河川技術論文集, 第32巻, 2026年6月

赤外線測定技術を用いた非接触式河川水温計測システムの開発および水温補正に関する検討

DEVELOPMENT OF THE NON-CONTACT RIVER WATER TEMPERATURE OBSERVATION SYSTEM WITH INFRARED SENSING AND INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE CORRECTION

冨家雄一[1]・野谷靖浩[1]・渡邊明英[2]・松延和彦[2]・森田正人[1]・
若杉佳功[3]・菅野修平[3]
Yuichi FUKE, Yasuhiro NOYA, Akihide WATANABE, Kazuhiko MATSUNOBU,
Masato MORITA, Yoshinori WAKASUGI and Shuhei KANNO

[1](株)東京建設コンサルタント　流域環境事業本部　環境モニタリング研究所
（〒330-0841 さいたま市大宮区東町1-36-1 トーケン大宮ビル）
[2]正会員　工博　(株)東京建設コンサルタント　環境防災研究所
（〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6）
[3] (株)東建エンジニアリング（〒330-0841 さいたま市大宮区東町1-36-1）

既存の計測技術を活用して，非接触により連続観測が可能であり，維持管理が容易な非接触式水表面温度連続計測システムを開発した．水温計測のベースとなる機器として，放射温度計及び赤外線(IR)カメラの2種類について検討を行った．実験水路での予備検証結果を踏まえ，多摩川における実証実験を実施し，濁度や反射光等の影響や気温および水面水温と水中水温の差の関係について確認するとともに，データの解析を行った．データの解析については，接触式ボタン型水温計との測定値を比較した結果，2種類の非接触観測機器はいずれも気温と連動して測定結果に差が出ることに着目し，補正式の検討を行った．最後に，システム全体の管理コスト面の評価を行い，開発成果をとりまとめた．

Key Words: *water temperature, continuous observation, non-contact sensor, correction formula*

１．はじめに

河川の水温観測は，現状では月1回の観測が基本となっている[1)]ため，河川環境・魚類の生息への水温の影響を把握するために十分な水温データが取得されていない．また月1回の観測では1日の時間変化，最高・最低水温は捉えられず，魚類の生息環境の変化など将来予測の推定もできない．今後の河川環境の把握のためには，河川水温の継続した観測を行うことが必要である．赤外線放射を用いた非接触式水温機器は，古くから研究開発が行われている分野のひとつであり[2), 3)]，観測コストの縮減がなされている現在では，実用的な河川水温測定手法としての利活用の可能性が高い．その一方で，現状では水温の長期間に及ぶ連続的な観測は，点検やデータ回収など管理コストが課題である．

また，近年では特に海岸・海洋分野においては，衛星画像[4), 5)]やUAV[6)]を利用したリモートセンシング手法が確立されている．他方，現状では，河川においては非接触式の連続観測で適用できる観測機器がない．

本開発の目的は，非接触で連続観測が可能であり，かつ維持管理が容易な「非接触式水表面温度連続計測システム」を開発することである．

２．検証期間および利用した機器

(1) 検証期間

検証は2段階に分けて行った．まず，予備検証として令和5年度において，非接触式水温機器の機器性能や適用条件を実験水路にて実験・検証した．次に，令和6年8月～令和7年1月において，実験水路の検証結果を踏まえ，実河川(多摩川田園調布地点)において実証検証を行い，設置方法による精度検証，補正式の検討等を行った．

(a) 放射温度計　　(b) IRカメラ

図-1 利用した水温計測機器

表-1 放射温度計の仕様

測定波長スペクトル範囲	8～14μm：遠赤外線
測定範囲	-40℃～+70℃
最小標的サイズ	全角44度の円錐状
測定精度	-20～+65℃：±0.2℃以内
使用温度湿度範囲	温度：-55～+80℃ 湿度：0～100%R.H.
サイズ・重量	φ23×60mm、190g
電源	DC4.5～24V

