

ひまわり 8 号衛星データを用いた
スプリットウィンドウ法による霞ヶ浦水面温度の推定

池田翼

201621160

平成 31 年 1 月

筑波大学大学院

生命環境科学研究科環境科学専攻

平成 30 年度 修士（環境科学）学位論文

要旨

地表面温度は多くの研究において重要なファクターである。農業においては高温や低温は野菜の病気の原因となることがいわれており、生物学的には高温は昆虫の増加に寄与すること、気象学においては大気境界層の発達に影響することがいわれている。また、水文学においては水蒸気や二酸化炭素のフラックスに影響することがいわれている。

地表面温度の観測の多くは地上に観測器を設置して行われるが、広域スケールでは正確な値を得ることが難しいことがいわれており、特に水面は観測器の設置が難しいため、同時刻で広域スケールの観測を行うことは困難である。そのような状況においては、衛星リモートセンシングを用いた観測が適している。

本研究では霞ヶ浦西浦において、ひまわり8号の衛星データと湖心観測所の観測データを用いてスプリットウィンドウ法による水面温度の推定を行った。先行研究の式と係数を用いた推定において、推定精度は最も高いもので 9.43°C と低い結果となった。また、湖心観測所の水面温度データを用いたスプリットウィンドウ法による水面温度の推定では推定精度が最も高かったものは Band13 と Band15 の組み合わせで 2.31°C であった。

月ごとにデータを見ていったところ推定精度が一番悪かった Band13 と Band14 を組み合わせた水面温度である T_{s1314}^* も、Band13 と Band15 を組み合わせた水面温度である T_{s1315}^* や Band14 と Band15 を組み合わせた水面温度である T_{s1415}^* と変わらない推定精度となる期間があり、推定精度が悪くなる要因に輝度温度差が関係していることが明らかとなった。特に輝度温度差が 0 に非常に近い値や負の値を示すときにその推定精度が格段に落ちると考えられる。また、輝度温度差が十分にある場合でも水面温度が 40°C 以上となるときに推定精度が落ちることが確認された。

昼と夜のデータの比較では夜における Band13 と Band15 の組み合わせの推定精度が 1.39°C と先行研究よりも高い値を示した。夜間において推定精度が高くなる要因として、夜間は日中と比較して、水面温度が高温となる期間が少ないからであると考えられる。

輝度温度差による低い推定精度が確認された Band13 と Band14 の組み合わせにおいて、閾値を用いて輝度温度差による場合分けを行い、スプリットウィンドウ法の係数を3種類求め、水面温度を計算した結果、閾値を用いない場合より高い精度を得ることができた。

本研究の結果より水面においてもスプリットウィンドウ法を用いることで高い精度での温度の推定が可能であることが明らかとなった。今後は通年のデータにおいて、閾値を用いることで推定精度の高いスプリットウィンドウ法の係数を決定することが望まれる。

キーワード： ひまわり 8 号、スプリットウィンドウ法、水面温度

Estimation of the water surface temperature of Lake Kasumigaura with
split-window technique
using Himawari-8 satellite data

Abstract

The surface temperature is an important factor in many fields. For example, an extreme temperature could be a cause of vegetable diseases in agriculture. Higher temperature biologically contributes to the increase of insects, and in meteorology, it influences the development of atmospheric boundary layer. In hydrology, it influences the flux of water vapor and carbon dioxide.

Many observations of surface temperature have been carried out by installing observation instruments on the ground, but it is difficult to obtain an accurate value in a wide area, especially on the water surface since it is difficult to set observation instruments. In such a situation, observation using satellite remote sensing is suitable.

In this study, the split-window technique was applied to estimate the surface temperature of the Lake Kasumigaura (Nishiura) using the satellite data of Himawari-8.

The accuracy was determined by comparing surface temperature observed at the Koshin observatory located at the center of the lake.

In the estimation using formulas and coefficients proposed in the previous studies, the highest estimation accuracy was only 9.43 °C. The combination of Band 13 and Band 15 resulted in the lowest RMSE of 2.31 °C.

It was also found that the combination of Band 13 and Band 14, which produced the lowest estimation accuracy, could yield the same estimation accuracy as combination of Band 13 and Band 15 and combination of Band 14 and Band 15 in certain periods. It became clear that when the brightness temperature difference was very close to 0 or negative, the estimation accuracy was extremely reduced. Also, it was confirmed that the estimation accuracy dropped when the water surface temperature was larger than 40 °C.

The estimation accuracy of the combination of Band 13 and Band 15 at night was 1.39 °C, which was higher than that reported in the previous study. The reason for the higher estimation accuracy in the nighttime appears to be fewer periods during which the water surface temperature became higher than in the daytime.

In the combination of Band 13 and Band 14, a higher accuracy could be obtained when different coefficients for different temperature ranges were determined. However, no improvement in accuracy was observed when the

brightness temperature difference was low. Even when the brightness temperature difference was negative, it was considered that the estimation accuracy is further improved by using this approach.

From the results of this study, it was revealed that temperature estimation with high accuracy is possible by using the split-window technique also on the water surface. From now on, it is desirable to determine the coefficients of the split-window technique with high estimation accuracy by using the different coefficients for different temperature ranges in the whole year data.

Keyword: Himawari-8, Split-window technique, water surface temperature

目次

1.はじめに	1
1.1.研究背景	1
1.2.人工衛星ひまわりについて	1
1.3.大気補正の方法	2
1.4 スプリットウィンドウ法に関する先行研究	2
1.5.研究目的	3
2.方法	4
2.1.研究対象地域	4
2.2.データ	4
2.2.1.観測所データ	4
2.2.2.衛星データ	5
2.2.3.船データ	6
2.2.4.対象日	6
2.3.雲の除去	7
2.4.スプリットウィンドウ法	16
3.結果と考察	17
3.1.時間、空間の代表性	17
3.1.1.空間の代表性	17
3.1.2.時間の代表性	19
3.2.先行研究との比較	21
3.3.霞ヶ浦における解析結果	24
3.3.1.推定値と観測値の比較	24
3.3.2.月ごとの比較	27
3.3.3.時間での比較	38
3.4.閾値を用いたスプリットウィンドウ法	42
4.結論	46
謝辞	47
参考文献	48

表目次

表 1	ひまわり 7 号からひまわり 8 号へのスペックの変化	2
表 2	各月における有効なデータ数	14
表 3	式(2)における係数(Yamaoto et al. 2018)	21
表 4	式(3)における係数(Yamamoto et al. 2018)	22
表 5	式(4)における係数 α (内田ら、2016)	22
表 6	霞ヶ浦における式4の係数 α	24
表 7	各月ごとの RMSE	35
表 8	各月ごとの決定係数	35
表 9	日中夜間ごとの RMSE	41
表 10	日中夜間ごとの決定係数	41

図目次

図 1	研究対象地域	4
図 2	キャリブレーションの様子(図中赤丸が放射温度計).....	5
図 3	クリッピング後のポイントデータ	6
図 4	Band13 の輝度温度 T_{b13} と水面温度 T_s の関係	7
図 5	Band14 の輝度温度 T_{b14} と水面温度 T_s の関係	8
図 6	Band15 の輝度温度 T_{b15} と水面温度 T_s の関係	8
図 7	6 月 29 日における輝度温度の時間変化	9
図 8	6 月 30 日における輝度温度の時間変化	9
図 9	7 月 2 日における輝度温度の時間変化	10
図 10	7 月 21 日における輝度温度の時間変化	10
図 11	8 月 4 日における輝度温度の時間変化	11
図 12	8 月 26 日における輝度温度の時間変化	11
図 13	9 月 23 日における輝度温度の時間変化	12
図 14	9 月 28 日における輝度温度の時間変化	12
図 15	10 月 2 日における輝度温度の時間変化	13
図 16	10 月 21 日における輝度温度の時間変化	13
図 17	雲がないときの Band3 の可視画像(8 月 4 日 13 時)	14
図 18	雲があるときの Band3 の可視画像(8 月 4 日 10 時)	14
図 19	Band13 の輝度温度 T_{b13} と水面温度 T_s の関係	15
図 20	Band14 の輝度温度 T_{b14} と水面温度 T_s の関係	15
図 21	Band15 の輝度温度 T_{b15} と水面温度 T_s の関係	16
図 22	船の航路と水面温度の観測点(空間の代表性)	17
図 23	6 月 16 日における観測点間の水面温度変化	18
図 24	6 月 17 日における観測点の水面温度変化	18
図 25	11 月 3 日における観測点の水面温度変化	19
図 26	船の航路と水面温度の観測点(時間の代表性)	20
図 27	6 月 16 日における 10 分間の水面温度変化	20
図 28	11 月 3 日における 10 分間の温度変化	21
図 29	式(2)による水面温度の推定値 $T_s(2)$ と観測値 T_s の比較	22
図 30	式(3)による水面温度の推定値 $T_s(3)$ と観測値 T_s の比較	23
図 31	式(4)による水面温度の推定値 $T_{s1415}(4)$ と観測値 T_s の比較	23
図 32	Band13 と Band14 を用いた推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s の比較	25
図 33	Band13 と Band15 を用いた推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s の比較	25
図 34	Band14 と Band15 を用いた推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s の比較	26
図 35	全期間における水面温度観測値 T_s と Band13、14、15 の輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} の変化	26
図 36	全期間における観測値と Band13 と Band14 を用いて推定された水面 温度の差と Band13 と Band14 の輝度温度の差	27

図 37	6 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	28
図 38	6 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	28
図 39	6 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	29
図 40	7 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	29
図 41	7 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	30
図 42	7 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	30
図 43	8 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	31
図 44	8 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	31
図 45	8 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	32
図 46	9 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	32
図 47	9 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	33
図 48	9 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	33
図 49	10 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	34
図 50	10 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	34
図 51	10 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	35
図 52	輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ と RMSE	36
図 53	輝度温度差 $T_{b13} - T_{b15}$ と RMSE	36
図 54	輝度温度差 $T_{b14} - T_{b15}$ と RMSE	37
図 55	観測値 T_s と観測値と推定値の誤差 $T_s - T_{s1315}^*$ 、 $T_s - T_{s1415}^*$	37
図 56	日中における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	38
図 57	日中における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	39
図 58	日中における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	39
図 59	夜間における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s	40
図 60	夜間における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s	40
図 61	夜間における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s	41
図 62	推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} < 0.6$)	42
図 63	推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} > 0.6$)	43
図 64	推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} > 0.6$: 紫色、 $T_{b13} - T_{b14} < 0.6$: 黄色)	43
図 65	推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($0 < T_{b13} - T_{b14} < 0.6$)	44
図 66	推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} < 0$)	44
図 67	推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} < 0$: 黄緑色、 $0 < T_{b13} - T_{b14} < 0.6$: 水色、 $0.6 < T_{b13} - T_{b14}$: 紫色)	45

1.はじめに

1.1.研究背景

地表面温度は多くの研究において重要なファクターである。農業において高温や低温は野菜の病気の原因となることがいわれており、生物学的には高温は昆虫の増加に寄与すること(Muharam et al., 2017)、気象学においては大気境界層の発達に影響することがいわれている(Oku and Ishikawa, 2003)。また、水文学においては水蒸気や二酸化炭素のフラックスに影響することがいわれている。

地表面温度の観測の多くは地上に観測器を設置して行われるが、広域スケールでは正確な値を得ることが難しいことがいわれており(Oku and Ishikawa, 2003)、特に水面は観測機の設置が難しいため、同時刻で広域スケールの観測を行うことは困難である。そのような状況においては、衛星リモートセンシングを用いた観測が適している。Agung et al. (2017)では、東ジャワ州プロボリンゴの海岸域において発電所の排水による海面の温度変化を Landsat-8 の熱赤外バンドを用いて推定した。一方、湖のような地形においては湖岸の陸面の影響を受けてしまうため高い解像度が求められる(日本リモートセンシング学会, 2011)。その中でひまわり 8 号は多くの熱赤外バンドを持ち、静止気象衛星の中では最も高性能なもののひとつとなっており、観測に適していると考えられる。

1.2.人工衛星ひまわりについて

ひまわり8号は平成26年10月7日に種子島宇宙センターから打ち上げられた、静止気象衛星である。世界最先端の観測能力を有する可視赤外放射計(AHI: Advanced Himawari Imager)を搭載し、天気予報を始め、台風、集中豪雨、気候変動などの監視・予測を目的に、直接観測を行うことが困難な海洋や砂漠・山岳地帯を含む広い地域の雲や水蒸気の分布、上空の風、火山灰の分布、海面の温度などを観測している(気象庁「静止気象衛星ひまわり8号, 9号の概要」)。

表1はひまわり7号からひまわり8号へのスペックの変化を表している。観測バンド数は可視域で1から4近赤外域で0から3熱赤外域で4から10と増加し、観測頻度は30分間隔から10分間隔、特に日本付近では2.5分間隔となっている。また解像度はグリッド幅が可視域では1.0 kmから0.5 km、赤外域では4.0 kmから2.0 kmとなっている。データは2015年の7/7から現在まで取得が可能である。まとめると、観測バンドの増加、空間解像度の向上、観測間隔の減少が行われている(気象庁「日本の静止気象衛星の歩み」)。

気象庁では、ひまわり8号の機能の十分な活用を図るため、国内の多くの研究機関がひまわりの観測データを即時的にかつ過去にさかのぼって入手できる環境を整備しており、観測データは情報通信研究機構(NICT)、千葉大学環境リモートセンシング研究センター(CEReS)、東京大学地球観測データ統融合連携研究機構(EDITORIA)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の4つの機関から取

得が可能である(気象衛星センター「研究者向けデータ公開」)。

表 1 ひまわり 7 号からひまわり 8 号へのスペックの変化

	Himawari-6,7	Himawari-8
Observation bands	Visible:1 Near infrared:0 Thermal infrared:4	Visible:4 Near infrared:3 Thermal infrared:10
Observation interval	Observational frequency: 30 minutes	Observational frequency:10 minutes Near Japan: 2.5 minutes
Spatial resolution	Visible:1.0 km Infrared:4.0 km	Visible:0.5 km(Band3), 1.0 km Infrared:2.0 km
Data acquisition available period	Himawari-6:2005/6/28~2010/6/30 Himawari-7:2010/7/1~2015/7/7	Himawari-8:2015/7/7~present

1.3.大気補正の方法

衛星で観測されたデータは放射輝度として得ることができる。放射輝度は次の式で表すことができる(山本・石川, 2016)。

$$I = B(T) = \varepsilon B(T_{sfc})\tau + R_{at\uparrow} + R_{ref}\tau \quad (1)$$

ここで I は放射輝度 [$W/sr \cdot m^2$]、 τ は空気の透過率、 $R_{at\uparrow}$ は大気上端からの上向き放射 [W/m^2]、 ε は地表面射出率、 T_{sfc} は地表面温度 [K]、 B はプランクの関数、 R_{ref} は地表面で反射される大気の下向き放射 [W/m^2] である。

この中で第一項は地表面からの直接的な放射、第二項は大気からの上向き放射、第三項は大気の下向き放射の反射成分を表している。この中で大気を通過する放射成分は大気中の気体分子やエアロゾルによる吸収や散乱により減衰される。この大気の影響を取り除くために大気補正を行う必要がある。

大気補正の方法としては次の二つの方法がある。一つは大気中の温度と水蒸気の鉛直分布と太陽と衛星の角度を得ることで放射のどの程度の量が散乱、吸収されるかを放射伝達式によって計算する方法。二つ目はスプリットウィンドウ法(Sobrinho et al., 1994)とよばれるものである。赤外域の二つの波長における輝度温度を計算することにより大気の平均的な影響を除去する方法である。本研究ではこの方法で水面温度を算出する。

1.4 スプリットウィンドウ法に関する先行研究

先ほど述べたスプリットウィンドウ法ではより精度を高めるために様々な研究が行われてきた。より高い精度のスプリットウィンドウ法の式を得る研究をした Yamamoto et al. (2018)では3つのバンドを用いた式(2)や3つのバンドを用いた式に非線形項を組み込むこんだもの(3)が考えられた。これらの係

数の値は放射伝達モデルによって得られたシミュレーションデータから最

適化手法により推定されたものである。シミュレーションでは、様々な気温・水蒸気プロファイル、地表面温度、地表面射出率の組み合わせを想定し、それらの環境下における熱赤外 3 バンドの輝度温度観測値が計算されている。

$$T_{sfc} = e_0 + \left(e_1 + e_2 \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right) T_i + \left(e_3 + e_4 \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j}\right) T_j + \left(e_5 + e_6 \frac{1-\varepsilon_k}{\varepsilon_k}\right) T_k \quad (2)$$

ここで T_{sfc} は地表面温度 [K]、 T_i, T_j, T_k はバンド i, j, k における輝度温度 [K]、 $\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k$ はバンド i, j, k における地表面射出率、 $e_k (k=0,1,2,3,4,5,6)$ は係数である。

$$T_{sfc} = f_0 + \left(f_1 + f_2 \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right) T_i + \left(f_3 + f_4 \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j}\right) T_j + \left(f_5 + f_6 \frac{1-\varepsilon_{i1}}{\varepsilon_{i1}}\right) T_k + f_7 (T_i - T_j)^2 + f_8 (T_i - T_k)^2 + f_9 (T_j - T_k)^2 \quad (3)$$

ここで T_{sfc} は地表面温度 [K]、 T_i, T_j, T_k はバンド i, j, k における輝度温度 [K]、 $\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k$ はバンド i, j, k における地表面射出率、 $f_k (k=0,1,2,3,4,5,6,7,8,9)$ は係数である。推定精度は 0.9 K であり特に入力データの誤差に対して頑強であった。

内田(2016)では次の式が用いられた。

$$T_s = T_{bi} + \alpha(T_{bi} - T_{bj}) \quad (4)$$

ここで T_s は地表面温度 [K]、 T_{bi}, T_{bj} はバンド i, j における輝度温度 [K]、 α は係数である。

係数の決定には地表面温度の観測値が必要であり、米国地球観測衛星 TERRA に搭載されたセンサ ASTER で観測された地表面温度を用いた。推定精度は 1.5 °C 程度であった。

1.5. 研究目的

霞ヶ浦のような広い湖においては、水面温度を一様に観測することが困難であり、スプリットウィンドウ法による水面温度の推定が可能であれば、今後のフラックス等の解析に役立つと考えられる。また、スプリットウィンドウ法を湖に適用した事例はほとんどない。

以上より、本研究の目的はスプリットウィンドウ法 の推定精度の高いバンドと係数を明らかにし、霞ヶ浦西浦全域の水面温度を推定することである。

2.方法

2.1.研究対象地域

研究対象地域は霞ヶ浦である(図 1)霞ヶ浦は日本で 2 番目に大きい湖であり、湖面積は 220 km²、平均水深 4 m、最大水深 7 m の浅くて広い湖である。霞ヶ浦は西浦、北浦、外浪逆浦から構成されており、本研究では最大の面積を持つ西浦を対象に解析を行う。

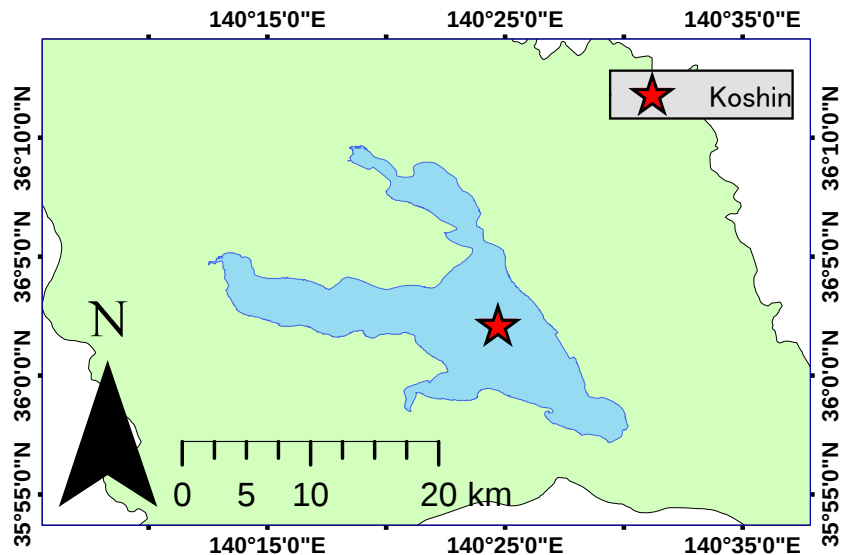


図 1 研究対象地域

2.2.データ

2.2.1.観測所データ

スプリットウィンドウ法の係数の算出に用いられる水面温度 T_s [°C] は霞ヶ浦西浦にある国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所が管理している霞ヶ浦湖心観測所 (N36.043, E140.411) において筑波大学が観測機材を設置して観測しているデータを用いた。使用した機器は放射温度計 (4000A, EVEREST INTERSCIENCE INC.) であり、実験室でキャリブレーション後、5 月 15 日に設置を行った。データは 10 分平均値であり、キャリブレーションによって得られた補正式を用いて補正を行った。

放射温度計のキャリブレーションは次の方法で行った(図 2)。



図 2 キャリブレーションの様子(図中赤丸が放射温度計)

- ① 定温攪拌水槽(TR-2A, アズワン)に水と氷、食塩を入れ電源を入れ攪拌を行う。
- ② 棒状温度計を入れ水温が 0 °C となったことを確認し、放射温度計を 12 V 電源に接続、射出率を 1.0 と設定し、水面の温度を測定する。
- ③ 測定値を 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行う。この 10 個の測定値の平均値を放射温度計の 0 °C の測定値とした。
- ④ 定温攪拌水槽のヒーターの電源を入れ、10 °C になるよう水温を上げる。
- ⑤ 棒状温度計を入れ 10 °C であることが確認できたら③と同様の操作を行う。
- ⑥ 以下 20 °C、30 °C、40 °C について④、⑤と同様の手順で測定を行った。

空間代表性と時間代表性を検証するために用いる風速 U [m/s]も湖心観測所で筑波大学が観測しているデータを用いた。

2.2.2.衛星データ

ひまわりの衛星データは東京大学データ統合解析システム DIAS からダウンロードした。使用したバンドは可視域の Band3 と熱赤外域の Band13(10.4 μm)、Band14(11.2 μm)、Band15(12.3 μm)である。データは 2.5 分間隔の瞬間値であり日本域のものを NetCDF 形式でダウンロードし、ArcGIS を用いて霞ヶ浦西浦湖面でクリッピングを行い、各ピクセルをポイント化し 10 分ごとの瞬間値を計算に利用した。本研究では湖心観測所があるピクセルの輝度温度データをスプリットウィンドウ法の検証、ポイントがあるピクセルの輝度温度データを霞ヶ浦西浦全域の水面温度推定に利用した(図 3)。

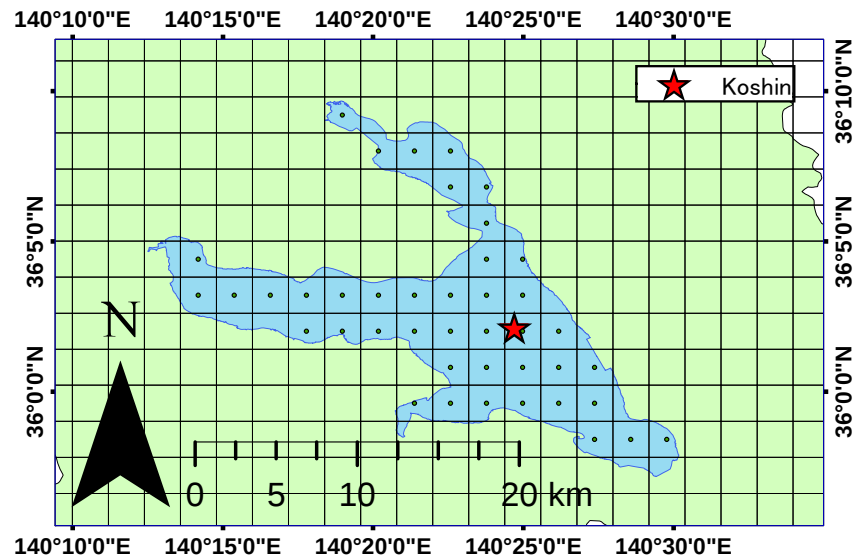


図 3 クリッピング後のポイントデータ(グリッドはひまわり 8 号のもの、ポイントは各ピクセルをポイント化したもの)

2.2.3.船データ

霞ヶ浦では遊覧船が航行している。この船は土浦-潮来間をおよそ 1 時間、土浦-玉造間をおよそ 30 分、玉造-潮来間をおよそ 30 分かけて航行している。この船に各種観測機器を取り付け、霞ヶ浦湖面上の風速、水面温度、湿度、気温等の観測が行われた。船には GPS が取り付けられており、観測データと同時に位置データも計測されている。観測は 2018 年 6 月 16 日、6 月 17 日、6 月 23 日、9 月 23 日、11 月 3 日に行われた。本研究では時間の代表性、空間の代表性を検証するため、この船に取り付けられた放射温度計(505, Minolta)の測定値を利用した。データは 10 Hz 間隔で測定された瞬間値であり、2018 年 6 月 16 日午後、6 月 17 日午後、11 月 3 日の水面温度と座標データを利用した。

2.2.4.対象日

人工衛星ひまわりの熱赤外バンドは雲がある場合、雲の影響を受け正確な地表面温度を得ることができない。本研究ではできるだけ雲の影響を受けないように、日照時間が長いこと、降雨がないことを条件に解析対象日を決定した。気象条件は気象庁の AMeDAS 土浦と霞ヶ浦湖心観測所で霞ヶ浦河川事務所が行っている観測データを参考にした。その結果解析対日は 2018 年 6 月 29 日、6 月 30 日、7 月 2 日、7 月 21 日、8 月 4 日、8 月 26 日、9 月 23 日、9 月 28 日、10 月 2 日、10 月 21 日の 10 日間となった。この 10 日間について 10 分ごとのデータを解析し、計 1440 個のデータに対して解析を行った

2.3.雲の除去

図 4~6 は全対象期間について x 軸に Band13、Band14、Band15 の輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} [°C]、 y 軸に水面温度 T_s をプロットしたものである。図を見ると多くの輝度温度と水面温度は線形であるように見えるが、輝度温度の中にはマイナス方向に帯状になっている点があることがわかる。輝度温度は雲があると低い値を示すため、この雲の影響を取り除く必要がある。本研究では Oku and Ishikawa(2003)を参考に閾値を決めそれ以下の輝度温度の値を雲があるとし、その期間のデータを除外することにした。図 7~16 は x 軸に時間、 y 軸に輝度温度、日射量をプロットしたものである。図 7~16 から輝度温度は滑らかに変化している期間と値がばらついている期間が存在していることが確認できる。輝度温度をこの二つの期間で分類し、それぞれについて Band3 の可視画像による雲の確認を行った(図 17、18)。その結果、滑らかに変化している期間において、雲は存在していなかったが、ばらつきのある期間においては雲が存在している部分と存在していない部分があることがわかった。そのためばらつきのある期間に対して、熱赤外画像を用いて、雲が存在する上限が何度であることを確認した。その結果、Band13、Band14 は 6 月、7 月、8 月が 17 °C、9 月、10 月は 12 °C、Band15 は 6 月、7 月、8 月が 13 °C、9 月、10 月は 10 °C を閾値として決定した。以上より、全期間 1440 個のデータのうち雲が存在しないと判別された 1031 個のデータを用いて解析を行った。表 2 に各月における有効なデータ数を示す。雲除去後の Band13、Band14、Band15 の輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} と観測値 T_s の関係を図 19~21 に示す

