

複雑な横断形状を有する河道における高度な音響
トモグラフィシステムを使用した流量観測手法の開発

北見工業大学 工学部 社会環境系

アルサワフ モハマドバセル

複雑な横断形状を有する河道における高度な音響 トモグラフィーシステムを使用した流量観測手法の開発

Improvement of River Flow Measurement Using the Fluvial Acoustic Tomography System in a Geometrically Complex River Channel

アルサワフ モハマドバセル¹

MohamadBasel ALSAWAF

¹北見工業大学 工学部 社会環境系 助教

要 旨

河川計画においては、流量の正確な観測が最も重要な要素の一つである。特に洪水時の流量観測は、安全面と観測の容易さから、橋梁で行われるのが一般的である。しかしながら、現在の常呂川の管理においては、流量計測の精度が低く、課題となっている。本研究目的は、橋梁を用いずに、常時水位から洪水時まで、複雑な横断形状を持つ河川において、シームレスで正確かつ安全に流量を観測する方法を開発することです。本研究では、Fluvial Acoustic Tomography System (FATシステム)を用いて、河川流量の連続観測を行った。まず、測定の可能性を検証するために、異なる横断面でトモグラフィー観測を実施した。さらに、測定精度の確認のため、他の独立した手法との検証を行った。その結果、FATシステムは、他の手法との良好な一致性をもって、複雑な河床地形における流量計測に可能性を有することが明らかになった。特に、本研究の重要な貢献は、極めて浅い河床地形でも流量を計測することができる点であり、より幅の狭い河川にも適用できる可能性を示唆している。総じて、本研究は、河川における流量動態の観測手法として有望な方法であることを示した。

《キーワード：常呂川；流量；流速；音響トモグラフィー；河床》

1. はじめに

北海道オホーツク地域は、他の日本地域と比較して、長く寒冷な冬と短く涼しい夏を特徴とする亜寒帯気候を呈しており、流域スケールでの水文学的プロセスを解明するために、連続した長期の河川流量データが不可欠である。しかしながら、正確な流量測定は、長年にわたり水文学者や水資源エンジニアにとって大きな課題でした。さらに、信頼性の高い河川流量の常時観測は、水資源システムの最適な運用・管理計画の策定、水文学過程の理解、関連する気候極端事象の影響の最小化に不可欠です。

通常、流量観測所においては、水位-流量関係式¹⁾を用いて、直接流量観測値と水位記録を基に流量を推定する手法が主流である。現場計測では、音響ドップラー流速計 (ADCP)²⁾を用いて平均流速を測定することが多い。ADCPは従来型計測機器に比べて多くの利点を持つが、河川環境での適用には機能・効率面での課題が残されている。例えば、移動船搭載ADCP計測の主な課題としては、(i) 船舶の不安定さによる乱流環境下での精度低下、(ii) 悪天候・洪水時には安全上の観点から直接計測が困難であり、ピーク流量の捕捉が難しい³⁾、(iii) 高精度な計測には熟練者による長時間の作業が必要である⁴⁾ ことなどが挙げられる。

近年、河川工学・水文学研究において、超音波伝播時間差法への応用が盛んに研究されています。特に、河川音響トモグラフィシステム (Fluvial Acoustic Tomography, もしくは、FAT) システムは、従来海洋・海域で用いられてきた相互音響伝達手法を、より浅い水域である河川や河口域にも適用するための高度な技術として開発された^{5, 6)}。

基本的に、初期のFATシステムは17kHzの全指向性トランスデューサーを使用して運用されてきましたが、その後改良された新しいバージョンのFATシステムは25kHzの全指向性トランスデューサーを使用して運用されるようになった。これまでにFATシステムを用いた研究では、高精度な河川流量モニタリング^{7, 8)}、ダムフラッシュ特性⁹⁾、潮汐接続部における2次元流速と塩分分布の再構成¹⁰⁾、ダム湖水系動態のモニタリング⁵⁾ など、さまざまな水文主題が研究・調査されてきた。近年、より複雑な地形を持つ狭小な河川流量を精密に測定することを目的として、55kHzトランスデューサーを使用した新しいバージョンのFATシステムが開発されました。例えば、Al Sawafら (2020)¹¹⁾ は、FAT55kHzシステムを用いた河川流量測定の可能性を示した。

水中音響学的な観点から見ると、浅水域は広範な重要な音響アプリケーションにとって挑戦的な環境である。海洋とは異なり、河川境界は、しばしば異なる底質、複雑な地形、および音響信号の伝搬に大きな影響を与える複合層の成層を有しており、これは音響伝搬距離が短い場合に最小限に抑えることができる¹²⁾。さらに、浅い河川では、水表面付近での屈折、後方散乱、底減衰、および混響などの他の要因も考慮しなければならない。加えて、極めて小さな微分到着時間精度¹³⁾を達成することが不可欠である。実用上、より高周波数の新しいタイプのFATは、広島県内のいくつかの河川や河口域で極めて短期間 (数時間から数日) の観測を行い、高い性能を示した。

本研究の目的は、革新的な河川音響トモグラフィシステムを用いて、流量の連続観測を解明することである。さらに、より高周波数のFATシステムを用いて、複雑な底地形を有する狭小河川において、厳しい観測サイト条件下での現場観測プログラム中に観察された課題や問題点を提示・議論する。本研究の主要な問いは、超音波伝播時間差原理が他の既存手法と比較して河川流量推定をどのように進歩させることができるのかである。本研究の主要な貢献は、ジグザク形配置の河川音響トモグラフィシステムを用いて、河川における流向推定に関する最初のガイドラインを提案することであり、これは試みとして行われる。また別の重要な貢献は、直接アプローチを用いてオープンチャンネルにおける流量測定をさらに一歩進めることである。すなわち、本研究では、河川横断面積 (水位)、平均流速、流向の3つの基本要素を用いて、河川流量の常時観測を検討する。

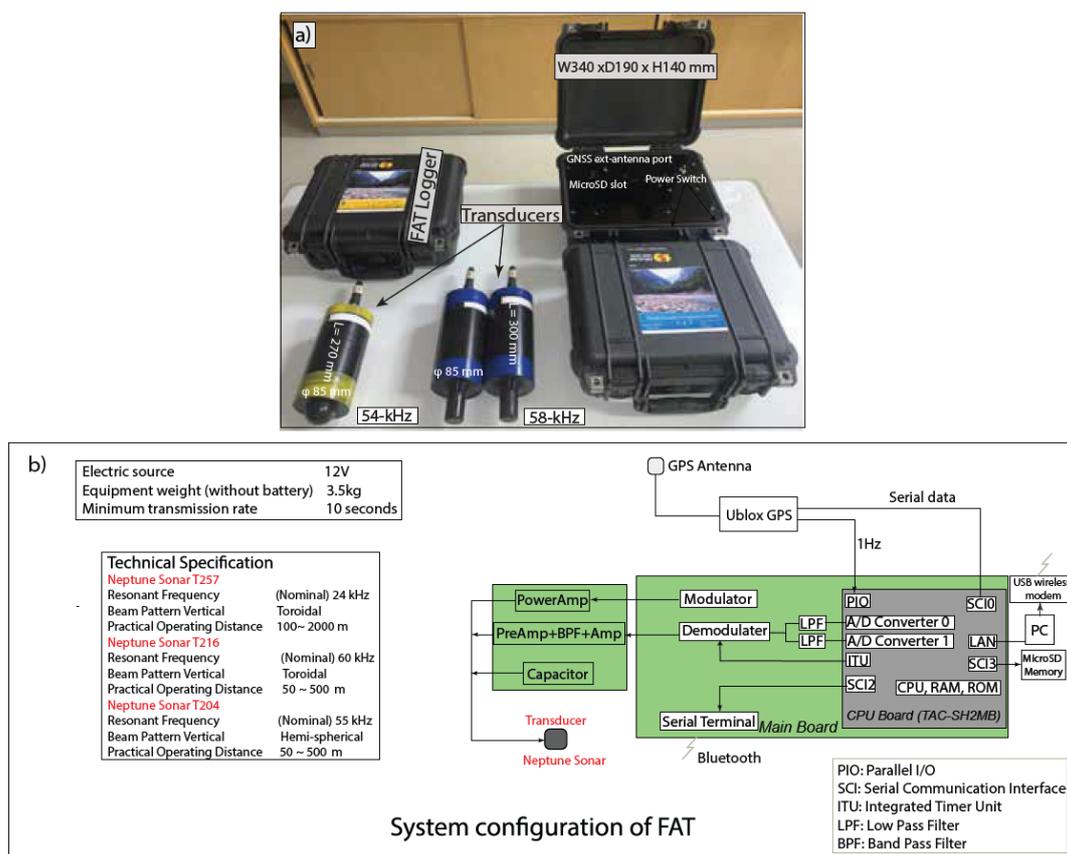


図1 a) FAT システムロガーおよびトランスデューサー, b) FAT システムの主要な構成

2. 河川音響トモグラフィシステム概要

FATシステム（図1）は、広島大学が開発したのですが、河川での流量観測を測定するためにつかっている。超音波伝播時間差原理を利用し、水深0.3m程度の山岳溪流から、数メートル程度の沿岸河口域まで、浅い河川の流量を計測します¹³⁾。本システムの原理は、超音波伝播時間差原理である。FATシステムの大きな利点は、複雑な後処理手順を必要とせず、平均流断面積流速を測定できることです。

FATシステムの音響信号は、全指向性トランスデューサーから10-55kHzの範囲で放射される。FATシステムは、高精度標準周波数（10MHz）と精密授時パルス（1Hz）を供給可能な u-blox LEA-8T GPS受信機を搭載しており、両システムユニットの同時動作に不可欠な高精度な時刻同期を実現します。10MHz信号は、FATの高精度送信用および信号処理のための基準クロックとして用いられます。音響パルスはGPSクロックによりトリガーされ、両トランスデューサーから30秒間隔で同時に送信される。音響パルスは、擬似ランダムシーケンスに属する単一の9次Mシーケンス（最大長シーケンス）で構成される。FATの動作限界は音波の波長と水深に依存し、音波伝搬には水深（dm）が波長（λ）の10倍以上であることが要求される。したがって、50kHzの場合、FATは水深が0.3m以上であることが必要と考えられる。図1aにはFATシステムロガーとトランスデューサー、さらに図1bにはFATシステムの主要構成を模式図で示す。

FATシステムは、常設モニタリング地点における河川断面の複雑な形状や地形を有する河川においても、対岸距離に制約されず設置・運用が可能である。従って、以下の様に従来の障害を克服し、様々な望ましい機能を提供することが期待できる。(i) 生物の多様性の維持、(ii) 船舶の安全な航行の確保、そして最も重要な点として、(iii) 複雑な河床形状や浅い河川における流量計測のための、実用的かつ実現可能なソリューションを提供し、世界中の同様の河川への適用が可能である。

