

タイトル：Flux Sampling Errors for Aircraft and Towers 著者：Mahrt L.

掲載誌：Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (1998) 15, 416-429

1. はじめに

航空機によるフラックス vs タワーによるフラックス：一致しない 議論が進行中

本論文の命題：不一致の原因の探索

図1：フラックス調査の戦略（ボックス内の数字は参照すべき節を表す）

- 1) 質の制御（Vickers and Mahrt, 1997: J. Atmos. Sci. 53, 2997-3012）
- 2) 平均化スケールの選択 コスベクトル、積算フラックスなどに基づく
- 3) 非定常データの判別・除去（4c 節）
- 4) ランダム誤差と系統的誤差の算定・除去（4a,b 節）

2. データセット

航空機-1) BOREAS（北方林観測）データ：カナダ北方林、地上 35m

航空機-2) CODE（オゾン沈着観測）データ：カルフォルニア San Joaquin Valley

タワー-1) BOREAS データ：カナダ北方林

タワー-2) RASEX（大気海洋観測）データ：沖合いタワー（10m）

タワー-3) CODE データ：綿花サイト（10m）、ワイン畑サイト（10m）

タワー-4) Microfronts 観測データ：NCAR-ASTER タワー（休眠状態の草地上）（10m）

タワー-5) COSPECTRA（エネルギー炭素移動観測）データ：中部オレゴン ponderosa 松林（45m）

3. 航空機 vs タワー比較

3a. エネルギー残差

$$\text{エネルギー残差を定義：} R \equiv \frac{R_{net} - H - LE - G}{R_{net}} \quad (1)$$

図2：エネルギー残差の風速依存性（安定度依存性）（BOREAS タワーサイトは検討中）

草地サイト：風速の増加 緩やかに増加（弱風時のデータがない）

その他のサイト：風速の増加 残差の減少（特に松林 45m タワーで顕著）

地表面の非均一性によって引き起こされる大規模な循環による熱輸送の可能性

航空機データ：減少傾向は統計的に有意ではない。タワーよりは大きい。

3b. 航空機フラックスの誤差

- 1) 航空機高度と地表面の間の貯留と移流 乱流フラックスの顕著な高度依存性
- 2) 水平スケール(平均化スケール)の不足 系統的誤差（4b 節）
- 3) ランダム誤差 同高度・同経路の繰り返し飛行によって減少
- 4) 一定高度を維持する困難さ 航空機の飛行は完全に水平ではない

1～3 の解決策：均一地表面・定常状態での低空飛行

多高度測定からの地表面フラックス外挿の場合は、最低高度の飛行を増やし精度を上げる。

3c. タワーフラックスの誤差

- 1) 地表面の非均一性 + 測定視野の狭さ + 恣意的なサイト選定
- 2) 下降風方向への渦の伸長とうねった渦(roll vortices)の形成 フラックスの過小評価
- 3) 粗度層より下での観測
- 4) センサーパスと測器の応答による平均化 フラックスの過小評価
- 5) 上昇気流・下降気流 ゆっくりとした大規模対流 地表面の過熱
- 6) 3次元風速センサーの傾き補正 弱風時に影響大
- 7) 平均化時間の不足 弱風時に捉える渦の数が不足 フラックス過小評価
- 8) 定常流の除去 排出流、メソスケール対流が補足不能

定常流を含めたフラックスの表現： $\overline{w'\theta'} + \overline{w^*\theta^*} + \overline{w}\overline{\theta} = \overline{w'\theta'} + \overline{w^*\theta^*}$ (3 改)

（上線は時間平均、大括弧は空間平均、ダッシュは時間偏差、米印は空間偏差）

4. フラックスサンプリング問題と非定常性

4a. ランダム誤差の評価

$$\text{ランダム誤差：} RE = \left[\frac{\text{var}(\text{flux})}{n} \right]^{1/2} = \left[\frac{\text{var}(\text{flux})L}{R} \right]^{1/2} \quad (5,6)$$

全データ R を L の長さで n (= L/R) 個のレコードに分割。各レコード間の分散を var(flux)。

非定常状態では、L の決定が困難で恣意的になるが、各レコードに 1 つの構造が含まれる位が適当か？

例-1) RASEX タワーデータ：RE が大 抵抗係数と風速のプロットがばらつく事実と整合

例-2) BOREAS 航空機データ：RE が小 なかなか GOOD な観測じゃん

RE を指定 R の算定 = 必要なサンプリング長の見積り。

4b. 系統的誤差の評価

$$\text{実用的サンプリング誤差の見積り：} Flux(0, x_r) = \frac{1}{x_r} \sum_{x=0}^{x=x_r} w' f' \quad (7)$$

x_r は r 番目の観測値、 x_r を 0 R へ近づけ、 $Flux(0, R) = \overline{w' f'}$ への収束を指標とする。

4c. 非正常性の指標

非正常性の扱い：トレンド除去 恣意的。偏りをもたらす可能性あり。

非正常性を数値評価し、目的に応じて非正常状態のデータを除去する。

非正常性の数値評価（尺度の開発）

図5a：時系列を I 個のレコードに分割。レコードを J 個のセグメントに分割

$$\text{レコード内標準偏差：} \sigma_{wi}(i) = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J [F(i, j) - \bar{F}(i)]^2} \quad (8)$$

$$\text{レコード内ランダム誤差：} RE = \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{J}} \quad (9)$$

$$\text{レコード間標準偏差：} \sigma_{btw} = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (\bar{F}(i) - \bar{F})^2} \quad (10)$$

$$\text{非正常比：} NR = \frac{\sigma_{btw}}{RE} = \sqrt{J} \frac{\sigma_{btw}}{\sigma_{wi}} \quad (11 \text{ 改})$$

図6：エネルギー残差は非正常比 NR の関数か？ MicroFronts データより

NR が 2 以下では残差はおよそ 0.2 程度、2 以上では平均値もバラツキも激増する。

時系列を飛行経路長に置き換えれば、航空機データにも応用可である。

例) CODE 航空機データ：NR は熱フラックスで 3 程度、水蒸気フラックスで 2 程度

5. ランダムフラックス誤差：飛行の繰り返し

5a. 平均的な空間多様性

図5b：一定のパスを I 回繰り返し飛ばす。パスを J 個のセグメントに分ける。

さらに、それを K 日にわけて飛ばす。

$$\text{セグメント毎の平均値：} F(j) \equiv \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k(j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I F_k(i, j) \quad (12,13)$$

5b. ランダム誤差と非正常比

飛行日毎に RE_k と NR_k が計算される。

BOREAS データの熱・水では NR_k は 1.1 ~ 1.2 程度 メソスケール・日変化の影響なし

5c. 必要パス数の予測

$$\text{必要パス数：} I_r = \left[\frac{\sigma_{btw}}{XF_k} \right]^2 \quad (22)$$

$X=0.1$ すなわち相対誤差 10%程度がよからう。I=5 ~ 6 回の時に試算して決める。

表1：BOREAS の熱フラックスの統計量。No.flt > I_r である。運動量は RSE が大きい。

6. 領域平均フラックスとグリッドパターン

$$m \text{ 番目の小領域のフラックス：} F_m = \langle F \rangle + \hat{F}_m + F'_m \quad (24)$$

$\langle F \rangle$ は領域平均、 \hat{F}_m は領域平均に対する小領域平均の偏差、 F'_m は小領域平均に対する偏差。

$$\text{グリッド平均ランダム誤差：} \frac{1}{M} \sum_1^M F'_m = \frac{\sigma_F}{\sqrt{(M)}} \quad (26)$$

