Further, the sapling keeps the survival ratio 69 % at -10°C. 3) *growth* : The survival rate of sapling which grows without water supply for a month, reaches to 95 %. Also, the amount of grass decreases with increases of mother tree, but it is advantageous for the sapling of larch to grow under less amounts of both grass

and mother tree because it can obtain more light quantum required to the photosynthesis.

Therefore, as the factors on the mechanism were examined referring the meteorological date on the spot, the hydraulic and thermal ones as a requirement dose not control the growth directly. It was clarified that the optimum range in the growth density of mother tree exists, when a certain amount of seed supplies and mother tree and grass grows little. Moreover, it implies that the litter having effects to shield the light, to suppress the evaporation of soil water and to insulate thermally, extends the range.