

森林の成立および皆伐が土壌の2・3の性質に及ぼす影響について

第1報 森林の成立にともなう土壌の性質の変化

堤 利 夫

TOSHIO TSUTSUMI

Influence of the Development of Forest Vegetation and Clear Cutting on Some Properties of Forest Soil.

Part 1. Soil Changes with the Development of Forest Vegetation.

内 容

1. は じ め に……………	37	7. 窒素および無機養分の循環のはやさ……………	51
2. 調査地および調査方法……………	37	8. 土壌中における各物質の垂直分布……………	53
3. 林分の各物質現存量の推定法……………	39	9. ま と め……………	57
4. 各物質の森林の成立にともなう経年変化……………	40	文 献……………	59
5. 林地における有機物量増加の経過……………	47	Résumé ……………	62
6. 動的平衡に達するに必要な年数の推定……………	50		

1. は じ め に

森林と土壌との間にある密接な相互作用を解明することは森林生態学的に興味ある問題であるばかりでなく、林業にとっても甚だ重要なことである。それは最近問題になりつつある皆伐にともなう地力低下の現象、天然生林の人工造林地への転換、林地肥培などの問題に対する基礎的な知見と対策はこの相互作用系を解明することによって、はじめて求められると思われるからである。

本報告は森林の成立、消失にともなう林地の性質の変化過程を生態学的な観点から解析し、森林と土壌とを結ぶ相互作用の関係を明らかにしようとしたもののうち、森林の成立にともなう炭素、窒素、無機養分の量的な経年変化の過程を解析したものである。

本研究をつねに広く指導された四手井教授、有益な御指導を戴いた川口教授に厚く御礼申しあげる。また本調査の実行に協力された木村隆臣、徳丸始朗、有光一登、渡辺賢、小倉耕三の各氏に謝意を表する。

なお、本調査は大阪営林局、とくに治山課の各位、神戸、大津、岡山、広島、奈良の各営林署の各位の御好意、御協力のもとに行なわれたもので、ここに厚く御礼申しあげる。

2. 調査地および調査方法

主として瀬戸内海沿岸に広く分布する、花崗岩を母材とした荒廃地に対して施行された治山造林地は森林として極めて特殊なものであるが、初期条件、土壌の母材、植栽された樹種、治山造林の方法がほぼ等しく、気候的条件もおおむね温暖で降水量の少ない地域にあり、いろいろな場所でえた結果を比較的無理なく比較できるという点で優れている。従って、これらの治山造林地について森林の成立にともなう諸物質質量の変化を時間要因との関係のもとに量的に解析を行なった。

元来、局地的な変化が多く、作用要因の複雑な森林を対象とする野外での調査には数多くの困難をともない、誤差の大きいことはさけられないが、可能な限り数多く調査し、条件をそろえることによって、一般的な傾向を推定することは可能であろう。

調査した治山造林地はつぎの6地区28林分である。

(i) 栗太地区(滋賀県栗太郡瀬田町, 大津営林署栗太治山事業所管内): 施工後経過年数 5, 18, 35, 40, 42, 60, 62年の林分, および天然生アカマツ林の8林分である。

(ii) 六甲地区(兵庫県芦屋市山芦屋町, 神戸営林署六甲治山事業所管内): 施工後経過年数 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8年の林分, および天然生アカマツ林の8林分である。

(iii) 玉野地区(岡山県玉野市宇野, 岡山営林署玉野治山事業管内): 施工後経過年数 3, 5, 7, 7年の4林分である。

(iv) 呉地区(広島県呉市外神内町, 焼山村): 施工後経過年数 2, 5, 7年の3林分。

(v) 西条地区(広島県加茂郡西条町, 西条営林署西ヶ谷, 大迫山国有林): 施工後33, 42年の2林分。これらの2林分の実際の施工年度はここに示したものよりさらに古い, それぞれ大正5年, 14年に大規模の改植が行なわれたというので, この時を基準として経過年数を求めた。

(vi) 宇治地区(京都府宇治市, 奈良営林署折居, 八軒屋国有林): 施工後21, 40, 44年の3林分。

以上の各地区で, 対照として未施工の裸地について数カ所から土壌試料をとった。

Table 1. 調査地の気象条件
Climatic conditions of sampling areas.

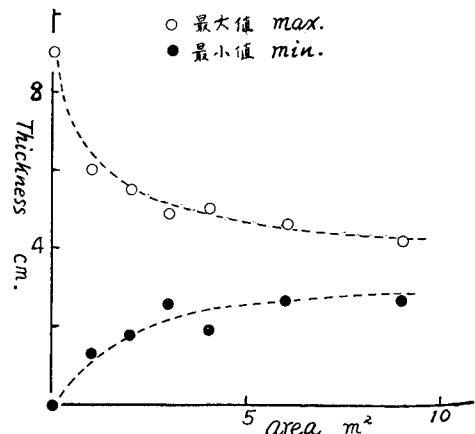
調査地名 Name of sampling area	栗太 Kurita	六甲 Rokkō	玉野 Tamano	呉 Kure	西条 Saijō	宇治 Uji
観測所 station	瀬田川 Setagawa	神戸 Kōbe	田ノ口 Tanokuchi	海田市 Kaidaichi	西条 Saijō	宇治 Uji
年平均温度 °C Mean Annual Temperature	14.1	15.3	15.5	15.1	14.5	14.6
年降水量 mm Annual Precipitation	1518	1386	1086	1387	1447	1351
海拔高 m Elevation	88	58	6	35	212	17
暖かさの指数 °C Warmth index	113.6	126.0	126.5	123.6	109.4	120.1
寒さの指数 °C Coldness index	-4.5	-1.9	-1.1	-1.9	-5.8	-4.1

大阪営林局管内 降水量及気温 大阪営林局 1955 による。

調査した各林分の状況は別の報告(堤ほか1958, 1959, 1960)に詳しい。また, 調査地の気象をまとめて第1表に示した。この表からわかるように, 6地区を通じて気温, 降水量に著しい違いはなかった。

各林分ごとに10m²のプロット4~5を設け, 1プロット中の任意の4カ所から試料土壌を採取し, よく混合してそのプロットを代表するものとした。プロットごとに分析した値を平均して林分の値とした。従って, 各林分では16~20点の平均値としてあらわされている。

これは京大上賀茂試験地のヒノキ林で, A₀層の厚さの分散を測定したところ, 第1図に示されるように, 10m²程度まで測定面積をひろげると, 場所による差異が少なくなるという結果を得たからである。



第1図 A₀層の厚さと測定面積との関係
The relationship between the thickness of A₀ layer and area

土壌試料を採取した深さは 0~10cm, 10~20cm, 20~40cm, 40~60cm である。これは一般に林木の根、とくに吸収根は浅く(刈住 1957), 60cm 深までとれば、林木の生活に関係深い土壌層の大部分を含むと考えたからである。しかし、若い治山造林地では風化土壌層が浅く、30cm 程度にすぎないので、このようなところでは 0~5cm, 5~15cm, 15~25cm の 3 層から採取した。

なお、これらの治山造林地では階段面にのみ土壌化が進み、法面と著しく異なっているので、土壌調査は段面について行ない、必要に応じて直高、傾斜度、段巾の値から単位面積当りの諸量を推定した。

土壌試料を採取した地点ごとに 10 点ずつ A_0 層の厚さを測定した。別に A_0 層の容積重を測定し、単位面積当りの重量に換算した。

調査した各林分で毎木調査を行ない、その中から選んだ供試木について葉、枝、幹の諸量を求め、相対生長関係を用いて林分の現存量を求めた。10 年未満の若い治山造林地は肥料木(主としてヒメヤシブシ *Alnus pendula* Matsum., オオバヤシブシ *Alnus sieboldiana* Matsum., ヤマハンノキ *Alnus hirsuta* var. *sibirica* C. K. Schnoid., ニセアカシア *Robinia pseudo-acacia* Linn.) より成り、この中から 49 本を供試木とした。10 年以上の各林分は主としてアカマツ (*Pinus densiflora* S. et Z.) よりなり、この中から 7 本の供試木をとった。用いた相対生長の定数値は第 2 表に示した。

Table 2 (1) 肥料木の相対生長関係の定数

$W=bD_{30}^a$ における a, b の値
values of a, b in $W=bD_{30}^a$

(W=各部乾重 dry weight of each parts, g; D_{30} =地上 30cm 直径 cm, Diameter at 30cm height)

	幹 Stem	枝 Branch		葉 Leaf	
		1	2	1	2
a	2.75	2.92	2.51	2.34	1.82
b	24.0	3.8	13.8	6.7	2.1

1: ニセアカシア・ヒメヤシブシ (*Robinia pseudo-acacia*, *Alnus pendula*)

2: ヤマハンノキ・オオバヤシブシ (*Alnus hirsuta* var. *sibirica*, *Alnus sieboldiana*)

Table 2 (2) アカマツ (*Pinus densiflora*) の相対生長関係の定数

$W=b(D^2 \cdot H)^a$ における a, b の値

Values of a, b in $W=b(D^2 \cdot H)^a$

W: 各部乾重 kg, dry weight of each parts.

D=D·B·H, cm, H=Height m.

	幹 Stem	枝 Branch	葉 Leaf
a	0.73	0.76	1.01
b	0.015	0.026	0.018

採取した土壌はチェーリン改良法(河田 1955)により炭素を、キュールダール法により窒素を分析した。また、熱塩酸、0.2 N 塩酸抽出物について、モリブデン青法でリンを、E. D. T. A. 法でカルシウム、マグネシウムを、炎光光度計(日立製)でカリウムを分析した。

樹体は 1 本ずつ葉、枝、幹の各部について湿式灰化を行なった後、上記の方法により無機養分を求め、窒素はキュールダール法で求めた。 A_0 層有機物についても同様である。

3. 林分の各物質現存量の推定法

土壌については原土一定容積中の細土量に細土の各物質含有率を乗じて、土壌単位面積当りの量を求め、層ごとに求められた値から、林地単位面積当り一定の深さの土壌に含まれる各物質量を求めた。

A₀ 層については、A₀ 層有機物量にそれぞれ各物質含有率を乗じて A₀ 層に含まれる諸量を求めた。

樹体については、先づ相対生長関係から各部の乾物現存量を求めた。アカマツおよび肥料木のカリウム、カルシウム、マグネシウムでは肥料木の樹種差、場所、樹令、個体の大小による差が明らかでなかったため、アカマツ、肥料木のおのおのについて、樹体各部ごとに全分析値を平均した値を、それぞれ各林分の現存量に乘じて林木に保有される各物質量を求めた。

肥料木の窒素とリンは直径の増大とともに含有率が低下する傾向が明らかであったので、樹体各部ごとに、各部乾重とそれに含まれる量との関係を求め、この関係式を用いて計算した。用いた樹体各部の養分含有率を第3表に、肥料木の窒素、リンについての相対生長関係の定数値を第4表に示した。

Table 3. 樹体各部の養分の平均の含有率（絶乾%）
nutrients contents of each parts of trees (% based on dry weight)

		Nitrogen N	Phosphorus P	Kalium K	Calcium Ca	Magnesium Mg
葉 Leaf	肥料木 Soil improver	3.09	0.18	1.13	0.72	0.20
	アカマツ Pinus densiflora	1.14	0.06	0.35	0.52	0.09
枝 Branch	肥料木 Soil improver	0.73	0.05	0.35	0.37	0.04
	アカマツ Pinus densiflora	0.34	0.03	0.15	0.43	0.07
幹 Stem	肥料木 Soil improver	0.40	0.03	0.15	0.27	0.05
	アカマツ Pinus densiflora	0.09	0.005	0.06	0.34	0.03

肥料木 Soil improver : ヒメヤシアブシ, オオバヤシアブシ, ヤマハンノキ, ニセアカシア
Alnus pendula, Alnus sieboldiana, Alnus hirsuta var sibirica, Robinia pseudo-acacia.

