

森林生態系における炭素の循環

——リターフォール量とその分解速度を中心として——

河 原 輝 彦⁽¹⁾

Teruhiko KAWAHARA : Carbon Cycling in Forest Ecosystems

——In reference to litter fall and its decomposition——

要 旨：リターフォール量および分解量を中心に有機物の動きを調べ、森林生態系の炭素の循環の概要を検討した。

森林の土壌中に含まれる炭素量は、林分によって大きく異なるが、広域的にみると、気温の低い亜寒帯林にくらべて気温の高い熱帯林のほうが少ない傾向にあるといえる。

土壌有機物の主な供給源であるリターフォール量は、一般には熱帯林で最も多く気温が低くなるにつれて低下するといわれている。しかし筆者の調査例では針葉樹林の場合は明らかでなく、広葉樹林の場合のみ気温の高い地域にある森林ほど多く、気温との間におよそ一次の直線関係がみられた。

落葉の分解速度は、針葉よりも広葉のほうが速く、また気温の低いところよりも気温の高いところほど速く、分解速度と気温の間には指数関数的な関係があった。針葉に広葉を混合すると野外でのリターバッグによる実験では、針葉の分解が促進される傾向がみられたが、室内でのインキュベーションによる実験でははっきりしなかった。2種の針葉を混合した場合は、野外のリターバッグによる実験でもその効果ははっきりしなかった。

皆伐に伴う土壌への有機物供給量の変化、あるいはヒノキ純林と混交林における A₀ 層の状態から、林地保全上問題のあるところでは炭素の循環系の乱れをなるべく少なくするような施業法を取り入れていく必要があると考察した。

目 次

は じ め に	22
I 土壌中の炭素量	23
II リターフォール量	25
1. 季節変化	25
2. 1年間のリターフォール量	28
1) 落 葉 量	28
2) 落葉以外のリターフォール量	30
III 落葉落枝の分解	30
1. 落葉の分解率の推定	30
2. 2樹種落葉混合と分解速度	32
3. 材 の 分 解	34
IV 土 壌 呼 吸 量	37
1. 日変化と季節変化	37
2. 1年間の土壌呼吸量	40
3. 根の呼吸量の推定	40
4. 枯死材からの CO ₂ 発生量	42

V 炭素の循環	43
1. 樹体部での炭素の循環	43
2. 土壌中での炭素の循環	43
3. 系全体の炭素の循環	45
VI 施業と有機物の動き	45
1. 皆伐と有機物の動き	45
2. 混交林と有機物の動き	47
引用文献	48
Summary	51

はじめに

最近、スギやヒノキなどの単純一斉造林あるいは大面積の皆伐施業は、土壌に悪影響を与え地力低下の危険があることなどが、以前にも増して強く指摘されている。

したがって、今後は木材生産とともに地力保全をも重視した森林施業を推し進めていく必要がある。その一つとして、安定している物質循環系の破壊をなるべく少なくするような施業方法を取り入れていくことになる。そのための基礎資料の一つとして、まず森林生態系での物質循環機構を知り、それらから施業と物質循環とのかわり方を解明する必要がある。

森林生態系での物質の動きをみると、つぎのようになる。植物体は土から水と無機物を吸収し、太陽エネルギーを利用して空気中の炭酸ガスから有機物を合成し、植物体を作りあげる。一方、落葉・落枝、根の枯死あるいは枯死木の林地への倒木などによってその有機物の一部および吸収された養分物質の一部は、リターとして林地に還元されている。この還元された有機物は、土壌動物や土壌微生物の働きによ

て徐々に分解され、炭素は CO_2 ガスとして放出されるが、無機養分の大部分は再び林木に利用されている。

ここでは、植物体を構成している物質の中で大きな部分を占めている炭素（有機物）の動きについて検討した。その炭素の循環を模式的に図示すると、Fig. 1 のようになる。この炭素の循環を大きく分けると、植物体を中心とした動きと、土壌を中心とした動きになる。まずここでは林地（土壌）を中心とした炭素（有機物）の動きを、リターフォール量とその分解から検討し、そのあと森林の施業と炭素循環との関係について考察した。なお、この論文はいままでに報告したものを中心に取りまとめ再検討し、新しい立場から考察を加えたものである。

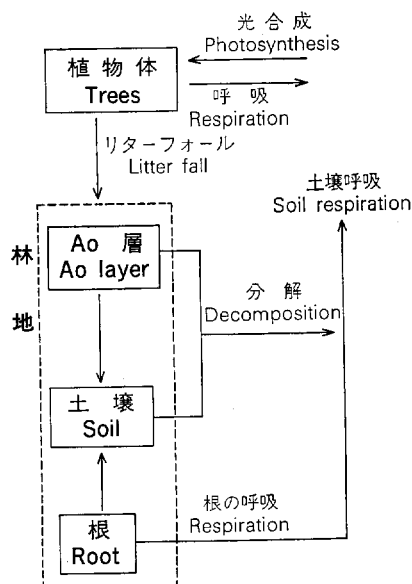


Fig. 1. 森林生態系での炭素の循環
Carbon cycling in forest ecosystem.

I 土壌中の炭素量

土壌中 (A_0 層を含む) に蓄積されている炭素量は我が国で調査した林分の範囲内では, 41 ton/ha (アカマツ林) から 230 ton/ha (カラマツ林) まであり, 最大値と最小値とでおよそ 5 倍の違いがあった²⁰⁾。

また, 熱帯林で調べられた炭素量では, 10~140 ton/ha²¹⁾ と林分間で著しい違いがみられるが, 全体的にみれば, 我が国の調査林分よりも蓄積量が少ない傾向にあった。

このように林分によって炭素量に違いが生じた原因として, 気温, 降水量, 地形, 樹種, 土壌の性質などいろいろ多くのものが挙げられるが, ここでは気温で整理してみた (Fig. 2)。

両者の関係は, 同一気候帯にある森林でも局地的な違いがあるため, かなりのバラツキがみられる。しかし, 全体的には気温が高くなるにつれて土壌中に蓄積されている炭素量は, 指数関数的に減少する傾向がみられ, その両者の関係を平均値でみると,

$$\log C = 1.898 - 0.005 T$$

の関係式で表わされる。ここで C は炭素量 (ton/ha), T は月平均気温が 0°C 以上の積算気温 ($^\circ\text{C}$) である。この結果は JENNY ら¹⁴⁾ が気温と炭素含有率との関係で見い出している法則性とほぼ一致している。

土壌中の炭素は, もともとそこにあったものではない。すなわち, 森林が成立するに伴って, 葉は光合成作用を行い, 大気中から CO_2 を取り入れ有機物を作り, その一部がリターとして林地に加えられ, 一部は分解され大気中に放出され, 残りが土壌中に移動し, そこでしだいに蓄積されたものである。

この蓄積量の時間的変化について, CROCKER ら²⁾ は氷河の後退後の炭素量の変化を調べ, その結果, 森林の成熟とともに土壌中に炭素が蓄積され, しだいに一定量に近づくことを報告している。また, これと同じ傾向がハゲ山造林地においても認められている²⁰⁾。さらに, この問題についての研究は, 数学モデルを使って多くなされており, 炭素の蓄積量の時間的変化を,

$$dc/dt = L - k'C \quad \text{または} \quad C = \frac{L}{k'}(1 - e^{-kt})$$

L : 供給量, C : 林地の炭素量, k' : 平均分解率, t : 時間

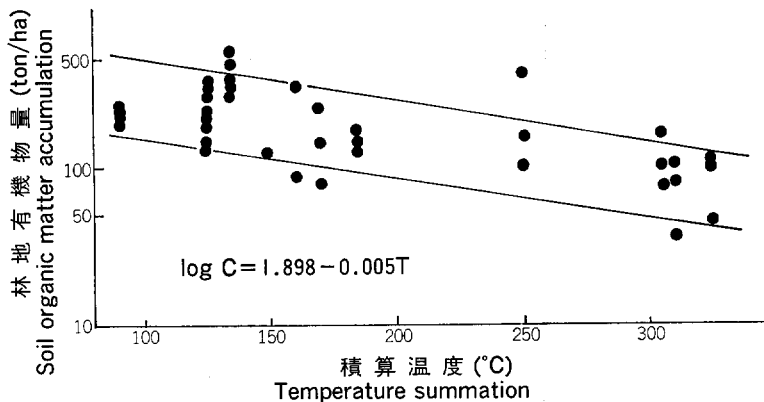


Fig. 2. 林地の有機物量と積算温度との関係
Relation between the amount of organic matter in soils and temperature summation.

Table 1. 調査林分の概況
Description of the experimental stands.

林分 No.	樹種 Species	場所 Location	林齢 Age (yr)	密度 Density (no./ha)	樹高 Height (m)	直径 Di- ameter (cm)	文献 Note
1	ブナ <i>Fagus crenata</i>	(1) 栃木 Tochigi	天然	868	10.9	15.3	(27)
2		(2) 京都 Kyoto	"	782	14.3	22.3	} (17)
3	ミズナラ <i>Quercus mongolica</i>	"	"	1,900	19.5	14.0	
4	コナラ <i>Quercus serrata</i>	(1) 埼玉 Saitama	40	2,350	11.3	11.8	(Unpublished)
5		(2) "	20	6,100	5.8	4.2	(23)
6	ケヤキ <i>Zelkova serrata</i>	(1) 東京 Tokyo	65	923	14.1	15.3	} (Unpublished)
7		(2) 群馬 Gunma	60	960	19.1	19.8	
8	コジイ <i>Castanopsis cuspidata</i>	熊本 Kumamoto	天然	2,950	11.3	10.4	(17)
9	アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	(1) 埼玉 Saitama	23	3,840	8.6	6.8	} (19)
10		(2) "	23	6,469	5.9	6.1	
11		(3) "	23	14,601	4.3	4.0	
12		(4) "	30	2,130	8.8	11.1	
13		(5) 京都 Kyoto	20	1,900	9.5	12.8	(17)
14		(6) 東京 Tokyo	15	30,000	5.7	5.0	(23)
15	ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	(1) 栃木 Tochigi	45	1,230	15.8	21.8	} (27)
16		(2) "	14	3,600	5.3	8.6	
17		(3) 兵庫 Hyogo	19	2,355	10.6	12.4	} (30)
18		(4) "	12	3,240	7.8	9.1	
19		(5) 滋賀 Shiga	53	1,175	14.6	19.2	(Unpublished)
20	スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	"	6	40,000	4.1	3.9	(23)
21	ヒノキ・アカマツ <i>C. obtusa</i> & <i>P. densiflora</i>	(1) 兵庫 Hyogo	C. 51	480	20.4	21.1	} (30)
			P. 50	283	23.4	34.4	
22		(2) "	C. 33	933	10.9	11.6	
			P. 32	622	18.0	21.3	
23		(3) "	C. 22	1,867	11.3	12.2	
			P. 20	622	14.0	16.3	
24		(4) "	C. 12	3,022	7.2	7.7	} (30)
			P. 12	1,822	7.5	8.1	
25		(5) 滋賀 Shiga	C. 60	341	16.2	14.7	(17)
			P. 60	182	18.0	24.2	
26	ヒノキ・カラマツ <i>C. obtusa</i> & <i>Larix leptolexis</i>	山梨 Yamanashi	C. 50	839	17.9	20.3	(28)
			L. 55	214	24.5	26.2	

Table 1. (つづき) (Continued)

林分 No.	樹 種 Species	場 所 Location	林 齢 Age (yr)	密 度 Density (no./ha)	樹 高 Height (m)	直 径 Di- ameter (cm)	文 献 Note
27	アルビジア <i>Albizia falcata</i>	フィリピン Philippines	8	315	18.8	28.9	} (29)
28	メリーナ <i>Gmelina arborea</i>	"	9	1,191	15.8	16.0	
29	アピトン <i>Diptero. grandiflorus</i>	"	45	925	17.2	31.0	
30	フタバガキ <i>Dipterocarp</i>	"	天 然 Natural	1,444	17.1	17.8	

で表されている。そして、このモデルはまた十分時間がたち、森林が成熟すれば土壤中の炭素量は、動的平衡状態に達し、供給量と分解量とは等しく、 $L = k'C$ になることを示している⁸⁾⁴¹⁾。

この $L = k'C$ の式からもわかるように、平衡状態にある土壤中の炭素蓄積量は、供給量と分解率との大きさによって決まってくる。いいかえれば、供給量と分解率の大きさが、土壌を中心とした炭素の動きの速さを表しているといえる。

II リターフォール量

林地への有機物の供給源としては、リターフォールによるものと、枯死した根によるものがある。しかし、枯死根量は直接測定することは困難であるため、ここでは測定していない。ただ GREENLAND ら⁸⁾はいろいろなデータをもとにして平均的な枯死量としてリターフォール量の約 1/2 ぐらいで、リターフォール量の多い林分では根の枯死量も多い傾向にあるという。リターフォールは降雨とともに林地への養分供給源として重要であるが¹⁷⁾⁻¹⁹⁾、林地への養分供給量のうち 2・3 の養分を除けばリターフォールの占める割合は大きい¹²⁾¹³⁾¹⁷⁾。

