

テーダマツ幼令林の物質生産機構

赤井 龍 男・古野 東 洲・上田 晋之助・佐野 宗 一

Mechanisms of Mater Production in Young Loblolly Pine Forest

Tatsuo AKAI, Tooshu FURUNO, Shinnosuke UEDA and Sōichi SANO

目 次

要 旨	26	1) 林内の明るさ	
まえがき	27	2) 生枝下高の変化	
1. 調査林分の概況	28	3) 地床植生	
2. テーダマツの相対生長と林分現存量	28	6. 土壌環境	38
1) 調査方法		1) 粗腐植の堆積	
2) 相対生長関係		2) 土壌の構造と理学的性質	
3) 地上部現存量		3) 土壌の化学的性質	
3. 林分生産量	31	7. 物質循環	40
1) 個体の生長		1) 地上部各部の養分含有率	
2) 林分の幹生産量		2) 生態系内の養分現存量とその配分	
4. 林分の生産構造	33	3) 養分の落葉落枝としての環元—— 平均分解率	
1) 断面積の本数分布		4) 土壌中養分の消費の早さ	
2) 林分密度		あとがき	47
3) 幹枝葉の垂直的配分——生産構造		文 献	48
4) 葉と枝の関係		Resumé	48
5. 林内環境	36		

要 旨

この研究は、京都大学農学部白浜試験地に、密度と施肥量をかえて植付けられ、一部はすでに完全な閉鎖状態に達した7年生のテーダマツ林 (*Pinus taeda*) と、上賀茂試験地の苗畑に床替後5年間放置され、すでに自然間引が起こり最多密度の状態に達した小林分とを対象に、それらの林分の総合的な物質生産のしくみを明らかにしようとしたものである。

施肥した林分には N, P₂O₅, K₂O がそれぞれ 15:8:8 の化成肥料と、同比率の配合肥料の2種を1本あたり 100g ずつ植付け時から3ヵ年与えたが、1967年10月現在、立木密度は ha あたり約 2,100 本(疎)、約 3,800 本(中)、約 6,500 本(密)で、平均胸高直径(d)はそれぞれ約 10.2cm, 7.8cm, 8.0cm に達し、平均樹高(h)は密度に関係なくほぼ 6~7m であった。しかし施肥しなかった林分はいずれの密度でも生長が悪く、約 30% の個体がまだ胸高に達していなかった。上賀茂の小林分は密度約 93,000 本/ha, d は 1.7cm, h は 2.8m で、約 111,000 本/ha の枯死木が認められた。

林分の地上部各部分の現存量は、資料木の層別刈取りによる相対生長法から推定したが、上賀茂の小林分は総刈りを行なった。胸高直径 (D cm) と樹高 (H cm) の D^2H に対する幹材積 (V cm³) なら

びに密な林分の幹乾重 (w_s , kg), 枝乾重 (w_B , kg) と葉乾重 (w_L , kg) の相対生長関係は比較的適合度がよく, その近似式はつぎのようであった。

$$\log V = 0.8638 \log(D^2H) + 0.2810$$

$$\log w_s = 0.8404 \log(D^2H) - 3.0073$$

$$\log w_B = 1.2253 \log(D^2H) - 5.4815$$

$$\log w_L = 1.0078 \log(D^2H) - 4.4445$$

白浜における密な林分の幹乾重は 55~59ton/ha, 枝乾重と葉乾重はそれぞれ 13~14ton/ha と推定されたが, 葉量は他のマツ属よりかなり多いようであった。この葉量は落葉期前の2年分の着葉量であるが, 春5月, 1年葉のみを着生していた上賀茂の小林分でも約 10ton/ha と計測された。

密な林分の年間幹材積生産量は 32~35m³/ha で, 他のマツ属より著しく大きい。

林分の生産構造は葉が上層にかたよった広葉型で, 密な林分の生枝下の平均相対照度は 1~2% であった。そして樹高に対する生枝下高の相対値と林内の明るさとは相関が高いようであった。

L型の断面積分布や自然間引の状態からみて, 上賀茂の小林分は最多密度 (ρ , 本/ha) に達していると思われたので, これから最多密度曲線を暫定的にもとめてみた。

$$\log v = -1.5 \log \rho + 4.3075$$

粗腐植 (A₀層) の堆積量は乾重でほぼ 9~12ton/ha となり, 立木密度による差はほとんど認められなかった。

白浜試験地の土壌の構造ならびに理化学性はきわめて悪かった。肥料として施用した N, P, K の3成分は, 施肥量が増加するとともに地上部 (テーダマツ以外の他植物も含む) と地下 45cm の深さまでの土壌 (粗腐植を含む) を合せた生態系内の各部分で明らかに増加し, とくに可給態の P と K は施用量にほぼ比例して, 地上部, 地下部とも増加し, はじめの養分不足を補って順調な物質循環を繰返すようであった。

これに反して, 施肥しなかった置換性の Ca と Mg は生態系内の増加はなく, 地上部に吸収保持された量だけは土壌中から減少していた。

N, P, K の推定平均分解率はきわめて高く, 粗腐植中の養分は 1~3 年でほぼ分解されるようであった。しかし幹に毎年蓄積される吸収速度から土壌中の可給態養分の残存量を推定すると, P は約 10 年分, K は約 20 年分しかない計算になり, 物質の循環からみて, 近い将来生長が減退する可能性が大きいものと思われた。

ま え が き

近年, 各樹種の林分現存量, 生産力を調査した報告は数多くみられ, マツ属についてもとくにわが国での主要樹種であるアカマツを調査した報告は多い。

テーダマツは導入樹種のなかでも林業的に最も有望と思われるものの一つで, 実際に日本各地に造林され, その造林成績の報告は多い。しかし密度と施肥の試験を組み合せた林分の生産機構を解析した研究は全くなく, ただ10年生の林分現存量, 生産力を調査した湯浅ら¹⁾, 落葉, 落枝量を調査した只木ら²⁾の報告がみられるにすぎない。

京都大学農学部附属演習林白浜試験地では, 柴田³⁾の計画で, 1961年3月に満1年生のテーダマツを密度と施肥量をかえて植付け, その後の生育状態の調査を続けてきた。この初期の生長および土壌の理化学性の変化については, 柴田ら³⁾がその概要を報告しているが7生育期を経た1967年秋には立木密度の高い林分は, はやくも完全に閉鎖し, 自然間引をおこす状態に達した。本報告では, これらの林分の地上部現存量, 生長量, 生産構造を調査検討し, あわせて生態系内における養分分析から, 物質生産機構の解析を試みた。

本報告をとりまとめるに有益なご助言を賜わった京都大学農学部四手井教授に厚くお礼申しあげます。さらに調査にご協力いただいた演習林和田助教授ほか演習林教官、職員各位、ならびに調査に際して便宜をいただいた白浜試験地、上賀茂試験地の各位に深く感謝いたします。

1. 調査林分の概況

白浜試験地における調査の対象林分は密度が疎、中、密の3段階に分けられ、各密度ごとに化成肥料施用、配合肥料施用、無施肥の3区分の合計9区画に分けられている。そして1区画は約0.05haで繰返しはない。

施肥区には肥料としてN, P₂O₅, K₂Oがそれぞれ15:8:8の化成肥料と、同比率の配合肥料を1本あたり100gずつ、植付け時から3年間毎年4月に与えた。調査は1967年10月上旬に行なったが、調査時、施肥区の平均樹高はほとんど6mを越え、さらに高密度の施肥区はすでにほぼ完全に閉鎖し、下枝も枯れあがり、下層植生はわずかしかみられなかった。しかし中、低密度区では下層植生は地面をおおいうほどに進入し、とくにススキ、コシダが多く、木本植物ではヒサカキ、シャシャンボ、クチナンシ、ツツジ類がみられ、サルトリイバラも比較的多かった。

なお、試験地設定当初の計画による植付け本数はhaあたり2,500本、5,000本および10,000本の3密度であったが、今回の調査の結果、現在の立木密度は表-1のように計画本数よりも少なかった。

Table 1. Descriptions of Loblolly pine stands studied in Shirahama and Kamigamo.

Location	Stand density	Fertilizer	Tree number per hectare	Mean height (m)	Mean diameter at breast high (cm)	Basal area per hectare (m ²)
Shirahama	Low	Complex	2,066	7.0	10.5	18.4
		Mixed	2,151	6.7	9.9	18.5
	Middle	Complex	3,835	5.1	6.9	16.0
		Mixed	3,765	6.2	8.6	23.0
		Non	3,750	1.6	—	—
	High	Complex	6,536	7.3	8.1	36.5
Mixed		6,543	6.3	7.8	34.6	
Kamigamo	High	Non	93,333	2.8	1.7	23.0

また無施肥区での生長はいずれの密度の林分でも全く悪く、約30%の個体が調査時まで胸高にまで生長していなかった。

さらに、上賀茂試験地の苗畑で床替後5生育期を放置したテーダマツの小林分を対象に加え、1968年5月に調査した。この林分は本数ですでに54.3%が枯死し最多密度の状態になっていた。

2. テーダマツの相対生長と林分現存量

1) 調査方法

白浜試験地では、各林分にそれぞれ約0.01haの標準地を設け胸高直径、樹高の毎木測定を行なった。化成肥料施用の3林分よりいろいろな大きさの供試木23本(密林分8本、中林分8本、疎林分7本)、無施肥区より2本を地際より伐倒し、地際(0.0m)から地上30cmまでと、それ以上は胸高(1.3m)、2.3m……各1mの層ごとに幹、枝、葉の生重量をただちに計測し、サンプリングにより絶対率を研究室でもとめ、それぞれ乾重量に換算した。さらに各層から採取した円板による樹幹解析で幹材積、幹生長経過、幹生長量をもとめた。なお、針葉の新旧葉は分けることが困難であったので全着葉

量としてもとめた。

上賀茂試験地では標準地 (1.5m×1.5m) 内に含まれるすべての個体の地上部を同じように層別刈取りして測定した。この調査林分の針葉は、冬期間中に旧葉 (満1年以上) がすでに全部落葉し、1967年に伸長した新葉 (満1年以内) だけが残っていた。

2) 相対生長関係

伐倒調査した各個体の胸高直径 (D) と樹高 (H) の D^2H (cm^2cm) に対する幹材積 (V) ならびに幹 (w_s)、枝 (w_B)、葉 (w_L) の乾重量の相対生長関係をもとめると図-1 のようになった。これらの関係はつぎのように近似された。

幹乾重	$\log w_s = 0.8404 \log(D^2H) - 3.0073$	(1)
幹材積	$\log V = 0.8638 \log(D^2H) + 0.2810$	(2)
葉乾重	$\log w_L = 0.7428 \log(D^2H) - 3.0160$ (疎・中)	(3)
〃	$\log w_L = 1.0078 \log(D^2H) - 4.4445$ (密)	(4)
枝乾重	$\log w_B = 1.0528 \log(D^2H) - 4.5298$ (疎・中)	(5)
	$\log w_B = 1.2253 \log(D^2H) - 5.4815$ (密)	(6)

$V : \text{cm}^3, w : \text{kg}, D : \text{cm}, H : \text{cm}$

これらの相対生長関係の中で葉量および枝量の場合、図-1-2、図-1-3のように、密林分と他の林分とで明らかな差があり分離するようで、さらに、密林分では比較的良好な直線性を満足するようであるが、中、疎林分ではばらつきがみられた。密林分では後述するように最多密度に近い状態になっていたが、中、疎林分では下層植生量も多く、まだ林冠が完全に閉鎖していないため各個体間の分散が大きくあらわれたと考えられる。

