



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	森林における物質・エネルギー交換過程の評価手法の高度化に関する研究
Author(s)	中屋, 耕
Citation	北海道大学大学院農学研究院邦文紀要, 29(2), 149-213
Issue Date	2008-02-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/32913
Type	departmental bulletin paper
File Information	29-149.pdf



森林における物質・エネルギー交換過程の 評価手法の高度化に関する研究*

中 屋 耕

(勸電力中央研究所 環境科学研究所)

Study of improvement on evaluation method of energy
and mass exchange between atmosphere and forest ecosystem

Ko NAKAYA

(Central Research Institute of Electric Power Industry, Environmental Science
Research Laboratory, 1646 Abiko, Abiko, Chiba 270-1194, Japan)

目	次
第1章 緒 論	149
1.1 乱流フラックスによる物質・エネルギー交換過程の評価	149
1.2 乱流フラックス測定における問題点	150
1.3 シンチレーション法のレビューと本論文の目的	151
第2章 シンチロメータの森林への適用とその問題点	152
2.1 概 要	152
2.2 はじめに	153
2.3 理論的背景	154
2.4 観 測	158
2.5 結果と考察	160
2.6 結 論	167
第3章 シンチロメータによる空間平均効果の確認	167
3.1 概 要	167
3.2 はじめに	167
3.3 理論的背景	168
3.4 観 測 方 法	170
3.5 結果と考察	172
3.6 ま と め	186

第4章 空間平均フラックス測定を応用した NEE 評価	187
4.1 概 要	187
4.2 は じ め に	187
4.3 方 法	188
4.4 結果と考察	191
4.5 ま と め	199
第5章 総 合 考 察	199
付 録	202
謝 辞	204
参 考 文 献	204
Summary	211

第1章 緒 論

1.1 乱流フラックスによる物質・エネルギー交換過程の評価

進行する地球温暖化に伴う急速な気象環境の変化は、陸域生態系に重大な影響を及ぼすと考えられる。2007年に刊行されたIPCC第4次報告書のWorking group IIでは、Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerabilityと題し、陸域生態系への外部環境の直接的・間接的影響が大きく取り上げられ、その理解をさらに進める継続的な取り組みの必要性が謳われている。これまで植物組織から個体、群落、メソスケールそして地球規模に至る様々な時間スケールにおいて、植物を主体とする陸域生態系と外部環境の相互作用としての物質・エネルギー循環を解明しようとする努力がなされて

* 北海道大学博士論文 (2007)

Doctoral thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2007)

きた。その目的は、栽培環境の調節であったり、農地・森林管理、緑地保全、地域防災、水資源管理、炭素循環システム解明、気候影響解明など多岐にわたる。こうした様々な時空間スケールの中で、大気底部における数十 m から数十 km に至る水平空間スケールおよび、数秒から数日に至る時間スケールにおける地表面—大気間の物質・エネルギーに関する相互作用の理解は、我々の生活空間と関わりが深く、陸域生態系への外部環境の影響を解明する上で非常に重要である。

大気底部では地表面—大気間の物質・エネルギーの移動は、主に乱流輸送による。物質・エネルギーが乱流によって移動する単位面積・単位時間あたりの量を表す乱流フラックスの測定は、こうした輸送量を評価するための重要な手法である。乱流フラックス測定の直接的な目的は、物質・エネルギー交換量の評価だけでなく、地表面において乱流輸送がどのように行われているのかという現象解明でもある。今日までに、理想的なプラットフォームである平坦で広域に均一な地表において、実測に基づいて乱流輸送理論が体系化されてきた¹。また、大気乱流は、浮力パラメータ、レイノルズ応力および顕熱フラックスの3つのパラメータで表されるとした Monin-Obukhov の相似則の適用によって、温度、比湿などのポテンシャルのプロファイル測定によって顕熱や潜熱フラックスが求まることが分かった。その結果、さまざまな乱流輸送モデルやフラックス測定手法の実用化が進んだ²。こうした理論および測定手法やノウハウは、それほど複雑で先進的ではない装置でも測定可能なため、様々な形態の地表面に拡張および適用されてきた。

近年、陸域生態系の炭素循環解明の手段として、CO₂ フラックス測定による生態系純交換量 (NEE: net ecosystem exchange) 評価の取り組みが積極的に行われるようになってきた。CO₂ 濃度変動計の高性能化と低価格化が進んだことから、乱流変動項を直接評価する渦相関 (EC: eddy-covariance) 法を採用したフラックス測定が広く実施されるようになった。NEE が森林に吸収された正味の炭素量に相当するこ

とに着目して、森林生態系の炭素固定量を評価することは、乱流フラックス測定の位置づけの一つである³。また、フラックス測定サイトの間で連携を図り、測定値やデータ処理手法に関する情報を共有化しようとする取り組みが進められ、欧米や、豪州、アジアにおいてネットワークが拡大している^{4,5,6}。このようなフラックスネットワークの第一義の目的は、陸域をカバーするための多点のフラックス測定値の共有である。相互比較可能な品質のデータセットを獲得することで、陸域生態系の炭素循環モデル構築に寄与できる。測定およびデータ処理手順に関する情報の提供や共通化への取り組みも進められており^{7,8}、乱流フラックス測定点の拡充や測定値の品質確保に貢献している。

1.2 乱流フラックス測定における問題点

最も仮定が少なく、直接的に乱流フラックスを測ることができる EC 法においても重大な問題が存在することが知られている。

水平方向に一様で、対象期間内で状況が変化しない地表面においては、現象の時間スケールが正しくとらえられていれば、任意地点におけるフラックス測定値はすべて同じ値をとると考えられる。換言すれば、一地点での測定によって対象領域を代表する値が得られる。しかし、不均一な地表面や、大気の大気対流が著しい、あるいは強安定な状態では、しばしば乱流フラックス測定値に精度的な問題が生じることがある。それを端的に表しているのが、乱流フラックスを含んだエネルギー収支が閉じない状態、すなわちインバランス問題である。エネルギー収支の整合は、フラックス測定における妥当性の指標の一つである。エネルギー収支は、地表面に入力される有効エネルギーである純放射量に対する伝熱（顕熱）や水の蒸発潜熱として消費されるエネルギー、および土壌や植物体による貯熱変化量としてのエネルギーの釣り合いとして表される。このうち、乱流フラックスとして測定されるのは顕熱フラックスと潜熱フラックスで、貯熱量は日周期で放熱と吸熱を繰り返すため、長期間積算値におけるエネルギー収支は顕熱フラックスと潜熱フラックスおよび有効エネルギーとの比較となる。一般に有効エネルギー

測定値の不確定性は小さく、それを超えてエネルギー収支に不整合（インバランス）が見られる場合、乱流フラックスの測定値が原因である可能性がある。

こうしたフラックス測定におけるインバランスが世界的に多く報告されている。例えば FLUXNET では、純放射量に対する熱フラックスの寄与がサイト間の平均で 0.7–0.8 程度である負のインバランス傾向（熱フラックスの過小評価）が問題となっている⁸。この問題を引き起こす要因として、フェッチの不足や乱流フラックスと放射センサーのソースエリアの不一致⁹、あるいは、Moncrieff et al.¹⁰ でレビューされているようなセンサーの応答性やシステムエラーの相違が考えられる。しかし、観測されているエネルギーインバランスに相当するエネルギー量について、これらでは十分な説明が得られなかった。次にあげられた要因は、タワー自体およびセンサーが引き起こす大気の局所的な擾乱や、物質交換に及ぼす局所的な平均流の影響である¹¹。そのような場合、乱流フラックスの測定値に何らかのバイアスが生じていると考えられた。とすれば、顕熱フラックスや潜熱フラックスと同様に測定される CO₂ フラックスにも誤差が生じ、その長期積算によって評価された NEE にも影響があると容易に予想できる。

背の高い植物体によって構成される森林上の大気には粗度層（RSL：Roughness Sub-Layer）と呼ばれる特徴的な境界層が発達する。その中で測定された乱流信号では、測定高さが林冠に接近するほど Monin-Obukhov の相似則が成立しないことが報告されている^{12,13}。多数のフラクスタワー間の比較実験¹⁴ は、森林上の大気乱流構造解明のための一つの試みである。さらに、EC 法を任意の地点で実施した場合、測定値が過小評価傾向となる確率が高いこと^{15,16} など、数値実験によるアプローチを通して新たな知見が示されている。

1.3 シンチレーション法のレビューと

本論文の目的

乱流測定センサは、ある広がりを持った風上領域を起源とする信号をとらえる。センサによってこの信号の起源領域（ソースエリア）が

異なれば、センサ間で測定値の差異からフラックス測定が空間スケールに依存することを実証的に裏付けることができ、渦相関センサによる測定の不確定さの原因を明らかにすることにつながると考えることができる。そこで著者は、この信号の起源領域が従来のセンサに比べてより広域であると期待されるシンチロメータに着目した。シンチロメータは、乱流による温度変動が引き起こす大気の可視光域の屈折率変動を、遠隔光源の受光強度の変動、すなわち光のゆらぎ（シンチレーション）として検出する装置である。シンチロメータは、光を発するトランスミッタと受光装置であるレシーバで構成され、光学的な測定パスである装置間の距離を 50 m–5 km とすることができる（使用可能距離は装置によって異なる）。シンチレーションは、屈折率変動の構造関数定数 C_n^2 および内部スケール l_0 に変換され、消散法によって運動量、顕熱および潜熱フラックスに関連づけられる。シンチレーション法は、Tatarskii¹⁷ による大気乱流と屈折率変動の理論に多くの理論的根拠を置く。その後のシンチレーション法に関する研究の主な流れは、Monin and Yaglom¹⁸ の教科書、Hill et al.¹⁹ によるレビューに集約されている。シンチロメータには大きく分けて 2 種類に区別される。大口径シンチロメータ（LAS：large aperture scintillometer）は、測定パスを 5 km まで長距離化できる装置で顕熱フラックスを評価する。小口径シンチロメータ（DBSAS：displaced-beam small aperture scintillometer）は、測定パスの上限が 250 m 程度と比較的短距離であるが、顕熱フラックスに加えて大気運動量の指標である摩擦速度も評価できるという特徴を持つ。Thiermann²⁰ によって DBSAS が商品化されたことを機に、シンチロメータの適用例が増えた。2002 年には、Boundary-Layer Meteorology vol. 105 において、シンチレーション法の特集が組まれた。

シンチレーション法の主な利点は、光学パス全体における平均値が得られること、短い平均化時間でフラックスが計算可能であること、および装置による測定場の擾乱がないことなどで、これらはフラックス測定の代表性を高める

要素である。一方、シンチレーション法の実施には少なくとも2基のタワーが必要でコストが増加する、EC法に比べてフラックス算出のために用いる仮定が多い、霧や雨などによって容易に測定不能になることが主な不利点である。

シンチレーション法のフラックス測定手法としての妥当性は、主にEC法との一致によって判断されてきた。測定パスを長距離化できるLASを均一な小麦畑に適用した例では、大気不安定状態において草丈の短い地表面ではLASとEC法の結果はよく一致した²¹。一方、パッチ状の土地利用形態や起伏のある地形など一様な地表面にLASを適用した例では、EC法の結果より大きな値を示す傾向が報告された^{22,23}。Monin-Obukhov 相似則 (MOST) の成立および実効測定高さの決定が、光学的な測定値である C_n^2 および l_0 をフラックスに換算する際に要求されるが、地表面の粗度や不均一性が増すほどその成立性の確認は困難になる。森林における MOST の成立性に疑問が持たれていたこともあって、シンチロメータの森林への適用性を確認した例はこれまでに見られない。

本研究の目的は、従来の観測システムに比べ、より広い空間平均値の取得が期待できるシンチロメータを林冠上に適用し、エネルギーインバランスの原因の一つと考えられる林冠上の組織的な乱流輸送機構を実証的に明らかにすることである。また、シンチロメータの適用によって空間代表性の高い乱流フラックスを取得し、インバランスが緩和されることを示すことで、シンチレーション法の妥当性を検証する。さらに、現在最も実用的な乱流フラックス測定手法である渦相関法の信頼性を高める、シンチロメータを活用した補正法を提言する。

本論文の論旨構成を図1.1に示す。第2章では林冠上でシンチロメータを運用する上での問題点や、測定値の特徴を調べ、シンチロメータの森林への適用性を確認する。そして第3章では、エネルギーバランスを指標として、林冠上の組織的な乱流輸送機構を実証的に解明すると共に、シンチロメータによって空間代表性の高いフラックスが観測されることを示す。さらに、渦相関法の信頼性を高めるためにシンチロメー

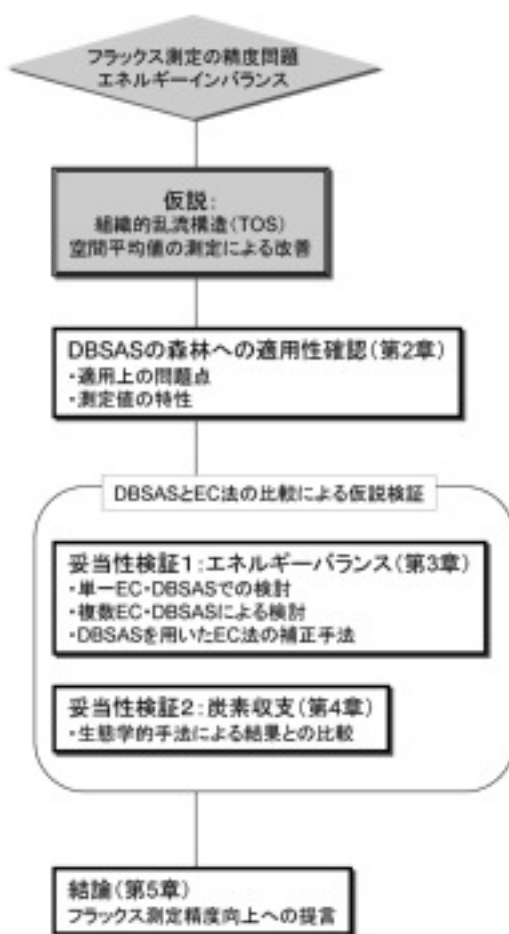


図 1.1 本研究の論旨展開の概要と章構成。

タを活用した補正法を開発する。そして、第4章では CO_2 フラックスにシンチロメータによる補正を施し、シンチロメータによって補正した NEE の妥当性を森林の炭素収支を指標に検証する。

第2章 シンチロメータの森林への適用とその問題点

2.1 概 要

大気中の屈折率変動によってもたらされる光強度のゆらぎ (シンチレーション) を応用したシンチレーション法は、ユニークな乱流測定手法である。その測定光路を従来の渦相関 (EC) センサとは桁違いに長く設定することができるため、空間の平均的な乱流信号が取得できること、測定器自体が測定場を乱す影響が少ないこ

となどがシンチレーション法で想定される長所である。しかし、シンチレーション法を森林に適用した例はこれまで報告されておらず、その特性が明らかになっていなかった。そこで、平均樹高 18 m の落葉広葉樹林の林冠上 10 m (28 m a. g. l.) の位置において、2002 年の 6 月から 11 月までの期間を対象として、小開口シンチロメータ (DBSAS: displaced-beam small aperture scintillometer) を用いた大気不安定状態における乱流測定を実施し、その適用性について考察した。DBSAS の基本的な出力である乱流運動エネルギー (TKE) および温度変動の消散率 (ϵ , ϵ_T) は、EC センサから導いた消散率と異なった傾向を示した。すなわち、消散率における DBSAS と EC の比は、相対乱流強度 (平均風速で標準化した鉛直風変動: $\sigma_w/\bar{u}$) に対して特徴的な変化を見せた。相対乱流強度が小さい条件 ($\sigma_w/\bar{u}$ が小さい) では DBSAS による消散率が顕著に大きくなった。また、風が弱く、相対的な上下方向混合が大きな場合 ($\sigma_w/\bar{u}$ が大きい) では、EC による消散率が DBSAS より大きくなる傾向が強くなり、その境界的な $\sigma_w/\bar{u}$ の値は、約 0.3–0.4 であった。TKE および温度変動の消散率から摩擦速度および顕熱フラックスを算出する際に必要となる Monin-Obukhov 相似則の成立性を調べた結果、TKE の無次元消散率において既往の関数形からの乖離が見られた。EC センサによる熱フラックスに基づいた熱収支解析では、主に熱フラックスが放射量を下回るエネルギーフラックスのインバランスが観測された。DBSAS による熱フラックスは EC に比べて大きく計算される傾向があり、熱収支式が閉じやすかった。それに対し、摩擦速度は EC が DBSAS に比べて大きくなる傾向があったが、摩擦速度が小さな領域では DBSAS の結果が EC の結果を上回った。この他、渦相関センサと DBSAS を組み合わせた水蒸気および CO₂ フラックス測定や、DBSAS のビーム距離の修正による測定精度向上を試みた。

2.2 はじめに

森林上の乱流フラックスは、単一のタワー上で渦相関 (EC) 法によって評価するのが一般的で、そこで得られるフラックスは、本質的に対

象森林を代表することが期待されている。しかし、背の高い植物によって構成される森林上では、フラックスの代表性における固有かつ重要な問題として、しばしばエネルギー収支式が閉じない状況 (エネルギーインバランス) が報告される。渦相関法によって得られた熱フラックスが領域の代表的な値を過小評価しているとする、同様の測定原理で得られるガスフラックスなども同様のバイアスを含んでいることになる。

このような背景のもと、シンチロメータが新たな乱流フラックス測定手法として期待を持って迎えられた。乱流による温度変動が引き起こす大気の可視光域の屈折率変動は、遠隔光源の受光強度の変動、すなわち光のゆらぎ (シンチレーション) として検出できる。シンチロメータは、光を発するトランスミッタと受光装置であるレシーバで構成され、光学的な測定パスである装置間の距離を 50 m–5 km とすることができる (使用可能距離は装置によって異なる) ため、検出した乱流信号が起源とする領域 (ソースエリア) が従来のセンサに比べて非常に大きいと期待されている。

光学的なシンチレーションからフラックスを導出する手法 (シンチレーション法) は、運動エネルギーや温度変動などの消散率 ϵ からフラックスを算出する消散法と呼ばれる理論を応用している。大気境界層では、乱流の「生成」と「消散」が絶え間なく行われている。消散率 ϵ は、摩擦による乱流エネルギーの消散 (dissipation) を表し、渦相関法によって得られる乱流変動量からは生成 (production) に関する情報が得られる。そして、地面近くでは乱流の生成項と消散が釣り合っていることが多いため、消散率 ϵ から乱流変動量を求めることができるというのが、消散法の大まかな原理である。その際、光学的な測定値である屈折率変動の構造関数定数 C_n^2 および乱流の内部スケール l_0 をフラックスに換算する過程で、Monin-Obukhov 相似則 (MOST) の成立が要求されるが、地表面の粗度や不均一性が増すほどその成立性の確認は困難になる。森林へのシンチロメータの適用性を確認した例がないのは、MOST の確認が困難で

あったことが一因と思われる。Hartogensis et al.²⁶ は、小口径シンチロメータ (DBSAS) および EC センサから導出した乱流運動エネルギーの消散率を比較した。消散率を比較することで MOST の成立性や、ゼロ面変異を決定せずともセンサ間の特性を調べることができるため、森林など粗度の大きな地表面では有効な手法と考えられる。^{27;28}

本章では、シンチロメータの森林への適用性を明らかにする。また、EC センサとシンチロメータの間で消散率を比較することを通して、広いソースエリアを持つセンサの特徴を示す。

2.3 理論的背景

本節ではシンチロメータによるフラックス算出についての理論的な背景を述べる。シンチロメータによるフラックス算出は二つのステップからなる (図 2.1)。まず、(1)消散率 (TKE およびスカラー変動) を光学的に測定し、次に(2)消散法の適用によって消散率からフラックスを算出する。消散法 (dissipation method) は、顕熱、潜熱および運動量フラックスと消散率との関係を用いて、消散率からこれらのフラックスを求める手法である。この手法は、Deacon²⁹ によって提案され、Taylor³⁰ によって初めてその有効性が認められた。乱流測定値の高周波成分で消散率を決定することから、船舶の揺れ等の低周波信号の影響を受けにくく、これまで海上ブ

ラットフォームでのフラックス測定を初めとした多くの応用研究があり^{31;32;33}、近年では陸上における有用性についても認められるようになってきた^{34;35}。しかし、後述するように、消散法は様々な問題を抱えており、今後の解決を目指して意欲的な研究が求められている対象でもある。

2.3.1 小口径シンチロメータによる消散率の光学測定

乱流信号からの消散率算定には、消散率の定義から直接計算する直接消散法 (the direct variance dissipation method) と、スペクトルや構造関数などの慣性小領域での性質を利用する慣性消散法 (the inertial dissipation method) がある。乱流エネルギーが分子粘性で消散する時空間スケールでの乱流測定 (大気境界層内では空間スケール 1 mm, 時間スケール 1/1000 秒オーダー) は実用的ではないため、既存の乱流測定機器での観測データを利用する本論では後者を用いることとし、構造関数を用いた消散率算定³⁶を行う。風速 u あるいは温度 T , 比湿 q などのスカラー s の乱流信号から、乱流運動エネルギー $\overline{e_t} = (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})/2$ (以下、TKE と呼ぶ) とスカラーの変動 $(\overline{s's'})/2$ の慣性小領域におけるスペクトルは、スペクトルの実空間への転写である構造関数によって表すことができる。ここで、 u, v, w は風向方向、横風方向、鉛直方向の風速成分である。また、バーは時間平均値、プライムは平均値からの変動を表す。任意の距離座標 x における 2 次の構造関数 $D_{ab}(r)$ は次のように定義される。

$$D_{ab}(r) \equiv \overline{\Delta a \Delta b},$$

$$\Delta a \equiv a(x+r) - a(x) \quad (2.1)$$

ここで r は距離スケールであり、 a と b はそれぞれ、 u, T, q などを表す。Kolmogorov の理論によれば、 r が慣性小領域内にあるとき 2 次の構造関数と消散率は、以下のような関係にある^{1;36}。

$$D_{uu}(r) = 4.0 \alpha_{uu} \epsilon^{\frac{2}{3}} r^{\frac{2}{3}}, \quad (2.2a)$$

$$D_{ss}(r) = 4.0 \alpha_{ss} \epsilon_s \epsilon^{-\frac{1}{3}} r^{\frac{2}{3}} = C_s^2 r^{\frac{2}{3}} \quad (2.2b)$$

ここに ϵ と ϵ_s は、それぞれ TKE およびスカ

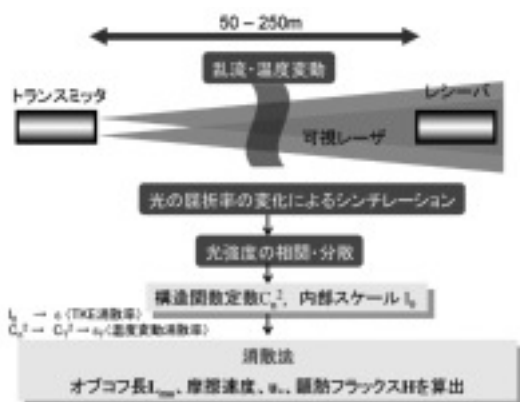


図 2.1 シンチロメータによるフラックス測定の原理。内部スケール l_0 から乱流運動エネルギーの消散率 ϵ が、屈折率の構造関数定数 C_n^2 および ϵ から温度変動の消散率 ϵ_s が求められる。

ラーの変動の消散率である。 α_{uu} は Kolmogorov 定数 ($=0.55$) で、 α_{ss} は Obukhov-Corrsin 定数 ($=0.8$) と呼ばれる普遍的な定数である。比例定数 C_s^2 は、構造関数定数と呼ばれる。 a と b の組み合わせ、屈折率 $[n:n]$ 、温度 $[T:T]$ 、比湿 $[q:q]$ および $[T:q]$ に対応して、構造関数定数はそれぞれ、 C_n^2 、 C_T^2 、 C_q^2 および C_{Tq} となる。

シンチロメータは、光源であるトランスミッタと受光装置であるレシーバから構成される。大気の変動は、光のゆらぎ（シンチレーション）を引き起こすため、トランスミッタから発せられた光は強度変動としてレシーバによって測定される。大気の変動は、光学測定パス間の大気における乱流熱輸送によって引き起こされる。レシーバによって測定した光強度の log 分散 B は、光線が通過する空間の乱流場が等方的かつシンチレーションが弱い ($B < 0.3$, Rytov approximation) 条件を前提として、屈折率変動の構造関数定数 $C_n^2(\text{m}^{-2/3})$ および乱流の内部スケール l_0 (乱流渦が徐々に小さな渦に崩壊していく際、これ以上小さくなると分子粘性により渦が維持できなくなり、熱として分解していくスケールの目安) に関連づけることができる¹⁷。

本研究で用いる SLS40A (Scintec AG, Germany) は、市販の小口径シンチロメータ (DBSAS) で、測定パス長は 50–250 m の間で設定できる製品である。波長 $0.67\mu\text{m}$ の HeNe レーザーを偏光面が直交する 2 本のビームに分離し、2 光路のシンチレーションから TKE および気温変動の消散率を求め、フラックスを算出する装置である。SLS シリーズは単一光源を用いることで動作および測定の安定性と経済性を両立させた製品であるが、単一光源ゆえの問題も抱えることになった(後述)。ビーム間の距離オフセット d は 2.7 mm 、ディテクタの直径 D は 2.5 mm で、二つのフォトダイオードによって光強度の変動を検知する。独立した 2 光源と受光機がある場合の光強度の log 共分散 (B_{12}) は次式で表される²⁰。

$$B_{12} = 4\pi K^2 \int_0^{L_p} \int_0^\infty k \phi_n(k, l_0, C_n^2) J_0(kd) \sin^2 \left[\frac{k^2 x (L_p - x)}{2KL_p} \right] \left[\frac{4J_1^2(kDx/2L_p)}{(kDx/2L_p)^2} \right] dk dx \quad (2.3)$$

ここで、 x は、パス長 L_p の光軸上での位置、 $K = 2\pi/\lambda(\text{m}^{-1})$ は光の波数、 $k(\text{m}^{-1})$ 乱流の波数、 C_n^2 は屈折率変動の構造関数定数、 l_0 内部スケール、 J_0 および J_1 は 0 次と 1 次の第 1 種ベッセル関数で、ビーム間の距離 d および受光機の直径 D によって定まる感度分布を表す。式 (2.3) 式中の被積分関数はシンチロメータの感度分布を表す荷重関数 $W(k)$ で、パスの中央で最大値となる釣鐘型の関数形を取る。検出器単体による分散を表す B_1 と B_2 は式 (2.3) で $d=0$ とすることで得られる。(2.3) 中の ϕ_n は屈折率変動の 3 次元スペクトルで、

$$\phi_n(k, l_0, C_n^2) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3} f(k, l_0) \quad (2.4)$$

であり、 $f(k, l_0)$ は、Hill and Clifford³⁷ による屈折率変動の 3 次元スペクトルモデルである。Frehlich³⁸ は、計算の簡易化のために、Hill and Clifford³⁷ の物理モデルをベースに、次のようなシンプルな多項式型の経験モデルを提案した。このような簡易モデルは、計算過程のチェックに用いると有用である。

$$f(k) = \left[1 + \sum_{n=1}^4 a_n k^n \right] \exp[-\delta k] \quad (2.5)$$

$$(\delta = 1.1090, a_1 = 0.70937, a_2 = 2.8235, a_3 = -0.28086, a_4 = 0.08277)。$$

(2.4) を (2.3) に代入し、 x および k について積分することで次式が得られる。

$$B_{12} = 0.124 C_n^2 K^{7/6} L_p^{11/6} f_B \left(\frac{l_0}{\sqrt{\lambda L_p}}, \frac{d}{\sqrt{\lambda L_p}}, \frac{D}{\sqrt{\lambda L_p}} \right) \quad (2.6)$$

f_B は l_0 、 d および D の増加に対する B_{12} の減衰を表す関数である。相関係数 $n_{12} = B_{12}/(B_1 B_2)^{1/2} = B_{12}/B_1 = B_{12}/B_2$ は l_0 、 d および D の関数となり、 d と D を定数と考えると、相関係数 n_{12} から内部スケール l_0 が求められる²⁰。 l_0 がわかれば、式 (2.3) で $d=0$ とおくことで、 B_1 (あるいは

B_2) から C_n^2 が求められる。

Scintec 社のソフトウェアでは、 l_0 に対する n_{12} および f_B をパス長 L_p に対する数表として用意し、 B_{12} と B_1 および B_2 からリアルタイムで l_0 と C_n^2 を計算する。得られた l_0 から乱流運動エネルギー (TKE) の消散率 ε は次の関係によって求められる³⁷⁾。

$$\varepsilon = \nu^3 \left(\frac{7.4}{l_0} \right)^4 \quad (2.7)$$

ここで $\nu (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$ は空気 の 動粘性係数である。こうして求めた ε と以下で求める温度変動および比湿変動の構造関数定数を式 (2.2b) に代入することで、温度変動および比湿変動の消散率が求められる。屈折率の変動に最も寄与するのは気温 T (K) であり、ついで比湿 q (kg kg^{-1}) の変動である。CO₂ などのガスは大気中に微量しか存在しないため屈折率変動には影響しない。屈折率変動の構造関数定数 C_n^2 は気温変動の構造関数定数 C_T^2 ($\text{K}^2 \text{m}^{-2/3}$)、比湿変動 C_q^2 ($\text{m}^{-2/3}$) および気温と比湿の結合構造関数定数 C_{Tq} ($\text{Km}^{-2/3}$) によって次のように表される³⁹⁾。

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 + 2 \frac{A_T A_q}{Tq} C_{Tq} \quad (2.8)$$

定数 A_T と A_q は光の波長、気圧、気温および比湿の影響を受ける。本論で使用する DBSAS で利用する波長 $\lambda = 0.67 (\mu\text{m})$ においては、Andreas⁴⁰⁾ による以下の式を用いる。

$$\begin{aligned} A_T &= -7.89 \times 10^{-5} \bar{p} / \bar{T} \text{ および} \\ A_q &= -5.722 \times 10^{-5} \bar{q} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで p (hPa) は気圧である。光源に単一波長を用いる DBSAS では C_n^2 の値が一つしか得られないため (2.8) から C_T^2 および C_q^2 を一意に求めることが出来ない。この問題に対し、Thiermann²⁰⁾ は比湿が C_n^2 に与える影響が気温に比べて 1 オーダー小さいためこれを無視できる⁴⁰⁾ とし、(2.8) の右辺第 1 項のみから C_T^2 を求めた。DBSAS に付属のフラックス計算ソフトウェアはこの計算方法を採用しており、運動量フラックスおよび顕熱フラックスのみが計算される。

他方、式 (2.8) において、 C_{Tq} と C_q^2 の関与を回避するために、他のセンサによって測定した

q と T の関係を適用することが考えられる。式

(2.8) から明らかなように、シンチロメータは水蒸気の変動に対しても感度を持ち、潜熱フラックスが顕熱フラックスに比べて 1 オーダー以上大きい条件では C_T^2 が過大評価されてしまうことから水蒸気に対する補正の必要性が指摘されている⁴¹⁾。水蒸気影響の古典的な補正法は Wesely⁴²⁾ によって提唱されたボーエン比 (顕熱フラックスと潜熱フラックスの比: H/LE) 補正である。ボーエン比補正には $\overline{w'T'}$ と $\overline{w'q'}$ が必要なため、EC システムなどのセンサによる測定値を用いる。ここに、EC システムによる測定値を導入することは、空間平均された乱流信号を測定するという点で新たな不確定要素が加わることもある。Moene⁴³⁾ はボーエン比補正について精査し、気温と比湿の標準偏差 σ_T 、 σ_q の比を用いる手法が、フラックスの比を用いた手法に対して、測定項目が少ないため誤差が小さいことを示した。すなわち

$$\frac{C_T^2}{C_q^2} \approx \frac{\sigma_T^2}{\sigma_q^2} \quad (2.10)$$

とすることで、(2.8) は、 C_n^2 と C_T^2 に関して次のように変形できる

$$\begin{aligned} C_n^2 &\approx \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 \left(1 + 2 \frac{A_q}{\bar{q}} \frac{\bar{T}}{A_T} R_{Tq} \frac{\sigma_q}{\sigma_T} \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_q^2}{q^2} \frac{\bar{T}^2}{A_T^2} \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_T} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

T と q の平均値と分散、そして相関係数 R_{Tq} を他のセンサで測定することで、水蒸気の影響をキャンセルした C_T^2 を計算することが出来る。

2.3.2 消散法に基づくフラックス算定

大気の流れの生成と消散の関係は、運動方程式から導かれる乱流エネルギーの収支式として表される。すなわち、水平一様で状態の変化しない接地境界層では、摩擦による機械的な乱れの成分と浮力による熱的な乱れの成分によって、TKE ($\overline{e_i}$) の収支方程式は以下のように書かれる。

$$-\overline{w'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{g}{T} \overline{w'\theta'_v} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'e'_i} + \frac{1}{\rho} \overline{w'p'} \right) = \varepsilon \quad (2.12)$$

