

力学的アンサンブル手法による熱帯アジアモンスーン地域の河川流量の潜在的季節予測可能性

A STUDY OF POTENTIAL PREDICTABILITY OF
SEASONAL PREDICTION OF RIVER DISCHARGES BASED ON
A DYNAMICAL ENSEMBLE METHOD

仲江川 敏之¹, 保坂征宏²

Tosiyuki NAKAEGAWA and Masahiro HOSAKA

¹正会員 博士(工学) 気象研究所 主任研究官(〒305-0052 つくば市長峰1-1)
²非会員 修士(理学) 気象研究所 主任研究官(〒305-0052 つくば市長峰1-1)

Potential predictability of seasonal mean river discharges is investigated based on an offline river flow model forced with outputs obtained from an SST-forced ensemble seasonal atmospheric forecast using a global climate model. The ensemble consists of six-member integrations with different atmospheric initial conditions with the same sea surface temperature. The variance ratio based on the analysis of the variance is used as an index of the potential predictability. The potential predictability of the river discharges in the selected three river basins of tropical Asian Monsoon regions is largely higher than that of the net water flux into the ground ($P - E$). This is responsible for river discharges that is obtained by integration of the surface and subsurface runoff along the river routing network of a given subbasin area since the integration of $P - E$ over a given subbasin area has a minor influence on the potential predictability.

Key Words : river discharge, seasonal forecast, river routing network, potential predictability, Asian monsoon

1. はじめに

ある地点における河川流量は、その地点で定義される流域内の水文過程水フラックスを積分した結果と考えられる。流域水収支法による蒸発量算定、大気－陸面結合水収支法による大陸河川での陸水総貯留量算定¹⁾や、陸面過程モデルの河川流量による検証²⁾などは、河川流量が積分量であるという点をうまく活用している。一方、Depth-Area-Duration 解析によれば流域面積が大きいほど平均降水量は少なくなり、その結果、河状係数にも同じ傾向がある³⁾。これは、河川流量が面積平均として平均化されることに加えて、河道網に沿った積分の結果、それ以上の平均化作用をもたらすことを意味している。即ち、前者は流域界という流域特性から得られるものであり、後者は更に河道流下過程の特性から得られるものである。

降水量など水資源量に関係する量は、季節予測が難しいことが知られている^{4),5)}。上述の河道流下過程による平滑化は、ランダムな変動を小さく抑えることができる。季節平均河川流量は流域面積が大きいほど、予測が容易になることが期待される。しかし、季節平均という時間平均操作がすでに行われていたり、大気現象と

流域のスケールの相対的な大きさなども関わってくるので、必ずしも予測精度を上げるとは限らない。

そこで本研究では、全球大気モデルを用いた力学的なアンサンブル長期積分実験結果を全球河川モデルに入力として与えるオンライン実験を実施し、熱帯アジアモンスーン地域の河川流量の潜在的予測可能性を調査した。更に、河道網に沿って積分する効果が季節平均河川流量の予測に与える影響を検討した。

2. 研究手続

(1) モデルと実験

実験に用いた大気モデルは気象研究所(MRI)/気象庁全球気候モデル(MJ98)である。水平分解能はおよそ300kmのスペクトルモデルで、鉛直層数30、最上層は0.4hPaである⁶⁾。物理過程のうち、陸面モデルはSimple Biosphere モデルを気候モデル用に改良したL3SiBで⁷⁾、植生、雪、土壤からなり、土壤3層で温度、水分量等を予報する。また、河川モデルは、全球河川流下モデル(GRiverT)⁸⁾である。河道網として全球0.5°グリッドのデジタル河川流路網(TRIP)⁹⁾を用い、全球一定の流速0.4m/sで河川流量を算定している²⁾。GRiverTは大気

モデル出力から、表面流出と地中流出を入力として受取り、オフラインで河川流量を算定する。なお、この計算では湖沼や人為的な水管理の影響は含まれていない。

実験は 1951 年から 2000 年までの 50 年で、大気下部条件として与えた海面水温と海水密接度は、英国気象局 Hadley センターの HadISST を用いた¹⁰⁾。メンバー数は 6 で、同じモデル、設定で実施した長期積分ランにより初期値を作成した。

