

潜熱・顕熱フラックスの領域平均値 とPatch Scaleの関係

THE RELATIONSHIP BETWEEN REGIONAL AVERAGE OF LATENT
AND SENSIBLE HEAT FLUXES, AND PATCH SCALE

葛葉泰久¹・早野美智子²・岸井徳雄³

Yasuhisa KUZUHA, Michiko HAYANO and Tokuo KISHII

¹正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

(兼)地球フロンティア研究システム(〒105-6791 港区芝浦1-2-1)

²非会員 博士(学術) 防災科学技術研究所(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

³正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

The relationship between regional average of latent/sensible heat flux is discussed. When numerical simulation by Local Circulation Model is carried out, the circulation in the sub-grid region, namely, the area, which is between each grid point, is often ignored. That means that wind speed in the sub-grid is assumed to be much less than background wind. On the other hand, the regional average latent/sensible heat flux from the complex land use surface, which includes several patches, is often estimated by 'weighted average method'. Some researchers have pointed out that this method is available for the patch which scale is less than 10km.

In this study, some numerical simulations were carried out, under the condition, which was cause of circulation in the sub-grid, and then the effect of patch scale was considered. The main result obtained is that 'weighted average method' is useful, even if patch scale exceeds 10km. And a few considerations related to 'scale issues' are shown.

Key Words: Local circulation model, Scale issues, Latent heat flux, Sensible heat flux, Patch scale, Constant flux layer

1. 序論

林地等の植生地や裸地からの蒸発散量を把握することは、水文学・水資源工学的に「主たる損失項」として非常に重要である。そのため、蒸発散量を把握するために、観測・実験、数値シミュレーションなどが数多く行われてきた。ここで、例えば「被覆状態が同じとみなせる領域からの蒸発散量」を求める場合には、本研究のテーマである、「スケール問題」を考慮する必要はない。しかし、広域場に様々な異なる被覆状態の地表面(以下、均一場とみなせるそれぞれの地表面をPatchと称す)がモザイク状に混在する場合には、事情が異なる。すなわち、各Patchでの蒸発散量から、領域平均値を求めねばならず、ここに後述するような「スケール問題」がかかわってくるからである。特に、数値シミュレーションを行う場合、この問題を考慮することは不可欠である。著者らは、琵琶湖流域を対象とした局地循環モデル(以下、LCMと称す)によるシミュレーション¹⁾などを行ってきたが、LCMにおけるスケール問題²⁾も研究対象にしてきた。

LCMでは地表面直近(通常、接地境界層の上端と考える)の格子点は、平面的に見て、1kmオーダー～100kmオーダーの間隔で配置される。今、LCMの水平方向格子点間隔をx, y両方向とも10kmであるとする。LCM, すなわち大気モデルの最下層格子点(以下、「最下層格子点」と称す)では、下方境界条件として、運動量、顕熱、潜熱の3つのフラックス値が必要となる。これらのフラックスは、最下層格子点における物理量と、その格子点に対応する、すなわち直下にある10km四方の地表面における物理量から計算される。これらのフラックスは、「一つの最下層格子点と、それに対応する地表面間の平均フラックス」(以下、単に「領域平均フラックス」と称す)であるが、通常地表面は「複合的に利用された面」であることから、3つのフラックスを求めるために、何らかの工夫が必要となる。例えば、「一つの最下層格子点に対応する地表面」を「均一な面」とみなす方法もある。他に領域平均フラックスを求める方法として、「各Patchの面積による加重平均法(以下、単に「加重平均法」と称す)」が提案されている^{例えは3)}。この方法は、LCMの1つの最下層格子点に対応する地表面が複数の異なるPatchからなる場合に、

