

大規模貯水池における 貯水量変化の衛星モニタリング

SATELLITE MONITORING FOR WATER STORAGE VARIATIONS IN LARGE RESERVOIRS

馬籠純¹・竹内邦良²・平野順子³・石平博⁴

Jun MAGOME, Kuniyoshi TAKEUCHI, Junko HIRANO and Hiroshi ISHIDAIRA

¹学生会員 山梨大学大学院 工学研究科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²正会員 工博 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³学生会員 山梨大学大学院 工学研究科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

⁴正会員 工博 山梨大学助教授 大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

The method for monitoring the variation of reservoir storage is presented. Satellite observations are used to estimate the change of storage volume of the reservoirs, where satellite images are applied to detection of water surface and satellite altimetry is used to measure the change of water level. This method has potential to be used for monitoring reservoir storage without in-situ observations, and it could be applied to ungauged or data poor basins.

The case studies are conducted in 3 large reservoirs in Africa (Akosombo, Victoria and Nasil), and the results of case studies show that the presented method can provide seasonal to inter-annual variability of reservoir storage. In addition, the relation between change of reservoir storage and precipitation is also investigated in these 3 large reservoirs.

Key Words : *Satellite Remote Sensing, Reservoir Storage, Prediction in Ungauged Basin*

1. はじめに

現在, 地球上には, 堤高15m以上の大規模ダムだけでも約45 000以上も運用されている¹⁾. これらのダム貯水池により開発された水資源は, 河川, 湖沼, 地下水などと共に, 都市, 農業, 工業用水の水源, 洪水調節機能, 水力発電による電力供給源, さらに観光, レクリエーションなど様々な便益を社会にもたらしている.

一方, これらダム貯水池の総貯水量約7000 km³ は, 世界で1年間に利用可能とされる河川水約12 500 km³ ²⁾の半分以上を占めており, 環境, 水循環過程への影響も少なくない. たとえば, 貯水池内における土砂堆積, 富栄養化, 上流域での排水不良, 土砂堆積, 下流域への河道水不足, 河床低下, さらに水生生物の移動, 生息阻害などである. このようにダム貯水池が水環境へ与える影響が懸念されることから, ダム貯水池建設・運用による環境影響評価ならびに既存貯水池群のさらなる効率運用が

強く望まれている.

このような既存貯水池群の効率運用ならびに環境影響評価のためには, 貯水量の季節変化ならびに年々変化の広域的なモニタリングが必要である. にもかかわらず, 現状では, 貯水量に関する情報を十分に得ることができない場合も多い. その理由としては, 近年, 世界各地の地上水文観測網が荒廃し, 流域水管理計画の基礎となる水文データが十分に得られない地域が拡大してきていることや, 国際河川のように関係機関が多く情報の共有が困難であることなどが挙げられる. このような現状に鑑み, 国際水文科学会(IAHS)では先進国と途上国の研究者が共同で, 地上観測データの不足する流域での水文予測技術の開発研究(Prediction in Ungauged Basin: PUB)を推進している. このようなデータの不足する流域に対しては衛星リモートセンシングの応用が非常に有効であり, これはPUB研究の中心課題の一つである.

