

方向スケール(界面長約 8km)を考慮して最も単純化した定常波に関する線形理論を用いて算出すると約 8 時間であり、観測値とほぼ同値である。このことから塩水層の周期的な流れは内部セイシュに起因する流れであることが推察できる。図-5 より流速変動の位相は南北成分で上層の方が下層よりも 2~3 時間速いのに対し東西成分では上層のほうが下層よりも 2~3 時間遅いことが分かる。図-6 より前述の 6~8 時間の周期をもつ流れは流向を右回りに変動させながら周期的に変動を繰り返している。流向が湖長軸方向のとき流速が極大(約 10cm/s)となり短軸方向のときに極小(約 1cm/s)となっており、この成因は内部セイシュが発生する直前 11/12/18:00 まで湖長軸方向(湖上流から湖出口)に 10m/s 程度の強風が吹き続けていたために内部セイシュ直前まで塩淡水境界面が湖長軸方向(湖上流側)に傾いていたためであると思われる。

4.2 淡水層の流れ 図-6 より

11/12/12:00~11/13/12:00 において風速は 8~12m/s の間で変動し風向も大きく変動している。淡水層(1~7.5m)における流速ベクトルは風向の急変による乱れが生じており、淡水層全体の流速の変動は風の変動と一致している。また風が 5m/s 程度となる 11/13/12:00~11/13/24:00 の間では前述の淡水層の流れとは異なり淡水層上層(水面~2m 付近まで)は風と同方向の流れであるが淡水層下層(水面からの距離:2m~7m)ではそれと 180 度異なる流れとなり淡水層で 2 層の流れ(吹送循環流)を形成していることが明らかである。図-7 は湖全域の水深 4.5m における流速ベクトルを示す。流速データは 5 秒間隔で測定したものを 50 秒間ごとに移動平均したものである。図-3,4 (●印)に示すように測定時間中及びその前後における風速は 5m/s 以下である。淡水層中層における流れは図-7 に示すように湖流入口付近には左回り、湖心付近には右回りの水平還流を確認することができた。

5. まとめ:本観測期間中塩水層の流れは 6~8 時間の周期をもつ流れ(5cm/s 前後)が存在していた。その流れの成因として内部セイシュが考えられる。2)淡水層流れにおいて、風速 5m/s 程度の風が吹送したときには吹送流が卓越したのに対し、風速 5m/s 以下の風が吹送したときには流入水、湖盆形状の影響が卓越していた。

参考文献 1)池永 均他.網走湖における塩淡水 2 成層の形成と挙動に関する研究, 水工学論文集第 40 巻, pp.598-594.1995

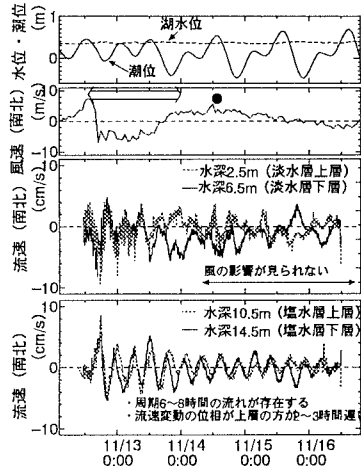


図-3 網走地方の風速(南北成分)と湖心における流速(南北成分)の時系列

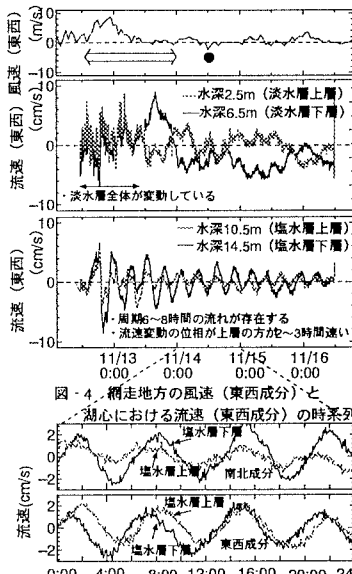


図-4 網走地方の風速(東西成分)と湖心における流速(東西成分)の時系列

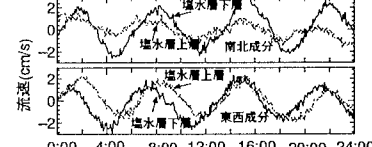


図-5 塩水層における流速の時系列(図-3,4拡大)

