

AGCM-流路網モデルによる世界の大河川の流出ハイドログラフ Hydrograph estimations by flow routing modelling from AGCM output in major basins of the world

鼎 信次郎*・西尾 健**・沖 大幹†・虫明 功臣††

by Shinjiro KANAE, Ken NISHIO, Taikan OKI and Katsumi MUSIAKE

The river flow is indispensable to the hydrologic cycle. But in the Atmospheric General Circulation Model, the river flow is always ignored. So in this paper, we make a global river direction file for T21 grid resolution, at first, and then make a river routing model and calculate it. As input, we use runoff from the CCSR/NIES AGCM (T21 resolution). After calculation, we analyze the results of some world major basins by comparing the results of model with observations. As a result of this paper, we reproduce seasonal changes of discharge better than before.

*Keywords: atmospheric general circulation model,
global river network model, global river runoff model*

1. はじめに

AGCM(Atmospheric General Circulation Model, 大気大循環モデル)は、将来の気候変動が憂慮される現在、未来の気候を予測するための研究手段として非常に注目を浴び、精力的に研究が進められている。その中でも特にAGCMの陸面過程は、我々が地上に住んでいる限り我々の生活に直接影響を及ぼす重要な過程であるが、その複雑さもあり、モデル化に関してはまだまだ発展途上の段階である。今回注目したのはその中の流路網(河川網)についてである。現在のAGCMでは、地表面からでた流出を内陸から瞬時に海に運ぶ形式となっており、河川による水の輸送(特に輸送による時間遅れ)は考えられていない。しかし実際は、全球レベルでも、河川は水や熱の輸送にある程度の役割を果たしており、特に、我々の生活圏には大きな影響を持っている。また、流路網がなければ、水文循環が閉じているとはいえず、加えて、大気モデルを海洋モデルと結合するときのことを考えると、河川は淡水供給元としての役割も大きい。さらには、信頼できる流路網ができれば、モデルによる流量を観測値と比較することによって、それは、AGCMと現実の気候との対応を調べるツールの一つとなり得る。以上のようなことを念頭に置き、初期の段階ではあるが、現在のAGCMの流出形式と比べて流路網モデルの有用性を確かめるべく本研究を行なった。

2. 今回使用したAGCMの概要

今回使用したAGCMは、東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)が共同で開発しているAGCMである。以下これをAGCMと省略して表記する。グリッドの細さは全球を 64×32 (T21)に分割したものである。このグリッドサイズは、1つが 5° 以上であり、水文現象を表現するには少々粗いサイズではあるが、計算機資源の都合によりこのサイズで行なった。流出や蒸発散の計算のための陸面過程スキームとしては、近藤バケツモデル[1]が採用されている。近藤バケツモデルの特徴は、旧来のバケツモデルが飽和しなければ(バケツが一杯にならなければ)流出が起こらなかったのに対し、不飽和でも流出が起こる点である。この近藤バケツモデルを、まず全球深さ20cmとしてAGCMを動かした。つぎに、新たに全球深さ15cmとしてAGCMを動かした。この2種類のAGCM Runの結果を用いて、流路網モデルを計算することにする。当然、浅い15cm

*学生会員 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修士1年(〒106 港区六本木7-22-1)

**千葉工業大学工学部土木工学科4年

†正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所助手(〒106 港区六本木7-22-1)

††正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所教授(〒106 港区六本木7-22-1)