また、スカラー量 s の変動の生成消散については以下で表される。

$$-\overline{w's'}\frac{\partial \bar{s}}{\partial z}-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial z}\overline{w's'^2}=\varepsilon_s \quad (2.13)$$

ここで p hPa は気圧, $\theta_0 = \theta(1+0.61q)$ (K) は仮温位 (θ : 温位) を表す。これら収支式の導出については、文字⁷に詳しく解説されている。式 (2.12) の各項はそれぞれ生成項, 浮力項, 輸送項, 圧力項, そして消散率である。また, (2.13) の各項は, 生成項, 輸送項, そして消散率である。両式第1項の $\overline{u'w'}$ および $\overline{w's'}$ が求めるべき運動量およびスカラーのフラックスに相当する。接地境界層においては両式とも輸送項および圧力項を無視できると仮定して, 摩擦速度 ($u_* \equiv \sqrt{-\overline{u'w'}}$), Obukhov 長 (L_{mo}) および von Karman 定数 ($k_{kar} \approx 0.4$) を用いて, それぞれを $u_*^3/k_{kar}z$ と $k_{kar}zu_*/(\overline{w's'})^2$ によって無次元化することにより, 式 (2.12), (2.13) は測定高さ $z(=z_m-d_0)$ (m) において, 安定度パラメータ $\zeta(=z/L_{mo})$ の関数として以下のように表される^{44,4}。

$$\phi_\varepsilon \equiv \frac{k_{kar}z\varepsilon}{u_*^3} \approx \phi_m(\zeta) - \zeta \quad (2.14a)$$

$$\phi_{es} \equiv \frac{k_{kar}zu_*\varepsilon_s}{(\overline{w's'})^2} \approx \phi_s(\zeta) \quad (2.14b)$$

ここで ϕ_ε と ϕ_{es} は TKE およびスカラーの無次元消散率を, ϕ_m と ϕ_s は TKE およびスカラーの無次元した鉛直勾配を表す。 d_0 (m) はゼロ面変位で, 植生地上での風速プロファイルの対数分布を仮定した際の, 実際の測定高 z_m (m) の高さを測る基準面を上方に修正するためのパラメータで, 群落高 $\times 0.7$ という値が良く使われる。MOST によれば, 水平一様で定常な接地層においては, これらの無次元消散率は安定度パラメータのみに依存する普遍関数となることを, 式 (2.14) は表している。ここで用いられる Obukhov 長 L_{mo} (m) は, 以下の式で定義される。

$$L_{mo} \equiv \frac{-u_*^3}{k_{kar}\frac{g}{T}\overline{w'T_v'}} = \frac{-u_*^3\rho}{k_{kar}g\left(\frac{H}{c_p T} + 0.61E\right)} \quad (2.15a)$$

$$\rho c_p \overline{w'T_v'} = H \quad (2.15b)$$

$$\rho l \overline{w'q'} = lE \quad (2.15c)$$

ここで $g=9.81$ (ms⁻²) は重力加速度, ρ (kgm⁻³) は空気密度, c_p (Jkg⁻¹K⁻¹) は空気の定圧比熱, l (Jkg⁻¹) は水の蒸発潜熱, T_v (K) は仮温度であり, H (Wm⁻²), lE (Wm⁻²) は地表面における顕熱および潜熱フラックスである。式 (2.14b) の $s=\theta$ および $s=q$ に関する式をそれぞれ u_* , H , lE について解くと,

$$u_* = \left[\frac{k_{kar}z\varepsilon}{\phi_\varepsilon(\zeta)} \right]^{1/3} \quad (2.16a)$$

$$H = \rho c_p \left[\frac{k_{kar}zu_*\varepsilon_T}{\phi_{\varepsilon T}(\zeta)} \right]^{1/2} \quad (2.16b)$$

$$lE = \rho l \left[\frac{k_{kar}zu_*\varepsilon_q}{\phi_{eq}(\zeta)} \right]^{1/2} \quad (2.16c)$$

となる。無次元消散率 ϕ_i ($i=\varepsilon, \varepsilon T, \varepsilon q$) の関数形が既知であれば, 式 (2.15) および式 (2.16) は連立方程式として解くことができ, u_* , H , lE が求められる。

無次元消散率は, 観測結果から求められたいくつかの関数形が提案されている^{46,47,48}。本論では, DBSAS の標準的な計算でも用いられている Thiermann and Grassl⁴⁷ による

$$\phi_\varepsilon(\zeta) = (1-3\zeta)^{-1} - \zeta \quad (\zeta < 0) \quad (2.17a)$$

$$\phi_\varepsilon(\zeta) = (1+4\zeta+16\zeta^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\zeta > 0) \quad (2.17b)$$

$$\phi_{\varepsilon\theta}(\zeta) = [\phi_\varepsilon/(1-7\zeta+75\zeta^2)]^{\frac{1}{3}} \quad (\zeta < 0) \quad (2.17c)$$

$$\phi_{\varepsilon\theta}(\zeta) = [\phi_\varepsilon(1+7\zeta+20\zeta^2)]^{\frac{1}{3}} \quad (\zeta > 0) \quad (2.17d)$$

を用いる。温位と比湿の大気安定度に対する応答が相似であれば $\phi_{\varepsilon\theta} = \phi_{eq}$ が成立し, 非線形連立方程式である式 (2.15) および (2.16) は繰り返し計算によって解くことが出来る。

2.3.3 CO₂ フラックスへの拡張

水蒸気補正の際に導入した水蒸気と気温の構造関数定数比と分散比の相似性が成立するならば式 (2.10) にしたがって, シンチロメータによる C_T^2 と, 渦相関センサによる σ_T, σ_q から C_q^2 を算出できると考えられる。同様にこの相似性を CO₂ などのガスフラックスまで拡張すると以下が成り立つ。

$$\frac{C_T^2}{C_c^2} \approx \frac{\sigma_T^2}{\sigma_c^2} \quad (2.18)$$

これにより, 渦相関センサによって得られた気温, 水蒸気密度および CO₂ 密度の分散とシンチロメータによって得られた気温変動の構造関数

定数から水蒸気および CO_2 変動の構造関数定数 C_q^2 , C_c^2 が求められる。この算出法は純粋なシンチロメータによる導出ではなく、渦相関センサとの組み合わせによることを留意する必要がある。しかし、現時点でシンチロメータと同様のスケールで CO_2 の変動を測定する手法は存在しない。式 (2.2b) に q および c に関する構造関数定数を代入して消散率 ε_q と ε_c が求められる。 $\phi_{e\theta} = \phi_{eq} = \phi_{ec}$ と仮定し、式 (2.16) を ε_c に対して拡張することにより CO_2 フラックスも計算可能となる。

2.3.4 渦相関センサによる消散率の算定

シンチロメータとの比較に用いるために、渦相関 (EC) センサによる測定値から消散率 (ε , ε_T , ε_q) を算定する方法について述べる。EC センサによる消散率の算定には、スペクトル (エネルギーや物質質量変動の周波数表現) の慣性小領域における乱流特性を利用して間接的に求める慣性消散法 (inertial dissipation method) を用いるのが一般的である。ただし、フーリエ変換の結果は一般に乱れが大きく、消散率の推定誤差要因となりうるため、ここではスペクトルの実空間表現である構造関数にもとづいた消散率の推定法を用いる。式 (2.1) で定義した構造関数 D_{ab} は、EC センサによる時系列において、平均風速と測定時間差を距離スケール r に変換することで得られる。Taylor 仮説あるいは凍結乱流仮説が成立すると、時系列のデータ間の時間差 τ と平均風速の間には、 $\tau \bar{u} = r$ の関係にある。式 (2.2) に示すように 2 次の構造関数が $r^{2/3}$ に比例していることから、慣性小領域に相当する r の範囲で構造関数に $r^{2/3}$ の曲線をフィットさせることで式 (2.2) から消散率を求め、消散法によるフラックス計算へと進む (図 2.2)。超音波風速計のパス長 d_s より小さい乱流変動は測定されず、測定高さよりも大きい渦はその一部分しか測られないことから、浅沼・工藤³⁴ に倣い、十分に乱流変動測定が保障されるフィット範囲として $2d_s < r < z/2$ を選択した。

2.4 観測

2.4.1 観測地点の概要

観測地 (軽井沢サイト) は中部地方の浅間山東麓 (36°24'N, 138°35'E, 標高 1380 m) に位置

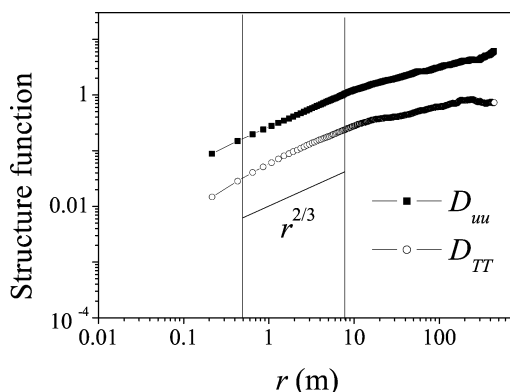


図 2.2 構造関数と実空間距離 r の関係。 $r^{2/3}$ に対する回帰係数が構造関数定数となる (2002 年 6 月 10 日 10:00)。

し (図 2.3), 火山堆積物の上に有機物層が発達した平坦な緩傾斜地 (南西から北東に向かって -3°) に、林齢約 50 年の 2 次林が成立している。地上高約 16–18 m の林冠を構成するのは主にダケカンバ (*Betula ermanii* Cham.), ヤマハンノキ (*Alnus hirsuta* Turcz.), ミズナラ (*Quercus mongolica* var. *crispula*) などの落葉広葉樹で、カラマツ (*Larix kaempferi* Carr.) 等の針葉樹が点在している。更に亜高木であるナナカマド (*Sorbus commixta* Hedl.), オオツリバナ (*Euonymus planipes* Miq.) が平均樹高 6 m で中層を占め、平均樹高 3 m のノリウツギ (*Hydrangea paniculata* Sieb.) が下層を占める。関東から甲信地方にかけての山地帯上部から亜高山帯下部で見られる種構成であるが、林床にササを欠く。リタートラップによる落葉量から推定した単位土地面積あたりの葉面積 (LAI) は約 $5.7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ であった。着葉期は 5 月から 10 月の間で、12 月から 3 月の間は積雪する。軽井沢測候所 (999 m a. s. l.) における 1971–2000 年の平年値では、年平均気温 7.9°C , 年降水量 1197.6 mm であった。森林のフェッチは主風向に対してそれぞれ約 1 km (N), 600 m (W) で、西と南にそれぞれ 150 m 離れて車道が通っている。軽井沢サイトの地形を図 2.3 に示す。

2.4.2 フラックス測定と解析方法

DBSAS を用いたフラックス測定は、(1) TKE およびスカラー変動の消散率 (構造関数定数)

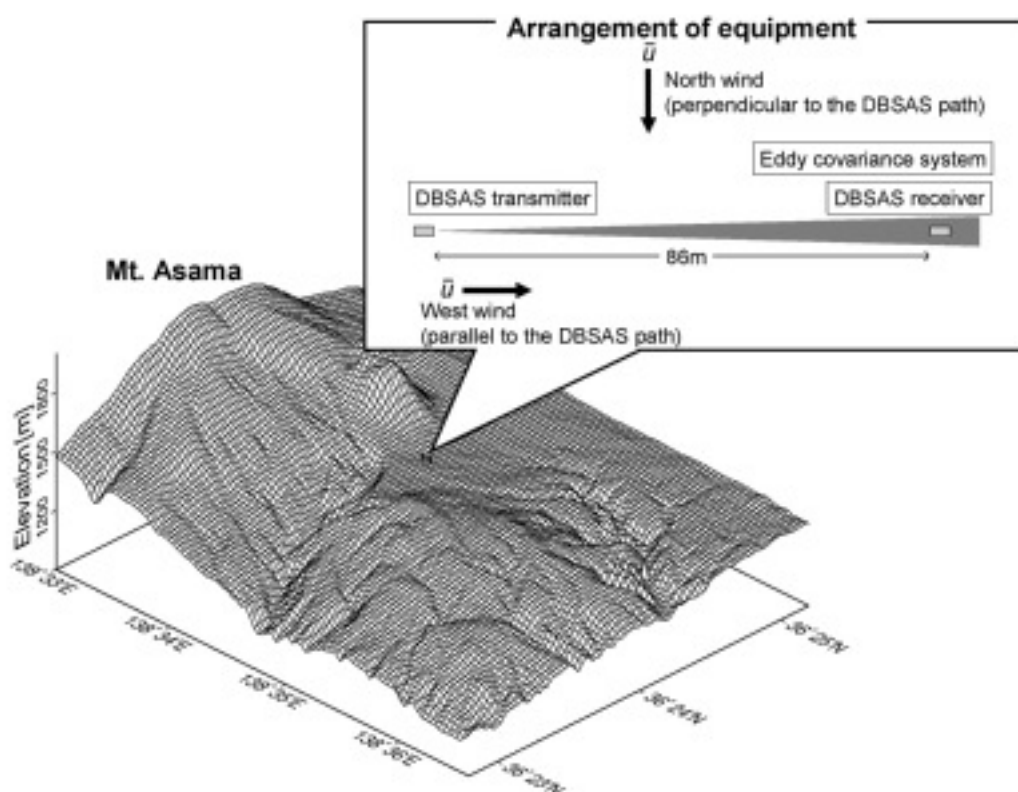


図 2.3 軽井沢サイトの地形とセンサの配置。

の算定と、(2)消散法に基づくフラックス算出の2段階に分かれる。したがって、まずシンチロメータと渦相関センサの間で消散率の特性を解析し、次にフラックスの算出値を消散法と渦相関法の間で比較する。

図 2.3 に示すように、シンチロメータの測定パスは、東西に 86 m の間隔で配置した 2 基の鋼製足場材組上げタワーの塔頂(地上高 28 m)に設定した。シンチロメータは市販の SLS40A (Scintec AG, Germany) を用いた。シンチロメータのトランスミッタとレシーバをそれぞれ西側と東側に配置し(図 2.4)、付属の PC ソフトウェア (SLSRUN, ver. 2. 23; Scintec AG) を用いて、 B_1 , B_2 , および n_{12} を 4 kHz サンプルングで 1 分間ブロック平均値を収録した。渦相関法によるフラックス測定は東側の塔頂で行い、3-D 超音波風速計 USA-1 (Metek GmbH, Germany), open-path 式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 変動計 LI-7500 (Li-Cor Inc., USA) を用いて 10 Hz サンプルングで運動量、顕熱、潜熱、 CO_2 フラック

スを測定した(図 2.5)。放射収支の測定には 4 成分式放射計 MR40 (Eko, Japan) を用いた。USA-1 は非直交パス型の超音波風速計で、基部の 10 cm 角のコントロールボックスからセンサを保持するマストが直立し、その周囲に超音波プローブが配置されている。特徴的な形状を持ったセンサであるが、様々な超音波風速計を並列測定した検討では、特に問題があるような結果は報告されていない^{49,50}。

EC 法の計算にはブロック平均化時間として 30 分を用いた。解析の前処理として、(1)超音波風速計による音仮温度に対する横風補正および水蒸気補正を行い、(2) Planar-fit によるセンサの傾度補正⁵¹を行った。また、open-path 式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 変動計による CO_2 の乱流変動項算出には WPL 補正⁵²を施した。

同時に渦相関システムによる時系列データから、2.3.4 にしたがって TKE およびスカラー変動の消散率を計算した。ゼロ面変位として平均樹高 18 m の 0.7 倍を用いた。なお、8 月から



図 2.4 小口径シンチロメータ (DBSAS) の (A) 東側タワー (Tower-1) に設置したレシーバおよび (B) 西側タワー (Tower-2) に設置したトランスミッタから望む Tower-1。

9 月にかけて落雷による測定器の故障により欠測した。渦相関法と対応させるためにシンチロメータの測定値は 30 分平均値を解析に用いることとし、2002 年 6 月から 11 月までの観測結果を解析対象とした。乱流輸送が卓越する大気状態である不安定時の昼間 (8:00–16:00) で、シンチロメータの光路が降雨等で遮断されない晴天日のデータを抽出した。なお、(2.15) および (2.16) の解を繰り返し計算によって求める際に、解が収束しなかったものは解析から除外した。

今後の議論で用いる消散率やフラックスについて、渦相関法によって計算されるものには添え字に “EC” を用い (例: ϵ_{EC} , ϵ_{TEC} , ϵ_{qEC})、シンチロメータによるものには添え字に “SAS” を用いる (例: ϵ_{SAS} , ϵ_{TSAS} , ϵ_{qSAS}) こととする (表 2.1)。

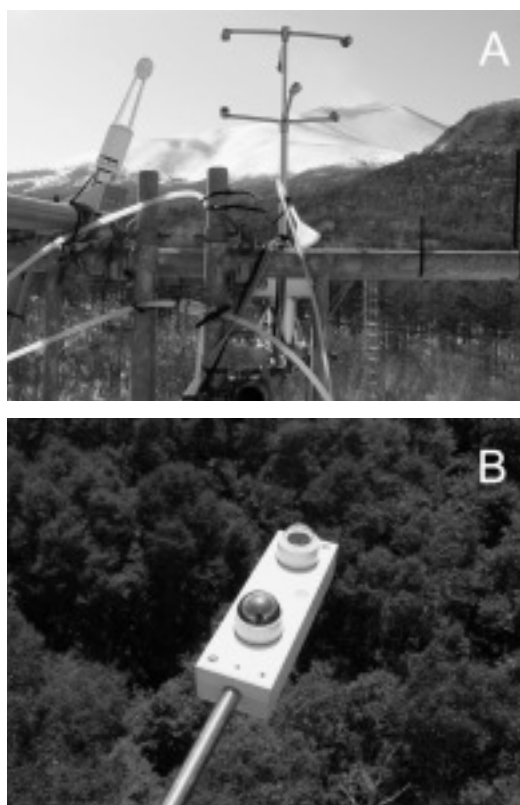


図 2.5 (A) Tower-1 の塔頂に設置した渦相関 (EC) センサ (左から、オープンパス CO₂ 分析計, 超音波風向風速計, 大気サンプリングインレットが見える) および (B) 4 成分長短波放射計。

表 2.1 シンチロメータおよび渦相関センサによるフラックス算定に関わるシンボルの表記ルール。

センサ	消散率	フラックス
シンチロメータ	ϵ_{SAS} (TKE)	u^*_{SAS}
	ϵ_{TSAS} (気温)	H_{SAS}
	ϵ_{qSAS} (比湿)	lE_{SAS}
	ϵ_{cSAS} (CO ₂)	F_{cSAS}
渦相関センサ	ϵ_{EC} (TKE)	u^*_{EC}
	ϵ_{TEC} (気温)	H_{EC}
	ϵ_{qEC} (比湿)	lE_{EC}
	ϵ_{cEC} (CO ₂)	F_{cEC}

2.5 結果と考察

2.5.1 消散率の特性

本小節では TKE およびスカラー変動の消散率の測定結果について述べる。消散率の算定は、

DBSAS によるフラックス算出過程の最初のステップである。

消散率の風向依存

DBSAS による温度変動および比湿変動の消散率は、北風の際に EC を上回る傾向があった (図 2.6b, 図 2.6c)。比湿変動の消散率比が温度変動の消散率比にくらべて風向に対する変動幅が大きい、 ε_{qSAS} が純粋な DBSAS 由来ではなく、他のセンサとの組み合わせによることを留意する必要がある。TKE に関しても、DBSAS は北風の際に EC を顕著に上回る傾向が見られるが、それ以外の風向では EC より小さくなる (図 2.6a)。解析対象期間ではシンチロメータのパスに直交する北風と平行する西風が

卓越し、ほぼ同程度の風速 $\bar{u}$ の範囲で分布した。一方、東風および南風の際の風速は小さかった (図 2.6e)。

DBSAS および EC による消散率 (TKE, 温度変動) の比は、風向に依存して明らかに変化した (図 2.6)。この関係は、平均風速および平均風速で標準化した鉛直風変動 ($\sigma_w/\bar{u}$) の風向分布と関連が強い (図 2.6e, 2.6f)。 $\sigma_w/\bar{u}$ は、鉛直方向の気流の乱れの強さを表し、これ以降 $\sigma_w/\bar{u}$ を相対乱流強度と呼ぶ。次に、DBSAS と EC の消散率比 $\varepsilon_{SAS}/\varepsilon_{EC}$ および $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ が、平均風速で標準化した相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ の増加に対して漸近的に減少する関係を図 2.7 に示す。DBSAS による消散率が EC による消散率

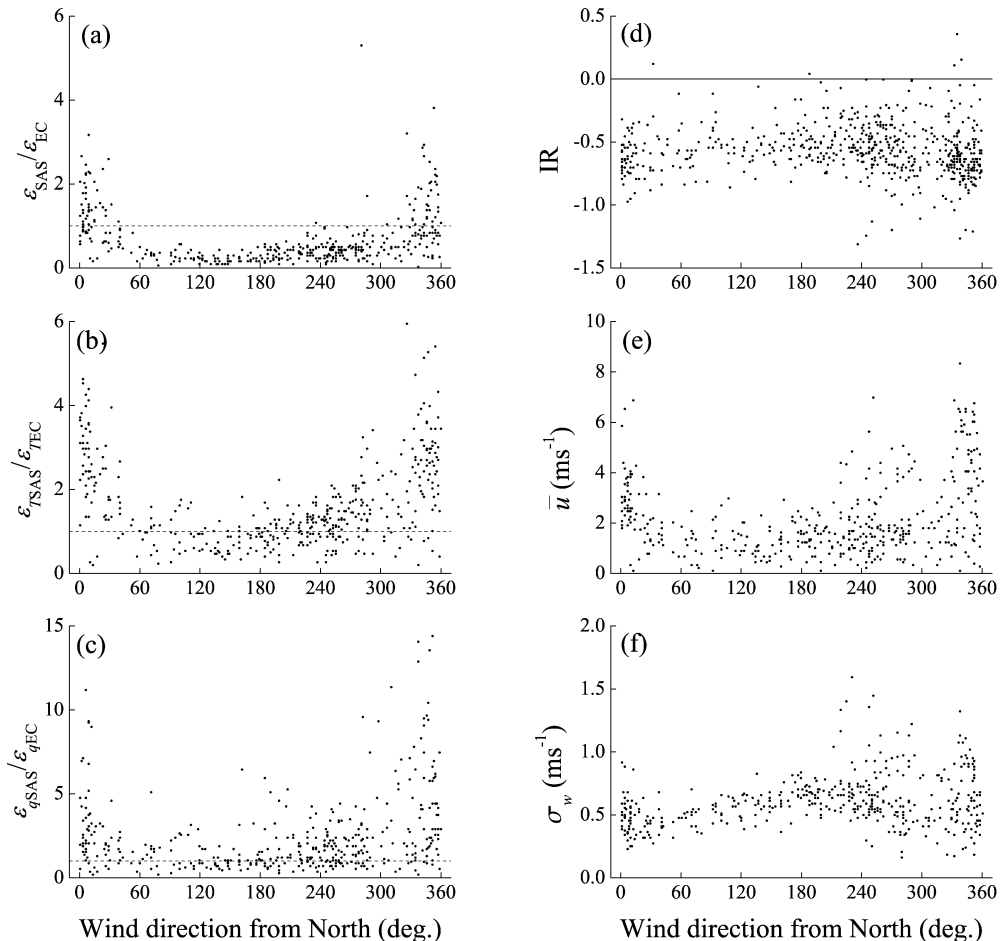


図 2.6 風向に対する観測値の分布：(a)DBSAS と EC 間の TKE 消散率の比 $\varepsilon_{SAS}/\varepsilon_{EC}$, (b)温度変動の消散率の比 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$, (c)比湿の消散率の比, $\varepsilon_{qSAS}/\varepsilon_{qEC}$, (d)インバランス率 IR, (e)平均風速 $\bar{u}$, (f)鉛直風の標準偏差 σ_w 。

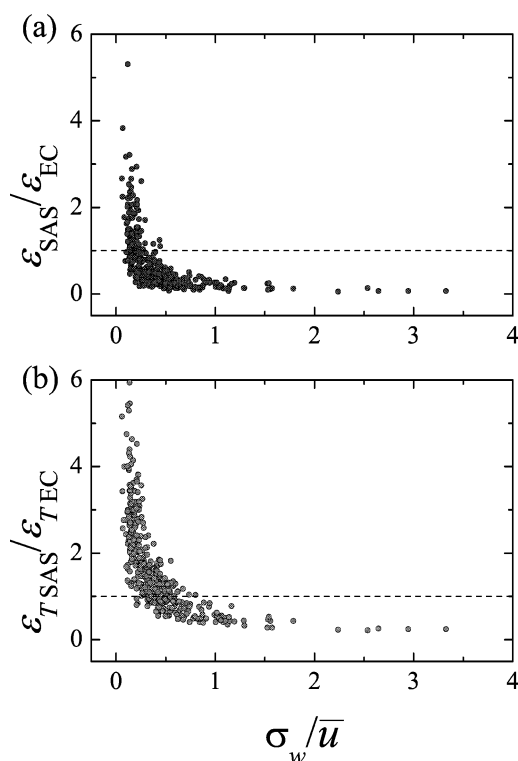


図2.7 シンチロメータ (DBSAS) および渦相関 (EC) センサ間の消散率比と相対乱流強度の関係。(a) TKE, (b) 温度。

を上回るのは、風速が大きく相対乱流強度が小さい条件下で、一方風速が小さく相対乱流強度が大きい場合には EC による消散率が DBSAS を上回った。そして、その境界的な $\sigma_w/\bar{u}$ の値は、約 0.3–0.4 であった。

熱フラックス測定におけるエネルギーインバランス

ここで、フラックス測定におけるインバランス率 IR を次のように定義する。

$$IR = \frac{(H + LE + J - R_n)}{R_n} \quad (2.19)$$

ここで、 $R_n (\text{Wm}^{-2})$ は放射計によって得られる純放射量で、 J は林冠気層に蓄えられる貯熱変化量と潜熱の和で表される ($J = z_m \rho C_p \Delta \bar{T} / \Delta t + z_m \rho l \Delta \bar{q} / \Delta t$)。貯熱変化量には、このほかに地中伝熱と植物地上部の貯熱変化があるが、ここでは測定値が得られていない。これらは森林内では値が小さく、最大でも ± 数 10 Wm^{-2} 程度と⁷言われているが、乱流フラックスの値が小

さい時間帯によってはインバランスに大きく寄与する可能性はある。式 (2.19) では、乱流フラックスが純放射量を上回ると IR が正の値をとる。DBSAS と EC 間の消散率比は TKE および温度変動に関して共に北風の際に大きな値を示す傾向があった (図 2.6a, b, c) のに対し、IR は北風時に大きな分散を見せる傾向はあるが、消散率比ほどの明確な風向依存性は見られなかった (図 2.6d)。フラックス測定における熱収支の整合は、フラックス測定の妥当性を示す指標の一つと考えられる。厳密な熱収支解析を行うには、地中伝熱など今回考慮しなかった貯熱項を考慮する必要があるが、EC 法に基づくインバランスにも、風向依存性が見られたことは興味深い。

渡辺・神田¹⁵；神田他¹⁶ は LES (large eddy simulation) を用いた接地境界層の数値実験を行い、理論的に均一な場においても組織的な乱流構造が発生し、単一タワーで実施される EC 法におけるインバランスを引き起こすことを示した。彼らは熱フラックスの過小評価が平均鉛直流の増加に応じて過大評価に転じる現象を示した。そして、組織的な乱流構造の影響を減らし、空間平均されたフラックスをタワー観測によって得るためには、多点の同時測定が必要であると結論づけた。DBSAS と EC センサによる消散率の大小が相対乱流強度 (平均風速で標準化した鉛直風変動) に応じて逆転する現象 (図 2.7) を、渡辺・神田¹⁵ および神田他¹⁶ が示した乱流強度とインバランスの関係に対応させると、相対乱流強度は組織的な乱流構造に、消散率比はインバランスに対応する尺度として考えることができる。DBSAS は EC センサに比べて空間平均された乱流信号を得られると期待されている。異なる特性を持つ 2 種類のセンサの出力を比較することにより、林冠上気層における乱流輸送構造の不均一さを支持する結果が得られた。

2.5.2 EC および DBSAS によるフラックス算定

DBSAS によるフラックス算出の第 2 ステップは、消散法の適用によって TKE およびスカラー変動の消散率から各種フラックスを計算す

る。本小節では DBSAS 由来のフラックスの特徴について議論し、フラックス算出過程の不確定さにも言及する。

無次元消散率

消散法によるフラックス算出過程では無次元消散率が安定度パラメータの関数として一意に表される必要がある。森林上の Monin-Obukhov 普遍関数は、裸地や草地などの地表面で得られた結果に比べて大きなばらつきを持ち、その関数形も異なると言われている¹³。無次元消散率についても同様のことが予想された。EC センサによる測定値から算出した無次元消散率(ϕ_ϵ , $\phi_{\epsilon T}$, ϕ_{eq} , ϕ_{ec})と大気安定度パラメータ ζ との関係を図 2.8 に示した。 ϕ_ϵ は、これまでに経験的に求められた主な普遍関数モデルのラインを境界として、より値の大きな領域に分布した。一方、 $\phi_{\epsilon T}$ はモデルが示すラインを中心に分布したがばらつきが大きい。 ϕ_{eq} , ϕ_{ec} はさらに広く分散した。これら観測値から導いた無次元

消散率と普遍関数との差異が、フラックス計算値にどのように影響するのかを調べるために、通常の計算条件の結果を基準値として、TKE の無次元消散率 ϕ_ϵ および温度変動の無次元消散率 $\phi_{\epsilon T}$ をそれぞれ単独で変化させ、摩擦速度および顕熱フラックスの変化を比較した (図 2.9)。その結果、 ϕ_ϵ が基準値 (普遍関数値) より小さい場合、 u_* および H は基準値より大きく、 ϕ_ϵ が基準値を超えると、 u_* および H は小さくなった。しかも、 ϕ_ϵ に対する応答は、 H に比べて u_* が大きく、より敏感であることが分かった (図 2.9A)。 $\phi_{\epsilon T}$ と H も同様の関係にあったが、 u_* は $\phi_{\epsilon T}$ が変化しても一定である (図 2.9B)。

しかし、観測値から導いた無次元消散率と従来の普遍関数が一致しないからといって、森林上で MOST が成立しないということを短絡的に導くことはできない。単一のタワーでの測定で得られた乱流信号には何らかのバイアスがか

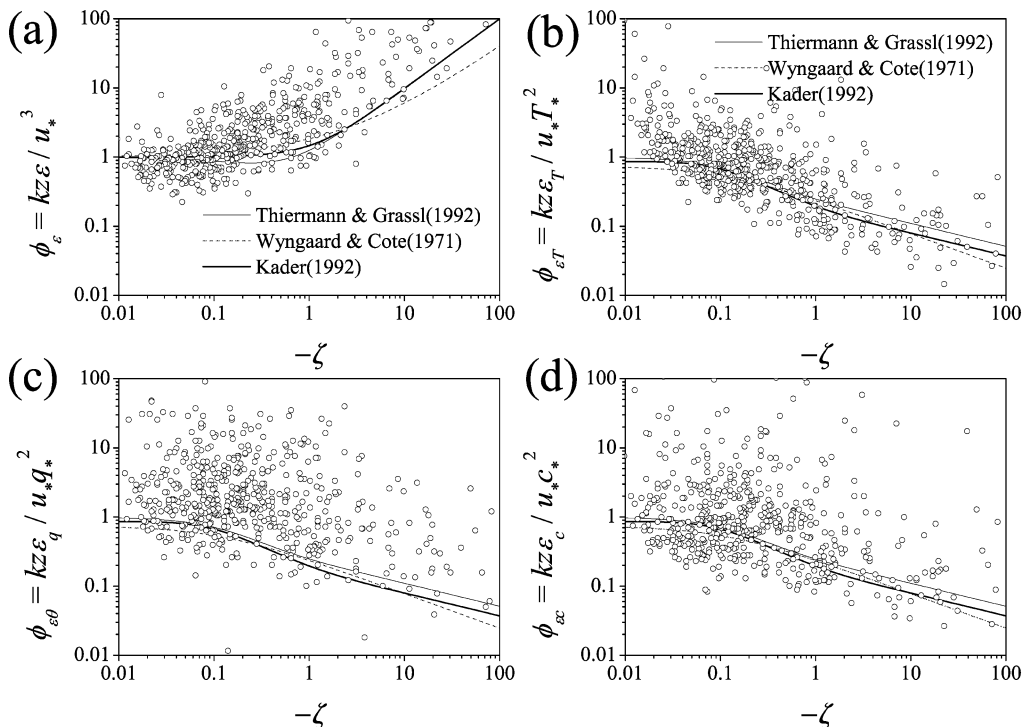


図 2.8 不安定条件下での、渦相関センサによる無次元消散率と大気安定度パラメータ ζ の関係。(a) TKE ϕ_ϵ , (b) 温度変動 $\phi_{\epsilon T}$, (c) 比湿変動 ϕ_{eq} , (d) CO_2 密度変動 ϕ_{ec} これまでに発表された経験関数も示す。

