

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	http://hdl.handle.net/2115/32913
Туре	bulletin (article)
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

(財電力中央研究所 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

1	乱流こ	7ラッ	クス	に。	よる!	物質	・エネノ	レ
	ギー亥	を換過	程の	評値	<b>亜</b> …	•••••		···149
2	乱流に	フラッ	クヌ	、測	定に	おけ	る問題	夏
	点	•••••		•••••	•••••	•••••		150
3	シンラ	トレー	ーショ	コン	法の	レヒ	ミューと	<u>-</u>
	本論文	ての目	的…	•••••	•••••	••••		151
章	シン	チロ	×-;	タの	森材	えつ	適用と	<u>-</u>
	その	問題,	띘					152
1	概	要	i	•••••	•••••	•••••		152
2	はじ	めに	•••••	•••••	•••••	•••••		···153
3	理論的	的背景		•••••	•••••	•••••		154
4	観	測		•••••	•••••	•••••		···158
5	結果と	: 考察		•••••	•••••	•••••		···160
6	結	部	ì····	•••••	•••••	•••••		…167
章	シン	チロ	<b>×</b> – ;	タに	よる	空間	同平均效	边
	果の	確認						167
1	概	要	i	•••••	•••••	•••••		…167
2	はじめ	った…	•••••	•••••	•••••	•••••		…167
3	理論的	的背景		•••••	•••••	•••••		168
4	観 測	方 法		•••••	•••••	•••••		170
5	結果と	: 考察		•••••	•••••	•••••		$\cdots 172$
6	まと	: Ø	•••••	•••••	•••••	•••••		…186
	1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5	1 2 3 章 123456章 123456元ーン論シそ概は理観結結シ果概は理観結ま、「「」」として、「「」」として、「」」として、「」」として、「」」として、「」」として、「」」として、「」」として、	1 乱ギ乱点シ本シそ概は理観結結シ果概は理観結末シーン論シの「じ論」を手確」に背面にする。 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 章 1 2 3 章 1 2 3 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 章 1 2 3 章 1 2 3 4 5 5 5 章 1 2 3 4 5 5 5 章 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 2 3 4 5 5 5 章 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 5 章 1 1 2 3 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	1       乱流フラックスの         ギニシンテレーション       ジンテレーション         ネシンテンのロメージョン       シンのの         キシンの問め       シンの         ホシン       モレーション         シンの目       メージ         1       概         2       五、シンテンの         2       本シンの町         3       シンの町         4       ごの町         5       結         5       結         6       シンの面         1       は         2       理観         4       総         5       編         6       ま         5       ま         6       ま         5       ま         5       ま         6       ま         7       新潟県と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1       乱流フラックスに。         ギー交換過の評価         2       乱流フラックス測         点…フラックス測         点…シチレーション         本シンチレの目の・・・・・・         ネシンチの間裏         1       概         ジンチの間点         1       概         2       理論         4       観         5       結         5       結         6       シンチの確認         1       概         5       結         6       シンチの確認         1       はじめ的背景         2       はじめの背景         3       観果と考察         4       観果と考察         5       結果と考察         6       結果と考察         5       ま         5       ま	1       乱流フラックスによる         ギー交換過程の評価・・・・         2       乱流フラックス測定に         点       シンチレーション法の         本論文の目的・・・・・       本論文の目的・・・・・         章       シンチロメータの森林         その問題点       1         1       概         2       はじめに・・・・・・         3       三、シンチロメータの森林         その問題点       1         1       概         2       はじめに         3       理論的背景・・・・・・         4       観         第       シンチロメータによる         条の確認       1         1       概         2       はじめに・・・・・・・・・・         3       理論的背景・・・・・・         4       観       方 法         5       結果と考察・・・・・・         5       まと考察・・・・・         5       ま       め・・・・・         5       ま       と	1 乱流フラックスによる物質         ギー交換過程の評価・         2 乱流フラックス測定におけ         点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	<ol> <li>1 乱流フラックスによる物質・エネ/ ギー交換過程の評価…</li> <li>2 乱流フラックス測定における問題 点…</li> <li>3 シンチレーション法のレビュー</li> <li>本論文の目的・</li> <li>本論文の目的・</li> <li>ないチロメータの森林への適用 その問題点</li> <li>1 概 要・</li> <li>2 はじめに…</li> <li>3 理論的背景・</li> <li>4 観 測・</li> <li>5 結果と考察・</li> <li>6 結 論・</li> <li>シンチロメータによる空間平均交 果の確認</li> <li>1 概 要・</li> <li>2 はじめに…</li> <li>3 理論的背景・</li> <li>4 観 測・</li> <li>5 結果と考察・</li> <li>6 結 論・</li> <li>ジンチロメータによる空間平均交 果の確認</li> <li>1 概 要・</li> <li>2 はじめに…</li> <li>3 理論的背景・</li> <li>4 観 測方法・</li> <li>5 結果と考察・</li> <li>5 結果と考察・</li> </ol>

\* 北海道大学博士論文(2007)

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

第4章	空間平均	肉フラックス測定を応用!	L
	た NEE	2 評価	187
4.1	概	要	187
4.2	はじめ	に	187
4.3	方	法	
4.4	結果と考	察	191
4.5	まと	Ø	199
第5章	総合考	<b>新</b> 察	199
付	録		202
謝	辞		204
参考了	て献		204
Summ	ary		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空 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 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一大気 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一大気間の物質・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<sup>2</sup>。 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,CO<sub>2</sub>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。 CO<sub>2</sub> 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<sup>3</sup>。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<sup>4:5:6</sup>。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<sup>7:6</sup>、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<sup>8</sup>。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<sup>9</sup>, あるいは, Moncrieff et al.<sup>10</sup> 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<sup>12;13</sup>。多数の フラックスタワー間の比較実験<sup>14</sup>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<sup>15;16</sup> 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-5km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<sub>n</sub><sup>2</sup> および内部ス ケール & 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、Tatarskii<sup>17</sup> 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 Yaglom<sup>18</sup>の教科 書, Hill et al.<sup>19</sup> 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 5km 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250m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。Thiermann<sup>20</sup>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 Meterology 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<sup>21</sup>。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で ない地表面に 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<sup>22;23</sup>。 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 b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さが増すほど 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 CO₂ 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18mの落葉広葉樹林の林冠上10m(28 ma.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  $\lambda - \beta$  (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 ( $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_T$ ) 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: $\sigma_w/\overline{u}$ )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 ( $\sigma_w/u$ 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、その境界的な $\sigma_w/u$ 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 ると,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50m-5km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  $\varepsilon$ 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<sup>2</sup> および乱流の内部スケール & 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 度や不均一さ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.<sup>26</sup> 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。<sup>27:28</sup>