ちなみに、BOREAS などだと、これは、かなり小さい。

7. 結論

サンプリング誤差 航空機フラックスとタワーフラックス 不一致

タワーエネルギー残差 航空機エネルギー残差

乱流 = 非正常 誤差見積りは不明確 フラックスも不明確 非正常性の尺度を開発

非正常比による判定 = 客観性が高いので、いいぞ！！？

でも、一般化していいかどうかは、更なるデータの取得・解析しないとわからんぞっと

10 ~ 15km の今のデータだと、だいたい 6 回ぐらいの繰り返しが必要のようである。

必要なパス数は気象状態に依存し、航空機の高さとともに増加する。

グリッド平均フラックスのランダム誤差は小さいと分かる。

グリッドエリア内のフラックス空間分布は、ランダム誤差のため難しい。

ランダム誤差を減らすには、条件を同じにした飛行をもっと増やさないとはいけない。

おまけ（筆者がもらした愚痴？ introduction より）

航空機とタワーのフラックスの比較はしばしば、フラックスサンプリングの判定基準(第4章 a,b)を満足させる航空機計画の不必要な失敗によって地位を落としている。必要なサンプルのサイズあるいは必要な飛行パスの数を見積もる方法は既に存在するのに、これらの方法は通常、観測プロジェクトに応用されない。フラックスサンプリングの判定基準を満足させることの失敗は時々、与えられたフラックス航空機に置かれる多すぎる要求に起因する。この場合、フラックスサンプリングの考慮には低い優先度が置かれてしまう。不幸にも、フラックスサンプリングの判定基準を満足しない航空機フラックスは信用できない。それでも、航空機データは、空間的な多様性の情報を供給するための広域観測プロジェクトの重要な部分ではありつづける。

Abstract

タワー観測と航空機観測の間の相違を招く様々なエラーと影響が調査される。この調査は航空機フラックスが時々タワーで測定されたフラックスよりも小さくなるという文献による報告に動機付けされている。タワーと航空機の両方のフラックスエラーは、いくつかの独立な効果による地表面の非均一性を伴い大きくなる。地表面の非均一性は風速が小さくなるにつれてタワーフラックスのエラーを大きくする可能性がある。

フラックスサンプリングのエラーに関する調査手法についてレビューが行われる。そのようなエラーの見積もりは、タワー時系列の非定常性(あるいは、航空機データの非均一性)のため、真の地球物理学的時系列における様々な程度の不適用性を経験している。非定常のための新しい尺度が開発され、従来の手法に必要な非定常性の式における仮定を取り除く。この非定常尺度が大きくなると、表面のエネルギーインバランスは急激に増加する。最終的に、反復されるフライトパスとグリッドパターンを用いた適切なフラックスサンプリングを得るための戦略が概説される。

1. Introduction

同時に行う航空機とタワーで計ったフラックスはしばしば一致しない。この不一致は広域観測プロジェクトから集計しているデータについて、進行中の議論を生んだ。航空機とタワーのフラックスの相違の理由は無数にある。多くの観測プロジェクトのなかで、航空機によって測られた顕熱・潜熱フラックスの和がタワーで測られたものより小さい場合(Shuttleworth, 1991)もあれば、同程度のものもあり、この場合は航空機の軌道が十分に均一であった(Desjardins et al., 1997)。本研究の目標は、ひとつの統合された議論における航空機とタワーのフラックスの相違のあり得る原因を調べ、選り抜きの問題についてより詳しく調査をすることである。この目標に向かって、タワーと航空機フラックスのエラーの多くの原因を第3章でレビューする。

航空機とタワーのフラックスの比較はしばしば、フラックスサンプリングの判定基準(第4章 a,b)を満足させる航空機計画の不必要な失敗によって地位を落としている。必要なサンプルのサイズあるいは必要な航空機経路の数を見積もる方法は既に存在するのに、これらの方法は通常、観測プロジェクトに応用されない。フラックスサンプリングの判定基準を満足させることの失敗は時々、与えられたフラックス航空機に置かれる多すぎる要求に起因する。この場合、フラックスサンプリングの考慮には低い優先度が置かれてしまう。不幸にも、フラックスサンプリングの判定基準を満足しない航空機フラックスは信用できない。それでも、航空機データは、空間的な多様性の情報を供給するための広域観測プロジェクトの重要な部分ではありつづける。

データ調査のための一般的な戦略が図-1 に概説される。第1段階はデータの質の制御である(Vickers and Mahrt, 1997; およびその引用文献を見よ)。平均化スケールの選択(第2段階)は、通常、コスペクトルあるいは積算されたコスペクトルから得られる累積フラックス(例えば、Desjardins et al., 1989; Oncley et al., 1996)、あるいは、異なるウインドウサイズを通した単純平均に基づく累積フラックス(Sun et al., 1996)に基づく。

第3段階は、非定常(非均一)な記録を判別することであり、第4章 c で開発される新しい方法に基づく。無作為エラーと系統的错误の計算は妥当ではなく、計算されるフラックスは平均化長さに敏感であるから、非定常の記録はこの先の解析から省く。第4段階は無作為エラーと系統的错误(それぞれ第4章 a,b)の規模の調査である。この解析は第5章で与えられる軌跡と第6章で与えられる航空機グリッドパターンの上の反復されるフライトにおあつらえ向きである。

2. Data

本研究で解析するデータは、カナダ国立調査評議会(CNRC)の Twin Otter 調査航空機によって得られたものである(MacPherson, 1996)。データは、地上 35m の固定された軌道を繰り返されるフライトで得られた。地表面は、BOREAS の異なる「均一」な地区を代表している。一般的に、与えられたある1日、あるサイトのための繰り返されるフライトの全ては、1時間の期間に行われた。その間は熱フラックスと気温は通常おおよそ一定である。各サイトの運動量の粗度長は観測されたフラックスと Paulson(1970)の相似関係から計算される。 $-z/L$ が小さい(弱不安定)場合が粗度長の決定において強調され、安定度関数の特殊形状の効果を最小にした。ここで、 z は観測高度で L は Monin-Obukhov 長である。強不安定には、計算される粗度長は与えられたサイトにおいてもっと変化する。

地表面の非均一性の効果を調べるために、全てのフライトに繰り返されるフライトパスが地表面に配慮して一直線に設定され、バランスをとって、全てのパスが正確に同じ地表をカバーするようにされた。

6km 以下の調整されたフライト軌道が省略された。フライトはしたがって、10 区分に分割された。この選択は時々、より大きなスケールで起こるフラックス(メソスケールフラックス)の小さな断片を省略した。フライト軌道の長さや区分長は異なる軌道間でいくばくか変化した。幸運にも、ほとんどのフラックスは、通常、2~300m 以下のスケールで起こった。フラックスは、パス平均からの変動で計算され、その後、記録された区分の上で合計された。

本研究はまた、カルフォルニアの San Joaquin Valley から得られた Canadian Twin Otter 航空機データも解析した。それは、カルフォルニアオゾン沈着観測(CODE)の間得られた(MacPherson et al., 1993; Pederson et al., 1995; Mahrt et al., 1994)。ここで解析される CODE のデータは 1991 年の 7 月 23 日と 30 日の 2 日間のフライトである。どちらのフライトも 30km の軌道のうえの 8 つのパスからなり、地表面はよく整備された冷涼な灌漑地と暖かく乾燥した非灌漑地の 5-10km の区分からなっている。

タワーデータは 5 つの異なる観測プロジェクトからのものが解析される。BOREAS タワーデータは BOREAS 情報システムから供給された。沖合いタワーデータは Riso 大気海洋観測からのものが解析され、それは Barthelmie et al., 1994; Hojstrup et al., 1995; Mahrt et al., 1996 に詳細が記されている。CODE の綿花サイト(Delany et al., 1993)、ワイン畑サイト(den Hartog et al., 1992)からのタワーデータも解析された。さらに、Microfronts 観測からの NCAR-ASTER タワーデータが解析された。これは、1995 年 3 月にほとんど休眠状態の草地上で得られた渦相関データである。本研究ではまた、共同空間エネルギー炭素移動観測(COSPECTRA)のタワーサイトからの渦相関データを含み、これは、1996 年の夏の中部オレゴンの ponderosa 松林でなされたものである(Anthoni et al., 1998)。渦相関データは 45m で得られ、平均樹高よりもおよそ 15m 高い。他の全てのタワーデータは地表面から 10m 高い地点のものである。

3. Aircraft-tower comparisons

a. Energy residual (エネルギー残差)

