

小野川湖における流動パターンと出水末期の水質特性に関する検討 Flow Patterns and Water Quality Conditions in the Closing Stage of a Fluid in Lake Onogawa

榎本英基*・長林久夫**・木村喜代治***

By Hideki ENOMOTO, Hisao NAGABAYASI and Kiyoji KIMURA

Relation between flow patterns and stratification process is investigated by the observed data in Lake Onogawa. Transition of the time-scale, 7hr., obtained from coherence of temperature-cross-spectrum and retention time estimated from velocimetry has good agreement to the flow patterns in the lake. The flow in the epilimnion has high-rate horizontal circulation because the lake is used hydropower generation. In the hypolimnion, sediment transportation is observed in closing stage of the fluid in 1995, July, in spite of the flow stagnant in the stratification season.

Keywords: mountainous lake, flow patterns, retention time, sediment transportation, water quality condition

1. はじめに

近年、水資源や自然環境としての重要な役割を有する湖沼やダム湖などの閉鎖性水域における開発・保全に対する関心は高まっている。一般に、湖沼等の水質特性は集水域での負荷発生状況と流入・流出の形態及び湖沼水の成層化に伴う混合・循環に依存しており、環境の違いによりその特性は異なっている。このことより、水系を一環とした河川環境の保全を考える上で湖沼の役割は大きく、湖の流動特性と水質特性を水理学的に究明することは重要である。本研究は、福島県裏磐梯の長瀬川流域の湖沼群に位置する小野川湖を対象として、季節的な流動特性の変化とそれに伴う水質諸量の流入から流出までの変化過程を把握するために調査研究を行っている¹⁾²⁾。本論文においては、1994年5月から10月にかけて1ヶ月間隔で行った全域調査の結果をもとに小野川湖における流動パターンを詳細に検討すると共に、水温変動のクロススペクトルにより得られた卓越コヒーレンス分布より湖の成層状態に対応した変動特性を検討し、流動特性との対応を見いだした。ついで、1995年7月17日から19日まで行った出水末期の調査の結果より、出水後の水質の経時的な変化特性の検討を行い、底泥の流送機構を検討した。

2. 小野川湖概要及び調査概要

* 学生会員 日本大学大学院工学研究科土木工学専攻

** 正会員 工修 日本大学助教授 工学部土木科

*** 正会員 工博 日本大学教授 同上

(〒963 福島県郡山市田村町徳定字中原原 1)

小野川湖は、磐梯山の噴火によって形成された北東から南西に長い山間地のせき止め湖であり、最大長約3km、最大幅約0.9km、貯水池容量約1364万m³である。湖の形状としては南西部は、水深が浅く平均水深は約4m程度であり、島が点在し非常に複雑な形状をしている。北東部における平均水深は12m程度である。小野川湖においては、湖水が発電に利用されているために水位や流出量などは、発電所で管理を行っている。主な流入河川は北東部では、小野川・不動川があり、この2河川は自然河川となっている。南西部では、剣ヶ峰水路・桧原川があり、この河川は、上流にある桧原湖の水門によって流量が調整されている。また、主な流出は湖のほぼ中央に位置する小野川発電所の取水口で秋元湖へと流下している。これより、小野川湖の流動は取水口を境に北東部と南西部に分けて考えることができる。この湖は夏期には水温成層が形成され、成層より下部では停滞性が強く、表層と湖底付近での水質は異なっている。また、冬期には湖面が完全に結氷し逆成層が形成される。

水質測定は、島津理科社製のCTIS-P1008N総合水質計を用いて水深・溶存酸素量(DO)・酸化還元電位(ORP)等8項目を1m間隔で測定を行った。各水質の対応をとるために、水深1mでは3分間計測をし、奇数深度では30秒計測を行い、偶数の深度では2分間計測を行った。流速測定は、アレック電子社製2成分電磁流向流速計を用いて各測線で1m間隔に測定を行い、各深度の平均値評価時間は3分程度である。また、最深部及び流入河川においては、アレック電子社製メモリー式水温計を用いて10分間隔で水温観測を行っている。1994年5月から10月までは、水深3m・6m・9m・12mとA3の6mと9m及び各流入河川の計10点で観測を行った。1995年5月から10月までは、水深2m・4m・6m・8m・10m・12mと各流入河川の計10点で水温の自記観測を行った。