Table 4. 肥料木における窒素、リン量の相対生長関係の定数値

$y=b \cdot w^a$ における a, b の値
Values of a, b in $y=b \cdot w^a$
y : N, P 量, amount of N, P, mg,
w : 各部乾重 g. dry weight of each parts

	葉 Leaf		枝 Branch		幹 Stem	
	a	b	a	b	a	b
Nitrogen	0.99	1.56	0.91	1.11	0.88	0.96
Phosphorus	0.86	0.54	0.69	0.50	0.78	0.053

なお、古い治山造林地（アカマツ林）では下層に低木層が存在する。六甲、栗太の2地区ではこれらの現存量を標準法によって推定し、常緑樹、落葉樹に区分して同様の方法で分析し、これを林木に加算した。

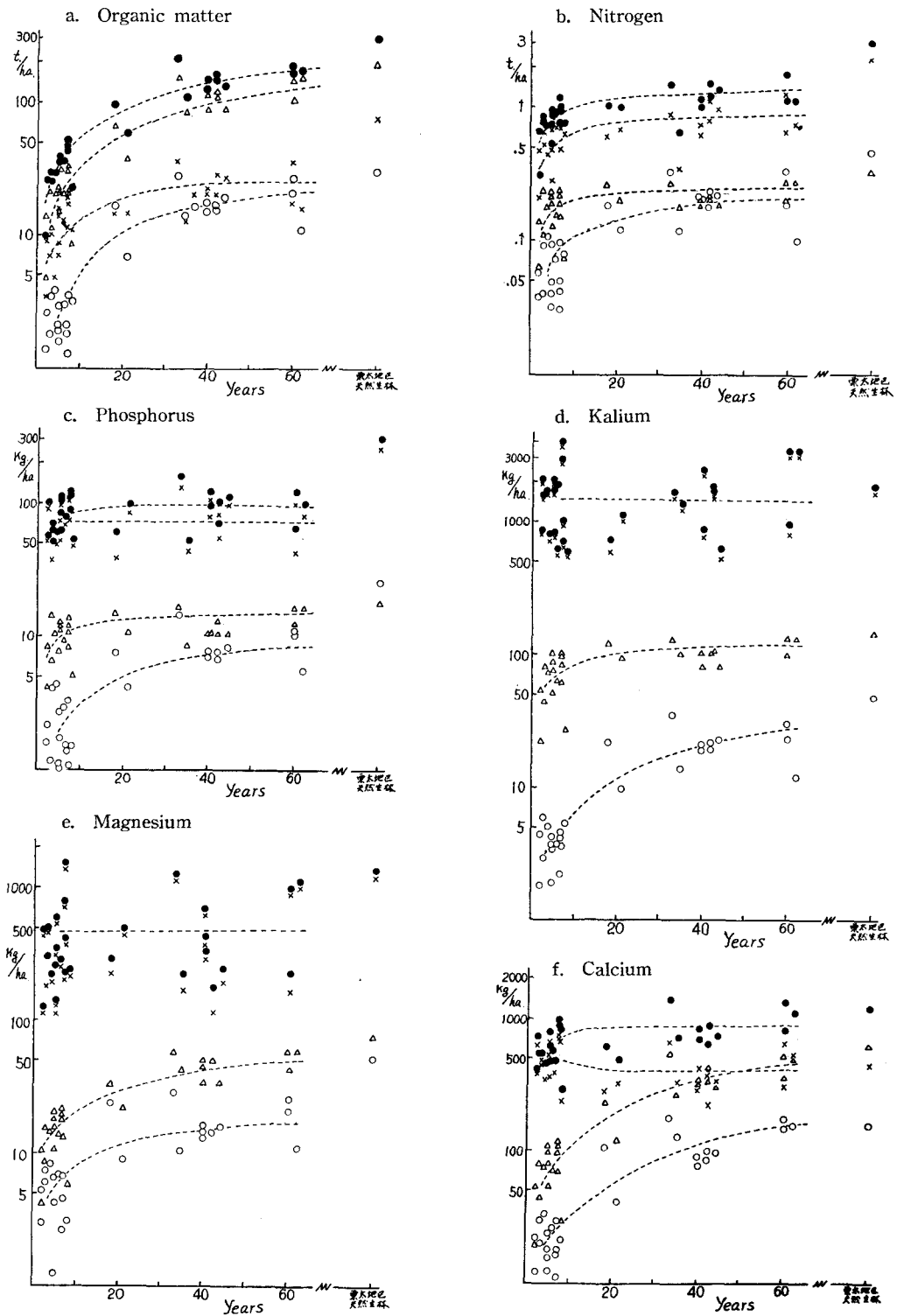
林木、A₀ 層、土壌の3部分に含まれる各物質量を合計して、林分のもつ総蓄積量とした。

4. 各物質量の森林の成立にともなう経年変化

林分を林木、A₀ 層、土壌（0~25cm）の3部分に区分し、1 ha 当り各部分のもつ有機物、各養分量を林令（森林が成立してからの経過年数）との関係で図示したものが、第2図である。

ここで土壌中の無機養分は熱塩酸で抽出されたものである。有機物量として示したものは林木、A₀ 層では乾物量をそのまま有機物量とし、土壌中のそれは炭素量に 1.724 を乗じて求めた。

本図によると、林木、A₀ 層における各物質量はおよそ林令とともに次第に増加していく傾向を示したといえよう。



第2図 a~f. 森林の成立にともなう諸物質の量的変化(土壤中の無機養分は熱塩酸可溶)
Changes in the amount of organic matter and of nutrients with the development of forest
(mineral nutrients in soil: conc. HCl soluble)

●全量 (total amount) ×土壌 (soil) △林木 (trees) ○Ao層 (Ao layer)

土壤中に含まれる各物質質量はその性質によって経年変化の傾向が異なっていた。すなわち、有機物では林令とともに増加していく傾向があったに対し、無機養分では林分ごとの違いが大きく、増加、減少の一定の傾向を示さなかった。窒素は両者の中間にあり、林令とともに増加していくように思われるが、その傾向は有機物の場合ほど明瞭ではなかった。

従って、林分全体としてみると、有機物は明らかに森林の成立にともない、次第に増加していく傾向を示し、窒素も幾分増加の傾向を示したが、無機養分ではほとんど増加、減少の一定の傾向を示さなかったといえる。

このように、森林の成立にともなう物質質量の経年変化が物質の性質によって異なっていたのは、どのような理由によるかについて考えてみよう。

森林生態系ではその内部で、または外部との間でつねに物質の循環が行なわれているが、その循環の性質あるいは経路が物質の性質によって違うことが知られている (Odum 1953, 吉良 1960)。森林の成立にともなう物質質量の変化には、このような物質の循環が重要な意味をもつであろう。それは森林が成立したことによって森林に物質質量の増加がおこるためには、つねに林外からの物質の獲得がなければならないからである。

炭素の循環は完全な開放系で、森林は空気中の炭素を同化する一方、呼吸や落葉落枝など枯死した有機物の土壤中での分解によって、再びそれを空気中にかえす。従って、森林における炭素または有機物量の変化は、森林による炭素の同化のはやさと、その損失のはやさとの比によって決まるはずである。一般にわが国の林地での有機物の分解速度は小さく、毎年の落葉落枝は1年で完全に分解してしまうことはないから (四手井, 堤 1962)、森林が成立すると、有機物または炭素は林木の形で蓄積されていくと同時に、落葉落枝の形で有機物が林地に供給されるようになり、森林の生育する限り継続され、林地表層や土壤中にも有機物が蓄積されはじめる。

すなわち、森林は炭素を大気からとり入れ、有機物の形で蓄積し、分解や呼吸による損失が森林の成立した当初では、炭素の同化量よりも少なかったので、森林の有機物蓄積が次第に増加していったといえる。

窒素量の経年変化は有機物量のそれほど明瞭ではないが、やや漸増の傾向があった。

治山造林地では、最初に造林された肥料木はやがて衰えて、次第にアカマツ林に変っていく。このような植生の変化のはやさは場所によって違うであろうが、栗太地区の例では約20年を経過するとアカマツ林に変っていた。第3表に示されたように、樹体各部の窒素含有率はアカマツに比べ肥料木では著しく大きい。このことのために、肥料木林からアカマツ林になると、林木として保有される窒素量は減少する。林令とともに林木としての有機物量が増加するにもかかわらず、窒素量の増加が不明瞭であったのはこのためであろう。

ハンノキ属の森林からトウヒ林への推移により (Crocker ら 1957)、マメ科植物から非マメ科植物への推移 (Jenny 1958) によって同じ傾向がみられるから、若し造林当初から同一樹種が成立していたときには、窒素の増加はもっとなめらかなカーブを示すであろう。この傾向は後述するリン、カリウムの場合においても同様である。

このように、樹種の交代によって経年変化にある程度の混乱があったと考えられるが、林分全体としての窒素量は森林の成立とともに次第に増加し、林分外からの窒素の獲得が行なわれていたことを示している。

従来、土壤中の窒素量の増加は落葉落枝の供給によると考えられていたが、落葉落枝に含まれる窒素は、もともと土壤中のそれを吸収したものであり、従って、それは土壤の窒素を再び土壤へかえず閉鎖的な循環であって、林分全体としての窒素量を増加させる作用を本質的にはもっていない。

これに対し、共棲あるいは遊離の窒素固定菌による空中窒素の固定は明らかに林分全体の窒素量を

増加させるのに役立つ。

肥料木が成立した若い治山造林地でみられた窒素量の増加には、その根瘤による空中窒素の固定が大きな役割をもっていたであろう。治山造林地の結果から毎年の窒素の増加量をおおまかに推定すると、平均して 100kg/ha/year 程度であった。

マメ科植物の窒素固定力についてのいくつかの測定値 (Russell 1950, Waksman 1952) とオーダーはほぼ等しく、また、ハンノキ属の林分で A₀ 層と土壤中の窒素量は約40年間に、平均して年 62 kg/ha ずつ増加した (Crocker ら 1955) という。これらの値は治山造林地でえた値と著しく大きな違いがない。

若い治山造林地では、林分全体としての窒素の現存量が 1000 kg/ha をこえないので、肥料木による窒素の固定は、林分全体の窒素量の変化に大きな影響をもち、若い造林地で急激に窒素量を増加させたことに密接に関係していると考えられる。

このように、根瘤菌による空中窒素の固定は森林への窒素の獲得に直接結びつくが、根瘤をもたない一般の樹種よりなる森林でも、その成立にともなって、窒素の増加がおこることが知られている (Dickson ら 1953 a. b, Ovington 1957)。

これらの結果は、森林における窒素の増加がかなり一般的におこりうることを示している。その供給源が何であるかは明らかではないが、おそらく、遊離の窒素固定菌の作用、あるいは降水に含まれてくる窒素などが関係していると思われる。降水に含まれる窒素量についてのわが国での測定例では年 2~20kg/ha 程度 (青木 1954, 牧坂 1958) であるという。

林地での窒素の獲得経過については今後なお検討を必要とするが、森林は窒素を外部からとり入れて、森林で増加させる能力をもち、一般に森林の成立にともない森林のもつ窒素量の増加がおこると考えてよいであろう。

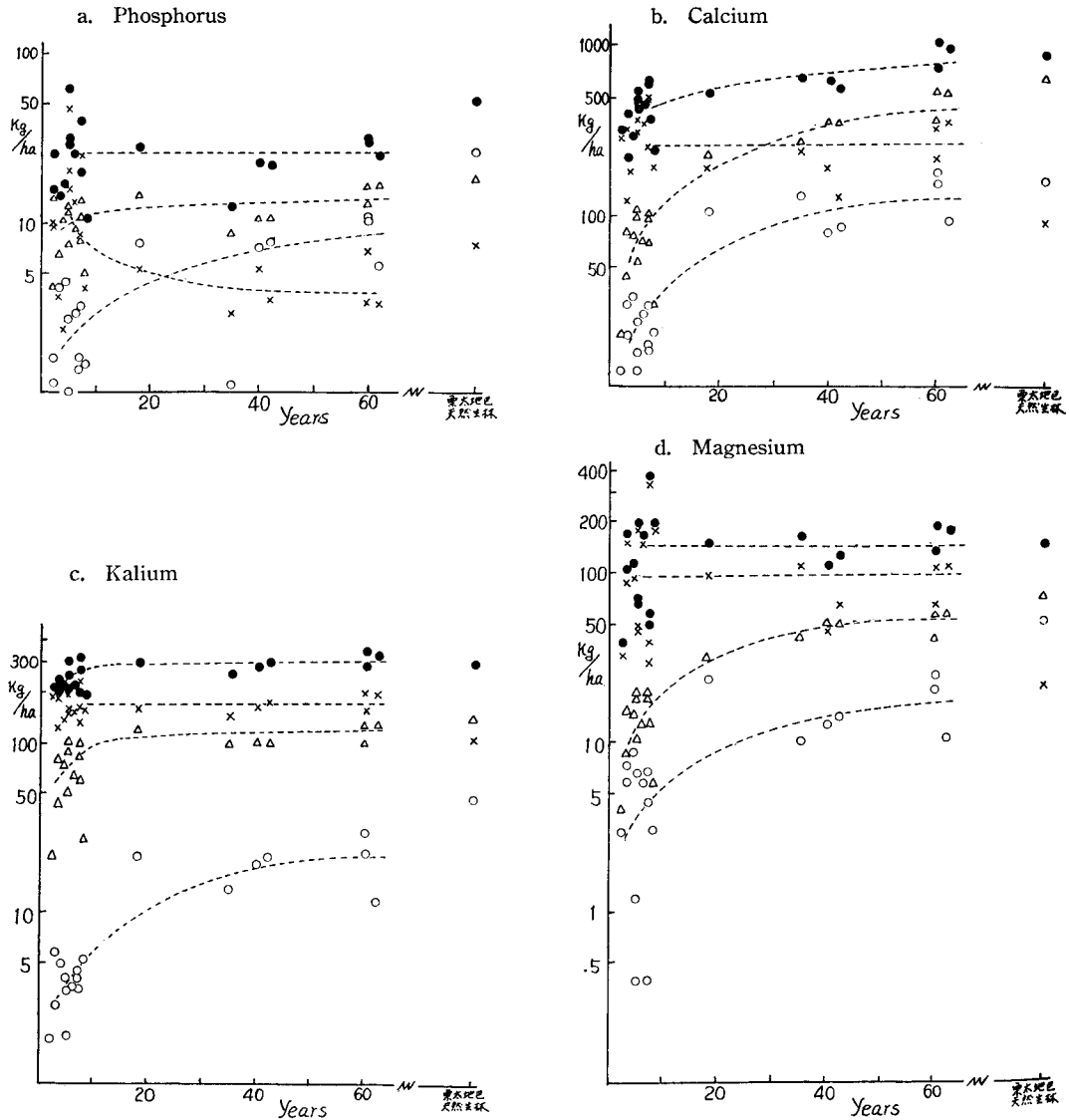
すなわち、窒素は炭素と同様に開放的な循環系をもち、森林の成立にともない林内で増加するが、炭素が葉による同化作用によって大気中からとり入れられるのに対し、窒素は同様に大気中からとり入れられるとしても、それは林木自体によるものではなく、表層土の微生物活動や降水などによっており、獲得の方法が全く違っている。このことは窒素の増加は必ずしも炭素または有機物とつねに同じ割合で進行するものではないことを示しているといえよう。