そこで, 貯水量変化のモニタリングに対しても, 衛星リモートセンシング技術を利用した新たな手法の開発が

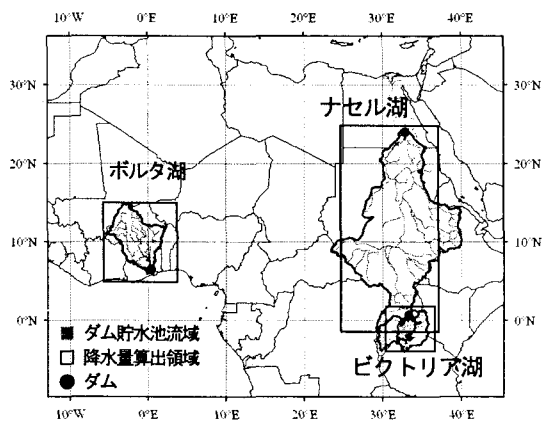


図-1 対象貯水池位置

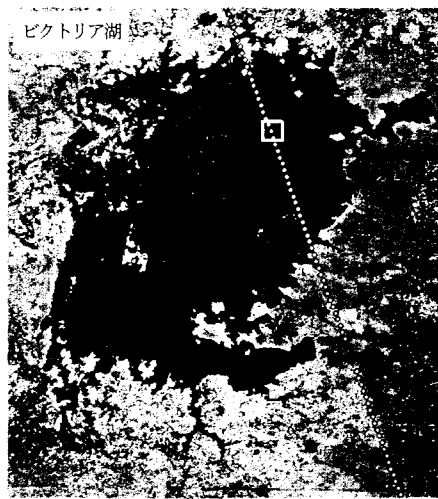
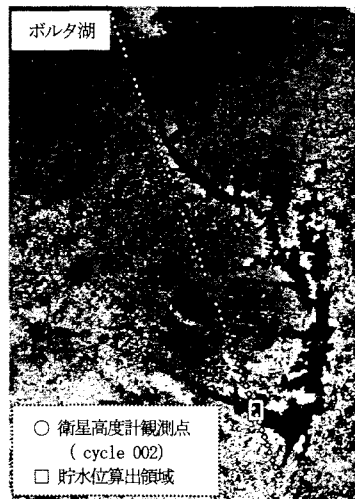


図-2 対象貯水池TERRA/MODIS衛星画像およびTOPEX/POSEIDON衛星高度計観測点

表-1 対象貯水池基本諸元

貯水池名	流域	湛水面積	貯水容量	竣工年	目的
ボルタ湖	ボルタ川	8482 km ²	148 km ³	1965	H
ビクトリア湖	ナイル川	68800 km ²	*2700 km ³	1954	H
ナセル湖	ナイル川	6500 km ²	162 km ³	1970	H, I, F

H：水力発電、I：灌漑、F：洪水制御

湛水面積、貯水容量は満水時の値

※ 貯水量のほとんどは自然湖のもので、Owen Falls ダムにより270 km³の容量が付け加えられた。

必要である。これまでにも、地表面水文情報抽出に関して、衛星画像から求めた湖沼の湛水面積の変化と気候変動との関連性に関する検討（例えば、Harris, 1994³⁾）や、衛星高度計による大規模湖沼、河川の水位変化の評価に関する検討（例えば、Morris et al., 1994⁴⁾；Birkett, 1998⁵⁾）がなされてきている。しかし、流域水管理に対しては貯水量の定量的かつ長期的なモニタリングが重要であるにも関わらず、これらの検討はこれまでほとんどなされていない。

そこで、本研究では、地上観測情報に依らない貯水量の季節変化、年々変化の定量的モニタリングの可能性を検討するため、衛星画像・高度計データを用い、アフリカの3つのダム貯水池・湖沼（ボルタ湖、ビクトリア湖、ナセル湖）の貯水量変化の推定を試みる。さらに、得られた貯水量の季節、年々変化と降水量変化との関連性についても考察し、衛星による貯水量モニタリングの意義について述べる。

2. 対象貯水池

本研究では、図-1および表-1に示す3つのダム貯水池

を対象に検討を行った。

(1) ボルタ湖（アコソンボダム）

アコソンボダムにより造られたボルタ湖の湛水面積（8482 km²）は、世界の貯水池の中で最大の規模である。また、樹枝状の形をしており、多くの入江や流入河川を持つ。湖が非常に長く伸びているため、その集水域は2つの気候帯に分かれ、北方地域では雨期が年に1度しかないが、南半分の地域では2度見られる。

(2) ビクトリア湖（オーウェンフォールズダム）

世界第三位の湛水面積を持つビクトリア湖は、ケニア、ウガンダ、タンザニアの三カ国に囲まれる国際湖沼であり、エジプトへ流れるナイル川の源流である。周囲に複数の流入河川があり、北岸から流出した地点に Owen Falls ダムが運用されている。