1994年の現地調査は、5月から10月まで月に1回の割合で計測を行った。測定点は、南西から北東にのびるA測線の6点とA3を起点とするB測線の3点とA4を起点とするC測線の2点、及び各流入河川の河口部の4点の計15点となっている。調査は全測点において水質と流速の測定を行い、この調査を全域調査という。図1に1994年5月から10月までの桧原観測所の気温と降水量の気象データを示す。

出水末期の調査は、1995年7月17日の夕方から19日まで行った。調査は、降雨後約12時後に開始しており、河川流量はピーク時に比べて減少しているため出水末期とした。水質測定は、最深部において17日に1回、18日には午前8時から4時間おきに3回、19日には1回の計5回測定を行った。

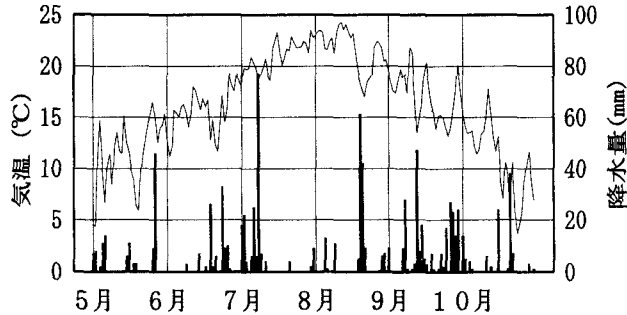


図1. 桧原観測所気象データ

3. 湖内流動パターンと水温スペクトルとの関係

3.1 水温変動特性

図2に1994年5月から10月までの最深部の水温の時系列図を示す。図より循環期にあたる5月から6月上旬にかけては、3m以外の層では水温が一様で気温の上昇にともなって徐々に各深度に水温差が生じてきている。水温成層の形成期にあたる6

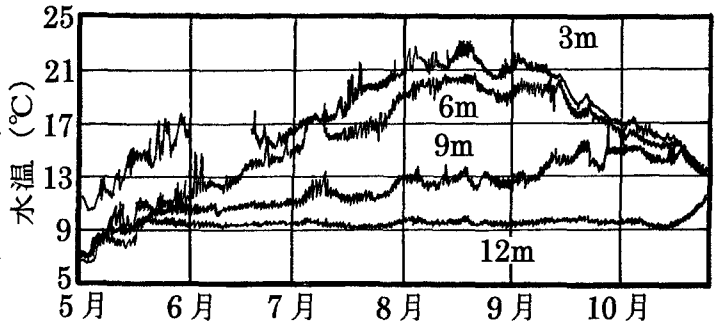


図2. 水温変動特性 (1994年)

月から7月下旬にかけては、3mと6mで水温が上昇しているが、それよりも下層では水温の上昇はなくほぼ一定水温となっている。水温成層の安定期にあたる8月は、3mと6mが気温に対応した変化を示すが、9mでは異なる変動特性を有している。水温成層の崩壊期にあたる9月上旬から10月下旬にかけては、表層から徐々に水温が低下し、9月中旬では3mと6mはほぼ同一水温となり、10月中旬には9mの層まで同一水温になっている。12mは、6月から9月下旬まで水温の変動が少なく微流動層となる。10月中旬から上層との混合が徐々に始まって12mの水温が上昇している。特に、7月上旬に3mと6mで同一水温になる時期があるが、これは、7月5日から7月9日にかけて約120mmの降水量によるもので、河川水の流入により大きな混合が生じている。また、この降雨の影響は9mの層でも見られる。成層形成期には、比較的大きな混合が生ずることが認められた。

3.2 流動パターン

流動パターンの検討は、湖内での物質輸送をモデル化する上で必須の要件であるが、成層形成の各時期に応じた検討例は少ない。

小野川湖の季節ごとの流動パターンを図3-(a)～(d)に示す。流動パターンは、流速測定の結果をもとに湖内の流速ベクトル図を作成し、その図より流動パターンを推定した。図3-(a)は、5月10日のものである。日流入量は、南西部から5.5m³/sec、北東部から9.1m³/secで、流出量が22.2m³/secと推定され総流入量よりも流出量が多い。図より南西部からの流入は、A3地点まで表層を流下しており、北東部においては、流入水がA5地点までは表層から4m位を流れ、そこからA3地点まではさらに深い位置を流下している。図3-(b)は、8月1日のものである。流入量は、南西部から10.8m³/sec、北東部から12.1m³/secで流出量は22.2m³/secと推定され総流入量と流出量はほぼ同じとなっている。8月1日はゆるい成層が形成され水面から10mまではほぼ等間隔の水温変化である。湖内の流動は、南西部では表層を流下しており、北東部では流入水温に対応して4～6mの層を流下している。A4からA6までの成層下部の流速は、1～3cm/secとなりほとんど流れのない状態である。図3-(c)は、9月24日のものである。このときの流入量は、南西部で0.5m³/sec、北東部では1.6m³/secで、流出量は0.5m³/secと推定され流入及び流出が非常に少ない状態である。北東部において、小野川

