

渦相関法によるコナラ二次林の 二酸化炭素フラックスの測定

宮浦 富保・山田 亮・横田 岳人

1. はじめに

里山管理の生産生態学的な基礎資料として、森林の生産力を把握しておくことは重要である。しかしながら、サイズが大きく多様な樹種が存在する森林群落の生産力を測定するためには、多くの労力を長期間にわたって投入しなければならない。

微気象学的方法による二酸化炭素 (CO_2) フラックスの測定は、自然の環境条件を乱さずに群落の CO_2 吸収量および放出量を測定することができる (安田2002) という利点がある。龍谷の森のコナラ二次林に建設された観測タワー上部に、オープンパス方式による渦相関測定システムを設置し、継続的な測定をおこなってきた。このシステムを用いることにより、比較的少ない労力で森林の生産力を把握することができ、森林の更新状態の推移に伴う生産力の変化を明らかにすることができると期待されている。システム設置後1年間のデータを得ることができたので、その結果を整理し、コナラ二次林の CO_2 フラックスの推定を試みた。

2. 方法

CO_2 フラックス

森林は大気との間で CO_2 の交換を行っている。 CO_2 は植物の光合成により大気から植物体内に固定され、また植物体の呼吸や土壌呼吸により大気中に放出される (図-1)。渦相関法で測定できるのは、図-1の太い矢印であらわした下向きフラックスと上向きフラックスである。これらのフラックスは、光合成による固定と呼吸による放出の差し引きとして、森林と大気間の正味の CO_2 移動量をあらわしている。植物の光合成による CO_2 の固定量が、葉や枝、幹、土壌の呼吸量よりも大きいときに下向きフラックスが

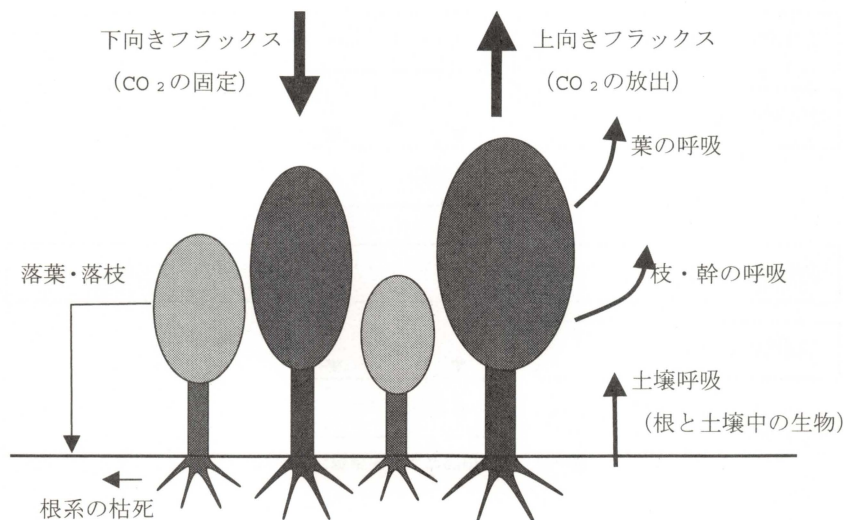


図1. 森林でのCO₂の働き

観測される。光合成にとって条件のよい日中には、下向きのフラックスが観測される頻度が高くなる。夜間には、植物の光合成はおこなわれないので、基本的には上向きのフラックスのみとなる。

測定林分の概況

渦相関法の測定システムを設置している観測タワーは、龍谷大学瀬田隣接地（龍谷の森）のコナラ二次林に建設されている。上層木の主要構成樹種はコナラ（*Quercus serrata*）、ウミズザクラ（*Prunus grayana*）、リョウブ（*Clethra barbinervis*）などであり、最大樹高は約20mである。下層植生としてソヨゴ（*Ilex pedunculosa*）、サカキ（*Cleyera japonica*）、ヒサカキ（*Eurya japonica*）などがあげられる。観測タワーの近くで2005年5月に測定した胸高断面積合計は23.1 [m²/ha]であり、そのうちコナラが約66%（15.2 [m²/ha]）を占めていた。