の方が流量が多くなると期待される。今回使用した AGCM に関しては、詳しくはこの論文集の中の沖 他 [2] を参照していただきたい。

3. 流路網ファイルの作成

モデルを作成するに当たって、まず、 $64 \times 32(T21)$ のグリッドに合わせて流路網ファイルを作成した。各グリッドとも河川の流れは 8 方向に流れ出し得るとした。また、各グリッドに流入する流れはいくつあっても構わないが、各グリッドから流出する流れは一つに限るとした。現在、この流路網には季節変化が無いが、河川が無くなる季節には流出量が少なくなるといえるので、問題ないと考える。内陸部で矢印がないところは、河川が無いと判断したところである。大河川の無いところの矢印は、いくつかの河川を代表して海に水を流しているものとする。またグリッドが粗いために、大河川流域以外では適切に矢印を配したところもいくつかある。本研究で作成した流路網ファイルを図 1 に示す。今回の流路網ファイルは、世界地図 [3] を参考に、目視で作製したものであり、今後さらに合理的なものに改善していく予定である。

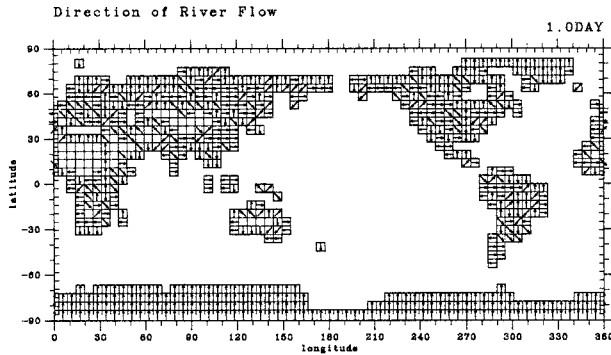


図 1: T21 の流路網ファイル

4. 流路モデル

4.1. 流路モデルの式

以下に今回使用した流路モデルの計算式について記述する。これは、Miller et al[4] の式に基づいている。

流量を F 、密度を ρ 、河川の断面積を A 、流速を u とすると

$$F = \rho Au \quad (1)$$

また、河川の貯留量(重さ)を S 、河川の体積を V 、グリッド間の代表距離を d とすると

$$V = Ad \quad (2)$$

$$S = \rho V \quad (3)$$

この (2),(3) 式を (1) 式に代入すると

$$F = S \frac{u}{d} \quad (4)$$

ここで、 F と S は求める値なので、 $\frac{u}{d}$ のみがパラメータになる。このうち d については、今回は地球を球と考え、2 グリッド間の距離を、2 点と球の中心を通る大円上の 2 点間の距離として求めた。結果として、 u のみがパラメータとなる。もし、 $\frac{u}{d}$ をパラメータとして考えると、タンクモデルと同じ形式になる。

つぎに、各タイムステップごとの計算方法について述べる。 S を川の貯留量、 F_{in} を上流グリッドからそのグリッドに流入する河川流量、 F_{out} をグリッドから流出する河川流量、 R をグリッド内の地表面スキームからの流出量、 Δt をタイムステップとすると

$$S^{t+1} = S^t + \Delta t R^t + \Delta t F_{in}^t - \Delta t F_{out}^t \quad (5)$$

ただし、

$$F_{out}^t = S^t \frac{u}{d} \quad (6)$$

であるとして計算を行なった。ここにおいて、右肩の t は、各タイムステップを表す。本研究では、1 タイムステップを1日とした。上式のうち、 R はAGCMの結果から与えられ、 S と F とは計算によって求められる変数である。

4.2. モデルの計算条件

まず初めに、流路網モデルはAGCMとはオフラインで計算したことを記しておく。地表面が近藤バケツモデル全球深さ20cmのときは、AGCMを4年間動かした結果を用い、全球深さ15cmのときは、AGCMを2年間動かした結果を用いた。河川の流量を計算するに当たって、まず初期の河川の貯留量を適当に定め、そのスピニングアップとしてAGCMの1年目のみの結果を用い流路網モデルを3年間走らせた。(これは、流路網モデルをAGCMの1年間のデータのみを繰り返し使って何年も走らせたとき、流路網モデルの結果は、1年目を除いて、2年目以降は全て同じ結果になり定常化することから、スピニングアップは3年で十分としたものである。)そしてスピニングアップ後、AGCMの1年目の結果、2年目の結果、3年目の結果、などと順に用いて流路網モデルの計算を行ない、スピニングアップのデータを切り捨てた残りのデータを平均したものを結果として採用した。流速は観測値も存在しないため、今回は全球一様とし、深さ20cmのときには、 $u = 0.1(m/s), 0.3(m/s), 0.7(m/s)$ の3種類を用いた。深さ15cmのときは、深さ20cmのとき $u = 0.3(m/s)$ による結果が最も良かったため、それのみを用いた。

