

スラッシュマツ幼令林の物質生産機構

赤井 龍男・上田晋之助・古野 東洲

Mechanisms Related to Matter Production in
a Young Slash Pine Forest.

Tatsuo AKAI, Shinnosuke UEDA and Tooshu FURUNO

目 次

要 旨	56	1) 林内の明るさと生枝下高
まえがき	57	2) 地床植生
1. 調査林分の概況	58	6. 土壌環境
2. スラッシュマツの相対生長と 林分現存量	58	1) 調査方法
1) 調査方法		2) A ₀ 層の堆積
2) 相対生長関係		3) 試験地土壌の一般的特徴
3) 地上部現存量		4) 土壌の理学的性質
3. 林分生産量	61	5) 土壌の化学的性質
1) 個体の生長		7. 生態系内における養分要素の循環
2) 林分の幹生産量		1) 地上部各部の養分要素含有率
4. 林分の生産構造	63	2) 生態系内の養分現存量とその配分
1) 断面積の本数分布		3) 養分の落葉落枝としての還元—— 平均分解率
2) 立木密度		4) 土壌中の養分の消費の早さ
3) 幹枝葉の垂直的配分——生産構造		あとがき
4) 葉と枝の関係		文 献
5. 林内環境	65	Résumé

要 旨

この研究は1961年3月、京都大学農学部白浜試験地に密度と施肥量を組合せて植付けられ、立木密度の高い一部の林分はすでに閉鎖状態に達した8年生のスラッシュマツ (*Pinus elliottii*) 林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。

施肥した林分にはチッソ、リンサン、カリがそれぞれ15:13:12の組成の隣安尿素系肥料を、植付け密度に反比例させて1本あたり100, 50, 25gの基準量とその倍量ずつ植付け時と翌年の2カ年与えた。1968年10月現在、施肥した林分の立木密度はhaあたり2,200~2,000本(疎)、2,800~4,000本(中)、5,400~5,800本(密)で、平均胸高直径はそれぞれ12.1~12.2cm, 10.4~9.5cm, 7.9~9.6cmに達し、平均樹高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、平均樹高はまだ2mに達していなかった。

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。胸高直径

(D cm) と樹高 (H cm) の D^2H に対する幹材積 (V cm³), 幹乾重 (w_s kg) ならびに密な林分の枝乾重 (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。

$$\log V = 0.9038 \log(D^2H) + 0.1332$$

$$\log w_s = 0.9200 \log(D^2H) - 3.3819$$

$$\log w_B = 1.2610 \log(D^2H) - 5.9440$$

$$\log w_L = 1.0351 \log(D^2H) - 4.5584$$

倍量施肥した密なスラッシュマツ林分の幹材積は196m³/ha で, 乾重現存量では幹 72 ton/ha, 枝 9 ton/ha, 葉 18 ton/ha と推定された。葉量は落葉期直前の2年分の着葉量であったが, 隣接のテーダマツや他のマツ属よりかなり多かった。同じ林分の最近1年間の幹材積生産量は約 28 m³ (10 ton)/ha で, テーダマツ林より約20%少ないが, 他のマツ属より著しく大きい。

密な林分の生産構造は葉が上層にかたよった広葉型で, その生枝下の平均相対照度は約5%であった。そして林内の明るさに対する生枝下高や地床植生量の相関はかなり高かった。

施肥した林分の A₀ 層 (落葉, 落枝, 粗腐植, 腐植) の堆積量は乾重で 4.5~11.7 ton/ha となり, 立木密度の高い林分ほど多かった。しかしスラッシュマツ林分の平均分解率は 80~120% で著しく大きく, 落葉は1年前後でほとんど分解されるようであった。

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。しかし林分が成立することによって表層 5cm 位まではいくらか物理性の改善が認められる。肥料として施用したチッソ, リンサン, カリの3成分は, 葉中の含有率が無施肥のものより高くなり, また特に可給態のリンサン, カリの現存量は地上部 (地床植生も含む) と A₀ 層を含む地下 35cm の深さまでの土壌を合せた生態系で, 根も考慮するとそれぞれの施肥量にほぼ等しい増加を示した。さらに物質循環上閉鎖系に属する可給態のリンサン, カリや置換性のカルシウム, マグネシウムは, 地上部に吸収保持された量だけ土壌中から減少していた。

チッソ, リンサン, カリの推定平均分解率はきわめて高く, A₀ 層中の養分は1年前後ではほぼ分解されるようであった。しかし毎年幹に蓄積される吸収速度から土壌中の可給態養分の残存年数を推定すると, 密な林分ではリンサン, カリが30~40年, カルシウムが15年分しかないことになり, 物質の循環からみてこれまでのような高い生産量を持続することは困難であると思われた。

ま え が き

スラッシュマツ (*Pinus elliottii*) はわが国に導入されたマツ属の中でも, すでに報告した¹⁾テーダマツ (*Pinus taeda*) と同様, 林業的に最も有望と思われる樹種である。これまで日本の各地に造林され, 良好な生長を示している報告が多い。しかしスラッシュマツ林分の生産力を林分密度や物質循環から解析した研究は日本においてはほとんどなく, ただ14年生の密度の異なる林分現存量や生産量を調査した安藤らの報告があるのみである。²⁾

和歌山県白浜町の京都大学農学部附属演習林白浜試験地に, 1961年3月, 柴田の計画で³⁾満1年生のスラッシュマツを植付け密度と施肥量を組合せて植付けたが, 8生育期を経過した1968年秋には, 立木密度の高い林分は早くも閉鎖し, 自然間引の状態に近くなった。

すでにこの林分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, 本報告は密度と施肥の組合せによってあらわれる生産力のちがいを, 林分の地上部現存量, 生長量, 生産構造ならびに主要養分要素の生態系内における循環の解析から明らかにしようとしたもので, すでに報告した¹⁾テーダマツと一連の研究である。

本研究は43年度文部省科学研究費総合研究の計画にもとずき行なわれたもので、赤井、古野が地上部生産機構を測定解析し、赤井がとりまとめ、また上田が土壤環境と物質循環について分析し、とりまとめたものである。

本研究を総合研究の一環として企画された京都大学農学部演習林佐野教授、たびたび助言をいただいた京都大学農学部四手井教授ならびに調査にあたってご協力をいただいた演習林教官、職員各位に深く感謝いたします。

1. 調査林分の概況

試験地の地形は30°前後の南面傾斜の小さい丘陵で、地質は第3紀層に属しきわめてせき悪である。調査林分は立木密度が疎、中、密の3段階で、各密度ごとに基準量と2倍量の施肥ならびに無施肥の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0.05 haで繰返しはない。

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、毎木調査の結果、現在の立木密度はTable 1のように計画本数より少なかったので、

Table 1 Descriptions of Slash pine stands studied in Shirahama Experimental Station.

Stand density	Amount of fertilizer		Number of trees per hectare	Mean height (m)	Mean diameter at breast height (cm)	Basal area per hectare (m ²)
	(g/tree)	(kg/ha)				
Low	100	220	2,200	6.8	12.1	25.8
	200	400	2,000	6.9	12.2	23.5
Middle	50	140	2,800	6.5	10.4	24.1
	100	400	4,000	6.2	9.5	29.3
High	25	135	5,400	5.8	7.9	27.5
	50	290	5,800	7.4	9.6	43.6
High	0	0	4,000	1.9	—	—

それぞれの林分を疎、中、密で区別することにした。

施肥にはチッソ、リンサン、カリがそれぞれ15:13:12の磷安尿素系肥料を用い、haあたりの施肥量が各密度のいずれの林分も250 kg(基準量)と500 kg(2倍量)の2種の区になるよう計画本数にもとずいて単木あたりの施肥量を算定し、植付け当年とその翌年の4月に計2回施肥した。しかし立木本数が計画より少ないので、Table 1のようにhaあたりの施肥量は計画より少なかった。

Table 1から明らかなように、調査時、施肥区の平均樹高はほとんど6 mを越え、また胸高直径の平均生長量は1.0~1.5 cmに達し、さらに高密度区はすでに下枝も枯れあがり、ほぼ完全に閉鎖しているのに反し、無施肥区の林分の生長はいずれの密度でも全く悪く、約25%の個体はまだ胸高にまで達していなかった。

これは白浜試験地のようなせき悪林地における肥培効果として注目されよう。しかし植付け本数が多くて単木あたりの施肥量が1回25gというように少ない場合は、樹高、胸高直径など個体、林分とも生長量はそれほど増加せず、また一定量以上多く施用しても、個体の樹高生長にはほとんど影響しないようであった。

2. スラッシュマツの相対生長と林分現存量

1) 調査方法

各林分のほぼ中央附近に標準地を設け、胸高直径、樹高の毎木測定を行なった。ついで各密度区

とも倍量施肥の林分からいろいろな大きさの資料木 24 本（密林分 11 本，中林分 8 本，疎林分 5 本），無施肥区（密）から 4 本を選び，それぞれ地際より伐倒し，地際（0 m）から地上 0.3 m までと，それ以上は胸高（1.3 m），2.3 m……と各 1 m の層ごとに切り離し，幹，枝，葉の生重量をただちに計測し，サンプリングによる絶乾率から，それぞれの乾重量をもとめた。さらに各層から採取した円板の樹幹解析で，幹材積，幹生長経過，幹生長量をもとめた。なお，葉令を正確に見分けることが困難であったので，針葉量は全着葉量として測定した。

2) 相対生長関係

伐倒した資料木各個体の胸高直径 (D) と樹高 (H) の D^2H ($\text{cm}^2\cdot\text{cm}$) に対する幹材積 (V) ならびに幹乾重 (w_s) の相対生長関係は，Fig. 1-1 のように比較的適合度がよく，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させているが，枝乾重 (w_B) や葉乾重 (w_L) の相対生長関係は，Fig. 1-2, 3 のように，密な林分と他の林分で明らかな分離が認められた。勿論生育段階が進み閉鎖状態になれば，疎な林分も密な林分の相対生長関係に近づくであろう。

