

ナイル川流域における多国間水資源開発コンフリクトに関する研究

安部雅宏⁽¹⁾・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄

(1) 国土交通省四国地方整備局山鳥坂ダム工事事務所

要 旨

本稿では、国際河川流域国間の水資源開発コンフリクトの解決を目的とした水文モデルとコンフリクト解析の統合手法を提案する。空間解像度20kmのMRI-AGCMとCMIP3による21世紀末予測気候値を大気境界条件とし、農業開発シナリオを設定の下、陸面過程モデルSiBUCと分布型流出モデルHydro-BEAMによる陸域水循環モデルをナイル川全流域に適用する。実行可能領域内で定性的選好順序間の事象を正しく取り入れていくには、段階的にオプションを組込んでいけばよい。この組込みを陸域水循環モデルを用いたシナリオ分析の自然な拡張として実行する方法を提案する。モデル出力値をベースにコンフリクト解析を行う際に生じた発生事象を視覚化する手法も提案する。さらに複数均衡解に対し、20年渇水をナイル川全流域の計画渇水とする場合、各流域国に対して推奨される農業開発度の上限値は40%であることを得た。今後、本研究成果について意思決定者により議論されシナリオ・基本要素の設定等にフィードバックが与えられることが期待される。

キーワード: 国際河川流域管理, 陸域水循環モデル, コンフリクト解析, ナイル川全流域

1. 研究背景・目的

ナイル川は世界最長(約6,700km)の河川であり、流域内11カ国により共有されている。その源流は面積世界第3位(約68,000km²)のビクトリア湖であり、ケニア、ウガンダ、タンザニアの3カ国に囲まれる国際湖沼である。ビクトリア湖からサハラ砂漠を通過して地中海に到達する。エジプト、スーダン及び南スーダンのナイル川下流域国では、大部分が砂漠気候であり、降水量は微々たるものである。その昔、ギリシャの歴史家ヘロドトスは「エジプト文明はナイルの賜である」と言ったが、下流域国の水資源国外依存度は極めて高い。FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)のAquastat統計値(以下、Aquastat)によると、エジプトの水資源国外依存度は96.9%と報告されている。

21世紀に入り、水危機、食糧危機を警告する声が強くなってきたようである。特にナイル川は水紛争が生じている国際河川として警告されている(例えばUNESCO, 2009)。1998年から2002年にアスワンハイダムに到達した年平均観測流量は約72(Gt/year)である。Aquastatによると、エジプトの年農業使用水量

は59(Gt/year)である。そのまま到達流量と使用流量の差をとると13(Gt/year)となり、ナイル川の余裕は大きくないことが想像される。

加えてナイル川流域の灌漑面積が増加傾向にあることがわかっている。Aquastatによる灌漑面積(Irrigated area)と灌漑可能面積(Irrigation potential)との比をとると、エジプト、スーダン及び南スーダンは灌漑可能面積(容易に灌漑可能な土地面積)の内、既に約7割を灌漑域として利用しているが、他国は約1割のみを灌漑域として利用し、まだ十分に灌漑域を拡大することが可能である。Aquastatによる灌漑時系列データによると、上流域国の灌漑面積は1960年代から徐々に増加傾向にある。このまま流域国が各々水資源開発を続けると、ナイル川への水需要量が供給量を上回り、水資源争奪が生じると想定される。本稿ではこのナイル川の水資源争奪の可能性を問題提起し、その解決を目指す。

本研究の目的は、「水文モデルとコンフリクト解析の統合」を行い、「気候変動、水資源開発考慮時のナイル川コンフリクト解消」に向けた分析を行うことである。コンフリクト解析はゲーム理論でいう非協力ゲームのメタゲームでのアルゴリズムを拡張

発展させた分析手法であり、現在に至るまで政治学、経済学及び土木計画学等多くの分野に跨って適用されてきた(例えば坂本ら, 2005)。メタゲームの「メタ」には基本的な戦略形ゲームからさらにその背後まで掘り下げて相手の行動を考え自身の行動を選択するというニュアンスが込められており、目的関数を最大化させる最適化手法とは均衡解の意味が異なる。実行可能領域内で、定性的選好順序間の事象を正しく取り入れていくには、段階的にオプション(戦略)を組込んでいけばよい。本稿ではこの組込みを、陸域水循環モデルを用いたシナリオ分析の自然な拡張として実行する方法を提案する。本手法が示す分析結果が流域国の意思決定者により議論され、シナリオ・基本要素の設定等にフィードバックを与え発展していくと、本研究手法の役割である、「再現性をもつ意思決定の判断材料」として国際流域管理に貢献することができると思われる。

2. 水文モデルとコンフリクト解析の統合

2.1 解析手順

本研究の解析手順を説明し、全体像を示す。Fig.1は本研究の全体像を表すフロー図である。解析手順は、入力データの作成、シミュレーション、出力値の検証と考察、出力値を用いた解析・議論の4段階に分けられる。

入力データは標高、土地被覆、土地利用データ等の地表面入力データと降水量、気温、下向短波放射、下向長波放射、比湿、地表面気圧、風速等の気象要素入力データの2種類に分類できる。本研究では、現地観測データを入手することが困難なため、全球を対象としている衛星観測データを広く用いている。Table1に入力データの一覧を示す。これらの入力データを陸面過程モデルSiBUCの境界条件、分布型流出モデルHydro-BEAMの地理情報、及び将来予測計

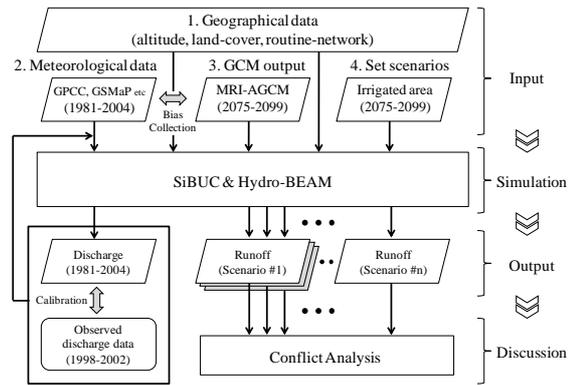


Fig.1 Procedure of analysis

算ではMRI-AGCMとCMIP3の出力値を用いる。陸域水循環モデルにより算定された出力をベースとしてコンフリクト解析に組込むことで、「気候変動、水資源開発考慮時のナイル川コンフリクト解消」に向けた分析を行う。第6章4節では本研究手法が示すナイル川コンフリクト解消案を示す。

2.2 陸面過程モデルSiBUC

SiBUC(Simple Biosphere Model including Urban Canopy)はSiB(Simple Biosphere Model)をベースに開発されてきた陸面過程モデルである(田中ら, 1994)。SiB(Sellers, 1986)は当時のGCMの格子サイズ(~100km)での陸面水文過程を表現していることに対し、SiBUCでは1km格子サイズの陸面水文過程を表現するため地表面状態を都市キャノピー、都市カバー、水面、緑地に分類している。さらに、灌漑取水量・灌漑排水量を作物種と水位値より算定する構造も導入されている。

予報変数(内生変数)と大気境界条件(外生変数)を説明する。SiBUCで表現される地表面要素を大きく分けると都市キャノピー(ビル家屋等の建物、コンクリート)、都市カバー(道路等の舗装面、アスファルト)、水体(河川、水路、湖沼等)、緑地(裸地、植生等の非

Table 1 Input data

プロダクト	パラメータ	空間解像度	時間解像度
SRTM30	標高	30 seconds	-
GLCC ver.2	土地被覆	30 seconds	-
ECOCLIMAP	土壌	30 seconds	-
SPOT-VEGETATION	NDVI	30 seconds	-
GPCC	降水量	1.0 degree	Monthly
GSMaP	降水量	0.1 degree & 0.25 degree	Hourly
H08	気温, 放射, 比湿	0.5 degree	Daily
JRA25 再解析	風速, 気圧	1.1 degree (水平)	6 hours
MRI-AGCM	気象7要素	0.1875 degree	Hourly & 3 hours
CMIP3	降水量	ex. 1.875 degree	Monthly

