

戸田 孝 (滋賀県立琵琶湖博物館)

1. はじめに

琵琶湖全体をめぐる定常的な流れである環流には1926年の発見以来100年近い研究史があり、特に1960年ごろから1995年ごろまでは精力的に研究が進められた。しかし、その後は環流そのものに着目した研究は少なくなっている。これは、環流自体がどのようなものであるかという全体像は、それまでの研究で概ね解明されたと考えられているからであろう。しかし、環流に関する知見が、琵琶湖における種々の研究課題を進めるに際して前提として理解せねばならない基本事項であることに変わりはない。また、環流の生成維持機構、あるいは生物現象との相互関係など、詳細な部分についてはまだまだ未解明の課題が残されている。

そこで、講演者は100年間の研究史を総括する総説を、初学者を意識した「教科書的総説」であることを目標にまとめ、来年早々の陸水学雑誌で公表予定である。ここではその概要を紹介する。

2. 先駆的観測から地衡流性の発見まで

琵琶湖で初めて行われた測流は、1925年8月に海洋气象台(後の神戸海洋气象台)が外洋観測のノウハウを内水域にも応用するべく進めた観測の一環であった(須田ら, 1926)。当時、湖や湾などの閉鎖的な水域に「静振」が発生することは知られていたが、1925年8月29日から31日までの測流で静振では説明できない定常的な流れが見出され、これを「第1~第3環流」と命名した。

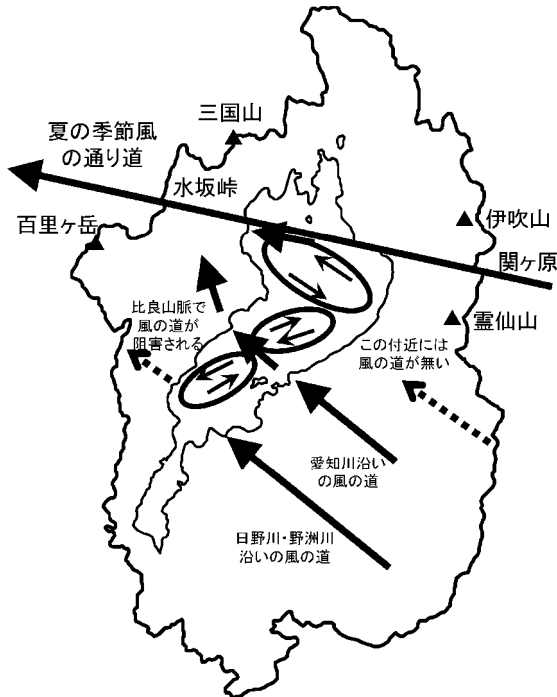


図1. 須田ら(1926)による環流成因説の図解

彼らは環流の成因として風による駆動を想定し、地形条件の考察から、図1のような仮説を提唱した。この仮説は水槽実験でも再現され、広く知られるようになったが、それが改めて検証される機会は、戦争の影響などもあり、30年近くにわたって途絶えてしまった。

戦後10年ほど経って、森川(1955)が流速計による観測を行ったが、数少ない流速計では流れの状況を的確に捉えることができなかった。そこで、森川・岡本(1960)は漂流瓶による調査を行い、第1環流が安定的に存在することが検証されたが、疑問点も出てきた。それは、風の吹き方に関わらず同じような第1環流が見出される傾向が出てきたことである。これは、須田ら(1926)による「風で駆動される」という描像では説明できない。

一方、岡本・森川(1961)は漂流瓶観測を行っている際に観測していた水温を解析する中で、環流が地球回転の影響を受けた「地衡流」になっている可能性に思い当たり、実際に地衡流を算出すると漂流瓶で求めた流れとよく一致することを示した。つまり、地球回転の影響を全く考慮していない須田ら(1926)の描像は、琵琶湖の状況を正しく反映していない可能性が高いことが観測的証拠で示されたのである。

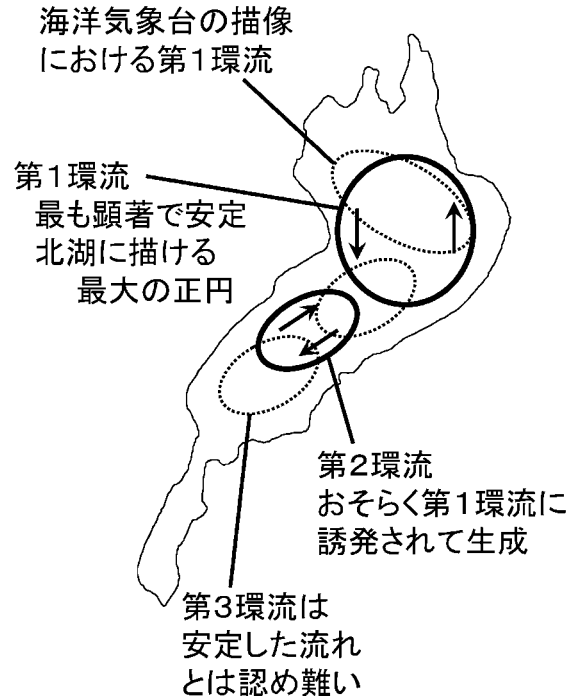


図2. Endoh and Okumura (1983)による環流像に筆者が注記を施したもの

3. 継続観測による環流の実態解明

環流が概ね地衡流になっているとすれば、「力学

計算」によって、水温観測のみから流れの様子を知ることが可能となる。そこで、この考えに基づいて、環流の様相を明らかにするための観測手法を検証する基礎研究が進められた。そして、その成果に基づいて遠藤ら(1981)は半年以上にわたる継続観測を行い、第1環流が春から秋まで継続的に存在していることや、その形状が円に近く、須田ら(1926)の描像よりも南方の、北湖の最も広い部分を大きく占める位置にあることなどを明らかにした。その後、何年にもわたる継続観測が進められた結果、この配置が毎年再現されることが明らかになり(Endoh and Okumura, 1993)、図2のような描像が確立された。

