

## 陸面過程モデルによるカスピ海流域における水収支の再現

### Reproducing Historical Change of Water Balance by Land Surface Model in the Caspian Sea Basin

峠 嘉哉<sup>(1)</sup>・田中 賢治・中北 英一

Yoshiya TOUGE<sup>(1)</sup>, Kenji TANAKA and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

Drastic fluctuation of the Caspian Sea was reported in 20th century, and serious flood and ecological damage were induced. Therefore, the reason of its fluctuation has been studied, but still unclear.

The main purpose of this study is to explain the reason of fluctuation. Therefore, first of all, historical water balance was reproduced from 1960 to 2000 by physical water circulation model. And secondly, four hypotheses were discussed, which are climate change, saving water demand, developing dam to cut discharge to Kara-Bogaz-Gol Bay and sea temperature rise. As a result, few fluctuations were reproduced by the model. Since global dataset was used for meteorological data, local measured data is required to review. As for artificial water use, impacts were small, however, since irrigation efficiency was reported to be improved, this can be a part of the reason as well as developing dam in KBG. Sea surface temperature was measured by AVHRR satellite data, and it slightly increased.

**キーワード:** 陸面過程モデル, SiBUC, カスピ海, 灌漑

**Keywords:** Land surface model, SiBUC, Caspian Sea, Irrigation

#### 1. 本研究の背景と目的

中央アジア西部に位置するカスピ海は世界最大の内陸湖であり、流域は約350万km<sup>2</sup>に渡る (Fig.1) . 流入河川は約130本と言われており、最大はボルガ川でカスピ海への流入量の8割を占める。カスピ海は内陸湖であるが、東部にカラボガズゴル湾 (以下KBGと呼ぶ) と隣接しており、唯一の流出先となっている。このKBGへの流出と湖面からの蒸発によって、流入水との水収支が均衡している (Klige et al., 1992) . このカスピ海では、20世紀に次ページのFig.2に示

されるような大きな水位変動があったことが知られている。このV字の急激な水位変動の結果として、水位低下時には航行障害や塩分濃度上昇による生態系への被害が発生し、水位上昇時には洪水被害が多発した。どちらも事前に予測できず、変動が急激であったために大きな被害につながった。そのため、カスピ海の水位変動の原因を把握し今後の予測を行っていく必要があるが、原因は現在も明らかになっておらず歴史的にも実に様々な説が唱えられてきた (Bolgov et al., 2005; Arpe et al., 2000; Arpe et al., 2007) .

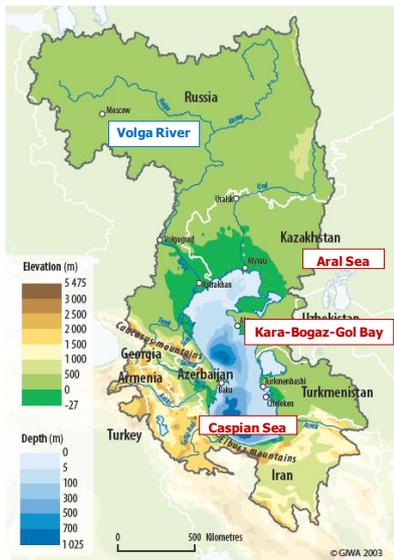


Fig.1 Caspian Sea Basin (GIWA, 2003)

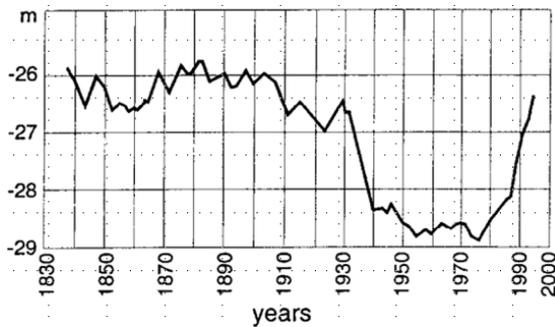


Fig.2 Fluctuation of the Caspian Sea level (Klige et al., 1992)

