

土木研究所資料

超音波ドップラー流速プロファイラー の河川流量観測への応用に関する 研究報告書

平成12年3月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

超音波ドップラー流速プロファイラー の河川流量観測への応用に関する 研究報告書

水文研究室	室長	金木 誠
	前室長	寺川 陽*
	主任研究員	吉谷 純一
	研究員	松浦 達郎

要旨

回転式流速計や浮子といった従来型の流速計は、取り扱いが簡単で誰にでも使用でき、観測データも比較的安定して取れるという利点がある一方で、その観測精度に問題がある場合も少なくない。近年開発された新しい観測機器のうち ADCP は極めて短時間のうちに水深方向の 3 次元流速分布を観測できるという従来型流速計には無い特長等を持っている。

本報告書は、超音波ドップラー流速プロファイラー（ADCP）を河川流量観測へ応用するために行った各種調査、検討、実験及び観測結果についてとりまとめたものである。本報告書では、最初に ADCP の測定原理を解説し、さらに、ADCP を用いた流量観測システムの開発、河川横断面内流速分布可視化ツールの開発、利根川・阿賀野川での現地観測実験とその精度検討結果についてとりまとめた。

キーワード：ADCP、流量観測、TRANSECT、3次元流速分布の可視化、ラジコンボート

* 現 建設省中部地方建設局中部技術事務所 所長

まえがき

河川流量を測る方法としては、一般にある時点の断面積と流速を測定し両者の積として流量を求める方法がとられる。したがって精度の良い流量データを得るためには、流速及び断面積の観測精度をそれぞれ上げることが必要である。このうち、河川の流速を測定する方法として、従来は、低水時の回転式流速計による方法と洪水時の浮子による方法の2種類が主に用いられてきた。これらの方法は、取り扱いが簡単で誰にでも使用でき、観測データも比較的安定して取れるという利点を持っていることから、長年主たる流量観測手法として利用されてきた。それと同時に基本的にこれらの手法は、ポイントあるいは測線上での計測しかできず、実際の観測では、河道断面内のいくつかの代表点における流速値を使用して流量を算出するため、観測時の河川の状況によっては観測精度が必ずしも良くないという問題点を有している。

一方、近年の様々な技術進歩により、ADCP(超音波ドップラー流速プロファイラー)や電波流速計、水圧式水深流速計、ビデオ画像解析による方法といった、各種の新しい流量観測技術が開発されてきている。

このうちADCPは、水中で超音波を発射し、水流とともに動くゴミやプランクトン等の微少な散乱体から反射されるドップラーシフト量(ドップラー効果による周波数の変化量)を測ることにより、流速の鉛直分布を計測できる観測機器である。従来型の流速計との大きな違いは、従来型流速計が基本的に単独で流速分布の観測ができないのに比べ、ADCPは、1台で水深方向の流速分布を同時に計測できる点にある。船舶等にADCPを搭載し、河川を横断させながら計測を行えば、横断面内の流速分布及び流量を短時間で計測することが可能である。

米国における水文観測実務を担当しているUSGS(米国内務省地質調査所)では、流量観測技術の向上に向けた取り組みの一環として、ADCPの導入を試験的に進めてきており、いくつかの観測所においては、既に従来からのボートと流速計を用いた手法の代わりにADCPを用いた観測を採用している。

さて、平成3年度よりスタートした土木研究所とUSGSとの日米水文水資源に関する研究協力のテーマの一つとして、水文観測技術が取り上げられ、その中でADCPの適用性評価について技術情報の交換を行うこととなった。

本報告書は、日本の河川におけるADCPの適用性を評価する目的で、平成6年～10年の4年間にわたって実施してきた、ADCPを用いた流量観測システムの開発、現地での適用性検討実験及びデータ処理システムの開発等の成果についてとりまとめたものである。

なお、本研究を実施するにあたって、USGS水文観測技術事務所長(当時)のラトコビッチ氏には、米国におけるADCP技術の現状やUSGSでの取り組みなどについて貴重な情報を提供していただいた。また、木下良作博士にはADCPを搭載するためのラジコンボートの製作や現地観測において、多大なご協力・ご指導をいただいた。建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所、同関東地方建設局利根川下流工事事務所には、それぞれ阿賀野川、利根川に関する各種の資料やデータの提供をしていただいただけでなく、各種の実験や観測を行う際にも、多大なる便宜を図っていただいた。さらに阿賀野川における観測の際には、北斗測量調査株式会社、株式会社エス・イー・エイの関係諸氏に様々なご協力を頂いた。ここに記して敬意を表したい。

平成12年3月

水文研究室長

金木 誠

超音波ドップラー流速プロファイラー（ADCP）の 河川流量観測への応用に関する研究報告書

まえがき

第1章 総論	1
1.1 研究の経緯	1
1.2 ADCP の計測原理	1
1.3 TRANSECT	6
1.3.1 TRANSECT による流量算出方法の概要	6
1.3.2 TRANSECT による各層の大きさの算出	6
1.3.3 TRANSECT による中層流量の算出	7
1.3.4 TRANSECT による表層及び河床付近の流量算出方法	9
1.3.5 岸付近の流量算出方法	10
第2章 利根川における ADCP 特性調査	13
2.1 調査の目的及び方法	13
2.1.1 河川横断観測	13
2.1.2 観測モード毎の比較	13
2.1.3 観測環境の違いによる影響	14
2.2 流量観測結果	18
2.2.1 ADCP による流量算出方法	18
2.2.2 ADCP による流量観測結果	18
2.2.3 他の観測手法による流量観測結果	22
2.2.4 他の観測手法及び各観測モード毎による流量観測結果との比較	29
2.2.5 航路の違いによる流量観測結果への影響	29
2.3 流速観測結果	32
2.3.1 3D-ACM による定点流速観測結果	32
2.3.2 ADCP による横断流速観測結果	35
2.4 濁度観測結果	48
2.4.1 河川水中の濁度が ADCP による流量観測に与える影響	48
2.4.2 濁度計による河川横断観測結果	48
2.4.3 ADCP によって観測された音強度分布	48
2.4.4 濁度と音強度との関係の把握	48

2. 5	まとめ	49
第3章	ADCPを用いた流量観測システムの開発	68
3. 1	河川流量観測機器としての ADCP の特徴	68
3. 2	河川用 ADCP の仕様	68
3. 2. 1	流速測定項目	68
3. 2. 2	対地速度項目	69
3. 3	ADCP 搭載用ラジコンボートの開発	70
第4章	河川横断内流速分布可視化ツールの開発	71
4. 1	AVS とは？	71
4. 1. 1	AVS の概要	71
4. 1. 2	モジュールを用いた可視化作業	71
4. 1. 3	ビジュアルプログラミングの採用	72
4. 2	AVS を利用した ADCP 可視化ツールの作成	72
第5章	阿賀野川における現地実験及び流量観測	75
5. 1	阿賀野川の概要及び観測地点付近の状況	75
5. 2	Type I による融雪出水時の流量観測	75
5. 2. 1	観測の目的と方法	75
5. 2. 2	観測結果	75
5. 2. 3	流量観測精度の評価	78
5. 2. 4	本観測における Type I の操作性及び安定性について	78
5. 3	ADCP 無線制御装置の開発	79
5. 4	Type II を用いた低水量観測実験	80
5. 4. 1	実験の目的と方法	80
5. 4. 2	実験結果	80
5. 4. 3	流量観測精度の評価	80
5. 5	Type II と浮子による同時流量観測	83
5. 5. 1	観測の目的と方法	83
5. 5. 2	観測結果	83
5. 5. 3	Type II と浮子による各流量観測結果の比較	83
5. 6	まとめ	83
	参考文献	89

第1章 総論

1.1 研究の経緯

ADCPとは、Acoustic Doppler Current Profiler(超音波ドップラー流速プロファイラー)の略称で、その名が示すとおり、超音波のドップラー効果を利用した流速計である。もともと船舶や潜水艦の速度計として開発され、近年の情報処理技術の向上に伴い、水中の流れについても計測可能となったものである。まず1970年代半ばに海洋学の分野において海流の計測用として使用され始めた。以降改良が重ねられ、1990年代に入って河川でも適用可能な機種が開発された。

一方、河川における流量観測では、通常、河川流速を測定し、それと流水断面積との積から流量を算出する方法をとっている。河川流速を測定する方法としては、低水時にはプライス流速計に代表される回転式流速計や電磁流速計による方法が、洪水時には浮子による方法が広く用いられている。

回転式流速計や電磁流速計は比較的使いやすく、動作も安定しているが、各機器毎に性質が異なり、さらに時間の経過とともにそれが変化するため、定期的に検定を受ける必要がある。また、一般的にこれらの流速計は流向を測定することができないため、感潮区間や堰の背水区間等のように逆流が発生する場所での観測には不向きである。

浮子による方法は、安価で簡便であり、手早く観測できるという利点を持っているが、渦や死水域の影響を受けやすく、真っ直ぐに流れないことが多く、その結果観測精度に問題がある場合が少なくない。

また、いずれの方法も観測精度を上げるためには、同時に多数の測線について観測しなければならない。しかしそれは、著しい時間と労力の増大を意味しており、事実上困難である。

ADCPはこれら従来の方法と比較すると、極めて短時間のうちに多点の観測を行うことができる。しかもADCPは3次元の流向・流速分布を測定できるため、逆流が発生するような区間でも適用することが可能である。

そこで本研究では、日本の河川におけるADCPを用いた流量観測の可能性について調査・検討を行い、ADCPを用いた流量観測システムの開発を行った。以下に、本研究に関連して得られた成果を記述し、今後の研究の参考に供したい。

なお本研究は、主として実用性のある流量観測システムの開発という点に主眼を置いたため、理論的な考察については今後待つ課題も多い。これらの点については、今後とも研究を進める予定である。

1.2 ADCPの計測原理

ADCPは、超音波のドップラー効果を利用して流速を測定する。ドップラー効果とは、音源が移動するとき、その移動速度に応じて観測される音波の周波数が変化する現象のことである。例えば、救急車のサイレンの音が、近づいてくるときには高く、逆に遠ざかるときには低く聞こえるのは、このドップラー効果のためである。

ADCPは水中に向けて超音波を発信し、水中の散乱体からの反射を受信する。ここで言う散乱体とは、河川とともに流れている超音波を反射する物質のことで、水中に浮遊するプランクトン、浮遊砂、ゴミ等である。ADCPはこの反

射波のドップラーシフト量を求め、流向・流速分布を算出することができる。

図1. 1に示すように、鉛直方向に対して θ だけ傾いたZ方向へ周波数 f_0 の超音波パルスを発信する1対のトランスデューサ(送受信機) T_1, T_2 を考える。水中の散乱体 S_1, S_2 は紙面に沿った平面内を同じ速度 u, w で動いているものと仮定する。ここで u, w はそれぞれ水平、鉛直方向の流速成分である。 T_1 から発信された超音波は、 S_1 で反射されて T_1 に戻ってくる。この反射波は S_1 のビーム軸方向速度成分 V_1 に応じたドップラー効果によって周波数が変化する。ドップラー効果を簡単に説明すると、音源(散乱体からの反射波)とセンサー(トランスデューサ)が相対的に近づきつつあるときは、相対的運動がないときよりも音源の周波数が高く感知され、逆に遠ざかりつつあるときは音源の周波数が低く感知される現象のことである。

これらの関係を式で表すと、センサーが静止し、音源がセンサーに近づきつつあるときは、

$$f=f_0 \frac{c}{c-v} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 1)}$$

となる。

またこれが遠ざかりつつあるときは、

$$f=f_0 \frac{c}{c+v} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 2)}$$

となる。

次に音源が静止し、センサーが遠ざかりつつあるときは、

$$f=f_0 \frac{c-v}{c} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 3)}$$

となる。

また、これが近づきつつあるときには、

$$f=f_0 \frac{c+v}{c} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 4)}$$

となる。ここで、 c :音速、 v :センサーまたは音源の移動速度、 f_0 :音源の発信周波数 をそれぞれ表している。

いま、河川の流れと一緒に v という流速で進行する散乱体があるとすると、トランスデューサ T_1 から周波数 f_0 の超音波を発信すると、受信周波数 f_1 は、

$$f_1 = \frac{c+v}{c-v} f_0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 5)}$$

となり、これが徐々に遠ざかる場合は v の符号を変えればよい。

ここでドップラーシフト周波数 f_0 は、

$$f_b = f_1 - f_0 = \frac{2v}{c-v} f_0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.6)}$$

で表される。このように式(1.6)の関係から、 f_b を測定すれば、速度 v を求めることができる。なお、ドップラーシフト周波数とは、音源からの発信周波数からずれた周波数差

$$f_b = f_1 - f_0$$

のことである。

$c > v$ より式(1.6)は次のように簡略化される。

$$f_1 = \left(1 + \frac{2v}{c}\right) f_0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.7)}$$

一方、流速成分の成分分解より

$$v = w \cos \theta + u \sin \theta \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.8)}$$

が得られる。式(1.8)を式(1.7)に代入して、

$$f_1 = f_0 \{1 + 2(w \cos \theta + u \sin \theta)/c\} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.9)}$$

となる。

トランスデューサ T_2 から発信された超音波についても同様に、散乱体 S_2 で反射して T_2 に戻ってくる反射波の周波数 f_2 は次式で与えられる。

$$f_2 = f_0 \{1 + 2(w \cos \theta - u \sin \theta)/c\} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.10)}$$

そこで f_1 と f_2 を測定することによって、 u 、 w はそれぞれ次式で求めることができる。

$$u = \frac{(f_1 - f_2)c}{4f_0 \sin \theta} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.11)}$$

$$w = \frac{(f_1 + f_2 - 2f_0)c}{4f_0 \cos \theta} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.12)}$$

トランスデューサ T_1 で得られるドップラーシフト量を f_{b1} 、 T_2 で得られるドップラーシフト量を f_{b2} とすれば次式になる。

$$u = \frac{(f_{b1} - f_{b2})c}{4f_0 \sin \theta} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.13)}$$

$$w = \frac{(f_{b1} + f_{b2})c}{4f_0 \cos \theta} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.14)}$$

これより、散乱体が河川と一緒に動いている場合には、(u, w)は河川の流速となる。ここで、u、wの導出において散乱体S₁、S₂が同じ速度で動いていると仮定していることに注意しなければならない。また、ビーム軸方向の異なる距離にある散乱体からの反射信号は、異なる時間に受信されるため、受波信号を時間区分して処理することにより流速分布を求めることができる。

なお、このような計測法では、速度変動のスケールが超音波ビームの水平距離2htan θ (h:水深)より小さい現象は計測できないことを意味している。例えば、θが20°、水深hが5mであった場合は、約3.6m範囲内の流向・流速分布が一樣であると仮定して計測しているため、これより小さい渦や内部波が存在するような場合は誤差が大きくなる。逆にこのような渦が無視できる程度であれば十分な効果が期待できる。

実際のADCPでは、互いに直交する断面内に配置した、2対(4個)のトランスデューサを使用する(図1.2)。(T₁、T₂)により流速成分(u, w₁)を、(T₃、T₄)により流速成分(v, w₂)を求める。2対のトランスデューサを使用するADCPシステムでは、w(鉛直方向の流速成分)を2回求めることができる。したがって、w₁とw₂を比較することにより流速の空間分布によって発生する計測誤差を検定することができる。このV_e=w₁-w₂を誤差流速(error velocity)と呼ぶ。

また図1.1のように、ビーム軸が傾いている場合、河床からの反射波と河床近くの散乱体からの反射波が同時にトランスデューサへ戻ってくるため、河床付近において測定不能な領域が生じる。トランスデューサから河床までの距離をH、ビームの傾きをθとすれば測定不能域H_bは次式で与えられる。

$$H_b = H(1 - \cos \theta) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1.15)}$$

したがって、測定水深の約6%が河床からの測定不能領域となる。また、トランスデューサが超音波を発信してから、受信可能な状態になるまでの時間、計測できないこと等から、表層部にも一定の測定不能域が発生する。

1. 3 TRANSECT

今回使用した米国RDインスツルメント社製ADCPには、標準ソフトウェアとして「TRANSECT」という観測データ収集・解析処理用ソフトウェアが添付されている。TRANSECTは、ADCP本体のコントロール、観測データの収集およびその解析、収集あるいは解析データの表示等、ADCP観測におけるデータに関して中心的な役割を担っている。

TRANSECT内部で扱われている処理は非常に多く、かつ複雑であるが、ここではその中でも主に流量算出と測定不能域の補間に関する部分について概説する。

1. 3. 1 TRANSECTによる流量算出方法の概要

図1. 3にTRANSECTにによる流量計算概念図を示す。

TRANSECTは、ADCPによって測定されたデータについて、各アンサンブル(ADCPのデータを構成する最小単位)毎にMidQ(中層部における流量)を計算し、計測不能域であるTopQ(表層部における流量)およびBtmQ(河床付近における流量)に関しては外挿する。そしてこれらの値を全観測横断にわたって積算し、総流量として表示する。また、TRANSECTは観測できなかった岸近辺の流量もソフトウェア上の処理によって外挿する事ができる。

ADCPは、船に対する流れの速度分布を測定する。さらにADCPは、河床に対する船の速度(対地速度)及び各ADCPビームに対して河床までの深さも測定する。流量の計算は基本的にこれらのデータの上に依存しており、ADCPの向きや船の位置を知る必要はない。また、図1. 3に示されるとおり、これらの観測が水路の片側近くから始まり、もう片方近くで終了している限り、航路は任意に取ることができる。

TRANSECTで算出される流量の不確かさは、主にランダムエラー、バイアス及び外挿流量(表層、河床付近及び岸近辺流量)による誤差に起因する。なお、流量を外挿するアルゴリズムは参考文献2)、3)から適用されている。

TRANSECTでは観測不能域の流量を外挿する方法として、CONSTANT法とPOWER法の2種類を選択できる。両方法の詳細は後述するが、CONSTANT法とは、観測不能域の流速分布を観測された流速分布から直線近似する方法で、POWER法とは、指数関数で近似する方法である。ここで、POWER法を用いる場合、流況及び河床の粗度に基づいた指数を選択することができる。

表1. 1にTRANSECTによる流量算出において使用される用語の定義を示す。なお、ここで定義されている用語は、特別な断りがない限り、ADCPが表層から河床に向いている場合を仮定している。したがって、定義中の「最初」とは「もっとも浅い」事を、「最後」とは「もっとも深い」事を意味している。

1. 3. 2 TRANSECTによる各層の大きさの算出

流量を計算する前に、表層、中層、河床付近の各層の大きさを決定しなければならない。TRANSECTは、表層部の厚さを見つけるために最初のデプスセルの中央を用いる。全水深については4ビーム水深の平均(D_{ave})を用いる。

$$D_{top} = D_{ADCP} + D_b + ((D_p + D_o + D_a)/2) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 16)}$$

TRANSECTは、超音波サイドローブからの雑音干渉の水深を決定し、水面からのトランスデューサ面の水深に加え、送信パルスの連続性に依存する厚さを加えることによって、最後のgood bin(観測された最深層)の水深を D_{ave} から計算する。

$$D_{LGMAX}=(D_{ave}+\cos \theta +D_{ADCP})-((D_p-D_o)/2) \quad \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 17)}$$

最後のgood binの位置(D_{LG})から D_{TOP} までのADCP流速(実際に観測された流速)がMidQを計算するのに用いられる。さらに底までの距離は以下により求められる。

$$D_{total}=D_{ave}+D_{ADCP} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 18)}$$

以上のことから各層の境界を以下のように定義する。

$$Z_1=D_{total}-D_{LG}-D_a/2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 19)}$$

$$Z_2=D_{total}-D_{top}+D_a/2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 20)}$$

$$Z_3=D_{total} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 21)}$$

また、各層の厚さは以下の通りとなり、これより各層の大きさが決定される。

$$\text{表層}=Z_3-Z_2 \quad \text{式(1. 22)}$$

$$\text{中層}=Z_2-Z_1 \quad \text{式(1. 23)}$$

$$\text{河床付近}=Z_1 \quad \text{式(1. 24)}$$

1. 3. 3 TRANSECTによる中層流量の算出

ADCPを用いて河川横断面内の流量を算出するためには、図1. 3のように岸から岸までの水路を横断し、各アンサンプルの流量を合計しなければならない。任意の水面を通して総流量 Q_t を決定するための一般式を式(1. 25)に示す。

$$Q_t = \int \int_s V_f \cdot n ds \quad \text{式(1. 25)}$$

ここで、ds: 差分面積、 V_f : 平均流速ベクトル、 n : 一般地点における横断路に垂直な単位ベクトル を表している。
水路を横切って動く船について、sの面積は横断路の下の垂直面によって決定される。ADCPは船の動きと流速
の両方を測定するので式(1. 25)を以下の形で再整理することができる。すなわち、

dz: 差分水深、dt: 差分時間、 V_b : 平均船速ベクトル、T: 総横断時間、d: 総水深 (D_{total})、 k : 垂直方向の単位ベクトル

と定義すると、ds、 V_f 、 n はそれぞれ以下のように定義できる。

$$ds = |V_b| dz dt \quad \text{式(1. 26)}$$

$$V_f \cdot n = |V_f| \sin(\phi) \quad \text{式(1. 27)}$$

したがって、式(1.10)は以下ようになる。

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d (V_f \times V_b) \cdot k \quad dz dt \quad \text{式(1. 28)}$$

クロス積($V_f \times V_b$)・ k を直交座標に変換すると、次式を得る。

$$(V_f \times V_b) \cdot k = F_x B_y - F_y B_x \quad \text{式(1. 29)}$$

ここで、 F_x : 平均流速ベクトルの横方向成分

F_y : 平均流速ベクトルの前方、後方成分

B_x : 平均船速ベクトルの横方向成分

B_y : 平均船速ベクトルの前方、後方成分

を表している。

TRANSECTは、式(1. 23)によって求められた層内の各binについて式(1. 25)及び連続したアンサンブル間の
時間差を用いてそのbinの流量を計算する。この各bin流量を観測全横断にわたって合計することによりMidQを算出
する。

1. 3. 4 TRANSECTによる表層及び河床付近の流量算出方法

(1) CONSTANT法

この方法は、必ずしも一般的な水理学的法則に従っているわけではない。特に速度がゼロ付近にまで減少するとされている底境界近くの河床付近において、開水路における水平方向流速の垂直分布に関して、一般に認められている水理学的理論にのっとったものではない。

この方法は、分布における最初のgood binから表層まで(TopQ)あるいは最後のgood binから河床まで(BtmQ)のクロス積を直線的に外挿する方法である。計算式を以下に示す。

$$TopQ = X_{FG} \Delta t (Z_3 - Z_2) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 30)}$$

$$BtmQ = X_{LG} \Delta t \cdot t_1 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 31)}$$

(2) POWER法

まず、開水路における鉛直方向の流速分布を以下のように定義する^{2),4)}。

$$u/u^* = 9.5(Z/Z_0)^b \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 32)}$$

ここで、Z:河床までの距離、u:河床から距離Zの地点までの速度、u*:せん断速度、Z₀:河床の粗さに支配される積分定数、b:1/6 を表している。

ADCPで観測されない項をまとめると、 $u = (9.5u^*/Z_0^b)Z^b$ となる。ここで $a' = (9.5u^*/Z_0^b)$ とすると先ほどの式は以下になる。

$$u = a' \cdot Z^b \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 33)}$$

動船による流量観測では、式(1.18)においてuを置き換えることにより、クロス積XはADCP速度から計算される。

$$X = a'' \cdot Z^b \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1. 34)}$$

各デプスセルについて、Z及びXはTRANSECTにより計算される。式(1.34)のうち未知であるa''は値に等しい指数則の逆導関数を設定することにより解く。

TRANSECTは式(1. 34)を表層及び河床付近において積分し、 Δt を乗じることにより表層及び河床付近の流量を算出する。計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
TopQ &= \Delta t \cdot a'' \int_{Z_2}^{Z_3} Z^b \cdot dz \\
&= \frac{\Delta t \cdot Da(Z_3^{b+1} - Z_2^{b+1}) \sum_{i=Z_1}^{Z_2} X_i}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(1.35)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
BtmQ &= \Delta t \cdot a'' \int_0^{Z_1} Z^b \cdot dz \\
&= \frac{\Delta t \cdot Da \cdot Z_1^{b+1} \sum_{i=Z_1}^{Z_2} X_i}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(1.36)}
\end{aligned}$$

ここで、dz:深さ方向のデプスセルの大きさ(=Da)を表している。

1.3.5 岸付近の流量算出方法

岸付近の流量を算出するために、まず比率-補間法によって最初または最後にわかった平均流速(Vm)間の流速を評価する。そして、観測エリア最後の区間と残りの水路との間に三角形のエリアを仮定することによって、この岸付近のエリアにおける流量は次式によって計算することができる。

$$Q_{side} = 0.707 V_m L \cdot d_m / 2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(1.37)}$$

ここで、d_m:観測エリア両端区間の水深、L:岸から観測エリア最後の区間までの距離を表している。

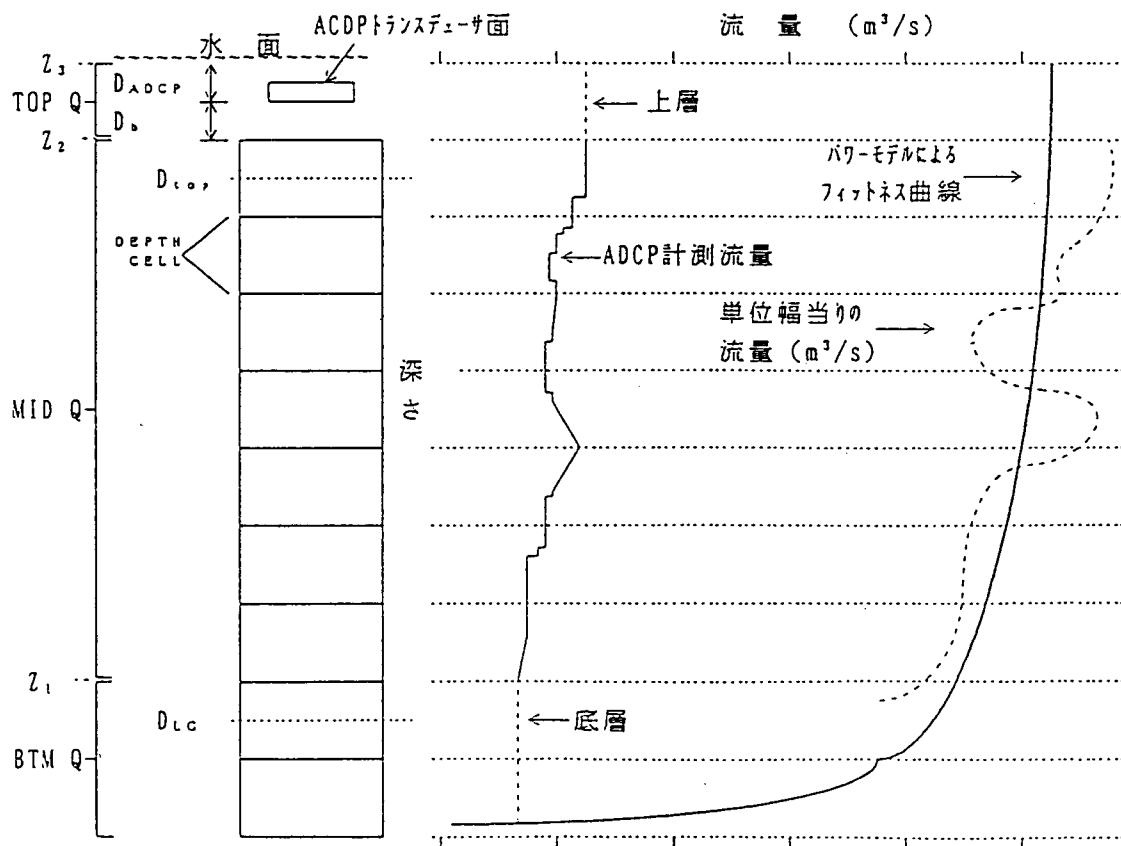
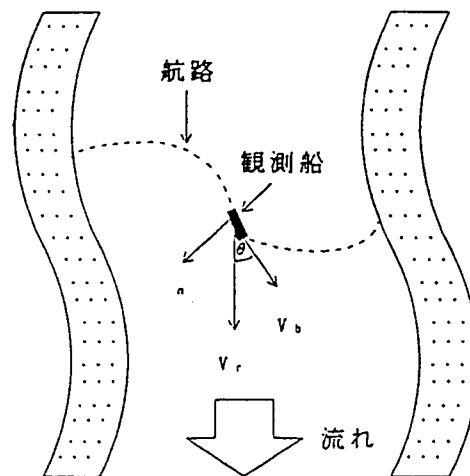


図1.3 TRANSECTによる流量計算概念図

表1.1 TRANSECTによる流量算出用語

用 語	定 義
Δt	連続したアンサンブルの間の差。
BtmQ	分布のなかの底部における測定されないデータの概算流量値。
*D _b	デプスセル (bin) の大きさ、またはrange gateの長さ。 各range gateはデプスセルに相当する。ADCPはrange gateまたはデプスセルの連続から分布を構築する。
D _{ADCP}	ADCPトランスデューサ面の水表面からの水深。
*D _g	送信間の空白。
D _{gc}	最後のgood bin (すなわち、中間水層の最後のbin) の水深。
D _{gcmax}	最後の、可能性のあるgood binの水深。
D _{bed}	底 (すなわち、水路床) までの水深。
D _{avg}	ADCPビームからの平均測定水深 (D _{ADCP} を含まない)。
*D _{del}	送信パルス間の遅れまたは相関遅れ。
*D _p	送信パルス長、D _p は単一送信パルスの長さである。BBシステムは、2つまたは、もっと多くのパルスを送信する。もし、パルスが符号化されているならば、これは、単一要素の長さではなく、1つの符号化されたパルスの総長さである。
*D _{1st}	最初の binの中央の水深。
MidQ	ADCP速度およびbottom-trackデータからの分布の中間にて計算された流量。
*N _p	送信パルスの数。
TopQ	分布のなかの最上部における測定されないデータの概算流量値。
X	ADCPデータから計算されたクロス積 (段落F - 1.2参照)。
X'	指数曲線適合から計算された総合のクロス積。

*注：これらのデータはADCPによって直接出力される。

第2章 利根川におけるADCP特性調査

2.1 調査の目的及び方法

本調査の目的は、ADCPの実河川における特性を把握し、流量観測手法としての可能性を調査することである。そこで今回は、平成6年9月6日、利根川の取手及び布川地点において以下の観測を行った。図2.1、図2.2に観測位置図を示す。なおこのときの取手地点の水深及び水面幅はそれぞれ約2m、約150m、布川地点の水深及び水面幅は約7m、約160mであった

2.1.1 河川横断観測

観測は、ADCP観測システムを船に固定し、図2.1、図2.2の各観測測線上を3往復し、合計6ケースの観測を行った。なお、観測モードは、河川域での推奨モードであるモード2を使用した。ADCPによる観測精度を上げるためには、なるべく低速かつ一定の速度で観測を行わなければならない。今回の観測では1データ当りの標準偏差を1cm/s程度にするため、船速は約0.4m/sにしなければならない。このような低速による観測は、船外機などの機械類による方法では行えないため、観測測線上にワイヤーロープを張り、そのロープを人力で伝いながら船を移動させて観測を行った。

船にはADCPの他に、ADCPが観測できない表層部の流速を測定するために、SACMと呼ばれる3次元流向流速計も取り付けた。ADCPは、1200KHzと2400KHzの2種類を使用した。

また、本観測期間中、ADCPによる流速観測の検証のため、3D-ACM(写真2.4)という、定点の3次元流向及び流速を測定できる機械を用いて、取手地点は大利根橋中央(水深0.5mと1.8m)、布川地点は栄橋中央(水深1.8mと7.0m)に設置し、定点の2水深における時系列流向・流速の測定を行った。(図2.3)

2.1.2 観測モード毎の比較

ADCPには、観測を行う流れの状況に応じた、6種類の観測モードが提供されている。この各モードによる観測結果を比較し、モード毎の観測特性を明らかにするために、各モード毎に2.1.1と同様の観測を1往復行った。

以下に各観測モード一般的な特性について示す。なお、今回比較を行ったのはモード2、4、5の3つである。

(1)モード0

ユーザが定義可能な観測モードである。ユーザによって自由に設定ができる分、ユーザはADCPについて十分な知識を有していることが求められる。通常はあまり使用されない。

(2)モード1

流れが強く、荒れた流れを計測するのに向いている。最大±10m/sの流速を計測することが可能なモードである。ただし、得られるデータの精度は、他のモードの物と比較すると悪くなる。

(3)モード2

非常に遅い流れの場を計測するのに適している。河川や湖沼で計測するのに適している。

(4)モード3

モード2をさらに精度良く計測するためのモード。ただし計測時間が掛かるため、現在では使用されることはほとんどない。

(5) モード4

速い場や遅い流速の場を連続的に観測したい場合に使用する。モードが指定されない場合、このモードが自動的に選択される。

(6) モード5

流速が遅く、水深が浅い流れの場において計測するのに適したモード。小さな湖沼等での計測に適している。流速(船速等も合わせた合成流速)が速いほど計測可能水深は浅くなる。

2. 1. 3 観測環境の違いによる影響

河川横断測線に対して、適当なS字やU字の測線を設定し、その測線上を観測することによって、航路の違いによる影響を調査する(図2. 4)。また、河川水中の濁度による観測への影響を把握するために、濁度とADCPの反射強度との関係を調査する。