表-2 IRカメラの仕様

測定波長スペクトル範囲	**7.5～13.5μm：遠赤外線**
測定範囲	**ハイゲイン：0℃～160℃** **ローゲイン：0℃～160℃**
観測範囲の標的サイズ	**44度(水平)、36度(垂直)**
測定精度	**100℃以下：±5℃**
センサーフォーマット	**640×512**
使用温度湿度範囲	**温度：-40～+70℃** **湿度：0～95%R.H.**
サイズ・重量	**D313×W233×H124(mm)，5.1kg**
電源	**DC12～24V**

図-2 比較用ボタン型温度計

(2) 開発に利用した観測機器

非接触式水温機器には，**図-1**に示す精密放射温度計(クリマテック社製 CAP-SI-111)(以下，放射温度計)ならびに赤外線カメラ(FLIR社製 FH-SERIES R)(以下，IRカメラ)の2種類を用いた．それぞれの仕様を**表-1**，**表-2**に示す．両者とも原理的には赤外線による水温測定を用いたものであるが，前者は比較的低コストで測定範囲内の平均値を出力するのに対し，後者は画像範囲内の任意のポイントにおける水温を出力できるという差異がある．測定値の比較対象とする接触水温測定には，事前に検定を行ったボタン型温度計を設置した．小型軽量の接触式水温計で，上記2種類の非接触式水温計と比較を行う際に利用するものである．その外観を**図-2**に，仕様を**表-3**に示す．

(3) 要求仕様の設定

河川環境・魚類の生息上の影響を水温観測で調べるにあたっては，一般に1～2℃あるいはそれより小さい誤差範囲での測定精度が求められる．他方で，現状では河川の非接触計測で技術的に可能な誤差範囲は未知であり，

表-3 ボタン型温度計の仕様

測定範囲	-20～+30℃（水中）
測定精度	0～+50℃：±0.2℃
応答速度	5分(水中)
サイズ・重量	30×40×17(mm)，23g
電源	DC3V内蔵、寿命：5年

図-3 実河川実証事件地点位置図[7)]

図-4 実河川機器設置状況

非接触式機器の特性を把握し補正方法を提案することを目的とし，要求される最低限の精度の目安として±2℃を設定した．

3．現場実証試験の概要

令和6年度に非接触式水温機器について実河川をフィールドとして，多摩川における現地試験を実施し，性能評価等（適用範囲，洪水時の観測，影響因子の抽出）の実証試験を実施した．この際には，前述の通り，令和5年度に東京建設コンサルタントかすかべ環境防災研究センター(埼玉県春日部市大場128-1)の実験水路において行った予備検証結果を参考とした．機器の設置は田園調布（上）の水位観測局舎とした(**図-3**)．

(1) 観測期間

検証期間は，洪水等で変動する流水，降雨や水蒸気，外気温等の非接触式水温計の計測値が影響を受ける条件等を把握する必要があることから，令和6年8月1日から令和7年1月28日までの6ヶ月で実施した．

(2) 観測システムの設置

図-4に示す通り，観測機器は，田園調布（上）観測所観測局舎屋上へ放射温度計・気象計（温度・湿度）・IRカメラを設置した．また局舎内に収納BOXを設置し，

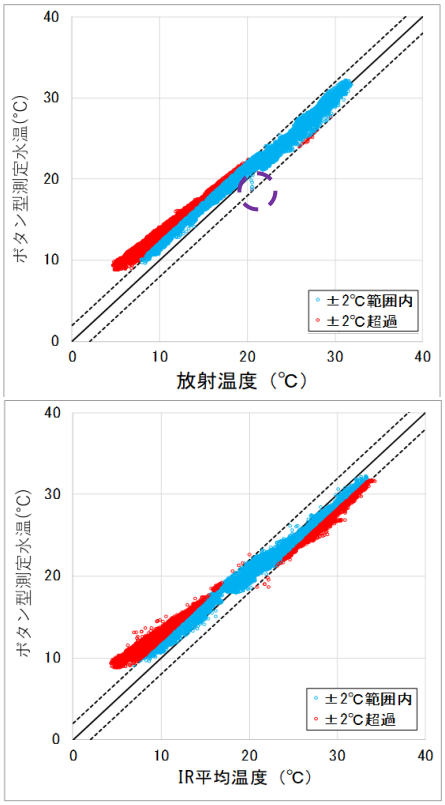


図-5 非接触式水温計と実測した表面水温との散布図
（上：放射温度計，下：IRカメラ）

バッテリとIRカメラロガーを収納した．水温観測精度の影響因子の可能性を踏まえ濁度計を設置した．また，水位計及び比較対照とするボタン温度計を観測塔に設置した．ボタン温度計は洪水時にも観測可能になるように鉛直方向に複数設置するとともに細かく水位に追従できるように移動式フロートを設置した．

