

河床変動を考慮した設置型流速計による洪水流量観測手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平24～平28

研究グループ：水災害研究グループ

研究担当者：岩見 洋一

萬矢 敦啓，本永 良樹

【要旨】

本研究は洪水時の河川が河床変動を起こしていることを前提に、設置型流速計を用いて観測精度が高い流量観測手法を検討するものである。それには設置型流速計の精度、観測された流速から平均流速を検討するための流速補正係数、河床高の算定方法が重要となる。ここでは、あらゆる洪水規模、気象条件で観測された橋上操作艇に搭載した超音波多層型三次元流速計の結果から、設置型流速計の観測精度、河床変動及び流速補正係数の河床波による変化状況を、実観測の結果から議論した。

その結果、電波式流速計やSTIVは十分実用に資する精度を有していること、河床変動と流速補正係数は河床波の影響を強く受けることが確認された。

キーワード：河川水流量観測，設置型流速計，表面流速，流速補正係数，河床変動

1. はじめに

日本の河川は、大陸河川と比較すると河床勾配が大きく、流路延長が短いことから急流河川に位置づけられる。それ故に日本国内における流量観測の難しさは、速い流速と高濁度、大きな河床変動を伴うこと、さらに出水を読むことの難しさである。一方で、実測流量値は、河道計画上の基礎データとなること、質の高い水位流量関係を把握するための必須データであることから、河道計画及び河道管理上、計測すべき優先度の高いデータである。日本国においてはこのような認識が流量観測業務の発注者から受注者に至るまで広く浸透しているため、あらゆる事象での計測結果が蓄積し、また新しい計測技術の開発が高く評価される。これらは日本国の貴重な財産であり、今後の河川工学の発展に大きく貢献することが期待される。

新しい流量観測機器は二つのグループに分けられる。一つは河川構造物として半永久的に設置される固定設置型の機器であり、もう一つは観測者の関心に基づきどこへでも持ち運べて計測できる可搬式の機器である。近年、日本の土木学会（Japan Society of Civil Engineers, JSCE）において、複数の固定設置型観測システムが研究されている。例えば、電波式流速計（山口他¹⁾、萬矢他²⁾）、超音波流速計（木下他³⁾、中川他⁴⁾、川西他⁵⁾⁶⁾）、H-ADCP（岡田他⁷⁾、二瓶他⁸⁾）そして画像解析手法（藤田他⁹⁾¹³⁾）などがある。電波式流速計な

どで計測する表面流速については、風の影響に対する補正に関する研究がなされてきた（本永他¹⁴⁾、柏田他¹⁵⁾）。またこれらの固定設置型の機器の特徴は自動観測、面的な流況の観測、高いサンプリング周波数での計測が可能なこと、等である。また可搬式の流速計に関しては、橋上操作艇（リバーボート）およびGPSや音響測深器、GPSコンパスなどの周辺機器の開発・改良により、橋上操作艇に搭載した超音波多層型三次元流速計（Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP）による横断観測が我が国の厳しい河川状況においても実用化されるようになってきた¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。このような技術の発展を背景として、これまで実観測では計測が困難と思われる事象を説明できるようになってきた。それらは例えば洪水時の河床変動、河床粗度係数の変化、掃流砂の時間変化等である。

これらの技術を研究し開発するために、日本土木学会内の水理水文委員会内に設置された流量観測検討小委員会が流量観測ワークショップを開催した。加えて、土木研究所の技術的な支援の下、国土交通省のいくつかの河川事務所が、先行的に電波式流速計、STIV（Space-Time Image Velocimetry）¹⁹⁾、ADCPの曳航観測に関する調査・研究を行い、大規模な河床変動を伴う規模の洪水及び強風を伴う気象条件等、あらゆる条件における観測事例を蓄積した。

また近年頻発する大規模洪水により、洪水敷の灌水

や外水氾濫が発生した。このような時には、作業員が既往の観測手法を実施できずに、流量値が得られない事例が発生している。このような問題を解決する意味でも、設置型流速計を用いた無人自動計測の可能性が再認識され始めている。

これらの技術、計測結果は、河川砂防技術基準²⁰⁾等の国内における基準作りに使用するととどまらず、International Organization for Standardization (ISO)へ反映させることが、日本の国益となる。現に、土木研究所はISOの分科会であるTC113 (Hydrometry) のSC1 (velocity area method) の日本代表であり、これらの日本のデータ及び技術を反映させ始めている。例えば、SC1 ISO1070ではSlope-Area methodが議論されており、これは水位から流量を換算する際に水面勾配の効果を考慮して算出する手法である。しかし、概念的、理論的な考察はあるが、あらゆる流況での適用性を議論することは容易ではない。著者等のISOでの役割は、日本で計測したデータを基に、これらの精度評価をすることである。また、SC1では非接触型流量観測手法に関して基準化するための議論が始まり、著者等の役割は国際基準のファーストドラフトを作成することである。

上記の知見から、設置型流速計を用いて精度の高い流量値を得るためには、平面的な流速分布、計測された流速値から平均流速を算出するための流速補正係数、水位、河床高から算出する水深を得る必要がある。またYorozuya and Fukami²¹⁾によると、河床高と流速補正係数は河床波により大きく影響を受けることが報告されている。このためこれらはセットで議論する必要性がある。本報告では、2章で設置型流速計でも特に非接触型流速計を用いた河川の表面流速計測の現状とその精度に関して、3章では河床変動と流速補正係数に関して議論する。またその他の研究事例として、CCTVカメラとSTIV手法を用いた流速値の算出方法に関わった。これは、既往のインフラ施設を用いた流速計測手法の一例であり、初期投資を抑える観点から広く普及すべき技術として期待が大きい。また画像解析技術を用いた既往の流量観測手法の省人化の技術と、現地への普及するための試みがある。これらは九州地方整備局河川部河川環境課が中心となり検討した結果であり、詳細は島本ら²²⁾を参考にされたい。

