

航空三角測量による琵琶湖北湖の流動観測と水理学的考察

大西 外明*・大林 成行**・高橋 康夫***

1. はじめに

琵琶湖の水質劣化の問題は、近年、大きな社会的関心事となり、種々の機関において多角的な調査研究が進められている。同湖にかかわる諸問題のうち、湖水の流動特性は水質環境を論じるうえでも、また水理学的見地からも興味深いものがある。特に北湖の流動特性の把握は、北湖が琵琶湖全体の約 80% を占めていることから、琵琶湖の水質問題を論じるうえで重要な意味をもつものと考えられる。この琵琶湖北湖の流動に関しては、古くから調査研究が行われてきているが²⁻¹³⁾、これらの既述の研究は、観測値相互に相当な時間的ずれを含む浮標追跡法や数値解析を基にしたもので、琵琶湖々水の流れについて現実の姿を正確にとらえているか否かについては検討の余地が多いと考えられる。浮標追跡法等の従来の現地観測法は、琵琶湖のように時間的にも空間的にも大きなスケールを持った流れを短時間の内に観測するために使用するのには限度がある。その点、人工衛星や航空機からのリモートセンシングは、広い水域での流れの観測に有効に適用しうる事が多く、たとえば、琵琶湖北湖の表層環流に関しても、大西・田中¹⁾は 1979 年 10 月の航空写真上の濁水分布を基にして考察を行った例がある。人工衛星の利用については、これまで、海洋および沿岸海域を対象にした流れの観測には有用であることは判っているものの^{14,15)}、逆に琵琶湖のような内湖における流れの観測についての適用性に関しては、従来からほとんど検討が加えられていないのが実情である。また、上述のように、航空機を使った観測法は、琵琶湖を対象とした規模の流れに有用ではあるが、従来からの利用方法は、低高度から水面の極く近傍を対象とした現象の観測に適用されていただけであり、高高度から広域水面を対象にしたり、水面下の流れについて直接的測定に利用した試みは無い。

以上の現状を勘案して、本論文では比較的高い高度で飛行する航空機上から水面近傍および水面下における北

湖環流の流速分布を測定することを試み、その測定結果から、北湖水平環流の分布特性について考察を行うものである。また、琵琶湖の環流は湖面の風の方向に大きく支配されることが予想されるが、琵琶湖周辺の陸上で観測される風向と湖上での風向との関係については、従来、全く実測されていないことを考え、本研究では湖面において発煙筒を使用し、その発煙の流向を航空機から観察して、湖周辺の定点観測所で得られた風向との比較を試みた。さらに、広域水域を対象とした観測に人工衛星ランドサットを利用することの可能性と有用性を検討するために、発煙筒を用いたいくつかの実験を試みた。

2. 現地調査

現地調査は 1980 年 8 月 1 日と 8 月 2 日に行った。本研究における現地調査の内容は大別して、(i) 航空機を使った浮標追跡による湖流の観測、(ii) 航空写真による湖上での煙を利用した風向の観測、(iii) 観測船を使った湖上でのデータ収集、(iv) 湖周辺の気象観測データの収集、である。これらの調査内容について上記の 2 日間にそれぞれ、表-1 に示す項目について行った。

表-1 調査の項目

8 月 1 日	8 月 2 日
低高度写真撮影	高高度写真撮影
風向・風速観測	風向・風速観測
気温・湿度観測	気温・湿度観測
湖水面の湿度分布	
垂直温度分布	垂直温度分布
	漂流ブイの投下
	漂流ブイの追跡
	発煙筒の点火

2.1 航空機による写真撮影

湖の部分的な水域を対象とした低高度の航空機による湖流調査は過去において行われた例はあるが^{10,12)}、本研究では、北湖全域を対象に、湖流の分布特性を調査する目的で航空三角測量による手法を試みた。このような広域を対象とした調査ははじめての試みである。現地調査に際して、航空三角測量の解析精度を高めるために、すべての写真画像中にできるだけ多くの陸域が撮られるように、撮影高度を 6 000 m に設定するとともに撮影コース

* 正 会 員 東京理科大学理工学部土木工学科

** 正 会 員 東京理科大学理工学部土木工学科

*** 学生会員 東京理科大学大学院

として太陽高度と太陽方位を考慮したうえで図-1に示すC-1(延長69.2km),C-2(延長41.0km)を定めた。なお、この2つのコースで撮影された航空写真のオーバーラップは80%である。これは撮影対象が水域であるためにハレーションによる写真の欠落を防ぐためである。

