

# 涸沼川における塩水楔と内部波の特性について Field Survey on Salt-Wedge and Internal Wave in Hinuma River

国立公害研究所 正員 村岡浩爾  
国立公害研究所 正員 ○平田健正

## 1. はじめに

二成層流れにおける混合機構には内部フルード数、レイノルズ数あるいはこれらが組み合わせたパラメタ等種々の水理量に関与しており、したがって、その機構解明には流れの微細構造にまで立ち入る必要がある。その意味で実験的には点計測と可視観測技法を併用し、混合形態について内部波の碎波<sup>1)</sup>や渦動による巻き込み<sup>2)</sup>等多くの知見が得られている。

他方、現地観測となると計測機器や観測条件等の問題点もさることながら、潮位（月令）と河川自流量の関係、時には一潮汐間にも強混合から弱混合を繰返すところに現象理解の難しさがある。加えて、同一時刻においても空間的に塩分濃度や流れの構造が変化しており、塩水楔の侵入長や混合量を精度良く見積るためには水理量の時間的、空間的特性を調べ、成層域の全体像を把握することが望ましい。

以上の視点から中規模河川である涸沼川において満潮時の前後6時間流速、塩分濃度および温度の鉛直方向分布を連続観測した。本研究はこれらの資料を基に弱混合河川における混合量や界面抵抗係数と平均の水理量との相互の関連について検討したものである。また、弱混合河川では界面に生長する内部波と界面抵抗係数や混合量との間に不可分な関連が存在するが、内部波の現地観測例となると極めて乏しいのが実情である。著者らは平均諸量と併せて界面近傍の塩分濃度の変動量も記録し、この変動時系列から卓越する周波数成分の抽出を行い、実河川における内部波の特性について報告する。

## 2. 涸沼川と現地調査の概要

涸沼川は水戸市を流下する那珂川の右支川であり、河口の上流1km地点で那珂川と合流し、それより8kmの河道区間（下流涸沼川）を経て涸沼に入る。図-1(a)に示されるように涸沼の形状は細長く、平均水深2.5m、幅1.5km、延長8kmで、それより上流は再び河道を形成する。下流涸沼川では入潮時に強混合状態も存在し、那珂川本川の流水も逆流するため複雑な流況を呈する。しかし、涸沼に入ると涸沼は浅く吹送流が卓越するため十分に混合し、塩分濃度は鉛直方向にはほぼ一様となっている。さらに上流涸沼川では潮汐振動の影響を受けるものの大潮時でも潮差は20cmと小さく、弱混合の成層化が観測される。

そこで、今回は下流涸沼川を除外し、上流涸沼川の成層域のみ観測対象とした。調査期間は昭和56年9月14日～16日の大潮時で、満潮時の前後6時間連続観測を実施した。

測定地点は図-1(b)に示しているが、河口(St-1)から涸沼大橋(St-4)までの584mを3分割し、St-1～St-4を設けた。上流涸沼川における塩水楔の侵入長は涸沼水の塩分濃度と涸沼川の自流量によりかなり異なる。昭和56年1月に行った予備調査では涸沼内の塩分濃度は1.0‰(gr/L)であり、河口から1.5km地点まで塩水楔の侵入が認められたものの、今回は涸沼内の塩分濃度が0.5‰まで低下しており、St-4がほぼ塩水楔の終端部に相当している。また、ここで言う河口は地理的に便宜上設定したものであって、水理学的な河口と一致するとは限らない。St-1から

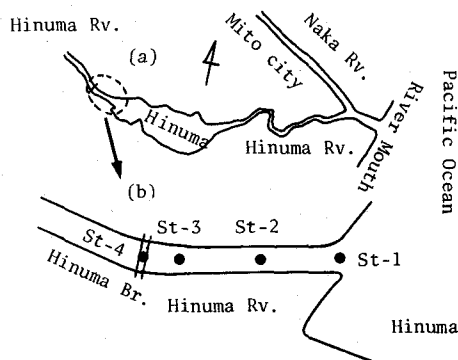


図-1 涸沼川と測定地点の概略図

St-4 の河幅（水面幅），河道中央部の水深と測定地点間距離を表-1 にまとめている。St-3 の水深が他の地点より大きくなっているが，この地点には浚渫船（幅 4 m，長さ 15m）が河道中央部に投錨しており，この浚渫船を利用して測定したためである。

