

非一様地表面加熱場に生じる エネルギーインバランス

LES STUDY ON THE ENERGY IMBALANCE PROBLEM FOR HETEROGENEOUS SURFACE

稲垣厚至¹・神田学²・マルコス・オリバー・レッツエル³
・ジークフリート・ラッシュ³

Atsushi Inagaki, Manabu Kanda, Marcus Oliver Letzel and Siegfried Raasch

¹ 学生員 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8852 目黒区大岡山2-12-1)

² 正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8852 目黒区大岡山2-12-1)

³ ドイツ ハノーバー大学 気象気候学科

The so-called energy imbalance problem is investigated through numerical experiments using Large Eddy Simulation (LES). LES experiments are done for daytime atmospheric boundary layers over a flat surface with inhomogeneous heat flux. The heat flux is represented by a one-dimensional sinusoidal curve with a variable wavelength and amplitude.

The following are the main results. 1) When the amplitude is enough, the bias and variance of imbalance is increase. A weak inhomogeneity of surface heating, however, may relax the negative bias of imbalance. This is attributed to the heat transport efficiency of vertical mean wind. 2) Although longer wavelengths generally give a smaller bias of imbalance, the 2km wavelength singularly increases the bias of imbalance. 3) The bias and variance of imbalance decrease in accordance with horizontal wind. Longer averaging time gives a smaller bias but a larger variance of imbalance. The tendency of these two results is almost the same as in the homogeneous heating case.

Key Words : *imbalance problem, heterogeneous surface, Large Eddy Simulation model
eddy correlation method*

1. はじめに

現在観測研究において、点計測乱流に基づく渦相関法によるフラックスの算定が多く行われているが、近年の観測研究による結果より¹⁾²⁾、この値は熱収支を満たさない、特に過小評価する傾向があることが確認されてきた。これがインバランス問題と呼ばれるものであり、観測データの信頼性に関わる重要な問題である。この問題に対し、神田・渡辺(2002)³⁾、神田(2002)⁴⁾はLESを用いた数値解析によって検討しており、これにより計器の影響や場の不均一性などによる観測誤差に依存しない水平一様な空間に生じるインバランスの基本的な性質についてはほぼ明らかにされた。

そこで本研究はその研究結果をふまえた上で、水平方向に非一様性を与えた場に生じるインバランスについての検討を行った。場に非一様性を持たせる方法として、底面加熱を一様に与えるのではなく水平方向に正弦関数

で変化させた。これにより強い加熱を受ける部分と弱い加熱部分が存在するような不均一な場がつくりだされる。実空間のイメージとしては、起伏のない平らな地表面であるが雲があるため局所的な日射を受けるような状況や、地表面パラメータが異なるような場を想定している。

このような非一様な加熱を受ける場において、主に以下について検討を行った。

- ① 非一様加熱特有である局所的な加熱の強さ、加熱パターンの細かさなどがインバランスに与える影響について検討する。本研究では加熱パターンを正弦関数で変化させて与えているので、前者については加熱振幅を、後者については加熱波長を変化させて行う。
- ② 一様加熱場でのインバランスが持つ基本的な性質が非一様加熱場に対しても一般的であるか検証する。具体的には水平一般風の存在する場合や、異なる乱流平均化時間を用いた時に生じる変化などについて検討する。

表-1 共通計算条件一覧表

領域 (x-y-z)	8km-8km-2.8km
空間解像度	水平・鉛直ともに50m
時間解像度	0.4sec
格子点数 (nx-ny-nz)	160-160-50
解析高度	100m

表-2 計算例一覧表

Case	波長 λ (km)	振幅 A (%)	一般風 (ms ⁻¹)
HW0	0	0	0
HW1-8	1	80	0
HW2-1	2	10	0
HW2-4	2	40	0
HW2-8	2	80	0
HW4-2	4	20	0
HW4-8	4	80	0
HW8-8	8	80	0
HW4-2u2	4	20	2 (x-dir)
HW4-2v2	4	20	2 (y-dir)