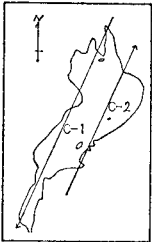


図-1 撮影コース

表-2 撮影期間

コース	C-1	C-2
撮影回数		
1	14:30	15:00
2	15:10	16:40
3	16:50	17:20
4	17:30	18:00

撮影はC-1の場合には北から南へ、C-2には南から北方向に行った。C-1コースに進入を開始してからC-2に進入するまでの時間差は30分であり、表-2に示すように全部で4回の撮影を行った。1回目の撮影から2回目、2回目から3回目、3回目から4回目までの間にそれぞれ10分間の待ち時間をとった。撮影回数間の待ち時間については当初の計画では1~2時間程度が考えられたが、現地調査の当日になって気象条件等の影響から10分間に短縮して行われた。撮影に用いた航空機はエアロコマンダー685、カメラはRC-10(航測用・超広角)およびハッセルブラッド500EL/Mを用いた。

2.2 浮 標

図-2の左側に示す浮標を図-3に示す8個所に投下したが、その際表-3に示すようにNo.4~No.6投下地点における抵抗板の深さを5mと10mに、また、それ以外の投下地点では5m,10m,20mとし、湖流の動きを水深別に観測できるようにした。ここで、No.4~No.6においても当初は20m水深の抵抗板を入れる計画であったが現地での投下の際の事故により欠落した。さらに、浮標には航空機上からの識別を容易にするために図-2に示す構造の発煙筒をとりつけるとともに、発煙筒の色を表-4のように深度別に白、黄、赤に区別した。発煙筒は窒素酸化物を主成分とした直径8

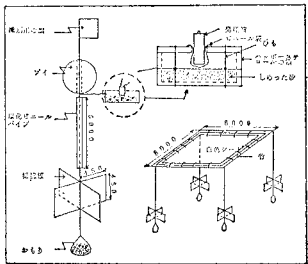


図-2 浮標および白色シートの構造

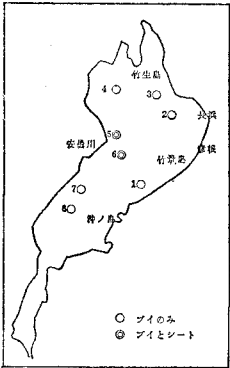


図-3 投下地点の略図

表-3 投下地点別抵抗板の深度

投下地点No.	浮 標	白 色シート
1	5 m, 10 m, 20 m	
2	5 m, 10 m, 20 m	
3	5 m, 10 m, 20 m	
4	5 m, 10 m	
5	5 m, 10 m	5 m
6	5 m, 10 m	5 m
7	5 m, 10 m, 20 m	
8	5 m, 10 m, 20 m	

表-4 発煙筒の色と深さの関係

深さ(m)	発煙筒	し ろ	き	あ か
5		○		
10			○	
20				○

cm、高さ15cmの円筒形のものを用い、その発煙筒持続時間は約5分であり、航空機の飛来に同期させて発煙させた。

観測用浮標としては、上記の発煙筒付浮標の他にNo.5とNo.6の地点には図-2に示す8.0m×8.0mの白色シートに抵抗板をセットしたものを湖面上に浮べた。それは風が浮標の移動におよぼす効果を調査することのほか、浮標や発煙の識別が不可能であった場合に最小限の標識点として利用することと、理論的には撮影高度と写真精度から被写体の最小単位は計算できるが、6000mという比較的高い高度から撮影した写真画像上で、波浪や気象条件を考慮したうえで識別できる物体の規模を確認することによって将来の調査方法に役立てることを意図したものである。

2.3 湖面上での観測

航空写真で得られた情報を定量化する目的で、湖上の観測船から、航空写真撮影に合わせて表-5に示す項目について実測を行った。図-4はその際の調査測定線であり、その線に沿って船を一定速度で走らせ、水

表-5 観測項目と装置名

観測項目	装 置
風向・風速	風向風速計
気温・湿度	アースマン温湿度計 自己温湿度計 検定済棒温度計
水 温	放射温度計
表面分布	サーミスター温度計
垂直分布	

