

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

金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 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

アルサワフ モハマドバセル¹

MohamadBasel ALSAWAF

¹ 金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 助教

要 旨

河川工学設計において、河川流量記録の継続的かつ正確な計測は、最も重要な応用の一つである。近年の流速計測手法の進歩は、河川流量計測の信頼性と精度を飛躍的に向上させている。本研究では、常呂川における河川流量の長期観測を実施した。主要な目的は、極めて浅く狭い泥質河川における河川流量計測に対する河川音響トモグラフィーシステム（FAT）の適用可能性を検討することである。取得されたデータは、以下の三つの観点から詳細に分析された。第一に、音響トモグラフィーを用いた高度な観測スキームを実施された。第二に、複数の独立した流れ場データセットを用いた検証を行われた。第三に、二重音響周波数を用いて測定された。高度なモニタリング能力における新たな成果として、極めて浅い水深条件下での観測が記録された。すなわち、FATによる測定は可能であったものの、測定断面における最小水深は9cm以上である必要性が示された。さらに、FATシステムは高水位時における流況のモニタリング能力も実証した。さらに、複数の独立した流量測定記録を用いることで、FATシステムによって測定された流量は、HADCPやSTIVといった高度な測定手法によって取得された記録と極めて良好な一致を示すことが証明された。また、その不確実性の範囲は非常に小さく、測定の信頼性が高いことが示唆された。さらに、高伝送周波数を用いることで、より短い波長が得られ、空間分解能および速度分解能の向上が可能となり、結果として望ましい測定精度が達成されることが判明した。しかしながら、高濃度の懸濁粒子が存在する環境下では、測定精度が著しく低下する傾向が見られた。対照的に、低伝送周波数を用いる場合は、より長い波長が得られるため、微細な変動に対する感度が低下し、測定精度が不十分となる可能性がある。しかしながら、高濃度の懸濁物質が移動する状況下においても測定が実施可能であるという利点が認められた。最終的に、伝播時間の原理に基づき、3つの水中音響システムをジグザグ状に設置することによる流向推定に関する知見を提供した。

《キーワード：常呂川；流量；流速；音響トモグラフィー；河床；流れ方向》

1. はじめに

日本列島の他地域と比較して、北海道オホーツク地域は亜寒帯性気候を呈し、寒冷な冬季が長く、冷涼な夏季が短いという特徴を持つ。この気候特性は、特異な水文現象を形成する要因となる。気象庁の資料によれば、オホーツク地域は全国的に降水量が少ない地域として知られている。しかしながら、同地域は洪水災害から免れるわけではない。例えば、2016年には、一週間に三つの台風が連続して発生し、長期間にわたり中程度の降雨から激しい降雨が引き起こされ、記録的な洪水が発生した¹⁾。この事例は、降水量が少ない地域であっても、特定の気象条件下では大規模な洪水が発生しうることを示唆している。承前を踏まえれば、寒冷気候地域においても、河川流量動態の正確かつ高度なモニタリングは、重要な課題である。

しかしながら、オホーツク地域の河川流域は依然として原生状態に近く、人為的な影響をほとんど受けていない。さらに、同地域の河川の大部分は、浅く狭い河道によって特徴づけられる。基本的に、同地域における流量測定は、伝統的な手法である水位流量曲線 (Rating Curves: RC) 法を用いて推定されている。すなわち、この手法は水位 (H) と河川流量 (Q) との間に存在する関係性に基づいているため、一部の文献では ($H-Q$) 法とも称される。しかしながら、RC法による流量測定は、信頼性の高い推定値を提供するために二つの主要な課題を抱えている。第一に、北海道における凍結期は、例年12月下旬から4月上旬にかけて発生し、年間約100日間継続する。他の季節とは異なり、凍結期における水位と河川流量の関係は特異である。これは、水位の時間変動が、河床高、有効水深、河水の喫水深という3つの主要な項の関数として表されるためである²⁾。したがって、通年で使用可能な単一のRC式、あるいは複数のRC式を開発することは、経験的パラメータが連続的に変化するため、長期的に見て実用的ではないと考えられる。第二に、温暖な気象条件下においては、低流量時の河川流量は安定しており、したがってRC法の適用は妥当である。しかしながら、当該地域は季節的な台風や熱帯低気圧による洪水の影響を受けやすいことを考慮する必要がある。高流量条件の場合、これは重要な調査対象であるが、RCによる流量評価は多くの場合において疑問視され、信頼性に欠ける³⁻⁶⁾。したがって、RC以外の信頼性の高い流量計測手法を用いることが極めて重要である。

地域における河川流量計測精度の向上と長期流量変動評価を目的として、常呂川において北開水工コンサルタント株式会社による長期観測プログラムが開始された。初期段階では、先進的な二つの手法を用いた連続流量計測が実施された。すなわち、i) 水平型音響ドップラーレンズ (HADCP)、および ii) 赤外線カメラを用いた時空間画像流速計測法 (STIV) である。しかしながら、HADCP、STIV、および既設の流量観測施設 (RC) により取得された記録の間には顕著な差異が認められた。そこで、2023年以降、独立した計測記録を提供することを目的として、水中音響トモグラフィーシステム (FAT) が観測地点に設置された。FATシステムによる初期計測結果は良好であったものの、画期的な知見を得るには至っていない。

河川流量計測手法に関する研究は数多く存在し、各計測手法の長所と短所を個別に議論した文献は枚挙にいとまがない⁷⁻¹³⁾。しかしながら、各流量計測手法は固有の能力を有すると同時に、特定の状況下では回避不能な欠点も持ち合わせている点を留意すべきである。特に、計測地点の地形的特徴や制約条件は、計測手法の選択と適用に大きな影響を与える。

常呂川における観測特性は、過去の実施例と比較して顕著な差異を示す。すなわち、本観測プログラムは、東アジアにおける最寒冷地域の一つにおいて、高濃度の土砂および流木を運搬する浅く狭い泥床河川を対象として実施された。土砂粒子の高濃度は、音響的手法を用いた流量観測の性能に重大な影響を及ぼす可能性があることから¹⁴⁾、音響的手法による計測能力の限界を考慮する必要がある。高濁度条件下における音響信号の強い減衰に関連する困難を克服し、より高精度な河川流量計測を提供するため、本観測プログラムの二年目において、FATシステムによる計測が、多様な配置における異なる音響周波

数を用いて実施された。

本研究は、オホーツク地域に位置する常呂川における現地観測プログラムを通じて、高精度な流量計測を実現するための可能性と課題を明らかにすることを目的とする。特に、河川流量の計測精度向上を主眼とし、低流量時、高流量時、および高濁度流量時における河川音響トモグラフィーシステム(Fluvial Acoustic Tomography System, 以下FATと略記する)を用いた計測結果に焦点を当てる。複数の設置方法を適用し、かつ複数周波数を用いることで、流量動態の連続的なモニタリングを試みた点が本研究の新規性である。したがって、本研究は、狭隘な河道条件下で高土砂負荷を伴う河川における音響モニタリングの挙動に関する知見の不足を補完することを目的とする。

2. 調査地域と観測設定

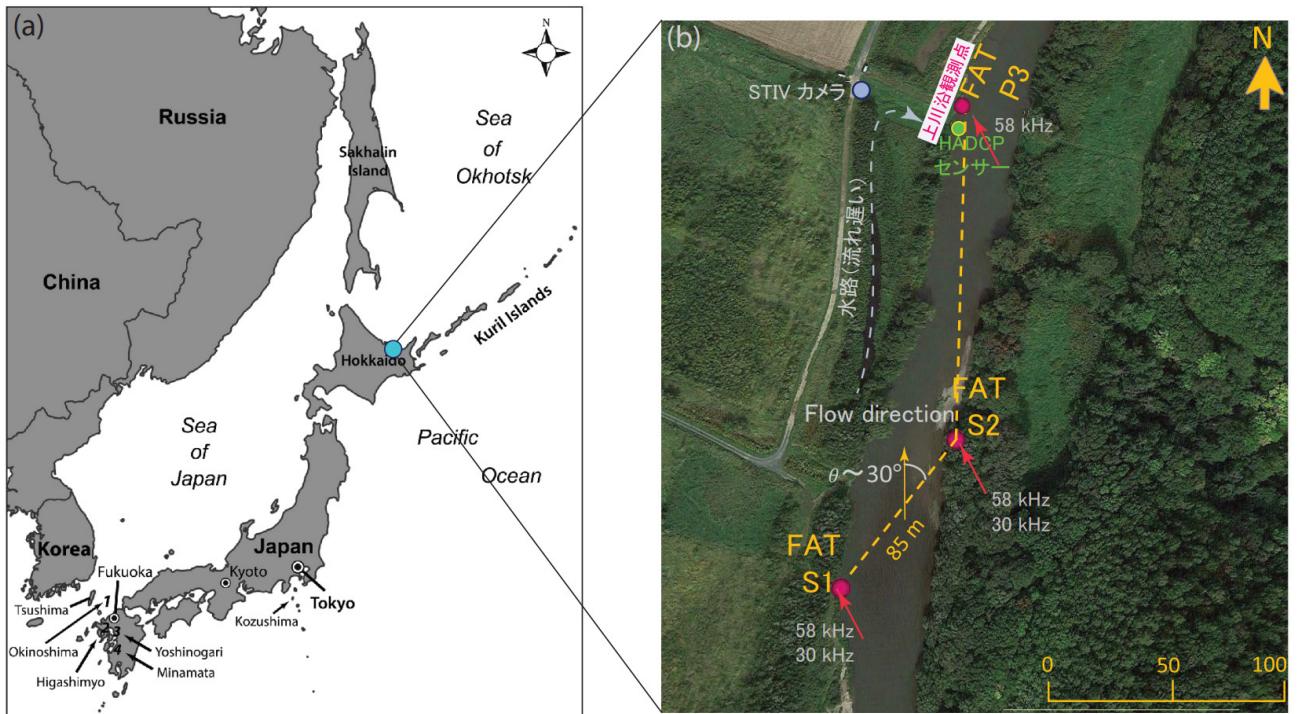


図1 a) 日本における研究領域の位置, b) 観測地点とFATシステム, ドップラーフlow速計, STIVカメラの設置

本研究では、北海道北見市に位置するオホーツク地方最大の河川である常呂川において、現地観測を実施した(図1)。常呂川は、全長120 km、観測地点付近の平均川幅は約40 m、流域面積は1930 km²である。水源は三国山に発し、置戸町、訓子府町をそれぞれ経由した後、北見市中心部において主要支流である無加川と合流し、オホーツク海に注ぐ。

当該地域は、寒冷な冬季と比較的温暖な夏季を特徴とする湿潤大陸性気候に属する。最も寒冷な月は1月と2月であり、平均最低気温は-9°Cである。一方、最も温暖な月は8月であり、平均最高気温は20°Cである。年間平均降水量は約800 mmであり、8月が最も降水量が多く、2月が最も少ない。