つぎに，測定項目は流速・塩分濃度・温度の鉛直分布（平均量）と塩分濃度変動（変動量）の 2 種類であり，St-1, St-2, St-4 の 3 地点では平均量のみ，St-3 は平均量と塩分濃度変動の 2 種類測定した。前者については，小型船舶を用いて船上から平均量の鉛直分布を界面付近は特に丹念に 5cm 間隔で，それ以外は 10～20cm 間隔で測定した。流速測定にはプロベラ流向流速計（CM2-SA），電導度と温度には電気水質計（E ST-3）を用いている。流心での流速が河川横断方向を代表し得ないとの報告もあるが，ともかく流心に沿って St-1→St-2→St-4 と移動しなから順次観測する。そのため隣り合う測定地点間には 20 分程度の時間遅れが生じ，一連の測定には約 1 時間要するため各測定点では 1 時間毎に観測資料が得られることになる。後者については，流心付近に鋼管パイプで測定架台（2×2 m）を組み，架台上から界面近傍の濃度変動を計測する。使用した機器は実験室用電導度計（MK-103S）を改良したものであり，3 コのセンサーを 20cm 間隔で計測棒に配置し，計測棒を鉛直方向に上下させることにより界面付近を鉛直方向に 5 cm 間隔で計測した。各位置での測定時間は 3～5 分で，塩分濃度変動は磁気テープ上に記録している。

図-2 は St-1 の流速・密度・温度分布の一例であり，入潮時の資料である。流速は上層で若干腹んだ形となり，界面付近で急減し，下層には上流に向う逆流部が存在する。密度分布は界面付近でその勾配が最大となり，入潮時でもかなり明瞭な界面を有する典型的な弱混合の流動パターンであることが理解されよう。また，密度と温度の分布形は非常に良い相応を示し，河川水と潟沼水が明確に識別できる。温度は上層で 20.5℃，下層で 22.5℃ 程度であり，この値は観測期間を通じて変化することはなかった。

表-1 測定地点の断面諸量

| Station | Width<br>(m) | Depth<br>(m) | Interval<br>(m) |
|---------|--------------|--------------|-----------------|
| St-1    | 42.9         | 2.10         | 234.5           |
| St-2    | 45.9         | 2.20         |                 |
| St-3    | 48.8         | 2.90         | 234.0           |
| St-4    | 50.0         | 1.70         |                 |

表-2 観測した水理諸量

| Case Time | Section | $\epsilon$       | $h_t$ | $h_l$ | $U_l$ | $U_m$ | Re     | $F_i$ | $\psi$ | $f_i$            |
|-----------|---------|------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|------------------|
| 1 3°37    | 1-2     | 1.87             | 209   | 132   | 4.1   | 9.1   | 53800  | 0.26  | 3670   | 2.54             |
| 2 4°44    |         | 1.99             | 215   | 130   | 4.2   | 7.6   | 55000  | 0.27  | 3910   | 2.11             |
| 3 5°37    |         | 1.93             | 220   | 123   | 5.4   | 7.6   | 66400  | 0.36  | 8370   | 1.10             |
| 4 6°38    |         | 1.77             | 223   | 110   | 8.4   | 5.1   | 91500  | 0.61  | 33600  | 0.45             |
| 5 7°30    |         | 2.23             | 223   | 110   | 10.6  | 19.5  | 116300 | 0.68  | 54000  | 0.31             |
| 6 8°21    |         | 1.85             | 220   | 119   | 11.5  | 20.0  | 136600 | 0.78  | 83700  | 0.12             |
| 7 9°11    |         | 2.18             | 217   | 137   | 13.0  | 16.9  | 178100 | 0.76  | 104000 | 0.14             |
| 8 5°05    | 2-3     | 1.84             | 211   | 185   | 4.0   |       | 74500  | 0.22  | 3650   | 1.38             |
| 9 5°56    |         | 1.88             | 225   | 154   | 4.4   | 6.2   | 66900  | 0.26  | 4470   | 1.09             |
| 10 6°57   |         | 1.81             | 227   | 156   | 5.9   | 6.0   | 92300  | 0.36  | 11600  | 0.60             |
| 11 7°49   |         | 1.86             | 226   | 143   | 10.0  | 7.7   | 143000 | 0.62  | 54500  | 0.08             |
| 12 8°41   |         | 1.65             | 223   | 175   | 10.1  | 15.4  | 177000 | 0.60  | 63500  | 0.19             |
| 13 5°21   | 1-2     | 1.74             | 209   | 99    | 4.8   | 11.2  | 47600  | 0.37  | 6520   | 1.83             |
| 14 6°27   |         | 1.93             | 214   | 81    | 7.6   | 8.6   | 61100  | 0.61  | 23000  | 0.43             |
| 15 7°31   |         | 2.36             | 218   | 90    | 7.6   |       | 67700  | 0.53  | 18700  | 0.59             |
| 16 8°39   |         | 2.52             | 218   | 93    | 9.6   |       | 89300  | 0.64  | 36300  | 0.26             |
| 17 9°30   |         | 2.51             | 217   | 108   | 9.4   | 15.2  | 101000 | 0.57  | 33200  | 0.42             |
| 18 10°15  |         | 2.37             | 211   | 132   | 9.6   | 22.8  | 127000 | 0.55  | 38600  | 0.36             |
|           |         | 10 <sup>-3</sup> | cm    | cm    | cm/s  | cm/s  |        |       |        | 10 <sup>-2</sup> |

