

JMA 89 モデルを用いた河川流出量の評価 (I)

— 積雲対流スキームによる流域水収支の比較 —

— 柳錦平*・千葉 長*・杉 正人**・隈 健一***・佐藤信夫****

River Runoff Estimation Simulated by the JMA89 Model (I)

— Basinwide Water Balance Compared between Kuo and PAS Schemes —

By

Kimpei ICHIYANAGI*, Masaru CHIBA*, Masato SUGI**,
Ken-ichi KUMA*** and Nobuo SATO****

**Atmospheric and Hydrospheric Science Division,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

***Climate Research Department, Meteorological Research Institute, Japan*

****Numerical Prediction Division, Japan Meteorological Agency, Japan*

*****Office of Meteorological Satellite Planning, Japan Meteorological Agency, Japan*

Abstract

The results of a 10-year integrations of the JMA89 global model with the Kuo scheme and the prognostic Arakawa-Shubert scheme (PAS) were compared. In global, basinwide water balance simulation by the PAS scheme was more realistic than that of the Kuo scheme, however river runoff by both schemes were overestimated as compared with actual observation. Seasonal variation in river runoff simulated by an AGCM was largely different from that observed on the points of time-lag between precipitation and river runoff and amplitude. The cause for these discrepancies was attributed to lack of river channel residence time in land surface model.

Key words: Atmospheric general circulation model, Simple-Biosphere model, River runoff, Water balance in major river basins, Deep convective scheme

1. はじめに

近年は、大気大循環モデル (AGCM; Atmospheric General Circulation Model) における陸面過程の重要性が認識され、様々な地表面状態を考慮した陸面過程モデルを組み込む研究が多く行われている。例えば Sato *et al.* (1989) はメリーランド大学の AGCM に SiB (Simple

-Biosphere) モデルを組み込むことによって、陸面の熱収支がより現実的になったことを報告している。また Betts *et al.* (1996) は、AGCM の計算結果と北アメリカで行われた特別観測 (FIFE; First International Satellite Land Surface Climatology Project Field Experiment, BOREAS; Boreal Ecosystem Atmosphere Study) のデータを比較して、異なる時空間スケールでの土壌水分、蒸発、降水の相互作用や、初期値の重要性について議論している。しかし、このような特別観測のデータはその期間内での評価であり、モデルを長期積分した結果の評価には使用できない。そこでモデルの平均値を評価するためには、長期間にわたって観測が行われている河川の流出量データが利用される。例えば、Russel and

*防災科学技術研究所

気圏・水圏地球科学技術研究部

**気象研究所 気候研究部

***気象庁 数値予報課

****気象庁 気象衛星室

Miller (1990) や Sausen *et al.* (1994) は AGCM を使って河川流出量を再現する際に、Global Runoff Data Centre (GRDC) の観測データと比較して、土壌タイプや植生・地形勾配などを使ったパラメタリゼーションを行っている。また Oki *et al.* (1995) は、大気中の水蒸気量まで含めた大気流域水収支から河川流出量の推定を行い、同じく GRDC のデータと比較している。

本研究では AGCM の陸面モデルを評価するために、大河川の流域ごとに降水量と河川流出量を計算し、それらを観測値と比較した。また、AGCM の積雲対流パラメタリゼーションは降水量分布を変化させるのみならず、地表面に到達する太陽放射を通して蒸発散量を変化させ、さらには河川流出量にも大きな影響を及ぼす (Ichiyangi *et al.*, 1997)。そこで、2つの積雲対流スキームを用いた実験を行い、流域単位での降水量と河川流出量の違いについても考察した。

2. 数値実験及び観測データ

本研究に使用した AGCM (JMA 89) は、気象庁において現業用の予報モデルとして使われていたものを、長期間積分し易いように水平分解能を T42 にしたものである。積雲対流スキームは Kuo 方式の他に、PAS (Prognostic Arakawa-Shubert) 方式を用いた。同じ初期条件から、両スキームによる実験を 10 年間実行し、その平均値について解析を行った。陸面水文過程には SiB モデル (佐藤, 1989) が使われている。モデルの河川流域は、GRDC のデータから面積の大きい 27 河川を選定し、地形と流路を考慮して流域区分を行った。各河川の流出量は流域全体ではなく、流量観測地点より上流にある格子点の総和として計算した。

降水量の観測値は、NOAA Baseline Climatological Datasets 中の Monthly Station Precipitation Data を用い、河川流出量と同じく、流域ごとに全観測点を抽出して平均した。河川流出量の観測値は GRDC データを用い、欠測期間を除いて月平均した。ただし観測期間が短い河川については、気候学的な平均値を表していない可能性もある。

3. 結果および考察

3.1 全球分布

AGCM に用いられている対流スキームは、全球規模での降水量分布を変化させ、さらに陸域の水循環にも影響を与える。図 1 は陸域水循環の各成分について、Kuo 方式と PAS 方式の違いが 100 mm/year 以上の地域を示したものである。

対流性の降水量 (図 1 a) は、基本的には海洋域で PAS 方式の方が多く、陸域で Kuo 方式の方が多く。しかし、アマゾンとアフリカ西部では、陸域でも PAS 方式の方が降水量が多い。一方、大規模凝結による降水量 (図 1 b) は、海洋域で Kuo 方式の方が多く、陸域では顕著な違いは見られない。しかし、アンデス山脈・アフリカ東部・チベットでは、Kuo 方式の方が降水量が多い。蒸散

量と遮断蒸発量 (図 1 c) は、アマゾン・アフリカ西部・チベットでは、対流性の降水量と同じく PAS 方式の方が多く。逆に、アフリカ東部やオーストラリア東岸では、Kuo 方式の方が多く。裸地面からの蒸発量 (図 1 d) は、インド西部と中国・オーストラリア内陸部では Kuo 方式の方が多く、PAS 方式の方が多く地域は、ほとんど見られない。蒸発量は両方とも、熱帯域では Kuo 方式と PAS 方式の違いが大きい地域が多いが、高緯度域ではあまり違いが見られない。土壌水分量 (図 1 e) と河川流出量 (図 1 f) は、対流性の降水量とほとんど同じ分布をしており、アフリカ東部とアジアモンスーン地域では Kuo 方式の方が多く、アマゾンとアフリカ西部で PAS 方式の方が多く。土壌水分量と河川流出量の分布は似ているが、アフリカ中部とチベットの一部分で Kuo 方式の方が多く地域の分布が異なる。

以上のように、降水量と河川流出量の分布は非常によく似ており、陸域へのインプットである降水量によって、河川流出量がほぼ決定される地域が多いことを示している。しかし、チベットでは対流性降水は PAS 方式の方が多く、河川流出量は Kuo 方式の方が多く、また、オーストラリアは対流性降水は Kuo 方式の方が多く、河川流出量は顕著な違いは見られない。これらの地域では、単に入力としての降水量が違うだけでなく、陸域の水循環が大きく変化していることが推測される。

