

人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル

東京大学生産技術研究所 沖 大幹

1. 研究の背景・全体構想

途上国における人口増加や生活様式・社会構造の変化、さらに気候変動の影響等に起因した、世界的な水危機、食糧不足、それらに関わる紛争の勃発等の懸念が前世紀末あたりから世界的に喧伝されている。これら危機的な状況は極端な一例だという考え方ももちろんあるが、人間活動の変化と自然の変動、及びその相互作用が何らかの形で少なからず地球の水資源へ影響するのは間違いないと考えられている。こうした水資源問題に関する情報は、本研究の開始前には、下に挙げるようにほぼ全て欧米からの発信であった。

- ① Shiklomanov ら、ロシア水文研究所グループ(Shiklomanov, 2000)。WMO (国際気象機関) や UNESCO (国連教育科学文化機関) はこの推定値を良く使っている。現状、将来ともに、国別統計値を基本的に使用している。
- ② Alcamo や Döll ら、ドイツのカッセル大学グループ(Alcamo et al., 2003)。水需要を含む社会側の将来予測モデリングに長じていて、灌漑面積データ等のオリジナル情報を発信している。世界水ビジョン等、水フォーラム関係は彼らの推定を使っている。
- ③ Arnell 等、イギリスのグループ(Arnell, 1999)。IPCC (気候変動に関する国家間パネル) の第三次報告書までは彼らの推定が主に利用されていた。
- ④ Vörösmarty 等、ニューハンプシャー大学のグループ(Vörösmarty et al., 2000)。IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) や GWSP (Global Water System Project) 等では彼らの推定が主に利用されている。

これに対し、アジアの地域性、とりわけアジアモンスーン気候と稲作文化が水資源・水問題に深く関わっている点を考慮した上での広域の水資源アセスメント・将来予測、それらのアジアからの情報発信が必要であると考え、これまでの研究成果を生かしつつ社会へ貢献するべく、世界をリードする枠組みでの世界水資源アセスメントを行う研究を構想した。

我々は当該分野では後発ではあるが、地球規模水循環推定に関して上記いずれのグループも月単位程度で簡単な水収支モデルを使って推定しているのに対し、エネルギー水収支を厳密に解く陸面モデルの推定値に基盤を置いている点が長じている。さらに、灌漑要求量とダム貯水池操作、そして水収支モデルを結合させた水循環算定システムを構築することにより、一步リードすることを狙っている。将来予測に関しては、単純に気候モデルの将来予測と現状との差を現状の推定値に上乘せしたり、気候モデルの将来予測降水量と気温とから再計算したりするだけではなく、気候モデルの将来予測値の現実に即したバイアス除去手法を各種吟味、新規開発することにより、より広く受け入れられる将来の水循環推定を行ってゆく。

水需要側に関しては、河川環境保全に必要な環境用水需要のグローバルな推定が大きな柱であり、かつ世界に先駆的な取り組みとなる。さらに、都市とそれ以外に分類した、現状の資料収集調査に基づくより緻密な都市用水量データベースの構築及び将来予測が、他では行われていないアドバンテージである。また灌漑面積に関しては、リモートセンシングによるアジア域の水田分布データを新たに構築し、既存の灌漑面積割合データを高度化して用いること、さらには、将来予測に関

して、土地利用モデルと結合された農業灌漑モデルによって灌漑用水需要を推定している点が新しい。また、量だけではなく質の問題に関しても現地観測と対応した広域推定が可能となる様に研究開発を進めており、特に飲料水に関連して重大問題だと認識されている硝酸体窒素の負荷、地域循環に関する取り組みがなされている。

水問題は食料問題と表裏一体であるが、国際的な水ストレス緩和の動きの一部としての Virtual Water のやりとり、さらに食料交易の将来展望に関してもシステムダイナミクス的なアプローチにより取り組んでいる。

本研究によって、世界の水危機の現状とその軽減・回避策、将来展望に対するアジアからの情報発信が可能となり、水危機と日本との関係、国際総合水管理施策決定支援のための情報基盤が提供されることが期待される。