2. 非接触型流速計による河川の流量観測

2.1 観測手法の種類

技術的に原理の異なる3つの観測システムが流況に

応じて選択される。流況として、1)水面の振動の激しい速い流れ、2)様々な擾乱を含む流速を持つ流れ、3)感潮域の流れ、などである。1)の流況については、非接触型の電波式流速計が適切である。河川横断方向に水位が一定でなくても、電波式流速計は適切な値を得ることができる。この機器の設置台数は川幅に応じて決まる。2)の流況については、川の片岸からビデオカメラ一台で横断全体の観測ができる場合には、ビデオカメラで撮影した画像を使用するSTIV (Space-Time Image Velocimetry) が適切である。川幅が約150mより広ければ、反対側の岸からもう一台のカメラにより撮影することが必要となる。STIVはLSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) とは異なり、流速測定の精度は画像のピクセル・サイズには依存しない。STIVは電波式流速計のように水表面の波を必要とするものであるが、ルールに従って投下された浮子と組み合わせることで波がなくても観測を可能とする。3)の流況については、非常に遅い流速も含め、最も広い流速範囲を計測できるH-ADCPが最適である。他の技術とは違い、H-ADCPは水面の波は必要としないが、トランスデューサーが水面下に十分沈むだけの水深が必要となる。

議論を明確にするために、**図-1**に流況と機器との関係を示す。図の縦軸は河床勾配であり、これは水表面振動の程度を示す指標である。一方、横軸は流速である。両軸に示した流れに関するこれらの指標は独立変数ではないが、本論文において機器の適用範囲に関する議論を明確にする上で役立つ。ここでは、STIVや電波式流速計のような非接触型流速計について議論する。手法の詳細に関しては岩見ら²³⁾を参照にしたい。ここでは報告書らの所有するあらゆる流況・気象条件における計測事例を基に、非接触型流速計の精度の検証を実施した。その結果を示す。

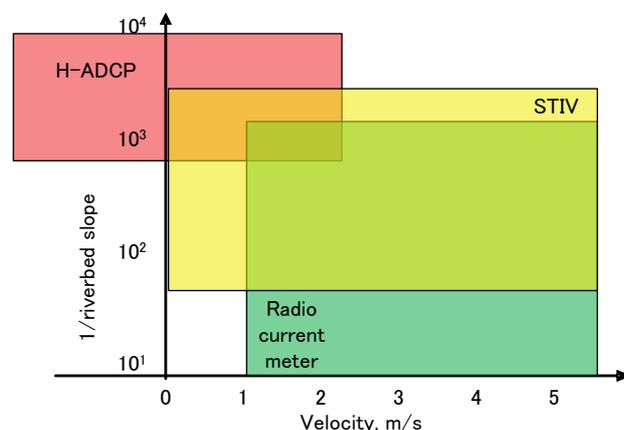


図-1 流況と観測機器の関係

2. 2 観測結果

非接触型電波式流速計やSTIVによる観測結果を検証するために、電磁流速計、プライス式流速計、橋上操作艇に搭載した ADCP など他の観測機器を用いて水面付近の流速を計測した。これらの機器による観測を河床変動のある／なし、風のある／なし、など様々な条件下で実施した。ADCP 計測に関しては、流速鉛直分布を計測するために橋上操作艇を定点にとどめて、ある一定時間の観測を実施した。水面の流速を推定するために、constant 法を採用した。電磁流速計およびプライス式流速計については水面下 10~15cm のところを計測している。

(1) 非接触型電波式流速計

図-2は様々な手法による観測結果の相関図である。横軸がaDcp, プライス式流速計, 電磁流速計による流速である。一方、縦軸は電波式流速計による流速である。これらのデータは様々な河床変動条件, 風条件における同時観測により得られたものである。これらのデータはほぼ図中45°の線に乗っており、概ね一致していることがわかる。実際、プロットしたデータに対して最小二乗法により得られる近似直線の勾配は0.946, R^2 が0.94である。このように良好な一致が見られたが、45°の線から若干ずれているデータも見られる。例えば、図中▲で示したデータは河川流下方向に対する逆風が卓越し、かつ河床が変動している条件下での観測結果である。このような条件下における流速鉛直分布は岩見ら²⁾の結果が詳しい。例えば水面付近の流速鉛直分布は強風により大きく影響を受け、風向に応じてより上下流へ向けて曲げられる。本永ら¹⁴⁾は風の影響を除去するために、現地における観測結果を基にして次式を提案している。

$$U_{\text{修正NCC}} = U_{\text{NCC}} - 0.073 \times U_{\text{WIND}}$$

ここに、 U_{NCC} は非接触型流速計(NCC: Non-Contact Current meter)により測定された表面流速、 U_{WIND} は風速を表す。 $U_{\text{修正NCC}}$ は風補正を施した U_{NCC} となる。図-3は図-2のデータに風補正を施した結果である。例えば、▲、●または*で示されるデータは上記の式による風補正を施している。風補正の結果、近似直線式の勾配および R^2 に顕著な改善が見られた。

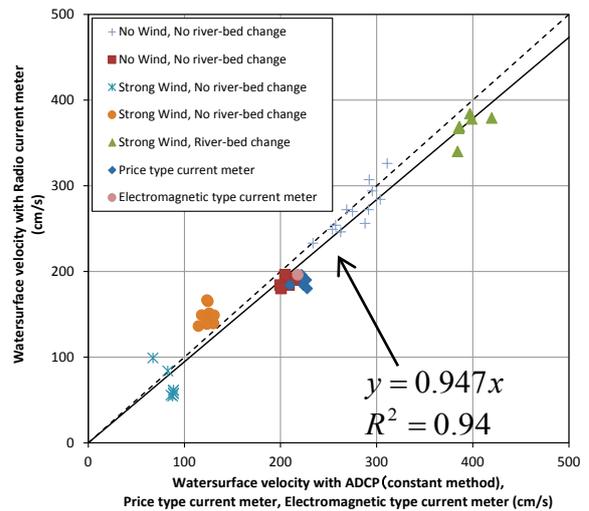


図-2 電波式流速計と他機器との相関 (風補正なし)