図1bには、本モニタリングプログラムにおいて使用された計測機器の設置位置を示す。上川添観測所では、水位を毎時計測しており、当該地点で導出された経験的な流量観測式を用いて流量(Q_{RC})を連続的に推定した。上川添観測所における推定年平均流量は、35 m³/sであった。

水平型音響ドップラーフlow速計(HADCP)センサーを左岸に設置し、流量記録(QHADCP)を取得した。使用したHADCPの周波数は300 kHzであった。さらに、赤外線カメラ(FLIR FCシリーズ0)を左岸から

約60m離れた位置に設置し、空間時間画像流速法（Space Time Image Velocimetry, STIV）と呼ばれる手法に基づき河川流量を推定した。

3. 調査地域と観測設定

3. 1. FAT測定の原理

既報¹⁵⁾において、システム仕様および測定原理の詳細が網羅的に記述されているが、本解析の円滑な理解と議論の展開のために、ここで基礎方程式を再掲することは重要である。FATシステムの測定原理は、伝搬時間である⁶⁾。すなわち、各トランスデューサは、GPS衛星を用いて同時かつ事前に定義された特定の時刻に、対となるトランスデューサに向けて音響パルスを発信する。同時に、各トランスデューサは、反対側のトランスデューサから発信された信号を受信する。また、発信レートは30秒ごとに設定された。したがって、特定の時刻（例：2023年2月3日01:00:00）において、 t_1 はS1から発信されS2で受信された音響パルスの経過時間であると言える。同様に、 t_2 はS2から発信されS1で受信された音響パルスの経過時間である。結果として、伝送線（S1-S2）に沿った流れの断面平均流速（ U ）は、以下のように算出される。

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

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距離です。従って、流れ方向断面平均流速成分（ V ）は、式（2）を用いて以下のように表される。

$$V = \frac{U}{\cos \theta} \quad (2)$$

ここで、 θ は伝送線と流れ方向の平均流速とのなす角である（図1b）。結果として、河川流量（ Q_{FAT} ）は開水路における基礎的な流量式を用いて推定できる。

$$Q_{FAT} = V \times A \times \sin \theta \quad (3)$$



図2 a) 右岸に設置されたFAT監視ユニット, b) FATシステムロガーとバッテリー, c) 浅い流れの条件下における右岸での水中トランスデューサーの設置, d) トランスデューサー設置の詳細図

ここで, A はS1とS2によって形成される断面の断面積である. S1-S2に沿った断面積の連続的な測定を行うため, 河川横断面の縦方向および横方向の情報をトータルステーションを用いて計測した. 一方, 平均水位は圧力変換器を用いて連続的に計測された. したがって, 水面標高の水平線と河川横断面曲線との積分により, 断面積の正確な値が得られる.

承前述の通り, 本モニタリングプログラムにおいては, それぞれ58 kHzおよび30 kHzの音響信号を発

信する2種類のトランステューサを用いた（図2（c, d））。この組み合わせの主な理由は、高濃度の土砂フラックス発生時におけるFATシステムによる計測を可能とするためである。58 kHzトランステューサは河床から約25 cm上方に、30 kHzトランステューサは河床から約40 cm上方に設置した。

3.2. 新たな配置スキーム

式(2)および式(3)において、流れ方向成分 θ は、平均流速(V)および流量(Q_{FAT})の推定に必要とされることが示されている。過去の研究において、 θ の値を求めるための様々な手法が広範に提案されてきた。Al Sawafら⁶は、その値を決定するために、(i) ADCP船、(ii) 河川流量の基準記録、(iii) 4つのFATシステムによるクロス配置、(iv) 3つのFATシステムによる三角配置など、複数の手法が利用可能であることを指摘している。昨年度のプロジェクトでは、観測目標の一つとして、S1, S2, P3を通過する「ジグザグ」配置という新たな配置スキームを用いて、流れ方向項 θ の可能性を調査することが挙げられた（図1b）。しかしながら、図1bに示すように、P3付近で追加の流量を放出する小さな水路の寄与による乱流に基づいた仮定のため、測定記録は期待された結果を示さなかった。

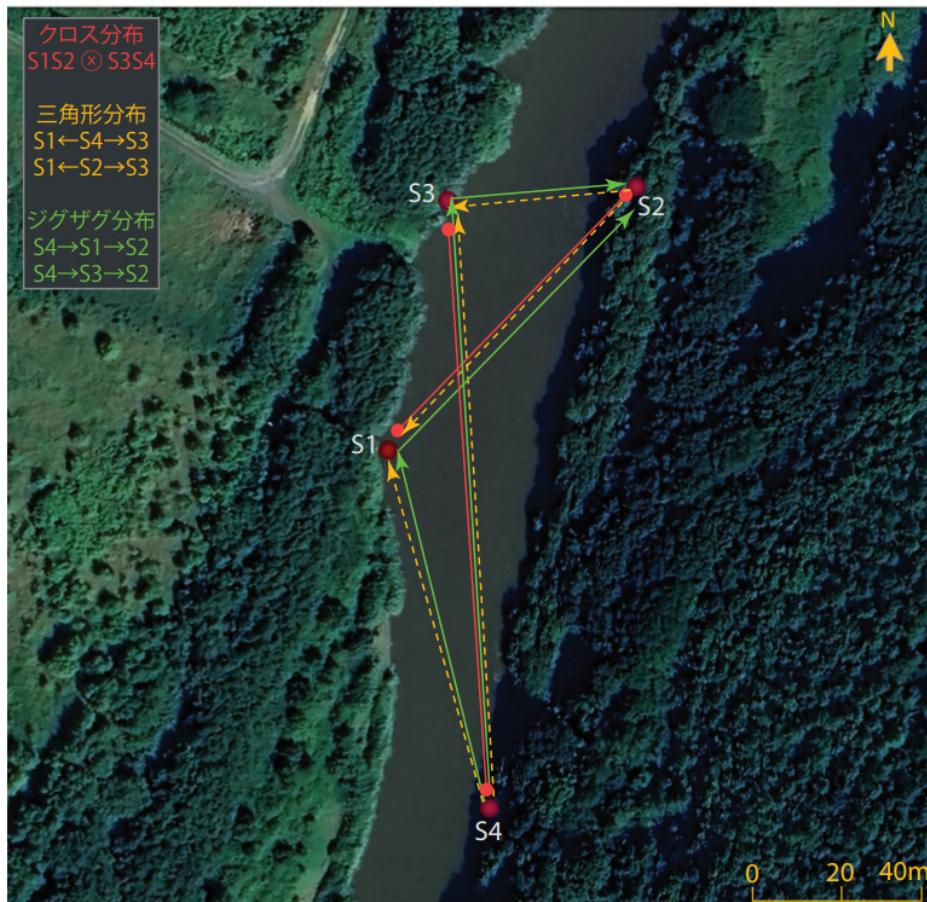


図3 新しい複数ステーションに展開されたFATシステムを用いた配置スキームの図解

本年度は、この課題を克服するため、図3に示す新たな配置計画を導入した。この新たな配置計画は、河川流路における水路断面平均流速の時間変動に関する堅牢で正確かつ包括的な情報を提供することを可能とする。この配置は、FATシステムの4つの音響観測点(S1, S2, S3, S4)で構成される。特筆すべきは、昨年度の観測記録が良好であったため、S1とS2の位置は変更されなかった点である。全観測点の周波数は58 kHzに設定された。

図3に示す配置構成は、以下の複数の視点から分析可能であるように構成された。(i) 単一の交差展開、

(ii) 二つの三角形展開, (iii) 二つのジグザグ展開である. 例えば, 図3の赤線は, S1S2 × S3S4間のクロス分布を概説する. また, この新たな配置構成を用いて, 破線の黄色で示されるように二つの三角形スキームが生成された. 具体的には, (i) $S1 \leftarrow S4 \rightarrow S3$, および (ii) $S1 \leftarrow S2 \rightarrow S3$ である. 最後に, この配置構成において, 実線の緑色で示されるように二つのジグザグ配置が形成された. 具体的には, (i) $S4 \rightarrow S1 \rightarrow S2$, および (ii) $S4 \rightarrow S3 \rightarrow S2$ である.

4. 観測結果

図4は, 観測期間中に上川沿観測所で測定された水位の時間変動を示している. この図において, 赤線はFATシステムによる測定の閾値水位を示している. すなわち, 上川沿観測所で測定された水位がこの閾値 (2.2 m) 未満の場合, FATシステムによる河川流量の取得は不可能であり, 一方, 上川沿観測所で測定された水位が2.2 mを超えた場合, FATシステムによる測定が可能となる. 加えて, 観測期間の大部分において水位が非常に低いことが確認できる.

