

蒸発モデルにおける Upscaling に関する基礎的考察

Basic Considerations on Upscaling for the Evaporation Model

葛葉泰久*, Murugesu Sivapalan**, 岸井徳雄***

By Yasuhisa KUZUHA, Murugesu SIVAPALAN, and Tokuo KISHII

A grid square of a meso-scale or macro-scale hydrological model usually includes various kinds of single land-use surfaces (elements). In order to estimate three fluxes from a grid square, fluxes from each element have to be averaged. For this purpose, Scale Issue has been researched by many researchers.

In this paper, numerical simulations were undertaken and considerations about upscaling from micro-scale to meso-scale was also undertaken, focusing on the aerodynamic resistance between the surface and the 'blending height'. Defining the resistance of a whole grid square by parallel summation of the corresponding elemental resistances, the areal average fluxes were found to be similar.

Keywords: Upscaling, Flux, Numerical simulation, Resistance, Evaporation

1. 序論

いわゆる「大気モデル」と「地表面モデル」あるいは「地中モデル」をカップリングしたマクロ/メソスケール蒸発モデルの構築あるいはモデルによる数値シミュレーションを行おうとする場合、「スケール問題」を考慮する必要がある。Raupach et al.¹⁾によれば、「スケール問題」は「人が違えば意味が異なる」ということになるが、本論文では例えば upscaling について、以下のように考える。すなわち通常、マクロ/メソスケールモデルでの一つのグリッド内には裸地、植生地、水体等、様々な地（水）表面が混在するので、表面データを大気モデルに反映させるために、何らかの方法で表面データの総合化/平均化を行う必要がある。一例を挙げれば、土地利用形態が混在した「複合場」を、単一な土地利用がされた「均一場」で置き換えてもそのグリッド内の表面から生じる運動量 flux、顕熱 flux、水蒸気 flux が適正に評価されているとすれば、その「複合場と等価な均一場」を求める方法は upscaling の手法として極めて有益なものである。

著者らは葛葉ら²⁾, Sivapalan et al.³⁾等で scale 問題に関する研究を行ってきたが、本論文では運動量 flux、顕熱・水蒸気 flux 算定の際の無次元抵抗に焦点をあて、upscaling に関する考察を行うことにする。領域内

* 正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所研究員 気圏水圏地球科学技術研究部
(305 つくば市天王台3-1)

** Ph.D Associate Professor, Centre for Water Research, University of
Western Australia, Nedlands, WA6009, Australia

*** 正会員 防災科学技術研究所室長 気圏水圏地球科学技術研究部
(305 つくば市天王台3-1)

の flux を、各均一場の面積割合に応じて単に荷重平均し、領域平均 flux を求める方法は upscaling 手法を用いたものではないが（後述する 'blending height' の仮定を用いた場合は upscaling 手法を用いたものであると考える）、実用上しばしば upscaling 手法を用いた場合と同程度の結果が得られ、すなわち upscaling 手法を用いた flux 算定法は上記の「面積割合による荷重平均」を行なう方法と比較して、実用上必ずしも最適な方法とは限らない¹⁾。それにもかかわらず例えば文献1)では、1)不均一な場では implicit に様々な平均化が行なわれているが、upscaling の研究はそこで使われている仮定を明らかにする、2)例えば、後述する 'blending height' の仮定により接地境界層の取り扱いが簡単になるなど、upscaling 手法はある種の非均一な場の取り扱いを容易にする、などの理由をもって upscaling の研究の必要性を説いている。本研究の最終的な目的は、マクロスケール水文モデルに適用可能な、実用的かつさらに制約の少ない upscaling 手法の開発であるが、本論文ではまず基礎的知見を得ることを目的とし、実用的手法の開発は次の段階の目的と位置付けて行なってきた研究成果を示す。

2. モデルと研究の方法

数値シミュレーションによる検討を行った。モデルはマイクロスケールの2次元モデルと1次元モデルで、いずれも大気モデルと地中モデルをカップリングしたものである（図-1）。モデル自体はそれぞれ他の研究ですでに用いられたものであるが、以下で概説する。

