

Large Eddy Simulation を用いたインバランス問題に対する検討

東京工業大学 学生会員 ○稲垣 厚至

東京工業大学 正会員 神田 学

東京工業大学 正会員 マルコス・オリバー・レッツェル

1. はじめに

現在、大気中の熱・水・物質輸送過程を把握する際に渦相関法が主に用いられている。この手法は直接乱流フラックスを測定できることから、信頼性の高い測定手法の1つとされている。しかし近年、その信頼性を揺るがす「インバランス問題」の存在が確認されてきた。インバランス問題とは渦相関法による測定値と領域内の熱収支を満たす空間平均的な値が一致しない現象である。さらに渦相関法の測定値が過小となる傾向が強いことから、インバランスの発生する原因は地表面条件や計器の誤差などの観測誤差によるものだけでなく、渦相関法という測定手法自体にも問題があると考えられる。そこで本研究ではLESを用いた数値実験により、観測誤差を完全に排除した一様な領域下でもインバランスが生じることを確認し、その上で基礎的なインバランスの性質を検証した。その結果をふまえてインバランスを改善するような測定手法を提案する。

2. 研究概要及び結果

日中の大気境界層を模擬した直方体型の3次元空間の底面から一様に熱が供給されるような場をLESを用いて解析する。その際にインバランスを次のように定義する。（ w ：鉛直風速、 T ：温度）

$$Ib = \overline{w'T'} - [\overline{wT}] \quad (1)$$

$\overline{w'T'}$ は渦相関法で求まる顕熱フラックス、 $[\overline{wT}]$ は熱収支法で求まる空間平均顕熱フラックスである。 Ib を $[\overline{wT}]$ で除した値をインバランス率とし、これを解析水平断面上の各格子点で測定する。表1に代表的な解析例とその解析結果を示す。表中の $[Ibr]$ は水平断面空間平均されたインバランス率である。標準偏差はインバランス率のばらつきに対するものである。この表より、観測誤差を取り除き、観測点数を増やして厳密な空間平均をとってもインバランスが生じることが示される。一様な環境下においても熱対流が図1のような局所性をもった空間構造（サーマルパターン）が形成され、これがインバランスを発生させる。

・ 乱流平均化時間の影響

表1の解析例①と②を比較する。平均化時間を長くとるとインバランス率の空間平均値は減少するが、各格子点でのばらつきは増加する。つまり平均化時間を長くとっても、単純には点計測値の空間代表性は向上しない。これは底面からの一様な熱供給により形成される温度の長周期成分と、サーマルパターンの非常にゆっくりした変動がもたらす局所的な鉛直風速の長周期成分の影響である。

表1 各解析例及び解析結果（インバランス率の空間平均値、標準偏差）

解析例	格子幅	領域(X,Y)	一般風	解析高度	平均化時間	$[Ibr]$	標準偏差
①	50m	8km,8km	0ms^{-1}	100m	1時間	22.24%	46.61%
②	50m	8km,8km	0ms^{-1}	100m	3時間	9.63%	60.27%
③	50m	8km,8km	4ms^{-1}	100m	1時間	1.78%	17.04%
④	25m	8km,8km	0ms^{-1}	50m	1時間	13.80%	29.36%
⑤	25m	8km,8km	0ms^{-1}	125m	1時間	26.56%	51.26%
⑥	50m	16km,16km	0ms^{-1}	100m	1時間	21.13%	46.60%
⑦(filter)	50m	8km,8km	0ms^{-1}	100m	1時間	33.68%	41.60%
⑧(filter)	50m	8km,8km	0ms^{-1}	100m	3時間	15.17%	24.27%

キーワード インバランス問題, LES, 点計測乱流, 空間代表性

連絡先 〒152-8552 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 TEL 03-5734-2597

・ 水平一般風の影響

解析例①と③を比較する。図2は横軸にインバランス率、縦軸にその値をもつ格子点の確率密度をもつ確率密度関数である。図2(上)を見ると一般風が強くなるに従い、分布がインバランス率0の方へ収束していく傾向が見られる。つまり、インバランスが大きく改善される。これは図1(中)に見られるように、移流によりサーマルパターンが大きく変化することと、局所的なサーマルの強さ自体も減少するためである。

・ 解析断面高度の影響

図2(下)より、断面高度が高いほどより大きなインバランスが生じる事が示された。これは図1(左下、右下)に見られるように、高度が増すほど細く強いはっきりとしたサーマルラインとなり、局所性がより顕著になるためである。

・ 検査領域の広さの影響

検査領域を $8\text{km} \times 8\text{km}$ (解析例①)と、 $16\text{km} \times 16\text{km}$ (解析例⑥)を比較したところ、インバランス率、標準偏差共に大きな差が見られない。これはサーマルの発生密度、サーマルの強さなどが領域の広さに影響されないためである。このことから、このような様な環境下では、検査領域を広げても空間代表値としての信頼性は保たれることが示された。

