

温帯落葉広葉樹林の2タイプの土壌における炭素収支 (2)

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	酒井, 正治 堤, 利夫
巻/号	69巻2号
掲載ページ	p. 41-48
発行年月	1987年2月

論 文

温帯落葉広葉樹林の2タイプの土壌における炭素収支 (II)
土壌呼吸速度の季節変化とそれに及ぼす土壌環境要因

酒井正治*・堤 利夫**

酒井正治・堤 利夫：温帯落葉広葉樹林の2タイプの土壌における炭素収支 (II) 土壌呼吸速度の季節変化とそれに及ぼす土壌環境要因 日林誌 69: 41~48, 1987 天然生落葉広葉樹林内の同一斜面の上部, 下部におのおのみられた乾性, 適潤性褐色森林土について, それらの土壌系での炭素収支を調べるため, 土壌呼吸速度を1978年から1980年までの3年間測定した。鈣質土壌とA₀層の呼吸速度を分けて測定するため, 自然状態の林床およびA₀層を除去した林床からの土壌呼吸速度をアルカリ吸収法(桐田のスポンジ法)を用いて測定した。両プロットとも, 土壌呼吸速度は季節的に地温と同調して変化し, 土壌呼吸速度と地温との間に強い指数関数関係を示した。含水率は一時的に土壌呼吸速度に影響することはあるけれども, 通年では含水率の影響は小さかった。温度10°C上昇に伴う土壌呼吸速度の変化率(Q₁₀値)は上部で2.33, 下部で1.85となり, 上部のほうが下部より大であった。この違いは土壌水分, 細根量, 根の呼吸速度, 土壌有機物の質の違い等に起因すると考えられた。

SAKAI, Masaharu and TSUTSUMI, Toshio: Carbon cycles of two different soils in a cool-temperate forest in Japan (II) Seasonal variations of soil respiration rates under the effects of soil environmental factors J. Jpn. For. Soc. 69: 41~48, 1987 Comparisons of the carbon cycles of two different soils were made on a slope in a deciduous broadleaved forest in Kyoto Prefecture. Plots were established in the upper part (N5) of a dry brown forest-soil (BB) and in the lower part (N7) of a moderately-moist brown forest-soil (BD). Soil respiration rates of soil systems with and without A₀ layers were measured in 1978~1980, using the alkali absorption method. Seasonal changing of soil respiration rates followed that of soil temperature. There were highly significant exponential correlations between soil respiration rates and soil temperatures during the three years on both plots. Whether an A₀ layer existed or not, Q₁₀ values were 2.33 and 1.85 in N5 and N7, respectively. We think this difference in Q₁₀ values was caused by the differences in the biomass of fine roots, root respiration rates, qualities of soil organic matter, and so forth.

I. ま え が き

前報(酒井・堤, 1986)では, 2タイプの土壌での炭素収支の一連の研究のうち, 土壌系への炭素の収入源の一つである落葉落枝量について報告した。本報では落葉落枝量の調査と並行して行った土壌系での炭素の支出について報告する。

林床からのCO₂の放出を土壌呼吸とよぶ(LUNDEGÅRDH, 1927)。従来, 土壌中の有機物の無機化速度あるいは土壌での物質代謝のパラメータを測定する方法として, 土壌呼吸速度を測定することが行われてきたが, そのことに疑問がないわけではない(ROMELL, 1932; REINERS,

1968; WITKAMP and FRANK, 1969; ANDERSON, 1973; SCHLESINGER, 1977; SWIFTら, 1979; EDWARDSら, 1981; PATIら, 1983)。というのは, 土壌呼吸には根の呼吸および有機物の無機化に由来するCO₂が含まれこれらを分離する必要があること, 土壌中で生成したCO₂の一部は水に溶けて流出したり, 根に吸収される可能性のあること, また有機物が完全に酸化されないでCO₂以外の炭素化合物(たとえば一酸化炭素, メタン, 酸, アルコール等)として放出あるいは溶出する可能性のあること等のためである。このように, 土壌呼吸速度がそのまま土壌有機物の無機化速度であるとはいえないことが明らかであるが, 上記の疑問点の中で根の呼吸以

* 林業試験場四国支場 Shikoku Br., For. and Forest Prod. Res. Inst., Kochi 780

** 京都大学農学部 Fac. of Agric., Kyoto Univ., Kyoto 606

外は一般に量的には少ないことが明らかにされている(吉良, 1976; GOSZら, 1976; SCHLESINGER, 1977; SWIFTら, 1979)。また, 一般に, 地表面に供給された落葉落枝は土壌生物の作用を受け, 一部は地表面で無機化されて大気にかえり, 残りは鈹質土層へ移動する。鈹質土層に入った有機物は引き続き分解を受け, 最終的には CO_2 の形で大気へ放出されるので, 地表面に供給された落葉落枝はさまざまな分解過程を経て, 最終的に CO_2 として大気へ還元するといえる。したがって, 根の呼吸を考慮にいれておけば, 土壌呼吸速度の測定は土壌有機物の無機化速度を推定するうえで有効な方法とってよいであろう。

