

衛星・数値地形情報に基づくダム貯水量の推定

ESTIMATION OF WATER STORAGE IN DAM RESERVOIRS
BY USING SATELLITE OBSERVATIONS AND DIGITAL ELEVATION MODEL

馬籠純¹・竹内邦良²・石平博³

Jun MAGOME, Kuniyoshi TAKEUCHI 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 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

To understand the spatial and temporal distribution of water storage in reservoirs is important for water resources management as well as for studying water cycle on the global. In this study, a method for estimating water storage in a reservoir is proposed based on satellite observations and digital elevation model. The relationship between area of water surface (A) and volume of water storage (V) is calculated from digital elevation model, and modeled as $V=aA^b$. Using this A-V relation, the water surface measured from satellite images can be translated into the volume of water storage.

The proposed algorithm is applied to Yagisawa-reservoir, which is located in upper reach of the Tone river basin in Japan. Although estimated water storage does not yet satisfactorily agrees with the observed, potential of storage volume estimation by this method is well demonstrated.

Key Words : *Water storage in reservoirs, Area of water surface, Digital elevation model, Satellite remote sensing*

1. はじめに

人口増に伴う水需要の増大は21世紀に人類が直面する最も大きな問題の一つである。しかしながら、地球上に存在する水量には限りがあり、またその一部は水質悪化により利用できなくなりつつある。したがって、安定した水供給のためには、利用可能な水資源量を正確に把握し、それを効率的に運用する必要がある。現在、都市、農業、工業用水の水源としては河川、地下水等と並びダム等の貯水池が利用されており、その水は多くの水需要を賄っている。したがって、貯水池における貯水量の把握は、水資源管理に非常に重要であり、そのためには貯水量の広域的なモニタリングが必要となる。

さらに近年、このような水資源的な役割だけでなく、ダムによる水の貯留ならびに河川水の流下遅延が大陸・地球規模での水循環へ与える影響についても認識されつつある。現在世界では、高さ15m以上のダムが36000以上も運用されており、この数は1950年から1986年の間に688%も増加している¹⁾。これらダムによる貯留は、洪水

調節、水力発電および農業、工業、都市用水の供給により社会に対して重要な便益を与える一方、河川水の滞留時間を増すことにより水循環にも影響を与える。さらに、このようなダムにおける河川水の滞留は、貯水池の土砂堆積、下流の河道水不足、水生生物の移動、生息に対する阻害などの問題も引き起こす。Vorosmarty et al²⁾は0.5°メッシュの全球河道網と貯水容量0.5km³以上の大ダムの貯水容量データをもとに、ダムによる河川水の滞留時間のグローバルな分布について検討し、幾つかの大河川の河口では、貯水池における滞留により、3ヶ月を超えるような流出遅れが現れていると推定している。このように、ダムによる貯留が大陸規模での水循環に与える影響を評価するためにも、ダム貯水量を広域的かつ継続的に監視することは非常に重要である。

このような貯水量の広域モニタリングに対しては、リモートセンシング技術の適用が有効であると考えられる。過去、衛星リモートセンシングを用いた地表面水文情報の抽出については、様々な検討がなされてきた。その中には水面の抽出に関するものも多く含まれており(たとえば、力丸ほか³⁾、六田ほか⁴⁾など)、このような水面抽

表-1 J-ERS1/SAR 基本諸元

センサ名	SAR
周波数	1.257GHz
ピクセルスペーシング	12.5m,18m,25m
オフナディア角	35°
観測幅	75km
回帰日数	44日
衛星高度	568km

表-2 ADEOS/AVNIR 基本諸元

センサ名	AVNIR
波長域	0.40～0.50
	0.52～0.62
	0.62～0.72
	0.82～0.92
パンクロモード※	0.52～0.72
空間分解能	16m/8m(※)
観測幅	80km
回帰日数	41日
衛星高度	797km

表-3 貯水池基本諸元

ダム名	矢木沢ダム	川俣ダム	草木ダム
水系	利根川水系	利根川水系	利根川水系
河川名	利根川	鬼怒川	渡良瀬川
集水面積	167.4km ²	179.4km ²	254.0km ²
湛水面積	5.67km ²	2.59km ²	1.7km ²
常時満水位	EL 854.0m	EL 976.0m	EL 454.0m
最低水位	EL 796.5m	EL 930.0m	EL 403.7m
総貯水量	204,300,000m ³	87,600,000m ³	60,500,000m ³
有効貯水量	175,800,000m ³	73,100,000m ³	50,500,000m ³