この2度の温度差は電導度にして2%程度の誤差を生じることになるが、以下の解析で温度補正は上下層の密度についてのみ実施することとする。これらの資料を基に平均諸量を計算することになるが、本研究では上下層の中間密度を有する位置を界面と定義する。

観測した水理諸量を表-2に示す。Case 1~Case 12は9月15日のCase 13~Case 18は9月16日の観測資料である。また、界面抵抗係数や混合速度は全てSt-1とSt-2、あるいはSt-2とSt-3間の平均値として算出されるため、表中Sectionの項で区別している。例えばSection 1-2（以後S 1-2のように略す）はSt-1とSt-2間の平均値を表すこととする。前述したように、隣り合う測定点での観測資料には20分程度の時間差があるが、ここでは上流側測定点の水理量（流速と水深）をその経時変化から補正して、下流側測定点の時刻に基準化している。表中左から、Time: 観測時刻ε: 上下層の相対密度差, ht: 全水深, h1: 上層水深, U1: 上層の平均流速, Um: 混合速度, Re: 上層のレイノルズ数, Fi: 上層の内部フルード数, ψ:  $Fi^2 \cdot Re$ , fi: 界面抵抗係数である。

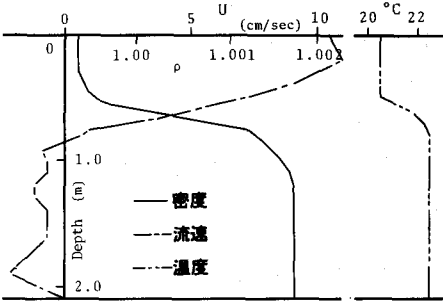


図-2 流速・密度・温度の分布

### 3. 観測結果と考察

#### (1) 上層水深・流速・内部フルード数の経時変化

観測期間中の干潮時にはSt-1でも塩水楔の侵入を示す塩分濃度は検出されず一潮汐間に塩水楔は完全に河道部で往復運動しているものと推察される。図-3は上層水深 $h_1$ を全水深 $h_t$ で除した9月15日の $h_1/h_t$ の経時変化を示したものであり、図中矢印の時刻はSt-3の水位記録から得られた満潮時刻である。なお、St-3の $h_t$ は観測地点が局所洗掘されているため、便宜上St-2の値を用いることとした。この日は午前4時45分にSt-3で塩水楔の先端部の通過が認められ、同時刻に $h_1/h_t = 1.0$ となっている。同図から、St-3ではSt-1より1時間程度遅れて上層水深が最小となり、入潮初期と退潮時に $h_1/h_t$ の時間変化が大きく、塩水楔の侵入・後退する様子がうかがえる。また、S1-2とS2-3でその区間長がほとんど同じであること、 $h_t$ は大きく変化しないことから、ある時刻における各測定点での $h_1/h_t$ の差がその区間内の界面勾配の程度を表すことになる。これによると、St-3が塩水楔の往復運動の影響を強く受ける時間帯を除いて、下流側区間であるS1-2の方が界面勾配は大きい。

