

陸域短波長放射収支のマクロモデル化

— 地形効果の領域平均化 —

Macro-scale Modeling of Shortwave Radiation Budget over the Land Surface

- Spatial averaging of topographical effect -

石平 博*・小池俊雄**・陸 旻皎***・早川典生****

By Hiroshi ISHIDAIRA, Tosio KOIKE, Minjiao LU and Norio HAYAKAWA

Abstract

Macro-scale hydrological models have been investigated for the purpose of introducing the effect of land surface heterogeneity to the GCM. The shortwave radiation budget, which is one of the most important components, is influenced by the topography as well as the surface albedo. Generally speaking the topographical effect on incident solar radiation is expressed by using inclination and aspect of a slope. This paper evaluates the difference between the insolation receiving rate using only averaged inclination and aspect on the grid scale of a GCM and one by using the variance and co-variance as well as mean values. The difference is related to a area-wise parameter to give the effect of topographical heterogeneity on shortwave radiation budget.

Keywords : macro-scale hydrological model, radiation budget, topographical effect, digital elevation model

1. はじめに

地球温暖化や異常気象等の問題が顕在化する中、気候変動が地球規模の水・エネルギー循環に及ぼす影響と、逆に地域規模の水・エネルギー循環が気候変動に与える影響を予測・評価することが必要となってきた。現在の大気循環モデル (GCM) の多くは、海洋一大気、陸域一大気のそれぞれの相互作用を表すスキームを含んでおり、評価・予測の精度は向上してきている。しかし、グリッドサイズが大きいために取り込めない物理過程がまだ数多く残されている。特に陸域一大気相互作用については、陸面条件の多様性と不均一性および現象の非線形性ゆえに、広域の熱・エネルギー鉛直フラックスと陸面水文状態の平均量を推定することは極めて困難で、GCMグリッドサイズがある程度小さくなくても対応できる問題ではない。

このような陸面水文学の多様性・不均一性に対しては、これまで対象とする領域を、その中がほぼ均質とみなせる程度に十分に小さな単位区画に分割して取り扱う「分布型モデル」のアプローチ¹⁾²⁾が取られてきたが、地球規模あるいは大陸スケールの現象を取り扱うための単位としては、計算機の今後の発達を考慮して

* 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 (同上)

*** 正会員 工博 長岡技術科学大学助手 (同上)

**** 正会員 ph. D. 長岡技術科学大学教授 (同上)

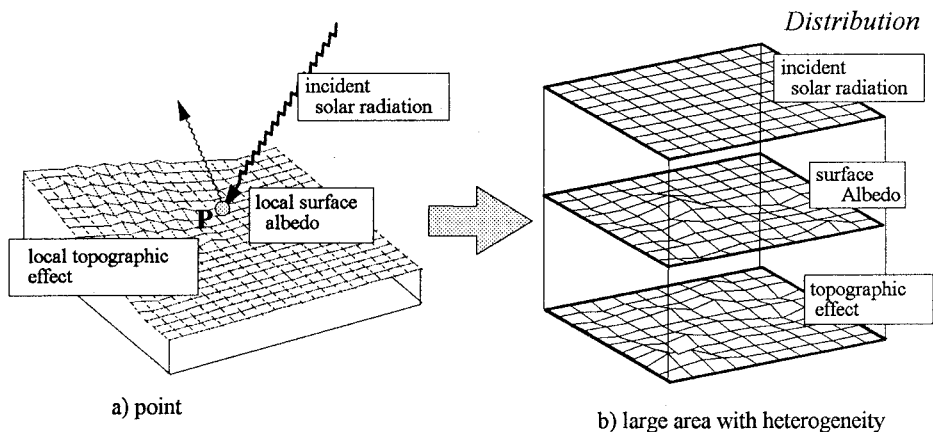


図-1 陸面における短波長放射収支

も、非現実的なグリッドサイズである。そこで不均一な場でしかも非線形な現象を空間的に平均化する手法を開発し、GCMグリッドサイズ(数十km~100km)での平均的なフラックスや陸域水文状態を算定することが求められている。対象とするこれらのサイズは、気象学では「メソスケール」と呼ばれているが、これまで一般に極めて小さいスケール(~1km)を取り扱ってきた水文学では「マクロスケール」と呼ばれる。