この研究では, この考えに基づき性質の違い二つの土壌において土壌呼吸速度の季節変化, 年変動およびそれに及ぼす温度, 含水率の影響について検討した。なお, 根の呼吸については別の報告に譲る。

II. 調査地の概要

調査地は第 I 報で報告した(酒井・堤, 1986) 京都大学芦生演習林の天然生落葉広葉樹林で, 野田畑谷斜面の上部および下部を実験プロットとして選んだ。斜面の方位は西, 斜面長は 100 m, 平均傾斜は約 35 度である。なお, 上部プロットを N5, 下部プロットを N7 とした。

土壌断面図を図-1 に示した。N5 の土壌は乾性褐色森林土(粒状・堅果状構造型)(BB 型土壌)で, 土壌表層には L 層および F・H 層からなる厚い A₀ 層(3~7 cm)があり, A 層(10 cm)はうすい。N7 の土壌は適潤性褐色森林土(BD 型土壌)で, A₀ 層は L 層(1~3 cm)のみでうすく, A 層(25 cm)は厚い。表層土(0~5 cm 深)の礫含有率は N7 では 37% と大きく, 反対に N5 ではわずかに 5% であった。

III. 実験方法

1. 土壌呼吸速度

土壌呼吸速度は季節変化のほか, 年変動をすることが知られている(FROMENT, 1972; DE BOOIS, 1974)。そこで, N5 および N7 で 1978 年から 1980 年にわたる 3 年間, 土壌呼吸速度を測定した。ただし, 各年とも, 融雪後の 4 月下旬から降雪前の 12 月上旬までの約 7 か月間であった。

土壌系での炭素収支の解析を行ううえで土壌の各コンパートメント, たとえば, L 層, F・H 層, 鈹質土層および根からの呼吸速度を測定する必要がある。従来, 森林では 桐田 (1971 b), 千葉 (1975), 中根 (1975, 1978), VIRZO DE SANTOら (1976), 萩原ら (1984) 等

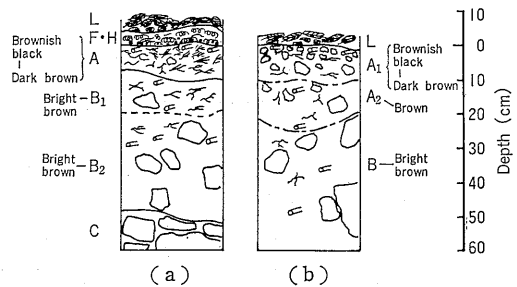


図-1. 土壌断面図

Soil profiles

(a) Upper part (N5) (Bb type soil); (b) lower part (N7) (Bd type soil)
BB, dry brown forest-soil; Bd, moderately-moist brown forest-soil

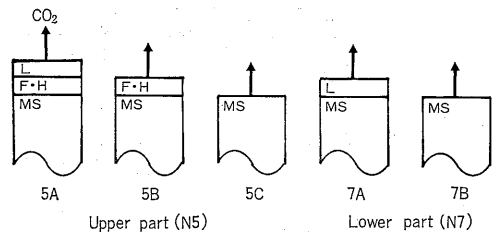


図-2. 土壌呼吸測定のための林床処理状態

Design of experiment to measure the soil respiration rate and to separate the respiration rate of A₀ from that of the total soil system

A, control plot; B, forest floor without L layer; C, forest floor without A₀ (L+F·H) layer; L, L layer; F·H, F·H layer; MS, mineral soil layer

がこのような分析を試みている。ここでは, これらを参考にして図-2 のように自然状態の林床からの土壌呼吸速度を測定すると同時に, A₀ 層を除去した区を設け, そこでの土壌呼吸速度も測定した。

すなわち, N5 では自然状態の林床(対照区とよぶ, 5A), L 層を除去した林床(L 層除去区とよぶ, 5B), A₀ (L+F·H) 層を除去した林床(A₀ 層除去区とよぶ, 5C), N7 では対照区(7A), A₀ 層除去区(7B)の土壌呼吸速度をおのおの測定した。5C および 7B は鈹質土層からの土壌呼吸速度, 5A と 5C の差および 7A と 7B の差はそれぞれ N5 および N7 における A₀ 層の呼吸速度, 5A と 5B の差および 5B と 5C の差はそれぞれ N5 における L 層および F・H 層の呼吸速度を示すことになる。

測定方法は, 測定現場の条件を考慮して WALTER-HABER の密閉アルカリ吸収法を改良した 桐田 のスポンジ法(桐田, 1971 a)を使用した。桐田のスポンジ法で

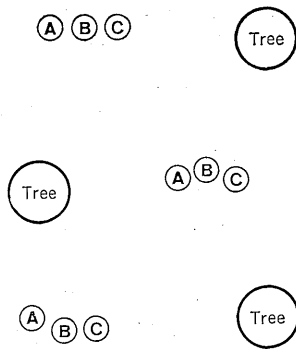


図-3. 土壌呼吸測定容器の配置
Arrangement of the chamber to measure
the soil respiration rate at N5
Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ, chambers; A, B, C, refer to Fig.2.