3.2 流域水収支

このような分布の違いが、どの程度現実を再現しているのかを評価するために、大河川流域の流域水収支を計算した。GRDC より選定した 27 河川について、流域内の降水量と河川流出量を平均し、それぞれを観測値と比較した。観測値およびモデルの計算結果を表 1 に示す。

年降水量の 27 河川の合計値は、観測値では 21,035 mm/year に対して、Kuo 方式では 23,023 mm/year、PAS 方式では 20,581 mm/year となる。同様に、年河川流出量の 27 河川の合計値は、観測値では 8,149 mm/year に対して、Kuo 方式では 11,555 mm/year、PAS 方式では 9,511 mm/year となる。年降水量については、両スキームともに観測値に近いが、年河川流出量については両方式ともに、観測値よりも過大に評価している。両方式を比較すると、年降水量も年河川流出量もともに、PAS 方式の方が観測値に近い。しかし流出率 (河川流出量/降水量) を計算すると、観測値では 0.36 に対して、Kuo 方式では 0.44、PAS 方式では 0.46 となる。GRDC (1996) によると、流出率は 0.33~0.38 と見積もられており、観測値の 0.36 は妥当な値である。しかし、モデルの結果は河川流出量を過大評価しているため、流出率はかなり大きい。Kuo 方式の方が観測値に近いのは、流域面積の大きい Amazonas の河川流出量を、過小に評価していることが原因である。

次に、各河川流域ごとに降水量と河川流出量を、観測値と比較する。表 1 より Amazonas, Huanhe などでは、年降水量も年河川流出量もともに、Kuo 方式よりも PAS 方式の方が観測値に近い。このように降水量と対応

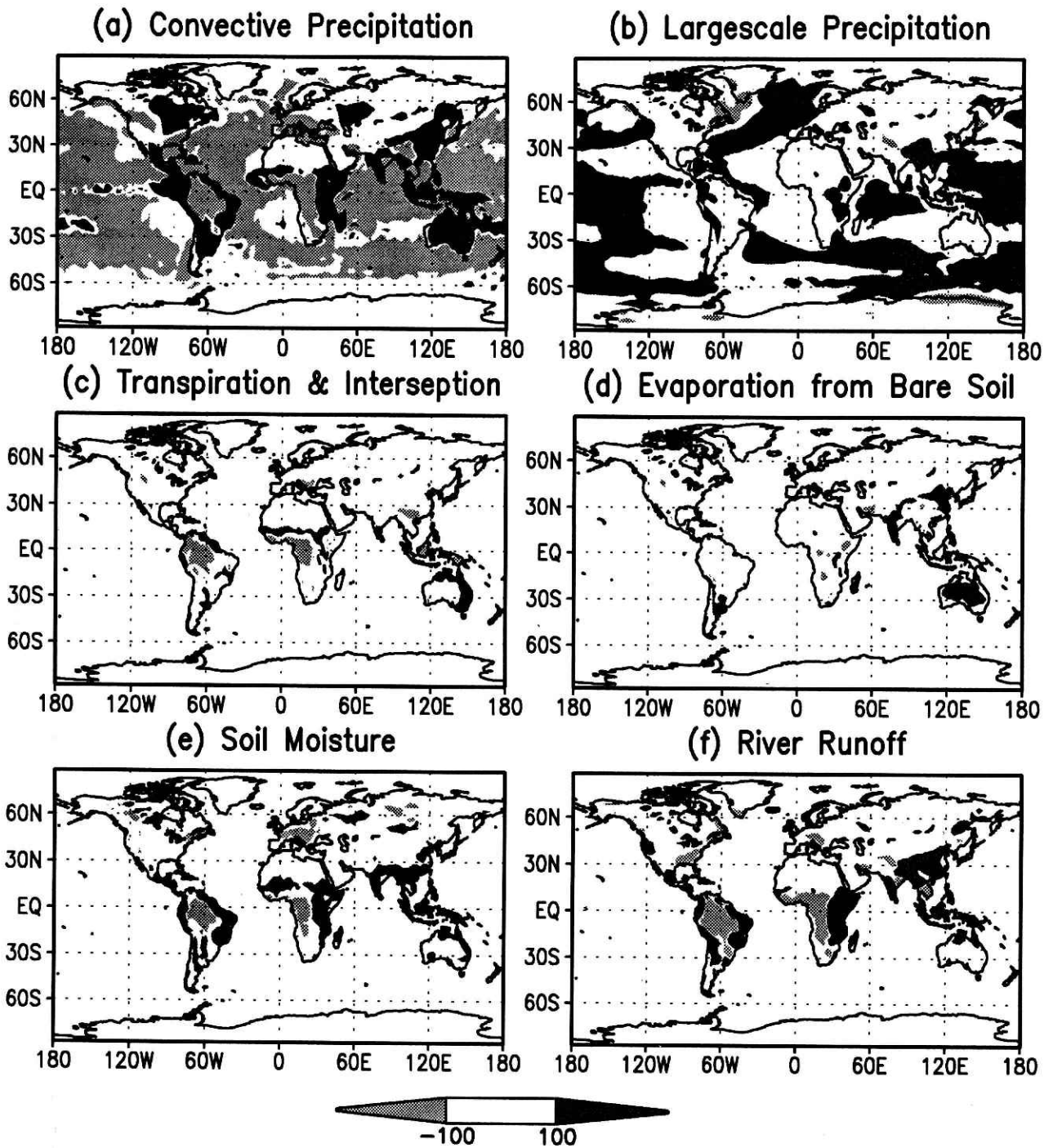


図1 Kuo方式とPAS方式の水循環の比較(Kuo-PAS)
 (a) 対流性の降水量, (b) 大規模凝結による降水量, (c) 蒸散量と遮断蒸発量, (d) 裸地面からの蒸発量, (e) 土壌水分量, (f) 河川流出量

Fig. 1 Surface hydrology between Kuo and PAS schemes (Kuo-PAS).
 (a) Convective precipitation, (b) Large scale precipitation, (c) Transpiration and interception, (d) Evaporation from bare soil, (e) Soil moisture, (f) River runoff.

