

16. 気象庁気候データ同化システム出力を利用した全球水資源モデル H08 の準実時間シミュレーション

花崎 直太^{1*}

¹国立環境研究所 (〒305-8506茨城県つくば市小野川16-2)

* E-mail: hanaaki@nies.go.jp

気象庁気候データ同化システム JCDAS と全球水資源モデル H08 を利用した準リアルタイムシミュレーションシステムの構築に向けて、過去の水文諸量の再現性と主要な早魃・洪水イベントの検出可能性を調査した。1986-1995 年の 10 年間については、平均的な水文諸量には再現性が見られたものの、降水量の精度不足が一つの原因で、主要な早魃・洪水イベントは十分に検出できなかった。2003-2012 年の 10 年間に起きた 50-100 年に 1 度の早魃・洪水イベントについては検出可能性が示唆された。

Key words: *Global water resources, global hydrological model, drought, flood*

1. はじめに

近年、早魃や洪水による大規模な被害が世界各地で起きている。2006 年のオーストラリア東部の早魃では小麦の生産が平年に比べ約 40% 減少し、2010 年のロシア西部の早魃ではやはり小麦が記録的な不作になった。一方で、2010 年には中国の各地で、2011 年にはタイで洪水が発生し、多数の人命が失われ、産業に深刻な被害が発生した。世界各地の早魃や洪水に関する情報をリアルタイムで把握するとともに、いち早く発生のリスクを検出することは被害を軽減する上で極めて重要である。

これまでに全球を対象とした水文モデルが多数開発され、過去や将来に関する長期のシミュレーションが実施されてきた¹⁾²⁾。これらの水文モデルをリアルタイムで運用し続けたなら、世界の主要な早魃や洪水のイベントを捉えられるのだろうか？

広域水文モデルのリアルタイムシミュレーションの課題は二つある。第一の課題はリアルタイム気象データの入手可能性と信頼性である。近年、気象機関が、数値気象予報や再解析を直近まで更新し続けた結果を提供するようになっている。こうした気象データと広域水文モデルを利用し、芳村ほか(2007)は日本全域を対象に、Alfieri et al.(2013) は全球を対象としたリアルタイムシミュレーションの報告を行っている³⁾⁴⁾。第二の課題は、現実の河川にはダムや堰などがあり、取水なども行われていること

である。灌漑や貯水池操作といった人間活動を含む全球水文モデルは近年いくつか開発されているが、これらのモデルがリアルタイムに運用された事例は、筆者の知る限りない。

本報告は約 2 日の遅れで信頼性の高い全球再解析データを提供する気象庁気候データ同化システム JMA Climate Data Assimilation System (JCDAS)⁵⁾と主要な人間活動の要素を含む全球水資源モデル H08⁶⁾⁷⁾を利用した準リアルタイムシミュレーションの構築に向けて、水文諸量の解析を行った結果と、そこから得られた課題について報告する。

2. 方法

(1) モデル

全球水資源モデル H08 は自然の水循環と人間の水利用を統合的に計算することのできる全球水文モデルである⁶⁾⁷⁾。H08 は蒸発量や流出量を計算する陸面サブモデル、河川流量を計算する河川サブモデル、耕作期間や農作物の収量を推定する作物成長サブモデル、農業・工業・生活用水の取水を扱う取水サブモデル、世界の主要な貯水池を操作する貯水池操作サブモデル、河川生態系のために河道に維持する流量を設定する環境用水サブモデルからなる。

本研究では陸面サブモデルと河川サブモデルのみを利用

用した。なお、両サブモデルとも、個別の流域での水文パラメータのチューンには行わず、気候帯ごとに同一のものを用了。H08 のソースコードの改変を行い、準リアルタイムシミュレーションに対応させた。すなわち、熱・水収支を完全に閉じさせつつ、計算の中断・再開に柔軟に対応できるようにした。

(2) データ

H08 の入力データは気象データと地理データに大別される。

本研究で利用した全球気象データはJCDAS である。電力中央研究所と気象庁は過去25 年分の長期再解析データJRA-25 を公開している⁵⁾。これは、1979 年から2004 年にかけて、一つの数値解析予報システムを利用して同化サイクルを実行して開発された全球気象データである。このシステムによる計算を現在まで延長し続けているのがJCDAS である。空間解像度 T106 (ガウス格子、東西320×南北 160 格子、赤道付近でおおよそ1.125°×1.125°) の6 時間単位のデータが約2 日の遅れで提供されている(これをもって準リアルタイムと呼ぶことにする)。正確には2004 年までがJRA-25、それ以降がJCDAS となるが、簡便のため、以下では両者ともJCDAS と呼ぶことにする。

JCDAS が提供する気象要素は多数あるが、H08 の入力データとして利用したのは表-1 に示す7 要素である。ここで、モデル面解析値である気温、比湿、風速、気圧は数値解析予報システムの計算結果に加え、地上気象観測、ゾンデ観測、航空機観測、衛星観測などの観測値が反映されており、信頼性が高い。一方、2次元物理量モニターである降水量、下向き短波放射、下向き長波放射は数値解析予報システムの計算結果のみが含まれ、観測による制約が少ないという点で信頼性がやや低い。入力データは1986 年以降現在まで取得した。また、更新分を取得するプログラムも作成した。後述する地理データと整合させるため、取得したデータは全て1°×1°の等格子間隔に変換した。降水量は近藤(1994)を利用して降雨量と降雪量に分類した⁸⁾。