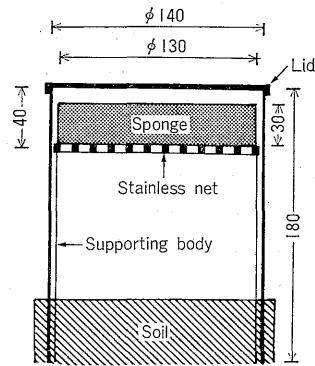


図-4. 土壌呼吸測定容器の概要
Diagram of the chamber for measuring soil
respiration rate
Unit, mm

はスポンジを使うことにより吸収効率を高いレベルに維持できること、また CO₂ 放出量の1日の積算値が測定可能なため日サイクルを考慮する必要のないこと、装置が簡便でしかも安価なため野外で多点測定が可能なこと等の長所がある。

1978年および1980年の容器の設置数は各処理区とも7個で、それぞれ林床にランダムに設置した。ただし、できるかぎり条件を一定にするため、図-3に示したように異なった林床処理のものが相互に隣接しあうように容器を設置した。1979年は両プロットとも容器を対照区にのみ設置し、容器の設置数は8個であった。測定回数は月2～5回の頻度で行った。

土壌呼吸速度測定容器は市販のミルク缶（森永ドライミルク 1,250 g）を改良したのを使った。ただし、図-4に示したように、容器のサイズは桐田式スポンジ法の必要条件（桐田, 1971 a）を満たしている。容器は、直径

15 cm, 高さ18 cmの円筒でプラスチックのふたがついており、底を開放したものである。別にスポンジ（直径13 cm, 厚さ3 cm）をのせる台を容器の内側に密着させ、さらにそのスポンジ台の上に1 mm 目のステンレス製金網をのせ、スポンジに吸収された KOH 溶液が土壌へ落下するのを防いだ。また、外気との流通がないように容器の上端にごくわずかのワセリンを塗布し、プラスチックのふたをしっかりと閉めた。

現場では一定濃度、一定量の KOH 溶液をホールピペットで計り、これをスポンジに均一にしみこませ、このスポンジを金網中央に置き、すばやくふたをした。

なお、測定前のスポンジ内の CO₂ 量および実験操作過程で吸収する CO₂ 量を同時に測定するため、同じ容器で底のあるものを用いて土壌呼吸速度の測定と同じ操作を行った。このブランク測定は N7 で3個の容器を用いて行った。

スポンジの回収は原則として24時間後に行い、24時間以内に0.2規定の HCl で滴定し、吸収 CO₂ 量を算出した。滴定の際、指示薬として0.1% フェノールフタレイン溶液および0.1% メチルレッド溶液を使用した。

スポンジに供与した KOH 溶液は2規定、20 ml であったが、夏に土壌呼吸速度が高い場合には桐田 (1971 a) のいう残余率 (q) が0.8以上になるように測定時間を12時間とし、昼間および夜間に分けて測定を行い、それらを加えて1日の土壌呼吸速度とした。

2. 気温、地温および含水率

土壌呼吸測定の際、両プロットで最高最低温度計を用いて地上高約1.2 mの最高最低気温と地表面下5 cm 深の最高最低地温を記録した。また、現場での月平均気温を求めため、N7に1か月巻き自記温度計を百葉箱に収納して林床に設置し、地上高0.3 mの気温を測定した。

土壌呼吸速度の測定開始前と終了後に、L層、F・H層および表層土を各プロット2か所で採取し、それらを実験室に持ち帰り、105°Cの恒温器に入れ絶乾重を求め、含水率(%湿重基準)を算出した。土壌呼吸の測定開始前と終了後の含水率の平均を測定時の平均含水率とした。

IV. 結果と考察

1. 調査地の気温、地温および含水率

1) 気温および地温

土壌呼吸速度測定期間中の気温および地表面下5 cm 深の地温は、それぞれ8月に25.0, 21.6°Cの最高値、12月下旬に0.1, 1.0°Cの最低値をとる季節変化を示し

表-1. 含水率の頻度分布
Frequency distribution of moisture content
(% of fresh weight) in 1978~1980

Factor	Moisture content (%)			
	<45	45~55	55~65	65<
7L	16.2	16.2	28.5	39.2
5L	28.7	20.2	22.5	28.7
5F·H	2.3	13.3	32.8	51.6

Factor	Moisture content (%)		
	<30	30~40	40<
7S	22.0	67.4	10.6
5S	15.4	73.1	11.5

L, L layer; F·H, F·H layer; S, top soil

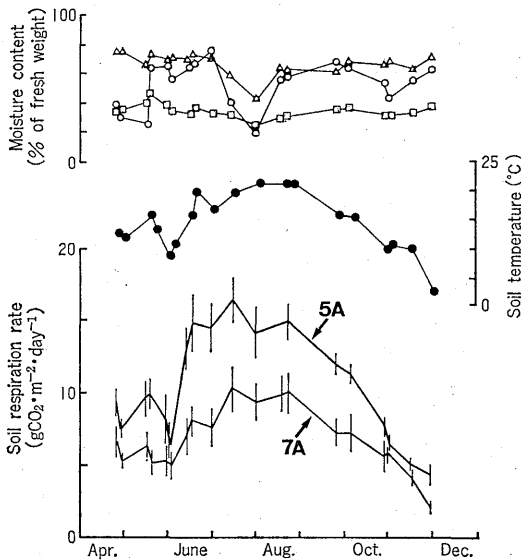


図-5. 1978年の5Aと7Aの土壌呼吸速度、地温および含水率の季節変化

Seasonal patterns of soil respiration rates of 5A and 7A, soil temperature and moisture content at N5 in 1978

The vertical lines are \pm SE.