した河川流出量の変化は、流域へのインプットである降水量が変化したことが原因と考えられる。しかし反対に、Niger, Parana などでは、年降水量は Kuo 方式の方が観測値に近いが、年河川流出量は PAS 方式の方が観測値に近い。また、それとは逆に Indus, Zaire などでは、年降水量は PAS 方式の方が観測値に近いが、年河川流出量は Kuo 方式の方が観測値に近い。これらのように、降水量と河川流出量の変化が一致していない河川流域では、降水量の変化では説明できない。

さらに、27 河川の降水量と河川流出量を観測値と比較し、図 2 に示す。Kuo 方式では降水量も河川流出量とともに、観測値との差が大きく、ばらつきも大きい。一方、PAS 方式では降水量は観測値とほぼ一致している。しかし河川流出量については、ほとんどが観測値よりも大きく、ばらつきが大きい。このように各河川流域ごとに見ても、Kuo 方式よりも PAS 方式の方が、降水量も河川流出量も観測値に近いことが明らかとなった。

3.3 季節変化

各河川流域の降水量と河川流出量の季節変化を、図 3 に示す。降水量については、モデルの季節変化は観測値に近い河川流域が多い。とくに流域面積の大きい河川では、両スキームともにモデルの季節変化は、観測値とよく一致している。しかし河川流出量については、観測値よりも季節変化の振幅が大きかったり、ピークがずれている河川流域が多い。

Amazonas では、モデルの降水量は観測値に近い季節変化をしており、とくに PAS 方式は観測値とよく一致している。しかし、モデルの河川流出量は降水量と同じ時期にピークがあるが、観測値は降水量よりも 3 ヶ月ほど遅い。このように流域面積の大きな河川で、河川流出量のピークが観測値よりも早く表れる原因としては、流域内の各格子から流量観測点までの流路を流れる時間、つまり河道貯留の滞留時間が考慮されていないことが挙げられる。また、Zaire, Paranaなどは、モデルの降水量は観測値に近い季節変化をしているが、モデルの河川流出量は観測値に比べて振幅が非常に大きい。現実の河川では、各支流から流量観測点までの流下時間がそれぞれ異なるために、河川流出量は平均化され振幅が小さくなる傾向がある。モデルの河川流出量の振幅が大きい原因としては、流路が考慮されていないために、河川流出量が平均化されていないことが挙げられる。

それに対して、Brahmaputra ではモデルの降水量も河川流出量も観測値に近い季節変化をしている。この流域は、流域面積が小さく地形勾配が急峻であり、河道貯留の影響が少ないと推定される。そのため、河川流出量の季節変化は観測値にほぼ等しい。また、積雪域の Yenisei, Lena では、降水量の季節変化は観測値とほぼ等しく、河川流出量の季節変化も融雪時の急激な増加が見られる。これらの河川では SiB モデルによって、融雪がうまく再現されていることを示している。つまり、河川流

表 1 大河川流域の降水量および流出量

Table 1 Annual mean precipitation and river runoff in major river basins.

River Name (Region)	Runoff Observation		Precipitation (mm/yr)			Runoff (mm/yr)		
	(km ²)	(years)	NOAA	Kuo	PAS	GRDC	Kuo	PAS
Amazonas (S. America)	4640300	56	2197	1355	2110	1053	491	990
Zaire (Africa)	3475000	81	1527	1052	1331	349	412	459
Ob (Russia)	2949998	55	440	433	303	134	205	151
Yenisei (Russia)	2440000	49	482	493	471	229	252	236
Lena (Russia)	2430000	50	347	413	370	216	218	207
Parana (S. America)	1950000	80	1172	1191	913	268	582	429
Amur (Russia)	1730000	52	467	652	561	150	248	237
Changjiang (Asia)	1705383	4	851	1988	1518	465	1370	905
Mackenzie (N. America)	1570000	19	346	478	469	168	187	184
Volga (Russia)	1360000	106	534	628	457	188	276	222
Missouri (N. America)	1357677	92	580	462	496	54	140	147
Niger (Africa)	1000000	29	450	217	39	34	50	26
Murray (Australia)	991000	20	534	426	112	8	31	21
Zambeze (Africa)	940000	4	800	945	991	112	404	396
Indus (Asia)	832418	7	583	207	304	86	93	184
Danube (Europe)	807000	64	749	573	795	253	153	264
Huanhe (Asia)	688421	4	408	970	530	56	511	211
Colombia (N. America)	631960	4	432	584	627	4	365	313
Colorado (N. America)	613830	111	329	296	245	280	159	102
Dniepr (Russia)	463000	33	576	564	552	101	214	202
Brahmaputra (Asia)	405000	9	1507	1810	1270	1541	1183	643
Northern Dvina (Russia)	348000	103	550	629	534	302	320	271
Xijiang (Asia)	329705	8	1427	2010	1664	681	1038	657
Blue Nile (Africa)	325000	71	929	2137	1050	150	1542	735
Araguaia (S. America)	320290	4	1677	1327	1439	604	444	596
Fraser (N. America)	217000	73	455	838	917	396	504	551
Euphrates (Asia)	114000	4	684	345	513	269	163	172
Sum	34634982		21035	23023	20581	8149	11555	9511
Runoff Ratio (Runoff/Precipitation)						0.36	0.44	0.46

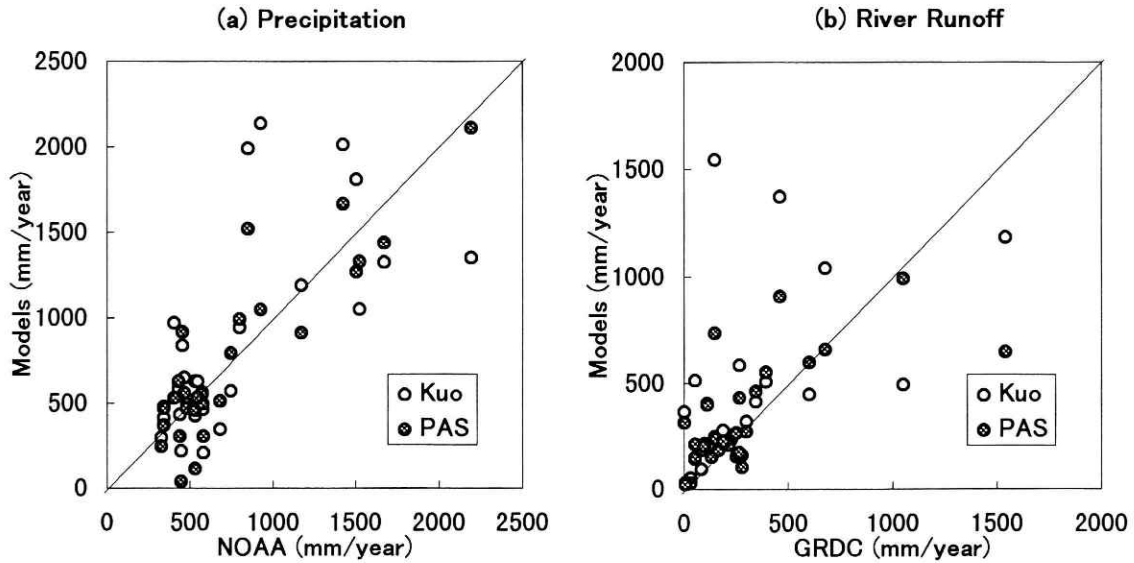


図2 モデルと観測値の降水量と河川流出量の比較
(a) 降水量, (b) 河川流出量

Fig. 2 Precipitation and river runoff compared between AGCM and observation.
(a) Precipitation, (b) River runoff

