報告書概要

①技術研究開発テーマ名	河道内樹林化に対応した流量観測技術の高精度化・高効率化に関する研究

②研究代表者

氏名	所属・役職
二瓶　泰雄	東京理科大学理工学部土木工学科・准教授

③共同研究者

氏名	所属・役職
宮川　勇二	関東地方整備局 江戸川河川事務所・所長
利根川　誠	関東地方整備局 江戸川河川事務所・調査課長
鈴木　建也	関東地方整備局 江戸川河川事務所・調査係長
市山　誠	パシフィックコンサルタンツ㈱・河川部長
柏田　仁	パシフィックコンサルタンツ㈱・技師

④背景・課題

河道内の樹林化は全国的に進行しており，流下阻害や礫河原喪失などの様々な問題が生じている．そのため，河道内樹林化に対応した河川管理を行う必要があり，その一つに河道内樹林化を考慮した流量観測法の見直しが挙げられる．樹木群内や背後では死水域が形成され，流速横断分布はより複雑なものになるため，洪水流量観測法として標準的な浮子は死水域を流下できないという根本的な問題があり，流速横断分布を正確に捉えられず，結果として流量計測精度は低下する恐れがある．類似した問題は，低流速時の計測限界があるポータブル電波流速計にも当てはまる．この問題を解決するには，ADCP を用いて断面全体の流速計測を行うことが考えられるが，実務ベースでは ADCP 導入はコスト面で難しい．そのため，安価で計測が容易な浮子や電波流速計を活用し，かつ，「点」流速データから「面」データを推定する流速内外挿技術の導入が不可欠である．

⑤技術研究開発の目的

研究代表者は，H-ADCP による「線」流速データを「面」データや流量に変換可能な力学的内外挿法（DIEX 法）を開発しており，近年では，浮子による「点」から「面」流速データ推定法にも DIEX 法を応用し，それらの有用性を示している．この DIEX 法では樹木等の流体抵抗を考慮することは可能であるので，樹林化した河道の流量計測精度向上に大きく寄与するものと期待できる．

本研究では，浮子や電波流速計による流速計測法と DIEX 法を組み合わせ，樹林化した河川に適した高精度・高効率性の流量観測技術を開発する．

⑥技術研究開発の内容・成果

（1）現地観測（流速計測）に係わる検討

1）樹林化河道への適応性が高い流速計測技術の選定

本研究では，樹林化河道における流速計測手法として適用性が高く，かつ，容易な観測手法である電波流速計を検討対象とした．

樹林化河道では，河道内に点在または密生する樹木・植生が支障となることで浮子の流下が困難となる．また，実用化されつつある新たな流速計測技術についても適用が困難な手法が多い（**表 1**）．例えば，H-ADCP は 1 台で流速横断分布を計測可能な機器であるが，超音波ビーム上に支障物がないことが前提となるため，適用が困難である．同様の理由によって超音波流速計が棄却され，見通し不良が生じることから画像解析法の適用範囲も限定的となる．ADCP は曳航範囲に樹木・植生がない限りは問題とならないが，観測の容易性やコストの観点から本研究では検討対象から除外した．

以上に列挙したとおり，多くの流速計は樹林化河道での適用性に課題があるが，電波流速計は電波照射範囲の波紋の移流速度を計測するオイラー的な非接触流速計であり，センサー面～水面の間に支障物が無い限

り計測でき，樹林化河道においても概ね観測可能である．よって，本研究では電波流速計を検討対象とした．

表 1　各種流速観測手法の概要

大分類	観測手法	計測原理	測定対象	長所	短所
単発観測	プライス流速計（回転式流速計）	測定部に取り付けられたカップの回転速度を流速に換算する．	点流速	機器が安価で，計測が容易である．低水時観測に一般に用いられる．	センサーにゴミ等が絡まると計測不可となり，洪水時計測が困難となる．
	電磁流速計	測定部周辺に作られた人工の磁界が流水により変化し，それにより生じる電圧を計測する．	点流速	機器が安価で，計測が容易である．低水時観測に一般に用いられるが，高流速でも計測可である．	センサーにゴミ等が絡まると計測精度が低下する．また，高流速時における姿勢制御が容易でない．そのため，洪水時計測に不向きである．
	浮子	橋上などから浮子を投下し，橋下流の二断面間を浮子が通過する時間を計測し，流速を求める．	ある横断地点の表層平均流速	大量の浮遊物が流れる洪水時においても安価で確実に計測できる．	浮子が流下方向にまっすぐ流れず，どの横断地点を測っているかが不明確になる．浮子流速（表層流速）から水深平均流速に変換するための更正係数の設定法が適切でない．
	画像解析法	水表面のトレーサー（ゴミや波紋）等をビデオカメラにより撮影し，それをPIV等により画像解析して表面流速を計測する．	水表面上の流速分布	安価な市販のビデオカメラで十分計測可能である．水中に非接触状況で計測できるため，洪水時の浮遊物の影響が無い．また，瞬時に流速平面分布を計測できる．	幅広な大河川での計測は困難である．表面流速から水深平均流速に直す更正係数が風の影響を強く受け，設定方法が一般化されていない．本観測法の自動連続計測化は実用レベルではない．
	電波流速計	水表面に電波を発射し，ドップラー効果を利用して表面流速を計測する．電波発射方向の一方向流速のみ計測する．	水表面上の点流速	非接触計測が可能であり，洪水時の浮遊物の影響は無い．自動連続計測が可能である．安価な可搬型タイプも市販されている．	波紋などが生じない低流速場では計測できず，低水時には適用不可である．画像解析法と同様に，更正係数の設定が問題である．
	ADCP	超音波のドップラー効果を利用して，流速鉛直分布計測が可能である．	ある横断地点の流速鉛直分布	瞬時に流速鉛直分布を計測できる．専用ボートに搭載されたADCPを横断方向に移動させることで，横断面全体の流速分布計測が可能となる．水深の同時計測を行っており，短時間・少人数で流量観測の実施が可能である．	6m/sを越える大流速時には専用ボートの姿勢維持が困難になる．大量の流木等の浮遊物があるときは観測実施が困難な場合がある．
連続観測	H-ADCP	超音波を水平方向に発射し，ドップラー効果を利用して，ある高さの流速横断分布を計測する．	ある高さの流速横断分布	わずか1台で流速横断分布計測が可能であり，最大計測範囲が300mという長距離計測用も市販されている．	出水時には，高濁度水により超音波の減衰が顕著になり，計測範囲が減少する．計測値から断面流速分布に変換する手法の確立が必要となる．
	超音波流速計	超音波の送受信機を河川両岸に固定設置し，超音波伝播時間差から送受信装置間の平均流速を計測する．	送受信装置間の平均流速	大出力の超音波送信機を用いることにより，出水中の高濁度時においても計測が可能である．	センサーが比較的高価であり，設置も大掛かりな事例が多い．計測値から横断面全体の平均流速に変換する手法の確立がキーとなる．

２）現地および実験水路における電波流速計の精度検証

A）電波流速計の概要

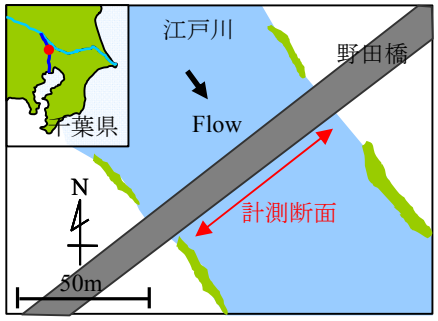
電波流速計は，空中から水表面に向かって斜め上方から電波を発射し，水表面に形成されている波などの凹凸からの反射電波を計測し，そのドップラー効果を利用して表面流速を非接触計測している．元々，設置型として開発されていたが，最近では安価な可搬型タイプも製品化され，より簡便な流速計測が可能となっている．また，非接触計測を行っているため，出水時に多量のゴミが浮遊している我が国の河川における流量観測には適しており，今後，様々な河川流量観測への適用が期待される．しかしながら，電波流速計の流速計測精度の検証事例は多くなく，水面波が発生しない所では，計測原理上，流速計測自体ができない．これに加えて，計測深度や計測値の風速依存性に関する知見が少ない．また，電波流速計等による表面流速データから流量を算定する際には，標準的に水深平均流速と表面流速の比である更正係数）が用いられる．水表面流速は，一般に，風による影響を大きく受けることから，更正係数も風の影響を考慮する必要があるが，そのような検討は十分なされていない．

本節では，風洞付開水路実験や現地観測を行い，電波流速計の流速計測性能を検証する．ここでは，①電波流速計による表面流速値と他の流速計による流速鉛直・横断分布を比較すると共に，②電波流速計により計測された表面流速の更正係数に対する風速依存性を把握し，流速計測性能を検討する．また，③流量計測精度の検証として，上記の室内実験結果を用いて，電波流速計やその他の流速計による流速値から流量を算定・比較する．そこでは，更正係数を用いる従来の流量算定法に加えて，著者らが開発している，「点」もしくは「線」流速データから「面」流速データを推定可能な力学的内外挿法（Dynamic Interpolation and EXtrapolation method，DIEX 法）を用いる．

