

1. 林床植生による炭素固定に影響を及ぼす 森林内光環境の現地観測

FIELD MEASUREMENTS OF SOLAR RADIATION AND CARBON FIXATION IN A FOREST ECOSYSTEM

秋山 侃* ・ 篠田成郎* ・ 酒井 徹** ・ 都築克紀** ・ 湯浅 晶*

Tsuyoshi AKIYAMA, Seirou SHINODA, Toru SAKAI, Katsunori TSUDUKI, Akira YUASA

ABSTRACT; Film-solarimeters were deployed to measure the spatial distribution and the seasonal variation of the amount of solar radiation in a broadleaf deciduous forest in a cool-temperature zone. The experimental field is located in Takayama City in the central part of Japan and the forest floor is covered mainly with dwarf bamboo (*Sasa senanensis* Rehd). The films were placed on and under the floor vegetation at ninety points over an area of 0.72 ha and were replaced at two-week intervals from April to November, 1998. This new method worked well when the mean daily temperature ranged between 8 and 20 degrees. The characteristics of the light environment, which govern the amount of carbon fixation into the floor stratum in the forest, were related with topography, leaf phenology of the tree species and vegetation.

KEYWORDS; light environment, solar radiation, carbon fixation, film-solarimeters, floor vegetation

1. 緒言

地球温暖化問題を考える上で、森林の持つ二酸化炭素固定機能を見落とすことはできず、先の地球温暖化防止京都会議 (COP3) でも、各国の二酸化炭素削減目標が森林の影響を勘案して定められていることは周知の通りである。しかしながら、森林内の物質収支を定量的に把握すると同時に、森林内外での様々な環境要因の影響評価ができなければ、二酸化炭素固定量を推定することはできないはずである。森林域における二酸化炭素固定は、植生による光合成作用が基本となっているため、光環境に関する適切な評価が炭素固定機能の定量的把握に欠かせないと考えられる。こうした検討は最近になってようやく行われるようになってきたものであり、1次林に対する日射と炭素固定量との関係が主たる検討対象とされてきている¹⁾。

一方、温帯林から寒帯林にかけての植物群落における炭素収支を考える場合、上部植生のみならず林床植生や土壌での収支までを総合的かつ定量的に把握することが重要となるとの指摘はかなり以前からある²⁾。岐阜大学流域環境研究センター高山試験地の試験林 (岐阜県高山市岩井町内の乗鞍岳北西斜面に位置する0.72haの冷温帯落葉広葉樹林) では、森林内での二酸化炭素フラックスの鉛直分布の観測と同時に、林床植生による炭素固定量の観測が過去6年間にわたって継続されてきている。とくに、樹木、林床植生、土壌、大気などの間での炭素循環過程の季節変化特性について検討が進められてきており、各コンパートメント間での炭素収支が明らかにされてきている³⁾。また、こうした森林内炭素循環を明らかにする上で、林床下部植生での炭素生産量が無視できないほど大きく、樹冠植生による日射遮断が存在するため、日射と炭素固定との関係がより複雑かつ重要になっており、地形要因、植生要因および気象要因と森林内光環境との関係を炭素収支の観点から明らかにすることの重要性も指摘されている⁴⁾。

そこで本研究では、この試験林における現地観測を通じて、森林内日射量の空間分布特性およびその季節的変動特性を明らかにするとともに、こうした光環境を媒介として、林床植生による炭素固定作用へ与える影響を検討することを目的とする。また、このような研究を進めるうえで、ムラの多い林床の光環境を正確に把握するためには、多点のデータを安価に収集できる測器が必要となる。このため、最近開発された簡易積算日射計フィルムによる積算日射量の精度およびその適用可能性についても検討する。