3. 河川音響トモグラフィシステム測定原理: 超音波伝播時間差法

超音波伝播時間原理に基づき、FATシステムは断面（例えば、S1_S2）を伝搬する音速（ c ）と対応する断面積平均流速（ u ）を推定できる。具体的には、超音波伝播時間は、トランスデューサーから定義された受信機（群）に向けてトリガーされた音響信号が経過する時間です。したがって、一对のトランスデューサー（例えば、S1とS2）の場合、取得された通過時間 t_{S1} と t_{S2} （S1局のトランスデューサーからS2局のトランスデューサーへ向けてトリガーされた音響パルスとその逆）を用いて、伝達経路（S1_S2）を沿った音速と断面積平均流速を以下のように計算する。

$$c = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{S1}} + \frac{1}{t_{S2}} \right) \quad (1)$$

$$u = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{S1}} - \frac{1}{t_{S2}} \right) \quad (2)$$

L はS1トランスデューサーとS2トランスデューサー間の斜距離です。FATから取得される流量、 Q_{FAT} は次のように定義できる。

$$Q_{FAT} = u \times A \times \tan \theta \quad (3)$$

流れ方向角（ θ ）は、次のいずれかの方法で求めることができる：(i) ADCPボート、(ii) 基準流量記録からの回帰解析、(iii) 3台FATシステムによる三角形配置、(iv) 4台FATシステムによる十字形配置。

4. 河川音響トモグラフィシステム測定原理: 超音波伝播時間差法

本研究では、北海道北見市にあるオホーツク地域最大河川である常呂川を対象として現地調査を実施した。常呂川は流路延長120km、調査地点付近での平均流幅40mを有す。流域面積は1930km²に達し、周辺生態系にとって生命線といえる存在である。常呂川は三国山を源とし、置戸町や訓子府町などの風光明媚な町々を流れ下った後、北見市中心部で支流である無加川と合流し、最終的にオホーツク海に注ぐ。

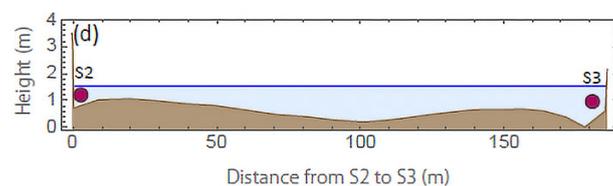
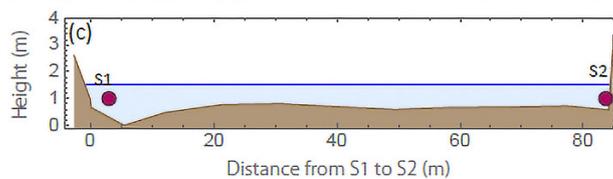
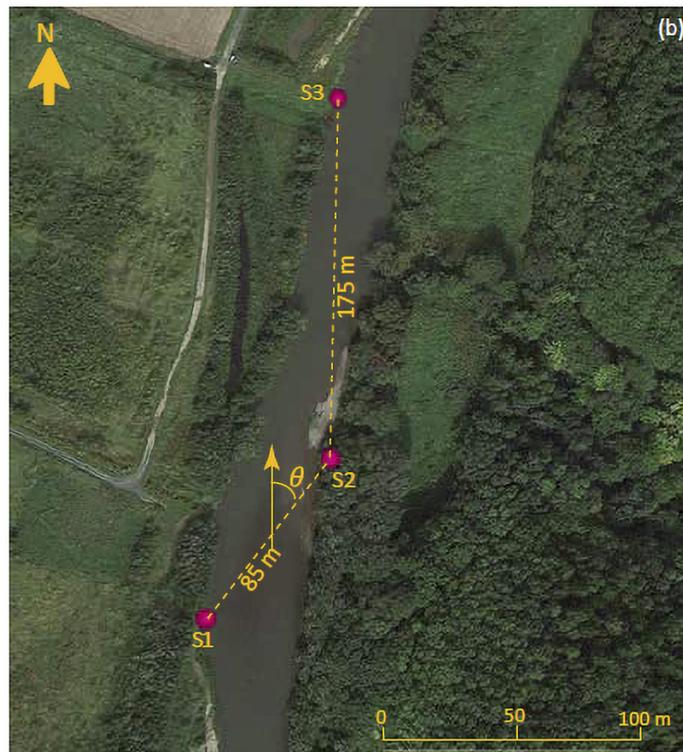
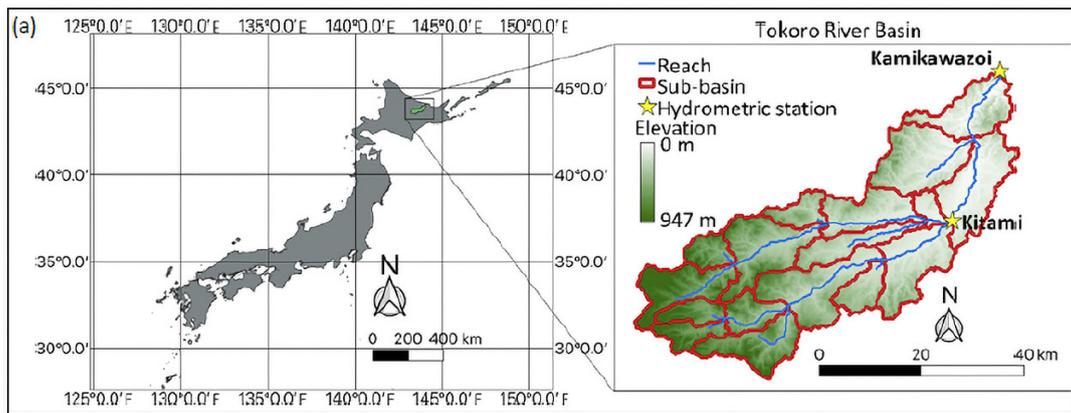


図2 a) 常呂川流域; b) 観測地点とFATシステム設置位置; c) & d) トランスデューサーの設置位置 (赤丸)

調査対象地域は、寒冷な冬と比較的温暖な夏を特徴とする湿潤大陸性気候に属する。国土交通省によれば、1978年から2004年までの平均年気温は5.8℃、平均最低気温と最高気温はそれぞれ-24.2℃と32.7℃であった¹⁴⁾。同地点での同期間の平均降水量は726.8mmと報告されている。

FATシステムを用いた河川流量のトモグラフィー測定の配置を図2b)に示す。3台のFATシステムをジグザグ状に観測所に設置した。示すように、システムの1台は右岸 (S2観測点) に設置され、残りの2台

は左岸（S1観測点およびS3観測点）に設置した。なお、観測地点の水深は流量が低い場合に著しく浅くなり、特にS2付近では水位が10cm程度まで低下することに注意必要であり。また、観測所の河床は砂とシルトが混じっている。



図3 FATシステムロガーと河川サイトへの設置

平均水位の時間変化を観測するために、3台の圧力記録計（HOB0®_U20 水位・温度記録計）を各変換器（S1, S2, S3）に取り付け、5分間隔でデータを取得するようにプログラムしました（図3b）。S1_S2とS2_S3間の河床測量測定には、600kHz周波数の単ビーム測深儀を搭載したADCPボートを使用して実施しました。S1_S2とS2_S3間の断面積の時間変化計算には、S1_S2とS2_S3でそれぞれ観測された水位ロガーによる平均水位の時系列と、河床の高さを積分することにより推定しました。表1は、実験の構成と設定の概要を示しています。

表1 観測プログラムの主な機能と設定

観測所名	発信周波数	トランスデューサー 区分	信号伝 送速度	S2から の距離	観測期間
S1	54kHz	半球ビーム広帯域トランスデューサー (T204, Neptune Sonar Ltd)	30 秒ごと	84.5m	2023年08月17日～ 2023年09月27日
	58kHz	円筒ビーム広帯域トランスデューサー (T226, Neptune Sonar Ltd)			2023年09月27日～ 2023年10月02日
S2	58kHz	円筒ビーム広帯域トランスデューサー (T226, Neptune Sonar Ltd)	30秒ごと	0m	2023年08月17日～ 2023年10月02日
S3	58kHz	円筒ビーム広帯域トランスデューサー (T226, Neptune Sonar Ltd)	30 秒ごと	175 m	2023年09月05日～ 2023年09月27日
	54kHz	半球ビーム広帯域トランスデューサー (T204, Neptune Sonar Ltd)			2023年09月23日～ 2023年10月02日

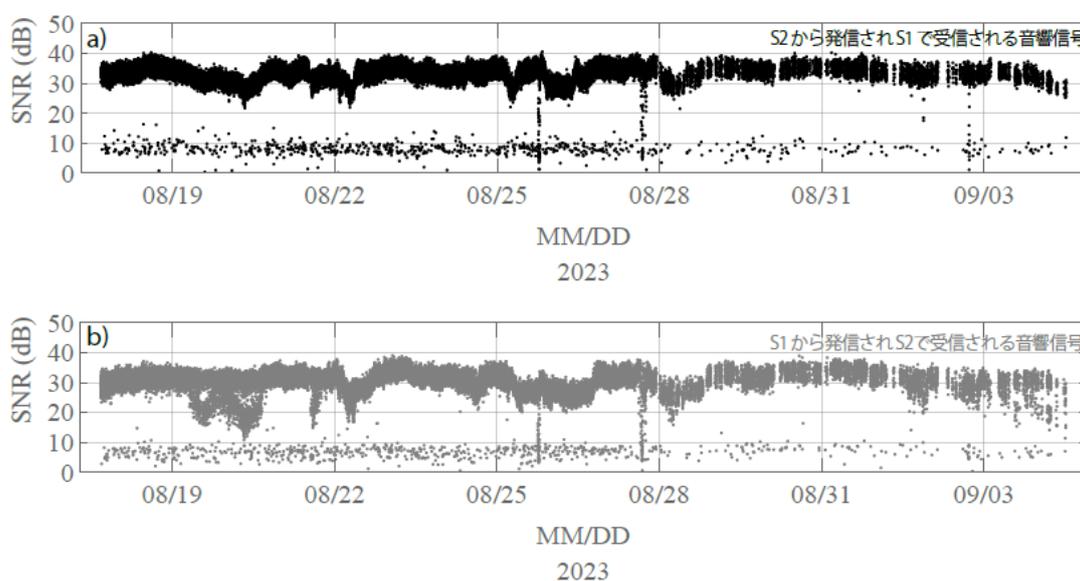


図4 最初のモニタリング期間中にS1（黒）とS2（グレー）で受信されたSNRデータの時系列

5. 観測結果

本研究の初回モニタリングキャンペーンは、2023年8月17日から9月5日までの間、継続的に実施された。この期間中、S1-S2間で連続的な測定が行われた。最初に、図4は信号対雑音比（SNR）を示している。ご覧の通り、記録されたSNRデータの大部分は良好な範囲（すなわち、 $\geq 10\text{dB}$ ）に収まっている。しかし、8月28日頃からデータ欠損が見られるが、これはバッテリー性能に起因するものと考えられる。一方、図5は、S1からS2へ、およびS2からS1へと発信された相関信号の重ね合わせ図である。

