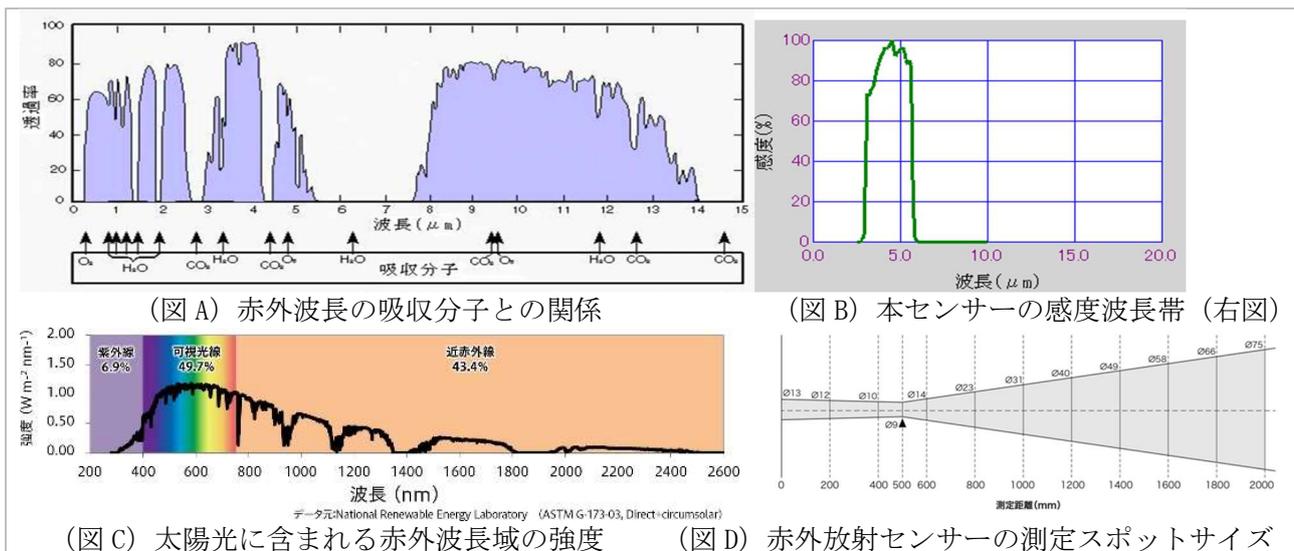


河川砂防技術研究開発【開発成果概要】

①開発事業者	組 織 名 (ふりがな)	開発代表者名	役 職
	株式会社クレアリンクテクノロジー	水原 隆道	代表取締役
②開発経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和5年度	令和 6年度	総 合 計
	999.9 万円	999.9 万円	1999.8 万円
③共同開発者氏名	(開発代表者以外の開発者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)		
氏 名	所属機関・役職 (※令和7年3月31日現在)		
森岡 将貴, 影林 佑哉, 緒方 旗生	株式会社クレアリンクテクノロジー ソフトウェアエンジニア、ADS部門長、IoTソフトウェアエンジニア		
上田 陽介, 保田 貞臣	ジャパンセンサー株式会社 大阪営業所担当、 エンジニア		
④開発の目的・目標 (様式革新-2に記載した開発の目的・目標を簡潔に記入下さい。)	<p>■ 長期河川水温観測に適した赤外放射水温観測機器の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 非接触測温における実用手法として赤外放射特性の観測手法を用い、赤外受光からの直接電気変換(一般的には赤外→熱→電気変換)での温度数値化を前提として機器開発、実証を進める。 ● 一般に、赤外放射測温はその赤外放射量(率、完全黒体を1として、水は0.9程度)が対象物により大きく異なり、また、その放射の受光路の影響を受けるため、一般的には、屋内の近距離(数メートル以下)での工業利用や、人工衛星から地表を観測する分布傾向分析での使用法が主であり、最近では人体表面温度計測に頻繁に使用される。 ● <u>低温域で比較的高精度・高確度で使用する目的にはあまり適さない。</u> ● 特に、雰囲気(光路空気)が変化する屋外、長距離(数メートル以上)では、水蒸気(H₂O)、二酸化炭素(CO₂)の赤外吸収帯の影響を排除、補正する必要があり、被測定物の放射率変化がある場合には、真値に近い高い確度を得ることが難しい。 <p>本実施計画では、フィールド観測や機器設計・構成技術、省電力データ通信、統計データ解析・処理技術などを組み合わせ、実フィールドでの検証データを基に河川や水場などにおける観測精度や特性の最適化を図ることを目的とする。</p> <p>■ 目標1 ロングレンジ光学特性を持つ赤外放射温度計のチューニング</p> <p>「赤外 H₂O 吸収帯を避け、長距離集光レンズ搭載での河川向け赤外放射観測センサー」</p> <p>センシングの中核となる赤外集光による温度観測値の変換装置であるセンサーに、InSb(インジウムアンチモン)素子からのダイレクト電流変換を行う高精度、高効率素子を用いて、(赤外放射測温では)水温のような低温域の感度を十分に確保し、また、測定赤外波長を 5.6 μm 以下とし、水蒸気など H₂O 吸収帯の影響を抑制し、水蒸気量が多い河川など水辺での湿度分布・変化の影響を受けにくい測定を可能とする。さらに被観測点との距離は、1 級河川の岸壁建物などからの利用で 10~30m 程度以上あることを想定し、長焦点集光レンズにより適切な狭スポットサイズで観測が可能となるようにセンサーを設計した。標的サイズは、図 D の通りであるが、10m で 42cm 径、20m で 87cm 径となり面平均放射で温度を算出する。本目的達成のため、本機器ひとつで、計測部をコンパクトに構成できるように計装・受光変換パラメータなどのプロファイルを調整し、センサー部の最適化を行う。本センサーの赤外波長の感度帯(図 B)は、水、CO₂ などの吸収帯(図 A)をカットし、また、太陽光に含まれる近赤外線波長(図 C)の影響を最小化している。ただし、当社実験で、波面反射した太陽光がセンサーに入射することで、高温が検出されるなどするため、対策・設置手法なども併せて検討することを目標にしている。</p>		





