

タイ国Chao Phraya川流域における 計量科学魚探を用いた河床形状及びダム湖形状 の観測とADCPを用いた流速観測

OBSERVATION OF RIVERBED FORMS AND DAM RESERVOIR BOTTOM
FORMS USING MEASUREMENT SCIENCE FISHFINDER, AND FLOW
VELOCITY OBSERVATION USING ADCP IN CHAO PHRAYA RIVER BASIN,
THAILAND

道谷健太郎¹・笹川幸寛²・手計太一³
Kentaro DOUTANI, Yukihiro SASAKAWA and Taichi TEBAKARI

¹学生員 富山県立大学 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

²学生員 学士 富山県立大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

³正会員 博(工) 富山県立大学准教授 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

This paper reported that flow velocity observation using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) and observation of a riverbed forms and dam reservoir bottom forms using measurement science fishfinder were carried out in the Chao Phraya River, Thailand.

Key Words : Flow velocity, ADCP, Riverbed forms, Dam reservoir bottom forms , the Chao Phraya River, Thailand

1. はじめに

音響測深機は河床形状、貯水池湖床の形状の観測方法として広く用いられている。

河床形状は時間とともに変動し、その変遷を知ることには河川管理上極めて重要である。特に出水時には河床が大きく変動するケースがあり、形状抵抗の変化は水位の変動に大きく影響する。

ダム貯水池への堆砂はダムの貯水容量を減らし、貯水池の持つ治水・利水の能力を低下させる。また土砂が貯水池でせき止められることで上流では河床の上昇、下流では河床の低下や河口部の海岸線の後退が起こる。貯水池の堆砂の状況を把握するための、音響測深機を用いた湖床の観測は日本で広く行われている。断面形状の測定のみならず、コンタースライス法によって堆砂量を算定することも可能である。

流量観測の手法として、1982年に米国で開発されたADCP(超音波ドップラー多層流向流速計)は、欧米を中心に全世界で広く利用され、研究分野のみならず現場でも高く評価されている。我が国においても、平成24年6月に改定された「河川砂防基準 調査編」の中で、主要

な流量観測手法の種類の一つとしてADCPによる手法が記載された。

開発途上国においても、利便性やコストを鑑み、ADCPを現業に利用する国・地域が広がっている。しかしながら、支援国によって高度な機器だけ提供され、附属する活用技術やノウハウなどの提供は軽視されているのが実情である。高度な機器を有効に利用し続けてもらうためには、活用技術やノウハウは継続的に支援する必要がある¹⁾。

著者らのグループでは、10年以上にわたりタイ王立灌漑局に水文観測のアドバイスを行ってきた。2014年10月、タイ最大かつ社会・経済的に最重要であるChao Phraya川流域において、ADCPを利用した流況観測、計量科学魚探DT-X(Bio Sonic社製)を用いた河床形状ならびにダム湖形状の観測を王立灌漑局と共同で実施したので本稿で報告する。

また、最近では海外において水理・水文観測を実施するプロジェクトが多くなっているため、著者らのグループにおける問題点も合わせて報告する。

2. Chao Phraya川

図-1に示したのが、Chao Phraya川流域の地形図と河川網である。地形的には、北部の上流域は山岳地帯、中流域は氾濫原、下流域はデルタである。北部から流れるPing川(流域面積36,018 km²)、Wang川(流域面積11,708 km²)、Yom川(流域面積24,720 km²)、Nan川(流域面積34,557 km²)中流域に位置するNakhon Sawanで合流し、Chao Phraya川が始まる。さらに西側からSakae Krang川が流入し、そしてAyutthayaで東から流れるPasak川(流域面積18,200 km²)と合流し、タイ湾へ流れ出る。一般に、上述した7つの河川を併せてChao Phraya川流域と呼ばれている。

ここで、日本を代表する河川とChao Phraya川流域の縦断形状を図-2に示す。例えばChao Phraya川に着目すると、上流端にあたるNakhon Sawanから河口までは約310 km、標高差は約25.6 mということから、縦断勾配は約1/12000となり、非常に緩やかであることがわかる。Chao Phraya川流域上流部(支川)縦断勾配と日本国内でも緩やかな勾配の河川の一つである信濃川(1/5000)比較しても、さらに緩やかであることがわかる。

Chao Phraya川流域上流には2つの大規模ダム貯水池が存在する。Ping川上流に位置するBhumibolダムは総貯水量134.6 億m³の重力式コンクリートダムである。Nan川上流に位置するSirikitダムは総貯水量10.6 億m³のロックフィルダムである。これら貯水池の主な運用目的は、発電、灌漑、治水である。

3. 観測概要

本章では、観測機材、観測場所について詳述するとともに、海外への機材搬送についても報告する。

(1) 観測機材

流速観測に用いた機材は、ADCP本体、ADCPを曳航するリバーボート、無線装備、12Vバッテリー、携行型発電機、PC、ロープ、工具類である。河床の観測に用いた機材は、DT-X本体(トランスデューサ、サーフェスユニット)、GPS受信機、ケーブル・コード類、固定用のパイプと金具、ロープ、12Vバッテリー、携行型発電機、PC、工具類である。

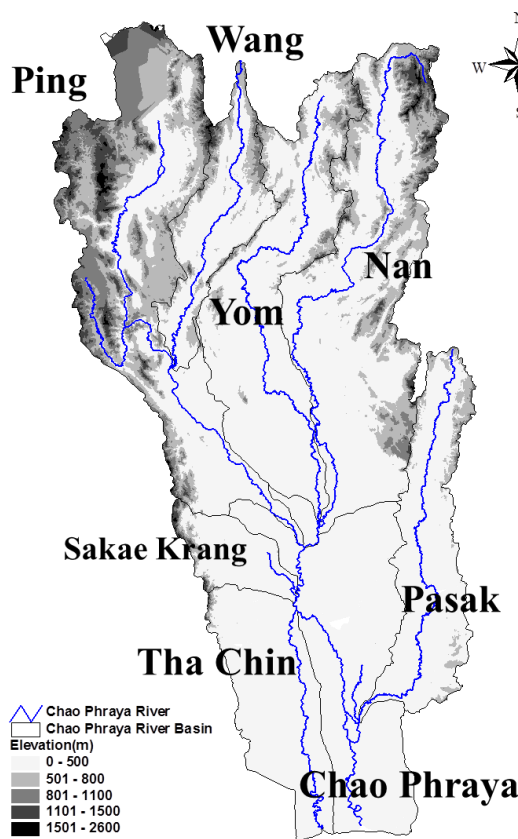


図-1 Chao Phraya川流域の地形図と河川網.