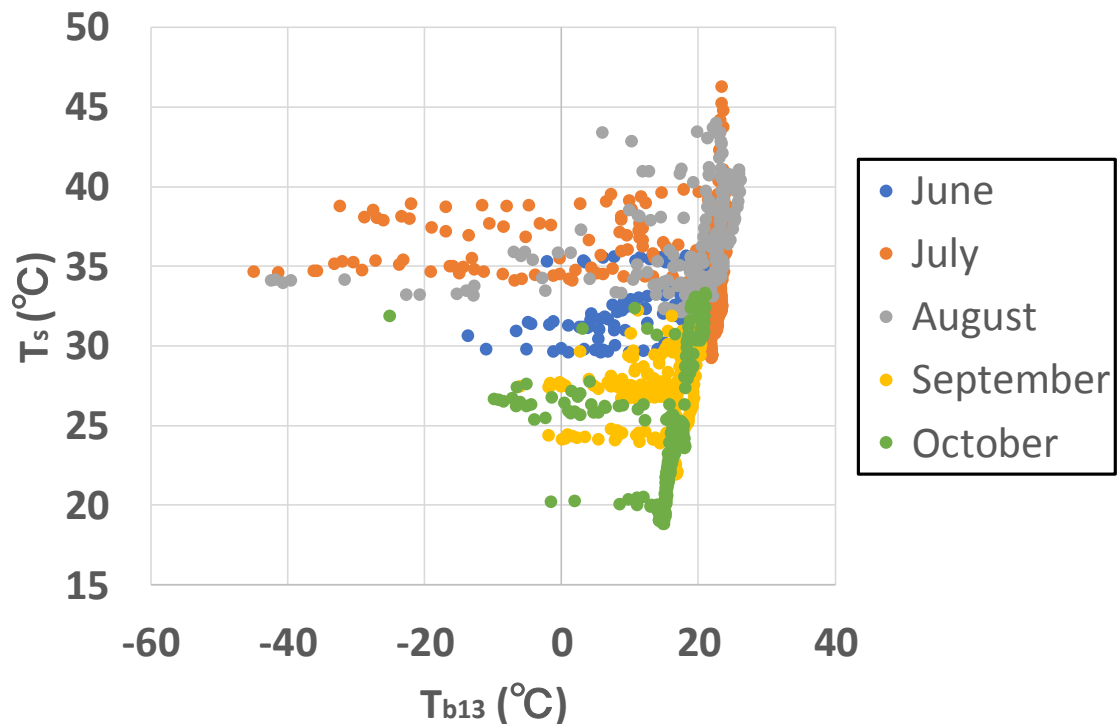


図 4 Band13 の輝度温度 T_{b13} と水面温度 T_s の関係

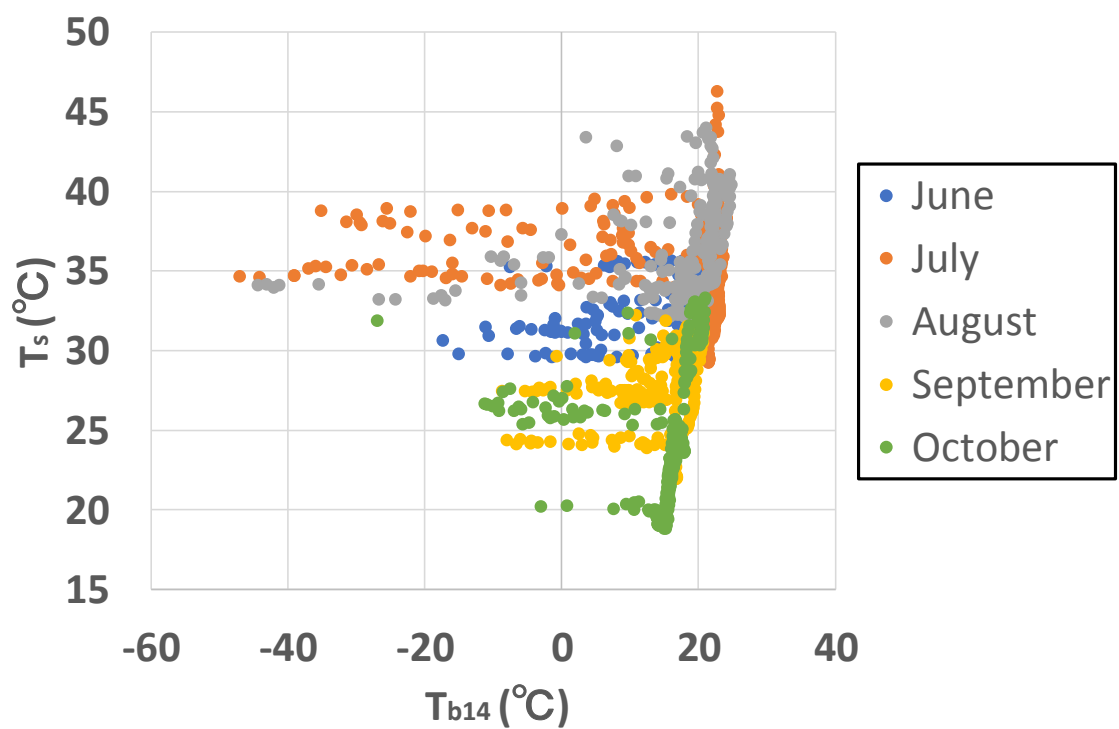


図 5 Band14 の輝度温度 T_{b14} と水面温度 T_s の関係

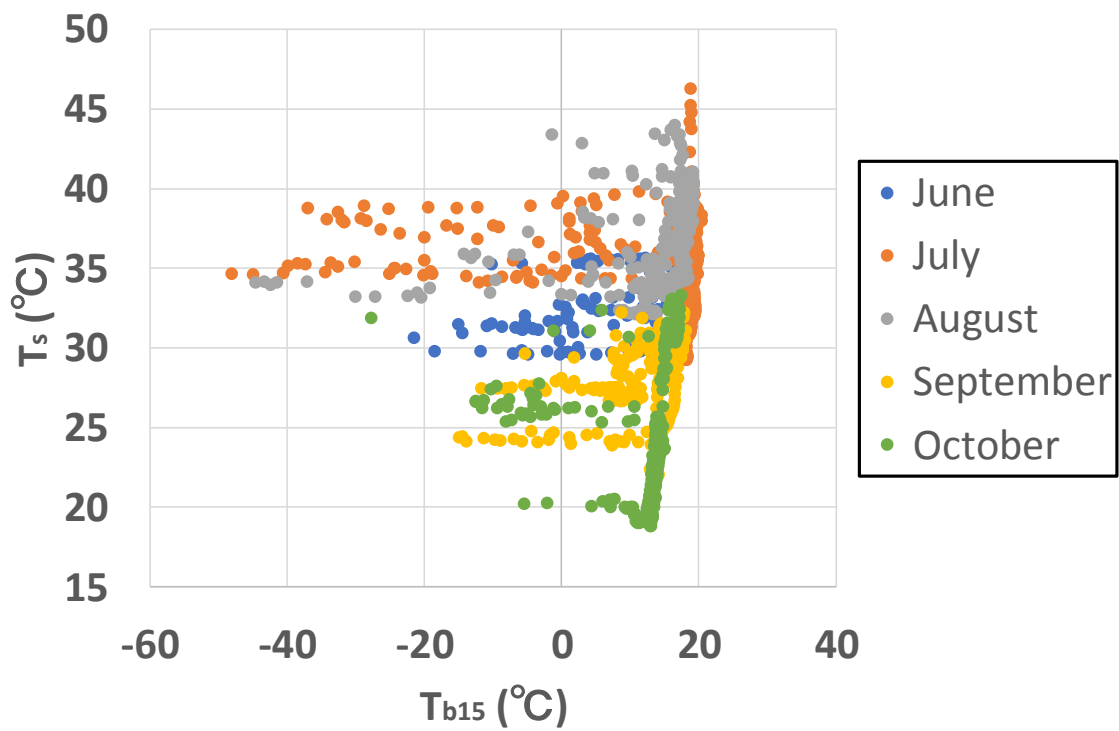


図 6 Band15 の輝度温度 T_{b15} と水面温度 T_s の関係

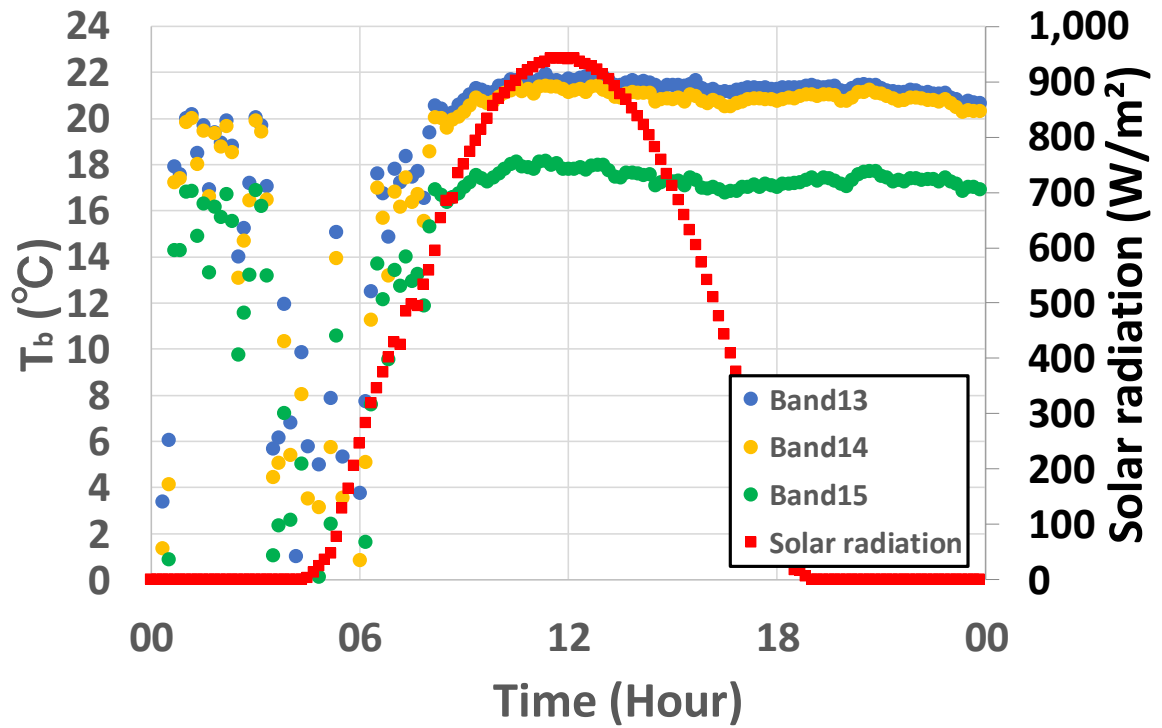


図 7 6月29日における輝度温度の時間変化

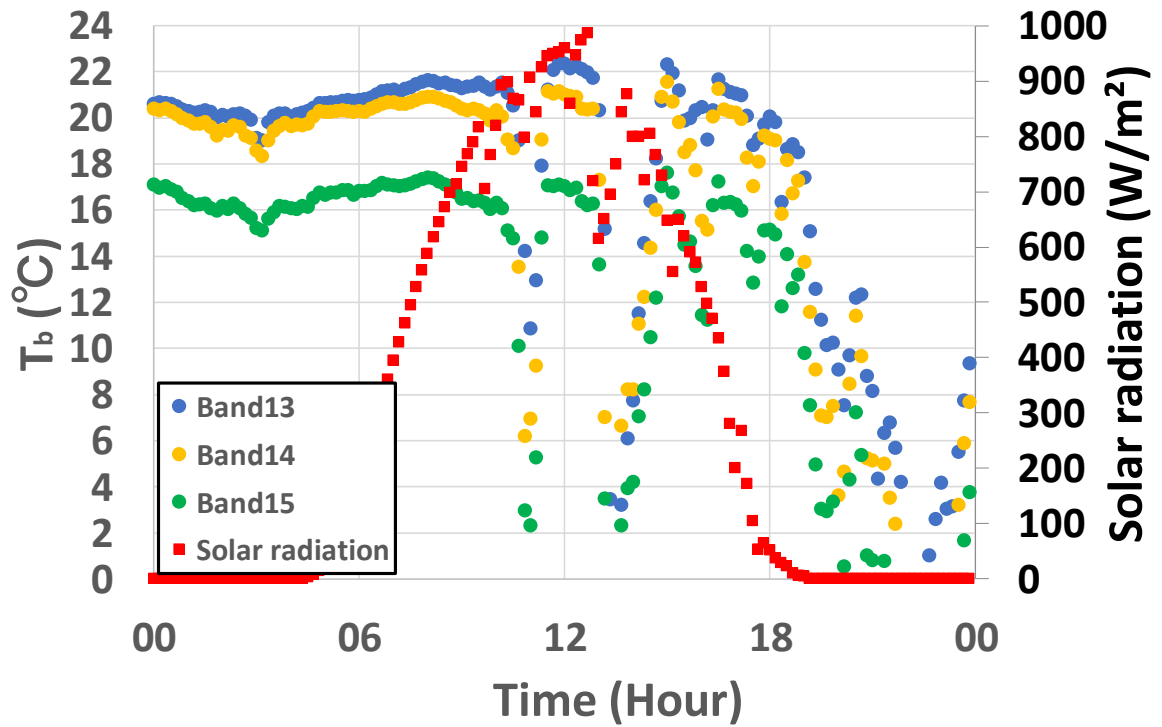


図 8 6月30日における輝度温度の時間変化

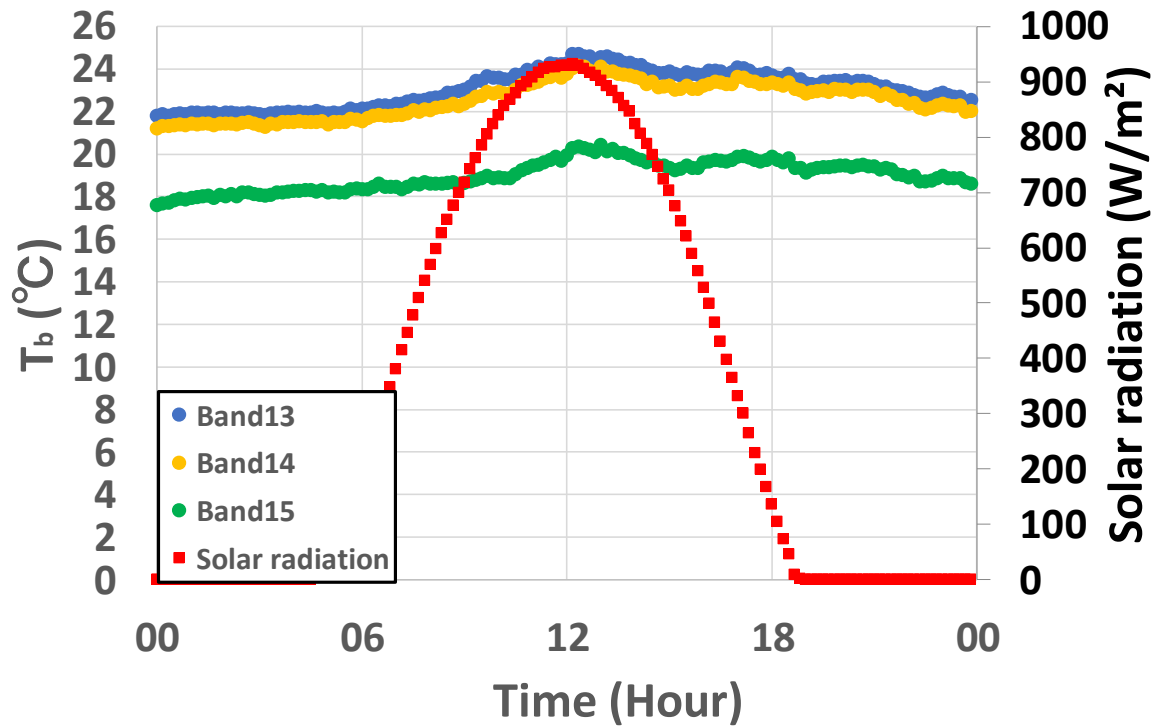


図 9 7月2日における輝度温度の時間変化

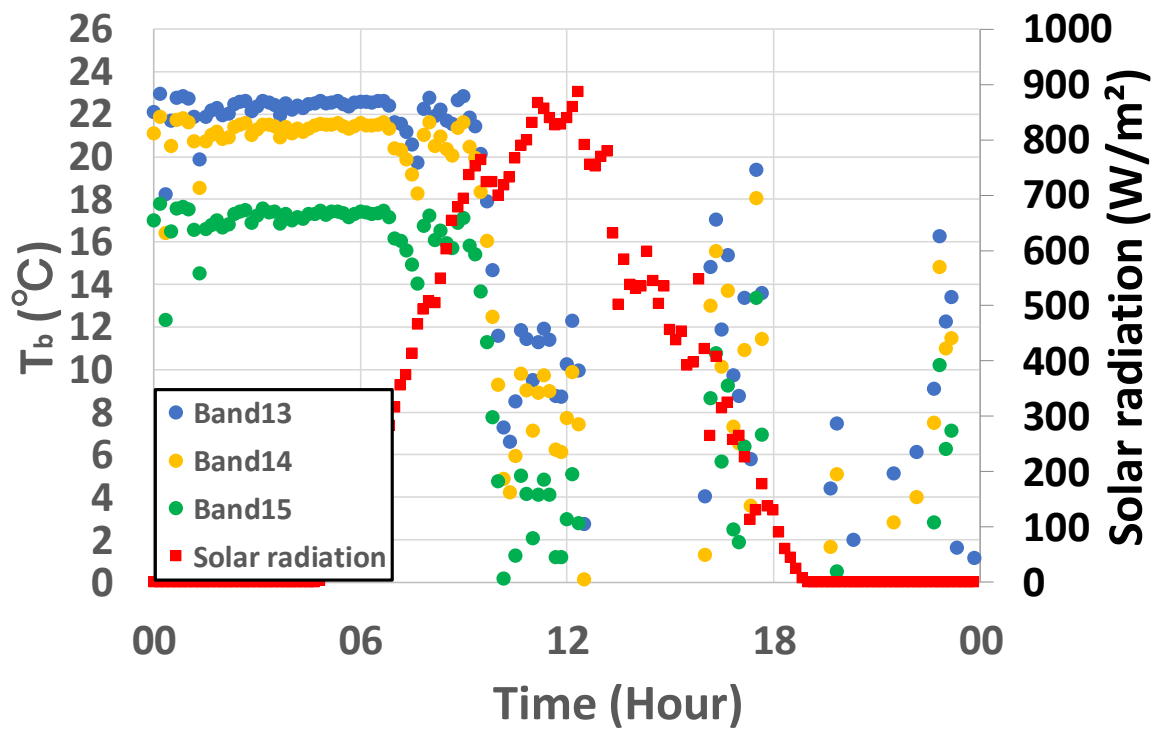


図 10 7月21日における輝度温度の時間変化

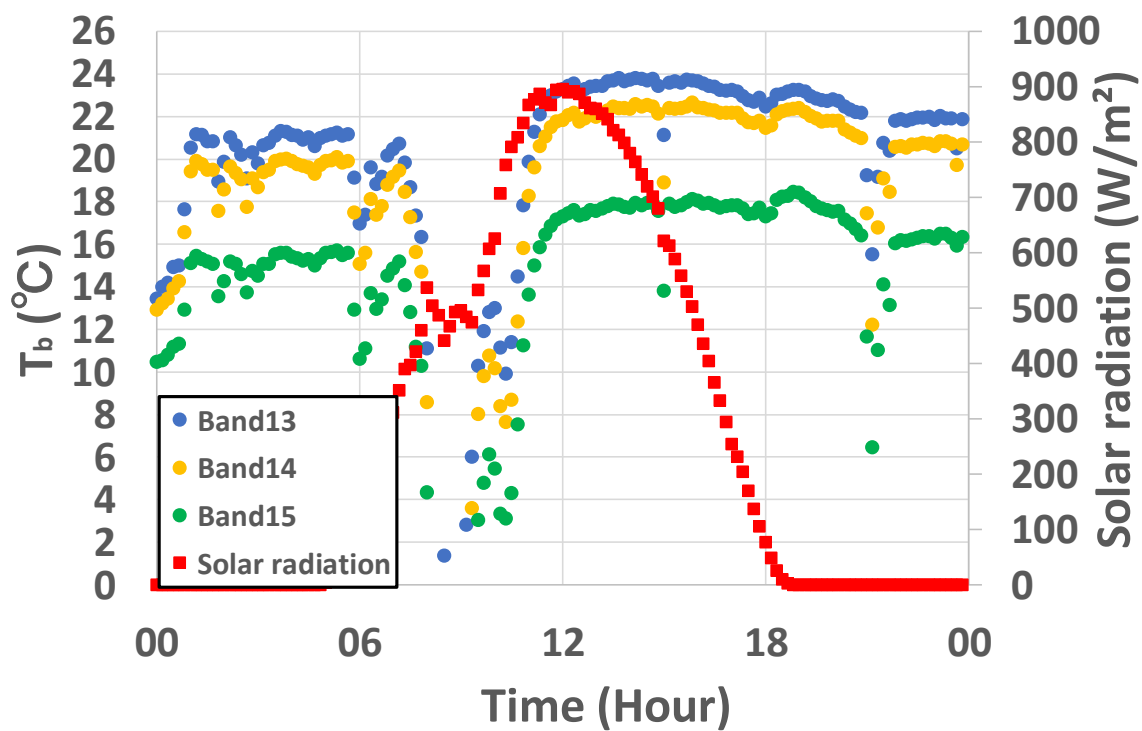


図 11 8 月 4 日における輝度温度の時間変化

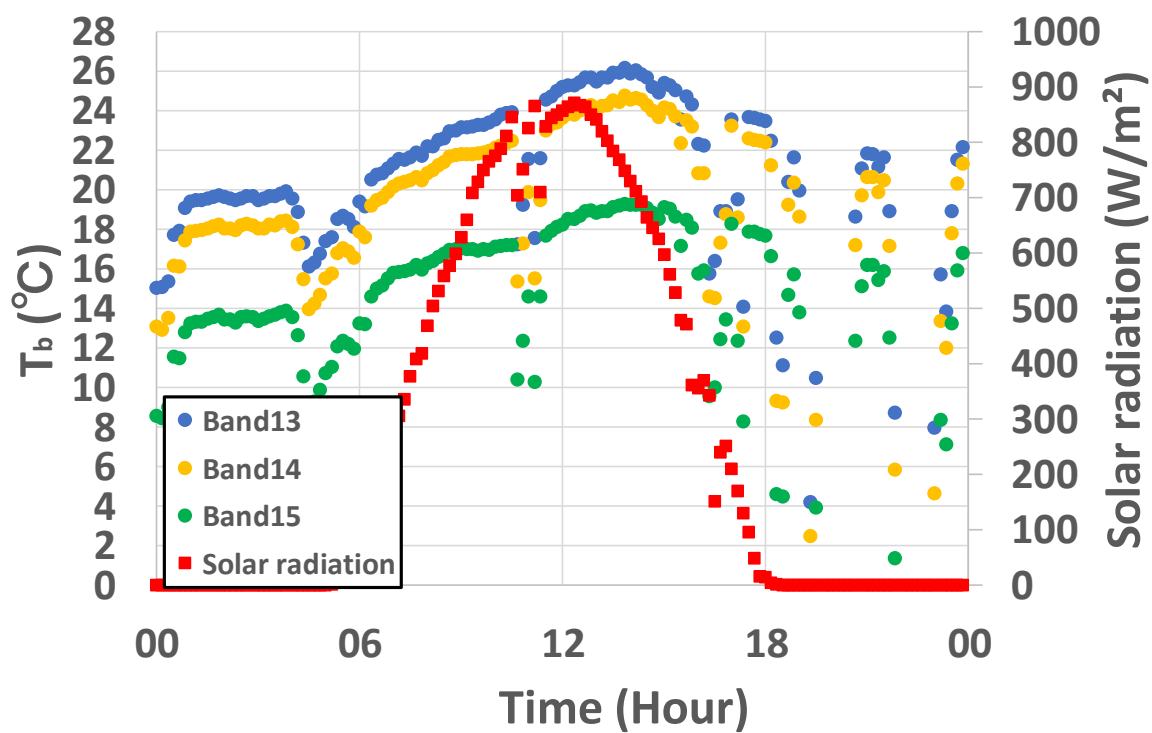


図 12 8 月 26 日における輝度温度の時間変化

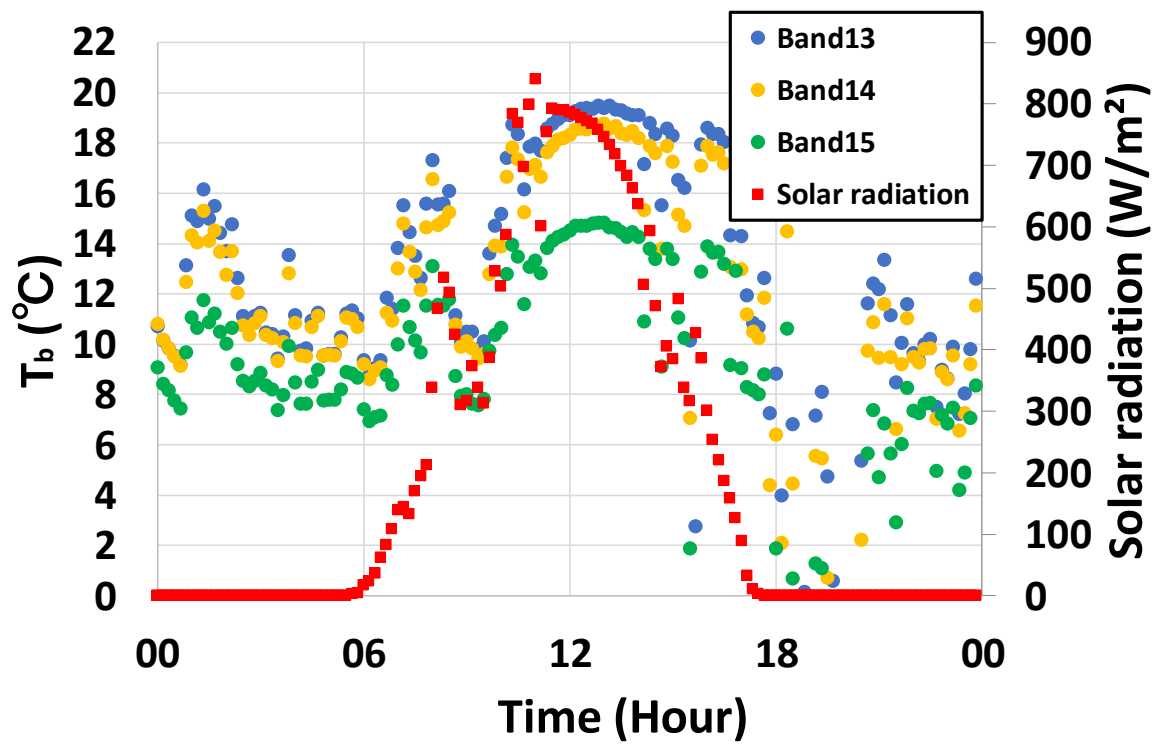


図 13 9 月 23 日における輝度温度の時間変化

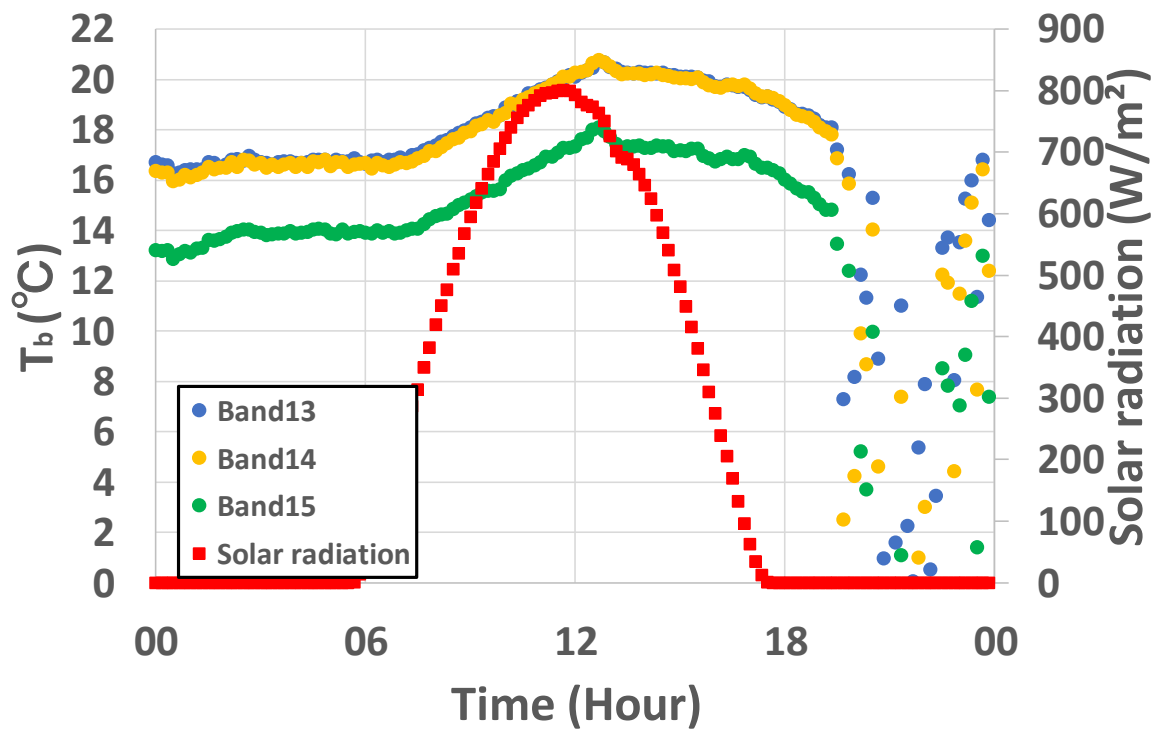


図 14 9 月 28 日における輝度温度の時間変化

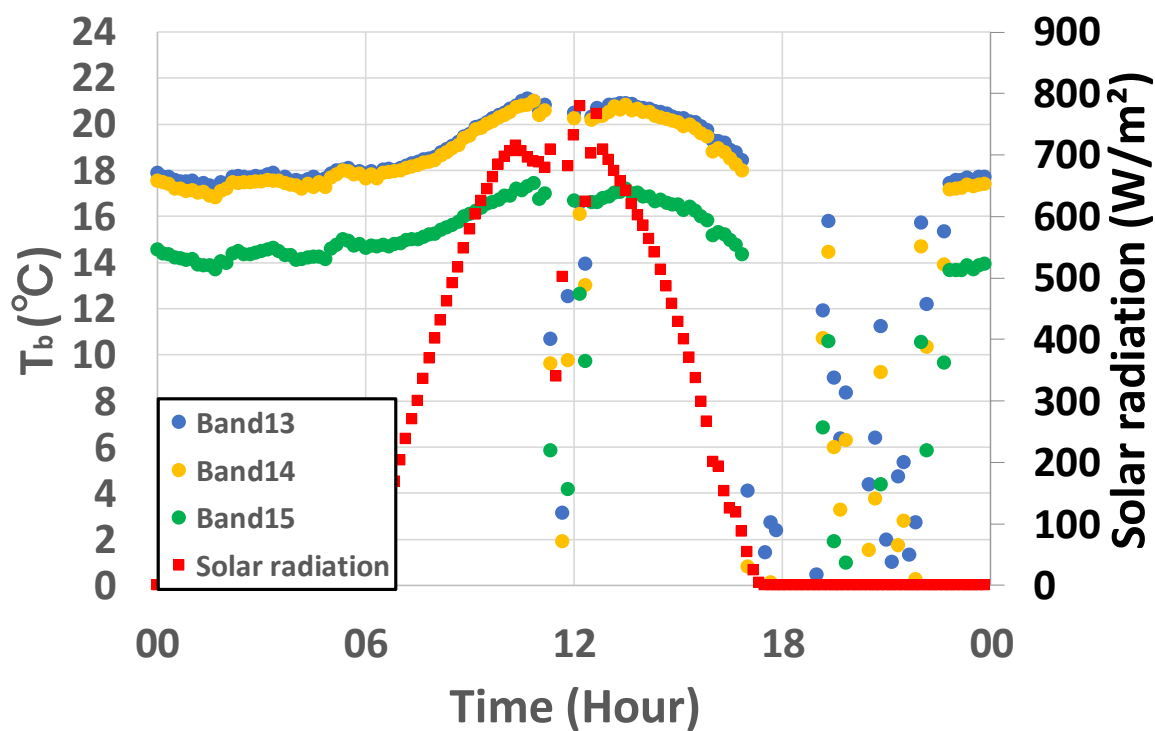


図 15 10月2日における輝度温度の時間変化

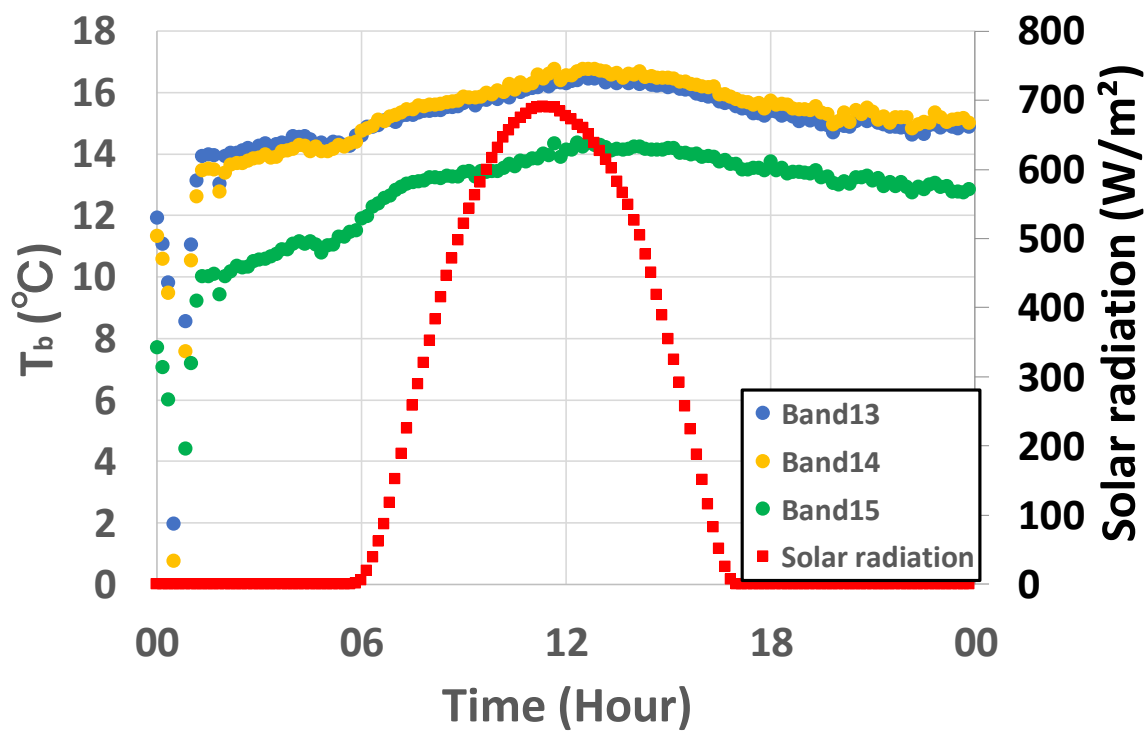


図 16 10月21日における輝度温度の時間変化

表 2 各月における有効なデータ数

June	July	Aug	Sep	Oct
205	202	206	177	241

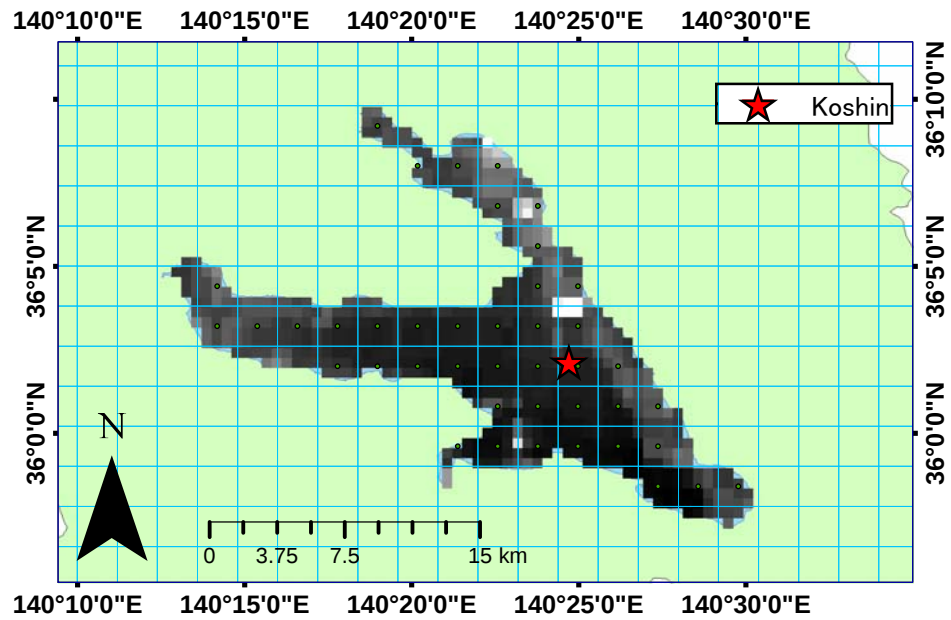


図 17 雲がないときの Band3 の可視画像(8 月 4 日 13 時)

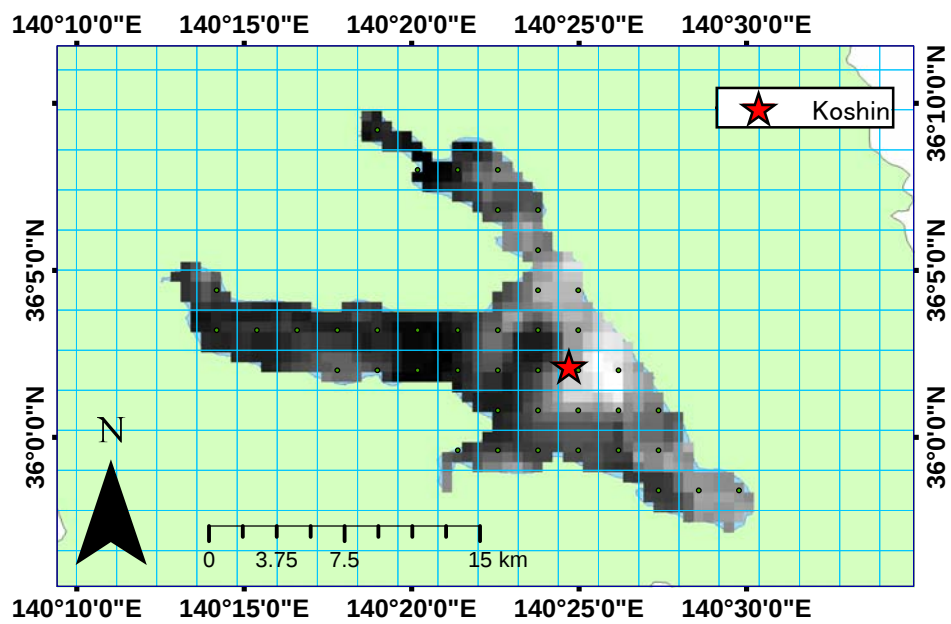


図 18 雲があるときの Band3 の可視画像(8 月 4 日 10 時)

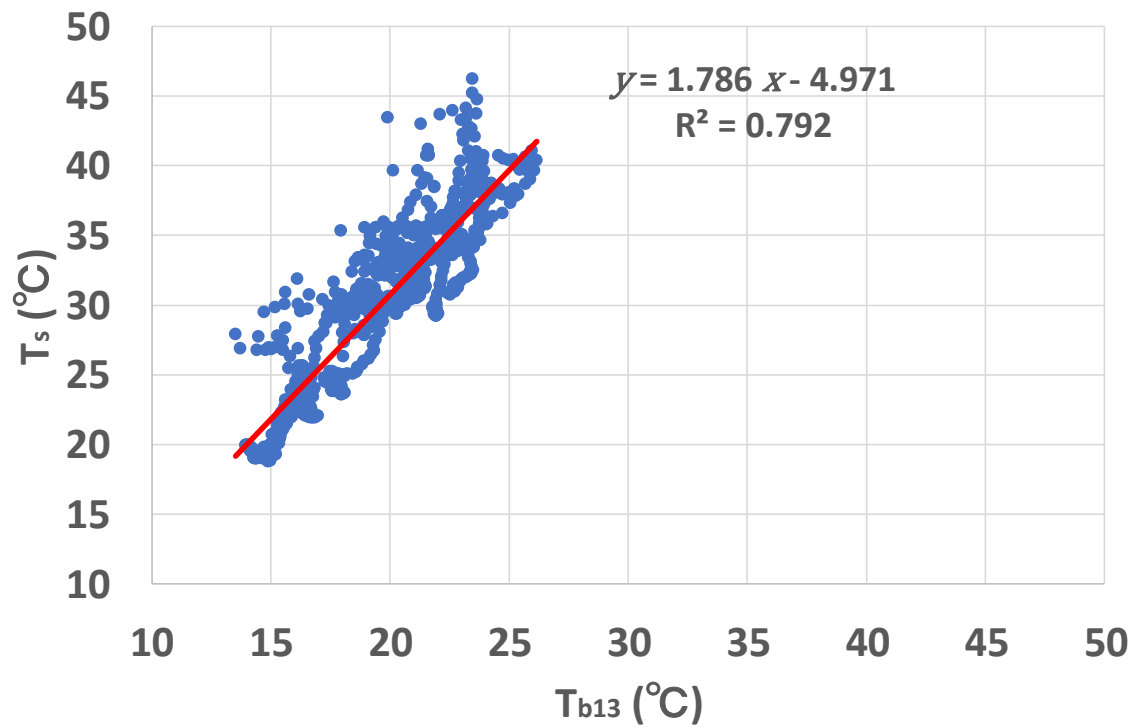


図 19 Band13 の輝度温度 T_{b13} と水面温度 T_s の関係

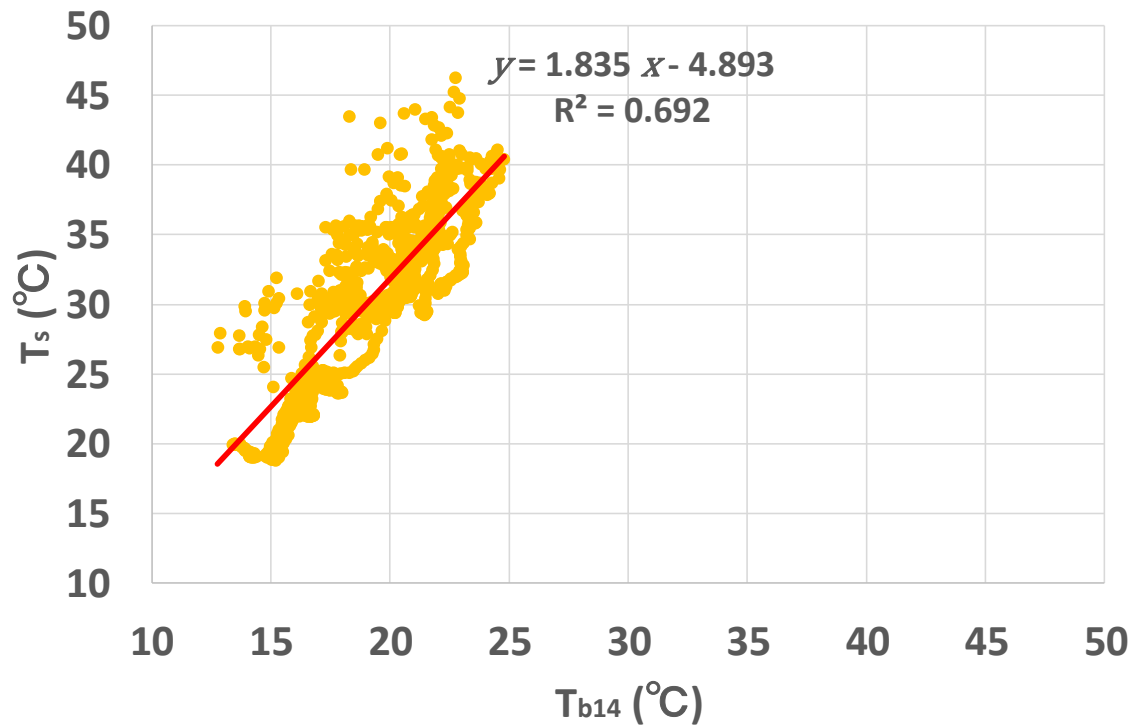


図 20 Band14 の輝度温度 T_{b14} と水面温度 T_s の関係

