

連年施肥を受けたトドマツ・エゾマツ・アカエゾマツ壮齢林における 間伐前後のリター分解速度

森林総合研究所北海道支所 伊藤江利子・橋本徹
森林総合研究所 相澤州平・長倉淳子

はじめに

森林総合研究所北海道支所羊ヶ丘実験林の土壤環境長期モニタリング試験林では、連年施肥が林木の成長と土壌の変化に及ぼす影響を追跡するため、1973年に植栽したトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林に1978年以降継続して施肥を行っている^(1,9)。

本試験林における過去の調査により、林木の成長に関しては、施肥により初期成長は増加するが林冠鬱閉後は成長差が拡大しないこと^(1,9)、初期の施肥で生じた樹高差は施肥を止めた後も保たれること⁽¹⁾、3樹種の中ではエゾマツ・アカエゾマツで成長に対する施肥の効果が比較的長く持続するが、トドマツの直径成長では初期施肥の効果が次第に薄れること^(1,13)が明らかになっている。また表層土壌の変化に関しては、施肥区でpHが顕著に低下すること、交換性塩基量は低いが可給態Pや交換性Alの含有量は高いこと^(1,5,7,10,12)、施肥によりトドマツ針葉のMnおよびAl濃度が高まり、土壤酸性化の影響と考えられること⁽⁶⁾、堆積有機物層の単位重量当りの土壤微生物バイオマスC、Nが長期の連年施肥によって減少すること⁽⁵⁾が明らかにされた。

これらに加えて、林床に堆積する有機物層に関しても施肥区と無施肥区の間で顕著な差が報告されている。施肥開始後36年が経過した時点でトドマツ林の施肥区における堆積有機物量は無施肥区の2倍以上に達していた⁽⁵⁾。しかしながら同時期のトドマツ林の地上部バイオマスには堆積有機物量ほどの差異は認められない。施肥区の地上部バイオマスは無施肥区の1.2倍程度に留まっており^(2,3)、林床に供給される有機物量（リターフォール量）にも堆積有機物量の差異を説明できるほどの著しい違いはない⁽⁵⁾。施肥区では微生物量が減少していることを踏まえ、施肥区における有機物分解の抑制が林床有機物の顕著な堆積傾向をもたらしている可能性が提唱されている⁽⁵⁾。

そこで本研究では、土壤環境長期モニタリング試験林において施肥の有無で林床有機物の分解速度が異なるかどうかを確かめるため、リターバッグ法を用いた落葉分解試験を行った。また高密度壮齢林である本試験林では、試験期間中の40年生時に全層間伐が行われた。落葉分解速度は間伐前後にそれぞれ実施し、間伐による落葉分解速度の変化が認められるかどうか検討した。

調査地と調査方法

1) 試験地概要

森林総合研究所北海道支所（札幌市豊平区）構内の土

壤環境長期モニタリング試験林（N 42.991, E 141.393）で調査を行った。当試験林は林地肥培モデル実験林として設定され、1973年にトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ（すべてマツ科）、1974年にウダイカンバ（カバノキ科）が植栽された。本研究で対象とする針葉樹種では樹種毎に4個の試験区が隣接し、施肥区と無施肥区が交互に設定された。1978年に施肥を開始し、6年間の施肥区（NPK6年区）と現在まで年1回春（5月下旬から6月上旬）の施肥を継続している施肥区（NPK区）があり、本研究ではこのうち連年施肥を継続している施肥区と対照となる無施肥区を調査対象とした。落葉分解試験（後述）を開始した2012年11月までの施肥量および試験継続期間である2012年から2017年にかけての毎年の施肥量を表-1に示す。

表-1 2012年11月までの合計施肥量と2012-2017年における連年の施肥量

	トドマツ		エゾマツ・アカエゾマツ			
	N	P	K	N	P	K
合計施肥量 (kg ha ⁻¹)	4326	1220	1665	4654	1314	1789
連年施肥量 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)	130	28	54	141	31	58

各試験区は1.6 m間隔の方形植え（3906本 ha⁻¹）で、試験区のサイズはトドマツで15本×12列（24 m×19 m）、エゾマツ、アカエゾマツで10本×10列（16 m×16 m）である。トドマツでは各試験区を東西6列ずつに分割し、西側6列では2002年に下層間伐を行っている。本研究では立木が高密度で維持されていた東側6列（0.023ha）内で調査を行った。エゾマツ、アカエゾマツでは試験区全域を対象に2003年に下層間伐が行われた。本研究では林縁および試験区境界を避け、各試験区10列のうち中央6列（0.015ha）内で調査を行った。