* 岐阜大学流域環境研究センター Center for River Basin Environmental Research, Gifu University

** 岐阜大学大学院工学研究科 Graduate School of Eng., Gifu University

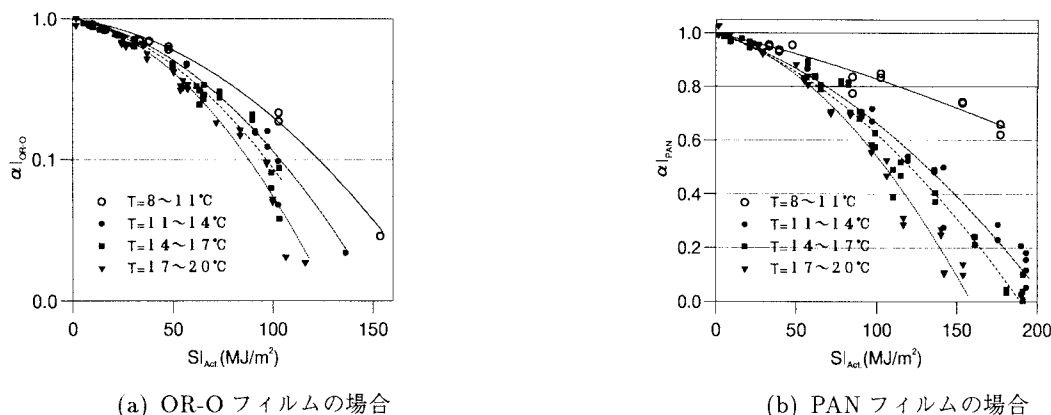


図-1 全天日射計による積算日射量の観測値 $S|_{Act}$ と簡易型積算日射計フィルムの褪色率 α との関係

2. フィルム積算日射計

本研究で用いた積算日射量の計測方法は、従来からあるジアゾ感光紙法を改良したもので、色素の褪色を利用して日射量が求められる。実際には、アゾ色素を含浸させて着色したセルロース・アセートフィルムの色素が日射によって褪色することに伴い、透過率が高まるため、この透過率を測定することにより、日射量に換算される。今回の観測では、千葉大学と大成化工(株)によって共同開発された簡易積算日射計フィルム⁵⁾を使用した。なお、こうした日射量推定法は最近開発されたものであるため、その精度についてあまり明らかにされていない。とくに、野外計測に適用した例はほとんどなく、その測定精度および適用範囲を明らかにしておくことが必要となる。

2.1 測定原理

フィルムに光が当たると、光のエネルギーをフィルムが吸収することに伴い、フィルムに着色してあるアゾ色素の変色が発生する。すなわち、フィルムの色変化の大きさが光エネルギーの吸収量に対応することになる。ここで、フィルムの反射率が全ての波長帯にわたりほぼ一定で、吸収率を波長で積分した値が特定の波長の透過率によって近似的に表現され得ると仮定すれば、フィルムに対する全波長の光の吸光度 D は、特定波長の透過率 τ の関数として、 $D = f(\tau)$ のように表現される。このため、露光前および露光後のフィルムの透過率 τ_0 および τ を測定することにより、それぞれに対応した吸光度 D_0 および D が求められることになる。また、フィルムの褪色率 α を $\alpha = D/D_0$ で定義すれば、 α は日射によるフィルムの光吸収の大きさ(積分量)に相当するため、露光期間内における積算日射量 S と対応するはずである。なお、光吸収の大きさは色素の化学的な褪色反応によるため、気温 T にも依存することになり、 $\alpha = f(S, T)$ のような関数関係を想定する必要がある。以上より、 $D = f(\tau)$ および $\alpha = f(S, T)$ の関数関係を決められれば、フィルムの露光前後の透過率 τ_0 と τ から積算日射量 S を求めることが可能になる。

2.2 透過率と吸光度との関係

フィルム透過率は分光光度計で測定されるが、とくに露光後のフィルムは短時間に測定されなければならない。ここでは、野外でも素早い計測が可能な特定波長対応・小型・軽量の光透過率測定装置(大成化工社製 TS-450)を用いて透過率 τ を測定することにした。今回用いた簡易型積算日射計フィルムには、塗布する色素の違いによって、比較的長時間の積算日射計測に適した PAN と、反応が鋭敏で短期間用の Oil Red-O (以下では、'OR-O' と略記する)の2種類があり、計測に際しては設置場所によって使い分ける必要がある。各フィルムに関する光度計の検定曲線は次式で表される。

$$D|_{OR-O} = -3.863 \log \tau|_{OR-O} - 1.10, \quad D|_{PAN} = -2.519 \log \tau|_{PAN} - 0.726 \quad \dots \dots \dots (1)$$