一般的に、航空機とタワーのデータの相互比較は顕著な相違を導く。以下では、様々なサンプル源と解析源のタワーのフラックスエラーを議論するが、全般的に、流れのかく乱、航空機の upwash、音波伝達物の被陰、取り込みチューブ中の変動減衰、風速変動測器とスカラー量測器の間の距離による相関の欠損、測器の応答時間と測定パス間の平均化による信号の欠損、高速の航空機による測定温度の圧縮率効果などのような測器に特有の使用機器問題は避ける。Webb の補正(Sun et al., 1995)のような個々の測器に特有の後処理の手順もまた、ここでは考えない。

タワーと航空機のフラックス観測の間の相違は、規格化されたエネルギー残差の項で表現され、次式のように定義される。

$$R \equiv \frac{R_{net} - H - LE - G}{R_{net}} \quad (1)$$

分母分子は、比を平均する問題を避けるため、別々に平均されている。式-1 の分子は、樹冠の貯留と分子の多くの項の誤差のため、通常ゼロでない。多くのデータセットで入手不可能であるため、樹冠貯留の項は規格化エネルギー残差には含まれない。

タワーデータの規格化エネルギー残差はサイト毎に異なる日変化をする。日変化の影響を減らすために現地時間の 10:00 ~ 14:00 のデータを用いる。弱風時のない Microfronts の草地では規格化エネルギー残差は風速とともにゆっくりと増加する(図-2)。その他のデータセットでは、規格化エネルギー残差は風速とともに減少する。ponderosa 松林サイトでは、規格化エネルギー残差は風速の低下とともに劇的に増加する。

地表面植生と地表面地形に関して、草地は比較的均一であるのに対し、ponderosa 松林は非常に非均一である。さらに、ponderosa 松林の観測は、他のサイトが地面から 10m の高さであるのに対し、45m の高さである。このようなタワー間の相違は地表面の非均一性によって引き起こされる大規模な循環による熱輸送の可能性と矛盾しない。そのような循環はより強い非均一性での弱い風を伴うときに最も重要になると考えられ、それらの影響は高度にともなって強くなる。そのような推測は 3c 章で後ほど考慮される。風速、摩擦速度、モニンオブコフ長は顕著に相関しており、規格化エネルギー残差は地表面摩擦速度の減少すなわち不安定性の増大(大きな $-z/L$)にともなって増加する。

草地における風速に伴った規格化エネルギー残差の緩やかな増加はおそらく、渦の伸長による欠けているフラックスと大きな渦の不適切なサンプリング(3c 章)による。同様の風速に伴う増加は、Cabauw タワーデータ(F.Bosveld, 1997, P.C.)においても風速が 5m/s 以上の時にみられる。

BOREAS のタワーサイトにおいて、規格化エネルギー残差は弱風時に増大するものもいくつかあるが、風速への明らかな依存性を示さないサイトもある。この挙動の原因は BOREAS のタワーグループ内で、現在調査中であり(A.Black, 1997, P.C.)、エネルギー残差の風速依存性は将来の原稿で報告されるであろう。

う。

全てのフライト経路について BOREAS の Twin Otter データを結合し、航空機経路下のタワーサイトから得られる地中熱フラックスを用いると、規格化エネルギー残差は、風速の減少に伴って、なんとなく増大することが示される(図-2)。しかし、航空機データに基づくエネルギー残差の標準誤差は大きく、この傾向は統計的に有意ではない。これは、航空機速度は境界層における典型的な風速よりも非常に大きく、したがって、輸送する渦のサンプリングは弱風によって減少しないためと考えられる。しかしながら、BOREAS における規格化エネルギー残差は、タワーフラックスに基づくものに比べて、航空機フラックスに基づくものが時々大きい。弱風状態を除いて、BOREAS の航空機データに基づく規格化エネルギー残差は図-2 中の全ての観測プロジェクトのタワーデータに基づくものよりも大きい。Desjardins et al. (1997) は、存在する水の蔓延によって、BOREAS でのいくつかの航空機フライト経路下では地中への熱フラックスが大きいだろうと主張している。CODE の航空機データの規格化エネルギー残差は、風速のレンジが非常に限られているのに対応して、土壌への熱フラックス測定を伴ったサイト上のフライトの数が限られているために、示さない。タワーサイトの土壌熱フラックスを用いると、ワイン畑サイトの航空機データに基づいた規格化エネルギー残差はタワーフラックスに基づくものとほぼ同じになった。しかしながら、綿花サイトでは、タワーフラックスに基づくものに比べて、航空機フラックスに基づくものが顕著に大きくなった。

24 時間の分子を平均した時、取り消しが部分的にきくので、24 時間のタワー平均に基づく規格化エネルギー残差 R の値は日中の値に基づくものに比べて十分に小さい。分子は日中に正であり夜間に負になる傾向にある。取り消しは弱風時に大きい。このため、24 時間のエネルギー収支は日中のエネルギーバランスよりも簡単に均衡し、24 時間のタワーのエネルギー収支は日中の航空機フラックスと比べるべきではない。

樹冠貯留が残った行方不明のエネルギーの全てあるいは大部分を説明するとは思えない。エネルギー残差が部分的に純放射と土壌熱フラックスの誤差によるとしても、後述の 2 つ節では大気への顕熱・潜熱フラックスの誤差の様々な原因を調査する。

b Aircraft flux errors

1) 航空機データは通常タワーデータよりも高い位置で採取される。航空機高度と地表面の間の貯留と移流は乱流フラックスの顕著な高度依存性を導き(Emais, 1995; Betts et al., 1990; Sun and Mahrt, 1994)、推測した表面フラックスに誤差を導き得る。微量気体の放出/吸収源は、地表面近くで著しいフラックスの相違を導き得る(Lenschow and Delany 1987; Kramm and Dlugi 1994; Gao and Wesley 1994; Massman et al., 1994)

2) 輸送の水平スケールは、境界層の低部において、高度とともに急激に増大する(Lenschow 1995)。例えば 30m という低い飛行高度でも、顕著な輸送が 5 ~ 10km 以上のスケールで起こり、不十分なフライト長は顕著な割合のフラックスを省いてしまい(系統的エラー、4b 章)、それは、Betts et al.(1994); Sun and Mahrt(1994); Mann and Lenschow(1994) に示されている。非常に弱いメソスケールの運動は、時々鉛直方向の運動と輸送される量の顕著な相関によって特徴付けられるため、顕著なフラックスを導き得る。この結果が、航空機フラックスがタワーフラックスよりも小さい所でのいくつかのケースを説明する(Shettleworth 1991)。さらに、加速度計の積算の誤差、慣性航行システムにおいて使用されるジャイロスコープのドリフト、差分 GPS システムの誤差、これらの積算による航空機の運動の除去の観点における知られていない不確実性ととも、大規模な鉛直方向の運動が観察される。

3) 無作為エラーは、同高度、同経路の時系列的な繰り返し飛行によって減少されうる(Desjardins et al., 1989; Sun and Mahrt 1994)。

4) 乱流運動と変化する地形上で一定高度を維持する困難さによる航空機の鉛直変位によって、航空機の飛行は完全に水平ではない。したがって、平均鉛直勾配は航空機時系列の事項的な変動を導く(Lenschow 1973; Vickers and Mahrt 1997)。

1 ~ 3 のエラーは比較的均一で定常的な状態を選び、渦サイズのより小さな地面近くを飛ぶことによって、減少できる。その時、航空機とタワーのフラックスは非常に密接に比較可能である(Desjardins et al 1997)。しかしながら、航空機フラックスはしばしば、航空機と地面の間のフラックス変化を最小にするのに十分なほど地面に接近して飛ぶことは不可能である。航空機の特性和航空規制のため、航空機の飛行高度は時々 100m かそれよりも高い。この場合、鉛直フラックス変動は、顕著な移流や薄い境界層において非常に大きくなり得る。航空機と地面の間のフラックス変化の影響を減らすために、地表面フラックスは時々、崇高度のフラックス測定とそこから地表面を外挿することによって航空機から推定される。この方法はサンプリング問題に対して特に脆弱である。なぜなら、全観測期間の間、一高度でのサンプリ

