

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

Estimation of hydrological cycle and water balance in large river basins by an atmospheric general circulation model

沖 大幹*、虫明 功臣**、江守 正多***、沼口 敦****
by Taikan OKI, Katumi MUSIAKE, Seita EMORI and Atusi Numaguti

An atmospheric general circulation model (AGCM) was used for the study of global hydrological cycle. AGCM used was developed by a cooperative research project between Center for Climate System Research (CCSR), University of Tokyo and National Institute for Environmental Studies. The results were examined referring to the observational data. Especially in the case of river basin scale, estimates from the combined atmospheric-river basin water balance method using ECMWF objective analysis data (1989-92) and GRDC were used for the comparison of water balance components. The seasonal change of total water storage in each basin shows a good correspondence between the AGCM simulation and the water balance estimation.

Keywords: Atmospheric general circulation model, Atmospheric water balance, Objective analysis data, Basin water storage

1. はじめに

大気大循環モデル (atmospheric general circulation model、以下 AGCM と略す) とは、大気の大循環を模倣するよう計算機上で数値的に表現したものを一般には指す。現在気象・気候分野では AGCM は重要な研究 tool となっており、また、実際の気象予測では中心的に利用されている。適用する時間スケールに応じて AGCM の利用のされ方は異なっていて、大まかに次の 3 つに分類できる。

- (i) 数日程度の天気予報
 - (ii) 季節降水量の予報など、1 カ月～数カ月程度の予測
 - (iii) 地球温暖化など、数十年を越えるような長期の気候変動の予測
- (i) では、地球全体を覆うような AGCM では空間分解能を荒くせざるを得ないため、予報対象領域付近のみを覆うような局地数値モデルが実際の気象予測に利用される。しかし、AGCM はその境界条件を与えるために必須であり、AGCM の精度向上によって天気予報の延長が可能になると考えられている。
- (ii) では、これまでの平均気圧パターンや海面水温分布から経験的に推定していた長期予報に代わって、基本的には物理法則に基づく AGCM の予測結果が直接利用できるようなと今後期待されている分野である。初期値の不確実性に起因する誤差を抑制するため、異なる時点の初期値から積分した AGCM の結果を利用するアンサンブル予報という手法^[4]が用いられることになるようである。
- (iii) は、AGCM を長期積分して得られた結果を直接用いるものであり、初期値よりは海面水温や雪氷分布などの境界条件、あるいは地球温暖化で言えば放射収支に変化をもたらす大気成分の変化などといった外部条件がより大きな影響を持っている。

*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)

*** 修士(学術) 東京大学総合文化研究科 (〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1)

**** 博士(理学) 国立環境研究所大気圏環境部 (〒305 つくば市小野川 16-2)

表 1: CCSR/NIES AGCM 5.3 の概要

方程式系	全球プリミティブ方程式系
予報変数	風速、温度、地表気圧、気圧高度、比湿、雲水量
水平離散化	スペクトル変換法
鉛直離散化	σ 系 (Arakawa and Suarez, 1983)
放射	2 ストリーム DOM/adding 法 (Nakajima and Tanaka, 1986)
雲過程	雲水予報
積雲対流	雲質量フラックス予報型の Arakawa-Schubert スキーム
鉛直拡散	Mellor and Yamada(1974) level 2、対流混合層の非局所的拡散
地表 flux	Louis(1979) パルク式、Miller et al. (1992) の対流効果
地表面過程	多層熱伝導、新パケツモデル (Kondo, 1993)
重力波抵抗	McFarlane(1987)

表 2: RUN ごとで変化させた条件

RUN 名	地表面水文 過程モデル	圃場 容水量	積分 期間
S20	近藤新パケツ モデル [1]	200 mm	5 年
S15	近藤新パケツ モデル [1]	150 mm	3 年
O20	オリジナルパ ケツモデル [2]	200 mm	1 年

これら (i)-(iii) を河川・水資源管理にあてはめると、それぞれ集中豪雨の予測による洪水管理、季節降水量の予測による治水管理、そして気候変動の予測にともなう社会基盤整備計画策定のスケールに相当している。すなわち、AGCM によってどのような予測が行なわれているかについて、河川・水資源管理の面からも注目することは極めて重要である。