このほかに、Global Soil Wetness Project Phase 2 (GSWP2) による全球気象データも用意した。これは全球を1°×1°の等格子間隔で、1986～1995 年の10 年間で6 時間単位でカバーしている^{6) 9)}。GSWP2 データは各種の月単位地上観測データを基本とし、日々変動や日周期の情報をERA40 再解析¹⁰⁾から得て開発されたデータで、少なくとも開発された時点で最も信頼性の高い全球気象データの一つであった。この気象データを利用してH08 は入念な

検証が実施されている⁶⁾。

H08 を利用するために必要な、河道網地図、アルベド(地表面反射率)等の地理データは全て Hanasaki et al. (2008a)で示されたものを利用した⁶⁾。空間解像度は1°×1°である。

表-1 本研究で利用したJCDAS の要素

要素	出典	略語
気温	モデル面解析値	Tair
比湿	モデル面解析値	Qair
風速	モデル面解析値	Wind
気圧	モデル面解析値	PSurf
降水量	2次元物理量モニター	Rainf Snowf
下向き短波放射	2次元物理量モニター	SWdown
下向き長波放射	2次元物理量モニター	LWdown

(3) 実験・解析方法

本研究では、対照実験、本実験、追加実験の3種類を実施した。まず対照実験はHanasaki et al. (2008a,b)と全く同じ条件で実施した(同研究の追試ともいえる)^{6) 7)}。入力気象データはGSWP2であり、期間は1986-1995 である。次に本実験は入力気象データにJCDAS を利用して実施した。計算期間は1986 年から現在(2012 年12 月31 日)までである。気象データ以外の条件は、対照実験と同一である。追加実験は本実験と同一であるが、降水量データのみGSWP2 に差し換えて実施した。

本研究では、大きく分けて三つの検討を行った。第一に、JCDAS とGSWP2 の全球気象データを比較・考察した。第二に、本実験と対照実験により得られた水文諸量(河川流量・土壌水分量・積雪水当量)を比較・考察した。ここでは特に4つの河川に着目した。世界の主要な穀倉地であり、近年旱魃にも見舞われたアメリカ中西部、ロシア西部、オーストラリア西部を代表する河川としてそれぞれミシシッピ川、ヴォルガ川、ダーリング川、そして2011 年に記録的な洪水被害のあったタイのチャオプラヤ川である。しかしチャオプラヤ川は他の河川と比べて流域面積が小さいため、隣接する大河のメコン川に着目することにした。これらの二つの検討を実施したのはJCDAS とGSWP2 の期間が重なる1986-1995 年である。第三に2003-2012 年の本実験の結果を解析し、期間中に発生した50-100 年に一度という規模の旱魃・洪水イベントがどのようにとらえられているのかを考察した。