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,Deacon<sup>29</sup>によっ て提案され,Taylor<sup>30</sup>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,これまで海上プ



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 b から乱流運動 エネルギーの消散率  $\epsilon$  が,屈折率の構 造関数定数  $C_n^2$  および  $\epsilon$  から温度変動 の消散率  $\epsilon_T$  が求められる。

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<sup>31;32;33</sup>,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<sup>34;35</sup>。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 告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1mm,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<sup>36</sup>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。

$$D_{ab}(r) \equiv \triangle a \triangle b,$$
  
$$\triangle a \equiv a(x+r) - a(x)$$
(2.1)

ここでrは距離スケールであり, $a \ge b$ 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<sup>1;36</sup>。

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

$$D_{ss}(r) = 4.0 \,\alpha_{ss} \varepsilon_s \varepsilon^{-\frac{1}{3}} r^{\frac{2}{3}} = C_s^2 r^{\frac{2}{3}} \tag{2.2b}$$

ここに  $\varepsilon$  と  $\varepsilon$ s は, それぞれ TKE およびスカ

ラーの変動の消散率である。 $a_{uu}$  は Kolmogorov 定数 (=0.55) で,  $a_{ss}$  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。 $a \ge b$  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,  $C_n^2$ ,  $C_f^2$ ,  $C_q^2$  および  $C_{Tq} \ge c$ 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。 大気の屈折率変動は、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。大気の屈折率変動は、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  $C_n^{2}(m^{-2/3})$  およ び乱流の内部スケールし(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 µm 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2.5mm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*<sub>12</sub>)は次式で表される<sup>20</sup>。

$$B_{12} = 4\pi K^{2} \int_{0}^{L_{p}} \int_{0}^{\infty} k \phi_{\pi}(k, l_{0}, C_{n}^{2}) J_{0}(kd) \sin^{2} \left[ \frac{k^{2} x (L_{p} - x)}{2KL_{p}} \right] \left[ \frac{4J_{1}^{2} (kDx/2L_{p})}{(kDx/2L_{p})^{2}} \right] dk dx$$
(2.3)

ここで、xは、パス長  $L_{p}$ の光軸上での位置、K= $2\pi/\lambda(m^{-1})$ は光の波数、 $k(m^{-1})$ 乱流の波数、 $C_{n}^{2}$ は屈折率変動の構造関数定数、b内部スケール、  $J_{b}$ 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 $\phi_{n}$ は屈折率変動の 3 次元スペクトルで、

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

であり、f(k, b)は、Hill and Clifford<sup>37</sup>による 屈折率変動の3次元スペクトルモデルである。 Frehlich<sup>38</sup>は、計算の簡易化のために、Hill and Clifford<sup>37</sup>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。

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

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

 $f_B$ は b, 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  $n_2 = B_{12}/(B_1B_2)^{1/2}$  $= B_{12}/B_1 = B_{12}/B_2$ は b, d および D の関数とな り,  $d \ge D$  を定数と考えると,相関係数  $n_2$  から 内部スケール b が求められる<sup>20</sup>。b 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、んに対する  $n_2$ および  $f_b$  をパス長  $L_b$  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 bと  $C_n^2$  を計算する。得られた b から乱流運動エ ネルギー (TKE)の消散率  $\varepsilon$  は次の関係によって 求められる<sup>37</sup>。

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

ここで $\nu$ (m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)は空気の動粘性係数である。こ うして求めた $\varepsilon$ 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<sup>-1</sup>)の変 動である。CO<sub>2</sub> 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  $C_r^2$  は気温変動の構造 関数定数  $C_r^2$ (K<sup>2</sup>m<sup>-2/3</sup>),比湿変動  $C_q^2$ (m<sup>-2/3</sup>)およ び気温と比湿の結合構造関数定数  $C_{rq}$ (Km<sup>-2/3</sup>) によって次のように表される<sup>39</sup>。

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

定数  $A_r \ge A_q$  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  $\lambda=0.67(\mu m)$  においては, Andreas<sup>40</sup> による以下の式を用いる。

$$A_{T} = -7.89 \times 10^{-5} \bar{p} / \bar{T}$$
 および  

$$A_{q} = -5.722 \times 10^{-5} \bar{q}$$
(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  $C_n^2$  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,Thiermann<sup>20</sup> 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<sup>40</sup> とし, (2.8) の右辺第 1 項のみから  $C_n^2$  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, $C_{Tq} \geq C_q^2$ の関与を 回避するために,他のセンサによって測定した  $q \ge T$ 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/E*) 補正である。ボーエン比補正には $\overline{w'T'}$ と $\overline{w'a'}$ 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 加わることでもある。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  $\sigma_{T}$ 、 σg 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

$$\frac{C_T^2}{C_q^2} \approx \frac{\sigma_T^2}{\sigma_q^2} \tag{2.10}$$

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

$$C_n^2 \approx \frac{A_T^2}{\overline{T}^2} C_T^2 \left( 1 + 2\frac{A_q}{\overline{q}} \frac{\overline{T}}{A_T} R_{Tq} \frac{\sigma_q}{\sigma_T} + \frac{A_q^2}{\overline{q}^2} \frac{\overline{T}^2}{A_T^2} \left( \frac{\sigma_q}{\sigma_T} \right)^2 \right)$$
(2.11)

 $T \ge q$ 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

大気の乱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(*a*)の収支方程式は以下のように書か れる。

