

気象モデルと結合するための マクロ水文モデルの構成法について

A strategy to build a macro hydrological model
to be coupled to an atmospheric model

椎葉充晴*・立川康人**・市川 温***

by Michiharu SHIIBA, Yasuto TACHIKAWA and Yutaka ICHIKAWA

To successfully model global energy and water cycles, the linkage of the hydrologic model and atmospheric model is required. We present a strategy to build a macro hydrological model to be combined to an atmospheric model.

First we present a way to combine the field models of the atmospheric and hydrologic systems, in which the natural catchment shapes can be used as macro hydrological grids. This makes us to utilize the experience in hydrological modeling of watersheds.

Second we present a strategy to build simplified distributed hydrological models of the processes within each macro hydrological grid. We take into account topography and stream network structure to derive simplified models, using the cluster analysis and stream order analysis. This type of simplification will be useful when considering the heterogeneity of hydrological state variables within a grid.

*keywords : Macro hydrological model, Scale-up, Topography, Distributed model
Stream order, Cluster analysis technique*

1. はじめに

気象モデルと結合できるマクロ水文モデルの構成は、GEWEX (Global Energy and Water cycle EXperiment), GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment)¹⁾の重要な研究目的の一つとなっている。本研究では、その基本的な方法論の一つを提示する。

気象モデルと水文モデルの結合を考える場合、場のモデルの結合と境界での状態変数・フラックスの結合をどのようにするか2つの課題を考える必要がある。本研究では、SiBUCモデルなど²⁾他の多くの研究と同様に、気象系と水文系との鉛直方向のフラックスが、気象系下層と水文系表層の状態量から算出されるものとして、場のモデルの結合を中心に、気象モデルと水文モデルの結合の問題を考える。

従来、水文モデルでは、山腹斜面、河道、湖など水

文学的な場の条件を考えて、流域を分割するという方法が取られることが多かった。これに対して、気象モデルは、何らかのグリッドを空間に考えて、そのグリッドで温度や圧力、水蒸気量などの変数の変化過程を計算していく形のモデルが使われることが多いのである。そのため、両方の場のモデルの結合を考える場合、現在のところ、水文モデルもグリッド形式で取り扱うという形で考えられているようであるが、果して、このような形式でなければいけないのであろうか。

本研究では、斜面、河道、湖など水文学的な場の条件を考えた流域場の分割を考慮して、気象・水文結合モデルを作成することを可能にするような場のモデルの結合方式を提案する。

また、気象モデルと結合するためのマクロ水文グリッド内の流れのモデル化について考察し、場のモデルの分析に基づく水文過程の簡略化方式を提案する。特に、マクロ水文グリッド内の水文量の分布をモデルの中で表現するために、簡略化されたモデル自体も分布型となるような方式を考える。

* 正会員 工博 京都大学防災研究所教授
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)
** 正会員 工博 京都大学防災研究所助教授
(同上)
*** 学生員 工修 京都大学大学院博士後期課程
(〒606 京都市左京区吉田本町)

2. 気象グリッドと水文グリッドの分離による場の結合方法の一般化

2.1 気象モデルと水文モデルの場のモデルの特徴

気象現象では、境界として地球表面の地形が問題になることを除けば、場は連続体と考えていいので、何らかのグリッドを空間に考えて、そのグリッドで温度や圧力、水蒸気量などの変量の変化過程を計算していく形のモデルが使われることが多い。この場合、グリッドの位置や形は本質的に問題ではなく、たとえば、グリッドを全体として移動させても解析は可能である。

水文現象では、雨水は斜面と河道を流れ下り、湖や海に注ぐことを重視して、これらの地表の境界に対応した場のモデルを作るのが伝統的な方法である。たとえば、流域を分割する場合も、河道網をいくつかに区分し、区分された河道部分の集水域ごとに部分流域に分割するという方法がとられる。大きな湖がモデル対象域に含まれれば、その湖が一つの分割域として採用されるであろう。このように、水文モデルでは、対象とする流域の特性に依存して、場が分割されるのが普通である。

このように、任意に区分することができる気象の場と、流域場の特性に応じて分割することが要求される水文の場とをどのように結びつけるかという問題は、それ自身考察の対象となるべき重要な問題である。Kite³⁾は、一様でない地表に一樣なグリッドを強制するのではなく、流域の自然な境界に基づく水文学的なモデルを使うべきであると主張している。以下、本論文では、Kiteの主張に従って、水文モデルでは自然な境界に基づいて領域を区分するとし、どのような気象・水文モデルの結合方式が考えられるか考察する。

2.2 交差する気象グリッドと水文グリッド 以下、記述を簡単にするために、グリッドボックス(格子線に囲まれた領域)のこともグリッドと呼ぶことにする。水文系の場のモデル化では、一樣なグリッドではなくて、自然な流域境界に即した分割によるべきだという議論を考慮し、以下、グリッドと言っても、矩形のグリッドに限定せず、任意の閉じた領域を考えることにする。たとえば、流域界などを基準として、場を、互いに重ならない複数の領域に区分して、それぞれの領域をグリッドと呼ぶことにする。

