

生育の悪い海岸砂丘クロマツ林の施肥による改善とその生産生態学的研究

Causal Analyses of Poor Growth Observed at the Inner Part
of the Pine Plantations on Coastal Sand Dune

蒲谷 肇*

Hajime KABAYA*

目	次
まえがき	12
第1章 千葉県富津海岸砂丘クロマツ林における環境解析と施肥実験	
a. 調査地の概要	14
b. 化学分析の方法	14
c. 生育不良林の環境解析	16
d. 施肥実験と施肥当年の結果	19
e. 施肥2年目の結果	24
f. 針葉量の測定	25
g. マメ科植物にとっての栄養条件	26
h. 富津海岸砂丘クロマツ林の生長阻害要因	27
第2章 茨城県村松海岸砂丘クロマツ林における環境解析と施肥実験	
a. 調査地の概要	29
b. 化学分析の方法	29
c. 生育不良林の環境解析	31
d. 施肥実験	35
e. 生長阻害要因	38
第3章 静岡県新居海岸砂丘クロマツ林における施肥の効果	
a. 調査地の概要	39
b. 化学分析の方法	40
c. 現存量, 生産量の測定法	40
d. 施肥試験区とリター除去区の設定	41
e. 施肥によるクロマツ針葉の重量および養分濃度の変化	41
f. 施肥によるリター量およびそれに含まれる養分量の変化	43
g. 施肥, リター除去による樹高, 材積の変化	46
h. 施肥, リター除去による生産量の変化	49
i. 施肥したクロマツ針葉の光合成量	54
第4章 クロマツ林の針葉量, 針葉中の養分量と純生産量	
a. 富津海岸クロマツ林の現存量, 純生産量, 光合成量	56
b. 田無市のクロマツ林の現存量, 純生産量	56
c. 清澄(千葉県天津小湊町)のクロマツ天然生林の現存量, 純生産量	58
d. 針葉量と針葉の生産能率	59
e. 生産物の分配	62
f. 針葉中の養分濃度および養分量と地上部純生産量	63
第5章 クロマツ海岸林における養分の循環	
a. 方法	64
b. リター中の養分量	64
c. 林内雨, 林外雨中の養分量	64
d. 樹冠からの溶脱量	68
e. 幹, 根への固定量	70
f. ハマエンドウによるN固定量	71

*東京大学農学部演習林本部

Administration Office of the University Forests, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

g. 林地の養分の収支……………71	引用文献……………75
要 旨……………73	Summary……………78

ま え が き

わが国では海岸砂防林の造林樹種としてクロマツが最も多くつかわれている。全国で約2万haある海岸砂丘地はすでにおおかたが植林され、¹¹⁾今後は林の撫育や管理が重要な段階となっている。砂丘の前線部で飛砂のため頂端部が損傷を受けて生長を阻害されているのは、飛砂防備林としての機能の結果であるからやむをえないが、飛砂や塩風の影響の少ないやや内陸に後退した場所でも生育不良地がかなりの箇所が存在する。そこでは防風効果を高めるために生育が改善されなければならない。鳥取砂丘、^{10,53,54)}神奈川県湘南海岸、^{24,27)}静岡県新居海岸、²⁵⁾千葉県富津海岸²¹⁾においてそのような例が報告されている。鳥取砂丘において、原ほか(1954)はN施肥によって樹高生長が改善された結果を報告しているが、栄養条件以上に根系の発達の種類や土壌(砂土)の水分条件に注目し、小笠原ほか(1975)は、その生育不良の原因は明らかでないと述べている。茅ヶ崎海岸、²⁴⁾富津海岸⁴⁸⁾では水分条件に生育不良の原因を求められている。門田(1962)は主に生理学的実験と環境測定によってNaClによる塩害説を主張している。しかし水分不足や塩害をその原因とする説は環境(風速、蒸発量、土壌水分量、砂中のNa量)測定や室内実験を根拠に主張されただけで、林分レベルでの実験、仮説の検証がなされていない。もし水分不足や塩害が原因であるとするならば、水分不足期の夏に灌水を行い、あるいは海から運ばれる量に相当するNaを砂に散布して、生長がいかに変化するか、針葉中の水分、栄養分がいかに変化するかという実験を行うことが必要であろう。

著者は千葉県富津海岸、茨城県東海村村松海岸、静岡県浜名郡新居浜海岸でクロマツ人工造林地内の生育不良地で環境解析、施肥、樹体各部および落葉、落枝などの重量測定・栄養分の化学分析を行い、生産生態学的手法で上記の課題に林分レベルで取り組んだ。

国際生物事業計画(I B P)のわが国での展開は森林を対象としての生産生態学、生態系生態学研究によるデータの蓄積を世界の他の部分のものを合わせたものより多くさせたといわれている⁶²⁾が林地肥培との関連でなされた研究はほとんど見られない。林地肥培の研究の多くは肥料工業界から要請された林学者がまず効果がある肥培例を見出し、さらに施肥を行えばどの程度生長が改善されるかということにとらわれていたためにI B Pのなかにとり入れられることが少なかったと思われる。林地肥培の研究は施肥したアカマツ林の葉量を調べた塘(1962)、施肥したスギ林・ヒノキ林の葉量を調べた原田(1970)、肥培林における落葉による養分の還元量を調べた研究(佐藤ほか1972、佐々木1972)を除くと、ほとんどはせいぜい単木単位の葉、枝、

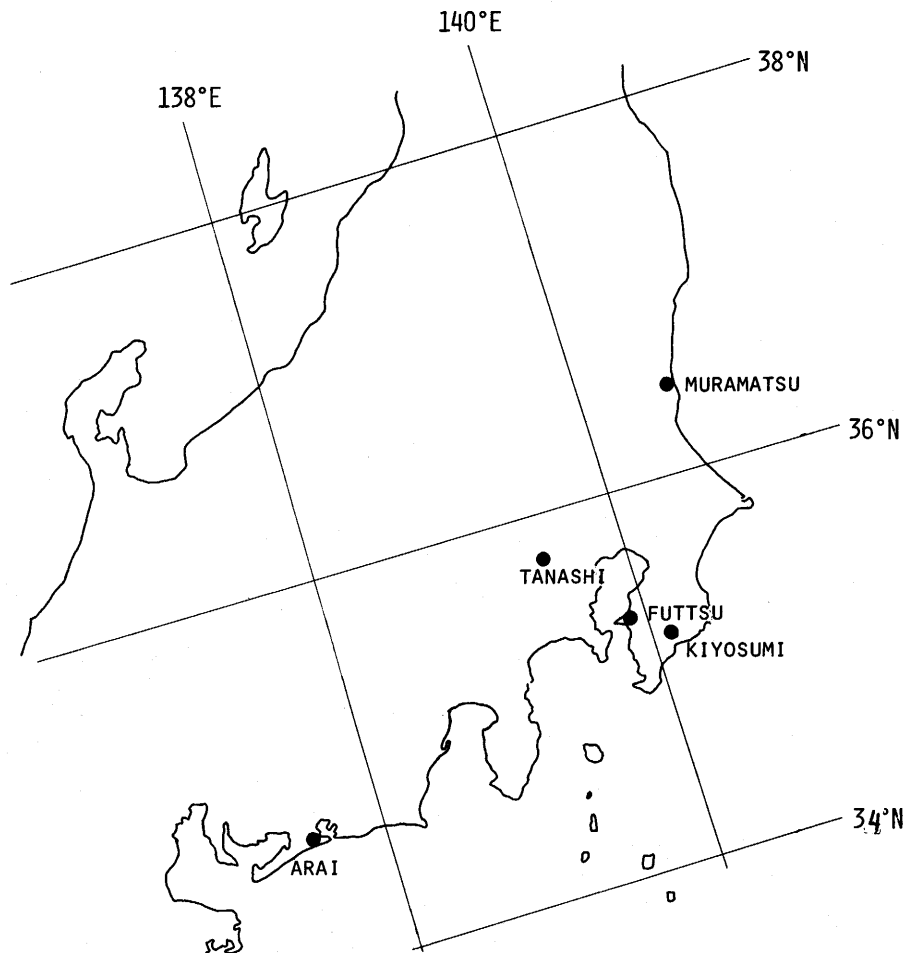


図-1 調査地の位置

Fig-1. Map of the study sites.

幹の養分濃度の変化^{2,28,31,33,63})に着目しているにすぎなかったり、幼齢林を対象としたものである。¹⁷⁾この点は外国における研究についても同様で、K、Nの施肥が葉の生産量に及ぼす影響に着目しているMADGWICK et al.(1970), HEILMAN & GESSEL (1963)を除くとほとんどみられない。

保安林の改良は木材生産による収益がたとえ全くないとしてもその最低限の目的が達せられることから、とくに収支にとらわれない。この点において保安林における肥培技術の確立はとりわけ現実性をもっている。本研究は海岸砂丘地の生育の悪いクロマツ林の生長障害要因を明らかにするとともに、施肥が林分レベルでどのようなメカニズムを通じて効果をもたらすかを明らかにすることを目的とした。またそれは同時に、海岸砂地のような極度に貧栄養で肥培の効果の出やすい所での肥効のあらわれるメカニズムの研究は、一般の森林における施肥の効果

のメカニズムを解析するためのよい手がかりとなるはずであると考える。

この研究を行うにあたり、多くの方々の援助を頂いた。ここに記して深く感謝する次第である。終始研究を指導していただいた東京大学農学部佐藤大七郎名誉教授、同根岸賢一郎助教授、富津および新居での研究の機会を与えていただいた千葉大学理学部沼田真教授、同生嶋功助教授、東京大学演習林扇田正二名誉教授、化学分析や実験の方法について教えて下さった同遠藤健治郎講師、同茅野充男助教授、元林業試験場土壌調査部新名謹之助氏、同植村誠次氏、現地での仕事や化学分析に協力していただいた林業試験場森川靖技官、同桜井尚武技官、野生生物研究センター山瀬一裕氏ほか元東京大学農学部造林学教室の大学院学生、研究生の方々、千葉県林務課八木佐雄氏、東京大学千葉演習林糟谷重夫技官、愛知演習林および田無試験地の職員の方々。とりわけ新居での調査には愛知演習林向井竹雄氏、富津・村松の調査には東百合子氏に多くの時間をさいて協力頂いた。

第1章 千葉県富津海岸砂丘クロマツ林における 環境解析と施肥実験

a. 調査地の概要

富津海岸は千葉県富津市の最西部にあり、東京湾に突き出た富津岬に連なる広大な砂丘地である(図-2)。海岸の北側部は遠浅のおだやかな東京湾に面するが、浦賀水道に面する南側部は外洋性の海岸で強風時には飛砂もはげしい。一帯は明治末年以後敗戦の1945年まで要塞地帯であって、軍の演習場として人工の加わることが比較的少なく、海岸線に近いところは一面の白砂地帯であり、自然の海岸植物群落が発達していた⁵⁾。

後方の明治時代以前からの高齢林も戦後に荒されたため、千葉県林務課は前方部に砂防林造成計画をたて、1948年からクロマツを主とする植林を始めた。1961年ごろには全域の植栽がほぼ完了した⁶⁾。

クロマツの生育の状態は図-3に示すように汀線に近い人工堤防から100mの範囲はどこの海岸でもみられるように塩風、飛砂の障害にあつて上長生長が妨げられ、ハイマツ状となっているが、内陸側に向うに従つて生長が次第によくなっている。しかしその後方の汀線から200~300mにあつて、塩風、飛砂の害を強く受けない場所であるにもかかわらず、針葉が黄色でかつ針葉長が短く生育がきわめて悪い箇所が汀線に平行して帯状に、戦後の造林面積の約1/2の規模で存在している。それらの林齢は調査時点の1966年で約18年生であった。

b. 化学分析の方法

この生育の悪い林帯の生育不良の原因を明らかにするために針葉、砂の化学分析を行った。

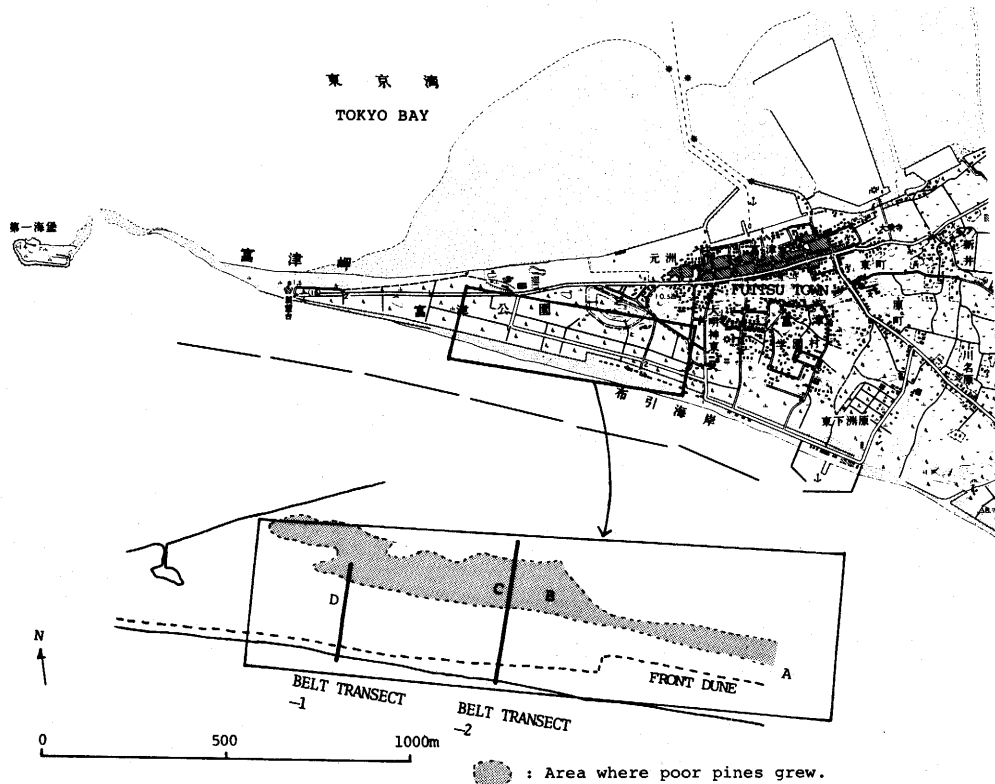


図-2 富津海岸砂丘クロマツ林の位置と調査地点

Fig-2. Location of the plots studied and poor plantation of pine at Futtsu, Chiba Prefecture.

針葉は60~70℃の熱風乾燥機で乾燥し、鉄分の混入をさけるためポットミルで粉碎し分析試料とした。P, K, Ca, Mg, Feの分析のために分析試料1.0~1.5gを HNO_3 20cc, HClO_4 0.5~1ccとともに100ccのケルダールフラスコで湿式灰化した。Pはヴァナドモリブドリン酸の比色法²⁰⁾, Kは蛍光分析法, CaとMgはNN指示薬, TPC指示薬を用いたEDTA滴定法⁴⁹⁾, Feはオーフェナンスロリンを用いた比色(分光光度計)法で測定した。Nの分析は分析試料0.1~0.2g(砂土は1~2g)を用い酸化触媒にSe, HgOを用いたマイクロケルダール法によった。クロロフィルは採集後1~2日以内に生葉1gをアセトン・エーテルで抽出し分光光度計を使った比色法⁷⁾により測定した。分析値は85℃(砂土は105℃)の乾燥重あたりとし、分析誤差は2%以内にとどめるよう複数の分析を行った。土壌(砂)のpHは採土したまま乾燥せずに水:砂=1:1にしてガラス電極のpHメーターで測定した。

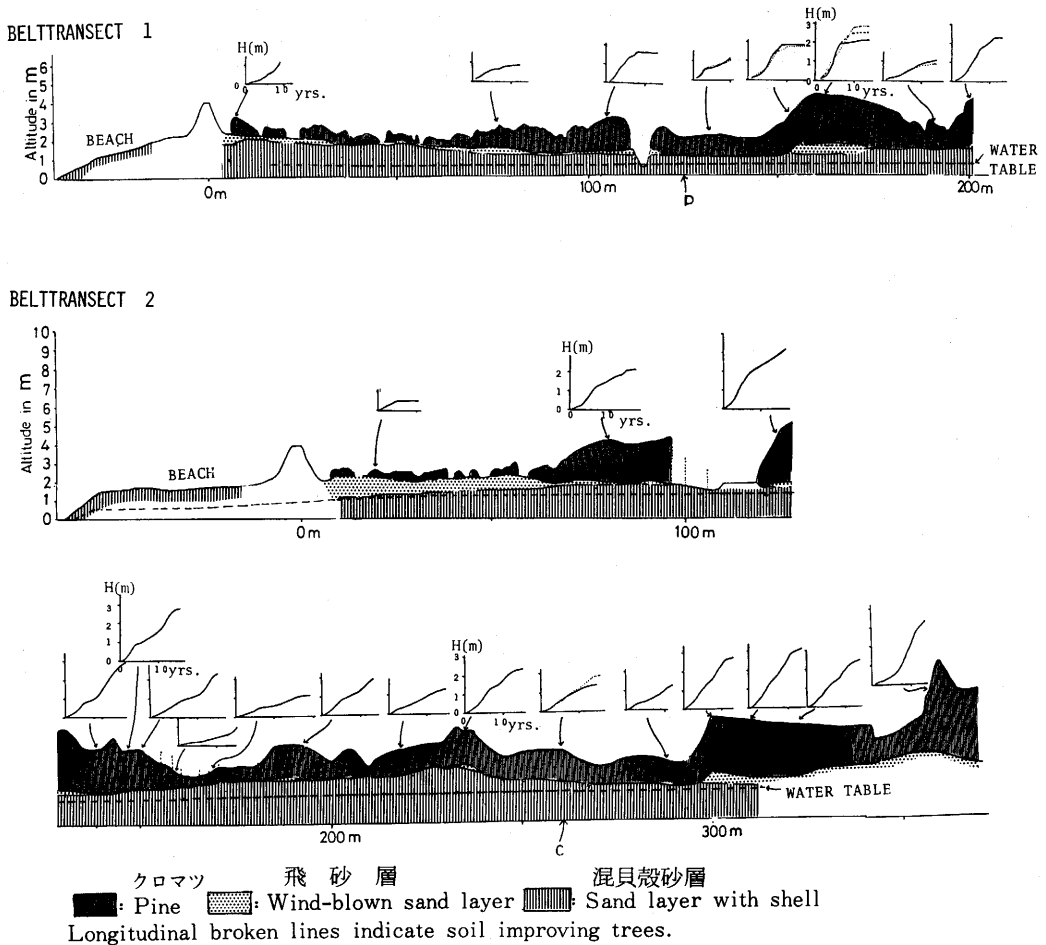


図-3 富津海岸のベルトランセクトの縦断面図

Fig-3. Longitudinal section of the belttransect 1 and 2 shown in Fig. 2 at Futtsu.

Curves at upper part at each sketch indicate the courses of height growth of pine trees at different plots by the arrow.

c. 生育不良林の環境解析

富津海岸の生育の悪い林帯は植林直後から生長が悪く（図-3の150～300mにあるクロマツの樹高生長曲線参照）、落葉かきも行えないほどの樹高が1～2mのところが多い（図-4）。そこで生育の悪い原因は落葉かきなどによる人為の影響ではなく、環境立地によるものと考えた。図-2に示した位置に汀線から内側にベルトランセクトを2本とり、地形・クロマツの樹高生長経過（節間長を測定）・1966年7月18日の地下水位・肥料木（イタチハギ・ハンノキ）の樹高・砂の堆積状態を記載した。

ベルトランセクトー1では人工堤防からの距離120～150mおよび180～200mの場所で、ベ



図-4 富津海岸の生育の悪い17年生の林分

Fig-4. A poorly growing 17-year-old pine stand at Futtsu.

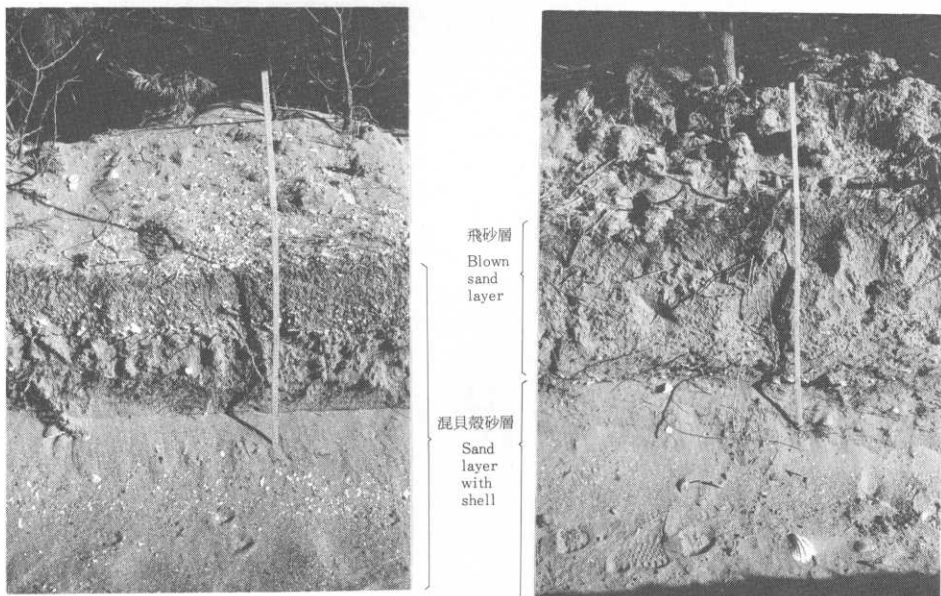


図-5 生育の悪い林(左),と良い林(右)の土壤断面

Fig-5. Soil profile of a poorly (left) and a well growing pine stand (right).

ルトトランセクトー2では150m~300mの場所で生育が悪い。それぞれに共通していることは、地表面に混貝殻砂層が露出して(図-5左),pHが8~9を示すことである。かつその場所は海からの飛砂,塩風に直接さらされていなく,地下水位は生育のよい場所と同一レベルにあった。図-2のC, D地点の地下水位の年間の変動は図-6に示したように比較的水位は高く,海拔高の低いD地点では年間を通じて変動が少ないようであった。また生育の良い所は混貝殻砂層が露出せ

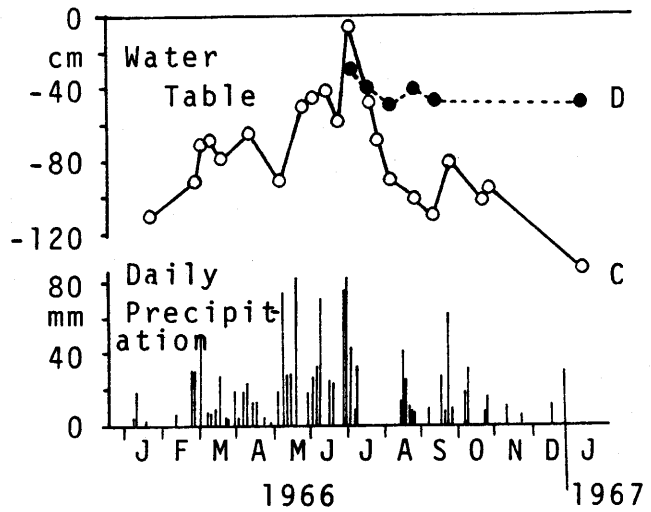


図-6 C, D地点(図-2)の地下水位の変動と降水量
Fig-6. Variation of water table at plot C and D shown in Fig. 2 and precipitation at Futtsu.

ず粒子の細かくそろった飛砂が風積したところで, pHは6~7を示した(図-5右)。

以上のことから生長阻害要因は強風や水分条件ではなく, 貝殻層と関係した土壌(砂)中の栄養条件であると考えた。

表-1 富津海岸における生育の良いクロマツと悪いクロマツの当年生葉中の養分濃度

Table-1. Concentration of nutrient elements in current-year needles of pine trees at Futtsu.