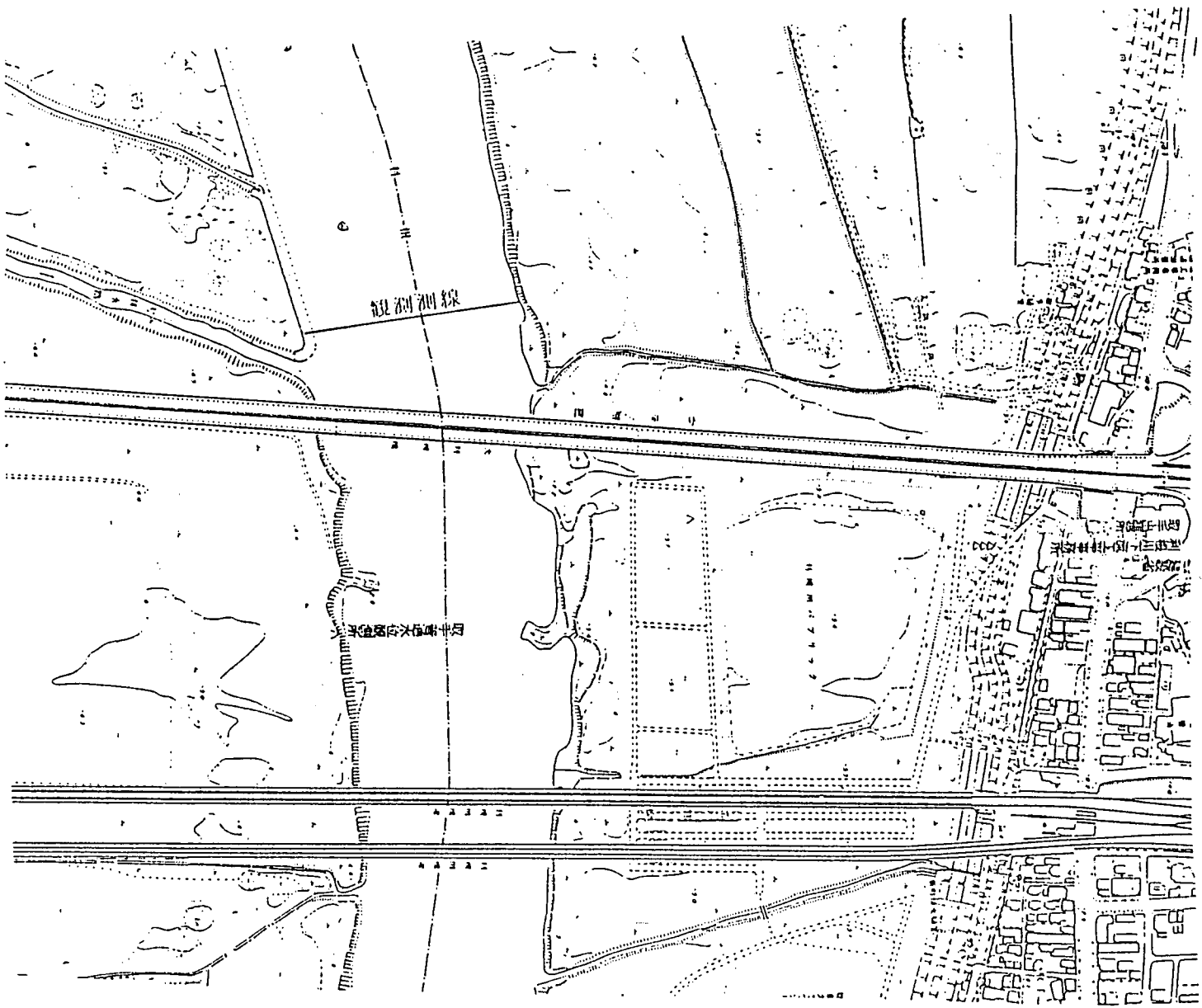


図2. 1 取手観測測線の位置図

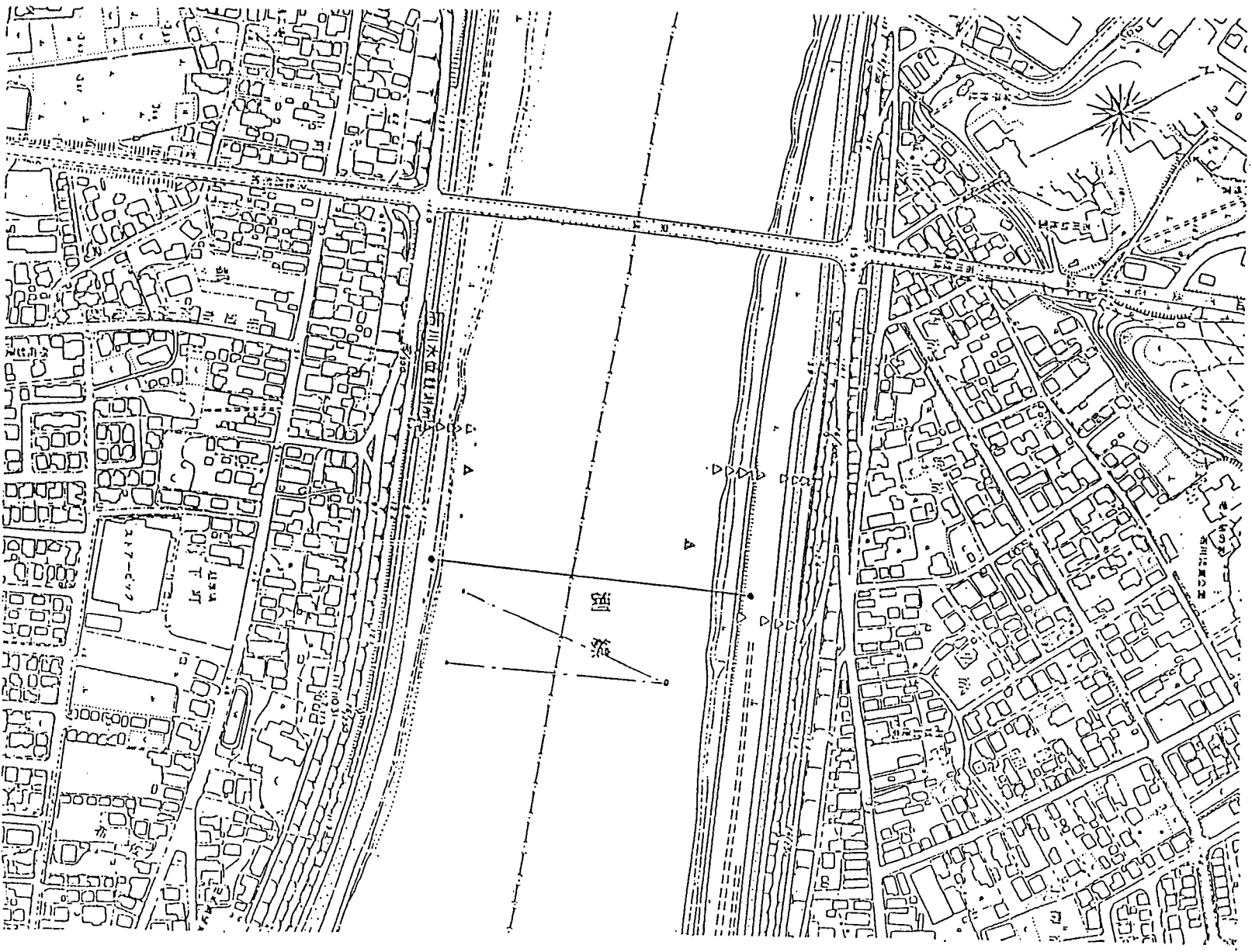


図2. 2 布川地点測線の位置図

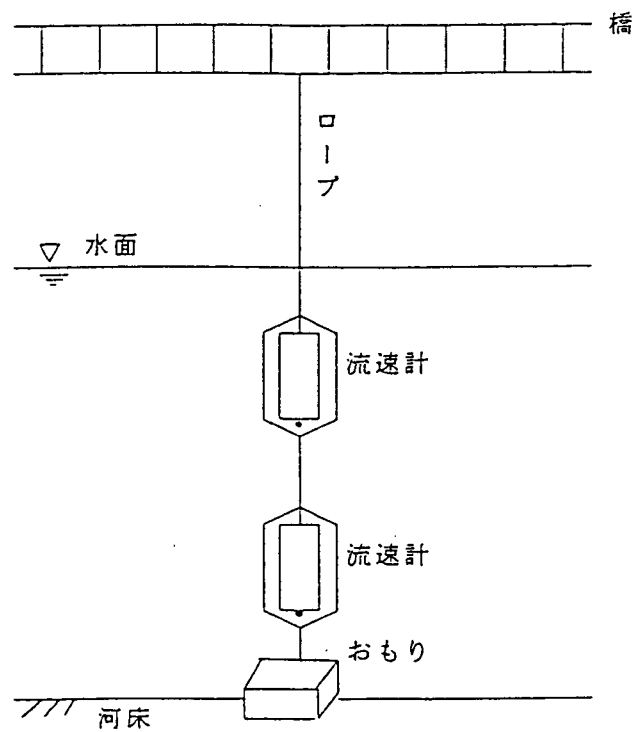


図2.3 定点観測設置図

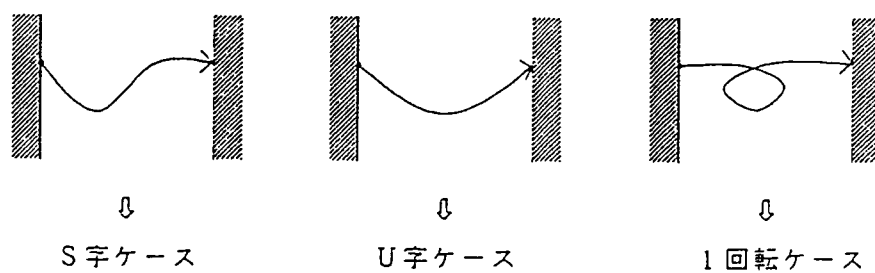


図2.4 今回設置した航路

2.2 流量観測結果

2.2.1 ADCPによる流量算出方法

通常ADCPを用いて観測を行うと、ADCPの標準添付ソフトである「TRANSECT」によって、流量が算出される。TRANSECT内の流量算出方法は前述したとおりだが、今回は、これとは別の方法によっても流量を算出し、それぞれの算出方法による違いも比較・検討することにした。

今回新たに作成した流量算出方法は、ADCPが表層部に測定不能域ができることから、この部分の補間用に別途SACMを使用し、これをADCPと同期させながらデータ収集を行い、このデータを用いて流量を計算するという方法である。また、実際の計算では、スカラー演算とベクトル演算(新規演算)という2つのシステムに分けて行っている。そこで、以下にこの2つのシステムについて説明する。

(1) スカラー演算

通常の河川での定期流量観測で用いられる観測機器は、回転式流速計や電磁流速計が主流である。したがって計測される値は、1次元の流速値である。これはいわゆるスカラー量であり、この値に観測断面積を乗じて流量を算出している。

図2.5に示されるように、船が移動する距離 b の間に観測される流速は、 V (m/s)である。 V は、南北成分と東西成分の2成分を持つベクトル量である。ADCPはこのベクトル量 V を計測する。そこで、ADCPによって計測された各ポイント毎の流速ベクトル値をスカラー量に変換し、移動距離をかけて流量を算出した。

(2) ベクトル演算

ADCPが計測できない表層部の流速をSACMによって計測する事によって補間し、流量算出精度向上を目指したものである。図2.6にTRANSECTと本算出方法それぞれが仮定している鉛直流速分布を示す。これをみてもわかるとおり、TRANSECTと本方法とでは、表層部、河床部の取り扱いが異なるだけである。

2.2.2 ADCPによる流量観測結果

モード2を使用した3往復観測による流量観測結果を表2.1、表2.2に示す。ここで、ADCPと表示されているのはTRANSECTによって算出された流量である。これらの結果から以下のことが判明した。

(1) 取手地点

① 1200KHz

6回の観測のうち、3回目の往路でデータの欠測が生じた。この部分を除いた5回の平均は、ADCPでの演算では54.1 m^3/s 、新規演算システムでは、48.6 m^3/s であった。なお、スカラー演算では99.0 m^3/s であった。

② 2400KHz

各演算方法の平均流量は、ADCPは80.3 m^3/s 、新規演算は88.6 m^3/s 、スカラー演算は185.3 m^3/s であった。平均値に対する最大偏差は、ADCPは約14%、新規演算は約45%、スカラー演算は約19%であった。平均値だけ見るとADCPと新規演算の差は10%程度だが、新規演算では数値にばらつきが大きい。

(2) 布川地点

①1200KHz

各演算方法の平均流量は、ADCPが87.5m³/s、新規演算は79.9m³/s、スカラー演算は284.7m³/sであった。平均値からの最大偏差は、ADCPは約10%、新規演算は約17%、スカラー演算は約6%であった。ADCPによる結果と新規演算とは約10%の差が生じている物の概ね一致しているが、スカラー演算はどちらも大きく異なっている。

②2400KHz

各演算方法の平均値は、ADCPが100.6m³/s、新規演算システムは91.3m³/s、スカラー演算は122.7m³/sであった。平均値からの最大偏差は、ADCPが約8%、新規演算が約7%、スカラー演算が約21%であった。ADCPによる結果と新規演算とは約10%の差が生じているものの概ね一致している。スカラー演算ではADCPの約20%大きくなっている。

なお、今回の観測では、観測後1200KHzのモード2には問題があったことが判明したため、比較対象外とした。

以上のことから、3回の往復観測による平均値からの偏差は、どの演算方法でも約10%程度は発生することがわかった。特に取手地点の観測結果は値の変動が激しい。布川地点ではその変動が時間の経過とともに減少する傾向を示している。今回使用した3種類の流量算出手法の中では、ADCPによる方法が比較的安定して流量を算出している。

また、表層部における流速をSACMによって補間した場合における流量は、ADCP単独で得られる値よりも約10%小さく計算されることがわかった。

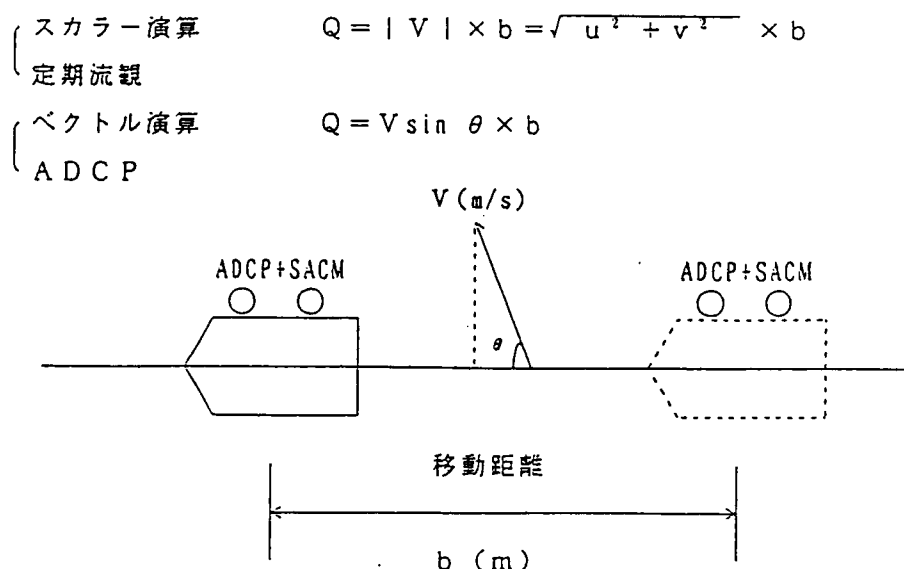


図2.5 今回用いた流量算出方式の概念図

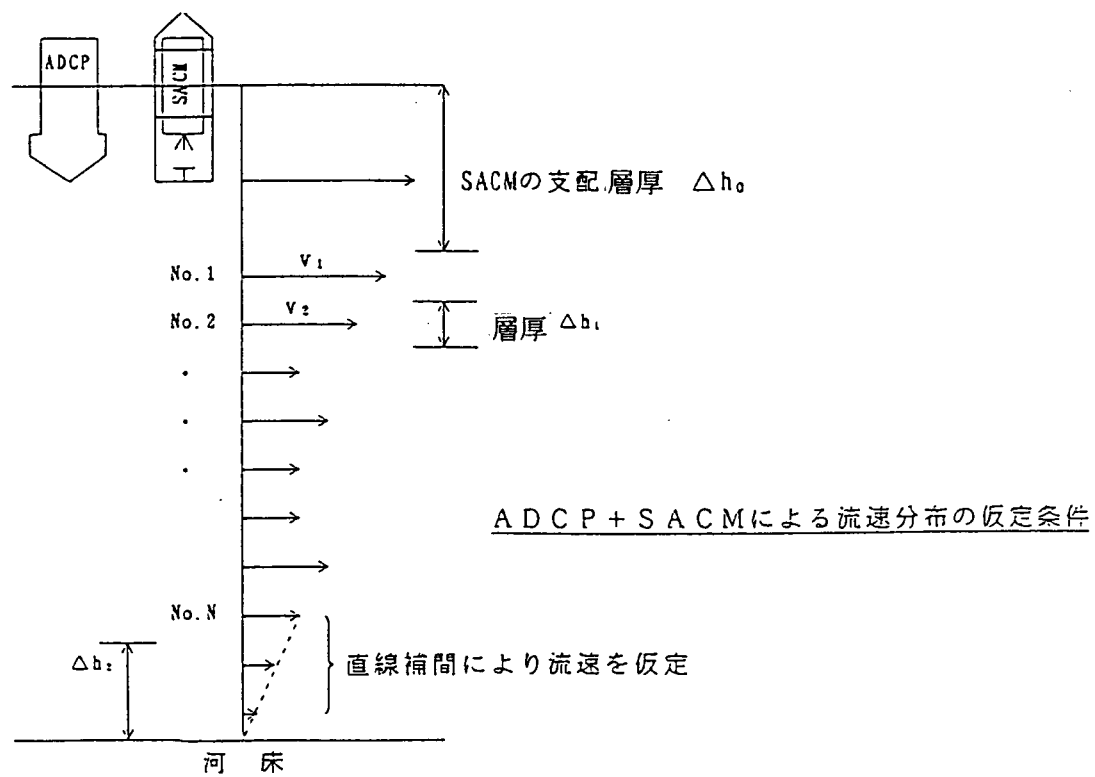
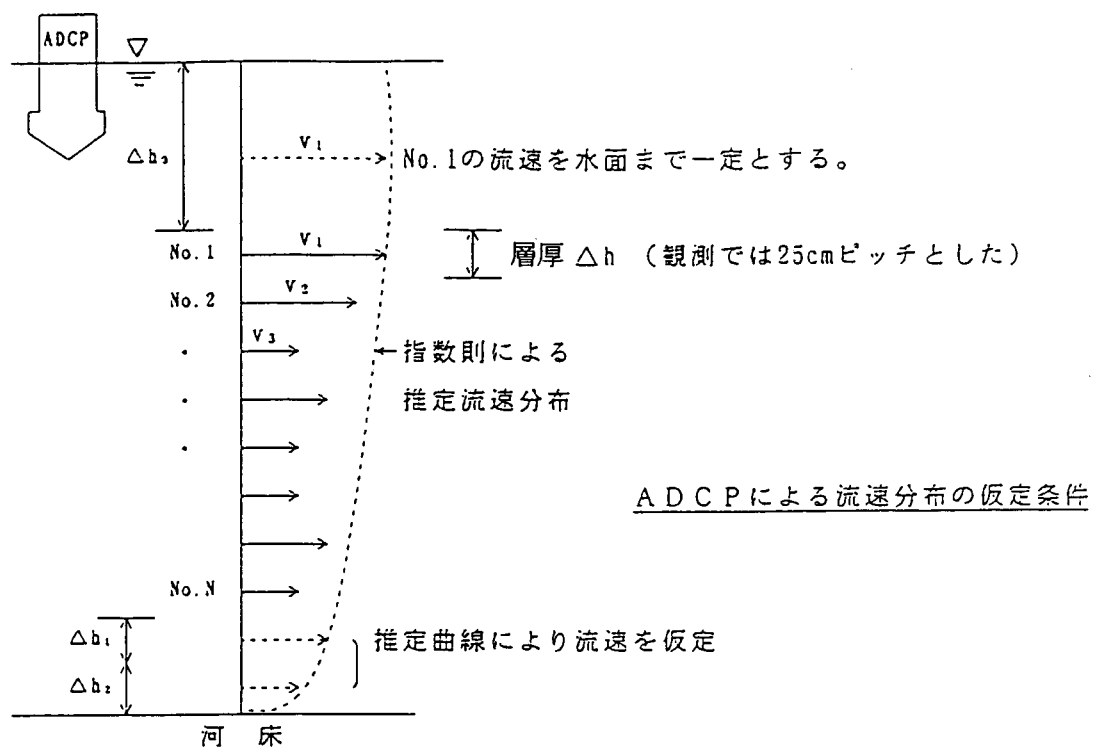


図2. 6 各方式における流速分布の過程

表2.1 繰り返し観測による結果(取手地点)

(単位: m^3/s)

ケース	1 2 0 0 KHz			2 4 0 0 KHz		
	A D C P	演 算 結 果		A D C P	演 算 結 果	
		スカラー	ベクトル		スカラー	ベクトル
モード 2 (1) 往	50.0	97.6	47.5	72.5	150.4	48.9
モード 2 (1) 復	52.9	99.3	47.2	69.0	202.7	100.5
モード 2 (2) 往	50.3	99.9	47.9	83.8	224.7	109.2
モード 2 (2) 復	51.4	93.0	42.7	79.4	182.0	98.6
モード 2 (3) 往	—	—	—	85.8	171.3	96.3
モード 2 (3) 復	66.1	105.1	57.8	91.3	180.8	78.1
平 均	54.1	99.0	48.6	80.3	185.3	88.6

表2.2 繰り返し観測による結果(布川地点)

(単位: m^3/s)

ケース	1 2 0 0 KHz			2 4 0 0 KHz		
	A D C P	A D C P + S A C M		A D C P	A D C P + S A C M	
		スカラー	ベクトル		スカラー	ベクトル
モード 2 (1) 往	96.5	294.5	90.2	108.7	—	97.9
モード 2 (1) 復	94.2	289.8	88.9	104.1	126.6	94.6
モード 2 (2) 往	87.9	283.4	80.3	102.2	126.5	92.3
モード 2 (2) 復	81.2	287.0	76.5	98.0	119.0	89.6
モード 2 (3) 往	81.4	281.4	76.9	95.4	122.6	87.0
モード 2 (3) 復	83.9	271.8	66.6	95.2	119.0	86.4
平 均	87.5	284.7	79.9	100.6	122.7	91.3

2. 2. 3 他の観測手法による流量観測結果

(1) 定期流量観測

ADCPを用いた流量観測を実施した同一測線において、定期流量観測を行った。さらにこの地点に加えて、取手と布川の間で合流している小貝川の上流、戸田井地点においても定期流量観測を行った。図2. 7に定期流量観測位置の模式図を示す。なお、これらの観測は同時に実施されたのではなく、取手(9:40頃)、戸田井(13:50頃)、布川(15:30頃)の順に観測された。各地点の観測結果を図2. 8、図2. 9、図2. 10に示す。

①取手地点

流量観測の結果は $89.27\text{m}^3/\text{s}$ 、平均流速は $0.26\text{cm}/\text{s}$ であった。流速は表層付近で大きく $0.3\text{m}/\text{s}$ 以上のものもある。

②布川地点

流量観測の結果は $136.69\text{m}^3/\text{s}$ 、平均流速は $0.12\text{m}/\text{s}$ であった。流速は河川中央付近の表層部が最も速く、約 $0.2\text{m}/\text{s}$ であり、岸に近くなるほど小さくなる。

③戸田井地点

流量観測の結果は $16.88\text{m}^3/\text{s}$ であった。左岸部に $0.4\text{cm}/\text{s}$ 程度の流れがある。

図2. 7に示されるように、取手と戸田井の流量を合計したものが布川の流量となる。しかし、布川と戸田井の合計流量は $106.15\text{m}^3/\text{s}$ であり、布川で観測された $136.69\text{m}^3/\text{s}$ 比べるとおよそ30%の差が生じている。

(2) 超音波流量計及び水位流量曲線式による流量

布川地点に置いては、超音波流量計が設置されており、常時流量観測が行われている。また、取手及び戸田井地点には水位流量曲線式(H-Q式)が作成されており、これを用いて流量を算出することができる。

表2. 3及び図2. 11に超音波流量計による布川での流量観測結果を示す。

表2. 4は、H-Q式によって求められた取手、戸田井地点における流量とそれらを合計した布川流量(H-Q布川)、超音波流量計による布川流量(超音波布川)および、H-Q布川と超音波布川の差について示したものである。

これらから、H-Q布川と超音波布川の差は概ね10%以内であることがわかる。

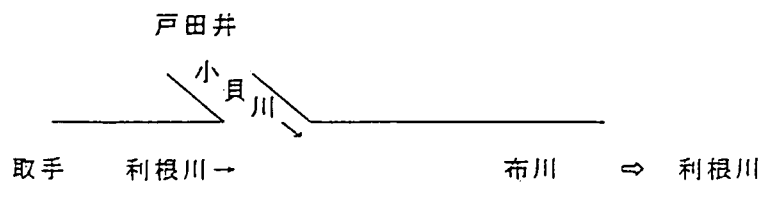


図2. 7 定期流観位置模式図

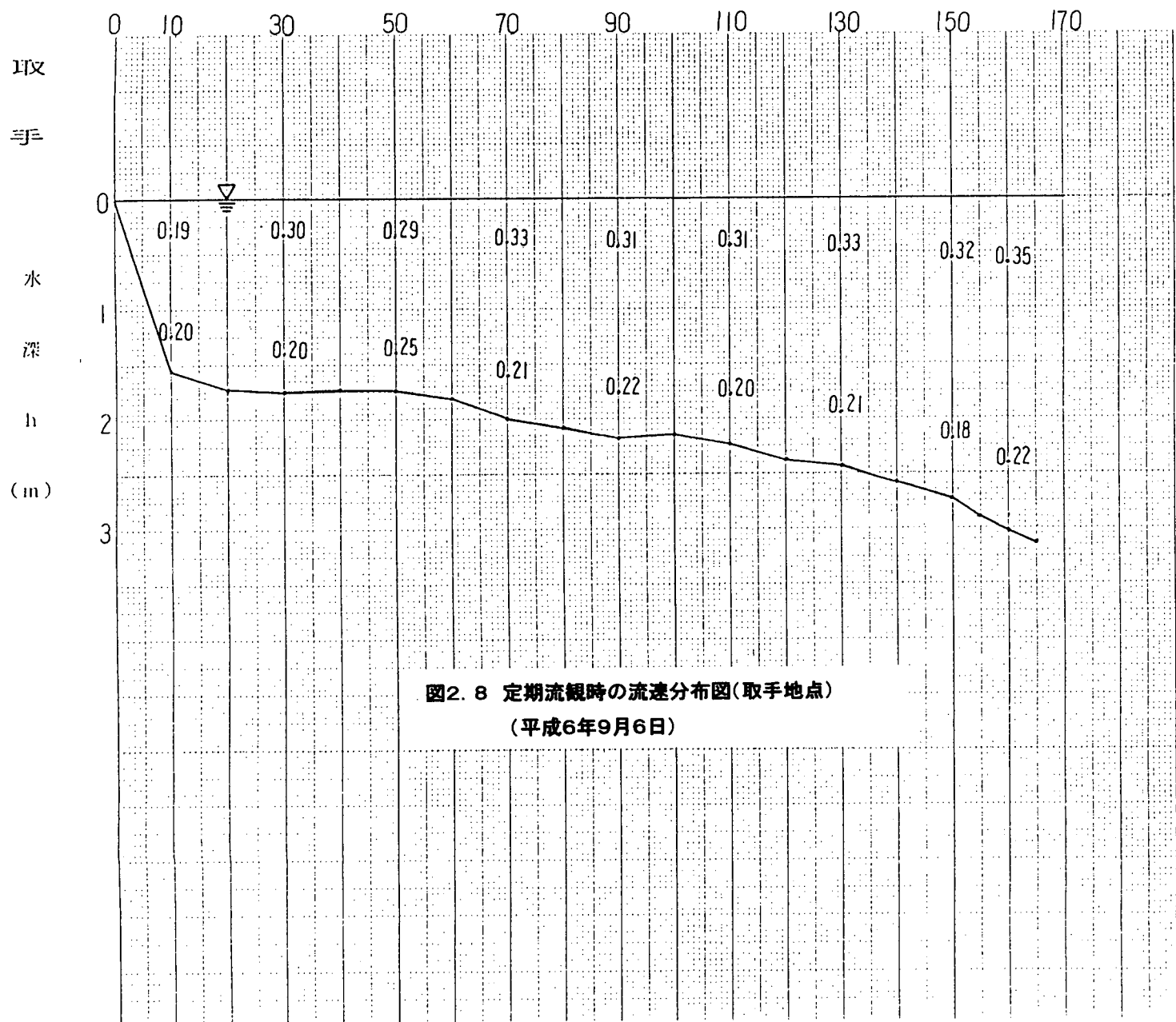


図2.8 定期流観時の流速分布図(取手地点)
(平成6年9月6日)

観測番号		
観測年月日		6・9・6
観測者	測定	石原
	記帳	芦田
気象	天候	晴
	風向	川上
	風力	弱風
観測時刻(時分)	初め	9:25
	終り	9:54
	平均	9:40
水位(m)	基準	
	初め	-1.81
	終り	-1.80
	平均	-1.81
器	流速計型式	
	検定式	
械	使用	重し
	方法	舟
計算者	計算	
	再計算	
計算結果	全流量(m ³ /s)	89.27
	全断面積(m ²)	341.95
	平均流速(m/s)	0.26
備考		

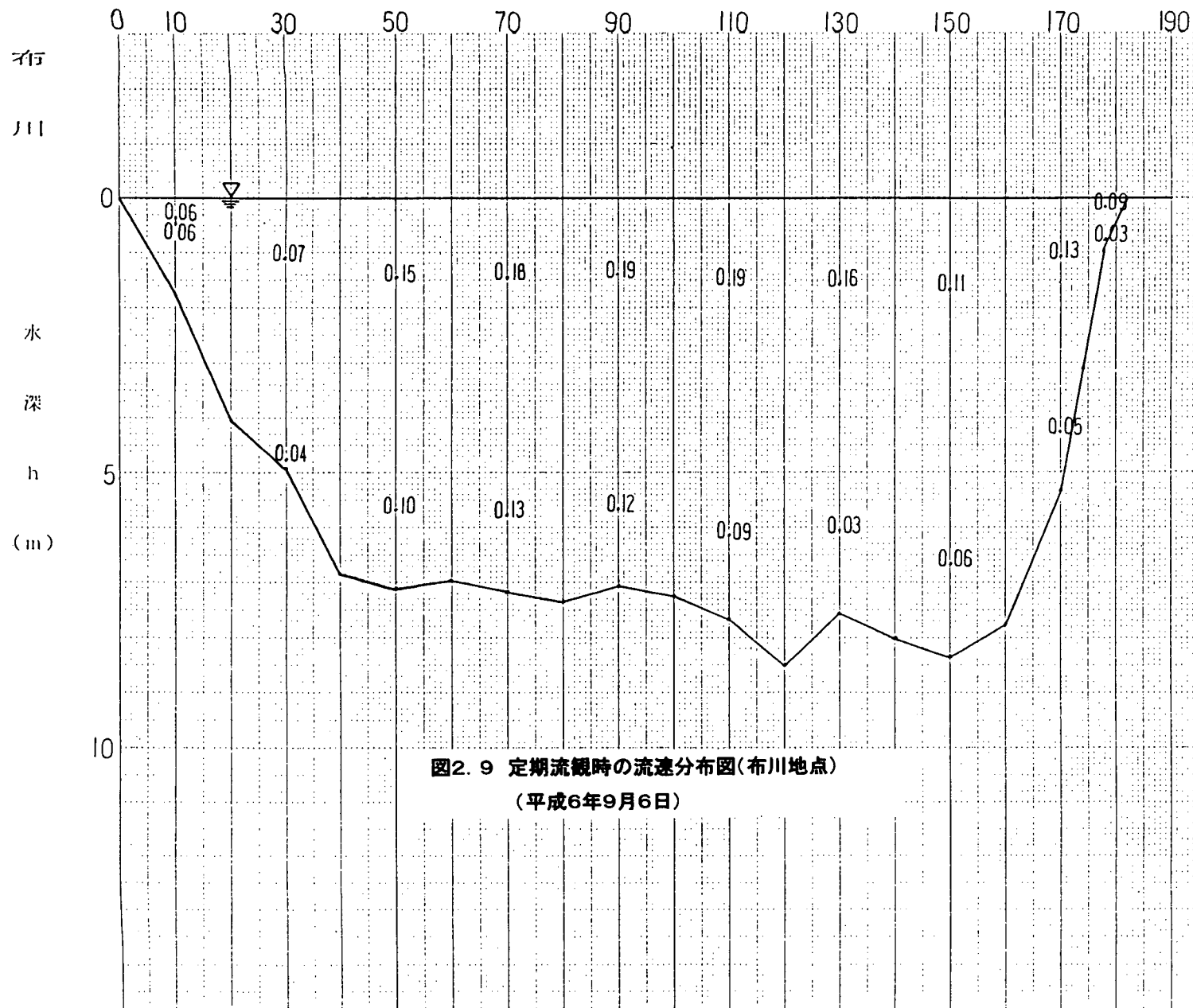


図2.9 定期流観時の流速分布図(布川地点)
(平成6年9月6日)

観測番号		16
観測年月日		6・9・6
観測者	測定	大山
	記帳	中島
気象	天候	晴
	風向	川下
	風力	弱風
観測時刻(時分)	初め	13:30
	終り	14:15
	平均	13:53
水位(m)	基準	
	初め	1.07
	終り	1.09
	平均	1.06
器	流速計型式	Na電磁
	検定式	
械	使用	重し
	方法	舟
計算者	計算	中島
	再計算	大山
計算結果	全流量(m ³ /s)	136.69
	全断面積(m ²)	1147.78
	平均流速(m/s)	0.12
備考		

戸田井

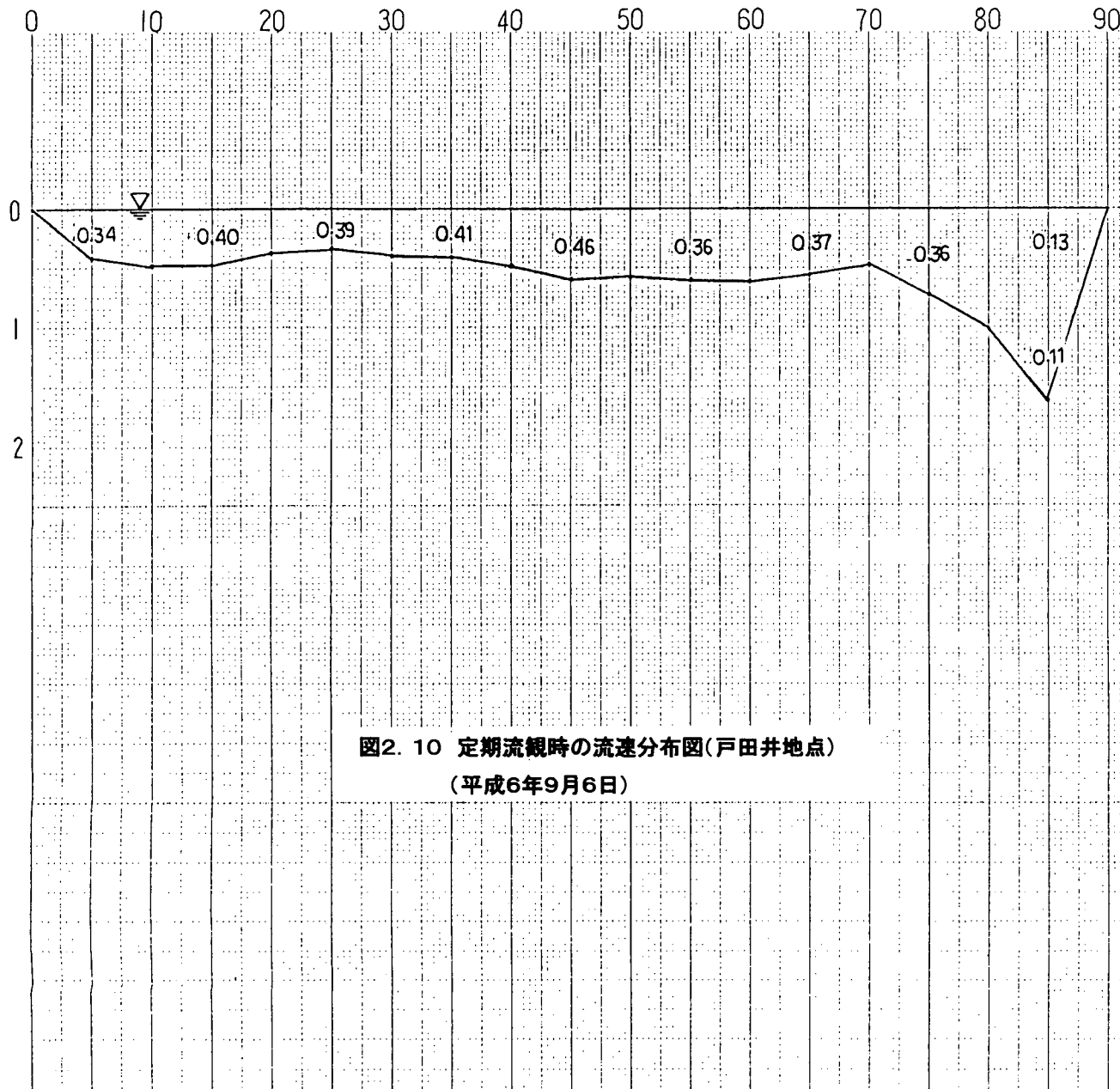
水深
h
(m)

図2. 10 定期流観時の流速分布図(戸田井地点)
(平成6年9月6日)

観測番号		15	
観測年月日		6・9・6	
観測者	測定	石原	
	記帳	芦田	
気象	天候	晴	
	風向	川下	
	風力	弱風	
観測時刻 (時分)	初め	15:20	
	終わり	15:47	
	平均	15:34	
水位 (m)		基 準	
	初め	0.49	
	終わり	0.49	
	平均	0.49	
器 械	流速計型式		V=0.129 N10.012
	検定式		
	使用	ロッド	
	方法	舟・徒歩	
計算者	計算		芦田
	再計算		石原
計算結果	全流量(m³/s)		16.88
	全断面積(m²)		50.58
	平均流速(m/s)		0.33
備考			

表2.3 布川地点超音波流量計におけるデータ

流速・流量日報(布川)

1994年(平成6年)

