

霞ヶ浦西浦における熱収支と熱分布特性の解明

2018 年 1 月

小川 信平

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

地球科学専攻

修士（理学）学位論文

小川 信平

Heat Balance and Heat Distribution in Lake Kasumigaura

January 2018

Shinpei OGAWA

Heat Balance and Heat Distribution in Lake Kasumigaura

A Dissertation Submitted to
the Graduate School of Life and Environmental Sciences,
the University of Tsukuba
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
(Master's Program in Geosciences)

Shinpei OGAWA

霞ヶ浦西浦における熱収支と熱分布特性の解明

小川信平

要旨

湖への熱の出入りを熱収支といい、水中の熱環境を形成している。これは蒸発量や熱循環、光合成など湖で起こる様々な現象に深く関わっており、その機構の解明は重要な研究課題の一つである。湖の熱収支・熱環境について、水深の浅い湖では特に大気の影響が非常に大きいと考えられている。しかし、熱収支式の残差である水中熱流量の挙動に触れた研究例は少ない。本研究では霞ヶ浦「西浦」を対象に、湖面上の熱収支の空間分布を詳細に明らかにした上で、水柱の熱構造に与える移流熱の影響を時空間的に明らかにすることを研究目的とした。

湖心及び周辺の観測所から気象データを入手し、補正・エラー処理を行った後、Kriging 法を用いて湖全体に空間内挿した。そして、各グリッドで顕熱と潜熱のバルク式、及び放射収支式を解いて水中熱流量を算出した。計算は 2014 年 1 月 1 日 1 時から 2014 年 12 月 31 日 24 時まで毎 1 時間行った。次に、西浦内部で月に 1 度行われている水質の現地調査のうち鉛直方向に連続して測定された水温とその測定深度を基に貯熱量を計算し、翌月の計算結果と併せて貯熱変化量を算出した。最終的に、現地調査が行われた地点ごとにボックスモデルを解き、湖内部の移流による熱フラックスを推定した。

湖面上の熱収支に関して、水中熱流量の時間変化は、絶対量・日較差の大きい正味放射量の影響を強く受け、水中熱流量の空間分布に対しては潜熱・顕熱フラックスの分布に影響を受けていた。潜熱・顕熱フラックスは、それぞれ比湿勾配と温度勾配が支配的要因ではあったが、空間分布については風速に依るところが大きく、湖心部・南東部において高い傾向が確認された。加えて、風速や日射量には、一部地域に定常的な分布特性がみられた。

ボックスモデルの計算の結果、西浦は水温の空間偏差が小さいことから、貯熱量の地点特性は主に水深によって決定されることが分かった。また、降水による持ち込み熱量や湖底との熱交換量は小さく、無視しても問題ないと考えられた。水深を定数として計算した場合、移流による熱輸送量は、土浦入・高浜入では冷却的作用が大きく、湖心域から湖尻にかけては加熱的作用が大きく現れていた。加えて、牛込沖を除き、各地点の熱交換量における移流の占める割合が大きいことが確認された。

西浦全体を考えると、流入出河川による熱交換量は小さく、西浦の熱収支は主に大気によって支配されていた。しかし、単位面積当たりの熱輸送量を比較すると、河川水による熱輸送量が湖面における熱輸送量よりも数千～数万倍も大きいことが分かった。このことから、河口付近においては西浦一般とは全く異なる熱環境を形成している可能性が示唆された。

キーワード：熱収支、水中熱流量、ボックスモデル、空間内挿法

Shinpei OGAWA

Abstract

Heat in and out of the lake is called heat balance and it forms a thermal environment in the water. It is deeply involved in various phenomena occurring in lakes such as evaporation amount, heat circulation, photosynthesis, etc. Therefore, it is important to elucidate its mechanism. The effect of the atmosphere is very large especially in a shallow lake for the heat balance and thermal environment of the lake. However, there are not many studies which investigated the behavior of the heat flow between water body. In this research, the spatial distribution of heat balance on the lake surface is clarified in detail for Lake Kasumigaura "Nishiura". The purpose of the study is to clarify the influence of advection heat on the thermal structure of the water column in a spatiotemporal way.

Meteorological data was acquired at the lake center and from observation station, and then spatial interpolation was performed throughout the lake using the Kriging method. The bulk formula of sensible heat and latent heat and the radiation balance equation were solved on each grid to calculate the underwater heat flow rate. The calculations were from 1 o'clock January 1, 2014, to 24 o'clock December 31, 2014, every hour. Then, heat storage was estimated based on the water temperature continuously measured profile once a month inside Nishiura, together with the calculation result of the following month of heat storage change. The amount was calculated. Finally, a box model was applied to each point and the heat flux by advection was estimated.

According to the heat balance over lake surface, the temporal variation in the water heat flux was strongly influenced by the net radiation, which has the largest absolute quantity and daily range, and on the spatial distribution of the water heat flux was affected the distribution of the latent heat flux and the sensible heat flux were dominated by the specific humidity gradient and the temperature gradient, respectively. However, those spatial distributions depended largely on the wind speed and the tendency was high in the southeastern area and the lake center area. In addition, some distribution characteristics were indicated in wind speed and solar radiation.

As a result, that the calculation of each box model, the spatial characteristics of the water temperature were small in Nishiura, then the areal feature of the water heat storage was mainly determined by the water depth. Steady the heat flux carried by precipitation and the heat exchange between lake bottom layer and lake sediment were small, and it was considered that there was no problem even if neglected it. When calculating these models with the water depth as a constant, the amount of heat transported by advection was large in the cooling effect at Tsuchiura-iri and Takahama-iri, and the heating effect appeared greatly from the lake center area to the lake entrance. Excluding Ushigome-oki, it was confirmed that the ratio of the advection in the heat exchange at each location was large.

Considering the whole of the lake, the amount of heat exchange by the inflow river was small, the

heat balance in Nishiura was dominated primarily by the atmosphere. However, when comparing the heat flux per unit area, it was found that the amount of heat flux of river water is several thousand times larger than the heat flux on the lake surface. From this, it was suggested that there is a possibility that the thermal environment is completely different between the lake general and near the estuary.

Keywords: Heat balance, Water heat flux, Box model, Spatial interporated method

目次

表目次.....	v
図目次.....	vii
1. はじめに.....	1
1.1. 研究背景.....	1
1.2. 先行研究：湖の熱収支.....	1
1.3. 先行研究：霞ヶ浦の熱収支.....	2
1.4. 研究目的.....	3
2. 研究方法.....	4
2.1. 研究対象地域.....	4
2.2. 観測概要.....	4
2.2.1. 湖心観測所における筑波大学取得データ.....	4
2.2.2. 周辺の気象観測.....	4
2.2.3. 水文・水質データ.....	6
2.2.4. 地理情報データ.....	7
2.3. 熱フラックス計算.....	7
2.3.1. 湖面の熱収支.....	7
2.3.2. 放射収支.....	7
2.3.3. 顕熱フラックス・潜熱フラックス.....	8
2.3.4. ボックスモデル.....	10
2.4. 空間内挿.....	12
2.4.1. 内挿方法の検討.....	12
2.4.2. 予測データの検証.....	14
3. 結果と考察.....	15
3.1. 湖面における熱収支（全体傾向）.....	15
3.2. 湖面における熱収支（時空間分布）.....	16
3.3. 湖面における熱収支（領域別の特性）.....	17
3.4. 頻度分布と月変化.....	18
3.5. 湖の貯熱量と移流熱.....	19
3.6. 河川との熱交換.....	20
4. 結論.....	22
謝辞.....	23
参考文献.....	24
付録.....	27

表目次

表 1	湖心観測所における筑波大学取得データ	28
表 2	霞ヶ浦周辺の気象観測データ(国土交通省河川事務所).....	29
表 3	霞ヶ浦周辺の気象観測データ(AMeDAS)	32
表 4	霞ヶ浦周辺の気象観測データ(環境省, 国立環境研究所, 霞ヶ浦臨湖実験センター).....	34
表 5	霞ヶ浦周辺の気象観測データ(環境省).....	35
表 6	霞ヶ浦周辺の気象観測データ(百里飛行場).....	37
表 7	霞ヶ浦(水温観測データ).....	38
表 8	国土交通省水質調査時刻	39
表 9	国土交通省(水位観測データ).....	40
表 10	西浦・流入出河川の観測データ(2007, 2008).....	41
表 11	風向別粗度長.....	42
表 12	水面温度と水深 0m 水温の年変動と標準偏差	44
表 13	湖心における水面温度と水深 0m 水温の比較と熱容量への影響	44
表 14	水温調査日・ボックスモデルの計算期間	45
表 15	単回帰分析による水温補正.....	46
表 16	空間内挿法の比較	46
表 17	交差検証の結果(掛馬沖).....	48
表 18	交差検証の結果(湖心).....	48
表 19	湖面熱収支の月変化.....	49
表 20	湖心における熱収支(先行研究 (Sugita et al., 2014) との比較).....	50
表 21	熱収支項に対する寄与率	51
表 22	天候に基づいて選定された解析対象日.....	51
表 23	天候及び季節による変化	52
表 24	各領域の熱収支(年平均値と空間的な標準偏差)	55
表 25	月変化.....	56
表 26	ボックスモデル結果(麻生沖).....	59
表 27	熱容量の計算結果と比較(麻生沖)	59
表 28	ボックスモデル結果(掛馬沖).....	60
表 29	熱容量の計算結果と比較(掛馬沖)	60
表 30	ボックスモデル結果(木原沖).....	61
表 31	熱容量の計算結果と比較(木原沖)	61
表 32	ボックスモデル結果(湖心)	62
表 33	熱容量の計算結果と比較(湖心)	62
表 34	ボックスモデル結果(西の洲沖)	63
表 35	熱容量の計算結果と比較(西の洲沖).....	63
表 36	ボックスモデル結果(沖宿沖).....	64
表 37	熱容量の計算結果と比較(沖宿沖)	64
表 38	ボックスモデル結果(高浜沖).....	65

表 39	熱容量の計算結果と比較(高浜沖)	65
表 40	ボックスモデル結果(高崎沖).....	66
表 41	熱容量の計算結果と比較(高崎沖)	66
表 42	ボックスモデル結果(玉造沖).....	67
表 43	熱容量の計算結果と比較(玉造沖)	67
表 44	ボックスモデル結果(牛込沖).....	68
表 45	熱容量の計算結果と比較(牛込沖)	68
表 46	ボックスモデル結果(Station.1)	69
表 47	熱容量の計算結果と比較(Station.1)	69
表 48	ボックスモデル結果(Station.3)	70
表 49	熱容量の計算結果と比較(Station.3)	70
表 50	ボックスモデル結果(Station.7)	71
表 51	熱容量の計算結果と比較(Station.7)	71
表 52	ボックスモデル結果(Station.9)	72
表 53	熱容量の計算結果と比較(Station.9)	72
表 54	ボックスモデル結果(Station.12)	73
表 55	熱容量の計算結果と比較(Station.12)	73
表 56	各地点の熱収支(年合計値)	74
表 57	流入出河川と湖面の熱交換量	75
表 58	大気との熱交換による水温への影響 (国土交通省調査日)	76
表 59	大気との熱交換による水温への影響 (環境省調査日)	77

図目次

図 1	研究対象地域の観測地点	78
図 2	気温の観測地点	79
図 3	日射量の観測地点	79
図 4	大気圧の観測地点	80
図 5	降水量の観測地点	80
図 6	相対湿度の観測地点	81
図 7	風速・風速の観測地点	81
図 8	水温・水位観測地点	82
図 9	西浦・流入出河川の観測地点(2007, 2008)	82
図 10	水面温度と水深 0m 水温の年変動と標準偏差	83
図 11	湖心における水面温度と水深 0m 水温の比較と熱容量への影響	83
図 12	水深 0.5m 水温と水温の鉛直平均値の比較(国交省)	84
図 13	水深 0.5m 水温と水温の鉛直平均値の比較(環境省)	84
図 14	湖底と最深層の温度比較	85
図 15	水中日射量	85
図 16	内挿法の比較(G)	86
図 17	内挿法の比較(H)	86
図 18	内挿法の比較(LE)	87
図 19	内挿法の比較(Rn)	87
図 20	内挿法の比較(U_{10})	88
図 21	内挿法の比較(Ta)	88
図 22	交差検証 q (釜谷沖を対象)	89
図 23	交差検証 q (湖心を対象)	89
図 24	交差検証 $S \downarrow$ (掛馬沖を対象)	90
図 25	交差検証 $S \downarrow$ (湖心を対象)	90
図 26	交差検証 Ta (掛馬沖を対象)	91
図 27	交差検証 Ta (湖心を対象)	91
図 28	交差検証 U_{10} (掛馬沖を対象)	92
図 29	交差検証 U_{10} (湖心を対象)	92
図 30	交差検証 WS (掛馬沖を対象)	93
図 31	交差検証 WS (湖心を対象)	93
図 32	月平均値(熱収支, 気温, 日射量, 水位)と月積算値(降水量)	94
図 33	湖心における熱収支(先行研究との比較)	95
図 34	晴天指数(冬)	96
図 35	晴天指数(春)	96
図 36	晴天指数(夏)	97
図 37	晴天指数(秋)	97
図 38	G (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	98

図 39	G (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	99
図 40	G (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	100
図 41	H (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	101
図 42	H (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	102
図 43	H (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	103
図 44	LE (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	104
図 45	LE (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	105
図 46	LE (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	106
図 47	Rn (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	107
図 48	Rn (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	108
図 49	Rn (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	109
図 50	U_{10} (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	110
図 51	U_{10} (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	111
図 52	U_{10} (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	112
図 53	Ch (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	113
図 54	Ch (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	114
図 55	Ch (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	115
図 56	Ce (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	116
図 57	Ce (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	117
図 58	Ce (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	118
図 59	$Ts-Ta$ (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	119
図 60	$Ts-Ta$ (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	120
図 61	$Ts-Ta$ (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	121
図 62	$qs-qa$ (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	122
図 63	$qs-qa$ (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	123
図 64	$qs-qa$ (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	124
図 65	Tw (晴)の空間分布(日平均)と時間変化	125
図 66	Tw (曇)の空間分布(日平均)と時間変化	126
図 67	Tw (雨)の空間分布(日平均)と時間変化	127
図 68	バルク輸送係数と風速の関係	128
図 69	分割領域	128
図 70	熱収支の時間変化(各水域全体の平均値)	129
図 71	G ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	130
図 72	H ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	131
図 73	LE ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	132
図 74	Rn ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	133
図 75	U_{10} ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	134
図 76	$Ts-Ta$ ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	135
図 77	$qs-q$ ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化	136

図 78	Ch ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化.....	137
図 79	Ce ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化.....	138
図 80	ボックスモデル結果(麻生沖).....	139
図 81	熱収支・熱容量の比較(麻生沖).....	139
図 82	ボックスモデル結果(掛馬沖).....	140
図 83	熱収支・熱容量の比較(掛馬沖).....	140
図 84	ボックスモデル結果(木原沖).....	141
図 85	熱収支・熱容量の比較(木原沖).....	141
図 86	ボックスモデル結果(湖心).....	142
図 87	熱収支・熱容量の比較(湖心).....	142
図 88	ボックスモデル結果(西の洲沖).....	143
図 89	熱収支・熱容量の比較(西の洲沖).....	143
図 90	ボックスモデル結果(沖宿沖).....	144
図 91	熱収支・熱容量の比較(沖宿沖).....	144
図 92	ボックスモデル結果(高浜沖).....	145
図 93	熱収支・熱容量の比較(高浜沖).....	145
図 94	ボックスモデル結果(高崎沖).....	146
図 95	熱収支・熱容量の比較(高崎沖).....	146
図 96	ボックスモデル結果(玉造沖).....	147
図 97	熱収支・熱容量の比較(玉造沖).....	147
図 98	ボックスモデル結果(牛込沖).....	148
図 99	熱収支・熱容量の比較(牛込沖).....	148
図 100	ボックスモデル結果(Station.1).....	149
図 101	熱収支・熱容量の比較(Station. 1).....	149
図 102	ボックスモデル結果(Station.3).....	150
図 103	熱収支・熱容量の比較(Station. 3).....	150
図 104	ボックスモデル結果(Station.7).....	151
図 105	熱収支・熱容量の比較(Station. 7).....	151
図 106	ボックスモデル結果(Station.9).....	152
図 107	熱収支・熱容量の比較(Station. 9).....	152
図 108	ボックスモデル結果(Station.12).....	153
図 109	熱収支・熱容量の比較(Station. 12).....	153
図 110	大気由来の熱輸送量($G + Q_{rain}$)の時空間変動.....	154
図 111	移流 Q_{ad} の時空間変動(水深一定).....	154
図 112	移流 Q_{ad} の時空間変動(水深変動).....	155
図 113	移流熱輸送量と水位変化・水温変化の関係性.....	156
図 114	水位と調査日.....	157
図 115	水温の水平方向平均値・標準偏差.....	157
図 116	河川と湖面の熱交換量.....	158