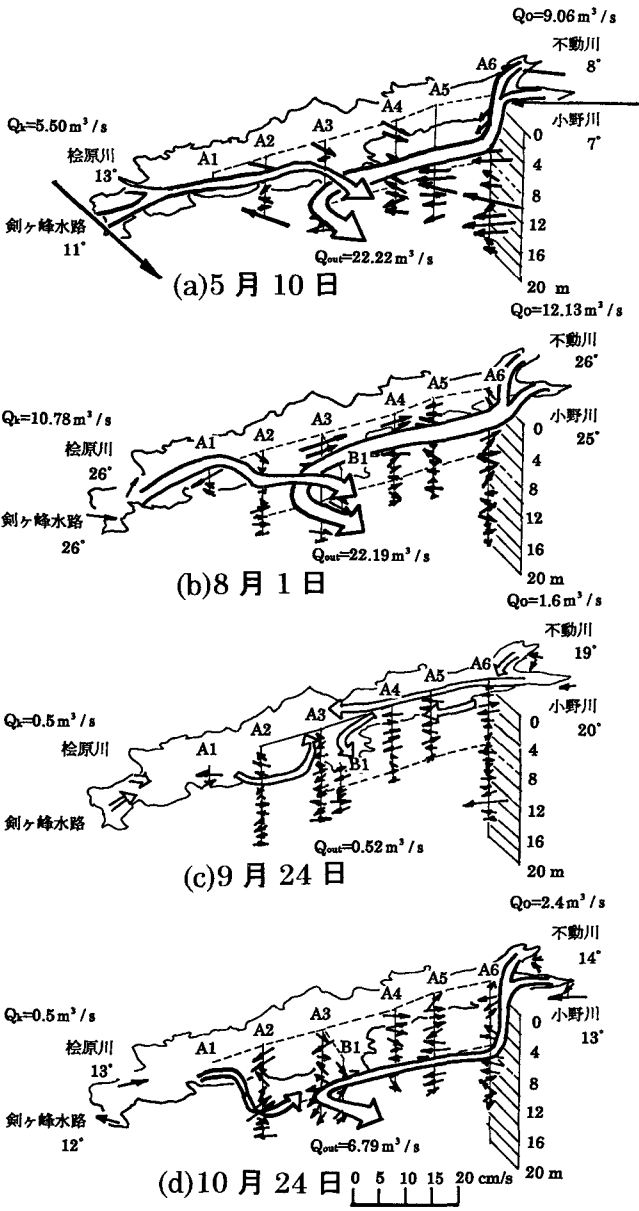


図3. 流動パターン

と不動川の河川水温はそれぞれ 19.7℃と 19.0℃であり、A5 地点において表層と 4m 程度の水深に分かれて流下している。この時の湖内の平均流速は、約 3cm/sec と小さい値である。図 3-(d)は、10 月 24 日のものである。この時の流入量は南西部で 0.5 m³/sec、北東部で 2.4 m³/sec となっている。流出量は 6.8 m³/sec で総流入量よりも流出量が多い。湖内の流れは、南西部では A2 地点で 7m の層を流下しており、また、北東部では 8m を中心に、4~5m の層厚で流れているのが見られる。この時の平均流速は約 4~5cm/sec である。これらのことより、小野川湖における流動特性として循環期においては、湖内の流動層は水深の深い所を流れており、水温成層の安定期においては、表層近くを流下していることが推定された。

また、流路を平均流速で割った滞留時間を推定したものを表 1 に示す。

表 1. 滞留時間 (hr)

表より、湖水の引き抜きが行われている時は、滞留時間がほぼ 10 時間前後と短い時間で流れているが、9 月のように流入及び流出がないときは非常に滞留時間が長くなっている。よって、通常はこの湖では水平混合が卓越しており、滞留時間が短いので流動層における水質は、流入河川の水質状況に近いと推定される。