このようにリターフォールは土壌への有機物や養分の主要な供給源であるとともに、すでにみたように森林の物質循環の解明の上からも主要な経路であるため、ここでは 1 年間のリターフォール量とともに、それらに關与する要因について検討した。

調査方法はつぎのとおりである。

調査林分内に 1 m^2 ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$) のトラップを 5~10 個設置し、原則として毎月 1 回の割でリターを回収し、乾燥したのち、葉、枝、樹皮、球果、その他に分け、それぞれの重量を測定した。測定年数は林分によって異なり 1~5 年である。なお、調査林分の概況を Table 1 に示しておく。

1. 季節変化

幾つかのリターフォールの季節変化を Fig. 3 に示した。

針葉樹林や落葉広葉樹林の落葉は、10月~12月(林分によっては11月~1月)の落葉期にもっとも多く落下している。すなわち、秋型の落葉である。しかし、落葉期以外の生育期間中においても少量ずつではあるが、絶え間なく落葉し続けている。落葉期以外の季節に落葉した量を全落葉量との割合でみると、例えば、40年生アカマツ林で約 40%、45年生ヒノキ林で約 10% となり、針葉樹林ではかなりの量が生育期間中でも落葉していることがわかる。このような生育期間中の落葉は、昆虫によるものや、雨風など気象条件によるものが大きな比率を占めているものと考えられ、また、その落葉の性質も違うであろう²⁸⁾。

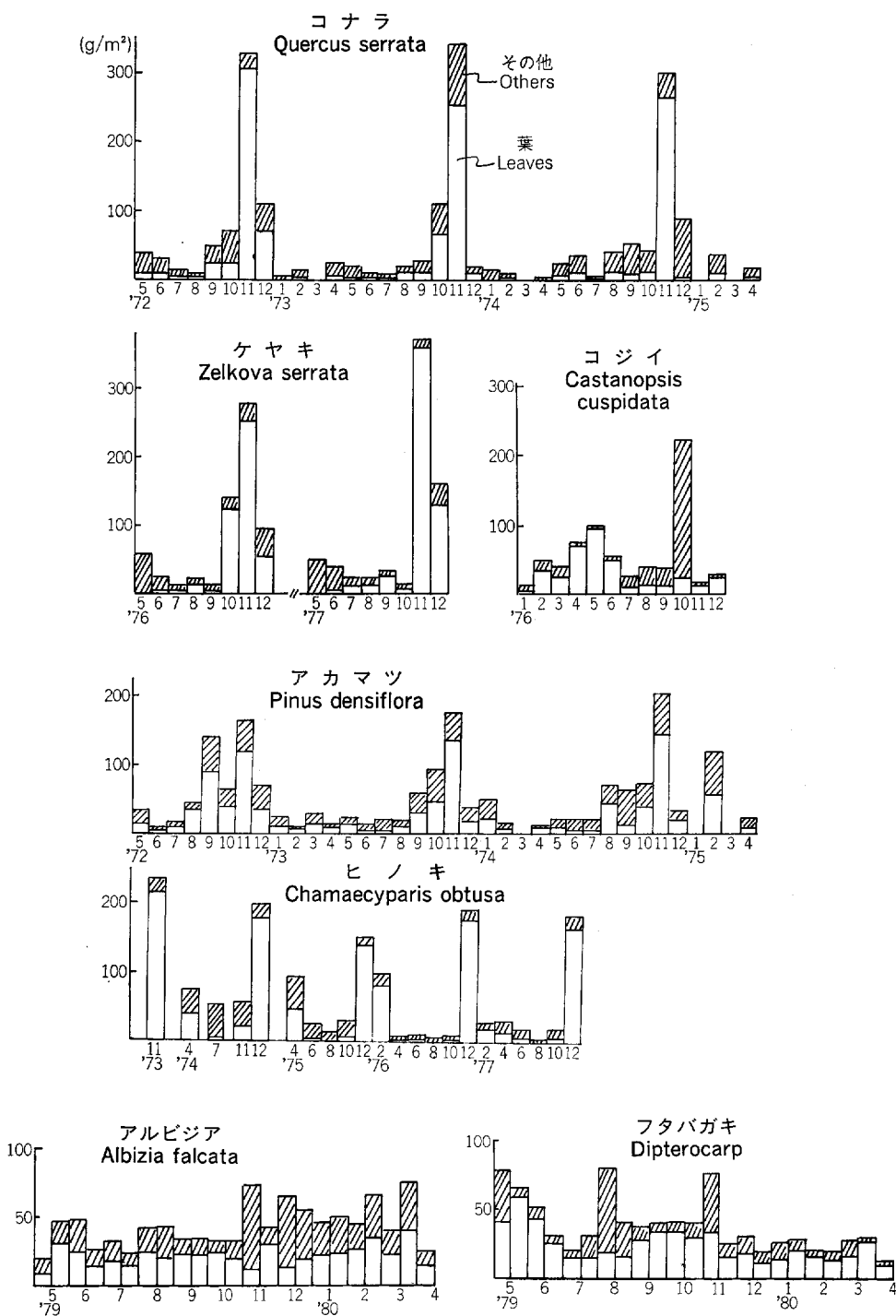


Fig. 3. リターフォールの季節変化

Seasonal variation of litter fall.

Table 2. 1 年間の平均リターフォール量

Average amounts of litter fall.

(g/m²·yr)

林分 No.		測定年数 Period (yr)	葉 Leaf	枝 Branch	樹皮 Bark	球果 Corn	糞 Feces	花 Flower	その他 Others	合計 Total
1	ブナ <i>F. crenata</i> (1)	4	291.9	47.0		41.4			56.9	437.2
2	(2)	1	348.9	58.2					14.4	421.5
3	ミズナラ <i>Q. mongolica</i>	1	371.9	36.1					42.8	450.8
4	コナラ <i>Q. serrata</i> (1)	3	290.7	93.8	1.0	92.7	10.6	6.7	30.1	525.6
5	(2)	3	450.2	105.0	0.3	15.7	6.5	3.4	19.2	600.3
6	ケヤキ <i>Z. serrata</i> (1)	2	528.5	75.2		15.4	9.3	27.6		656.0
7	(2)	2	526.5	88.6		27.8	30.1			673.0
8	コジイ <i>C. cuspidata</i>	1	399.2	316.5				36.6		752.3
9	アカマツ <i>P. densiflora</i> (1)	1	303.4	77.5	20.2				28.4	429.5
10	(2)	1	281.4	61.9	10.0				24.9	378.2
11	(3)	1	234.0	14.7	10.9				18.8	278.4
12	(4)	3	421.3	128.5	22.0	11.8	5.3	8.6	27.2	624.7
13	(5)	1	519.3	124.0	44.7				87.6	775.6
14	(6)	2	546.0						81.0	627.0
15	ヒノキ <i>C. obtusa</i> (1)	4	231.8	47.4	4.5	15.3			6.1	305.1
16	(2)	4	216.8	13.5		0.5			8.5	239.3
17	(3)	2	216.8	0.7	0.5	13.8		3.4	3.4	238.6
18	(4)	2	210.6	1.0	2.0	2.6		0.2	0.2	216.6
19	(5)	2	262.6	49.5		19.1			21.5	352.7
20	スギ <i>C. japonica</i>	2	530.0							530.0
21	ヒノキ・アカマツ <i>C. obtusa</i> & <i>P. densiflora</i> (1)	2	425.5	126.9	46.8	33.5			49.2	681.9
22	(2)	2	461.9	114.9	53.9	28.1			22.9	681.7
23	(3)	2	362.1	54.4	14.9	13.6			8.0	453.0
24	(4)	2	271.3	6.6	5.2	3.0			6.8	292.9
25	(5)	2	281.7	135.1					106.7	523.5
26	ヒノキ・カラマツ <i>C. obtusa</i> & <i>L. leptolepis</i>	5	273.5	50.4	9.5	3.8			18.3	355.5
27	アルビツア <i>A. falcata</i>	1	519.1	376.1						895.2
28	メリーナ <i>G. arborea</i>	1	527.3	201.5						728.8
29	アピトン <i>D. grandiflorus</i>	1	534.0	237.7						771.7
30	フタバガキ <i>Dipterocarp</i>	1	534.0	339.3						873.3

一方、照葉樹林での落葉は、針葉樹林や落葉樹林の季節変化とは異なり、落葉期の9～10月にも多少落葉しているが、落葉のピークは開葉期の4～6月であり、その時期の落葉量は全体の55%を占め、落葉期の16%よりはるかに大きく、春型の季節変化を示している。

熱帯林の落葉の季節変化を、早生樹アルビジア人工林とラワンなどフトバガキ科の天然林で調べた結果でみると、日本の林分のようなはっきりしたピークのある季節変化をせず、1年間を通して絶え間なく落下している⁸¹⁾。このような季節変化をするのは、気温の季節変化の幅が非常に小さく、生育休止期がはっきりしないために常に葉の更新が行われているためであろう。

落葉以外のリターの季節変化では、花が5・6月に多くなる傾向がみられるが、それ以外のものでははっきりした傾向はみられない。

2. 1年間のリターフォール量

各林分の1年間の平均リターフォール量を Table 2 に示した。

1) 落 葉 量

落葉量はおよそ 3 ton/ha・年 前後といわれているが⁴⁵⁾、ここで測定した結果では 2.2～5.3 ton/ha・年と、林分間で大きな違いがみられた。これは樹種、測定年次、地位、林齢、気温など非常に多くの要因に影響されているためであり、ここでいくつかの要因と落葉量との関係について検討した。

(1) 落葉量の年変動：同一林分でも落葉量に年変動が認められる。その例として、4年間測定されたヒノキ幼齢林でみると、最少量 1.6 ton/ha・年から最少量 2.7 ton/ha・年と倍近い差がみられる。また、3年間測定されたコナラ林においても、3.8 ton/ha・年から 5.1 ton/ha・年とかなり大きな違いがある。このように年によって差が生じる理由については今のところはっきりしないが、その年の新葉量や気候などが影響しているのかもしれない。これらの結果からすれば、その林分の平均的な落葉量を求めるためには、数年間継続して測定する必要がある。

(2) 地位と落葉量：一般に地位を表す指標として樹高が用いられ、樹高の高いところほど地位が良いとされている。この関係を約 23 年生で地位の異なるアカマツ林 3 林分でみた²¹⁾ (Fig. 4)。地位の良い林分の平均樹高が 8.6 m であったのに対して、地位の悪い林分では 4.3 m と前者の半分の樹高である。このような地位の異なるアカマツ林での落葉量は、3.0 ton/ha・年と 2.3 ton/ha・年となり、地位の良い林分ほど多くなる傾向がみられる。これと同じような傾向として、地位の悪い斜面上部よりも地位の良い斜面下部のほうで落葉量が多くなることが報告されている¹⁶⁾。

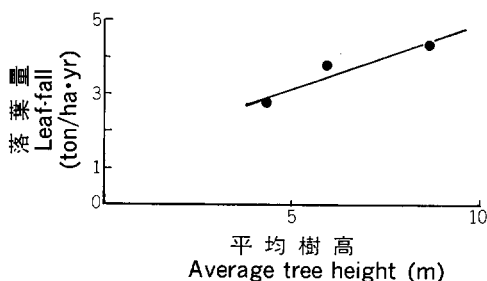


Fig. 4. アカマツ落葉量と平均樹高（地位）との関係

Relation between average tree height (site) and leaf-litter fall in *P. densiflora*.

面下部のほうで落葉量が多くなることが報告されている¹⁶⁾。

(3) 林分構造と落葉量：落葉量は純林か混交林かで、また、単層林か複層林かなど林分構造の違いによって変わってくると思われるので、ここでは、ヒノキ純林とヒノキに天然生アカマツが混った混交林とで落葉量の比較をした⁸²⁾。

純林も混交林も、測定年による差はそれほど大きくなかったので、2年間の平均値で林分間の比較をした。ヒノキ純林の落葉量は約 2 ton/ha・年であったのに対して、混交林の落葉量は 2.7～4.6

ton/ha・年で林分間の差はあったが、いずれの混交林もヒノキ純林より多い。

混交林間で落葉量に差が生じた理由にはいろいろあるが、その一つとして、ヒノキとアカマツの樹高差をあげることができる。落葉量と樹高差との関係を図示すると、Fig. 5 のようになり、林齢が進み両種の樹高差が大きくなるにつれて落葉量も多くなる傾向がみられる。すなわち、樹高差の大きい林分ほどクロネが立体的に分布し、光の利用度が大きく、葉の生産量も多くなる。それに伴って落葉量も多くなったものと考えられる。しかし、他の混交林における落葉量をみると、ヒノキ・カラマツ混交林で 2.7 ton/ha・年³⁰⁾、ヒノキ・クロマツ混交林で 2.8 ton/ha・年¹⁹⁾となり、混交林での落葉量が必ずしも多いとはいえないデータもあるので、今後検討する必要がある。

(4) 林齢と落葉量：一般に若い林分ほど落葉量は多くなる傾向があり、アカマツ林でみると、15～18 年生林で 5.2～5.5 ton/ha・年であったが、これより林齢の高い林分では 3.0～3.7 ton/ha・年と少なくなっている。これと同じような傾向は蜂屋ら¹⁰⁾によって報告されている。これは林齢 20 年前後で林分葉量が最大になるとともに、生長量も最も大きくなるので、それに伴って落葉量も多くなるものと思われる。

(5) 気候と落葉量：BRAY & GORHAM⁸⁾ や RODIN ら⁴⁴⁾ は、世界のいろいろな森林で測定されたリター

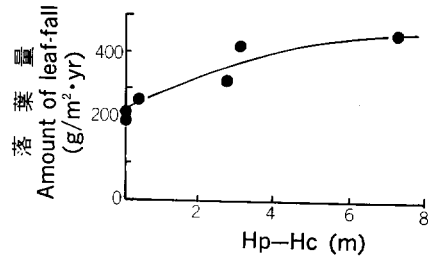


Fig. 5. アカマツとヒノキの樹高差 ($H_p - H_c$) と落葉量との関係
Relation between mean height difference ($H_p - H_c$) and amount of leaf-litter.