月日 時分	水位 Y・P [m]	上層流速 [m/s]	下層流速 [m/s]	補間流速 [m/s]	瞬時流量 [m ³ /s]	平均流量 [m ³ /s]	固有流量 [m ³ /s]	6H平均 固有流量 [m ³ /s]	適用
9/06 01:00	0.98	0.10	0.14	0.10	108.27	101.80	88.14	88.49	布川地点の観測時間は 14:00 ~ 16:00 であった。 ・瞬時流量の平均値 101.8m ³ /s ・平均流量の平均値 114.8m ³ /s ・固有流量の平均値 108.9m ³ /s ・6時間平均固有流量の 平均値 109.6m ³ /s
02:00	0.97	0.11	0.14	0.08	112.61	115.42	107.26	90.88	
03:00	0.99	0.06	0.11	0.06	76.75	98.34	99.17	93.07	
04:00	1.04	0.03	0.09	0.04	54.37	59.66	86.69	92.63	
05:00	1.06	0.09	0.08	0.06	78.20	77.53	86.18	91.38	
06:00	1.06	0.11	0.09	0.07	92.08	87.52	90.28	92.95	
07:00	1.07	0.11	0.12	0.07	105.77	92.43	95.18	94.12	
08:00	1.07	0.08	0.08	0.08	73.66	92.85	92.85	91.72	
09:00	1.08	0.10	0.10	0.09	92.27	92.74	98.25	91.57	
10:00	1.10	0.09	0.09	0.07	83.39	82.34	93.41	92.69	
11:00	1.04	0.15	0.15	0.09	137.22	125.52	108.16	96.35	
12:00	1.00	0.16	0.16	0.09	145.12	136.99	117.36	100.86	
13:00	0.96	0.14	0.14	0.08	125.92	133.56	116.75	104.46	
14:00	0.95	0.13	0.12	0.08	112.20	123.05	110.29	107.37	
15:00	0.95	0.14	0.14	0.08	125.66	118.56	113.15	109.85	
16:00	0.96	0.07	0.08	0.07	67.45	102.86	103.27	111.49	
17:00	1.01	0.08	0.08	0.04	72.72	81.46	95.48	109.38	
18:00	1.03	0.08	0.08	0.07	73.03	67.61	89.16	104.68	
19:00	1.05	0.09	0.08	0.04	78.02	83.15	89.05	100.06	
20:00	1.06	0.10	0.10	0.05	91.87	84.44	95.05	97.52	
21:00	1.07	0.10	0.10	0.07	92.07	85.60	88.78	93.46	
22:00	1.08	0.09	0.09	0.06	83.04	85.77	91.28	91.46	
23:00	1.05	0.13	0.07	0.09	92.26	88.27	87.45	90.12	
24:00	1.02	0.16	0.17	0.09	150.23	129.01	112.54	94.02	
日合計値					8367	8447	8478	8390	
日平均値	1.03	0.10	0.11	0.07	96.84	97.77	98.13	97.11	
日最大値	1.10	0.16	0.17	0.10	150.23	136.99	117.36	111.49	
発生時刻	10:00	24:00	24:00	01:00	24:00	12:00	12:00	16:00	
日最小値	0.95	0.03	0.07	0.04	54.37	59.66	86.18	88.49	
発生時刻	15:00	04:00	23:00	19:00	04:00	04:00	04:00	04:00	

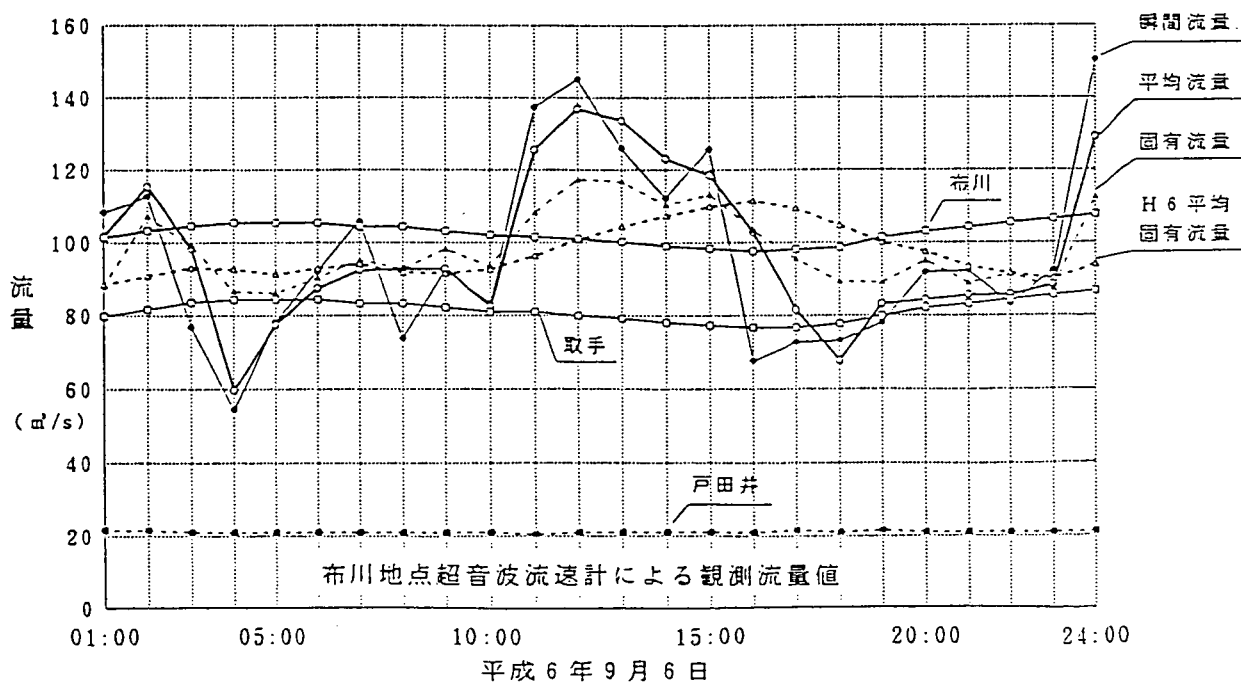
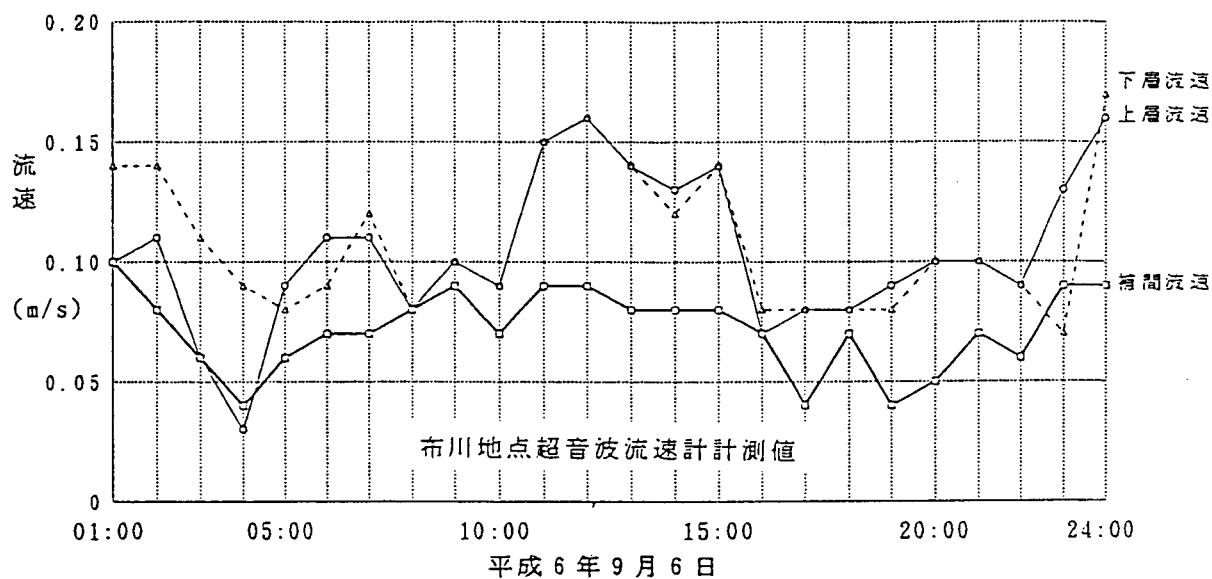
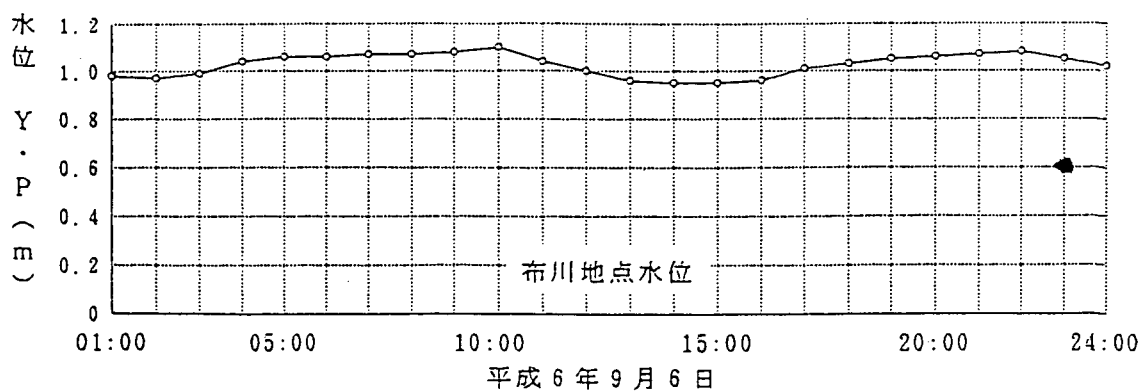


図2. 11 観測日における布川地点の超音波流速測定結果

表2. 4 6年9月6日の流量一覧表

単位 : m^3/s

月日 時分	取 手	戸田井	①布川	②布川 (超音波)	布川流量差 ①-②
9/06 01:00	79.87	21.58	101.45	88.49	12.96
9/06 02:00	81.73	21.58	103.31	90.89	12.42
9/06 03:00	83.61	21.02	104.63	93.07	11.56
9/06 04:00	84.45	21.02	105.47	92.63	12.84
9/06 05:00	84.45	21.02	105.47	91.38	14.09
9/06 06:00	84.45	21.02	105.47	92.95	12.52
9/06 07:00	83.33	21.02	104.35	94.12	10.23
9/06 08:00	83.33	21.02	104.35	91.72	12.63
9/06 09:00	82.21	21.02	103.23	91.57	11.66
9/06 10:00	81.11	21.02	102.13	92.69	9.44
9/06 11:00	81.11	20.48	101.59	96.35	5.24
9/06 12:00	80.03	21.02	101.05	100.86	0.19
9/06 13:00	79.19	21.02	100.21	104.46	-4.25
9/06 14:00	78.11	21.02	99.13	107.37	-8.24
9/06 15:00	77.35	21.02	98.37	109.85	-11.48
9/06 16:00	76.61	21.02	97.63	111.49	-13.86
9/06 17:00	76.61	21.58	98.19	109.38	-11.19
9/06 18:00	77.69	21.02	98.71	104.68	-5.97
9/06 19:00	79.87	21.58	101.45	100.06	1.39
9/06 20:00	82.11	21.02	103.13	97.52	5.61
9/06 21:00	83.25	21.02	104.27	93.46	10.81
9/06 22:00	84.40	21.02	105.42	91.46	13.96
9/06 23:00	85.57	21.02	106.59	90.12	16.47
9/06 24:00	86.75	21.02	107.77	94.02	13.75

2. 2. 4 他の観測手法及び各観測モード毎による流量観測結果との比較

これまで述べた各観測手法による流量観測結果および、ADCPの各観測モード毎に計測した流量観測結果の平均値を表2. 5に示す。なお、モード5については、計測可能水深の関係から取手地点の1200KHzでしか観測できなかった。

取手での1200KHzモード2の結果と布川の定期流観値を除けばどの手法を用いても全体平均値の約10%以内であり、取手及び布川地点における流量値としては全体平均値が妥当な値であると考えられる。

流量観測精度についてはADCPと他の観測手法との間に大きな差は認められなかった。また、ADCPの各機種における観測モード毎による差や流量算出手法毎による差も概ね10%以内であり、大きな差は認められなかったそれらと比べると比較的大きいものの、使用周波数による差も実用上問題となるほど大きい差は認められなかった。

2. 2. 5 航路の違いによる流量観測結果への影響

S字、U字、1回転の3航路を走行して得られた流量値を表2. 6に示す。取手地点及び布川地点の流量は表1. 5からそれぞれ84. 0m³/s、93. 4m³/s前後であると考えられる。

取手地点のS字及びU字航路の流量値はどの方法でも概ね10%程度の差であり大きな差は認められないが、1回転航路はこれらよりもかなり小さな値となっており差も大きくなっている。

布川地点はいずれの航路による流量も30%以上の差がある。これは、布川での観測時、風が強かったため、人力で船を移動するのではなく船外機を用いたため、観測の精度が落ちたせいだと考えられる。

表2. 7にADCPによる流量観測結果の一覧を示す。

表2.5 各手法による流量観測結果(平均値)

(*1. 2. 3. を含む)

(単位: m^3/s)

地点	モード	A D C P		A D C P + S A C M		定期 流 観	超音波 流量計	H-Q 式 (+2)	平 均 (+3)
		1200KHz	2400KHz	1200KHz	2400KHz				
取 手	2	54.1	80.3	48.2	88.6	89.3	—	80.8	84.0 (78.0)
	4	76.5	85.9	77.1	92.7				
	5	84.4	—	—	—				
布 川	2	87.5	100.6	79.9	91.3	136.7	(+1)	98.4	93.4 (95.6)
	4	85.2	94.1	81.5	86.5		109.6 (101.8)		
	5	—	—	—	—				

- (+1) 超音波の流量は、毎時変動しており、ここでは布川地点を A D C P で観測していた。時間帯の 14:00 ~ 16:00 の平均流量を示す。() 書き数値は、超音波流量計の瞬時値を 14:00 ~ 16:00 の間で平均化した値である。
- (+2) H ~ Q 式による流量換算値は、取手地点で現地観測を実施していた 10:00 ~ 12:00 の平均値を使用し、布川地点では 14:00 ~ 16:00 の平均値を示す。なお、布川の H ~ Q 式による流量は、取手と戸田井の合成流量である。
- (+3) 平均値は、1200KHz のモード 2 の結果と布川の定期流観値を省いた値を示している。下段 () 内数値はそれらを含む平均値である。

表2.6 各航路毎の流量観測結果

(単位: m^3/s)

地点	ケース	1200KHz		2400KHz	
		A D C P	ADCP+SACM	A D C P	ADCP+SACM
取 手	S 字	77.4	74.3	75.5	76.9
	U 字	88.6	79.3	88.7	89.8
	1 回転	66.7	61.2	74.3	69.5
布 川	S 字	52.8	49.1	51.5	42.9
	U 字	67.3	54.1	51.1	47.0
	1 回転	52.4	48.6	52.9	48.4

表2.7 ADCPによる流量の観測結果の一覧

(単位: m^3/s)

地 点	ケース名	観測時刻	1 2 0 0 KHz			2 4 0 0 KHz		
			A D C P	演算結果		A D C P	演算結果	
				ｽｶｰ-演算	新規演算 システム		ｽｶｰ-演算	新規演算 システム
取 手 地 点	ε-F 2(1)往路	10:14	50.0	97.6	47.5	72.5	150.4	48.9
	ε-F 2(1)復路	10:25	52.9	99.3	47.2	69.0	202.7	100.5
	ε-F 2(2)往路	10:35	50.3	99.9	47.9	83.8	224.7	109.2
	ε-F 2(2)復路	10:41	51.4	93.0	42.7	79.4	182.0	98.6
	ε-F 2(3)往路	10:50	—	—	—	85.8	171.3	96.3
	ε-F 2(3)復路	11:06	66.1	105.1	57.8	91.3	180.8	78.1
	ε-F 4 往路	11:12	77.1	101.4	80.1	92.7	214.9	118.9
	ε-F 4 復路	11:32	75.9	96.6	74.1	79.1	115.6	66.6
	ε-F 5 往路	11:40	83.8	616.0	—	—	224.6	58.7
	ε-F 5 復路	11:50	84.9	—	—	—	202.4	168.8
	S字 往路	12:10	78.3	126.9	79.1	87.2	176.3	92.7
	S字 復路	12:14	76.4	139.7	69.4	63.7	188.0	61.0
	U字 往路	12:17	77.1	109.0	67.6	100.5	164.5	111.1
	U字 復路	12:20	84.0	124.4	90.9	76.8	179.1	68.4
	1回転 往路	12:24	68.5	116.9	73.9	82.1	158.3	88.9
	1回転 復路	12:27	64.9	121.9	48.5	66.4	195.1	50.0
布 川 地 点	ε-F 2(1)往路	15:05	96.5	294.5	90.2	108.7	—	97.9
	ε-F 2(1)復路	15:14	94.2	289.8	88.9	104.1	126.6	94.6
	ε-F 2(2)往路	15:19	87.9	283.4	80.3	102.2	126.5	92.3
	ε-F 2(2)復路	15:25	81.2	287.0	76.5	98.0	119.0	89.6
	ε-F 2(3)往路	15:30	81.4	281.4	76.9	95.4	122.6	87.0
	ε-F 2(3)復路	15:36	83.9	271.8	66.6	95.2	119.0	86.4
	ε-F 4 往路	15:45	81.8	167.5	82.5	95.0	158.5	87.7
	ε-F 4 復路	15:51	88.5	163.7	80.5	93.1	157.4	85.2
	ε-F 5 往路	17:54	—	—	113.2	—	260.2	42.6
	ε-F 5 復路	18:04	—	—	—	—	269.9	50.1
	S字 往路	16:56	48.6	129.0	45.0	53.5	144.7	44.3
	S字 復路	17:01	56.9	141.5	53.1	49.4	152.5	41.4
	U字 往路	17:04	56.7	136.8	51.5	58.6	154.0	50.7
	U字 復路	17:07	77.9	135.6	56.6	43.5	154.0	43.2
	1回転 往路	17:10	46.9	140.2	45.4	56.6	166.6	54.9
	1回転 復路	17:14	57.8	141.3	51.8	49.2	171.4	41.9

表中の — 印は、欠測による計算不能、計測不能、計算上不安定による出力不可能である場合に付けている。

2. 3 流速観測結果

2. 3. 1 3D-ACMによる定点流速観測結果

図2. 12に取手地点の図2. 13に布川地点の定点流速観測結果をそれぞれ示す。

取手地点での流れは、流速はおよそ0. 2～0. 3m/sであり、上層、下層ともに主に左岸側へ向かって流れているが、およそ5分ほどの周期で流向が変動している。

布川地点での流れは、流速は取手地点より遅く、概ね0. 1m/s以下であった。上層と下層の流速変動の状況が異なり、上層では14:40まで大きく変動して乱れており、その後およそ40分周期で上下流に流れが変動している。これは、当時下流から上流へ向かって吹いていた10m/s以上の強風による吹送流によるものと推察される。これに対して下層では上層ほどの周期的な流れの変動はないものの、146:10頃から上流へ向かう流れに変化している。

以上のことから、取手、布川両地点とも周期は大きく異なるが、周期性のある流れが観測されている。流れは、取手地点では下流に向かう流れが主で、布川地点では上流に向かう流れが主である。

U
10.0cm
V
10.0cm

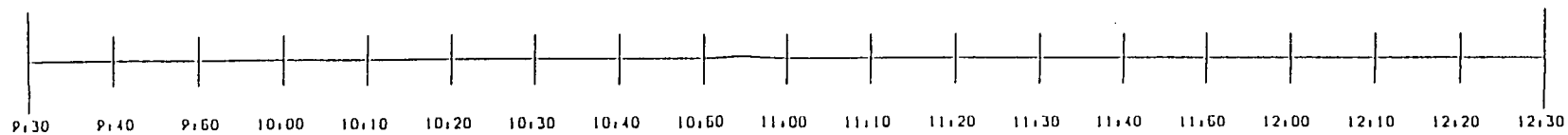
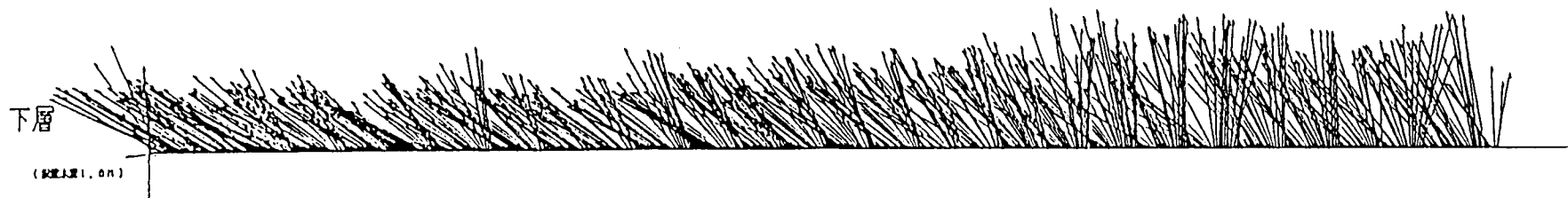
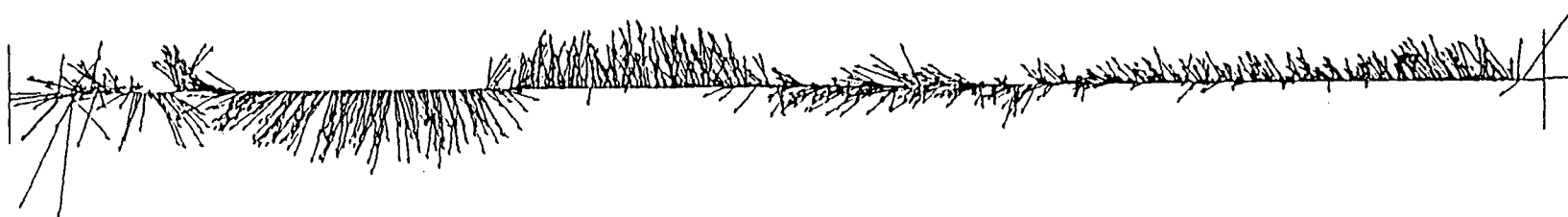


図2.12 定観測結果(取手地点)

U
10.0CH
10.0CH V

上層

(観測深度1.0m)



下層

(観測深度7.0m)

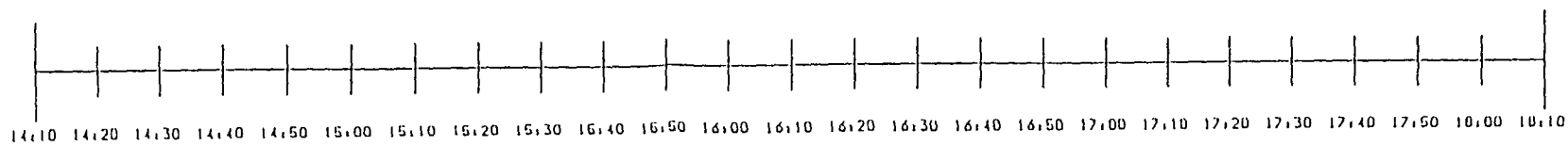
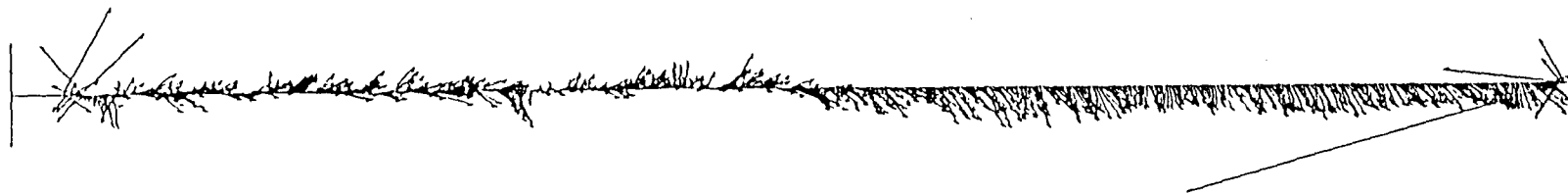


図2.13 定観測結果(布川地点)

2.3.2 ADCPによる横断流速観測結果

流速分布を表現する方法として流速コンター図があるが、コンター図では、1成分しか表現できない。ADCPは3成分が計測できるため、そのうちの2成分を横断図上に表現する方法として、図2.14のような方法で各計測水深毎に河川の上空から見た流速ベクトルを各水深毎に表示した。図2.15、図2.16に代表的な流速ベクトル横断分布図を示す。

図2.17～25に代表的な流速コンター図を示す。流速値は、流下方向成分ではなくスカラー値を示した。これは、スカラー量でしか表示できない定期流量観測とADCPとを比較し易いようにADCPのベクトル量をスカラー量に変換したものである。以上から、以下の観測結果が得られた。

(1) 取手地点

① 観測条件:1200KHz、モード2

左岸より50m地点に0.2m/s以上の比較的速い流れが存在する。また、右岸125～150m区間の水深1.2m以上の地点にも20cm/s以上の比較的速い流れが存在する。さらに、水深の約50%付近に0.1m/sの流速等高線が存在する。

② 観測条件:1200KHz、モード4

全体としては0.1m/s以上の流速の場合であるが、0.2m/s以上の流速コンターが水塊としていくつか存在しており、また中央から右岸の下層部において速い流速が存在している。

③ 観測条件:2400KHz、モード2

左岸から80m、水深80cmの位置において0.3m/s以上の流れが、左岸から110m付近まで水深約60%の位置において0.2m/sの流速コンターがそれぞれ存在している。また、右岸部において0.2m/s以上の流速を示している。

④ 観測条件:2400KHz、モード4

左岸から85m地点において全水深で0.2m/s以上の流速が、85m～150mの区間では0.1m/s以下の流速が存在する。また、右岸部において、0.2m/s以上を越える区間が生じている。

(2) 布川地点

① 観測条件:1200KHz、モード2

河川の中央から左岸部において0.1m/s以上の流速値を示している。中央部から右岸側は遅く0.01m/sの部分も存在する。水深方向の流速変化は、横断方向の変化に比較して小さい。

② 観測条件:1200KHz、モード4

①とほぼ同様な傾向を示している。

③ 観測条件:1200KHz、モード5

左岸側40m～80mの区間において0.1m/sに流速コンターが存在する。左岸の岸付近や河川中央より右岸側では0.04～0.05m/sの遅い流速が存在する。なお、この観測条件下での観測限界は水深約7mであるため、それ以上の区間では欠測となっている。

④ 観測条件:2400KHz、モード2

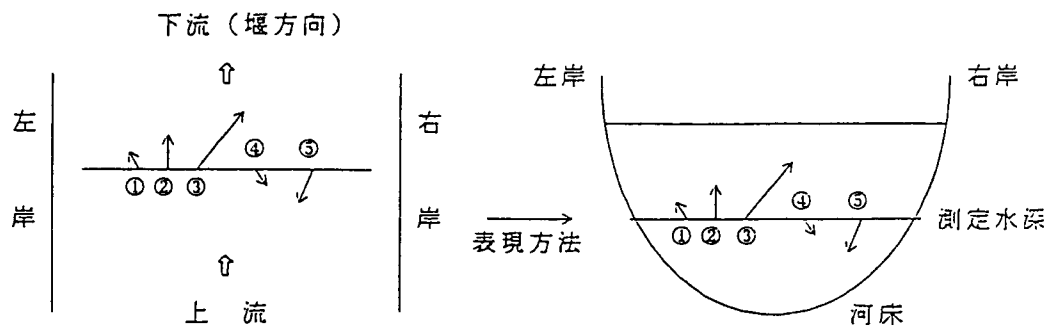
左岸から30m地点より80mまでの区間においては、0.1m/sの流速コンターが存在する。また、左岸の岸付近と

河川中央から右岸の区間において流速が遅く0.03～0.04m/sである。また、水深方向の流速変化は小さい。

⑤観測条件:2400KHz、モード4

左岸から30m地点より80mまでの区間においては、0.1m/sの流速コンターが存在する。表層部の流速が比較的速く、ほぼ全面において0.1m/s以上である。また、水深4.3m付近では、0.1m/sに流速コンターラインが河床付近まで伸びている。

上記の結果から、ADCPで観測された値は流向・流速とも、他の観測手法によって観測されたものと比較するとそれほど大きな差はなく、ほぼ同様の傾向を示していることがわかる。



(a) 河川を上空から見た時のある水深での流速ベクトル

(b) 河川の上空から見た流速ベクトルを河川横断面上にプロットして表現。

ここで、①下流左岸向きの流れ

②下流向きの流れ

③下流右岸向き流れで流速大（矢印の長さで流速を表現している）

④上流右岸向き流れ

⑤上流左岸向き流れ

図2.14 今回作成した流速ベクトル図の解説

U
20.0cm
20.0cm V

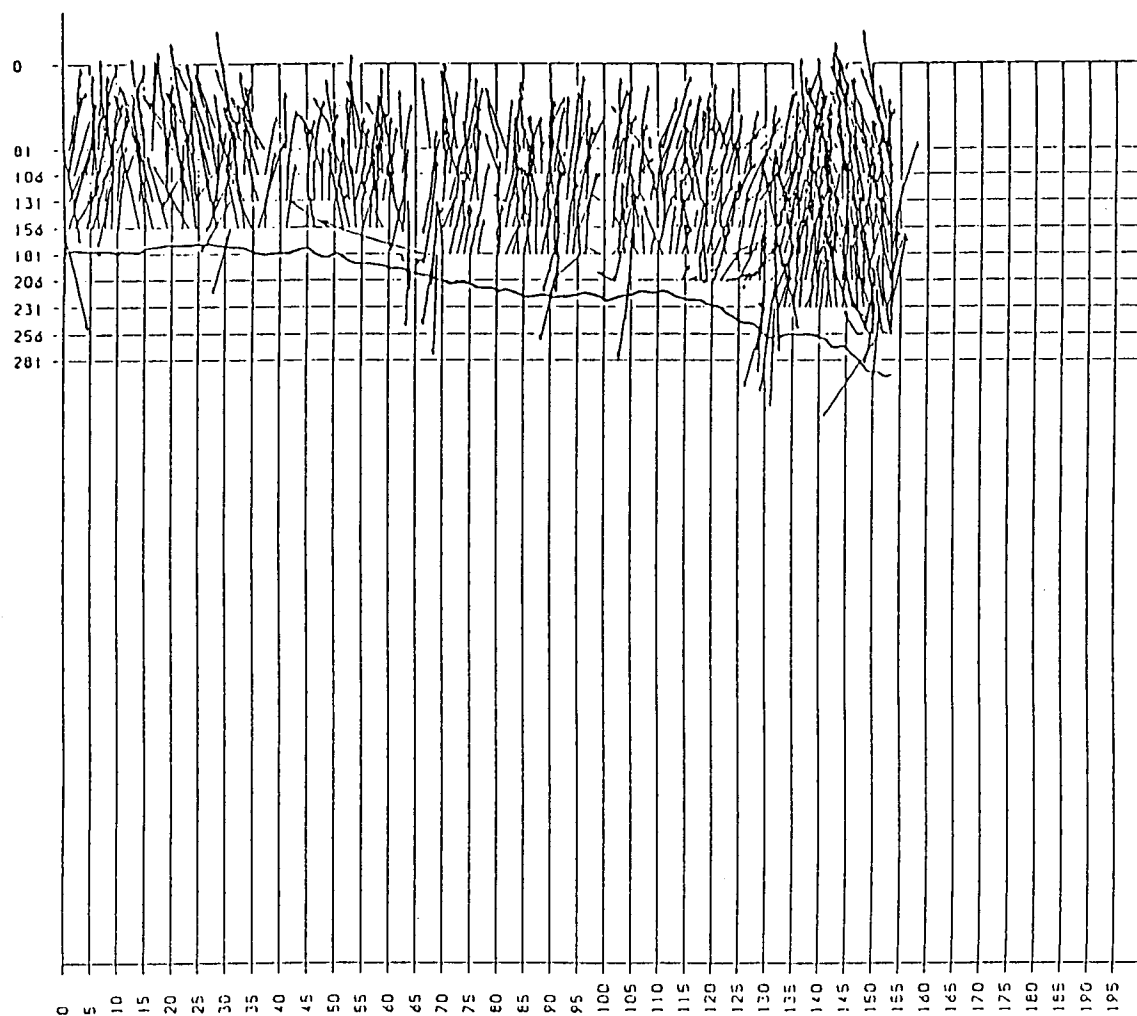


図2. 15 利根川取手地点流速横断分布図(U.V 成分) 2400KHz モード2

第1回 往路 (生データ、4ビーム解析)

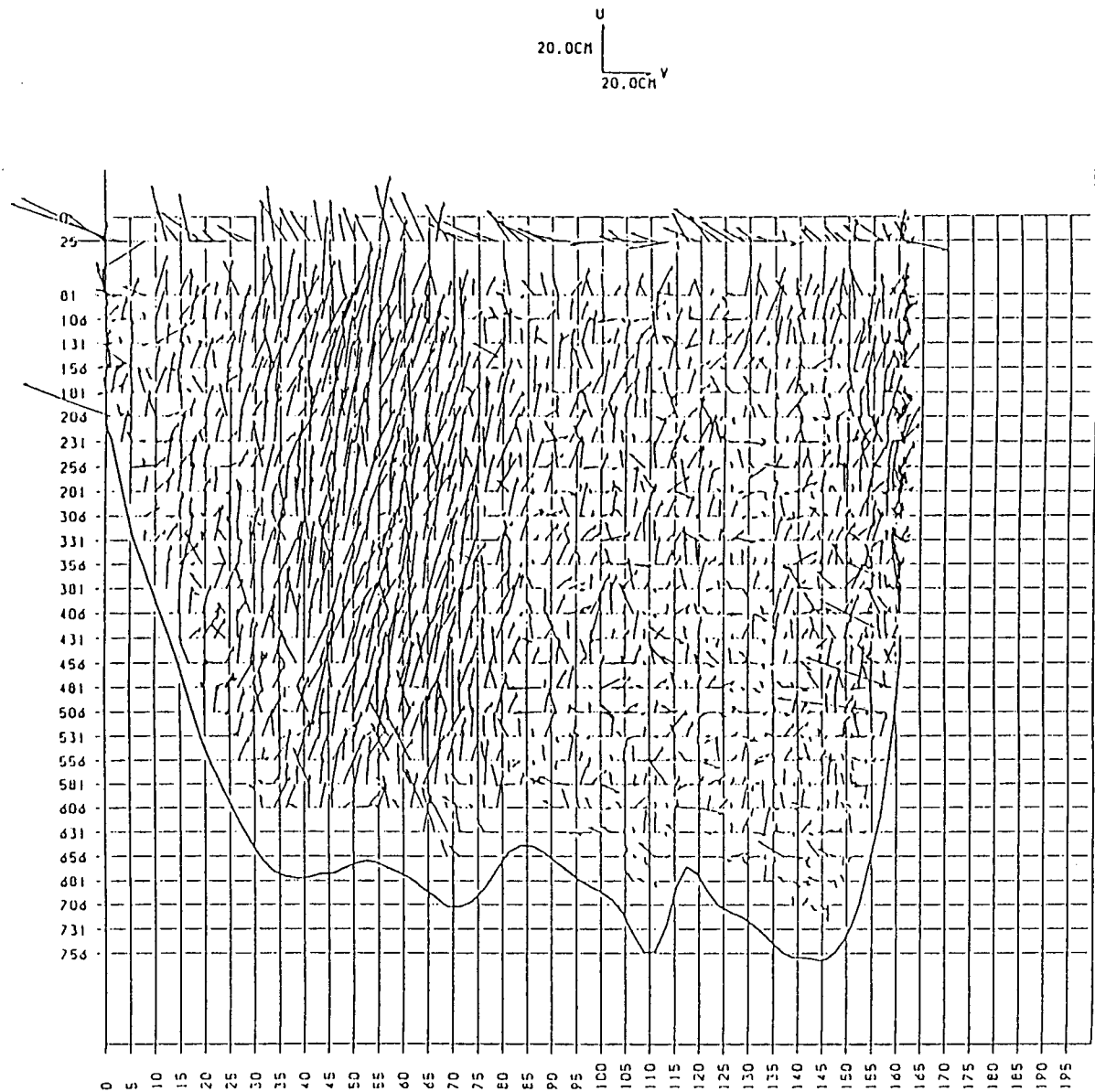


図2. 16 利根川布川地点流速横断分布図(U.V 成分) 2400KHz モード2

第1回 往路 (生データ、4ビーム解析)