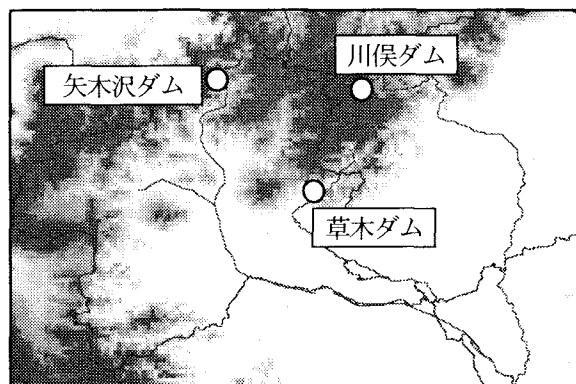


図-1 貯水池位置

出技術を用いて貯水池の湛水面積の拡大／縮小を監視することにより、貯水量の変動傾向については把握が可能である。しかしながら、衛星リモートセンシングにより得られるのは湛水面積など平面的な情報であり、貯水量については直接的に計測は出来ない。したがって、貯水量把握のためには、衛星観測により得られる湛水面積から貯水量を推定する手法が必要となる。

そこで本研究では、ダムにおける湛水面積(A)と貯水量(V)との関係(以下A-V関係と示す)を数値地形情報より求め、その関係と衛星画像から得られる湛水面積情報から貯水量を推定する方法を提案する。さらに、この手法を利根川上流域の矢木沢ダムにおいて適用し、本手法による貯水量把握の可能性について検討する。

2. 使用データおよび対象貯水池

(1) 衛星データ

現在、数多くの衛星が運用され、様々な衛星データが利用可能になってきている。今回、湛水面積の抽出に使用した衛星データは以下の2種類のデータである。

a) J-ERS1/SAR

このセンサは、観測幅が75kmと広く、また、得られる画像解像度は、12.5mと高い。さらに、マイクロ波は雲を透過して地表面まで届くことから、雲の影響を受けず、地表面状態を継続的に観測するのに適している。本研究では、94/3/28、94/8/7、95/3/25、95/7/25、97/1/3に取得された計5シーンのデータ(レベル2.1、パス66、ロ

ウ239)を用いた。

b) ADEOS/AVNIR

このセンサは、16mの高解像度かつ可視・近赤外の多波長での観測が可能である。ただし、雲の影響を受けるため、対象領域が鮮明に捉えられているデータを用いる必要がある。ADEOS運用期間内(96年8月～97年6月)で水面抽出に使用可能なデータを検索し、97/1/16のデータ(レベル1B2、パス1395、ロウ365)を解析に用いた。

(2) 数値地形情報

本研究では、日本の貯水池における検討であること、A-V関係をできるだけ精度良くモデル化する理由から、現在、利用可能な数値標高データ中で最も高解像度である、国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)を用いる。

(3) 対象貯水池概要

矢木沢ダムは利根川上流の群馬県北部に位置し、ダム貯水池は洪水時満水位で湛水面積5.674km²、総貯水容量2億430万m³の多目的ダムである。ダムサイトにおける地形および周辺の一般的な地形は急峻な谷地形である。

また、貯水量推定の対象とする矢木沢ダムに加え、川俣ダム、草木ダムにおいて、衛星画像からの湛水面積抽出の解析を行った。これらのダムサイトの地形も矢木沢ダムと同様な地形であるが、貯水池規模は矢木沢ダムの半分以下となっている。