D^2H に対する各部分量の関係式はつぎのように近似された。

幹材積

$$\log V = 0.9038 \log(D^2H) + 0.1332 \dots (1)$$

幹乾重

$$\log w_s = 0.9200 \log(D^2H) - 3.3819 \dots (2)$$

枝乾重 (疎, 中)

$$\log w_B = 1.2610 \log(D^2H) - 5.7822 \dots (3)$$

枝乾重 (密)

$$\log w_B = 1.2610 \log(D^2H) - 5.9440 \dots (4)$$

葉乾重 (疎, 中)

$$\log w_L = 0.9920 \log(D^2H) - 4.2507 \dots (5)$$

葉乾重 (密)

$$\log w_L = 1.0351 \log(D^2H) - 4.5584 \dots (6)$$

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

これらの近似式の常数値をすでに報告したテダマツの結果と比較すると，密な林分における枝，葉の関係はかなりよく類似しているが，幹の場合はスラッシュマツの方がその勾配がいくらか急で，大きくなるほど通直になる傾向が認められた。

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

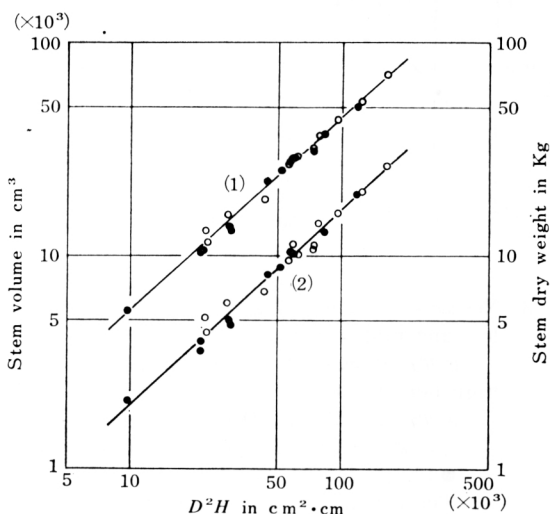


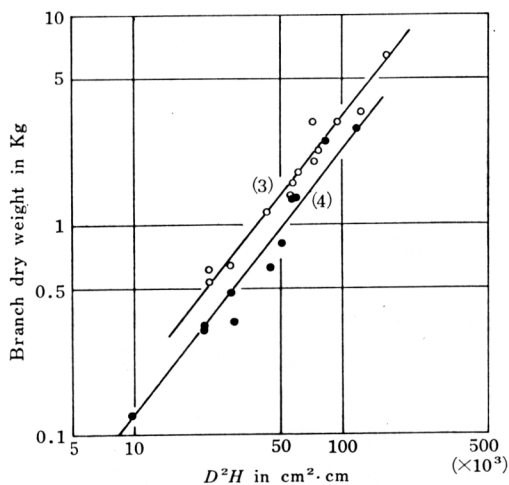
Fig. 1 Allometric relations between upper ground parts and D^2H in $\text{cm}^2\cdot\text{cm}$.

1—1 Stem volume (V) in cm^3 .

$$\log V = 0.9038 \log(D^2H) + 0.1332 \dots (1)$$

Stem dry weight (w_s) in Kg.

$$\log w_s = 0.9200 \log(D^2H) - 3.3819 \dots (2)$$



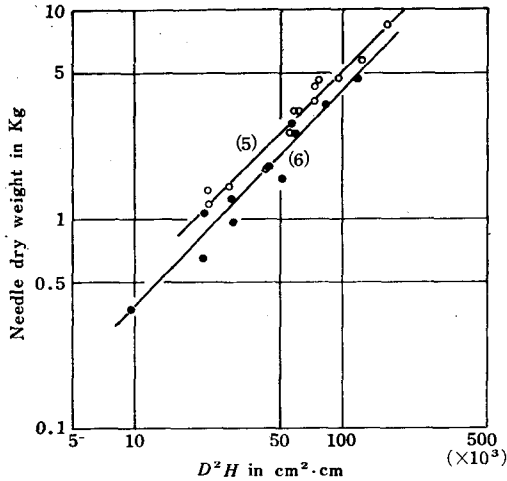
1—2 Branch dry weight (w_B) in Kg.

low and middle density stands.

$$\log w_B = 1.2610 \log(D^2H) - 5.7822 \dots (3)$$

high density stand.

$$\log w_B = 1.2610 \log(D^2H) - 5.9440 \dots (4)$$



1—3 Needle dry weight (w_L) in Kg.
 low and middle density stands.
 $\log w_L = 0.9920 \log (D^2H) - 4.2507 \dots (5)$
 high density stand.
 $\log w_L = 1.0351 \log (D^2H) - 4.5584 \dots (6)$
 ○: low and middle density stands
 ●: high density stand
 These marks apply in Fig. 3.

ため、本来の生産力を発揮したものと想われた。

Table 2 Biomass of Slash pine stands per hectare.

Stand density	Amount of fertilizer (g/tree)	Stem volume (m ³)	Stem dry weight (ton)	Branch dry weight (ton)	Needle dry weight (ton)
Low	100	102	37.6	7.8	11.7
	200	91	33.7	6.9	10.5
Middle	50	95	34.9	6.6	10.6
	100	111	40.6	6.9	12.2
High	25	105	38.2	4.1	8.7
	50	196	72.1	9.3	17.6
High	0	8	3.8	0.4	1.9

森林が充分閉鎖すると林分の葉量は樹種に特有な一定量に達する。密林分倍量区の葉乾重は ha あたり約 18 ton で、安藤らの推定した針葉量の最大値 8.5 ton の約 2 倍であった。このような著しい違いは調査時期の差によるものと考えられる。すなわちスラッシュマツの落葉は、テーダマツなどとはほぼ同様、晩秋から初冬にかけてもっとも多く、冬期に旧葉はほとんど落葉して新葉だけになるようである。したがって本調査は落葉を開始する前の10月始めに行なったので、旧葉をも大部分着けているに反し、安藤らの調査は2月に行なわれているため、旧葉はかなりあるいはほとんど落葉していたものと思われる。

スラッシュマツの伸長生長は、テーダマツと同様、年に数段の枝階を作るため、新旧枝葉を全体にわたって正確に区別することは困難である。それ故旧葉がどれだけ着いていたかは明らかでないが、

それぞれの地上部現存量を推定した。それらの結果を Table 2 に示した。

密林分倍量区の ha あたりの幹材積 196 m³ (幹乾重 72 ton) は、安藤らの調べた14年生スラッシュマツ林の最大値 174 m³ (66 ton) より約10%多く、平均生長量の比較においても隣接のテーダマツ林のそれよりかなり多い。一方、アメリカ合衆国のスラッシュマツ植付け密度試験における ha あたり幹材積の最大値は、13年生 (約1,500本/ha) の場合、フロリダ州レーク市で 232 m³、トラハッシーで 312 m³ と報告されているが、一般には植付け密度 2,500本/ha、地上10年生で 160 m³ が普通のようなのである。原産地のこの値と比較しても、白浜試験地の幹現存量は林令の割に多いといえよう。さらにまた、東大造林教室がもつめた12~15年生のアカマツ林の幹量より約70%も多い。このようにスラッシュマツ林の生産量が高いのは、後述の物質循環でも論ずるが、施肥によって必要な養分要素の循環がきわめてうまくいくようになった

葉令は最長2年以下であることは確かであり、⁵⁾ 只木らが調べたテーダマツの落葉量の結果からも、スラッシュマツの新葉量は Table 2 の結果のほぼ半分であると思われる。

1年前の同じ時期に調査した隣接のテーダマツ林の葉量と比較すると、スラッシュマツ林の方が約30%多い。また反対にスラッシュマツ林の枝乾重はテーダマツ林のそれより30%ほど少ない。相対生長からみた幹の形質、初期の幹平均生長量などとともに、これらの差異は多くの点でよく類似した両樹種の間の特徴といえるかも知れない。

一方、⁷⁾ スラッシュマツ林の葉量を他のマツ属と比較してみると、⁶⁾ 只木がまとめたマツ属9種の中、⁷⁾ 四手井がハイマツで測定した値 (21.7 ton/ha) を除いていずれの値よりも大きい。また同じ3針葉である *Pinus longifolia* の葉量よりはるかに多い。しかしこれらの葉量の比較は前述のように調査した時期を考慮すべきで、今後さらによく検討する必要がある。ただ川那辺ら⁹⁾が苗畑の高密度林分で、10月中旬に測定したアカマツ 12.6 ton/ha、クロマツ 16.1 ton/ha の葉量と比較すると、スラッシュマツ林の葉量が異常に多いとはいえないようである。

3. 林分生産量

1) 個体の生長

閉鎖状態に達した密林分倍量区の単木の幹材積の生長経過を、樹幹解析結果から皮なし連年幹生長量であらわすと Fig. 2 のようになる。これからも明らかのように、林分がうっ閉してくると単木の生長は低下するが、なかでも初期生長の悪い個体はより早く生長量が落ち、競争に負けてやがては自然枯死に至る。反対に初期生長の大きい個体は生長率も大きく、競争に勝つてますます他の個体を被圧するようになる。

しかし幹の連年生長量は、いずれの個体も植付け後7年目で明らかに低下しているが、この傾向は隣接のテーダマツの資料と一致している。この原因についてはまだ充分明らかでないが、¹⁾ 8年目にはほとんどの個体が生長を回復あるいは増大せしめているので、調査時期とか施肥効果の減少よりむしろ1966~1967年(6~7年目)の気象上の影響が大きかったと思われる。ジョージア州のジョージ・ワルトン試験林の調査例でも¹⁰⁾生長期に降水量が少ない月が続くと明らかに生長が低下しているが、1967年5月と8月の異常に少ない降水量が原因の一つである可能性が大きい。

スラッシュマツの幹連年生長量の最多の時期は、フロリダ州における報告からすると、18~20年位のものである。したがって白浜試験地におけるスラッシュマツの個体のより大きい連年生長量は今後まだ増加する見通しが強い。

樹幹解析結果からもとめた最近1年間の幹乾重生長量の D^2H に対する相対生長関係は、Fig. 3 のようになり、枝葉の場合と同様、密な林分とバラツキの多い他の林分に分離する。それぞれの関係式はつきのように近似された。

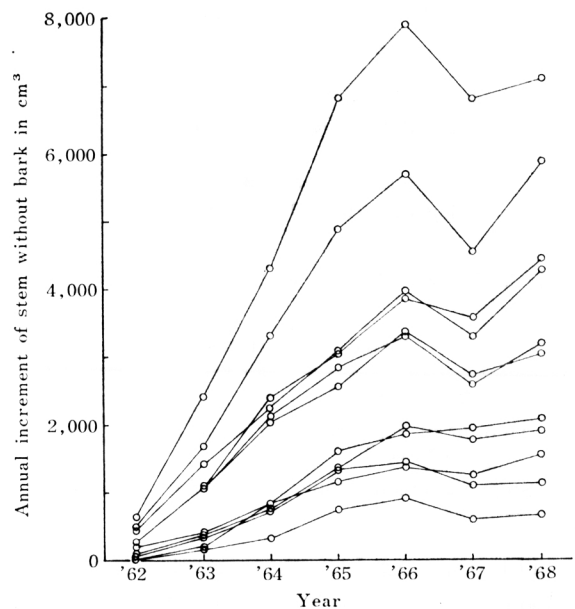


Fig. 2 Annual increment of stem without bark yearly.