しかし、流域全体の水収支を定量的に推定した研究は少なく、例えば、水位変動が大西洋等での特徴的な大気循環で説明される事も多いが (Rodionov, 1994), その大気循環の結果として具体的に流域内でのどのような気象条件が発現しカスピ海の水位変動に繋がるのかについて定量的な議論が必要である。Dumont (1998) はボルガ川からの流入量とカスピ海の消長は相関が低く、他の要素も影響が大きい事を指摘していることから、様々な原因を複合的に評価するために、流域全体の水収支を定量的に評価することが必要である。

加えて、牧田 (1997) は気象条件による影響だけでなく上流域で農地改革が行われたことが一因である可能性についても言及しており、実際に1960年から1970年前半にかけての僅かな水位低下傾向の原因は上流域における人為的利用の影響が75%を占めると言われていることから (Rodionov, 1994), 気象条件だけでなく人為的な取水の影響も考慮することが必要である。

そこで本研究では、陸域水循環モデルをカスピ海流域全体に適用し、主に全球で用意されている気象

データセットを用いながら過去の水収支を定量的に再現する。

## 2. 解析手法

### 2.1 解析の流れ

本研究で使用した陸域水循環モデルは峠ら (2011) がアラル海流域で使用したものと同様であり、解析の流れをFig.3に示す。まず、陸面過程モデルSiBUC (Tanaka, K., 2004) による鉛直一次元水熱収支解析を行い、その結果を足し合わせることで流域全体の水収支を解析した。その結果から得られるカスピ海への流入量を基にカスピ海領域を推定し、水域の変化を次期タイムステップの陸面解析の土地被服条件に反映させた。解析は1960年~2000年で行っており、空間解像度は約20kmである。

陸面過程モデルSiBUCは鉛直一次元解析を行っており、下の式(1)で流出量Runoffを計算している。

$$Runoff = Prec - Evap - \Delta Swe - \Delta Soilm + Win - Wout \quad (1)$$

ここに、Runoffは流出量、Precは降水量、Evapは蒸発散量、 $\Delta Swe$ は積雪水当量の変化量、 $\Delta Soilm$ は土壤水分の変化量である。メッシュ内に灌漑地がある場合には灌漑必要水量Winと、灌漑排水量Woutが考慮される。なお、Runoffは表面流出量と基底流出量の和であり、本研究ではこれを水資源量と定義する。SiBUCでは式(1)の全項を別々に物理的手法によって解析するが、それと同時にこの式(1)が常に成り立つようになっていく。

流域内の全メッシュでRunoffを計算した後、式(2)で流域全体の水収支を計算する。

$$Qin = \sum Runoff - \sum \frac{Win}{\gamma_c} + \sum Wout + \beta \quad (2)$$

ここで、Qinはカスピ海への流入量、 $\gamma_c$ は運搬効率、 $\beta$ は生活用水と工業用水の和であり、式(2)は水資源量と水需要量の差がカスピ海へ流入することを表して

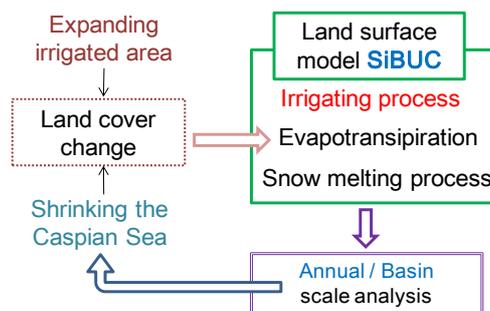
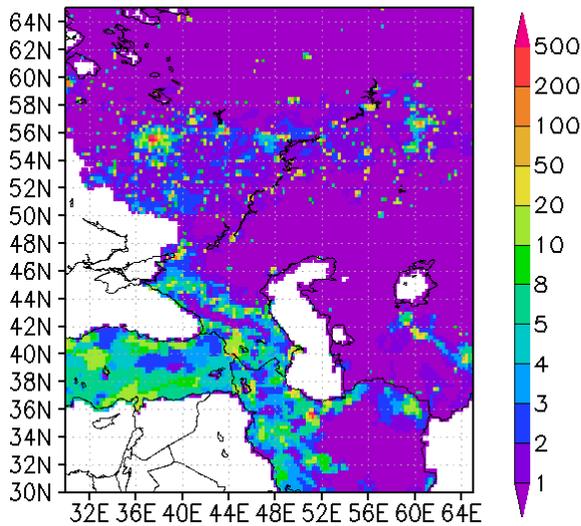
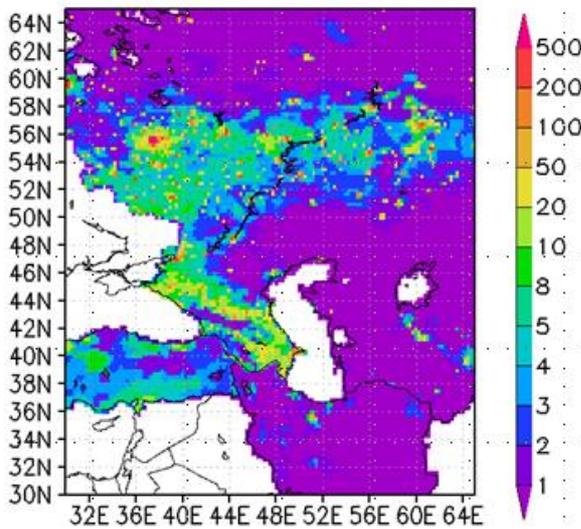