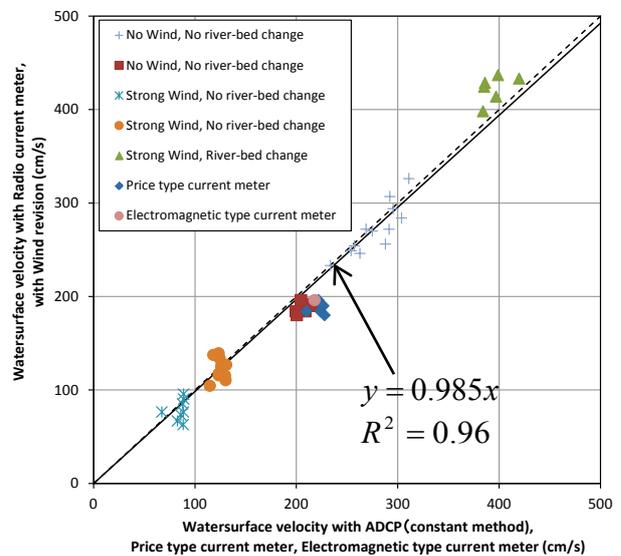


図-3 電波式流速計と他機器との相関 (風補正有り)

(2) SITV

図-4はSITVとaDcpによる水面流速の比較である。横軸はaDcpによる流速を示す。一方、縦軸はSTIVによる流速を示す。図-2、図-3同様、これらのデータは様々な河床変動条件, 風況条件下におけるSTIVとaDcpの同時観測の結果である。これらの観測結果はほぼ45°の線に乗っており、良好な相関を示している。実際には、若干45°の線から外れたデータもあるが、最小二乗法による近似直線の勾配は1.0145であり、 R^2 は0.86である。前の議論と同様に、図-5に示す通り風の影響を補正した。この図が示す通り、わずかではあるが改善が見られる。実際、近似直線の勾配は0.9872, R^2 は0.95となった。

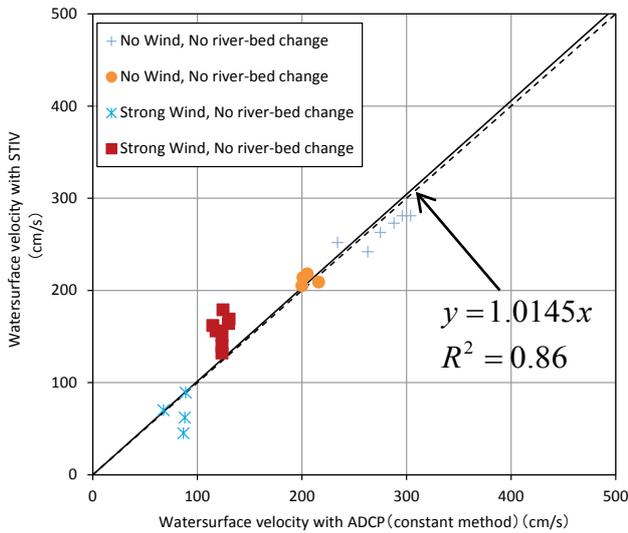


図-4 STIVとaDcpの相関（風補正なし）

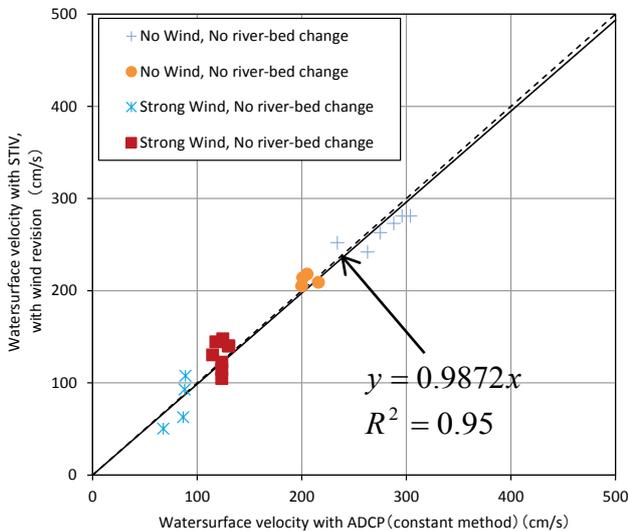


図-5 STIVとaDcpの相関（風補正有り）

2. 3 考察

ここまで、本報告では非接触型流速計による手法およびその精度について議論してきた。非接触型流速計による観測値より流量値を得るために、断面積と流速補正係数の情報が必要である。

断面積については、水位と河床高という二つの要素を把握する必要がある。水位については、水位は河川横断方向に一定であるという仮定の下、単体の水位計により得ることができる。（実際には、現場での技術者の知見では河川の中央付近で水面が盛り上がっているとのことである。）一方、河床高は土砂移動が活発に生じている断面においては洪水中にほぼ変動する。このような断面において流量観測を実施する場合には、適切な流量値を得るために出水中にあっても河床断面形状の頻繁な観測が必要である。

流速補正係数とは鉛直平均流速を得るための係数である。通常、流れの状況に応じて変わる。流れが十分に整正で対数分布測が成り立つ場合、0.85が係数として適切な値となる。実際、Muste et al.²⁴⁾は0.85という数字は水理学のアカデミックな場においては広く受け入れられていると述べている。一方、出水中にaDcpにより実際に河川流れを観測した結果に基づき、Yorozuya and Fukami²¹⁾は、河床高変動がないあるいはわずかな場合には流速補正係数は 0.85 ± 0.05 になること、逆に河床変動が卓越する場合には1.1あるいは0.7という値も見られたことを示した。これまで流速補正係数の決定に関する議論はほとんどなされてこなかったため、適切な係数を把握するための当該断面におけるaDcp観測が実施されるべきである。

3. 河床変動を伴う河川における流速補正係数の設定手法に関する研究

3. 1 内容

本論文では表-1に示す河川／地点においてADCP横断観測や河川表面流速、水位、水面勾配観測を実施し、それらのデータを用いてリアルタイムでの流速補正係数の設定について議論する。