2. 理論的背景

w を鉛直風速 (ms⁻¹)、 T を温位 (K) とすると任意地点におけるある瞬間の顕熱フラックスは次のようにおける。

$$F = wT \quad (1)$$

そして式(1)の w と T を次のように時間平均成分とそこからの乱れ成分に分解する。

$$w = \bar{w} + w' \quad (2a)$$

$$T = \bar{T} + T' \quad (2b)$$

ここで $\bar{\quad}$ は時間平均操作を表す。これらを式(1)に代入し、それにレイノルズ平均を適用すると、次の式(3)が導かれる。

$$\bar{F} = \bar{w}\bar{T} + \overline{w'T'} \quad (3)$$

この式(3)の右辺第2項が渦相関法によって求まる乱流フラックスである。さらに式(3)に空間平均操作を施すと次のようになる。

$$[\bar{F}] = [\bar{w}\bar{T}] + [\overline{w'T'}] \quad (4)$$

$[\quad]$ は空間平均操作を示す。この式(4)より、領域の熱収支を満たす空間平均的なフラックス(左辺)は、平均流が担う正味の熱輸送(右辺第1項)と乱流が担う熱輸送(右辺第2項)の和であることが分かる。つまり空間平均しても依然として残る平均流熱輸送項のため、乱流フラックスを厳密に空間平均しても空間平均的なフラックスとは一致しない。

ここでインバランス量と、それを正規化した値であるインバランス率を次のように定義する。

$$ib = \overline{w'T'} - [\bar{F}] \quad (5)$$

$$ibr = \frac{[\overline{w'T'} - \bar{F}]}{[\bar{F}]} \quad (6)$$

本研究で直接計算されるのは w と T の値であり、上記の手順に従い各種フラックスやインバランスを計算する。

ここで式(5)を空間平均し、そこに式(4)を代入すると次の関係が得られる。

$$[ib] = -[\bar{w}\bar{T}] \quad (7)$$

通常 w と T は正の相関があることから式(7)の値は負となる。つまりフラックスを過小評価する傾向があるインバランス問題の理論的原因は、平均流が担う正味の熱輸送量であることが分かる。

3. 数値実験概要

(1) LESモデル

本研究は日中の対流混合層を数値モデルにより再現し、実際の観測場と見立てて解析していく。その数値モデルに Raasch and Schroter⁹⁾ による PALM (Parallelized Large eddy simulation Model) を用いた。これはLESを並列計算するようコーディングされたモデルであり、その基本的な枠組みとして Deardorff¹⁰⁾ のモデルを原型としたものである。

(2) 計算条件

直方体型の3次元空間を日中の大気境界層とみなし、起伏の無い平坦な地表面から鉛直方向へ顕熱フラックスを供給する。そのときに x 方向には式(8)に示すように正弦関数で変化を与え、 y 方向には一様となるような縞状の加熱を与えた。

$$F_{gv}(x) = F_g + F_g A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (8)$$

A : 加熱振幅(%), λ : 加熱波長(m)

x : 距離(m)

F_g : 正味の顕熱フラックス (=0.1Kms⁻¹)

これを実際の観測場に見立てるなら、畑のような一方方向に同じ地表面条件が続く場や、筋状の雲の切れ間から日射が差し込むような場などを想定することができる。

初期の温位勾配は、日中の典型的な値(上空1kmまで0.0008(K m⁻¹)それ以上で0.0074(K m⁻¹))とし、水平方向に一様となっている。境界条件は、水平方向には周期境界条件を用い、上端にはレーリ層を設け重力波を吸収させている。また総観場での上下降流は無く、任意時間で $[w] = 0$ となる。

また発達しうる大気境界層高度は加熱振幅や加熱波長に依らずどれも約1200m程度である。これは本計算が模擬している、良く晴れた日中に発達する境界層高度となっている。

積分時間は各解析例において5時間計算したが、始めの2時間は統計的に準定常化するのに使われるため、残りの3時間のデータを解析に用いた。解析対象となる水平断面高度は大気混合層内である高度100mとした。主な共通計算条件及び、各解析例でのパラメータの設定値をそれぞれ表-1、表-2に示す。