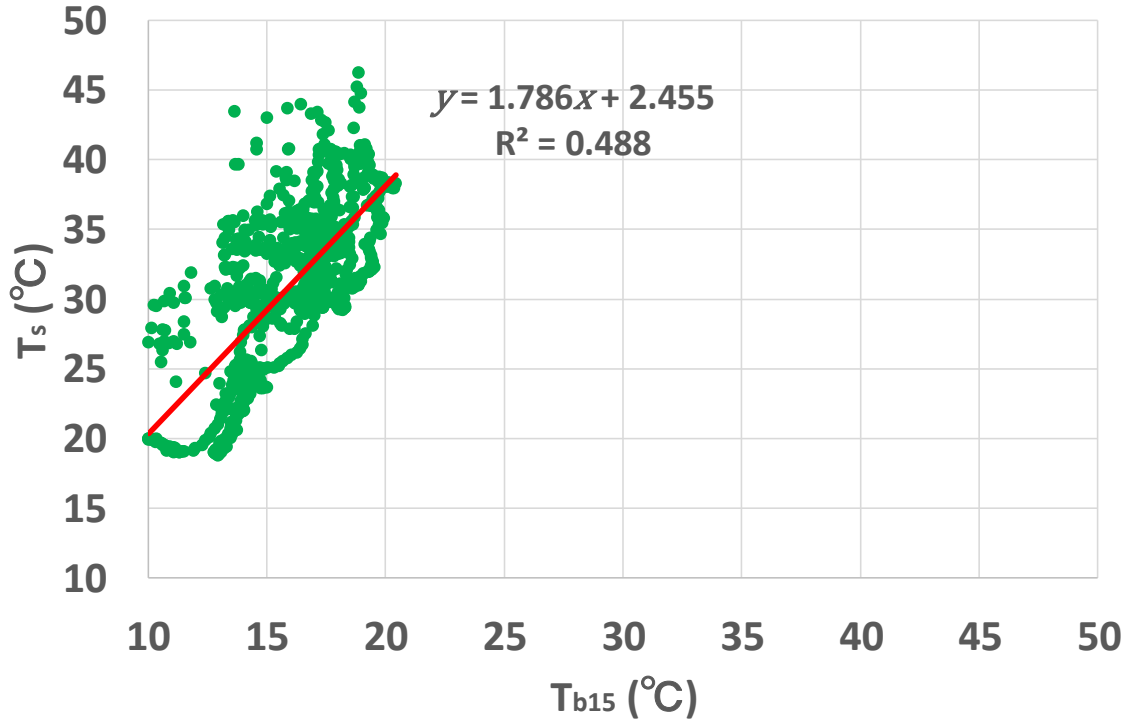


図 21 Band15 の輝度温度 T_{b15} と水面温度 T_s の関係

2.4. スプリットウィンドウ法

スプリットウィンドウ法は内田ら(2016)の式(4)を用いた。式は次のとおりである。

まず、湖心観測所で観測されている水面温度とひまわりから得られた輝度温度データを用いて係数 α を計算する。係数 α は最小二乗法によって算出する。計算は次のように行った。まず、誤差の二乗和 S は次の式で表される。

$$S = \sum_{i=1}^n [T - \{T_{bi} + \alpha(T_{bi} - T_{bj})\}]^2 \quad (5)$$

推定値と実測値の差が最小になるように α について微分したときの値が 0 となればいいので

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0 \quad (6)$$

これを解くと α の値は次のようになる

$$\alpha = \frac{\sum T \cdot T_i + \sum T_i \cdot T_j - \sum T \cdot T_j - \sum T_j^2}{\sum T_i^2 - 2 \sum T_i \cdot T_j + \sum T_j^2} \quad (7)$$

この計算で得られた、係数 α を用いて水面温度の推定値 T_s^* [°C] を計算した。

3.結果と考察

3.1.時間、空間の代表性

本研究で利用する観測値 T_s は霞ヶ浦湖心でのみで測られている 10 分平均値である。一方、ひまわり熱赤外バンドの輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} は2 kmメッシュの平均であり、時間方向では瞬間値である。そのため、霞ヶ浦湖心で観測されているデータが時間的、空間的に代表性があるものであることを示す必要がある。本研究では 2018 年 6 月～11 月に霞ヶ浦西浦を航行する船上から観測された放射温度 T_{IRT} のデータを用いて検証を行った。

3.1.1.空間の代表性

霞ヶ浦湖面上において温度 T_{IRT} の水平方向の変化が小さいことを示す必要がある。船の航路上において、湖心付近の点を 2 点間の距離ができるだけ 2 km に近くなるような観測点をきめたものが図 22 である。2 点間の温度 T_{IRT} の瞬間値の時間変化と平均値、標準偏差 s 、対象日の天候、平均風速 U をまとめたものが図 23～25 である。標準偏差は 0.32°C ～ 0.36°C であり、天候や風速 U の違いに関わらず、低い値を示していることから 2 km 程度では距離による水面温度 T_s の変化はほとんどないといえる。

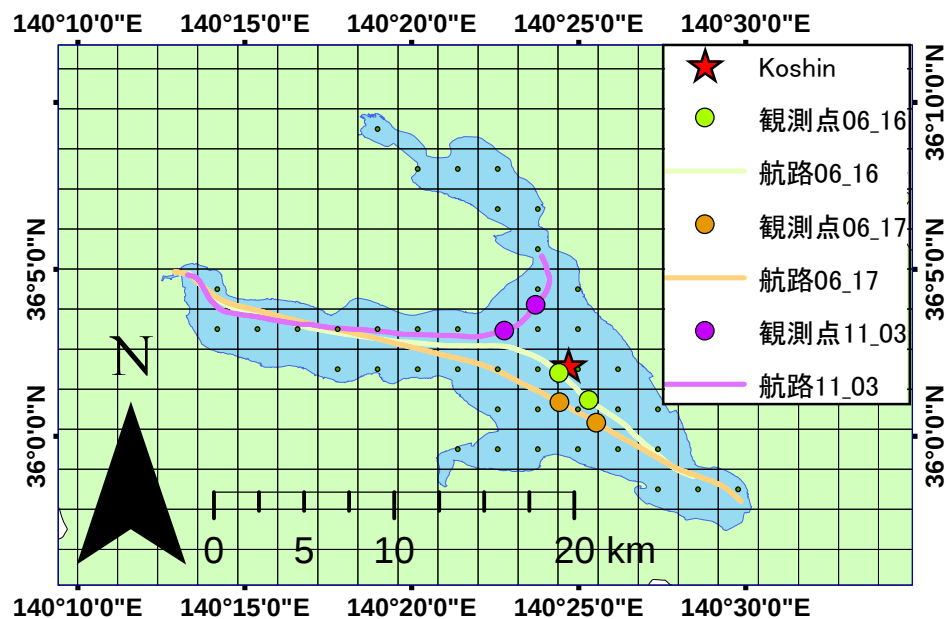


図 22 船の航路と水面温度の観測点(空間の代表性)