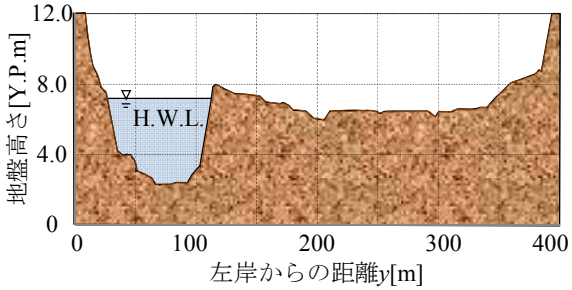
B）検討方法

ア）現地観測

観測サイトは，**図 1(a)**に示す江戸川・野田橋下流側（河口から+39km）を対象とする．**図 1 (b)**に示すように，江戸川は複断面河道であり，その低水路幅は約 100m，高水敷幅は右岸側において約 300m となっている．**表 2** は観測期間や流況などを示す．本観測では，出水時 1 回，平常時 2 回となっており，出水時においても高水敷が冠水する規模ではなかったので，観測位置は低水路のみとした．本観測で用いる機器は，可搬式電波流速計（RYUKAN，横河電子機器㈱製）と ADCP（Workhorse1200kHz，Teledyne RDI 製），ADV（Acoustic Doppler Velocimeter，Nortek 製）の 3 つとする．**図 2** に示すように，ADCP 計測で用いられることが多い専用ボート（Riverboat，Teledyne RDI 製）の中央部に ADCP を鉛直下向きに装着すると共に，ADV も ADCP センサのそばに下向きに取り付け，これらを水面に浮かべた形で計測した．また，電波流速計に関しては，橋上の下流側に水平面から 45 度傾けた状態で設置した．各流速計の計測深さとしては，電波流速計は水表面，ADCP は水面下 0.35m から 20cm 毎に，ADV は ADCP の未計測範囲である水面下 0.18，0.20，0.27m とした．また，流速計測と同時に，橋上中央部にて，マルチ環境測定器（LM-8102，アズワン㈱製）により風向・風速を計測した．計測時間間隔を電波流速計 1.0s，ADCP7.5s，ADV1.0s と設定した．



（a）平面図



（b）横断面図

図 1　観測サイト（江戸川・野田橋）

表 2　観測期間と流況

観測実施日	流況	水位 [Y.P.m]	ADV計測高さ[m]	風速[m/s](下流向きを正)
2012/6/21 9時～17時	出水時	7.41	-	-4.35
2012/10/2 15時～17時	平常時	5.29	0.18，0.27	-3.41
2012/11/21 15時～16時		3.71	0.20	2.57

イ）室内実験

室内実験では，**図 3** に示す水路長 20m，水路幅 1m の風洞付水平開水路（パシフィックコンサルタンツ㈱所有）を用いた．ここでは，電波流速計とピトー管（計測部外径 5mm），浮子（縦 3.0×横 2.6×厚さ 0.5cm の木片）を用いた．浮子については水表面近傍の流速を

計測するために，喫水を 4mm（静水中）とした．実験時の水理条件としては，流量を 0.270m^3/s，水深を 0.280～0.286m で固定し，風条件は無風，順風（+3.6m/s）・逆風（-4.2m/s）の 3 つとした．計測断面は，図 3(a)に示すように，無風・順風時は流下距離 X=15m（送風機からの吹送距離 5m），逆風時は X=14m（吹送距離 5m） とした．横断面内の計測位置は，図 3(b)に示すように，電波流速計及び浮子は表面流速の 9 地点（0.1m 間隔），ピトー管は水面からの深さ z=0.01，0.03，0.05m にて 19 地点（0.05m 間隔）とした．また，横断面中央部にて，ピトー管を用いて水面下 10cm まで 1.0cm 間隔，10cm 以深では 3.0cm 間隔で流速鉛直分布を計測した．

C）結果と考察

ア）流速鉛直・横断分布

電波流速計の計測状況の基本特性を把握するために，水路中央部における流速鉛直分布を図 4 に示す．ここでは，無風・順風・逆風における電波流速計とピトー管，浮子の実験結果を表示する．また，ピトー管により得られた水深平均流速も図示する．なお，ピトー管（z=0.01m）の流速データを同化した DIEX 法による流速推定結果も表示しているが，3.3 にて検討する．これより，電波流速計の計測値は，風速条件に依らず浮子と一致している．一方，これらとピトー管の計測値は順風では概ね一致するが，無風・逆風では差は広がっていることが分かる．このような電波流速計とピトー管（水面下 1cm）の流速計測値の違いは，実験水路の計測断面（送風機から 5m）における吹送流の発達状況や二次流の影響を受けているものと推測されるが，詳細は不明な点が多く今後の検討課題とする．

様々な横断位置において電波流速計とピトー管，浮子の流速値を比較するために，3 つの風速パターンにおける流速横断分布を図 5 に示す．ここでは，ピトー管の流速値に関しては，z=0.01m と 0.03m，0.05m の差はほとんど無いので，z=0.01m の計測値のみを採用している．これより，電波流速計と浮子の流速値はどの横断位置，3 つの風速条件でも一致しているが，z=0.01m におけるピトー管の結果とは明確に差が生じており，流速鉛直分布の結果と対応している．浮子の喫水が 4mm であることを考慮すると，電波流速計は水表面極近傍（<5mm）における流速を正確に計測しているものの，水面下 1cm 以深の結果とは異なること，その様子が風速条件により変化していることが示唆された．

上記の室内実験結果と現地観測結果を用いて，電波流速計と他の流速計による流速値を比較したものを図 6 に示す．他の流速計としては，実験結果では浮子とピトー管（z=0.01m），観測結果では，ADCP（z=0.35m）と ADV（z=0.18，0.20，0.27m）を表示する．まず，図 6 (a)より電波流速計の流速値は浮子の値とほぼ一致しており，両者の相対差の RMS

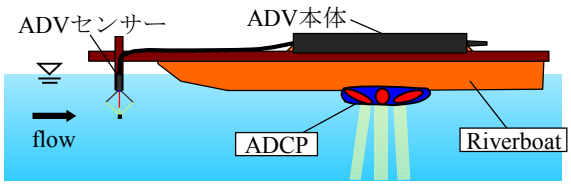


図 2　観測時における ADV・ADCP の計測状況

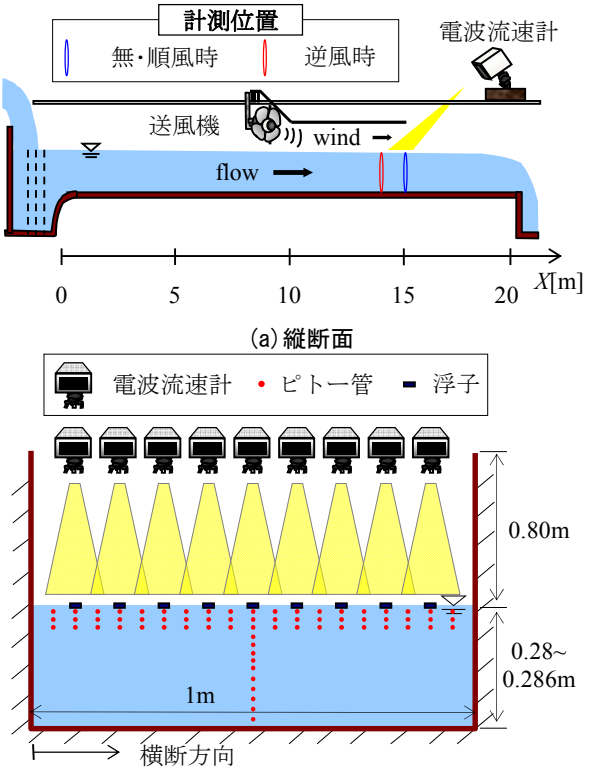


図 3　風洞付水平開水路における各測器の計測位置概略図

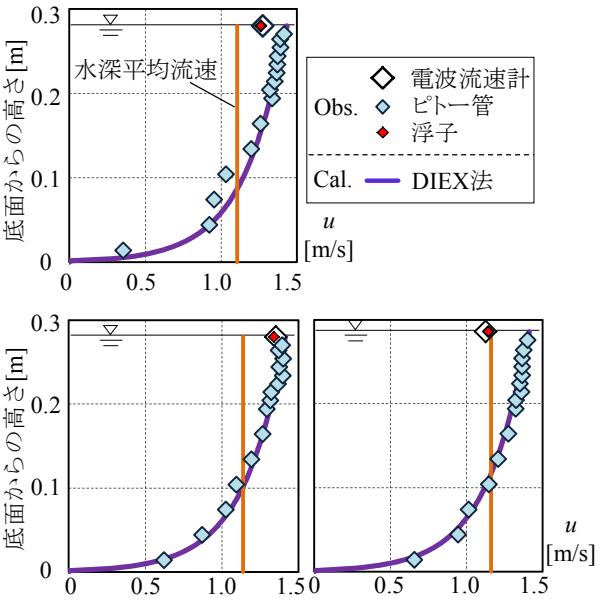


図 4　水路中央部での流速鉛直分布

（Root Mean Square）値は 3.2%と極めて小さい．一方，電波流速計とピトー管の流速値に関する相対差の RMS 値は順風 6.4%，無風 8.9%，逆風 19.6%となり，その差は逆風ほど大きくなっている．さらに，ADCP や ADV に対する相対差の RMS 値は 24，27%となり，実験結果よりも大きな差となっている．これは，ADCP や ADV の計測位置がピトー管よりも深いためであると考えられる．これらより，現地・室内スケール共に，電波流速計の計測値は水表面極近傍の流速を捉えていることが示唆された．