2. 研究手法・体制

本研究は、大きく分けて①水供給（水循環）算定グループ、②用途ごとの水需要算定グループ、③共通基本データの開発グループ、④モデル統合化／アセスメントグループ、及びこれらすべてをつなぐ⑤情報基盤技術グループによって構成されている。以下に、それらの構造と相互関係を簡単に図示する。

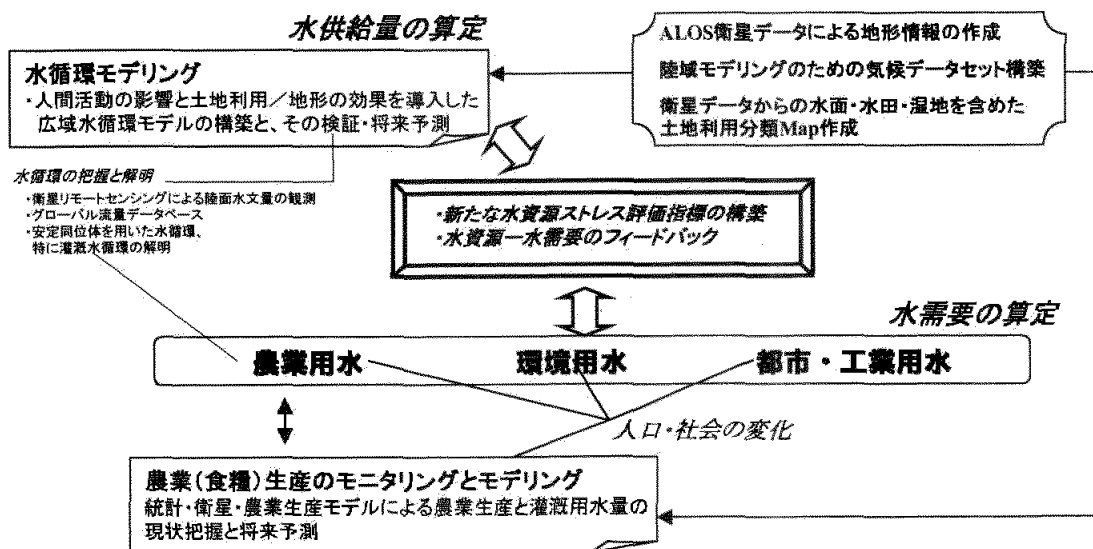


図1：本研究の構成

3. 研究成果

①水供給（水循環）算定（代表：沖大幹 東京大学生産技術研究所）

(1) ダム操作を考慮した水供給モデル開発

水資源の時間的偏在の緩和に重要な役割を果たしているダム貯水池(世界の上位約 500)及びその操作を考慮した河川流量を算定した。貯水池操作モデルは貯水池操作の長期実測データが取得できた Chao Phraya (タイ)、Colorado・Missouri (北米) の3流域の9貯水池において、貯水池操作を考慮しない場合と比較し、流量の季節変動の再現性が大幅に向上することが示された。

(2) 複数の陸面モデルを用いた水供給量の最適推定値算定

前述の通り、地球規模水循環推定に関して欧米の先行研究グループは月単位程度で簡単な水収

支モデルを使って推定している。我々は、エネルギー水収支を厳密に解く陸面モデル(LSM)を複数用いることにより、水供給量の最適推定値を求めようとしている。10のLSMを用いて得られた全球の平均的水収支は図2のようになる。