舗装面)の4種類に分けられる。上記の4種類の地表面要素に対するSiBUCの予報変数は合計16変数、分類としては表面温度(植物, 地面, 水面, 屋根面, 壁面, 路面), 地中温度(植生, 水体, 都市域), 遮断水分量(植物, 地面, 屋根, 道路), 土壌水分量(表層, 根層, 再補給層)の4種類である。

大気境界条件は参照高度における気温, 比湿, 気圧, 風速, 降水量, 下向短波放射量, 下向長波放射量の7種類である。それらの入力値として表面温度, 地中温度, 遮断水分量, 土壌水分量に関する水・熱収支式をタイムステップ1時間で解く。モデル詳細は先行研究(Tanaka, 2004)を参照されたい。

2.3 分布型流出モデルHydro-BEAM

Hydro-BEAMは流域環境評価を目的に開発された分布型流出モデルである(例えばKojiri, 2006)。本研究ではSiBUCの出力値をHydro-BEAMに受け渡して水文量を評価する手法(小槻ら, 2011)をナイル川に適用する。Hydro-BEAMの予報変数は流量のみである。前述した入力データをSiBUC出力から受け取り, kinematic wave式により表面流と河道流を算定する。

本稿では計算タイムステップ10分とする。計算順序は上流域から落水線に従い計算を行う。落水方向は8方向であり, グリッド毎に落水方向が決定される。作成手順は集水面積が10,000km²以上のサブグリッド(以下河道グリッド)が存在するメッシュに対して落水方向を決定する。そして河道グリッドの存在しないメッシュの落水方向を決定する。本手法では, 集水面積の大きい河川の落水方向が優先されて決定されるため, 河川における主河道の追跡が可能である(Fig.2)。落水線中に設けてあるダム地点では放流量操作を行う。

2.4 新しいコンフリクト解析: 水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析

(1) N人コンフリクト解析

本節では一般的なn人コンフリクト解析の数理を説明する。これにより, 次節で提案する方法の違いがより明確になる。コンフリクト解析は, ゲーム理論という非協力メタゲームにおけるアルゴリズムを拡張発展させた分析手法である。ここでいうコンフリクトとは, 岡田ら(1988)によると, 「なんらかの点で違いがある人や組織や社会が緊密に接触するとき, そこにもの考え方や価値観や利害に衝突が生じる(あるいは生じている)状態」と説明されている。コンフリクト解析は, 3つの基本要素(i)プレイヤー, (ii)オプション, (iii)選好順序により構成される。

プレイヤーとは, ゲーム(意思決定)を行う主体(当

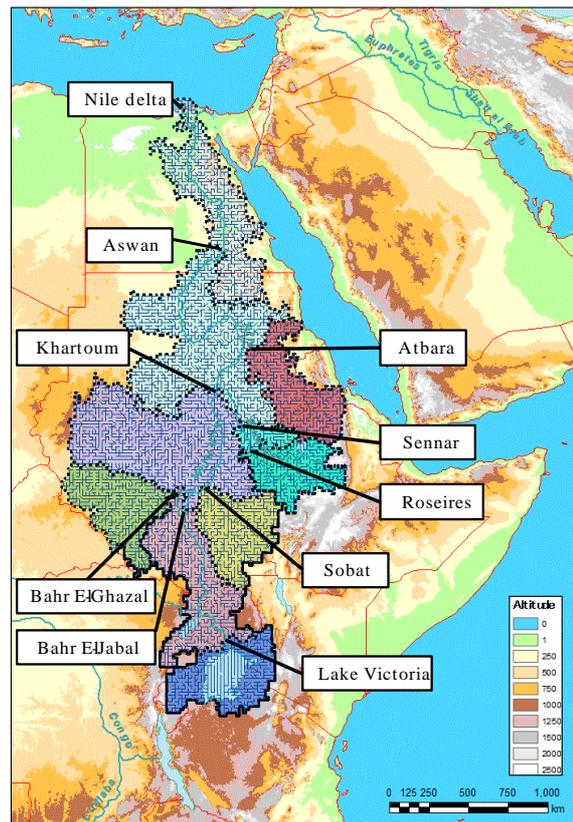


Fig.2 Flow routing in the Nile River Basin

事者)である。本研究では, プレイヤーの基本単位を国とし, エジプト, スーダン&南スーダン, エチオピア, 白ナイル上流域国として議論を進める。オプションとは, プレイヤーの選択肢である。ゲーム理論の分野では戦略とも呼ばれるが, ここでは, 慣例に従いオプションと記載する。選好順序とはオプションの優劣の関係である。本研究では序数型メタゲーム, つまり利得と効用が45度線型関数で表わされている状況を取り扱う。

n人コンフリクトにおける全ての発生事象の集合は, 次のように全プレイヤーのオプション集合の直積で表現される。

$$Q = S_1 \times \dots \times S_n \quad (1)$$

ここで, Q は発生事象の集合, S_i はプレイヤー*i*の戦略の集合である。ある戦略が集合 S_i の要素であることを示すときは記号 s_i を用いる($s_i \in S_i$)。すなわち, 集合 Q は各オプション集合から1つの要素を選ぶすべての組合わせからなる集合である。集合 Q の要素を q で表わすことにする($q \in Q$)。

n人コンフリクト解析において, 各プレイヤーは各々の選好順序に従い実現可能なオプションの中から意思決定を行う。コンフリクト解析のアルゴリズムにはプレイヤーAは発生事象 q からの一方的改

善(Unilateral Improvement: UI)を考えるという過程がある。一方的改善は次のように定義される。

$$m_i^+(q) = m_i(q) \cap M_i^+(q) \quad (2)$$

ここで、集合 $m_i^+(q)$ を一方的改善、 $m_i(q)$ は一方的到達可能な発生事象、 $M_i^+(q)$ はプレイヤー i にとって発生事象 q よりも好ましい発生事象 q の集合である。一方、プレイヤー i にとって発生事象 q よりも好ましくない発生事象 q の集合を $M_i^-(q)$ と表わす。なお、一方的到達可能な発生事象とは、発生事象 $q = (\bar{s}_i, \bar{s}_{N-i})$ に対して、

$$m_i(q) = \{(s_i, \bar{s}_{N-i}) \mid s_i \in S_i\} \quad (3)$$

ここで、 N は n 人のプレイヤーの集合、添字の $N-i$ は集合 N からプレイヤー i を除いた集合である。記号 " \bar{s} " はその戦略を固定して考えることを示している。 M_i は各プレイヤー i に対する選好関数を意味し、 Q から集合 Q の中集合 $B(Q)$ への対応として定義する。

次に均衡解に関して説明する。前述の通り、コンフリクト解析では各プレイヤーが各々の選好順序に従い合理的な意思決定を行う。ここでいう「合理的」とは次の条件を満たすときをいう。発生事象 $q = (\bar{s}_i, \bar{s}_{N-i})$ がプレイヤー i に対して合理的、すなわち $q \in R_i$ であるための条件は、他のプレイヤーの戦略 \bar{s}_{N-i} を固定したときプレイヤー i が戦略 s_i をどのように選んでも q より好ましい発生事象を見つけることができないというものである。従って、プレイヤーに対して合理的であるとは、

$$R_i = \{q \mid \forall s_i, (\bar{s}_i, \bar{s}_{N-i}) \in M_i^-(q)\} \quad (4)$$