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

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

ここで phPa は気圧,  $\theta'_{n} = \theta(1+0.61a)(K)$  は仮 温位 (θ:温位)を表す。これら収支式の導出に ついては、文字で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  $(u_* \equiv \sqrt{-u'w'})$ , Obukhov 長 ( $L_{mo}$ ) および von Karman 定数 ( $k_{kar} \simeq 0.4$ ) を用いて, それぞれを  $u_*^3/k_{\text{kar}}z \geq k_{\text{kar}}zu_*/(\overline{w's'})^2$ 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 344;40

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

$$\phi_{\epsilon s} \equiv \frac{k_{\text{kar}} z u_* \varepsilon_s}{(w's')^2} \approx \phi_s(\zeta) \tag{2.14b}$$

ここで  $\phi_{e} \ge \phi_{es}$  は TKE およびスカラーの無次 元消散率を,  $\phi_m \ge \phi_s$  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×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。

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

$$\rho_{C_P} \overline{w' T_v'} = H \tag{2.15b}$$

$$\rho \overline{lw'q'} = lE \tag{2.15c}$$

ここで g=9.81(ms<sup>-2</sup>)は重力加速度, $\rho$ (kgm<sup>-3</sup>) は空気密度, $c_{\rho}$ (Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) は空気の定圧比熱, l(Jkg<sup>-1</sup>) は水の蒸発潜熱, $T_{v}$ (K) は仮温度であ り,H(Wm<sup>-2</sup>),IE(Wm<sup>-2</sup>) 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, IE について解くと,

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

$$H = \rho c_{p} \left[ \frac{k_{\text{kar}} z \mathcal{U}_{*} \varepsilon_{T}}{\phi_{\epsilon T} T(\zeta)} \right]^{1/2}$$
(2.16b)

$$lE = \rho l \left[ \frac{k_{\text{kar}} z u_* \varepsilon_q}{\phi_{\epsilon q}(\zeta)} \right]^{1/2}$$
(2.16c)

となる。無次元消散率  $\phi_i(i = \varepsilon, \varepsilon T, \varepsilon q)$ 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, IE 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<sup>46,47;48</sup>。本論で は,DBSASの標準的な計算でも用いられてい る Thiermann and Grassl<sup>47</sup> による

$$\begin{aligned} \phi_{\epsilon}(\zeta) &= (1 - 3\zeta)^{-1} - \zeta & (\zeta < 0) \ (2.17a) \\ \phi_{\epsilon}(\zeta) &= (1 + 4\zeta + 16\zeta^{2})^{\frac{1}{2}} & (\zeta > 0) \ (2.17b) \\ \phi_{\epsilon\theta}(\zeta) &= [\phi_{\epsilon}/(1 - 7\zeta + 75\zeta^{2})]^{\frac{1}{2}} \ (\zeta < 0) \ (2.17c) \\ \phi_{\epsilon\theta}(\zeta) &= [\phi_{\epsilon}(1 + 7\zeta + 20\zeta^{2})]^{\frac{1}{2}} \ (\zeta > 0) \ (2.17d) \end{aligned}$$

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  $\phi_{\epsilon\theta} = \phi_{\epsilon q}$  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 CO<sub>2</sub>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 式 (2.10) にしたがって、シンチロメータによ る  $C_r^2$ と、渦相関センサによる  $\sigma_r$ 、 $\sigma_q$  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 CO<sub>2</sub> などのガスフラックスまで拡張すると以下 が成り立つ。

$$\frac{C_T^2}{C_c^2} \approx \frac{\sigma_T^2}{\sigma_c^2} \tag{2.18}$$

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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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  $\epsilon_q \ge \epsilon_c$  が求めら れる。 $\phi_{\epsilon\theta} = \phi_{\epsilon q} = \phi_{\epsilon c} \ge c$ 仮定し、式 (2.16) を  $\epsilon_c$ に対して拡張することにより CO<sub>2</sub> 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 ( $\epsilon$ ,  $\varepsilon_T, \varepsilon_q$ )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 Dab 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γ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 $\tau$ 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<sup>2/3</sup>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<sup>2/3</sup>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。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<sup>34</sup> 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



に対する回帰係数が構造関数定数。 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16-18m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 Mig.) が平均樹高 6mで中層を占め、平均樹高3m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 m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup> 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1197.6mmであった。森林のフェッ チは主風向に対してそれぞれ約1km(N),600 m(W)で、西と南にそれぞれ150m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  $n_2$  を4 kHz サンプリ 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 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 変動計 LI-7500 (Li-Cor Inc., USA)を用いて 10 Hz サン プリングで運動量,顕熱,潜熱, CO<sub>2</sub> 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<sup>4950</sup>。

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  $\mathbb{E}^{51}$ を行った。また,open-path 式  $CO_2/H_2O$ 変動計による  $CO_2$  の乱流変動項算出 には WPL 補正<sup>52</sup>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: $\epsilon_{EC}$ ,  $\epsilon_{TEC}$ ,  $\epsilon_{qEC}$ ), シン チロメータによるものには添え字に "SAS"を 用いる (例: $\epsilon_{SAS}$ ,  $\epsilon_{TSAS}$ ,  $\epsilon_{qSAS}$ ) 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 CO<sub>2</sub>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	$\varepsilon_{ m SAS}$	(TKE)	U*SAS
	$\varepsilon_{TSAS}$	(気温)	$H_{\rm SAS}$
	$\varepsilon_{q{ m SAS}}$	(比湿)	$lE_{\rm SAS}$
	$\varepsilon_{c\text{SAS}}$	$(CO_2)$	$F_{cSAS}$
渦相関センサ	$arepsilon_{ m EC}$	(TKE)	<i>U</i> *ec
	$\varepsilon_{\scriptscriptstyle TEC}$	(気温)	$H_{\rm EC}$
	$arepsilon_{q  ext{EC}}$	(比湿)	$lE_{\rm EC}$
	$\varepsilon_{c\text{ec}}$	$(CO_2)$	$F_{cec}$

## 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 幅が大きいが、 $\epsilon_{qsAs}$ 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 *ū* 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  $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}$ および  $\varepsilon_{\text{TSAS}}/\varepsilon_{\text{TEC}}$ 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