4．現場実証試験結果のとりまとめ

(1) 実河川における測定温度差と時間帯・天候等の関係

図-5の散布図に示すとおり，放射温度計，IRカメラいずれの機器でも平均値では概ね±2℃の範囲(上下の破線の間)内だが，いずれの機器ともに低温時(概ね10℃以下)で測定温度差が大きく生じ，IRカメラでは25℃程度でも測定温度差が発生していることがわかる．なお，同図の紫破線円で囲んだのは，9/25 5:40～7:00のデータであり，接触測定のデータに2℃以上の有意でない低下があるため，以下の検討において分析対象から除外している．

次に時間帯・天候別による放射温度計，IRカメラの観測データについて，それぞれ以下の定義で整理した．時間帯は朝（6:00～10:00）・昼（10:00～14:00）・夕（14:00～18:00）に分類し，天候は晴天（連続日照時間4時間かつ連続降雨0時間）・曇天（連続日照時間0時間かつ連続降雨0時間）・雨天（連続日照時間0時間かつ連続降雨4時間）に分類した．

表-4 非接触温度計の天候・時間帯毎の平均温度差

非接触温度計 温度差(℃)		放射温度計	IRカメラ (平均)
晴天	6～10時	0.34	1.48
	10～14時	2.04	1.68
	14～18時	0.41	1.82
曇天	6～10時	0.73	1.1
	10～14時	0.57	1.07
	14～18時	0.06	1.06
雨天	6～10時	0.58	0.84
	10～14時	0.31	1.13
	14～18時	-	-

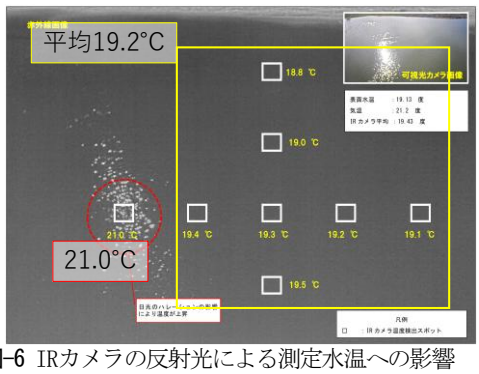


図-6 IRカメラの反射光による測定水温への影響

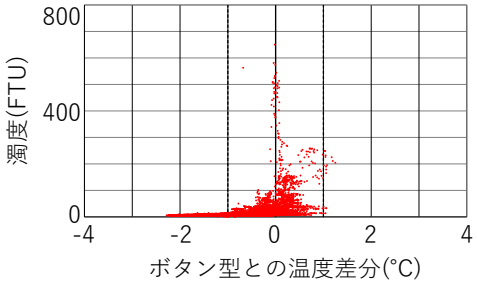


図-7 放射温度計の濁度によるばらつきの変化

分類ごとでのボタン型水温計との平均温度差を**表-4**に示す．晴天時ではIRカメラ，放射温度計ともに日中で測定温度差が大きく出る傾向にある．曇天時はIRカメラの誤差は晴天時より小さくなり，放射温度計についても同様の傾向を示す．雨天時はどちらの測定方式も曇天と大きく変わらない傾向であった．このことから，特に晴天時の場合は，日射による影響を強く受ける．放射温度計においては10～14時の真昼の時間帯に大きくなり，IRカメラにおいては午前中～夕方まで全体的にやや大きくなる特性がある．この原因として，特にIRカメラの場合は光の反射の影響を強く受ける(**図-6**)．そのため，設置に当たり，南向きにならないように留意が必要となる．他方，雨天時は雨滴による測定結果への影響もありうるが，これの検証については今後の課題とする．