(1) 観測内容

各観測地点において出水時にADCPを搭載した橋上操作艇による横断観測を実施し、河道断面内のプロファイル的な流速分布および河床高横断形状を測定した。ADCP横断観測を実施した断面は図-6に例を示すように河床形状等に応じて区分断面に分割した。水位および水面勾配を測定することを目的として、左右岸いずれかの水際に沿って複数の水位計を縦断方向に並べて設置した。基本的な並べ方は流量測定断面の直上流、直下流および上流側、下流側それぞれ500m程度離れた地点である。この間隔であれば有意な水位差が求められると考えられる。縦断的に設置した複数の水位計における水位データから最小二乗法により水位縦断分布を直線近似し、その直線の勾配を水面勾配とする。水位についてはADCP観測断面に最も近い地点である観測断面直下流の水位計データを用いる。水位計データは1分毎に出力した。各区分断面の横断中央部を流速測線とし、橋梁上から下流側へ向けて設置した電波式流速計により各測線上の表面流速を測定した。データは1秒毎に出力し必要に応じて移動平均処理を施した。

表-1 各観測地点諸元

| 観測地点名 | I | HA | U | H0 |
|-------------|---------------------|--------------|--|----------------------------------|
| 水系／河川 | T川水系／K川 | I川水系／I川 | S川水系／S川 | S川水系／U川 |
| 観測期間 | 2011年9月2日～9月3日 | 2013年5月2日～3日 | 2012年10月1日 2012年11月15日 | 2012年4月20日～22日 2013年4月19日～21日 |
| 出水状況 | 台風12号による出水 | 融雪出水 | 2012年10月1日： 台風17号による出水 2012年11月15日： 低気圧性降雨による出水 | 融雪出水 |
| 河床勾配 | 1/300 | 1/1200 | 1/13000 | 1/430 |
| 最大流速 | 4.85m/s | 1.86m/s | 2012/10/1：1.26m/s 2012/11/15：1.46m | 2012年：3.33m/s 2013年：3.06m/s |
| 水面幅 | 約80m | 約100m | 約100m | 約140m |
| 最大水深 | 4.16m | 4.39m | 2012/10/1：3.22m 2012/11/15：4.33m | 2012年：2.38m 2013年：2.08m |
| 観測時の河床変動の有無 | 有 河床変動幅は最大で約1.5m | なし | なし | なし |

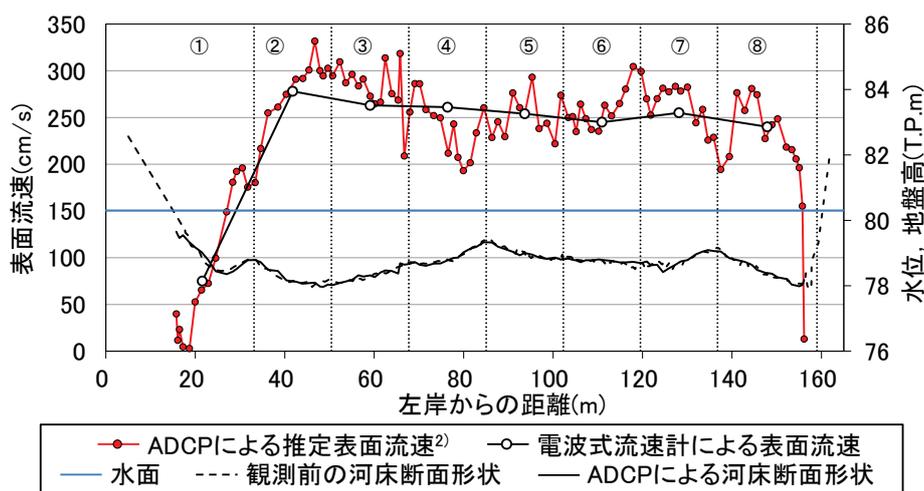


図-6 区分断面分割例 (U川H0地点)

(2) 比較・検証用の流速補正係数

流速補正係数をリアルタイムで設定する手法について検討するに当たり、同手法で設定した係数の精度について、比較・検証するための流速補正係数が必要である。ADCP横断観測により横断方向にアンサンブル毎の流速鉛直方向分布が求まる。鉛直平均流速を算出するに当たり、各アンサンブルの流速鉛直方向分布について最小二乗法により対数則の近似式を与えた。上層不感帯、下層不感帯については同近似式を延長して与えた。アンサンブルごとに図-7に示すように対数則近似式を鉛直方向に数値積分し水深で割って鉛直平均流速を求めた。この時ADCP観測時に設定したセル層厚に従って鉛直方向に区分分割を行った。上層不感帯

下層不感帯については実測領域との境界位置からセル層厚に応じて分割し、余った部分についてはそれぞれ最上層、最下層の分割区間とした。対数則近似式は数学的には河床のごく近傍で $-\infty$ となるが、本解析では基本的にADCP観測のセル層厚に従って分割するため河床から10～20cm程度の高さまでしか検討対象とせず、下層不感帯へ対数則近似式を延長しても問題はないと考える。また図-7に示すように河川表面流速は同近似式を水面まで延長して与えた。これらにより流速補正係数(=鉛直平均流速/河川表面流速)を求めた。上述したアンサンブル毎の流速補正係数については各区分断面内で平均し、各区分断面を代表する流速補正係数とする。ここで求めた流速補正係数は流速補正係

数①とする。これは流速補正係数を定義通りに求めた値であり、後述するリアルタイムで設定する流速補正係数の精度を検証する際に比較・検証のために用いる。ここでは各アンサンプルの流速データから対数則を用いて流速鉛直分布の近似式を求めたが、ADCPによる観測結果では実測流速データが鉛直方向にほぼ垂直になる場合(図-8)や河床付近で実測流速データが負値を示す場合(図-9)があり、これらを対数分布則で近似することについては本来議論が必要と思われる。このような流速の鉛直分布形状は先述した通り河床変動と密接な関係があると考えられるがそれについて議論するためのデータがまだ十分とは言えず、また図-8、図-9のような実測流速データを示すアンサンプルは著者らが実施したADCPによる横断観測の結果内では比較的少数の事例であったことなどから、現時点ではあえて対数則を当てはめるものとする。今後もADCPによる観測を継続的に実施し、河床変動と流速鉛直分布の関係についての知見が蓄積される中で詳細な検討が可能になると考えている。