幹重量、幹材積では植付け密度の多少にかかわらず、ほぼ一つの相対生長関係を満足しているようで、さらにその適合度も比較的良好。(1)および(2)式は白浜の調査木での関係式であるが、図-1-1にはこの関係の延長線上に上賀茂で測定した個体をプロットした。 D^2H と幹乾重の相対生長関係を、湯浅ら¹⁾が静岡県下で調査したテーダマツ10年生林分での場合と比較すると、近次式の勾配が、本調査の0.84に対し0.94と違いがみられる。 D^2H と幹量の相対生長関係は同樹種ではほとんど林分分離がみられないことを菅⁴⁾は秋田地方と吉野地方のスギで認めているが、白浜と上賀茂での測定結果もこのことをうらづけている。湯浅らの結果と本調査の結果との間に、差があらわれ

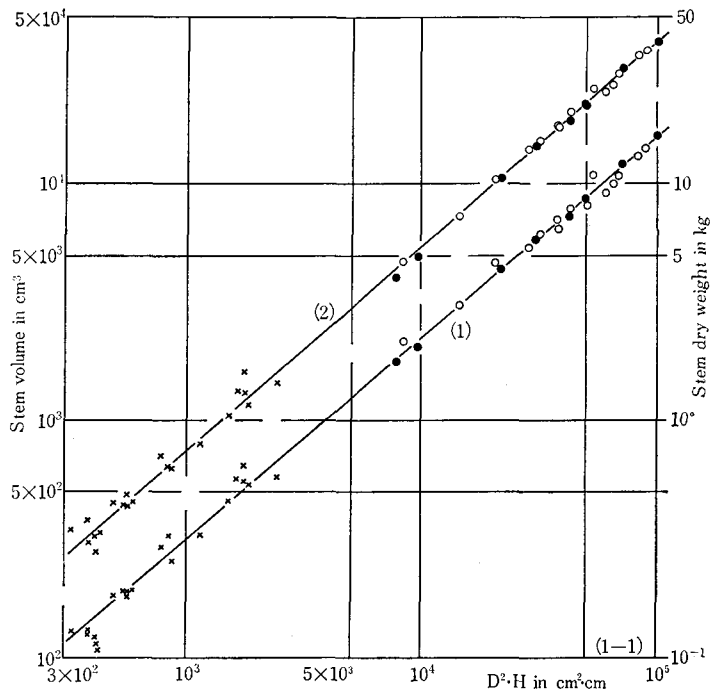
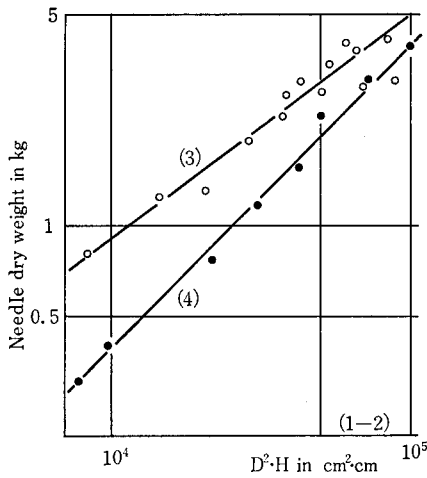
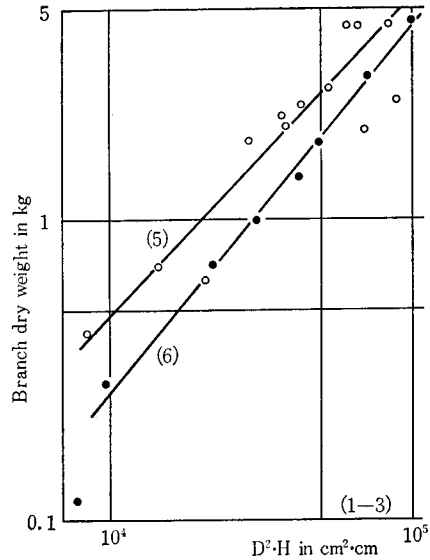


Fig. 1. Allometric relations between upper ground parts and D^2H .

1-1 stem dry weight (w_s) in kg and D^2H in cm^2cm .	
$\log w_s = 0.8404 \log(D^2H) - 3.0073$	(1)
stem volume (V) in cm^3	
$\log V = 0.8638 \log(D^2H) + 0.2810$	(2)



1-2 needle dry weight (w_L) in kg.
 low and middle density stands.
 $\log w_L = 0.7428 \log(D^2H) - 3.0160 \dots\dots(3)$
 high density stand.
 $\log w_L = 1.0078 \log(D^2H) - 4.4445 \dots\dots(4)$



1-3 branch dry weight (w_B) in kg.
 low and middle density stands.
 $\log w_B = 1.0528 \log(D^2H) - 4.5298 \dots\dots(5)$
 high density stand.
 $\log w_B = 1.2253 \log(D^2H) - 5.4815 \dots\dots(6)$

○ : low and middle density stands
 ● : high density stand
 × : Kamigamo's stand
 These marks apply in Fig. 3.

た原因はわからない。

3) 地上部現存量

相対生長関係式(1)~(6)を毎木調査結果からもとめた直径樹高階別本数分配表にあてはめ、白浜のテ-ダマツ林のそれぞれの地上部現存量を推定し、また上賀茂試験地では総伐りによる実測を行なった。それらの結果を表-2に示した。

Table 2. Standing crops of Loblolly pine stands per hectare.

Location	Stand density	Fertilizer	Stem volume (m³)	Stem dry weight (ton)	Branch dry weight (ton)		Needle dry weight (ton)
					living	dead	
Shirahama	Low	Complex	69.0	27.2	9.1	2.4	8.8
		Mixed	68.9	25.9	8.7	1.9	8.4
	Middle	Complex	53.3	21.5	6.0	1.4	7.6
		Mixed	81.9	32.7	10.0	2.6	11.0
		Non	3.3	1.3	0.5	0.1	0.9
	High	Complex	149.4	59.4	14.4	9.7	13.9
Mixed		138.3	55.1	12.5	8.4	12.6	
Kamigamo	High	Non	67.1	27.6	5.3	18.1*	10.3

* include dry weight (14.5 ton/ha) of dead trees.

密林分の幹量 (55~60ton/ha) は、東大造林教室⁵⁾がもとめた若いアカマツ林 (12~15年) のそれの約4割も多い。また湯浅ら¹⁾の測定値と比べれば胸高断面積合計で約2割、幹重量で約3割も本調査の推定値が大きい。

本調査で非常に興味のあることは、密林分の林分葉量 12.6~13.9ton/ha がこれまでアカマツ林でえられたどの値よりも多いことで、この密林分では、その大多数の測定値のほぼ倍、またはそれ以上の葉量をもっていることになる。また只木⁶⁾がまとめたマツ属9種の林分葉量と比較すると、四手井⁷⁾がハイマツで測定した値(21.7ton/ha)を除いていずれの値よりもテーダマツ林の方が多く、同じ3針葉である *P. longifolia* の葉量⁸⁾よりはるかに多い。しかし、クロマツ林では 10.1~13.8ton/ha の葉量が報告⁹⁾され、川那辺ら¹⁰⁾は苗畑の高密度林分で10月中旬にアカマツで12.6ton/ha、クロマツで16.1ton/ha の葉量を推定しているが、これらの値と比べれば、白浜のテーダマツ林がとくに多い葉量を持っているとは言えないようである。

テーダマツの葉量を測定した報告は少なく、湯浅ら¹¹⁾は12月中旬の測定で 4.1ton/ha をえている。針葉量は調査時期により落葉量とのかねあいでもかなり違いがあらわれ、本調査の10月上旬の結果と比較する場合に、落葉の経過を考慮する必要がある。しかし湯浅らの調査林分がすでに旧葉が落葉し終わった1年分の葉量と考えてもまだすくない。

年間の落葉量は只木ら²⁾、Metz¹¹⁾がもとめ、前者は 5.09~6.86ton/ha (林齢8年)、後者は 4.23 (林齢10年) をえている。

テーダマツの上長生長はアカマツ、クロマツのような経過をたどらず、年に数段の枝階を作るために新旧葉を区別することが困難で、旧葉がどれだけ着いていたかは不明である。テーダマツの針葉の寿命が最長2年であることは確かで、さらに落葉のピークが秋~初冬²⁾で、本調査の10月上旬にはまだ旧葉の大部分が残っていたと考えられる。すなわち只木ら²⁾が調査した林分で2年分の葉量としては 10.2~12.7ton/ha になり、とくにその高密度林分で、本調査の結果と非常に似ている。なお、Metz¹¹⁾の値は湯浅らの測定値同様にすくないように思われるが、さらに彼は *P. echinata* を 25% 含んだ 20~25年生林での落葉量は 5.02ton/ha と報告している。

上賀茂試験地の苗畑で、1回床替後、放置されたテーダマツの小林分での葉量は総伐りで 10.3ton/ha となった。この調査は5月に入ってからであったので旧葉は完全に落葉し、着いている針葉は前年に展開したもののみで、マツ属の同葉齢の着葉量としては最高の値となった。さらにこの調査より2週間後にこの値をチェックするために、同一林分で一定面積内を上方に伐り上げ、その葉量を測定したところ 11.5ton/ha と 12.8ton/ha とさらに大きい値をえた。すなわち、本調査結果から、テーダマツの高密度林分では年間に 10ton/ha 以上の新葉を展開することもありうると考えても間違いではないようである。

3. 林分生産量

1) 個体の生長

閉鎖状態に達した白浜試験地の密林分の単木の幹材積の生長経過を樹幹解析結果の皮なし連年幹生長量であらわすと図-2のようになる。

林分がうっ閉してくると、単木としての生長量がおさえられることは明らかで、なかでも小さい個体は早くから生長量が横ばいを示している。すなわち、より小さい個体では調査年より3生育期前からこの傾向を示し、本林分ではこの時すでに林冠がうっ閉しはじめたと推定される。この時期にはまだ大きい個体はそれほど競争の影響をうけることなく生育を続けたこともわかる。さらに1生育期を過ぎれば、続いてつぎの小さい個体から連年生長量の増加が頭打ちになり、さらには低下するようになる。なお、調査年の個体生長量で、とくに優勢木とみられる最大の個体でも横ばいを示したことは、調査時期が10月上旬で、白浜のような温暖地ではまだ年間の生長が終わっていないとも考えられるが、一方連年生長量最多の時期であるとか、あるいは本調査林分が過去に施肥された林分で肥効がきれてきたと考えることもできる。この点については機会をつくり再調査し解明したい。

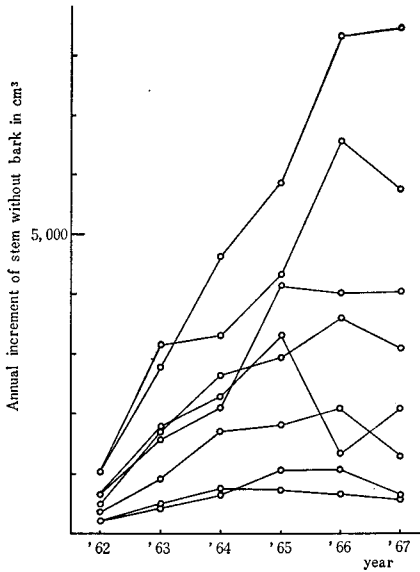


Fig. 2. Annual increment of stem without bark in each year.