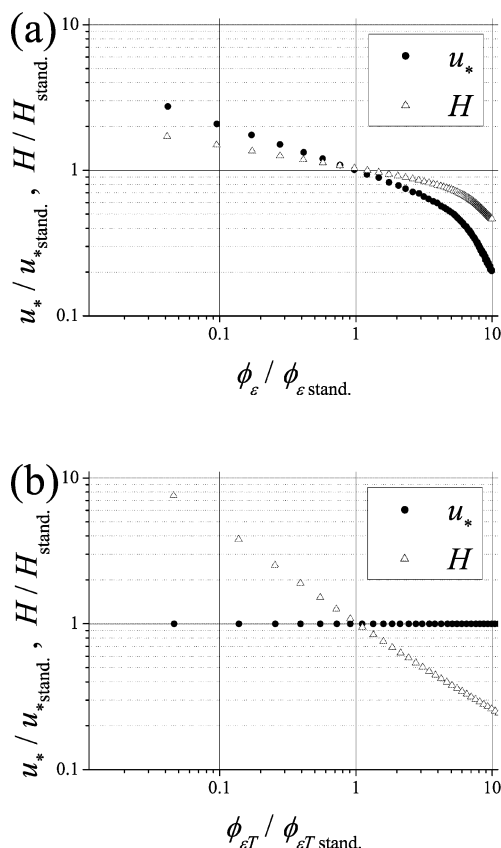


図 2.9 (a) TKE の無次元消散率 ϕ_ϵ および (b) 温度変動の無次元消散率 $\phi_{\epsilon T}$ の変化に対する摩擦速度 u_* および顕熱フラックス H の変化。通常の計算条件の結果 (2002 年 6 月 10 日 10 時から 30 分間を対象) を基準値とした比で表した。各軸における 1 が基準値 (添え字 stand.) に相当する。

かっている可能性がある。また, Simpson et al.¹³ は, 林冠上の異なる高度において, EC 法と傾度法 (MOST に基づく測定手法) を比較した。その結果, 林冠高さの 1.9–2.2 倍では EC と傾度法が良く一致する一方で, 林冠の 1.2–1.4 倍の測定高さでは EC と傾度法の差異が大きくなった。軽井沢サイトの測定高さは, 林冠の 1.6–1.8 倍にあたることから, より高い位置での測定によって MOST の適用性が向上する可能性もある。

DBSAS による構造関数定数への水蒸気影響

EC センサによる温度と比湿の分散比 σ_T^2 / σ_q^2 を用いて, 式 (2.10) により DBSAS による ϵ_{TSAS}

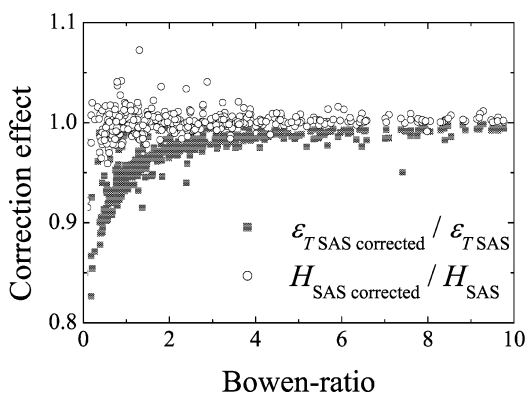


図 2.10 DBSAS による温度変動の消散率 ϵ_{TSAS} および顕熱フラックス H_{SAS} における水蒸気補正効果。

を補正した効果は, Bowen 比が 0.5 以下の条件で最大で 15% に相当した (図 2.10)。この結果は, Bowen 比が低い条件で, 単色光源の DBSAS を用いる際には, 水蒸気の影響を考慮する必要性を示す。Green and Hayashi⁴¹ は蒸発量が非常に大きい地表面である水田に LAS を適用し, 水蒸気による影響が無視できるとの仮定に基づいて ϵ_T を算出しなければならない単色光源シンクロメータを低 Bowen 比の条件で用いる場合には, 何らかの水蒸気補正が必要であると述べている。一方, 顕熱フラックスにおける水蒸気補正効果は 5% にとどまった。フラックスを算出するために行った非線形連立方程式の繰り返し計算の中で, 無次元消散率 $\phi(\zeta)$ やゼロ面変位 d_0 などの不確定要素が加わってそれぞれの要素の影響が相殺された結果, 顕熱フラックスへの水蒸気影響が消散率に比べて小さくなったものと推察される。EC センサーと DBSAS ではソースエリアが異なると考えられるため, 両センサの出力を組み合わせた補正方法は, 条件によっては精度向上につながらないことも考えられる。しかし, 低 Bowen 比条件には明らかに水蒸気の影響を受ける。加えて, この方法によって比湿に関する構造関数定数 C_q^2 が得られる。

EC および DBSAS によるフラックスの比較

DBSAS 法および EC 法によって得られたフラックス測定値を比較する。摩擦速度 u_* では, 約 0.4 ms^{-1} を境に, それより大きい領域では

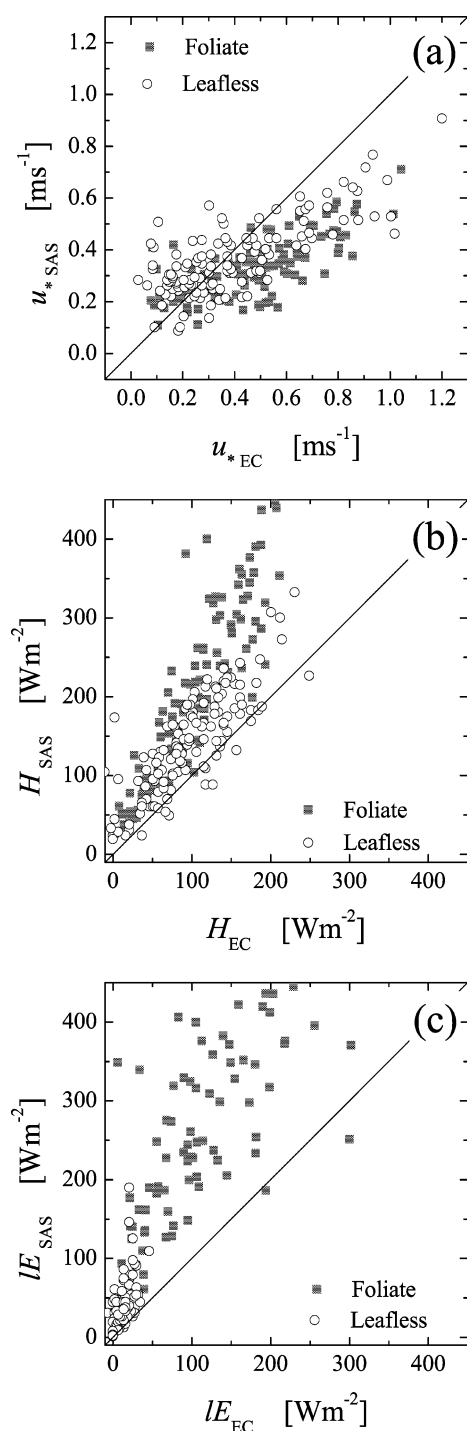


図 2.11 DBSAS および EC によるフラックスの比較。(a) 摩擦速度 [$u_{*EC} : u_{*SAS}$], (b) 顕熱フラックス [$H_{EC} : H_{SAS}$], および (c) 潜熱フラックス [$IE_{EC} : IE_{SAS}$]. 着葉期および落葉期のデータを区別して表示した。

DBSAS 法が EC 法に比べて小さい値を出力する傾向があった (図 2.11a)。同じメーカーの DBSAS を草地に適用した例⁵³でも、同様の傾向が報告されているが、筆者らの結果は更に DBSAS の結果が EC の結果を下回る傾向を示した。図 2.9 に示したように、TKE 無次元消散率 ϕ_e が普遍関数より大きいと u_* は小さく計算される。DBSAS においても EC 法と同様の無次元消散率のバイアスが働いている可能性はある。

ただし、 u_* が $0.4 ms^{-1}$ よりも小さい領域では DBSAS による評価値が EC より大きい。EC 法による u_* が小さい状況で DBSAS 法による評価値が大きくなる傾向は、DBSAS がより空間平均された値を検出した効果と考えることができる。局所的に大気乱流が乏しい場合でも、空間的には十分な乱流輸送が存在する可能性は否定できない。特に長期間に渡るフラックス測定の際に行われる QC (quality control) では、乱流状態が乏しいことを理由として u_* が小さい状況のデータを棄却することが行われている^{54;55} が、このような場合には QC によって新たなバイアスが生じると考えられる。一方、顕熱フラックス H および潜熱フラックス IE に関しては DBSAS による値は EC による値より大きくなる傾向があった (図 2.11b, c)。 H や IE が大きくなるほど差が大きくなるのは u_* とは逆の傾向である。式 (2.16) 内で用いられる無次元消散率と実測値との乖離 (図 2.8) が原因の一つとして考えられる。また、DBSAS によるスカラーフラックスが大きくなる傾向は相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ が 0.5 より小さい領域での消散率の過大評価に起因する (図 2.7a)。TKE 消散率についても $\sigma_w/\bar{u}$ が 0.2 より小さい領域で DBSAS の結果が大きくなる傾向があるが、全体的には EC センサによる TKE 消散率の方が大きい (図 2.7b)。また、図 2.11 には 7 月以前の林冠に葉がある着葉期のデータと、11 月以降の非着葉期のデータを区別して描画した。 H 、および u_* のデータは、葉の有無で明らかに異なる傾向を示し、DBSAS 法の結果と EC 法の結果の差異は着葉期においてより大きかった。この原因の一つとして、葉によって粗度が

変化したことによりゼロ面変位 d_0 が実質的に変化したことが考えられる。消散法では d_0 を一意に与える必要があるため、ゼロ面変位が変化するような地表面に適用する際には注意が必要である。

2.5.3 林冠上に適用した DBSAS の系統誤差

摩擦速度 u_* が大きくなるほど DBSAS 法による u_* は EC 法の結果を下回る傾向があった。De Bruin et al.⁵³ は、DBSAS は u_* が 0.2 ms^{-1} 以下で EC 法の結果より大きくなる一方で、平均風速 $\bar{u}$ が大きな条件では EC 法の結果を下回る傾向があったことを述べている。そして、DBSAS の測定原理では、 u_* は内部スケール l_0 から導かれるものであり、EC と DBSAS の u_* の不一致は DBSAS の系統的なエラーによる可能性があるとして主張した。シンチロメータを用いたフラックス算出過程の複雑さを考慮すると、系統的错误の原因を詳細に探ることは多大な労力を要し、本論の目的からも逸脱する。ここでは、もっとも可能性の高い誤差要因について議論する。まず考えられるエラー要因は、風によって引き起こされるセンサの振動による u_* 過小評価である。トランスミッタの振動がフラックス測定値に与える影響について Thiermann and Rummel⁵⁶ が検討している。振動の増加に従って相関係数 r_{12} が増加し、 u_* が過小評価されると仮定して、De Bruin et al.⁵³ は風速を変数とした r_{12} の補正方法を提案した。それに対し、筆者の結果では DBSAS と EC 間の消散率比について明確な風速依存性が見られず、センサの振動がエラーを引き起こしていると主張するに足る根拠は得られなかった。

次に考えられるエラー要因は、測定装置固有のスケール定数である。Hartogensis et al.²⁶ はビーム間距離 d を 2.7 mm から 2.6 mm に変更することで、式 (2.3) における加重関数 $W(k)$ が変化し、DBSAS と EC の間で u_* がよく一致することを示した。 d に対する DBSAS 測定値の感受性の高さが示された結果である。 C_f^2 が d によって変化しないため、 u_* が増加することによってスカラーフラックスの測定値は減少する。 d はビームスプリッタのオフセット

であるが、メーカーはその精度が 0.1 mm であると述べている。従って $\Delta d = 0.1$ の調整はメーカーが提示した仕様の範囲内である。そこで、 d の長さを 0.1 mm 減らして 2.6 mm とすることで再計算を行った。その結果、DBSAS と EC 間の u_* の値が近づく傾向が見られたが、両者が一致するに十分ではなかった (図 2.12)。装置特有の定数は製造過程において装置ごとに定められているが、仕様精度内の調整であっても u_* の測定値に影響を与えることが確認された。し

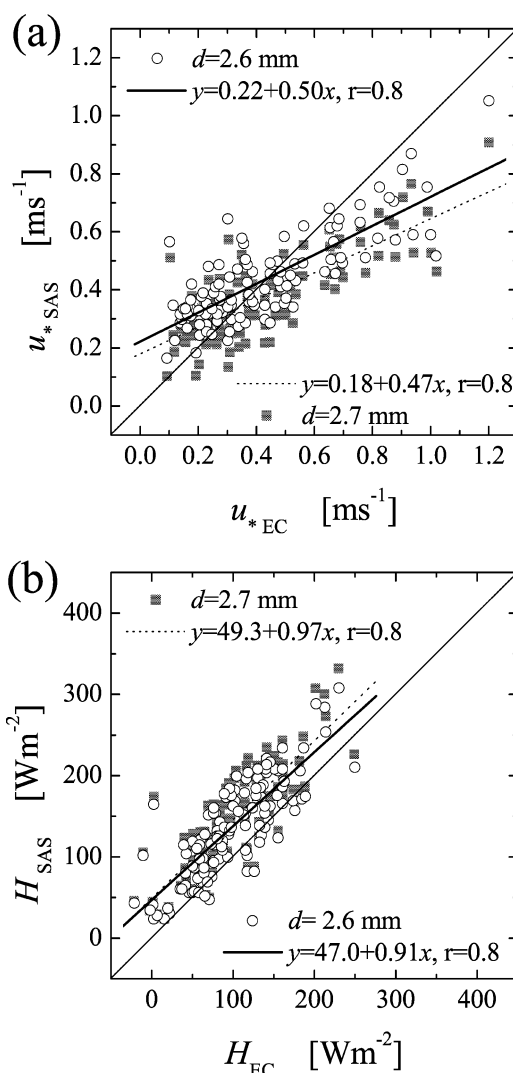


図 2.12 (a)摩擦速度 u_* および(b)顕熱フラックス H に対するビーム間距離 d の調節効果。非着葉期を対象として計算。

かし、 d の調整だけでは、DBSASによる u_* がEC法の結果に対して小さくなるセンスを十分に説明できない。DBSASによる u_* の過小評価はセンサおよびフラックス算出手法の系統的（避けられない）エラーにのみ起因するものではなく、大気乱流の状況など他の要因があることがわかった。

2.6 結 論

大気不安定条件の下、林冠上におけるDBSASとECとの測定値の比較を行った。DBSASとECによって測定されたTKE消散率の比 $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ および温度変動の消散率の比 $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ は、相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ に対して漸近的に変化した。熱収支の整合性から判断して、この現象はDBSASがより空間平均的な乱流信号を検知することによってもたらされたと推察された。フラックス算出においては、特に2つめのステップである消散率からMOSTの適用によってフラックスを算出する過程での不確定要素が大きかったが、直ちに林冠上でのMOST不成立を示すものではなかった。異なるソースエリアを持つセンサ間の比較によって、フラックス測定の妥当性検証が行える可能性が示された。

第3章 シンチロメータによる 空間平均効果の確認

3.1 概 要

本章では、温度変動の消散率について、小口径シンチロメータ（DBSAS：displaced-beam small aperture scintillometer）および渦相関（EC：eddy-covariance）法の出力値を比較した。その結果、異なるセンサによって得られた消散率の比は大気の鉛直方向の機械的攪拌に関連づけられる相対乱流強度および風向に対して変化することがわかった。また、DBSASとEC間の消散率の差異が大きいほど、フラックス測定の妥当性の指標であるエネルギーインバランスが大きく、ECによる測定誤差が大きいことが示唆された。鉛直方向の機械的攪拌が小さい状況でも、DBSASはローカルな鉛直移流項の影響を受けにくかった。こうした現象は、林冠上の大気に大規模で定常的な組織乱流構造

（TOS：turbulent organized structure）が発達することによってもたらされると推察された。そこで、シンチロメータを設置した2基のタワー頂上で実施した2組のECシステムの測定値を比較したところ、地形的な要因および大気乱流の状態に起因する明らかな空間的差異が認められた。フラックス測定値の空間的差異が大きくなるほど、フラックス測定の妥当性の指標である熱収支は閉じにくく、森林上で渦相関センサのソースエリアよりスケールの大きなTOSが発生するという仮説を支持する結果であった。次に、DBSASの領域平均化効果を更に確認するために、道路上に停車した高所作業車を第3のタワーとして用いることで、2組のDBSASを用いた直交2パスの同時測定を実施した。その結果、測定パスが長くなり、フラックス測定のソースエリアが大きいほど、温度変動の消散率が大きくなる傾向が見られた。温度変動に限定されるが、DBSASの空間平均化効果はソースエリアの大きさに一因があると考えられた。フラックス測定のソースエリアが広いことから判断して、森林上に適用したDBSASはより空間平均された乱流信号を検出することが確認された。さらに、現在最も実用的な乱流フラックス測定手法である渦相関法の信頼性を高める、シンチロメータを活用した補正法を考案し、乱流フラックス測定における妥当性の検証においても有用であることを確認した。

3.2 はじめに

水平方向に均一な森林では、空間的に平均された乱流フラックスを長期的に測定するために、単一のタワーにおいて渦相関法（EC）が用いられるのが一般的である。顕熱フラックス H と潜熱フラックス LE が適切に評価されていれば、フラックスに基づく熱収支は整合する。しかし、実際には放射計の出力と乱流フラックスを含む熱収支式が整合しない例が、特に背の高い植物で構成される森林において多く報告されている⁸。このフラックス測定のインバランス問題は、乱流フラックスの測定の精度的な不確定さが原因であると考えられている。

インバランス問題を引き起こす要因の一つは測定条件に関するもので、装置の設置条件や測

定誤差などが考えられている（例えば, Moore et al.⁹; Mahrt¹¹; Massman and Lee⁵⁷）。これらは、緻密な測定計画や運用によって回避可能であると言える。一方、林冠上に発達する Roughness sub-layer (RSL) における乱流構造に起因する要因は、EC の測定原理に関わると共に、乱流信号の空間的な偏差や代表性問題そのものである。Katul et al.¹¹ は、7つのタワーを用いた検討により、均一な森林上にもかかわらずフラックス測定値に明らかな空間偏差が存在することを示した。Kanda et al.⁵⁸ は、large-eddy simulation (LES) を用いた数値実験によって、均一な常時加熱状態の地表面において組織的かつ定常的な乱流構造 (TOS: turbulent organized structure) が生じ、単一タワーによる測定では負のインバランスが必然的に起こる現象を示した。そして、領域の平均フラックスを取得し、フラックス測定におけるエネルギーインバランスを解消するためには、複数タワー測定など、水平方向に分散した観測網が必要であると結んだ。Oren et al.⁵⁹ は、時間解像度の高い (<1 hr) フラックスでは、タワー間の差異が大きく、フラックス算出の際の平均化時間を長時間にすることで、フラックスの空間的な差異が減少することを、6カ所のタワーを用いた観測を通して示した。

上記の乱流構造がインバランスの主要因と仮定すると、フラックス測定のソースエリアが広域であればあるほど、その測定値は領域平均値に漸近すると考えられる²⁸。商品化されている小口径シンチロメータ (DBSAS) はトランスミッタとレシーバによって光学的に乱流の内部スケールを測定する装置である。トランスミッタとレシーバの距離を 50 から 250 m までとることができる。DBSAS によって従来の EC センサに比べて空間的な平均値が測定できると考えられる⁵³。DBSAS は摩擦速度 u_* および顕熱フラックス H の算出に必要なパラメータである乱流運動エネルギー (TKE) 消散率 ε および温度変動消散率 ε_T を出力する。前章では、森林上に設置した DBSAS および EC の大気不安定時の測定値を比較し、DBSAS による H および IE が EC の出力を上回る傾向があることを見

いだした。 H および IE が大きく評価される傾向は、熱収支式を整合させるように働く。

本節の目的は、エネルギーインバランスを引き起こす主な原因と推察される林冠上の組織的乱流構造が成立していることを実証的に明らかにすることである。そして、エネルギーインバランスを指標として、DBSAS によるフラックス測定における空間平均化効果を明らかにする。

3.3 理論的背景

接地境界層において乱流統計量に時間的変動と空間的変動があるとする、領域を代表するフラックスを得るためには時間および空間的な平均が必要である。タワー観測において渦相関システムによって測定される乱流信号は、ある起源領域 (ソースエリア) 内の空間平均値であり、その時間平均値から時空間平均値を計算する。しかし、渦相関システムのソースエリアが小さい場合、本来知りたい空間平均値との間に差異が生じる。このため、広域の空間平均フラックスを得るためには複数タワーの同時測定が必要である。航空機による空間平均値に基づくフラックス測定では厳密な意味での時間平均値を得ることはできない。DBSAS は単一タワーを使用する手法に比べて空間的に平均された信号を検出することができる。本節では、森林上での熱フラックス観測の妥当性はエネルギー収支によって定義されたとする。そして、DBSAS からフラックスを算出する手順を述べ、最後に EC の出力との直接比較法について述べる。

水平一様な地表面において、上下方向の定常流がない状態では、時間平均および空間平均の乱流フラックスは風速の鉛直成分 (w) とスカラー量 (s : temperature, vapor, CO_2) によって次のように記述される。

$$\bar{F} = \overline{ws} + \overline{w's' s'} \quad (3.1a)$$

$$[F] = [w's's']. \quad (3.1b)$$

ここに、 $(\overline{\quad})$ および $([\quad])$ は、それぞれ時間および空間平均を表し、添字 ($'$) は平均値からの変動、添字 t と s は時間的および空間的変動を表す。上下方向の定常流がないことが前提な

ので、 $\overline{w's'} = \overline{s'} = [w] = [w's'] = [s'] = 0$ の関係がある。式(3.1a)の右辺第1項 $\overline{w\bar{c}}$ は、ある点でのローカルな鉛直平均流に駆動される鉛直移流を表す。第2項 $\overline{w's'}$ は、乱流変動項である。大局的に上下方向の定常流がない状況 ($[w]=0$) においても、ある点でのローカルな鉛直平均流 $\bar{w}$ は値を持つ。従って、ローカルな鉛直移流項を無視することはできず、正しいフラックスは信号の時系列だけでは評価できないことになる。単一タワーにおける渦相関システムで、ソースエリアが小さい場合、 $\overline{w's'}$ を測定していると見なすことができる(図3.1a)。その場合、対流の卓越する大気不安定状態では、単一タワーで測定される熱フラックスは系統的に過小評価となる。これまでに、単一タワーでのローカルな鉛直移流項に関する評価が精力的に行われてきており、総フラックス $\bar{F}$ に対する鉛直移流項の寄与が、大気乱流の状態によって変化することが示された (Lee⁶⁰; Mahrt¹¹)。対して、ある時点における空間平均フラックスは乱流変動項のみを用いて表される。領域を代表するフラックス

は、式(3.1a)の空間平均 $[\overline{w's'}]$ によって(図3.1b)、あるいは、式(3.1b)の時間平均 $[\overline{w's's}]$ によって得られる。式(3.1a)内のローカルな鉛直移流項は、空間平均によっても完全に消えることはないがほとんど相殺される。その結果、乱流相関項の値が大きくなりインバランスが緩和されることが Kanda et al.⁵⁸ に述べられている。これらのことから、フラックス測定値の領域代表性は複数タワー観測によって向上すると言える。

Lee⁶⁰ は、測定高さまでのスカラープロファイル s の積分値と鉛直平均流を用いて、ローカルな鉛直移流項を次のように求めた。

$$\overline{w's} = \bar{w} \left[\bar{s}_z = z_m - \frac{1}{z_m} \int_0^{z_m} s dz \right] \quad (3.2)$$

Finnigan⁶¹ は、Leeの方法に対して、水平移流 (e. g. drainage flow) も EC 法によるフラックス測定に影響を与えるため、2次元、3次元のエネルギー収支解析が必要だと指摘した。しかし、Leeの鉛直積分による移流項の算出法は、単一のタワーにおける測定では有効である。ここから、単一タワーでの EC システムによる時間平均フラックスについて議論する。乱流フラックス測定によって顕熱フラックス H (Wm^{-2}) および潜熱フラックス LE (Wm^{-2}) が正しく評価されていれば、それらと純放射量 R_n (Wm^{-2})、地中貯熱変化量 G (Wm^{-2})、生態系貯熱変化量 S_b (Wm^{-2}) との間で熱収支が成立する。すなわち、

$$R_n = S_b + G + H + LE + V \quad (3.3a)$$

$$R_n = S_b + G + \rho c_p \overline{(w'T')} + \rho l \overline{(w'q')} + V \quad (3.3b)$$

$$V = \rho \bar{w} \left[c_p \bar{T} + l \bar{q} - \frac{1}{z_m} \int_0^{z_m} (c_p \bar{T} + l \bar{q}) dz \right] \quad (3.3c)$$

$$S_b = \rho c_p \int_0^{z_m} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} dz + \rho \lambda \int_0^{z_m} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} dz \quad (3.3d)$$

上式中の V (Wm^{-2}) は移流フラックス、 T (K) は温度、 ρ (kgm^{-3}) は空気密度、 q は比湿、 c_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) は空気の定圧比熱および λ (Jkg^{-1}) は水の蒸発潜熱である。本章では S_b は林冠内の大気貯熱変化量と定義する。フラックス測定の

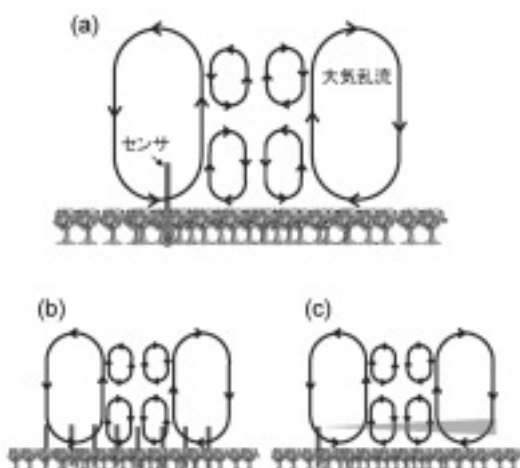


図3.1 フラックス測定に及ぼすのTOSの影響の概念図。(a)ソースエリアよりも大きい定常的な組織乱流構造 (TOS) がある場合には、全てのスケールの渦がセンサを通過することができないため、乱流変動項だけでは全てのフラックスを評価できない。(b)多点観測による平均値、あるいは(c)広域の空間平均値を測定できるセンサの利用によって取得した乱流輸送項は、総フラックスに近づく。

エネルギーインバランスは、式 (3.3a) の右辺と左辺が釣り合わない問題である。これ以降、エネルギーインバランス率を

$$IR = (H + IE + S + V - R_n) / R_n, \quad S = S_b + G \quad (3.4)$$

と定義し、タワーでのフラックス測定の妥当性指標として用いる。この指標は前章および Nakaya et al.²⁷ 内の IR と本質的に同じであるが、ローカルな鉛直移流項および地中貯熱項が加わっている。鉛直移流 V を計算するために、EC センサによる $\bar{w}$ を用いる。このため、単体のタワーにおけるフラックス観測では、超音波風速計による $\bar{w}$ の測定誤差や、Finnigan⁶¹ が指摘した水平移流の寄与などが、 V を評価する上での誤差要因や限界となりうる。

3.4 観測方法

DBSAS によるフラックス算出は、風速およびスカラー変動の消散率からモーメントおよびスカラーフラックスを導く消散法に基づく⁶²。前章で述べたように、我々の用いる DBSAS は、乱流の内部スケール l_0 および温度変動の構造関数定数 C_2^2 を測定する装置である。それぞれのパラメータは乱流運動エネルギー (TKE) 消散率 ε と温度変動消散率 ε_T に換算され、摩擦速度 u_* および顕熱フラックス H

が計算される。注意しなくてはならないのは、消散率によってフラックスを算定する際にはいくつかの不確定要素が存在することである。消散率によるフラックス算定は Monin-Obukhov 相似則 MOST の成立が不可欠であるが、林冠上の RSL (Roughness sub-layer) での MOST の成立性は確認されていない。林冠上の風速プロファイルにおけるゼロ面変位を別途定める必要がある。また、正負の符号が異なる 2 種類のフラックスが計算されるため、どちらのフラックスを採用するか、何らかの手段で判断する必要がある。Scintec のマニュアルでは、別途傾度法などを実施してフラックスの正負を判定するように推奨している。前章では、消散法の基本パラメータである消散率同士を比較することが、EC と DBSAS の測定値の特性を比較する上で不確定要素を減らし、より本質的な議論を可能にすることを示した。なお、消散率の比較においては、消散率自体が正の値をとるため、フラックスの符号は考慮する必要はない。そこで、本節では、(1) EC センサと DBSAS の間での TKE および温度変動の消散率、(2) 2 基のタワーでの EC フラックスおよび (3) 異なるパス設定の DBSAS 間の消散率を比較を通した検討を行う。

軽井沢サイト (図 3.2) では、常設のタワーと

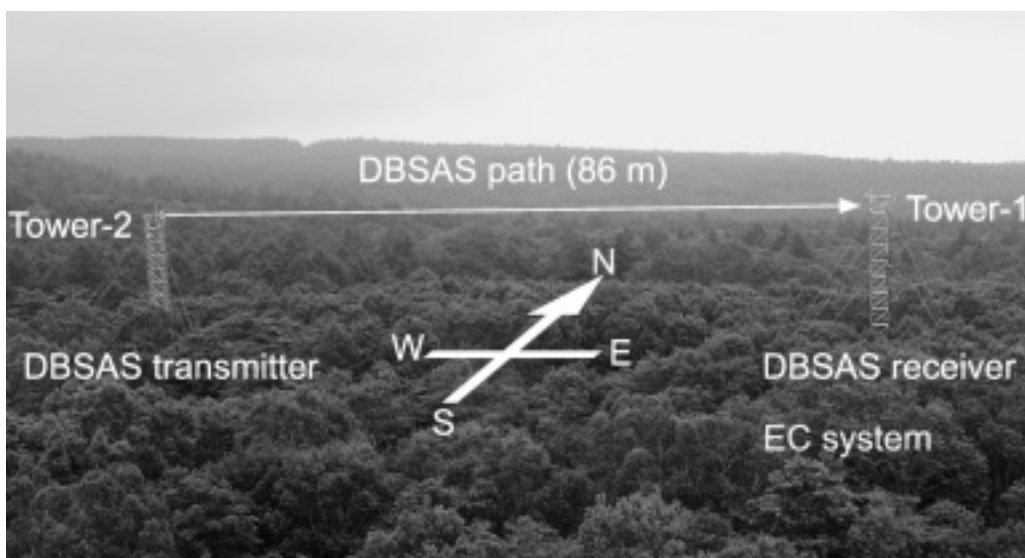


図 3.2 軽井沢サイトの概観と、フラックス測定装置の配置。

して地上高 28 m の鋼製足場材組上げタワーが 2 基、東西方向に 86 m の間隔で設置されており、東側を Tower-1、西側を Tower-2 と呼ぶ (図 3.2 および 3.3)。DBSAS のパスはこのタワー間に設定されており、DBSAS (SLS40, Scintec AG, Germany) のトランスミッタを Tower-2 の塔頂に、レシーバを Tower-1 の塔頂に設置した。更に、もう一組の DBSAS を運用するために、第 3 のタワー (Tower-M) として、Tower-1 の南側 150 m の車道に、高所作業車を一時的に停車した (図 3.3, 3.4 および 3.5)。高所作業車のゴンドラをを地上高 27 m に掲揚し、DBSAS のトランスミッタを搭載することで、直交した 2 パスの DBSAS が設定できた。トランスミッタの角度を調節するために、遠隔操作できる 2 回転軸のターンテーブルに固

定した。ステッピングモータの最小動作角度は 0.05 mrad で、150 m 先では 7.5 cm の移動角度に相当する。直交 2 パス DBSAS の同時観測は、2005 年の 7 月中旬および 9 月中旬の、延べ 7 日間の昼間に実施した。

渦相関法の測定装置、測定項目およびデータ処理過程は前節と同様である。前節の測定項目に加え、林冠内大気中の貯熱量を評価するための、温湿度鉛直プロファイルを 5 高度 (28, 21, 17, 8.5, 3 m) に設置した通風温湿度計 (HMP45A; Vaisala, Finland) を用いて測定した。5 秒インターバルで測定した瞬時値の 30 分平均値を解析に用いる。地中熱流量は、地温プロファイル (-0.02 , -0.05 , -0.2 , -0.4 , -0.6 , -0.8 , -1.2 m) の経時変化と体積含水比プロファイル (-0.1 , -0.2 , -0.4 , -0.6