観測タワーの周囲500m以内には、コナラ二次林以外にヒノキ人工林が存在し、アカマツ・ソヨゴ群落およびアカマツ群落と判定された森林も存在している（宮浦・横田 2005）。

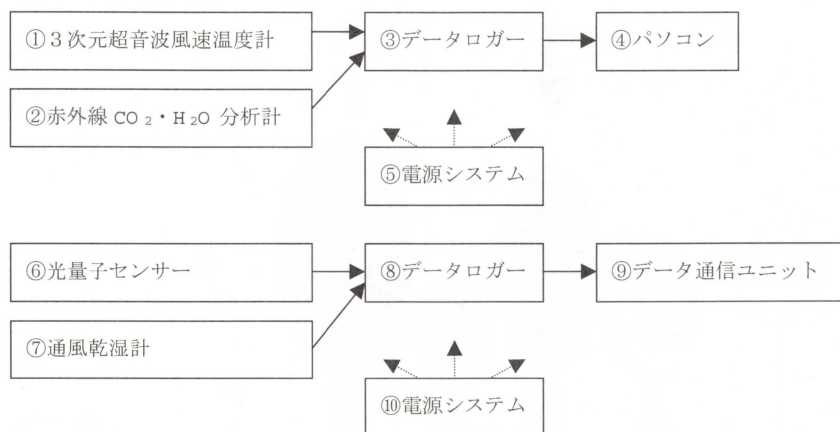


図-2. 測定機器とデータ集録システム

使用測定機器

図-2に各測定機器とデータ集録システムの構成を示す。

それぞれの機器の概要は以下のとおりである。

- ① 3次元超音波風速温度計 (CSAT3, Campbell社) 風速 (3成分) と温度の測定。
- ② 赤外線CO₂・H₂O分析計 (オープンパスCO₂・H₂OアナライザーLI-7500, LI-COR社)
- ③ データロガー (CR23X, Campbell社)
- ④ パソコン (データ記録ユニット CPU-SB20/256 (FIT) GY, CONTEC社)
- ⑤ 電源システム (家庭用風力・太陽光ハイブリッド発電システム
アウル/ECO-10ZXP, ゼファー社)
- ⑥ 光量子センサー (LI-190S, LI-COR社)
- ⑦ 通風乾湿計 (通風筒付乾湿球温度計PFH-01, 株式会社ブリード)
- ⑧ データロガー (CR10X, Campbell社)
- ⑨ データ通信ユニット (携帯電話を利用)
- ⑩ 電源システム (太陽電池+バッテリー)

3次元超音波風速温度計と赤外線CO₂・H₂O分析計のデータは、0.1秒ごとに記録されており、大量のデータとなるので、USB経由でフラッシュメモリー等にコピーしてデー

タを持ち帰った。

光量子センサーと通風乾湿計のデータは、10分ごとに記録されている。携帯電話を利用して（⑨データ通信ユニット）、研究室からデータの収集ができるようにした。

3次元超音波風速計、赤外線CO₂・H₂O濃度分析計、光量子センサーおよび通風乾湿計は、地上高25mの観測タワーの上部に設置した。

電源システムに関しては、太陽電池パネルで発電をおこない、バッテリーに蓄電することで安定的な電力供給を図った。⑥の電源システムではさらに風力発電装置も装備し、効率的な電源供給を図った。

使用データとデータ処理

今回の解析では、2005年6月7日13時30分から2006年6月8日8時56分までの期間に収録された超音波風速温度計および赤外線CO₂・H₂O分析計のデータを使用した。日付および時間、風速の3次元成分（東西、南北、上下）、気温、二酸化炭素濃度、水蒸気量のデータが、0.1秒ごとにテキスト形式で記録されている。また、光量子センサーおよび通風乾湿計のデータについては、2005年7月2日から2006年7月1日の期間に収録されたものを用いた。