■ 目標 2 河川・水場の環境特性を考慮して測定値の適正補正手法を開発

目標 1 のセンサーで得られた測定値と、「直接計測での実測河川液温」を評価分析

観測精度を高めたセンサーであっても、赤外放射の測定値をゆがめる多種の環境要素を含む場合や、冬期の極低温での赤外放射量が相対的に大きく低下状況での測定値の単純利用では直接液温計測に比する高い温度測定精度の確保が困難である。ここでの目標は、測定部を安価・小型化達成のため、赤外光受光と機器気温測定値のみによって、真値と誤差が小さい水温を得る適正補正手法のモデル化、および、補正プロファイルの生成を行う。また、本目標 1、および 2 を達成、評価のための、評価システムを設計・実装し、通年を通じた気候・気象変化に伴う、環境外乱による影響が少ない、観測ユニットの構成を目指した。

■ 目標 3 (R6) 最適観測のための最適化・実用化など

令和 6 年度においては、観測システムの性能向上に加えて、設置方法などの最適化や、可視化ツールなどの充実を図り、システム全体の完成度向上と、長期的な観測に耐えるシステムを検討した。また機器の小型化や省電力化によって、設置面積の削減を行うことで、より適切な観測ポイントを設置場所として選択できる自由度や量産時の経済性も視野に入れた実用化を目指す開発を行った。

⑤開発成果

■ 開発成果 進捗概要

- 最適なセンサーのチューニング → 満了
- 非接触測定器・測定システム (セルラー通信、LoRa受信機) → 開発完了、R6小型改良完了
- 対照実験用 液温直接計測サテライト機器 (LoRa送信機) → 開発完了
- クラウドデータストア (既存システムを利用) → 正常稼働中
- コンカレント・準リアルタイムWebUI → 開発完了、正常稼働中
- データ処理・可視化・分析ソフトウェアなど → 開発完了
- 非接触計の柔軟な設置と設置省面積化に寄与する専用設置金具 → 開発完了
- 通年季節変動データのサンプリングと分析 → 2025/3/26満了(観測機材撤去済)

■ 令和5~6年度 実証・実施成果

- 多摩川2箇所での、実証検証完了
- 河川の表面付近に加えて、深さ30cm付近の実測温度の推計計算の実施を完了
- 非接触観測データのノイズ除去、補正法の最適化の実施完了
- 補正出力データの実測値との統計誤差などを分析

