

灌漑取水の影響を考慮した 全球河川流量シミュレーション

GLOBAL RIVER DISCHARGE SIMULATION TAKING INTO ACCOUNT IRRIGATION WATER INTAKE

花崎直太¹・鼎信次郎²・沖大幹³
Naota Hanasaki, Shinjiro Kanae and Taikan Oki

¹学生会員 工修 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²正会員 工博 総合地球環境学研究所 (〒602-0878 京都市上京区高島町335)

³正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

A global river discharge simulation is conducted taking into account irrigation water intake and reservoir operation. The monthly irrigation water demand is calculated globally by a modeling approach, and it is withdrawn from the river section in the same calculating cell. Four simulation runs (with/without irrigation intake × with/without reservoir operation) are compared, to clarify the effect of irrigation water intake on the river discharge simulation.

In the latter part, irrigation water demand and supply is assessed in monthly interval for nine basins in the world. The result suggests that the irrigation water intake significantly decreases the river discharge in specific period and affects the water resources in the whole river basin.

Key Words: Global river discharge simulation, Irrigation, Reservoir Operation

1. はじめに

灌漑用水は世界で年間2504km³取水され、1753km³消費されると推定されている¹⁾。これは年間総取水量3788km³の66%、世界の河川流量40000km³の6%に当たる莫大な量である¹⁾。この灌漑用水取水は世界の河川流量にどのような影響を及ぼしているのだろうか？また灌漑農地は全耕作地の17%に過ぎないが、そこから生産される食料は全食料生産の40%を占めている²⁾。灌漑農業は世界の人口増加と経済成長に伴う食料問題の鍵を握っているが、このための灌漑用水は持続的に取水できるのだろうか？

灌漑が広域の河川流量に与える影響について論じた研究は数多く発表されている。Haddeland et al. (2004)は灌漑がColorado川とMekong川流域の水・熱収支に与える影響を陸面過程モデルと河川流下モデルを利用して定量的に評価した³⁾。甲山ら (2004)は灌漑が淮河の上中流域の水収支に与える影響を衛星リモートセンシングと陸面過程モデルを利用して定量的に評価した⁴⁾。対象を流域から全球へと拡大するための研究も数多く発表されている。Döll and Siebert (2002)は灌漑農地分布データ、気象データ、作物要求水量モデルを利用し、

0.5°x0.5°の空間解像度で世界の灌漑用水量を算定した⁵⁾。Alcamo et al. (2003)はこの結果を取り入れ世界水資源モデルを開発した⁶⁾。このモデルでは河川取水と河川流量が統合的に扱われるとされているが、論文中には灌漑が世界の河川流量や水循環に与える影響について言及されていない。

本研究の目的は以下の3つである。第1に灌漑取水を考慮した全球河川流量シミュレーションをおこない、全球・流域の河川水収支に与える影響を定量的に示すことである。第2に灌漑取水を考慮することで流量シミュレーションの再現性が向上するか検討することである。観測流量には灌漑取水の影響が含まれているので、モデルにこれらの要素を取り込めば理論上は計算値が観測値に近づくはずである。第3に灌漑用水需要と灌漑取水のバランスを月単位で空間分布を含めて定量的に評価することである。既存の水資源アセスメントでは上流の取水による流量の減少が考慮されず、また評価も年単位で行われることが多かった。しかし灌漑取水は絶対量が多く下流の河川流量への影響が無視できないこと、必要な時期に必要な量が供給できることが重要であることから、本研究では取水を考慮し、月単位での評価を試みる。

2. 方法

(1) モデル

本研究では5つのモデルを利用する。

a) 全球河川流路網モデルTRIP⁷⁾

空間解像度1°×1°のデジタル河道網地図を持ち、同じく空間解像度1°×1°のグリッド流出データを上流から下流へ、流下による時間遅れを考慮しながら積算して河川流量の計算を行う。TRIPは流下専用のモデルであり、降雨流出過程は陸面過程モデルを用いて外部で計算される。

b) 農事暦推定モデル⁸⁾

気温と河川流量の月データを点数化することにより、1年のうち最も農作業に適した期間を月単位で割り出す。単純化のために3つの重要な前提をおいている。①作物の生育期間は5ヶ月とすること。栽培期間が5ヶ月なので二期作まで可能である。②月平均気温が5℃を下回る月には作物が生育できないものとする。③作付け種は水稲とそれ以外の2種類とすること。水稲の作付けはインド東部から中国の淮河以南までの南～東アジアとし、地域で固定する。この地域では一期作も二期作も水稲が栽培されるものとする。

c) 灌漑用水推定モデル⁹⁾

b)で得られた作付け期間に対して、作物の理想的な生長に必要な水量を計算する。これは可能蒸発散量に植物の成長に応じて時間的に増減する作物係数を乗じたものから有効降雨量を引いた量である。単位面積あたりの需要量に世界の灌漑面積の分布を乗じて求めた灌漑用水需要量は表-1の通りである。