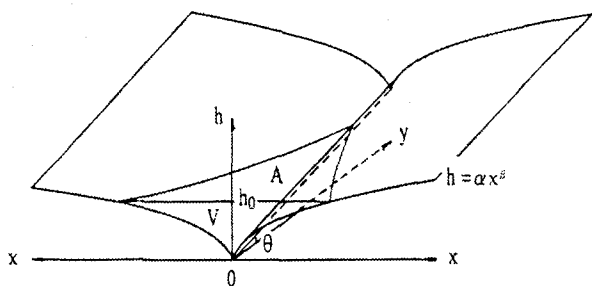


図-2 谷地形の仮定

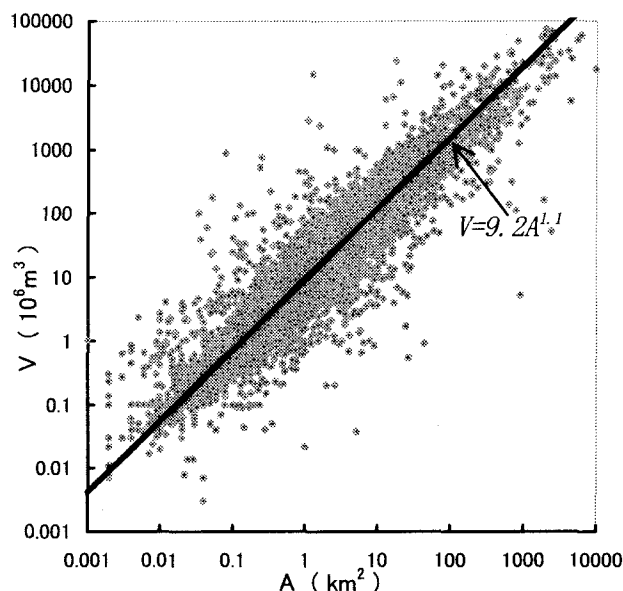


図-3 世界の貯水池の湛水面積Aと貯水容量V (7936 貯水池)

3. 貯水池 A-V関係のモデル化

(1) A-V関係

図2のように、斜面形状が $h = \alpha x^\beta$ (h : 標高、 x : 谷の中心からの距離) で、かつ一定勾配 θ を持つような谷地形を仮定した場合、貯水池におけるA-V関係は以下のように表すことができる。(竹内(1996))⁵⁾

$$V = a A^b \quad (3a)$$

もし、 $h = \alpha x$ ($\beta=1$) のような地形ならば、幾何学的相似により $V \propto A^{1.5}$ となるが、World Register of Dams¹⁾ およびダム年鑑⁶⁾ に記載されている世界各国のダム貯水池(7936の貯水池)における常時満水位時のA、Vのデータを式(3a)に当てはめるところ、以下のような結果が得られている。(竹内(1996))⁵⁾

$$V = 9.2 A^{1.1} \quad (A: \text{km}^2, V: 10^6 \text{m}^3) \quad (3b)$$

本研究でも、この竹内による検討に倣い、貯水池のA-V関係を式(3a)により表現することとした。

(2) 数値地形情報を用いたA-V関係のモデル化手法

a) A、Vの計算

馬籠ほか⁷⁾ の手法により、グリッド型の数値標高データ

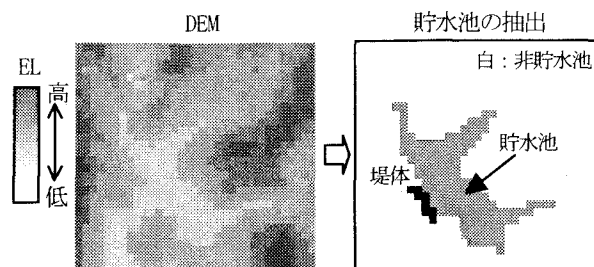


図-4 数値地形情報における貯水池部分の抽出

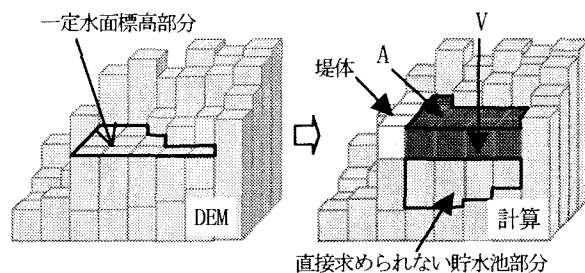


図-5 計算イメージ (既存貯水池部分での計算)

を用いて、貯水池におけるA、Vを計算する。はじめに、現実の貯水池地点が、標高は貯水位より低く、かつ堤体より上流側に存在することを利用して、貯水池位置を特定する。数値標高データ上で堤体位置、堤高、貯水位を設定した後、貯水位より標高が低いグリッドを検索し、この中から堤体上流側に位置しており、かつ連続するグループを抽出し、これを貯水池とする。次に、地形、堤体、貯水池は図-3のように直方体の複合体と考え、湛水面積Aは貯水池のグリッド数×グリッド面積、貯水量Vは貯水池の各グリッド上における、標高値から水面標高までの高さを持つ直方体の体積を積算して求める。