	北東部	南西部
5 月 10 日	8	4
8 月 1 日	12	10
9 月 24 日	50	68
10 月 24 日	8	4

3.3 流動特性と水温のスペクトル解析との関係

各水深間の水温データをもとにクロススペクトルを検討した。コヒーレンス分布は、7 時間と 3 時間周期の分布が流動特性に対応して卓越的な変動を示している。図 4 に 5 月の降水時と晴天時の 7 時間周期のコヒーレンス変動を示す。晴天時の 3m-6m ではこの周期のコヒーレンスがあまり見られていない。これは、気温の変化に 6m が対応しないことを示している。6m 以深で高い値となるのは 5 月 8 日から 12 日まで平均 13m³/sec の流出量があり、前述した流動層の効果と考えられる。降雨があった 26 日から 27 日にかけて 6m-9m と 9m-12m でコヒーレンスが高くなっているのは、河川水の流入によるもので、晴天時に比べてより深い層で見られる。

また、図には示していないが、8 月の晴天時においては、3m-6m で高い値を示しており、9 月になると 3m-6m で 8 月よりもさらに高い値となり、降雨があると 6m-9m までも同じ値となる。これらのことより、循環期から成層の安定期までは降雨があると流動層以下でコヒーレンスの値が高くなっている。崩壊期になると流動層から表層にかけて値が高くなっていることがわかった。よって、降雨時には河川水の流入により流動層厚が増加する事が推定された。

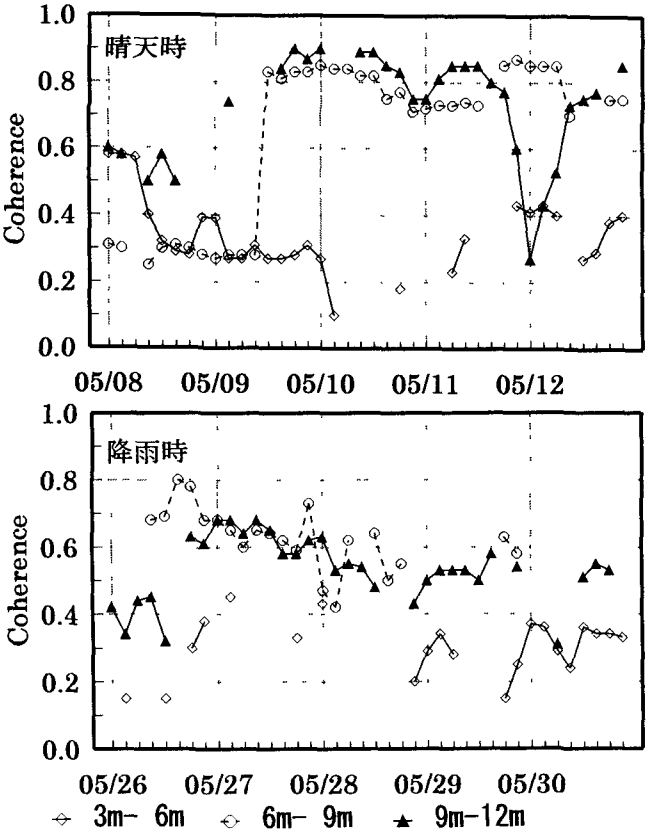


図 4. 7 時間周期のコヒーレンス変動

4. 出水末期の水質特性

出水に対応した湖内での水質特性の変化過程は、湖への負荷量の算定とともに沈降性物質の挙動を知るうえ

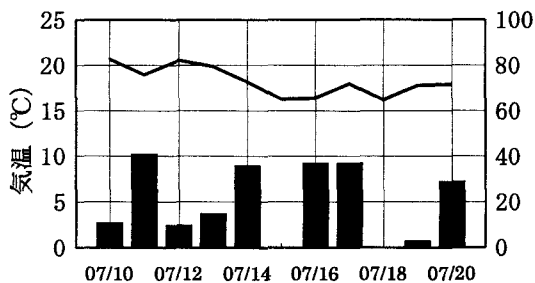


図5. 気象状況

で重要である。

4.1 水質特性

図5に7月10日から7月20日までの桧原観測所気象データを示す。測定開始日までの一週間の累積降雨量は約 220mm となっており気温は降雨等の影響により、あまり日変動がなく平均気温もこの時期では低めになっている。

