

都市河川感潮部の水質と物質輸送の現地観測

FIELD OBSERVATIONS OF THE WATER QUALITY AND TRANSPORT OF SUBSTANCES IN URBAN TIDAL RIVER

松本治彦¹・坂本淳一²・天野卓三²・隈崎博一³・羽田野袈裟義⁴

Haruhiko MATSUMOTO, Junichi SAKAMOTO, Takuzou AMANO, Hirokazu KUMASAKI and Kesayoshi HADANO

¹正会員 工博 宇部短期大学教授 環境衛生学科 (〒755 宇部市文京町5-40)

²学生会員 山口大学大学院 工学研究科 (〒755 宇部市常盤台2557)

³正会員 鹿児島県庁 (〒892 鹿児島市山下町11-1)

⁴正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

This paper reports the results of field observation of the water quality and the flux of salinity, flow velocity and water level which was planned in order to understand the process of substances transport which occurs in the tidal river under the effect of density stratifications. Distributions of salinity and velocity were observed during one tide. Change in the flux of salinity toward downstream and upstream has been given separately. Observed water depth and the depth averaged velocity have been compared with ones obtained through one dimensional unsteady analysis.

Key Words : field observation, density stratification, salinity flux, flow velocity, substance transport, tidal river

1. はじめに

河川感潮部の流れや水質は、潮汐と密度の影響を受けて複雑に変動する。特に、固有流量の少ない都市河川では、この影響を受けて水質は時間的に大きく変動する。また、河川感潮部は流域からの雨水流出や生活排水等が集中するエリアであり、汚濁物質の堆積しやすい領域でもある。さらにこの領域は、それ自身が浄化の対象であるとともに、海域への汚濁物質の流れを制御し、海域の環境に大きな影響を与える領域である。したがって、河川感潮部で水質変動、底泥の挙動について把握することは、浄化対策を考えるうえで重要である。

河川感潮部の流れは、塩分分布の状態から弱混合、緩混合、強混合に大別されるが、同一の河川でもこれらが潮汐により、また同一の潮汐でも潮時により、別の混合形態が発生し、これら3形態を統一的に取り扱えるモデルはまだ提案されていない。このような状況では、現地観測により浄化対策に結びつくデータを収集することが不可欠である。河川感潮部の観測例として、河原らによる旭川^{1), 2)}、二渡らによる六角川³⁾などがあるが、固有流量の少ない都市河川感潮部を取り上げているのは、土屋らによる都

内河川感潮部^{4), 5)}など数例にすぎない。

本研究では、都市河川感潮部で現地観測を実施し、一潮汐間の水質の時間・空間的変動や分布特性、混合形態について検討した。また、現地調査から得られた水理量を用いて一次元非定常流計算の問題点を検討した。

2. 調査の概要

調査は宇部市(人口17万人)の中央部を流下する真締川(流路延長約7 km)の下流部約1.3 kmの感潮区間で行った。図-1に示すように、この感潮区間の4地点で一潮汐間の水質調査を行った。調査は1995年の7月27日(第1回;大潮)、8月22日から23日(第2回;中潮)、10月17日から18日(第3回;小潮)、1996年の7月31日(第4回;大潮)、10月19日(第5回;小潮)および12月25日(第6回;大潮)の計6回行った。第1回から第5回までの調査では、この感潮部で1時間毎に採水を行った。採水は表面はバケツ、水面下0.5m, 1.0m, 2.0mおよび3.0mではハイロート型採水器で行った。分析項目は濁度(積分球式濁度計)、CODMn(過マンガン酸カリウムによる酸素消費量)および塩化物イ

オン（モール法）の3項目である。また、第5回の調査では、上記項目に加えて、最も河口よりのStn.1で2時間毎に流速の横断面分布を測定した。測定は川幅方向に5地点で水深方向に表層から0.5m毎に底層まで行った。第6回の調査では、Stn.1で1時間毎に流速、塩分および濁度の横断面分布を測定した。なお、濁度は濁度計（赤外後方散乱方式；PT-1）、塩分はサリノメーター（E. I. L. ;MC5/2型）、流速は電磁流向流速計（ACM210-D）を使用した。各調査日の潮時および潮位の概要を表-1に示す。