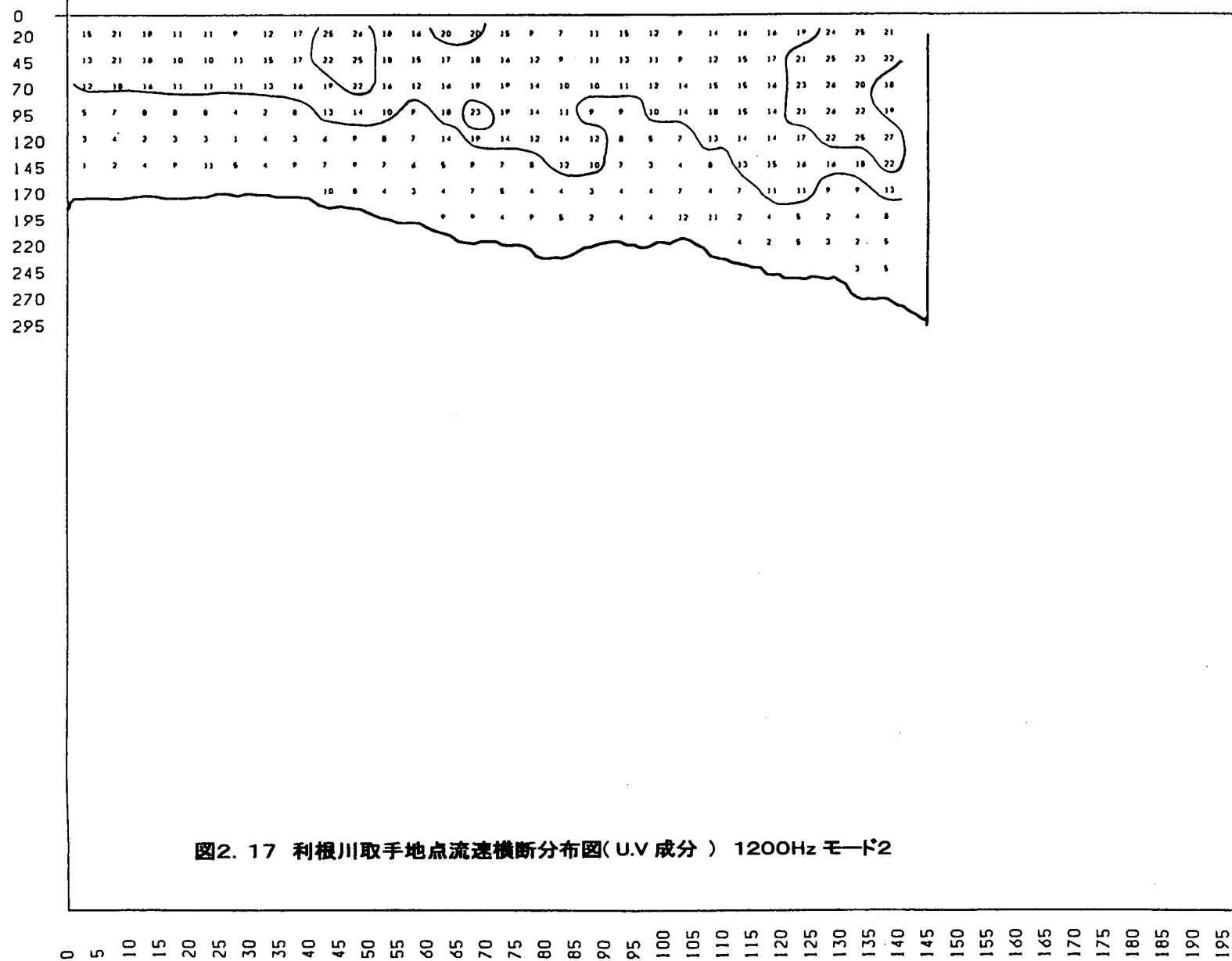


图2. 17 利根川取手地点流速横断分布图(U.V 成分) 1200Hz モード2

0

87

112

137

162

187

212

237

262

287

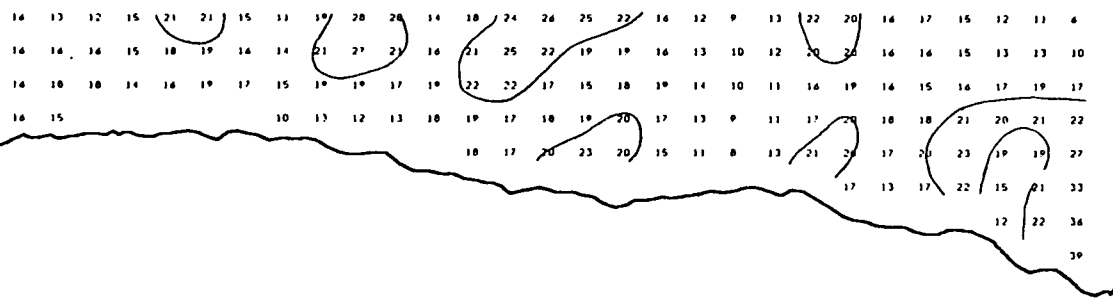


図2. 18 利根川取手地点流速横断分布図(U.V 成分) 1200Hz モード4

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195

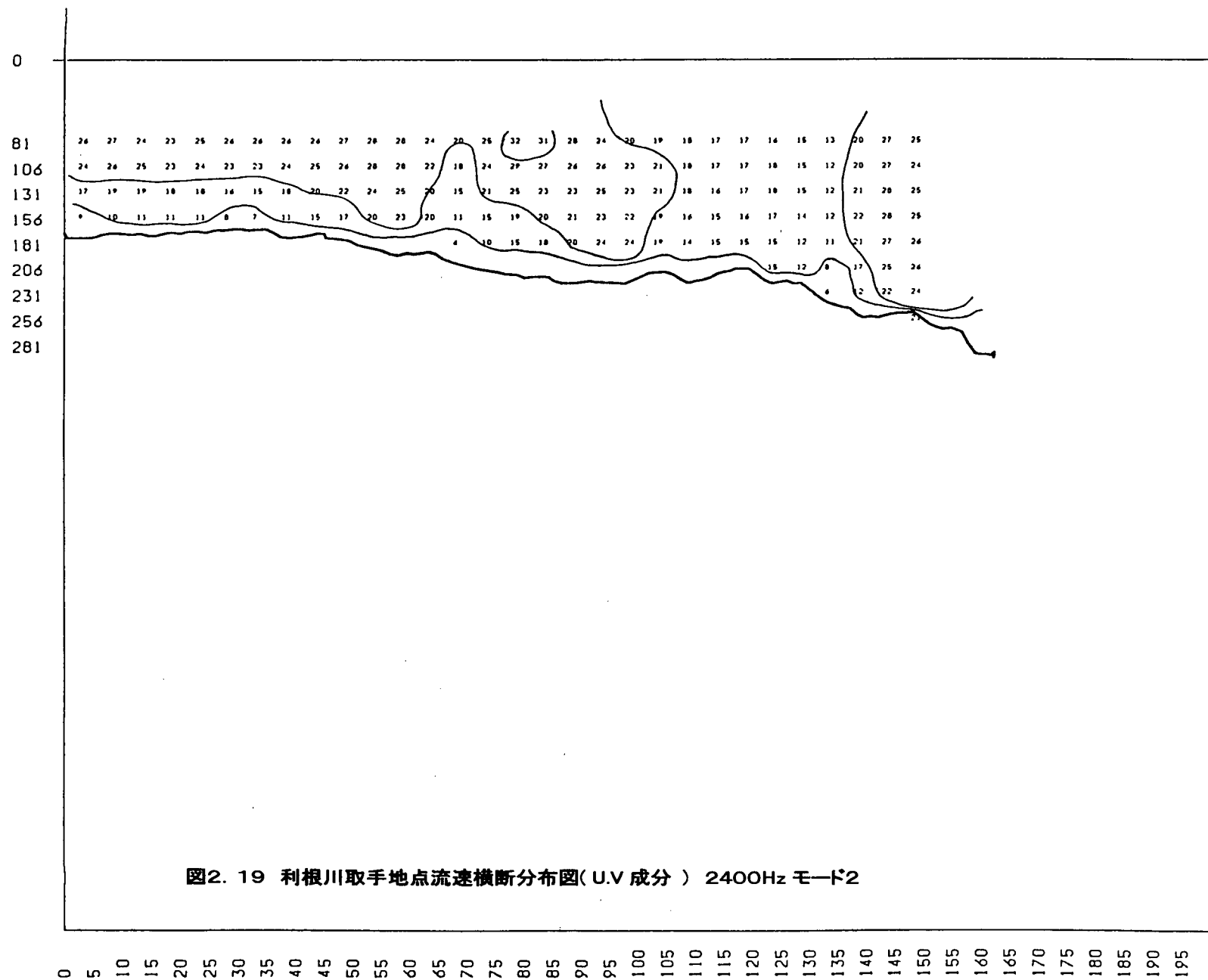


図2. 19 利根川取手地点流速横断分布図(U.V 成分) 2400Hz モード2

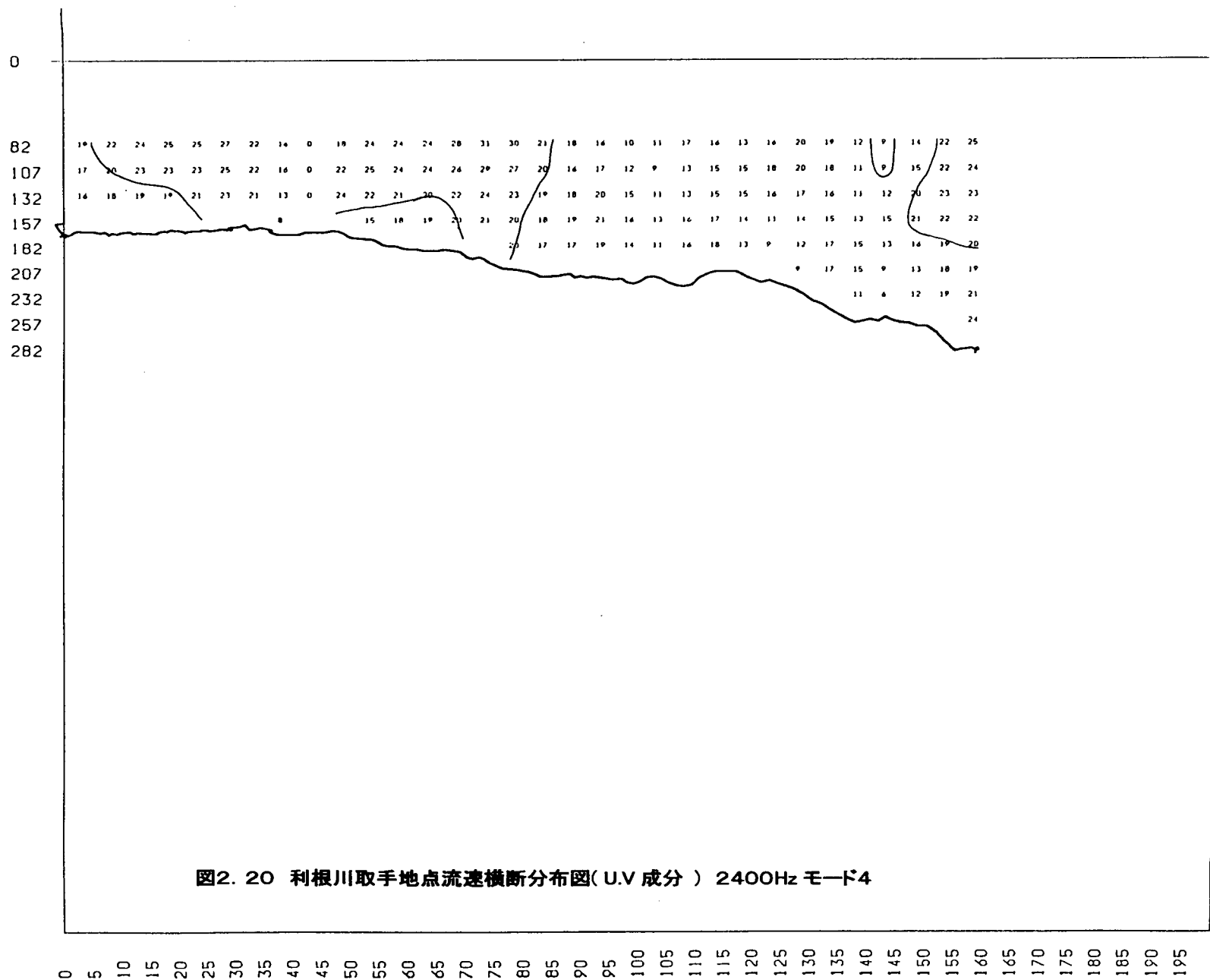


図2. 20 利根川取手地点流速横断分布図(U.V 成分) 2400Hz モード4

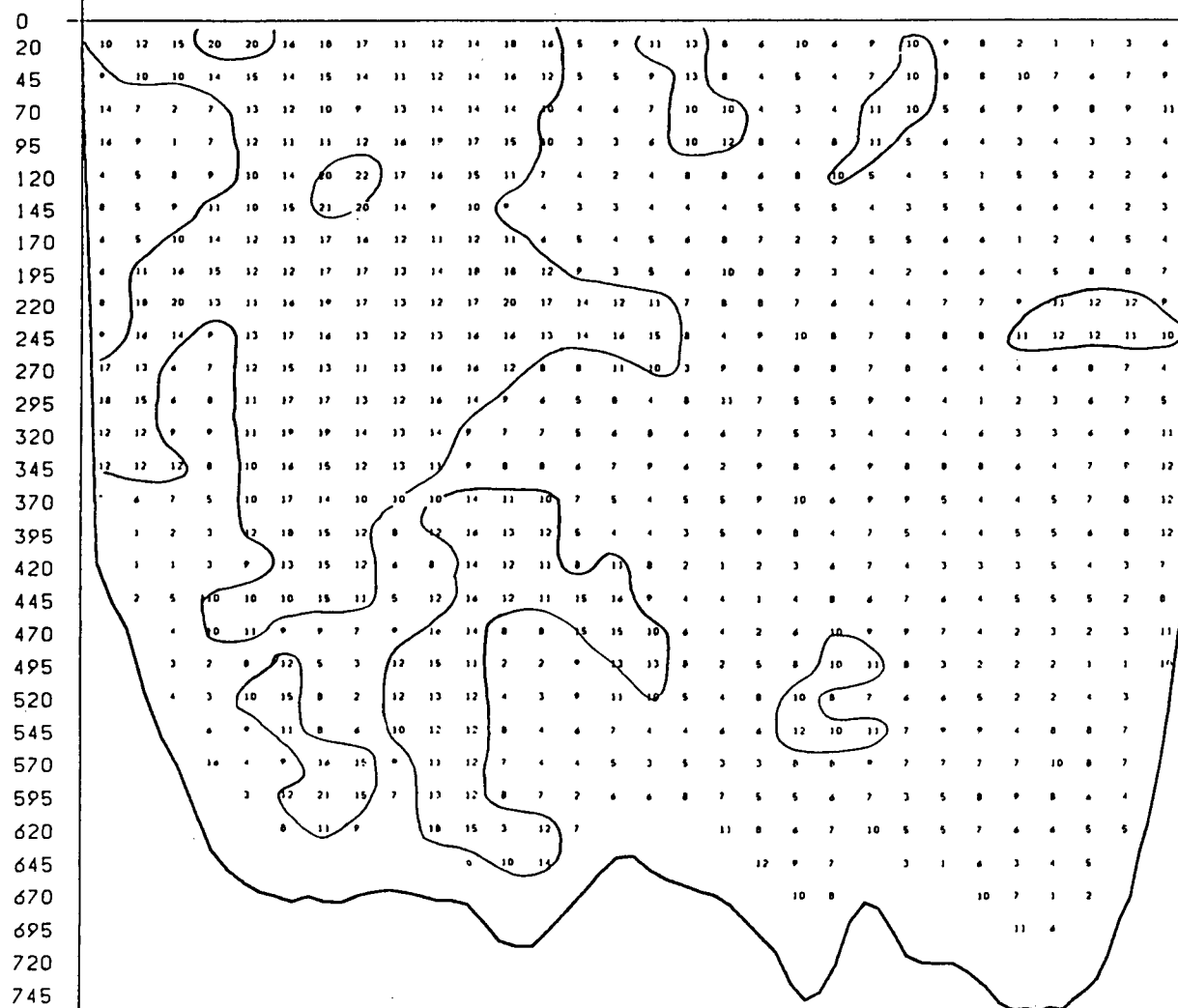
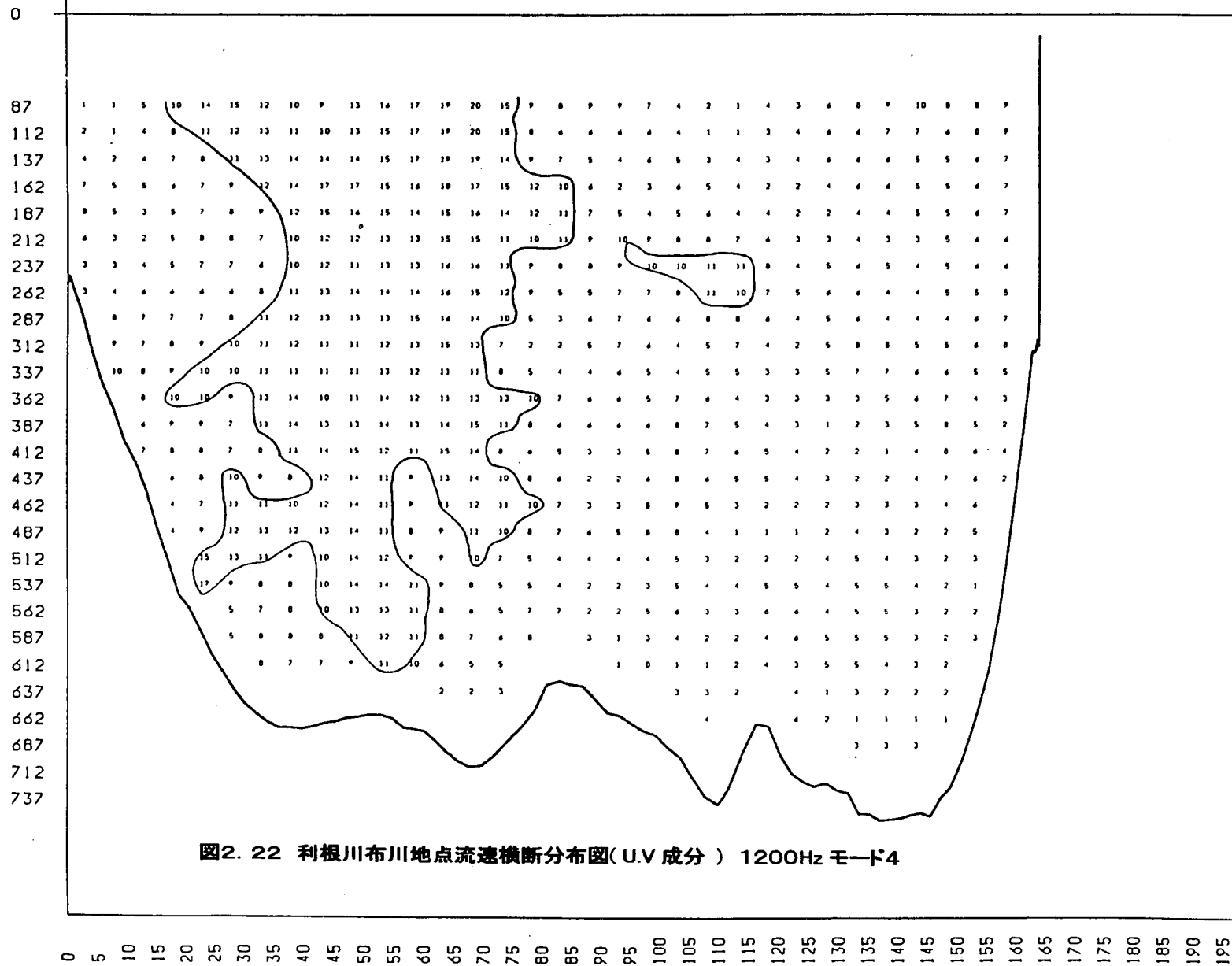


図2. 21 利根川布川地点流速横断分布図(U.V 成分) 1200Hz モード2

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195



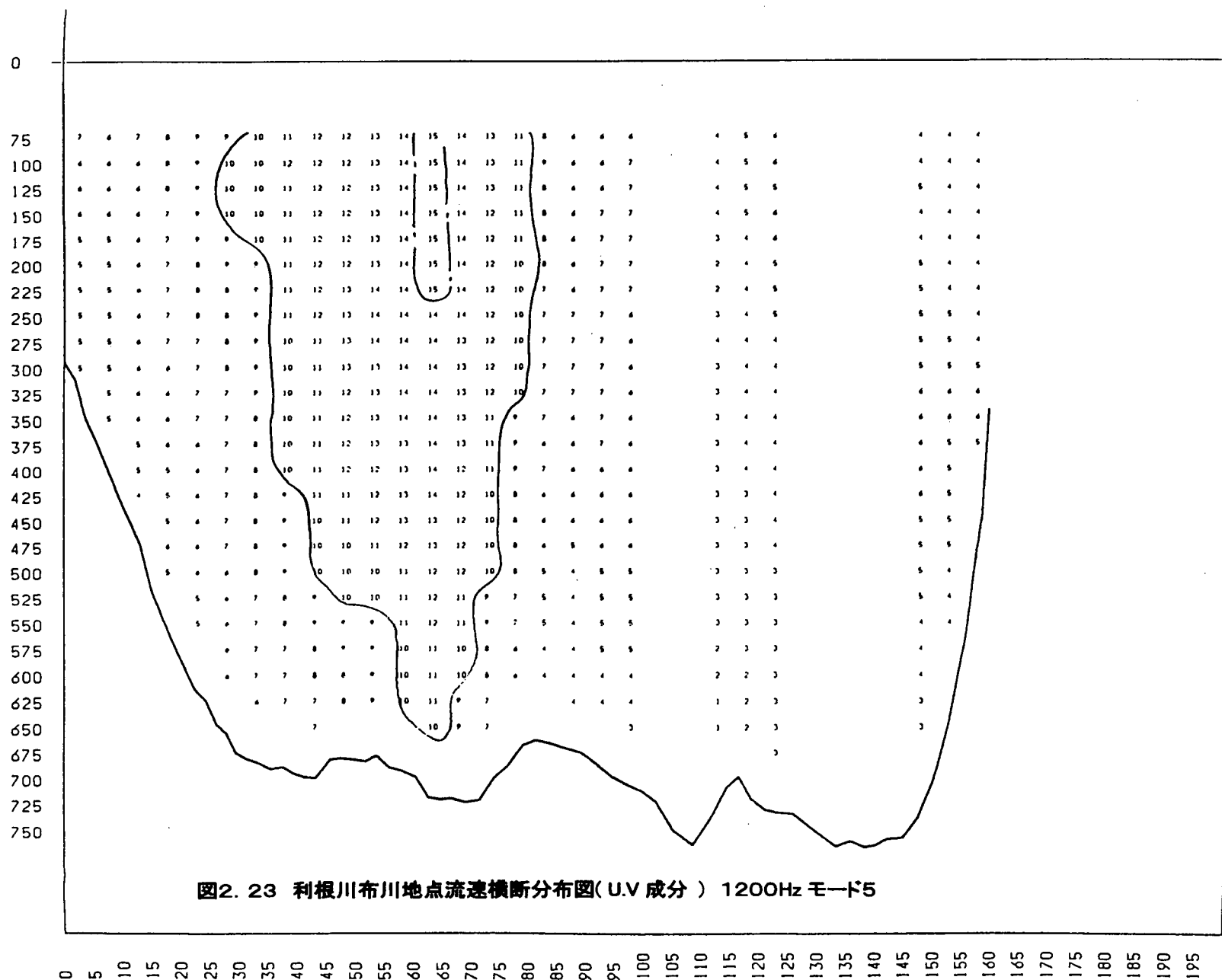


図2. 23 利根川布川地点流速横断分布図(U.V 成分) 1200Hz モード5

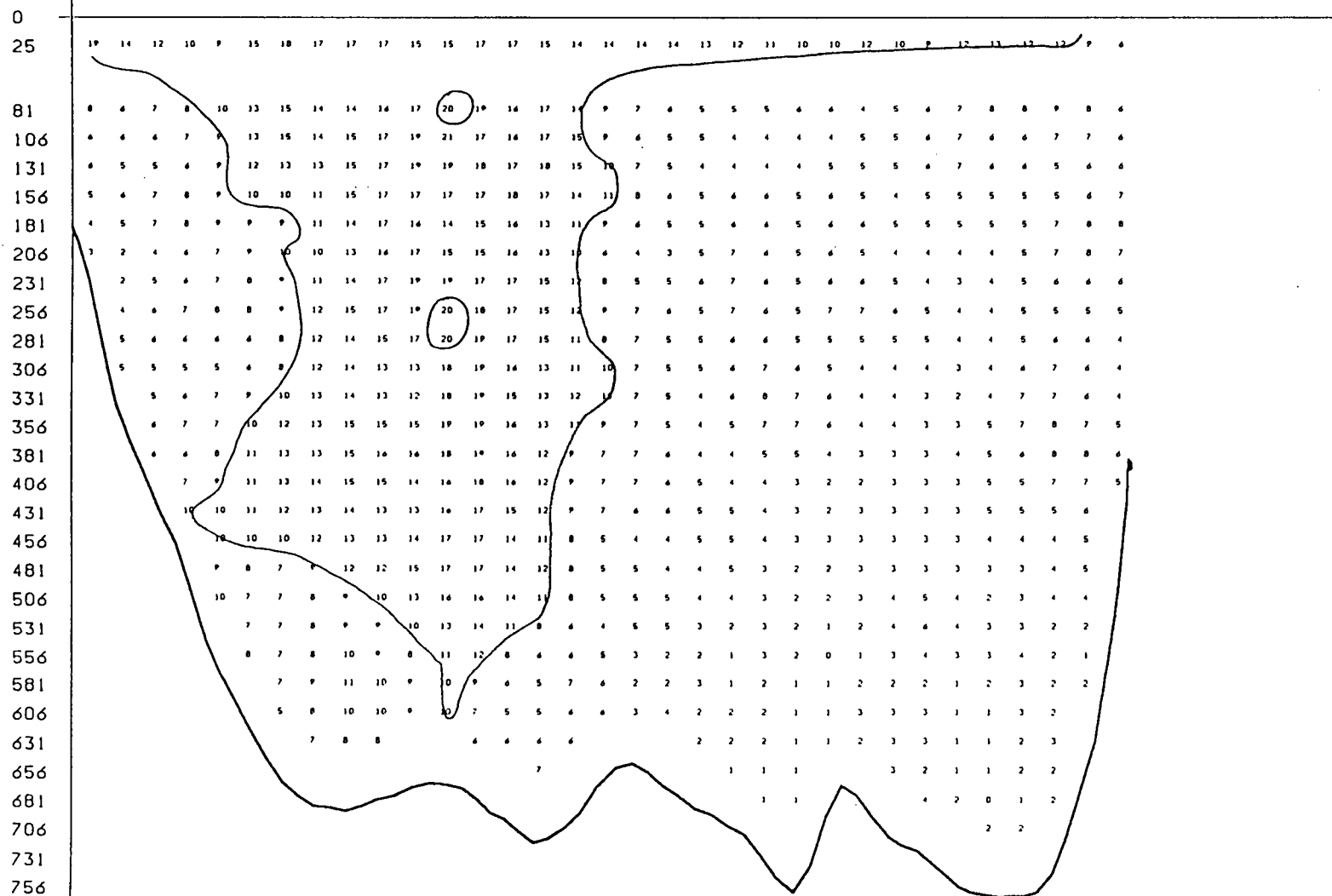


図2.24 利根川布川地点流速横断分布図(U.V 成分) 2400Hz モード2

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195

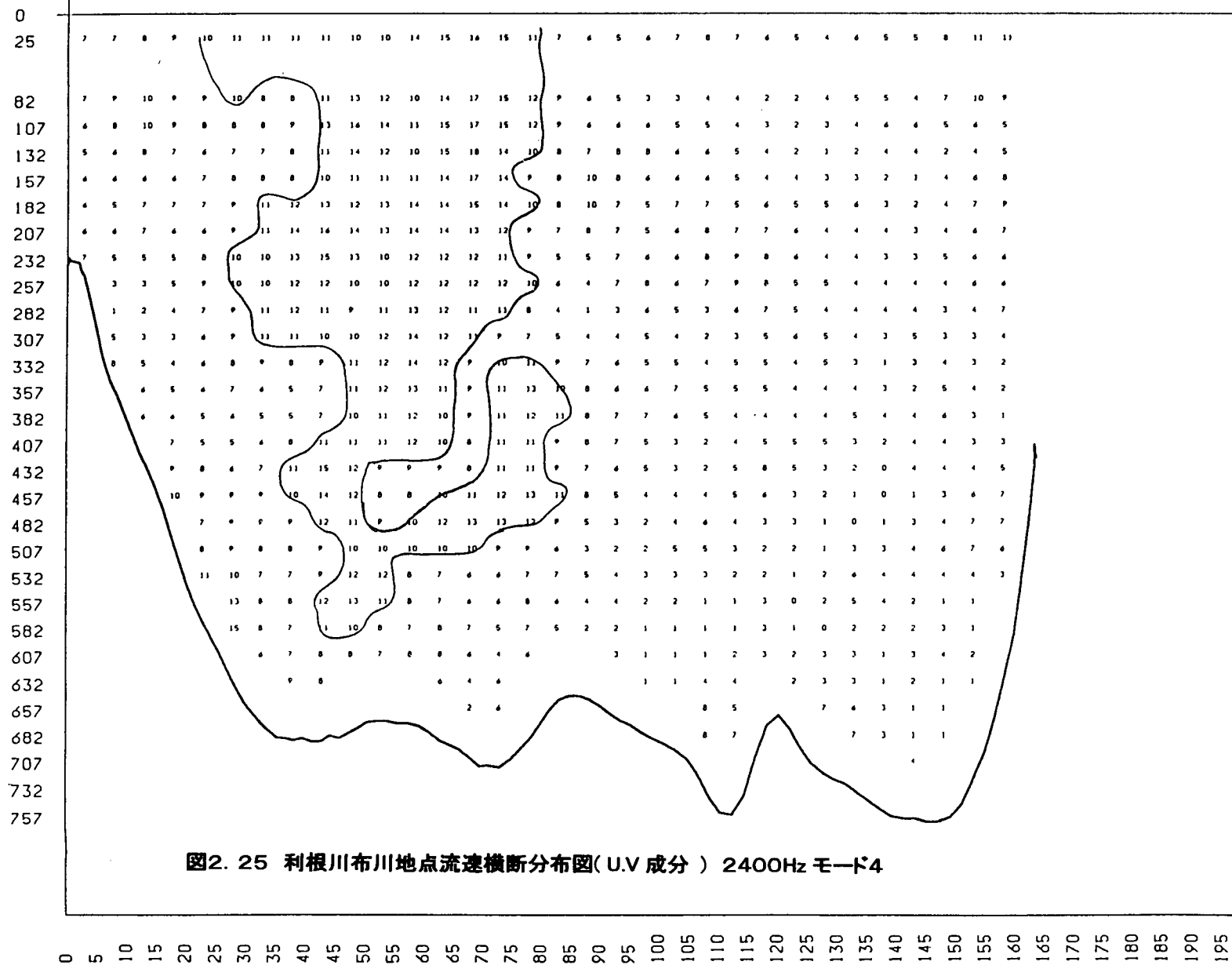


図2. 25 利根川布川地点流速横断分布図(U.V 成分) 2400Hz モード4

2. 4 濁度観測結果

2. 4. 1 河川水中の濁度がADCPによる流量観測に与える影響

ADCPは、河川水中の散乱体からの超音波の反射波を受信することにより、河川流速を求めている。したがって、反射波の反射音強度の違いによって、得られる観測結果が異なる可能性がある。反射音強度の減衰の割合は、河川水中の濁度によって変化する。そこで、ADCP観測と同一深度で濁度を観測し、反射音強度と濁度との関係を調査することによって、濁度がADCPに与える影響を把握することができる。さらに、反射音強度と濁度の関係が把握できれば、ADCPは反射音強度も計測しているため、ADCPによって河川内の流向・流速及び流量だけでなく、濁度分布も推定することが可能となる。

2. 4. 2 濁度計による河川横断観測結果

ADCPで観測している河川横断方向に張ったワイヤーに沿って、10m毎に濁度計を河川水中へ挿入し、水深0.5m毎に濁度を計測した。観測の結果得られた濁度分布を図2. 17、図2. 18に示す。取手、布川両地点とも濁度は概ね10前後でありほとんど差はない。

2. 4. 3 ADCPによって観測された音強度分布

ADCPによって観測された反射音強度データを用いて、観測断面内の音強度分布を作成した。ここで言う音強度は、式(2. 1)によって求められる。

$$EA=SL+SV+constant-20\log(R)-2\alpha R \quad \cdot \cdot \cdot \text{式(2. 1)}$$

ここで、EA:音強度(dB)、SL:発射音強度(dB)、SV:散乱強度(dB)、 α :吸収係数(dB/m)、R:トランスデューサから計測層までのビーム軸の距離(m)を表している。

また、図2. 28～36に作成した代表的な音強度分布図を示す。

2. 4. 4 濁度と音強度との関係の把握

今回の調査では、濁度と音強度との関係は、以下の仮定に基づいて検討を行う。

- (1) 水中の濁度と水中に浮遊する微粒子は比例している。
- (2) ADCPが発射した超音波は、水中に浮遊する微粒子によって反射、散乱される。
- (3) 微粒子の濃度が高くなれば散乱強度が強くなり、ADCPで受信される反射、音強度が大きくなる。
- (4) ADCPによって観測される、いわゆるE.I(Echo Intensity)と濁度の間に相関関係がある。

濁度計による観測と同一ポイントでのADCPによるE.Iデータと濁度データの相関図を作成する。図2.37～50に代表的なケースについて示す。

これから、相関係数は高い場合でも0.38程度で、ほとんどのケースで相関性が認められなかった。

今回の調査では、濁度が8～20程度であり、非常に狭い濁度分布しか得られておらず、これらのデータから濁度がADCPに与える影響について明らかにすることはできなかった。

2. 5 まとめ

利根川における各種の調査により、河川におけるADCPの特性が以下のように判明した。

(1) 流量観測結果によると、ADCPと他の観測手法との間に大きな差はなく、少なくとも従来の手法と同程度の流量観測精度を有していると考えられる。

(2) 使用周波数の違いによる流量観測結果は、2400KHzの方が他の観測手法に近い値を算出していることが多いが、2400KHzと1200KHzの差は概ね10%程度であり、どちらを使用してもそれほど大きな差は無いと考えられる。

(3) 流量の算出方法の違いによる流量観測結果は、概ね10%程度の差であり特に大きな差は認められなかった。したがって、通常はTRANSECTによる算出流量を用いても実用上問題はないと考えられる。ただし、洪水時などの河川の流れが大きく乱れているような条件下での検討は今回行っていないため、現在のところ、このような条件下におけるTRANSECTの流量算出精度は不明である。

(4) 観測モードの違いによる流量観測結果は、モード5、モード4、モード2の順で他の手法との差が小さかったものの、どのモードともそれほど大きな差はなかった。モード5は今回最も他の手法との差が小さかったが、計測可能水深が小さく、実河川においては適用しにくいモードであるため、通常はモード4による観測で十分であると考えられる。

(5) 以上のことから、通常の河川におけるADCPを用いた流量観測を行う際には、1200KHz、モード4による観測で十分であると考えられる。

(6) ADCPによる観測は、従来の方法と比較して、短時間で非常に多くの情報を得ることができ、観測横断面内の流速分布も知ることができるため、河川内の流れの様子を把握するのに非常に有効であることが確認された。

(7) ADCPによる流速観測結果と他の観測手法による結果を比較すると、流向・流速分布ともほぼ同様の傾向を示していることが確認された。

(8) ADCPで観測している反射音強度と河川内の濁度との関係を調査したところ、濁度が狭い範囲でしか観測できなかったため、明瞭な関係は見い出せなかった。

155 145 135 125 115 105 95 85 75 65 55 45 35 25 15 7.5

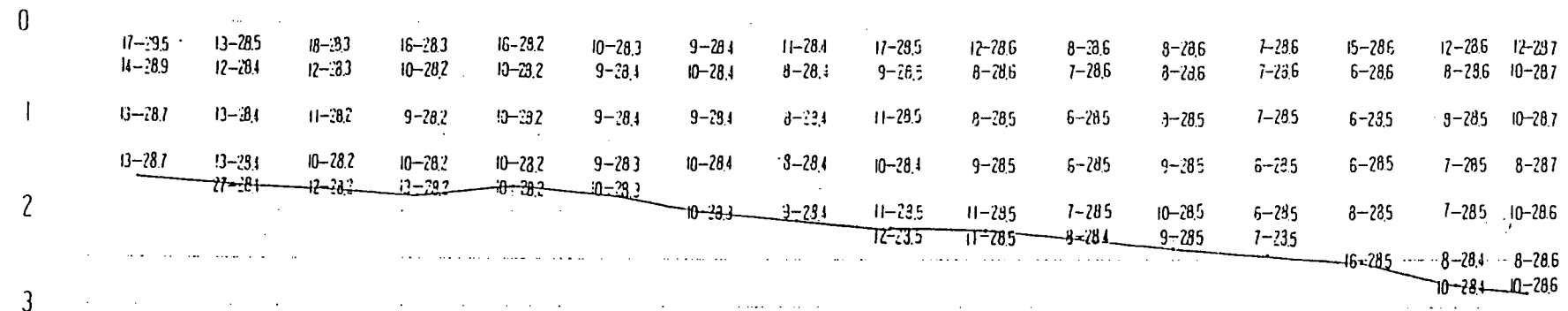


図2.26 取水地点濁度および水温分布図 (濁度:ppm—水温:°C)