データの可読性向上と、後のデータ処理を容易にするために、プログラム（seikei.vbs VBScript、以下同様）を用いてデータの整形を行った。その後、データの時間変化についての大まかな把握をおこなうために、各測定値の1分毎の平均値を算出した（mean_min.vbs）。CO₂濃度の1分毎の平均値を用いて、図-3のように時間変化のグラフを作成した。

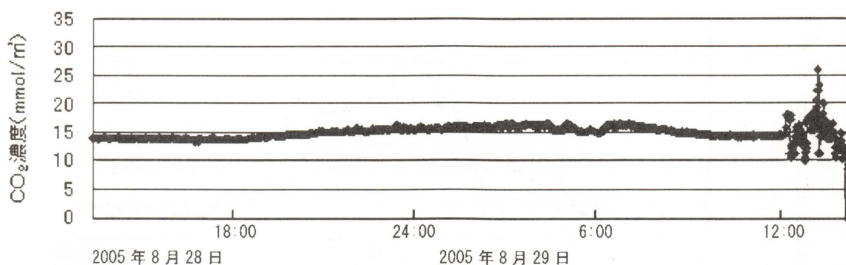


図-3. 2005年8月28日12時46分から29日13時42分までのCO₂濃度の変化
データとしては1分ごとの平均値を用いた。

CO₂濃度は時間の経過に伴いゆっくりと変化する傾向が見られた。図-3の例では8月28日18時頃から8月29日3時頃にかけてCO₂濃度がゆっくりと上昇する傾向が見られる。このような長時間にわたるCO₂濃度の変化は、大気移動などに伴う変化であり、対象とする森林群落の短期的な生産・消費活動とは直接の関係がないと考えられる。対象とする森林群落によるCO₂濃度の変化（フラックス）を把握するためには、このような大きな変化傾向（トレンド）を除去する必要がある（AsiaFlux運営委員会2003）。今回はトレンドを時間についての一次式で近似し（cal_coeff.vbs）、この近似式からの偏差にもとづいてフラックスの計算をおこなった。ここで、図-3のグラフの最後の部分のようにばらつきが激しいデータについては、解析から除外した。

CO₂フラックスを以下のように算出した（cal_covar.vbs）。

$$Fc = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{n - 1} \tag{1}$$

ここで、 x は風速の鉛直成分である。 y は0.1秒ごとに測定されたCO₂濃度の、近似直線（トレンド）からの偏差である。 n は計算に用いたデータ数である。今回は30分ごとにフラックスの計算をおこなった。すべてのデータがそろっている場合は、 $n=18000$ となる。

3. 結果および考察

推定されたCO₂フラックスの例を図-4に示す。ここで、CO₂フラックスが正の値であるときはCO₂が森林群落に固定されていることを示し、CO₂フラックスが負のときはCO₂が森林群落から放出されていることを示す。

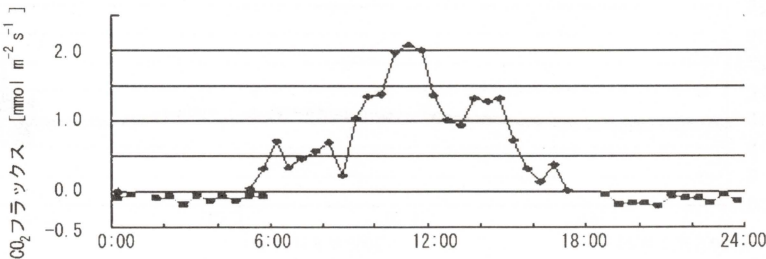


図-4. CO₂フラックスの時間変化
2005年6月8日0:00～24:00の例

図-4の例では、日の出とともに光合成生産が始まり、CO₂の固定量が増加している。正午頃に最大値となり、その後減少して、夜間はCO₂が放出されている。

これ以降の解析では、便宜的に6:00から18:00を日中とし、18:00から翌日の6:00までを夜間とした。

0:00から6:00まで、および18:00から24:00までのCO₂フラックスの合計値を1日当たりの夜間の生態系呼吸量 (Re [gCO₂ m⁻² day⁻¹]) と定義した。Reと夜間の平均気温 (T [°C]) との関係を図-5に示す。両者の関係は、