H_p : height of *P. densiflora*
 H_c : height of *C. obtusa*

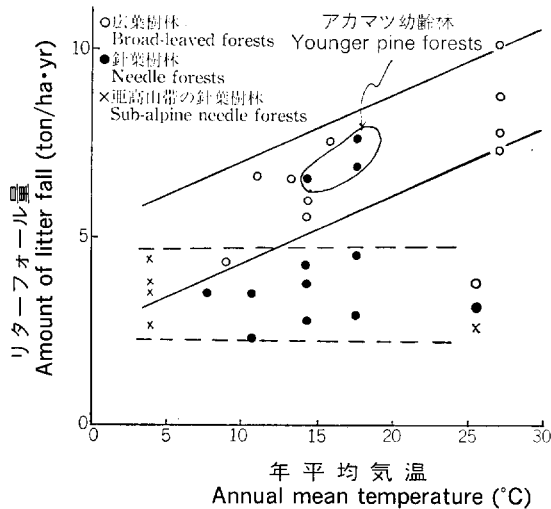


Fig. 6. 年平均気温とリターフォール量との関係
Relation between annual mean temperature and amount of litter fall.

実線：広葉樹林のリターフォール量の範囲

Soild line: Range of amount of litter fall in broad leaved forests.

点線：アカマツ幼齢林を除いた針葉樹林のリターフォール量の範囲

Dotted line: Range of amount of litter fall in needle forests except for younger pine forests

のデータを集め、気候の違いとリターフォール量との関係を調べている。それによると、リターフォール量は熱帯林で最も多くなり、ついで暖温帯林、亜寒帯林となり、緯度が高くなるにつれて少なくなるという。すなわち、気温が低くなるにつれて落葉量は少なくなっている。

この関係を著者の調べた林分の落葉量でみると (Fig. 6)、広葉樹林では気温の高い地域にある森林ほど落葉量は多くなる傾向がみられる。一方、針葉樹林では気温との関係ははっきりしないが、アカマツの幼齢林の落葉量を除けば気温との関係はほとんどなく、2.5~4.5 ton/ha・年の範囲の値をとるとみなしてよいであろう。

2) 落葉以外のリターフォール量

全リターフォール中落葉の占める割合が、最も大きく58~91%であるが、ついで多いのが落枝である。落枝量は林分によってかなり大きな違いがあり、その量は0.3~1.3 ton/ha・年となり、全リターフォール量の5~19%を占めている。なお、ここで測定されている落枝量は、ほとんどが小枝であるが、天然林など大枝の落下の多い森林で枝量を測定するためには、トラップを大きくして測定する必要がある。

落葉枝以外のもので多いものが、樹皮と球果であるが、樹皮では特にアカマツ林で多く0.1~0.2 ton/ha・年である。球果・種子の落下量は年により極端な変動が認められ、豊作、凶作の波がみられる。例えば、栃木のブナ林で4年間測定した結果では²⁹⁾、1973年が並作、1976年が大豊作で、その落下量はそれぞれ0.6 ton/ha・年、1.0 ton/ha・年に達するが、それにくらべて凶作の1974年と1975年の落下量は無視する程度に少ない。なお、1976年の種子の落下量は同年の全リターフォール量の20%を占めた。このような球果や種子の落下量の年変動は、ヒノキなどほかの樹種の林分においても認められる。

これらのほかに花・虫糞などがあるが、これらの量は針葉樹林よりも広葉樹林のほうが多い傾向がみられる。

III 落葉落枝の分解

落葉落枝などリターフォールとして樹体から林地に供給された有機物は、土壤微生物や土壤動物の働きによってしだいに分解されていくが、一部は腐植として土壤中に蓄積される。ここでは落葉や材の分解経過や気温との関係、樹種による分解速度の違いなどについて検討した。

1. 落葉の分解率の推定

落葉の分解の時間的経過を知るために、リタートラップにたまったものを集め、一定量の落葉を寒冷紗の袋に入れ、それぞれの林の地表に置き、一定期間ごとに回収し、落葉の残存重量を測定した。なお、このバッグ法は自然状態とはかなり異なるところもあるが²²⁾、落葉の分解経過が簡単に求められることから、ここではこの方法を用いた。

それらの結果をみると²⁶⁾²⁹⁾、いずれの落葉も時間が経過するに伴って分解が進み、その量は少なくなっていく (Fig. 7)。すなわち、重量は初年度に大きく減少し、しだいにその減少は緩慢になっていく。言い換えると重量は時間の経過に伴って指数関数的に減少し、その重量減少は、

$$y = e^{-kt} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここで、 y は落葉の残存率 (%), k は重量減少 (分解) 率 (y_r^{-1}), t は地表に設置してから時間 (y_r) である。これと同様の傾向は安藤²⁾、Olson⁴¹⁾、堤ら⁴⁹⁾によっても報告されている。

いずれの落葉も同じような傾向がみられるが、直線の勾配であらわされる重量減少率は、樹種や地域に

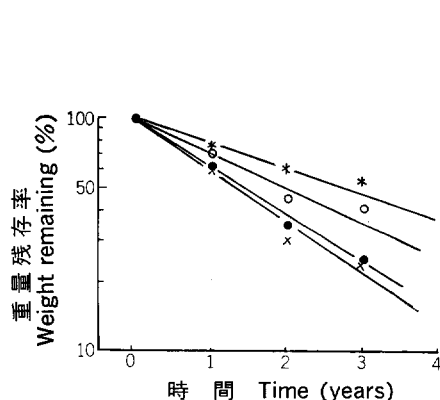


Fig. 7. 落葉の重量残存率の時間的変化
Decomposition rate of the leaf-litter
observed by the litter bag method.

- ブ ナ *Fagus crenata*
● コ ナ ラ *Quercus serrata*
× ア カ マ ツ *Pinus densiflora*
* ヒ ノ キ *Chamaecyparis obtusa*

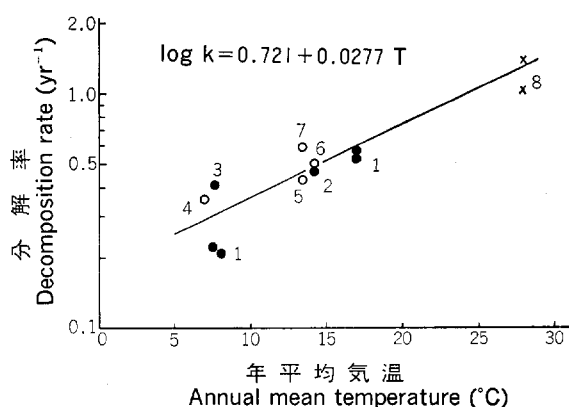


Fig. 8. リターバッグ法による落葉の分解率と
年平均気温との関係

Relation between decomposition rate
of leaf-litter and annual mean tem-
perature.

1. *Chamaecyparis obtusa*, 2. *Pinus densiflora*,
3. *Larix leptolepis*, 4. *Fagus crenata*, 5. *Cy-
lobalanopsis glauca*, 6. *Quercus serrata*, 7.
Magnolia obovata, 8. Grass (Philippines).

よって違いがみられる。そこで、重量減少率を環境や樹種との関係について検討した。

重量減少率（分解率） k と年平均気温 T との関係を図示すると、Fig. 8 のようになる。大きくみれば、樹種の違いもあるが、 k は気温に支配され、両者の間には片対数グラフで直線関係にあり、

$$\log k = 0.721 + 0.0277 T$$

で表される。年平均気温が 8°C 前後で k は $0.2 \sim 0.4 \text{ yr}^{-1}$ 、 15°C 前後で約 0.5 yr^{-1} 、 28°C で約 1.2 yr^{-1} となり、気温の高いところほど重量の減少速度は大きくなっている。すなわち、気温の高いところほど有機物の分解が早いことになる。

Fig. 7 において、針葉樹よりも広葉樹のほうが、また、常緑樹よりも落葉樹のほうが上方に位置しているものが多い。このことは針葉樹よりも広葉樹の落葉のほうが、また、常緑樹よりも落葉樹の落葉のほうが、分解が速いことを表しており、落葉広葉樹、落葉針葉樹、常緑広葉樹、常緑針葉樹の順に分解速度が小さくなる傾向がみられる。このような樹種による落葉の分解速度の違いは、落葉の養分量、とくにチッ素含有量に大きく影響されていると考えられている⁴⁹⁾。森林型別にチッ素含有率の大きい順にみると、落葉広葉樹>落葉針葉樹>常緑広葉樹>常緑針葉樹となり⁵²⁾、分解速度の大きさの順と同じである。このことからチッ素含有率の大きい落葉ほど早く分解する傾向があることがわかる。これと同じような結果について大政・森⁴²⁾によっても報告されている。

A_0 層に集積している全有機物の平均分解率 k' は、

$$k' = \frac{L_0}{L_0 + F} \dots\dots\dots (2)$$

で求められる⁸⁾⁴¹⁾。ここで、 L_0 は1年間の落葉量 (g/m^2)、 F は落葉直前の A_0 層の有機物量 (g/m^2) である。なお、この式は林分の A_0 層有機物が動的平衡状態に達し、みかけ上は一定量になっているときに成り立ち、 A_0 層全体の平均の分解速度が求められる。

A_0 層の有機物量および落葉量の測定が共に行われている林分で (2) 式を用いて平均分解率を求める

と、温帯林のブナ林で 0.36 yr^{-1} 、コナラ林で 0.45 yr^{-1} 、照葉樹林で 0.60 yr^{-1} 、熱帯林で 0.98 yr^{-1} となる。落葉が完全に分解し、 A_0 層から消失してしまうまでの年数は、温帯林で2～3年、照葉樹林で1.5～2年、熱帯林で約1年である。この結果はリターバッグ法で落葉の分解過程を調べた結果と同じく、気温が高い地域の森林ほど A_0 層の有機物は早く分解している。

リターバッグ法で求めた重量減少率 (k) と A_0 層有機物量とリターフォール量から求めた k' との関係は次のとおりである²⁶⁾。

毎年林地に供給される落葉が、バッグ内の落葉と同じ分解率で減少していくと仮定すると、落葉から n 年後の重量は、

$$L_n = L_0 e^{-nk}$$

になる。したがって、

$$\begin{aligned} L_0 + F &= L_0 + L_1 + L_2 + \dots + L_n + \dots \\ &= L_0 (1 + e^{-k} + \dots + e^{-nk} + \dots) \\ &= L_0 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(e^{-k})^n - 1}{e^{-k} - 1} = \frac{L_0}{1 - e^{-k}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。(2) 式と (3) 式から、

$$k' = 1 - e^{-k} \text{ または } k = -\log(1 - k') \quad \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。

ここで1例として、落葉直前の A_0 層有機物量 (F) が 501 g/m^2 、1年間の落葉量 (L_0) が3年間の平均値で 427 g/m^2 であるアカマツ林の k および k' を求めて比較した。

(2) 式から求めた k' は 0.460 yr^{-1} であったのに対して、(1) 式で求めた $k = 0.474 \text{ yr}^{-1}$ を (4) 式に代入して求めると、 $k' = 0.377 \text{ yr}^{-1}$ となった。この k' は (2) 式から求めた値よりも小さくなり、一致しなかった。このような違いが生じたのは、リターバッグ法による分解と自然状態とでは分解が違うことや、 A_0 層の有機物には落葉以外に分解の遅い樹皮、実、小枝などが含まれているためであろう。

2. 2 樹種落葉混合と分解速度

針葉樹の落葉よりもチッ素含有率の高い広葉樹落葉のほうが分解が早い傾向があったことや、一般には広葉樹林のほうが土壤微生物や土壤動物の数が多く³⁸⁾⁵⁵⁾、また針葉樹に広葉樹が混ざると針葉樹だけよりも土壤動物の数が増えるといわれていることなどから⁴⁷⁾、分解速度の遅い針葉に広葉を混合すれば針葉の分解が促進されることが期待される。この問題については、いままでに幾つかの試験が行われているが¹¹⁾⁴¹⁾⁴⁸⁾⁵⁸⁾、はっきりした結果は得られていない。そこで、針葉に広葉を混合した場合、針葉の分解速度にどのような影響を与えるかを検討した。