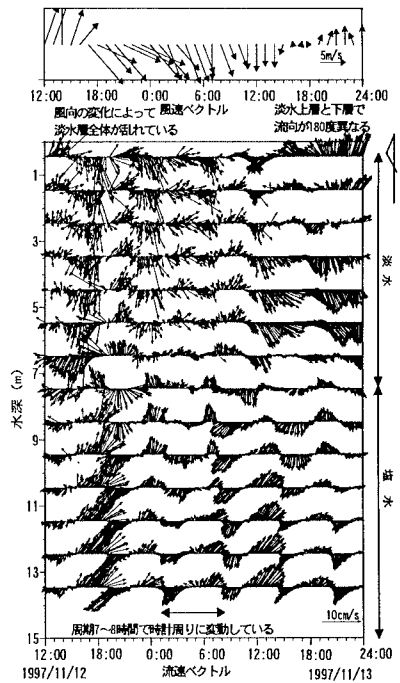


図-6 網走地方の風速の時系列
網走湖心における流速の時系列

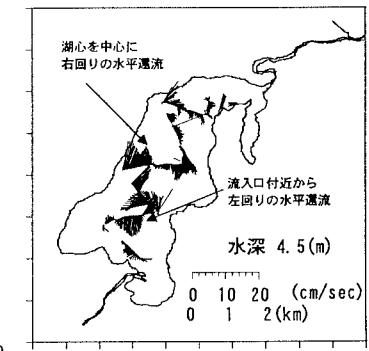


図-7 網走湖における水平流速ベクトル図
1997/11/14 10:05~13:20

II-354

風によって生じる定山溪ダム貯水池の水面変動特性

北海道大学大学院 学生員 鈴木 洋之*
 北海道大学大学院 正 員 長谷川 和義*
 北海道開発局 正 員 石田 享平**

1. はじめに

ダムの操作管理において流入量の推定は非常に重要な問題である。また、この流入量は静水位の変化から貯水量の変化量を求めることで推定される。しかし、この水位データはセイシュ、風波など各種ノイズを含んでおり、真の静水位を知ることは非常に困難となっている。著者らは、この問題の解決の為に定山溪ダム貯水池に5点の水位計を設置し、解析を行うことで風によって引き起こされる水面の吹き寄せ現象の存在を確認した^{1),2)}。流入量推定において、この現象は一般的に行われている平均処理のみでの除去は不可能であり、解析的に変動量を推定することが必要となる。本研究は、この変動量の推定を目的として、定山溪ダム貯水池を対象に風に対する水面振動の応答を解析的に調べたものである。

2. 風による吹き寄せ現象

図-1は定山溪ダム貯水池の平面形状と水位計位置を示したものである。風向風速計はNo. 4の位置に水面から2mほどの位置に設置されている。図-2は1996年10月30日にこの風速計で記録された平均風速であり、長軸成分風速は上流向きを正とし短軸成分風速は右岸向きを正としてある。図-4は各点で記録された水位のトレンド成分を除去し900秒移動平均を施したものである。これらの図から風速は30分から1時間程度で変動していること、長軸方向風速が0となる時に、No. 1とNo. 6で変動の山が出現し位相がずれることが確認できる。この時系列から8:45と30分後の9:15の水面形を同時水位で表わすと図-3のように水面形の振動が現れる。これは風速変動に伴う見かけの振動である。

3. 風による水面変動の理論解析

図-5に示すように堤体を原点として上流側にx軸をとる二次元座標を定義する。貯水池幅B(x)は軸に垂直なものとし、横断面形状は矩形近似できるものとする。ここで風が湖面に与える力はせん断力のみとして、この座標系において二次元連続式及び運動量式を適用する。この時、運動量式と連続式に対して、運動量係数は1とみなして、さらに長波近似を適用することで表-1の基礎式(1)を得ることができる。この方程式は形からみて明らかに風のせん断力を外力とする波動方程式である。定山溪ダムの場合、平面形状は図-1から明らかに三角形で近似できる。また、貯水池幅、水深共に堤体から離れるに伴い直線的に小さくなるので、(1)式のBとhに1次関数を与えると表-1の定山溪ダムのモデル式(2)になる。次にこのモデル式を解く際に、初期条件と境界条件を端点での反射を考慮し表-1の(3)、(4)のように与える。この時、解は表-1(5)式のように得ることができる。