イ）更正係数や表面流速の風速依存性

電波流速計の表面流速データから流量算出時に用いる更正係数α（=水深平均流速／電波流速計の表面流速）と風速 U_w の関係を**図 7** に示す．更正係数算出に用いる水深平均流速は，室内実験ではピトー管の結果，現地観測では ADCP の結果よりそれぞれ求める．また，風速 U_w としては下流向きを正とする．観測結果には，出水時データ（逆風，-4.35m/s）のみを採用する．これより，実験結果としては，無風・順風時における更正係数は標準値（=0.85）と近くなっているが，逆風時では 1.03 となり，標準値を大きく上回った．また，逆風条件の現地観測結果では，全ての更正係数は 1 を上回り，逆風時の実験結果より大きな値となる．なお，観測・実験結果の大きな差異は，吹送流の発達状況の違いと類推される．このように，表面流速の更正係数の風速依存性は現れ，様々な風速条件下では更正係数が 0.85 の一定値とならない可能性が示された．

このような更正係数と直接関係する表面流速の風速依存性を過去のデータを交えて検討するために，電波流速計による表面流速計測値 u_{RCM} と水面直下の流速データ u_{ref} との差Δu（$= u_{RCM} - u_{ref}$）と風速 U_w との相関図を**図 8** に示す．本実験結果として u_{ref} にピトー管（z=0.01m）の計測値を採用する．また，既存の研究として，大手ら，柏田ら，本永らによる流速差と風速の提案式を点線で表示する．これより，本実験結果では，**図 6(a)**に示すように，どの風速条件でも流速差はΔu は負になることが多い．これらの結果と既存の提案式を比べると，逆風条件では同程度であるものの，順風・無風条件ではΔu を過小評価している．本実験データに対して近似直線を適用したところ，以下の近似式が得られた．

$$\Delta u = 0.0291 U_w - 0.1048 \qquad (1)$$

このように，傾きは 0.029（風速の 2.9%）と柏田らや本永らよりも小さい．無風時にΔu が 0 とならないため，切片が 0 となっていない．なお，本実験では吹送距離が 5m しかなく，吹送流が十分発達していない可能性がある．多くの風速条件下において十分に吹送流が発達した条件での追加実験が必要であり，今後実施する予定である．

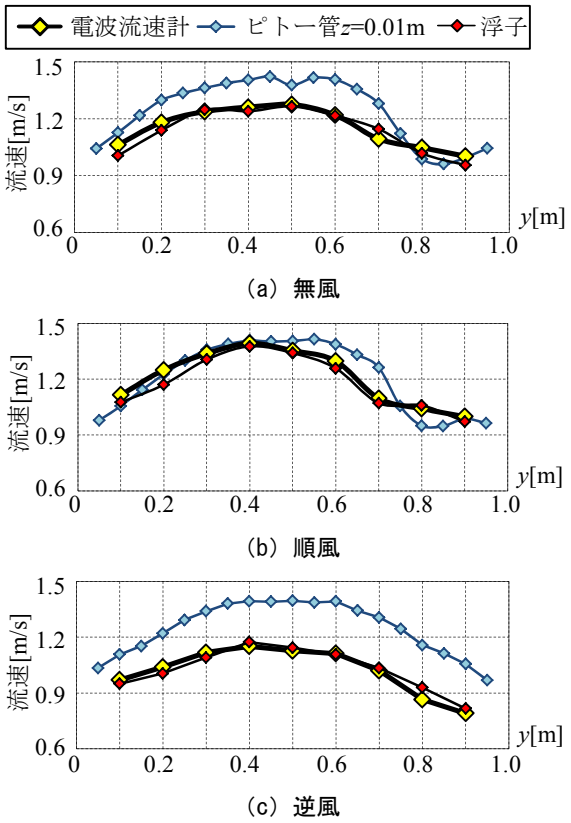


図 5　水表面近傍の流速横断分布

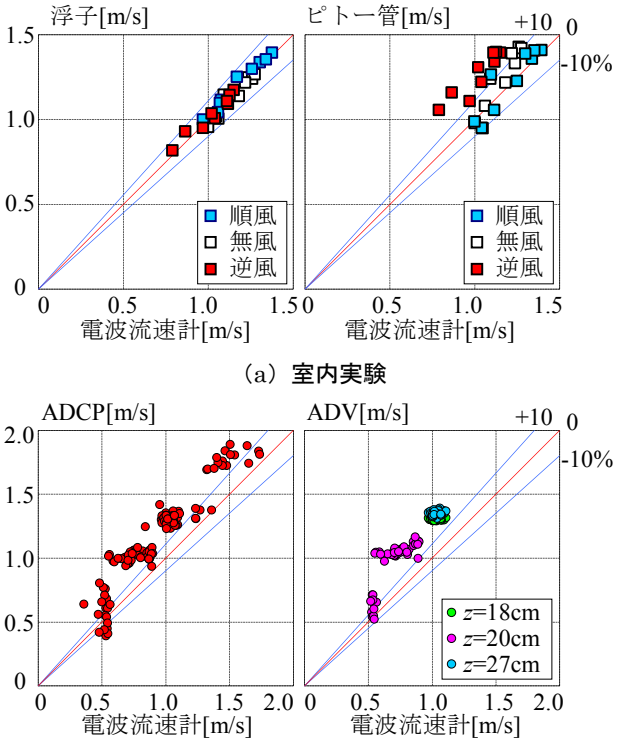


図 6　電波流速計と他の流速計の比較

3）結論

本検討により得られた結論は以下のとおりである．

1) 室内実験結果から，電波流速計の流速データは，浮子と一致するものの，水面下 0.01m のピトー管の計測値とは概ね一致しなかった．このことより，電波流速計の計測値は水表面極近傍（<5mm）の流速を捉えていることが示された．
2) 電波流速計による表面流速データに対する更正係数を調べたところ，実験結果より，順風時や無風時は標準値と近くなったものの，逆風時では 1.03 となった．このように，様々な風速条件下では更正係数が 0.85 の一定値とならない可能性が示唆された．
3) 更正係数を用いる従来法と DIEX 法により室内実験結果に対して流量を推定した．電波流速計に関しては，更正係数を用いる Case1-1 か 1-2 において良好な流量推定精度となった．また，DIEX 法に関してはピトー管の流速値（z=0.01m）を用いると，流量誤差が 5%以下となり，極めて良好な流量推定が可能となることが示された．（報告書本編では詳述）

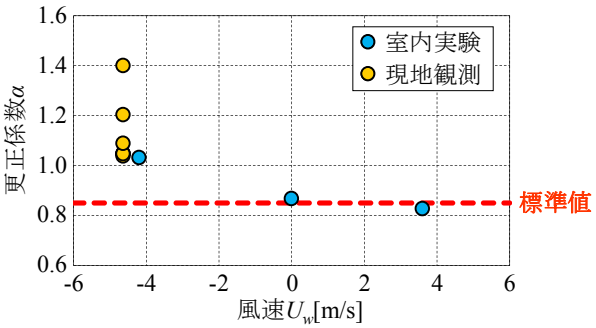


図 7　電波流速計の更正係数 α と風速 Uw の関係

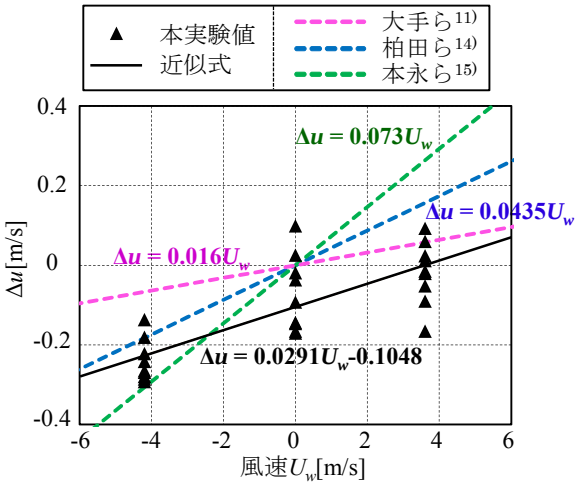


図 8　流速差 Δu と風速 U_w の相関図

（2）流速内外挿操作に係わる検討

流量観測の高度化・高効率化を実現するにあたって必要となる流速観測・流速内外挿操作の技術開発のうち，ここでは流速内外挿操作の高度化を図る．研究代表者が開発した力学的内外挿法（DIEX 法）は，力学的条件を満足する流速の横断面分布を推定することが可能であり，様々な環境下での適用性が示されている．しかしながら，樹林あるいは植生の影響を強く受けた流況に対する適用性については，これまで十分な検討が行えていなかった．

本章では，研究代表者らによって蓄積された ADCP による流速横断面分布の観測データから，離散的な「点」の模擬観測データを作成し，DIEX 法を適用することで，DIEX 法の流速横断面分布および流量の推定精度（再現精度）を検証する．さらに，模擬観測データの空間解像度を変化させることで，流速・流量の推定精度の影響を確認し，高精度化と高効率化を実現可能な観測点数について検証する．

1）検討方法

A）観測対象サイト

DIEX 法の有効性を詳細に検証するために，実際の観測データを用いずに，ADCP 移動観測法による断面流速データから模擬データを作成し，本手法の流速・流量推定精度を検証する．ADCP 移動観測法による観測対象サイトは，利根川水系江戸川野田橋（河口から約 39.5km），荒川水系隅田川白鬚橋（河口から約 9km），荒川水系荒川西新井橋（河口から約 13.6km）とし，位置図を**図 9**，それぞれの横断面図を**図 10** に示す．