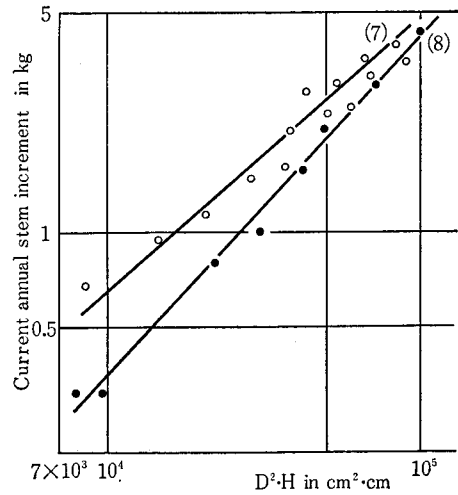


Fig. 3. Allometric relation dry weight of current annual stem increment (Δw_s) in kg and D^2H in $cm^2 \cdot cm$.
 low and middle density stands.
 $\log \Delta w_s = 0.8938 \log(D^2H) - 3.7899 \dots (7)$
 high density stand.
 $\log \Delta w_s = 1.0821 \log(D^2H) - 4.7875 \dots (8)$

調査木の最近1年間の幹乾重生長量を樹幹解析結果の皮なし幹材積生長量、皮なし幹材積、幹乾重量より換算すると、密林分の最大の調査木 ($D: 11.3cm, H: 791cm$) で $4.3kg$ 、ほぼ平均にあたるもの ($D: 8.4, H: 705cm$) で $2.1kg$ になる。

各調査木の幹乾重生長量と D^2H ($cm^2 \cdot cm$) との相対生長関係を求めると図-3のようになり、つぎのように近似される。

幹乾重生長量 (kg) $\log \Delta w_s = 0.8938 \log(D^2H) - 3.7899$ (疎・中) $\dots (7)$

$\log \Delta w_s = 1.0821 \log(D^2H) - 4.7875$ (密) $\dots (8)$

この近似式も密林分で比較的良好に適合し、疎・中の林分ではばらつきがみられる。

2) 林分の幹生産量

毎木調査結果より、各区の最近1年間の林分幹乾重生産量を図-3の相対生長関係 (7, 8式) を用いて求めると表-3のようになる。密林分の値を幹材積生産量に換算すると化成肥料区 $35.2m^3/ha$ 、配合

Table 3. Current annual increment of Loblolly pine stands per hectare.

Location	Shirahama						Kamigamo
	Low		Middle		High		
stand density	Low		Middle		High		High
Fertilizer	Complex	mixed	Complex	mixed	Complex	mixed	Non
Stem increment (ton)	8.2	8.2	6.2	9.7	14.4	12.9	10.1

肥料区 $31.6m^3/ha$ となり、蜂屋ら¹²⁾が調査した壮齡アカマツ林の年生長量 ($9.5 \sim 21.8m^3/ha$) よりもかなり多く、生産力は高い。

樹高生長経過を樹幹解析結果より各区の平均で求めると図-4のようになり、1967年の伸長量が各区ともそれまでより少ない。もし、調査時すでに樹高生長を終わっていたと考えれば、その連年生長曲線が下降を示しはじめた原因を、“肥料ぎれ”と考えられないこともない。樹高生長が減退を続けるよ

うであれば、今後ひきつづいて $30\text{m}^3/\text{ha}$ を越える高い生産力を続けることは不可能のように思われる。すなわち、白浜のようなせき悪地で、若いテーダマツ林が高い生産力を示したことは肥料の効果と認められるが、樹高生長でややおとろえがみえはじめたことから、肥料切れのような現象があることも考えられる。このようなことから、本調査のテーダマツ林の今後の生育経過は種々の面で興味がある。

4. 林分の生産構造

1) 断面積の本数分布

同齡単純林の立木構成、特に競争状態を明らかにするためには、古くから行なわれてきた直径階別本数分布いわゆる林相曲線より、断面積分布を調べる方がよいようである¹²⁾。このことから図-5に断面積を直径の平方として、その本数分布を各林分ごとに示した。

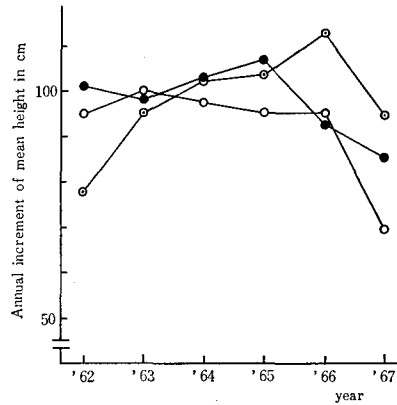


Fig. 4. Annual increment of mean tree height in each year.
 ● : low density stand
 ○ : middle density stand
 ● : high density stand

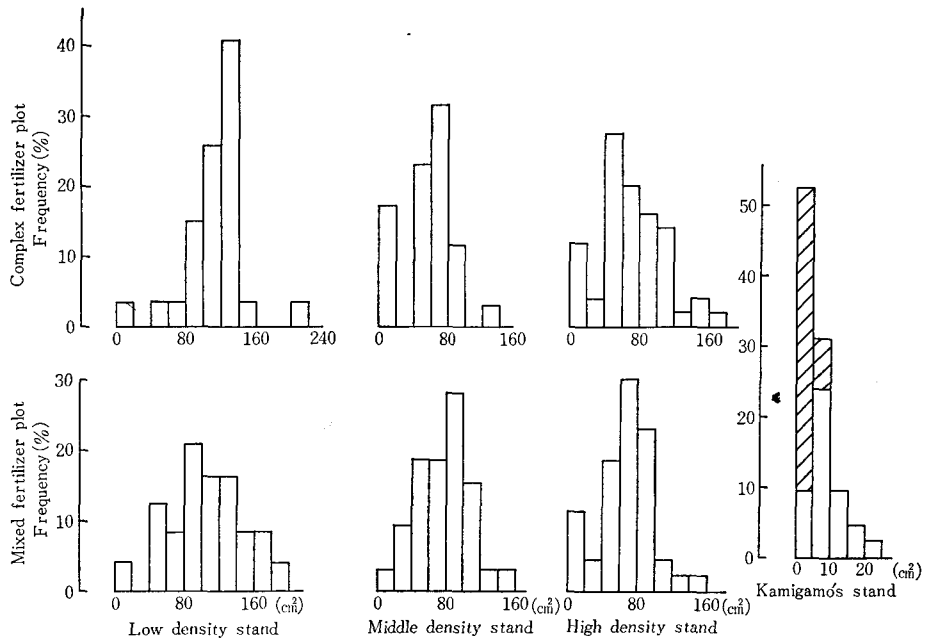


Fig. 5. Frequency distribution of $(DBH)^2$.

▨ : dead tree

図-5からも明らかのように、相対的に立木密度の疎な林分の分布型は現在正規型であるが、密な林分では少し左にひずんだいわゆるL型分布に近い状態になりつつある。

さらに上賀茂試験地における断面積分布を調べると、図-5のように典型的なL型になる。そして斜線部分で示したように小径木は枯死し、しかもこの小林分ではすでに初期の成立本数の半数以上が枯死している。このような林分は、いわゆる自然間引の状態にあって、テーダマツ林のこの生長段階に

おける最多密度と考えてよからう。

2) 林分密度

閉鎖した森林として数十年を経過したテーダマツの林分は、現在ほとんど日本にはみあたらないようであるので、テーダマツ林の密度効果を適確にとらえることは困難である。しかし前述のように、植付け後5年という若い小林分であるが、haあたり100,000本近い高密度ですでに自然間引が起っている上賀茂試験地の資料を、一応テーダマツ林で実現する最高の密度とし、アカマツ林などの例からその勾配を3/2として平均材積の暫定的な最多密度曲線をもとめ、また、林分の競争密度(C-D)効果を等樹高曲線として示すと図-6のようになった。

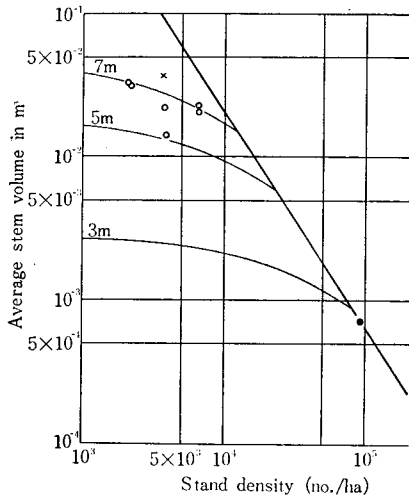


Fig. 6. Equivalent height curves and full density curve of average stem volume.

$$\log v = -1.5 \log \rho + 4.3075$$

- : Shirahama
- : Kamigamo
- × : Shizuoka¹⁾

These marks apply in Fig. 7.

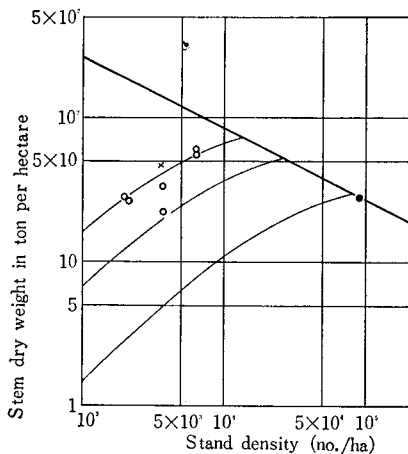


Fig. 7. Equivalent height curves and full density curve of stem dry weight per hectare.

$$\log w_s = -0.5 \log \rho + 3.9294$$

勿論これらの傾向は生育段階の進んだ林分が与えられた時、あるいは修正されるかも知れないが、少ない資料から強引に外押しし、平均材積の最多密度曲線式をもとめると

$$\log v = -1.5 \log \rho + 4.3075$$

となった。

この式の常数値は只木ら¹³⁾、安藤¹⁴⁾のもとめたアカマツ林の場合とそれほど違いがない。

また図-6の等樹高曲線からも明らかなように、植付け後同じ7生育期を経た白浜試験地内でも、中密度の林分のように地位の低い所では、平均樹高は小さくなるため、生物学的にはことなつた生長段階にあるといえよう。

一方、静岡における湯浅らの資料¹⁾ (平均樹高7.7m, 平均胸高直径9.6cm, 林齢10年)を同じ図に示したが、皮なし幹材積の平均であるのに、ほぼ適当な位置にある。

つぎにhaあたりの幹乾重に対する立木密度の関係をもとめると図-7のようになった。平均材積の場合と同様、外押しの危険が大きい、その最多密度曲線式はほぼ

$$\log w_s = -0.5 \log \rho + 3.9294$$

と推定された。

さきにものべたように、これらの近似式は生長段階の進んだ多くの資料がえられるまでの暫定的なものである。

3) 幹枝葉の垂直的配分——生産構造

同化器官である葉と、非同化器官である幹枝の林分内の垂直的構成、すなわち層別刈取りによる生産構造図を図-8に示した。林齢が若いので蓄積量としての幹量は、1~2年間に更新される葉量に比較して少ないが、それでも立木密度が疎、中、密と変化するにしたがって、幹、枝、葉の各部分は、それぞれ特徴のある垂直的配分を示す。

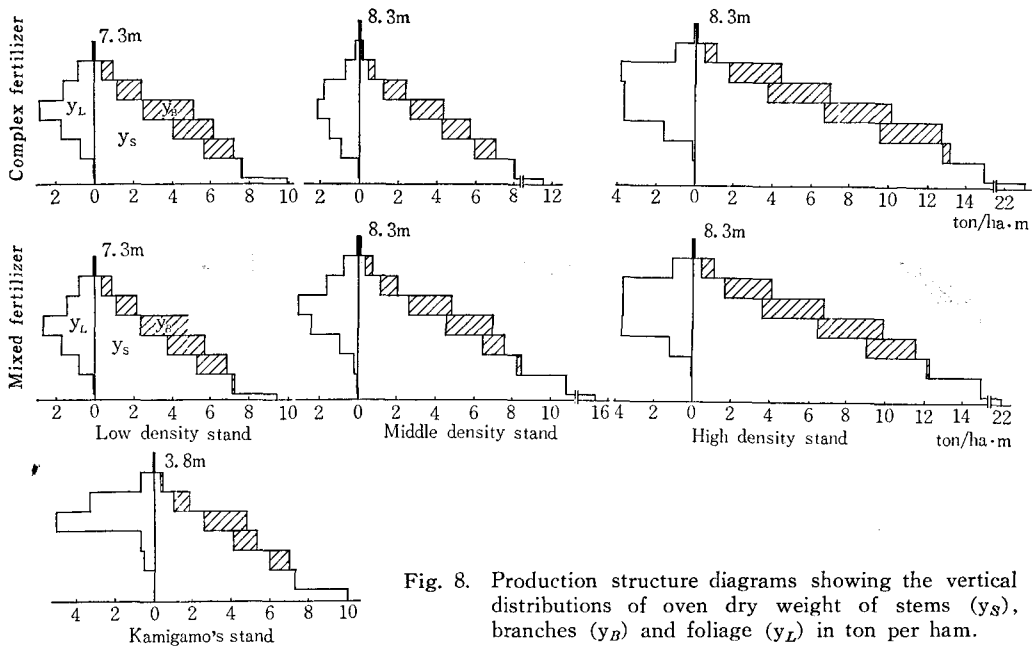


Fig. 8. Production structure diagrams showing the vertical distributions of oven dry weight of stems (y_s), branches (y_b) and foliage (y_L) in ton per ha-m.