4. 解析解の検討

本稿では省略するが、セイシュを表わす(2)式の同次解は実測値によく一致することが確認されている。(5)式は風外力によっておこる水面の強制振動を表わしている。今回は、風入力として表-2(6)式の周期関数を与えて水面応答の検討を行った。式(5)に(6)を入れて積分を行うと(7)式を水面応答として得る。さて、 $a=0$ (一様風)では、(7)式中[]の中は(8)式のようになり、自由振動周期

が残ることが分かる。ここで、 $b=5$ 、 $C_f=0.01$ を(8)式に与えてiを10項までとり水面形状を調べてみた。図-6は最大傾斜時、図-7は最も水平に近づいた時の水面形状を示している。一様風の場合でも水面が一定の傾斜を保つのではなく、平均傾斜面付近で小さい変動を繰り返す結果が得られた。次に風速が周期的に変化する場合について考える。この時注目すべき点は、風の周期が自由振動周期に一致する場合、及び自由振動周期の2倍になる場合である。これら2つの周期が一致する時、(7)式の[]中の4項目と5項目が(9)式に示すように極限で共振状態を表わすようになる。また、風の周期が自由振動周期の2倍となる時にも2項目と3項目が式(10)に示すように共振状態を表わす。また、この時4項目と5項目が(11)式のようになり、自由振動周期の2倍周期の水面振動が現れることが確認できる。この仕組みで発生すると考えられる振動は700秒周期のセイシュとして観測されている³⁾。図-8は最大5m/s、周期30分の風、 $C_f=0.01$ を与えて式(6)の和を10項まで求めた時の時空間変化を示したものである。風周期に対応した水面変動が現れており、図-4に示した吹き寄せに非常に近い形を得ることができた。また水面の応答は約1/4周期遅れて現れており、位相ずれも理論上で確認することができた。

5. 終わりに

定山溪ダム貯水池における風の水面振動応答の解析解は実現象を良く表現している。今後はこの解析解をフィルター理論に応用するなどの方法で、より精度の高い流入量の推定を行いたいと考えている。

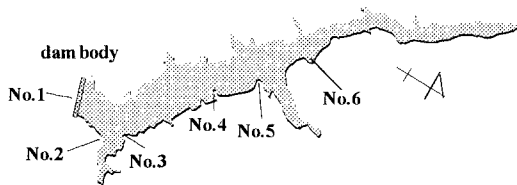


図-1 水位計設置位置

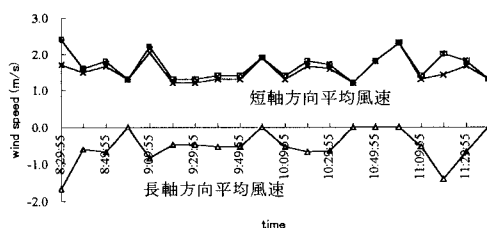


図-2 風速変動 (96.10.30 8:30-11:30)

キーワード：流入量推定、風による吹き寄せ、波動方程式

* 札幌市北区北13条西8丁目、** 札幌市中央区南32条西8丁目

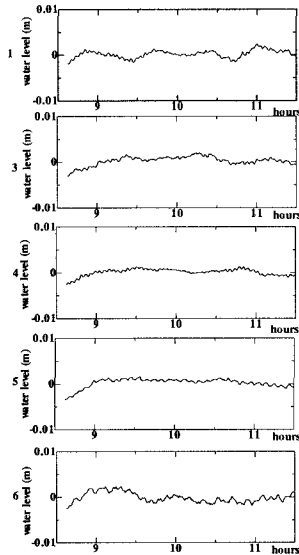


図-3 各点水位の900秒移動平均
(96.10.30 8:30~11:30)

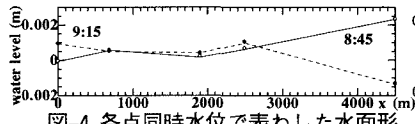


図-4 各点同時水位で表わした水面形

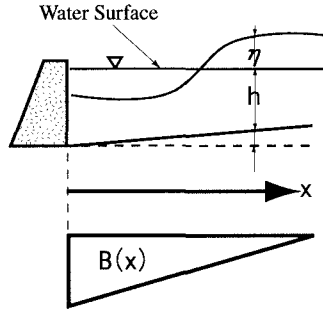


図-5 座標軸の定義

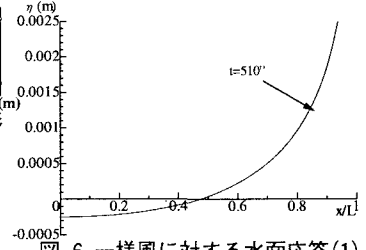


図-6 一様風に対する水面応答(1)
(最大傾斜時)

