

平成 26 年度 卒業論文

二酸化炭素・温度・比湿測定に基づく大気-湖沼間の
フラックス分布の推定
-霞ヶ浦土浦入りを対象として-

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

201110778

原田瑞穂

2015 年 1 月

目次

要旨	ii
Abstract	iii
表目次.....	v
図目次.....	vi
1. はじめに	- 1 -
1.1. 研究背景	- 1 -
1.2. 先行研究	- 1 -
1.3. 研究目的	- 2 -
2. 研究方法	- 3 -
2.1. 観測概要	- 3 -
2.1.1. 現地観測（霞ヶ浦）	- 3 -
2.1.2. 周辺観測点（霞ヶ浦）	- 4 -
2.1.3. 周辺観測点（河川流入等）	- 4 -
2.1.4. 現地観測（桜川）	- 4 -
2.2. データ処理.....	- 5 -
2.2.1. 風速高度変換.....	- 5 -
2.2.2. 水質値時間変換	- 5 -
2.2.3. 気象値時間変換	- 5 -
2.3. 空間内挿	- 5 -
2.3.1. 内挿方法	- 6 -
2.3.2. 処理範囲	- 6 -
2.3.3. 鉛直断面図.....	- 6 -
2.4. 各フラックスの算出	- 6 -
2.4.1. 顕熱フラックスの算出.....	- 6 -
2.4.2. 潜熱フラックスの算出.....	- 7 -
2.4.3. 二酸化炭素フラックスの算出	- 7 -
3. 結果と考察.....	- 8 -
3.1. 顕熱フラックスの分布.....	- 8 -
3.2. 潜熱フラックスの分布.....	- 9 -
3.3. 二酸化炭素フラックスの分布	- 9 -
3.4. 流入河川等の影響.....	- 10 -
4. 結論.....	- 12 -
謝辞	- 13 -
参考文献	- 14 -
付録	- 17 -

二酸化炭素・温度・比湿測定に基づく大気-湖沼間のフラックス分布の推定

-霞ヶ浦土浦入りを対象として-

原田瑞穂

要旨

水資源の保全、地球温暖化対策のため、湖沼における水収支、二酸化炭素収支を明らかにすることは非常に重要である。湖沼の収支の推定は、水に関しては流入、流出、降雨、蒸発を、溶存ガスに関しては流入、流出、大気との交換、生物活動を把握する必要がある。しかし大気との交換量（フラックス）は空間的な変化があり、また観測点が少ないため水域全体の正確なフラックスの推定が難しい。

本研究では観測データを空間内挿し、バルク法を用いて霞ヶ浦土浦入りの潜熱、顕熱、二酸化炭素フラックス分布を求めた。観測は2014年10月9日と10月31日に霞ヶ浦湖上で行われ、同時にフラックスへの河川の影響を求めため10月2日から11月30日まで流域最大の桜川において採水を行った。

調査の結果、潜熱、顕熱フラックスと二酸化炭素フラックスは異なる分布傾向を示すことが分かった。全体の傾向として潜熱顕熱は霞ヶ浦土浦入り西部で低く湖心で高く、二酸化炭素フラックスは土浦入り西部で高く、湖心で低い値を示した。しかし土浦から土浦入り中央部までの地域は、河川流入、下水処理場の排水の影響を受け、全体の傾向とは異なる分布を示す場合があった。

桜川が基底流量の場合、土浦入り最奥部岸から1 km程度までには下水処理場からの温かい排水が表層に滞留し、河川水はその下を流れるため、フラックスは排水の影響を強く受ける。最奥部から離れると下水処理場の影響が弱まり、流量の多い桜川の河川水の影響が強く表れるようになる。この場合、水温が高く、 pH の低い土浦入り最奥部では強い正の二酸化炭素フラックスが生じ、潜熱、顕熱も中央部より大きな正の値を示す。河川水の影響が現れる領域は pH の上昇、水温の低下が起こり、二酸化炭素フラックス、潜熱、顕熱フラックスすべて減少する。

一方、洪水流出時には湖水と比較して冷たい水が大量に流入してくるため、下水処理場の排水の影響が弱まり、土浦入り最奥部から中央部までの広い範囲に河川水の影響が表れる。河川水の水温は観測期間中、湖水よりも常に低く、 pH は平水時より低下するため、広い範囲で二酸化炭素フラックスが増加、潜熱、顕熱フラックスが減少する。

二酸化炭素フラックスに関しては pH の鉛直方向の変化が大きく、二酸化炭素吸収時においても、深度1 mにおける水中の二酸化炭素濃度 C_w は大気と平衡な水中の二酸化炭素濃度 C_a を上回っており、ごく表層のみが低い C_w を示すことから弱度の攪乱によってフラックスが急激に変化する。また二酸化炭素フラックスの分布は pH の分布とほぼ一致するため、地点ごとの pH の値をと湖心観測所の値を用いて土浦入りの地域ごとのフラックスを高精度で推測できる可能性がある。

キーワード：フラックス、水平分布、霞ヶ浦、プランクトン、河川流入、下水処理水、鉛直分布

The estimation of spacial distribution of flux between lake and atmosphere based on measurement of CO₂ concentration, temperature and specific humidity
-A case study in Tsuchiura bay of Lake Kasumigaura -

Mizuho HARADA

Abstract

It is very important to make clear the water and CO₂ balance of the lakes to save water resources and prevent global warming. Measurement of the amount of inflow, outflow, evaporation and rain is necessary to calculate water balance. It is necessary to grasp inflow, outflow, exchange with the atmosphere and biological activities to estimate carbon balance. However, there is a spatial change in the exchange amount with the atmosphere (flux). Estimating flux in the whole water surface is difficult because observation points are limited. Therefore, in this study, the latent heat, the sensible heat, and the carbon dioxide flux distribution in Tsuchiura bay of the Lake Kasumigaura were estimated by spacially interpolating the observed data, and applying the bulk method.

The observation was carried out no the Lake Kasumigaura on October 9, 2014 and October 31. At the same time, water sampling was performed in Sakuragawa river which has the biggest sub-basin in Kasumigaura basin, from October 2nd to November 30th to examine the influence of the river on lake surface flux.

The fact that the latent heat, the sensible heat flux, and the carbon dioxide flux show a different distribution tendency has emerged from this investigation. As a whole tendency, latent heat and sensible heat flux is small in Tsuchiura bay, and large in the center of Kasumigaura. The carbon dioxide flux is large in Tsuchiura bay, and small in center of Kasumigaura. However, in the western Tsuchiura bay those flux was influenced by the river inflow and discharge from a sewage plant, and occasionally showed distribution different from the entire tendency.

When the flow of Sakuragawa river is small, flux strongly receives a sewage plant effluent impact, because bottom of Tsuchiura bay is covered with warm water from the sewage plant and the river flows under it. On the other hand, when it leaves the bottom of Tsuchiura bay, the influence of the sewage water becomes weak, and the influence of the stream water comes to appear strongly. In this case, A strong, downward latent heat, sensible heat and carbon dioxide flux are caused because of low pH and warm water, in the area where the influence of the stream water appears, these flux are decrease because water temperature of the river is lower than that of sewage water and its pH is higher than pH of sewage water.

When there is large discharge of Sakuragawa river, the influence of the drain of

the sewage plant becomes weak, and the influence of the stream water appears within the wide range from the bottom of Tsuchiura bay to the central part of Kasumigaura due to lots of cold and low pH water inflow. Therefore, the carbon dioxide flux increased, and the latent heat and the sensible heat flux decreased in the large area.

For the carbon dioxide flux, flux change rapidly by weak stir times, because the change in a perpendicular direction of the pH is large, so the layer that carbon dioxide is absorbed is very thin. The distribution of the carbon dioxide flux is almost determined by the distribution of pH. Thus, we could estimate carbon dioxide flux in each region from the distribution of pH, by the use of the value of the Koshin observatory station (center of Kasumigaura).

Key words : flux, special distribution, Lake Kasumigarua, phytoplankton, river inflow, sewage disposal plant outflow, vertical distribution

表目次

表 1	霞ヶ浦現地観測項目	- 18 -
表 2	周辺観測所の観測項目（霞ヶ浦河川事務所）	- 19 -
表 3	周辺観測所の観測項目（環境省大気汚染常時観測システム）	- 20 -
表 4	周辺観測所の観測項目（環境研究所・気象庁・航空自衛隊）	- 21 -
表 5	桜川現地観測項目	- 22 -
表 6	霞ヶ浦浄化センター測定項目	- 22 -
表 7	桜川流量観測点観測項目	- 22 -
表 8	風速観測点における風向別粗度長（1）	- 23 -
表 9	風速観測点における風向別粗度長（2）	- 24 -

図目次

図 1	研究対象地域	- 25 -
図 2	研究手順	- 26 -
図 3	現地観測測器配置	- 27 -
図 4	湖上採水地点	- 28 -
図 5	周辺観測点	- 29 -
図 6	湖心水質時間変化 (10/9)	- 30 -
図 7	湖心水質時間変化 (10/31)	- 30 -
図 8	土浦気象時間変化 (10/9)	- 31 -
図 9	土浦気象時間変化 (10/31)	- 31 -
図 10	顕熱フラックス分布図 (10/9)	- 32 -
図 11	顕熱フラックス分布図 (10/31)	- 33 -
図 12	Ts-Ta 分布図 (10/9)	- 34 -
図 13	Ts-Ta 分布図 (10/31)	- 35 -
図 14	Ts 分布図 (10/9)	- 36 -
図 15	Ts 分布図 (10/31)	- 37 -
図 16	Ta 分布図 (10/9)	- 38 -
図 17	Ta 分布図 (10/31)	- 39 -
図 18	風速分布図 (10/9)	- 40 -
図 19	風速分布図 (10/31)	- 41 -
図 20	Chn 分布図 (10/9)	- 42 -
図 21	Chn 分布図 (10/31)	- 43 -
図 22	湖心顕熱フラックス時系列 (10/9)	- 44 -
図 23	湖心顕熱フラックス時系列 (10/31)	- 44 -
図 24	潜熱フラックス分布図 (10/9)	- 45 -
図 25	潜熱フラックス分布図 (10/31)	- 46 -
図 26	qs-q 分布図 (10/9)	- 47 -
図 27	qs-q 分布図 (10/31)	- 48 -
図 28	qs 分布図 (10/9)	- 49 -
図 29	qs 分布図 (10/31)	- 50 -
図 30	q 分布図 (10/9)	- 51 -
図 31	q 分布図 (10/31)	- 52 -
図 32	風速分布図 (10/9)	- 53 -
図 33	風速分布図 (10/31)	- 54 -
図 34	Cen 分布図 (10/9)	- 55 -
図 35	Cen 分布図 (10/31)	- 56 -
図 36	湖心潜熱フラックス時系列 (10/9)	- 57 -
図 37	湖心潜熱フラックス時系列 (10/31)	- 57 -
図 38	二酸化炭素フラックス分布図 (10/9)	- 58 -

図 39	二酸化炭素フラックス分布図 (10/31)	- 59 -
図 40	Cw-Ca 分布図 (10/9)	- 60 -
図 41	Cw-Ca 分布図 (10/31)	- 61 -
図 42	Ca 分布図 (10/9)	- 62 -
図 43	Ca 分布図 (10/31)	- 63 -
図 44	Cw 分布図 (10/9)	- 64 -
図 45	Cw 分布図 (10/31)	- 65 -
図 46	風速分布図 (10/9)	- 66 -
図 47	風速分布図 (10/31)	- 67 -
図 48	Ac 分布図 (10/9)	- 68 -
図 49	Ac 分布図 (10/31)	- 69 -
図 50	pH 分布図 (10/9)	- 70 -
図 51	pH 分布図 (10/31)	- 71 -
図 52	DIC 分布図 (10/9)	- 72 -
図 53	DIC 分布図 (10/31)	- 73 -
図 54	湖心二酸化炭素フラックス時系列 (10/9)	- 74 -
図 55	湖心二酸化炭素フラックス時系列 (10/31)	- 74 -
図 56	桜川流量、降雨時系列	- 75 -
図 57	桜川の重炭酸、Cw 濃度	- 76 -
図 58	桜川の pH 変動と降雨の関係	- 76 -
図 59	霞ヶ浦浄化センター放流量・降雨量	- 77 -
図 60	霞ヶ浦浄化センター放流水の水温・pH	- 77 -
図 61	湖沼断面図位置図	- 78 -
図 62	10/9 水温断面図	- 79 -
図 63	10/31 水温断面図	- 80 -
図 64	10/31 pH 断面図	- 80 -
図 65	10/31 Cw 断面図	- 81 -
図 66	10/31 DIC 断面図	- 81 -
図 67	10 月における桜川の河川流入と下水処理場放流水の比較 (流量)	- 82 -
図 68	10 月における桜川の河川流入と下水処理場放流水の比較 (水温)	- 82 -
図 69	10 月における桜川の河川流入と下水処理場放流水の比較 (pH)	- 83 -
図 70	炭酸アルカリ度を変化させたときの溶存二酸化炭素濃度の変化 (水温 20°C)	- 83 -
図 71	全観測点風速分布図 (10/9)	- 84 -
図 72	全観測点風速分布図 (10/31)	- 85 -

1. はじめに

1.1. 研究背景

水資源の保全、地球温暖化対策のため、湖沼における水収支、二酸化炭素収支を明らかにすることは非常に重要である。湖沼の収支の推定は、水に関しては流入、流出、降雨、蒸発を、溶存ガスに関しては流入、流出、大気との交換、生物活動を把握する必要がある（上野ほか, 2011）。しかし大気との交換量（フラックス）は空間的な変化が大きくまた観測地点が少ないため水域全体の正確なフラックスの推定が難しい。

上記のフラックスを直接測定する唯一の方法として渦相関法が知られている（kondo and Tsukamoto, 2007）が、この方法は二酸化炭素濃度、水蒸気濃度、気温、鉛直風速の瞬間値を連続的に測定する必要があり、観測地点がさらに限られている。そのため、フラックスが水温、気温など一般の気象データから求められる（近藤, 1994）バルク法が一般に利用される。バルク法を用いた水面におけるフラックス F_x の算出式は、

$$F_x = C_x U (x_s - x_a) \quad (1)$$

の様に表される。ここで U は風速、 x_s 、 x_a はそれぞれ水面および大気中における物理量 x の値であり、 C_x はバルク輸送係数と呼ばれる。

二酸化炭素フラックスを求める際に必要なバルク式中の物理量 x_s 、 x_a はそれぞれ水中の二酸化炭素濃度 C_w と大気と平衡な水中の二酸化炭素濃度 C_a である。

一方、潜熱、顕熱フラックスの物理量はそれぞれ大気側の比湿、気温と水面直上の比湿と水温である（宮野, 2010）。

霞ヶ浦において二酸化炭素、潜熱、顕熱フラックスは霞ヶ浦西浦中央部の湖心観測所において渦相関法により測定されているが、同観測所で観測されている潜熱フラックスと同じ分布を示す蒸発量は湖心の値が霞ヶ浦全域を代表していないことが分かっており（Sugita et al. 2014）、霞ヶ浦全域のフラックスを正確に推定するためにはそれぞれのフラックスの分布傾向を明らかにする必要がある。

本研究で述べるフラックスとは単位面積当たりには通過する物理量（輸送量）と定義され、単位として二酸化炭素では $\text{mg/m}^2 \text{s}$ が、潜熱、顕熱では W/m^2 が主に用いられる。それぞれのフラックスについて鉛直下向きをマイナス（-）、鉛直上向きをプラス（+）と定義されることが多い。このため本研究でも同様の単位、正負の向きを採用した。

1.2. 先行研究

湖沼で行われたフラックス測定、推定に関する研究は主に以下の3つが挙げられる。

まず高橋（2013）では霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスを霞ヶ浦湖心観測所で観測されたデータを用いて渦相関法により測定した。解析対象期間は2007年6月から2012年11月までである。この結果、湖心では昼夜関係なく吸収、放出が起こっており、全体では吸収が卓越することが明らかになった。またその原因として一次生産力の大きさとともに洪水流出時の河川水による希釈の可能性に言及している。

次に Sugita et al.（2014）では、霞ヶ浦における蒸発量の分布を推定し、湖心観測所のデータと比較を行っている。この結果、湖心観測所の値は湖心とその南西部に関しては代表性を有しているも

の、それ以外の地域ではそのまま適用できないことが明らかになった。

福島ほか（1995）では、霞ヶ浦湖心と琵琶湖南湖湖心における二酸化炭素フラックスを、水中濃度と大気平衡濃度の差にガス交換係数を乗じて求めている。解析対象期間は1992年4月1日から1993年3月31日までの1年間である。結果、霞ヶ浦湖心では年間58%程度の期間負のフラックスが生じていることが分かった。同時に水塊における溶存態無機炭素（DIC）の収支を求めるうえで大気-水面間の物質移動を正確に推定する必要があり、空間分布も考慮する必要があると述べている。

1.3. 研究目的

先行研究で述べたとおり、霞ヶ浦においてフラックスの分布特性とその要因を考察したものは蒸発量に関する Sugita et al.（2014）のみである。

よって、本研究の目的は、霞ヶ浦湖心から河川や人間活動の影響が大きいと考えられる土浦入り最奥部までの地域の潜熱、顕熱、二酸化炭素フラックス分布を推定しその分布特性を明らかにすること、そしてその分布の要因を考察し、おもなフラックス規定要因を明らかにすることである。

2. 研究方法

2.1. 観測概要

本研究の対象地域は、茨城県に位置する霞ヶ浦（西浦）の湖心（36° 02′ 35″ N, 140° 24′ 42″ E）から土浦入り最奥部土浦港までの地域である（図 1）。霞ヶ浦は日本で琵琶湖に次ぐ湖面積 220km²を持ち、平均水深 4m、最大水深 7m と非常に浅い湖である。流域面積は 2157km²、流域人口は約 96 万人（2002 年度末）であり茨城県の人口、面積の約三分の一を占めるのみならず、関東平野に住む人々の貴重な水資源として大きな役割を果たしている（霞ヶ浦環境科学センター，2014）。霞ヶ浦を構成する西浦、北浦、外浪逆浦のうち、最大の面積を持つ西浦の土浦入り最奥部には流域内最大の都市土浦市が存在し、霞ヶ浦流域内最大の流域面積をもつ桜川が流入している。

本研究ではこの土浦入り周辺および湖上での観測値を西浦全域に空間内挿し、河川流入の影響が顕著に表れると予想される台風通過直後の 10 月 9 日と桜川の流量がほぼ基底流量の 10 月 31 日の 13:30 の土浦入りにおける各フラックスを推定した（図 2）。

2.1.1. 現地観測（霞ヶ浦）

霞ヶ浦土浦入り湖上において 2014 年 10 月 9 日と 10 月 31 日の 11 時から 15 時の間に湖上における採水と気象観測を行った。

気象観測項目は、気温 T_a [°C]、相対湿度 Rh [%]、二酸化炭素濃度 ρ_c [ppm]、10m 風速 U_{10} [m/s] である（図 3）。二酸化炭素濃度以外の項目は船上に設置した高さ 9.5m のアンテナポールの先端（水面からの高さおよそ 10m）に測器を設置し連続で観測を行った。二酸化炭素濃度に関しては、同じくアンテナポールの高度 10m に吸気口を設置し、ポンプにより船のデッキ上に設置したガス分析器まで吸気し測定した。これらの観測によって得たデータのうち、空間内挿には採水地点において調査船が停泊している 4 分平均値を使用した。10 月 9 日は電源トラブルにより、一部地点の気象データが観測できなかった。

採水は深度 0.1m を全地点、任意の地点で 2m と湖底直上の 3 深度で行い、空気の入らないようサンプル瓶に入れ密閉した。同時に 0.1m 水温 T_w [°C] と湖面温度 T_s [°C] を測定した（図 3）。なお 10 月 31 日の湖面温度 T_s はセンサーの出力端子とロガーとの接触が悪くロガーにデータが記録できなかったため、測定地点において放射温度計の液晶表示をビデオ撮影した後、研究室でビデオ画像から数値を読み取り 10 秒間の平均値を地点の観測値とした。また 10 月 9 日の採水に関しては持ち帰ったサンプルの一部を誤って凍結させてしまったため、31 日より pH と重炭酸濃度を測定できた採水地点数は少ない。

採水したサンプルは保冷バックに入れて研究室に持ち帰り、2 日以内に水素イオン濃度 pH と重炭酸濃度 HCO_3^- [mmol/L] を測定し、炭酸アルカリ度 Ac [mmol/L] を求めた。

$$A_c = \frac{[HCO_3^-] \times [H^+] + k_2}{61[H^+] + 60k_2} + [H^+] - \frac{k_w}{[H^+]} \quad (2.1)$$

水素イオン濃度 $[H^+]$ [mmol/L]、炭酸の平衡定数 k_1 、 k_2 、水の平衡定数 k_w は以下の式（福島ほか, 1995）から求めた。水温 T_w は測定地点の値を用いた。

$$[H^+] = 10^{-pH+3} \quad (2.2)$$

$$-\log k_1 = \frac{3404.71}{273.15+T_w} + 0.032786 \times (273.15 + T_w) - 14.712 \quad (2.3)$$

$$-\log k_2 = \frac{2902.39}{273.15+T_w} + 0.02379 \times (273.15 + T_w) - 6.471 \quad (2.4)$$

$$-\log k_w = \frac{4470.99}{273.15+T_w} + 0.01706 \times (273.15 + T_w) - 6.0875 \quad (2.5)$$

2.1.2. 周辺観測点（霞ヶ浦）

霞ヶ浦周辺の気象、水質観測点のデータを使用した。使用データの詳細は表 2～4 に示した。また各観測点の位置は図 5 に示した。なお湖心観測所の炭酸アルカリ度 Ac は 9 月 8 日、10 月 17、日 11 月 4 日に湖心観測所で採取した水サンプルの重炭酸濃度を加重平均した値と当日対象時刻の湖心観測所の pH を用いて計算した。

使用したデータは以下の通りである。

1. 霞ヶ浦河川事務所：気象・水質データ
2. 気象庁 AMeDAS：気象データ

気象庁ホームページにおける過去の気象統計情報からダウンロード

3. 環境省大気汚染常時観測システム：大気・気象データ

茨城県ホームページにおける大気汚染常時監視情報からダウンロード

4. 茨城空港定時航空実況気象通報式（航空自衛隊百里基地）：気象データ
5. 国立環境研究所臨湖実験施設：気象・水質データ

国立環境研究所臨湖実験施設ホームページからダウンロード

2.1.3. 周辺観測点（河川流入等）

霞ヶ浦に流入する桜川の流量を桜川の藤沢新田（図 1）の水位観測点のデータを 2012 年の水位流量曲線を用いて流量に変換した。また藤沢新田は河口から離れているため山本（2014）の方法を用いて河口の流量へ変換した。詳細は山本（2014）を参照。

また霞ヶ浦浄化センターから下水処理水の放流量、水質データを使用した。

2.1.4. 現地観測（桜川）

藤沢新田観測点下流約 300m の栄利橋（図 1）において 10 月 2 日から 11 月 30 日まで橋の中央部やや左岸よりの流れの中央部からステンレス製採水バケツを用いて 0.1m 深度の採水を行った。採水直後に 0.1m 水温 T_w を測定し、研究室に持ち帰ってから 2.1.1 と同様に pH と HCO_3^- を測定し炭酸アルカリ度 Ac を求めた。

2.2. データ処理

取得したデータのうち風速 U に高度補正を、風速 U 、気温 T_a 、水温 T_w 、湖面温度 T_s 、水蒸気圧 e 、水素イオン濃度 pH に関して時刻変換を行った。なお水蒸気圧 e [hPa] はあらかじめ気温 T_a と相対湿度 Rh から以下の式 (近藤, 2006) を用いて求めている。

$$e = 6.11 \times 10^{7.5 \times T_a / (273.3 + T_a)} \times \frac{Rh}{100} \quad (2.6)$$

2.2.1. 風速高度変換

本研究で使用したバルク輸送係数は高度 10m の風速から求められているため、各観測点の風速を (伊倉, 2012) の方法を用いて高度 10m 風速 U_{10} に変換した。観測値を U 、補正値を U_{10} とし、粗度長を z_0 、測定高度を z とし、大気安定度が中立と仮定すると以下の式であらわされる。

$$U_{10} = U \times \frac{\ln(\frac{10}{z_0})}{\ln(\frac{z}{z_0})} \quad (2.7)$$

各観測点の粗度長は土地利用データから推定した Sugita et al. (2014) のものを使用し、8 方位を 16 方位に適用するため、4 方位の粗度長データから風向の加重平均により 16 方位の粗度長を求めた (表 8, 9)。

気温 T_a 、水蒸気圧 e は高度による影響が小さい (伊倉, 2012) ことと、地点ごとのフラックスが不明であるため高度補正は行わなかった。

2.2.2. 水質値時間変換

水温や水素イオン濃度は時間によって変化するため湖心観測所のデータを用いて時間補正を行った。なお 10 月 9 日と 10 月 31 日はともに曇りであったため、それぞれの項目の時間変化は小さかった。

補正式は補正値を α 、観測値を β 、13:30 の湖心値を A 、観測値 β の時刻の湖心値を B とすると以下の式で表される。

$$\alpha = \beta \times \frac{B}{A} \quad (2.8)$$

2.2.3. 気象値時間変換

現地観測値に関してフラックス推定時刻の 13:30 値を求めるため土浦の値を用いて時間補正を行った。なおこちらも水質同様変化は小さかった。補正式は 2.2.2 と同様である。

2.3. 空間内挿

時間内挿、高度補正処理を行い 13:30 分の値に換算したデータを空間内挿した。内挿した項目は、

気温 T_a 、水蒸気圧 e 、10m 風速 U_{10} 、二酸化炭素濃度 ρ_c 、水温 T_w 、湖面温度 T_s 、炭酸アルカリ度 A_c 、水素イオン濃度 pH である。大気圧 P は空間的な変化が見られなかったため土浦の値 (1023hPa) を全域で使用した。

2.3.1. 内挿方法

時間内挿処理済みのデータを **kriging** 法によりラスターデータを作成した。作成には Golden Software 社 Surfer12 を使用し、出力グリッドサイズは 0.001° (およそ 100m) 四方とした。

2.3.2. 処理範囲

気象項目は取得したデータのうち最も外側の測点まで内挿した。水質項目は取得データを $35.95^\circ \sim 36.1^\circ$ N、 $140.2^\circ \sim 140.5^\circ$ E (高浜入りを除く霞ヶ浦西浦全域) の範囲で内挿 (測定地点が限られている一部項目は外挿) したのち、霞ヶ浦西浦の領域を抜き出した。

2.3.3. 鉛直断面図

土浦入りにおけるフラックス分布の考察のため、2.1.1 の観測データと 2.1.2 の霞ヶ浦河川事務所掛馬沖観測所のデータから、水温、水素イオン濃度 pH 、溶存二酸化炭素 C_w 、全炭酸 DIC の鉛直分布図を作成した。なお 10 月 9 日に関しては、2m 以深のサンプルが測定不能になってしまったため、水温のみ鉛直分布図を作成した。

使用したデータのうち、深度 0.1m、2m のデータに関しては 2.3.1 と同様に水平方向に **kriging** 法によってラスターデータを作成した。その後各観測点から鉛直断面まで垂線を引き、垂線と断面との交点の地点のラスターの値を断面上の観測値として使用した。0.1m、2m 以外の水深のデータに関しては最も近い観測点のものを断面上の観測値として代入した。

このようにして得たデータを **kriging** 法を用いて鉛直方向に空間内挿を行い断面図を作成した。

2.4. 各フラックスの算出

Surfer12 で作成したラスターデータを Esri 社 ArcGIS ver10.2 へ読み込み、マップ代数演算を用いて以下の式から各フラックスを計算した。

2.4.1. 顕熱フラックスの算出

顕熱フラックス H [W/m^2] は気温 T_a 、湖面温度 T_s 、10m 風速 U_{10} から以下の式を用いて計算した。

$$H = C_p \times \rho_a \times C_{hn} \times U_{10} (T_s - T_a) \quad (2.9)$$

空気密度 ρ_a [g/m^3] は以下の式 (近藤, 2000) から求めた。 C_{hn} はバルク輸送係数 (付録参照)。 P は土浦における 13 : 30 分の気圧、大気の定圧比熱 C_p [$J/kg/K$] は変化が小さいため定数 1006 を使用した (浅井ほか, 1993)。その他の項目についてはラスターデータの各グリッドの値を用いた。

$$\rho_a = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15+T_a} \times \frac{P-0.378 \times e}{1013.25} \quad (2.10)$$

2.4.2. 潜熱フラックスの算出

潜熱フラックス LE [W/m^2] は比湿 q [kg/kg]、飽和比湿 q_s [kg/kg]、10m 風速 U_{10} から以下の式を用いて計算した。値はラスターデータの各グリッドのものを用いた。

$$LE = l \times 1000 \times \rho_a \times C_{en} \times U_{10}(q - q_s) \quad (2.11)$$

蒸発潜熱 l [J/g]、比湿 q 、飽和比湿 q_s 、飽和水蒸気圧 e_s [hPa] は以下の式から求めた。 C_{en} はバルク輸送係数（付録参照）。

$$l = 3.15 \times 10^3 - 2.38(273.15 + T_a) \quad (2.12)$$

$$q = \frac{0.622 \times e}{p} \quad (2.13)$$

$$q_s = \frac{0.622 \times e_s}{p} \quad (2.14)$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{7.5 \times T_s / (273.3 + T_s)} \quad (2.15)$$

2.4.3. 二酸化炭素フラックスの算出

二酸化炭素フラックス F [$mg/m^2/s$]、大気と平衡な水中の二酸化炭素濃度 Ca [$mmol/L$]、水中の二酸化炭素濃度 Cw [$mmol/L$] から以下の式を用いて計算した。値はラスターデータの各グリッドのものを用いた。

$$F = 44 \times \kappa_c \times U_{10}(C_w - C_a) \quad (2.16)$$

C_w 、 C_a は以下の式から求めた（福島ほか, 1995）。 κ_c はバルク輸送係数（付録参照）。

$$C_a = \frac{1.19 - 4.38 \times 10^{-2} T_w + 8.4 \times 10^{-4} T_w^2 - 6.38 \times 10^{-6} T_w^3}{44} \times \frac{28.96}{\rho_a} \times \frac{\rho_c}{350} \quad (2.17)$$

$$C_w = \frac{A_c \times [H^+]^2}{k_1([H^+] + 2k_2)} \quad (2.18)$$

3. 結果と考察

3.1. 顕熱フラックスの分布

顕熱フラックス H 、 T_s-T_a 、 T_s 、 T_a 、 C_{hn} 、 U_{10} の分布を図 10～19 示す。

10月9日、31日ともに T_s と T_a の空間的な差は 1.5°C 以内に収まっており、両日とも顕著な偏りが見られなかった。このため T_s-T_a も最大で 2°C 程度であり、湖心域の南西部を中心にほぼ同心円状に分布している。全体の分布傾向は主に気温分布と風速分布の傾向に一致しており、霞ヶ浦では一部地域を除きこの二つの気象要素によって分布傾向が決まっている。10月9日のフラックス分布図には河川流入と思われる舌状に水温が小さい領域が河口から土浦入り中央部にかけて見られる(図 17)が 31日には明確に表れていない(図 18)ことから、河川流入の顕熱フラックスへの影響は河川流量が平水時には顕熱フラックス H の分布は潜熱フラックスと比較して河川の影響を受けにくいことが予想される。

潜熱フラックス、顕熱フラックスともに湖面温度 T_s がフラックスを規定する主な要因の一つであるが、潜熱フラックスを決定する飽和比湿-比湿 q_s-q は T_s-T_a よりも変動が一桁以上大きいため潜熱フラックスよりも空間分布における差異が小さいと考えられる。また分布傾向に違いがみられる原因として、潜熱フラックスの q は気温、相対湿度によって決まるため、顕熱フラックスと異なり、気温と相対湿度から求められる水蒸気圧 e の空間分布の影響を受けていると考えられる。

土浦入り最奥部(桜川河口付近よりも北側の地域)では周囲と比較して高いフラックスがみられる。この原因として土浦港北側に位置する下水処理場(霞ヶ浦浄化センター)の放流水の温度が湖水よりも高いことが原因として挙げられる(図 62)。この霞ヶ浦浄化センターは土浦市とその周辺自治体(阿見町、石岡市、小美玉市、かすみがうら市)の約 22.2 万人の下水を処理しており、一日平均 76759t/日を処理している(玉生, 2008)。霞ヶ浦にはこのほかに霞ヶ浦常南、霞ヶ浦水郷、小貝川東部の 3つの流域下水道事務所が存在しているが、霞ヶ浦浄化センターを管轄する霞ヶ浦湖北下水道事務所の流域人口、処理能力は 4つの事務所の中で最大である。

下水処理場からの排水の温度は、今回の調査期間中、常に河川水、湖沼水よりも高い値を示していた。東京都区部の下水道を対象とした研究(木内, 2003)では下水処理場からの放流水の温度は年々上昇しており、月別平均値の比較では夏期よりも冬季に上水道の水温と比較して水温上昇が顕著であることが分かっている。下水道の水温が高い原因として木内(2003)は上水道水源の変化による給水温度の上昇、気温、地温の上昇、浴槽の大型化、シャワー利用の増加、食器洗浄機、温水洗浄便座などのエネルギー多消費型生活様式への移行による世帯あたりエネルギー消費量の増加と、核家族化による世帯数の増加を挙げている。東京都区部では年平均約 99 TJ(業務部門、家庭部門のエネルギー消費量の約 11%)の熱が東京湾に放出されている。

霞ヶ浦流域でも上水道水源である湖沼水の水温上昇、下水道流域内でのエネルギー消費量の増加が起こっている可能性があり、東京湾よりもはるかに閉鎖性の高い霞ヶ浦ではよりその影響を顕著に受けることが予想される。上水道取水口のある土浦入り中央部では本研究の結果からは下水処理場の排水の直接の影響は見られなかったため地域的な条件で原水の水温上昇は起こらないと考えられる。しかしこの地域は桜川が降水流出時には河川水の影響を受ける地点にあるため、気温、地温の長期変動の影響を受けると考えられる。排熱の影響は冬季により顕著に現れるため、冬季の霞ヶ浦土浦入りの潜熱、顕熱フラックスは湖心値や夏期の測定値から推測を行うと過小評価される恐れがある。

顕熱フラックス H の分布は両日ともに T_s-T_a の分布にほぼ一致しているため、顕熱フラックスの分布の主な要因は T_s-T_a であると言える。特に T_s は下水処理水、農業排水などの水温の変化を受けやすいため、これらの流入付近では局所的に高いフラックスを示すことが分かった。霞ヶ浦では流域内での水資源の循環利用が盛んに行われているため、熱収支を考える場合、人工の排熱の影響は無視できないと考えられる。

3.2. 潜熱フラックスの分布

潜熱フラックス LE 、 $q-q_s$ 、 q 、 q_s 、 U_{10} 、 C_{hn} の分布を図 38~47 に示す。潜熱フラックスは全体の傾向として土浦から湖心に向かうにつれて上昇する傾向を示していた。

10月31日の潜熱フラックスは霞ヶ浦全体で小さく 3 W/m^2 程度であり、土浦入り最奥部に最大値が見られる。 LE の分布は $q-q_s$ の分布と一致しているため、 LE は q_s-q によって決まると言える。

水蒸気圧 e から求められる q もほぼ一定とみなせるため、この日の q_s-q を決めているのは主に q_s である。 q_s は湖面温度 T_s によって決まり、温かい下水処理場の排水の流入する土浦入り最奥部から土浦入り中央部にかけて舌状に T_s の高い領域が伸びていることから、曇りかつ風が弱い日の土浦入り西部の潜熱フラックス分布は排水の分布が決定していると考えられる。

一方、10月9日の潜熱フラックスは土浦入りから湖心にかけて高くなる傾向がみられる。9日は q が土浦から湖心に向かうにつれて減少することと、河川流入が大きいため土浦入り西部の T_s に湖沼水よりも水温の高い下水処理場の放流水の影響より、湖水よりも水温の低い河川水の影響が強くと表れているためであると考えられる。このため潜熱フラックスは顕熱フラックスよりも大気側の条件の影響を受けやすく、その結果、湖面温度の分布傾向とは異なった分布を示しやすいと考えられる。

蒸発量の分布を推定した Sugita et al. (2014) では湖面の年蒸発量分布を決定する主な要因として風速の分布を挙げているが、10月31日は風が弱く、空間的な偏りも土浦入りにおいては小さかったため、潜熱フラックスに風速の影響はあまり見られなかった。一方10月9日では潜熱フラックスは風速分布と似た傾向を示していたため、フラックス分布には一定以上の風速で風速分布の影響が表れると考えられる。