すなわち、幹量は立木密度が高い林分ほど一定面積あたりの全量が多くなるとともに、図-8のように下部への配分が多い。これは断面積分布のところすでに検討したように、相対的に密度が増加するほどL型分布になり、小径木が多くなるためである。

一方、葉量の垂直的配分は密度の疎な林分では、下層まで葉を多く着生し、一般針葉樹と同様いわゆるイネ型といわれるような特徴を示すが、密な林分では着葉量のモードは上層にかたより、多くの広葉樹と同じようなソバ型（広葉型）を示すようになる。特に最多密度の状態にある上賀茂の小林分の場合は、著しく上層にかたより、陽性樹種といわれるアカマツの状態ときわめて類似^{6,16)}するが、

haあたりの全葉量では前述のようにアカマツの数倍の値を示すので、上層附近におけるテーダマツの葉の密度はかなり高いといえよう。

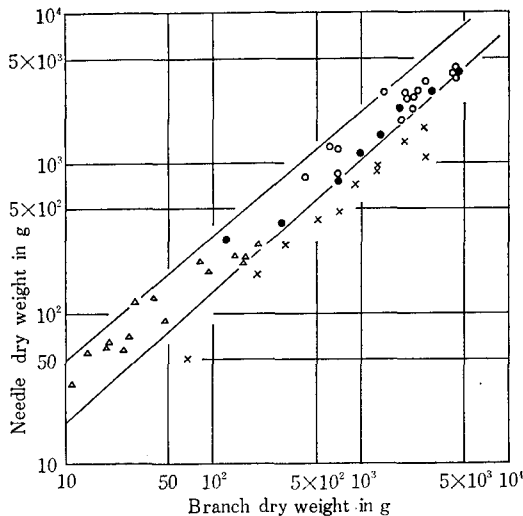


Fig. 9. Allometric relation between oven dry weight of needles and branches.

- : Low and middle density stand
- : High density stand
- △ : Kamigamo's stand
- × : *Pinus densiflora* stand

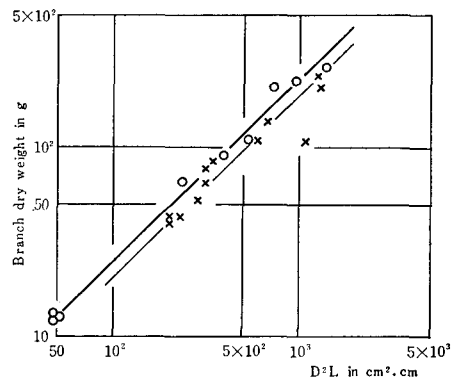


Fig. 10. Relation between oven dry weight and volume showing cross-sectional area of base (D^2) \times length (L) of branches.

- : Upper layer branches
- × : Under layer branches

4) 葉と枝の関係

林分の密度が相対的に増すにつれて枝は枯れあがっていくが、幹や枝を養うに必要な最少限の葉量とか、単位枝量に着生することのできる葉量の最大値は、樹種によってほぼ一定であると思われる。

図-9に単木あたりの枝と葉の幹重の相対生長関係を示した。一般に立木密度の高い林分内のものは下限線に、疎な林分内のは上限線附近にちらばるが、図-9からも明らかなように、アカマツなどに比較⁵⁾してこれらの上下限界線はいずれもかなり高く、同じ枝量に対してテーダマツの葉量の着生量は多いようであった。

つぎに葉を十分つけている上層部の枝と、枯死寸前の下層部の枝との容積重について検討してみよう。図-10に枝の根元直径の平方 (D^2) に、枝長 (L) を乗じた容積に対する枝乾重 (w_B) の関係を示した。これからある程度理解できるように、下部枝の容積重の方が小さく、上部枝の方が充実している傾向がうかがわれた。

5. 林内環境

1) 林内の明るさ

各林分の林冠下、地床植生上の明るさを、照度計(東芝5号)で数10cm間隔に35点以上各2ヵ所ずつ測定し、同時刻の裸地の照度(50,000Lux以上の時測定)に対する相対照度(%)をもとめ、その算術平均を表-4に示した。

Table 4. Relative light intensity under canopy and height of the lowest living branch.

Location	Stand density	Fertilizer	Relative light intensity		Height of the lowest living branch
			Average	Converted logarithm	
Shirahama	Low	Complex	7.1	6.0	1.91 ± 0.42
		Mixed	8.2	7.6	1.84 ± 0.43
	Middle	Complex	36.5	35.5	1.71 ± 0.42
		Mixed	19.8	15.4	2.00 ± 0.49
	High	Complex	1.8	1.5	3.66 ± 0.84
		Mixed	2.0	1.8	3.18 ± 0.84
Kamigamo	High	Non	1.7	1.1	1.59 ± 0.28

林内における相対照度の分布は、日もれ (sun fleck) があるので図-11の高密度林分の例のように、

一般にL型になるが、これを対数変換すると、図-11の右のようにほぼ正規型になるので、林内における平面的な相対照度の分布は一応対数分布と考えてよからう。それで対数変換した平均値も表-4に示した。相対照度として検討する場合、ここではすべてこの変換値の平均を用いることにする。

林内の明るさは枝葉量や、太陽高度によっては幹量の影響をうけるが、門司、佐伯の方法に準じて、対数めもりにした相対照度(対数変換値の平均)と葉乾重の関係をもとめると図-12のようになった。一応上限と下限線がもとめられそうであるが、この間のバラツキは林内の明るさに影響を

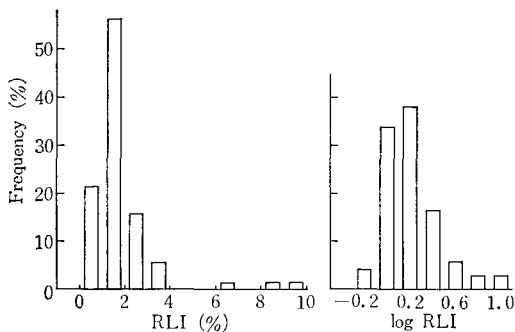


Fig. 11. Frequency distribution of relative light intensity (RLI) under canopy in high density stand.

与える葉以外の部分、すなわち幹、枝などの関係、あるいは照度測定の精度などが影響を与えるためと思われる。

これらの数値から推考すると若いテーダマツでもっとも暗い林分の相対照度は1~2%の範囲にあるようで、これは只木ら¹⁷⁾の測定したアカマツ林の相対照度2.1%に比較し、多少小さく、単位枝量につく葉量の多いこととともに、テーダマツはマツ属の中でも比較的耐陰性が強い樹種であるといえそうである。

2) 生枝下高の変化

林分内の生枝下高の平均は表-4に示したようであるが、高密度の林分の生枝下高は他と比較して著しく高く、樹高の半分くらいまで枯れあがっていた。枯れあがりの程度は林分の大きさ、すなわち平均樹高にちがいがあっても比較ができるよう相対値であらわす方がよい。

そこで平均樹高に対する生枝下高の割合を百分率であらわし、相対照度との関係をもとめると図-13のようになった。これからも明らかのように生枝下高と林内の明るさとはかなり相関が高いようで、コンマ以下の相対照度まで外押ししてみると、0.5%くらいで枝下高が樹高の2/3くらいになる。また、林内が明るくなるほど枝下高は低くなるが、孤立木のような状態になっても、林木は生理的に枝を落すことが多いので、最下部まで枝を着けることはほとんどない。テーダマツの場合も相対照度が10%前後より以上に明るくなっても、平均樹高10mくらいまでの林分では樹高の1/3くらいより下層に枝葉をつけることはほとんどないように思われる。しかしこの現象は下層植生の繁茂とも関連があるはずである。

いずれにしても林内陽光量と枝下高との関係は、テーダマツの耐陰性の問題をも含めて、今後さらに詳しく検討する必要があるだろう。

3) 地床植生

密な林分を除いて林内に比較的多くみられる植生は大体つぎのようなものであった。

コシダ、ススキ、ノイバラ、サルトリイバラ、イヌザンショウ、カマツカ、ホソバアオダモ、クチナシ、ヒサカキ、ヤマツツジ、コナラ、タイミンタチバナ、イソノキ、ウバメガシ、

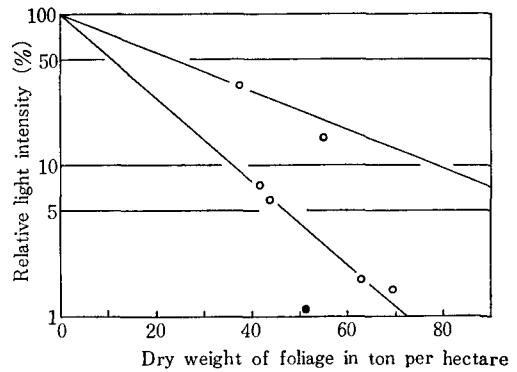


Fig. 12. Relation between relative light intensity and oven dry weight of foliage.
○ : Shirahama
● : Kamigamo

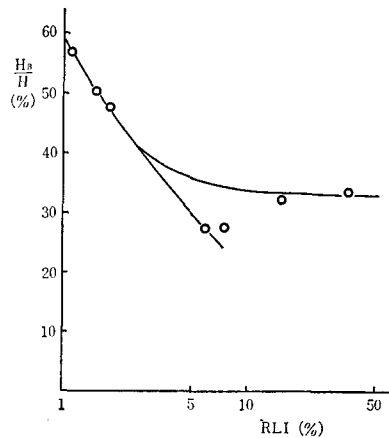


Fig. 13. Relation between ratio of height of the lowest living branch (H_B) to mean height of trees (H) and relative light intensity (RLI) under canopy.