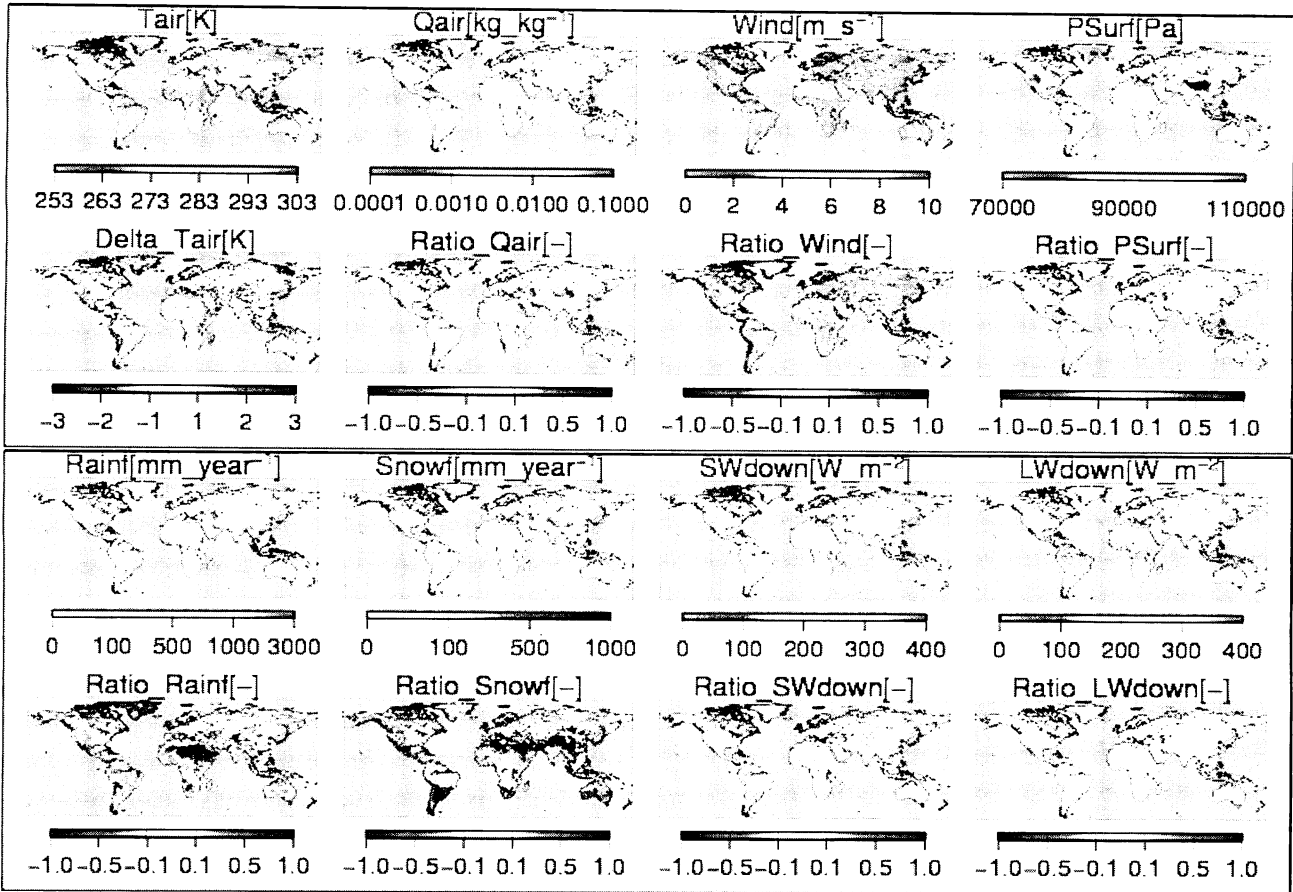


図-1 JCDAS の8つの気象要素とそのGSWP2からの偏差。略語は表-1を参照のこと。

3. 結果と考察

(1) JCDAS と GSWP2 の比較

まず、JCDAS の8つの気象要素とその GSWP2 からの偏差を図-1 に示す。まず、モデル面解析値の出力である気温、比湿、気圧には大きな差がなかった。ただし、風速は GSWP2 (ERA40 と同じ) に比べると多くの地域で10%以上小さい傾向があった。次に、2次元物理量モニターの出力である下向き長波は GSWP2 とよく一致した。降雨量にはアフリカ北部・南部、アメリカ西部、オーストラリア中部など、乾燥域において大きい傾向が見られ、逆にアマゾン川流域では小さかった。それ以外の地域での差は10%程度に収まった。降雪量はユーラシア大陸の高緯度において GSWP2 より小さく、その他の地域で大きかった。両者の違いは大きく、差が10%を超えるところが多かった。下向き短波は GSWP2 に比べて全球的に10%以上大きかった。

風速と下向き短波放射には JCDAS と GSWP2 に系統的な差がみられ、今後詳細な調査が必要である。仮に GSWP2 が真値に近いとすれば、JCDAS の風速の弱さは流出量を過大に、短波放射の強さは逆に過小に評価することにつながる。降雪量の差は大きかったが、GSWP2 では雨量計補正が行われたことに留意する必要がある。こ

れは強風下における降雪の捕捉率低下を補うための操作だが、特にユーラシア大陸で強い補正効果があった(元の観測データより降雪量が増えた)。このことが、ユーラシア大陸における JCDAS と GSWP2 の差異を説明するかもしれない。

2次元物理量モニターの出力である降水量、下向き短波、下向き長波は河川流量や土壌水分量といった水文諸量の計算結果に大きな影響を与える。そこで4河川においてさらに詳細に分析した結果を図-2 に示す。長波放射は月変動も含めて、GSWP2 と非常に一致した。ただし、ダーリング川では夏季に値が小さかった。短波放射も、季節変動やその振幅は GSWP2 とおおむね一致したが、一貫して過小評価の傾向があった。また、ミシシッピ川の1992年、ヴォルガ川の1990年、ダーリング川の1992-1993年、メコン川の1995年など、GSWP2 では平年に比べて落ち込んでいる時期に JCDAS は平年に近い値を取る傾向があり、これらの年では乖離が大きかった。次に降水量だが、ダーリング川とヴォルガ川の1990年以降などで季節変動や年々変動に関して、JCDAS は GSWP2 とよい一致を見せた。ただし、月変動までは合致していない。ミシシッピ川とメコン川では JCDAS は GSWP2 より全般的に降水量が大きかった。また、年々変動に関しても他の2河川ほどには一致が見られなかった。