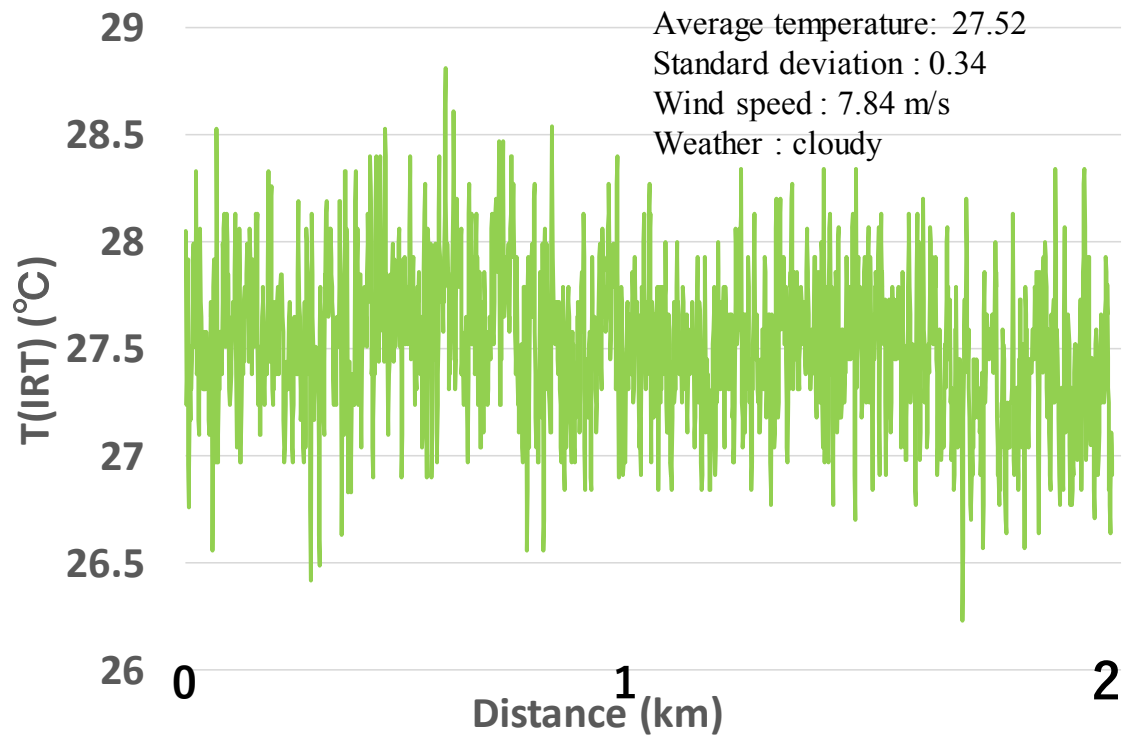


図 23 6 月 16 日における観測点間の水面温度変化

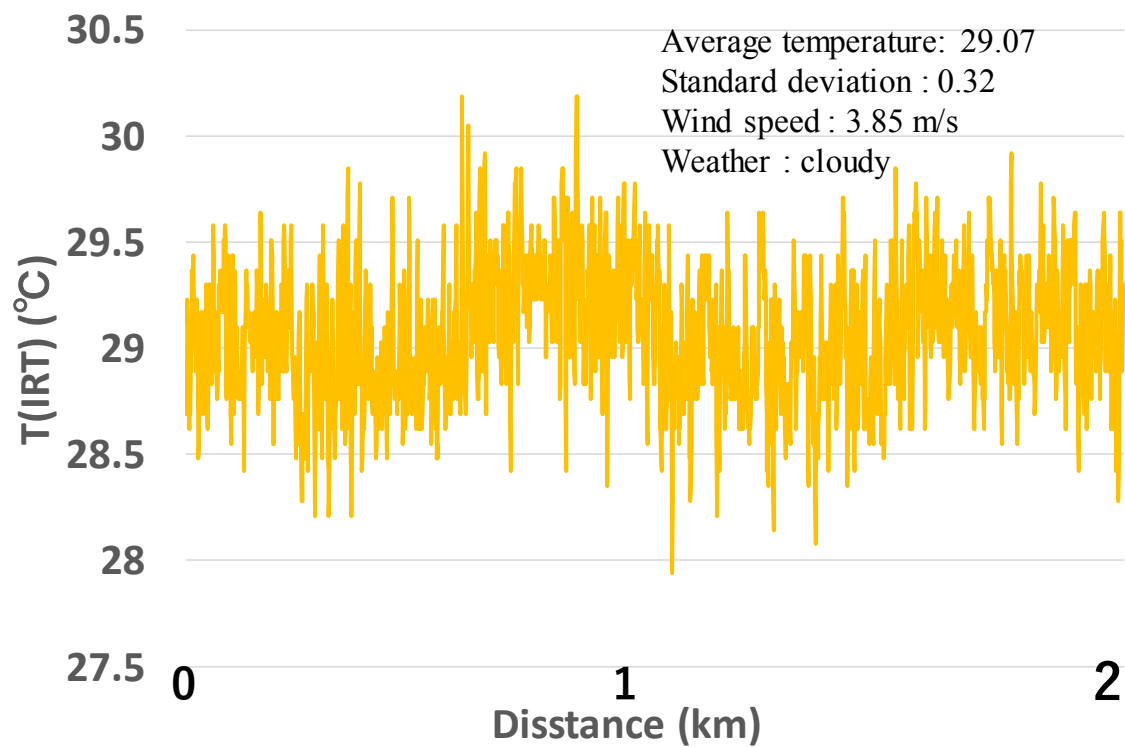


図 24 6 月 17 日における観測点の水面温度変化

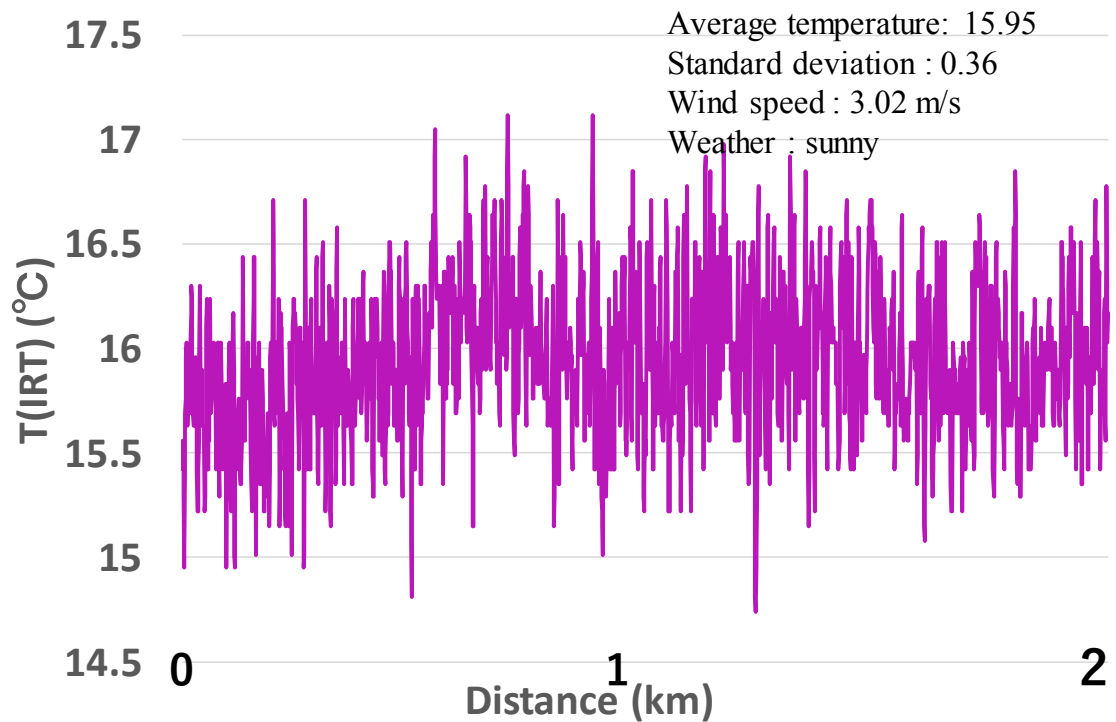


図 25 11 月 3 日における観測点の水面温度変化

3.1.2.時間の代表性

霞ヶ浦湖面上において短い時間間隔における温度の変化がほとんどないことを示す必要がある。船の航路上において、10 分間における移動距離ができるだけ少ない区間を選び、その両端を観測点とした(図 26)。その区間の温度 T_{IRT} の瞬間値の時間変化と平均値、標準偏差、対象日の天候、平均風速をまとめたものが図 27、28 である。標準偏差は 0.37°C ~ 0.61°C であり、特に土浦港付近と土浦入り湖面との時間間隔による水面温度 T_s の変化は 0.6°C 程度と大きかった。

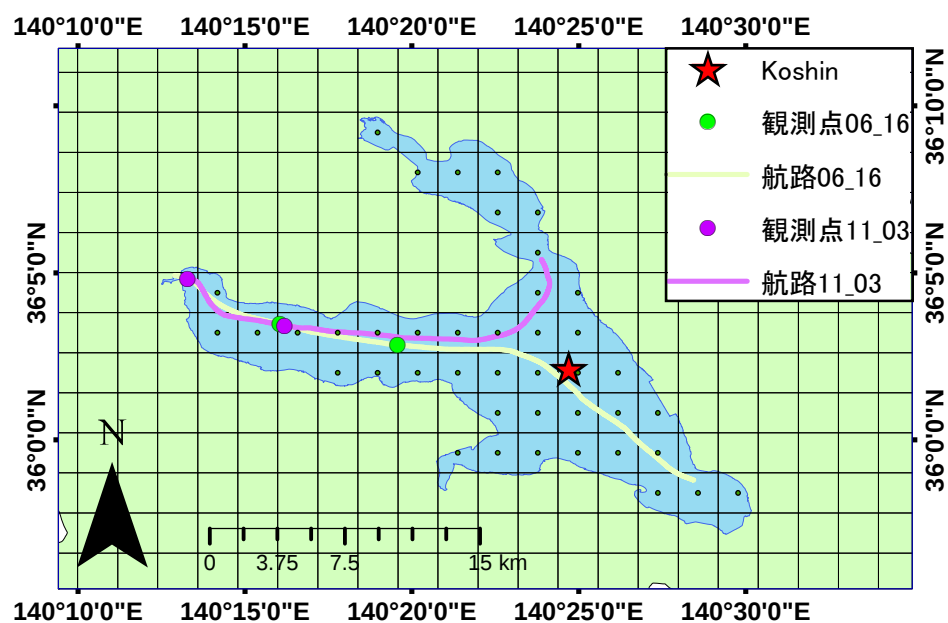


図 26 船の航路と水面温度の観測点(時間の代表性)

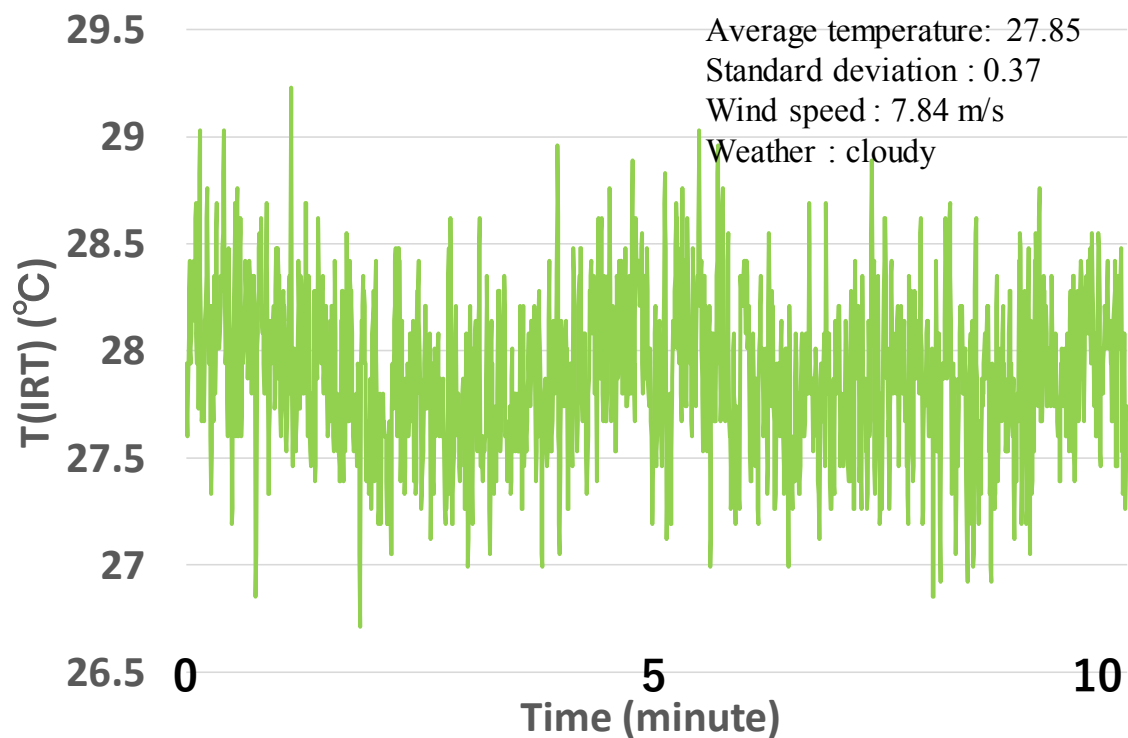


図 27 6 月 16 日における 10 分間の水面温度変化

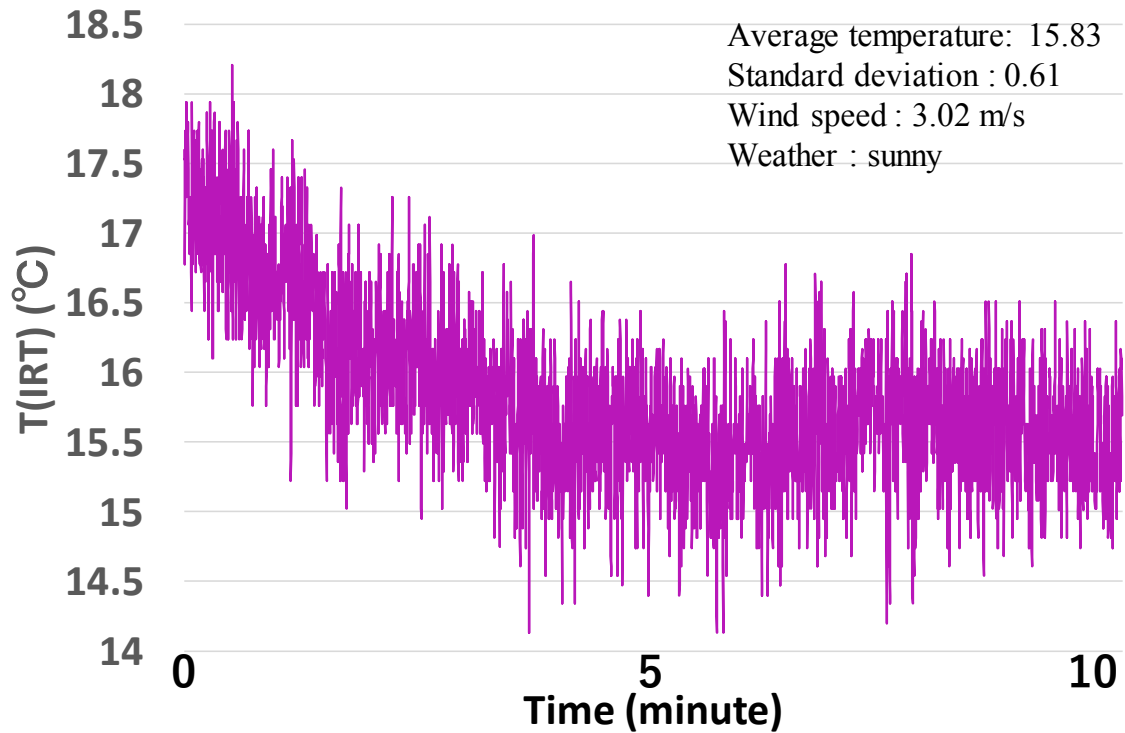


図 28 11 月 3 日における 10 分間の温度変化

3.2. 先行研究との比較

先行研究の式(2)、(3)、(4)について霞ヶ浦の Band13、Band14、Band15 の輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} を用いて計算を行った。係数は表 3~5 の値を利用した。式(2)、(3)に関してはすべてのバンドに対して水の射出率の値 $\varepsilon = 0.96$ を用いて計算を行った。結果を図 29~31 に示す。いずれの式の推定値 T_s^* も 1 対 1 の直線から大きく外れており、推定値 T_s^* が過小評価されていることがわかる。推定精度が最もよかったのは式(4)において Band14 と Band15 を用いたもので推定精度は 9.43°C と高くなかった。これらの式はすべて地表面温度を対象に用いられたものであり、本研究では水面温度を用いたため誤差が生じたと考えられる。

表 3 式(2)における係数(Yamaoto et al. 2018)

e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6
20.58	1.837	1.036	-1.954	0.221	0.133	-0.207

表 4 式(3)における係数(Yamamoto et al. 2018)

f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
8.594	1.644	0.639	-1.317	0.180	0.039	-0.098	0.342	0.026	0.009

表 5 式(4)における係数 α (内田ら、2016)

$T_{bj} \backslash T_{bi}$	B13	B14	B15
B13		2.1961	0.4126
B14	-3.1961		0.7352
B15	-1.4126	-1.7352	

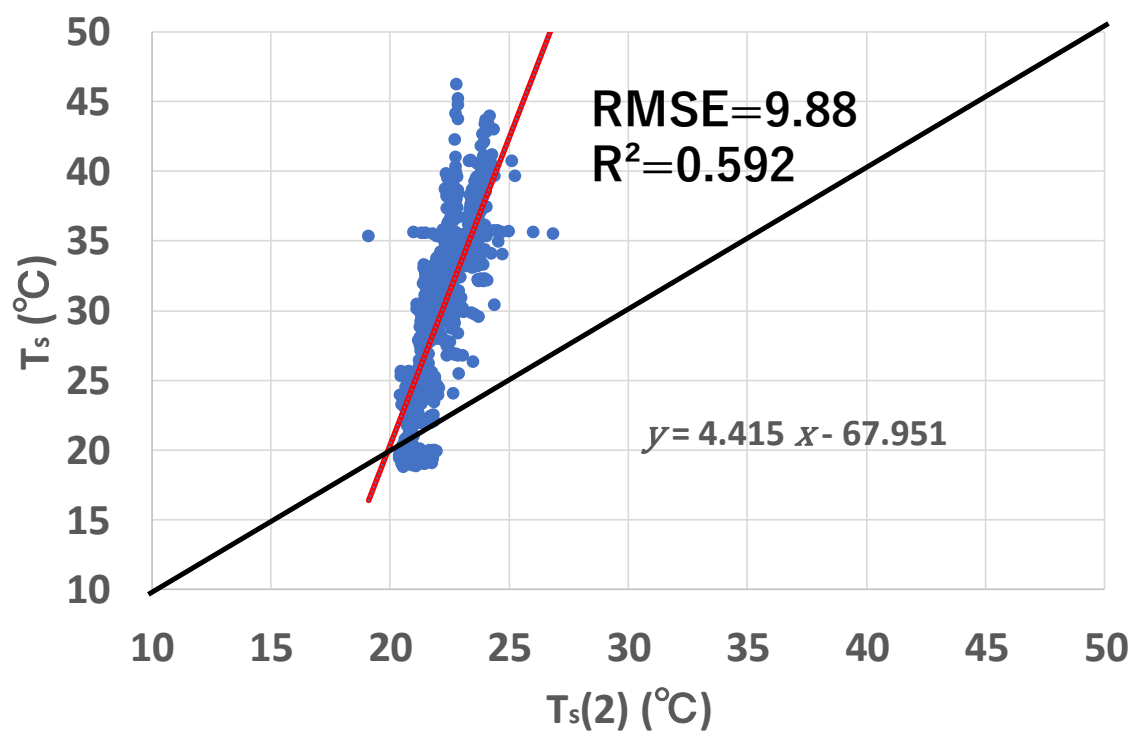


図 29 式(2)による水面温度の推定値 $T_s(2)$ と観測値 T_s の比較

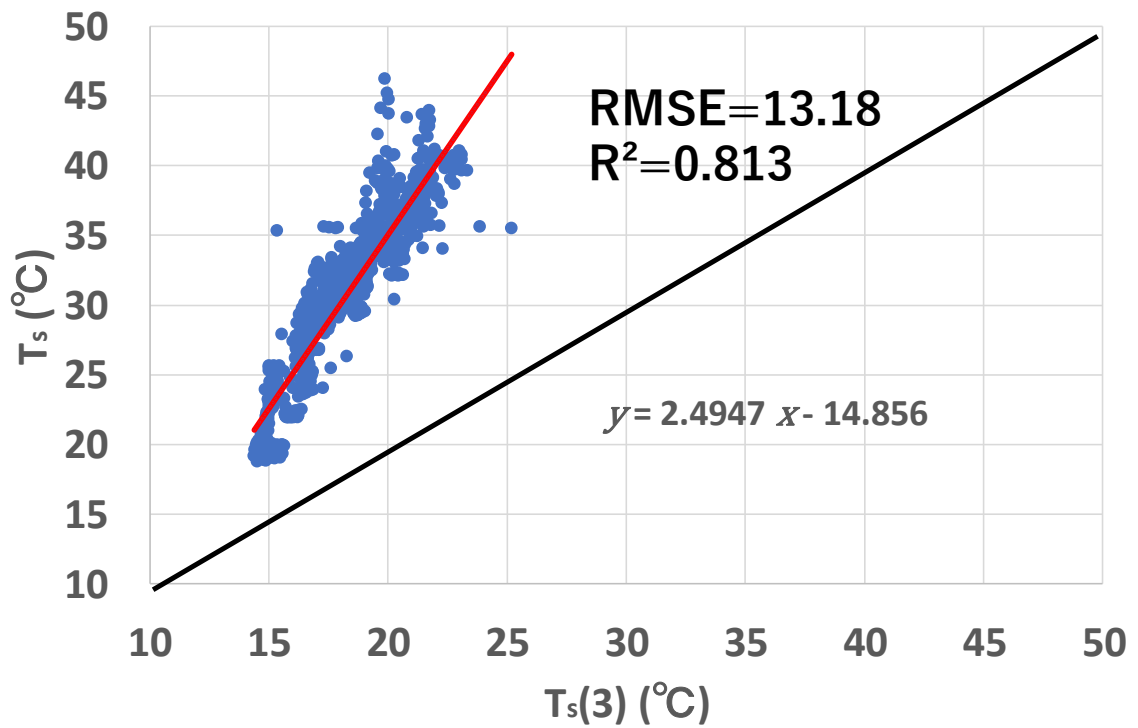


図 30 式(3)による水面温度の推定値 $T_s(3)$ と観測値 T_s の比較

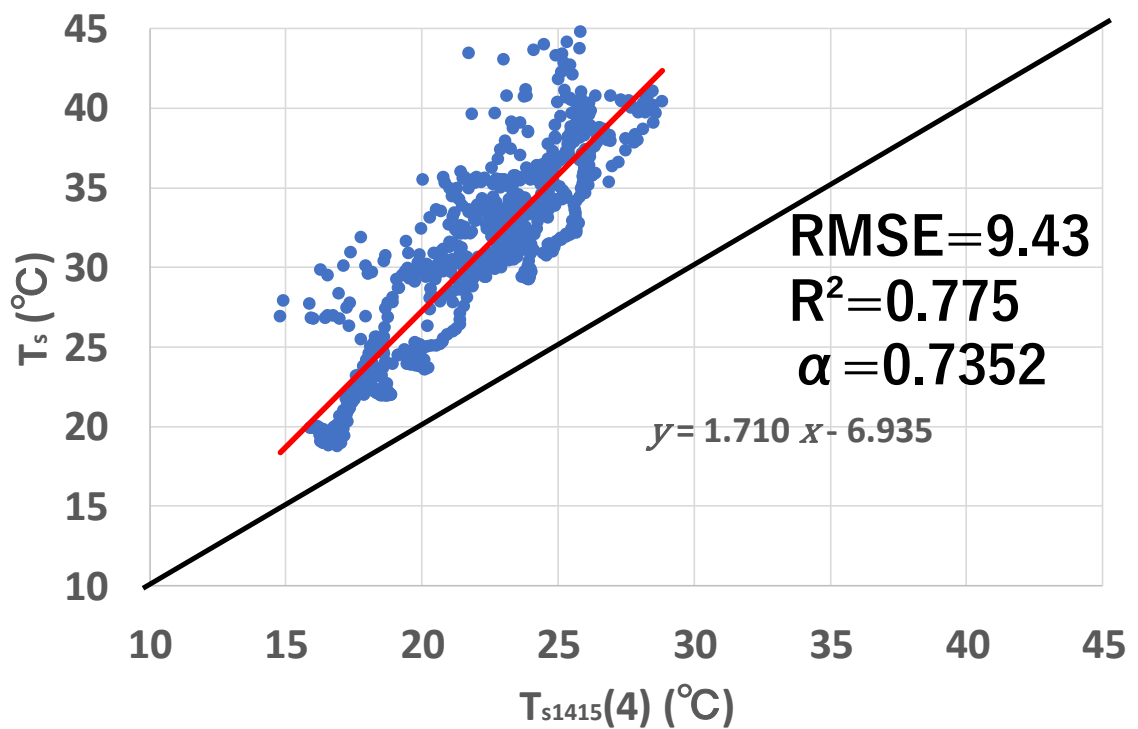


図 31 式(4)による水面温度の推定値 $T_{s1415}(4)$ と観測値 T_s の比較

3.3.霞ヶ浦における解析結果

3.3.1.推定値と観測値の比較

表 6 の係数を用いて計算した水面温度の推定値 T_s^* と観測値 T_s から決定係数 R^2 と平均平方二乗誤差 RMSE を求めた。また、推定値と観測値、 $x = y$ の直線をプロットしたものが図 32～34 である。なお、式(4)においてはバンド i、j の順番によって係数 α の値が異なるが、得られる推定値の値は等しいため、3 種類のバンドの組み合わせについてのみ決定係数 R^2 と平均平方二乗誤差 RMSE の計算を行った。Band13 と Band14 の組み合わせの推定値を T_{s1314}^* 、Band13 と Band15 の組み合わせの推定値を T_{s1315}^* 、Band14 と Band15 の組み合わせの推定値を T_{s1415}^* とする。推定値と観測値の決定係数は 0.717～0.842 と高い相関を示した。また、RMSE は最も小さかったものは T_{s1315}^* で 2.31℃、最も大きかったものは T_{s1314}^* で 6.04℃であった。もっとも推定精度の高かったバンドの組み合わせは Band13 と Band15 の組み合わせであり、Band15 を含む組み合わせは推定精度が高い傾向にあった。一方で、Band13 と Band14 の組み合わせは推定精度が最も悪く図 32 を見てみると回帰直線も 1 対 1 の直線から外れており、推定値の多くが過小評価されていることが確認された。図 35 は全期間における観測値 T_s と各バンドの輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} である。このグラフを見ると全期間において $T_s > T_{b13}$ 、 T_{b14} 、 T_{b15} であり、各バンドの輝度温度はほぼ同じ傾向で変化していることが確認できる。また T_{b13} と T_{b14} はほぼ同じ値を示していたが、 T_{b15} は他の 2 バンドの輝度温度より 3～4℃低い値を示すことがわかった。本研究で用いたスプリットウィンドウ法の式において、右辺第一項に入る輝度温度 T_{b13} と T_{b14} はほぼ同じ値であるので、第二項の 2 バンドの輝度温度差によって、推定精度の差が生じたと考えられる。全期間における観測値 T_s と Band13、Band14 による推定値 T_{s1314}^* の差の絶対値 $|T_s - T_{s1314}^*|$ と Band13 と Band14 の輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ をプロットしたものが図 36 である。この図を見ると輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ が 0 に近い点において、誤差が大きくなる傾向がみられた。各バンドの輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} 、観測値 T_s 、推定値 T_s^* を各月および時間ごとに分類し、推定精度を検証した。