2.3 検量線の作成

褪色率 α は、上式から求められる露光前後の吸光度 D_0 と D をその定義式に適用して算出される。また、 α は積算日射量 S と気温 T の関数として表現されるので、この関数形(検量線)を求めるために、岐阜大学流域環境研究センター高山試験地建物の屋上に設置されている全天日射計(英弘精機社製ネオ日射計 MS-42)の脇に簡易積算日射計フィルムを一定期間併置するという露光実験を行った。この実験では、広い温度域に遭遇させるよう、1998年3月31日から12月1日まで約2週間間隔で計18回行った。こうして算出された褪色率 α と全天日射計による

表-1 全天日射計による積算日射量の観測値 $S|_{Act.}$ と簡易型積算日射計フィルムの褪色率 α との関係に関するキャリブレーションパラメータの推定結果

	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c
OR-O	-3.0×10^{-7}	2.0×10^{-6}	-5.0×10^{-5}	6.0×10^{-6}	-2.0×10^{-4}	-5.0×10^{-7}	2.0
PAN	-5.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	9.0×10^{-4}	2.4×10^{-4}	6.7×10^{-3}	2.5×10^{-1}	100

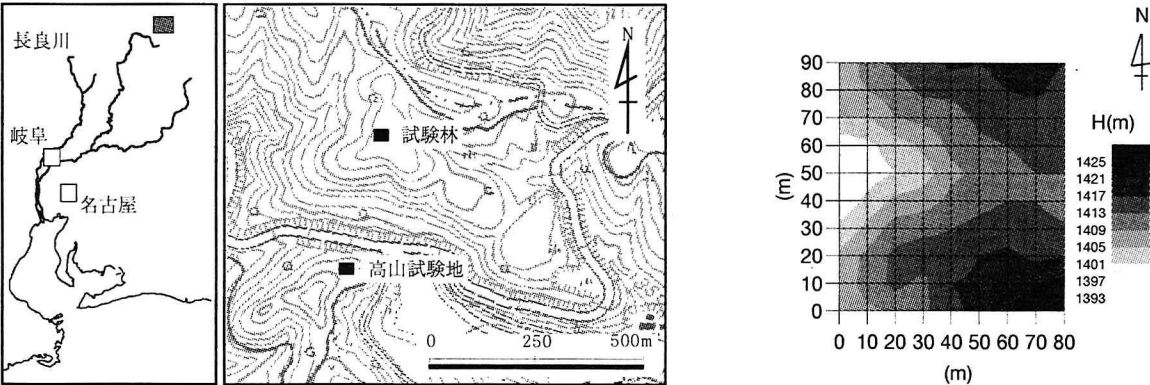


図-2 試験林の位置および観測対象領域内の地形と格子分割

積算日射量 $S|_{Act.} (MJ/m^2)$ との関係を図-1 に示す。図中の曲線は、褪色率 α を

$\alpha = aS^2 + bS + c, a = a_1T^2 + a_2T + a_3, b = b_1T^2 + b_2T + b_3 \dots\dots\dots (2)$
で表現できるものと仮定した場合の温度域ごとの関係を示しており、実線、破線、点線および細点線は、それぞれ、気温 $T = 8.5^\circ C, 12.2^\circ C, 15.7^\circ C$ および $17.8^\circ C$ の場合の結果に対応している。また、式 (2) 中のパラメータ $a_i, b_i (i = 1, 2, 3)$ および c の推定結果を表-1 に示す。表-1 を式 (2) に適用した検量線を用いることにより、フィルムの褪色率および観測期間内平均気温から期間内の積算日射量が求められることになる。

2.4 フィルム日射計の適用範囲

図-1 から、フィルムの特徴として、気温が高くなるにつれて色素の褪色速度が速まることがわかる。しかし、この差はフィルムの種類によっても異なる。すなわち、OR-O では温度の影響が小さいのに対して、PAN では影響を大きく受け、とくに低温になると褪色反応が鈍くなる傾向が顕著に認められる。今回は平均気温が零下となる12月から3月には測定していないが、厳寒期にはフィルム表面に着霜が見られることから、この期間の使用は不適であろう。観測対象地域では夏期でも高温になることがなかったため、高温側の限界についてはさらに検討を要す。降雨や湿度に関する影響についても検討したが、もともとこのフィルムは水中の光環境も計測できる⁵⁾ため、試験期間中に水分の影響は認められなかった。適用できる積算日射量の限界について、OR-O では $150 MJ/m^2$ までの範囲内で直線性が保たれた。PAN については $200 MJ/m^2$ が限界で、それ以上では急激に劣化した。夏期快晴日の日射量は $20 \sim 30 MJ/m^2$ であることから、開放面での設置期間は、OR-O では4～5日、PAN では1週間程度と推察される。しかし、林床など光の弱い場所では当然長くなる。このほか、後述の森林内での測定の際に、埃や落葉あるいは豪雨などによる表面の汚染(とくに地際設置の場合)が多少認められたため、2週間程度で交換の方がよいと思われる。また、林内では鳥や動物によるいたずらもまれにあった。以上の結果から、適用範囲を十分理解した上で、林内の光環境等を計測する場合、フィルム日射計が簡便で有効な道具となりうることが示唆される。