図 117	大気と移流の熱輸送量比(水深一定).....	160
図 118	大気と移流の熱輸送量比(水深変動).....	160

1. はじめに

1.1. 研究背景

水体の水の出入りを水収支というように、水体の熱の出入りを熱収支といい、水中の熱環境を形成している。湖の熱収支は、湖面や湖底における熱交換や温度の異なる水塊の流入出によって構成されており、概略的には次式のように説明される(Nino and Tamburrino, 2004)。

$$C_p \rho V \frac{dT}{dt} = A_s H_n - A_{sed} H_{sed} + H_i - H_o \quad (1)$$

ここで、水の定圧比熱 C_w [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$], 水の密度 ρ_w [kgm^{-3}], 湖の体積 V [m^3], 湖の平均温度 T [K], 湖の表面積 A_s [m^2], 大気から水面までの単位面積あたりの正味熱フラックス H_n [Wm^{-2}], 湖底面積 A_{sed} [m^2], 水層と湖底堆積物との単位面積あたりの正味熱フラックス H_{sed} [Wm^{-2}], 水の流入による正味熱フラックス H_i [Wm^{-2}], 水の流出による正味熱フラックス H_o [Wm^{-2}]である。

水収支の規模にも依るが、一般的に滞留時間の長い湖のような水体では、熱収支の要素のうち湖面における熱交換量が比較的に大きいとされている(新井・西沢, 1974)。加えて、地球表面の熱源の大部分が太陽からもたらされるといわれている(杉田ほか, 2009)。そのため、湖の熱収支は式(1)の右辺第2項と第3項を除いた式を用いて議論されることも少なくない(Soultana and Vassilis, 2007; Matti et al., 2016; Zheng and Bastiaanssen, 2017)。

湖における熱収支は、例えば霞ヶ浦の富栄養化現象やアオコ発生の要因とされている水温躍層の形成(石川ほか, 1989; 橋本ほか, 2007)や、琵琶湖の大規模な環流の形成(遠藤ほか, 1981)など、湖で起こる様々な現象の根幹に深く関わっている(永田ほか, 2012)。従って、その機構の解明は複数の分野に跨る重要な研究課題の一つと考えられる。

1.2. 先行研究：湖の熱収支

ここで、湖の熱収支に関する先行研究を紹介する。後述する研究の目的は、一貫して上記の式(1)の各要素を細分化して広域的に明らかにするところにある。

湖の熱収支に関する研究手順は、「水面を通して行われる熱収支」と「湖内部の水温構造」の2つの段階に大別できる。前者では、観測や推定式によって湖面の各熱フラックスを求めることを目的としており、渦相関法による直接測定(Michel and Moreo, 2013)や、ボーエン比法(伊藤・岡本, 1974)による推定法が確認された。その中でも、大気中1高度の観測データを用いてフラックスを精度良く推定できるバルク法を用いた研究が多く見受けられた(石岡ほか, 2001; 原田ほか, 2012)。また、近年では衛星データから推定される水面温度と推定式等を組み合わせることにより、地上観測が困難な地域や広範囲にわたって湖の熱収支や蒸発量を算出する研究が行われている(Hassan, 2013; Zheng et al., 2015)。ただし、空間解像度や観測周期が大きいことに加え、MODIS等においてはプロダクトのバージョン(Collection)の違いによる解析結果への影響が大きいという問題が挙げられていた(Liou and Kar, 2014)。なお、放射量に関しては、放射計で測定されるほかに The Bird Clear Sky Model (BCSM, Bird, 1984)をはじめとした推定式がしばしば利用されていた。

湖内部の水温構造の解明を目的とする後者では、観測された水温に基づいて湖の貯熱量を計算し、

水面の熱交換に加えて河川や地下水等との熱のやり取りを踏まえて最終的な湖の熱収支を評価する。概念としては、湖を 1 つの水体に単純化して考えるボックスモデル(ex. 新井, 1965)に始まり、水温の鉛直分布を表現できるように多層化した 1-D モデル(Thiery et al., 2014), 2 方向の分布を表現できる 2-D モデル(小松・石井, 2008), 複雑な形状をもつ水域への適用が可能な 3-D モデル(ex. 中村ほか, 2001)が確認された。これらは、それぞれ運動方程式・連続の式・移流・拡散方程式に基づいて構築されており、河川や湖底との熱交換もこれに準じて結合される(中村ほか, 2013)。なお、高次元モデルほど詳細な予測値を得ることが出来る反面、計算時間が長い上にパラメータの数が多いため、用途や状況に応じてどの概念を用いるか判断する必要がある。また、入力値として用いる気象データの観測密度は現実的に限られているため、数値解析の再現性や検証方法について注意しなければならない。

1.3. 先行研究：霞ヶ浦の熱収支

霞ヶ浦は大気の影響を強く受ける浅く広い湖沼であり、蒸発量や水温分布など熱に関する研究が数多く行われている。八木ほか(2000)は、水温の変動が大気からの熱輸送に敏感に応答し、貯熱変化量と熱輸送量が等しいことから鉛直 1 次元的な熱収支が成立するとしている。特に夏季には、季節成層が形成されない代わりに水温差から成る日成層が形成され、吹送流の空間分布や移流方向を支配している(北澤ほか, 2008)。一方で、風速が 12ms^{-1} を超えた場合に濁度が上昇することが確認されており、これが湖の貯熱量に負の影響を及ぼすとされている(関ほか, 2006)。

大気熱フラックスについて、宮野(2008)は湖心観測所にて渦相関法によるフラックス観測を行い、熱収支のうち水中熱流量が全体の 7 割を占めること、湖の貯熱効果によって潜熱輸送量の季節変化が緩やかであることを明らかにした。加えて、潜熱輸送量と顕熱輸送量が常に上向きであること、梅雨入りによって夏季においても熱収支が小さくなる月が確認されたことを示した。Sugita et al.(2014)は、長期観測の結果からこの貯熱効果による現象が毎年周期的に起こっていることを明らかにしている。宮野(2010)は、渦相関法を用いたフラックス観測が出来ない降雨イベント時に、それらのデータ補間を担っているバルク法について着目し、バルク輸送係数の導出を行った。その際、低風速条件下においてバルク輸送係数が特徴的に変動し、計算値の誤差が大きくなる傾向があることを明らかにしている。これについて、Wei (2013)及び Wei et al. (2016)は、これが乱流運動エネルギーの僅かな変化に起因している可能性を指摘すると共に、水体一般に調整されたバルク輸送係数の導出式を提案した。伊倉(2010)は、衛星データ及び周辺の気象観測所から得られたデータを元に、バルク法を用いて蒸発フラックスの空間分布を算出した。これより、蒸発フラックスの空間分布が湖面上で一様ではないことを明らかにしている。加えて、他の気象項目の空間偏差が小さいことから、主に風向風速とこれの関数であるバルク輸送係数が蒸発フラックスの空間的な分布に寄与していると述べた。これに対し、原田(2015)は、船上調査と渦相関法を組み合わせたフラックスの移動観測の結果から、土浦入りの湖面熱フラックスの空間分布が水面温度 T_s に依存している可能性を述べている。

1.4. 研究目的

霞ヶ浦では、上記の通り熱収支や熱環境に関する様々なことが明らかになっている。一方で、湖面上の熱フラックスの空間分布について解析した研究は確認できなかった。また、湖の移流による熱変化量の測定が困難な為か、湖の熱環境に対する水中熱流量と移流の影響を空間的に明らかにした研究も確認することができなかった。

以上より、筑波大学によってフラックスの長期定点観測が行われており、尚且つデータ・知見ともに充実している霞ヶ浦の西浦を対象に、湖面上の熱収支の空間分布を明らかにした上で、熱収支に与える移流の影響を時空間的に明らかにしようと考えた。

2. 研究方法

2.1. 研究対象地域

霞ヶ浦は、琵琶湖に次いで日本第 2 位の広さを有する、利根川水系に属した海跡湖で、古くから人々の生活と密接な関係を築いてきた重要な水資源である。しかし、昭和 40 年代後半になると流域における人口増加や産業活性化に伴って水質汚濁が進行し、水質環境基準の「湖沼 A の類型」指定を受け、湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼となった(海老瀬,1994)。これまで、長期的モニタリングや霞ヶ浦富栄養化防止基本計画を始め、霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画の実施によって水質改善が試みられている。

西浦は、茨城県南東部に位置する霞ヶ浦の最大の構成要素で、湖面積は 172km²、平均水深は 3.87m、最大水深は 7.1m の広く浅い湖である。湖底は平坦で、Y.P. 1.00m 時に約 6.88 億 m³の貯水量があり、滞留時間は約 200 日とされている(霞ヶ浦環境科学センター, 2017)。水収支に関して、西浦への流入は河川流入が 11.46 億 m³y⁻¹、湖面降水が 2.32 億 m³y⁻¹、全体で 16.15 億 m³y⁻¹であり、対する流出は、河川流出が 15.32 億 m³y⁻¹、湖面蒸発が 1.19 億 m³y⁻¹、全体で 19.62 億 m³y⁻¹と概算されている。なお、これらの値は 2008 年から 2010 年の平均値であり、土地利用や利水・治水状況の変化によって各比率は年々変化している(山本, 2014)。

2.2. 観測概要

2.2.1. 湖心観測所における筑波大学取得データ

西浦の湖心には、霞ヶ浦湖心観測所と呼ばれる水質自動観測所がある。これは、霞ヶ浦河川事務所によって管理され、1975 年 4 月 1 日から長期的に観測が続けられている。筑波大学は、同施設に 2007 年 5 月 24 日から観測機材を複数設置し(宮野, 2008)、2018 年 1 月現在まで連続的に水文・気象観測を行っている。観測項目は、風速 3 成分 u, v, w [ms⁻¹], 音仮温度 T_{sv} [°C], 水蒸気濃度 ρ_v [gm⁻³], 二酸化炭素濃度 ρ_c [mmolm⁻³], 4 成分放射量 $S\downarrow, S\uparrow, L\downarrow, L\uparrow$ [Wm⁻²], 相対湿度 Rh [%], 水面温度 T_s [°C], 水温 T_w [°C]である。観測所および観測データの詳細は表 1 に示す。本研究では、2014 年 1 月 1 日 1 時から同年 12 月 31 日 24 時までの観測データのうち、4 成分放射量 $S\downarrow, S\uparrow, L\downarrow, L\uparrow$ と相対湿度 Rh 、水面温度 T_s を前 60 分平均値に修正して利用した。ここで、長波放射量 $L\downarrow, L\uparrow$ は後述する式(4)で自動的に温度補正された値を使用した。なお、データロガーの不調により 5 月 5 日 23 時 30 分と 10 月 20 日 23 時 00 分から 12 月 4 日 10 時までの期間のデータが欠測していたため、前者は前後のデータを用いて線形内挿を施し、後者はエラーとして処理した。

2.2.2. 周辺の気象観測

熱収支の空間分布を求めるにあたり、筑波大学が取得したデータ以外の地点での気象観測データも内挿補間する際に利用した。後述する入手データは、それぞれ必要に応じて単位や時間を調整・補正し、欠測値や異常値はエラーとみなして除外した。観測地点および観測データの詳細は表 2~6 と図 1~7 に示す。なお、表内の座標は 10 進法(度 + 分 / 60 + 秒 / 3600)で表記している。

a). 国土交通省関東地方整備局（霞ヶ浦河川事務所）

霞ヶ浦流域内に自動観測所を複数設置し、水文水質データ及び気象データを収集・提供している。管理は主に霞ヶ浦河川事務所と独立行政法人水資源機構が分担して行っている他、流域内の市町村等で観測されたデータも併せて管轄している。本研究では、霞ヶ浦河川事務所調査課より直接提供していただいた気象観測データを利用した。利用データ項目は、気温 T_a [°C], 相対湿度 Rh [%], 風向 WD [16 方位], 風速 U [ms^{-1}], 大気圧 AP [hPa], 日射量 $S \downarrow$ [$\text{MJm}^{-2}\text{h}^{-1}$], 雨量 P [mmh^{-1}], 水温 T_w [°C] である。データを利用した観測所は、掛馬沖、釜谷沖、潮来、湖心観測所、土浦、東村、玉造、出島、小高、波崎、鉾田、麻生沖、鰐川、木原、平山、日川、小川、小野川、牛久、美野里、恋瀬川、河江、岩瀬、真壁、藤沢新田、白浜、北浦の計 27 地点である(表 2)。なお、文中の MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism) も同義である。

b). 国土交通省気象庁 (AMeDAS)

AMeDAS(Automated Meteorological Data Acquisition System)は、全国約 1300 か所に設置されている気象庁の無人観測施設である。1974 年 11 月より運用が開始され、気象 4 要素を観測する観測所は全国に約 840 か所(約 21km 間隔)ある。本研究では、2014 年の特別値データをホームページからダウンロードして利用した。利用データ項目は、気温 T_a [°C], 相対湿度 Rh [%], 風向 WD [16 方位], 風速 U [ms^{-1}], 大気圧 AP [hPa], 日射量 $S \downarrow$ [$\text{MJm}^{-2}\text{h}^{-1}$], 雨量 P [mmh^{-1}] である。データを利用した観測所は、鹿島、鉾田、土浦、つくば館野、龍ヶ崎、下妻、笠間、古河、水戸、常総、坂東、江戸崎、柿岡、門井、美野里の計 15 地点である(表 3)。

c). 環境省国立環境研究所（霞ヶ浦臨湖実験施設）

この実験施設は茨城県稲敷郡美浦村に設置され、国立環境研究所によって管理されている。敷地内では様々な気象等の観測が行われており、1991 年 5 月から現在までの観測データが公開されている。本研究では、2014 年の時間データファイルをホームページからダウンロードして利用した。データ項目は気温 T_a [°C], 相対湿度 Rh [%], 風向 WD [16 方位], 風速 U [ms^{-1}], 大気圧 AP [hPa], 日射量 $S \downarrow$ [$\text{MJm}^{-2}\text{h}^{-1}$], 雨量 P [mmh^{-1}], 水温 T_w [°C] である。観測場所は、臨湖実験施設の実験管理棟屋上と 150m 沖合に位置する取水塔屋上の 2 地点である(表 4)。

d). 環境省国立環境研究所（環境数値データベース）

環境省が都道府県・指定都市から報告を受けた大気常時測定結果の各測定における 1 時間値測定データを収録したもので、環境省水・大気環境局大気環境課が編集し、2009（平成 21 年度）より一般公開している。一般大気環境測定局及び自動車排出ガス測定局において観測された大気汚染物質及び一般気象項目が収録対象となっている。公開されているデータは会計年度で区切られているため、本研究では 2013（平成 25 年）と 2014（平成 26 年）の茨城県の時間値データをホームページよりダウンロードし、時系列調整を施して利用した。利用データ項目は気温 T_a [0.1°C], 相対湿度 Rh [%], 風向 WD [16 方位], 風速 U [0.1ms^{-1}], 日射量 $S \downarrow$ [$0.01\text{MJm}^{-2}\text{h}^{-1}$] である。データを利用した観測所は水戸石川、水戸東部、土浦保健所、土浦中村南、石岡杉並、古河保健所、下妻、笠間市役所、東茨城大戸、大宮野中、鹿島宮中、鹿島事務所、神栖消防、潮来保健所、江戸崎公民館の計 15 地点である(表 5)。これ以降、霞ヶ浦臨湖実験施設(Rinko)と併せて NIES (National Institute for Environmental