ングの場合と比べると、与えられた一高度で得られるサンプルサイズがより小さくなるからである。さらに、上層は大きな渦に特徴付けられ、従って、サンプリングのより大きな無作為誤差を導く。さらに、フラックスにおける小さな誤差がフラックス変化に大きな誤差を導き、地表面に外挿されるフラックスの値に大きな誤差を導く。鉛直勾配は測定誤差に特に脆弱である(e.g. Derbyshire 1995)。Kelly et al.(1992)はフラックスサンプリング問題の効果を減らす試みの後では、鉛直勾配の符号が逆転した例を報告している。複数の航空機を用いればこの種の誤差は減らせるが、これは、かなり高額であるし、相互比較飛行を通じた校正がうまくいく必要がある。フラックス変化の見積りの特殊な困難さは Kelly et al.(1992)によって認識され、Mann and Lenschow(1994)で、様々な積算スケール、上昇拡散と下降拡散の区別、仮定した鉛直プロファイルの面から取り扱われている。

可能な限りもっとも低い高度で全期間を飛ぶのが、航空機によって表面フラックスを見積もる望ましいアプローチであることが明らかとなる。例えば、30m で測られた熱フラックスは、フラックスが高さと境界層上面近くの消失に対して直線的に減少するとすれば、典型的な日中の状況下で地表面フラックスより数パーセントしか小さくないだろう。二高度がフラックス変化の見積りに使われた時でも、Mann and Lenschow(1994)は、フラックス変化における誤差を最小にするには、飛行時間のほとんどは低い高度に費やすべきことを発見した。

c. Tower flux errors

タワーを基礎としたフラックスには、以下のエラーの原因が長々とあるようである。しかしながら、エラーの多くは独立ではない。5,6,7,8のエラーは図-2におけるエネルギー残差の風速依存性を説明するかもしれない。

- 1) 地表面は常に、様々な程度に非均一であるので、航空機は、タワーとは異なる地表面を”見て”いる。タワーの渦相関測定の”視野”は、非常に小さいと思われ(Schmid, 1994)、タワーはしばしば、操作に有利な位置に置かれ、一般に湿った地表面の地域の中では乾いた所に置かれたりする(Desjardins et al.,1997)。この場合、タワーフラックスはその場の代表にしかない。
- 2) 下降風方向への渦の伸長と回転する渦の形成がタワーのようなその場の観測に深刻なサンプリング問題を導く(LeMone 1973)。回転する渦は、通常平均化時間よりも長いタイムスケールで乱流フラックスを和らげる。この問題は航空機の飛行とともに非常に減少され、特に剪断に直交する向きへの飛行は同じ長さの平行な飛行にくらべて著しく多いサンプルを捕らえる(Beane et al., 1972; Lenschow 1970; Nicholls 1978; Wilczak and Tillman 1980; Kaimal et al., 1982; Grossman 1982, 1992)。
- 3) タワーフラックスは粗度サブレイヤー上でなければならないが、それは、連続しない森林樹冠や都市域では非常に高い。
- 4) フラックスが、輸送する渦が小さく鉛直風速変動が弱い地表面に接近しすぎて、測定されると、測器は、センサーパスの平均化と測器の応答時間によって組織される小規模フラックスの欠損によって、輸送する渦の全てを、完全には解明できない。
- 5) 弱い大規模流れと著しい表面の暖まりを伴って、速度変動は純粋な上昇気流あるいは下降気流のものにより近づく。その特殊な流れの歪みは、個々の音波の設計に依存したほぼ純粋な上昇および下降気流を伴って、影響を及ぼす。
- 6) 弱風時には、音波計への傾き補正が、穏やかあるいは強風時よりも、フラックスへ非常に強い影響を及ぼす(Mahrt et al., 1996)。
- 7) 高さに伴う渦の大きさの増大を考慮した後でも、与えられた時間間隔において、航空機は、タワーに比べて、より多くの数の渦を調査する。渦はタワーをその風速に応じて通過するが、航空機の非常に早い速度で渦は航空機センサーを通過する。結果的に、弱風時に、大きな渦のサンプルサイズは小さすぎる。サンプルサイズを増やすために、タワーフラックスは通常、30分というようなより長い期間で平均化される。平均化時間を延ばすと通常無作為フラックス誤差を減らす、追加的な非定常性を捕らえることができない。
- 8) タワーは定常渦に由来するフラックスを捕らえることはできない(Lee and Black1993)。そのような渦は地表面の非均一性に関連させられるか、弱い風と著しい表面熱フラックスを伴ってゆっくりと移動する。晴天の夜間の状況では、フラックスは、排出流の収束によって組織される定常的な上昇気流か、よりゆっくりと冷やされる地表面によって引き起こされる上昇気流に関連したある場所で優先的に起こる(Sun et al., 1997)。タワーはしばしば、より暖かく乾いた場所に設置されるため(DesJardins et al., 1997)、日中はメソスケールの上昇気流に位置しうる(図-3)。定常的な鉛直運動はレイノルズフラックスの計算において除去されるため、定常的な循環に関するタワーの位置取りにかかわらず、タワーはそのようなフラックスを取りのがす。地表面の非均一性によっておこる準定常的な循環の印は、Doran et al.(1992), Mahrt and Ek(1993), Mahrt et al (1994b), Desjardins et al(1997)によって観測されている。

時間平均の $w\theta$ は以下のように書ける。

$$\overline{w'\theta'} + \overline{w\theta} \quad (2)$$

第2項は数値的に大きくなり得、ゼロ温度(ゼロ分子運動エネルギー)の参照状態に関してだけ意味を持つ。この項は、 $\overline{w} = 0$ となる均一な流れで起こるものとして、通常無視され、この場合、熱フラックスは $\overline{w'\theta'}$ である。しかしながら、定常的な渦を伴うと、 $\overline{w'\theta'}$ は、全熱フラックスの不適切な見積りであり、渦のスケールをおおう空間的な平均化が必要である。このことは、局地的な時間平均流れ $\overline{w}(x)$ を、時間平均の空間平均 $[\overline{w}]$ と、この空間平均からの時間平均の偏差 $w^*(x)$ に分解することで表現される。式-2の空間平均は従って次式となる。

$$[\overline{w'\theta'}] + [\overline{w^*\theta^*}] + [\overline{w}][\overline{\theta}] \quad (3)$$

鉛直移動の空間平均の時間平均 $[\overline{w}]$ はゼロであると仮定する。これは、鉛直移動の局地的な時間平均が消えてしまうという仮定よりも弱い仮定である。すると、式-3の右側の第3項が消え、参照状態の困難が除去される。

式-3の第2項は、定常渦(図-3)による熱フラックスである。この熱フラックスは表面のエネルギー収支の調査も含まなければならない。このフラックスの寄与はタワー測定では捕らえられない。定常熱フラックス $[\overline{w^*\theta^*}]$ は、観測高度が地表面に接近するほど小さい。この項は、大規模流が弱く、大きな定常的あるいはゆっくりと移動する渦の形成が可能な時に、潜在的に重要であると予想される。

これまでの平均化時間では、ゆっくりと動く渦によるフラックスは見逃され(系統的誤差)、渦は、その代わり、平均流の非定常性として現れる。平均化時間を延ばすと、このフラックスのいくばくかは捕らえられるだろうが、大きな無作為フラックス誤差を伴って測定される。これらの誤差は次の章で議論される。

4. Flux sampling problems and nonstationarity

本章は既存の手法によって見積もられるフラックスのサンプリング誤差について簡単に調査する。これらの手法は全て、定常性が必要である。したがって、4c章では記録の非定常性を定量化する手法を開発する。以下の2つの節では無作為誤差と系統的誤差の評価への全般的なアプローチを概観する。

a Random flux error

伝統的に、無作為誤差は以下のように見積もられる(Lumley and Panofsky 1964; Wyngaard 1973, 1983; Lenschow and Stankov 1986; Lenschow et al, 1994)

$$RE = \left[\frac{2 \text{var}(\text{flux}) \lambda_f}{R} \right]^{1/2} \quad (4)$$

