

# Landsat-8 TIRS データによる 日本湖沼の表面水温推定の精度検証

作野裕司<sup>1</sup>・楨尾慶太<sup>2</sup>

## Precision test of water surface temperature estimation in Japanese lakes using Landsat-8 TIRS data

Yuji Sakuno<sup>1</sup> and Keita Makio<sup>2</sup>

**Abstract:** The objective of this study is to estimate the precision of water surface temperature (*LST*) in Japanese lakes using Landsat-8 TIRS data for the just after 1 year launched in February 2013. The satellite / observed data set in 2013 was collected in main lakes of our country such as Lake Shinji, Lake Nakaumi, Lake Biwa, Lake Kasumigaura, and Lake Ogawara. The following matters became clear. 1) The *LST* precision by the single band method was about 1.6 - 3.1 °C. 2) The *LST* precision by two band method using TIRS band 10 and band 11 was about 0.9 °C. 3) The *LST* precision by two-band method, which considered the effect of the solar zenith angle correction for water-vapor absorption, was 0.9 °C. Therefore, The *LST* estimation by simple two-band method using TIRS band 10 and band 11 only was recommended by this research.

**Key words:** Landsat-8, thermal sensor, lake, SST, remote sensing

### はじめに

湖沼の富栄養化が問題となって久しい。湖沼の水温は、「そこに生活する生物と物質循環に大きな影響を与える」(西条・三田村, 1995) ため、行政や湖沼管理者の富栄養化対策にとって非常に重要なパラメータの1つである。湖沼生態系への水温影響は大別して

2つあり、1つは「温度の上昇にともなって生物の活性が高まる」(温度が10°C上がると、生物の活性がおおよそ2倍になる)、そして「水温の季節変化による湖水の停滞(成層)と鉛直循環(混合)による影響」がある(西条・三田村, 1995)。また、湖沼の表面水温は、その地域の気温とも関係し、大きな湖では沿岸の気温を緩和させる等の効果もある。しかし、琵琶湖のよ

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科・Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527, Japan.

<sup>2</sup> 元広島大学大学院工学研究科・Formerly Graduate School of Engineering, Hiroshima University.

受付日: 2017年11月7日, 受理日: 2018年2月5日, WEB掲載日: 2018年2月22日

表1 Landsat-8 TIRS センサの諸元.

Table 1 Characteristic of Landsat-8 TIRS sensor.

Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)	Swath (km)	Quantization (bits)
10	10.60 - 11.19	100	180 × 185	12
11	11.50 - 12.51			

うな大きな湖では、水温の水平分布の差も大きく、宍道湖のような淡水と海水が入り混じる汽水湖では時間的な変化も大きいと、時空間的な水温分布把握が難しかった。

このような問題点を克服するために衛星リモートセンシング (RS) による水温分布把握は、実測を補間する有力なモニタリングツールとして期待されている。衛星 RS による水温推定に関しては、NOAA や MODIS 等の熱赤外センサによって日本近海でも毎日、海洋の表面海水温を知ることができる (Sakaida and Kawamura, 1992; Hosoda and Qin, 2011)。しかし、これらの衛星の解像度は 1km 程度であり、日本の多くの湖沼で利用するには、粗すぎる解像度である。一方、LANDSAT TM・ETM や Terra ASTER 等の解像度 60 ~ 120 m 程度の高解像度の熱赤外センサを使って、湖の水温分布を把握する研究も行われてきた (Lathrop and Lillesand, 1987; Becker and Daw, 2005)。ただし、いずれのセンサも設計寿命を超えているため、観測停止の危険性を常に有している。こうした状況の中、2013 年 2 月 11 日に Landsat-8 (Irons et al., 2012) と呼ばれる衛星が NASA/USGS によって打ち上げられた。この衛星には、OLI と呼ばれる解像度 30m の可視～中間赤外のマルチスペクトルセンサとともに TIRS (Thermal Infrared Sensor) と呼ばれる熱赤外センサ (解像度 100m) が搭載されている (Reuter et al., 2015)。従来の Landsat-7 と比較して高い量子化 (12bit) と 2 バンド化が実現されているため、この衛星シリーズとしては、より高精度の水温分布推定が期待されている。すでに打ち上げから、5 年が経過しており、海外では TIRS の水温精度やその分布特性について論じられている成果も出てきているが (Aleskerova et al., 2016; Huang et al., 2017)、いずれも地域的な事例に過ぎず、検証されたとは言いがたい。また国内に至っては、成果がほとんどないというのが現状である。

このような背景から、本研究では我が国湖沼における TIRS データの実利用を念頭に、利用の第一歩として実用的な手法による表面水温 (LST: Lake Surface

Temperature) の精度検証を行うことを目的とした。なお、本論文ではアルゴリズム (推定方法) としての新規性は問わず、既存の基本的アルゴリズムを用いた「精度検証」を主眼とする。具体的には、日本の代表的な淡水または汽水の 5 湖沼において、打ち上げ直後の 2013 年の Landsat TIRS / 実測データセットを使って、表面水温推定式を校正する。校正した実用的な手法を別の日のデータセットを使って精度検証を行った。最終的に、その校正式を使って OLI データから得られた湖沼の水温分布の特徴を述べる。