図 9　観測対象サイト位置図

B）観測対象洪水

野田橋では単断面流れおよび複断面流れの観測（それぞれ 248 回，186 回）に成功しており，白鬚橋および西新井橋は単断面流れの観測（それぞれ 26 回，53 回）に限定されている．なお，白鬚橋，西新井橋は感

表 3　模擬浮子の投下本数設定

(a) 江戸川野田橋

Main channel case	1	2	3	4
Num. of float	3	4	5	6
Resolution[m-1]	40	30	24	20
Emergency / Standard	E	-	-	S

Flood plain case	1	2	3	4	5
Num. of float	3	5	7	10	14
Resolution[m-1]	93	56	40	28	20
Emer. / Stan.	E	-	-	-	S

(b) 隅田川白鬚橋

Case	1	2	3	4	5	6
Num. of float	5	7	9	11	13	15
Resolution[m-1]	32	23	18	15	12	11
Emer. / Stan.	E	-	-	-	-	S

(c) 荒川西新井橋

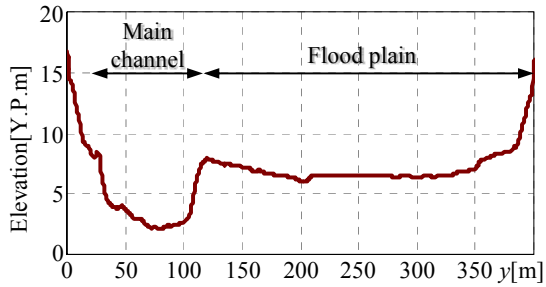
Case	1	2	3	4	5	6	7
Num. of float	5	7	9	11	13	15	18
Resolution[m-1]	36	26	20	16	14	12	10
Emer. / Stan.	E	-	-	-	-	-	S

潮域に位置することから，密度成層が破壊され，かつ，明確な順流状態となっている洪水・観測期間のみを抽出している．また，江戸川野田橋の複断面流れについても，高水敷において明確な順流状態となっている期間のみを抽出した．

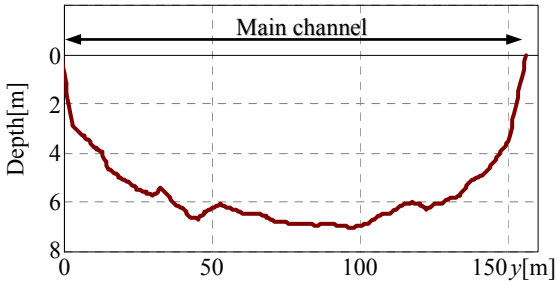
C）観測方法

観測機器としては，ADCP Workhorse1200kHz（Teledyne RDI 製）を用い，これを専用ボートに鉛直下向きに付け横断方向に移動させて，横断面全体の流速分布データを取得した．

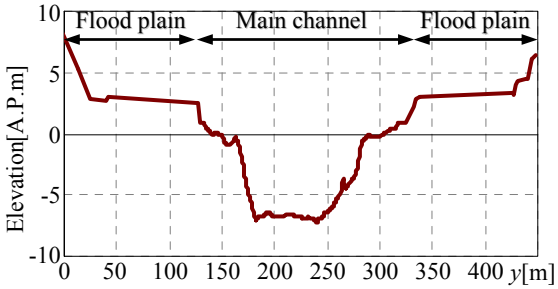
この ADCP データから模擬浮子データを作成する際には，**図 11** のように，浮子吃水以浅の流速値を平均したものを浮子流速とし，その測定高さは吃水中央とする．なお，浮子長さと更正係数は水深に合わせて変化させている．浮子の投下本数の設定としては，一般に準用される河川砂防技術基準調査編に従い，**表 3** に示すケースを想定し，浮子流速データの空間解像度の影響を抽出した．なお，標準法および緊急法を Reference ケースとした．



(a) 利根川水系江戸川野田橋



(b) 荒川水系隅田川白鬚橋



(c) 荒川水系荒川西荒井橋

図 10　観測対象サイト横断図

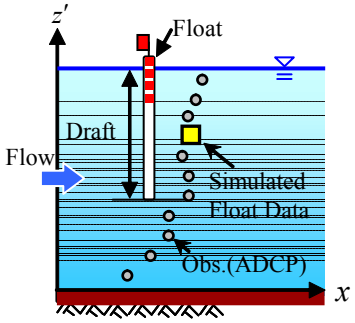


図 11　模擬浮子データ作成方法

2）単断面河道における模擬浮子データを用いた流速・流量推定精度の検証

DIEX 法による樹林化河道での流速・流量推定精度の検証を行う前に，一般的な河道条件下における適用性を検証する．ここでは，単断面河道を対象として，DIEX 法による流速・流量推定精度を検証した．

ア）Reference ケースにおける流速推定精度

単断面河道における各流速内外挿法の流速推定精度を精緻に検証するために，以下に Reference ケースのうち ADCP による流量観測値が最大であった観測期間における流速推定結果を示す．**図 12** は ADCP による流速横断面分布の観測結果と DIEX 法による流速横断面分布の推定結果を合わせて図示している．これより，本手法による横断面流速分布はなめらかに推定されており，橋脚による後流域を除いては，ADCP 観測結果に現れている空間変動パターンを再現できている．

より詳細に観測値と推定値の流速分布を比較するために，**図 12** と同じ流量ピーク時の水深平均流速横断分布を**図 13** に示す．ここでは，観測値と本手法による推定値とともに，従来法および改良法による推定値も