表-1 灌漑用水需要

	本研究	Döll and Siebert 2002	Shiklomanov 2000
灌漑面積 (106km ²)	2.54	2.54	NA
灌漑用水需要A (km ³)	1413	1091	1753
灌漑用水需要B (km ³)	2826	2452	2504

表-1にある灌漑用水需要Aは作物の純要求量、Bは配水時の損失などを考慮した取水量を指す。Döll and Siebert (2002)はモデルを利用した計算値、Shiklomanov (2000)は統計データを編集した値である。灌漑設備が未発達であるほど、取水量は純要求量より大きくなる。

d) 貯水池操作サブモデル⁹⁾

全球河川流路網モデルTRIPに貯水池操作を取り入れるための着脱可能な機能追加モジュールである。総貯水容量10億m³以上の500の貯水池について、貯水容量、年平均流量と貯水池の目的から操作ルールを推定し、ルールにそって放流・貯留の操作を行う。本研究では以下のように花崎ら(2004)とは異なる方法で操作ルールの設定を行う。まずWRTによる生活用水と工業用水の取水量の全球分布データ⁹⁾ (1995年ベース、全球0.5°×0.5°)とc)の

灌漑用水需要を足し合わせ、月別の全用水需要を計算した。生活用水と工業用水は年平均値しか入手できなかったので毎月一定量が取水されると仮定した。次に貯水池の下流域の全用水需要を足しあわせ、貯水池ごとの下流の需要変動パターンを得た。貯水池からは貯水池の主目的に関わらず、この需要変動パターンに合わせた放流を行うものとする。

e) 灌漑取水サブモデル

全球河川流路網モデルTRIPに灌漑取水の効果を取り入れるための着脱可能な機能追加モジュールである。c)で計算された灌漑用水需要Aを河川から取水し、その水は全て蒸発散に使われるとみなす。実際に取水されるのは灌漑用水需要Bにあたる量であるが、これは地下浸透や河川への復流水を含んだ量であり、水収支を考える上で扱いが難しい。取水は下流への影響を無視し、その地点で流量がゼロになるまで行われる。この量を「可能灌漑取水量」と名づける。本研究では灌漑用水はすべて河川水から取水されると仮定する。実際には世界の多くの地域で地下水が主な灌漑用水供給源として使われているが、陸域の水収支を計算する際に利用する陸面過程モデルが地下水涵養を考慮せず、これに相当する水を河川への基底流出として処理することから、本研究では地下水からの取水は河川からの取水に含めることにしている。TRIPでは陸域全てのグリッドに対して流量のあるなしに関わらず河道を割り当てていること、河道に入った基底流出は取水以外に蒸発などで失われまいと仮定していることから、乾燥地や乾季に行われる地下水を利用した灌漑に対しても適用が可能だとみなした。

(2) 数値実験

本研究では世界の河川流量に関する4つの数値実験をおこなう。TRIPに与える全球1°×1°のグリッド流出データは4つとも共通にGlobal Soil Wetness Project Phase 1 (GSWP1)で構築された世界の陸域の水文気象データセット¹⁰⁾のうち、気象庁の陸面過程モデルSiBを用いてオフライン計算されたものを利用した。計算期間は1987年と1988年の2年分である。