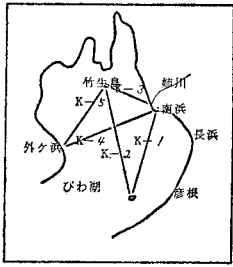


図-4 湖上調査線

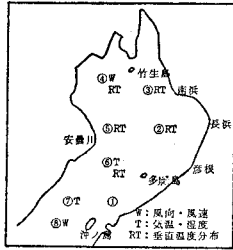


図-5 8月2日湖上観測点

温, 気温, 温度を測定した。また同時に, 図-5 に示す諸点において風向, 風速, 気温および湖水の鉛直方向水温分布を測定した。

2.4 気象データ

図-6 に示す各観測所における風向・風速の記録を収集し現地調査の結果と比較・検討した。

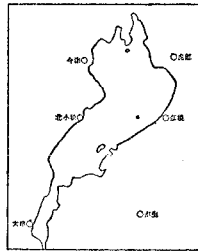


図-6 気象データ収集地点

3. 結果と考察

3.1 水温分布

前述した湖上での観測の結果, 8月1日の琵琶湖北湖の表面温度は 図-7 のように分布するものと推測される。しかし, このデータから, 琵琶湖北湖全域について水温分布を考察することには無理があり, 今後, 本研究で行った調査規模以上のスケールでの調査の必要性が感じられた。今後, 調査を継続していくうえで大きな課題である。今回の調査結果にみるかぎり, 湖面の温度差の湖流への影響はあまり見られなかった。また, 各測定箇所における鉛直方向水温分布は 図-8 の通りである。水面下 10 m~15 m の所に顕著な躍層層が分布しており, それより上層では密度が均一になっていることがわかる。このことから, 北湖の表層環流の深さも近似的には本調査時点においては 10 m~15 m のオーダーであ

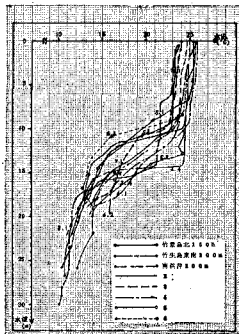
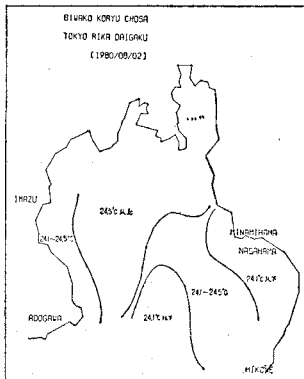


図-7 北湖の表面温度分布の概略 図-8 垂直方向の温度分布

ると考えられる。

3.2 陸地と湖上での風向分布の差

湖上の風向は航空写真撮影により得られた写真画像上の煙の方向により知ることができる。表-6 はその結果

表-6 湖上での風向

Group-No.	Float-No.	Interval	Wind-Direction	
2	1	1	N73.5W	WNW
2	1	2	N80.5W	WNW
2	2	2	N77.0W	WNW
2	3	2	N77.0W	WNW
3	1	1	N73.0W	WNW
3	1	2	N72.0W	WNW
3	2	2	N72.0W	WNW
3	3	2	N76.0W	WNW
4	1	1	N57.0W	NW
4	1	2	N58.0W	NW
4	1	3	N61.0W	NW
4	2	1	N54.0W	NW
4	2	1	N54.0W	NW
4	2	3	N75.0W	WNW
5	1	1	N22.0W	NNW
5	1	2	N22.0W	NNW
5	1	3	N25.0W	NNW
5	2	1	N27.0W	NNW
7	1	1	N73.0W	WNW
7	1	2	N72.0W	WNW
7	2	1	N74.0W	WNW
8	1	3	N61.0W	NW

まとめたものである。表中, Group-No. は 図-3 に示す浮標投入箇所を示し, Float-No. はそれぞれの浮標投入箇所における抵抗板の水深をあらわしており, 1 は 5 m, 2 は 10 m, 3 は 20 m を示したものである。また Interval は各撮影間の回数を示したものである。さらに, 琵琶湖周辺の気象観測所での同時刻での風向, 風速記録によれば 図-9 の風向, 風速分布が得られる。表-6 と 図-9 から, 湖上と湖岸での風向は厳密には一致しないが, おおむね北西および北西西の方向から入っていることがわかる。

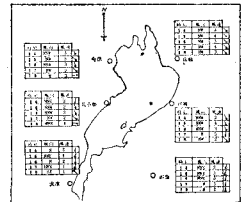
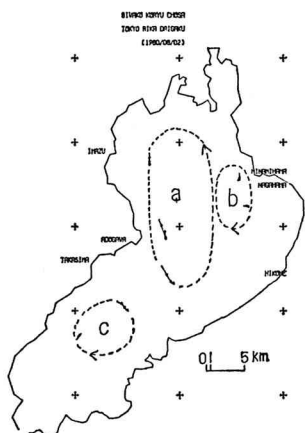
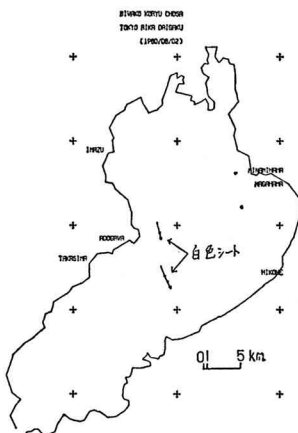