ここで R は記録長、 $\text{var}(\text{flux})$ は個々の地点におけるフラックスから算出される分散、 λ_f はフラックスの積算スケールである。フラックスの分散と積算スケールの両者はデータから見積もられねばならず、それ自身が誤差の影響を受け、式-4は誤差のひとつの見積りを供給するにすぎない。この見積りの精度は、サンプルサイズとともに増大し、積算スケールの見積りに用いる手法に依存するが、それは時々非常に難しい。Mann and Lenschow(1994)は、モデルスペクトルへのフィッティングを用いて積算スケールを見積もることを推奨しているが、Anselmet et al(1984)は、二次の構造関数の式で積算スケールを見積もることを推奨している。

n 個の記録に分割される時系列を考える。時系列に対する平均フラックスの無作為誤差は、フラックス分散の式において再形成される。

$$RE = \left[\frac{\text{var}(\text{flux})}{n} \right]^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $\text{var}(\text{flux})$ は記録間のフラックスの分散である。この無作為誤差の見積りは伝統的な標準誤差である。与えられた(90%のような)信頼係数にとって、信頼区間は RE に比例する(Bendat and Piersol 1986)。誤差すなわち不確定性は記録数の平方根に従って減少する。Sun and Mahrt(1994)は、弱い非定常性を考慮して、記録間の依存性による式-5への補正を見積もる。無作為誤差は時系列の長さの平方根に反比例することに注意すべし、従って、要素-2による無作為誤差が減少させることは、要素-4による時系列の長さが増加することを必要とする。したがって、フラックスの粗い近似には、比較的精密なフラックス観測ほど、要求は多くない。

式-5 は各記録 L' の長さで分割された時系列 R の長さの面から記録数を表現することによって、式-4 に類似した式に変換される。すると、式-5 は以下ようになる。

$$RE = \left[\frac{\text{var}(\text{flux})L'}{R} \right]^{1/2} \quad (6)$$

も、 L' が積算スケールの 2 倍として選ばれば、この無作為誤差見積りは式-4 へ単純化される。ひとつの残された違いは式-4 におけるフラックスの分散がフラックスの地点値から計算されているのに対し、式-6 のフラックスの分散は個々の記録を平均したフラックス値から従来の方法で計算される点である。

大気は、積算スケールの計算があいまいとなったり、計算方法に敏感であったりする程度に、しばしば非定常である。スペクトルや積算されたスペクトルもまた、この場合不明瞭になる。単純な重み付けなしの平均のためのウィンドウサイズの関数としてのフラックスの試験は、フラックスのスケール依存性のより安定した見積りを供給し(Sun et al., 1996)、その上、レイノルズ平均を満足させる。しかしながら、大きな非定常性があると、フラックスは、平均化スケールの選択に敏感になり、平均化スケールの選択は恣意的になる。

ある特定の応用において、 L' はデータの特性に特有の方法で選ばれるだろう。その場合、 RE はきわめて異なる意味をもつ。たとえば、Gluhovsky and Agee(1994)は、時系列中の均一な記録を元にこの長さスケールを選択し、Mahrt and Gibson(1992)は、フラックスを支配する整った構造の大きさをもとにこの平均幅を選んだ。このアプローチは整ったイベントが全フラックスを支配するという事実を信頼し(Katul and Vidokovic 1996 とその中の参考文献を見よ)、平均化長さを決めるための積算スケールの選択ともっとも近い。このアプローチを用いると、それぞれの「記録」は主にひとつのフラックスのイベントを含み、レコード間のフラックスの分散は大きくなる。フラックス値は多数の記録で平均されており、式-5 中の n が大きいので、この大きな分散が無作為誤差を大きくする必然性はない。

式-4 と式-6 は、 R について解き、最大の許容される誤差を特定することにより、必要とされる記録のひとつの見積りへ変換され得ることに注意すべし。一般的に、速度成分間の比較的低い相関と、運動量フラックスの大きな空間多様性(Beljaars and Holtslag, 1991)のために、長いサンプル期間が運動量フラックスの測定のために必要とされる(Lenschow and Stankov 1986; Mahrt and Gibson 1992)。

異なる変数間の関係を解析する場合、ひとつは、大きな無作為フラックスサンプリング誤差によって特徴づけられる境界外の点を当てにするだろう。たとえば、RASEX タワーデータの抵抗係数と風速の関係において、境界外の点の不釣り合いな断片は、大きな無作為フラックス誤差で特徴付けられる(Mahrt et al, 1996)。しかしながら、本研究で解析される BOREAS の航空機データにおいて、無作為フラックス誤差は大きな値にはならなかった。

b Systematic error

輸送の適切なサンプルを得ることができないくらい短い記録長さは、著しい系統的誤差を生む。しばしば、大規模な運動は不適切にサンプルされるため、フィルターによって意図的に除かれる。このことは無作為誤差を減らすが、系統的誤差を増大させる。この偏りを最小化するために大規模な運動を保持しつづけるとおそらく無作為誤差を大きくするだろう。記録長さの増加によって無作為および系統的誤差を減らす試みは、著しい非定常性と非均一性を捕らえるだろう。系統的誤差の大きさの見積りは、常に、記録長さよりも長いスケールのフラックスの重要性の厳格な見積りが不可能であるという事実から制限される。それは、記録長さよりも大きなスケールのフラックスの重要性は記録長さよりも小さなスケールの情報から見積もらなければならない。このため、系統的誤差の評価は無作為フラックス誤差の評価よりも不確かである。この制限を受け入れると、系統的誤差は、コスベクトル、積算コスベクトル、あるいは記録サイズへのフラックスの依存性から有意なフラックスの最大スケールを決定し、そのような全てのスケールを含むように平均化長さを選ぶことによって、最小化することができる。もし、有意なフラックスがデータから得られる最も大きなスケールを超える場合は、系統的誤差は大きいと思われる。系統的誤差の正式な見積りは Lenschow et al (1994)で見つけれ、ここでは、系統的誤差は、記録長さの観点で積算スケールのサイズに関係づけられており、Vickers and Mahrt(1997)では、単純だが包括的な見積りが平均化スケールへのフラックスの依存性の点から定式化されている。

実用的であるが、厳密でない“全部の”のフラックスサンプリング誤差の見積りは、記録のはじめと、記録中の参照点との間の細分フラックスの面から構築され(Grossman, 1992)、次式のように定義される。

$$\text{Flux}(0, x_r) = \frac{1}{x_r} \sum_{x=0}^{x=x_r} w' f' \quad (7)$$

ここで、 x_r は、 r 番目の観測点であり、 f はあらゆる輸送される量である。このフラックスは、ある小さな値から、全ての記録の長さまで、 x_r が成長的に増大することによって、繰り返し計算され、 $\text{Flux}(0, x_r)$ の時系列を形成する。サンプリングエラーが小さいと、 $\text{Flux}(0, x_r)$ は、 x が記録の最後 $x_r=R$ に近づく前に、記録フラックス $\overline{w'f'}$ によく収束する。この見積りは無作為誤差と系統的誤差の両者を含む。 $\text{Flux}(0, R)$ への収束は、妥当であるように思われるが、優位なサンプリングエラーを除外するのに十分な状況ではない。この誤差見積りは解釈するのは困難である一方、積算スケールの評価を必要としない。 $\partial \text{Flux}(0, x_r) / \partial x_r$ の無作為および系統的誤差への正式な関連付けは可能であるが、得られる関係は、知られていない可能性の分布を含む。

Anselmet et al.(1984)は、同様の判断基準を細分記録長さへの細分記録構造関数の依存性へ応用した。彼らは、最小の区分長さを定義し、ここで、全てのより大きな区分長さの値にとって、構造関数は全記録構造関数の 5% 以内にとどまる。

c Nonstationarity

無作為誤差および系統的誤差の見積もられた小さな値は、そのような見積りが顕著に非定常なタワーの時系列の場合には不正であるので、誤った安全の認識を供給し得る。ほとんど全ての大気の運動は様々な程度に非定常あるいは非均一である。地表面フラックスの非定常性は日変化、メソスケールの運動、雲の通過によって起こる。航空機は、循環システム自身の時間スケールと比べると短い時間で与えられた循環システムを横切るため、航空機データの場合、時系列の非定常性は、第一に流れの空間的な多様性に起因する。したがって、以下の発展における非定常性の単語は、航空機データに用いられる場合、通常非均一性を示している。