## 方法

### Landsat-8 TIRS センサについて

Landsat-8 は陸域イメージャー「OLI」(the Operational Land Imager) と熱赤外センサー「TIRS」(Thermal Infrared Sensor) と呼ばれる、プッシュ・ブルームセンサ (pushbroom sensor: 像面センサ) つまり、1 ライン分の光検知素子を並べて 1 方向 (進行方向) にのみ走査を行うセンサを積んでいる。このプッシュ・ブルームセンサは、スキャナーのように機械的可動部分がないため、信頼性に優れている。このうち、本研究では表 1 に示すような特性を持つ「TIRS」データが使われる。このセンサの解像度は 100 m、観測幅は 185 km × 180 km である。また観測周期は 16 日であるが、観測軌道 (極軌道) は軌道同士で一部オーバーラップして撮影されるため、実際、宍道湖・中海の観測周期は 8 日となる水域もある。従来機である Landsat-7 の「ETM」の熱赤外バンドの解像度 60m と比べると、解像度の性能では劣っている。しかし、量子化が 8 ビットから 12 ビットに向上し、単バンドから 2 バンドへと性能が向上している。

### 実用的な表面水温推定法

TIRS の熱赤外センサを使って、LST を推定する最も単純で実用的な方法は、水面から鉛直上向きに放射されるエネルギーを以下のような「プランクの法則」

表 2 式 (2) と式 (3) における Landsat-8 TIRS データの温度変換係数.

Table 2 Conversion factors for temperature from Landsat-8 TIRS data using Equations (2) and (3).

Band	$K_1$	$K_2$	$M_L$	$A_L$
10	774.89	1321.08	3.34E-04	0.1
11	480.89	1201.14	3.34E-04	0.1

が成り立つと仮定して、計算する方法である.

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda[BT]}\right) - 1} \quad (1)$$

ここで、 $L_\lambda$  は放射輝度、 $h$  はプランク定数、 $c$  は光速、 $k$  はボルツマン定数、 $\lambda$  は波長、 $BT$  は輝度温度 (Brightness Temperature) を示す。衛星から観測できるのは、式 (1) の  $L$  であり、大気や放射率が無視できる場合、式 (1) の  $BT$  が、地上の温度に相当する。そこで式 (1) の定数項である右辺の「 $2hc^2/\lambda^5$ 」を  $K_1$ 、右辺の分母のうち「 $hc/k\lambda$ 」を  $K_2$  として、 $BT$  を解くと、式 (2) のような形となる。

$$BT_\lambda = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

実際、他の Landsat シリーズの熱赤外センサデータ同様 (Ahn et al., 2006)、TIRS でも式 (2) により  $BT$  が計算される。なおここで計算される温度は絶対温度 (K) であるが、本研究では実測温度の単位 (°C) に合わせるため、以後の計算では、すべて式 (2) で導かれる  $BT$  の絶対温度から「273.15」を引いた値として扱った。ここで  $L$  と  $\lambda$  の単位は「 $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ 」と「 $\mu m^{-1}$ 」である。さらに式 (2) の  $L_\lambda$  は式 (3) より TIRS が観測したデジタル値 (DN: Digital Number) から得られる。

$$L_\lambda = M_\lambda \times DN_\lambda + A_\lambda \quad (3)$$

ここで  $M$  と  $A$  は放射輝度変換係数で、 $M_\lambda$  と  $A_\lambda$  はヘッダ情報から得られる。本研究で実際に使われた  $K_1$  と  $K_2$ 、および  $M$  と  $A$  の値を表 2 に示す。ただし  $M_\lambda$  と  $A_\lambda$  の値は本来打ち上げ後の校正で別の値に置き換えられることがあるが、本研究で扱われたすべてのデータは同じ値であった。なお、このような単バンド

データから  $LST$  を推定する方法をここでは、「単バンド法」と呼ぶ。

一方、式 (2) では実際には「大気の影響」(主に水蒸気) を大きくうけるので、実測の  $LST$  とは異なる場合が多い。そこで、大気中での放射の散乱及び吸収の大きさが波長によって異なることを利用して複数バンドで大気効果を補正する SW 法 (Split Window Method) がよく使われる (McMillin and Crosby, 1984; 丹波ほか, 1991)。これを応用すると TIRS データでは Band10 (10 $\mu m$  帯) と Band11 (11 $\mu m$  帯) の、次のような式で大気の影響を補正することが可能となる。

$$LST = BT_{10} + \beta(BT_{10} - BT_{11}) + \gamma \quad (4)$$

この式は海表面と衛星の間の放射伝達方程式の解析から、通常の実測の温度レンジ (0 ~ 30°C 程度) において、右辺第 2 項の「 $BT_{10} - BT_{11}$ 」(大気補正項) と「 $LST - BT_{10}$ 」(左辺の  $LST$  から右辺第 1 項の  $BT_{10}$  を移行した値) がほぼ直線関係を示す、という結果に基づいて導出されたものである (横山ほか, 1992)。または、式 (4) を拡張して、以下のような式も使われる。

$$LST = \alpha BT_{10} + \beta BT_{11} + \gamma \quad (5)$$

ここで  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は、「実測  $LST$ 」と TIRS から得られる「Band10 と Band11 の  $BT$ 」との回帰分析で得られる係数である。このような 2 バンドデータから  $LST$  を推定する方法をここでは、2 バンド法と呼ぶ。なお、式 (4) と式 (5) は本質的に同意であるので本研究では式 (5) を使う。また大気効果を補正する 2 バンド法では、しばしば水蒸気吸収の天頂角 ( $\theta_z$ ) 補正として  $[\sec\theta_z - 1]$  を導入し (写真測量学会編, 1986; Lee et al., 2010)、以下のような式も提案されている。本研究でもこのような式が有効か確かめた。

$$LST = \alpha' BT_{10} + \beta'(BT_{10} - BT_{11}) + \gamma'(BT_{10} - BT_{11})(\sec\theta_z - 1) + \delta \quad (6)$$

表3 2013年におけるTIRS／水表面温度データセットの概要.