○ L layer; △ F·H layer; □ top soil

た。月平均気温、月平均地温とも、N5のほうがN7より高い傾向にあり、低温期にはその温度差は約1°Cであったが、高温期では非常に小さくなった。塚本ら(1977)は同調査地域での気温および地温(10cm深)は斜面上下間で顕著な差がないと報告しており、たとえN5のほうが高いにしても、その差は非常に小さいことが予想された。1978年から1980年までの3年間、気温および地温の季節変化はほぼ同じであった。

2) 含水率

L層の含水率は20~80%と広い範囲にあって変動が

著しく、20%まで低下することがあった。F·H層および表層土の含水率はそれぞれ40~80%、20~50%の範囲にあったが、一時的な低下がみられただけで、測定期間を通して概して安定していたといつてよいであろう。また、1978年から1980年までの3年間、含水率の季節変化はほぼ同じであった。

表-1にL層、F·H層および表層土の含水率の出現頻度(%)を3年間分(1978~1980年)まとめて示した。L層の含水率については、N7では含水率55%以上のものが約7割、N5では約5割を占め、N7のL層はN5のそれより高い含水率に偏っている傾向があった。これは芦生演習林野田畑谷斜面での堤・片桐(1974)の測定結果と同様の結果であった。N5のF·H層では含水率55%以上が8割強を占め、常に高い含水率を維持していた。表層土では両プロットとも30~40%の含水率が7割前後を占めており両プロット間の差は認められなかった。しかし、堤・片桐(1974)の報告では表層土の含水率は斜面下部で高い。この違いは本調査では土壌サンプルの採取の際、大きな礫を取り除いたが小さな礫を取り除かなかったため、礫の多い斜面下部のN7において土壌含水率が低く算出されたためであろう。

2. 土壌呼吸速度の季節変化

土壌呼吸速度と地温の季節変化の一例を図-5に示した(1978年の5Aと7Aの例)。

すでに多くの報告があるように(ANDERSON, 1973; 片桐ら, 1979; 桐田, 1971b; PHILLIPSONら, 1975; 酒井, 1985; VIRZO DE SANTOら, 1976; YONEDA and KIRITA, 1978), 両プロットとも土壌呼吸速度は明らかな季節変化を示し、それは地温のそれとよく一致した。

図-5中に各測定時の土壌呼吸速度の標準偏差を示したが、両プロットとも標準偏差は高温時に大であった。ANDERSON(1973)も同様の結果を得ている。また、各測定時の変動係数は3年間の平均でN5、N7でそれぞれ22%、30%となり、測定容器間の土壌呼吸速度のばらつきはN7がN5より大きかった。これは表層土の礫含有率の違いによると考えられた(千葉, 1975)。変動係数の報告例として20~40%(桐田, 1971b)、7~30%(千葉, 1975)があり、今回の測定値はこれらの範囲内であった。この変動係数を用いて、両プロットでの必要な設置容器数を信頼限界95%、抽出誤差20%の仮定で求めると、N5で5個、N7で9個となり、両プロットとも土壌呼吸速度の測定値はかなりの精度で代表値をあらわしていると考えられた。

対照区における土壌呼吸速度($gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot 日^{-1}$)の3年間の最大値は、N5で18.5(1979年7月)、N7で

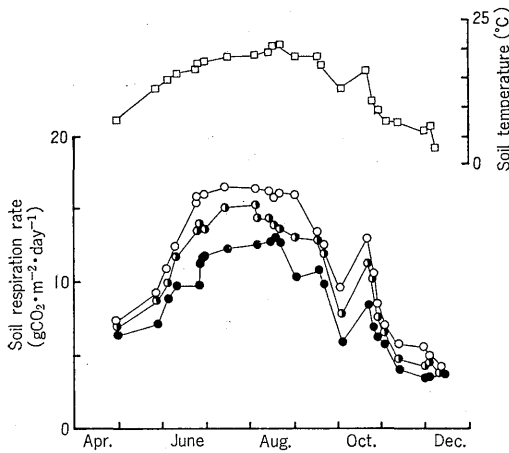


図-6. 1980年のN5の各処理区の土壌呼吸速度と地温の季節変化
Seasonal patterns of the soil respiration rates for each plot and soil temperature at N5 in 1980
○ 5A; ● 5B; ■ 5C

10.4 (1978年7月), 最低値はN5で3.9 (1980年12月), N7で3.1 (1980年12月)であった。桐田(1967)は芦生演習林内のブナ林で, 夏に土壌呼吸速度を測定し, 本調査地の夏の測定結果とほぼ同じオーダーの結果を得ている。

なお, L層およびA₀層除去区の土壌呼吸速度の季節変化も対照区同様, 地温と平行関係にあった。ただし, L層およびA₀層を除去すると土壌呼吸速度は明らかに低下した。図-6は1980年のN5の例を示したものである。この関係は各プロットおよび各年度で認められた。