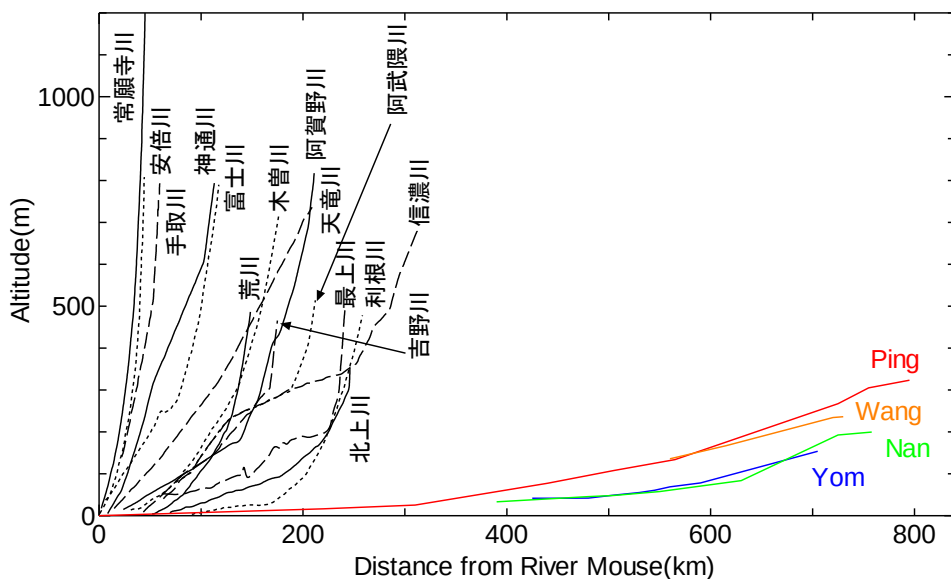


図-2 日本を代表する河川とChao Phraya川流域の縦断形状.

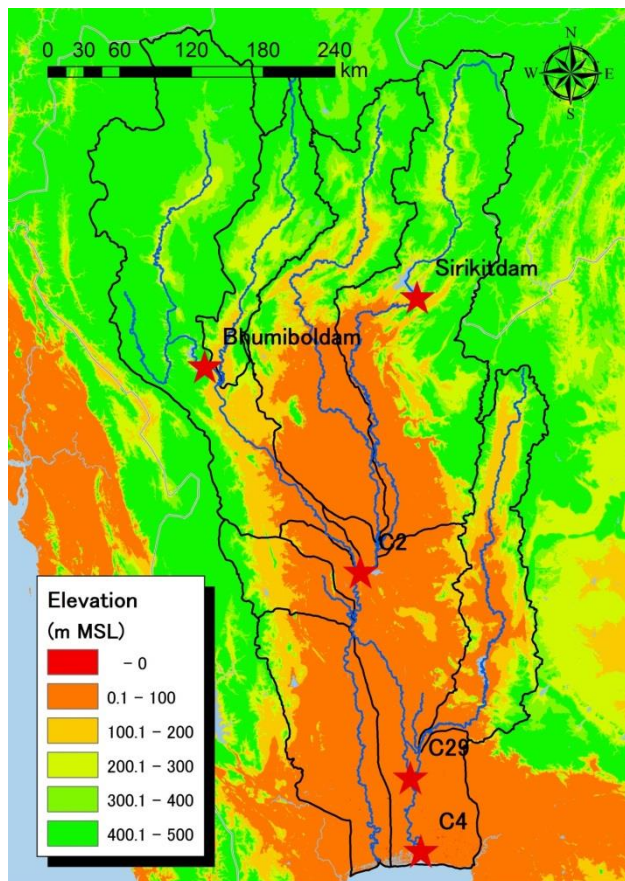


図-3 観測した5地点の位置図

表-1 観測箇所の詳細

観測箇所名	都市名、県名	北緯	東経
C.4	Bangkok	13.59938	100.59518
C.2	Nakhon Sawan	15.7013	100.141
Bhumibolダム	Sam Ngao District, Tak	17.24823	98.96994
Sirikitダム	Tha Pla District, Uttaradit	17.76786	100.566
C.29	Ayutthaya	14.15242	100.5155

飛行機搭乗時、バッテリーは預けることができないため、機内持ち込みをしなければならないが、空港のセキュリティチェックで説明する必要がある。

昨年タイ国で行った調査²⁾において、携行型発電機については、機内へ預けること、そして機内持ち込みも拒否された。航空会社の許可リストにない機材であったためである。そのため、12Vから100Vもしくは200Vに変換するための変圧器を現地で調達したが、そのために半日を要した。今回の調査においても12Vバッテリーのみを電源とし、100V電源の必要な場合は変圧器を用いてこれを補った。

(2) 観測場所

観測場所と位置の詳細を図-3と表-1に示す。Bhumibolダム貯水池、Sirikitダム貯水池ではADCPによる観測は行わずDT-Xによる湖床の観測のみを行った。その他の地点ではDT-XとADCPとを同時に用いて観測した。すべて船舶を用いた観測であり、船舶については、渡し船事業者や釣り人にレンタルして観測を行った。