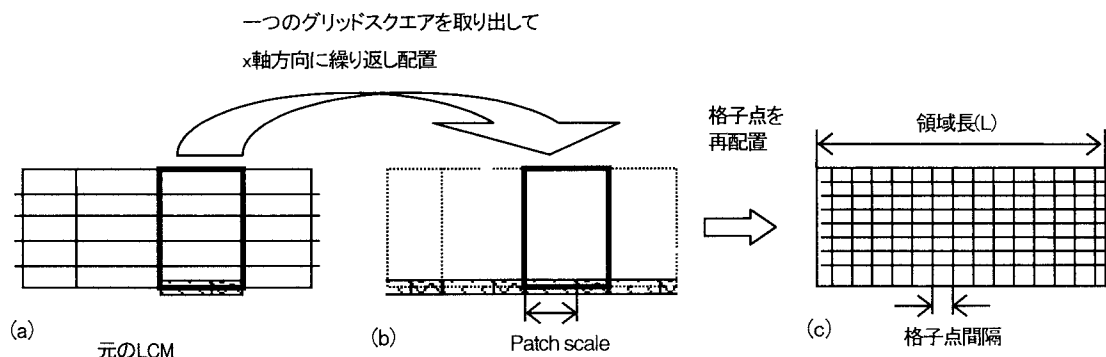


図-1 モデルの基本的コンセプト

「それぞれのPatch - 最下層格子点間」でのフラックスを個々に求め、それぞれのPatchの面積割合によって加重平均を行い、最下層格子点での下部境界条件となる「領域平均フラックス」を求めるといものである。

ここで、10km四方の地表面に、ある被覆状態のPatch (Patch Aとする)と、別の被覆状態のPatch (Patch Bとする)が混在すると仮定する。また、Case 1では、領域がPatch A,Bで半々に分割され(すなわち2つのPatchのみ存在する)ているとする。それに対して、Case 2では、Patch A,Bの総面積は各々半分ずつであるが、いくつかのPatchがモザイク状に分散しているとする。「加重平均法」を用いれば、Case 1,2における領域平均フラックスは同じ値として推定される。ところが実現現象では、必ずしも同じになるとは限らない。これが、LCMによるシミュレーションにおける「スケール問題」の一つとなっている。

本論文では、「加重平均法」を用いる際に、Patchのスケールが、領域平均フラックスの値に与える影響を調べることを目的としている。

なお、本論文の結果の一部は文献4)ですでに発表済みであるが、そこではおもに計算結果を示しただけであった。そこで本論文では追加計算を行い、さらに詳細な検討を行った。

2. 検討方法

本研究では、LCMを用いた数値シミュレーションによる検討を行った。使用したモデルは2次元モデルで、木村⁵⁾が開発したものを本研究用に若干変更したものである。このモデルはブシネスク近似、静力学平衡を仮定したドライモデルであり、木村らにより多数の研究に用いられてきた。モデル中の方程式は、通常用いられるものと同様なので省略するが(例えば文献5)を参照されたい)、計算に用いられるおもな変数は、水平風速(2成分)、垂直風速、温位、比湿である。また、地表面温度はFRMを用いて予報し、地表面-最下層格子点間の潜熱フラックスは、いわゆる β 法⁶⁾を用いた。すなわち、湿潤度は蒸発効率 β で表現し、最下層格子点の比湿と地表面の飽

表-1 主な計算条件

共通な条件			
乾燥地の β :1.0	湿潤地の β :0.0	低層スタントン数0.6	
地表面粗度長(運動量)0.5(m)	計算時間:48(hour)		
各Caseの条件			
Case a	領域長: 400 km	格子点間隔: 1 km	
	Patch Scale: 5(a1), 10(a2), 50(a3), 100(a4), 200(a5)Km		
Case b	領域長: 4000 km	格子点間隔: 10 km	
	Patch Scale: 100(b1), 200(b2), 500(b3), 1000(b4), 2000(b5)Km		
Case c	領域長: 20000 km	格子点間隔: 50 km	
	Patch Scale: 1000(c1), 2500(c2), 5000(c3), 10000(c4) Km		
Case w	領域長: 4000km	格子点間隔: 1 km	
	Patch Scale: 10(w1), 50(w2), 100(w3), 500(w3), 1000(w4), 2000(w5) km		