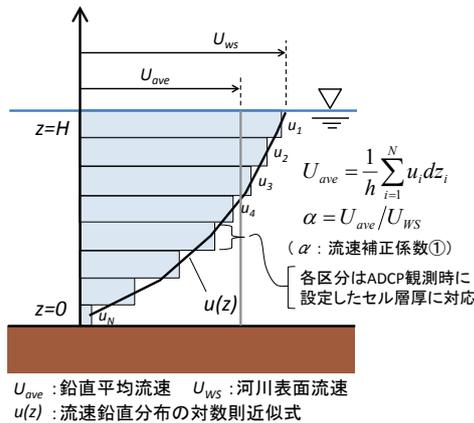


図-7 流速補正係数①

(流速鉛直分布近似式を数値積分し平均流速を求める。)

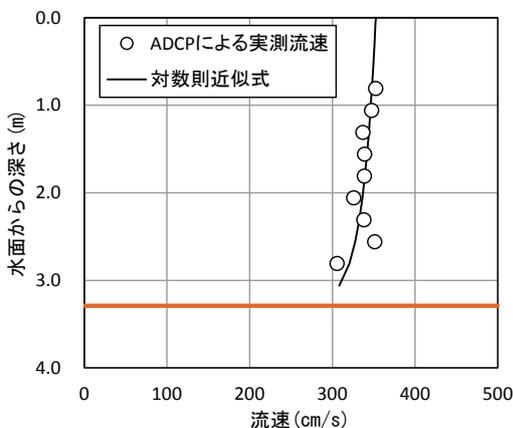


図-8 ほぼ垂直に近い流速実測値の鉛直分布例

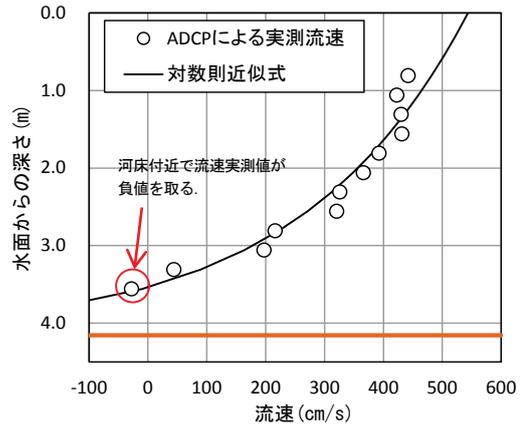


図-9 河床付近で負値を取る流速実測値の鉛直分布例

(3) 流速補正係数のリアルタイム設定手法の考え方

流速補正係数①はADCP横断観測結果を基に算出する値であり、リアルタイムで求め続けることはできない。そこで萬矢ら²⁾により開発された方法を用いてリアルタイムで流速補正係数を設定することを検討する。粗面流れの対数分布測 $u(z)$ を表面流速がわかっている流れに適用すると、普遍定数 A_r が消去され次式となる。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{h}\right) + \frac{U_h}{u_*} \quad (1)$$

ここで、 $u(z)$: 河床からの高さ z における流速(m/s)、 u_* : 摩擦速度(m/s)、 κ : カルマン定数 (=0.4)、 h : 水深(m)、 U_h : 河川表面流速である。式(1)を河床から水面まで積分することで鉛直平均流速 U を計算し、それを U_h で割ることで流速補正係数 α を以下のように算出する。

$$\alpha = \frac{U}{U_h} = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{u_*}{U_h} \quad (2)$$

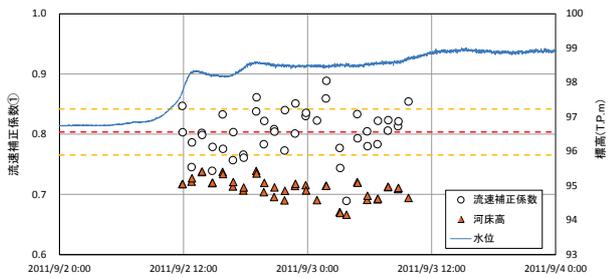
表面流速 U_h は電波式流速計によりリアルタイムで測定しているため、摩擦速度 u_* がわかれば(2)式を用いて流速補正係数がリアルタイムで求まる。

(4) 摩擦速度の求め方

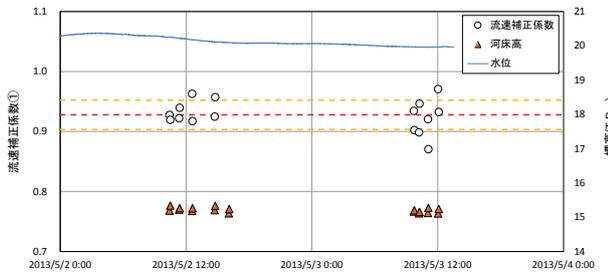
摩擦速度 u_* の算出方法を以下に2種類示す。一つはADCPによる流速実測データを基に算出した鉛直方向流速分布の近似式から理論的に算出する方法である。先述の通り鉛直流速分布が対数分布則に従うと仮定し、実測データに対して最小二乗法により鉛直方向流速分布の近似式が次式の形で求まる。

$$u(z) = C_A \cdot \ln z + C_B \quad (3)$$

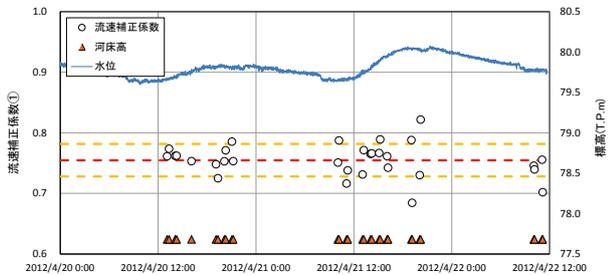
C_A , C_B は係数である。(1)式と(3)式を係数比較すると次



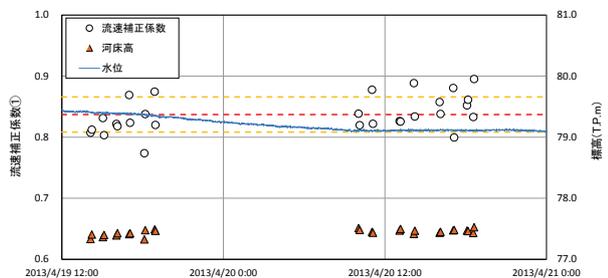
(a) KJII地点 2011/9/2-9/3



(b) IJIIHA地点 2013/5/2-5/3



(c) UJIIHO地点 2012/4/20-4/22



(d) UJIIHO地点 2013/4/19-4/20

図-10 各河川における流速補正係数①、

河床高および水位の時系列図（流速補正係数①、河床高は流
心当該区分断面の平均値）

式により摩擦速度 u_* が求まる。

$$u_* = 0.4C_A \quad (4)$$

(4)式から求まる摩擦速度はADCP実測データを基に
して求めているので流速補正係数のリアルタイム算出
には使用できない。しかしながらADCP実測データに
対する流速の鉛直分布の対数則近似式から理論的に算