実験室的には、ヒノキやアカマツの落葉にチッ素含有率の大きいヤシャブシの落葉や $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を混合して、インキュベーション法で CO_2 発生量の変化を調べた²⁸⁾。しかし、混合の効果ははっきりしなかった。これはこの方法では微生物の分解活動が制限されているうえに、土壤動物の働きの大部分が除かれているためである。そこでインキュベーション法よりも多少自然状態に近いリターバッグ法を用いて、混合の効果を推定した²⁰⁾。

ヒノキ落葉をバッグに入れ、隣接したヒノキ林とブナ林に設置し、その重量減少を比較した。その結果 (Fig. 9)、ヒノキ林に置いたものは3年間で43%の重量減少があったのに対して、ブナ林に置いたもの

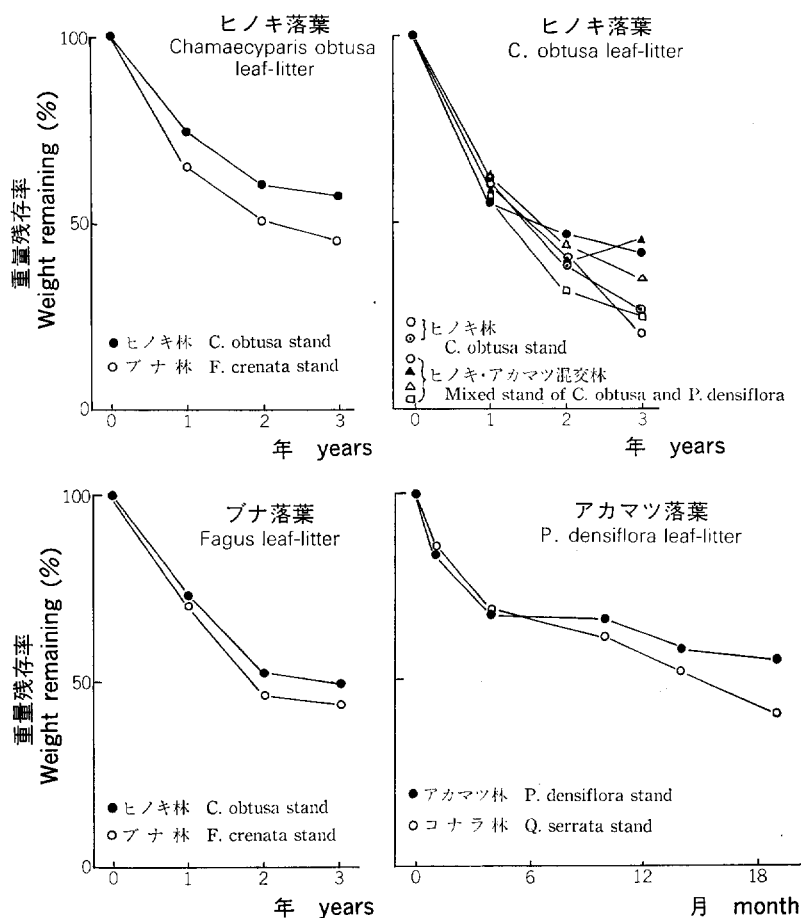


Fig. 9. 落葉を異なった樹種の林に置いた場合の分解速度の比較
Comparison with decomposition rates of leaf-litter in different species stands.

は55%の減少があり、ヒノキ林に置いたものよりも早く分解している。すなわち、ブナ林の生物相のほうが、ヒノキ林の生物相よりも豊富であり、ブナ落葉がヒノキ落葉の分解を促進させる効果があったと認めることができる。一方、逆にブナ落葉をヒノキ林とブナ林に置いた場合をみると、ヒノキ林に置いた落葉の分解は、ブナ林に置いた落葉よりも遅かった。このことから上に述べたようにヒノキ林の生物相がブナ林に比べて貧相であることが推察される。

これと同様の試験として、アカマツ落葉をコナラ林とアカマツ林に設置して、その分解速度を比較した。その結果では、コナラ林に置いた落葉のほうが分解が早く、18か月目で60%の重量減少があった。これに対して、アカマツ林に置いたアカマツ落葉は45%の重量減少であった。

つぎに、ヒノキ落葉をヒノキ純林とアカマツ・ヒノキ混交林に置いて、分解速度の比較を行った³²⁾。3年間の重量減少率をみるとヒノキ林では60~75%、混交林では55~80%となり、純林と混交林とははっきりした差はなかった。すなわち、純林と混交林では有機物分解に関する微生物相には違いがあるのだろうが、ヒノキ落葉の分解速度への影響の違いは小さかった。

以上みてきたように、ヒノキやアカマツなど針葉樹の落葉に、ブナやコナラなどの落葉広葉樹の落葉を混合すれば、針葉樹の落葉の分解が促進され、物質循環速度が速められる効果もあるだろう。しかし、針葉樹に針葉樹の落葉を混合した場合、今回の実験ではその効果ははっきりしなかったもので、今後ともこれに関するデータを集める必要がある。

3. 材の分解

リターフォールとして林地に供給された太枝や枯死個体の分解速度の推定は、落葉に比べて分解に長時間かかることや、測定困難なことなどによって、これに関する報告は非常に少ない(26)30)57)58)。

ここでの材の分解速度の推定を、

① 一定の長さの試験材(アカマツ、ヒノキ、カラマツ)を林床に設置し、その重量の経年的変化の測定(26)30)

② 亜高山帯の縞枯現象にあるシラベ林で、倒れてからの年数が異なるシラベ材の重量測定(24)の二つの方法で行った。なお、シラベ林での倒木してから年数は、後継樹の年齢から推定した。

材を林床に放置しておく、と、分解が進み、しだいに重量は減少していく。この変化をアカマツの重さ w (長さ 10 cm あたり) とその中央直径 D との関係でみると (Fig. 10),

$$\text{設定時} \quad \log w = 0.680 + 0.932 \log D^2$$

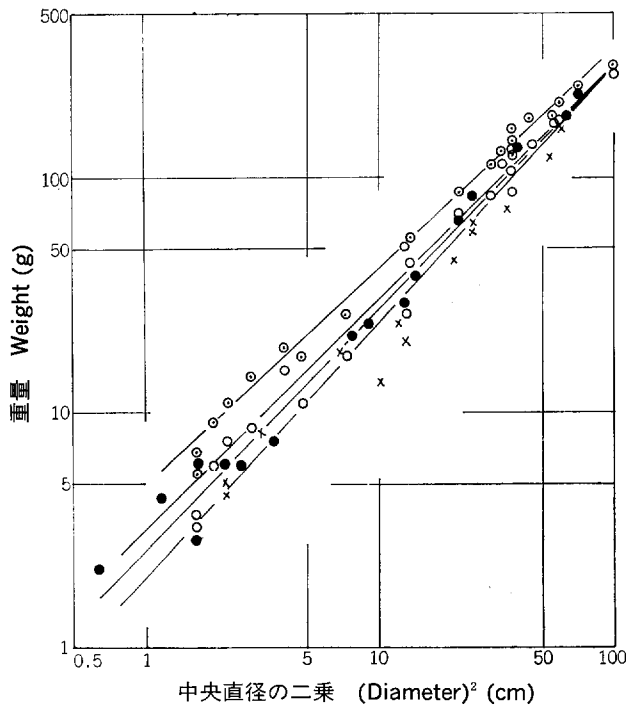


Fig. 10. 試験材(アカマツ)の中央直径の二乗と重量との関係
Relation between square of diameter and weight of stem woods (*Pinus densiflora*).

○: Initial (1972), ○: After two years (1974),
●: After three years (1975), ×: After four years (1976)

$$2 \text{ 年 目 } \log w = 0.477 + 1.000 \log D^2$$

$$3 \text{ 年 目 } \log w = 0.385 + 1.046 \log D^2$$

$$4 \text{ 年 目 } \log w = 0.291 + 1.080 \log D^2$$

となった。時間の経過に伴って切片、勾配ともに変化し、切片は分解が進むにつれて小さくなり、また勾配は逆に分解が進むにつれて大きくなっている。時間と勾配、時間と切片との関係は Fig. 11 のようになり、両者の間にはきれいな直線関係が得られた。この関係を使えばその後の重量変化を知ることができる。なお、分解に伴う勾配の変化は、直径の大きい材など分解速度が遅くなるためである。

材は分解に伴って軽くなっていくが、分解に伴う材の容積の変化がほとんどみられない場合が多い。すなわち、このことは分解が進み重量が減少していくに伴って比重（重さ/容積）が小さくなっていくことになる。アカマツで重量減少率と比重との関係を見ると (Fig. 12), 重量減少率 (R_w) と比重 (ρ) との間には直径や経過時間の違いに関係なく一本の直線

$$\rho = 0.5 - 0.005 R_w$$

で近似することができ、重量減少率の大きい材ほど比重は小さくなっている。したがって、比重の変化をもって材の分解程度を表すことができる。このことはヒノキやカラマツの材についてもいえる。

材の分解も葉と同じように時間がたつにつれて重量は指数関数的に減少し (Fig. 13), 残存率 (γ) と時間 (A) との間に、

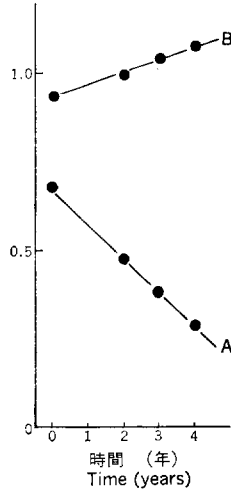


Fig. 11. $\log w = A + B \log D^2$ 式の A と B の時間変化
Values of constants A and B of the formula $\log w = A + B \log D^2$.

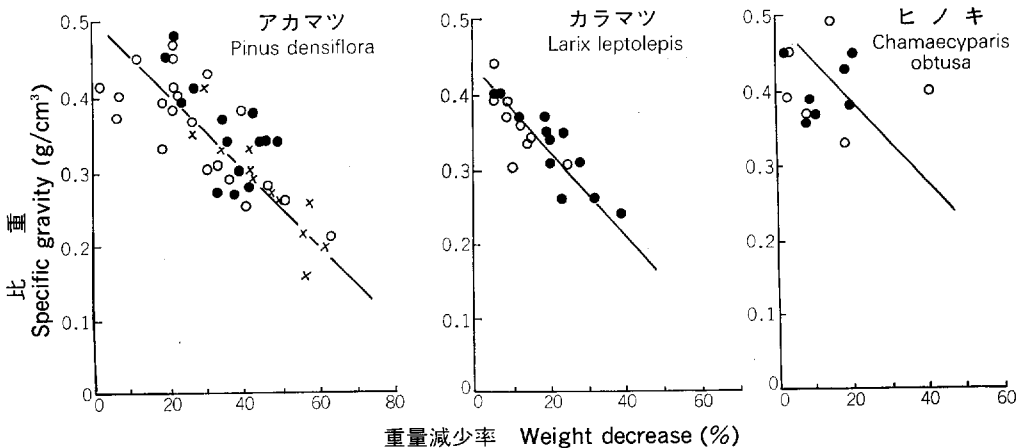


Fig. 12. 幹材の重量減少率と比重との関係
Relation between rates of weight decrease and specific gravity of stem woods.

○: 2年後 After two years, ●: 3年後 After three years, ×: 4年後 After four years.

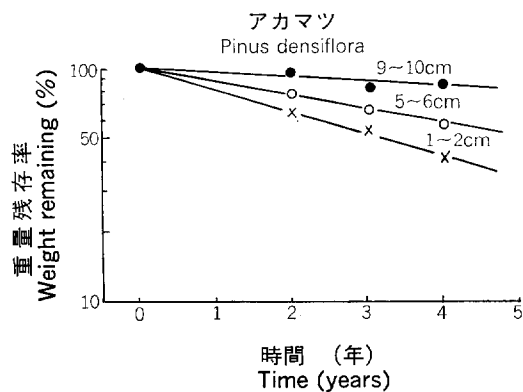


Fig. 13. アカマツ材の重量減少率の時間的变化

Relation between periods of decomposition and weight remaining.

図中の数字は直径
Numbers in the figure are diameters.

Fig. 14. 分解時間と比重との関係
Relation between period of decomposition and specific gravity of woods.