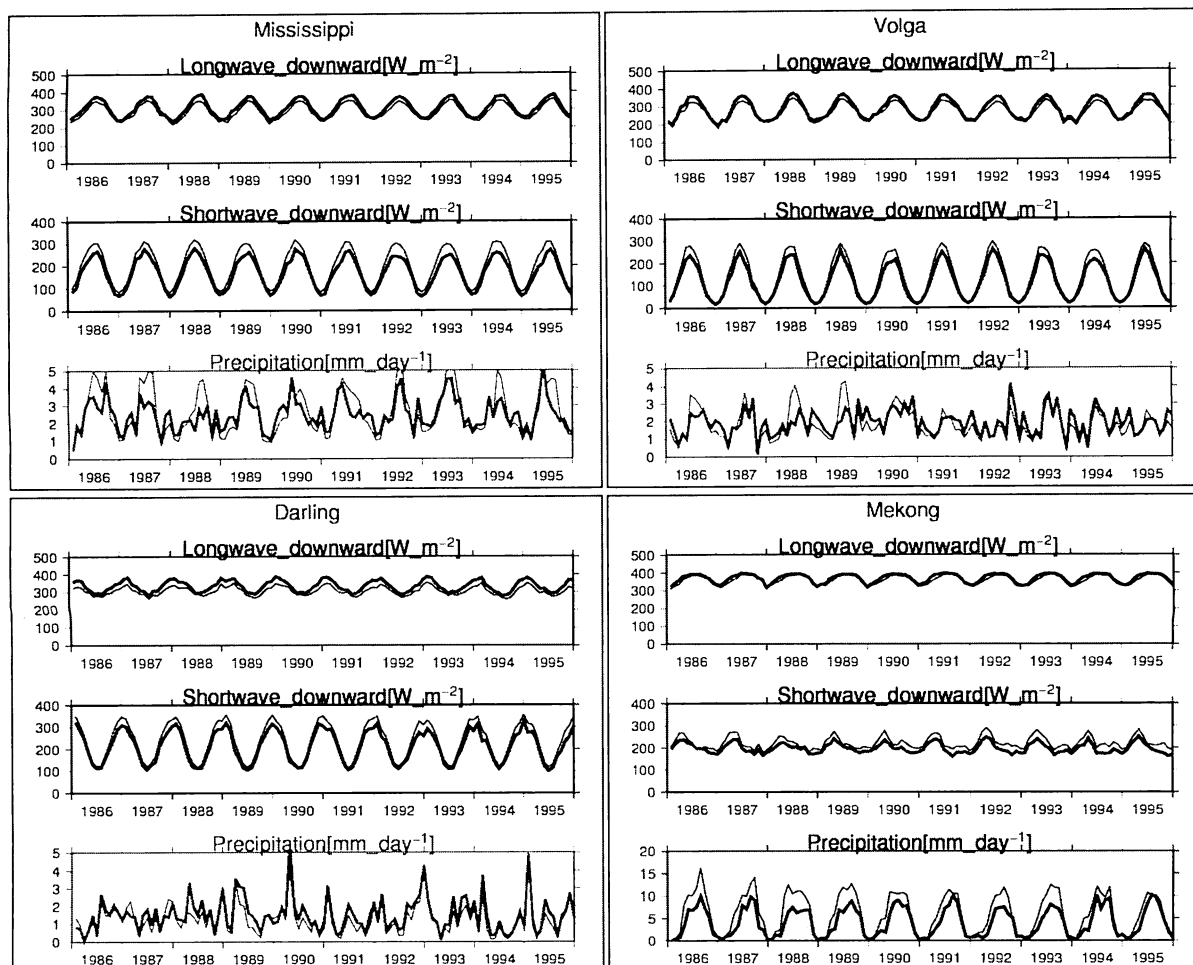


図-2 4河川における下向き長波・下向き短波・降水量の時系列の比較。太線がGSWP2、細線がJCDAS。

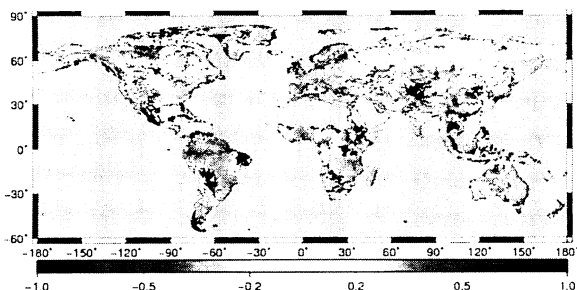


図-3 本実験の流量の対照実験からの偏差。

(2) 本実験と対照実験の比較

次に1986-1995年について、本実験と対照実験の比較を行った。図-3は流出量の比較を示している。これを見ると広範な地域で流出量に20%以上の偏差が現れたことが分かる。例えばアマゾン川流域は赤く示されており、これは本実験の流量が対照実験よりかなり小さいことを示す。この原因は図-1に示されたように、降雨量が小さく、下向き短波放射量が大いことにあると考えられた。

図-4には4河川の1986-1995年の河川流量、土壌水分量、積雪水当量の時系列を示す。結果は観測地点ごとに示されており、ミシシッピ川はVicksburg、ヴォルガ川はVolgograd、ダーリング川はWalgett、メコン川はPakse地点のものである。

まず、対照実験の結果を見ると、ミシシッピ川とメコン川において流量の年々変動や季節変動の再現性が高かった。ヴォルガ川では、全般的に過大評価の傾向がみられたが、冬季流量だけは過小評価だった。ヴォルガ川には多数の貯水池があり、冬季に放流が行われるが、本研究ではその貯水池操作を無視していることが原因と考えられる。ダーリング川の河川流量は大幅な過大評価だった。広域水文モデルのシミュレーションにおいて、乾燥地の流量の再現性は一般に低いことが知られており¹⁾、早期の改良は困難かもしれない。ただし、1988-90年に他の年より流量が多かったことはとらえられている。

次に、本実験の結果をみる。ミシシッピ川とメコン川では流量の再現性が対照実験に比べて非常に悪くなった。ミシシッピ川では系統的な過小評価が見られ、季節変動の振幅も大幅に小さい。メコン川では系統的な過大評価が見られ、年々変動がほとんどなくなってしまっている。ヴォルガ川とダーリング川では、ハイドログラフの再現性は向上している。図-2においてGSWP2とJCDASの降水量が比較的良好一致を見せていたことを踏まえると、おそらく、下向き短波放射量が増加し、蒸発量が増したため、流出量が減り、過大評価が縮小したのだと考えられる。