表 6 霞ヶ浦における式(4)の係数 α

	B13	B14	B15
B13		12.084	2.566
B14	-13.084		3.236
B15	-3.566	-4.236	

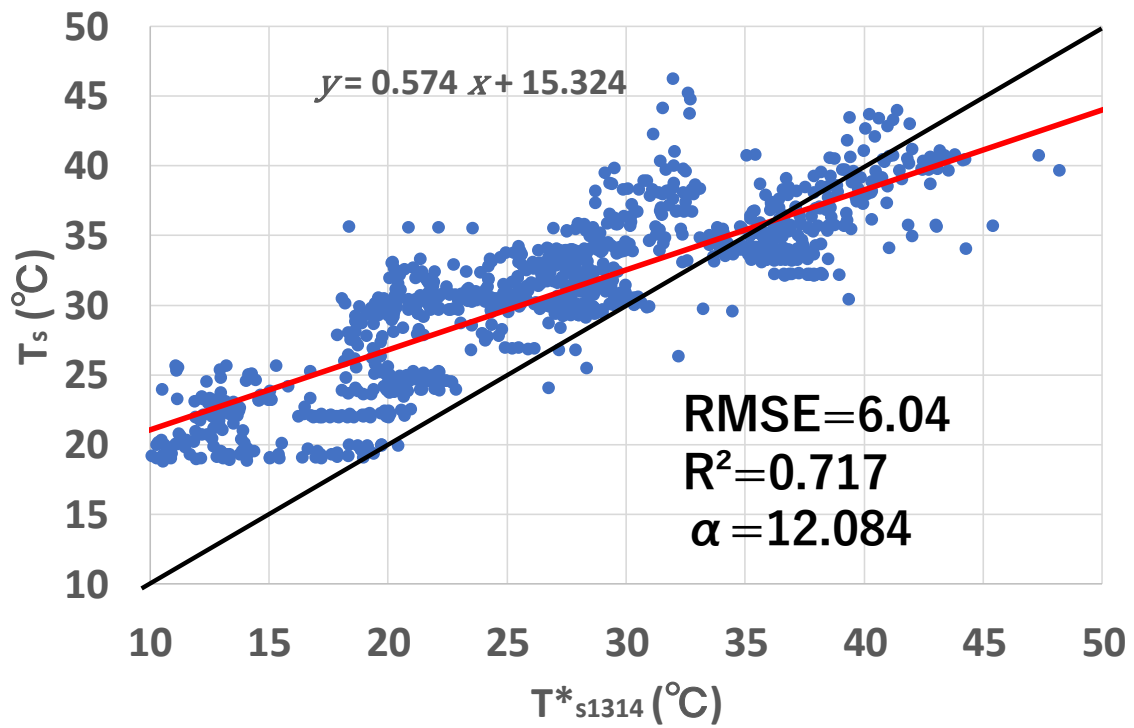


図 32 Band13 と Band14 を用いた推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s の比較

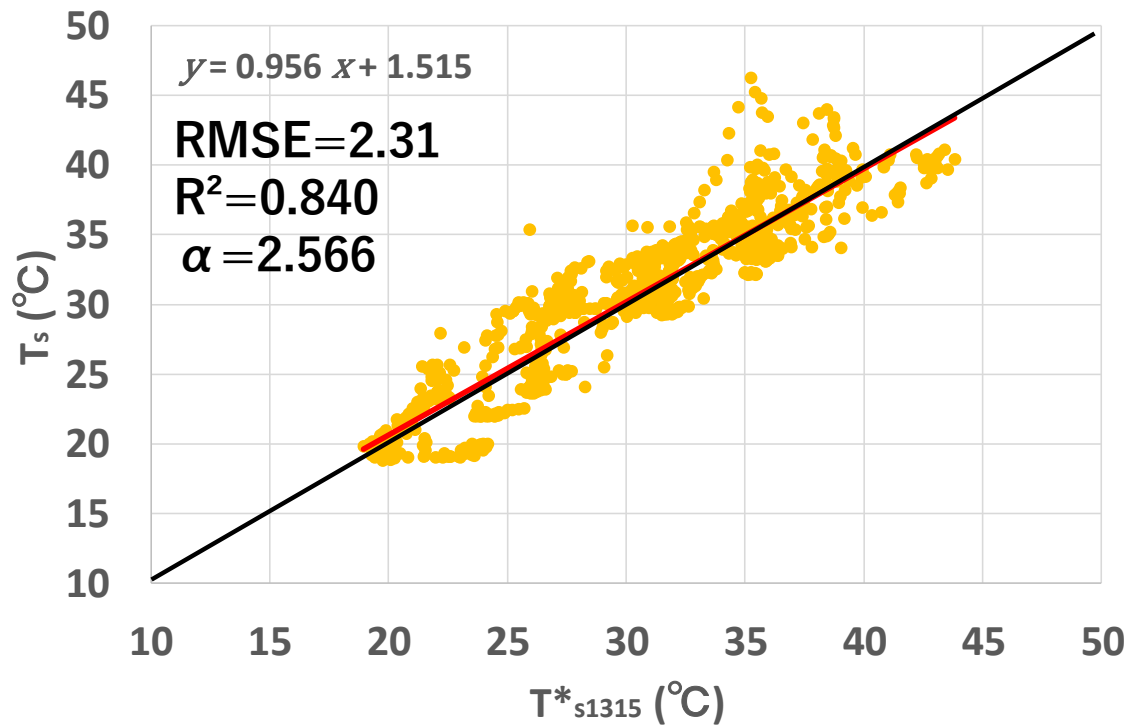


図 33 Band13 と Band15 を用いた推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s の比較

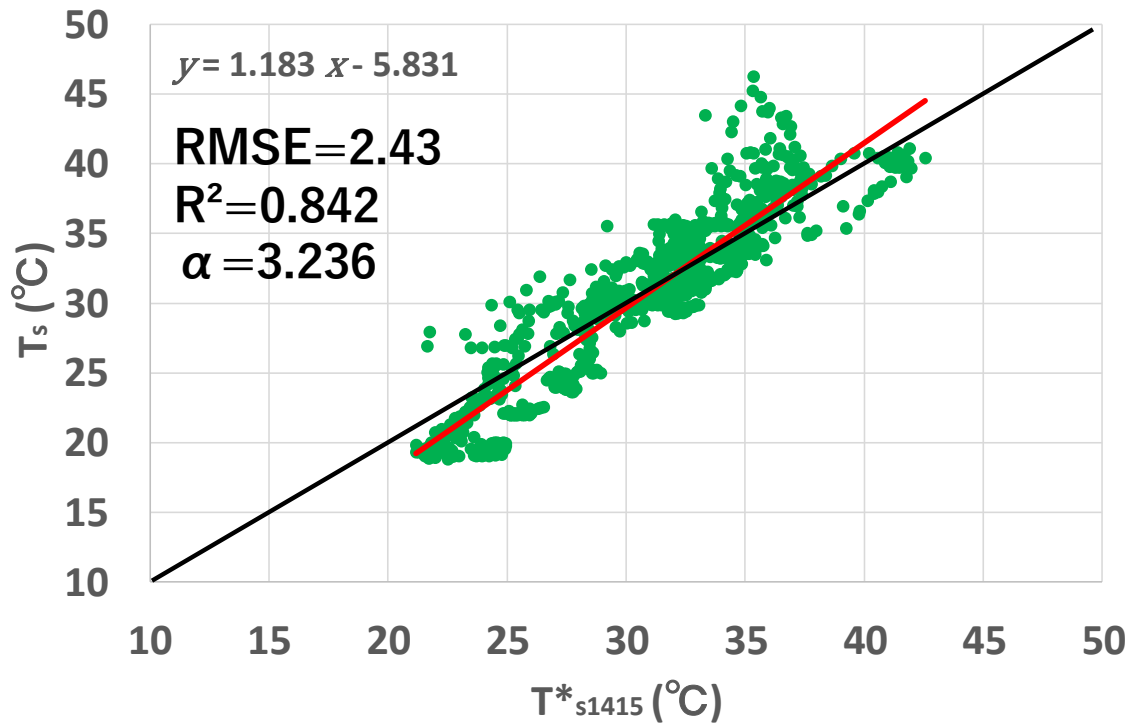


図 34 Band14 と Band15 を用いた推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s の比較

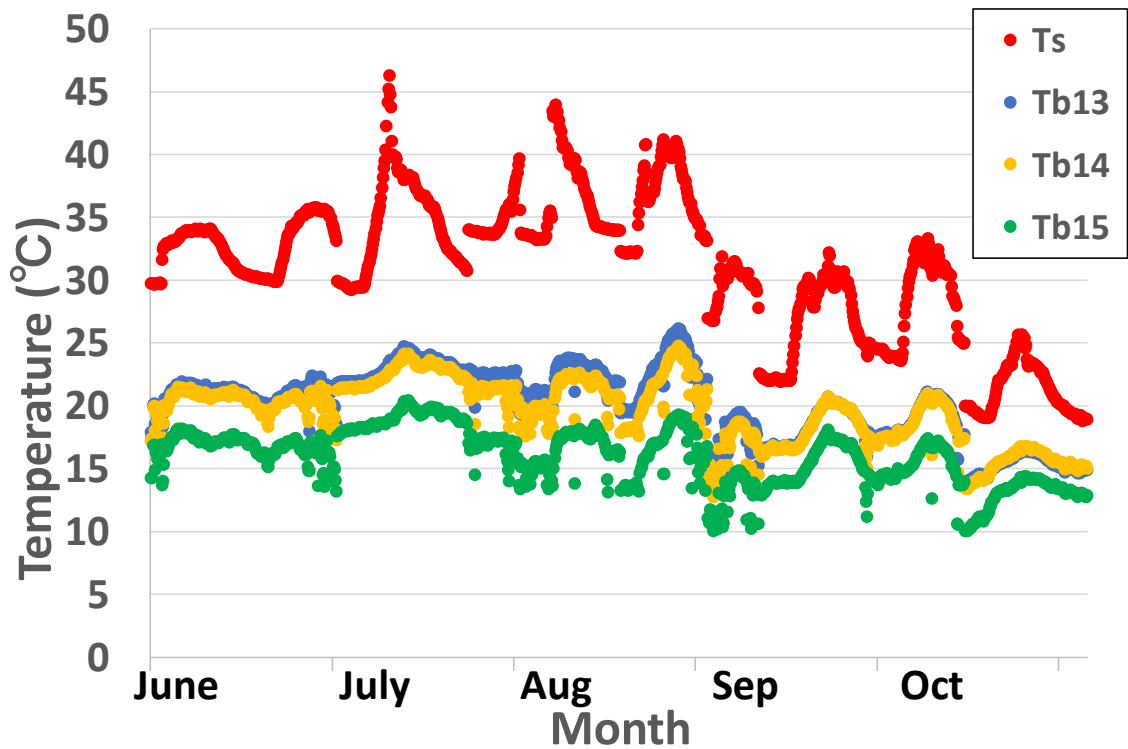


図 35 全期間における水面温度観測値 T_s と Band13、14、15 の輝度温度 T_{b13} 、 T_{b14} 、 T_{b15} の変化

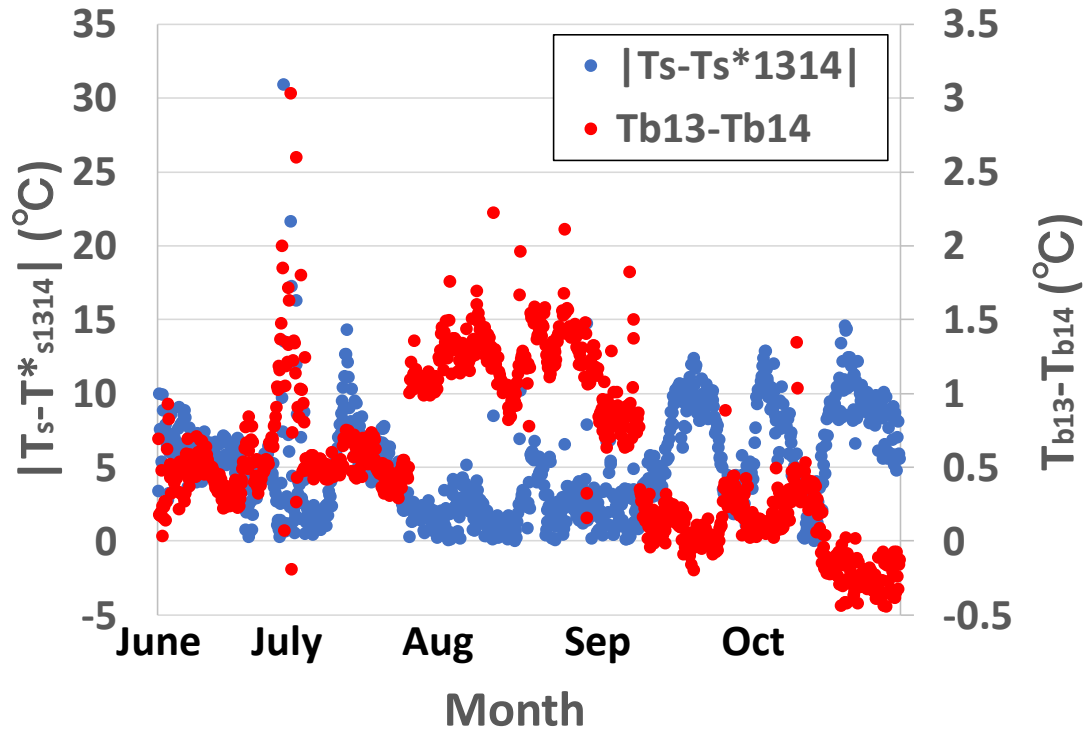


図 36 全期間における観測値と Band13 と Band14 を用いて推定された水面温度の差と Band13 と Band14 の輝度温度の差

3.3.2.月ごとの比較

月ごとの推定値と観測値の関係を示したものが、図 37~51 である。また、各月ごとの決定係数と RMSE の関係をまとめたのが表 7、8 である。RMSE に注目すると T_{s1315}^* と T_{s1415}^* は同様の傾向を示し、7 月が最も大きく 2.6 °C 程度、6 月が最も小さく 1.5 °C 程度であった。一方、 T_{s1314}^* は 8 月が最も小さく 2.36 °C と T_{s1315}^* と T_{s1415}^* とほとんど変わらない値となった、しかし 10 月では 7.58 °C と高い値を示した。各バンドの輝度温度差と RMSE を示したものが図で 52~54 である。この図を見ると輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ が小さいほど RMSE が大きくなる傾向がみられ特に輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ が 0.6 °C を下回ると大きい誤差が生じている。一方で輝度温度差 $T_{b13} - T_{b15}$ 、 $T_{b14} - T_{b15}$ と RMSE の大小は特に関係性が見られなかった。そこで RMSE の特に大きかった 7 月について観測値 T_s と観測値と推定値の誤差 $|T_s - T_{s1315}^*|$ 、 $|T_s - T_{s1415}^*|$ の関係性を示すと(図 55)温度が 40 °C 以上の点において 5 °C 以上の誤差が生じていることが明らかとなった。以上より本研究で用いたスプリットウィンドウ法の式は、高温であるとき、またバンドの輝度温度差が非常に小さいときに誤差が生じやすいと考えられる。