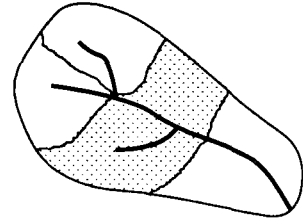


図-1 水文グリッド

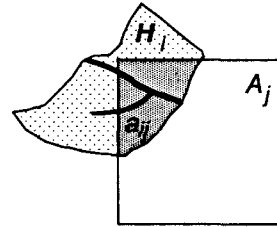


図-2 水文グリッドと気象グリッドの重ね合わせ

図-1に水文系の場のグリッド分割の例を示す。太い線は河道を、細い線は流域界を表しているものとする。この例では、流域内を4個の“グリッド”に分けている。

このような一般的な水文系の場のグリッドに対して、気象系のグリッドを重ね合わせたものを図-2に示す。この図で、 H_i は、 i 番目の水文グリッド、 A_j は j 番目の気象グリッド、 a_{ij} は、 H_i と A_j の重なる部分の面積を表すことにする。ここで、水文グリッド H_i と気象グリッド A_j との間の単位面積当りのフラックス F_{ij} は、それぞれのグリッドの代表的な状態量から計算されるものとする。

このような仮定のもとで、水文グリッド H_i からの大気へのフラックス F_{H_i} 、気象グリッド A_j から地表面へのフラックス F_{A_j} は、

$$F_{H_i} = \sum_j a_{ij} F_{ij}, \quad F_{A_j} = \sum_i a_{ij} F_{ij}, \quad (1)$$

と表されると仮定することができる。鉛直方向のフラックスをこのように計算する方法を採用すれば、水文グリッドは必ずしも矩形に取る必要はなく、水文系を素直な形で計算することが可能になると考える。

2.3 気象グリッドに対応したマクロ水文グリッド 前項では、水文グリッドの決め方には触れなかった。水文グリッドは、気象グリッドとは独立に決定しても良いが、気象グリッドに対応してマクロ水文グリッドを図-3のように定めるのも、検討に値する一つ

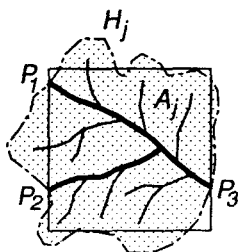


図-3 マクロ水文グリッドの決定方法 A

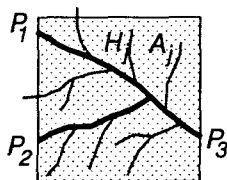


図-4 マクロ水文グリッドの決定方法 B

の方法であると考えられる。

図-3 中、 A_j は気象グリッドである。気象グリッドのグリッドサイズを Δx とするとき、水源からの長さが Δx より短い河道を派川とみなす。そうでない河川を主河川と呼ぶことにする。図-3 中で、黒い太い線は主河川を、灰色の細い線は破線を表すものとする。このとき、気象グリッド A_j の格子線で主河川を横切る点 P_1, P_2, P_3 を求め、この河道点 P_1, P_2, P_3 で区切られる部分河川網の集水域を、気象グリッド A_j に対応する水文グリッド H_j とする。

筆者らは、以前⁴⁾、図-4 に示すように、マクロ水文グリッドと気象グリッドとを同一とする方法を考えた。この二つの方法を比較すると、マクロ水文グリッドの決定だけを考えると、図-4 に示す方法が簡単であるが、主河川が通らない気象グリッドの水文計算をどうするかなどの問題を考える場合には、図-3 に示す方法の方が簡明であると思われる。

3. 場のモデルの分析に基づく水文過程の簡略化

3.1 マクロ水文グリッド内の不均一性の取扱い
マクロ水文グリッド内の水文モデルは、できるだけ水文過程を考慮したモデルとするべきであると考えられる。具体的に言う、マクロ水文グリッド内の地形量や土地被覆の分布を考慮したモデルを考えるべきである。

とは言っても、マクロスケールで考える場合には、

地形に即して逐一流れを追跡計算するのは大変であるから、何らかの簡略化を考えながら、従来の水文学の成果を採り入れて、地形や土地被覆の非均一性を考慮したモデルとするべきである。

気象モデルと結合するべきマクロ水文モデルを考える場合、グリッド内の水文系の状態量、たとえば、水分量分布の不均一性をどのように処理するかがキーポイントであるということは、すでに共通認識となっており、問題は、どのようにこの不均一性を捉え、表現するかという点にある。根拠無く一般的な確率分布形を想定してその分布の効果を議論するのでは無く、なぜそのような分布になるのかを説明することができなければならない。

筆者らは、水文系の状態量の不均一性をもたらす主な原因は、地形や土地被覆の不均一性と降雨の不均一性にあると考える。従って、マクロ水文グリッド内の地形量や土地被覆特性の分析にもとづいたモデルを考えることによって、水文系の状態量の不均一性の一部は考慮できると考える。降雨の不均一性の影響の評価は、流出場の分析だけでは導くことはできない。