一方で、気象・気候システムにおいて地表面水文過程が重要な役割を持っていることも明らかになりつつあり、いかに適切に地表面水文過程を AGCM で表現するかが当然その予測精度に大きな影響を及ぼすことになる。例えば、佐藤 [5] は気象庁の AGCM に、地表面水文モデルとして陸上生態系モデルを組み込むことによって陸面水収支・熱収支の予測が著しく向上したと言っているし、ヨーロッパ中期天気予報センター (ECMWF) ではやはり地表面水文過程を改良することによって、ミシシッピ川に大洪水のあった 1993 年 7 月について、より実測に近いアメリカ中西部における降水分布を再現することができるようになったと報告している [6]。したがって、AGCM の予測精度向上のためにも地表面水文過程を改良することが有効であり、それがまた水文過程の延長予測を可能とすることになる。

また、AGCM の中では風、気温や湿度といった大気物理量はもちろん、積雪深・土壌水分といった地表面諸量や降水・蒸発・流出量などといった全球をくまなく観測することが容易でない水文量についても地球上を覆うすべての領域について算定されている。現実と細部が異なっているにしても考慮されている物理過程に従って運動量やエネルギー、質量などが輸送・交換され、モデル中では収支しているはずであり、水循環や水収支の分布と変動、あるいは考慮されている水文過程が及ぼす影響を調べるのが可能となる。

ここでは、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) が共同研究で開発している AGCM を用いた数値実験を行ない、大気水収支法による推定値など [8] を参照しながら、全球の水循環と水収支が AGCM によってどのように表現されているかを調べた結果を報告する。

2. モデルと数値実験

2.1 モデルの概要

使用した大気大循環モデルは CCSR と NIES との共同研究によって作成された 3 次元大気大循環モデルの version 5.3.12a であり、その概略は表-1 の様になっている。今回の数値実験では、空間解像度を T21L20 とした。これは鉛直方向には 20 層、水平方向については球面級数展開に三角波数切断 (triangular truncation) が施され Gaussian 格子に変換して約 5.6° 四方に相当する分解能を持っている。

表 3: AGCM によって算定された各大陸の平均年降水量 (mm year^{-1})。Legates [3] の推定値を比較に載せる。Globe は全球平均である。

RUN	Eur	Afr	Asia	N.A.	S.A.	Oc	Ant	Arc	NA	SA	Ind	NP	SP	Globe
S20	918	651	1059	1011	1222	492	251	374	913	663	1132	1635	1177	1062
S15	902	663	1068	1012	1219	555	261	382	901	663	1118	1611	1175	1058
O20	993	698	1053	1048	1154	552	249	393	918	654	1147	1629	1182	1069
Legates	758	751	706	743	1630	803	602	317	1128	798	1215	1692	1373	1137

Eur : Europe Afr : Africa Arc : Arctic Sea NA : North Atlantic Ocean
 N.A. : North America S.A. : South America SA : South Atlantic Ocean Ind : Indian Ocean
 Oc : Oceania Ant : Antarctica NP : North Pacific Ocean SP : South Pacific Ocean

表 4: AGCM によって算定された各大陸の平均年流出量 (Runoff) もしくは降水量-蒸発量 (P-E)。単位は面積あたりの水柱高 (mm year⁻¹) に換算してある。大気水収支法から推定された水蒸気収束量 ($-\nabla_H \cdot \vec{Q}$) や地上観測データからの推定値と比較している。領域の略称は表-3と同じ。

RUN	Eur	Afr	Asia	N.A.	S.A.	Oc	Ant	Arc	NA	SA	Ind	NP	SP	Globe
S20(Runoff)	183	140	328	203	287	83	0	0	0	0	0	0	0	67
S20(P-E)	178	140	325	239	283	80	229	246	-410	-298	-322	188	-11	0
S15(Runoff)	191	165	359	223	291	118	0	0	0	0	0	0	0	73
S15(P-E)	176	164	343	249	276	104	238	259	-417	-316	-339	171	3	0
O20(Runoff)	156	172	298	201	261	138	0	0	0	0	0	0	0	65
O20(P-E)	134	161	284	239	228	102	225	261	-409	-319	-282	205	-12	1
OkI et al. [7]	136	-100	235	263	415	54	112	185	-282	-193	-126	99	-64	0
沖ら [8]	195	4	244	318	773	24	130	208	-292	-305	-198	130	-109	0
B&R [9]	255	113	260	223	611	267	143	(B&R : Baumgartner and Reichel)						
Lvovitch [10]	273	140	281	258	578	222	157							
Korzun [11]	273	153	300	315	678	278	164							