3. 土壌呼吸速度と温度との関係

このように, 土壌呼吸速度は温度との関係が深い, その関係については温度に対して指数関数的に増加することが知られている (ANDERSON, 1973; 千葉, 1975; 片桐ら, 1979; 桐田, 1971b; 中根, 1978; NAKANEら, 1983; PHILLIPSONら, 1975; REINERS, 1968; 酒井, 1985; TSUTSUMIら, 1985; YONEDA and KIRITA, 1978)。図-7は対照区における土壌呼吸速度と地温との関係を示したものである。各プロットとも3年間を通してほぼ同じ関係を満足し, 有意水準1%で正の相関があった。この回帰式は次式であらわされる。

$$\begin{aligned} \log SR &= 0.482 + 0.0367 \times T & 5A \\ r &= 0.915 \quad (p < 0.01) \\ \log SR &= 0.453 + 0.0266 \times T & 7A \\ r &= 0.912 \quad (p < 0.01) \end{aligned}$$

SRは土壌呼吸速度 ($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{日}^{-1}$); Tは地温 ($^{\circ}\text{C}$)

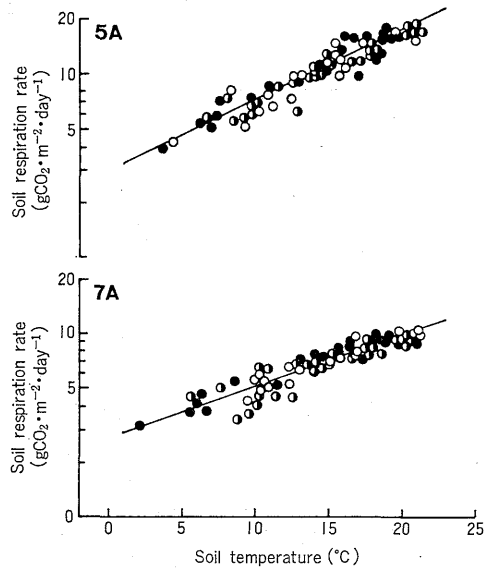


図-7. 土壌呼吸速度と地温との関係
Relationships between the soil respiration rates and soil temperature for 5A and 7A in 1978~1980
○ 1978; ● 1979; ■ 1980

このように3年間の測定でおおよそ一つの直線に回帰できたことから, 地温に対する土壌呼吸速度の関係においては年変動はきわめて少ないとみられた。回帰直線の切片の値および温度係数(傾きの値)は, ともに5Aのほうが7Aより大であった。温度係数と同じ意味をもつQ₁₀値(温度10°C上昇に伴う土壌呼吸速度の変化率)は, 5Aで2.33, 7Aで1.85であった。

これらのQ₁₀値を従来の文献値と比較する場合, 温度の測定位置(たとえば, 気温, 地温等)によりQ₁₀値が違うことに注意しなければならない。すなわち, 一般に地温を使った場合の温度係数は気温のそれより高くなりQ₁₀値が大きくなる。また, 土壌呼吸速度と温度との関係をあらわすには, 気温より地温を使用したほうが適当であると報告されている(桐田, 1971b; 中根, 1978; 片桐ら, 1979)。また, 本調査地においても, 上記の回帰直線からの土壌呼吸速度のばらつきをあらわす残差平方和は地温を使った場合のほうが気温の場合より小さくなることから, 地温が気温より土壌呼吸速度と密接な関係をもっているといえよう。そこで, 既往の文献にみられる各種森林下の土壌について, 地温および地表温をもとにした土壌呼吸速度のQ₁₀値と本調査地の測定値とを比較することにした(表-2)。Q₁₀値は1.8~4.1の範囲をとり, その平均値は2.67であった。また, 千葉(1975)は近畿, 四国地域の15林分(針葉樹林および広

表-2. 地温と地表温に基づいた土壌呼吸速度の Q_{10} 値
 Q_{10} values of soil respiration rates based on soil temperatures and soil surface temperatures in forests

Forest type	Q_{10} value	Note	Reference
Deciduous broadleaved	2.51~2.66(2.59)††	2 stands	(ANDERSON, 1973)
Hinoki	2.6		(萩原・徳積, 1978)
Sugi	4.1		(萩原ら, 1984)
Japanese larch	3.0		(萩原ら, 1980)
Deciduous broadleaved	2.12~2.92(2.43)††	5 stands	(片桐ら, 1979)
Evergreen broadleaved	2.86		(桐田, 1971b)
Evergreen broadleaved	2.59~2.89(2.76)†, ††	3 stands	(中根, 1975)
Beech-fir	3.17		(中根, 1978)
Mature akamatsu	2.45		(NAKANE ら, 1983)
Beech	2.18		(PHILLIPSON ら, 1975)
Sawara-hinoki	1.8		(酒井, 1985)
Mixed oak	2.0		(瀬戸ら, 1978)
Beech and beech-fir	2.0	2 stands	(VIRZO DE SANTO ら, 1976)
Evergreen broadleaved	2.14~2.94(2.61)†, ††	5 stands	(YONEDA and KIRITA, 1978)
Total	1.8~4.1(2.67)	25 stands	
Deciduous broadleaved	2.33	N 5 (Upper part)	Present study
	1.85	N 7 (Lower part)	