飽和比湿から顕熱フラックスを算定した。計算は48時間分行い、その間の β は一定とした。設定条件等は、表-1にまとめたとおりである。

本研究の基本的なコンセプト(図-1参照)は次の通りである(以下、2次元モデルということを前提としている)。LCMで格子点を配置すると、各格子点での物理量を用いた計算が行われるが、隣接する格子点の間、すなわちサブグリッド内の現象は特別なパラメタリゼーションを行わない限り、表現されない。通常、LCMにおいては、サブグリッドスケールの熱的循環は重視されていない。

ここでは、LCMの(xy平面上の)一つのグリッドスクエアを取り出し、故意にそこで熱循環が起こるような条件を作り出し、上述の「加重平均法」による領域平均フラックスがPatchの配置(スケール)の影響をどの程度受けるかを調べた。以下、「1つのグリッドスクエアを取り出す」という表現を用いるが、これは、図-1(b)に示すように、大きなスケールのモデルの、隣接する格子点間領域を取り出すことを意味する。ただし、実際には、後述するようにモデルの「静力学平衡」の仮定を満たすように、取り出した領域をx軸方向に繰り返し配置し(図-1(b))、新たに格子点を再配置した(図-1(c))計算領域を設定している。

具体的には次のような計算を行った。すなわち、x方向に長さLの計算領域を設定し(以下、Lを「領域長」と称

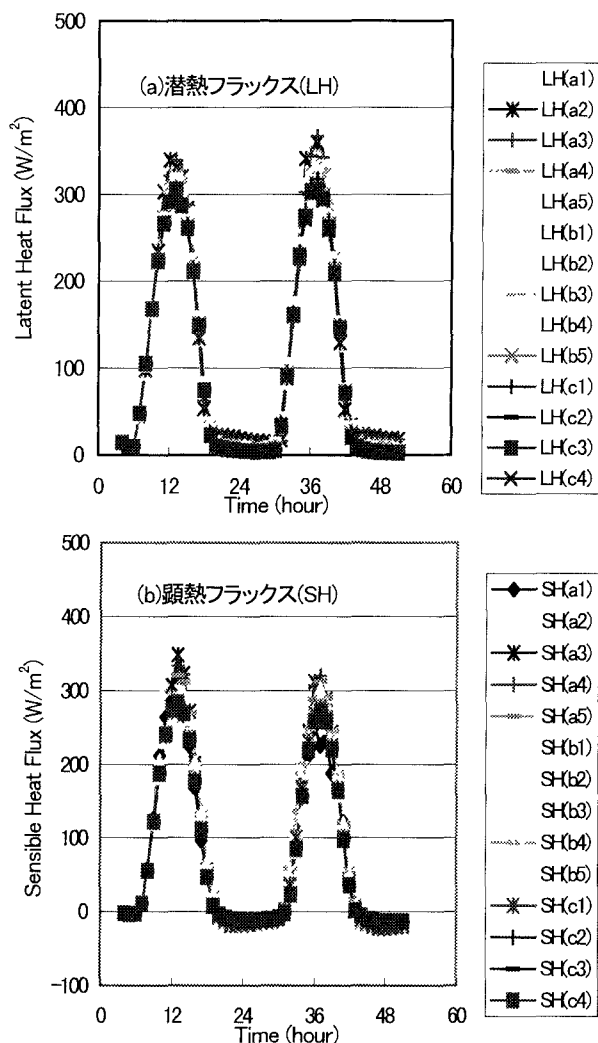


図-2 潜熱・顕熱フラックスの時間変化

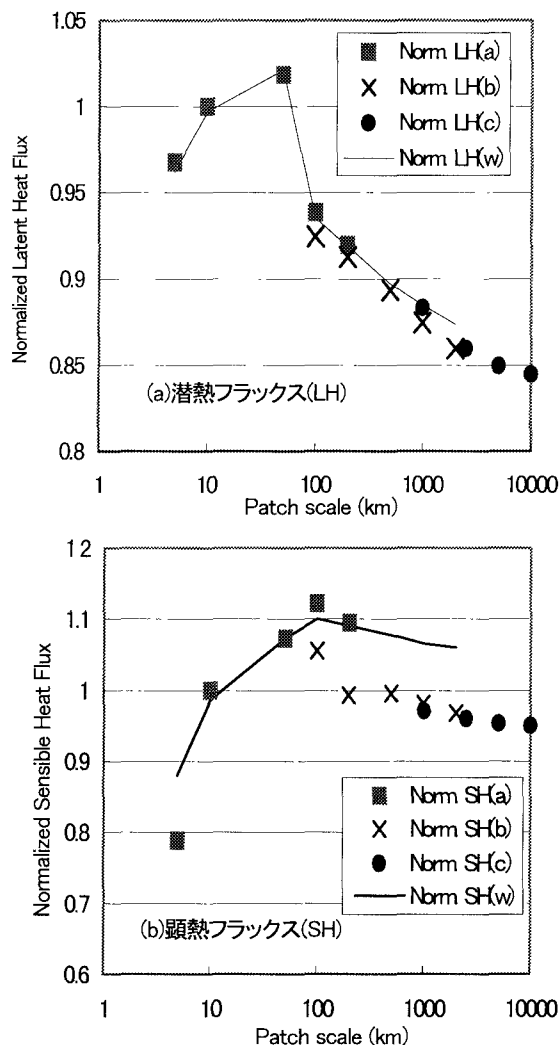


図-3 Patch scaleと正規化されたFlux値の関係

す), (x方向に総計して) $L/2$ の地表面を湿潤地($\beta=1$), $L/2$ の領域を乾燥地($\beta=0$)とした。湿潤地, 乾燥地, 双方とも領域内に占める総面積(この場合は2次元モデルであるから正確には長さの総計)は, $1/2$ ずつである。ここで, Patch scaleが領域平均(顕熱・潜熱)フラックス値に与える影響を調べるために, Patchの配置を様々に変えた。