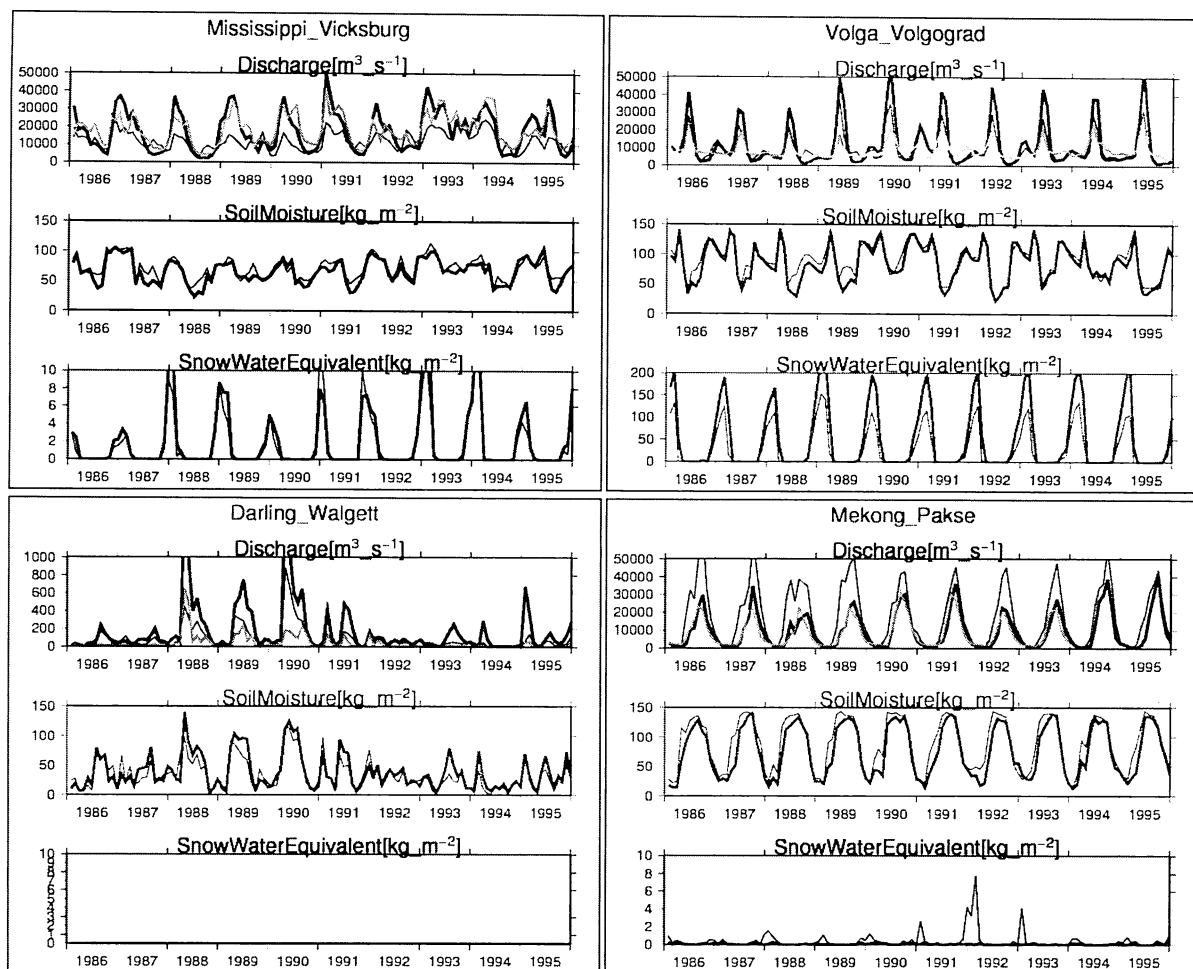


図-4 1986-1995 年の水文諸量の時系列。黒色の太線が対照実験、黒色の細線が本実験、灰色の太線が観測である。

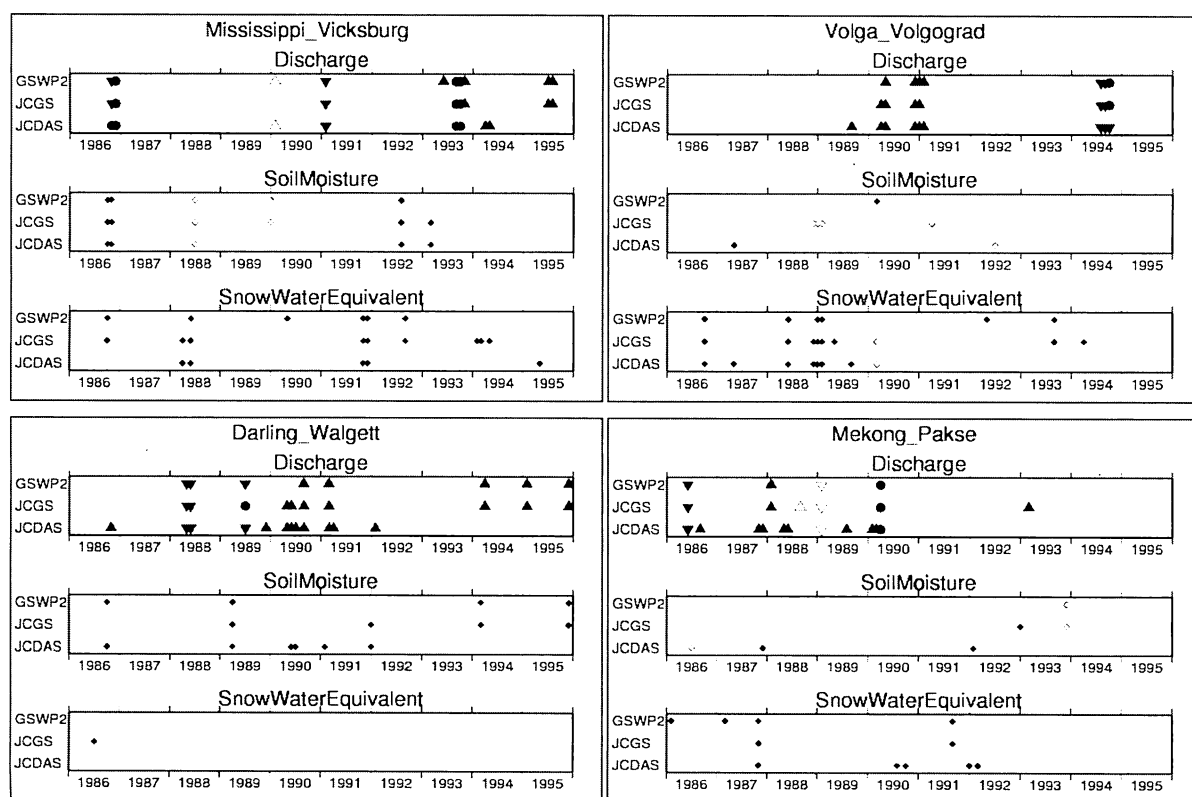


図-5 1986-1995 年の旱魃・洪水イベント検出の成否。記号の種類は表-2 を参照のこと。GSWP2 は対照実験、JCGS は追加実験、JCDAS は本実験の結果を示す。