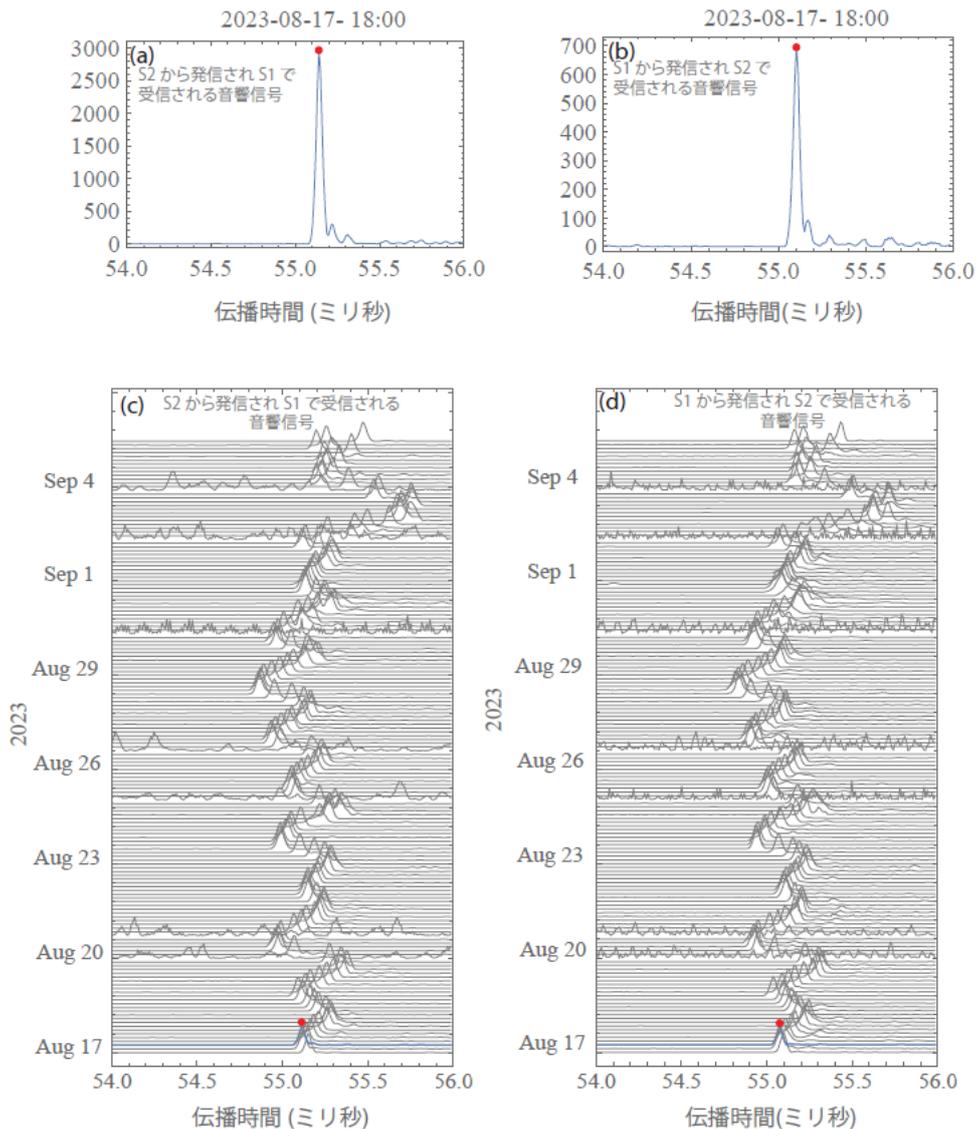


図5 a) とb) 発信信号の例, c) 下流点S2から上流点S1へ発信された相関信号 と, d) 上流点S1から下流点S2へ発信された相関信号の重ね合わせプロット

図6 (a) と (b) には、それぞれ点S1と点S2での計測された伝搬時間が示されています。さらに、図6 (c) ではこれら伝搬時間を直接比較し、経路に沿った潜在的なばらつきを浮き彫りにしています。注目すべきことに、図6cは上流側点（観測点S1）から発信された伝搬時間は下流側点（観測点S2）から発信された伝搬時間よりも早く到着したことを示しており、それで、式 (2) により正の流速をもたらしました。

さらに、図7aは伝送路（S1-S2）を横断した平均流速を示している。興味深いことに、図7bは Q_{FAT} と Q_{HQ} データの時間変化間に良好な相関関係があることを示唆しています。また、図7cは流量計による別の独立した測定値とともに、 Q_{FAT} と方式と Q_{HQ} 方式で得られた流量変化の詳細な比較を提供している。特筆すべきは、図7dはFATとHQで推定された流量間の誤差パーセンテージが低く（10%未満）であることを示している。これは、FATシステムが正確な河川流量測定に潜在的な可能性を有することを意味している。

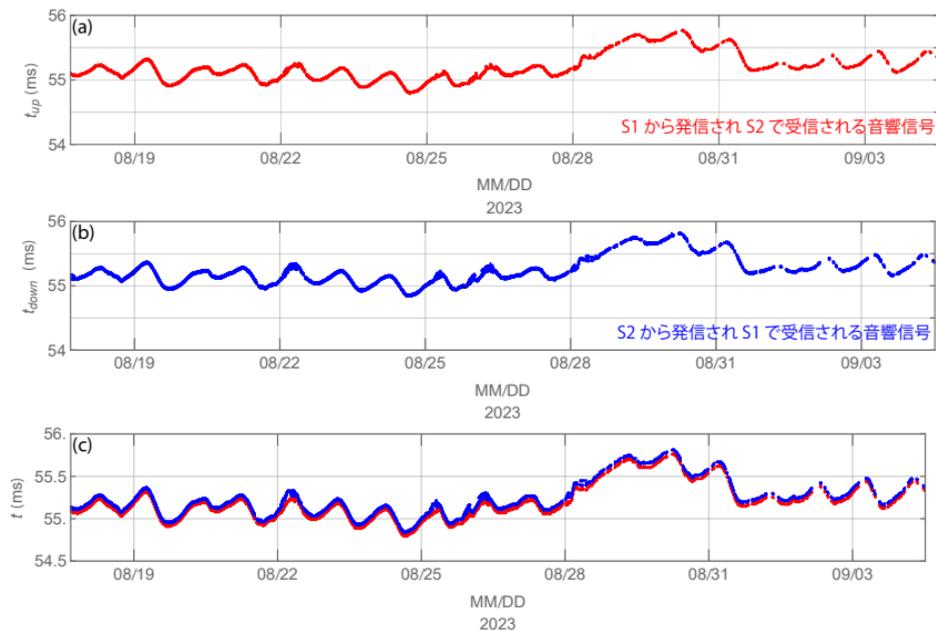


図6 伝搬時間の時系列: a) S1から信号を送信し, S2で受信した信号, b) S2から信号を送信し, S1で受信した信号, c) (a) と (b) の組み合わせプロット

第2回目のモニタリングキャンペーンは, 2023年9月5日から2023年9月27日まで実施されました. このキャンペーンでは, S3にFATシステムが追加で配備されました. この追加観測局の当初の目的は, 流量の正確な測定と, 測定期間中の流向変化の継続的な追跡でした. 記録されたSNR信号の時系列を見ると, S1-S2 (図8a) の信号は, S2-S3 (図8b) の信号と比較して比較的良好であることが確認できます. しかしながら, 図8 (a&b) から明らかですが, S2局では日中 (10dB未満) に受信信号強度 (SNR) が著しく低い値を示しており, 一方, 夜間はS2局でS2-S3方向の音響信号を受信できなかったことも見られます (図8b).

図9および図10には, それぞれS1-S2間とS2-S3間で発信された相関信号の積層プロットを示す. S1-S2間で発信された信号の大部分は良好に受信されたが, 図9dに示すように, S2の位置がS1から発信された信号の完全受信を妨げる障害物となっていたことが認められる. 同様に, 図10cからは, S3から送信された音響信号のかなりの部分がS2で完全には受信できなかったことがわかる. さらに, S2とS3で受信されるピークの時間差は, 約2ミリ秒と推定され, 下流点 (図10cのS3) のピークが上流点 (図10dのS2) のピークよりも先行して到達することが確認できる.

図12a) S1-S2に沿った平均水位 (黒) と上川沿観測所 (赤) の時刻列, b) 流量の時系列: FAT (黒), HQ (赤), 流速計 (青), HADCP (緑), STIV (茶), c) エラー割合 (不確実性) の時刻列, d) S1-S2に沿った伝搬時間の時刻列, e) S1-S2に沿った水面勾配 (赤), S2-S3に沿った水面勾配 (黒), データが疑わしい期間はピンク色で網掛けされている.

本研究では, 同時期に5種類の独立した観測記録, すなわちFAT (河川音響トモグラフィシステム), HQ (水位流量曲線), H-ADCP (Horizontal Doppler Acoustic Profiler), 流速計, STIV (Space-Time Image Velocimetry) を用いて観測を行いました. 図11bは長期の観測期間を示していますが, セグメント分割を行い, 各記録間の差異を局所的に調べることで示唆が得られると考えられます. 従って, 図 (12, 13, 14) は, 検討対象とした各ケースについて, 主要な観測ダイナミクスを明らかにしています. すなわち, 各図は, a) 水位, b) 流量, c) 誤差率, d) 伝搬時間, e) 水面勾配の時間変化を示しています. 水位の変化は, S1とS2で観測された平均水位を計算し, その後, 上川沿の観測所で測定された水位データと比較して算出された. また, S1-S2間の水面勾配 (WS_{S1-S2}) とS2-S3間の勾配 (WS_{S2-S3}) は, 式 (4)

と式 (5) を用いて推定された。さらに、本研究で式 (6) を用いて推定されたエラー割合 (EP), 計算された。

$$WS_{S1-S2} = \frac{WL_{S1} - WL_{S2}}{L_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$WS_{S2-S3} = \frac{WL_{S2} - WL_{S3}}{L_2} \times 100\% \quad (5)$$

$$EP(\%) = \frac{Q_{FAT} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \times 100\% \quad (6)$$