以上の手法により、貯水位を堤体位置の標高上1m毎に設定し、A、Vを連続的に求めた。

b) 計算値の補正

数値標高データにおいて、既存の貯水池部分の標高値は、水面下の実地形の標高値ではなく、ある一定の水面標高値で満たされている(図-5左)。このため、a)の計算値はこの一定水面標高値以下の貯水池部分が含まれておらず(図-5右)、補正が必要となる。そこで、この計算値と、A、Vが既知、例えば常時満水位の値より補正量を求め、すべての計算値に加算することで補正を行う。

c) モデル化

b)で求めた補正值A、Vを用いて、式(3a)のパラメータa、bを最小2乗法により決定する。

図-6に、以上の手法によるモデル化の流れを示す。まずa)によって数値標高データからA、Vを計算し、b)の補正を行う。以上の計算値を用いて、式(3a)で外挿することにより、実際の水位変動に伴うA-V関係をモデル化する。

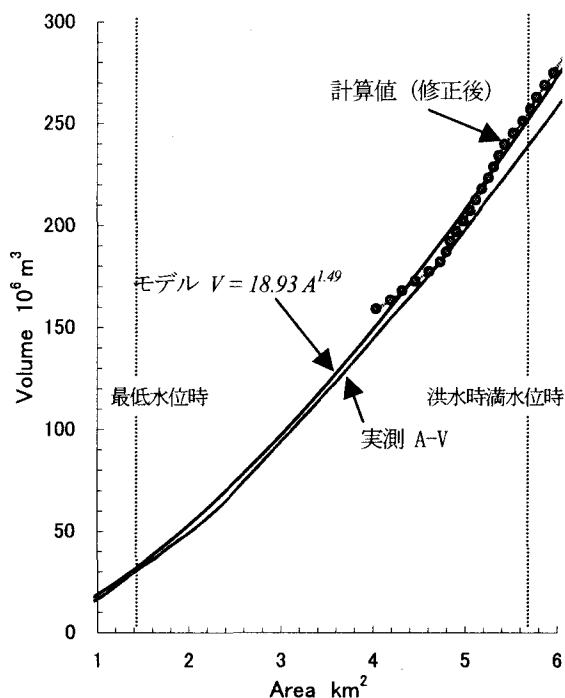


図-6 矢木沢ダムA-V関係モデル

(3) 矢木沢ダムにおけるA-V関係のモデル化

国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)を用い、(2)の手法を適用した結果、矢木沢ダムのA-V関係は次式のようにになった。

$$V = 18.93 A^{1.49} \quad (A: \text{km}^2, V: 10^6 \text{m}^3) \quad (3c)$$

得られたA-V関係の検証データとして、ダム管理事務所が地形図より求めたA、Vを実測値として用いる。実際の貯水池操作による水位変動を考慮し、最低水位から洪水時満水位に対応する範囲で、実測値と式(3c)から得られる値を比較したところ、相対誤差の平均は+5.2%、最大+8.5%であった。

4. 貯水量Vの推定

(1) 衛星画像からの湛水面積Aの抽出

本研究では、以下に示す3つの推定方法を用いた。

a) 抽出法1 J-ERS1/SAR画像目視抽出 (SAR目視)

湛水域のような滑らかな面では、マイクロ波が鏡面反射するため、後方散乱は小さく、SAR画像上で暗く表示される⁸⁾。また、地被状態やマイクロ波の放射方向・角度に対する地表面の地形傾斜方向・角度によっては、湛水域と同様に後方散乱が小さくなり、同様に暗く表示される部分も多い⁸⁾。

そこで、目視抽出を容易にするため、まず、主に低い値を示している湛水域を濃度変換により強調する。さらに、値の分布を一様にし画像を見やすくするヒストグラム平滑化を行う。抽出法1では、以上の処理により得られた画像を用いて、地形図の湛水域と等高線より湛水域



図-8 抽出法2 (SAR半自動) による湛水面積の抽出結果 (J-ERS1/SAR 94/3/28 中央の灰色部分が抽出湛水域)

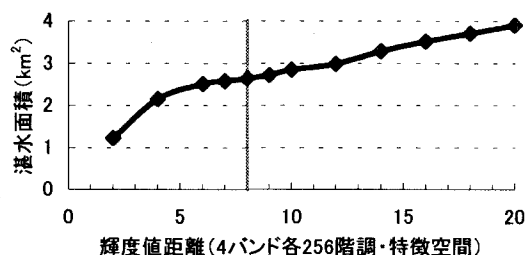


図-9 抽出法3 (AVNIR半自動) による輝度値距離と抽出湛水面積

の形状を推測し、目視により抽出を行った。湛水面積Aは湛水域のピクセル数に公称ピクセルサイズ(12.5m×12.5m)を掛け合わせるにより算出した。

b) 抽出法2 J-ERS1/SAR画像半自動抽出 (SAR半自動)