無機養分のうち、リンとカリウムでは前述の窒素の場合と同様に、肥料木林からアカマツ林への推移にともない樹体での含有率が著しく低下したため、林木に含まれる量の経年変化は不明瞭であるが、分析した4つの物質を通じて、おおよそ A₀ 層、林木では林令の増加とともに次第に増加していくようである。これに対し、土壤中の量はバラツキが大きく、林分全体としても同様で、経年変化に一定の傾向が認められなかった。

このような傾向を示したことの一つの原因として、土壤に含まれていた量にバラツキが大きかったことがあげられる。林分全体に含まれる現存量に対して土壤に含まれる量がどれほどになるかを求めると、林分によって多少変化するが、20年生以上の林分では有機物で20%以下であったに対し、カルシウムでは40%以上、窒素で約50%以上、リン、マグネシウムで約70%以上、カリウムでは約80%以上に達した。このように無機養分は土壤に含まれる量が相対的に大きく、しかも、土壤中の量が場所ごとにバラツキが大きかった。初期条件として与えられたバラツキの範囲を打消すほど大きな量的変化が調査した年数、約60年、の範囲内ではおこらなかったのも、林分全体としての現存量の経年変化に一定の傾向を示さなかったのではないと思われる。

しかし、土壤中の養分量を 0.2 N 塩酸可溶のものについて計算すると、土壤に含まれる量比はかなり小さくなり、リンで約20%、カルシウムで30~40%、マグネシウムで50~60%、カリウムで60%程度に低下したが、林分全体としての量的な経年変化の傾向は第3図に示したように熱塩酸可溶の

ものを対象としたときとほとんど同様である。従って、土壤に含まれる量の相対的な大小やそのバラツキだけが、経年変化に一定の傾向を示さなかったことの原因だとは考えられない。



第3図 a~d. 森林の成立にともなう諸物質の量的変化 (土壤中の無機養分は0.2N塩酸可溶)
Changes in the amount of organic matter and of nutrients with the development of forest.
(mineral nutrients in soil: 0.2 N HCl soluble)

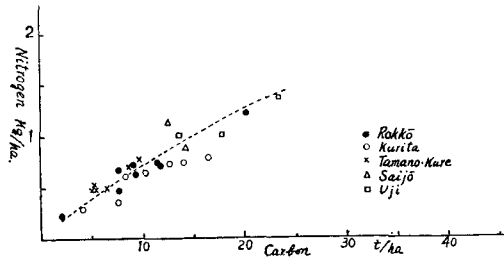
●全量 (total amount) ×土壤 (soil) △林木 (trees) ○Ao層 (Ao-layer)

なお、治山造林地では植付けと同時に施肥が行なわれる。施肥量は場所や年度によって幾分異なるが、昭和25年頃以降の林地と、明治、大正時代の古い林地とを比較すると、窒素、リンの施肥量が最近に多く、カリウム、カルシウムは古い林分で多かったと推定される(大津営林署1942, 林野庁1959)。従って、無機養分量の経年変化をみるうえにこのことを考慮しておかねばならないが、植付けと同時に与えられた肥料は、初期に相当量の流亡があったと考えねばならないうえに、リンのように土壤に含まれる量の少ないもの以外、施肥によってその経年変化が著しく乱されていたとは考えられな

い。このことは、とくに熱塩酸で抽出されるものを対象とするときには、問題にする必要はないように思われる。

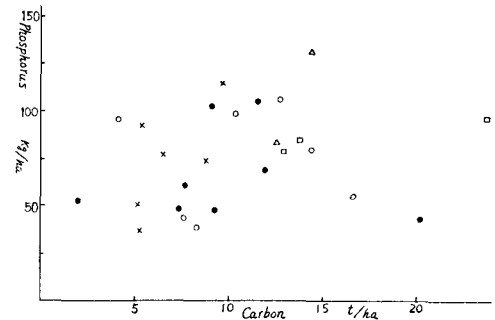
有機物および窒素と無機養分との量的な経年変化の違いをはっきりさせる目的で、土壌中の有機物量と窒素、無機養分量との関係を求め第4,5図に示した。

すなわち、窒素量は炭素量とほぼ一定の割合を保って増加していく傾向が明らかである。これは炭



第4図 土壌中の有機物量と窒素量との関係
(土壌深、0-25 cm)

Relationship between the amount of soil organic matter and that of nitrogen (soil depth 0-25 cm).



第5図 土壌中の有機物量とリン量（熱塩酸可溶）との関係（土壌深 0-25 cm, 凡例、第4図に同じ）
Relationship between the amount of organic matter and that of phosphorus (soluble in conc. HCl).
(soil depth, 0-25 cm, notes: same as Fig. 4).

素、窒素の循環がともに開放的な性質をもっていたことによっており、それぞれ両者の獲得量と損失量との割合がほぼ一定に保たれていたことを示したものといえよう。しかし、第2, 3図から予想できるように、土壌中の有機物量と無機養分量との間には一定の関係が見出されなかった。第5図はその1例を示したものであるが、この傾向は熱塩酸可溶、0.2 N塩酸可溶の分析した4元素のすべてについて同様であった。

土壌中での有機物量の増加に応じて、ほぼ一定の割合で窒素量の増加がみられるが、無機養分量の増加は期待できない。この傾向は無機養分量の経年変化が炭素や窒素のそれとは全く性質の異なったものであることを示すものと考えてよいであろう。

森林に対する無機養分の供給源は炭素や窒素のように森林生態系外の大気中のそれではなく、土壌中の可給態養分である。森林は炭素、窒素を系外からとり入れて系内での蓄積を増加できるが、無機養分は系外からとり入れるのではない。林木は土壌から無機養分を吸収し、再びそれを落葉落枝として土壌にかえす。この循環は閉鎖系であるから、樹体に無機養分が吸収保持されると、その分だけが土壌中で減少し、林分全体として無機養分の量的な変化が全くおこらないという現象が予想できる。

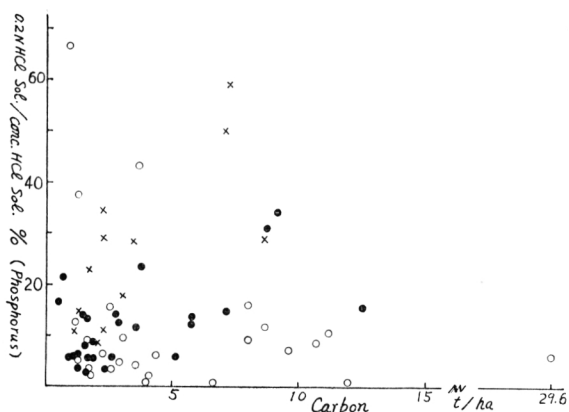
カリホルニアで森林の成立とともに土壌中の塩基置換能は増大するけれども、置換性塩基量は1200年を経た森林でも若い林分と明瞭な差異を示さなかった (Dickson ら 1954)。約60年以後では塩基量は継続的に減少の傾向さえ認められるようである。また、中欧の森林で表層土のリン、カリウム量が一般に夏に少なく冬に多いという季節的な変化を示すことがあった (Feher 1936, 1937) という。この現象は閉鎖性の大きい小さな湖において、プランクトンの増殖と栄養塩類の減少とが密接な関係をもつ (Odum 1953) ことと共通した現象であると考えられる。

これらの傾向は森林における無機養分の循環が閉鎖的で、林分内で物質の移動があったとしても林分全体としての量的な変化はおこりにくいことを示したものと見えるであろう。

すなわち、無機養分量が森林の発達にともない量的に明瞭な関係を示さなかったのは、閉鎖的であるという循環系の性質に原因していたと考えられ、治山造林地に限られた特別の現象ではなく、一般的のものと考えるべきように思われる。

また、土壌中に有機物量が増加し、そのことによって粒団化が進む(堤ら 1960)など物理性の変化がおこる。この変化にともなっておこる無機養分の形態の変化を推定する目的で 0.2N 塩酸可溶物の熱塩酸可溶物に対する割合をもとめて、土壌中の有機物量との関係をみた。

第 6 図に明らかなように、土壌中で有機物量が増加しても 0.2N 塩酸可溶物の割合は増加しなかった。これはリンについて示してあるが、その他の物質でも傾向はほぼ同じで、土壌中に有機物量が増



第 6 図 土壌中の有機物量と 0.2 N 塩酸可溶の無機養分の熱塩酸可溶物に対する割合との関係(土壌深、0-25 cm, 凡例第 4 図に同じ)

Relationship between the amount of organic matter and the ratio of 0.2 N HCl soluble nutrients to conc. HCl soluble. (soil depth 0-25 cm, notes, same as Fig. 4).

(Nye 1961) だけによるのではなくて、樹体が空気中のエアロゾル状の無機養分を物理的に吸着することによっておこる(Ingham 1950) ことがあるとすれば、降水による供給量は森林における無機養分量の変化に無視しえない影響を与えるであろう。

イングランドでは森林の成立にともない林分としての無機養分量が増加したという例(Ovington 1955, 1956 a. b. 1957, 1958 a. b. c.) があり、伊豆大島でも森林の成立にともない表層土の可給態無機養分量が増加した(手塚 1961) という。すなわち、森林が成立したことによって無機養分量が増加するのは、おそらく表層土での有機物の増加により、その物理化学性が変化し、未風化鉱物の風化や降水による供給の捕捉に有利となったことが関係しているであろう。

しかし一方で、林地から無機養分の流亡が同時におこっているとみななければならない。わが国河川の水の分析値(三宅 1944) や栗太地区の小さな溪流の分析値によっても、無機養分の流出が推定される。また、林地では土壌の化学的な性質に由来しておこる無機養分の表層土からの溶脱がある。森林の成立とともに表層土の pH が低下し(Dickson ら 1954, 1957, Godwin ら 1933), このような pH の低下は土壌中でのカルシウムの溶脱と密接に結びついている(Salisbury 1925, Hissink 1938, Wilson 1960)。このような溶脱による損失は立地条件が等しいとき、樹種の性質による違いが大きい(宮崎 1942, Ovington 1954) という。

すなわち、無機養分を森林外より獲得することがあっても、同時に損失の道も広く、降水や岩石の風化による獲得をいつでも森林での増加量と考えるわけにはいかならないと思われる。森林の成立にともなう無機養分量の経年変化はこのような獲得と損失の釣合いによって決まり、森林の成立にともない無機養分の獲得に有利な条件が与えられると Ovington や手塚の示したような量的な増加が期待される。

このように、無機養分の循環を単純に閉鎖系と考えることは誤りで、多分に開放的な性質をもつが、

増加し、物理性が改良されてきても可給態養分量がとくに著しく増加するという傾向は認めにくい。

このように無機養分の循環は閉鎖系であるとみられるが、完全な閉鎖系ではなくて、系外からの獲得の道がいくつか考えられる。例えば降水に含まれるもの、未風化鉱物の風化などである。

わが国での雨水の分析値(三宅 1957) を用い、年降水量 1000mm として求め、kg/ha で示すとカリウム 0.5~49, カルシウム 0.5~18.4, マグネシウム 0.2~9.3 となり、京大上賀茂試験地ではカリウム 2.7, カルシウム 10.8, リン 0.4 となった(丸山ら未発表)。林内雨は林外雨に比べて一般に養分濃度が高いが、それが樹葉からの溶脱

炭素や窒素とは循環の経路、獲得と損失の方法には著しい違いがあり、炭素や窒素が森林の成立にともないほぼ確実に増加するのに対して、無機養分量ではいろいろな立地条件の影響を受けて、つねに必ず増加するとはいえない。治山造林地でえた結果は森林外からの獲得と森林外への流出とが量的にほぼ等しく、みかけのうえで閉鎖的な循環を行っていたため量的な変化に乏しかったと解釈すべきであろう。

すなわち、森林は炭素、窒素の蓄積を増加させる能力をもち、森林の成立にともない林地の土壌化が進むとしても、無機養分量をつねに増加させるとは限らない。無機養分の獲得、損失に関する条件を検討することは林地の地力維持をはかるうえには重要な問題である。

5. 林地における有機物量増加の経過

第2図にみられるように森林の成立にともない林地の有機物量は次第に増加していく。林地の有機物量はその分解量と供給量との釣合いによって決まる (Kittredge 1948)。森林の成立にともなう林地有機物増加の経過は、これらに経過年数を加え、それらの函数として考えることができる。