(2) 解析法

予測の難易を示す指標として、アンサンブル予測によって到達できる年々変動の最大値である潜在的予測可能性を用いる。ここで潜在的とは、モデルは与えられた観測 SST に対して完全に大気変動を再現することができ、更に SST の予測が完璧に行えると仮定した場合の予測可能性であることを意味している。従って、実際の予測可能性はこの潜在的予測可能性よりも小さくなる。潜在的予測可能性の指標として、分散分析に基づく、分散比を用いた^{4),5)}。

季節予測では、大気現象のカオス的な振舞いにより、決定論的な予測は意味を持ち得ないので、アンサンブル法による予測が必要になる。アンサンブル法では、アンサンブル平均は予測可能な変動を表し、各メンバーのアンサンブル平均からの偏差は予測不可能なカオス的変動を表していると考えることができる。ここで、予測可能な変動とは SST によって強制されるメンバー間に共通の変動と言い替えられる。分散比は全変動の分散 ($\hat{\sigma}_{TOT}^2$) に対する予測可能な意味のある変動の分散 ($\hat{\sigma}_{SST}^2$) の比、

$$R = \hat{\sigma}_{SST}^2 / \hat{\sigma}_{TOT}^2 \quad (1)$$

で定義され、0~1 の値を取り、1 に近いほど、予測可能性が高いと言える。上式の分散はそれぞれ、次のように求めることができる。

$$\hat{\sigma}_{INT}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2 \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_{EM}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_{SST}^2 = \hat{\sigma}_{EM}^2 - \frac{1}{n} \hat{\sigma}_{INT}^2 \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_{TOT}^2 = \hat{\sigma}_{SST}^2 + \hat{\sigma}_{INT}^2 \quad (5)$$

ここに、 $\hat{\sigma}_{INT}^2$ は予測不可能な分散の気候値を表し、 $\hat{\sigma}_{EM}^2$ はアンサンブル平均の年々変動の大さを表している。また、 i は積分年、 j はメンバー番号を表し、 $x_{i,j}$ は i 年目のアンサンブルメンバー j の季節平均データ、 \bar{x}_i は i 年目のアンサンブル平均、 $\bar{\bar{x}}$ は全データの平均、即ちモデル気候値を表している。式(4)の右辺第 2 項はアンサン

表-1 対象河川の流域特性。但し、数値河川流路網での値。

河川名	流域面積	河口位置	
	(km ²)	経度	緯度
メコン河	812210	106.75E	10.25N
チャオプラヤ川	177383	100.75E	13.75N
ガンジス河	948421	89.75E	22.25N

ブル数が少ないために内部変動分が消去しきれず $\hat{\sigma}_{EM}^2$ に含まれている変動を除去するためのものである¹¹⁾。

(3) 対象流域

対象とする流域は、熱帯アジアモンスーン地域に流域を持つ、メコン河、チャオプラヤ川、ガンジス河の 3 河川である。これらの河川が位置する熱帯では、降水量 – 蒸発量 ($P - E$) や流出量などの予測可能性が比較的高く⁵⁾、河川流量の予測も高いと考えられる。メコン河とチャオプラヤ川は南北に長い河川であり、ガンジス河は東西に長いという幾何学的特徴がある。表-1 に 3 河川の流域面積と河口位置がまとめられている。

(4) 積分効果

はじめに述べた、流域内の積分について、定義を与えておく。ある流域内のサブ流域（その地点からの上流域）における降水や蒸発量の平均は、次の積分で表すことができる。

$$\overline{S(x)} = \frac{1}{A} \int_{\text{subbasin}} S(x') dx' \quad (6)$$

ここに、 $S(x)$ は水文量、 x はサブ流域下端を表す変数、 x' はサブ流域内の地点を表す変数、subbasin は積分領域、 A はその面積を表す。一方、与えられたサブ流域に対する河川流量 $D(x)$ は

$$D(x) = \frac{1}{A} \int_{\text{subbasin}|\text{channel}} F(S(x'; t(x'))) dx' \quad (7)$$