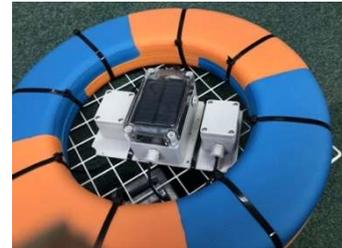
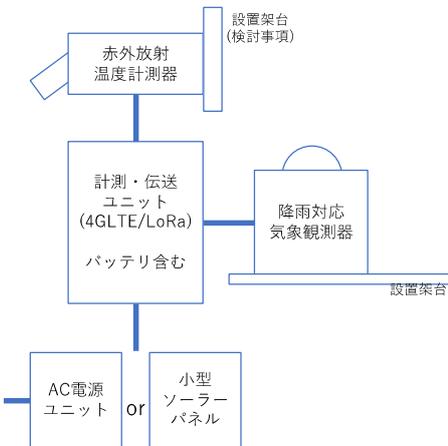
■ 詳細

1. 実証・観測のための観測機器の設計・開発

実証用観測機器は、以下のユニットで構成される

- ・データ処理・伝送ユニット（12Ah 12V 蓄電池、別途 20W ソーラーパネル）
- ・赤外放射温度計
- ・環境計測センサー（気温・湿度・照度・日射・風量・風向等）
- ・フロート（浮き輪）型表層温度測定機器（3000mAh 3.7V 直電値、5W ソーラーパネル）

本開発の実証データ取得のための検証ユニットとして、図 E 機器構成にて、実河川（多摩川・東京都）2カ所、並びに、当社屋外バルコニー部（京都府精華町）に設置した上で、5分間隔の水溫、環境測定データを常時自動取得するシステムを構成した。フロート型機器と、データ処理・伝送ユニット間は、920MHz 特定小電力 LoRa 通信方式の無線接続により接続し、省電力・長期観測に適した設計としている。観測データは、ほぼリアルタイムにデータ処理・伝送ユニットに集められ、クラウドストレージにセルラー回線によって伝送される。本実証においては、分析のため多量の測定値を伝送している。

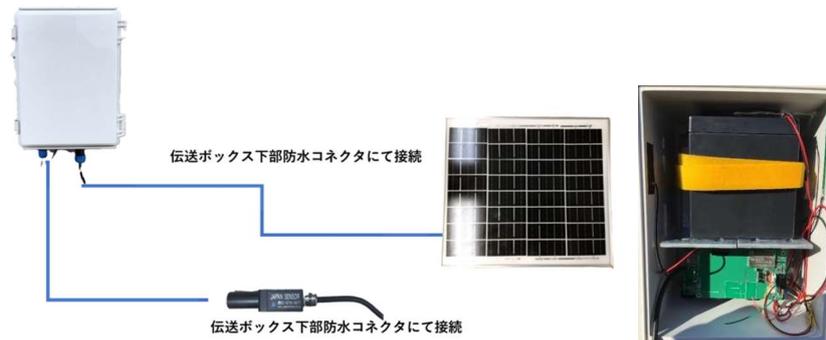


(図 E) 検証・実証用 機器構成

計測伝送得ユニット

直接液温計測フロート

本実証機器、および、観測データをもとに、令和6年度において、センサー類の最適化、機器の小型化を行い、河川水溫への影響などがみられないファクタを取り除き、観測機器やセンサー構成を最適化した。また、消費電力の抑制、設置フットプリントの小型化を達成した(図 F)。



(図 F) 令和6年度に改良した、小型化実用サイズの機器構成(容積40%削減、60%の省電力化を達成)

2. データ解析と河川温度計測プロファイルの開発

気中水分量が多い（気温変化での相対湿度に追随）、またその季節変化が多様な河川や日本の屋外環境において、赤外受光センサーの環境外乱等による測温誤差の変動は最も注意を必要とする部分である。この課題について、次のようなアプローチで解決を進めた。

- 温度ドリフトの影響をセンサー内で自律補正
- 小型気象観測機器の併用、ならびに、可能な範囲で物理接触水溫測定によって実証・観測データとの比較対照サンプリングを行い、機器技術の有効性の検証と同時に、適切な補正、放射特性影