表-2 DT-Xの設定と仕様

仕様	出力周波数	200kHz
	ビーム角	6°
設定	BioSonics社製	
	底面の検出 Rising Edge threshold	-50dBから
	出力間隔	0.1秒
	観測水深	0~100m

表-3 ADCPの設定条件

C. 29観測所以外

計測モード	12
計測層厚	0.1 m
計測層数	170
アンサンブルタイム	6.23 sec
ウォーターピング数	3
サブピング数	8
ボトムトラック機能	on
ボトムピング数	3
固定観測における 流速誤差の標準偏差	6.35 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート

C. 29観測所

計測モード	12
計測層厚	1.0 m
計測層数	26
アンサンブルタイム	2.84 sec
ウォーターピング数	3
サブピング数	8
ボトムトラック機能	on
ボトムピング数	3
固定観測における 流速誤差の標準偏差	0.72 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート

4. 観測結果

本観測で利用したDT-Xの仕様と設定とを表-2に、ADCPの設定コマンドを表-3に示す。

2つの貯水池以外の3地点4観測日においては、DT-XとADCPによる観測を同じ船で同時に行った。これは現地での予備実験において、2つの機器同士がそれぞれの結果に干渉しないことが明らかになったためである。また、以下に示すADCP観測結果のA-A'~Z-Z'、 α - α' 、 β - β' はDT-X観測結果の地図上に示したA-A'~Z-Z'、 α - α' 、 β - β' と同じ観測断面を表している。DT-XとADCPの同時観測の結果得られた水深は、ほぼ一致していた。



写真-1 C.4観測所におけるボートを用いた観測の風景

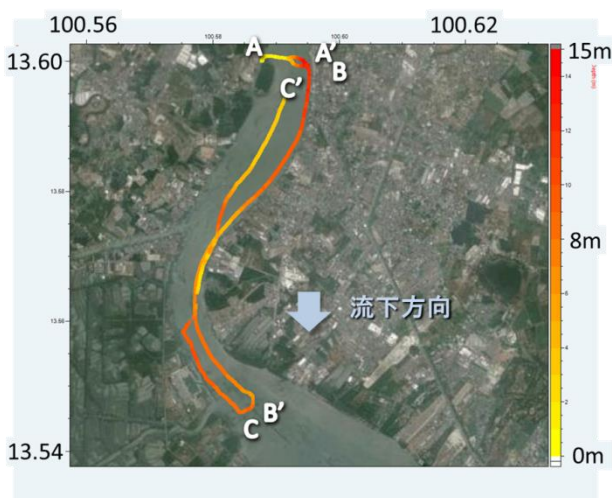


図-4 C.4観測所におけるDT-Xの河床深度の観測結果

(1) C.4観測所

写真-1は2014年10月11日にC.4観測所（Chao Phraya川河口）で行ったボートを使った観測の風景である。渡し船の個人事業者に船をレンタルした。

図-4はDT-Xの水深の観測結果である。図中の黄-赤色で示した曲線が測線であり、色が赤色に近いほど水深が大きい。水深の最も大きい地点は図中のA地点付近で、水深は13.4mであった。観測時の水位0.7mを利用して、観測データを換算すると最深河床は-12.7mである。図中の上半分においては左岸側、下半分においては右岸側の河床が低い傾向があり、蛇行による侵食の影響が見られる。

図-5はADCP観測結果である。ADCPの計測設定条件は表-3の通りである。以下の断面図では、流速の南方成分を負の値(青色)、北方成分を正の値(赤色)で示している。縦軸は水深、横軸は観測距離を表す。流速の範囲は-180~30 cm/sである。A-A'断面では左岸側に主流速が存在し、右岸よりも水深が約10mも深いことがわかる。また、右岸側や左岸の河床付近には逆流が確認できる。A-

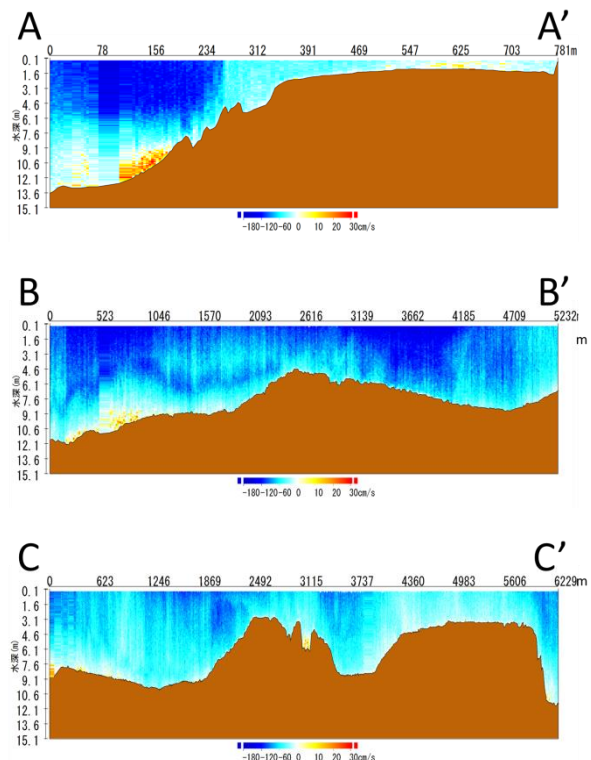


図-5 C.4観測所におけるADCPの横断・縦断面図



写真-2 C.2観測所におけるボートを用いた観測の風景

A'断面の流量は1314.2 m^3/s である。B-B'は上流から下流、C-C'は下流から上流の河川縦断観測である。

(2) C.2観測所

写真-2は2014年10月12日に行ったC.2観測所における観測の風景である。C.2観測所は北西からPing川、北東からNan川が合流し、Chao Phraya川を形成する地点である。