Studies)と表記する場合がある。

e). 防衛省航空自衛隊 (百里基地)

航空気象隊は航空支援集団の航空気象群に属し、気象観測や予報などの業務を毎日 24 時間行い、基地に所在する各飛行隊に気象情報を提供している(百里基地, 2017)。本研究では、百里気象隊予測班より、直接提供していただいた気象観測データを利用した。利用データ項目は気温 T_a [°C], 相対湿度 Rh [%], 風向 WD [°], 風速 U [KT], 大気圧 AP [hPa]である。単位変換は気象庁(1998)を参考に、風速は $1[KT] = 0.514444[ms^{-1}]$ として計算し、風向は北向きを 0° として $-11.25^\circ < \text{方位} \leq +11.25^\circ$ の範囲で 16 方位に変換した。なお、VBR はエラー値として扱った(表 6)。以後、JASDF (Japan Air Self-Defense Force)と表記する場合がある。

2.2.3. 水文・水質データ

霞ヶ浦西浦では、国立環境研究所によって1976年から、霞ヶ浦河川事務所によって1972年から毎月湖内数地点で水質調査が行われている(図 8)。測定されたデータはそれぞれのホームページよりダウンロードして利用することができる。本研究では、a)2013 年と 2014 年の霞ヶ浦 DB Water quality ファイルと、b)2014 年の公共用水域水質測定結果表を取得し、その中の水深 z [m], 水温 T_w [°C], 水中懸濁物 SS [mgL⁻¹], 懸濁有機窒素 PON [mgL⁻¹]のデータを編集・使用した。調査地点に関して、国立環境研究所は St.1, St.3, St.7, St.9, St.12 の 5 地点、霞ヶ浦河川事務所は掛馬沖、木原沖、牛込沖、高崎沖、玉造沖、湖心、西の洲沖、麻生沖、高浜沖、沖宿沖の 10 地点、計 15 地点である(表 7)。各月の水質調査時刻については表 8 に示した。なお、St.1 の 9 月は欠測であった。

西浦内部の水位 h [m]については、国土交通省管轄の水文水質データベースから 2014 年の水位 1 時間データをダウンロードして利用した。観測地点は、木原、大山、出島、湖心、八木薪、井上、麻生沖の 7 地点である(表 9, 図 8)。各調査地点の湖底深度は、国土地理院の電子国土 web で公開されている霞ヶ浦の湖沼図及び上記水質調査地点の位置情報より決定した。

河川を通じた熱交換量を計算するため、国土交通省河川事務所より提供いただいた流入出河川の流量 Q [m³s⁻¹], 水温 T_w [°C], 水位 h [m]を利用した(表 10, 図 9)。本研究の対象期間である 2014 年度は、流入河川の流量観測が行われていなかったため、熱交換量計算に必要なデータが揃っていない 2007 年 6 月から 2008 年 11 月に観測されたデータを用いて計算を行った。観測地点は、恋瀬川、桜川 (藤沢新田)、小野川、潮来である。このほかに、水温差の計算に際して掛馬沖、湖心、麻生沖の水温データも利用した。加えて、河川の断面積 A [m²]は同地点の観測水位及び断面積計算書 (兼原測量設計株式会社, 2008)を用いて計算し、断面積に関する情報が無い潮来については異常値を取り除いた水位・流量データ(173 データ)から近似式 ($A = 793.22 e^{0.2379 h}$) を導出し、水位データを基に断面積を計算した。なお、ここで用いたデータは全て 1 時間値である。

2.2.4. 地理情報データ

範囲計算や空間内挿, 作図にあたって a)国土交通省国土地理院が提供している基盤地図情報から 5m メッシュの数値標高モデル, b)国土交通省国土政策局国土情報課が提供している国土数値情報から水域, 地形, 土地利用, 政策区域のファイルをそれぞれダウンロードして利用した. なお, 測地系は JGD2000 に統一した.

2.3. 熱フラックス計算

2.3.1. 湖面の熱収支

下向きを正として, 湖面における熱フラックス G [Wm^{-2}]は近藤(1994)より次式の残差として求められる.

$$G = R_n - H - LE \quad (2)$$

ここで, 正味放射量 R_n [Wm^{-2}], 顕熱フラックス H [Wm^{-2}], 潜熱フラックス LE [Wm^{-2}]である.

2.3.2. 放射収支

正味放射量 R_n は地表面の放射収支式の残差として求められ,

$$R_n = S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (3)$$

で表すことが出来る(杉田ほか, 2009). ここで, 下向き短波放射量 $S \downarrow$ [Wm^{-2}], 上向き短波放射量 $S \uparrow$ [Wm^{-2}], 下向き長波放射量 $L \downarrow$ [Wm^{-2}], 上向き長波放射量 $L \uparrow$ [Wm^{-2}]である. 放射収支式の計算については全て実測値を用いたが, 下向き短波放射量 $S \downarrow$ 以外は湖心観測所のみの値を適用し, 下向き短波放射量 $S \downarrow$ は周辺観測所のデータを含めて内挿補間した値を適用した. なお, 実測された長波放射量とは次式で補正された値である.

$$L \downarrow \text{ or } L \uparrow = \left(\frac{U_{py}}{E_{py}} \right) + 5.67 \times 10^{-8} T_{py}^4 \quad (4)$$

ここで, 電圧出力 U_{py} [μV], 感度 E_{py} [$\mu\text{VW}^{-1}\text{m}^{-2}$], センサー温度 T_{py} [K]である.

2.3.3. 顕熱フラックス・潜熱フラックス

顕熱フラックス H は、大気－湖水間の熱伝達に伴う熱交換量であり、気温－水温差や風速に依存する。潜熱フラックス LE は、水の蒸発により失われる熱量であり、湿度勾配や風速に依存する。これらのフラックスの算出において、これまで様々な方法が提案されている。渦相関法は、気温と鉛直風の共分散としてフラックスを直接測定できる方法だが、オープンパス方式のセンサーを用いる場合において降雨イベント時に観測できないことに加え、高価な観測機材と定期的な維持管理が必要のため、広域での観測環境を整えることが難しい(杉田ほか, 2009)。プロファイル法および熱収支・ボーエン比法(The Energy Balance Bowen Ratio method, EBBR 法)は、一般的な気象観測データを利用してフラックスを推定することができるが、2 高度の観測値が必要であることから、広域への適用が難しい(Brutsaert, 2008)。熱収支法(The Energy-Balance Wind and Scalar Profile method, EBWSP 法)は条件付きで 1 高度の観測値からフラックスを推定できるが、 G が既知である必要がある上に夜間の接地逆転層発生時に精度が悪いこと(Kai and Higinoia, 2014)から、今回利用することができない。以上より、一般的かつ大気中 1 高度(= 地上 10m)の気象観測データからフラックスを推定できるバルク法を用いて各フラックスを推定することとした。Sugita et al. (2014) によると、霞ヶ浦湖心において、渦相関法による蒸発フラックス実測値とバルク法による蒸発フラックス推定値の誤差が $RMSE = 0.03 \text{ mmh}^{-1}$ と確認されていることから、当該地域の適用に際して十分な精度が確保されていると言える。

顕熱フラックス H と潜熱フラックス LE は、上向きを正としてバルク法によって次式で表される(近藤, 1994)。

$$H = \rho_a C_p C_h U_{10} (T_s - T_a) \quad (5)$$

$$LE = \rho_a L_e C_e U_{10} (q_s - q_a) \quad (6)$$

ここで、大気密度 $\rho_a [\text{kgm}^{-3}]$ 、空気の定圧比熱 $C_p [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$ 、蒸発潜熱 $L_e [\text{Jkg}^{-1}]$ 、顕熱輸送のバルク輸送係数 $C_h [-]$ 、潜熱のバルク輸送係数 $C_e [-]$ 、水上 10 m 高度の水平風速 $U_{10} [\text{ms}^{-1}]$ 、水面温度 $T_s [^{\circ}\text{C} \text{ (or K)}]$ 、水上 10 m 高度の気温 $T_a [^{\circ}\text{C} \text{ (or K)}]$ 、水面比湿 $q_s [\text{kgkg}^{-1}]$ 、水上 10 m 高度の比湿 $q_a [\text{kgkg}^{-1}]$ である。なお気温 T_a と比湿 q_a に関して、観測高度差による影響が小さいことが明らかにされている(伊倉, 2010)ため、高度補正を行わずに実測値をそのまま適用した。

大気密度 ρ_a は永田ほか(2012)より、

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{273.15 + T_a} \cdot \frac{AP}{1013.25} \cdot \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{AP}\right) \quad (7)$$

であり、大気圧 $AP [\text{hPa}]$ は実測値を与えた。空気の定圧比熱 C_p は一定とみなしてよいとされており、今回は近藤(1994)と Brutsaert(2008)によって示されている値(= 1005)を定数として与えた。

蒸発潜熱 L_e は実験式として杉田ほか(2009)より、

$$L_e = a + bT_a \quad (8)$$

で与えられ、 $a = 2.50025 \times 10^6$ 、 $b = -2.365 \times 10^3$ である。

次にバルク輸送係数について．通常，例えば潜熱のバルク輸送係数は，

$$C_e = \frac{k^2}{\left\{ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_{sm}\left(\frac{z}{L}\right) \right\} \left\{ \ln\left(\frac{z}{z_{0v}}\right) - \Psi_{sv}\left(\frac{z}{L}\right) \right\}} \quad (9)$$

で求められ(杉田ほか, 2009), 尚且つ各湖にてキャリブレーションして決定することが望ましいとされている(Brutsaert, 2008). ここで, それぞれ風速と地表面比湿の粗度長 z_0 [m], z_{0v} [m], 大気安定度補正関数 Ψ [-], モニンオブコフ長 L [m], カルマン定数 k [-] ($= 0.4$), 観測高度 z [m]である. しかし, 既に霞ヶ浦の湖面上においてキャリブレーションされた経験式があるため, 今回は Wei et al. (2016)に示された次式を用いてバルク輸送係数 C_e , C_h を算出した.

$$C_h = \frac{c_1}{U_{10}} \cdot \exp[-\{ \ln(U_{10}) - c_2 \}^3] + c_3 + c_4 U_{10} \quad (10)$$

$$C_e = \frac{d_1}{U_{10}} \cdot \exp[-\{ \ln(U_{10}) - d_2 \}^3] + d_3 + d_4 U_{10} \quad (11)$$

ここで, $c_1 = 2.121021886 \times 10^{-3}$, $c_2 = 0.2751502697$, $c_3 = 9.120266534 \times 10^{-4}$, $c_4 = 1.6479059 \times 10^{-5}$, $d_1 = 9.078622125 \times 10^{-4}$, $d_2 = 0.2173819734$, $d_3 = 1.137911624 \times 10^{-3}$, $d_4 = 1.538412447 \times 10^{-5}$ である. 計算は各グリッドで行い, Sugita et al.(2014)に従って $U_{10} < 0.6 \text{ ms}^{-1}$ の場合は $U_{10} = 0.6 \text{ ms}^{-1}$ の定数として扱った.

地上 10m 高度の水平風速 U_{10} は, 次の補正式によって求めた(杉田ほか, 2009).

$$U_{10} = U \cdot \frac{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (12)$$

ここで, 各観測所で観測された風速 U [ms^{-1}], 風速の観測高度 z [m], 風向別粗度長 z_0 [m]である. 風向別粗度長 z_0 は, 伊倉(2010)と原田(2015)によって求められた値を必要に応じて 16 方位に変換して使用した(表 11). 風向別粗度長 z_0 は, 各観測所を中心として風向別に中心角 45° , 半径 $100z$ [km] の扇形を作成し, その範囲内の土地被覆割合に基づいて決定されている. 計算方法は, 伊倉(2010)に詳しい.

水上 10m 高度の比湿 q_a と水面の比湿 q_s は, 実測された大気圧 AP を用いてそれぞれ,

$$q_a = \frac{0.622 e_a}{(AP - 0.378 e_a)} \quad (13)$$

$$q_s = \frac{0.622 e_s}{(AP - 0.378 e_s)} \quad (14)$$

で表される(永田ほか, 2012).

大気中の水蒸気圧 e_a [hPa]は近藤(1994)より次式にて,

$$e_a = \frac{Rh}{100} \cdot 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_a}{273.15+T_a}} \quad (15)$$

であり, 相対湿度 Rh [%]と気温 T_a [°C]は実測値を与えた. 飽和水蒸気圧 e_s [hPa]は水面が飽和していることを前提として, 水面温度 T_s を用いて

$$e_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_s}{273.15+T_s}} \quad (16)$$

で求めた(近藤, 1994).

2.3.4. ボックスモデル

水中の貯熱量 S [Jm⁻²]は, 新井・西沢(1974)を参考に,

$$S = \sum_{i=1}^N \bar{\rho}_{wi} C_w \bar{T}_{wi} h_i \frac{(\bar{h} + W)}{\sigma h} \quad (17)$$

で表した. ここで, 水面から i 番目の層の平均水密度 $\bar{\rho}_{wi}$ [kgm⁻³], 水面から i 番目の層の平均水温 $\bar{T}_{wi}$ [K], 水面から i 番目の層の厚さ h_i [m]であり, 水の比熱 C_w [Jkg⁻¹K⁻¹]は Bruseart(2008)より $T_w = 20$ [°C]のときの値(= 4182)を定数として与えた. 加えて, 水面(0m)の温度 T_w は熱収支式の計算と整合性を図るために湖心観測所の値 T_s に置き換えて湖面全体で一様と仮定した. σh [m]は調査時の観測水深(全水深), $\bar{h}$ [m]は調査当日 8 時~15 時までの水位の平均値で, 水温調査地点から最も近い水位観測データをそれぞれ適用した. W [m]は Y.P.=0m から湖底までの高さを表し, 観測地点ごとに一定値を与えた. 詳細については後文にて説明する

観測から得られた水深及び高さデータについて, 船上調査であることから観測位置に誤差が生じ, 湖底の高さが年間を通して一定にならない可能性が考えられる. その場合, 見かけの水位変動が生じ, 水中の貯熱量 S を正しく評価することができない. そこで, 環境省及び国交省が行った現地調査によって得られる水深データをそのまま使用するのではなく, 以下の手順により W [m]を決定し, 水柱高の変動が水位のみに影響されるように修正した.

- (1) 水質調査当日, 7 時~16 時の間の水位変動が小さい日(0.02 mday⁻¹ 以下)のみを対象とする.
- (2) 対象の日について, 調査地点から最も距離が近い水位観測所の水位データ(Y.P.)と調査により得られた観測水深 σh [m] (Y.P.)の差を求め, Y.P. =0 m から湖底までの高さを計算する.
- (3) 計算によって得られた湖底までの高さのうち, 通年で最小の値を各地点で選択する.
- (4) 電子国土 web 上の湖沼図(T.P.)と目視で比較し, 妥当性が確認された値をそれぞれの W [m]として決定する(T.P. = $W + 0.84$).