と表現できる。そして、すべてのプレイヤーに対して合理的である発生事象を均衡解と呼ぶ。コンフリクト均衡解を特徴づけるのが解析中に含まれる不可避的制裁(抑止力)という概念である。発生事象に対して次式(5)が成り立つとき、不可避的制裁(抑止力)が存在するという。

$$\exists s_{N-i} \quad \forall s_i: (s_i, s_{N-i}) \in M_i^-(q) \quad (5)$$

式(5)は S_{N-i} によりプレイヤー i の選好を下げるプレイヤー i 以外のプレイヤー $N-i$ による一方的改善が存在する場合、プレイヤーに抑止力が働くということを意味している。プレイヤー i に一方的改善は存在するが、不可避的制裁(抑止力)が存在しない、つまり発生事象 q がプレイヤー i に対する安定な発生事象の集合 R_i^* に含まれないための必要十分条件は、

$$m_{N-i}(p) \cap M_i^-(q) = \phi \quad (6)$$

であるような $m_i^+(q)$ の要素 p が存在することであり、逆にそのような p が存在しなければ発生事象 q は安定となり、集合 R_i^* の要素となる。このことをま

とめると、

$$\begin{aligned} (\exists p \in m_i^+(q) \mid m_{N-i}(p) \cap M_i^-(q) = \phi) \\ \Leftrightarrow q \notin R_i^* \end{aligned} \quad (7)$$

ところで、集合 $m_{N-i}(p)$ は $m_{N-i}^+(p) \cup m_{N-i}^-(p)$ と表わすことができるが、集合 $m_{N-i}^-(p)$ に属する発生事象は有効的ではなく、意味のある制裁とみなすべきではない。従って(7)は、

$$\begin{aligned} (\exists p \in m_i^+(q) \mid m_{N-i}^+(p) \cap M_i^-(q) = \phi) \\ \Leftrightarrow q \notin R_i^* \end{aligned} \quad (8)$$

と書き直せる。この(8)を用いてプレイヤー i に対する安定性を決定する。ここで、「安定」とは発生事象があるプレイヤーに対して(i)合理的発生事象、(ii)対称型メタ合理的発生事象、(iii)一般型メタ合理的発生事象のいずれかであるときをいう。その際その発生事象はそのプレイヤーに対して安定であるという。

コンフリクト解析を実際の問題に適用する際、効率的かつ見落としのないように各発生事象の各プレイヤーに対する性質を調べなければならない。Fig.3 にプレイヤー i に対する安定性を決定するアルゴリズムを示す。

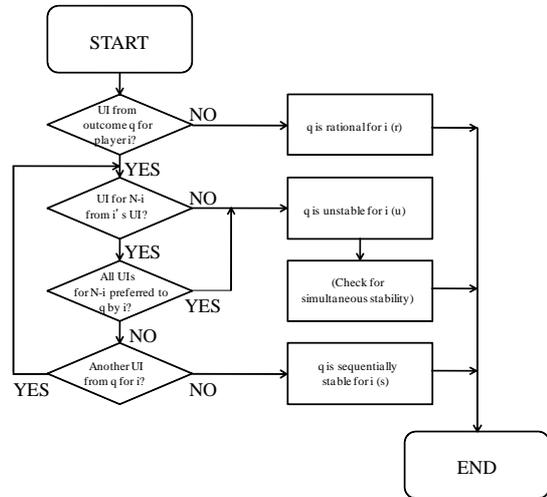


Fig.3 Algorithm of stability analysis(Okada, 1988)

(2) 水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析

本項では水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析について既存のコンフリクト解析と比較し説明する。本研究とこれまでのコンフリクト解析との大きな違いは、「合意形成の本質となる選択肢(オプション)の表現方法」にある(Table2)。既存の解析手法

では利害関係者の選択肢は定性的な表現, 例えば「国際河川の広域管理を推進する・推進しない」, 「上流国を信頼する・信頼しない」といった文言であった。その結果に対する考察も定性的な議論を行い, 分析者の見識による結論を出している。政策立案に対する大筋を評価する目的であれば, 既存のコンフリクト解析で帰結の大枠を把握できるため十分であるかもしれない。しかし, 第1章で問題提起した水資源争奪の可能性を分析し, 解決に貢献するためには定量的な分析が不可欠であると著者らは考える。本論文では, 将来農業開発を促進するのであれば, 「一体どの程度促進するのか, またその影響に対してどのような優先順位の下, 各主体は意思決定を行うのか」という判定を水文シミュレーションの結果をベースに行う」手法を提案し適用する。定量的オプションを解析に組み込むと定量的な議論が可能となるが, 一方対象とする発生事象数が指数関数的に増加し, 従来手作業で行っていた安定性分析が困難となるといった短所もある。本研究では基本要素の設定と, プレイヤー数分の選好順序さえあれば, 安定性分析を自動で行うプログラムを作成した。これにより, 従来取り扱うことが困難であった大量の発生事象を扱うことが可能となった。さらに, 安定性分析時に生じる複数の均衡解への分析(解の視覚化, 共通解の抽出, 解の絞込み)も重点的にを行い, 定量的な結論を得ることができることを確認した。第3,4,5章でナイル川流域における水文シミュレーション, 将来気候の検討, 及び土地利用シナリオ別の農業使用水量の変化を計算し, 第6章で本研究手法の適用結果を報告する。

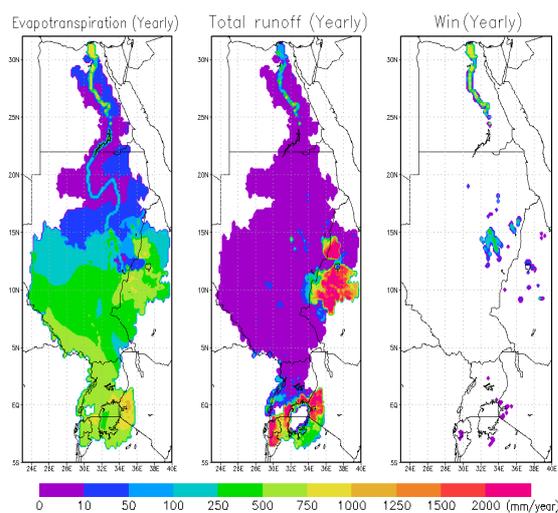


Fig.4 Distribution map of water balance components (Evap, Qs+Qb, Win)

3. 地表面水文量の検証

3.1 地表面水文量の季節性の考察

ナイル川全流域における地表面水文量に関して考察する。Fig.4 に陸面過程モデル SiBUC による算定結果を示す。それぞれ左から蒸発散量, 総流出量(表面流出量+地中流出量), 灌漑要求水量を示している。単位はいずれも(mm/year)である。ナイル川流域は南側は赤道直下の熱帯雨林気候であり, 一年中安定した降水量が観測されている。ビクトリア湖上で降水量が陸域より減少して観測されているが, ビクトリア湖集水域平均で約 900~1100(mm/year)である。中緯度帯西側はサハラ砂漠であり, 砂漠気候である。砂漠地帯では降水量は年数 mm 程度であり, 降雨が降るや否やすぐ蒸発し, 利用可能な水資源は皆無であると考えられる。中緯度帯東側は亜熱帯気候の特徴をもち, 降水量は年間約 750~950mm である。中緯度帯東側は雨季乾季がはっきりしており, 雨季は 6 月から 10 月である。この雨季に, 青ナイル川の流量が増大し, ロゼイレسدダム, スンナルダムを流れ, 白ナイル川と合流し, アスワンハイダムへと達する。赤道帯, 中緯度東側は共通して地中流出による流出が支配的であることが考察される。北側は地中海性気候の地域もあり, エジプトカイロ付近は冬期に降雨が観測されている。灌漑要求水量の時期は作物にもよるがおおむね 6 月から 10 月に灌漑用水が必要であることがわかる。