表 5: AGCM によって算定された各流域の年平均水収支 (mm month⁻¹)。Legates の降水量や GRDC の流量データを ECMWF の客観解析データから算定した水蒸気フラックス収束量と組み合わせて用いた大気・流域水収支法による算定結果 (WB) と比較している。

River	Precipitation			Evaporation			Runoff			ΔW		
	S20	S15	WB	S20	S15	WB	S20	S15	WB	S20	S15	WB
Amazonas	1589	1563	2076	1096	1115	1534	494	465	1053	101(101)	87(87)	382
Zaire	1559	1638	1586	999	967	1501	556	663	365	118(118)	108(108)	124
Mississippi	1199	1168	894	1084	1031	712	110	129	184	91(91)	91(91)	104
Nile	517	546	578	457	484	531	61	64	149	45(45)	34(34)	74
Ob	867	890	460	755	746	330	124	175	134	182(117)	187(115)	140
Yenisei	844	829	423	705	704	195	155	158	222	165(83)	165(85)	120
Lena	912	870	404	619	626	215	297	265	215	139(16)	152(39)	139
Amur	1182	1232	558	903	922	384	275	320	178	99(42)	107(28)	62

2.2 数値実験の設定と実施

ここでは、地表面水文過程を若干違えた表-2の 3 通りについて変化させて数値実験を行なった。共通の条件は以下の通りである。

- 初期値は、CCSR で静止成層状態の大気から積分を始めた 10 年 run の結果。ただし、この積分は倍の解像度を持つ T42 で行なわれたので、単純に空間内挿して使用した。
- 海面水温や地表面アルベド、海氷厚さは前記 10 年 run と同様、季節変化する気候値が与えられた。すなわち、毎年同じ日には同じ分布となっている。
- 氷河域は固定され、そこでは海洋・水面と同様常に蒸発量は可能蒸発量に等しいとされた。
- 1 カ月を 30 日、1 年を 360 日とした。太陽入射もこれに応じて年変化する。

なお、初期値として利用した 10 年 run の地表面水文過程は S20 run と同じ条件であった。

実行は主に HP9000/715/100 (100 SPECint92、137 SPECfp92) というワークステーションで行ない、1 年分の積分に CPU time でほぼ 110 時間かった。計算経過は降水量、蒸発量、流出量などの地表面水文量については 1 日分ごとの積分値を出力し、その他大気予報変数の snap shot を 10 日分ごとに保存した結果、1 年分で約 100 MB に達した。東京大学生産技術研究所計算機室の好意で利用させていただいた HITACHI9000/735/125 (136 SPECint92、201 SPECfp92) では、ほぼ同様の計算が 75 時間程度で終了した。ちょうど SPECfp92 に比例する速度差である。T21 は格子間隔にして約 600 km と地表面水文過程を議論するにはかなり荒いが、例えば 2

倍の解像度にすると計算時間が約 10 倍、出力データ量も 4 倍にはなり、計算機資源の制限から現実的でないと思われるので T21 を選択した。

3. 結果と考察

3.1 大陸・海洋規模の水収支

各大陸・海洋ごとにそれぞれ集計した年降水量を表-3に示す。

全球平均 (Globe) はほぼ Legates の推定値と一致している。Legates の推定値は雨量計における蒸発や風による捕捉率の低下を考慮して補正されているため従来の推定値よりも高めであり、AGCM の結果は極めて良好であると言える。しかしながら細かく見ていくと、大陸ではヨーロッパ、アジア、北アメリカで多めに計算されており、逆にアフリカ、南アメリカやオセアニア、そして南極などで少なくなっている、ちょうど南北半球で差がある。海洋に関しては陸地に比べて差は少ないが、Legates の推定値に比べて多いのが北極海だけで、後はいずれも AGCM の方がやや少なめの計算値となっている。RUN 間の差はあまり顕著ではない。オセアニアで S20 が S15 や O20 よりも少なめになっているが、オセアニアでは年々変動が大きく算定されているので、積分期間が互いに異なりしかもまだ充分ではない今回の結果から早急に結論を出すことは難しい。