試験期間中の2014年2月に間伐を行った。この間伐による林況の変化を表-2に示す。落葉分解試験（後述）は間伐前後に分割して行った。その他の試験地および施肥量の詳細は既報^(1,2,7)の通りである。

2) 堆積有機物量調査

林床有機物の堆積状況を明らかにするため、堆積有機物量調査を2012年9月に行った。各調査林分の林床に50cm×50cmの調査枠を6か所設置し、調査枠内の堆積有機物を採取した。採取した堆積有機物は直径5cm以上の枝を大枝、それ以外を堆積有機物と区分し、70℃で3日間乾燥した後の重量（以下、乾燥重）を測定した。

表-2 間伐前後の林況

	トドマツ		エゾマツ		アカエゾマツ	
	施肥区	無施肥区	施肥区	無施肥区	施肥区	無施肥区
間伐率 (%)	40	46	40	36	38	36
立木密度 (本 ha ⁻¹)						
間伐前	2170	2344	2279	2539	2539	2344
間伐後	1302	1302	1367	1628	1563	1497
地上部現存量 (Mg ha ⁻¹)						
間伐前	324	296	251	255	349	250
間伐後	206	186	157	173	251	178

地上部現存量の推定には既往の推定式を用いた⁽²⁾

なお堆積有機物量のデータの一部は 2016 年の森林学会⁽³⁾にてポスター発表済みである。

3) 落葉分解試験

林床有機物の分解速度をリターバッグ法により推定した。リターバッグ法では落葉を封入したリターバッグを地表等に設置し、一定の期間が経過した後に回収して、時間の経過に伴うリターの現存量の変化をもって分解速度を評価する。本研究では封入有機物の初期重量に対する残存量の比(重量残存率)で評価した。リターバッグは調査 6 林分(3樹種×2施肥区分)内の堆積有機物上に 2012 年 11 月 19 日に 60 個, 2013 年 12 月 11 日に 120 個設置した。前者を間伐前, 後者を間伐後と便宜的に呼称するが, 実際の間伐時(2014 年 2 月)においては後者のリターバッグは林地の積雪下に設置されていた。リターバッグに封入した落葉は 2012 年 10 月(間伐前設置分)および 2013 年 10-11 月(間伐後設置分)の期間に対象林分内に設置したリターバッグで集めた落葉を風乾して用いた。別途取り分けた林分ごとの落葉試料について, 風乾重量と乾燥重を測定して, 含水率を求めた。封入試料の含水率を試験に用いたバッグは内寸法 10cm×15cm のナイロンメッシュ製で, メッシュのオープニングは約 0.24mm, ナイロン糸の太さは約 0.18mm だった。バッグの四辺はヒートシーラーを使って溶着した。バッグに風乾重で 10g の落葉を封入した。各バッグの封入試料の乾燥重を試料風乾重と含水率から求めた。

間伐前に設置したリターバッグは設置約 0.5 年後(2013 年 5 月), 1 年後(2013 年 11 月), 間伐後に設置したリターバッグは設置約 0.5 年後(2014 年 5 月), 1 年後(2014 年 11 月), 2 年後(2015 年 11 月), 4 年後(2017 年 11 月), 以上の計 6 回に渡って回収した。したがって設置期間 0.5 年の試料は冬季期間の設置となる。以下, 上記の 6 回の回収イベントを間伐(前/後)x年と呼称して区別する。これは間伐前(ないしは後)に設置しx年後に回収したリターバッグを意味する。リターバッグは各回収時の各調査林分から 5 個ずつ回収して反復とした。ただし間伐後 1 年のトドマツ施肥区ではバッグ破損のため回収数は 4 であった。回収したリターバッグの中に残存する落葉の乾燥重を測定した。また一部の試料を用いてマッフル炉で試料約 200 mg を 830℃ で 5 分間加熱後, 燃焼灰の重量を測定し, 各試料の灰分率を求めた。試料設置前後の灰分率の変化からリターバッグ内への鉱質土壌の混入量を推定し, その影響を指標値から除外する灰分補正を行った。