(疎・中) $\log \Delta w_s = 0.9454 \log(D^2H) - 4.2424$ (7)

(密) $\log \Delta w_s = 0.9409 \log(D^2H) - 4.3312$ (8)

Δw_s : kg, D^2H : cm²cm

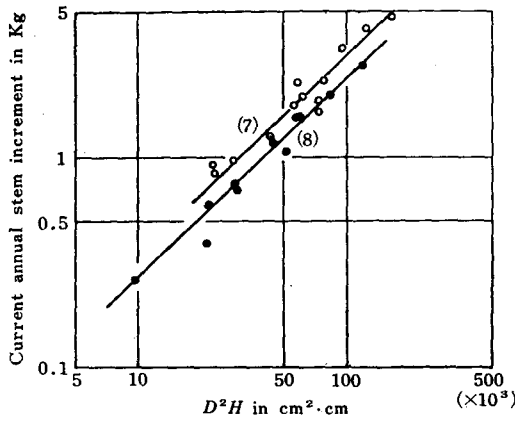


Fig. 3 Allometric relations between dry weight of current annual stem increment (Δw_s) in Kg and D^2H in cm^2 cm.

low and middle density stands (○).
 $\log \Delta w_s = 0.9454 \log(D^2H) - 4.2424$
(7)

high density stand (●).
 $\log \Delta w_s = 0.9409 \log(D^2H) - 4.3312$
(8)

く、したがって ha あたりの年間幹生産量は他の施肥区よりも明らかに低い。

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

Stand density	Low		Middle		High	
Amount of fertilizer (g/tree)	100	200	50	100	25	50
Stem increment (ton)	6.86	6.36	6.48	8.79	5.23	10.11

以上の論議のように、白浜試験地におけるスラッシュマツ林の生産量は、せき悪地であっても充分施肥し、林分を密に仕立てることによって著しく高められるが、このような大きい生産力をいつまで持続できるか興味のある課題である。この見通しに対するもっとも有効な解析の方法は後述の物質循環であろうが、ここでは他の方法として生産量のタテ方向への蓄積すなわち樹高生長経過を検討してみよう。

樹幹解析結果から単木の樹高生長経過を各区の平均でもとめると Fig. 4 のようになる。これからも明らかなように、どの区も植付け後数年目がもっとも大きい年間樹高生長量を示すが、その後は次第に生長量が減少する。しかし 1 本あたりの施肥量が少ない (50g), 密な区の高生長量の低下する割合は、他の区に比較してもっとも大きい。一般に樹高生長は密度の影響はうけないとされているが、前述のジョージア州ジョージ・ワルトン試験林のスラッシュマツ密度試験の結果もこのことを裏付けている。それ故樹高生長の減退はいわゆる“肥料ぎれ”の現象とも考えられるので、林分の幹乾重生産

2) 林分の幹生産量

各林分の最近 1 年間の幹乾重生産量を、毎木調査結果に 7, 8 式をあてはめてもとめると Table 3 のようになる。密林分倍量区の年間生産量は安藤らの調査した 14 年生スラッシュマツ林の 8.7 ton/ha より約 20% 多かったが、隣接テータマツ林の値よりは 20% ほど少なかった。また密林分倍量区の ha あたり年間生産量を幹材積生産量に換算すると約 27.5m³ になるが、その値はフロリダ州におけるスラッシュマツの造林成績の最大値と等しい。

さらに本試験地の年間幹生産量を他の樹種と比較すると、蜂屋らが調査した壮令アカマツ林の幹生産量 (9.5~21.8m³/ha) や、只木らがまとめた暖温帯地域の他の針葉樹の値よりも大きく、生産力はかなり高いといえよう。

しかしながら同じ施肥区であっても、1 本あたりの施肥量が 25 g と少ない場合は、前述のように個体の生長もおとり、たとえ植付け本数を多くしても、同化器官である葉の量も少な

量が 10 ton/ha を越える高い生産力を今後も続けることは困難であるかも知れない。

4. 林分の生産構造

1) 断面積の本数分布

同令単純林の立木構成、特に競争状態を明らかにするためには、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¹³⁾。このことから断面積を直径の平方としてその本数分布を Fig. 5 に示した。

Fig. 5 からいづらか理解できるように、相対的に立木密度の疎な林分の分布型は、現在ほぼ正規型であるが、密な林分では少し左にひずんでいるようである。完全な自然間引の状態になると、典型的な L 型になるが、いずれの林分もまだその前の段階であり、最多密度には至っていない。

2) 立木密度

現在日本には数十年生の閉鎖したスラッシュマツ林はないようであるので、スラッシュマツ林分の密度効果を適確にとらえることは困難である。しかし樹種の特性的類似している既報のテーダマツの資料を一応比較値として、立木密度 (ρ 本/ha) と林分の平均単木材積 (v m³) の関係を示すと Fig. 6 のようになった。

暫定的にもとめたテーダマツの最多密度曲線は

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

で、Fig. 6 の点線はテーダマツ林分の競争密度 (C-D) 効果を等樹高曲線として示したものである。スラッシュマツ林の等樹高曲線は安藤らの調査結果も含めて実線で示したが、テーダマツ林の等樹高曲線より 1 m ほど高い。このことは立木密度や平均樹高が同じであっても、スラッシュマツの平均単木材積ならびに林分材積がテーダマツのそれより大きいことを意味する。

なお、スラッシュマツ林の最多密度曲線は、テーダマツの暫定線と共通しそうで、この最多密度曲線は只木ら¹⁴⁾、安藤¹⁵⁾のもとめたアカマツ林の例と類似する。しかしさきにものべたように、Fig. 6 の曲線は生長段階の進んだ資料が多く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 Fig. 7 に示した。林令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、それでも立木密度の違いによって各部分量の垂直的配分にテーダマツ林と同じよ

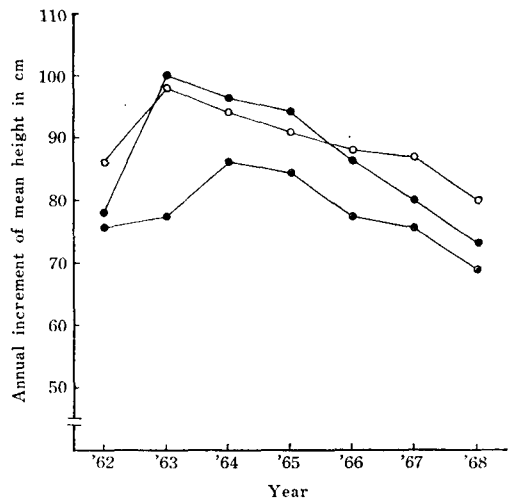


Fig. 4. Annual increment of mean tree height yearly.

○: low density stand
□: middle density stand
●: high density stand

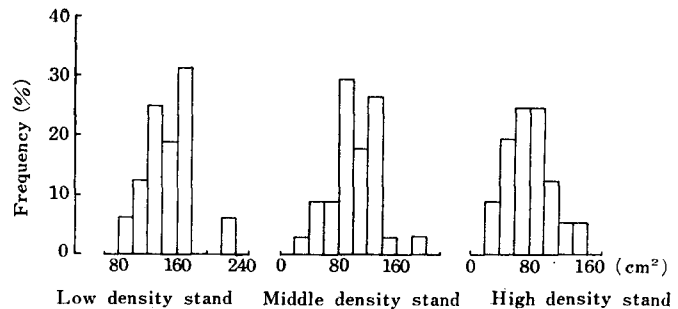


Fig. 5 Frequency distribution of (DBH)²

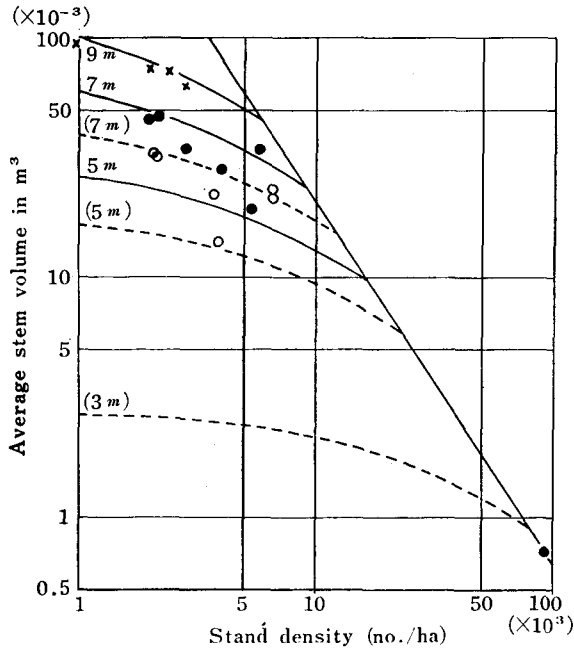


Fig. 6 Equivalent height curves and full density curve of average stem volume.