Table 3 Overview of TIRS / in-situ SWT data set in 2013.

Site	Data set acquisition date	Number of data set	LST range (°C)	Data set acquisition date	Number of data set	LST range (°C)
	Calibration			Validation		
1 L. Shinji	4/13, 7/11, 8/19, 11/7, 11/23	5	10.0 - 30.6	5/24, 8/12, 9/13, 11/16	4	13.9 - 29.5
2 L. Nakaumi	7/11, 8/19, 11/7, 11/23	4	12.4 - 31.5	5/24, 8/12, 9/13, 11/16, 12/2	5	10.5 - 30.5
3 L. Biwa	5/17, 6/27, 8/5, 8/21	4	13.3 - 30.3	5/26, 7/20, 8/14, 10/17	4	17.3 - 29.4
4 L. Kasumigaura	4/26, 8/16, 10/3	3	15.4 - 30.4	5/12, 9/17, 11/20	3	14.2 - 26.5
5 L. Ogawara	7/15, 10/19	2	16.1 - 22.9	9/17, 11/4	2	13.7 - 21.3
		18	10.0 - 31.5	Total	18	10.5 - 30.5

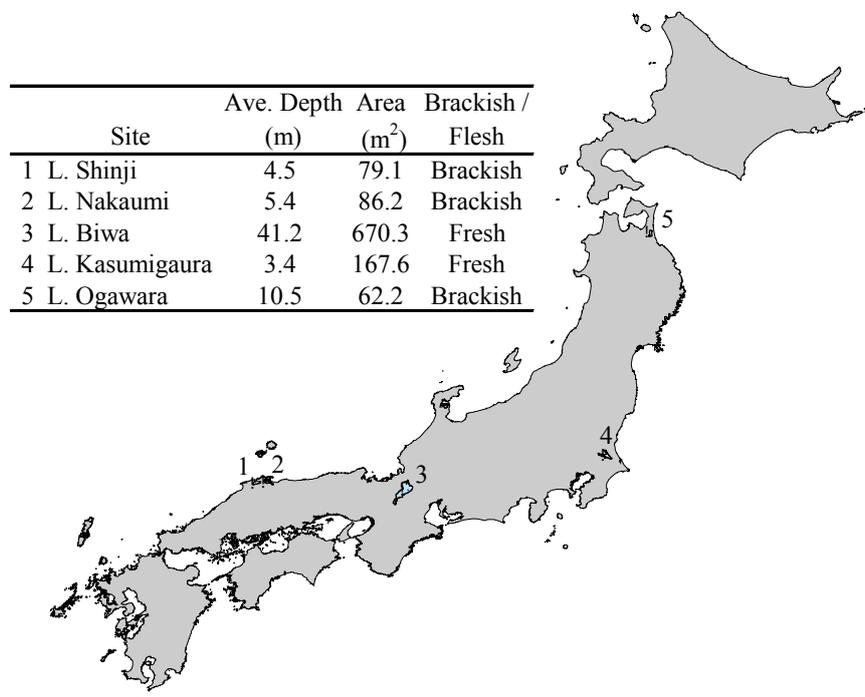


図1 それぞれの湖における水表面温度の実測地点と地理的条件.

Fig. 1 Observed LST data acquisition points and geographical condition of each lake.

ここで、 $\theta_s$  が太陽天頂角、 $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$ ,  $\delta$  は定数である.

### 衛星／実測表面水温データセット

本研究で使用した衛星データは USGS が「Earth Explorer」を介して無償配布している「Landsat-8 OLI TIRS Level1 GeoTIFF」データプロダクト(1シーン700MB-1GB程度)を使用する. ダウンロードされたデータから各測点において Band10 (10.6-11.2 $\mu$ m) と Band11 (11.5-12.5 $\mu$ m) の DN を抽出した. 一方, 実測水温データは, 図1に示す5湖沼(穴道湖, 中海, 琵琶湖, 霞ヶ浦, 小川原湖)の湖心部において国

土交通省が水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) として自動観測している午前11時(衛星とほぼ同期)のデータを取得した. 詳細な測点は穴道湖(穴道湖湖心, 北緯35度27分01秒, 東経132度57分36秒), 中海(中海湖心, 北緯35度27分59秒, 東経133度11分29秒), 霞ヶ浦(霞ヶ浦湖心, 北緯36度02分16秒, 東経140度24分14秒), 琵琶湖(安曇川沖中央, 北緯35度18分21秒, 東経136度08分41秒), 小川原湖(小川原湖湖心, 北緯40度49分06秒, 東経141度19分55秒)である. 今回は, 表3に示すように Landsat-8 データが実質的に提供さ

表 4 表 3 に示される校正用 TIRS / 水表面温度データセットを使った水表面温度モデルの統計結果.