Plot	Age of stand (Yr.)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Chlorophyll	Length of needles (cm)	Annual growth of shoot (cm)
A (good stand)	8	12.5**	1.26*	9.4*	3.32	1.58	0.42**	2.30**	9-11	50-60
B (poor stand)	15	5.2	0.94	5.5	3.64	1.37	0.17	0.73	5-6	5-10

*Difference significant at 5% level.
** ————— 1% level.

林木の栄養診断を行うためには、葉の化学分析を行うことが有効であるとされている。そこで1965年11月に生長の最もよい地点（人工堤防裏の図一2のA地点，図一7）と生長の悪い地点（図一2のB地点，図一4）のそれぞれ5個体，3個体の当年生葉を採取し化学分析を行った。分析の結果は表一1に示したようにN，P，K，Fe，クロロフィルの含有率に差が認められた。Fe，クロロフィル含有率に差があり，Caを多く含んだ混貝殻層はpHが高いことから，石灰過多による鉄欠クロロシス⁷¹⁾である可能性が先ず第一に考えられた。またKが欠乏するとFeの吸収がそこなわれることが知られており，^{3,16)} Caが多い土壤ではK/Caのバランスも影響して⁴⁾拮抗作用によってKが欠乏するともいわれている。また針葉の分析結果からNおよびPの欠乏も考えられた。



図一7 富津海岸の人工堤防うらの生育のよい林分（8年生）

Fig-7. A well growing 8-year-old pine stand behind front dune at Futtsu.

d. 施肥実験と施肥当年の結果

Fe欠クロロシス説を優先させたため，図一8に示した配置で図一2のB地点において施肥実験を行った。記号と施肥の内容は以下のようである。

C₁，C₂区：無施肥。

D区：砂丘地の飛砂を10cmの厚さに客土。

S₁区：土壤を酸性化するために硫黄華8kg/aの散布。

S₂区：土壤を酸性化するために硫黄華32kg/aの散布。

NP区：N量1kg/a，P₂O₅量1.2kg/aに相当する硝安および第1燐安の散布。

K₁区：K量1kg/aに相当する塩化加里の散布。

K₂区：K量3kg/aに相当する塩化加里の散布。

K₃区：K量2kg/aに相当する硫酸加里の散布。

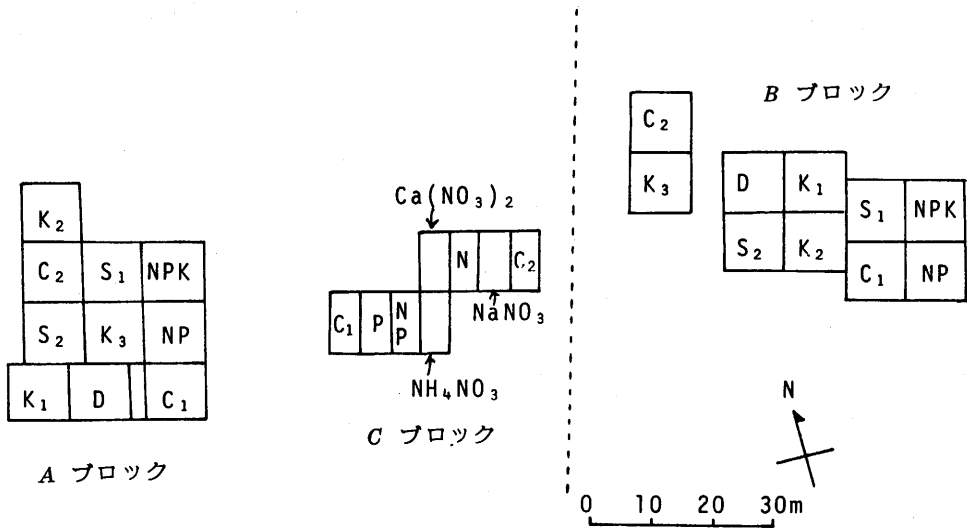


図-8 施肥実験区の配置 (記号は本文中)

Fig-8. Arrangement of plots of the fertilization experiment at Futtsu.
Explanation of marks is seen in the text.

NPK区：N量1 kg/a, P₂O₅量1.2kg/a, K量3 kg/aに相当する硝安, 第1 燐安, 塩化加里の散布。

P区：P₂O₅量1.2kg/aに相当する過燐酸石灰の散布。

N区：N量1 kg/aに相当する硝安の散布。

Ca(NO₃)₂：N量1 kg/aに相当する硝酸石灰の散布。

NaNO₃区：N量1 kg/aに相当する硝酸ソーダの散布。

NH₄NO₃区：N量1 kg/aに相当する硝安の散布。

3つのブロックのうちA, Bブロックの各区の大きさは10×10m²の正方形で, そのうち中心の7×7m²に施肥を行い, 各区の境いは溝を掘り横走根を切断し, 隣接区の影響をさけるようにし, 施肥は1966年3月に行った。CブロックはA, BブロックのNPK区とNP区でのめいりような効果の現われた1966年6月段階で追加的に設定したものであり, 1区の大きさは5×10m²である。

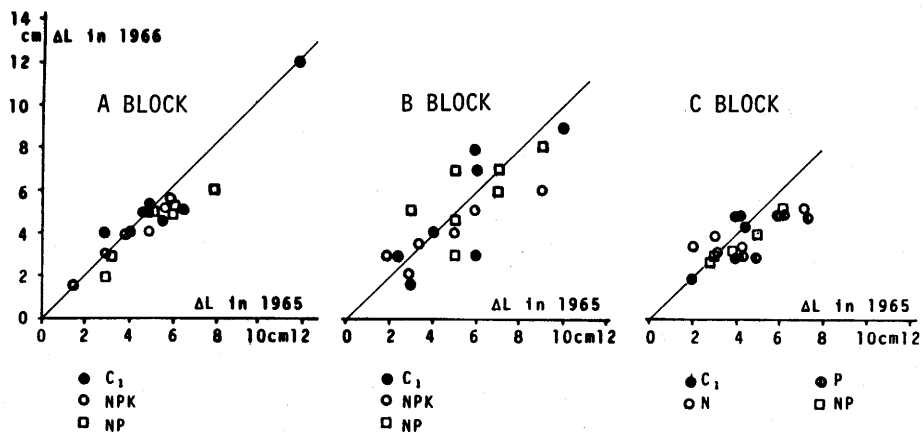


図-9 力枝における施肥当年の当年生枝の節間長とその前年枝の節間長との関係

Fig-9. Relations between the current-year node length and the last year one of the longest branch at the end of the year fertilized.

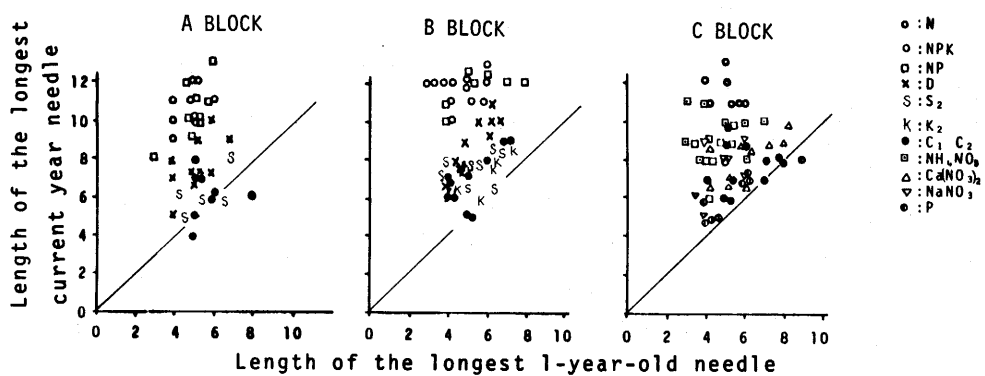


図-10 施肥当年生葉の最長葉と前年葉との針葉長の関係

Fig-10. Relations between the maximum length of current-year needles and that of 1-year-old ones in the fall of the year fertilized.

施肥の効果をみるため、1966年10月に各区からランダムに8~12個体を選び力枝の節間長と針葉の長さ⁵⁷⁾を測定した。図-9に示したようにいずれの区においても前年の節間長と施肥当年の節間長はほぼ同じ値を示し、施肥した区による差がみとめられなかった。施肥当年に展開した針葉の最も長いものを、同じ枝の前年枝に付いている針葉の長さを基準として、各区の施肥の効果を調べると図-10のような関係がみられた。NPK区、NP区、N区、 NH_4NO_3 区が針葉長の増大をもたらしたことがわかる。飛砂を客土したD区はいくぶん効果が見られたが対照区と重複しているものもあった。この結果はN分が効果があったことを示している。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 区、 NaNO_3 区が対照区とくらべて差がみとめられなかったのは6月に施肥したため例年がない多雨の梅雨(図-6参照)によって NO_3-N が充分吸収されないまま砂土のために地下に溶脱したためであろう。なお PO_4^{3-} は砂地でもほとんど溶脱しないことが知られている。⁷³⁾

なお施肥実験区の隣接地の数本に3月にFe-EDDHAを木部に注入したり、針葉の展開した6月に葉面散布を行ったが何の変化もみられなかった。

さらに施肥が針葉中の養分濃度にいかなる変化を与えるかを調べるため、AブロックのNPK区、 K_3 区、 C_1 区およびCブロックのN区、 C_1 区、 C_2 区から1966年10月に当年生葉を採取して化学分析を行い結果を表-2に示した。針葉長が長く、クロロフィル含有率が高く葉が緑色となったNPK区、N区は対照区とくらべてNの濃度が高かったがP濃度は低かった。Kおよび

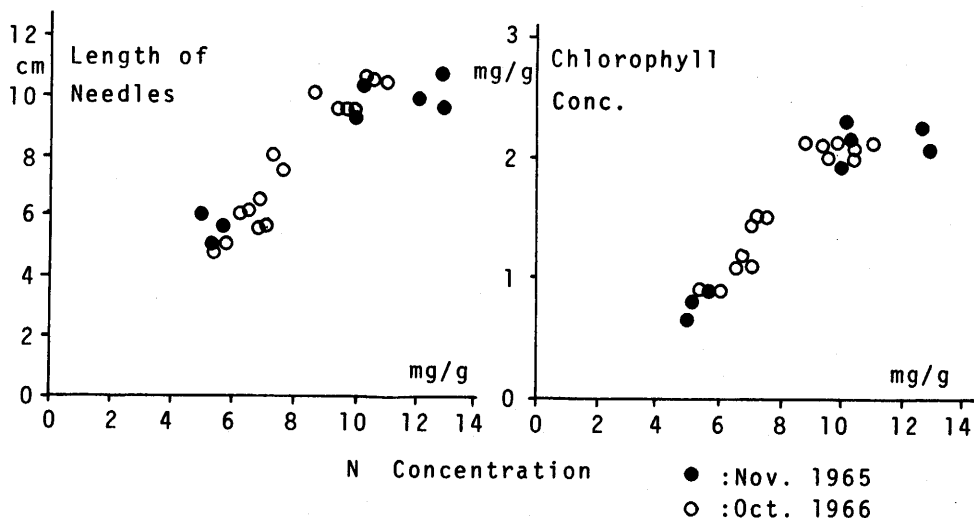


図-11 当年生葉のN濃度と針葉長およびクロロフィル含有率との関係

Fig-11. Nitrogen concentration in current year needles in relation to length and chlorophyll concentration.

表一 2 施肥実験区におけるプロットごとの当年生葉中の養分濃度と針葉長 (1966年10月)

Table—2. Concentration of nutrient elements in current-year needles of pine trees between 4—8 months after fertilization.

Plot	N	P	K	Ca	Fe	Chlorophyll	Length of needles cm
	mg/g						
C BLOCK	10.3	0.72	5.1	3.3	0.12	2.0	9—12
N plot	9.4	0.71	5.0	3.8	0.11	2.0	7—11
	11.0	0.81	5.7	5.3	—	2.1*	9—12
	9.4	0.74	5.8	2.4	0.08	2.1*	7—11
A BLOCK	9.8	1.06	6.3	4.4	0.07	2.1*	7—12
NPK plot	7.1	0.83	5.4	3.5	0.10	1.5	6—10
	8.6	0.95	6.8	3.9	0.12	2.1	8—12
	10.4	0.89	5.5	4.9	—	2.1*	8—12
A BLOCK	6.8	1.03	5.0	3.5	0.11	1.2*	5—8
K ₃ plot	7.5	1.03	6.2	2.9	0.10	1.5	6—9
	7.2	1.14	5.2	3.4	0.11	1.1*	4—7
	5.8	0.94	6.5	3.2	—	0.9	4—6
A BLOCK	5.4	1.23	4.4	3.6	0.11	0.9*	5—7
C ₁ plot	6.1	0.96	4.9	3.6	0.10	0.9	5—7
C BLOCK	7.1	1.17	5.7	4.1	0.12	1.5	4—7
C ₁ plot	6.8	0.98	6.3	2.6	0.09	1.2*	4—7
C BLOCK	6.3	0.97	4.6	4.8	0.11	1.1	4—8

*Rough estimation based on needle color.

平均値の差の多重検定 (5%レベル)

Multiple testing of difference significant at 5 % level.

Plot	N	NPK	K	C
	mg/g			
Nutrient Element	N	9.0	6.8	6.3
	P	0.93	1.04	1.08
	K	6.0	5.7	5.2
	Ca	4.2	3.3	3.8
	Fe	0.10	0.11	0.11

Feの濃度はいずれの区ともそれぞれ5～6mg/g, 0.10～0.11mg/gの範囲にあり, Feの葉面散布が効果なかったことと合わせて考えるとFe欠クロロシス説は採用されないこととなった。

この実験区(表一2)と1965年に栄養診断を行った個体(表一1)から針葉長の平均値およびクロフィル含有率とN含有率との関係を見ると図一11に示されたような高い正の相関関係

がみられた。N含有率が9 mg/g以上になると針葉長およびクロロフィル含有率ともほぼ一定の値を示した。このことは当年生葉のN濃度が0.9%以下ではN欠乏のクロロシスを生じること示している。

e. 施肥2年目の結果

1967年の3月にはAブロックのNPK区、NP区、BブロックのNPK区、NP区、CブロックのN区にはN量—1 kg/aの硫酸を追肥した。

施肥2年目も当年葉の針葉長はNH₄-Nを含んだ区では10~13cm, それ以外は6~10cmで前年とほぼ同様であった。前年には施肥の効果がみられなかった力枝の節間生長量は図-12に示し、Nを含んだN区、NP区、NPK区が年間伸長量を増大させた。

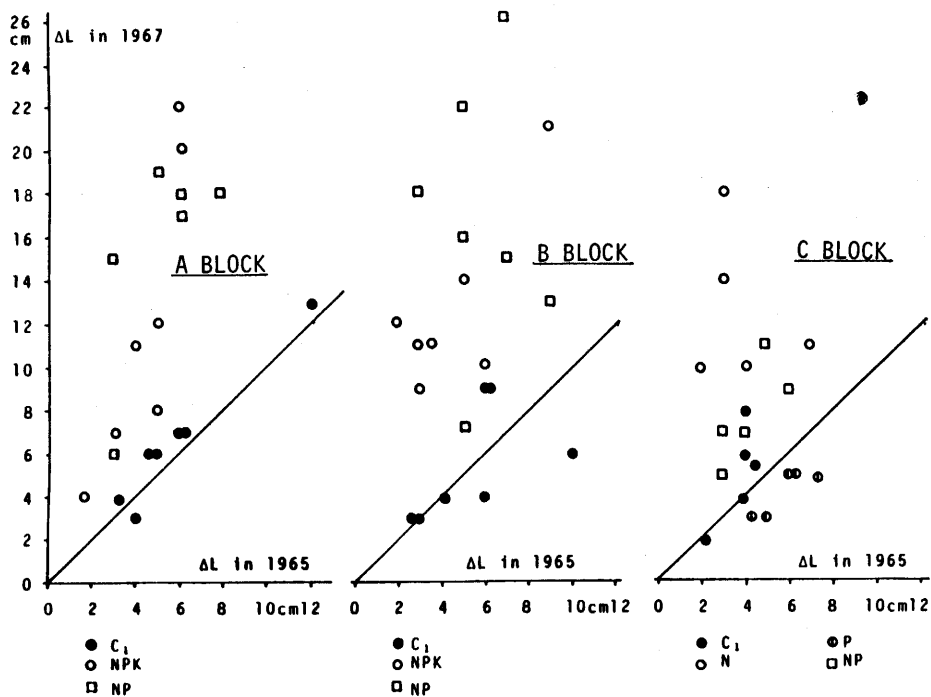


図-12 施肥2年目の力枝当年生枝とその前々年生枝との節間長の関係

Fig-12. Relations between the current-year node length and the 2-year-old node length of the longest branch in the second year after fertilization.



図-13 富津海岸の施肥実験地AブロックのK3区(左)とNPK区(右)
(1968年12月撮影)

Fig-13. Plot K₃ (left) and plot NPK (right) in A BLOCK of fertilization experiment at Futtsu in Dec., 1968.

f. 針葉量の測定

林木の生長は葉部の光合成による剰余生産によることから、葉量を測定することは重要である。林分の破壊の程度を低く抑えて葉量を測るには、枝のつけ根直径とその枝についての葉の相対生長関係を求め、切り落さない枝のつけ根直径の値にあてはめて単木あるいは林分の葉量を推定することができる。²²⁾

1967年10月にA, BブロックのC₁, C₂, NPK, NPの各区から合計28本の枝をおろして、枝のつけ根直径(D)と針葉乾重の関係と各枝のつけ根直径の値から、針葉量はhaあたり以下のように計算された。

	C ₁ 区	NP区	NPK区
Aブロック	2.3t/ha	6.4t/ha	7.1t/ha
Bブロック	2.8t/ha	6.9t/ha	4.5t/ha

以上のようにN施肥区では針葉量が2～3倍に増加した。

g. マメ科植物にとっての栄養条件

クロマツにとってはNが生長阻害要因になっており、Pも施肥実験地の養分分析の結果から不足状態であると推測される。しかし根粒菌と共生したマメ科植物がNの養分欠乏になるはずがないが、現地ではクロマツと同様に生長が悪い（図-3の縦の破線）。

そこでガラス室で生育の悪い林帯（図-2のB地点）の砂土をNeubauerのポットに入れ、地上部重0.3gのイタチハギ（*Amorpha fruticosa* L.）を植えつけ、次のような施肥実験を行った。

+K：砂600gあたり硫酸カリウム400mg。

+P：砂600gあたり過リン酸石灰170mg。

+Fe：Fe-EDDHAとEDTA-Feで30ppmとした。

pH 6：硫酸でpH 6に調整した。

実験は1966年6月9日から1966年8月31日まで行った。対照区（表-3の（none, none））は3回繰り返したが他は1ポットずつである。ポットの水分は脱イオン水で飽和含水率の約60%に保つようにした。

8月31日に刈り取ったイタチハギの地上部乾重を表-3に示した。結果からリン酸加肥がイタチハギの生長を増大させたことがわかる。つまりイタチハギにとってもKやFeの欠乏ではなかった。

また1966年10月に現地の生育のよい林分に自生しているカラスノエンドウ（*Vicia sativa*）の種子を、現地の砂を入れたポリバケツ（15l）4個に播種した。ポリバケツは現地の日当りのよい野外に砂中に埋め込んだ。1967年5月に刈り取りを行い、収量および化学成分の含有率を測定し、表-4に示した。表-4の右欄の砂中の養分濃度は全窒素（ケルダール法）、JACKSON（1958）による3つの形態のPである。江景村（1965）の水稻についての実験によれば土壌が酸性から中性に傾くにしたがってCa-Pが利用されにくくなるといわれる。表-4からクロマツの生育不良林の砂土に育てられたカラスノエンドウはPの濃度および収量がきわめて

表-3 ノイバーワーポットによる施肥実験後のイタチハギの収量

Table-3. Harvest of *Amorpha fruticosa* in Neubauer pot.
(g dry weight per pot)

			pH 6		Fe-EDDHA	
	none	+K	none	+K	none	+K
none	0.79	0.74	0.94	1.35	0.76	0.82
+P	2.43	2.38	1.67	2.55	2.33	2.29

表一４ ポリバケツ中のカラスノエンドウの収量と養分濃度および砂土の養分濃度

Table-4. Harvest and the concentration of nutrient elements of *Vicia sativa* grown in a polyethylene bucket filled with sand of good or poor stand and the concentration of nutrient elements of the sand used.

Sand used	<i>Vicia sativa</i>						Concentration of nutrient in the sand			
	Harvest (g)	N	P	K (mg/g)	Ca	Mg	N	Ca-P	Fe-P (ppm)	Al-P
Good stand	11.8	24.0	0.99	11.7	5.0	2.0	94	71	17	6
	11.3	23.2	1.17	13.5	8.5	2.0	98	65	17	6
Poor stand	3.3	17.0	0.68	11.2	9.8	1.8	40	86	10	3
	1.6	18.0	0.67	10.7	9.4	1.5	40	83	10	5
	—	—	—	—	—	—	—	83	11	3

低い。これは貝殻に含まれるCaと結合した形のPが多いため、Pがカラスノエンドウに利用されにくいためであろう。

h. 富津海岸砂丘クロマツ林の生長阻害要因

d. ~g. 節で述べた結果を要約すると、クロマツに対してはNを含んだ施肥のみが針葉長、葉色の変化（黄→緑）つまりクロロフィル含有量、樹高生長量、針葉量を増加させたが、マメ科植物に対してはPを含んだ施肥が収量を増加させたということである。

原ほかによる研究（1954）においても生育不良のクロマツ林に対するN, NP, NK, NPKの施肥が針葉長、樹高の増大をひき起し、針葉中の水分量は乾燥期において対照区より多いことを明らかにしている。栄養条件がよくなれば根が発達するなどして十分に水分を吸収しうる状態になるのではないかと考えられるから、この生育不良木の水分状態は2次的なものであろう。富津の調査地においても地下水位が同レベルの隣接した場所でも生育に差がみられたことから、三寺ほか（1964）や門田（1962）の主張する水分不足や水分不足に伴って生ずる塩害をクロマツの生長阻害要因とすることは疑問である。野外の環境測定と室内実験だけによって自然を解釈するだけでなく、野外の実験によって仮説を証明する必要がある。

富津海岸のクロマツ林の生育の悪い主要な原因は水分条件でなく栄養条件であり、砂土中のN分の不足に起因するといえる。これは貝殻の多い海浜が陸化（関東大地震時？）してから時間がたっており、貝殻が雨水によって溶け、Caが PO_4^{3-} と強く結合して、マメ科植物にとってのP欠乏が生じ、根粒菌などによる林地へのNの集積が遅れているためと考えられる。さら

に砂浜から100～300 mと離れているため、前線部において砂防造林が進んだ今となっては海からのNを含んだ有機物の供給はほとんど望めない状況にある。

第2章 茨城県村松海岸砂丘クロマツ林における 環境解析と施肥実験

a. 調査地の概要

村松海岸林は茨城県那珂郡東海村村松の海岸砂丘地にあり(図14), 東京大林区署(現在の営林局)と林業試験場が1918年に共同して設置した海岸砂防試験林であった。クロマツの植栽は1925年に始められ, 1939年に終了した⁴⁷⁾植栽当時の試験地の詳細は河田(1940)によって報告されている。20年ほど前までは国有林水戸営林署の管轄であったが, 現在は原子力研究所の管理下にある。

図14に示した前砂丘と2列目の砂丘の带状部(汀線から300mの範囲)においては, クロマツの幹が内陸(風下)に向って傾いた形をしており, 頂端部の針葉は枯れている。そのような外部形態からそこでの生長低下は飛砂, 塩風害によるものと考えられる。

しかしその後方部の汀線から300~1,000m離れた砂丘の裏手にあって, 風速も弱まっている場所においても生育の悪い地帯が大面積に広がっている(1967年当時)。ところどころに針葉が長く緑色で, 年間上長生長が20cm以上を示す林分が混在するが, 多くは植林後30~40年になるにもかかわらず樹高が4m以下で, 針葉が短く黄色の年間上長生長が1~10cmの生育不良林となっている(図15)。

また2列目の砂丘上の一部と内陸部には古くからの林があり, モミ(樹齢120年), アカマツ, クロマツ, スダジイ, カシ類から構成されている。

b. 化学分析の方法

針葉の化学分析の方法は前章と同様である。土壌(砂土)中の置換性塩基の含量は1Nの NH_4OAC で抽出したのち, ウォーターバス上で王水処理し有機物を分解し, Kは蛍光分析, CaとMgはNN指示薬, TPC指示薬を用い



図-15. C地点の林相

Fig-15. A poorly growing pine stand near the point D at Muramatsu.