「Case a1」では5kmの乾燥地, 湿潤地を交互に配置した。同様に, 「Case a2」「Case a3」「Case a4」では, それぞれ10km, 50km, 100kmの乾燥地, 湿潤地を交互に配置した。「Case a5」では, $L=400$ kmの全領域が, 200km長の乾燥地, 湿潤地から構成される。「Case b」「Case c」「Case w」については, 表-1を参照されたい。なお, 風速の影響を見るため, それぞれのケースについて, 初期風1m/s, 5m/s, 10m/sの3通りの計算を行った。1000km以上のPatchを想定することは, 現実的ではないという考え方もあろうが, 傾向を調べるため, また直接の対象とはしていないが, GCMsなど, よりスケールの大きなモデルでも結

果の応用が可能なように, あえて, 表-1のような計算条件を用いたことを付記しておく。

ここで, 領域長(L)によってCases a,b,c の3つに分けた理由は以下による。

- 1) たとえば Patch Scale 10kmについて計算する場合, 計算領域内の地表面が「乾燥地」「湿潤地」それぞれ1面から構成されていれば, すなわち, 領域長を20kmとすれば良いが, モデルの「静力学平衡」の仮定より, 領域長はある程度長くとる必要がある。すなわち, Case aの領域長を400kmとした。
- 2) この研究では Patch scale 10000kmの場合まで計算したので, Case cでは領域長を20000kmとした。
- 3) すべての計算をCase c, すなわち領域長=20000kmで行えば, Patch scaleを小さくした計算をする際, 計算資源の無駄となる。