(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  $\sigma_{wo}$ 



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。

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

ここで、 $R_n(Wm^{-2})$ 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 ( $J = z_m \rho c_p \Delta \overline{T} / \Delta t$ + $z_m \rho l \Delta \overline{q} / \Delta t$ )。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<sup>-2</sup> 程度 と<sup>7</sup>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はあるが、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<sup>15</sup>;神田他<sup>16</sup>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<sup>15</sup>および神田他<sup>16</sup>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<sup>13</sup>。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( $\phi_{\epsilon}, \phi_{\epsilon t}, \phi_{\epsilon q}, \phi_{\epsilon c}$ )と大気安定度パラメータ などの関係を図 2.8 に示した。 $\phi_{\epsilon}$ 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。 $\phi_{\epsilon q}, \phi_{\epsilon c}$ 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  $\phi_{\epsilon}$  および温度変動の無次元消 散率  $\phi_{\epsilon \tau}$  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、 $\phi_{\epsilon}$  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、 $\phi_{\epsilon}$  が基準値を超えると、 $u_{*}$  および H は小 さくなった。しかも、 $\phi_{\epsilon}$  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)。 $\phi_{\epsilon \tau}$  と H も同様の関係に あったが、 $u_{*}$  は  $\phi_{\epsilon \tau}$  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  $\zeta$ の関係。(a) TKE  $\phi_{\epsilon}$ , (b) 温度変動  $\phi_{\epsilon \tau}$ , (c) 比湿変動  $\phi_{\epsilon q}$ , (d) CO<sub>2</sub> 密度変動  $\phi_{\epsilon c}$  これまでに発表された経験関数も示す。







かっている可能性がある。また,Simpson et al.<sup>13</sup>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  $\sigma_{7}^{2}/\sigma_{q}^{2}$ を用いて,式(2.10)により DBSAS による  $\epsilon_{TSAS}$ 



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 Havashi<sup>41</sup> 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  $\epsilon_T$ を算出しなければならない 単色光源シンチロメータを低 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  $\phi_{1}(\zeta)$ 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<sup>2</sup> 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  $0.4 \text{ ms}^{-1}$ 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[HEC: HSAS], および(c)潜 熱フラックス[IEEC: IESAS]。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<sup>53</sup> 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  $\phi_{\epsilon}$ 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<sup>-1</sup>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 и\* が小さ い状況のデータを棄却することが行われてい る<sup>54,55</sup>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 E 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 и\*のデータは、葉の有る無しで明らか 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 ゆが実質的に 変化したことが考えられる。消散法では ゆを一 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<sub>\*</sub> 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.<sup>53</sup> kt, DBSAS kt  $u_* \nota^{5} 0.2 \text{ ms}^{-1}$ 以下で EC 法の結果より大きくなる一方で、平 均風速 ū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 b 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、系統的エラー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 Rummel<sup>56</sup>が検討している。振動の 増加に従って相関係数 n2 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 r12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 のスケーリング定数である。Hartogensis et al.<sup>26</sup> はビーム間距離  $d \approx 2.7 \text{ mm}$  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。  $C_{t}^{2}$  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<sub>\*</sub> 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<sub>\*</sub> 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 Esas/ EEC および温度変動の消散率の比  $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ 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 *IE* 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<sup>8</sup>。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.<sup>9</sup>; Mahrt<sup>11</sup>; Massman and Lee<sup>57</sup>)  $_{\circ}$   $\mathcal{I}n$ 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.<sup>11</sup> 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.<sup>58</sup> は, largeeddy 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.<sup>59</sup>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<sup>53</sup>。DBSAS は摩擦速度 u<sub>\*</sub> 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<sub>T</sub> 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 *E* 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と,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 によって定義されるとする。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<sub>2</sub>)によっ て次のように記述される。

$$\overline{F} = \overline{w}\overline{s} + \overline{w'_{t}s'_{t}} \tag{3.1a}$$

$$[F] = [w'_{s}s'_{s}].$$
 (3.1b)

ここに、( ̄)および([])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 $t \ge s$ 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、 $\overline{w'_t} = \overline{s'_t} = [w] = [w'_s] = [s'_s] = 0$ の関係があ る。式(3.1a)の右辺第1項 *wc* 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 wí sí 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 교 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, $w_{isi}$ 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 $\overline{F}$ 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 (Lee<sup>60</sup>; Mahrt<sup>11</sup>)。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



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。

は,式(3.1a)の空間平均[*wisi*]によって(図 3.1b),あるいは,式(3.1b)の時間平均[*wisi*] 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.<sup>58</sup>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。

Lee<sup>60</sup>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。

$$\overline{w}\overline{s} = \overline{w} \left[ \overline{s}_{z} = z_{m} - \frac{1}{z_{m}} \int_{0}^{z_{m}} \overline{s} dz \right]$$
(3.2)

Finnigan<sup>61</sup>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<sup>-2</sup>)および潜熱フラックス  $E(Wm^{-2})$ が正 しく評価されていれば、それらと純放射量  $R_n$ (Wm<sup>-2</sup>)、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、

$$R_n = S_b + G + H + lE + V \tag{3.3a}$$

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

$$V = \rho \overline{w} \bigg[ c_P \overline{T} + l \overline{q} - \frac{1}{z_m} \int_0^{z_m} (c_P \overline{T} + l \overline{q}) \bigg] dz$$
(3.3c)

$$S_{b} = \rho c_{p} \int_{0}^{z_{m}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} dz + \rho \lambda \int_{0}^{z_{m}} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} dz \qquad (3.3d)$$

上式中の  $V(\text{Wm}^{-2})$ は移流フラックス, T(K)は温位,  $\rho(\text{kgm}^{-3})$ 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 $\lambda(\text{Jkg}^{-1})$ 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 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

$$IR = (H + lE + S + V - R_n)/R_n, \quad S = S_b + G$$
(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.<sup>27</sup> 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  $\overline{w}$  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  $\overline{w}$  の測定誤差や、Finnigan<sup>61</sup>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タムおよ びスカラーフラックスを導く消散法に基づ く<sup>62</sup>。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 bおよび温度 変動の構造関数定数  $C_n^2 \epsilon$ 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  $\epsilon$  と温度変動消散率  $\epsilon_T$  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-laver) 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28mの鋼製足場材組上げタワーが 2基、東西方向に86m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