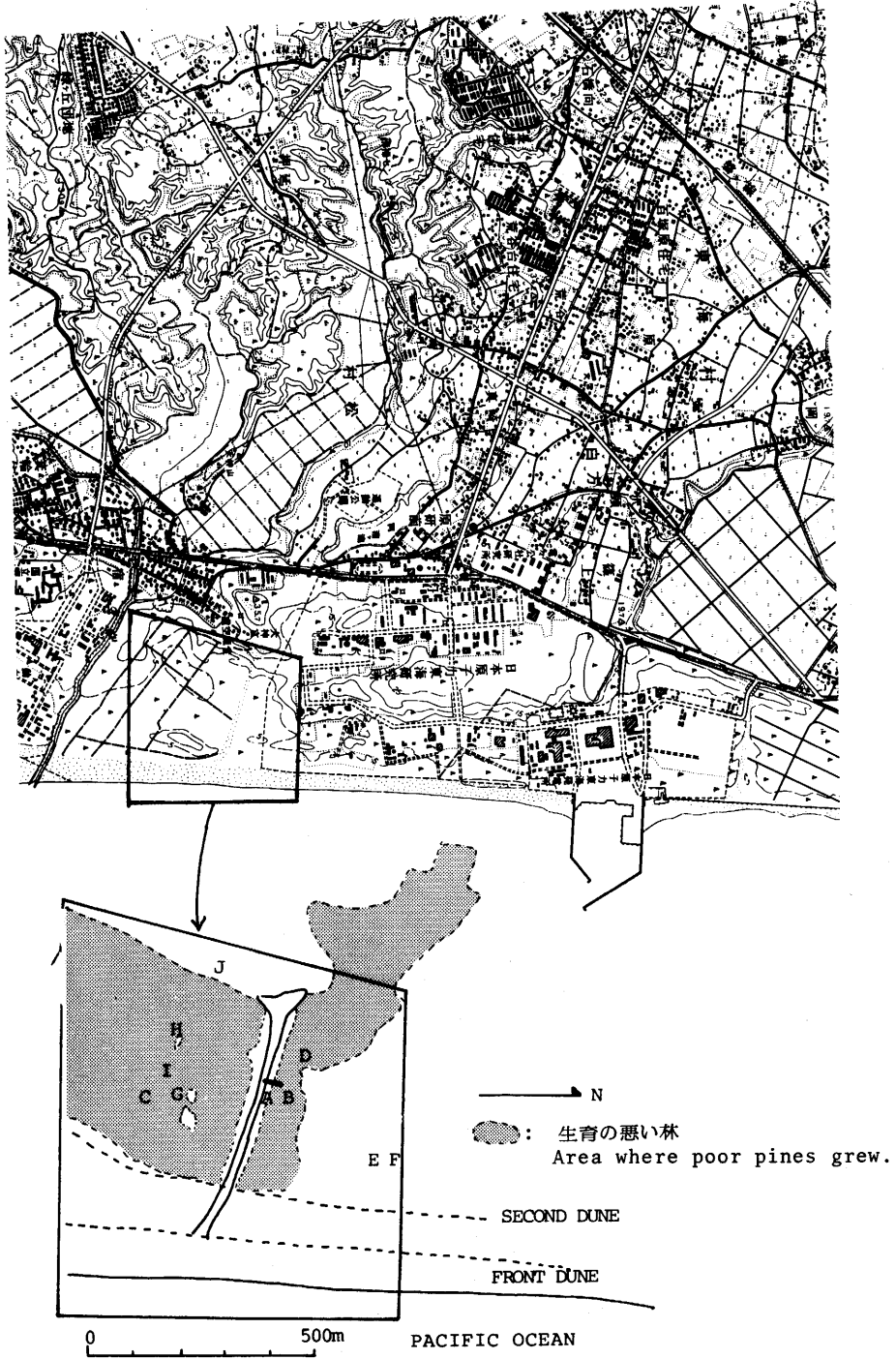


図-14. 村松海岸における調査地点の位置

Fig-14. Location of the plots studied and poor plantation of pine at Muramatsu, Ibaraki Prefecture.

たEDTA 滴定法で定量した。

c. 生育不良林の環境解析

先に述べたように砂丘裏手の汀線から300~500m離れている場所で、生育の悪い林の中に生育のよい林が混在している。そのひとつは晴嵐碑から海岸に通ずる幅約20mの道路の両側と、ニセアカシアが混植している箇所と原子力研究所の敷地に近い林分である。ニセアカシアの混交している所はニセアカシアの刺のために、原研敷地の近くは民家から距離が離れているために落葉採取が控えられていて林床に落葉が残されA層が発達している。しかしそれ以外の所は、調査時点の1966年には落葉かきが行われていて、林床は砂が露出しているところが多かった。

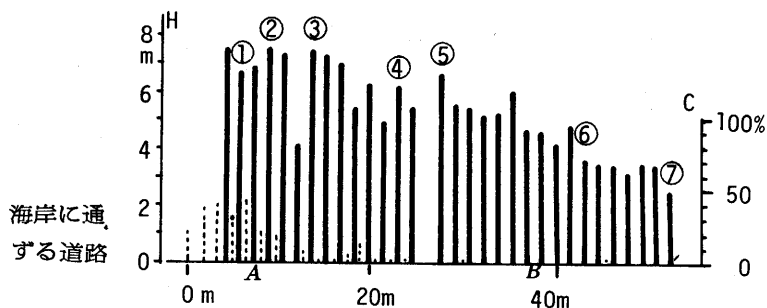


図-16. A, B地点を結ぶベルト上のクロマツの樹高(実線), イタチハギの被度(点線)

Fig-16. Height of pine (solid line) and cover degree of *Amorpha fruticosa* (broken line) on the belt transect A-B shown in Fig. 14.

そこで生育の良い林と悪い林でクロマツの樹高生長経過, 土壌の養分の分析, クロマツ当年針葉の化学分析を行い両者を比較した。

図16は図14のA, B地点で道に直角にとったベルト・トランセクトに出現したクロマツおよびイタチハギの生育状態である。道から離れるに従って樹高および胸高直径の値が小さくなっている。下層に生育しているイタチハギの被度も同様の傾向を示している。そのベルト・トランセクトからクロマツ7本(図16の①~⑦)の樹高生長の経過を節間長の測定から推定し図17に描いた。植栽後数年は大きな差がみられないが、道から離れた⑥, ⑦は1945年ごろから生長の頭うち状態がみられ, ④, ⑤のそれは1955年ごろからである。①, ②, ③はほぼ一貫して生長が良い。それは道側に何らかの望ましい環境条件があることを暗示している。直射光のあた

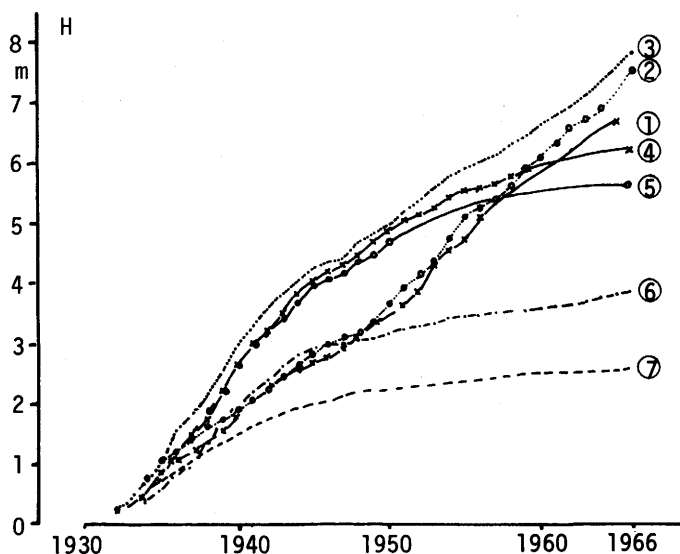


図-17. 図16の番号のつけられたクロマツの樹高生長経過

Fig-17. Courses of high growth of pine trees numbered in Fig. 16.

表-5 A, B 両地点の当年生葉中の養分濃度

Table-5. Concentration of nutrient elements in current-year needles of pine trees growing near the points A and B at Muramatsu. (Jan. 1966)

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Chlorophyll	Length of current-year needle (cm)
	(mg/g)							
A	7.9	0.96	7.2	1.53	1.45	0.09	1.68	8-10
	8.5	1.07	7.3	2.03	1.39	0.12	2.02	8-11
B	4.1	0.72	4.6	2.49	1.00	0.11	0.60	5-8
	5.8	1.06	5.9	2.54	1.08	0.13	0.71	6-7

る道にはイタチハギが繁茂していることから、望ましい環境条件とはイタチハギによって固定されたN分であると考えられる。

AおよびB地点から2個体のクロマツを選び、頂端に近い部位から当年生葉を採取し、化学分析をした結果を表5に示した。N, K, Mg, クロロフィルの含有濃度に大きな差がみられた。また両地点と前砂丘の飛砂の置換性塩基量とpHの値を表6に示した。生育の悪い所の砂土中

表一六. A, B 両地点の置換性塩基と pH

Table—6. Amount of exchangeable base and pH-value of the sand sampled from front dune, near the points A and B, respectively, at Muramatsu.

	Ca	Mg m.e./100g sand	K	pH (H ₂ O)
Front-dune	5.0	0.45	0.11	6.3
A 0—5 cm deep	0.85	0.47	0.10	5.2
20—30			0.05	5.4
B 0—5	0.40	0.17	0.07	5.4
20—30			0.04	5.8

のMg含有量は100g砂土あたり0.17~0.20m.e.であり、いままで知られているMg欠乏土壌の値(0.17~0.25m.e.,⁵⁾0.12~0.22m.e.⁶⁴⁾に近似しているが、第5章で述べるように海岸林では潮風および雨によってNa, Mg, Ca, Kは多量に林内にもたらされるので、砂土が置換容量が低いことも考え合わせると、安易にMg欠乏土壌とはきめられない。

図18は図14に記された生育の悪いC, Dおよび生育の良いE, F, G, Hの地点のクロマツおよび混交しているニセアカシアの樹高生長経過である。C, D地点は1940年以後は樹高が頭うちになっているが、G, H地点はニセアカシアが混交した2~3年のちに生育が回復してきており、E, Fの原子力研究所に近い林床の落葉がとり残されているところは1960年以降に生育が回復してきている。1966年9月におけるA, B, C, E, F, G, I地点およびモミ, クロマツ, スダジイ, 高齢林のJ地点における土壌表層のN現存量と比較してB, C地点のN現存量は明らかに少ない(表7)。

表一七. A₀層と砂土中の窒素の現存量 (kg/ha)

Table—7. Amount of organic nitrogen in each point in Fig. 14. (kg/ha)

	Front-dune K	Poor site		Good site				
		B	C	A	E	F	G	J
L layer	0	0	5	4	9	11	15	11
F layer	0	0	15	0	30	60	85	84
H layer	0	0	0	0	77	126	105	89
A layer (0—5cm)	21	49	49	105				2000
B layer (5—30cm)	120	120	180	170	160	140	230	290
Total	140	170	250	280	280	340	440	2500

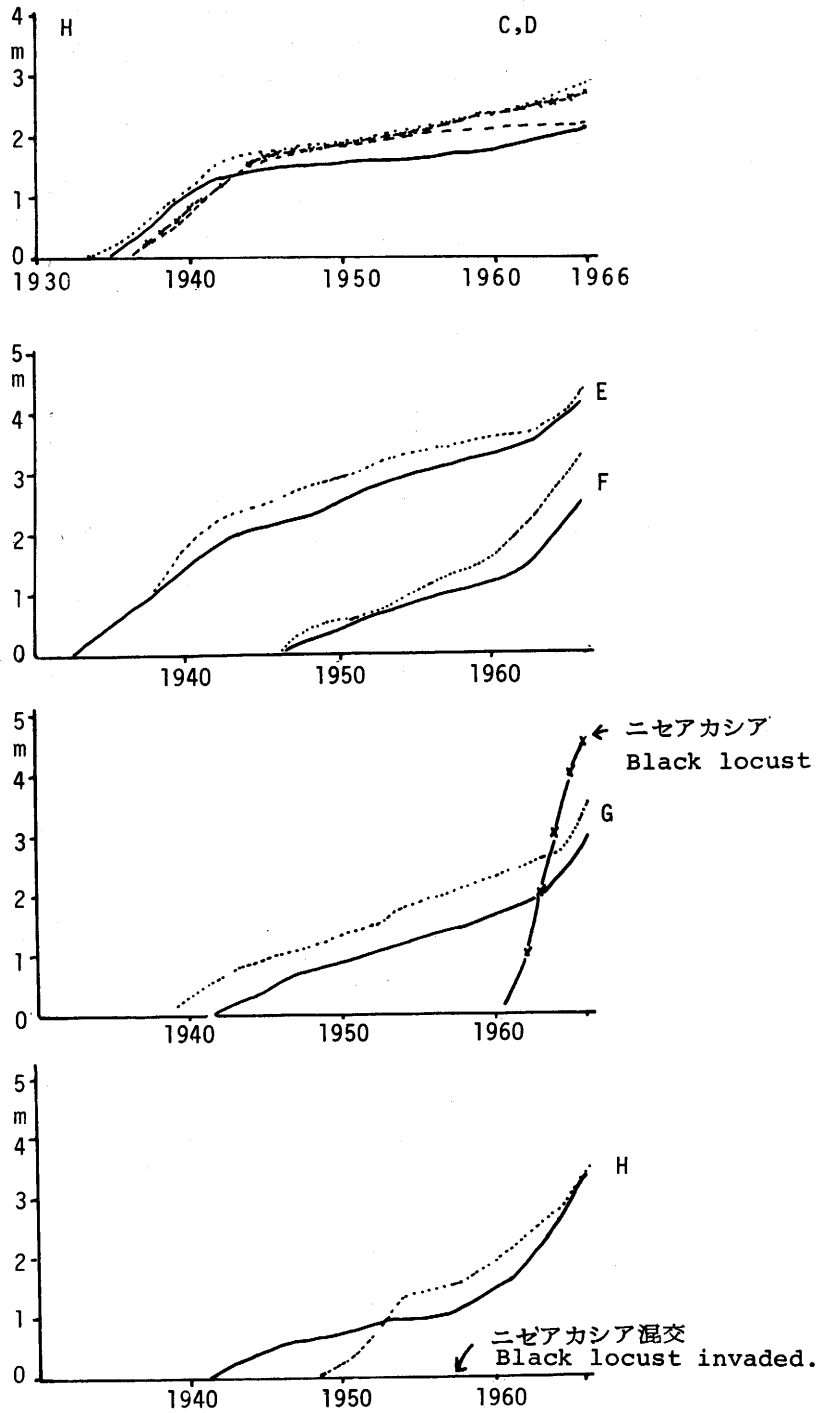


図-18. C, D, E, F, G, H地点のクロマツおよびニセアカシアの樹高生長経過

Fig-18. Courses of height growth of pine and black locust trees near the point C, D, E, F, G and H in Fig. 14.

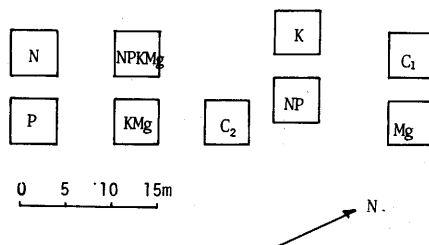
d. 施肥実験

針葉，砂土の分析から不足が予想されたN，K，Mgのうちいずれが制限要因となっているか確かめるため，1966年3月（N区，P区は1967年3月）に表8，図19に示した設定内容で施肥を図14のI地点で行った。1区の大きさは5m×5mであり，同一の平坦面にあった。各区からランダムに7個体を選び主軸頂端部の針葉の長さ，上長生長を測定した。

上長生長は前章の富津海岸における施肥と同様で施肥当年には差があらわれなかった。施肥当年の針葉の長さを前年の針葉の長さを基準にしてくらべると，図20のごとくであって，N区，NP区，NPKMg区つまりNを

含んだ区にのみ施肥の効果があらわれた。それらのうちNPKMg区の効果が劣っていたのは，N源としてNO₃態Nが35%含まれているため，容易に流亡してしまったためであろう。

針葉長およびクロロフィル含有率との関係は図21に示したように，富津海岸林の場合とほぼ同様で，N濃度が9mg/g以上では針葉長，クロロフィル含有率ともほぼ一定となることから，9mg/g以下の値を示す対照区，NPK Mg区，K Mg区はNの欠乏状態にあるとみてよい。またB地点での当年生葉の分析値（表5）で低い値を示したKの5～6mg/g，Mgの1.0～1.1mg/gは生育のよいG地点とNP区（表9）とほぼ同じ値であることから，クロマツにとって欠乏状



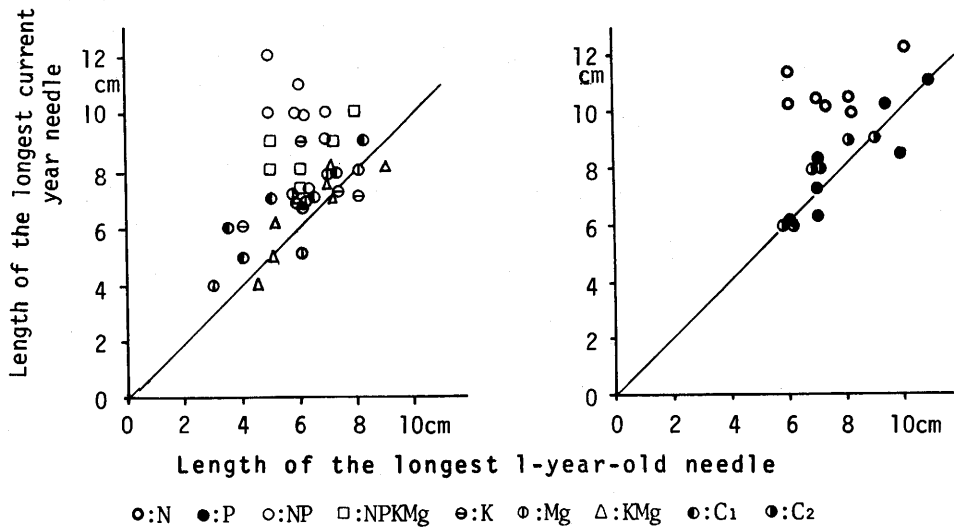
図—19. 施肥実験区の配置

Fig—19. Arrangement of plots of the fertilization experiment at Muramatsu. Explanation of marks is seen in Table 8.

表—8. 施肥した肥料の量

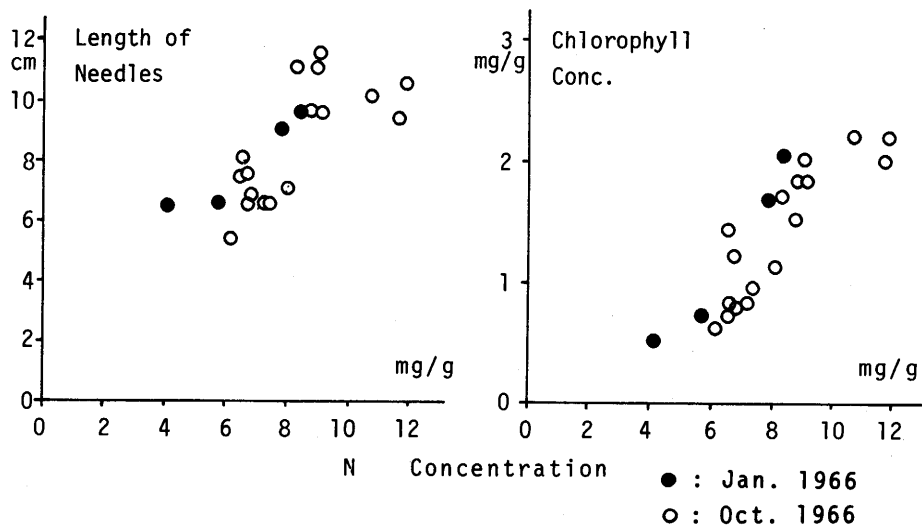
Table—8. Amount of fertilizer applied. (kg/ha)

	N		P	K	Mg	肥料 fertilizer
	NH ₄ -N	NO ₃ -N				
C plot	0	0	0	0	0	
K plot	0	0	0	110	0	K ₂ SO ₄
Mg plot	0	0	0	0	60	MgSO ₄
KMg plot	0	0	0	110	60	K ₂ SO ₄ , MgSO ₄
N plot	80	0	0	0	0	(NH ₄) ₂ SO ₄
P plot	0	0	54	0	0	CaH ₄ (PO ₄) ₂ · H ₂ O
NP plot	80	0	54	0	0	(NH ₄) ₂ SO ₄ , NH ₄ H ₂ PO ₄
NPKMg plot	52	28	54	110	60	NH ₄ NO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , MgSO ₄ , K ₂ SO ₄



図—20. 施肥当年生最長葉と前年生葉の針葉長の関係

Fig—20. Relations between the maximum length of the longest current year needles and that of the longest 1-year-old ones in the fall of the year fertilized at Muramatsu.



図—21. 当年生葉のN濃度と針葉長およびクロロフィル含有率との関係

Fig—21. Nitrogen concentration in current year needles in relation to length and chlorophyll concentration.

表一 9. 施肥当年の針葉（当年生葉）の化学成分
1966年10月 *目測による推定値

Table-9. Concentration of nutrient elements in current-year needles of pine trees in the fall of the year fertilized.
*: Rough estimation based on needle color.

	mg/g						針葉長cm
	N	P	K	Ca	Mg	Chloro- -phyll	
NP 区	8.4	1.29	5.6	3.3	1.4	1.7*	9~13
	9.1	1.13	6.4	4.0	1.2	2.00	10~13
	10.8	1.15	6.0	3.7	1.0	2.2*	9~11
	9.0	1.15	5.3	3.3	1.3	1.8*	9~13
NPKMg区	6.6	0.91	6.1	3.4	1.0	1.42	7~9
	9.1	1.03	6.8	2.9	1.2	1.8*	8~11
	8.9	0.94	6.4	2.9	0.9	1.5*	9~10
KMg 区	7.5	0.93	5.4	2.5	1.2	0.93	5~8
	6.2	1.34	10.3	1.9	1.1	0.6*	4~6
	6.7	0.90	6.3	2.5	1.1	0.8*	6~9
C _{1,2} 区	6.9	0.85	6.1	2.8	1.2	0.79	5~8
	8.1	0.94	5.5	2.7	1.0	1.1*	5~9
	7.3	1.03	5.7	3.1	0.9	0.8*	5~8
	6.8	0.99	5.4	3.7	1.2	1.2*	5~8
	6.6	1.08	7.3	3.2	1.1	0.7*	5~10
G 地点	11.8	1.05	6.4	2.4	1.2	2.0*	8~11
	12.0	1.58	4.7	3.0	1.2	2.2*	9~12

平均値の差の多重検定 5%レベル

Multiple testing of difference significant at 5 % level.