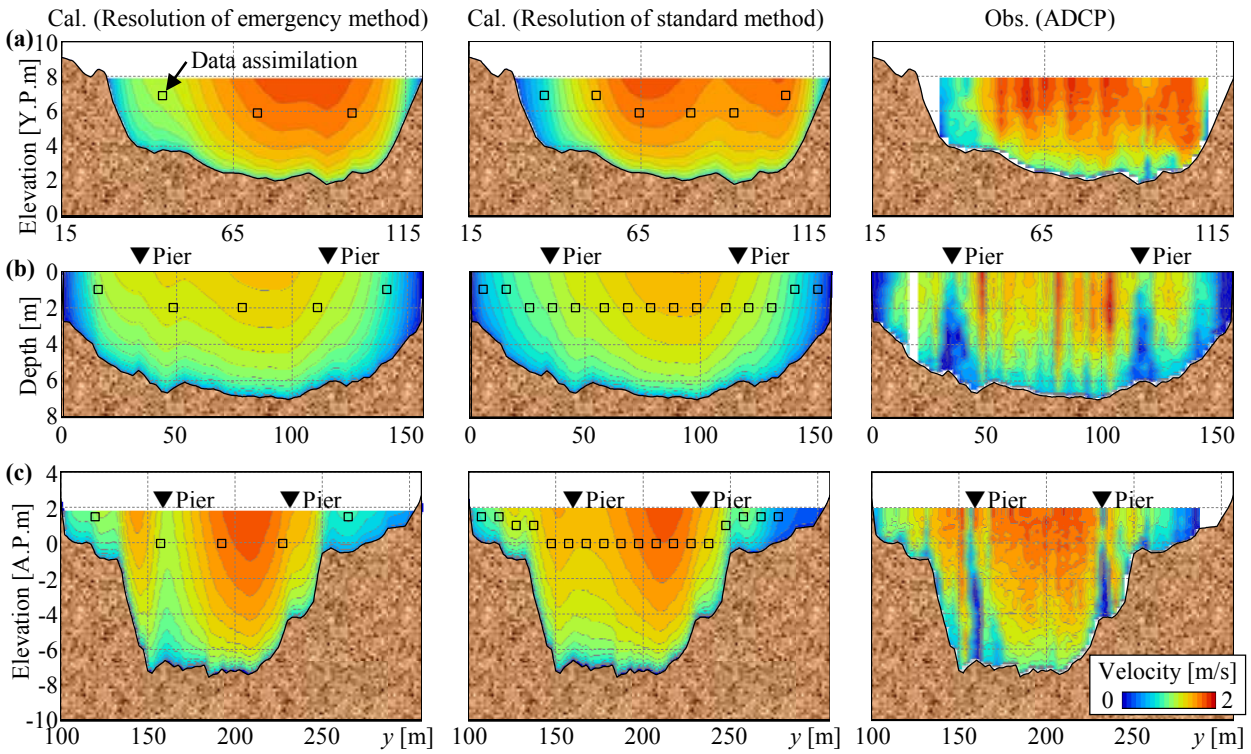


図 12　単断面河道における流速横断面分布の観測値と DIEX 法による推定値（観測流量ピーク時）

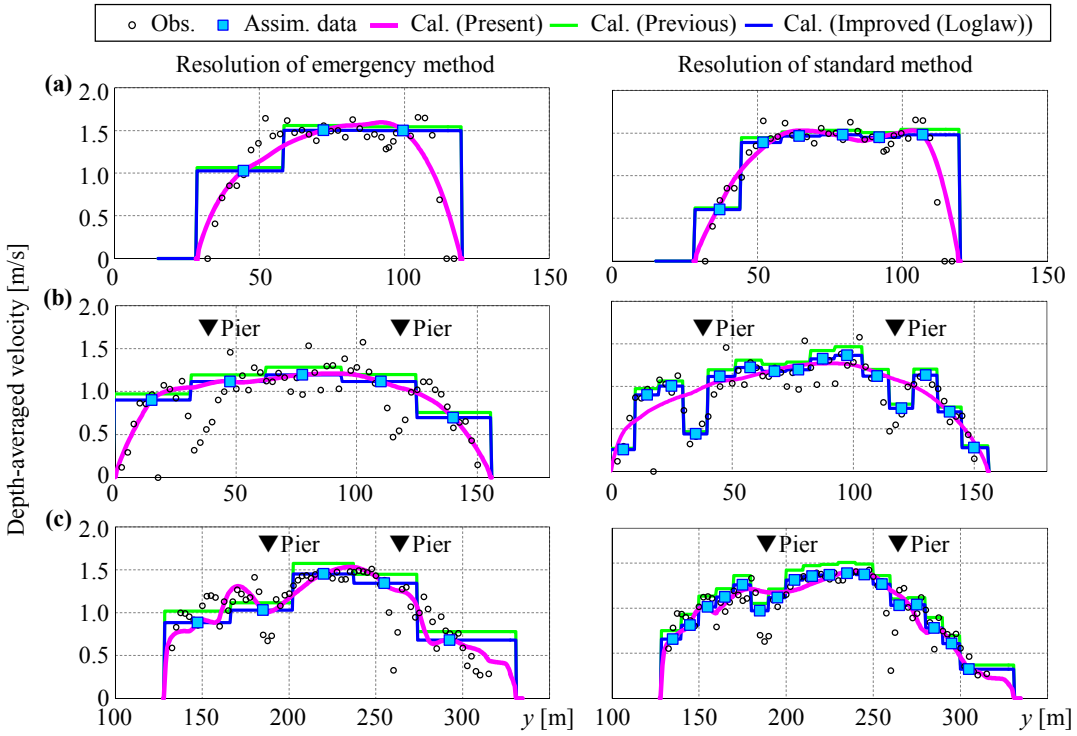


図 13　単断面河道における水深平均流速横断分布の観測値と各手法の推定値（観測流量ピーク時）

表示している．ここで，従来法は，一般に用いられる更正係数による水深平均化と区分断面内に一様に流速を内外挿する手法，改良法は，従来法の水深平均化手法を対数分布則に置き換えたものである．これより，本手法による水深流速横断分布は ADCP 観測結果を良好に再現できている．一方で，代表流速を区分内に一様に与える従来法および改良法については，各区分内で ADCP 観測値との乖離が見られる．特に従来法は ADCP 観測値に対して概ね過大評価傾向にあることが分かる．

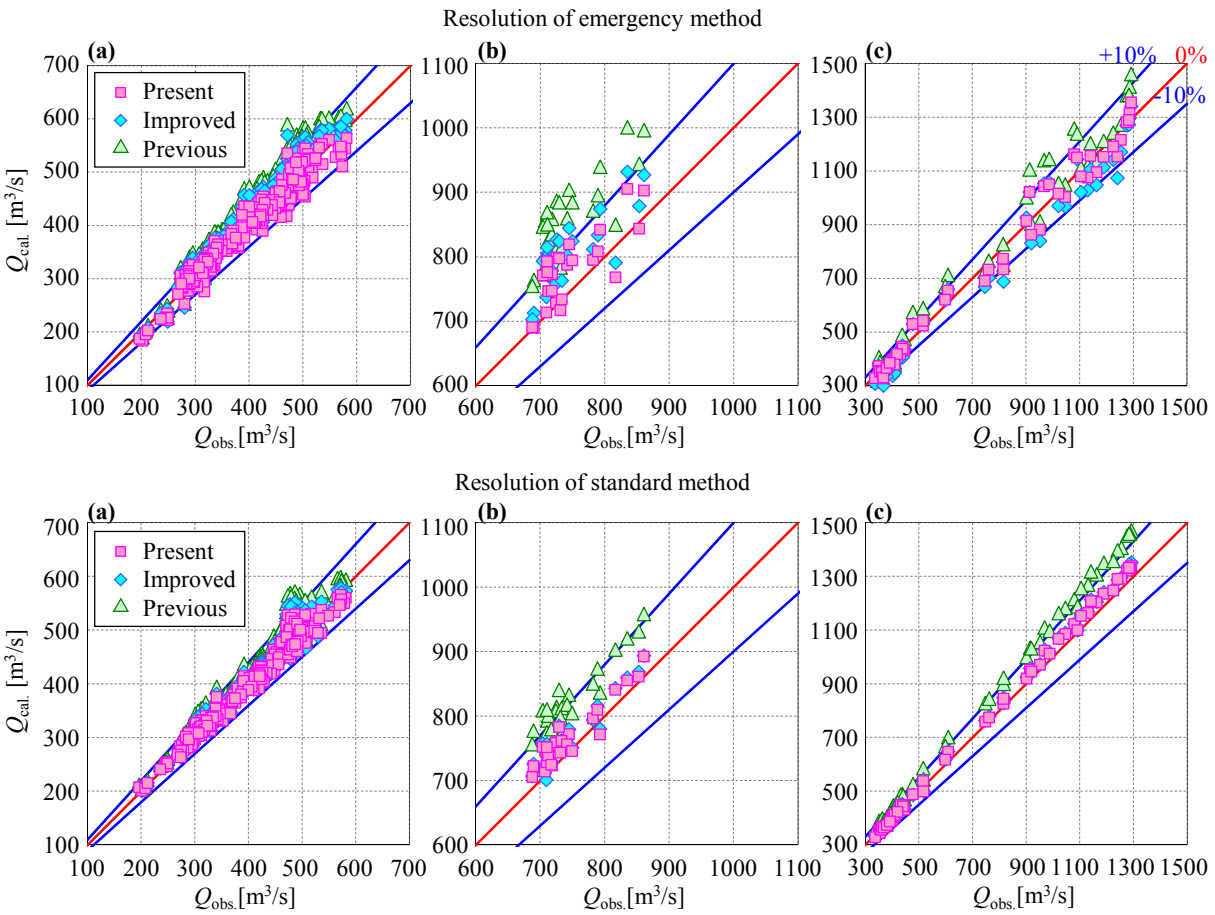


図 14　単断面河道における流量に関する ADCP 観測値と各手法推定値の相関図

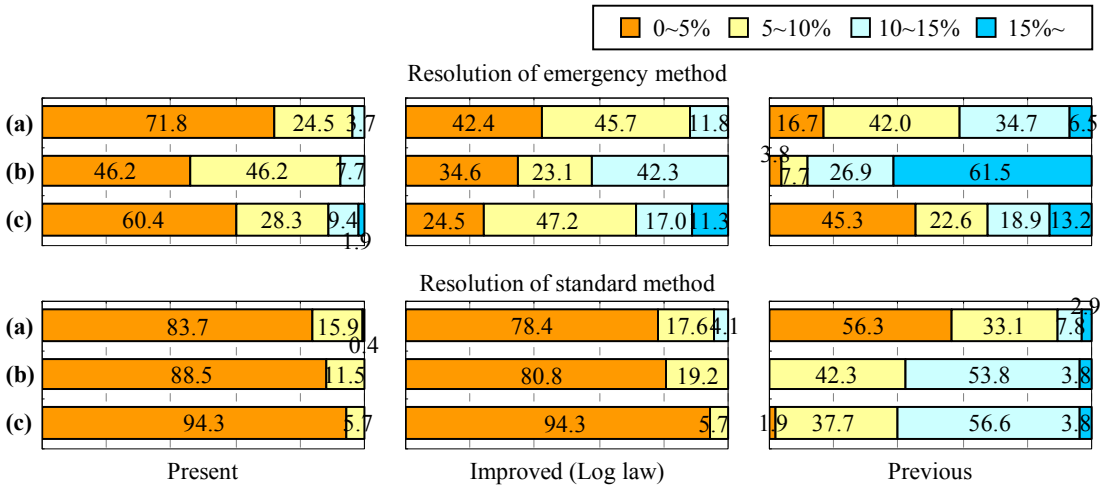


図 15　単断面河道における各手法による流量推定結果の相対誤差 Err の頻度分布

イ）Reference ケースにおける流量推定結果

次に，単断面河道における各流速内外挿手法による流量推定精度を評価するために，**図 14** に ADCP 観測値と模擬浮子からの流量推定値の相関図を示す．同図中には，誤差 0%，±10%に相当する実線も合わせて図示している．これより，緊急法のプロットは，どの観測サイトにおいてもバラツキと変動幅がともに大きいが，本手法は他の流速内外挿手法と比較して相対的にばらつきが小さく，概ね±10%の範囲に収まっている．標準法では，どの手法の推定結果もそれぞれバラツキが小さく，緊急法と比較して高い精度を示している．しかしながら，従来法においては概ね 10%を超える過大評価となっている．

図 15 は流量計算結果の相対誤差の頻度分布を示す．図中では，相対誤差の絶対値が 0～5%，5～10%，10～15%，15%以上に分けて表示している．

本手法では観測データの空間解像度が緊急法相当（以下，低解像）であっても，観測サイトに係わらず，観測期間の 50%程度は±5%以内，90%程度は±10%以内の推定精度を示すことが分かる．さらに，標準法相当の空間解像度（以下，高解像）では，概ね 80～90%の割合で±5%以内で，ごく一部のデータを除いて±10%以内に収まり，本手法は安定的に高い流量推定精度を示している．