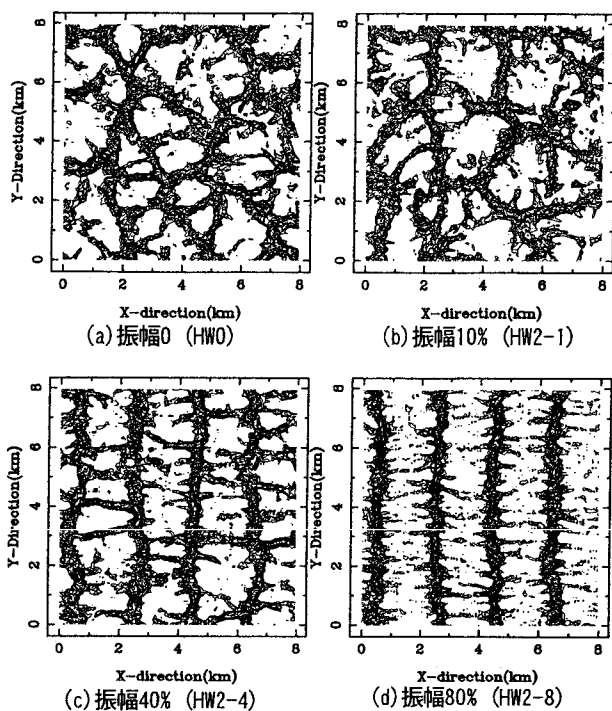


図-1 平均鉛直風速分布(上昇流域)

4. 実験結果

(1) 加熱振幅の影響

式(8)の加熱振幅 A を変化させ、加熱の不均一性の強さによってインバランスがどのように変化するか調べる。

まず図-1の正の平均鉛直風速分布(コンター間隔 0.1 ms^{-1})を見ると、一樣加熱(図-1(a))では亀の甲羅状のサーマルが形成されていたが、強い不均一性を持った縞状の加熱(図-1(c), (d))ではその構造があら骨のような形となっており、加熱の強い部分($x=0.5 \text{ km}, 2.5 \text{ km}, 4.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km}$)では強い平均鉛直流が生じている。加熱の不均一性に対応して生じる2次的なメソ循環による熱輸送の効果は平均移流項の中に現れるため、直感としては加熱振幅 A が大きいほど平均流による熱輸送、つまりインバランスが増大すると考えられる。

図-2のインバランス率の確率密度分布を見ると、確かに大きな加熱振幅のときは負のインバランスが多く発生していることが見られる。しかし小さな加熱振幅($0\% \sim 40\%$)ではこの図からは一概に判断することはできない。

そこで次に図-3のインバランス率の断面空間平均値 $[\text{ibr}]$ を見てみる(λ : 加熱波長)。先の直感に従うなら、加熱の不均一性が増大するに従い $[\text{ibr}]$ も増えると考えられたが、 $[\text{ibr}]$ が下限値をとるのは加熱振幅が若干の不均一性があるときであり、これに反する。これらについて以下検討を行う。

図-3においてインバランス率の変化が最も顕著な加熱波長 2 km のケースに着目する。インバランスの空間平均値は式(7)で示されるような関係があり、 $\bar{w}$, $\bar{T}$ の値と両者の相関によって決まるので、それらを詳しく見てい