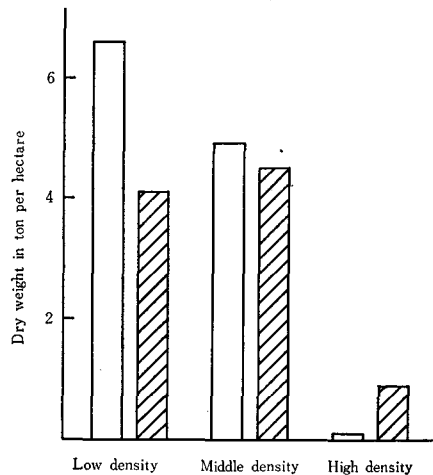


Fig. 14. Oven dry weight of ground flora in each stand.
□ : Complex fertilizer
▨ : Mixed fertilizer

コバノミツバツツジ, ガンピ, シャシャンボ, ヤマウルシ, ネジキ, ネズミサシなど。

このように林内にはいろいろな種類の植物がみられるが、その量は林分が密になるほど少なくなる。すなわち図-14に示したように密な林分内にはほとんど植生がみられないが、密度の中や疎な林分内には、上述のような植物、主として低木性の樹木類が密生し、平均高1m, 乾重6ton/haにも達する場合があった。

このような地床植生の進入は、明らかに林内の陽光量に支配されるが、個々の種類の耐陰性については現在まだ明らかでない。

6. 土 壤 環 境

1) 粗腐植の堆積

粗腐植(落葉落枝, 粗腐植, 腐植を含む A_0)の堆積量は密度のことなる各林分とも表-5のように、ほぼ9~12ton/haでほとんどちがいがなかった。ただテーダマツの落葉は11月~12月頃にもっとも多いという報告があるので、10月上旬に測定されたこの値は年間を通じもっとも少ない量であるかも知れない。

粗腐植量(乾重)を当年葉乾重(当年葉が正確に分離できないので、着葉年数を2年として葉量の $\frac{1}{2}$ を仮定)で除した値、すなわち分解年数ならびにその逆数である平均分解率は、表-5のよう各林分間に大きな差は認められなかった。

天然性アカマツの平均分解率が10~20%くらいであるのに比較して、テーダマツのそれはほぼ30~50%と著しく分解率が高く、落葉落枝は2~3年間でほとんど分解されるようであった。このように分解速度が早いことは、白浜試験地のようなせき悪地では、生態系内の物質循環からみてきわめて有利であると思われた。

2) 土壌の構造と理学的性質

(1) 調査の方法

斜面上部と下部の2ヵ所に基岩に達するまでの土壌断面を作り、土壌の構造、組成の外観的な特徴を林野土壌調査基準¹⁸⁾に従って記録した後、0~15cm, 15~30cm, 30~45cmの深さ別に、400cc容の採土円筒を用いて試料を採取し、理化学的分析を行なった。

(2) 土壌の構造, 組成

白浜試験地一帯の地質は第3紀層に属し、砂岩、礫岩の互層よりなりたっているといわれる¹⁹⁾。し

Table 5. Dry weight of raw humus and litter (A_0 layer) and its decomposition ratio.

Stand density	Fertilizer	Dry weight of A_0 layer (ton/ha)	Decomposed year	Average decomposition ratio (%)
Low	Complex	8.9	2.34	42.7
	Mixed	12.4	2.44	41.0
Middle	Complex	9.4	3.76	26.6
	Mixed	12.3	2.64	37.9
High	Complex	12.3	2.04	49.0
	Mixed	11.4	2.14	46.7

Table 6. Soil profile characters of Loblolly pine stands in Shirahama.

Horizon	Depth from surface	Soil color ^{**}	Texture	Structure	Hardness	Definition of boundary
A_0	0~4cm	2.5 YR 4/4	—	—	—	Distinct
A	4~12	7.5 YR 7/2	Silty clay loam	Single-grain structure	Slightly Hard	Distinct
B	12~34	7.5 YR 6/3	Silty clay loam	Clod structure	Hard	Indistinct
C	34~49	7.5 YR 7/4	Silty clay	Clod structure	Hard	Indistinct

* by Standard soil color chart (1965)

かし本調査地点では礫岩は認められず、主として微細な粒子よりなる砂岩を母材料としており、土壌層の厚さはほぼ 45cm 程度で比較的薄く、かつ未熟である。これらの外観的な観察結果は表-6 のようであった。

以上のように土壌の一般的な性質は、A 層は薄く、また土壌の構造は全層にわたってきわめて不良であって、かつ堅密であることが特徴としてあげられよう。

(3) 土壌の理学的性質

土壌の理学的性質は「民有林野土壌調査方法」によりもとめ表-7 に示した。表-7 から明らかなよう

Table 7. Physical properties of soil in Shirahama.

Stand density and fertilizer	Soil depth (cm)	Volume weight (V'_w)	Porosity (P' ,%)	Maximum water holding capacity ($W'_{max,2}$,%)	Minimum air capacity ($A'_{min,2}$,%)	Water content (%)	Oven dry weight of soil, gravel and root per 100cc.			Oven dry weight of soil (ton/ha)
							Soil <2mm (g)	Gravel >2mm (g)	Root (g)	
Low, Complex	0~15	98.7	59.8	45.3	14.5	13.1	88.3	9.3	1.04	1325.0
	15~30	133.5	49.4	56.4	-7.0	14.7	113.2	20.2	0.18	1698.0
	30~45	120.6	52.4	73.1	-20.7	41.3	94.7	25.9	0.03	1420.7
Middle, Complex	0~15	106.7	58.2	34.9	23.3	11.7	96.7	9.8	0.24	1449.9
	15~30	124.8	52.9	42.9	10.0	12.2	109.8	15.0	0.04	1646.4
	30~45	170.8	35.8	43.3	-7.5	22.1	162.4	8.4	0.01	2436.3
High, Complex	0~15	98.8	61.5	39.8	21.8	10.0	81.3	17.3	0.19	1219.7
	15~30	124.0	53.2	43.3	9.9	9.3	112.6	11.4	0.03	1689.6
	30~45	141.4	46.9	34.6	12.3	8.6	115.6	25.9	0.03	1733.4
Middle, Non	0~15	104.3	59.5	28.6	30.9	4.4	90.3	13.4	0.56	1354.2
	15~30	98.8	62.6	43.6	19.1	14.3	90.6	8.1	0.01	1358.6
	30~45	101.9	61.6	40.6	21.0	11.3	97.2	4.7	0.01	1457.3

に、容積重はいずれも表層で 100前後、下層では 100~150 程度を示し、非常に重く、孔隙の少ないち密な土壌であることを示している。また保水力（最大含水量）は小さく、特に最小容気量は下層土でマイナスを示すものがあるほど小さい。すなわち、この林地は土壌層全体にわたって通気性ならびに透水性が悪いため、林木の根の活動にはきわめて好ましくない土壌環境であるといえよう。

表-7 に示した理学的性質からは各林地の間に大きな差異は認められなかったが、これは植付け後 7 年くらいの林分では土壌の理学的性質の変化が認められるほどにはいたらなかったと考えられよう。しかし、斎藤ら²⁰⁾の調査では林分の閉鎖によって最表層 0~5cm の土壌層の理学的性質がある程度改善されたことが報告されている。今回の調査でも施肥量の多い高密度区では表層の土色がムル状の腐植によって変わりつつあることからみて、今後長年月の間には落葉、落枝の分解によって徐々に改善されていくと思われる。

3) 土壌の化学的性質

前述の方法にしたがって採取した土壌は、風乾後篩別（直径 2mm）し、その細土について分析を行なった。分析方法は次の方法によった。

pH：ガラス電極 pH メーター、置換酸度：カップン法、全チッソ (N)：ケルダール法、全タンソ (C)：チューリン簡易滴定法、リンサン (P)：モリブデンブルー還元法（光電比色計使用）、カリ (K)：炎光分析法、カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg)：EDTA 滴定法。

なお、分析結果はすべて絶乾物あたりに換算して用い、その結果を表-8 に示した。

一般的な化学的性質として特に C、N、有効態の P ならびに K の含有率が比較的少ないせき悪な土壌であることがあげられよう。第 3 紀層に生成された土壌は一般にせき悪な場合が多いが、なかでも

Table 8. Chemical properties of soil in Shirahama. (% on oven dry basis)

Stand density and fertilizer	Soil depth	P · H		Exchange acidity (Y ₁)	C (%)	N (%)	C/N	0.2N-HCl soluble		Exchangeable		Hot-HCl soluble			
		H ₂ O (1:2) Suspension	IN-KCl (1:2) Suspension					P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Low, Complex	0~15	4.90	4.10	14.8	1.41	0.097	14.54	0.0038	0.0059	0.033	0.035	0.046	0.118	0.365	0.080
	15~30	5.25	4.25	12.7	0.64	0.046	13.91	0.0032	0.0044	0.009	0.019	0.031	0.115	0.094	0.095
	30~45	5.40	4.10	14.8	0.27	0.027	10.00	0.0017	0.0038	0.018	0.025	0.029	0.121	0.303	0.064
Middle, Complex	0~15	4.90	4.05	12.0	1.04	0.071	14.65	0.0070	0.0061	0.014	0.028	0.035	0.123	0.058	0.094
	15~30	5.20	4.00	16.0	0.34	0.036	9.44	0.0023	0.0052	0.014	0.018	0.038	0.142	0.232	0.047
	30~45	5.40	4.05	16.7	0.27	0.029	9.31	0.0015	0.0041	0.018	0.022	0.039	0.156	0.163	0.079
High, Complex	0~15	4.85	4.00	12.3	1.56	0.099	15.76	0.0052	0.0081	0.018	0.026	0.041	0.125	0.330	0.095
	15~30	5.05	4.10	12.3	0.46	0.038	12.11	0.0051	0.0054	0.018	0.009	0.036	0.127	0.398	0.047
	30~45	5.15	4.10	12.7	0.35	0.026	13.46	0.0038	0.0049	0.014	0.012	0.031	0.129	0.284	0.079
Middle, Non	0~15	5.40	4.35	8.6	0.90	0.076	11.84	0.0052	0.0047	0.033	0.025	0.036	0.074	0.106	0.199
	15~30	5.65	4.30	8.6	0.39	0.036	10.83	0.0041	0.0029	0.014	0.019	0.033	0.085	0.082	0.268
	30~45	5.50	4.15	12.7	0.38	0.033	11.52	0.0021	0.0029	0.014	0.025	0.033	0.111	0.338	0.071

本試験地のように母材料がほぼ砂岩のみに依存している場合はさらにこの傾向が極端になるのであろう。また、表-8から認められるように施肥した林地は無施肥の林地より、やや酸性に進む傾向があるほか、C, N, Kなどの含有率も多少多い傾向があるようである。もともと養分の含有率は重量%であるので、土壌の容積重がことなる林地では、互いに直接比較することはできない。それ故一定面積、一定の深さの土壌中に含まれる養分現存量の多少がきめ手になる場合が多く、さらには森林生態系内の物質循環のしくみを解析してこそ、その林地の本来の生産力を理解しうるといえるであろう。

7. 物質循環

1) 地上部各部の養分含有率

テーダマツの各部分、下層植生、A₀層(粗腐植)等の分析用試料は林分の諸量の測定時に同時に採取し、その一部は含水率の測定用とし、他の大部分は風乾後粉碎して分析用試料とした。分析方法は、Nはケルダール法により、PおよびKは湿式灰化、CaおよびMgは乾式灰化後、珪酸その他妨害成分を除去した試料について、それぞれつぎの方法で分析した。

P : モリブデンブルー還元法 (光電比色計使用), K : 炎光分析法, Ca, Mg : EDTA 滴定法。

なお、分析結果はすべて絶乾物あたりの含有率に換算し、表-9に示した。無施肥区と施肥区間の差異についてみると、特に葉のN, P, Kの3成分が施肥した林地で明らかに増加していることが認められた。これに対してCaは反対に少なくなる傾向が認められた。一方、非同化器官に含まれるN, P, Kの3成分は、葉でみられるような明らかな傾向は認められないが、Caは施肥した林地において明らかに減少し、またMgもほぼ似た傾向を示した。このことから肥料として施用したN, P, Kの3成分とCa, Mgの2成分は同じ養分要