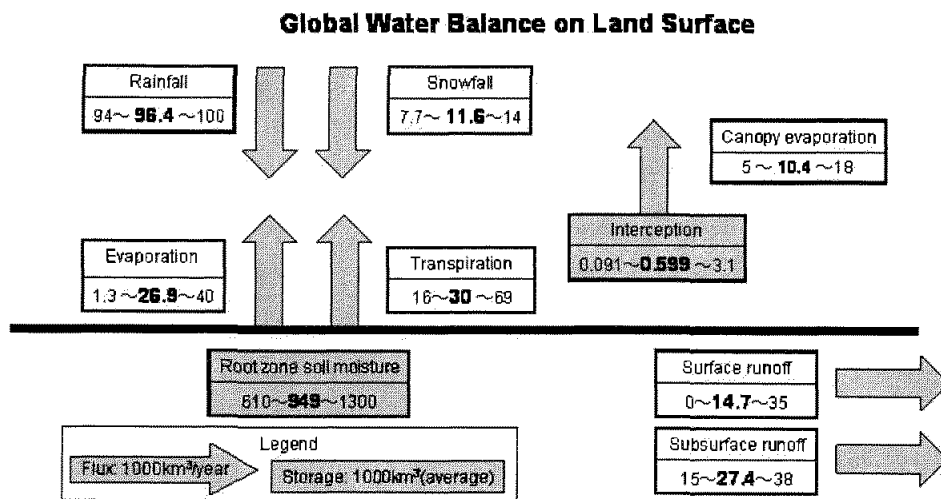


図2：全球の陸面の水収支図（1987年、10LSMの平均・最小・最大値）

②用途ごとの水需要算定

(1) 農業水需要・土地利用モデル開発（代表：柴崎亮介 東京大学空間情報科学センター）

水量的にもっとも重要である農業的土地での水利用を推定するため、国際・国内の食糧需給・貿易政策なども考慮した需給バランスモデルを構築し、農地作付オプション（土地利用の選択肢）情報を求め、これまでの土地利用や期待収益などを考慮した農地利用分布推定及び付随する農業用水需要量算定を行った。

今後は、非灌漑農地の灌漑、施肥量の増加、機械化など一種の設備投資による土地利用選択肢の自律的な拡大・発展過程をモデル化し、土地利用・水利用の集約化や気候変動に対応した「適応化」過程を表現する。

(2) 環境用水需要推定（代表：白川直樹 筑波大学機能工学系）

河川環境保全のための必要流量である環境用水需要について、地域の自然特性や社会発展段階などによって異なる環境の性質や環境配慮の意味を考慮したグローバルな需要分布を推定した。考慮項目は、自然条件としては乾燥－湿潤の軸、さらには季節的な乾季の有無や年々変動の激しさ、経済・社会の成熟度に応じた環境用水に対する人々の期待（項目、効果など）である。全球規模で定量的な推算を行うと、年総流量あたり、また集水面積あたりの値にして、中程度の必要性をもつ地域において年総流量の1～3割、より高度に必要な地域において5割程度であった。

(3) 都市用水需要推定（代表：大瀧雅寛 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科）

都市用水需要予測および各国の水利用実態に関するさまざまな文献のレビューを行うとともに、世界各都市の都市用水、家庭用水使用量の経年変化とその要因の解析を行った。これまで解析を行ってきた東京やシンガポールに加え、ヘルシンキやコペンハーゲンなどの水利用の経年変

化の情報を集めてその傾向を調べた。いずれの都市においても1970～80年代において、一人あたり水使用量はピークを迎えていることがわかった。また、同様の調査をロンドン、ネパールなどで現地研究者を通して行っている。また、平成14年度から行っていた世界各都市の用途別家庭水使用量に関する調査とその比較を継続して行っている。水利用用途ごとに各都市で利用量の違いが見られ、用途ごとにいくつかの要因が導き出された。さらには、チェンマイ市の数十世帯を対象として水利用実態に関するアンケート調査を行うとともに、1～3月にかけて各水栓にメータを設置して水利用量の調査を行っている。国内の都市に対しては、都市水使用量の経年変化と影響因子の解析を20都市程度を対象として行い、世帯人数が重要な因子として導かれる結果となった。

また、日中の業種別工業用水使用状況についてデータを収集して比較を行い、多くの業種で中国における回収利用率が日本の30年前のレベルであることが確認された。

③共通基本データの開発（代表：安岡善文 東京大学生産技術研究所）

衛星リモートセンシングデータの高次利用として、TERRA/MODIS、NOAA/AVHRR等の高頻度・広域観測データを基に、地表面の水、植生、土壌、地表面温度の空間分布を時系列で計測する手法を開発し、アジア並びに全球の詳細な時系列土地被覆特性の把握を行った。一例として、15mという高空間解像度・大陸スケールにおいて、異なる生育ステージごとの水田分布を抽出した。