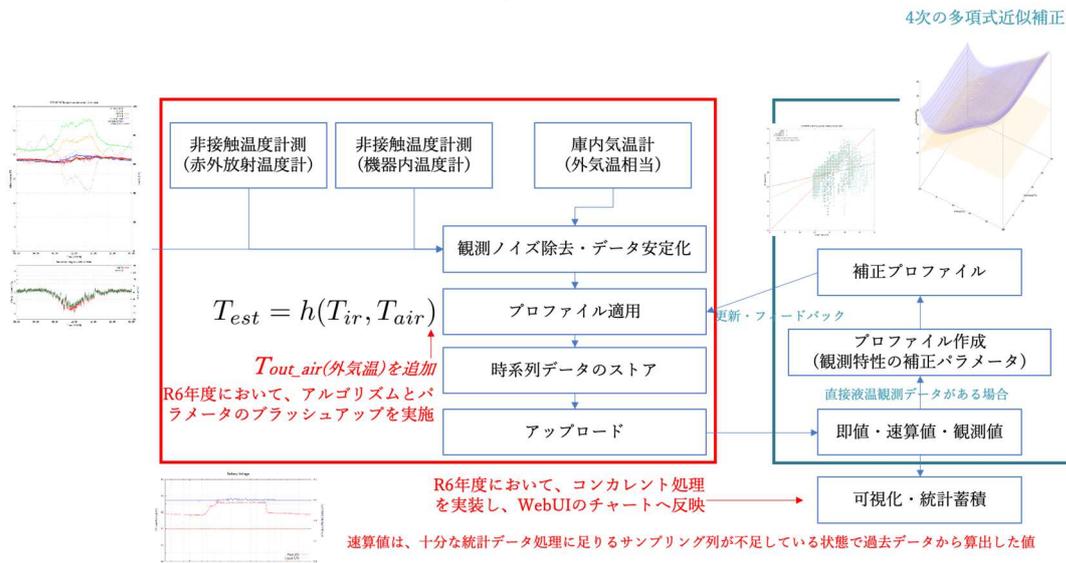
響パラメータの導出などを行った。本要求目標である、±2℃程度の誤差精度への安定的な着地のため、実証環境下での±1℃誤差程度の設計指針で調整を行った。(センサーの再現性が0.5℃程度、外乱誤差が大きいのが課題であり、精度向上のための細かな工夫を重ねた)

- 設置状態(角度、方角など)による観測精度の向上を目指し分析と対応を検討
- 最適な設置方法や、河川での外乱(反射や気溜まり)などを低減
- 赤外放射温度計から得られる温度値を、外部情報から適切に補正す

などの手法によって非接触温度計測を河川環境向けに最適化を進めている。機器開発などを終えた後、令和5年11月から順次、機器を設置し、計測を開始し、令和6年においては、機器の改良小型化も併用したうえで、令和7年3月において実証観測を完了した。

■ 観測から・解析・プロファイル開発のフローの確立

赤外放射のセンサー性能の向上は前述のとおりだが、雰囲気による外乱などで誤差が生じることが実際の観測で判明したため、その精度や計測値の補正によって非接触計測値から表層、深部液温の真値(ここでは便宜上、直接計測液温値とする)へ補正出力(推定値算出)をする必要がある。真値を推定するため、完成目標のモデルを右のフローのように想定し、演算による定式補正プロファイルを導出することを試みた。このプロファイル作成の手順は、真値が判明している各計測結果を集計し、外乱の非相関パラメータを取り除き、最終的に得られた、赤外放射温度と同機器内部温度(ほぼ外気温に等しい)のみから、真値を推定する3元4次関数を定義し、最小二乗法によるフィッティングを行い、係数を得て、それをプロファイルとした。(左のフロー図を参照)