Fig.3 Study flow



(a) Domestic water demand



(b) Industrial water demand

Fig.4 Water demand

いる。ここで運搬効率 $\gamma_c$ とは、河川で取水してから灌漑地まで水を運搬する際の効率であり0.4と設定した。 $\beta$ の推定方法は次の2.2で詳述する。

カスピ海の貯留量変化 $\Delta V$ は、式(3)で計算する。

$$\Delta V = Q_{in} + (P - E)_{Casp} - Q_{KBG} \quad (3)$$

ここに、 $(P - E)_{Casp}$ はカスピ海上における降水量と蒸発量の差で負の値をとる。右辺第3項の $Q_{KBG}$ は、KBGへの流出量を表している。 $Q_{KBG}$ の推定方法については、2.3で詳述する。

## 2.2 生活用水量と工業用水量の推定

カスピ海への流入量の8割を占めるボルガ川流域はモスクワ等の大都市を含んでおり、生活用水や工業用水の需要が多いことが推察される。一般的に、生活用水と工業用水は農業用水とは異なり、取水量のうち使用後に浄化されて河川に戻される割合が高

く、河川流量に対する影響は小さい場合が多い。しかし、過去の文献においてカスピ海の水位変化の一因として上流での生活用水・工業用水の需要量が増加したことを挙げる記述もあるため、カスピ海の水位変動に対して与える影響度について試験的に考察することとした。

推定にはFAOSTAT (<http://faostat.fao.org/>)で公開されている国別統計値を用いたが、国別データであるためロシアのような広大な国ではメッシュごともしくは最低でも流域ごとの需要量を推定する必要があった。そこで本研究では、安部ら(2011)で用いられた手法を用い、人口分布を用いて国別の需要量からメッシュごとの需要量を推定した。式(4)に示す。

$$Demand_i = \sum_k Stat_k \frac{P_i}{P_k} \quad (4)$$

ここに、 $Demand_i$ は*i*メッシュにおける需要量、 $Stat_k$ は*k*国全体における需要量、 $P_k$ は*k*国の全人口、 $P_i$ は*i*メッシュにおける人口である。使用した人口分布データセットは、GPW (Gridded Population of the World)の全球人口分布データセットであり、推定された生活用水と工業用水の分布図をFig.4に示す。

## 2.3 カラボガズ湾への流出量

1970年代初頭においてカスピ海では水位低下が問題視されていたため、少しでも抑える目的でKBGへ流出する水量を堰きとめるダムが1980年に建設された。当初はKBGの水量は保持されるものと目されていたが、実際には数年で消失してしまっただため、1983年より年間2Gtの水量がパイプによってカスピ海より導水された。しかし、1978年以降はカスピ海の水位が上昇し洪水被害が深刻となった事を受け、1991年にダムは破壊された。このようにカスピ海からの流出量が人為的に操作されていたため、式(3)のようにカスピ海消長モデル内で考慮することで、影響を定量的に推定する (Kosarev et al., 2009)。