2.1 モデルの概要

(a) 大気モデル（葛葉ら²⁾ 参照）

基本支配方程式は連続式 (1)、運動量移動式 (2)、熱移動式 (3)、水蒸気移動式 (4) の4つである。

$$\partial u / \partial x + \partial w / \partial z = 0 \quad (1)$$

$$\partial u / \partial t + u (\partial u / \partial x) + w (\partial u / \partial z) = \partial \{ K_m (\partial u / \partial z) \} / \partial z \quad (2)$$

$$\partial \theta / \partial t + u (\partial \theta / \partial x) + w (\partial \theta / \partial z) = \partial \{ K_h (\partial \theta / \partial z) \} / \partial z \quad (3)$$

$$\partial q / \partial t + u (\partial q / \partial x) + w (\partial q / \partial z) = \partial \{ K_v (\partial q / \partial z) \} / \partial z \quad (4)$$

ここで (u, w) は水平 (x)、鉛直 (z) 方向の風速ベクトル、 θ は温位、 q は比湿、 K_m 、 K_h 、 K_v はそれぞれ運動量、顕熱、水蒸気移動に関する鉛直渦拡散係数で、通常通り Mellor, Yamada⁴⁾ の方法で求めた。式 (2)、(3)、(4) で圧力項が無視されているが、これは Kimura⁵⁾ に従い、無視できるような条件設定を行ったためである。条件とは、具体的には初期風速、各均一場の領域長などの関係である。

(b) 地中モデル（葛葉ら⁶⁾ 参照）

基本的に Campbell⁷⁾ に準じている。液水移動は水分ポテンシャルの勾配に比例する。比例定数、すなわち透水係数と圧力ポテンシャルは含水率の関数とした。水蒸気移動は、湿度勾配に比例する成分と、温度勾配に比例する成分の和になる。熱移動は、顕熱移動としての温度勾配に比例する成分と、上述の水蒸気移動に伴う潜熱移動成分の和である。

(c) 大気モデルと地中モデルの結合

地中モデルで求めた地表面での物理量と、大気モデル最下層（この高さを参照高さと呼ぶ）での物理量から、運動量 flux (τ)、顕熱 flux (h)、水蒸気（潜熱）flux (e) を求め、これらを両モデルの境界条件として用いた。それぞれ、以下の式 (5)、(6)、(7) で求めた（鉛直上向きを正としている）。

$$\tau = -\rho u_*^2 = -\rho (u_b \kappa)^2 / \{\ln(z_b / z_{om}) - \Psi_m\}^2 \quad (5)$$

$$h = \rho C_p u_* \kappa (t_o - t_b) / \{\ln(z_b / z_{oh}) - \Psi_h\} \quad (6)$$

$$e = \rho u_* \kappa (q_o - q_b) / \{\ln(z_b / z_{ov}) - \Psi_v\} \quad (7)$$

ここで ρ , u^* , u_b , κ , z_{om} , Ψ_m はそれぞれ、空気密度、摩擦速度、参照高さでの水平風速、カルマン定数、運動量移動に関する地表面粗度、積分普遍関数である。 C_p , t_o , t_b は空気の体積熱容量、地表面温位、 z_b での温位である。また q_o , q_b はそれぞれ地表面、 z_b での比湿である。ここで、実際には水蒸気移動に関する地表面粗度 (z_{ov})、積分普遍関数 (Ψ_v) は、熱移動に関するもの (z_{oh} , Ψ_h) と同じ値を用いた。

(d) 計算条件 (表-1 参照)

大気モデルの側方境界条件は、periodic な境界条件を用いた。地中モデルの下端での境界条件は、以下のようにした。すなわち、各均一場では、計算開始時に表-1 に示したような位置に地下水位があると仮定し、地中の含水率分布は hydrostatic な状態にあると仮定する。そして、下端境界条件として、地表面下 1 m の位置で、初期条件と同じ水分ポテンシャルを維持するとした。