速が早く河道貯留の滞留時間が短いと推定される河川では、河川流出量の季節変化は適切に表現されている。

しかし、ほとんどの河川でモデルの河川流出量は、観測値よりも過大評価である。とくにピーク時において、モデルと観測値との差が大きい。今回の解析ではモデルの河川流出量を流域内の各グリッドの平均値で表現しており、各グリッドから瞬時に流量観測点まで到達したことになる。そのため、河道の流下時間を考慮すれば、ある程度は河川流出量が平均化され、振幅は改善されると推定される。

4. まとめ

JMA 89 モデルを用いて大河川の流域水収支を解析した結果、年降水量と年河川流出量は Kuo 方式よりも PAS 方式の方が観測値に近い。しかし、モデルの結果は河川流出量を過大評価しているため、流出率は観測値よ

りもかなり大きい。また流域面積の大きい河川では、降水量と河川流出量の位相の遅れや、河川流出量の振幅の大きさが観測値と大きく異なる。この原因として、モデルの河川流出量を評価する際に河道貯留の滞留時間を考慮していないことが挙げられる。今後はモデルの流域内に流路を構築し、河川流出量を適切に評価する必要がある。

謝辞

東京大学生産技術研究所の虫明研究室には GRDC のデータを使わせて頂きました。その際、東京都立大学理学部の松山洋助手と、東京大学生産技術研究所の仲江川敏之助手に便宜を図って頂きました。防災科学技術研究所の飯塚聡研究員と金田昌樹研究員には、本稿をまとめるにあたり適切なアドバイスを頂きました。ここに感謝いたします。

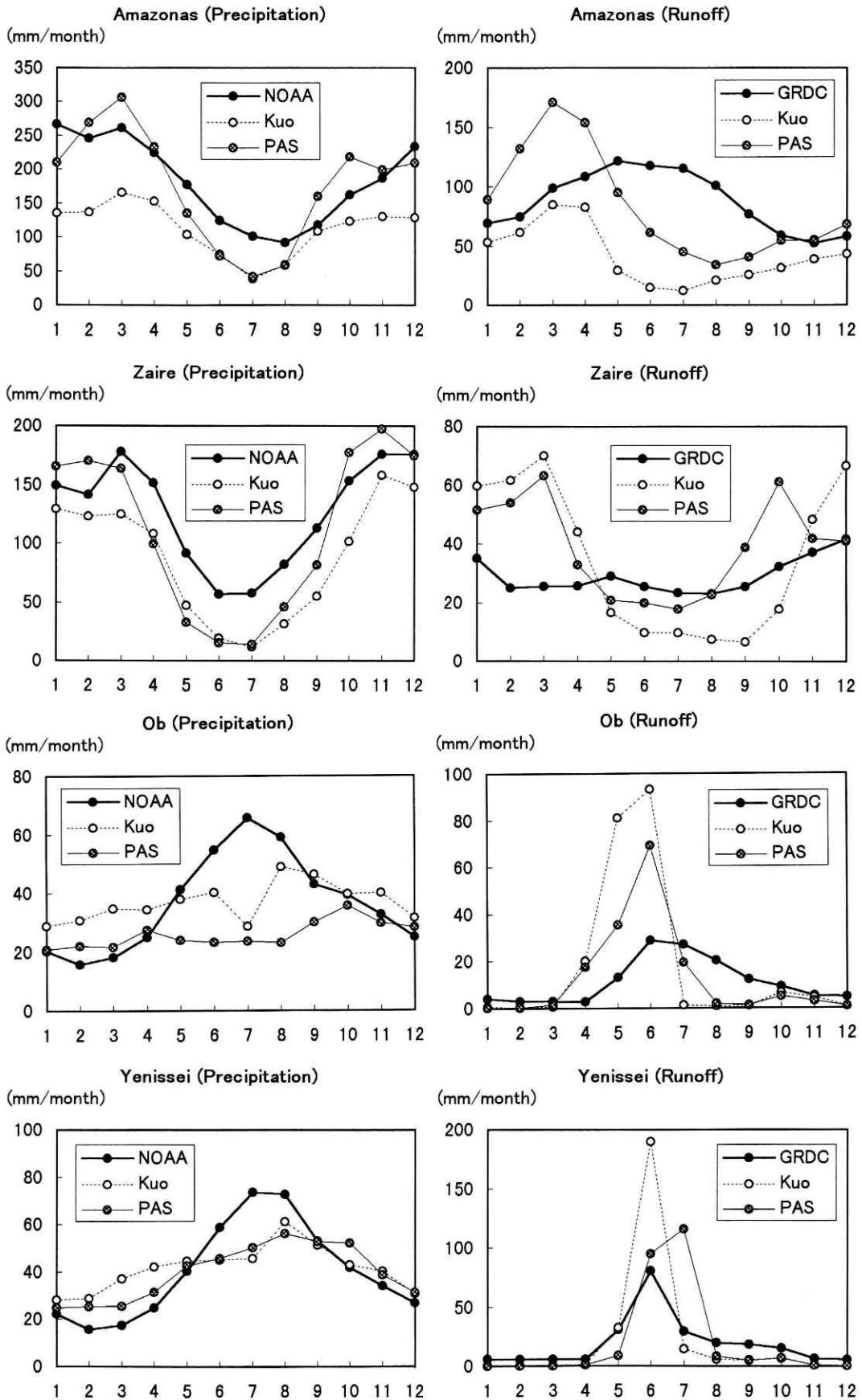


図3-1 降水量と河川流出量の季節変化 (Amazonas, Zaire, Ob, Yenissei)

Fig. 3-1 Seasonal variation of precipitation and river runoff. (Amazonas, Zaire, Ob, Yenissei)