- : Slash pine in Shirahama
- ×— : Slash pine in Tokushima²⁾
- : Loblolly pine in Shirahama¹⁾

うな特徴が認められる。

すなわち幹量については、立木密度が高い林分ほど面積あたりの全量が多くなるとともに、Fig. 7 のように下部への配分が多くなる。これは立木密度が相対的に増加するほど小さい個体が多くなるためである。

一方、葉の垂直的配分については、立木密度の疎な林分では下層まで着葉が多く、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ソバ型（広葉型）に近い特徴を示すようになる。これは陽性樹種といわれるアカマツ林の状態とよく似ているようであるが、スラッシュマツの ha あたりの葉の総量は著しく多いので、上層附近における葉の密度はテーダマツと同様かなり高いといえよう。

4) 葉と枝の関係

幹や枝を増加させ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。そこでスラッシュマツとテーダマツの単木あたりの枝と葉の乾重の相対生長関係を Fig. 8 に示した。すでに報告したように、同一枝量に対するテーダ

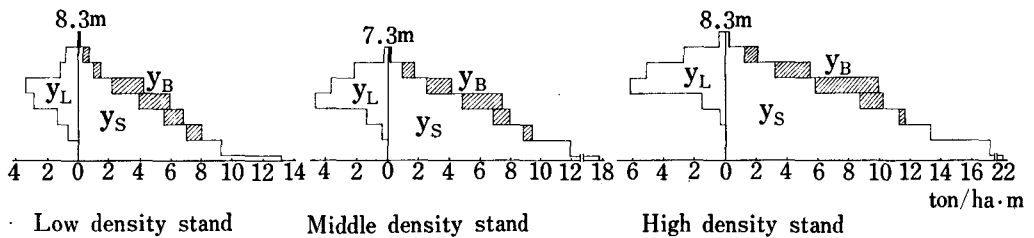


Fig. 7 Production structure diagrams showing the vertical distributions of oven dry weight of stem (y_S), branches (y_B) and foliage (y_L) in ton per ha. m.

マツの着葉量はアカマツより多いが、Fig. 8 から明らかなように、スラッシュマツの着葉量はテーダマツよりさらに5割ほど多い傾向が認められた。

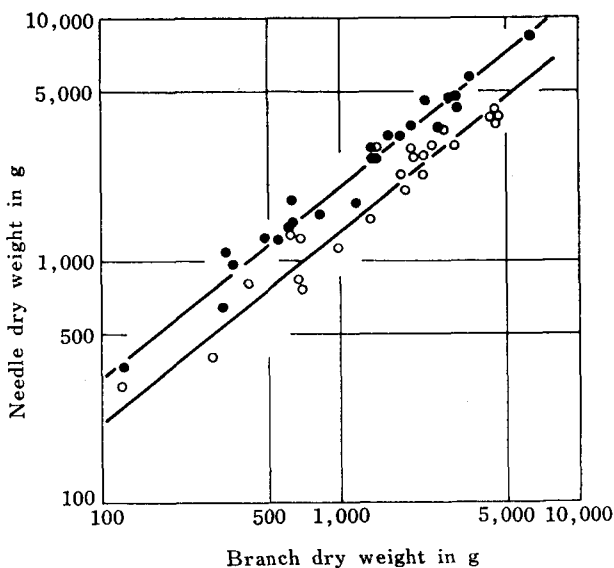


Fig. 8 Allometric relations between oven dry weight of needles and branches.

○: Slash pine
●: Loblolly pine

5. 林内環境

1) 林内の明るさと生枝下高

林外照度が 40,000~50,000 Lux の時、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 50 cm 間隔に 40 点以上 2カ所ずつ測定し、同一時刻の裸地の上向照度に対する相対照度（%）をもとめ、その算術平均を Table 4 に示した。林内における相対照度の分布は“日もれ”（sun fleck）があるので、一般に L 型になるが、対数変換するとほぼ正規型になる。それ故林内における平面的な相対照度は一応対数分布すると考えると、平均相対照度はこの変換値の平均を用いる方が適切であると思われる。しかし計算の結果、対数変換値の平均値は算術平均の値より僅か小さいだけで、各林分の傾向には全く影響を与えないようであるので、ここでは算術平均した相対照度を用いることにした。

Table 4 の林内平均相対照度から推考すると、スラッシュマツ林の値は、隣接テーダマツ林の明るさより明るいようで、特に密な林分ではテーダマツ林の 1.8~2.0%、あるいは只木ら¹⁷⁾の測定したアカマツ林の相対照度 2.1% よりかなり明るい。しかしこれは前述のように本試験地のスラッシュマツ林がまだ自然間引の状態に至っていないためで、林分葉量の多さからしてもテーダマツ林と同程度の閉

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

Stand density	Number of trees per hectare	Relative light intensity (%)	Percentage of sun-flecks		Height of the lowest living branch (m)
			>5%	>10%	
Low	2,000	22.4	93	60	1.92
Middle	4,000	26.7	98	65	2.08
High	5,800	4.9	18	10	3.38

鎖状態にはなるであろう。

一方、“日もれ”の量は葉の光エネルギーの利用効率に影響し、また平均相対照度のようなならされた明るさでは理解しにくい林分構成を、ある程度明らかにすることができよう。この意味で5%と10%以上の相対照度のあらわれる比率を Table 4 に示した。これからも明らかのように、密な林分の相対照度のほぼ平均値である5%以上の相対照度のあらわれる比率は、密林分では全体の約 $\frac{1}{4}$ であるに反し、疎、中の林分ではほとんどを占めている。さらに10%以上でも約 $\frac{1}{2}$ を占め、かなり日もれがあることがわかる。

林分が相対的に密になると次第に枝は枯れあがり生枝下高は相対的に高くなる。各林分内の生枝下高の平均は Table 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明らかに高く、樹高の半分位まで枯れあがっていた。こ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あった。

2) 地床植生

植物の葉の光補償点はほぼ 3,000 Lux といわれているが、植物生長期において相対照度5~10%以上の明るさがあれば、林内に植生が進入繁茂できる。Table 5 に 2m² 内の地床植生量をhaあたりで示した。この値を隣接テラダマツ林と比較すると、全般にスラッシュマツ林内の植生量の方が2倍

Table 5 Fresh and dry weights of ground flora per hectare.

Stand density (Fertilized)	Mean height (cm)	Fresh weight				Oven dry weight (ton)
		Deciduous (ton)	Evergreen (ton)	Herbs (ton)	Total (ton)	
Low	90	3.4	10.0	2.3	15.7	8.5
Middle	80	2.5	0.1	2.9	5.5	11.6
High	80	1.4	12.0	12.7	26.1	2.6
High (Non)	80	5.6	8.7	7.0	21.3	14.7

以上も多い。これは前述のように林内の明るさとの関連が大きいようである。

一般に林内が暗くなるほど地床植生は減少するが、樹種別では常緑のものが相対的により少なくなる傾向がある。しかし個々の種類の耐陰性とかスラッシュマツ林との関連については現在まだ明らかでない。

本試験地の林内に比較的多くあらわれた植生は大体つぎのようなものであった。

コシダ、ノイバラ、サルトリイバラ、ヤマハギ、ガンピ、コバノトネリコ、コナラ、コバノミツバツツジ、ヤマツツジ、カマツカ、ネジキ、アカメガシワ、ヒサカキ、クチナシ、タイミンタチバナ、ヤマモモ、ウバメガシ、シャシャンポ、ソヨゴ、カンコノキ、カヤ、ネズミサシなど。

6. 土 壤 環 境

1) 調査方法

土壌調査は前述の疎、中、密の各林分の中で、施肥量の多い倍量区について実施した。これに対照区として密林分の無施肥区をつけ加えた。A₀層(落葉、落枝、粗腐植、腐植)の堆積量の調査はこれら試験区内の斜面上部と下部のそれぞれ2カ所に1×1mの方形枠を設け、枠内の全量をていねいに採取、秤量し、同時にその1部の資料から含水率を測定し、ヘクターあたり絶乾物量に換算した。また土壌断面の調査としてはA₀層¹⁸⁾を採取した同じ地点で、基岩に達するまで掘り、構造、組成などの外観的特徴を林野土壌調査基準にしたがって記録した後、0~5 cm、5~20 cm、20~35cmの深さ別に400cc容採土円筒を用いて試料を採取し、それについて理化学性の分析を行なった。

2) A₀ 層の堆積

各林分の A₀ 層の堆積量は Table 6 のように乾重で 3~12 ton/ha で、明らかに林分の成立状態

Table 6 Dry weight of raw humus and litter (A₀ layer) and its average decomposition rate.

Stand density (Fertilized)	Amount of fertilizer (g/tree)	Dry weight of A ₀ layer (ton/ha)	Years required for total decomposition	Average decomposition rate (%)
Low	200	4.5	0.86	116.7
Middle	100	7.0	1.15	87.1
High	50	11.7	1.33	75.2
High (Non)	0	3.2	—	—

にもなつて変化していた。すなわち施肥した林分では、立木密度が大きくなるにしたがつて A₀ 層の堆積量も増加している。なお、スラッシュマツの落葉は主として11月から12月にかけて行なわれるようであるので、調査を行なった10月初旬は年間を通じて最も少ない A₀ 層量であると思われるが、この堆積量を昨年度調査した隣接のテーダマツ林と比較すると、密林分ではほぼ同じ結果をえたが、疎、中林分では比較的少ない。スラッシュマツ林の葉量はテーダマツ林より20%程度多いので、疎、中林分の A₀ 層量はかなり少ないように思われる。この原因の一つとして考えられることは、テーダマツ林を調査した1967年は5月と8月の雨量が少なく比較的よく乾燥した年で A₀ 層の分解が進まなかったと思われるのに反し、スラッシュマツ林を調査した1968年は比較的雨量も多く、A₀ 層の分解は促進されたとも考えられる。しかし、またテーダマツに比べてスラッシュマツの落葉が容易に分解される性質をもっていることであろう。A₀ 層量(乾重)を当年葉乾重(当年葉を正確に区別できないので、スラッシュマツの葉が2年分着生していたと仮定して、着葉量の1/2量)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を Table 6 に示した。Table 6 から明らかなようにスラッシュマツの落葉、落枝はほぼ1年前後で分解されることになり、天然性アカマツ林の4~5年¹⁶⁾、隣接のテーダマツ林の2~3年に比べて著しく速い。このことは前述したように、たまたま調査した年の気候条件に大きく影響された面も無視できないが、アカマツ、テーダマツなどに比べてスラッシュマツの落葉の分解がきわめて容易であるのも確かであろう。このように落葉の分解が速く、分解率が高いことは、本試験地のようなせき悪な土壤環境に対する造林樹種として、養分要素の循環上からきわめて有利であると思われる。

3) 試験地土壌の一般的特徴

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⁾。しかし本試験地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いる。本調査地

Table 7 Soil profile in experimental stand.