3.3. 二酸化炭素フラックスの分布

二酸化炭素フラックス F 、 C_w-C_a 、 U_{10} 、 C_w 、 C_a 、 DIC 、 Ac 、 pH 、 C_{dn} の空間分布図を図 37~49 に示す。二酸化炭素フラックスは C_w-C_a の分布にほぼ一致している。

C_w-C_a に関連する、溶存態無機炭素 DIC 、炭酸アルカリ度 Ac と大気と平衡な時の水中の二酸化炭素濃度 C_a は空気密度 ρ_a 、二酸化炭素濃度 ρ_c 、気温 T_a の空間的な偏りが少ないため、10月9日、31日ともに全域でほぼ一定の値をとる。水質項目である DIC と Ac に関しては鉛直方向の変化も小さい (図 50、51、54、55)。

C_w-C_a に大きな影響を与えている C_w は主に水温、塩分濃度、大気との交換、生物活動、異なる炭酸系の水の混合 (鉛直混合や河川流入など) によって決定される (石井, 1996)。本研究対象地域はほぼ淡水であり、水温もほぼ一定であるため、フラックス分布の主な決定要因は生物活動と流入である。霞ヶ浦の一次生産力は高いものの、透明度が低く有光層が薄いことから底生藻類の生産量が浮遊性藻類の生産量を大きく下回る (Takamura et al. 1995) こと、底生藻類が生息する湖棚が埋め立てや干拓によりほぼ消失 (平井, 1995) したことから、湖心部と沿岸部の一次生産力の差は大きくな

いと考えられる。今回の研究対象地域では DIC 、 Ac 、 Tw の変化が小さいため、 Cw の変動はほぼ pH による炭酸の平衡移動によるものと考えてよく、二酸化炭素フラックスはほぼ pH によって決定されていると言える。霞ヶ浦湖沼水の $pH8$ 前後では、炭酸物質の約 90% は炭酸水素イオンとして存在しているため、大気-海洋間の交換に關与する海洋表面の CO_2 は 1 割にも満たないが、水温、塩分、 pH などの条件が変化することで炭酸系がシフトするとその濃度は敏感に反応する（石井ほか, 2000）。霞ヶ浦土浦入りから湖心にかけての地域については炭酸アルカリ度 Ac の変化が小さく、特に pH が 7.5 以上の領域では炭酸アルカリ度の変化による溶存二酸化炭素濃度 Cw への影響は小さい（図 72）ため、 pH の分布を把握することで湖心の渦相関法による観測値を用いて霞ヶ浦全域のフラックスを地域ごとに推定できる可能性がある。

pH は河川流入と下水処理水が流入する土浦入り最奥部で低く、湖心に向かうにつれて上昇する傾向がみられる。10 月 9 日は土浦入り全域で 8 を下回り、31 日よりも広域に河川水の影響が現れている。また台風の通過による河川流量の増加と風の影響により湖水が鉛直混合されたことも pH が低い原因であると考えられる。10 月 31 日は風が弱く鉛直混合が起こりにくいため、河口から土浦入り北岸にかけて pH が低い領域は河川流入と下水処理水の影響であると考えられる。

また透明度が低く有機態炭素の生産が活発に行われる有光層が薄いため、 pH の鉛直方向への変化も大きく 10 月 31 日の Cw 断面図からは深度 0.5m 程度で Cw が Ca を上回ることが読み取れる。霞ヶ浦は湖面面積と比較して水深が極めて浅いため若干の風により鉛直方向に混合してしまう（村岡・福島, 1981）ため、このような場合フラックスが短時間で急激に変化することが予想される。

土浦入り最奥部には桜川と霞ヶ浦浄化センターからの放流水が流れ込み、 pH が大幅に低下（湖心より 1 程度低い）している。桜川が基底流出時には霞ヶ浦浄化センターの放流水水温は湖水、河川水よりも 1.5 度ほど高いため、土浦入り最奥部表層には放流水由来の特に低い pH の水（6.5~6.8 程度）が表層に滞留（図 64）し、常に顕著な正のフラックスが生じている。河川水は水深 2m ほどを流れ、排水の影響がなくなる掛馬沖北側から湖心側にかけての表層と全域の底層の pH に影響を及ぼしていると考えられる。一方、河川流量が増加するとこの成層が崩れる（図 63）ため、土浦入り最奥部の桜川河口付近でも桜川の河川水の影響が強く表れる。

3.4. 流入河川等の影響

藤沢新田における流量と重炭酸濃度、 pH 、 Cw の値を示す（図 34、35）。基底流出時の河川水の涵養源である地下水は微生物の多く存在する土壤に接しており、分解対象の有機物も多く存在する（田澤ほか, 2005）ために CO_2 に富み過飽和になることが知られている（森・香川, 1999）。本研究の対象期間中、桜川藤沢新田付近では河川水の Cw は常に Ca より高く、 pH も常に 7.6 を下回っており河口付近の pH を下げる働きをしていた。さらに洪水流出時には重炭酸濃度が減少し、少し遅れて pH も低下する傾向がみられる。この原因として、桜川流域中下流部のつくば周辺の降雨などによる水の交換が比較的活発な不圧地下水は一般に pH 5.0~6.8 を示し（田口, 1978）、河道降雨、表面流出などの応答の早く、溶存炭酸が過飽和でない流出成分が流出したのち、不圧地下水の流出の影響が現れるためと考えられる。これに伴い河口付近でも pH が低下するため湖水中の炭酸の平衡が溶存二酸化炭素を増加させる方向へ移動し、 Cw の値は平水時に比べて高くなる。このことから、高橋（2013）が可能性の一つに挙げている河川による洪水流出時の溶存二酸化炭素の希釈は起こらず、むしろ基底流出時よりも湖水の Cw の値を上昇させるため、霞ヶ浦の Cw が低い原因は湖内での活発

な有機炭素の生産によるものと言える。

本研究の結果から作成した鉛直断面図から読み取れる河口付近の河川水の pH と藤沢新田の pH が一致していない。この原因として、富栄養化した低地の小中河川では植物プランクトンや水草による光合成の影響によって日照時に著しく pH が上昇することが知られており、霞ヶ浦に流入するつくば市の花室川においても同様の現象が起こる（國府田ほか, 1985）ことが挙げられる。桜川でも土浦市内の川床勾配が藤沢新田付近よりも小さく流速が小さいため、同様の現象が起きているためと考えられる。このため流入河川の水質を正確に把握するためには勾配の緩やかな河川では基底流出時の河川水の水質項目の測定は、湖沼の影響を受けず、かつ河口に近い地点で行う必要がある。

また霞ヶ浦浄化センターは常に湖水よりも低い pH (6.5~7.0) の下水処理水を霞ヶ浦に放流しており（図 37）、桜川との流量の差が小さい基底流出には土浦入り最奥部のフラックスおよび水温、炭酸系の鉛直構造に大きく影響を及ぼしていることが分かった。下水処理場では下水中の土砂、大きなゴミを沈殿池で取り除いたのち、活性汚泥の入った生物分解槽に酸素を送り込み、好気性微生物を用いて汚水中の窒素、リンを固形化してろ過し取り除いている。この過程で同時に微生物は呼吸により汚水中の有機態炭素を無機化して二酸化炭素に変換しているため、水中の二酸化炭素濃度 C_w が上昇し放流水中の pH が下がる。同時に全炭酸 DIC も高くなると考えられる（図 50,51）。

降雨の pH は、土浦市に隣接するつくば市の森林総合研究所で 3.88~6.22（伊藤・加藤, 2003）と湖水や河川水よりも低い値を示すものの、水収支に占める割合が低い（山本, 2013）、湖面の二酸化炭素フラックスへの影響は降雨直後のみであると考えられる。

本研究の対象地域には含まれていないが、西浦湖尻の麻生沖付近は周囲と比較して極端に高い pH を示しており、海水の混合の影響が考えられる。このためこの地域では塩分濃度も考量しなければならず、単に pH の分布だけでは、湖心の観測値からこの地域のフラックスを推定することはできないと考えられる。霞ヶ浦には海水の遡上を防止するため利根川との合流地点付近に常陸川水門があり、霞ヶ浦の水位の調整を行っている。塩分濃度はこの水門の操作に影響を受けること予想されるため、影響の小さい時期に関しては pH によるフラックス推定が行える可能性がある。

4. 結論

霞ヶ浦におけるフラックス分布は二酸化炭素フラックスに関しては pH に、潜熱、顕熱フラックスは湖面温度 T_s の分布に一致する傾向が強かった。潜熱、顕熱、二酸化炭素フラックスはそれぞれ異なる分布傾向を示した。

土浦入り全体の傾向として潜熱、顕熱フラックスが土浦から湖心に向かうにつれて上昇、二酸化炭素フラックスは減少する傾向が見られた。土浦入りにおける湖水の全体的な流動方向は土浦から湖心方向であることから、霞ヶ浦全体では河川等からの流入によって pH が低く、水温の低い河川水が流入し、湖内の長い滞留時間（約 200 日）のため、流下の過程で植物プランクトンによる水中の溶存二酸化炭素 C_w の消費と、日射などによる湖水表層の加熱が行われることで、二酸化炭素フラックスは西部が高く東部が低い傾向に、逆に潜熱、顕熱フラックスは東部が低く、西部が高い傾向になると考えられる。しかし土浦最奥部から土浦入り中央部までの約 5km の地域は、下水処理場の放流水と桜川の影響を受け、全体の傾向とは異なる分布を示す場合があった。

桜川が基底流出時、桜川の流量と下水処理場の放流量の差が小さい（図 69）。土浦入り最奥部には下水処理場からの温かい放流水が表層に滞留し、河川水はその下を流れる（図 65）ため、フラックスは排水の影響を強く受ける。一方最奥部から離れると下水処理場の影響が弱まるため流量の多い桜川の河川水の影響が強くなるようになる。この場合、水温が高く、 pH の低い下水処理場の放流水の影響が大きい土浦入り最奥部では強い正の二酸化炭素フラックスが生じ、潜熱、顕熱も中央部より大きな正の値を示す。放流水の影響が弱まる最奥部から 2 km ほどの地点から湖心側では、底層を流れてきた河川水が湖面に現れるため相対的に pH の上昇、水温の低下が起こり、二酸化炭素フラックス、潜熱、顕熱フラックスがすべて減少する。

桜川の流量が増加すると湖水と比較して冷たい水が大量に流入してくるため、攪拌されることにより下水処理場からの排水による成層が崩れ、土浦入り最奥部から中央部までの広い範囲に河川水と底層水の影響が表れる（図 64）。基底流出時よりも水温、 pH の低い河川水、底層水が大量に湖面に供給されるため、広い範囲で二酸化炭素フラックスが増加、潜熱、顕熱フラックスが減少する。

二酸化炭素フラックスを決定する主な要因の一つである pH は鉛直方向の変化が大きく（図 66）、負のフラックスが生じている時においても、深度 1m の湖水中の C_w は C_a を上回っており、二酸化炭素の吸収を行っているのはごく表層に限られることが裏付けられた。また今回の観測の結果、二酸化炭素フラックスの分布は pH の分布とほぼ一致しており、ほかの条件下でも同様の現象が起こるのであれば、炭酸アルカリ度の変化の影響を受けにくくなる pH が 7.5 以上の場合、地点ごとの pH の値と湖心観測所の値を用いて土浦入りの地域ごとのフラックスを高精度で推測できる可能性がある。

本研究で推定を行ったフラックスはあくまでも瞬間値であり、中長期的なフラックス分布を明らかにしてはいない。これを明らかにするためには、桜川やその他の中小河川、農業排水などの年間の流量と pH 、 Ac の関係を明らかにしたうえで、10 月以外の季節や晴天時などほかの条件下での観測が必要である。

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、現地観測をはじめ、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。

筑波大学水文科学分野の諸先生方には、中間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。また、杉田研究室の院生の方々には研究室ゼミでの貴重なご助言・ご意見のほか、現地観測を手伝っていただくなどお世話になりました。

アイ・シー・エスの稲野辺氏には、毎月のデータ回収に同行させていただき、研究を円滑に進めることができました。

国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所の斎藤務氏には、何度も観測データの閲覧の問合せに関し丁寧に対応していただき大変感謝しております。

茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所施設管理課皆川忠三郎氏と茨城県生活環境部環境対策課大気保全Gの大内氏には年度末の忙しい時期にもかかわらず追加のデータの提供に応じていただきました。

株式会社ラクスマリーナと筑波大学体育会ヨット部の皆さんにはマリーナ使用時に観測機材置き場の提供、機材の設置の試験などを手伝っていただきました。感謝申し上げます。

以上の方々と、本研究に対して応援・励ましをいただいた家族や友人をはじめとするすべての方々に、この場を借りて心から御礼申し上げます。

参考文献

- 浅井富雄・武田喬男・木村竜治 1993. 雲や降雨を伴う大気, 東京大学出版会, 17p.
- 安部喜也・半谷高久 1974. 一般水質化学, 上巻, 共立出版, 285p.
- 天野耕二・福島武彦・松重一夫 1998. 湖沼における DO と pH の連続モニタリング結果を用いた物質循環, 生物代謝特性の評価方法. 水環境学会誌, 21, 112-118.
- 石井雅夫 1996. 海洋の二酸化炭素分圧に影響を及ぼす種々の因子. 月刊海洋, 11, 10-15.
- 石井雅夫・吉川久幸・松枝秀和 2000. 電量滴定法による海水中の全炭酸濃度の高精度分析および大気中の二酸化炭素濃度と海水中の全炭酸の放射性炭素同位体比の測定. 気象研究所技術報告, 41, 5p.
- 市川正巳・佐倉保夫 1978. 降雨流出特性について. 筑波研究学園都市の開発にともなう気候・水文環境の変化, 101-106
- 伊藤優子・加藤正樹 2003. 関東地方の都市近郊平地林における降水中の成分濃度と負荷量・森林総合研究所構内における降雨の観測結果. 森林総合研究所研究報告, 2(3), 149-155.
- 茨城空港定時航空実況気象通報式 METAR : 世界の空港の天気 (METAR,TAF) >茨城の空港の天気 (METAR,TAF) , インターネット :
<http://www.time-j.net/MetarApp/MetarTaf/RJAH>(最終閲覧 2014/11/1)
- 茨城県 : 大気汚染常時監視情報 > 常時観測データ一覧, インターネット :
<http://www.taiki.pref.ibaraki.jp/data.asp>(最終閲覧 2014/11/1)
- 茨城県霞ヶ浦環境科学センター : 調査・研究 > 霞ヶ浦について, インターネット :
http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04_kenkyu/kasumigaura/kasumigaura.html (最終閲覧 2014/12/28)
- 岩田徹・三枝信子 2003. 渦相関法によるフラックス解析の実際. Asia Flux 運営委員会編 : 陸域生態系における二酸化炭素フラックス等のフラックス観測の実際. 国立環境研究所, 25-44.
- 上野健一・久田健一郎 2011. 地球学調査・解析の基礎, 古今書院, 158-160.
- 沖野外輝夫 1976. 富栄養化調査法, 講談社, 48-53.
- 気象庁 : “気象統計情報”, インターネット : <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (最終閲覧 2014/11/12)
- 國府田悦男・袖山亨・松本宏・片野剛・橘田雅美・武田勝治・高橋正征 1985. 夏期花室川における溶存酸素と炭酸・重炭酸イオン濃度の日周変動について. 筑波の環境研究, 9, 100-105
- 国立環境研究所臨湖実験施設 : “霞ヶ浦臨湖実験施設気象情報提供”, インターネット :
<http://www.cger.nies.go.jp/kasumi/index.html> (最終閲覧 2014/11/20)
- 小山忠四郎 1976. 湖沼における炭素と窒素の循環. 地球化学, 10, 12-16.
- 近藤純正 2000. 地表面に近い大気の科学—理解と応用—, 東京大学出版会, 324p.
- 近藤純正 2006. 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 東京大学出版会, 324p.
- 西條八束・三田村緒佐武 1995. 新編 湖沼調査法, 講談社, 238p.
- 高橋孝生 2013. 渦相関法による霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスの測定とその変化要因の考察. 筑波大学生命環境学群地球学類地球環境学専攻卒業論文, 1-16.
- 田口雄作 1978. 河川水・地下水の水質とその変化について. 筑波研究学園都市の開発にともなう気候・水文環境の変化, 107-115

- 田澤勝・狩野直樹・今泉洋 2005. 新潟県内の主要な河川・湖沼水の水質および同位体的・化学的特徴. 分析化学, 54(9), 789-798.
- 玉生史郎 2008, 上水はどこから来て、下水はどこに行くのか -霞ヶ浦を例にして-. 地質ニュース, 664, 65-72
- 登坂博行 2006. 地圏の水環境科学, 東京大学出版会, 195-199.
- 永田俊 2008. 流域環境評価と安定同位体-水循環から生態系まで-, 京都大学学術出版会, 111-132
- 野崎健太郎 2002. 湖沼沿岸帯における基礎生産の特性. 陸水学雑誌, 63, 225-231.
- 花町優次・中村剛也 2013. 霞ヶ浦における植物プランクトン由来溶存態有機炭素の挙動予測. 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報, 9, 40-44
- 平井幸弘 1995. 湖の環境学. 古今書院, p20.
- 福島武彦・松重一夫・Weisburd, R.S.J. 1995. DO, pHの連続測定による気液ガス交換, 光合成, 呼吸速度の推定方法について. 水環境学会誌, 18, 279-289.
- 福島武彦・松重一夫・Weisburd, R.S.J. 秦三和子・細見正明 1995. DO, pHの連続測定の結果をもとにした実験池の物質循環, 生物代謝特性の評価. 水環境学会誌, 18, 755-765.
- 宮田明 2003. データの管理, データベース作成の実際. Asia Flux運営委員会編: 陸域生態系における二酸化炭素フラックス等のフラックス観測の実際. 国立環境研究所, 85-114.
- 宮野愛子 2008. 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの測定と評価. 筑波大学第一学群自然科学類地球科学主専攻卒業論文, 50p.
- 村岡浩爾・福島武彦 1981. 霞ヶ浦(西浦)の湖流. 国立公害研究所研究報告, 19,1-149
- 森雅佳・香川尚徳 1999. 河川の溶存酸素濃度を変動させる環境要因-石出川の場合-. 陸水学雑誌, 60, 335-345
- 山本和也 2013. 霞ヶ浦の水収支の推定. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士論文, 23p
- Iwata, T., Yoshikawa, K., Nishimura, K., Higuchi, Y., Yamashita, T., Kato, S. and Ohtaki, E. 2004. CO₂ flux measurements over the sea surface by eddy correlation and aerodynamic techniques. J.Oceanogr., 60, 995-1000.
- Iwata, T., Han, Z., Kasai, R. and Kohzu, A. 2007. Carbon dioxide and methane emissions from a hydroelectric reservoir. Annual Report 2006 of 21st Century COE program: Research Education on Intergrated River Basin Management in Asian Monsoon Resion., 21st Century COE program, University of Yamanashi, 85-86.
- Kondo, F. and Tsukamoto, O. 2007. Air-sea CO₂ flux by eddy covariance technique in the Equatorial Indian Ocean. J.Oceanogr., 63, 449-456.
- Koyama, T., Nishimura, M. and Matsuda, H. 1977. Diurnal and seasonal variations of exchange rate of carbon dioxide across an air-lake water interface. Japan.J.Limnol., 38, 131-137.
- Manaka, T., Ushie, H., Araoka, D., Inamura, A., Suzuki, A and Kawahara, H. 2013. Rapid alkalization in Lake Inawashiro, Fukushima, Japan: Implications for future changes in the Carbonate system of terrestrial waters. Aquat Geochem., 19, 281-302
- Sugita, M., Ikura, H., Miyano, A., Yamamoto, K and Wei, Z. 2014. Evaporation from Lake Kasimigaura : annual totals and variability in time and space. Hydrological Research Letters., 8(3), 103-107.

- Takamura,N.,Iwakuma,T and Yasuno,M. 1987. Primary production in Lake Kasumigaura,1981-1985. Japan J Limnol., 48, S13-S38
- Takamura,N.,Iwakuma,T and Yasuno,M. 1990. Primary production of epiphytic algae and phytoplankton in the littoral zone of lake kasumigaura. Marine Microbial Food Webs., 4, 239-255
- Wanninkhof , R. 2007. The Impact of Different Gas Exchange Formulations and Wind Speed Products on Global Air-Sea CO₂ Fluxes. Transport at the Air Sea Interface., 1-23.
- Wei Z-w. 2013. Estimation of surface fluxes using bulk transfer methods over lake surface: an example of Lake Kasumigaura. MS thesis, Graduate School of Life and Environmental Sciences, the University of Tsukuba, 160p.

付録

バルク係数について

バルク輸送係数とは、

$$F = C_x U(x_s - x_a) \quad (A1)$$

で表されるバルク式の C_x である。正確なフラックスを求めるためには、研究対象地域に最適化されたバルク係数を使用しなければならない。そのため対象とする水面の波高や風速、二酸化炭素であれば pH などにより変化するフラックスを再現するため、定数のものから風速の関数のもの、pH による補正項があるものまでさまざまなものが提案されている。

今回使用したバルク係数は潜熱、顕熱は Wei (2013) の値を、二酸化炭素は Wanninkhof (2013) の方法から高橋 (2013) が求めた値を使用した。Wei (2013) では霞ヶ浦湖心観測所の鉛直風速、気温、比湿 10Hz 観測データの共分散からバルク係数を求めている。

潜熱バルク輸送係数 C_{en} 顕熱バルク輸送係数 C_{hn} 二酸化炭素バルク輸送係数 κ_c は以下の式から計算した。

$$C_{en} = (0.0009078622125/U_{10}) \times \exp(-(\ln(U_{10}) - 0.2173819734)^3) + 0.001137911624 - 1.538412447E - 0.05 \times U_{10} \quad (A2)$$

$$C_{hn} = (0.002121021886/U_{10}) \times \exp(-(\ln(U_{10}) - 0.2751502697)^3) + 0.0009120266534 + 1.6479059E - 0.05 \times U_{10} \quad (A3)$$

$$\kappa_c = \left(\frac{S_{cCO2}}{S_{c_{水蒸気}}} \right)^{-\frac{2}{3}} \times C_e \quad (U_{10} \leq 3 \text{ m/s}) \quad (A4)$$

$$\kappa_c = \left(\frac{S_{cCO2}}{S_{c_{水蒸気}}} \right)^{-\frac{1}{3}} \times C_e \quad (U_{10} > 3 \text{ m/s}) \quad (A5)$$

ただし、 C_e は霞ヶ浦湖心観測所で 2008 年から 2010 年にかけて求められた潜熱のバルク係数の平均値 (=0.001) (Wei, 2013)、 S_c はシュミット数であり、 $S_{cCO2}=0.947$ 、 $S_{c_{水蒸気}}=0.60$ (近藤, 2006) とした。

表 1 霞ヶ浦現地観測項目

観測項目	測器 測定法	設置高度	サンプリング時刻	平均化 時間	ロガー出力時刻
気圧 P [hPa]	VAISALA WXT520 シリコン静電 容量式気圧計	10 m	毎秒	前 2 分	2 分毎
風速 U [m/s]	WXT520 2成分超音波風 向風速計	10 m	毎秒	前 2 分	2 分毎
相対湿度 Rh [%]	WXT520 高分子膜式 湿度計	10 m	毎秒	前 2 分	2 分毎
気温 Ta [°C]	WXT520 セラミック 抵抗式温度計	10 m	毎秒	前 2 分	2 分毎
二酸化炭素濃度 ρ_c [ppm]	LI-COR LI840 非分散赤外線 吸収式 ガス分析器	10 m (吸気口高 度)	毎秒	前 2 分	2 分毎
湖面温度 Ts [°C]	MINOLTA 505 熱電対列式 放射温度計	1.5 m	0.1 秒	前 2 分	2 分毎
水温 TW [°C]	TECHNOL SEVEN D617 白金抵抗式 温度計	-0.1, -2.0 m, 湖底直上	採水地点 到着時	瞬間値	ロガー出力なし
水素イオン濃度 pH	HORIBA D24 ガラス電極式 pH 計	-0.1, -2.0 m, 湖底直上	採水後 2 日以内	瞬間値	ロガー出力なし
重炭酸イオン濃度 HCO_3^- [mmol/L]	酸滴定法	-0.1, -2.0 m, 湖底直上	採水後 2 日以内	瞬間値	ロガー出力なし

表 2 周辺観測所の観測項目（霞ヶ浦河川事務所）

地点名	北緯	東経	項目	高度 (m)	サンプリング 時刻	平均化時間
潮来	35.94	140.54	気温 T_a [°C]	17.5	毎秒	前 1 時間
			相対湿度 Rh [%]	17.5	毎秒	前 1 時間
			風向 WD [°],風速 U [m/s]	18.5	毎 0.25 秒	前 1 時間
			気圧 P [hPa]	5.0	毎時 0 分	瞬間値
掛馬沖	36.05	140.24	気温 T_a [°C]	5.0	毎秒	前 1 時間
			相対湿度 Rh [%]	5.0	毎秒	前 1 時間
			風向 WD [°],風速 U [m/s]	7.0	毎 0.25 秒	前 1 時間
			気圧 P [hPa]	5.0	毎時 0 分	瞬間値
			水温 T_w [°C]	-0.5	毎秒	前 20 分
釜谷沖	36.01	140.57	気温 T_a [°C]	3.0	毎秒	前 1 時間
			相対湿度 Rh [%]	3.0	毎秒	前 1 時間
			風向 WD [°],風速 U [m/s]	7.0	毎 0.25 秒	前 1 時間
			気圧 P [hPa]	3.0	毎時 0 分	瞬間値
土浦	36.07	140.21	気温 T_a [°C]	10.0	毎秒	前 1 時間
			相対湿度 Rh [%]	10.0	毎秒	前 1 時間
			風向 WD [°],風速 U [m/s]	11.0	毎 0.25 秒	前 1 時間
			気圧 P [hPa]	6.0	毎時 0 分	瞬間値
東村	35.94	140.45	気温 T_a [°C]	3.0	毎秒	前 1 時間
			相対湿度 Rh [%]	3.0	毎秒	前 1 時間
			風向 WD [°],風速 U [m/s]	41.0	毎 0.25 秒	前 1 時間
			気圧 P [hPa]	3.0	毎時 0 分	瞬間値
麻生沖	35.96	140.49	風向 WD [°],風速 U [m/s]	9.5	毎 0.25 秒	前 1 時間
			水温 T_w [°C]	-0.5	毎秒	前 20 分
出島	36.07	140.38	風向 WD [°],風速 U [m/s]	5.0	毎 0.25 秒	前 1 時間
小高	36.01	140.06	風向 WD [°],風速 U [m/s]	5.5	毎 0.25 秒	前 1 時間
玉造	36.10	140.40	風向 WD [°],風速 U [m/s]	11.0	毎 0.25 秒	前 1 時間
銚田	36.15	140.51	風向 WD [°],風速 U [m/s]	6.5	毎 0.25 秒	前 1 時間
鰐川	35.92	140.62	風向 WD [°],風速 U [m/s]	8.0	毎 0.25 秒	前 1 時間

表 3 周辺観測所の観測項目（環境省大気汚染常時観測システム）

地点名	北緯	東経	項目	高度 (m)	サンプリング 時刻	平均化 時間
水戸石川	36.39	140.43	二酸化炭素濃度 ρ_c [ppm]	4.0	毎秒	前1時間
銚田保健所	36.16	140.51	風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
鹿島事務所	35.90	140.64	気温 Ta [°C]	4.0	毎10分	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	4.0	毎10分	前1時間
			風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
神栖消防	35.90	140.67	二酸化炭素濃度 ρ_c [ppm]	4.0	毎秒	前1時間
			気温 Ta [°C]	4.0	毎10分	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	4.0	毎10分	前1時間
			風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
波崎太田	35.84	140.74	風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
潮来保健所	35.94	140.57	気温 Ta [°C]	4.0	毎10分	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	4.0	毎10分	前1時間
			風向 WD [°] 風速 U [m/s]	12.0	毎0.25秒	前1時間
石岡杉並	36.20	140.29	風向 WD [°], 風速 U [m/s]	12.0	毎0.25秒	前1時間
土浦保健所	36.07	140.19	気温 Ta [°C]	4.0	毎10分	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	4.0	毎10分	前1時間
			風向 WD [°] 風速 U [m/s]	12.0	毎0.25秒	前1時間
江戸崎公民館	35.95	140.32	風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
龍ヶ崎保健所	35.91	140.19	風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
つくば高野	36.10	140.04	風向 WD [°]	12.0	毎0.25秒	前1時間
土浦中村南	36.04	140.17	風向 WD [°] 風速 U [m/s]	14.0	毎0.25秒	前1時間

※気温は小笠原計器製作所 TS-3D（白金抵抗式温度計）、相対湿度は小笠原計器製作所 HS-131（毛髪式湿度計）、風向風速は KOSHIN MVS-350（ブラシレス式風向風速計）、二酸化炭素濃度は HORIBA VA-3000（非分散赤外線吸収式マルチガス分析計）

表 4 周辺観測所の観測項目（環境研究所・気象庁・航空自衛隊）

地点名	北緯	東経	項目	高度 (m)	サンプリング 時刻	平均化 時間
臨湖実験施設 取水塔 (環境研究所)	36.01	140.38	気温 $Ta[^\circ\text{C}]$	6.0	毎 10 秒	前 1 時間
			風向 $WD[^\circ]$	6.0	毎 10 秒	前 1 時間
			風速 $U[\text{m/s}]$			
			相対湿度 $Rh[\%]$	6.0	毎 10 秒	前 1 時間
つくば館野 (AMeDAS)	36.06	140.13	水温 $Tw[^\circ\text{C}]$	-0.5	毎 10 秒	前 1 時間
			気温 $Ta[^\circ\text{C}]$	1.5	毎 10 分	前 1 時間
			相対湿度 $Rh[\%]$	1.5	毎 10 分	前 1 時間
			風向 $WD[^\circ]$ 風速 $U[\text{m/s}]$	20.4	毎 0.25 秒	前 10 分
龍ヶ崎 (AMeDAS)	35.89	140.21	気圧 $P[\text{hPa}]$	31.0	毎時 0 分	瞬間値
			気温 $Ta[^\circ\text{C}]$	1.5	毎 10 分	前 1 時間
鹿島 (AMeDAS)	35.96	140.63	風向 $WD[^\circ]$ 風速 $U[\text{m/s}]$	9.4	毎 0.25 秒	前 10 分
			気温 $Ta[^\circ\text{C}]$	1.5	毎 10 分	前 1 時間
茨城空港 (航空自衛隊)	36.16	140.41	風向 $WD[^\circ]$ 風速 $U[\text{m/s}]$	6.5	毎 0.25 秒	前 10 分
			気温 $Ta[^\circ\text{C}]$	1.4	毎時 0 分	瞬間値
			相対湿度 $Rh[\%]$	1.4	毎時 0 分	瞬間値
			風向 $WD[^\circ]$ 風速 $U[\text{m/s}]$	7.8	毎秒	前 1 時間
			気圧 $P[\text{hPa}]$	31.0	毎時 0 分	瞬間値

表 5 桜川現地観測項目

地点名	北緯	東経	項目	測器	データ形式
栄利橋	36.1135	140.1445	水温 T_w [°C]	D617	瞬間値
			水素イオン濃度 pH	D24	瞬間値
			重炭酸濃度 HCO_3^- [mmol/L]	酸滴定法	瞬間値

表 6 霞ヶ浦浄化センター測定項目

地点名	北緯	東経	項目	サンプリング時刻	データ形式
霞ヶ浦 浄化 センター	36.084	140.216	水温 T_w [°C]	毎日 9 : 00	瞬間値
			水素イオン濃度 pH	毎日 9 : 00	瞬間値
			放流量 [m ³ /日]	毎秒	日積算値

表 7 桜川流量観測点観測項目

地点名	北緯	東経	項目	データ形式
藤沢新田	36.114	140.143	水位[m]	前 1 時間値
			降雨 R [mm]	前 1 時間値

表 8 風速観測点における風向別粗度長 (1)

地点名	高度 (m)	風向							
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
東村	41	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
臨実験施設	6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
つくば館野	20.4	0.84	0.9125	0.985	1.0575	1.13	1.073	1.015	0.958
茨城空港	7.8	0.313	0.260	0.207	0.153	0.1	0.278	0.457	0.635
鉾田	6.5	0.565	0.519	0.473	0.426	0.38	0.414	0.448	0.481
龍ヶ崎	9.4	0.29	0.285	0.28	0.275	0.27	0.228	0.185	0.143
鹿島	6.5	0.405	0.483	0.56	0.638	0.715	0.637	0.558	0.479
土浦保健所	12	1.25	1.235	1.22	1.205	1.19	1.183	1.175	1.168
潮来保健所	12	0.24	0.258	0.275	0.293	0.31	0.545	0.78	1.015
石岡杉並	12	0.983	0.975	0.967	0.958	0.95	0.931	0.913	0.894
土浦中村南	14	1.033	1.054	1.076	1.097	1.118	1.144	1.169	1.195
湖心	10	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土浦	11	1.19	0.988	0.785	0.583	0.38	0.569	0.758	0.946
潮来	18.5	0.675	0.675	0.675	0.675	0.675	0.589	0.503	0.416
釜谷沖	7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
掛馬沖	7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
麻生沖	9.5	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
小高	5.5	0.755	0.841	0.928	1.014	1.1	0.973	0.845	0.718
玉造	11	0.45	0.405	0.36	0.315	0.27	0.228	0.185	0.143
出島	5	0.9	0.678	0.455	0.233	0.01	0.01	0.01	0.01
鰐川	8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.143	0.185	0.228

※粗度長の単位は m

表 9 風速観測点における風向別粗度長 (2)

地点名	高度	風向							
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
東村	41	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
臨実験施設	6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
つくば館野	20.4	0.9	0.944	0.988	1.031	1.075	1.016	0.958	0.899
茨城空港	7.8	0.813	0.675	0.537	0.398	0.26	0.273	0.287	0.230
銚田	6.5	0.515	0.57	0.625	0.68	0.735	0.693	0.65	0.608
龍ヶ崎	9.4	0.1	0.108	0.115	0.123	0.13	0.17	0.21	0.25
鹿島	6.5	0.4	0.476	0.553	0.629	0.705	0.63	0.555	0.48
土浦保健所	12	1.16	1.175	1.19	1.205	1.22	1.228	1.235	1.243
潮来保健所	12	1.25	0.998	0.745	0.493	0.24	0.24	0.24	0.24
石岡杉並	12	0.875	0.894	0.913	0.931	0.95	0.958	0.967	0.975
土浦中村南	14	1.22	1.213	1.205	1.198	1.19	1.151	1.112	1.072
湖心	10	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土浦	11	1.135	1.116	1.097	1.077	1.058	1.091	1.124	1.157
潮来	18.5	0.33	0.359	0.388	0.416	0.445	0.503	0.56	0.618
釜谷沖	7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
掛馬沖	7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
麻生沖	9.5	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
小高	5.5	0.59	0.611	0.633	0.654	0.675	0.695	0.715	0.735
玉造	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.26	0.45	0.45	0.45
出島	5	0.01	0.033	0.055	0.078	0.1	0.3	0.5	0.7
鰐川	8	0.27	0.228	0.185	0.143	0.1	0.1	0.1	0.1