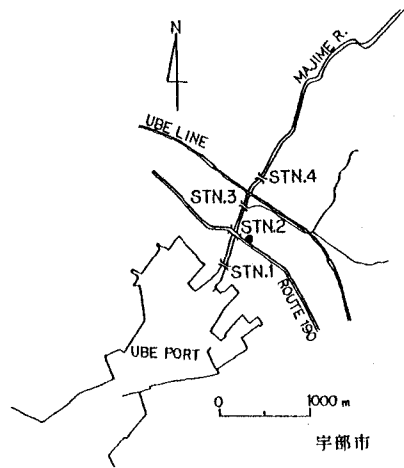


図-1 調査地点

表-1 調査日の概要

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回
調査日	1995. 7. 27	1995. 8. 22	1995. 10. 17	1996. 7. 31	1996. 10. 19	1996. 12. 25
調査時間	8:30-22:30	19:00-8:00	15:00-3:00	9:00-22:00	13:00-0:00	9:00-21:00
	大潮	中潮	小潮	大潮	小潮	大潮
満潮	8:30 341cm	19:21 329cm	15:10 278cm	9:05 390cm	13:42 319cm	9:27 351cm
干潮	14:58 58cm	1:24 173cm	21:30 189cm	15:36 16cm	19:55 170cm	15:30 102cm
満潮	21:52 379cm	7:02 308cm	3:04 240cm	22:01 420cm	1:24 282cm	21:07 319cm

3. 調査結果と考察

(1) 水理学的な感潮部の分類

(a) 塩化物イオン分布

図-2の各地点における塩化物イオンの鉛直分布の経時変化より、混合型について検討する。第1回の塩化物イオン分布をみると、Stn. 2, 3および4では干潮時を除いて常に鉛直方向に濃度勾配があり、感潮河川の分類としては緩混合型に近い。一方、河口部のStn. 1では満潮時には全層で15‰前後の一定した値であり、この時期には強混合型に近い。第2回の分布をみると、第1回と同様にStn. 2, 3および4

では緩混合型、Stn. 1では満潮時に強混合、それ以外の潮時では緩混合型となっている。第3回の分布をみると、Stn. 1では満潮時に強混合、その他の潮時では緩混合型、Stn. 2, 3, 4では緩混合型から弱混合型となっている。