図6に7月15日から7月20日までの水温と風の時系列図を示す。例年では、この時期は水温成層の形成期にあたり水温は表層で上昇傾向を示すが、今回測定を行った結果では、表層ではあまり水温が上昇しておらず逆に水温が低下している。気象データから見てみると、気温の日変化があまりなく降水量も多いために表層での水温の変化がなかったものと思われる。また、6mの層では頻繁に上層と混合しているのがみられる。これは、風速が5m/sec以上の時にこの現象がみられることから吹送流による混合であると推定される。

図7に各水質項目の鉛直分布図を示す。7月の代表的な値として1995年7月5日に測定を行った結果もグラフ上に示した。水温と溶存酸素量(DO)は、出水後に顕著な変化は見られなかった。pHは、10m以深で河川水の値に近づいている。濁度(TB)は、18日の6mから10mにかけて徐々に上昇しており、19日は5mから7mの層で値が上昇しているのがわかる。湖底付近においては、徐々に濁度層が上昇し16時にピークとなり、その後層厚が減少している。665-TB 勾配値は、TBの中に含まれる藻類の多さを示すもので勾配値が大きいと藻類の含まれる割合が多く、勾配値が

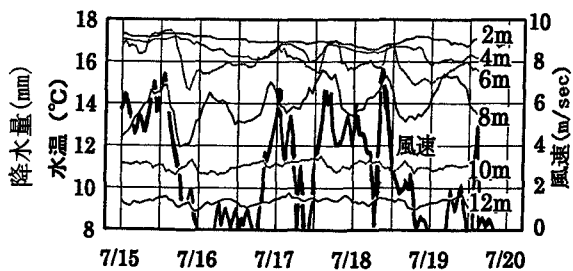


図6. 水温と風速の時系列図

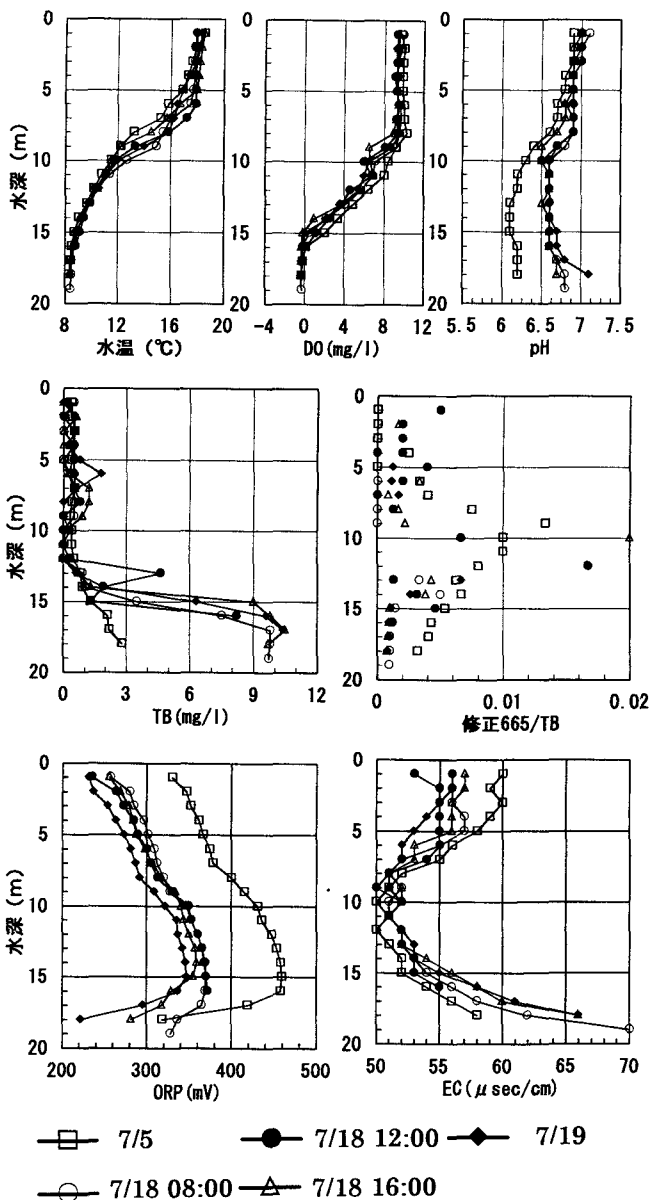


図7. 水質の鉛直分布図

小さいと藻類が少ないことを示している⁴⁾。鉛直分布を見ると、10m 付近で徐々に勾配値が大きくなっており、このことより、10m 付近で 18 日の昼から夕方にかけて藻類が増えていると推定される。また、湖底付近で 665-TB の勾配が低いことより湖底での濁度の高い層は、出水による沈降性物質の流下や底泥の巻き上げにより形成されたと推定される。酸化還元電位(ORP)は、時間が経過するにつれて値が徐々に低下している。電気伝導率(EC)は、12m 以下の層において ORP とは逆に値が増加しているのがわかる。このことから、微流動層においては EC と ORP には何らかの関係があると推定される。これらのことより、水温や DO は、測定期間中顕著な変動は見られなかったが、その他の水質項目については降雨による影響を確認することができた。