a) CTRL実験

TRIPを利用して河川流量の計算を行ったものである。

b) RSVR実験

TRIPと貯水池操作サブモデルを利用して河川流量の計算を行ったものである。

c) INT実験

TRIPと灌漑取水サブモデルを利用して河川流量の計算を行ったものである。

d) INT-RSVR実験

TRIPと貯水池操作サブモデル、灌漑取水サブモデルを両方利用して河川流量の計算を行ったものである。

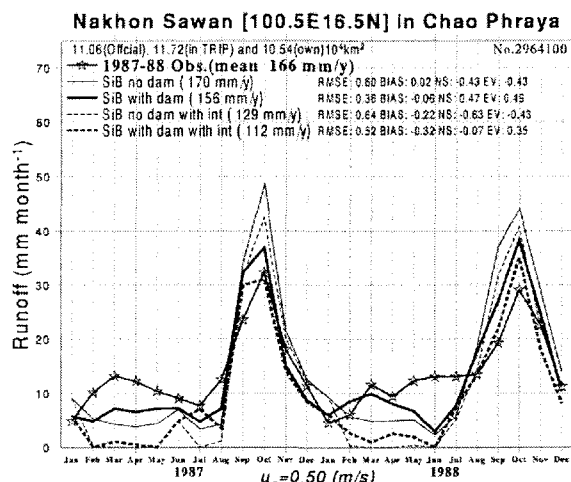
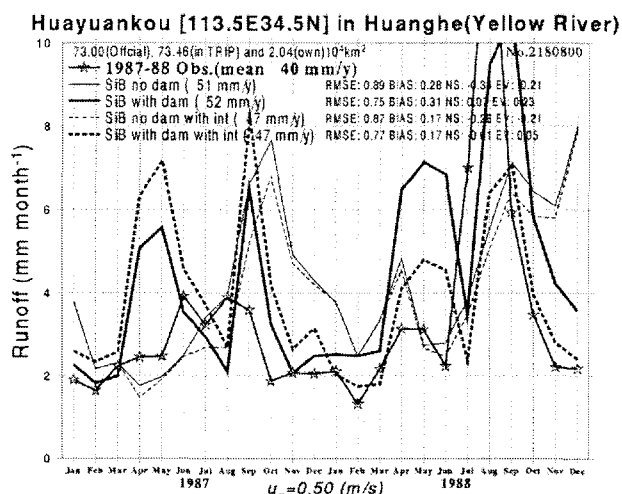


図-1 河川流量の比較 (左: Huang He川 (黄河) Huayuankou (花園口)、右: Chao Phraya川 Nakhon Sawan)

(3) 検証流域

本研究ではHuang He川 (黄河)、Nile川、Amu Darya川、Sir Darya川、Colorado川 (アメリカ合衆国)、Chao Phraya川、Ganges川、Indus川、Euphrates川の9流域に着目する。これらの流域は灌漑農業が盛んな流域であり、断流の発生が指摘されている河川でもある²⁾。

3. 結果

(1) 河川水収支への影響

まず各実験の1987年の全球の水収支を表-2に示す。灌漑用水需要の計算値は1413km³/yearであったが、本研究で得られた取水可能量は貯水池がない場合で649 km³/year、ある場合でも709km³/yearであり、需要量の約50%に過ぎない。全球の年間の河川流量は世界の灌漑用水需要よりはるかに大きいので、いかに水資源が時間・空間的に偏在しているかを示しているといえよう。今回考慮した世界の500の貯水池の操作によってもたらされる灌漑用水は60km³と計算された。

表-2 各実験の水収支 (km³/year、1987年)

	CTRL	RSVR	INT	INT-RSVR
流出量	30876	30876	30876	30876
河口到達流量	30876	30936	30240	30153
灌漑取水	0	0	649	709
河道内貯留変化	0	-5	-13	-4
貯水池貯留変化	0	-55	0	18

(2) シミュレーション結果の検証

計算期間である1987-1988年について観測値が入手できた2地点について各実験のシミュレーション結果の検証を行う。

a) Huang He川 (黄河) Huayuankou (花園口)

貯水池がない場合は8月から11月にかけて流量の

ピークが見られる。これに対して観測値の流量のピークは6月から9月にかけて見られる。貯水池がある場合は上流の貯水池 (三门峡ダム、主目的は洪水調節) の操作の影響を受け、4月・5月と9月に流量のピークが現れている。これは前節のb)で推定されたHuang He川下流域の農事暦が一期作は8月から12月、二期作は3月から7月であり、これにあわせて放流が行われているためである。実際のこの流域では6月から9月にかけてトウモロコシ、10月から5月にかけて冬小麦が栽培されている (沈彦俊私信)。現在の農事暦推定モデルは栽培期間を5ヶ月に固定し、気温が高いほど栽培適性を高く設定しているため、栽培期間が長く、気温の低い冬をまたいで栽培される冬小麦を栽培する地域で農事暦に誤差が大きい。