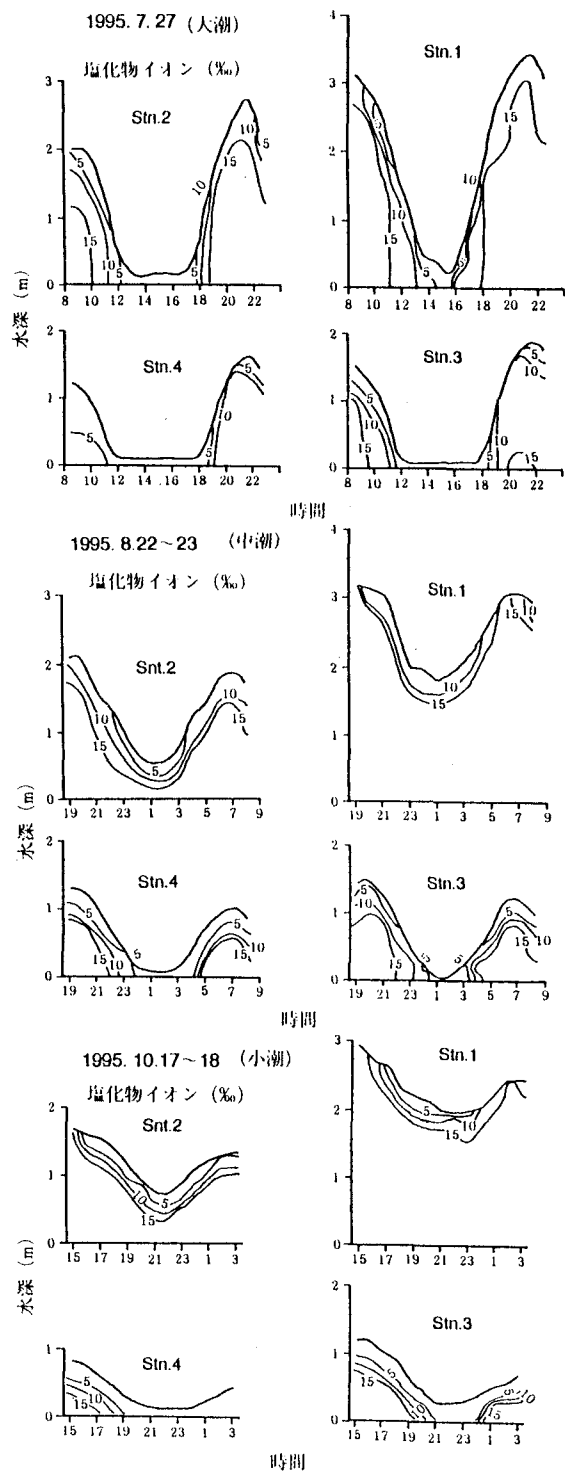


図-2 塩化物イオンの鉛直分布の経時変化

次に図-3に第4回と5回の調査結果より塩化物イオンの縦断面分布を示す。この図をみると、大潮期の第4回では強混合型から緩混合型、小潮期の第

5回では緩混合型から弱混合型であることがわかる。

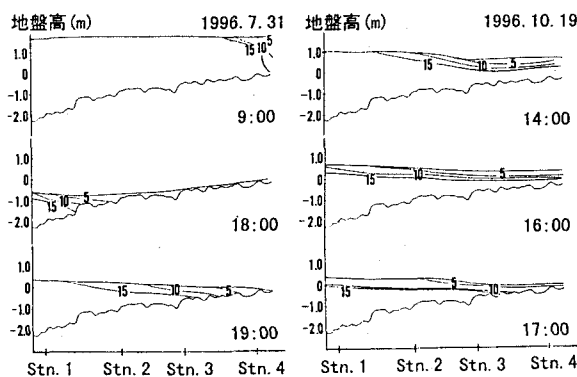


図-3 塩化物イオンの縦断面分布

(b) 須賀の区分法⁶⁾

このように塩化物イオンの鉛直分布から判断すると、真締川感潮部の混合形態は潮差の大小、潮時の違いによって各地点で3つの形態をとり、一概に1つの型を定義できないことがわかる。そこで、須賀の区分法に従って各地点の1時間毎の塩化物イオンから各々に $D = (\text{水面の値}) / (\text{底付近の値})$ を計算し、その結果を図-4に示す。ここで、 $D \leq 0.1$ のときは弱混合、 $0.1 < D < 0.5$ のときは緩混合、 $D \geq 0.5$ のときは強混合型となる。図をみると、第1回では Stn. 1, 2 で50%近くが強混合となり、残りの50%が緩混合型、Stn. 3, 4では70%が緩混合型となる。第2回では、Stn. 1の70%が緩混合型、Stn. 2, 3の80~90%が緩混合型、Stn. 4では強混合、緩混合、弱混合の3形態が現われている。第3回では、Stn. 1の50%が緩混合、残りの50%が強混合、Stn. 2, 3では80~90%が緩混合、最上流のStn. 4では弱混合に近い値となっている。以上の結果から、真締川の感潮部の水理学的分類は平均化すると緩混合型に近い。

真締川は固有流量が $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ と極めて少ないが、このような都市河川の観測例としては土屋ら⁴⁾ による目黒川感潮部を上げることができる。この河川感潮部は固有流量が $0.1 \sim 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ と極めて少なく、真締川と似ている。しかし、観測結果のうち、塩化物イオンの縦断面分布をみると、大潮、小潮のどちらの場合でも、海水の塩分濃度に近く、水理学的分類は鉛直方向の濃度勾配の少ない強混合型に分類されており、緩混合型の真締川と異なっている。