図-6はC.2観測所におけるDT-Xによる水深の観測結果である。この観測所では2014年10月12日と15日の2回にわたり観測を行った。この図は2回の観測結果を一つにまとめたものである。水深の最も大きい地点は合流地点直下の中央部であった。そのうちPing川側は浅くNan川側が深い形状となっており、その境界部分が最も水深が

大きい地点（11.7 m）であった。観測時の水位19.6 mを利用して、観測データを換算すると最深河床は7.8 mである。

また図-7は同地点におけるDT-Xの観測結果を用いて描いた河床の形状図である。これは、観測時の水位のデータと観測で得られた水深から、河床の形状を標高で示したものである。青い色が濃いほど標高が低く、水深は大きい事を示している。測線の間はNatural Neighbor法を用いて補完している。この図から、Ping川に比べNan川河床の標高が低く、合流後はNan川の延長上に標高の低い部分が広がっていることがわかる。

図-8はC.2観測所（Nakhon Sawan合流後）のADCP観測結果である。D-D'は左岸→右岸→左岸の観測結果である。観測開始地点から17～34 mの水深が浅くなる範囲が右岸側である。右岸側では逆流が発生している。C.2観測所でも主流部の対岸では逆流が発生していた。E-E'と

F-F', H-H'断面はすべて横断観測結果である。それぞれ流量は534.1 m³/s, 460.8 m³/s, 335.4 m³/sである。観測結果において、大きいものと小さいもの間で流量の差が約200 m³/sあった。これは、流速により横断時にボートが流されたことが影響しているのではないかと考えられる。また、G-G'は下流から上流への縦断観測である。

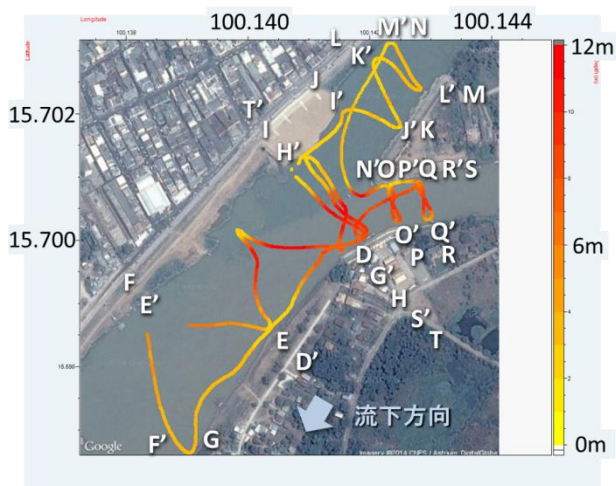


図-6 C.2観測所におけるDT-Xの水深観測結果

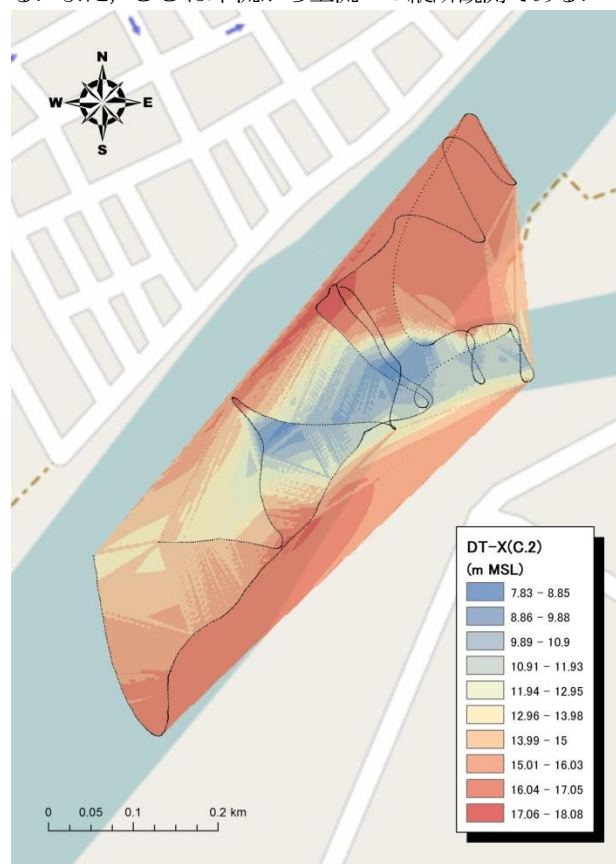


図-7 C.2観測所における河床形状図

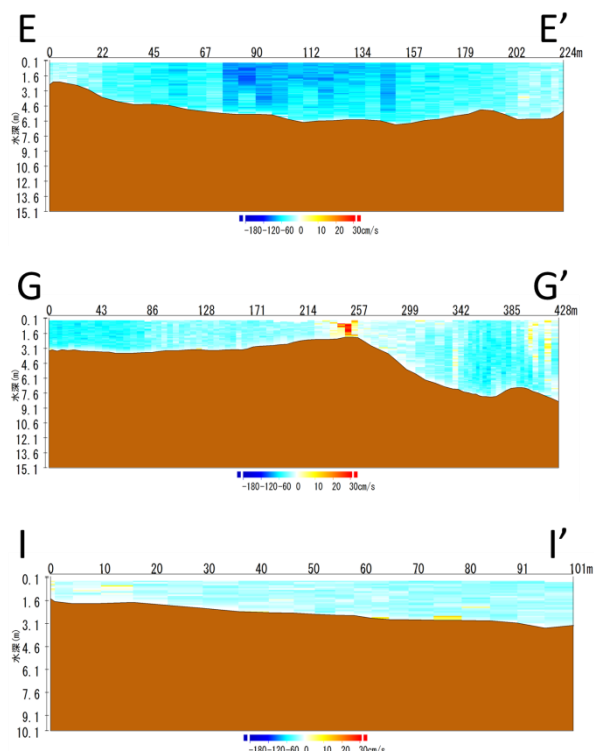
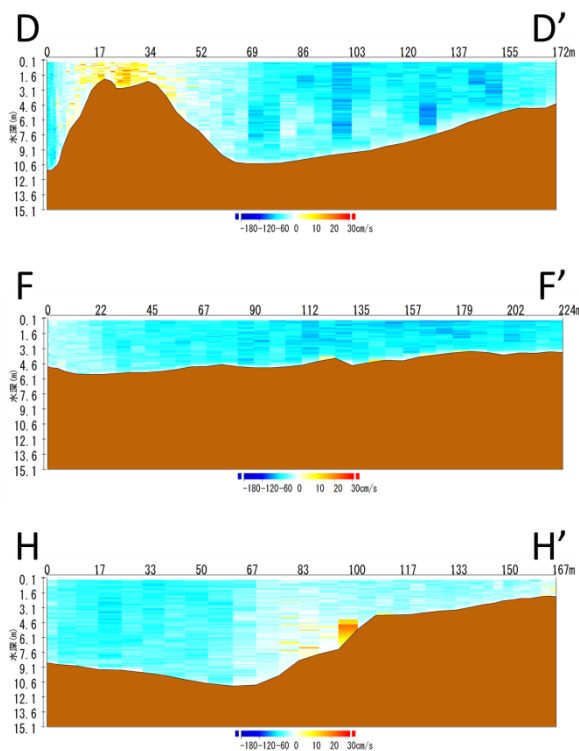