図-4は上層の平均流速 $U_1$ 図-5は内部フルード数 $Fi$ の経時変化である。St-1で $U_1$ は時間とともにほぼ線形に増加し、St-2でも同様な傾向が見られるものの、退潮時には一定の値となっている。他方、St-3では入潮時に $U_1$ は4cm/secと小さくあまり変化しないが、満潮時から退潮時にかけて急激に加速されて最大値をとる。それ以降

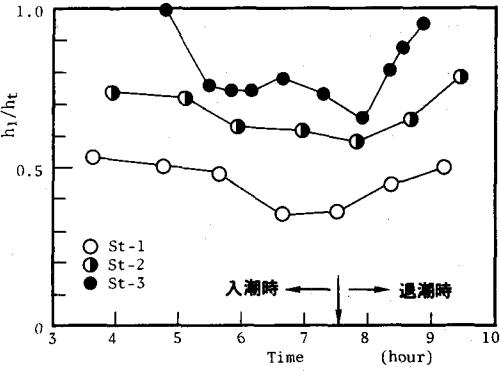


図-3 上層水深の経時変化

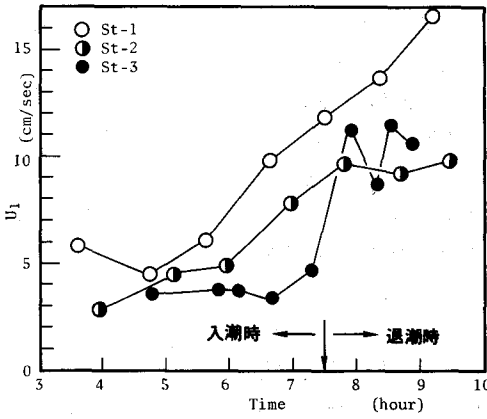


図-4 上層平均流速の経時変化

は $U_1$ は減少すると予想されるが、図-3から分るように塩水楔の先端部がSt-3より下流側に後退するため観測を終了した。

$Fi$ は上層水深と平均流速を反映して、退潮時に最大となり、St-2とSt-3では0.6, St-1では1.0となっている。ここで、河口条件について考えてみる。観測期間中、St-1での河川横断方向の界面の長さは、河川幅とほぼ等しく、上層については長方形断面と見なせる。したがって、下層流速を無視する限り河口条件は $Fi=1.0$ となる。このことから、St-1では退潮時の一時期に河口条件を満足し、それ以外ではSt-1から沖合いに水理学的な河口が存在すると言えよう。

## (2) 混合速度

混合速度 $U_m$ について、大坪・福島<sup>3)</sup>の提案した上層と下層の塩分濃度差の流下方向変化から推定する手法もあるが、瀬沼川での塩水楔長は短かく、河幅も狭いことから以下のように求めた。すなわち、下流側断面からの塩分濃度の全流出量と上流側断面からの全流入量との差から、当該区間で生成される混合量を算出し、その区間内の有効界面面積と下層塩分濃度で除して $U_m$ を見積った。 $U_m$ と $U_1$ の関係を示せば図-6のようである。図中、観測日時と計算区間の別、および退潮時の資料に羽根を付け識別している。以下、全てこの表示を行う。概して、 $U_m$ は $U_1$ とともに増加するが、データのばらつきはかなり大きい。また、混合係数 $E (=U_m/U_1)$ と上層の overall なリチャードソン数 $Ri$ との関係も調べたが、 $Ri$ 数が1.6~2.0と大きく、両者に有意な相関は見られなかった。そこで、 $E$ を $\Psi (=Fi^2 \cdot Re)$ に対してプロットしたのが図-7であり、Keuleganの実験値も矢印で示している。入潮時の資料についてはいずれも $\Psi$ の増加に伴い $E$ は減少し、この傾向は神通川や石狩川での観測結果とも一致する。しかしながら、退潮時に $E$ は再び大きくなり、この様子は $E$ と $Re$ 数との関係にも認められた。このような $E$ の振舞いについて下流側区間S1-2では内部跳水の影響を受け、混合量を大きく見積り過ぎた可能性もあるが、S2-3の資料にもこの傾向が見られ、本来観測資料がこの程度にばらつくものなのか、あるいは混合機構そのものが変化しているのか、今後の観測資料の集積を待ちたい。なお、大坪・福島の手法でも $E$ 値を求めたが、著者らの値より大きくなるものの、全体的な傾向は変わらなかったことを付記しておく。