各調査地点の表層水温を湖心の水面温度 T_s に置き換えて計算することについて, その仮定が計算結果に及ぼす影響を検証した. 湖心の水面温度 T_s の値と, 国交省と環境省が 0 m 水深の水温とし

て記録している値を表 12 にまとめ、それを時系列で比較したものを図 10 に示す。湖心の表面温度と平均値を比べると、標準偏差は小さいものの両者の間に常に 1°C 以上の差が生じていることが分かる。この差は測器の違いによって生じるもので、各省が水面から数 mm～数 cm の深度を 0 m と定義していることが原因であると考えられる。湖心を対象に、測定された水温とそれに基づいて計算された熱容量を比較した結果を表 13 と図 11 に示した。それにより、ボックスモデル計算に与えるそれらの影響は小さい(全体の 0.001%未満)と判断できたが、今後更に厳密な計算を行う際には水面温度と 0 m 水深の水温間に数 cm の層を随時追加する必要があると考える。加えて、 $T_s - T_w(0m)$ の差は 0.58～6.64°C と大きい上に一定ではないことから、表面温度の不足データに水温データを利用して補正・補間することは適切ではないと判断した。

水の密度 ρ_w は UNESCO(1983) より、

$$\rho_w = a_1 + a_2 T_w - a_3 T_w^2 + a_4 T_w^3 - a_5 T_w^4 + a_6 T_w^5 \quad (18)$$

で求められる。ここで、 $a_1 = 999.842594$, $a_2 = 6.79352 \times 10^{-2}$, $a_3 = 9.095290 \times 10^{-3}$, $a_4 = 1.001685 \times 10^{-4}$, $a_5 = 1.120083 \times 10^{-6}$, $a_6 = 6.536332 \times 10^{-9}$ である。

水平移流による平均熱フラックス $\overline{Q_{ad}}$ [Wm^{-2}] は、次式(八木ほか, 2000 を参考)より求めた。

$$\overline{Q_{ad}} = \frac{dS}{dt} - \bar{G} - \overline{Q_{gd}} - \overline{Q_{rain}} \quad (19)$$

ここで、期間 t [s] における貯熱変化量 dS/dt [Wm^{-2}]、大気側との平均熱フラックス $\bar{G}$ [Wm^{-2}]、湖底との平均熱フラックス $\overline{Q_{gd}}$ [Wm^{-2}]、降水による平均熱フラックス $\overline{Q_{rain}}$ [Wm^{-2}] である。期間 t [s] は水温調査日の間の時間、つまり平均化時間数を表しており、それぞれの機関の調査日に応じて決定した(表 14)。なお、霞ヶ浦河川事務所の調査時間が 8 時～15 時に行われていること、国立環境研究所の調査時間が不明だったことを考慮して、全ての調査は一律で 10 時に行われていると仮定して計算を行った。この仮定によって生じる入力平均値への影響は 0.1 Wm^{-2} 程度であり、平均化時間のスケールを踏まえて無視できると考えた。

降水による熱フラックス Q_{rain} は、降水の温度と大気中の温度が平衡状態であり(Imberger and Patterson, 1981)、水体が鉛直方向に完全混合していると仮定し、水体の平均温度と気温の差 ΔT [K] ($= |T_{wp} - T_a|$) と降水量 P [ms^{-1}] を用いて

$$Q_{rain} = \rho_w C_w \Delta T P \quad (20)$$

として表される。ここで、水の密度 ρ_w [kgm^{-3}] は式(18)に T_a を代入して求め、水の比熱 C_w [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] は式(17)と同じ値を使用した。 ΔT の算出について、降水量 P と気温 T_a は 1 時間ごとに測定され、かつ随時変動しているため、水体の平均温度 T_{wp} として各月の水温鉛直分布の調査結果を用いることは現実的ではない。西浦内部の水温調査結果に基づいて、水深 1 m ごとの平均水温及び標準偏差を求めたところ、各月の標準偏差は 0.13～0.68°C 程度であり、水面温度を除いて鉛直方向の水温変化は小さいことが確認された(図 12)。そこで、湖内数地点で 1 時間ごとに観測されている水深 0.5 m の水温を Kriging 法によって空間内挿し、ボックスモデルの計算地点ごとに、内挿した水温 T_w と毎月の

調査によって得られた水温の鉛直平均 $\overline{T_w}$ との回帰直線を求めた。そして、その重み付けを水深 0.5m 水温 T_w に施すことで得られた値を、1 時間ごとの水体の平均温度 T_{wp} として利用することにした ($T_{wp} = a \cdot T_w + b$)。その詳細は表 15 と図 12・13 に示す。

湖では、湖底との平均熱フラックス $\overline{Q_{gd}}$ が他のフラックスに比べて小さく、無視できるとされる場合が多い (Tony et al., 2012; 伊藤・靱井, 2010)。ただし、浅い湖においては湖底まで日射が到達することが知られているため、考慮する必要も考えられる。本研究において、湖底との平均熱フラックス $\overline{Q_{gd}}$ をどう扱うべきか、以下の手順で確認した。

水中に入射した短波放射は深度に伴い吸収・散乱によって指数関数的に減衰する。深度 z [m] における短波放射量 I_z [Wm^{-2}] は Kirk (1983) より以下の式で示される。

$$I_z = (S \downarrow - S \uparrow) \exp -K_d \cdot z \quad (21)$$

この式における水中の鉛直消散係数 K_d [m^{-1}] を求めるにあたり、中村・守弘 (2016) によって霞ヶ浦に対して求められた以下の重回帰推定式を利用した。

$$K_d = 0.15 \times POM + 0.07 \times Tripton + 0.321 \quad (22)$$

ここで、懸濁有機物質 POM [mgL^{-1}] と懸濁無機物質 $Tripton$ [mgL^{-1}] は以下の式で

$$POM = \frac{PON}{0.063} \quad (23)$$

$$Tripton = SS - POM \quad (24)$$

と表される。ここで、懸濁有機窒素 PON [mgL^{-1}] と水中懸濁物 SS [mgL^{-1}] は実測値である。

各ボックスモデル計算地点で算出した水中の鉛直消散係数 K_d と、各地点の年最大正味短波放射量 $(S \downarrow - S \uparrow)_{max}$ を入力値として式 (25) を計算した。その結果、最深層の水温と湖底の温度の差が小さく伝達による熱交換が活発ではないこと (図 14)、及び湖底に対して日射の透過による直接的な加熱が行われていないこと ($I_{Bottom} < 1 \text{ Wm}^{-2}$) が確認できたため (図 15)、 $\overline{Q_{gd}} = 0$ として計算を行った。

2.4. 空間内挿

2.4.1. 内挿方法の検討

先述の式を用いて水平移流による平均熱フラックス $\overline{Q_{ad}}$ を算出するにあたり、水温調査地点における湖面上の熱収支式を解く必要がある。しかし、気象観測地点と水温の調査地点は一致していない場合がほとんどである。本研究では、この前提条件を満たすために周辺の気象観測データを空間内挿法によって湖面全体に補間し、各調査地点における熱収支を計算した。空間内挿法には様々な方法があり、研究用途や状況に応じて適切なものを選択することが望ましい。空間内挿法の違いによる結果への影響について、山田 (2007) は霞ヶ浦流域の降水量 P を対象に、Kriging 法の結果と IDW 法とスプライン法による結果との比較を行っており、内挿法の違いによって $\text{RMS} = +23 \sim +58$

(mm y^{-1})の差が生じることを明らかにしている。

本研究では、空間内挿法の違いが熱収支の計算結果に及ぼす影響について、シェパード法（調整 IDW 法）と最小曲率法（スプライン法）を用いた場合の結果と、Kriging 法を用いた場合の結果との比較を行った。なお、ここで入力に用いたデータは、後述する晴天指数によって選別された 4 日間の快晴日を基準に、それぞれの日から前後 3 日を加えた計 4 週間(672 データ)の標本データである。そのため、今回の比較結果が母集団でも整合性が取れているのか検証するために、t 検定を行った。その結果を表 16 と図 16～21 に示す。このうち、表 16 は Kriging 法との関係性を個々の指標で表したものである。相関係数 R と決定係数 R^2 は LE と H を除いて 1 に近い値を示しており、全体的な傾向が内挿法の違いに左右されにくいことが確認できた。一方で、両側確率 t-test および 2 乗平均平方根誤差 RMSE では 2 集団の大部分が不等分散であること、それが母集団においても整合することを示しており、1 グリッドごとの値に関しては内挿法の違いが結果に大きく左右することが明らかになった。そして、それは特に IDW 法を用いた場合や、空間偏差の大きい U , LE , H といった項目を内挿する際に顕著に現れることが確認された。

これらの結果を踏まえ、地球統計学において信頼性が高く(正路・小池, 2007), サンプル同士の空間的自己相関を考慮できるために、サンプル数が少なくデータ精度の低い状況での空間内挿法として適している(ESRI ジャパン株式会社, 2017), 通常 Kriging 法(Ordinary Kriging method)を使用することとした。基礎式は次式で表される。

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (25)$$

この式について、 i 番目の位置における計測値 $Z(S_i)$, 予測位置と計測位置間の空間的關係によって決まる i 番目の位置における計測値の不明な加重 λ_i , 予測位置 S_0 [°], 計測値の数 N [°] であり、各項の単位は対象の計測値に依存する。

使用したソフトは Golden Software 社の Surfer8 と Surfer12, 及び Esri 社の ArcGIS である。内挿範囲は(Longitude, Latitude) = (140.7077, 36.1612) ~ (140.2083, 35.8408)であり、グリッドサイズは 90m×90m である。内挿した項目は気温 T_a [°C], 比湿 q_a [kgkg $^{-1}$], 下向き短波放射量 $S_{\downarrow}$ [Wm $^{-2}$], 10m 高度の風速 U_{10} [ms $^{-1}$], 蒸発潜熱 Le [Jkg $^{-1}$ K $^{-1}$], 水温 T_w [°C], 雨量 P [mmh $^{-1}$]であり、内挿周期は毎 1 時間、内挿期間は 1 年間である。これを西浦の範囲で抜き出し、ASCII データに変換した上で解析を行った。西浦の湖面を再現するグリッド数は 24512 個(≒198 km 2)となっており、茨城県霞ヶ浦環境科学センター(2014)により報告されている西浦の湖面積 (172 km 2) と比べて計算上 26 km 2 もの差が生じている。これは、グリッドの輪郭が正方形(ラスターデータ)で構成されているため起こる問題である。本研究では、水温調査地点が含まれるグリッドのデータを局所的に利用することが主眼に置かれている。加えて、湖全体を面的に述べる際には湖全体平均値 [Wm $^{-2}$]と湖面積 (172 km 2) を乗じて算出しているため、この問題は無視できるとして考察を行った。

2.4.2. 予測データの検証

Kriging 法を適用するにあたり、湖内の観測所だけでは観測密度が不十分であることから大部分を陸面での観測データによって補っている。陸面で得られたデータに基づいて湖面上の値を予測する場合、観測所の土地被覆が異なることに依る影響はどの程度あるのか、それを明らかにするために予測精度の検証を行った。

方法には交差検証を採用した。これは、手元にある標本データから解析するデータ(Training set)を取り出し、それ以外に残った標本データ(Testing set)を用いてトレーニングセットの値を予測し、トレーニングセットの真値と予測値を比較することで解析自身の妥当性を検証する一般的方法である。今回は、湖内の観測所のうち、気象観測項目が充実している湖心観測所と掛馬沖のデータをトレーニングセットとして、その他の観測所のデータからそれら2地点の値をKriging法によって予測した。ただし、2014年は掛馬沖において相対湿度 Rh の観測が行われていなかったため、掛馬沖での比湿 q の検証は行わず、代わりに釜谷沖を対象として比湿の検証を行った。

結果を表17, 18と図22～図31に示す。地点別に比較すると、湖心観測所よりも掛馬沖での予測精度が悪く、決定係数 R^2 も小さかった。これは、位置情報に基づいて予測値を算出する内挿補間法の性質と陸面と水面の気象条件の違いが相互的に作用した結果、陸地からの距離に近い掛馬沖において陸面の影響が色濃く表れたためではないかと推察する。RMS(二乗平均平方根)、RMSE 及び RMSPE(平均平方二乗誤差率)に関しては両地域とも大きく、特に日射量 $S\downarrow$ と風速 WS と高度補正後の風速 U_{10} に関して大きなバラツキが確認された。これに関して、掛馬沖(または釜谷沖)に湖心の値を直接代入した場合の予測精度を求めた結果、気温 Ta と比湿 q を除いてクリギング法の予測精度と同程度か、僅かに向上することが明らかになった。霞ヶ浦湖面上と周辺の陸面での観測値の違いについて、以前にも伊倉(2010)に指摘されていることから、空間変動性の高い気象項目を予測する際には、観測環境を踏まえて項目別に内挿法を決定する必要があると考える。なお、ここでの議論はあくまでも予測精度の検証である。本研究で扱うデータは、湖内全ての観測所の値を含めたものであり、どの比較対象よりも予測精度の良いものを使用している。

3. 結果と考察

3.1. 湖面における熱収支（全体傾向）

計算によって得られた熱収支の 1 時間平均値から、1 ヶ月平均値を求め、空間的な標準偏差と共に図 32 に示した。ここで、1 時間平均値は西浦湖面全体の平均値を指す。加えて、西浦湖面上の下向き短波放射量 S_d 、気温 T_a 、水位 h の月平均値と降水量 P の月合計値も併せて表示した。

図 32 において、水中にもたらされる熱フラックス（以下、水中熱流量）が正味放射量の変動を追従していることが確認できた。また、正味放射量は下向き短波放射量と時間変動傾向が似ており、例えば降水量の多い梅雨の時期（6 月）に見られるように、天候の影響を強く受けていることが示された。次に、潜熱フラックスと顕熱フラックスについてみると、それらのピークが水中熱流量及び正味放射量のピークから 2 ヶ月ほど遅れていることが確認できた。この遅れは Sugita et al., (2014) にも報告されており、図 32 から考察するに湖の貯熱効果または気温との強い関係性から成るものと考えられる。更に、この図における熱収支についての詳細を表 19 に示した。月平均でみると、年間を通して水中熱流量以外の熱収支項は正の値であった。これより、西浦は潜熱・顕熱フラックスによって冷やされ、正味放射量によって温められる傾向にあることが分かった。年平均値では正味放射量 (105.2 Wm^{-2}) が最も大きく、続いて潜熱フラックス (74.7 Wm^{-2})、顕熱フラックス (20 Wm^{-2}) となっており、地表面が常に飽和状態である水体一般の特徴と一致した。一方で、水中熱流量は 2～7 月を除いて負の値をとっており、年平均では 11 月の値が無い為に 10.3 Wm^{-2} ではあるものの、年間の収支が 0 に近い値を示していた。

今回の計算結果が正しいかどうか検証するべく、先行研究(Sugita et al., 2014)によって求められた 2008 年から 2012 年の熱収支項の平均値と本研究で求めた 2014 年の熱収支項を比較した(表 20, 図 33)。両者とも湖心観測所を対象としており、熱収支式の計算にはバルク式(バルク輸送係数の決定には同様の式を使用)と放射収支式を同じく用いている。また、図 33 には 5 年間の熱収支から算出された標準偏差も表示した。図より、全体的な傾向は一致しているものの、5 年間の平均値に対して潜熱フラックスは値が高く、顕熱フラックスに関しては値が低く、両者とも標準偏差の範囲内に収まっていない場合がみられた。ただし、正味放射量は例年に近い値を示しており、水中熱流量も例年と比較して類似した変動傾向を示していた。計算過程を再確認してみても問題が見つからなかったため、この計算結果を妥当であると判断し、考察を進めることにした。

続いて水中熱流量、及び湖面の熱収支式の各項に対して、どの要因による影響度が大きいのか数値的に明らかにするため、それぞれ入力パラメータの寄与率 R^2 (決定係数)と t 値を求めた(表 21)。寄与率とは、説明変数の変動が回帰によってどれだけ説明されたかという比率であり、 t 値は説明変数が目的変数に対してどの程度影響するかを表したものである。どちらも、値が大きいほど影響力が大きいと判断できる(豊田, 2017)。これらを求める上で使用したデータは、計算によって得られた 1 時間平均値に基づいて算出した西浦湖面全体の平均値である。なお、計算結果における P 値 (有意確率) が全て 0.05 未満であることを確認した上で分析を行った。その結果、潜熱フラックスには比湿度による影響が最も大きく、次いで風速の影響が大きいことが分かった。一方で顕熱フラックスでは、温度差の影響が大きいのにに対し、潜熱フラックスほど風速の影響が大きいことが示された。正味放射量及び水中熱流量に対しては、フラックスや放射の向きによって影響が二分していたために一概には言えないが、正味放射量には下向き短波放射量が、水中熱流量には正味放射量がそれぞれ比較的大きく影響していることが確認された。

3.2. 湖面における熱収支（時空間分布）

西浦湖面上における熱収支項，特に水中熱流量について，時間変化と空間分布を考察する．ここで，先述より正味放射量の挙動が重要であることが分かっているため，特に正味放射量の分布や変化と関係が深い日射量が卓越する快晴の日を各季節で1日ずつ選択し，水中熱流量の季節・日変化及び空間分布を確認することにした．