と表される。ここに、 F は入力 $S(x)$ に対して河川流量を算定する関数、 $t(x')$ は x' における入力が $D(x)$ に影響を与える時間遅延、 $\text{subbasin}|\text{channel}$ は積分領域 subbasin を河道網 channel に沿って積分することを表す。ここでは、式(6)を流域積分、式(7)を河道網積分と呼ぶ。今、 \overline{S} と D の演算だけに着目すると、両者は面積積分操作という点で同じであるが、サブ流域内の積分順序を問わない流域積分と順序を問う河道網積分という違いがあり、これを以下では河道網積分効果と呼ぶ。本研究では、この効果を調べるために、陸面への正味水フラックスである $P - E$ と河川流量を比較する。

3. 結果

(1) 分散比の地理分布

図-1に熱帯アジアモンスーン地域における河川流量分散比の分布を示す。大気モデルと河川モデルでの海陸分布とが異なるため、流量分散比が計算できなかつた所(例えば、マレー半島)もある。

春(3-4-5月; MAM)は殆どの陸上で、分散比は0.2以下となっている。インドシナ半島を流れる河川は、メコン河、チャオプラヤ川を始めとして、下流域のみに分散比の高い場所が見られる。一方、インド亜大陸では、ガンジス河の北側上中流部の本線に沿って、分散比の高い地域が見られるだけである。熱帯アジアモンスーン地域では、この時期雨季のオンセット前に当たり、 $P-E$ の年々変動も小さく、その大部分は予測できない大気擾乱によるものなので、それを流下させた結果である河川流量の分散比は低くなっている。メコン河とチャオプラヤ川の下流で分散比が高くなっているのは、 $P-E$ の分散比が比較的高いためである。良く見ると、大気モデルのグリッドに相当するパターンが並んでいるのが分る。一方、ガンジス河流域では、下流よりも上中流で分散比が高くなっている。この流域の北端はヒマラヤ山脈南壁の降雪地帯である。春の融雪量は、 $P-E$ よりも予測し易い気温によって決まり、実際、積雪量の変動が予測し易いことが知られている⁵⁾。従って、分散比の高い融雪水が流下するので、河川流量も高い比を取る。

夏(6-7-8月; JJA)は、春に比べ分散比が、インドシナ半島、インド亜大陸、パキスタンなどを始めとして、高い地域が多い。この時期は雨季に当たり、 $P-E$ も予測し易い。しかし、20°N以北の内陸部は分散比が0.2以下の地域が多い。この地域では、本川に沿って分散が高い地域が見られる。メコン河の分散比は、下流で高く、本川を遡上するに連れ、低くなっている。チャオプラヤ川も同様であるが、メコン河ほど明瞭ではなく、 $P-E$ の分布が反映している可能性もある。一方、ガンジス川流域では、河口から、遡上していくに従い、中下流の本川で分散比が高くなる傾向が見られる(図-4(2)参照)。周囲の支川の分散比が低いことから、流域面積が大きい事による積分効果であることが示唆される。上流域は、大気現象自体の予測がし易いので、本川のみならず、支川でも分散比が高い。この予測し易い大気現象は、春とは異なり、 $P-E$ の高い分散比によるものである⁵⁾。ここで、細述している3河川以外の、サルウィン川、イラワジ川、コダヴァリ川などで、本川に沿って遡上するに従い、分散比が小さくなるのが見られる。