図-8 C.2観測所におけるADCPの横断・縦断図（断面D～I）

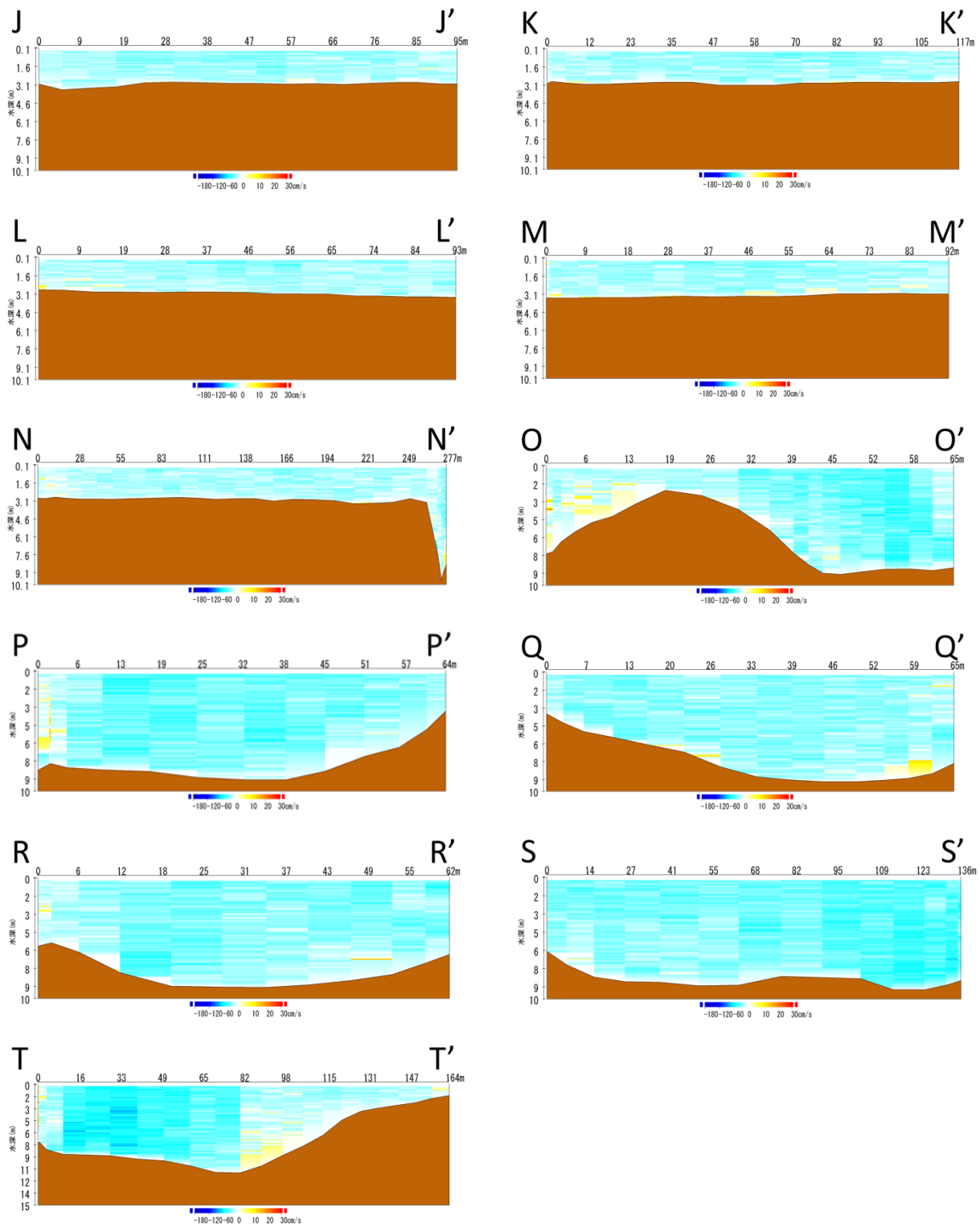


図-9 C.2観測所におけるADCPの横断・縦断面図（断面J～T）

図-9は2014年10月15日に行った、C.2観測所における2回目のADCP観測の結果である。一回目の観測では合流後の観測のみであったが、二回目は合流前のPing川、Nan川についても観測を行った。I-I'は船着き場からPing川右岸までの観測、J-J'～M-M'断面はPing川の横断観測の結果である。横断観測結果の流量はそれぞれ、49.8 m^3/s 、59.2 m^3/s 、43.3 m^3/s 、50.4 m^3/s となり、差は最大で15 m^3/s となった。次に、N-N'はPing川右岸からNan川右岸までの移動時の観測であり、O-O'～R-R'断面がNan川