一方で，従来法は本手法に対して誤差が大きいだけでなく，観測サイトにより誤差の生起頻度分布に相違が見られ，また，観測データの空間解像度の増加に伴う誤差の生起頻度分布の変化傾向も異なる．低解像従来法ではおよそ半数の観測期間で 10%を超過する誤差が生じ，さらに，高解像従来法においても流量推定精度の向上度合いは限定的である．さらに，高解像の改良法と本手法で同等程度の流量推定精度が認められ，かつ，低解像の改良法と本手法で流量推定精度に差が認められることは，従来法における更正係数の取扱いおよび流速の内外挿手法（区分求積法）に問題があることを示唆している．

ここで，流量推定精度に与える更正係数の影響について評価するために，**図 16** に水深と更正係数の関係を示し，同図中に Reference ケースにおける浮子投下位置の水深の頻度分布を合わせて図示する．また，**図 17** に更正係数の誤差（一般値－対数則）の生起頻度を示している．なお，ここでの対数則にはマニングの粗度係数 n=0.025 を与えている．これらより，荒川では主流部において水深が相対的に大きく，最大長である 4m 浮子を用いても吃水水深比が小さいために更正係数の一般値の妥当性が低下する．次いで，隅田川，江戸川の順で水深が大きく，同様の順に更正係数の誤差が大きい．

ウ）観測データの空間解像度と流量推定精度

前節までに示した標準法と緊急法相当の空間解像度に加えて，様々な空間解像度における各手法の流量推定精度を検討する．

図 18 に模擬浮子データの空間解像度と流量推定精度の関係を示す．ここで，横軸には浮子投下間隔を用いている．従来法および改良法では，空間解像度と流量推定精度の間に明瞭な相関関係が認められる．しかしながら，誤差の絶対値は従来法が最も大きく，空間解像度の増大によって流量推定誤差が 5%を下回る改良法に対して，水深の大きい隅田川や荒川では 10%以上の誤差に収束した．一方で，本手法では模擬浮子データの空間解像度に対する流量推定精度の依存性は低く，浮子の増減に係わらず概ね 5%程度以下の高い精度を保持することが可能であった．

エ）計算パラメータへの依存性

本手法及び改良法に含まれる計算パラメータである粗度係数が流量推定精度に与える影響を評価する．サンプルデータ数の多い江戸川を対象（N=248）として，マニングの粗度係数 n を 0.010～0.050$m^{-1/3}s$ の範囲で 0.005$m^{-1/3}s$ ごとに変化させた場合の流量推定結果の相対誤差を**図 19** に示す．本手法では空間解像度にかかわら

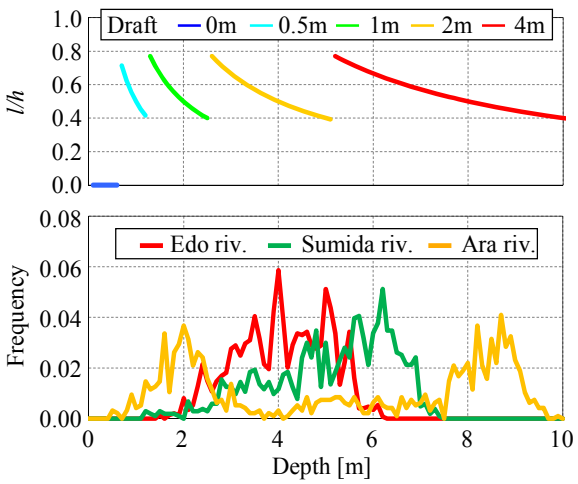


図 16　水深毎の浮子吃水水深比と各手法の更正係数および各観測サイトにおける生起頻度

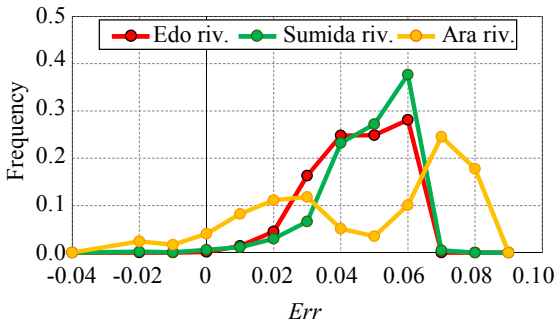


図 17　更正係数誤差（一般値－対数則）の生起頻度

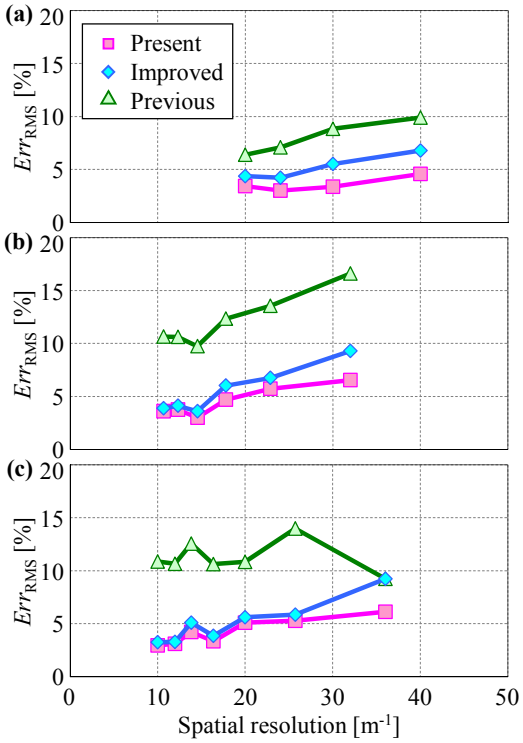


図 18　模擬浮子データの空間解像度と流量推定精度

ず n=0.025m$^{-1/3}$s が最適値となっている．一方で，改良法を用いた場合には，標準法では n=0.030m$^{-1/3}$s，緊急法では n=0.040m$^{-1/3}$s が最適値となり，空間解像度によって変化が認められる．特に緊急法については，区分求積法による流速横断分布の過大評価量を相殺するために，低水路粗度としては過大な値となっている．このように，本手法では，観測データの空間解像度にかかわらずマニングの粗度係数の最適値は一定であり，かつ，低水路粗度として一般に採用される 0.020～0.035m$^{-1/3}$s 程度の範囲では，流量の推定誤差は最大でも 6%未満であり，この n の範囲における流量推定精度は概ね良好である．

3）複断面河道における模擬浮子データを用いた流速・流量推定精度の検証

ア）Reference ケースにおける流速推定精度

複断面河道における本手法の有用性を検証するために，各手法による流速推定精度を詳細に示す．**図 20** は，江戸川における台風 0709 号出水のピーク流量時における横断面内の流速横断面分布の観測値および本手法による推定値を比較したものである．これより，複断面河道においても，単断面河道と同様になめらかに流速の内外挿できている．また，観測値と推定値の流速分布パターンを比べると，低水路では両者は概ね類似しているものの，高水敷では推定値は観測値ほどの空間変動状況を再現できていない．

より詳細に観測値と推定値の流速分布を比較するために，**図 20** と同じ流量ピーク時における水深平均流速の横断分布を**図 21** に示す．これより，本手法による推定値は，高水敷ではやや過小評価しているものの，低水路ではほぼ一致している．一方，従来法や改良法では，区分された断面において流速が一様となるため，流速の不一致が目立ち，特に低水路左岸側や高水敷右岸側の水際付近などで顕著となっている．

さらに，前述した台風 0709 号出水より小規模であった 2006 年 7 月出水，台風 1115 号出水時のピーク流量時の水深平均流速横断分布を**図 22** に示す．高水敷における流速の空間変動が大きく，緊急法相当の観測データ解像度では，本手法を用いても複雑な流速分布の推定が出来ていない．それぞれの高水敷の分担流量は 307m^3/s，373m^3/s と台風 0709 号における 590m^3/s に対して小さく，樹木・植生が倒伏せず流況に与える影響が大きかったと推察される．なお，DIEX 法では植生抵抗項を基礎方程式中に含めることで，樹木・植生の影響を考慮することが可能であるが，樹木・植生の影響度合いは水位・流量規模により一意に説明できるものではなく，河道管理を含む植生消長過程や倒伏状態を考慮する必要があり，パラメータの設定は容易とは言いがたい．このため，樹林・植生の影響が大きい流況下では，必要十分な観測点数を確保する必要があることが分かる．

イ）Reference ケースにおける流量推定精度

次に，複断面河道における本手法の流量推定精度を検証するために，流量に関する観測値と推定値の相関図を**図 23** に示す．ここでは，断面全体および低水路，高水敷に