3. 森林内光環境の時空間的变化

3.1 試験林の概要

フィルム日射計を用いて森林内の光環境の空間的変異とその季節変化を計測した。観測対象とする試験林は、北緯36度8分、東経137度26分、標高1400m付近の乗鞍岳南西斜面に位置しており、東西80m、南北70mの矩形領域内での詳細な調査を実施している。図-2は、試験林の位置および地形を示したものである。調査対象矩形領域を南北・東西それぞれ実斜面で10mの正方格子に分割し、格子点での標高を実測した結果を用いて図-2を作成してある。試験林内の最低および最高標高は、それぞれ1396mおよび1423mであり、17mの標高差が存在している。図-2からわかるように、試験林内の南北中心線に沿って東西方向に谷筋が存在しており、南北両端が尾

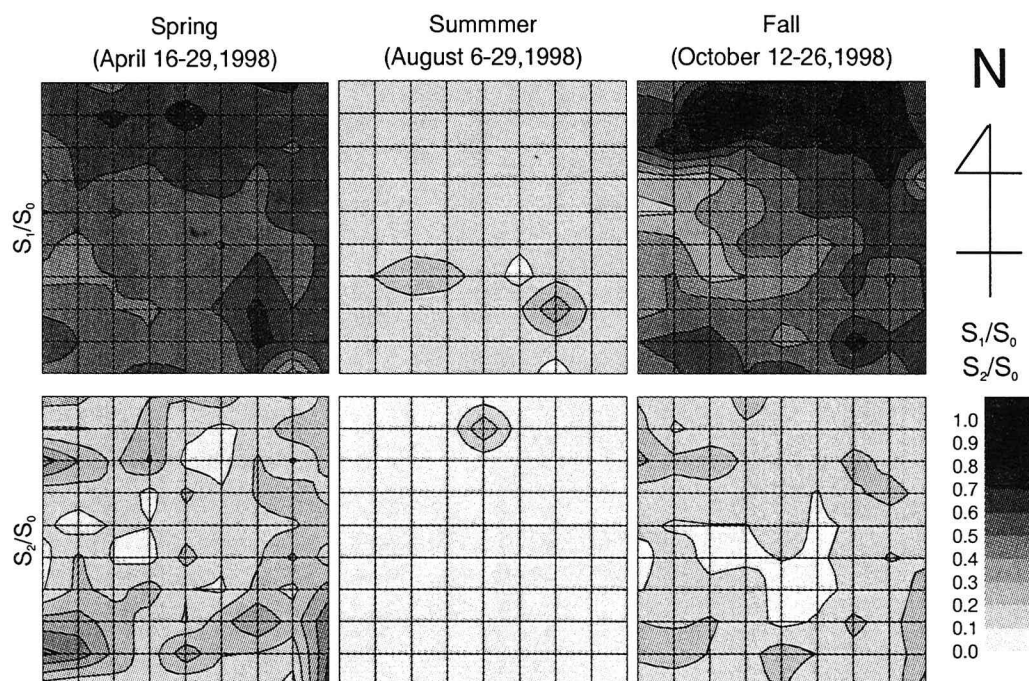


図-3 林床植生上部および林床植生下部での相対積算日射量 S_1/S_0 および S_2/S_0 に関する空間分布とその季節変化

根もしくは起伏斜面となっている。とくに、南東の角が最も標高が高いため、太陽高度の低い冬季には、山陰になる場所も多く出てくる。

この試験林は、林床が草高 1m 前後のクマイザサ (常緑) に覆われた落葉広葉樹林であり、カンバ類、ミズナラ、ホオノキなど (約 30 種、1000 本) の冷温帯を代表的する落葉樹によって構成されている。このため、冬季の林内は明るい、ササは 1m 以上の雪に埋もれている。4 月上旬に雪が融け、樹木は 5 月になると一斉に展葉して林床は暗くなる。夏の間、林内は暗いが、木漏れ日による光のぼらつきは大きい。10 月になると落葉が始まり、11 月初めにはほぼ完了する。