の横断観測結果である。流量はそれぞれ、80.0 m^3/s 、129.0 m^3/s 、102.3 m^3/s 、106.9 m^3/s であり、差は最大で49.0 m^3/s である。O-O'断面観測の流量が小さくなったのは、観測開始が早く2河川合流部の逆流を観測したためだと考えられる。S-S'はNan川右岸から合流後左岸の移動観測で、T-T'断面は合流後横断観測の結果である。この結果より、合流後の流量は355.5 m^3/s であった。合流前2河川の流量観測結果の中で、それぞれ一番大きい値を合計すると188.2 m^3/s である。合流前の2河川の流量



写真-3 Bhumibolダム貯水池における観測の風景

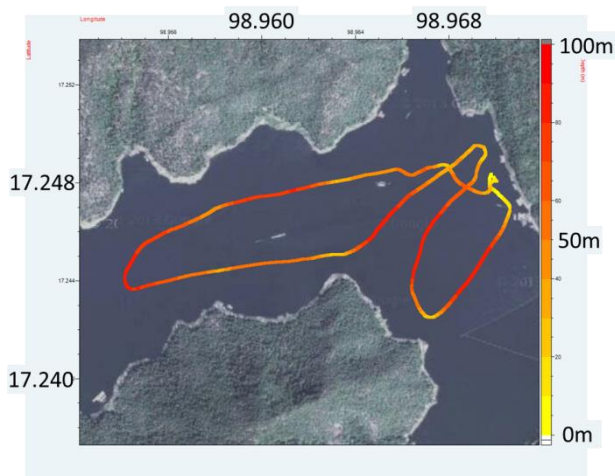


図-10 Bhumibolダム貯水池におけるDT-Xの水深観測結果

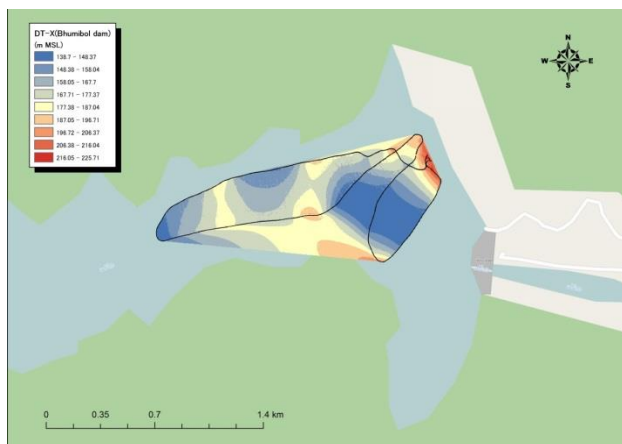


図-11 Bhumibolダム貯水池の形状図

の合計と合流後の流量の観測結果に $167.3 \text{ m}^3/\text{s}$ の差が生じた。これは、上流部においては、河川断面の全面を観測できていないために、過小評価されたと考えられる。また、下流に関しては流下方向に対して測線が斜めになってしまったため、実際よりも流量が過大評価された



写真-4 Sirikitダム貯水池における観測の風景

可能性が考えられる。測線が傾いたのは、河川の流速が速く、ボートが流されたことによる。

(3) Bhumibolダム貯水池

写真-3は2014年10月13日に行ったBhumibolダム貯水池における観測の風景である。図-10はBhumibolダム貯水池におけるDT-Xの水深の観測結果である。岸から近い地点の水深は小さく、岸から離れた地点の水深は大きい傾向が見て取れる。水深は最も大きい地点で 89.0 m であった。観測時の水位 227.2 m を利用して、観測データを換算すると最深湖床は 138.2 m である。

図-11はBhumibolダム貯水池におけるDT-Xの観測結果を用いて描いたダム湖床の形状である。堤付付近の湖床は、標高 140 m 程度の平坦な部分を中心に、山側にかけてすり鉢状に形成されている事が見て取れる。図の左半分、谷の狭窄部に黄色く帯状に示された部分は、周りの部分よりも標高が高く表示されている。この部分は左岸と右岸に近い2測線の補完によって描かれているため帯状に標高が高く示されている。しかし、この帯状部の中央はかつて河道であった部分であり、岸からも離れていることから、実際中央部の標高はより低いと推察される。ダム湖の形状をおおまかに捉えるためであっても、今回の観測より多くの測線が必要であると考えられる。

(4) Sirikitダム貯水池

写真-4は2014年10月14日に行ったSirikitダム貯水池における観測の風景である。図-12はSirikitダム貯水池におけるDT-Xの水深の観測結果である。岸に近い地点の水深が小さく、貯水池の中央に近づくに連れ水深が大きくなる傾向が見られる。水深は最も大きい地点で 73.8 m であった。観測時の水位 145.6 m を利用して、観測データを換算すると最深湖床は 71.8 m である。