※粗度長の単位は m

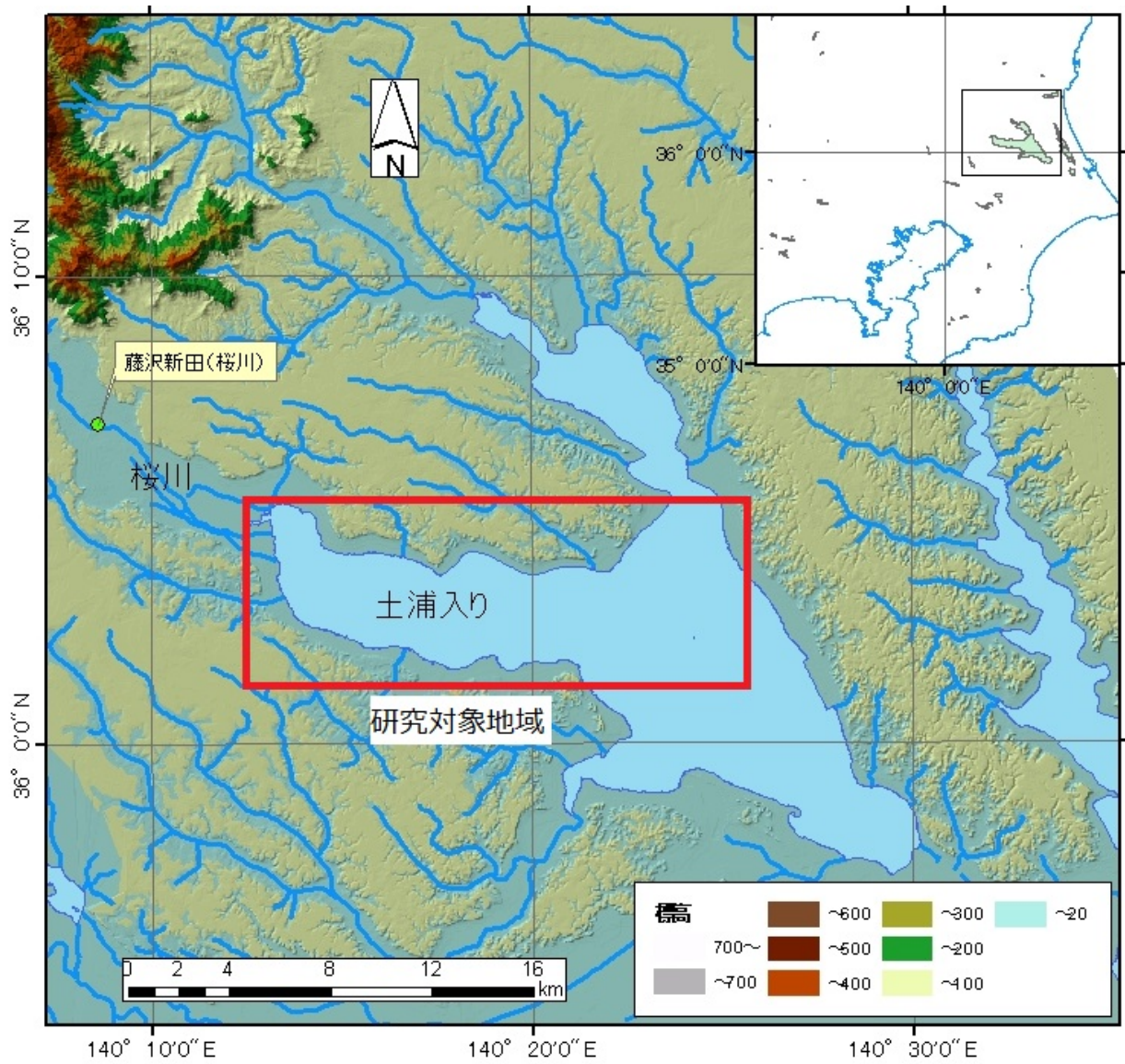


図 1 研究对象地域

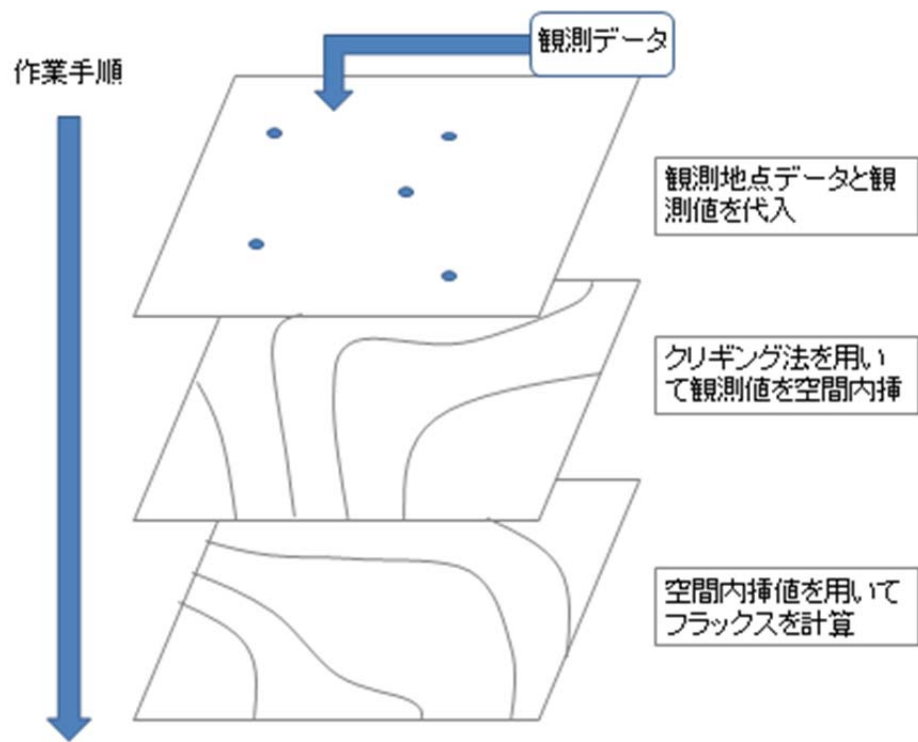


図 2 研究手順

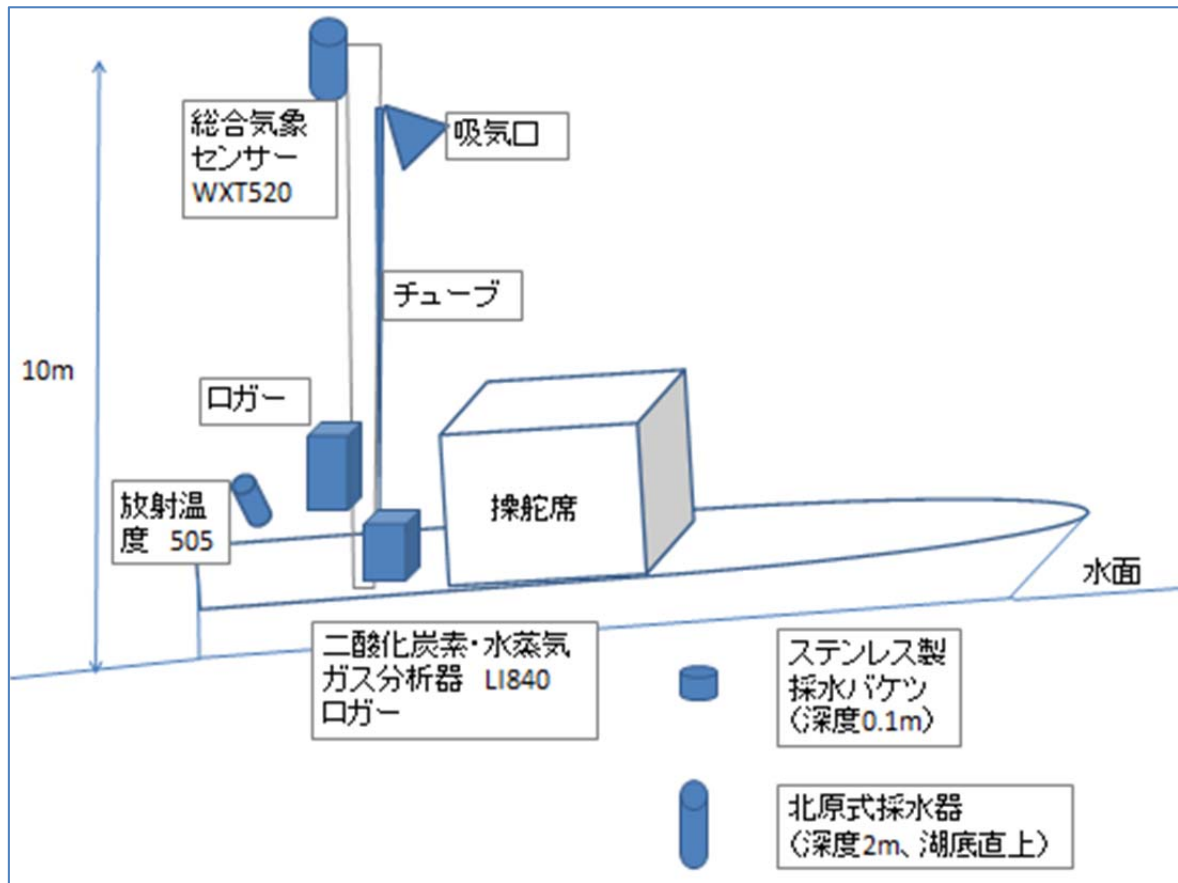


図 3 現地観測測器配置

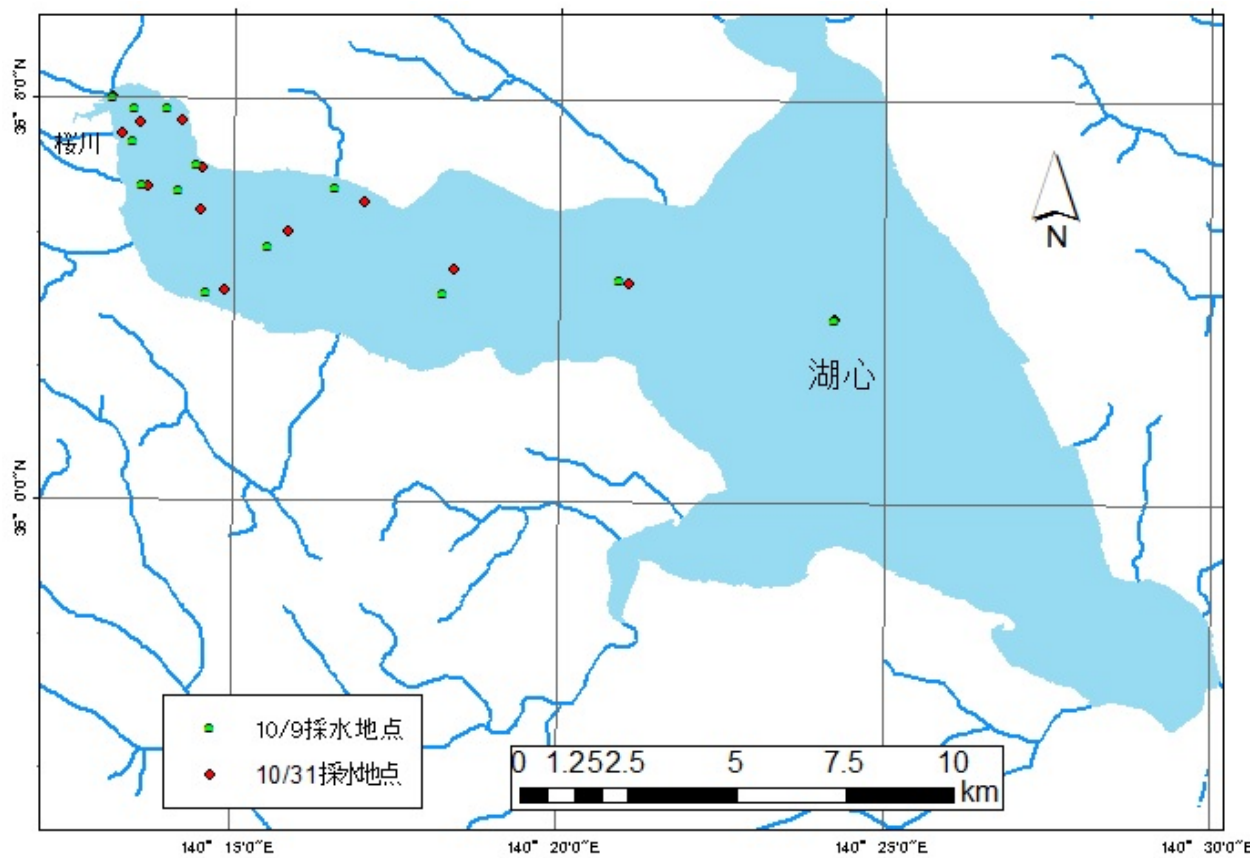


图 4 湖上採水地点

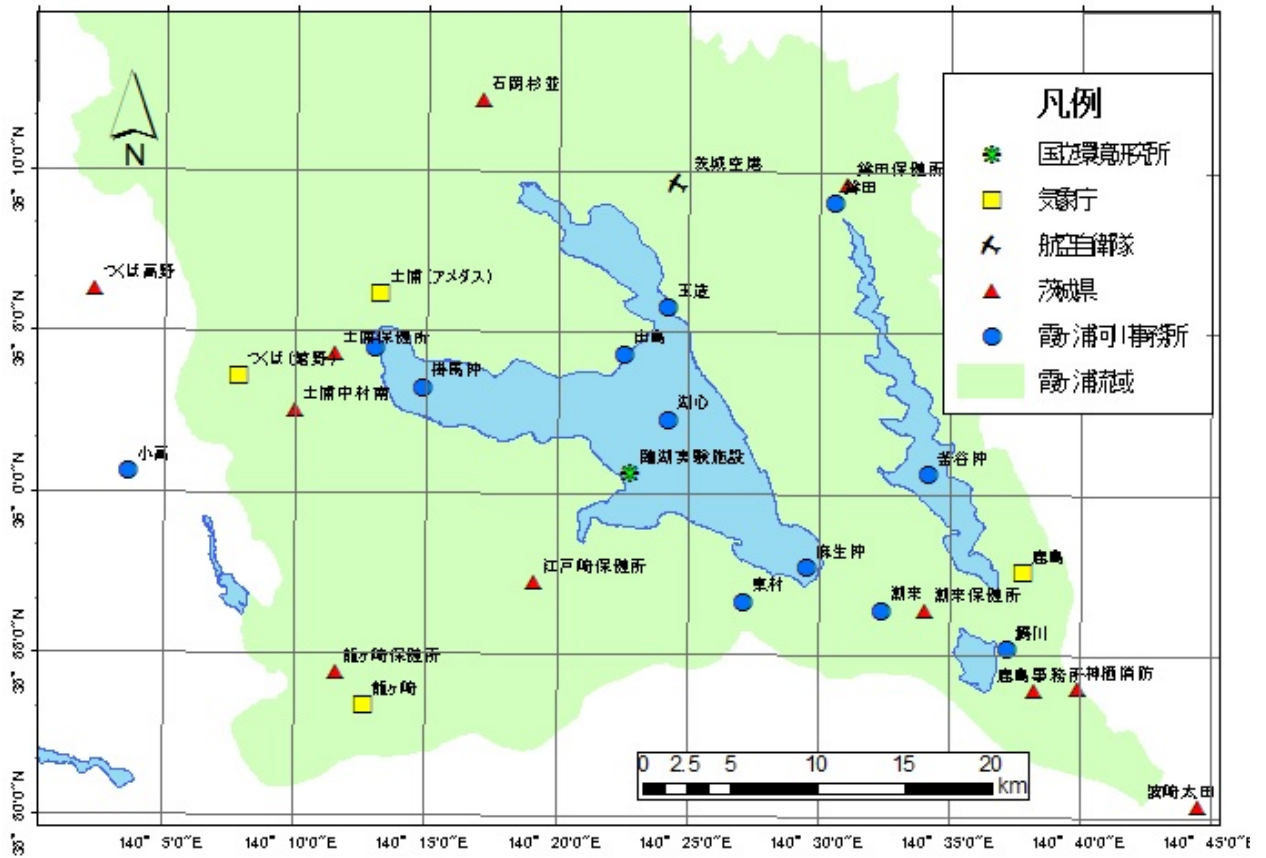


図 5 周辺観測点

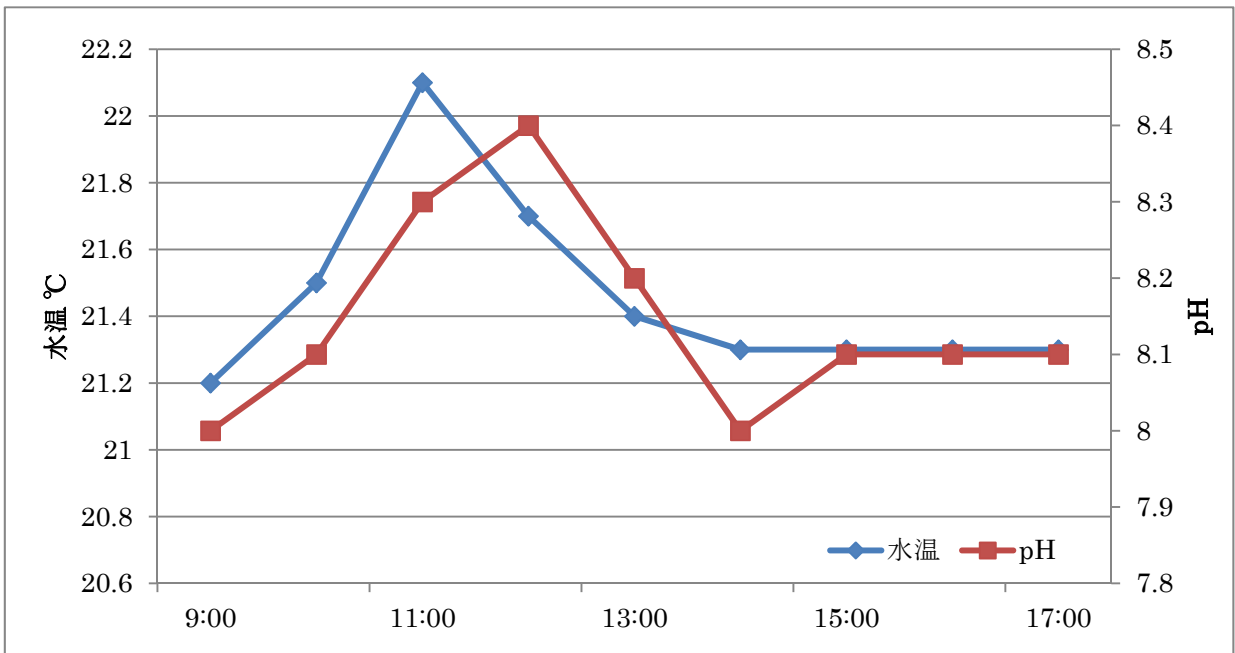


图 6 湖心水质时间变化 (10/9)

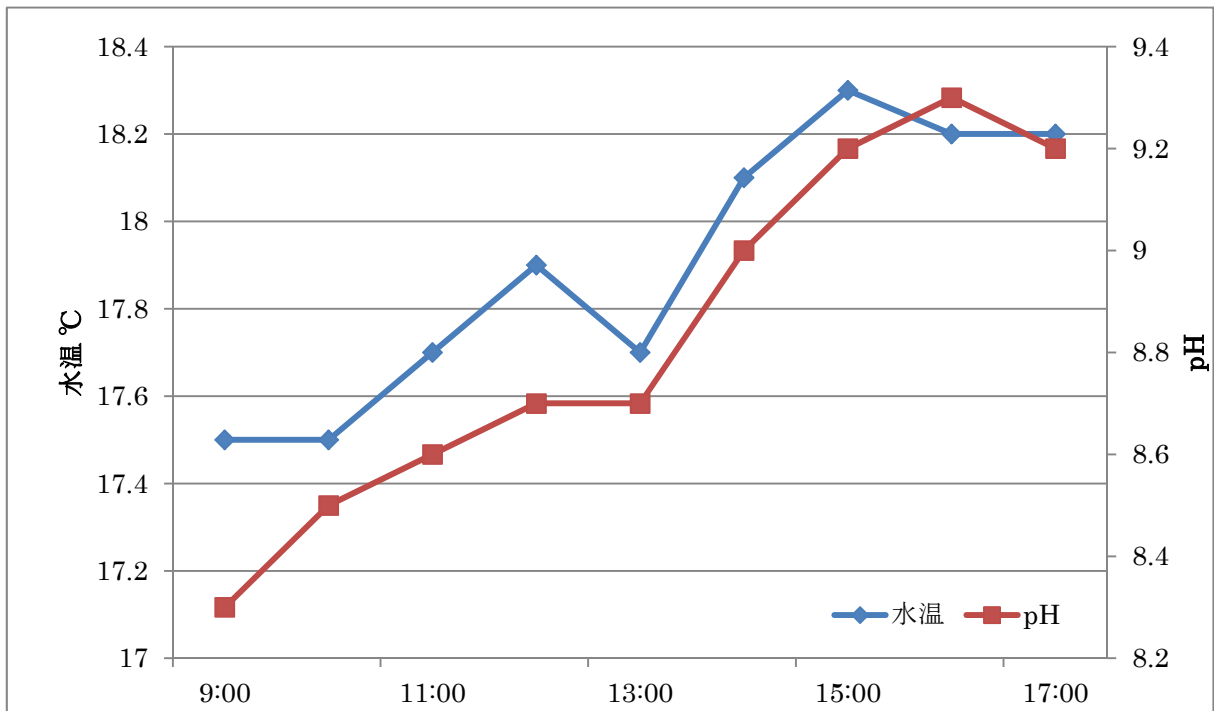


图 7 湖心水质时间变化 (10/31)

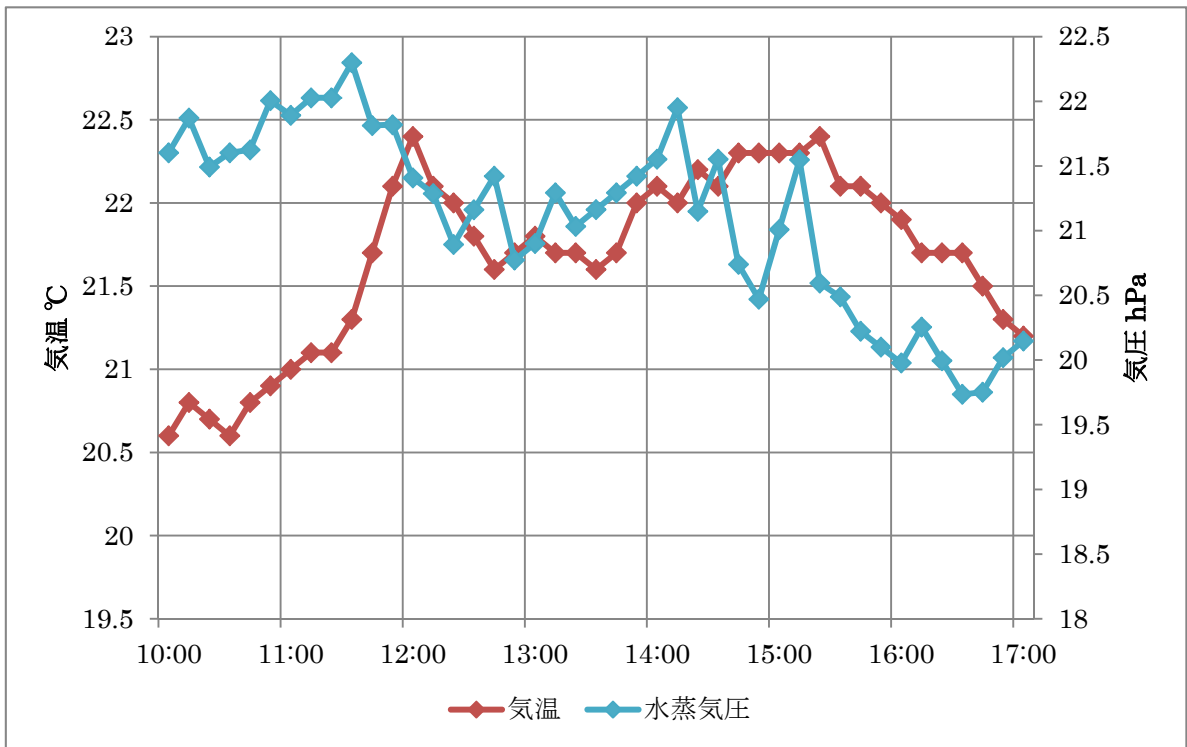


图 8 土浦气象时间变化 (10/9)

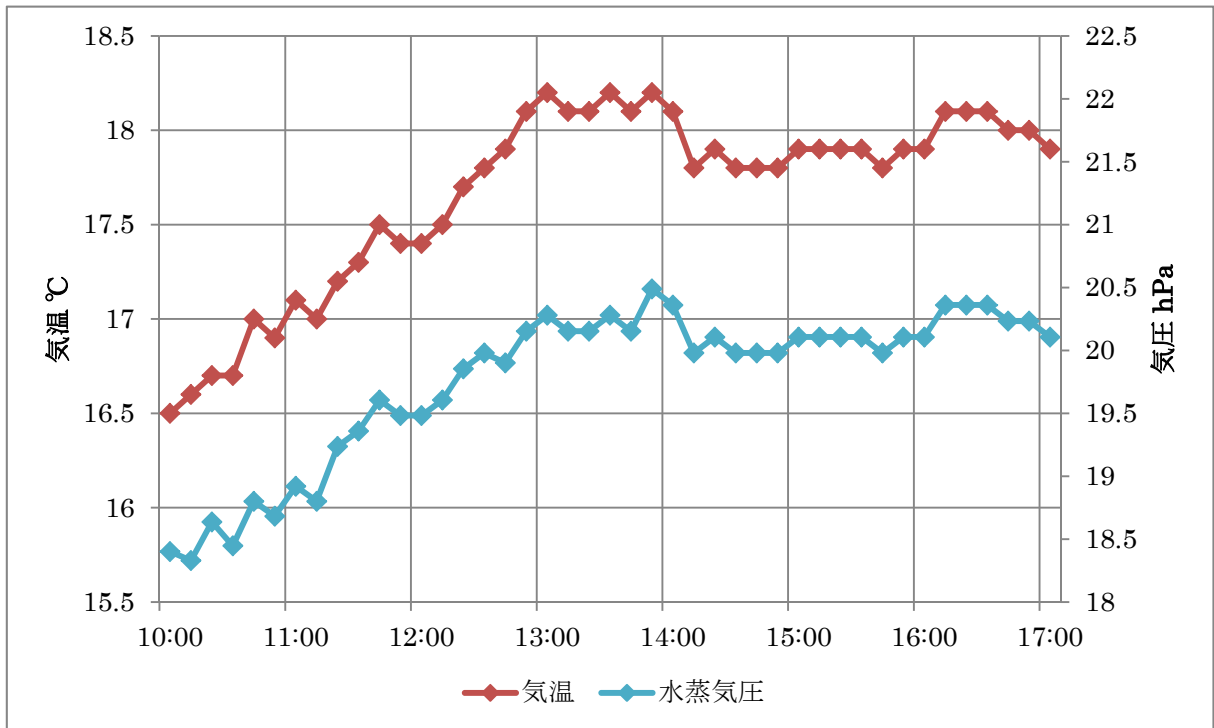


图 9 土浦气象时间变化 (10/31)

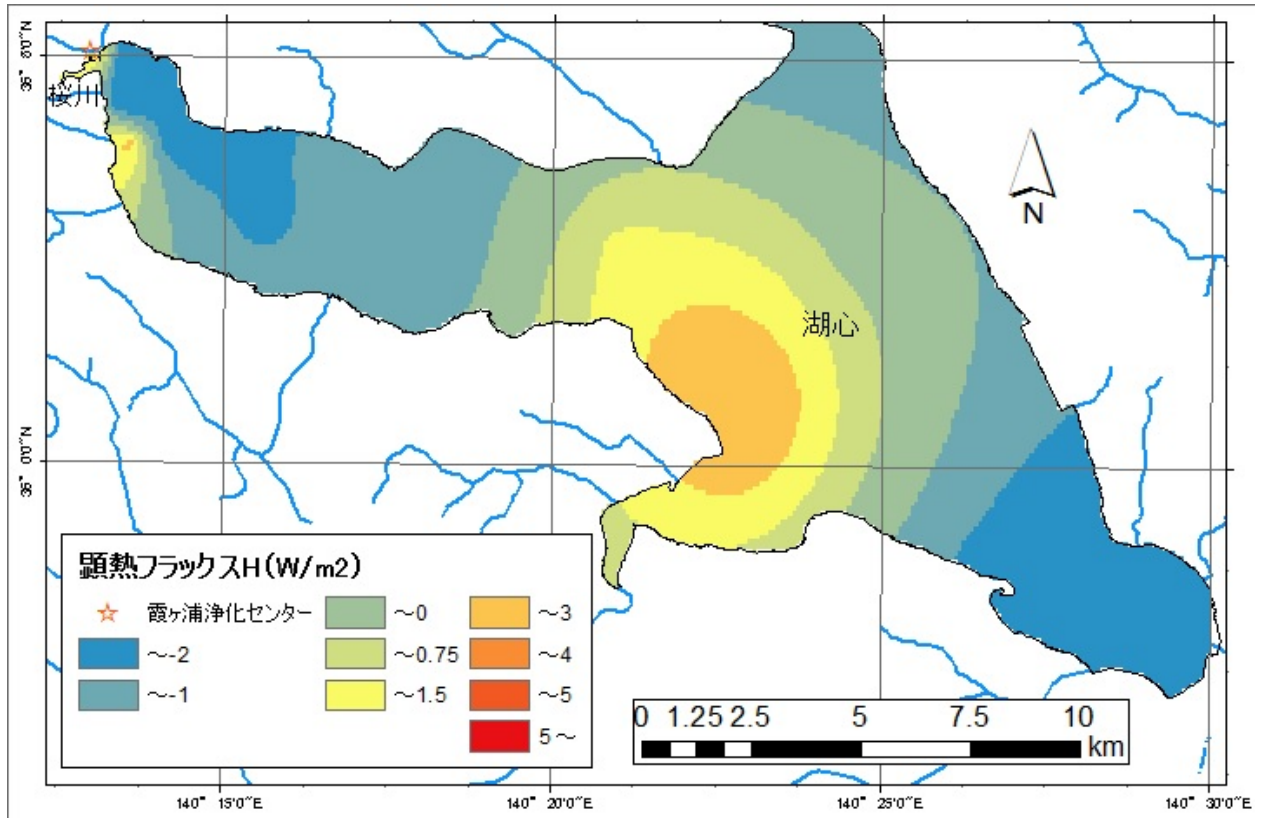


図 10 顕熱フラックス分布図 (10/9)

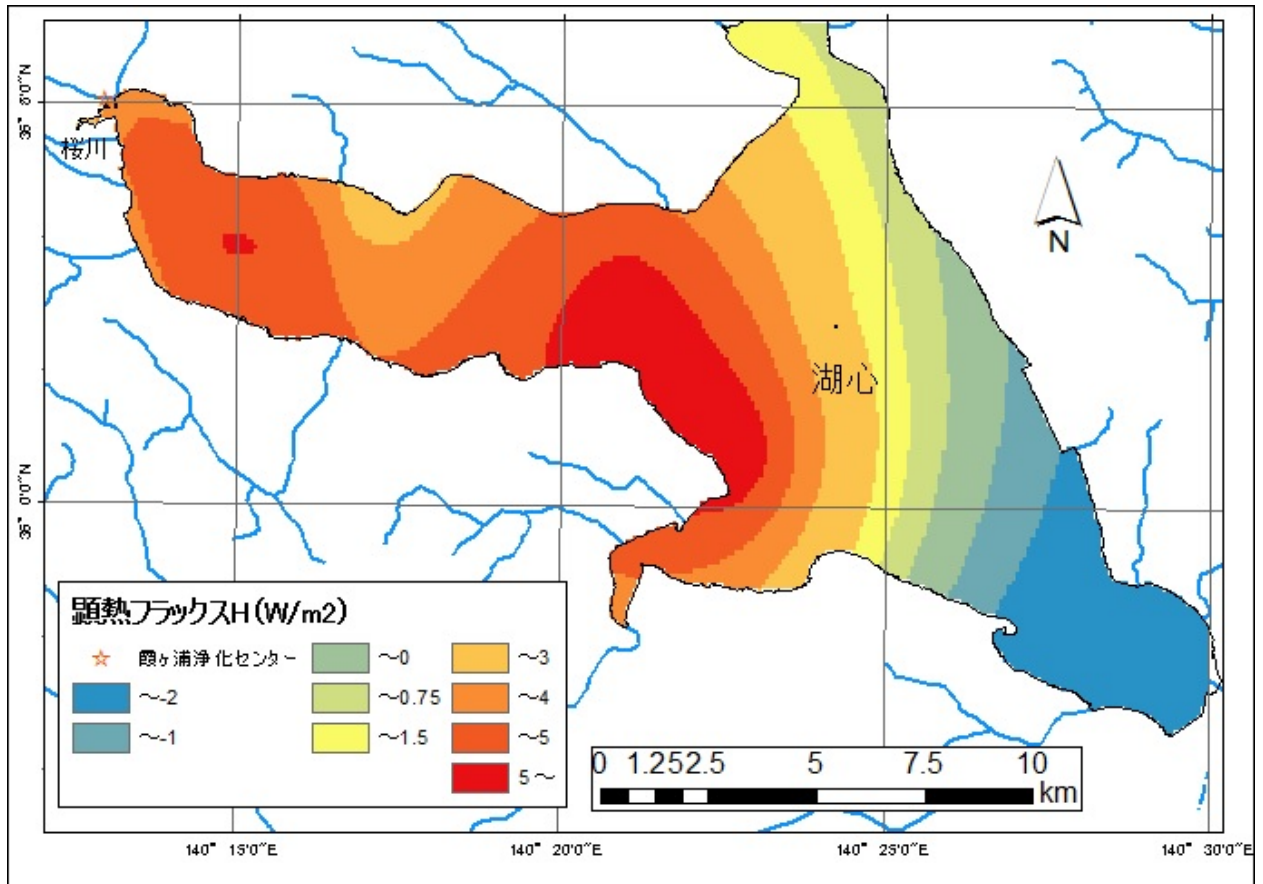


図 11 顕熱フラックス分布図 (10/31)

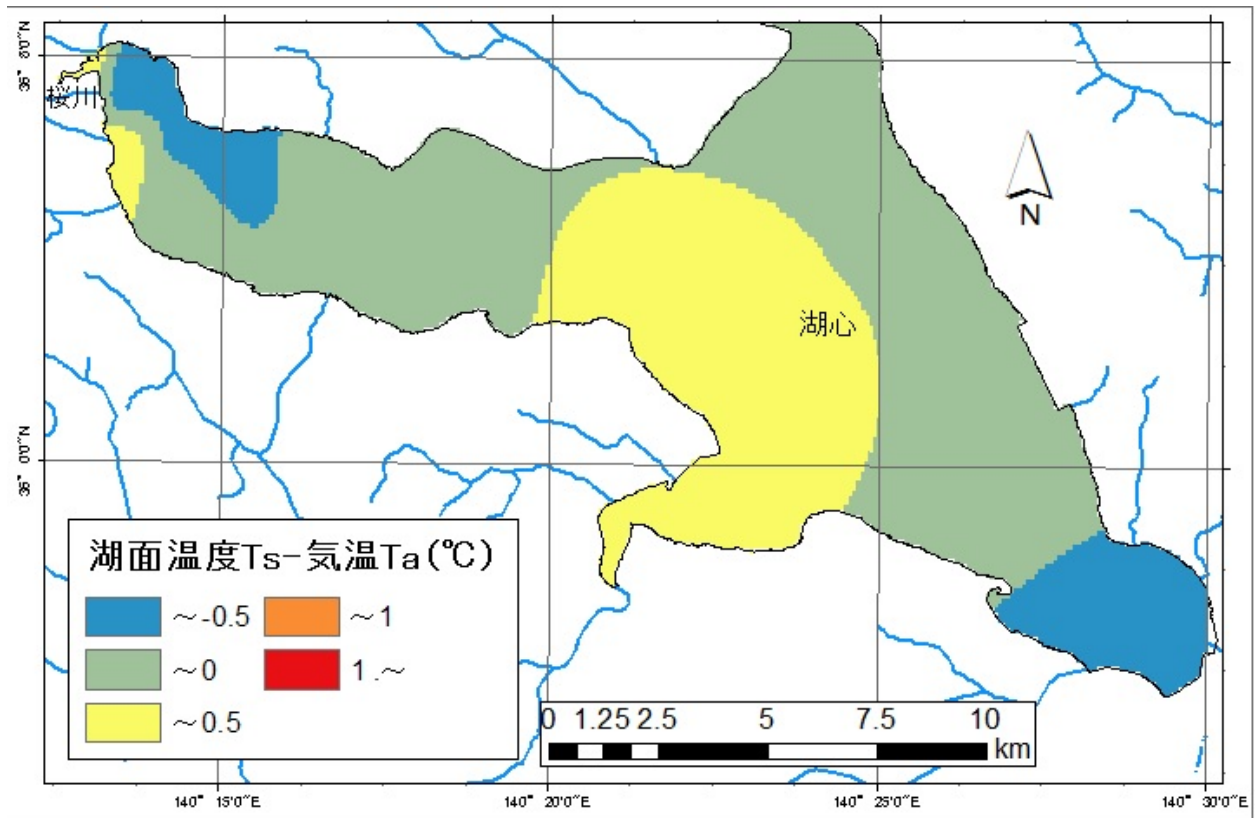


图 12 T_s - T_a 分布图 (10/9)