まず、林地への毎年の有機物の供給量と分解量についてふれておこう。

(i) 供給量：有機物の供給源は落葉落枝、枯死した樹皮、根などである。

毎年の落葉量については Ebermayer (1876) 以来多くの測定結果があり、樹種、立地条件、施業方法などによって違いがあるとみられているが (Ramann 1893, Aaltonen 1948, Kittredge 1948, Lutz ら 1951, Watson 1956), 落葉量は林令、密度、立地条件と明らかな関係を示さなかったという報告 (大政ら 1937) もある。

従来の落葉量の測定値 (文献番号 1, 3, 7, 8, 15, 21, 28, 35, 45, 49, 58, 69, 77, 78, 79, 80, 83, 93) をとりまとめると、種々な条件や樹種について、おおよそ 1~4.5 ton/ha の範囲内にあり、頻度の高いのは 1.5~3.5 ton/ha の間であった。

一方、閉鎖した純群落では葉量がほぼ一定になる傾向のあることが知られている (吉良ら 1956, 佐藤ら 1955, 大島ら 1958)。治山造林地の若い肥料木林の林分葉量は第5表に示されたように、約 1.2~4.7 ton/ha で、樹種、場所の違いと明らかな関係がなく、この範囲は前述のそれとほぼ一致していた。

Table 5. 治山造林地肥料木林の林分葉量 (絶乾 ton/ha)
Leaf weight of mixed stands of *Alnus* spp. (Oven dry, ton/ha)

	六 甲 Rokkō							玉 野 Tamano				呉 Kure			栗太 Kurita
林 令 Stand age	2	3	4	5	6	7	8	3	5	7	7	2	5	7	5
葉 量 Leaf weight	1.33	2.22	3.52	2.37	2.50	2.45	1.21	4.08	3.79	4.67	3.01	2.80	3.55	3.75	4.35

落葉量が種々の条件によって変るとしても、その差異をはっきりさせうるほど、現在の野外での測定の精度が高くない。従って、樹種や立地条件が異なっても毎年の落葉量はおおよそ 1.5~3.5 ton/ha で、条件の著しい違いを考慮すると比較的变化の巾が小さく、とくに同じ樹種がほぼ同じ立地に生育するときは、その林分が閉鎖している限り、落葉量に著しく大きな変化はないと考えられる。

落葉以外のものは量的に著しく大きくはなく、(Lutz ら 1951), 閉鎖した林内では年によって著しく大きな変化をもたなかったという (Ovington 1959 c)。このほか、毎年枯死する根は量的にも質的にも重要な問題をもつとみられる (Wittich 1952, Zonn 1959) が、ここでは根量などを測定してい

ない。

(ii) 落葉の分解量：落葉や土壤有機物の分解は有機物の性質，環境条件，土壤の性質，微生物の数，種類などの要因の影響をうけて著しく異なることが知られている（Waksman ら 1931，大政ら 1937，堤 1956，1959）。このような差異は林令の増加にともなう A_0 層での微気象の変化や，土壤の性質の変化にともなっておこると考えられるので，同一樹種よりなる林分でも林令の増加とともに分解率は変化するであろう（Handley 1954）と推定される。

このことを確かめるために栗太地区の各林分について分解率を求めたが，とくに林令との間に明瞭な関係が認められなかった。この傾向はヨーロッパアカマツ林についての測定値（Ovington 1959）から計算した結果においても同様であって，分解率が林令によって変るといふ証拠はなかった。

(iii) 有機物量増加の経過

林令とともに有機物量の増加する経過は第2図に示されている。樹種が肥料木からアカマツへ変ること，調査地がひろくひろがり，林分ごとに各種の条件が必ずしも完全に同一ではないので，バラツキがかなり大きい，おおよそ，林令とともに次第に有機物量が増加していくこと，その増加は初期に著しく，次第に増加の絶対量が減少していく傾向が認められる。

仮に，毎年の供給量（ a ）と分解率（ p ）を時間（年数 n ）に無関係に一定と仮定すると，1年目，2年目，…… n 年目の林地の有機物量 $S_1, S_2, \dots, S_n$ はそれぞれつぎのようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} S_1 &= a \\ S_2 &= a + a(1-p) \\ S_3 &= a + a(1-p) + a(1-p)^2 \\ &\vdots \\ S_n &= a + a(1-p) + a(1-p)^2 + \dots + a(1-p)^{n-1} \\ &= a \cdot \frac{1-(1-p)^n}{p} = \frac{a}{p} \times \{1-(1-p)^n\} \quad \dots\dots\dots ① \end{aligned}$$

n を無限大とすると

$$S_{n \rightarrow \infty} = a/p \quad \dots\dots\dots ②$$

すなわち，林地の有機物量は等比級数式に従って増加していき，初期に増加の絶対量が多いが，次第に減少して最大値に近づいていくという経過を示す。理論的には無限に最大値に近づくが，絶対に最大値には達しないということになるが n が充分大きくなると S_n の変化量が甚だ小さくなるから，実用的に S_n が一定になったと考えて差支えないであろう。このときの S_n を S_m で示すと， S_m は②式に示されたように， a と p だけによって決定され，それらが一定であれば S_m は林令に無関係に一定に保たれ，林地の有機物量は増加，減少の変化のない平衡状態がえられるということを示している。

さらに，時間 n とその時の林地の有機物量との関係を求めるため，②式を①式に代入すると，

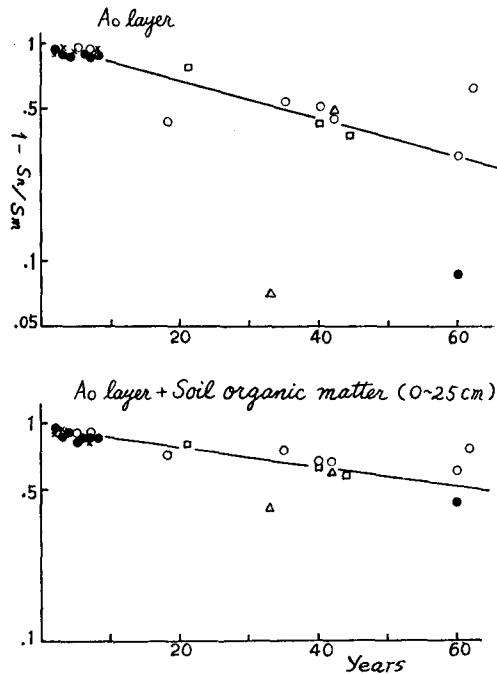
$$\begin{aligned} S_n &= S_m \{1-(1-p)^n\} \\ (1-p)^n &= 1 - S_n/S_m \\ \therefore n \log(1-p) &= \log(1 - S_n/S_m) \end{aligned}$$

p が一定であるから， $\log(1-p)$ も一定で，これを K で示すと

$$K \cdot n = \log(1 - S_n/S_m) \quad \dots\dots\dots ③$$

すなわち，有機物量の増加を S_m に対する不足率の形で示すことができる。

治山造林地でえた結果が③式にあてはまるかどうかを調べたものが第7図である。③式では n が充分大きく，平衡状態に達したときの有機物量 S_m が必要である。ここでは栗太地区の天然生アカマツ林の値を適用した。前述したように，6地区において気象，母材，植生などの条件に大差なく，地区



第7図 林地における有機物増加の過程（凡例，第4図に同じ）

Accumulation of soil organic matter with the progress of time (notes: same Fig. 4).

ごとの差がはっきりしないこと，栗太地区の天然生林は n が十分に大きい老令林であることから，この値を治山造林地の S_m とした。

すなわち，バラツキがあって，③式がきれいにあてはまるとはいえないけれども，近似的に半対数直線関係が成立するとみてよいであろう。

森林の成立にともなう有機物量の経年変化についての報告¹⁾（文献番号 5, 6, 10, 12, 13, 14, 15, 20, 35, 45, 69, 72, 75, 87）は多いが，その大部分は A_0 層量だけについてのものである。調査場所，樹種，立地が異なるが，おおよそ最初急激に増加し，ある期間の後には増加がはっきりしなくなるという傾向はほぼ共通して認められる。

A_0 有機物の増加は時間要因との関係において，ほとんど一次の直線的な関係を示す場合がある（Crocker ら 1955, Stoeckeler 1961）。このような関係に従えば， A_0 層量は無限に増大していき，古い天然生林では著しく多量の有機物が堆積していなければならない。実際には，このような例はほとんど認められない。Crocker らの結果でも一次の直線的な関係はすべての期間にわたってあて

はまるものではないことは明らかである。

上記の資料について， S_m をそれぞれの資料中の天然生林または最老令林での値で代表し，③式にあてはめると，比較的よく満足するものと，ゆるい S 字型の曲線を示すものとがあった。

このように近似的に③式であらわすことができて，なおバラツキがあることの一つの原因として， S_m のとり方や a ， p を一定とした仮定があげられる。

実際に測定された S_m の値はある程度の誤差を含むうえに，すべての林分について共通の S_m だという確かな証明はない。本調査結果で栗太地区天然生アカマツ林の値をすべてに共通した S_m としたことにバラツキを大きくした一つの原因があるろう。

また， a ， p の値は，前述したように，同一林分内では林令の増加とともに大きな変化を示さないように思われるが，逆に森林の成立，閉鎖，土壌化の進行などの諸変化に無関係に a ， p がつねに一定に保たれるという確かな保証はない。従って， a ， p を一定と仮定して導いた③式には誤差が伴う。 a ， p が林令その他の条件と関係して変化するものとすれば，これら要因との関係を今後解明することによって，③式をより合理的に修正する必要があるろう。

このように，林地の有機物量の増加の経過を③式であらわすことにはなお検討の余地がある。しかし，治山造林地での結果のほかに，いくつかの測定例ではほぼ近似的に③式がなりたちうることがわかった。

②式は小川ら（1961）によっても導かれ，また土壌の諸性質の動的な平衡を考えるに使われ（Nikiforoff 1942），①式を変形して実測された a ， p の値から平衡に達するに要する年数の推定が行われた（Jenny 1949）。後 2 者はともに初項として $a(1-p)$ を用いているが， a を使うか $a(1-p)$ を使うかは，その年の落葉前を出発点とするか，落葉後をとるかによって異なるだけで，本質的に違い

はなく、基本的な考えは一致していたといえる。

これらのことから治山造林地でえた結果が、調査地だけに限られた特殊なものではなくて、一般に林地における有機物の増加の過程は近似的に③式であらわすことができるように考えられる。

有機物の集積はその供給量と分解量の比によって決まる。供給量より分解量の方が少ないときは、分解残渣が毎年累加され、次第に増加する。毎年の分解量は有機物の現存量とその分解率との積で求められるから、分解率が小さくても有機物量が大きくなると、当然分解の絶対量は増加する。林地における有機物量の増加の絶対量が林令の増すとともに次第に小さくなっていくのはこのような理由によると考えられる。

このように林地の有機物量の増大とともに分解量が大きくなっていくと、ついにはそれが毎年の有機物の供給量に等しくなる点に達する。このような状態では毎年供給された有機物量に相当した量が分解されて、林地の有機物の量的な変化は全くおこらなくなってしまう。この状態は動的な平衡状態である。

一般に、裸地に成立した森林の下で、林地の有機物はその供給と分解との釣合によって決まる一定の割合で増加していき、その森林のおかれた条件によって決まる一定の値、すなわち、動的平衡状態に達するまで、ほぼ③式に従って増加していくと考えられる。

6. 動的平衡に達するに必要な年数の推定

①式に従えば動的平衡に達するのは、年数が無限大になることが必要である。しかし、最大値に充分近づいた後は、実用的には平衡状態になったと考えてよいであろう。

Jenny (1949) は最大値の95%に達したとき平衡に達したものとみて、①式より必要な年数を推定した。これは平衡状態にあるとみられる林地の有機物の現存量と供給量を測定することによって計算できる。

これに対し、Kittredge (1948) は林地の有機物量に対する毎年の供給量の比は有機物の分解のはやさをあらわし、平衡状態にあるときは、この比が平衡に達するまでの年数をあらわすとのべている。

②式から年数が無限大になったときの有機物の分解率 p は、 $p = a / S_m$ で求められる。Kittredge のいう S_m / a は分解率の逆数であり、従って分解のはやさをあらわすものであることは間違いないが、平衡に達するに要した年数をあらわすものではなくて、毎年供給されたものが分解されてしまうに要する年数を示すもののように考えられる。

有機物の増加が①式に従っておこるものとすれば、平衡に達するに要した年数の推定には Jenny の導いた式が適当であろう。

栗太地区の天然生アカマツ林地の有機物量について、毎年の有機物供給量を林分葉量の $1/2$ 、すなわち 4.0 ton/ha/year と仮定して、Jenny の式に従って最大値の95%に達するに要した年数を求めた。また、治山造林地での結果に従い、第7図の上、下限を外挿して最大値の95%に達するに要した年数の推定を行なった。これらの推定値をあわせて第6表に示した。

すなわち、2つの方法でえた推定値に大きな違いがあった。これは栗太地区天然生アカマツ林での葉量の推定の誤差や、治山造林地における60年間の結果を極端に外挿して求めたことによっておこったものとみられる。栗太地区天然生アカマツ林の A_0 層は20年をこえと、ほぼ平衡状態に達することを示しているが、治山造林地では、この時期に天然生アカマツ林の約 $1/2$ 程度の A_0 層をもつにすぎない。