## (3) 界面抵抗係数

界面抵抗係数 $fi$ については、内部波のエネルギー逸散に求めるもの<sup>5)</sup>や流速分布から推定する手法<sup>6)</sup>など、最近活発に検討されているが、本研究では従来から慣用的に使用されている(1)式の簡略式に依った。

$$\frac{fi}{2} = - \frac{(1-Fi^2)}{Fi^2 \cdot \frac{ht}{ht-h_1}} \cdot \frac{dh_1}{dx} \quad (1)$$

既往の研究に倣って $fi$ を $\Psi$ で整理すると図-8のようである。同図から、 $fi$ はかなりまとまった値となり、 $\Psi$ の増

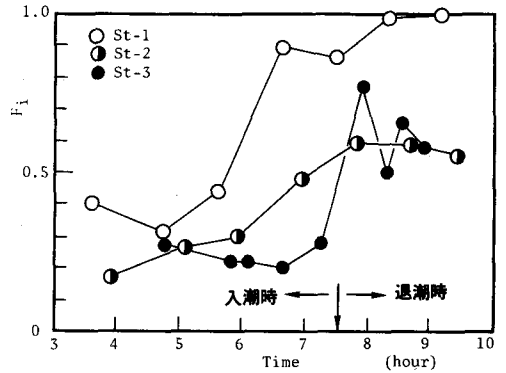


図-5 内部フルード数の経時変化

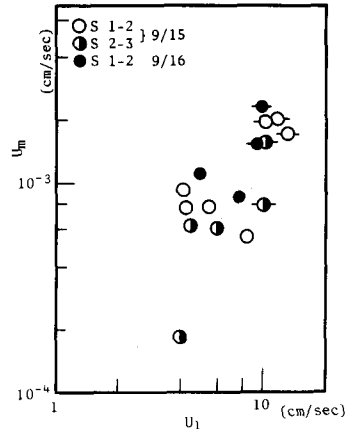


図-6 混合速度

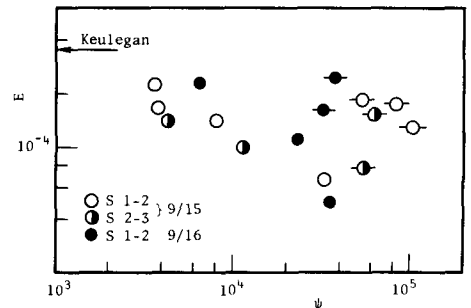


図-7 混合係数と $\Psi$

加とともに減少する。これらの観測資料から $f_i$ を $\Psi$ の関数として表示すれば

$$f_i = 18.7 \cdot \Psi^{-0.834} \quad (2)$$

となる。 $f_i$ の関数形は数多く提示されているが、本観測結果の $\Psi$ のべき数については岩崎<sup>7)</sup>のそれとほぼ一致する。しかし、係数は約2.4倍となっている。 $f_i$ にばらつきが少ないのは、瀬沼川での塩水楔長が短く、界面勾配が精度良く計測できたためであり、その分 $f_i$ が大きくなったと推察される。また、同じ $\Psi$ 値に対し、S1-2とS2-3の資料を比較すると界面勾配の値にもよるが、S2-3の方が小さく、上下層の水深比によっても変化することが分かる。いずれにしても、同一河川で一潮汐間に $f_i$ が1オーダーも変わり、実測資料から $f_i$ を見積るには十分留意する必要がある。