本研究では快晴の日を a)湖面上で雨量が観測されておらず，b)晴天指数 $Kr \geq 0.6$ （田村ほか，2002）の条件を満たす日と定義した．晴天指数 Kr は，大気を通過して地上に到達する日射量の割合から天候状態を判断する基準値であり，田村ほか(2002)より

$$Kr = \frac{\sum_{i=1}^{24} S \downarrow_i}{\sum_{i=1}^{24} SH_i} \quad (SH_i, S \downarrow_i \geq 0) \quad (26)$$

で表される． SH は大気外水平面日射量 [Wm^{-2}]（計算式は付録を参照）である．また，ここで用いる日射量は内挿補間された湖面全体の平均値を使用した．季節の期間については気象庁(2016)によって定義されている区分方法に倣い，冬(12月～2月)，春(3月～5月)，夏(6月～8月)，秋(9月～11月)とした．なお，つくば館野観測所(AMeDAS)において，毎日9時に目視による天気観測(気象庁，2016)が行われているが，これによって快晴と判断された日でも西浦湖面上で雨量が確認される場合があったため，この観測データは考慮しないこととした．

図32で示された通り日射量への天候の影響も無視できないため，快晴の日に加えて曇りの日（晴天指数 $Kr \leq 0.4$ かつ日積算降雨量 = 0）と雨の日（晴天指数 $Kr \leq 0.4$ かつ日積算降水量 ≥ 30 mmで気温 $> 0^{\circ}C$ ）についても各季節で1日ずつ選択し，同様の解析を行った．これら条件により選定された解析対象日の詳細を表22に，晴天指数 Kr の計算結果を図34～図37にまとめた．

選定日における熱収支項と，それに付随する内挿補間されたグリッドデータの時空間分布を図38～67に示した．項目は，水中熱流量 G ，顕熱フラックス H ，潜熱フラックス LE ，正味放射量 Rn ，10 m 風速 U ，潜熱バルク輸送係数 C_e ，顕熱バルク輸送係数 Ch ，水面温度と気温の差 $T_s - T_a$ ，水面比湿と比湿の差 $q_s - q$ ，水深0.5m水温 T_w である．これらのうち，空間分布図には選別日における日平均値を使用し，時間変化図には西浦湖面上の1時間平均値を使用した．ここで，標準偏差と平均値は空間分布より算出した値である．加えて，選定日の1日平均値から標準偏差と変動係数（データのばらつきを相対的に評価する無次元数で，（標準偏差）/（平均値）で求めることが出来る値）を求め，表23にまとめた．

まず水中熱流量について述べる．時間変化は，寄与率が他の熱収支式の項と比べて格段に大きい正味放射量と基本的に一致しており，冬に小さく夏に大きいという季節変化や夜間に小さく昼間に大きいといった1日の変動傾向がみられた．一方で，図38の夏季の値にみられるように，風が強い日は潜熱フラックスが卓越する影響で値が低くなり，相対的に正味放射量の影響が小さくなることが確認された．その場合，それと同時に標準偏差も大きくなることが分かった．空間分布図をみると，時間変化とは一変して正味放射量の影響が確認できなかった．春季の桜川河口付近のような絶対値の大きさに起因する例外があるものの，正味放射量の変動係数が0.1程度と小さいために水中熱流量の空間的な分布に対する影響は小さいのではないかと考えた．なお，秋季雨天の正味放射量の変動係数は， -4.2 と大きい値を示しているが，平均値が -1.3 と非常に小さいために水中熱流量の空間分布への影響は確認できなかった．水中熱流量の空間分布については，季節や天候に依らず湖心から

湖尻にかけて比較的に低い値をとっており、土浦入で高い値をとっていた。

次に顕熱・潜熱フラックスについて述べる。顕熱フラックスの時間変化および空間分布に関して、明確な季節性を確認することが出来なかったが、晴れの日よりも天候の悪い日の方が 10 Wm^{-2} ほど高くなることがわかった。1 日平均値では全て正の値を示したが、図 41 の春季や図 43 の冬季のように 1 時間平均値では負の値を示すことが確認された。時間変化は寄与率の大きい温度勾配 $T_s - T_a$ が支配的であったが、空間分布では風速やバルク輸送係数 Ch の影響を強く受けていた。加えて、風速が強くなるほどバルク輸送係数の値・標準偏差が小さくなる傾向にあることから(図 68)、強風時の顕熱フラックスの空間分布にはバルク輸送係数以外の影響、特に風速や温度勾配の影響が強くなっていた。全体として、風速の大きい湖心部～南東部で比較的の高い値が集中していた。潜熱フラックスは、夏季に最も大きく、冬季に小さいといった季節性がみられたものの、天候に依る影響は小さいことが確認された。1 日平均値で比較すると、快晴を除いて正味放射量よりも熱収支に与える影響が大きい場合があるとわかった。空間分布は顕熱フラックスと類似傾向にあり、風速の大きい湖心部～南東部に卓越していた。一方で、顕熱フラックスよりも風速に敏感に反応しており、空間分布のみならず時間変化において、特に強風時に風速の影響を強く受けていた。ただし、絶対値は寄与率の大きい比湿勾配 $q_s - q$ が支配的であるため、図 45 のように強風時であっても比湿勾配が小さい場合は潜熱フラックスの増加に結びつかないことが明らかになった。変動係数は $0.1 \sim 0.3$ ほどであり特段大きいわけではないが、標準偏差は他の熱収支項に比べて非常に高く、水中熱流量の空間分布の主要因であることが示唆された。

続いて正味放射量について述べる。正味放射量は先述の通り年較差・日較差が大きく、時間的な偏差が大きいものの、空間的な偏差は小さい。例外的に、平均値が小さい日には相対的に標準偏差が大きいことはあった。画一的に、正味放射量の増加は下向き短波放射量の総量に依存しているが、雨の日や曇りの日など大気中の水分子量が多い場合には下向き長波放射量が大きくなるためか(早坂, 2014)、夜間の値が 0 に近くなることが確認された(例えば図 49)。その際、水中熱流量の動向が潜熱・顕熱フラックスに一存し、時間的なばらつきが大きくなっていた。空間分布特性に関しては、通年で土浦入の最奥部で低い値を示した。

温度勾配 $T_s - T_a$ は、季節や天候による影響は小さく、標準偏差も大きくないことが分かった。しかし、図 61 の冬季にみられるように、冷たい降雨の流入によって気温 T_s よりも T_a が高くなった場合には標準偏差が大きくなることが確認された。晴れの日においては、夜間に高く、昼間に低くなる傾向がみられた。湿度勾配 $q_s - q$ も同様に空間分布や天候による影響が小さいことが示されたが、温度勾配よりも季節変化が明瞭で、夏に高く冬に低くなっていた。どちらも標準偏差が小さいため、空間分布特性は不明確であったが、比較的土浦入や高浜入で高くなることが確認できた。水温 T_w は、季節変化に応じて変化しており、標準偏差は小さかった。特徴的な点として、冬季の晴れの日に土浦入で高い値が測定されていた。

3.3. 湖面における熱収支（領域別特性）

熱収支の時空間分布に関して、西浦を類似した特性ごとに分割し、その各領域における面的な特性を明らかにしようと試みた。西浦の湖内環境特性について、先行研究から以下のことが明らかに

されている。西浦は地形的に高浜入と土浦入、湖心域に分けることができ、水域間の混合が非常に小さく湖流傾向が異なっている(村岡・福島, 1981)。高浜入と土浦入には、西浦最大の流入河川である恋瀬川と桜川が流入している。そのことから湖心域と比較して水質が異なり、気象変動に伴う水質変動も大きく表れる(福島ほか, 1983)。麻生(湖尻・下流部)では、唯一の流出河川である常陸利根川に接していることから、塩水等の影響を受けて特異的な湖環境が形成されている(藪崎ほか, 2006)。これらに加え、西浦をボックスモデルで表現する際に高浜入(23 km^2)、土浦入(49.3 km^2)、湖心域(86 km^2)、湖尻(12.7 km^2)に分割するのが良い(村岡・福島, 1984)とされていることから、これに倣って水域を区分し、それぞれの特性を考察することとした。分割領域を図 69 に、領域ごとの湖面全体の月平均値、及び空間的な標準偏差を表 24 と図 70 に示す。

図 70 と表 24 より、水中熱流量は春先から夏季は正、秋口から冬季には負の値を示していた。年平均値をみると湖尻のみ負の値を示し、土浦入よりも約 23 Wm^{-2} も低い結果となった。一方で、潜熱・顕熱フラックスは、それとは逆の傾向を示している。風速の空間分布図(図 50~52)より、小高観測所を中心として風速の値が恒常的に大きいことが確認されており、それを起因とした顕熱・潜熱フラックスの卓越がこのような現象を引き起こしたのではないかと考える。また、風速分布特性の影響は湖心域にも及んでおり、湖尻に次いで湖心域の風速・潜熱フラックスの値が高くなっていた。正味放射量に関して、高浜入と土浦入の値が他の水域よりも $5\sim 10 \text{ Wm}^{-2}$ 近く低い。この傾向は春から夏の間の数ヶ月に亘って表れており、図 47~49 の春季の空間分布図においても確認することができた。両水域でみられる正味放射量の空間的な特性について、雲の分布か、もしくは観測密度の影響が考えられるが、特定の期間のみ表れることから、前者によるものではないかと推測する。それぞれの標準偏差については、領域面積が広いほど比例的に大きくなる傾向がみられた。加えて、領域ごとの差は各熱収支項がピークに近い時期に大きくなることも示された。

3.4. 頻度分布と月変化

熱収支式に関わる項目に関して、毎 1 時間のグリッドデータを元に月別の線形ヒストグラムと相対累積度数図を作成した。各ヒストグラム作成に利用したデータ数は、1 ヶ月の日数 $\times$ 24 時間 $\times$ 西浦湖面上のグリッド数で求められた月の合計数で構成されている(例えば 1 月の月合計は 18236928 データ)。また、月平均値と月平均標準偏差も同様のデータから求めた。それらを表 25 及び図 71~79 に示す。

時間変化傾向に近い水中熱流量と正味放射量についてみると、 0 Wm^{-2} 以下が $50\sim 70\%$ を占めており、湖上では基本的に放熱する頻度が高いことが確認された。また、正味放射量の負の値に着目すると、複数のピークが確認できる。これは、先述の通り天候の違いによる夜間の放射収支特性によるものと考えられる。顕熱フラックスは、夏から秋の期間と冬から春の期間で頻度分布が二分しており、冬から春にかけて 20% 近い負の値が確認された。それに対し、潜熱フラックスは常に正の値を示しており、冬季以外で高い値を示した。加えて、潜熱フラックスは高い値が多い春~夏ほど空間的な偏差値が大きくなる傾向がみられた。風速は、通年で平均 3.5 ms^{-1} の風が吹いており、そのうち約 4% は 10 ms^{-1} 以上の強風であった。温度勾配 $T_s - T_a$ は 4°C 前後の割合が多く、夏から秋にかけて高い値を示した。一方で、冬季には 20% ほど負の値を示しており、総じて顕熱フラックスと同じような頻

度分布となっていた。比湿勾配 $q_s - q$ は $0 \sim 0.01 \text{ kgkg}^{-1}$ の間で季節変化をしており(図 77), 季節によっては表れない領域(例えば 1 月は 0.5 kgkg^{-1} 以上の頻度が 0 である等)も確認された。バルク輸送係数のヒストグラムの形は通年でほとんど不変であるが, 0.6 ms^{-1} より大きな風速の頻度が大きい月ほどヒストグラムが均される様子が再現されていた(図 78・79)。

3.5. 湖の貯熱量と移流熱

水温の調査地点におけるボックスモデルの結果と対象期間における湖面の熱収支, 水深変化量, 水温変化量を図 80~109, 表 26~55 に示した。加えて, それらの結果を分布として表現したものを図 110~112 に示した。対象地点は, 国土交通省の調査が行われた 10 地点と国立環境研究所の調査が行われた 5 地点の計 15 地点で, 計算期間は 11 月の欠測を踏まえて 1 月調査日から 10 月調査日までの 9 期間とした。図について, 偶数番号の図には期間内(Period. 前の月の調査日から翌月の調査日までの間)における湖面熱収支の平均値(Wm^{-2})とボックスモデルの計算結果(Wm^{-2}), 及び前の月との水位差($^{\circ}\text{Cperiod}^{-1}$)と水体の平均水温差(mperiod^{-1})を時系列で表示している。次に奇数番号の図に関して, 上段の図は期間内における熱収支項の正と負の合計値($\text{MJm}^{-2}\text{period}^{-1}$)を示しており, 湖面上向きを正, 湖面上向きを負(H と LE は符号を逆転させている)として表した。この詳細は, 地点ごとに年合計値を求めて表 56 にまとめた。中段は, 水位変化を考慮して大気との熱交換($G + Q_{\text{rain}}$)のみを入力値として与えた場合の熱容量 S (MJm^{-2})と実測された熱容量 S との比較図である。一方で, 下段の図は, 水位変化を無視して, 各地点で求められた年平均水深を一定値として与えた場合の仮想的な熱容量比較図である(この 2 つの図に関して, 熱容量と熱輸送量は積み上げではないことに注意。)基本的に, 表には作図に用いられた値がまとめられている。その上で, 偶数番号の表には各熱輸送量の割合の絶対値(分母は $|Q_{\text{ad}}| + |G| + |Q_{\text{rain}}|$)を加え, 奇数番号の表には水位差に伴って水温変化に関係なく見積もられた移流熱輸送量 $\Delta Q_{\text{ad}} (= Q_{\text{ad}} - Q_{\text{ad}}(\text{一定}))$ を加えた。また, 表中の合計値及び平均値は Period1~9 の値を基に計算した値であり, 奇数番号の表の正の合計と負の合計とは表内の値を用いて算出したものである。なお, $Q_{\text{ad}}(\text{一定})$ とは定数を指しているのではなく, 水位変化を無視したボックスモデルの計算結果における Q_{ad} である。

全体的な傾向について, どの地点においても降水によって持ち込まれる熱量が 1 Wm^{-1} 以下と非常に少なく, 湖内の熱収支への影響が非常に小さいことがわかった。ただ, 計算の時間スケールが一ヶ月よりも短い際には, 無視できない場合があるため注意が必要である。また, 水中熱流量が季節的要因を反映しつつも緩やかに変動を示しているのに対し, 貯熱変化量は全く異なる変動を示した。そのため, これらの残差として算出される移流による熱フラックスは, 貯熱変化量に似た変動傾向を示すこととなった。そこで, 貯水変化量が水深データと水温データを用いて計算されることから, 水位変化量と水温変化量を表した図との比較を行った。すると, 貯熱変化量は水位変化に大きく影響を受けていることが明らかになった。この傾向は移流熱輸送量に対しても顕著で, それは水温との相関性が殆ど確認できないほどであった(図 113)。これは, 水体の平均水温が 1°C 変化するごとに貯熱量が 14.9 MJm^{-2} ほど変化するのに対し, 水深が 0.1 m 変化するだけで 120 MJm^{-2} の貯水量変化が起こるという, 影響力の違いによって生じたものと考えられる。霞ヶ浦開発事業の運用開始(1996 年 4 月)以降, 霞ヶ浦の水位は国土交通省によって管理されており, 常陸川水門の開閉を通して 4 月

から10月中旬はY.P.+1.1m, 11月中旬から2月末の間はY.P.+1.3mを目標に水位運用が行われている(国土交通省, 2012). 図114に, 西浦の平均水位(Y.P.)と西浦湖面上の降水量の特別値と水温調査日を示した. この図より, 確かに西浦の水位はある程度一定に保たれてはいたが, 降雨イベントや周辺流域からの流入などの複合的な要因による急激な水位上昇, 及びそれに対する水位運用に起因する短期的な水位変化が頻繁に起こっていることが確認された. このことから, 月に一度の調査結果に基づいてボックスモデルの計算を行うと, 例えば10月の調査日と水位の関係性のような短期的なトレンドを強く反映してしまい, 月変化量や月平均値が適切に評価できない事態が起きてしまうことが明らかになった.