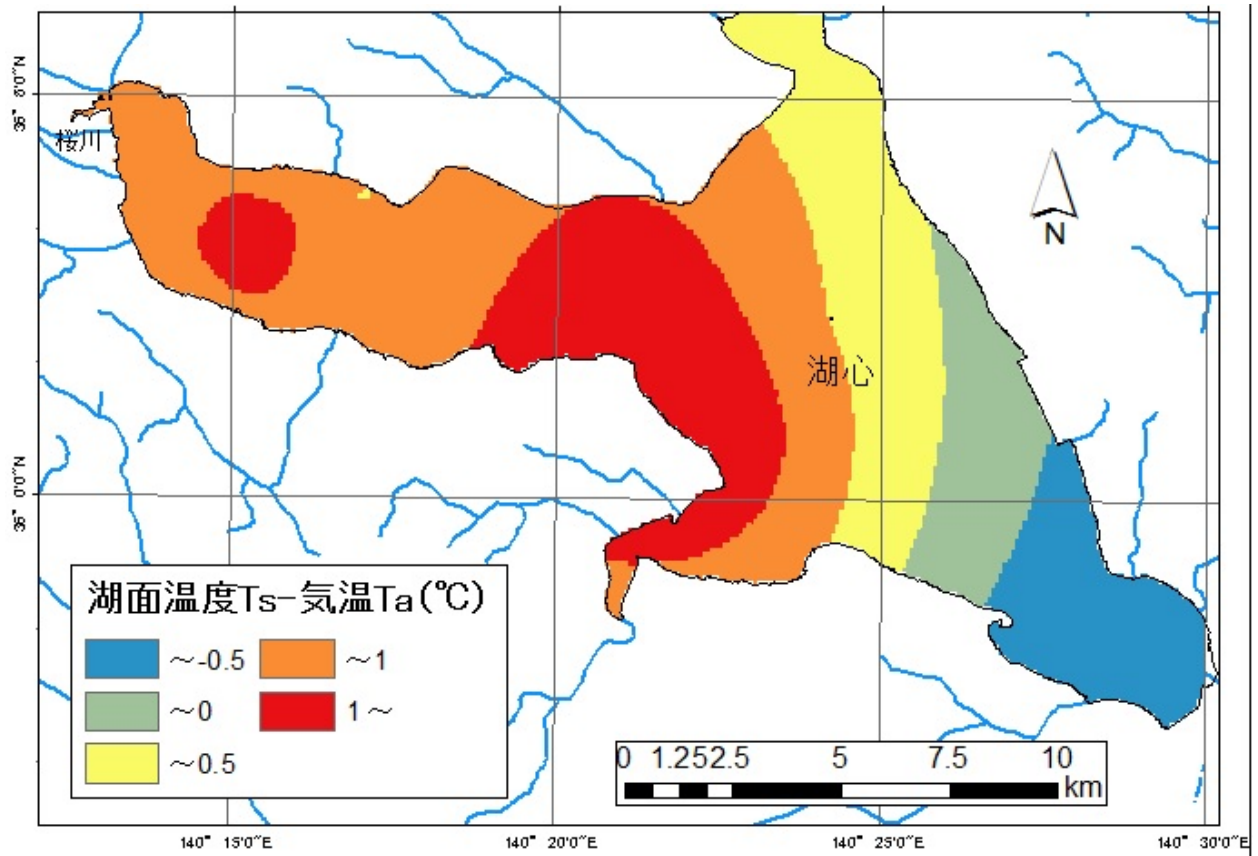


図 13 T_s - T_a 分布図 (10/31)

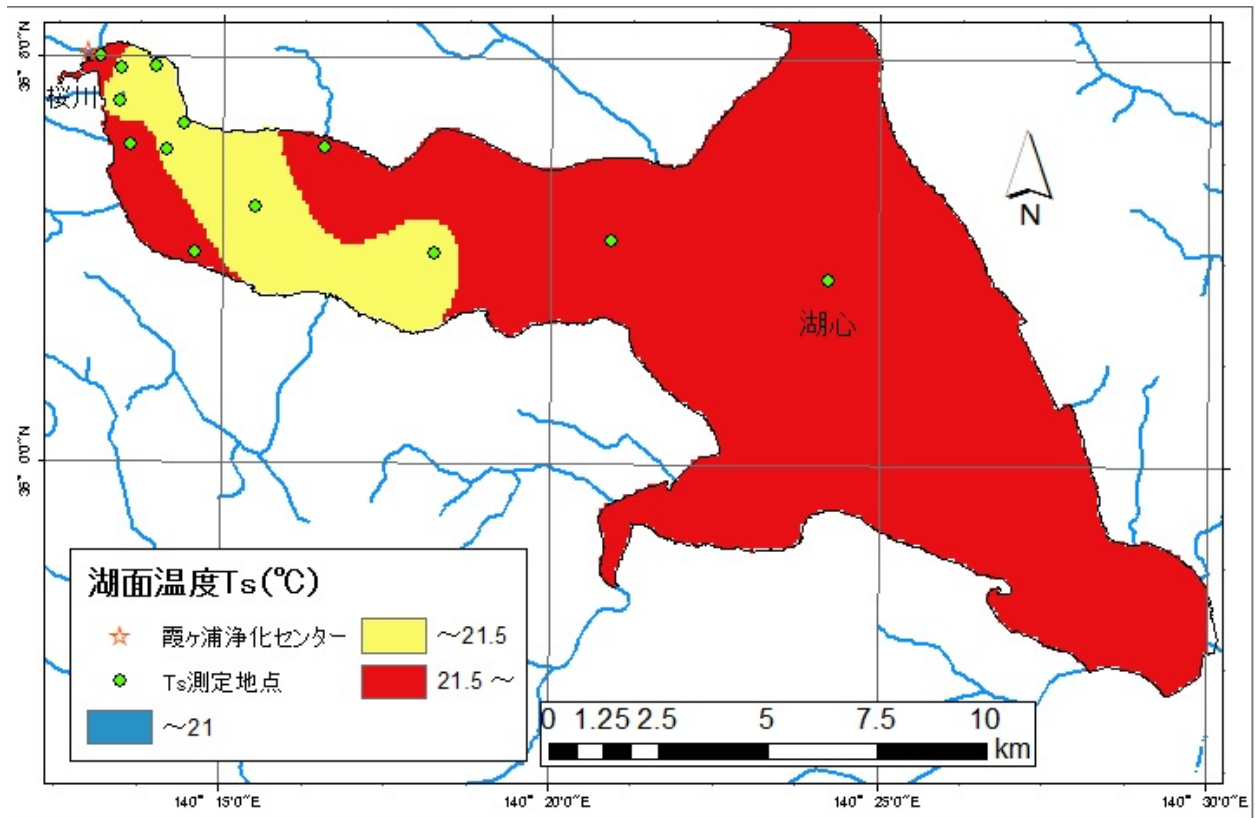


図 14 T_s 分布図 (10/9)

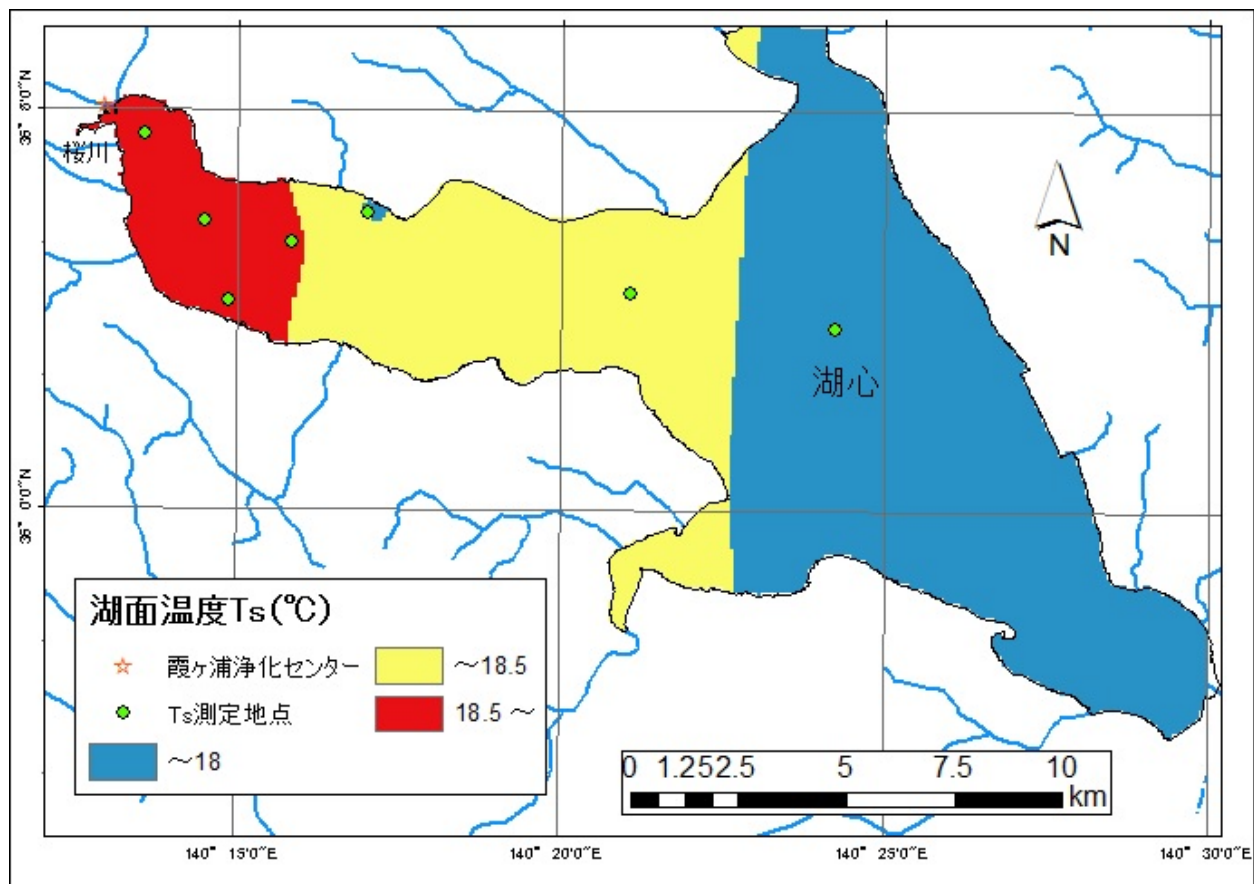


図 15 T_s 分布図 (10/31)

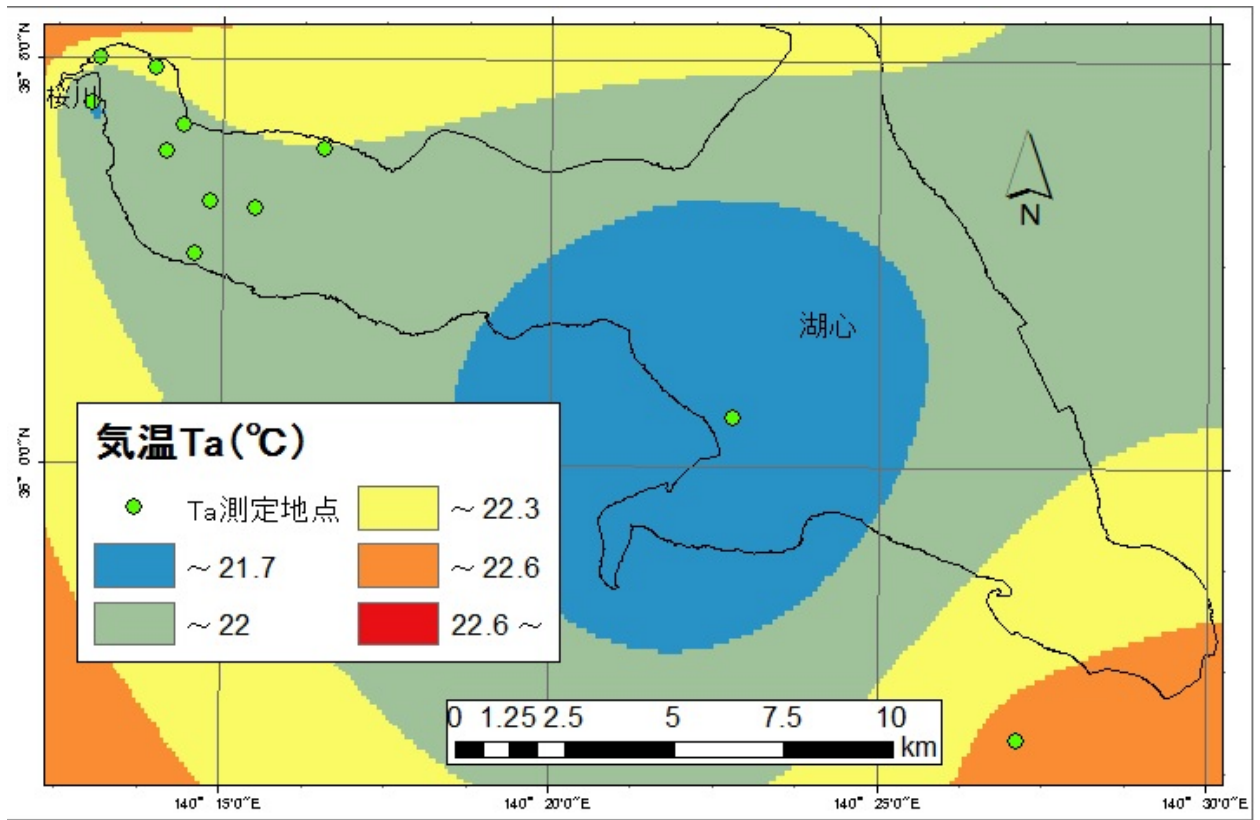


图 16 T_a 分布图 (10/9)

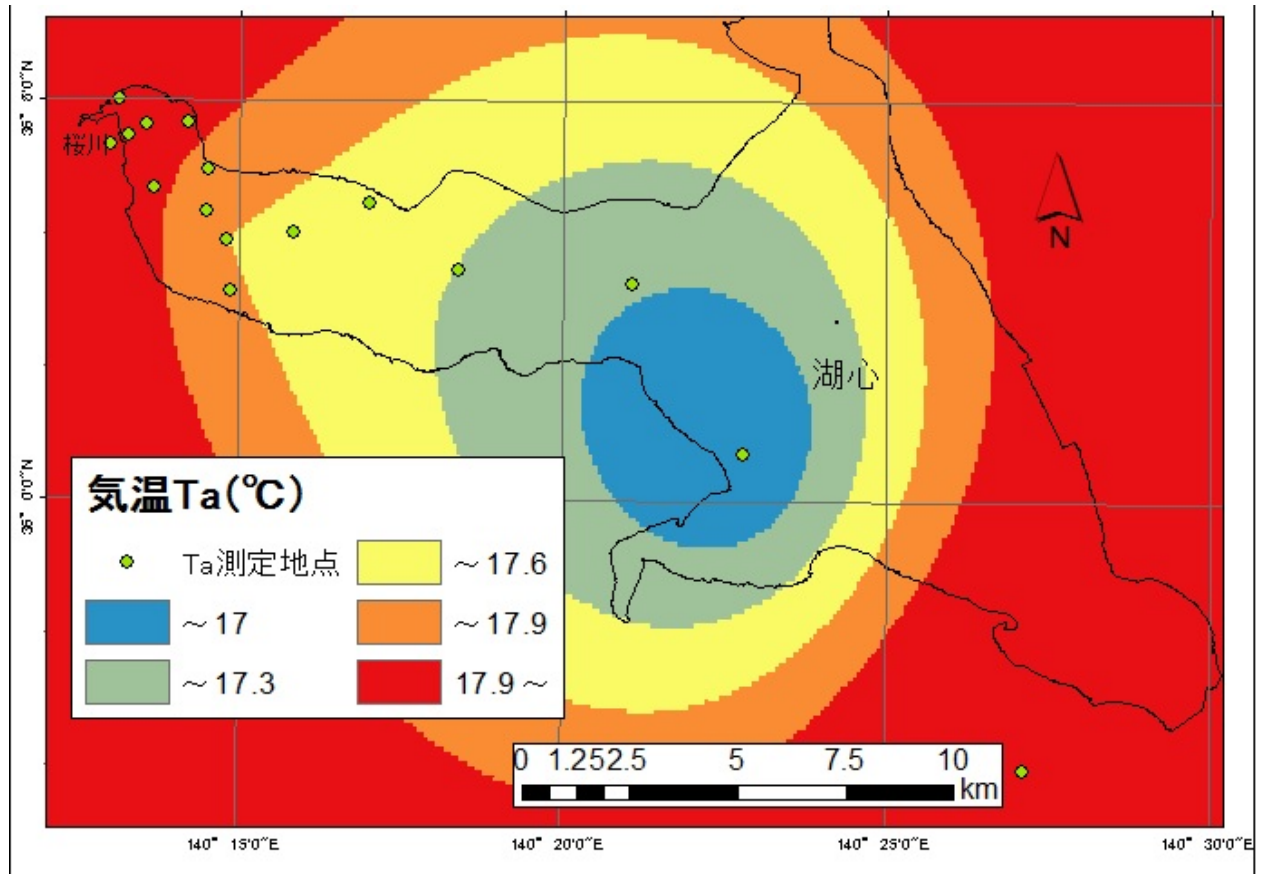


图 17 T_a 分布图 (10/31)

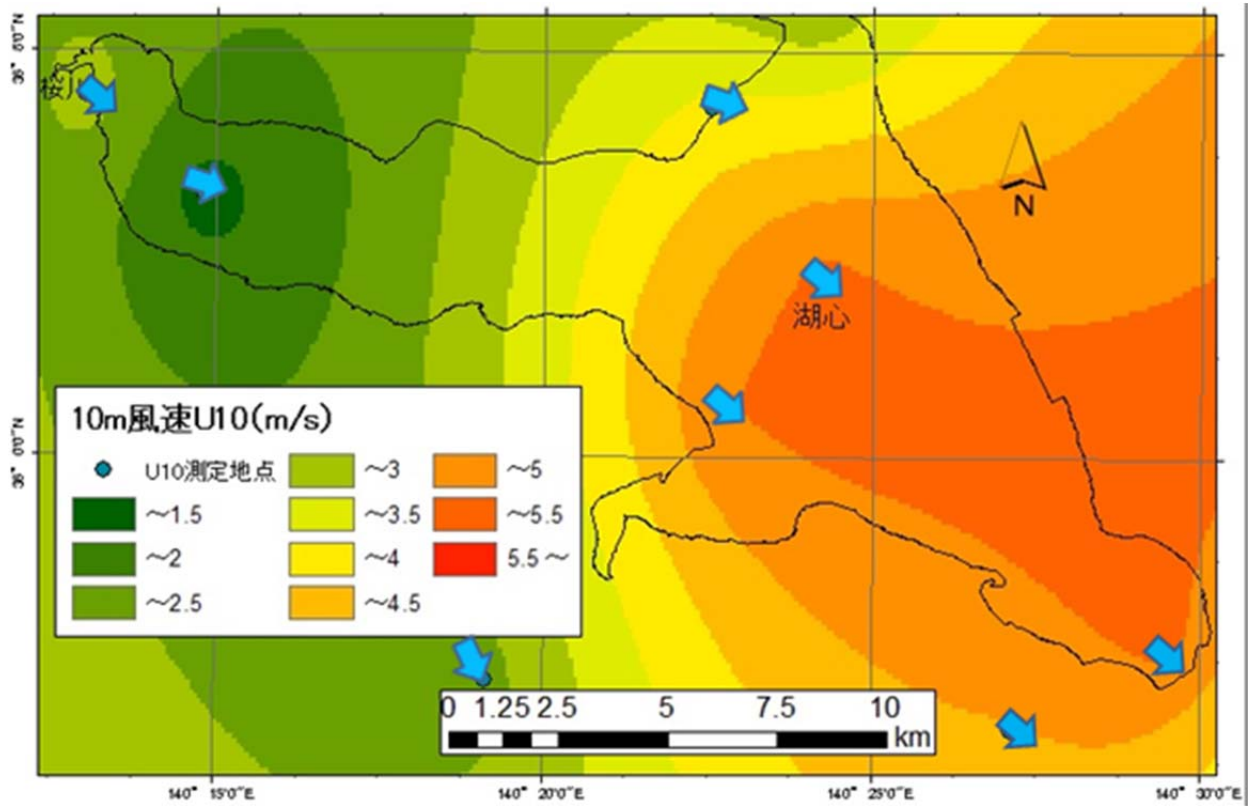


図 18 風速分布図 (10/9)

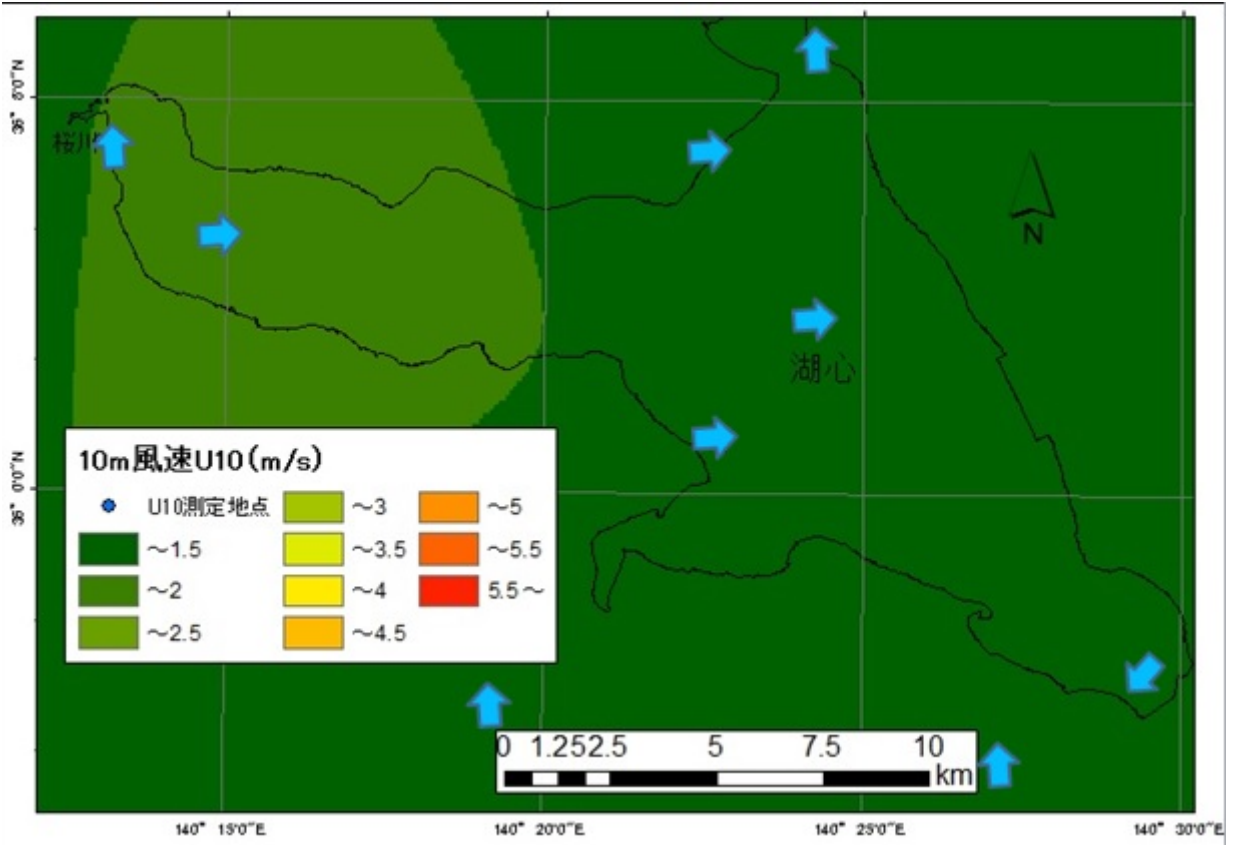


图 19 風速分布図 (10/31)

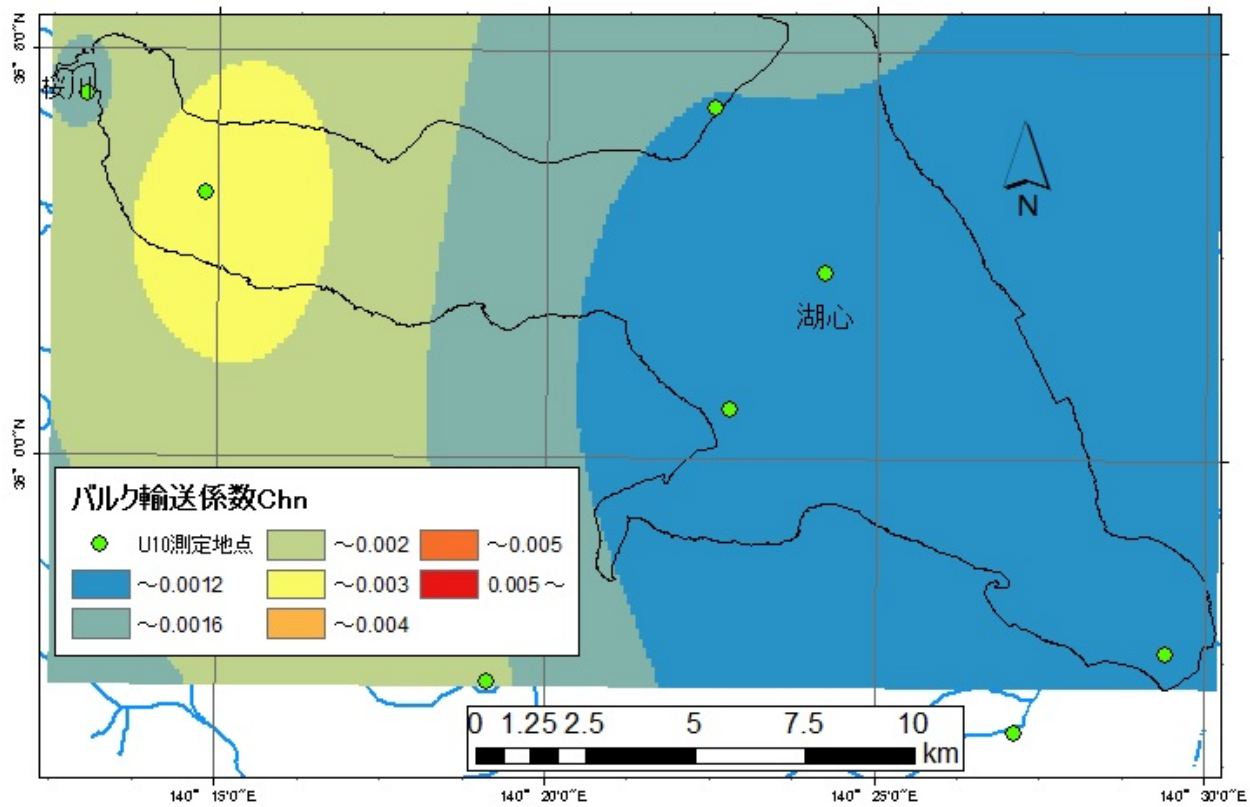


図 20 Ch_n 分布図 (10/9)

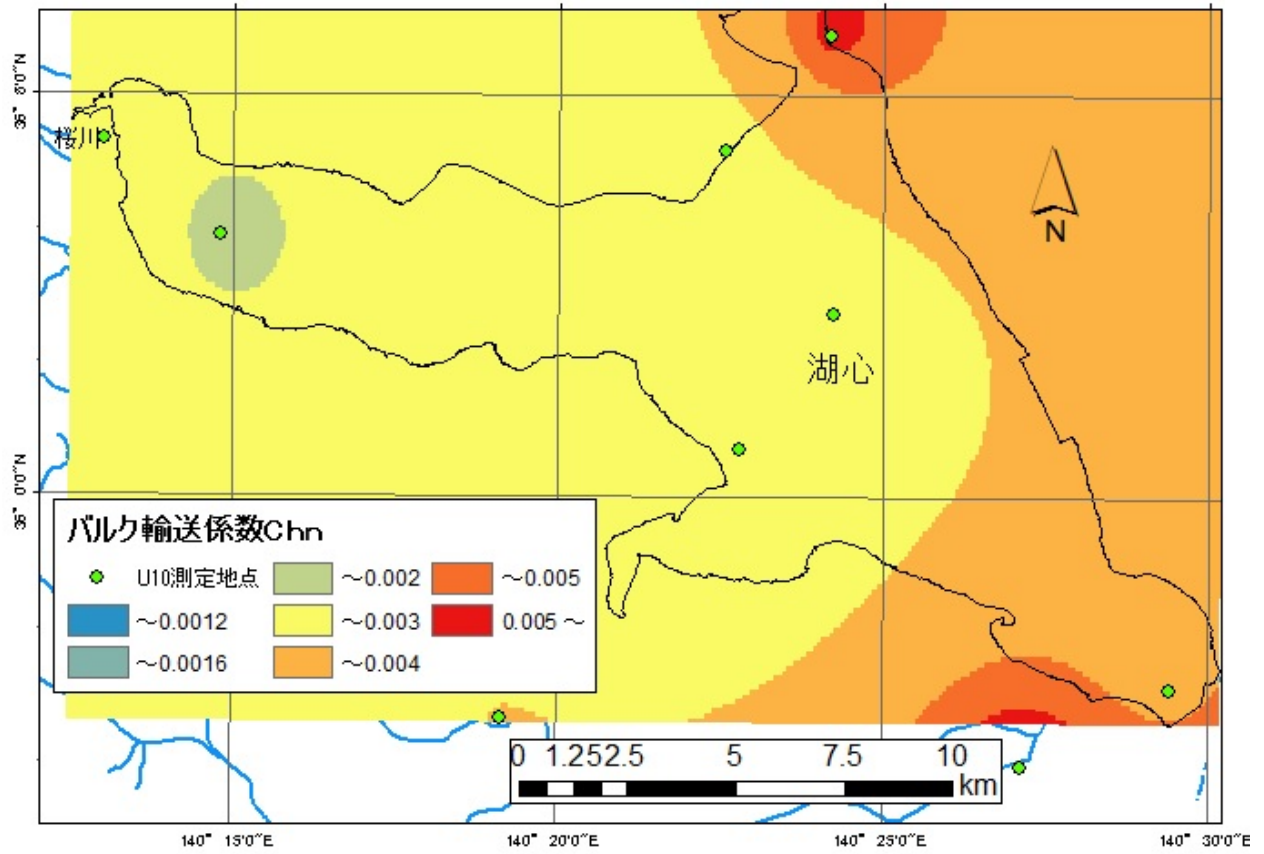


図 21 Ch_n 分布図 (10/31)

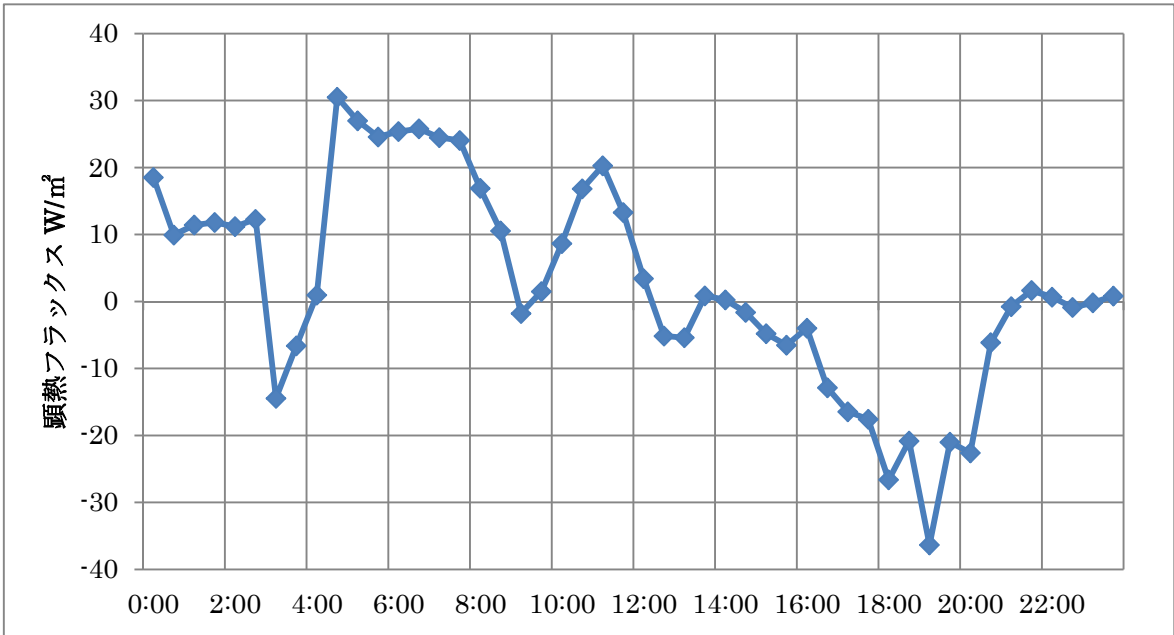


図 22 湖心顕熱フラックス時系列 (10/9)

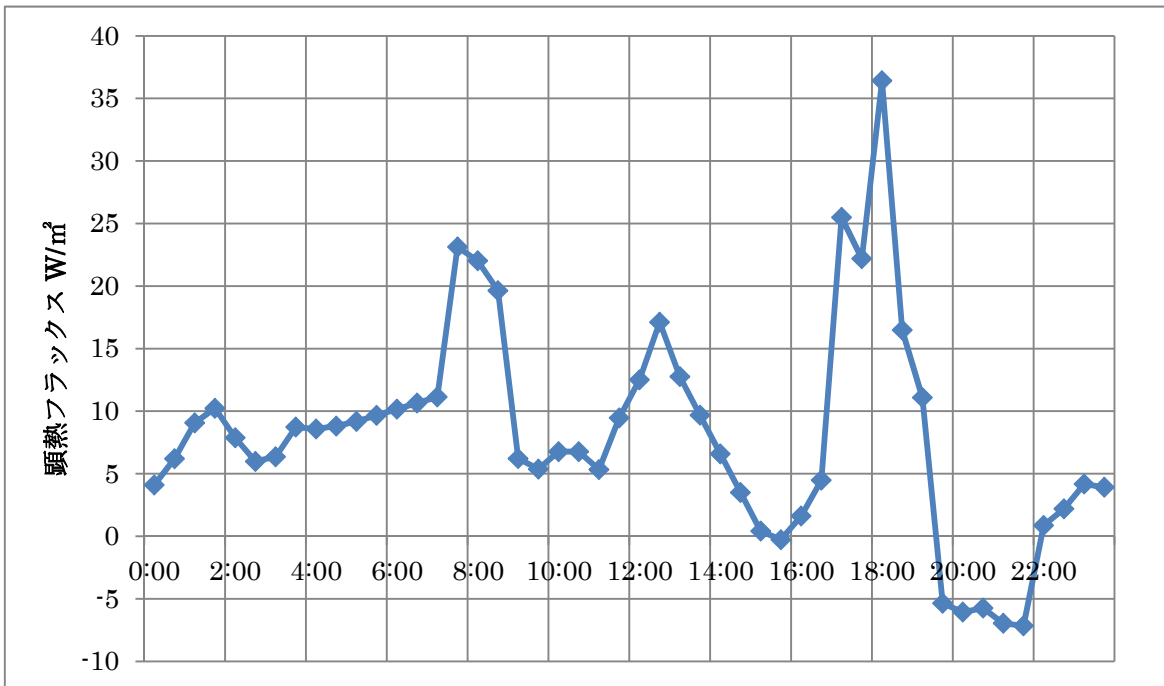


図 23 湖心顕熱フラックス時系列 (10/31)