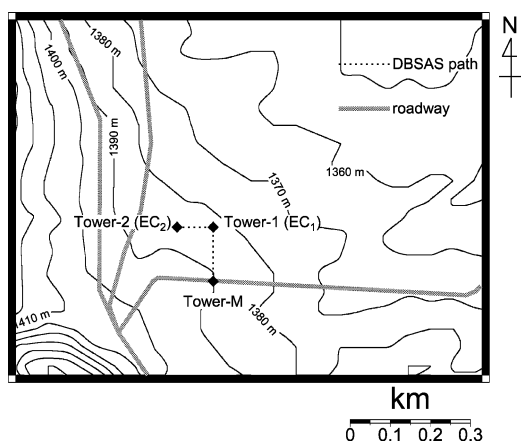


図 3.3 軽井沢サイトの地形と、DBSAS および EC センサの配置。

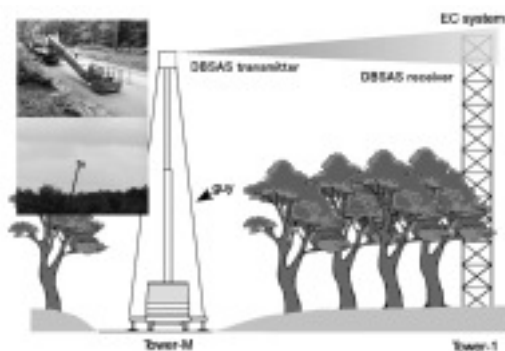


図 3.4 高所作業車を用いたシンチロメータ計測の概要。



図 3.5 高所作業車を用いたシンチロメータ計測の様子。(A)ターンテーブルにトランスミッタを固定 (手前は、遠隔操作用のコントローラ) および(B) Tower-1 に設置したレシーバから望むトランスミッタ。

m) の30分瞬時値から、広田他⁶³の方法に従って算出した。ECデータおよびDBSASデータのブロック平均時間は30分で、DBSASのデータプロセッシングは製造者であるScintecの提示する手法に従った。

DBSASおよびECのデータセットは以下のルールで作成した：解析対象は2002–2003の5月から11月の間および2005年の直交2パスDBSASの同時観測期間。昼間($\zeta < 0$)と夜間($\zeta > 0$)を区別し、前節と同様にDBSASが良好にデータ取得できる晴天日を選別した。大気安定度の符号でデータを区別したのは、無次元消散率(式(2.17))とフットプリント関数(3.5.7で後述する)において、 ζ の符号に対して異なる関数形をとるためである。光路の遮断や装置の振動などに起因すると思われるエラーを含んだデータは解析から除外した。フラックスや消散率で、渦相関法によって計算されるものには添え字に“EC”を用い、シンチロメータによるものには添え字に“SAS”を用いることは、前章と同様である。

3.5 結果と考察

3.5.1 単一タワーにおけるエネルギーインバランス

ECによって評価される乱流フラックスが、貯熱量や局所的鉛直移流フラックスを足しあわせても、純放射量に満たない負のインバランスが頻繁に見られた(図3.6)。式(3.3a)には、バイオマス貯熱(幹などによる貯熱)変化量が含まれていない。バイオマス貯熱変化量は短期の熱収支においては大きく寄与しうが、日単位では熱の吸収放出が相殺しほとんど無視できる。日積算値およびさらに長期間の収支においてもエネルギーインバランスが見られた(図示せず)ことから、バイオマス貯熱を考慮しなくてもエネルギーインバランスは明らかである。昼間では、式(3.3a)の右辺全体の93%を、ECによって測定される顕熱フラックスおよび潜熱フラックスが占めた。貯熱項およびローカル鉛直移流は多くても平均で7%程度であった。熱フラックスの総量が大きい場合には、その中で乱流フラックスの寄与が大きかった。熱フ

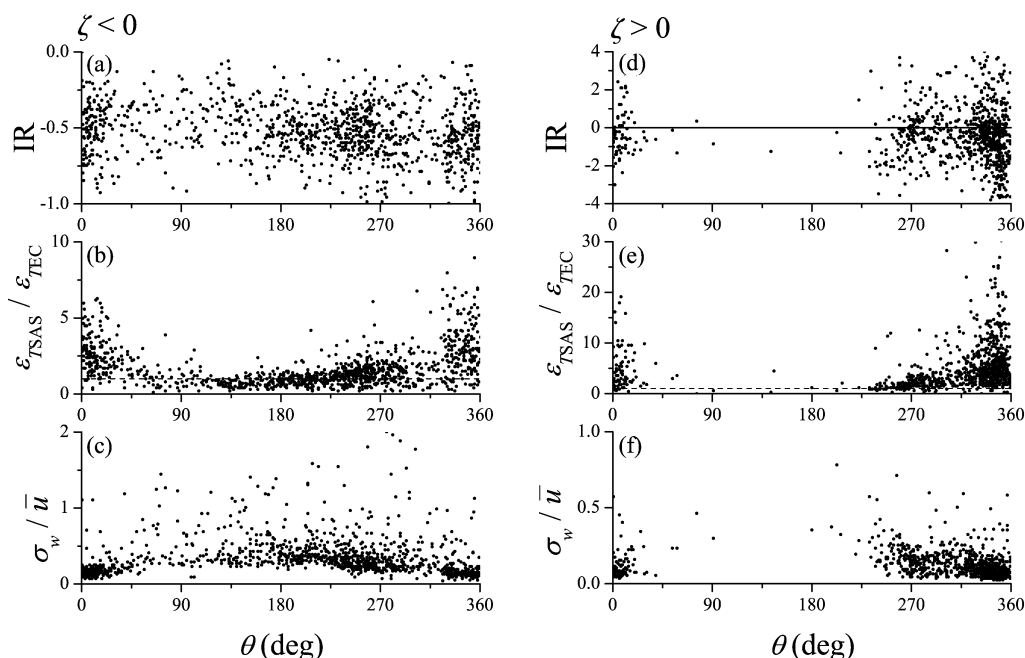


図3.6 不安定時($\zeta < 0$)および安定時($\zeta > 0$)における乱流統計量の風向依存性。
(a) (d)インバランス率IR, (c) (e)DBSASおよびECセンサ間の消散率比 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$, および (d), (f)相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ 。 θ は、北からの角度で表した平均風向(度)大気の安定度で区別して作画した。

ラックスの総量が小さい場合、時として貯熱項およびローカル鉛直移流は乱流フラックスと対等であったが、熱収支式においては乱流フラックスによる熱輸送がもっとも支配的であった。Lee and Hu⁶⁴が、インバランスの整合には鉛直移流項の算入が効果的であることを示したが、本結果では、インバランスが整合するにはローカルな($\bar{w}\bar{s}$)は未だ不足であった。LESによる数値実験の結果では、ローカルな鉛直移流自身に空間的な差異があり、フラックス測定ソースエリアの小さい単一タワーでの測定の場合、乱流フラックスの過小評価は避けられないことを示した⁵⁸。更に、実際の大気境界層においては、TOSが成立するとして水平方向の移流および発散を考慮に入れる必要がある^{64;65}。IRは大気が中立な状態でよりばらついた分布を示した(図省略)が、中立時は R_n が小さいことが多いことがばらつきの原因と考えられる。

3.5.2 DBSAS および EC による

消散率の特徴

DBSAS および EC センサによる測定値から得られた消散率は、それぞれのセンサの一次出力に近い。このため、各センサから得られた消散率を比較することで、センサの特性を明らかにすることができると考えられる²⁷。ここではまず、Tower-1 および Tower-2 間の DBSAS と EC センサについて、消散率と風速や安定度などの大気の状態とを比較した。その結果、DBSAS および EC センサによる消散率の比 $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ (Nakaya et al.²⁷ の Fig. 2a) および $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ には明らかな風向依存性が見られ、北風時には大きく、南風時には小さかった(図 3.6)。この消散率比は、平均風速、鉛直風変動、および平均風速で標準化した鉛直風変動 $\sigma_w/\bar{u}$ に対応したもので(図 3.6)、 $\sigma_w/\bar{u}$ は風向が 180 度の際に大きかった(図 3.6c)。図 3.7 に示すように、 $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ は相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ の増加に対して漸近的に減少した。 $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ においても同様の関係が見られた。 $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ および $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ が $\sigma_w/\bar{u}$ に対して類似した傾向を示すため、今後本章では、顕熱フラックス算出を考慮して $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ について議論を進める。相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ は、風速が大きい場合に小さな値

をとる傾向があり、対流が卓越する不安定時で $\bar{u}$ が小さく σ_w が大きい場合に大きくなる。さらに、 $\sigma_w/\bar{u}$ が最も大きくなるのは、中立時に $\bar{u}$ が小さくなる条件であった。 $\sigma_w/\bar{u}$ は、乱流の相対的な強さを表し、大気により混合された状況では EC センサによる消散率 (ε_{EC} および ε_{TEC}) は DBSAS の結果より大きくなる。

次に、消散率比の風速依存性に関する他の要因を調べるために、同一の $\sigma_w/\bar{u}$ 範囲に対する $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ を風向に対してプロットした(図 3.8)。風向 θ (degree) は、北風を基準として東、南、西の順に増加する。図 3.8 の横軸 $|\cos(\theta)|$ は、北-南の風向で 1 をとり、東-西の風向で 0 となる。 $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ は、風向が DBSAS のパ

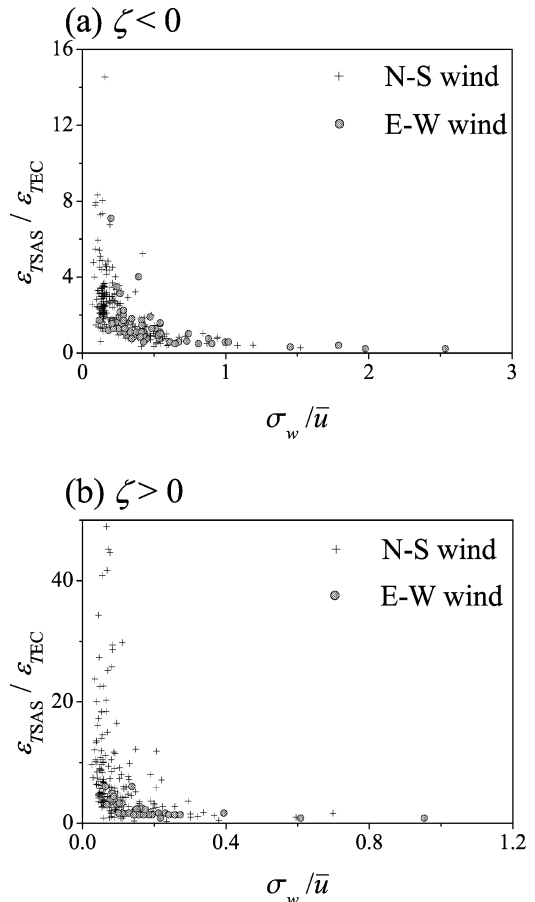


図 3.7 南北風 (N-S) と東西風 (E-W) に分類した相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ と DBSAS と EC 間の温度変動の消散率比 $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ の関係。(a) 不安定時, (b) 安定時。

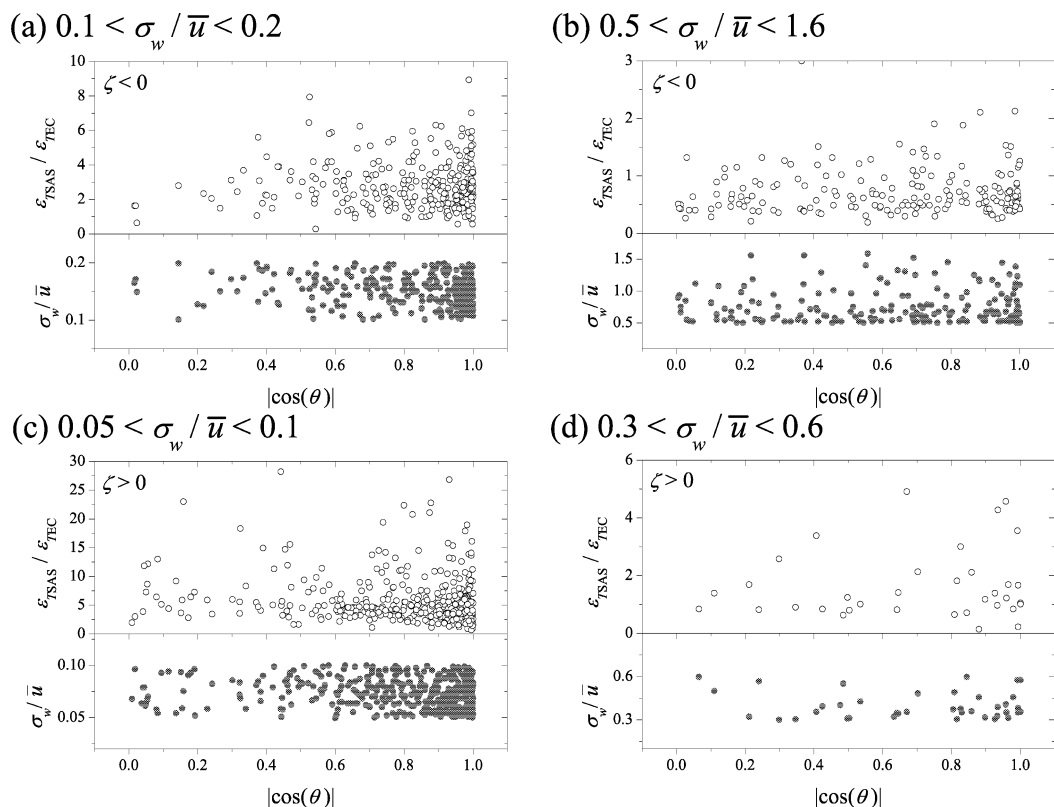


図 3.8 同一範囲の $\sigma_w/\bar{u}$ における、風向と DBSAS および EC 間の温度変動の消散率比 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ の関係。 $|\cos\theta|$ は、DBSAS のパス長における風向の寄与を表し、パスに直交する風向で 1 を、平行する風向で 0 をとる (a) (b) 大気不安定状態、および (c) (d) 安定状態のデータを示す。

スに直交する場合（北－南）に大きくなるような明確な分布は見られなかった。

3.5.3 エネルギーインバランスへの乱流フラックスの寄与

エネルギーインバランス IR は、風向に対して消散率比とは幾分異なった特徴的な分布を示した (図 3.6)。すなわち、IR および $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ の分布は北風時に共に分散が大きく、また西風時には IR のみ大きく分散した (図 3.6)。大気不安定条件下では、IR は広くばらつき、 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ の間に明確な相関関係は見られなかった (図 3.9a)。大気安定時には分散が大きく、そこから相関関係を見つけるのは困難であった (図 3.9 b)。そこで、熱収支式 (3.4) の右辺の中でも不確定さの大きい鉛直移流項 V を除いたインバランス率を IR_{-v} として再定義した。

$$IR_{-v} = (H + LE + S - R_n)/R_n, \quad S = S_b + G \quad (3.5)$$

その結果、 IR_{-v} の分布は収斂し、消散率比に対する負の相関が見られた (図 3.9c および 3.9 d)。式 (3.1) は、単一タワーのフラックス測定において、鉛直移流を評価しないことがエネルギーインバランスの原因となることを示している。しかし、ローカルな鉛直移流項 V を算入しても、熱収支式に依然として残差が認められた (3.5.1)。 V には風向や大気安定度などに対する明確な傾向はなかった。単体のタワーにおけるフラックス観測では、超音波風速計による $\bar{w}$ の測定誤差や、Finnigan⁶¹ が指摘した水平移流の寄与などが、 V を評価する上での誤差要因や限界となりうる。TOS の存在下ではローカルな鉛直移流項 V には空間的偏差があり、インバ

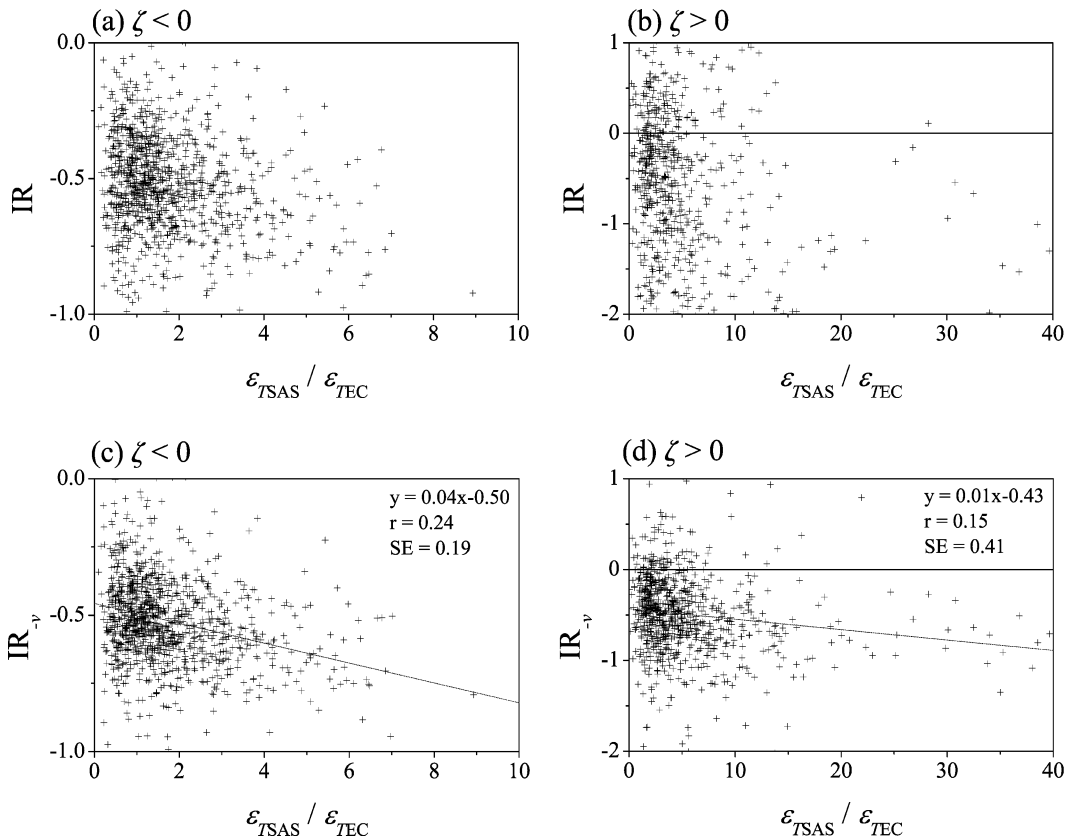


図 3.9 不安定時における DBSAS と EC 間の温度変動の消散率比 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ とエネルギーインバランス率 IR およびローカルな鉛直移流を除いたインバランス率 IR_v の関係。(a) (c) 大気不安定状態および (b) (d) 安定状態のデータ (c), (d) の回帰係数は $p < 0.0001$ で有意。

ランスとの関係が薄いことが指摘されている⁵⁸。これらの事象は、単一タワーで得られた測定値から計算したローカルな鉛直移流項を乱流変動項に加えても、空間平均的な領域を代表するフラックス $[\bar{F}]$ を得ることができないことを示す。

式 (3.5) で定義される IR_v は、全フラックスに対する鉛直移流の潜在的な寄与を意味する。 IR_v の値が小さいほど、測定された全フラックスに対する乱流変動項の寄与は小さくなる。全体的なばらつきは大きいものの、 IR_v は DBSAS と EC の消散率比に対して負の相関がある (図 3.9)。すなわち、EC による消散率が DBSAS の消散率より小さくなるほど、熱収支式の残差における EC 法による乱流フラックスの寄与が小さく、インバランスが増加する。こ

の現象は、大気の相対的乱流強度が弱い、 $\sigma_w/\bar{u}$ が小さな場合に頻繁に見られる。換言すると、DBSAS は $\sigma_w/\bar{u}$ が小さな条件でも、乱流フラックスを測定できると言える。従って、単一タワーでの EC 法におけるフラックス測定のエネルギーインバランス問題は、TOS 存在かで変形したローカルな乱流変動項のみを評価することに起因し、DBSAS は EC に比べて鉛直移流の影響を受けにくいことがわかった。DBSAS のこの効果は、機械的な大気の攪拌が貧弱な際に顕著である。

Meijninger et al.⁶⁶ は、フラックス測定におけるフットプリントを計算し、DBSAS のソースエリアが EC センサに比べて十分に大きく、更にパス直交風向時に最も大きくなることを示した。対照的に、EC センサのソースエリアは、風

向の影響を受けにくい。

DBSAS と EC 間の消散率の大きな違いは、DBSAS のソースエリアの大きさに起因する空間平均化効果による。これらの結果は、3.3 で述べた、空間平均によってローカル鉛直移流 $\overline{w's'}$ は相殺され、乱流変動項 $\overline{w's'}$ が全フラックスに占める割合が大きくなるという仮説を支持する。熱収支式の整合がフラックス測定 of 妥当性指標とすると、DBSAS は空間平均フラックス $\overline{w's'}$ に相当する消散率 $[\bar{\epsilon}]$ に近い値を測定し、その効果はパス直交風向時に顕著であると考えられる。

ただし、放射計のフットプリントとフラックスセンサのフットプリントが異なるため、 R_n を妥当性指標とすることは、厳密には正しくない。乱流フラックス測定 of フットプリントが風速や安定度などによって変化するのに対し、放射計 of フットプリントは一定である。乱流フラックスと R_n のフットプリントは異なり、それらに基づいた熱収支解析にインバランスを引き起こす可能性がある。当森林のような混交林ではフットプリントが異なれば、起因する乱流信号や放射量も異なる可能性がある。空間平均化効果の更なる議論には、フラックスの多点観測などが必要である。

3.5.4 渦相関法による乱流フラックスの空間的偏差

2 基のタワーにおける渦相関 (EC) 法の測定値を比較した (図 3.10)。水平風速の時間平均値は、 4 ms^{-1} より大きな領域では Tower-1 の値が Tower-2 より大きくなる傾向があり、 4 ms^{-1} 以下の範囲では両者が一致せず分散する傾向が見られた (図 3.10a)。時間平均風速の鉛直成分については 2 つのタワー間での明確な傾向は見られなかった (図 3.10b)。東-南風以外の風向では、Tower-1 と Tower-2 で観測された風向は一致しなかった (図 3.10c)。一方、風速の標準偏差はよく一致した (図 3.11a)。これらの風況の特徴は、西側に峰がある影響で風が巻いていることが原因と考えられる。摩擦速度 u_* は、値が小さな領域において両タワーで風速 $\bar{u}$ の相違が大きいためばらついた (図 3.10d)。純放射量はタワー間での差異が小さく、両者はよく

一致した (図 3.10e)。Tower-2 でのスカラーフラックス (顕熱フラックス H 、潜熱フラックス LE 、および CO_2 フラックス F_c) は Tower-1 を上回る傾向があった (図 3.10f, g, h)。この傾向は、Tower-2 での鉛直風の標準偏差が Tower-1 よりも大きめであることに対応している (図 3.11b)。Katul et al.¹⁴ は、均一な林冠上での多点タワー測定を実施し、乱流フラックスに比べて標準偏差の方がタワー間の差異が小さいという本サイトと類似した結果を報告している。平均風における地形の影響は明らかで、乱流フラックスにおいてもタワー間での差異が見られた。

3.5.5 スカラー変動の消散率の空間的偏差

Tower-1 における検討では、DBSAS および EC の消散率比は、相対的乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ と密接に関わることを見いだしたが、分布形が若干異なるものの、Tower-2 においても同様の関係が確認された (図 3.12)。 $\sigma_w/\bar{u}$ は大気 of 機械的攪拌の強さと考えることができる。TKE および温度変動の消散率をタワー間で比較すると、両者は一致せず、ばらつきが大きい (図 3.13)。タワー間の平均風速が 2 ms^{-1} より大きくなると、Tower-1 に比べて Tower-2 の消散率が大きくなる傾向が見られ、逆に平均風速が 2 ms^{-1} 以下では Tower-1 の消散率が大きくなる傾向があった。消散率が他の乱流統計量に比べ、タワー間での不一致を見せた原因には、EC による測定値から慣性消散法による消散率算出方法が、風速 of 水平成分の変動を用いるため、風速の影響 (図 3.10a) を受けやすいことが考えられる。相対的乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ は、一見してタワー間での一致が見られないが、平均風速が 2.0 ms^{-1} を超えると $\sigma_w/\bar{u}$ は 0.5 以下となり、分散は小さくなる (図 3.14)。片方のタワーで $\sigma_w/\bar{u}$ が 1.0 を超える場合、もう一方のタワーでの $\sigma_w/\bar{u}$ は 1.0 以下となる。平均風速が小さい状況下での大きな $\sigma_w/\bar{u}$ 値 of 空間的偏差は、TOS の存在によって生じている可能性がある。 $\sigma_w/\bar{u}$ が大きい場合、EC センサによる消散率は DBSAS による消散率を上回る傾向がある (図 3.12)。しかし、値 of 大きな $\sigma_w/\bar{u}$ に関して空間的な偏差が存在することは、図 3.12 に示されるようなセン

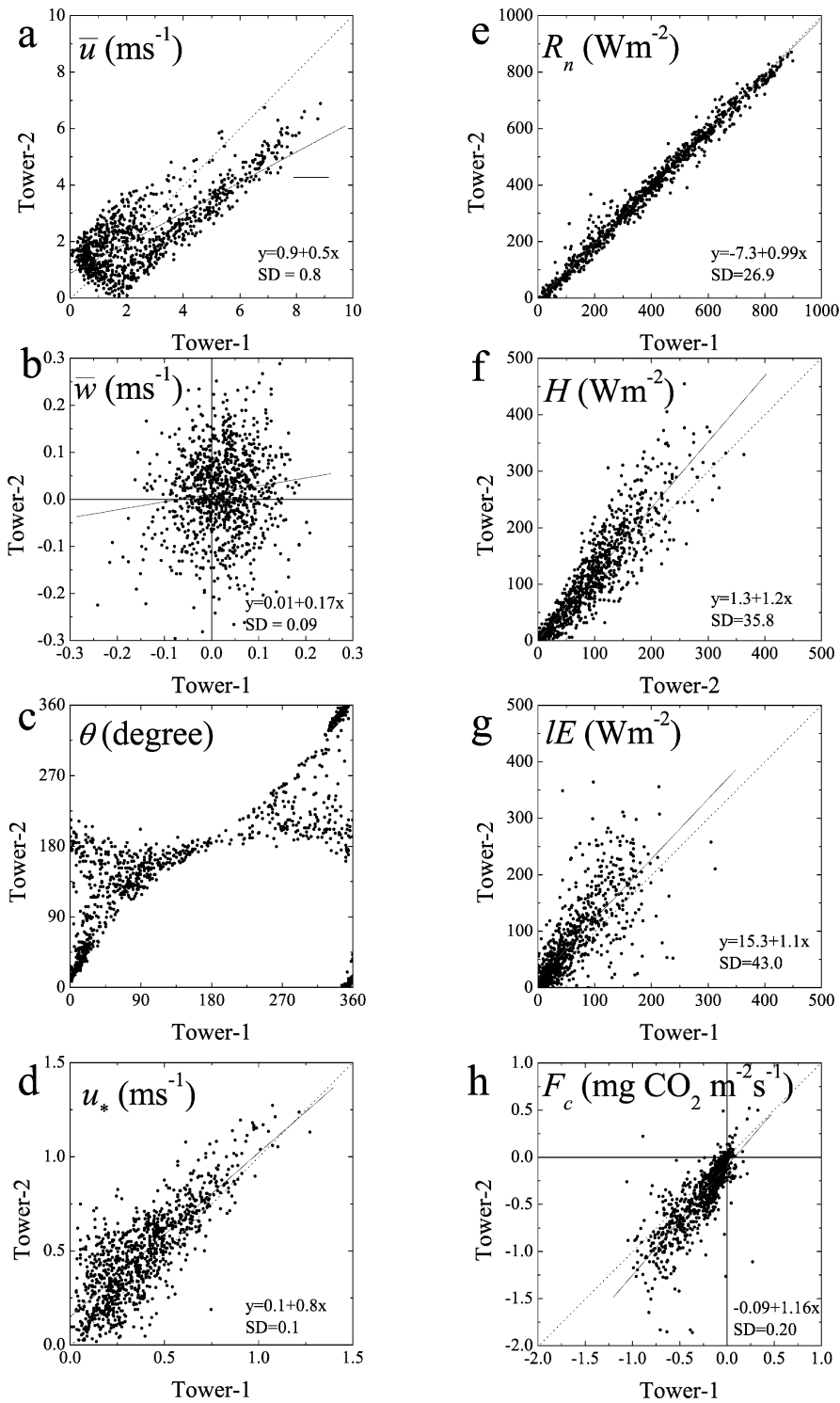


図 3.10 タワー間における風況およびフラックスの比較。(a)平均風速；(b)平均鉛直風；(c)風向；(d)摩擦速度；(e)純放射量；(f)顕熱フラックス；(g)潜熱フラックス；および(h) CO_2 フラックス。

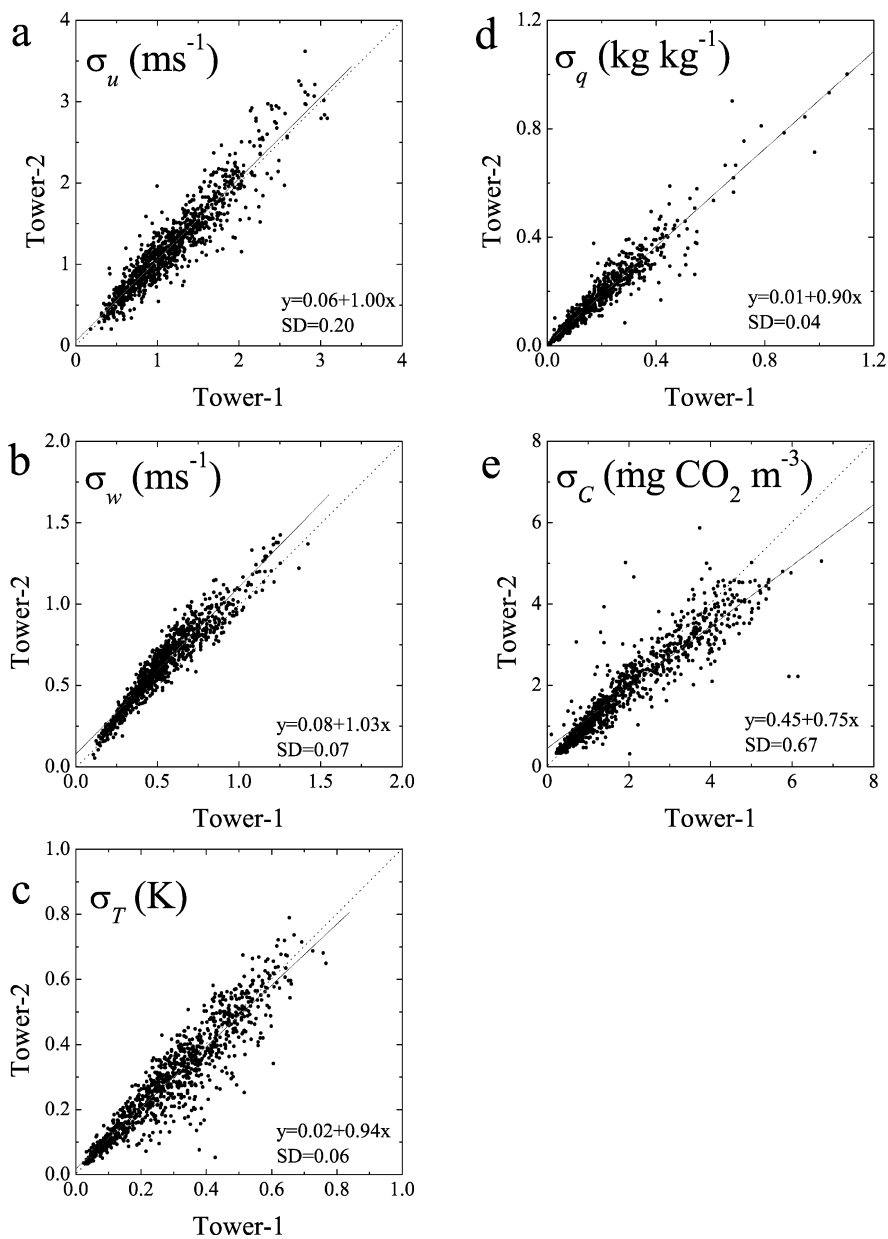


図 3.11 2 基のタワー間での測定値の標準偏差の比較。(a) 水平風；(b) 鉛直風；(c) 温度；(d) 比湿；および (e) CO_2 密度。

サ間の消散率比と $\sigma_w/\bar{u}$ との関係にほとんど影響しない。なぜなら、消散率比は $\sigma_w/\bar{u}$ が 0.3 を超えた付近で急激に減衰し、それより大きな $\sigma_w/\bar{u}$ に対してはほとんど変化しない。