このように動的平衡状態に達するに要する年数の推定は充分ではないが、25 cm 深の土壤中の有機物を加えると、おおよそ80年またはそれ以上を必要とすると推定され、土壤中の有機物量が平衡状

Table 6. 有機物量の動的平衡に達するに要した年数の推定値
Estimation of time necessary to reach equilibrium of soil organic matter

	栗太地区天然生アカマツ林 Natural stand of <i>Pinus densiflora</i> in Kurita		治山造林地 Erosion control forest
	平均分解率 mean rate of decomposition	年数 years	年数 years
Ao 層 Ao-layer	13.3 %	21	135~170 (150)
Ao 層+土壌 (25cm 深) Ao-layer+Soil(25cm depth)	3.7 %	80	210~360 (270)
Ao 層+土壌 (60cm 深) Ao-layer+Soil(60cm depth)	2.8 %	106	—

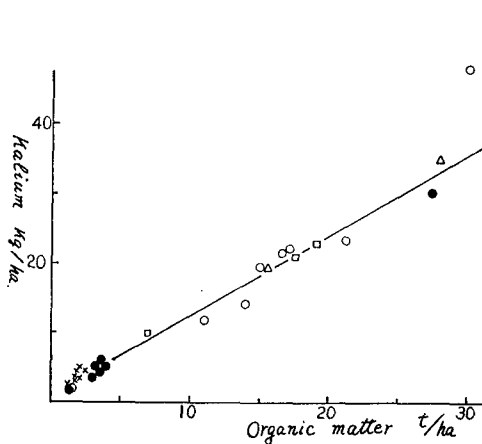
態に達するのには相当長期間を必要とするものとみられる。

いくつかの資料（文献番号 1, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 15, 24, 28, 35, 36, 37, 61, 69, 72, 75, 83, 85）について、 A_0 層有機物の平均分解率と平衡に達するに要する年数を推定した。有機物供給量が不明のものについては 3 ton/ha/year として求めると、平均分解率は 2~41%，平衡に達するに要する年数は約 10~200 年の範囲内にあった。カリホルニアでそれぞれ 1~63%，約 3~331 年という値が求められ（Jenny 1949），有機物の平均分解率は約 1.7~100% の範囲内にひろがっていた。

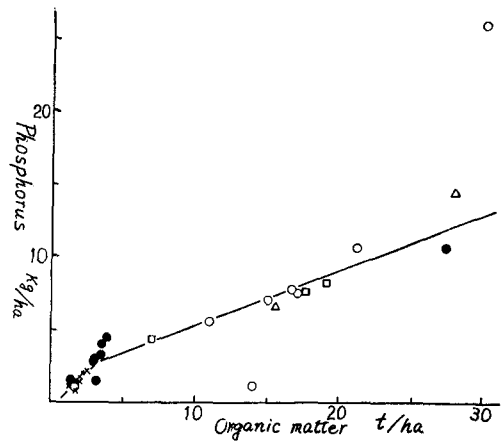
このように、有機物の分解率は分解に関する条件によって著しく異なる。Jenny の式に従えば、平衡に達するに要する年数は分解率の函数であり、分解率が小さくなるほど指数曲線的に増大する。従って、平衡に達するに要する年数は分解に関する条件のよいときに短かく、悪くなると著しく長い年月を必要とするであろう。

7. 窒素および無機養分の循環のはやさ

森林の成立にともなう無機養分の量的な変化は乏しいが、土壤中から吸収されたものは落葉落枝として地表にかえり、 A_0 層で分解をうけて土壤中へ再びかえされている。このような循環のはやさを推定する目的で、まず A_0 層における窒素および無機養分量の変化を A_0 層有機物量との関係で示し



第8図 A_0 層における有機物量とカリウム量との関係（凡例，第4図に同じ）
Organic matter~kalium relation in Ao layer (notes: same as Fig. 4).



第9図 A_0 層における有機物量とリン量との関係（凡例，第4図に同じ）
Organic matter~phosphorus relation in Ao layer (notes: same as Fig. 4).

たものが第8, 9図である。

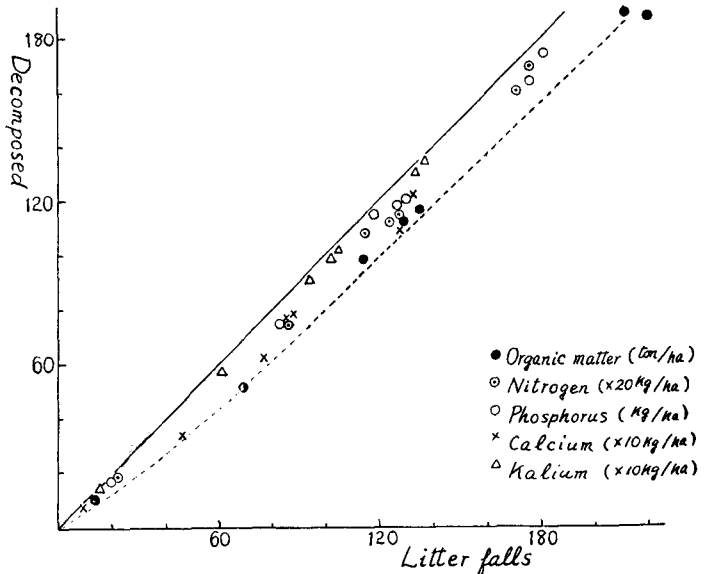
前に第4図で示したように、窒素量は有機物量とほぼ一定の割合を保って増加していく。無機養分量も A_0 層だけを対象とすると、その量は主として A_0 層有機物量の影響を受け、 A_0 層量が多くなるほどそこに含まれる無機養分量は増加する。

第8, 9図に例示されたように、カルシウム、カリウムではほとんど全測定範囲にわたって、一次の直線関係が成立したが、リンにおいては勾配に変化がみられた。これは若い肥料木林とアカマツ林とで供給される落葉の性質が異なるためであろう。物質の性質によって、このような違いはあったとしても、 A_0 層における無機養分量は、有機物量の増加にともない、それぞれ一定の割合で増加していき、 A_0 層での有機物の増加の過程はそのまま、窒素や無機養分の増加の過程を示したといえよう。

このことは A_0 層の有機物量の動的平衡が実現するとともに、窒素や無機養分量も動的な平衡に達し、毎年落葉落枝として供給された窒素や無機養分量に相当した量が、土壌への移動や林木による吸収などによって A_0 層から失なわれていくことを示したものと考えられる。

60年生の林分まで各種の林令のそろっている栗太地区について、有機物、窒素、無機養分のそれぞれについて、各林令までに落葉として供給された量と、それまでに分解消失した量とを推定して示したものが第10図である。供給された量は、それまでの落葉量およびそれに含まれる各養分量であらわし、各林令における林分葉量に期間（年数）を乗じて落葉量とした。たお、アカマツ林では林分葉量の $\frac{1}{2}$ が落葉すると仮定し、5~18年生の林分では10年生までを肥料木林、11~18年はアカマツであったとした。また、1~5年の4年間のうち、最初の1年は落葉量を0として計算した。

供給量と分解量が等しいとき、両者の関係は原点を通り、 45° の勾配をもつ直線であらわされる。供給量に比べ、分解量が少なく、 A_0 層に物質が集積しているときは 45° 線より下方にはずれてくるが、動的な平衡に達すると 45° 線に平行となり、その時の差が平衡状態における A_0 層での各物質量を示すはずである。



第10図 A_0 層での各物質の総供給量と分解量との関係
Relationship between the total amount of litter falls and of decomposition in A_0 layer.

第10図において、有機物量の変化はおおよそこのような傾向を示していたように思われるが、各林分ごとに推定された供給量や分解量に誤差があるため、このような考えを証明するのになお充分ではなかった。

窒素や無機養分量の変化は、すべて有機物量の変化を示す線と 45° 線との間に含まれてくる傾向があった。このことは、各養分の A_0 層からの消失のはやさが有機物それ自身よりはよいということを示しており、この傾向はカリウムにおいて最も著しかった。このことには、 A_0 層での分解、無機化の速度のほかに、降雨による無機養分の A_0 層からの溶脱 (Nykqvist 1959) が関係しているのであろう。

総供給量に対する分解消失量の割合を60年生の林分について求めると、有機物では90%，窒素で95%，リンで94%，カリウムで98%，カルシウムで86%であった。すなわち、60年間に供給された有機物、窒素などのおおよそ90%以上がA₀層で分解をうけて消失しており、A₀層として現存している量は総供給量の約10%に満たないことを示している。

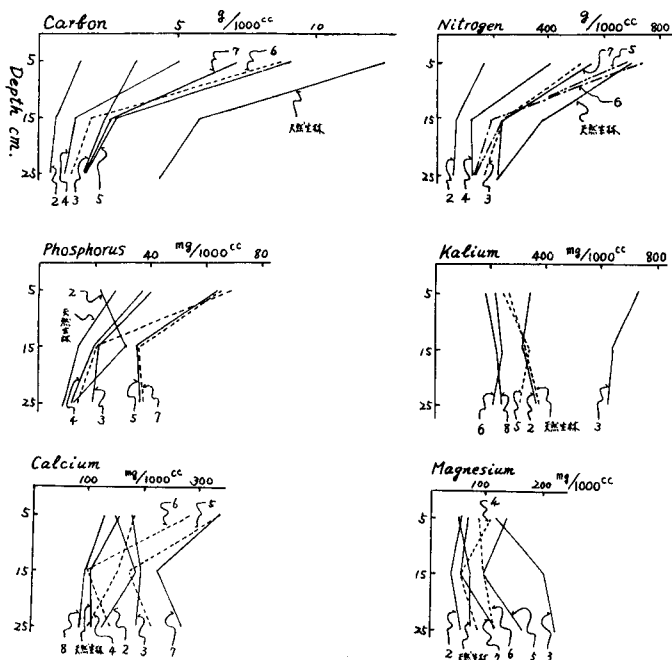
アカマツ落葉の分解が広葉樹落葉などに比べてはやいものではなく（堤 1956, 大政・森 1937）、治山造林地の環境条件も分解にとくに有利なものではないことを考慮すると、林地表層での有機物分解量は意外に大きく、落葉として加えられた諸物質はその大部分がA₀層から土壤中へ移動してしまいヨーロッパアカマツ林で認められた傾向（Ovington 1959 c）と等しく、林地表層でのこれら諸物質の分解移動は甚だ速やかに行なわれているものと推定される。

供給量の推定が正確ではないから、これらの値に充分の信頼をおけず、今後なお検討を必要とするであろう。

8. 土壤中における各物質の垂直分布

森林が成立すると、その下で土壤中の有機物、窒素量は漸増する。無機養分の量的な変化は不明瞭であったが、落葉落枝を通じてさかんに循環していることは明かである。これらの変化は当然土壤中での諸物質の垂直分布に変化をあたえるであろう。

土壤中での有機物その他養分量の垂直分布を、六甲地区を例として図示したものが第11図である。いずれも原土 1000 cc 中に含まれる量であらわした。なお、無機養分はいずれも熱塩酸可溶のものである。



第11図 諸物質量の土壤中での垂直分布とその経年変化（六甲地区）図中の数字は林令を示す
Vertical distribution of organic matter and of nutrients in soils and their changes with time.(on Rokko).

有機物は表層土に多く集積され、年数の経過するほど表層と下層との差が相対的に大きくなっていく傾向があった。この傾向は治山造林地の6地区を通じてほぼ共通していたといえるようであった。

窒素についてもおおよそよく似た傾向が認められたが、無機養分については場所ごとの違いが大きくて、有機物や窒素の場合ほどはっきりした傾向を示さなかった。リン、カルシウムでは表層土にやや多かったようであるが、年数の経過にもなう一定の傾向を示していないようであり、マグネシウム、カリウムではやや下層ほど多い傾向を示すようであるが、林令との間に一定の傾向はなかったようである。

有機物や窒素量は表層土に多く、年数の経過にもないこの傾向は次第に強くなる傾向があった。同

じような傾向は Dickson ら (1953 b. 1955) によっても認められている。

土壌中の有機物の供給源は主として落葉落枝であるから、表層土でまず有機物の集積がおこるのは当然であろう。しかし、それはやがて下層へ移動するから、有機物の垂直分布は表層土への有機物の供給量と土壌中での分解量、下降の速度によって決まると考えられる。

有機物下降のはやさをA層の厚さの経年変化で推定しようとしたものが第12図である。

褐色森林土のA、B両層の炭素含有率は必ずしも一定していないが、いくつかの資料（文献番号 18, 22, 23, 26, 34, 38, 39, 40, 44, 50, 51, 52, 81）について検討すると、B層の炭素含有率の上限はおおよそ2.5%程度と考えてよい。治山造林地では60年を経過した林分でも表層土の炭素量は2%をこえなかったので、成熟した褐色森林土における同様の土壌層位の区分を行なうことはできない。ここでは相対的に有機物による汚染の程度によってA、B層に区分し、A層の厚さを測定した。

10年未満の若い治山造林地ではA層はほとんど認められなかったうえに、A層の厚さは林分ごとにバラツキが大きかったので不明瞭であるが、おおよそ林令の増加とともに次第に厚くなっていく傾向があった。