Table 4 Statistical results of *LST* model for calibration using TIRS / in-situ calibration data set as shown in Table 3.

No	<i>LST</i> estimation model		$r^2$	bias(°C)	SD (°C)	N
1	SBM*	$LST = BT_{10}$	-	-2.43	2.22	18
2		$LST = BT_{11}$	-	-2.68	3.13	18
3		$LST = 1.27BT_{10} - 2.64$	0.95	0	1.61	18
4		$LST = 1.33BT_{11} - 3.52$	0.88	0	1.65	18
5		$LST = 0.0032DN_{10} - 58.7$	0.95	0	1.65	18
6		$LST = 0.0039DN_{11} - 69.9$	0.87	0	2.67	18
7	TBM**	$LST = 2.74BT_{10} - 1.63BT_{11} + 0.00571$	0.99	0	0.89	18
8		$LST = 0.0076DN_{10} - 0.00501DN_{11} - 38.5$	0.99	0	0.87	18

\*SBM: Single band model

\*\*TBM: Two band model

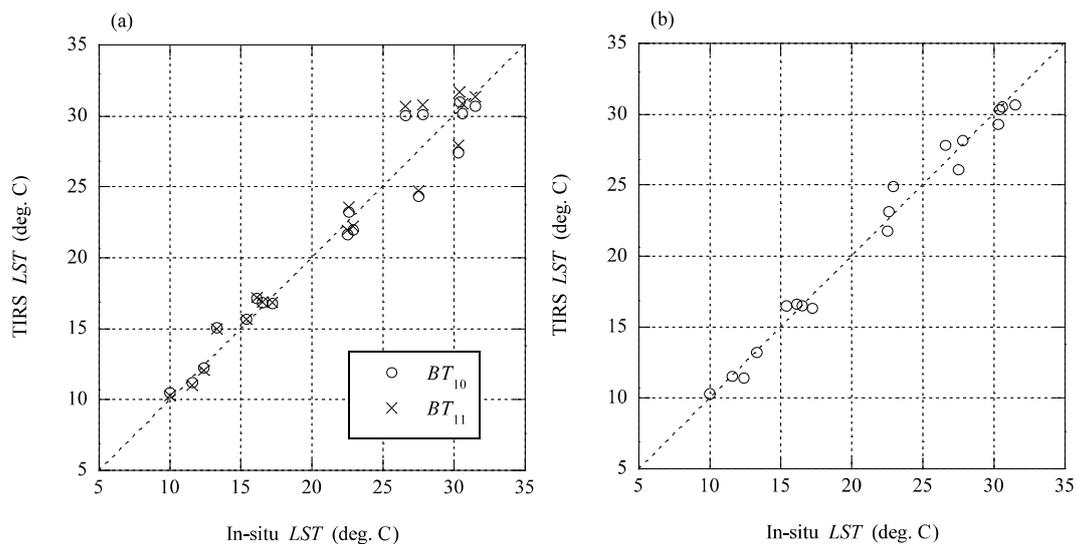


図 2 校正のための実測水表面温度と TIRS 水表面温度の関係. (a) 単バンド法, (b) 2 バンド法.

Fig. 2 Relationship between in-situ *LST* and TIRS *LST* for the calibration. (a) Single band method. (b) Two band method.

れた 2013 年 4 月から同年 12 月までの 36 個の TIRS/ 実測水温データセットを使った. このデータセットをほぼ同じ水温レンジになるように各水域で 2 種類のデータセットに分けた. そのうちの片方を校正用, もう片方を検証用とした. なおこれらのデータの詳しい測定水深は宍道湖・中海が 1m, 琵琶湖で 2m, 霞ヶ浦で 0.5m, 小川原湖で 4m であった. それぞれの水深から表皮水温への変換手法についても別途検討したが (作野, 2014), 変化要因 (風速や日射量など)

が複雑で変換精度もよくなかったため, 本論文ではそれぞれの観測所における観測水深での表層水温をそのまま使用した.