0 0.1 0.2 0.3 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。

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3.5 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<sup>53</sup>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るが、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 の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  $\sigma_w/\bar{u}$ 。 $\theta$  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 Hu<sup>64</sup> 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 (*ws*) 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、フラックス測定のソー 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<sup>64;65</sup>。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 Rn 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 などの大気の条件とを比較した。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.<sup>27</sup>のFig. 2a) および  $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$ 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、 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ 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。 $\epsilon_{SAS}/\epsilon_{EC}$ においても 同様の関係が見られた。 $\epsilon_{SAS}/\epsilon_{EC}$ および $\epsilon_{TSAS}/$  $\varepsilon_{TEC}$ 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  $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$  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 $\sigma_w$ 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、大気がより混合された状況 では EC センサによる消散率 ( $\varepsilon_{EC}$ および $\varepsilon_{TEC}$ ) 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 $\sigma_w/u$ 範囲に対する  $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ を風向に対してプロットした(図 3.8)。風向 $\theta$  (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、北一南の風向で1をとり、東一西の風向 で0となる。 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ 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 σw/ūと DBSAS と EC 間の温度変動の消散率比 ε<sub>rsAs</sub>/ ε<sub>rec</sub>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  $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$ 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、 $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$ 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。

$$IR_{-v} = (H + lE + S - R_n)/R_n, \quad S = S_b + G$$
(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 *w* の測定誤差や、Finnigan<sup>61</sup>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





ランスとの関係が薄いことが指摘されてい る<sup>58</sup>。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.<sup>66</sup> 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  $\overline{ws}$ は相殺され、乱流変動項 [ $\overline{wtsi}$ ] 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の妥当性 指標とすると、DBSAS は空間平均フラックス [ $\overline{wtst}$ ] に相当する消散率 [ $\varepsilon$ ] 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<sub>n</sub>*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の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 のフットプリントは一定である。乱流フラック スと*R<sub>n</sub>*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<sup>-1</sup>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<sup>-1</sup> 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 и\* は, 値が小さな領域において両タワーで風速 ū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 E, および CO<sub>2</sub> 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.<sup>14</sup>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)。 $\sigma_w/\bar{u}$  は大気の機械的攪 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2ms<sup>-1</sup>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2ms<sup>-1</sup>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, 風速の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<sup>-1</sup>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 σ<sub>w</sub>/ū 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  $\sigma_w/\bar{u}$  値の空間的偏差は, TOS の存在に よって生じている可能性がある。 $\sigma_w/u$ 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、値の大きな  $\sigma_w/\bar{u}$  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)CO2 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)CO2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。乱流フラックスベース のインバランス率 IR<sub>4</sub> 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  $\varepsilon_{SAS}/\varepsilon_{EC}$ 、温度変動の消散率比  $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ の関係。

$$IR_{h} = (H + lE - R_{n})/R_{n}$$
(3.6)

これは、基本的に Nakaya et al.<sup>27</sup> 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<sup>67</sup>。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<sub>h</sub> 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。

$$D_{h} = (\mathrm{HF}_{1} - \mathrm{HF}_{2})/\sqrt{\mathrm{HF}_{1} \times \mathrm{HF}_{2}}$$
$$\mathrm{HF}_{1} = H_{1} + lE_{1} ; \mathrm{HF}_{2} = H_{2} + lE_{2} \qquad (3.7)$$

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<sub>h</sub>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  $[\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}]$ 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,  $H \approx IE$  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<sup>68;69;70</sup>。しかし, De Bruin et al.<sup>71</sup> 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<sub>2</sub> 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 3.15 ダワー間の熱フラックス偏差 D<sub>h</sub> と 各タワーにおけるインバランス率 IR<sub>h</sub>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チロメータ<sup>72</sup>を用い、水蒸気変動の消散 率  $\varepsilon_q$ および温度変動の消散率  $\varepsilon_T$ 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 Meixner<sup>73</sup>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 ū, 摩擦速度 u\*, 安定度パラメータく,測定高さ z で、くの符号に 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 (v) にお ける風速変動  $\sigma_v$ の感度関数 D(x, y) との積が



[X] 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。

$$\sigma_{vSAS} = \sigma_v + |\cos(\theta)| a L_p \tag{3.8}$$

ここに、 $L_{\rho}(m)$ 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 Asas および EC の ソースエリア AEC が得られる (図 3.18b)。風向 が DBSAS パスと平行な場合、Asas と AEC 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はいない。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には有効性が 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。*Asas/Aec*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 *Asas/Aec* 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 Asas/AEC 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 の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。

 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ の分布の上限線は  $A_{SAS}/A_{EC}$ 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、 $A_{SAS}/A_{EC}$ に関わらず、 $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ は小さな値をとる (図3.21e および3.21g)。後述(3.5.9)するが、  $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ を、 $\sigma_w/\bar{u}$ および  $A_{SAS}/A_{EC}$ 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  $A_{SAS}/A_{EC}$ 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 によってゴンドラ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<sub>sas</sub>/A<sub>EC</sub> とインバランス 率 IR<sub>-v</sub> の関係(不安定時)。



[3.21 ソースエリア比 Asas/Aec および相対的乱流强度 σw/uと SAS および EC 間の温度変動の消散率比 ε<sub>TSAS</sub>/ε<sub>TEC</sub> 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ゴンドラを車体に 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,ゴンドラが安定して 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することができ る。Hartogensis et al.<sup>26</sup> 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.<sup>74</sup> 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.<sup>53</sup>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* 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<sub>SAS</sub> お よび H<sub>E</sub>C, u<sub>\*SAS</sub> および u<sub>\*E</sub>C の比をとると, u<sub>\*SAS</sub> H<sub>SAS</sub> 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Asas/AEC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。</li>

$$u_{*\text{sas}} = u_{*\text{ec}} [\varepsilon_{\text{sas}} / \varepsilon_{\text{ec}}]^{1/3}$$
(3.9a)