肉眼的な判定によるみかけのA層の厚さの代りに、有機物量の深さごとの変化から炭素含有率が0.7%に達する点の深さを求め、この深さの経年変化を調べたが、本質的には第12図の結果と同様で、初期7年間に急に深くなって6～8cm程度に達し、その後はゆっくり変化し、40年をこえてようやく10cmをこえはじめたにすぎない。なお、各地区の裸地の炭素量が約0.2%であったから、0.7%という値はそれより0.5%増加したときの深さを示す。

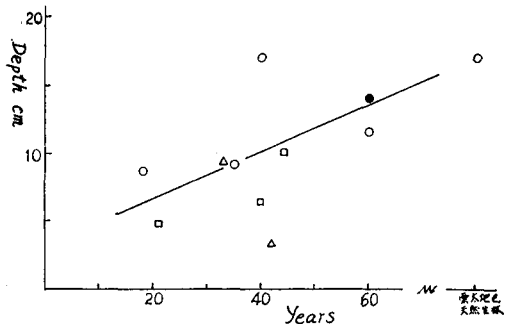
初期に急激な変化のみられるのは、土壌の有機物量の急激な増加の傾向とよく一致していたようであるが、土壌試料の採取方法による影響も大きいものと思われる。土の採取は0～5cm、5～15cm、15～25cmの3点であったから、とくに表層土において細かく区分して採取すれば初期における変化は修正されるであろう。

このように、初期の変化過程には充分の信頼をおけないが、20年で約7cm程度、60年では約13cm程度のA層をもつから、40年間に平均約6cmの増加があったことになり、毎年の平均増加量は約0.15cmに相当する。

農耕跡地に成立したマツ属の森林の下でA層は20年頃から認められ、21年で0.5 inch、31年で3 inch、110年で5 inchに達したという (Billings 1938)。従って、21～31年の10年間では平均0.63 cm/year、31～110年の80年間で0.06 cm/yearの増加になる。また広葉樹林下では平均して約0.14 cm/yearの増加を示した (Griffith ら 1930)。

有機物下降のはやさはその化学的な性質のほか、土壌の物理、化学性などの多くの条件によって影響をうけるであろうから、簡単には比較できないが、これらの値はいずれも有機物下降のはやさが甚だおそいものであることを示している。

このように有機物の下降はおそいと推定されるに対し、表層土には毎年集積されるため、有機物の増加は表層土に集中し、本調査の年数の範囲内では、林令の増すほど次第に表層と下層との相対的な差が大きくなると考えられる。



第12図 A層の厚さの経年変化

(凡例、第4図に同じ)

Time~Thickness of A layer relationship

(notes: same as Fig. 4).

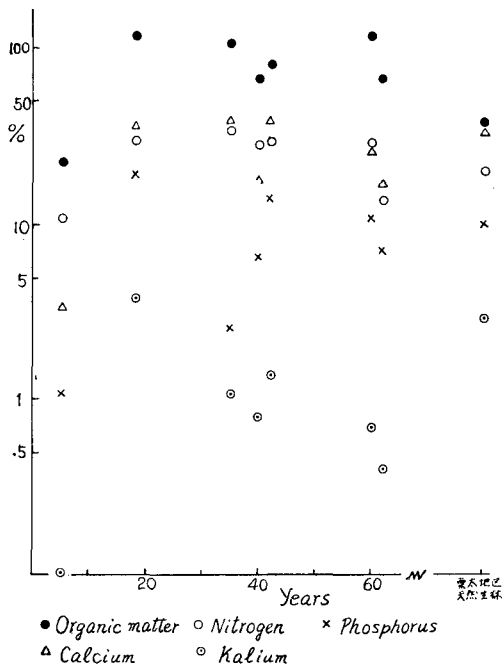
土壌中の窒素の供給源は表層土の微生物活動に主としてよっており、それらはつねに落葉落枝を通じて表層土にかえされている。窒素が有機物と同様に表層土ほど多く、下層に向かって漸減する垂直分布を示すのはこのためであろう。

しかし、表層土における窒素量増加の経年変化は有機物量の場合ほど明瞭ではなかった。これは前にのべたように、肥料木林からアカマツ林への移行にともなう、窒素の獲得量に変化があったと推定されることに原因しているのであろう。下層土における変化も不明瞭で、60年を経過した林分でも 15~25 cm 層で 300 kg/ha をこえなかった。この傾向は第13図によっても明らかであろう。

窒素の垂直分布の林令の増加にともなう推移が有機物のそれほど明瞭でないのはこのためであろう。

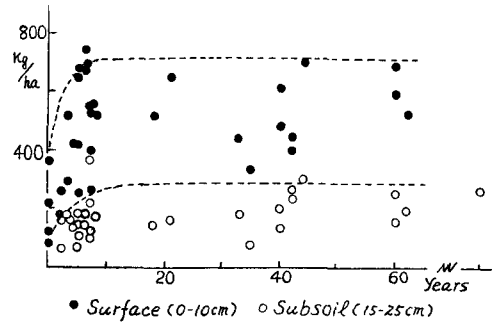
いずれにせよ、有機物、窒素は表層土に多く集積される傾向があり、土壌全体としての増加は主として A_0 層や表層土での増加に負うていたとみることができる。

なお、 A_0 層の有機物量が増加すると、それにともない A_0 層に蓄積される窒素、リンなどの絶対量も増加してくることは前にのべた。 A_0 層に蓄積された各物質の量と土壌中に含まれている量との比を求め、栗太地区での結果を図示したものが第14図である。他の地区での値も著しい違いは認められなかった。



第14図 土壌中の各物質現存量に対する A_0 層のもの割合

The ratio of the amount of nutrient in A_0 layer to that in soils.



第13図 表層土、下層土における窒素量の経年変化

Changes in the amount of nitrogen in surface and in subsoils.

すなわち、土壌中の量に対する A_0 層での量の比は物質によって異なり、有機物で最大でアカマツ林では 70~120% 程度に達した。窒素、カルシウムはこれにつき約 15~40%、カリウムは最も小さく 4% をこえなかった。リンはカルシウム、窒素とカリウムの間で約 10% 前後の値を示し、マグネシウムはリンより小さく、カリウムより大きかった。

このような事実もまた、有機物や窒素が表層に多く集積される傾向のあることを示している。

無機養分の垂直分布は物質の性質、土壌の性質などによって異なり、複雑である。有機物や窒素は最初から土壌に含まれていたものではなくて、植物や微生物の生活作用の結果土壌に集積されたものであったに対し、無機養分は土壌に含まれており、岩石の風化によって供給され、一部は土壌中を化学的な変化をうけて移動し、一部は植物に吸収され、落葉落枝として再び表層土にかえられる。従って、その垂直分布はこれらの作用要因の影響をうけて様々に変化しうるのである。

一般には、リン、カルシウムは表層土に多く、

カリウム、マグネシウムは下層に向って漸増する傾向がある（Lutz ら 1951）とされている。治山造林地でえた結果も熱塩酸可溶のものについては、おおそよく似た傾向を示した。しかし、土壤中の量の場所的な違いが大きいので、林分が成立してからの経過年数との間にはほとんど何の関係も認められなかった。

このような傾向に関係するものとして、落葉落枝による各物質の毎年の循環量の大小について考える必要がある。

熱塩酸可溶の無機養分の土壤中の量は、毎年林木によって吸収される量に比較すると、治山造林地のような瘠悪林地でも相対的に充分大きい。このことは第2図で明らかであるが、葉に含まれる物質量をその年の還元量だと考えて、土壤中の含量に対する百分率を求めると、土壤中の含量の最も少なかったリンでさえ10%をこえなかった。すなわち、毎年の還元量は土壤中の含量に比べて少なく、土壤から吸収して、これを地表へ再配分し、土壤中での垂直分布を変えるという毎年の作用はそれほど大きくはない。そのうえ、落葉によって表層土にかえされた養分のある部分は再び林木によって吸収されるであろうから、表層土にかえされたもののすべてが、下層土から吸収されて表層土へ再配分されたものではなく、表層土のものが再び表層土にかえされたにすぎない場合が考えられる。このような場合には、還元量の相対的な大小と垂直分布の形との間に本質的には関係が少ない。また、土壤中での移動のはやさは物質の性質によって異なるであろうから、循環の相対的な大小だけで垂直分布の形が決定され则认为することには無理がある。

しかし、落葉を通じての地表への再配分が、長い期間継続されると、下層への移動が容易におこらない限り、落葉による循環は次第に垂直分布に影響を与えるようになるであろう。

栗太地区の40年生以上の林分について、第10図の場合と同様、各林令までに落葉を通じて表層土に供給された各物質の総量を求め、これと土壤中の含有量との比を求めたのが第7表である。

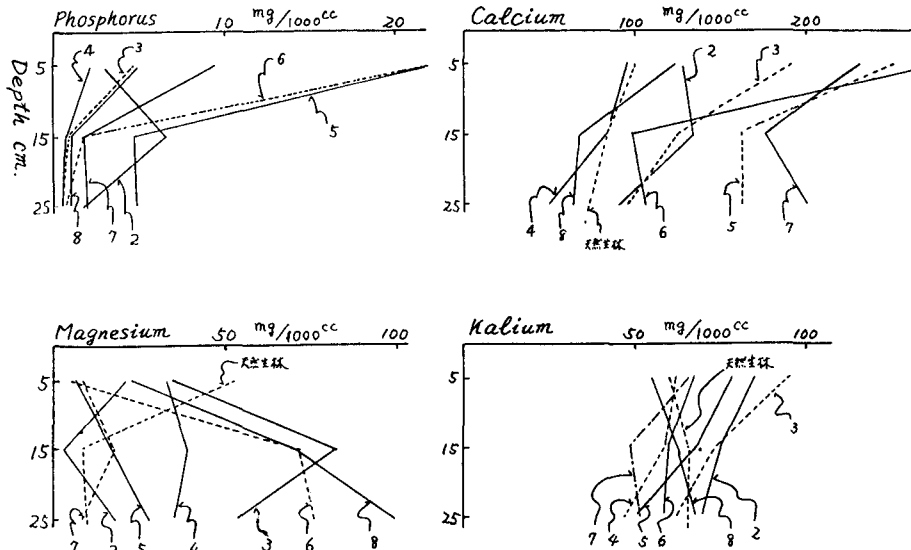
すなわち、40～60年間に、リン、カルシウムでは土壤中の現存量より多い量が落葉を通じて地表に再配分されていたに対し、カリウム、マグネシウムでは明らかに少なかった。前に示した第14図においても、土壤中の含量に対する A_0 層での含量の割合がカルシウムでとくに大きく、リンがこれに近づき、カリウム、マグネシウムでは少なかったことも、落葉による循環が長い年月の間には、垂直分布に次第に大きな影響を与えてくることを示していると考えてよいであろう。

Table 7. 無機養分の総供給量と土壤中の現存量, () 内は 0.2 N 塩酸可溶
Total amount of mineral nutrients that contained in litter fall and in soils.
() : soluble in 0.2 N HCl.

Stand age 林令		40	42	60	62
Phosphorus kg/ha	litter fall (A)	126	129	176	181
	soil (B)	106 (5.3)	55 (3.5)	99 (3.4)	79 (3.3)
	A/B %	120 (2400)	230 (3700)	180 (5200)	230 (5500)
Calcium kg/ha	litter fall (A)	843	875	1277	1320
	soil (B)	436 (191)	225 (128)	675 (328)	550 (353)
	A/B %	190 (440)	390 (680)	190 (390)	240 (370)
Kalium kg/ha	litter fall (A)	1015	1047	1331	1363
	soil (B)	2361 (166)	1574 (178)	3138 (204)	3176 (198)
	A/B %	43 (610)	67 (590)	43 (650)	43 (690)
Magnesium kg/ha	litter fall (A)	192	199	270	278
	soil (B)	635 (48.1)	115 (65.2)	905 (112.3)	1007 (112.8)
	A/B %	32 (400)	173 (305)	30 (240)	28 (650)

治山造林地でみられたリン、カルシウムとカリウム、マグネシウムの垂直分布の違いには、このような循環の相対的な大きさの違いが一つの重要な作用要因であろうと推定される。

0.2 N 塩酸可溶のものについての垂直分布を六甲地区の場合を例として図示したものが第 15 図である。



第15図 無機養分 (0.2 N 塩酸可溶) の土壌中での垂直分布とその経年変化 (六甲地区)
(図中の数字は林令を示す)

Vertical distribution of mineral nutrients (soluble in 0.2 N HCl) in soil and its changes with time. (on Rokko)

熱塩酸可溶のものでも表層に集中する傾向のあったリン、カルシウムではその傾向がより強くあらわれており、カリウムでは熱塩酸可溶のものとは逆に、むしろ表層から下層にむかって漸減する傾向を示した。

0.2 N 塩酸可溶の無機養分量は熱塩酸可溶のものに比べて少なく、従って、ある林令までの間に、落葉を通じて林地に供給された量と土壌中の含量との比は熱塩酸可溶のものの場合に比べて著しく大きくなり、第 7 表に明らかなように、リンでは 24~55 倍にまで達した。従って、落葉によっておこる林地表層への各物質の再配分の影響がより大きくあらわれ、そのことが垂直分布の勾配をはげしくしたことに密接に関係していると考えられる。

無機養分の可給態化が表層土でしかんにおけるとすれば、表層土ほど可給態養分が多いのは当然であるが、それらは林木によって吸収されるから、落葉を通じての循環がおこらなければ、表層土での高い可給態養分量を維持できないであろう。