(3) ナセル湖（アスワンハイダム）

ナセル湖は、エジプトのカイロの南約690km地点に建設されたアスワンハイダムによる貯水池である。ダムはナイル川の本川上に建設されており、また貯水池は砂漠地帯にあることから、その蒸発量は非常に多い。

表-2 衛星による貯水量モニタリング手法

手法	分類	手法(使用データ)
a	衛星のみ	$A(\text{Sat}) + H(\text{Alt}) \rightarrow dV = A_{\text{ave}} \times dH$
b	衛星のみ	$A(\text{Sat}) \rightarrow \text{H-A 曲線}(\text{Sat+Alt})$
c	衛星のみ	$H(\text{Alt}) \rightarrow \text{H-A 曲線}(\text{Sat+Alt})$
d	衛星+DEM	$A(\text{Sat}) \rightarrow \text{A-V 曲線}(\text{DEM})$
e	衛星+DEM	$H(\text{Alt}) \rightarrow \text{H-V 曲線}(\text{DEM})$
f	衛星+DEM	$A(\text{Sat}) \rightarrow \text{H-A 曲線}(\text{DEM})$
g	衛星+DEM	$H(\text{Alt}) \rightarrow \text{H-A 曲線}(\text{DEM})$

H: 貯水位, A: 湛水面積, V: 貯水量

Aave: 2時期の平均A, dH: 2時期の貯水位差

Sat: 衛星画像, Alt: 衛星高度計, DEM: 数値標高データ

→: 衛星観測 A or H から H-A or H-V or A-V 関係を利用して算出

3. 貯水量変化の衛星モニタリング

(1) モニタリング手法の概要

本研究では, Magome et al.⁶⁾ の貯水量推定手法を用いた. この手法は, 表-2に示すように, 貯水池の位置と使用可能なデータの組み合わせにより, 衛星画像と衛星高度計データのみを利用して貯水量変化を推定する方法と, 衛星画像および衛星高度計データのいずれか一方と数値地形情報(DEM)を組み合わせて用いる方法の合計7つの方法がある. これによって, 任意地点の貯水量のモニタリングを可能としている.

本研究では, 対象とした3つの貯水池において, 衛星画像ならびに衛星高度計データが利用可能であること, さらに衛星画像に対して衛星高度計データがより長期間得られていることから表-2の手法のうち手法c(衛星高度計データ, 衛星画像を利用)を適用した.

この手法cは, まず衛星高度計と衛星画像により貯水池の貯水位Hと湛水面積Aの関係(H-A曲線: $A = \alpha H^\beta$)を求める. そして以下の関係式に衛星高度計で観測される貯水位Hを入力することにより, 貯水量変化を求める(図-3).

$$dV = \int_{H=H_0}^{H_1} A(H) dH = \int_{H=H_0}^{H_1} \alpha H^\beta dH \quad (1)$$

ここで, α , β はH-A曲線の係数, H_0 は基準水位, H_1 は衛星高度計により観測された水位(m)である.

(2) 使用データ

本研究では, 衛星画像にTERRA/MODISのSurface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m(図-2)を使用した. 期間は2000年10月~2002年12月までである. MODISは, 中分解能(250 m~1 km)のセンサであるものの, 広範囲, 高頻度観測が可能であることが大きな特徴である.