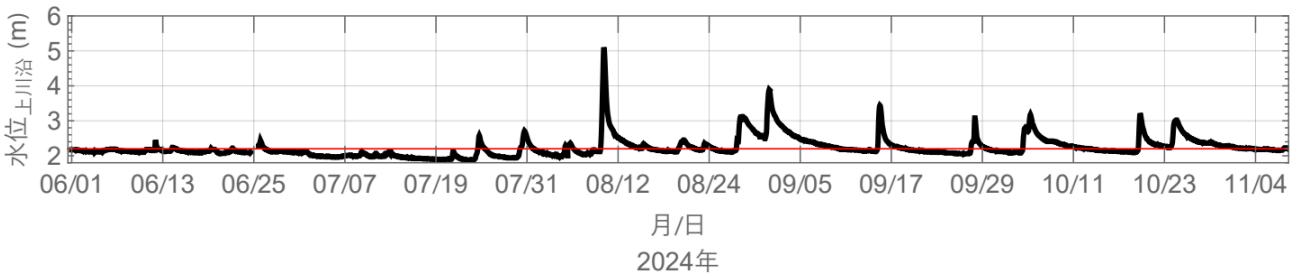


図4 2024年に上川沿観測所において計測された水位変動（赤線は閾値水位を示す）

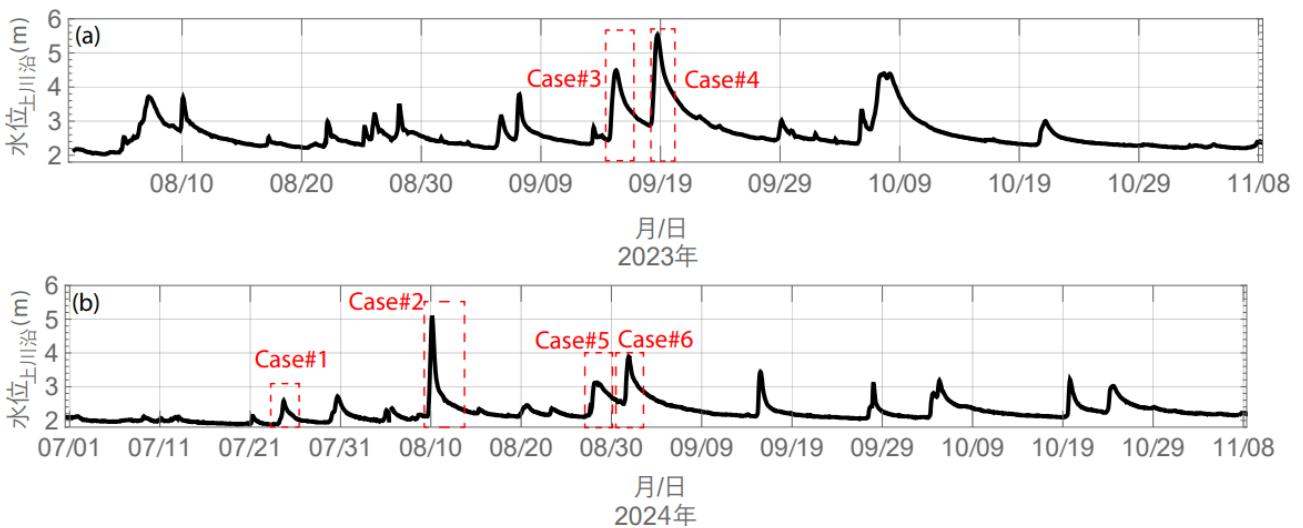


図5 上川沿観測所における水位変動：a) 2023年およびb) 2024年

一方, 図5は, 2023年および2024年の特定の期間における上川沿観測所で記録された水位の時間変動を示す. まず, 2023年には, FATシステムによる58 kHzの周波数を用いた河川流量測定に加え, HADCPおよび赤外線カメラによる測定を実施した. その後, 極低温 (-20°C未満) に耐えられる設計ではなかったため, 冬季を迎える前に全ての監視システムを撤去した. 2024年には, 再び同一のFAT 58 kHzを用いた流量測定を実施したが, 8月中旬以降, 降雨イベント時に発生する高土砂フラックスに対応するため, 既存の58 kHzトランステューアに30 kHzトランステューアのペアを1組追加した.

本研究では、対象とする事象を有意なものに絞り込むため、以下の三つの異なる状況における流量計測を調査した。すなわち、(i) 新しいトモグラフィースキームを用いた音響測定、(ii) 他の独立した流量記録との河川流量比較、(iii) 二重周波数を用いた河川流量計測である。

4.1. 新しいトモグラフィースキームを用いた音響測定

図6は、上川沿観測所で取得された水位の変動と、S1S2、S2S3、S3S4、およびS1S4の各経路に沿って記録されたSNR信号の時間変動を比較して示したものである。トモグラフィーシステムの設置は、2024年6月13日に実施された。

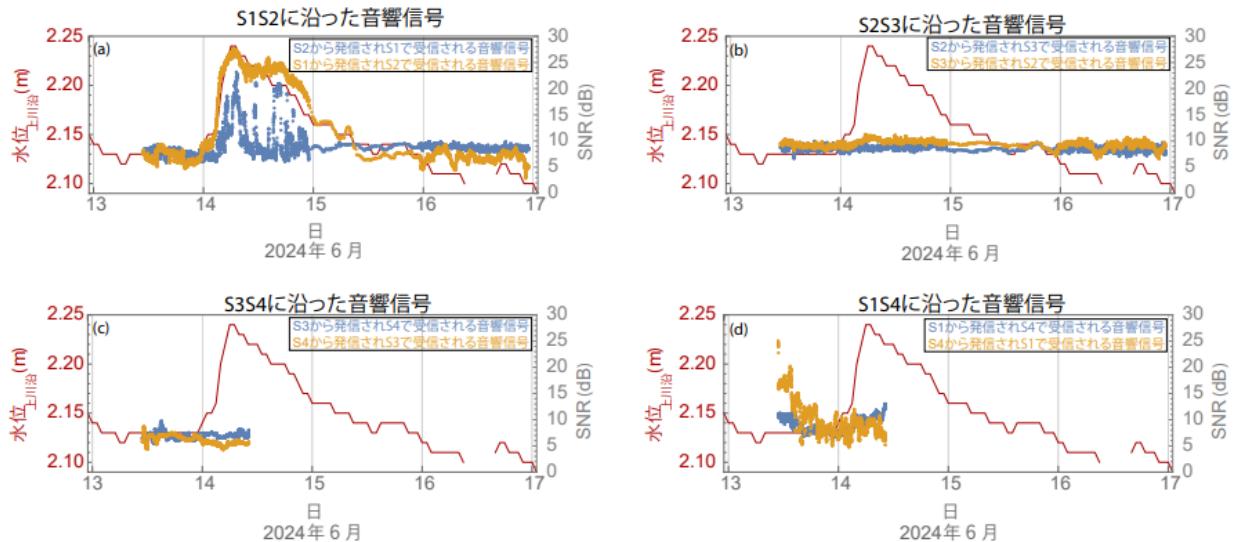


図6 上川沿観測所における水位変動と、以下の区間におけるSNR信号の記録との比較を示す。
a) S1S2区間, b) S2S3区間, c) S3S4区間, d) S1S4区間。

図6に示すように、FATシステムによる音響測定は午後12時頃に開始され、約3日間継続された。その後、水位が長期間上昇しなかったため（図4）、全てのシステムが停止された。また、S4のバッテリーはソーラーパネルを接続せずに運用されたため、消耗したことを特筆すべきである。したがって、S1S4およびS3S4に沿った測定は1日間のみ実施された。

FATシステム設置前において、測定地点における水位は低く、より安全な展開条件が確保されていた。また、6月14日に豪雨が予測されていたが、降雨による水位上昇は10cm程度に留まった。

図6に示されるように、S1S2区間におけるSNR信号は、水位の上昇に伴い顕著な改善が見られた。これは、当該断面が昨年度の観測においても利用されたことから、予想された結果である。しかしながら、S2S3区間およびS3S4区間において記録されたSNR信号は、所望の閾値（所望の閾値は10 dB以上）を下回るため、信頼性に欠けるものであった。さらに、S1S4区間におけるSNR信号は、測定期間の初期においてわずかに高い値（10 dB超）を示したことが確認できる。

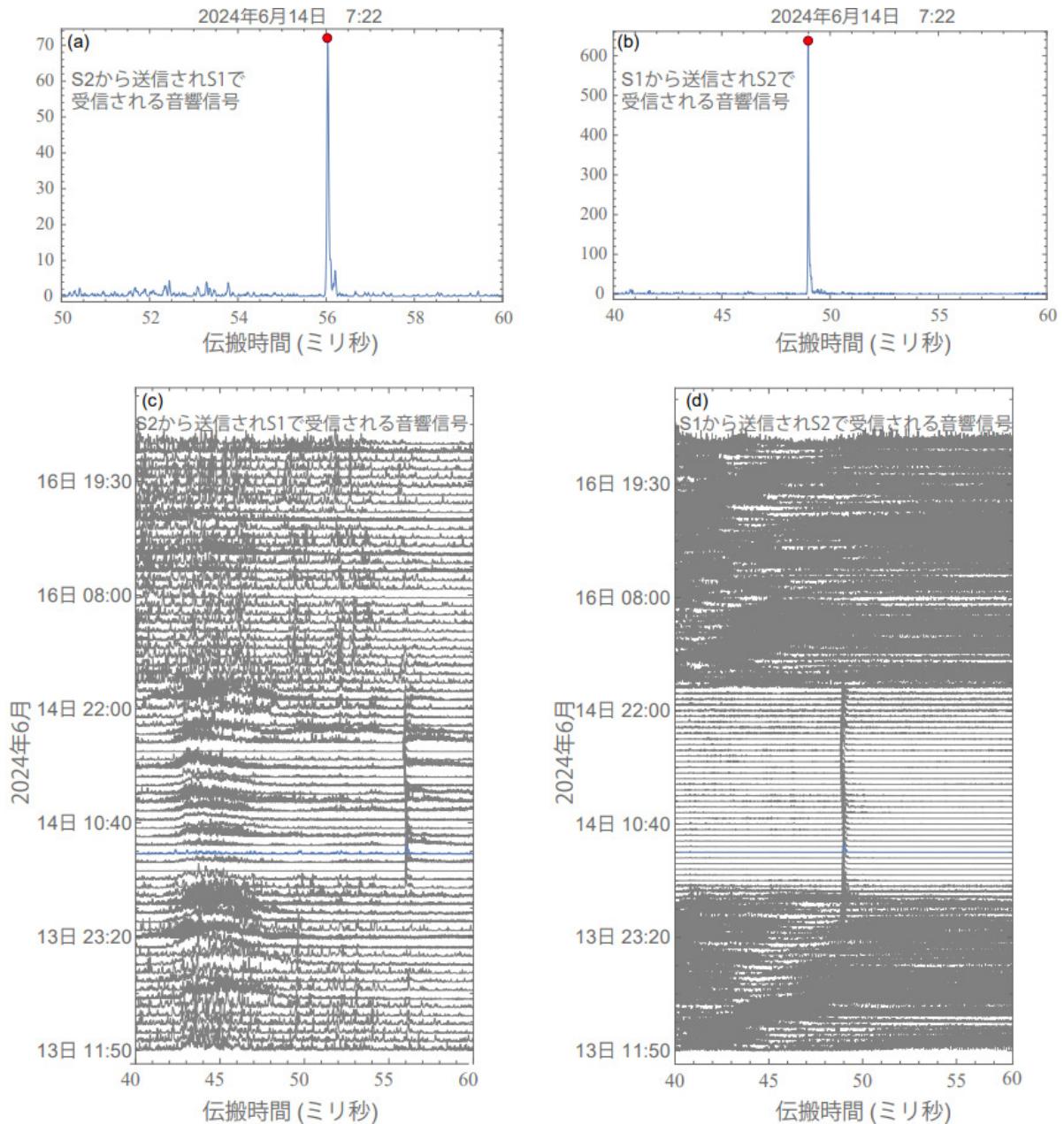


図7 2024年6月における、S2→S1（左図）およびS1→S2（右図）間の相関パターン信号のスタックプロット

複数FATシステム間で記録された伝播時間を明確に把握するため、伝播時間のスタックプロットを図7, 8, 9, 10に示した。まず、図7 (c, d) は、S2からS1、およびS1からS2へ伝播した時間のスタックプロットである。水位上昇時に伝播時間ピークが明確に検出されるものの、ピーク時間に大きな差異が認められる。これは、式(1)に基づければ、S1S2間の流速成分が負となることを示唆し、妥当ではない。