3.2 斜面流れ追跡の簡略化モデル 斜面の流れは、マクロ水文グリッド内の斜面形状の分布を解析することによって、

$$\bar{q}(t) = \sum_i w_i q(t|\theta_i) \quad (2)$$

と表される。ただし、 $q(t|\theta_i)$ は、地形特性パラメタ θ_i を持つ斜面からの単位面積当りの流出ハイドログラフであり、 w_i は、地形特性パラメタ θ_i を持つ斜面の重み、 $\bar{q}(t)$ は、マクロ水文グリッド内の平均的な斜面流出ハイドログラフである。斜面形状の分布の分析手法や地形特性パラメタ空間の分割方法など検討すべき課題が残されているが、筆者らは、流域を三角形の集合でモデル化する地形解析手法⁵⁾と、クラスタ分析手法を用いて、この方法の適用を開始している⁶⁾。

3.3 派川網流れ追跡の簡略化モデル 派川網の流れに対しては、河道網集中型 kinematic wave モデル⁴⁾を適用することも考えられるが、河川位数の概念に基づくつぎのような方法が考えられる。

マクロ水文グリッド内の派川網の構造を解析して、各派川の位数を求め、位数 i の派川の個数 N_i 、位数

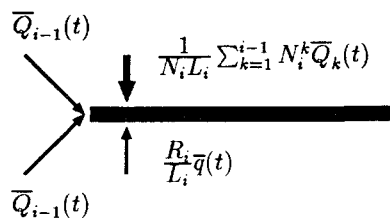


図 - 5 派川網流れ追跡の簡略化モデル

i の派川に流入する位数 k の派川の個数 N_i^k , 位数 i の派川の平均河道区分長 L_i , 位数 i の派川の平均残流域面積 R_i を求め, 位数 i の派川の場合のモデルを図 - 5 のように設定する。図中, 太線は位数 i の派川を表し, 上流端で位数 $i-1$ の派川が合流し, 側方から, 位数 $i-1$ 以下の派川および位数 i の残流域からの流入を受けていることを表している。このとき, 位数 i の派川の流れの連続式は,

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = q_i(t) \quad (3)$$

で与えられる。

ただし, $H_i(x, t)$, $Q_i(x, t)$ は, 位数 i の派川の通水断面面積, 流量, $q_i(t)$ は, 位数 i の派川への平均横流入強度であり,

$$q_i(t) = \frac{1}{N_i L_i} \sum_{k=1}^{i-1} N_i^k \bar{Q}_k(t) + \frac{R_i}{L_i} \bar{q}(t) \quad (4)$$

で与えられるものとする。位数 i の派川の流出ハイドログラフは,

$$\bar{Q}_i(t) = Q_i(L_i, t) \quad (5)$$

で与えられる。流量 $Q_i(x, t)$ は通水断面面積 $H_i(x, t)$ の指数関数で表されるとする。

このモデルは位数ごとに流れを平均化したもので, 計算は大幅に簡略化される。

以上に述べたマクロ水文グリッド内の斜面・河道の計算モデルは, あらかじめマクロ水文グリッド内の地形・河道網を解析して, その分布を計算に採り入れ, しかも, クラスタ分析, 位数解析によって, 計算を簡略化し, 計算モデルは分布型のままであるという特徴をもっている。マクロ水文グリッドと大気との鉛直フラックスの計算に水文学の空間分布が必要な場合に, 分布型の計算モデルを使っていると言う利点が活かされる可能性がある。

3.4 主河川流れの追跡モデル 主河川は, あまり複雑にならないと考えられるので, そのまま, kinematic wave 法または dynamic wave 法で計算するか, 前述した河道網集中型 kinematic wave 法を用いて計算する。

4. おわりに

本論文では, 斜面, 河道, 湖など水文学的な場の条件を考えた流域場の分割を考慮して, 気象・水文結合モデルを作成することを可能にするような場のモデルの結合方式を提案した。

また, このモデル結合方式のもとで, マクロ水文グリッド内の流れのモデル化について, 計算の方針を示した。マクロ水文グリッド内の流れのモデルは, 場の構造を分析し, クラスタ分析や河道位数解析を用いて簡略化するものであって, 流れのモデル自体は分布型のままである。このため, 必要であれば, 水文学の分布の影響を考慮することができるという特徴がある。

今後, 鉛直フラックスの計算モデルを追加して全体モデルを作成し, 大陸河川に適用して行きたい。

参考文献

- 1) Japan National Committee for WCRP: GEWEX Asian Monsoon Experiment Science Plan, 1994.
- 2) 田中賢治・池淵周一: 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-2, pp. 299-313, 1994.
- 3) Kite, G.: Why use continental scale hydrological models?, Abstracts of Presentations, WMO/IAHS Workshop, Continental Scale Hydrological Models: Charting the Future, 11-13, Nov. 1996.
- 4) 高埴琢馬・椎葉充晴・市川 温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, 第 38 巻, pp. 809-812, 1994.
- 5) Tachikawa, Y., M. Shiiba, and T. Takasao: Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure, Water Resources Bulletin, 30, no. 1, pp. 9-17, 1994.
- 6) 市川 温・椎葉充晴・立川康人: 流域内地形量の統計解析による流出過程の集中化, 水工学論文集, 1996 (投稿中).