取水の影響は貯水池がない場合は単純な流量減少となって現れる。しかし貯水池がある場合の87年は逆に流量の増加という結果が得られた。貯水池の初期貯留量は87年の1年分の流出データをモデルに繰り返し与えて平衡に達したときの貯水池貯留量を利用しているが、取水を考慮した際に貯水池への流入量に変化し、平衡状態が変わってしまったのである。

ここでは貯水池操作による流量ピーク再現性の向上、取水による流量の過大評価の緩和の可能性は示唆されたが、本研究では河川流量、貯水池操作、灌漑取水の各要素に不確実性があり、効果を明示できなかった。農事暦と貯水池の初期貯留量に観測値を与えれば解析もしやすく、再現性も上がると考えられるので、今後の課題としたい。

b) Chao Phraya川 Nakhon Sawan

貯水池の考慮の有無は花崎ら (2004) で詳しく論じられたので取水の効果だけを考察する。87年は取水を考慮すると貯水池の有無に関わらず、2月から5月にかけて断流状態となる。この期間は乾季にあたり、灌漑用水需要が極めて高く、流量観測地点上流で河川水

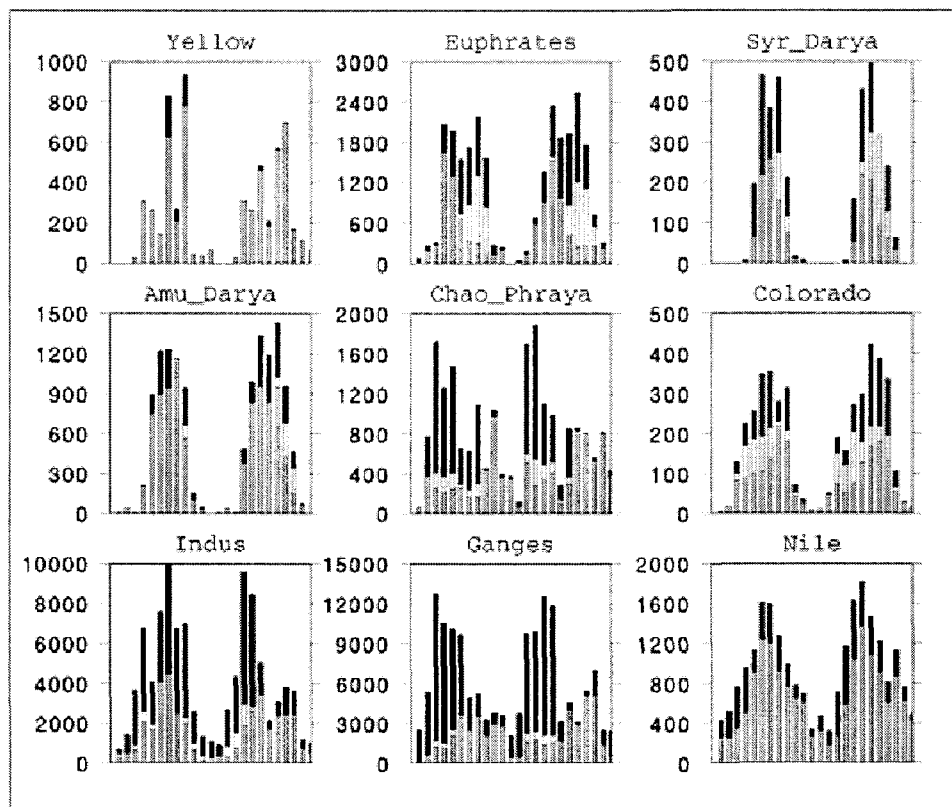


図-2 流域の月別の灌漑用水需要と
可能灌漑取水量 (m³/s) の時系列 (1987-1988)

を取り尽くしてしまったからである。88年は貯水池がある場合は断流こそ免れているが、観測値に比べれば流量は極めて小さい。後述するとおり、この流域は乾季に灌漑用水需要が可能灌漑取水量を大幅に上回る。このような場合、現実の世界では当局が流域全体の需給バランスを考慮し、作付面積を適宜コントロールしている。取水量を算定する際にも同様の考慮が必要なが示唆された。