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

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。

$$\begin{bmatrix} (\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}})^{1/3}\varepsilon_{T\text{SAS}}/\varepsilon_{T\text{EC}} \end{bmatrix}^{1/2} \\ = y_0 + a_1 \exp[-(\sigma_w/\bar{u} - x_0)/a_2] \\ x_0 = (A_{\text{SAS}}/A_{\text{EC}} - 1)/a_3$$
(3.10)

 $[(\epsilon_{\text{SAS}}/\epsilon_{\text{EC}})^{1/3} \epsilon_{\text{TSAS}}/\epsilon_{\text{TEC}}]^{1/2}$ 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 $\epsilon_{\text{TEC}}$ 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、 $\epsilon_{SAS}/\epsilon_{EC}$ および $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$ 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<sub>2</sub> 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<sub>SAS</sub> は、最も高い  $\varepsilon_{TSAS}/$  $\varepsilon_{TEC}$  が得られた A<sub>SAS</sub>/A<sub>EC</sub> を定数として計算し た結果である。H<sub>EC</sub> は  $\sigma_w/u$  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 [(ε<sub>SAS</sub>/ε<sub>EC</sub>)<sup>1/3</sup>ε<sub>TSAS</sub>/ε<sub>TEC</sub>]<sup>1/2</sup>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<sup>75</sup>。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



*lE*<sub>EC</sub> 図 3.27 DBSAS による EC 法の補正効 果:(a)顕熱(b)潜熱の結果。

0

200

y=1.4x+6.2

600

800

r=0.79

400

するための新たなアプローチと言える。

## 3.6 まとめ

400

200

-200

-400 -400

-200

 $lE_{
m SAS}$ 

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18mの広葉樹林内に 86m離れて設置した地上高28m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、CO<sub>2</sub>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: displacedbeam 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  $CO_2$  フラックスに適用することで, DBSAS 相当の  $CO_2$  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  $CO_2$  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,補正値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, 時として土壌呼吸チャンバによる土壌呼吸量を 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<sub>2</sub>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壌呼吸量測定 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<sup>3</sup>。

現在,地球規模の CO<sub>2</sub> 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ルー ス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<sup>4</sup>。生態系の炭素循環を定量化するた めには,森林全体の CO<sub>2</sub> 収支の評価が重要であ る。森林全体の CO<sub>2</sub> 収支は,CO<sub>2</sub> 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  $CO_2$  の収支を表す生態系純 交換量 (NEE: Net Ecosystem Exchange) は,  $CO_2$  フラックス  $F_c$  を用いて次式で表される。

 $NEE = F_c + S_c \tag{4.1}$ 

ここで、S<sub>c</sub> 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 ( $gCO_2m^{-2}yr^{-1}$ ) 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<sup>70</sup>; Saigusa et al.<sup>77</sup>; Wang et al.<sup>78</sup> 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,CO2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 CO2 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 CO2 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<sub>2</sub>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<sup>51</sup>
- (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<sup>7</sup>

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。CO2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<sub>2</sub> 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 *l*min<sup>-1</sup> で 吸引し、その一部を2.0 *l*min<sup>-1</sup> で CO<sub>2</sub> 分析計 に導入した。水蒸気変動による CO2 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 CO2 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 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 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<sup>6</sup>。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<sup>79</sup>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<sup>76</sup>。 当サイトでは CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 貯留 変化量  $S_e$  は、塔頂での CO<sub>2</sub> 濃度 c の時間変化 量から算出した<sup>80</sup>。

$$S_{c} = \int_{0}^{z_{m}} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz \simeq z_{m} \triangle \bar{c} / \triangle t$$
(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,メインテナンス, 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<sup>6</sup>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<sup>81</sup> 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  $\varepsilon_{\text{SAS}}/\varepsilon_{\text{EC}}, \varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ は、相対乱流強度  $\sigma_w/\bar{u}$  およ びソースエリア比 Asas/AEC 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CO2フラックスに適用するこ とで、DBSAS 相当の領域平均 CO2 フラックス  $F_{cSAS}$ を算出する。 $\varepsilon_{SAS}/\varepsilon_{EC}$ および $\varepsilon_{TSAS}/\varepsilon_{TEC}$ 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)×140 m (E-W) の範 囲を 10 m×10 m の区画に分け<sup>82</sup>, 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1m×1mの落葉採取装置(リタートラッ プ)を林床から1.3m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<sup>83</sup>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 -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<sup>84</sup>。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9m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 CO2 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 CO2 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  $\mu$ molm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) k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 寒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<sub>2</sub> 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 CO2 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 CO2 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 CO2 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 CO2 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<sup>85</sup>。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 CO₂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<sub>2</sub>をアルカリ溶液に吸収させる装置である<sup>85</sup>。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<sub>2</sub>濃度が設定値を下回るとバッテリ駆動のポンプが停止し、外気CO<sub>2</sub>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<sup>86</sup>。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<sup>85</sup>。

#### 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ダにアルカリ溶液を満たし、チャンバ内の CO₂を吸収させる。(B)チャンバ内の CO₂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、メインテナンス、悪 天候,機器の故障などが原因であった。FLUX NET<sup>54;55</sup> や Asia Flux<sup>6</sup> 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 и\* 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 CO₂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  $\epsilon_{SAS}/\epsilon_{EC}$  および  $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$ 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 RA =  $A_{SAS}/A_{EC}$ 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*<sub>csas</sub>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 IR = (H + lE - Rn)/Rn 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 CO2 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<sub>EC</sub>  $+\lambda E_{\rm EC}+V$ )に比べ, DBSAS 補正による顕熱及 び潜熱フラックス ( $H_{sas} + \lambda E_{sas}$ ) が明らかに大 きくなって,純放射量 Rn 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。



が分かる。また、CO<sub>2</sub>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  $\epsilon_{SAS}/\epsilon_{EC}$ および  $\epsilon_{TSAS}/\epsilon_{TEC}$ が、 $\sigma_w/u$ 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 CO<sub>2</sub> 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、NEEsas 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 NEEsas と土壌呼吸量との比較