同様に各大陸・海洋ごとに集計した年流出量を表-4に示す。Oki et al. [7] と沖ら [8] は大気水収支による推定値、Baumgartner & Reichel、Lvovitch そして Korzun は地上観測データに基づく気候学的推定値 (以下気候値とする) である。

ヨーロッパや南アメリカでは AGCM の結果は気候値に比べると小さくなっている。アフリカについては大気水収支に基づく推定値が不十分であり、AGCM の結果は気候値と良く一致している。アジアはやや AGCM の推定値が大きい。北アメリカやオセアニアは推定値間の違いも大きい、AGCM の値が全般にやや小さめである。南極については、夏に数ミリの融雪による土壌水分への供給があるだけで流出がない。氷河による流出が今回の AGCM では考慮されていないので P-E に相当する分の積雪水量が年々増加していることになる。他の大陸でも同様に、流出量と P-E との差は土壌水分もしくは積雪水量の経年変化に寄与している。RUN 間の違いを見ると、予想される通り圃場容量が小さい S15 の方が S20 よりもやや多めの流出量となっている。海洋上については南太平洋を除けば良く対応しており、特に 1989-92 年の ECMWF 客観解析データに基づく沖ら [8] の算定値と AGCM の結果とはほぼ一致している。

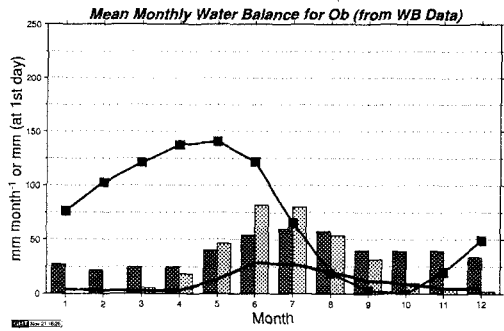


図 1: 観測値に基づいて算定した Ob 川の水文要素の平均的な季節変化。左側の濃い色の棒が降水量、右側の薄い色の棒が蒸発量、マークのない太い実線が流出量、そして■でマークされた線が陸水総貯留量を示す。

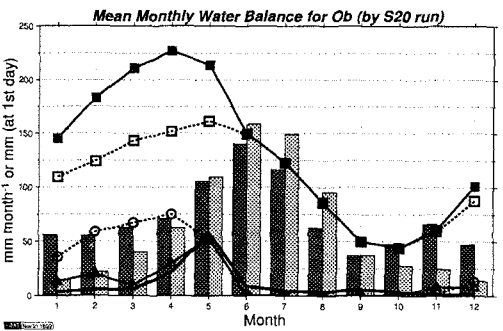


図 2: AGCM の S20 run によって計算された Ob 川の水文要素の平均的な季節変化。□のついた破線が土壌水分貯留量、○のついた破線が積雪水量、そして△のついた実線が融雪量を示す。その他は図-1と同じ。

3.2 流域水収支

次に、大陸上にいくつかの河川流域を区分し、それぞれについて AGCM で算定された水収支を集計した。年間水収支を表-5に示す。 ΔW は各月始めの陸水貯留量 (土壌水分+積雪水量) の平均的な年変化の最大値と最小値との差である。括弧内にはそのうちの土壌水分のみの年変化振幅を示す。参照用のデータとして、降水量は前節と同様 Legates [3] の推定値を、流出量としては Global Runoff Data Centre の月データを多年平均したものを用いた。蒸発量については、Legates の降水量推定値と European Centre for Medium-Range Weather Forecasts で作成された 1989 年-1992 年の 4 次元同化客観解析データから求めた水蒸気フラックス収束量 $-\nabla_H \cdot \vec{Q}$ とを組

み合わせた大気水収支法から推定した。土壌水分量年振幅 ΔW については水蒸気フラックス収束量と GRDC の流量より推定した陸水総貯水量の月単位年変化から算定した。

降水量については大陸ごとの集計と同様、北半球の河川で AGCM はかなり多めに計算しており、南半球の Amazonas 川では逆に少なめである。赤道付近を流れる Zaire 川や Nile 川では Legates の気候値と良く対応している。蒸発量についても大気水収支による気候値と AGCM 算定値との差も同様であり、結果として流出量は GRDC データに基づく平均値に近い値となっている。陸水貯留量の月単位年変化振幅 ΔW については Amazonas 川を除けば非常に良い一致を示している。Amazonas については、河道周辺の広大な低平地に流出水が貯留していて、大気-陸域水収支法ではこれも陸水貯留として算定されるのに対して、今回の AGCM では流出水は系外に直ちに排除されるものとしている点がこの差になっているものと考えている。