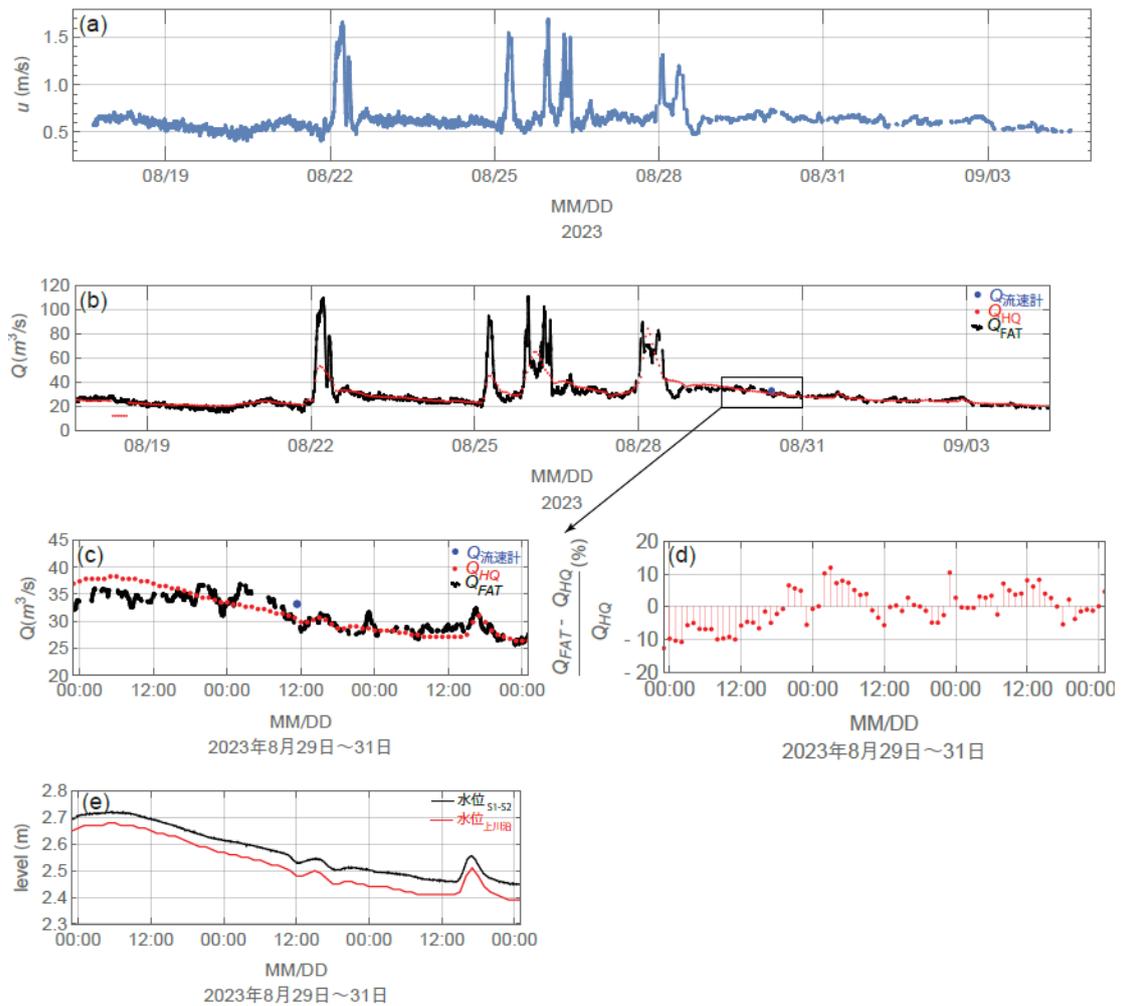


図7 a) S1-S2に沿った平均断面流速の時系列, b) 流量時系列: FAT (黒), HQ (赤), 流速計 (青), c) 流量の時刻列の詳細なウィンドウ, d) FATとHQ間のエラーの割合, e) S1-S2に沿った平均水位 (黒) と上川沿観測所 (赤) の時刻列

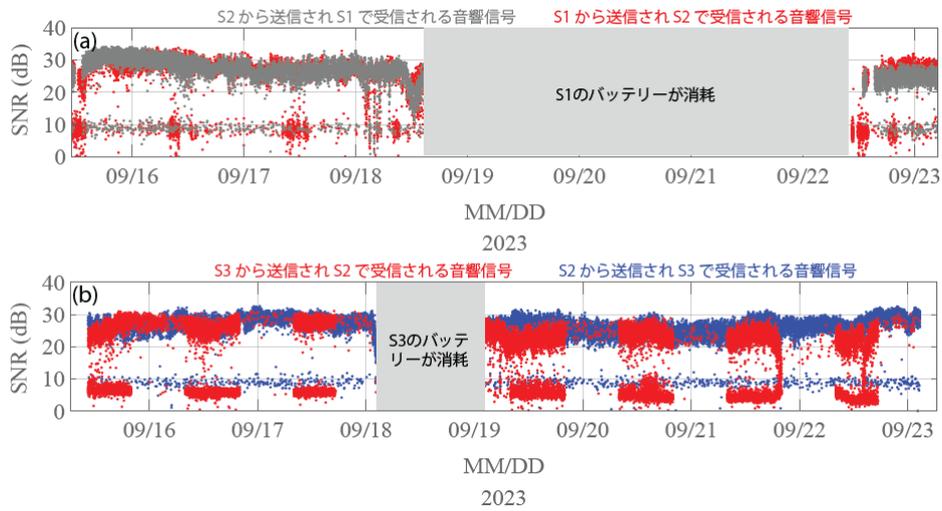


図8 a) 第2回目のモニタリング期間中のSNRデータの時系列：a) S1とS2の間の断面，b) S2とS3の間の断面

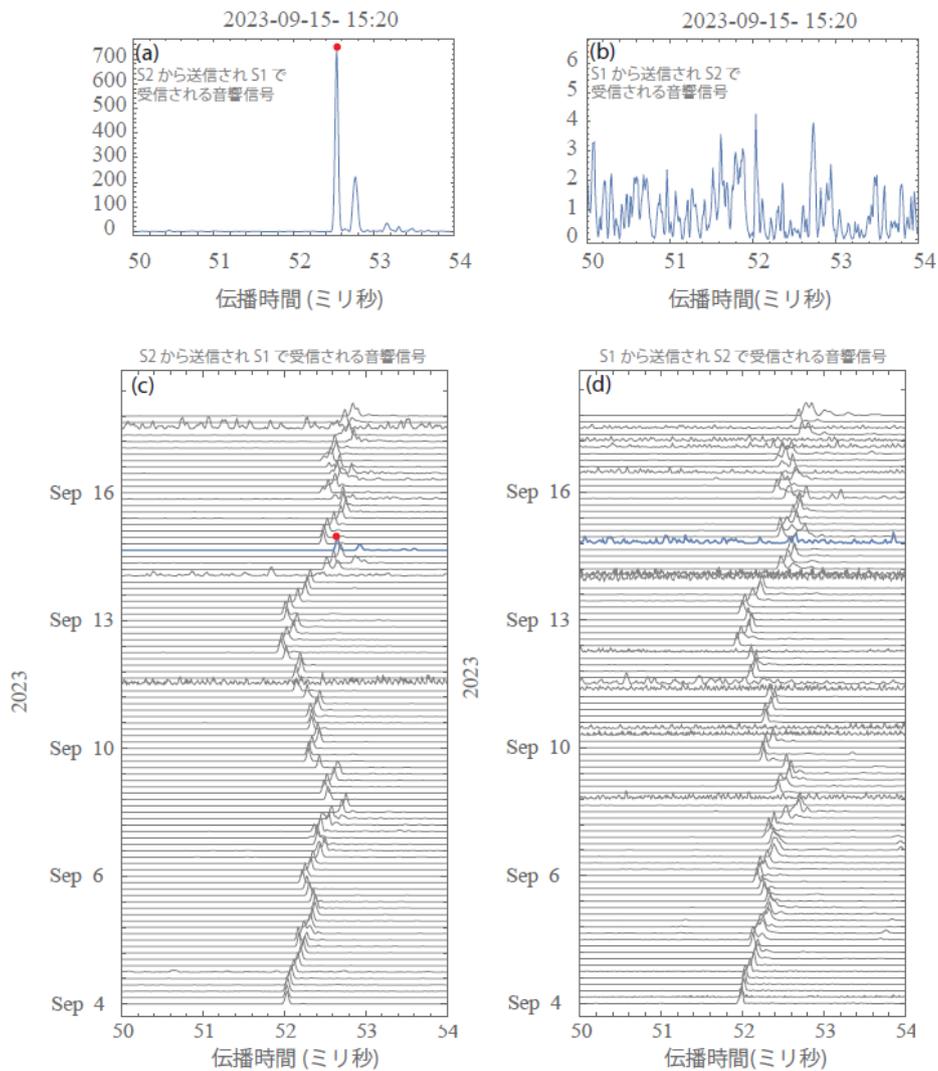


図9 a) とb) 発信信号の例，c) 下流点S2から上流点S1へ発信された相関信号と，d) 上流点S1から下流点S2へ発信された相関信号の重ね合わせプロット

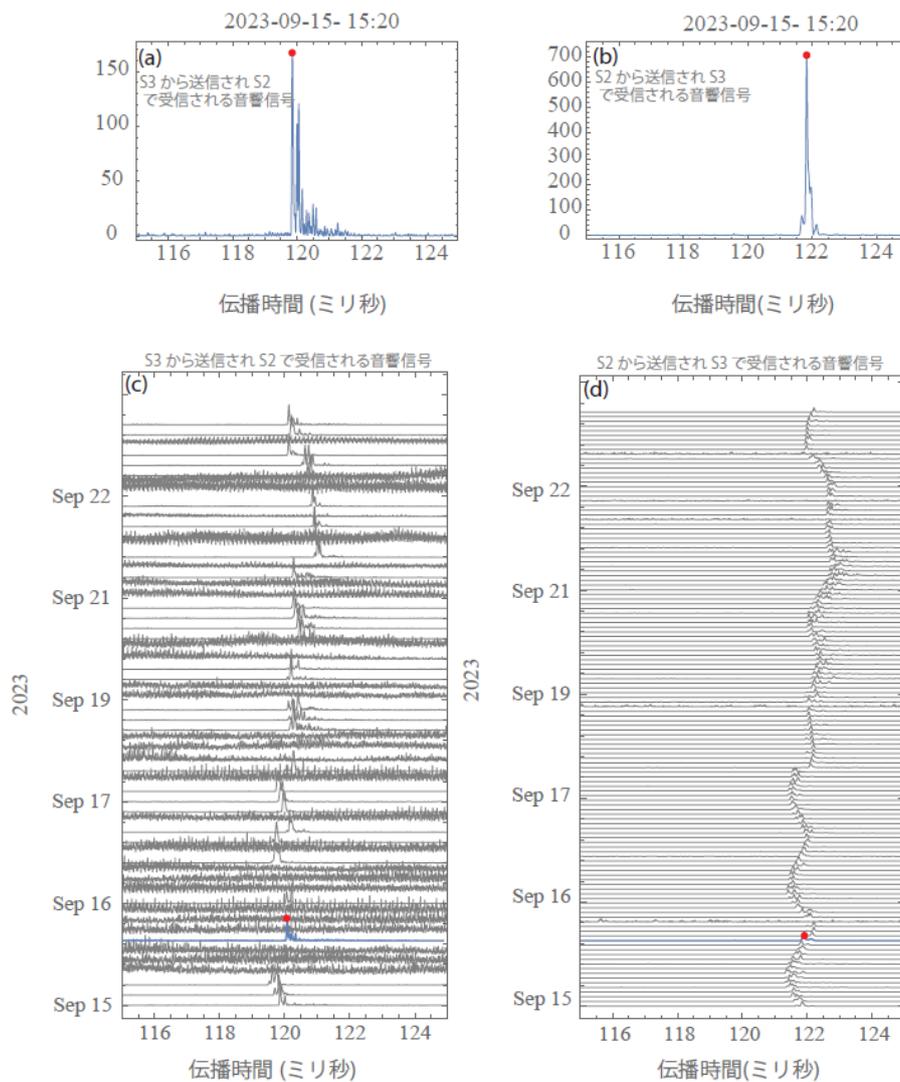


図10 a) とb) 発信信号の例, c) 下流点S3から上流点S2へ発信された相関信号 と, d) 上流点S2から下流点S3へ発信された相関信号の重ね合わせプロット