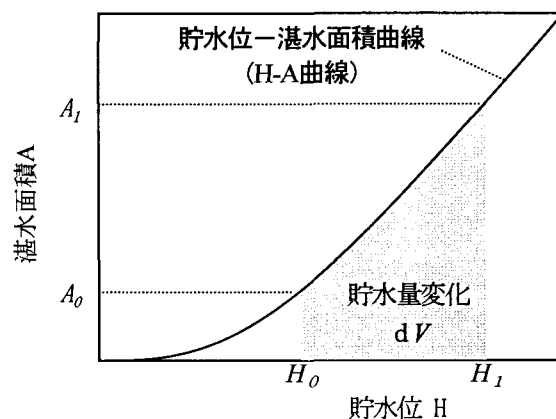


図-3 H-A 曲線と貯水量変化

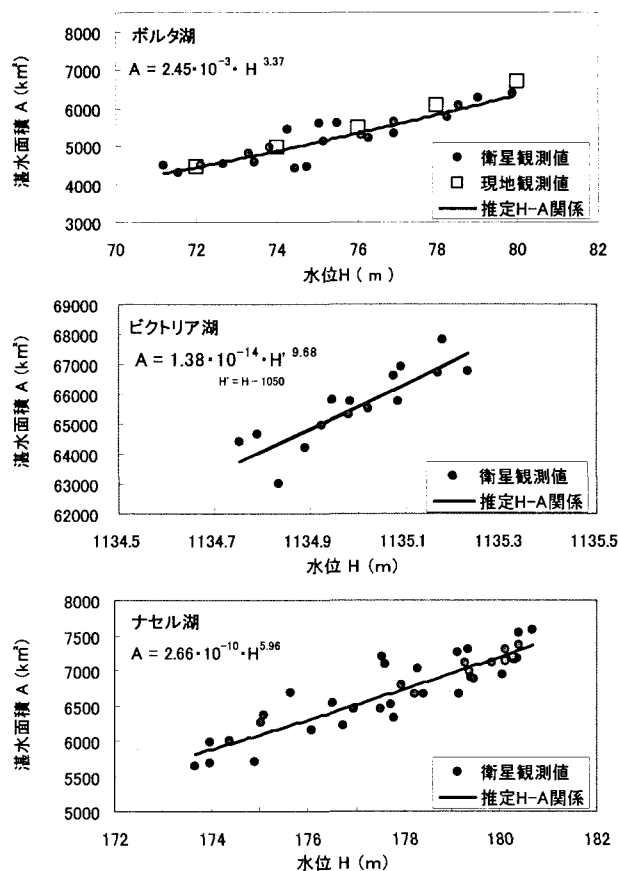


図-4 衛星による推定H-A 曲線
(ビクトリア湖では1050mを最低標高と仮定した)

今回は雲の影響を少なくする目的から上記の8日間合成データをNASA/EOS⁷⁾より取得し用いた. なお, バンド5(1230~1250 nm)を用い, 閾値処理にて湛水面積を算出した.

衛星高度計データは, TOPEX/POSEIDON衛星のMGDR-BデータをNASA/PODAACのFTPサイト⁸⁾より取得し用いた. 期間は1992年10月から2002年8月までである. TOPEX/POSEIDON衛星は約10日の周期で同一地点を観測でき, そのサンプリング間隔は軌道方向に約6 km, 軌道間隔は赤道において約315 kmである. 本研究では, 図2に示す矩形領域内でかつDigital Chart of the Worldより