カスピ海からKBGへの流出量は、既往研究で統計値がFig.5のように公開されていた。しかし、この値を用いてKBGの水収支解析を行うと、流入量がKBG

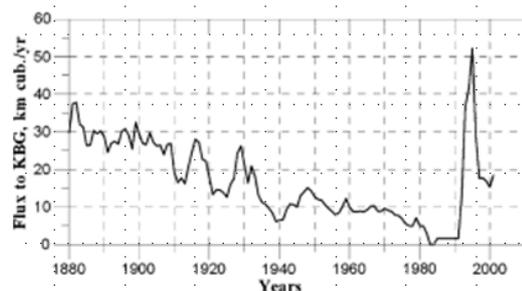


Fig.5 Water discharge to KBG (Frolov, AV., 2003)

BATHYMETRY (GEBCO) Caspian Sea

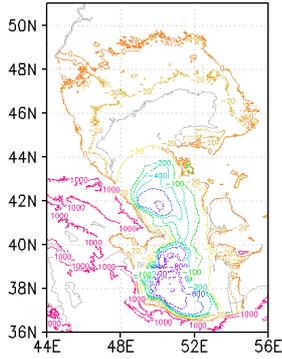


Fig.6 Bathymetry map of the Caspian Sea

からの高い蒸発量を賄う事ができないためKBGが常に縮小を続ける結果となった。そのためカスピ海以外からの流入河川があると考えられるが、KBGの流入河川については具体的な情報が得られなかったため、本研究ではKBGへの流出量を式(5)のようにKBG上の降水量、蒸発量と水量変化から逆算することでKBG上の水収支が合うように設定し、カスピ海とKBGがダムによって分断されている間は、1980年から1982年までは毎年0Gt、1990年までは毎年2Gtが流入すると設定した。

$$Q_{KBG} = (P - E)_{KBG} + \Delta V_{KBG} \quad (5)$$

ここに、 $(P-E)_{KBG}$ はKBG上における降水量と蒸発量の差、 $\Delta V_{KBG}$ はKBGの水量変化を表している。

## 2.4 使用したデータセットについて

最後に、解析に際して使用したデータセットについて簡潔に述べる。

### a) 気象強制力

気象強制力には、以下の全球データを使用した。

- ・平林プロダクト (H08) : H08 (Hirabayashi, 2008) より、降雨量・降雪量・気温・比湿・下向き短波放射・下向き長波放射の気象データを使用した。
- ・JRA25 : JRA25 (Onogi et al., 2007) からは、H08にはなかった気圧と風速のデータを用いている。

### b) 灌漑面積の経年変化の推定

峠ら (2011) の解析時と同様に、過去の灌漑面積の発展をモデルの入力条件で考慮している。FAOSTATから得られる各年の国別統計値を現在の灌漑面積分布を基に分配し、各メッシュの土地被服率に反映させた。

### c) カスピ海の等深線データ

カスピ海消長モデルに必要な等深線データには、GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) データセットを使用した (<http://www.gebco.net/>)。GEBCOは全球で海の水深を約1kmの解像度で公開している。水深データは船舶からの音響探査データを基に衛星データを用いて内挿している。Fig.6にカスピ海における等深線を示す。

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 水収支解析結果

Fig.7に、式(2)に示した流域全体の水収支解析結果を示す。ここでIrrigは灌漑必要水量を表し、式(2)の第2項と第3項の和で計算される。Fig.7では式(2)のRunoffとIrrig、 $Q_{in}$ が比較されているが、水資源量Runoffに対してIrrigが非常に少ないために、ほとんどのRunoffが $Q_{in}$ として流出している事が分かる。前述した1978年を境としたカスピ海の水位変動に対し、その原因と見られるような顕著なトレンドの変化は見られなかった。

次に、カスピ海への流入量の8割を占めるボルガ川の流出量と比較を行う (Fig.8)。ボルガ川の流量は1984年までしか公開されていなかったため、1984年までの流量データと比較する。比較した結果、長期平均値は概ね合っていたが、1978年から観測流量が僅かに増加したことが解析では再現できなかったため、その期間で流量を過小評価していた。