森林における CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> フラックス  $R_h$  から成 る。 $R_a$  は,葉 ( $R_i$ ),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 CO<sub>2</sub> 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<sub>g</sub>,群落呼吸量 R<sub>e</sub> および NEE の関係を以下に示す。

$$NEE = -A_g + R_e \tag{4.3a}$$

$$R_e = R_a + R_h \tag{4.3b}$$

$$R_a = R_l + R_t + R_r \tag{4.3c}$$

$$R_s = R_r + R_h \tag{4.3d}$$

夜間は  $A_s = 0$  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<sup>87</sup>。

 $R_e = R_0 Q_{10}^{T/10} \tag{4.4}$ 

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。



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<sup>85</sup> 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<sub>SAS</sub> 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  $R_{\text{eEC}}$  は炭素収支上の矛盾がある。小林 他<sup>88</sup> 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<sup>89</sup> 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 ( $R_l+R_l, R_r, R_h$ ) 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  $R_{\text{esas}}$  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



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<sup>90</sup>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 NEEsas 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 NEEsas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CO2 吸収の瞬時値は大気乱流輸送の結果で、必ずし も葉面のCO2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<sup>80</sup>。

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

PAR (Photosynthetically active radiation) は 群落上に入射する光合成有効放射量 ( $\mu$ molm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>),  $P_m$  は最大光合成量 ( $\mu$ molm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)を表し, a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



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。

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<sup>91;92</sup>,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<sup>93</sup>、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 Pm の平均値は, 19.3( $\mu$ molm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)であった。また、中低木 (ナ ナカマド, ミズナラ低木)のPmの平均値は 5.6(µmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)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。NEEsas 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(µmolm<sup>-2</sup>  $s^{-1})$ 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 4.10 個果における人射光重 PAR と光谷 成速度 P との関係(2003 年 8 月)。

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

ここで、L 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  $I_{nc}$ は、I の微分の絶 対値として表される<sup>96</sup>。

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

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  $I_{\text{Inc}}$  に 対する光合成量 P は (4.5) 式の PAR を  $I_{\text{Inc}}$  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  $I_{\text{Inc}}$  の変化および式 (4.5) に  $I_{\text{Inc}}$  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 ( $P_{\text{up}}$ ) をダケカ ンバで代表させ、中低木の光合成量 ( $P_{\text{low}}$ ) 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  $P_{\text{can}}$  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<sub>low</sub> として、 $P_{\text{can}}$  は次式で表される。

$$P_{\text{can}} = \int_{0}^{\text{LAI}} P dF$$
  
= 
$$\int_{0}^{\text{LAI-LAI_{10W}}} P_{\text{up}} dF + \int_{\text{LAI-LAI_{10W}}}^{\text{LAI}} P_{\text{low}} dF$$
  
(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*<sub>Inc</sub> 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<sub>2</sub> の交換量が変化するなど、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、NEEsas による  $A_g$  の 分布は、NEE<sub>EC</sub> による  $A_g$  に比べて  $P_{can}$  に近づ き、NEEsas 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 $\mu$ molm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> における群 落光合成のポテンシャルと NEE から導いた群



度の比較 (PAR=2000 $\mu$ molm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)。

落光合成量を示した。EC 法の過小評価は CO<sub>2</sub> 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。NEEsas 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,渦相関法の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 NEEsas の特性

NEEsas 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,NEEsas 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,CO<sup>2</sup>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<sub>SAS</sub> に基づく森林 CO<sub>2</sub> 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( $\approx$ -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 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> の吸収・放 出が強調された(図 4.14a)。その結果、NEE<sub>SAS</sub> 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

よての有米州		I INDI (**	(LL) + Re(	町 笄恒/ 6	
		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)	°C	6.6	6.0	7.3	6.0
年平均地温 (-0.2m)	°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
NEEec	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	-663	-366	-832	-861
NEEsas	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	-990	-495	-1052	-1217
GPP(EC)	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	2603	2060	3270	2955
GPP(SAS)	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	4235	3149	4400	4539
$R_s$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	2101	2119	2291	2203
$R_{e E C}$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	1939	1694	2438	2093
$R_{e \mathrm{SAS}}$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	3245	2654	3355	3322
$R_{0  ext{ec}}$	$\mu \mathrm{molm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$	0.66	0.59	0.53	0.50
$R_{ m 0SAS}$	$\mu \mathrm{molm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$	1.20	1.05	0.73	0.85
$Q_{10\text{EC}}$		2.21	2.18	2.90	2.89
$Q_{10SAS}$		2.06	1.96	2.90	2.74