Chen et al(1994)⁹⁾は不均一な場における不飽和流を表現するモデルとして、Richards方程式を空間平均化したSHAREモデルとrectangular profileを用いたAveraged Green-Amptモデルを開発し、これを用いて計算した土壌飽和度プロファイルと3次元有限要素法で解いたRichards方程式の数値解との比較を行なうことにより、それぞれの手法の適用性の評価を行なっている。その結果、rectangular profileを用いたGreen-Amptモデルが、対象とする領域における土壌特性の変動が大きい場合にも良い結果を生じることが示されている。また、仲江川ら(1994a)⁹⁾は、サブ領域での物理量分布を考慮できる領域蒸発量算定式を導出し、これを用いて領域内における表層土壌水分量と地表面温度の分布の影響を調べる数値実験を行っている。この検討により、表層土壌水分および地表面温度の分布の効果が確認され、その分布の効果は平均、分散のみならずその分布形状によっても異なることが明らかとなった。さらに仲江川ら(1994b)⁹⁾は、一様でない場における土壌水の浸透を表現する手法についても検討を行い、浸透を支配する不飽和透水係数およびマトリック・ポテンシャルのサブ領域における分布を考慮した場合としない場合とで、浸潤計算の結果に大きな差異が生ずることを示した。上記の研究はいずれも、ある物理現象に関してpoint scaleで導出された支配方程式をある広がりを持つ領域内で平均化することによりその場での平均的な挙動の表現を行なうものであり、対象領域内における物理量の分布情報を導入しているのが特徴と言える。

本研究では、陸域-大気相互作用の中で、蒸発散、融雪、凍土の融解の最も大きな熱源である短波放射収支に着目し、モデルのマクロスケール化手法について検討する。

一般に、ある任意地点における短波放射収支量 R_s は以下のように表現される。

$$R_s = (1 - \alpha) \cdot I \cdot C_T \quad (1)$$

ここに示すように R_s は α :アルベド, I :日射量, C_T :地形効果を表す補正係数 という3つの物理量により決定される。この(1)式を領域平均化することによりある領域内における短波放射収支を表現する式が得られるが、そのためにはこれら物理量の領域内での分布について検討しなければならない。またアルベド、日射量、地形補正係数の各項目の分布だけでなく、項目相互の共分散項についても本来検討を要するが、本研究では、それ自身が斜面勾配等の地形特性により決定される C_T の領域平均値算定手法について検討する。この成果と、アルベドや日射量の空間分布特性を組み合わせることにより、蒸発散、融雪、凍土融解の算定に必要な短波放射収支モデルのマクロスケール化が可能となる。

2. 地形効果の領域平均化

本研究では、短波放射収支における地形の効果を表現する指標として太陽南中時の受光係数⁷⁾ S_N を用いる。これは任意地形のある地点における日射量の強さを表す係数で、赤道上の平坦地が春分南中時にうける強さを1としている。受光係数の概念を図-2に示すが、この中で斜面 π 上の地点 N における南中時の受光係数は LN を1とすると L から π に下ろした垂線 LR の長さで表される。

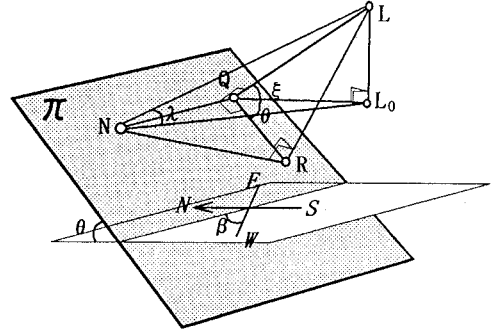


図-2 受光係数の概念図

$$S_N = \sin \lambda \cos \theta + \frac{\sin \lambda}{\tan \lambda} \sin \theta \cos \beta \quad (2)$$