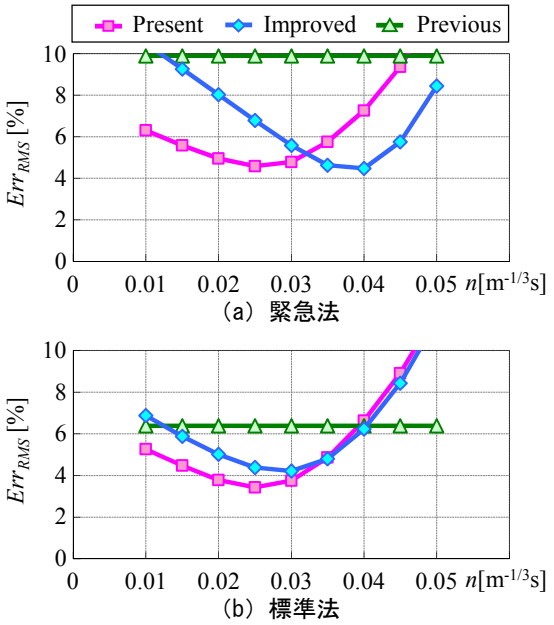


図 19　様々な粗度条件下における流量推定誤差

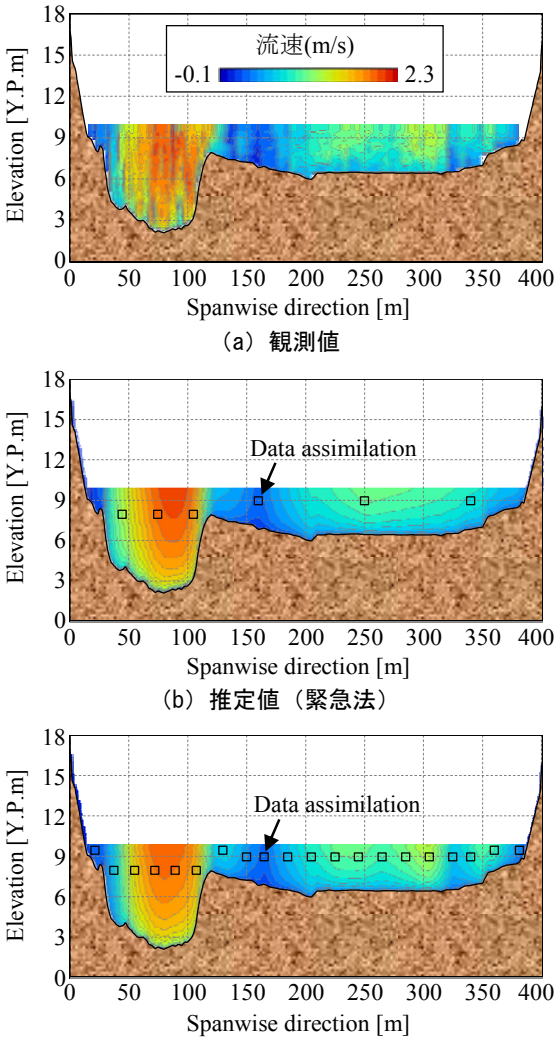


図 20　複断面河道における流速横断面分布の観測値と DIEX 法による推定値

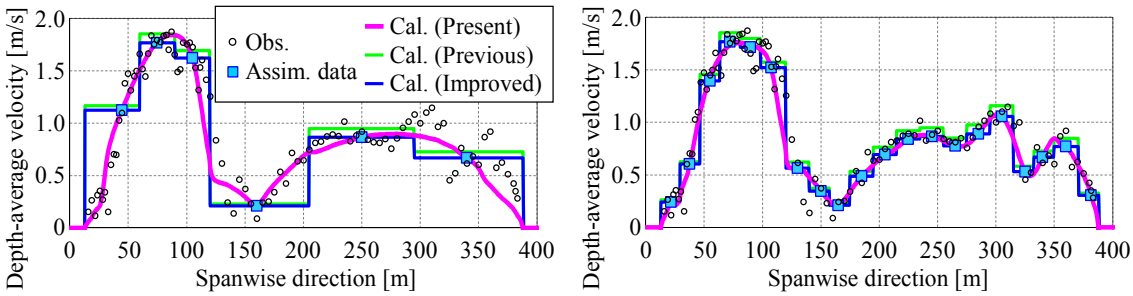


図 21　複断面河道における水深平均流速横断分布の観測値と各手法の推定値
（台風 0709 号、観測流量ピーク時）

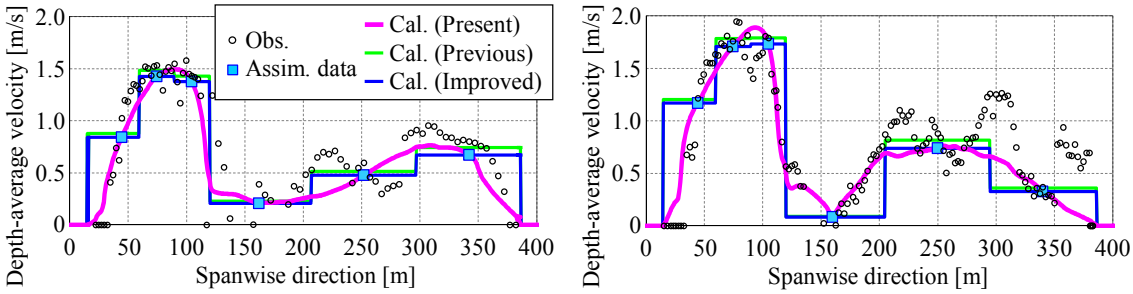


図 22　複断面河道における水深平均流速横断分布の観測値と各手法の推定値
（左から、2006 年 7 月出水ピーク時、台風 1115 号出水ピーク時）

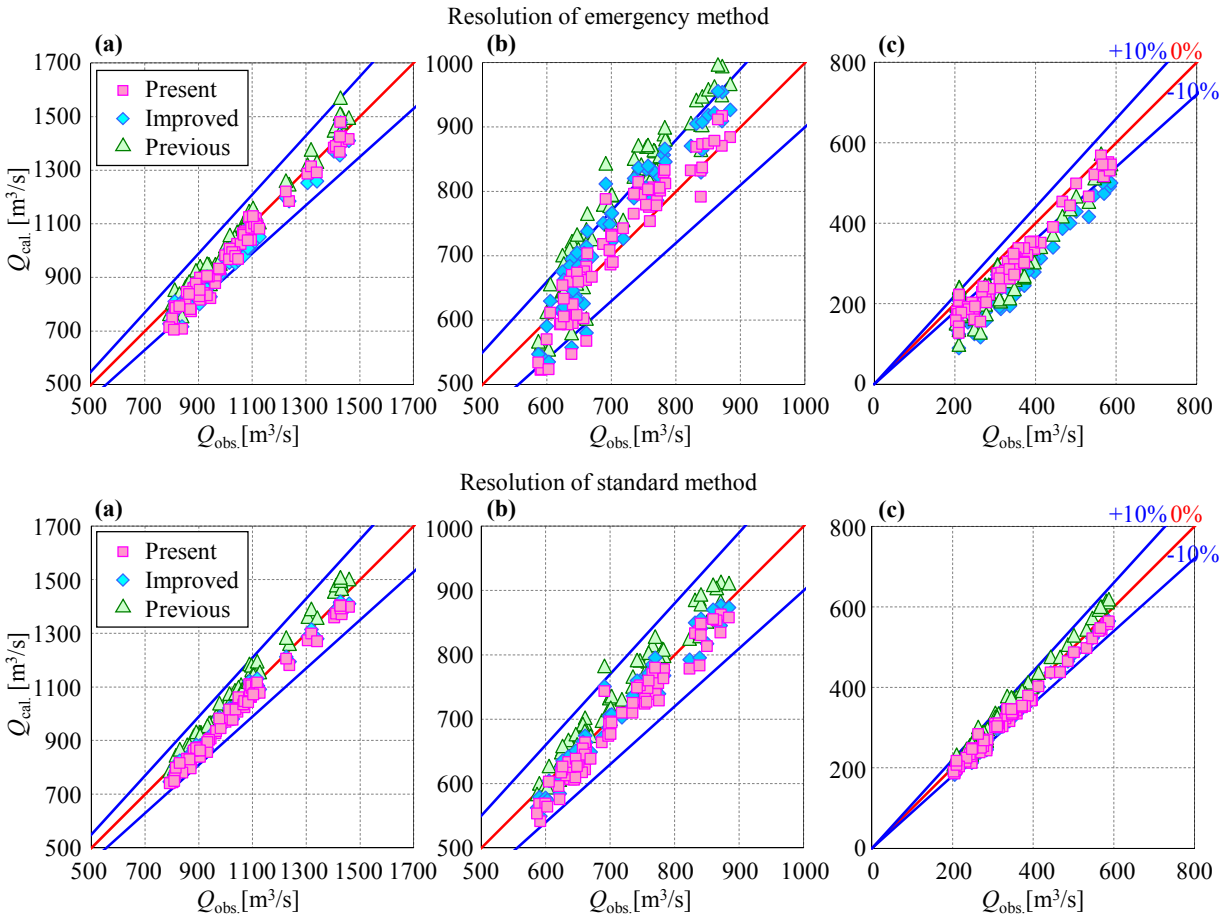


図 23　複断面河道における流量に関する ADCP 観測値と各手法推定値の相関図
（上段：緊急法、下段：標準法、左から(a)断面全体、(b)低水路、(c)高水敷）