## 結果と考察

### TIRS による水温推定式の開発

表 4 に校正用データセットを使って開発された *LST* 推定式と統計量のまとめを示す. なお表 4 はモデル

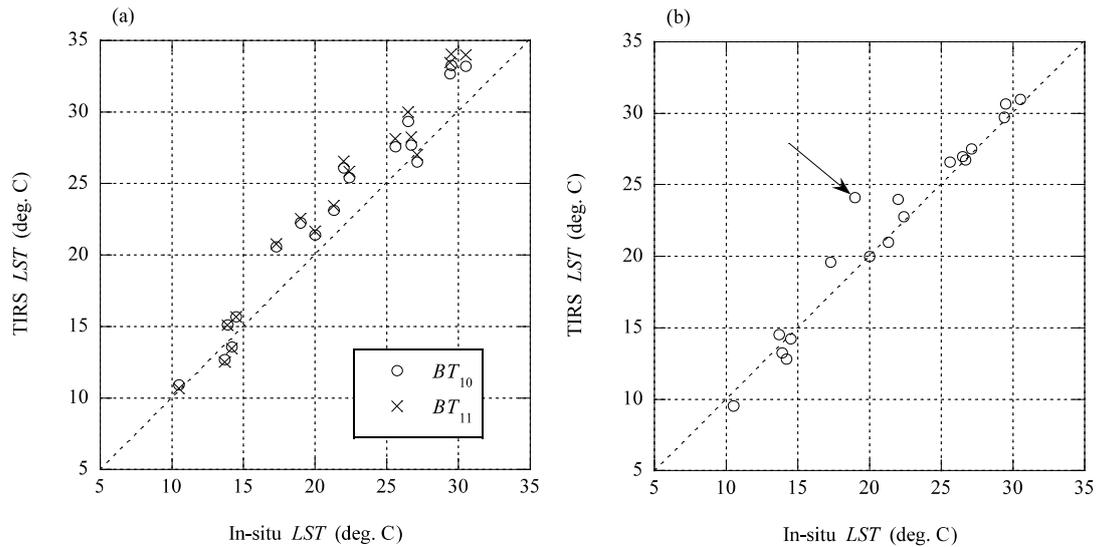


図3 検証のための実測水表面温度と TIRS 水表面温度の関係。(a) 単バンド法 (表 5 の No.5 と No.6), (b) 2 バンド法 (表 5 の No.7)。

Fig. 3 Relationship between in-situ *LST* and TIRS *LST* for the validation. (a) Single band method (No.5 and No.6 of Table 5). (b) Two band method (No.7 of Table 5).

の種類として、*BT* そのものを *LST* とするモデル (No.1, No.2), *BT* を線形式として *LST* を推定するモデル (No.3, No.4), その線形式をより簡便な方法として *BT* を *DN* に変換したモデル (No.5, No.6), そして式 (5) を使ったモデル (No.7) と式 (5) の *BT* を *DN* に変換したモデル (No.8) の 8 種類の場合をそれぞれ示している。これより、単バンド法では、「*BT*<sub>10</sub> と実測 *LST*」と「*BT*<sub>11</sub> と実測 *LST*」の差の平均 (bias) はそれぞれ  $-2.4^{\circ}\text{C}$  と  $-2.7^{\circ}\text{C}$  と過小評価であり、標準偏差 (SD) は  $2.2^{\circ}\text{C}$  と  $3.1^{\circ}\text{C}$  であった。これに対して、No.3 と No.4 では、SD は  $1.6^{\circ}\text{C}$  と  $1.7^{\circ}\text{C}$  まで精度が向上した。*BT* の代わりに *DN* を使った No.5 と No.6 のうち、No.5 の Band10 では  $1.7^{\circ}\text{C}$  と同じ SD となった。一方、2 バンド法の No.7 と No.8 は、*BT*, *DN* とともに SD が約  $0.9^{\circ}\text{C}$  であり、SBM と比較して、 $0.8^{\circ}\text{C}$  精度が高くなった。一方、2 バンド法による結果は、*BT*, *DN* とともに SD が約  $0.9^{\circ}\text{C}$  であり、SBM と比較して、 $0.8^{\circ}\text{C}$  精度が高くなった図 2 は表 4 の中から *BT* を使った場合の実測水温と TIRS 水温の関係を示す。このうち (a) が単バンド法、(b) が 2 バンド法である。これより、特に  $25^{\circ}\text{C}$  以上の高温部で単バンドの SD が大きくなっていることがわかる。これは、高温部になるほど水蒸気の影響を受けやすいからだと考える。

このような実用的な式を使った *LST* の水温推定精度の値について、海洋や湖沼において AVHRR や MODIS を使った例でも  $0.5^{\circ}\text{C} \sim 0.7^{\circ}\text{C}$  程度の SD

があると報告されている (写真測量学会編, 1986; Steissberg et al., 2005)。さらに TIRS 同様、高解像度 TIR センサである ASTER 熱赤外 5 バンドの *BT* を使った多バンド法でも  $0.5^{\circ}\text{C}$  (乾燥季) と  $1.4^{\circ}\text{C}$  (湿潤季) の精度と報告されている (Tonooka, 2005)。またどれだけ細かい温度差を見分けるかを示す指標である雑音等価温度差 NEDT (Noise Equivalent Temperature Difference, 2 点温度を測定しその温度差を信号と雑音の比で割った値) の観点からみても、MODIS や AVHRR 等の比較的高い NEDT ( $0.02\text{--}0.1\text{K}@300\text{K}$ ) のセンサと比較して、NEDT が  $0.4\text{K}@300\text{K}$  である TIRS では、今回の約  $0.9^{\circ}\text{C}$  (SD としては  $0.9\text{K}$  と同意) という推定 SD は妥当な数値であると考えられる。

### TIRS による水温推定式の検証

一方、表 4 のような校正式が任意の日でも使えなければ、実利用の観点からは非常に困る。そこで、表 4 に示した *LST* 推定モデルを表 3 右側に示されるデータセットを使って検証した。表 5 はその検証結果を示している。なお、表 5 中のモデルの種類は、表 4 と同じ 8 種類である。また、図 3 は表 5 の中から *BT* を使った場合の実測水温と TIRS 水温の関係を示す。このうち (a) が単バンド法 (表 5 の No.5 と No.6 のモデル式を使用)、(b) が 2 バンド法 (表 5 の No.7 のモデル式を使用) である。これより、単バンドでは、表 5 のとおり、 $\text{bias} \pm \text{SD}$  が  $0.7\text{--}3.5 \pm 1.6\text{--}2.3^{\circ}\text{C}$  と 2 バンド法と

表 5 表 3 に示される検証用 TIRS / 水表面温度データセットを使った水表面温度モデルの統計結果.