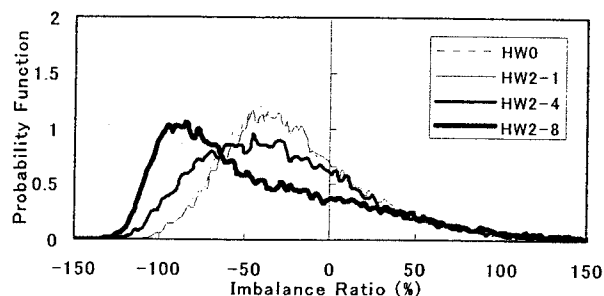


図-2 インバランス率の確率密度分布

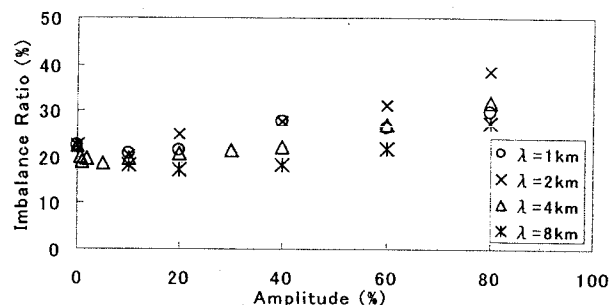


図-3 空間平均インバランス率と加熱振幅の関係

くことにする。図-4はそれぞれ $y=4 \text{ km}$ の位置における (a) $\bar{w}$, (b) $\bar{T}$, (c) $\bar{w}$ と $\bar{T}$ の相関の x 方向変化を示す図である。相関については以下の式より導いた。

$$\rho_x = \frac{(\bar{w}_x - [\bar{w}])(\bar{T}_x - [\bar{T}])}{\sigma_{\bar{w}} \sigma_{\bar{T}}} \quad (9)$$

$\sigma_{\bar{w}}$: $\bar{w}$ の標準偏差, $\sigma_{\bar{T}}$: $\bar{T}$ の標準偏差

まず図-4(a) (b)を見ると $\bar{w}$, $\bar{T}$ とともに加熱の強い部分で大きな値を示しており、加熱振幅が大きくなるにつれその値が少し大きくなる傾向が見られる。しかし常に $[\bar{w}] = 0$ であることや、インバランスは平均流相関項であることからこれら個々の値でそれを議論するのは不十分である。そこで両者の相関を取った図-4(c)を見てみる。そもそも式(9)の意味は平均鉛直流 $\bar{w}$ による熱の輸送効率を示している。この図から加熱の強い部分に大きな正の相関が見られ、つまり平均鉛直流による熱の輸送は主に加熱の強い部分に生じる上昇流が担っていることが分かる。そしてより強い振幅を与えた例(HW2-8)では輸送効率はより大きな値を示している。つまり加熱振幅が大きい場合、上昇流域(強加熱部)における平均流熱輸送量が正味の熱輸送量を増加させるほど大きくなり、そのためインバランス率が上昇したと考えられる。

では加熱振幅の弱い例(HW2-1)ではどうであろうか。再び図-4(c)に着目すると、HW2-1の強加熱部における値は先ほどのように小さくなく、正味の熱輸送量を左右するほどの値ではない。つまり加熱振幅の弱い例では強加熱部が場全体での平均流熱輸送を支配するのではなく、他の部分を含めた輸送効果の影響が効いてくる。つまり場全体での平均流熱輸送を考慮する必要がある。