ここで、 WL_{S1} と WL_{S2} 、それぞれのS1とS2の水位観測値を表します。同様に、S1-S2間の斜距離を L_1 、S2-S3間の斜距離を L_2 で表します。また、 Q_{obs} は測定された流量値（HQ、HADCP、STIVいずれか）を示します。

FATシステムで観測された流量データの異常を理解するために、それに伴う伝搬時間の時刻列を提示することが不可欠でした。解析結果に入る前に、観測対象の水位は2.2mから5.5mの範囲にあったことに留意されたい。一方で、流量は20m³/sからおよそ250m³/sまで変動していた。さらに、水位が2.7mを超えるとHADCPによる流量測定が行われ、同様に、4mを超えるとSTIVカメラによる流量測定が行われた。

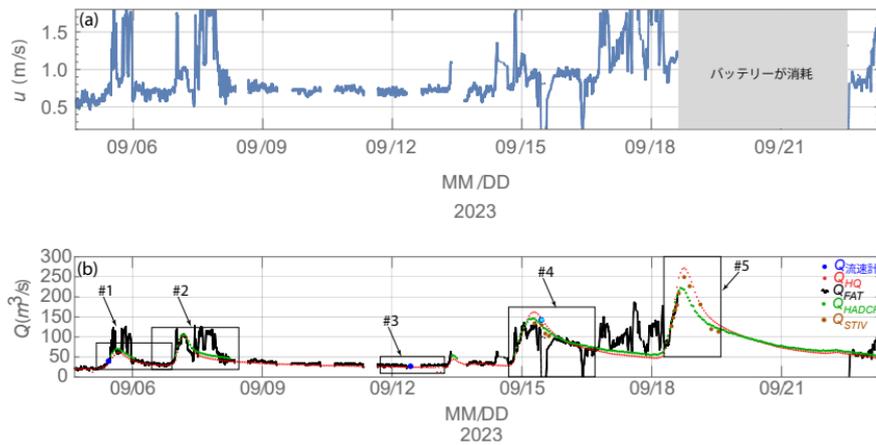


図11 a) S1-S2 に沿った平均断面流速の時系列, b) 流量の時系列 : FAT (黒), HQ (赤), 流速計 (青), HADCP (緑), STIV (茶)

図12のように、Case#1の場合、水位が1m上昇し、Case#2では約1.5mが上昇した。しかしながら、FATシステムでは一部の期間において流量の完全な取得ができなかった。これは、伝搬時間が完全に整合していなかったことが原因と考えられる。一方で、信頼できる記録期間におけるFATとHADCP/HQとの比較で15%のばらつきが示されており、FATによる流量測定の可能性が示唆されたことは肯定的材料である。

より高強度事象を詳細に検討すると、Case#4では最高水位は4.9m、Case#5では5.53mに達することが明らかになった。さらに重要と思われるのは、FATシステムで得られた流量値は、他の測定手法 (HADCP, STIV, HQ) と良好な一致を示した点である。特に、Case#5で示された高流量時におけるFATとSTIVの比較において、両手法間の誤差率は10%を超えなかったことが明瞭に示された。

最終のモニタリングキャンペーンは、9月27日から10月初旬にかけて実施されました。このキャンペーンの目的は、この複雑な海底地形下での音響通信の改善可能性を検証し、別のタイプの音響変換器を使用して正確な流量記録を提供することでした (表1)。

図15は、伝搬時間、断面平均流速、流量の時系列データを示している。FATシステムで計測された流量性能の詳細については、図16で確認できる。なお、FATとHADCPの誤差率は20%以内に留まることも引き続き確認された。ただし、10月以降はクマの足跡による被害のため、FATシステムによる連続観測が完了しなかった。

前述のように、第2回モニタリングキャンペーンにおいては、S1-S2とS2-S3で連続的に流量を測定しました。図10 (a, b) に示したように、S2で測定されたピークとS3で測定されたピークとの差は2ミリ秒と推定され、下流側の観測点 (S3) でのピークが上流側の観測点 (S2) でのピークよりも早く到達したことが示唆されています。すなわち、図17 (a, b, c) に示すように、これらの伝搬時間の時系列をプロットすると、下流側の観測点 (S3) から上流側の観測点 (S2) へのすべての伝搬時間が、上流側から下流側への伝搬時間よりも早く到達していることがわかる。したがって、この場合の時間差 (Δt) は負の値となり (図17d), 従って、S2-S3区間における断面平均流速は必然的に負の値となる (図17e) が、これは現在の観測地点の場合には妥当ではない。

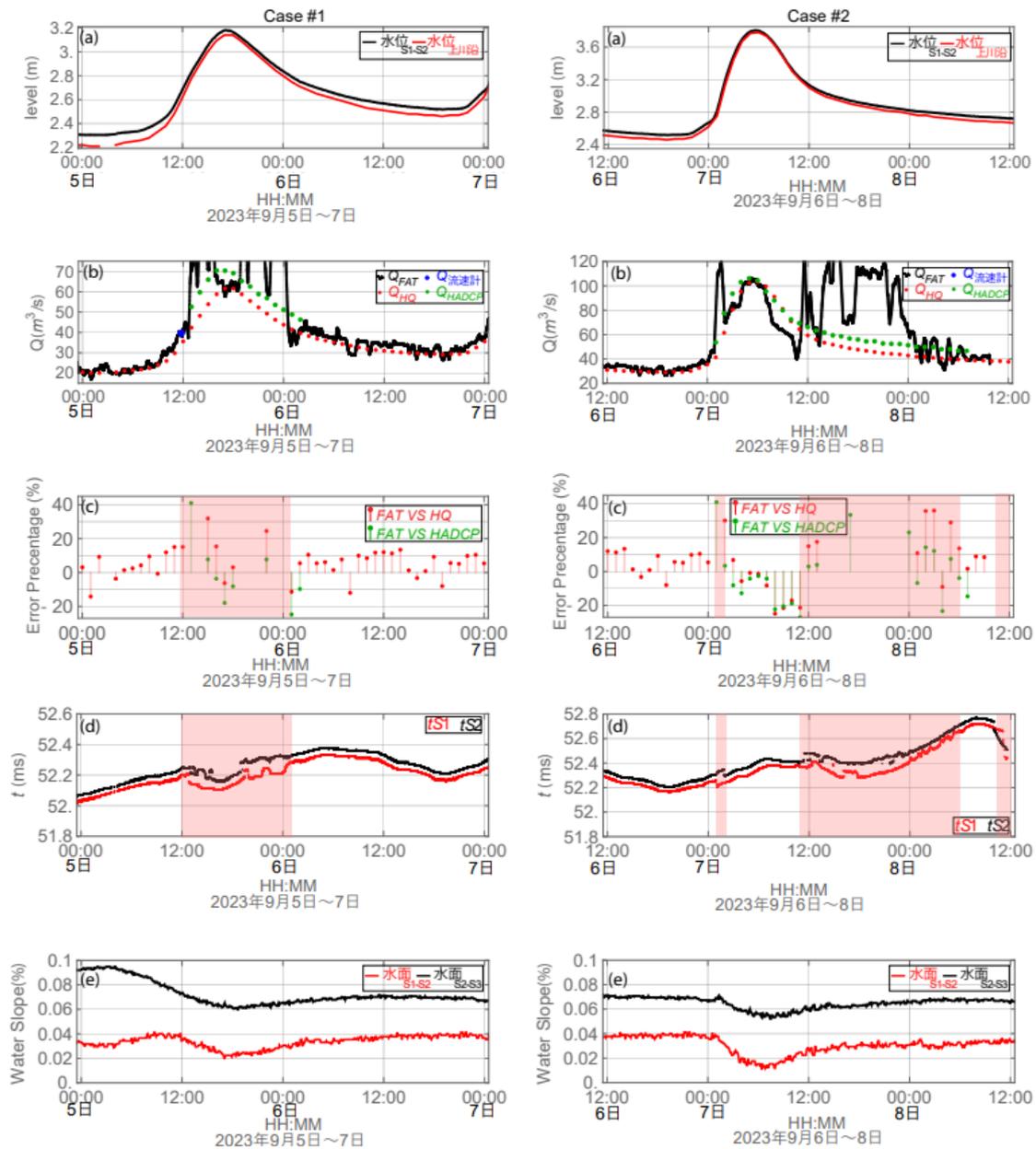


図12 a) S1-S2に沿った平均水位（黒）と上川沿観測所（赤）の時刻列, b) 流量の時系列：FAT（黒）、HQ（赤）、流速計（青）、HADCP（緑）、STIV（茶）、c) エラー割合（不確実性）の時刻列, d) S1-S2に沿った伝搬時間の時刻列, e) S1-S2に沿った水面勾配（赤）、S2-S3に沿った水面勾配（黒）、データが疑わしい期間はピンク色で網掛けされている