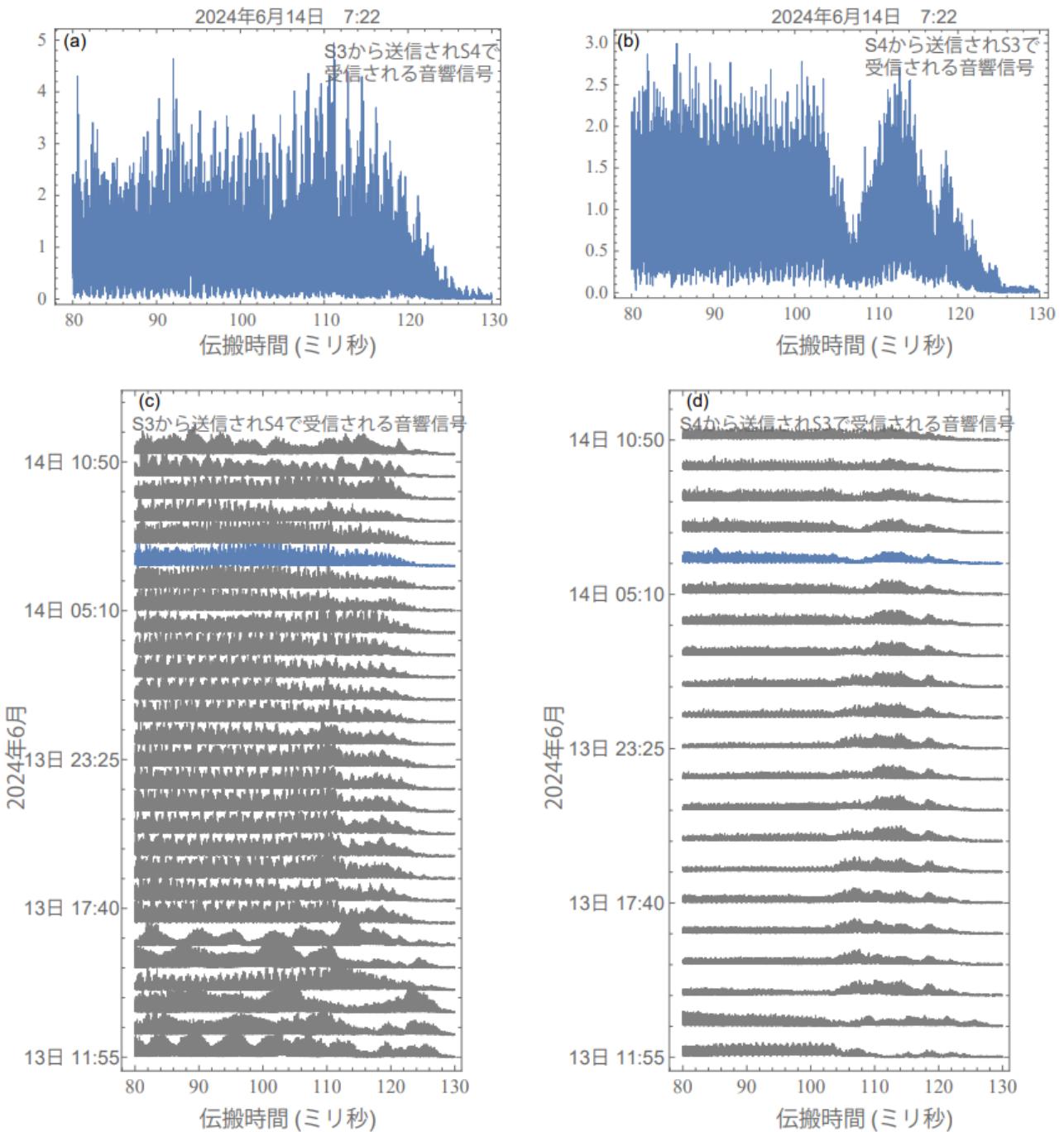


図8 2024年6月における、S3→S4（左図）およびS4→S3（右図）間の相関パターン信号のスタックプロット

一方、図10(c, d)に示されるS4S1間の伝播時間の積算プロットは、正の流速成顯著なピークを示した。対照的に、図8および図9に示されるように、S3S2またはS4S3間で測定された音響信号からは明瞭なピークは検出されなかった。図4に示されるように、水位は長期間にわたり上昇せず、また、6月および7月の降雨の可能性も気象予報では予測されなかつたため、当該手法による測定は中止された。代わりに、S1S2間の測定が実施された。