3. インバランスを軽減する手法の提案

・ デジタルフィルター処理

渦相関法では温度の長周期成分の影響を大きく受ける。そこで温度情報にデジタルフィルターをかけて長周期成分を取り除く。表1の解析例⑦と①(もしくは⑧と②)を比較すると、ばらつきが大きく改善されることが分かる。しかしインバランス率の空間平均値は増加しており、これは温度トレンド以外の乱流情報を除去した可能性が高く、改善すべき点である。

・ 有意な観測点数の提案

各解析の確率密度分布より、実際の観測研究における観測点の配置密度を提案する。原理は水平断面からランダムに点を抽出し、それらを平均した値が必要とする精度で得られるか調べる単純なものである。図3は解析例③に適用した結果で、算出された観測点数と許容誤差の関係を示している。

4. 結論

①インバランスの性質について、各要因(平均化時間、一般風、高度、領域)が与える影響を定量的に示し、実際の観測で測定値にどの程度インバランスが入り込んでいるのかの指標を示すことができた。②観測点数の空間配置密度を定量的な裏づけをもって示すことができた。実際の観測場と上記の計算条件を照らし合わせることで、多様な場に対して適用することができる。

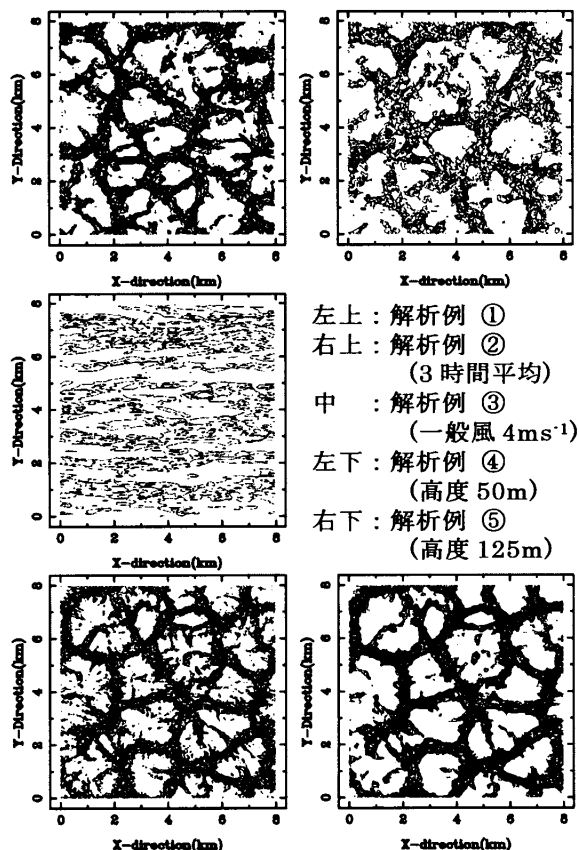


図1 正の平均鉛直風速の断面空間分布

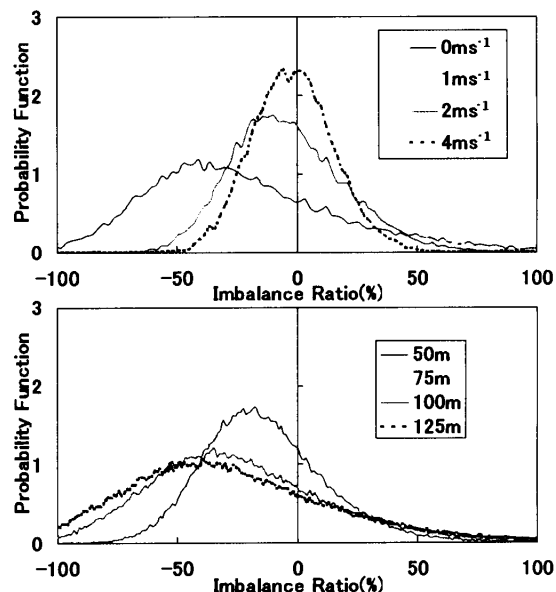


図2 インバランス率の確率密度分布
上: 平均化時間比較 下: 解析高度比較

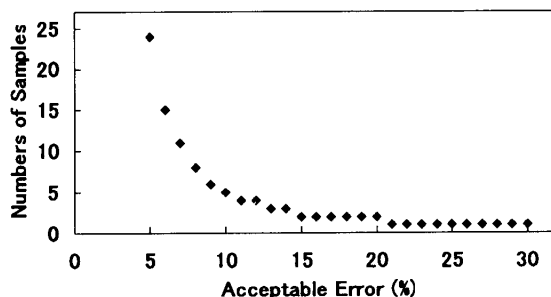


図3 有意な観測点数と許容誤差の関係
(信頼係数 90%, 計算例③に適用)