非定常のメソスケール運動は乱流フラックスを穏やかにし、時々、乱流運動よりも大きなスケールでのフラックス(メソスケールフラックス)の算出を導く。多くの記録を平均すると、この大規模スケールのフラックスはゼロに近づくが、与えられるデータ記録の膳フラックスを有意に変化させ得る(sun et al., 1996)。計算されるフラックスへの大規模運動の効果を減らすために、多くの研究者は直線によるトレンド除去、二次式によるトレンド除去(Caramori et al., 1994)、あるいは、より工事のフィルターをフラックス算出に必要な変数に適用し、フィルターをかけている。しかしながら、非定常性をともなうと、大規模運動は、さまざまな時間スケールで同時に起こり、その場合、計算されるフラックスは、通常、フィルターのタイプ、カットオフする波長、記録長さ自身に敏感である。直線によるトレンド除去はいくらか標準的であり、そのような選択は恣意的であるし、いくつかの状況ではフラックス計算を退化させる(Caramori et al., 1994)かもしれないが、そのため、記録間の比較を容易にする。大規模運動が直線的ななければならない物理的理由はない。事実、非乱流運動と乱流運動の規模が広く離れている場合のみ、直線的なトレンド除去が完全に効果的である。直線的なトレンド除去は総観規模の変化による非定常性を効果的に除去する。顕著なメソスケールの流れがあると、スケールの分離は起こらず、直線トレンド除去は効果的でない。

大規模流れの除去がいくらか恣意的であり、時々効果的でなく、偏りをもたらすかもしれないので、トレンド除去およびフィルターを通すことを避け、そのかわり、更なる解析から非定常の記録を除去しても良い。しばしば、非定常性は、時系列の点検と、自動補正関数が最小値へ達しないことによって明白である(積算スケールは未決定)。Gluhovsky and Agree(1994)は、記録が比較的大量の独立した細分区分に分割できると仮定することによって、逆転法(Kendall and Stuart 1961)を応用した。Vickers and Mahrt(1997)は、細分記録フラックスへ直線トレンドを当てはめ、トレンドの静的な有意性をテストした。静的に有意な大きなトレンドをもつ記録は、非定常と分類された。図-4 は、RASEX タワーデータから得られた 2 つの例を供給する。ここでは、直線トレンドを当てはめることがフラックスの非定常性を適正に表現しないため、メソスケールの運動がフラックスを穏やかにしている。さらに、これらの記録をより小さな細分区分に分割することは、主要な非定常性を効果的に除去しない。

以下では、任意の時間依存を許す非定常性の尺度を開発する。非定常性の見積りは、定常状態においては、記録中の無作為な可変性に起因する記録平均の標準誤差は記録平均間の可変性を予測するという事実にもとづく(e.g. Bendat and Piersol 1986 の 4.3.1 章をみよ)。この状態からの逸脱が非定常性の尺度を形成する。この目的に向けて、時系列を I 個の記録に分割し、それぞれの記録を J 個の細分記録区間に分割する(図-5)。フラックスは、それぞれの区間において単純な重み付けなしの平均化で計算される。 i 番目の記録におけるフラックスの“記録上”の標準偏差は、以下のように計算される。

$$\sigma_{wi}(i) = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J [F(i, j) - \bar{F}(i)]^2} \quad (8)$$

ここで、 $F(i,j)$ は*i*番目の記録の*j*番目の細区分の任意の量のフラックスであり、 $\bar{F}(i)$ は*i*番目の記録のそれらの細区分フラックスの平均である。この記録中の標準偏差の値は全ての記録において平均され、記録中の標準偏差 σ_{wi} のひとつの見積りを得る。この表記法をもちいると、無作為誤差(式-5)は、以下のようになる。

$$RE = \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{J}} \quad (9)$$

この見積りは、細区分が十分に短い時に概ね定常となることを仮定している。したがって、以下の展開は、定常性のための必要条件であるが十分条件ではない。

記録間のフラックスの標準偏差は次式で表される。

$$\sigma_{btw} = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (\bar{F}(i) - \bar{F})^2} \quad (10)$$

ここで、 \bar{F} は全ての区間と記録を通じて平均された細区分フラックスである。時系列が定常なら、記録中のフラックスの無作為な可変性に基づく標準誤差(式-8)は、記録間のフラックスの標準偏差として見積もられる(式-10)。しかしながら、記録が非定常であれば、記録間の多様性は無作為な多様性と同様に非定常性にもよるため、記録間のフラックスの多様性は標準誤差よりも大きくなる。したがって、“非定常比率”が以下のように定義される。

$$NR = \frac{\sigma_{btw}}{RE} \quad (11)$$

ここで、無作為誤差見積り RE は記録中の可変性に基づく標準誤差であり(式-9)、 σ_{btw} は記録平均フラックスの記録間標準偏差である。式-11 は必然的に Bendat and Piersol(1986)の式-4.33 の右辺に対する左辺の比である。定常状態において、 NR はおよそ 1 である。 NR が 1 より顕著に大きいとき、フラックスの記録間の多様性はフラックスの無作為な可変性と同様に非定常性にも由来する。

さてここで、非定常性の地表面エネルギー不均衡への影響をテストする。地表面のエネルギー収支の評価は RASEX のタワーデータでは入手できない。 NR を評価するのに必要な生のデータが CODE のタワーデータでも入手できない。非定常比率は Microfronts のデータから評価でき、それは、地表面エネルギー不均衡と関係つけられる。移行期を避けるため、日中の期間つまり純放射が 20Wm^{-2} を超える場合を用いた。ここで、Microfronts のほとんどのデータにおいて水蒸気フラックスよりも熱フラックスの方が顕著に大きく、そのエラーがたぶんエネルギー収支の不均衡にたぶんより貢献すると考えられるため、ここでは熱フラックスのための NR を評価した。夜間は、エネルギー収支は、時々、純放射と土壌熱フラックスに支配され、熱フラックスの誤差はエネルギー不均衡にあまり影響を及ぼさない。

それぞれの時系列は 6 つの 10 分記録($i=1,6$)に分割され、それぞれは順に 6 つの 100 秒の細区分記録($j=1,6$)に分割される(図-5 を見よ)。100 秒フラックスの記録中と記録間の標準偏差は、非定常比率(式-11)を評価するのに使用される。100 秒フラックスは非定常性を評価するのにのみ使用され、全乱流フラックスより小さい。30 分フラックスが地表面エネルギー収支からの残差を計算するのに使用される。

日中の Microfronts データの規格化エネルギー残差は、非定常比率がおよそ 2 を超える前は、平均的におよそ 0.2 であり、非定常比率が 2 を超えると、規格化エネルギー残差の平均値およびばらつきともに劇的に増加する(図-6)。非定常の場合を除くことによって、実質的に地表面エネルギー収支は改善し、非定常状態におけるフラックス測定の問題はエネルギー不均衡に寄与していることが示唆される。非定常状態における明らかなフラックスの過小評価は、非定常状態の間メソスケールで起こるフラックスに起因するだろう。さらに、どのように系統的なフラックスの過小評価を導くかは明らかではないが、地表面エネルギー収支に用いたフラックスは、30 分の記録の間の“平均”流の変化によって汚染されている。無作為的誤差および系統的誤差および非定常性はすべて相関ががるので、エネルギー収支残差はまた、無作為誤差及び系統的誤差の増大にともなっても増加する。しかしながら、非定常状態において、フラックスの計算、無作為フラックス誤差、および系統的誤差の全てが不明瞭な量であり、平均化スケールの選択に敏感である。

Microfronts の結果にもとづいて、 NR が 2 をこえる非定常の記録について考える。 NR が 2 を超える場合、非定常性に起因する可変性は乱流フラックスの無作為可変性の規模と同じオーダーと見積もられている。しかしながら、この NR のカットオフ値は使用者の許容度に依存する。もし、非定常記録を放棄することが調査の目的にとって重要な偏りを導くなら、より大きなより寛大な NR のカットオフ値が選択されるべきだ。例えば、大きな非定常性を持った RASEX 記録の放棄は弱風時を優先的に除去し、気候学的データにおいて偏りを導く。