リターバッグ設置中の表層土壌の温度と水分は, 各試験区のリターバッグを設置した地点の近傍で深さ 5cm の土壌中に

センサーを埋設し, データロガーにより 30 分間隔で記録した。

4) データ解析

林床有機物の現存量に施肥が及ぼす影響を明らかにするため, 一般線形モデル(GLM)を用いた分散分析で解析した。目的変数は堆積有機物現存量, 説明変数は施肥, 樹種, 施肥と樹種の交互作用とした。同様に林床有機物の分解速度に施肥が及ぼす影響を明らかにするため, GLMを用いて解析した。目的変数は既往のリター分解モデル⁽¹⁴⁾

$$\ln(M_t/M_0) = -kt$$

における分解速度定数 k を用いた。上記のモデル式における M_t は時間 t における重量, M_0 は初期重量である。k は正の値で, 値が小さいほど分解が遅いことを示す。説明変数はすべて名義変数で樹種 (3 種), 施肥 (施肥区・無施肥区の 2 区分), 回収 (計 6 回の回収イベント), およびそれらの交互作用を用いた。効果が認められた要因については Tukey の HSD 検定により要因内の項目間に有意な差が認められるかどうか検定した。

統計解析には JMP ver.10.0 (SAS Inst., Cary, NC)を用いた。

結果と考察

1) 堆積有機物現存量に対する施肥の効果

堆積有機物現存量を図-1 に, 堆積有機物現存量に関する分散分析の結果を表-3 に示す。GLM に使用した説明変数はすべて有意であった。無施肥区では樹種間に差は認められず, 16-20 Mg ha⁻¹ 程度の現存量を示した。施肥は堆積有機物現存量に対して正の効果認められ, 施肥により堆積有機物現存量が増加することが示唆された。しかしながら GLM では樹種と施肥の交互作用も有意な

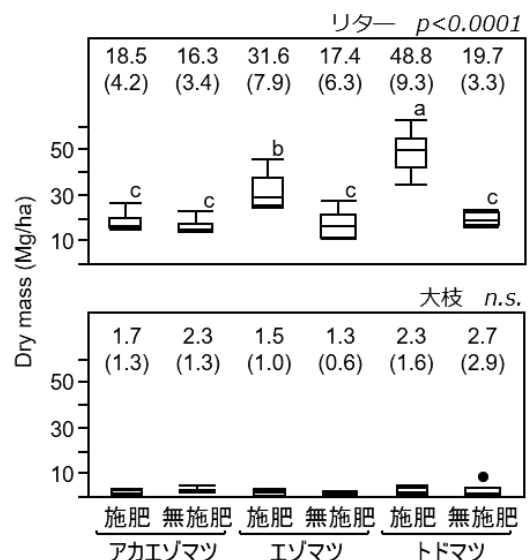


図-1 堆積有機物現存量

数値および括弧内の数値は平均値と SD を示す (n = 6)。箱ひげ図の箱の中央線は中央値, 両端は 25% と 75% の分位点を示す。ひげの両端は外れ値を除いた最大・最小値を示す。点は外れ値を示す。外れ値は第 1 四分位点 - 1.5 × (4 分位範囲) 未満ないしは第 3 四分位点 + 1.5 × (4 分位範囲) より大きい値とした。異なるアルファベットは Tukey の HSD 検定で差があることを示す。

効果として認められた。トドマツとエゾマツの施肥区で堆積有機物量が無施肥区より大きい有意な傾向が認められたが（図-1）、アカエゾマツでは施肥区と無施肥区に有意な差は認められなかった。トドマツはモミ属 (*Abies*)、エゾマツとアカエゾマツはトウヒ属 (*Picea*) であり、属の区分と堆積有機物量の傾向は合致しなかった。なお大枝の堆積量に関しては林分間の有意差は認められなかった。

これらの結果により、林床への有機物供給量に樹種および施肥による違いがないことを仮定するならば、堆積有機物の分解速度は無施肥区では樹種間に違いがない一方で、施肥区ではトドマツとエゾマツで低下しており、特にトドマツでは低下の傾向が顕著なものと予想された。

表-3 堆積有機物現存量に対する分散分析の結果

要因	自由度	平方和	F 値	p 値
樹種	2	1716.66	22.47	<.0001
施肥	1	2069.04	54.15	<.0001
処理×樹種	2	1091.84	14.29	<.0001