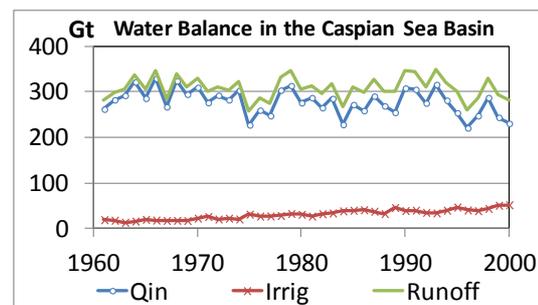


Fig.7 Water balance in the Caspian Sea Basin

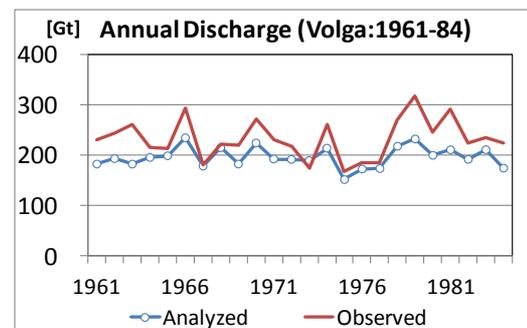


Fig.8 Annual discharge of Volga River

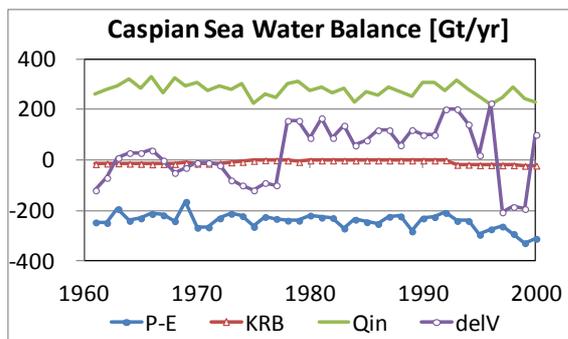


Fig.9 Water balance of Caspian Sea

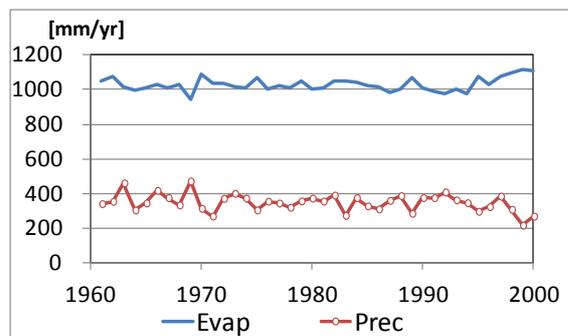


Fig.10 Averaged annual evaporation and precipitation on the Caspian Sea

### 3.2 カスピ海の水収支

次に、流域全体の解析を通して解析されるカスピ海の水収支解析結果を示す。Fig.9に、式(3)で計算されるカスピ海の水収支解析結果を示す。ここで  $(P-E)_{Casp}$  は、カスピ海面積に大きく依存するが、現段階ではV字の水位変動を含む過去の経年変化を正確に再現できていないため、カスピ海消長モデルを用いずに統計値を基に推定された海領域に対して解析した。同様に、カスピ海の貯水量変化  $delV$  は、水位変動の統計値と等深線データを用いて推定し、 $Q_{in}$  には前節で解析された結果を用いている。Fig.9の結果では  $P-E$  の値がカスピ海の面積変化に応じて変化しているが、それでは風速の増加や気温の上昇等を通じたカスピ海上の気候変動の影響が分からないため、Fig.10にカスピ海上での蒸発量と降水量をmm/yrで表した。ここでの蒸発量と降水量は、40年間の解析期間を通じて常に海上であったメッシュのみにおいて平均を行っている。

まず  $delV$  を見ると、1970年代後半までは0Gt/yrを推移しつつ若干の減少傾向であったが、1978年を境に200 Gt/yr近く急増し、その後150Gt/yr前後を推移している。 $(P-E)_{Casp}$  はほぼ一定であったが、カスピ海の面積が増加するに従って蒸発量が増加傾向にある。 $Q_{KBG}$  はほぼ20Gt/yr周辺を推移し、ダムが造られていた期間は0~-2Gt/yrとなっている。