5. 代表的な大河川についての結果

今回のT21のスケールでは表現できる河川は限られており、地域的な代表性と流量観測値の有無を考えて、Amazonas川、Mississippi川、Zaire(Congo)川、Ob川、Amur川の5河川について結果を示すことにする。流量の図において、GCMと表記された線は現在のGCMで使われている方法(流出を内陸からすぐに海に運ぶ方法)による結果を示し、 $u = 0.1, 0.3, 0.7$ はそれぞれの速度(m/s)のときの近藤バケツモデル深さ20cmによる結果を示し、vb15は近藤バケツモデル深さ15cmのときの結果を示す。observationはGRDC(Global Runoff Data Centre)のデータによる観測値[5]である。河川流量の観測値と計算値の比較などの全体的な分析は、近藤バケツモデル深さ20cmの計算結果を用いて行ない、その後、近藤バケツモデル20cmと15cmとの比較を行なった。図の中の流量の単位は($mm/month$)になっている。また、Amazonas流域のみについては、降水量や蒸発量などの気候値とAGCMの結果を示した。ここで気候値とは、降水量はLegatesの気候値であり蒸発量は大気水収支法[2]により求められたものを利用した。Amazonas流域以外についての降水量や蒸発量はこの後の[2]を参照していただきたい。

5.1. Amazonas川

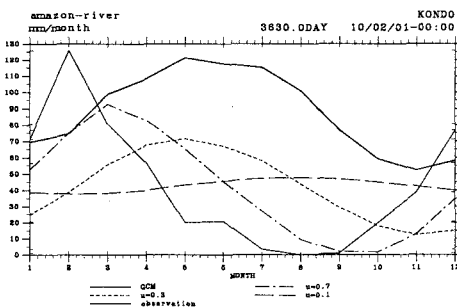


図 2: Amazonas 川の流量, 近藤バケツモデル深さ20cmの場合。凡例は上段から横に順に、現在のAGCMによる結果, $u = 0.7(m/s)$ による結果, $u = 0.3(m/s)$ による結果, $u = 0.1(m/s)$ による結果, 観測値。

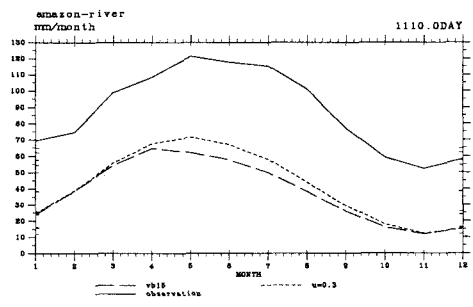


図 3: Amazonas 川の流量, 近藤バケツモデル深さ20cmと15cmの比較。凡例は上段から横に順に、深さ15cmのときの結果, 深さ20cmのときの結果(ともに $u = 0.3(m/s)$), 観測値。

Amazonas川の流量の結果は図2,3である。Amazonas流域は、気候値と比べて降水量がかなり少ないというAGCM上の問題があるため、全体としてモデルの流量が少ないという欠点が存在する。しかし、流路網モデルに対して入力となるAGCMのAmazonas流域での降水量-蒸発量を見ると(図4,5)、冬が大きく夏は小さいあるいは