3.2 日射計フィルムの設置箇所

森林内の植生構造は平面的なものではなく、上部植生や林床植生などの存在により、複雑な 3 次元構造となっていることが一般的である。このため、こうした森林内での炭素固定作用と日射量との関係を検討する上で、空間的な日射量分布の計測は必要不可欠となる。そこで、鉛直方向には、林床植生 (クマイササ群落) よりやや高い地上 1.5m の地点での積算日射量 S_1 と林床植生下部の地上約 10cm の積算日射量 S_2 を同時に計測することにした。また、平面的な日射量分布を把握するために、試験林の矩形領域を 10m 格子に分割して得られる格子点を測点とした (図-2)。すなわち、東西方向に 9 本、南北方向に 10 本の測線を設け、各測線の交点 (合計 90 地点) を日射計フィルム設置地点とした。なお、日射計フィルムの交換を約 2 週間ごとに実施し、前述の方法により、その間の積算日射量を算出した。

3.3 林内光環境の空間的分布と季節変化

森林内光環境の現地観測は、前述の露光実験と同様な期間に対して実施しており、合計 18 回のフィルム交換を行った。図-3 は、林外 (樹冠上部) 積算日射量 S_0 (前述の高山試験地建物屋上での全天日射計による計測結果) に対する林床上部積算日射量 S_1 および林床下部積算日射量 S_2 の比として定義される相対積算日射量 S_1/S_0 および S_2/S_0 の分布状況を示す。フィルム設置期間数に対応した合計 18 回分のこうした計測結果を時間順に並べると、太陽高度や上部植生の展葉・繁茂・落葉といった季節変化の様子をより詳細に検討することができる。図-3 では、各季節の代表例として、春期 (4 月 16~29 日)、夏期 (8 月 6~29 日) および秋期 (10 月 12~26 日) での結果を示している。上段がササ群落上部での相対日射量 S_1/S_0 を、下段がササ群落下部での相対日射量 S_2/S_0 を表す。場所ごとの日射量の違いが認められるが、これは地形のみならず、被陰している樹木の種類、大きさ、密度などに関連していると考えられる。