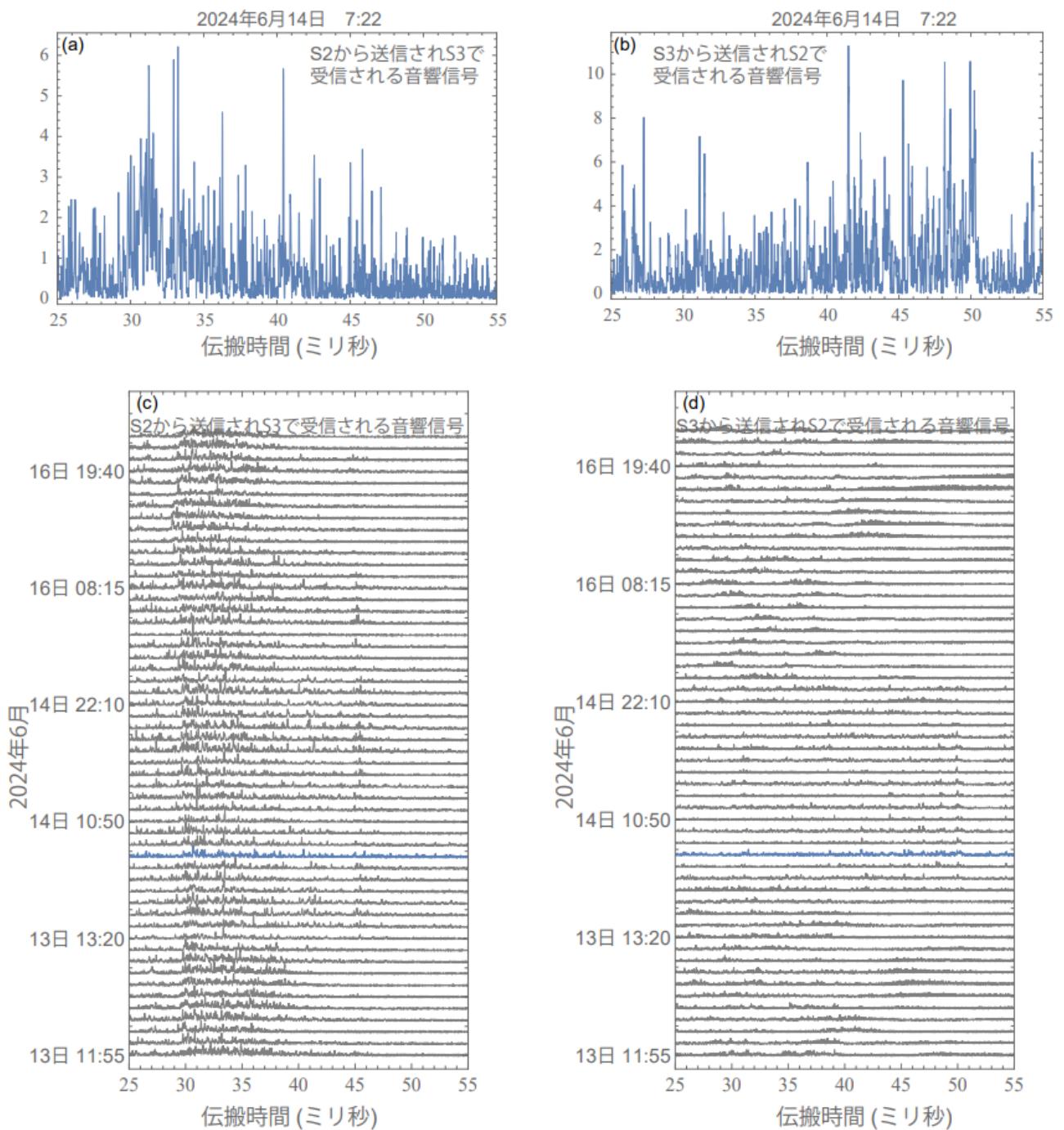


図9 2024年6月における、S2→S3（左図）およびS3→S2（右図）間の相関パターン信号のスタッップロット

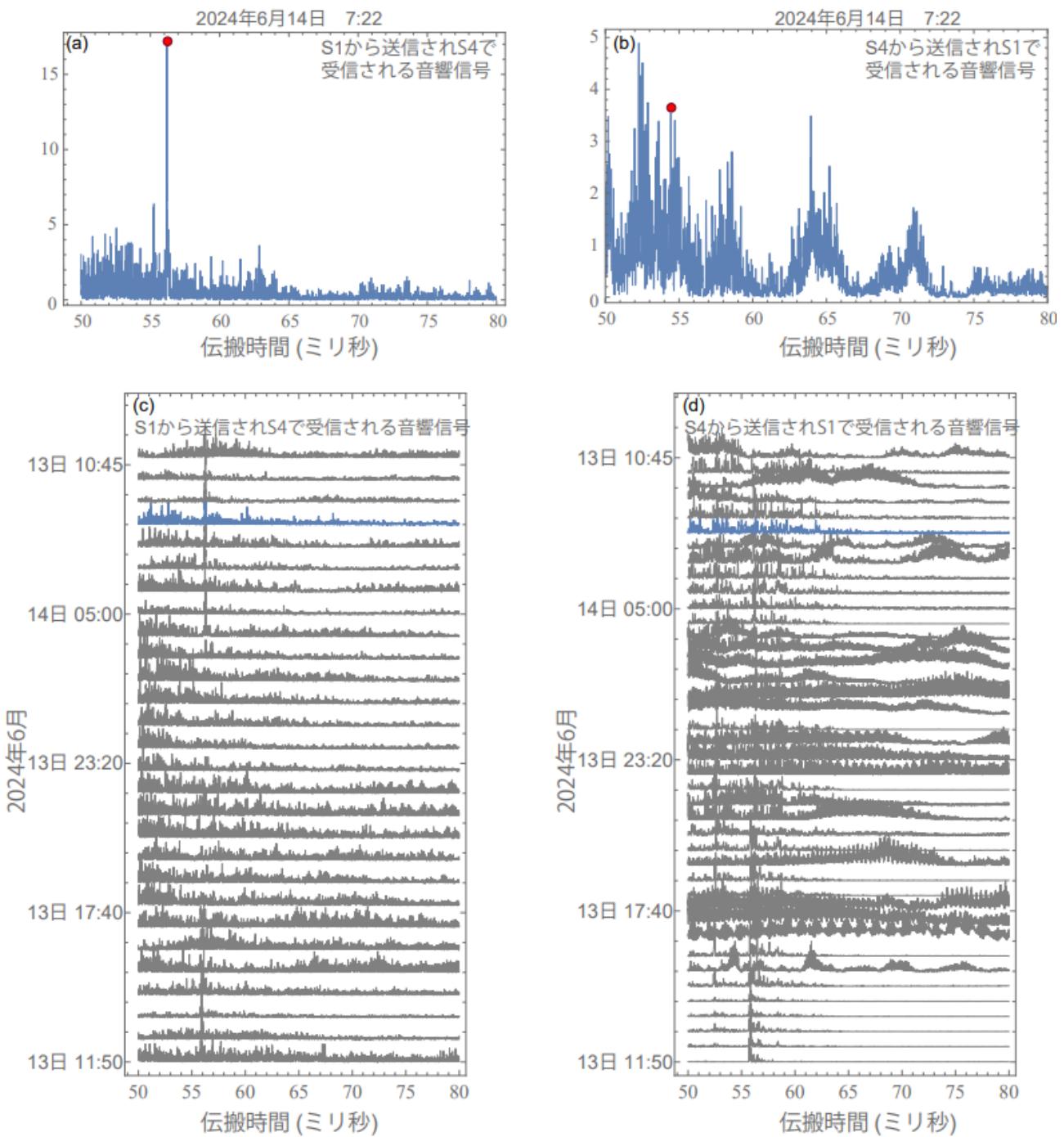


図10 2024年6月における、S1→S4（左図）およびS4→S1（右図）間の相関パターン信号のスタックプロット

4.2. 他の独立した流量記録との河川流量比較

FATシステムによる流量測定の妥当性を評価するためには、その精度と性能を判断するための参照記録との比較が不可欠である。本研究では、基礎的な比較対象として、上川沿観測所における流量記録を用いた。しかしながら、RC法による流量観測は、特に高流量時において精度が低下する可能性があることが周知の事実である。

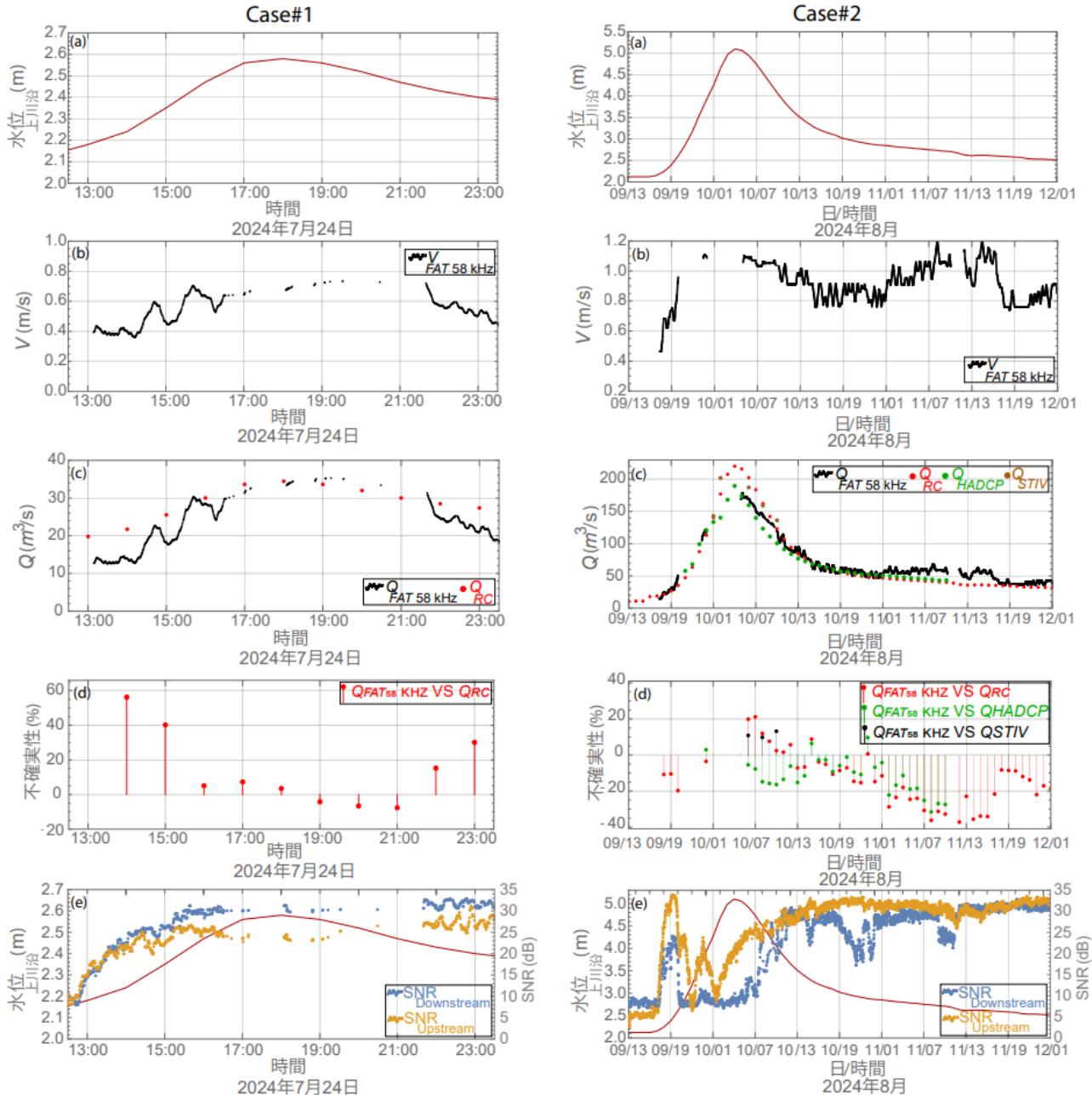


図11 時系列図：(a) 上川沿観測所における水位、(b) FAT 58 kHzにより計測された流路方向断面流速（黒）、(c) Q_{FAT} 58 kHz（黒色）、 Q_{RC} （赤）、 Q_{HADCP} （緑）、および Q_{STIV} （茶）による流量計測値、(d) Q_{FAT} 58 kHzと Q_{RC} の間の不確実性（赤）、 Q_{FAT} 58 kHzと Q_{HADCP} の間の不確実性（緑）、 Q_{FAT} 58 kHzと Q_{STIV} の間の不確実性（黒）、(e) 調査期間中のFAT SNR信号の性能

したがって、より信頼性が高く明確な河川流量記録の考察を可能にするため、2023年および2024年に実施されたHADCP（音響ドップラーフlow速計）およびSTIV（表面画像流速計）による追加の流量記録を本研究において提示する。この点に関して、HADCPによる観測は上川沿観測所の水位が約2.7mを超え

た場合にのみ可能であり、STIVによる流量観測は上川沿観測所の水位が約4.2mを超えた場合に実施されたことを特筆しておくことは非常に重要である。

図11aは、上川沿観測所におけるCase#1およびCase#2の水位の時間変動を示している。ここで、ケース#1は極めて浅い条件下での流況を表し、一方、ケース#2は2024年における最大流量条件下での流动特性を示すものである。

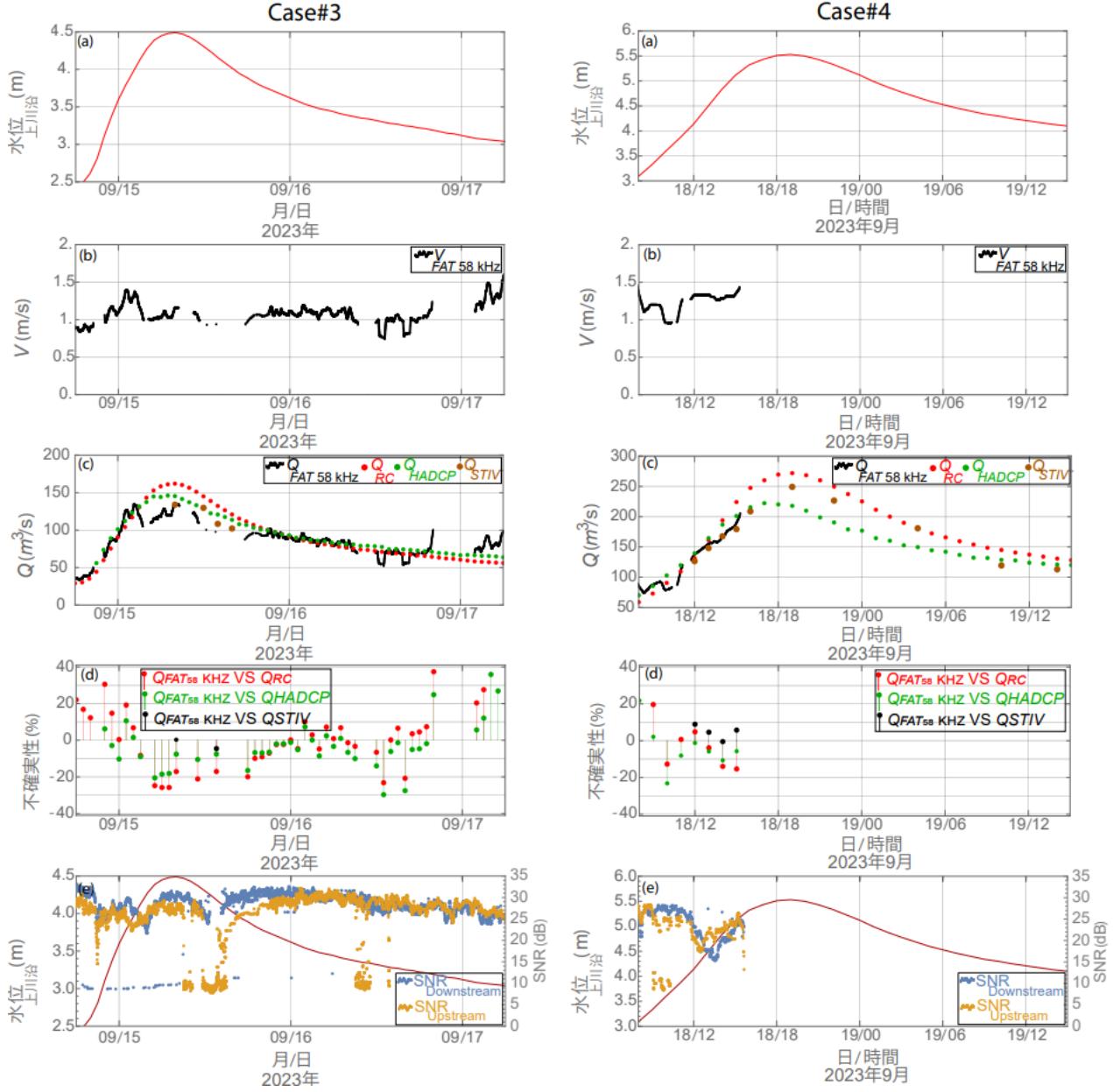


図12 時系列図：(a) 上川沿観測所における水位、(b) FAT 58 kHzにより計測された流路方向断面流速（黒）、(c) $Q_{FAT\text{ 58 kHz}}$ （黒）、 Q_{RC} （赤）、 Q_{HADCP} （緑）、および Q_{STIV} （茶）による流量計測値、(d) $Q_{FAT\text{ 58 kHz}}$ と Q_{RC} の間の不確実性（赤）、 $Q_{FAT\text{ 58 kHz}}$ と Q_{HADCP} の間の不確実性（緑）、 $Q_{FAT\text{ 58 kHz}}$ と Q_{STIV} の間の不確実性（黒）、(e) 調査期間中のFAT SNR信号の性能