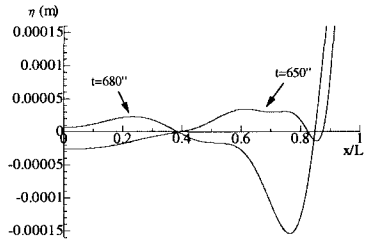


図-7 一様風に対する水面応答(2)
(最も水平に近づいた時)

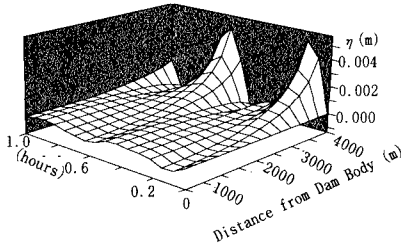


図-8 周期30分の風に対する理論水面変動

表-1 基礎式と解析解

(基礎式)
$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - h \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \left(-\frac{h}{B} \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{gB} \frac{\rho_s C_f U_s^2}{2\rho} \frac{\partial B}{\partial x} \quad (1)$$

(モデル式)
$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - gh_0 \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{2gh_0}{L} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\rho_s C_f U_s^2}{2\rho(L-x)} \quad (2)$$

(初期条件) $t=0 \rightarrow \eta=0 \quad (3)$

(境界条件) $x=0, L \rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial x}=0 \quad (4)$

(非同次解)
$$\eta = \frac{2}{\sqrt{gh_0}} \frac{\rho_s}{\rho} C_f \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1-J_0(j_{2,i})}{j_{2,i} J_1(j_{2,i})} \frac{J_1(j_{2,i} \sqrt{1-x/L})}{\sqrt{1-x/L}} \int_0^t [U_s(\tau)]^2 \sin \left[j_{2,i} \frac{\sqrt{gh_0}}{2L} (t-\tau) \right] d\tau \quad (5)$$

ここで、 h =平均水深、 g =重力加速度、 η =平均水位からの水面変位、 ρ =水の密度、 t =時間、 h_0 は堤体での水深、 U_s =風速、 J_n は n 次ベッセル関数、 $j_{2,i}$ は2次ベッセル関数の零点で定義される i 番目の固有値である。

表-2 風入力に対する水面の応答

$$U_s(\tau) = a \sin(\omega_s \tau) + b \quad (6)$$

$$\eta = \frac{2}{\sqrt{gh_0}} \frac{\rho_s}{\rho} C_f \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1-J_0(j_{2,i})}{j_{2,i} J_1(j_{2,i})} \frac{J_1(j_{2,i} \sqrt{1-x/L})}{\sqrt{1-x/L}} \left[\frac{a^2 + 2b^2}{2\omega_i} + \frac{a^2 \omega_i}{2(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(2\omega_i t) - \frac{2(a^2 + 2b^2)\omega_s^2 - b^2 \omega_i^2}{\omega_i(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(\omega_i t) - \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_i t) + \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_s t) \right] \quad (7)$$

$$[] = \frac{b^2}{\omega_i} \{ 1 - \cos(\omega_i t) \} \quad (8)$$

$$\lim_{\omega_s \rightarrow \omega_i} \left[\frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_i t) + \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_s t) \right] \rightarrow ab \left\{ -t \cos(\omega_i t) + \frac{\sin(\omega_i t)}{\omega_i} \right\} \quad (9)$$

$$\lim_{\omega_s \rightarrow \omega_i} \left[\frac{a^2 \omega_i}{2(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(2\omega_i t) - \frac{2(a^2 + 2b^2)\omega_s^2 - b^2 \omega_i^2}{\omega_i(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(\omega_i t) \right] \rightarrow -\frac{a^2}{4} t \sin(\omega_i t) - \frac{a^2 + 2b^2}{2\omega_i} \cos(\omega_i t) \quad (10)$$

$$\left[\frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_i t) + \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_s t) \right] = \frac{8ab}{3\omega_i} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\omega_s}{2} t\right) \right\} \sin\left(\frac{\omega_s}{2} t\right) \quad (11)$$