図-9 湖周辺の風向

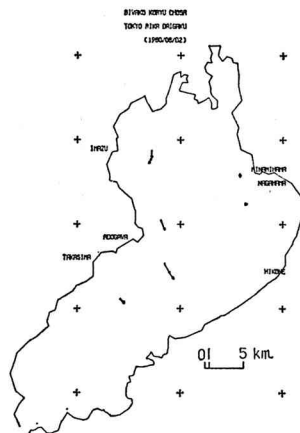
大西・田中は気象観測所の風向記録を基にして北湖環流の発生機構を解析的に検討するに際して, 湖面上の風向を湖岸の風向と一致するものと仮定しているが¹⁾, 上記の実測結果は, この仮定が近似的には成立することを示唆しているものと考えられる。



図—10 水深 5 m での水の動き



図—11 水深 10 m での水の動き



図—12 水深 20 m での水の動き

3.3 湖流の分布

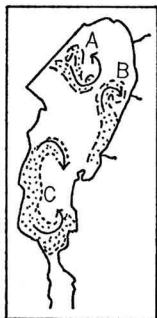
表—2 に示す各撮影時刻毎に得られる航空写真画像上の浮標を航空三角測量を使って解析し、単位時間ごとの浮標の移動ベクトルを、水深 5 m, 10 m, 20 m について図示すると 図—10~12 のようになる。これらの図から、最大移動速度は水深 5 m で 0.782 m/s, 水深 10 m で 0.403 m/s, 水深 20 m では 0.424 m/s であり、表層に近い所ほど移動速度は大きく、表層から 20 m 程度の水深までの水塊の移動はほぼ同一方向となっていることがわかる。この移動層厚さのオーダーは 図—8 に示す水温躍層面上部の水深にほぼ一致している。さらに、琵琶湖のエクマン深度を次式

$$D = 7.6W / \sqrt{\sin \varphi}$$

(D : エクマン深度 (m), W : 水面での風速 (m/s), φ : 経度 ($^{\circ}$))

において $W = 2.0$ m/s, $\varphi = 35.0^{\circ}$ として求めると $D \approx 20$ m となる。これらのことから、今回調査対象とした水面から約 20 m の部分は単一層をなして移動しているものと考えられる。

以上のことを考慮に入れると、本調査時における北湖の水平環流分布として、図—10 の点線で示す 3 個の水平環流が得られる。この分布は 1927 年の神戸海洋気象台の観測結果²⁾ および大西・田中¹⁾ が報告している 1979 年 10 月 23 日の分布 (図—13) とも類似している。図—10 中の長浜、彦根沖にみられる時計まわりの水平環流 b は、大西・田中による B 環流に対応するものと考えられる。この b 環流は 15 m よりも浅い水深部に分布するものであり、北西風によって水深 20 m より深い北湖中央部に発生した反時計まわりの大環流 a が浅い湖底によ



図—13 濁流現象からみた湖流の方向 (文献 (1) より引用)

り妨げられ、その対向流としても環流が発生するものと推測される。

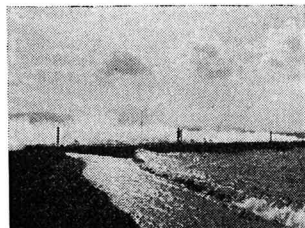
3.4 ランドサットデータの利用

本研究におけるもう 1 つの目的として、人工衛星ランドサットデータの湖流調査への利用がある。

人工衛星ランドサットは周期的にデータを提供してくれるとともに、広域面積のデータを同時に収集する能力、すなわち、可視領域だけでなくはるかに広い波長域にわたって、いくつかの波長帯ごとに分割し、それぞれ特徴あるデータを収集することができる。したがって、収集されたランドサットデータを湖流の現象解明に応用することは、湖面全域についての同時観測、時系列的観測に対して非常に有効なものであり、これまでの研究課題を大巾に解決してくれるものと期待される。