また，他の計測データとの関連性について，本実証試験の条件下では湿度・風に関しては水温測定結果には影

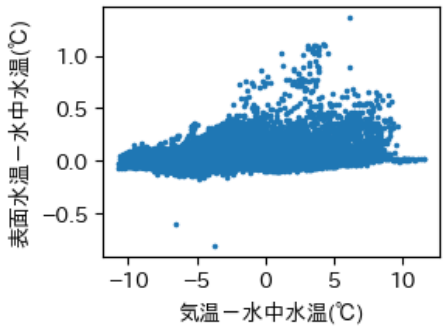


図-8 気温，表面水温の水中水温との差分の関係

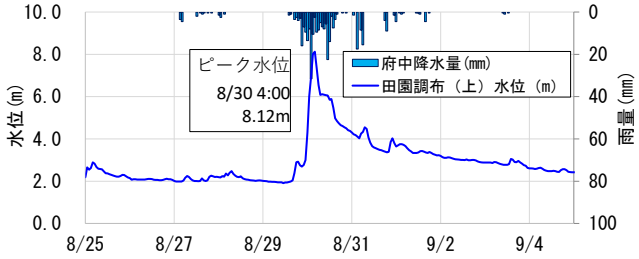


図-9 田園調布(上)水位と府中降水量

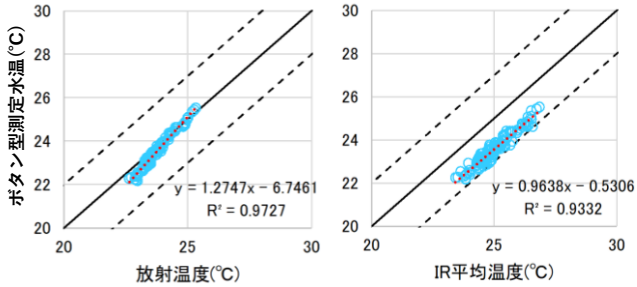


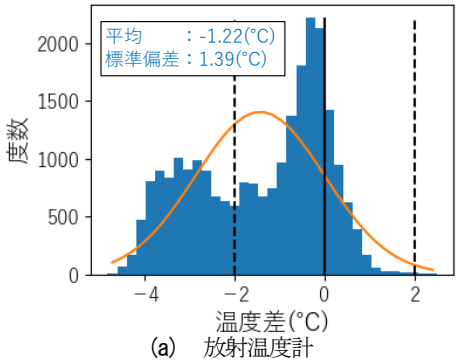
図-10 放射温度計(左)及びIRカメラ(右)の洪水時観測結果

響が確認されなかった．濁度について，例として放射温度計についてボタン型との差分を**図-7**に示す．結果の平均値への影響は明確ではないが，ばらつきは濁度が高くなるほど小さくなる傾向にあった．濁度が高いほど粒子による赤外線放射が多くなるためと推測される．IRカメラについても同様の傾向がみられた．

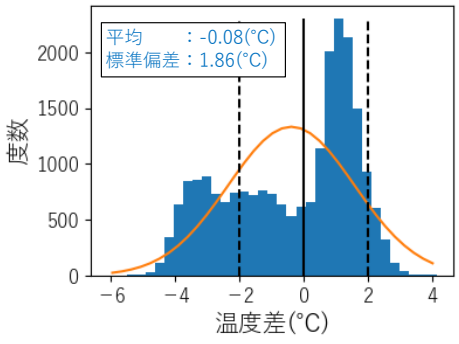
さらに，今回の赤外線による測定では原理的に表面水温の測定に限られるが，河川環境上の評価においては，水中も含む全体の水温の評価も重要となる．表面水温は気温の影響を特に受けやすい．**図-8**に水面下のボタン型水温計を利用した気温－水中水温と表面水温－水中水温の散布図を示す．本検討ではボタン型水温計の測定も平常時の水面の高さ付近に限るため，縦軸の差分が大きく現れないデータも多いが，若干正の相関傾向がみられる．

(2) 洪水時の観測精度

実証試験期間内で最も大きな出水が記録された8月30日のデータについて分析し，洪水時における機器の適用性について検証した結果，±2℃以内の精度で観測ができていることを確認した．上流の府中地点の降水量と観測地点の水位ハイドログラフを**図-9**に，測定水温について