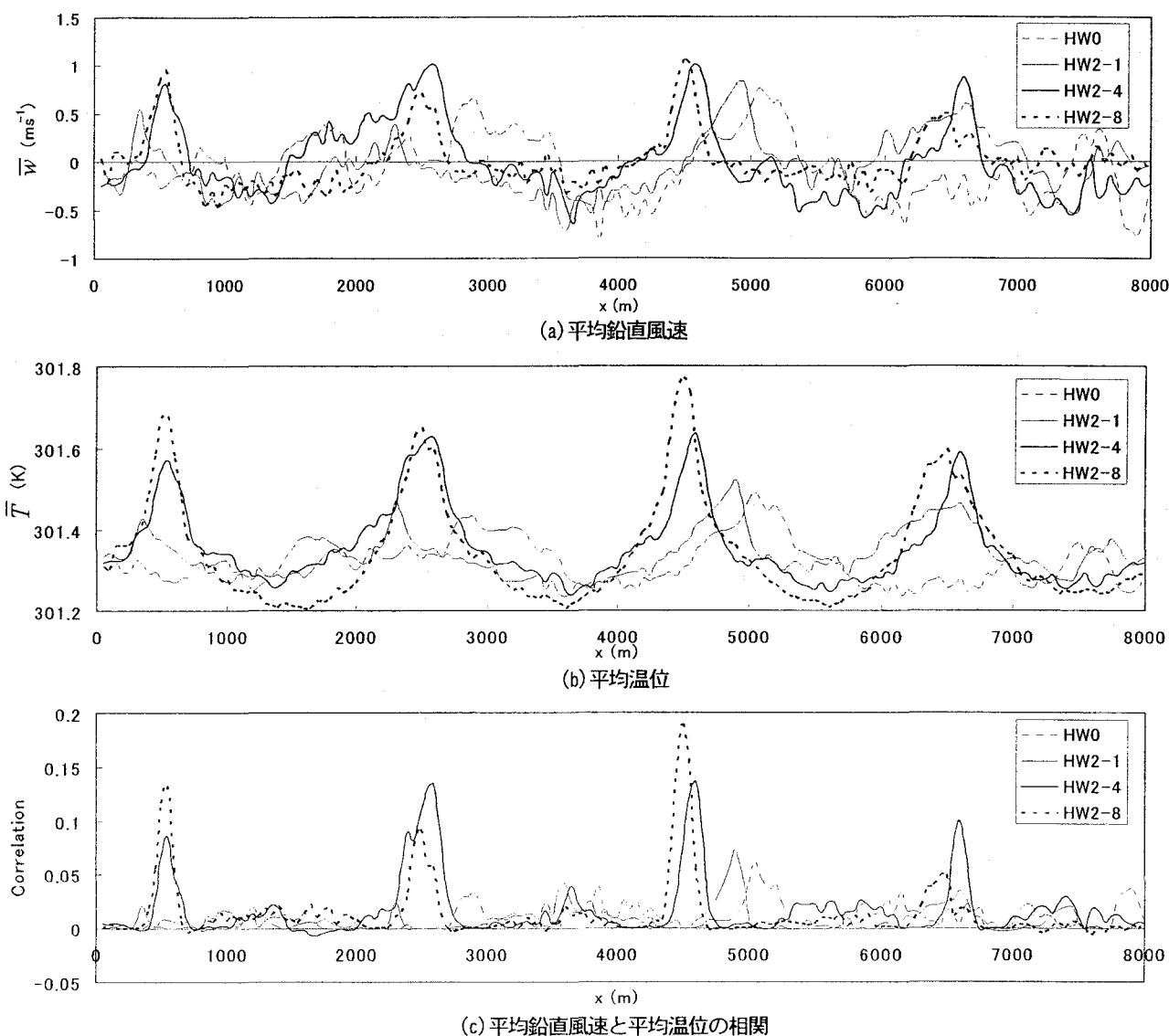


図-4 各種統計量のx方向分布 (z=100m, y=4000m)

ここで図-3における弱い加熱振幅によりインバランスが若干減少することについて考えるため、一様加熱と加熱振幅の弱い例(HW4-2)を比較してみる。場全体での $\bar{w}$ と $\bar{T}$ の相関図(図5)を見てみると、一様加熱(図-5(a))ではほぼ一直線に分布しているのに対し、弱い加熱振幅(図-5(b))では上昇流域(正の $\bar{w}$)で相関が少し乱れている。つまり温位が小さなところで上昇流が発生しており、上昇流の輸送効率が減少することが示されている。さらに領域全体での相関(式(10))を計算した。

$$\rho_{\bar{w}\bar{T}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{w}_i - [\bar{w}])(\bar{T}_i - [\bar{T}])}{\sigma_{\bar{w}}\sigma_{\bar{T}}} \quad (10)$$

n : 水平断面格子点数

その結果一様加熱では0.92、HW4-2では0.86であり、確かに場全体を見た時の相関は弱い加熱振幅を持つ方が小さくなっている。図-1(a)に示されるような一様加熱が作り出す構造は線形安定性理論で示されるような

最大発達率を与える擾乱によって選択的に自己組織化された構造パターンであり⁷⁾、最も効率の良い熱輸送が行われる。この構造は加熱条件によらず、実際の気象場ではアスペクト比2.0のものが最も安定である。このため不均一性により任意的に定められた構造パターンでは熱輸送の効率が下がったものと考えられる。