2) 落葉分解速度に対する施肥の効果

各林分の各回収回におけるリター重量残存率を図-2に示す。設置後 0.5 年におけるリター重量残存率は 0.82-0.86 程度であり、冬季の積雪下でリター重量は 1 割以上減少していた。その後のリター重量残存率は設置後 1 年、2 年、4 年で 0.63-0.71, 0.57, 0.33 と推移し、時間の経過に伴ってリターの減少速度が緩やかになるリター分解モデルに準じた傾向が認められた。

分解速度定数 k に対する分散分析の結果を表-4 に示す。k に対する効果は樹種、施肥、回収のすべての説明変数で認められたほか、樹種と回収の交互作用および 3 つの説明要因の交互作用でも認められた。樹種と施肥の交互作用は有意な効果とは認められず、「分解速度は無施肥区では樹種間に違いがない一方で、施肥区ではトドマツとエゾマツで低い」とした予想に反する結果となった。

3 つの説明要因に対する Tukey の HSD 検定および最小二乗平均値を表-5 に示す。樹種要因では 3 樹種間の有意差が認められ、特にトドマツで k が小さかった。施肥要因では予想に反し、施肥区で k が有意に大きかった。ただし施肥の水準間の最小二乗平均の差 (0.65) は樹種 (最大 1.90) の 1/3 程度であった。回収要因では間伐後 2 年以降で k が小さい傾向ならびに経過時間 1 年以下では間伐前の試験で k が明瞭に大きい傾向が有意に認められた。この 1 年以下の分解期間における間伐前後の差については後に検討する。樹種×施肥×回収の各水準における k の平均値と SD を表-6 に示す。回収水準ごとの k の違いが明瞭であるため、各回収水準内における樹種×施肥の水準間の違いを検討した (表-6)。同一の回収水準内においては樹種×施肥の水準間の違いは顕著でなかった。回収要因の 6 水準中 4 水準で樹種×施肥の水準間の違いは認められなかった。有意差が認められた間伐前 1 年と間伐後 2 年においても同一樹種内で施肥水準間の違いが認められたのは間伐後 2 年におけるアカエゾマツだけであり、ここでも k が大きいのは施肥区であった。

表-4 分解速度定数 k に対する分散分析の結果

要因	自由度	平方和	F 値	p 値
樹種	2	1.16E-6	54.33	<.0001
施肥	1	1.85E-7	17.31	<.0001
樹種×施肥	2	8.67E-9	0.41	0.6675
回収	5	4.67E-6	87.33	<.0001
樹種×回収	10	3.14E-7	2.94	0.0022
施肥×回収	5	4.75E-8	0.89	0.4911
樹種×施肥×回収	10	3.34E-7	3.12	0.0012

要因はすべて名義変数。樹種はアカエゾマツ、エゾマツ、トドマツの 3 水準、施肥は施肥区、無施肥区の 2 水準、回収は設置時期と設置期間の組み合わせで区分された回収イベントを意味し、計 6 水準からなる。

表-5 分解速度定数に対する樹種、施肥、回収の効果

要因	水準	最小二乗平均 (×10 ⁻⁴)
樹種	アカエゾマツ	10.57 ^a
	エゾマツ	10.12 ^b
	トドマツ	8.67 ^c
施肥	施肥区	10.11 ^a
	無施肥区	9.46 ^b
回収	間伐前 1 年	12.61 ^a
	間伐前 0.5 年	10.77 ^b
	間伐後 0.5 年	9.78 ^c
	間伐後 1 年	9.60 ^c
	間伐後 2 年	8.06 ^d
	間伐後 4 年	7.89 ^d

同一要因内で同じ文字を共有しない水準は有意に異なる。最小二乗平均は GLM において他の要因による効果を中立的な値 (各水準で計算された係数の平均) に固定した時の名義変数要因の各水準の予測値を意味する。各要因の詳細は表-4 の脚注を参照。

表-6 分解速度係数 (平均値 (SD) ×10⁻⁴)