3.2 中流域の水収支解析

本節では前節で算定した地表面水文量を分布型流出モデルに受け渡し河川流量の再現精度を確認する。本研究対象であるナイル川は乾燥地域, 半乾燥地域, 熱帯地域と南北に気候帯を横断している流域面積 300 万 km² を越える大陸河川であり, いくつかの支流流域毎に水収支解析を行う必要がある。十分な流量算定精度を満たすには降雨入力データに対しても十分な精度が必要である。しかし, ナイル川流域は広範囲かつ観測データの公開に関して十分でないため, 観測降雨データのデータ整備が困難であること, 全球規模の衛星降雨観測データには依然としてその観測精度に課題を残す。そのため十分な精度の降雨データをグリッドレベルで整備することは極めて困難である。本研究では, 中流域代表地点の観測流量と算定流量の年平均値を一致させるように降雨量補正を中流域毎に行った。その結果, 算定精度は年総流量誤差 1 割程度以内となった(Fig.5)。

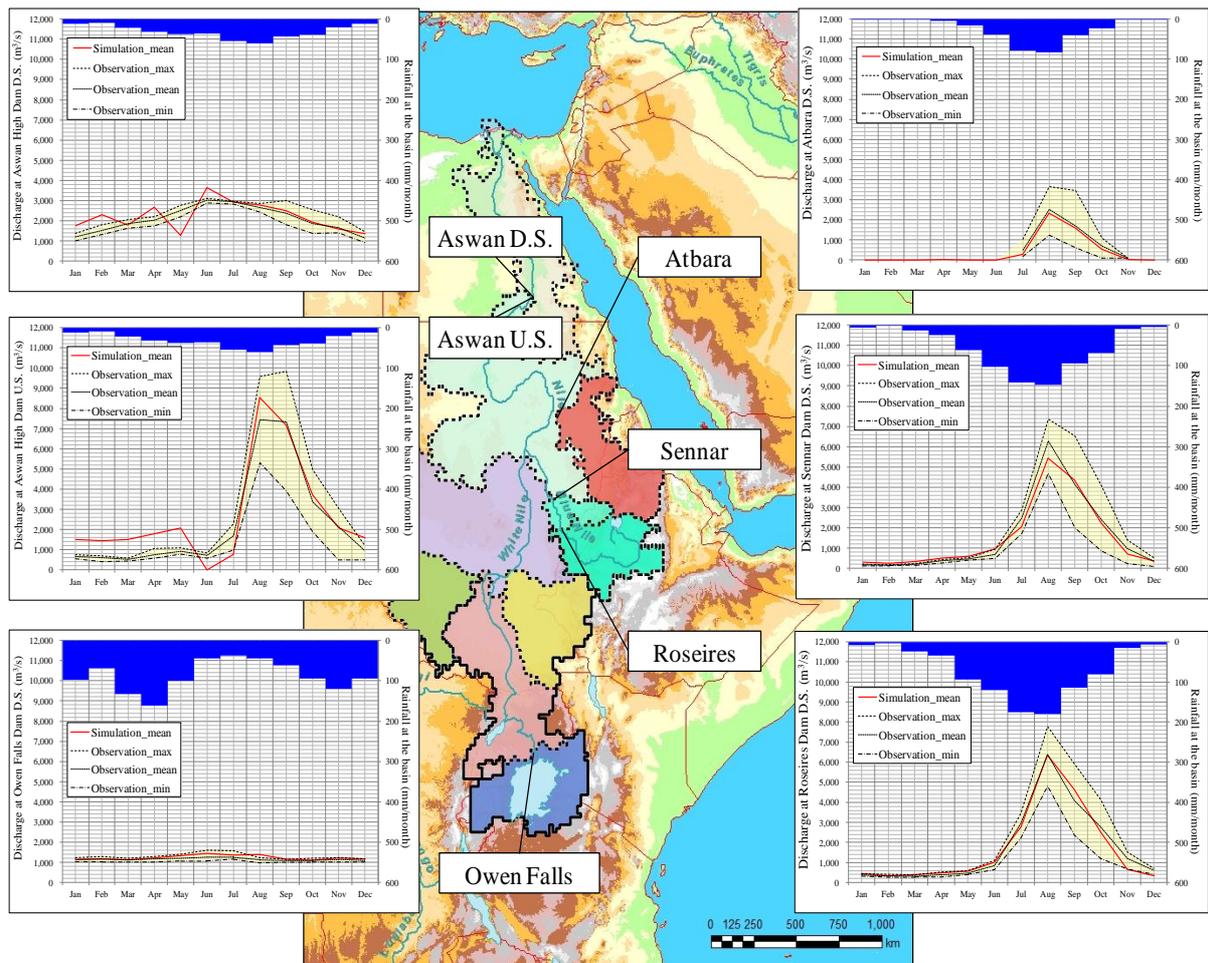


Fig.5 Validation of discharge in the sub-basin

4. MRI-AGCMとCMIP3による気候変動推計

本論文では、空間解像度約20kmの気象研究所全球大気モデル (Meteorological Research Institute Atmospheric General Circulation Model: MRI-AGCM) と世界気候研究計画 (World Climate Research Programme: WCRP)による第3次結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project phase 3: CMIP3)の結果を利用し、21世紀末シミュレーションの入力値を検討する。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)の第4次報告書 (IPCC, 2007)で引用されたCMIP3は世界各国の研究機関で開発された複数の気候モデルによる実験結果である。Webサイト (<http://esg.llnl.gov:8080/index.jsp>)で公開されているため、誰でも入手可能であるが、20世紀再現実験の2次元(地表面)データに限っても1TB程度のサイズがあり、データの入手だけでも大変な労力と時間を要する(道広ら, 2011)。CMIP3及びMRI-AGCMの将来予測については、A1Bシナリオ(大気中の温室効果ガス

濃度が21世紀末に20世紀末の約2倍)による実験結果である。CMIP3のいくつかのGCMについてはアンサンブルラン(複数実験)の結果を公開しているが、道広ら(2010)によると、同一モデルによる複数ランの差異は小さいため、1モデル1ランで代表させている。各GCMの切り取り範囲をTable3にまとめる。MRI-AGCMは計算領域を陸域のみに限定しているため、比較対象領域には海域を含まないことに注意が必要である。

4.1 GCMバイアス補正

GCMの出力値を将来気候シミュレーションの入力値として検討する際、モデルバイアスを補正することが推奨されているのが現状である。本研究では、GCM 現在気候月別値を衛星観測及び再解析プロダクトを用いて作成された現在気候値の月別値と一致させる手法を採用した。なお、補正比率が2倍以上(100%以上)となる場合は、これ以上の補正は補正として意味をなさないと考え、補正上限率を2とした。