Horizon	Depth	Color ※	Texture	Structure	Hardness	Definition
A ₀	4~0 ^{cm}	2.5YR 4/4	—	—	—	Distinct
A	0~8	10YR 5/4	Sandy loam	Single-grain	Slightly hard	Distinct
B	8~25	10YR 6/6	Sandy loam	Clod	Hard	Indistinct
C	25~35	7.5YR 7/4	Silty clay loam	Clod	Hard	Indistinct

※ by Standard soil color chart of Japanese Agriculture, Foresters & Fishers Research Council (1965)

Table 8. Physical properties of soil. (100cc Volume)

Stand density (Fertilized)	Depth	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.		
							Soil <2mm	Gravel >2mm	Root
Low	0~5 cm	87.45	64.65%	52.55%	12.10%	32.30%	84.38 g	2.38 g	0.70 g
	5~20	102.07	61.02	41.93	19.09	27.68	98.22	3.60	0.25
	20~35	118.20	55.48	36.30	19.18	28.55	106.23	11.90	0.08
Middle	0~5	70.34	70.02	64.66	5.36	51.66	65.06	3.90	1.38
	5~20	98.23	62.61	51.78	10.83	25.03	80.08	17.93	0.23
	20~35	86.03	67.54	38.97	28.57	21.72	63.08	22.83	0.13
High	0~5	74.91	69.38	74.60	-5.22	54.10	72.01	2.13	0.78
	5~20	119.18	54.93	43.82	11.11	33.32	105.38	13.70	0.10
	20~35	130.82	50.96	38.18	12.78	29.93	97.69	33.10	0.03
High (Non)	0~5	100.17	60.57	47.83	12.74	33.58	95.60	3.80	0.78
	5~20	101.92	60.69	49.33	11.36	31.33	97.20	4.23	0.45
	20~35	141.72	46.68	39.55	7.13	32.80	116.15	25.45	0.10

点は昨年度報告したテーダマツ林¹⁾と隣接し、土壤の諸性質はこれとほぼ同じであるが、土壤層の厚さは35cm程度であって、テーダマツ林よりもさらに薄かった。これらの外観的な観察結果は Table 7 に示したが、要するにA層は薄く、土壤の構造は全層にわたってきわめて不良で、かつ堅密であり、未熟なせき悪土壤であるといえよう。

4) 土壤の理学的性質

各林分の土壤の理学的性質は「民有林野土壤調査方法」¹⁸⁾により測定し、その結果を Table 8 に示した。これから明らかのように、容積重はいずれも表層 0~5 cm で70~100 前後、下層では 100~140 程度を示し、非常に重いことを示している。また孔隙量も50~70%位であって、全般に孔隙の少ない密な土壤である。また保水力(最大含水量)は小さく、最小容気量も著しく小さい。以上のことからこの林地は土壤層全体にわたって通気性ならびに透水性が不良なため、林木の根の活動にはきわめて好ましくない土壤環境であるといえよう。

つぎに、林分の成立状態にともなう土壤の理学的性質の経年変化について考察すると、無施肥区(まだ胸高に達していないものも多く、林分として成林していない)の表層 0~5cm では容積重が100程度を示しているのに対し、施肥区はいずれも70~80前後に下っているのが認められる。これは明らかに施肥区の林分の落葉、落枝が分解、腐植化して土壤の理学的性質を改善せしめたのであろう。一方、土壤断面の外観的な観察においても施肥区の表層 0~5cm では丸状の腐植の侵入が明らかに認められ、土色、土壤の構造ともに改善されつつあることが認められた。しかし 5cm 以下の下層では施肥区においても無施肥区とほとんど差は認められず、植付け後8年間位では、まだこの層にまでは影響するにいたら

かったのであろう。いずれにしる施肥によって林分の閉鎖を速めることは、土壤の物理的性質の改善に役立つと思われる。

5) 土壤の化学的性質

前述の方法にしたがって採取した土壤は、風乾後、斜面上部と下部の2カ所が均等になるよう混合して篩別（直径 2 mm）し、その細土について化学的性質を調べた。なお、分析方法は次のようである。

P・H：ガラス電極 P・H メーター

置換酸度：カップン法

全チッソ：ケルダール改良法

全タンソ：チューリン簡易滴定法

リンサン：モリブデンブルー還元法
(光電比色計使用)

カリ：炎光分析法

カルシューム、マグネシューム：
EDTA 滴定法

以上の分析結果はすべて絶乾物あたりに換算して Table 9 に示した。

これらの結果より本試験地土壤の一般的な化学的性質をみると、酸性はきわめて強く、タンソ、チッソはもとより、その他の養分要素の含有率も非常に少ないせき悪な土壤であるといえる。しかし林地の生産力はかならずしも養分要素の含有率の多少だけで判断できるものでなく、容積重の異なる土壤を比較するには一定面積、一定の深さ中に含まれる養分の現存量の多少を考慮する必要があることは勿論である。さらにこれら養分要素の森林生態系内における循環のしくみを解析してこそ、その林地林木の生産力を理解できるといえるであろう。なお、林分の成立にともなう土壤の化学的性質の変化をみると、施肥区の表層では無施肥区に比べて、タンソ、チッソ、その他可給態養分の含有率がやや増加する傾向も認められるが、その差は僅かであった。したがって化学的性質では理学的性質で

Table 9. Chemical properties of soil. (% on oven dry basis except P・H and exchange acidity)

Stand density (Fertilized)	Depth cm	P・H		Exchange acidity (%)	C	N	C/N	0.2N-HCl soluble			Exchangeable			Hot-HCl soluble																													
		H ₂ O (1:2) Suspension	1N-KCl (1:2) Suspension					P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %																								
		Low	0~5	4.95	3.95	12.9	1.750	0.126	13.89	0.0057	0.0124	0.0247	0.0183	0.0529	0.1058	0.289	0.064	5~20	5.05	4.05	14.5	0.872	0.075	0.0036	0.0099	0.0070	0.0152	0.0385	0.1217	0.122	0.064	20~35	5.30	3.85	17.1	0.558	0.046	0.0025	0.0097	0.0081	0.0183	0.0426	0.1380
Middle	0~5	4.45	3.45	21.5	2.733	0.169	16.17	0.0061	0.0170	0.0248	0.0317	0.1290	0.1433	0.293	0.065	5~20	4.60	3.85	20.2	0.813	0.075	0.0033	0.0126	0.0096	0.0183	0.0528	0.1503	0.126	0.064	20~35	5.10	3.90	18.7	0.802	0.059	0.0031	0.0104	0.0091	0.0183	0.0700	0.1259	0.116	0.069
High	0~5	5.20	3.95	10.8	1.341	0.126	10.64	0.0051	0.0124	0.0140	0.0152	0.0325	0.0813	0.258	0.060	5~20	5.30	4.15	9.7	0.732	0.073	0.0031	0.0102	0.0060	0.0100	0.0328	0.0732	0.104	0.064	20~35	4.60	3.95	12.1	0.468	0.042	0.0025	0.0070	0.0046	0.0163	0.0485	0.1017	0.170	0.074
High (Non)	0~5	4.85	3.90	18.1	1.527	0.101	15.12	0.0041	0.0128	0.0143	0.0163	0.0621	0.0937	0.231	0.055	5~20	5.20	3.90	16.6	0.774	0.061	0.0033	0.0079	0.0112	0.0153	0.0530	0.0855	0.136	0.055	20~35	5.40	4.00	15.0	0.588	0.046	0.0022	0.0079	0.0111	0.0101	0.0547	0.0892	0.122	0.060

認められたほど改善のあととはみられないようである。また熱塩酸可溶成分（全養分）の含有率では林分の成立にともなう影響を認めることはできなかった。

7. 生態系内における養分要素の循環

1) 地上部各部の養分要素含有率

主林木たるスラッシュマツは幹、生枝、枯枝、葉の4部分に分け、地床植生は少ないので幹、葉を一緒にし、また A₀ 層は落葉、落枝、粗腐植、腐植等が均等に混合するようにして試料を採取した。なお、これらの試料は林分の諸量の測定時に同時に採取し、一部は含水量の測定用とし、他の大部分は風乾後粉碎して分析用の試料とした。分析方法はチッソはケルダール法によったが、リンサンとカリは湿式灰化、カルシウムとマグネシウムは乾式灰化した後に珪酸その他の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行なった。

リンサン：モリブデンブルー還元法（光電比色計使用）。カリ：炎光分析法。カルシウム、マグネシウム：EDTA 滴定法。

なお、分析結果はすべて絶乾率に換算して Table 10 に示した。これらの結果より施肥した林分と、無施肥の林分を比べると、特に葉において著しい特徴が認められる。すなわちチッソ、リンサン、カ

Table 10. Concentration of nutritive elements in stems, branches, needles of Slash pine, ground flora and A₀ layer. (% on oven dry basis)