ここで S_N : 受光係数, λ : 南中時の太陽入射角, θ : 斜面勾配 (南向き+, 北向き-), β : 斜面向き (真南または真北からの角度) である。次に、(2)式中 θ, β を以下のように表現することにより、領域内での θ や β の分布の効果を導入する。

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad \beta = \bar{\beta} + \beta' \quad (3)$$

ここで上線は平均項、プライムは平均からの偏差を表す項 (変動項) を意味する。なお、 λ については今回その領域内での分布を考慮せず、領域内で均一であるものとして取り扱う。そして、(3)のように表現された θ, β を(2)式に代入し領域平均を行うことにより、領域平均受光係数 S_N が以下のように得られる。

$$\overline{S_N} = \sin \lambda \cos \bar{\theta} + \frac{\sin \lambda}{\tan \lambda} \left[\sin \bar{\theta} \cos \bar{\beta} \left(1 - \frac{\bar{\theta}'^2}{2} - \frac{\bar{\beta}'^2}{2} \right) - \cos \bar{\theta} \sin \bar{\beta} (\bar{\theta}' \bar{\beta}') \right] \quad (4)$$

ここに示すように、(4)式は θ, β に関する分散 ($\bar{\theta}'^2, \bar{\beta}'^2$) 項, 共分散項 ($\bar{\theta}' \bar{\beta}'$) を含んでおり、これにより $\overline{S_N}$ に対するサブグリッドスケールでの θ や β の変動の効果が考慮されている。次節では、この分散・共分散の効果がどの程度の大きさを持ち、それが $\overline{S_N}$ の決定に対してどの程度寄与するのかについて検討する。

3. サブグリッドでの θ, β の変動の効果

本節では、(4)式における分散・共分散項の影響度を見るために、実地形データを用いてこれらの効果についての検討を行なう。

3.1 地形情報の抽出手法

解析対象としたのは、a) チベット高原・タングラ、ヤンシーピン領域 (スケール: 40×40km、以下タングラ領域)、b) 九州・伊良原領域 (スケール: 8×8km、以下伊良原領域)、c) 筑波・山口領域 (スケール: 1.6×1.6km、以下山口領域) の3つの領域である。今回はこれらの領域内の等高線情報をもとに作成したグリッドベースDEM⁸⁾を地形データとして使用した。図-3に各領域において用意された地形データの概要を示す。この図に示されるように、チベット高原内に位置するタングラ領域の地形は比較的平坦であるのに対し、日本の山間地に位置する伊良原、山口領域は起伏に富んだ地形であるなど、各領域の地形特性は大きく異なっている。次に、用意したDEMの各メッシュ点において、図-4に示すように対象とするメッシュ点の近傍4点から作られる4つの三角形平面の法線ベクトルの和を求め、これをその点における斜面特性ベクトルとする。このベクトルの水平面に対する正投影から斜面向き、鉛直線との角度から斜面勾配を求め、これをDEMの全メッシュ点について行うことにより対象領域内の θ, β の分布を求めた。