式-11 の航空機データへの応用は、記録の空間的非均一性の影響の調査のために使用される。例として、CODE における灌漑地および非灌漑地上の 30km のフライト軌道は 6 つの 5km の記録に分割され、それぞれの記録は非均一性の評価のために 10 個の 500m の細区分に分割される。CODE の航空機データにおいて、非定常性比率 NR は熱フラックスにおいては平均的に 3 程度、水蒸気フラックスにおいては平均的に 2 程度である。結果として、全記録の無作為誤差と系統的フラックス誤差のあらゆる見積り法が疑わしく、フラックス計算は不明確である。しかしながら、もし記録が均一な細区分に分割することが可能なら、記録平均フラックスの無作為誤差の見積もりはそれぞれの細区分上を繰り返し通過することによって復元されうる(5 章)。

5. Random flux errors: Repeated aircraft passes

記録長さの増加は、更なる表面の非均一性を取り込む危険をはらむので、時々、適切なサンプルサイズは、経路長の増加(図-5)の代わりに飛行経路上のパスの繰り返しによって、採られる。この節では、メソスケールあるいは総観規模スケールの流れと日変化の時間依存性による繰り返し飛行パス間のフラックスの非定常性をテストする。解析は異なる日における複数のフライトを含むように一般化される。第 3 章の用語を用いると、飛行経路に沿った個々のパスは単一の記録であり、飛行経路は個々の細分記録に分割される。BOREAS のデータについて、パスの記録は 10 個の細分に分割され、典型的な長さは 1km で特殊な経路に依存している。

a. Averaged spatial variation

BOREAS の飛行経路は非常に短く、4c 章で概説した非均一性の解析は適用できない。結果的に、飛行経路の非均一性はここでは、複数の飛行日の結合データによってテストされる。k 番目の飛行の i 番目のパスのある量の乱流フラックス $F_k(i,j)$ を考える。以降では、k 番目の飛行の全てのパスを平均した j 番目の細分を次式で計算する。

$$F_k(j) \equiv \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I F_k(i,j) \quad (12)$$

おそらく、表面状態の空間変化によって決まる、飛行経路に沿った乱流フラックスの“季節的な”空間変化を得るために、この細分のフラックス値は、K 個の飛行の平均であり、次式で表される。

$$F(j) \equiv \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k(j) \quad (13)$$

空間フラックス変化のこの“定常的な”部分は、たぶん地表面状態の空間多様性によると思われ、フラックスの無作為多様性を計算するために航空機データを用いる前に、取り除かれるべきである。同時に、この手順は、雲の覆い方、地表面の水分パターンなどの多様性によって、日に日に地表面フラックスの空間多様性は変化するとすれば、フラックスの人工的な変化を持ち込む危険をはらむ。BOREAS のデータについて、飛行経路は十分に均一であり、この手順は通常、結果を顕著には変化させない。ひとつの例外が Desjardings et al (1997) に記されている。Mahrt et al (1994a) は、ある流れのさらに詳細な分解を発表する。そこでは、フラックスのおおきな空間変化が強力な地表面非均一性によって起こっている。

b Random error and nonstationarity ratio

与えられたパスにおける無作為フラックスサンプリング誤差の見積りは、パス記録中の乱流フラックスの標準偏差の計算を必要とする。第一に、与えられたパスに沿った多様性に基づくフラックスの標準偏差(記録中の多様性)を以下の式で計算する。

$$\sigma_{k,wi}(i) = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J [F_k(i,j) - F_k(i)]^2} \quad (14)$$

ここで、i 番目のパスのフラックスの平均値が次式で表される。

$$F_k(i) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J F_k(i,j) \quad (15)$$

I 個のパスの標準偏差を平均すると次式を得る。

$$\sigma_{k,wi} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \sigma_k(i) \quad (16)$$

パス平均フラックスの無作為誤差あるいは標準誤差(式-5)は、次式で計算される。

$$RE_k = \frac{\sigma_{k,wi}}{\sqrt{J}} \quad (17)$$

パス間のパス平均フラックスの標準偏差(記録間の標準偏差)は、次式で計算される。

$$\sigma_{k,btw} = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (F_k(i) - F_k)^2} \quad (18)$$

繰り返されるパスにおける非定常性比率(式-11)は、次式ようになる。

$$NR = \frac{\sigma_{k,btw}}{RE_k} \quad (19)$$

BOREAS の非定常性比率は、図-7 から察するとおり、飛行経路に依存して熱および水蒸気について平均して 1.1 から 1.2 の間である。BOREAS データの非定常性比率が小さい値であることは、全ての雲の覆いを含めたメソスケールの運動および日周期変化による時間依存性が通常フラックスの可変性に重要でないことを意味する。このことは部分的に、与えられたサイトの繰り返されるパスが通常 30 分以下であり、一般的に真昼間に行われたという事実による。2.3, のフライトにおいて熱と水の非定常性比率が 2 より大きいとしても、次の解析において破棄するデータはない。

応力はベクトル量であるため、運動量フラックスの計算はいくつかの異なる方法で行なうことが出来る。ここでは、平均風の方向における運動量成分を試験し、風と直角な向きの応力については無視する。直角向きの成分の規模は通常、大きな不確定性を伴う。運動量フラックスは普通、前述の研究(3 章)で見られたように、熱と水のフラックスに比べて、より大きな無作為サンプリング問題によって特徴付けられる。時として、運動量フラックスのパス間可変性は、大きな運動量フラックスのパス間可変性 and/or 非常に小さな飛行平均運動量フラックスによって、非常に大きくなる。後者は弱風のさまよう風向を伴って起こる。

c Predicting required number of passes

繰り返されるパスの主な目的は、安定したフラックスの見積りを得ることである。BOREAS の Twin Otter データについて、熱フラックスのパス間可変性(式-18)は、パス内可変性(式-17)に基づく標準誤差に密接に関連している。飛行経路内において、流れが十分に定常的で均一であれば、飛行経路上の与えられたパスの中のフラックスの多様性は、航空機パス間のフラックスの可変性と究極的にはフラックスの適切な見積りを得るために必要なパスの数を以下のように、予測するのに利用できる。

非定常性比率が 1 に近いと仮定すると、パス平均フラックスのパス間可変性(式-18)に基づく、飛行平均フラックスの標準誤差は、次式となる。

$$\frac{\sigma_{k,btw}}{\sqrt{I}} \quad (20)$$

表-1 は、次式の飛行平均乱流フラックスによって分割された標準誤差によって計算される”相対”飛行標準誤差のサイト平均の大きさを含んでいる。

$$\frac{\sigma_{k,btw}}{F_k \sqrt{I}} \quad (21)$$

ここで、 F_k は飛行平均フラックスである。BOREAS データについて、飛行平均熱フラックスの相対標準誤差はおおよそ 8% である(表-1)。水蒸気フラックスの相対誤差もほぼ同じである。しかしながら、運動量フラックスの相対標準誤差は著しく大きく(表-1)、とくに、burn 経路と old aspen 経路において大きい。運動量フラックスの標準誤差の大きな平均値は、弱風時に支配されている。

ある量 X へ相対無作為誤差を減少させるのに必要なパスの最低数 I_r は、次式で見積もられる。

$$I_r = \left[\frac{\sigma_{btw}}{XF_k} \right]^2 \quad (22)$$

ここで、 X は普通 0.1 が選ばれ、10% の相対誤差に相当する。BOREAS データについて必要なパスの数 I_r の値は(表-1)、実際のパス数が一般に熱と水について必要な数よりも大きいことを示している。原理的な問題は十分なパスを積算して、フラックスのパス間標準偏差をみつめることであり、ほとんどの観測プロジェクトにおいて最低限のことである。運動量について、フラックスのパス間可変性のフラックスの大きさに対する比は、ときどき、大きくなり、フラックスが時々非常に小さくなり、符号がパス間によって変化するような弱風時には特に大きい。

