

航空機搭載MSSによる貯水池水質の観測

Observation of Water Quality in Dam-reservoirs by MSS on Aircraft

高須修二^{*}、廣瀬昌由^{**}、宮井貴大^{***}、天野裕史^{****}

By Shuji TAKASU, Masayoshi HIROSE, Takahiro MIYAI and Yushi AMANO

In order to carry out effective countermeasures for water quality in dam-reservoirs, it is necessary to observe water quality in detail. MSS on aircraft is useful for observation of horizontal distribution of water quality. The observation by MSS which has 12 bands was carried out for 3 dam-reservoirs and the distributions of water temperature, SS and chlorophyll-a were analyzed by the relationship between CCT count of specific bands and ground truth data for each item. As one of the results, a sinking point of inflow which has high density was identified clearly.

Keywords: remote sensing, MSS, water quality of reservoirs

1. はじめに

近年水に対する要求が広範・多岐に及び、貯水池に対しても治水や利水としての施設としてだけでなく、水と親しむ空間としての要請が高まってきている。そのような要請の中で一部のダムでは、流域からの汚濁負荷や貯水池の特性等によって水質の悪化が問題となっている。もちろんそのようなダムに対しては、その特性に応じてしかるべき対策の検討¹⁾が行われ、また、より有効な水質保全対策の研究²⁾もなされている。しかしながら、そのような対策をより有効に行うための基礎資料としての貯水池内の水質に関する観測は、原則的には、貯水池内部で面的に数点に限られており、峡谷に位置し、複雑な形をした貯水池の面的な水質データの把握は十分でないと思われる。

一方、近年リモートセンシング技術の進歩はめざましく、土地利用分類等様々な分野への応用が進んでいる。水質調査への応用もさかんであり、ランドサット衛星によるMSSやTMデータを用いた湾域の水質観測や航空機搭載MSSによる湖の水質解析が行われ、面的な水質データを把握し、水環境の解明に1つの有効な手段となっていると思われる。

- | | | | | |
|------|-----|---------------------|-------|--------------------|
| * | 正会員 | 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 | 室長 | (〒305 茨城県つくば市大字旭1) |
| ** | 正会員 | 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 | 研究員 | |
| *** | 正会員 | 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 | | |
| **** | | 建設省土木研究所環境部環境計画研究室 | 部外研究員 | |

そこで、本研究では今後の貯水池の水質管理、水環境管理に役立てるためにその面的な水質データを把握することを目的に、上述のように様々な適用が図られているリモートセンシング技術のうち、解像度を考慮し航空機搭載MSSによって貯水池の水質観測を行い、貯水池周辺の地形的な特性から画像上に多く含まれると思われる日影の影響を画像処理時に考慮した上でリモートセンシング技術による貯水池水質観測の有効性について検討を行った。

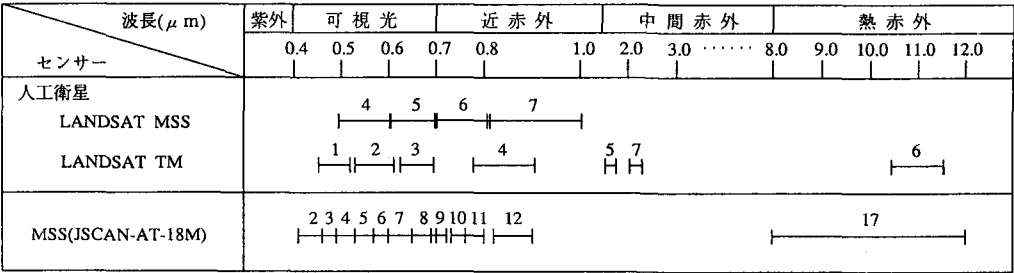
表－1 MSS撮影の諸元

観 測 日 時	調査地点	対地高度	チャンネル及び波長域
1993.8.24 8:55～8:57 9:02～9:04	高山ダム (2コース)	1234m	BAND2～BAND12, BAND17
1993.8.24 8:46～8:48	布目ダム	1072m	BAND2～BAND12, BAND17
1993.8.24 8:39～8:41	室生ダム	1063m	BAND2～BAND12, BAND17