4.2 ORP と EC の関係

図 8 に ORP と EC の 95 年の測定結果と今回の結果を示す。循環期から成層の形成期までは、ORP と EC には明確な関係は見られないが、8 月から 10 月にかけては ORP が下がると EC が上昇している。図 9 は測定時の ORP と EC との関係であり、表層から 10m 付近までの値は、EC が 50 程度で分布している。また湖底付近では、図 8 の成層期に見られたような現象が見られる。15m 付近の TB が低下するにつれて ORP-EC 勾配が低下し 7 月 5 日の通常の勾配に近くなる。これは、出水による沈降性物質の流動現象とともに底泥の巻き上げが起こり ORP と EC の値が増加し、その後、出水の沈静化に伴い ORP が改善され従来の状態に戻っていくためと推定される。

5. まとめ

- (1)成層の各段階における流動パターンを推定した。これより、循環期と成層形成期では 9m 程度の層に、成層期では 4m 程度の層に流動層があり、降雨時には厚層が増加することが確認された。
- (2)水温のクロススペクトル解析では、晴天時と降雨時のコヒーレンス変化より流動層が確認された。
- (3)この湖は発電利用により、高い水平混合を有することが認められた。また、流動層における平均滞留時間はほぼ 10 時間程度である。
- (4)出水末期の調査では、水温・DO に顕著な変化が見られなかったがその他の項目については、出水末期の変化をとらえることができた。

<参考文献>

- 1)藤田、長林ら：水工学論文集、第 36 巻、1992 年 2 月、pp205-210
- 2)長林、木村、塩月：水工学論文集、第 38 巻、1994 年 2 月、pp289-294
- 3)榎本、長林、木村：東北支部講演概要集、1995 年 3 月、pp132-133
- 4)塩月、木村、長林：水工学論文集、第 38 巻、1994 年 2 月、pp301-306

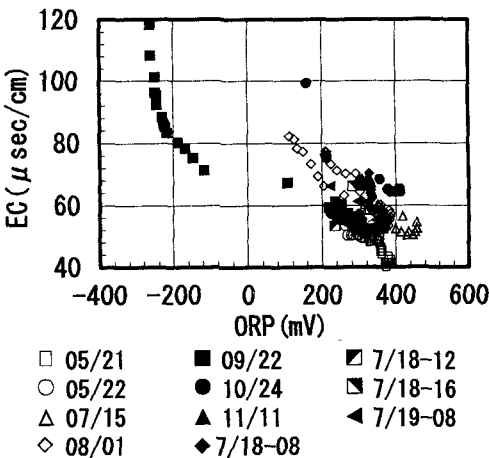


図 8. ORP と EC の関係 (1995 年)

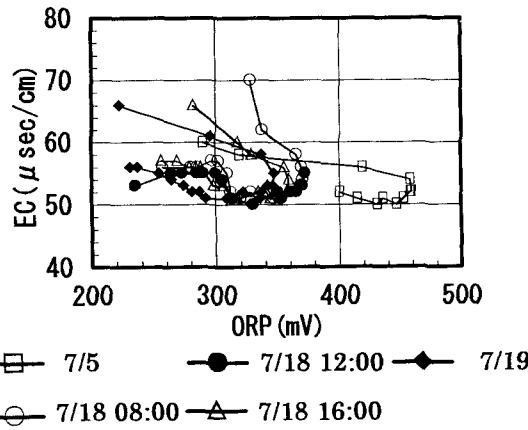


図 9. ORP と EC の関係 (出水測定)