つぎに、混合による付加マサツ抵抗係数 $f_{ia}$ を2Eで評価し、 $f_i$ とオーダー比較したのが図-9である。同図から、 $f_i$ の減少とともに $f_{ia}$ も減少し、混合が活発となる退潮時においても $f_{ia}$ は $f_i$ の1/5程度と小さいことが理解できる。

(4) 内部波

ここでは、St-3の点計測から得られた濃度変動時系列について考察する。図-10は密度分布から決定される界面に相当する位置での濃度変動記録を選び、Re数あるいは $\Psi$ の増加による相異を示したものである。図中にRe数と $\Psi$ を記載しているが、これらはSt-3での値であり、(a),(b),(c)の順に表-2のCase 9,10,12に相当する。濃度変動は全て内部波に基因するとは断定できないが、観測当日はほぼ無風状態で表面波が観測されず、密度界面も明瞭であることから内部波と対応させて検討する。同図から入潮初期の(a) $\Psi=3,300$ では30秒程度の長周期成分が見られ、2~5秒の短周期成分が間欠的に通過するのが分かる。この様子は(b) $\Psi=4,700$ 、(c) $\Psi=5,700$ と $\Psi$ の増加に伴いさらに顕著となり、短周期成分が連続的に出現している。このような濃度変動パターンは実験室規模で観測される内部波の時間波形と酷似しており、 $\Psi$ が増加しても予想された以上に周期成分が存在するようだ。濃度変動の振幅についても、(c)は(a)の3倍にもなっている。そこで、水質混合の目安として濃度変動の分散 $\sigma$ を採用し、観測資料中の最大値

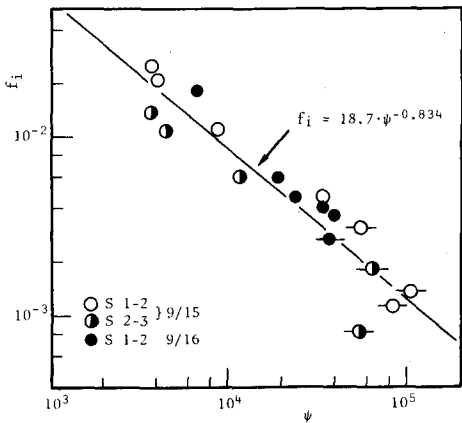


図-8 界面抵抗係数と $\Psi$

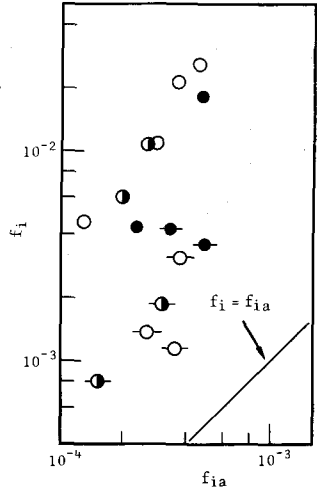


図-9  $f_i$ と $f_{ia}$

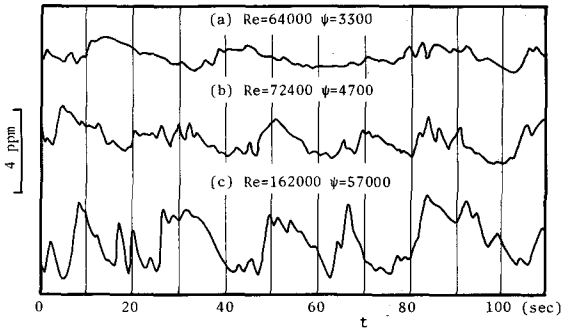


図-10 塩分濃度の時間波形

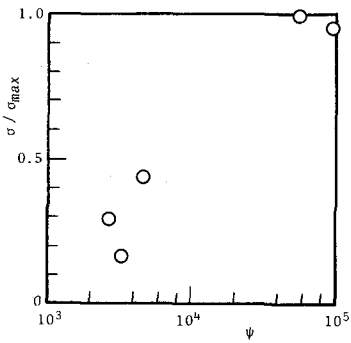


図-11  $\sigma/\sigma_{max}$ と $\Psi$

$\sigma_{\max}$ で無次元化して $\Psi$ との関係を調べたのが図-11である。資料数は少ないが、 $\sigma/\sigma_{\max}$ は $\Psi$ とともに増加し、退潮時( $\Psi > 30,000$ )には入潮時と比較して混合が活発に行われていることを示唆している。