分けており，推定値としては本手法と改良法，従来法の結果を表示している．

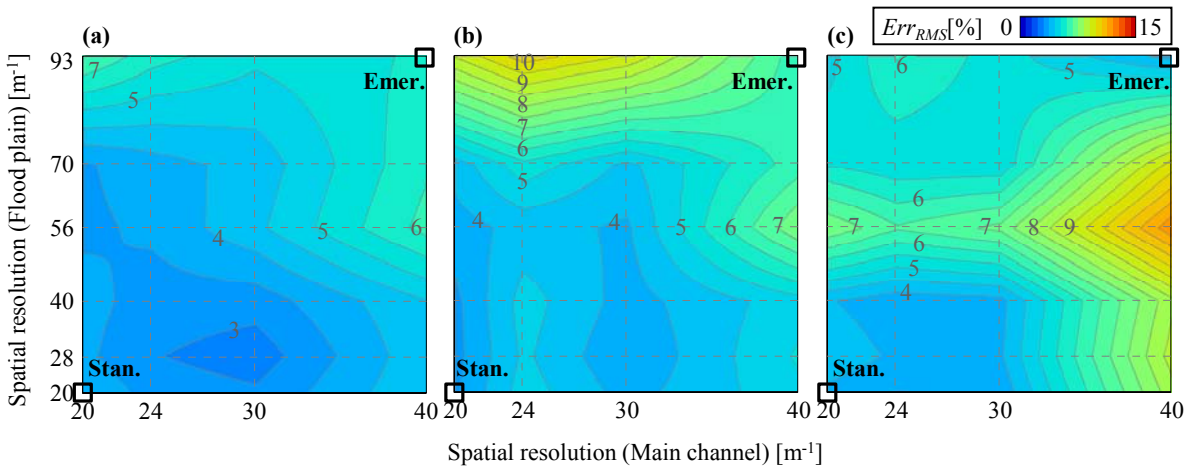
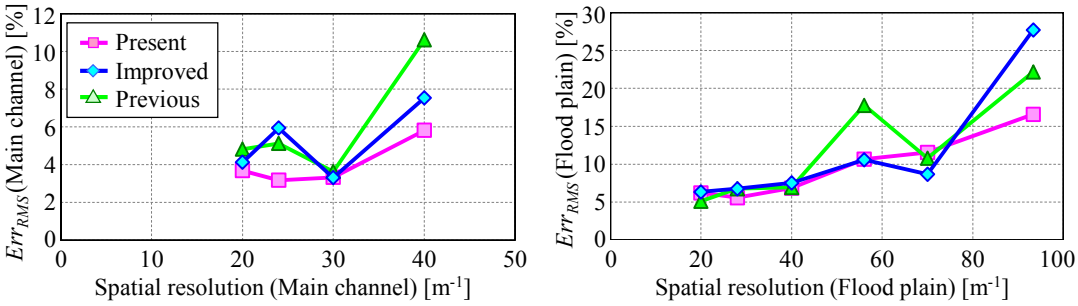


図 24　観測データの空間解像度と流量推定精度（左から、(a)本手法、(b)改良法、(c)従来法）



（a）低水路　　（b）高水敷

図 25　低水路・高水敷それぞれにおける観測データの空間解像度と流量推定誤差

まず，緊急法の解像度における断面全体の流量推定精度はすべての手法で良好であり，従来法がやや過大評価傾向にある．さらに，流量推定精度を低水路・高水敷に分けて評価すると，それぞれ過大評価・過小評価の傾向にあり，相互に補完する形で断面全体で高い精度であったことが分かる．この相互補完の度合いは従来法で最も顕著であり，次いで，改良法で同様の傾向が見られる．一方で，本手法では低水路・高水敷それぞれにおいて概ね高い精度が保持されており，断面全体としても高い精度であったことが分かる．ただし，高水敷での流量が 400m^3/s を下回る範囲では植生の影響が強く，観測データが補間範囲を代表することができないため，過小評価傾向が顕著となっている．

次に，標準法の解像度における断面全体の流量推定精度は，概ね本手法，改良法，従来法の順に高い事がわかる．浮子データの空間解像度を高めることで，改良法では本手法と同等の流量推定精度を示したが，従来法では過大評価となった．これは，前述したとおり，従来法における流速鉛直分布の取扱いに問題があることを示唆している．

ウ）観測データの空間解像度と流量推定精度

前節までに示した標準法と緊急法相当の空間解像度に加えて，様々な空間解像度における各手法の流量推定精度を検討する．ここでは，低水路 4 ケースと高水敷 6 ケースを組み合わせた全 24 ケースの浮子投下方法を想定した．

図 24，**図 25** は，それぞれ断面全体，低水路・高水敷における本手法と改良法，従来法の流量推定誤差の RMS 値 ErrRMS を示している．

従来法の結果に着目すると，低水路 30m^{-1}，高水敷 40m^{-1} 以上の空間解像度のデータを与えることで 5%程度の精度を持つ．しかし，観測データの空間解像度と流量推定精度が単純な相関関係を示しておらず，低水路と高水敷の誤差のバランスによって全体の誤差が決定されている．

改良法では，従来法と比較して，高解像化により高精度となる傾向にある．これは，従来法と比較して流速鉛直分布の取扱いが実洪水現象に合致したことに由来する．

本手法では，浮子データの空間解像度に依存せずに高い流量推定精度を保持しており，極めて高い精度で流速の横断・鉛直方向の内外挿を行っている．低水路・高水敷に分けた誤差分布を見ても，それぞれで概ね高い精度の流量を算出しており，従来法のように相互の誤差の補完は生じていない．ただし，高水敷の観測

データ解像度が $93m^{-1}$ と極めて小さい場合において，高水敷の大きな流量推定誤差に起因して断面全体の誤差が 7%を上回る場合が見られた．

以上より，本手法により，離散的な「点」流速データを「面」データに良好に変換できると共に，流速・流量推定精度が良好であることから，本手法の有効性が示された．一方で，植生の影響が顕著な中小規模出水においては，疎な観測データでは補間範囲も含めた代表性を持ち得ないことから，高水敷の流量推定精度に注意する必要がある．この対策としては，観測データの高解像化や数値計算に植生抵抗の評価が考えられる．ただし，植生の影響が顕著となる流況では，高水敷の分担流量も小さいことから，河道全体の流量の誤差に与える影響は概ね軽微と考えられる．

（３）まとめ

本研究では，樹林化河道での高水流量観測の高精度化・高効率化を目指して，流速観測手法及び流速内外挿手法について検討した．

様々な制約条件が見られる樹林化河道においては，電波流速計による流速観測に大きく期待が出来ることから，電波流速計の計測性能や環境依存性について，現地観測及び室内実験による検討を行った．また，流速内外挿手法としては研究代表者が開発し，これまで様々な河道条件下での適用性を確認してきた DIEX 法について，樹林・植生の影響を強く受けた流況への適用性を検討した．

得られた主な成果は，以下のとおりである．

流速観測に関わる検討結果

① 電波流速計は電波照射範囲の波紋の移流速度を計測するオイラー的な非接触流速計であることから，樹林化河道においても概ね観測可能

② 電波流速計の計測性能について，現地観測および室内実験を実施したところ，以下の結果を得た
- 電波流速計の流速データは，浮子と一致するものの，水面下 0.01m のピトー管の計測値と概ね一致しなかった．これより，電波流速計の計測値は水表面近傍（<5mm）の流速を捉えている
- 電波流速計による表面流速データに対する更正係数を調べたところ，順風時や無風時は標準値と近くなったものの，逆風時では 1.03 となった．この様に，様々な風速条件下では更正係数が 0.85 の一定値とならない可能性が示唆された．
- レーザーPIV を用いて，壁面付近（幅 1m の水路で側壁より 0.1m 地点）の水面極近傍の流速分布計測を試みたが，二次流構造の影響を大きく受けた結果となり，検討方法について，今後改善の余地がある．（報告書本編に詳述）

③ 平面 2 次元流況計算により，樹林化・植生が繁茂する区間での流速・水位分布について検討したところ，流下阻害によって高水敷における水位が低水路と異なる（断面積の適切な評価が困難），高水敷から低水路に向かった流れにより浮子流下に支障が生じる（流速の適切な評価が困難）といった現象が発生することが示唆された（報告書本編に詳述）

流速内外挿に係わる検討結果

① 多量の ADCP 観測データから模擬観測データを作成し，DIEX 法を適用することで，流速横断面分布の推定精度（再現精度）を確認した

② DIEX 法により，離散的な点データが滑らかに内外挿可能であるが，十分な観測データ数を与えなければ，（植生に係わる精緻なパラメータ設定を行わない限りは）樹林・植生の影響を強く受けた流速分布の精緻な推定は困難である

③ しかしながら，本研究で対象とした江戸川・野田橋地点においては，樹木・植生の影響が顕著に現れる中小規模出水における高水敷の流量分担率が低いため，河道全体の流量精度は，観測データの空間解像度によらず，概ね保持されることが分かった

⑦今後の課題・展望

本研究では，流量観測の要素である流速観測・流速内外挿操作を対象とした検討を実施した．

このうち，流速観測手法として電波流速計について検討したが，電波流速計の計測対象とする水表面では風応力が作用した場合に流速の増大・減少が生じ，水深平均流速との関係が一定（一般に 0.85 の比率）に保持されなくなった．このため，現地観測・室内実験により風向風速が及ぼす影響について評価を試みたが，現時点で定量・定式化に至るだけのデータの蓄積ができていない．今後は，吹送距離や吹送時間等についても，合わせて評価していく必要がある．

一方で，流速内外挿手法として検討を実施した DIEX 法について，様々な河道形状（単断面・複断面，水深の大小）や観測データの空間解像度においても高い流速推定精度を保持し，かつ，計算パラメータ（粗度係数）への依存性は概ね小さいことが明らかとなった．本手法は，一般に使用される浮子測法のみならず，新たな流速計測技術として実用化されつつある電波流速計や画像解析手法（STIV 法・PTV 法），H-ADCP 等へも適用可能であり，今後の流量観測の省コスト化や高効率化，高精度化に大きく寄与するものと考えられる．

以上