以上から、春と夏では、河川流量の予測可能性は異なり、それを規定する大気側の要因も異なることが明らかとなつた。また、ガンジス河を除き、本川を遡上するに

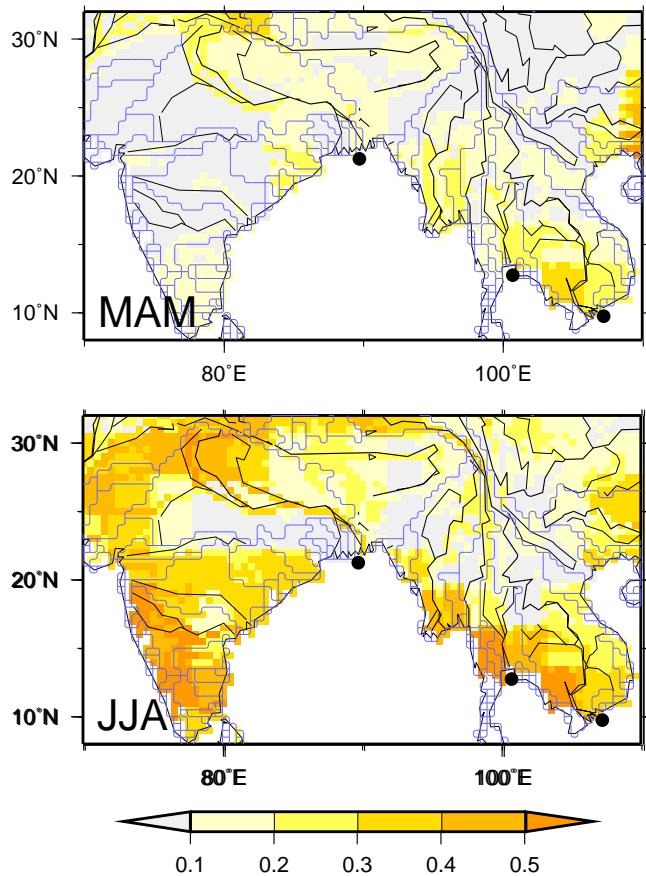


図-1 热帯アジアモンスーン地域における河川流量の潜在的予測可能性(分散比)。上: 春(3-4-5月;MAM), 下: 夏(6-7-8月;JJA)。図中の●は表右からメコン河、チャオプラヤ川、ガンジス河の河口を表している。詳しくは表1を参照。また、黒実線は主要河道網を、淡青実線は流域界を表している。

従い、分散比が小さくなっていく傾向が見られることから、河道網積分効果の存在が示唆される。

(2) メコン河

図-1から、本川に沿って下流から遡上するに従い、分散比が高くなることが定性的に示されたので、河道網積分効果を定量的に調べる。そこで、河川流域のサブ流域を考え、サブ流域で平均された $P-E$ の分散比と、そのサブ流域の最下流点での河川流量の分散比を比較する。河川流量それ自体が、サブ領域で河道に沿って積分された結果であるので、上記のような比較が、適切である。この比較は、対象とする河川流域の総ての点で行った。

図-2にメコン河のサブ流域面積と分散比の関係を示す。図中の縦の破線は大気モデルグリッドの凡の面積を示している。この破線より左側では、河川モデルに同一の大気モデルから得られた強制力が与えられるので、河道網積分の影響は小さく、サブ流域面積と分散比の関係はない。