() The mean of Q_{10} values

† Q_{10} values based on soil surface temperature

†† Q_{10} values calculated from the regression equation between the soil respiration rate and temperature

表-3. 各処理区の土壌呼吸速度と地温との関係
 Regression and correlation coefficient of Eq. (1) for each plot of N5 and N7 in 1978~1980

Plot No.	a	b	r
5 A	0.482	0.0367	0.951**
5 B	0.425	0.0379	0.959**
5 C	0.312	0.0382	0.919**
7 A	0.448	0.0266	0.916**
7 B	0.332	0.0278	0.915**

$\log SR = a + b \times T$ (1)

SR, the soil respiration rate ($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$); T, soil temperature (5cm depth °C); a, b, regression coefficient; r, correlation coefficient

** Significant at 1% level

5 A, 5 B, 5 C, 7 A, 7 B refer to Fig. 2.

葉樹林)で土壌呼吸速度と地表温との関係を求め、 Q_{10} 値は 1.49~2.46 の範囲であると報告しており、本調査地の値はそれらの範囲内であった。

次に、土壌呼吸速度と地温との回帰式について処理区間およびプロット間の違いを考えてみる。

表-3 に各処理区における土壌呼吸速度と地温との指数関数関係式の係数を示した。なお、対照区の土壌呼吸速度は 1978 年から 1980 年までの 3 年間、そのほかの処理区のそれは 1978 年および 1980 年の 2 年間の測定結果である。

同一プロットであれば林床の処理に無関係に温度係数はほぼ同じで、処理の違いは切片の違いとなってあらわれた。プロット間の比較をしてみると、N5 と N7 で温

度係数に明らかな違いがあった。すなわち、N5 では 0.0367~0.0382、N7 では 0.0266~0.0278 で、N5 が N7 より大であった。

本調査と同様の例として、TSUTSUMI ら(1985)はヒノキ林内の同一斜面で、適潤性褐色森林土(BD型)の斜面下部から乾性褐色森林土(BB型)の尾根までの 3 斜面位置で土壌呼吸速度を測定し、尾根の温度係数は斜面下部および中部のそれより大きいことを報告した。

一方、中根(1975)は照葉樹林内の斜面下部から尾根までの土壌呼吸速度の測定を行い、尾根の温度係数が斜面中部および下部のそれより低いことを示した。また、千葉(1975)は夏期の土壌含水率が低い場合には、温度係数が小さくなると報告している。このように、夏期の土壌含水率の低下が起りやすい尾根あるいは斜面上部で温度係数が低いという報告があり、本調査とは反対の結果であった。

また、片桐ら(1979)は表層土の含水率の高い斜面下部から最も乾燥した斜面上部および尾根までの落葉広葉樹林内の 5 林分で測定を行い、林分間の温度係数の違いは認めているが、その一般的傾向およびその原因については言及していない。このように温度係数と土壌水分との関係が不明な例がある。

以上のように、地形に対応した土壌水分環境の違いに起因した乾性から湿性にわたる土壌型と温度係数との関係は一定でないことから、温度係数が局地的に変化する原因を土壌水分環境だけで説明することができないこと

は明らかである。千葉(1975)は各種15林分で礫と根を除去した土壌を0~30°Cの温度範囲で培養し、それらの土壌の Q_{10} 値は1.79~2.89の範囲にあり、それは温度、水分条件のほかに土壌有機物の質的な違いが関与している可能性があるとして報告している。TSUTSUMIら(1985)はBD型土壌の土壌有機物はBB型土壌のそれより安定性が高いため、BD型土壌の土壌呼吸速度はBB型土壌のそれにくらべて、低い可能性を示し、温度係数に対する土壌有機物の質の影響を示唆している。また、 A_0 層および土壌有機物は季節的な組成変化があると考えられることから、両プロットの土壌有機物の質の違いが温度に対する土壌有機物の反応を複雑なものにすることが予想された。このような土壌有機物の質的なちがいと温度係数との関係について調べた例はほとんどなく、各種土壌を適当な温度範囲で培養して土壌有機物が温度にどのように反応するかを調べる必要がある。

また、NAKANEら(1983)はアカマツ成熟林で伐採前と伐採後の温度係数をくらべ伐採後の温度係数は伐採前にくらべて小さくなると報告している。伐採後は根の呼吸速度が急激に低下すると考えられることから、このことは根の呼吸が温度係数を大きくする可能性を示唆している。MINDERMAN and VULTO(1973)はbirchのポット試験で有木ポットと無木ポットにおける Q_{10} 値は、有木ポットで2.0、無木ポットで1.3と報告している。また、全土壌呼吸速度に対する根の呼吸速度の割合は夏で2/3、冬で1/3~1/2と夏が冬より大であることを示した。これらのことは根の呼吸速度が Q_{10} 値を高め、しかも夏の根の呼吸速度が Q_{10} 値に大きな影響を及ぼすことを示唆している。KOSONEN(1969)は耕地、KUCERA and KIRKHAM(1971)、PATIら(1983)は草地で土壌呼吸速度と根量との間に正の関係があると報告している。以上のように、根量や根の呼吸速度は温度係数に密接に関係し、根量が大きければ根の呼吸速度が大で、しかも根の呼吸は高温時に活発になるため根の呼吸速度の高い林分は少ない林分より温度係数にプラスの影響を大きく与える可能性がある。