抽出法2は、画像処理手法を用いて半自動的に湛水域を抽出する。まず、抽出法1での処理に加え、ウィンドウサイズ3×3の平滑化フィルタを用いた空間フィルタリング処理を行い、SAR画像の特徴である画像のぼらつきを軽減する。次に、2値化処理を施し、湛水域と非湛水域を分割する。2値化処理の閾値は、様々に変化させた閾値の中から、地形図を参考に湛水域の形状を最も良く表示していると考えられる値を採用している。さらに、ウィンドウサイズ7×7で多数決を取る処理を画像全域に施し、孤立点の除去を行った。最終的に、湛水域は領域化して抽出するが、明らかに斜面部分と考えられる領域は、目視により除去した。

c) 抽出法3 ADEOS/AVNIR画像半自動抽出 (AVNIR半自動)

抽出法3も、領域拡張法⁹⁾を用いて、半自動的に湛水域の抽出を行う。この手法はまず、波長帯数の次元を持つ特徴空間⁹⁾(輝度値空間)において、特定のピクセル値との類似度を示す輝度値距離を設定する。この輝度値距離を用いて、画像中の特定のピクセルを起点に、近傍のピクセル(4近傍もしくは8近傍)から、類似するピクセルを検索、統合する。以降、新しく統合されたピクセルに

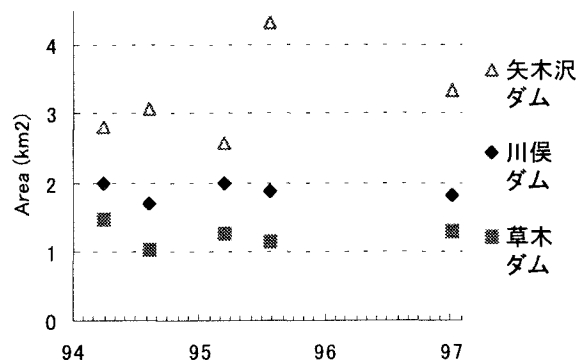


図-10 抽出法1(SAR目視)による湛水面積抽出結果

表-4 貯水量推定結果(矢木沢ダム)

date	抽出法1(SAR目視)			抽出法2(SAR半自動)	
	実測V	V 1	誤差	V 2	誤差
	10^6 m^3	10^6 m^3	%	10^6 m^3	%
94/3/28	85.7	87.8	2.4	116.3	35.7
94/8/7	85.3	100.8	18.2	141.0	65.4
95/3/15	72.6	77.7	7.0	97.7	34.5
95/7/25	177.4	168.3	-5.2	197.8	11.5
97/1/3	123.1	114.0	-7.4	164.0	33.2

date	抽出法3(AVNIR半自動)		
	実測V	V 3	誤差
	10^6 m^3	10^6 m^3	%
97/1/16	116.5	80.2	-31.2

※ 誤差：実測値に対する相対誤差(%)

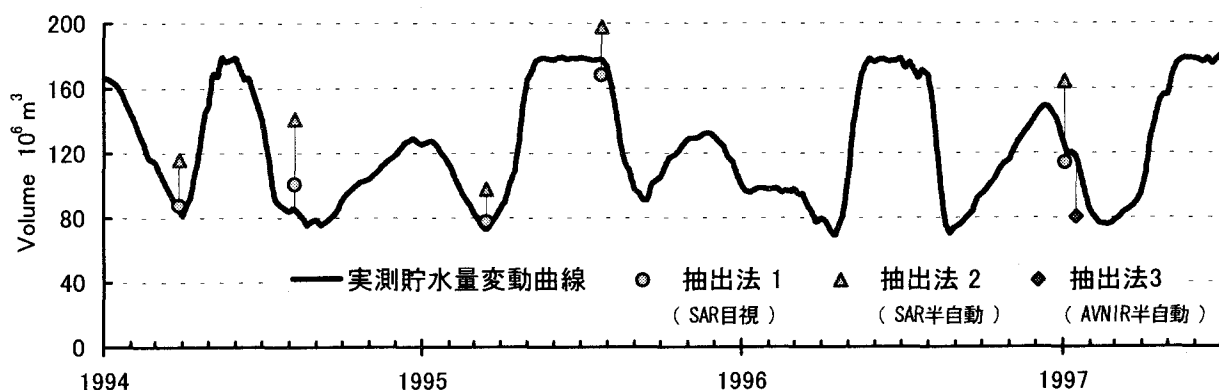


図-11 貯水量の推定結果と貯水量変動曲線との比較(矢木沢ダム)