Table 3 Utilized range of MRI-AGCM and CMIP3

ID	NAME	Country	Number of x mesh	Number of y mesh	Southwestern corner			Number of data			Spatial resolution		
					Longitude	Latitude		East and West	North and South	Total	East and West	North and South	
1	BCC-CM1	China	192	96	22.500	x=13	-6.528	y=45	11	22	242	1.8750	1.8650
2	BCCR-BCM2.0	Norway	128	64	22.500	x=9	-6.977	y=30	8	15	120	2.8125	2.7910
3	CCSM3	USA	256	128	22.500	x=17	-6.303	y=60	14	29	406	1.4060	1.4010
4	CGCM3.1 (T47)	Canada	96	48	22.500	x=7	-5.567	y=23	6	12	72	3.7500	3.7110
5	CGCM3.1 (T63)	Canada	128	64	22.500	x=9	-6.977	y=30	8	15	120	2.8125	2.7910
6	CNRM-CM3	France	128	64	22.500	x=9	-6.977	y=30	8	15	120	2.8125	2.7910
7	CSIRO-Mk3.0	Australia	192	96	22.500	x=13	-6.528	y=45	11	22	242	1.8750	1.8650
8	CSIRO-Mk3.5	Australia	192	96	22.500	x=13	-6.528	y=45	11	22	242	1.8750	1.8650
9	ECHAM5/MPI-OM	Germany	192	96	22.500	x=13	-6.528	y=45	11	22	242	1.8750	1.8650
10	ECHO-G	Germany/Korea	96	48	22.500	x=7	-5.567	y=23	6	12	72	3.7500	3.7110
11	FGOALS-g1.0	China	128	60	22.500	x=9	-6.977	y=28	8	15	120	2.8130	2.7910
12	GFDL-CM2.0	USA	144	90	21.250	x=9	-5.000	y=43	9	20	180	2.5000	2.0000
13	GFDL-CM2.1	USA	144	90	21.250	x=9	-5.000	y=43	9	20	180	2.5000	2.0000
14	GISS-AOM	USA	90	60	22.000	x=6	-7.500	y=28	6	15	90	4.0000	3.0000
15	GISS-EH	USA	72	46	22.500	x=5	-6.000	y=22	5	11	55	5.0000	4.0000
16	GISS-ER	USA	72	46	22.500	x=5	-6.000	y=22	5	11	55	5.0000	4.0000
17	INGV-SXG	Italy	320	160	22.500	x=21	-5.047	y=76	17	35	595	1.1250	1.1215
18	INM-CM3.0	Russia	72	45	20.000	x=5	-8.000	y=21	5	11	55	5.0000	4.0000
19	IPSL-CM4	France	96	72	22.500	x=7	-6.338	y=34	6	17	102	3.7500	2.5350
20	MIROC3.2 (hires)	Japan	320	160	22.500	x=21	-5.047	y=76	17	35	595	1.1250	1.1215
21	MIROC3.2 (medres)	Japan	128	64	22.500	x=9	-6.977	y=30	8	15	120	2.8125	2.7910
22	MRI-CGCM2.3.2	Japan	128	64	22.500	x=9	-6.977	y=30	8	15	120	2.8125	2.7910
23	PCM	USA	128	64	22.500	x=9	-6.977	y=30	8	15	120	2.8125	2.7910
24	UKMO-HadCM3	UK	96	73	22.500	x=7	-5.000	y=35	6	16	96	3.7500	2.5000
25	UKMO-HadGEM1	UK	192	145	22.500	x=13	-5.000	y=69	11	31	341	1.8750	1.2500
26	MRI-AGCM3.1S	Japan	1920	960	22.875	x=123	-4.966	y=453	91	198	18018	0.1875	0.1870
27	MRI-AGCM3.2S	Japan	1920	960	22.875	x=123	-4.966	y=453	91	198	18018	0.1875	0.1870

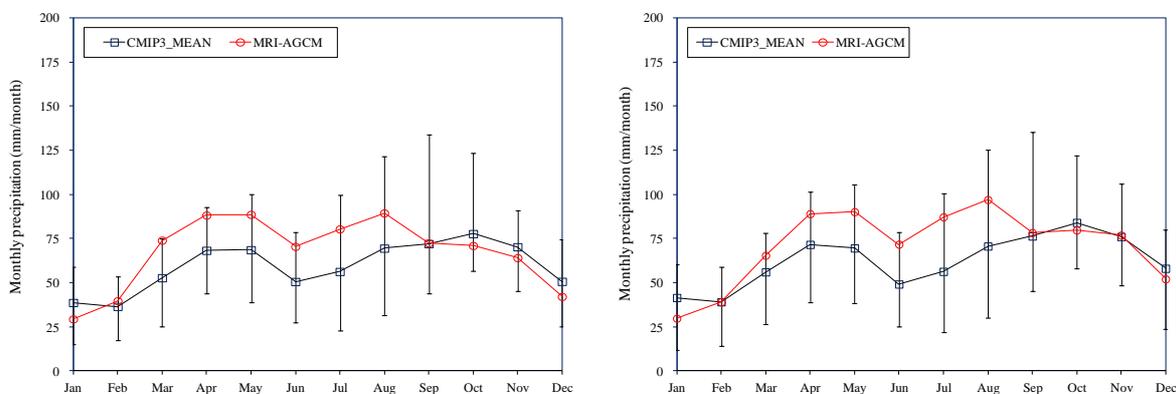


Fig.6 Prediction in the end of 21st century by MRI-AGCM and CMIP3
(left: 20th century, right: A1B scenario, no bias correction)

4. 2 MRI-AGCM将来気候値とナイル川全流域流出量

第6章での定量的オプションによるコンフリクト解析を検討する前準備として、将来気候下の流域平均降水量と年間総流出量の相関関係を調べる。本来はCMIP3を含む全GCMを大気境界条件とし複数回長期計算を行えばよいが、本論文では時間的制約のため、本節で説明するMRI-AGCMによる長期計算結果から得られる関係式をCMIP3に用いる。決定係数0.6486より正の相関が見られると考える。今後、移動時間相関値を検討すること等が本相関関係の現象を理解する上で必要であると考える。

4. 3 MRI-AGCMとCMIP3による将来気候渇水年の推定

本節では、第6章で21世紀末の渇水年別のコンフリクト解析を行うため、MRI-AGCMとCMIP3を用いて21世紀末の渇水年を算定する。使用したGCMは

MRI-AGCM(2075-2099)とCMIP3(2080-2099)の計24GCM、485年分の降水量(mm/year)年気候値である。全てのGCMで現在気候時に前述(4.1節)したバイアス補正を行っている。つまり、ここで評価していることは現在気候値と21世紀末気候値との気候シグナルを評価していることと同値である。本論文では485年分の気候値の内、降水量下位20%(5年に1回の確率)を5年渇水値、下位10%を10年渇水値、下位5%を20年渇水値、下位2%を50年渇水値、及び下位1%を100年渇水値とした。本論文では前節(4.3節)で算定した回帰式を用いて算定された総流出量を利用可能水資源量の上限としてコンフリクト解析の実現可能領域の制約条件として用いる。

5. 農業開発による21世紀末ナイル川流域水争奪の分析

本章では農業開発シナリオ別の土地利用パラメー

タの変化方法を説明し、シナリオ別の農業使用水量を算定する。第1章で述べた通り、FAO統計値によるとナイル川流域国の灌漑面積は1980年代から徐々に増加傾向にある。この背景を考慮し21世紀末を議論するため、本研究では(9)式のように農業開発度を導入する。

$$\text{農業開発度 (\%)} = \frac{\text{灌漑拡大面積}}{(\text{灌漑利用可能面積}) - (\text{現在灌漑面積})} \times 100 \quad (9)$$

ここで、利用可能灌漑面積(km²)とは、FAO Aquastatにより報告されている「Irrigation potential」を意味し、本論文ではこの値と現在灌漑面積(Aquastatで手に入る最新の値)との差を残り灌漑可能面積とし、その値と灌漑拡大面積との百分率を農業開発度と定義する。灌漑面積拡大の方法は、現在土地利用で灌漑面積が存在している場所の灌漑面積を平均比率で増加させ、増加分の面積を都市と水体を除く他土地利用の内、最大値から差し引くという処理を行っている。前述の農業開発シナリオの下、灌漑面積値を変化させた際の各国オプション別灌漑水使用量(Gt/year)を算定する。Fig.7に農業開発度(オプション)別の各プレイヤーの年灌漑使用水量の推移を示した。Fig.7の横軸は農業開発度であり、農業開発度が0%ということは、現在の灌漑面積と等しい(現状維持)であることを意味する。なお、陸面過程モデルで算定される量は灌漑要求水量であり、現在灌漑面積と等しい時にAquastatの国別灌漑使用水量に一致させるように調節を行っている。