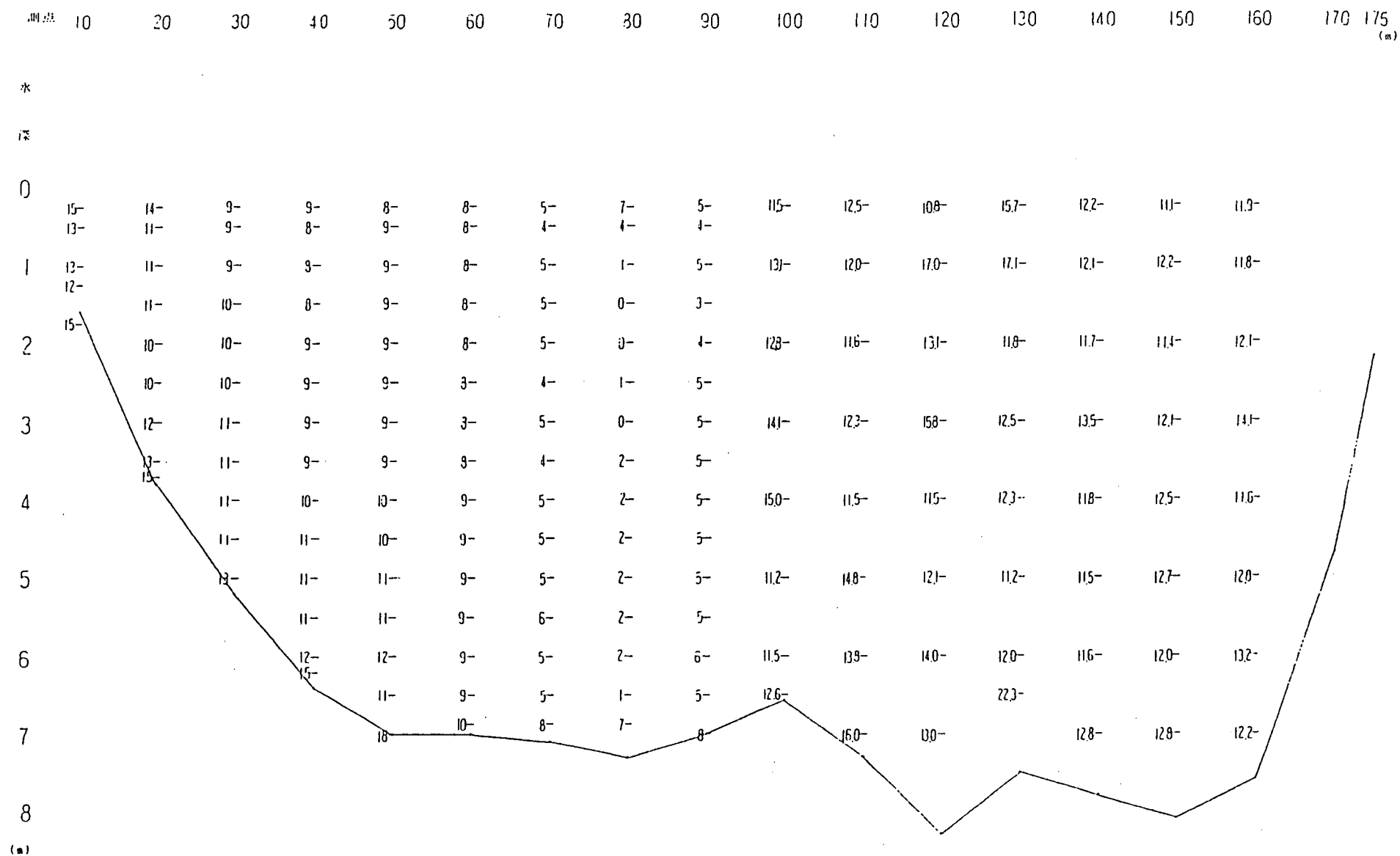


图2.27 布川地点濁度分布图 (ppm)

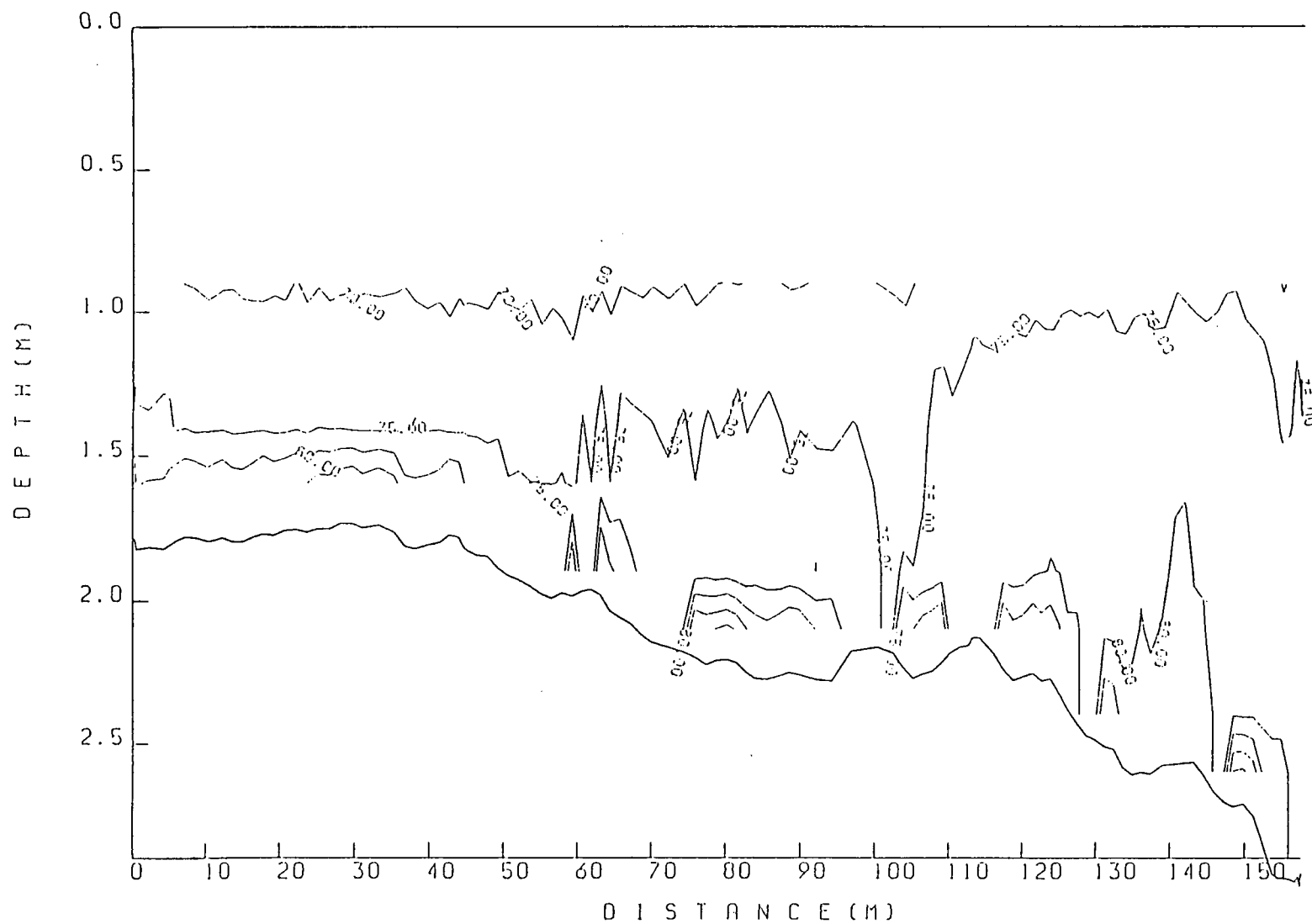


图2. 28 音強度分布図

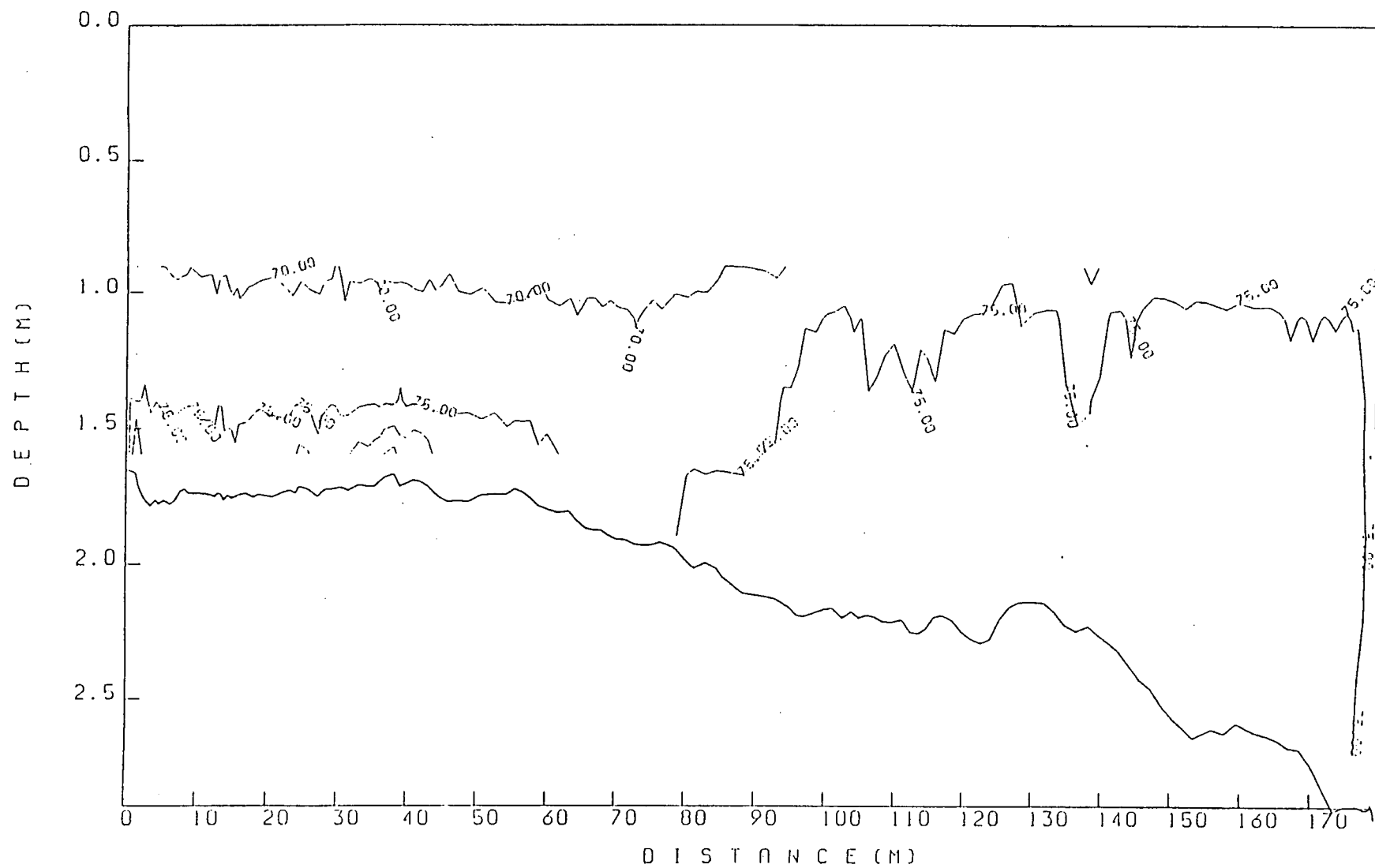


図2. 29 音強度分布図

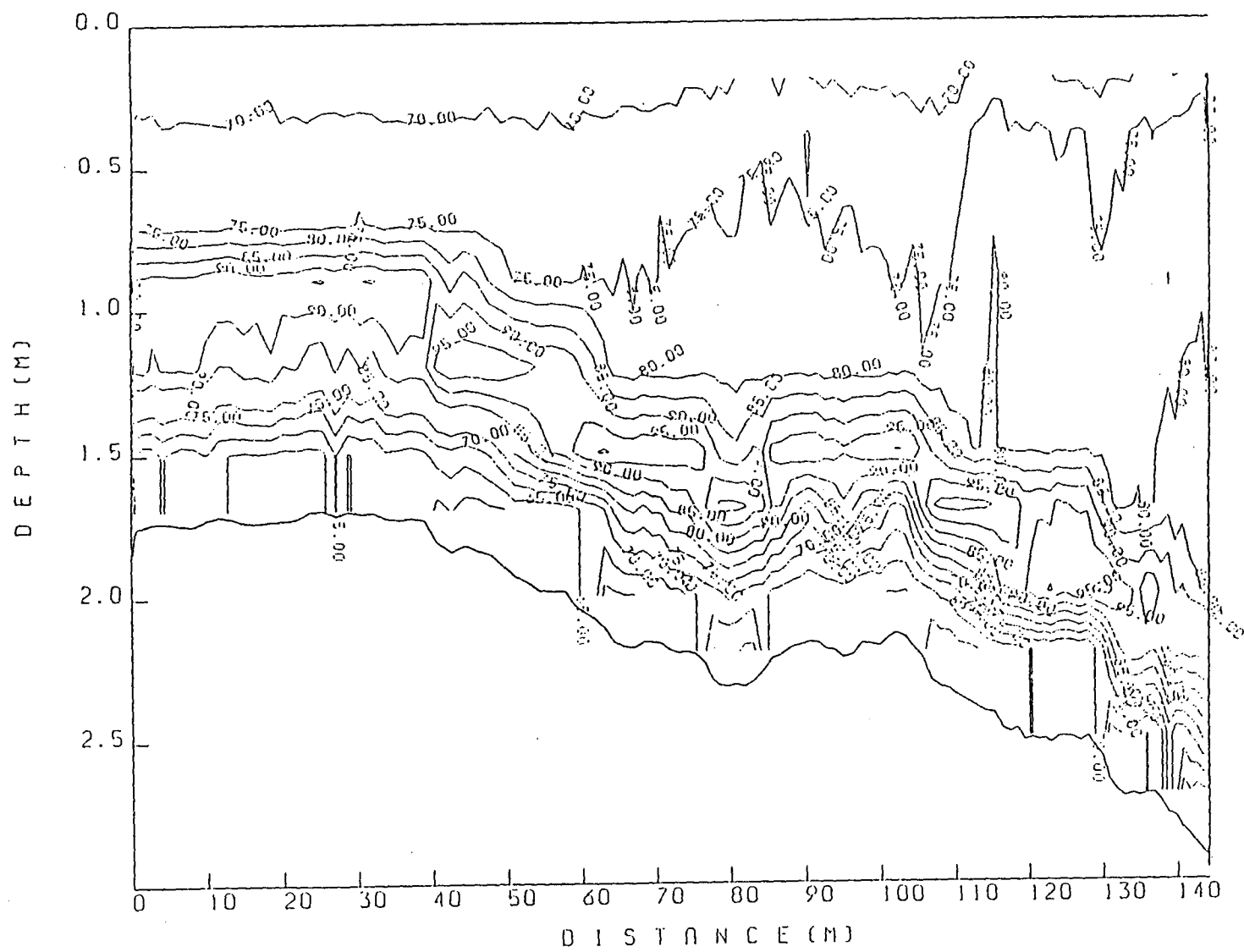


图2.30 音強度分布図

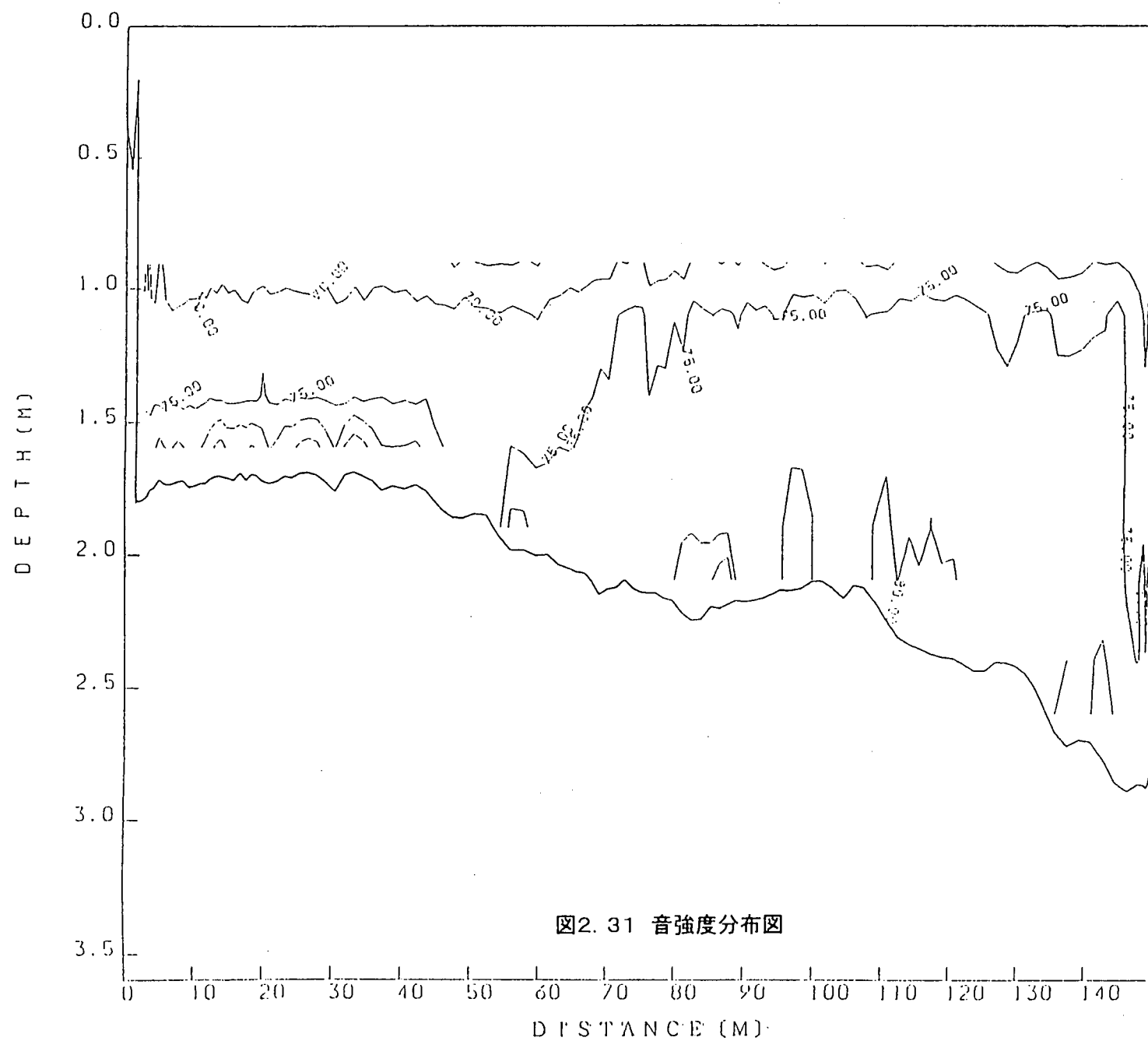


図2. 31 音強度分布図

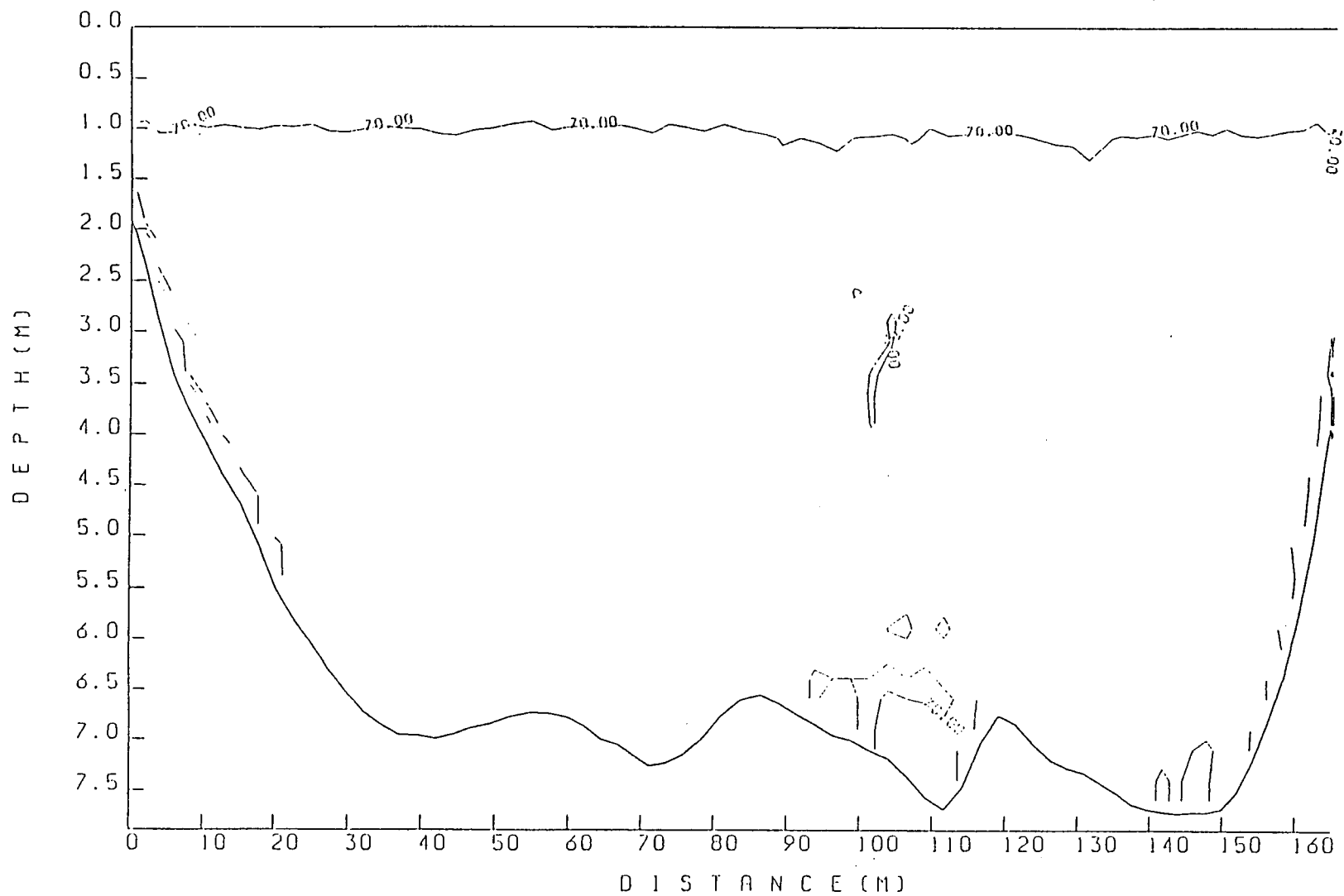


图2.32 音強度分布図

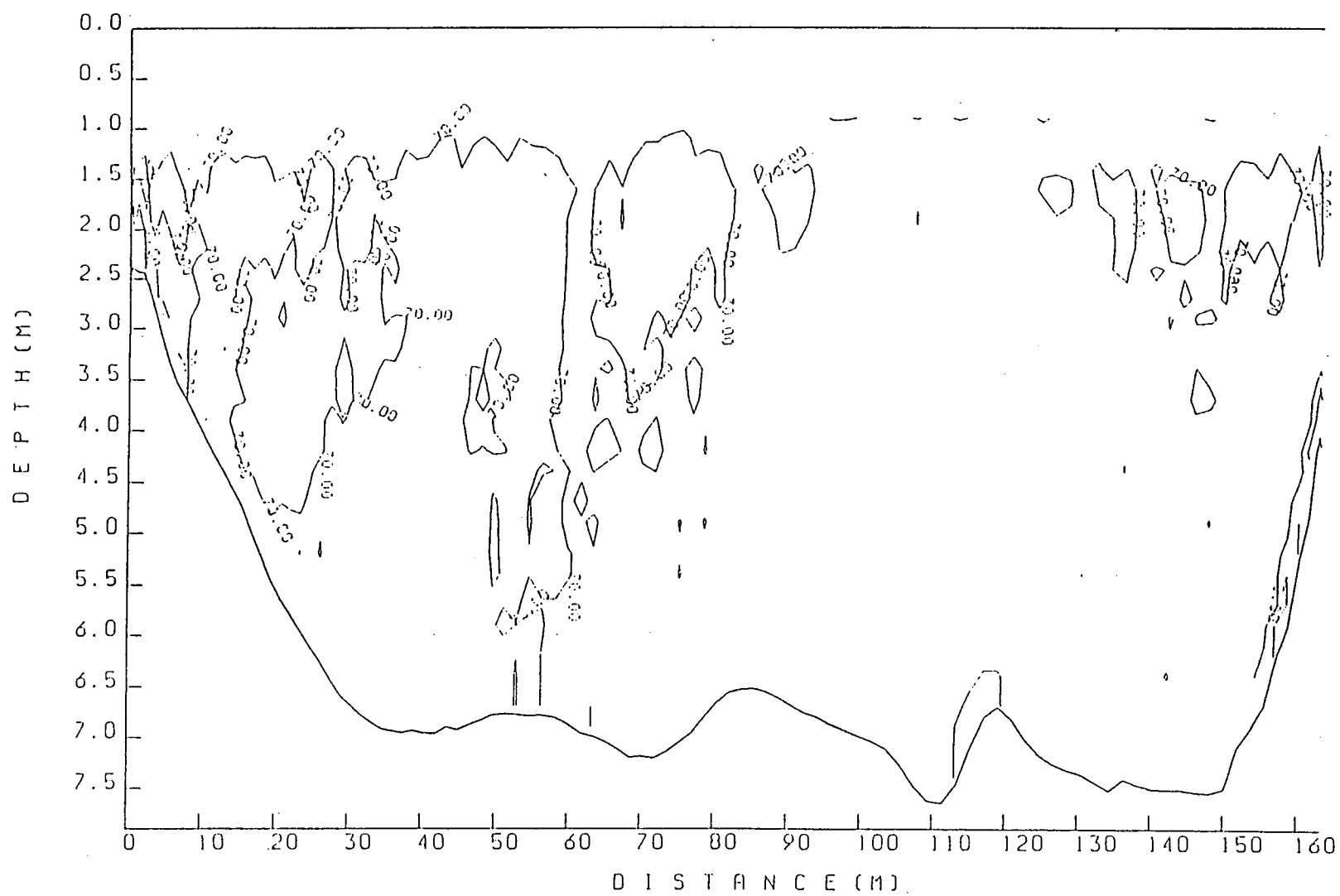


图2.33 音强度分布图

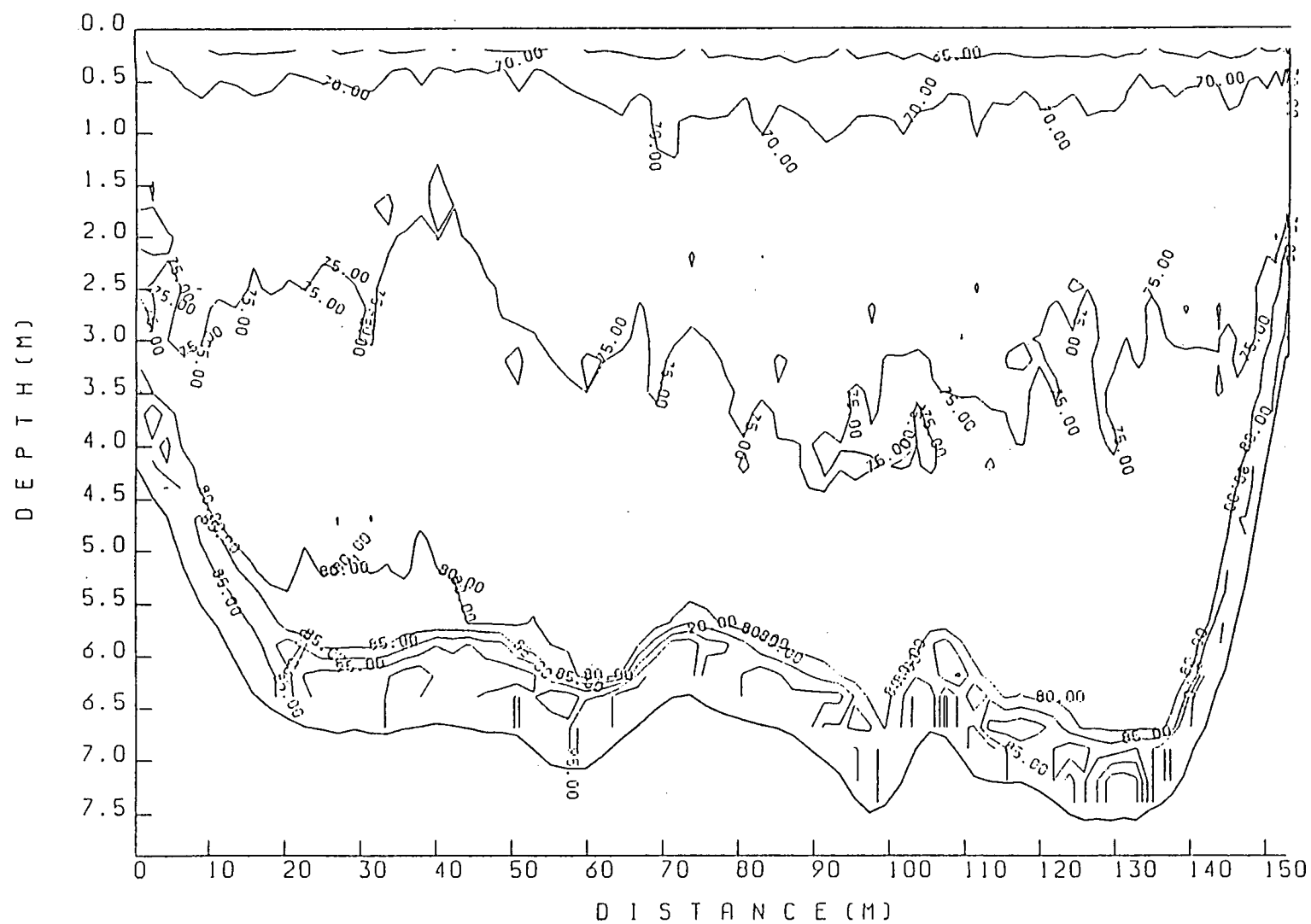


图2.34 音强度分布图

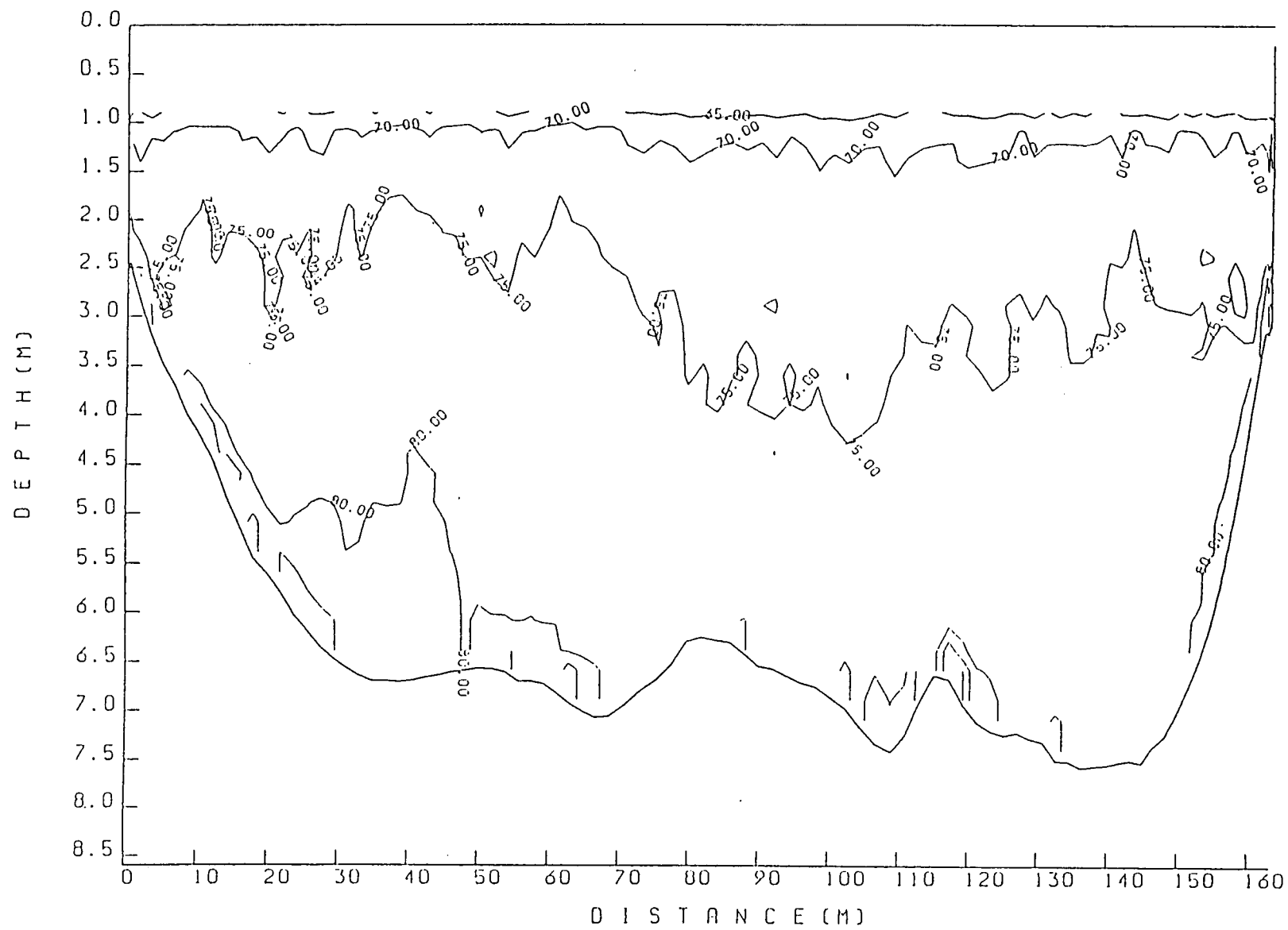


图2.35 音强度分布图

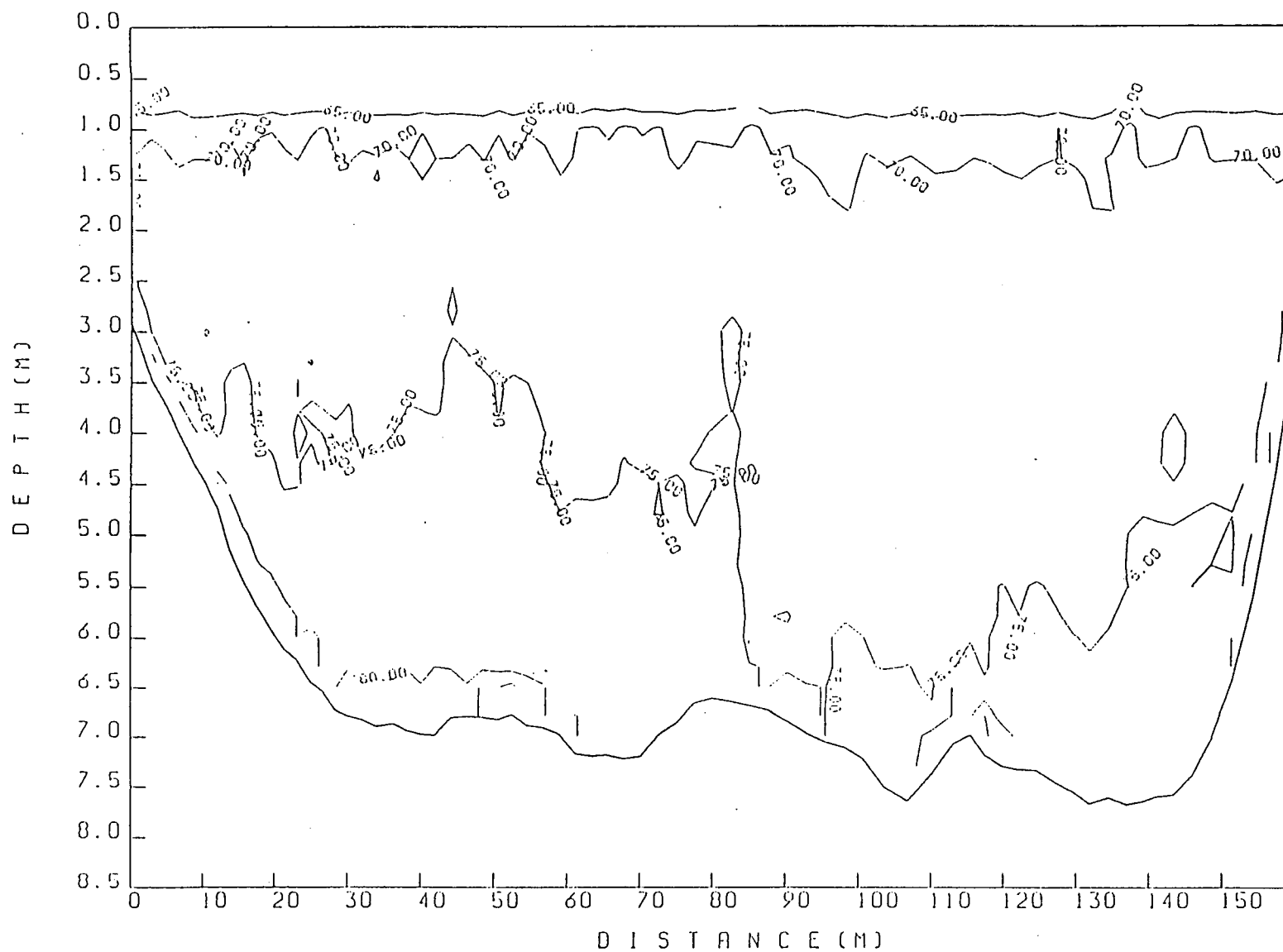
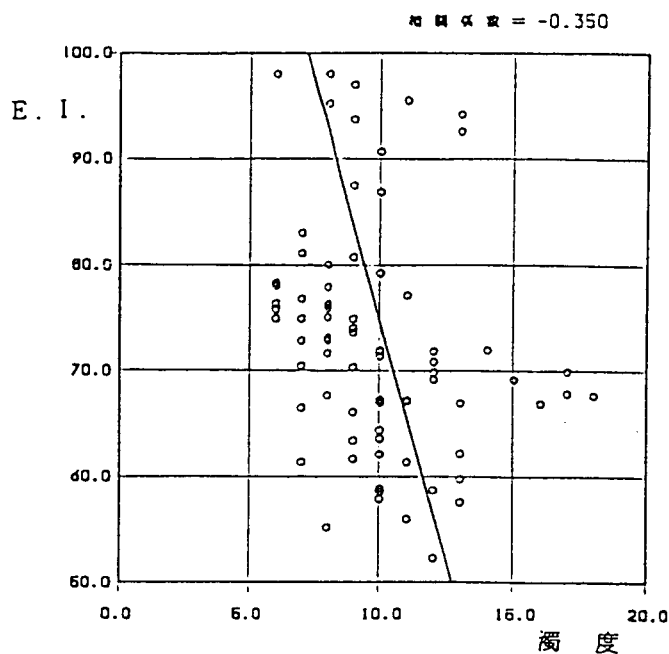