次に, 地点ごとの特性について考察する. 図115に測定深度別の水温の平均値と標準偏差を示した. 水温は表面を除いて鉛直方向はほぼ一定値であり, 標準偏差も全層で小さい. つまり, 熱容量の地点差は主に水深に依存して生じており, 一ヶ月という長期スケールで計算を行う場合には, 一地点での水温鉛直測定値が西浦全体を代表できるという可能性が示された. ボックスモデルに関して, 先述の短期的トレンドの影響を考慮して, 主に水位を不変として求めた計算結果について考察する. 水位変動を無視した場合, 熱容量は水温変化のみに影響を受ける. そのため, 夏に大きく冬に小さい, 図115と似通った季節性がみられた. 移流による熱輸送量について, 土浦入に区分される地点(掛馬沖, 木原沖, 沖宿沖, St.7)では負の値が非常に大きく, 土浦入より小さいものの高浜入に区分される地点(高崎沖, 高浜沖, St.1, St.3)でも同様の傾向がみられた. 対照的に, 湖心付近(湖心, St.9)は, Q_{ad} の負の合計が $-22 \sim -36 \text{ MJm}^{-2}$ しかなく殆ど正の値であったことから, 移流によって常に加熱されていることが確認された. 湖尻に区分される地点(西の洲沖, 麻生沖, St.12)では, 正の値が湖心域よりも大きくなっており, 西浦は流下に伴って移流によって温められる傾向が高くなることが明らかになった. 移流による熱輸送量は地域差が如実に表れており, 基本的には正か負のどちらかに傾倒していることが確認されたが, 水中熱流量が負になる冬季(Period 1等)に正の値を示すことがあるなど, 季節変化による影響が表れる場合もみられた. 水中熱流量と移流による熱輸送量は完全に相反している訳ではないが, 水中熱流量とは逆相関関係を示すことが多かった. そのため, 大気との熱交換のみを考慮した計算値が実測値を上回る場合が殆どであった.

水位変化量を含めた計算の結果から求めた移流による熱輸送量と, 水位変化量を含めない計算結果から求めた移流による熱輸送量の差 ΔQ_{ad} をみると, $-485 \sim 803 \text{ MJm}^{-2}$ という非常に大きな値を示していた. これは, 水位変化の短期的なトレンドと共に取り除かれてしまった移流による熱輸送量である. 現実には水位変化が起きているため, 本来は考慮すべき値である. 今回は水温の測定頻度の関係からこれらを考察することが叶わなかったが, 計算周期や測定頻度を短くしてこれらの動向も考慮できれば, 西浦湖内の熱環境の解明に更に近付くことが出来るだろう.

3.6. 河川との熱交換

土浦入で行われた渦相関法によるフラックスの現地観測の結果, 霞ヶ浦浄化センターからの排水や桜川からの流入水と湖水との間に生じる水温差によって, 排水口・河口付近の湖面フラックスが局地的にそれらの影響を受けて増減することが報告されている(原田, 2015). 本研究のこれまでの結果からも, 水柱の熱容量に与える移流熱の影響が小さくないことや, その空間的偏差が大きいことが

確認できる。河川が湖の熱収支に与える影響について明らかにするため、水温・流量データが得られた流入出河川(桜川、恋瀬川、小野川、潮来)を対象に熱交換量を求め、西浦湖面の値との比較を行った。

河川の熱輸送量は新井・西沢(1974)を参考に以下の式で求めた。

$$Q_{rivIN} = C_w \rho_w (\theta_{IN} - \theta_{Lake}) \frac{Q}{A} \quad (27)$$

$$Q_{rivOUT} = C_w \rho_w (\theta_{Lake} - \theta_{OUT}) \frac{Q}{A} \quad (28)$$

ここで、流入河川の熱輸送量 Q_{rivIN} [Wm^{-2}], 流出河川の熱輸送量 Q_{rivOUT} [Wm^{-2}], 流入河川の平均水温 θ_{IN} [K], 流出河川の平均水温 θ_{OUT} [K], 河口から最も近い水温観測地点における観測水温 θ_{Lake} [K], 水の密度 ρ_w [kgm^{-3}], 水の比熱 C_w [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$], 流量 Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], 水位変化に連動した断面積 A [m^2]である。計算は1時間ごとに行い、1年間の変化を連続的に表すために1月から11月10日までは2008年の値を、11月10日から12月末までは2007年の値を使用した。なお、通常一次元で湖を考えた際に、断面積 A として扱われるのは湖の表面積である(新井・西沢, 1974)。ただし、本研究では河川との接続部における局所的な熱交換(単位面積当たりの熱輸送量)の考察を念頭に置いて計算を行ったため、上記式には河川の断面積を適用している。

結果を図116と表57に示す。ここには比較のために、2014年の水中熱流量 G の湖面平均値を湖面積(172 km^2)で乗じた値も併せて表示している。熱輸送量の総量をみると、西浦湖面での熱交換が主体的で(年平均値では、流入出河川の熱輸送量の約20~400倍)、流入出河川が西浦全体の熱収支に与える影響は微小であった。対して、単位面積当たりの熱輸送量を比較すると、河川水による熱輸送量が湖面における熱輸送量よりも数千~数万倍の影響力があることが確認された。つまり、西浦の熱フラックスを述べる上で、表面温度 T_s や水温 T_w の空間偏差が小さく大気との熱交換が支配的であるという前提が、河口付近の熱環境に限っては成り立たないことが示唆された。

次に、各河川の特徴を述べる。流入河川に着目すると、1~5月で正の値、6~12月は負の値を示していた。これより、春季には相対的に温かい水が流れ込み、夏季から冬季にかけては相対的に冷たい水が流れ込んでいることがわかった。この季節的傾向は図65~67でも表れており、どの流入河川においても等しく存在していたが、通年でみると前者の値は小さく、湖水に対しては殆ど冷却的役割を担っていることが示された。加えて、その影響は桜川($-3906 \text{ MJm}^{-2}\text{hour}^{-1}$)が最も大きく、次に恋瀬川($-2900 \text{ MJm}^{-2}\text{hour}^{-1}$)、小野川($-840 \text{ MJm}^{-2}\text{hour}^{-1}$)となっており、地点差が大きいことも確認された。流出河川については、湖水の方が低温の場合が多いためか、年間を通して西浦を相対的に温めていることがわかった。また、単位面積当たりの熱輸送量は他河川と比べて小さいものの、それでも大気との熱交換量より大きく、断面積も大きいことから、水門が開かれた際には熱フラックスへの影響を考慮する必要があると考える。

4. 結論

霞ヶ浦西浦を対象に、湖内外の観測データを用いて湖面上の熱収支の時空間分布を算出した。その値と水温鉛直分布の実測値を基に、水温観測地点においてボックスモデルを適用し、湖内の熱環境の月変化や移流の特性を時空間的に明らかにした。

湖面上の熱収支に関して、水中熱流量の時間変化は、絶対量・日較差の大きい正味放射量の影響を強く受け、それに類似した変動を示していた。そのため、悪天候時の水中熱流量は、晴天時と比べて小さい値になっていたが、夜間に限れば雲による温室効果によって晴天時よりも高い値になる場合が確認された。一方で、正味放射量の空間偏差が小さいことから、水中熱流量の空間分布に対しては潜熱・顕熱フラックスの分布が重要であることが分かった。潜熱・顕熱フラックスは、それぞれ比湿勾配と温度勾配が支配的要因ではあったが、空間分布については風速に依るところが大きく、南東部において高い傾向にあった。加えて、正味放射量とは対照的に天候の影響は小さく、悪天候時に高い値を示すこともあった。水中熱流量の分布を領域別にみると、湖尻と土浦入では年平均 23 Wm^{-2} もの差が生じており、風速の空間分布にある程度の定常性が存在する可能性が考えられた。これは霞ヶ浦湖面上の蒸発量の空間分布に関する先行研究にも記されており、通年で高い値を示す湖心・小高観測所周辺の風速について、地形や気候特性を踏まえて検証する必要があると考える。

ボックスモデルの計算の結果、月平均では、どの調査地点においても降水による持ち込み熱量が 1 Wm^{-2} 以下と非常に小さく、簡易的な計算の場合にはこれを無視しても問題ないと思われる。水柱の貯熱量は水温と水深によって求められるが、西浦の場合は水温の偏差が小さいことから、貯熱量の地点差は主に水深によって決定された。移流による熱輸送量は、湖心域・湖尻以外で負の値が大きく、特に掛馬沖や高浜沖周辺ではその特性が顕著に現れていた。一方で、湖心域・湖尻では正の値が大きく、西浦の熱環境が一義的に決められないことを示した。図 117 と図 118 に、大気との熱交換量と移流による熱交換量の比を概略的に表した。この図より、牛込沖を除く地点で移流の占める割合が大きいことが見て取れる。それと同時に、短期トレンドと共に水位変化量が除去されたことで、大部分の移流熱が計算に考慮されていないことが分かる。その様子は、水中熱流量のみを入力して計算した水温と観測された水温が大きく異なっていることから確認でき(表 58, 59)、移流による熱輸送が熱収支において重要な役割を果たしていることが認められた。今後、水温鉛直分布の観測頻度を高め、これらの移流熱の短期的な変動を明らかにする必要があると考える。

西浦全体を考えると、流入出河川による熱交換量は小さく、西浦の熱収支は主に大気によって支配されていた。しかし、単位面積当たりの熱輸送量を比較すると、河川水による熱輸送量が湖面における熱輸送量よりも数千～数万倍も大きいことが分かった。このことから、先述において湖の水温の空間偏差は小さいと述べたが、河口付近においては西浦一般とは全く異なる熱環境を形成している可能性が示唆された。流入河川について、1～5 月は湖を温め、6～12 月は湖を冷却する様な傾向を示し、流出河川については河川水温が湖水温よりも高いことから相対的に湖を温める傾向にあることが示された。

西浦の熱収支は、大気との熱交換が中心ではあるが、移流による熱輸送も無視できない重要な要素であることが示された。また、湖面の熱収支に空間分布がみられるのと同じ様に、移流の影響度にも地点差がみられた。本研究より確認された特徴的な地点(河口付近や南東部)において、現地観測に基づいた詳細な解析を行うことで、西浦の熱環境特性の解明に更に迫ることが出来るのではないかと結論付ける。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始丁寧なご指導を賜りました筑波大学生命環境科学研究科の杉田倫明教授に心より感謝申し上げます。ご多用にも関わらず常日頃よりお心にかけていただき、研究に行き詰った際には杉田教授の的確かつ革新的なご助言によって幾度となく困難を乗り越えることが出来ました。霞ヶ浦の定期調査に同行させていただいた際に、様々なお話をお聞かせいただいたこともかけがえのない思い出になりました。また、筑波大学生命環境科学科の辻村真貴教授、浅沼順教授、山中勤准教授、河内敦助教（現 株式会社東京建設コンサルタント主任技師）には流域ゼミや授業を通して沢山の貴重なアドバイスをいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

百里気象隊予測班、霞ヶ浦河川事務所湖沼環境課の皆様にはご多忙中にも関わらず貴重な観測データを提供していただきました。株式会社アイ・シー・エスの稲野辺様には毎月の霞ヶ浦湖心調査に同行させていただきました。本当にありがとうございました。

杉田研究室の宝音朝格拉さん、Vilaysack Khonsavanh さんには観測機器の調整や使用方法等を教えていただきました。同研究室の松野晃大さん、黒江彩萌さん、山中研究室の佐藤怜さんには論文執筆中に沢山のアドバイスや激励を賜りました。同期の池田翼君、畢世明君には、共通の目標に向かって助け合い・切磋琢磨し合い、素晴らしい時間を共有させていただきました。同研究室の方々には研究活動のみならず、様々な場面でお世話になりました。心より御礼申し上げます。

最後に、研究室ゼミや日常的な議論を通じて様々な知見や刺激を与えてくださった杉田研究室・流域ゼミのメンバー、研究活動を支えてくれた家族や友人、並びに私が大学生活で関わらせていただいた全ての方々に、改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 新井正 (1965): 駒ヶ池における熱収支観測. 農業気象, **4**, 141–145.
- 新井正・西沢利栄 (1974): 水温論, 共立出版, 27–218.
- 伊倉宏弥 (2010): 衛星データを用いた霞ヶ浦湖面における蒸発量分布の推定. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士論文, p.130.
- 石岡賢治・田中賢治・中北英一・池淵周一 (2001): 水田・湖面における水・熱収支の季節変化. 土木学会第 56 回年次学術講演会, **258**, 1–2.
- 石川忠晴・田中昌宏・小関昌信 (1989): 浅い湖の日成層が水質に及ぼす影響. 土木学会論文集, **411**, 247–254.
- 伊藤克己・岡本巖 (1974): びわ湖における水温の変動(VII). 熱収支と南北両湖の交流. 陸水学会, **35**, 127–130.
- 伊藤祐二・靱井和朗 (2010): 気象変化が深い湖の湖面蒸発量, 水温, 熱収支に及ぼす影響—鹿児島県池田湖の事例—. 農業農村工学会論文集, **78**, 1–6.
- 茨城県霞ヶ浦環境科学センター (2017): 霞ヶ浦について. インターネット: <http://u0u1.net/IjhT> (2017/12/18 閲覧).
- ESRI ジャパン株式会社 (2017): ArcGIS ユーザーのための内挿法ガイド. 14–41.
- 海老瀬潜一 (1994): 霞ヶ浦は, 今. 水文・水資源学会誌, **7**, 467–475.
- 遠藤修一・岡本巖・中井衛 (1981): 琵琶湖北湖の環流について(1). 水温分布からみた環流の変動. 陸水学会誌, **42**, 144–153.
- 大槻恭一 (2016): 放射, 森林水文授業テキスト. 水資源学, 1–10.
- 兼原測量設計株式会社 (2008): 平成 19 年度霞ヶ浦流入 7 河川流量観測報告書. 断面積計算書, 43–77.
- 桑形垣男 (2006): アメダス地点における全天日射量(日平均)の推定法. 農業環境技術研究所, 1–2.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 23–40.
- 気象庁 (1998): 気象観測の手引き. 気象観測ガイドブック. 16–21
- 気象庁 (2016): 時に関する用語. インターネット: <https://goo.gl/esTj> (2017/11/10 閲覧).
- 気象庁 (2016): 天気欄の記号の説明. インターネット: <https://goo.gl/oQCS9> (2017/10/19 閲覧).
- 北澤大輔・小松伸行 (2008): 北浦の成層構造の数値解析. 生産研究, **60**, 51–55.
- 国土交通省 (2012): 霞ヶ浦の水位管理の実態について. 1–5.
- 小松伸行・石井裕一 (2008): 多層レベルモデルによる霞ヶ浦の湖流解析. 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報, **4**, 89–97.
- 正路徹也・小池克明 (2007): 講座「地球統計学」クリギング 誤差を考慮した空間データの補間. 日本地熱学会誌, **29**, 183–194.
- 杉田倫明・田中正・筑波大学水文科学研究室 (2009): 水文科学, 共立出版, 2–102.
- 関智弥・福島武彦・今井章雄・松重一夫 (2006): 霞ヶ浦の濁度上昇と底泥巻き上げ現象. 土木学会論文集 G, **62**, 122–134.
- 田村純雪・大谷謙仁・黒川浩助 (2002): 多傾斜面日射量の測定と評価に関する研究. 日本太陽エネルギー学会, **3**, 1–3.
- 豊田祐貴 (2017): Excel 分析ツール完全詳解. 秀和システム, 38–327.