### 3.3 カスピ海の水位変動についての考察

本研究では、カスピ海の過去の水位変動の原因を探るため、陸面過程モデルによる水循環解析を行った。しかし、Fig.2に示すような1978年を境とした顕著な変化は解析の中で全く見られなかった。本節ではこの原因を含めて水位変動の原因を以下の4点に渡り考察を行う。

#### a) 気候変動

既往研究で頻繁に議論されている気候変動に関しては、Fig.7に見られるように1978年を境にした顕著な変化は見られなかった。上流域の降水量や気温に目立った変化はなく、カスピ海上の風速が減少して蒸発量が減少したとする研究もあるが、Fig.10のように年間蒸発量の強度に変化はほぼ見られなかった。

その一つの原因として、入力に用いた気象データに過去の気候変動が十分に反映されていなかった可能性がある。APHRODITE等の他の気象データでも同様の結果を得たが、これらのデータセットは全球や大陸規模で用意されているものであり、サイエンスコミュニティに公開されている気象観測データは最大限反映されているものの、元々中央アジアは公開されたデータが著しく少ない地域であるので、実際に気候変動が起きていても観測されない場合や観測されていても公開されていない可能性がある。様々な研究で気候変動が議論されていることもあり、今後はボルガ川の流量を含めて現地の水文データの収集を試みる必要がある。

Fig.8に見られるボルガ川の年流量の観測値では、1978年からの約5年間は50~80Gt/yrほど流量が多くなっていった。Fig.9の  $delV$  を見ると、1978年前後で200Gt/yrほど増えているので、ボルガ川の流量増加以外も要因となる。同時に、このボルガ川の流量増加の原因についても具体的に探る必要がある。

#### b) 水利用形態の変化

灌漑水需要量の経年変化について、今回行った水循環解析では、FAOSTATから得られる灌漑面積の変化のみが考慮されていたが、1章で述べたような灌漑効率の向上や生産性の低い農地の放棄等は、定量的な推定ができないために考慮できなかった。今後は現地の情報をより収集すると共に、運搬効率や灌漑面積を変えた場合の効果についても定量的に検討する必要がある。

#### c) カラボガスゴル湾のダムの影響

KBGにダムが造られた理由がカスピ海の水量保持であったことや、KBGとカスピ海が分離されていた時期とカスピ海の水位上昇の時期がほぼ一致するた

め、カスピ海水位の上昇の主因の一つと考えられた。しかし定量的に解析した結果、 $delV$ の絶対値が100Gt/yr以下であった1970年代後半までは、20Gt/yr前後となる $Q_{KBG}$ の影響は比較的大きいが、1980年以降は $delV$ の絶対値が150Gt/yr程度に達するため、影響は限定的であると言える。

#### d) 海水温の変化

気候変動の影響として水収支の変化に着眼されることが多いが、カスピ海は最大深度が1000m以上あるため、外洋の海面上昇と同様に、気候変動によって海水温が上昇するとカスピ海の水位も上昇する可能性がある。

そこで、AVHRRの衛星解析値を用いてカスピ海の過去の海面温度の変化を推定した (Fig.11)。Fig.11より、AVHRRのデータが使用可能となる1982年から2000年までの期間に海面水温は僅かに増加傾向にあり、その上昇幅は2°C以下であった。これは水の熱膨張率を考えると、仮に全水深1000mで一様に温度上昇したとしても40cm程度の水位上昇であるため、原因の一つとは考えられるが、主要因は別にある可能性が高い。

#### 4. 結論と今後の課題

本研究では、現状で使用可能な全球の気象データセットを入力条件に陸面過程モデルを用いて、カスピ海の過去の水収支の再現を試みた。加えて、カスピ海の水位変動の原因について考察を行った。

流域全体の水収支解析では、ボルガ川の流量を一定の精度で再現できたことは成果であるが、1978年からの数年間でボルガ川の流量が増加したことを再現できなかった。今後は、1984年以降のボルガ川の流量データを探すと共に、この流量増加の要因についても調査する。