化学成分	lot	G区	NP区	NPKMg区	C区	KMg区
	Nutrient Element	N	11.9	9.3	8.2	7.1
P		1.32	1.18	0.96	1.00	1.06
K		5.6	5.8	6.4	6.0	7.3
Mg		1.2	1.2	1.0	1.1	1.1
Ca		3.7	3.1	3.1	2.7	2.3

態を示す濃度とは言えないであろう。

e. 生長阻害要因

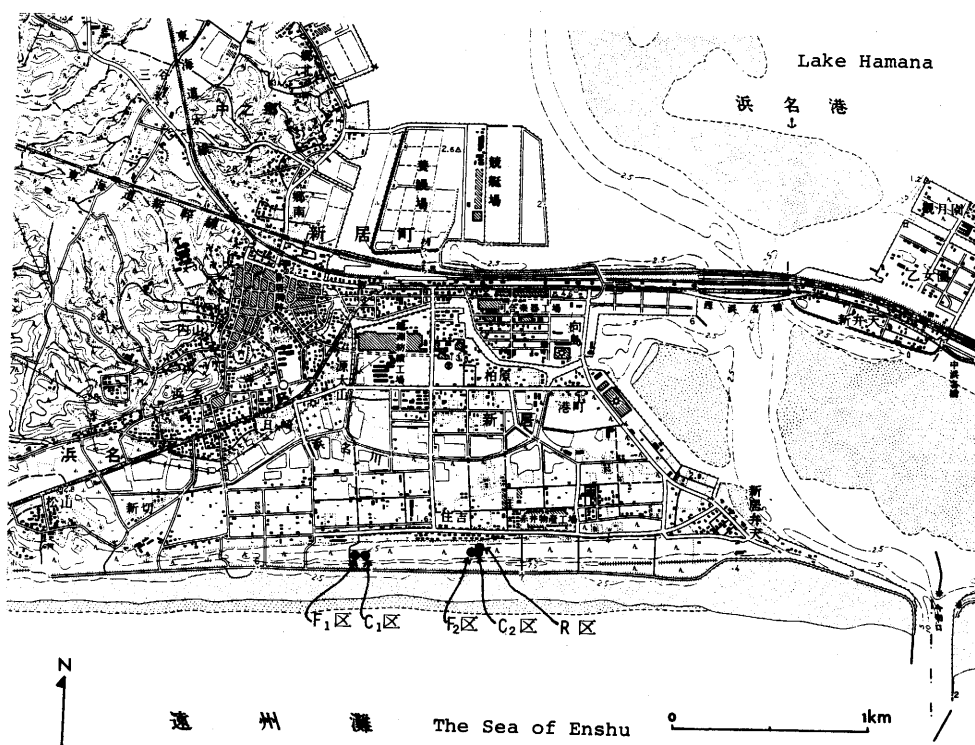
c 節 d 節の結果から、生育不良林の生長阻害要因は土壌（砂）中のN分の欠乏にあることが明らかになった。それは周辺の民家による落葉かきに起因したものであると考えられる。

第3章 静岡県新居海岸砂丘クロマツ林における施肥の効果

a. 調査地の概要

新居海岸クロマツ林は静岡県浜名郡新居町の遠州灘に面する海岸砂丘地にある（図22）。東京大学愛知演習林の管理の下に1928年に海岸砂防の試験地（新居試験地）として設置されたところである。調査当時の1967年には主な林は林齢が33～34年になっていたが、樹高が5～6mにしか達しない不成績造林地であった。しかし前章の村松海岸林と異なり、林床の落葉かきはきわめて部分的にしか行われておらず、そのためか生長が回復しつつある林も多かった。

新居試験地では1965年までしか気象観測が行われていないので、約4km離れた舞阪測候所の



図—22 新居海岸砂丘クロマツ林の試験区の位置

Fig.—22 Study site at Arai, Shizuoka Prefecture.

データ³⁵⁾によると1966～1971年の年平均気温は16.0～16.4℃、年降水量は1708～1799mmの夏雨型の比較的年変動の少ない温暖な気候で、月平均最低気温は0℃を割ることがなかった。

b. 化学分析の方法

針葉や落葉落枝の栄養分を分析するために以下の方法をとった。80℃の熱風乾燥機で乾燥した試料をウィリーミルで粉碎し分析試料とした。P, K, Ca, Mg, Naの化学分析のために1.0～1.5gの分析試料をHNO₃ 20cc, HClO₄ 0.5～1ccとともに100ccのケルダールフラスコで湿式灰化した。Pはヴァナドモリブドリン酸硝酸系の比色法, K, Na, Ca, Mgは原子吸光度計(パーキンエルマー製)によった。Caの測定に際してはLaを添加した。Nの分析は第1章と同様にマイクロケルダール法によった。

c. 現存量, 純生産量の測定法

試料木の重量は各試験区から4～5本ずつを伐倒し, 2mの高さごとに幹, 枝, 針葉に分けて生重を竿秤りで秤量した。枝・針葉は当年生, 1年生, 2年生, その他に分けて秤量した。根は株の周回約1mで横走根を切断して掘り上げ, チェーンブロックで引きあげた。それぞれ一部をサンプルとして実験室にもちかえり, 80℃の熱風乾燥機で一定の値になるまで乾燥し, 水分含量を求め乾重に換算した。

幹のサンプルとして高さ0m, 0.3m, 1.3m, 2.3m……と1mごとに円盤をとり, それから材積, 材積生長量を回転体に近似して計算した。生長量の重量への換算は材部が一樣の比重をもっていると仮定して行った。枝の生長量は齡別層別にとられたサンプルの枝(長さ10～20cm, 本数15～20本)の断面積比から求めた。針葉の生産量は当年生葉の現存量とした。マツカレハの幼虫による摂食量は6～7月に多いので当年生葉の食害による減少は比較的少ないと考えられる。

森林の現存量および生産量を試料木の値から計算する方法は依田(1971), 佐藤(1973), 木村(1976)の解説書に詳しいので簡潔に記すと以下のようになる。

試料木の全重あるいは部分重Wは胸高直径Dおよび樹高Hと以下の関係にある。

$$W = aD^b \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{あるいは } W = a(D^2H)^b \dots\dots\dots(2)$$

この関係はHUXLEY(1932)のとなえた相対生長の法則に根拠をもち, 林木の葉量についてはKITTRIDGE(1944)によってはじめて適用された。(1)式で $b = 2$ とすると重量Wは断面積 g と比例関係にあることになる。

$$W = ag \dots\dots\dots(3)$$

(3)式を基礎にして林分全体の重量を計算する方法は最も簡単であるが, b の値が2から大き

く離れ、試料木が偏った大きさのDあるいは D^2H が選ばれた場合は大きな誤差を生ずることになる。(2)式のH(樹高)は、毎木の値を測定するに際しては伐倒するか登って測定しない限り誤差をとまなう。ブローメリス測高器では測定しやすい樹種のスギ(20m高)でさえ2mの測定誤差があった。⁸⁾(1),(2),(3)式の比較はSATOO(1968, 1970), 蒲谷・佐藤(1968)によって行われているがそれぞれ大差ない結果になっている。これは試料木が偏った大きさから選ばれなかったためであろう。本報告では後述するR区でbの値が3近く、かつ試料木が区内の最大直径木から選ばれたため(3)式からの推定値が(1)式からの推定値より10~20%大きいという結果となった。そこで手数がかかるが、(1)式を基礎に計算を行った。

d. 施肥試験区とリター除去区の設定

図22に記入した位置に施肥区(F₁区:20m×30m, F₂区:20m×30m) 対照区(C₁区:20m×30m, C₂区:20m×30m)を1967年5月26日に設定した。

リター除去区(R区:14m×15m)は1967年7月19日に追加設定し、年に4回の割合でリター(落葉, 落枝など)を除去した。

施肥は砂地のため養分の流亡が予想されるのでオガ屑堆肥⁷⁰⁾をマルチングする方法によった。オガ屑堆肥はオガ屑約1.5t, 米ヌカ180kg, 鶏糞180kgを1967年5月26日に積み込み, 6月20日に切り替えを行い, 7月19日に完成した堆肥をhaあたり18tの割合で施肥区に硫安(N量として150kg/ha)とともにマルチングした。また, それとは別に硫安haあたりN分100kg/haを1967年5月26日に施した。追肥は硫安haあたりN分50kg/haを1968年3月, 1969年3月, 1970年3月に行った。

e. 施肥によるクロマツ針葉の重量および養分濃度の変化

1967年5月より1年間F₂区とC₂区においてそれぞれ決められた3個体の樹冠上部から当年生葉, 1年生葉, 2年生葉にわけて, 生重約10gの試料をサンプリングし, 重量測定および化学分析を行った。結果は図23に3個体の平均値として示した。

針葉1対あたりの乾重量は当年葉では6月から10月まで増加するがあとはほぼ一定の値をとり, 施肥区で100~150mg対照区で80~100mgであって両区に大きな差がみられた。1年生葉, 2年生葉の重量は期間を通じて80~100mgのほぼ一定の値をとり, 施肥区対照区の間には差がみられなかった。

クロマツ針葉の諸栄養分の季節, 葉齢による変化については門田(1952)の報告があるが灰分あたりの量であるので比較しにくい。同じ常緑性の木本の葉の季節, 葉齢による栄養分の変化としてMILLER(1963a)の南極ブナの種類(*Nothofagus truncata*)の報告がある。南極ブナの葉のN, P, K濃度は開葉した10月から12月にかけて減少しその後翌年の4月までわずかに

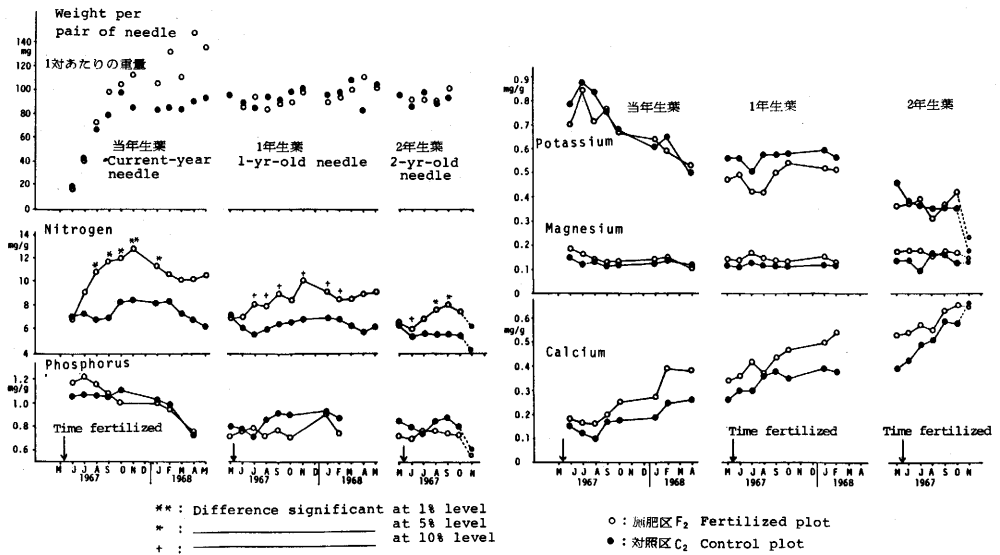


図-23 施肥区と対照区におけるクロマツ針葉の重量，養分含有率の変化

Fig.—23 Changes in weight and concentration of nutrient elements in needles of pine trees after fertilization.

増加しその後10月まではほぼ横ばいの変化をたどるが、Ca、Mgについては1年を通じて変化がみられない。小笠原(1974)によるアカマツの葉齢の違いによる研究ではN、Pに関しては当年生葉が1年生葉より濃度が高く、Caは逆であった。新居の対照区のクロマツの針葉の養分濃度の季節変化に関してはCaを除いて南極ブナと似かよった傾向を示した。つまり1年生葉のN、P、K濃度は新たに展開する当年生葉の方へ転流するためか5～7月に減少するが8～9月にかけて増加しその後一定の値を示した。Mgは年間を通じて変化がみられず、Caは5月から翌年の2月まで次第に増加する傾向を示した。葉齢による違いはアカマツの場合とほぼ同様でN、P、Kの濃度は当年生葉、1年生葉、2年生葉と次第に減少し、図23の右端の小さい丸で示した11月の落葉ではさらに減少した。落葉時における減少はKで最も大きかった。Mgは葉齢による差は見られず、Caは当年生葉、1年生葉、2年生葉と年齢を経るほど高濃度になる傾向があり、落葉時(図23の点線)にはさらに高くなった。

施肥による各成分の変化は以下に述べるようであった。

Nの濃度は施肥前の1967年5月には1年生葉、2年生葉とも施肥区、対照区の両方において6.7～7.1mg/gの値であったが、施肥1カ月後には2年生葉において施肥区で増加し、対照区との間に有意な差(t検定 $\alpha=0.10$)がみられその傾向は1年生葉においても2カ月後以降にあらわれた。当年生葉のN濃度は6月には差がみられなかったが8月以後には有意な差がみられた。第1章(図11)、第2章(図21)の針葉長およびクロロフィル含有率との関係からみて当

年生葉のN濃度（10月～1月測定）の値で9 mg/g以下ではN欠乏であることが推測されたが、新居の対照区はその値は平均8.5mg/gであり、富津海岸、村松海岸の生育不良地ほどでないがN欠乏の状態を示していることがわかる。施肥によってその値が11.3～12.8mg/gになったことは針葉中のNの栄養状態が回復したことをあらわすだろう。

P, K, Mg, Caの値は施肥前においても針葉中の濃度が区によって異なっており、分析も3個体の試料を混合して行ったため差の検定はできなかった。しかし対照区の10月～1月の当年生葉に含まれるP, K, Mgの濃度はそれぞれ1.01～1.10, 6.2～6.8, 1.17～1.33mg/gであり、富津海岸、村松海岸でP, K, Mgの施肥を行った林からの値がそれぞれ0.93～1.18, 6.4～7.3, 1.0～1.1mg/gとほぼ等しいことから、新居海岸の対照区はP, K, Mgの欠乏であるとはいえない。対照区のCaの濃度は1.8～1.9mg/gであり、施肥区の2.5～2.8mg/gおよび富津海岸の生育のよい林の3.6～3.7mg/gとくらべてきわめて低い値であったが、これはラジアータマツに関するWILL (1957) の報告にあるようにCaが樹体の位置によって変化が大きいことによると考えられ、後で述べる1969年11月の4本の試料木の各区の平均値の値3.2～4.5mg/g (図39) からみると施肥区との差は認められなかった。

f. 施肥によるリター量およびそれに含まれる養分量の変化

直径75cmのサラン製の円型リタートラップ（受け口の面積0.442m²）を作製し、地上からほぼ1mの高さに取りつけた（図24参照）。各試験区の中央よりにC₁区、F₁区は5個、C₂区、F₂



図—24 C₁プロットにおけるリタートラップ

Fig.—24 Litter traps in the plot C₁ at Arai.

区は10個ずつ配置した。月に1回の割合で回収し、針葉・マツカレハ幼虫の糞・雄花・球果と種子・枝・その他に仕分けし80℃の熱風乾燥機で1～2昼夜乾燥後秤量し、1年間の合計値を表10に示した。なお1969年9月～11月のF₁, C₁は10個ずつのトラップでの値であり、1969年11月4日以降のF₂, C₂区は伐倒の影響の少ないトラップ4個ずつの値である。

マツカレハ幼虫の糞・球果と種子・枝の量については施肥区と対照区で差がみられなかった。しかし雄花の落下量については施肥1年後に大きな差がみられた(表11, 図25)。また針葉の落下量は施肥開始15カ月後の1968年8月ごろから施肥区において増加し、測定期間の1970年6月

表—10 施肥区および対照区における年間のリター量

Table—10. Annual amount of litterfall in the fertilized plots, F₁ and F₂, and the control plots, C₁ and C₂.

		(g/m ²)		
		May 26, 1967 —May 20, 1968	May 20, 1968 —May 23, 1969	May 23, 1969 —May 28, 1970
Plot C ₁	Needle	392.5	305.6	
	Male flower	3.9	6.1	
	Cone & seed	47.7	20.4	
	Branch	29.7	44.0	
	Frass	8.9	14.7	
	Others	14.8	13.5	
	Total	497.5	404.3	
Plot C ₂	Needle	383.8	366.7	415.8
	Male flower	5.4	4.6	1.8
	Cone & seed	37.4	20.0	66.4
	Branch	3.5	30.0	7.8
	Frass	8.4	39.3	73.3
	Others	13.4	14.2	28.3
	Total	451.9	474.8	593.4
Plot F ₁	Needle	286.1	473.9	
	Male flower	8.7	6.6	
	Cone & seed	30.6	6.0	
	Branch	7.4	23.4	
	Frass	3.6	30.3	
	Others	11.4	16.2	
	Total	347.8	556.4	
Plot F ₂	Needle	388.7	530.4	703.1
	Male flower	8.9	10.8	4.1
	Cone & seed	56.6	17.9	53.3
	Branch	7.0	41.2	12.2
	Frass	10.1	80.4	85.9
	Others	16.7	20.0	45.7
	Total	488.0	700.7	904.5

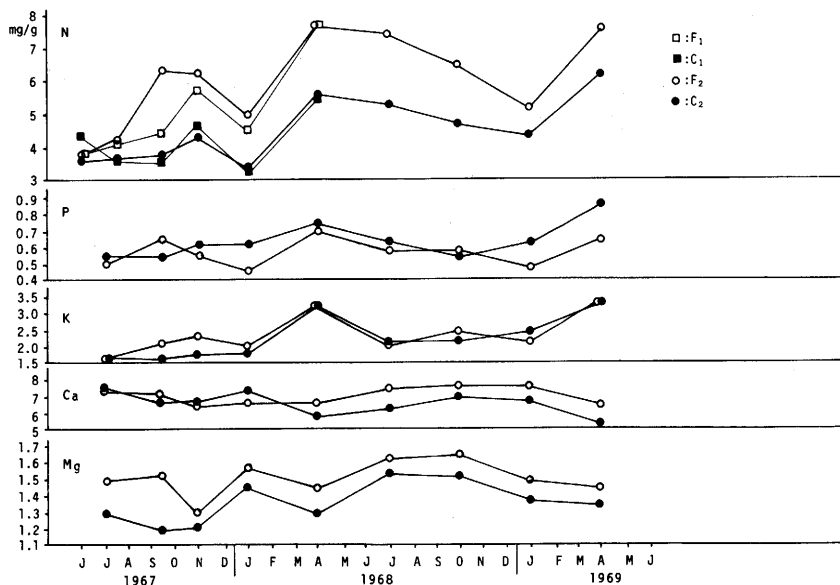


図-26. 施肥区および対照区におけるリター（針葉）中の養分濃度の変化

Fig-26. Changes in concentration of nutrient elements in the needle-litter trapped after fertilization in May, 1967.

しており、施肥の影響ははっきりしなかった。Mgの濃度は樹体についている生葉（図23）と同じように施肥前から濃度差がみられ施肥による影響は明らかでなかった。

g. 施肥，リター除去による樹高・材積の変化

1) 樹高の変化

図27は伐倒した試料木（h節参照）の節間長から求めた樹高生長曲線である。どの試料木も1945年ごろ生長が悪くなり、再び1961～2年に回復しはじめている。この生長の悪い期間は戦中戦後の物資の著しい不足時期と一致し、落葉採集の激しかった時期と想定される、1961～2年は薪炭から灯油プロパンへの燃料革命の時期に一致する。1962年は木炭の生産量が戦後のピーク時の半分になった年であり、わが国の貿易の自由化が始まり原油の輸入量も急激に増加した年である。1962年以後は落葉採取も次第に小規模なものとなり、クロマツ林の林床は次第に養分の蓄積に入ったと推測される。No.5～9（F₁区）、No.10～13（F₂区）は1967年の施肥によって翌年の1968年からさらに急激に生長がよくなった。このことは任意の年の値をその前年の値との関係でXY座標にプロットした定差図に描くと（図28）より明瞭になる。施肥区は

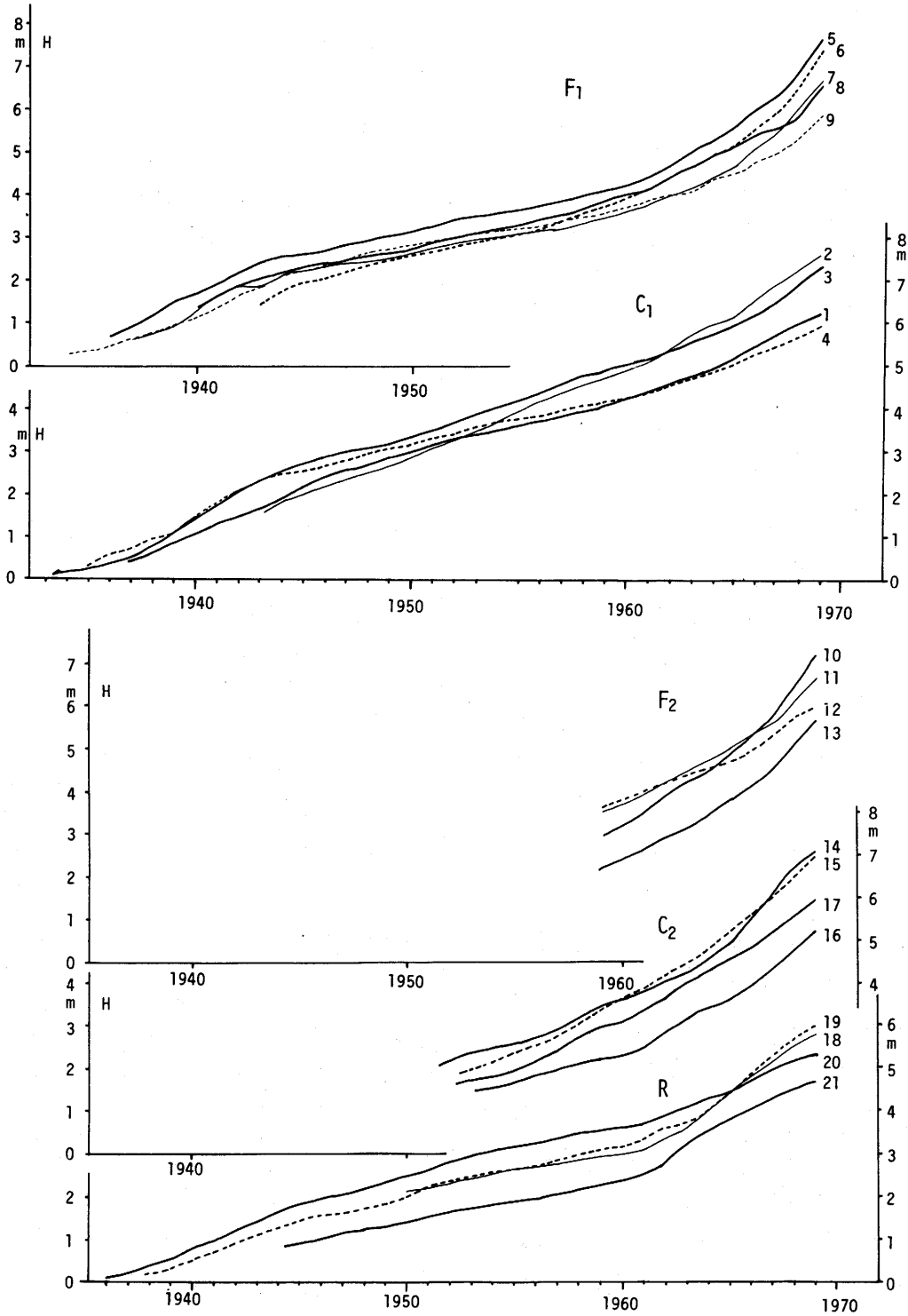
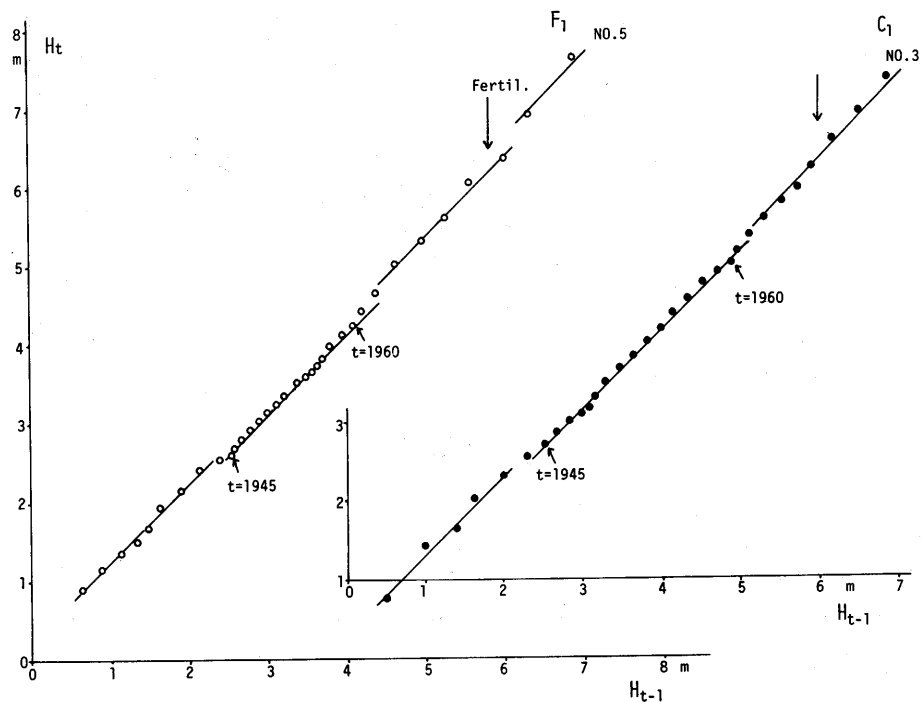


図-27. F₁区, C₁区, F₂区, C₂区, R区の試料木の樹高生長経過

Fig-27. Courses of height growth of pine trees in the plots F₁, C₁, F₂, C₂, and R.