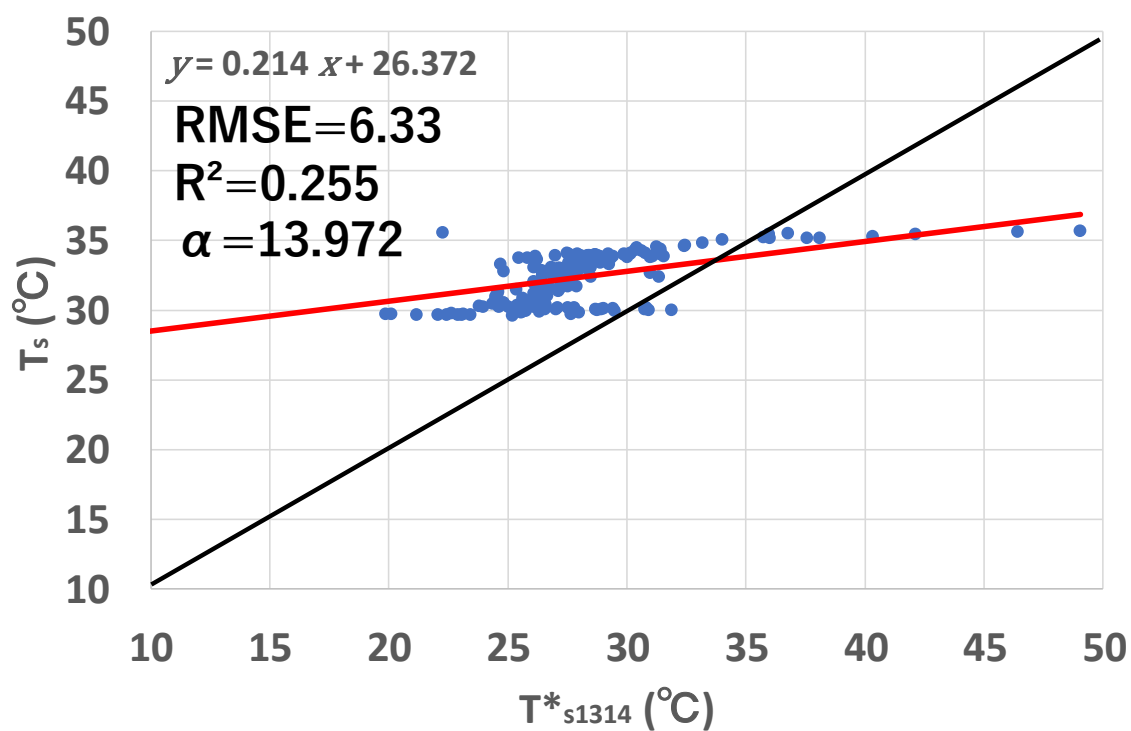


図 37 6 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

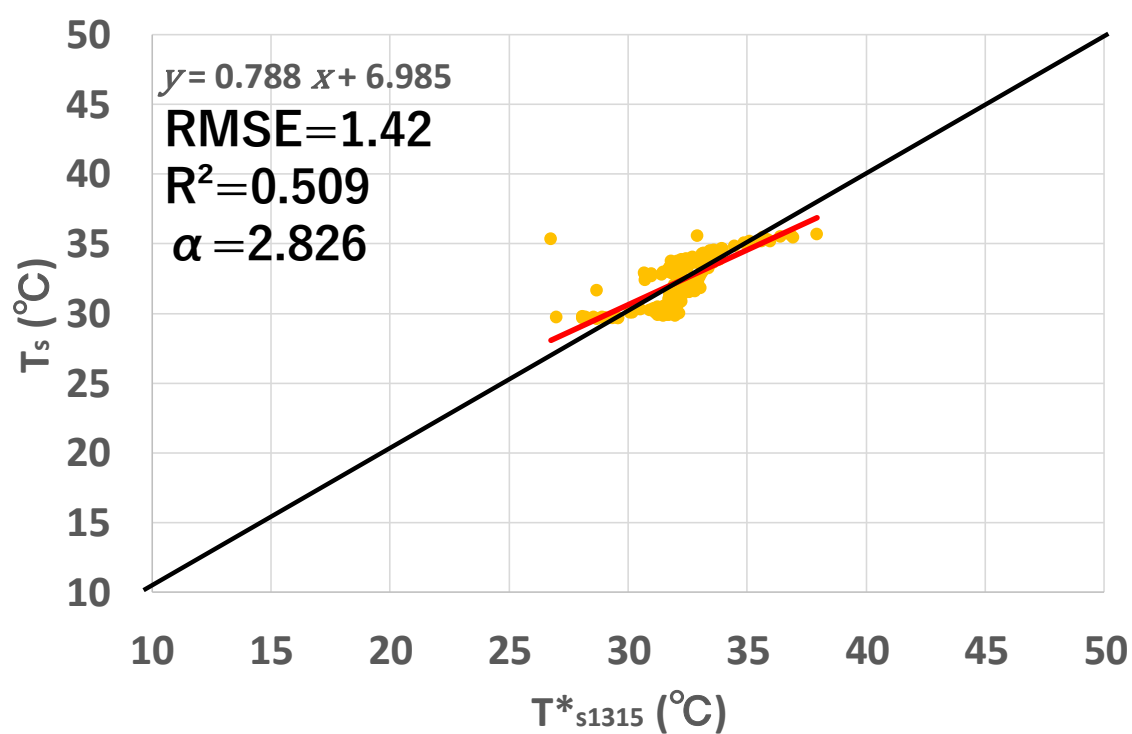


図 38 6 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s

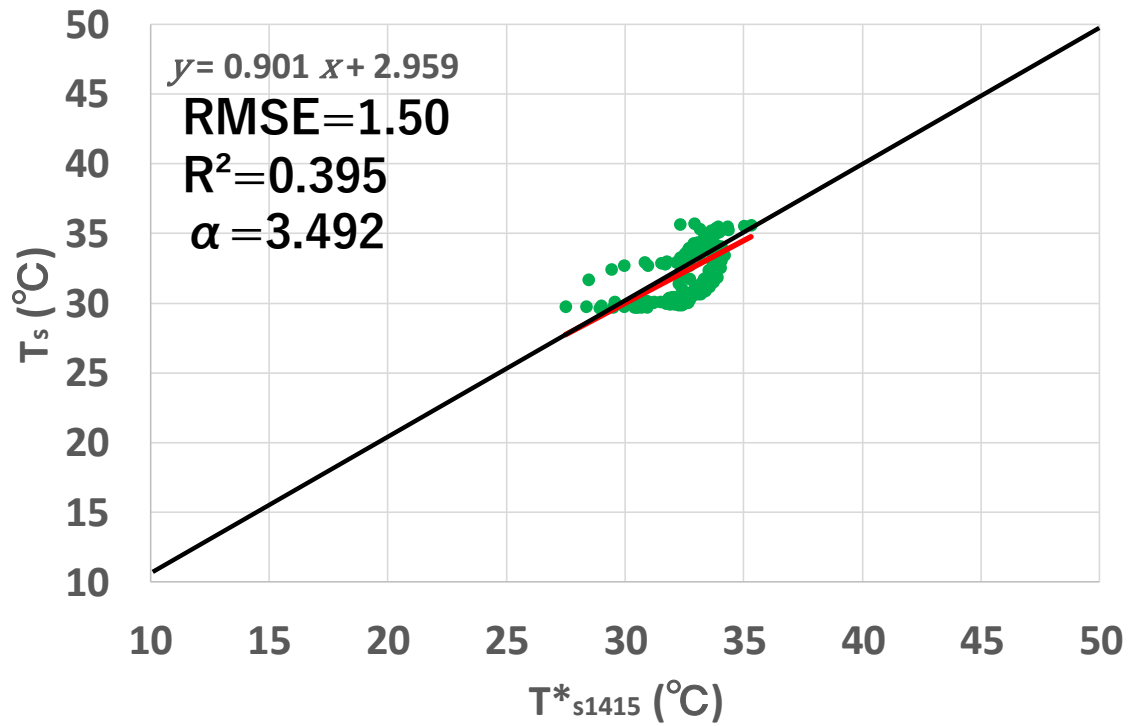


図 39 6月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s

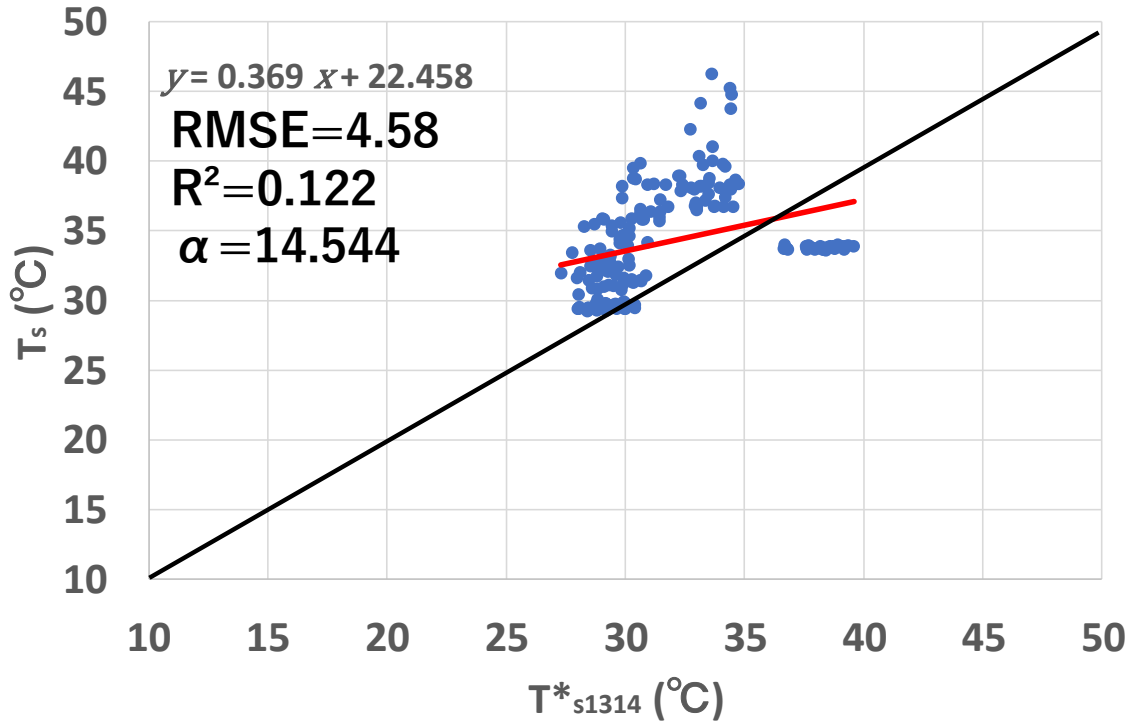


図 40 7月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

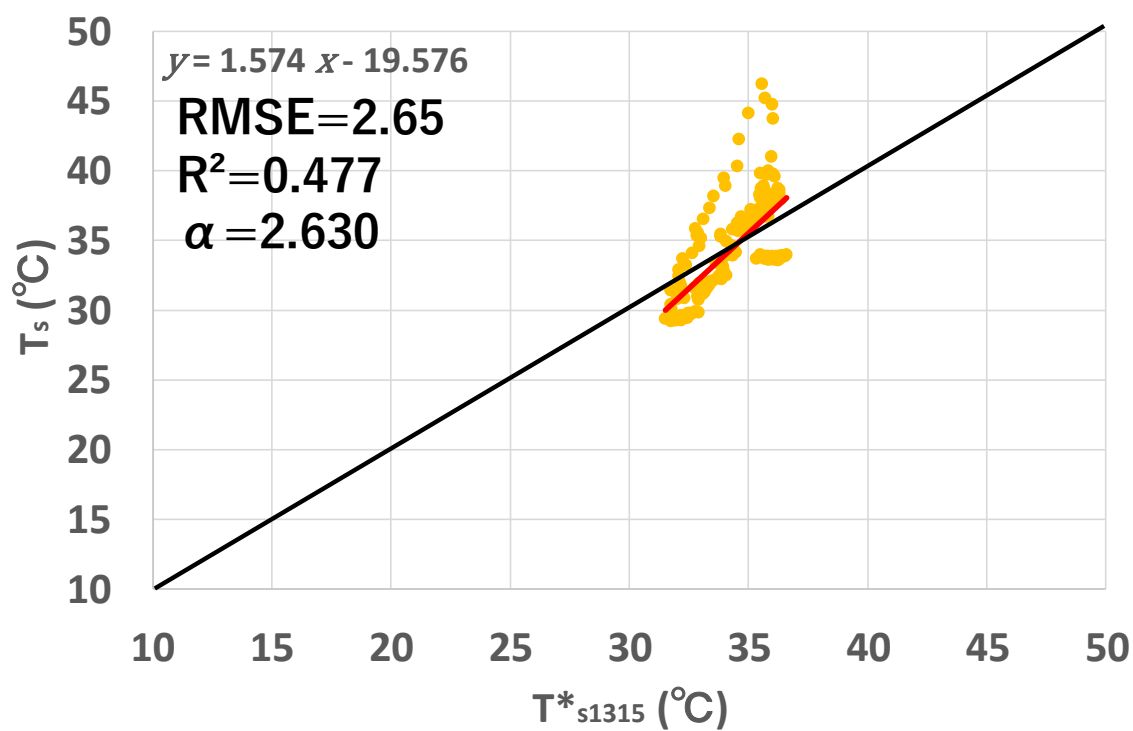


図 41 7月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s

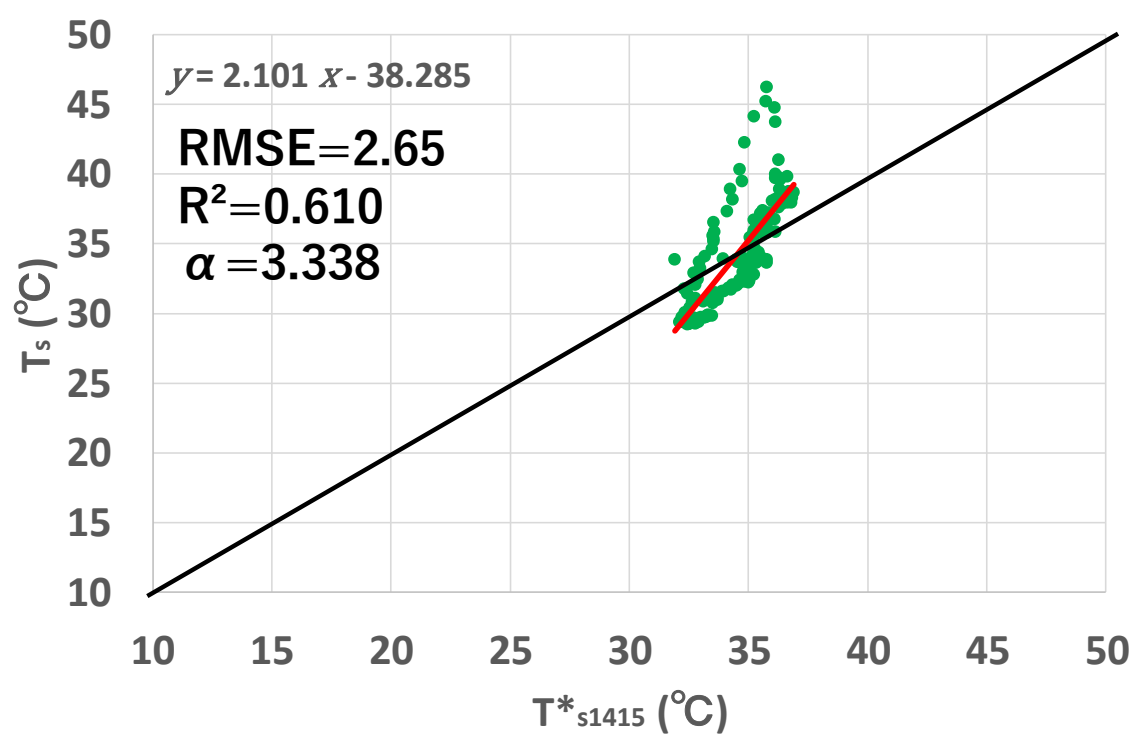


図 42 7月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s

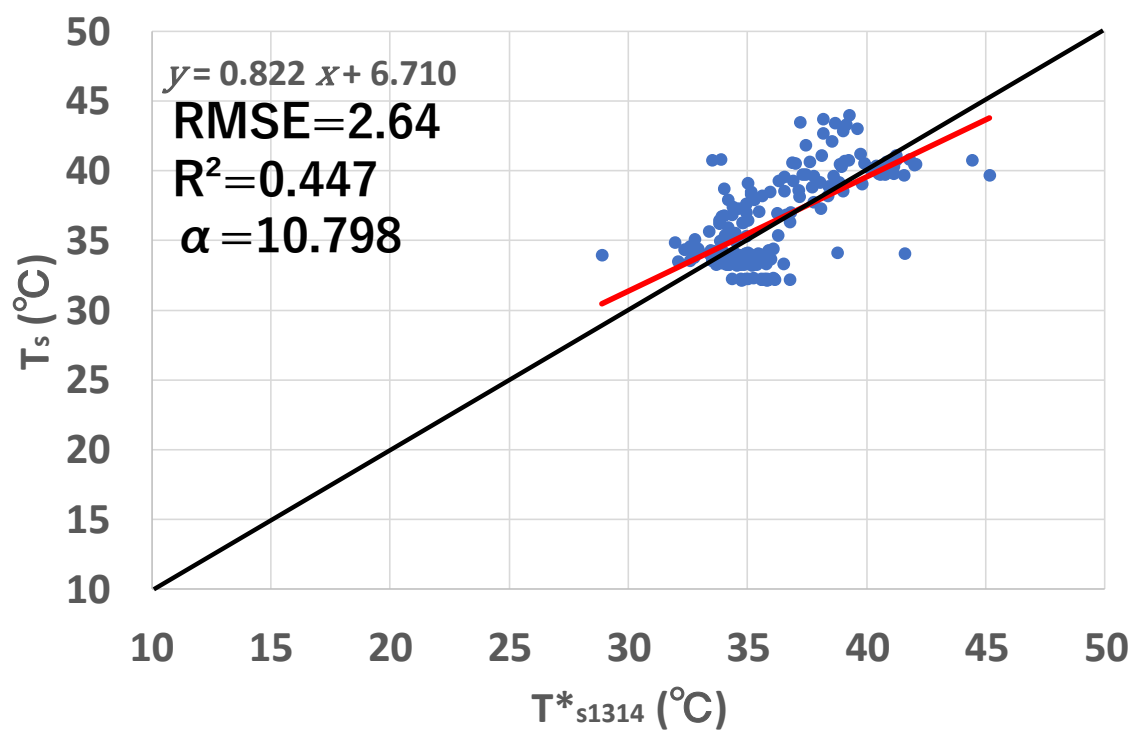


図 43 8 月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

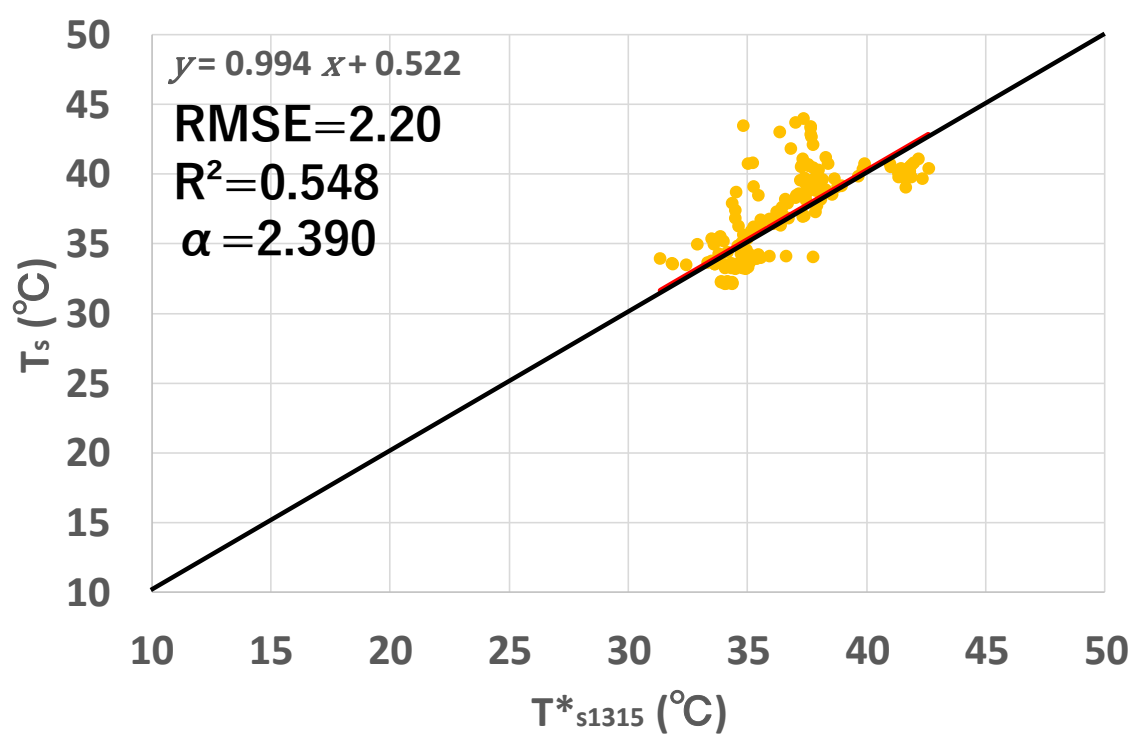


図 44 8 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s

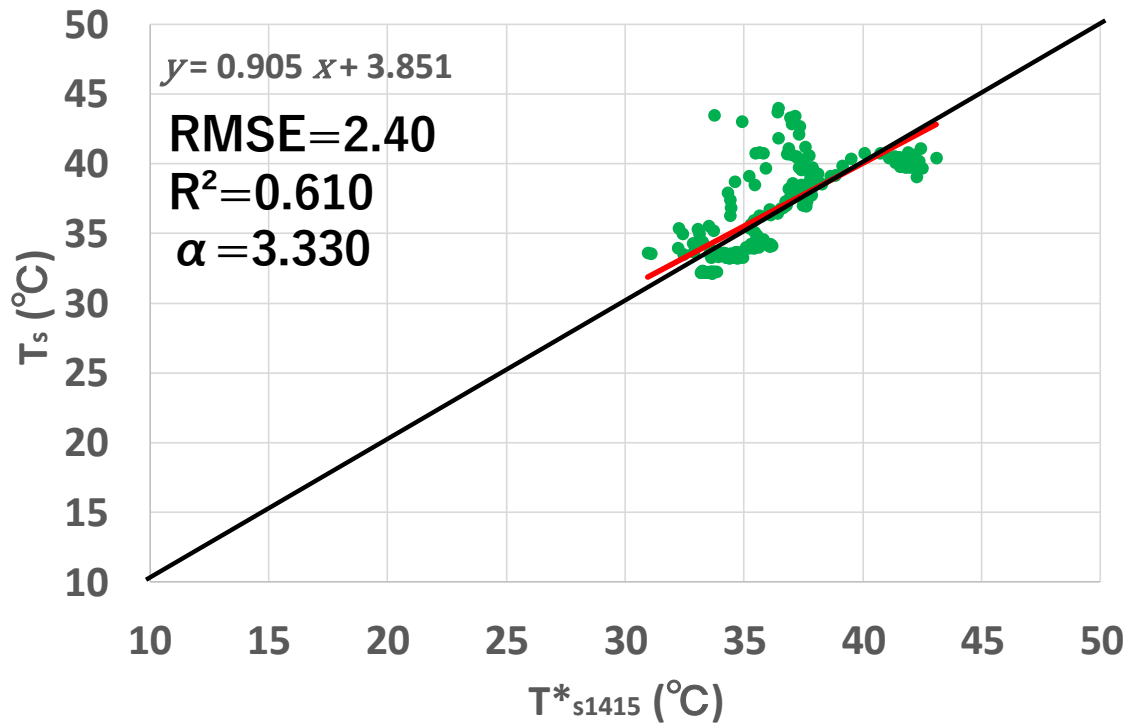


図 45 8月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s

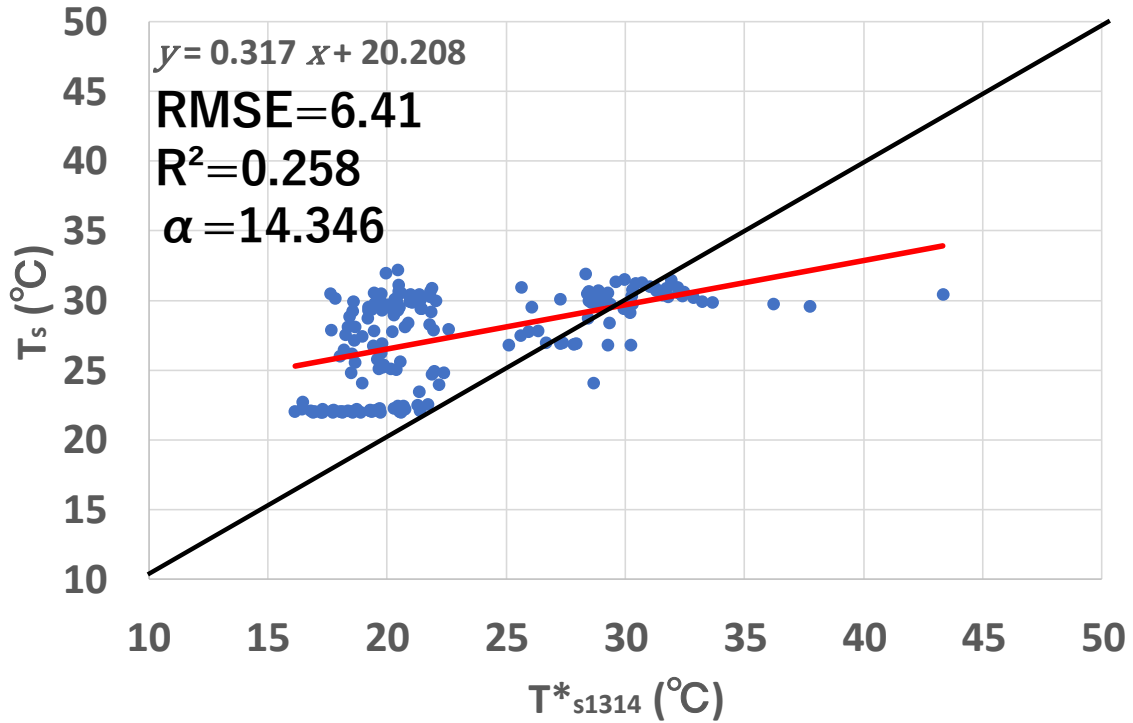


図 46 9月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

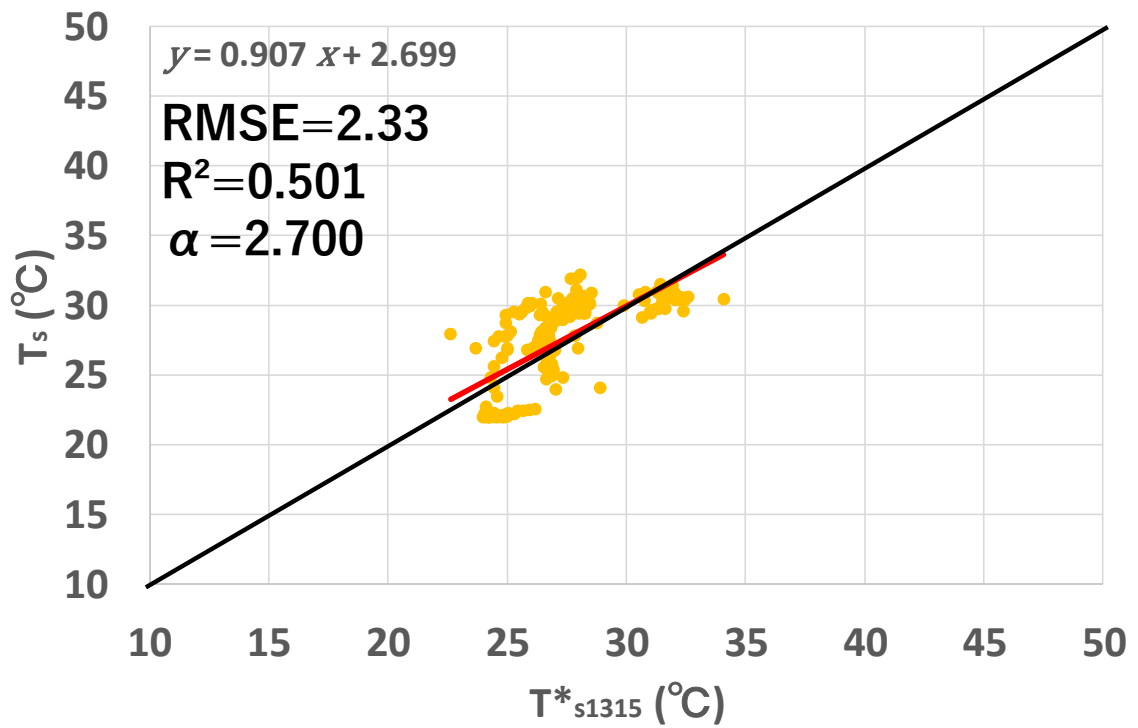


図 47 9 月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s

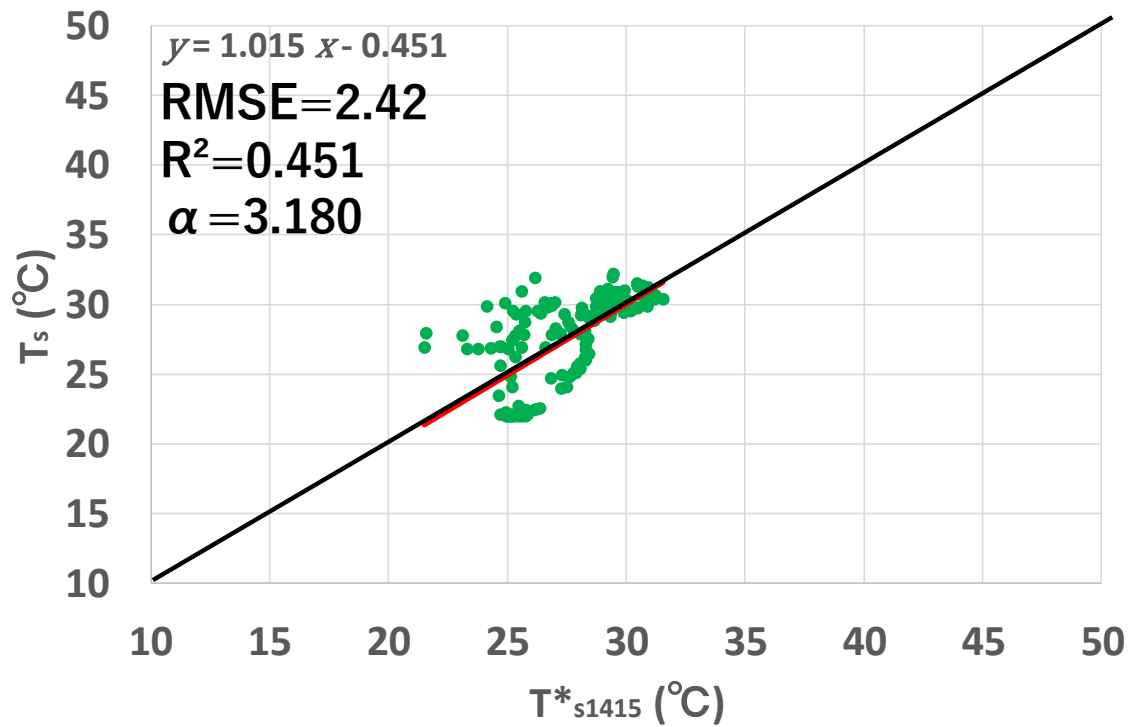


図 48 9 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s

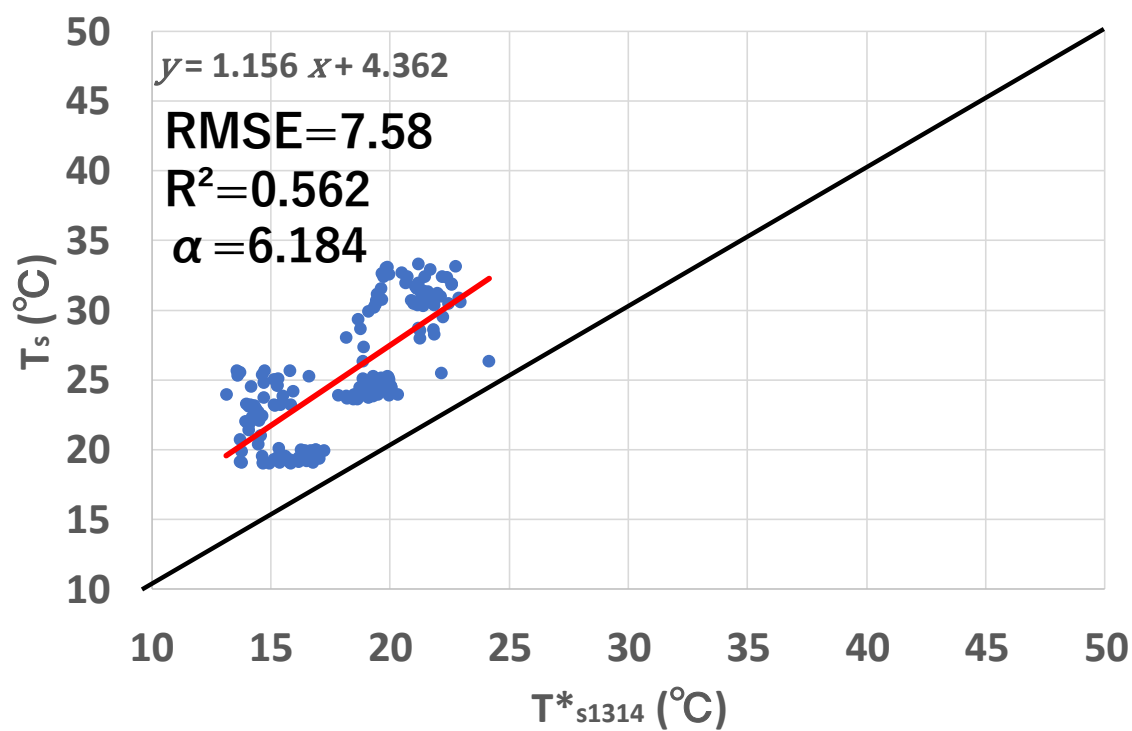


図 49 10月における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

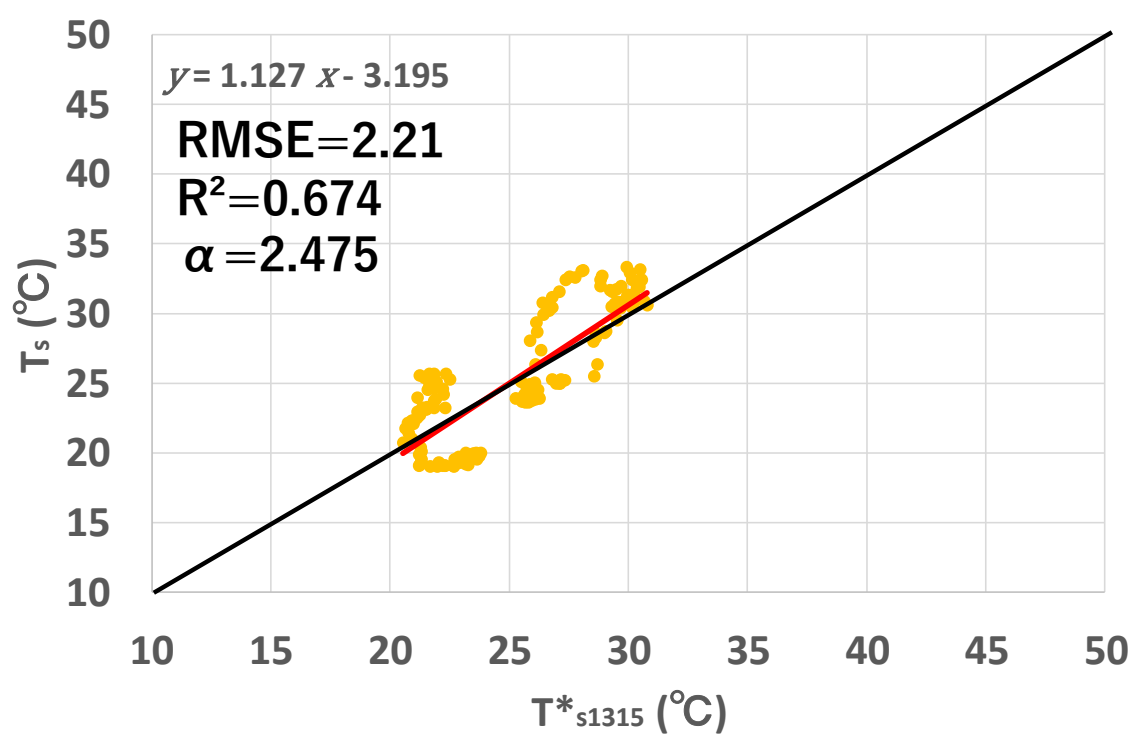


図 50 10月における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s

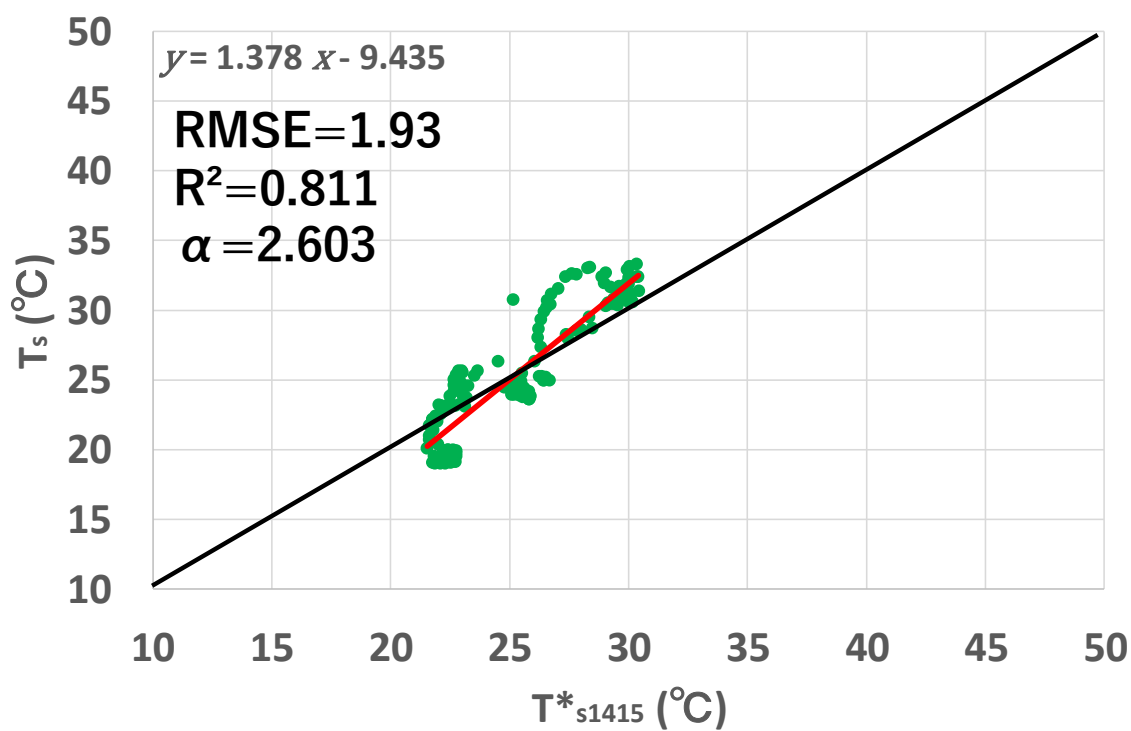


図 51 10 月における推定値 T_{s1415}^* と観測値 T_s

表 7 各月ごとの RMSE

RMSE	T_{s1314}^*	T_{s1315}^*	T_{s1415}^*
June	6.33	1.42	1.50
July	4.58	2.65	2.65
August	2.64	2.20	2.40
September	6.41	2.33	2.42
October	7.58	2.21	1.93