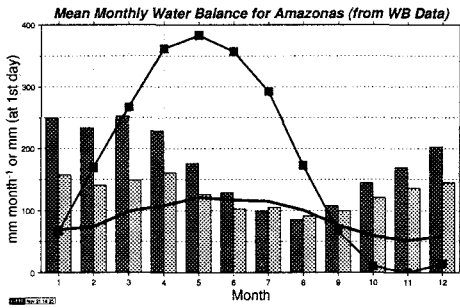


図 4: 観測値に基づいて算定した Amazonas 川の水文要素の平均的な季節変化。左側の濃い色の棒が降水量, 右側の薄い色の棒が蒸発量, マークのない太い実線が流出量, そして■でマークされた線が陸水総貯留量を示す。

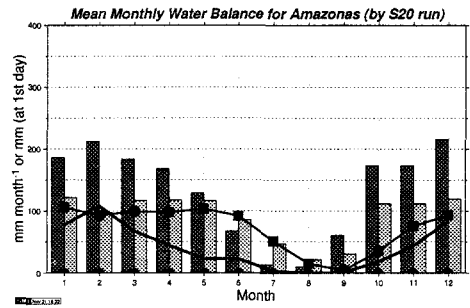


図 5: AGCM の Amazonas 川の水文要素の平均的な季節変化。□のついた破線が土壌水分貯留量, ○のついた破線が積雪量, そして△のついた実線が融雪量を示す。

マイナスという特徴が気候値と似ており、季節変化はますます再現されている。そこで図を見ると、 $u = 0.3(m/s)$ のときの季節変動は観測値とよく合っており、現在の AGCM の方法と比べて改良されたといえる。 $u = 0.1, 0.3, 0.7(m/s)$ のときをそれぞれ比べると、このモデルにおいては、流速が流量の季節変動に重要な役割を果たしており、流量の季節変動は流速のセンシティブィティが高いといえる。また、バケツモデルの深さ 20cm のときと比べて深さ 15cm のときのほうが流量が増加しているとはいえず、AGCM 全体のフィードバックによるものかもしれないが、降水量が少ないことも合わせて、今後の注意や改善が必要な流域といえる。

5.2. Mississippi 川

Mississippi 川の流量の結果は図 6,7 である。Mississippi 川の流量の季節変動は、観測値とモデルの計算結果とは大きく異なる。流域の降水量-蒸発量を見ると、気候値の方が AGCM に比べて冬から春先にかけて大きな値を示すが、年間を通して見ると、他の河川流域と比べてもある程度良い一致を示している。この降水量-蒸発量が原因でないとすると、Mississippi 流域の特徴である融雪の取り扱いが、流量の観測値とモデルの結果との相違の原因であると考えられる。また、バケツモデルの深さ 20cm のときと比べて深さ 15cm のときのほうが流量が増加しているとはいえない。Amazonas 川と同様に、バケツモデルの深さを減らしたから流量が増加するとはいえず、AGCM の複雑さをもの語る結果となっている。

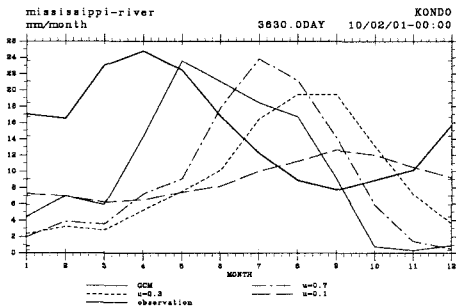


図 6: Mississippi 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm の場合。

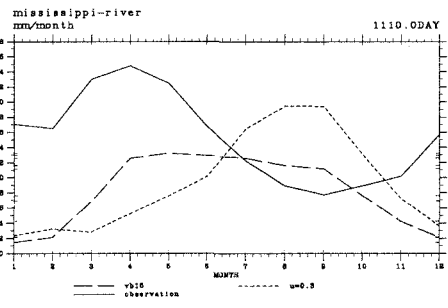


図 7: Mississippi 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm と 15cm の比較。