まず、Case#1に示される浅水流条件における測定結果について考察する。図11aから、水位は約2.16mから上昇し、2.58mでピークに達したことが確認できる。しかしながら、図11 (a, b, c) に示されるように、FATシステムによる測定は、水位が約2.2mを超えた時点で適用可能であったことが認められる。 Q_{FAT} および Q_{RC} によって得られた流量の時間変動を図11cに示す。残念ながら、このイベントのピーク時

には、一部の期間において音響信号が受信できなかった。また、非常に低い水位では、 Q_{FAT} と Q_{RC} の間に顕著な変動が検出される。しかしながら、図11cに示すように、水位の上昇に伴い、この変動は非常に小さくなつた。さらに、FATシステムによって推定された流量記録の妥当な比較を行うために、式(4)に示すパーセント誤差を用いて不確実性を評価した。

$$\text{不確実性} = \frac{Q_{Ref} - Q_{FAT}}{Q_{FAT}} (\%) \quad (4)$$

ここで、 Q_{Ref} は検討対象とする基準流量記録（例： Q_{RC} , Q_{HADCP} , Q_{STIV} ）を示す。図11dに示された不確実性は、極めて低い水位においてFATによる計測値が過小評価されていたことを示唆している。しかしながら、水位の上昇に伴い、これらの変動は劇的に減少した。

Case#2に示される高流量条件下における計測について考察する。図11aに示されるように、水位は2.1mから上昇を開始し、5.1mでピークに達した。水位上昇過程において、図11eに記録されているように、SNR値が著しく低かったため、大部分の信号が解析不能となったことが認められる。断面平均流速は、概ね0.45～1.1m/sの範囲であった。特筆すべき点として、 Q_{FAT} , Q_{RC} , Q_{HADCP} , および Q_{STIV} によって推定された流量の時間変動は、非常に良好な一致を示した（図11c）。図11dに示されるように、推定される平均不確実性の範囲は±17%であった。

図12aに示すように、上川沿観測所における水位は、Case#3において4.49m, Case#4において5.53mのピークに達した。Case#3における断面平均流速は、概ね0.85m/sから1.3m/sの範囲であった。同様に、Case#4における断面平均流速は、0.95m/sから1.48m/sの範囲であった。図12cに示された流量記録を考慮すると、二つの重要な点が検出される。第一に、高水位の場合、すなわちCase#3, Case#4, およびCase#2において、RC法によって得られた流量記録は、Case#3に示されるように、HADCP, FAT, およびSTIVによる記録と比較して過大評価された。この過大評価は、Case#4およびCase#2においてさらに顕著であった。一方、水位が低下するにつれて、RC法によって得られた流量記録は過小評価された。この文脈において特に重要なのは、FATシステムによって記録された流量が、他の高度な手法（STIV & HADCP）と比較して優れた性能を示したことである。さらに、 Q_{FAT} と Q_{HADCP} , および Q_{FAT} と Q_{FAT} の平均不確実性は、概ね±15%であった。残念ながら、ケース#4では、FATシステムのバッテリーが9月18日に消耗し、イベント全体にわたって河川流量を完全に測定することはできなかつた。

4.3. 二重周波数を用いた河川流量計測

本観測プログラムにおいて、軽微な降雨が発生した場合においても、目視にて確認可能なほどの顕著な懸濁物質の流動が誘発されることが確認された。高濁度条件下における音響信号の強い減衰に関連する困難を克服するため、S1S2区間における河川流量計測は、図2(c & d)に示すように、S1およびS2に並列配置された二つの中心周波数（すなわち、58 kHzおよび30 kHzトランスデューサ）を用いて実施された。この組み合わせの目的は、高懸濁物質条件下においても連続的かつ正確なトモグラフィー測定を維持することにあつた。

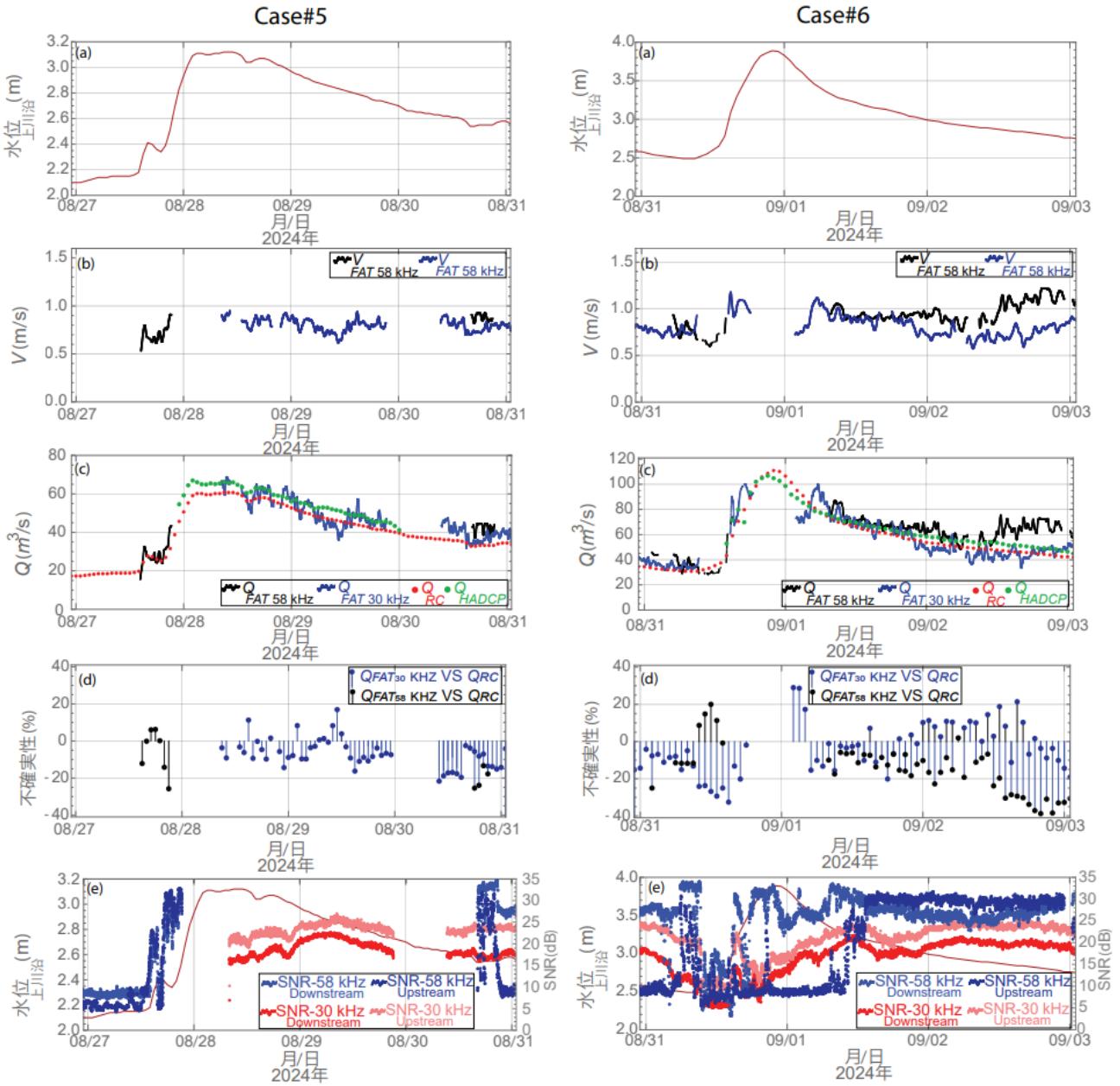


図13 時系列図：(a) 上川沿観測所における水位、(b) FAT 58 kHzにより計測された流路方向断面流速（黒）及びFAT 30 kHzにより計測された流路方向断面流速（青）、(c) $Q_{FAT\ 58\ kHz}$ （黒） $Q_{FAT\ 30\ kHz}$ （青）、 Q_{RC} （赤）、 Q_{HADCP} （緑）による流量計測値、(d) $Q_{FAT\ 58\ kHz}$ と Q_{RC} の間の不確実性（赤）、 $Q_{FAT\ 30\ kHz}$ と Q_{RC} の間の不確実性（青）、(e) 調査期間中のFAT SNR信号の性能

同様に、図13aは、Case#5およびCase#6における上川沿観測所の水位の時間変動をそれぞれ示している。図13aから明らかなように、これらの2つのケースにおける上川添観測所の水位は、過去に提示されたケースと比較して、顕著な上昇を示さなかった。

Case5において、FAT 58 kHzシステムは、図13 (b, c) に示すように、増水初期において平均流速および河川流量の計測を開始したことが確認される。しかしながら、同システムは8月28日深夜にバッテリーの故障により停止し、8月30日午後に交換された。一方、FAT 30 kHzシステムについては、水位が約2.6 mを超えた場合に計測が可能となる点が特筆される。また、図5bのCase5に示すように、しばらくの間水位上昇が見込まれないことから、システムバッテリーの節約および頻繁な交換を回避するため、同システムは8月28日12:00に自動起動するように設定された。これにより、設定時刻以降、断面平均流速および流量が記録されたことが確認できる。全体として、FATシステムによる流量計測値は、上川添観

測所およびHADCPによる対照記録と非常によく一致していることが、図13cおよび図13dに示されている。

Case6では、上川沿観測所における水位が3.9 mでピークに達したことが示された。図13eから、FAT 58 kHzシステムの受信SNR信号は、水位上昇期に特に上流側トランステューサの受信信号において顕著な低下を示したことが確認できる。同様に、FAT 30 kHzシステムの受信SNR信号も類似の挙動を示したが、FAT 58 kHzと比較して伝送損失期間は短かった。FAT 58 kHz（黒線）とFAT 30 kHz（青線）によって測定された断面平均流速は概ね一致した。しかしながら、FAT 58 kHzによって測定された流速は、洪水終期においてわずかな増加を示した（図13b）。結果として、図13dに示されるように、FAT記録と上川沿観測所で推定された流量記録との間の不確実性は同程度であった。