2. 観測方法とデータ処理手順

2.1 観測方法

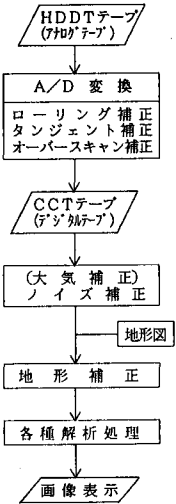
観測は航空機に搭載したMSS（JSCAN-AT-18M）で行い、その波長域が図－1に示す可視光域、近赤外域、熱赤外域を含む12バンドのデータに収集した。このMSSは、航空機の下方を向き、走査ミラーが進行方向に直角に走査するように機体に取り付けられる。検知器が瞬間に検知する範囲は2.5mradであり、走査ミラーの一回転毎に航空機の進行方向に直角な向き（走査方向という）に、幅2.5mradの帯状を検知する。従って対地高度1000mで飛行観測することで、機器の性能上は水平方向の解像度2.5mを確保できる。また、スキャナーの走査角が約80度であるので、撮影幅は撮影高度の約1.6倍となる。今回の観測対象は、3つのダム貯水池（高山ダム、布目ダム及び室生ダム）で、対地高度約1050～1250mであるため、撮影幅は約1760～2100mになる。表－1に今回の撮影時刻と対地高度を示す。



図－1 MSS各バンドの波長

2.2 観測データ処理手順

MSSによって受信されたデータは画像データであり、一旦広い幅のHDDTテープに保存され、このテープをコンピュータに適したCCTテープ（デジタルデータ）に変換する。この際に、ローリング補正やタンジェント補正等も行う。このような面的なデジタルデータは、画像として表示できるので、画像データとも呼ばれ、その画像を構成する1個のデータ領域の事をピクセルという。本観測では、1つの走査線について512のピクセルに分割したため、1つのピクセルは約3.4～4.1mを表す事になる。また各ピクセルのそれぞれのバンドのCCTカウント値を0～255までのレベルに変換した。画像の表示、地形補正は、DEC station 5000/240で行った。一連の処理手順を図－2に示す。



図－2 観測データの処理の流れ

3. 水質解析

3.1 水質解析手法

2で得られたリモートセンシングデータから水質を推定する方法として、大別して物理的方法と統計的方法がある。物理的方法は、水質と光の分光特性や水面反射光等の影響を物理光学的な理論モデルを用いて記述し、そのモデルを用いて水質を面的に

推定する方法であるが、モデルに含まれるパラメータが多く、その設定が難しい場合が多い。一方、統計的方法は、リモートセンシングデータとその観測と同期して実際に水面で測定したデータ（トルースデータ）を用いて、両者の関係を統計的にモデル化する方法である。この方法は、処理が簡単であり、観測を繰り返し行い、多くのトルースデータに基づいて分析を行う事で、ある程度安定したモデルが得られる。本研究では、後者の方法により分析を行う。

本検討で対象とした水質項目は、水温、SS濃度及びクロロフィルaである。統計的方法を用いるため、水質のトルースデータは出来るだけ多い方が好ましいが、本検討では各ダム3地点にとどまった。各水質項目と相関の高いバンドは、対象とする水域、観測時期によって異なることが報告されており³⁾、重回帰式もそれぞれ異なる。今回観測を行った3貯水池は、地理的には比較的近傍に位置するものの、その水質特性が異なる事が予想されるが、本検討ではトルースデータが少ないので3ダムのデータを一括して取り扱う。しかし、それでもデータ数は9つであるので、既往の検討結果⁴⁾を参考にした。なお、水質の観測は、その位置の同一性を確保するため、網場や貯水池に架かる橋の橋脚付近等で行われる事が多いので、採水地点に対応するCCTの値は、それら構造物の影響が及ばないように考慮した。また、本研究の1ピクセルは約3.4~4.1m四方であるが、トルースの採水地点はこの精度で把握できなかったので、採水地点のCCTの値として4ピクセル×4ピクセル（約15m四方）の平均値を用いている。