図—28. F₁区No.5 試料木とC₁区No.3 試料木の樹高定差図

Fig—28. Regression lines between height in the one year (H_t) and in the previous year (H_{t-1}) of the fertilized tree No. 5 and control one No. 3.

4本の回帰直線（生育初期，落葉採取期，回復期，施肥後）に分けられ，対照区は施肥後を除いた3つの回帰直線に分けられる。

2) 材積の変化

連年の材積生長量の変化を図29に示した。施肥区は施肥翌年から材積生長量が急激に増加しているが，対照区はNo.15を除いて大きな変化はみられなかった。No.15の生長量の増加した理由は施肥区と最も近い位置にあり境の根切りが不十分であったためらしく1967年秋の根切りの効果のためか1969年には再び生長量が低下した。従来，肥培の研究者は材積定差図を用いて肥効の判定を行っている。⁹⁾³¹⁾⁶⁹⁾ここでも材積定差図によって検討すると対照区では図30に示すようにNo.2，No.15がわずかにずれた以外は直線上にきれいに並んでいる。一方施肥区においてはすべての試料木で1968年，1969年の点が大きくくずれた。このことは連年の材積生長量が1968年から急激な変化があったことに対応していて，肥効が施肥翌年の1968年から見出されたということである。

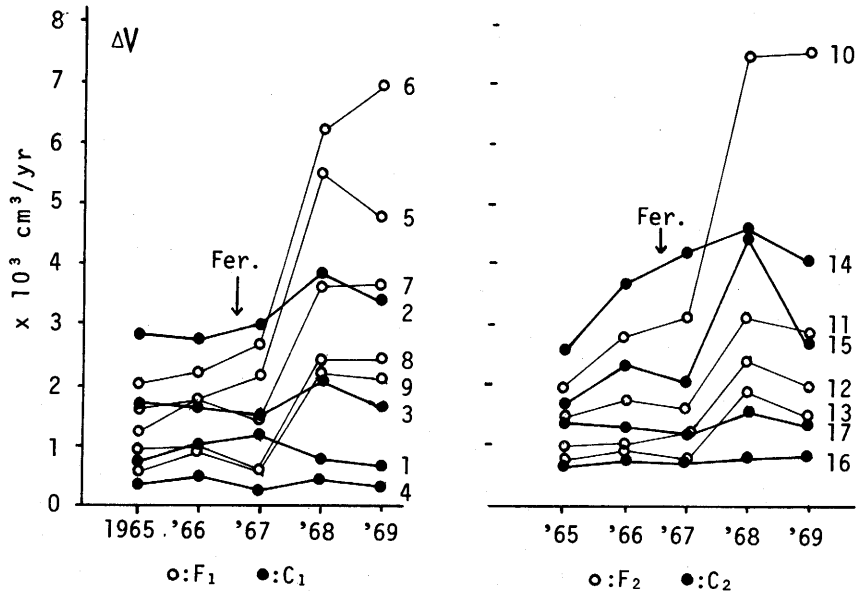


図-29. 施肥区 (F₁, F₂), 対照区 (C₁, C₂) における試料木の連年材積生長量

Fig-29. Changes in annual increment of stem volume in the fertilization plot, F₁ and F₂, and the control plots, C₁ and C₂.

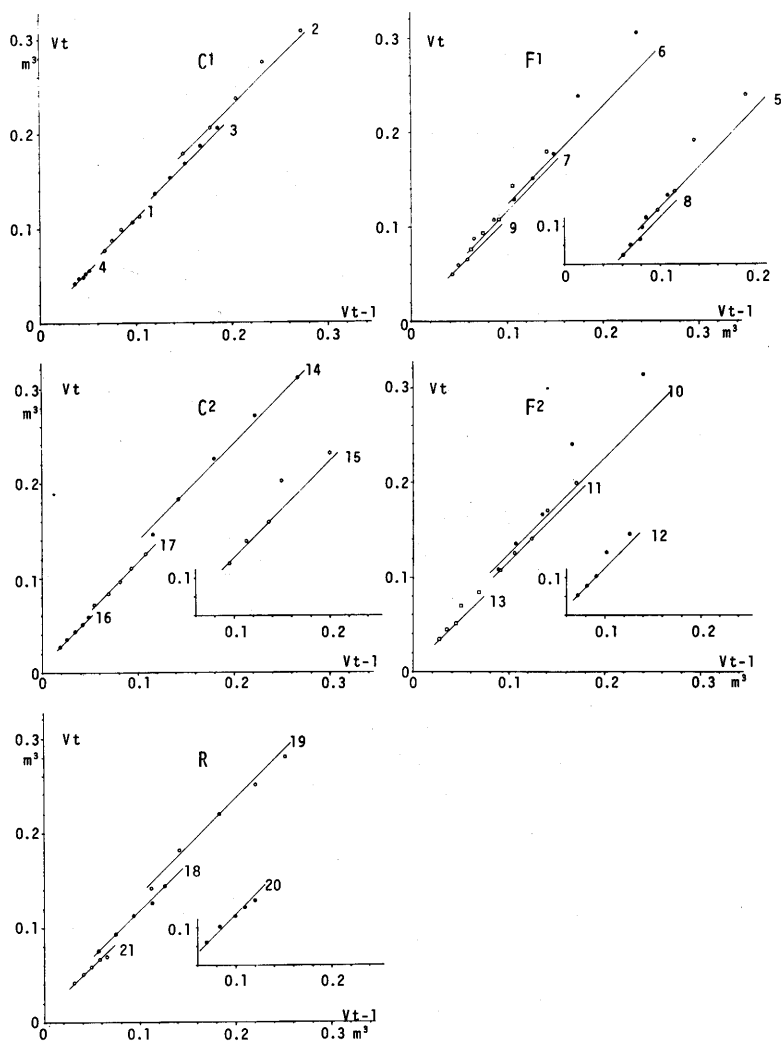
林床のリターの除去を行ったR区では図30に示すようにNo.18を除いて1969年の点下側にズレている。これはリターの除去によって材積の生長が低下したことを示している。

h. 施肥, リター除去による生産量の変化

1969年11月4日～7日にF₁, F₂, C₁, C₂, R区の各区の中心部から試料木をF₁区で5本, その他でそれぞれ4本伐倒し幹, 枝, 針葉, 根の重量および材積とその生長量を測定した。各試料木の測定値は重量は乾燥重として表12に示した。この値と各試験区内の全木の胸高直径の値 (表13) から単位面積あたりの現存量, 純生産量をC節に従って計算すると表14に示す値となった。()内の値は2年生葉がほとんど付いてない個体があったため相対生長式が計算できなかったため断面積の比から求めた値である。

幹の年生産量は施肥した当年は施肥前と差がなかったが, 翌年以後は2倍以上の値となった。落葉除去区は処理後年々減少する傾向がみられた (図31)。

枝の年生産量はいずれの区においても年々増加する傾向があったがとりわけ施肥区では施肥開始翌年以降に急激な増加がみられた (図31)。



図—30. C₁, F₁, C₂, F₂, R区における試料木の材積定差図

Fig—30. Reression lines between stem volume in the one year (V_t) and in the previous year (V_{t-1}) of the fertilized tress and control ones.

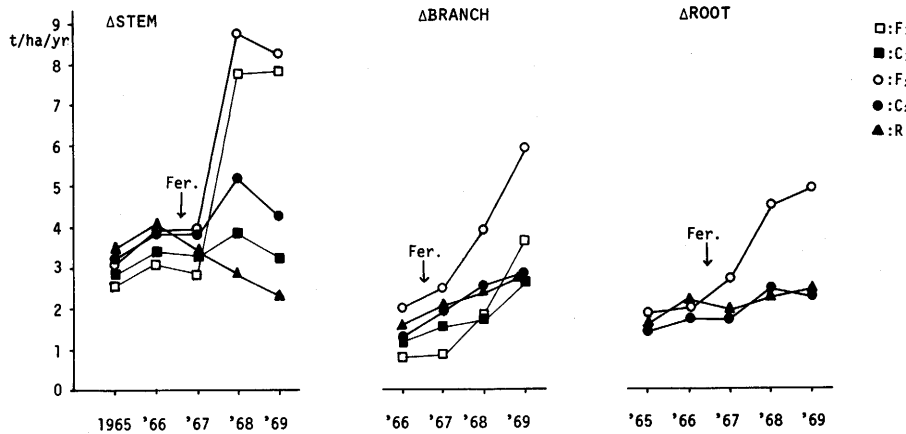
根の年生産量は施肥区において施肥当年にわずかな増加がみられ、翌年、翌々年には2倍以上の値となったが、対照区・リター除去区では大した変化がみられなかった(図31)。

針葉の年生産量は樹幹解析によって過去に溯って測定することができない。e節で明らかになったことは施肥当年に1対あたりの針葉重が増加しており、その年の落葉量がとりわけ増加

表—13. 新居の各調査地における胸高直径の分布

Table—13. Diameter breast high of trees in each plot at Arai. in each plot at Arai.

Plot	調査面積 Area m ²	D B H cm																													
F ₁	103.0	11.3	10.6	10.3	10.5	10.1	9.7	9.6	9.5	9.0	9.0	9.0	8.9	8.8	8.5	8.3	8.1	8.0	8.0	7.8	7.7	7.7	7.7	7.6	7.5	7.4	7.3	6.6	6.5	6.5	5.4
C ₁	82.5	10.8	10.4	9.8	9.8	9.1	8.9	8.8	8.6	8.3	8.2	8.0	8.0	7.7	7.6	7.3	7.3	6.9	6.8	6.7	6.6	6.4	6.3	6.2	5.8	5.7	5.8	5.7	5.1	5.0	
F ₂	72.5	14.7	12.7	11.5	10.9	10.0	9.9	9.7	8.7	8.6	8.5	8.3	8.2	8.1	7.6	7.5	7.4	7.2	7.0	6.8	6.7	6.5	6.1	5.3	5.0	4.5	4.3	3.9	3.3		
C ₂	63.6	12.6	11.3	11.1	11.0	9.9	9.3	9.2	8.2	7.8	7.8	7.4	7.3	7.3	6.9	6.8	5.5	5.1	4.9	4.9	3.0										
R	61.5	11.4	11.0	10.2	8.6	8.3	8.1	8.1	8.0	7.8	7.4	7.3	7.2	7.1	6.8	6.3	5.8	5.7	5.0	4.8	4.6	3.2									



図—31. 施肥区 (F₁, F₂), 対照区 (C₁, C₂), 落葉落枝除去区 (R) の幹, 枝, 根の生産量 (1965~1969) の変化

Fig—31. Changes in annual net production in the fertilized plots, F₁ and F₂, the control plots, C₁ and C₂, and the litter removed plot, R.

表-14 新居における伐倒調査区の現存量・純生産量・針葉の効率など

Table-14. Standing crop and annual net production in each plot at Arai. (35—37 yrs old)

	Stem										Needle					
	standing crop					net production					standing crop					
	m ² /ha	m	m ³ /ha	bark t/ha	0-5yrs. - total t/ha	1969 t/ha	1968 t/ha	1967 t/ha	1966 t/ha	1965 t/ha	0yr. t/ha	1yr. t/ha	2yrs. total t/ha			
F ₁	16.68	6.80	68.97	5.05	19.72	11.74	36.55	7.83	7.78	2.92	3.02	2.53	4.77	2.46	0.54	7.82
C ₁	16.21	6.86	69.76	5.91	14.15	18.33	38.52	3.20	3.84	3.26	3.48	2.84	3.99	2.36	0.52	6.96
F ₂	21.51	6.15	82.90	7.85	22.98	14.21	45.86	8.20	8.68	3.99	3.86	3.03	5.96	2.91	(0.27)	9.19
C ₂	16.76	6.12	64.25	4.44	17.52	11.98	34.00	4.20	5.23	3.71	3.80	3.08	4.64	2.89	0.59	8.17
R	15.27	5.22	52.25	3.99	13.93	11.41	29.48	2.30	2.86	3.39	4.05	3.41	4.42	2.04	(0.12)	6.60

	Branch				Root				Aboveground net production in 1969 t/ha	Efficiency of needle t/t
	standing crop		net production		standing crop		net production			
	0yr. t/ha	1yr. t/ha	2yrs. t/ha	3yrs. total t/ha	1969 t/ha	1968 t/ha	1967 t/ha	1966 t/ha		
F ₁	1.35	1.13	0.79	4.92	3.60	1.77	0.88	0.73	16.20	2.07
C ₁	0.84	0.80	0.72	6.18	2.55	1.70	1.50	1.03	9.74	1.40
F ₂	1.83	1.97	9.42	13.05	5.95	3.87	2.39	1.94	20.11	2.19
C ₂	0.89	1.23	8.62	10.70	2.85	2.54	1.95	1.17	11.69	1.43
R	0.72	1.06	9.49	11.31	2.71	2.48	2.01	1.57	9.43	1.43

F₁, F₂: fertilized plot

C₁, C₂: control plot

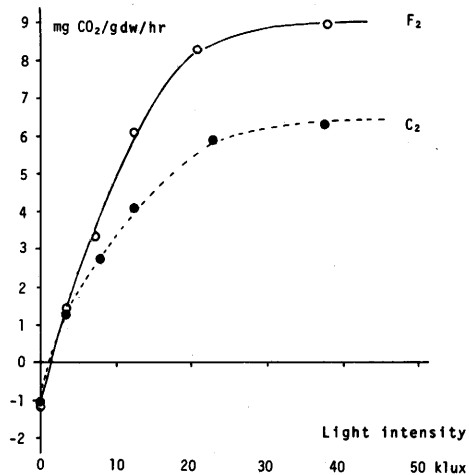
R : litter removed plot

したわけでないので、施肥当年に針葉量が当年生葉で3～4割増加したと推定される。施肥開始の翌々年の1969年における当年生葉の量は施肥区では対照区の2～3割多い量であった。

j. 施肥したクロマツ針葉の光合成量

1969年10月に新居海岸のF₂区、C₂区および富津の施肥試験区の樹冠上部から切り落した枝を水を張ったポリバケツに入れてその日のうちに東京大学の実験室に持ち運び、24時間以内に光合成量の測定を行った。切り枝ごと測定すると、KRAMERほか(1947)が指摘しているように針葉が重なりあって人工光源では光飽和に達しないことが予想されたので、2～3対の針葉を細いガラス管にさして光合成量を測定した。光源として東芝陽光ランプを用い、二重のガラス円筒でつくられた同化箱をそのガラスの間にクールニクス・サーキュレーターで温度を下げた水を通して温度調節を行った。CO₂濃度はベックマン製のディファレンシャル型の同化量測定装置につないで測定した。

図32は光源から同化箱までの距離を変えて光量を調節して測った光～光合成曲線である。



図—32. クロマツ当年生葉の光～光合成曲線(乾重あたり)(22℃)

Fig—32. Light dependence curve of apparent photosynthesis of the individual needle in the fertilized plot F₂, and the control plot C₂ at Arai.

30klux以上では光飽和していると考えてよいだろう。

38klux22℃の条件で2～3対の当年生針葉を11組ずつ測定した。平均値(±標準誤差)では

施肥区で $7.80 (\pm 0.22) \text{ mg CO}_2/\text{g/hr}$, 対照で $6.65 (\pm 0.36)$ であって, 両者は t 検定 ($\alpha = 0.05$) の結果有意な差が認められた。みかけの光合成量, 呼吸量とも楠元 (1967) に似た値であった。

第4章 クロマツ林の針葉量、針葉中の養分量と純生産量

第1章から第3章まで海岸の生育の悪いクロマツ林に窒素分を施した結果、針葉量・樹高生長量・材積生長量・光合成速度などが増加したことが分ったが、それらの値は海岸以外の林地とくらべて低くないかどうか。また生産量の増加を針葉の増加による分と光合成速度の増加(葉の純生産量に対する能率)による分のふたつに分けて解析することが SATOO (1967, 1968, 1970, 1971) によって企てられたが、そのふたつの割合がどのくらいなのか。さらに針葉中の養分量は生産量といかなる関係にあるのか。

上記の課題に答えるため東京都田無市(東京大学演習林田無試験地)のクロマツ人工林、千葉県安房郡天津小湊町(東京大学千葉演習林清澄作業所管内)のクロマツ(一部アイグロマツを含む)天然生林で伐倒調査を行い、富津および新居海岸の資料とともに比較検討を加えた。

a. 富津海岸クロマツ林の現存量、純生産量、光合成量

第2章で述べたように生育の悪い富津海岸のクロマツ林(1952年植栽)に1966年3月、6月、1967年3月に施肥を行ったがそのうちAブロックのNPK区、NP区には3年目の1968年3月にN量1kg/aの硫酸を追肥した。

1968年12月にAブロックのNPK区とC₁区で伐倒葉むしり調査を行い、現存量・純生産量を測定した。測定法は第3章と同じ方法であるが、 $v = aD^b$ の回帰係数が0.7~0.8と高くないものがあつたので、試料木から単位面積あたりの重量への換算は地際直径の断面積の比によって求めた。

各試料木の測定値は表-15に、試験区内の地際直径の分布は表-16に掲げた。それらから計算した試験区のhaあたりの現存量・純生産量などは表-17に示した。

光合成量は前章のi節に示した方法で1969年10月に施肥(NPK)区と対照(C₁)区から枝ごとポリバケツで実験室にもちかえり、8組ずつ測定した。みかけの光合成量の平均値(±標準誤差)は施肥区で8.39(±0.79)mgCO₂/g/hr, 対照区で3.54(±0.41)mgCO₂/g/hrでありt検定の結果、危険率1%のレベルで有意な差があつた。

b. 田無市のクロマツ林の現存量、純生産量

東京大学農学部附属演習林田無試験地の第1苗圃と第2苗圃の間にクロマツの小さな造林地がある。33年生のこのクロマツ林は低木層亜高木層を欠いていた。関東ローム層に由来する黒土の平坦地に成立し、苗畑に隣接していることから栄養条件は良好であると考えられる。

1968年10月にこの林から2本を伐倒し、現存量・純生産量の測定を行った。測定方法は胸高

表—15 富津・田無・清澄のクロマツ林における伐倒試料木の測定値

Table—15. Values measured of sample trees at Futtsu, Tanashi, and Kiyosumi.

Plot	No.	Stem				Needle				Branch				Cone		Root			
		D ₀	D ₉₀	D ₁₃₀	Height	weight	increment	weight			weight				increment	increment			
		cm	cm	cm	m	g	g	0 yr	1 yr	2 yr	total	0 yr	1 yr	2 yr	total	g	g		
Futtsu F (Fertilized)	1	5.9	4.2		1.80	796	402	771	429	0	1,200	236	147	839	1,222	612	97	755	336
	2	4.2	2.4		1.20	242	77	382	194	0	576	81	67	486	634	300	58	333	88
	3	3.5	2.8		1.26	248	125	248	167	0	415	69	64	224	357	183	96	232	84
	4	4.9	3.1		1.45	545	240	722	479	0	1,201	160	97	764	1,021	376	77	717	238
	5	4.5	2.7		1.25	332	90	517	321	0	838	131	87	473	691	450	67	—	—
Futtsu C (Control)	6	3.2	1.6		1.03	156	12	239	211	0	450	29	33	470	532	119	47	260	46
	7	2.6	1.3		0.79	59	5	119	35	0	154	18	15	200	233	52	0	—	—
	8	5.1	2.9		1.05	321	16	332	271	0	603	46	56	806	908	194	26	547	52
	9	3.6	1.5		0.88	56	3	183	107	0	290	36	23	521	580	136	0	—	—
	10	3.7	1.8		0.98	205	13	280	203	0	483	40	31	566	637	116	24	284	21
	11	3.6	2.2		1.00	190	11	138	79	0	217	19	18	419	456	96	0	204	23
	12	2.9	1.2		0.85	79	7	110	39	0	149	18	13	359	390	74	0	154	16
Tanashi	1			18.5	14.4	97.6	3.24	3.05	2.12	0.15	5.32	0.69	1.24	11.32	13.25	2.71	—	—	—
	2			24.3	16.6	167.1	11.29	5.85	5.02	0.65	11.52	0.88	1.74	25.08	27.70	5.65	—	—	—
Kiyosumi	1			8.8	9.5	15.08	0.40	0.57	0.50	0.00	1.07				1.68	0.52	—	—	—
	2			9.0	10.4	18.05	1.59	0.93	0.61	0.07	1.61				2.28	0.74	—	—	—
	3			13.0	11.3	50.22	5.14	2.77	2.22	0.29	5.27				10.35	2.44	—	—	—
	4			7.6	9.5	11.25	0.64	0.47	0.51	0.03	1.01				1.21	0.29	—	—	—
	5			11.5	11.3	35.37	2.91	1.86	1.34	0.16	3.37				5.71	1.52	—	—	—

表—16 富津・田無・清澄のクロマツ林の伐倒調査区における直径の分布

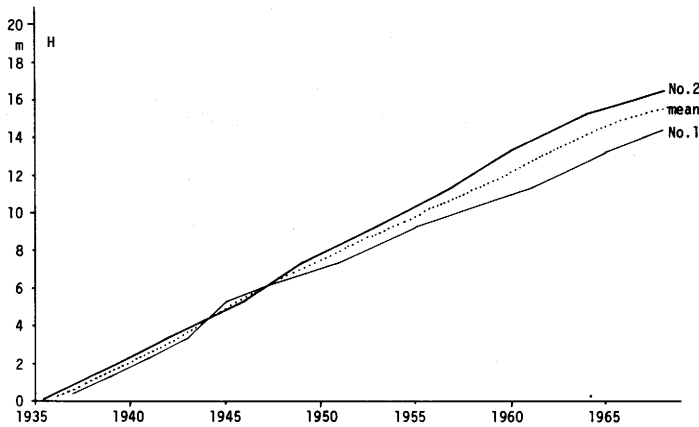
Table—16. Diameter of trees in each plot at Futtsu, Tanashi, and Kiyosumi.