Table 9. Concentration of nutrients in stem, branch and needle of Loblolly pine, ground flora and A₀ layer. (% on oven dry basis)

Stand density and fertilizer	Sample	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Ash (%)
Low, Complex	Stem	0.209	0.058	0.097	0.146	0.063	0.466
	Living branch	0.278	0.100	0.101	0.498	0.129	1.251
	Dead branch	0.224	0.055	0.010	0.479	0.125	1.315
	Needle	1.064	0.163	0.152	0.233	0.149	3.027
	Ground flora	0.818	0.119	0.277	0.343	0.427	5.895
	A ₀ layer	1.165	0.119	0.137	0.615	0.625	17.252
Middle, Complex	Stem	0.230	0.094	0.115	0.201	0.084	0.691
	Living branch	0.290	0.098	0.290	0.518	0.137	1.844
	Dead branch	0.189	0.069	0.014	0.759	0.110	1.120
	Needle	1.089	0.168	0.253	0.184	0.136	4.001
	Ground flora	1.150	0.133	0.439	0.323	0.364	5.295
	A ₀ layer	1.141	0.088	0.181	0.703	0.517	9.090
High, Complex	Stem	0.215	0.161	0.095	0.237	0.088	0.813
	Living branch	0.278	0.083	0.196	0.297	0.032	1.175
	Dead branch	0.176	0.054	0.044	0.446	0.133	1.549
	Needle	0.977	0.230	0.273	0.204	0.185	3.675
	Ground flora	1.161	0.192	0.951	0.996	0.989	5.125
	A ₀ layer	1.227	0.185	0.131	0.897	0.435	11.970
Middle, Non	Stem	0.226	0.056	0.138	0.329	0.111	0.125
	Living branch	0.289	0.076	0.245	0.524	0.140	1.605
	Dead branch	0.196	0.059	0.023	0.561	0.122	1.328
	Needle	0.786	0.122	0.092	0.350	0.164	4.394
	Ground flora	1.043	0.148	0.556	0.554	0.593	5.438
	A ₀ layer	—	—	—	—	—	—

素であっても、その吸収、移動の機構は異なるといえよう。

なお、本試験地におけるテーダマツの葉の養分要素含有率を現産地であるアメリカ南東部で生育している10~40年生以上の成木で測定された値^{11,21)}と比較すると、Nでは本試験地の方がやや高く、P、Kではほぼ等しく、Ca、Mgではむしろ低い結果を示した。また京都市北部の上賀茂試験地の4年生木²²⁾と比較すると、これら5成分はともに本試験地の方が低い含有率を示している。一般にどの樹種でも葉のN含有率は新葉の時代に高く、落葉期に向かって徐々に減少していくといわれている^{23,24)}。この調査を実施したのは落葉期に近い10月であったが、それでも原産地のNの含有率よりも高く、京都のそれよりも低いのは、新葉より落葉期にいたる間にみられる傾向と同じく、林木の年齢にもある程度影響され、若いものほど含有率が高い傾向があるように思われた。このことは林木の太さ別に調べた結果、細いものほど含有率が高いという報告²⁵⁾からみても、ほぼまちがいが無いであろう。いずれにしても、物質循環面よりみて、当初の施肥は落葉量そのものの増加をもたらすだけでなく、N、P、Kの含有率の高い落葉によってこれら成分の還元量がさらに増加する点も無視できないであろう。

2) 生態系内の養分現存量とその配分

テーダマツの各部分の養分現存量は表-2に示された幹、生枝、枯枝、葉のhaあたりの乾物量に、また、下層植生と粗腐植はそれぞれ図-14、表-5の乾物量にそれぞれの養分含有率を乗じて算出した。土壌中の養分現存量は表-7の細土量を各15cmの深さのhaあたり量に換算し、それに表-8の0.2N

Table 10. Nutrients in the ecosystem of Loblolly pine stands applied complex fertilizer in kg per hectare. (soil layer was calculated by available form)

Stand density and fertilizer	Middle, Non					Low, Complex					Middle, Complex					High, Complex					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	
Part in ecosystem																					
Upper ground part																					
Stem	3	1	2	4	1	57	16	26	40	17	50	20	25	43	18	128	96	56	141	52	
Living branch	1	0.4	1	3	1	25	9	9	45	12	17	6	17	31	8	40	12	28	43	5	
Dead branch	0.2	0.1	0.02	0.6	0.1	5	1	0.2	11	3	3	1	0.2	11	2	17	5	4	43	13	
Forage	7	1	1	3	1	94	14	13	21	13	83	13	12	14	10	136	32	38	28	26	
Ground flora	56	8	30	30	32	54	8	18	23	28	57	7	22	16	18	1	0.2	1	1	1	
Total	67	11	34	41	35	235	48	66	140	73	210	47	76	115	56	322	145	127	256	97	
Lower ground part																					
Ao layer	—	—	—	—	—	104	11	12	55	56	108	8	17	66	49	151	23	16	110	56	
Soil layer (45cm depth)	1,999	157	145	841	961	2,450	128	207	846	1,142	2,329	177	274	873	1,238	2,301	215	275	767	677	
Sum total	2,066	168	179	882	996	2,789	187	285	1,041	1,271	2,647	232	367	1,054	1,343	2,774	383	418	1,133	830	

塩酸可溶の P, K ならびに置換性の Ca, Mg の含有率を乗じて、それぞれ深さ別の現存量を計算し、それらを加え 0~45cm の深さの土壤中に含まれる ha あたりの現存量としてもとめた。これらの計算結果をまとめて表-10 に示した。なお、配合肥料を施用した林分では、養分分析は今回行なわなかったが、化成肥料区での分析結果を代用して、地上部の養分現存量を推定し表-11 に示した。地上部の養分現存量については、このテーダマツ林は植付け後わずか 7 生育期しか経ていないため、幹、枝、葉の量が少なく養分現存量も少ないのが当然と思われるが、土壤中の養分現存量、特に N が他の分析結果^{9,16)}と比較して非常に少ない。この点からも本試験地の土壌がせき悪であるといえそうであるが、密な林分の生長量からみて物質循環が順調に行なわれることによって、養分の欠乏をある程度補うことができると考えられる。

生態系内現存量を各林分の間で比較するといろいろ注目すべきことがらがあることに気付く。すなわち植付け当初に肥料として施用した N, P, K の 3 成分は施肥量が増加するとともに明らかに生態系内の各部分で増加しているが、Ca や Mg はほとんど変化がない。これらの関係をさらに詳しく解析してみよう。

すでにのべたように施肥は植付け時から 3 ヶ年毎年行なったが、その施用量の合計は表-12 のようで、単木あたりの施用量は同じであるため植付け密度の多い林分ほど施用量は多いことになる。

施肥量とそれによる生態系全体の増分の関係を理解しやすいよう各要素別に図-15, 16, 17 に示した。さらに増分量の動きを理解するため、生態系中、地上部と土壤中の養分要素の現存量の関係を図-18, 19, 20 に、また施肥はしなかったが Ca と Mg の関係も図-21, 22 に示した。これらの表および図から、各要素別に物質の動きを検討してみよう。

(1) N 現存量は図-15 のように無施肥区に比べて施肥した林分の方が明らかに増加しているが生態系内におけるその増分は実際の施肥量より多く、疎な林分では数倍も多くなっている。

Table 11. Nutrients in the upper ground part of Loblolly pine stands applied mixed fertilizer in kg per hectare.

Part in ecosystem	Stand density and fertilizer		Low, Mixed					Middl, Mixed					High, Mixed				
	Nutritive element	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	
Stem		54	23	28	60	23	69	29	36	75	29	116	50	61	127	50	
Living branch		24	8	18	40	10	28	9	21	46	11	35	11	26	58	14	
Dead branch		4	1	0.4	11	2	5	2	0.5	15	3	17	5	2	47	10	
Foriage		81	14	14	20	13	106	19	19	26	18	121	21	21	30	20	
Ground flora		42	6	23	23	24	47	7	25	25	27	9	1	5	5	5	
Total		205	52	83	154	72	255	66	102	187	88	298	88	115	267	99	

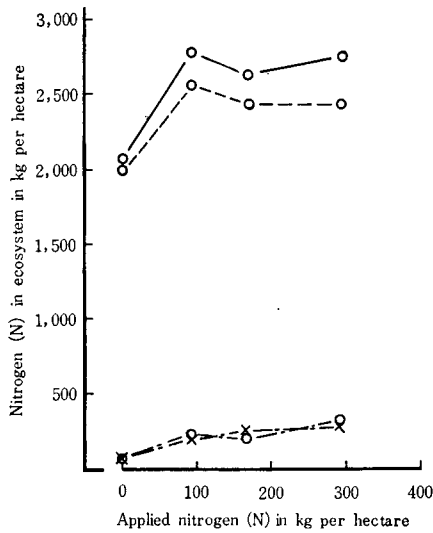


Fig. 15. Amount of nitrogen in ecosystem to applied nitrogen.

- — ○ Total in whole ecosystem. (Complex fertilizer)
- ··· ··· ○ Amount in A₀ layer and soil to 45cm depth. (Complex fertilizer)
- - - - ○ Amount in upper ground part. (Complex fertilizer)
- × - · - × Amount in upper ground part. (Mixed fertilizer)

また、図-15, 18から明らかなように、ある一定量以上施用しても、それともなう生態系内のN量の増加は明らかでなく、むしろ地下部ではかえって減少し、反対に地上部で増加する傾向が認められた。

このようにNの生態系内における配分、動きがそれほど明確でないのはここで分析測定した成分が可給態でなく、全N成分であったためと、土壤中の絶対量が多く、施肥量のほぼ10倍以上にも達するために、このような測定法では鋭敏にこれらの動きをとらえることができなかつたためと思われる。またNは物質循環上、半開放型の物質であって、土壤中の成分が林木により吸収され物質合成に利用された後、落葉落枝として林地にかえされる閉鎖的循環経路の外に、大気中に起原をもつN成分が、

Table 12. Amount of applied elements as fertilizer in each stand in kg per hectare.

Stand density	Fertilizer	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Low	Complex, Mixed	95	51	51
Middle	Complex, Mixed	171	91	91
High	Complex, Mixed	294	157	157
Middle	Non	0	0	0

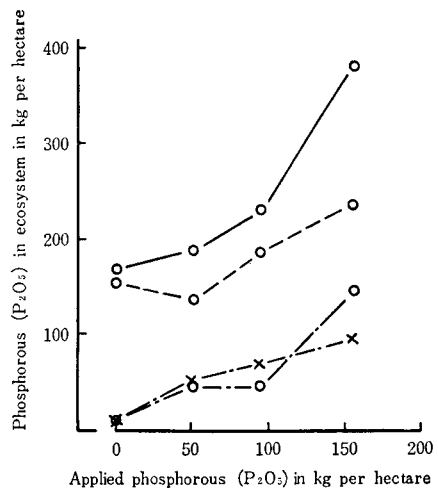


Fig. 16. Amount of phosphorous in ecosystem to applied phosphorous. See the explanation of Fig. 15.