ただし、 ω = 風速変化の角周波数、 a, b =定数、 $\omega_i = i$ 番目のモードを持つ自由振動の角周波数である。

参考文献

- 1) Ishida, K., K. Hasegawa, H. Suzuki and M. Fujita: Characteristic of Water Surface Oscillation in Jozankei Dam Reservoir, Proceeding of the First Korea-Japan Bilateral Seminar on Water Resource and Environmental Research, pp.73-80, 1996.
- 2) 石田享平、長谷川和義、鈴木洋之：多点同時水位計測による貯水池の水面振動解析、水工学論文集、第41巻、pp.1017~1022、1997.
- 3) 鈴木洋之、長谷川和義、石田享平：風を外力として生ずる定山溪ダム貯水池の水面変動特性、土木学会北海道支部論文報告集、第54号(B)、pp.208~213、1998

II-355

石川流域における河川水質の特性について

宇都宮大学工学研究科 学生員 加藤 友美
 宇都宮大学工学研究科 学生員 生天目 実一
 宇都宮大学工学研究科 正 員 長谷部 正彦
 宇都宮工業高校 正 員 桑川 高德

1. はじめに

住宅地の発展を主とした急激な都市化区域の増大は、河川の水質に多大な影響を及ぼしている。このように都市河川においては水循環の素過程、水量、水質の収支過程について明らかでない部分が多い。そのためには河川・下水・水路・地下水等を対象に都市域の水循環系を把握することが重要である。最近、金属系等の特定の物質は水循環の過程で変質することなく負荷源から河川へと輸送されることが分かってきた。循環過程におけるある物質、例えば、硝酸、カリウム等の多量な変化は、その循環過程の特定の機構(人間活動や社会生活等)との関係がある。そこで、石川流域を一つのモデルとし、そのような物質を追跡することにより、河川水質の特性をこの流域内の土地利用形態を踏まえ、定性的に把握することを目的とする。

2. 観測対象流域(石川流域)の概況

石川は、大阪府と和歌山県の境をなす三国山に源を発し、北流して、河内長野市、富田林市、羽曳野市と流下する。その途中で、大阪府と奈良県、和歌山県との府県境をなしている葛城山、岩湧山の山麓より発し西流する右支川、天見川、佐備川、千早川、梅川、飛鳥川を、また羽曳野丘陵より発する左支川、大乗川を合わせて、柏原市にて大和川(17km付近)に合流する流路延長が30km、流域面積220km²(道明寺地点)の南大阪地域で最大の河川である。流域図を図-1に示す。この石川流域の特性として、例えば、羽曳野丘陵を始めとする丘陵部においては、大規模な宅地開発や大学等の研究学園施設の立地が進み、近年の急激な市街化の進展により、平地部においては狭小過密な住宅形成が進み、遊水機能の低下が進みつつある。

3. 土地利用形態

土地利用分布状況を調べるために、25000分の1の地形図を用いた。それを250mメッシュで区切り、各土地利用の面積を算出し、分布図を作成した。図-2は、平成7年の土地利用分布図である。土地利用は、住宅地、工業用地、水田、果樹園、森林、ゴルフ場という分類とする。これらより、主に石川本流の西側に集中して住宅が増加していることが分かる。石川本流、加賀田川や天見川は森林地帯から河内長野市、富田林市及び羽曳野市

キーワード：土地利用、溶存成分、主成分分析

連絡先：〒321-0912 栃木県宇都宮市石井町 2753 電話 028-689-6214 F A X 028-662-6367

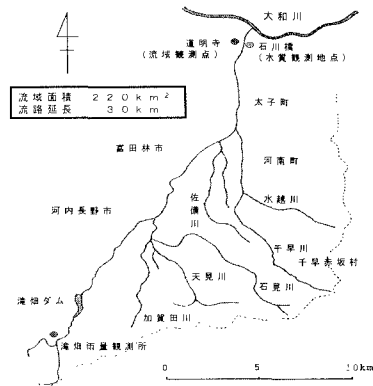


図-1 石川流域図

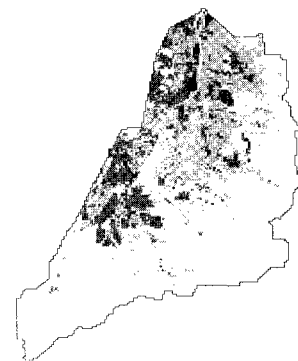


図-2 土地利用分布図(平成7年)

の住宅地を流れており、水田や果樹園を流れる場所は少ない。一方、石川の東側にある支流の千早川等では、森林地帯から水田、果樹園を通り住宅地へと流れている。このことから、土地利用と水質の関係を調べるためには、石川本流と東側の支流河川を調べる。