Plot	Area of plot m ²	D ₀ cm															
Futtsu F	13.6	2.9, 3.5, 4.0, 4.2, 4.2, 4.2, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 5.4, 5.7, 5.9, 6.7															
Futtsu C	27.8	2.1, 2.2, 2.5, 2.6, 2.9, 2.9, 3.0, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.4, 3.5, 3.6, 3.6, 3.2 3.6, 3.6, 3.7, 3.8, 3.8, 3.9, 3.9, 4.0, 4.2, 4.4, 4.4, 4.6, 4.9, 5.1															
Tanashi	59.3	D ₁₃₀ cm 15.4, 15.4, 15.7, 16.3, 16.3, 18.5, 21.6, 23.8, 24.3, 24.9															
Kiyosumi	46.9	7.2, 7.2, 7.5, 7.6, 7.7, 7.9, 8.8, 9.0, 10.0, 10.2, 10.2, 11.0, 11.5, 12.2, 12.9, 13.0, 15.3, 16.3															

表—17 富津・田無・清澄のクロマツ林の現存量・純生産量など

Table—17. Standing crop and annual net production in each plot at Futtsu, Tanashi, and Kiyosumi.

Plot	stand age	G m ² /ha	H m	standing crop t/ha							production t/ha/yr.				
				stem	needle				branch	cone	root	stem	branch	root	above ground
					0 yr.	1 yr.	2 yrs.	Σ							
Futtsu F	21		1.39	5.12	6.25	3.76	0	10.01	9.29	0.93	5.92	22.21	4.56	2.12	13.02
Futtsu C	21		1.94	1.79	2.36	1.59	0	3.94	9.28	0.16	3.11	0.11	1.31	0.34	3.78
Tanashi	33	55.27	15.5	199.70	6.71			12.70	30.89			10.95	6.23		23.89
Kiyosumi	23	34.22	10.5	117.42	6.30	4.64	(0.55)	11.49	21.80			10.76	5.61		22.67



図—33 田無クロマツ林の試料木の樹高生長経過

Fig—33. Courses of height growth of pine trees at Tanashi.

直径の断面積比を用いたことをのどいて富津海岸の場合と全く同様である。

2本の試料木の樹高生長経過を図—33に示した。富津海岸および新居海岸のクロマツと異なり植栽当初からかなり良い一定(約0.5m/年)の生長を示し、ほぼ同齡の新居海岸の2~3倍の樹高になっている。林分の胸高直径の分布は表—16に、試料木の測定値は表—15に、林分あたりの現存量、純生産量などの値は表—17に示した。

c. 清澄(千葉県天津小湊町東京大学農学部附属千葉演習林清澄作業所管内)のクロマツ天然生林の現存量、純生産量

千葉演習林の45林班D₄小班はもと野獣園としてシカ、イノシシを飼育していた場所であるが、太平洋戦争後廃園となったため、その後裸地となっていた場所のうち斜面にクロマツ、アイグロマツなどからなる天然生の林が成立した。地形は南西向きの傾斜35~36°の急斜面であり、地質は第3紀層の白岩凝灰岩層である。うっ閉した9~12mのクロマツの高木層の下にはウシコロシ、ヒサカキ、コナラ、イタヤカエデ、モミなどからなる低木層が密生していた。

1968年11月に22~23年生になったこの林から5本の試料木を伐倒し、現存量、純生産量を測定した。測定方法は第3章の新居海岸における場合と全く同様である。

試料木の樹高生長経過は図—34に示したようで、前節の田無のものとはほぼ重なり、生長は良好であった。林分の胸高直径の分布は表—16に、試料木の測定値は表—15に、林分あたりの現存量、純生産量などの値は表—17に示した。

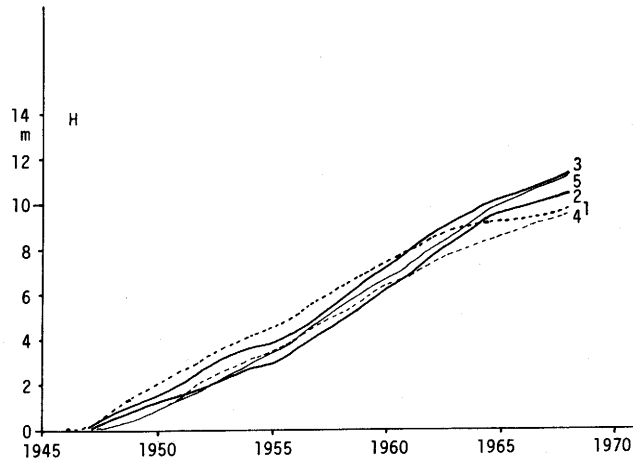


図-34 清澄クロマツ林の試料木の樹高生長経過

Fig-34. Courses of height growth of pine trees at Kiyosumi.

d. 針葉量と針葉の生産能率

全国のクロマツ林の針葉量のデータは施肥林を除くと本報告も含めて21林分について報告されている。^{1, 21, 22, 23, 54, 75, 76)} それらの分布は3つのモードをもった形を示している。haあたり3~5 tの針葉量しかもたない富津海岸と、鳥取砂丘の極端に生育の悪い林を除くと2グループになる。一方は10t/ha以上の生育のよい林で、他方は9 t/ha以下の生育の悪い林である。すなわち、田無のクロマツの平均樹高曲線(図-33の点線)を1.00とした21クロマツ林分の比樹高(=地位指数)と針葉量の関係を見た場合(図-35)、比樹高0.9以上の生育のよい林分では針葉量が10t/ha以上であり、比樹高0.6以下の生育の悪い林分では針葉量が9 t/ha以下であるからである。

新居海岸の施肥した区は針葉量が7.83, 9.19t/haであり高い値でないが、1969年8月の2回にわたる台風*によって落ちた針葉量を補正した値は(8月4日の時点では当年葉が生長しきっていないためいくぶん過大な値となるが)。F₁区で11.21t/ha, F₂区で12.44t/haとなって富津海岸の施肥区の10.01t/haとともに生育のよい林の仲間入りしたことになる。

*注 文献37)より

	観測地	最大瞬間風速 m/s	風向	雨量mm
台風7号 8月4日	イラコ	38.0	S	118
	ハママツ	31.7	SSE	97
台風9号 8月23日	イラコ	35.5	SE	54
	ハママツ	25.4	WSE	74

この台風のためか1969年は例年になく8~10月の落葉量が多い(図-25)。

新居海岸のF₁, C₁, F₂, C₂, Rの各区の試料木21本の針葉重 (F) と地上部純生産量 (Pt) の関係を見ると、原点を通る2つの直線に近似できる (図-36左)。一方はF₁, F₂の施肥区であり、もう一方はC₁, C₂, Rの対照区およびリター除去区である。

施肥区はPt=2.14F, 対照区・リター除去区はPt=1.44Fとなり、施肥区では針葉1kgで地上部の乾物量を1.14kg生産するが、対照区・リター除去区では1.44kgしか生産していないということをあらわしている。つまり施肥によって針葉の能率が約50%向上したことになる。

地上部純生産量が測定されている鳥取砂丘の3林分 (小笠原ほか1975) と伊東の6林分 (ANDO 1965, ここでは針葉の年生産量を針葉量の1/2として計算した) と前に述べた富津, 田無, 清澄の

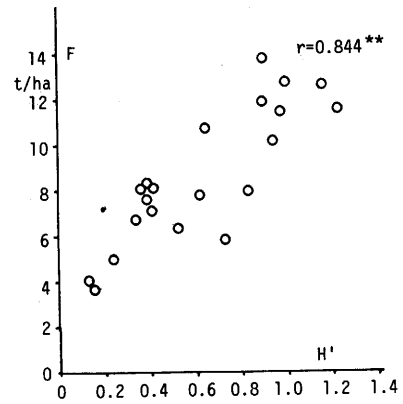


図-35 全国のクロマツ林の比樹高 (H') と針葉量 (F) の関係

Fig-35. Relation between needle amount F and site index expressed by relative height H' in *Pinus thunbergii* stands in Japan.

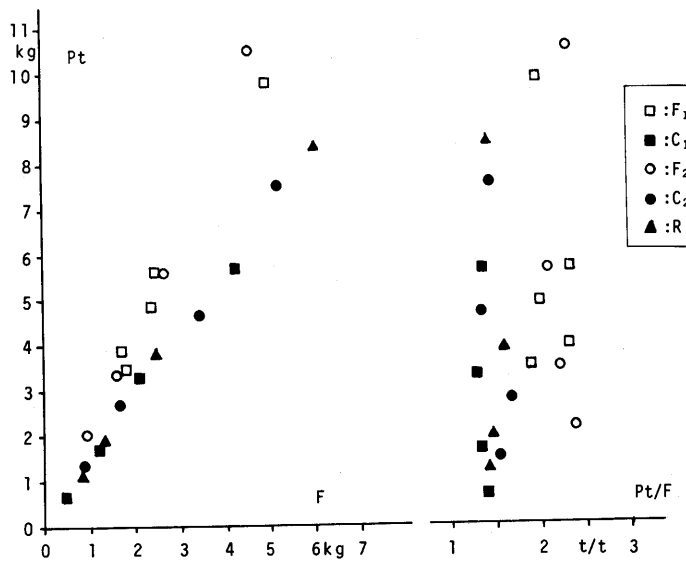
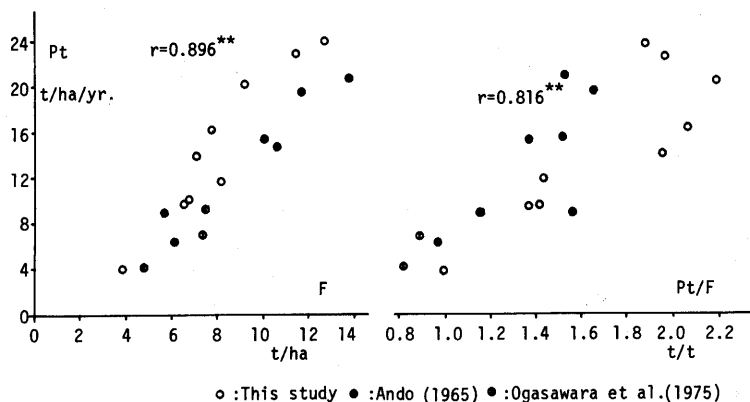


図-36 新居クロマツ林の単木ごとの地上部純生産量 (Pt) と針葉量 (F) および針葉の能率 (Pt/F) との関係

Fig-36. Aboveground net production Pt, in relation to needle amount F and efficiency of needles Pt/F in each tree in five plots at Arai.



図—37 林分あたりの地上部純生産量 (Pt) と針葉量 (F) および針葉の能率 (Pt/F) との関係

Fig—37. Aboveground net production Pt in relation to amount F and efficiency of needles Pt/F in *Pinus thunbergii* stands in Japan.

林分を含めて合計18林分の値から林分単位で上記の関係をみると、図—37左の関係がみられる。地上部純生産量 Pt は針葉量と高い正の相関関係がみられる (相関係数0.90)。ここで、地上部純生産量 Pt を針葉量 F と針葉の能率 Pt/F に分解することができる。

$$Pt = F \times Pt/F$$

Pt を Y 軸に Pt/F を X 軸にとり、すでに述べた21林分の値をプロットすると図—37右の関係がみられる。針葉の能率 Pt/F は林分ごとに異なった値を示し、それは Pt と正の相関をもった関係になっていることがわかる。つまり地上部純生産量は針葉量と針葉の生産能率の両方に依存しているのである。

以下に施肥によって針葉量と生産能率がどのくらい増加したかを計算しよう。F₁区とC₁区、F₂区とC₂区が隣り合った区であるので、その針葉量の差が施肥による増加分とするならば、施肥によって針葉量が6.95t/haから7.83t/ha、8.16t/haから9.19t/haへ、つまり両方とも約13%増加したと計算される。台風によると思われる影響を補正した場合は8.66t/haから11.21t/ha、9.89t/haから12.44t/haへ、つまり26~34%増加したと計算される。針葉の生産能率はC₁区=1.40t/t、F₁区=2.07t/t、C₂区=1.43t/t、F₂区=2.19t/tであり、それぞれの比からの計算では施肥による針葉の生産能率の増加は48~52%であり、単木からの計算値と一致する。台風によると思われる影響を補正した針葉量を用いた場合はC₁区=1.13t/t、F₁区=1.45t/t、C₂区=1.19t/t、F₂区=1.61t/tとなり、施肥による針葉の生産能率の増加は28~35%になる。

富津海岸のクロマツ林では、生産能率計算のための針葉量として1968年の純生産量に寄与した1967年の針葉量7.1t/haを用いると、施肥によって2年間で針葉量が3.9t/haから10.0t/ha

つまり約150%，針葉の生産能率は1.0t/tから2.0t/tつまり100%増加したことになる。

針葉量の少なかった富津海岸林に施肥した場合は、針葉量の増加が生産能率の増加より大きかった。しかし比較的生育が回復して針葉量も7~8t/haになっていた新居海岸林に施肥した場合は、針葉の生産能率の増加が針葉量の増加より大きいことがわかった。

生育のよい山地のクロマツ林の針葉の生産能率は1.5~2.0t/tであり、施肥した富津海岸、新居海岸のそれは2.0~2.2t/tである。このことは3つの施肥林において施肥の効果が充分であったことが針葉の生産能率の値からも言えることになる。

e. 生産物の分配

生産物が絶対量でどの程度分配されるかを著者の解析した9林分(新居C₁・F₁・C₂・F₂, R, 富津FC・FF, 田無T, 清澄K)と小笠原ほか(1975)の鳥取砂丘の3林分(T₁・T₂・T₃)から図-38に描いた。生産物の針葉, 枝, 幹への分配は富津および鳥取砂丘の極端に生育の悪い林(FC, T₁, T₂, T₃)を除くとそれぞれ4~6.7t/ha/yr, 2.5~6.2t/ha/yr, 2.2~11.0t/ha/yrの範囲となり, それぞれの最大値と最小値の比は1.7, 2.5, 5.0となる。生産量の総量が大きくなるに従って, 針葉へよりも幹や枝への分配が大きくなる。つまり極端に針葉量の少ない林を除いて施肥した場合の増加は, 幹や枝に多くあらわれるといえる。

新居海岸の対になったC₁区・F₁区とC₂区・F₂区を施肥前後の値とすれば, C₁区からF₁区では幹で245%, 枝で142%, 針葉で119%増加し, C₂区からF₂区では幹で194%, 枝で207%, 針葉で128%, 根で213%増加したことになる。施肥によって根へも大きく分配されることがわかる。

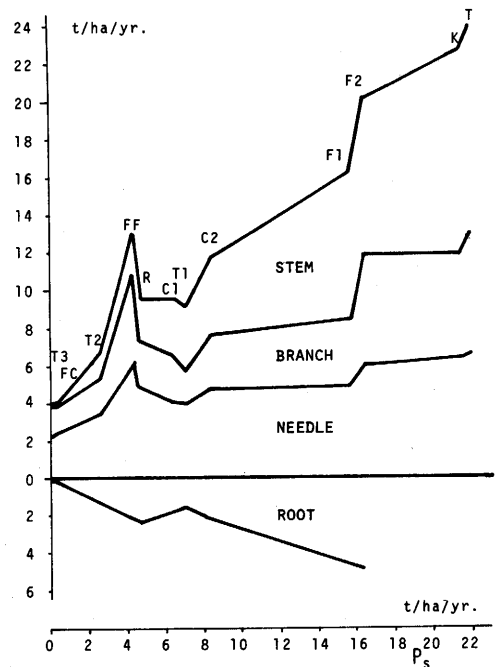


図-38 幹の純生産量(P_s)と各部分の純生産量の関係

Fig-38. Distribution of product to each organ in relation to rate of net production of stem P_s in each plot.

f. 針葉中の養分濃度および養分量と地上部純生産量

第1章の富津海岸, 第2章の村松海岸および原ほか(1954), 門田(1955)のN, P, Kなどの施肥試験の結果から, Nのみが効果のあったことがわかった。そのことは針葉中に含まれるNの濃度および総量が地上部純生産量と比例関係にあるならばさらにはっきりするだろう。

図-39は, 当年生葉中の各成分の濃度と地上部純生産量の関係を示したものである。相関係数(r)がプラスであるのはNのみで, かつ高い値を示した。Pに関しては田無は火山灰土壌であって磷酸吸収係数が高く, 富津は貝殻の石灰による磷酸の固定があるためか, Pの濃度が低い。河田・衣笠(1968, 1969), 衣笠・河田(1974, 1978)は, クロマツ幼齡林へのNPKの施肥によって針葉中のP濃度は0.5mg/gから0.8mg/gと高まった(逆にN濃度は11.0mg/gから0.9mg/gと低くなった)例を報告している。おそらくこれはP欠乏に対する改善例と思われるが, その回復濃度0.8mg/gをうまわった田無・富津は不足しているとは言えないだろう。Kはいずれの林分も6~7mg/gで大差はない。Caは貝殻の多い富津(FC, FF)で高い値がみられた。Mg, Naは第5章で述べるように海からの供給があるため, 内陸の田無が低い値である。

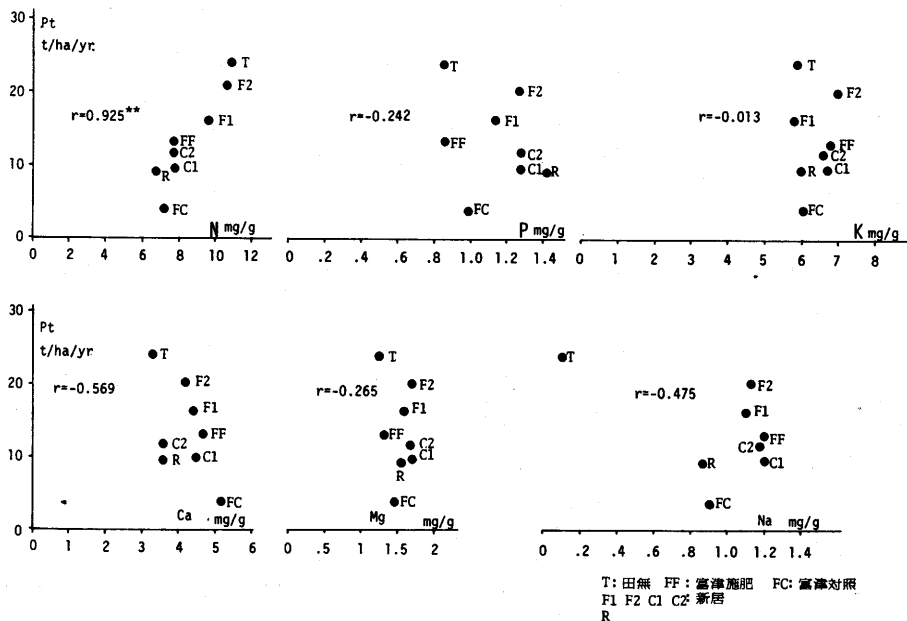


図-39 クロマツ林の地上部純生産量(Pt)と当年生葉中の養分濃度(N, P, K, Ca, Mg, Na)の関係
 T: 田無 FF: 富津施肥 FC: 富津対照 F₁, F₂, C₁, C₂, R: 新居

Fig-39. Relations between aboveground net production, Pt, and concentration of nutrient elements, N, P, K, Ca, Mg, and Na in current year needles in each plot.

第5章 クロマツ海岸林における養分の循環

第2章、第3章で村松海岸林と新居海岸林は落葉採取によって林床および土壌の養分が失われた結果生育が悪くなったようであり、施肥することによってクロマツの生育が回復したことがわかった。それらの養分が森林の内外にいかに関環しているか、さらに森林の養分収支はどのようになっているのかを知ることは森林の栄養状態を知るために重要なことである。

著者は新居海岸の施肥区 (F₂区) と対照区 (C₂区) において1968年1月から1969年2月まで林内外雨、リター (落葉, 落枝など) の回収 (第3章) を、1969年11月に試料木の伐倒 (第3章) を行い、それらを化学分析し、両区の養分吸収量, 還元量, 材部への固定量を計算した。

a. 方法

植物体の化学分析の方法は第3章と全く同じである。林内外の雨は直径14.8cm(面積172cm²)のポリロートを褐色のポリピンにとりつけ、林内に4コ林外に8コずつ設置し、月に1回の割合で回収した。林外, 施肥区 (F₂区), 対照区 (C₂区) の区ごとに試料を混合し実験室にもち帰り化学分析を行った。口紙で口過したのちNO₃-N, NO₃-Nは分光光度計を用いてそれぞれネスラー法,²⁰⁾ ニトロフェノールジスルホンサン法²⁰⁾によって回収後2~3日以内に行った。P, K, Ca, Mg, Naについては口液を王水, H₂O₂処理し有機物を分解し, Pはシャーマン法, K, Ca, Mg, Naは植物体と同様に原子吸光光度計 (パーキンエルマー製) で定量した。CaはEDTA滴定法も併用した結果, Laを添加しないでもPO₄³⁻の影響がなかった。

b. リター中の養分量

リターのうち落葉の養分濃度は3ヶ月分を, 落枝その他は2回にまとめて求めた (表18)。各成分とも針葉中に75%以上存在し, とりわけKとNaは90%以上の値となった。

針葉の落下によるNの還元量はF₂区で28.6kg/ha/yr, C₂区で16.4kg/ha/yrであり, この値は静岡県小笠郡の海岸砂丘クロマツ林の7林分でえられた値¹⁵⁾13.3~23.7 (平均18.7)kg/ha/yrに近い値であった。

c. 林内雨, 林外雨中の養分量

林床へは樹幹を伝わって流れる雨もあり, 樹幹流と言われる。測定が困難であったので本報告では行わなかったが, 同属のマツ林 (大津のアカマツ, ヒノキ林) における西村 (1973) の報告では樹幹流に占める養分量の割合は林内雨+樹幹流に対してN7%, P6%, K4%, Ca7%, Mg6%であってさほど大きな比重をしめていないようであった。そこでこの樹幹流の量を除外して考察を進めることにした。

表—18 施肥区 (F₂) と対照区 (C₂) のリター中の養分濃度および養分量 1968年2月—1969年2月Table—18. Concentration and Amount of nutrient elements in litter fall during Feb. 1968 to Feb. 1969 in the plots F₂ and C₂ at Arai.