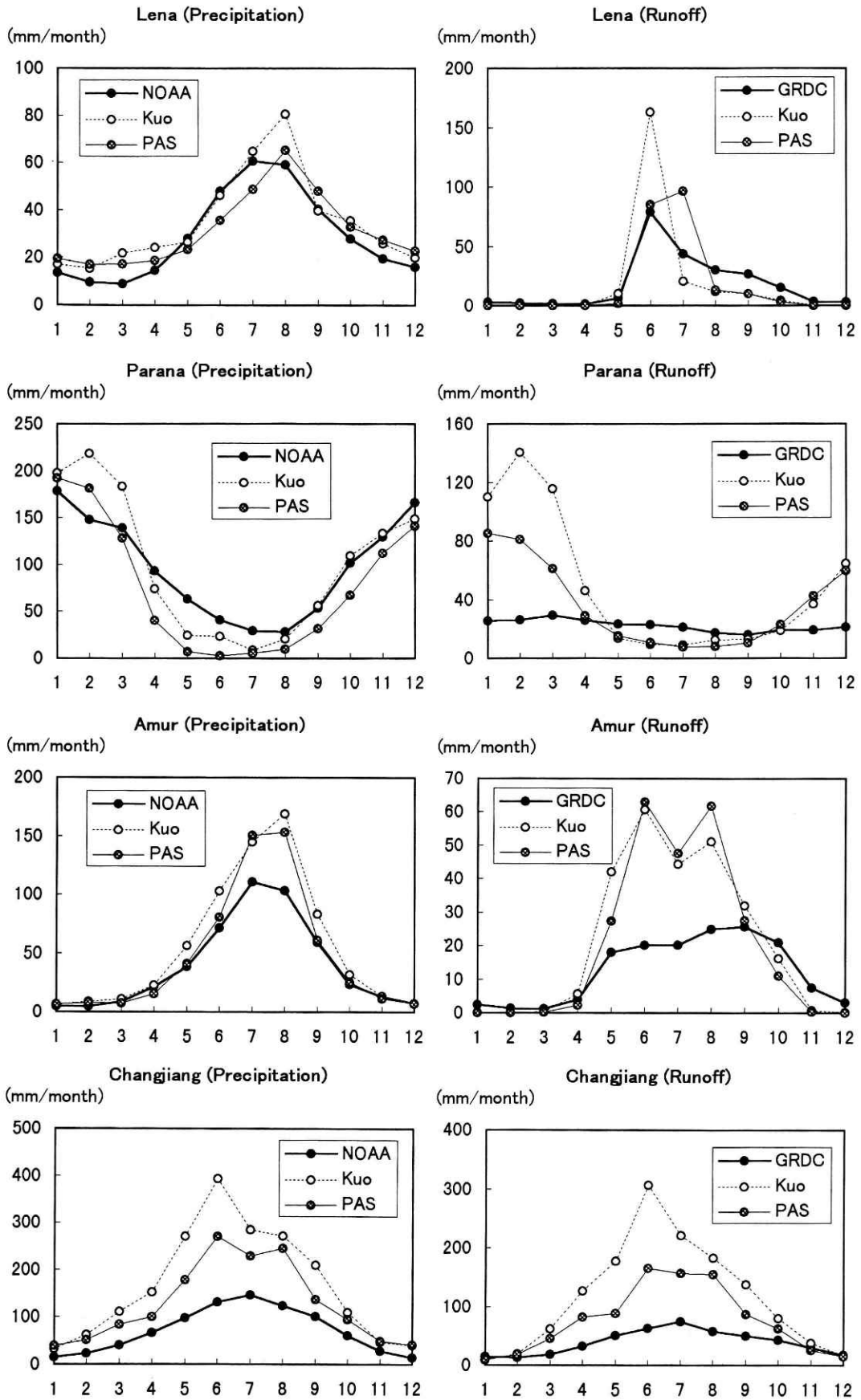


図3-2 降水量と河川流出量の季節変化 (Lena, Parana, Amur, Changjiang)

Fig. 3-2 Seasonal variation of precipitation and river runoff. (Lena, Parana, Amur, Changjiang)

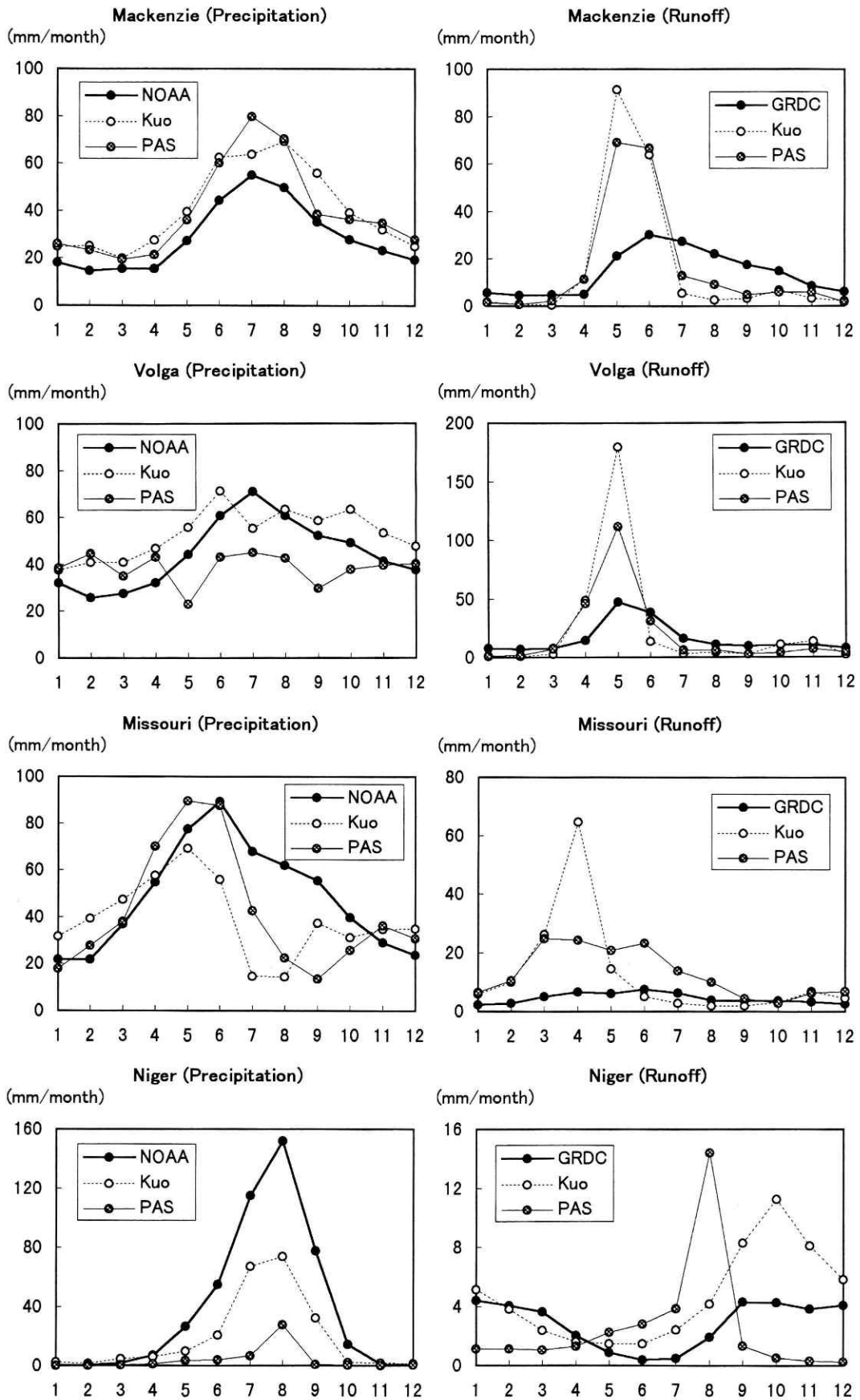


図3-3 降水量と河川流出量の季節変化 (Mackenzie, Volga, Missouri, Niger)