3.5.6 空間的偏差とエネルギーインバランス

当サイトにおいて風況における地形効果とス

カラーフラックスの空間的偏差が認められた。スカラーフラックスの空間的偏差によって各タワーにおける熱収支が異なる。これまで熱収支式の整合を、フラックス測定における妥当性の一つの指標としてきた。乱流フラックススペースのインバランス率 IR_h は次のように書ける。

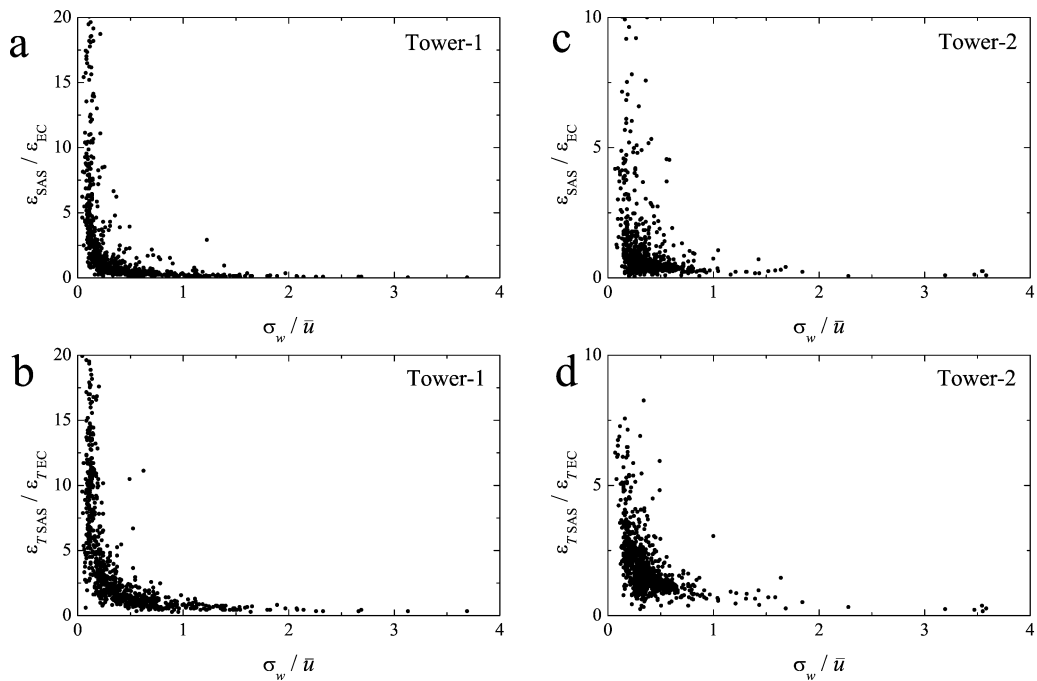


図 3.12 相対乱流強度 $\sigma_w / \bar{u}$ と、DBSAS および EC 間の TKE 消散率比 $\epsilon_{SAS} / \epsilon_{EC}$ 、温度変動の消散率比 $\epsilon_{TSAS} / \epsilon_{TEC}$ の関係。

$$IR_h = (H + lE - R_n) / R_n \quad (3.6)$$

これは、基本的に Nakaya et al.²⁷ の IR と同義であるが、貯熱項が含まれていない。空間的偏差を考える際、貯熱項と乱流フラックスは本質的に異なると考えられる⁶⁷。更に、時間平均フラックスのインバランスの原因が鉛直移流項であるとの仮定に基づけば、 IR_h はローカルな鉛直移流項の強度に関連づけられる。ここで、タワー間の熱フラックスの偏差を次のように定義する。

$$D_h = (HF_1 - HF_2) / \sqrt{HF_1 \times HF_2} \quad (3.7)$$

$$HF_1 = H_1 + lE_1; HF_2 = H_2 + lE_2$$

ここで、添え字 1 と 2 は、それぞれ Tower-1 と Tower-2 での測定値を表す。 D_h の符号が正の場合、Tower-1 での測定値が大きくなり、符号が負の場合は Tower-2 での測定値が大きくなるバイアスを示す。一方のタワーにおいてエネルギーインバランスが大きい場合、もう一方のタワーでは、逆にエネルギーのインバランスが小さくなっている (図 3.15)。式 (3.6) に貯熱

項が加わることは、 IR_h がゼロに近づくように働く。図 3.16 に示すように、Tower-2 が Tower-1 に比べてインバランス率が小さく熱収支式が閉じやすいのは、乱流フラックスが大きめに見積もられる傾向のためである。EC と DBSAS の比較という点では、タワー間の平均インバランス率 [IR_h] と、DBSAS による消散率に対する EC による消散率のタワー間平均値 [$\epsilon_{TSAS} / \epsilon_{TEC}$] の間には、Tower-1 のみの結果 (図 3.9c および 3.9d) と同様の負の相関が見られた (図 3.17)。相対乱流強度が小さく、DBSAS による消散率が EC による消散率に比べて大きい状況では、乱流フラックスが過小評価され、負のインバランス率が大きい。相対乱流強度が大きく、大気の機械的攪拌が大きな条件下ではインバランス率は小さい。

DBSAS と EC センサ間の消散率比が大きいほど空間平均的なエネルギーインバランスの差は大きい。また、このような状況下では、乱流フラックスの空間的偏差も大きいことがわかった。必然的に、各タワーでの測定値に基づくエネルギーインバランスも大きくなる。ローカル

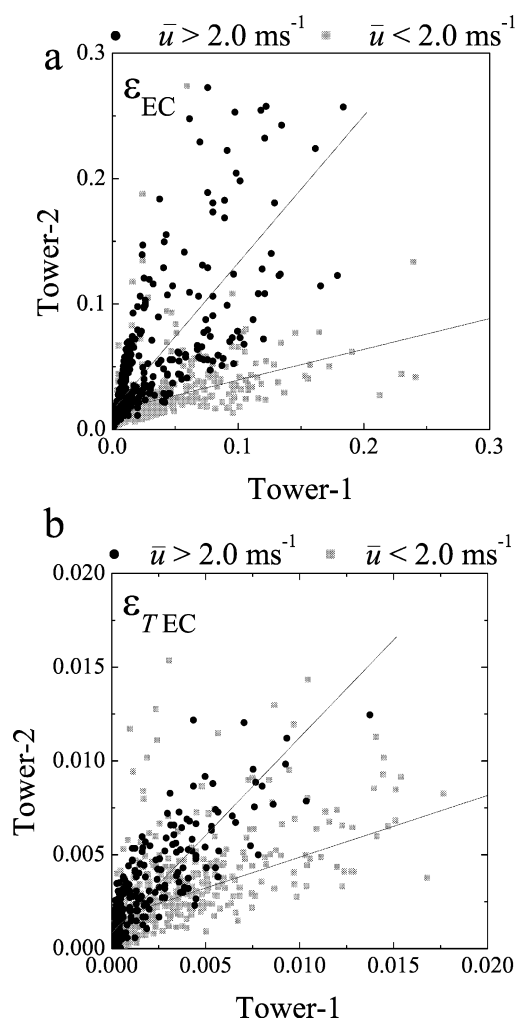


図 3.13 消散率比のタワー間での比較。(a) TKE 消散率, (b) 温度変動の消散率。

な鉛直移流項をインバランスの主な原因とする仮定は、この現象と矛盾しない。

更に、 H や IE と同様に、大気乱流構造に起因する乱流フラックスの空間的偏差が F_c においても生じているとすると、単一タワーにおける NEE 評価においても影響があると考えられる^{68;69;70}。しかし、De Bruin et al.⁷¹ が、混交林の林冠上で温度と水蒸気の乱流輸送に相似性が乏しいことを示すなど、温度と水蒸気および CO_2 に関する乱流輸送の相似性に関しては、未だ見解が定まっていない。温度以外のスカラーに関しても、乱流変動項の空間平均値が測定できれば、このような問題の解決に大きく貢献で

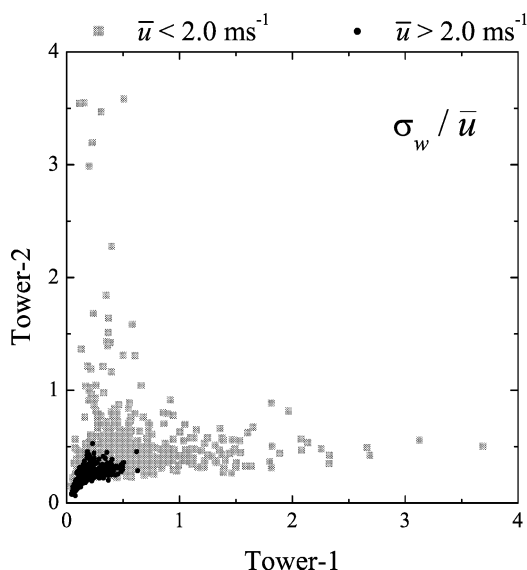


図 3.14 相対乱流強度についてのタワー間比較。強風時 (>2.0) と弱風時 (<2.0) に分類。

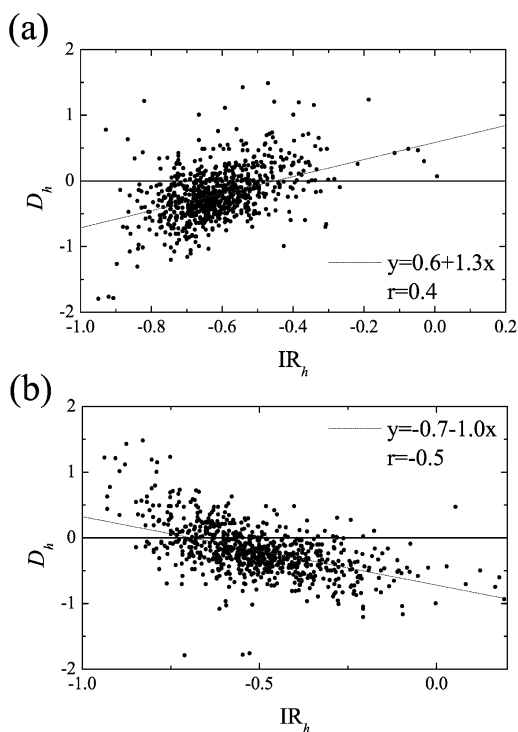


図 3.15 タワー間の熱フラックス偏差 D_h と各タワーにおけるインバランス率 IR_h の関係。(a) Tower-1 および (b) Tower-2 における結果。

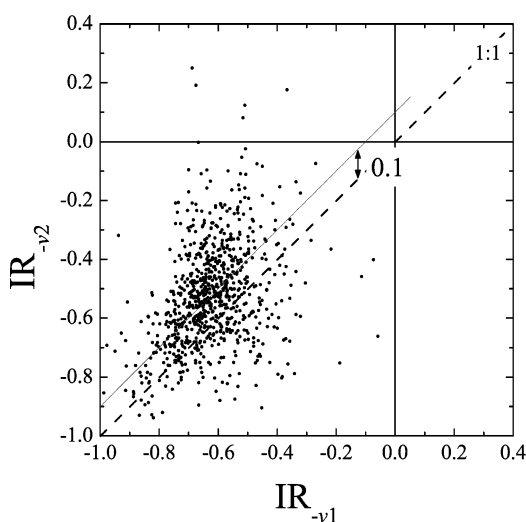


図 3.16 タワー間のインバランス率の比較。
図中の直線は、傾きを 1 として回帰
した結果を示している。

きる。例えば、測定光として 2 波長の光を用いるシンクロメータ⁷²を用い、水蒸気変動の消散率 ε_q および温度変動の消散率 ε_T を同時に測定することで、温度および湿度変動の空間的な偏差の理解が更に進むと期待される。

3.5.7 DBSAS と EC のソースエリアの違い

各センサごとのフラックス測定のソースエリアの違いを定量化するためにフットプリントモデルを用いる。フットプリントは、センサで検知する信号の風上領域からの寄与を表す概念で、風向軸におけるフラックス測定への寄与の大きさを表す関数として定義される（例えば図 3.18a）。そして、フットプリントを 2 次元的に表現したのがソースエリアで、フラックス測定に対して同一の寄与率をもつ信号の起源領域を表す。ソースエリアは、フットプリント関数に対して横風の分布を与えることで描かれる等値線で囲まれた領域と定義される。ここでは Kormann and Meixner⁷³ の解析的フットプリントモデル $F(x)$ を用いる。このモデルの入力変数は、風向軸 x における平均風速 $\bar{u}$ 、摩擦速度 u_* 、安定度パラメータ ζ 、測定高さ z で、 ζ の符号に応じて 2 種類の経験関数がモデル内で用いられる。フットプリント $F(x)$ と横風方向 (y) における風速変動 σ_v の感度関数 $D(x, y)$ との積が

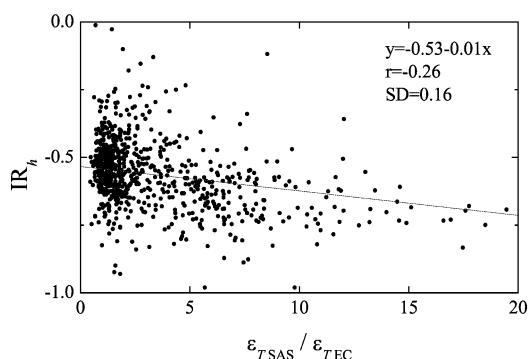


図 3.17 大気不安定時における、タワー間平均値に基づいた DBSAS と EC の温度変化の消散率比 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ と、インバランス率 IR_h の関係。
回帰係数は $p < 0.0001$ で有意。

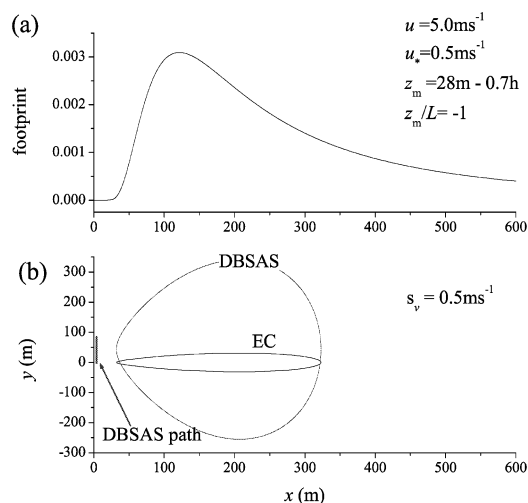


図 3.18 EC 法および DBSAS によるスカラーフラックス測定の (a) フットプリントおよび (b) 90% 寄与率の等値線の例。

描く等値線に囲まれた領域がフラックス測定のソースエリアとなる。DBSAS に相当するフットプリントの等値線は、横風感度関数 $D(x, y)$ に DBSAS のパス長をオフセットとして与えることで計算する。横風軸 y におけるオフセットを含んだ横風変動は次のように書かれる。

$$\sigma_{vSAS} = \sigma_v + |\cos(\theta)|aL_p \quad (3.8)$$

ここに、 $L_p(m)$ は DBSAS のパス長で、 a はスケールを表す定数である。風向に対するパス長の有効長は北を基点とする角度の余弦とパス長

の積で表す。それぞれの等値線を積分することで、DBSAS のソースエリア A_{SAS} および EC のソースエリア A_{EC} が得られる (図 3.18b)。風向が DBSAS パスと平行な場合、 A_{SAS} と A_{EC} は等しくなる。林冠上の RSL 内での MOST の成立性は未確認であり、林冠上へのフットプリントモデルの適用性も確立されていない。しかし、入力パラメータが同一のソースエリア同士を比較し、センサの特性を調べることは有効性があると考えられる。

DBSAS と EC 間のソースエリア比の風速に対する分布を図 3.19 に示す。ソースエリア比は風向に対してコサインカーブの絶対値を描きながら、風速および安定度パラメータに応じて分散する。 $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ の値はセンサ間のソースエリアの違いを意味する。では、センサ間でソースエリアの差が大きいと EC 法でのインバランスも大きくなるのであろうか。IR- v を $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ に対してプロットしたところ、EC センサに対

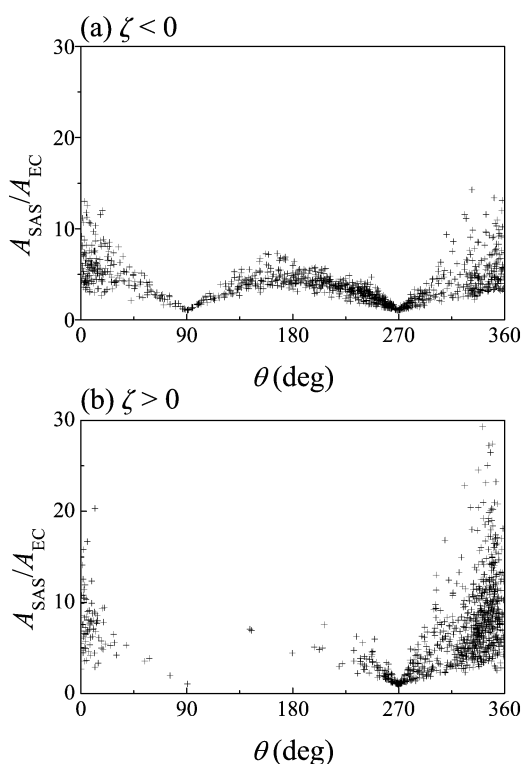


図 3.19 EC センサの測定値から計算したソースエリア比 $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ の風向依存。(a) 大気不安定時, (b) 大気安定時。

して DBSAS のソースエリアが大きくなるほど、負のインバランスが大きくなる傾向が見られた (図 3.20)。両センサのフットプリントの差が小さい領域ではインバランスは大きくばらつくが、EC センサに対して DBSAS のソースエリアが大きい場合には、必ず負のインバランスが生じている。この結果から、フラックス測定ソースエリアが大きいほどインバランスが緩和されることが分かる。

$\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ の分布の上限線は $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ に対応して増加する傾向があった (図 3.21a および 3.21c)。しかし、 $\sigma_w/\bar{u}$ が大きい場合には、 $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ に関わらず、 $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ は小さな値をとる (図 3.21e および 3.21g)。後述 (3.5.9) するが、 $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ を、 $\sigma_w/\bar{u}$ および $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ の漸近関数として経験的に表すことができる (図 3.21b, 3.21d, 3.21f, 3.21h および図 3.25)。これらの入力変数 $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ および $\sigma_w/\bar{u}$ は EC センサのみから得ることができる。

3.5.8 直交パスにおける DBSAS 同時測定

フラックス測定における DBSAS による空間平均化効果を明らかにするために、2つの DBSAS の測定光路 (パス) を直交するように配置し (図 3.3)、昼間の大気不安定時を対象とした同時測定を行った。高所作業車の腕木を伸張することで第3のタワーとして用いた。パスは L 字型に配置し、EC システムは L 字の頂点 (Tower-1) に配置して同時測定を行った。風によって Gondola が動揺するのを抑制するため

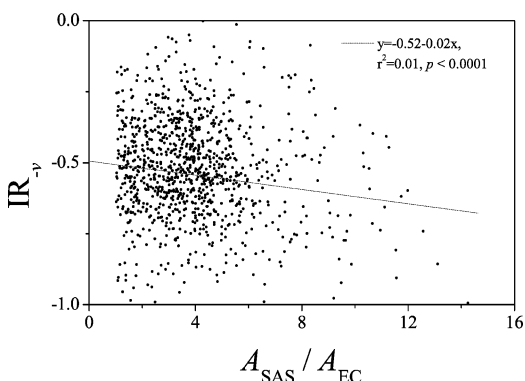


図 3.20 EC センサおよび DBSAS のソースエリア比 $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ とインバランス率 IR- v の関係 (不安定時)。

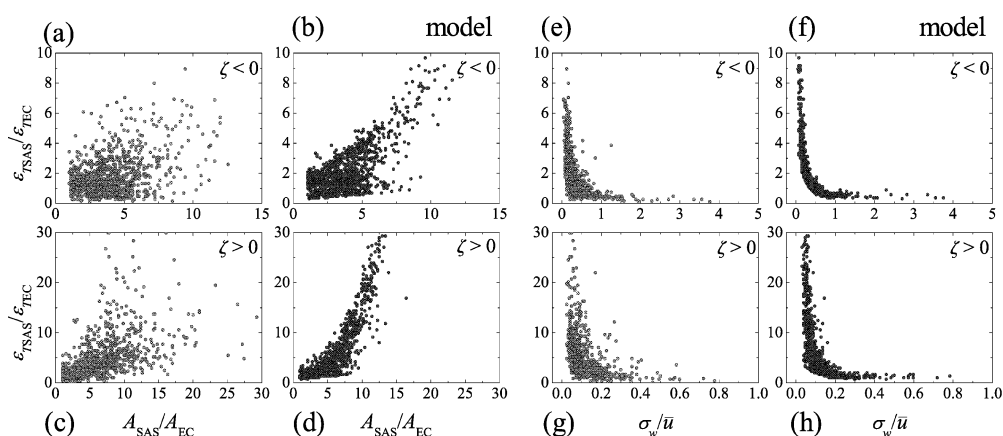


図 3.21 ソースエリア比 A_{SAS}/A_{EC} および相対的乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ と SAS および EC 間の温度変動の消散率比 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ の関係。(a), (b), (e), (f) 大気不安定時および(c), (d), (g), (h) 大気安定時 ‘model’ は 3.5.9 での計算結果。

に、張り綱を用いて掲揚した Gondola を車体に牽引した (図 3.4)。この方法によって、単一のタワーを備えたサイトでも車道が近傍にある場合、容易に DBSAS を適用することができる。測定期間中は霧が多く、解析に供するデータを豊富に得ることができなかった。また、センサの動揺による低周波のエラーが散見された。張り綱にワイヤを用いると、Gondola が安定して更に高品質なデータが得られる可能性がある。

追加された南北パスの DBSAS では、図 3.7、図 3.12 と同様の相対的乱流強度－消散率比の関係が見られた。DBSAS は EC に比べ、時系列データの平均化時間を短時間に行うことができる。Hartogensis et al.²⁶ は平均化時間とフラックス計算値の分散を比較し、DBSAS によるフラックス計算値が EC に比べて遙かに短時間の平均化時間で定常的になることを見いだした。この事実は、DBSAS による空間平均された測定値は、単一タワーの測定値の時間平均値と同等であると換言できる。そこで、DBSAS の測定値からの消散率算定に用いる平均化時間を 5 分として再計算を行った。この処理により、解析に用いるデータ数が増えるとともに、エラーを含んだデータをよりきめ細かく解析から除外できた。南北パスの DBSAS による温度変動の消散率は、東西パスの DBSAS による値より大きな値をとる傾向があった (図 3.22b)。しかし、TKE 消散率に関しては、大きくばらつく結果

となった (図 3.22a)。Green et al.⁷⁴ は、シンチロメータの出力値がパス長に応じて変化することを報告している。これまで DBSAS の出力が EC を上回る傾向の原因が、DBSAS によるフラックス測定のソースエリアが大きいことにあると述べてきた。そこで、3.5.7 に従い、直交したパス設定の DBSAS それぞれのソースエリアを計算した (図 3.23)。ソースエリアの大きさに従って熱収支の残差が小さくなるという仮定に従えば、ソースエリアの増加に対して消散率も増加することになる。結果、温度変動の消散率とソースエリアの間に、有意な正の相関があることを見いだした (図 3.24b)。一方、TKE 消散率については相関関係が見られなかった (図 3.24a)。DBSAS 間において TKE 消散率に明確な対応が見られなかった原因について現時点では不明である。DBSAS による摩擦速度の過小評価傾向 (De Bruin et al.⁵³ にも同様な状況が見られる) の原因についても不確定である。しかしながら、直交パス DBSAS の同時測定によってソースエリアへの依存性を明らかにすることができたことによって、DBSAS と EC センサを組み合わせた解析は、林冠上の大気乱流輸送機構の解明に有効であることが示された。

3.5.9 EC と DBSAS の組み合わせ法の提案

消散法によるフラックス測定には不確定要素があることを 3.4 で述べた。すなわち、正負の符号を持つ 2 種類のフラックスが算出されるた

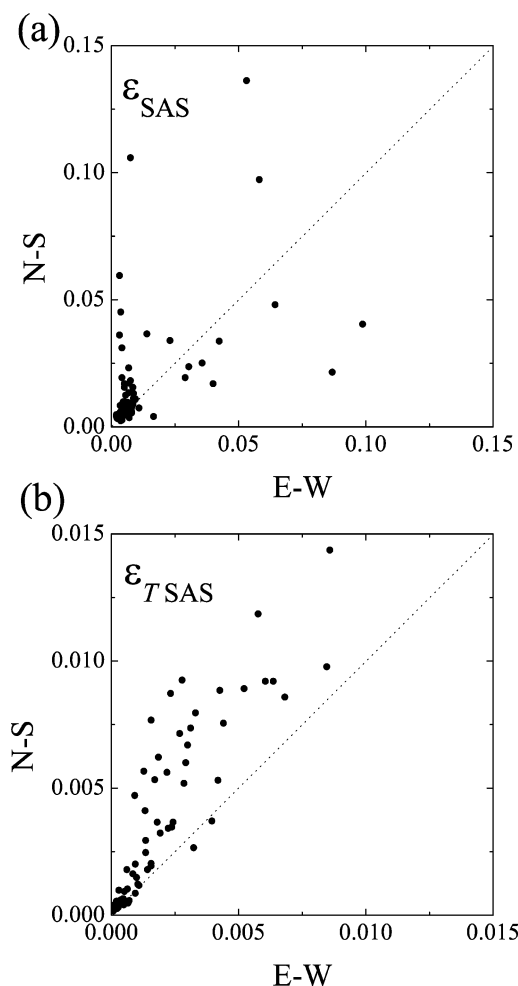


図 3.22 直交したパス設定のDBSAS 間における (a) TKE 消散率および (b) 温度変動の消散率の比較。

めどちらかを選択する必要があること；ゼロ面変異 d_0 を直接求めることができないこと；林冠上では MOST の普遍関数形が異なる可能性があり、その結果 u_* の過小評価や H の過大評価をもたらしている可能性がある。さらに、DBSAS は長光路の測定パスを持つため、雨や霧、昆虫などによって頻繁に測定が中断する。そこで、これらの不確定さが少ない EC の測定値をもとに、DBSAS 相当の測定値に変換する手法を考える。

式 (2.16a) と式 (2.16b) について、 H_{SAS} および H_{EC} 、 u_{*SAS} および u_{*EC} の比をとると、 u_{*SAS}/H_{SAS} は次のように表すことができる。

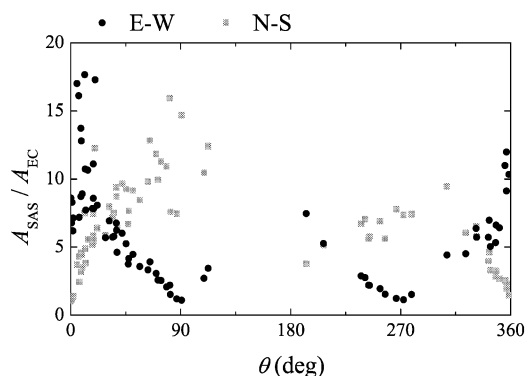


図 3.23 直交したパス設定のDBSAS における、EC とのソースエリア比 A_{SAS}/A_{EC} の北からの風向 θ (degrees) に対する分布。EC センサの測定値から、南北パス (N-S) および東西パス (E-W) に対応したソースエリアを計算した。

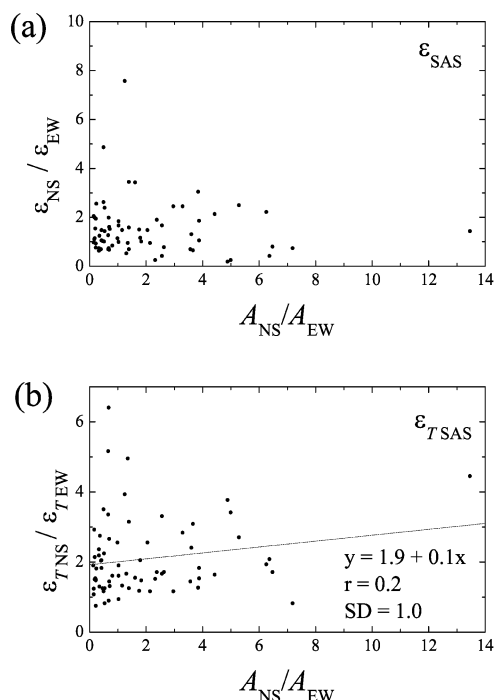


図 3.24 南北 (N-S) パスの DBSAS と東西 (E-W) パスの DBSAS 間の消散率比とソースエリア比の関係。(a) TKE 消散率および (b) 温度変動の消散率。(b) の回帰係数は $p < 0.1$ 水準で有意。

$$u_{*SAS} = u_{*EC} [\varepsilon_{SAS} / \varepsilon_{EC}]^{1/3} \quad (3.9a)$$

$$H_{SAS} = H_{EC} \left[(\varepsilon_{SAS} / \varepsilon_{EC})^{1/3} \varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC} \right]^{1/2} \quad (3.9b)$$

式 (2.16a) と式 (2.16b) において, 異なったセンサで得られる各消散率以外の値は変わらないと仮定した。厳密な比較を行うためには, EC は DBSAS のパス中央部で運用されるべきであろう。そして, 式 (3.9) において, $\varepsilon_{SAS} / \varepsilon_{EC}$ および $\varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC}$ が経験的に得られているとすると, u_{*SAS} および H_{SAS} が EC センサの測定値である u_{*EC} および H_{EC} から計算できる。この方法は, フラックスの方向が一意に定まる, d_0 は計算に無関係, 林冠上の MOST 成立の制限を受けないという利点がある。

図 3.25 に示す関係は, DBSAS と EC システムの消散率比の違いが, センサ間のソースエリアの違いに起因すると共に, EC システムによって測定された大気の相対的乱流強度 $\sigma_w / \bar{u}$ の影響を受けて変化することを表している。 $\sigma_w / \bar{u}$ が大きい領域の漸近値をオフセットと考え, 指数減衰関数によって上記の関係を表現した。式中の係数 a_1, a_2, a_3 を昼間のおよび夜間について最小二乗法によって決定した。夜間と昼間で係数が異なるのは, ソースエリアの算出に用いたフットプリントモデルが夜間と昼間で異なる関数で表されるためである。

$$\begin{aligned} & \left[(\varepsilon_{SAS} / \varepsilon_{EC})^{1/3} \varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC} \right]^{1/2} \\ &= y_0 + a_1 \exp \left[-(\sigma_w / \bar{u} - x_0) / a_2 \right] \\ & x_0 = (A_{SAS} / A_{EC} - 1) / a_3 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$[(\varepsilon_{SAS} / \varepsilon_{EC})^{1/3} \varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC}]^{1/2}$ の実測値と推定値の比較を図 3.26 に示す。昼間 (図 3.26a) に比べて夜間 (同 b) の分散が大きいのは, 渦相関センサによる温度変動の消散率 ε_{TEC} の算出精度が乱流状態の乏しい状況で低下したことが原因と考えられる。

DBSAS の広域なソースエリアに由来する顕熱フラックスは, $\varepsilon_{SAS} / \varepsilon_{EC}$ および $\varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC}$ の推定値を式 (3.9) に代入することによって得られる。更に, DBSAS と EC システムによる測定値の差異がソースエリアと乱流構造の関係に

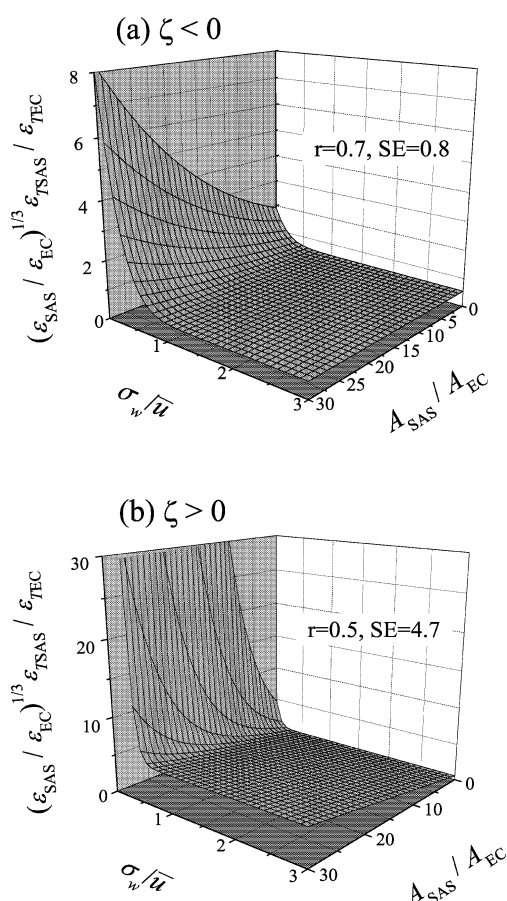


図 3.25 相対的乱流強度 $\sigma_w / \bar{u}$ とソースエリア比 A_{SAS} / A_{EC} で表した温度変動の消散率比 $\varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC}$ の関数表示。(a) 大気不安定時, (b) 大気安定時。用いたのは, オフセットのある漸近関数: $\varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC} = y_0 + a_1 \exp [-(\sigma_w / \bar{u} - x_0) / a_2]$, $x_0 = (A_{SAS} / A_{EC} - 1) / a_3$; a_1, a_2, a_3 は定数。