必要なパス数は、与えられた地点についての飛行の間に、控えめに变化する。しかしながら、この変化は、風速、安定度、雲量のような境界層状態との明らかな関連は示さない。

フラックスのパス内の空間多様性に基づく標準誤差は、フラックスのパス間多様性を見積もるための技術を含んでいるので、最初のパスからある一定の値以下に無作為フラックス誤差を減少させるために必要なパス数を見積もることができるかどうか問う。最初のパスにおけるフライト内の多様性にもとづく標準誤差があれば、飛行平均の標準誤差を見積もることができ、したがって、飛行中にリアルタイムでパス数の調整が可能である。この調整は飛行平均のフラックスが、不適切なサンプルサイズによって、信用にたらないという、さらに共通の状況避ける。

式-22 を用いると、最初のパスだけからの情報に基づいた必要なパス数の見積りは、次式となる。

$$I_{req} = \left[\frac{\sigma_{k1}}{F_k(1)\sqrt{JX}} \right]^2 \quad (23)$$

ここで、 $F_k(1)$ は最初のパスで平均されたフラックスである。この必要なパス数の”最初のパス”見積り(式-22)は、かなりのばらつきによって特徴付けられる。このばらつきは、更なるパスを積算することで、フラックスのパス内標準偏差の見積りを更新することによって減少できる。しかしながら、さらに信頼性のあるアプローチは、5 か 6 回のパスの後の式-22 の評価である。このパス数が、パス間の多様性を見積もるのにわずかに適切であろうが、それは存在する野外実線で改善される。

6. Area-averaged fluxes and grid patterns

グリッドパターンの航空機飛行は、空間平均地表面フラックスの見積りに頻繁に用いられ、Northern Wetlands 研究(Desjardins et al., 1994)、最初の ISLSCP の観測(FIFE)(Desjardins et al., 1992 a; Desjardins et al 1992b; Schuepp et al., 1992)や、さらに最近のカリフォルニアオゾン沈着観測(CODE)(Mitic et al, 1995)および、BOREAS(Ogunjemiya et al., 1997)における作戦の重要な形態であった。航空機は、飛行中、ある特定のサイトを1回か2回通過するだけなので、局地的に測定されたフラックスは大きなサンプリング問題に苦しめられる。しかしながら、全領域の空間平均フラックスのサンプリングエラーは、非常に小さくなる。この節では、領域平均フラックスの無作為誤差の見積りを定式化する。同様の見積りは、非均一だが均一な細分領域に分割され得る単一の経路の平均フラックスについて定式化されうる。誘導は弱い依存性を発生させる(Sun and Mahrt 1994)けれども、細分区間のフラックスはお互いに独立であると仮定する。

m 番目の細分エリアにおける乱流フラックスを以下のように区分することを考える。

$$F_m = \langle F \rangle + \hat{F}_m + F'_m \quad (24)$$

ここで、 $\langle F \rangle$ は真の領域平均フラックス、 \hat{F}_m は真の領域平均フラックスからの m 番目のサブエリアにおける真のフラックスの分散、 F'_m は、真のフラックスからの m 番目の均一なサブエリア上の1回のフライトから航空機で測定されたフラックスの分散である。すなわち、 F'_m はサンプリングに基づく誤差である。M 個の均一なサブエリア上 F_m を合計し、 \hat{F}_m の合計が定義により消えることに注意すると、次式をうる。

$$\frac{1}{M} \sum_1^M F_m = \langle F \rangle + \frac{1}{M} \sum_1^M F'_m \quad (25)$$

フラックスの分散 F'_m が、主として与えられたサブエリア上の与えられたパスで組織される無作為エラーによるもので、ゼロと期待される値と全領域における標準偏差 σ_F で特徴付けられるとすれば、グリッド平均フラックスの無作為誤差は以下のように表される。

$$\frac{1}{M} \sum_1^M F'_m = \frac{\sigma_F}{\sqrt{M}} \quad (26)$$

例えば、南部研究領域における BOREAS のグリッドパターンを考えると、それは、およそ 16km の 9 つの飛行軌道を含んでいる。前節からの結果を用いるために、各軌道を 2 つの 8km のサブエリアに分割し、全部で 18 個のサブエリアを導く。NR(式-19)がおよそ 1 であると仮定すると、無作為多様性 σ_{F_m} に由来する与えられたサブエリアの乱流熱フラックスの標準偏差は、パス間の可変性から見積もることができる。5 章にもとづく、パス間の標準偏差は、 0.02 K ms^{-1} のオーダーである。このとき、グリッド平均フラックスの標準偏差は 5% の誤差に対して $0.02 \text{ K ms}^{-1} \div \sqrt{18}$ すなわち、大まかに 0.005 K ms^{-1} である。したがって、空間パターンが革新的に確立されないとしても、個々のグリッド上の飛行から見積もられる領

域平均フラックスは、非常に現実的である。

単一のグリッド飛行の無作為誤差は大きい、地表面の非均一性に由来する地表面の空間多様性によって大部分がマスクされる。たとえば、0.03Kms-1 のオーダーの空間多様性を任意に記述したい場合、単一のパスにとって、サブエリアフラックスの無作為多様性に対する空間多様性の比率は 3/2 である。そのような空間多様性はデータから確信的に同定されない。空間パターンの振幅のおよそ 20% に無作為誤差を減少させるためには、10 パス以上が必要である。しかしながら、BOREAS グリッドでは 1 日に、グリッドパターンを 2 回繰り返すだけができるだけなので、5 日以上の異なる飛行日からの飛行データが結合されなければならない。より強い空間多様性を記述するためなら、もうすこし少ないフライトでもよい。しかしながら、そのような複合体の簡単な解釈は、フライトが相似の総観状態で行われ、同じ季節の間の同じ時刻に行われる必要がある。

領域をより小さなサブエリアに分割することは、 M を増やすが、 σ_{F_m} も増加させ、おそらく、サブエリア以上のスケールのフラックスの省略に伴う系統的誤差を増加させるだろう。

7. Conclusions and discussion

サンプリング誤差は異なる道のりで航空機データとタワーデータに影響を及ぼし、同時に行われる航空機およびタワーフラックス測定は、厳しいサンプリング条件が両方の観測プラットフォームにおいて合致したときのみ、一致すると予期される(4 章)。その場合でも、タワーと航空機フラックスは定常的で均一な状態にのみ同じフラックス値を生み出すと予期される。多くのその他の観測的困難さはタワーと航空機の値の不一致をもたらす(3 章)。それらの様々な誤差の相対的な重要性は現存するデータでは完全に分離できない。

弱風時にいくつかのタワーでエネルギー残差は大きくなるけれども、タワーフラックスに基づいた地表面エネルギー収支の残差は、航空機フラックスに基づくものと、一般的に同じぐらい小さい。定常的あるいはゆっくりとした動きの渦による輸送は、タワーエネルギー残差を引き起こす、もっともらしい原因である。

乱流フラックスの非定常性のため、フラックスサンプリング誤差の見積りは適切でなく、フラックスは平均化距離の選択に敏感である。結果として、フラックスの値は不明確である。大部分の地球物理学的な記録は、ある程度非定常である。現在の研究は非定常性の新しい尺度を発展させた。それは、非定常性を代表する動きの形状を仮定しない(4c 章)。地表面エネルギー収支の不均衡は、非定常比率 NR (式-11)がおよそ 2 を超えるときに、十分に大きくなることが分かる。より大きな不均衡は、大きな非定常性の時のフラックスのより大きな不確定性に明らかによっている。大きな非定常性とフラックスサンプリング誤差を持つ記録を破棄することは、フラックス-勾配関係のばらつきを減少させるといういくつかの証拠がある。そのような手順は、はみ出たものを単純に破棄するよりも、より客観的である。これらの結果の一般性は知られておらず、より広い状態の多様性のさらなるデータセットが必要である。

10 ~ 15km の比較的均一な航空機経路をもった現在のデータにおいて、全フラックスの 10% に無作為誤差を減少させるために、およそ 6 つの繰り返しパスが必要である。必要なパスの数は気象状態に依存し、航空機の高さとともに増加する。グリッド平均フラックスの無作為誤差は小さいと分かる(6 章)。しかしながら、グリッドエリア内のフラックスの控えめな空間可変性を定義する試みは、無作為フラックス誤差によって強く汚染されており、同様の状況の複数の飛行日が必要である。