6. 水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析適用結果

6.1 基本要素の設定

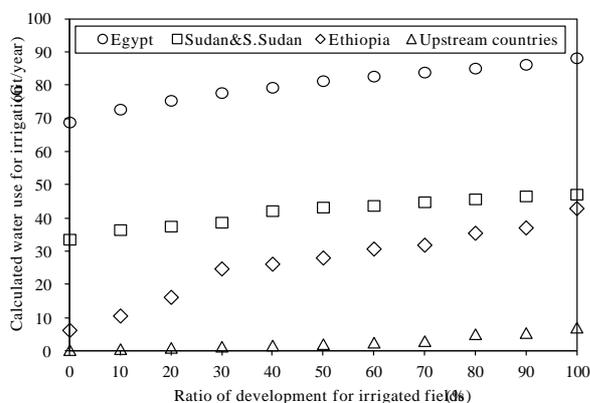


Fig.7 Irrigated water use of each player in each ratio of development for irrigated fields

本章では、第4章で得られた渇水年の利用可能水資源量上限値(総流出量)と、第5章で得られた農業開発シナリオ別灌漑水使用水量を入力値としたコンフリクト解析を行う。コンフリクト解析を行うためには基本要素である、プレイヤー、オプション、選好順序を設定する必要がある。水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析でも同様である。本研究では、プレイヤーを4プレイヤー、オプションを11通り、選好順序を2段階に設定する(Table4)。プレイヤーはナイル川下流域であるエジプト、中流域国のスーダン・南スーダン、青ナイル川上流域国のエチオピア、及び白ナイル川上流域国(ウガンダ、ケニア、タンザニア、ブルンジ、ルワンダ)とする。オプションは農業開発度を0%、10%、20%、...、100%とする11通りとする。選好順序(プレイヤーに対する事象の優劣を決定する優先順序)は第1に自国取水量が高い事象を優先し、第2に(自国取水量が同じ値の場合は)ナイル川残水量(利用可能水資源量と総水使用量の差)の値が高い事象を選好順序が高いものとする。あるプレイヤーに対してオプションはそれぞれ排反であるため、全事象数は14641(=11の4乗)となる。各開発度シナリオにモデル出力値を当てはめ、Fig.3に示すアルゴリズムを計算する。

6.2 統合手法適用の結果

本節では、水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析をナイル川流域に適用した結果を示す。均衡解(Equilibrium)はコンフリクト均衡解、つまり意思決定の結果生じたコンフリクトの落ち着く先である。コンフリクトの落ち着く先とは、当事者(プレイヤー)が行動を起こす前に相手のとりうる行動を的確に読みとり意思決定を行った結果であり、それぞれにとって納得のいくもの、もしくは受けとめなければならないものと考えられる。

Fig.8にナイル川全流域に本研究手法を適用した結果を示す。縦軸は「コンフリクト均衡解における農業開発度の均衡解平均」である。各渇水年でプレイヤー毎にコンフリクト均衡解の農業開発度均衡解平均を算定し、平均値も示した。なお横軸は5年渇水を1とし、100年渇水を5と表記している。このグラフよりプレイヤー間で異なる傾向を表わしていることがわかる。エチオピア、白ナイル上流域国に関しては渇水年が厳しくなるにつれ、農業開発度の均衡解平均は減少する傾向にある。一方、エジプトとスーダン・南スーダンは渇水年がたとえ厳しくなっても農業開発度の均衡解平均は単調減少せず上下に変動する動きをみせる。Fig.8よりわかることは、(例えば)20年渇水年の農業開発のプレイヤー平均は45%であるが、その45%という状態は20年渇水

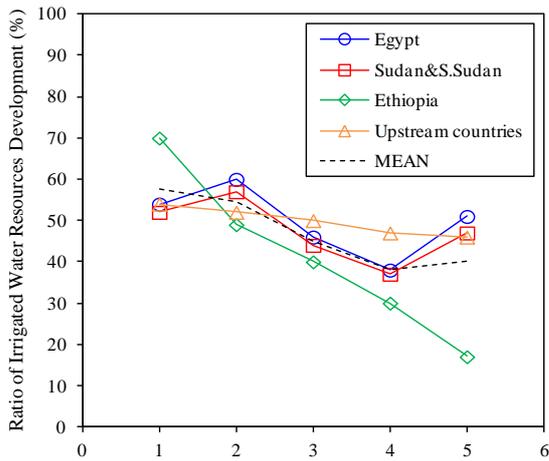


Fig.8 Result of conflict analysis

(Horizontal axis, 1: 5yr drought, 2: 10yr drought, 3: 20yr drought, 4: 50yr drought, 5: 100yr drought)

では合理的に得られる帰結となりうるが、100年渇水時には起こり得ない帰結であるということである。つまり、100年渇水時に起こりうる合理的な帰結は20年渇水の帰結とは別の状態が大半であり、20年渇水値で得られているプレイヤー平均45%という状態では100年渇水時、水資源争奪による議論が適切に行わなければ状態が悪化するということを示している。

6.3 複数均衡解への考察—視覚化, 共通解, 絞込み

本節では、本研究手法を適用した際に生じる複数均衡解について3種類の分析(i)解の視覚化, (ii)共通解の抽出, (iii)解の絞込みを行った。これらの分析は前節で生じた多数の複数均衡の性質(解のばらつき具合, 解の頻度・安定性)を調べるために工夫した分析手法である。順に説明する。解の視覚化は各プレ

イヤーを第1象限(エジプト), 第2象限(スーダン, 南スーダン), 第3象限(エチオピア), 第4象限(白ナイル上流域国)と配置した。軸の単位を均衡解の農業開発度(0%を0, 100%を1)とする。各プレイヤーの象限に45度線(135度線, 225度線, 315度線)をとり, それらの方向を正とする単位ベクトルをプレイヤー数分考える。それぞれの単位ベクトルに均衡解の農業開発度(0~1, オプション)の積をとり, プレイヤー数分のベクトルの和をとった終点をプロットする。つまり, 4人プレイヤーの場合は, 横軸, 縦軸ともにその最大値は1.414となる。

次に共通解の抽出について説明する。本視覚化法では均衡解の終着点を視覚的に表わしているが, 同じ終着点をもつ組み合わせが別の均衡解と重なる場合もありうる。そこで, 同一の均衡解を得る場合は色分けをして表示することで, 共通解をも視覚化することができた(例えば Fig.9)。

次に, 解の絞込みに関して説明する。前節 Fig.8で見られた, 100年渇水時の農業開発度の均衡解平均に関する傾向, すなわちエチオピア, 白ナイル川上流域国は50年渇水値に比べ減少する一方, エジプトとスーダン・南スーダンでは50年渇水値に比べ増加するといった正反対の結果を考える。そのような解の動きを分析するため, 解の絞込み上限値(プレイヤー間での農業開発度最大値と最小値の差の上限値)を設定した。例えば, 解の絞込み値が90%ということは, プレイヤー間の農業開発度の最大値と最小値の差が90%を越える場合, すなわち差が100%である事象を視覚化した結果から外すということである。

以上の分析を行った結果を渇水年別に Fig.9 から Fig.11 に示す。それぞれ共通解は多くて4度(黄)であることがわかる。また絞込みを強めていくにつれ, 偏りを示す(原点から遠い)均衡解が外されていく様子がわかる。