(2) 濁度、COD分布と底泥の巻き上げ

図-5(a), (b)に第1回から第3回調査までの各地点の濁度、CODの鉛直分布の経時変化を示す。

第1回(大潮)の濁度分布をみると、下げ潮から干潮前後の水深の浅い時間帯に全地点で高くなっている。これは、流下方向への流速の増大による底泥の巻き上げによると考えられる。特に、Stn. 1でこの現象が最も強く、上げ潮になってもしばらくの間、巻き上げの影響が残っている。また、この巻き上げ

の規模は、後述している第2回、第3回調査時と比べて最も大きい。COD分布をみると、各地点で各潮時とも全層ではほぼ一致した分布となっている。このうち、COD濃度の高いのは、干潮時前後の時間帯で 3 mg/l から 4 mg/l である。これは、濁度分布と同じように底泥の巻き上げによると考えられる。

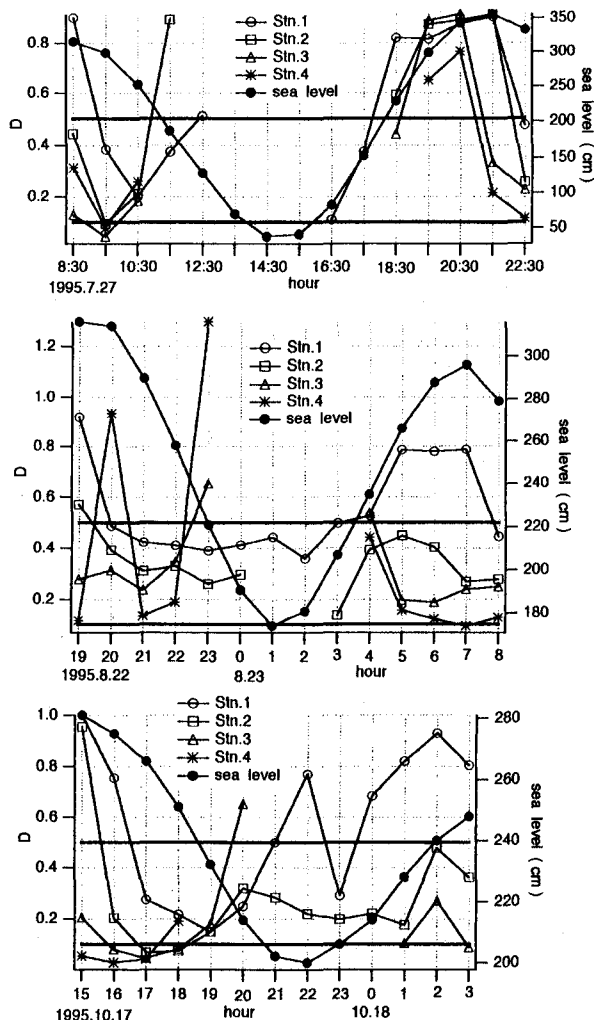


図-4 各点のD値の時間時間変動

次に第2回(中潮)の濁度分布をみると、上流では下げ潮時に表層で比較的高濃度となっている。一方、最下流のStn. 1では表層と比べて中・下層の方が高くなっており、特に上げ潮時には中層に 10 mg/l 以上の高濁度水塊が出現しており、底泥の巻き上げによる影響と考えられる。COD分布をみると、下げ潮時から上げ潮時を通じて高濃度の水が上流表層より流下しており、干潮時にはStn. 3, 4では全層にわたり 4 mg/l 以上と高い。これは、調査日前日に降った雨により汚濁物質が流入した影響と考えられる(11mmの雨量を記録)。Stn. 2では、雨の影響は小さくなっている。Stn. 1では上層と底層で干潮時付近を中心に 3 mg/l から 4 mg/l と高くなっているが、その他の潮時では 2 mg/l 台の様な分布となっている。

第3回（小潮）の濁度分布をみると、各地点とも下げ潮時に表層で10mg/l以上の高濃度となっているが、干潮から上げ潮時にかけては5 mg/l前後と低下している。このように下げ潮の一時期に濁度が高いのは、上述したように調査日前日の小雨による影響が考えられる（0.5mm未満の雨量）。また、Stn.1では干潮時直前に底層で10mg/l以上の高濃度となり、底泥の巻き上げによる影響が表れているが、その他の潮時ではほとんど5mg/l以下と低い。