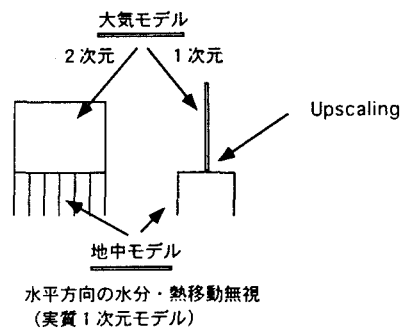
全部で4種類の計算結果を本論文の議論に用いるが、すべてのケースにおいて、同一の土壌を想定した。次項で述べるように、領域を2種類の均一場に分割してシミュレーションを行なったが、Case1~3では水分条件のみが異なる2領域を想定し、Case4では水分条件と地表面粗度が異なる2領域を想定した。すなわち、本論文では「水分条件が異なる場合」の upscaling に関しておもに考察を行なった。土壌の詳細な物理特性は省略するが、飽和透水係数 1.18×10^{-4} (cm/sec) の土壌である。

2.2 研究の方法

upscaling の単純な方法の一つに、

- 1) 参照高さを 'blending height' と考え、その高さでの各物理量は 1 つの領域内で同じ値をとる。
- 2) 領域内にはいくつかの均一場があるが、flux の領域内平均値は、各均一場の面積に応じて荷重平均で求める。
- 3) 各均一場内からの flux は、地表面での物理量と、領域内で共通の値をとる、参照高さでの値から求める。という3つの仮定に基づいた方法 (以下、荷重平均法と称す) がある。本論文では、メソスケールモデルの 1 つの grid square を取り出して、その領域を「全領域」と考えたマイクロモデルでシミュレーションを行った。例えば荷重平均法をモデル化する場合、境界層内の flux は領域平均量として取り扱われるので、それに対応するシミュレーションモデルは大気部分において、1次元モデルとなる。そして、upscaling などの平均化操作を全く行なわない、「現象を詳細に描いた」2次元モデルと output を比較することにより、妥当性・有用性の確認ができる。例えば文献5) ではこのような方法により、荷重平均法の妥当性が論じられており、また文献2) では、荷重平均法の適用限界について述べられている。本論文では同様の手法、すなわち2次元詳細モデルによる計算による output を真値と考え、他のモデルの output と比較するという手法により議論を行うことにする。

表-1 おもな計算条件



Model A Model B,C

図-1 各モデルの概要図

各モデルの特徴	
A:	2次元詳細モデル
B:	荷重平均法でfluxを平均化するモデル
C:	fluxの抵抗算定を簡略化したモデル
各ケースの条件 (括弧内の数字は領域長と初期地下水位)	
Case1	湿潤地(750m,1m) + 乾燥地(750m,1000m)
Case2	湿潤地(750m,1m) + 半乾燥地(750m,5m)
Case3	湿潤地(750m,1m) + 半乾燥地(750m,100m)
Case4	湿潤地(750m,1m) + 半乾燥地(750m,100m)
Case1~Case3 すべての領域で $z_{om} = 0.1\text{ m}$	
Case4	湿潤値で $z_{om} = 0.1\text{ m}$, 乾燥値で $z_{om} = 0.01\text{ m}$
その他の条件 (各Caseに共通)	
初期風速:4m/s 初期湿度:40% 初期地温:20deg. (深さ方向一定)	
大気モデルの上端:2600m 温位傾度 3.3deg./1000m	

3. 計算結果と検討

3.1 Case1による検討

まずCase1を用いた検討を行った。以下、他のケースでも同じであるが、シミュレーションは48時間分を行い、はじめの12時間と24時間目からの12時間が昼間となるように、短波放射をサインカーブで与えた。

図-2は、水蒸気 flux, 顕熱 flux の時間変化を示した図である。図中、例えば E(1A) とは、Case1-A の水蒸気 flux の変化曲線であることを示している。Case1-A と Case1-B のカーブがよく一致しているのは既に報告されているとおりである。