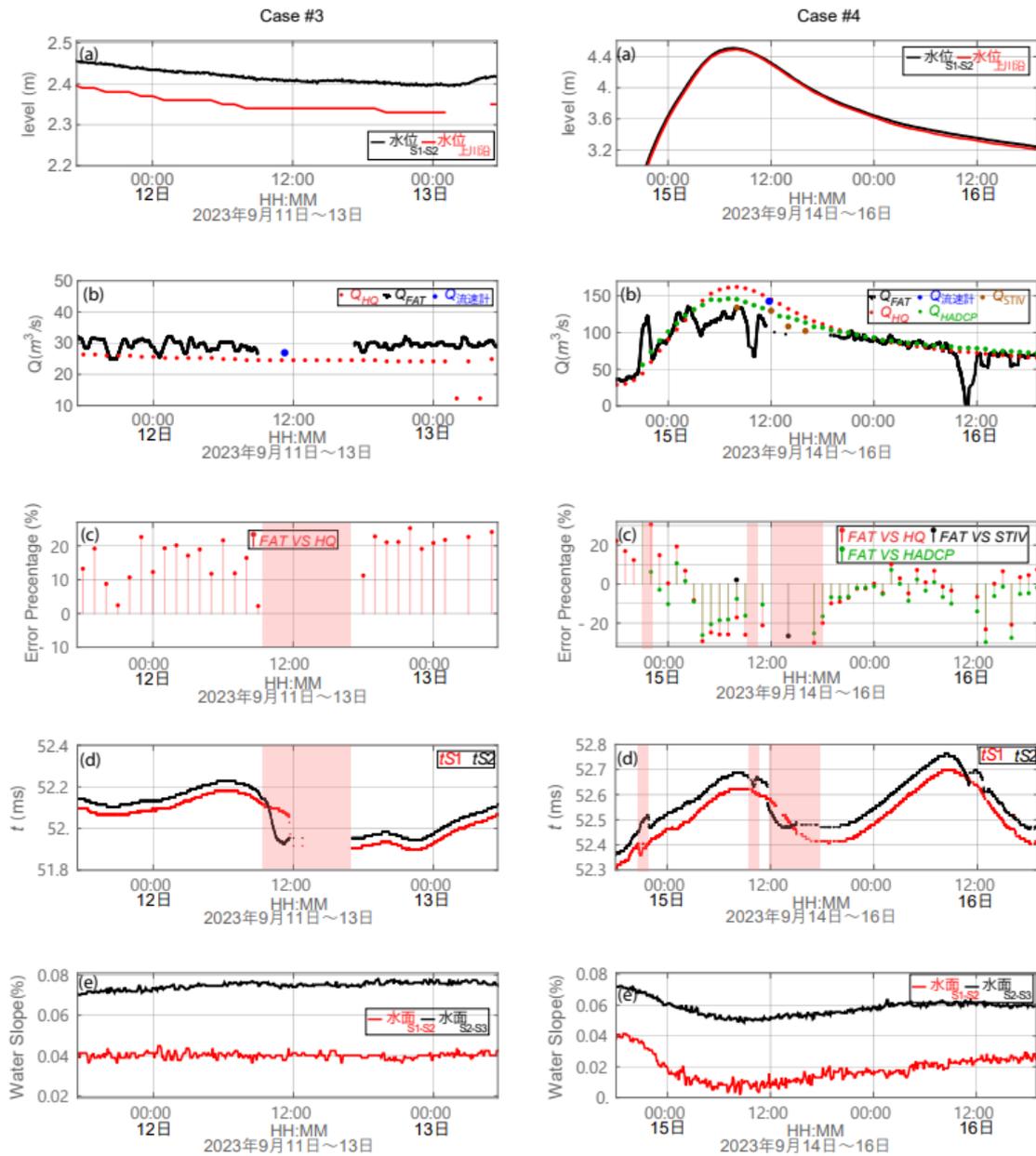


図13 a) S1-S2に沿った平均水位（黒）と上川沿観測所（赤）の時刻列, b) 流量の時系列：FAT（黒）、HQ（赤）、流速計（青）、HADCP（緑）、STIV（茶）、c) エラー割合（不確実性）の時刻列, d) S1-S2に沿った伝搬時間の時刻列, e) S1-S2に沿った水面勾配（赤）、S2-S3に沿った水面勾配（黒）、データが疑わしい期間はピンク色で網掛けされている

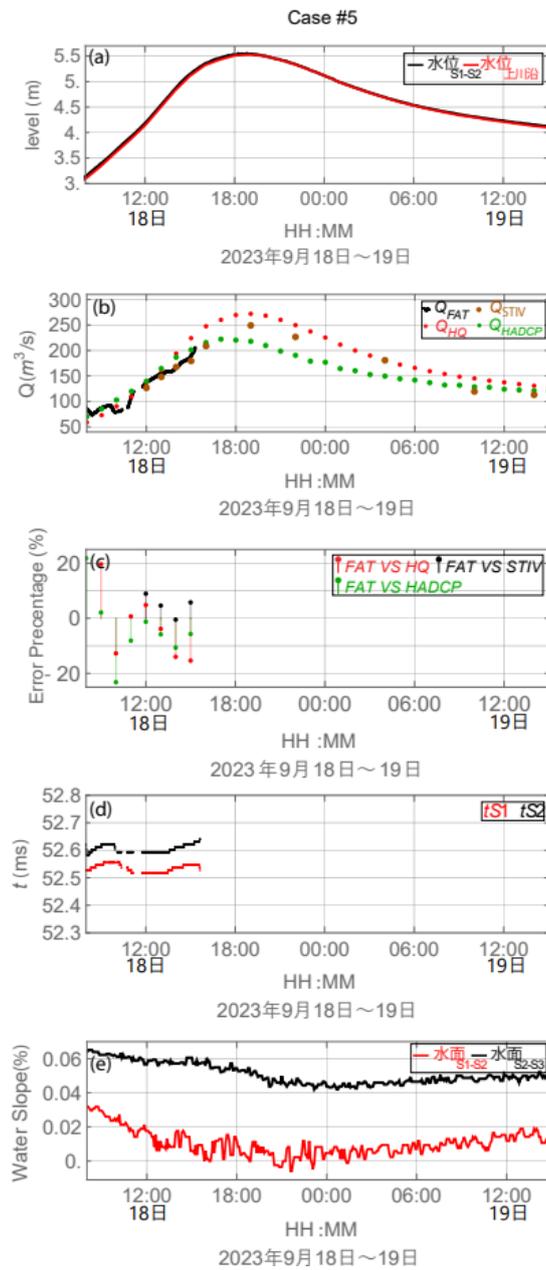


図14 a) S1-S2に沿った平均水位（黒）と上川沿観測所（赤）の時刻列, b) 流量の時系列：FAT（黒）、HQ（赤）、流速計（青）、HADCP（緑）、STIV（茶）、c) エラー割合（不確実性）の時刻列、d) S1-S2に沿った伝搬時間の時刻列、e) S1-S2に沿った水面勾配（赤）、S2-S3に沿った水面勾配（黒）

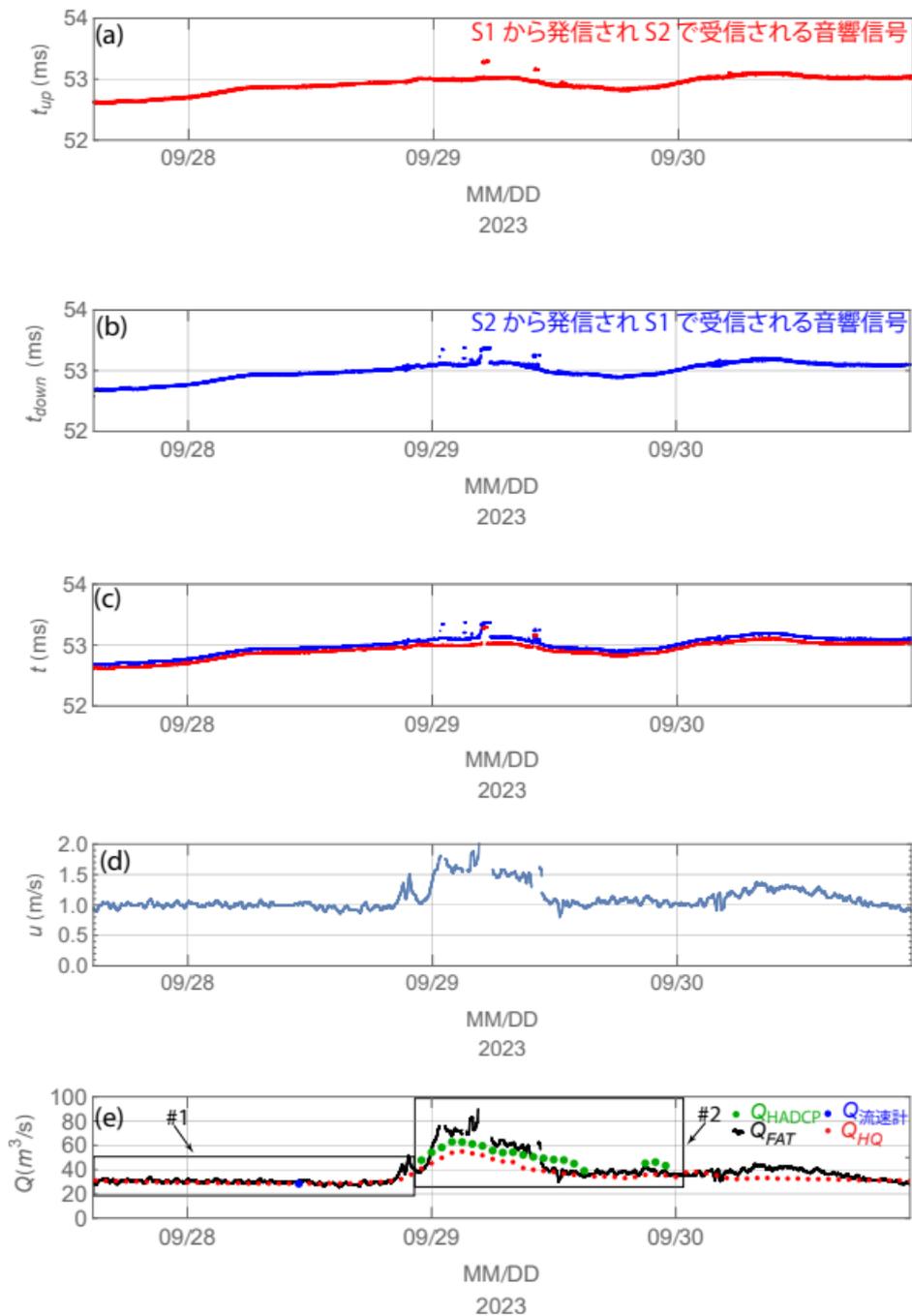


図15 a) S1から信号を発信し，S2で受信した信号の伝搬時間の時系列，b) S2から信号を発信し，S1で受信した信号の伝搬時間の時系列，c) (a)と(b)の組み合わせプロット，d) S1-S2に沿った平均断面流速の時系列，e) 流量の時系列：FAT(黒)，HQ(赤)，流速計(青)，HADCP(緑)