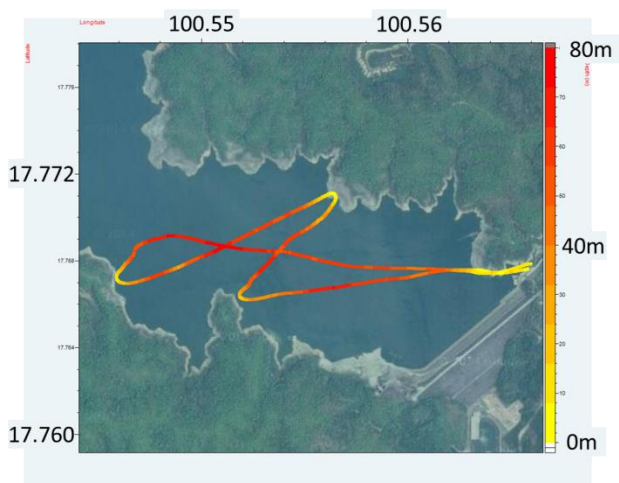


図-12 Sirikitダム貯水池におけるDT-Xの水深観測結果

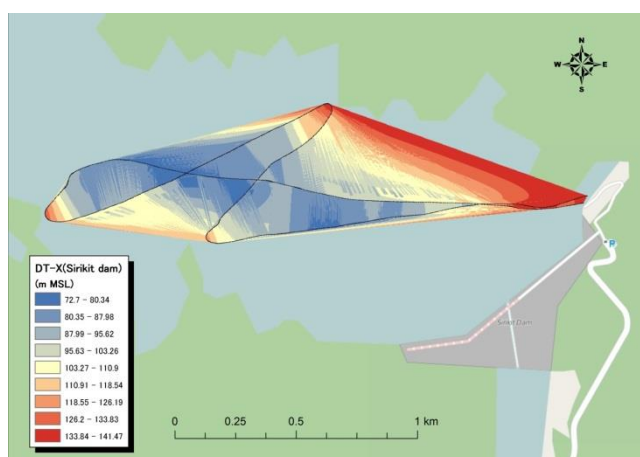


図-13 Sirikitダム貯水池の形状図

また図-13はSirikitダム貯水池におけるDT-Xの観測結果を用いて描いたダム湖床形状である。渓谷の中心に沿って標高の低い（標高72～89 m）部分が広がっている。しかし、Bhumibolダム貯水池と比べると標高の変化が連続的でないため、Sirikitダム貯水池の湖床は比較的起伏が大きいと考えられる。また、こちらの貯水池においても地図や航空写真から考えられる地形と補完部分の違いが大きく、ダム湖形状を捉えるためにはより多くの測線が必要であるといえる。

(5) C. 29観測所

写真-5は2014年10月16日に行ったC.29観測所（Ayutthaya）における観測の風景である。C.29観測所は以下に示す図-14の航空写真からもわかるように、川幅が大きく変化する地点である

図-14はC.29観測所におけるDT-Xの水深の観測結果である。水深は最も大きい地点において22.2 mであった。観測時の水位0.9 mを利用して、観測データを換算すると最深河床は-21.3 mである。川幅の変化する前後で水深の変化が見られる。川幅の小さい上流部の水深が大きく、川幅の大きい下流部の水深が小さい傾向が見て取れる。