式 (5), (6) に無次元抵抗を用いると、それぞれ式 (8), (9) の様になる。

$$\tau = -\rho u_*^2 = -\rho (u_b)^2 / r_m^2 \quad (8)$$

$$h = \rho C_p u_* (t_o - t_b) / r_h \quad (9)$$

ここで、無次元抵抗 r_m , r_h はそれぞれ $r_m = \{\ln(z_a / z_{om}) - \phi_m\} / \kappa$, $r_h = \{\ln(z_b / Z_{ob}) - \phi_h\} / \kappa$ に対応する。前述のように、水蒸気 flux に関する地表面粗度、積分普遍関数は顕熱 flux に関するそれらと同じと仮定したので、この r_h は、水蒸気 flux の算定の際にも等しく用いることができる。

今、領域内に均一場が複数あるとし、それぞれを均一場 i と表記する。均一場 i での flux を f_i 、領域全体に占める面積割合を a_i とする。また領域からの flux を F とすると、

$$F = \sum a_i f_i \quad (10)$$

と考えることができる。また、 F をモデル化する式と、各均一場での flux である f_i をモデル化する式は、同一であるとする。以上2つの条件は、Raupach¹⁾ が示した upscaling における制約条件である。本論文でも文献1) に準じ、upscaling のための式変形を行ってみる。

式 (8), (10) から、複合場での運動量 flux T は、

$$T = \sum a_i \tau_i = -\rho \sum (a_i U_b^2 / r_{m_i}^2) \quad (11)$$

となる。ここで、'blending height' の仮定から $u_{b_i} = U_b$ (blending height での風速) としている。また、上述のように、領域平均 flux は各均一場の flux と同様の方法で算定されるので、

$$T = -\rho U_b^2 / R_m^2 \quad (12)$$

となり、式 (11), (12) から次式 (13) が得られる。

$$1 / R_m^2 = \sum (a_i / r_{m_i}^2) \quad (13)$$

同様に式 (9), (10) から、

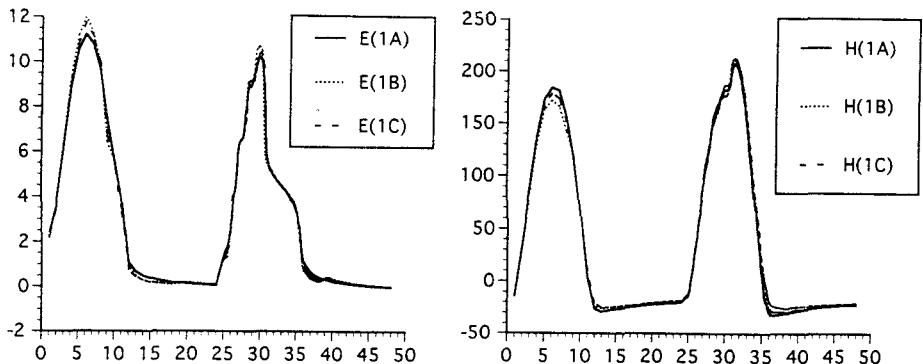


図-2 水蒸気 flux (左), 顕熱 flux (右) の時間変化 (Case.1)
縦軸は (mm/day) と (w/m^2), 横軸は両図とも時間 (Hour)

$$U^* / R_H = \Sigma \{ (a_i u_{*i} / r_{hi}) (t_{oi} - T_b) \} / (T_o - T_b) \quad (14)$$

が得られる。式(10)～(14)では、大文字の変数は小文字の変数に対応するがただし領域平均値を表わす。シミュレーションの過程でこれらの式を用いてRM, RHを求め、fluxの領域平均値を求めると、Case1-Bと同じ結果、すなわち荷重平均法によって求めたfluxが得られる。式(13)は比較的単純な式形になっているが式(14)はきわめて複雑である。