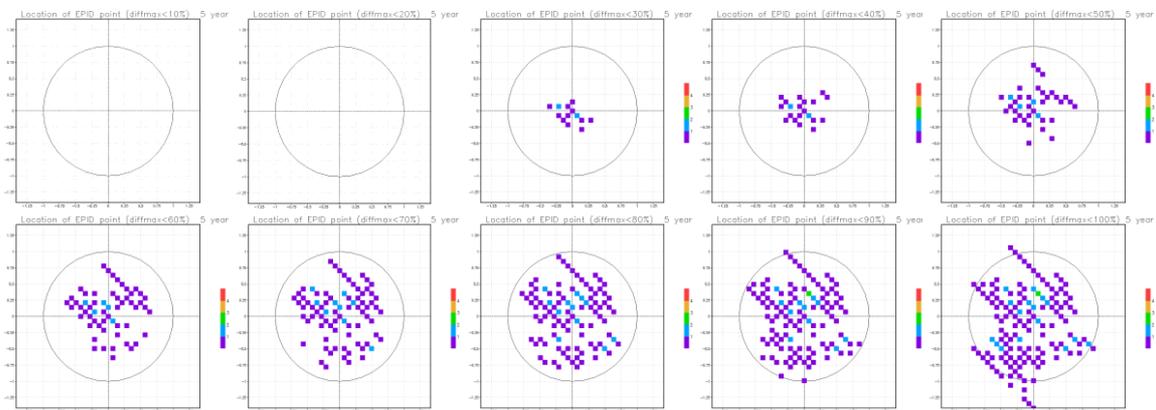


Fig.9 Visualization of plural equilibriums in the case of 5 year drought
(upper: 10% to 50% refinement, lower: 60% to 100% refinement)

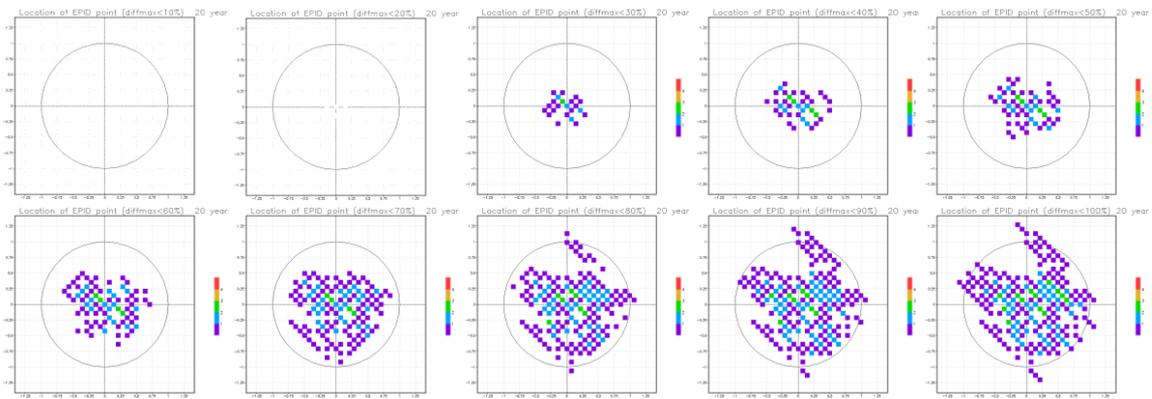


Fig.10 Visualization of plural equilibria in the case of 20 year drought
(upper: 10% to 50% refinement, lower: 60% to 100% refinement)

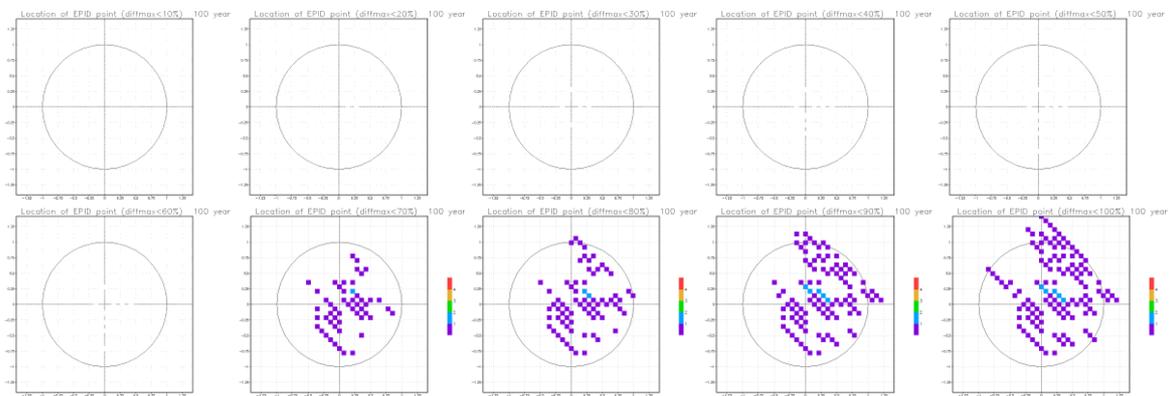


Fig.11 Visualization of plural equilibria in the case of 100 year drought
(upper: 10% to 50% refinement, lower: 60% to 100% refinement)

6. 4 本手法が示すナイル川コンフリクト解消案

本節では、これまで分析した結果、本論文で提案する手法により示唆されるナイル川流域の水資源開発コンフリクトの解消案を説明する。前節の解の絞込み結果より 100 年渇水の均衡解をプレイヤー間の不利なく検討するため、本論文では絞込み 70%の結果を用いて 21 世紀末のナイル川コンフリクトを考える。Fig.12 に前節で定義した絞込み上限値 70%の場合の水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析の解析結果を示す。縦軸は Fig.8 と同様「コンフリクト均衡解における農業開発度の均衡解平均」である。前節 Fig.8 と比べ、全てのプレイヤーが渇水年が厳しくなるにつれ農業開発度の均衡解平均が減少する傾向にあることがわかる。この傾向は、より厳しい渇水年の条件下に存在するコンフリクトの落ち着く先(の平均)は、より低い農業開発度であると解釈できると考える。これは、対策を立てる計画渇水年に対して、推奨される農業開発度上限値を表わしていると考えられる。具体的には、20 年渇水を計画渇水

としてナイル川流域国全体で対策を考える場合、流域国の農業開発度の上限値は 40%であり、それを越える水資源開発計画を計画する場合はさらなる議論が必要であるということを意味する。

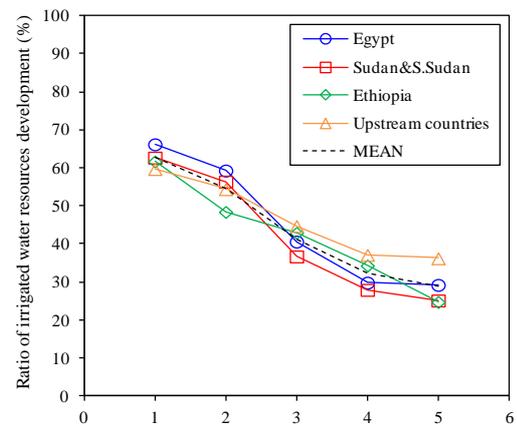


Fig.12 Result of conflict analysis (2) (70% refinement)
(Horizontal axis, 1: 5yr drought, 2: 10yr drought, 3: 20yr drought, 4: 50yr drought, 5: 100yr drought)

ただし、第1章の通り、本研究手法の役割は再現性をもつ意思決定の判断材料として国際流域管理に貢献することである。従って、本研究手法により示される結果は当該意思決定者により議論され、フィードバックを受けることが大切である。

7. 結論

本論文では「水文モデル出力を組合わせたコンフリクト解析」と題して水文モデルとコンフリクト解析の統合を行い、「気候変動、水資源開発考慮時のナイル川コンフリクト解消」に向けた分析を進めてきた。第1章ではナイル川流域の背景を説明し、問題提起を行った。第2章ではモデル入力値(2.1節)、陸面過程モデル SiBUC(2.2節)、分布型流出モデル Hydro-BEAM(2.3節)、さらにコンフリクト解析(2.4節)を説明し、本論文の解析手順と理論的枠組を見てきた。第3, 4, 5章ではナイル川流域における水文シミュレーション、将来気候の検討、及び土地利用シナリオ別の農業使用水量の変化を計算した。第6章では水文モデル出力をコンフリクト解析に組込む手法の適用結果を報告し、その際生じる複数均衡解に対して分析も行った(6.3節)。