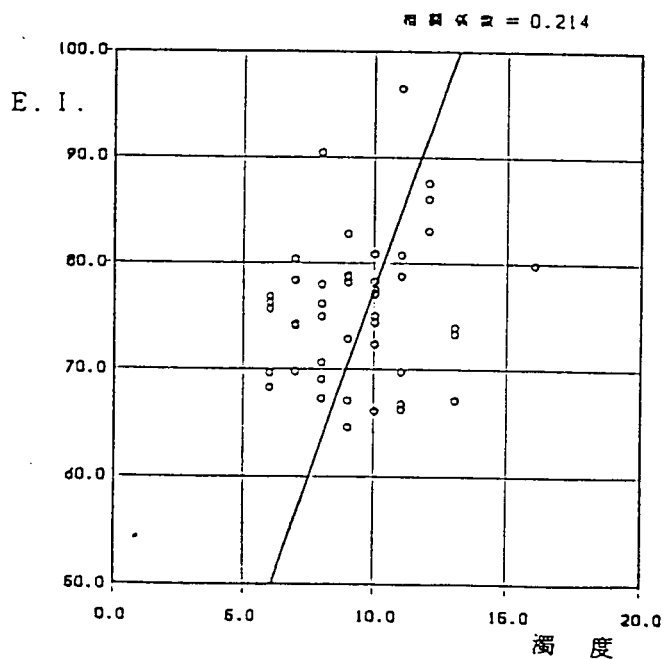
图2.36 音强度分布图



X	Y	X	Y
17.00	67.90	9.00	63.40
14.00	72.00	17.00	70.00
13.00	92.60	9.00	74.10
13.00	62.20	11.00	77.20
13.00	67.00	10.00	90.70
12.00	70.90	11.00	67.10
13.00	94.20	12.00	58.70
13.00	59.80	12.00	69.20
27.00	53.90	8.00	73.20
18.00	67.70	8.00	73.10
12.00	71.90	9.00	97.00
11.00	95.50	11.00	61.40
10.00	58.90	11.00	56.00
12.00	52.30	8.00	67.70
16.00	67.00	7.00	72.90
10.00	71.40	6.00	76.40
9.00	93.70	6.00	98.00
10.00	64.40	7.00	61.40
13.00	57.60	8.00	55.20
16.00	66.90	8.00	71.70
10.00	71.90	8.00	76.40
10.00	86.90	8.00	78.00
10.00	67.00	9.00	80.80
10.00	57.90	10.00	79.30
10.00	67.30	9.00	61.70
9.00	70.40	7.00	70.50
9.00	73.70	7.00	75.00
9.00	87.50	7.00	76.90
10.00	62.10	6.00	78.10
9.00	66.10	6.00	100.60
10.00	72.00	7.00	66.50
9.00	75.00	15.00	69.20
10.00	100.60	6.00	75.00
10.00	58.60	6.00	75.90
11.00	67.30	6.00	78.40
8.00	72.90	8.00	95.20
8.00	76.00	16.00	67.00
8.00	98.00	12.00	69.90
		8.00	76.30
		8.00	78.00
		7.00	81.20
		7.00	83.10
		8.00	80.10
		10.00	63.60

N 82 R -0.3499 A -0.904557E+01 B 0.164987E+03

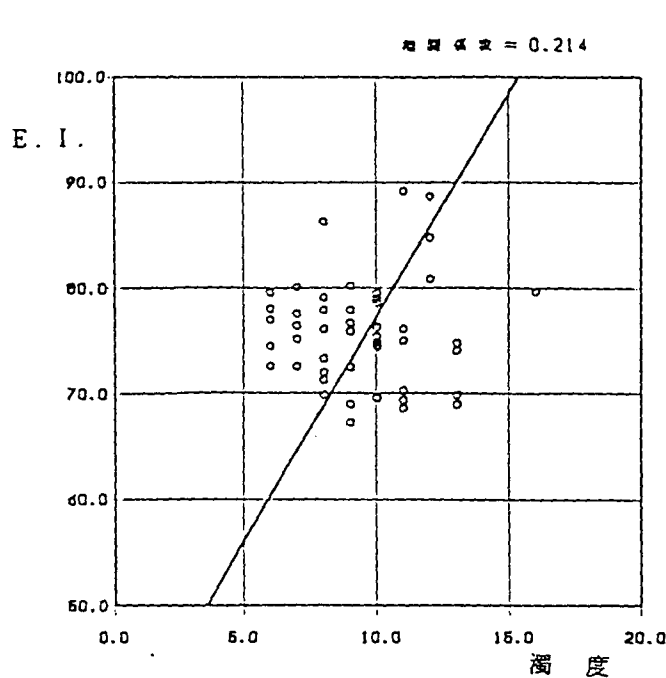
図2. 37 取手地点における濁度とE.I. (エコーインテンシティー)の相関図
(1200KHz、モード2、往路)



X	Y	X	Y
13.00	67.20	9.00	82.80
13.00	74.00	7.00	69.80
13.00	67.10	6.00	76.30
13.00	73.40	6.00	76.90
27.00	84.00	7.00	78.40
11.00	66.80	6.00	68.30
10.00	74.50	6.00	75.70
12.00	86.10	8.00	78.00
11.00	66.30	16.00	79.90
10.00	74.40	8.00	69.10
12.00	83.10	7.00	74.30
10.00	66.10	7.00	74.10
10.00	72.40	5.00	76.20
10.00	75.00	10.00	77.60
9.00	64.60		
9.00	72.90		
10.00	75.10		
9.00	67.10		
10.00	74.50		
10.00	78.30		
8.00	67.30		
8.00	75.00		
9.00	78.90		
11.00	69.80		
10.00	77.10		
11.00	78.80		
12.00	87.60		
8.00	70.70		
9.00	78.70		
11.00	80.80		
11.00	96.50		
6.00	69.70		
6.00	76.90		
7.00	80.40		
8.00	90.50		
8.00	69.10		
9.00	78.20		
10.00	80.90		

N 52 R 0.2137 A 0.714743E+01 B 0.611041E+01

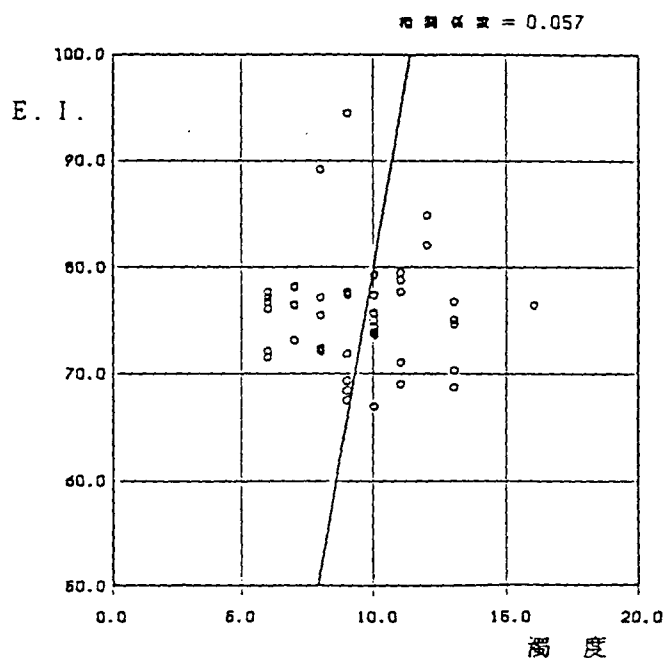
図2. 38 取手地点における濁度とE.I. (エコーインテンシティー)の相関図
(1200KHz、モード4、復路)



X	Y	X	Y
13.00	69.90	9.00	80.20
13.00	74.80	7.00	72.60
13.00	69.00	6.00	75.10
13.00	74.10	6.00	79.60
27.00	85.70	7.00	80.10
11.00	69.40	6.00	74.50
10.00	74.50	6.00	78.00
12.00	88.70	8.00	79.10
11.00	68.60	16.00	79.70
10.00	74.50	8.00	71.30
12.00	80.90	7.00	75.20
10.00	69.60	7.00	76.50
10.00	74.60	8.00	77.90
10.00	76.30	10.00	78.60
9.00	67.30		
9.00	72.50		
10.00	74.40		
9.00	69.00		
10.00	75.40		
10.00	79.00		
8.00	69.90		
8.00	76.10		
9.00	76.70		
11.00	70.30		
10.00	74.90		
11.00	75.00		
12.00	84.80		
8.00	72.00		
9.00	75.90		
11.00	76.10		
11.00	89.20		
6.00	72.60		
6.00	77.00		
7.00	77.60		
8.00	86.30		
8.00	73.30		
9.00	77.90		
10.00	79.50		

N 52 R 0.2142 A 0.423904E+01 B 0.348842E+02

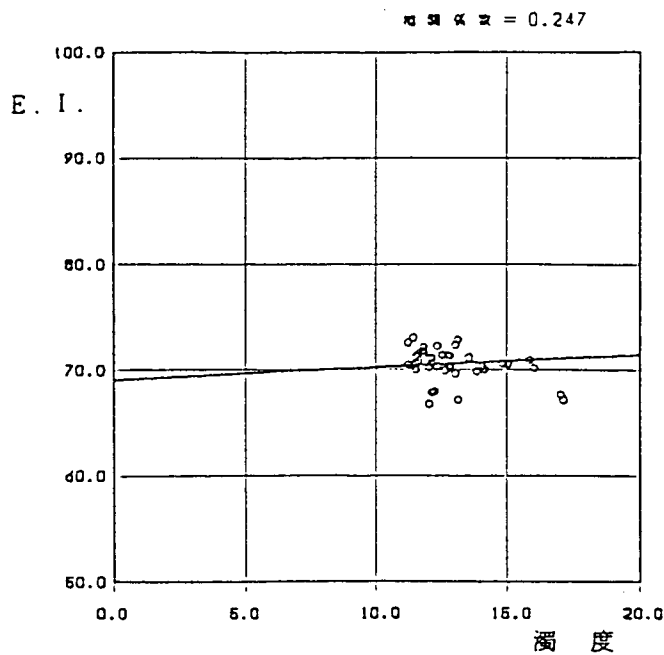
図2. 39 取手地点における濁度とE. I. (エコーインテンシティー)の相関図
(2400KHz、モード2、往路)



X	Y	X	Y
13.00	70.40	9.00	94.50
13.00	75.10	7.00	73.20
13.00	68.80	6.00	77.20
13.00	74.70	6.00	77.70
27.00	79.20	7.00	78.10
11.00	69.10	6.00	71.60
10.00	74.50	6.00	76.10
12.00	82.10	8.00	77.20
9.00	68.50	16.00	76.50
10.00	74.40	8.00	72.20
13.00	76.80	7.00	76.40
10.00	67.00	7.00	76.60
10.00	73.60	8.00	75.50
10.00	75.00	10.00	75.60
9.00	67.60		
9.00	71.90		
10.00	74.00		
9.00	69.40		
10.00	73.80		
10.00	77.40		
8.00	72.10		
8.00	77.20		
9.00	77.40		
11.00	71.10		
10.00	75.60		
11.00	77.70		
12.00	84.90		
8.00	72.50		
9.00	77.40		
11.00	75.80		
11.00	79.50		
6.00	72.20		
6.00	76.30		
7.00	78.30		
8.00	89.20		
8.00	72.40		
9.00	77.70		
10.00	79.30		

N 52 R 0.0572 A 0.143595E+02 B -0.635614E+02

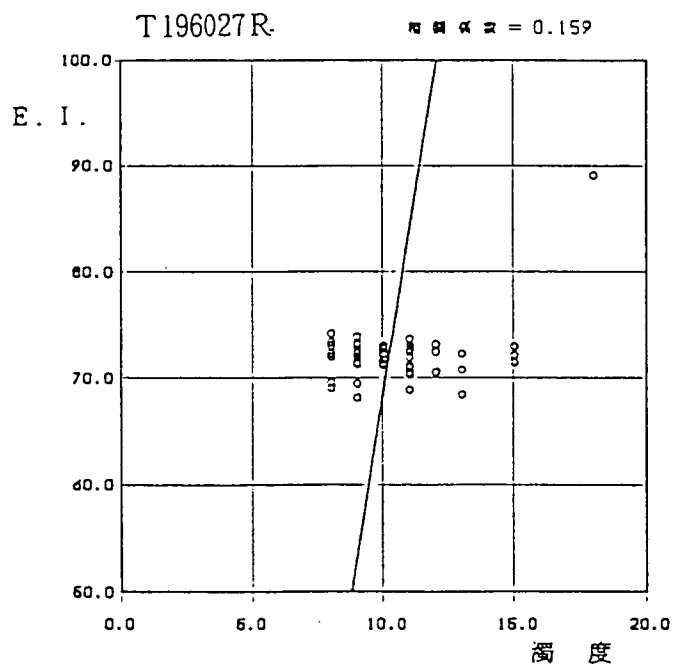
図2. 40 取手地点における濁度とE. I. (エコーインテンシティー)の相関図
(2400KHz、モード4、復路)



X	Y	X	Y
13.00	68.50	10.30	73.00
12.00	70.40	11.00	73.00
13.00	72.20	11.00	73.10
11.00	68.70	12.00	73.20
11.00	72.90	11.00	73.70
10.00	72.90	13.00	89.10
10.00	72.40	8.00	69.60
10.00	71.40	8.00	73.40
13.00	70.80	8.00	74.20
13.00	71.50	8.00	73.10
9.00	69.50	8.00	72.30
10.00	72.70	8.00	72.00
10.00	71.70	9.00	72.30
10.00	71.20	9.00	72.60
11.00	71.00	9.00	72.40
11.00	70.30	9.00	73.10
11.00	70.60	9.00	73.30
11.00	71.20	9.00	73.90
13.00	72.30	10.00	110.40
8.00	69.10		
8.00	73.00		
9.00	72.70		
9.00	72.50		
9.00	72.00		
9.00	71.50		
10.00	72.20		
11.00	72.50		
11.00	72.80		
11.00	72.60		
12.00	72.50		
13.00	73.00		
9.00	68.20		
9.00	71.30		
9.00	72.70		
9.00	73.10		
9.00	73.20		
9.00	73.10		
10.00	73.10		

N 57 R 0.1593 A 0.152936E+02 B -0.845058E+02

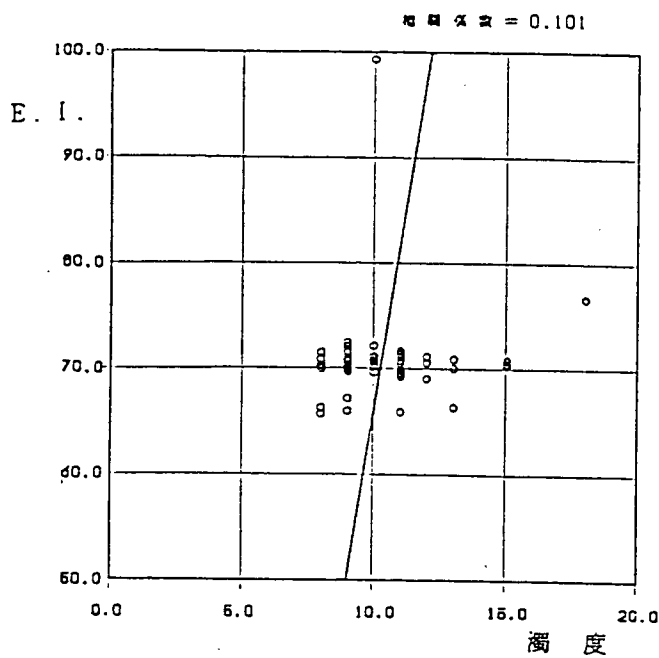
図2. 41 布川地点左岸側における濁度とE.I. (エコーインテンシティー)の相関図
(2400KHz、モード2、往路)



X	Y	X	Y
13.10	67.20	12.10	71.20
12.80	71.40	12.50	71.50
14.10	70.10	12.70	71.40
15.00	70.40	12.00	71.10
11.20	72.40	12.30	70.20
11.50	70.70	13.00	67.70
12.40	70.00		
12.00	66.80		
11.60	71.60		
12.30	70.40		
11.50	70.10		
14.80	70.70		
13.80	69.90		
16.00	70.20		
17.00	67.70		
13.10	72.90		
13.80	71.00		
11.50	70.60		
12.10	70.70		
14.00	70.40		
13.00	72.40		
16.20	75.40		
17.10	67.20		
11.80	72.20		
12.50	71.40		
12.30	72.30		
11.20	70.50		
12.00	70.30		
22.30	70.30		
12.10	67.90		
11.70	71.80		
13.50	71.20		
11.80	71.80		
11.50	71.30		
11.60	70.90		
12.80	70.50		
12.20	68.00		
11.40	73.10		

N 44 R 0.2471 A 0.119930E+00 B 0.690339E+02

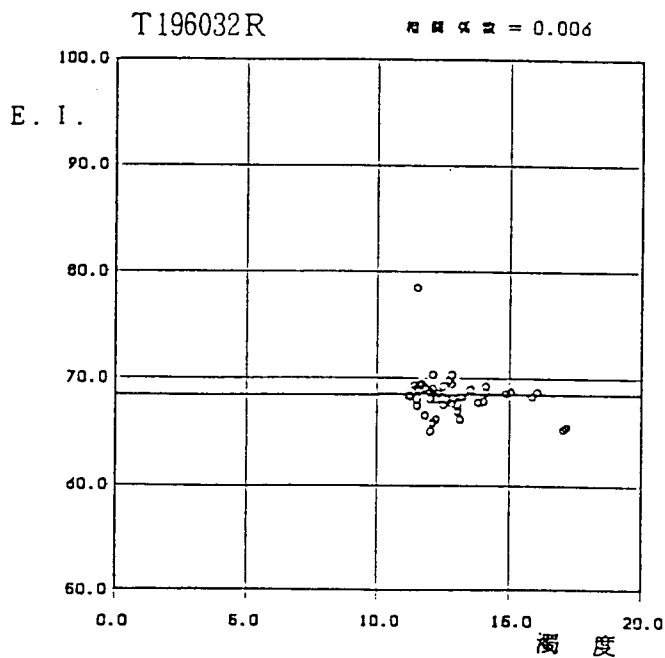
図2. 42 布川地点右岸側における濁度とE.I. (エコーインテンシティー)の相関図
(2400KHz、モード2、復路)



X	Y	X	Y
13.00	66.40	10.00	72.20
12.00	69.10	11.00	71.40
15.00	70.40	11.00	70.30
11.00	65.90	12.00	71.20
11.00	69.60	11.00	71.70
10.00	70.30	18.00	75.70
10.00	70.70	8.00	66.30
10.00	70.70	8.00	71.60
13.00	71.00	8.00	71.50
15.00	70.50	8.00	70.00
9.00	67.20	8.00	70.30
10.00	69.70	8.00	70.00
10.00	71.20	9.20	70.10
10.00	70.30	9.00	70.40
11.00	69.90	9.00	69.70
11.00	69.20	9.00	69.90
11.00	69.40	9.00	70.20
11.00	69.40	9.00	70.20
13.00	70.10	10.00	99.30
8.00	65.70		
8.00	70.90		
9.00	71.00		
9.00	69.70		
9.00	70.00		
9.00	69.90		
10.00	70.20		
11.00	71.10		
11.00	70.60		
11.00	70.80		
12.00	70.50		
15.00	70.90		
9.00	66.00		
9.00	70.70		
9.00	71.70		
9.00	71.50		
9.00	72.50		
9.00	72.10		
10.00	71.10		

N 57 R 0.1008 A 0.158354E+02 B -0.923423E+02

図2. 43 布川地点左岸側における濁度とE. I. (エコーインテンシティー)の相関図
(2400KHz、モード4、往路)



X	Y	X	Y
13.10	66.20	12.10	69.10
12.80	70.40	12.50	69.30
14.10	68.70	12.70	69.80
15.00	68.50	12.00	68.80
11.20	68.30	12.80	67.70
11.50	68.10	13.00	67.50
12.60	68.00	11.80	66.60
12.00	65.10	12.10	70.40
11.60	69.00	14.10	69.30
12.30	68.60	11.60	67.50
11.50	67.50	12.80	67.50
14.80	68.60	13.20	68.30
13.80	67.80	12.20	68.10
16.00	68.80	11.50	73.50
17.00	65.30		
13.10	68.30		
15.80	68.40		
11.50	68.10		
12.10	68.60		
14.00	67.90		
13.00	67.00		
36.20	70.50		
17.10	65.50		
11.80	69.10		
12.50	67.60		
12.30	68.60		
11.20	68.50		
12.00	68.10		
22.30	67.70		
12.10	65.90		
11.70	69.50		
13.50	69.00		
11.80	69.20		
11.50	69.10		
11.60	69.40		
12.80	68.10		
12.20	65.20		
11.40	69.40		

N 52 R 0.0063 A 0.420366E-02 B 0.484301E+02

図2. 44 布川地点右岸側における濁度とE. I. (エコーインテンシティー)の相関図
(2400KHz、モード4、復路)

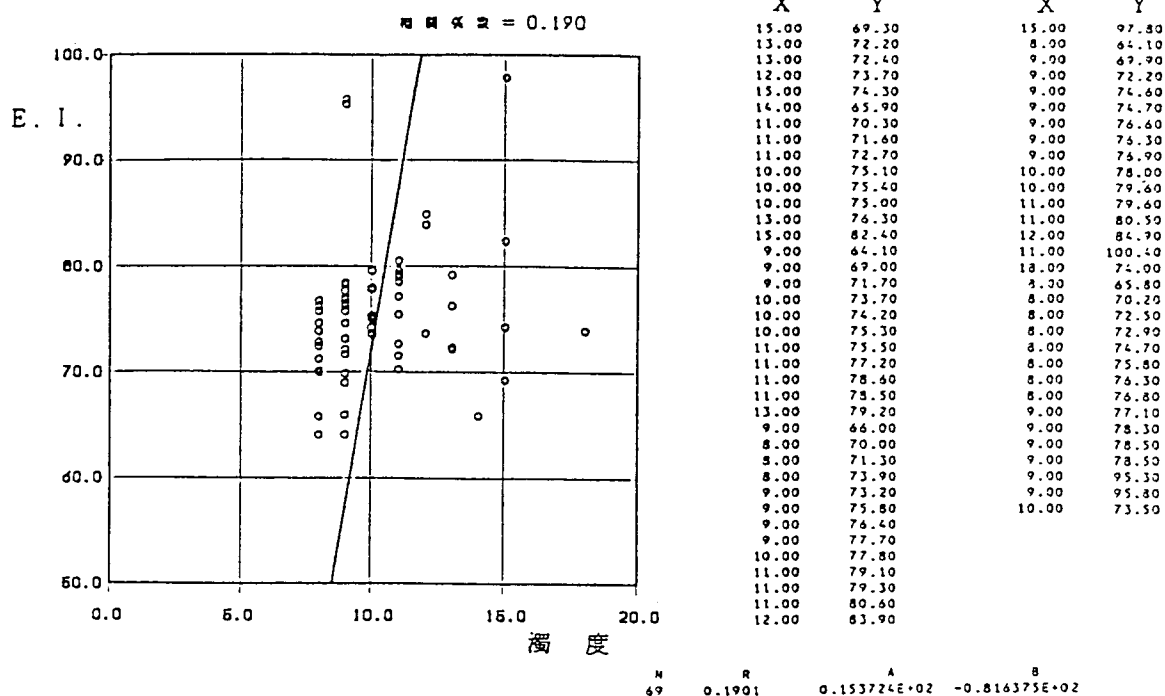


図2. 45 布川地点左岸側における濁度とE. I. (エコーインテンシティ)の相関図
(1200KHz、モード2、往路)

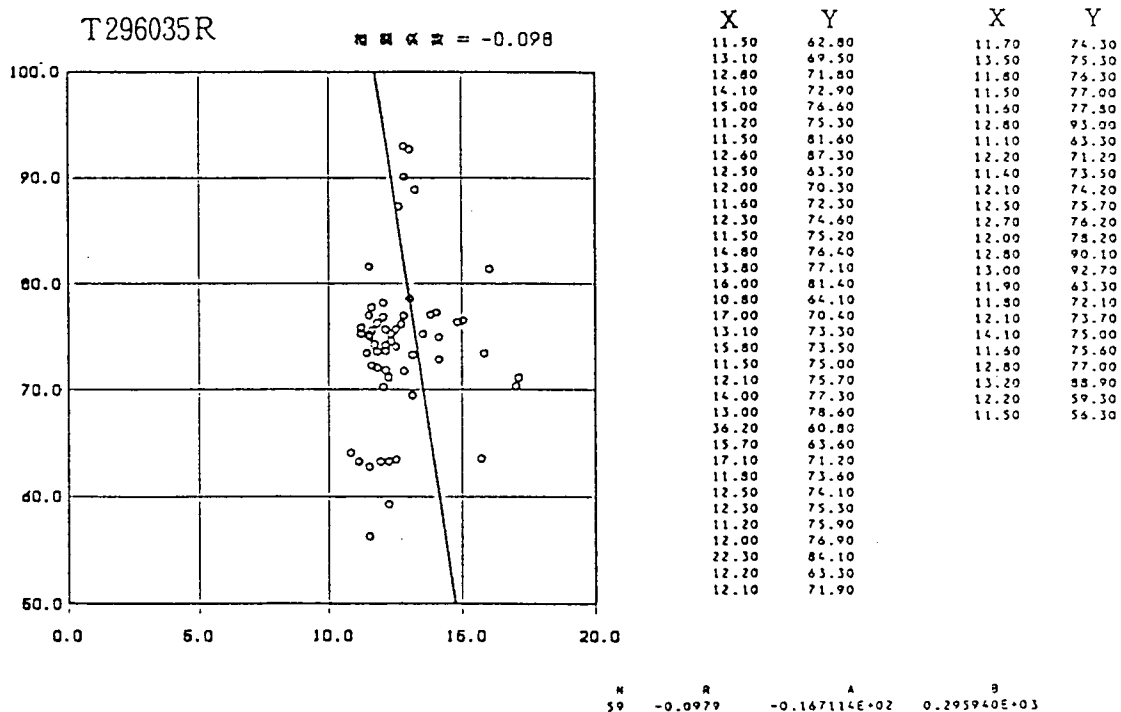


図2. 46 布川地点右岸側における濁度とE. I. (エコーインテンシティ)の相関図
(1200KHz、モード2往路)

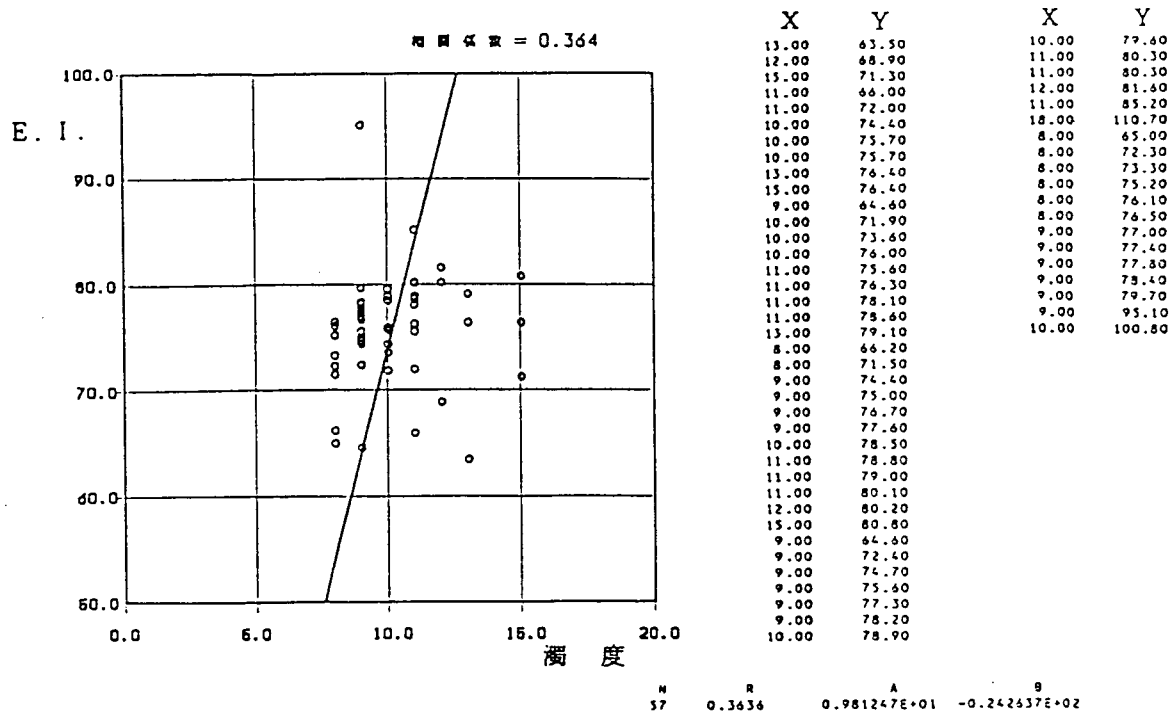


図2. 47 布川地点左岸側における濁度とE.I. (エコーインテンシティー)の相関図
(1200KHz、モード4、往路)

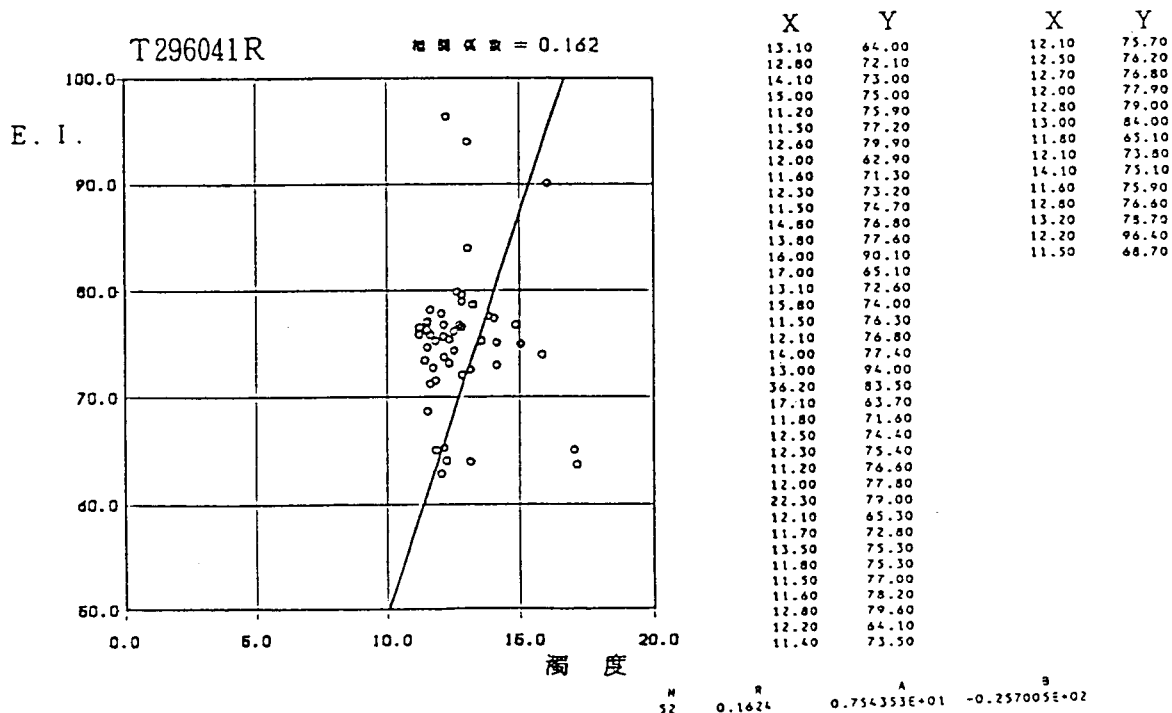
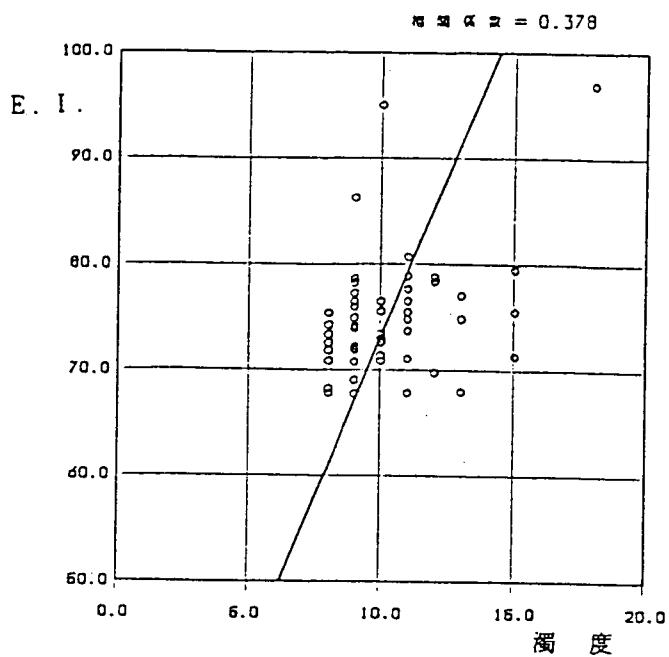