よってもたらされると仮定すれば, 同様のアナロジーが水蒸気や CO_2 など他のスカラーフラックスにおいても成立すると考えることができる。図 3.27 に示した H_{SAS} は, 最も高い $\varepsilon_{TSAS} / \varepsilon_{TEC}$ が得られた A_{SAS} / A_{EC} を定数として計算した結果である。 H_{EC} は $\sigma_w / \bar{u}$ に応じて上下方向に補正され, 全体として正方向にシフトする結果となった。この補正により, データセット全体で純放射量の 50% であった貯熱項と鉛直移流項を含む乱流フラックスが, 76% となり, エネルギーインバランスが緩和された。この結果は, 空間平均フラックス測定がエネルギーイン

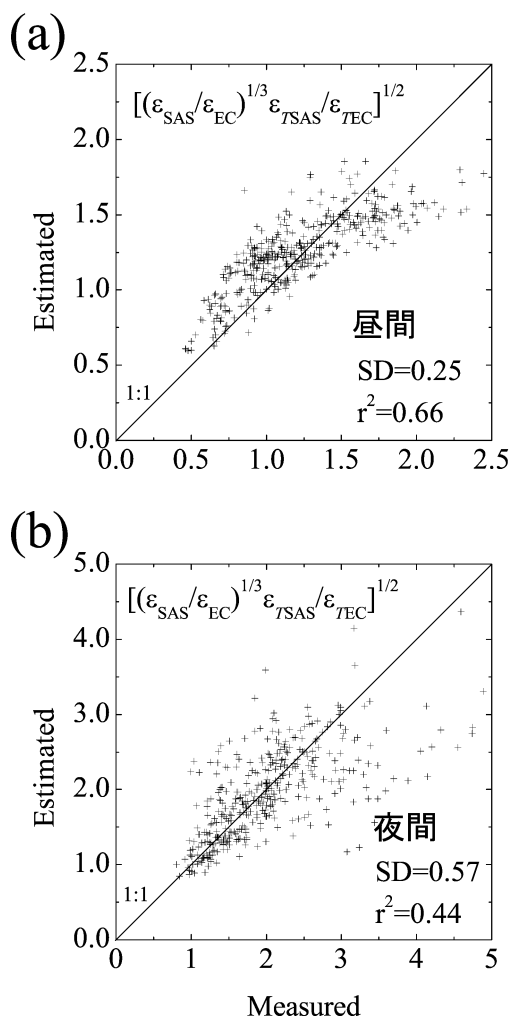


図 3.26 $[(\epsilon_{SAS}/\epsilon_{EC})^{1/3} \epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}]^{1/2}$ の実測値と推定値の比較。(a) 日中, (b) 夜間。

バランスの緩和につながるという議論と整合する。EC によるフラックスを DBSAS 相当のフラックスに補正する際には経験的関数の回帰精度の向上が重要である。

もちろんこの結果は、このサイト特有の現象である可能性は否めない。また、図 3.25 の経験関数を決定する際の誤差を軽減するための検討が必要である。顕熱輸送のアナロジーを他のスカラーに適用する点も議論の余地がある。混交林では、温度と水蒸気など他のスカラーとの相似性が必ずしも良好ではないことが報告されている⁷⁵。しかし、DBSAS とエネルギーバランスを用いた解析は、林冠上の乱流構造を明らかに

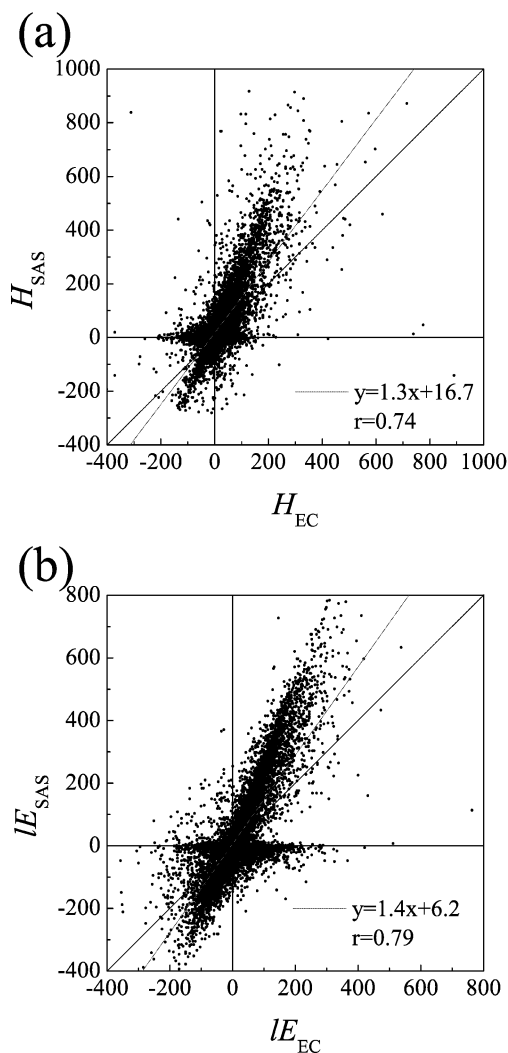


図 3.27 DBSAS による EC 法の補正効果：(a) 顕熱 (b) 潜熱の結果。

するための新たなアプローチと言える。

3.6 ま と め

DBSAS と渦相関センサの特徴を明らかにするために、平均林冠高さ 18 m の広葉樹林内に 86 m 離れて設置した地上高 28 m のタワーにおいて渦相関法と DBSAS の出力を比較した。更に、乱流フラックスの空間的偏差を解析するために、2 セットの渦相関法システムと DBSAS を用いた同時測定を行った。2 基のタワー間の比較において、乱流統計量に明らかな差異が見られた。風速の水平成分には地形の影響が見られ、乱流輸送項には水平風とは別の明

確な空間的偏差があった。乱流輸送量の空間的偏差は、大気の鉛直混合が相対的に小さいほど大きかった。組織的な乱流構造が単一のタワーで測定されるフラックスの空間的な偏差を引き起こしていると考えられた。直交する2パスのDBSASの同時測定から、温度変動の消散率はフラックス測定のソースエリアに応じて空間的に平均され、大きくなることがわかった。

熱収支式の整合をフラックス測定の妥当性の指標と仮定すると、DBSASはECに比べてより空間的に平均された乱流信号を測定でき、その結果フラックス測定のエネルギーインバランスが緩和されたと言える。DBSASは、大気の相対的乱流強度が貧弱な状況でも乱流信号を捉えることができ、フラックス測定のソースエリアが広いことがその要因である。

DBSASとECセンサを組み合わせた新たな補正手法は、乱流フラックス測定における妥当性の検証と、バイアスが生じている際にはそれを修正できるという点で有用である。

第4章 空間平均フラックス測定を 応用した NEE 評価

4.1 概 要

エネルギーインバランスを生じさせている現象が、他のスカラーフラックスに対しても同様のアナロジーで関わるとすれば、CO₂フラックス F_c の積算によって求められる生態系純交換量 (NEE: net ecosystem exchange) についてもバイアスが生じることが予想された。そこで、小口径シンチロメータ (DBSAS: displaced-beam small aperture scintillometer) と渦相関 (EC: eddy-covariance) システムによる測定値の差異がソースエリアと乱流構造の関係によってもたらされるとし、式 (3.9) と同様のアナロジーを CO₂ フラックスに適用することで、DBSAS 相当の CO₂ フラックス F_{CSAS} を算出することとした。落葉広葉樹林に設立したタワー上の EC システムを用いて、2002 年から 2005 年にかけて CO₂ フラックスの連続観測を実施し、前章で示した消散率比による補正を施すことで、 F_{CSAS} を長期間に渡って算出し、NEE を評価することを試みた。その結果、EC 法の結果か

ら算出した最大光合成量が、個葉の光合成特性と葉面積から導いた計算値を大きく下回るのに対し、補正值は計算値に近づくことがわかった。また、EC 法の結果から算出した群落呼吸量が、時として土壤呼吸チャンバによる土壤呼吸量を下回り、植物地上部の呼吸量を考慮する上で矛盾が生じた。これに対し、補正によって夜間の CO₂ 放出量が上方修正され、補正を施した群落呼吸量は、チャンバ実測による土壤呼吸量測定結果とも整合した。広域のソースエリアを持つ DBSAS による渦相関法の補正は、フラックスを積算することによって得られる NEE においても、定量的に矛盾なく適用できることがわかった。

4.2 はじめに

森林での詳細な時空間スケールにおけるエネルギー・物質の輸送過程に関する解析のためには、時間分解能の高い乱流フラックスの測定が不可欠である。一方、時間スケールの大きな物質交換課程である森林の炭素収支評価においても、乱流フラックス測定は有効な手段と考えられている³。

現在、地球規模の CO₂ 収支の評価・予測が盛んに行われており、地表面で実測されたエネルギーおよび物質のフラックスは検証データとして利用価値が高い。そのため、フラックスサイトをネットワーク化し、広域的かつ長期間にわたってフラックスデータをグラウンドトゥールズとして利用できる環境の整備が世界的に進められている⁴。生態系の炭素循環を定量化するためには、森林全体の CO₂ 収支の評価が重要である。森林全体の CO₂ 収支は、CO₂ の単位水平面積・単位時間当たりの交換量 (フラックス) を積算することで評価できる。

森林上における CO₂ の収支を表す生態系純交換量 (NEE: Net Ecosystem Exchange) は、CO₂ フラックス F_c を用いて次式で表される。

$$NEE = F_c + S_c \quad (4.1)$$

ここで、 S_c は森林内の空間に一時的に存在する CO₂ の変化量 (林冠内貯留変化量) で、1 日の中で貯留と放出を繰り返し、1 日間で積分するとほぼ相殺される。1 年間の NEE は、CO₂ フ

ラックスおよび貯留変化量の時系列1年分を積算することで求めることができる。1年間のNEE ($\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$) は光合成の同化作用によって森林生態系が1年間に正味吸収した CO_2 量を示す。日本では、長期 CO_2 フラックス測定に基づくNEE評価事例として、安田他⁷⁰；Saigusa et al.⁷⁷；Wang et al.⁷⁸ など多数の報告がある。

大気下層の地表面付近では大気乱流によって、運動量、熱、水蒸気、 CO_2 などが上下方向に運ばれる。これら各物理量を直接測定するために、フラックスサイトにおいては渦相関(EC)法が標準的に用いられている。しかし、晴天日の夜間など大気が安定した状態や、対流が盛んで大気が不安定な条件では、渦相関法による熱フラックスと放射計による純放射量が釣り合わない現象(エネルギーインバランス)が多発しており、主に渦相関法において評価誤差が生じていると認識されている。さらに、熱フラックスと同じ測定原理による CO_2 フラックスにおいても同様に評価誤差が生じ、長期積算によって求めるNEEに精度的な問題が生じることが懸念されている^{57,69}。前章までに、乱流信号を検出する領域(ソースエリア)の広いセンサであるシンチロメータ(DBSAS)を森林上に適用し、顕熱フラックスの領域代表性が向上することを実験的に示した。従って、DBSASの特性を他のスカラーフラックスに適用することができれば、それらの領域代表性が向上する可能性がある。

そこで本節では、前章で提案した渦相関法とDBSASの組み合わせによって、空間的に平均されたフラックスを長期間に渡って算出し、日本の落葉広葉樹林を例としてNEEを評価することを試みる。更に、群落呼吸量や光合成量との比較を通して補正によるフラックスの妥当性を示す。

4.3 方 法

ここでは、軽井沢サイトにおいて実施した乱流フラックスの長期測定にもとづくNEE評価手法について述べる。更に、渦相関法による乱流フラックスをDBSASとの組み合わせによって補正する方法について記述すると共に、

NEEとの比較検証に用いる光合成および呼吸量の測定について述べる。

4.3.1 乱流フラックスによるNEE評価

中部地方に位置する浅間東麓の落葉広葉樹林(軽井沢サイト)において CO_2 を含むフラックス測定を、2002年から2005年の間行った。森林管理簿によれば一帯はカラマツ林となっているが、現状は主に落葉広葉樹が優占する混交林となっている。正確な林齢は不明だが、およそ50年前後と推察される。測定地点の詳細は2.4.1に示した。高さ28mの鋼製足場材組上げ式のタワーを東西に86mの距離で配置し、東側のタワー(Tower-1)塔頂で渦相関法を実施するとともに領域平均フラックス測定のために、2基のタワー間をシンチロメータの測定パスとした。渦相関法では顕熱、潜熱、 CO_2 フラックスを測定した。フラックス算出には10 Hz サンプリング時系列の30分ブロック平均を用いた。また、以下の前処理を行った。

- (1)センサへの水滴付着や凍結などに起因する異常値の除去およびスカラー成分からの1次トレンド除去
- (2)Planar-fitによるセンサー角度補正⁵¹
- (3)超音波風速計による音仮温度に対する横風補正および水蒸気補正⁷

風速の変動成分の測定には非直交パス型の3-D超音波風速計であるUSA-1(Metek GmbH, Germany)を用いた。 CO_2 密度変動量は、降雨などの影響を受けにくく、測定値のドリフトが少ない閉光路(closed-path)式 CO_2 分析計(LI-7000, Licor USA)を用い、サンプリングレート10 Hzで測定した(図4.1)。内径4 mmのデカボンチューブ40 mを経由してタワー基部の観測舎に塔頂の大気サンプルを 9.0 lmin^{-1} で吸引し、その一部を 2.0 lmin^{-1} で CO_2 分析計に導入した。水蒸気変動による CO_2 への影響を排除するために、サンプル空気を半透膜除湿器によって脱水した。サンプルエアが塔頂から分析器までに到達する時間遅れは9~10秒程度であった。風速の変動成分と CO_2 密度変動成分との相関係数を指標とした信号の時間遅れ補正

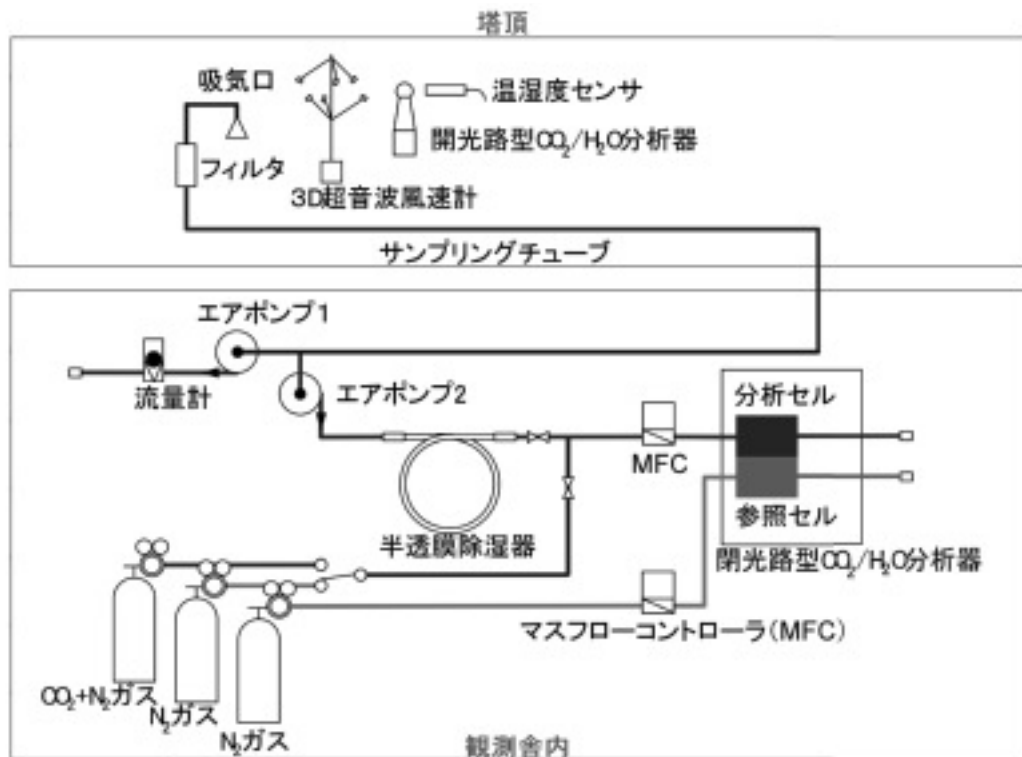


図4.1 渦相関法によるフラックス測定システムの概要。閉光路型 CO₂/H₂O 分析器には定期的に校正用のガスを導入することで測定精度を維持する。

法などが提案されている⁶。ここでは、相関係数の最も高い遅れ時間の数日間の平均値を用いた。当サイトの結果では、遅れ時間を1秒程度前後させても共分散の計算結果がほとんど変化しなかった。サンプルエアーの吸引に伴って信号の高周波成分が劣化してしまう問題は、応答関数を用いた補正⁷⁹などが行われている一方で、乱流のスケールが大きな森林上ではほとんど考慮しなくて良いことも報告されている⁷⁶。当サイトではCO₂密度変動の高周波成分補正は行わなかった。林冠内大気におけるCO₂貯留変化量 S_c は、塔頂でのCO₂濃度 c の時間変化量から算出した⁸⁰。

$$S_c = \int_0^{z_m} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz \approx z_m \Delta \bar{c} / \Delta t \quad (4.2)$$

加えて、エネルギーバランス解析のために、第3章3.3および3.4に従って林冠内大気の貯熱変化量 S_b 、地中貯熱変化量 G および鉛直移流量 V のデータセットを作成した。

4.3.2 欠測データの補間

フラックスからNEEを算出するためには、測定値異常、測定器の故障、メンテナンス、停電などさまざまな理由により発生する欠測を補い、連続した時系列を得る必要がある。そのために、AsiaFlux運営委員会⁶の指針に従って、1.5時間以内の短期欠測は線形補間を行い、それ以外はCO₂フラックスと相関の高い気象要素から欠測時のCO₂フラックスを推定した。気温－群落呼吸（生態系呼吸）量および日射量－群落光合成量の関係を経験的に求め、CO₂フラックスの欠測を補間した^{54:55}。気象要素の測定値が得られない場合は近藤⁸¹などの方法で最寄のAMeDAS（軽井沢：36°20'N, 138°32'E, 標高999 m, サイトからの直線距離7.4 km）データから調査地点の日平均日射量および気温を推定し、上記のパラメタリゼーションにより群落呼吸量および光合成量を求めた。

4.3.3 EC と DBSAS の組み合わせによる フラックスの補正

第3章において、DBSAS および EC システムによる TKE および温度変動の消散率比 $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$, $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ は、相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ およびソースエリア比 $A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ によって経験的に表すことができることを示した (3.5.9)。図 3.25 に示される関係は、DBSAS と EC システムの消散率比の違いが、センサ間のソースエリアの違いに起因すると共に、EC システムによって測定された大気の相対的乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ の影響を受けて変化することを表している。そして、図 3.25 に示した関数は、DBSAS および EC システムによる消散率比が EC システムの測定値で定まる値を変数とし、EC システムによる摩擦速度及び顕熱フラックスを式 (3.9) によって DBSAS に相当する値に換算することができる。そこで、DBSAS と EC システムによる測定値の差異がソースエリアと乱流構造の関係によってもたらされるとし、式 (3.9) と同様のアナロジーを CO_2 フラックスに適用することで、DBSAS 相当の領域平均 CO_2 フラックス F_{CSAS} を算出する。 $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ および $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ を推定するための経験関数を計算するために、2002 年 6 月から年 11 月までの晴天日の測定値を用いて回帰計算を行った。

4.3.4 葉面積および光合成の測定

フラックス測定値との比較を行うために、葉面積、個葉の光合成量の測定を行った。タワーを中心とした 60 m (N-S) $\times$ 140 m (E-W) の範囲を 10 m $\times$ 10 m の区画に分け⁸²、全ての生態データ取得の基準とした。

葉面積の季節変動を明らかにするために、開口部 1 m $\times$ 1 m の落葉採取装置 (リタートラップ) を林床から 1.3 m の高さに千鳥状に 19 個配置し (図 4.2B)、9 月中旬から 11 月上旬の落葉期に落葉・落枝を定期的に採取した。リター採取の方法などは、森林立地調査法編集委員会⁸³ によった。また、強風などによる落葉期以外の落葉・落枝を考慮して着葉期の 6 月から 9 月上旬まで、平均的な落葉量を示した 3 個所のリタートラップを用いて落葉量を調査した。あらかじめ樹種ごとの葉の乾燥重量と葉面積の関係



図 4.2 (A) リーフチャンバによる個葉の光合成反応の測定および (B) 林床に設置したリタートラップ。

を表す 1 次回帰式を求めておき、採取した落葉サンプルを 80°C で乾燥した後に、樹種ごとに分類して乾燥重量から葉面積を求めた⁸⁴。こうして求めた全ての葉面積をリタートラップごとに積算し、その平均値を林冠に存在した全ての葉の面積と見なして、調査区域の LAI (Leaf Area Index: 葉面積指数) を求めた。

単葉の光合成量の測定は、林冠構成木および中低木を対象とした。林冠構成木として、調査地点の森林を構成する樹木の地上部 (枝+幹) 炭素量の 44.3% を占める優占種であるダケカンバを選定した。渦相関法を実施したタワーの北側に隣接したダケカンバの高度 9 m 付近にある任意の成熟した個葉を測定対象とした。単葉の光合成量の測定には、携帯型光合成蒸散量測定装置 (LI-6400, Licor USA) を用いた (図 4.2A)。当装置は小型のリーフチャンバを備え、チャンバ内の気温、湿度および CO_2 濃度を外部

環境に追従させて制御できる。測定時のチャンバー内の気温、湿度は外部環境と同様となるように制御し、チャンバに流入する CO_2 濃度は外気より 10 ppm 高濃度となるように調節した。葉が十分に光飽和する光強度から 7 段階 (2000, 1500, 1000, 500, 200, 100, 0 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) に変化させ、最も光合成能力が高いと考えられる 7 月から 9 月の期間で光強度に対する光合成量の反応 (光-光合成反応) を調べた。また、中低木として、ナナカマド、ノリウツギ、ミズナラ幼木の光合成量を測定した。林床にはオシダ、マイヅルソウなどが繁茂しているが、林冠が閉塞しているため林床レベルの入射光量が非常に小さく、また林床植物の光合成能そのものが低いために、群落光合成量において林床植物の光合成量はほとんど無視できることを確認した。

4.3.5 土壌呼吸量の測定

廉価な CO_2 分析計 (GMD20, Vaisala, Finland) を用いた循環型土壌呼吸チャンバの測定値と、多点の低コスト評価法を組み合わせることで、土壌呼吸量の空間的偏差を評価し、地点の代表的な値を得た。土壌に伏せた密閉チャンバ内に放出される CO_2 をアルカリ溶液に吸収させ、回収したアルカリ溶液を滴定分析することで、吸収された CO_2 量の日積算値を求めるアルカリ (あるいは密閉) 吸収法は、廉価で単純な測定手法のため、多点計測が容易に行える利点がある。しかし、アルカリ吸収法は、チャンバ内の CO_2 濃度が周囲の大気に比べて大幅に低くなるため、土壌からの CO_2 拡散量に影響を与え、土壌呼吸量を過大評価する傾向が知られている。そこで、従来のアルカリ吸収法を多点で実施し、土壌呼吸量の空間偏差を把握した上で、より高精度な計測装置によって定量的な補正を施すことにより、対象地点を代表する値の評価手法を開発した⁸⁵。この手法の特徴は、改良した土壌呼吸チャンバに、アルカリ吸収法を採用することで、高精度な CO_2 分析計を用いる装置に比べて大幅なコストダウンを図ることができる。補正用に開発した循環型土壌呼吸チャンバは直径 210 mm、高さ 200 mm のステンレス製の円筒で、チャンバ内の大気を均等に吸引できるように配置した多数の吸引口を通して、

CO_2 をアルカリ溶液に吸収させる装置である⁸⁵。アルカリ溶液を通過した気体は再びチャンバ内に戻されるが、チャンバ内の CO_2 濃度が設定値を下回るとバッテリー駆動のポンプが停止し、外気 CO_2 濃度との格差が小さく保たれる (図 4.3)。同時に、ステンレス円筒 (直径 137 mm、高さ 250 mm) 内にアルカリ溶液を浸したスポンジを設置し (図 4.4)、アルカリ溶液に吸収された CO_2 量の日積算値を求めた⁸⁶。循環型チャンバによって、コドラート内 9 点で実施したスポンジ吸収法の測定値を統計的に補正し、試験地点の土壌呼吸量を算定した⁸⁵。

4.4 結果と考察

4.4.1 フラックス連続観測の結果

2002 年から 2005 にかけての年毎のフラックスデータ欠測率はそれぞれ 15%, 5%, 3%,

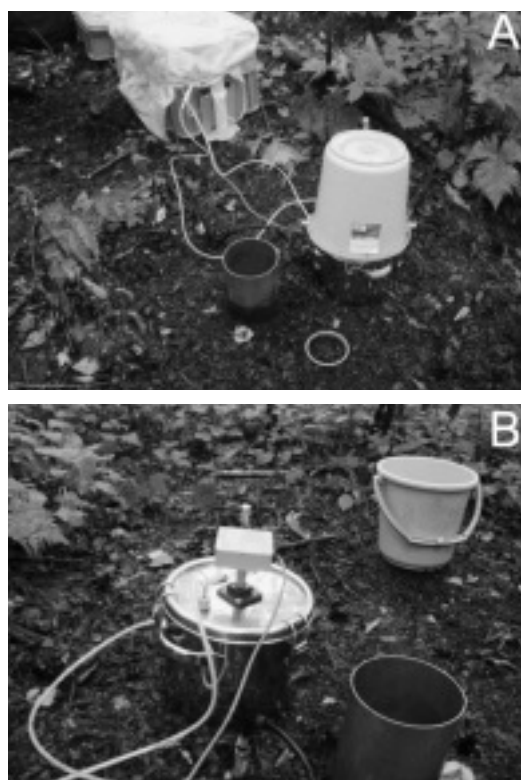


図 4.3 循環型チャンバを用いた土壌呼吸量の測定。(A) ポンプを納めたコンテナ横のメスシリングにアルカリ溶液を満たし、チャンバ内の CO_2 を吸収させる。(B) チャンバ内の CO_2 濃度をモニタリングするためのセンサ。

11%で、落雷による停電、メンテナンス、悪天候、機器の故障などが原因であった。FLUX NET^{54:55} や Asia Flux⁶ などでは信頼性の高いフラックス測定のために、乱流データのクオリティコントロール(QC)が提言されている。QCでは乱流の成立性が乏しい状況での渦相関法は信頼性が低いとして、摩擦速度 u_* や時系列データの定常性に基準を設け、基準に満たないデータを棄却して補間の対象とする。このため、標準的な森林フラックスサイトの欠測率は30%程度と言われている。しかし、本報告では、渦相関法の信頼性が低いとされる乱流の乏しい状態あるいは対流の大きな状態における計測値も含めてシンチロメータのデータと比較し、その結果に基づいて領域平均フラックスを算出するため、センサ上の凝結水や氷結などに起因する異常値を除いて全てのデータを用いた。また、



図 4.4 アルカリ吸収法による土壌呼吸量の測定。(A) 林床に設置したステンレス円筒内の CO_2 をアルカリ溶液に吸収させる。(B) 円筒内に設置されたアルカリ溶液を浸潤したスポンジ。

回帰計算を行った期間における DBSAS 単体の欠測率は約 40%であったのに対し、渦相関法は約 5%であった。

4.4.2 EC と DBSAS の組み合わせによる NEE の補正

補正パラメータ $\epsilon_{\text{SAS}}/\epsilon_{\text{EC}}$ および $\epsilon_{\text{TSAS}}/\epsilon_{\text{TEC}}$ は、EC システムの測定値から得られる相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ とソースエリア比 $\text{RA} = A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}}$ から計算される。RA は、平均風向が DBSAS の測定パスに直交する際に大きく、平行する際には小さく変化するように定義されている (図 3.19)。この RA をある一定値としてすべての風向に適用することは、DBSAS のソースエリアが小さくなる条件でも、仮想的ソースエリアが大きい条件で補正することに相当する。そこで、 F_{CSAS} が得られると考えられる最適な RA を計算するために、年間のエネルギー収支と RA の関係を調べた (図 4.5)。昼間の不安定時および夜間安定時共に、RA の増加にしたがってインバランス率 $\text{IR} = (H + LE - R_n)/R_n$ が増加する効果が見られた。特に、夜間安定時はその効果が強かった。次に、熱フラックス及び CO_2 フラックスの時系列における補正効果を見るために、図 4.5 の $\text{IR} = -0.2, -0.1, 0.0$ にそれぞれ相当する RA についての補正結果を図 4.6 に示す。EC 法による顕熱および潜熱フラックスに鉛直移流項を加えた熱フラックス ($H_{\text{EC}} + \lambda E_{\text{EC}} + V$) に比べ、DBSAS 補正による顕熱及び潜熱フラックス ($H_{\text{SAS}} + \lambda E_{\text{SAS}}$) が明らかに大きくなって、純放射量 R_n に接近していること

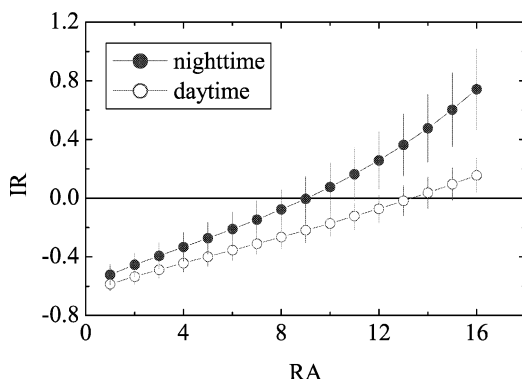


図 4.5 ソースエリア比 RA とインバランス率 IR の関係。IR は 4 年間の平均値。

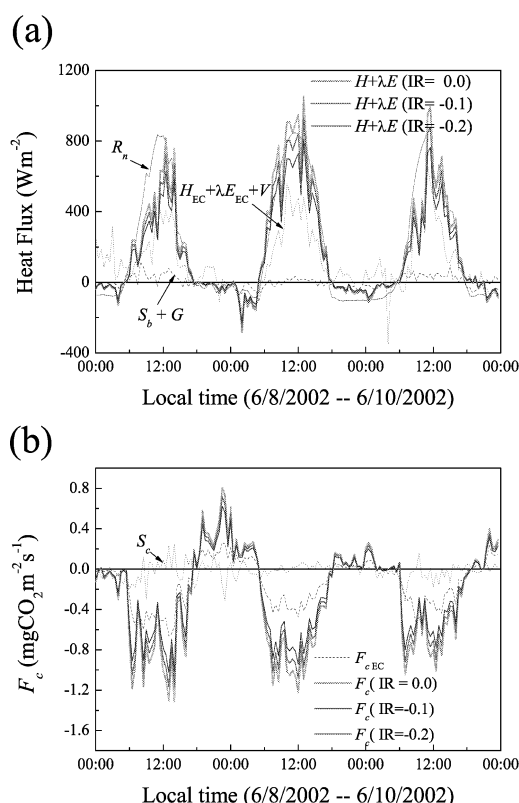


図 4.6 (a)熱フラックスおよび(b)CO₂フラックス時系列におけるDBSASによる補正効果の比較。

が分かる。また、CO₂フラックスは、エネルギーインバランスが解消されるに従って昼間の吸収及び夜間の放出の強度が増幅されている。今回の解析で用いなかった植物体に蓄えられる熱の変化量（バイオマス貯熱変化量）が熱収支に関与することと、過剰な補正による誤差の拡大を防ぐ観点から、インバランス率 $= -0.2$ を示すRAを求めた（夜間7.0，昼間9.6）。これによって補正パラメータ $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ および $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ が、 $\sigma_w/\bar{u}$ の変数として表され、渦相関センサの測定値に基づいて F_{CSAS} が得られた。

F_{CSAS} は、 $\sigma_w/\bar{u}$ が小さな領域では渦相関法によるフラックスより大きな値を示し、 $\sigma_w/\bar{u}$ が大きな領域では渦相関法より小さな値を示す。その結果、夜間の放出および昼間の吸収量ピークが大きく見積もられ、日変動の振幅が拡大する。図4.6(b)に示したCO₂フラックスの時系列では、放出・吸収ピークが拡大する傾向が見