Fig. 3-3 Seasonal variation of precipitation and river runoff.
(Mackenzie, Volga, Missouri, Niger)

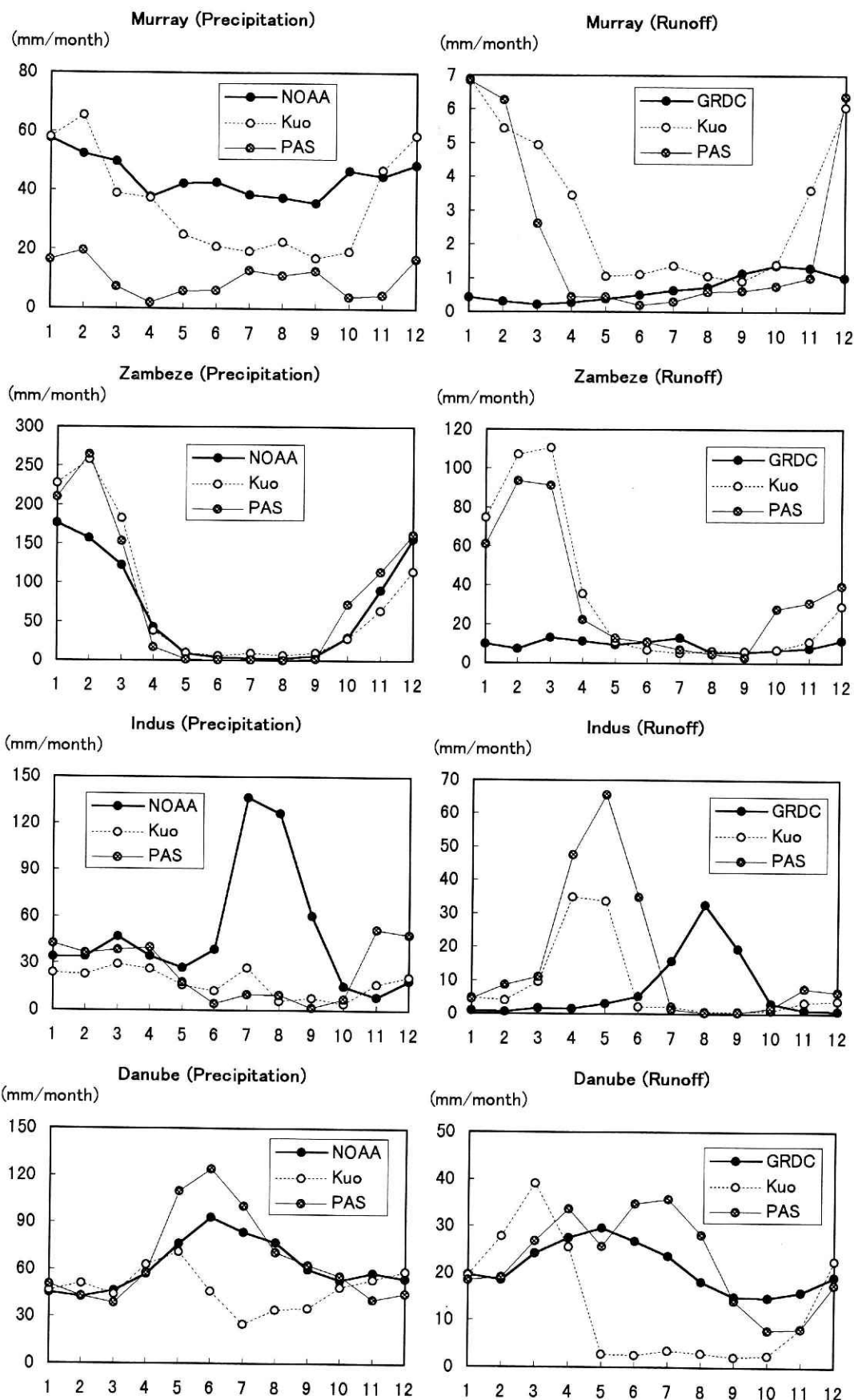


図3-4 降水量と河川流出量の季節変化 (Murray, Zambeze, Indus, Danube)

Fig. 3-4 Seasonal variation of precipitation and river runoff. (Murray, Zambeze, Indus, Danube)