4. 現地調査の結果と考察

3の土地利用結果を考慮して、水質調査及び流量観測を行った。観測日は平成9年の2月と7月である。水質分析項目は、一般理化学指標のpH、DO、EC（電気伝導度）と一般化学組成の塩化物イオン、硝酸イオンをはじめとする、8個のイオンである。結果は、石川本流と支流である千早川の各観測地点の電気伝導度をそれぞれ図-3、4に示す。一般に雨水には溶存成分が少ないので、生活排水等の影響を受けると、上流から下流へと溶存成分は増加する。住宅が増えはじめ、さらに住宅団地の集中する天見川、加賀田川が合流した後Y-25地点で急激な変動が見られる。一方、千早川は流下距離約10kmの間大きな変動はない。イオンについて言うと、硝酸イオン、塩化物イオン、重炭酸イオン、カリウムイオン、ナトリウムイオンについてもY-25地点において急激な変化を示す。しかし、千早川ではどのイオンも変動は小さい。これら二つの河川を比較したことで、住宅地の影響がかなり強いことが明らかになった。さらに、流下方向への土地利用変化における変化の仕方が違うと増加の傾向も異なる。

5. 主成分分析

8個のイオンから総合的な指標を作成し、各観測地点（全36地点）がどのような位置付けにあるのか把握するために主成分分析を行った。主成分は4つまで求めたが、主成分No.1に関しては特徴がつかみにくかったためNo.2、3により図-5のような散布図を作成した。主成分No.3までの累積寄与率は99%である。同じ流域は比較的同じエリアにプロットされた。石川本流は明らかに上流と中、下流で含有イオンが違うのが分かる。イオンを上流から追跡するだけでなく、このように統計分析をすることで流域ごとの特徴を一目で捉え易くなる。

6. 結論

主成分分析を行うことで流域別の特徴が定性的に捉えることができた。また、河川水に含まれるイオンと土地利用形態を比較することで小流域の特性を推定することが可能であると示された。

【参考文献】

「平成8年度石川流域総合水質保全対策研究業務報告書」：土木学会 1997年3月

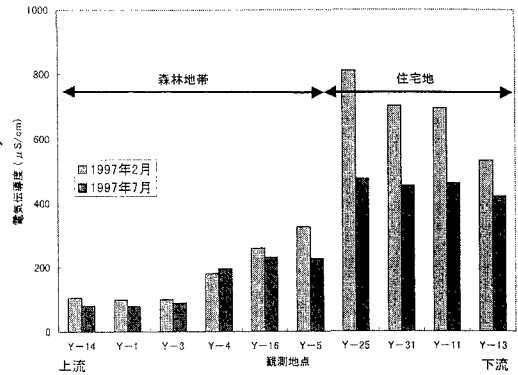


図-3 石川本流における観測地点の電気伝導度

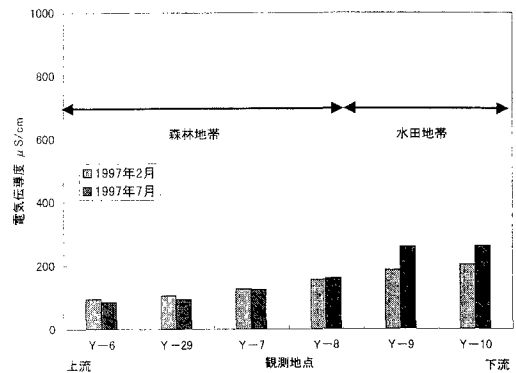


図-4 千早川における観測地点の電気伝導度

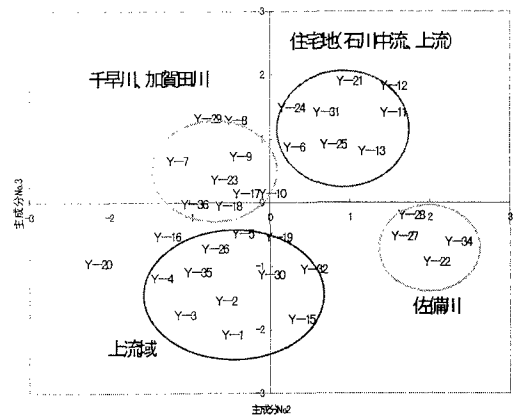


図-5 散布図（主成分No.2×主成分No.3）