3.2 日陰の処理

SSやクロロフィルa濃度の推定には、可視光領域の波長（BAND2～BAND9）が有効である。MSSSの可視光領域各バンドの観測レベルは、水面に照射される日光の強度に影響される。そのため、直射日光を受けている日向とそうでない日陰では、たとえ両地点の水質が同じであっても、当然各バンドに観測されるデータのレベル（強度）が異なる事が予想される。ダム貯水池は、一般に峡谷に位置する場合が多く、たとえ太陽が南中していても、水面上にはいくらかの陰が存在する。さらに、航空機MSSSによる観測は、太陽高度が高い場合には水面でハレーションを起こすため、そのような時間帯には観測できない（表－1）。そのため、観測画像上に陰が含まれる事は避けられない。一方、そのような陰になる領域、特に平面形状上入りくんだ部分は、水が滞留する可能性があり、水質が悪化する事も考えられる。そこで、まず観測されたMSSSデータに陰の影響が現れているかの分析を行った。このような日光強度については、異なる時期に撮影した画像においてその違いを考慮した研究⁵⁾はあるが、ここでは同一画像内での評価に注目した。高山ダム貯水池には、図－3に示す様に貯水池内に橋が架かっており、その陰が水面上にあると思われる。そこで、その陰が存在すると思われる領域において日向と日陰での各ピクセルのCCTレベルに違いが存在するかを主成分分析で分析を行った。対象としたバンドは、BAND2～BAND12

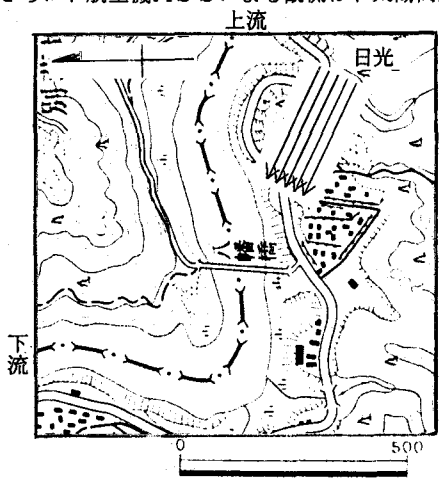


図-3 貯水池に架かる橋と陰の部分

表-2 主成分分析の結果（固有値と固有ベクトル）

固有値とその寄与率				固有ベクトル											
No	固有値	寄与率	累積%	主成分	BAND 2	BAND 3	BAND 4	BAND 5	BAND 6	BAND 7	BAND 8	BAND 9	BAND10	BAND11	BAND12
1	2.74	24.9(%)	24.9(%)	第1因子	0.30	0.16	0.35	0.47	0.48	0.40	0.20	0.28	0.16	-0.09	-0.04
2	1.33	12.1(%)	37.1(%)	第2因子	-0.10	0.37	0.32	0.12	-0.01	-0.07	-0.29	-0.14	-0.33	0.44	-0.57
3	1.10	10.0(%)	47.1(%)	第3因子	0.23	-0.53	0.01	0.07	0.21	0.04	0.23	-0.19	-0.45	0.52	0.23
4	0.99	9.0(%)	56.1(%)	第4因子	-0.31	-0.38	-0.01	0.10	0.21	0.44	-0.59	-0.33	0.23	-0.05	-0.02
5	0.92	8.3(%)	64.5(%)	第5因子	-0.58	-0.27	-0.08	-0.08	0.00	0.26	0.29	0.51	-0.24	-0.04	-0.33

表-3 主成分得点表

主成分得点

主成分	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	No 11	No 12	No 13	No 14	No 15	No 16	No 17	No 18	No 19	No 20
第1因子	0.81	0.10	0.10	0.15	0.16	0.10	0.15	0.17	-0.01	0.16	-0.78	-0.57	-0.75	-0.60	-0.58	-0.68	-0.67	-0.57	-0.87	-0.61
第2因子	0.09	0.22	-0.00	0.15	-0.01	-0.06	-0.02	0.08	-0.01	0.05	-0.05	-0.02	0.28	0.02	0.09	-0.12	-0.08	0.06	-0.21	0.09
第3因子	-0.13	-0.11	-0.04	-0.02	-0.03	0.01	0.02	-0.05	0.03	-0.09	0.07	-0.25	-0.07	0.04	-0.24	0.08	-0.08	0.11	-0.06	-0.08
第4因子	0.03	-0.01	0.08	0.01	0.14	0.06	0.10	-0.04	-0.03	0.18	0.01	-0.10	-0.21	-0.02	0.04	0.08	-0.11	-0.04	-0.09	-0.01
第5因子	0.00	0.06	-0.09	-0.06	0.10	0.04	0.02	0.04	0.08	-0.12	-0.07	-0.02	0.11	-0.07	-0.03	0.01	0.01	0.08	0.04	0.05