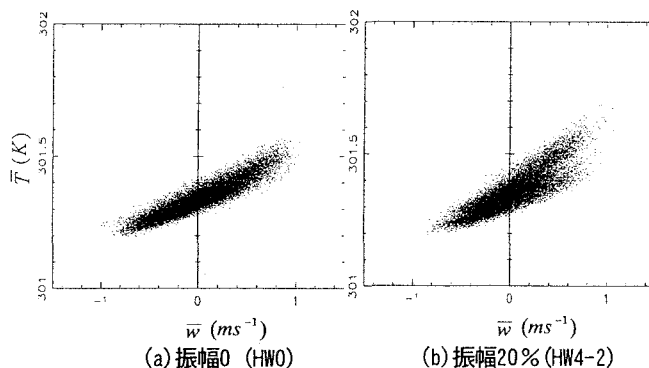


図-5 平均鉛直風速と平均温位の相関図

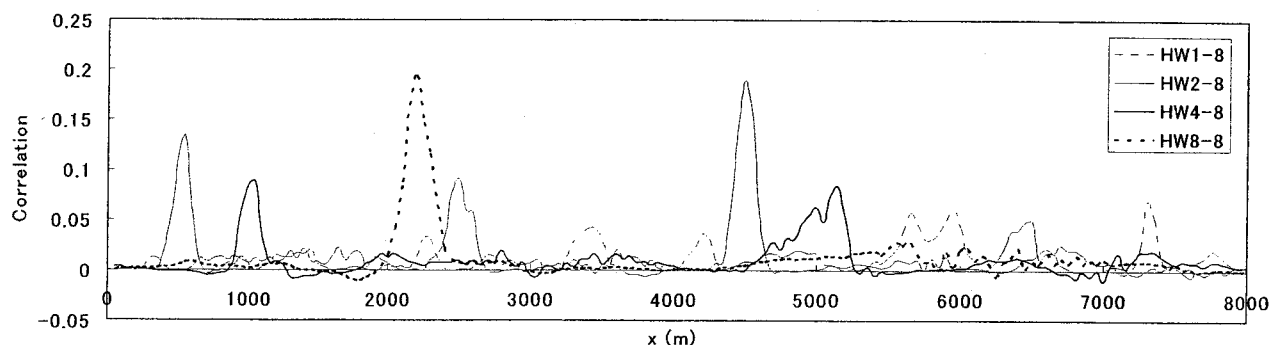


図-8 平均鉛直風速と平均温度の相関のx方向分布 ($z=100\text{m}$, $y=4000\text{m}$)

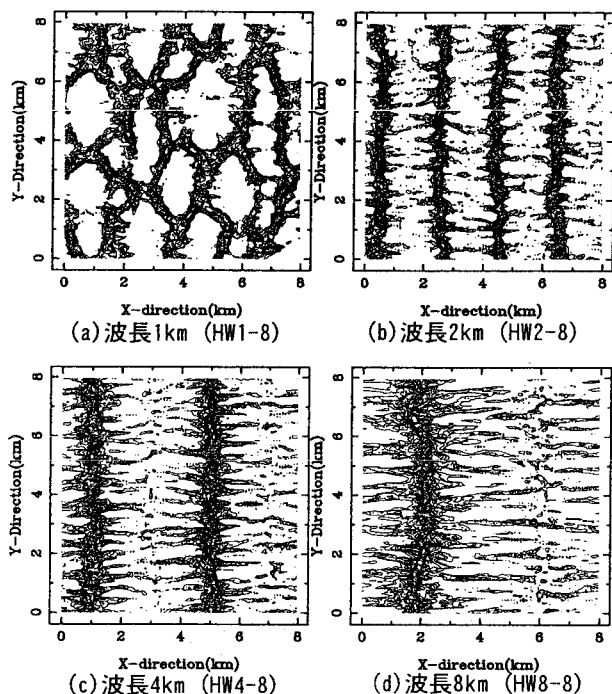


図-6 平均鉛直風速分布(上昇流域)