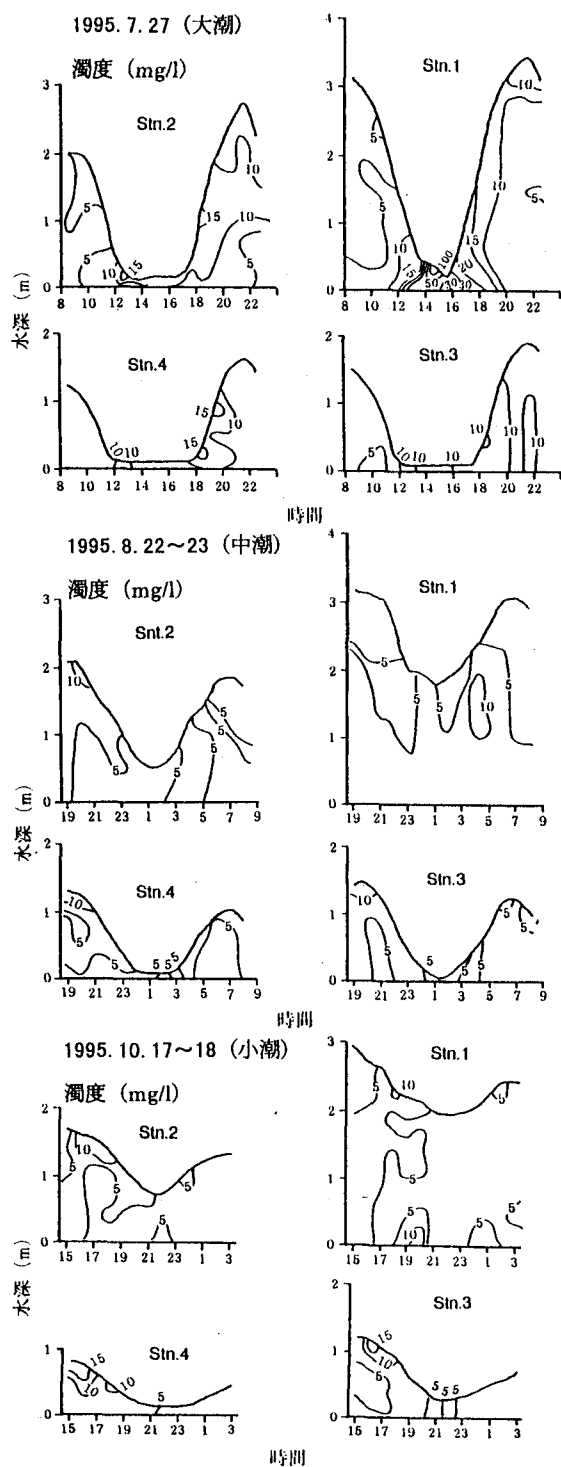


図-5(a) 濁度の鉛直分布の経時変化

COD分布をみると、各地点の表層では濁度が高濃度となっている時間帯に3 mg/l以上と高い。最上流部では、上げ潮時にも表層で3 mg/l以上と高くなっているが、その他の地点では1~2 mg/l程度と低い。なお、干潮時直前に濁度が高濃度であったStn.1の底層でも、COD濃度は2 mg/l以下と低い。