なお, Cases a,b,c の様に3つのCasesに分けて計算を行ったことの妥当性については後で検討している。

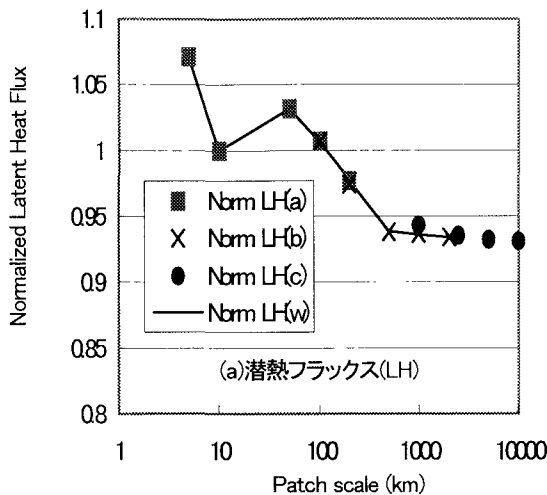


図-4 Patch scaleと正規化されたFlux値の関係
(初期風 5m/s)

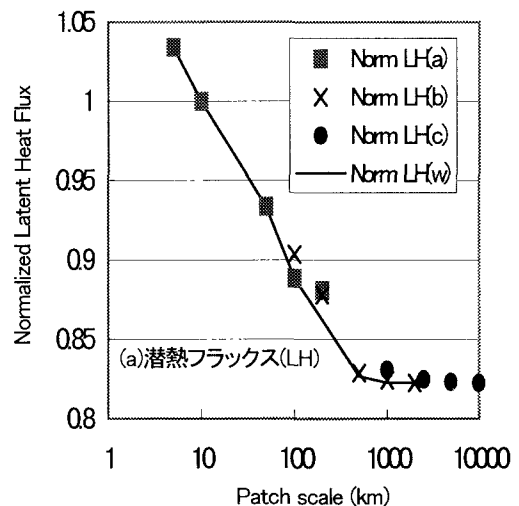
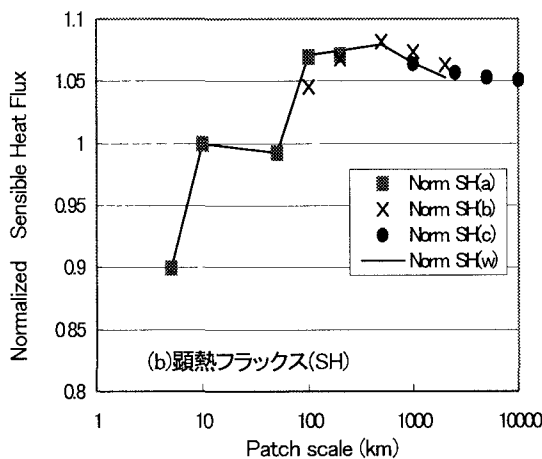
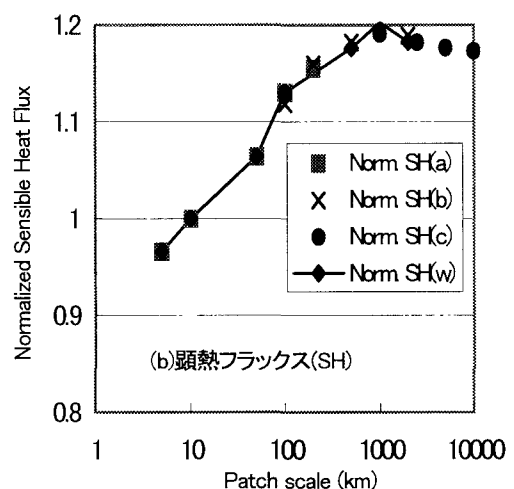


図-5 Patch scaleと正規化されたFlux値の関係
(初期風10m/s)