← 日向の部分 * 日陰の部分 (推定) →

の11バンドであり、橋の陰が存在すると思われる16ピクセル×16ピクセル（約65m四方）の領域の各ピクセルの値をサンプルとした。その結果を表-2に示す。まず、固有値の寄与率をみると第1主成分において24.9%、第5成分までの累積値で64.9%であり、特性を明確に抽出できているとは言えない。表-3に図-3に示した橋の陰であると予想される領域と、そうでない領域の各ピクセルの主成分得点表を示す。この表を見ると、陰の領域で第1主成分に対する得点が負になっており、光を受けていると思われる領域に対しては、正の値を示している。

従って、第1主成分は、その寄与率は低いものの、光が当たっている程度を表していると思われる。このことは、MSSの可視光バンドの観測レベルは、光を受けている部分と陰の部分で異なり、総合的に取り扱う場合には、何らかの補正が必要である事を意味している。図-4には、それぞれ日向と日陰と思われる複数のピクセルの平均値を各バンド毎に示した。BAND3～BAND8で両者の差が顕著である。

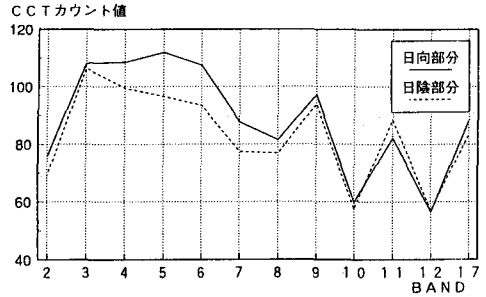


図-4 日向と日陰の各バンドのCCTカウントの比較

3.3 水温の分析

水温の分析には、BAND17を用いる。これは、いわゆる熱赤外線に属し、水面の表面温度を測定するもので、陰の影響を補正する必要がないと思われる。水温とBAND17のCCTカウントの相関図を図-5に示す。この図をみると、3ダムの間で、CCTカウントとトルスデータの間に若干の傾向の違いも見受けられる。図-6に布目ダムでの表面水温の変化を示すが、貯水池上流から流入した冷たい河川水は、しばらく表面を流下し、ダムサイトから約1.3kmの地点で下層に潜り込んでいると思われる。この様子は、流下方向に数点を選んで、その水温の変化をみた図-7で顕著にわかる。