表 8 各月ごとの決定係数

R^2	T_{s1314}^*	T_{s1315}^*	T_{s1415}^*
June	0.255	0.509	0.395
July	0.122	0.477	0.610
August	0.447	0.548	0.500
September	0.258	0.501	0.451
October	0.562	0.674	0.811

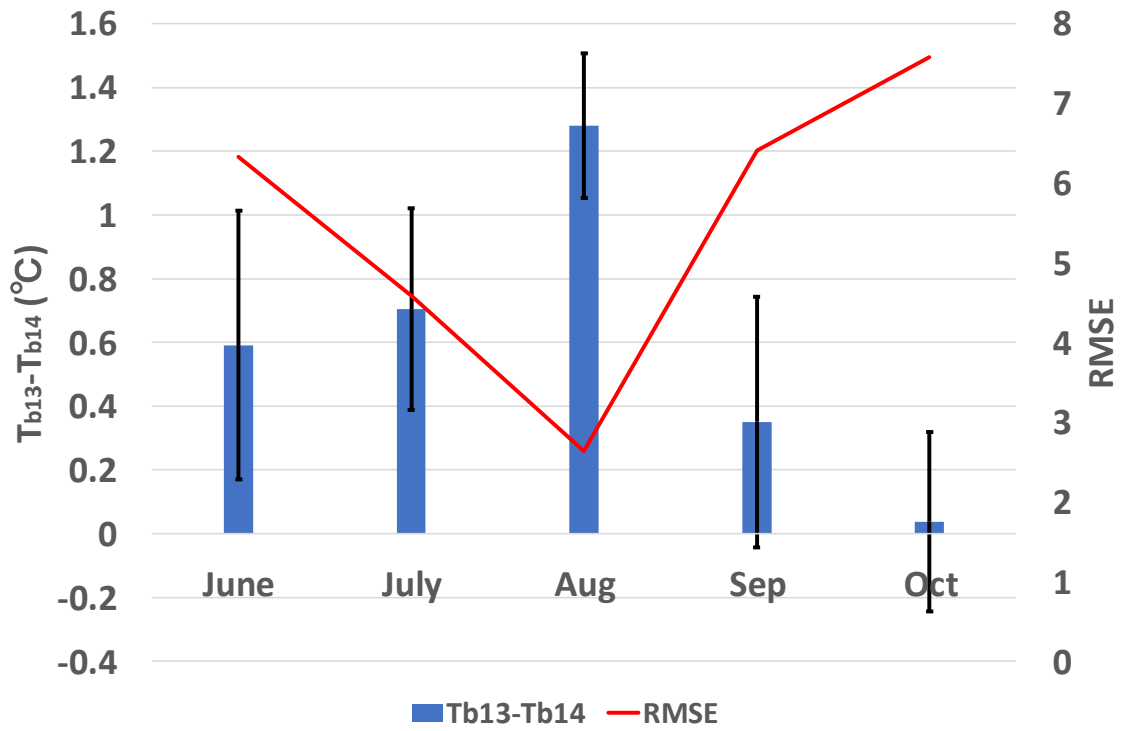


図 52 輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ と RMSE

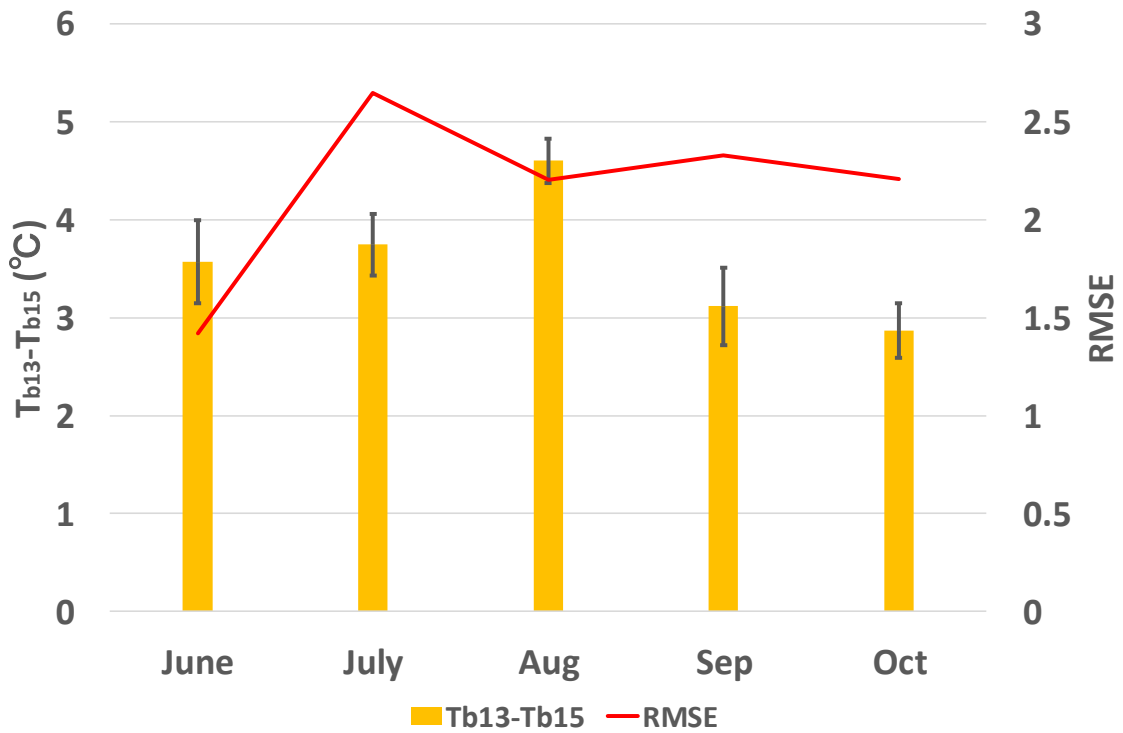


図 53 輝度温度差 $T_{b13} - T_{b15}$ と RMSE

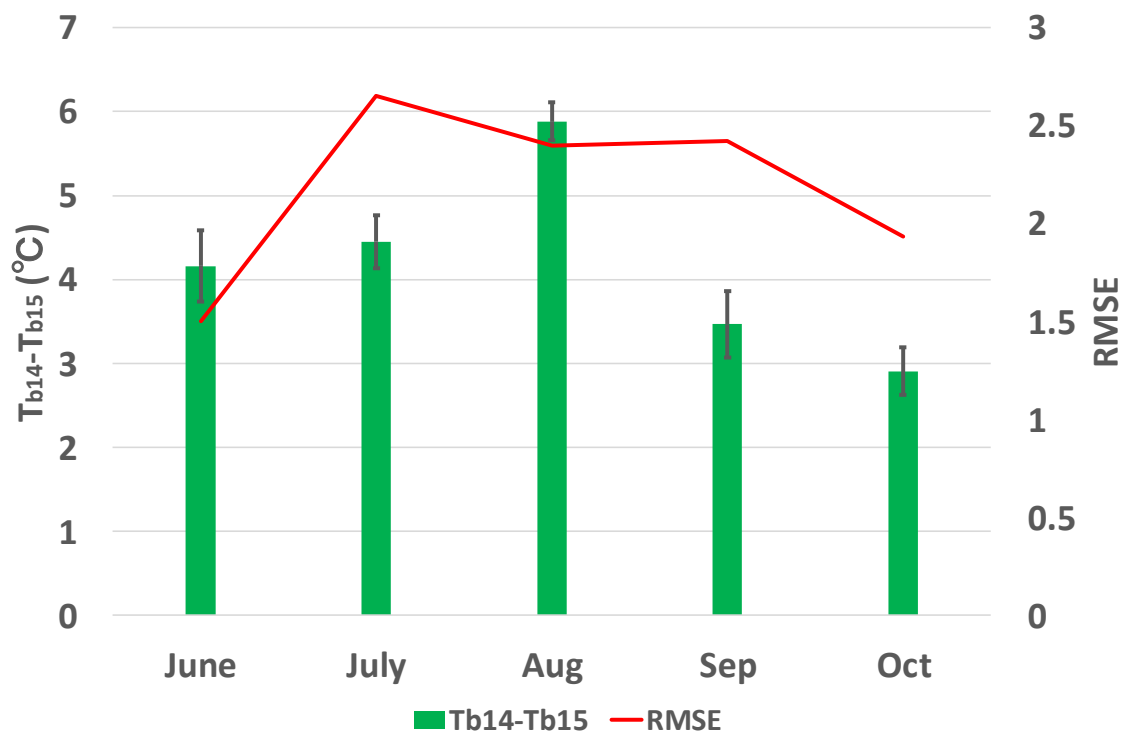


図 54 輝度温度差 $T_{b13} - T_{b15}$ と RMSE

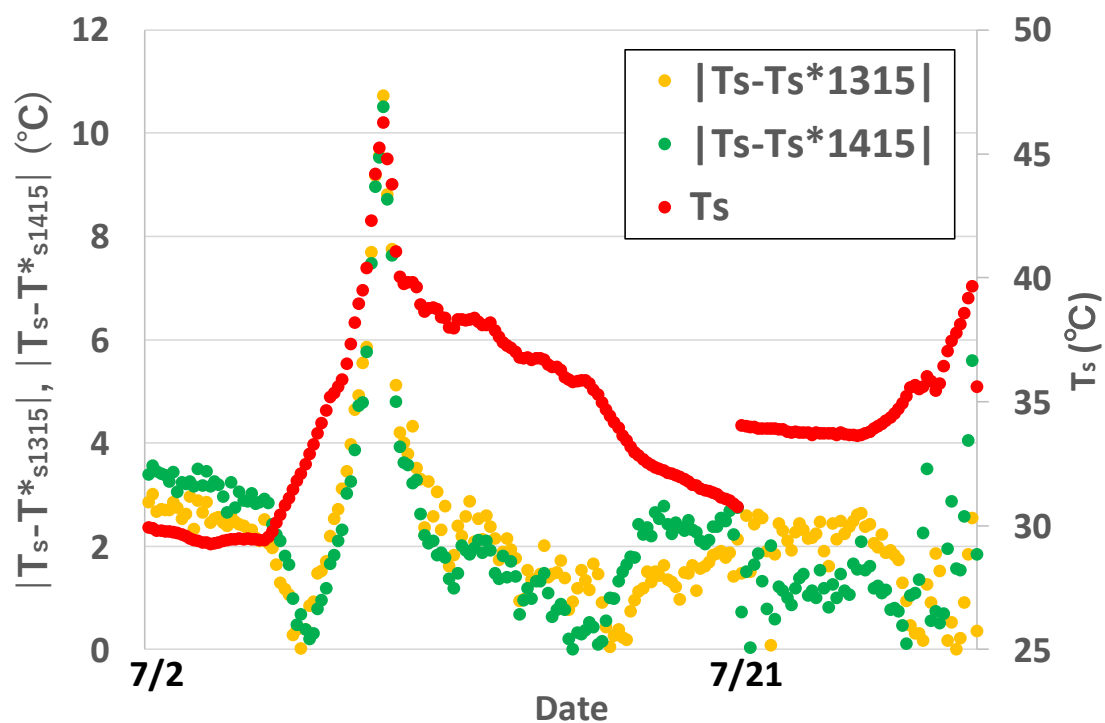


図 55 観測値 T_s と観測値と推定値の誤差 $|T_s - T_{s1315}|$ 、 $|T_s - T_{s1415}|$

3.3.3.時間での比較

内田ら(2016)では昼の推定精度がよく、1.5℃程度の誤差であったことが述べられている。本研究では夜間を含む時間も入れて解析を行っているので、昼間のみで解析を行った場合の精度の検証を行った。日中を6時から18時、夜間を18時から6時としそれぞれの期間について地表面温度の推定、RMSEの計算を行った(表9、10)。全期間1032個のデータに対して、日中のデータが456個、夜間のデータが576個であった。結果を図54~59に示す。 T_{s1314}^* 、 T_{s1315}^* 、 T_{s1415}^* いずれにおいても夜間の推定精度の方が高くなった。特に推定精度が高かったものは T_{s1315}^* で推定精度は1.39℃と内田ら(2016)よりも高い値を示すことができた。各期間の水面温度 T_s とその標準偏差を計算したところ昼間は平均32.8℃、標準偏差は5.4となった。一方夜間は平均28.5℃、標準偏差は5.2であった。月ごとの比較でも述べたように本研究のスプリットウィンドウ法の式は高温において誤差が生じやすい。今回夜間において、推定精度がよかったのは昼間には水面温度が高温となる時間が多く含まれるからであると考えられる。

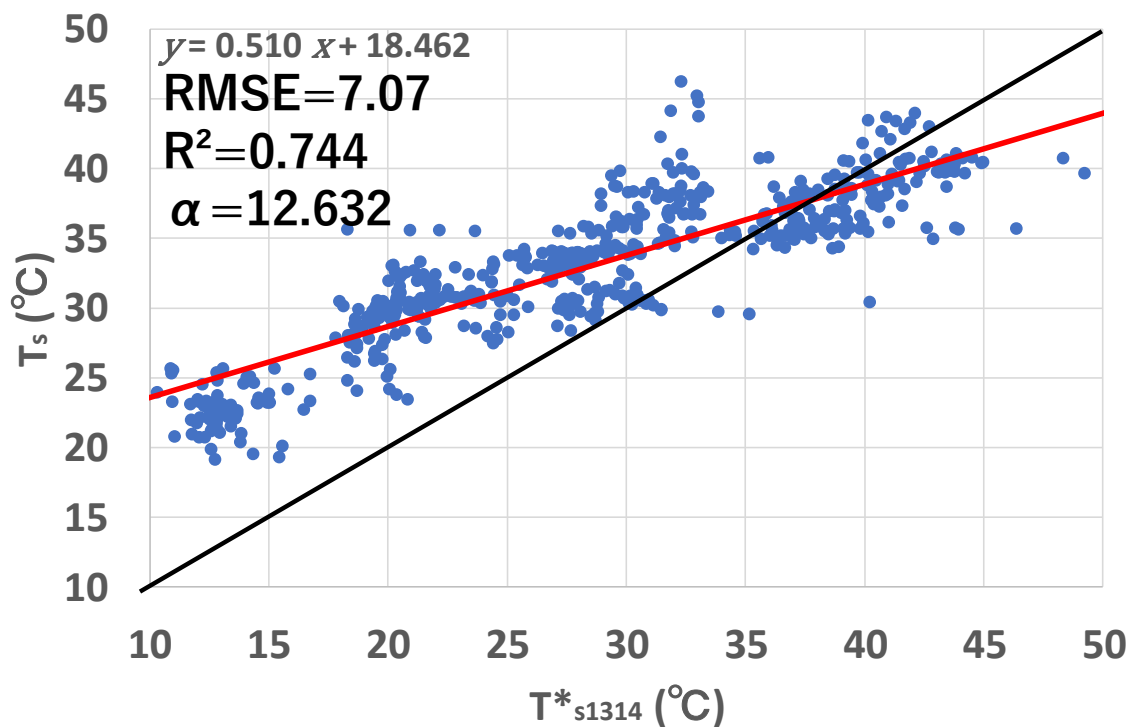


図 56 日中における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

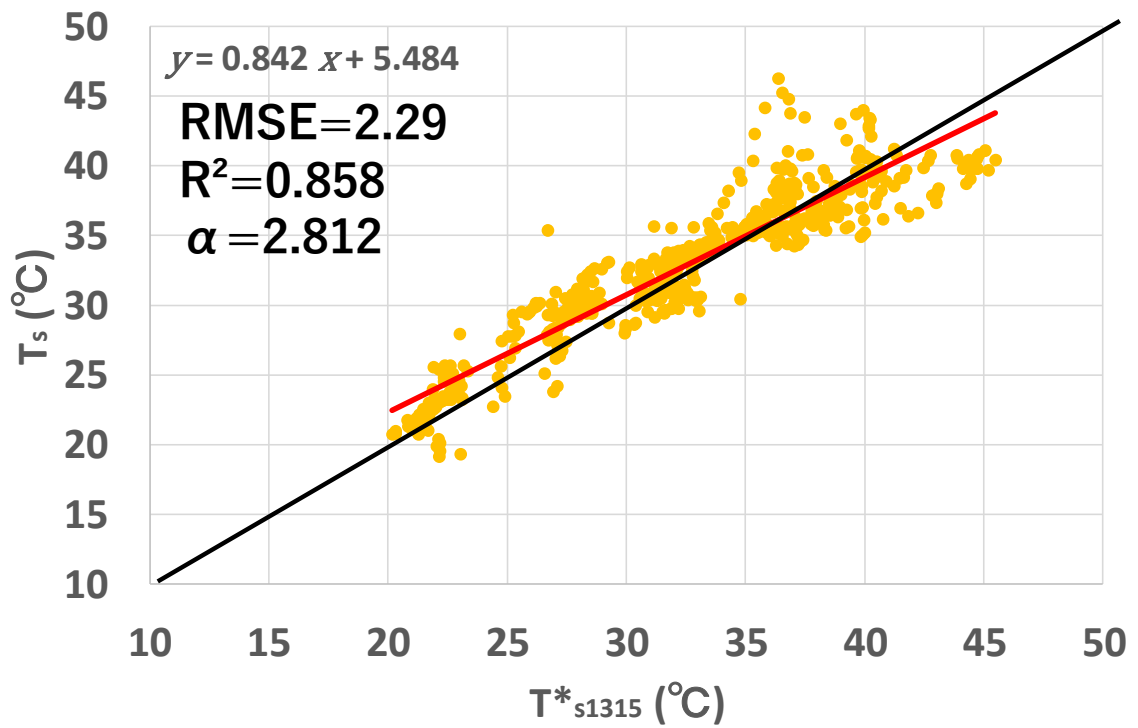


図 57 日中における推定値 T^*_{s1315} と観測値 T_s

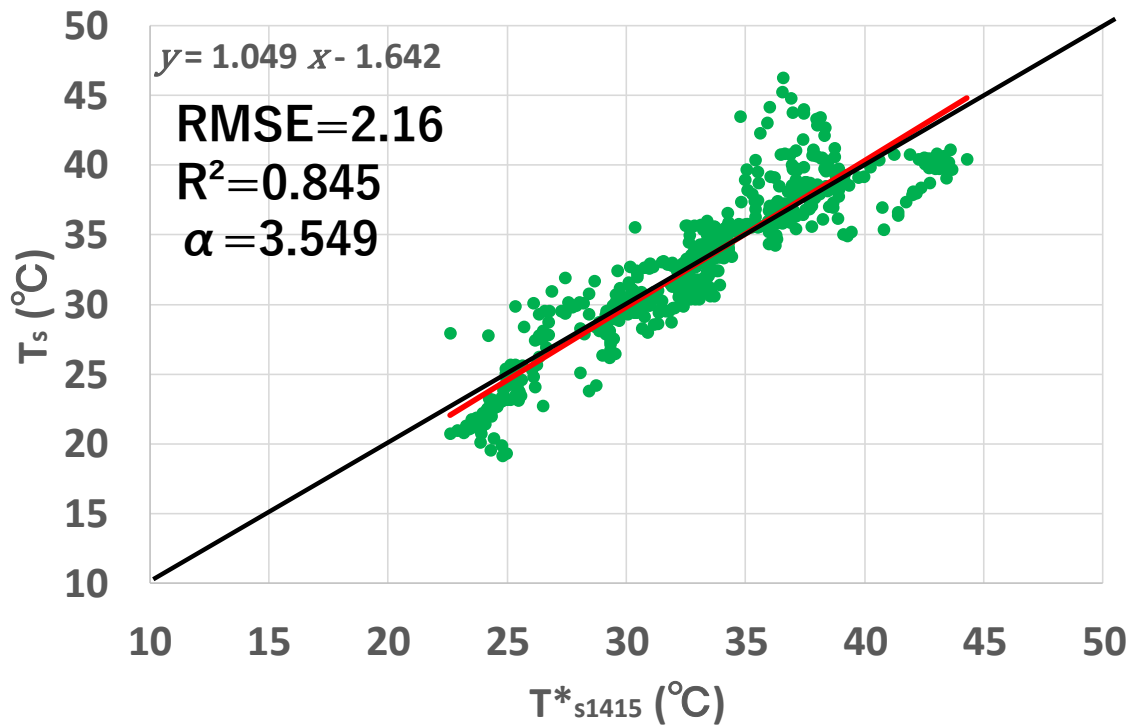


図 58 日中における推定値 T^*_{s1415} と観測値 T_s

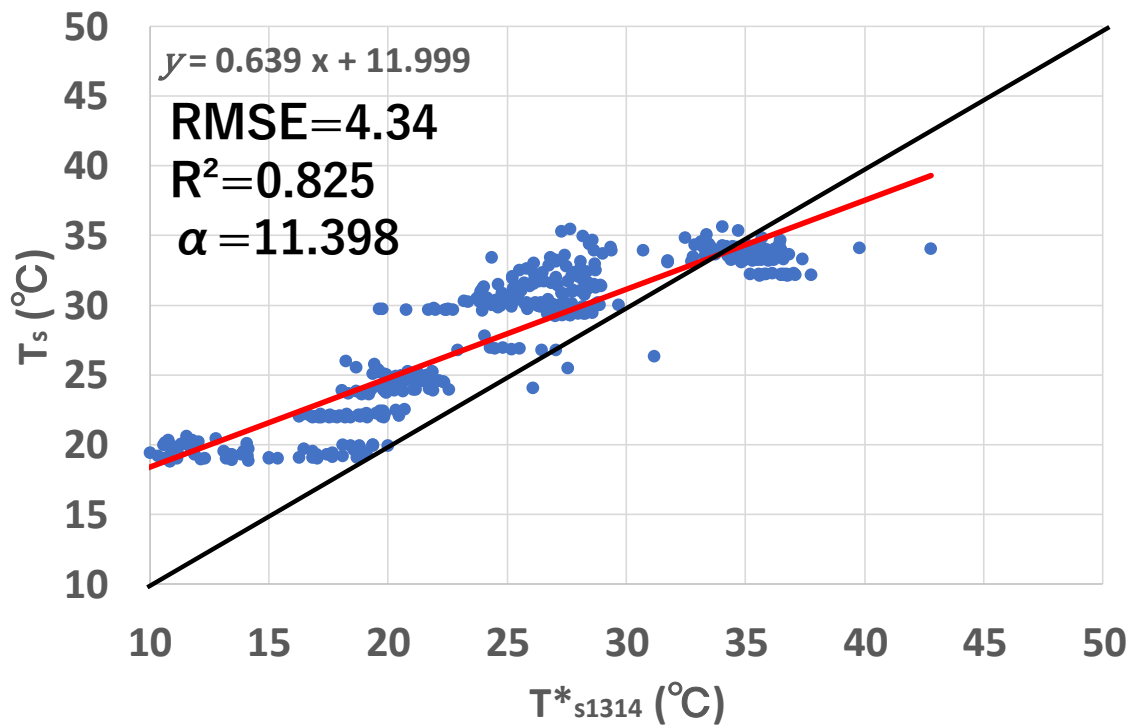


図 59 夜間における推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s

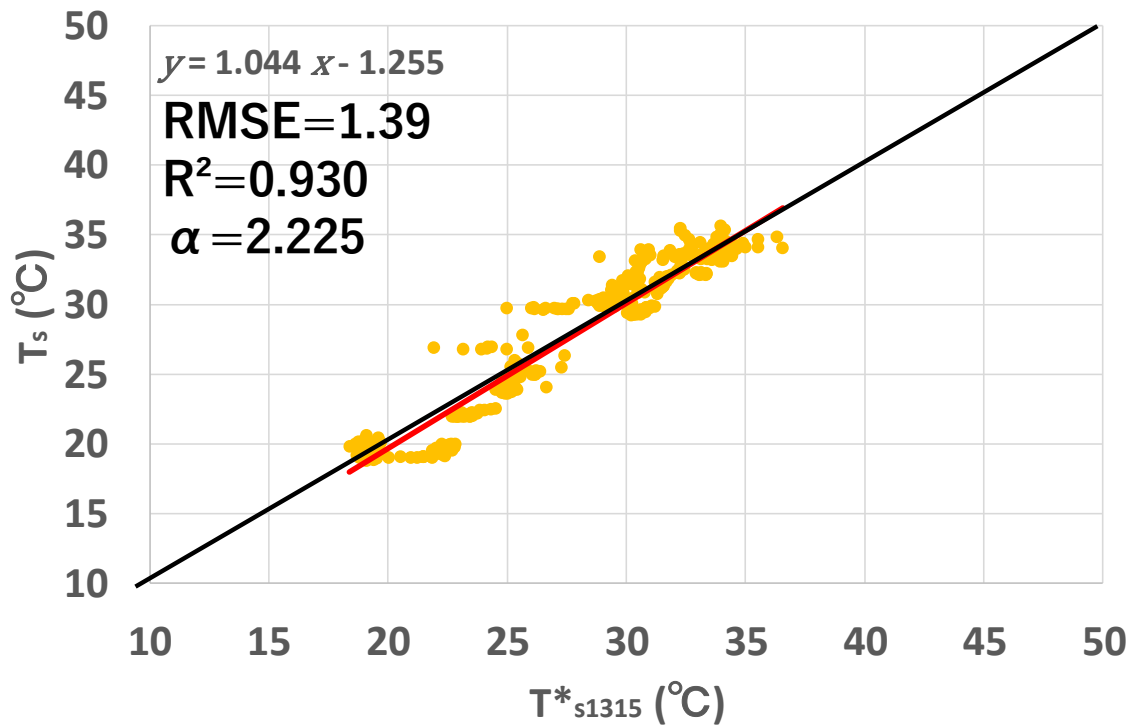


図 60 夜間における推定値 T_{s1315}^* と観測値 T_s

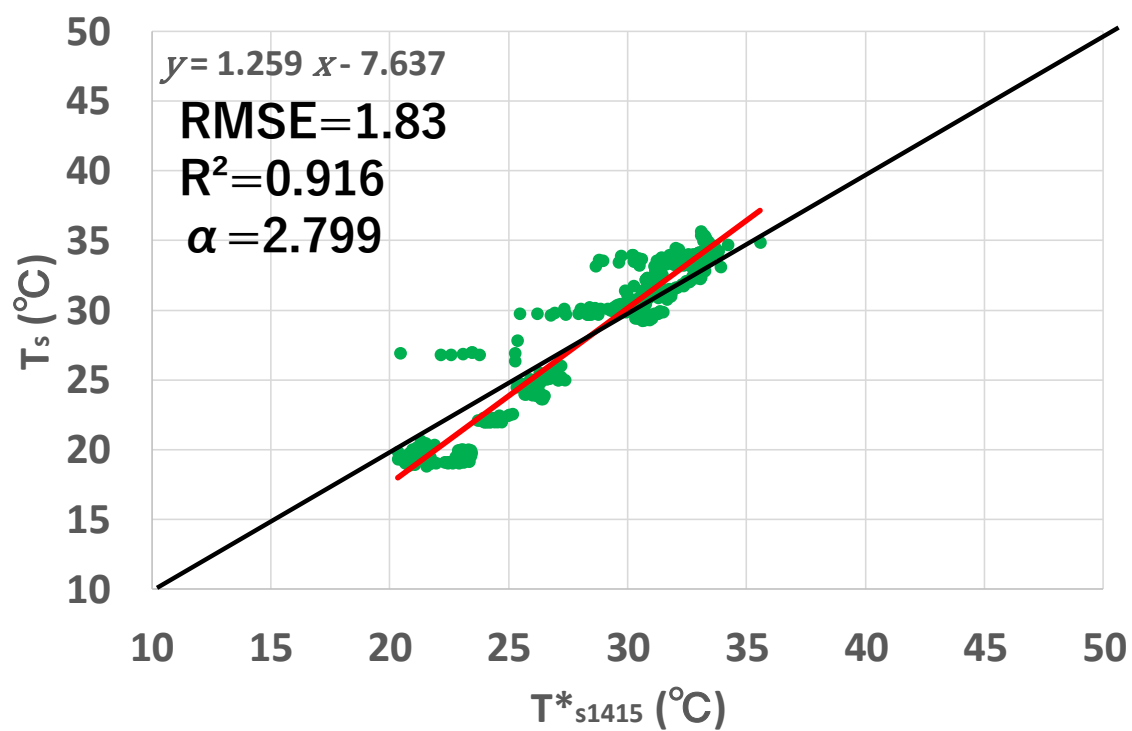


図 61 夜間における推定値 T^*_{s1415} と観測値 T_s

表 9 日中夜間ごとの RMSE

RMSE	T^*_{s1314}	T^*_{s1315}	T^*_{s1415}
Day	7.07	2.29	2.16
Night	4.34	1.39	1.83

表 10 日中夜間ごとの決定係数

R^2	T^*_{s1314}	T^*_{s1315}	T^*_{s1415}
Day	0.744	0.858	0.845
Night	0.825	0.930	0.916