本研究においては、人工衛星ランドサットから送られてくるデータの利用の可能性を検討するため、ランドサットが琵琶湖上を通過する時刻に合わせ湖上において発煙筒を使用した。このことは、ランドサットから提供される多くのデータの中に風向、風速といったデータが得られないことと、920 km という宇宙を飛ぶ人工衛星に対して湖上での発煙量がどの程度であればよいかといった実験結果が皆無であることによる。そこで、本実験では前述の発煙筒を 20 本用意し、その煙がランドサット画像上でどの程度に現われてくるかについて検討することにした。

本実験は 1980 年 10 月 27 日 9 時 51 分に琵琶湖々北の南浜において行ったが、写真—1 はその際の湖岸での発煙状況を示すものである。また、図—14 はランドサット画像をトレスしたもので、ランドサット画像上からかなり明確に



写真—1 発煙状況 (1981.10.27)



図-14 ランドサット画像の結果 (1980. 10.27)

発煙を確認することができた。また、風向に関しても、南東方向へ煙が流れていることから発煙時における現地の風向と一致しており、今後、人工衛星との交信手段として、発煙筒の煙が十分に利用できることが判明した。また、発煙量についても、風速に大きく影響されることが考えられるものの今回使用した量の半分以下で十分可能であることが確かめられた。しかし、ランドサット画像の中でどの程度の発煙量まで識別可能であるかについては、今後数回の実験が必要であろう。また、ランドサット画像の中で発煙と雲がどのように区別されるか、発煙が湖上と陸上で使用された場合に画像上でどのようなパターンが得られるかについては、今後の研究課題である。今回の調査に際しては、残念ながら、琵琶湖全域にわたってほぼ雲におおわれており、ランドサットデータを琵琶湖の流動解析について利用することができなかった。

4. おわりに

本研究において開発を試みた解析航空三角測量法による流動調査は、琵琶湖北湖のような広域を対象とした流動調査に有用であることが確かめられた。今後、他の広い水域を対象とした流れの調査にも十分適用できるものと考えられる。また、人工衛星ランドサットから送られてくるデータの利用についてはさらに研究を進めていく必要はあるが、今回の実験結果から推測して十分利用できると思われる。

参考文献

- 1) 大西外明・田中總太郎：琵琶湖湖北湖の環流の航空機による観察と解析の考察，第25回水理講演会論文集，pp. 569～575，1981.
- 2) 神戸海洋気象台：琵琶湖調査報告，神戸海洋気象台集報，pp. 1～103，1926.
- 3) 森川光郎・岡本 蔵：漂流瓶調査による琵琶湖の表面流について，陸水学雑誌，21，pp. 173～186，1960.
- 4) 遠藤修一・岸田玲子・岡本 蔵：琵琶湖の流況の連続記録(II)，1979年度日本陸水学会講演要旨集，p. 163，1979.
- 5) Okamoto, I.: Time variation of water temperature in lake Biwa, *Memoris, Fac. Education, Shiga Univ., Natural Sci.*, 18, pp. 53～64, 1968.
- 6) 岡本 蔵：琵琶湖の湖流；琵琶湖国定公園学術調査報告書，滋賀県，pp. 173～213，1980.
- 7) 遠藤修一：びわ湖北湖の環流の観測，沿岸海洋研究ノート，日本沿岸学会沿岸海洋研究会，第18巻，第1号，pp. 18～24，1980.
- 8) 遠藤修一・大西行雄・今里哲久：二層モデルによる琵琶湖々流の数値実験，1976年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 163～164，1976.
- 9) Onishi, Y.: Development of the current induced by the topographic heat accumulation (I)—The case of the axisymmetric basin, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 31, pp. 243～254, 1975.
- 10) 奥田節夫：リモートセンシングによる湖流の観察，琵琶湖問題研究機構研究報告，第9号，pp. 2～3，1974.
- 11) 山本淳之：漂流電波ブイによる湖流調査(予備調査)，琵琶湖問題研究機構研究報告，第9号，pp. 11～12，1974.
- 12) 奥田節夫・横山康二：航空機を利用した流水と拡散の観測，琵琶湖問題研究報告，第9号，pp. 44～47，1975.
- 13) 山本淳之・奥村康昭：漂流ブイの電波追跡による湖流観測，琵琶湖問題研究機構研究報告，第9号，pp. 56～58，1975.
- 14) Watanabe, T.: Marine Resources Division, Tokai Regional Fisheries Research Laboratory, Follow-on Investigation Program Approved Investigation No. 28990, Investigation of environmental change pattern in Japan, pp. 157～172, 1977.
- 15) 本州四国連絡橋公団：鳴門海峡における渦潮等の追跡調査及び検討，研究報告書 A79536-HR2-S25，pp. 1～40，1980.