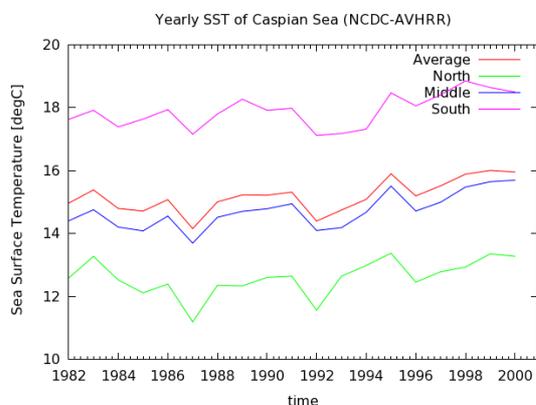


Fig.11 Historical change of annual averaged sea surface temperature

カスピ海の水収支では、貯水量の変化 $delV$ を統計値から推定し、その原因について考察した。気候変動が原因であるとする既往研究は多いものの、現状で使用可能な気象データセットには顕著なトレンドが見られないために、水収支解析を通して過去の気候変動を再現する結果は得られなかった。その他の要因についても定量的な考察が行われたが、どれも大幅で急激な $delV$ の変化を説明できるものではないため、様々な要因が複合的に作用した結果であると考えられる。

今回統計値として過去の水収支解析の根拠としてきたFig.2に示す水位変動の観測ステーションは、カスピ海上で4点のみであるため、水位の代表性の問題についても考察が必要である。

#### 参考文献

- 安部雅宏 (2012): ナイル川全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, 京都大学2010年度修士論文
- 牧田広道 (1997): カスピ海の過去と現在, 水文・水資源学会誌, Vol.10, No. 1, pp.87-95.
- 峠嘉哉・田中賢治・浜口俊雄・小尻利治 (2011): アラル海の縮小や集水域の灌漑地拡大の影響を考慮した水・熱収支の経年変化の再現, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, pp. 691-698.
- Arpe, K., Bengtsson, L., Golitsyn, G.S., Mokhov, I.I., Semenov, V.A. and Sporyshev, P.V. (2000): Connection between Caspian Sea level variability and ENSO, Geophysical research letters, Vol.27, No.17, pp.2693-2696.
- Arpe, K. and Leroy, S.A. (2007): The Caspian Sea Level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled, Quaternary International, Vol. 173, pp.144-152.
- Barannik, V., Olena B., and Felix S. (2004): The Caspian Sea region environmental change, *A Journal of the Human Environment*, Vol. 33, No. 1, pp. 45-51.
- Bolgov, M.V., M.K. Filimonova, and M. D. Trubetskova. (2005): On the Problem of the Caspian Sea Level Forecasting, NATO Science Series, Vol. 46, pp.27-35.
- Dumont, H.J. (1998): The Caspian Lake: history, biota, structure, and function, *Limnology and Oceanography*, Vol. 43, No. 1, pp. 44-52.
- Frolov, AV., (2003): Modelling of multiyear oscillations of the Caspian Sea level: theory and applications. GEOS, Moscow, Russia
- Hirabayashi, Y., Kanae, S., Motoya, K., Masuda, K. and Döll, P. (2008): A 59-year(1948-2006) global

- near-surface meteorological data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity, *Hydrological Research Letters*, Vol. 2, pp. 36-40.
- Klige, R.K. and Myagkov, M.S. (1992): Changes in the water regime of the Caspian Sea, *Geojournal*, Vol. 27, No. 3, pp. 299-307.
- Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G. and Zonn, I.S. (2009): Kara-Bogaz-Gol Bay: physical and chemical evolution, *Aquatic geochemistry*, Vol. 15, pp.223-236.
- Onogi, K., et al. (2007): The JRA-25 reanalysis, *J. Meteorol. Soc. Jpn*, Vol. 85, No. 3, pp.369-432.
- Rodionov, S. (1994): *Global and Regional Climate Interaction: The Caspian Sea Experience*, Kluwer.
- Tanaka, K. (2004): *Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model* doctoral dissertation, Kyoto University.

(論文受理日 : 2014年6月11日)