表-2 各観測における流速補正係数の平均値、標準偏差

| 河川/地点 | KJII/1地 点 | IJII/HA 地点 | SJII/U地点 | | UJII/HO地点 | |
|------------------|-----------------------------|---------------|----------|-------|-----------|-------|
| | (a) | (b) | N/A | N/A | (c) | (d) |
| 流速補正係数 平均値 | 0.8 | 0.93 | 0.75 | 0.84 | 0.85 | 0.83 |
| 流速補正係数 標準偏差 | 0.038 | 0.024 | 0.027 | 0.029 | 0.026 | 0.035 |
| 観測期間中 最大・最小の差 | 0.2 | 0.1 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.14 |
| 観測時の河床変 動の有無 | 有 河床変動 幅は最大 で約1.5m | なし | なし | なし | なし | なし |

出しているため、これを(2)式に代入して得られた流速
補正係数は流速補正係数①とほぼ等しくなると考えら
れる。これが示せば適切な摩擦速度をリアルタイム
で与えれば(2)式を用いて流速補正係数もリアルタイム
算出できることを示せる。(4)式による摩擦速度を(2)
式に代入して求める流速補正係数を流速補正係数②
と呼ぶ。もう一つの方法は以下の式で摩擦速度 u_* を算
出するものである。

$$u_* = \sqrt{ghI} \quad (5)$$

ここで、 g ：重力加速度 ($=9.8\text{m/s}^2$)、 I ：水面勾配であ
る。水面勾配 I は縦断方向に複数並べて設置した水位計
より求まる。(5)式で求まる摩擦速度を(2)式に代入して
求まる流速補正係数を流速補正係数③とする。流速補
正係数③はリアルタイムで求まる。本論文の著者らが
取り組んでいる自動流量観測システムにおいては本来
水深 h を河床高自動モニタリングシステムにより計測
することを目指しているが、本論文においては水位か
らADCPにより測定した河床高を差し引いて算出する。

4. 2 結果と考察

(1) 流速補正係数の変動傾向について

図-10(a)～(d)は表-1に示した各観測地点の流心に
該当する区分断面における流速補正係数①、区分断面
内で平均した河床高（以降、河床高と呼ぶ。）および
水位の時系列図である。また各観測期間中の流速補正
係数①の平均値を赤点線、平均値±標準偏差を黄点線
で図中に示している。図-10(a)よりKJII地点では出水
中に顕著な河床変動が生じ、それに応じて補正係数が
激しく変動していることがわかる。図-10(b)～(e)
については観測期間中明確な河床変動は生じておらず、
流速補正係数①も若干のばらつきを除いてほぼ一定値

であるように見受けられる。データ数が十分ではないため決定的な考察はできないが、流速が遅く、水深が深い河川ほど流速補正係数①のばらつきが少ないように見える。表 4-2は各観測地点における観測期間中の流速補正係数①の平均値、標準偏差、最大値と最小値の差をまとめている。河床変動が生じる河川に比較して、河床変動の生じない河川における流速補正係数①は値の振動幅が約半分になっている。河床変動の生じない河川について、今回の観測結果では、半数の観測ケースにおいて流速補正係数①が0.85に近い値となった。この値は表面流速に対する流速補正係数として水理学的に一般的に認められている値²⁴⁾とほぼ等しい。一方、最小0.75, 最大0.93という係数の値も見られる。またU川HO地点について図-10(c), (d)を見ると、同じ地点における観測結果であるにもかかわらず、流速補正係数①が2012年4月には約0.75, 2013年4月には約0.84と0.1程度の差が生じていた。紙面の都合上省略するが、両観測期間において観測断面における河床形状にほぼ変化がないことはADCP観測結果から確認済みであり、流速補正係数に差が生じる理由が明確でない。これについては今後の課題としたい。いずれにせよ、河床変動の生じていない河川においては河川ごとに流速補正係数の固有値が存在することがわかった。ただし一部の河川ではその値が何らかの理由により変化する場合があるため、ADCPによる横断観測を定期的を実施して、最適な流速補正係数を求め続けることが必要である。

(2) 流速補正係数①と流速補正係数②の比較・検討

図-11は流速補正係数①と流速補正係数②の比較図である。先述した通り、理論的には両者はほぼ一致することが予想されたが、この図からは流速補正係数が0.85以下になると流速補正係数②が若干小さくなる傾向が見られる。これは鉛直流速分布の近似式として利用した対数分布則は数学的には河床のごく近傍で ∞ になるが、流速補正係数①はその対数近似式をADCP観測のセル層厚で区分分割し数値積分しているため、河床のごく近傍での対数近似式を考慮していないのに対し、流速補正係数②の算出にあたっては河床のごく近傍の対数近似式による流速値が大きな負値を示す領域も考慮に入れているため、流速補正係数①が流速補正係数②よりも若干大きくなっていると考えられる。流速補正係数が約0.85以上の場合において両者が一致する傾向が見られるのは、流速補正係数が大きい場合には流速鉛直分布形状が垂直に近くなっており、対数

近似式が負値を示す領域が狭くなるため、相対的にこの領域の影響が少なくなるからと考えられる。実現象としては河床では流速に関してNo-Slip条件が成立しており、流速補正係数①の方が適切である。これらのことから図-11に示した程度の差異であれば流速補正係数②は概ね妥当な値を示していると言える。また、この結果より適切な摩擦速度が求まるのであれば、(2)式を用いて流速補正係数を換算する手法は有効であると言える。