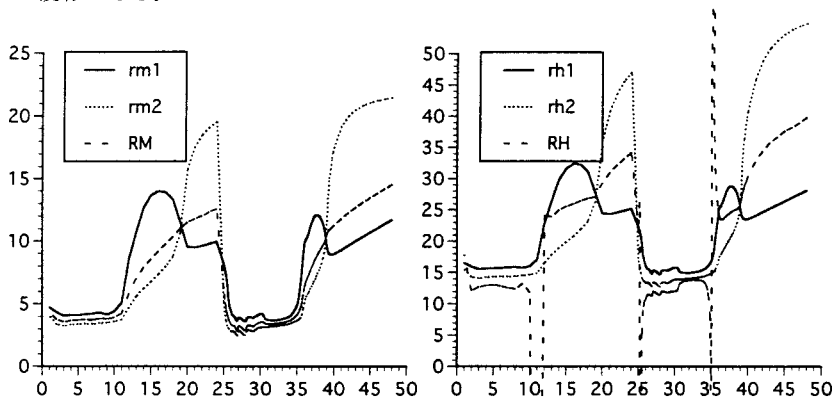


図-3 r_{m1}, r_{m2}, R_M の関係および r_{h1}, r_{h2}, R_H の関係

以下、湿潤領域、乾燥領域をそれぞれ領域1, 2とし、変数の添字にも用いる。図-3(左)は、 r_{m1} , r_{m2} , R_M の時間変化を示した図である。右図は r_{h1} , r_{h2} , R_H に関する同様の図である。両方の抵抗値とも類似の傾向を示している。すなわち、領域1, 2では地表面含水率がかなり異なるにもかかわらず、抵抗値は昼間、つまり不安定な状態において、それ程の差異が認められない。

そこで、式(14)を用いる代わりに、式(13)と類似の方法、すなわち

$$1 / R_H = \Sigma (a_i / r_{hi}) \quad (15)$$

で、 R_H を算定することを考えた。根拠は1)昼間においては r_{h1} , r_{h2} , R_H がかなり近い値をとるため、 R_H を r_{h1} , r_{h2} の平均値とすることも考えられるが、「抵抗」の物理的意味から式(15)のように考えた。2)夜間においてはもともと顕熱flux、水蒸気fluxとも絶対量が小さいので、近似式の精度は大きな影響を与えない。である。ただし、 R_M に関しては式(13)がそれほど複雑ではないので、そのまま式(13)から算定した。以上の仮定を用いたのがCase1-Cであるが、具体的な領域平均fluxの算定方法は以下のとおりである。すなわち、

- 1) r_{m1} , r_{m2} から式(13)により R_M を求める。
- 2) 式(12)により T を求める。
- 3) T から U^* を求める。
- 4) 式(15)を用いて R_H を求める。

式(9)を領域平均顕熱fluxの算定式に書き換えると、

$$H = \rho C_p U^* (T_o - T_b) / R_H \quad (16)$$

となるが、上で求めた各変数値を入力すれば H が求まる。ただし、 $T_o = \Sigma (a_i t_{oi})$ と仮定している。

図-2には、Case1-Cの時間変化曲線も示されているが、水蒸気fluxに関して言えば昼間のピーク時に2mm/day程度の誤差がある。しかし、気をつけて図をみればCase1-Cの結果はCase1-Bの結果にはほぼ等しく、すなわち‘blending height’の仮定を用いた荷重平均法と同程度の精度で水蒸気、顕熱fluxを推定していることが分かる。

3.2 他のCaseによる検討

Case1では、乾燥領域では計算初期を除き、水蒸気fluxが極めて小さくなり、水蒸気fluxに関して言えば湿潤領域での蒸発量が領域平均値を支配している。そこで念のため、Case1ほど水分条件が異なるCaseとして、Case2,3の様な条件下(表-1)での計算も行なったが、同様の結果を得た。なお、式(15)で抵抗値を逆数和から求めているが、これの妥当性を調べるために、Case1～4とは別に、領域内の均一場