(3) 流域灌漑農業への影響

次にモデルで推定された灌漑用水需要が同じくモデルで推定された河川流量により供給されるかを需給のタイミングと場所の両面から検討する。まず図-2に示したのが流域の月別の灌漑用水需要量と可能灌漑取水量の時系列を示したものである。黒のバーは流域の月別の灌漑用水需要を、白のバーは同じく貯水池がある場合の可能灌漑取水量を、グレーのバーは同じく貯水池がない場合の可能灌漑取水量を示す。つまり黒の部分灌漑用水の不足を、白の部分貯水池放流により取水可能になった量を示している。次に図-3の左図に示したのが年間のグリッド別の灌漑用水充足率（可能灌漑取水量の灌漑用水需要量に対する割合）の空間分布を示したものである。このとき、取水量、需要量ともに月毎の累積値を計算している。プロットの大き

さはグリッドあたりの灌漑農地面積を表す。ただし、10km²未満の場合は「+」と記した。プロットの色は灌漑用水充足率を表す。色が濃いほど充足率が低く、水需給が逼迫していることを示す。参考として既存の世界水資源アセスメントで採られることが多かった取水を考慮しない評価の結果も示した。図-3の右図は取水による流量の減少を考慮せずに流下計算を行い、各グリッドの年平均河川流量の年平均灌漑用水需要量に対する割合を空間分布で示したものである。

a) 月別の需給バランス

図-2より Indus 川、Ganges 川、Chao Phraya 川や Euphrates 川などで月によって需給バランスが大きく変わるのが見られる。アジアモンスーン域に位置する三流域では乾季にあたる1月から6月にかけて大きな灌漑用水需要が発生している。ただしこのときの需要量は全ての灌漑農地で作物の栽培に最適な量の水を与えて灌漑農業を行ったと仮定した場合の推定値であり、現実には休耕地になって需要が発生しない場合も多いと考えられる。Euphrates 川では融雪による出水が利用できない6月から9月にかけて灌漑用水の不足が発生しているが、これは貯水池操作により相当緩和される結果が示された。いずれの流域でも水需給が逼迫するのは乾季作の行われる期間にとどまり、雨季作の行われる期間にはそれほど深刻ではないことが示された。