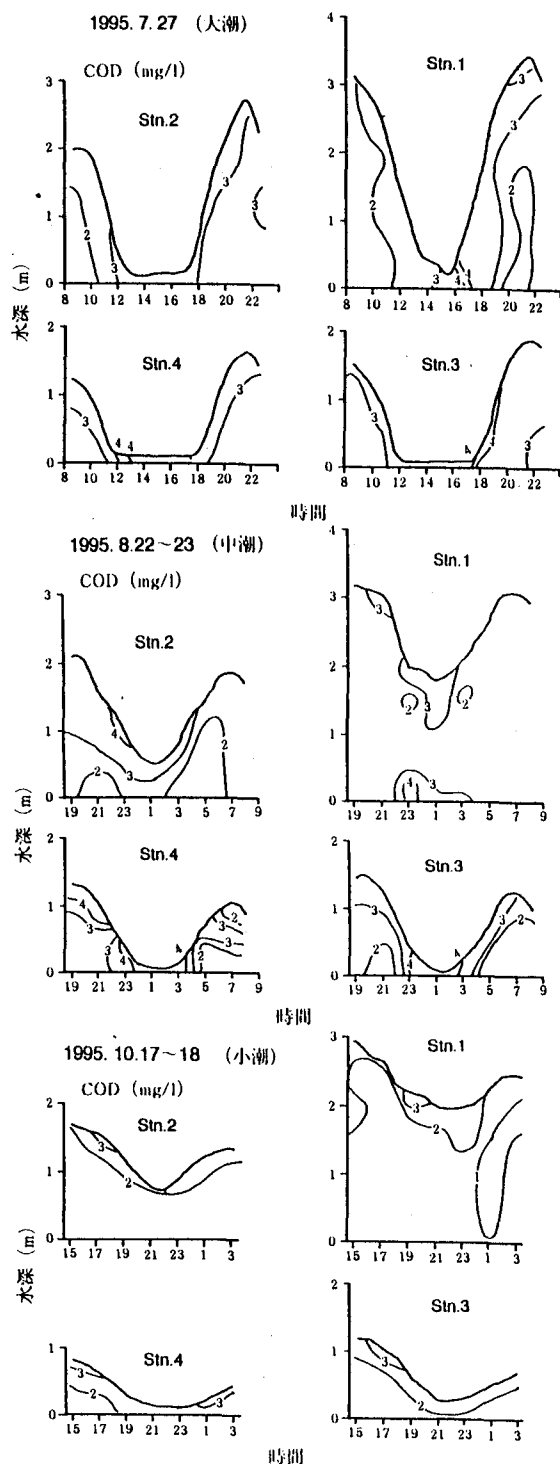


図-5(b) CODの鉛直分布の経時変化

(3) 塩分フラックス

図-6は第5回、6回調査時のStn.1における塩

分フラックスの時間変動⁷⁾を示している。図中の●は断面全体の塩分フラックス (All), □は順流方向の塩分フラックス (Plus), ■は逆流方向の塩分フラックス (Minus) を表わしている。第5回調査 (小潮) の塩分フラックスは, 流速 (図-9の実測値を参照) が最大となる満潮より3時間後の17時に最大となっている。塩分フラックスの時間変動をみると, 調査した時間帯のほとんどで順流方向と逆流方向のフラックスが常に存在しており, 溶解性物質の移動が複雑であることがわかる。