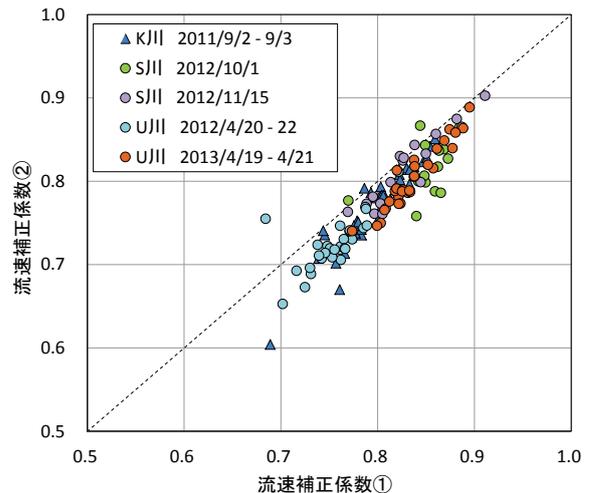


図-10 流速補正係数①と流速補正係数②との相関

(3) 流速補正係数①と流速補正係数③の比較・検討

図-11は流速補正係数①と流速補正係数③の比較図である。同図には萬矢ら²⁾が2009年7月に国内のT川K地点で実施した観測結果を基に算出した流速補正係数①、流速補正係数③のデータも載せている。図-11から流速補正係数①と流速補正係数③の関係には、2つのグループ(A群, B群とする。)が存在するように見える。図中、A群は流速補正係数③が流速補正係数①とほぼ等しいか、または若干大きい傾向を示している。B群は流速補正係数③が流速補正係数①とほぼ等しいか、または若干小さい傾向を示している。U川HO地点の観測結果は観測時期によりA群とB群に分かれている。U川HO地点での両観測期間における流量規模に大きな差はなく、また先述した通り、両観測期間において観測実施断面の横断形状にほとんど変化はなかった。U川の河川管理者に確認したところ、2度の観測の間に同河川において河道掘削を伴うような河川整備工事は実施されておらず、実際2012年4月～2013年4月に実施されたU川の定期横断測量結果を見ても河床変動は生じておらず、河床勾配に関しても両観測期間において変化はないことが分かった。このように現時点では流

速補正係数がA群, B群に分かれる理由は不明である。これについては今後の課題としたい。いずれにせよ, A群においては, 流速補正係数③を利用して最終的に流量を求める際, 得られる流量値は流量の真値とほぼ等しい, もしくは若干大きめの値を取るようになる。これは流量を“危険側”に評価していることになり, 実際の河川管理において著しい不具合はないと思われる。逆にB群においては流量を“安全側”に評価しているため安全面上好ましくない。このことからA群に属する河川については電波式流速計, 水位計のデータを利用してリアルタイムで流速補正係数を設定する手法が有効であると言える。B群に属する河川については出水時に実施するADCP横断観測により流速補正係数を設定する。ただし, U川の例に見られるように流速補正係数の傾向が変わる場合もあるため, 適宜ADCP横断観測を実施し, 流速補正係数の設定に関して検証を続けていく必要がある。

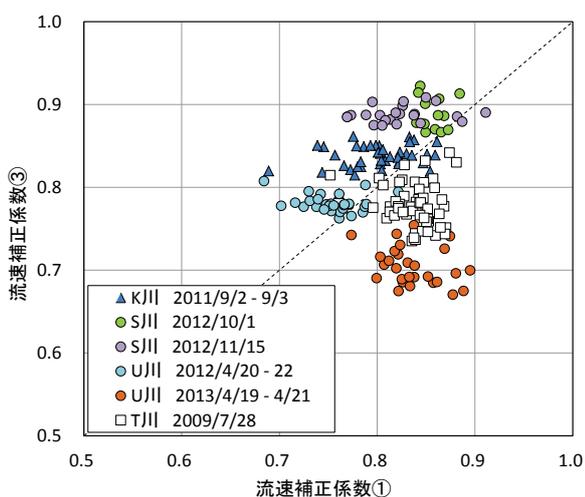


図-11 流速補正係数①と流速補正係数③との相関
(萬矢ら²⁾のT川における観測データを追加)

5. 結論

本報告で得られた結論は, 以下のとおりである。

- 1) 非接触型流速計として, 電波式流速計と STIV という2つの手法について実河川における精度評価を実施した。
- 2) 異なる河床変動条件, 風条件下において, 異なる機器による同時観測を実施した結果について検討した。
- 3) 非接触型流速計による観測結果を, aDcp, プライス式流速計, 電磁流速計などの他の機器による観測結果と比較した。
- 4) 検証の目的で, 異なる流況に対して aDcp による

河川表面流速の推定を導入した。

- 5) この検証においては constant 法を選定した。
- 6) 電波式流速計に関して, aDcp による推定流速との相関を調べた結果, 最小二乗法による直線近似式の勾配は 0.946, R^2 は 0.943 であった。
- 7) STIV に関して, 同様に aDcp による推定流速との相関を調べた結果, 最小二乗法による直線近似式の勾配は 0.946, R^2 は 0.86 であった。
- 8) 電波式流速計, STIV それぞれに対して風補正を施した結果, 図 2-9, 図 2-11に見られるように aDcp による推定流速との相関に顕著な改善が見られた。
- 9) 非接触型流速計による観測結果より流量を決定するため, 断面積, 流速補正係数が必要である。
- 10) 流速補正係数は, 特に河床変動が生じている場所においては, 一定値にはならないようであり, 適切な流速補正係数を見つけるため aDcp 観測が実施されるべきである。
- 11) 今後は図-1 に示した固定設置型流速計に空間的な流速分布を計算できる DIEX 法⁸⁾を併せて, 日本の流量観測技術の更なるレベル向上に資することを目的とした検討を進めていく。
- 12) 河床変動が生じていない河川においては, 流速補正係数は河川ごとにほぼ一定の固有値を示す。そのうち大半の河川では流速補正係数が河川表面流速に対する流速補正係数として水理学的に一般的な値と認められている 0.85 とほぼ等しいが, そうでない河川もあり, 河川ごとに ADCP を用いて固有値を調べる必要がある。
- 13) 河床変動が生じている河川においては, 流速補正係数は顕著に振動する。
- 14) 流量自動観測システム内でリアルタイム測定している河川表面流速, 水面勾配, 水深を用いて, 流速補正係数を設定する手法を提案した。一部の特徴を有する河川においては同システムの適用が有効であることを示した。