Stand density (Fertilized)	Sample	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Ash
Low	Stem	0.137%	0.035%	0.066%	0.176%	0.073%	0.695%
	Living branch	0.222	0.067	0.132	0.446	0.112	1.308
	Dead branch	0.113	0.020	0.024	0.557	0.164	1.308
	Needle	0.773	0.146	0.316	0.437	0.231	2.291
	Ground flora	0.824	0.115	0.245	0.746	0.407	5.780
	A ₀ layer	0.777	0.104	0.092	0.583	0.509	17.671
Middle	Stem	0.089	0.035	0.082	0.181	0.065	0.557
	Living branch	0.215	0.081	0.169	0.416	0.114	1.297
	Dead branch	0.130	0.025	0.039	0.488	0.176	1.398
	Needle	0.856	0.151	0.315	0.392	0.330	2.460
	Ground flora	0.773	0.092	0.237	0.685	0.351	3.530
	A ₀ layer	0.679	0.090	0.106	0.691	0.395	7.260
High	Stem	0.090	0.027	0.076	0.193	0.085	0.610
	Living branch	0.201	0.044	0.157	0.350	0.136	1.112
	Dead branch	0.089	0.017	0.026	0.451	0.069	1.161
	Needle	0.750	0.154	0.340	0.540	0.303	2.394
	Ground flora	0.964	0.208	0.376	0.626	0.317	3.510
	A ₀ layer	0.552	0.072	0.106	0.524	0.362	8.047
High (Non)	Stem	0.137	0.039	0.061	0.261	0.120	0.835
	Living branch	0.202	0.040	0.116	0.569	0.168	1.438
	Dead branch	0.148	0.025	0.032	0.543	0.079	1.317
	Needle	0.644	0.095	0.249	0.445	0.299	2.062
	Ground flora	1.047	0.071	0.338	1.022	0.368	4.021
	A ₀ layer	0.680	0.044	0.140	0.797	0.424	8.897

りの3成分の含有率は明らかに施肥区において増加したが、この増加率は特にリンサンとカリにおいて著しい。これに対してカルシウム、マグネシウムは前記3成分ほど差が明らかでないがむしろ減少の傾向もみられた。一方、非同化器官である幹や枝では大きな差異は認められなかったが、カルシウム、マグネシウムだけは施肥区の方が葉でみられた傾向とは反対に減少していた。このような傾向は隣接のテーダマツ林でも認められたが、肥料として施用したチッソ、リンサン、カリの3成分と、他の2成分はその吸収、移動、蓄積の機構が異なっているように思われる。いずれにしても物質循環上よりみて、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、チッソ、リンサン、カリの含有率の高い落葉によってこれらの成分の還元量がさらに増加する点も重要な意味をもつであろう。

なお、葉の養分含有率を隣接したテーダマツの値と比較すると、チッソとリンサンではテーダマツの方が高く、その他の成分ではスラッシュマツの方が高かった。

2) 生態系内の養分現存量とその配分

主林木中の養分現存量は Table 2 に示された幹、生枝、枯枝、葉の ha あたり乾物量に、地床植生および A₀ 層中の養分現存量はそれぞれ Table 5, Table 6 の ha あたり乾物量にそれぞれの養分含有率を乗じて算出した。土壤層中の養分現存量は、試験区内の斜面上部と下部の2カ所の測定結果を平均した深さ別 ha あたりの細土量 (Table 11) に、Table 9 の養分含有率を乗じてもとめた。なお、この土壤養分現存量のうち、チッソは全チッソ成分であるが、リンサン、カリは 0.2 規定塩酸可溶成分、カルシウム、マグネシウムは置換態であって、一応可給態養分としてとり扱った。これらの計算結果をとりまとめて Table 12 に示した。

以上の結果よりスラッシュマツ林分の地上部養分現存量の多少を40~60年生アカマツ林で調査された結果と比べると、すべての養分要素において、幹、枝中の蓄積量はまだ8生育期しか経っていない幼令林のために少なかったが、葉中現存量では施肥した林分において40年生アカマツ林にほぼ匹敵していた。また土壤層中現存量は一般的に少なく、本試験地がせき悪なことはここからもわかるが、葉中の現存量がかなり豊富なことからみて、物質循環が順調に行なわれればある程度養分の不足を補なっていけるものと思われた。また、以上の結果より各林分の養分現存量と施肥量との関係、また生態系内におけるその配分と植付け密度との関係などにおいても興味ある事実がみいだされたので、これを検討してみよう。

(1) 養分現存量と施肥量との関係——全生態系内現存量を各林分の間で比較すると、無施肥区より施肥区のチッソ、リンサン、カリの現存量は明らかに増加しているのが認められた。しかも、この増加量は特にリンサンとカリにおいて、施肥量ときわめて高い関連を示すことが認められた。すなわち植付け当年と翌年の2回に施用された要素量(当初の計画では植付け密度と逆比例させて1本あたりの施肥量を算定し、施用要素量が各林分とも同一となるよう設計されたが、実際の植付け密度が計画

Table 11. Amount of fine soil (<2mm) in tons per hectare.

Stand density (Fertilized)	Depth cm	Fine soil (<2mm) ton/ha
Low	0~5	464
	5~20	1,579
	20~35	1,539
	Total	3,582
Middle	0~5	337
	5~20	1,178
	20~35	1,154
	Total	2,669
High	0~5	414
	5~20	1,629
	20~35	1,552
	Total	3,595
High (Non)	0~5	462
	5~20	1,563
	20~35	1,712
	Total	3,737

Table 12. Amount of nutritive elements in each ecosystem in Kg per hectare. (Soil layer was calculated by available forms except for Nitrogen)

Nutritive element	N			P ₂ O ₅			K ₂ O			CaO			MgO			
	Low	Middle	High	Low	Middle	High	Low	Middle	High	Low	Middle	High	Low	Middle	High	
Stand density (Fertilized)																
Parts in ecosystem																
Stem	46	36	65	5	12	14	19	1	22	33	55	2	59	73	139	10
Living branch	15	15	19	1	5	6	4	0.1	9	12	15	0.4	31	29	33	2
Dead branch	1	2	6	0.2	0.2	0.3	1	0.03	0.3	0.4	2	0.04	7	6	28	1
Foliage	81	104	132	12	15	18	27	2	33	38	60	5	46	48	95	9
Ground flora	70	90	25	154	10	11	5	10	21	27	10	50	63	79	16	150
Total	213	247	247	172	42	49	56	13	85	110	142	57	206	235	311	172
A ₀ layer	35	48	65	22	5	6	8	1	6	7	12	4	26	48	61	26
Soil layer	585	569	521	466	26	21	21	19	58	57	51	59	115	84	58	66
	1,184	883	1,189	953	57	39	50	52	156	148	166	123	111	113	98	175
	708	681	652	788	38	36	39	38	149	120	109	135	125	105	71	190
Total	2,477	2,133	2,362	2,207	121	96	110	109	363	325	326	317	351	302	227	431
Sum total	2,725	2,428	2,674	2,401	168	151	174	123	454	442	480	378	583	585	599	629
	724	678	660	567												

通りいかなかったので ha あたり施用量に多少の差異が生じている。)は Table 13 にあげた通りであるが、この施用量とまずチッソの生態系内現存量との関連をみると、地上部と A₀ 層を合せた現存量ではほぼ施用量だけ増加している。しかし土壌中の現存量を含めると、明らかな傾向を示さなくなった。

すなわち全生態系内におけるその増分は実際の施用量よりも多く、疎林分で3倍弱、密林分では2倍余も多くなっているのに対し、中林分では施肥量の1/4位しか増加していない。このようにチッソの生態系内の配分、動きがそれほど明確でなかった原因として、ここで分析測定した土壌層中の成分が可給態でなく、全チッソ成分であったためとか、土壌層中の絶対量が多く施肥量の20倍以上にも達するために、このような測定法では施肥による影響を適確にとらえることができないことなどが考えられる。またチッソは物質循環上、半開放型の成分であって、土壌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径路の外に、大気中に起原をもつチッソ成分が、土壌中の微生物によって固定される量も加わるため、施肥量との関連づけはさらに難しいように思われた。なお、このような傾向は隣接のテーダマツ林においても同様に認められた。

つぎにリンサンの生態系内現存量と施肥量の関係をみると、この両者にかなり密接な関連が

あることが認められる。すなわち 75~104 kg/ha のリンサンを施用した3つの林分では、無施肥の林分に比べて全生態系内現存量として疎—45, 中—28, 密—51 kg/ha 増加している。この調査では根系中の現存量が測定されていないので、他の測定例からして地上部現存量の20%を根中の現存量と仮定すると、それぞれさらに8~11 kg/ha 増加するはずである。したがって疎な林分においては施用した要素量の約5割

が、中な林分ではその4割が、密な林分ではその8割が現在でも有効に物質循環に加わっていることになる。同様にカリについてみると、70~96 kg/ha の施用によってそれぞれ疎—76, 中—64, 密—102 kg/ha の増分をみた。これをリンサンの場合と同様に根系中の現存量を20%とみてその増分を算出すると、さらに17~28 kg/ha 増えるはずである。したがって疎な林分では施用要素量の約10割が、中な林分では約9割が、密な林分では実に10割以上が生態系内の循環に加わっていることになる。

このようにリンサンとカリでは土壌層中の可給態養分の現存量を含めて検討すると施肥量との関連がかなり適確にわかるだけでなく、施肥した要素の生態系内における動きが量的にも把握できよう。なお、これらの2成分はいずれも物質循環上閉鎖型に属しており、人為的に肥料として施用した量以外に外部からのとりこみが大量にあるとは考えられない。

しかし以上にあげた肥料のとりこみの比率はかなり大きく、特に密な林分においてカリが施肥量を上まわった原因は現在の所わからない。しかし森林が閉鎖し、生態系内に安定した循環径路ができることによって、土壌中の不可給態養分の可給態化を促進させるような、ある種の機能が進行していくことも充分想像できる。

(2) 生態系内における養分現存量の配分と立木密度の関係—これらの関係をみるために施肥した3林分について、各要素ごとに地上部(主林木と地床植生), A₀層, 土壌層の3部分の現存量と、これらの合計量である全生態系内現存量について林分密度との関係を Fig. 9~Fig. 13 に示した。これらの図から種々興味のある事実がみいだされる。すなわち、この試験では前にも述べたように施肥した3林分では1本あたりの施肥量を加減することによって、面積あたりの施用要素量を3林分ともほぼ一定になるように計画し実施されている。したがって常識的には植付け後8年間位では生態系内の現存量が3つの林分の間で大きく変動するとは思われない。特にチッソ以外の閉鎖型の要素では施肥以外に外部からのとりこみがほとんどない以上、なおのことこのことが強く言えるであろう。したがって生態系内における養分要素の吸収, 移動, 蓄積, 還元などの様相が立木密度によって異なることは容易に想像できるがこれらの点について検討してみよう。

まずチッソについてみると、地上部と A₀層の現存量で

Table 13. Amount of applied elements as fertilizer in Kg per hectare.