④モデル統合化／アセスメント（代表：安形康 東京大学新領域創成学科）

上記の水需要と水供給に関するモデルコンポーネントを結合し、自律的に将来の水需給バランスのアセスメントを行える統合モデルを作成することにより、現在および将来（2025年および2050年）の水需要バランスを予測することが目的である。現時点では、上記①②の10年分、10の陸面モデル（LSM）を用いた（現時点の）最適推定値を用いて河川流量を全球0.5度グリッド、10日単位で推計することにより全球の水資源量を算出した。さらに、工業用水・都市用水に関しては、国単位の水利用統計データおよび公開されている人口グリッドデータとから水需要量のグリッドデータを作成した。また、農業用水に関しては、気候データと穀物価格から作物タイプ選択および農事暦決定アルゴリズムを持った作物モデルと、広く使われる農業モデルEPICを組み合わせることにより、0.1度全球グリッドの水需要量を計算した。これらを組み合わせて、現時点における平均的な水需給バランスアセスメントを行なった（図3）。これは年単位の平均的なバランスを示したものであり、年間の水需要量を年間の水資源量で割った値 R_{ws} をすべてのグリッドセルについて算定するものである。 R_{ws} が0.4を超えると深刻な水資源逼迫の状態にあるとされる。

Annual Withdrawal-to-Availability Ratio

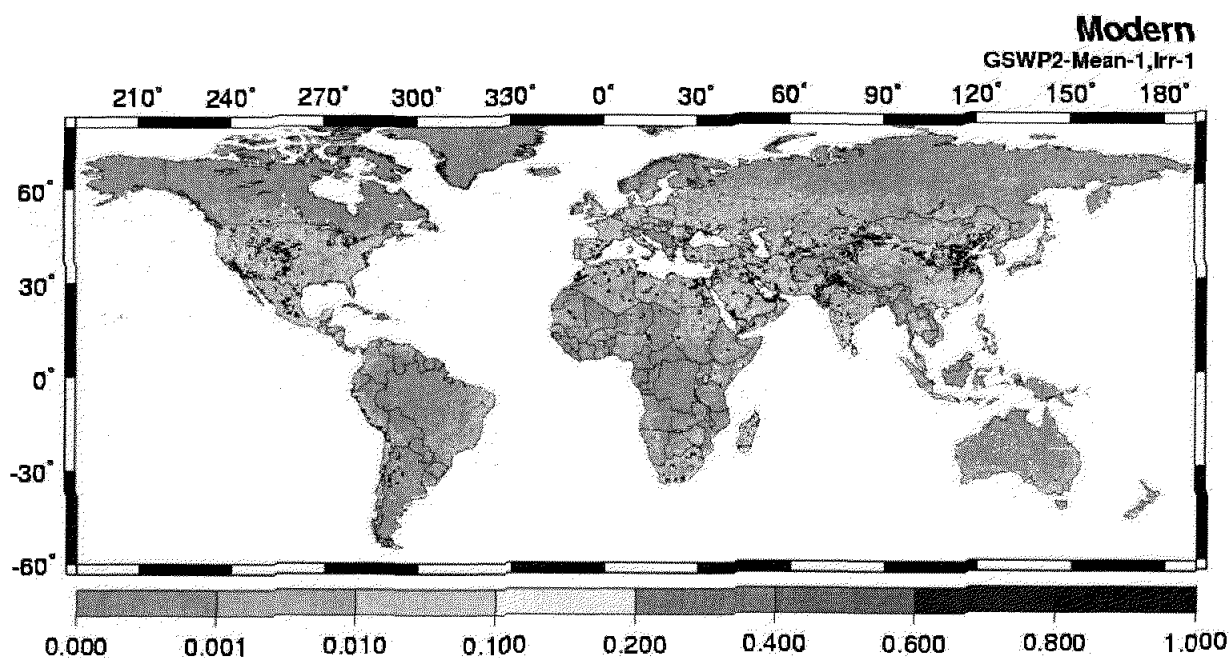


図3：陸面モデルによる最適推定値を用いた年単位・現在における水資源アセスメント
(赤の地域ほど水逼迫度が高い)

⑤情報基盤技術 (代表：喜連川優 東京大学生産技術研究所)