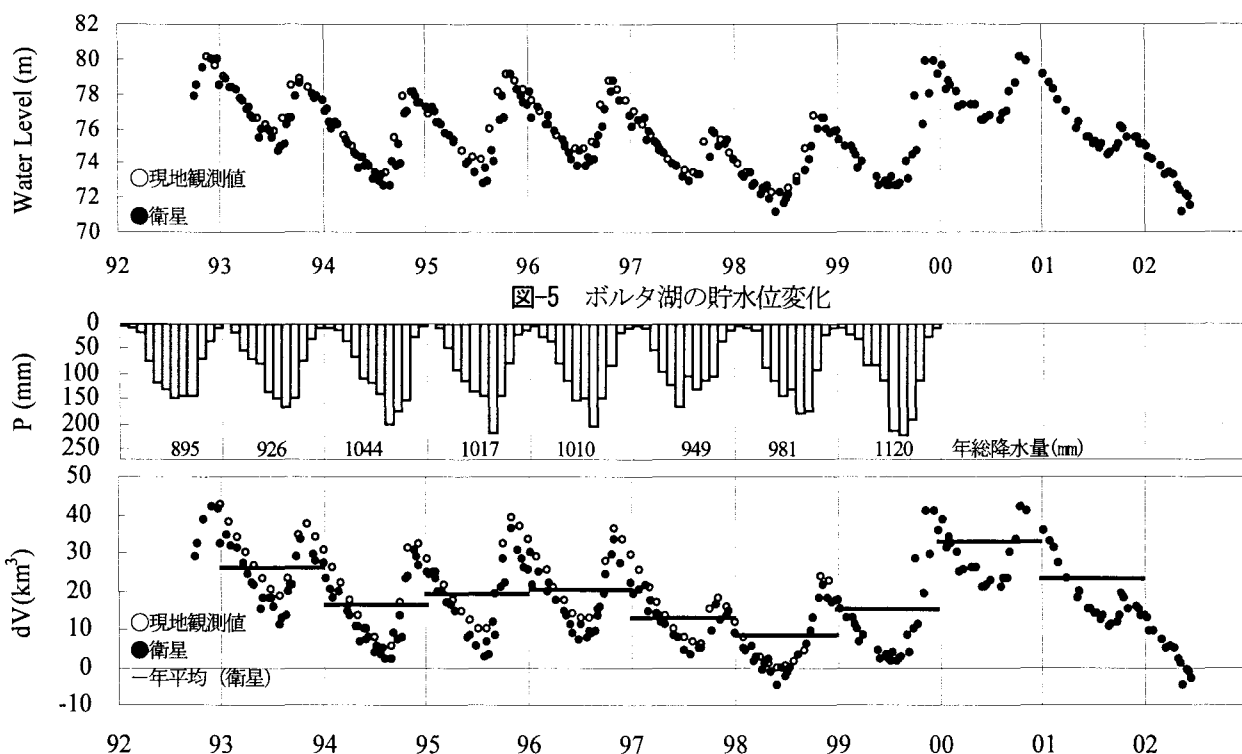


図-6 衛星による貯水量推定結果と現地観測貯水量および降水量との比較（ボルタ湖）

作成した水域界内に入る高度計観測点の水位の平均値を求め、これを貯水位とした。

(3) 適用と検証

1992年から2002年の期間を対象とし、3ダム貯水池の貯水量変化の推定を行った。なお、ボルタ湖については現地観測のH-A曲線および貯水位、貯水量（Volta River Authority が算出）が得られたため、ボルタ湖において本手法による推定値の精度検証を行った。

図-4は、TERRA/MODIS画像とTOPEX/POSEIDON MGRDBより推定したH-A曲線である。ボルタ湖については、現地観測値の5点の湛水面積と推定H-A曲線から得られる湛水面積の相対誤差を求めたところ、誤差の平均は173 km²であり、実測の湛水面積に対して2.9%の誤差であった。

図-5は、ボルタ湖のTOPEX/POSEIDON MGRDBより求めた衛星高度計による貯水位と地上観測水位の比較である。なお、実測水位は1ヶ月毎（月末の値）、衛星観測水位は10日間隔で得られていることから、月末の衛星観測値を用いて実測値に対する相対誤差を算出した。月末の衛星観測値を用いて実測値に対する相対誤差を算出した。この図より、各年における水位のピークや水位の増加、低減部分については、実測値と衛星観測値は良く一致しており、衛星観測は水位の季節、年々変化を良く捉えていることがわかる。93年～98年の期間での誤差の平均値は0.5m、RMSEは0.68mであり、これらは各年の水位の変化幅（＝実測値における最高水位と最低水位の差）の最大値6.8mの7%、10%である。

ただし、水位が低下する7,8月は、他の時期と比べると誤差が大きくなる傾向が見られる。誤差の最大値は95年8月の1.86mで、これは95年の水位の変化幅（4.8m）の39%であった。ボルタ湖では、衛星観測水位の算出において図-2の矩形領域内であつ水面内に位置する観測点が3点程度（時期、軌道によって変化）得られていたが、その中の陸地に近い観測点については、水位低下時にフットプリント内に陸地が占める割合が多くなった可能性があり、水位観測精度低下の一因となったと考えられる。低水位時の衛星観測精度の低下については、今後、原因の特定も含め対処方法を検討する必要がある。