回収	設置 期間 (日)	トドマツ		エゾマツ		アカエゾマツ	
		施肥 区	無施 肥区	施肥区	無施 肥区	施肥 区	無施 肥区
間伐前	183	9.44 (0.27)	9.95 (0.53)	11.23 (0.29)	10.58 (0.33)	11.73 (0.39)	11.67 (0.40)
0.5 年		11.7 ^{bcd}	10.29 ^d	13.33 ^{abc}	11.61 ^{cd}	14.23 ^{ab}	14.52 ^a
間伐前 1 年	364	(0.41)	(0.73)	(0.77)	(0.80)	(1.90)	(0.88)
間伐後 0.5 年		9.56 (0.47)	8.78 (0.28)	10.36 (0.46)	9.30 (0.45)	9.99 (0.25)	10.70 (0.82)
間伐後 1 年	352	9.14 (0.39)	8.28 (0.22)	10.85 (0.48)	9.78 (0.39)	10.13 (1.02)	9.43 (0.37)
間伐後 2 年		6.54 ^b (0.22)	6.71 ^b (0.80)	8.62 ^{ab} (0.80)	8.35 ^{ab} (1.80)	10.45 ^a (1.13)	7.72 ^b (1.62)
間伐後 4 年	1435	7.00 (0.90)	6.67 (1.55)	8.41 (2.70)	8.98 (1.07)	9.21 (2.21)	7.04 (1.69)

回収は設置時期と設置期間の組み合わせで区分された回収イベントを意味する。間伐前 (後) x 年は間伐の前 (後) に設置され、x 年後に回収されたリターバッグを意味する。間伐前 1 年と間伐後 2 年における同じ文字を共有しない樹種×施肥の水準は有意に異なる。その他の回収水準内では樹種×施肥の水準間に有意差は認められなかった。

以上の通り、本研究では落葉分解速度に対する施肥の効果は予想に反して正の効果が認められた。ただし、その効果は樹種に比較して顕著ではなかった。また 3 樹種の中で施肥の効果が比較的明瞭だったのはアカエゾマツだった。他の冷温帯林のマツ科針葉樹種でも落葉分解速度への施肥影響は顕著でなく、また樹種により異なることが報告されている。ダグラスファー (*Pseudotsuga menziesii*) における 4 年間の分解試験⁽⁶⁾では分解速度に施肥影響は認められなかった。また落葉の長期的な分解率に対しオウシュウトウヒ (*Picea abies*) では窒素の影響が

認められず、窒素施肥によりリターが腐植として蓄積する割合は増加しないと予測された⁽⁴⁾。ただしヨーロッパアカマツ(*Pinus sylvestris*)では負の関係が認められており⁽⁴⁾、この傾向は施肥区でより分解速度が大きいことが示唆された本研究の結果(特にアカエゾマツ)とは正反対であった。

3) 間伐前後の落葉分解速度の違い

1年以下の分解試験における間伐前後間の分解係数の違いについて考察するため試験期間中(2012年12月から2014年11月まで)の地温と土壌水分を図-3aに示す。地温と土壌水分は各日の平均値を林分ごとに求め、調査6林分の平均値を算出した値を示した。

地温は4月中下旬から上昇し始め、12月中下旬に下がり止まる年変動パターンを示し、冬季夏季ともに2013年(間伐前)と2014年(間伐後)の地温に大差はなかった。

土壌水分は冬季の積雪期間中は安定、雪解けの4月に著しく上昇、少雨の5-6月に乾燥、夏季から積雪までは乾燥と湿潤を繰り返す年変動パターンを示した。試験期間両年を通じて土壌水分は4月に最も高くなったが、土壌水分最大値には顕著な違いが認められ、2013年の土壌水分は2014年に比べて非常に大きかった。一時的な冠水には落葉の分解を促進する効果があり⁽¹¹⁾、また冷温帯林のリター分解を広域で比較した試験では温度よりも水分の方が分解速度への影響が大きいと報告されている⁽⁶⁾。間伐前の分解速度定数が間伐後より有意に大きい原因として、2013年4月の調査地林床が冠水に近い状態になっていた可能性が考えられる。また土壌水分は9月以降も2013年で全般的に大きい傾向が認められ、試験期間を通じて間伐前試験では乾燥による分解抑制が相対的に起こりにくかったと推察された。