ペタバイト単位に到達するであろう、超大規模地球規模水循環観測及びシミュレーションデータをアーカイブし効率的なデータ探査を可能とする共通の情報システムの構築、及び水資源データに特化した可視化インターフェースの構築を行った。そのうちのひとつとして、前出の①(2)の10のLSMからの全球1度×1度・毎日・10年分のデータ収集作業支援およびデータベース構築へ向けてのハードウェア整備、システム構築を行い、WEB経由で利用可能な視覚化データ比較システムを構築した(図4)。

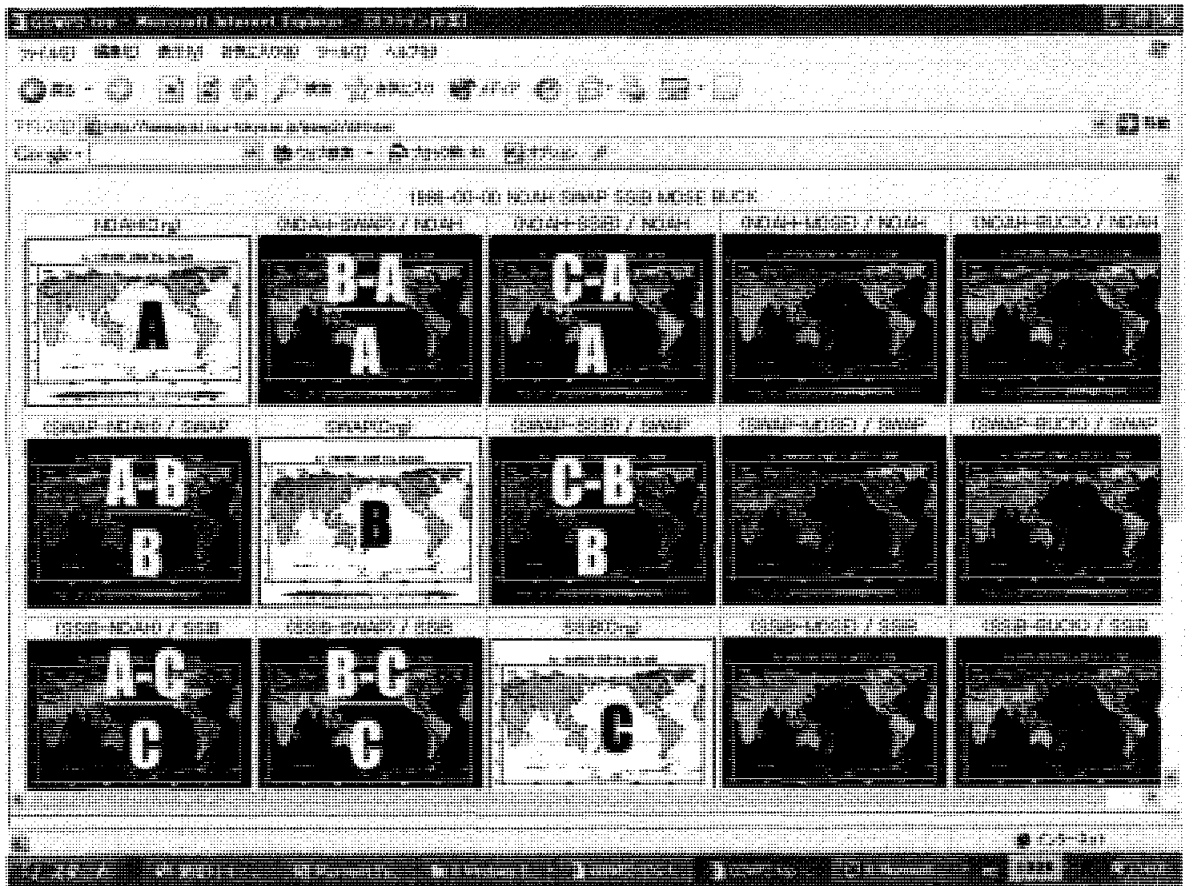


図4：陸面モデル間相互比較研究センター(ICC)のWeb上インタフェース

4. 考察・結論

現状、将来予測共に、これまでの世界水資源アセスメントと大きく違う衝撃的な結果は出ていないが、コンポーネントごとに、世界の先端的研究に追いつき、場合によってはリードし始めている。むしろ、自分達の手によってひとつひとつ推定していくことにより、従来のグローバル推定における不確実性、根拠があやふやな仮定等が明らかになり、当該分野における新たなブレイクスルーをもたらすきっかけ、方向性がはっきりと見えてきたことがここまでににおける大きな収穫である。