さらに、ボルタ湖において衛星高度計による水位変化をH-A曲線に入力し、貯水量を推定した結果を図-6に示す。なお、dVは、期間中の実測最低水位H=72.2mのときの貯水量からの変化量を示している。これより、本手法による貯水量変化の推定値は貯水量変化の季節変化ならびに年々変化を良く捉えていることが分かる。水位の場合と同様に精度を検証すると、93年から98年の期間で誤差の平均は4.1 km³、RMSEは4.8 km³、最大11.3 km³（最大変化幅39 km³に対してそれぞれ、10.5%、12%、29%）であった。ピーク時および増加、減少期の貯水量の誤差は小さいものの、水量低下時期にやや誤差が大きいことは課題である。しかし、衛星による貯水量の定量的な監視の可能性と、季節変化、年々変化の監視においてはその変化を定量的に捉えられることが確認された。

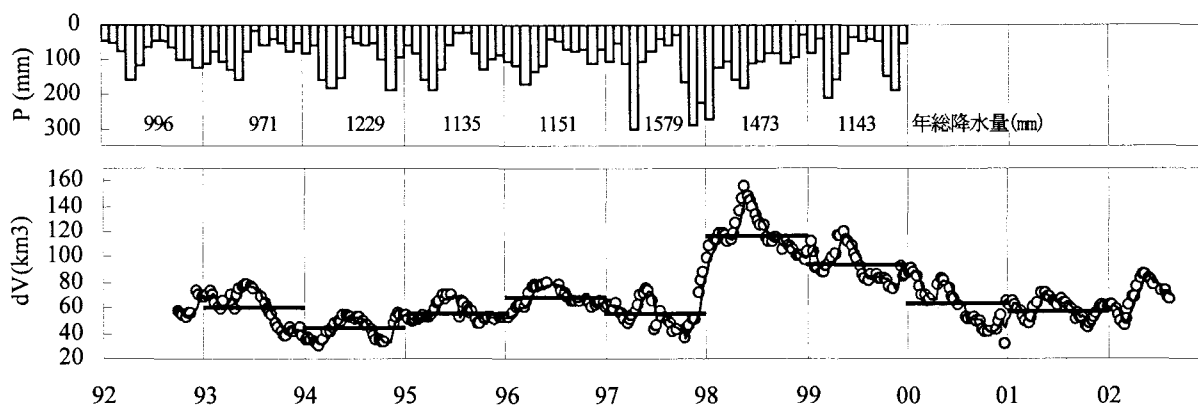


図-7 衛星による貯水量推定結果と降水量との比較（ビクトリア湖）

(dVは水位H=84mの時の貯水量からの変化量、一は年間平均値)

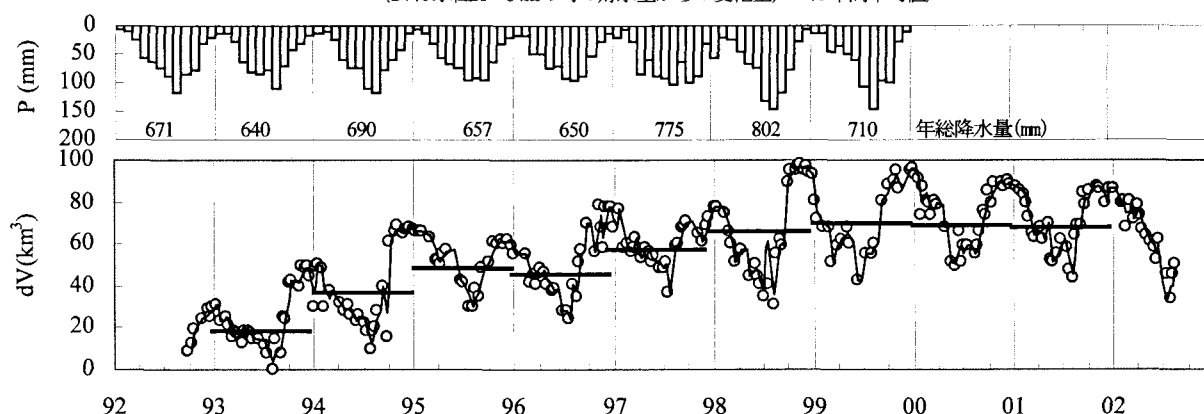


図-8 衛星による貯水量推定結果と降水量との比較（ナセル湖）

(dVは水位H=165mの時の貯水量からの変化量、一は年間平均値)