破線より右側では、各季節とも、河道網による積分の影響があり、また季節により影響に大きな差がある。河

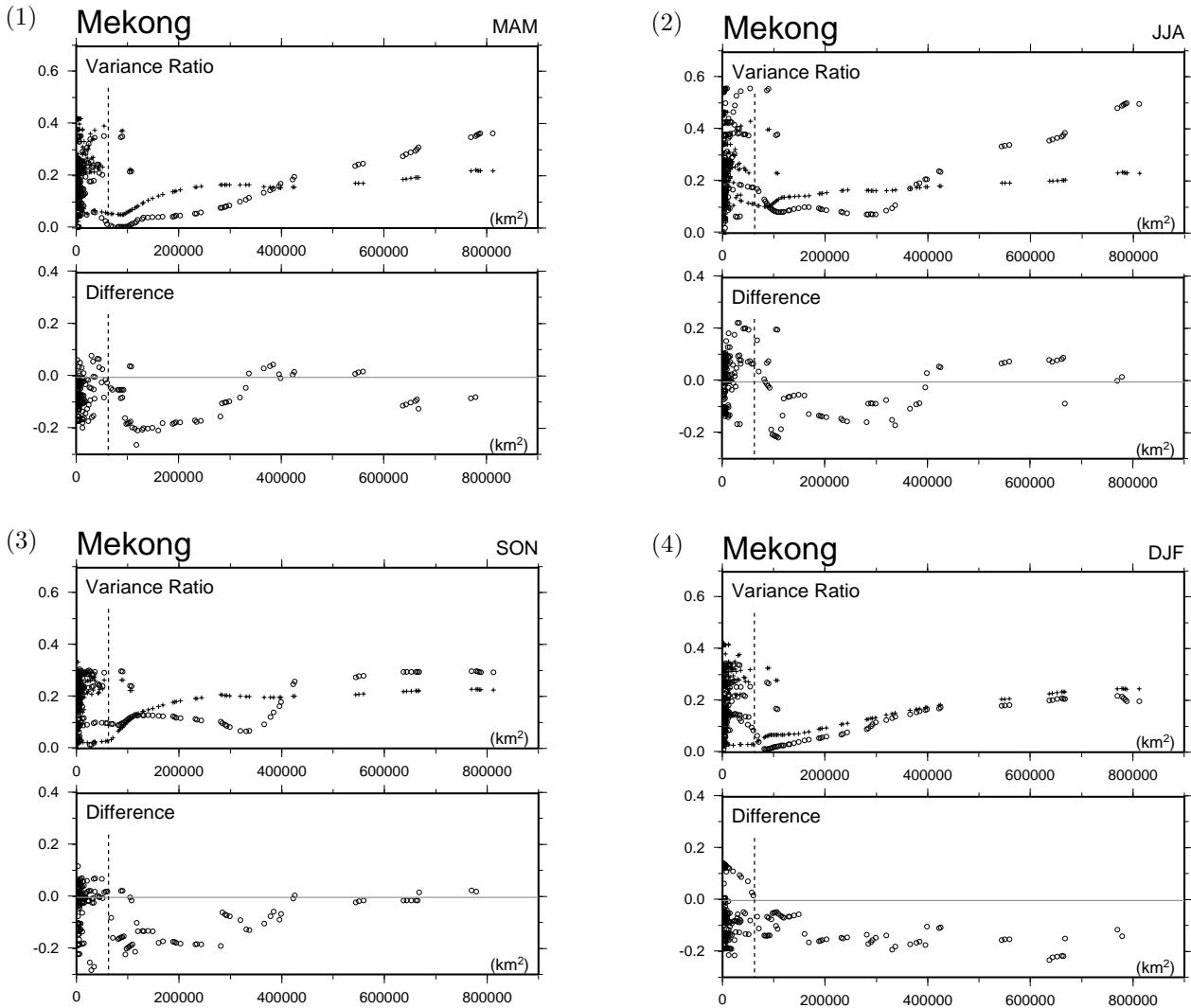


図-2 メコン河流域におけるサブ流域面積と河川流量分散比の関係。横軸: サブ流域面積 (km^2), 縦軸: 分散比 (無次元). (1) 春(3-5月), (2) 夏(6-8月), (3) 秋(9-11月), (4) 冬(12-2月). 各パネルの上段は分散比で、下段は河川流量から $P - E$ を引いた分散比の差が示されている。図中、○が河川流量、+が $P - E$ を表している。また、破線は大気モデルグリッドの面積を示している。

道網積分が河川流量分散比に与えている影響は秋と冬に小さく、春と夏に大きい。 $P - E$ 分散比の流域積分は大気グリッドサイズの2~3倍程度まで影響を与えているものの、どの季節を見ても、その後頭打ちとなっている。これは、 $P - E$ 分散比はサブ流域面積が大きくなるにつれて、流域平均へ収束していくからである。

また、河川流量と $P - E$ の分散比の差を見ると、40,000 km^2 以下のサブ流域では、どの季節でも $P - E$ の方が河川流量よりも分散比が高い。河川流量の分散比は、40,000 km^2 以下のサブ流域でも、流域面積と共に上昇しており、河道網積分の影響が見られる。同じ図を $P - E$ でなく、河川モデルの入力値である表面流出と地中流出の和で描くと(図略)、大気グリッド程度以下のサブ流域では小さな違いが見られるものの、全体として非常によく似た図が得られた。従って、陸面水文過程が分散比を小さくしたのではなく、河道網積分が分散比を下させる方向に働いていることを示唆している。

春と夏、40,000 km^2 以上のサブ流域では、河川流量と

$P - E$ の分散比の差は、流域面積の増加とともに増えている。図-1では周囲の分散比も高かったため明瞭で無かったが、河道網積分効果が図-2では明瞭にみられる。その差は河口付近では0.2程度にまでなり、雨季に当る夏では、0.25にまで達している。雨季の終息期に当る秋では、分散比の差は0.1に達しない。 $P - E$ の分散比は春、夏、秋共に0.2程度で、大きな違いはない。春と夏では40,000 km^2 以上で差の増加傾向が顕著であるが、秋には見られないでの、秋に河道網積分の効果が現れていないと言える。乾季に当たる冬は、 $P - E$ の分散比の方が僅かに高く、差は大気グリッド以上のサブ流域で負である。また、河道網積分の効果が現れていない点は、秋と同様である。