5. 今後の展開

残り2年という年限で最大の成果が出せるよう、結果を吟味しつつ方向修正を行いながら研究を進め、世界に情報発信していく。具体的には、以下のような点が挙げられる。

- 水資源アセスメント各要素の現状推定精度の向上
- 将来の水需給推定における不確実性の提示
- 将来の水需給推定におけるフィードバックへの取り組み
 - 例えば、温暖化を考慮した農業活動→水利用→気候システムへのフィードバック、等
- 新たな指標化、指標の変化の評価法の提案
 - 日単位推定流量、水質情報の利用
 - 現状との変化に着目した深刻度
 - 洪水リスク人口の現状と将来

- ▶ 人口増加・社会変化、及び気候変動への適応に必要な施策及び必要投資額といったスケールでの情報発信。

6. 引用文献

- Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, S. Siebert, Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 317-337, 2003.
- Arnell, N.W., A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain, *J. Hydrol.*, **217**, 314-335, 1999.
- Shiklomanov, I.A., Appraisal and assessment of world water resources, *Water Int.*, **25**, 11-32, 2000.
- Vörösmarty, C.J., P. Green, J. Salisbury, and R.B. Lammers, Global water resources+ vulnerability from climate change and population growth, *Science*, **289**, 284-288, 2000.

7. 主要な成果報告等（論文、口頭報告、受賞、取材）

(1) 論文発表（国内 9 件，海外 12 件）

内主要 10 件

1. Aramaki T., Suzuki M., Hanaki K., International analysis and projection of domestic water use, *Journal of Global Environment Engineering*, **10**, 1-10., 2004.
2. 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, **48**, pp463-468, 2004.
3. Kanae S., T. Oki, A. Kashida, Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999, *Journal of Meteorological Society of Japan*, **82**, 241-247, 2004.
4. Oki T. and S. Kanae, Virtual water trade and world water resources, *Water Science & Technology*, **49**(7), 203-209, 2004.
5. 白川直樹, グローバル水資源アセスメントを目指した環境用水需要量に対する影響要因の分類, 水工学論文集 **48**, 421-426, 2004.
6. Yang D., S. Kanae, T. Oki, T. Koike, K. Musiake, Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes, *Hydrological Processes*, **17**, 2913-2928, 2003.
7. Yoshimura, K., T. Oki, N. Ohte, and S. Kanae, A quantitative analysis of short-term ^{18}O variability with a Rayleigh-type isotope circulation model. *J. Geophys. Res.*, **108**(D20), 4647, doi:10.1029/2003JD003477, 2003.
8. 芳村圭, 沖大幹, 大手信人, 小池雅洋, 水の安定同位体 (^{18}O) の鉛直積分型水平 2 次元循環モデルの構築と検証, 水工学論文集, **47**, pp.109-114, 2003.
9. 芳村圭, 小池雅洋, 沖大幹, 大手信人, 地表面蒸発散による分別過程を考慮した水同位体陸面モデル及び流下スキームの構築, 水工学論文集, **48**, pp.229-234, 2004.
10. Yoshimura, K., T. Oki, N. Ohte, and S. Kanae, Colored moisture analysis estimates of variations in 1998 Asian monsoon water sources, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1315-1329, 2004.

(2) 口頭発表 (国内 60 件, 海外 67 件)

(3) 受賞

- 2004 日本水大賞 奨励賞 (沖)
- 2004 土木学会 水工学論文奨励賞 (芳村)
- 2003 国際水文科学会 (IAHS) Tison Award (沖・鼎・安形)

(4) 取材等 (新聞記事 15 件、雑誌 5 件、TV 3 件)

(5) その他

- 国連ミレニアム生態系アセスメントレポート淡水の章の lead author (沖)
- 気候変動に関する国家間パネル(IPCC)の第四次報告書のワーキンググループ II(影響・適応・脆弱性)の第 3 章『淡水資源とそのマネジメント』の lead author (沖)