4. 環流の成因に関する2つの仮説

地衡流では流れと「成層構造」の傾きとが互いに支えあう形で、流れの構造の中にエネルギー(運動エネルギーと有効位置エネルギー)を蓄積することができる。従って、環流は須田ら(1926)が考えたように風に直接反応してできる流れではなく、むしろ風のエネルギーが湖の中に有効位置エネルギーとして蓄えられ、それによって流れているものと考えの方が実際に近いと考えられる。それどころか、この有効位置エネルギーの源が風である必要さえ無い。

環流の成因については、地衡流性が確認された後も、当初は風による駆動と考えられた。それに対して、Oonishi(1975)は、湖心部と沿岸部との温度差をエネルギー源とする「熱成循環」でも環流が生成され得ることを数値実験で示した。夏季の湖水には表面からの加熱があるが、岸近くの浅い領域の方が熱を受ける湖水の量が少ないため、同じ加熱量でも速く温度が上昇することになり(地形性貯熱効果)、岸で湧昇、沖合で沈降、そして表面付近で沖向き、底面付近で岸向きの対流が形成される。この流れに対して地球回転による Coriolis 力が作用すると、北半球においては、収束流である表層流から反時計回りの循環流が発生する。底層流は底の摩擦に阻害されて発達できないため、この表層流のみが残って第1環流になるというのである。

風成循環説と熱成循環説の何れでも、定性的には矛盾無く環流の成因を説明できてしまう。このように両説が並立するのは、地衡流が「結果的に落ち着いた平衡状態」であり、どのようなエネルギー源であっても、それを同じ形のエネルギーに変換して落ちてしまうからである。従って、成因の特定にはエネルギー収支の量的評価が不可欠である。

5. 環流のエネルギー構造

環流のエネルギー収支を初めて系統的に量的評価したのは、診断モデルに熱流入や湖上風の影響を導入した Endoh(1986)である。その結果によると、春先から7月までは強い地形性加熱効果によって環流が生成維持されて風はそれを助ける役割を果たす。そして、10月以降には地形性加熱効果はむしろ負になり、環流は専ら風で維持されている。

一方、Akitomo et al. (2009a)は、近年飛躍的に

向上した計算機の演算能力を利用して、琵琶湖内の状況を詳細に再現したモデルを構築し、風や加熱の実際の観測データを与えて、実際に観測される流れを概ね再現することに成功した。そして、Akitomo et al. (2009b)は再現された流れを分析して、環流の形成に寄与しているのは専ら風のエネルギーであり、加熱の影響は二次的であると結論した。また、加熱に起源を持つエネルギー流入を浮力の仕事量で評価し、熱的作用が環流を維持する作用は専ら秋の冷却期に働くと結論した。

この2つの結果は、一見すると相互に矛盾しているように思えるが、必ずしもそうとは言い切れない。それは、Endoh(1986)が専ら湖全体へのエネルギーの入力に着目して評価しているのに対して、Akitomo et al. (2009b)は形成された環流のエネルギーに対する収支に着目して評価しており、両者の関係が明確でないからである。

そもそも、収支を考える際の主体となるべき「環流のエネルギー」とは一体何であろうか?環流は地衡流であるから、流れと成層構造が互いに支え合う構造になっている。従って、流れが持つ運動エネルギーと成層構造が持つ有効位置エネルギーを併せた全体を環流のエネルギーと考えるべきである。

しかし、Akitomo et al. (2009b)は環流のエネルギーを専ら運動エネルギーのみで評価している。その結果、彼ら自身も認めているように、多くのエネルギーが、環流中心域での水温躍層の高まりを形成するために失われるという評価になる。しかし、そのエネルギーは環流から失われたのではなく、「有効位置エネルギー」という形で環流の中に蓄積し続けていると考えるべきであろう。

しかしながら、この「環流が蓄積している有効位置エネルギー」の収支を Akitomo et al. (2009b)の手法に整合する形で評価するのは容易ではない。加熱の初期段階で形成される対流の作用との分離が困難だからである。エネルギー収支から環流の成因論を考えるためには、このような概念定義に対する慎重な考察が必要であろう。

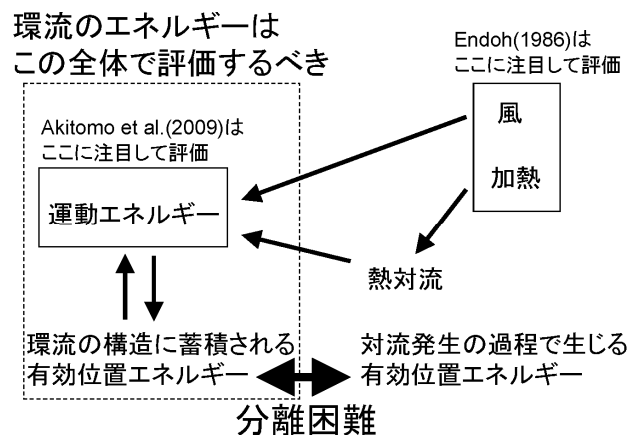


図3. 環流の生成に関わるエネルギーの流れ