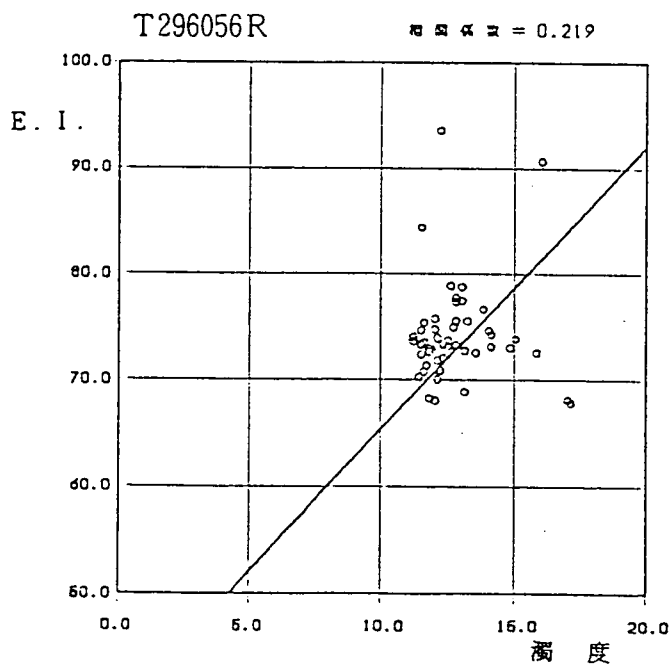
図2. 48 布川地右岸側における濁度とE.I. (エコーインテンシティー)の相関図
(1200KHz、モード4、往路)



X	Y	X	Y
13.00	65.00	11.00	80.70
12.00	67.30	13.00	96.70
13.00	71.40	8.00	67.70
11.00	67.90	8.00	70.90
11.00	71.10	8.00	72.60
10.00	72.70	8.00	73.40
10.00	72.50	8.00	74.30
10.00	73.50	8.00	75.40
13.00	74.90	7.00	76.00
15.00	75.60	9.00	76.50
9.00	69.10	9.00	77.30
10.00	70.90	9.00	78.30
10.00	71.40	7.00	78.70
10.00	73.00	9.00	86.30
11.00	73.70	10.00	95.00
11.00	73.80		
11.00	74.80		
11.00	76.50		
13.00	77.10		
8.00	68.30		
8.00	71.90		
9.00	71.90		
9.00	74.00		
9.00	73.90		
9.00	75.00		
10.00	75.60		
11.00	75.50		
11.00	76.60		
11.00	77.60		
12.00	78.40		
15.00	79.50		
9.00	67.80		
9.00	70.80		
9.00	72.30		
9.00	72.10		
9.00	74.20		
9.00	74.20		
10.00	75.50		
10.00	76.50		
11.00	77.70		
11.00	78.90		
12.00	78.80		

N 57 R 0.3785 A 0.613573E+01 B 0.118126E+02

図2. 49 布川地点左岸側における濁度とE. I. (エコーインテンシティ)の相関図
(1200KHz、モード5、往路)



X	Y	X	Y
13.10	68.90	12.80	77.40
12.80	73.30	13.00	78.80
14.10	73.20	11.80	68.30
13.00	73.90	12.10	73.20
11.20	74.10	14.10	74.30
11.50	74.70	11.60	73.60
12.60	78.90	12.80	75.60
12.00	68.10	13.20	75.60
11.60	70.80	12.20	93.60
12.30	72.10	11.50	84.40
11.50	72.40		
14.80	73.10		
13.80	76.70		
16.00	90.70		
17.00	68.20		
13.10	72.80		
15.80	72.60		
11.50	73.30		
12.10	74.00		
14.00	74.70		
13.00	77.50		
16.20	82.50		
17.10	67.90		
11.80	72.70		
12.50	73.20		
12.30	73.40		
11.20	73.70		
12.00	74.80		
22.30	75.40		
12.10	70.10		
11.70	71.60		
13.50	72.60		
11.80	73.00		
11.50	73.40		
11.60	75.40		
12.80	77.80		
12.20	70.90		
11.40	70.30		
12.10	71.90		
12.50	73.90		
12.70	75.00		
12.00	75.80		

N 52 R 0.2190 A 0.266635E+01 B 0.387466E+02

図2. 50 布川地右岸側における濁度とE. I. (エコーインテンシティ)の相関図
(1200KHz、モード5、往路)

第3章 ADCPを用いた流量観測システムの開発

3.1 河川流量観測機器としてのADCPの特徴

もともとADCPは海洋調査の分野で数多く利用されてきた観測機器であるが、河川流観測機器としてとらえた場合、2章で判明したように以下のような特徴を有している。

- (1) 瞬時に水深毎の3次元流向・流速を計測することができる。したがって、従来の方法では困難であった感潮区間や堰の背水区間の観測に非常に有効である。さらに船舶等に搭載して河川を横断させれば、走行断面内の流速分布及び流量を計測することができる。例えば、水面幅200m、平均水深7mの河川で、測線間隔5m、水深方向25cmピッチの設定で船速1m/sで横断観測を行った場合、約3分で1120ポイントの流向・流速と横断内の流量を計測可能であり、従来の観測機器と比べて極めて短時間のうちに多数の観測を行うことができる。
- (2) 通常、測定水深の約6%が測定不能域となるため、水深の浅い地点での観測には不向きである。
- (3) 測定原理上、乱れの大きな流れ、気泡を多く含んだ流れの場合、観測精度が低下する可能性がある。
- (4) 河川用のADCPとしては、超音波の周波数毎に300, 600, 1200, 2400KHzの機種が市販されている。水深が深い場合、濁流時のような散乱体の密度が高い場合には、透過性の高い低周波数の機種を、また求める精度が高い場合や高分解能が必要な場合は高周波数の機種を用いる。

3.2 河川用ADCPの仕様

河川で使用されることが多い、600, 1200, 2400KHzの3タイプのADCPについての仕様を以下に示す。

3.2.1 流速測定項目

(1) 流速計測精度

① 長時間観測: $0.2\% \times (\text{観測流速}) \pm 0.2\text{cm/s}$

② 短時間観測

短時間観測精度は、平均化する超音波パルスの数によって異なる。ADCPではこの超音波パルスの単位をpingと呼ぶ。1ping当りの精度は、使用周波数と測定層厚によって異なる(表3.1)。通常ADCPでは1pingのみで計測することはなく、複数のpingの平均値によって1つのデータ(アンサンブルと呼ぶ)を形成することが多い。それは、式(3.1)に示すように、複数のpingを用いて平均化することによりランダムノイズを減少させ、計測精度を上げることができるからである。例えば、1200KHz、25cm層厚、50pingの設定で観測を行った場合、計測精度は1.4cm/sとなる。ただし、この精度はあくまでも機器に対する理論上の精度であるため、現地の観測環境によってはこれよりも悪くなる。また、1データ当りのping数を多くすると空間分解能は低下する。

$$\text{計測精度}(\text{cm/s}) = \frac{1\text{ping当りの精度}(\text{cm/s})}{(\text{平均化するpingの数})^{0.5}} \cdots \text{式(3.1)}$$

表3. 1 1Pingあたりの精度 (単位:cm/s)

層厚 (m)	システム周波数(KHz)		
	600	1200	2400
0.12	—	—	4
0.25	—	10	3
0.50	10	4	2
1.00	4	2	1
2.00	2	1	—

(2) 計測水深等

① 計測水深等

表3. 2に流速測定項目における計測水深等について示す。

表3. 2 計測水深等(流速:m)

発信周波数(KHz)	600	1200	2400
最大計測水深(m)	60	20	5
計測開始水深(m)	1	0.5	0.25
計測層厚(m)	0.5～4	0.25～2	0.12～1
最大計測層厚(m)	128	128	128

ここで計測開始水深とは、トランスデューサから計測を開始する第1層までの間に生じる計測不能な範囲のことである。また、計測層厚は表3. 2の範囲内において任意に設定することが可能である。

② 流速計測範囲 (m/s) : ± 10 m/s

3. 2. 2 対地速度項目 (船速計測)

(1) 対地速度計測精度 (cm/s)

① 長時間観測: $0.2\% \times (\text{計測速度}) \pm 0.2$ cm/s

② 短時間観測: $0.0003V + (a + 0.003V) / (1 + bAF)$

(a: 1cm/s、F: 発信周波数(KHz)、b: $0.0001\text{KHz}^{-1}\text{m}^{-1}$ 、V: 流速(m/s)、A: 水深(m))

(2) 最大ping数 (ping/s) : $1 / (0.0044A + 0.02 + c)$

(A: 水深(m)、c: 内部コンパス使用時は0.05s、その他は0.0s)

(3) 計測水深等

① 計測水深

表3. 3に対地速度項目における計測可能水深について示す。

表3. 3 計測水深(対地速度:m)

発信周波数(KHz)	600	1200	2400
最大水深(m)	125	35	10
最小水深(m)	1.4	0.8	0.3

② 水深計測精度(m): $1\%(\text{計測水深}) \pm 120 / (\text{周波数})$

③ 流速計測範囲(m/s): $\pm 10\text{m/s}$

3. 3 ADCP搭載用ラジコンボートの開発

ADCPを用いて河川流量を測定しようとする場合、何らかの方法によって河川を横断させ、横断面内の流速分布を測定する必要がある。最も簡単なのは、2章で行ったように、漁船や手漕ぎボートのような小型船の船舷にADCPを取り付けて観測する方法である。しかし日本のような急流河川においては、洪水時は危険が大きくこうした方法は採用できない。また、観測地点の環境によっては船の動揺による誤差が無視できない。そこで、通常の船を用いるのではなく、ADCPを搭載し、安定して走行することができる無人ラジコンボート(RCボート)を用いることにした。

ADCPを搭載し、洪水中でも走行することが可能なRCボートの製作は、木下良作博士に依頼した。博士はこれまで主に、洪水中の河床変動を調査する目的で、洪水中でも音響測深機などの計測器を搭載して走行することができるRCボートを多数製作している^{5), 6), 7)}。木下博士によって製作されたRCボートを写真1に、またこのRCボートとADCPを組み合わせた流量観測システム(以後Type Iと呼ぶ)を図3. 1に示す。

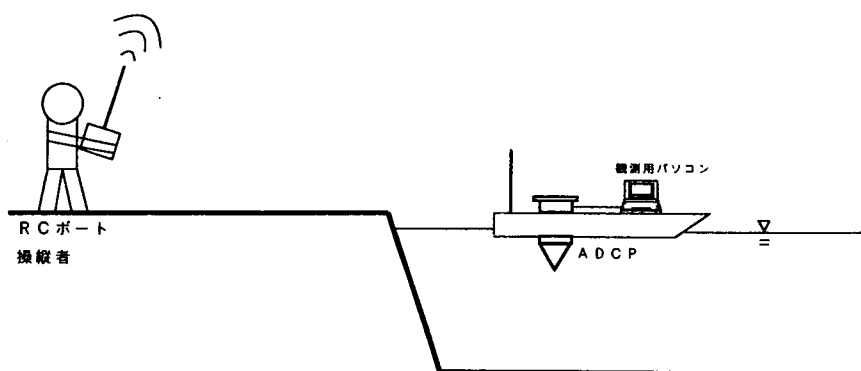


図3. 1 観測機器構成図(Type I)

(ボート操作のみ地上部から無線で行い、ADCPの操作及びデータ取得はボートに搭載したパソコンによって行う)

第4章 河川横断内流速分布可視化ツールの開発

今回作成した流量観測システムでは、観測断面内の3次元流速分布及び流量を計測することができる。しかし、本システムで得られるこれらのデータは基本的には単なる数値であるため、これより人が流れの状態を即座に理解する事は困難である。そこで得られたデータを人が理解しやすいように可視化するためADCPデータ可視化ツール(以下可視化ツール)の開発を行った。

今回作成した可視化ツールは、AVSを利用して作成を行った。そこでまずAVSについて簡単に説明する。

4.1 AVSとは？

4.1.1 AVSの概要

AVS (Application Visualization System)は、1989年に米国AVS (Advanced Visual Systems Inc)社で開発された可視化アプリケーション開発ツールである。取得した様々なデータを可視化することは非常に重要であるが、実際に行うことは困難な場合が多い。それは、既存のアプリケーションでは自分の目的に合うよう、自由なカスタマイズができない事が多く、また、自分でアプリケーションを作成する場合は、可視化やプログラミングに関して専門的な知識が必要とされるからである。AVSはそのようなことを解決するため、操作が簡単で拡張性があり、自由に可視化アプリケーションを構築できるツールを目標として開発された。

AVSの特徴は大きく分けて以下の2点である。

- (1) 可視化作業を「モジュール」という部品の組み合わせで行うこととし、可視化作業を小さな処理に分割したこと。
- (2) ビジュアルプログラミングの採用によって、可視化アプリケーションの構築作業を従来と比べて軽減したこと。

4.1.2 モジュールを用いた可視化作業

コンピュータを用いた可視化作業は、いわばデータ変換処理の連続である。各種の数値データを変換することによって、最終的に何らかの表示装置へ視覚化する。したがって、いくつかの適切な変換フィルタを通せば、可視化作業は完成することになる。

一般的な可視化作業は次のようなプロセスになる。

- (1) データの読み込み。
- (2) 可視化対象データの選択
- (3) 可視化手法の選択とイメージデータへの変換
- (4) 表示

AVSは上記の各ステップに対応する数百ものモジュールを提供する。ユーザは、必要なモジュールを組み合わせることで可視化アプリケーションを作成することができる。例えば、折れ線グラフという可視化は、次のような4つの手順に分割できる。

- ① 数値データを読み込む
- ② 縦軸・横軸の設定

③折れ線グラフの生成

④表示

ここで、折れ線グラフではなく棒グラフに表示を変更するときは、③の「折れ線グラフの生成」を「棒グラフの生成」モジュールに置き換える。このように可視化処理を小さな「モジュール」の組み合わせとすることで、柔軟性があり、かつ、誰にでもわかりやすいインターフェースを提供している。

4. 1. 3 ビジュアルプログラミングの採用

AVSはネットワークエディタというビジュアルプログラミングツールを提供する(図4. 1)。図4. 1のVectorウィンドウように、いくつかのモジュールを組み合わせた物をネットワークと呼ぶ。右上にあるモジュール群から必要な物をネットワークとして組み合わせていく事で、様々な可視化アプリケーションを作成することができる。図4. 1では、read fieldでデータを読み込み、boundsでデータ領域線を描画させ、Vector、combine vect、orthosliceで描画データを作成し、最後にUviewer3DでUshellウィンドウへ結果を表示させている。

これによってユーザは、可視化技術に関する特別な知識が無くても、独自のオリジナル可視化アプリケーションを作成することができる。また、AVSが用意していないモジュールでも、FORTRANやC言語などで独自にモジュールを作成して追加することができる。

4. 2 AVSを利用したADCP可視化ツールの作成

今回は、ADCPデータの可視化として以下の図を作成することとし、それに必要な新たなモジュールの作成及びネットワークの組立を行った。

- (1) 流量コンター図(m^3/s): ADCPによって観測された水深毎の流量コンター図。
- (2) 東西方向速度成分コンター図(m/s): ADCPによって観測された流速成分のうち、東西成分のコンター表示した図。東方向が正。
- (3) 南北方向速度成分コンター図(m/s): ADCPによって観測された流速成分のうち、南北成分の値をコンター表示した図。北方向が正。
- (4) 鉛直方向速度成分コンター図(m/s): ADCPによって観測された流速成分のうち、鉛直成分の値をコンター表示した図。上方向が正。
- (5) 3成分流速コンター図(m/s): 東西、南北、鉛直各成分による流速ベクトル値をコンター表示した図。
- (6) 流速ベクトル図(m/s): 東西、南北、鉛直の各流速成分より得られた流速ベクトル図。視点を自由に変えて任意の方向から見る事ができる。

各可視化結果を図4. 2～4. 7に示す。なお、どの図とも左軸に水深(m)を、河床を白線で、また左側が左岸、右側が右岸を示している。

さらに、上記の各データを任意に組み合わせて表示させたり、時系列順に連続的に表示させることが可能である。なお、本ツールの詳細な機能及び操作については、参考文献⁹⁾を参照のこと。

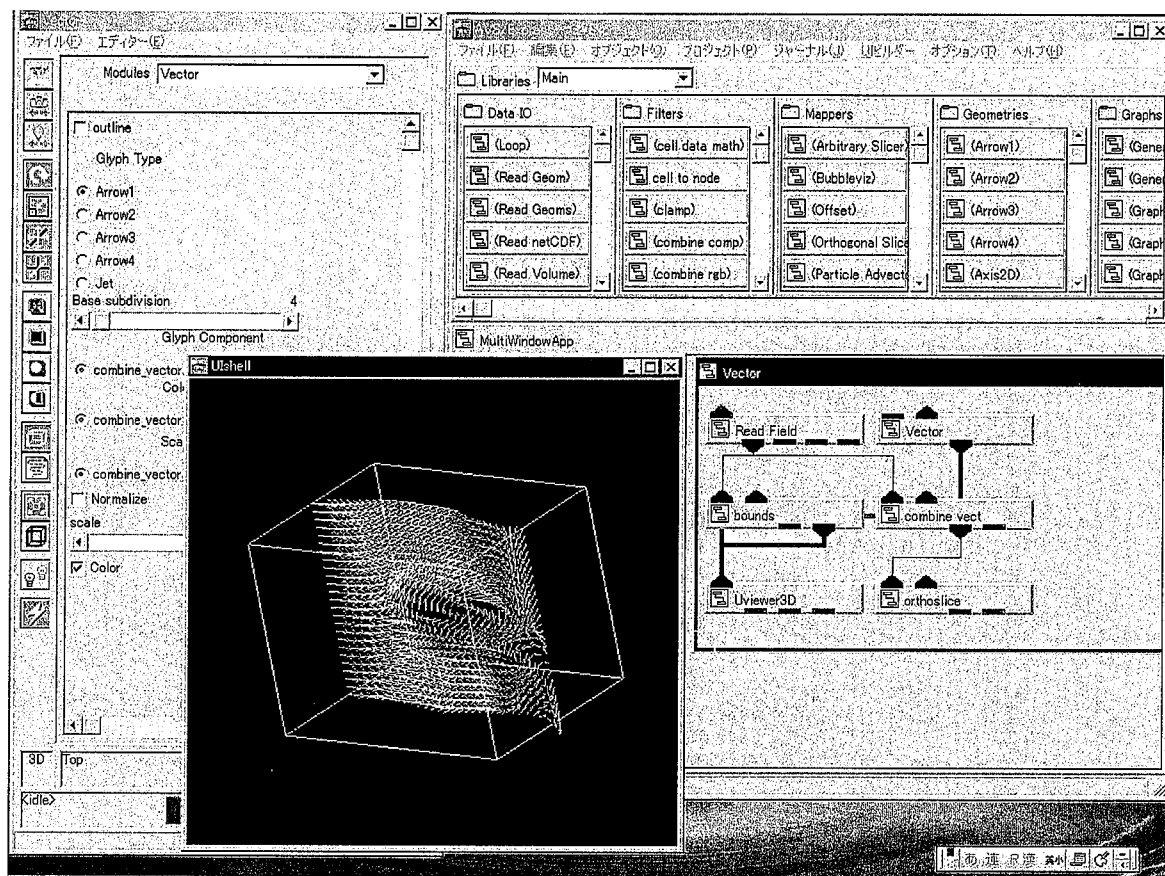


図4. 1 AVSネットワークエディタによるビジュアルプログラミング

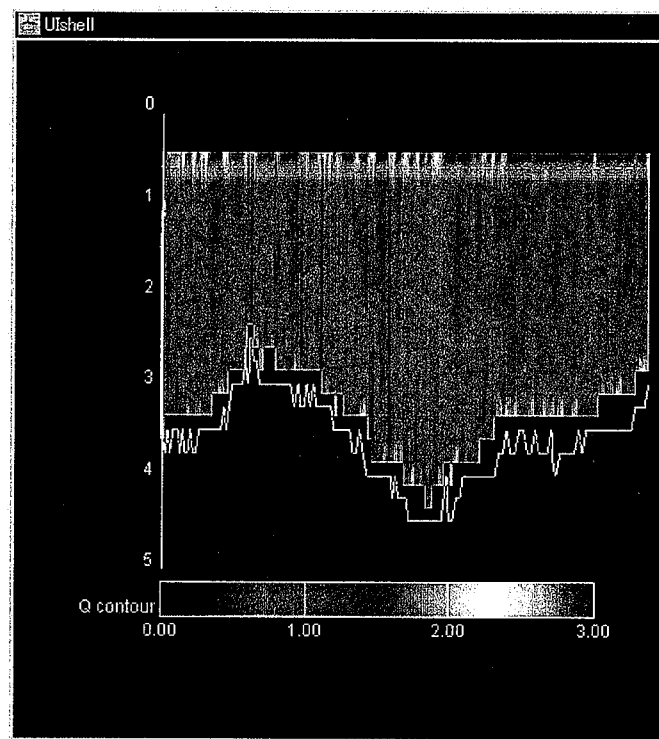


図4. 2 流量コンター図(m^3/s)



図4. 3 東西方向速度成分コンター図(m/s)

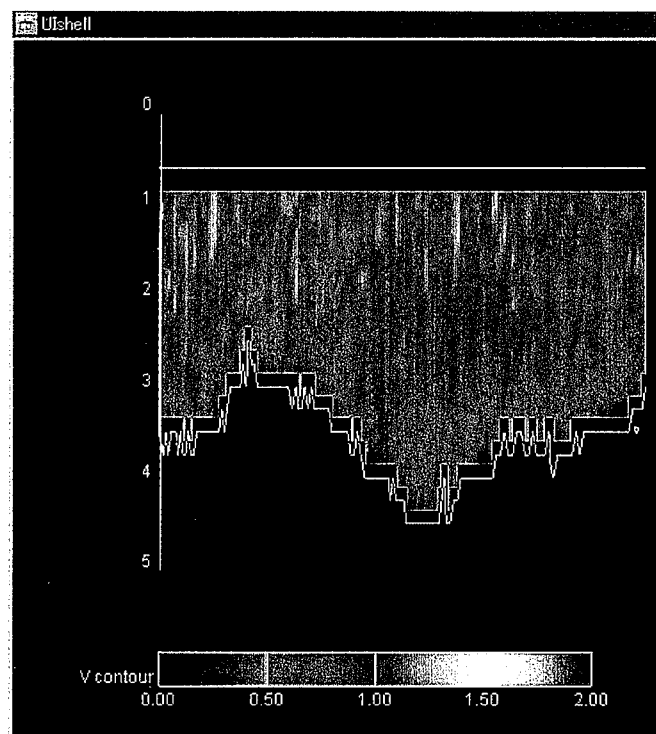


図4. 4 南北方向速度成分コンター図(m/s)

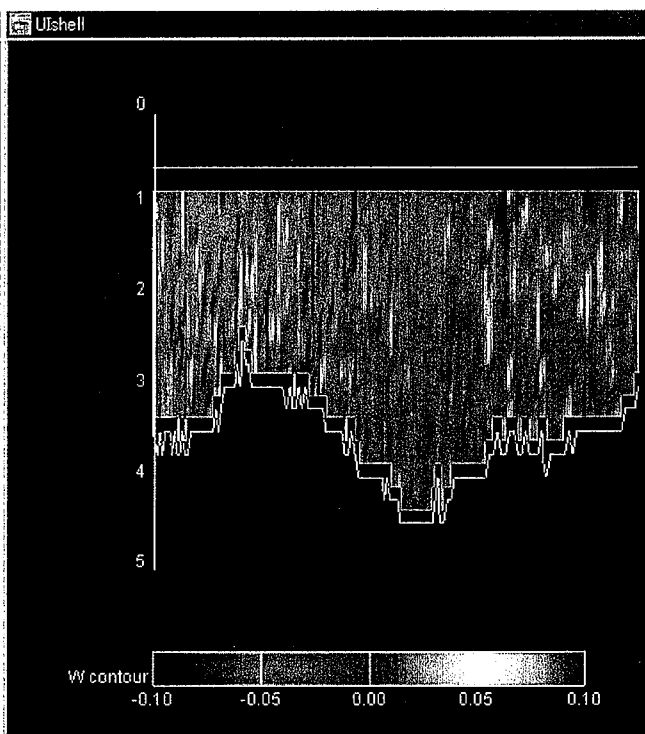


図4. 5 鉛直方向速度成分コンター図(m/s)

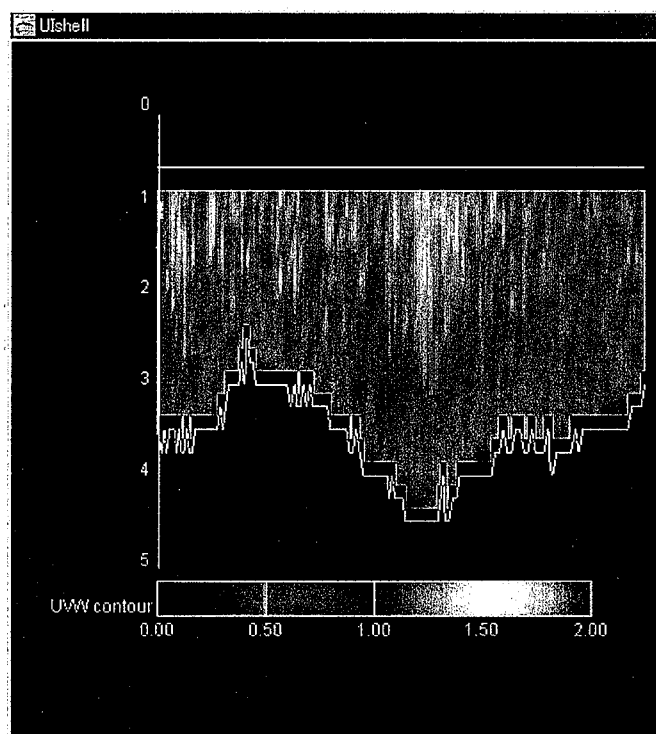


図4 6 3成分流速コンター図(m/s)

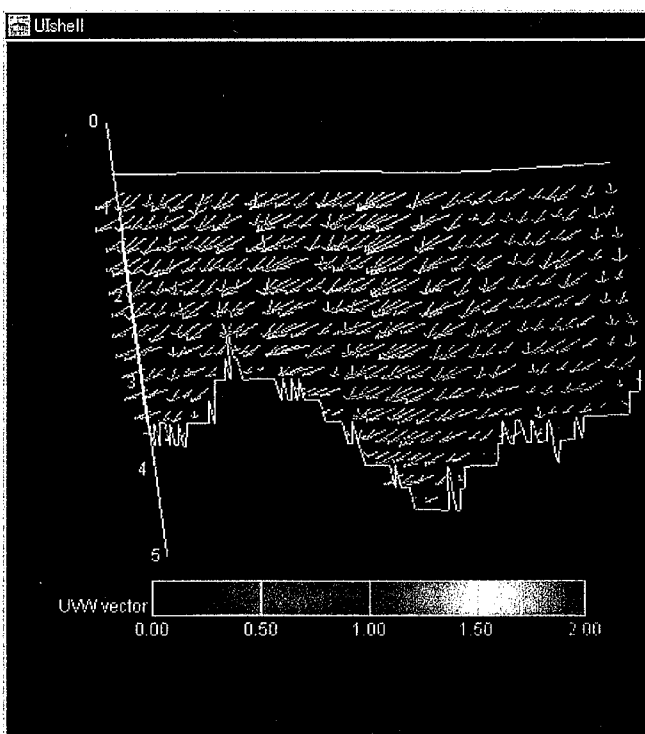


図4. 7 流速ベクトル図(m/s)

第5章 阿賀野川における現地実験及び流量観測

5.1 阿賀野川の概要及び観測地点付近の状況

阿賀野川の源流は、栃木、福島県境の荒海山(標高1,580m)に発している。その名を阿賀川と称し、山間部を北流して会津盆地を貫流し、猪苗代湖を水源とする日橋川、尾瀬沼を水源とする只見川などの大小支川を合わせて溪谷を西流し、新潟県に入る。ここで名称を阿賀野川と改め、五泉市馬下にて新潟平野に至り、新潟市において日本海に注いでいる。その流域は、新潟・福島・群馬の3県にまたがり、流域面積は7,710km²(日本第8位)、幹川流路延長は210km(日本第10位)という日本有数の大河である。阿賀野川の流域図を図5.1に示す。

流域内の年平均降水量は、会津地方の上流部で約1,200mm、新潟平野の下流部で約2,000mmであり、只見川上流域の山岳地帯では3,000mmを越える。山岳地帯では降水量の約1/3が降雪で、積雪深が5mを越える豪雪地帯であるため年間総流量は比較的豊富である。したがって、阿賀野川の流れを季節毎に見てみると、3～5月の融雪期に特に流量が多い。年間の総流出量は日本で4番目に多く、およそ100億m³もの流出量がある。この豊富な水資源は、灌漑用水、都市用水及び発電用水等に広く利用され、特に水力発電に関しては我が国でも有数の水力発電地帯となっている。

今回現地実験及び流量観測を行ったのは、この阿賀野川の河口から7.2kmの地点、大湊水位観測所付近である。この地点は、これまでの観測より、洪水面の横断傾斜が生じておらず、交互砂州の接続する最良断面であるため、今回の実験及び観測には最適の地点である⁹⁾。観測地点近傍の様子を図5.2に示す。

なお、これ以降の観測は、特に断りがない限り、全てこの観測断面上で行ったものである。

5.2 Type Iによる融雪出水時の流量観測

5.2.1 観測の目的と方法

平成9年4月8日9:00～16:00の期間において、Type Iを用いた流量観測を行った。本観測の主な目的は、融雪出水時という比較的流速が速い条件下における、Type Iの操作性・安定性及び流量観測精度の確認である。観測は図5.2の観測測線上を計10往復させ、20回分のデータを収集した。なお、Type Iを用いて観測に要する時間は、今回(水面幅約620m)の場合、1往復あたり10～15分程度であった。

5.2.2 観測結果

本観測で得られた、観測断面内流速分布を図5.3～6に示す。なお、この図では左側が左岸、右側が右岸を示しており、下流方向がほぼ真北である。

これらの図より、本観測時の川の流れは、主に北からやや西に向かった流れが多く、河川中央部に比較的速い流れがあることがわかる。またこのときの平均流速は約1.0m/s、最大流速は約1.5m/sであった。

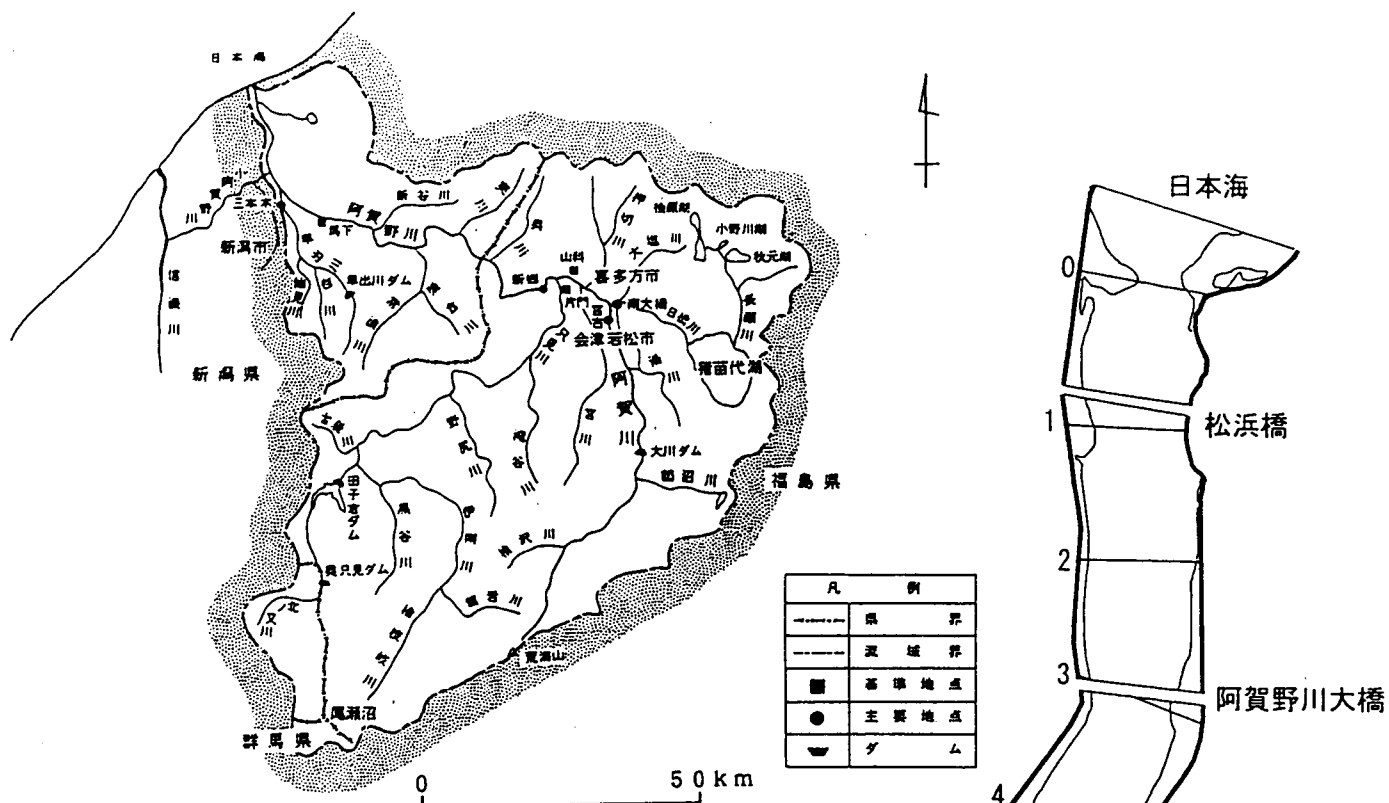


図5.1 阿賀野川流域概要図

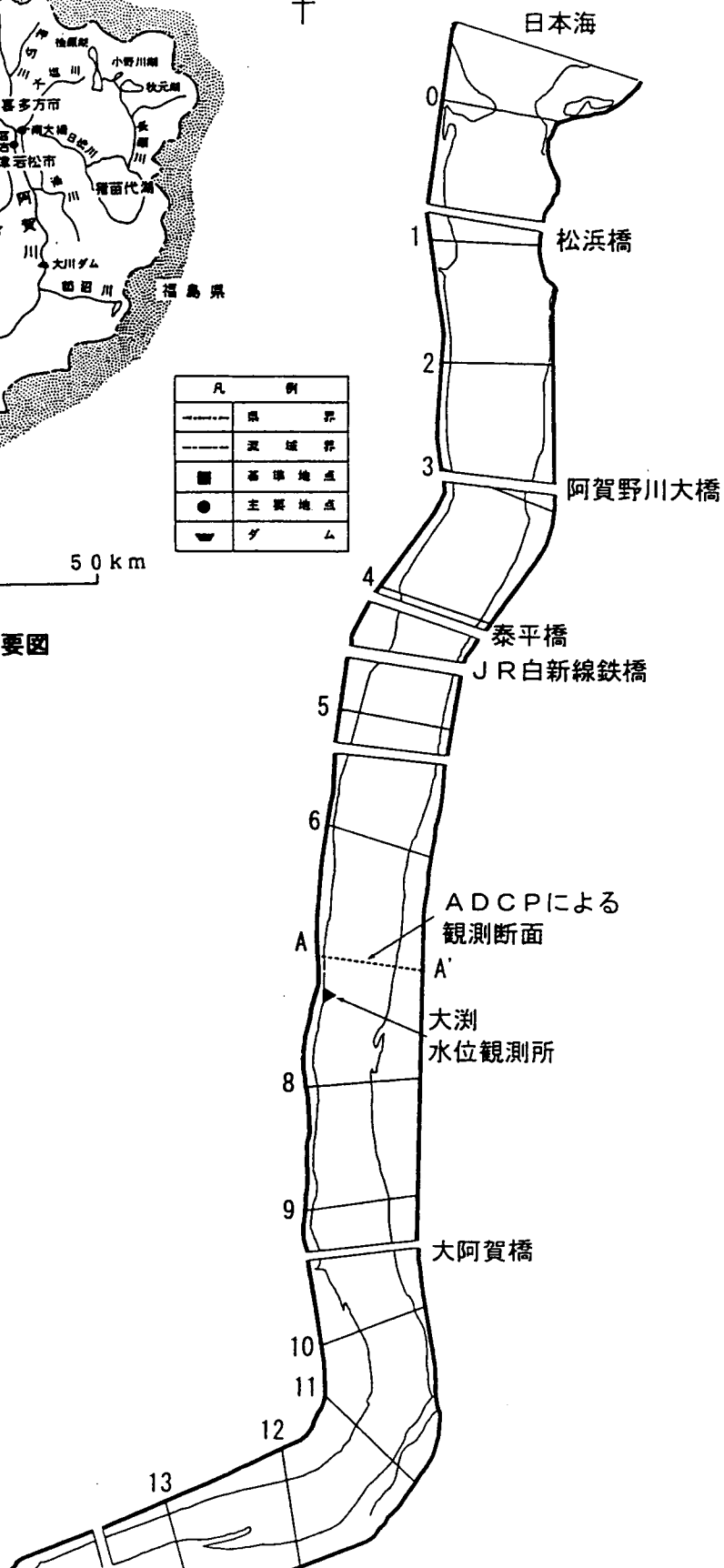


図5.2 ADCP観測位置図

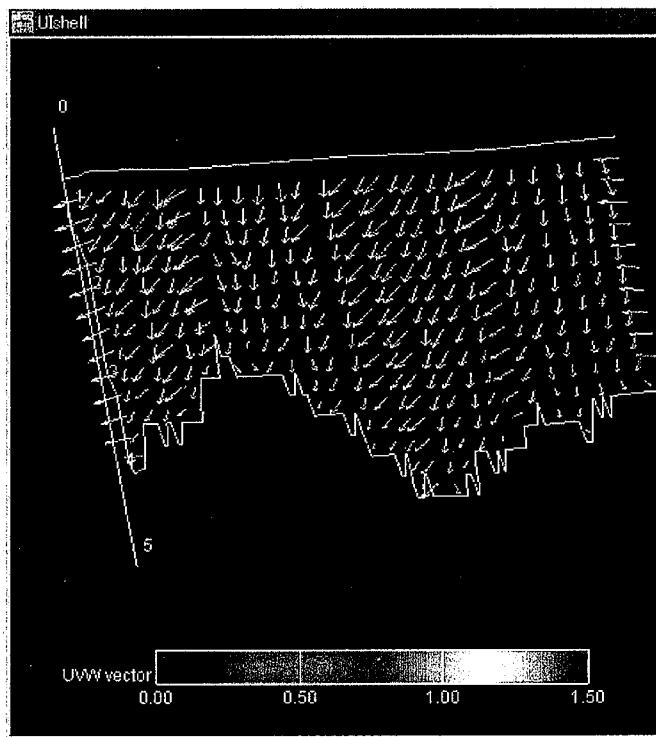


图5.3 観測断面内流速分布(1回目往路)