(2) 加熱波長の影響

加熱パターンの変化がインバランスに対しどのような影響をもたらすか検討する。方法として正弦関数変化で与えている底面加熱の波長 λ を変化させる。与えた波長は周期境界条件の関係から領域のx方向長さ(8km)を割り切れる値となっている。

平均鉛直流構造は図-6のようになった。そしてこのような場に生じるインバランスの空間平均値は図-7のようになった。これによると加熱波長2kmの時に大きなインバランスが生じるようであるが、この原因は何であろうか。これを検討するため、図-7で加熱波長による変化の最も大きい加熱振幅80%の計算例に対し、先程と同様に $y=4\text{km}$ の位置における $\bar{w}$ と $\bar{T}$ の相関のx方向変化(図-8)を見てみる。すると加熱波長2kmのときに他に比べ非常に大きな平均流の熱輸送効率が生じている。一般に局地循環の空間スケールが大きな程平均流による熱輸送は増加すると考えられるが、加熱波長2kmでの局所的な値は加熱波長8kmでの値と大差ない。その原因を考える。

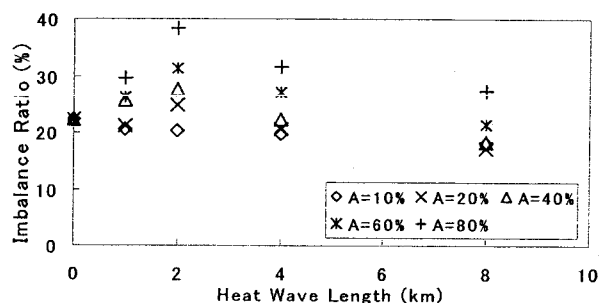


図-7 空間平均インバランス率と加熱波長の関係

本数値計算は晴れた日中を想定した計算であり、そのような場で発達しやすいサーマル構造のアスペクト比は約2.0であることが知られている。その構造の鉛直スケールを定める境界層高度はどの加熱波長でも約1kmである。また非一様加熱における局地循環の水平スケールを定めるのは加熱波長である。つまりそれが2kmのときアスペクト比が2.0となるため、局地循環自体が最も発達しやすい状態となり、局地循環による非常に大きな熱輸送効率が生じたものと考えられる。

(3) 平均化時間比較

平均化時間を変えることで一様加熱、非一様加熱におけるデータがそれぞれどのように変化するか比較検討を行う。計算開始後から1時間のデータ、また3時間のデータを平均化し比較する。その結果を表-3に示す。

一様加熱では平均化時間を長くすると、インバランスの空間平均値は減少するが標準偏差は増加する。これは温度の乱流成分 T' が場の温度上昇トレンドの影響を受けて、長時間とるほど T' が増加するためである。そして表-3より加熱に不均一性がある場合も同様の結果が得られており、また一様加熱と同様の説明をつけることができる。

しかし $[ibr]$ の値を見てみると、3時間平均では弱い加熱波長(HW4-2)より、一様加熱による値の方が小さくなっている。これは不均一な加熱による局地循環の時間スケールが3時間以上であるためと考えられる。

次にインバランス率の標準偏差を見ると、今度は

表-3 平均化時間別各種統計値

Case	平均化時間 (hour)	[ibr] (%)	σ_{ib} (%)
HW0	1	22.24	46.61
	3	9.63	60.27
HW4-2	1	20.54	44.58
	3	12.28	53.99

表-4 水平一般風の風向別各種統計値

Case	インバランス率[ibr] (%)	標準偏差 σ_{ib} (%)
HW4-2u2	4.22	28.42
HW4-2v2	11.26	28.60

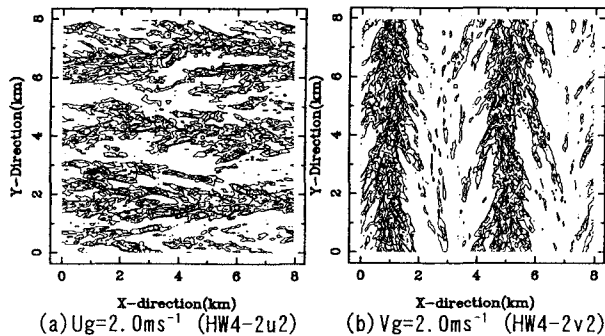


図-9 平均鉛直風速分布（上昇流域）

逆に非一様加熱のほうが長時間平均したときの値が小さくなっている。局所的に大きなインバランスが生じるのは、鉛直風速と温位の時系列変化が互いに強い正負の相関をなすときであると、神田(2002)⁴⁾は述べている。つまり非一様加熱では平均鉛直風構造が比較的停滞することにより局所的な鉛直風速トレンドが生じにくくなるためであると考えられる。