(3) チャオプラヤ川

図-3にチャオプラヤ川のサブ流域面積と分散比の関係を示す。大気グリッド面積を示す破線の位置から、チャ

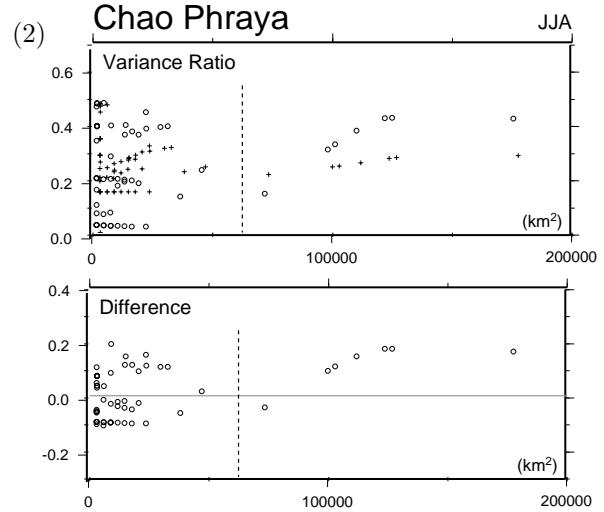
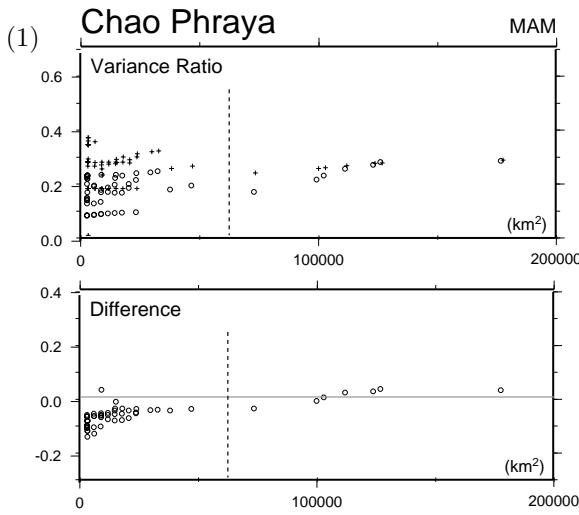


図-3 図-2と同じ、但しチャオプラヤ川。(1)春(3-5月), (2)夏(6-8月).

オプラヤ川の流域面積は大気グリッド3個分程度で、流域面積がメコン河に比べてかなり小さいことが分る。

春と夏ともに、メコン河と似た傾向が見られる。即ち、大気グリッドよりも大きい流域面積で明瞭な流量分散比の河道網積分による増加傾向が見られ、大気グリッドの倍程度まで $P-E$ 分散比の流域積分による増加傾向が見られる。また、河川流量と $P-E$ の分散比の差を見ると、 $10,000\text{km}^2$ 以上の流域面積では常に正となっている。メコン河では分散比の差が正となるのは、チャオプラヤ川の流域面積の倍以上であったことを考えると、河道網積分効果は流域毎に異なることが示唆される。

春と夏を比較すると、春は分散比の差が0.03程度にしかならないのに対して、夏は0.2近くになっている。雨季オンセット期前の春よりも雨季の夏の方が $P-E$ の分散比が高く、それに比例する形で河川流量の分散比も高くなっている結果、夏の方が分散比の差が大きく、また河道網積分効果も大きくなっている。

(4) ガンジス河

図-4にガンジス河のサブ流域面積と分散比の関係を示す。上で示した二つの河川と異なり、ガンジス河の分散比の振る舞いは大きく異なる。春夏ともに、分散比は流域面積と関係が小さく、下流域では逆に微減している。この傾向は図-1で見た通りである。分散比の差を見ると、春はサブ流域面積が増加するに従い減少、夏は $40,000\text{km}^2$ まで負の値を取り、その後増加している。河道網積分の効果は春に負、夏に正と逆の結果が得られた。