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(≈-NEE)+R<sub>e</sub>(計算値)。



**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*<sub>m</sub>)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<sub>EC</sub>=-682 gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup> に対し、NEE<sub>sas</sub>-935 gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>vr<sup>-1</sup> となった。 Saigusa et al.<sup>77</sup> 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 =  $-598 \text{ gCO}_2 \text{m}^{-2} \text{vr}^{-1} (-163)$ gC)m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>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 CO2 フラックスにも適用し たところ, NEE =  $-785 \text{ gCO}_2 \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1} (-214)$ gCm<sup>-2</sup>vr<sup>-1</sup>)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 gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>(875 gCm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>), 補正後では 4202 gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>(1146 gCOm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>)<sup>77</sup> で,当サイト の4年間平均値GPP<sub>EC</sub>=2724gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>お よび領域平均フラックスによる GPPsas=4081 gCm<sup>-2</sup>vr<sup>-1</sup>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.<sup>78</sup> が 2001 年に苫小牧において実施 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~-880 gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup> vr<sup>-1</sup>(-141~-240 gCm<sup>-2</sup>vr<sup>-1</sup>)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,時として土壌呼吸チャンバに よる土壌呼吸量を下回り,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<sub>2</sub> 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 る土壌呼吸量測定結果とも整合した。DBSAS 補正によって,CO<sub>2</sub>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 きく下回るのに対し、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 CO2 フラックスに適用 することで, DBSAS 相当に補正した CO₂フ ラックスから NEE を算出し、土壌呼吸や光合 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<sup>60</sup> 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と, 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  $\sigma_w/u$  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 *IE* 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、CO2フラック ス Fc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。  $\lambda E$  と同様に  $F_c$  に DBSAS 補正を施した生態 系純交換量 NEEsas 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<sub>EC</sub> では過 小評価が推察されたのに対し, NEEsas では過 小評価が緩和された(4.4.4)。DBSAS 補正に よって, CO2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<sub>2</sub> 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 <sup>2</sup>	フラックス測定のソースエリア
$A_{\mathcal{G}}$	$mgCO_2m^{-2}s^{-1}$	CO2 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
$C_{T}^{2}, C_{q}^{2}$	$K^2 m^{-2/3}$ , $m^{-2/3}$	気温、比湿の構造関数定数
$C_n^2$	$m^{-2/3}$	屈折率変動の構造関数定数
С	$mgCO_2m^{-3}$	大気中 CO2 密度
СрО	$\mathrm{JK}^{-1}\mathrm{m}^{-3}$	空気の体積熱容量
Duu, Dss		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×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	$\mathrm{kgm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$	蒸発量:蒸散量も含める
$e_t$	$m^{2}s^{-2}$	乱流運動エネルギー:turbulent kinetic energy(TKE)
$F_c$	$mgCO_2m^{-2}s^{-1}$	CO2 フラックス
F(x)		風向軸を <i>x</i> としたときのフラックス測定のフットプリント
G	$\mathrm{Wm}^{-2}$	地中貯熱変化量
GPP	$gCm^{-2}yr^{-1}$	総生産量(Gross Primaly Production)
g	$ms^{-2}$	重力加速度
Н	$\mathrm{Wm}^{-2}$	顕熱フラックス
$I_0$	$\mu \mathrm{molm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$	群落上端の入射光
$I_{ m inc}$	$\mu \text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	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 ( $=2\pi/\lambda$ )
$k_{ m kar}$		Karman 定数
$L_{ m mo}$	m	Monin-Obukhov 長(安定度長さ)
$L_{P}$	m	DBSAS の測定パス長
lo		乱流運動エネルギーの内部スケール
lE	$\mathrm{Wm}^{-2}$	潜熱フラックス
NEE	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	生態系純交換量(Net Ecosystem Exchange)
NEP	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	生態系純生産量(Net Ecosystem Production)
п		大気中の光の屈折率
Þ	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
$P_m$	$\mu \mathrm{molm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$	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
$R_{e}$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	群落呼吸量

記号	単位	説明
$R_l$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	
$R_s$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	土壤呼吸量
$R_t$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	幹呼吸量
$R_n$	$Wm^{-2}$	純放射量
$R_r$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	根呼吸量
$R_{ m s}$	$gCO_2m^{-2}yr^{-1}$	土壤呼吸量
$R_0$	$\mu  m molm^{-2} yr^{-1}$	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(=ūτ)
$\gamma_{12}$		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
$S_c$	$mgCO_2m^{-2}s^{-1}$	林冠内気層の CO₂ 貯留変化量
S		スカラー:気温,比湿,CO₂など熱や物質を表す
T, q	K, kg kg <sup><math>-1</math></sup>	気温,比湿
$T_v$	К	仮温度
$\mathcal{U}_{*}$	$\mathrm{ms}^{-1}$	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
$\alpha_{uu}, \alpha_{ss}$		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,CO2密度変動の消散率
ρ	$\mathrm{kgm}^{-3}$	空気の密度
ζ		安定度パラメータ= $(z_m - d_0)/L_{mo}$
$\theta$	degrees	北を基準に時計回りに表した風向
$ heta_v, T_v$	К	仮温位,仮温度
λ	μm	シンチロメータのビーム波長
ν	$m^{2}s^{-1}$	空気の動粘性係数
$\sigma_T, \sigma_q$	K, kg kg <sup><math>-1</math></sup>	気温、比湿密度変動の標準偏差
$\sigma_c$	$mgCO_2m^{-3}$	CO₂ 密度変動の標準偏差
τ	S	時系列データの時間差
$\phi_{\epsilon}, \phi_{\epsilon s}$		TKE およびスカラーの無次元消散率
$\phi_m, \phi_s$		TKE およびスカラーの無次元鉛直勾配
$\phi_n$		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科(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 a S I 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., Bakwind, P., Berbigier, P., Bernhofer, C., Burba, G., Clement, R., J, D. K., Elbers, J. A., Goldstein, A. H., Grelle, A., Granier, A., Gudmundssonm, J., Hollinger, D., Kowalski, A. S., Katul, G., Lawq, B. E., Malhi, Y., Meyers, T., Monsons, R. K., Mungert, J. W., Oechel, W., Paw, U. K. T., Pilegaardw, K., Rannik, U., Rebmanny, 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,植物と微気象一群落大気の乱れ とフラックスー,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., Grellej, A., Ibromk, A., Lawl, B. E., Kowalskig, A., Meyersa, T., Moncrieffm, J., Monsonn, R., Oechelo, W., Tenhunenc, J., Valentinip, R., and Vermaet, S., Energy balance closure at fluxnet sites, *Agric. For. Meteor*ol., 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 longterm 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 Meteor*ol., 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地境 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・レッ ツェル・ジークフリード・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., Bonnefond, 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 CO<sub>2</sub> 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CO<sub>2</sub>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., Displacedbeam small aperture scintillometer test. part II: CASES-99 stable boundarylayer 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. Fluied. 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) 一消散率 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 temparature 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., 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 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 correctionsand 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 eddycovariance 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 CO<sub>2</sub> 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 forestatmosphere CO<sub>2</sub> 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 standarddeviation 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 nonneutral 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 fluxvariance 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 CO<sub>2</sub> 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 methed, *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 CO<sub>2</sub> exchange over a larch forest in hokkaido, japan, *Atmospheric Environ.*, Vol. 38, 7021-7032, 2004.
- [79] Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, 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, *Ecol*ogy, 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,落葉広葉樹林の土壌炭素蓄 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 CO<sub>2</sub> 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 一密閉吸収法の検討Ⅳ.スポンジを利用し た密閉吸収法の開発一,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 CO<sub>2</sub> 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 する際の問題点一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 nonphotosynthetic 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 singletower 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.

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 then 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<sub>2</sub> 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 fluxbased ecosystem respiration was sometimes less than the soil respiration estimated by soil chambers. Considering the respiration calculated using the aboveground plant body, this result was inconsistent. 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.