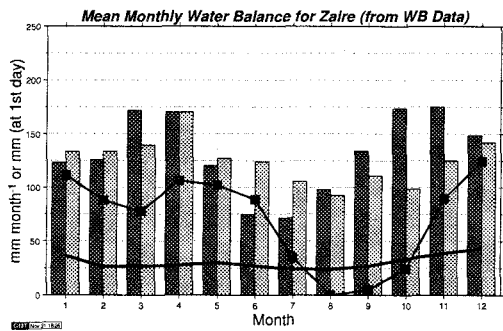


図 3: 観測値に基づいて算定した Zaire 川の水文要素の平均的な季節変化。

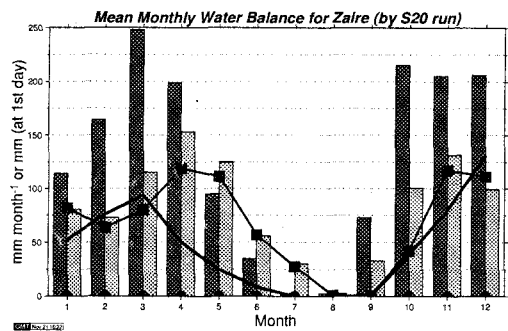


図 4: AGCM の S20 run によって計算された Zaire 川の水文要素の平均的な季節変化。

さらに、各水文要素の季節変化を検討する。観測データに基づいた算定値を Ob 川について示したのが図-1である。ここで、月単位の大気水収支法の適用に当たっては $-\nabla_H \cdot \vec{Q}$ の他に可降水量の時間変化 ($\frac{\partial W}{\partial t}$) を考慮している。また、大気-流域水収支法では陸水貯留量は相対値しか算定できないのでは便宜上最小値を 0 としている。一方、AGCM の計算値として S20 run の結果を示したのが図-2である。ちょうど積雪量の値程度 AGCM で計算された量の方がやや大きい、陸水貯留量の季節変化は大気-陸域水収支法で推定された値と極めて良く一致している。また、どちらの結果でも雪解けから夏にかけて降水量よりも蒸発量の方が多くなっているのが特徴的である。流出については、AGCM での計算値が融雪にともなう顕著なピークを 5 月に持つのに対して実際の観測値では 6-7 月にかけての緩やかな変化を示している。今回の AGCM による計算では河川による flow routing が考慮されていないため図-2では流域全体の流出を示している、この様な差が生じているものと考えられる。実際、河道による貯留と流下を適切に考慮することによって AGCM の算定値と実測値との対応は良くなる [12]。

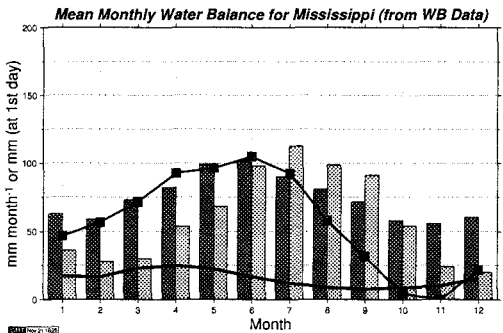


図 5: 観測値に基づいて算定した Mississippi 川の水文要素の平均的な季節変化。

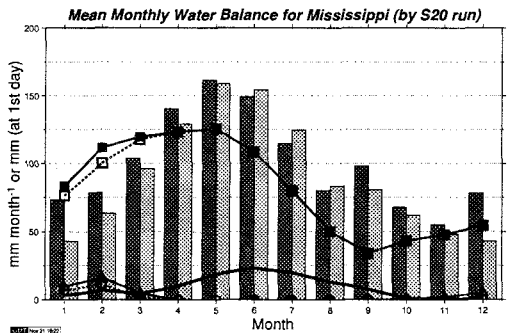


図 6: AGCM の S20 run によって計算された Mississippi 川の水文要素の平均的な季節変化。

次に、Zaire 川についての対応を図-3と図-4とに示す。Zaire 川では、AGCM による年降水量の算定値は Legates の推定値とほぼ等しかったが、図-3と図-4を比較してわかる通り、10 月から 4 月にかけてが非常に大きく、逆に 6-8 月が極端に少なくなってしまう。そのためか 6-8 月の流出量がほぼ 0 となってしまう、観測値とはかなり異なっている。それに関わらず陸水貯留量の季節変化が似ていることは注目に値する。