写真-5 C. 29観測所における観測の風景

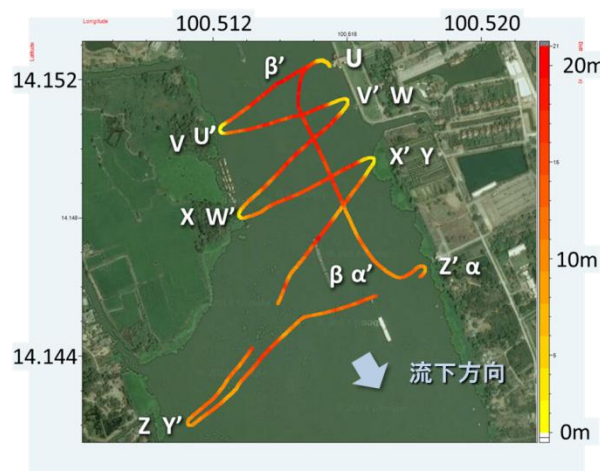


図-14 C. 29観測所におけるDT-Xの水深観測結果

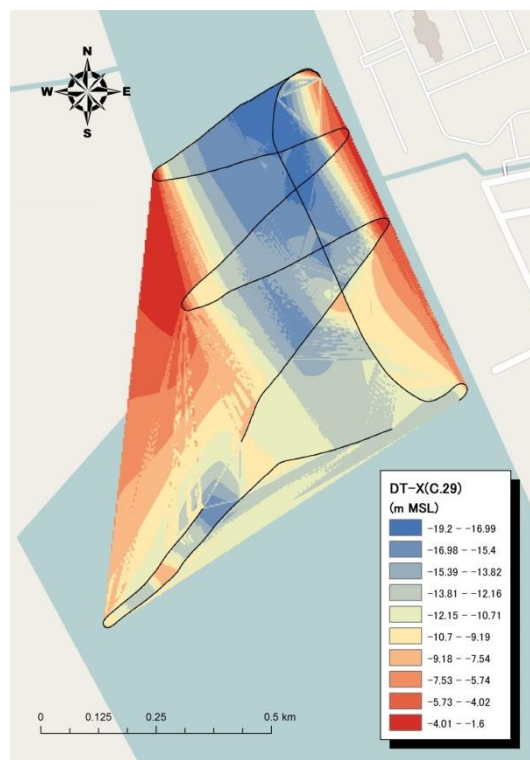


図-15 C. 29観測所における河床形状図

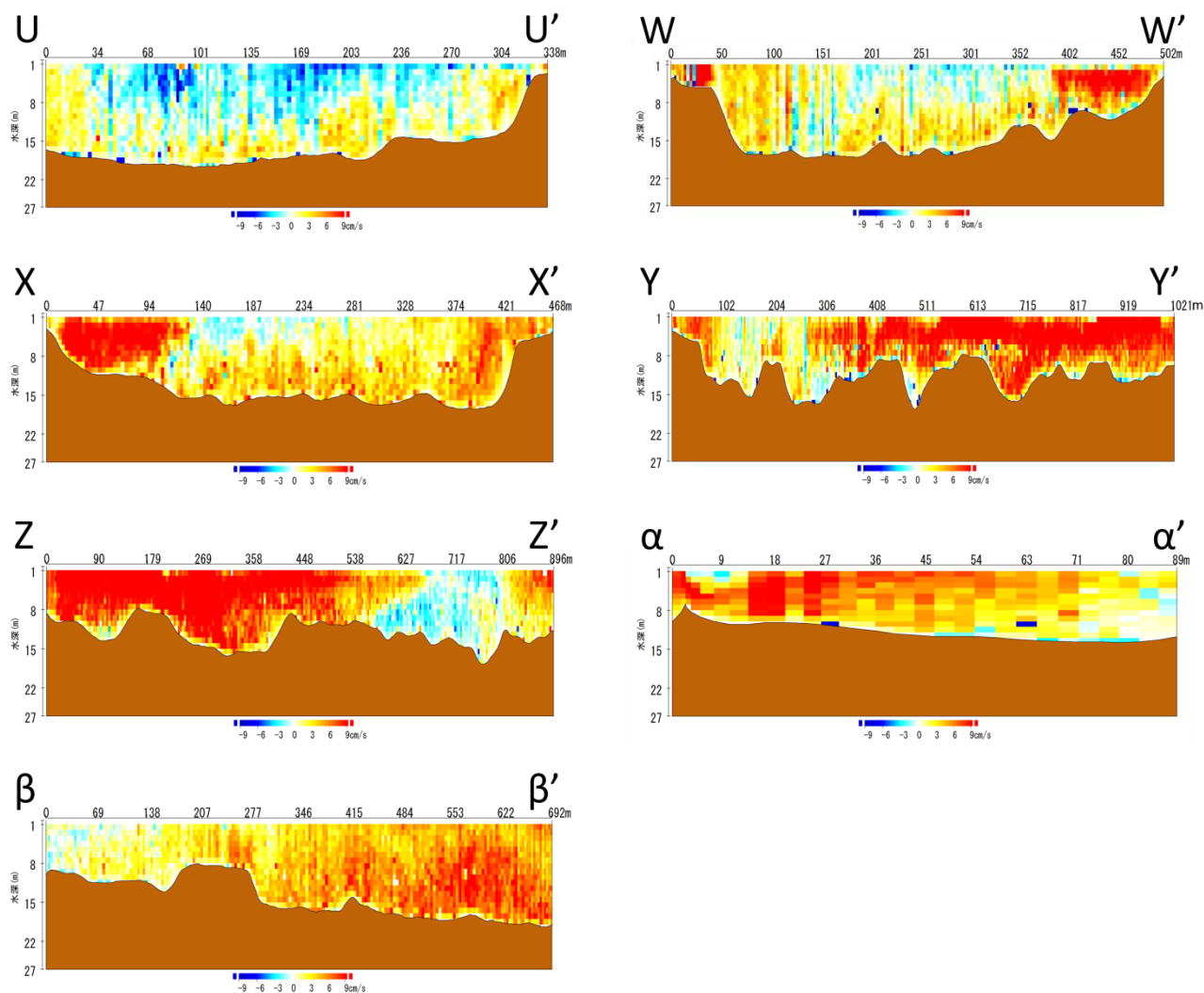


図-16 C.29観測所におけるADCPの横断・縦断面図

図-15は同地点におけるDT-Xの観測結果を用いて描いた河床形状の図である。C.29観測所の河床は標高-19～-4 mの範囲にあることがわかる。この図からも、川幅の小さい上流部の水深が大きく、川幅の大きい下流部の水深が小さい傾向が見て取れる。また、川幅変化後の下流を見ると、上流の延長にある左岸側の標高が低く、右岸側の標高が高いことがわかる。

図-16はC.29観測所のADCP観測結果である。C.29観測所のみADCPの計測設定条件は表-3の通りである。また、流速の範囲が-9～9 cm/sと非常に小さくなっている。U-U'～Z-Z'まで横断観測結果である。C.29観測所では横断断面の半分以上で赤系色の順流が発生していることがわかる。流量はそれぞれ、4.0 m³/s、-69.1 m³/s、-146.4 m³/s、-231.7 m³/s、-631.9 m³/s、-608.6 m³/sとなっている。この内負の値で表したのは、流量計算の結果遡上方向の流量が算出されたものである。C.29観測所は川幅が大きく変化する地点で、主流部は左岸側にあるが、その流速は非常に小さい。U-U'断面での流量は4.0 m³/sと流下方向に流れているが、その後下流側に移動するにつれて徐々に

逆流流量が大きくなり、Z-Z'断面では608.6 m³/sの逆流が発生している。このことから、観測日においてC.29観測所まで塩水遡上が発生していたと考えられる。また、 α - α' は左岸から河川中央までの移動観測、 β - β' は下流から上流の縦断観測である。赤色が強く出ているため、逆流が発生していることがわかる。

5. おわりに

今回の現地調査により、ADCPとDT-Xによる同時観測が可能であることが明らかになった。これにより、河川の流速観測と河床形状の観測が同時に行えるため、今回のような観測において効率を上げることができる。

DT-Xによる観測の結果、河川では河床形状の特徴をおおまかにではあるが捉えることができた。ダム貯水池においては湖床形状を図化したかったが、測線の少なさから詳細な形状は得ることができず、堆積状態を知るまでには至らなかった。しかしながら今回の方法で、リアルタイムの貯水池の水位と観測データによって湖床の標高が得られることがわかった。これにより、今後観測を続けて

いくことで、堆積状況の変化を知ることが可能である。

ADCPによる観測の結果、河口付近のみならず、C.29観測所（Ayutthaya）においても、河川の逆流が観測された。

今回の調査では、すべての地点で船舶をレンタルして行ったが、船速や方向の指示など、船の操作について指示を出すことに難儀した。今後同様の調査を行う場合、GPSによる現在地や、観測したい測線が地図上に表示されているものを、操舵手に見せながら指示を出すことで、観測がより効率的に行えると考ええる。

謝辞：観測に際して、株式会社ハイドロシステム開発の橘田隆史氏と疋田真氏に助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 笹川幸寛，手計太一：タイ国Chao Phraya川感潮域におけるADCPを用いた流速観測，河川流量観測の新時代第4巻,pp57-66,2013

(2015. 2. 13受付)