Table 5 Statistical results of LST model for validation using TIRS / in-situ calibration data set as shown in Table 3.

No	LST estimation model		$r^2$	bias	SD (°C)	N
1	SBM*	$LST = BT_{10}$	-	-1.02	1.32	18
2		$LST = BT_{11}$	-	-0.68	1.84	18
3		$LST = 1.27BT_{10}-2.64$	-	1.83	1.57	18
4		$LST = 1.33BT_{11}-3.52$	-	2.17	1.81	18
5		$LST = 0.320DN_{10}-58.7$	-	2.41	1.61	18
6		$LST = 0.00390DN_{11}-69.9$	-	3.51	2.25	18
7	TBM**	$LST = 2.74BT_{10}-1.63BT_{11}+0.00571$	-	0.6	1.45	18
8		$LST = 0.0076DN_{10}-0.00501DN_{11}-38.5$	-	0.45	1.42	18

\*SBM: Single band model

\*\*TBM: Two band model

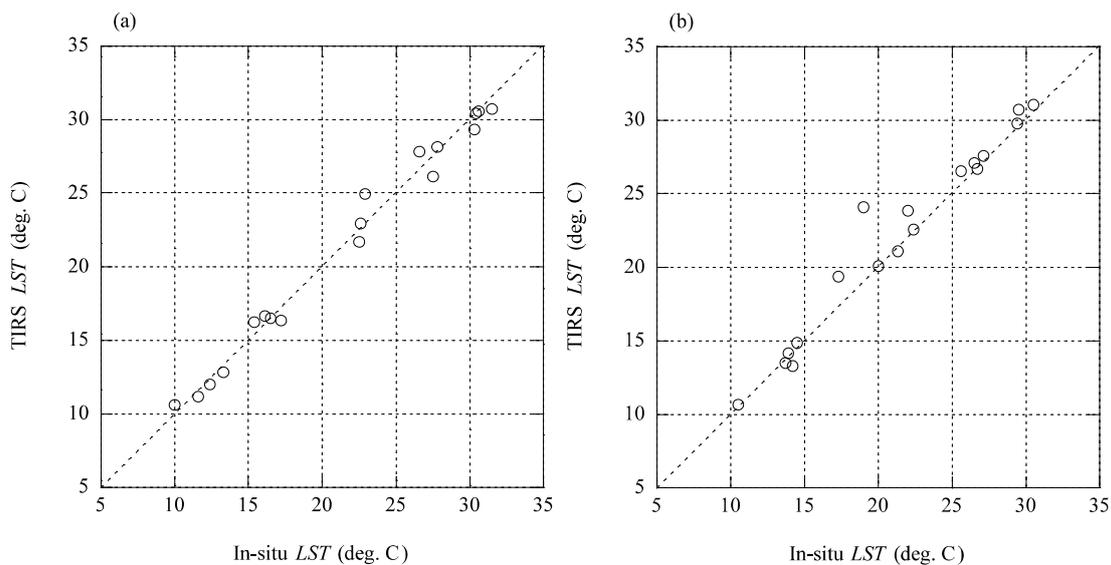


図 4 式 (5) を使った実測水表面温度と TIRS 水表面温度の関係。(a) 校正結果, (b) 検証結果.

Fig. 4 Relationship between in-situ LST and TIRS LST using Equation (5). (a) Calibration result. (b) Validation result.

比べて大きいことがわかる。2バンド法も bias が  $0.6^{\circ}\text{C}$  とやや大きいですが、これは図 3 右の矢印の時期を除くと、 $0.3 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$  となり、校正結果と同程度となる。図 3 から 2 バンド法は 1:1 の直線状に非常によく一致していることがわかる。なお、この矢印の地点は琵琶湖の 2013 年 10 月 7 日のデータであるが、風速や太陽天頂角等の観点(丹波ほか, 1991)でそのはずれの原因を探したが、他の時期との間に大きな相違はなく、原因は不明であった。考えられる点としては、衛星が観測する表皮部または実測観測深度になんらかの影

響で流れが生じて、表皮と実測深度との間に異なる水温になっていた可能性等がある。

#### 天頂角補正の効果

前節までに式 (2)、式 (5) のモデルを使った TIRS の単バンド法と 2 バンド法による LST 推定を行ってきた。最後に式 (6) に示される水蒸気吸収の天頂角補正の効果についても検討した。図 4 (a) は式 (6) を使って校正した LST 推定式で、図 4 (b) は式 (6) を使って LST 推定式を検証した図である。両方のデータから