$$Re = 4.12(1.42)^{\frac{T}{10}} \quad (2)$$

で近似された ($r^2=0.1475$)。

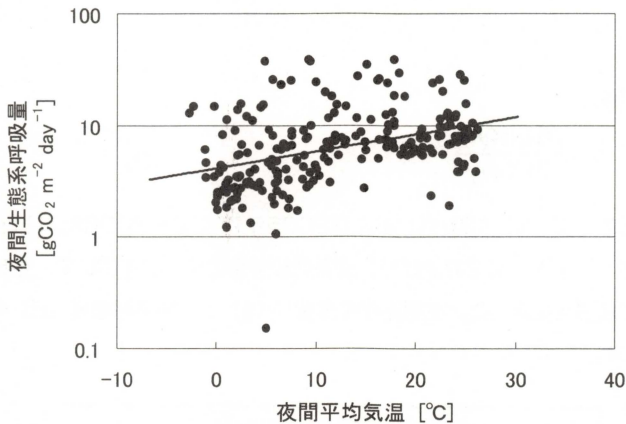
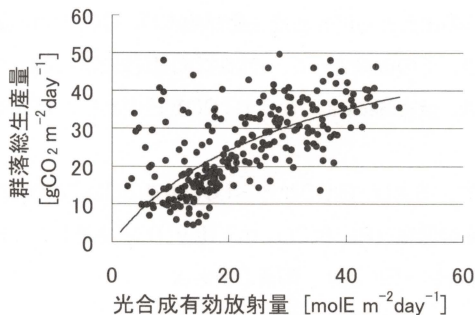


図-5. 夜間生態系呼吸量と夜間平均気温の関係
2005年7月2日～2006年7月1日の期間のうち、夜間生態系呼吸量の推定値が得られた244日分のデータにもとづいて描いた。

夜間の生態系呼吸量と夜間の平均気温との関係が、日中の生態系呼吸量と日中の平均気温との間にも成立すると仮定し、日中の生態系呼吸量を推定し、日中に群落に吸収されたCO₂量 (6:00から18:00までのCO₂フラックスの合計値) を加えることで、1日当たりの生態系総生産量 (Ag) を推定した。

1日当たりの生態系総生産量 (Ag [gCO₂ m⁻² day⁻¹]) と1日当たりの日射量 (光合成有効放射量Q [molE m⁻² day⁻¹]) との関係を図-6に示す。

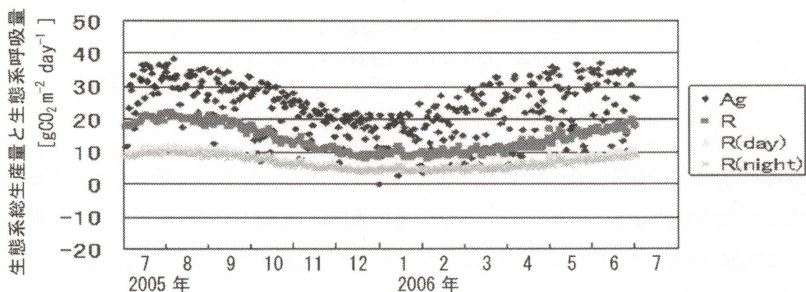


図－6. 生態系総生産量と光合成有効放射量の関係
2005年7月2日～2006年7月1日の期間のうち、群落総生産量の推定値が得られた244日分のデータにもとづいて描いた。

両者の関係は、

$$A_g = \frac{64.5Q}{33.4+Q} \quad (3)$$

で近似された。(2) 式、(3) 式、および2005年7月2日～2006年7月1日の期間の夜間平均気温、日中平均気温および光合成有効放射量のデータを用いて、生態系呼吸量と生態系総生産量を推定した。生態系総生産量 (A_g) と生態系呼吸量 (R) の季節変動を図－7に示す。