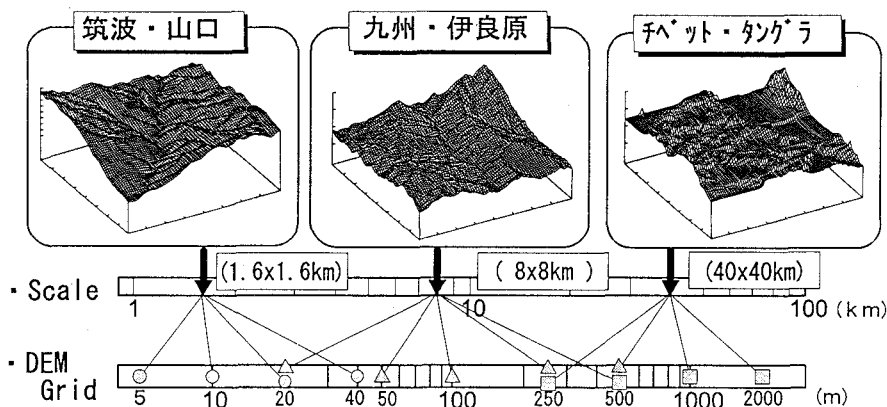


図-3 解析対象領域および地形データの概要

3. 2 スケールの違いによる分散・共分散の変動

ここでは、対象領域内における θ , β の変動特性がどの程度のスケールまで保たれるのを見るために、対象領域内を幾つかに分割してその分割エリア内で求めた θ , β の分散・共分散と全領域内で求めた分散・共分散との比較を行った。図-5はタンガラ領域500mグリッドDEMをもとにスケールの変化に伴う θ' の変化に関して検討した結果である。分割エリアのスケールが小さい場合には各分割エリアごとに θ' の値にバラツキが見られるが、そのスケールが大きくなるにつれてそのバラツキが収束する傾向にあり、フルスケールに対して $(1/2 \times 1/2)$ スケール以上の領域内においては、フルスケールとほぼ同じ変動特性を持つことが明らかとなった。また、 β の分散及び θ , β の共分散についても同様の傾向が確認されたことから、本解析においてはフルスケールのほかに、 $(1/2 \times 1/2)$ スケール、 $(3/4 \times 3/4)$ スケールの領域も検討の対象とした。

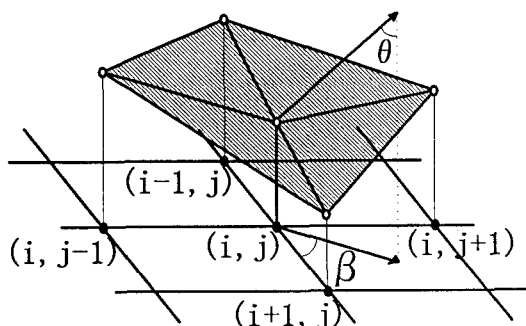


図-4 θ , β の算出概念

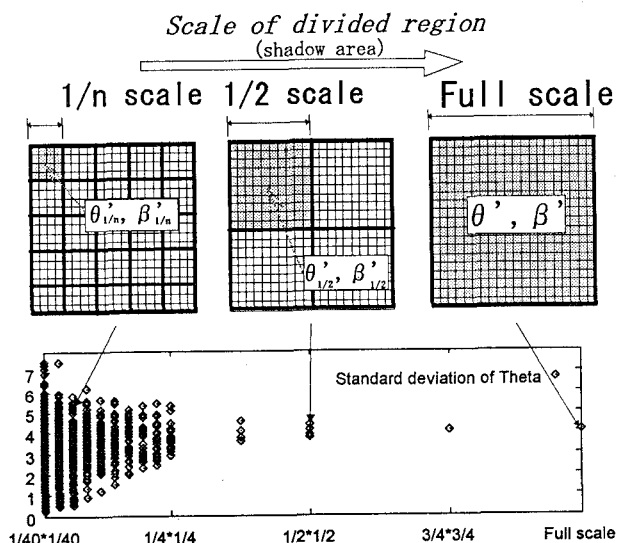


図-5 分割エリアのスケールによる θ' の変化 (タンガラ領域500mグリッドDEMでの検討結果)

3. 3 変動成分の効果に関する検討

対象領域内において抽出した θ , β の平均、分散、共分散をもとに、(4)式における変動成分 ($\overline{\theta'^2}$, $\overline{\beta'^2}$, $\overline{\theta'\beta'}$ の項) の効果について検討した結果が図-6である。横軸は変動の効果を検討して算出した $\overline{S_N}(\overline{\theta}, \overline{\beta}, \overline{\theta'^2}, \overline{\beta'^2}, \overline{\theta'\beta'})$ 、縦軸は変動の効果を検討せず平均値のみを用いて計算した $\overline{S_N}(\overline{\theta}, \overline{\beta})$ を表しており、a) タングラ領域、b) 伊良原領域、c) 山口領域での結果である。なお、 λ については春分南中時の値を用いている。比較的平坦な地形のタングラ領域においては、変動を考慮した場合としない場合の $\overline{S_N}$ の差は小さく (プロットが等値線近辺に分布)、領域内における θ , β の変動の効果はさほど大きくない。これに対して日本の山岳地域に位置し起伏の激しい地形特性を持つ伊良原、山口の両領域においては、変動を考慮した場合としない場合とで $\overline{S_N}$ の値に明瞭な差が確認でき、これは変動項の効果が無視し得ないほど大きいことを示している。以上の結果から、対象とする領域の地形特性により、 $\overline{S_N}$ の決定に対する変動項の寄与の程度が異なること、そして領域内地形における起伏が大きい場合にはその影響は $\overline{S_N}$ の値を大きく左右することが示された。