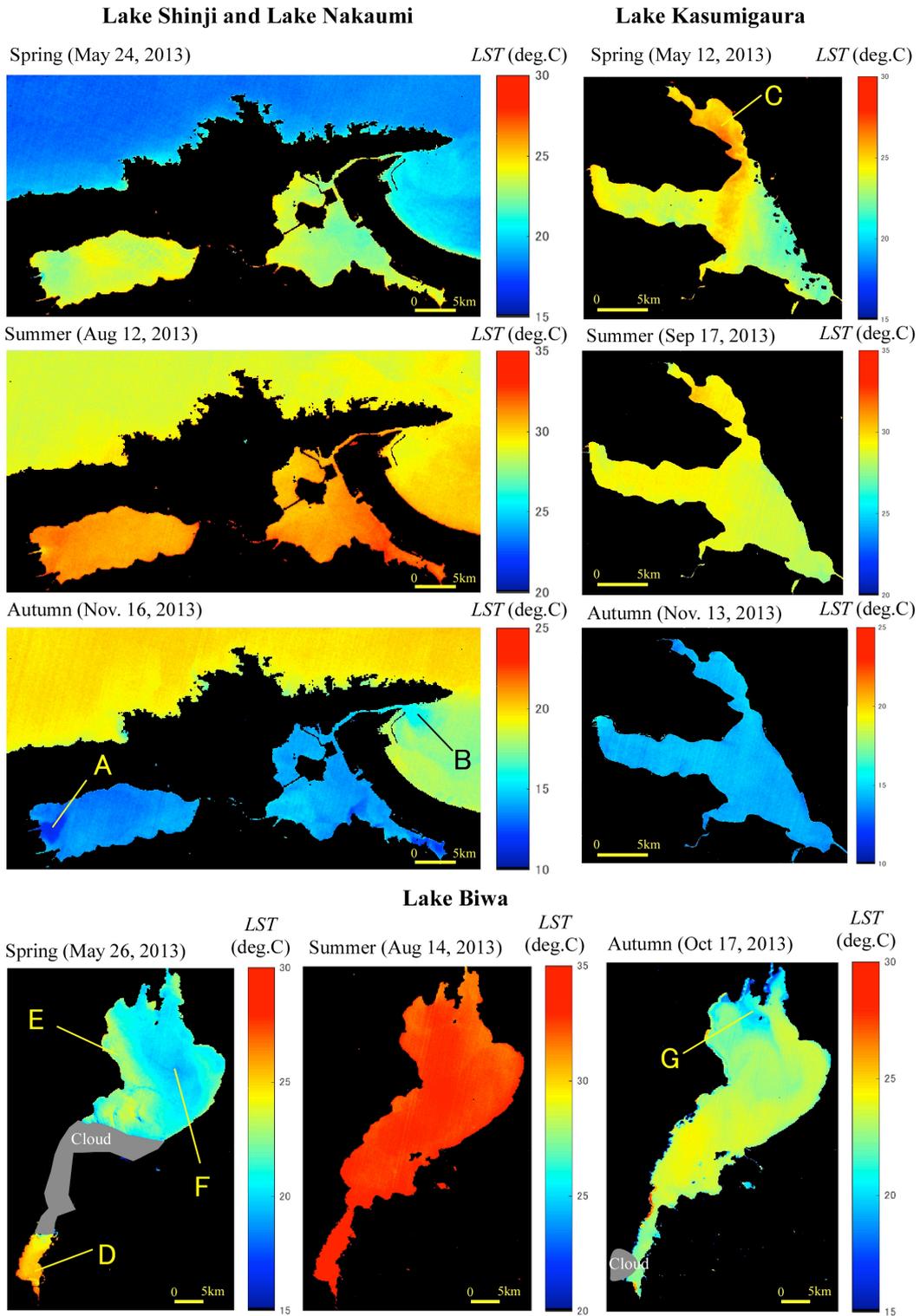


図5 2013年のLandsat-8データを使って表4のNo.7の校正式から推定された春、夏、秋における日本湖沼の表面水温マップ。(左上) 穴道湖, (右上) 霞ヶ浦, (下) 琵琶湖。

Fig. 5 *LST* map of Japanese lakes in spring, summer, autumn estimated from the calibration equation of No. 7 in Table 4 using Landsat-8 data of 2013. (Upper left) Lake Shinji and Lake Nakaumi, (Upper right) Lake Kasumigaura, (Lower) Lake Biwa.

得られたSDは、それぞれ0.9°Cと1.3°C(図3(b)の矢印にあたる点を除去した場合、後者は0.9°C)となり、より単純な式(2)、式(5)のモデルを使った場合と大差はなかった。過去の研究でも、詳細な水蒸気吸収を考慮して計算された成果として、MODISの精度は0.6-0.9°C程度、ASTERの精度は0.4°C(乾燥季)と0.8°C(湿潤季)であった。このように、極めて詳細な計算を行ったとしても、0.9°C程度のSDは生じるため、簡便さという観点からは表4のNo.7またはNo.8の推定式が最も実用的だと思われる。

### TIRS データから推定された湖における水温分布特性例

前節までにTIRSデータを使ったLST推定の精度検証を行ってきたが、最後にTIRSデータを使ったLST分布の特性について述べる。図5は、表4のNo.7の校正式を使って推定された、穴道湖・中海、霞ヶ浦、琵琶湖における春(5月)、夏(8-9月)、秋(11月)のLST画像である。水温は季節によって大きく異なるため、レンジを一定にした場合、分布把握が難しくなる。そこで、最大値-最小値は季節によって変化させ、水温差は各湖、同一季節内では同じ差(15°Cの差)になるよう作図した。これより、いずれの湖でも、夏は湖内のLSTは均一で非常に高くなっており、均一な分布であることがわかる。一方、春や秋には湖ごとに特徴的な分布パターンが表れていた。例えば、穴道湖では、斐伊川河口部(図5のA地点)や日本海(図5のB地点)との接点で密度差によって発生するとされる噴流状あるいはブルーム状の流出水の広がりパターン(井上ほか、1996)を把握することができる。また霞ヶ浦では、春に図5のC地点にやや高い水温がみられるが、基本的に水平的な変化は少ない。琵琶湖では、特に春や秋において南湖(図5のD地点)と北湖(図5のE、F、G地点)で水温差が大きいことがわかった。