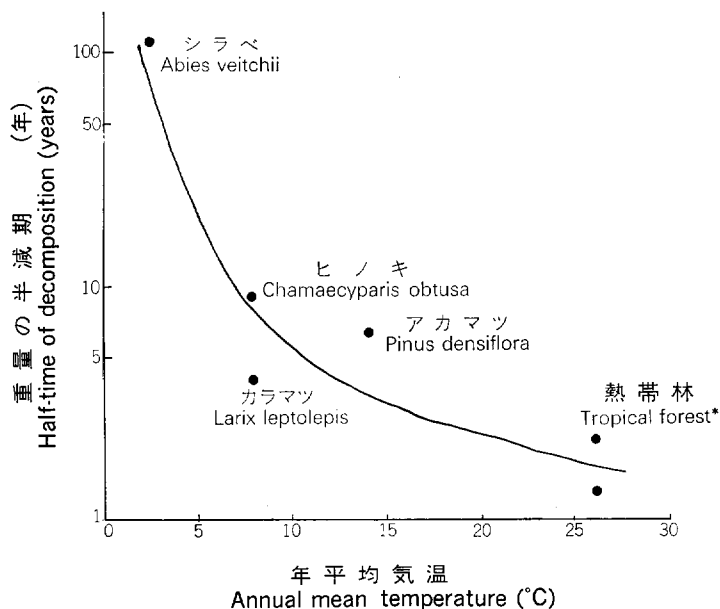
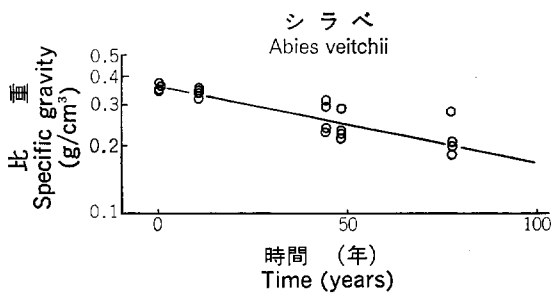


Fig. 15. 年平均気温と材の重量半減期
Relation between mean temperature and half-time of wood decomposition.

* YONEDA (1980)⁵⁸⁾

$$y = e^{-kt}$$

の関係がみられる。Fig. 13 からアカマツ材の分解率 (k) を直径階別に求めると、直径 1~2cm で分解率は 0.20 yr^{-1} 、5~6cm で 0.12 yr^{-1} 、9~10cm で 0.07 yr^{-1} となる。

アカマツと同じ方法でヒノキとカラマツの材の分解率を直径の大小 (3~12cm) を含めた平均値で求めると、ヒノキで 0.08 yr^{-1} 、カラマツで 0.17 yr^{-1} が得られる。重量の半減期はヒノキで約 9 年、カラマツで約 4 年となり、ヒノキに比べてカラマツのほうがかなり早く腐っていくことがわかる。

一方、亜高山帯のシラベ材の分解経過を比重の変化でみると、Fig. 14 のようになり、分解率を求めると 0.0064 yr^{-1} が得られた。この結果から シラベ材の比重が生材の 1/2 あるいは 1/10 になるまでの年数を推定すると、約 110 年と約 360 年が得られる。

材の分解速度の違いは、樹種の違いや直径の大小にも左右されるが、気温の違いにも大きく支配される。そこで、年平均気温と材の重量が半分になるまでの年数 (半減期) との関係を熱帯林での値⁸⁷⁾も含めてみると Fig. 15 のようになり、材の分解も気温に大きく支配され、気温の高い地域での材の分解は非常に早いことがわかる。

IV 土 壌 呼 吸 量

林床に落ちた新鮮落葉の分解過程は、リターバッグ法で割合簡単に知ることができる。一方、土壤中の腐植化した有機物の分解過程を知ることは困難であるが、有機物は分解すると最終的には土壌表面から CO_2 として放出される (これを土壌呼吸という)。この土壌呼吸量を測定することにより、有機物の分解の季節変化や 1 年間の有機物分解量を知ることが可能である。しかし、土壌呼吸量には有機物の分解によるものと、根の呼吸によるものが含まれている。したがって、系での炭素の収支を考える場合には両者を分離する必要はないが、有機物の分解量を推定するためには両者を分離する必要がある。

1. 日変化と季節変化

土壌呼吸の日変化の測定は、URAS を使った通気法で行ったが、その他の森林での測定方法は密閉アルカリ吸収法である。

土壌呼吸量の日変化をみると (Fig. 16)、正午近くで大きくなっている場合が多い。この変化は土壌表面温度に支配され、温度の上昇に伴って土壌呼吸量も大きくなっている。

一方、土壌呼吸量の季節変化をみると、夏に多く冬に少なくなる傾向がみられる (Fig. 17)。この傾向は測定林分すべての土壌呼吸量にみられる⁸⁸⁾²⁹⁾⁸⁰⁾。すなわち、

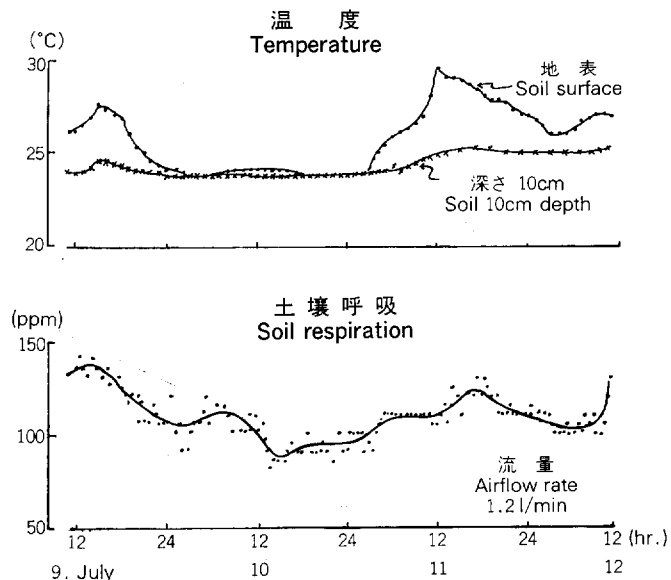


Fig. 16. 通気法による土壌呼吸量の日変化
Daily variation of soil respiration by air-flow method.

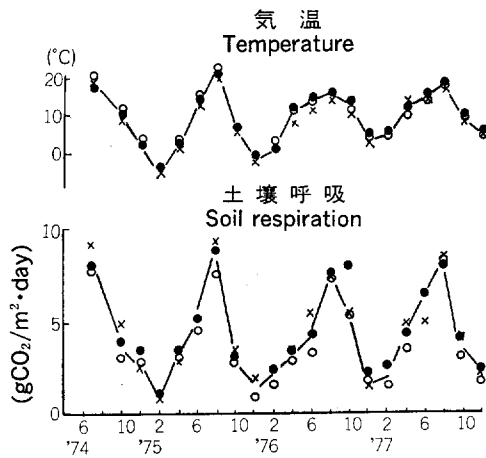


Fig. 17. 土壌呼吸量および平均気温の季節変化
Seasonal variation of soil respiration and mean temperature.

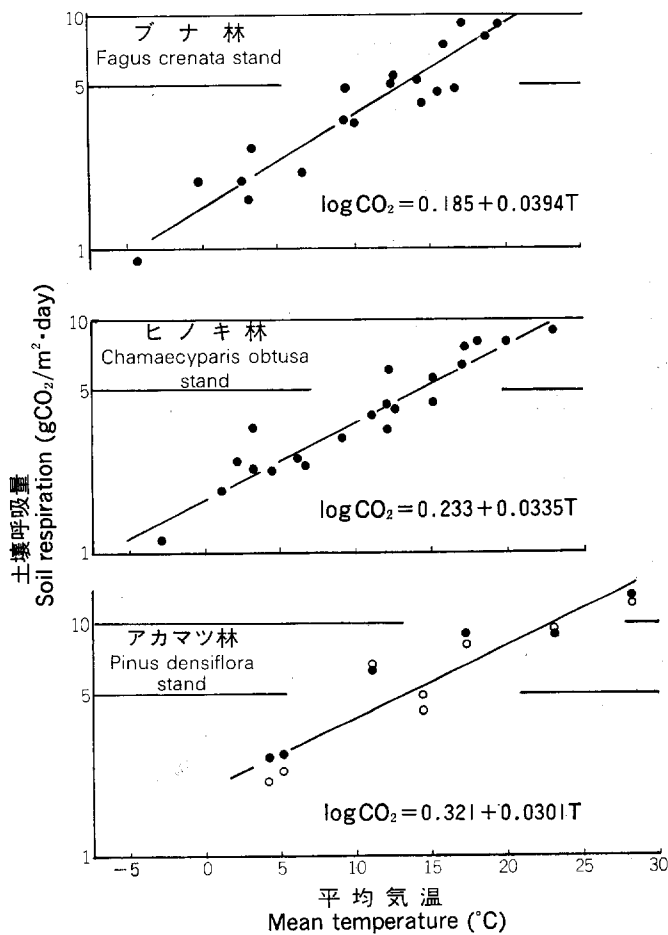


Fig. 18. 土壌呼吸量と平均気温との関係
Relation between soil respiration and mean temperature.

有機物の供給は主に 10~11 月に行われているのに対して、有機物の分解は 7~8 月の気温の高い時期に行われ、分解と供給とに時間的な差がみられる。

前述した落葉の分解速度と気温との間には指数関数的な関係が認められたことから、1 日間の土壌呼吸量と気温との間にも同様の関係が成り立っていることが期待される。そこで、気温 (測定日の最高気温と最低気温との平均値) と土壌呼吸量との関係を片対数グラフに図示すると、Fig. 18 のようになり、直線近似することができる。この回帰式は

$$\log \text{CO}_2 = A + BT$$

で表される。

各林分の勾配 B は、0.03 に近い値を示している。すなわち、気温が 10°C 上昇すると土壌呼吸量がほぼ 2 倍になるいわゆる $Q_{10} \approx 2$ の関係をほぼ満たしているといえる。

Table 3. 1 年間の土壌呼吸量
Annual soil respiration.

林分 No.	樹 種 Species	場 所 Location	林 齢 Stand age (years)	測定方法 Method of measure- ment	年間土壌 呼 吸 量 Annual soil resp. ($\text{CO}_2 \cdot \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$)	文 献 Note
1	ブ ナ <i>Fagus crenata</i>	栃 木 Tochigi	天 然 Natural	KOH	1.4	29)
4	コ ナ ラ <i>Quercus serrata</i>	埼 玉 Saitama	40	"	1.5	25)
9	アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	"	23	"	1.6	} Unpublished
10	"	"	23	"	1.6	
11	"	"	23	"	1.6	
12	"	"	30	"	1.7	
15	ヒ ノ キ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	栃 木 Tochigi	45	"	1.5	29)
16	"	"	14	"	1.4	"
18	"	兵 庫 Hyogo	12	"	1.6	32)
19	"	滋 賀 Shiga	53	"	1.0	19)
21	ヒノキ・アカマツ <i>C. obtusa</i> & <i>P. densiflora</i>	兵 庫 Hyogo	51	"	2.1	32)
24	"	"	12	"	1.6	"
26	ヒノキ・カラマツ <i>C. obtusa</i> & <i>L. leptolepis</i>	山 梨 Yamanashi	50	"	1.1	30)
	アカマツ <i>P. densiflora</i>	京 都 Kyoto		"	1.0~1.4	4)
	Mix mesophytic	Tennessee		Air-flow	3.8	7)
	Evergreen broad-leaved	Nara		KOH	3.4~4.6	35)
	Tallgrass prairie	Missouri		Air-flow	1.7	37)
	Oak	Minnesota		"	2.6~2.9	43)
	Tropical rain forest	Indonesia		KOH	1.9	54)
	Pine	Tennessee		"	1.1	56)

切片 *A* は *B* とは異なり林分によって差がみられる。この違いは年平均気温に影響され、年平均気温の低いところにある林分ほど大きくなる傾向がある。すなわち、気温の低い地域にある林分ほど土壤有機物量が多くなることから、切片 *A* は土壤有機物量の多い林分ほど大きくなっている。

2. 1年間の土壤呼吸量

1年間のおよその土壤呼吸量は、上の関係式と各月の平均気温から推定することができる。これまでに報告されている土壤呼吸量とともに Table 3 に示した。著者が求めた1年間の土壤呼吸量は $1.1 \sim 1.7 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$ で、林分間の差はそれほど大きくはなかった。

これまでに報告されている1年間の土壤呼吸量と比較すると、ここで得られた値は、千葉⁴⁾、KUCERA⁸⁷⁾、WANNER⁵⁴⁾、WITKAMP⁵⁶⁾の値に近かったが、そのほかの値よりもかなり小さく、例えば桐田⁸⁶⁾の値に比べて $1/2 \sim 1/3$ であった。

このように測定者によって土壤呼吸量に違いが生じた原因の一つとして、測定方法の違いが考えられる。測定は大きく分けて二つの方法(密閉アルカリ吸収法と URAS による空気流通法)で行われている。

一般に前者の方法より後者の方法で求めた値のほうが大きく、KUCERA⁸⁷⁾によればアルカリ吸収法は流通法の約 60% の値しか得られず、特に夏期に大きな差があったという。

そこで、密閉アルカリ法と URAS による空気流通法とを比較検討した。URAS で求めた CO_2 濃度と流量 ($l/\text{分}$) とから推定した1日間の CO_2 量と、アルカリ吸収法で求めた値との関係を見ると、Fig. 19 のようになり、両者の値は非常によく一致し、KUCERA⁸⁷⁾の報告の結果とは異なった。アルカリ吸収法と URAS の値とが一致したことから、ここで求めた1か年間の土壤呼吸量が過小評価値であるとはいえない。

3. 根の呼吸量の推定

土壤呼吸量から有機物の分解量を推定するためには、土壤呼吸量から根の呼吸量を差し引く必要がある。

そこで、苗畑の15年生アカマツ林と5年生スギ林を使って、立木を含まない一定面積の周囲の根を土壤を攪乱しないように深さ $30 \sim 40 \text{ cm}$ のところまで切断した根切断区と、自然状態のコントロール区で土壤呼吸量を測定し比較した²⁶⁾。

結果を Fig. 20 に示した。コントロール区の土壤呼吸量の増加にともなって根切断区の土壤呼吸量も増加するが、一部の点を除けば根切断区の土壤呼吸量はコントロール区のそれよりも小さく、アカマツが約 80%、スギで約 60% である。この両区の差を根の呼吸量とすると、土壤呼吸量中に占める根の呼吸量の比率はおおよそ $20 \sim 40\%$ ぐらいであるといえる。HABER⁹⁾も根の占める割合を $1/3$ と推定している。

コントロール区の1年間の土壤呼吸量を、平均

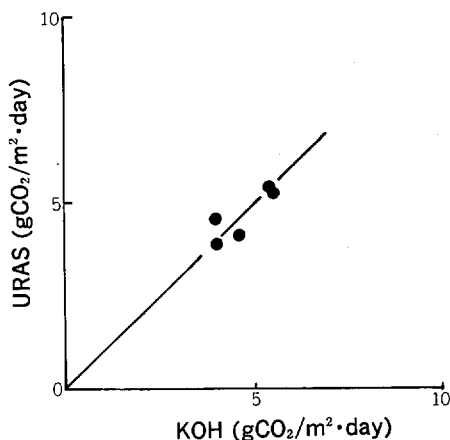


Fig. 19. アルカリ吸収法 (KOH) と URAS (通気法) との比較

Comparison with soil respiration rates by the method of KOH absorption and by that of air flow (URAS).