とくに下層土への移動を促進する要因の作用しない限り、土壌中での含量が少なく、落葉による循環の影響が相対的に大きい物質ほど、表層土への集中がより強くおこるものと考えられる。

9. ま と め

森林が成立してから年数の経過にともない、有機物は林木として蓄積されるもののほか、 A_0 層、土壌中でも明らかに増加し、窒素もまた有機物量の増大とおおよそ平行して増加する傾向が認められた。一方、林木や A_0 層に含まれる無機養分量は年数の経過にともない増加する傾向があるが、土壌

中に含まれるものは場所的な違いが大きく、年数の経過にともなう一定の傾向ある変化を示さなかった。無機養分の林分全体としての量的な変化もまた、土壌中の量の影響をうけて、その経年変化は増加減少の一定の傾向を示さなかった。

物質によって異なるこのような経年変化には毎年うける変化量の大きさや、場所ごとの違いが当然関係するが、物質によって異なる循環系の性質の違いが密接に関係していると考えられる。

すなわち、炭素や窒素の循環は開放系で、有機物は、葉による同化作用によって空気中の炭酸ガスからつくられ、森林内に蓄えられていき、窒素もまた空気中のその固定によって森林内で増加していく。これに対し、無機養分の落葉を通じておこる循環は、本来土壌中のものを再び土壌中へかえすだけで、林分全体の量的な変化とは関係なく、閉鎖的である。降水などによる供給と侵蝕、溶脱による損失があると考えられるため、開放的な性質をもつと思われるけれども、治山造林地では、このような供給と損失とがほぼ釣合って、みかけのうえて閉鎖的な循環系をつくっていたように思われる。

治山造林地でえた結果は、このように物質の循環系の性質の違いによるものと考えられるが、このことは、一般的に森林生態系は有機物や窒素を増加させ、林地においても次第に土壌化が進んでいくが、無機養分量を明瞭に増加させるという明らかな傾向はないことを示すものと考えられる。

有機物や窒素の増加は、表層土で明らかに認められたけれども、下層での増加は甚だ不明瞭で、年数の経過にともない、次第に表層土と下層土との量的な差異が大きくなっていく傾向があった。

A層の発達には、おおまかな推定値で毎年0.15cm程度で、林地表層土でおこった変化が深く下層にまで及んでいくのには長い年月を必要とすると考えられる。

このような物質の量的な変化は、森林内部では、落葉落枝による物質の循環によって支えられている。葉によってつくられた同化産物の一部は枯死して林地に落下し、同時に土壌から吸収された窒素や無機養分もまた再び土壌にかえされる。林地に加えられた有機物、それに含まれた養分はある期間の後、分解され炭酸ガスの形で大気中にかえり、養分は再び無機化される。

従って、みかけのうえて閉鎖的な循環系をもち、量的な変化の明瞭でない無機養分でも、落葉を通じてさかんに循環しており、たとえば栗太地区60年生林分のA₀層についてみると、それまでに加えられた有機物や養分の90%以上がA₀層で分解、消失していたことになる。

毎年吸収される養分の大部分が葉に含まれ、落葉として林地にかえされているから、森林は落葉を通じて甚だ効果的に養分の循環を行っていたといえよう。

このような落葉を通じておこる循環は無機養分の土壌中での垂直分布に影響を与え、リンとカルシウムでは次第に表層土により多く集積される傾向があった。土壌中に含まれる量に対して落葉に含まれる量が相対的に大きく、土壌中で下層土への移動がおこりにくい場合ほど、長い間には表層へ集中する傾向が強くあらわれるもののように思われる。

開放的な循環系をもつ有機物の林地での増加は毎年の供給量と分解量との釣合によって決定されると考えられる。治山造林地では植付後2～3年で林冠が閉鎖し、有機物の供給は最初から多いため、林地の有機物は初期に急激に増加し、次第に増加の絶対量は減少していく傾向があり、この過程は毎年の供給量と分解量を林令に無関係に一定として導いた等比級数式(③式)によって近似できた。

有機物がこのような過程に従って増加するとすれば、究極には毎年の供給量と等しい量が分解消失し、量的な増加、減少のない動的な平衡状態に達すると考えられる。

この状態における有機物量は毎年の供給量と有機物の平均の分解率によって決まると考えてよい。森林で閉鎖されている限り、毎年の供給量には著しく大きな違いはないとみられるから、林地の有機物量の多少に支配的に影響するものは分解率であるといえる。すなわち、動的な平衡状態では分解率の大小によって有機物現存量の多少に違いを生じ、分解がおそいほど多くなるが、毎年の分解の絶対量はその供給量と等しく、著しく大きな違いはおこらないといえよう。

有機物の分解と平行して養分の無機化も行なわれると考えると、動的な平衡状態では毎年落葉に含まれて供給されたと等しい量の養分が土壌中で無機化されるであろう。従って非同化部分の毎年の生長によってそこに固定されてしまう養分量さえ継続的に補給されれば、毎年の生長に必要な養分量の大部分は落葉を通じておこる循環によって、絶えず補給されていることになり、土壌中の養分量の多少や、分解のための条件の良否は養分の循環量の大小を決定するのに大きな意味をもたず、立地条件による違いは少なくなると考えられる。このように、動的な平衡状態では土地条件の良否の差がある程度打消されるもののように考えられるが、これは落葉による循環によって支えられており、土壌と林木を循環して、養分は甚だ効果的に利用されているといえることができる。

動的な平衡に達するのに必要な年数は、有機物増加の過程を示す式から計算され、Jenny (1949) の計算式に従えば、栗太地区の天然生アカマツ林で、 A_0 層では約20年、0~25 cm 深の土壌中の有機物を含めて80年、0~60 cm 深までをとると約106年と推定され、相当の長年月を必要とするものといえよう。

この年数は分解率が小さいほど、従って立地条件が不良なほど長くなると考えられ、立地条件が不良なほど平衡状態での有機物量が多いばかりでなく、平衡に達するのに長い年月を必要とすると考えられる。

従って、森林では物質の循環面で動的な平衡状態を維持していくことが最も有利で、立地条件に恵まれない林地ほど、このことは重要である。若し、皆伐などによってこの平衡が破られると、落葉を通じておこる物質循環の安定が破れ、再びこれを回復するのに相当の年月を必要とし、立地条件が不良なほど長くなるであろう。有機物や窒素は皆伐などによって失われたとしても、次代の林分の成立によって回復するが、無機養分の量的な回復は森林の成立だけによって必ずおこるとは期待し難いようである。

文 献

1. Aaltonen, V. T.: 1948. Paul Parey (Berlin). Boden und Wald.
2. 青木茂一: 1954. 養賢堂(東京) 土壌と植生
3. Alway, F. J. and R. Zon.: 1930. J. Forestry. Vol. 28. No. 5. 715-727.
Quantity and nutrient contents of pine leaf litter.
4. Alway, F. J. and J. Kittredge.: 1933. Soil Sci. 35. 307-312.
The forest floor under stands of aspen and paper birch.
5. Auten, J. T.: 1945. J. Forestry. Vol. 43. No. 6. 441-446.
Relative influence of sassafras, black locust and pine upon old-field soils.
6. Billings, W. D.: 1938. Ecol. Monographs. 8. 441-499.
The structure and development of old field shortleaf pine stands and certain associated physical properties of the soil.
7. Blow, F. E.: 1955. J. Forestry Vol. 55. No. 3. 180-195.
Quantity and hydrologic characteristics of litter under upland oak forests in Eastern Tennessee.
8. Chandler, R. F.: 1941. J. Amer. Soc. Agron. 33. 859-871.
The amount and mineral nutrient content of freshly fallen litter in the hardwood forests of Central New York.
9. Dickson, B. A. and R. L. Crocker.: 1953. J. Soil Sci. Vol. 4. No. 2. 123-141.
A chronosequence of soils and vegetation near Mt. Shasta California. (1).
10. Dickson, B. A. and R. L. Crocker: 1953. J. Soil Sci. Vol. 4. No. 2. 142-154. 同上 (2).
11. Dickson, B. A. and R. L. Crocker: 1954. J. Soil Sci. Vol. 5. No. 2. 173-191. 同上 (3).
12. Crocker, R. L. and J. Major.: 1955. J. Ecology. 43. 427-448.
Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay, Alaska.
13. Crocker, R. L. and B. A. Dickson.: 1957. J. Ecology. 45. 169-185.
Soil development of the recessional moraines of the Herbert and Mendenhall glaciers, south-eastern

Alaska.

14. Day, G. M. : 1940. J. Forestry. Vol. 38. No. 8. 646-648.
Topsoil changes in coniferous plantations.
15. Ebermayer, E. : 1876. J. Springer (Berlin).
Die gesammte Lehre der Waldstreu.
16. F    r, D. and M. Frank. : 1936. Zeitschr. f. Pflanzenernährung Düngung u. Bodenkunde. 43. 5-33.
Untersuchungen über den periodischen Kreislauf des Stickstoffes, des Phosphorus und des Kaliums
in dem Waldboden.
17. F    r, D. : 1937. Forstl. Wochenschr. Silva. 25. 329-334.
Der periodische Kreislauf des Phosphorus und des Kaliums in den Waldböden.
18. 藤川・谷口・柏木 : 1956. 林, 土, 調, 報 No. 6 名古屋営林局土壌調査報告 No. 3.
19. Godwin, H. and Turner, J. S. : 1933. J. Ecology, 21. 235-262.
Soil acidity in relation to vegetational succession in Calthorpe Broad, Norfolk.
20. Griffith, B. G., Hartwell, E. W. and Shaw, T. E. : 1930. Harvard Forest. Bull. 15.
The evolution of soils as affected by the old field white pine-mixed hardwood succession in Central
New England.
21. Handley, W. R. C. : 1954. Forestry commission Bull. No. 23.
Mull and Mor formation in relation to forest soils.
22. 林・下出 : 1953. 林, 土, 調, 報 No. 3. 長野営林局土壌調査報告 No. 1.
23. 林・下出 : 1954. 林, 土, 調, 報 No. 4. 同上 No. 2.
24. Hesselman, H. : 1937. Medd. Skogsf  rs  ks-Anst. 30. 529-716.
  ber die Abhängigkeit der Humusdecke von Alter und Zusammensetzung der Best  nde im nordischen
Fichtenwald von blaubeerreichem Vaccinium-Typ und über die Einwirkung der Humusdecke auf die
Verjüngung und das Wachstum des Waldes.
25. Hissink, D. T. : 1938. Soil Sci. 45. 83-94.
The reclamation of the Dutch saline soils (solonchak) and their further weathering under Humid
climatic conditions of Holland.
26. 茨木・栗田・虻川・伊藤・鈴木・伊藤 : 1956. 林, 土, 調, 報 No. 7. 秋田営林局土壌調査報告 No. 1.
27. Ingham, G. : 1950. Jour. Agri. Sci. Vol. 40. 55-61.
The mineral content of air and rain and its importance to agriculture.
28. Jenny, H., Gessel, S. P. and Bingham, F. T. : 1949. Soil Sci. 68. 419-432.
Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions.
29. Jenny, H. : 1958. Ecology Vol. 39. No. 1. 5-16.
Role of the plant factor in the pedogenic functions.
30. 刈住 昇 : 1957. 林, 試, 報 No. 94. 1-205. 樹木の根の形態と分布
31. 河田 弘 : 1955. 日, 林, 誌 Vol. 37. 270-275. TIURIN 法による土壌有機炭素の定量について
32. 吉良・穂積・小川・生嶋・依田・篠崎 : 1956. 生物科学 Vol. 8. No. 1. 2-10. 同種植物個体間の競争現象
33. 吉良竜夫 : 1960. 古今 (東京) 物質の循環 (吉良竜夫編 : 生態学大系 2 上)
34. 木崎・渡辺 : 1954. 林, 土, 調, 報 No. 4. 東京営林局土壌調査報告 No. 4. No. 5. No. 6.
35. Kittredge, J. : 1948. McGraw-Hill (New York) Forest Influence.
36. Kittredge, J. : 1955. J. Forestry Vol. 53. No. 9. 645-647.
Some characteristics of forest floors from a variety of forest types in California.
37. Krauss, G. und W. Wobst. : 1935. Tharandt. Forstl. Jb. 86. 169-246.
Über die stand  rtlichen Ursachen der waldbaulichen Schwierigkeiten im vogtl  ndischn Schiefergebiet.
38. 子幡・木崎・渡辺 : 1952. 林, 土, 調, 報 No. 2. 東京営林局土壌調査報告 No. 1.
39. 子幡・木崎・渡辺 : 1953. 林, 土, 調, 報 No. 3. 同上 No. 3.
40. 窪田・井上 : 1952. 林, 土, 調, 報 No. 2. 高知営林局土壌調査報告 No. 1.
41. Lutz, H. J. and R. F. Chandler. : 1951. John Wiley & Sons. (New York). Forest Soils.
42. 牧坂三郎 : 1958. 林業技術 No. 194. 35. 南四国の森林に降下する雨水中の窒素について
43. 丸山・岩坪・堤 : 未発表
44. 真下・久保 : 1956. 林, 土, 調, 報 No. 6. 名古屋営林局土壌調査報告 No. 1.
45. 三浦伊八朗・内藤三夫 : 1940. 東大演報 No. 28. 1-50.
武蔵野に於ける矮林の収穫および下草, 落葉採取について
46. 三宅泰雄 : 1944. 気象集誌 Vol. 22. No. 2. 48-57. 本邦河川の地球化学的研究 (第 1 報)
47. 三宅泰雄・杉浦吉雄 : 1957. 地人書館. 降水の化学
48. 宮崎 楠 : 1942. 興林会. 四国森林植生と土壌形態との関係について