表-2 主要な旱魃・洪水イベント検出の成否を表す記号

		観測結果			
		なし	旱魃	平常	洪水
実験 結果	旱魃	◇	○	△	☆
	平常		▽		▼
	洪水	◆	★	▲	●

図-4 で明らかになったように、少なくとも4河川において、流量の大まかな変動は本実験でも対照実験でもとらえられている。そこで、主要な旱魃・洪水イベントが捉えられているのかを調べた。まず、月別に流量の平年からの偏差を求め、それが標準偏差の2倍を超えるイベントを主要な旱魃・洪水イベントとみなした。これを観測、本実験、対照実験に関して求めた。本実験と対照実験の観測と一致具合、すなわち主要な旱魃・洪水イベント検出の成否は表-2 に示す記号で整理した。●は一致（検出成功）、▲は空振り（実験は旱魃・洪水と判定したが観測は平年だった）、★は逆さ（旱魃・洪水を逆に判定した）、▼は見逃し（観測では旱魃・洪水だったが実験は平年とみなした）を示す。塗りつぶしは洪水を、白抜きは旱魃を示す。1986-1995 年の河川流量について結果を示したのが図-5 の上段である。まず、本実験はミシシッピ川の1986 年と1993 年の4 か月分の洪水イベントを捉えることに成功した。しかし、3 回の空振りと1 回の見逃しがあった。ヴォルガ川とダーリング川では成功はなく、それぞれ6 回の空振りと3 回の見逃し、9 回の空振りと3 回の見逃しであった。メコン川では1 回成功があり、8 回の空振りと2 回の見逃しがあった。

ここで、対照実験についても同じく図-5 に結果を示した。本実験と大きく成績は変わらないものの、ミシシッピ川以外で空振りが減ったことが分かる。ヴォルガ川では6 回から4 回に、ダーリング川では9 回から5 回に、メコン川では8 回から1 回に減少している。この違いの原因は、図-2 において検討した通り、降水量データの精度の違いである可能性がある。そこで、本実験における入力気象データのうち、降水量だけを GSWP2 に差し換えた追加実験を行い、その結果も図-5 に示した。この追加実験の結果は対照実験とよく似ており、降水量データの精度向上が、空振りを減らす効果があることが示唆された。

図-5 の中段・下段にあるのは土壌水分量と積雪水当量について同じ検討を行った結果である。土壌水分量と積雪水当量の正の偏差は洪水イベントと、負の偏差は旱魃イベントと関連があると考えられる。しかし、今回の結果からは、旱魃・洪水イベントとの関連が明瞭には見られなかった。唯一の例外はミシシッピ川の1986 年で、洪

水検出に成功した 1-2 か月前に土壌水分量の高い偏差を検出している。

(3) 近年の大規模な旱魃・洪水

最後に本実験が近年の大規模な旱魃・洪水をどのように表現しているのかを解析した。ここでは特に2012 年のアメリカ中西部の旱魃、2010 年のロシア西部の旱魃、2006-2007 年のオーストラリア東部の旱魃、2011 年のタイの洪水に着目する。3 つの旱魃は世界の重要な穀倉地帯を襲い、収量の大幅な低下という被害をもたらした。アメリカの旱魃は1956 年以来¹¹⁾、ロシアの旱魃は130 年に1 度¹²⁾、オーストラリアの旱魃は100 年に1 度¹³⁾という規模であった。またタイの洪水は50 年に1 度の降水量がもたらしたとされる¹⁴⁾。図-4・図-5 と同様の図を2003-2012 年について示したのが図-6・図-7 である

まずアメリカ中西部を集水域とするミシシッピ川の水文諸量であるが、図-6 より2012 年の流量と土壌水分量が平年に比べて極端に小さいことが分かる。また図-7 より、土壌水分に関しては旱魃を4 か月検出した。次にロシアの穀倉地帯を流れるヴォルガ川であるが、図-6 から2010 年は流量が他の年より小さく、さらに、夏季の土壌水分も非常に小さかったことが分かる。その極大となった月は、旱魃を検出できた（図-7）。オーストラリアの穀倉地帯を流れるダーリング川の場合、2006-2007 年の流量・土壌水分量は低めに推移しているが、2003 年など他の年もそれに匹敵しており、旱魃の検出はできなかった。図-6 を見るとタイのチャオプラヤ川は2011 年の前半の流量が他の年より極端に大きく、4 か月の洪水を検出している。これは雨期の開始が早く、平年より数か月早く出水が発生し始めた事実とよく一致している¹⁴⁾。これらの結果から、50-100 年に一度といった旱魃・洪水イベントについては本実験でも存在を捉えられる可能性が示唆された。

4. まとめと今後の課題

気象庁気候データ同化システム JCDAS と全球水資源モデル H08 を利用した準リアルタイムシミュレーションシステムの構築に向けて、過去の水文諸量の再現性と主要な旱魃・洪水イベントの検出可能性を調査した。1986-1995 年の10 年間については、平均的な水文諸量には再現性が見られたものの、降水量の精度不足が一つの原因で、期間中の主要な旱魃・洪水イベントは十分に検出できなかった。2003-2012 年の10 年間に起きた50-100 年に1 度の旱魃・洪水イベントについては検出可能性が示唆された。