3.4. 閾値を用いたスプリットウィンドウ法

T_{s1314}^* は輝度温度差 $T_{b13} - T_{b14}$ が非常に小さいとき大きな誤差が生じると考えられる。そこで輝度温度差に閾値を作り、閾値の上下でスプリットウィンドウ法の係数を別々に定めた場合の検証を行った。図 52 から閾値を 0.6 とし $T_{b13} - T_{b14} > 0.6$ の期間と $T_{b13} - T_{b14} < 0.6$ の期間について、それぞれ係数 α を計算し、水面温度を推定した。結果を図 62~64 に示す。 $T_{b13} - T_{b14} > 0.6$ の期間では RMSE が 3.69 °C と精度がよくなった。一方で、 $T_{b13} - T_{b14} < 0.6$ の期間では RMSE が 6.79 °C とやや悪くなった。全期間を合わせると、RMSE は 5.74 °C と向上し、閾値を用いてスプリットウィンドウ法の式を二つ作ることによる効果が見られた。しかし、推定値の過小評価が低温域で生じており、これは $T_{b13} - T_{b14} < 0$ となる点において起こる現象であると考えられる。よって閾値に $T_{b13} - T_{b14} < 0$ を追加することでより推定精度が高まると考えられる。そこで閾値を $T_{b13} - T_{b14} < 0$ 、 $0 < T_{b13} - T_{b14} < 0.6$ 、 $0.6 < T_{b13} - T_{b14}$ の 3 つに場合分けして計算を行った。結果を図 65~67 に示す。 $T_{b13} - T_{b14} < 0$ の期間においては RMSE が 4.45 °C、 $0 < T_{b13} - T_{b14} < 0.6$ においては RMSE が 4.44 °C であり、さらに場合分けをすることで推定精度が向上した。しかし、全体の RMSE は 4.15 °C であり、 T_{s1315}^* 、や T_{s1315}^* ほど推定精度はよくなかった。

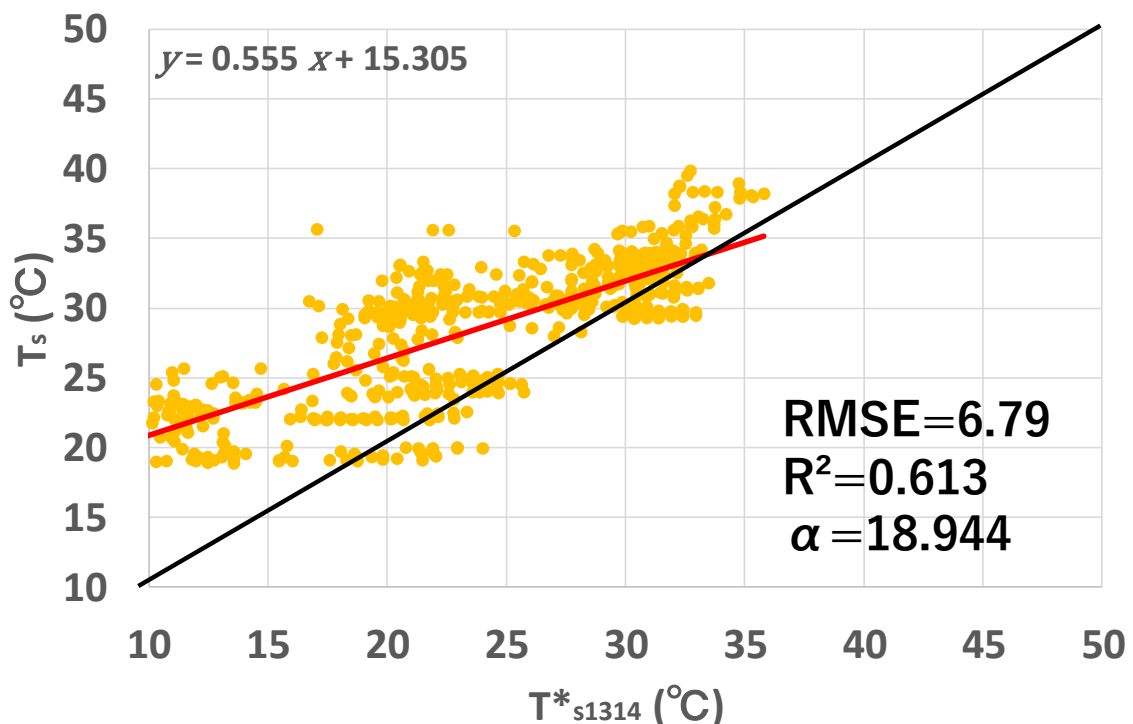


図 62 推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} < 0.6$)

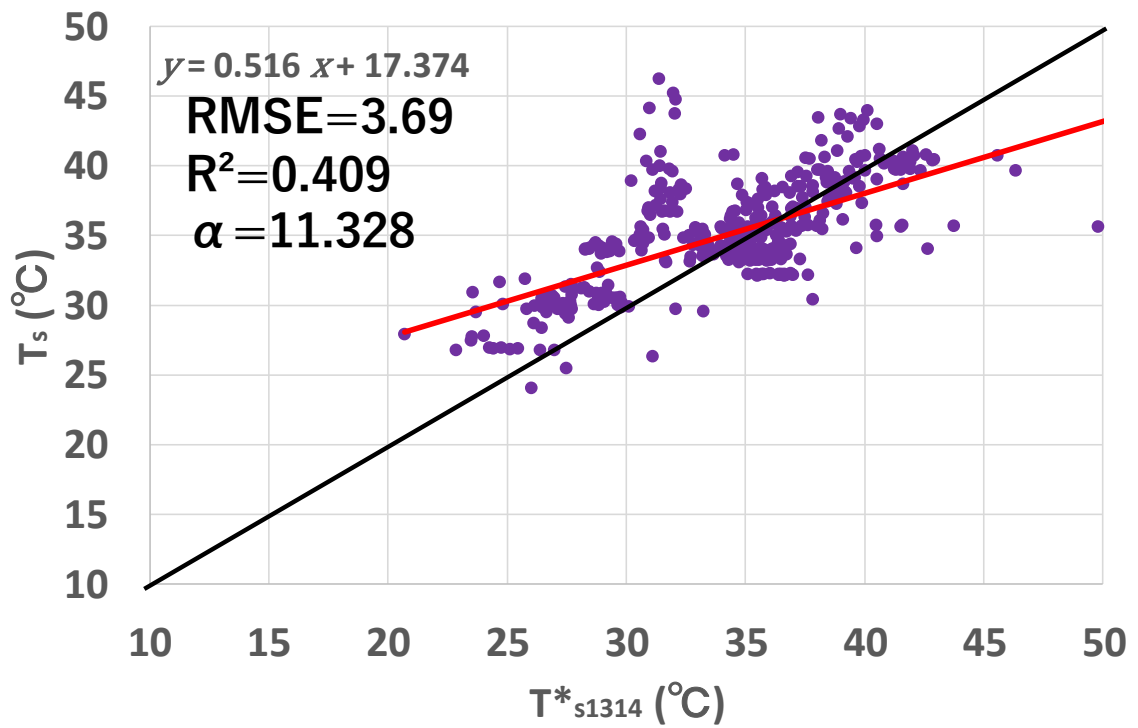


図 63 推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} > 0.6$)

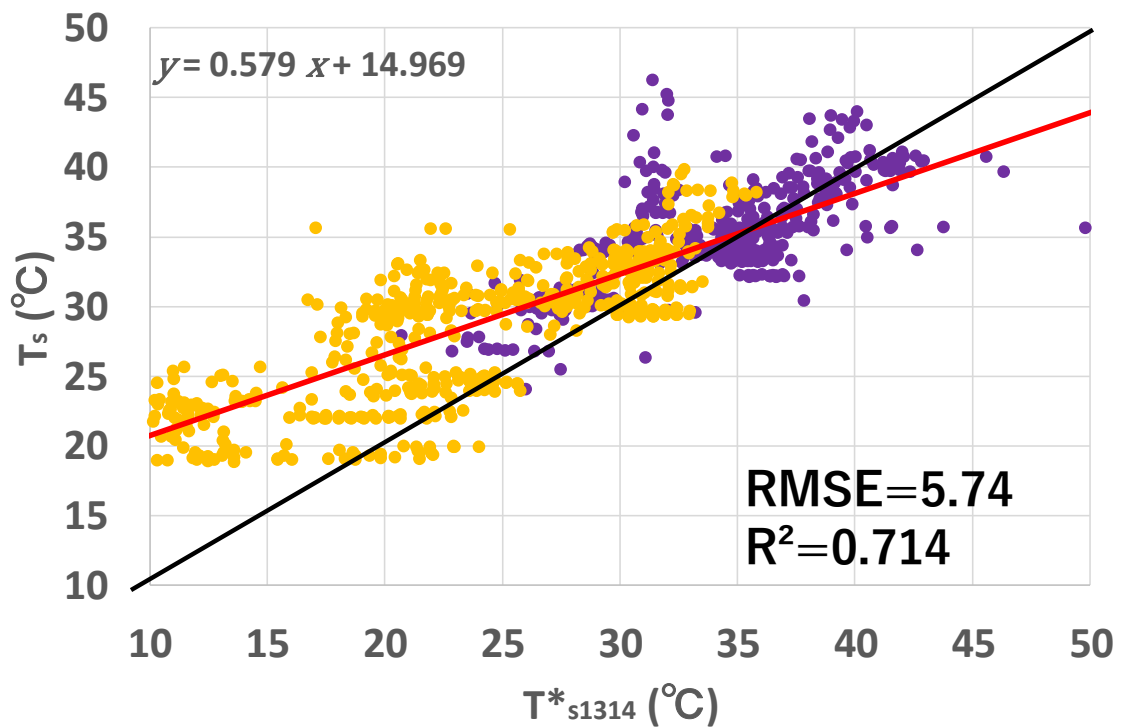


図 64 推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} > 0.6$: 紫色、 $T_{b13} - T_{b14} < 0.6$: 黄色)

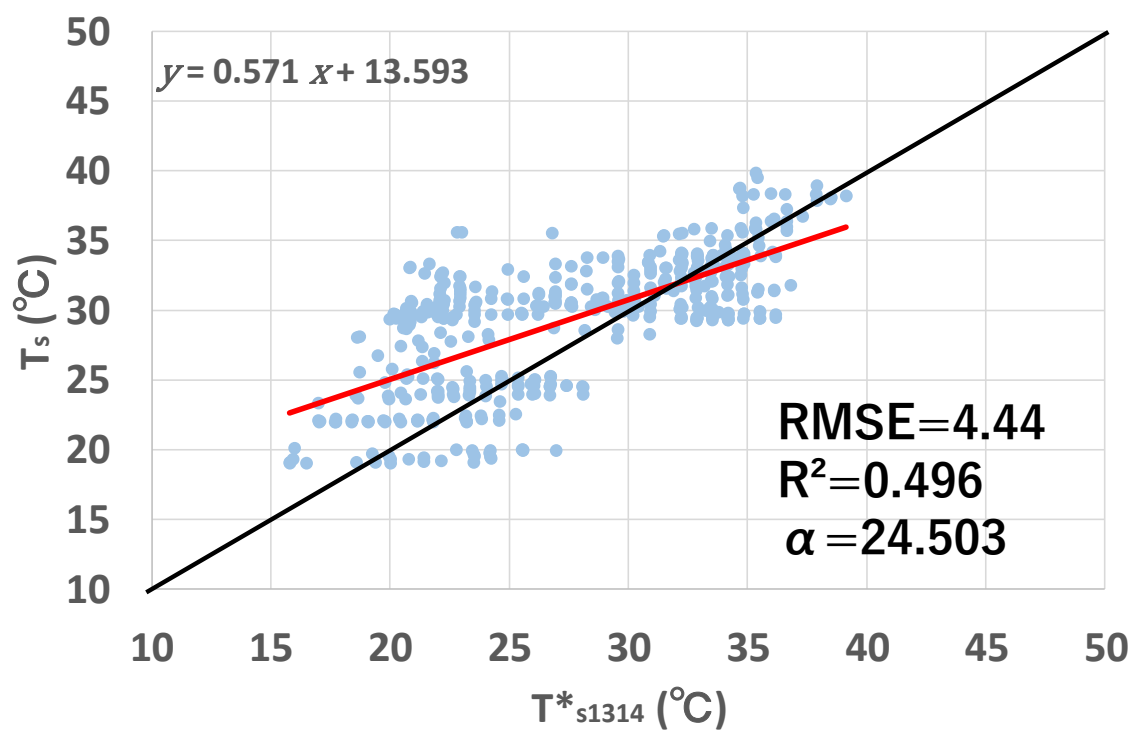


図 65 推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($0 < T_{b13} - T_{b14} < 0.6$)

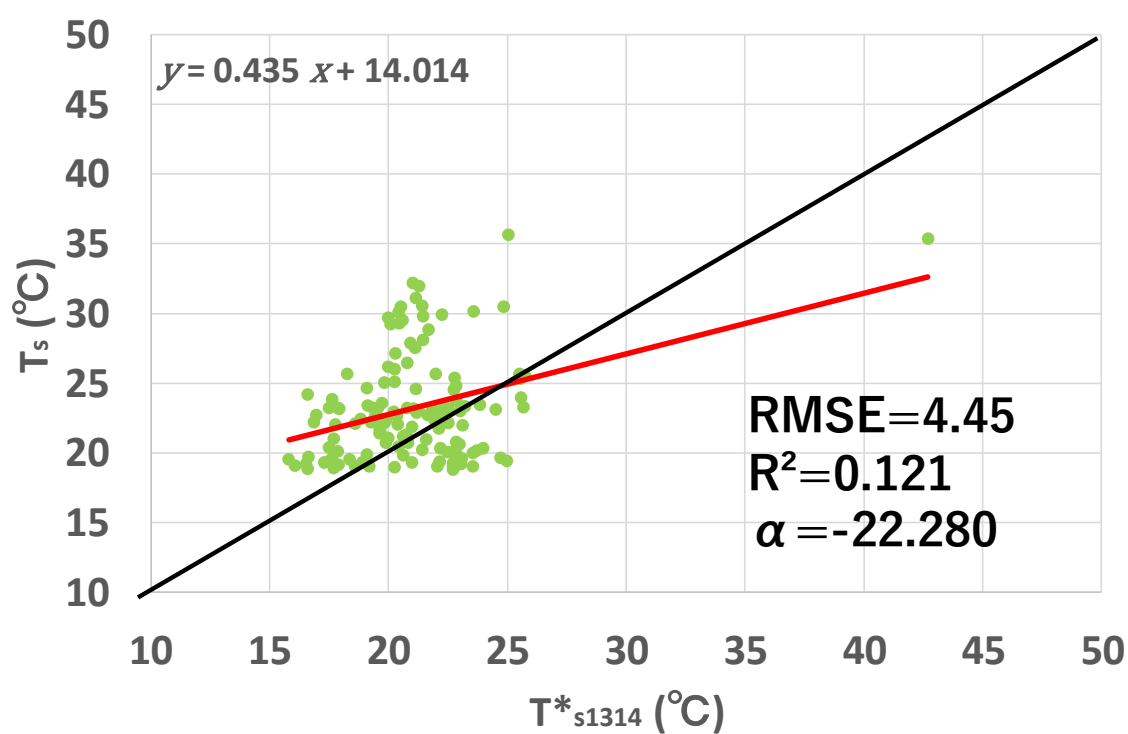


図 66 推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} < 0$)

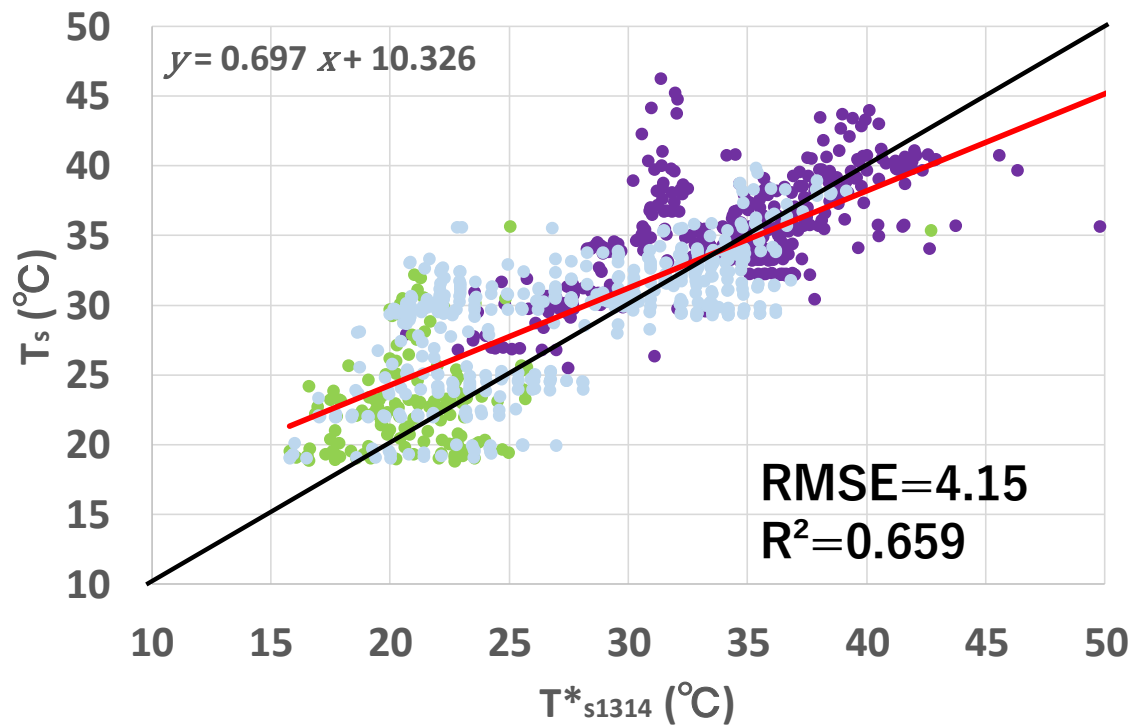


図 67 推定値 T_{s1314}^* と観測値 T_s ($T_{b13} - T_{b14} < 0$: 黄緑色、 $0 < T_{b13} - T_{b14} < 0.6$: 水色、 $0.6 < T_{b13} - T_{b14}$: 紫色)

4. 結論

霞ヶ浦西浦において、ひまわり 8 号の衛星データと湖心観測所の観測データを用いてスプリットウィンドウ法による水面温度の推定を行った。先行研究の式と係数を用いた推定において、推定精度は最も高いもので 9.43 と低い結果となった。これは地表面と水面での温度変化の傾向や温度の大小が異なることによるものであると考えられる。

湖心観測所の水面温度データを用いたスプリットウィンドウ法による水面温度の推定では RMSE が最も小さかったのは Band13 と Band15 の組み合わせで推定精度は 2.31 °C であった。

月ごとにデータを見ていったところ推定精度が一番悪かった Band13 と Band14 を組み合わせたものも T_{s1315}^* 、 T_{s1415}^* と変わらない推定精度となる期間があり、推定精度が悪くなる要因に輝度温度差が関係していることが明らかとなった。特に輝度温度差が 0 に非常に近い値や負の値を示すときにその推定精度が格段に落ちると考えられる。また、輝度温度差が十分にある場合でも水面温度が 40 °C 以上となるとときに推定精度が落ちることが確認された。

昼と夜のデータの比較では夜における Band13 と Band15 の組み合わせの推定精度が 1.39 °C と先行研究よりも高い値を示した。夜間において推定精度が高くなる要因として、夜間は日中と比較して、水面温度が高温となる期間が少ないからであると考えられる。

輝度温度差による低い推定精度が確認された Band13 と Band14 の組み合わせにおいて、閾値を用いて、二つのスプリットウィンドウ法の式を用いた結果、閾値を用いない場合より高い精度を得ることができた。しかし、輝度温度差が低いときの精度の向上は見られなかった。そこで、輝度温度差が負の値であるときにも閾値を用いることで、より推定精度が向上した。

本研究の結果より水面においてもスプリットウィンドウ法を用いることで高い精度での温度の推定が可能であることが明らかとなった。今後は通年のデータにおいて、閾値を用いることで推定精度の高いスプリットウィンドウ法の係数を決定することが望まれる。

謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学生命環境系の杉田倫明先生には、研究方法における丁寧なご指導など、数多くの面で大変お世話になりました。大変感謝申し上げます。また、筑波大学水文科学分野の諸先生方には、発表など機会のある度に貴重なご助言をいただきました。国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所には湖心観測所での放射温度測定とデータ利用をさせていただきました。杉田研究室の方々にはゼミでの貴重なご助言やご意見のほか本研究に関する励ましもいただきました。特に宝音朝格拉さんには霞ヶ浦におけるデータ処理に関する助言など大変お世話になりました。王さんには霞ヶ浦の船上観測データを提供していただきました。また、本研究で利用したひまわり8号のデータセットは、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。

参考文献

1. Agung, B.C., Haryo, D.A., Dian, S. (2017). Estimation of sea surface temperature (SST) using split window methods for monitoring industrial activity in coastal area. *Applied mechanics and materials*, 862, 90-95
2. Farrah, M.M., Siti, A.R., Siti, L.Z., Norida, M., Nur, A.A. and Nor, A.H. (2017). Remote sensing derivation of land surface temperature for insect pest monitoring. *Asian journal of plant sciences*, 16(4), 160-171.
3. 気象衛星センター. 研究者向けデータ公開.
<https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/info/resercher.html> (最終閲覧日 2018/1/30)
4. 気象庁. 日本の静止気象衛星のあゆみ. <http://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/enkaku.html> (最終閲覧日 2018/1/30)
5. 気象庁. 静止気象衛星ひまわり 8号, 9号の概要. <http://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/himawari89.html> (最終閲覧日 2018/1/30)
6. 日本リモートセンシング学会 編.(2011). 基礎からわかるリモートセンシング. 理工図書株式会社.
7. 小川信平.(2018). 霞ヶ浦西浦における熱収支と熱分布特性の解明. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士論文, p.160
8. 岡本謙一, 川田剛之, 熊谷博, 五十嵐保, 浦塚清峰. (2009). 宇宙からのリモートセンシング. コロナ社
9. Oku, Y. and Ishikawa, H. (2003). Estimation of land surface temperature over the Tibetan Plateau using GMS data. *Journal of applied meteorology*, 43, 548-561.
10. Ou, S.C., Chen, Y., Liou, K.N., Cosh, M., and Brutsaert. (2002). Satellite remote sensing of land surface temperatures: application of the atmospheric correction method and split-window technique to ARM-SGP site. *International journal of remote sensing*, 23, 5177-5192.
11. Sobrino, J.A., Li, Z-L., Stoll, M.P., and Becker, F. (1994). Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2, 243-253
12. Sobrino, J.A., Li, Z-L., Stoll, M.P., and Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ASTR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2089-2114
13. 内田 裕貴, 朝香 智仁, 野中 崇志, 岩下 圭之, 杉村 俊郎.(2016)「ひまわり 8号」熱赤外データによる地球表面温度の推定について. 土木学会論文集, 72, □_1-□_6.

14. Yamamoto, Y., Ishikawa, H., Oku, Y., Hu, Z. (2018). An algorithm for land surface temperature retrieval using three thermal infrared bands of Himawari-8. *Journal of the meteorological of Japan*, 96B, 59-76.
15. 山本 雄平, 石川 裕彦. (2016). ひまわり 8 号データを用いた地表面温度算出式の検討. 京都大学防災研究所年報, 第 59 号, 200-210.