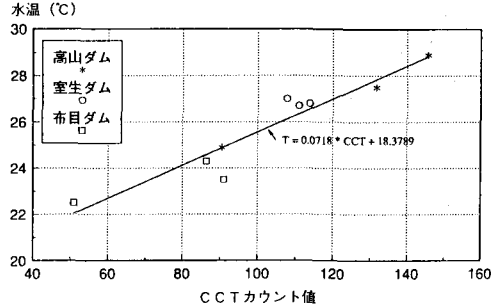


図-5 水温とCCTカウント値の相関図

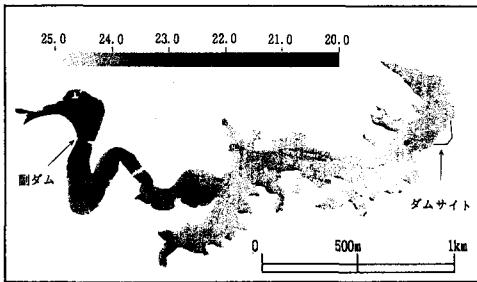


図-6 MSSによる表層水温分布

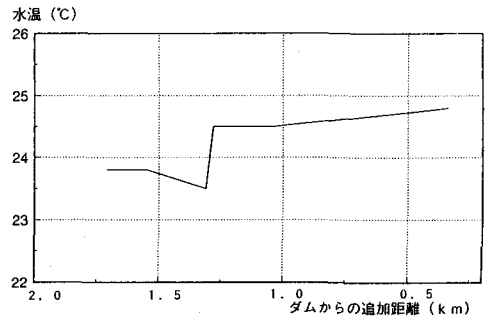


図-7 貯水池表層水温の縦断方向分布

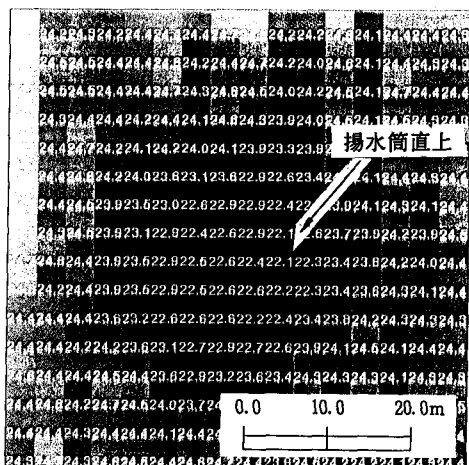


図-8 揚水筒付近の表層水温分布

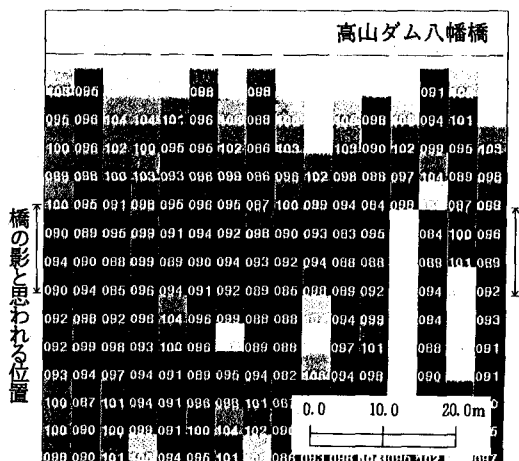


図-9 BAND9のCCTカウント値の分布

また布目ダムは、水質保全対策として揚水筒を用いた浅層曝気を行っている。表-4 SSとクロロフィルaの各バンドとの相関

浅層曝気は、貯水池の適当な深さに気泡を注入し、その気泡が上昇する際に周囲の流体を連行することで、成層を破壊させ、富栄養化を防止をする手法である。図-8の揚水筒付近の表層水温分布をみると、曝気により下層から冷たい水が上昇している事がわかる。曝気直上の水温は約22℃であり、曝気の影響を受けていないと思われるピクセルの水温（25℃程度）より、約3℃低い事が分かる。また、図-8から曝気によって連行された水温の低い（密度の高い）水の水平方向への広がり半径は、約17mとわかる。

3.4 SSの分析

SSと各バンド間の相関を表-4に示す。一般にSSと相関の高いバンドは、可視光域のバンドであるといわれているが、本検討では、BAND9との相関が最も大きかった。そこで、以下のSSに対する解析では、BAND9を用いる。ここで、3.2で述べたように、陰の領域の補正を行う必要があるが、BAND9に対しては、図-4でも示したように、BAND5やBAND6に比べて日向と日陰での差が少ない。図-9に図-3と同じ領域でのBAND9の分布を示すが、日陰の影響は顕著には見られない。しかし、表-3に示す主成分分析の結果の第1主成分に対する固有ベクトルは、比較的大きな値を示しており、バンド間の比演算を用いる等何らかの工夫の必要性も考えられるが、本検討では、BAND9との単相関分析によりSS分布を算出した。図-10に布目ダムでのSSの分布を示す。この図をみても、水温の場合とはほぼ同じ地点にSSの不連続点が存在し、この部分で流入水が潜り込んでいる事を裏付けている。

	SS	Chl.a
BAND2	0.7305	0.1019
BAND3	0.8757	0.3046
BAND4	0.7460	0.1354
BAND5	0.7524	0.1828
BAND6	0.5970	-0.0791
BAND7	0.6207	-0.0879
BAND8	0.8096	0.1060
BAND9	0.9557	0.4467
BAND10	0.9311	0.7924
BAND11	0.8570	0.7476
BAND12	0.8862	0.7244
BAND17	0.1345	0.7918

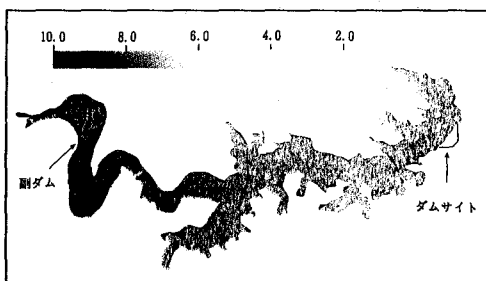


図-10 SSの分布

3.5 クロロフィルaの分析

クロロフィルaについては、電磁波の波長に対するその吸光特性が分析されており、その物理的特性から一般には今回用いたバンドでは、BAND2、BAND3及びBAND8が植物プランクトンの吸光域に相当し、近赤外線以上波長のバンドではほとんど吸光しない。表-5には、今回の観測での各バンドとクロロフィルaの相関係