		Nutrient concentration of litter fall						Nutrient amount of litter fall						
		kg/g						kg/ha						
Plot F ₂		N	P	K	Ca	Mg	Na	Dry matter	N	P	K	Ca	Mg	Na
Needles	Feb.-May 1968	7.7	0.70	3.2	6.5	1.43	1.2	293	2.26	0.21	0.94	1.90	0.42	0.35
	May-Aug. '68	7.4	0.58	2.0	7.4	1.62	1.3	623	4.61	0.36	1.25	4.61	1.01	0.81
	Aug.-Nov. '68	6.5	0.58	2.4	7.5	1.64	1.1	1528	9.93	0.89	3.67	11.46	2.51	1.68
	Nov. '68-Feb. '69	5.2	0.47	2.1	7.5	1.48	0.8	2275	11.83	1.07	4.78	17.06	3.37	1.82
Branches	Feb.-May '68	4.4	0.25	0.5	6.4	0.57	0.4	10	0.04	0.00	0.01	0.06	0.01	0.00
Cones	_____	3.9	0.24	0.5	1.6	0.47	0.4	22	0.09	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01
Male flowers	_____	8.2	0.61	1.0	2.9	0.96	0.3	58	0.48	0.04	0.06	0.17	0.06	0.02
Others	_____	10.0	0.88	1.9	3.4	1.17	0.8	46	0.04	0.04	0.09	0.16	0.05	0.04
Branches & Cones	May '68-Feb. '69	4.5	0.22	0.4	4.6	0.58	0.2	436	1.96	0.10	0.17	2.01	0.25	0.09
Others'	_____	7.8	0.69	1.4	4.7	1.07	0.5	640	4.99	0.44	0.90	3.01	0.68	0.32
Total								5931	36.65	3.16	11.88	40.48	8.37	5.14
Plot C ₂		Nutrient concentration of litter fall						Nutrient amount of litter fall						
		mg/g						kg/ha						
		N	P	K	Ca	Mg	Na	Dry matter	N	P	K	Ca	Mg	Na
Needles	Feb.-May 1968	5.6	0.74	3.2	5.8	1.28	1.2	271	1.52	0.20	0.87	1.57	0.35	0.33
	May-Aug. '68	5.3	0.63	2.1	6.2	1.53	1.5	515	2.73	0.32	1.08	3.19	0.79	0.77
	Aug.-Nov. '68	4.7	0.55	2.1	6.9	1.51	1.4	1151	5.41	0.63	2.42	7.94	1.74	1.61
	Nov. '68-Feb. '69	4.4	0.63	2.4	6.7	1.36	0.7	1524	6.71	0.96	3.66	10.21	2.07	1.07
Branches	Feb.-May '68	4.4	0.25	0.5	6.4	0.57	0.4	3	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Cones	_____	3.9	0.24	0.5	1.6	0.47	0.4	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Male flowers	_____	6.7	0.48	0.7	2.5	0.88	0.3	20	0.13	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01
Others	_____	10.0	0.88	1.9	3.4	1.17	0.8	38	0.38	0.03	0.07	0.13	0.04	0.03
Branches & Cones	May '68-Feb. '69	4.9	0.27	0.4	4.5	0.50	0.2	444	2.18	0.12	0.18	2.00	0.22	0.09
Others	_____	7.7	0.72	1.3	3.8	1.00	0.4	360	2.77	0.26	0.47	1.37	0.36	0.14
Total								4327	21.84	2.53	8.76	26.48	5.59	4.05

1968年1月19日から1969年1月24日まで月に1回の割で林内雨, 林外雨の量と養分濃度を測定し表19に示した。単位面積あたりの養分量になおしたのが表—20である。

林外から雨によってもたらされる1年間の養分量はN 5.9, P 0.38, K 8.2, Ca 9.7, Na 70.5kg/ha/yrであり調査に近い磐田市¹⁵⁾のN 6.0, P 0.04, K 7.7, Ca 10.9kg/ha/yrにPをのぞいて近い値である。京都市¹⁹⁾のN 3.5, P 0.24, K 4.5, Ca 10.6, Mg 1.1, kg/ha/yrおよび大津市⁵⁰⁾のN 5.4, P 0.63, K 2.6, Ca 10.7, Mg 2.6kg/ha/yrとくらべるとN, P, Ca

表—19 林外雨と施肥区・対照区の林内雨の月別の量と養分濃度 1968年1月~1969年1月
 Open: 林外F: F₂区 C: C₂区

Table—19. Monthly precipitation and concentration of nutrient elements in rain water in the openland (Open) and in throughfall in the plot F₂ (F) and C₂ (C) at Arai.

period plot		mm	NO ₃ -N ppm	NH ₄ -N ppm	P ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm
Jan. 19	Open	62	0.10	0.22	0.02	0.35	1.4	0.21	1.0
~Feb. 20	F	40	0.27	1.36	0.00	1.27	2.4	0.64	2.8
1968	C	43	0.27	1.22	0.00	1.45	2.3	0.75	3.0
Feb. 20	Open	85	0.07	0.06	0.005	0.45	0.90	0.46	2.5
Mar. 19	F	54	0.22	1.02	0.018	1.01	1.81	0.94	7.0
	C	65	0.22	1.09	0.011	0.96	1.65	0.88	6.0
Mar. 19	Open	177	0.09	0.06	0.00	0.18	0.65	0.28	1.9
~Apr. 15	C	123	0.20	0.62	0.01	0.58	1.02	0.65	4.4
	F	139	0.20	0.68	0.00	0.67	1.30	0.77	5.5
Apr. 15	Open	265	0.08	0.24	0.017	0.37	0.37	0.22	1.6
~May 20	F	180	0.33	0.65	0.006	1.40	0.97	0.83	6.1
	C	195	0.43	0.65	0.015	1.50	1.35	1.36	10.0
May 20	Open	110	0.08	0.62	0.037	0.75	0.70	0.50	4.2
~June 19	F	78	0.34	1.01	0.074	2.30	2.67	2.19	15.2
	C	88	0.30	1.01	0.062	3.10	1.77	2.08	14.4
June 19	Open	308	0.08	0.44	0.034	0.20	0.42	0.18	1.3
~July 18	F	216	0.16	1.11	0.058	0.75	1.16	0.68	4.0
	C	260	0.15	0.83	0.049	0.90	1.00	0.65	4.0
July 18	Open	150	0.00	0.10	0.008	0.43	0.57	0.64	5.0
~Aug. 22	F	94	0.66	1.02	0.172	2.70	2.78	3.56	26.0
	C	123	0.10	0.48	0.059	2.38	2.35	3.27	23.7
Aug. 22	Open	320	0.04	0.20	0.034	1.88	2.64	2.52	15.0
~Sep. 18	F	197	0.10	0.23	0.016	1.88	1.65	2.42	17.0
	C	256	0.06	0.30	0.029	1.73	2.08	2.31	14.9
Sep. 18	Open	69	0.03	0.30	0.049	0.45	0.99	0.48	2.5
~Oct. 18	F	55	0.27	0.98	0.031	3.08	2.25	2.22	11.3
	C	55	0.20	1.24	0.078	3.15	2.00	2.42	12.6
Oct. 18	Open	95	0.21	0.28	0.031	0.45	0.91	0.41	3.3
~Nov. 20	F	72	0.63	0.88	0.029	2.12	2.45	1.56	9.9
	C	72	0.56	0.86	0.061	2.25	2.00	1.50	10.2
Nov. 20	Open	183	0.00	0.16	0.002	0.33	0.50	0.21	1.7
~Dec. 23	F	144	0.24	0.61	0.003	2.20	1.22	0.72	3.8
	C	145	0.10	0.82	0.058	2.22	1.38	0.59	3.8
Dec. 23	Open	27	0.11	0.41	0.001	0.38	1.15	0.17	1.0
~Jan. 24	F	23	0.76	3.10	0.051	2.65	2.50	1.14	3.5
	C	20	0.50	2.80	0.067	2.58	2.18	1.00	3.3

表—20 林外雨と林内雨に含まれる養分量 (kg/ha)

Table—20. Monthly amount of nutrient elements contained in rain water in the openland (Open) and in throughfall in the plot F₂ (F) and C₂ (C) at Arai.

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	Na
Jan. 19	Open	0.06	0.14	0.01	0.22	0.87	0.13	0.62
~Feb. 20	F	0.11	0.54	0.00	0.51	0.96	0.26	1.12
	C	0.12	0.52	0.00	0.62	0.99	0.32	1.29
~Mar. 19	Open	0.06	0.05	0.00	0.38	0.77	0.39	2.13
	F	0.12	0.55	0.01	0.55	0.98	0.50	3.78
	C	0.14	0.71	0.01	0.62	1.07	0.57	3.90
~Apr. 15	Open	0.16	0.11	0.00	0.32	1.15	0.50	3.36
	F	0.25	0.76	0.01	0.71	1.25	0.80	5.41
	C	0.28	0.95	0.00	0.93	1.81	1.07	7.65
~May 20	Open	0.21	0.64	0.05	0.98	0.98	0.58	4.24
	F	0.59	1.17	0.01	2.52	1.75	1.49	10.98
	C	0.84	1.27	0.03	2.93	2.63	2.65	19.50
~June 19	Open	0.09	0.68	0.04	0.83	0.77	0.55	4.62
	F	0.27	0.79	0.06	1.79	2.08	1.71	11.86
	C	0.26	0.89	0.05	2.73	1.56	1.83	12.67
~July 18	Open	0.25	1.36	0.10	0.62	1.29	0.55	4.00
	F	0.35	2.40	0.13	1.62	2.51	1.47	8.64
	C	0.39	2.16	0.13	2.34	2.60	1.69	10.40
~Aug. 22	Open	0.00	0.15	0.01	0.65	0.86	0.96	7.50
	F	0.62	0.96	0.16	2.54	2.61	3.35	24.44
	C	0.12	0.59	0.07	2.93	2.89	4.02	28.78
~Sep. 18	Open	0.13	0.64	0.11	6.02	8.45	8.06	48.00
	F	0.20	0.45	0.03	3.70	3.25	4.77	33.49
	C	0.15	0.77	0.07	4.43	5.32	5.91	38.14
~Oct. 18	Open	0.02	0.21	0.03	0.31	0.68	0.33	1.73
	F	0.15	0.54	0.02	1.69	1.24	1.22	6.22
	C	0.11	0.68	0.04	1.73	1.10	1.33	6.93
~Nov. 20	Open	0.20	0.27	0.03	0.43	0.86	0.39	3.14
	F	0.45	0.63	0.02	1.53	1.76	1.12	7.13
	C	0.40	0.62	0.00	1.62	1.44	1.08	7.34
~Dec. 23	Open	0.00	0.29	0.00	0.60	0.92	0.38	3.11
	F	0.35	0.88	0.00	3.17	1.76	1.04	5.47
	C	0.15	1.19	0.08	3.22	2.00	0.86	5.51
~Jan. 24	Open	0.03	0.11	0.00	0.10	0.31	0.05	0.27
	F	0.17	0.71	0.01	0.61	0.58	0.26	0.81
	C	0.10	0.56	0.01	0.52	0.44	0.20	0.66

は近い値であるが、新居海岸が海に近いため⁶⁵⁾かKとMgは新居海岸がまさっている。林内の養分量の値はほとんどの月において林外を上まわっている。

なお8月～9月の林外雨中の養分量は次節で述べる理由から林内雨中の養分量－溶脱量とした。

d. 樹冠からの溶脱量

表—21 Naの量から算出した潮風による付着塩 (kg/ha)

Table—21. Monthly amount of adherent dry salt on pine trees calculated from that of sodium.

海水の成分比 Ratio of elements		Na 1.000	Mg 0.120	Ca 0.0382	K 0.0376
Jan. 19	F	0.50	0.06	0.02	0.02
~Feb. 20	C	0.67	0.08	0.03	0.03
1968					
	F	1.65	0.20	0.06	0.06
~Mar. 19	C	1.77	0.21	0.07	0.07
	F	2.05	0.25	0.08	0.08
~Apr. 15	C	4.29	0.51	0.16	0.16
	F	6.74	0.81	0.26	0.25
~May 20	C	15.26	1.83	0.58	0.57
	F	7.24	0.87	0.28	0.27
~June 19	C	8.05	0.97	0.31	0.30
	F	4.64	0.56	0.18	0.17
~July 18	C	6.40	0.77	0.24	0.24
	F	16.94	2.03	0.65	0.64
~Aug. 22	C	21.28	2.55	0.81	0.80
	F	(-14.51)			
~Sep. 18	C	(-9.86)			
	F	4.49	0.54	0.17	0.17
~Oct. 18	C	5.20	0.62	0.20	0.20
	F	3.99	0.48	0.15	0.15
~Nov. 20	C	4.20	0.50	0.16	0.16
	C	2.36	0.28	0.09	0.09
~Dec. 23	F	2.40	0.29	0.09	0.09
	F	0.54	0.06	0.02	0.02
~Jan. 24	C	0.39	0.05	0.01	0.01
1969					
Total	F	51.14	6.14	1.96	1.92
	C	69.91	8.38	2.66	2.63

Naは植物体にわずかしが含まれていないにもかかわらず、林内雨と林外雨に含まれる養分量の差が大きい。これは潮風によってもたらされた海水が針葉などの表面に付着して乾いたものが、雨水によって再び溶けたものと考えた。

林内雨と林外雨に含まれるNa量の差がすべて潮風によってもたらされた付着塩と仮定すると、

表—22. 雨による溶脱量 (kg/ha)

Table—22. Monthly amount of leaching of nutrient element from tree crowns.

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg
Jan. 19	F	0.05	0.40	-0.01	0.27	0.07	0.07
~Feb.	C	0.06	0.38	-0.01	0.37	0.09	0.11
1968							
	F	0.06	0.50	0.01	0.11	0.15	-0.09
~Mar. 19	C	0.08	0.66	0.01	0.17	0.23	-0.03
	F	0.09	0.65	0.01	0.31	0.02	0.05
~Apr. 15	C	0.12	0.84	0.00	0.45	0.50	0.06
	F	0.38	0.53	-0.04	1.29	0.51	0.10
~May 20	C	0.63	0.63	-0.02	1.38	1.07	0.24
	F	0.18	0.11	0.02	0.69	1.03	0.29
~June 19	C	0.17	0.21	0.01	1.60	0.49	0.31
	F	0.10	1.04	0.03	0.83	1.04	0.36
~July 18	C	0.14	0.80	0.03	1.48	1.07	0.37
	F	0.62	0.81	0.15	1.25	1.10	0.36
~Aug. 22	C	0.12	0.44	0.06	1.48	1.23	0.51
	F	0.07	-0.19	-0.08	(1.23)	(0.75)	(0.36)
~Sep. 18	C	0.02	0.13	-0.04	(1.35)	(0.73)	(0.45)
	F	0.13	0.33	-0.01	1.21	0.39	0.35
~Oct. 18	C	0.09	0.47	0.01	1.22	0.22	0.38
	F	0.25	0.36	-0.01	0.95	0.75	0.25
~Nov. 20	C	0.15	0.35	-0.03	1.03	0.42	0.19
	F	0.35	0.59	0.00	2.48	0.75	0.38
~Dec. 23	C	0.15	0.90	0.08	2.53	0.99	0.19
	F	0.14	0.60	0.01	0.49	0.25	0.15
~Jan. 24	C	0.07	0.45	0.01	0.41	0.12	0.10
1969							
Total	F	2.42	5.73	0.08	11.11	6.81	2.63
	C	1.80	6.26	0.11	13.47	7.16	2.88

海水の組成⁴¹⁾からNa量1.0000に対してMg量0.1200, Ca量0.0382, K量0.0376と計算される。月々の値は表-21に示した。8月~9月が例外的な値をとったのは1968年8月29日にWSWの最大瞬間風速26.9m/Sの強風100mmの雨量(浜松)を伴う台風³⁶⁾が通過したため海水の飛注が直接堤防内に入ったためであろう。

そこで樹冠からの溶脱量は林内雨中の養分量-付着塩の量-林外雨中の養分量として計算した。その値は表-22に示した。なお, 8月~9月の値は, 7月~8月の値と9月~10月の値の平均値とした。

季節による変化は, K, Ca, Mgでは1~3月の生育休止期に低い傾向があった。

1年間の量は施肥区でN 8.2, P 0.08, K 1.11, Ca 6.8, Mg 2.6kg/ha/yr, 対照区でN 8.1, P 0.11, K 13.5, Ca 7.2, Mg 2.9kg/ha/yrであり, 両区とも同じような値を示した。この値はテーダマツ林¹⁸⁾の値N 4.9, P 0.16, K 18.5, Ca 5.2kg/ha/yrに近い値を示している。

e. 幹, 根への固定量⁴⁶⁾

幹の材部のN, P, K, Mg, Naの濃度は形成層に近い外側で最も高く, 内側に向うにしたがって低くなり, 5年生以上の材部ではほぼ一定の値をとる。その値は施肥区においてN 0.66mg/g,

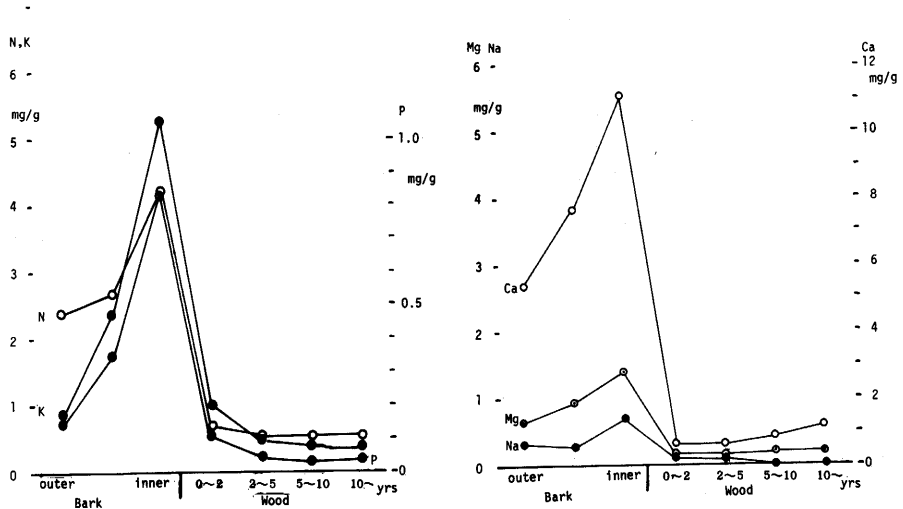


図-40 クロマツの幹の部分によるN, P, K, Ca, Mg, Naの濃度

Fig.—40. Changes in concentration of nutrient elements N, P, K, Ca, Mg and Na along radial direction of stem of a *Pinus thunbergii* tree in the control plot.

P 0.04mg/g, K 0.5mg/g, Mg 0.24mg/g, Na 0.0mg/g, 対照区においてN 0.56mg/g, P 0.04mg/g, K 0.4mg/g, Mg 0.18mg/gでNa 0.0mg/gであった。Caの濃度は内側に向うに従って高くなり、中心部では施肥区1.1mg/g, 対照区1.0mg/gとなった。ここでは施肥区も同じ傾向なので対照区のみ図示した。(図40)。

そこで上記の値を材部に固定される濃度として、幹と根（直径1 cm以下の細根を除く）の生産量（表-14）を掛け合わせて算出された値を幹、根への固定量とした（表-23, 24）。

f. ハマエンドウによるN固定量

林冠があいて、比較的明るい場所に、マメ科植物のハマエンドウ (*Lathyrus maritimus*) が敷きつめたように生育している所がある。そこでの生育開始期の2月のN現存量は地下部を含めて4 kg/haで最盛期の6月のそれは23kg/haであった。その増加分が根粒菌による固定と仮定すると、年間19kg/haのNが空気中から固定されたことになる。しかし施肥区では、ほとんどハマエンドウがみられない。対照区でも上記の場所の1/10ほどの現存量しかない。現存量と2月～6月のNの増加量が比例するとして計算すると、対照区のN固定量は2 kg/ha/yrとなる。

g. 林地の養分の収支

b. ~f. 節をとりまとめて、林地の養分収支を表にすると表-23, 24になる。

リターが林床から持ち去られるとしたら、林地から減少する養分量（地下水への流亡量を考えないと）はリター中の養分量+幹、根へ固定される養分量となる。その値を林外から供給される量に対する百分率でみると、対照区（表-23）ではN 320%, P 730%, K 100%, Ca 210%, Mg 38%, Na 3%となった。K, Mg, Naは林外からの供給量と等しいか、それ以下になり、落葉かきを行っても不足しないといえそうである。NとPの林外からの供給はきわめて少ない。落葉かきによってPが奪われた林地ではマメ科植物の生育は貧弱になり、N固定が進まないであろうし、Nは土壌母材からの風化も期待できない。さらに砂地ではNO₃-Nは地下水への流亡も大きいであろうから、決定的に不足状態となろう。Pも土壌母材からの風化がなかったなら不足をきたすであろう。

落葉かきがなされない状態を考えると、林地から減少する養分量（地下水への流亡を考えないと）は幹、根に固定される養分量に等しい。その値を林外から供給される量に対する百分率でみると、対照区ではN 42%, P 61%, K 21%, Ca 41%, Mg 7%, Na 0%となり全ての成分が足りる状態になる。しかしクロマツ林が施肥区なみの生産量を維持するためには、さらに多くの養分が幹、根に固定される（表-24）。その固定量を林外からの供給量に対する百分率でみると、N 138%, P 126%, K 57%, Ca 85%, Mg 22%, Na 0%となり、N, Pが不足する。

地下に流下する養分の量をLIKENSほか（1977）、T_{SUTSUMI}（1977）の総説にある温帯常緑樹林

表-23 対照区（無施肥区）における養分の収支

Table-23. Nutrient budget in the control plot C₂ at Arai.

		(kg/ha/yr)					
		N	P	K	Ca	Mg	Na
(A)	Input						
	rain water	5.9	0.38	8.2	13.0	9.7	70.5
	dry salt by sea wind			1.9	2.0	6.1	51.1
	leguminous fixation	2.0					
	total	7.9	0.38	10.8	15.7	18.1	140.4
(B)	Return						
	leached by rain	8.1	0.11	13.5	7.2	2.9	
	to forest litterfall	21.8	2.53	8.8	26.5	5.6	4.1
	floor total	29.9	2.64	22.3	33.7	8.5	
(C)	Immobilization into stem & root	3.3	0.23	2.3	6.4	1.2	0.0
(B+C)	Uptake by tree	33.2	2.87	24.6	40.1	9.7	
(D)	Average output in world	1.4	0.18	3.4	14.8	5.8	17.0
(E)	Weathering in Hubbard Brook	0	?	7.1	21.1	3.5	5.8
(A+E)-(C+D)	Budget	3.2	?	12.2	15.6	14.6	129.2

表-24 施肥区における養分の収支

Table-24. Nutrient budget in the fertilized plot F₂ at Arai.