気温と1日の土壌呼吸量との関係から推定すると、アカマツ林で $1.6 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ 、スギ林で $0.48 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ となり、これらを乾物量に換算すると、おのおの $750 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ と $225 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ となる。アカマツ林の値はすでに求めた高木林とほぼ等しいが、まだ A_0 層有機物がほとんど発達していないスギ林ではかなり小さい値になっている。

細根の呼吸量が全体の土壌呼吸量中に占める比率がアカマツ林で20%、スギ林で40%であると仮定し、この比率と上で求めたコントロール区の1年間の土壌呼吸量から細根の1年間の呼吸量を推定した。アカマツ林で $0.32 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ 、スギ林で $0.19 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ となり、これを乾物量に換算すると、 $150 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ と $90 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ となる。

アカマツ林で測定した1年間のリターフォール量は、葉が $546 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ 、その他が $81 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ 、合計量で $627 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ であった。コントロール区の土壌呼吸量からリターフォール量を差し引いた量を根の

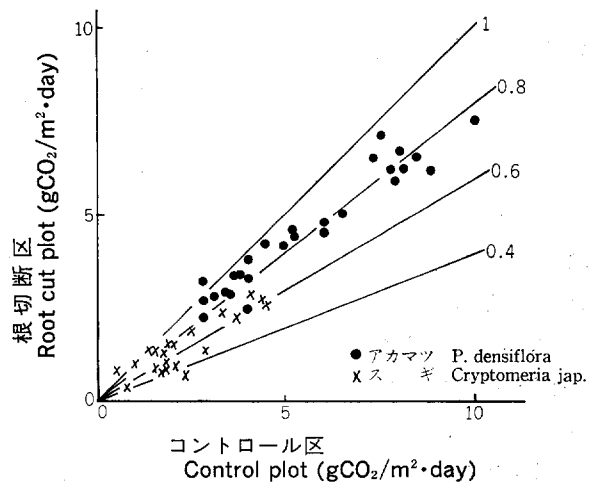


Fig. 20. コントロール区と根切断区との土壌呼吸量の比較

Relation between soil respirations in control plot and in root-cut plot.

図中の数字はコントロール区と根切断区との比
Numbers in the figure are ratio of root-cut plot to control plot.

Table 4. 土壌有機物の分解量と供給量との関係
Relationship between decomposition and supply of soil organic matter.

林分 No.	樹 Species	種	有機物分解量 ¹⁾ Decomposition (g/m ² ·yr)	有機物供給量 Supply (g/m ² ·yr)	供給量/分解量 Supply/ Decomp.
1	ブナ	<i>F. crenata</i>	501	561	1.12
4	コナラ	<i>Q. serrata</i>	478	437	0.91
9	アカマツ	<i>P. densiflora</i>	534	430	0.80
10	"	"	534	378	0.71
11	"	"	534	278	0.52
12	"	"	568	657	1.16
15	ヒノキ	<i>C. obtusa</i>	501	305	0.61
16	"	"	468	239	0.51
18	"	"	534	235	0.44
19	"	"	351	353	1.01
21	ヒノキ・アカマツ	<i>C. obtusa</i> & <i>P. densiflora</i>	701	682	0.97
24	"	"	534	292	0.55
26	ヒノキ・カラマツ	<i>C. obtusa</i> & <i>L. leptolepis</i>	478	356	0.74

1) 土壌呼吸量 $\text{Soil respiration} \times \frac{C}{\text{CO}_2} \times 1.75 \times 0.7$

呼吸量であるとする、 $123 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ となり、コントロール区の土壌呼吸量から根切断区のそれを差し引いて求めた根呼吸量（有機物換算で $150 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$ ）に近い値になった。

これらの結果から根の呼吸量を土壌呼吸量の30%として、土壌呼吸量が測定されている林分での土壌有機物の分解量を求め、リターフォール量（有機物供給量）との関係をみた（Table 4）。

この両者の関係を有機物の供給量と分解量の比率でみると、 $0.44 \sim 1.12\%$ となり、多くの林分で分解量のほうが大きかった。このことはしだいに土壌有機物が減少する傾向にあるといえる。ただし、ここで求めた供給量は高木からのリターフォールだけであって、林床植生の枯死量や根の枯死量が含まれていないこと、また、分解量においてもその推定法にまだ問題点も多いことなどを注意しておく必要がある。

4. 枯死材からの CO_2 発生量

林床から放出される CO_2 量には、土壌呼吸量として測定可能な CO_2 量のほかに、倒木や太い落枝からの CO_2 発生がある。

スギやヒノキなどの人工林では、枯死あるいは太枝の落下がほとんどないため、それほど大きな問題とはならない場合が多い。しかし、成熟した天然林などでは、倒木あるいは太い落枝が多いために、これらから放出される CO_2 量は、系全体の炭素の動きをみるためには、無視することはできない。

枯死材からの CO_2 発生量を知るために、試験材料として、分解程度の異なるアカマツとシラベ材を用いて、アルカリ吸収法で CO_2 発生量を測定した²⁴⁾²⁶⁾。

材は分解に伴って CO_2 ガスを放出していくが、分解の程度（ここでは比重で表す）によって CO_2 発生量が異なると考えられるので、この両者の関係をみた（Fig. 21）。バラツキの幅はあるが、傾向としては材の太さにはあまり関係なく、分解が進み比重 ρ (g/cm^3) の小さくなった材ほど CO_2 発生量 (mgCO_2/g)

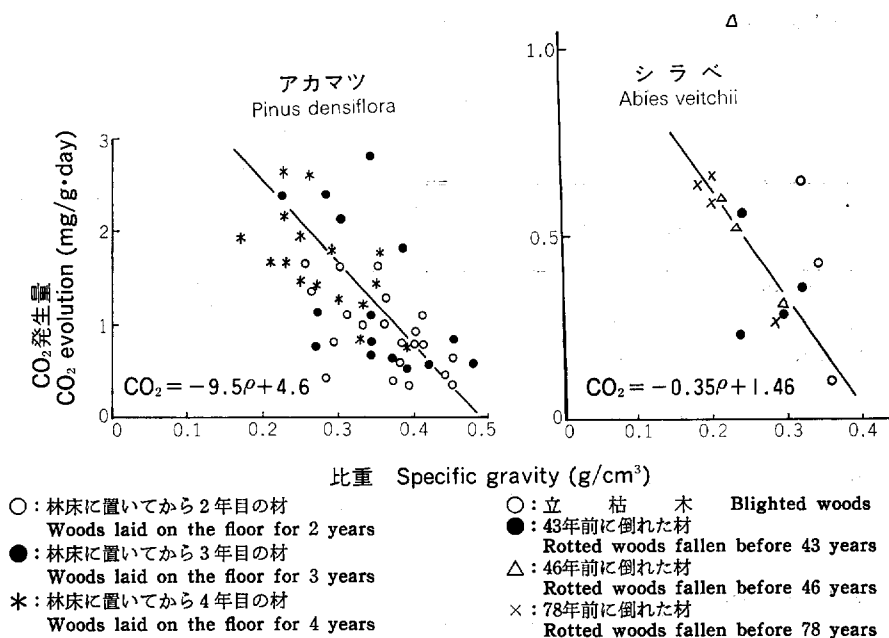


Fig. 21. 幹材の比重と25°Cでの CO_2 発生量
Relation between specific gravity and CO_2 evolution out of
stem woods at 25°C.

は多く,

$$\text{CO}_2 = -ap + b \quad (a, b: \text{常数})$$

の関係が認められる。この関係を温度別に求めるとともに林床の倒木量を知ると、それらの倒木から放出される1年間の CO_2 放出量が推定される。

米田⁶⁷⁾が常緑広葉樹林で調べた結果によれば、地表に蓄積されている枯死木 9.5 ton/ha から放出される CO_2 量は、全土壌呼吸量の14%に相当したことを報告している。このことからしても枯死木あるいは太枝の分解にともなう CO_2 発生量は、系全体の炭素の循環の中では無視できないことがわかる。

V 炭 素 循 環

すでに述べたように、リターフォール量やその分解速度はいろいろ多くの要因に影響されるため、林分によって大きく異なった。しかし、気温をベースにして整理してみると、リターフォール量、分解速度とも一定の傾向がみられた。そこで、炭素の循環速度を気候帯との関係で整理検討した。

1. 樹体部での炭素の循環

乾物量は、林齢、樹種、環境条件などいろいろな要因が違うために、林分によって大きく異なる。しかし、成熟し十分時間がたった林分では、生長による増加量と落葉枝や枯損などによる減少量とが等しくなり、動的平衡状態に達し、乾物量は与えられた環境や樹種に応じて一定値に近づくと考えられる。

そこで、十分時間がたち成熟しているであろうと思われる天然林で、気候帯別に乾物量をみると、熱帯多雨林で 300~400 ton/ha⁸⁸⁾⁸⁹⁾、暖帯の九州照葉樹林で 310 ton/ha⁴⁶⁾、亜寒帯のトドマツ林で 320 ton/ha⁸⁹⁾となり、気候帯による違いはあまり大きくはなく、およそ 300~400 ton/ha ぐらいの範囲に入ってくる林分が多い。

このように閉鎖した高木林を形成する気候帯の範囲内において、乾物量と気候帯との間にははっきりした関係がみられなかったことは、森林が気候帯に応じて樹種を変え、その気候にあった生活型をとっているためであろう。

平衡状態にある森林の乾物量が、気候帯によって大きく違わなかったことは、乾物生産の速度もまた同様であるということを示しているものではない。すなわち、乾物量は収入と支出のバランスによって決まってくる。収入は光合成作用であり、支出はリターフォールと呼吸による放出である。

収入の光合成量は総生産量(純生産量に呼吸量を加えたもの)で表すことができ、熱帯林で 120 ton/ha・年、暖帯林で 40~80 ton/ha・年、落葉樹林で 20~30 ton/ha・年の値が報告されており⁸⁴⁾、気温の高いところほど光合成量は大きい。すなわち、樹体の炭素の収入は、高温地域ほど大きいといえる。

乾物量が熱帯から亜寒帯まで大きな違いを示さず、ほぼ同じくらいであるとすれば、熱帯では高い収入に見合った高い支出があり、また、亜寒帯では低い収入に釣り合った低い支出があることになる。

支出としてのリターフォール量と呼吸量はともに気温の高い地域ほど大きい。前述したリターフォール量を気候帯別にまとめてみると、熱帯林で 8~15 ton/ha・年、暖帯林で 3~8 ton/ha・年、亜寒帯林で 1.5~3 ton/ha・年となり、気温が低くなるにつれてリターフォール量は直線的に減少する傾向がある。

以上の結果、樹体での炭素の出入量は気温の高いところほど多く、炭素の循環速度は大きいといえる。

2. 土壌中での炭素の循環

林地への炭素の供給量は、高温地域ほど大きいにもかかわらず、林地に蓄積されている炭素量は、気温

の高いところほど少なくなる傾向にある。すでにみたようにリターバッグ法による落葉の分解速度と気温との関係でも認められたように、リターとして林地に加えられた有機物は、高温地域ほど速く分解してしまうためであろう。

そこで、現存量調査をした森林において土壌有機物 (A_0 層も含む) が動的平衡状態に達しているものとして、 $k' = L/C$ から平均分解率を求め、分解率と気温との関係を広い地域で検討した。