春のガンジス河では、上中流域で、河川流量分散比が高いが、流下するに従い、分散比が低く、しかも大きい流量の支川合流があるため、河道網積分された後の河川流量は予測可能な変動が相対的に小さくなる。そのため、サブ流域面積と分散比の関係が負の相関になる。これは、河道網積分が条件によっては、予測可能性を低下させる場合もあることを示している。

4. 議論

多くの場合、ある面積以上ではサブ流域面積と正の河道網積分効果が存在することが示唆されたが、河川流量の分散比と流域面積の関係は複雑である。ここまで議論は、流域を面積だけで捉えて来たが、実際には、河道網は構造を持っている。夏のメコン河(図-2(2))をみると、流域面積約 $43,000\text{km}^2$ から約 $55,000\text{km}^2$ に点が離れているのは、約 $12,000\text{km}^2$ のサブ流域河川(ムーン川;右岸側)が本川に合流したためで、その下端における分散比は0.4に近い。このような高い分散比を持つ河川の合流があってはじめて、河道網積分効果が得られる。チャオプラヤ川でも分散比の高いサブ流域河川(パサック川;左岸側)の合流によってその効果が得られている。一方の、春のガンジス河(図-4(1))は上流域で既に分散比が高く、サブ流域の分散比は同程度かそれ以下のため、下流では分散比が逆に低下する傾向が見られる。このように、河道網積分効果は流域の面積だけでなく、構造も反映しているため、河川流量の分散比と流域面積の関係が河川毎に異なり、複雑な様相を示している。

河道網積分により分散比が低下する場合があることは、大気グリッドスケールより小さいサブ流域で、分散比の差が負の値を取ることからも示唆される。大気グリッドスケール以下の流域では、河川モデルへ与えられる流出量は一定で、流域積分であれば、分散比は変わらない。ところが、河道網積分では、河川水は河道網に沿って流下する過程が含まれるので、分散比を変化させ得る。このように小さいスケールでは、河道網積分はしばしば負の効果を見せると言える。

5. 結論

本研究では、全球大気モデルを用いた力学的なアンサンブル長期積分実験結果を全球河川モデルに入力とし

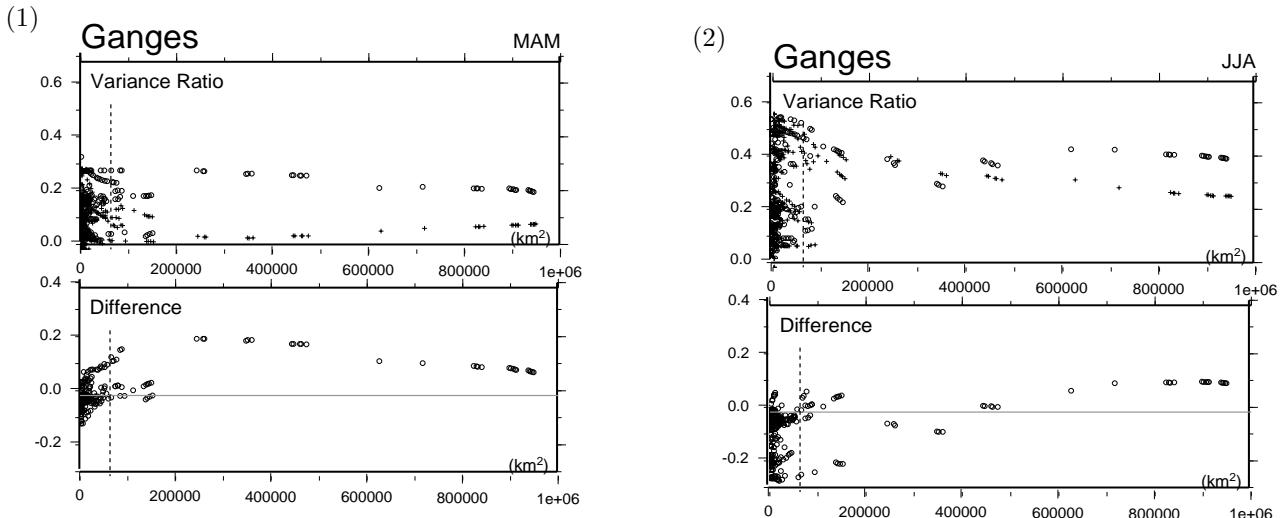


図-4 図-2に同じ、但しガンジス河。(1) 春(3-5月), (2) 夏(6-8月).