5.3. Zaire 川 (Congo 川)

Zaire 川の流量の結果は図 8,9 である。Zaire 川の流量は観測値とモデルの計算結果ではかなり異なる。入力である Zaire 川流域の降水量-蒸発量を見ると、12 月から 3 月にかけて AGCM の結果の方が圧倒的に大きい値を示

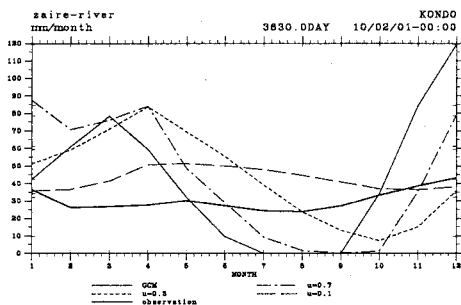


図 8: Zaire 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm の場合.

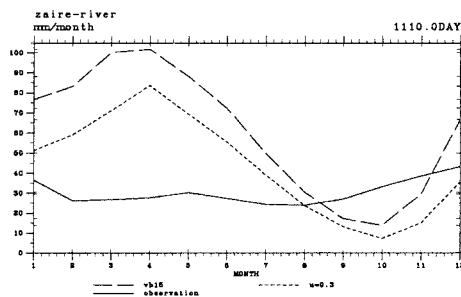


図 9: Zaire 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm と 15cm の比較.

し、また AGCM では 7,8 月にほとんど雨が降っていない (気候値では降っているが) ということが流量の相違の原因として現れていると考えられる。入力が変われば結果が異なるというわけであり、Zaire 川に限り $u = 0.1(m/s)$ のときの結果が一番適合しているように見えるからといって、 $u = 0.1(m/s)$ がこの流域では適当な流速であるとはいえない。Zaire 川流域は赤道をはさんでおり、そのことによる南北での雨期と乾期のずれが観測値のような 1 年中ほぼ一定の流量をもたらしているのだが、それがうまく AGCM で表現されていないといえる。

5.4. Ob 川

Ob 川の流量の結果は図 10,11 である。Ob 川の流量は $u = 0.3(m/s)$ のとき観測値とモデルの計算結果は非常に良い一致を示す。Ob 川流域での入力となる AGCM の降水量-蒸発量は、気候値と良い対応を示している。これが流量の良い結果の原因となっている。しかしながら、降水量や蒸発量を単独で見ると、AGCM による結果の方がとにもかなり大きく、流量が合っているからといって AGCM 全体が合っているとはいえないことを顕著に示す例となっている。バケツモデルの深さを変えた結果は、ここでは予想通り、バケツが浅い方が流出が大きくなっていく。

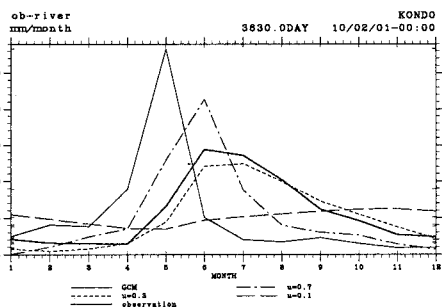


図 10: Ob 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm の場合.

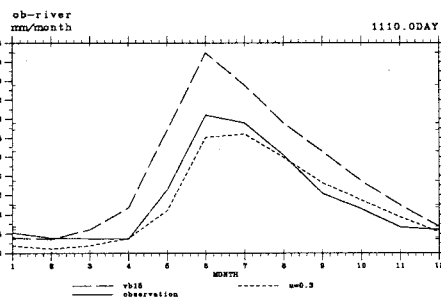


図 11: Ob 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm と 15cm の比較.