(4) 水平一般風の影響

縞状の加熱に対し、それに平行方向(x-dir)、垂直方向(y-dir)に対し、風速 2ms^{-1} の水平一般風を加えた。その結果は表-4のように、縞に対し垂直方向に一般風が吹く時(HW4-2u2)が大きくインバランスを改善することが分かった。この原因は図-9を見ると明らかであり、縞に対し垂直に吹く時は強い加熱部にできる平均流構造を場全体に移流するのにに対し、縞に平行に吹く場合には縞に沿って移流するだけで、元の平均流構造が残るため平均鉛直風速もあまり減少しないためである。

5. 結論

以上の結果より非一様な加熱を与えた場に生じるインバランスに対し、次のような結論が得られた。

- ① 加熱の不均一性が非常に強いとき、負のインバランスを発生する傾向も強くなる。これは強い加熱部における平均流熱輸送が圧倒的に増大し、正味の熱輸送を押し上げるためである。加熱の不均一性が弱いとき、それほど強い輸送は生じず、必ずしもインバランスは増加しない。

- ② 加熱パターンが 2km のときに最も大きなインバランスが生じる。これはこのとき生じる平均鉛直流構造のアスペクト比が約 2.0 であり、日中の大気条件でもっとも効率よく発達できる形状である。そのため強い平均鉛直流が生じ、温位との強い相関を生み出したためである。
- ③ 一様加熱、非一様加熱ともに平均化時間を長くするとインバランスの空間平均値は減少するが、その標準偏差は増加する。しかし平均流構造が変化することにより、循環の時間スケールも変化することにより効果は異なる。
- ④ 水平一般風が吹くときインバランスは改善されるが、場が不均一であるときは一般風の吹く方向によって改善される度合いが変わってくる。不均一な加熱では常に上昇流が生じ易い所、下降流が生じ易い所が分かれるため、両者が良く混ざるような方向に吹くとき最も改善される。

謝辞：本論では文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(課題番号：12450197)、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(代表：神田学)による財政的援助を受けました。ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) Twine, T. E., Kustas, W., Norman, J. M., Cook, D. R., Houser, P. R., Meyers, T. P., Prueger, J. H., Starks, P. J., Wesley, M. L.: Correcting eddy covariance flux underestimates over a grassland, *Agric. For. Meteorol.*, 103, pp. 279-300, 2000.
- 2) Lee, X.: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, *Agric. For. Meteorol.*, 91, pp. 39-49, 1998.
- 3) 神田学・渡辺力・マルコスレツル・ジグ・フリートラッシュ：LESによる熱収支インバランス問題に対する検討(第1報) 大気境界層スケールの対流構造の影響, 水文・水資源学会誌, vol.15, No.3, pp.243-252, 2002
- 4) 神田学・稲垣厚至・マルコスレツル・ジグ・フリートラッシュ：点計測乱流量の空間代表制に関する理論的検討-インバランス問題の物理的解釈-, 水工学論文集, 第46巻, 2002
- 5) Raasch, S. and Schroter, M.: PALM --- A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorol. Z.*, 10, pp. 363-372, 2001.
- 6) Deardorff, J. W.: Stratocumulus capped mixed layer derived from a three-dimensional model, *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, pp. 495-527, 1980.
- 7) 木村竜治, 地球流体力学入門, 1983
- 8) Albertson, J. D. and Parlange, M. B.: Natural integration of scalar fluxes from complex terrain, *Advances in Water Resour.*, 23, pp. 239-252, 1999

(2002. 9. 30受付)