このように、地形、土壌のタイプ等の違いによって局地的に温度係数が変わることがあり、この変化は土壌水分、細根量、根の呼吸速度および土壌有機物の質的な違いが原因と考えられるが、異なった土壌型に発達する各種森林で野外、室内実験を行いさらにデータを集積する必要がある。

4. 土壌呼吸速度と含水率との関係

前述したように、土壌呼吸速度と地温との関係は有意水準1%で正の相関があり、その相関係数は0.915~

0.959であった(表-3)。

一方、1978年夏、温度の上昇にもかかわらず一時的に土壌呼吸速度が低下することがあった(図-5)。これには含水率の低下の影響が考えられる。そこで、土壌呼吸速度と表層土の含水率(%湿重基準)との関係を調べてみたが、両プロットとも密接な関係は認められなかった。FROMENT(1972)はmixed oak林で、生長期に限り表層土(0~10cm深)の含水率(%乾重基準)と土壌呼吸速度は有意な正の相関がある(10%有意水準)と報告している。彼の調査地は比較的乾燥しやすい土壌環境下にあり、生長期には樹木の吸い上げによる土壌の乾燥が厳しくなるため、含水率の影響が大であると考えられた。一方、VIRZO DE SANTOら(1976)はbeech林で、土壌呼吸速度と表層土(0~5cm深)の含水率との関係を調べ負の相関がみられたが、この原因は二、三の例外を除き含水率はいつも70%(乾重基準)以上であるためであると報告している。このように、水分が過剰の場合あるいは反対に不足する場合に、含水率の影響がやや明らかになるように思われる。本調査では、表層土の含水率は両プロットとも40~50%(乾重基準)に集中しており、しかも二、三の例外を除き土壌が乾燥しすぎることがないため、土壌呼吸速度と土壌含水率との間の関係は密接でなかった。また、土壌呼吸速度と地温との指数関数式に表層土の含水率の要因を算入しても回帰式は改善されなかった。これは、本調査地では一時的な含水率の低下に伴い土壌呼吸速度の減少が認められるが、年間を通してみれば含水率の影響はわずかであることを示している。

V. おわりに

温帯落葉広葉樹林内のBB型土壌(斜面上部、N5プロット)およびBD型土壌(斜面下部、N7プロット)の2タイプの土壌型において、土壌系を中心とした炭素収支を研究してきた。本報では、土壌呼吸速度を3年にわたり調べ、その季節変化とそれに及ぼす地温および含水率の影響について解析した。

その結果、土壌呼吸速度は一時的に含水率の低下に伴い減少することがあっても、年間を通してみれば両プロットとも、その季節変化は地温のそれと平行して増減し、土壌呼吸速度と温度との間に指数関数式が導かれ、高い相関($r > 0.9$)を示した。このように、年間土壌呼吸速度の推定にあたり、地温を関数とした式が使用できる可能性を示した。土壌呼吸速度と地温との指数関数式の温度係数はプロット間で違いがみられ、N5で大きく、N7で小さかった。このように、地形、土壌のタイプ等

の違いによって、局地的に温度係数が変わることがあり、この変化は土壌水分、細根量、根の呼吸速度および土壌有機物の質的な違いが原因と考えられたが、さらに、詳細な検討が必要であろう。

なお、本研究は京都大学在学中、1978年より1980年にわたり行ったもので、その間ご援助をくださった京都大学農学部林学科森林生態学研究室および、同大学農学部付属芦生演習林の教官および職員の方々に感謝をいたします。また、論文のとりまとめにあたり、ご助言をいただいた林業試験場土壌第一研究室長大角泰夫博士および林業試験場四国支場土壌研究室の皆様にご留意を表します。