上述の2013-2014年の土壌水分の違いが間伐の実施と連関するものであるか検討するため、札幌気象台の旬別降水量平年値と試験期間の旬別降水量平年比を比較した(図-3b)。札幌の降水量の年変動パターンは7-2月に降水・降雪で比較的大きく、3-6月に少なくなる傾向を示す。試験期間中の降水量平年比を見ると、冬季(12-2月)は間伐前(2012-2013)でやや大きく、間伐後(2013-2014)で平年並みであった。冬季の期間降水量の平年比は間伐前が136%、間伐後が103%だった。これは間伐前試験では積雪由来の水分供給量が平年以上であったことを示す。さらに春先(3-4月)の降水量は間伐前後年で著しい違いがあった。2013年は春先の降水量が大きく、期間平年比は169%に達した。特に4月上旬には67mmの降水が記録され、これは4月上旬としては1883年の観測開始以降上位5%に位置する稀有な降水量であった。一方、2014年は春先の期間平年比が67%と平年を明瞭に下回っていた。夏季(5-11月)の降水量は間伐前後とも平年よりやや大きい程度で、期間平年比は112%と113%でほぼ同じであった。以上のことより、間伐前と間伐後の試験期間中の降水量は冬季と春季において間伐前の方が間伐後より大きい傾向が明らかであり、4月の土壌水分で認められた顕著な差は間伐の実施とは関係なく降水量を反映したものであると考えられた。間伐前試験期間の土

壌水分は平年より顕著に多く、間伐前試験で得られた分解速度係数は本調査地の平均的な値より大きい可能性が高い。間伐後の土壌水分はほぼ平年並みと推定されるが、春先に平年より顕著な乾燥を経験しており、これによりその後の分解が抑制された可能性もある。間伐後の試験で推定された分解速度係数は平均的な値と同程度かやや小さい可能性がある。

まとめ

連年施肥を行った北方針葉樹(トドマツ, エゾマツ, アカエゾマツ)壮齢林を対象とし、施肥区と無施肥区の林床有機物堆積量と落葉分解速度を比較した。トドマツとエゾマツでは施肥区で林床有機物堆積量が大きい傾向が認められた。林床有機物堆積量の差は落葉の分解速度の差に起因するとの作業仮説を検証するため、リターバッグ法による落葉分解試験を行った。分解速度定数は施肥区で大きい傾向が認められ、落葉の分解は施肥区で速いことが示唆された。これは作業仮説を棄却する結果であり、林床有機物堆積量の差は落葉後4年間の分解速度では説明できなかった。林床有機物堆積量の差は、より長期に渡る有機物の残存傾向に起因する、もしくは林床有機物供給量の差に起因する可能性がある。これらの要素と施肥の関係を明らかにすることが必要である。

間伐前後の各1年間の落葉分解速度を比較すると、すべての樹種で間伐前の分解速度が大きかった。調査地の地温・土壌水分を測定し、春先の土壌水分が間伐前年(2013年)で間伐後年(2014年)より著しく高かったことが明らかになった。間伐前の分解速度の大きさは春先の土壌水分の高さと関係があることが推察された。しかしながら気象庁の降水量データによれば間伐前年の冬季春先の降水量は平年をはるかに上回っていた。間伐前後の分解速度の違いは気象要因に起因するものであり、間伐が影響したことを示唆する特徴は認められなかった。この結果は本試験地のような多雪地域では春先の林床水分状態が落葉の分解速度に大きく影響することを示唆するものである。積雪量や融雪期の降水量が変化すると春先の林床水分状態も連動して変化し、林床有機物の分解系ならびに森林生態系の炭素・養分循環に大きな影響を及ぼす可能性がある。

謝辞

本研究は科研費24580232, 26450218 および21K05678による成果である。

引用文献

- (1) 相澤州平・伊藤江利子・橋本 徹・阪田匡司・酒井寿夫・田中永晴・高橋正通・松浦陽次郎・真田 勝(2012)トドマツ, エゾマツ, アカエゾマツおよびウダイカンバ人工林の37年間の成長経過と施肥の影響. 北森研 **60** : 93-99.
- (2) 相澤州平・伊藤江利子・橋本 徹・酒井佳美・鳥山淳平・大澤 晃・藤井創一朗(2015)羊ヶ丘実験林における40年生トドマツ, エゾマツ, アカエゾマツ人工林の地上部バイオマス量と施肥の影響. 北森研 **63** : 67-68.
- (3) 相澤州平・伊藤江利子(2016)間伐と長期間の施肥がトドマツ, エゾマツ, アカエゾマツ人工林の成長とリター量に

あたえた影響. 日本森林学会大会発表データベース **127**: P2-232.