られる。このため、 NEE_{SAS} に基づいて計算される群落光合成量や、群落呼吸量も変化することになる。

4.4.3 NEE_{SAS} と土壌呼吸量との比較

森林におけるCO₂放出を表す群落呼吸（あるいは生態系呼吸） R_e は、植物の呼吸 R_a と、土壌有機物分解および土壌動物の呼吸による林床面土壌から大気へのCO₂フラックス R_h から成る。 R_a は、葉（ R_l ）、幹・枝（ R_t ）、根（ R_r ）の呼吸で構成される。森林上で観測したNEEからは、 R_e に相当する情報が得られる。一方、林床面から群落内大気へのCO₂放出を表す土壌呼吸 R_s の内訳は、 R_h と根の呼吸 R_r で、土壌呼吸チャンバを用いた実測によって評価することができる。そこで、フラックスから算出した群落呼吸量の妥当性を確かめるために、NEEから導いた群落呼吸量とチャンバーによる土壌呼吸量を比較する。

群落光合成量 A_g ，群落呼吸量 R_e およびNEEの関係を以下に示す。

$$\text{NEE} = -A_g + R_e \quad (4.3a)$$

$$R_e = R_a + R_h \quad (4.3b)$$

$$R_a = R_l + R_t + R_r \quad (4.3c)$$

$$R_s = R_r + R_h \quad (4.3d)$$

夜間は $A_g=0$ なので、NEEが群落呼吸量となる。群落呼吸量は温度との相関が高く、温度に対する群落呼吸量のパラメタリゼーションには一般に Q_{10} 式と呼ばれる(4.4)式が用いられる⁸⁷。

$$R_e = R_0 Q_{10}^{T/10} \quad (4.4)$$

ここで、 T (°C)は温度、 R_0 は基準温度(273.15 K)における R_e である。 Q_{10} は温度係数で、基準温度から10 K上昇したときの R_e の増加割合を表す。調査地点の R_e を解析するために、 F_{CSAS} およびEC法によるNEEの夜間のデータと地上高さ3 mの位置の気温(T_{3m})の関係から、パラメータ Q_{10} 、 R_0 を各年について決定した(図4.7，表4.1)。次に、夜間の温度－呼吸量の関係が昼間でも同様に成り立つと仮定することで、気温と(4.4)式から昼間の R_e を推定した。

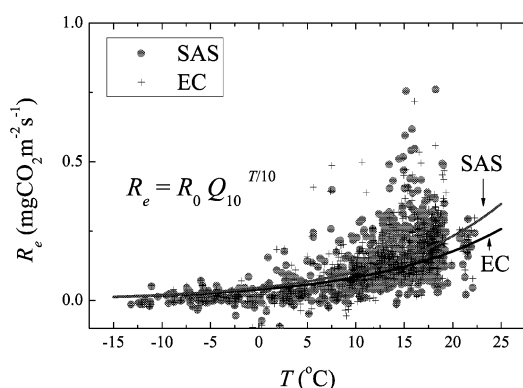


図 4.7 地上 3 m (a. g. l.) の位置における気温と群落呼吸量の関係 (2004 年)。

群落呼吸量 R_e と同様に、土壌呼吸量 R_s は地温との相関が高く、地温を変数とする関数で土壌呼吸チャンバの計測値を良く表すことができる。そこで、安池他⁸⁵らが明らかにした軽井沢サイトにおける関数を用いて、地表面下 2 cm 位置の地温測定値から観測期間における R_s を求めた (図 4.8)。

EC 法にもとづく群落呼吸量 R_{eEC} は、チャンバーによる土壌呼吸量 R_s をおおむね下回る結果となったのに対し、 NEE_{SAS} に基づく群落呼吸量 R_{eSAS} は、 R_s を全て上回った (表 4.1)。式 (4.3) からわかるように、群落呼吸量 R_e は、 R_s に植物地上部の呼吸量が加わったもので、 R_s を下回る R_{eEC} は炭素収支上の矛盾がある。小林他⁸⁸は、当サイトにおける大気中の炭素安定同位対比の変化と、 R_h および R_r の分別測定の結果⁸⁹ との比較を通して、群落呼吸量を構成する個別フラックスの比率を明らかにした。2004 年 8、9 月の平均値で、植物地上部、根、土壌微生物・有機物分解の割合 ($R_t + R_l$, R_r , R_h) は、それぞれ 0.34, 0.42, 0.24 であった。この結果からも、群落呼吸において植物地上部の呼吸量が無視できないことは明らかであり、 R_s を上回る R_{eSAS} は炭素収支上の矛盾がない。

また、年平均気温が最も低かった 2003 年の R_e は 4 年間の最小値を示すのに対し、 R_s は平均地温を反映して 2002 年が最小値であった (表 4.1)。両者の傾向が一致しなかったのは、植物地上部の呼吸量の影響による。一方、地温および気温が共に最も高かった 2004 年は、 R_s およ

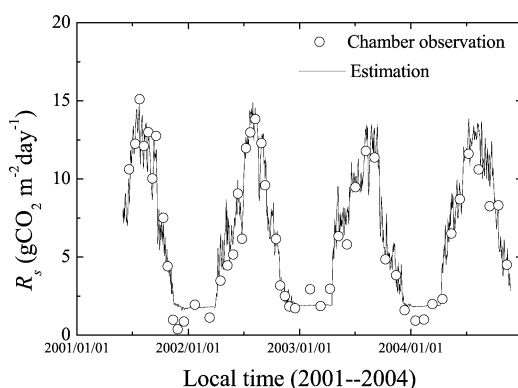


図 4.8 地温から推定した日土壌呼吸量と循環型チャンバー実測値の対応。

び地上部の呼吸量が最大となり、 F_{CSAS} による R_e も最高値を示し、年々変動という点では、 R_{eEC} と R_{eSAS} 共に同様の傾向となった。

この解析では、乱流状態に乏しいとして QC において棄却されることの多い低 u_* 時のデータも補正の対象としている。 u_* の値に閾値を設けたデータ選別の結果、群落呼吸量を評価する上で系統的偏向が働くとの意見⁹⁰ もあり、こうした QC にも議論が残されている。より広いソースエリアを持つ DBSAS は、局所的に乱流状態が乏しい状況でも乱流輸送をとらえることが期待でき、低 u_* 時のデータも上記の方法で DBSAS 相当のフラックスへの補正が可能と考えられる。

4.4.4 NEE_{SAS} と群落光合成量との比較

本章では、光合成量との比較を通して NEE_{SAS} の特性を明らかにする。着葉期における昼間の NEE は、光合成を反映して森林への吸収を示す。しかし、森林上空で観測される CO_2 吸収の瞬時値は大気乱流輸送の結果で、必ずしも葉面の CO_2 吸収とは一致しない。このため、時間平均値など統計値による比較を行う必要がある。 NEE によって評価される群落光合成量は、森林全体の正味光合成量に対応する。一方、葉の光合成量はリーフチャンバによって実測が可能である。しかし、森林は複雑な立体構造を持ち、林床面積あたりにその数倍の面積の葉が存在する。このため、個葉において計測された光合成量を群落光合成量と比較するためには個葉の計測結果を群落に拡張する必要がある。本

節では、群落最上端に入射する光の強度と葉の光－光合成量の関係および葉面積から、群落光合成量を簡易に評価する。

群落光合成量のパラメタリゼーション

NEE と群落呼吸量の差は同化作用による群落光合成量 (式 (4.3) の A_g) を示す。群落光合成量は、Michaelis-Menten タイプの飽和曲線によって次のようにパラメタライズされる⁸⁰。

$$A_g = P_m \text{PAR} / (\text{PAR} + P_m / \alpha) \quad (4.5)$$

PAR (Photosynthetically active radiation) は群落上に入射する光合成有効放射量 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 P_m は最大光合成量 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) を表し、 α は初期光合成効率を表す。式 (4.3) に従って、PAR に対する、群落呼吸量 (式 (4.4) を差し引いた NEE のプロットに、式 (4.5) をフィットしてパラメータを決定した。また、こうして求めたパラメータと入射光量から A_g を、式 (4.4) の温度－群落呼吸量の関係から R_e を算出し、(4.3) から欠測時の NEE を推定した。

葉面積の算出

次に、個葉の光合成量を群落光合成量 A_g に換算するための葉面積の算出結果を示す。落葉量から積算した最大葉面積指数 (LAI: Leaf area index) は、2002 年から 2004 年までそれぞれ 5.6, 6.3, 6.8 (m^2m^{-2}) で、増加傾向を示した。

図 4.9 に示した葉面積指数の変化を見ると、展葉が完了した 6 月から、落葉が開始する 9 月

までの期間も落葉が継続している。調査地点の優占種であるダケカンバは、春の一次展葉の後に 2 度目の伸張をすることが認められた。これは、ダケカンバやヤマハンノキに顕著な現象として知られており^{91,92}、6 月から 9 月の期間中も二次伸張による展葉が継続している場合、リタートラップは主に展葉が完了した葉を採集するため、落葉量から逆算した LAI は、実際に林冠に存在する葉面積を過大評価することになる。また、落葉直前には、窒素化合物が葉から幹に回収されるため、緑葉に比べて乾物重量－面積比が小さくなると考えられる。これらの現象は、リタートラップの解析のみでは捉えることができないが、二次伸張と養分回収は、面積－乾燥重量の関係において相殺される関係にある。全落葉重量に占めるダケカンバの落葉重量はほぼ 41% 程度で、葉面積換算では約 31% で、全葉面積における中低木の葉の割合は 30% であった。

群落光合成量の算出

立体的な空間構造を持つ森林群落では、存在する位置に応じた葉の光への順化があることが知られており⁹³、その関係を関数化することで、群落光合成量の算定に適用されている^{94,95}。しかし、ダケカンバやカラマツのような典型的な陽樹は林冠内が十分に明るく、葉の順化の差が明確ではないと考えられる。実際、個葉の光合成量はばらつきが大きく、林冠上位の葉と下位の最大光合成量に明確な傾向が見られなかったため、タワーから計測可能な複数の葉の平均値を用いてダケカンバ葉を代表させた (図 4.10)。その結果、リーフチャンバによって計測したダケカンバ個葉の最大光合成量 P_m の平均値は、 $19.3(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$ であった。また、中低木 (ナナカマド、ミズナラ低木) の P_m の平均値は $5.6(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$ で林冠構成木の半分以下であったが、少ない光量で迅速に最大値に達する特性があった。NEE_{SAS} による A_g は、7 月と 8 月に最大値を示し、その値は 2002 年から 2004 年の各年において、 $38.6, 43.2, 40.9(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$ であった。

Beer の法則に従い、群落内のある水平面にあたる光強度は I は、次式で表される。

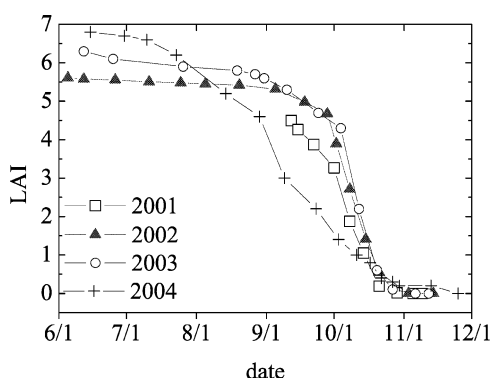


図 4.9 リター積算に基づいた落葉期の LAI の変化。参考のために 2001 年の値も示した。

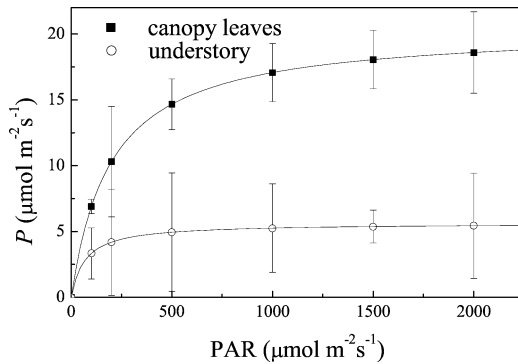


図 4.10 個葉における入射光量 PAR と光合成速度 P との関係 (2003 年 8 月)。

$$I = I_0 e^{(-KF)} \quad (4.6)$$

ここで、 I_0 は群落上端の入射光で、 K は葉の角度や大きさ、葉の空間分布などで決まる群落内の吸光係数である。本論文では便宜的に $K = 0.5$ とする。積算葉面積 F の位置で葉群が受ける単位面積あたりの光量 I_{inc} は、 I の微分の絶対値として表される⁹⁶。

$$I_{inc} = I_0 K e^{(-KF)} / (1 - a) \quad (4.7)$$

a は葉の透過率で、ダケカンバ葉の平均値は 0.14 であった。次に、葉群への入射光量 I_{inc} に対する光合成量 P は (4.5) 式の PAR を I_{inc} とすることで算出できる。図 4.11 に、積算葉面積に対する葉群への入射光量 I_{inc} の変化および式 (4.5) に I_{inc} を代入して求めた光合成量 P を示した。林冠構成木の光合成量 (P_{up}) をダケカンバで代表させ、中低木の光合成量 (P_{low}) と共に示した。そして、 P を F で積分することにより、群落全体の光合成量 P_{can} を計算することができる。落葉の分別から求めた中低木の葉面積指数を LAI_{low} として、 P_{can} は次式で表される。

$$\begin{aligned} P_{can} &= \int_0^{LAI} P dF \\ &= \int_0^{LAI-LAI_{low}} P_{up} dF + \int_{LAI-LAI_{low}}^{LAI} P_{low} dF \end{aligned} \quad (4.8)$$

このモデルでは水分不足による気孔閉塞がもたらす昼寝現象などは考慮していない。また、窒素含量によっても光合成速度は律速される。し

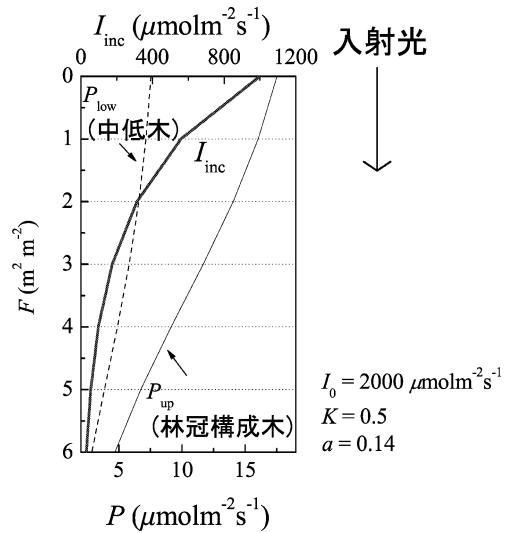


図 4.11 単位面積あたりの葉群が吸収する光量 I_{inc} および光合成量 (P) の積算葉面積 (F) に対するプロファイル。

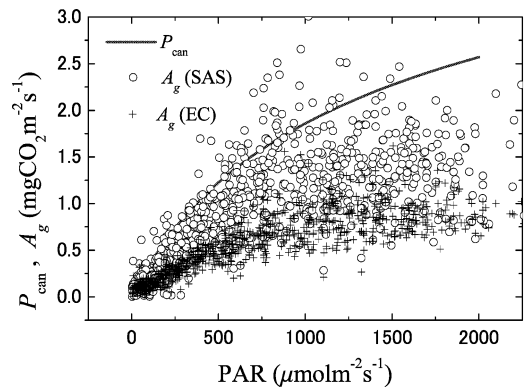


図 4.12 群落光合成のポテンシャルおよび群落光合成速度の入射光量 (PAR) との関係 (2004 年 7 月)。

たがって、本計算結果は群落光合成のポテンシャルと考えるのが適当である。植物体内の水分状態が気孔の開閉に影響したり、乱流の状態によって CO_2 の交換量に変化するなど、NEE は光-光合成曲線を中心に分散すると考えられる。図 4.12 に示すように、 NEE_{SAS} による A_g の分布は、 NEE_{EC} による A_g に比べて P_{can} に近づき、 NEE_{SAS} が試験地点の光合成特性をより良く表した。図 4.13 に調査地点で観測される最大光合成有効放射量 $2000 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ における群落光合成のポテンシャルと NEE から導いた群

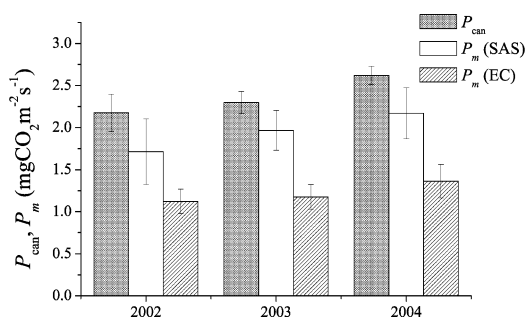


図 4.13 夏期（7 月，8 月）における群落光合成ポテンシャルと最大群落光合成速度の比較（PAR=2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）。

落光合成量を示した。EC 法の過小評価は CO₂ フラックスにおいても明らかで熱収支の過小評価と同程度であった。NEE_{SAS} による最大光合成量は、EC による最大光合成量の約 1.5 倍で、生態学的手法によって得られた群落光合成のポテンシャルに接近した。本報では、群落光合成ポテンシャルを、林冠構成種の葉量のうち 57% を占めるダケカンバ葉の光合成特性で代表させた。実際には、林冠を構成する他の樹木の光合成特性が異なることが考えられるが、それらが例えば中低木並の最大光合成量（ダケカンバの 1/2）であっても群落光合成ポテンシャルは 3/4 と計算され、過小評価は変わらない。軽井沢測候所における降水量の平年値 1197.6 mm は、さほど大きな値ではないが、2003 年から 2005 年にかけての無積雪期間における軽井沢サイトでの降水量平均値は、軽井沢測候所の 1053.3 mm に対して 1199.5 mm と 1 割程度多い。当サイトを含む軽井沢地方は霧が発生しやすく、凝結水による水分供給も推定される。林冠構成樹種に、ヤマハンノキやバッコヤナギなど湿潤な場所を好む樹種が含まれること^{97,98} から、当森林は十分に湿潤と考えられ、水ストレスが原因となって実際の光合成量が光合成ポテンシャルの計算値を大きく下回る状況は起こりにくいと推察される。

4.4.5 NEE_{SAS} の特性

NEE_{SAS} から導いた群落呼吸量とチャンバによる土壌呼吸量を比較した結果、群落呼吸量が土壌呼吸量を上回るという点で量的関係に矛盾がなく、年々変動の傾向においては DBSAS と

EC 法による結果が一致した。また、NEE_{SAS} から導いた群落光合成量は、EC 法の結果を上回り、個葉の光合成特性に基づく群落光合成ポテンシャルに近い値となった。これらの結果から、広域のソースエリアを持つ DBSAS による EC 法の補正は、CO₂ フラックスを積算することによって得られる NEE においても、矛盾なく適用できることがわかった。また、熱フラックスの収支を判断材料として、フラックス測定の妥当性を評価する方法論が支持される結果となった。

本結果は、当試験地特有の現象を捉えたものである。しかし、他の測定サイトにおいても、渦相関法と DBSAS と組み合わせた観測によってサイト固有の補正関数を求め、領域平均フラックスを求めることが原理的に可能と考えられる。そのための課題は、(1)補正関数を求めるのに必要な時間、(2)樹高や林冠の状態の変化による補正関数の変化、(3)十分な平均化領域を得るためのシンチロメータのパス長、などが考えられる。単一のタワーサイトでも、前章に示すような高所作業車を活用することで DBSAS の適用が可能となる。

4.4.6 NEE_{SAS} に基づく森林 CO₂ 収支の評価

表 4.1 に示したように、年間の NEE は大きな年変動を示す。これには、降水量、日射量、気温および水蒸気の飽差などの気象条件に加えて、病害虫なども複合で影響すると考えられる。例えば、2004 年は、他の年より落葉時期が早く、9 月中に葉量を減らしたにもかかわらず総生産量（GPP：Gross primary production）は高かった。GPP は、群落呼吸量 R_e と生態系純生産量 NEP ($\approx -\text{NEE}$) の和で表され、森林全体の光合成による産物を表す。これは、着葉期間の積算日射量が大きかったことによる。平年値に相当する森林の CO₂ 吸収量を得るためには、複数年に渡って調査を行う必要がある。

DBSAS による NEE の補正は、時系列変化の振幅を増幅するように働き、CO₂ の吸収・放出が強調された（図 4.14a）。その結果、NEE_{SAS} から算出した群落呼吸量 R_e および総生産量 GPP は EC 法の結果より大きくなった（表

表 4.1 渦相関法 (EC) および DBSAS 補正 (SAS) による炭素収支の評価結果と気象要素。
炭素収支に関する各要素は実測値に補間を施した値。日射量の積算は 5 月から 10 月
までの着葉期間を対象とした。GPP=NEP($\approx -NEE$) + R_e (計算値)。

		2002年	2003年	2004年	2005年
積算日射量	MJm^{-2}	2523	2362	2796	2650
年平均気温 (3m)	$^{\circ}\text{C}$	6.6	6.0	7.3	6.0
年平均地温 (−0.2m)	$^{\circ}\text{C}$	7.7	8.0	9.4	8.0
4–11月降水量	mm		1196.8	1686.2	715.4
4–11月降水量 (軽井沢)	mm	1052.5	1054.5	1262.5	843.0
NEE_{EC}	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	−663	−366	−832	−861
NEE_{SAS}	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	−990	−495	−1052	−1217
GPP(EC)	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	2603	2060	3270	2955
GPP(SAS)	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	4235	3149	4400	4539
R_s	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	2101	2119	2291	2203
R_{eEC}	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	1939	1694	2438	2093
R_{eSAS}	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	3245	2654	3355	3322
R_{0EC}	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.66	0.59	0.53	0.50
R_{0SAS}	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	1.20	1.05	0.73	0.85
Q_{10EC}		2.21	2.18	2.90	2.89
Q_{10SAS}		2.06	1.96	2.90	2.74

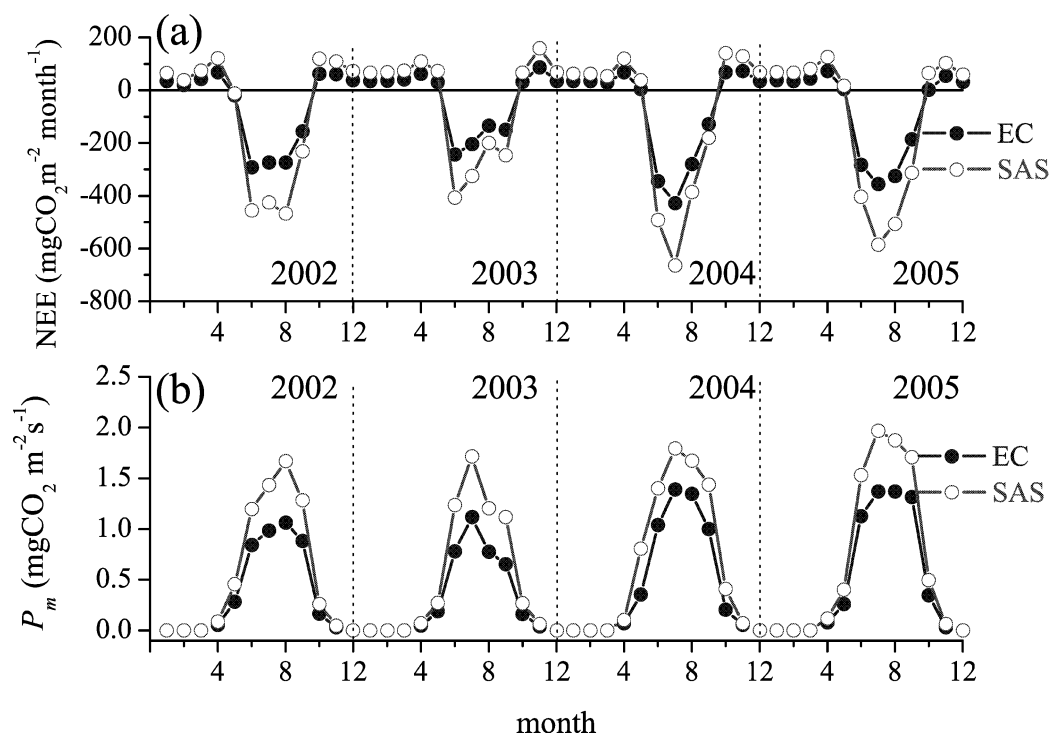


図 4.14 EC 法および DBSAS 補正による (a) 生態系純交換量 (NEE) および (b) 群落最大光合成量 (P_m) の比較。

4.1, 図 4.14b)。生態系純交換量に関しては, 4 年間の平均値で, $NEE_{EC} = -682 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ に対し, $NEE_{SAS} = -935 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ となった。Saigusa et al.⁷⁷ が, 調査地点と類似した立地条件の 40 年生のダケカンバ林で 1998 年から 1999 年に実施した渦相関法によるフラックス測定では, $NEE = -598 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1} (-163 \text{ gC})\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ で当サイトの結果に近い値であった。また, エネルギーインバランスが解消するように, 顕熱及び潜熱フラックスに乗じる係数を求め, 同じ係数を CO_2 フラックスにも適用したところ, $NEE = -785 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1} (-214 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1})$ となり約 1.3 倍となった。群落呼吸量 GPP について比較すると, EC 法で $3208 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1} (875 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1})$, 補正後では $4202 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1} (1146 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1})$ ⁷⁷ で, 当サイトの 4 年間平均値 $GPP_{EC} = 2724 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ および領域平均フラックスによる $GPP_{SAS} = 4081 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ と同等の結果であった。本論とは異なった補正法を用いているが, 当所の結果と同様に渦相関法による過小評価が起こっていると考えられる。気象条件の類似した測定例として, Wang et al.⁷⁸ が 2001 年に苦小牧において実施した 45 年生のカラマツ 2 次林におけるフラックス測定では, NEE は $-517 \sim -880 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1} (-141 \sim -240 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1})$ で, 異なる樹種においても同等の NEE が見られた。

4.5 ま と め

森林の炭素収支の面から小口径シンチロメータ (DBSAS) による空間平均化効果を確認することを目的として, DBSAS のソースエリアおよび相対乱流強度から決定した関数を用い, 渦相関 (EC) 法の測定値を補正して生態系純交換量 (NEE) を算出した。EC 法の結果から算出した群落呼吸量が, 時として土壤呼吸チャンバによる土壤呼吸量を下回り, 植物地上部の呼吸量を考慮する上で矛盾が生じた。これに対し, 補正によって夜間の CO_2 放出量が上方修正され, 補正を施した群落呼吸量は, チャンバ実測による土壤呼吸量測定結果とも整合した。DBSAS 補正によって, CO_2 の吸収と放出がともに変化することで炭素収支が変化した結果, 生態系純交換量 (NEE) が増加する結果となった。また,

EC 法の結果から算出した最大光合成量が, 個葉の光合成特性と葉面積から導いた計算値を大きく下回ることに対し, 補正値は計算値に近づくことがわかった。以上より, 広域のソースエリアを持つ DBSAS による EC 法の補正は, フラックスを積算することによって得られる NEE においても, 有効に適用できることがわかった。

第 5 章 総 合 考 察

第 1 章では, 緒論として乱流フラックス測定の意義と問題点としてエネルギーインバランスについて述べ, 新たな乱流測定装置によるエネルギーインバランスの原因解明と, 問題を改善する手法の開発を本論文の目的とした。第 2 章では, フラックス測定におけるソースエリアが大きいと期待される小口径シンチロメータ (DBSAS) を落葉広葉樹林の林冠上に適用し, 適用上の問題点について述べた。第 3 章では, フラックス測定の不確定さの指標であるエネルギーインバランスの発生要因について考察し, 空間平均化のスケールが増大するために, ソースエリアの大きなセンサを用いると熱収支のインバランスが向上することを示した。第 4 章では, DBSAS と渦相関 (EC) システムによる測定値の差異がソースエリアと乱流構造の関係によってもたらされるとした熱フラックスに関するアナロジーを, 同様に CO_2 フラックスに適用することで, DBSAS 相当に補正した CO_2 フラックスから NEE を算出し, 土壤呼吸や光合成などの生態データとの比較を通して, DBSAS による EC 補正の有効性に言及した。

これまで, 様々な地表面において DBSAS や大口径シンチロメータ (LAS) を用いた測定例があったが, 林冠上へ適用した事例はほとんどなかった。それは, タワーの振動に起因する測定エラーが予想されることや, 測定システムのセッティングの困難さに一因があるものと考えられる。しかし, もっとも大きな懸念は, 林冠上で Monin-Obukhov 相似則 (MOST) の妥当性が確認されていないことであった。シンチレーション法によるフラックス導出には MOST の成立が前提である。事実, 今回得られ

た無次元消散率の測定結果には、平坦な地表面上で得られた MOST 普遍関数への不一致が見られた (2.5.2)。DBSAS の u_* が EC 法による測定値を過小評価するという報告があり、今回の結果でも同様の傾向が得られたが、TKE 消散率における普遍関数との乖離が主な原因と考えられた。一方、タワーの振動、DBSAS のビーム間距離 (2.5.3)、水蒸気の影響 (2.5.2) などは深刻なエラー要因とは認められなかった。しかし、これらの結果から林冠上では MOST が成立しないという結論を導くことはできない。今回検討した無次元消散率は、森林に設置された単一タワー上の EC システムによるものであったが、こうして得られた測定値に何らかのバイアスが存在するとすれば、そこから算出された無次元消散率そのものに偏向が存在することになる。DBSAS の一次的な出力である TKE および温度変動の消散率は、EC システムによる測定値から算出した消散率に対して特徴的な差異を示した。相対的な乱流強度に応じて変化する DBSAS と EC システム間の消散率の比は、両者間のバイアスを示している。当然 DBSAS 側にもバイアスが存在するが、DBSAS による顕熱フラックスは EC 法の結果を上回る傾向があり、フラックス測定の不確定さの根拠であるエネルギーインバランスを緩和させるように働いた (2.5.2)。

フラックス測定のインバランスは、測定誤差や測定システムの不備によっても引き起こされ得るが、鉛直移流項を評価しないことが本質的な原因であるという説が有力になってきた。LES 実験で示されたように、林冠上の粗度層 (RSL) に大規模な組織乱流構造 (TOS) が定常的に存在するとすれば、点測定の時空間スケールでは総フラックスに占める鉛直移流項の寄与が大きくなる。実際には、EC センサーは、あるソースエリアを持ち、時空間平均値を測定する。しかし、TOS の空間スケールが EC のソースエリアより十分に大きい場合には、単一タワーの EC システムは、上記の点測定と同様のロジックで総フラックスを過小評価し、局所的な鉛直移流項が存在すると考えられる。このような状況下で総フラックスを正しく評価する

ためには、TOS のスケールに対応した多点の EC 測定値を平均するか、十分に測定上のソースエリアの大きな測定装置を用いる必要がある。

では、TOS は実際に林冠上に存在するのであろうか。軽井沢サイトでは風上の山体によって、水平風速と風向がよじれる地形効果が見られた (3.5.4)。しかし、 $\bar{w}$ にはタワー間における相関は見られない一方で、風速の鉛直成分との共分散であるフラックス測定値 $w's'$ の偏差が明確に存在することが確認された (3.5.4)。また、すべての風向でインバランスが見られるとともに、2 点のタワー間で熱フラックスの偏りが大きくなるほど、両タワーで観測されるエネルギーインバランスが大きくなることがわかった (3.5.6)。これらの結果は TOS の成立を状況的に支持する。また、このような条件下では、Lee タイプの鉛直移流項⁶⁰ は、 $\bar{w}$ の正しい評価が困難なため、単一タワーでの評価はインバランスの解消に対しては有効ではない。EC と DBSAS (3.5.7) および、直交するパス設定の DBSAS 同士の比較 (3.5.8) を通してソースエリアが大きいほど、温度変動の消散率が空間平均されて値が大きくなることが、昼間の大気不安定時に確認された。これは、TOS のスケールに対してセンサのソースエリアが相対的に拡大することで局所的な鉛直移流の寄与が小さくなった結果と解釈できる。DBSAS がより広域の平均値を測定しているとする、DBSAS と EC 間の消散率の差異と強く関連する相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ は、単一タワー EC によって計測された TOS の存在の尺度となる可能性がある。

こうした結果を基に、相対乱流強度 $\sigma_w/\bar{u}$ およびソースエリアをパラメータとする経験関数を求めることで、EC システムによる u_* および H を DBSAS 相当の値に補正できることを示した (3.5.9)。更に、DBSAS と EC システムによる測定値の差異がソースエリアと乱流構造の関係によってもたらされるとし、同様のアナロジーを潜熱フラックス LE に適用することで、この補正によってエネルギーインバランスが緩和されることを示した。また、このような補正は、乱流状態が乏しいとしてクォリティコント

ロールで棄却対象となるデータも対象とすることができる。DBSAS と EC センサを組み合わせた新たな補正手法は、乱流フラックス測定の検証と修正において有効である。この方法論は、既存の単一タワーサイトにも適用可能である。簡易に設置できるタワーなどを用いて、一定期間シンチロメータを設置することで経験関数を求めるなどの適用方法が考えられる (3.5.8)。