ただし、供給量としてのリターフォール量が測定されていない林分も多いので、ここでは葉の生産量をもって供給量とした。葉の生産量としては、落葉樹林では現存量そのものを、また、常緑樹林ではその林分が何年分の葉を持っているかを推定し、現存量をその年数で割ったものを使った。

このような方法で求めた土壌有機物の平均分解率と積算温度との関係を見ると (Fig. 22), 同一積算温度の地域においても、局地的な条件の違いや樹種の違いなどに影響され、林分間かなりのバラツキがみられる。しかし、傾向としては気温が高くなるにつれて分解率は指数関数的に増大し、積算温度が約 90°C の亜寒帯林に属するトドマツ林で $0.01 \sim 0.04 \text{ yr}^{-1}$ ⁶⁹⁾, 約 190°C の暖帯の九州照葉樹林で $0.04 \sim 0.09 \text{ yr}^{-1}$ ⁴⁶⁾, $300 \sim 350^{\circ}\text{C}$ のタイ熱帯林で 0.25 yr^{-1} ⁶¹⁾ 前後の大きな値を示している。

この平均分解率を用いて気候帯別に、林地に落ちたリターが、どれくらいの年月で完全に分解消失するかを計算してみた。熱帯林ではわずか4年、暖温帯林で11~25年、亜寒帯林で25~100年ぐらいかかり、気温の高いところほど循環速度が速いといえる。

リターフォール量と気温との間には、ほぼ一次の直線関係があり、亜寒帯林と熱帯林との違いは、せいぜい5倍程度であった。これに対して、分解率と気温の間には、二次曲線的な関係にあり、亜寒帯林と熱帯林とでは20~25倍の違いがみられる。したがって、林地の炭素量は、 $C = L/k'$ から、ほぼ分解率の差によって決まってくるといえる。

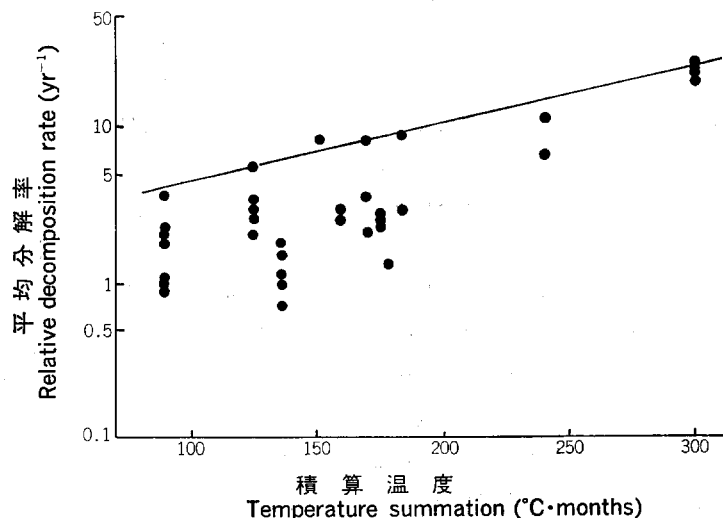


Fig. 22. 土壌有機物の平均分解率と積算温度との関係
Relation between the decomposition rate of soil organic matter and temperature summation.

3. 系全体の炭素の循環

総有機物量（樹体 + A_0 層 + 土壌）と気温との関係を上限値でみると、気候帯にあまり関係せず同じくらいの 500 ton/ha 前後の値をとっているのが多い。

天然林のような森林では、樹体の乾物量と気温との関係はほとんどないのに対して、土壌有機物は気温の高いところほど少なくなっている。このことから高温地域ほど炭素は、樹体部分に相対的に多く集積し、土壌に少ない傾向にある。

系のもつ総炭素量は、樹体での炭素の循環および土壌中での循環の結果として現れたものであり、系のもつ炭素量は収入と支出との量的な釣り合いによって決まってくる。すなわち、系内への収入は樹木の光合成であり、系外への主な支出は樹木の呼吸と土壌呼吸である。

すでに述べたように光合成速度、樹木の呼吸率、分解率ともに気温の高いところほど大きいことから、系全体での炭素の循環速度は高温地域の森林ほど大きいといえる。

VI 施業と有機物の動き

土壌を中心とした有機物の動きをみると、天然林あるいは古い人工林ではある程度安定した状態にある。このことはリターフォールとして供給される有機物量とその分解量とはおよそ釣り合った状態にあることになる。

しかし、このような安定した森林を伐採収穫すると、リターフォール量や分解量などに変化が起こり、安定していた有機物の動きに乱れが生じることになる⁸⁶⁾。

また、スギやヒノキなどの保育が遅れた閉鎖林分では林床の植生が消失する結果、地表の有機物や土壌が雨水で流亡しやすくなり、物質循環系が乱れ、林地の悪化をもたらしやすくなる¹⁾¹⁸⁾。

林地保全上、このような物質循環系の乱れをなるべく軽減させるような施業法を取り入れていく必要があるだろう。

1. 皆伐と有機物の動き

有機物の林地への供給量は、森林を皆伐すると一時的にゼロになるが、後継樹の生長に伴ってしだいに供給量は増加していく。しかし、植栽初期でも下刈りによる草や灌木などによる林地への有機物の供給がゼロになることはほんの数年である。その1例として²⁹⁾、ヒノキ林およびブナ林伐採跡地の下層植生量の変化をみると、Table 5 のようになり、4～5年目で4～5 ton/ha となっている。新植地では5～6年間毎年下刈りが行われているので、およそこれだけの下層植生量が、毎年リターとして林地に供給されていることになる。この量は高木林の平均落葉量と同じかそれよりやや多い量である。

森林が伐採されると、土壌への有機物供給量に変化が起こるばかりではなく、林地の有機物の分解速度にも変化が起こると思われたので、リターバッグ法と土壌呼吸測定法で調べた。

ヒノキとブナの落葉をそれぞれバッグに入れ、それぞれの樹種の林内と伐採跡地におき、それらの重量減少を調べた²⁹⁾ (Table 6)。

ヒノキの落葉は林内においたものよりも伐採跡地においたもののほうが分解が速かった。しかし、ブナの落葉では林内と伐採跡地とで大差なかった。これは伐採跡地では乾燥のために葉がちぢみ、地表面から浮き上がり分解されにくくなったためであろう。

ヒノキ伐採跡地で土壌呼吸量を測定した結果をみると、ヒノキ林内では $1.5 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ であったの

Table 5. 皆伐跡地の植生量
Biomass and main species at the cut-over area.

皆伐前の林分 Forest type before cutting	伐採後の年数 Years after cutting	現存量 Biomass (ton/ha)	主な植生の種類 Main species
ヒノキ林 <i>Chamaecyparis obtusa</i> stand	1 yr	0.5	ヤマウルシ <i>Rhus trichocarpa</i> ムラサキシキブ <i>Callicarpa japonica</i> リョウブ <i>Clethra barbinervis</i> アカソ <i>Boehmeria tricuspid</i> タケニグサ <i>Macleya cordata</i> ヘビノネゴザ <i>Athyrium yokoscense</i>
	2	2.9	コシアブラ <i>Acanthopanax sciadophylloides</i> ムラサキシキブ <i>Callicarpa japonica</i> クマイチゴ <i>Rubus crataegiifolius</i> ススキ <i>Miscanthus sinensis</i> エビズル <i>Vitis thunbergii</i>
	5	3.9	クサギ <i>Clerodendron trichotomum</i> キブシ <i>Stachyurus praecox</i> イタヤカエデ <i>Acer mono</i> ススキ <i>M. sinensis</i> アカソ <i>B. tricuspid</i> オトコヨモギ <i>Artemisia japonica</i>
落葉広葉樹林 Deciduous broad- leaved forest	3	2.4	スズタケ <i>Sasa purpurascens</i>
	4	4.7	スズタケ <i>S. purpurascens</i>

伐採後1年目にヒノキ植栽, 3年後から毎年1回下刈り

Plantation of *C. obtusa* planted at next year of cutting, weeding once a year started at third year after planting.

Table 6. リターバッグ法による落葉の分解
Decay of fallen leaves by litter bag method. (% of initial weight)

	ブナの落葉 <i>Fagus crenata</i> leaf		ヒノキの落葉 <i>Chamaecyparis obtusa</i> leaf	
	ブナ林 <i>F. crenata</i> forest	ブナ伐採地 Cut-over area of <i>F. c.</i>	ヒノキ林 <i>C. obtusa</i> forest	ヒノキ伐採地 Cut-over area of <i>C. o.</i>
Dec. 1974	100	100	100	100
Apr. 1975	98	98	93	97
Dec. 1975	70	69	74	56
Dec. 1976	46	54	60	46
Dec. 1977	44	48	58	29

に対して, 伐採跡地では $1.82 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ とかなり大きな値となった。すなわち, 伐採跡地の有機物の分解量は, 林内の約 1.2 倍になっている。これは地表の温度が林内のそれに比べて高くなり, 土壌中の生物の活動を活発化させ, 有機物の分解を促進させたためである。なお, ヒノキ伐採跡地での有機物の分解量は供給量の約 1.5 倍であった。

以上のように森林を皆伐すると, 土壌への有機物の供給量が減るに加えて, 土壌中での有機物の分解量

が増えることになり一時的に土壤有機物が減ることになる。さらに、森林の伐採によって土壤の流亡などが起こるため、前生林時代に土壤中に蓄積されていた養分量の減少にもつながることになる。とくに熱帯地域では土壤有機物量が非常に少ないうえに、気温が高く雨量が多いために、皆伐の影響は大であろう。

このような皆伐による林地の悪化を防ぐ方法の一つとして、なるべく林地の裸地化をさけた択伐のような非皆伐施業を取り入れていくべきであろう。したがって、今後は非皆伐施業と物質循環との関係について、より詳しく検討していく必要があると思われる。

2. 混交林と有機物の動き

樹種混交林は単純林よりも光、水、養分などをより有効に利用するために、物質生産は大きく、また、単純林よりも雨水による土壤や土壤有機物の流亡防止など環境保全的機能や木材生産機能において優れている可能性が大きいといわれている³²⁾。

すでにみたように針葉に広葉を混合すれば、針葉の分解を促進させる効果があるとともに、ヒノキ落葉のように細くなる針葉に広葉を混ぜると、土壤や有機物の流亡を防止する効果もある。しかし、針広混交林を作り上げることは困難な点が多い。そのため同じような効果を期待して、間伐により下層植生を導入する方法がとられている。この下層植生量は間伐の強さによって異なるが (Table 7)、この効果を量的に表したデータは乏しい。赤井ら¹⁾や荻住¹⁵⁾が人工降雨で行った実験結果をみると、下層植生はかなり土砂流亡を抑えているといえる。

針広混交に対して、ヒノキ・アカマツのような針々混交では、分解速度の促進効果はほ

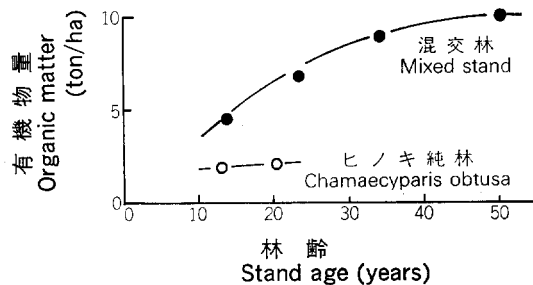


Fig. 23. 林齢と A_0 層有機物量との関係
Relation between stand age and amount of organic matter in the A_0 layer.

Table 7. 林内照度と下層植生量
Relation between light intensity and under-ground biomass.