- 中村恭志・戸田真仁・渡部一人・石川忠晴 (2013): 3次元貯水池数値流動モデル”TITech-WARM”の開発と釜房貯水池への適用. 土木学会論文集 B1, 水工学, **69**, 775–780.
- 中村剛也・相崎守弘 (2016): 霞ヶ浦に入射した光の減衰に対する懸濁物質の影響－光減衰機構の長期的変遷－. 陸水学雑誌, **77**, 1–5.
- 永田俊・熊谷道夫・吉山浩平 (2012): 温暖化の湖沼学, 京都大学学術出版会, 47–71.
- 橋本敏子・井澤博文・後田俊直・藤間祐二 (2007): アオコ発生簡易予測手法開発の試み. 全国環境研会誌, 47–52.
- 早坂忠裕 (2014): 雲の放射特性の基礎. 北海道大学学術論文集, **72**, 145–150
- 原田守博・鈴木佳宏 (2012): 都市域における溜め池の熱収支特性の評価. 土木学会論文集 B1, **68**, 1741–1746
- 原田瑞穂 (2015): 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－. 筑波大学大学院生命環境科学研究科卒業論文, 4–17.
- 百里基地 (2017): 部隊紹介. インターネット: <https://goo.gl/ou7rvs> (2017/12/11 閲覧).
- 福島武彦・相崎守弘・海老瀬潜一・村岡浩爾 (1983): 霞ヶ浦の水質変化特性の統計解析と水質観測方法. 衛生工学研究論文集, **19**, 14–19.
- 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専攻卒業論文, 6–12.
- 宮野愛子 (2010): バルク式を用いた湖面におけるフラックスの算出. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士論文, 21–30
- 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**, 117.
- 村岡浩爾・福島武彦 (1984): ボックスモデル構築に関する水理学的検討. 国立公害研究所研究報告, **54**, 42–50.
- 八木宏・灘岡和夫・内山雄介・日向博文 (2000): 長期連続観測に基づく東京湾澁島灘-霞ヶ浦の表層水温年間変動特性の比較解析. 土木学会論文集, **656**, 239–254.
- 藪崎志穂・田中正・福島武彦・浅沼順・飯田真一 (2006): 霞ヶ浦流域における河川水の水質・流域特性について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 4–12.
- 山田景子 (2007): 霞ヶ浦流域の水収支と土地利用との関係. 筑波大学第一学群自然科学類地球科学専攻卒業論文. 28.
- 山本和也 (2014): 霞ヶ浦流域の環境変化と水収支 1970 年代と現在の差異. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士論文, 6–60.
- Bird, R. E. (1984): A simple solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. Solar energy. **32**, 461–471.
- Brutsaert, W., 杉田倫明訳 (2008): 水文学, 共立出版, 22–62.
- Imberger, J. and Patterson, J. C. (1981): A dynamic reservoir simulation model-DYRESM5. Transport Models for Inland. Academic Press, 4–23.
- Kai, T. and Higinoya, S. (2014): Seasonal Variation of Heat and Water Balance and Influence of Vegetation on Grassland. The meteorological Society of Japan, **1091**, 1–4.
- Kirk, J.T.O. (1983): Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press., Cambridge. 120–125.

- Kotani, A. and Sugita, M. (2009): Concise formulae for the atmospheric of hemispherical thermal radiation measured near the ground surface. *Water Resources Research*, **45**, 1 – 6.
- Liou, Y. A. and Kar, S. K. (2014): Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms. *Energies* 2014, **7**, 2821 – 2849.
- Mohamed, H. (2013): Evaporation estimation for Lake Nasser based on remote sensing technology. *Ain Shams Engineering Journal*, **4**, 595 – 603.
- Matti, L., Elisa, L. and Lauri, A. (2016): Heat balance of supraglacial lakes in the western Dronning Maud Land. *Annals of Glaciology*, **57**, 39 – 44.
- Michael, T. and Moreo, A. S. (2013): Evaporation from Lake Mead, Nevada and Arizona, March 2010 through February 2012. USGS Scientific Investigations Report 2013, **5229**, 1 – 30.
- Nino, Y. and Tamburrino, A. (2004): Heat Balance in Lakes and Reservoirs. *Hidrodinamica Ambiental*, **71**, 1 – 4.
- Soultana, K. G. and Vassilis, Z. A. (2007): Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis Greece. *Journal of Hydrology*, **345**, 212 – 223.
- Sugita, M., Ikura, H., Miyano, A., Yamamoto, K. and Zhongwang, W. (2014): Evaporation from Lake Kasumigaura: annual totals and variability in time and space. *Hydrological Research Letters*, **8**, 103 – 107.
- Thiery, W. and Stepanenko, V. M. (2014): LakeMIP Kivu evaluating the representation of a large deep tropical lake by a set of one-dimensional lake models. 1 – 18.
- Tony, H., Li, S., Micah, D. and Andy, C. (2012): Heat balance analysis to validate the heat dissipation rate of a man-made lake as a heat rejection device in a power plant. *International journal of renewable energy research*, **1**, 81.
- UNESCO. (1981): Technical papers in Marine Science, 2 – 13.
- Wei, Z. (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, 15 – 56.
- Wei, Z., Miyano, A. and Sugita, M. (2016): Drag and Bulk Transfer Coefficients Over Water Surfaces in Light Winds. *Boundary-Layer Meteorol*, **10**, 1 – 25.
- Zheng, D. and Bastiaanssen, W. G. M. (2017): Evaluation of three energy balance-based evaporation models for estimating monthly evaporation for five lakes using derived heat storage changes from a hysteresis model. *IOP publishing*, **12**, 4 – 6.
- Zheng, D. and Bastiaanssen, W. G. M. (2015): A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs, Review and analysis of 22 lakes. *Remote sensing of environment*, **156**, 143 – 156.

付録

晴天指数を求めるに際し，大気外水平面日射量 SH [Wm^{-2}]は大槻(2013)と桑形(2005)を参考に以下の式を用いて計算した．

$$SH = \frac{S_{d0}}{\left(\frac{d}{d_0}\right)^2} \sin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (29)$$

ここで，太陽定数 S_{d0} [Wm^{-2}] ($= 1,367$)，地球－太陽間の距離 d/d_0 [rad]，緯度 ϕ [rad]，太陽赤緯 δ [rad]，時角 ω [rad]である．緯度 ϕ と後に出てくる経度 L は西浦湖心の値を用いた．

太陽－地球間の距離 d/d_0 と太陽赤緯 δ ，及び時角 ω は以下の近似式より，

$$\frac{d}{d_0} = 1 + a_1 \cos(a_2 (D - 186)) \quad (30)$$

$$\delta = 23.5 \times \cos(b_1 (D - 173) \times \frac{\pi}{180}) \quad (31)$$

$$\omega = \frac{(T - 12)}{12} \pi \quad (32)$$

で求められる．ここで， $a_1 = 0.01676$ ， $a_2 = 0.01721$ ， $b_1 = 0.01689$ ，通日 D [－]であり，真太陽時 T [－]は次の式で

$$T = T_m + \frac{(L - 135)}{15} + e \quad (33)$$

で求められ，標準時 T_m [－]，緯度 L [rad]，均時差 e [－]である．均時差 e は次の式より，

$$e = \frac{a_1 + a_2 \cos X - a_3 \sin X - a_4 \cos 2X - a_5 \sin 2X}{60} \quad (34)$$

$$X = 2\pi \times \frac{(D - 1)}{365} \quad (35)$$

として求められる．ここで， $a_1 = 0.0172$ ， $a_2 = 0.4281$ ， $a_3 = 7.3515$ ， $a_4 = 3.3495$ ， $a_5 = 9.3619$ である．

表 1 湖心観測所における筑波大学取得データ

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
湖心観測所	140.407	36.04	風速3成分 u, v, w [m/s]	超音波風速計	9.80 m	毎0.1 秒	前30分
			平均音仮温度 T_a [°C]	(Gill Instruments Ltd., R3A)			前30分
			水蒸気濃度 ρ_v [g/m ³]	オープンパスアナライザー (LI-COR, Inc., LI-7500)	9.25 m	毎0.1 秒	前30分
			短波放射 $S \downarrow, S \uparrow$ [W/m ²]	4成分放射計	4.29 m	毎5 秒	前30分
			長波放射 $L \downarrow, L \uparrow$ [W/m ²]	(Kipp & Zonen B.V., CNR-1)		毎5 秒	前30分
			相対湿度 Rh [%]	通風温湿度計 (REBS, Inc., AEM)	3.72 m	毎5 秒	前30分
			水面温度 T_s [°C]	放射温度計 (Minorta, CML-303N)	4.27 m	毎5 秒	前30分
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.1 m	毎5 分, 35分	前30分

※ 高度は平水位面 (Y.P. +1.0m)からの高さである.

※ 表 1 は宮野 (2010)より引用, 改編.

表 2 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(国土交通省河川事務所)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
掛馬沖	140.2412	36.0527	気温 T_a [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	5.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	7.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	5.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
釜谷沖	140.5692	36.0065	気温 T_a [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	3.0 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	塩化リチウム塗布式湿度計	3.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	7.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	3.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
湖心観測所	140.4070	36.0400	気温 T_a [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	10.0 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	塩化リチウム塗布式湿度計	10.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	10.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	10.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計	8.75 m	毎秒	積算値
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計	8.85 m	毎5分	積算値

※ 陸面の気象観測データにおける高度とは、一般的に T.P. 0m からの高さである。

表 2 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(国土交通省河川事務所), 続き

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
潮来	140.5433	35.9350	気温 T_a [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	17.5 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	塩化リチウム塗布式湿度計	17.5 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	18.5 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	5.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
土浦	140.2172	36.0740	気温 T_a [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	10.0 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	塩化リチウム塗布式湿度計	10.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	11.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	6.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
東村	140.4526	35.9443	気温 T_a [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	3.0 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	塩化リチウム塗布式湿度計	3.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	41.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	3.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
玉造	140.4026	36.0954	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	11.0 m	毎 0.25秒	前1時間
出島	140.3748	36.0698	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	5.0 m	毎 0.25秒	前1時間
小高	140.4581	36.0188	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	5.5 m	毎 0.25秒	前1時間
波崎	140.7096	35.8418	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	4.0 m	毎 0.25秒	前1時間

表 2 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(国土交通省河川事務所), 続き

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
鉾田	140.5046	36.1520	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	6.5 m	毎 0.25秒	前1時間
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
麻生沖	140.4867	35.9588	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	9.5 m	毎 0.25秒	前1時間
			水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m	毎秒	前20分
鰐川	140.6135	35.9271	風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	8.0 m	毎 0.25秒	前1時間
木原	140.2950	36.0278	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
平山	140.3397	36.1392	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
日川	140.6772	35.8628	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
小川	140.3519	36.1694	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
小野川	140.2500	35.9436	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
牛久	140.1269	35.9408	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
美野里	140.3228	36.2531	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
恋瀬川	140.2600	36.1850	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
瓦江	140.2052	36.2704	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
岩瀬	140.1222	36.3592	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
真壁	140.0939	36.2719	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
藤沢新田	140.1428	36.1142	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
白浜	140.5597	36.0281	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
北浦	140.4981	36.1061	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値

表 3 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(AMeDAS)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
鹿島	140.6216	35.9633	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	1.5 m	毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	6.5 m	毎 0.25秒	前 10分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
鉾田	140.5199	36.1579	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	10 m	毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	10 m	毎 0.25秒	前 10分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
土浦	140.2199	36.1033	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	10 m	毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	10 m	毎 0.25秒	前 10分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
筑波	140.1250	36.0567	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	1.5 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	電気式湿度計	1.5 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	20.4 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計	31.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S \downarrow$ [MJ/m ² /h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
龍ヶ崎	140.2133	35.8912	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	1.5 m	毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計	9.4 m	毎 0.25秒	前 10分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
下妻	139.9500	36.1667	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計		毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計		毎 0.25秒	前 10分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値

表 3 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(AMeDAS), 続き

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
笠間	140.2417	36.3817	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計		毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計		毎 0.25秒	前 10分
下館	139.9917	36.2917	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計		毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計		毎 0.25秒	前 10分
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
古河	139.7167	36.2028	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計		毎 10分	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計		毎 0.25秒	前 10分
水戸	140.4667	36.3889	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計		毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	電気式湿度計		毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風向風速計		毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計		毎時 0分	瞬間値
常総	139.9889	36.1222	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
坂東	139.9000	36.0361	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
江戸崎	140.3222	35.9667	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
柿岡	140.1917	36.2333	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
門井	140.0333	36.3333	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値
美野里	140.3306	36.2389	雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計		毎5分	積算値

表 4 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(環境省, 国立環境研究所, 霞ヶ浦臨湖実験センター)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
取水塔	140.3808	36.0040	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	6.0 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	バイサラ型湿度計	6.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風速計, シンクロ式風向計	6.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			水温 T_w [°C]	白金抵抗温度計	-0.2, -0.75, -1.5 m	毎秒	前20分
臨湖実験施設屋上	140.3763	36.0020	気温 T_a [°C]	白金抵抗温度計	8.0 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	バイサラ型湿度計	8.0 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [m/s]	風車型風速計, シンクロ式風向計	20.0 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	高精度振動式気圧計	4.0 m	毎時 0分	瞬間値
			日射量 $S\downarrow$ [MJ/m ² /h]	ネオ日射計		毎秒	積算値
			雨量 P [mm/h]	転倒ます式雨量計	0.1 m	毎5分	積算値

表 5 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(環境省)

地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
水戸石川	140.4264	36.3919	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
水戸東部	140.4994	36.3197	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
土浦保健所	140.1907	36.0712	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [0.1m/s]	風車型風向風速計	7.8 m	毎 0.25秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
土浦中村南	140.1734	36.0392	風向 WD [16方位], 風速 U [0.1m/s]	風車型風向風速計	7.8 m	毎 0.25秒	前1時間
石岡杉並	140.2853	36.2022	風向 WD [16方位], 風速 U [0.1m/s]	風車型風向風速計	7.8 m	毎 0.25秒	前1時間
古河保健所	139.7156	36.2039	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
下妻	139.9600	36.1844	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
笠間市役所	140.2386	36.3858	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値

表 5 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(環境省), 続き

地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
東茨城大戸	140.4203	36.3169	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
大宮野中	140.4025	36.5614	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
鹿島宮中	140.6219	35.9650	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
鹿島事務所	140.6403	35.8983	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
神栖消防	140.6667	35.8889	気温 T_a [0.1°C]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	露点式湿度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
潮来保健所	140.5675	35.9397	気温 T_a [0.1°C], 相対湿度 Rh [%]	白金抵抗温度計	1.4 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [16方位], 風速 U [0.1m/s]	風車型風向風速計	7.8 m	毎 0.25秒	前1時間
			日射量 $S \downarrow$ [0.01MJ/m2/h]	全天電気式日射計		毎秒	積算値
江戸崎公民館	140.3148	35.9606	風向 WD [16方位], 風速 U [0.1m/s]	風車型風向風速計	7.8 m	毎 0.25秒	前1時間

表 6 霞ヶ浦周辺の気象観測データ(百里飛行場)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	高度	サンプリング時間	平均化時間
百里飛行場	140.4049	36.1645	気温 T_a [°C]	気温湿度計 (明星電気)	1.5 m	毎秒	前1時間
			相対湿度 Rh [%]	気温湿度計 (明星電気)	1.5 m	毎秒	前1時間
			風向 WD [°], 風速 U [KT]	風向風速計 (明星電気)	6.8 m	毎 0.25秒	前1時間
			気圧 AP [hPa]	アネロイド型気圧計 (明星電気)	32.6 m	毎時 0分	瞬間値

表 7 霞ヶ浦(水温観測データ)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	水深	サンプリング時間	平均化時間
掛馬沖	140.2467	36.0539	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	3.489 m	毎月	瞬間値
木原沖	140.3011	36.0458	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	5.238 m	毎月	瞬間値
牛込沖	140.3550	36.0447	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	5.801 m	毎月	瞬間値
高崎沖	140.3383	36.1383	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	3.846 m	毎月	瞬間値
玉造沖	140.3986	36.0900	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	6.401 m	毎月	瞬間値
湖心	140.4042	36.0381	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	5.705 m	毎月	瞬間値
西の洲沖	140.4300	36.0061	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	5.151 m	毎月	瞬間値
麻生沖	140.4886	35.9650	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	1.215 m	毎月	瞬間値
高浜沖	140.3731	36.1244	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	3.656 m	毎月	瞬間値
沖宿沖	140.2689	36.0672	水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	0.856 m	毎月	瞬間値
St.1	140.3249	36.1492	水温 T_w [°C]	東邦電探社サーミスター温度計	3.093 m	毎月	瞬間値
St.3	140.3775	36.1217	水温 T_w [°C]	東邦電探社サーミスター温度計	3.516 m	毎月	瞬間値
St.7	140.2332	36.065	水温 T_w [°C]	東邦電探社サーミスター温度計	2.979 m	毎月	瞬間値
St.9	140.4037	36.0357	水温 T_w [°C]	東邦電探社サーミスター温度計	5.553 m	毎月	瞬間値
St.12	140.472	35.9766	水温 T_w [°C]	東邦電探社サーミスター温度計	3.423 m	毎月	瞬間値

※ 水深は T.P. 0m から湖底までの高さである。

表 8 国土交通省水質調査時刻

調査日	掛馬沖	木原沖	牛込沖	高崎沖	玉造沖	湖心	西の洲沖	麻生沖	高浜沖	沖宿沖
1/8	8:05	8:53	9:22	10:57	10:22	9:45	12:01	12:32	11:23	8:34
2/19	9:10	10:49	11:18	13:08	11:52	9:27	10:51	11:26	12:40	10:27
3/12	9:10	10:02	10:26	11:28	12:16	10:47	12:51	13:20	11:53	9:40
4/9	9:03	9:52	10:21	11:56	11:24	10:48	13:02	13:35	12:22	9:33
5/14	9:26	10:53	11:18	12:47	11:45	8:47	10:00	10:34	13:18	10:32
6/4	9:24	10:16	10:43	13:15	12:38	11:22	15:13	8:31	14:01	9:56
7/9	9:05	9:59	10:23	11:53	11:18	10:48	13:06	13:40	12:20	9:39
8/13	9:40	11:07	11:34	13:14	12:06	9:03	10:30	11:29	13:45	9:16
9/10	9:14	11:25	11:53	13:31	13:00	12:16	14:50	15:20	13:58	10:55
10/10	9:18	10:07	10:31	11:51	11:20	10:52	12:52	13:20	12:13	9:47
11/5	9:44	11:24	11:52	13:42	12:20	9:20	10:38	11:12	13:15	11:00
12/10	9:16	10:17	10:40	11:57	13:07	11:10	13:41	14:06	12:25	9:57

※ 環境省国立環境研究所の調査時刻に関する記載は確認できなかった。

表 9 国土交通省(水位観測データ)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	零点高	サンプリング時間	平均化時間
木原	140.2950	36.0278	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間
大山	140.3739	36.0092	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間
八木薪	140.3900	36.1281	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間
出島	140.3753	36.0697	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間
井上	140.4242	36.0567	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間
麻生沖	140.4886	35.9653	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間
湖心	140.4042	36.0378	水位 h [m]	水晶式水位計	0 m	毎秒	前1時間

※ 零点高は 2018 年 1 月現在の値(Y.P.)である.