5.5. Amur 川

Amur 川の流量の結果は図 12,13 である。流量の観測値とモデルの計算結果とはやはり $u = 0.3(m/s)$ のとき良い結果を示し、この川もバケツモデルの深さを変えた結果は予想通りである。

全体として、特に $u = 0.3(m/s)$ のとき河川流量の観測値とモデルの計算結果との相違は、降水量などの気候値と AGCM の結果との相違をよく表現しているといえ、さらに流路網の信頼性をあげれば、流域単位での AGCM の分析のための良いツールになるであろうと予想される。

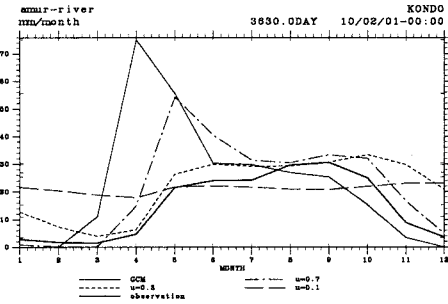


図 12: Amur 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm の場合.

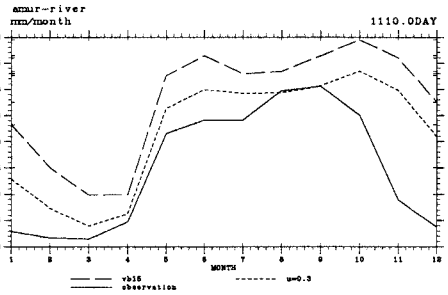


図 13: Amur 川の流量, 近藤バケツモデル深さ 20cm と 15cm の比較.

また、現在の AGCM と比べて季節変化をよく表現することができるので、今後海洋モデルなどとともに AGCM にオンラインで結合したときの効果が楽しみである。

6. むすび

本研究の流路網モデルはまだ非常に粗いものであるが、いままでの AGCM の方法（流出は瞬時に海へ運ぶ方法）と比べて、流量の季節変動を良く表現することができ、有用なものであるといえる。

今後の課題としては、まず今回のものよりもっと正確で妥当な流路網ファイルを作成することがあげられる。しかし、最も重要な課題は u あるいは $\frac{u}{d}$ をどう妥当に決定するかに集約される。 u は地形や水位のことを考慮に入れて、 d もグリッド間を河川が直線で流れているわけではなく、一般にはもっと長いので、河川網のフラクタルなどを考慮に入れて、今後検討しなければならない課題である。また、その中に含まれるが、ダムや湖、運河などの河川の途中の障害の影響についても、検討せねばならない。以上のような課題に順次取り組んでいくつもりである。

謝辞：本研究は平成 6 年度文部省科学研究費総合研究 (A) (代表: 虫明功臣) ならびに環境庁地球環境研究総合推進費の助成を受けて行なわれました。また、国立環境研究所の沼口敦さん、東京大学大学院総合文化研究科の江守正多さん、東京大学気候システム研究センターの阿部彩子さん、西村照幸さん、東京都立大学理学部地理学教室の増田耕一先生、松山洋さんをはじめとする陸面過程研究グループの皆さんに有益な御意見や御協力をいただきました。さらに、計算の一部には東京大学生産技術研究所計算機室の協力を得ました。ここに記して深い感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 近藤純正. 表層土壌水分予測用の簡単な新バケツモデル. 水文・水資源学会誌, Vol.6, pp.344-349, 1993.
- [2] 沖大幹, 虫明功臣, 江守正多, 沼口敦. 大気大循環モデルによる大河川の流域水循環と水収支推定. 水工学論文集, Vol.39, p.in this volume, 1995.
- [3] TIMES BOOKS LONDON, 1980. *Times Atlas of the World*
- [4] J.R.MILLER, G.L.RUSSELL and G.CALIRI. Continental-Scale River Flow in Climate Models, *Journal of Climate*, vol.7, 914-928, 1994.
- [5] 松山洋, 沖大幹. GRDC(世界河川流量データセンター) とそのデータについて, 水文・水資源学会誌, Vol.5. No.4. 1992.
- [6] D.R.Legates and C.Willmott. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation, *Intl. J. Climatol.*, 10, pp.111-127, 1990