図－7. 生態系総生産量 (A_g) と生態系呼吸量 (R) の季節変化
2005年7月2日～2006年7月1日

光合成量、呼吸量ともに、夏期に高い値をとり、冬季に低い値をとっている。しかしコナラが葉をつけていない季節である12月から3月にも、光合成量は $10\sim 20$ [$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$]程度の値を示していた。これはソコゴ (*Ilex pedunculosa*)、サカキ (*Cleyera japonica*)、ヒサカキ (*Eurya japonica*) などの常緑樹による光合成が寄与していたと考えられる。また、周辺にはヒノキ人工林やアカマツの優占する森林が存在し、これらの森林における光合成が、今回の測定値に反映していた可能性がある。

算出された結果によって、年間の生態系総生産量は 84.9 [$\text{tCO}_2\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]、年間の生態系呼吸量は 51.6 [$\text{tCO}_2\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]と推定された。乾燥重量に換算すると、年間生態系総生産量は 46.3 [$\text{t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]、年間生態系呼吸量は 28.1 [$\text{t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]と計算される。また、これらの差として年間生態系純生産量は 18.2 [$\text{t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]と推定される。

年間生態系総生産量、年間生態系純生産量、および年間生態系呼吸量は、熊本のコジイ林について 45.3 、 18.7 、 26.6 [$\text{t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]と推定されており、苗場山のブナ林について 27.5 、 15.3 、 12.2 [$\text{t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]と推定されている(依田1971)。また、京都府南部の広葉樹二次林の純生産量が 15.8 [$\text{t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$]と推定されている(後藤ほか2003)。これらのデータはいずれも、落葉・落枝量の測定と毎木調査の結果に基づいて積み上げられた推定値である。龍谷の森のコナラ二次林について渦相関法で推定された年間生態系総生産量、年間生態系純生産量、および年間生態系呼吸量は、これまで温帯地域で測定された値にほぼ匹敵するものである。このことから、渦相関法による CO_2 フラックスの推定値はほぼ妥当なものであったと考えられる。

図-4に例示した CO_2 フラックスの時間変化のデータは、比較的良好な条件で得られたものである。データ処理をおこなっている際に、明らかな異常値を発見することが多くあった。また、降雨の影響や機器の不調などのために、データが欠損することも多くあった。異常なデータの除去やデータの欠損のために、 CO_2 フラックスの測定値のみから生産力を推定することはできなかった。今回は、光合成有効放射量や気温の測定値をパラメータとして用いることにより、森林群落の生産力を推定した。推定された生産力はほぼ妥当な値ではあったが、推定の手順についてはさらに検討が必要であろう。

現在龍谷の森では、毎木調査を継続的に実施しており、これにもとづいて森林の現存量と成長量を推定することが可能である。また、リターフォール量の測定も継続的に行われているので、成長量の推定値と合計することで森林の純生産量を推定することが可

能である。こうして推定される純生産量が、今回渦相關法で推定された純生産量とどの程度一致するか確認する必要がある。

引用文献

- AsiaFlux運営委員会（2003）陸域生態系における二酸化炭素等のフラックスの観測の実際，独立行政法人国立環境研究所
- 後藤義明・小南裕志・深山貴文・玉井幸治・金澤洋一（2003）京都府南部地方における広葉樹二次林の地上部現存量及び純生産量，森林総合研究所研究報告2，115-147
- 宮浦富保・横田岳人（2005）「龍谷の森」植生図の作成，龍谷大学 里山学・地域共生学オープン・リサーチ・センター 2004年度年次報告書（龍谷大学），131-132
- 安田幸生（2002）群落のCO₂フラックス，森林立地調査法（森林立地調査法編集委員会編），博友社
- 依田恭二（1971）森林の生態学，築地書館