において同様に検索、統合していき、類似する領域が拡張しなくなるまで反復することによって、一塊の領域を抽出する。

以上の手法を用いて、輝度値距離(4バンド各256階調の特徴空間)毎に湛水域を抽出した結果が図-9である。この中から、地形図を参考にして、山地斜面の日陰部分を含まず、最も不足なく抽出している湛水域を最終的に採用した。湛水面積Aは抽出法1、2と同様に、得られたピクセル数×ピクセルサイズ(16m×16m)で算出する。

図-10は、抽出法1(SAR目視)を用いた、矢木沢ダム、草木ダム、川俣ダムにおける湛水面積の抽出結果である。目視による人為的な抽出誤差が含まれていると考えられるが、3貯水池とも、各シーン間の面積変動を抽出することができたといえる。

(2) 貯水量Vの推定

各抽出法により得られた湛水面積Aを用いて、式(3c)の貯水池A-V関係から貯水量Vを算出する。表-4および図-11は、矢木沢ダムを対象とした推定結果であり、矢木沢ダム管理事務所により観測された実測貯水量の変動データとともに推定結果を示した。

抽出法1(SAR目視)、抽出法2(SAR半自動)は、それぞれに誤差を生じてはいるが、図-11より、貯水量変動の増減傾向は捉えているものと考えられる。期待した抽出法

2(SAR半自動)においては、誤差が大きく、過大評価傾向となることがわかった。なお検討した5シーンにおいて、実測値に対する相対誤差の平均は、抽出法1が+8%、抽出法2が+36%となった。

また、抽出法3(AVNIR半自動)は、解析事例が1件で推定傾向を検討することはできないが、この例では過小評価となっており、相対誤差は-31%であった。

(3) 推定貯水量Vの誤差原因

本手法による貯水量推定の誤差原因は、第一に衛星画像より抽出した湛水面積Aの誤差であり、大きく影響している。第二に、得られた湛水面積Aから貯水量Vに変換する際の、A-V関係モデルの誤差がある。

矢木沢ダムにおける推定では、後者のモデル誤差は平均で+5.2%、最大で+8.5%の誤差である。前者の湛水面積Aの抽出誤差に関しては、以下で検討を行う。

a) J-ERS1/SARによる湛水面積Aの抽出誤差

湛水面積の抽出で最も誤差が発生した領域は、山地斜面と湛水域との境界部分と考えられる。特にマイクロ波放射方向と同方向の山地斜面は、SARの観測する後方散乱係数が小さく、湛水域と似通った値をとるため、この斜面との境界部分で誤差が生じやすいと思われる。

各手法で抽出された湛水面積Aを実測値と比較した結果、5シーンの相対誤差の平均は、抽出法1(SAR目視)で

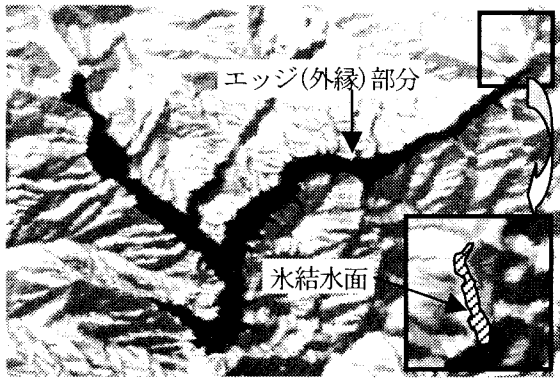


図-12 抽出法3 (AVNIR半自動) による湛水面積の抽出結果

－1.1%、抽出法2 (SAR半自動) で+19.2%となった。また、範囲は抽出法1で－7.2%～+8.9%、抽出法2で+4.1%～+36.4%となった。抽出法2の抽出画像を確認したところ、前述の境界部分において斜面を湛水域としている部分が多く確認された。以上の結果から、抽出法2 (SAR半自動) の過大評価の原因は、前述の山地斜面における誤判断のためと考えられる。