■ データ取得状況と分析および考察

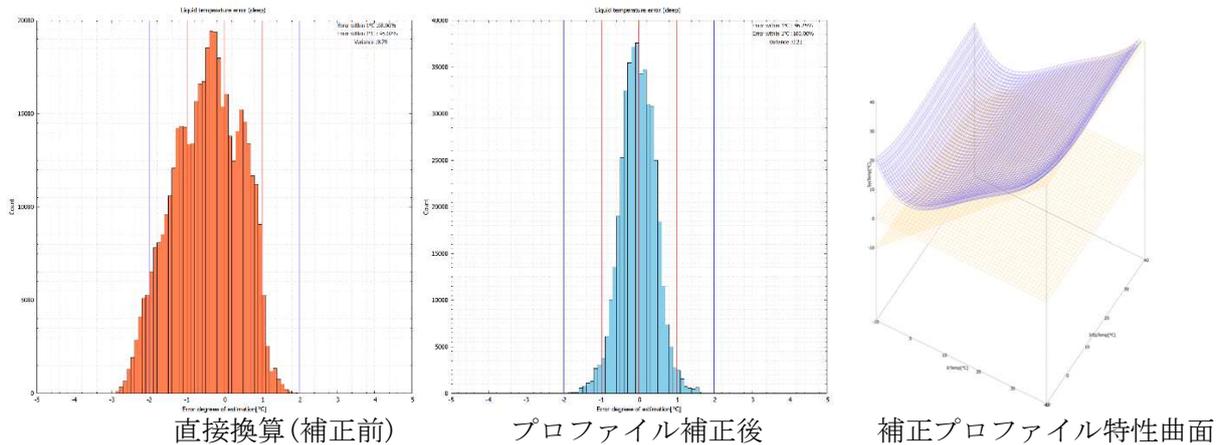
先に提案したプロファイル補正演算手法を用いて、これら補正をすることを試みた。令和5年～同6度における測定期間(2023/12-2025/3)の赤外放射計測と実測液温の差を求め、補正誤差精度を評価した。この成果では、おおむね、誤差1℃以内に約95%以上のサンプルデータが収まり、誤差2℃以内には99%以上が収まる。誤差分布における2地点分の結果からは、河川表層のばらつきの方が、30cm深部のばらつきより若干大きいことが確認できた。原因は、表層部分の実測温度は、日中の太陽照射による瞬間的な熱に左右され、いずれの測温方式でも瞬時値のばらつきが大きい。これらの影響を抑制するため、時間方向のノイズ除去フィルター処理の追加や、外気温ファクターを追加し、本最終報告時点における誤差補正特性プロファイルをより精度確保がしやすいものとなった。また、夜間においては、日射が無くなることから、極めて安定性の高い計測が実現できている。

本非接触観測手法は、赤外放射を用いており、また、赤外受光エネルギーを温度変換するために、内部ヒータを使用しているなど環境温度の影響による誤差、および、ノイズを受けやすい。また、極低温(0℃付近、実証では、10℃弱以下)において、温度の過少評価が発生しやすく、センサー感度の温度分布補正を必要とすることが令和5年時点から予測できていた。2カ年の観測によって、冬期のサンプリングデータを得られたことによって、通年の気候変化を補正プロファイルに組み入れること

に成功し、低温での温度感度不足を補うことに成功した。

令和5年度の設置初期で、確認、疑念の払拭のための証左確保の為に設置した多くの環境センサーについては、それらの観測結果と、水温変化や、赤外光への影響の実質的な相関ファクターがなかったことから、最終的に、赤外放射エネルギーからの換算温度、センサー機器内温度、外気温の3パラメータに依存した、補正プロファイルが妥当かつ、十分との結論に至っている。

補正プロファイルは、3元4次方程式のパラメータ導出をフィッティングカーブ計算によって求解し、実測値を4次曲面上にマッピングする方式を採用した。下図は、補正前の誤差偏り、誤差ばらつきが大きな状態がみられ、適切な補正によって、液温実測真値の誤差が収束すると同時に、分散の小さな正規分布による計算値が得られており、実用精度に至っていることが確認できた。



また、誤差要因の最も大きな課題である、直射の川面での乱反射影響であるが、設置条件による季節変動や時間帯依存（太陽方位）が大きいことがわかっており、春から夏場にかけての昼間の川面などへのIR乱反射光による測定部への入射を完全に防ぐことが難しいとの結論には至っている。設置金具において、最適な設置角を成すように器具構成に努めたが、設置場所の日射状況によっては、これらの過剰IR検出が生じる。令和6年度において、これらを統計的に抑制することを試み、オーバーサンプリング値から、実際にIR乱反射光の影響を低減したデータをフィルター抽出する処理によって、いくらかの誤差低減効果を図ることができた。

通年を通した実証計測において、本赤外放射温度計測器の河川での使用は、実用温度域にて、いくつかの具体的な誤差拡大要因を持っていることがわかった。

- ・ 実際の水温が極低温(0~7°C程度以下)
- ・ 実際の水温と外気温の差が著しく大きい場合
- ・ 冬期の南風などの急峻な温風による気温上昇(実証確認においては5以内で10°C超の上昇)で、水温の変化が見られない場合

いずれも、外気温による影響の範囲と考えられる事象である。令和6年度の改良として、外気温の測定法をIR計測器内の温度計以外に、外気温計を使用し、それを加えた補正法に修正することで、精度の改善を図ることができた。各観測データ、補正後の比較データ、補正プロファイルなどは、データセットやチャートとして報告データ一式として収録した。