- (4) Berg B (2000) Initial rates and limit values for decomposition of Scots pine and Norway spruce needle litter: a synthesis for N-fertilized forest stands. *Can. J. Forest Res.* **30**: 122-135.
- (5) Furusawa H, Nagakura J, Aizawa S, Ito E (2019) Effects of repeated fertilization and liming on soil microbial biomass in *Betula maximowicziana* Regel and *Abies sachalinensis* Fr. Schmidt stands in Japan. *Landsc. Ecol. Eng.* **15**: 101-111.
- (6) 長倉淳子・古澤仁美・相澤州平・伊藤江利子・橋本 徹 (2019) 施肥開始から18年間のトドマツ針葉とウダイカンバ落葉の養分濃度変化. *関東森林研究* **70**: 73-76.
- (7) 長倉淳子・古澤仁美・伊藤江利子・橋本 徹・梅村光俊 (2021) 連年施肥40年目のウダイカンバ林とトドマツ林の土壤養分状態. *関東森林研究* **72**: 201-204.
- (8) Prescott CE, Blevins LL and Staley C (2004) Litter decomposition in British Columbia forests: Controlling factors and influences of forestry activities. *BC Journal of Ecosystems and Management* **5**: 44-57.

- (9) 真田 勝・大友玲子・真田悦子(1995)トドマツ肥培林の成長と当年葉の養分濃度－施肥17年間の養分濃度の変動－. *日林論* **106**: 223-224.
- (10) 真田 勝・大友玲子・真田悦子(1997)林地肥培林における表層土壌の変化－植栽から20年のモニタリング－. *日林論* **108**: 201-202.
- (11) 佐々木晶子 (2011) 氾濫原河畔植生に由来する有機物の生産・分解・流出過程. *日本生態学会誌* **61**: 53-61.
- (12) 高橋正通・真田 勝・松浦陽次郎・尾根澤久枝(1999) 北方常緑針葉樹の人工林発達に伴う土壌交換性塩基の動態. *日林学術講* **110**: 525.
- (13) 田中永晴・酒井佳美・酒井寿夫・石塚成宏・松浦陽次郎・高橋正通・小野賢二(2004)25年間連年施肥がエゾマツおよびアカエゾマツの地上部バイオマス量に与えた影響. *日林学術講* **115**: 514.
- (14) Wieder RK and Lang GE (1982) A critique of analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology* **63**: 1636-1642.