3. 計算結果と考察

(1) Patch scaleの影響

図-2(a)(b)は、初期風1m/sの場合の、潜熱・顕熱フラックスの時間変化(計算開始後48時間分)をプロットしたものである。X軸の時間は、Local Standard Timeである。ただし24時以降については、例えば13時を13+24=37時と表記している。また、この図中にはPatch scaleが5kmの場合から10000kmのケースまで、15通りの計算結果を同時にプロットした。

この図から、次のようなことがわかる。すなわち、

(a)潜熱・顕熱フラックスとも、12時(2日目は36時)付近でもっともPatch scaleの差異による影響が大きく、その近辺を除けば、Scaleの影響は小さいと考えられる。

(b)夜間はScaleによってフラックスの値が異なるが、絶対量が小さいので、この差異は無視できる。

である。これらは初期風が1m/sのCaseについての結果であるが、初期風が5m/s、10m/sのCaseについても、類似の結果を得た。紙数の制約で図は省略する。

上述(a)のような結果を得たので、つぎに、2日目の13時(LST)での領域平均値の比較を行った。図-3,4,5において、X軸は対数表示したPatch scale(km)、Y軸は13時(LST)での領域平均フラックスである。ただし、フラックス値はPatch scaleが10kmのCase a(2)のフラックス値で正規化した値である。Patch scale 5kmの場合も、図中に併記したが、LCMの静力学的平衡の仮定より、格子点間隔を1km未満にすることには問題があると考えた。また一つのPatchが格子点5,6個以上で表現されるのが普通なので、各図とも、Patch scale 5kmのケース(格子点間隔1km,故に格子点数5個になる)は、参考値として考えられたい。

図-3(a)は潜熱フラックスに関する図である。図中の■はcase a, すなわち領域長400km, 格子点間隔1kmとした場合の結果, ×, ●はそれぞれ, Case b(同様に領域4000km, 格子点間隔10km), Case c(20000km, 50km)の

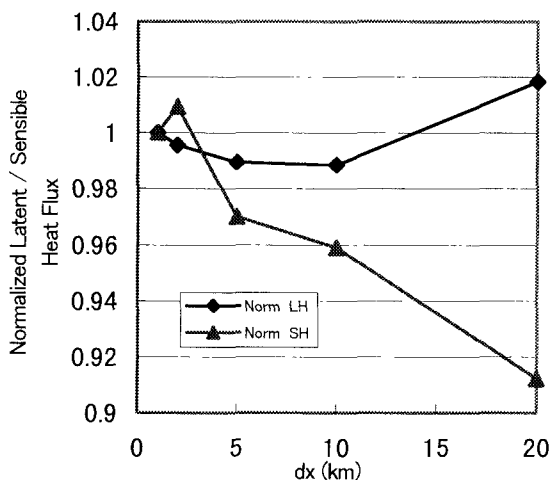


図-6 格子点間隔(dx)と正規化されたFlux値の関係

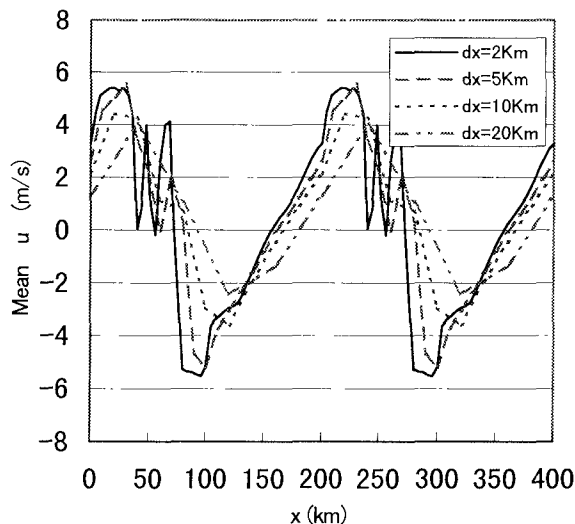


図-7 水平風速分布

結果で、例えばPatch scale 100km, 200kmについてはCases a, bの双方で計算を行った。また、図-3(b)は同様の図で、ただし顕熱フラックスに関する図である。また図-4、図-5は図-3と同様の図で、初期風が5m/s, 10m/sの場合の図である。なお以下の議論において、Patch scale 10kmの場合の計算値を基準に考え、Patch scaleを変化させた場合のそこからのずれを「誤差」と考えることにする。これらの3図から、以下のようなことがわかる。すなわち、