謝辞

ここで使用したデータは, 土木学会流量観測検討小委員会が開催した流量観測ワークショップにおける観測結果, および, 土木研究所の技術的な支援を受け, 河川事務所が実施した観測結果を用いている。また2章で解析したSTIVに関して, 解析ソフトの提供・技術指導を神戸大学藤田一郎教授から受けた。記して感謝の意を示す。

参考文献：

- 1) 山口高志, 新里邦生: 電波流速計による洪水流量観測, 土木学会論文集, No.497, pp.41-50, 1994.
- 2) 萬矢敦啓, 大平一典, 菅野裕也, 深見和彦: 非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察, 河川技術論文集, 第 16 卷, pp.53-58, 2010.
- 3) 木下武雄, 渡辺一夫: 超音波流速計の洪水観測への応用, 河川技術論文集, Vol.9, pp.225-229, 2003.
- 4) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発, 水工学論文集, 第 50 卷, pp.709-714, 2006.
- 5) 川西澄, 大庭尚史, 金子新, 水野雅光: 感潮河川における音波の横断伝搬特性と次世代超音波流速計による横断平均流速の測定, 水工学論文集, 第 52 卷, pp.937-942, 2008.
- 6) 川西澄, Mahdi RAZAZ, 渡辺聡, 金子新, 阿部徹: 次世代超音波流速計による感潮域の流量と水温・塩分の連続モニタリング, 水工学論文集, 第 53 卷, pp.1015-1020, 2009.
- 7) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正: 鶴見川感潮域における H-ADCP を用いた流量観測, 河川技術論文集, 第 11 卷, pp.243-248, 2005.
- 8) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.63 No.4, pp.295-310, 2007.
- 9) 藤田一郎, 河村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, 第 38 卷, pp.733-738, 1994.
- 10) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 11) 藤田一郎, 安藤敬済, 堤志帆, 岡部健士: STIV による劣悪な撮影条件での河川洪水流計測, 水工学論文集, 第 53 卷, pp.1003-1008, 2009.
- 12) 藤田一郎, 原浩気, 萬矢敦啓: 河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築, 水工学論文集, 第 55 卷, pp.1177-1182, 2011.
- 13) Fujita I., Hara H., Yorozuya A.: Evaluation of Imaging Tech-nique Accuracy for Discharge Measurement and Development of Real Time System for Surface Flow Measurement, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 30(1), 15-28, 2012.
- 14) 本永良樹, 萬矢敦啓, 深見和彦: 河床変動及び強風を伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_745-I_750, 2013.
- 15) 柏田仁, 二瓶泰雄, 山下武宣, 山崎裕介, 市山誠: 電波流速計による表層流速計測と DIEX 法に基づく流量推定手法の提案, 河川技術論文集, 第 18 卷, pp.393-398, 2012.
- 16) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦: 高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関する提案, 河川技術論文集, 第 16 卷, pp.59-64, 2010.
- 17) 独立行政法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター著: 流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver1.0, 2013.
http://www.icharm.pwri.go.jp/ryukan/manual_1.0.pdf
- 18) 菅野裕也・萬矢敦啓・深見和彦: 外部コンパスを併用した ADCP 観測に関する提案, 土木学会河川技術論文集, 第 17 卷, pp.35-40, 2011.
- 19) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 調査編, pp.51-85, 2012.
- 20) 藤田一郎, 中島丈晴: 実河川流計測における LSPIV の汎用化と水制間流れへの適用, 水工学論文集, Vol.44, pp.443-448, 2000.
- 21) Atsuhiko Yorozuya and Kazuhiko Fukami: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, The Third International Symposium on Shallow Flows(ISSF2012), Iowa City, U.S.A., 3-6 June, 2012. Abstract on pp.309-312; full paper in CD-ROM
- 22) 島本重寿, 藤田一郎, 萬矢敦啓, 柏田仁, 浜口憲一郎, 山崎裕介: 画像処理型流速測定法を用いた流量観測技術の実用化に向けた検討, 河川技術論文集, 第20巻, 2014. (投稿中)
- 23) 岩見洋一, 萬矢敦啓, 本永良樹, 藤田一郎: 非接触型流速計による河川の流量観測, 河川流量の新時代第4巻, pp.29-38, 2014.
- 24) M. Muste, I. Fujita, A. Hauet : Large-scale particle image ve-locimetry for measurements in riverine environments, Water Resour. Res., 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.

A STUDY ABOUT WATER DISCHARGE MEASUREMENT SYSTEM WITH FIXED TYPE DEVICES INCLUDING RIVER BED EVOLUTION

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : Water-related Hazard Research Group

Author : Yoichi IWAMI, Atsuhiko YOROZUYA

Yoshiki MOTONAGA

Abstract : Regarding to flood flow observations in Japanese rivers, our research group have focused on developing a water discharge measurement system within appropriate accuracy applying a fixed type velocimeter with premising the river bed evolution taking place. For this purposes, it is necessary to assure an accuracy of the fixed type velocimeter, to consider a velocity index for obtaining an averaged velocity from observed values by the fixed type velocimeter, and to consider the river bed evolution. In this study, based on results which were observed by Acoustic Doppler Current Profiler in various different flow/metrological condition, the authors discuss about the accuracy of the fixed type velocimeter, hydraulic phenomena about the sand wave related to the river bed evolution and the velocity index.

The authors make sure that 1) the fixed type measurement, such as the radio current meter or Space Time Image Velocimeter, have enough accuracy to be applied, and 2) the river bed and the velocity index are strongly influenced by the sand wave.

Key words : water discharge, Fixed type measurement, water surface velocity, velocity index, river bed evolution