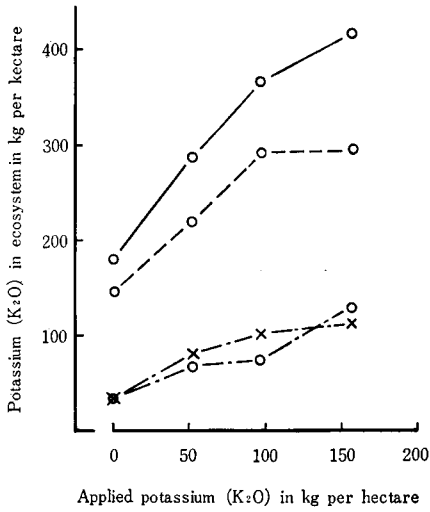


Fig. 17. Amount of potassium in ecosystem to applied potassium. See the explanation of Fig. 15.

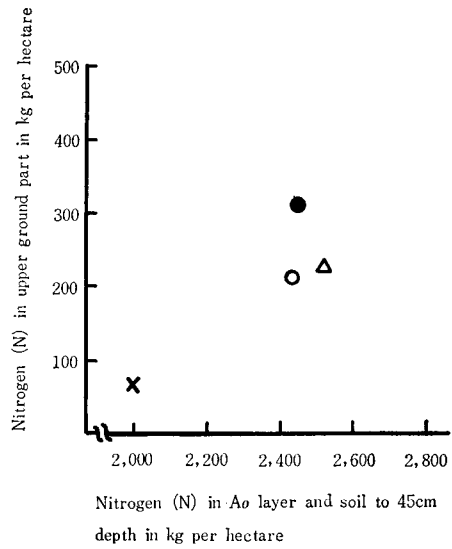


Fig. 18. Relation between amount of nitrogen in upper ground part and in under ground part. △ : Low stand density (Complex fertilizer) ● : Middle stand density (Complex fertilizer) ○ : High stand density (Complex fertilizer) × : Middle stand density (Non fertilizer)

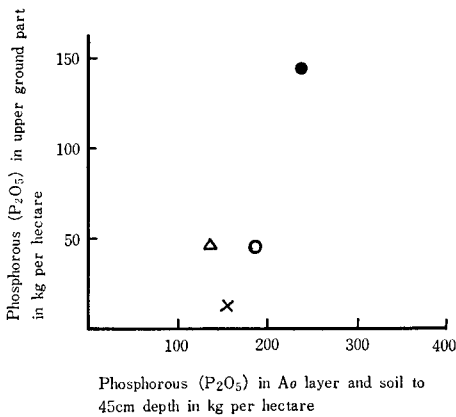


Fig. 19. Relation between amount of phosphorous in upper ground part and in under ground part. See the explanation of Fig. 18.

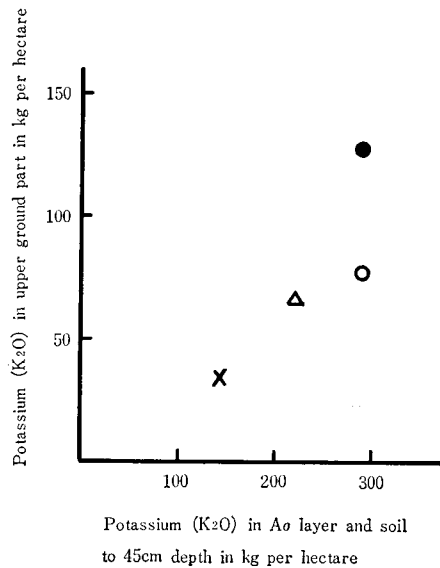


Fig. 20. Relation between amount of potassium in upper ground part and in under ground part. See the explanation of Fig. 18.

土壌中の微生物によって固定される量も加わるため、さらにこれらとの関連づけは難しいように思われる。

(2) PおよびKの2要素については、生態系内現存量と施肥量の関係がかなりはっきりとあらわれた。すなわち、生態系全体としては施肥量の増加にはほぼ比例して現存量が増加している。

まずPについて表-10, 11, 図-16, 19から施肥量と生態系ならびにその内部における量的な動きを

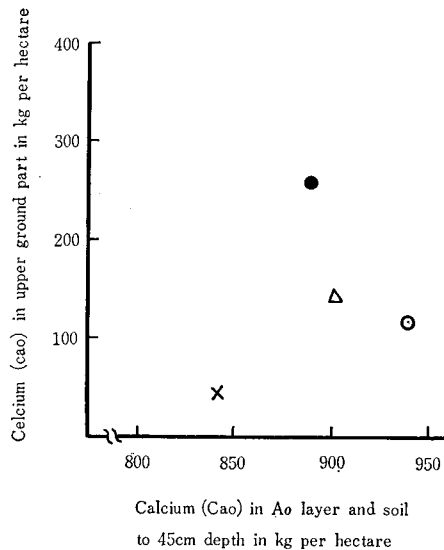


Fig. 21. Relation between amount of calcium in upper ground part and in under ground part. See the explanation of Fig. 18.

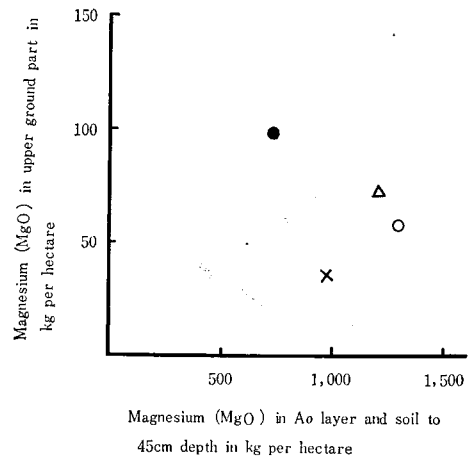


Fig. 22. Relation between amount of magnesium in upper ground part and in under ground part. See the explanation of Fig. 18.

解析してみよう。

ha あたり 51kg の P を施用した疎な林分では無施肥区に対して、P の地上部現存量は 37kg/ha の増量となり、土壤中現存量では 18kg/ha の減少となって、現在まだ根の量が測定されていないので正確にはわからないが、土壤中のこの減少量がそっくり根系部分に蓄積されているとしたら、この量と地上部現存量との合計が 55kg/ha となり、ほぼはじめの施肥量と一致する。さらに ha あたり 91kg を施用した中密度の林分では無施肥区に対して、地上部現存量で 36kg 増加し、土壤中の現存量でも 28kg の増量を示している。生態系全体では合せて 64kg の増量であるが、はじめの施肥量にはおよばない。これも P の施肥量のいくらかが根系部分に含まれていると考えればその不足分をある程度説明できそうだ。しかし基準とした無施肥の林分の値が、他の林分の施肥前の値として代表できるかどうか多くの疑問があり、すべてがこのような説明で十分とは思えない。しかし生態系の中の養分現存量をある一定の割合で変えることによって、少なくとも加えられた養分の行方と動きが客観的にとらえることができよう。つぎに ha あたり 157kg を施用した密な林分では無施肥区に比べて、地上部現存量では 134kg の増加となり、土壤中の現存量でも 81kg の増量で生態系全体としては合計 215kg の増量を示した。これは実に施肥量を約 50kg も上まわることになり、根系への蓄積を考えるとかなりの量が生態系内の循環に加わったことになる。もともと P は物質循環上閉鎖型に属しているのに施肥量を上まわる増分を示した原因は現在のところ明らかでないが、森林の閉鎖にともなって土壤中の不可給態の P が可給態化されて循環に加わったものか、また試験設定当初から 3 ヶ年間の施肥量そのものが、計画を上まわって施用されていたものか、あるいは施肥前の土壤中の P 含量が無施肥区の林地より多かったためか、そのいずれかであろうと思われる。とにかく P は明らかに施肥量の増加に比例して生態系内現存量が増大していることは確実であり、しかもこの施用量の範囲内では多く施用したほど林地の生産力が高くなるように思われた。

K も、P でみられた傾向とほぼ一致している。しかし生態系全体における増分は無施肥の林地に対し ha あたりそれぞれ疎 106kg、中 188kg、密 239kg と表-12の施肥量の 2 倍程度も多い。この原因も前述の密な林分における P の増分と同じような推論で説明できるであろうが、単純な現象だけをとり出して結論するには、あまりにも問題が複雑である。いずれにしても、施肥を行なうことによって生

態系内の養分要素の現存量が増加し、それが物質循環に加わり、生産力を高めることはほぼ間違いない事実であろう。

(3) 以上、P、Kにおいてみられた明らかな傾向は、すべて土壤中の養分要素を可給態として算出したものであり、全成分(熱塩酸可溶成分)で算出した結果は表-13に示したとおりで可給態成分のほぼ10倍以上の現存量を示した。この結果からはただちに明らかな傾向をみいだすことはできなかったが、長い年月の間にはこれが可給態化されて物質循環に加わるようになるであろう。

(4) Ca、Mgの2成分については施肥を行っていないので、前述の3要素のように生態系全体としての現存量に明らかな増加の傾向はみいだせない(表-10、11)。地上部現存量については当然ながら林分の諸量の増大によって、これら成分の吸収量の増加が認められるが外部からの生態系内へのとりこみがない故、土壤中の現存量はそれだけ減少することになるはずである。すなわち、P、Kは図-19、20のように施肥により増加した要素は土壤中だけでなく地上部における現存量をも増加させ、その配分は両方に行なわれることが多い。そしてこれらの図からも明らかなようにこの範囲での施肥量が多くなると生長を促進し地上部により多く吸収されるため、図中の点は右上に移動する。これに反し、施肥しなかったCa、Mgは図-21、22のように、林分現存量が多くなり地上部への吸収量が多くなるほど土壤中の養分現存量は減少するので左上に点に移る。このように施肥したために生態系内に養分要素の増加があったものと、施肥しなかった養分要素の生態系内部での動きを解析することによって物質循環のしくみをより明らかに理解することができる。

(5) 施肥しなかった林地における植栽木の生育が極度に悪かった原因を、これら生態系内の養分の動きより考えるとPとKの現存量が著しく不足していることが認められるが、テーダマツの成林を期待するためにはこれらの養分要素が少なくとも200kg/ha程度以上存在している必要があるように思われた。

3) 養分の落葉落枝としての還元——平均分解率

森林生態系における養分要素の循環は、その絶対量の多少とともに循環速度が重要な意義をもってはいることは間違いないであろう。この循環速度を左右する因子のなかで、影響のもっとも大きいものに林地へかえされた落葉落枝の分解、養分要素の還元、無機化の速さがあげられよう。

すでにのべたように毎年林地に供給される落葉落枝量を現存する粗腐植量(A₀層量)で除した比を分解率とし、その逆数を分解年数としてこの速さを表わすことができる。現在年間の落葉量の正確な調査結果がでていない(リ

タートラップによって調査中)うえに、テーダマツの新葉量の推定が大変むつかしいので試料を採取した時の林分の着葉量が2年分として、その半分が毎年林地へかえられるものと仮定し、その分解率を計算してみた。なお、着葉量を2年分とした理由は、只木ら²⁾のテーダマツ林における調査によれば春から秋の間は前年度の旧葉と、今年度の新葉の2年分が着生し、旧葉は晩秋より冬にかけて落葉

Table 13. Total nutrients (Hot-HCl soluble) in soil to 45cm depth in kg per hectare.

Stand density	Fertilizer	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Low	Complex	1,548	5,235	10,737	3,582
Middle	Complex	2,084	7,922	8,632	4,062
High	Complex	1,645	5,907	15,673	3,322
Middle	Non	1,417	3,775	7,476	7,371

Table 14. Average decomposition ratio of nutrients in fertilized stands.