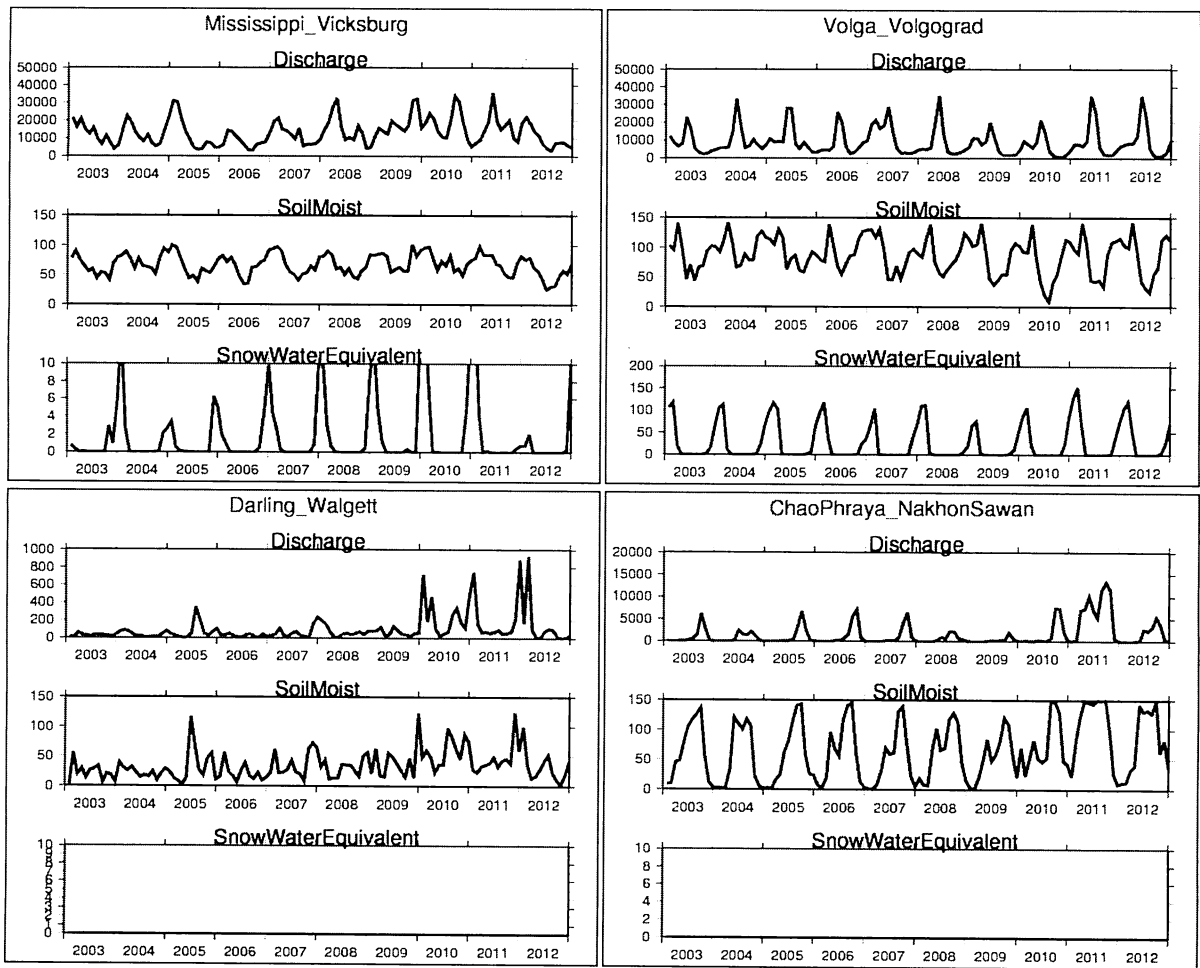


図-6 2003-2012 年の水文諸量の時系列。黒色の太線が本実験である。

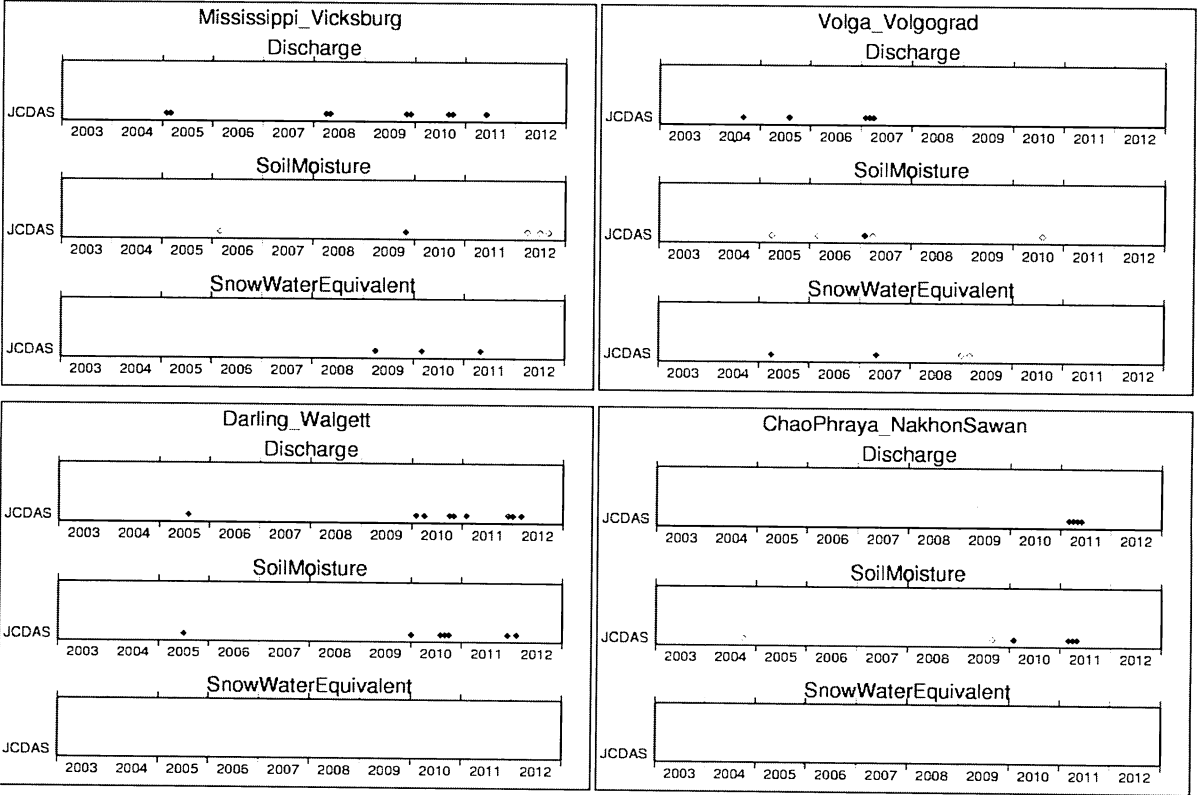


図-7 2003-2012 年の旱魃・洪水イベント検出の成否。記号の種類は表-2 を参照のこと。JCDAS は本実験の結果を示す。

本研究の結果と考察から導かれた今後の課題は四つある。第一に、降水量の精度を向上させる必要がある。JCDASは降水量の年々変動や季節変動をとらえきれていないケースがあった。例えば日本の AMeDAS のように地上観測雨量情報がほぼリアルタイムで公開されている流域の場合、降水量をこれらに差し換えることができれば、大幅にシミュレーションの精度を向上させられる可能性がある。第二に、H08 の水文パラメータのチューンを行う必要がある。入力である全球気象データに不確実性を含むこと、検証データが限られること、パラメータに強い地理的不均一性があることから、全球水文モデルの水文パラメータはなんらかの法則や規則から導かれる世界一律の値が使われることが多かった。しかし、全球気象データの精度が向上し、検証データの入手可能性も向上しているので、実現可能な流域だけでも水文パラメータのチューンを実施することで、水文諸量のシミュレーションの精度を向上させられると考えられる。第三に、本研究では自然水循環に関するサブモデルのみを利用したが、取水や貯水池操作などの人間活動に関するサブモデルも利用して、検証と改良を続けることが必要である。本研究で検討を行ったヴォルガ川など、貯水池操作による影響を強く受けている河川では、精度の向上が期待できる。その反面、貯水池操作や水利用には人間・社会の判断が含まれており、モデルにおいて一般化しきれないので困難もつきまとうだろう。第四に、結果の解析方法を改良する必要がある。例えば、本研究では主要な旱魃・洪水イベントを平年値からの偏差が標準偏差の2倍以上離れたものと定義したため、例えば低水期における流量の低下を原理的に旱魃として検出しにくいという問題などがある。また、本研究では旱魃・洪水イベントを先行する指標として土壌水分量と積雪水当量に着目したが、洪水や旱魃イベントとの関連が見られたのは稀であった。実際に起きたイベントのメカニズムにさかのぼり、モデルの再現性を検討しつつ、先行指標を見つけることが必要である。

近年、全球水文モデルは自然の水循環に加え、取水や貯水池操作なども扱えるように拡張されており、農業生産性推定モデルとの結合も行われてきている。本研究で得られた知見は、全球水文モデルをリアルタイムで運用していくための基礎となるものだと考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 23760468 の成果の一部である。利用したデータセットは気象庁及び電力中央研究所による JRA-25 長期再解析プロジェクトにより提供されたものである。

参考文献

1) Haddeland L., et al.: Multimodel Estimate of the Global Terrestrial

- Water Balance: Setup and First Results, *J. Hydromet.*, Vol. 12, pp. 869-884, 2011.
- 2) Hagemann S., et al.: Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models, *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, Vol. 3, pp. 1321-1345, 2012.