(c) Patch scale 10kmの計算結果を基準に考え、20%の誤差を許容値とするなら、Patch scaleが10000kmになっても、潜熱・顕熱フラックス値とも、許容誤差内の結果が得られていると考えられる。1)計算領域内に熱的循環を故意に起こすような条件($\beta=0$, $\beta=1$ のPatchを混在させた)下で行なった計算であること、2)ここで、前述の結果(a)に依り、最も条件の悪い13時(LST)の値を比較したこと、3)実際には一つのグリッドスクエア内に10000kmのPatchが存在する条件下での計算は行われないだろう、ということから考えると、20%の誤差を許容限度とするなら、シミュレーションにおいて、Patch scaleの影響を考慮する必要はないといえる。

(d) 誤差の許容限度を10%と考えても、おおむねPatch scale 100km以下なら、熱的循環に起因する影響は小さく、Patch scaleの影響を考慮する必要はない。

という結果が導かれる。ただし図-3(b)のみ、3つのCaseの計算結果が、うまくオーバーラップしていない。Case b, cの結果はほぼオーバーラップかつ連続しているが、Cases a, bの結果には乖離がある。そこで、すべてのCaseについて、Case wなる計算を行った。このCaseの計算条件は、表-1に示したとおり、領域長4000km, 格子点間隔1kmである。図-3,4,5中の実線が、その結果である。

図-3では、Case wの計算結果と、×, ●でプロットした値がうまく一致しないが、図-4,5では、うまく一致している。格子点間隔がより小さい方が、現象をより忠実に再現していると考えるのが自然であり、それから考えて、

(e) 初期風速が小さい場合に、格子点間隔の違いによる影響が顕著になる。ある程度以上の初期風速を与えた場合、すなわち5m/s, 10m/sとした場合については、格子点間隔を領域長に応じて1km~50kmと変化させても、その影響はほとんどない。

という結果が導かれる。なお、通常領域長が大きくなれば計算資源節約のために格子点間隔を大きくするのが普通であり、Case b, cはそれに従った計算を行ったわけであるから、Case wの結果は、前述の結果(c),(d)を否定するものではなく、格子点間隔を1kmと、より細かくしたら、(図-3において)Patch scale 100km以上の場合に、誤差がより大きくなった(それでも誤差は10%以内におさまっている)という結果を得たにすぎない。

しかし、結果(e)は「格子点間隔と潜熱・顕熱フラックス算定誤差」という問題を新たに示しているので、節を変えてこの検討を行うことにする。

(2) 格子点間隔の影響

前節で述べたように、初期風速が小さいとき、Case a (格子点間隔1km), Case b (同10Km), Case c (同50Km)の結果(図2-(a),(b))がうまくオーバーラップしなかった。また、それらの結果は、格子点間隔1kmのCase wから得られた曲線上にのらなかった。この理由を、「各Caseの格子点間隔(dx)の差に起因する」と仮定し、以下のような計算を行った。すなわち、

1) 計算条件はdx=1km, 2km, 5km, 10km, 20kmの5とおりとする。他の計算条件は、今までのCaseと同じである。

2)図2-(b)からわかるように、Patch scale 100kmあたりでこれらの間の誤差が大きいので、Patch scaleを100kmとしての計算を行った。