て与えるオフライン実験を実施し、熱帯アジアモンスーン地域の季節平均河川流量の潜在的予測可能性を調べた。河川流量の予測可能性は、陸面への正味水フラックスである $P - E$ の予測可能性よりも、本川沿いで高いことが示された。これは、季節平均河川流量の年々変動は、 $P - E$ よりも予測しやすいことを示している。また、メコン河、チャオプラヤ川では、上流よりも下流の方が予測しやすく、地形的条件を考えなければ、下流で水管理をした方が容易であることを示唆している。ただし、メコン河のように中流域で最小、春のガンジス河のように河口で最小となる場合もある。

更に、河川流量が河道網に沿って積分した水文量であることが、河川流量の予測可能性に与える効果について調べた。サブ流域で流域積分した $P - E$ の分散比と河川流量の分散比を、比較したところ、あるサブ流域面積以上では、河川流量の分散比は $P - E$ の分散比よりも通常高かった。但し、閾値となる流域面積は、流域毎に異っていた。従って、河道網積分効果は分散比を高くする方向に働くので、降水量や蒸発量といった、大気変数に比べ、河川流量の季節予測はし易いと多くの場合、結論付られる。一方で、本研究で対象とした3河川は全て熱帯アジアモンスーン地域に位置するにも関わらず、河道網積分効果は定量的には大きく異なっていた。これは、流域面積のみならず、河道網の構造、大気条件にも依存していることが示された。

以上の結果から、河道網積分効果により、概ね季節平均河川流量は流域面積が大きいほど予測が容易であると示されたが、上で述べたように、単純ではない。今後は、まず全大陸の主要河川で、同様の解析を進める必要があろう。

謝辞： 本研究は、気象研究所融合型経常研究「季節予測システムの構築と経年変動機構・予測可能性の研究」の成果である。

参考文献

- 1) K. Masuda, Y. Hashimoto, H. Matsuyama, and T. Oki. Seasonal cycle of water storage in major river basins of the world. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, pp. 3215–3218, 2001.
- 2) T. Oki, T. Nishimura, and P. Dirmeyer. Assesment of annual runoff from land surface model using total runoff integration pathways (trip). *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 77, pp. 235–255, 1999.
- 3) R. K. Linsley, M. A. Kohler, and J. L. H. Paulhus. *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, third edition, 1982.
- 4) 仲江川敏之、楠昌司、杉正人、鬼頭昭雄 小林ちあき、高野清治. 全球大気モデルを用いた季節予報実験に基づく水資源量の予測精度と予測可能性. 水工学論文集, Vol. 46, pp. 109–114, 2002.
- 5) T. Nakaegawa, M. Sugi, and K. Matsumaru. A long-term numerical study of the potential predictability of seasonal mean fields of water resource variables using MRI/JMA-AGCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 81, No. 5, pp. 1041–1056, 2003.
- 6) K. Shibata, H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka, and M. Sugi. A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with an MRI/JMA98 GCM. *Pap. Meteor. Geophys.*, Vol. 50, pp. 15–53, 1999.
- 7) T. Nakaegawa and M. Sugi. Impact of soil moisture movement schemes in a SVATS on global climate of AGCM. *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models*, Vol. 270, pp. 47–52, 2001.
- 8) M. Hosaka, D. Nohara, T. Nakaegawa, and S. Yukimoto. Mri global river flow model using trip. *J. Meteor. Soc. Japan*, p. to be submitted, 2005.
- 9) T. Oki and Y. C. Sud. Design of total runoff integrating pathways (TRIP) - a global river channel network. *Earth Interactions*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–37, 1998.
- 10) N. A. Rayner, E. B. Horton, D. E. Parker, C. K. Folland, and R. B. Hackett. Version 2.2 of the global sea-ice and sea surface temperature data set, 1931–1994. Climate research technical note, Hadley Center, Meteorological Office, 1996.
- 11) D. P. Rowell. Assesing potential seasonal predictability with an ensemble of multidecadal GCM simulations. *J. Climate*, Vol. 11, pp. 109–120, 1998.

(2005. 9.30 受付)