4. 大規模貯水池の貯水量変化の評価

(1) 評価方法と使用データ

衛星データにより推定した大規模貯水池の貯水量変化について、降水量の変化と貯水池操作等との関連性について考察する。

ここで用いた降水量データは、デラウェア大により作成された Tropical Land-Surface Precipitation: Gridded Monthly and Annual Time Series (1950 - 1999) (Version 1.01)⁹⁾である。本研究では、92年から99年までを対象として、各貯水池の上流域（図-1の矩形領域）における月単位の領域平均降水量を用いた。

(2) 貯水量変化の評価

a) ボルタ湖

貯水量の季節変化については、冬季（乾季）に増加し、夏季（雨季）に減少する傾向を読み取ることができる

（図-6）。この変化は、発電目的のために、雨季に貯水量を増加させ、降水量の少ない乾季から雨季がはじまる期間においても発電用に貯水量を利用し続けている貯水池操作の結果と考えられる。また、降水量がピークを迎える8月から約2ヶ月後に貯水量は最低となることが多い。

貯水量の年々変化については、92年から99年半ばまでのゆるやかな減少傾向、99年後半から2000年にかけての増加傾向、2000年後半以降の減少傾向がみてとれる。降水量との関係を見ると、前年に比べて140 mm増加した99年の降水量増加が、99年後半の貯水量増加傾向と関連していることが伺える。また、92年から99年にかけて貯水量は減少傾向であるが、この期間の降水量は特に減少傾向が見られるわけではないことから、降水量のみでこの時期の貯水量減少傾向を説明することは困難と言える。この現象を説明するには、降水量変化に加えて、ダム流域（ボルタ流域）での水使用量および気象条件等も考慮して検討する必要がある。

b) ビクトリア湖

図-7より、ビクトリア湖における貯水量の季節変化は、5月～6月と11月～12月の2つのピークがあることが分かる。これは周辺領域の降水量のピークが4月、10月であることに対応していると考えられる。

また、貯水量の年々変化についてみると、1997年までは比較的变化が小さいが、98年に急激に増加し、その後の2001年にかけて徐々にもとの水準に戻る傾向が伺える。この98年の貯水量の増加は、1997年の降水量が他の年度に比べて格段に多いためと考えられる。さらに貯水量は99年において減少しながらも、98年の多雨のために高い

水準を保っている。また、97年以前の変化の小さい期間であっても、ビクトリア湖は降水量変化に遅れて貯水量変化に現れている（93年は対象期間中では少雨年で一年後の94年に貯水量が減少、94年の降水量増加に対しては、95年に増加）。このように、ビクトリア湖では降水量の増減の影響がボルタ湖に比べて遅く現れている。これは、湖の規模が巨大なため、周辺領域の降水量変化の影響が貯水池全体に及ぶのに時間がかかるためと考えられる。

c) ナセル湖

ナセル湖における貯水量の季節変化は、冬季にかけて貯水量が増加し、夏季にかけて減少する傾向がみられ（図-8）、これはボルタ湖と同様である。この貯水池の利用目的の中に、灌漑、洪水制御に加えてボルタ湖と同様の水力発電が含まれていることから、類似した変化傾向になったものと考えられる。

貯水量の年々変化については、他の貯水池とは異なり、あまり明確な降水量との対応は見られなかった。年降水量の変化は93年から97年にかけて大きく変化していないにも関わらず、貯水量は増加傾向となっている。また、97年、98年とやや多雨傾向であるが、それが貯水量の変化と直接的に影響を与えていないように見える。これは、ナセル湖がナイル川の下流に位置しており上流域が非常に大きいこと、降水量の空間分布の影響や、ナセル湖まで到達する間の蒸発等の様々な水文・気象要因が大きく影響しているために領域の降水量だけでは説明できないことが一因と考えられる。また、99年以降は安定した貯水量であることから、この99年までにかけての増加傾向は、周辺の水利用増加に対応するための、貯水池における操作とも考えられる。