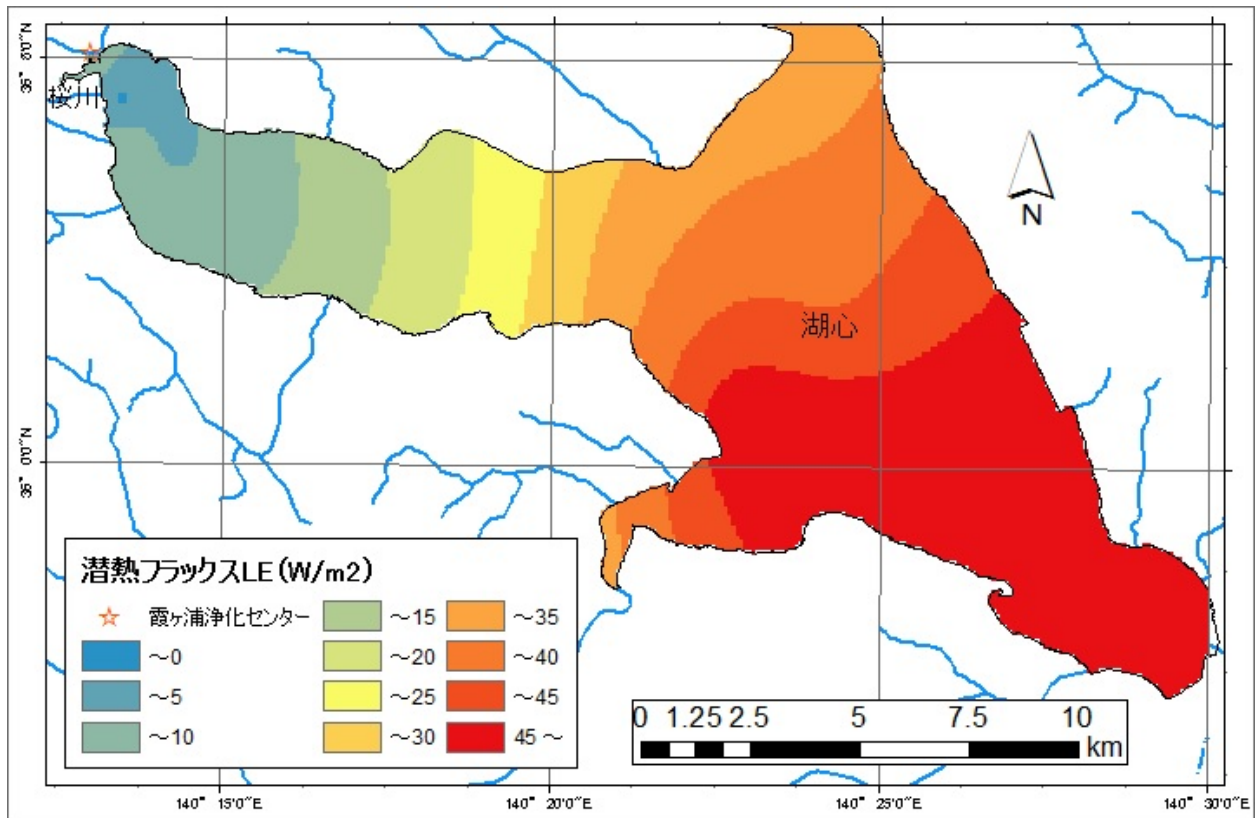


図 24 潜熱フラックス分布図 (10/9)

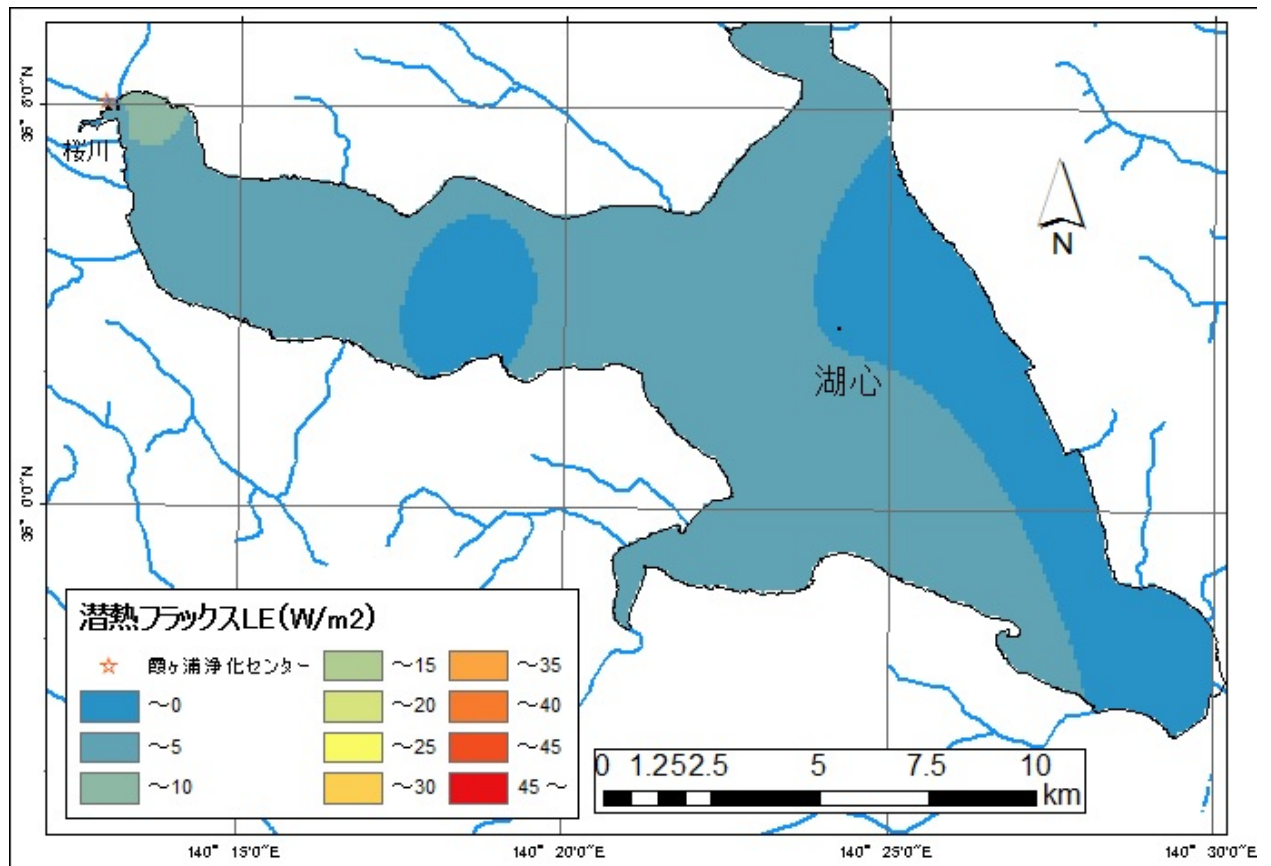


図 25 潜熱フラックス分布図 (10/31)

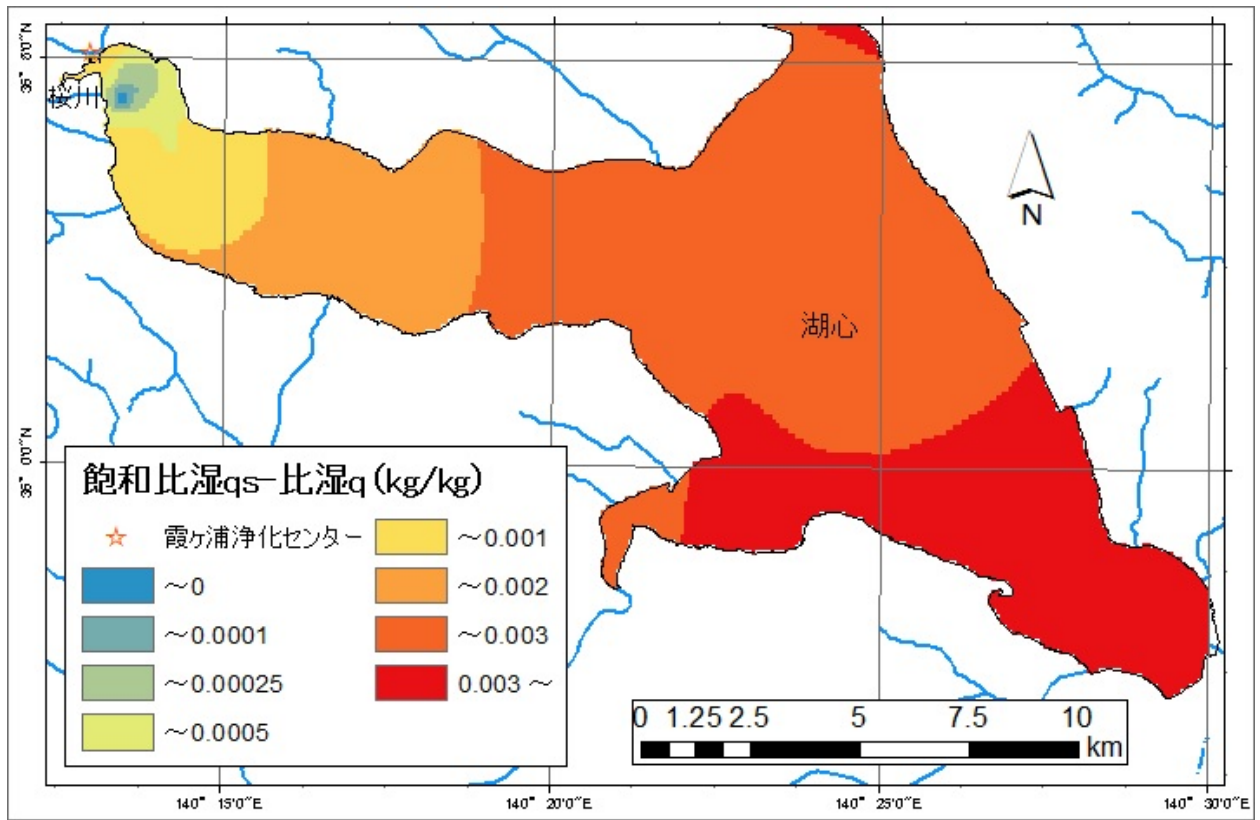


図 26 q_s - q 分布図 (10/9)

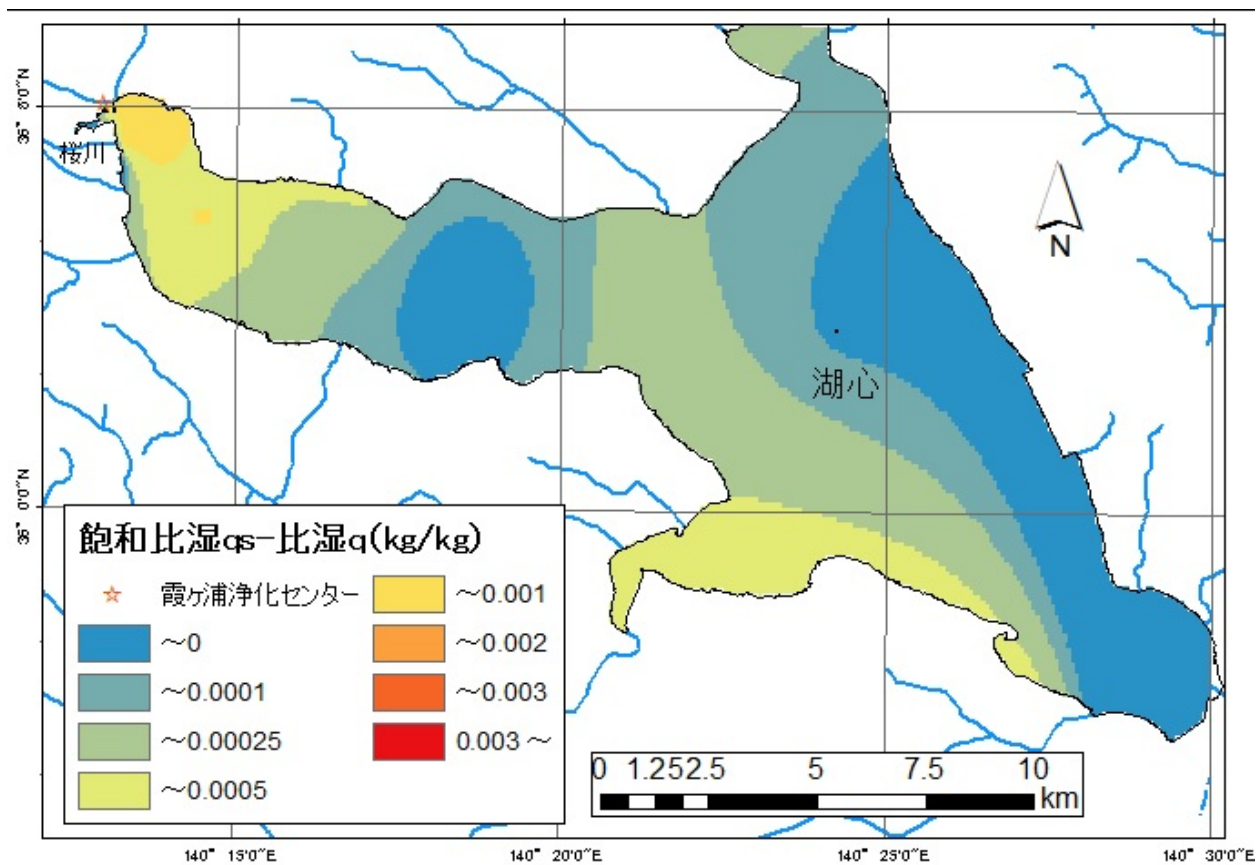


図 27 q_s - q 分布図 (10/31)

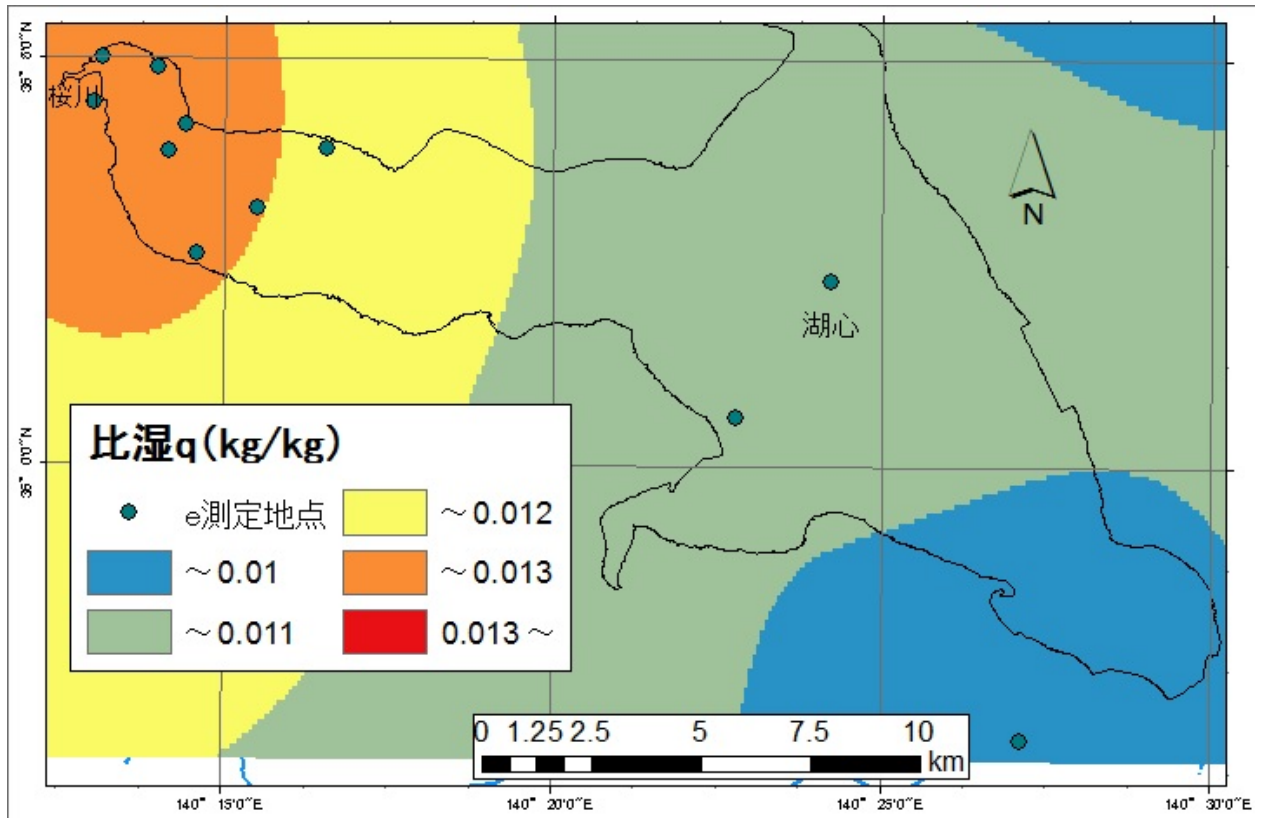


图 28 qs 分布图 (10/9)

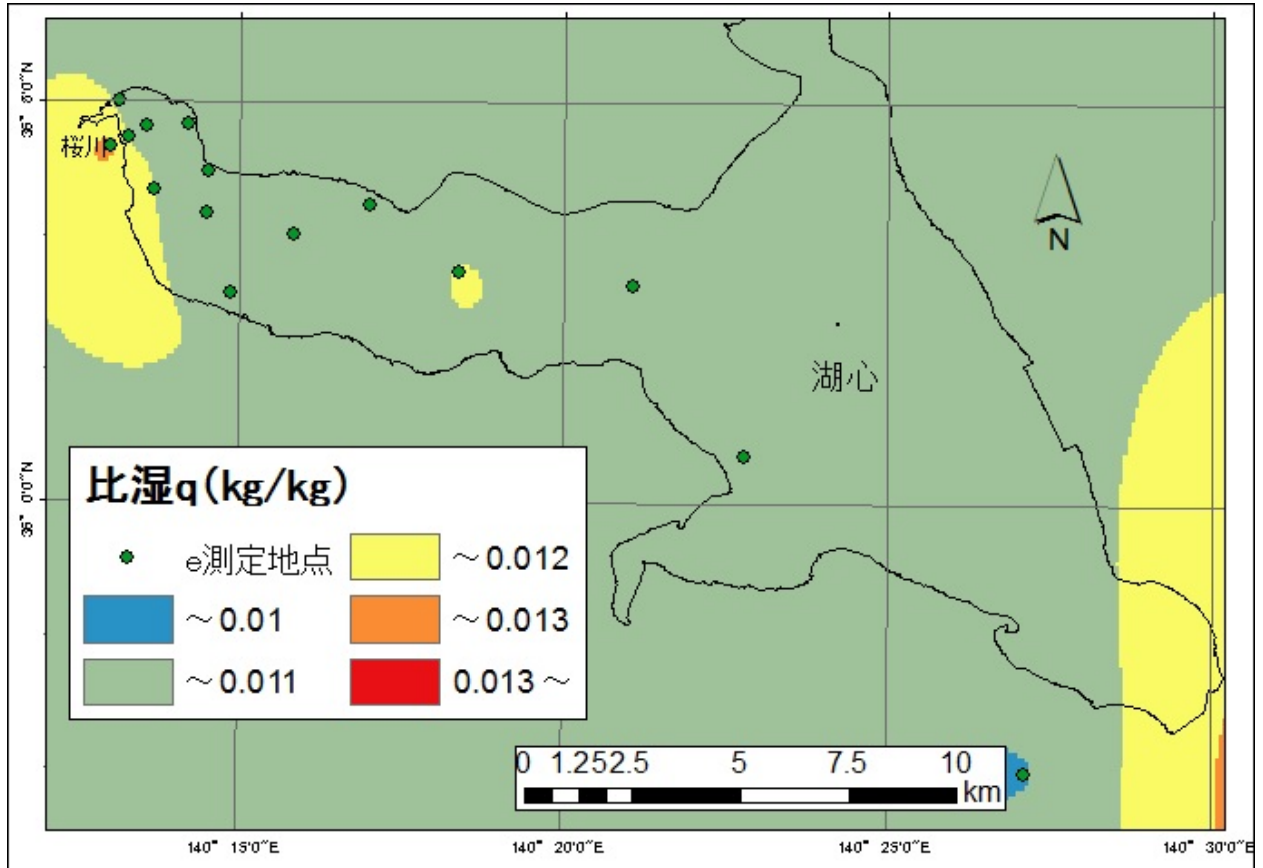


図 29 qs 分布図 (10/31)

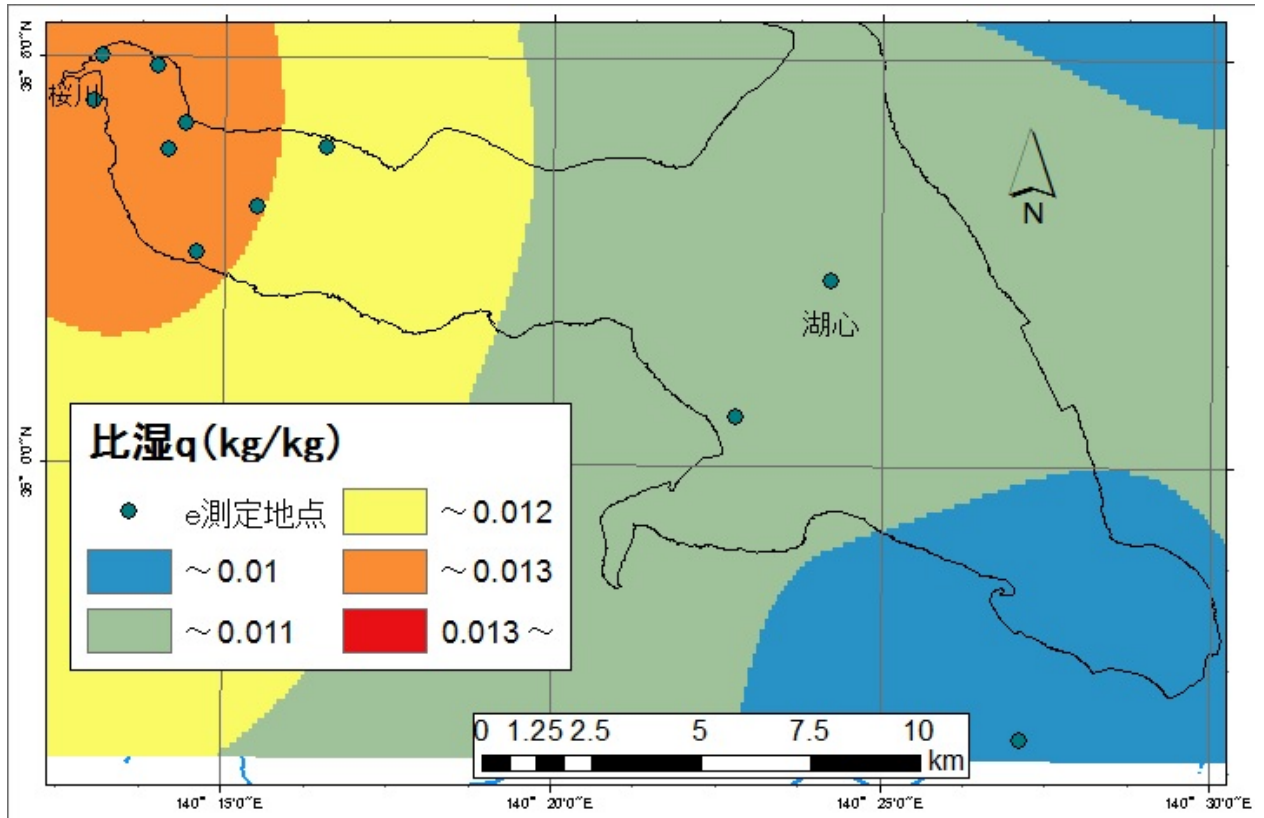


图 30 q 分布图 (10/9)

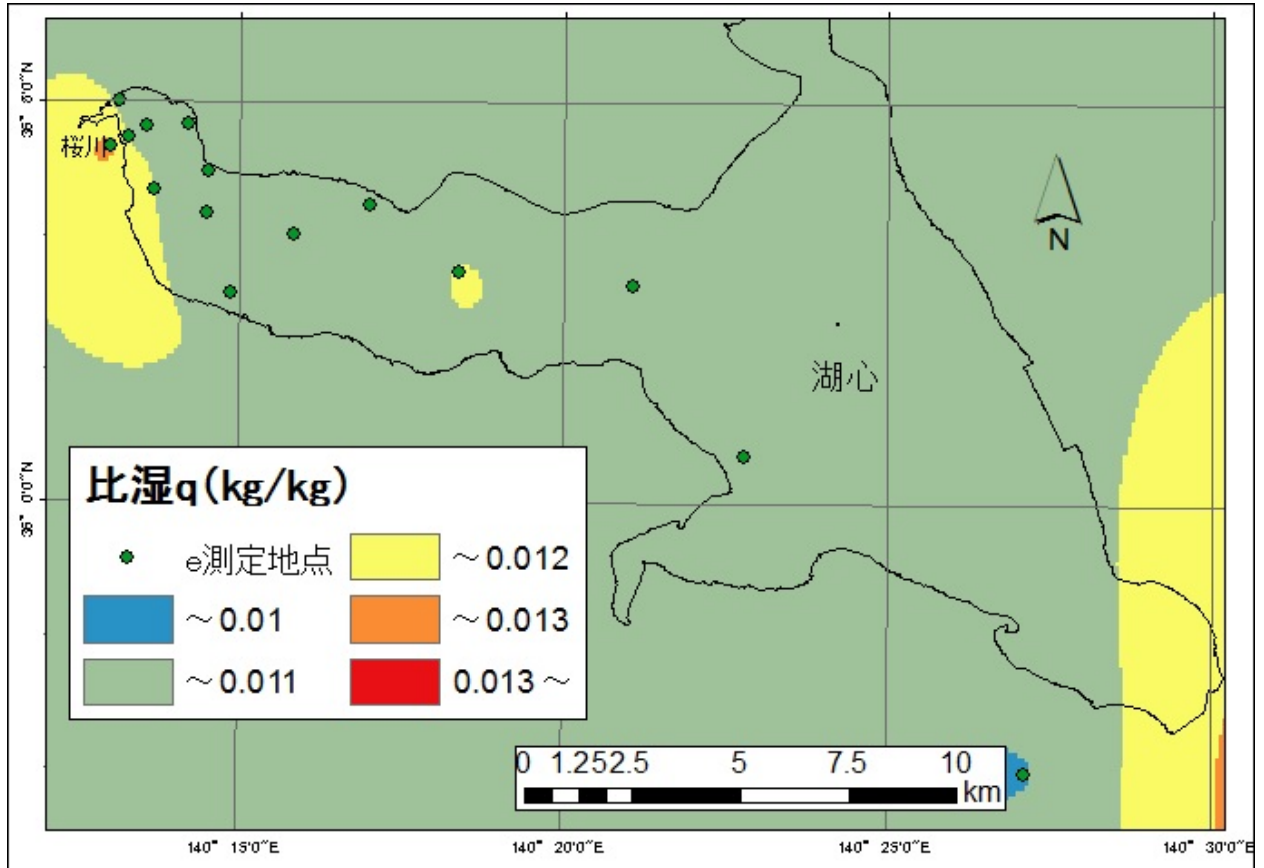


图 31 q 分布图 (10/31)

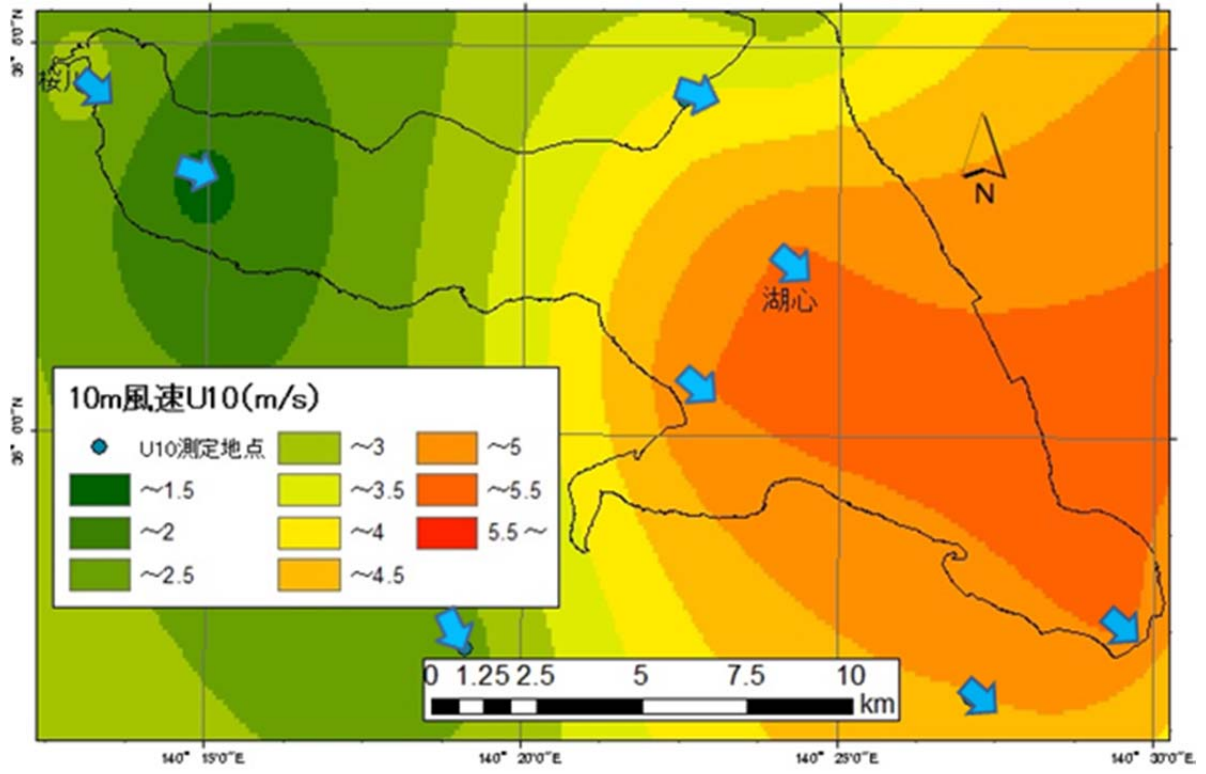


図 32 風速分布図 (10/9)

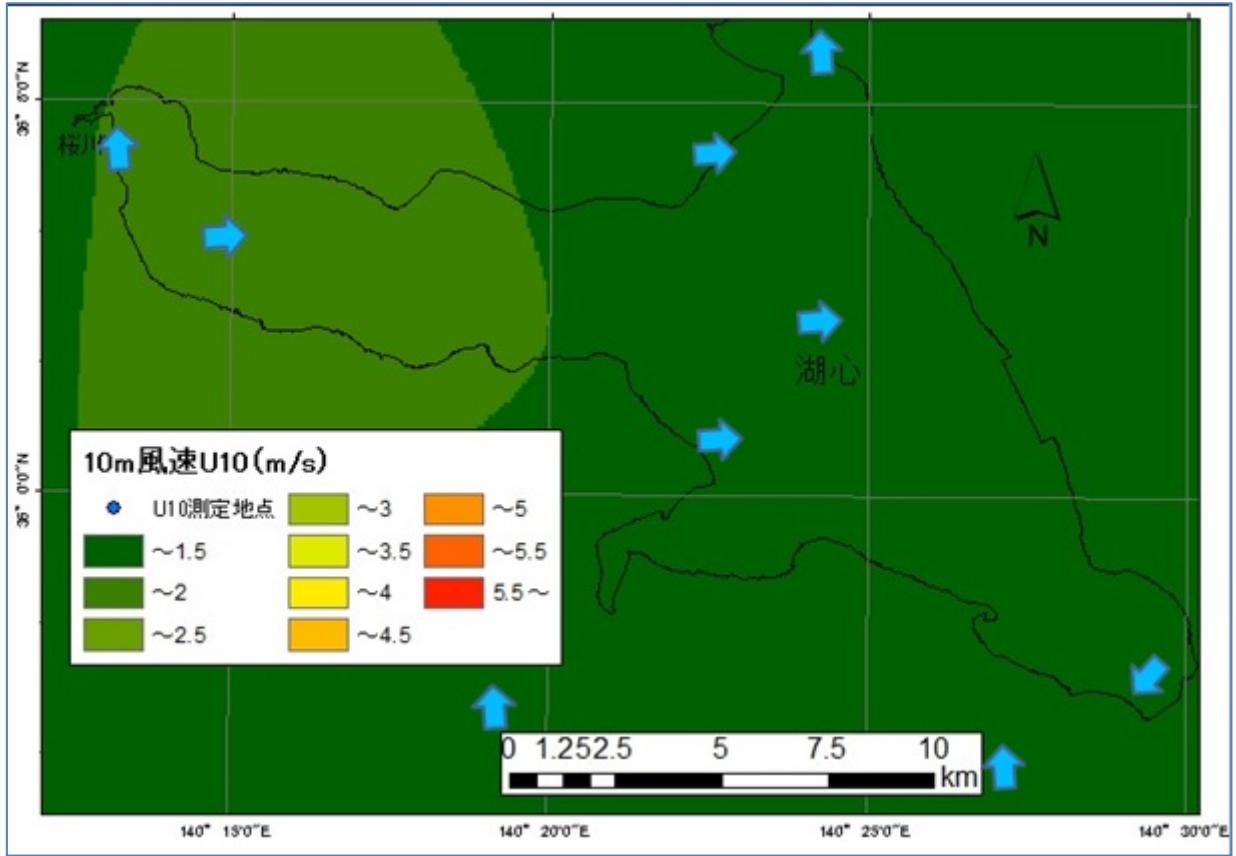


图 33 風速分布図 (10/31)

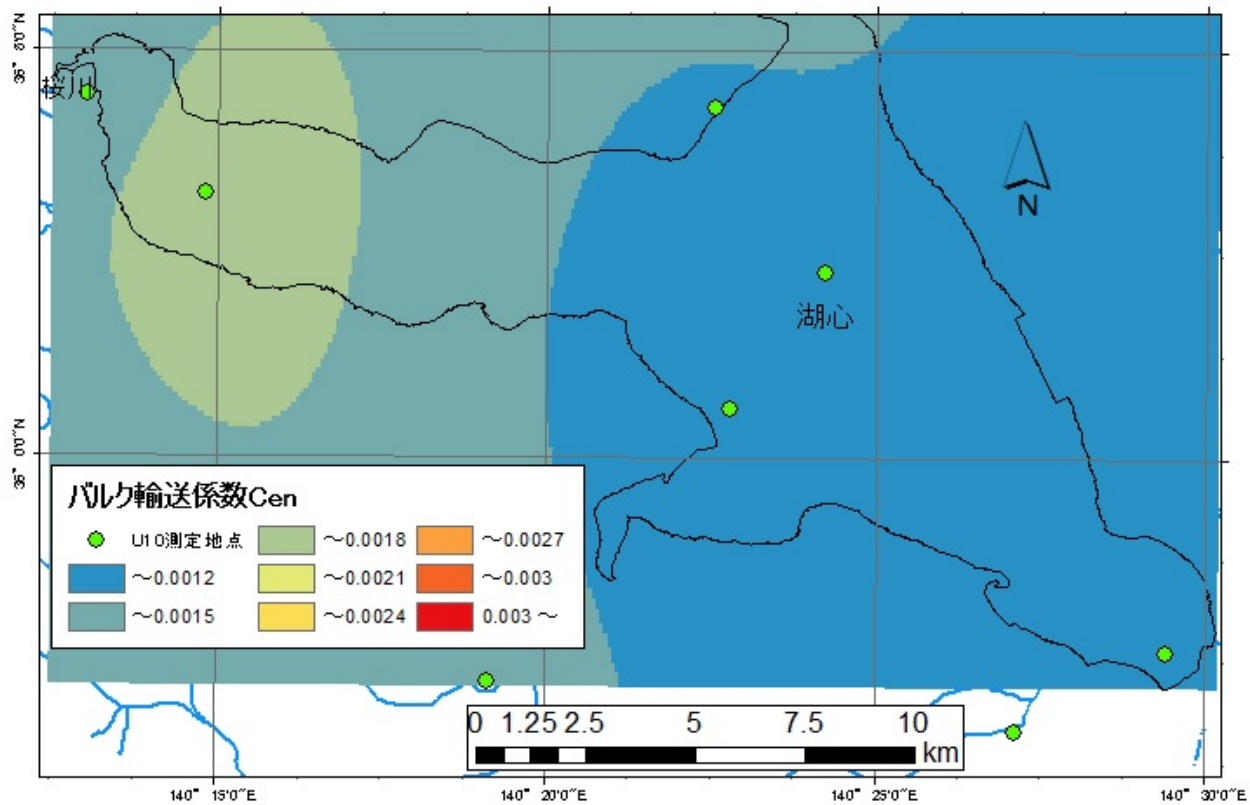


図 34 C_{en} 分布図 (10/9)