エネルギーインバランスを生じさせている現象が、他のスカラーフラックスに対しても同様のアナロジーで関わるとすれば、 CO_2 フラックス F_c の積算によって求められる NEE についても過小評価が生じることが危惧された。さらに、エネルギーインバランスがフラックス測定の不確定さの根拠として位置づけられているが、放射センサと乱流フラックスセンサのフットプリントが大きく異なる場合、必ずしもインバランスが測定の代表性の尺度とは限らない。 λE と同様に F_c に DBSAS 補正を施した生態系純交換量 NEE_{SAS} を求め (4.3.3)、森林の炭素収支の切り口から DBSAS 補正の特性を調べることは、こうした問題に対する一つのアプローチであった。簡易群落光合成モデルとの比較を通して、EC システムによる NEE_{EC} では過小評価が推察されたのに対し、 NEE_{SAS} では過小評価が緩和された (4.4.4)。DBSAS 補正によって、 CO_2 の吸収と放出が変化し、収支としての生態系純生産量 (NEP) が増加する結果となった (4.4.6)。また、夜間の CO_2 放出量が上方修正された結果、群落呼吸量が大きく見積もられ、土壌呼吸チャンバの結果とも整合した

(4.4.3)。DBSAS 補正の際に、経験関数の設定によって補正の強度や精度が変化するため、この回帰精度の向上が課題である。しかし、EC システムによるフラックス観測では、エネルギーバランス同様に NEE 評価にも過小評価が生じており、空間平均値の取得によってフラックス測定における領域代表性が向上することは明らかである。

ここで得られた結果は、固有森林におけるものであり、地形や森林構造が異なれば異なった結果になりうる。今後、この成果を一般化していくためには、異なった樹種や地形での DBSAS と EC システムとの比較を重ねていく必要がある。また、DBSAS 補正に経験関数を用いることの是非やその関数形について更なる検討が必要であろう。乱流輸送のアナロジーが顕熱と潜熱において同様であるかどうかの問題は、温度変動の消散率と比湿変動の消散率が同時に得られる 2 波長シンチロメータを適用することで、解決に向けて大きな進歩があると期待される。

DBSAS と EC システムを組み合わせたインバランスおよび炭素収支解析の組み合わせは、林冠上の乱流輸送構造を明らかにするための有効な手段といえる。今後、地形的な TOS 生成のしやすさの検証や、複雑地形におけるフラックス測定手法の進歩に寄与することを期待する。フラックス測定が、地域スケールの物質循環のグランドトゥールース取得手段となり得れば、フラックスサイトをネットワーク化する意義が更に高まる。

付録

付表：文中に使われる記号表

記号	単位	説明
A	m^2	フラックス測定ソースエリア
A_g	$\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CO_2 フラックスより求めた群落光合成量
A_T, A_q		構造関数定数式における、気温と比湿に関する定数
B_1, B_2, B_{12}		DBSAS の 2 つのビーム強度の log 分散および log 共分散
C_T^2, C_q^2	$\text{K}^2\text{m}^{-2/3}, \text{m}^{-2/3}$	気温、比湿の構造関数定数
C_n^2	$\text{m}^{-2/3}$	屈折率変動の構造関数定数
c	$\text{mgCO}_2\text{m}^{-3}$	大気中 CO_2 密度
$c_p\rho$	$\text{JK}^{-1}\text{m}^{-3}$	空気の体積熱容量
D_{uu}, D_{ss}		乱流運動エネルギー (TKE) およびスカラー変動に関する 2 次の構造関数
d, D	mm	DBSAS のビーム間距離、受光機直径
d_0	m	ゼロ面変位：群落高 $\times 0.7$ という値が良く使われる
d_s	m	超音波風速計のパス間距離
E	$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$	蒸発量：蒸散量も含める
e_t	m^2s^{-2}	乱流運動エネルギー：turbulent kinetic energy (TKE)
F_c	$\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CO_2 フラックス
$F(x)$		風向軸を x としたときのフラックス測定のプロット
G	Wm^{-2}	地中貯熱変化量
GPP	$\text{gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$	総生産量 (Gross Primary Production)
g	ms^{-2}	重力加速度
H	Wm^{-2}	顕熱フラックス
I_0	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	群落上端の入射光
I_{inc}	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	積算葉面積 F の位置で葉群に吸収された光量
IR		インバランス率
J	Ws^{-2}	林冠気層に蓄えられる貯熱フラックス
k, K	m^{-1}	空間波数、光の波数 ($=2\pi/\lambda$)
k_{kar}		Karman 定数
L_{mo}	m	Monin-Obukhov 長 (安定度長さ)
L_p	m	DBSAS の測定パス長
l_0		乱流運動エネルギーの内部スケール
lE	Wm^{-2}	潜熱フラックス
NEE	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	生態系純交換量 (Net Ecosystem Exchange)
NEP	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	生態系純生産量 (Net Ecosystem Production)
n		大気中の光の屈折率
p	hPa	気圧
P	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	光合成量
PAR	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	光合成有効放射量
P_{can}	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	群落光合成量
P_m	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	最大光合成量
Q_{10}		群落呼吸量の温度係数
RA		DBSAS および EC システムによるソースエリアの比
R_e	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	群落呼吸量

記号	単位	説明
R_t	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	葉呼吸量
R_s	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	土壌呼吸量
R_t	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	幹呼吸量
R_n	Wm^{-2}	純放射量
R_r	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	根呼吸量
R_s	$\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	土壌呼吸量
R_0	$\mu\text{molm}^{-2}\text{yr}^{-1}$	基準温度における群落呼吸量
r	m	構造関数における実空間の距離 ($=\bar{u}\tau$)
r_{12}		シンチロメータの2つのビーム強度の相関係数
S	Wm^{-2}	総貯熱変化量
S_b	Wm^{-2}	生態系貯熱変化量
S_c	$\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	林冠内気層の CO_2 貯留変化量
s		スカラー：気温、比湿、 CO_2 など熱や物質を表す
T, q	K, kg kg^{-1}	気温、比湿
T_v	K	仮温度
u_*	ms^{-1}	摩擦速度
u, v, w	ms^{-1}	風速の水平2成分と垂直成分
V	Wm^{-2}	鉛直移流フラックス
z	m	測定高：センサの測定地上高
z_m	m	センサの測定地上高
α		初期光合成効率
α_{uu}, α_{ss}		Kolmogorov 定数 (≈ 0.55), Obukhov-Corrsin 定数 (≈ 0.8)
$\varepsilon, \varepsilon_T, \varepsilon_q, \varepsilon_c$		TKE, 温度変動, 比湿変動, CO_2 密度変動の消散率
ρ	kgm^{-3}	空気の密度
ζ		安定度パラメータ $=(z_m - d_0)/L_{mo}$
θ	degrees	北を基準に時計回りに表した風向
θ_v, T_v	K	仮温度, 仮温度
λ	μm	シンチロメータのビーム波長
ν	m^2s^{-1}	空気の動粘性係数
σ_T, σ_q	K, kg kg^{-1}	気温, 比湿密度変動の標準偏差
σ_c	$\text{mgCO}_2\text{m}^{-3}$	CO_2 密度変動の標準偏差
τ	s	時系列データの時間差
$\phi_\varepsilon, \phi_{\varepsilon s}$		TKE およびスカラーの無次元消散率
ϕ_m, ϕ_s		TKE およびスカラーの無次元鉛直勾配
ϕ_n		屈折率変動の3次元スペクトル

謝 辞

本論文をとりまとめるあたり、北海道大学大学院農学研究院の平野高司教授、浦野慎一教授、小池孝良教授、北海道大学低温科学研究所の渡辺力教授（当時独立行政法人森林総合研究所）には、ご多忙中にも関わらず、懇切なるご指導とご高閲を賜りました。本紀要への投稿時には、大阪大学工学研究科の町村尚准教授による注意深い査読を賜りました。

本研究は、財団法人電力中央研究所環境科学研究所において実施したものである。電力中央研究所環境科学研究所の梨本真上席研究員、鈴木智恵子特別契約研究員（H13-H16在任）、小林卓也上席研究員、池田英史主任研究員、安池慎治上席研究員は、当サイトにおける共同分担者であり、研究計画設定から観測および結果のとりまとめに至るまで、多大な協力とご指導いただきました。また、電力中央研究所環境科学研究所の、阿部聖哉主任研究員、竹内亨主任研究員、石井孝主任研究員には、現地調査にご協力いただくと共に貴重な助言を頂きました。電力中央研究所環境科学研究所の河野吉久研究参事と株式会社セレス（当時電力中央研究所）の岡野利明博士には、直属の上司として研究推進上のご指導を賜りました。本研究の計画立案時に開催した研究計画評価会議では、独立行政法人森林総合研究所気象環境研究領域の大谷義一領域長、岡山大学大学院環境学研究所（当時独立行政法人産業技術総合研究所）の山本晋教授、国立環境官救助地球環境研究センターの山形与志樹主席研究員に、貴重なご助言を頂きました。株式会社セレスの秋田毅氏、古川淳氏には本研究の基礎となる測定システムの保守にご協力頂きました。測定システムの電源敷設に中部電力株式会社佐久営業所のご協力を頂きました。その他多くの周囲の方々のサポートを受け、本研究を推敲することができました。ここに記して、深く感謝の意を表します。当研究は、財団法人電力中央研究所措置研究費によって、環境省及び東信森林管理署の許可を得て北佐久郡軽井沢町長倉山国有林内で実施した。

参考文献

- [1] Kaimal, J. C. and Finnigan, J. J., *Atmospheric Boundary Layer Flows*: Oxford Univ. Press, 1994.
- [2] Raschke, E., ed. *Radiation and Water in the Climate System: Remote Measurements*, NATO ASI Series Series I, Global Environmental Change: Springer-Verlag, 1996.
- [3] Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., and Wagner, F., eds. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*: IGES for IPCC, 2004.
- [4] Falge, E., Baldocchi, D., Tenhunen, J., Aubinet, M., Bakwin, P., Berbigier, P., Bernhofer, C., Burba, G., Clement, R., J. D. K., Elbers, J. A., Goldstein, A. H., Grelle, A., Granier, A., Gudmundsson, J., Hollinger, D., Kowalski, A. S., Katul, G., Law, B. E., Malhi, Y., Meyers, T., Monson, R. K., Mungert, J. W., Oechel, W., Paw, U. K. T., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Valentini, R., Wilson, K., and Wofsy, S., Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from fluxnet measurements, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 113, 53-74, 2002.
- [5] Valentini, R., ed. *Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests*, Vol. 163 of Ecological studies: Springer, 2003.
- [6] AsiaFlux 運営委員会, 陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実態, Technical Report CGER-M015-2003, 国立環境研究所, 2003.
- [7] 文字信貴, 植物と微気象-群落大気の乱れとフラックス-, 大阪公立大学共同出版会, 2003.

- [8] Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, K., Law, B. E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., and Vermaet, S., Energy balance closure at fluxnet sites, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 113, 223-243, 2002.
- [9] Moore, K. E., Fitzgerald, D. R., Sakai, R. K., and Goulden, M., Seasonal variation in radiative and turbulent exchange at a deciduous forest in central Massachusetts, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 35, 122-134, 1996.
- [10] Moncrieff, J. B., Malhi, Y., and Leuning, R., The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water, *Global Change Biol.*, Vol. 2, 231-240, 1996.
- [11] Mahrt, L., Flux sampling errors for aircraft and towers, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol. 15, 416-429, 1998.
- [12] Nakamura, R. and Mahrt, L., Roughness lengths and similarity theory for local and spatially averaged fluxes, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 100, 47-61, 2001.
- [13] Simpson, I. J., Thurtell, G. W., Neumann, H. H., Den Hartog, G., and Edwards, G. C., The validity of similarity theory in the roughness sublayer above forests, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 87, 69-99, 1998.
- [14] Katul, G., Hsieh, C. I., Bowling, D., Clark, K., Shurpali, N., Turnipseed, A., Albertson, J., Tu, K., Hollinger, D., Evans, B., Offerle, B., Anderson, D., Ellsworth, D., Vogel, C., and Oren, R., Spatial variability of turbulent fluxes in the roughness sublayer of an even-aged pine forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 93, 1-28, 1999.
- [15] 渡辺力・神田学, LES による熱収支インバランス問題に対する検討 (第2報) 水平一様な植生キャノピー層を含む中立接境界層における検討, *水文・水資源学会誌*, 15, 3, 253-263, 2002.
- [16] 神田学・渡辺力・マルコス・オリバー・レツェル・ジークフリート・ラッシュ, LES による熱収支インバランス問題に対する検討 (第1報) 大気境界層スケールの対流構造の影響, *水文・水資源学会誌*, 15, 3, 243-252, 2002.
- [17] Tatarskii, V. I., *Wave propagation in a turbulent medium*, New York: McGraw Hill, 1961. 285pp.
- [18] Monin, A. S. and Yaglom, A. M., *statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence*, Vol. 2, Cambridge, MA: The MIT Press, 1975. 769pp.
- [19] Hill, R. J., Otto, W. D., Sarma, A. D., Wilson, J. J., Andreas, E. L., Gosz, J. R., and Moore, D. I., An evaluation of the scintillation method for obtaining fluxes of momentum and heat, NOAA Technical Memorandum ERL ETL 27, NOAA ERL ETL, 1997. 55pp.
- [20] Thiermann, V., A displaced-beam scintillometer for line-averaged measurements of surface layer turbulence, in *Proceedings of the tenth symposium on turbulence and diffusion*, 244-247, American Meteorological Society, Boston, MA, 1992.
- [21] Hoedjes, J. C. B., Zuurbier, R. M., and Watts, C. J., Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area, partly affected by regional advection, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 105, 1, 99-117, 2002.
- [22] Chehbouni, A., Watts, C., Lagouarde, J.-P., Kerr, Y. H., Rodriguez, J.-C., Bonafond, J.-M., Santiago, F., Dedieu, G., Goodrich, D. C., and Unkrich, C., Esti-

- mation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 105, 1, 215-226, 2000.
- [23] Lagouarde, J.-P., Bonnefond, J.-M., Kerr, Y. H., McAneney, K., and Irvine, M., Integrated sensible heat flux measurements of a two-surface composite landscape using scintillometry, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 105, 1, 5-35, 2002.
- [24] 中屋耕・鈴木智恵子・小林卓也・池田英史・安池慎治, 森林における CO₂ 吸収量評価法へのシンチロメータの適用, Technical Report V04010, 財団法人電力中央研究所, 2005 a.
- [25] 中屋耕・鈴木智恵子・小林卓也・池田英史・安池慎治, シンチロメータを用いた落葉広葉樹林の CO₂ 吸収量評価, Technical Report V04029, 財団法人電力中央研究所, 2005 b.
- [26] Hartogensis, O. K., De Bruin, H. A. R., and Van De Wiel, B. J. H., Displaced-beam small aperture scintillometer test. part II: CASES-99 stable boundary-layer experiment, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 105, 1, 149-176, 2002.
- [27] Nakaya, K., Suzuki, C., Kobayashi, T., Ikeda, H., and Yasuike, S., Application of a displaced-beam small aperture scintillometer at a deciduous forest under unstable atmospheric conditions, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 136, 45-55, 2006.
- [28] Nakaya, K., Suzuki, C., Kobayashi, T., Ikeda, H., and Yasuike, S., Spatial averaging effect on local flux measurement using a displaced-beam small aperture scintillometer above the forest canopy, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 145, 97-109, 2007.
- [29] Deacon, E., The measurement of turbulent transfer in the lower atmosphere, *Adv. in Geophys.*, Vol. 6, 211-228, 1959.
- [30] Taylor, R., A new approach to the measurement of turbulent fluxes in the lower atmosphere, *J. Fluid. Mech.*, Vol. 10, 449-458, 1961.
- [31] Champagne, F., Friehe, C., LaRue, J., and Wyngaard, J. C., Flux measurements, flux estimation techniques, and fine-scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 34, 515-530, 1977.
- [32] Kiely, G., Albertson, J., Parlange, M. B., and Eichinger, W., Convective scaling of the average dissipation rate of temperature variance in the atmospheric surface layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 77, 267-284, 1996.
- [33] Albertson, J., Parlange, M. B., Kiely, G., and Eichinger, W., The average dissipation rate of turbulence kinetic energy in the neutral and unstable atmospheric surface layer, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, D12, 13423-13432, 1997.
- [34] 浅沼順・工藤裕己, 消散法による地表面フラックスの算定とその水田上での応用, 水工学論文集, 44, 181-186, 2000.
- [35] 浅沼順, 消散法による地表面フラックスの算定とその水田上での応用(2) - 消散率算定に伴う諸問題, 水工学論文集, 45, 247-252, 2001.
- [36] Albertson, J., Kiely, G., and Parlange, M. B., Surface fluxes of momentum and water vapor, in E. Raschke ed. *Radiation and Water in the Climate System*, Vol. 45 of NATO ASI Ser. I, 59-82: NATO, 1996.
- [37] Hill, R. J. and Clifford, S. F., Modified spectrum of atmospheric temperature fluctuations and its application to optical propagation, *J. Optical Soc. of America*, Vol. 68, 892-899, 1978.
- [38] Frehlich, R., Laser scintillation measurements of the temperature spectrum

- in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 49, 1494-1509, 1992.
- [39] Hill, R. J., Clifford, S. F., and Lawrence, R. S., Refractive-index and absorption fluctuations in the infrared caused by temperature, humidity and pressure fluctuations, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 70, 1192-1205, 1980.
- [40] Andreas, E. L., Two-wavelength method of measuring path-averaged turbulent surface heat fluxes, *J. Atm. and Ocean. Techn.*, Vol. 6, 280-292, 1989.
- [41] Green, A. E. and Hayashi, Y., Use of the scintillometer technique over a rice paddy, *J. Agric. Meteorol.*, Vol. 54, 3, 225-234, 1998.
- [42] Wesely, M. L., The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 15, 43-49, 1976.
- [43] Moene, A. F., Effects of water vapour on the structure parameter of the refractive index for near-infrared radiation, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 107, 3, 635-653, 2003.
- [44] Wyngaard, J. C. and Clifford, S., Taylor's hypothesis and height-frequency turbulence spectra, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 34, 922-929, 1977.
- [45] Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere*, Chap. Methods Based on Turbulence Measurements, 190-196, Hingham, Mass.: D. Reidel-Kluwer, 1982. 299pp.
- [46] Wyngaard, J. C. and Coté, O. R., The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 28, 190-201, 1971.
- [47] Thiermann, V. and Grassl, H., The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 58, 367-389, 1992.
- [48] Kader, B. A., Determination of turbulent momentum and heat fluxes by spectral methods, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 61, 323-347, 1992.
- [49] Christen, A., van Gorsel, E., Vogt, R., Andretta, M., and Rotach, M. W., Instrumentation at steep slopes: Wind tunnel study - field intercomparison - measurements, *MAP Newsletter*, Vol. 15, 164-167, 2001.
- [50] Kirtzel, H. J., Metek's response to the article "the influence of the sensor design on wind measurements with sonic anemometer systems", Technical report, Metek GmbH, 2002.
- [51] Wilczak, J. M., Oncley, S. P., and Stage, S. A., Sonic anemometer tilt correction algorithms, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 99, 127-150, 2001.
- [52] Webb, E. K., Pearman, G. I., and Leuning, R., Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Vol. 106, 85-100, 1980.
- [53] De Bruin, H. A. R., Meijninger, W. M. L., Smedman, A.-S., and Magnusson, M., Displaced-beam small aperture scintillometer test. part I: the WINTEX dataset, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 105, 1, 129-148, 2002.
- [54] Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grünwalde, T., Hollinger, D., Jensen, N.-O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C. T., Law, B. E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and

- Wofsy, S., Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 107, 43-69, 2001a.
- [55] Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthony, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grünwalde, T., Hollinger, D., Jensen, N.-O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C. T., Law, B. E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and Wofsy, S., Gap filling strategies for long term energy flux data sets, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 107, 71-77, 2001b.
- [56] Thiermann, V. and Rummel, A., Correction for transmitter vibrations in laser scintillation measurements, in *Proc. Conference on Optics in Atmospheric Propagation and adaptive systems IV*, 9, European Symposium on Remote Sensing, Barcelona, 1998.
- [57] Massman, W. and Lee, X., Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 113, 121-144, 2002.
- [58] Kanda, M., Inagaki, A., Letzel, M. O., Raasch, S., and Watanabe, T., Les study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 3, 381-404, 2004.
- [59] Oren, R., Hsieh, C., Stoy, P., Albertson, J., McCarthy, H. R., Harrell, P., and Katul, G. G., Estimating the uncertainty in annual net ecosystem carbon exchange: spatial variation in turbulent fluxes and sampling errors in eddy-covariance measurements, *Global Change Biology*, Vol. 12, 5, 883-896, 2006.
- [60] Lee, X., On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, *Agric. Forest Meteorol.*, Vol. 91, 39-49, 1998.
- [61] Finnigan, J., A comment on the paper by lee (1998): 'On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation', *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 97, 55-64, 1999.
- [62] Hill, R. J., Algorithms for obtaining atmospheric surface-layer fluxes from scintillation measurements, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, Vol. 14, 456-467, 1997.
- [63] 広田知良・福本昌人・渡辺力, 地中熱流量と水体・森林貯熱量, 塚本修・文字信貴編, 地表面フラックス測定法, 日本気象学会, 第6章, 141-151, 2001.
- [64] Lee, X. and Hu, X., Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 103, 277-301, 2002.
- [65] Lee, X., Reply to comment by finnigan on 'On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation', *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 97, 65-67, 1999.
- [66] Meijninger, W. M. L., Hartogensis, O. K., Kohsiek, W., Hoedjes, J. C. B., Zuurbier, R. M., and De Bruin, H. A. R., Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface - Flevoland field experiment, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 105, 1, 37-62, 2002.
- [67] Finnigan, J., The storage term in eddy flux calculations, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 136, 108-113, 2005.
- [68] Lee, X., Fuentes, J. D., Staebler, R. M., and Neumann, H. H., Long-term observation of the atmospheric exchange of CO₂ with a temperate deciduous forest

- in southern ontario, canada, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, 15975–15984, 1999.
- [69] Hollinger, D. Y., Aber, J., Dail, B., Davidson, E. A., Goltz, S. M., Hughes, H., Leclerc, M. Y., LEE, J. T., Richardson, A. D., Rodrigues, C., Scott, N. A., Achuatavarier, D., and Walsh, J., Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO₂ exchange, *Global Change Biology*, Vol. 10, 1689–1706, 2004.
- [70] Richardson, A. D., Hollinger, D. Y., Burba, G. G., Davis, K. J., Flanagan, L. B., Katul, G. G., Munger, W., Ricciuto, D. M., Stoy, P. C., Suyker, A. E., Verma, S. B., and Wofsy, S. C., A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 136, 1–18, 2006.
- [71] De Bruin, H. A. R., Kohsiek, W., and Van Den Hurk, B. J. J. M., A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapour using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 63, 231–257, 1992.
- [72] Lüdi, A., Beyrich, F., and Matzler, C., Determination of the turbulent temperature-humidity correlation from scintillometric measurements, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 117, 525–550, 2005.
- [73] Kormann, R. and Meixner, F. X., An analytical footprint model for non-neutral stratification, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol. 99, 207–224, 2001.
- [74] Green, A. E., McAneney, K., and Lagouarde, J., Sensible heat and momentum flux measurement with an optical inner scale meter, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 85, 3, 259–267, 1997.
- [75] Katul, G., Goltz, S. M., Hsieh, C. I., Cheng, F. M., Mowry, F., and Sigmon, J., Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 74, 237–260, 1995.
- [76] 安田幸生・渡辺力・大谷義一・岡野通明・中山敬一, 落葉広葉樹林上における CO₂ フラックスの季節変化, 水文・水資源学会誌, **11**, 6, 575–585, 1998.
- [77] Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., Kondo, H., and Nishimura, N., Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 112, 203–215, 2002.
- [78] Wang, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Kondo, H., Hirano, T. A., T., and Fujinuma, Y., Net ecosystem CO₂ exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan, *Atmospheric Environ.*, Vol. 38, 7021–7032, 2004.
- [79] Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Ranknik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C. H., Clement, E. J., R and, Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., and Valentini, V. T., R and, Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology, *Advances in Ecological Research*, Vol. 30, 113–173, 2000.
- [80] Hollinger, D. Y., Kelliher, F. M., Byers, J. N., Hunt, J. E., McSeveny, T. M., and Weir, P. L., Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere, *Ecology*, Vol. 75, 134–150, 1994.

- [81] 近藤純正, 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- [82] 池田英史・安池慎治・小林卓也・中屋耕・鈴木智恵子, 落葉広葉樹林の土壤炭素蓄積・存在形態に関する検討, Technical Report U03069, 財団法人電力中央研究所, 2004.
- [83] 森林立地調査法編集委員会, 森林立地調査法, 博友社, 1999.
- [84] 日本林学会「森林科学」編集委員会編森をはかる, 古今書院, 2003.
- [85] 安池慎治・小林卓也・中屋耕・鈴木智恵子・池田英史, 森林土壌から放出される CO₂ ガス量の空間的定量評価法の開発, Technical Report U03010, 財団法人電力中央研究所, 2003.
- [86] 桐田博允, 野外における土壌呼吸の測定—密閉吸収法の検討Ⅳ. スポンジを利用した密閉吸収法の開発—, 日本生態学会誌, 21, 119-127, 1971.
- [87] Lloyd, J. and Taylor, J. A., On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*, Vol. 8, 315-323, 1994.
- [88] 小林卓也・中屋耕・池田英史・安池慎治・鈴木智恵子, 炭素安定同位体比を用いた森林内 CO₂ 放出量の構成比率の推定, Technical Report V04028, 財団法人電力中央研究所, 2005.
- [89] 池田英史・安池慎治・小林卓也・中屋耕・鈴木智恵子, 落葉広葉樹林の土壌有機炭素の蓄積・分解評価手法の提案, Technical Report V04025, 財団法人電力中央研究所, 2005.
- [90] 安田幸生・渡辺力・大谷義一・溝口康子, 渦相関法によって生態系呼吸速度を評価する際の問題点—間欠的な乱流状態下での摩擦速度補正について—, 農業気象, 61, 3, 177-187, 2005.
- [91] 菊澤喜八郎, 北の国の雑木林, 蒼樹書房, 1986.
- [92] Koike, T., Physiological ecology of the growth characteristics of japanese mountain birch in northern japan: a comparison with japanese white birch, E. O. Box ed., *Vegetation Science in Forestry: Global Perspective based on Forest Ecosystems of East & Southeast Asia*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 409-422, 1995.
- [93] Hozumi, K., Shinozaki, K., and Tadaki, Y., Studies on the frequency distribution of the weight of individual trees in a forest stand. 1. a new approach toward the analysis of the distribution function and the -3/2th power distribution., *Jap. J. Ecol.*, Vol. 18, 10-20, 1968.
- [94] Kurachi, N., Hagihara, A., and Hozumi, K., Evaluation of the light interception by non-photosynthetic organs in a *Larix leptolepis* plantation, *Ecological Research*, Vol. 1, 173-183, 1986.
- [95] Kurachi, N., Hagihara, A., and Hozumi, K., Effect of light interception by non-photosynthetic organs on canopy photosynthetic production, *Ecological Research*, Vol. 4, 187-197, 1989.
- [96] Saeki, T., Interrelationships between leaf amount, light distribution and photosynthesis in a community, *Bot. Mag.*, Vol. 73, 5-63, 1960.
- [97] 中静透, 森のスケッチ, 東海大学出版会, 2004.
- [98] 沼田眞・岩瀬徹, 図説 日本の植生, 朝倉書店, 1975.

Summary

Rapid change of the environment, which is occurring with global warming, is considered to impart serious impacts on terrestrial ecosystems. The Fourth Assessment of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which is to be published in 2007, entitled “Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability,” addresses direct and indirect influences of environmental impacts on ecosystems.

Observation of turbulent flux in the atmospheric boundary layer provides an effective means to investigate the interaction between the atmosphere and vegetative ecosystems. Such observations can be used to evaluate the vertical exchange of energy and mass. Recently, the eddy-covariance (EC) method has been used widely to estimate turbulent fluxes. In addition, long-term continual observations of CO₂ flux have been performed actively to evaluate carbon cycling in terrestrial ecosystems. However, many flux sites have been reported for cases in which accuracy problems of flux measurement can occur, even by EC method, which can measure turbulent flux directly. The energy imbalance issue, i. e., a phenomenon by which the turbulent heat flux does not match the measured net radiation, is regarded as a typical problem of accuracy in flux measurements. The energy balance is a valid criterion of turbulent flux measurement; the energy imbalance status implies some bias of the estimated turbulent flux.

A recent study showed the inherent negative bias of the imbalance of fluxes of single-tower measurements. The study used homogeneous ground surface heating conditions

resulting from the turbulent organized structure (TOS) using numerical experiments with large-eddy simulation (LES) in a convective boundary layer. The necessity of horizontally distributed observation networks, such as multi-tower measurements, was suggested for evaluation of regionally averaged fluxes. Presuming that the factors described above are the main factors causing this imbalance, measured values obtained using an instrument that senses a signal from a larger source area might approach the correct spatially averaged value.

The objective of this study is to elucidate the structure of turbulent transportation above a forest canopy using a scintillometer. That instrument is expected to have a larger source area of flux measurement than conventional EC sensors. In addition, this paper presents discussion of the improved spatial representativity using the energy imbalance as a criterion for flux measurement validity. The study also proposes a new method for determining the turbulent flux; the method combines both the DBSAS and EC systems.

- (1) The scintillation method estimates the momentum flux (u_*) and the sensible heat flux (H) from the fluctuations of refractive index in atmosphere caused by the turbulent temperature variations. The scintillation method is expected to measure spatial averaged turbulence signals better than EC because its optical measurement path can be set from 50 m to 250 m. No precedent exists for application of scintillometry to a forest. Characteristics above a forest canopy are

not well known. In this study, simultaneous measurements using a commercially available displaced-beam small aperture scintillometer (DBSAS) and two sets of EC systems were used during 2002–2005 to investigate the applicability of DBSAS above a forest canopy. Two 28-m-tall scaffolding towers were erected 86 m apart through an 18-m-high deciduous mixed forest canopy. The sensible heat fluxes observed at two towers showed remarkable differences. Meanwhile, heat fluxes were biased toward the other tower when the averaged energy budgets between the two towers were not similar. These results imply that the TOS causes an energy imbalance of flux measurement. The DBSAS uses some assumptions in derivation of u_* and H from the dissipation rates of turbulent kinetic energy (TKE) and temperature fluctuations. Therefore, the dissipation rates were calculated from the EC sensors for comparison. Results showed that the difference in dissipation rates using the different sensors changed asymptotically with the relative turbulent intensity ($\sigma_w/\bar{u}$). The DBSAS dissipation rates are sometimes larger than EC under the conditions of smaller $\sigma_w/\bar{u}$. The DBSAS results tended to be larger than EC for both the dissipation rate and the sensible heat flux. This bias functions to reduce the energy imbalance of flux measurements. These results indicate that the dissipation rate increases by spatial averaging according to the source area of flux measurement; this effect is remarkable for the smaller $\sigma_w/\bar{u}$.

- (2) By spatial averaging, the contribution of local advection caused by TOS, which is regarded as the residue of the energy balance equation, is canceled out because

the spatial scale of measurement covers up the heterogeneity provided by TOS. Assuming that DBSAS applied to a mixed forest can better measure spatial averaged turbulence signals than EC, the relative turbulent intensity ($\sigma_w/\bar{u}$) measured using a single tower is considered to be one criterion of TOS existence. A new method was developed that corrects u_* and H measured using EC system into the DBSAS corresponding value. This method is based on the proportional relationship between the ratio of H and the ratio of the dissipation rate and both rates are obtained using DBSAS and EC measurements. The ratio of dissipation rates, which corresponds to a correction coefficient, is described as an empirical function of the $\sigma_w/\bar{u}$ and the ratio of source area of DBSAS and EC. Furthermore, presuming that the inevitable underestimation by EC is caused by the TOS over forest canopy, this relationship is extended to water vapor flux E . The energy balance closure was improved; furthermore, the greater spatially averaged flux was evaluated using the revised heat fluxes.

- (3) The effect of DBSAS correction was examined according to the carbon balance in the forest using CO_2 flux revised analogously to water vapor flux revision. Although the maximum photosynthetic rate of the ecosystem derived from the EC result was less than the photosynthetic rate derived from the individual leaf photosynthesis rates, the revised value reached the calculated value. The flux-based ecosystem respiration was sometimes less than the soil respiration estimated by soil chambers. Considering the respiration calculated using the above-ground plant body, this result was incon-

sistent. The ecosystem respiration derived from the revised CO_2 flux was reasonably larger than the soil respiration. Consequently, the net ecosystem exchange (NEE) increased because of the change of CO_2 balance caused by the flux

CO_2 correction for emission and absorption. This new method, which combines both DBSAS and EC methods, approaches the correct spatially averaged value and can be used to verify and correct turbulent flux measurements.