(Nutrients in half foliage/Nutrients in A₀ layer × 100)

Stand density	Fertilizer	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Low	Complex	45	64	54	19	12
Middle	Complex	36	81	35	11	10
High	Complex	45	70	119	13	23

し、次の新葉がでるまでの間は1年分だけ着葉していると報告しているの、10月初旬に調査した今回の林分葉量は年間を通じ最多の時期であったと思われるからである。

各養分要素の平均分解率の計算結果を表-14に示した。平均分解率はすべて10%以上で、一般に分解率が高く分解の速度が速いようであった。この分解率の逆数が分解に要する年数であるがNではほぼ2~3年の間に、Pでは1~2年の間に、Kでは1~3年の間に分解され、物質循環に加わっていくようである。これに対してCaとMgは分解に必要な年数は5年から10年程度であって前の3成分に比べれば長い期間が必要であることが認められた。

一般にマツ類の落葉は広葉樹に比較してその分解速度はおそいとされている¹⁶⁾。しかし、このテーダマツ林分ではN、P、Kの3成分の分解速度はかなり速く、また各地のアカマツ林と比較しても相当大きな分解率を示した。このことはこれら養分の循環速度が相当に速いことを意味し、これが土壤中の養分不足を補なっているように思われた。

4) 土壤中養分の消費の早さ

葉および枝に含まれる養分はいずれ落葉落枝となって林地へかえされ、循環に加わるが、幹に吸収された養分はそのまま林分中にとどまり、林地へかえられることはない。したがってこの分に相当するだけの量は毎年土壌およびA₀層中から減少していくはずである。Nについては物質循環上、半開放系に属しているので、土壤中の現存量に大気中に起原をもつN成分がある程度加わるから必ずしも幹に蓄積される量だけ減少するとは限らないが、他の無機成分はいずれも閉鎖型に属しているため、ほぼ正確にこの分だけは土壌中より減少するはずであろう。これらの関係を明らかにするため、A₀層と土壌層(0~45cm)中に含まれるそれぞれ可給態の養分現存量を最近1年間に幹に吸収された量で除した値を表-15に示した。これは今後この年間吸収量で幹に養分の蓄積が行なわれた場合、現在の土壌中の養分現存量が何年間で吸収消費されるかということを示している。

表-15によると完全に閉鎖したとみられる高密度区ではPは僅か10年分、Kは21年分、Caでは26年分の養分量しか保持していないことになる。NとMgはこれに比べればやや余裕のあることを示しているが、決して多いという量ではない。勿論長年月の間には可給態の成分に比べて10倍以上の現存量をもつ不可給態養分(熱塩酸可溶成分)が徐々に可給化するであろうから、計算された年数よりも余裕のあることは確かであろうが、現在のような大きな生長量を続けていくためには、近い将来、これらの養分が不足をきたす可能性が高く、やがて生長量の減退がおこるものと推考された。

あ と が き

以上のべたいろいろな結果から、白浜のようなせき悪な林地にテーダマツを造林する場合、植つけ当初に適当な施肥を行なうと、比較的早期に閉鎖した林分を作り上げることができ、またこのために自己施肥が早く可能となってN、P、K、Ca、Mgはともに順当に循環を繰り返していくことが明らかになった。この意味において施肥の効果は比較的高かったと思われるが、土壌中に含まれる可給態養分量の幹に吸収され保持されることによって起こる消費の早さから考えて、本報告でのべたような大きな生長量が今後何年間持続するかは、はなはだ疑問であり、この点については今後なお調査を続けていく必要があると思われる。

Table 15. Amount of available nutrients in A₀ layer and soil compared with amount of current annual uptake in stem of Loblolly pine.

(Amount in A₀ layer and soil to 45cm depth/Amount of current annual uptake in stem)

Stand density	Fertilizer	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Low	Complex	148	29	27	74	230
Middle	Complex	197	41	47	76	252
High	Complex	79	10	21	26	58

文 献

- 1) 湯浅保雄・伊藤悦夫：若いテーダマツ林の生産力，78回日林講，115～117，(1967)
- 2) 只木良也・香川照雄：森林の生産構造に関する研究 (XIII) コジイほか2，3の常緑樹林における落葉枝量の季節変化，日林誌，50，7～13，(1968)
- 3) 柴田信男・上中幸治・大橋照夫：林木施肥に関する研究 (X) テーダマツ及びスラッシュマツにおける植栽密度と肥効との関係，日林関西支講，12，59，(1962)
- 4) 菅誠：人工一斉林の林分密度に関する生態学的研究，(1967)
- 5) 四大学林学教室：物質循環面より見た森林生態系の生産力，資料 No. 1，316～373，(1963)
- 6) Tadaki, Y. : Some Discussions on the Leaf Biomass of Forest stands and Trees, Bull. Gov. For. Exp. Stat. Jap., 184, 135～161, (1966)
- 7) 四手井綱英：立山付近に分布するハイマツの物質生産について，日林誌，45，169～173，(1963)
- 8) 川那辺三郎・四手井綱英・岩坪五郎：パキスタンマツ林とアカマツ林の物質生産について，72回日林講，242～244，(1962)
- 9) 坂口勝美・伊藤清三：造林ハンドブック，養賢堂，(1966)
- 10) 川那辺三郎・四手井綱英：陽光量と樹木の生育に関する研究 (Ⅲ) 針葉樹苗木の生育におよぼす被陰の影響，京大演報，40，111～121，(1968)
- 11) Metz, L. J. : Weight and Nitrogen and Calcium content of the Annual Litter Fall of Forests in the South Carolina Piedmont, Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 16, 38～41, (1952)
- 12) 佐藤ほか共著：造林学，朝倉書店，(1965)
- 13) 只木良也・四手井綱英：数量間伐に関する生態学的研究，京大演報，34，1～31，(1963)
- 14) 安藤貴：同令単純林の管理密度に関する生態学的研究，林試研報，210，1～153，(1968)
- 15) 峰屋欣二・藤森隆郎・棚秋一延・安藤貴：アカマツ幼令林の葉量および落葉量の季節変化，林試研報，191，101～113，(1966)
- 16) 四手井綱英編：アカマツ林の造成，地球出版，(1963)
- 17) 只木良也・四手井綱英：林木の競争に関する研究 (Ⅲ) アカマツ幼樹を用いた小型林分での機械的な間伐試験，日林誌，44，129～139，(1962)
- 18) 林野庁編：民有林野調査方法，(1954)
- 19) 松下進：日本地方地質誌，近畿地方，205～213，(1966)
- 20) 斎藤達夫・柴田信男・薬師寺清雄：テーダマツの植栽密度と施肥が土壌におよぼす影響，78回日林講，295，(1967)
- 21) F. J. Alway and R. Zon : Quantity and nutrient contents of pine leaf litter, J. For., 28, 715～727, (1930)
- 22) 伊佐義郎・村上温夫・薬師寺清雄：外国産マツ類の育成に関する研究 (I) テーダマツの肥培に関する基礎的考察，京大演報，29，162～180，(1960)
- 23) White, D. P. : Variation in the nitrogen, phosphorous and potassium content of pine needles with season, crown position and sample treatment, Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 18, 326～330, (1954)
- 24) Merric C. Hoyle, Donald L. Mader : Relationships of foliar nutrients to growth of Red pine in Western Massachusetts, For. Sci., 10, 337～347, (1964)
- 25) J. D. Ovington, H. A. I. Madwick : Distribution of organic matter and plant nutrients in a plantation of Scots pine, For Sci., 5, 345～355, (1959)

Résumé

The subject of the studies is to account for the important mechanism of mater production in a 7-year-old Loblolly pine (*Pinus taeda*) forest planted with three kinds of density and manured variously in the Shirahama Experimental Station of Kyoto University Forest (Wakayama pref.), and also, investigation of productivity was made in a small stand transplanted in the nursery bed of the Kamigamo Experimental Station (Kyoto city) five years ago. Especially, the biomass of the upper ground part in each pine forest, productivity of stem, production structure, soil conditions and the circulation of nutrients within ecosystem were discussed in this paper.

In the manured forest stand, complex fertilizer which contains nitrogen (15%), phosphorus (8%) and potassium (8%) have been manured 100 grams per tree for 3 years after planting annually, and also, mixed fertilizer was used similiary. The amount of applied element per hectare was shown in Table 12. In October 1967, stand density, mean diameter breast high (DBH), mean height and basal area of sample stands were shown in Table 1.

Biomass of upper ground parts per stand was estimated with the method of allometric relation. The sample trees of various dimensions were cut down at the base, and the stem, branches and needles of each tree were separately weighed with the stratified clip technique. The fresh weight data were converted into oven-dry weight basis, and the volume of stems were measured with stem analysis. The allometric relations of the stem volume ($V\text{cm}^3$), the stem dry weight (w_s kg), branch dry weight (w_B kg) and needle dry weight (w_L kg) to D^2H ($D\text{cm}$; DBH, $H\text{cm}$; tree height) in high density stand well fitted a linear relation shown logarithm (Fig. 1). These regression formulas were found as follows :

$$\log V = 0.8638 \log(D^2H) + 0.2810$$

$$\log w_s = 0.8404 \log(D^2H) - 3.0073$$

$$\log w_B = 1.2253 \log(D^2H) - 5.4815$$

$$\log w_L = 1.0078 \log(D^2H) - 4.4445$$

In the high density stand of Shirahama, the dry weight of stems per hectare was estimated at about 55~59 ton, and also branches and foliage at 13~14 ton respectively. These standing crops tended to be larger than those values of other genus pine forests which have been reported by many workers.

As the result that the seasonal change of the foliage biomass and leaf-fall amount in a forest, the amount of foliage measured before defoliation of grown needle in the previous year was presumed to be the largest of all seasons. But in May, the dry weight of foliage only consisting of a year needle in the Kamigamo's forest stand was about 10 ton per hectare.

The current annual increment of stem volume in a high density stand was estimated at 32~35m³/ha, and its production was seemed to be remarkably larger than other genus pine forest.

The production structure diagram showing the vertical distributions of oven dry weight of stems, branches and foliage differed in various closed stand (Fig. 8). As regards the vertical distribution of foliage it seemed that the Loblolly pine forest was the herb-type whose foliage appeared mainly in upper strata of crown.

The light intensity under crown in closed stand ranged from 1 to 2 percent of full daylight, with average including sun-fleck (Table 4). And the correlation between the height of the lowest living branch and relative light intensity seemed to be high.

It was presumed that the Kamigamo's stand where the distribution of cross sectional area was L type and natural thinning had already occurred had become formation of full density. As the results, a tentative curve was expressed as follows :

$$\log v = -1.5 \log + 4.3075$$

The oven dry weight of litter and raw humus (A_0 layer) was estimated at 9~12 ton/ha, and these accumulated amount did not differ too much in each stand. The forest stand of the Shirahama Experimental Station consisted of extremely sterile soil where the physical properties was compact (Table 7) and the nutrients of nitrogen, phosphorous and potassium were lacking in surface layer (Table 8 and 10).

The amount of nitrogen, phosphorous and potassium in forest ecosystem consisted of upper ground parts (ground flora included) and soil to 45cm depth (raw humus included) obviously increased with fertilizer. Especially, available phosphorous and potassium increased in proportion to applied amount of fertilizer in both under ground and upper ground parts. Therefore, it was considered that the circulation of nutrients had smoothly been promoted in forest ecosystem. But exchangeable calcium and magnesium applied as non-fertilizer did not increase in forest ecosystem. And it was found that the elements in soil decreased as much as was absorbed in upper ground part.

The average decomposition rate of nitrogen, phosphorous and potassium was showed Table 14, it was presumed that the nutrients in raw humus decomposed for 1~3 years mostly. Because of part of nutrients accumulated in stem annually, phosphorous and potassium in soil have remained of only 10 and 20 times of annual uptake. It seems that these quantity was not too much for the continuation of present growth.