		(kg/ha/yr)					
		N	P	K	Ca	Mg	Na
(A)	Input						
	rain water	5.9	0.38	8.2	13.0	9.7	70.5
	dry salt by sea wind			1.9	2.0	6.1	51.1
	leguminous fixation + fertilization	50.0					
	total	55.9	0.38	10.1	15.0	15.8	121.6
(B)	Return						
	leached by rain	8.2	0.08	11.1	6.8	2.6	
	to forest litterfall	36.7	3.16	11.9	40.5	8.4	5.1
	floor total	44.9	3.24	23.0	47.3	11.0	
(C)	Immobilization into stem & root	7.7	0.48	5.8	12.8	3.4	0
(B+C)	Uptake by tree	52.6	3.72	28.8	60.1	14.4	
(D)	Average output in world	1.4	0.18	3.4	14.8	5.8	17.0
(E)	Weathering in Hubbard Brook	0	?	7.1	21.1	3.5	5.8
(A+E)-(C+D)	Budget	46.8	?	8.0	8.5	10.1	110.4

のstream output あるいは run off の平均値 (11ヶ所) —— N 1.4 kg/ha/yr, P 0.18, K 3.4, Ca 14.8, Mg 5.8, Na 17.0——でもっておきかえ, 岩石(土壌母材)の風化量をHubbard Brookの落葉広葉樹林の値⁴³⁾(N 0 kg/ha/yr, P?, K 7.1, Ca 21.1, Mg 3.5, Na 5.8)でもっ

ておきかえると、施肥区と対照区における養分の収支は表-23, 24の最下段の値となる。施肥区において硫酸が施されなかったとしたらNの収支は、 -3.2t/ha/yr となる。またPは土壤母材の風化による可吸態化が0としたら、収支は -0.28t/ha/yr となる。その他の成分は黒字になっている。

K, Ca, Mg, Naは海からの供給が多く、Caに関しては土壤母材からの供給が多い^{43, 68}ことから不足しにくい成分であるといえよう。Pは土壤母材からの供給もとくにマツの菌根によるものが考えられるが、Nはほとんど望めないで、最も不足しやすい成分といえよう。

要 旨

千葉県富津海岸、茨城県東海村村松海岸において汀線から100~1,000m内側に入った場所に生育の悪いクロマツの人工林がある。そこでの環境解析、施肥実験によって生育の悪い原因を明らかにし、かつ静岡県新居海岸（東京大学愛知演習林新居試験地）の施肥林と無施肥林において現存量、純生産量、養分の循環量などの測定を行い、施肥が林分レベルでどのようなメカニズムを通じて効果をもたらすかを明らかにすることを目的とした。

1. 富津海岸砂丘の生育の悪い林

生育の悪い林は良い林とくらべて、地下水位のレベルがほぼ同一であるが、貝殻をより多く含んだ砂地の上に成立している。そこで主要な生長阻害因子は水分条件ではなく、栄養条件であると考え、生育の悪い林帯の中央部でN, NP, P, K, S, Feの施肥実験を行った。NH₄-Nを含んだ施肥区においてのみ、針葉中のN濃度、樹高生長量に他の区にくらべて差がみられ、施肥の効果がみられた。またポット実験によってマメ科植物はP欠乏であることがわかった。

クロマツにとって生長阻害要因はNの欠乏にあると判断できたが、その起因するところは、この海岸砂丘が陸化してからの時間が短い上に、貝殻が砂土に多く混在するためにマメ科植物も生育が悪くNの蓄積が進んでいないためであると考えた。

2. 村松海岸砂丘の生育の悪い林

1968年当時の林床は落葉かきがなされ、A₀層を欠き砂土が露出している場所が多かった。その場所にN, NP, NPKMg, P, K, KMg, Mgの施肥を行った結果、Nを含んだ区のみにおいて針葉長、針葉の色に他の区と差がみられ、N施肥の生長に及ぼす効果がみられた。

トゲのあるニセアカシアの混交する場所や人家から離れた原子力研究所の隣接地では落葉かきが行われていなく、生長が回復していることから、この林の生長阻害要因は落葉かきによるNの持出しによるものと判断された。

3. 生育の悪い海岸砂丘クロマツ林における施肥の効果

新居海岸の生育の悪い林にオガ屑堆肥と硫安（合計でNとして250kg/ha）を初年に、その後3年間は硫安（Nとして50kg/ha/yr）を施し、施肥の効果がいかに現われるかを2ヶ所で調べた。

施肥当年では針葉1対あたりの重量は当年生葉では対照区（無施肥）の3～4割増加したが、1年生葉・2年生葉では変化がなかった。針葉中のN濃度は2年生葉では施肥後1ヶ月で高くなり、当年生葉・1年生葉では3ヶ月後に対照区とくらべて高くなった。落葉中のN濃度は施肥3ヶ月後に高くなった。

1ヶ月ごとに測定された落葉量は施肥15ヶ月後で増加がみられた。雄花の量は施肥翌年に多くなったが、枝や球果の落下量には変化がみられなかった。

樹高、直径、材積の増大は施肥翌年にあらわれた。純生産量の増加は、針葉・根は施肥当年に増加したが、幹・枝は翌年になってはじめてみられた。

新居海岸と富津海岸でクロマツ当年生葉のみかけの光合成速度を10月に光飽和、22℃で測定した。新居海岸では施肥区で平均7.8mg、CO₂/g/hr、対照区で平均6.7mgCO₂/g/hrであり、富津海岸では施肥区で8.4mgCO₂/g/hr、対照区で3.5mgCO₂/g/hrであった。施肥によるみかけの光合成速度の増加は統計的に有意であった。

4. クロマツ林の針葉量・針葉中の養分量と純生産量

生産量Pは針葉量Fと針葉の生産能率P/Fに分解される。

$$P = F \times P/F$$

海岸の生育の悪いクロマツ林にNを施肥した結果、純生産量が増加したが、その増加に対して針葉量の増加と生産能率の増加がどの割合で寄与しているかを調べた。

新居海岸2ヶ所、富津海岸1ヶ所において施肥試験地の対照区と施肥区をそれぞれ施肥前後の値として両者をくらべた。新居海岸では針葉量は7.0から7.8t/haおよび8.2から9.2t/haへと約12%増加した。針葉の地上部純生産量に対する能率は1.4から2.2t/tおよび1.4から2.2t/tへと約50%増加した。富津海岸においては針葉量が3.9から10.0t/haへ、針葉の地上部純生産量に対する能率は1.0から2.0t/tへ増加した。富津海岸のように極端に針葉量の少ない林では施肥によって増加した生産物はまず針葉量の増加にふり向けられ、生育の良い林では幹や根へ多く分配されることがわかった。

富津海岸の2林分、新居海岸の5林分、東京大学演習林田無試験地の1林分における地上部純生産量と当年生針葉中のN・P・K・Ca・Mgの濃度との関係を見ると、純生産量はNの濃度と高い相関関係（0.925**）がみられ、ほかの要素とは有意でない負の相関関係（-0.01～-0.57）がみられた。

5. クロマツ林における養分の収支 (表-23参照)

新居海岸において養分の循環量を測定した。降水およびハマエンドウの根粒によって林内に供給されるNの量は7.9kg/ha/yrであり、幹と太い根に固定される量は3.3kg/ha/yrである。そこで砂地においてNO₃-Nが流亡しやすいこと、林床の落葉かきによって22kg/ha/yrのNが持ち出されることはNの欠乏を決定的なものにしている。

海に近いため林外から供給されるK, Ca, Mg, Naの量はそれぞれ10.8, 15.1, 18.1, 140.4 kg/ha/yrと比較的多かった。とりわけMgは落葉かきによって林外に持ち出される量(5.6kg/ha/yr)を十分にまかなえるほど林外から供給されていることがわかった。

引用文献

- 1) ANDO, T. (1965), Estimation of dry-matter and growth analysis of the stand of Japanese black pine (*Pinus thunbergii*). *Advancing Frontiers of Plant Sci.* 10, 1—10.
- 2) 朝日正美・原秀・春田泰次 (1970), 肥培林の栄養分布 (第5報) クロマツ樹体の磷, 加里, 石灰, 苦土含量. 日林中部支講18, 21—24.
- 3) BJÖRKMÄN, E. (1953), Om "granens gulsjuka" i planskolor. *Skogsv Fören. Tidskr.* 51, 211—229.
- 4) BOLLE—JONES, E. W. (1955), The interrelationships of iron and potassium in the potato plant. *Plant and Soil* 6, 129—173.
- 5) BRÜNING, D. (1963), Einfluss einer mineralischen Düngung auf das Jugendwachstum von Kiefern und Roteichen. *Forstarchiv* 34, 25—30.
- 6) 千葉県, 富津地内海岸砂地造林事業概況書.
- 7) COSMAR, C. L. & ZSCHEILE, F. P. (1942), Analysis of plant extracts for chlorophylls a and b by a photoelectric spectrophotometric method. *Plant Physiol.* 17, 198.
- 8) 演習林研究部・千葉演習林 (1974), 千葉演習林更新林分資料(1) 演習林18, 131—191.
- 9) 藤田桂治・塘隆男・佐藤久男・堀田庸・宮下信嗣 (1974), スギ成木林の肥培効果 (Ⅱ) —樹幹析解による肥効のあらわれ方—. 85回日林講, 110—112.
- 10) 原勝・田中一夫・佐伯浩・鈴木導夫・田中幸一郎 (1954), 海岸砂丘地に於ける黒松造林不成績地の改善に関する研究 (第Ⅱ報). 鳥取大農会報10(3), 36—58.
- 11) 原勝 (1960), 海岸砂防の歴史について, 砂丘研究6(2), 1—8.
- 12) 原田洸 (1970), スギの成長と養分含有量およびこれに及ぼす施肥の効果に関する研究. 林試研報230, 1—104.
- 13) HEILMAN, P. E. & GESSEL, S. P. (1963), The effect of nitrogen fertilization on the concentration and weight of nitrogen, phosphorus, and potassium in Douglas-fir trees. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27, 102—105.
- 14) HUXLEY, J. S. (1932), Problems of relative growth. 74) より引用
- 15) 稲川悟一・伊藤悦夫 (1972), 海岸砂丘クロマツ林における落葉とそれによるチッ素の還元について, 日林中部支講20, 189—194.
- 16) INGESTAD, T. (1957) Studies on the nutrition of forest tree seedling I. Mineral nutrition of birch.

- Plant Physiol. 10, 418—439.
- 17) 伊佐義朗・村上温夫・薬師寺清雄 (1960), 外国産マツ類の育成に関する研究 (第I報) テーダマツの肥培に関する基礎的考察. 京大演報29, 162—189. 180.
 - 18) 伊藤悦夫・稲川悟一・佐敷修 (1964), 林内雨の養分循環に果す役割. 静大農研報14, 189—202.
 - 19) 岩坪五郎・堤利夫 (1968), 森林内外の降水中の養分量について (Ⅲ) 流亡水中の養分量について. 京大演報40, 140—156. 140
 - 20) JACKSON, M. L. (1958), Soil chemical analysis. 498pp. Prentice-Hall, Inc.
 - 21) 蒲谷肇・生嶋功・沼田真 (1963), 富津クロマツ人工林の生育状態中間報告. 千葉大文理生物学教室20pp.
 - 22) ———・生嶋功・沼田真 (1964), クロマツ林の生長と間伐—クロマツ海岸林の生態学的研究I. 千葉大文理銚子臨海研報6, 1—26.
 - 23) ———・佐藤大七郎 (1968), クロマツ林の乾物現存量, 生長量, 窒素現存量の推定法について. 79回日林講, 93—94.
 - 24) 門田正也 (1952), 防潮林の生態学的研究(8)クロマツ葉中の栄養三要素と糖分. 東大立研報10, 16—20.
 - 25) ——— (1955), 荒廃地造林の諸問題. 育林学新説, 195—211. 朝倉書店
 - 26) ——— (1962), 海岸砂地のクロマツの塩害に関する生理生態学的研究. 名大演報2, 1—95.
 - 27) ———・田崎忠良 (1949), 防潮林の生態学的研究(1). 東大立研報3, 38—51.
 - 28) 河田弘・衣笠忠司 (1968), クロマツ幼齡林施肥試験. 79回日林講, 328—329.
 - 29) ———・——— (1969), 広島県姥ヶ原国有林におけるクロマツ幼齡林施肥試験. 林試研報29, 121—136.
 - 30) 河田杰 (1940), 海岸砂丘造林法. 54pp. 養賢堂
 - 31) 川名明・相場芳憲・生原喜久雄 (1968), 壮齡林の肥培に関する研究 (Ⅲ) ヒノキ壮齡林について(2). 79回日林講, 333—335.
 - 32) 木村允 (1976), 陸上植物群落の生産量測定法. 112pp. 共立出版
 - 33) 衣笠忠司・河田弘 (1974), クロマツ幼齡林施肥試験. 日林関西支講25, 73—75.
 - 34) ———・——— (1978), クロマツ幼齡林施肥試験 (広島県西条菅林署姥ヶ原国有林)(第2回中間報告). 林試研報300, 121—140.
 - 35) 気象庁 (1967—1972), 観測所気象年報1966—1971.
 - 36) ——— (1969), 気象要覧828.
 - 37) ——— (1970), 気象要覧840.
 - 38) KITTREDGE, J. (1944), Estimation of foliage of trees and shrubs. J. For. 42, 905—912. 62) より引用
 - 39) 江景村 (1965), 水田土壌中各形態磷の有効性. 日土肥36, 90—94.
 - 40) KRAMER, P. J. & CLARK, W. S. (1947), A comparison of photosynthesis in individual pine needles and entire seedlings at various light intensities. Plant Physiol. 22, 51—57.
 - 41) 小山忠二郎・半田暢彦・杉村行勇 (1972), 湖水・海水の分析. 294pp. 講談社
 - 42) 楠元司 (1967), クロマツの光合成および呼吸. JIBP—PT—F (昭和41年度), 36—39.
 - 43) LIKENS, G. E, BORMANN, F. H, PIERCE, R. S, EATON, J. S. & JOHNSON, N. M. (1977), Biogeochemistry of a forested ecosystem. 146pp. Spriger-Verlag.
 - 44) MADGWICK, H. A, WHITE, XYDIAS G. K. & LEAF A. L. (1970), Biomass of Pinus resinosa in relation to potassium nutrition. For. Sci. 16, 154—159.
 - 45) MILLER, R. B. (1963a), Plant nutrients in hard beech. II. Seasonal variation in leaf composition. New Zealand J. Sci. 6, 378—387.

- 46) ——— (1963b), Ibid. III. The cycle of nutrients. Ibid. 6, 388—413.
- 47) 水戸管林署 (1955), 村松海岸植栽試験地の概要.
- 48) 三寺光雄・沼田真 (1964), 海岸クロマツ林の生態学的研究Ⅱ—生長阻害要因の検討—. 千葉大文理紀要 4(2), 39—46.
- 49) 新名謹之助 (1965), 林野土壌化学分析法—V. 森林立地 7(1), 21—28.
- 50) 西村武二 (1973), 山地小流域における養分物質の動き, 日林誌55, 323—333.
- 51) 沼田真 (1958), 千葉県における海岸砂丘の植物群落. 千葉県植物誌46—58.
- 52) 小笠原隆三 (1974), 樹齡・葉齡によるアカマツの葉内成分の変化. 日林誌56, 271—275.
- 53) ———・渡辺孝 (1974), 海岸砂丘地におけるクロマツの樹高と葉内成分の変化. 日林誌56, 321—324.
- 54) ———・曳地政雄・坪井考明・木下修二・柴山善一郎 (1975), 海岸砂丘地における松林の発達と物質生産 (第1報) 15年生クロマツ林の樹高と現存量, 生長量などとの関係. 鳥取砂丘研報14, 25—31.
- 55) 佐々木茂 (1972), カラマツの本数密度と肥培効果 (Ⅱ) —落葉量と落葉養分濃度の季節変化—. 日林東北支会誌23, 64—67.
- 56) 佐藤俊・岩川雄幸・吉田桂子 (1972), 肥培林の落葉量と養分濃度の時期別変動. 日林関西支講23, 168—170.
- 57) SATO, T. (1964), Some aspects of the variation of needles of pines on the eroded land. 演習林 15, 45—53.
- 58) ——— (1967), Efficiency and quantity of leaves of closed stands *Cryptomeria japonica* as influenced by site quality. XIV. IUFRO-Congress München, 396—404.
- 59) ——— (1968), Primary production relations in woodlands of *Pinus densiflora*. Symposium on primary productivity and mineral cycling in natural ecosystems. (Young, H. E. ed.), 52—80. Maine University Press.
- 60) ——— (1970), A synthesis of studies by the harvest method: Primary production relations in the temperate deciduous forests of Japan. Analysis of temperate forest ecosystems (Reichle, D. E. ed.). Ecological studies. I, 55—72. Springer Verlag.
- 61) ——— (1971), Primary production relations of coniferous forests in Japan. Productivity of forest ecosystems Proc. Brussels Symp. 1969, 191—205.
- 62) 佐藤大七郎 (1973), 陸上植物群落の物質生産Ia—森林—. 95pp. 共立出版.
- 63) 芝本武夫 (1977), 森林の土壌と肥培. 142pp. 農林出版.
- 64) STONES, E. L. Jr. (1953), Magnesium deficiency of some northern pines. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17, 297—300.
- 65) 竹内丑雄 (1976), 降水中の化学成分の発生源. 成蹊論叢15, 91—100.
- 66) 田島俊雄 (1963), 林木の栄養診断. 林地肥培入門18—22. 加里研究会.
- 67) 郷隆男 (1962), わが国主要造林樹種の栄養および施肥に関する基礎的研究. 林試研報137, 1—158.
- 68) TSUTSUMI, T. (1977), Storage and cycling of mineral nutrients. JIBP SYNTHESIS 16, 140—162.
- 69) UEDA, M., ITO T. & KAWANA, A. (1971), Studies on the fertilization in established stands (IV). Examination of fertilization periods according to different growing phases of Sugi (*Cryptomeria japonica*) stands. 日林誌55, 42—50.
- 70) 植村誠次 (1964), オガ屑堆肥の製造と施肥効果. わかりやすい林業研究解説シリーズ6 51pp. 林業科学技術振興所
- 71) WALLACE, A. & HALE, V. Q. (1962), A hypothesis of the case of lime-induced chlorosis. Decade of synthetic chelating agents in inorganic plant nutrition, 28—35.

- 72) WILL, G. M. (1957), Variations in the mineral content of radiata pine needles with age and position in tree crown. New Zealand J. Sci. Tech. B 38, 699—706.
- 73) 山内益夫 (1966), 砂丘土壤における作物栽培に関する土壌肥料的な研究 (第2報) 施与チッ素の陸稲による利用と溶脱. 砂丘研究12(2), 21—32.
- 74) 依田恭二 (1971), 森林の生態学 331pp. 築地書館.
- 75) 湯浅保雄・伊藤悦夫 (1967), クロマツ林の林分葉量その年次構成と生長について. 日林中部支講15, 87—93.
- 76) 湯浅保雄・神尾和美 (1973), アカマツおよびクロマツ幼齡林の林分葉量と落葉量について, 静大演報 2, 25—33.

(1980年5月29日受理)

Summary

Japanese black pine, *Pinus thunbergii*, is the most important species among the trees used for windbreak on coastal sand dune in Japan. Usually in these pine stands for windbreak, the growth of trees is remarkably depressed at the nearby front edge faced to beach and increases toward the inside. But sometimes the depression of growth occurs at an inner part distant 100—1,000m from the front edge. The depression at the front edge may result from the strong sea wind and the shifting sand in return for its role as windbreak, while the cause of depression at the inner part has not been studied sufficiently.

To make clear the cause of the poor growth observed at the inner part were made, here, the measurement of environmental factors, the fertilization experiments and the estimation of primary production and nutrient. The study were carried out at the plantations in Futtsu, Muramatsu, Arai and other places (Fig. 1).

1. Studies at Futtsu

The pine stand studied was distant 100—300m from the beach, 17-year-old and 1—2m in height. This poorly growing stand was not exposed to a strong sea wind and not different from the surrounding well growing stands in watertable. Since in the soil layer of the stand was found an accumulation of shells which were abundant in calcium carbonate and make alkaline the soil pH value, the mineral nutrient relations were studied as a limiting factor for the growth. The fertilization experiments with N, NP, NPK, and K and the acidification treatment with S, flowers of sulphur, were made at the central part of the stand.

The effect of fertilization was observed only at the plots with $\text{NH}_4\text{-N}$ in the length and the color of needles in the fall of the year treated and also in the elongation of current year shoot in the next year (Fig 9, 10, 12). The nitrogen concentration of current year needles was highly correlative both to the length of needles and the concentration of chlorophyll (Fig. 11). The injection into xylem and the foliage spray of Fe-EDDHA had no effect on the growth, respectively. The poor growth of pine trees may be caused by nitrogen deficiency and not by lime-induced chlorosis.

The leguminous plants which have root nodule for fixing air nitrogen showed poor

growth near the pine stand. The growth of *Amorpha fruticosa* growing in the pot filled with the sand soil of this stand was improved only when the phosphate addition was made. From these results it is supposed that the poor growth of leguminous plants on the calcium rich sand soil resulted in the lower pace in accumulation of nitrogen and the inferior growth of pine trees.

2. Studies at Muramatsu

The course of height growth and the nutrient concentration of needles and sand soils in the poorly growing pine stand were compared with those in the well growing stand. The difference in rate of height growth was not observed for several years after the planting in 1932. The depressed rate begun to appear after 1945 and may be connected with the intensive harvesting of the litter owing to the lack of fuel just after the end of World War II. The concentration of nitrogen, potassium, and magnesium both in the needles and in the sand soils in the well growing stand was higher than in the poorly growing stand.

The fertilization experiments with N, NP, P, K, Mg, KMg, and NPKMg were made to seek the factors limiting the growth. The positive effects of the fertilization on the elongation and the nitrogen concentration in needles appeared only in the plots with $\text{NH}_4\text{-N}$ (Fig. 20). The well growing stands were found only at the place where the litter was not harvested and/or the leguminous trees, black locust, planted as soil improving tree grew vigorously.

3. Studies at Arai

The effect of nitrogen fertilization which was effective to improve the depressed growth in pine stand both at Futtsu and at Muramatsu, was studied in detail at Arai. The ammonium sulphate and saw dust compost, 250 kg/ha as N amount, were applied to two poorly growing pine stands in May, 1967.

The fertilization increased the weight a needle in current year shoots by 30—40 %, but did not change in older shoots. The following effects were observed with lapse of time after the fertilization : an increase of nitrogen concentration in 2-year-old needles 1 month later and in current year and 1-year-old needles and in needle litter 3 months later (Figs. 23, 26) ; an increase of amount in needle litter 15 months later and male flower litter 1 year later (Fig. 25) ; an increase of growth rate in diameter, height and volume of stem 1 year later (Figs. 28—30). Annual net production of root increased slightly in the year fertilized and amounted to twice as much as before the fertilization 1 to 2 years later (Fig. 31). The amounts of branch and cone litter were not changed by the fertilization.

The rate of apparent photosynthesis of current year needles was measured under the controlled conditions, saturated light intensity and 22°C, in October. The average rates in Arai were 7.8 mg/ CO_2 /gdw/hr in the fertilized pine trees and 6.7mg in the control ones, and those in Futtsu were 8.4 mg and 3.5 mg, respectively. These difference between the fertilized and the control trees were significant at

5 % level.

4. Net production and nutrient concentration in fertilized pine stands

The net production Pn can be divided into two components ;

$$P_n = F \times P_n/F$$

where F is the amount of needles and Pn/F is the net production per unit amount of needles, the needle efficiency (SATO, 1967). The increase of net production yielded by the nitrogen fertilization was analysed by the components, F and Pn/F.

The fertilization increased F from 7.0 to 7.8 or from 8.2 to 9.2 t/ha and Pn/F from 1.4 to 2.1 or from 1.4 to 2.2 t/t in the two pair plots, fertilized and control plot at Arai, and F from 3.9 to 10.0 t/ha and Pn/F from 1.0 to 2.0 t/t at Futtsu, respectively (Fig. 37). So the increase has resulted from both the increase in amount of needles and that in needle efficiency. The fact that the levels of F and Pn/F improved by the fertilization were nearly equal to those in well growing inland stands at Tanashi and at Kiyosumi shows the satisfactory results of these nitrogen fertilization.

In the poorly growing stand attaching a small amount of needles, 4—5 t/ha, the products increased by the fertilization were mainly distributed to produce new needles, while in the well growing stand to the growth of stem and root.

A high correlation was found between the net production and the concentration of nitrogen in current year needles. The concentration of phosphorus, potassium, calcium, or magnesium in current year needles had no apparent relation to the net production respectively (Fig. 39). The presumption that the limiting factor is nitrogen was supported by these relations.

5. Nutrient budget in the poorly growing pine stand (Table. 23)

The amounts of nutrient elements contained in litterfall, precipitation and through-fall were measured every month. Also the nutrient elements in pine trees felled and the nitrogen in *Lathyrus maritimus*, a leguminous herb, were measured. Using these values, the nutrient budget which was composed of the input by precipitation, salt breeze and leguminous fixation ; the uptake by trees ; the immobilization into stem and thick roots ; and others, was calculated both in the fertilized plot and the control plot at Arai.

The amount of potassium, calcium, and magnesium supplied from the outside, chiefly from the sea, was large. Especially the rate of magnesium supply was higher ; 18.1 kg/ha/yr from the outside compared 5.6 kg/ha/yr in the litterfall. The amount of nitrogen ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) supplied by precipitation and leguminous fixation was 7.9 kg/ha/yr, and that immobilized into stem and thick roots was 3.3 kg/ha/yr. When the litter containing 21.8 kg nitrogen per hectare was harvested from the unfertilized stand every year, the balance of nitrogen budget would lose and the pine trees would encounter a deficiency of nitrogen conclusively.