引用文献

- ANDERSON, J. M.: Carbon dioxide evolution from two temperate deciduous wood land soils. *J. Appl. Ecol.* **10**: 361~378, 1973
- 千葉喬三: 森林土壌有機物の無機化速度ならびに森林の土壌呼吸速度の推定に関する研究. 高知大農紀要 **27**: 1~108, 1975
- DE BOOIS, H. M.: Measurement of seasonal variations in the oxygen uptake of various litter layers of an oak forest. *Plant & Soil* **40**: 545~555, 1974
- EDWARDS, N. T., SHUGART, H. H., McLAUGHLIN, W. F., HARRIS, W. F., and REICHLER, D. E.: Carbon metabolism in terrestrial ecosystems. *In* Dynamic properties of forest ecosystems. IBP 23 (REICHLER, D. E., ed.), 499~536, Cambridge University Press, Cambridge, 1981
- FROMENT, A.: Soil respiration in a mixed oak forest. *Oikos* **23**: 273~277, 1972
- GOSZ, J. R., LIKENS, G. E., and BORMANN, F. H.: Organic matter and nutrient dynamics of the forest and forest floor in the Hubbard Brook forest. *Oecologia* **22**: 305~320, 1976
- 萩原秋男・穂積和夫: ヒノキ人工林の土壌呼吸量. 89回日林論: 191~192, 1978
- ・勝野真澄・穂積和夫: スギ人工林の土壌呼吸. 85回日林論: 361~362, 1984
- ・鳥居仁司・———・林川孝司: カラマツ人工林の土壌呼吸量の推定とその季節変化. 日林中支講 **28**: 43~46, 1980
- 片桐成夫・石井 弘・三宅 登・福芳隆博: 三瓶演習林内の落葉広葉樹林における物質循環に関する研究 (VII) 土壌呼吸速度とそれに及ぼす2,3の要因について. 鳥根大農研報 **13**: 50~56, 1979
- 吉良竜夫: 陸上生態系一概论. 生態学講座 **2**, 106 pp, 共立出版, 東京, 1976
- 桐田博充: 野外における土壌呼吸の測定—密閉吸収法の検討—. 科研「生物圏の動態」森林の一次生産測定法の研究班中間報告 (吉良竜夫編): 72~78, 1967
- : 同上
- (IV) スポンジを利用した密閉吸収法の開発. 日生態会誌 **21**: 119~127, 1971 a
- : 照葉樹林の土壌呼吸に関する研究. 日生態会誌 **21**: 230~244, 1971 b
- KOSONEN, M.: CO₂ production in relation to temperature and plant mass. *Oikos* **20**: 335~343, 1969
- KUCERA, C. L. and KIRKHAM, D. R.: Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology* **52**: 912~915, 1971
- LUNDEGÅRDH, H.: Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Sci.* **23**: 417~450, 1927
- MINDERMAN, G. and VULTO, J.: Carbon dioxide production by tree roots and microbes. *Pedobiologia* **13**: 337~343, 1973
- 中根周歩: 森林斜面における土壌有機物のダイナミクス. 日生態会誌 **25**: 206~216, 1975
- : 大台が原ブナ-ウラジロモミ林における土壌有機物のダイナミクスとその季節変動. 日生態会誌 **28**: 335~346, 1978
- NAKANE, K., YAMAMOTO, M., and Tsubota, H.: Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Jap. J. Ecol.* **33**: 397~408, 1983
- PATI, D. P., BEHERA, N., and DASH, M. C.: Microbial and root contribution to total soil metabolism in a tropical grassland soil from Orissa, India. *Rev. Ecol. Biol. Sol.* **20**: 183~190, 1983
- PHILLIPSON, J., PUTMAN, R. J., STEEL, J., and WOODELL, S. R. J.: Litter input, litter decomposition and the evolution of carbon dioxide in a beech, woodland-wytham wood, Oxford. *Oecologia* **20**: 203~217, 1975
- REINERS, W. A.: Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forest. *Ecology* **49**: 471~483, 1968
- ROMELL, L. G.: Mull and duff as biotic equilibria. *Soil Sci.* **34**: 161~188, 1932
- 酒井正治: サワラ・ヒノキ林における土壌呼吸に占める根の呼吸の割合. 日林関西支講 **36**: 96~98, 1985
- ・堤 利夫: 温帯落葉広葉樹林内の2タイプの土壌における炭素収支 (I) 落葉落枝量. 日林誌 **68**: 1~9, 1986
- SCHLESINGER, W. H.: Carbon balance in terrestrial detritus. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* **8**: 51~81, 1977
- 瀬戸昌之・宮沢武重・田崎忠良: いくつかの土壌における二酸化炭素の発生速度と土壌の温度および水溶性有機物量との関係. 生物環境調節 **16**: 109~112, 1978
- SWIFT, M. J., HEAL, O. W., and ANDERSON, J. M.: Methods of study for decomposition ecology. *In* Decomposition in terrestrial ecosystems (SWIFT, M. J., HEAL, D. W., and ANDERSON, J. M., eds.), 318~334, Blackwell Scientific Publication, Oxford, 1979
- TSUKAMOTO, J.: Soil macro-animals on a slope in a deciduous broad-leaved forest (I) Two species of terrestrial Isopoda: *Ligidium japonica* and *L. paulum*. *Jap. J. Ecol.* **26**: 201~206, 1977
- 堤 利夫・片桐成夫: 森林の物質循環と地位との関係について (II) 斜面の環境勾配と乾湿度指数. 日林誌 **56**: 434~440, 1974
- TSUTSUMI, T., NISHITANI, Y., and SAKAI, M.: On the effects of soil fertility on the rate of soil respiration in a forest. *Jap. J. Ecol.* **35**: 207~214, 1985
- VIRZO DE SANTO, A., ALFANI, A., and SAPIO, S.: Soil metabolism in beech forests of Monte Taburno (Campania Apennines). *Oikos* **27**: 144~152, 1976
- WITKAMP, M. and FRANK, M. L.: Evolution of CO₂ from litter, humus, and subsoil of a pine stand. *Pedobiologia* **9**: 358~365, 1969
- YONEDA, K. and KIRITA, H.: Soil respiration. *In* Biological production in a warm-temperate evergreen oak forest of Japan. JIBP synthesis 18 (KIRA, T., ONO, Y., and HOSOKAWA, T., eds.), 239~250, University of Tokyo Press, Tokyo, 1978 (1986年2月6日受理)