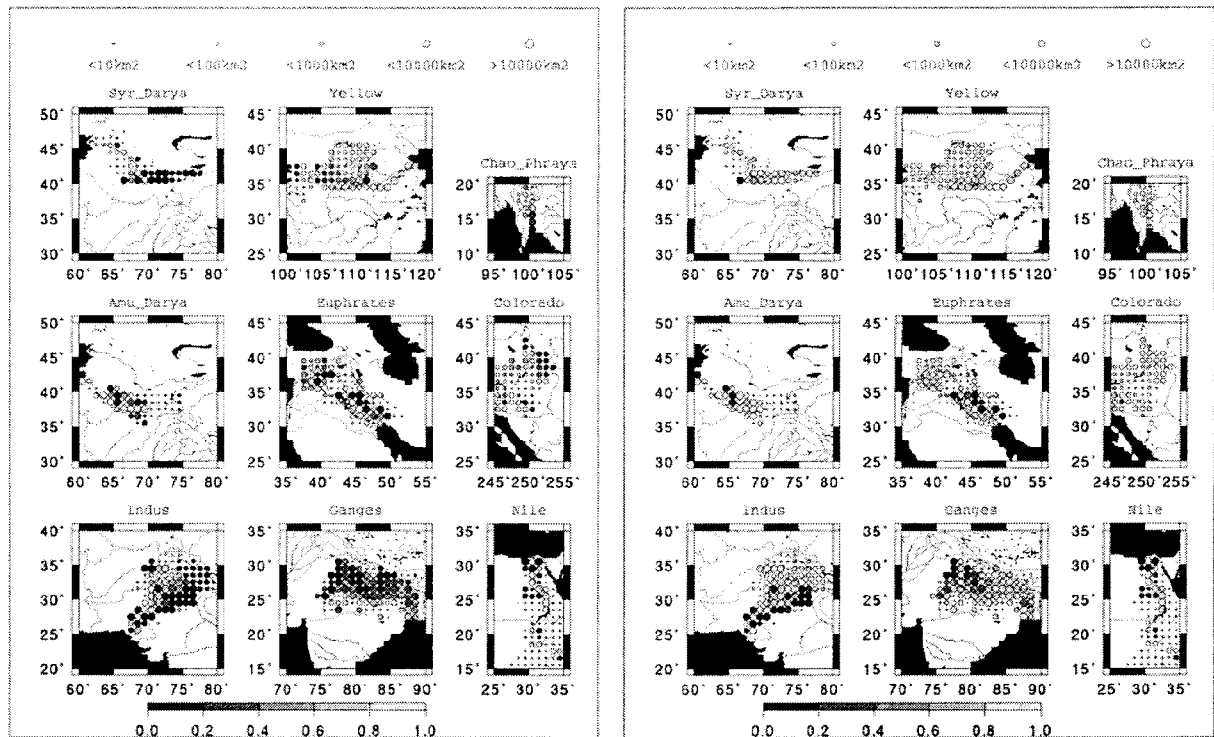


図-3 年間のグリッド別の灌漑用水充足率の空間分布
(左：取水を考慮 右：取水を考慮せず)

水需給の逼迫が懸念されているHuang He川とNile川では年間を通じて灌漑用水の不足が生じないという意外な結果が得られた。これには二つの理由が考えられる。一つには本研究では水路によるグリッド外への導水や河口デルタ地帯での流路の分岐を考慮していないことである。グリッド外への分水が行われていれば、需要量はより大きくなることが予想される。これについては次節で論じる。二つにはNile川の特事情で、流量計算値が観測値に比べてかなり過大になることである。Chan and Eagleson (1980)はWhite Nile川の流量の60%がBahr El Ghazalの湿地帯で蒸発により失われると報告しているが¹¹⁾、現在利用しているモデルではこのような流下途中の蒸発は考慮できず、下流の流量を過大評価することになる。

Colorado川では年間を通じて貯水池による取水量増加の効果が見られる。貯水池を考慮しない場合、この流域では流量の時間変動が極めて大きい。貯水池を考慮した場合、流域に9つもある貯水池が年間流入量を下流の需要に応じて再配分するため、大きな効果を生んでいると考えられる。

b) グリッド別の需給バランス

まずは取水の考慮の有無について検討する。その違いが最も顕著に現れているGanges川やChao Phraya川を見ると、取水を考慮した左図では河口に向かうにつれ充足率が下がっていく（グレーが増えていく）のに対し、取水を考慮しない右図では充足率が下がっていない（白のまま）。この現象は供給量に対する需要量の

割合が高いほど顕著に現れるため、水資源の評価を行う上で極めて重要である。この現象は下流に限られたものではなく、Huang He川、Euphrates川、Colorado川では上流域に見られる。

次に前述した導水について考察する。本研究では河川以外の水路による導水を考慮していない。このためたとえ本流のあるグリッドとは1グリッドずれただけでも、本流から河川水が全く供給されないため充足率が低くなる場合が見られる。図-3でIndus川やNile川ではこの例が見られる。これらのグリッドでは本流から導水が行われていると考えるのが妥当であり、今後モデルに取り組んでいく必要がある。本研究では持続可能な水資源に着目するため、降水を起源とした流出のみで解析を行っている。このため帯水層の地下水（化石水）に依存した灌漑地では供給量を過小評価する可能性があるので注意が必要である。

最後に、本研究では灌漑効率100%の灌漑取水のみを考慮したが、他にも灌漑配水途中のロスや生活用水や工業用水の取水がある。灌漑効率が低い場合や大都市がある場合には影響がより大きくなると考えられる。

c) 需給バランスの定義の違いに関する考察

図-3の左図と右図にはもう一つ大きな違いがある。左図も右図も灌漑用水の需要量は等しいが、供給量には左図では年間可能取水量を、右図では年間河川流量を利用している。左図は各月の灌漑需要に対する実際の取水量が考慮されているので需要を上回った河川流

量は供給量に含まれない。しかし右図は需要を上回った河川流量も供給量に含まれることになる。この影響はChao Phraya川を見ると顕著である。図-1右図や図-2を見れば明らかなように、この流域では乾季に流量が少なく、灌漑用水需給が逼迫し、逆に雨季には流量が豊富で灌漑需要が少なく、灌漑用水に余剰が発生している。しかし図-3の右図の方法では雨季の余剰分と乾季の不足分が相殺され、河川水が乾季と雨季を合わせた灌漑用水量をまかなえるという誤った情報を示している。