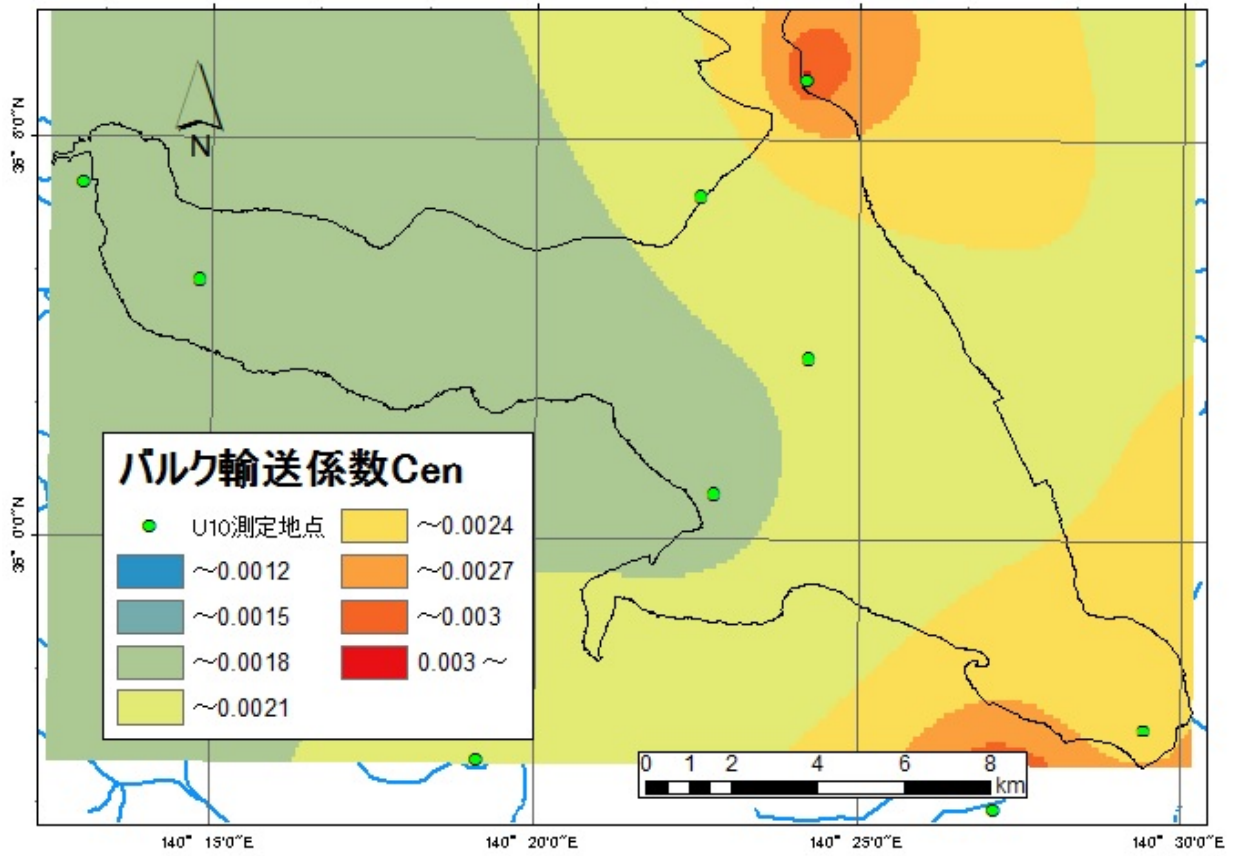


図 35 C_{en} 分布図 (10/31)

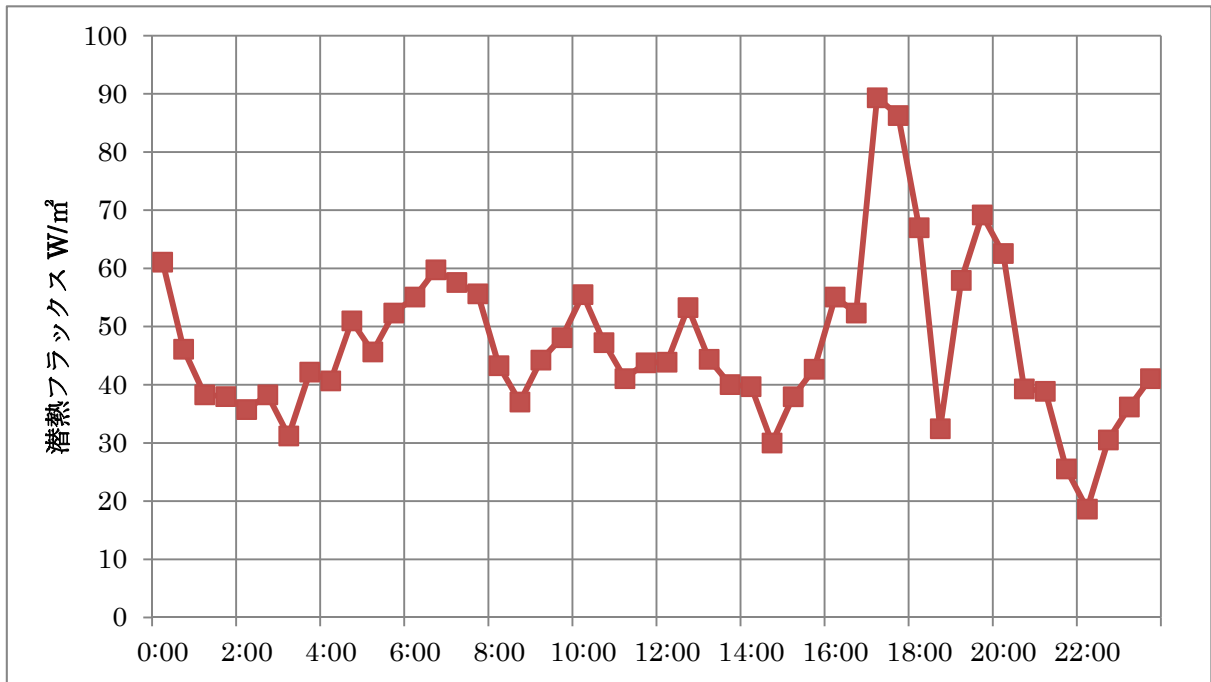


図 36 湖心潜熱フラックス時系列 (10/9)

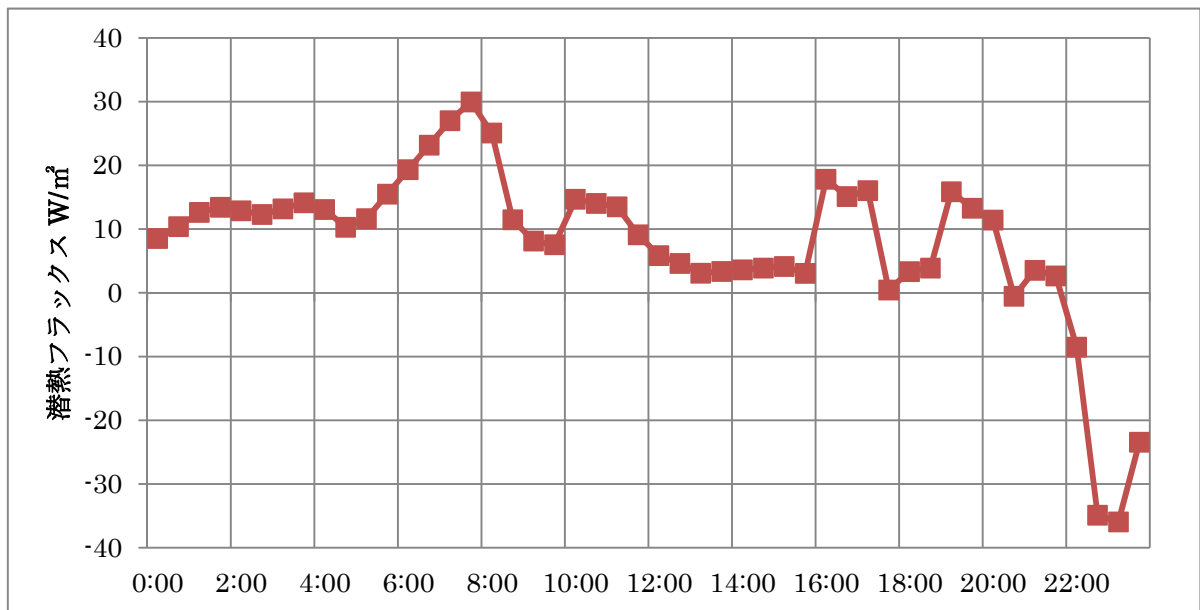


図 37 湖心潜熱フラックス時系列 (10/31)

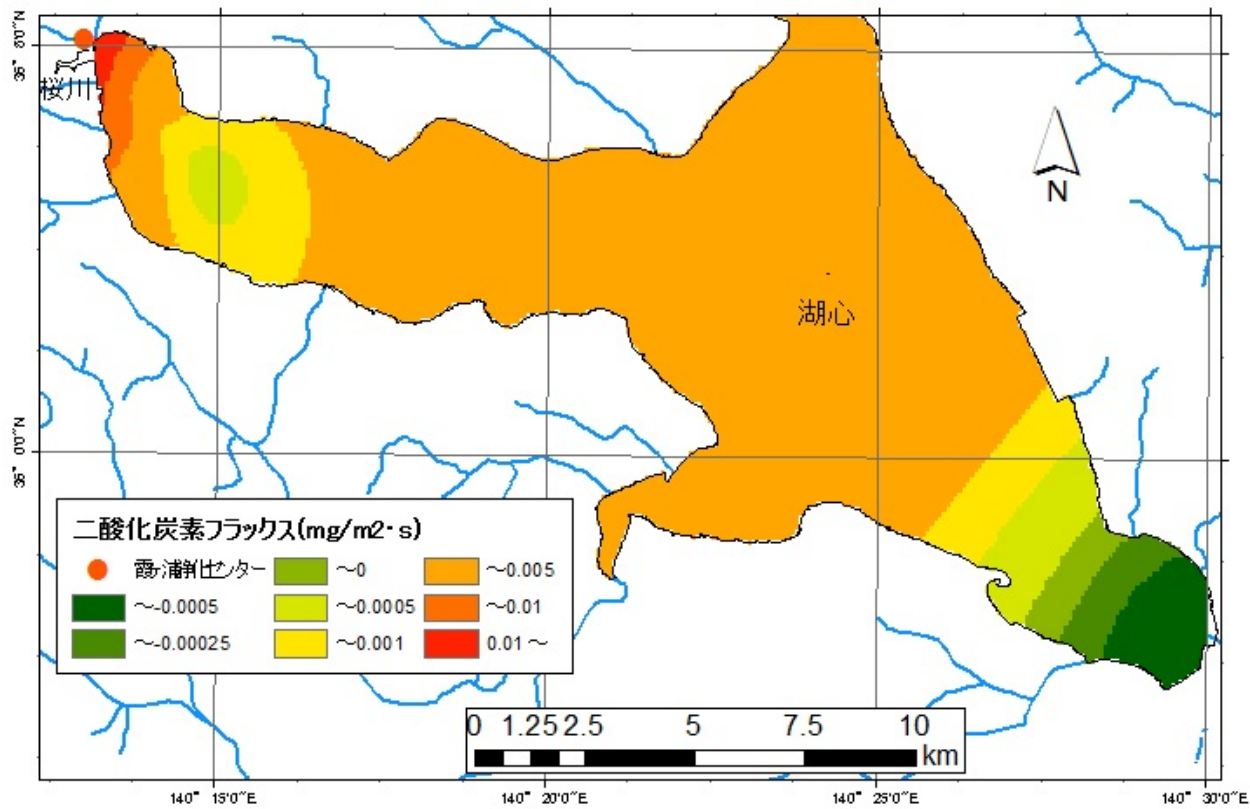


図 38 二酸化炭素フラックス分布図 (10/9)

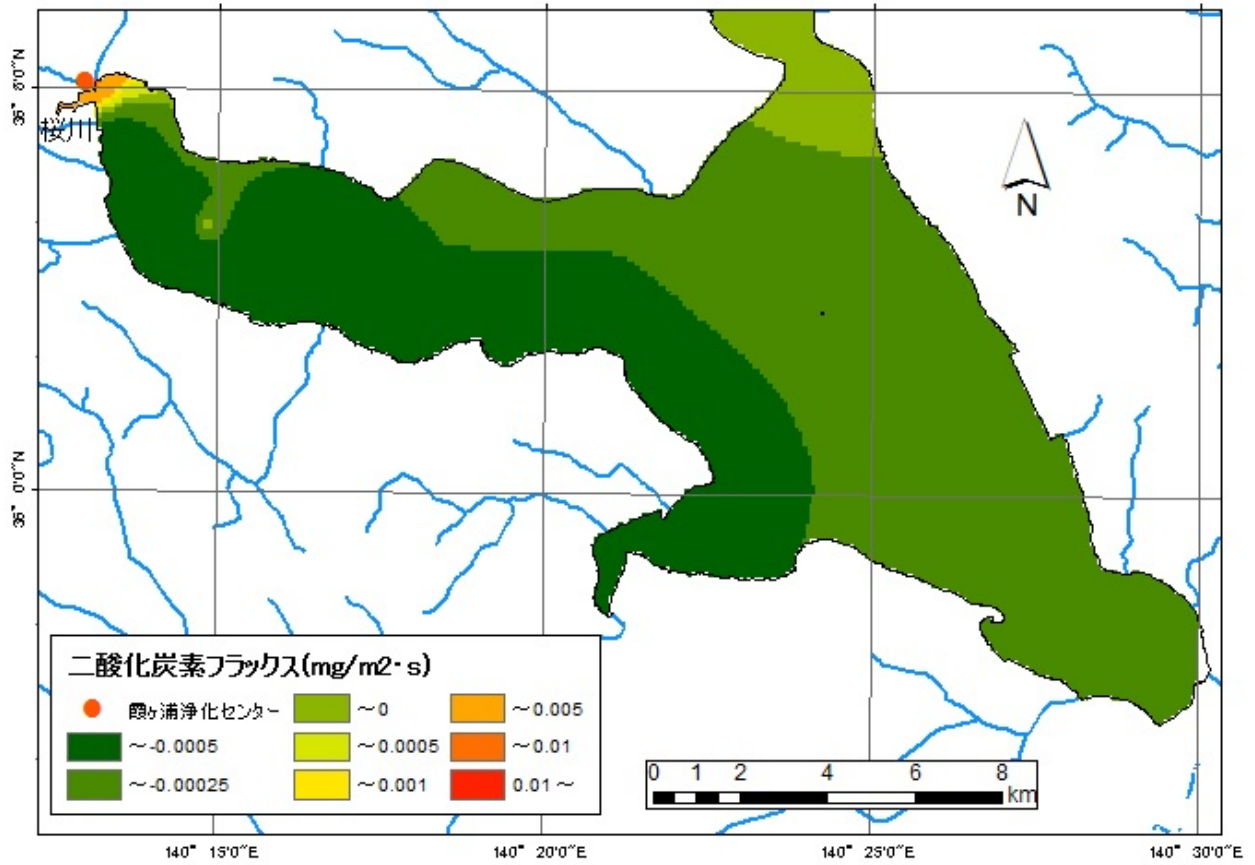


図 39 二酸化炭素フラックス分布図 (10/31)

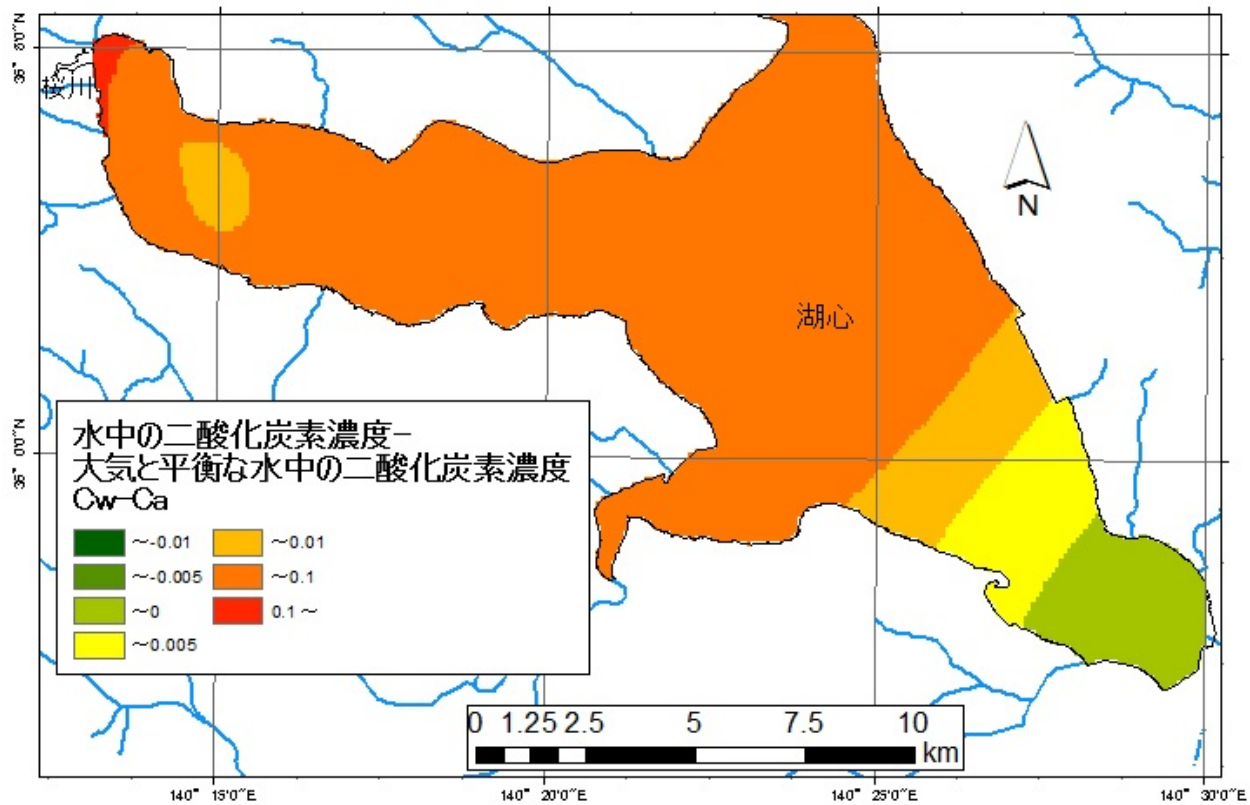


図 40 $C_w - C_a$ 分布図 (10/9)

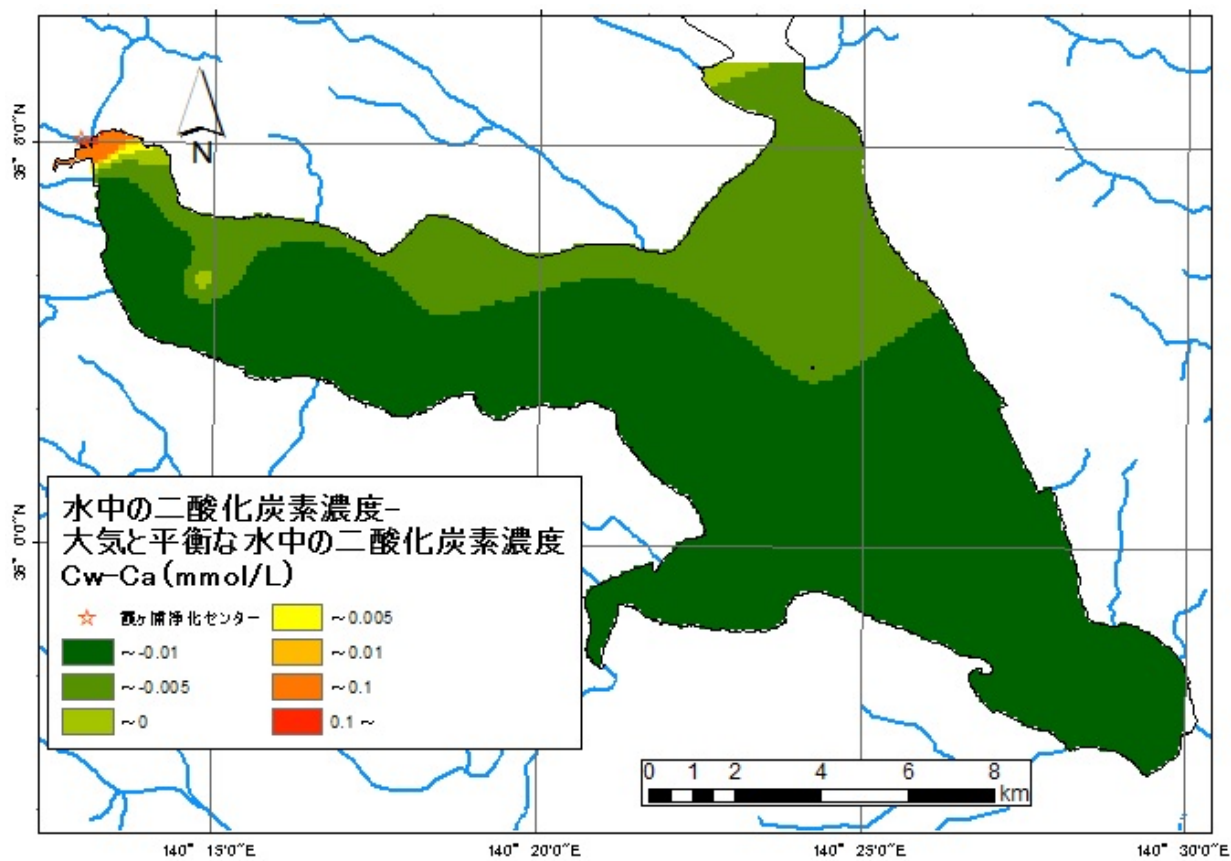


図 41 C_w-C_a 分布図 (10/31)

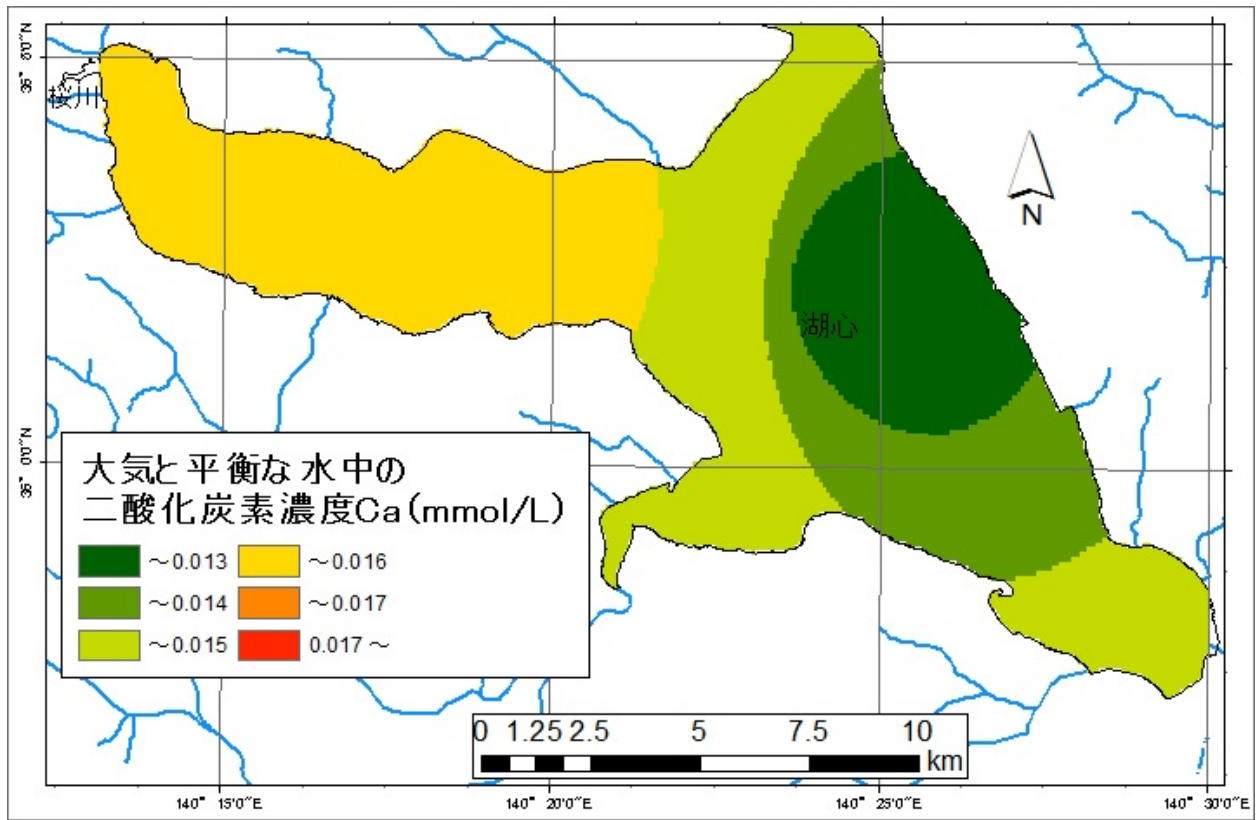


図 42 Ca 分布図 (10/9)

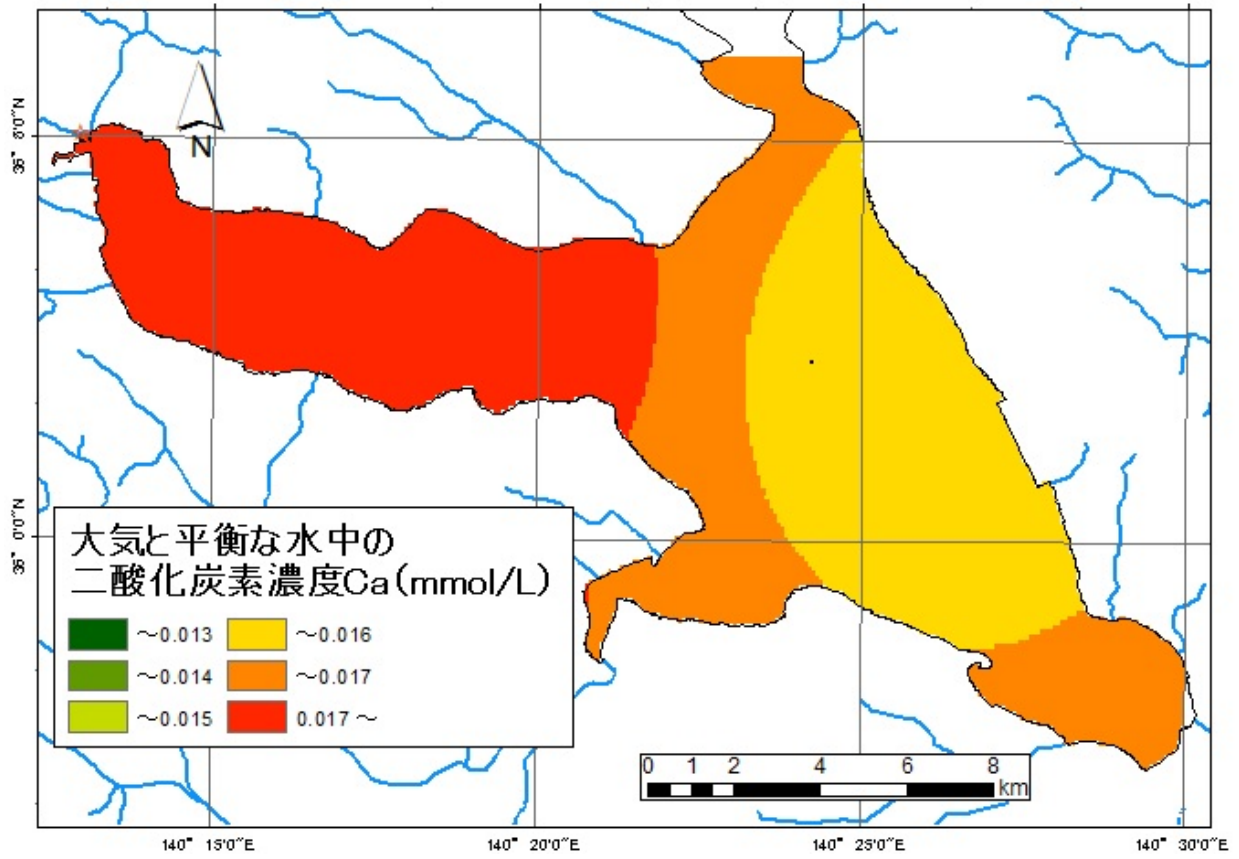


図 43 Ca 分布図 (10/31)

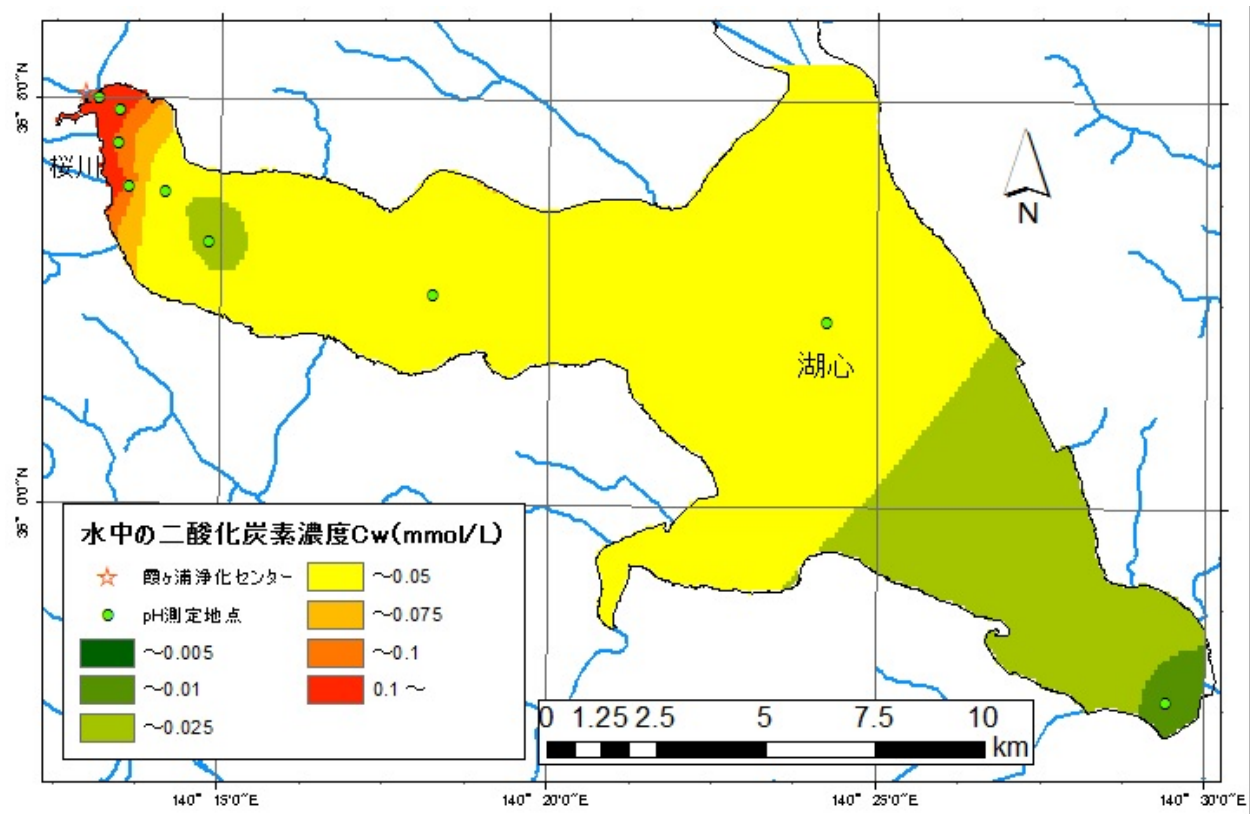


図 44 C_w 分布図 (10/9)

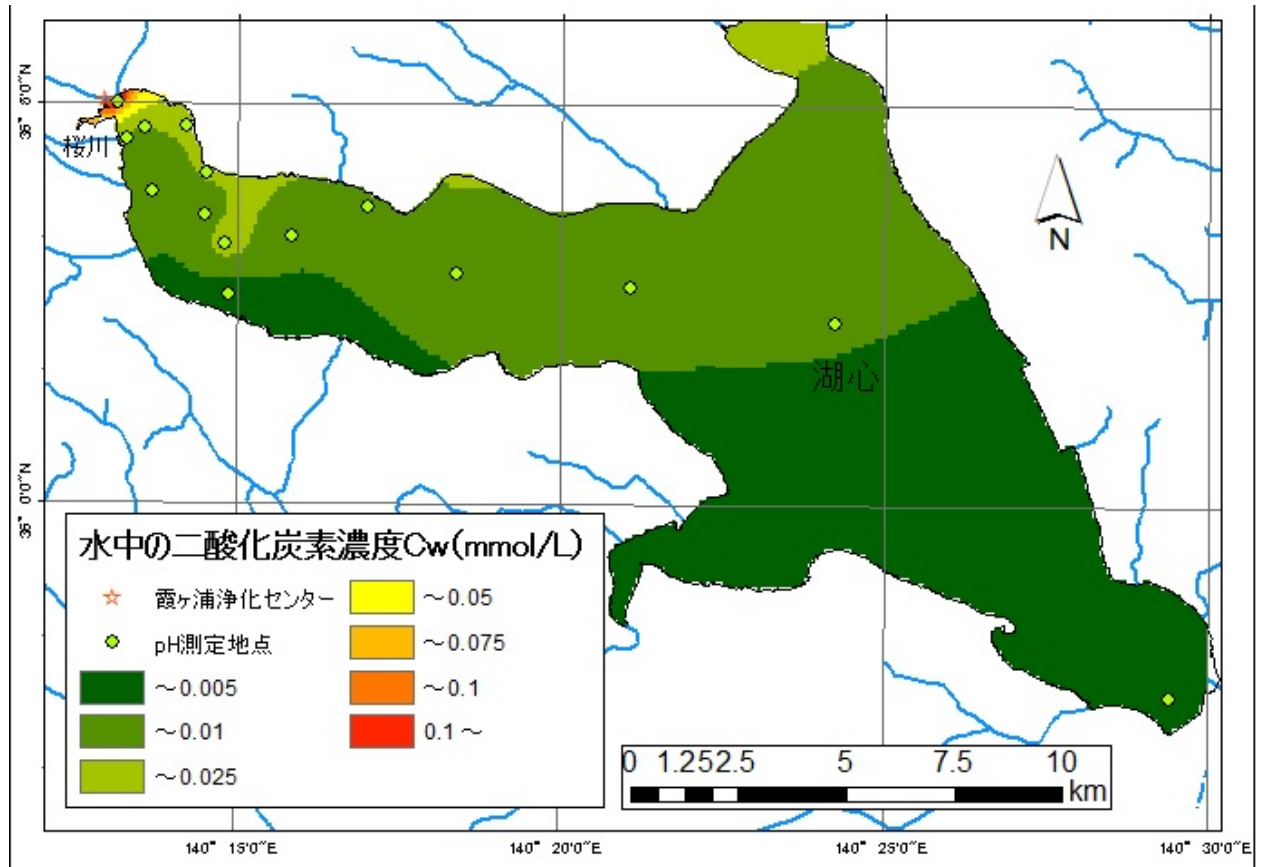


図 45 C_w 分布図 (10/31)

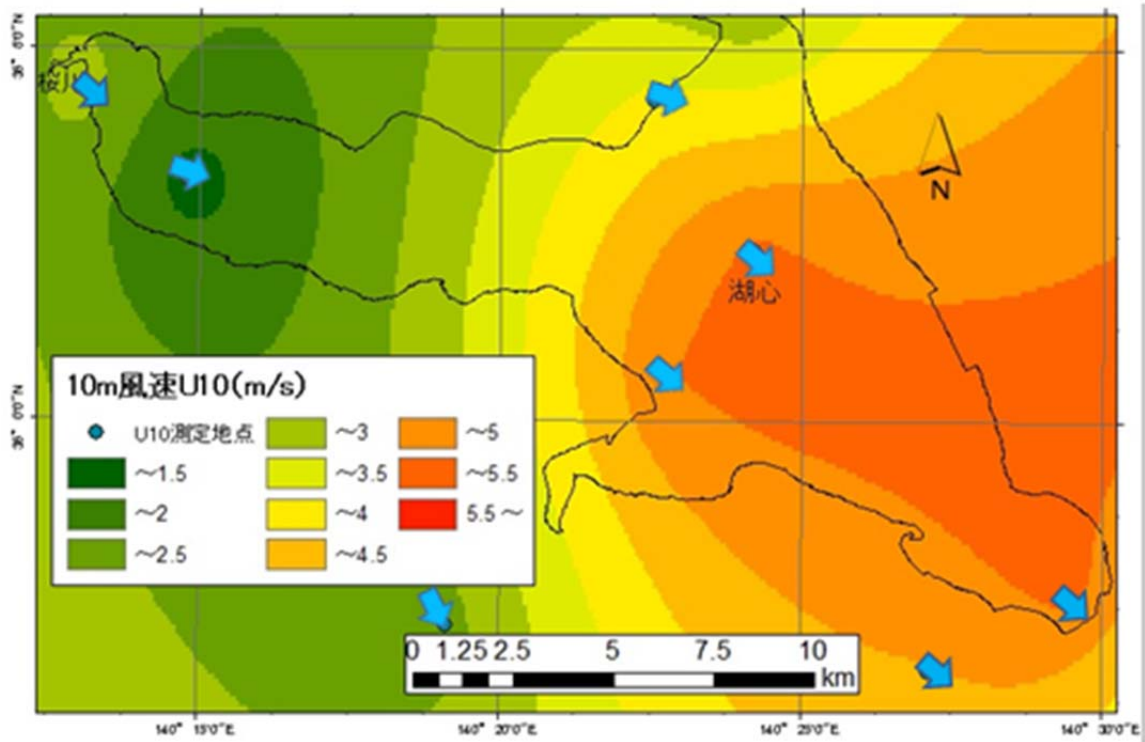


図 46 風速分布図 (10/9)