### ま と め

2013年2月に打ち上げられたLandsat-8 TIRSデータを使って、日本湖沼におけるLSTの推定精度を検証した。その結果以下のような事項が明らかになった。

- 1) 単バンド法によるLST精度は、1.6-3.1°Cであった。また、BTの代わりにDNを使っても推定精度はほとんど変わらなかった。
- 2) 2バンド法によるLST精度は、0.9°Cであった。単バンド法と同じく、BTの代わりにDNを使っても推定精度はほとんど変わらなかった。
- 3) 水蒸気吸収の天頂角補正の効果を考慮した2バンド法によるLST精度は、0.9°Cであった。これは、天頂角補正をしない2バンド法と推定精度はほとんど変わらなかった。
- 4) TIRSデータから推定された、穴道湖・中海、霞ヶ浦、琵琶湖における水温分布から、夏のLSTの差は非常に小さく、特に春において河口付近などで、特徴的なLST分布パターンが把握された。

今後は、2014年以降から最近までのLandsat-8データを使った場合の精度検証を行うとともに、富栄養化対策に役立つクロロフィルa濃度、濁度推定も行う。最終的には、現地観測、数値シミュレーションなどとの融合により、広域的な水質管理手法を提案していきたい。

### 謝 辞

本研究は科研費(課題番号:16H05631, 17H04625)の成果の一部である。関係者各位に謝意を表す。

### 引 用 文 献

- Ahn, Y.-H., Shanmugam, P., Lee, J.-H. and Kang, Y.Q. (2006) Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea. *Marine environmental research*, 61(2):186-201.
- Aleskerova, A. A., Kubryakov, A. A. and Stanichny, S. V. (2016) A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 52(9):1155-1161.
- Becker, M.W. and Daw, A. (2005) Influence of lake morphology and clarity on water surface temperature as measured by EOS ASTER. *Remote sensing of environment*. 99(3):288-294.
- Hosoda, K. and Qin, H. (2011) Algorithm for estimating sea surface temperatures based on Aqua/MODIS global ocean data. *Development and validation of the*

- algorithm. *Journal of Oceanography*, 67(1):135-145.
- Huang, Y., Liu, H., Hinkel, K., Yu, B., Beck, R. and Wu, J. (2017) Analysis of Thermal Structure of Arctic Lakes at Local and Regional Scales Using in Situ and Multidate Landsat - 8 Data. *Water Resources Research*, 53:9642-9658.
- Irons, J.R., Dwyer, J.L. and Barsi, J.L. (2012) The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*, 122:11-21.
- 井上和也, 古岸裕三, 奥寺健彦, 豊田政史 (1996) 沿岸域における河川流出水小野広がり解析, *水工学論文集*, 40:473-478.
- Lathrop, R.G. and Lillesand, T.M. (1987) Calibration of thematic mapper thermal data for water surface temperature mapping: case study on the Great Lakes. *Remote sensing of environment*, 22(2):297-307.
- Lee, M.-A., Tzeng, M.-T., Hosoda, K., Sakaida, F., Kawamura, H., Shieh, W.-J., Yang, Y. and Chang, Y. (2010) Validation of JAXA/MODIS sea surface temperature in water around Taiwan using the Terra and Aqua satellites. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(4):727-736.
- McMillin, L. and Crosby, D. (1984) Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C3):3655-3661.
- Reuter, D.C., Richardson, C.M., Pellerano, F A., Irons, J.R., Allen, R.G., Anderson, M., Jhabvala, M.D., Lunsford, A.W., Montanaro, M., Smith, R.L., Tesfaye, Z. and Tesfaye, Z. (2015) The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: Design overview and pre-launch characterization. *Remote Sensing*, 7(1):1135-1153.
- 西条八束, 三田村緒佐武 (1995) 新編湖沼調査法. 講談社サイエンティフィク, 230p.
- Sakaida, F. and Kawamura, H. (1992) Estimation of sea surface temperatures around Japan using the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)/NOAA-11. *Journal of Oceanography*, 48(2):179-192.
- 作野裕司 (2014) 水表面効果を考慮した Landsat-8 による穴道湖・中海の表面水温精度検証. 日本海洋学会 2014 年度春季大会講演要旨集, 55.
- 写真測量学会編 (1986) 熱赤外リモートセンシングの技術と実際. 鹿島出版, 168p.
- Steissberg, T.E., Hook, S.J. and Schladow, S.G. (2005) Characterizing partial upwellings and surface circulation at Lake Tahoe, California–Nevada. USA with thermal infrared images. *Remote sensing of environment*, 99(1):2-15.
- 丹波澄雄, 相馬孝志, 渡辺孝志, 横山隆三 (1991) Split Window Function による海表面温度推定誤差と気象・海象条件. *日本リモートセンシング学会誌*, 11 (4) :21-32.
- Tonooka, H. (2005) Accurate atmospheric correction of ASTER thermal infrared imagery using the WVS method. *IEEE Transactions on, Geoscience and Remote Sensing*, 43(12):2778-2792.
- 横山隆三, 丹波澄雄, 渡辺孝志 (1992) Split Window 法による海表面温度推定式の係数項の性質について, *日本リモートセンシング学会誌*, 12 (3) :21-27.