つぎに、FFT法による濃度変動スペクトル $P_c$ を図-12に示す。データ数は1024個、サンプリング間隔は10Hzで、用いた資料は図-11の(b)と(c)である。両者とも、低周波側に周期にして20.8秒の、高周波側では2~6秒の卓越成分が見られる。この低周波成分について、同時刻に計測した下層中でのスペクトルにも同じ周波数帯に卓越成分が存在し、おそらくは内部波によるものであろう。そこで、低周波成分に相当する内部波の波長を上層流動、下層静止とした二層界面波モデルから求めると表-3のようである。波高についても概略値ではあるが、濃度変動の振幅を界面での濃度勾配で除して推定し、波形勾配として表-3に併記している。周期は20.8秒と長いのに比べ波長が短いのは、瀬沼川での上下層の相対密度差が一般の感潮河川の1/10となっているためであり、瀬沼川で卓越する内部波は水深規模であることが分かる。他方、高周波成分は二層界面波モデルでは全て不安定領域に入り、波動というよりはむしろ主流に移流された塩水塊と理解される。この成分は著者の一人が行った実験での internal ripple<sup>1)</sup>に対応するものと考えられ、今後、混合量との関連について調べて行きたい。

#### 4. 結 語

本研究は瀬沼川における塩水楔の観測資料について平均的水理量を中心に考察した。得られた知見を要約すれば以下のである。

(1) 混合速度にばらつきはあるものの、上層の平均流速と正の相関をもつ。また、入潮時の混合係数は神通川や石狩川の観測結果と同様、 $\Psi$ の増加とともに減少する。

(2) 界面抵抗係数は $\Psi$ の増加とともに減少し、従来から指摘されているように $\Psi$ の関数として(2)式で表示できる。また、同一河川でも一潮汐間に1オーダー変化する。

(3) 瀬沼川における内部波は実験室規模で観測されるのと同様、低周波成分に高周波成分が重畳した構造を有する。また、観測した範囲内で、卓越する内部波の波長は瀬沼川の水深規模である。

本研究は文部省科学研究費・試験研究(代表者・大阪大学教授 室田 明)の助成を得、また同研究グループのメンバーの方々から貴重な御意見を頂いた。記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 室田 明・平田健正：土木学会第22回水理講演会論文集，1978.
- 2) 吉田静男：土木学会論文報告集，vol. 278, 1978.
- 3) Otsubo, K. and H. Fukushima: IAHR, 8th Congress, 1959.
- 4) 中村 宏・稲松敏夫：土木学会第13回海岸工学講演集，1966.
- 5) 玉井信行・浅枝 隆：土木学会論文報告集，vol. 271, 1978.
- 6) 日野幹雄：土木学会第23回水理講演会論文集，1979.
- 7) 岩崎敏夫・岸田州生・柴田信重：土木学会第17回年次学術講演会講演概要集，1962.

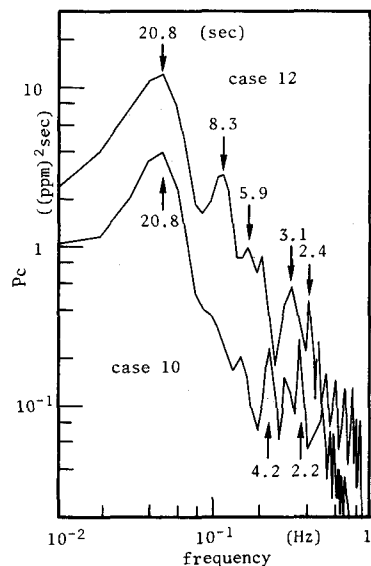


図-12 濃度変動スペクトル

表-3 内部波の特性

| Case | Wave Period (sec) | Wave Length (m) | Wave Slope |
|------|-------------------|-----------------|------------|
| 10   | 20.8              | 1.12            | 0.107      |
| 12   | 20.8              | 1.80            | 0.101      |