(a)　放射温度計



(b)　IRカメラ温度計

図-11 ボタン型温度計との測定温度差のヒストグラム(補正前)

ボタン型水温計と比較した散布図を**図-10**に示す．

(3) 現地実証結果に対する補正式の検討

現地実証試験データのとりまとめ結果より，放射温度計，IRカメラともに±2℃の精度を超過するデータも散見される結果となったが，今後，実運用に向けては気候変動による影響を捉え生態系への影響等の基礎情報とするためには，いずれも更なる精度向上が必要になる．

ここでは，非接触式機器により観測された水温について，接触式の測定と比較して特に気温の影響を受ける可能性が高いと考え，気温をパラメータにして補正する補正式を作成した．

a) ボタン型温度計との差分分布整理

放射温度計，IRカメラそれぞれについて，ボタン型温度計による表面水温との差分を取り，ヒストグラム化した．これらを**図-11**に，平均，標準偏差が等しい正規分布曲線(橙色)と重ねて示す．いずれもヒストグラムは二山となる傾向を示している．また，特に放射温度計については負の値(放射温度計水温＜ボタン型測定水温)に偏っている．

観測全期間を通した，放射温度計とIRカメラそれぞれのボタン型温度計表面水温との差分の時系列図を**図-12**に示す．差分の値は9月下旬ごろから徐々に下がっているが，年明けの1～2月には徐々に下げ止まる．このことから，水温と同時計測している気温データを用いて水温計測値を補正できると考え，補正式の立式を試みた．

b) 回帰分析による補正式の立式

それぞれの計測水温とボタン型水温計の差について，

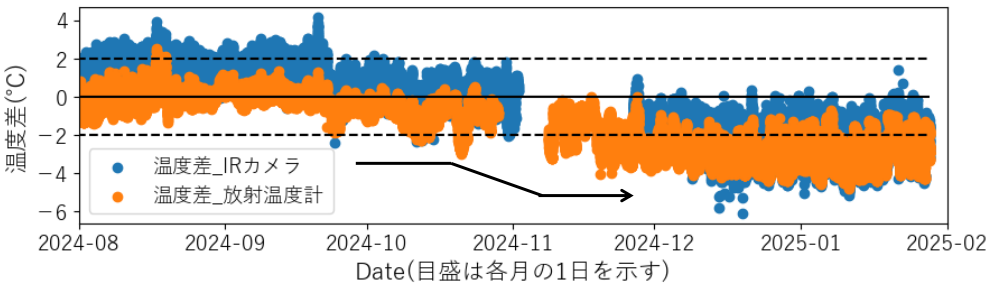
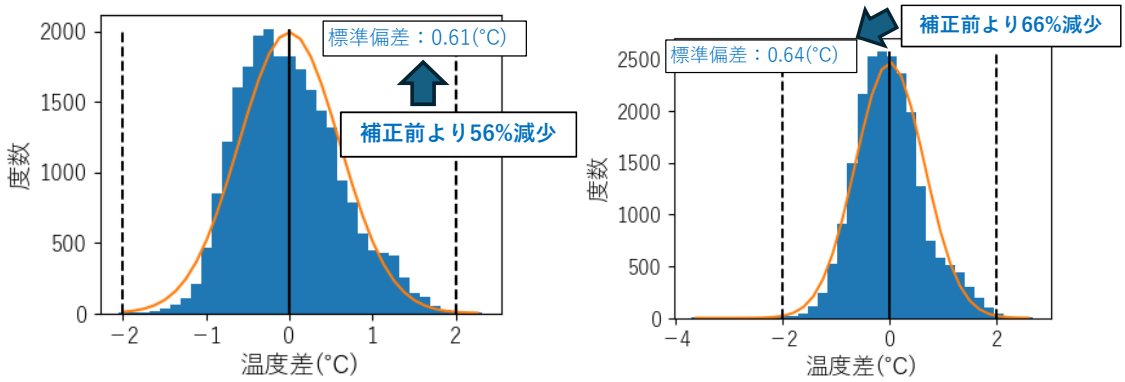