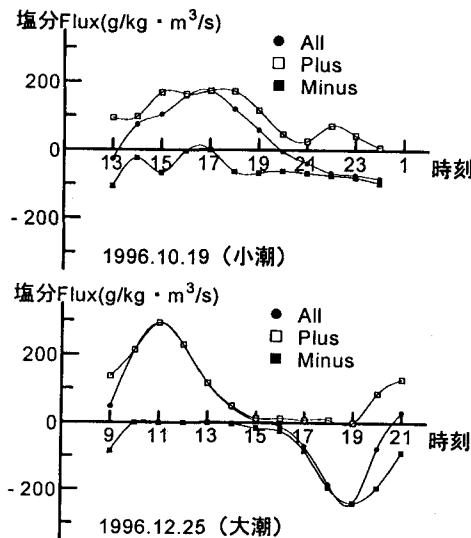


図-6 塩分フラックスの時間変動

一方, 第6回調査 (大潮) の塩分フラックスをみると, 流速が満潮後約3時間で最大となるが, 塩分フラックスは満潮後約2時間で最大となっている。両者の最大値が発生する時刻が異なるのは, 次のように説明される。満潮時前後は塩分分布は余り変化がないから, 塩分フラックスの最大値は断面平均流速と水深の積が最大となる時刻と考えてよい。下げ潮時には満潮後の経過時間が短い程水深は大きいから, 塩分フラックスが最大になる時刻は流速最大の時刻から満潮時よりにシフトする。大潮時にはこの効果が出ている。また, 干潮後約3時間で流速は逆流方向に最大となっているが, 塩分フラックスは干潮後約4時間で逆流方向に最大となっている。この現象も上述と同様に考えればよい。なお, 大潮では塩分フラックスの時間変動をみると, 第5回調査と異なり, 測定した13回のうち, 順流, 逆流の両方向で塩分フラックスがみられたのは, わずか3時刻であり, ほとんどの時刻では, 順流あるいは逆流かのどちらか一方しかみられない。これは, Stn.1では大潮の時期に流速は横断面および鉛直方向でほとんど一様な方向に流れているからである。

図-7の第6回調査時の濁度フラックスの時間変動をみると, 上述した大潮時の塩分フラックスの変動と全く同様な傾向を示している。

(4) 不定流計算の検討

現地観測では測定しうる物理量が限られるので, 水理計算から推定した量を用いることができれば大変便利である。ここではその可能性をさぐる意味で不定流計算を感潮域に適用することを試みた。

開水路流れのうち, 長方形水路を考えると基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = i - i_f \quad (2)$$

ここで, i は流路床勾配, v は断面平均流速, h は水深, g は重力加速度, i_f は摩擦勾配である。Massauの方法により⁸⁾, 特性曲線式が得られる。

$$\omega_+ : \frac{dx}{dt} = v + c \text{ 上で } \frac{d}{dt}(v + 2c) = g(i - i_f) \quad (3)$$

$$\omega_- : \frac{dx}{dt} = v - c \text{ 上で } \frac{d}{dt}(v - 2c) = g(i - i_f) \quad (4)$$

ここで, $c = (gh)^{1/2}$ である。以上の式を用いて非定常流の計算を行った。境界条件は上流端で流量 Q (真締川の固有流量 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$), 下流端で水深 h (宇部港の潮位変化より算出) を与えた。さらに, 表-2の初期条件を与えて第5回, 6回調査の水深, 流速の時間変動について計算を行った。図-8はStn.1における水深の時間変動, そして図-9は同地点における流速の時間変動を示す。なお, この非定常流の計算では, 密度成層の効果を考慮せず, 密度一定としている。

表-2 初期条件

項目	第5回	第6回
距離軸のメッシュ数	64	68
距離軸の差分間隔 (m)	40	40
時間軸のメッシュ数	50400	46800
時間軸の差分間隔 (s)	1	1
流量 (m^3/s)	0.2	0.2
河川幅 (m)	40	40
単位幅流量 (m^3/s)	0.005	0.005
河床勾配	0.00119	0.00119
Manningの粗度係数	0.03	0.03
中立水深 (m)	2.435	2.100
潮汐の振幅 (m)	0.615	1.150
潮汐の周期 (s)	46920	45000
等流水深 (m)	0.0383	0.0383
限界水深 (m)	0.0137	0.0137

図-8の水深の時間変動をみると, 小潮 (第5

回) 期では18時と22時を除くと、実測値と計算値はほぼ一致している。また、大潮期(第6回)では、実測値と計算とはよく一致しており、特性曲線法による非定常流計算は感潮部の水面形を推定することができる。