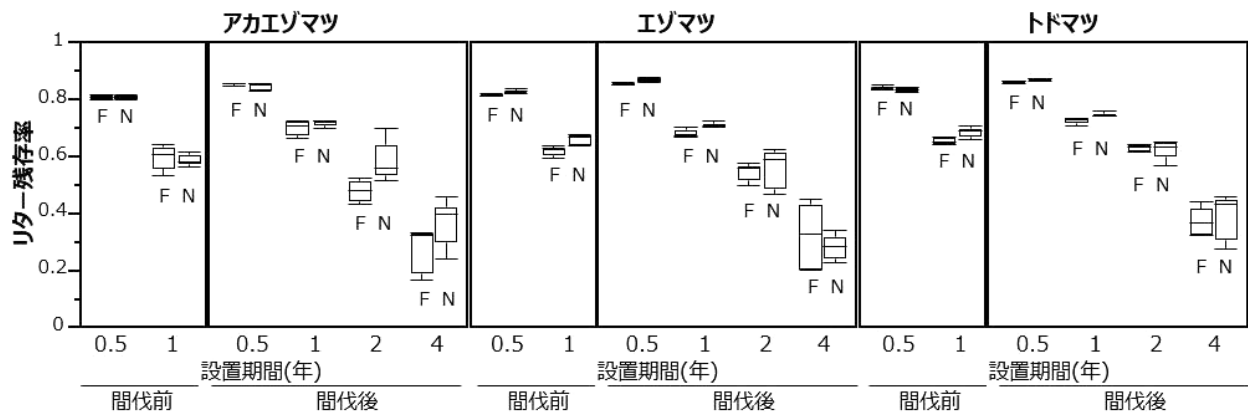


図-2 リターバッグ法によるリター重量残存率
F:施肥区 N: 無施肥区

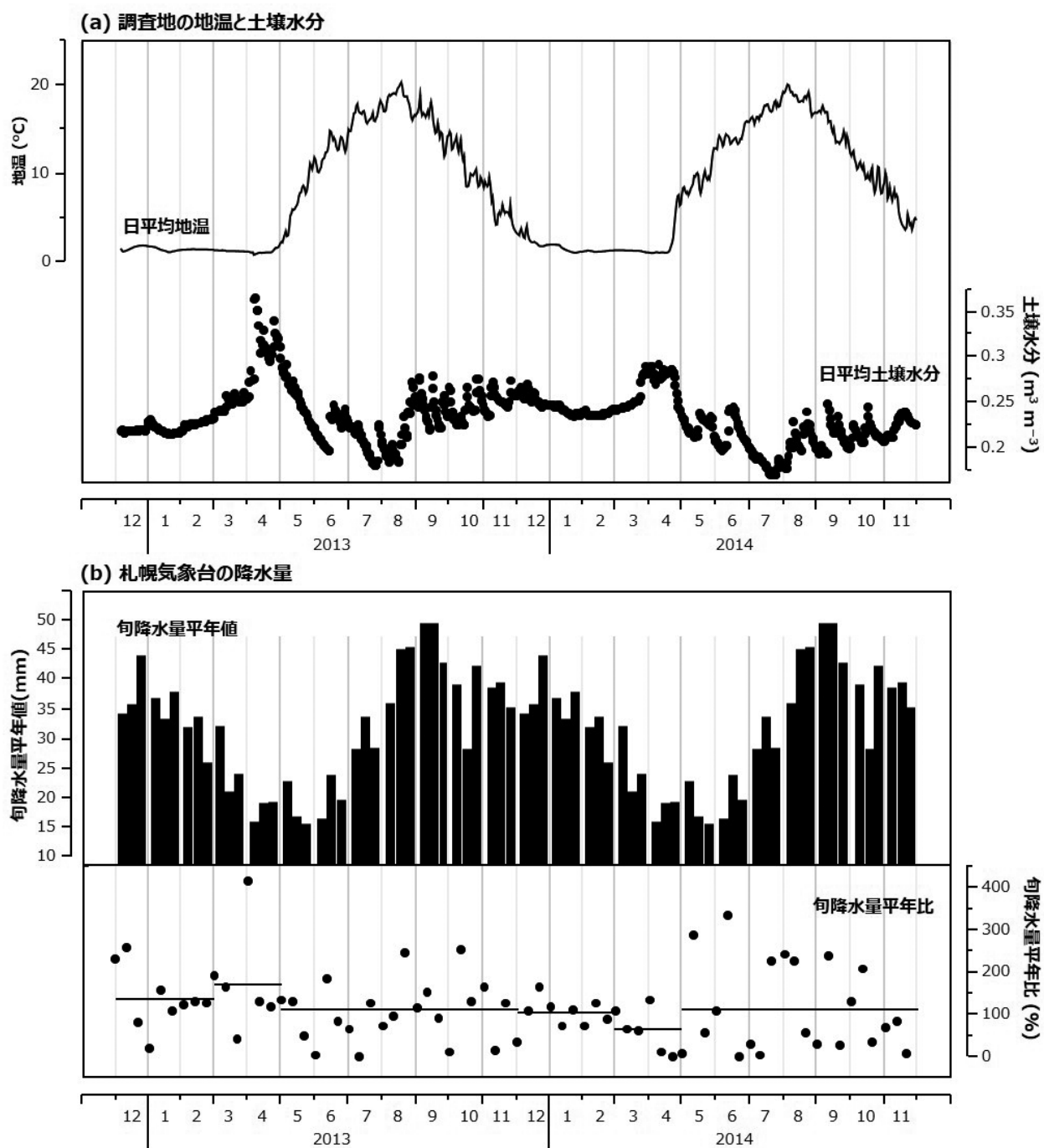


図-3 分解試験中の環境条件 (分解期間 1 年まで)

旬降水量平年比の水平線は降水量の (冬季 (12~2 月)、春先 (3~4 月)、夏季 (5~11 月)) 期間平年比を表す