3. 4 節では、 $\overline{S_N}$ の決定に対するこの変動項の効果の大きさを、他の地形量を用いて表現する手法について検討する。

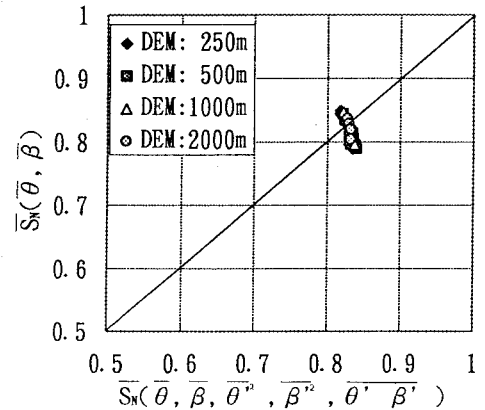
3. 4 変動項の効果のパラメタリゼーション

実際に GCM グリッドスケールへ (4) 式を適用することを考える場合、領域内の変動成分を各グリッドスケールで直接計測することは困難であることから、これらの項の効果を他の計測可能な物理量により表現すること (パラメタリゼーション) が必要となる。本節では、サブグリッドでの変動項の効果 $d\overline{S_N} (= \overline{S_N}(\overline{\theta}, \overline{\beta}, \overline{\theta'^2}, \overline{\beta'^2}, \overline{\theta'\beta'}) - \overline{S_N}(\overline{\theta}, \overline{\beta}))$ を領域内の起伏量 (凹凸の数やその高さ) によりパラメタライズする手法について検討した。

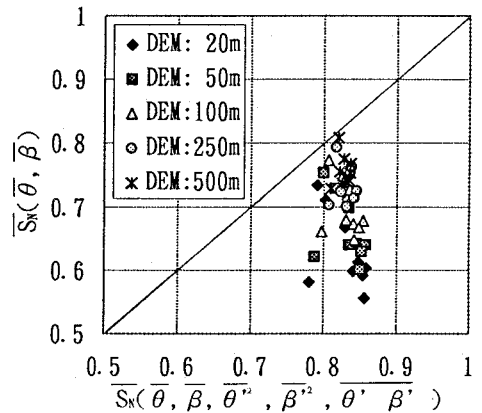
今回、領域内の起伏量を表す指標として以下に示す U_i を用いることとする。

$$U_i = \frac{\sum (H_m - h)^2}{A} \quad (5)$$

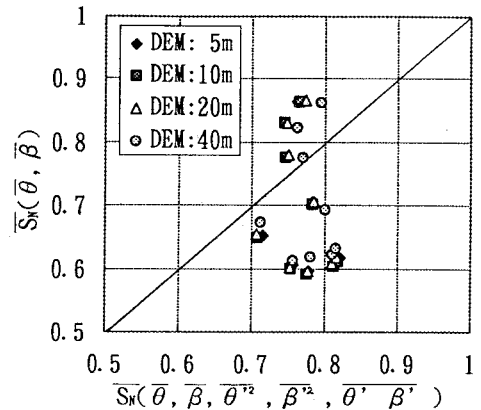
ここで H_m : 領域平均標高 (m)、 h : 各 DEM メッシュ点での標高 (m)、 A : 領域面積 (m^2) である。この起伏量表現インデックス U_i と $d\overline{S_N}$ の関係を各領域、各 DEM メッシュサイズについて調べることにより、 U_i による $d\overline{S_N}$ の表現を試みた。図-7 にその結果の一例を示す。