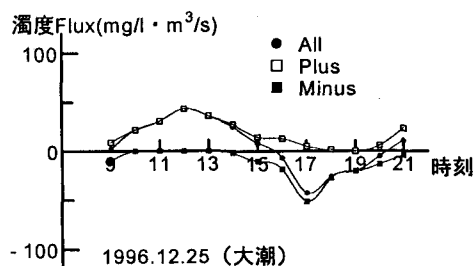


図-7 濁度フラックスの時間変動

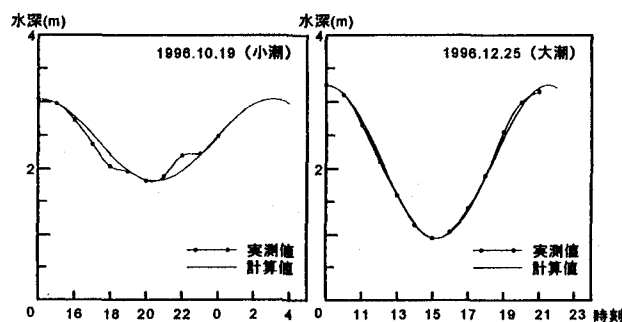


図-8 水深の時間変動

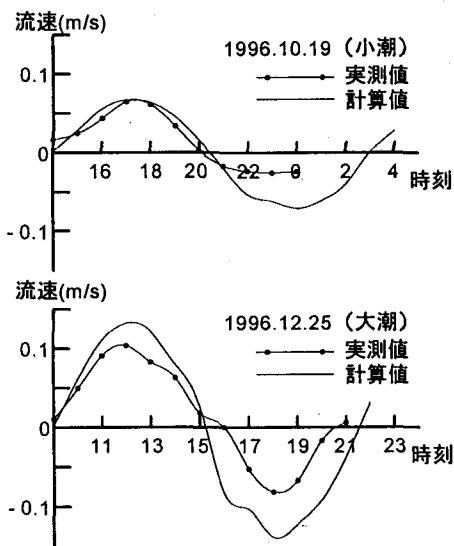


図-9 流速の時間変動

図-9の流速の時間変動をみると、計算値と実測値に位相差はほとんどないが、流速の絶対値は計算値が実測値より過大となっている。特に、逆流時(上げ潮時)にその誤差が大きい。さらに、大潮期では順流時(下げ潮時)にも比較的大きな誤差となっている。このような流速の過大評価の原因とし

ては、不定流計算で密度成層による流速分布の効果を考慮していないことがあげられる。また、河床勾配、川幅に平均的な一定値を用いていることも影響していると考えられる。

4. まとめ

固有流量の少ない都市河川の1つである真締川感潮部で現地観測を行った結果、次のようなことがわかった。

- 1) 真締川感潮部は、固有流量が $0.2\text{m}^3/\text{s}$ と極めて少なく、潮差は大潮で3~4m程度と大きい、混合形態は塩分分布より緩混合型に近い。
- 2) 大潮および中潮では、下げ潮から干潮前後の水深の浅い時間帯に、底泥の巻き上げによる影響が表れており、最下流では、上げ潮になっても、その影響が残っている。
- 3) 塩分フラックスの最大と流速の最大となる時間とが異なる場合がある。
- 4) 密度成層効果を見逃した非定常流計算(密度一定)は、感潮部の水面形を与えるのに利用できるが、断面平均流速を推定することができない。

「謝辞」

本研究の現地調査を行うにあたり、山口大学工学部社会建設工学科および宇部短期大学環境衛生学科の学生諸氏に多大な助力を頂いた。記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 河原長美, 名合宏之: 旭川感潮部および児島湾における表面水質と鉛直平均水質の特徴, 水質汚濁研究, Vol. 6, No. 3, pp. 135-144, 1983.
- 2) 河原長美, 名合宏之: 旭川感潮部における表面水質の統計的性質, 水質汚濁研究, Vol. 7, No. 4, pp. 232-238, 1984.
- 3) 二渡了, 楠田哲也, 大石京子: 強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性, 土木学会論文集, No. 452/II-20, pp. 71-79, 1992.
- 4) 土屋十圓, 和泉清: 目黒川感潮部における水質変動と底泥堆積物の挙動, 第33回水理講演会論文集, pp. 637-642, 1989.
- 5) 土屋十圓, 和泉清: 都市河川の感潮域における水質と汚濁堆積物の挙動, 水工学論文集, Vol. 35, pp. 573-578, 1991.
- 6) 須賀堯三: 河川工学, 朝倉書店, 1985.
- 7) Fischer, H. B., Imberger, J., List, E. J., Koh, R. C. Y. and Brooks, N. H.: Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, p.17, 1979.
- 8) たとえば, 椿東一郎: 水理学II, 森北出版, 1974.

(1997. 9. 30受付)