49. 森下義郎・大山浪雄：1957. 林，試，報 No. 99. 59-144. 緑化促進によるハゲ山の早期復旧
50. 森山・佐藤・石沢：1952. 林，土，調，報 No. 2. 前橋営林局土壌調査報告 No. 1.
51. 向野・谷口：1956. 林，土，調，報 No. 2. 名古屋営林局土壌調査報告 No. 2.
52. 村松・渡辺・佐藤：1953. 林，土，調，報 No. 3. 東京営林局土壌調査報告 No. 2.
53. Nikiforoff, C. C.: 1942. Amer. Jour. Science Vol. 240. 847-866. Fundamental formula of soil formation.
54. Nye, P. H.: 1961. Plant and Soil. Vol. 13 No. 4. 333-346.
Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest.
55. Nykvist, N.: 1959. Oikos, Vol. 10. No. 2. 190-211. Leaching and decomposition of litter (1).
56. Odum, E. P.: 1954. W. B. Sanders. (London). Fundamentals of ecology.
57. Ogawa, H. Yoda, K. and T. Kira: 1961, Nature and Life in Southeast Asia Vol. 1.
A preliminary survey on the vegetation of Thailand.
58. 大政正隆・森経一：1937. 帝，林，試，報 Vol. 3. No. 3. 39-107. 落葉に関する二，三の研究
59. Oshima, Y., M. Kimura, H. Iwaki and S. Kuroiwa: 1958. Bot. Mag. Vol. 71. 289-301.
Ecological and physiological studies on the vegetation of Mt. Shimagare. (1).
60. 大津営林署：1942. (大津営林署) 大津の砂防
61. Ovington, J. D.: 1954. J. Ecology. Vol. 42. 71-80.
Studies of the development of woodland conditions under different trees. (2). The forest floor.
62. Ovington, J. D.: 1955. J. Ecology. Vol. 43. 1-21.
同上 (3). The ground flora.
63. Ovington, J. D.: 1956. a. J. Ecology. Vol. 44. 171-179.
同上 (4). The ignition loss, water, carbon and nitrogen content of the mineral soil.
64. Ovington, J. D.: 1956. b. J. Ecology. Vol. 44. 597-604.
同上 (5). The mineral composition of the ground flora.
65. Ovington, J. D.: 1957. The New Phytologist. 56. 1-11.
The volatile matter, organic carbon and nitrogen contents of tree species grown in close stands.
66. Ovington, J. D., H. A. I. Madgwick.: 1958. a. The New Phytologist. 57. 273-284.
The sodium and phosphorus contents of tree species grown in close stands.
67. Ovington, J. D.: 1958. b. J. Ecology Vol. 46. 127-142.
Studies of the development of woodland conditions under trees. (6). Soil sodium, potassium and phosphorus.
68. Ovington, J. D.: 1958. c. J. Ecology. Vol. 46. 391-405.
同上 (7). Soil calcium and magnesium.
69. Ovington, J. D.: 1959. Ann. Bot. Vol. 23. No. 90. 229-239.
The circulation of minerals in plantations of *Pinus sylvestris* L.
70. Ramann, E.: 1890. Berlin. Die Waldstreu.
71. 林野庁編：1959. 日本治山治水協会，治山計画と実行
72. Rowe, P. B.: 1955. J. Forestry. Vol. 53. No. 5. 342-351.
Effects of the forest floor on disposition of rainfall in pine stands.
73. Russell, E. W.: 1950. Longmans, Green. (London). Soil conditions and plant growth.
74. Salisbury, E. J.: 1925. J. Ecology. 13. 322-328.
Note on the edaphic succession in some dune soils with special reference to the time factor.
75. Sartz, R. S. and W. D. Huttingen.: 1950. J. Forestry. Vol. 48. No. 5. 341-344.
Some factors affecting humus development in Northeast.
76. 佐藤大七郎・中村賢太郎・扇田正二：1955. 東大・演・報 No. 48. 65-90.
林分生長論資料 (1) 立木密度のちがう若いアカマツ林
77. 佐藤大七郎・功力六郎・桑川昭夫：1956. 東大・演・報 No. 52. 33-51.
林分生長論資料 (3) チョウセンヤマナランの再生林における葉の量と生長の関係
78. 佐藤大七郎・根岸賢一郎・扇田正二：1959. 東大・演・報 No. 55. 101-123.
林分生長論資料 (5) 上層間伐をおこなったケヤキ人工林における葉の量と生長量
79. 佐藤大七郎：1955. 朝倉 (東京) 林木の生長の物質的基礎 (育林学新説 116-141)
80. 芝本武夫：1951. みどり Vol. 3. No. 3. 9-16. 我が国森林土壌の生産力と造林用肥料に就いて
81. 芝本武夫：1952. 林野庁. スギ，ヒノキ，アカマツの栄養並びに森林土壌の肥沃度に関する研究
82. 四手井・堤：1962. 日. 林. 誌, Vol. 44. No. 11. 297-303. 林地の有機物集積量とその年分解率と気候との関係
83. Sims, I. H.: 1932. J. Forestry. Vol. 30. No. 1. 90-91.
Litter deposition and accumulation in the pine-oak type of the southern Appalachians.
84. Stoeckeler, J. H.: 1961. Forest Sci. Vol. 7. No. 1. 66-71.

- Organic layers in Minnesota Aspen stands and their role in soil improvement.
85. Süchting und Christmann: 1935. Mitt. Forstwirt. u. Forstwiss. 6. 425-446.
Über den Abbau von Auflagehumus bei Waldboden. (III) Humusabbau und Kahlschlag.
 86. Yasuhiko Tezuka: 1961. Jap. J. Bot. Vol. 17, 371-402.
Development of vegetation in relation to Soil formation in the volcanic island of Oshima, Izu, Japan.
 87. Trimble, G. R. and H. W. Lull: 1956. Northeastern Forest Exp. Stat. Forest Serv. U. S. Dept. Agri.
The role of forest humus in watershed management in New England.
 88. 堤 利夫: 1956. 京大・演・報 No. 26. 59-87. 林木落葉の分解について
 89. 堤 利夫・徳丸始朗: 1958. 治山事業調査報告 (大阪営林局) No. 8.
治山造林地の林力回復過程に関する調査報告
 90. 堤 利夫・有光一登: 1959. 同上 No. 11
 91. 堤・徳丸・有光・渡辺: 1960. 同上 No. 14
 92. 堤 利夫・岡林 巖: 1959. 生理生態 Vol. 8. No. 2. 124-129. 林木落葉の分解に及ぼす温度の影響について
 93. 堤 利夫・四手井綱英・岡林巖: 1961. 京大演報, No. 33. 187-198. 林木落葉の分解について (Ⅱ)
 94. Waksman, S. A. and F. C. Gerretsen.: 1931. Ecology. 12. 33-60. Influence of temperature and moisture upon the nature and extent of decomposition of plant residues by microorganisms.
 95. Waksman, S. A.: 1952. John Wiley & Sons. (New York) Soil Microbiology.
 96. Watson, D. J.: 1956. The Growth of leaves. Edited by F. L. Milthorpe. Butterworth scientific Pub. (London). 178-191. Leaf growth in relation to crop yield.
 97. Wilson, K.: 1960. J. Ecology. Vol. 48. 341-359.
The time factor in the development of dune soils at south Haven Peninsula, Dorset.
 98. Wittich, W.: 1952. Schrif. Forstl. Faku. Univ. Göttingen. Bd. 4.
Der heutigen Stand unseres Wissens vom Humus und neue Wege zur Lösung des Rohhumusproblems.
 99. Zonn, S. V. (遠藤健治郎訳): 1959. 日・林・協 森林と土壌

Résumé

To understand the close relationship between soil properties and forest vegetation, the study on the process of the soil development with the progress of time or with the development of vegetation is needed.

In this report, the relationship between the time factor and the forest soil properties, namely, the amount of organic matter, nitrogen and mineral nutrients are considered.

The studied area were the erosion control forests which widely distribut over the Setouchi district. The mother rock in this district is granite, and the mean annual temperature is about 14-15°C, while the annual precipitation is about 1000~1500 mm.

With the development of forest vegetation the amount of organic matter increased with the progress of time, in all parts of ecosystem, i. e. trees, Ao layer and soil.

The amount of nitrogen also increased, but the results were not so definite as compared to that of the organic matter, because the vegetation changed from alder which were planted at first and has root-nodules fixing atmospheric nitrogen, to pine.

On the other hand, there were no definite changes in the total amount of mineral nutrients.

It seemed that this fact was due to the difference of the circulation system of each substance. The circulation system of carbon and nitrogen through forest ecosystem is open, and so forests take in carbon and nitrogen from the atmosphere and accumulate them in the form of trees, Ao layer and soil organic matter.

If the rate of accumulation is more rapid than the rate of loss by way of decomposition and respiration, it will increase the amount of carbon and nitrogen in forest ecosystem with the

progress of time.

On the contrary, the circulation system of mineral nutrients is closed. They are absorbed by trees from the soil and are returned to the soil in the form of litter. No quantitative changes in forest ecosystem can be expected by this circulation.

We may conclude that forest ecosystems can accumulate carbon or organic matter and nitrogen but cannot increase in mineral nutrients.

Precisely speaking, the circulation system of mineral nutrients are also open, because rain water contains some amount of nutrients, and the weathering of rocks in the process of forest development may occur. On the other hand, forests lose mineral nutrients by the way of runoff water, surface erosion and leaching.

The rate of loss of mineral nutrients may change with many site conditions, therefore, it cannot be concluded whether forest ecosystem can increase in mineral nutrients or not.

The increasing process of soil organic matter with time can be expressed by the formula of geometrical progression.

Soil organic matter increases rapidly in early stages, but soon the absolute value of yearly increase begin to decrease. It decreases with the progress of time, and finally it reaches a dynamic equilibrium.

The amount of soil organic matter at dynamic equilibrium (S_m) is decided by two factors: one is the amount of supply to soil (a), another is the rate of decomposition (p): $S_m = a/p$.

The rate of decomposition (p) is the key factor that decides the amount of soil organic matter, because there are no remarkable variations in the amount of litter fall (amount of supply (p)) in the closed stands.

Therefore, the slower the rate of decomposition, the richer the organic matter in the soil. However, on the status of dynamic equilibrium, the amount of supply and that of decomposition are equal, and then we find no quantitative change in the amount of soil organic matter.

Nearly equal amount of mineral nutrients which are returned to the soil by litter fall may be decomposed or mineralised in the soil and the circulation through tree and soil continue to be the stable status in the dynamic equilibrium system.

It takes a very long time to reach the equilibrium. In this research, it is estimated that it may take 80 or more years to reach the equilibrium. The slower the rate of decomposition, the longer the time necessary to reach the equilibrium.

The source of organic matter which is supplied to the soil is litter fall. It is accumulated on the surface of the forest soil, and the gain of nitrogen also mainly occurs at the surface of the soil. Therefore the vertical distribution of organic matter and nitrogen in the soil begins to change with the progress of time.

It contains a very small amount of organic matter and nitrogen at the initial stage, and there are no differences in the amount between surface (0–5 cm), subsurface (5–15 cm) and subsoil (15–25 cm). But, with the development of forest vegetation, the accumulation of organic matter and nitrogen mainly occurs at the surface of the soil and their downward transport is very slow, and then the decreasing gradient of organic matter and nitrogen content with depth begins to increase with the progress of time.

The vertical distribution of mineral nutrients is more complex.

The amount of mineral nutrients in the soil were not so small even at the initial stage. With the development of forest vegetation, they are absorbed by trees and soon returned to the surface soil. This circulation of mineral nutrients by litter fall must have some influence on the vertical distribution of mineral nutrients.

The substances that are scarce in the soil suffer a more severe influence on vertical distribution than the substances that are plentiful in the soil by this circulation above mentioned.

In this research, phosphorus and calcium were scarce in the soil, and the total amount that returned to the soil during 60 years were about twice as much as the amount that was contained in the soil.

If the rate of downward transport of these substances is not so rapid, it seems that they begin to be accumulated on the surface soil, and the decreasing gradient with depth begins to increase with the progress of time.

As above mentioned, the forest ecosystem is able to accumulate organic matter and nitrogen in the soil, and after a long time, they reach the dynamic equilibrium in quantity. On this status, the circulation of substance through trees and soil is in stable status. The equal amount of substance that is returned to the soil by litter fall is decomposed in the soil.

On the other hand, the forest ecosystem does not always have the ability to accumulate the mineral nutrients. If the loss of organic matter and nutrients occur by clear cutting or surface erosion, the amount of the loss of organic matter and nitrogen will be recovered by the development of secondary forest vegetation, but an amount equal to the loss of mineral nutrients by clear cutting may not always be recovered. If the mineral nutrients decrease in the soil, their loss by surface erosion may increase, because they begin to accumulate on the surface soil by litter fall.