a) タングラ領域



b) 伊良原領域



c) 山口領域

図-6 変動の効果を検討した $\overline{S_N}$ と考慮しない $\overline{S_N}$ の比較

プロットはややバラついているものの、起伏量 U_i の増加に伴い変動の効果 $d\overline{S_N}$ が増大する現象を表現でき
ており、また各領域においてある特定のDEMメッシュサイズを選定することにより、3つの領域共通の
 $d\overline{S_N}-U_i$ 関係（図-7中の実線）確立が可能であることが明らかとなった。以上の結果から、今回用いた
インデックス U_i は領域内の起伏度を良く表現しており、 $d\overline{S_N}$ を推定するための指標として有効であること
が示された。しかし、1) 指標 U_i の算定には使用するDEMのメッシュサイズが影響することや、2) 異なる
幾つかの領域間共通の $d\overline{S_N}-U_i$ 関係を決定するために使用するDEMメッシュサイズ（図-7におけるタ
ングラ：250mメッシュ、伊良原：100mメッシュ、山口：40mメッシュに相当するサイズ）をどのように選定す
るか等、幾つか問題も残されていることから、今回使用したような数値地形情報だけでなく、リモートセン
シングデータ等の様々な情報を組み合わせた、より一般的なパラメタライズ手法の開発が今後の課題である。

5. 結論

本研究で得られた結果、および結論を以下に示す。

- 1) 空間的に不均質な場を対象とした短波放射収支における地形効果の表現手法（領域平均受光係数の算出方法）が確立された。
- 2) 領域平均受光係数の決定におけるサブグリッドでの θ , β の変動の効果が確認された。
- 3) サブグリッドでの変動の効果の、他の地形特性量によるパラメタライゼーションが試みられた。

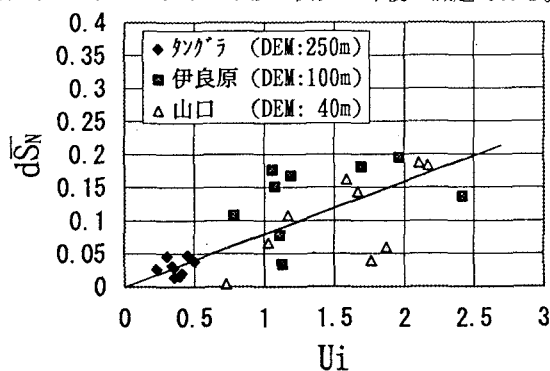


図-7 U_i による $d\overline{S_N}$ の表現

謝辞 本研究は、科学研究費総合研究（A）「水文量の時空間分布特性に基づくマクロ水文モデルの構築」（主任研究者：虫明功臣）の成果の一部である。関係各位に対し、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 陸旻皎, 小池俊雄, 早川典生: 分布型水文情報に対応する分布型流出モデルの開発, 土木学会論文集, 441/II-12, pp. 135-142.
- 2) 陸旻皎, 小池俊雄, 早川典生: 分布型流出モデルの総合化について, 水文水資源学会1994年研究発表会要旨集, pp. 206-209.
- 3) ZHI-QIANG CHEN, R.S. GOVINDARAJU and K.L. KAVVAS: Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields 1. Development of models, Water Resource Research, vol. 30, No. 2, pp. 523-533, 1994.
- 4) ZHI-QIANG CHEN, R.S. GOVINDARAJU and K.L. KAVVAS: Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields 2. Numerical Simulation, Water Resource Research, vol. 30, No. 2, pp. 525-548, 1994.
- 5) 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣: サブグリッドスケールの分布を考慮した蒸発量の算定について, 水工学論文集, 第38巻, pp. 167-172, 1994.
- 6) 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣: サブ領域の物理量分布を考慮した浸透について, 水文水資源学会1994年研究発表会要旨集, pp. 264-265, 1994.
- 7) 東京営林局(1943): 宝川森林理水試験地報告, pp. 43-63
- 8) 陸旻皎, 小池俊雄, 早川典生, 益倉克成: 分布型流出モデルのための河道特性の評価, 水工学論文集, 第35巻, pp. 161-166, 1991.
- 9) 石平博, 小池俊雄, 陸旻皎: 水文学における日射環境のマクロ化に関する考察, 第12回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp. 109-112, 1994