■ 観測機器の低消費電力化を達成

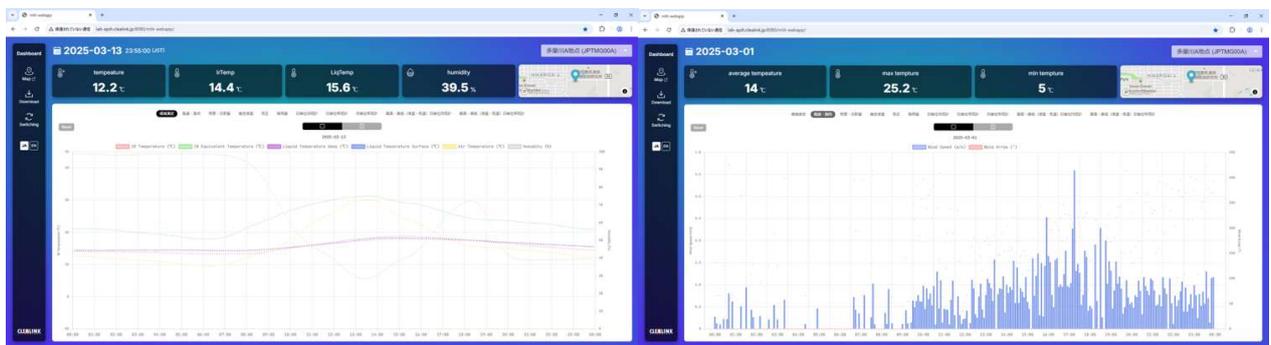


最新の観測機を15°C~20°Cの外気温環境に放置し、充電せずに設計上の動作・伝送間隔で連続稼働試験を行った。ほぼ新品12V 5Ah(60Wh)鉛蓄電池(標準的なもの)を使用し、満充電からバッテリー

一電圧が大きく低下し稼働できなくなるまでの連続動作期間は、10日間を達成した。実際は、バッテリーの劣化を加味する必要があり 10%程度の低下と、低温時の出力低下を想定する。無日照期間を7～9日程度とし、10.5V程度を給電終止電圧と定義する。また、バッテリー交換のサイクルは一般的な気象条件の地域で3年程度、寒冷地では2年程度が好ましい。

■ コンカレントデータ（準リアルタイム+並行処理）処理と Web システム上での可視化

連続自動観測するシステムの特長上、現在状況と観測結果、誤差補正結果をタイムリーに確認したい。そのため、観測結果を、随時取り込み、解析、誤差補正、可視化（グラフ描画）の一連の処理を、複数の観測システムからのデータによって、効率的に行うシステムと、可視化 UI を開発し、本観測データに適用した。これによって、最短で 10～20 分程度のリアルタイムとの差にて、河川の観測結果を目視できるようになっている。（実際には、バッテリー寿命やサンプリングパラメータなどにより変化する）