コンフリクト解析とは異なる利害が衝突している、もしくはこれから衝突が生じる状態を分析し、今後どのようにすればこの利害衝突が解消するかを提唱する解析手法であり、その理論的枠組は社会的側面と密接に関わっている。しかし、安定性分析(表)という概念によって、その分析対象は手計算で分析可能な範囲に限られていたのかもしれない。筆者は従来のコンフリクト解析から得られる定性的な結論に対して少なからず疑問を抱いていた。とはいえ、コンフリクト解析は複数の利害関係者がそれぞれ望む状態が異なり、議論の終着点が見えてこない国際河川の水争奪には有用であるという思いがあった。この思いと、自身の所属する研究室で行われている数値計算を何とかして活かしたいという思いがつながり、本論文で報告してきた研究手法が浮かんできたのである。国際水資源管理の意思決定分野における具体的政策の立案・評価には、今後この解析手法が主流になるのではないかと思われる。

ナイル川流域の水文学的研究は数多く、世界中の研究者により研究が進められている。参考文献として引用した Elshamy(2006)もその1つである。本論文での中の水文学的研究は、陸面過程モデルによるナイル川中流域毎の水収支解析(3.3節)、分布型流出モデルによる流量再現等、解析の質と量はナイル川の水循環を理解するには十分なだけ成果を報告できたと考えている(第3章)。

また2012年6月時点、我が国による最新の GCM である MRI-AGCM(空間解像度: 20km)の出力結果を利用し、ナイル川流域の21世紀末の将来気候を中流域毎に議論してきた。さらに、本論文では CMIP3 の複数 GCM による出力結果も利用し、21世紀末の渇水年評価の結果も報告した。ナイル川流域における気候変動推計のまとめとしても有効であるかもしれない(第4章)。

依然として水文学分野の課題である将来の水需要量予測を本論文ではナイル川流域に限り行った。その際、議論の対象となりうる土地利用変化に関しては本研究では FAO 統計値を全面的に活用し、農業開発度という形で土地利用の変化量を考えた。この点は各国の意向や環境容量によって変化する部分であるため、その発展的研究の必要性を主張する。本論文では農業開発度別の農業使用水量を陸面過程モデル SiBUC により水・熱収支を考慮して算定した。その結果、たとえ現状と同じ灌漑面積であっても算定された灌漑水使用量は増加(例えば、エジプトでは年間 10Gt 増加)するという結果となった。これは気温上昇の予測結果により灌漑地の水面からの蒸発量が増加したためであると考えられる(第5章)。

研究背景でも述べたが、21世紀に入り、水危機、食糧危機を警告する声が強くなってきている。水文学を専門とする研究者はこの問題に対して何らかの解決策を提示し、人類を導いていかなければならないと考える。本論文ではこの問題の一側面にすぎないが、利用可能水資源量の下での利害対立の状態を分析してきた。結果として、20年渇水をナイル川全流域の計画渇水とする場合、各流域国に対して推奨される農業開発度の上限値は 40%であることを得た。この割合を越える水資源開発が進められると、渇水年が複数年続いた場合、協力的な水利用なくしては深刻な水不足となるのではないかと懸念を示す(第6章)。

そして越境水系の水問題の最大の問題は、それが「水以外の政治的・経済的問題とつながった非常に取り扱いにくい状態にある」ということである。その課題に貢献するためには、真に物事を見る眼を養い、現実の社会的水問題を見抜く必要がある。本研究手法が今後、多くの研究者・実務者によって議論され、世界平和へ貢献する日が来ることを願ってやまない。

謝 辞

本研究は、「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」のもと、対象流域へ赴き行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 岡田憲夫・キース, W. H. ・ニル, M. F. ・福島雅夫 (1988) : コンフリクトの数理 メタゲーム理論とその拡張, 現代数学社.
- 小槻峻司・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄 (2011) : 灌漑を考慮した陸域水循環モデルの構築, 土木学会水工学論文集, 第55巻, pp. 553-558.
- 坂本麻衣子・萩原良巳・畑山満則 (2005) : 水資源開発コンフリクトにおけるプレイヤーの設定に関する研究, 環境システム研究論文集, 第33巻, pp. 415-422.
- 田中賢治・池淵周一 (1994) : 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-2, pp. 299-313.
- 中山幹康 (1996) : 英米および世界銀行によるアスワン・ハイ・ダム建設への援助中止を招いた諸要因に関する考察, 水文・水資源学会誌, 第9巻, 4号, pp. 340-350.
- 萩原良巳・坂本麻衣子 (2006) : コンフリクトマネジメント 水資源の社会リスク, 勁草書房.
- 道広有理・鈴木靖・佐藤嘉展 (2010) : 気象変動情報データベースの開発とその利用, 土木学会論文集, 第67巻B-2, pp. 1211-1215.
- 道広有理・佐藤嘉展・鈴木靖 (2011) : 日本陸域を対象としたCMIP3マルチ気候モデルの評価, 水文・水資源学会2010年度研究発表会, pp. 84-85.
- 萬和明・田中賢治・中北英一 (2008) : 陸面過程モデルによる土壌水分量推定値の季節変動・年々変動の精度評価, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp. 565-571.
- Elshamy, M.E.A.M. (2006): Improvement of the hydrological performance of land surface parameterization: an application to the Nile Basin, Doctorial dissertation, the University of London.
- Hirabayashi, Y., Kanai, S., Motoya, K., Masuda, K. and Doll, P. (2008): A 59-year(1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models, Hydrological Research Letters, Vol. 2, pp. 36-40.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, U. K.
- Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin environment assessment model (Hydro-BEAM), Watershed Models, Singh VP, Frevent DK. (eds). Taylor & Francis, CRC Press: Florida; pp. 613-626.
- Niall, M.F. and Hipel, K.W. (1984): Conflict analysis: models and resolutions, New York, North Holland.
- Richards, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, Vol. 1, pp. 318-333.
- Siebert, S., Doll, P., Feick, S., Hoogeveen, J., and Frenken, K (2007): Global map of irrigation areas version 4.0.1, Johann Wolfgang Goethe University., Frankfurt am Main, Germany/FAO, Rome, Italy.
- Tanaka, K. (2004): Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, Doctorial dissertation, Kyoto University.
- UNESCO (2009): Water in a changing world, the United Nations World Water Development Report 3, UNWATER.

(論文受理日 : 2012年6月8日)

Conflict on Water Resources Development between Multiple Countries in the Nile River Basin

Masahiro ABE⁽¹⁾, Kenji TANAKA, Toshiharu KOJIRI and Toshio HAMAGUCHI

(1) Yamatosaka Dam Office, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

Synopsis

The aim of this paper is to propose hybrid of conflict analysis and hydrological model. The method is applied to the Nile River basin, utilizing MRI-AGCM and CMIP3 as boundary conditions, land surface model (SiBUC), and distributed runoff model (Hydro-BEAM) based on scenarios which depend on irrigated area. It is reasonable to consider graded options in order to express events among qualitative preference

orders within feasible events and a method is proposed to operate graded options. The method to visualize plural equilibrium events which calculated by conflict analysis is proposed. Results of this method would describe that it is necessary for adaptation on 20 years drought years in the case that all basin countries develop 40 % of remained potential field for irrigated area. It is indispensable to feed back to the set of options and preference orders by decision makers.

Keywords: international river management, hydrological model, conflict analysis, Nile River basin