- 3) 芳村圭, 岡澤毅, キムヒュンジュン, 瀬戸心太, 小岩祐樹, 沖大幹, 鼎信次郎: 気象予報モデル GPMV を用いた日本域河川流量予測システムの構築と検証, 水工学論文集, Vol. 51, pp. 403-408, 2007.
- 4) Alfieri L., Burek P., Dutra E., Krzeminski B., Muraro D., Thielen J., and Pappenberger F.: GloFAS – global ensemble streamflow forecasting and flood early warning, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp. 1161-1175, 2013.
- 5) Onogi K., et al.: The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II*, Vol. 85, pp. 369-432, 2007.
- 6) Hanasaki N., et al.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 12, pp. 1007-1025, 2008.
- 7) Hanasaki N., et al.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 12, pp. 1027-1037, 2008.
- 8) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 1994.
- 9) Dimmeyer P. A., et al.: GSWP-2 - Multimodel analysis and implications for our perception of the land surface, *B. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 87, pp. 1381-1397, 2006.
- 10) Uppala S. M., et al.: The ERA-40 re-analysis, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 131, pp. 2961-3012, 2005.
- 11) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Drought and Heat Wave of 2012: Midwest and Great Plains, http://www.crh.noaa.gov/images/crh/CRROC_Heat_and_Drought_Update.pdf, 2012.
- 12) 農林水産省: 海外食料需給レポート 2010, 農林水産省, 2011.
- 13) 平澤明彦: 不安定要素の増すオーストラリアからの小麦、農林金融, Vol. 61, pp. 511-523, 2008
- 14) Komori, D. et al.: Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in Central Thailand, *Hydrol. Res. Lett.*, Vol. 6, pp. 41-46, 2012.