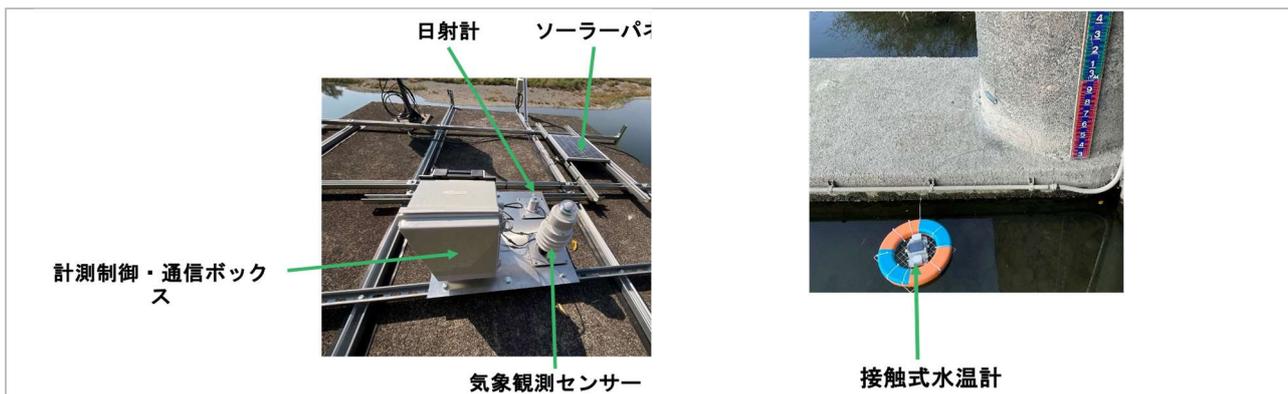


■ 機器設置と設置最適条件

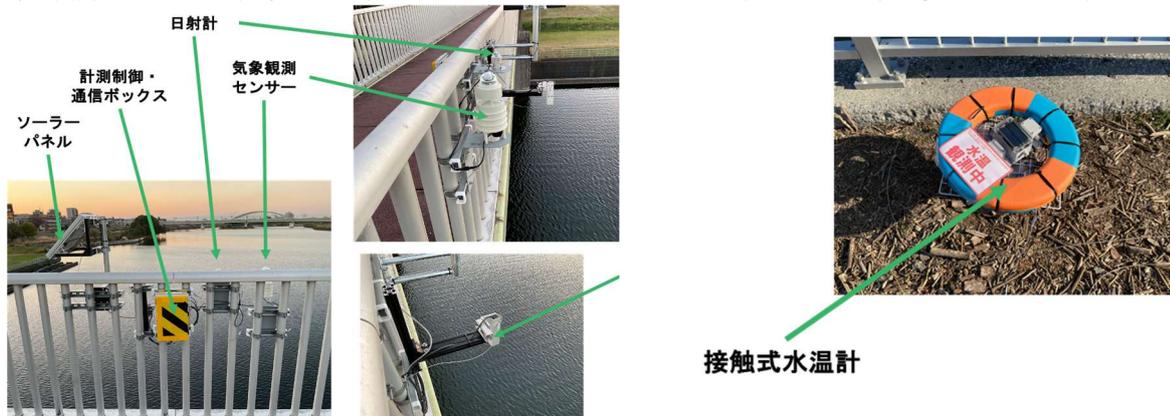
本実証では、以下の2箇所の設置場所を選定しそれぞれの設置環境と測定条件に合う条件を算出しセンサーなどを設置した。



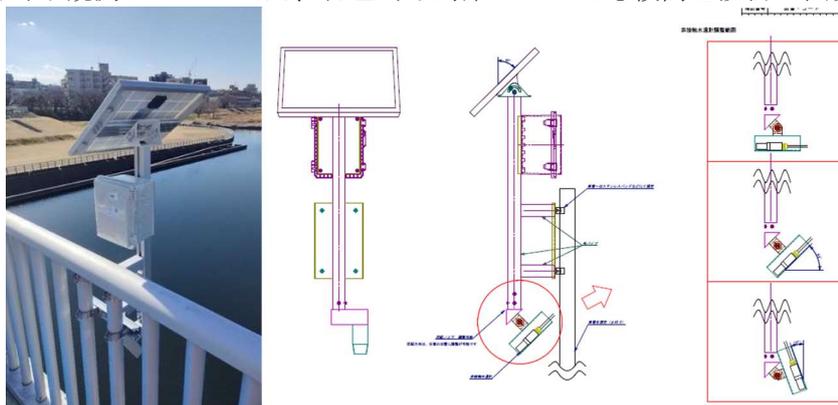
設置場所その1：田園調布（上）水位観測所 東京都大田区田園調布1丁目（左岸）



設置場所その2：二ヶ領宿河原堰 左岸：狛江市水神下/右岸：川崎市多摩区宿河原



日射の影響の低減は、設置環境に大きく左右され日中の観測にのみ影響を与える要素である。耐用高度(仰角)から、川面での乱反射の影響を抑えるセンサーの設置角を計算し、設置方法を最適化することで問題を低減できることが分かっている。すでに、2箇所の実証環境の差でもそれを示している結果を得ており、それらの条件から、設置場所選定基準などを加味して、専用の設置金具を考案するなど、実用的な観測システムの内、物理的な対策についても検討と設計・開発を行った。



考案した専用金具

⑥今後の実用化や改良検討の余地

- 機器搭載ファームウェアを量産規模での管理が可能な仕組みに改良・更新
- 赤外放射温度センサーのサンプリングパラメータの改良検討
- 河川(水量)規模の大きく異なる河川の測定サンプルの強化やそれに基づくプロファイルの適用
- 本提案の瞬時値の補正手段に加え、変化量に着目した解析手法の検討