5. 結論と今後の課題

冒頭に挙げた目的に対し以下のような考察が得られた。第一に世界の可能灌漑取水量は貯水池を考慮した場合709km³、考慮しない場合649km³と推定された。これは花崎ら(2004)により見積もられた全球の灌漑需要量1413km³の約50%にすぎない。流量シミュレーションの精度の影響も考えられるが、花崎ら(2004)は取水可能性のない灌漑用水を多量に灌漑需要推定に含めている可能性があり、灌漑需要量の推定に流域の水需給バランスを考慮する必要が示唆された。なお貯水池操作により可能取水量は10%程度上昇するという結果が得られ、需給バランスを論じる際に貯水池が果たす役割が大きいことが示された。

第二に灌漑取水を考慮することによるシミュレーションの再現性の向上の可能性に関しては結論を得ることができなかった。Huang He川では推定された農事暦と現実の農事暦にずれがあり、農事暦が取水と貯水池操作に大きな影響を持つことから検証を続けることができなくなった。モデルによる農事暦の推定は文献が入手できない地域にも適用できるという利点があるが、シミュレーションの根幹に関わるため、空間解像度や時間解像度を下げても観測ベースのものを使う必要が示唆された。Chao Phrayaでの検証では乾季の取水量が過大に見積もられていることが明らかになった。ここでも、上述の通り、灌漑需要の推定に際し、水需給バランスを組み込む必要があることが示された。

第三に月単位の灌漑用水の需給バランスであるが、本研究が扱った9つの流域では雨季作の灌漑用水需要はおおむね河川水によって供給できるという結果が得られた。乾季作の灌漑用水の不足量は流域差があるが、雨季作よりもはるかに大きい。水資源アセスメントを行う際はこの渇水期の評価に重点が置かれるべきであることを強調したい。需給バランスに果たす貯水池の効果は特にEuphrates川、Colorado川で顕著なことが示

された。ただしこれらの結果には導水やデルタでの河道分岐による灌漑流域の拡大、灌漑以外の取水、配水中のロスなどが考慮されず、現実の影響はより大きいと考えられた。最後に取水の考慮の有無、および年単位の評価と月単位の評価を比較し、水資源の評価に取水の考慮と年単位以下の評価が重要であることを示した。

謝辞：本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業「人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル」（代表：沖大幹）の成果の一部です。有益なコメントを下された査読者の方に感謝いたします。

参考文献

- 1) Shiklomanov, I. A.: Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, 25(1), pp11-32, 2000
- 2) Postel, S.: Pillar of sand, Norton & Company, 1999
- 3) Haddeland, I. Lettenmaier, D. P. and Skaugen, T.: Effects of irrigation on the water and energy balances of the Colorado and Mekong river basins. *J. of Hydrol.*, (submitted)
- 4) 甲山治、田中賢治、池淵修一：中国淮河流域における農業形態の推定と陸面過程モデルへの適用、水工学論文集、Vol. 48、pp.211-216、2004
- 5) Döll, P and Siebert, S.: Global modeling of irrigation water requirements. *WRR*, 38(4), 2002
- 6) Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F. Lehner, B., Rösch T. and Siebert, S.: Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrol. Sci. J.*, Vol 48(3), pp317-337, 2003
- 7) Oki, T. and Sud, Y. C. Design of Total runoff integrating pathways (TRIP) –A global river channel network. *Earth Interactions*, Vol.2, 1999. <http://EarthInteractions.org>
- 8) 花崎直太、鼎信次郎、沖大幹：貯水池操作が全球の河川流量に与える影響の評価、水工学論文集、Vol.48、pp.463-468、2004.
- 9) WRI (World Resources Institute) 1998-99 World Resources. Report of UNEP, UNDP & World Bank. Oxford University Press, Oxford, UK
- 10) Dirmeyer, P. A. Dolman, A. J. and Sato, N. The pilot phase of the global soil wetness project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.80, pp.851-878, 1999.
- 11) Chan, S. -O. and Eagleson, P.S.: Water balance studies of the Bahr El Ghazal Swamp. Rep. No. 161, Ralph M. Parsons Lab. Water Resources. Hydrodynamics, MIT, 1980

(2004. 9. 30 受付)