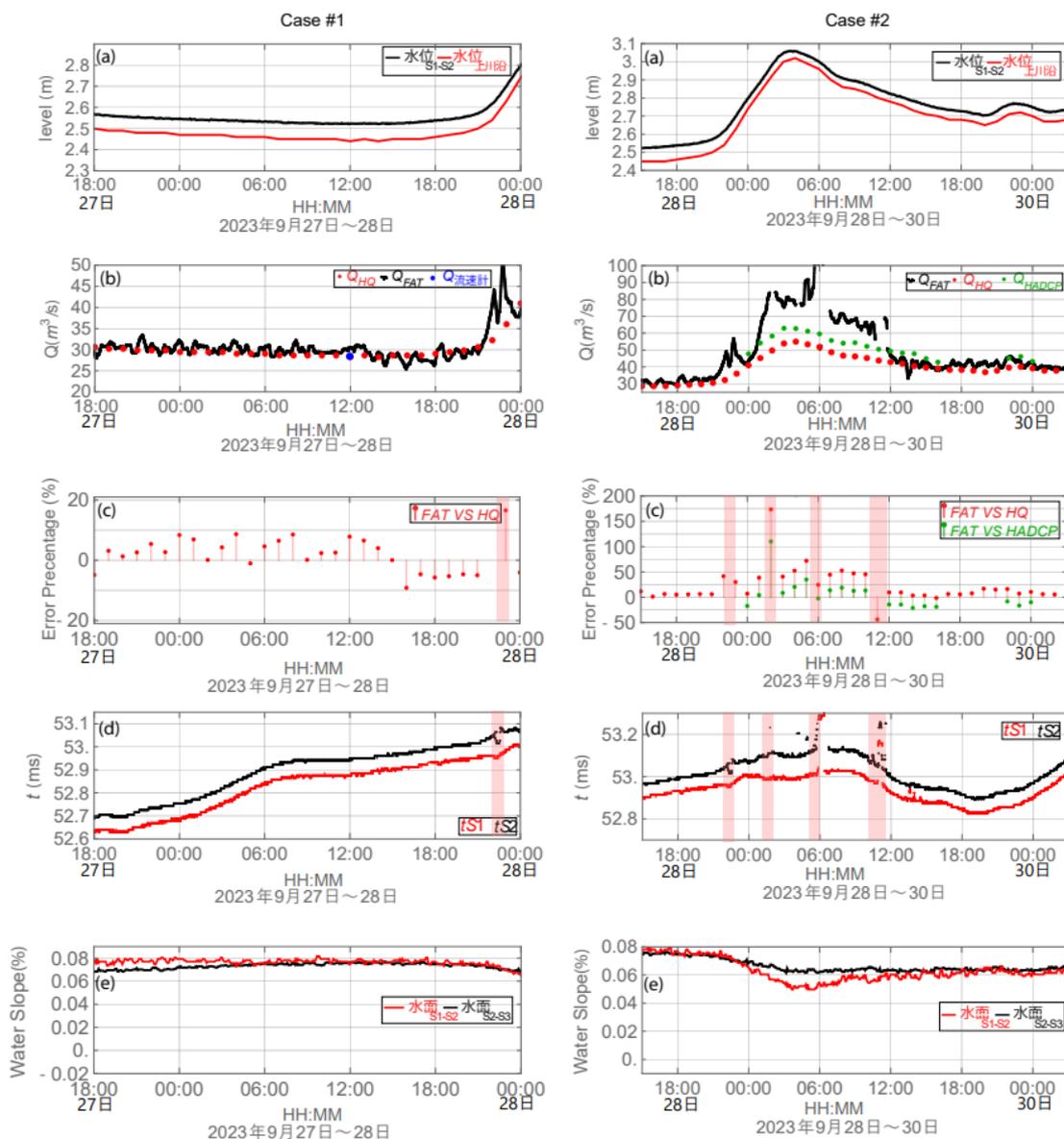


図16 a) S1-S2に沿った平均水位（黒）と上川沿観測所（赤）の時刻列, b) 流量の時系列：FAT（黒）、HQ（赤）、流速計（青）、HADCP（緑）、STIV（茶）、c) エラーの割合（不確実性）の時刻列, d) S1-S2に沿った伝搬時間の時刻列, e) S1-S2に沿った水面勾配（赤）、S2-S3に沿った水面勾配（黒）、データが疑わしい期間はピンク色で網掛けされている

6. 議論

これまでのFATシステムを用いたモニタリングプロジェクトでは、30kHz全方位広帯域トランスデューサーが使用されてきました。しかし、2017年以降、FATシステムの新世代が開発され、58kHz全方位広帯域トランスデューサーで動作するように改良され、現在調査が進められています。高周波数を使用する主な目的は、基本的に浅く狭い河川においてより高分解能の測定を可能にすることでした⁵⁾。

今回の観測の技術的側面に関する主要な質問は、特定の送信周波数を選択するために用いられる基準は何であるかということです。この質問に答えるために、図18は、送信周波数と送受信機間の音波路長を関数とした速度分解能曲線を示しています。高周波数、すなわち54~58kHz（青色ドットで示す）で得られる速度分解能は、同じS1、S2、S3間の距離を使用したとしても、従来の30kHz版のFATシステムで得られる速度分解能よりも優れていることがわかります。さらに、今回の観測では、使用するトランスデューサーの順序を特定する特別な理由はありませんでした。したがって、どの順序でも同じ結果が得られることが予想される。

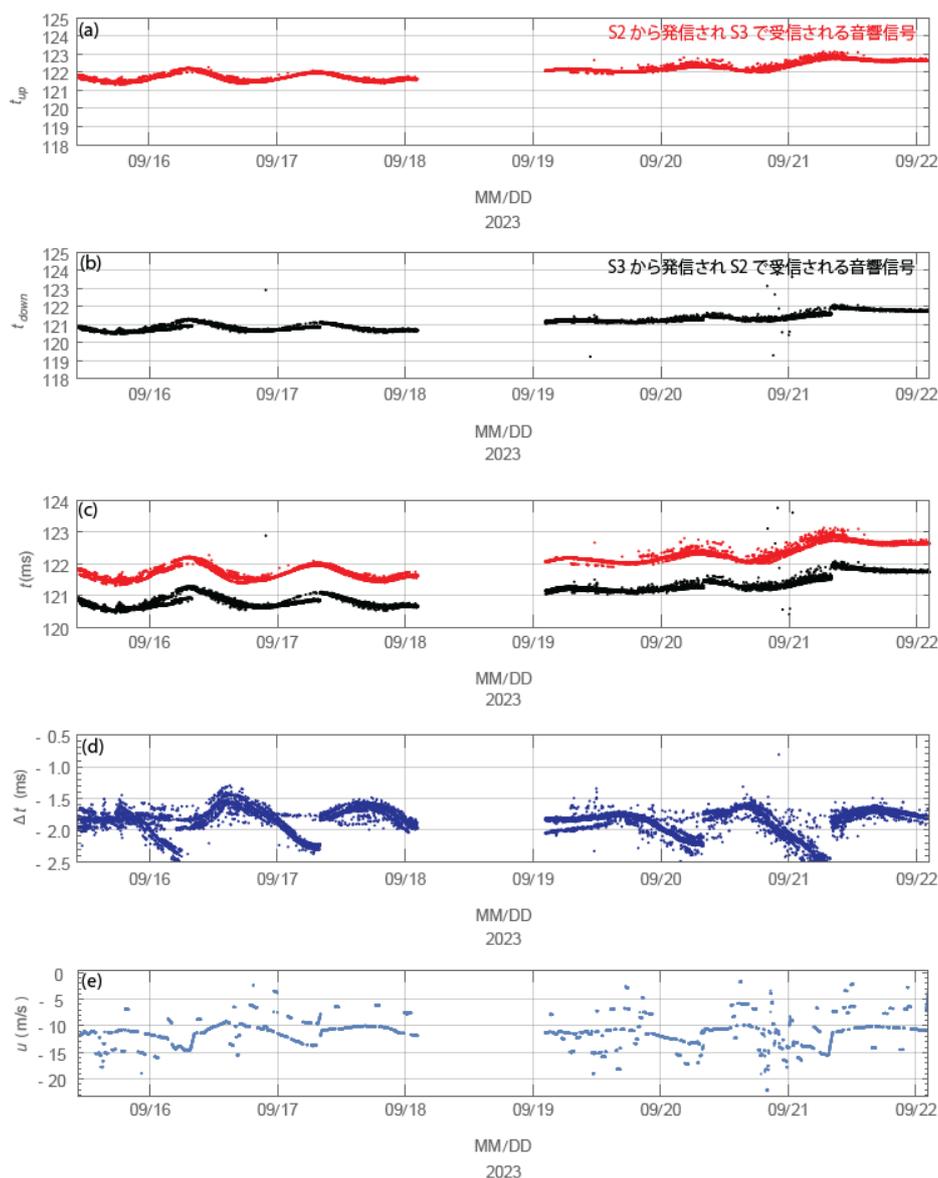


図17 a) S2から信号を発信し、S3で受信した信号の伝搬時間の時系列、b) S3から信号を発信し、S2で受信した信号の伝搬時間の時系列、c) (a) と (b) の組み合わせプロット、d) 時差時系列、e) S2-S3に沿った平均断面流速の時系列

河川工学的観点から見ると、2種類の異なる水中音響トランスデューサー間の相互伝達は、必ずしも特定の重要性を意味するものではないかもしれませんが、今回の観測の技術的目的の一つは、上記のような異なるタイプのトランスデューサーを使用した相互伝達が達成できるかどうかを検証することでした。もう一つの重要な点として、技術（機器）の理論設計は、場合によっては実用（実際）設計とは一致しない可能性があるということです。したがって、望ましい性能を最大限に発揮するために、継続的な改良が検討されている。

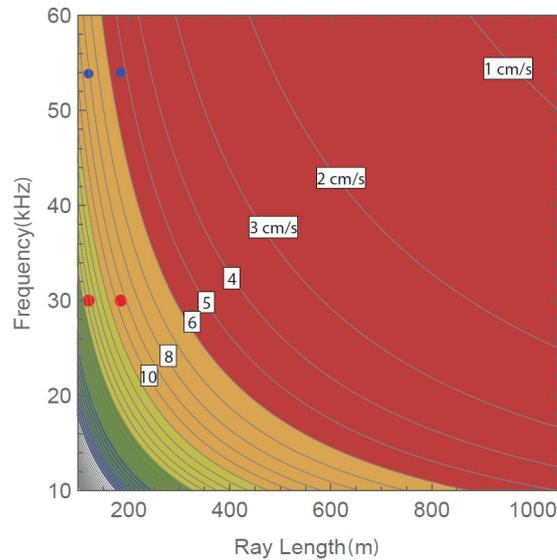


図18 観測設定に応じた FATシステム の速度分解能曲線

本研究プログラムにおける重要な課題の一つとして、FATシステムによる計測精度を上げることができる（提起することができる）。この問いを包括的に答えるためには、S1-S2とS2-S3で得られた計測値を別々に検討することが重要である。まず、S1-S2区間の観測結果は、他の手法と比較して良好な性能を示した。すなわち、FATシステムで推定された流量は、HADCP、STIV、および流速計で得られた他の流量記録とほぼ一致していた。さらに重要なことは、FATによる流量推定値と他の手法との推定値のパーセンテージ誤差が非常に近似していたことであり、この結果は、トモグラフィ計測の性能を裏付けるものである。

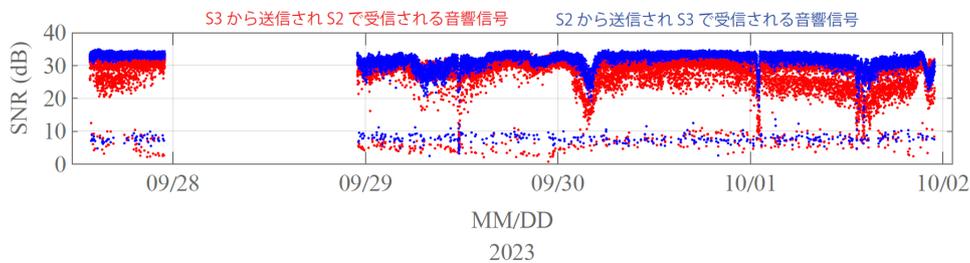


図19 第3回目のモニタリング期間中のSNRデータの時系列

しかしながら、低流量時においてはFATシステムによる計測に顕著な異常は見られなかったものの、図(12, 13, 14, 16)に示すように、いくつかの期間で不正確な計測値が得られたことも認める必要がある。ただし、FATは特定の水位に対して制限を示さなかったことに留意すべきである。むしろ、これらの図から明らかなように、主な原因は記録された伝搬時間のばらつきにあった。伝搬時間のばらつきに関しては、浅い河川では屈折、後方散乱、底減衰、および反響などのさまざまな要因も考慮する必要がある。さらに、非常に小さな到達時間差を考慮に入れるため、ミリ秒レベルの精度を達成することが不可欠である。