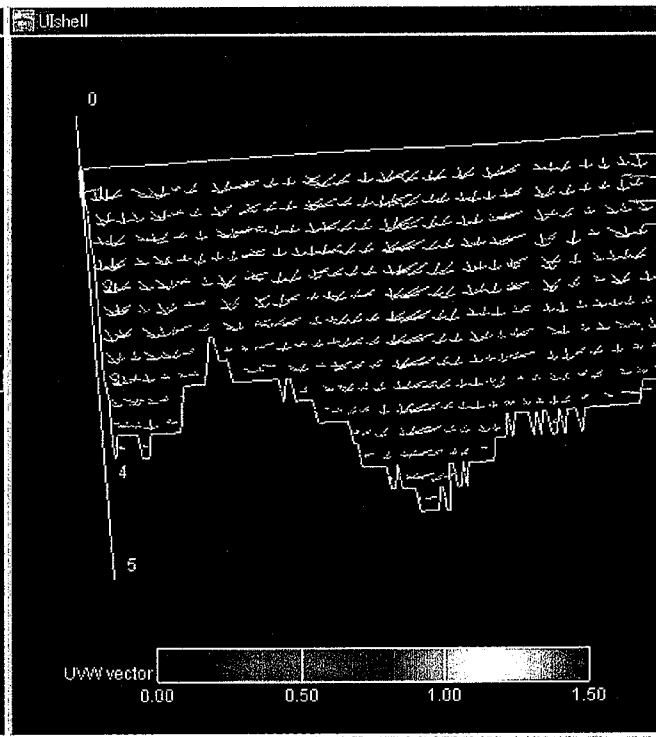


图5.4 観測断面内流速分布(4回目往路)

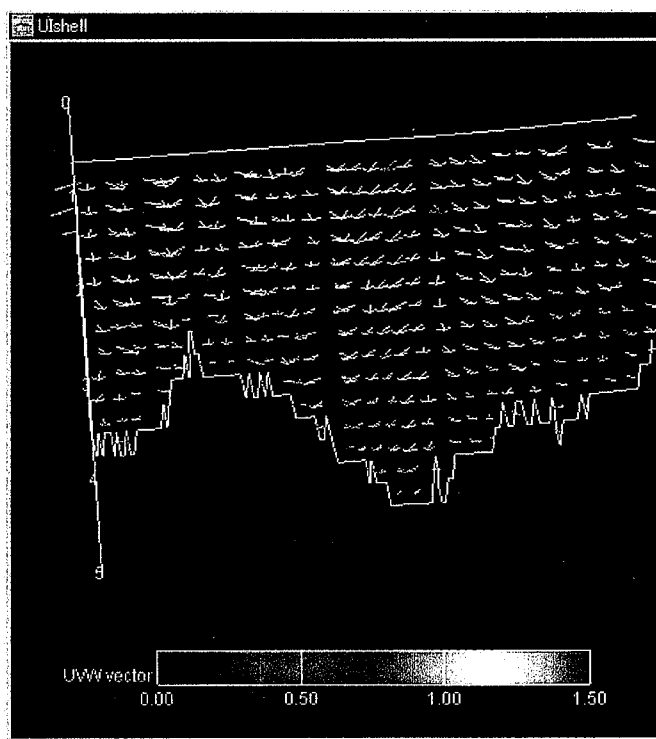


图5.5 観測断面内流速分布(6回目往路)

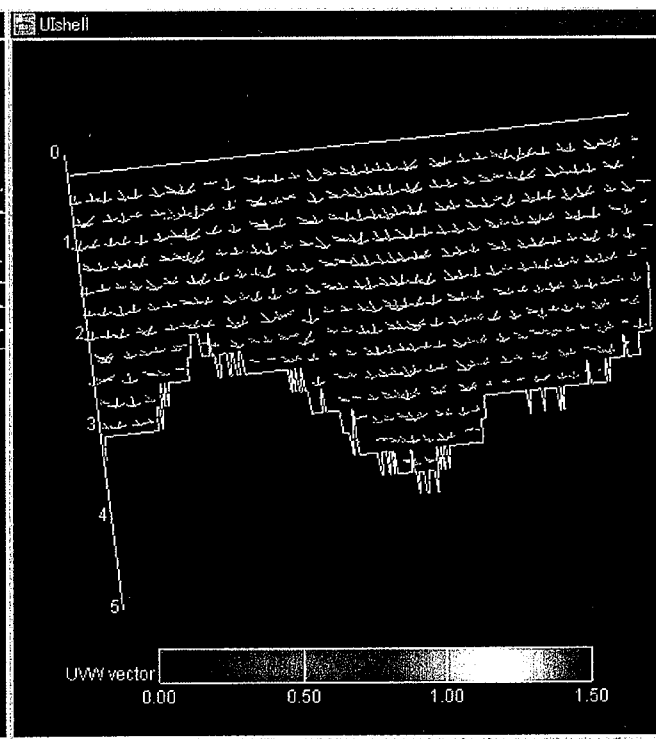


图5.6 観測断面内流速分布(9回目往路)

5.2.3 流量観測精度の評価

表5.1に、ADCPによる計算流量(以下ADCP流量)と観測地点近傍にある満願寺流量観測所と横越流量観測所におけるH-Q曲線による流量(以下H-Q流量)を示す。なお、横越流量観測所は観測地点より上流約5km、満願寺流量観測所は観測地点より上流約9kmの地点にそれぞれ位置している。

ADCP流量とH-Q流量を比較すると、満願寺では約14～8%、横越では約9～3%の差であり、大きな差は認められなかった。実河川における流量の真値を正確に把握することは困難であるため、この結果を持ってADCP観測精度を論じることはできないが、Type I による流量観測精度は少なくとも従来の手法と同程度であると考えられる。

5.2.4 本観測におけるType I の操作性及び安定性について

今回の観測条件下(流量約2000m³/s、最大流速約1.5m/s)において、Type I の走行に関する操作性及び安定性が問題となることは全くなかった。ただし、Type I が持ついくつかの課題が明らかになった。すなわち、

(1)ADCP、観測用パソコンともRCボートに搭載してしまうため、一旦観測が開始されRCボートを走行させてしまうと、観測者は観測が終了するまで観測データの確認やADCPの操作を直接行うことができない。

(2)本システムでは河川内を走行させて流量を観測させるため、ゴミや流木等多量の流下物が存在する流れの観測には適さない。

の2点である。

(1)については、次項で無線制御装置を製作し解決を試みる。しかし、(2)については現在までのところ決定的な解決方法はなく、せいぜい観測期間中に流下物に対する監視員を設置する程度の解決策しかない。しかも夜間のような流下物自体を視認することが困難な場合には、この方法も適用できなくなり、このような場合、本システムによる観測は非常に難しくなる。

表5.1 ADCP流量とH-Q流量との比較

観測時刻	流 量(m ³ /s)			H-Q流量とA D C P 流量との差(%)	
	満願寺で の流量	横越での 流量	大湊での A D C P 流量	満願寺流 量との差	横越流量と の差
9:00	2502.9	2362.3	2148.2	14.2	9.1
10:00	2421.3	2308.1	2140.1	11.6	7.3
11:00	2352.5	2243.9	2134.0	9.3	4.9
12:00	2295.9	2191.0	2049.9	10.7	6.4
13:00	2239.9	2124.6	2045.9	8.7	3.7
14:00	2206.7	2092.1	2004.8	9.2	4.2
15:00	2151.9	2043.9	1961.1	8.9	4.1
16:00	2119.3	2004.2	1944.0	8.3	3.0

5.3 ADCP無線制御装置の開発

5.2.4で述べたように、Type I の欠点を解消するため、新たにADCP無線制御装置(以下無線装置)の開発を行った。無線装置の主な使用を表5.2に示す。

無線装置とは主として無線モデムとモデムコントローラーから成っており、観測用パソコンからADCPを遠隔操作及びデータの送受信を行うための機器である。この時の観測機器構成図(Type II)を図5.7に示す。この装置を用いることによって、観測者は水の流れの様子をリアルタイムで確認することができ、またその情報をもとに観測中でも自由にADCPの操作を行うことが可能となる。

表5.2 ADCP無線制御装置仕様

項目		規格・仕様
無線仕様	送信出力・方法	10mW、複信
	使用周波数	1, 200MHz帯
	伝送速度	16, 000bps
	エラー訂正	有り
	データバッファメモリ容量	4, 096バイト
有線仕様	規格	RS-232C準拠
	通信速度	最高38, 400bps
	同期方式	全2重方式
モデムコントローラA		PCからのブレーク信号をNullに変換する。
モデムコントローラB		ADCPからのNullをブレーク信号に変換する。

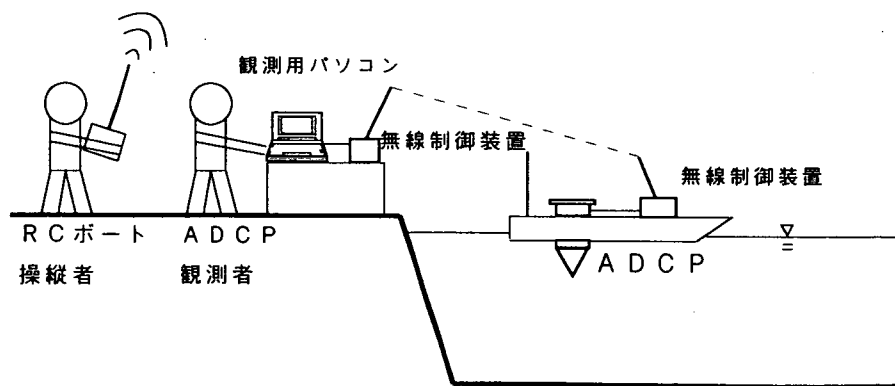


図5.7 観測機器構成図(Type II)

(ボート及びADCPの操作をともに地上部からの無線で行う)

5. 4 Type IIを用いた低水流量観測実験

5. 4. 1 実験の目的と方法

平成9年6月26日9:00～15:00の期間において、Type IIを用いた低水流量観測実験を行った。本実験の目的は以下の4点である。

- (1)無線通信可能距離の確認
- (2)無線装置によるADCP本体の操作性の確認
- (3)観測データの送受信の確認
- (4)Type IIの流量観測精度の確認

観測は観測測線上及びその近傍を計5往復させ、10回分のデータを収集した。なお、本館即時の水面幅は約550mであった。

5. 4. 2 実験結果

通信可能距離は最大約700mであることが確認された。ただしRCボートが草木等の障害物によって、地上側から見通せなくなると距離に関係なく通信不能になった。これは、通信に使用している無線の周波数帯(1200MHz帯)の特性のためであると考えられる。また通信可能距離内におけるADCP本体の操作は全て問題なく行えることが確認された。ただし、観測データの送受信については、送受信の同期がうまく取れていないことに起因すると考えられる通信不能状態に陥ることがあり、その結果いくつかの欠測が生じた。そこで、観測データの取得に関しては、無線によるデータのみではなく、ADCP内部に装着されている不揮発性メモリーにもデータを書き込み、2種類の方法を併用できるよう若干の改造を行うこととした。

本観測で得られた観測断面内流速分布を図5. 8～11に示す。これらの図より観測時の川の流れは、比較的北東～北北東へ向かうものが多いものの、それ以外の流れも多数存在しており、流れにばらつきが認められることがわかる。また、平均流速は約0. 2m/s、最大流速は約0. 5m/sであった。

5. 4. 3 流量観測精度の評価

表5. 3にADCP流量と満願寺流量観測所におけるH-Q流量を示す。これより、満願寺観測所での流量との差は全て10%以内であり、Type Iと比べてADCP無線制御装置使用による観測精度の低下は特に認められなかった。

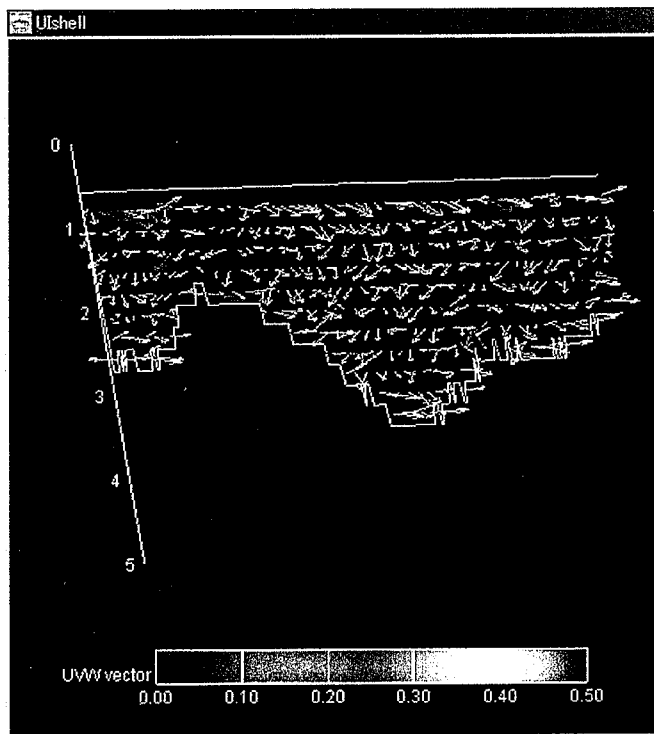


图5.8 觀測断面内流速分布(1回目往路)

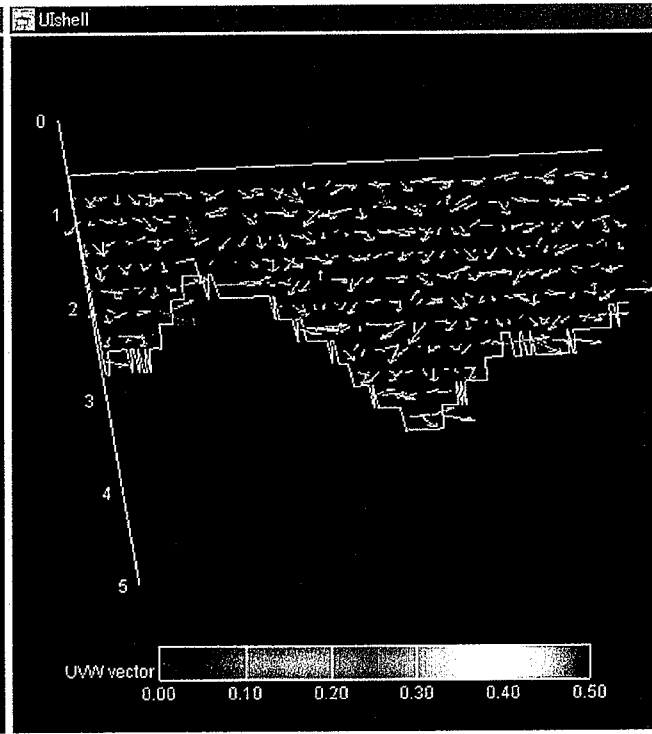


图5.9 觀測断面内流速分布(2回目往路)

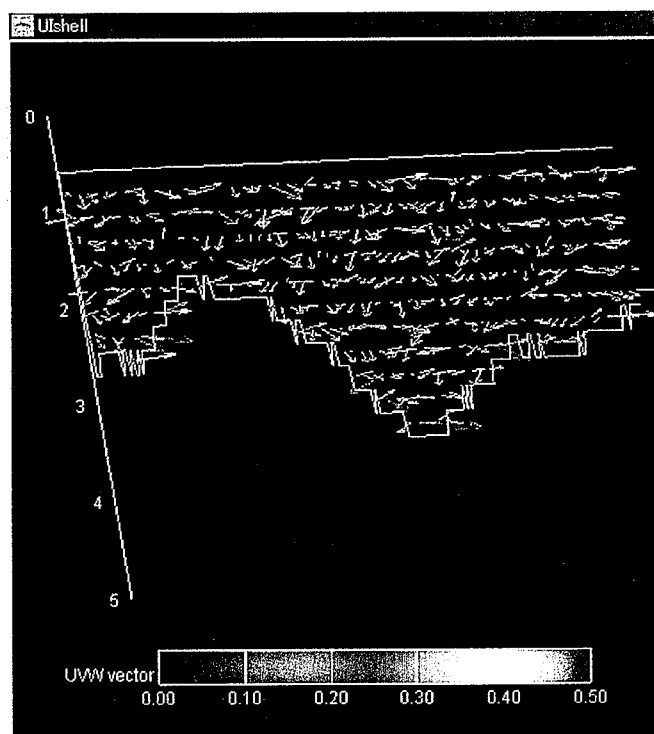


图5.10 觀測断面内流速分布(3回目復路)

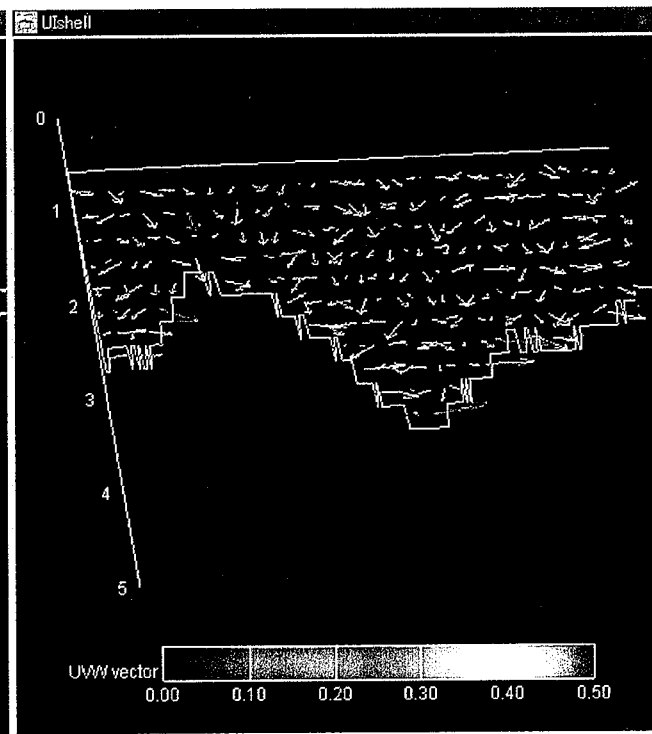


图5.11 觀測断面内流速分布(4回目復路)

表5.3 ADCPと満願寺H-Q流量との比較

	流 量 (m ³ /s)		H-Q流量とA D C P 流量との差 (%)
観測時刻	満願寺 での流量	大渕での A D C P 流量	満願寺流量 との差
10:00	132.2	132.8	0.4
14:00	167.7	159.1	5.1
14:30	177.4	180.6	1.8
15:00	187.3	171.8	8.3

5.5 Type IIと浮子による同時流量観測

5.5.1 観測の目的と方法

平成10年8月5日9:00～16:00の期間においてType IIと浮子による同時流量観測を行った。本観測の目的は、Type IIのデータ記録方式をADCP内部メモリ併用方式へ改造した事による動作の確認と、その流量観測精度の確認である。浮子による流量観測は、木下良作博士が開発した表面浮子投下装置を取り付けたRCボート(以下「浮子用RCボート」と呼ぶ)を用いて行った⁹⁾。

浮子は、RCボート用コントローラーのレバーによって両舷から交互に一本ずつ投下される仕組みになっている。また投下された浮子の位置測定は、河岸に設定されたレーザートラクトータルステーションにより行われる。

観測は、観測測線上をType II、浮子用RCボートを交互にそれぞれ4回ずつ走行させた。なおこの時の水面幅は約570mであった。

5.5.2 観測結果

データ記録方式の変更による動作の異常は特に認められなかった。本観測で得られた観測断面内流速分布を図5.34～41に示す。

これより左岸側に比較的速い流れが存在すること、河川中央部に比べて岸に近い部分の流れに乱れがあることなどがわかる。また平均流速は約0.8m/s、最大流速は約1.5m/sであった。

5.5.3 Type IIと浮子による各流量観測結果の比較

表5.4に浮子流量観測結果を示す。これから、左岸側に比較的速い流れが多く存在していることがわかる。これは先述したType IIによる観測結果と同様のものである。

表5.5～8は、計4回にわたるType IIと浮子による観測データのうち、区分断面毎の平均流速値を比較したものである。ここで区分断面1とは最も左岸側の断面のことを示している。

これらの表から、2～4回目に関しては、Type IIと浮子による流速観測値の差は、各観測毎にややばらついているものの概ね10%前後であった。1回目はこれらより差は大きい、これはType IIと浮子との間の観測時間が空いてしまったために、差が大きくなってしまったものと考えられる。

表5.9にType IIと浮子による各流量観測結果を示す。Type IIと浮子の差は概ね10%以下であった。

以上のことから、Type IIによる流量観測精度は、少なくとも浮子によるものと同程度以上が期待できると考えられる。

5.6 まとめ

今回、ADCPとRCボートを組み合わせた2種類の流量観測システムを開発し、さらにその適用性の検討のために、実河川における流量観測を実施した。その結果より以下のことが確認された。

- (1) RCボートの操作は、流量約2000 m³/s、最大流速約1.5 m/sの洪水でも問題なく行えた。
- (2) 無線制御装置性能試験において、ボートが見通せる範囲内では、無線でADCPを完全にコントロールできることが確認された。ただし、データの送受信に関しては送受信間でうまく同期がとれない場合があり、その結果通信不能となってデータの欠測が生じることがあった。そこで、データ取得方式を、ADCP内部メモリ併用方式に改造し、その動作の確認を行った。また、無線装置の通信可能距離は最大700m程度、RCボートの操作可能距離は最大1000m程度であることがわかった。
- (3) Type IIを用いることによって、観測者は河川内の流れの様子や流量観測結果を現場にてリアルタイムで把握することが可能である。また、仮に無線装置の通信可能距離外に出ても、ADCP内部メモリ併用方式のため、データが欠測することはない。
- (4) 開発した流量観測システムによる流量観測は、今回行った観測地点のように、ある程度水深があり、それほど乱れていない流れであれば、少なくともこれまでの流量観測手法と同程度の精度が期待できると考えられる。
- (5) 本観測システムは、流下物が非常に多く、かつそれが視認できないような夜間等の状況下では用いることが困難である。また、大洪水時のような非常に乱れた流れでの観測は未だ実施していないため、このような条件下における本システムの観測精度は、現状では不明である。今後、様々な条件下における流れについて観測を行い、本システムの適用範囲を明確にしていく必要がある。

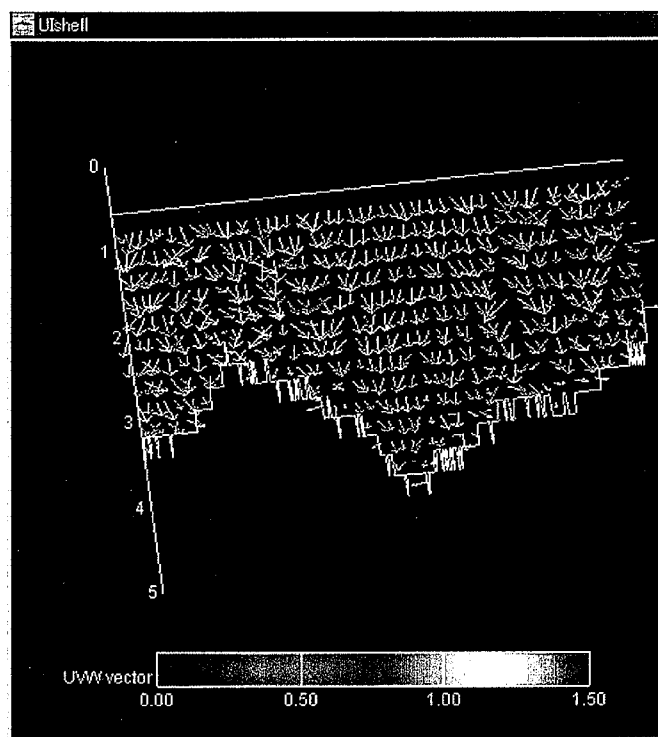


图5.12 観測断面内流速分布(1回目往路)

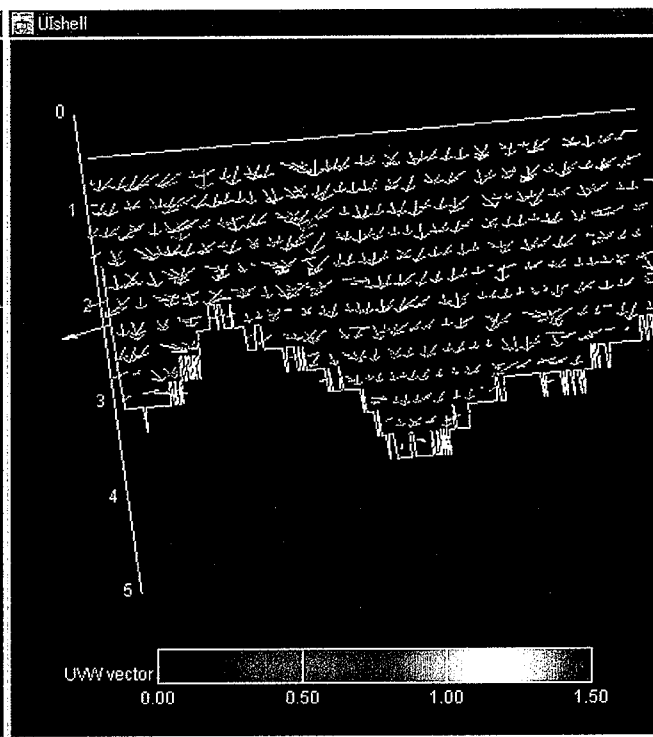


图5.13 観測断面内流速分布(2回目復路)

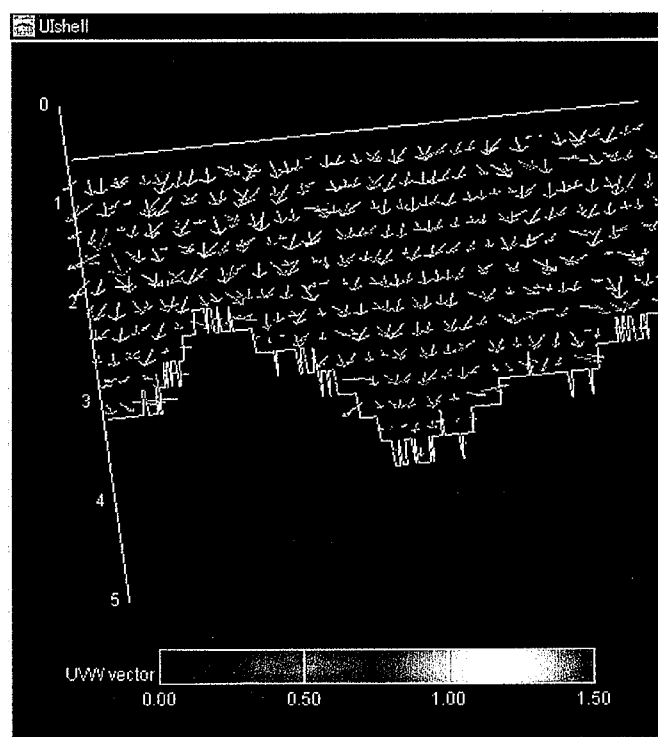


图5.14 観測断面内流速分布(3回目往路)

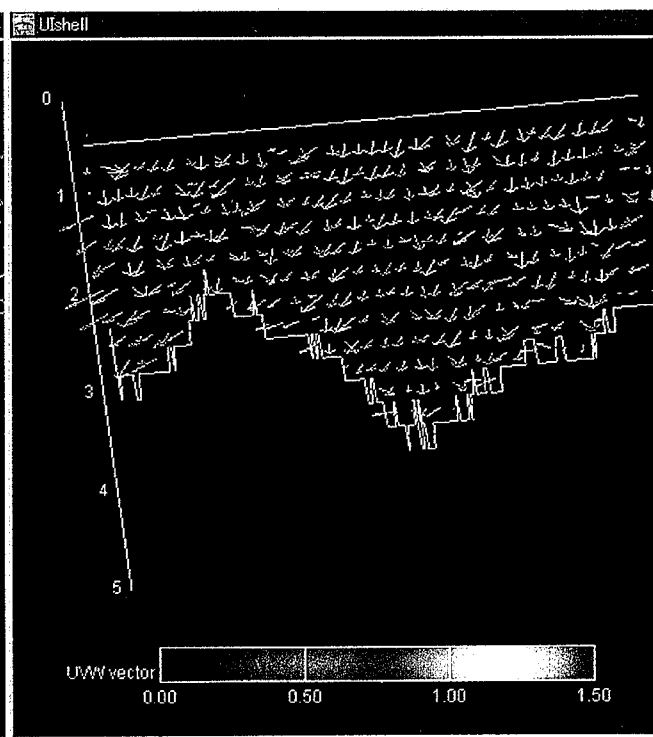


图5.15 観測断面内流速分布(4回目復路)

表5.4 浮子による流量観測結果

回数	左岸からの 浮子投下距離(m)	流速 (m/s)	区分断面積 (m ²)	区分流量 (m ³ /s)	総流量 (m ³ /s)
1回目	32.940	1.050	165	147	
	80.903	1.114	165	156	
	135.447	1.074	156	139	
	189.654	1.095	149	139	
	229.573	0.959	169	138	
	284.671	0.992	218	184	
	334.806	0.965	235	193	
	392.268	0.946	212	170	
	443.027	0.964	185	152	
	494.081	0.876	195	145	
	548.121	0.862	159	116	
	588.839	0.566	90	51	1730
2回目	82.772	0.927	309	243	
	130.025	1.035	120	106	
	177.242	0.911	129	123	
	238.164	0.935	163	130	
	276.165	0.929	183	145	
	330.300	0.941	212	170	
	375.239	0.781	204	136	
	434.814	0.937	196	156	
	488.023	0.778	181	120	
	539.041	0.816	164	114	1445
3回目	78.222	0.851	299	216	
	127.470	0.900	131	100	
	180.593	0.888	147	111	
	231.898	0.912	153	119	
	275.581	0.836	198	141	
	333.085	0.902	221	169	
	384.750	0.799	184	125	
	432.185	0.866	182	134	
	487.986	0.826	190	133	
	543.334	0.787	233	156	1404
4回目	80.178	0.903	296	227	
	137.494	0.946	126	101	
	180.316	0.836	123	87	
	224.103	1.004	164	140	
	284.371	0.911	206	160	
	333.009	0.888	203	153	
	384.167	0.856	199	145	
	439.782	0.710	182	110	
	491.787	0.823	170	119	
	543.224	0.780	224	149	1391

表5.5 ADCPと浮子による区分断面平均流速の比較(1回目)

区分断面	浮子流速(m/s)	ADCP流速(m/s)	浮子とADCPとの差(%)
1	1.050	0.919	12.5
2	1.114	0.919	17.5
3	1.074	0.912	15.0
4	1.095	0.871	20.4
5	0.959	0.848	11.6
6	0.992	0.868	12.5
7	0.965	0.823	14.8
8	0.946	0.803	15.1
9	0.964	0.824	14.5
10	0.876	0.795	9.29
11	0.862	0.776	9.93
12	0.686	0.579	15.6

表5.6 ADCPと浮子による区分断面平均流速の比較(2回目)

区分断面	浮子流速(m/s)	ADCP流速(m/s)	浮子とADCPとの差(%)
1	0.851	0.787	7.52
2	0.900	0.878	2.44
3	0.888	0.819	7.77
4	0.912	0.835	8.44
5	0.836	0.819	2.033
6	0.902	0.791	12.3
7	0.799	0.780	2.38
8	0.867	0.784	9.53
9	0.826	0.749	9.32
10	0.787	0.687	12.7

表5. 7 ADCPと浮子による区分断面平均流速の比較(3回目)

区分断面	浮子流速(m/s)	A D C P 流速(m/s)	浮子とA D C Pとの差(%)
1	0.927	0.854	0.787
2	1.035	0.879	15.1
3	0.911	0.828	9.11
4	0.935	0.833	10.91
5	0.929	0.814	12.4
6	0.941	0.802	14.8
7	0.781	0.786	0.641
8	0.937	0.789	15.8
9	0.778	0.775	0.386
10	0.816	0.742	9.069

表5. 8 ADCPと浮子による区分断面平均流速の比較(4回目)

区分断面	浮子流速(m/s)	A D C P 流速(m/s)	浮子とA D C Pとの差(%)
1	0.903	0.803	11.1
2	0.946	0.816	13.7
3	0.836	0.773	7.54
4	1.004	0.747	25.6
5	0.911	0.785	13.8
6	0.888	0.791	10.92
7	0.856	0.755	11.8
8	0.710	0.744	4.73
9	0.823	0.729	11.4
10	0.780	0.683	12.4

表5. 9 ADCP流量と浮子流量との比較

観測番号	浮子流量(m^3/s)	A D C P 流量(m^3/s)	浮子とA D C Pとの差(%)
1	1730	1550	10.4
2	1450	1400	3.11
3	1404	1390	0.854
4	1390	1310	5.75

参考文献

- 1):金子新、伊藤集通、「ADCPの普及と海洋学の発展」、海の研究、Vol.3、No.5、1994
- 2):Simpson,M.R. and Oltmann,R.N.,“An Acoustic Doppler Discharge Measurement System”,Proceedings of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering,Vol.2,1990
- 3):Gordon,R.L.,“Acoustic Measurement of River Discharge”,Journal of Hydraulic Engineering,Vol.115,No.7,July, 1989
- 4):Chen,Cheng-Lung,“Unified Theory on Power Laws for Flow Resistance”,Journal of Hydraulic Engineering, Vol.117,No.3,1991
- 5):木下良作、「河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案」、水文・水資源学会誌、Vol.11,No.5,1998
- 6):木下良作、「エアクションRCボートによる洪水流調査」、第35回飛行機シンポジウム、日本航空宇宙学会、1997
- 7):木下良作、「無人ラジコンボートによる洪水流調査」、ACVの研究、28、1997
- 8):建設省土木研究所水文研究室、「ADCP可視化ツール操作マニュアル」、1998
- 9):阿賀野川工事事務所、「阿賀野川河川事業概要」、1998
- 10)松浦達郎、吉谷純一、金木誠、「洪水流量観測の高度化に関する研究」、土木技術資料41-4、建設省土木研究所、1998
- 11)松浦達郎、金木誠、「ラジコンボートを用いたADCPによる流量観測システムの開発」、第53回年次学術講演会講演概要集、(社)土木学会、1998
- 12)河川局河川環境課、土木研究所水文研究室他、洪水流量観測の高度化に関する研究、第51,52回建設省技術研究会報告、建設省大臣官房技術調査室、1997;1998
- 13)A.Terakwa,T.Shingyouchi,“The Application of Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP) for Measuring Discharge at the Lower Reach of Tone River”,The Third PWRI-USGS Workshop on Hydrology・Water Resources and Global Climate Change,pp.181-189,1995
- 14)V.J.Latkovich,“The Application of ADCP and AVM in USA”,The Third PWRI-USGS Workshop on Hydrology・Water Resources and Global Climate Change,pp.190-191,1995