5. 議論

5.1. 河川流量測定値と他の参考河川流量記録との比較に基づく推論

Falvey¹⁶⁾は、河川の水面が音響信号の完全反射体としてみなせることを指摘した。さらに重要な点として、滑らかな水面反射体の条件は、式(5)を用いて以下のように表される。

$$\lambda = 8 \times h \times \sin \varphi \quad (5)$$

ここで、音響波の波長を λ 、最小水深を h 、水面とのなす音響波の入射角（浅射角）を φ とすると、 φ は少なくとも 1° である。河床の場合、河床材料が多様であるため、音響波の反射挙動の予測は非常に複雑である。しかしながら、河床からの音響信号の反射は高度に減衰すると言える。淡水中における音速 c を1481 m/s、トランステューサの周波数 f を58 kHzとすると、式(6)より波長は2.5 cmとなる。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

結果として、式(5)を代入すると、最小水深（ h ）は少なくとも約18 cmである必要があることがわかる。Case#1（図11）に示されるような深い水位の間、FATシステムによって推定された河川流量は、上川沿観測所で計算されたRC手法によって推定された流量と比較して過小評価されていることが観察された。しかしながら、上川添観測所の水位が約2.5 mを超えると、QFATとQRCの一致はより高くなつた（図11aおよび図11c）。この文脈において、FAT 58 kHzシステムは上川沿観測所の水位が2.2 mを超えたときに音響測定を開始したことを想起することは重要である。この水位において厳密に、伝送線路に沿った最小水深は図14に示されるように9 cmと測定され、これは最小波高（約18 cm）の半分であった。この結果は、FAT 58 kHzがこの深度で測定を提供できる能力を示している。しかしながら、この極端に浅い深度での測定の精度を検証するためには、別の堅牢な測定手法（RC手法以外のもの）を用いて測定の精度を検証する必要がある。

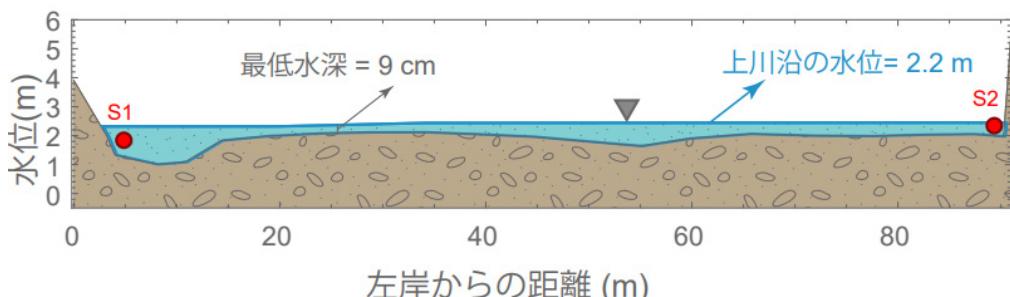


図14 上川沿観測所の水位が2.2 mである場合の、伝送線に沿った断面形状

Case#2およびCase#4で示される高水位時において、FATシステムは河川流量を測定する能力を示したことが確認できる。さらに、図11および図12に示されるCase#2, Case#3, Case#4において、FATシステムによって測定された流量は、STIVやHADCPなどの他の高度な手法によって得られた流量記録と非常に良好な一致を示していることが視覚的に明らかである。加えて、図11dおよび図12dに示されるように、これらの記録間の不確実性範囲は非常に低いことが検出される。したがって、この文脈において二つの興味深い疑問が生じる。第一に、FATによる計測は、特定の高水位まで、あるいは上昇過程または下降過程のいずれかに限定されるのか、という疑問がある。この問い合わせに対する答えは単純に否である。すなわち、Case#2において、上昇過程とは異なり、水位に関係なく下降過程においてFATシステムによって河川流量が完全に計測されたことが確認できる（図11c）。さらに、Case#4において、図12cに示されるように、当該イベントの上昇過程においてもFATシステムによる流量が捉えられたことが検証できる。しかしながら、流量計測の不連続性は、主にFATシステムによって記録されたSNR（Signal-to-Noise Ratio）信号が劇的に低下したことにより中断された（図11e）。この低下の主な理由は、トランシスデューサ間の記録された音響パルスの強度を減衰させた高濃度の堆積物の移動に起因すると考えられる。例えば、図15は、非常に穏やかな降雨イベントによって引き起こされた河川現場の高濁度状態を記録している。注目すべきは、その時、上川沿観測所で計測された水位は1.91 mであり、測定された日降水量は約2 mmであったことである。

第二に提起されるべき疑問は、適用されたアプローチのうち、どれが正確な流量測定値を提供したかという点である。実際、河川において正確な流量測定を可能とする普遍的なアプローチは存在しない。各アプローチは、避けられない不確実性の範囲を有している。これは、各河川地点が固有の特性と特徴を有するためである。したがって、断面を通過する河川の瞬間流量の「真の」または「正確な」値を断言することはできない。むしろ、測定精度を最大化するための最善の方法は、短期間に複数の測定アプローチを利用し、より良い推定を行うことである。



図15 極めて穏やかな降雨による超浅水条件下において、監視地点で観測された高濁度状態

5.2. 河川流量計測における二周波を用いた推定

本研究の開始時において、監視対象地点の特異性から、58 kHzのFATシステムを用いたトモグラフィ一観測を実施した。具体的には、観測地点における河川水路の平均幅は40 mであった。良好な音響通信を2つの音響観測点間で確保するため、図1bに示すように、トランスデューサを斜め平面に配置することが推奨され、その結果、斜距離は85 mとなった。既往の研究[17]において、トランスデューサのペア間の最小距離(D_{min})は式(7)を用いて推定可能であることが示されている。

$$D_{min} = \frac{\kappa}{f} \times c \times M_{sequence\ digits} \quad (7)$$

ここで、 $\kappa=3$ であり、 $M_{sequence\ digits}$ は、系列の桁数は511である。さらに、FATシステムの速度分解能は音速と送信周波数の関数であり、式(8)を用いて表現できる。

$$V_R = \frac{c^2}{2 \times L \times 2 \times f} \quad (8)$$

表1 最小観測条件および現在観測条件における速度分解能値の情報

発信周波数	最小限の条件		現地の条件	
	L (m)	V_R (m/s)	L (m)	V_R (m/s)
58 kHz	40	0.24	85	0.11
30 kHz	76	0.24	85	0.22

表1に示すように、58 kHzのトランスデューサ対間の最小距離は、速度分解能0.24 m/sを達成するために40 m以上である必要がある。一方、30 kHzのトランスデューサ対の場合、最小距離は76 m以上である必要があり、速度分解能は0.24 m/sである。この点における主要な課題は、なぜ二重周波数を用いてこの観測が実施されたのかという点である。この問題を包括的に理解するためには、二つの観点から検討する必要がある。第一の観点は波長と速度分解能であり、第二の観点は信号の吸収と散乱である。第一の観点について、式(6)を用いて推定された58 kHzトランスデューサの波長は2.5 cmであった。一方、30 kHzトランスデューサの波長は5 cmであった。一般に、短波長を使用することにより、空間分解能、速度分解能、および精度が向上することが知られている。特に、水特性の小規模な変動が存在する場合に有効である。対照的に、長波長を使用すると、小規模な変動に対する感度が低下し、不正確または劣悪な測定結果をもたらす可能性がある。表1に示された結果から、58 kHzシステムを使用した際の速度分解能は0.11 m/sに向上したが、30 kHzシステムを使用した際の速度分解能は0.22 m/sに留まった。

音響パルスの吸収および散乱に着目する際、高透過周波数(58 kHz)で生成された音響パルスは、懸濁粒子による吸収を受けやすく、その結果として信号品質の低下および測定精度の低下を招く可能性があることを留意する必要がある。平易に言えば、58 kHzシステムから放射される音響パルスの音響強度は、30 kHzシステムから放射されるものと比較して弱く、したがって、二重周波数を併用した測定を実施する必要があった。過去の観測プログラムにおいては、58 kHzシステムのみを用いた精密な測定が可能であった。しかしながら、本河川における多量の堆積物物質の移動は、完全な流況測定を提供するために、30 kHzシステムを用いた追加の測定が不可欠であることを示唆した。

5.3. 新しいトモグラフィースキームを用いた音響測定

FATシステムを用いた伝播時間原理に基づく流れ方向の連続計測には、主に二つのアプローチが存在する。一つ目のアプローチは、Bahreinimotlaghら¹⁷⁾によって提案されたものであり、四つのFATシステムを十字平面状に配置し、流向を連続的に推定する手法である。その後、Al Sawafら¹⁸⁾は、このアプローチを潮汐河川やダム湖などの様々な水域に適用するための詳細な指針を示した。二つ目のアプローチは、Al Sawafら⁶⁾によって提案されたものであり、三つのFATシステムを三角形平面状に配置し、河川流れ方向の連続計測を行う手法である。しかしながら、一部の河川サイトにおいては、伝播時間に基づく連続的な河川流向計測のために、十字平面または三角形平面の配置を行うことが困難な場合がある。

そこで本研究では、世界で初めてとなるジグザグ平面に少なくとも三つのFATシステムを設置し、河川流向を計測するための新たな計測スキームの適用を試みた。この新たなスキームによる計測の信頼性を高めるため、S1S2 × S3S4で構成される十字配置による河川流向計測、および二つの三角形平面 ((i) S1←S4→S3, (ii) S1←S2→S3) による計測結果を併用することを検討した。

残念ながら、計測信号の品質不良により、有意義な成果を示すことはできなかった。しかしながら、本研究プログラムで得られた経験に基づき、いくつかの洞察を以下に概説する。図16に、前提条件を簡略化して示す。まず、本手法は、二つの断面 (S1S2およびS2S3) における流量が等しい、またはほぼ等しいという仮定に基づいていることを述べておく必要がある。この仮定により、流量連続の原理を適用することが可能となり、ある断面 (すなわちS1-S2) から流出する流量は、次の断面 (S2-S3) へ流入する流量と等しくなる。結果として、S1S2を通る流量 (Q_{S1S2}) とS2S3を通る流量 (Q_{S2S3}) は、本質的に等しくなる。