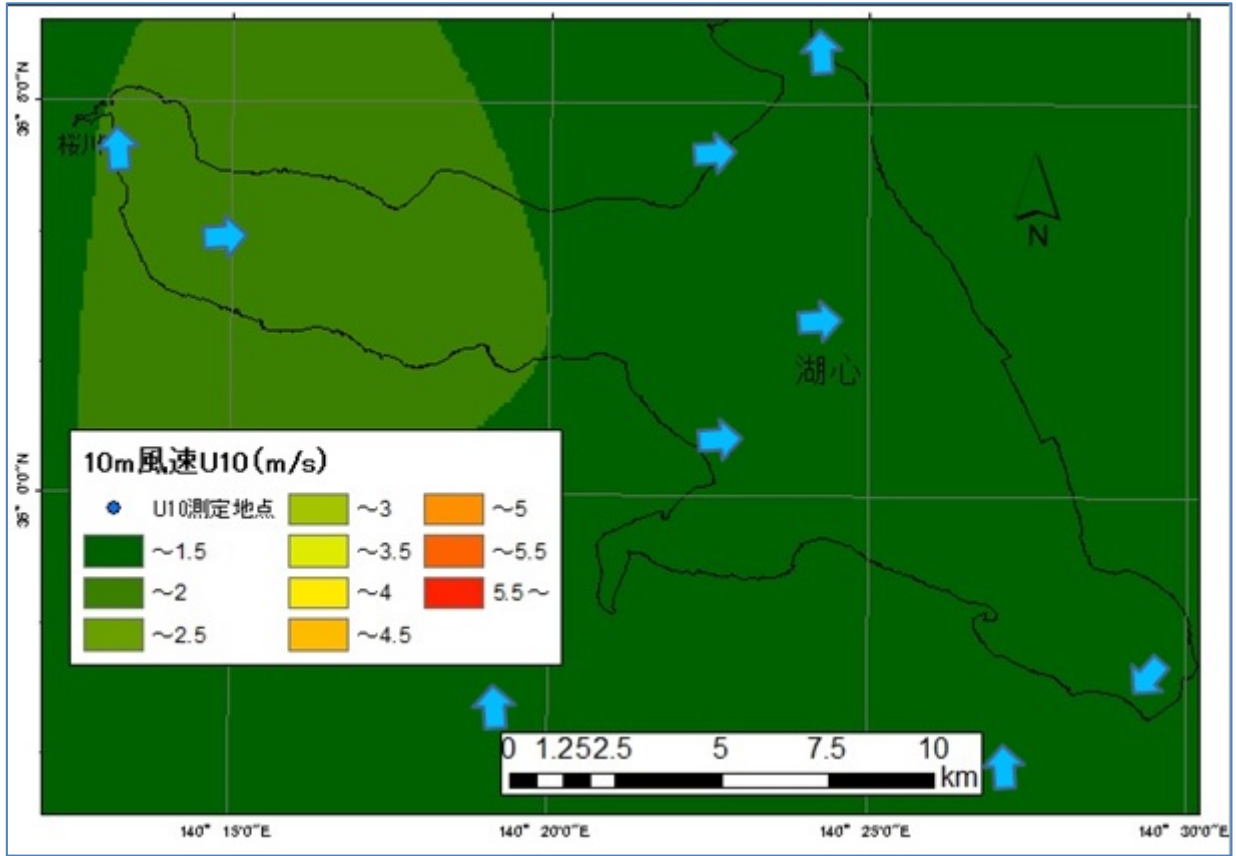


图 47 風速分布図 (10/31)

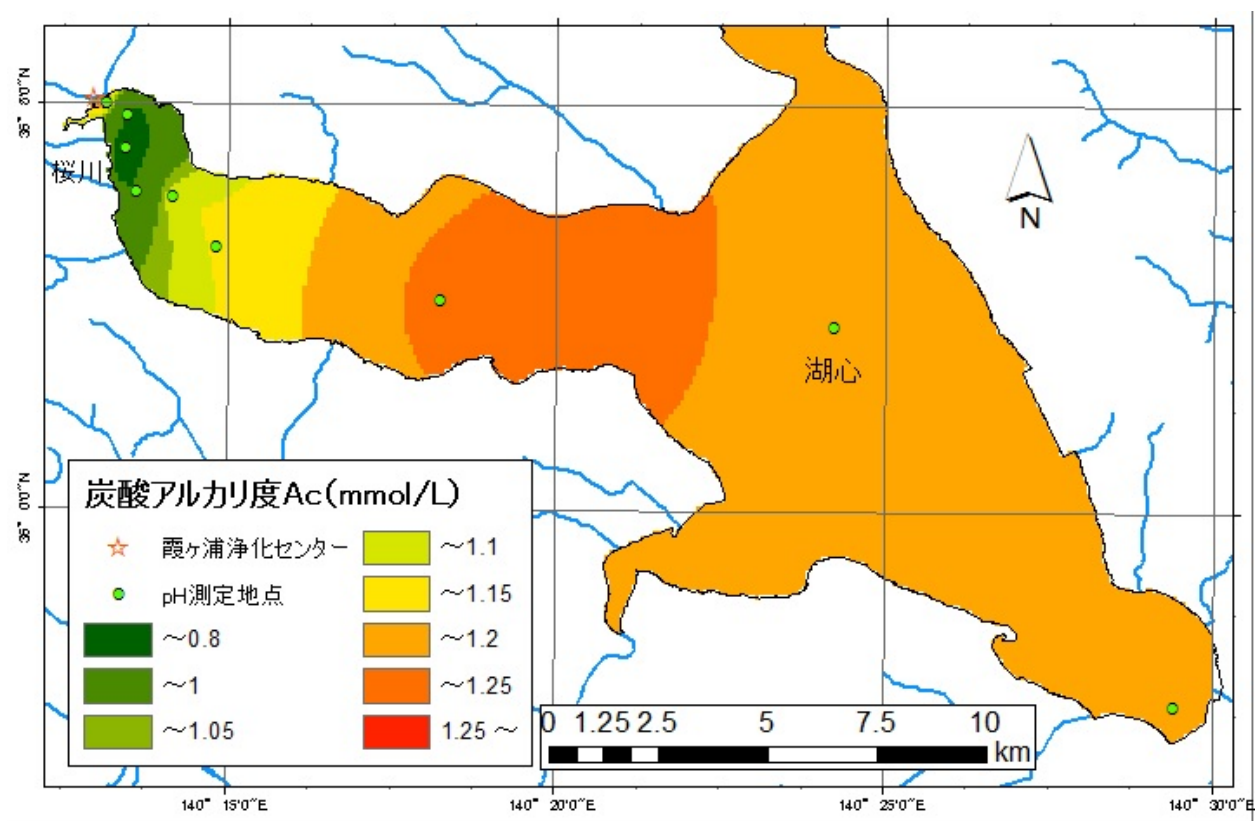


図 48 Ac分布図 (10/9)

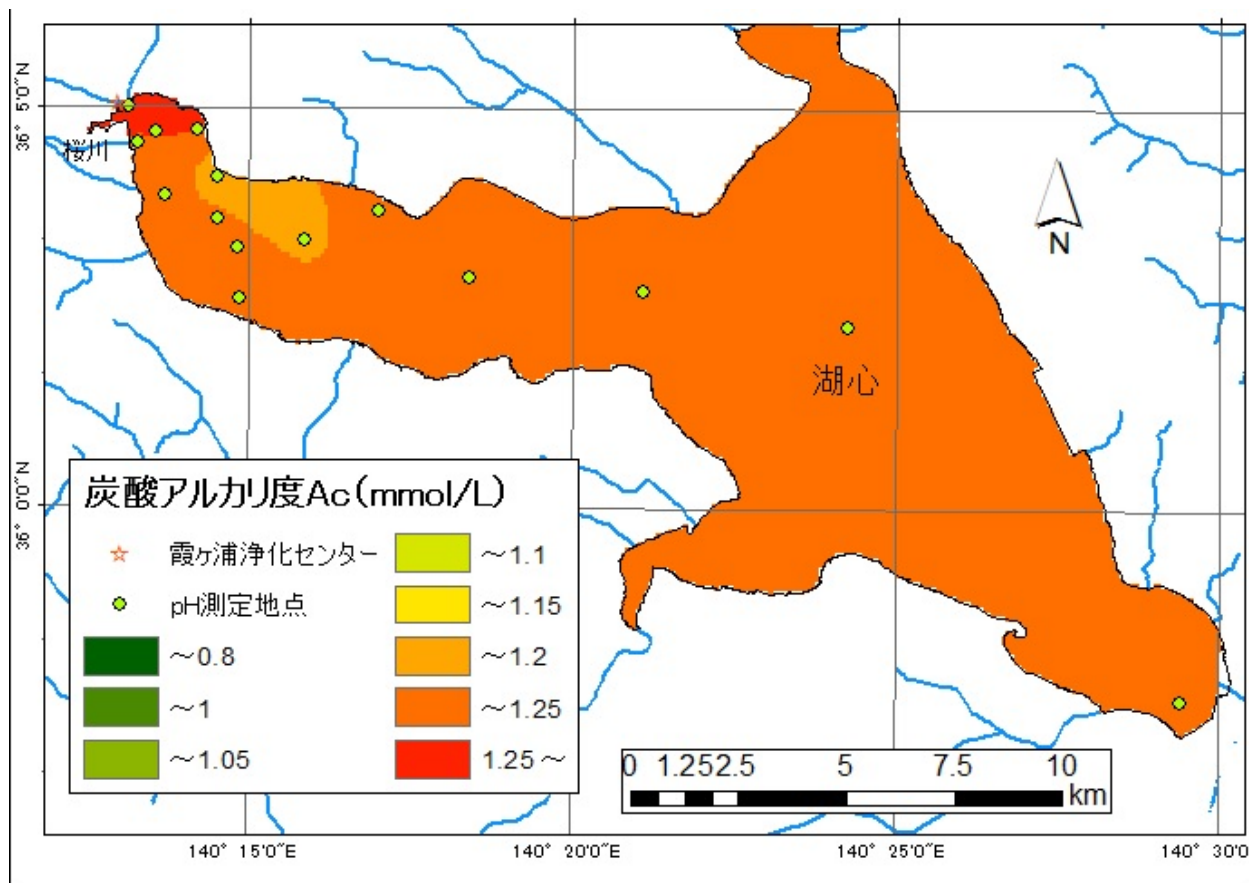


図 49 Ac分布図 (10/31)

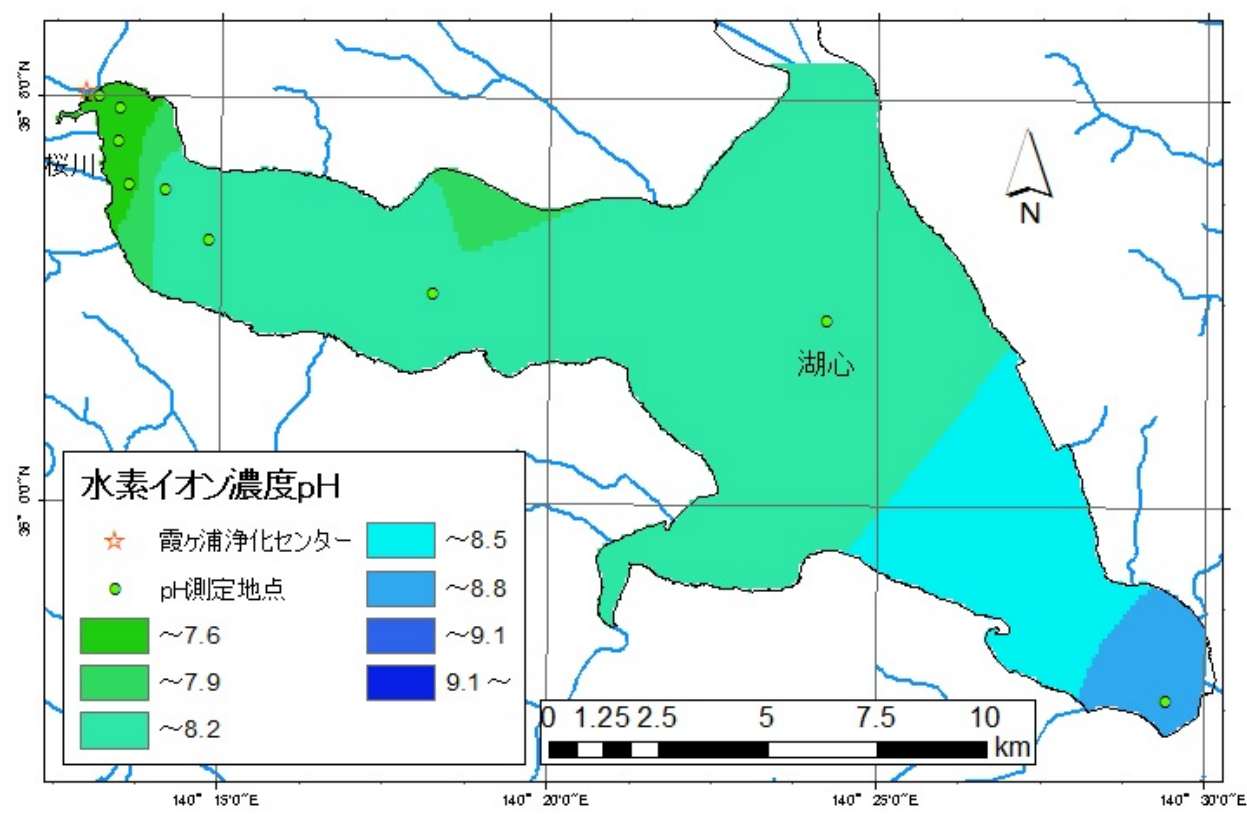


図 50 pH分布図 (10/9)

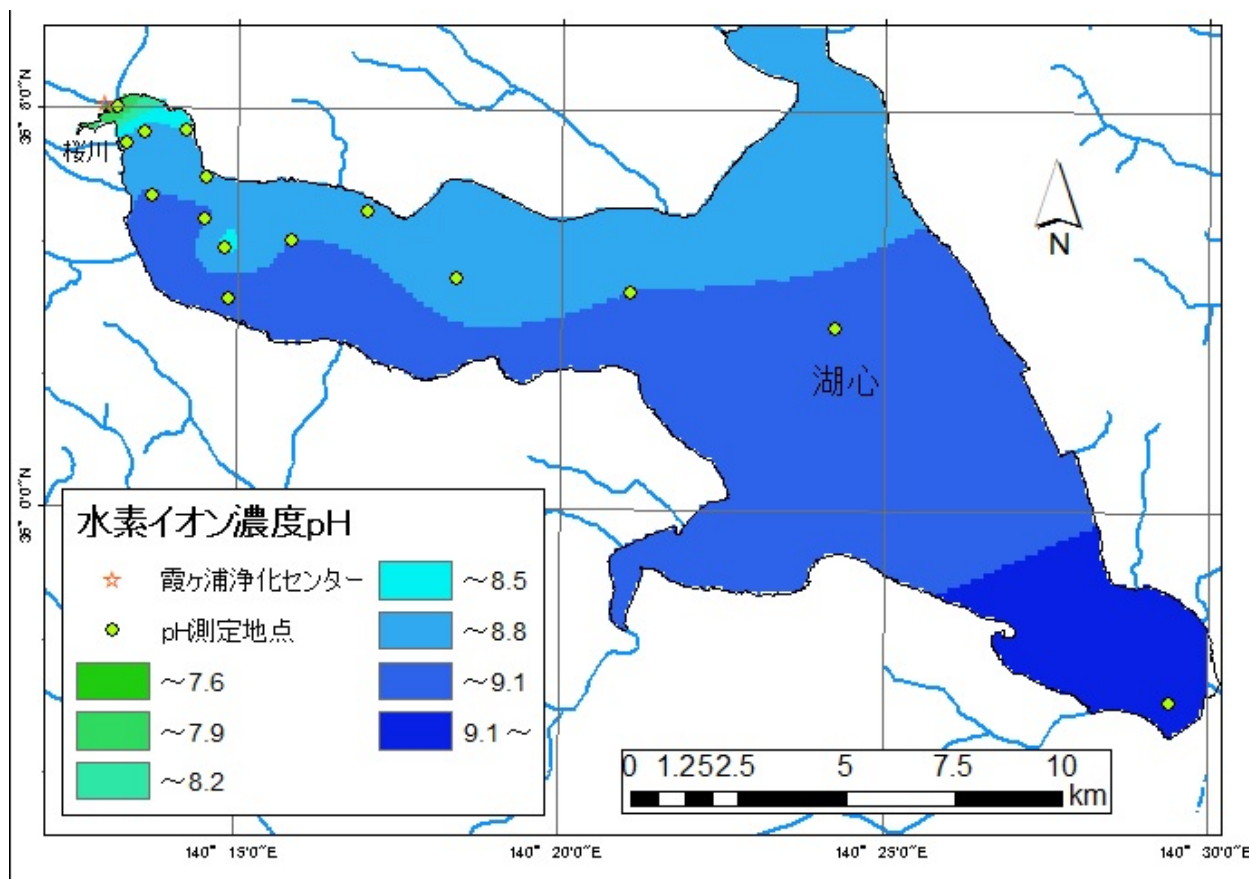


図 51 pH分布図 (10/31)

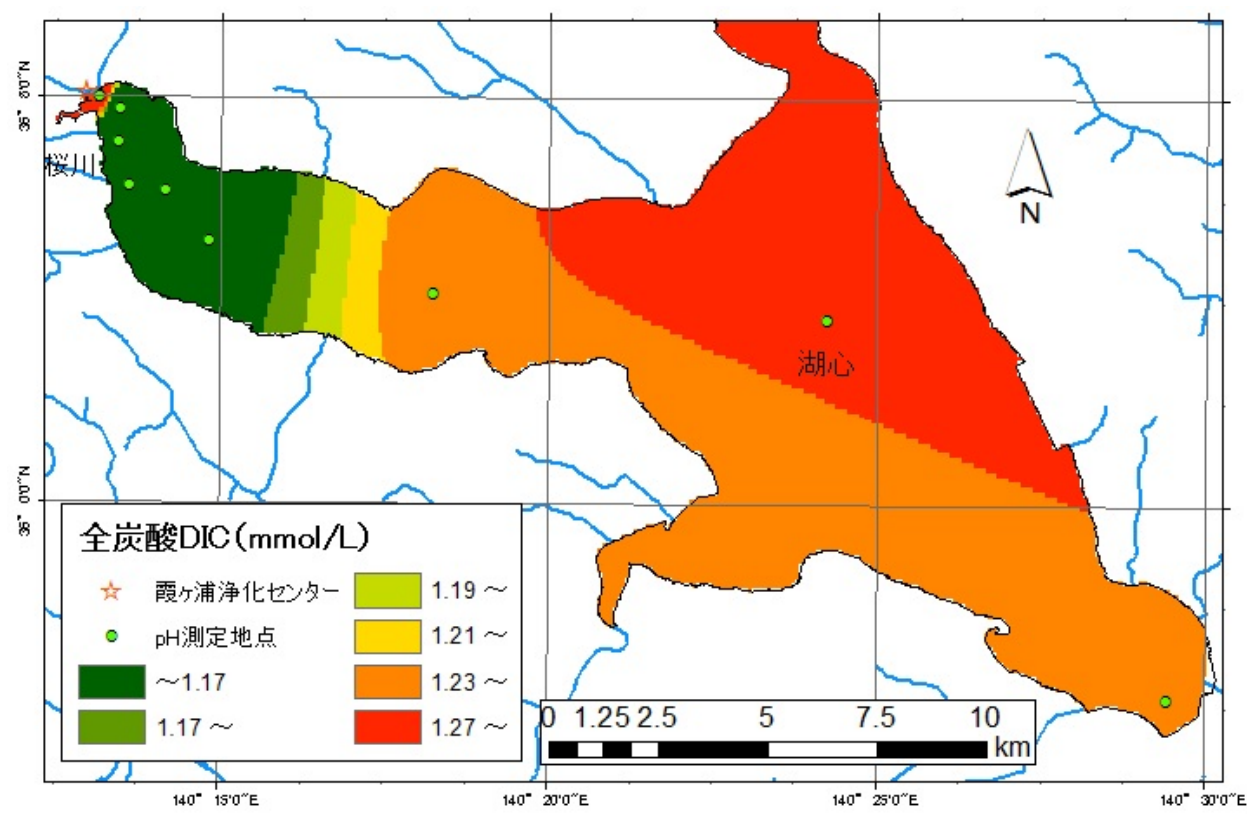


図 52 DIC分布図 (10/9)

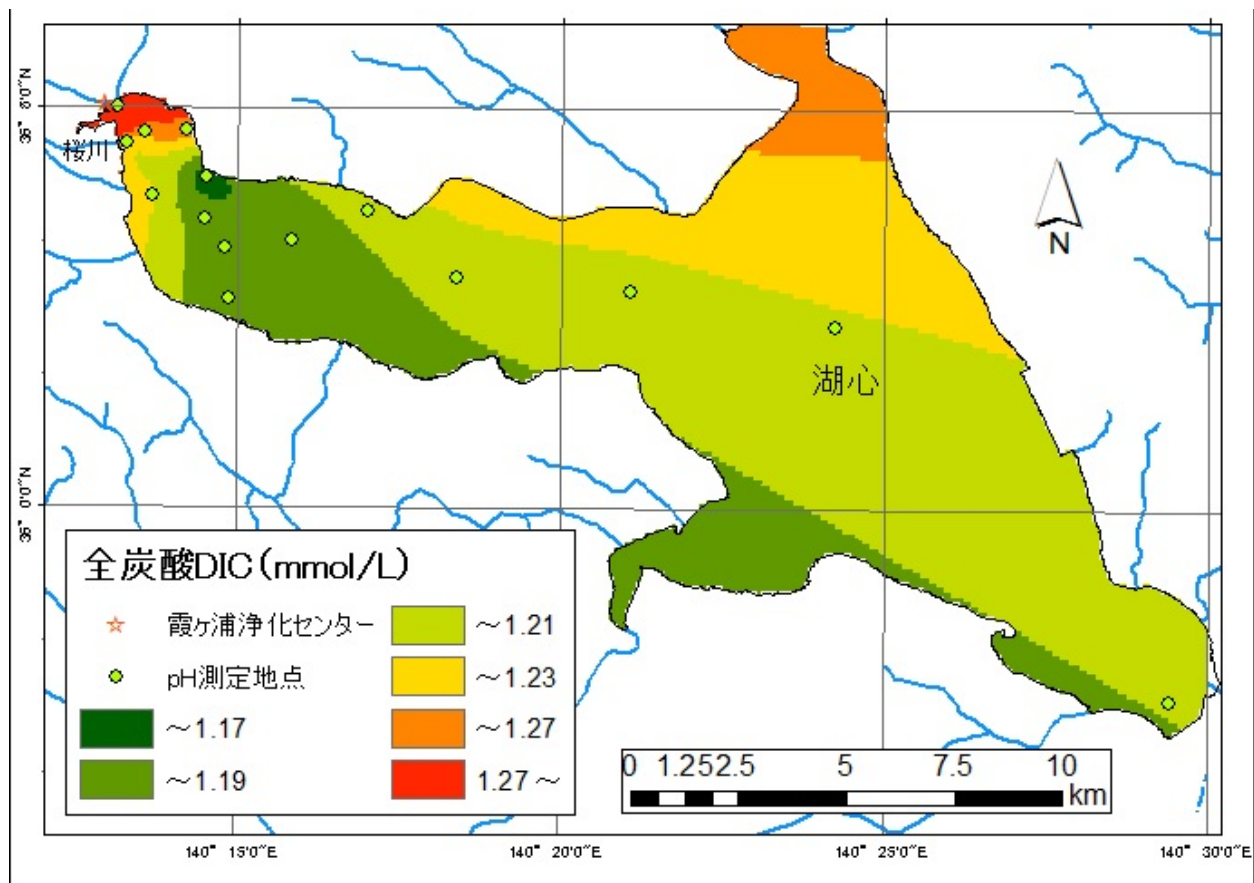


図 53 DIC分布図 (10/31)

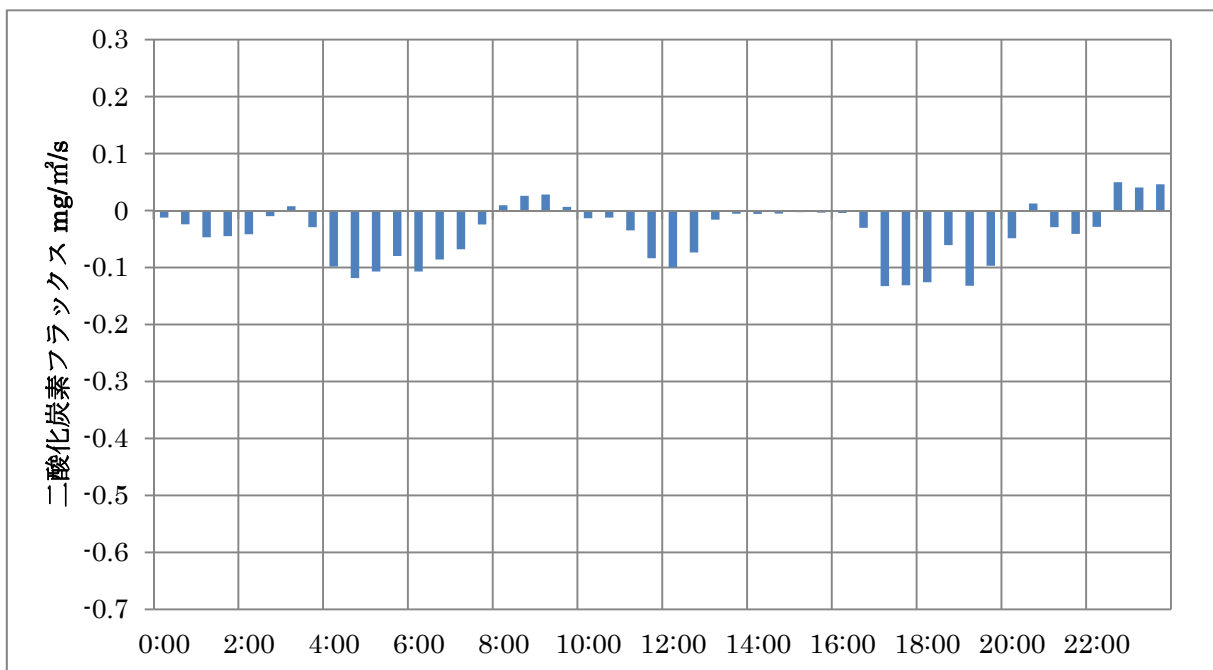


図 54 湖心二酸化炭素フラックス時系列 (10/9)

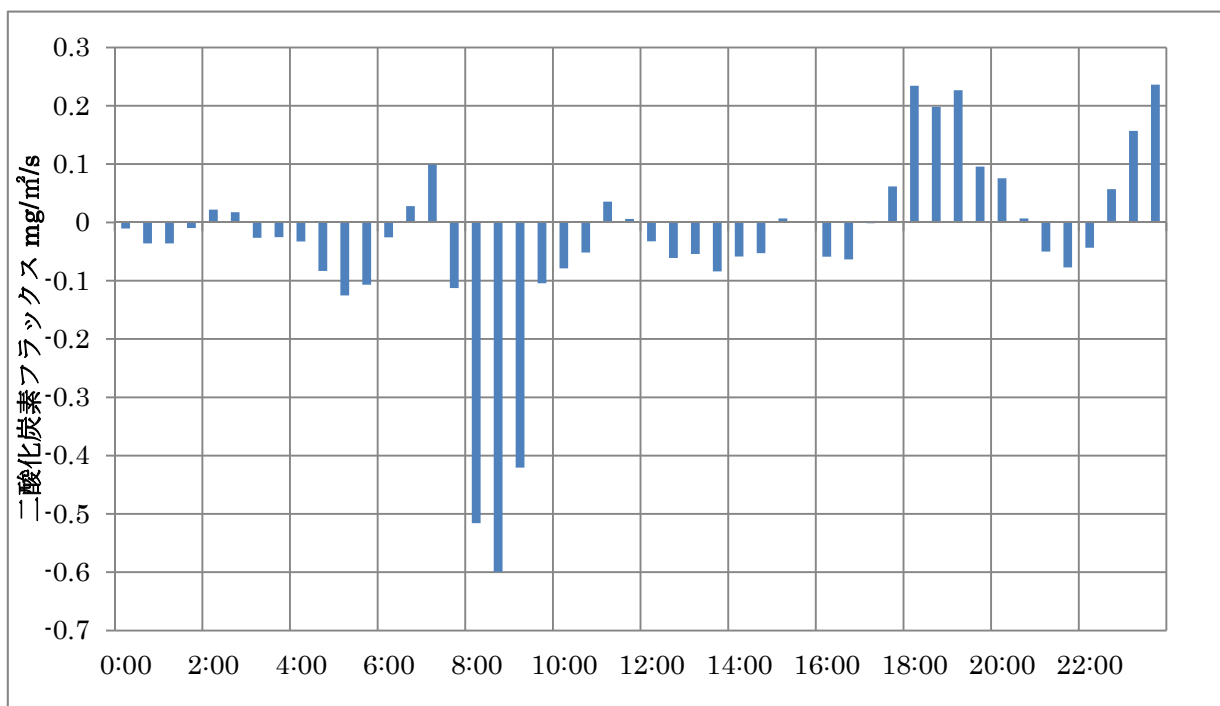


図 55 湖心二酸化炭素フラックス時系列 (10/31)