図-6はこれらの計算結果を示したものである。図-3,4,5と同様に、48時間の計算時間中、2日目の13時(LST)の値を用い、潜熱フラックス値、顕熱フラックス値とも、 $dx=1km$ のCaseの計算値で正規化してある(Y軸)。X軸は格子点間隔(dx)である。この図から、以下のようなことがわかる。すなわち、

(f)図-3(a)においても、潜熱より顕熱の方が1)各Caseの計算結果がオーバーラップしない、2)Case wの結果と一致しないという傾向が顕著であったが、図-6を見ても潜熱フラックスに関しては dx の違いの影響はさほど大きくない。(g)顕熱フラックスに関しては、 dx の違いの影響がかなり顕著に出ている。この結果は、初期風速が小さい場合には、 dx の設定を慎重に行わなければならないということを示唆している。ただし、この場合でも、誤差は高々10%以下である。

である。なお、本節での計算は、Patch scale 100kmで行ったので、湿潤地、乾燥地がそれぞれ2つずつ含まれるように、全領域のうち、400km長の範囲で高度10mの水平風速の分布を図-7にプロットした。

この図から、 dx の違いにより、同じ100kmのPatchでも、風速場の様相が微妙に異なることがわかる。 dx の変化により、風速場が微妙に異なることが示されている。

4. 結論と課題

従来から用いられている「加重平均法」に関し、Patch scale と「領域平均フラックス」との関係について調べた。LCMではサブグリッド内の風速はbackground windの強さより十分に小さいことが仮定されている。しかし、LCMによるシミュレーションの精度を下げる一因として、サブグリッドスケールの熱的循環が挙げられることは明らかである。そこで、故意に、熱的循環が大きくなるような条件下、すなわち湿潤地($\beta=1$)と乾燥地($\beta=0$)が交互に隣接するような条件下でシミュレーションを行った。いわゆる、海陸風が吹送しやすい条件である。その結果、裸地を対象とし、Patch scaleを10kmとしたCaseと比較する という条件下で、20%の誤差を許容限度とするなら、「加重平均法」を使用するにあたって、スケール問題は考慮する必

要がない、10%の誤差を許容限度としても、Patch scaleが100km以下なら、スケールを考慮する必要がないことがわかった。

今後の課題を以下のように考える。

- 1)土壌(または地表面)モデルだけではなく、植生モデルを包含した LCM において同様の検討を行い、ここで得られた結果より、さらに普遍的な結果を得る必要がある。
- 2)例えば文献 3)では、「加重平均法」を用いる際に、1つの最下層格子点が代表している大気においては、同一高度の大気は十分に Blend されており、物理量が同一であるという仮定が用いられている。今回は 1つのグリッドスクエアを取り出して、さらに細かく格子点を配置したため、この仮定は用いられていない。この仮定を用いた場合にも Patch scale を考慮する必要があるかどうかを検討する必要がある。今後はこれらに関する検討、さらには新しいスキームを開発する研究を行う。

謝辞： 木村富士男筑波大学教授には、開発された局地循環モデルの使用を許可していただくとともに、数々のコメントをいただきました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 葛葉泰久ら：3次元蒸発散モデルの琵琶湖流域への適用と2,3の基礎的検討，水工学論文集，第38巻，pp.137-142，1994。
- 2) 葛葉泰久ら：複合場からのフラックス推定 ― 局地循環モデルに関する基礎的考察 ―，水文・水資源学会誌，Vol. 9，pp.153-161，1996。
- 3) Kimura, F: Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface: Test of a New Parameterization Scheme, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 67, pp.401-409, 1989。
- 4) 葛葉泰久ら：局地循環モデルにおける地表面水蒸気フラックス算定誤差，第53回年講概要集第2部，pp.54-55，1998。
- 5) 例えば，木村富士男：局地風モデルを利用した光化学汚染の数値シミュレーション，気象研究所技報，Vol.11(7)，pp.217-295，1984。
- 6) 近藤純正（編著）：水環境の気象学，朝倉書店，1994。

(1998.9.30受付)