	相対照度 RLI (%)	現存量 Biomass (g/m ²)	主な植生 Main species
無間伐区 Non-thinning	1.8	葉 Leaf 0 非同化 Non-leaf 0	林床植生なし Non vegetation
弱度間伐区 Light-thinning	5.3	葉 Leaf 38 非同化 Non-leaf 30	ヤマアジサイ <i>Hydrangea macrophylla</i> アセビ <i>Pieris japonica</i> サルトリイバラ <i>Smilax china</i> ウラボシ <i>Gleichenia glauca</i>
強度間伐区 Heavy-thinning	11.8	葉 Leaf 69 非同化 Non-leaf 24	ヤマアジサイ <i>H. macrophylla</i> ツクバネウツギ <i>Abelia spathulata</i> クロモジ <i>Benzoin umbellatum</i> サルトリイバラ <i>S. china</i> ウラボシ <i>G. glauca</i> ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>

とんどない。しかし、すでに Fig. 5 でみたようにリターフォールとしての有機物供給量は、ヒノキ純林よりも混交林のほうが多くなる傾向がみられる。また、 A_0 層の有機物量はヒノキ純林に比べて混交林ではかなり多くなり、地表面を覆っている (Fig. 23)。このことはアカマツ落葉はヒノキ落葉の飛散や土壌の流亡を抑える効果があるといえる。このように樹種混交は環境保全的機能面で優れているところが多いので、今後は樹種によっては混交林の造成を考慮する必要があるだろう。

引用文献

- 1) 赤井龍男・吉村健次郎・真鍋逸平・有光一登・相場芳憲・杉浦孝蔵：人工降雨によるヒノキ林内の落葉・土壌等の流出移動について (II)，下層植生の成立状態の異なる若齢林分のリター，表層土の移動量，92回日林論，213～214，(1981)
- 2) ANDO, M.: Litter fall and decomposition in some evergreen coniferous forests. Jap. J. Ecol., 20, 170～181, (1970)
- 3) BRAY, J. R. and E. GORHAM: Litter production in forests of the world. Adv. Ecol. Res., 2, 101～156, (1964)
- 4) 千葉喬三・堤 利夫：森林の土壌呼吸に関する研究 (I)，土壌呼吸と気温との関係，京大演報，39, 91～99, (1967)
- 5) CROCKER, R. L. and J. MAJOR: Soil development in relation to vegetation and structure age at Glacier Bray, Alaska. J. Ecol., 43, 427～448, (1955)
- 6) CRSSLEY, D. A., M. P. HOG LUND and J. HOG LUND: A litter bag method for the study of micro-throods inhabiting leaf litter, Ecology, 43, 571～573, (1962)
- 7) EDWARDS, N. T. and P. SALLINES: Continuous measurement of carbon dioxide evolutions from partitioned forests. Ecology, 54, 406～412, (1962)
- 8) GREENLAND, D. J. and J. L. M. KOWAL: Nutrient content of the tropical forest of Ghana. Plant and Soil, 12, 154～174, (1960)
- 9) HABER, W.: Ökologische Untersuchung der Bodenatmung. Flora, 146, 107～157, (1958)
- 10) 蜂屋欣二・藤森隆郎・棚秋一延・安藤 貴：アカマツ幼齢林の葉量および落葉量の季節変化，林試研報，191, 101～113, (1966)
- 11) 石井 弘：アカマツ林土壌における糸状菌の分布に関する研究 (4)，針葉と広葉の糸状菌群落における影響，島根大農研報，2, 51～56, (1968)
- 12) 伊藤悦夫・稲川悟一・佐藤 修：林内雨の養分循環に果す役割，静大農報，39, 110～124, (1967)
- 13) 岩坪五郎・堤 利夫：森林内外の降雨中の養分量について (II)，京大演報，39, 110～124, (1967)
- 14) JENNY, H.: Soil organic matter-temperature relationship in the eastern under states. Soil Sci., 31, 247～252, (1931)
- 15) 荻住 昇・寺田正男：根系調査，「農林漁業における環境保全的技術に関する総合研究」試験成績書 (第5集)，139～142, (1979)
- 16) 片桐成夫・堤 利夫：森林の物質循環と地位との関係について (IV)，林地への養分供給量，日林誌，58, 79～85, (1976)
- 17) 河原輝彦・岩坪五郎・西村武二・堤 利夫：カンレンボク模型林分における物質の動き，日林誌，50, 125～134, (1968)
- 18) ———・堤 利夫：Litter fall による養分還元量について (I)，養分含有率の季節変化，京大演報，42, 91～102, (1971)
- 19) ———：同 (II)，有機物量および養分量，日林誌，53, 231～238, (1971)
- 20) KAWAHARA, T. and T. TSUTSUMI: Studies on the circulation of carbon and nitrogen in the

- forest ecosystems. *Bul. Kyoto Univ. For.*, 44, 141~158, (1972)
- 21) 河原輝彦・蜂屋欣二・竹内郁雄・佐藤 明：地位の違うアカマツ林の Litter fall 量について, 83 回日林講要旨集, 60, (1972)
 - 22) KAWAHARA, T. and A. SATO : Decomposition of litter in the forest floor (1), study on the decomposition rate by litter bag method. *J. Jap. For. Soc.*, 56, 258~261, (1974)
 - 23) 河原輝彦：同 (II), 2 種類の落葉混合が分解速度に及ぼす影響, 日生態会誌, 25, 71~76, (1975)
 - 24) ———・佐藤 明：同 (III), 亜高山帯林での材の分解について, 日林誌, 57, 357~360, (1975)
 - 25) ———：同 (IV), 土壌呼吸量中の根の呼吸量の推定, 日林誌, 58, 353~359, (1976)
 - 26) ———・佐藤 明：同 (V), アカマツの葉, 幹および根の分解率の推定, 日林誌, 59, 321~326, (1977)
 - 27) KAWAHARA, T. : Dynamics of soil organic matter and carbon cycling. *JIBP-Synthesis* 16, 132~140, (1977)
 - 28) 河原輝彦：リターの分解について (VI), 落葉落枝までの重量変化, 日林誌, 60, 317~322, (1978)
 - 29) ———・只木良也・竹内郁雄・佐藤 明・樋口国雄・加茂皓一：ブナ天然林とヒノキ人工林の物質生産とその循環, 日生態会誌, 29, 387~395, (1979)
 - 30) ———・佐藤 明・竹内郁雄・只木良也・蜂屋欣二：カラマツ・ヒノキ混交林におけるリターフール量とその分解, 林試研報, 313, 79~91, (1981)
 - 31) KAWAHARA, T., Y. KANAZAWA and S. SAKURAI : Biomass and net production of man-made forests in the Philippines. *J. Jap. For. Soc.*, 63, 320~327, (1981)
 - 32) 河原輝彦・山本久仁雄：ヒノキ・アカマツ混交林に関する研究 (I), 物質生産と分解速度について, 日林誌, 64, 331~339, (1982)
 - 33) 菊沢喜八郎・渡辺弘之・パイラット・サイチュエ・四手井綱英：林床無脊椎動物の現存量について, 京大演報, 37, 25~39, (1965)
 - 34) 吉良竜夫：森林の一次生産力と生産エネルギー効率, 天然林の一次生産力の比較研究班, 中間報告 (昭44年度), (1970)
 - 35) 桐田博充：照葉樹林の土壌呼吸に関する研究, 日生態会誌, 21, 230~244, (1971)
 - 36) 小林繁男・有光一登・宮川 清・加藤正樹：森林の皆伐に伴う立地要因の変動 (III), 斜面形態と表層物質の動き, 91回日林講要旨集, (1980)
 - 37) KUCERA, C. L. and D. R. KIRHAM : Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, 52, 912~915, (1971)
 - 38) 中根周歩：三タイプの極相林における土壌有機物の循環比較と総合的考察, 日生態会誌, 30, 155~172, (1980)
 - 39) OGAWA, H., K. YODA, K. OGINO and T. KIRA : Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand (2). *Plant biomass. Nature and Life*, 4, 49~80, (1965)
 - 40) 大内幸雄・安藤辰夫・沢田善一・青山雅行・小寺伸一・鈴木重蔵：亜高山帯の森林施業に関する研究 (II), 亜高山帯林の生産構造と生産力について (1), p. 32, 名古屋営林局, (1969)
 - 41) OLSON, J. S. : Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 14, 322~331, (1963)
 - 42) 大政正隆・森 経一：落葉に関する二・三の研究, 帝室林試研報, 3, 39~107, (1937)
 - 43) REINERS, W. A. : Carbon dioxide evolutions from the floor of three Minnesota forests. *Ecology*, 49, 471~483, (1968)
 - 44) RODIN, L. E. and N. I. BAZILEVICH : *Vegetation*. p. 288, London, (1967)
 - 45) 斎藤秀樹：森林におけるリターフール研究資料, 京府大演報, 25, 78~89, (1981)
 - 46) 四手井綱英・堤 利夫・管 誠：人吉事業区コジイ天然生林の調査報告, p. 53, 住友林業, (1962)
 - 47) THOMAS, W. A. : Decomposition of loblolly pine needles with and without addition of dog

wood leaves. Ecology, 49, 568~571, (1968)

- 48) 堤 利夫・杉山利治・田村安男：アカマツ落葉の分解に対するヒメヤシャブシ落葉混合の影響，日林講，63，150~152，(1954)
- 49) ————：林木落葉の分解について，京大演報，26，59~87，(1956)
- 50) ————：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，京大演報，34，37~64，(1963)
- 51) ————・菅 誠・CHOOB KHENAMARK：タイ国の森林土壌における物質量とその循環，東南アジア研，4，95~126，(1967)
- 52) ————・河原輝彦・四手井綱英：森林生態系における物質循環について（I），個体および林分の地上部の養分量，日林誌，50，66~74，(1968)
- 53) WAKSMAN, S. A. and F. C. JENNY : Composition of natural organic materials and their decomposition in soil. Soil Sci., 24, 274~283, (1927)
- 54) WANNER, H. : Soil respiration, litter fall and productivity of tropical rain forest. J. Ecol., 58, 543~547, (1970)
- 55) 渡辺弘之：森林における大型土壌動物の落葉粉碎と土壌耕耘に関する研究，京大演報，44，1~19，(1972)
- 56) WITKAMP, M. : Rates of carbon dioxide evolution from the forest floor. Ecology, 47, 492~494, (1966)
- 57) YONEDA, T. : Studies on the forest floor (2), dry weight loss and CO₂ evolution of decaying wood. Jap. J. Ecol., 25, 132~140, (1975)
- 58) YONEDA, T., K. YODA and T. KIRA : Accumulation and decomposition of big wood litter in Pasoh forest, West Malaysia. Jap. J. Ecol., 27, 53~60, (1980)
- 59) 四大学合同調査：森林の生産力に関する研究（第 1 報），北海道主要針葉樹林について，国策パルプ，(1961)

Carbon Cycling in Forest Ecosystems

—In reference to litter fall and its decomposition—

Teruhiko KAWAHARA⁽¹⁾

Summary

This work was carried out to study the carbon cycle in forest ecosystems, especially as related to fallen litter and its decomposition.

(1) Accumulation of soil organic matter

The amount of organic matter accumulation on and in the forest soils of Japan varied very widely depending on many factors. Geographically speaking, however, the temperature gradient may be the most important factor, as indicated by the very low organic matter content level of tropical forest soil.

The relationship between total accumulation of organic matter on and in the soil (C) and the summation of mean monthly temperature with 0°C as the threshold (T) is expressed by the formula;

$$\log C = 1.898 - 0.005 T$$

(2) Amount of litter fall

The peak leaf-falls of forests in Japan were observed in early winter (November to December), and in the tropical forests of Philippines, leaf-fall was observed throughout the year.

A wide range of annual litter fall production was measured in many forests. However, the higher litter production tended to be in higher temperature. In Japan, mean annual leaf-fall was about 3 ton/ha. But the annual leaf-fall varied in different cases. For example, there was more leaf-fall in young forests than in mature forests, more in broad-leaved forests than in coniferous forests, and more in mixed forests than in pure forests.

(3) Decomposition of organic matter

The rate of weight loss of leaf-litter tended to decrease with time, and the trend of weight decrease with time was close to an exponential curve, and the relation was formulated as

$$y = e^{-kt}$$

Where y is remaining weight of leaf-litter, k decomposition rate, and t time.

The decomposition of deciduous broad-leaves was faster than that of conifer needles. The addition of deciduous broad-leaves accelerated the decomposition of conifer needles. However, mixing conifer needles with other conifer needles didn't promote the decomposition of these needles.

The decomposition rate of stems depended on the stem diameter. For example, the decomposition rates of *Pinus densiflora* stems of 1~2 cm, 5~6 cm and 9~10 cm diameter were 0.20, 0.12 and 0.07 yr^{-1} , respectively. Specific gravity (weight/volume) decreased with decreasing weight rate.

(4) Soil respiration

A day's soil respiration increased exponentially with temperature. This relation can be expressed by the formula;

Received January 30, 1985

(1) Kansai Branch Station

$$\log \text{CO}_2 = A + BT$$

Where CO_2 represents soil respiration ($\text{mg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$), T is daily mean temperature ($^{\circ}\text{C}$), and A and B are constants. The slope of this formula (B) is about 0.03 in all stands. That is to say, Q_{10} is approximately 2.

Annual soil respirations were $1.1 \sim 1.7 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$, and root respiration was estimated at 30~40 percent of soil respiration.

The rates of CO_2 evolution from wood litter increased with time since the dead of the wood.

(5) Cycle of carbon

Photosynthesis, respiration and litter fall all increase with higher temperature. Consequently, the cycling rate of carbon in plants increases in hotter regions, though plant biomass is fairly uniform irrespective of climatic zone.

The decomposition of soil organic matter tended to increase exponentially with temperature; $1 \sim 4 \times 10^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ in subarctic forests, $3 \sim 9 \times 10^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ in laurel-leaved forests and about $25 \times 10^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ in tropical forests.

Both the litter fall and decomposition rate of organic matter increased with temperature. This fact implies that the input and output of carbon in soil, i. e., carbon cycling, is faster in higher temperatures.

Amounts of total carbon stored in forest ecosystems were not clearly related with temperature, but the rates of input (photosynthesis) and output (respiration of plant and soil) tended to increase with temperature, that is, the cycling rates of carbon in forest ecosystems were presumed to increase with higher temperatures.

When forests are clearly cut, soil organic matter decreases gradually, because the litter fall stops, decomposition is promoted and soil leaching occurs. In order to keep organic matter in soil, it is necessary to avoid clear cutting of forests, and to develop multistored forests.