Stand density (Fertilized)	(Kg/ha)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Low	120	104	96
Middle	120	104	96
High	87	75	70
High (Non)	0	0	0

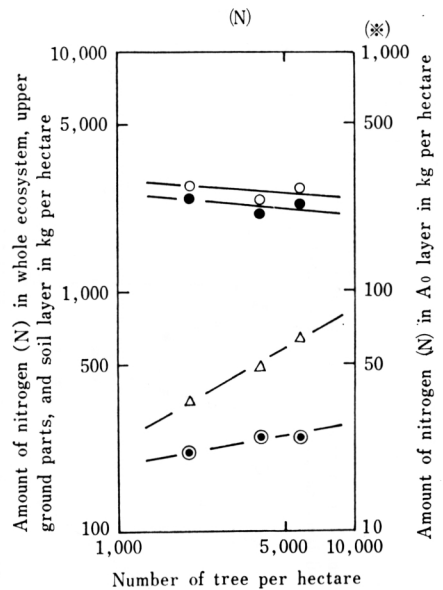


Fig. 9 Relations between amount of nitrogen in the ecosystem and stand density.

—○—: Amount in whole ecosystem
—●—: Amount in soil layer (0~35cm depth)
—●—: Amount in upper ground parts (Stem, branches, foliage and ground flora)

(*) —△—: Amount in A₀ layer

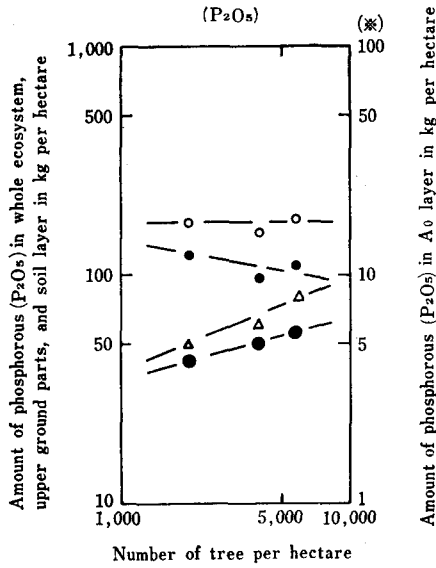


Fig. 10 Relations between amount of phosphorous in the ecosystem and stand density. See the explanation for Fig. 9.

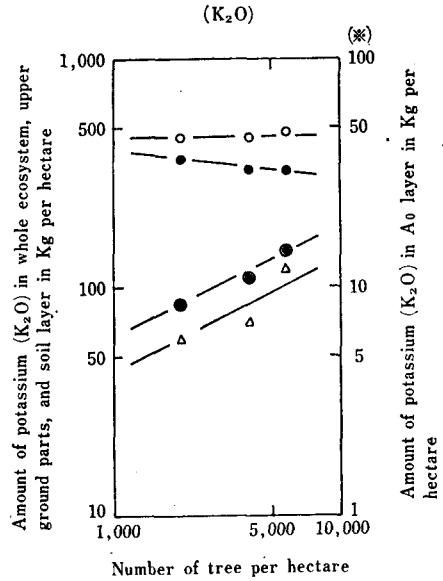


Fig. 11. Relations between amount of potassium in the ecosystem and stand density. See the explanation for Fig. 9.

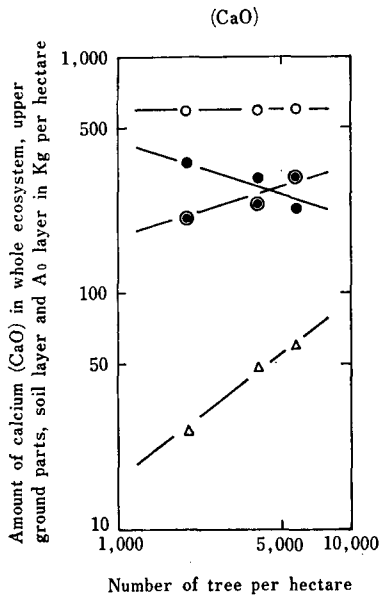


Fig. 12. Relations between amount of calcium in the ecosystem and stand density. See the explanation for Fig. 9.

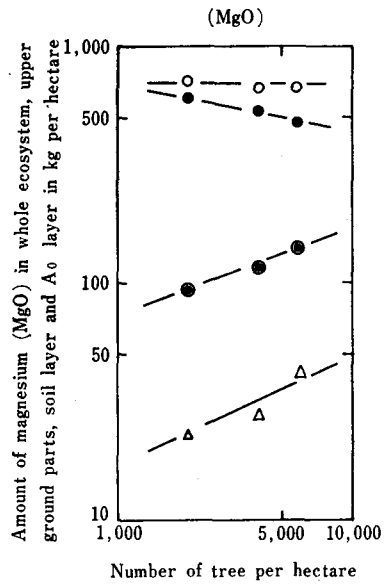


Fig. 13. Relations between amount of magnesium in the ecosystem and stand density. See the explanation for Fig. 9.

は立木密度が高くなるほどチッソの現存量も増加する傾向がみられる。これは Table 2 でのべた林分の諸量の増大に比例して地上部への吸収量が増大していることを示している。これに反し土壤層中の現存量は減少の傾向がみられるが、これはむしろそれぞれの施肥量に比べて、土壤中の絶対量が多く、3林分間の土壤層中の現存量のバラツキが大きすぎると理解した方がよいようである。したがって土壤層中の60程度の地上部養分現存量を合せた全生態系内現存量は、土壤層中のバラツキに影響されて、先に論じたような一定の傾向を示さない。これは前述したように測定したチッソ成分が可給態でないこと、半開放型の要素であることなどが原因しているのであろう。

これに対して閉鎖型に属するリンサンとカリではかなり明らかな傾向が認められる。すなわち地上部現存量、 A_0 層現存量では立木密度が高くなるにしたがって増加することはチッソと同様であるが、これとはほぼ同じ量だけ土壤層中現存量は減少の傾向を示している。これは林分の増大につれて地下部からの吸い上げ量の増加分だけ土壤層中の現存量は減少し、密な林分になるほどこれが強く表われるものと理解された。したがってこれを全部合せた全生態系内現存量では3林分ともにほぼ一定の値を保ち、吸い上げ量と土壤中の残存量とは相関連した動きをしているようである。

一方施肥しなかったカルシウムとマグネシウムについても同様な調査を行なったが、リンサン、カリと同じく地上部現存量、 A_0 層現存量では明らかに立木密度が大になるにしたがって増加するのに対し、土壤層ではこれとはほぼ反比例して減少する。このために全生態系内現存量でも同様に3林分にわたってほぼ一定の値を保っていることが明らかに認められた。しかもこの2成分は肥料として外部からの持ちこみがなかったため、密な林分になるほど土壤層からの吸い上げ量の影響が強く表われ、リンサンとカリでみられたよりもこの傾向が明確に認められた。

以上の点より、チッソ以外の閉鎖型に属する要素ではかなり正確に生態系内の動きをとらえることができたといえよう。なお、昨年度調査したテグマツ¹⁾林では林分の密度の増加にともなって施肥量も増加するよう計画されていたので、肥料として施用されたチッソ、リンサン、カリの3要素では明らかに林分密度が大になるほど生態系内現存量も増加を示した。しかし施肥を行なわなかったカルシウム、マグネシウムの2要素では今年度の調査と全く同様な結果を示した。これらの点より考えて、少なくとも植付け密度を多くし、早くうっ閉させた林分ほど養分要素の循環の効率は高くなり、このことが生産力の増大に役立っているといえる。また同時に当初の施肥がきわめて有効に働いたことをこれらの事実が示しており、なおかつ、8生育期をすぎた現在でも順調に物質循環に加わっていることは農作物の場合と異なり、森林の最も大きい特徴の一つといえよう。なお、チッソ、リンサン、カリの施用によって、施肥していないカルシウム、マグネシウムまでが生態系における循環の速度を速め、生産力の増大につながっていることは注目される。

(3) 土壤層中の全養分(熱塩酸可溶成分)の現存量

以上においてみられた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るが、全要素量(熱塩酸可溶成分)として分析し、算出した結果は Table 14 に示した。この結果より土壤層中には可給態養分量に比べて全養分量ではリンサン、カリ、カルシウムではほぼ10倍程度、マグネシウムでは4~5倍程度も存在することを意味する。これらの結果からは各林分の差異について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にはこれらが徐々に可給態化され、物質循環に加わっていくものと思われる。

Table 14. Amount of total nutrients (Hot-HCl soluble) in soil layer to 35cm depth in Kg per hectare. (Kg/ha)

Stand density (Fertilized)	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Low	1,509	4,534	4,961	2,293
Middle	1,863	3,705	3,809	1,769
High	1,421	3,106	5,399	2,439
High (Non)	2,052	3,295	5,280	2,140

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ゐることは論をまたない。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 A_0 層量で除した比を平均分解率とし、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。現在年間の落葉落枝量の正確な調査ができていないので、仮に調査を行なった時の着葉量を2年分とし、その半分が毎年林地へかえさ

れるものとして、この平均分解率を計算してみた。その結果を Table 15 に示す。この結果からするとすべての養分とも平均分解率は非常に高く、分解が速いことを示している。この逆数が分解に要する年数であるが、チッソ、リンサンではいずれも1年以内の短期間で、カリでは半年以内で、カルシウム、マグネシウム

では1~2年で分解され、物質循環に加わっていくことになる。これは一般のアカマツ林と比べても非常に速く、また昨年度調査した隣接のテーダマツ林よりもさらに速かった。この傾向は第6章でのべた A_0 層そのものの分解率でも同様の結果であり、ここでものべたようにこの年の気候条件に影響された面も無視できないが、やはりスラッシュマツの落葉は非常に速く分解される性質をもっているといえよう。このことが土壤中の養分不足を補っているように思われた。

4) 土壤中の養分の消費の早さ

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、循環に加わっていくが、幹に吸収保持された養分はそのまま林分中にとどまり林地へかえされることはない。したがってこの分に相当するだけの量が毎年地下部から減少していくはずである。

半開放型に属しているチッソについては大気中に起原をもつ成分が土壤中にある程度加わっていくため、必ずしも幹に蓄積された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のではほぼ正確にこの分だけは土壤中より減少していくはずである。この量を調べるために最近1年間に幹に吸収された量を算出して Table 16 に示した。なお、この算出方法は林分量の調査の際採取した試料木について樹幹解析を行なって、最近1年間の幹の生長量が施肥した林分ではそれぞれ疎—6.36 ton/ha、中—8.79 ton/ha、密—10.11 ton/ha と算出されたので、これにそれぞれの養分含有率を乗じて算出した。この表より ha あたりチッソは8~9 kg、リンサン2~3 kg、カリ4~8 kg、カルシウム11~19 kg、マグネシウム5~9 kg が最近1年間に幹に蓄積されていったことになる。この分だけ地下部から減少したと思われるが、この関係をみるために地下部 (A_0 層と土壤層) に含まれるそれぞれの可給態養分量を最近1年間に幹に蓄積された量で除した値を Table 17 に示した。これは今後この年間吸収量で各養分が幹に蓄積していった場合、現在の土壤中の可給態養分現存量が今後何年間で吸収消費されるかということを示している。この表によるとチッソは200年以上、リンサンではほぼ30~60年分、カリでは

Table. 15 Average decomposition rate of nutritive elements in the fertilized plots.