割合が異なる場合、すなわち $a_1 = a_2$ にならない場合についても確認したが、同程度の精度の結果を得た。以上は領域内の地表面粗度が一定値の場合についての検討であったが、Case4では、水分条件とともに粗度長も2つの均一場で変えた。図-4は図-2と同じでCase4に関する図である。この図より、地表面粗度が2つの領域で変化する場合においては、前述の方法で今までほどの精度で水蒸気 flux、顕熱 flux を推定することはできないが、10時間を過ぎたあたりからは十分な精度の推定が可能と考える。

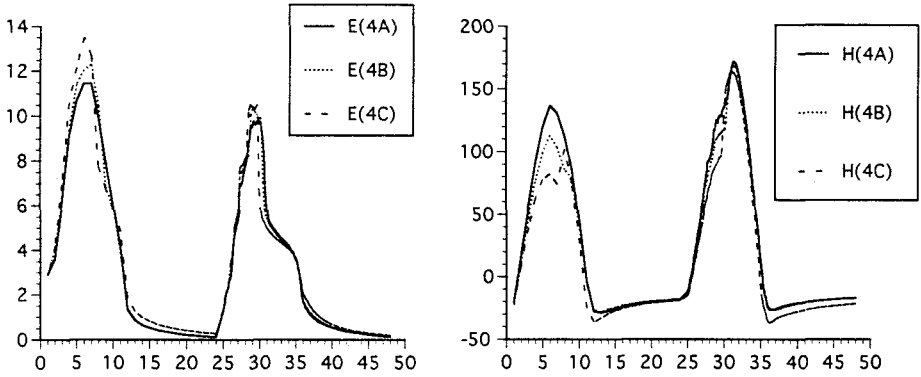


図-4 水蒸気flux (左), 顕熱flux (右) の時間変化(Case.4)
縦軸は (mm/day) と (W/m^2), 横軸は両図とも時間 (Hour)

4. 結論

簡単な条件のもとで、upscaling に関する検討を行なった。得られた結果は以下のとおりである。1) 水分条件が大きく異なる場合でも、地表面粗度を含む土壌条件がほぼ同じであれば、領域平均 flux に関わる抵抗値は個々の均一場での抵抗値を用いて簡単に表現することが可能である。2) 地表面粗度が大きく異なる場合においてはある程度の誤差を生じるが、要求精度によっては上述の手法で平均 flux の推定が可能であると考えられる。以上のようなことが明らかになったが、さらに、3) 本論文の式系によるモデルでは、荷重平均法が実用的ではあるが、例えば現在著者らが構築している「植生地を包含したモデル」等、「抵抗」という概念が多用され、また気孔スケールから流域スケールまで、抵抗値の総合化・平均化を通して平均 flux を求めようとする場合においては、ここで得られた知見が参考になると考える。

参考文献

- 1) Raupach, M.R., J.J. Finnigan: Scale Issues in Boundary-Layer Meteorology : Surface Energy Balances in Heterogeneous Terrain, in 'Scale Issues in Hydrological Modelling', John Wiley & Sons, 1995, pp.345-368
- 2) 葛葉泰久・池淵周一・岸井徳雄: 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, No.2, 1996, pp.153-161
- 3) 例えば, Sivapalan, M, J.D. Kalma: Scale Problems in Hydrology :Contributions of the Robertson Workshop, in 'Scale Issues in Hydrological Modelling', John Wiley & Sons, 1995, pp.1-8
- 4) Mellor, G.L., T. Yamada: A Hierarchy of Turbulance Closure Model for Planetary Boundary Layers, J. Atmos. Sci., Vol.31, 1974, pp.1791-1806
- 5) Kimura, F.: Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surfaces: Test of a New Parameterization Scheme, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.67, 1989, pp.401-409
- 6) 葛葉泰久・石原安雄・下島栄一: 数値シミュレーションによる裸地蒸発に関する研究, 京都大学防災研究所年報, Vol.31, 1988, pp.255-274
- 7) Campbell G.S.: Soil Physics with Basic, Elsevier Sci. Publishers B.V., 1985