(3) 衛星による貯水量モニタリングの可能性と意義

貯水量の変化は、ダム上流域における様々な自然・人為的要因が複雑に影響した結果として現れるものであり、図-8の解析結果からも明らかのように、降水など単一の気象要因のみから、その変化および貯水池操作を説明することは困難である。また、貯水量は季節・年々で大きく変動することから、その変化を捉えるためには、長期・連続的な貯水量の監視が必要である。本研究で示した手法は季節・年々変化の把握が可能であり、長期連続的な観測に対して有効であると考えられる。

また、今回用いた手法は、衛星データのみから貯水量を推定するものであり、現地観測データが得られない地域における貯水量の広域的かつ定常的なモニタリングを可能にする技術と言える。したがって、この手法は、十分な地上観測データが無い地域を含む、広域水資源の総合的な管理・運用に大きく寄与するものと期待される。

さらに、大陸～全球規模での水循環解析やダムの環境影響評価においても、貯水池操作に関するデータは、必要であるにも関わらず最も不足している情報であり、これらの研究分野への本手法の応用も期待される。

5. まとめ

本研究では、アフリカの3つの貯水池（ボルタ湖、ビクトリア湖、ナセル湖）を対象に衛星による貯水量変化の評価を行った。

ボルタ湖（総貯水量148 km³）における検証結果は、誤差の平均が4.1 km³、RMSEが4.8 km³（最大変化幅39 km³に対して平均誤差が10.5%、RMSEが12%）であり、衛星による貯水量の定量的モニタリング手法の適用性が示された。

また、降水量と貯水量変化の関連性について検討した結果、降水量等の気象データのみから貯水量変化ならびに貯水池操作を評価することは困難であるといえ、本手法などによる長期の連続的な貯水量監視が重要である。

今後は衛星モニタリング手法の精度向上ならびに適用限界を明らかにする必要がある。さらに、この衛星による貯水量推定手法を基礎として、貯水量推定値に基づく貯水池の操作ルールモデル（例えば、花崎ほか¹⁰⁾）のパラメータ同定、貯水池操作を考慮した流出解析及びそれに基づく将来的な流域水資源量変化の予測などにも取り組む予定である。

参考文献

- 1) ICOLD: World register of Dams 1998, International Commission on Large Dams, Paris., 1998.
- 2) Igor A. Shiklomanov: World water resources: *Modern assessment and outlook for the 21-st century*, World Freshwater Resources 1999.
- 3) Harris, A. R.: Time series remote sensing of a climatically sensitive lake. *Remote Sensing. Environment*. 50, pp.83-94, 1994.
- 4) C. S. Morris, S. K. Gill: Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the Great Lakes, *Journal of Geophysical Research*, vol.99, pp.24,527-27,539,1994
- 5) Birkett, C. M.: Contribution of TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large river and wet land. *Water Resources Research*. vol.34, no.5, pp.1223-1239,1998
- 6) Magome et al. ; Method for satellite monitoring of water storage in reservoirs for efficient regional water management, IAHS Publ. no. 281, pp.303-310, 2003.
- 7) NASA EOS : <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>
- 8) NASA PODAAC: TOPEX/POSEIDON MGDR-B
ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_height/topex_poseidon/
- 9) Center for Climatic Research Department of Geography University of Delaware: Tropical Land-Surface Precipitation: Gridded Monthly and Annular Time Series (1950 - 1999) (Version 1.01),
<http://climate.geog.udel.edu/~climate/index.shtml>
- 10) Hanasaki et al : Simulation the discharge of Chaophraya River taking into account reservoir operation, IAHS Publ. No 281, pp.215-223, 2003.

(2003. 9. 30受付)