最後に Mississippi 川について同様に示したのが図-5と図-6である。AGCM による計算値の方が 4-5 月に降水量が多いにも関わらず、流出ピークは観測値が 4 月ごろであるのに対し、AGCM では 6 月ごろと遅くなっている。この原因は AGCM では 2 月に算定されている融雪のピークが実際よりも小さく、現実の融雪洪水ピークを AGCM では再現できないためではないかと考えられる。しかしながら位相に若干のずれがあるものの、陸水貯留量については AGCM の算定結果と大気-陸域水収支に基づく推定値とは良く対応しており、夏に蒸発量が降水量を上回る特徴も共通している。

4. おわりに

CCSR/NIES AGCM を数年分値積分し、その中で表現されているグローバルな水循環について調べた。特に、大流域ごとに調べた結果では、大気-流域水収支法で推定された陸水貯留量と AGCM で計算された土壌水分+積雪水量とで、その季節変化が良く対応していることが見出された。圃場容水量を全球一様に 200 mm から 150 mm にさせた場合、流出量の増加は認められたが、他の水文要素に及ぼす影響は積分期間の制約もあってはっきりとはわからなかった。

今後は、サブグリッドスケールの変動^[13]や植生、流域地形などが考慮できる様な地表面水文過程のパラメタリゼーションを組み込んで数値実験を行ない、より現実的な水文過程が再現できる様にしていきたい。それにあたっては、平均値だけではなく年々の変動や極値などにも注目し、将来的には GCM による予測結果に基づいて様々な計画策定が可能になれば素晴らしいと考えている。また、得られた結果を解釈するためには気候システムにおける多様なフィードバックループを理解することが必要であり、それには GCM を用いたパラメタのセンシティビティ試験とともに実際の観測データをグローバルに収集・作成することが極めて重要であろう。

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、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用なご意見や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] S. Manabe, J. Smagorinsky, and R. F. Strickler. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 93, pp. 769-798, 1965.
- [3] D. R. Legates and C.J. Willmott. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation. *Intl. J. Climatol.*, Vol. 10, pp. 111-127, 1990.
- [4] S. Yamada, S. Maeda, T. Kudo, T. Iwasaki, and T. Tsuyuki. Dynamical one-month forecast experiments with the JMA global prediction model. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 69, pp. 153-159, 1991.
- [5] 佐藤信夫. 新用語解説 (25) sib. 天気, Vol. 38, p. 202, 1991.
- [6] A. C. M. Beljaars, P. Viterbo, M. J. Miller, A. K. Betts, and J. H. Ball. A new surface boundary layer formulation at ECMWF and experimental continental precipitation forecasts (July 1993). Technical Report Vol.3, No.3, International GEWEX Project Office, 1993.
- [7] T. Oki, K. Musiak, H. Matsuyama, and K. Masuda. Global atmospheric water balance and runoff from large river basins. *Hydrol. Proces.*, 1994. in print.
- [8] 沖大幹, 虫明功臣, 松山洋, 増田耕一. 大気水収支と地球規模の水循環. 土木学会論文集, 1995. 投稿中.
- [9] F. Baumgartner and E. Reichel. *The World Water Balance : Mean Annual Global, Continental and Maritime Precipitation, Evaporation and Runoff*. Ordenbourg, München, 1975. 179pp.
- [10] M. I. Lvovitch. The global water balance. *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 54, pp. 28-42, 1973.
- [11] V. I. Korzun, editor. *World Water Balance and Water Resources of the Earth*, Vol. 25 of *Studies and Reports in Hydrology*. UNESCO, 1978.
- [12] 鼎信次郎, 西尾健, 沖大幹, 虫明功臣. 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. 水工学論文集, Vol. 39, , 1995. in this volume.
- [13] 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣. サブグリッドスケールの物理量分布が土壌の水-熱移動に与える影響. 水工学論文集, Vol. 39, , 1995. in this volume.