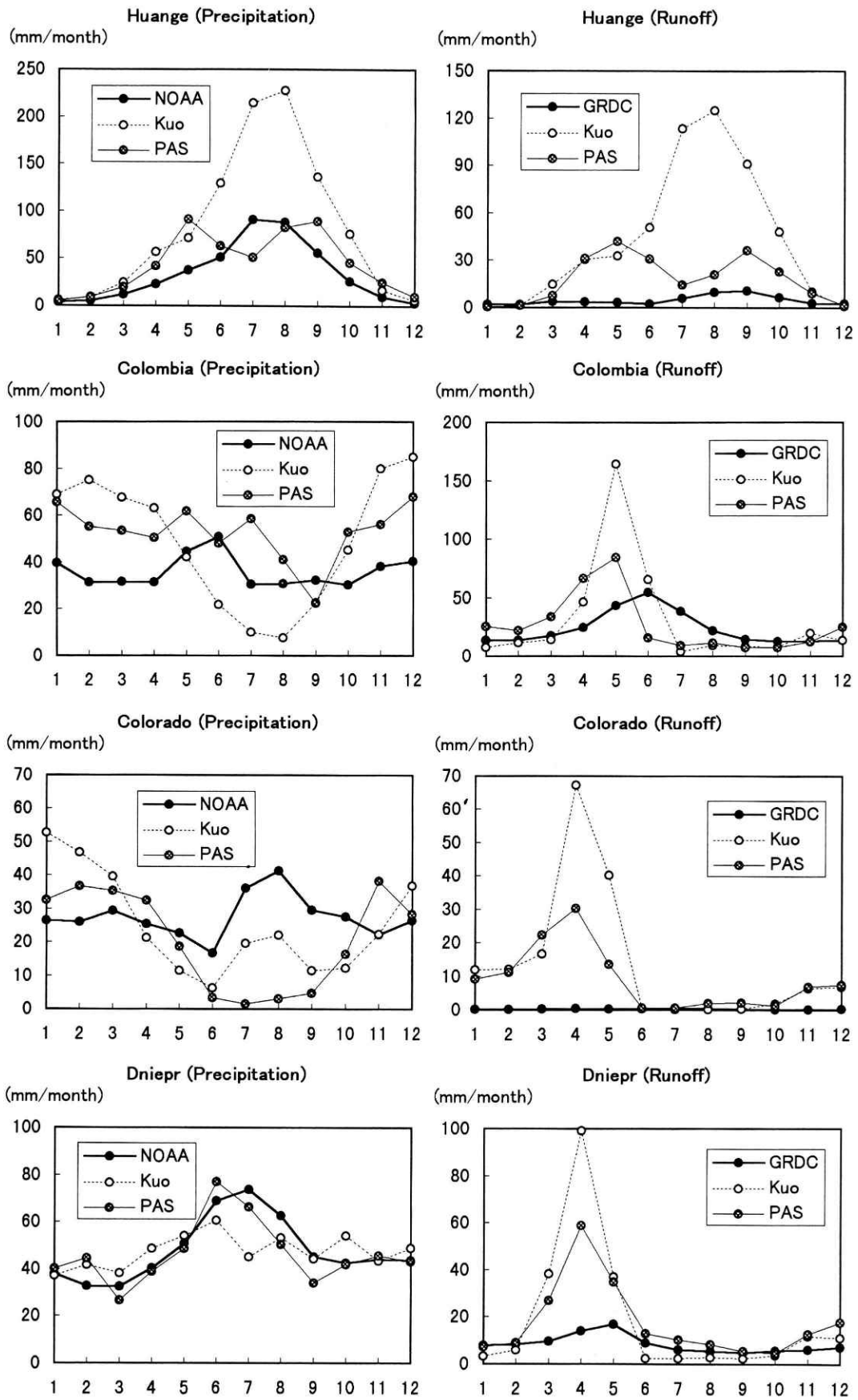


図3-5 降水量と河川流出量の季節変化 (Huanhe, Colombia, Colorado, Dniepr)

Fig. 3-5 Seasonal variation of precipitation and river runoff. (Huanhe, Colombia, Colorado, Dniepr)

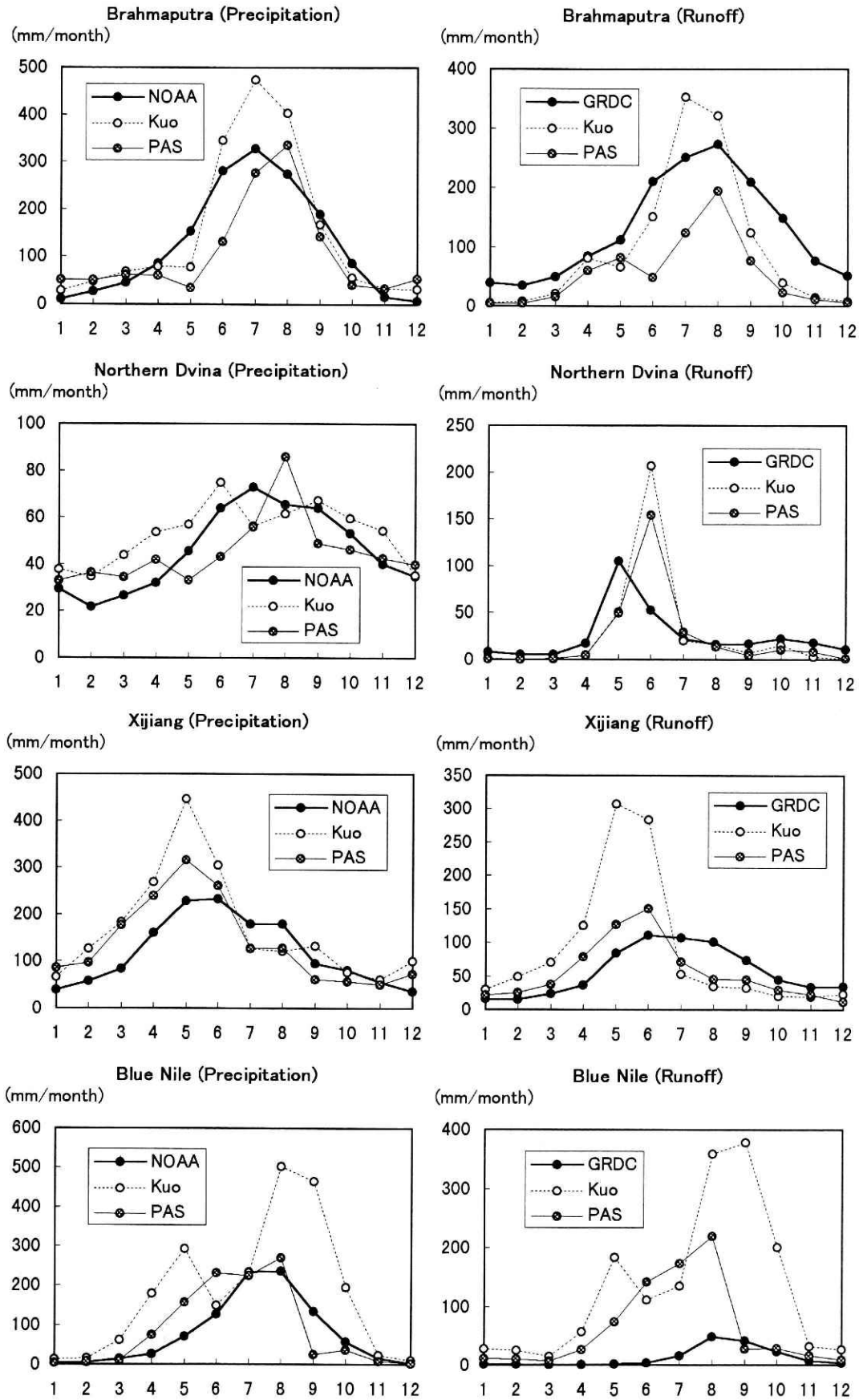


図3-6 降水量と河川流出量の季節変化 (Brahmaputra, Northern Dvina, Xijiang, Blue Nile)

Fig. 3-6 Seasonal variation of precipitation and river runoff. (Brahmaputra, Northern Dvina, Xijiang, Blue Nile)