数も併せて示しているが、単相関では上述のクロロフィルaの特性を反映すると思われるバンドでは相関が低い。BAND10との相関が高いが、今回トルースとしてデータが十分確保できなかったのと、クロロフィルaに関しては、上述のような物理的な特性がある程度分析されているので、バンド間の比演算を行って相関を分析したところ、BAND5/BAND6との相関が高くなる結果が得られた（相関係数=0.98）。この両バンドは近接するバンドであり、その比が物理的にもつ意味については、今回の検討で断定的なことはいえないが、この比演算をすることで3.2で示した陰の影響もある程度除去することが期待できるので、この比を用いてクロロフィルaの分布を算出した。その結果を図-11に示す。クロロフィルaも、水温やSSとほぼ同じ地点で不連続点があり、その上流側ではクロロフィルaの濃度は低く、下流域では濃度が高い。また、トルースとして実施した水質観測の各項目間の相関をみるとクロロフィルaとSSの相関が0.999と極めて高く、図-10と図-11が似通った分布をしている事は、布目ダムでは、観測を行った今年の8月下旬では、植物性の浮遊物がSS濃度に及ぼす影響が大きかった事を示唆している。

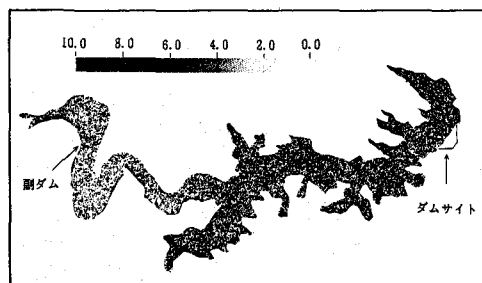


図-11 クロロフィルaの分布

4. おわりに

本研究では、水質によって異なる電磁波の特性を利用して、貯水池の面的な水質情報の抽出を行った。航空機搭載のMSSを用いることで、水平方向の解像度は、約3.4~4.1mを確保する事ができ、水温、SS及びクロロフィルaの平面的な分布を把握する事ができた。特に、貯水池流入水のダム貯水池内での潜り込み地点や、曝気によって持ち上げられた冷水塊の潜り込み地点が平面的に把握できた。今後、これら観測値を基に現象の解明を行う必要がある。また、今回のように貯水池を対象にする場合、画像上に陰が含まれる可能性があり、可視光を用いて解析を行う場合には、十分留意する必要がある事が示唆された。今回の観測ではトルースデータを十分観測する事が出来なかったため、相対的な比較にとどまらざるを得なかったが、今後は今回の検討を踏まえて、必要なポイント（例えば陰の部分）で水質観測を行い、それらを踏まえてより有効な水質情報を抽出する必要がある。

本研究を行うにあたり、トルースデータの収集・分析は水資源開発公団木津川ダム総合管理所の協力を得た。また、MSSの撮影・解析においては、(株)中日本航空の協力、助言を得た。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 例えば、国井宏悦、村上昌宏：釜房ダム水質保全対策パイロット実験について、第4回水資源に関するシンポジウム前刷集、pp.483-488、1992
- 2) 例えば、丹羽薫、久納誠、大西実、山下芳浩：貯水池流動制御による水質保全対策、水工学論文集、第37巻、pp.266-270、1992
- 3) 加藤洋一、島村秀樹、平石雅美：ランドサットTMデータの水環境への利用、日本写真測量学会、年次学術講演会概要集、pp.105-108、1985
- 4) 例えば、大林成行、高橋康夫、江野沢誠：航空機MSSデータを使った淡水域の環境情報抽出に関する研究、第39回土木学会年次学術講演会概要集、第4部、pp.371-372、1984
- 5) 大西外明、河合弘泰：ランドサットTMデータによる河川放流水拡散域の定量的解析、海岸工学論文集、第38巻、pp.196-200、1991