また、全 90 地点での積算日射量に関する平均値の季節変化を図-4 に示す。図中の上段が林外積算日射量に対

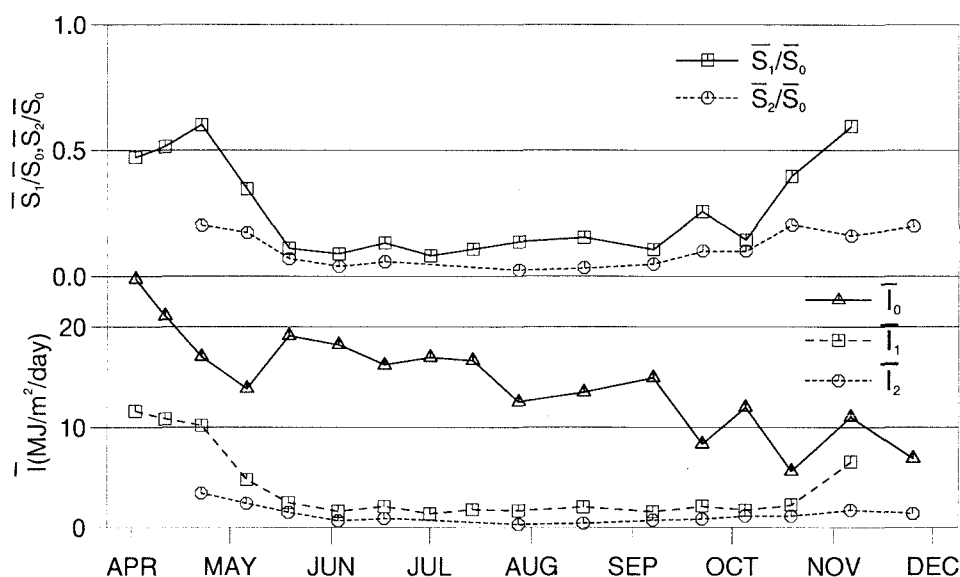


図-4 林内での相対平均積算日射量および平均日射強度の季節変化

する林内での相対積算日射量 $\bar{S}_1/\bar{S}_0$ と $\bar{S}_2/\bar{S}_0$ を、下段が積算日射量を日換算した値、すなわち平均日射強度 $\bar{I}$ を表している。相対値でみると、林床植生上部では、春先は50%を超えるものの、夏季には20%以下に低下し、秋に再び50%以上に回復する。林床植生下部では、常緑のササの下でも季節変動はあるものの、最大でも20%を超えることは少なく、夏の間は5%以下になる。一方、日射強度の図のうち最上の線($\bar{I}_0$)と2番目の線($\bar{I}_1$)との間の部分が樹木層が受けた光であり、2番目($\bar{I}_1$)と3番目($\bar{I}_2$)との間がササ層が受けた光に相当する。さらに $\bar{I}_2$ より下は土壌に到達する光である。

林内光環境の時間的変化特性および空間分布特性を定量的に評価するためには、今後、こうしたデータを継続的に集積するとともに、展葉や落葉の時期、葉密度の樹種ごとの変化などの植生要因との関係をさらに解析する必要がある。

4. 林床植生による炭素固定量と林内日射量との関係

観測対象試験林では、1993年に西村ら⁴⁾により、林床植生であるササによる純炭素生産量が実測されている。そこで、1998年での観測結果を用いて1993年の林内光環境を推定し、西村らによる純炭素生産量との関係を検討してみる。

4.1 月平均日射強度の推定

上述の岐阜大学流域環境研究センター高山試験地では、気象観測を始められたのが1995年であるため、岐阜地方気象台高山気象官署(標高560m;以下、高山測候所と呼ぶ)での気象データを用いて、純炭素生産量が実測された1993年の森林内光環境を推定する。まず、1995年～1998年の4年間について、高山測候所と高山試験地との気象データを月平均値で比較した結果、高山測候所での日照時間と高山試験地での積算日射量との間(単相関係数:0.817)および高山測候所と高山試験地での気温相互(相関係数0.997)に明瞭な対応関係が確認できた。この結果を用いて、1993年に対して推定した観測対象試験林での日平均気温 $T(^{\circ}\text{C})$ 、日射強度 $I_0, I_1, I_2(\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day})$ および林床植生による吸収日射強度 $I_1 - I_2(\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day})$ と西村らによるササ型林床植生による純炭素生産量 $C(\text{g}/\text{m}^2)$ の月別変化を図-5に示す。

4.2 林床植生の炭素固定量に及ぼす林内積算日射量の影響

図-5より、ササ型林床植生による純炭素生産量 C は、林床上部日射強度 I_1 や林床植生による吸収日射強度 $I_1 - I_2$ の増減とよく対応していることがわかる。また、こうした増減は気温変化と逆の傾向を示しているとも言える。図-6は、林床上部日射強度 I_1 および林床植生吸収日射強度 $I_1 - I_2$ と純炭素生産量 C との関係を示したものであり、各プロット近傍の文字は月名を表す。7月・8月では、上部植生による日射遮断のために林床植生の光合成活動が抑制され、呼吸作用に伴う炭素の放出が活発となっている。しかしながら、その前後の6月・9月では、上部植生樹冠にわずかな開口部が残されており、そこからの微弱な光による炭素固定が呼吸による炭素放出を上回る