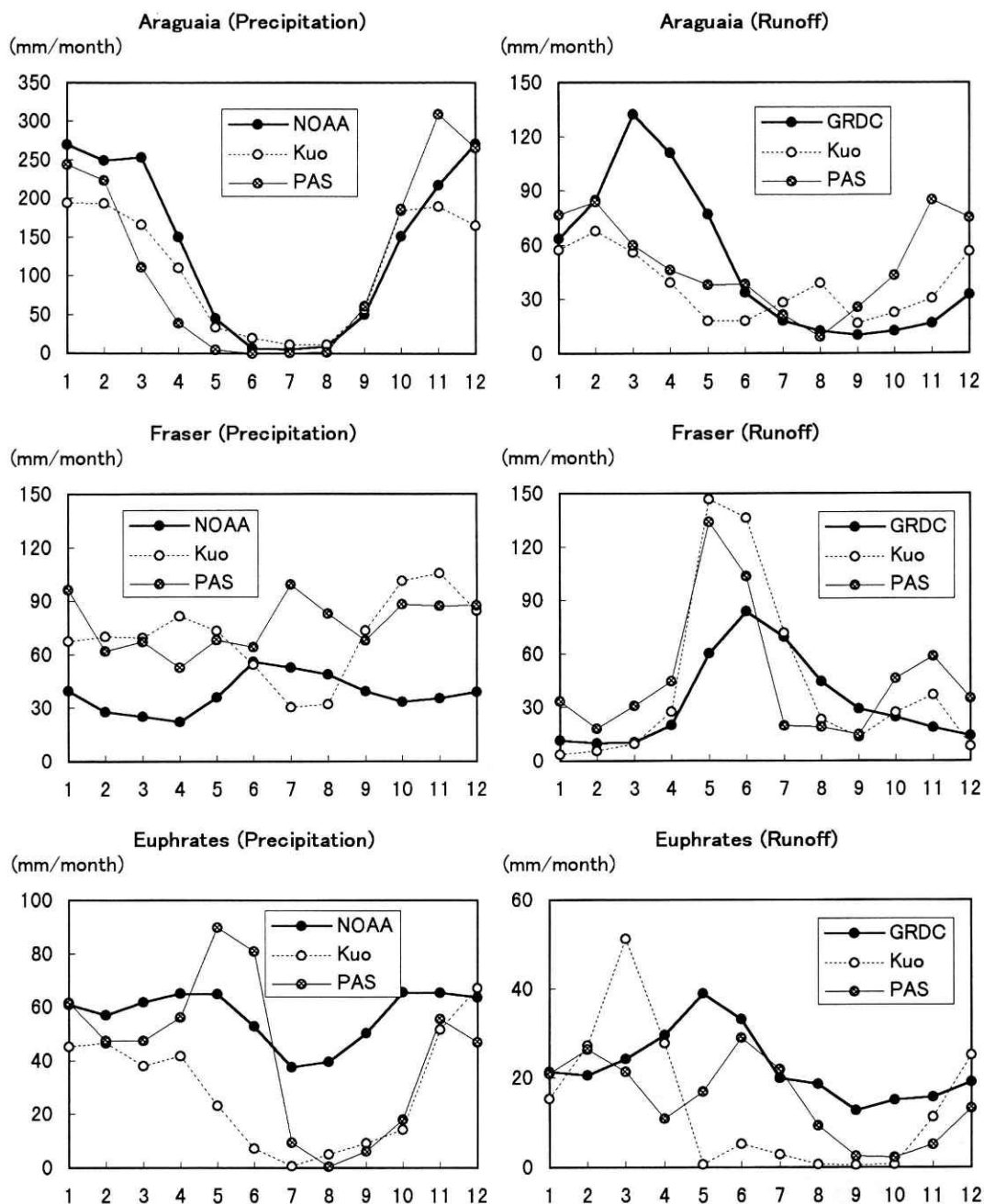


図3-7 降水量と河川流出量の季節変化 (Araguaia, Fraser, Euphrates)

Fig. 3-7 Seasonal variation of precipitation and river runoff. (Araguaia, Fraser, Euphrates)

参考文献

- 1) Betts, A. K., J. H. Ball, A. C. M. Beljaars, M. J. Miller and P. Viterbo (1996): The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives., *J. Geophys. Res.*, **101**, 7209-7225.
- 2) GRDC (1996): Freshwater fluxes from continents into the world oceans based on data of the global runoff database. GRDC Report No. 10, Koblenz, Germany.
- 3) Ichiyanagi, K., M. Chiba, M. Sugi, K. Kuma and N. Sato (1997): Comparative study of water balance in Asia between Kuo and PAS Schemes simulated by the JMA89 Model. Proceedings of the International Symposium on Hydro-Environment in Asia, CEReS, Chiba Univ., Japan, 69-74.
- 4) 松山 洋・沖 大幹(1992): 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* **5**, 65-70.
- 5) Oki, T., K. Musiak, H. Matsuyama, and K. Masuda (1995): Global atmospheric water balance and runoff from large river basins. *Hydrol. Process.*, **9**, 665-678.

- 6) Russell, G. L. and J. R. Miller (1990): Global river runoff calculated from a global atmospheric general circulation model. *J. Hydrol.*, **117**, 241-254.
- 7) 佐藤信夫(1989): 生物圏と大気圏の相互作用. 数値予報課報告別冊第35号, 4-72.
- 8) Sato, N., P. J. Sellers, D. A. Randall, E. K. Schneider, J. Shukla, J. L. Kinter, Y-T. Hou and E. Albertazzi (1989): Effects of implementing the Simple Biosphere model in a General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2757-2782.
- 9) Sausen, R., S. Schubert and L. Dumenil (1994): A model of river runoff for use in coupled atmosphere-ocean models. *J. Hydrol.*, **155**, 337-352.

(原稿受理: 1997年11月12日)

要 旨

Kuo方式とPAS方式を比較するため, JMA 89モデルをそれぞれ10年間積分し, 大河川の流域水収支を解析した. その結果, 年降水量と年河川流出量はKuo方式よりもPAS方式の方が, 観測値に近いことが明らかとなった. しかし, モデルの結果は河川流出量を過大評価しているため, 流出率は観測値よりもかなり大きい. また流域面積の大きい河川では, 降水量と河川流出量の位相の遅れや, 河川流出量の振幅の大きさが観測値と大きく異なる. この原因として, モデルの河川流出量を評価する際に河道貯留の滞留時間を考慮していないことが挙げられる. 今後はモデルの流域内に流路を構築し, 河川流出量を適切に評価する必要がある.

キーワード: 大気大循環モデル, SiB, 河川流出量, 流域水収支, 積雲対流スキーム