図-12　ボタン型温度計との測定温度差の時系列分布

表-5　補正後のボタン型温度計との温度差に関する整理結果

	放射温度計	IRカメラ温度計
標準偏差(：ばらつき)	0.605	0.644
± 2 ℃からの外れ数(率)	7(0.03%)	80(0. 37%)
± 1 ℃からの外れ数(率)	2303(9.55%)	2581(11.9%)



(a)　放射温度計　　(b)　IRカメラ温度計

図-13　ボタン型温度計との測定温度差のヒストグラム(補正後)

水温と同時測定している気温，および非接触水温計とボタン型水温計との測定温度差を説明変数，(ボタン型水温計の値を真値と仮定した)水温を目的変数とし，近似式を決定する回帰分析を行った．

回帰式の次数については，1次式，2次式の2ケースで試行したが，要求仕様として設定した±2℃以内に収めるという目的に照らし合わせると，1次式でも十分な結果が得られていると判断し，以下では1次式での近似による結果のみを掲載している．

加えて，気温と水温測定値の差分との相関についても，相互相関を取ることにより時間差がみられるかどうかも検証したが，時間差はほとんど確認されなかった．

得られた補正式は，次の(1), (2)式の通りである．

$$T_{radi} = t_{radi} - 0.135t_{air} + 3.86 \quad (1)$$

$$T_{IR} = t_{IR} - 0.189t_{air} + 3.87 \quad (2)$$

ここに，T_{radi}：補正後の放射温度計温度(℃)，t_{radi}：補正前の放射温度計温度(℃)，t_{air}：現地測定気温(℃)，T_{IR}：補正後のIRカメラ温度計温度(℃)，t_{IR}：補正前のIRカメラ温度計温度(℃)である．

c) 補正式の適用

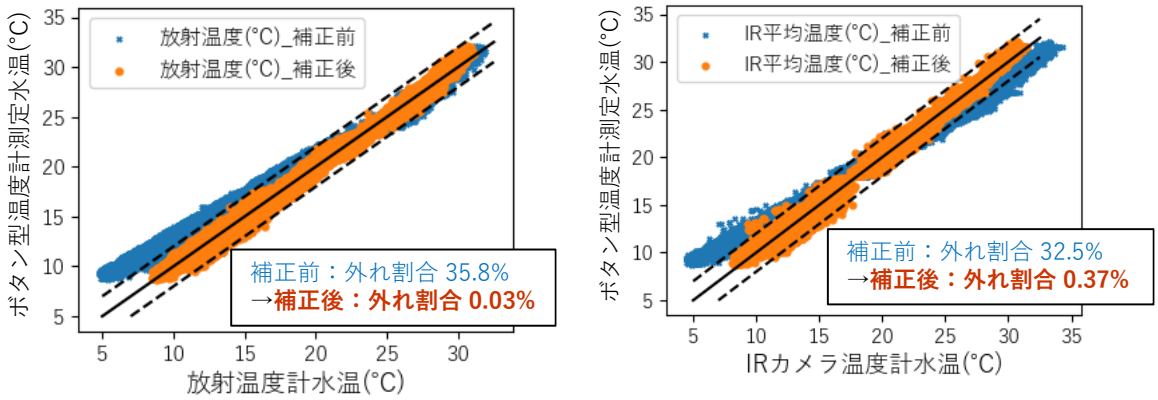
補正結果について，それぞれの測定手法およびケースによる，補正後のボタン温度計との温度差について，標準偏差および外れデータ数を**表-5**に示す．平均値については，いずれのケースも補正式の定数項により，数値誤差を除けば0になることを確認している．

補正前と比較して，標準偏差は0.67℃以内(3σ＜2℃，ここにσ：標準偏差)の範囲に収まった．外れ値の割合に関しては，IRカメラで若干3σ(約0.26%)の範囲を超えるが，±1℃からの外れ率はいずれも1.5σ(約13.4%)以内に収まっている．これは，放射温度計に比べると，IRカメラの方が，正規分布よりも中央付近と両側の裾野に広がる，尖度の大きい分布となるためと考えられる．