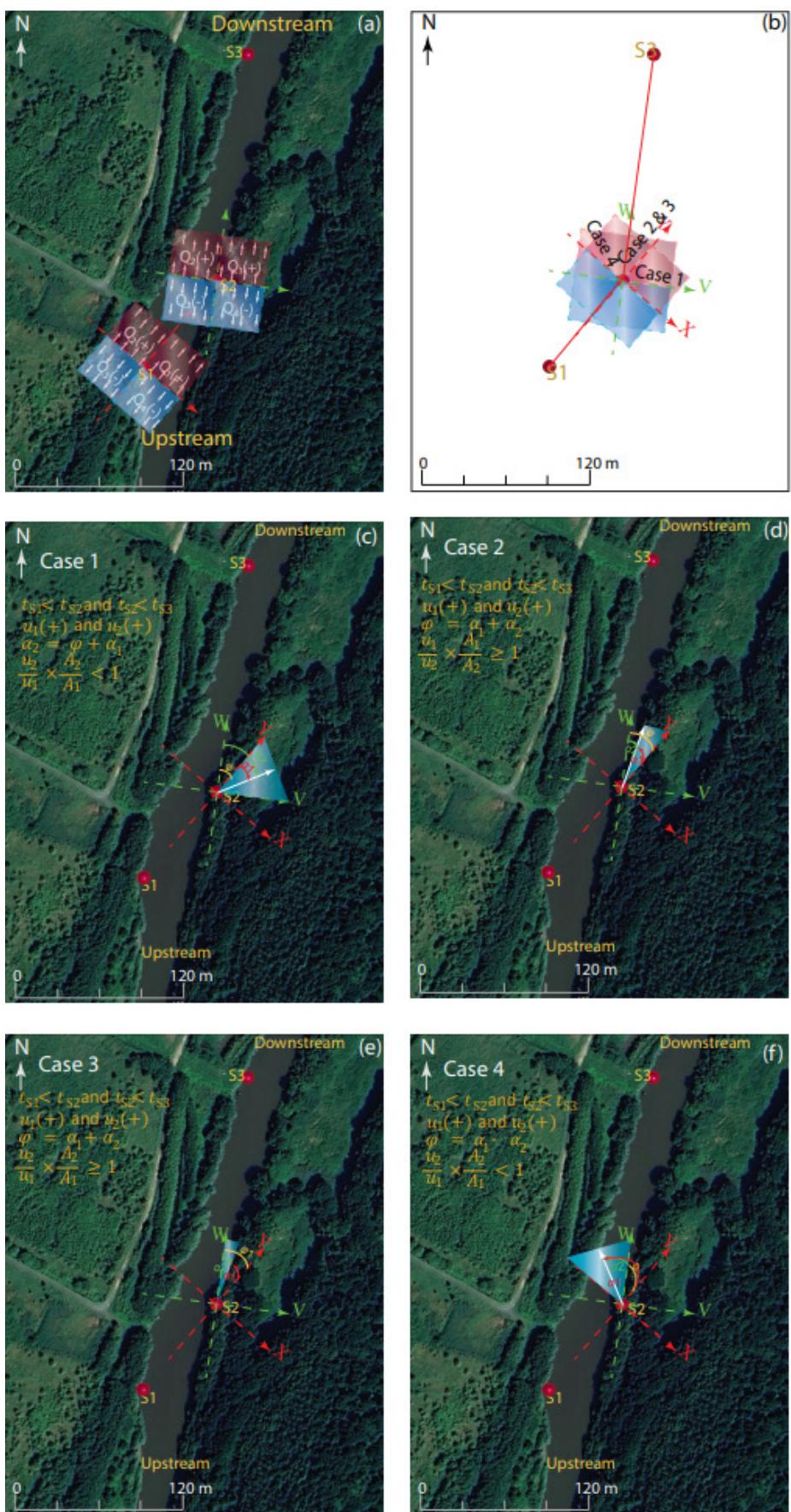


図16 流れの方向のケースを示したものである。a, b)は基本的な領域の図解, c) はケース1, d) はケース2, e) はケース3, f) はケース4

$$Q_{S1S2} = Q_{S2S3} \quad (9)$$

方程式 (9) は、以下のように表現される。

$$U_1 \times A_1 \times \tan \theta_1 = U_2 \times A_2 \times \tan \theta_2 \quad (10)$$

ここで、 U_1 , A_1 , および θ_1 は、それぞれ断面平均流速、音波経路 S1S2 に沿った断面積、および音波経路 S1S2 と流れ方向との間の角度を表す。同様に、 U_2 , A_2 , および θ_2 は、それぞれ断面平均流速、音波経路 S2S3 に沿った断面積、および音波経路 S2S3 と流れ方向との間の角度を表す。

まず、流れの方向領域を決定する。本観測地点の場合、流れは一方向性であり、すなわち、流れは上流から下流へと予想される。したがって、S1S2線に沿った流速成分 (U_1) およびS2S3線に沿った流速成分 (U_2) はともに正である。よって、流れの領域は、両伝送線軸の交差領域内にあるべきである。より具体的には、図16 (a, b) に示すように、((X, Y) および (V, W)) の第一象限 (Q1) および第二象限 (Q2) の交差領域内にある。なぜなら、第三象限 (Q3) および第四象限 (Q4) を通る河川の流れは負となるからである。したがって、この場合の流れの領域は $180 - 2\phi$ に等しく、図16に示すように、四つの場合が区別される。

瞬時的な流れ角度 (θ_1 および θ_2) は、流速ベクトル (U_1 および U_2) と断面積 (A_1 および A_2) の状態を調査することにより推定できる。図16cに示すように、ケース1の領域における流れ方向が妥当である場合、S1S2およびS2S3上の流れ方向は、 $\theta_2 = \phi + \theta_1$ と表現される。ケース2の領域における流れ方向が妥当である場合、流れ方向は、 $\theta_2 = \phi - \theta_1$ と表現される。ケース3の領域における流れ方向が妥当である場合、流れ方向は、 $\theta_1 = \phi - \theta_2$ と表現される。最後に、ケース4の領域における流れが妥当である場合、流れ方向は、 $\theta_1 = \phi + \theta_2$ と記述される。

6. まとめ

河川流量データの継続的かつ正確な測定は、河川工学設計において最も重要な応用の一つである。近年、河川流量測定手法の進歩により、河川流量測定の信頼性と精度が向上している。本研究では、常呂川における長期的な河川流量測定を実施した。本研究の主な目的は、河川音響トモグラフィーシステム (FAT) を用いて、非常に浅く狭い泥質河川における河川流量測定の可能性を調査することである。観測されたデータは、3つの異なる視点から検討された。第一に、新しいトモグラフィー方式を用いた測定。第二に、複数の独立した流量データセットを用いた検証。第三に、二重音響周波数を用いた検討である。

高度な監視能力に関する新たな成果として、極めて浅い条件下でもFATによる測定が可能であることが確認された。ただし、測定断面における最小水深は9cm以上である必要がある。さらに、FATシステムは高水位時の流量観測能力も示した。複数の独立した流量測定記録を用いた結果、FATシステムで測定された流量は、HADCPやSTIVなどの高度な測定手法で取得された記録と非常に良く一致し、不確実性の範囲も非常に小さいことが証明された。

また、高い送信周波数を使用すると、より短い波長が得られ、空間分解能と速度分解能が向上し、望ましい測定精度が得られることがわかった。しかし、高濃度の堆積粒子が存在する場合の測定は困難であった。一方、低い送信周波数は、より長い波長を提供し、小規模な変動に対する感度が低くなり、測定精度が低下する可能性がある。しかし、高濃度の堆積物が移動している場合でも測定が可能である。

さらに、本研究で得られた重要な知見の一つは、各河川流量測定方法には避けられない不確実性の範囲が存在することである。これは、各河川が独自の特性と特徴を持つことから、特定の測定方法が他の方法よりも優位になるためである。したがって、特定の断面を通過する河川の瞬間的な流量の「真の」

または「実際の」値を断定することはできない。最後に、伝播時間原理に基づいた3つの水中音響システムをジグザグに設置することによる流向推定に関する考察を提供した。

7. 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るとともに、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ー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) Kawajiri, S., Kawaguchi, T., Watanabe, Y., Hayakawa, H., Miyamori, Y., Nakamura, D., Yamashita, S.: Investigation report of geotechnical disaster on river area due to typhoon landfall three times on Okhotsk region, Hokkaido, Japan. *Soils and Foundations*. 59, 764-782, 2019
- 2) Yoshikawa, Y., Watanabe, Y., Hayakawa, H., Hirai, Y.: A STUDY OF ICE BREAK AND ICE FLOW DURING RIVER ICE BREAKUP. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*. 67, I_1075-I_1080, 2011
- 3) Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G.: Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*. 19, 117-127, 2008
- 4) Domeneghetti, A., Castellarin, A., Brath, A.: Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrol Earth Syst Sci*. 16, 1191-1202, 2012
- 5) Gensen, M.R.A., Warmink, J.J., Berends, K.D., Huthoff, F., Hulscher, S.J.M.H.: Improving rating curve accuracy by incorporating water balance closure at river bifurcations. *J Hydrol (Amst)*. 610, 127958, 2022
- 6) Al Sawaf, M.B., Kawanisi, K., Gusti, G.N.N., Khadami, F., Xiao, C., Bahreiniotlagh, M.: Continuous measurement of flow direction and streamflow based on travel time principles using a triangular distribution of acoustic tomography systems. *J Hydrol (Amst)*. 617, 128917, 2023
- 7) Petersen-Øverleir, A., Reitan, T.: Objective segmentation in compound rating curves. *J Hydrol (Amst)*. 311, 188-201, 2005
- 8) Sivapragasam, C., Muttill, N.: Discharge Rating Curve Extension - A New Approach. *Water Resources Management*. 19, 505-520, 2005
- 9) Muste, M., Fujita, I., Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour Res*. 44, 2008
- 10) McMillan, H., Seibert, J., Petersen-Overleir, A., Lang, M., White, P., Snelder, T., Rutherford, K., Krueger, T., Mason, R., Kiang, J.: How uncertainty analysis of streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications. *Water Resour Res*. 53, 5220-5228, 2017
- 11) Holmes Jr., R.R.: River rating complexity, <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70193968>, 2016
- 12) Lee, K., Firoozfar, A.R., Muste, M.: Technical Note: Monitoring of unsteady open channel flows using the continuous slope-area method. *Hydrol Earth Syst Sci*. 21, 1863-1874, 2017
- 13) Sawaf, M.B. Al, Kawanisi, K., Jilati, M.N., Xiao, C., Bahreiniotlagh, M.: Extent of detection of hidden relationships among different hydrological variables during floods using data-driven models. *Environ Monit*

Assess. 193, 692, 2021

- 14) Nihei, Y., Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation. Water Resour Res. 44, 2008
- 15) 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・研究所紀要 (XXXV), 2025
- 16) Falvey, H.T.: Effect of Gradients on Acoustic Velocity Meter. Journal of Hydraulic Engineering. 109, 1441-1453, 1983
- 17) Bahreinimotlagh, M., Kawanisi, K., Danial, M.M., Al Sawaf, M.B., Kagami, J.: Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge. Flow Measurement and Instrumentation. 51, 30-39, 2016
- 18) Al Sawaf, M.B., Kawanisi, K., Xiao, C., Gusti, G.N.N., Khadami, F.: Monitoring Inflow Dynamics in a Multipurpose Dam Based on Travel-time Principle. Water Resources Management. 36, 2589-2610, 2022