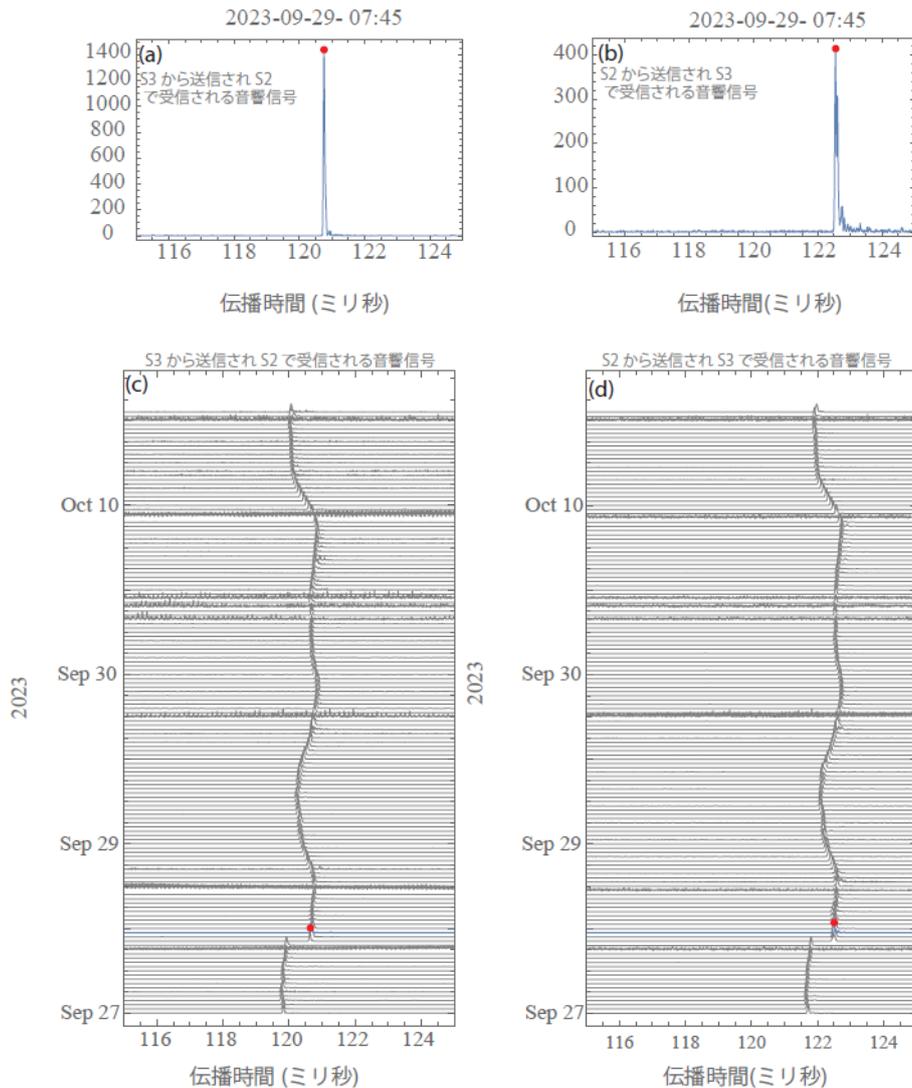


図20 a) と b) 発信信号の例, c) 下流点S3から上流点S2へ発信された相関信号と, d) 上流点S2から下流点S3へ発信された相関信号の重ね合わせプロット

第2回目では、S2-S3間の測定において、図17dのように全期間を通じて伝達時間の差が約-2ミリ秒と観測されたため、式(2)に基づく断面積平均流速は負の値となった。この時間差は、製造されたGPSクロックの問題もしくはシステム自体に問題が起因していると考えられた。そのため、S3で使用されていたシステムをS1へ、S1のシステムをS3へ移動させた。移動後、S2-S3間のSNR強度が改善されたにも関わらず(図19)、図20および図21のように同様の現象が発生したため、システムクロックに問題は無かったと考えられる。したがって、負の流速が発生した原因が問われる。原因は現在も調査中であり、簡潔に説明することはできないが、S3の設置場所は図1bのように側水路に非常に近接しており、この現象を引き起こす局所的な横流が発生している可能性がある。もう一つの可能性として、主要な水路(すなわち、S2-S3間の伝送経路全体)に沿って半埋没した残骸(主に樹木)が存在し、これらのシステム間の相互伝達を妨げていることが考えられる。したがって、この問題を解明するためには更なる調査が必要である。いずれにせよ、S3の設置場所が選択されたのは、隣接するHADCPシステムとSTIVカメラの存在、および十分な太陽光発電を可能にするオープンスペースの存在によるものであり、メンテナンス作業の軽減にもつながる利点があったことを付記しておく。

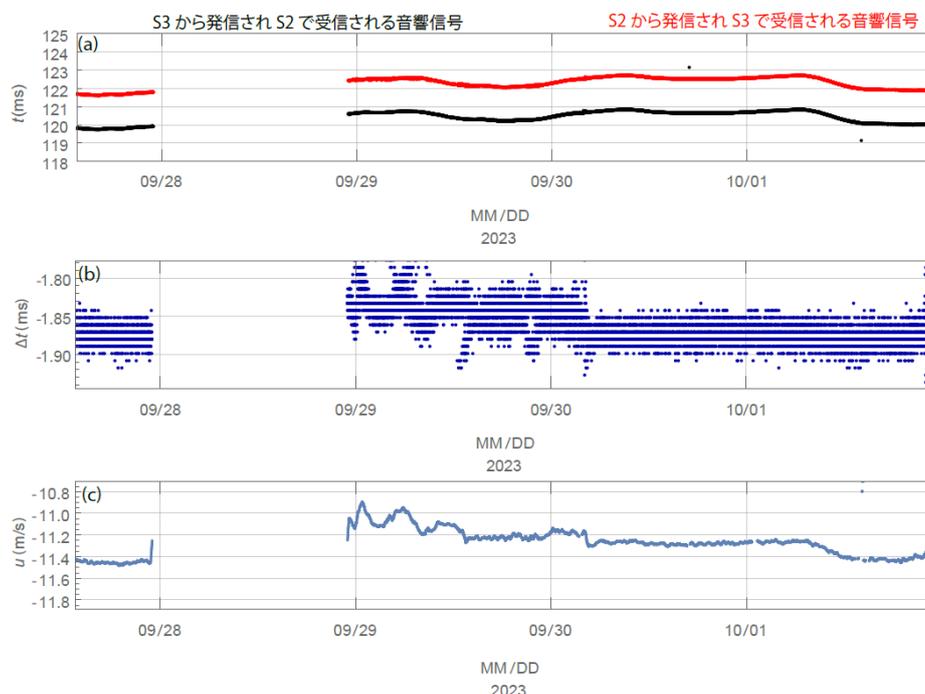


図21 a) 伝搬時間の時系列, b) 時差時系列, c) S2-S3に沿った平均断面流速の時系列

7. まとめ

本研究は、複雑な河床形状を持つ常呂川において、高精度な流量観測の可能性を明らかにすることを目的としています。基本的には、新しいトモグラフィック手法であるFATシステムと呼ばれる手法で流量を継続的に測定し、他の独立した手法と比較しました。結果は、これらの手法との良好な一致が見られ、この技術の可能性を示唆しています。しかし、右岸が音響信号の正確な伝達を制限しているようで、慎重に検討・調査する必要があります。

8. 謝辞

本研究は、国土交通省北海道開発局 網走開発建設部、及び北開水工コンサルタント株式会社のご協力により実施することができました。調査にご携わられたすべての方々に感謝申し上げますとともに、今後の関連調査や河川整備のさまざまな側面に関する調査においても引き続きご協力を賜りますようお願い申し上げます。

また、北見工業大学渡邊康玄教授にはご意見・ご指導をいただき、広島大学川西澄教授・江田憲彰先生には河川音響トモグラフィシステム測定の改善に関する技術的な支援・ご指導を賜りました。

参考文献

- 1) Rantz, S. E.: Measurement and Computation of Streamflow Vol. 1 - Meas. Stage Discharge, USGS Water Supply Pap. 2175, 1982
- 2) Levesque, V. A., and Oberg, K. A.: Computing Discharge Using the Index Velocity Method, 2012
- 3) Kawanisi, K., Bahreinimotlagh, M., Al Sawaf, M. B., and Razaz, M., : High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using shallow-water acoustic tomography Hydrol. Process. 30 2247-54, 2016
- 4) Williams, R. D., Rennie, C. D., Brasington, J., Hicks, D. M., and Vericat, D.: Linking the spatial distribution of bed load transport to morphological change during high-flow events in a shallow braided river

J. Geophys. Res. Earth Surf. 120 604-22, 2015

- 5) Al Sawaf, M. B., Kawanisi, K., Xiao, C., Gusti, G. N. N., and Khadami, F.: Monitoring Inflow Dynamics in a Multipurpose Dam Based on Travel-time Principle Water Resour. Manag. 36 2589-610, 2022
- 6) Al Sawaf, M. B., Kawanisi, K., Gusti, G. N. N., Khadami, F., Xiao, C., and Bahreinimotlagh, M.: Continuous measurement of flow direction and streamflow based on travel time principles using a triangular distribution of acoustic tomography systems J. Hydrol. 617 128917, 2023
- 7) Danial, M. M., Kawanisi, K., and Al Sawaf, M. B.: Characteristics of tidal discharge and phase difference at a tidal channel junction investigated using the fluvial acoustic tomography system Water (Switzerland) 11 857, 2019
- 8) Khadami, F., Kawanisi, K., Al Sawaf, M. B., Gusti, G. N. N. and Xiao, C.: Spatiotemporal Response of Currents and Mixing to the Interaction of Tides and River Runoff in a Mesotidal Estuary Ocean Sci. J. 57 37-51, 2022
- 9) Al Sawaf, M. B., and Kawanisi, K.: Novel high-frequency acoustic monitoring of streamflow-turbidity dynamics in a gravel-bed river during artificial dam flush CATENA 172 738-52, 2019
- 10) Xiao, C., Kawanisi, K., Torigoe, R., and Al Sawaf, M. B.: Mapping tidal current and salinity at a shallow tidal channel junction using the fluvial acoustic tomography system Estuar. Coast. Shelf Sci. 258 107440, 2021
- 11) Al Sawaf, M. B., Kawanisi, K., and Xiao, C.: Measuring Low Flowrates of a Shallow Mountainous River Within Restricted Site Conditions and the Characteristics of Acoustic Arrival Times Within Low Flows Water Resour. Manag. 34 3059-78, 2020
- 12) Thorne, R. E.: Review: Experiences with shallow water acoustics Fish. Res, 1998
- 13) Razaz, M., Kawanisi, K., Kaneko, A. and Nistor, I.: Application of acoustic tomography to reconstruct the horizontal flow velocity field in a shallow river Water Resour. Res. 51 9665-78, 2015
- 14) Muto, Y., Noda, K., Maruya, Y., Chibana, T., and Watanabe, S.: Impact of climate and land-use changes on the water and sediment dynamics of the Tokoro River Basin, Japan Environ. Adv. 7 100153, 2022