(Amount of nutrients in one-years foliage / Amount of nutrients in A_0 layer×100)

Stand density	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Low	116 %	150 %	275 %	88 %	52 %
Middle	108	150	271	50	71
High	102	169	250	78	63

Table 16. Amounts of nutritive elements in current annual uptake in stem in the fertilized plots. (Kg/ha)

Stand density	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Low	8.71	2.23	4.20	11.19	4.64
Middle	7.82	3.08	7.21	15.91	5.71
High	9.10	2.73	7.68	19.51	8.59

40~90年分, カルシュームでは僅か15~30年分, マグネシュームでは60~140年の養分量を保持していることになって, リンサン, カリ, カルシュームではあまり余裕がないように思われる。勿論長年月の間には可給態の成分に比べて10倍程度の現存量をもつ不可給態養分(熱塩酸可溶成分)が徐々に可給化されるので

この年数よりも余裕のあることは確かであるが, 現在のような大きな生長量を続けていくためには, 将来リンサン, カリ, カルシュームなどが不足をきたす可能性も考えられる。これらの点については今後も調査を続けていきたい。なお, 隣接のテーダマツ林での調査結果に比べれば, スラッシュマツ林では各養分とも余裕を残しているのは確かであり, この点スラッシュマツは養分的にみて経済的な樹種といえるかも知れない。

Table 17. Amounts of available nutrients in A₀ layer and soil compared with amounts of current annual uptake in stem.
(Amount in A₀ layer and soil to 35cm depth / Amount of current annual uptake in stem)

Stand density	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Low	288	57	88	34	136
Middle	279	33	46	22	98
High	267	43	44	15	61

あ と が き

南紀海岸地帯のようなせき悪林地で林業生産を行なうことはきわめて困難であるとされてきたが, 以上論議したいろいろな結果から考えると, 立木密度を高め, また植付けの初期に適当な施肥を行なうことによって, スラッシュマツやテーダマツのような外国産マツならば, 比較的早期に閉鎖した林分を作りあげることができよう。もともと土壤中に林木の生長に必要な養分要素が少ない場合は, 生態系内の物質循環を早めれば生長を持続できるはずであるが, 成林し閉鎖するのに必要な養分量や, 幹に吸収され蓄積されることによって起る土壤中からの消費量(減少量)は, その育林目的から推考して適当量を肥料として補給しなければならないであろう。この研究は林分量と施肥量を変量として, 物質生産のからくりを解き明すとともに, 上述の目的に理論的基礎を与えようとしたものであるが, 変量数が少なく, 試験の規模も小さいので, なお多くの問題を残している。これらの点については今後なお試験調査をつみ重ねていく必要がある。

文 献

- 1) 赤井龍男・古野東洲・上田晋之助・佐野宗一: テーダマツ幼令林の物質生産機構, 京大演報, **40**, 26~49 (1968)
- 2) 安藤 貴・竹内郁雄: 密度の異なるスラッシュマツ林の生長解析, 日林関西支講, **18**, 314~316 (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) 四大学林学教室: 物質循環面よりみた森林生態系の生産力, 資料 $\#$.1, 316~373 (1963)
- 5) 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)
- 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) 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)
- 10) 大隅清示: アメリカ合衆国におけるスラッシュマツの研究, 徳島県林業指導所(1964)
- 11) 蜂屋欣二・土井恭次・小林玲爾: アカマツ林の林分成長の解析——岩手地方社令人工林の一例, 林試研報,

- 176, 75~88 (1965)
- 12) 只木良也・蜂屋欣二：森林生態系とその物質生産，林業科学技術振興所 (1968)
 - 13) 佐藤ほか共著：造林学，朝倉書店 (1965)
 - 14) 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)
 - 15) 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)
 - 16) 四手井綱英：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：民有林野土壤調査方法 (1954)
 - 19) 松下 進：日本地方地質誌，近畿地方，205~213 (1966)
 - 20) 上田晋之助・渡辺政俊：スラッシュマツの造林木に対する肥培の効果について (1) 特に肥料の施用時期と，方法のちがいによる生長量の差について，日林講，第78回，6~7 (1967)

Résumé

The subject of the studies is to account for the important mechanisms in matter production in an 8-year-old Slash pine (*Pinus elliottii*) stand planted in the Shirahama Experimental Station of Kyoto University Forest (Wakayama Pref.). This stand was planted in three densities and these three were fertilized in various amounts. Emphasis on the biomass of the upper ground parts, productivity of stem, production structure, soil conditions and the circulation of nutrients within the ecosystem are discussed in this paper.

In the forest stands, after planting, ammonium phosphate-urea complex fertilizer containing nitrogen (15%), phosphorous (13%) and potassium (12%) were applied to plots of the three densities each year for two years in dosage of 100, 50 and 25 grams per tree. Also applications of 200, 100 and 50 grams were made in inverse density proportions. And three unfertilized plots were also observed. The amounts of elements applied per hectare for two years are shown in Table 13. Measurements taken in October, 1968, of stand density, mean diameter breast height (DBH), mean height and basal area of sample plots are shown in Table 1.

The biomass of the upper ground parts per stand was estimated by the method of allometric relation. Sample trees of various sizes were cut down at the base, and the stem, branches and needles of each tree were separately weighed using the stratified clip technique. The fresh weight data were converted into oven-dry weights, and the volume of stem was measured by stem analysis. The allometric relations of the stem volume (V cm³), the stem dry weight (w_s kg), branch dry weight (w_B kg) and needle dry weight (w_L kg) to D^2H (D cm : DBH, H cm : tree height) in the high density plots closely correlated to with the linear relation shown in the logarithm (Fig. 1). These regression formulas were found to be :

$$\begin{aligned}\log V &= 0.9038 \log (D^2H) + 0.1332 \\ \log w_s &= 0.9200 \log (D^2H) - 3.3819 \\ \log w_B &= 1.2610 \log (D^2H) - 5.9440 \\ \log w_L &= 1.0351 \log (D^2H) - 4.5584\end{aligned}$$

In the high density plot with double quantity fertilizer applications, the stem volume per hectare was estimated at about 196m³, and the dry weight of stems at about 72 tons, branches at about 9 tons and foliage at about 18 tons respectively (Table 2). These biomasses except for the branches tended to be larger in value than those of Loblolly pines and pine forests of other genres as reported by many workers. As a result of seasonal changes of the foliage biomass and leaf-fall amounts in a forest, the amount of foliage measured before the defoliation of needles of the previous year was presumed to be the largest of all seasons.

The current annual increment of stem volume in the same plot was estimated at about 28m³/ha

(Table 3) and its production seemed to be remarkably larger than pine forests of other genuses, but its increment was smaller by about 20% than a Loblolly pine forest planted contiguous to the Slash pine stand.

The vertical distribution of oven-dry weight of stems, branches and foliage differed in various closed plots as shown by a production structure diagram (Fig. 7). As regards the vertical distribution of high density plots it seemed that the Slash pine forest was the herbytype whose foliage appeared mainly in the upper strata of the crown. The average light intensity under the crown in a closed plot showed about 5% of full daylight, with the average including sun-flecks (Table 4). And the correlation between the height of the lowest living branch and the relative light intensity seemed to be high.

The oven-dry weight of the A_0 layer (consisting of litter, raw humus and humus) in the fertilized plots was estimated at 4.5-11.7 ton/ha (Table 6), and these accumulated amounts increased in proportion to the density plot. The average decomposition rate of the A_0 layer was estimated at 80-120%, it was presumed that the litter took about a year to decompose.

The forest stand of the Experimental Station consisted of extremely sterile soil, compact (Table 8) and lacking in nitrogen, phosphorous and potassium (Tables 9 and 12). It was observed that as the forest grows and thus becomes denser the physical soil properties were improved in the surface layer (0-5cm).

The concentrations of nitrogen, phosphorous and potassium in the needles in the fertilized plots were higher than in the non-fertilized (Table 10). The amounts of phosphorous and potassium in the forest ecosystem in the upper ground parts (ground flora included) and those available in the soil to 35cm depth (A_0 layer included) increased as the amounts of fertilized applied increased (Table 12). But in the soil, available phosphorous and potassium or exchangeable calcium and magnesium which belong to a closed system, from the point of view of nutrient circulation, decreased in proportion to the amount taken up in the upper ground parts.

The average decomposition rates of nitrogen, phosphorous and potassium in the Slash pine stand were higher than those in Loblolly pine stands and many others (Table 15). Because part of the nutrients accumulate annually in the stem, the amounts of phosphorous and potassium in the soil remain at 30-40 times the annual uptake in the high density plots, and calcium at only 15 times (Table 17). Judging from the circulation of nutrients, it seems that these quantities were not sufficient for the continuation of present growth.