b) ADEOS/AVNIRによる湛水面積Aの抽出誤差

抽出法3 (AVNIR半自動) による湛水域の形状を、抽出法2 (SAR半自動) と比較すると、より正確に湛水域の形状を抽出していると思われる。これは、AVNIR画像は多バンドであり、情報量が多いためと考えられる。にもかかわらず、誤差－31%の過小評価とやや大きな誤差を生じている。原因として、氷結水面部分が湛水域として抽出されず、湛水面積を過小評価したことが挙げられる。また、抽出湛水域のエッジ(外縁)部分、つまり斜面との境界部分で湛水面積の過小評価傾向があり、これが累積し大きな誤差を生じたと考えられる。そこで、氷結部分の面積と、抽出湛水域のエッジ(外縁) 1ピクセル分の面積を抽出し、はじめの湛水面積に加算した結果が表-5のとおりである。氷結部分で若干の改善がみられ、エッジ部分も加えると相対誤差が－5%となり、大きく改善された。この結果、貯水量の推定値も改善されている。以上のことから、湛水域のエッジ部分も氷結していたために湛水域として抽出されず、推定精度に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

また、抽出湛水面積は、抽出の際に用いた輝度値距離によっても、図-9で示したように変動し、推定精度に影響を与える。例えば、今回採用した輝度値距離8 (4バンド各256階調の特徴空間) の湛水面積に対して、9、10とした場合、それぞれ0.08km²、0.21km²増加し、この増分は実測されたA (3.46km²) の2%、6%となっている。

6. まとめと今後の課題

本研究では、衛星データから湛水面積Aを推定し、数値標高データより得られた貯水池A-V関係を用いて、貯

表-5 氷結部分とエッジ部分の影響 (抽出法3・AVNIR半自動)

date	実測A(km ²)	A km ²	誤差(%)	
97/1/16	3.46	2.64	－24%	※1
		2.71	－22%	※2
		3.27	－5%	※3
	116.5	80.2	－31%	※1
		83.7	－28%	※2
		110.7	－5%	※3

※ 誤差: 実測Aおよび実測Vに対する相対誤差

※1 抽出法3

※2 抽出法3+氷結部分

※3 抽出法3+氷結部分+エッジ(外縁) 1ピクセル

水量を推定する手法を提案した。本手法では、実際の貯水量変動のデータが得られない地点においても、衛星画像および数値地形情報を利用することで、貯水量の推定が可能である。今回、矢木沢ダムを対象に本手法を適用した結果、かなりの誤差を生じたものの、変動傾向の把握はでき、本手法による貯水量推定の可能性は示されたと考えられる。今後、まず衛星情報による湛水面積抽出の精度向上を図り、加えてA-V関係の推定精度の向上を図ることで、実用に向けて手法の改善を行っていききたい。

謝辞: 本研究で使用した矢木沢ダム関連のデータは、水資源開発公団沼田総合管理所矢木沢ダム管理所より提供して頂いたものである。衛星データは、宇宙開発事業団より提供を受けたものである。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) ICOLD : 1984,1988 World register of Dams. International Commission on Large Dams, Paris.
- 2) Vorosmarty et al : The Storage and Aging of Continental Runoff in Large Reservoir Systems of the World, Ambio, Vol.26 No.4, pp. 210-219, 1996
- 3) 力丸ほか: RADASAT SARとScan SAR Narrowの両モード・データによる湛水域抽出能力の比較検討, 日本リモートセンシング学会第26回学術講演会論文集, pp. 409-410, 1999
- 4) 六田ほか: 多時期SARデータによる地表水の面積変動抽出法に関する基礎的研究, 第52回年次学術講演会概要集第2部, pp. 388-389, 1997
- 5) Takeuchi.K : On the scale diseconomy of large reservoirs inland occupation, IAHS Publication no.240, pp. 519-527, 1996
- 6) 日本ダム協会: ダム年鑑1990, 1990
- 7) 馬籠ほか: 数値標高データを用いた貯水地容量の計算手法の開発, 第54回年次学術講演会概要集第2部, pp. 604-605, 1999
- 8) 写真測量学会: 合成開口レーダ画像ハンドブック, pp. 83-88, 1998
- 9) 田村秀行: コンピュータ画像処理入門, pp. 128-132, 1985

(2000. 10. 2受付)