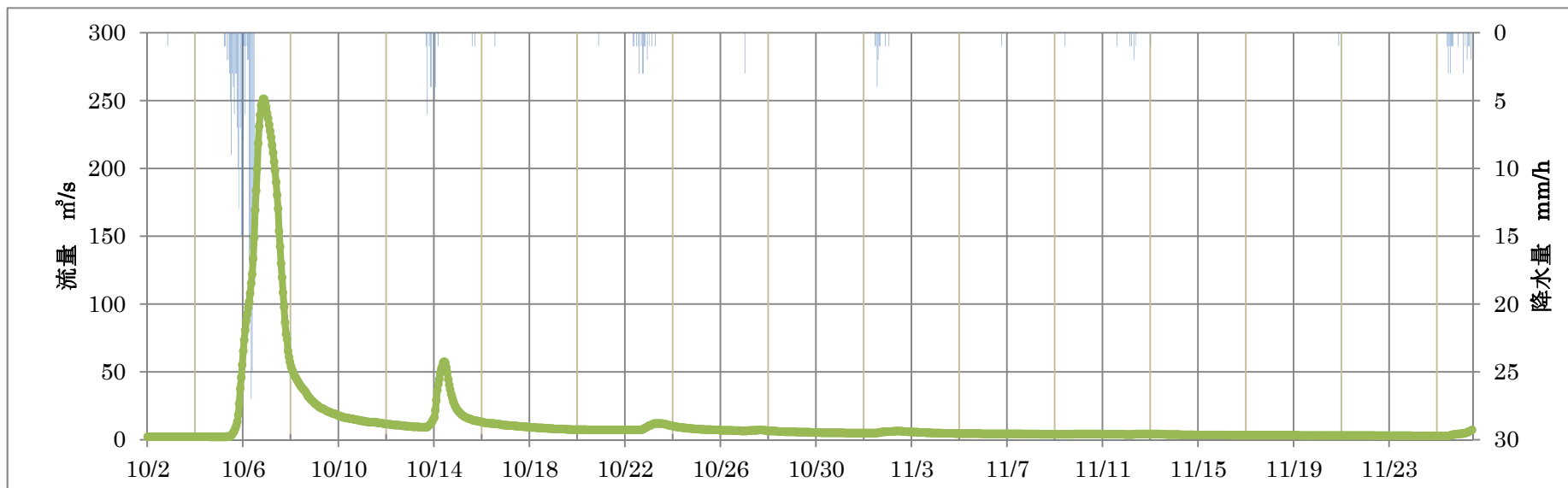


図 56 桜川流量、降雨時系列

※目盛り線の時刻は特に断りのない限りすべて 0 : 00 とした。

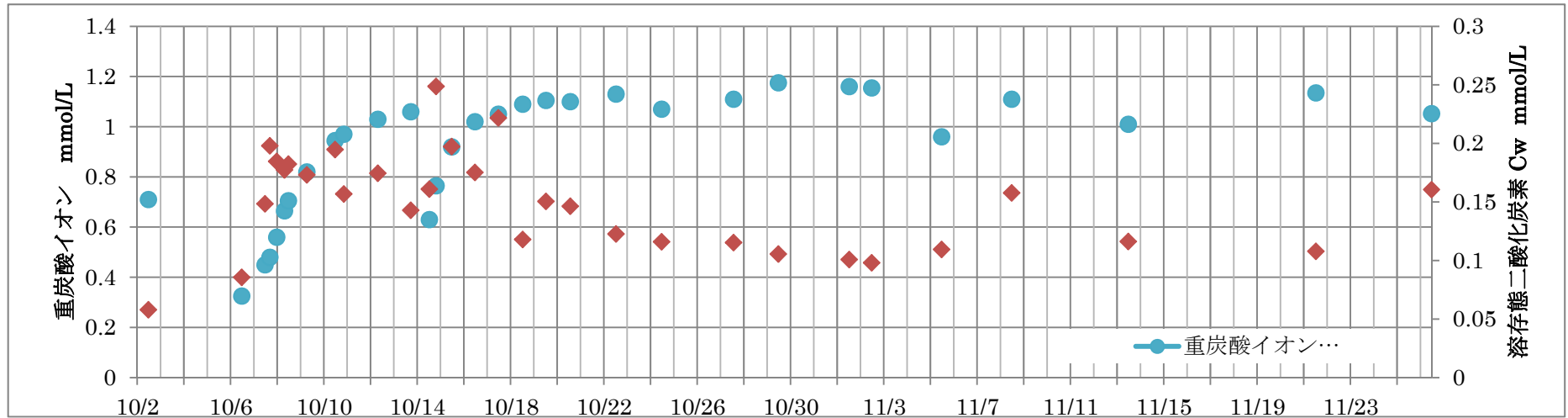


図 57 桜川の重炭酸、Cw 濃度

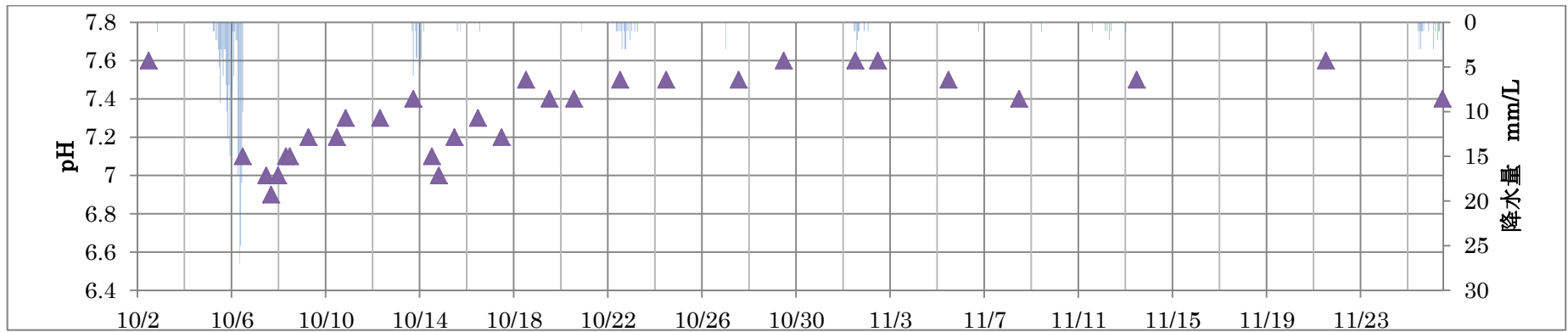


図 58 桜川の pH 変動と降雨の関係

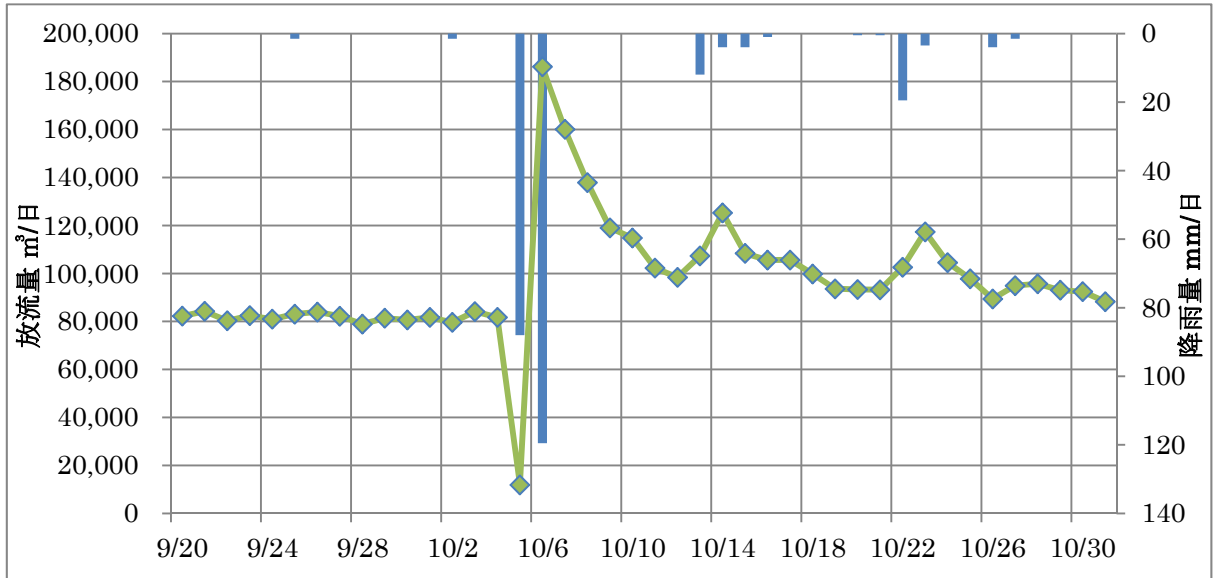


図 59 霞ヶ浦浄化センター放流量・降雨量

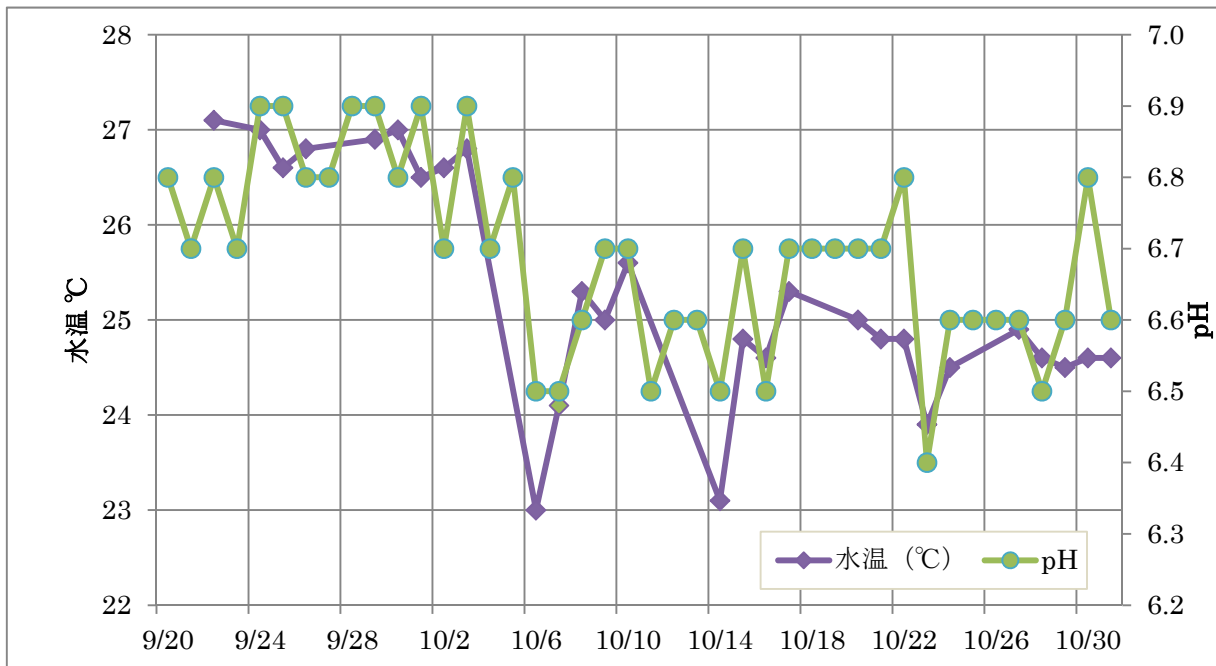


図 60 霞ヶ浦浄化センター放流水の水温・pH

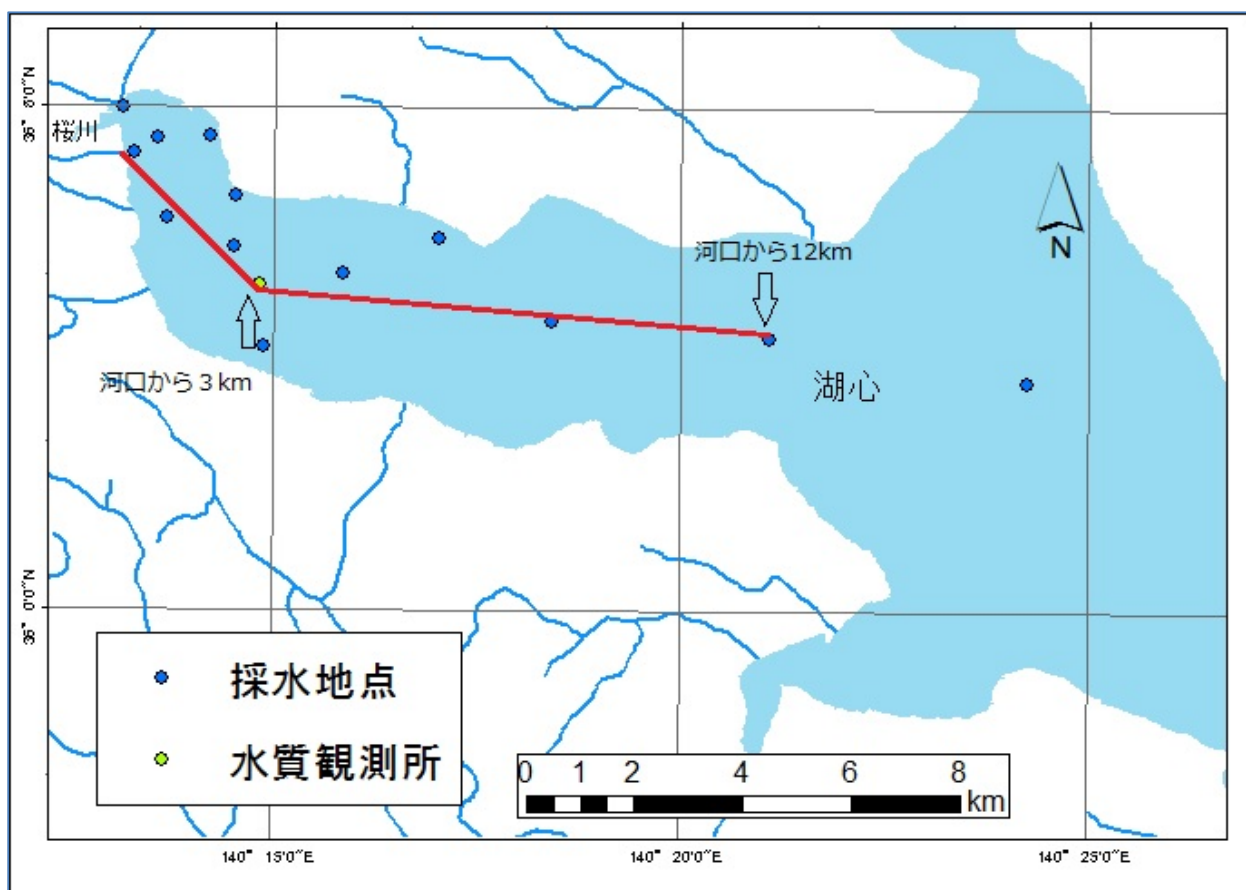


図 61 湖沼断面図位置図

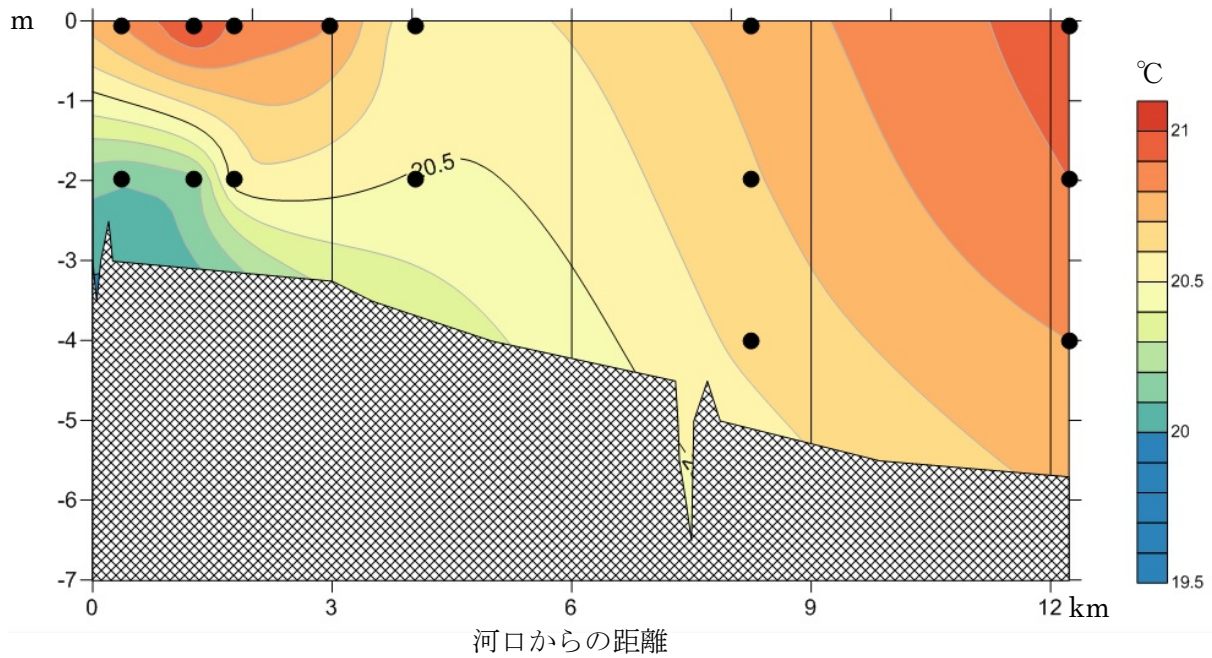


図 62 10/9 水温断面図

●は採水地点 (図 64～68 まで同様)

網掛け部分は 1988 年国土地理院発行の湖沼図から作成した湖底断面

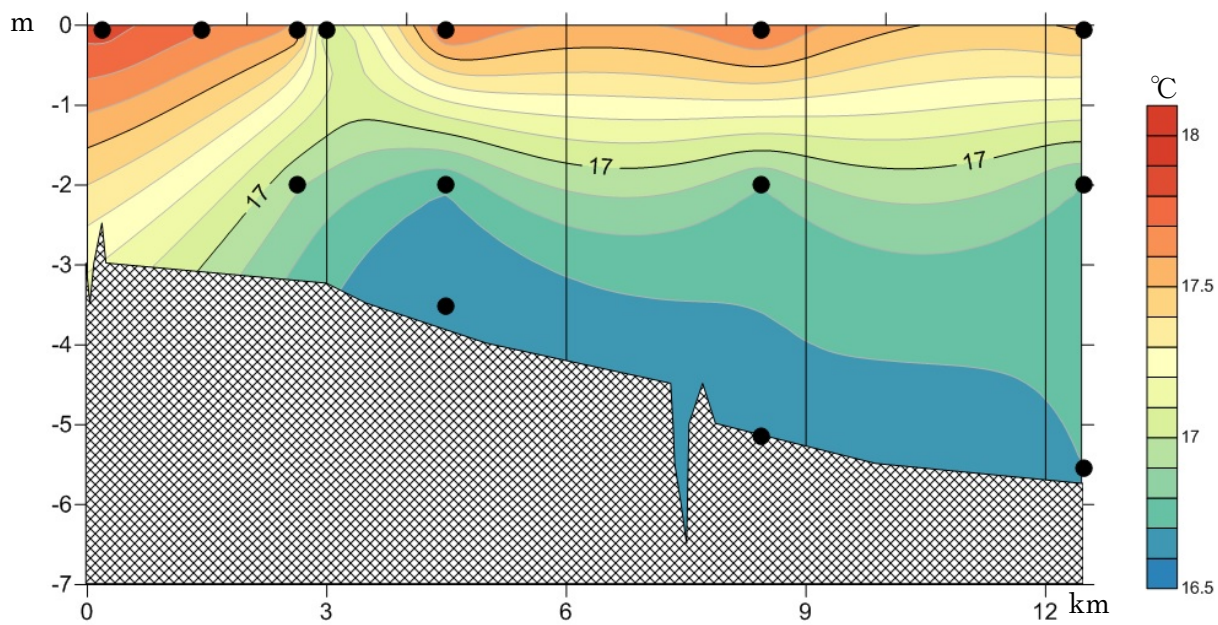


图 63 10/31 水温断面图

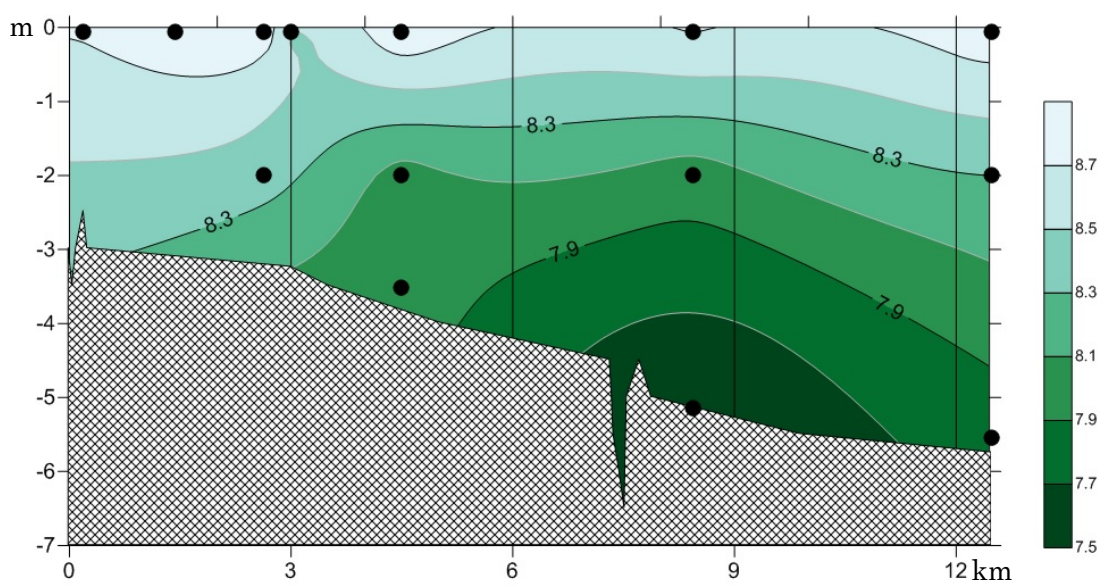


图 64 10/31 pH断面图

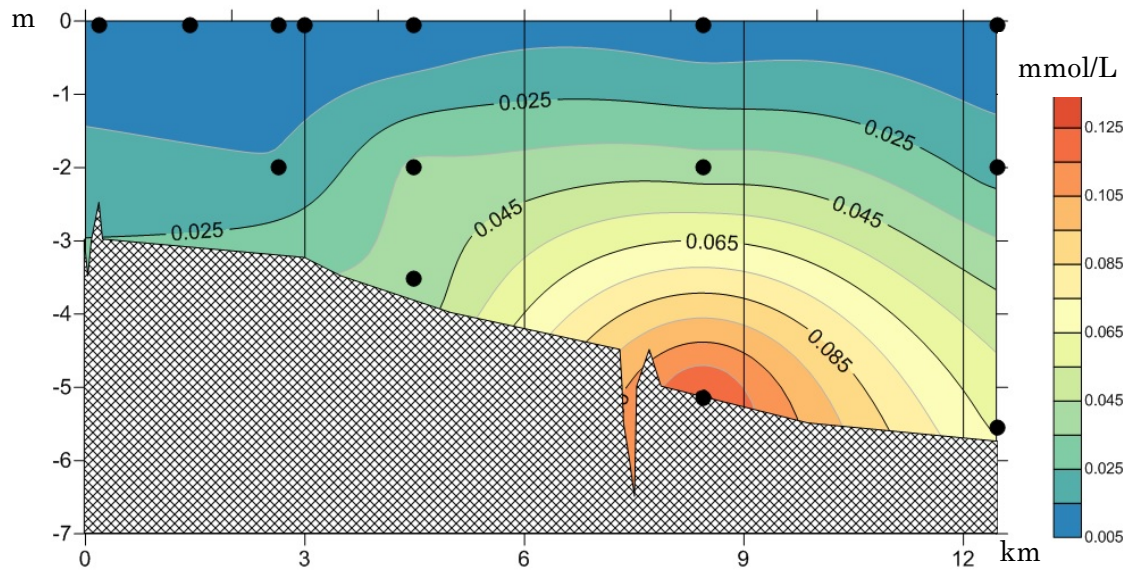


图 65 10/31 C_w 断面图

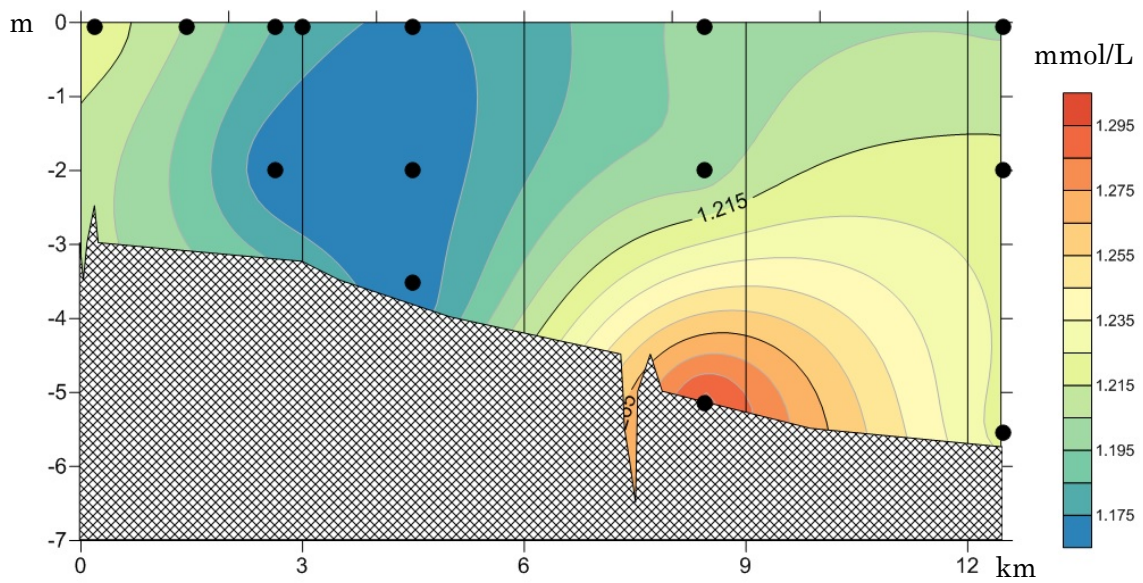


图 66 10/31 DIC 断面图

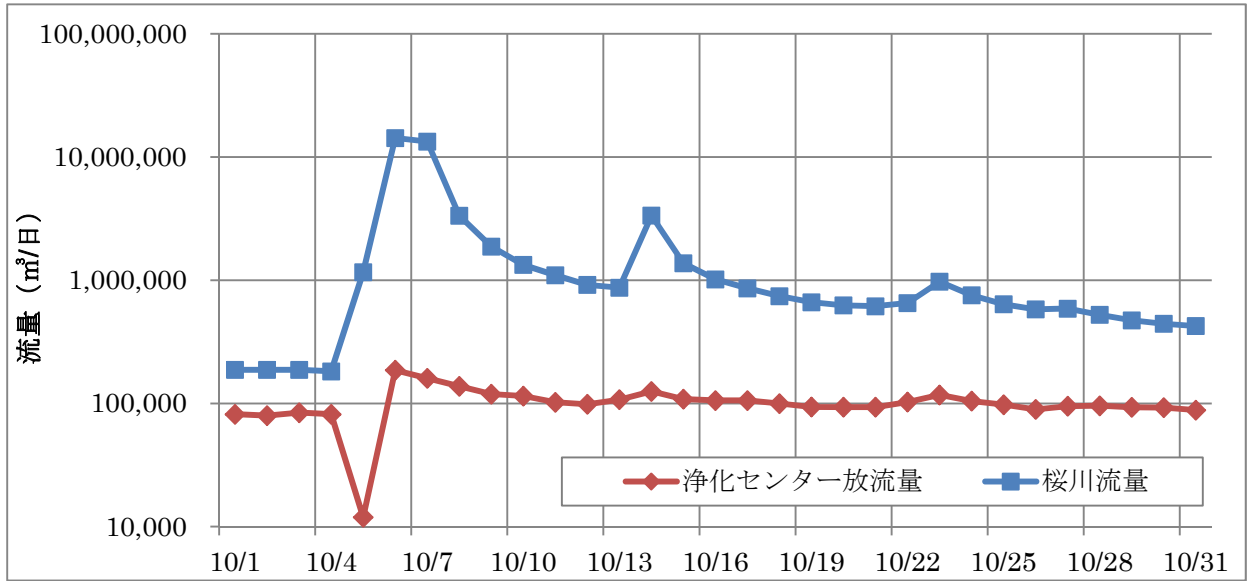


図 67 10月における桜川の河川流入と下水処理場放流水の比較（流量）

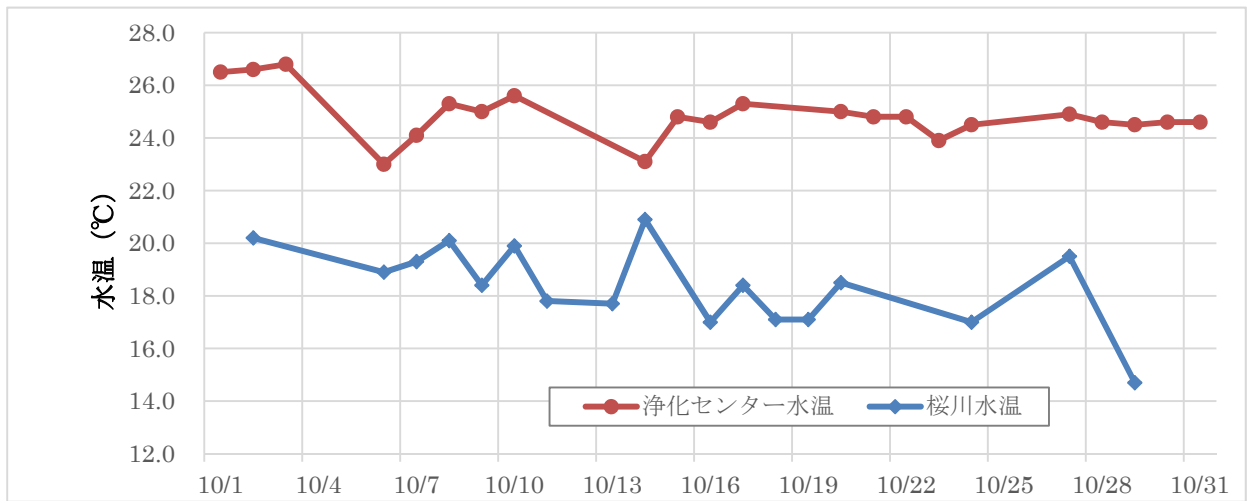
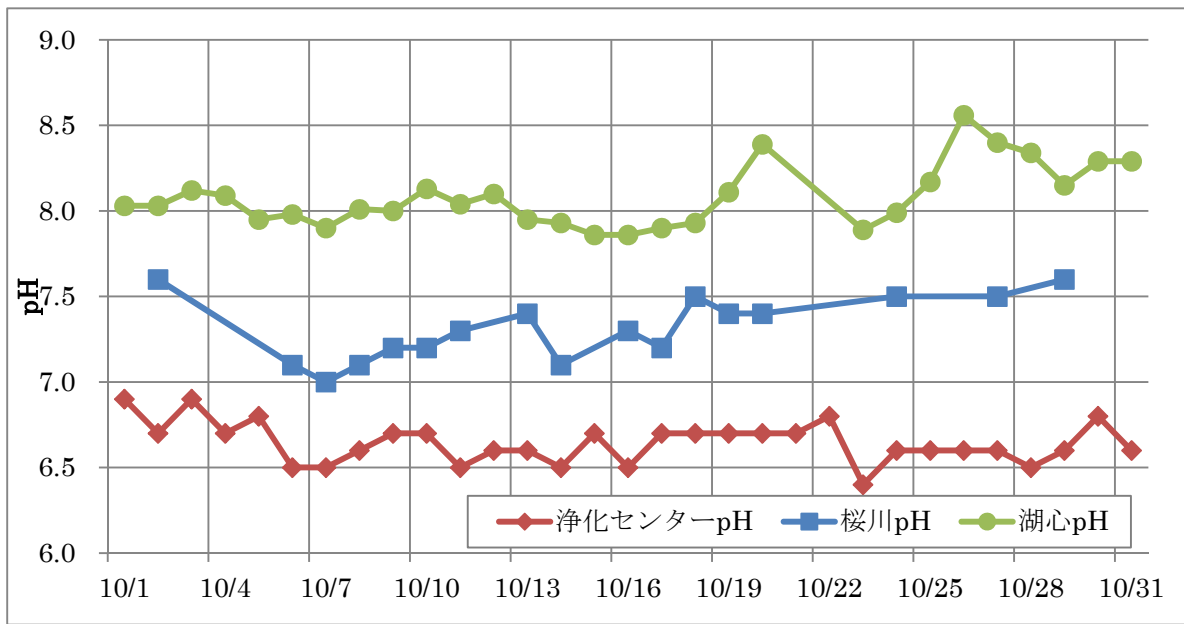


図 68 10月における桜川の河川流入と下水処理場放流水の比較（水温）



※湖心の pH は 9 : 00 の観測値

図 69 10 月における桜川の河川流入と下水処理場放流水の比較 (pH)

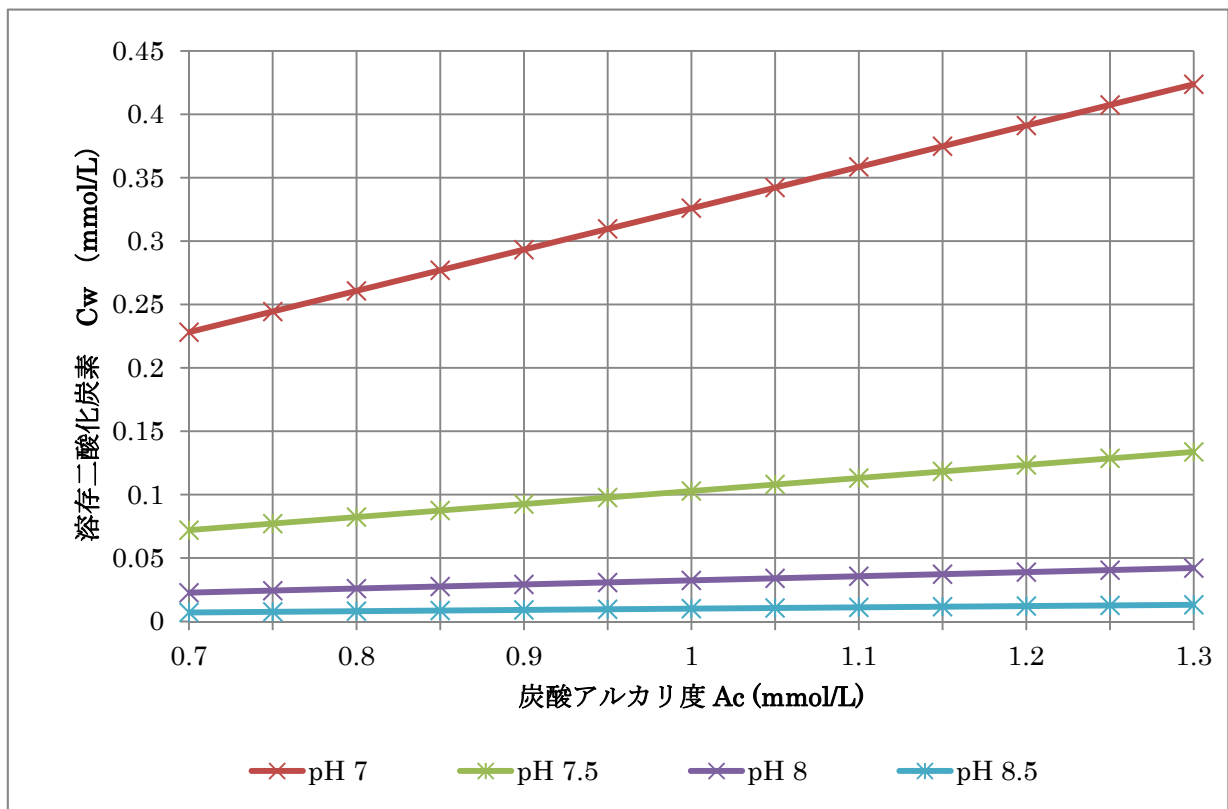


図 70 炭酸アルカリ度を変化させたときの溶存二酸化炭素濃度の変化 (水温 20°C)

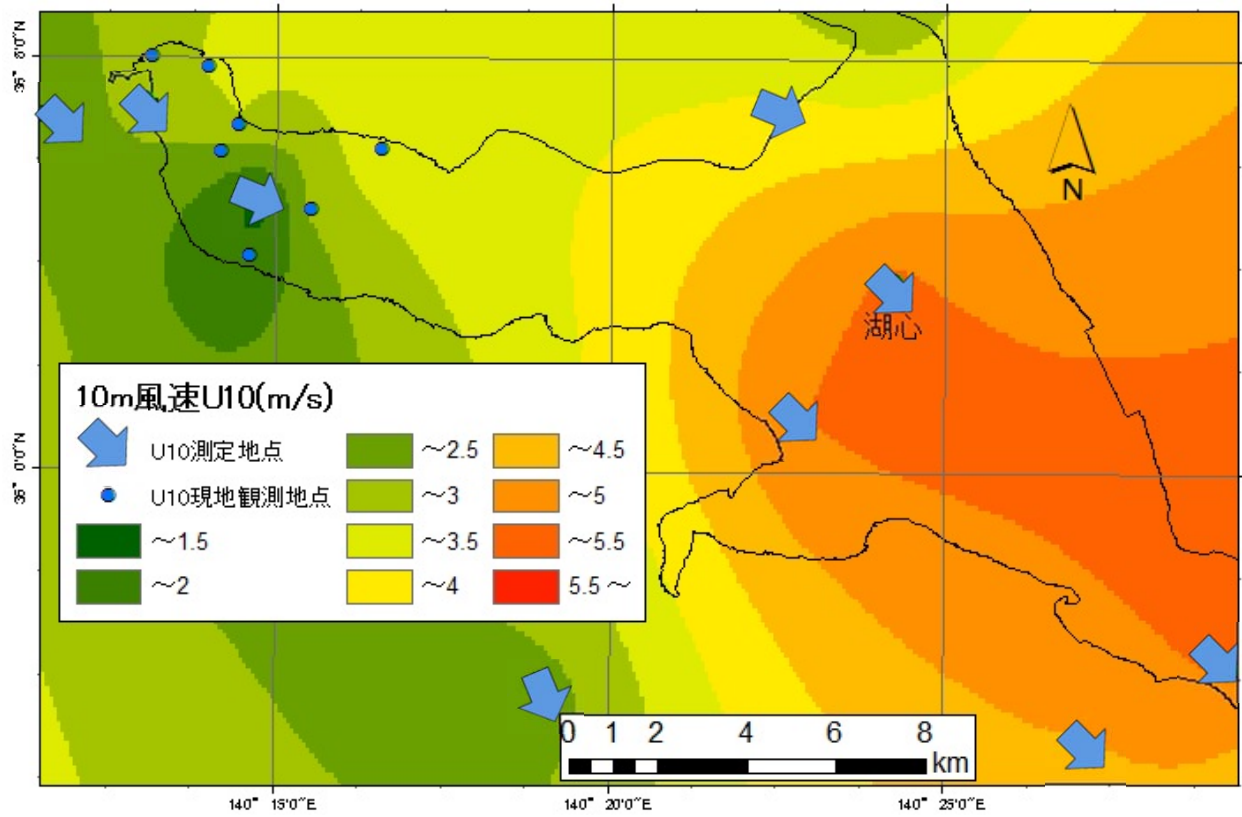


图 71 全観測点風速分布図 (10/9)

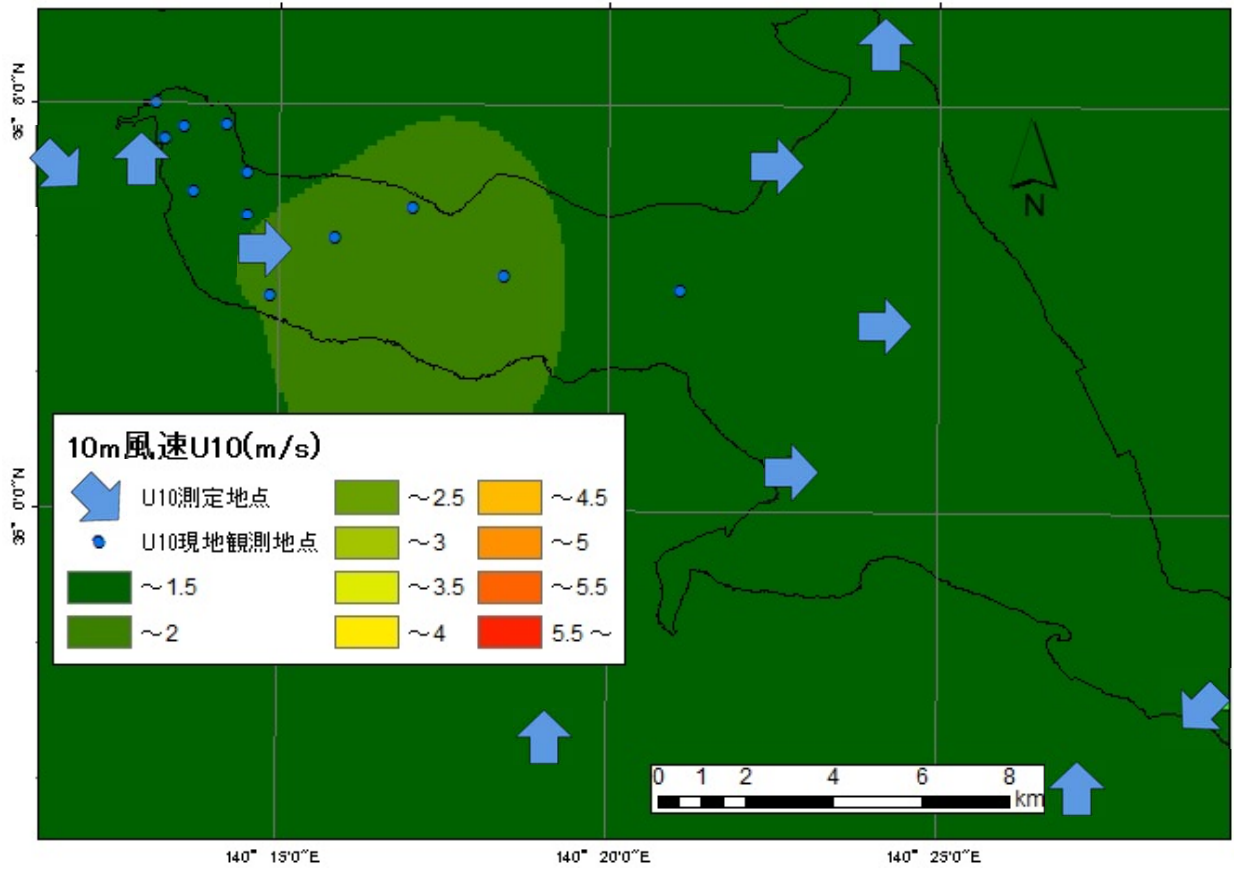


図 72 全観測点風速分布図 (10/31)