図-13に，**図-11**と同様の方法で補正後のボタン型水温計との温度差のヒストグラムを示す．上述の「IRカメラの方が尖度の大きい分布になる」という傾向が実際に現れている．また，若干正の方に歪みはあるが，概ね左右対称な形状となっている．**図-14**に補正前後で散布図を比較して示す．いずれの測定手法においても，気温を用いた補正により，±2℃以内の範囲に収まっていることが確認される．

(4) 設置および維持管理コストに関する検討

非接触式水温計の放射温度計とIRカメラを局舎屋上および橋梁欄干に設置した場合の設置コストを評価した．



(a)　放射温度計　　(b)　IRカメラ温度計

図-14　補正前後における散布図の比較

結果，放射温度計では約270万円，IRカメラで約570万円と算定された．一方，維持管理コストについては，年4回の定期点検等を行うことを想定した場合において，概ね30万円/年程度と算定された．現況での接触式自動監視装置の設置イニシャルコストは1000～1500万円程度であることと比較すると安価である．また，非接触であることから維持管理も12回/年から4回/年に減じられる．これらを考えれば，ライフサイクルコストの優位性は高いということが分かる．

5．おわりに

本研究では，電波流速計およびIRカメラという2種類の非接触の測定機器を用い，陸上および橋梁から水温を連続的に計測可能なシステムの開発を行い，ボタン型温度計との比較により測定精度の検証を行った．また，気温をパラメータとして用いた補正式を適用することにより，3σの管理精度の中で±2℃以内に収めることが可能となることを確認した．

今回利用した放射温度計，遠赤外線カメラは，河川水温を観測対象として連続的自動観測を行う専用の機器ではなく，本研究はこれらを利用して河川を対象とした実証実験を行い，システムとしての社会実装へつなげる提案を行ったものである．特に，濁度や反射光の影響の検討や，洪水時も含めて適用可能性を示すことができた点において，今後の河川環境のモニタリングに向けて非常に有意義な提案であると考える．

一方，今後の課題としては，設置する箇所の環境特性にあわせた補正手法の検討が挙げられる．具体的には，水面の波の多少でも計測精度が変わる可能性があるほか，今回は気温のみを用いた補正であったが，地域の違いにより日射の影響等を補正の説明変数に加える必要がありうる．また，今後，前述の雨滴と河川表面水の区別も含め，河川水温に特化した，あるいは水温環境の特性を踏まえたより高性能の機器が開発される可能性があり，より的確な観測を行うための観測機器等について継続的に情報を収集・把握する．そのうえで，リアルタイム配信時の欠測処理等対応も含めて，機器・システム性能の更なる向上に向けた検討を行うことが必要である．

謝辞：本技術開発は，国土交通省 令和5年度 革新的河川技術部門の公募テーマ「非接触式水温機器の開発」に参画し実施したものである．実施にあたり，国土交通省水管理・国土保全局河川計画課河川情報企画室ならびに国土交通省関東地方整備局河川部河川環境課には多大なるご協力をいただいた．記して謝意を表する．

参考文献

1) 河川水質調査要領（案）（令和6年8月　水管理・国土保全局河川環境課）第II章　公共用水域監視のための水質調査, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/youryou_ref2.pdf
2) 小倉義光，田中浩，木村竜治，平啓介，三沢信彦，石川浩治，八木橋章子，原克子，近藤洋輝，乙部弘隆：赤外線放射温度計とバケツ法による表面水温の比較，Journal of the Oceanographical Society of Japan,Vol.25 No.5, pp.255-258, 1969.
3) 藤村貞夫，花泉弘：熱赤外リモートセンシングによる温度推定，計測と制御，Vol.21, No.11, pp.14-19, 1982.
4) 川村宏：海洋リモートセンシング 第2回 衛星観測による海面水温，Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol.22, No.2, pp.206-211, 2002.
5) 細田皇太郎：衛星リモートセンシングによる海面水温観測，写真測量とリモートセンシング，Vol.52, No.5, pp.234-238, 2013.
6) 坂井伸一，岡田輝久，新井田靖郎：沿岸海域調査に係るUAV水温観測手法の開発，土木学会論文集B1(水工学), Vol.76, No.2, pp.1471-1476, 2020.
7) 国土地理院地図電子国土WEB，https://maps.gsi.go.jp/ (2024 年11月ダウンロード)

(2026. 4. 2受付)