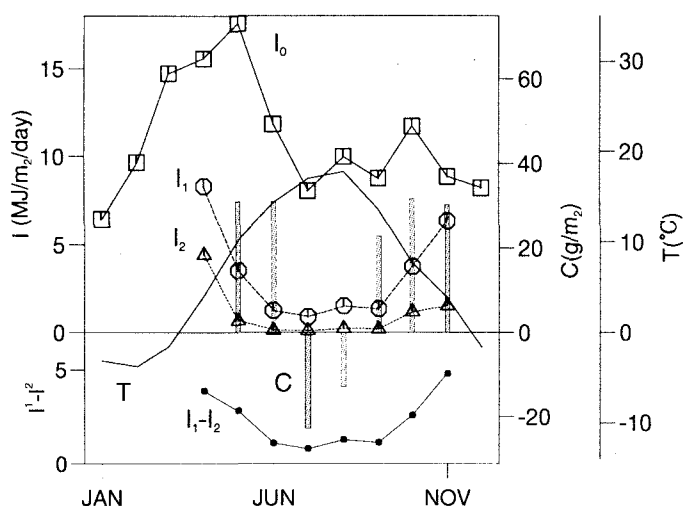


図-5 1993 年の林内光環境諸量の推定結果とササ型林床植生による純炭素生産量の月変化

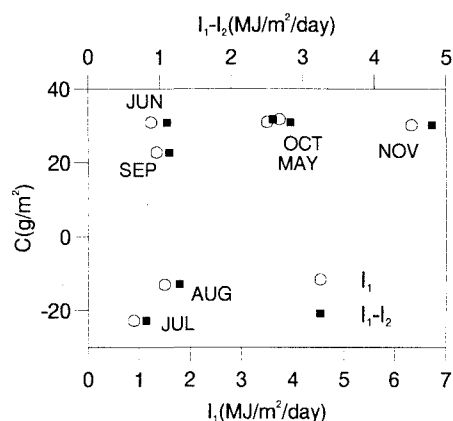


図-6 林内光環境諸量とササ型林床植生による純炭素生産量との関係

ことになっている。また、林床への日射量が大きくなる5月・10月・11月では、日射強度の大きさの割には純炭素生産量が増加しておらず、頭打ちの状態となっていることがわかる。こうした光合成の急激な立ち上がりや光飽和点の低さは、陰葉における光強度-光合成曲線の特徴とよく一致している。また、7月・8月の平均気温が18℃程度であることに対して、6月や9月の平均気温は14℃前後であり、ササの成長にとっての最適温度に近かったために、光環境よりも温度環境が支配的だったとも解釈できる。

データ数が不足しているため、こうした考察は推論の域を出ないが、森林域での炭素循環過程を定量的に評価するためには、日射強度の変化に対する炭素生産量の変化率(光合成速度)の空間分布および季節変化を明らかにしていくことが重要であろう。

5. 結語

以上、本研究では、簡易積算日射計フィルムの有効性を検証するとともに、これを用いた森林内日射量の3次元の分布構造および季節変化特性を検討した。その結果、日平均気温が8~20℃の範囲では、高い精度で積算日射量を推定できることが判明した。また、林内の積算日射量は、地形、樹種、落葉・展葉時期などによく対応することが明らかとなった。さらに、こうした森林内光環境とササ型林床植生による炭素固定量との関係について検討した結果、わずかな光が林床に供給されるだけで炭素固定量は急激に増大するものの、光飽和は早くなる傾向を確認することができた。データ取得期間の短さや光環境と炭素固定量とを直接比較できないデータを用いているなどの問題点はあるものの、一地点でのデータではなく、面的に拡がりを持ったデータによって検討することが重要と思われる。今後、こうした方法を応用して、林内光環境と炭素循環過程との関係を3次元的に評価していくことが望まれよう。

最後に、本研究の実施に当たり、現地観測に協力して下さった富久尾歩氏(農業環境技術研究所)および買書剛氏(岐阜大学大学院農学研究科)に深謝の意を表す。また、本研究が文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号:09750591)の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 例えば、安田・渡辺・大谷・岡野・中山: 落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの季節変化, 水文学会誌, Vol. 11, No. 6, 1998, pp. 575-585.
- 2) 木村充: 陸上植物群集の生産量測定法, 共立出版, 1976, 112p.
- 3) 松井喜祐: 落葉広葉樹林におけるクマイザサ群落の物質生産に関する研究, 平成8年度岐阜大学大学院農学研究科修士論文, 1997.
- 4) N. Nishimura, T. Akiyama and Y. Matsui: Role of the sasa type floor vegetation for carbon cycling in cool temperate forest ecosystem, "Comparative Studies on CO₂ Fluxes Observed by Towers at Several Forests in the World", Int. Workshop in Hiroshima, Japan, Abst., 1997, pp. 31-34.
- 5) 大成化工株式会社: 簡易積算日射計フィルム取扱説明書, 1995.