表 10 西浦・流入出河川の観測データ(2007, 2008)

観測地点	経度	緯度	項目	測器	零点高	サンプリング時間	平均化時間
湖心	140.4042	36.0378	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	0m	毎秒	前1時間
麻生沖	140.4886	35.9653	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	0m	毎秒	前1時間
潮来	140.5503	35.9342	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	0m	毎秒	前1時間
			水位 $h[\text{m}]$, 流量 $Q[0.1\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$	超音波流速計		毎秒	瞬間値
掛馬沖	140.2467	36.0542	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	0m	毎秒	前1時間
小野川	140.2506	35.9436	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	0.375m	毎秒	前1時間
			水位 $h[\text{m}]$, 流量 $Q[\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$	水晶式水位計		毎秒	前1時間
桜川(藤沢新田)	140.1428	36.1136	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	1.018m	毎秒	前1時間
			水位 $h[\text{m}]$, 流量 $Q[\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$	水晶式水位計		毎秒	前1時間
恋瀬川	140.2594	36.1842	水温 $T_w[^\circ\text{C}]$	白金測温抵抗体	1.635m	毎秒	前1時間
			水位 $h[\text{m}]$, 流量 $Q[\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$	水晶式水位計		毎秒	前1時間

表 11 風向別粗度長

地点	z (m)	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
臨湖実験施設	20	0.17	0.1525	0.135	0.1175	0.1	0.1	0.1	0.1
つくば	20.4	0.84	0.9125	0.985	1.0575	1.13	1.0725	1.015	0.9575
百里基地	7.8	0.313	0.2595	0.206	0.153	0.1	0.278	0.456	0.6345
銚田	6.5	0.565	0.519	0.473	0.4265	0.38	0.414	0.448	0.4815
龍ヶ崎	9.4	0.29	0.285	0.28	0.275	0.27	0.2275	0.185	0.1425
鹿島	6.5	0.405	0.4825	0.56	0.6375	0.715	0.6365	0.558	0.479
土浦保健所	12	1.25	1.235	1.22	1.205	1.19	1.1825	1.175	1.1675
潮来保健所	12	0.24	0.2575	0.275	0.2925	0.31	0.545	0.78	1.015
石岡杉並	12	0.983	0.9745	0.966	0.958	0.95	0.9315	0.913	0.894
土浦中村南	14	1.033	1.054	1.075	1.0965	1.118	1.1435	1.169	1.1945
湖心	10	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土浦	11	1.19	0.9875	0.785	0.5825	0.38	0.569	0.758	0.9465
潮来	18.5	0.675	0.675	0.675	0.675	0.675	0.589	0.503	0.4165
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	0.8415	0.928	1.014	1.1	0.9725	0.845	0.7175
玉造	11	0.45	0.405	0.36	0.315	0.27	0.2275	0.185	0.1425
出島	5	0.9	0.6775	0.455	0.2325	0.01	0.01	0.01	0.01
鰐川	8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1425	0.185	0.2275
取水塔	6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
江戸崎	12	0.93	0.9725	1.015	1.0575	1.1	1.065	1.03	0.995
波崎	18	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
国設筑波	12	0.78	0.7375	0.695	0.6525	0.61	0.485	0.36	0.235

※ 伊倉(2010)及び原田(2015)より引用, 加筆(z は観測高度を表し, 単位は全て m である).

表 11 風向別粗度長, 続き

地点	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	100z (km)
東村	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
臨湖実験施設	0.1	0.1265	0.153	0.179	0.205	0.1965	0.188	0.179	2
つくば	0.9	0.944	0.988	1.0315	1.075	1.0165	0.958	0.899	2.04
百里基地	0.813	0.6745	0.536	0.398	0.26	0.273	0.286	0.2995	0.78
鉾田	0.515	0.57	0.625	0.68	0.735	0.6925	0.65	0.6075	0.65
龍ヶ崎	0.1	0.1075	0.115	0.1225	0.13	0.17	0.21	0.25	0.94
鹿島	0.4	0.4765	0.553	0.629	0.705	0.63	0.555	0.48	0.65
土浦保健所	1.16	1.175	1.19	1.205	1.22	1.2275	1.235	1.2425	1.2
潮来保健所	1.25	0.9975	0.745	0.4925	0.24	0.24	0.24	0.24	1.2
石岡杉並	0.875	0.894	0.913	0.9315	0.95	0.958	0.966	0.9745	1.2
土浦中村南	1.22	1.2125	1.205	1.1975	1.19	1.1505	1.111	1.072	1.4
湖心	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1
土浦	1.135	1.1155	1.096	1.077	1.058	1.091	1.124	1.157	1.1
潮来	0.33	0.359	0.388	0.4165	0.445	0.5025	0.56	0.6175	1.85
釜谷沖	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.7
掛馬沖	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.7
麻生沖	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.95
小高	0.59	0.6115	0.633	0.654	0.675	0.695	0.715	0.735	0.55
玉造	0.1	0.14	0.18	0.22	0.26	0.3075	0.355	0.4025	1.1
出島	0.01	0.0325	0.055	0.0775	0.1	0.3	0.5	0.7	0.5
鰐川	0.27	0.2275	0.185	0.1425	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8
取水塔	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.6
江戸崎	0.96	0.845	0.73	0.615	0.5	0.6075	0.715	0.8225	1.2
波崎	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.8
国設筑波	0.11	0.3575	0.605	0.8525	1.1	1.02	0.94	0.86	1.2

※ 伊倉(2010)及び原田(2015)より引用, 加筆 (単位は 100z を除いて全て m である).

表 12 水面温度と水深 0m 水温の年変動と標準偏差

Month	T_s (湖心)	国交省調査 T_w (0m)		環境省調査 T_w (0m)	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1	6.92	5.30	0.30	5.72	1.37
2	6.83	5.66	0.48	4.00	0.01
3	8.18	7.85	0.69	9.65	
4	16.41	14.24	0.48		
5	22.75	20.49	0.64	18.66	
6	26.69	25.25	0.98	22.45	
7	27.93	25.68	0.65		
8	33.84	28.36	1.03	27.39	
9	27.50	24.82	0.36		
10	24.31	21.11	0.30	20.78	
11		16.56	0.22		
12	10.36	9.49	0.41	8.92	0.15

※ 単位は°Cである.

表 13 湖心における水面温度と水深 0m 水温の比較と熱容量への影響

Month	湖心における温度比較 (°C)			湖心における熱容量比較 (MJm^{-2})		
	T_s (湖心)	T_w (0m)	差 ($T_s - T_w$)	T_s 使用 (A)	T_w 使用 (B)	差 (A - B)
1	6.92	5.3	1.62	7013.6	7012.0	1.6
2	6.83	4.8	2.03	7145.7	7143.6	2.1
3	8.18	7.6	0.58	6961.5	6960.3	1.2
4	16.41	13.7	2.71	7288.2	7285.5	2.6
5	22.75	19.3	3.45	7183.1	7179.7	3.4
6	26.69	24.5	2.19	7332.4	7330.3	2.2
7	27.93	25.4	2.53	7378.8	7376.4	2.4
8	33.84	27.2	6.64	7431.7	7425.4	6.3
9	27.50	24.7	2.80	7384.0	7381.4	2.6
10	24.31	21.7	2.61	7722.3	7719.1	3.1
11						
12	10.36	9.7	0.66	7151.0	7150.2	0.8

※ 単位は°Cである.

表 14 水温調査日・ボックスモデルの計算期間

Period	霞ヶ浦河川事務所			国立環境研究所		
	開始 (調査日)	終了	平均化時間(hour)	開始 (調査日)	終了	平均化時間(hour)
1	2014/1/8 10:00	2014/2/19 9:00	1007	2014/1/8 10:00	2014/2/12 9:00	839
2	2014/2/19 10:00	2014/3/12 9:00	503	2014/2/12 10:00	2014/3/12 9:00	671
3	2014/3/12 10:00	2014/4/9 9:00	671	2014/3/12 10:00	2014/4/9 9:00	671
4	2014/4/9 10:00	2014/5/14 9:00	839	2014/4/9 10:00	2014/5/7 9:00	671
5	2014/5/14 10:00	2014/6/4 9:00	503	2014/5/7 10:00	2014/6/11 9:00	839
6	2014/6/4 10:00	2014/7/9 9:00	839	2014/6/11 10:00	2014/7/9 9:00	671
7	2014/7/9 10:00	2014/8/13 9:00	839	2014/7/9 10:00	2014/8/12 9:00	815
8	2014/8/13 10:00	2014/9/10 9:00	671	2014/8/12 10:00	2014/9/16 9:00	839
9	2014/9/10 10:00	2014/10/10 9:00	719	2014/9/16 10:00	2014/10/8 9:00	527
10	2014/10/10 10:00	2014/11/5 9:00	623	2014/10/8 10:00	2014/11/12 9:00	839
11	2014/11/5 10:00	2014/12/10 9:00	839	2014/11/12 10:00	2014/12/10 9:00	671

表 15 単回帰分析による水温補正

	Kakeumaoki	Kiharaoki	Ushikomeoki	Takasakioki	Takahamaoki
a	1.002	0.997	0.996	1.018	1.017
b	0.073	0.125	0.264	-0.261	-0.294
	Tamatsukurioki	Koshin	Nishinosuoki	Asouoki	Okijukuoki
a	1.016	1.008	1.005	1.032	1.031
b	-0.134	0.233	0.162	0.025	0.113
	St1	St3	St7	St9	St12
a	0.993	0.997	0.977	0.999	1.010
b	-0.128	0.048	0.246	0.321	-0.353

※ T_{wp} (水体の平均水温) = $a \cdot T_w$ (水温) + b

表 16 空間内挿法の比較

	Item	Modified Shepard's Method (IDW)	Minimum Curvature
R	U	0.97	0.96
R^2	U	0.94	0.92
t-test	U	0.00	0.02
RMSE	U (ms^{-1})	0.18	0.16
R	G	0.99	0.99
R^2	G	0.99	0.99
t-test	G	0.95	0.25
RMSE	G (Wm^{-2})	16.43	33.73
R	H	0.95	0.82
R^2	H	0.89	0.67
t-test	H	0.01	0.89
RMSE	H (Wm^{-2})	3.35	6.21
R	LE	0.93	0.62
R^2	LE	0.87	0.39
t-test	LE	0.00	0.00
RMSE	LE (Wm^{-2})	11.33	20.57

※ Kriging 法に対して, IDW 法と最小曲率法をそれぞれ比較した結果である.

表 16 空間内挿法の比較, 続き

	Item	Modified Shepard's Method (IDW)	Minimum Curvature
R	$qs-q$	0.99	0.99
R^2	$qs-q$	0.99	0.99
t-test	$qs-q$	0.69	0.67
RMSE	$qs-q$ (kgkg^{-1})	0.00	0.00
R	$Rain$	0.99	0.99
R^2	$Rain$	0.99	0.99
t-test	$Rain$	0.51	0.96
RMSE	$Rain$ (mmh^{-1})	0.01	0.01
R	Rn	0.99	0.99
R^2	Rn	0.99	0.99
t-test	Rn	0.57	0.49
RMSE	Rn (Wm^{-2})	13.27	16.57
R	$Ts-Ta$	0.99	0.99
R^2	$Ts-Ta$	0.97	0.99
t-test	$Ts-Ta$	0.45	0.24
RMSE	$Ts-Ta$ ($^{\circ}\text{C}$)	0.33	0.17

※ Kriging 法に対して, IDW 法と最小曲率法をそれぞれ比較した結果である.

表 17 交差検証の結果(掛馬沖)

使用観測データ	項目	q (kgkg ⁻¹ , 釜谷沖)	$S \downarrow$ (Wm ⁻²)	Ta (°C)	U_{10} (ms ⁻¹)	WS (ms ⁻¹)
湖心	R ²	1.00	0.95	0.99	0.41	0.41
	RMS	0.01	188.55	17.00	4.50	4.44
	RMSE	4.14×10^{-4}	20.51	0.65	2.03	2.08
	RMSPE	0.65	136.25	1.20	15.16	16.01
掛馬沖以外	R ²	1.00	0.26	1.00	0.34	0.34
	RMS	0.01	167.94	17.00	3.39	3.31
	RMSE	4.47×10^{-4}	93.01	0.38	1.85	1.73
	RMSPE	0.63	112.64	2.50	8.19	8.53
掛馬沖含む	R ²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	RMS	0.01	189.40	17.06	3.96	3.81
	RMSE	1.16×10^{-6}	0.30	2.27×10^{-3}	0.01	0.01
	RMSPE	1.66×10^{-3}	0.54	0.01	0.04	0.05

※ 本年度, 相対湿度の観測が掛馬沖では行われていなかった為, 比湿のみ釜谷沖を対象に検証.

表 18 交差検証の結果(湖心)

使用観測データ	項目	q (kgkg ⁻¹)	$S \downarrow$ (Wm ⁻²)	Ta (°C)	U_{10} (ms ⁻¹)	WS (ms ⁻¹)
湖心以外	R ²	0.99	0.97	0.99	0.90	0.92
	RMS	0.01	183.55	16.77	4.42	4.25
	RMSE	7.12×10^{-4}	16.66	0.89	1.32	1.67
	RMSPE	0.69	1.37	6.25	2.55	3.26
湖心含む	R ²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	RMS	0.01	187.70	16.99	4.98	4.98
	RMSE	1.72×10^{-6}	0.04	2.08×10^{-3}	4.2×10^{-3}	0.01
	RMSPE	1.45×10^{-3}	3.21×10^{-3}	0.01	0.01	0.01

表 19 湖面熱収支の月変化

月	H		LE		Rn		G	
	月平均値	標準偏差	月平均値	標準偏差	月平均値	標準偏差	月平均値	標準偏差
1	15.6	2.6	37.4	6.1	41.0	6.5	-12.0	10.7
2	18.4	2.9	38.9	6.8	65.2	6.8	7.9	12.5
3	13.8	2.9	53.0	10.5	104.2	7.4	37.5	15.4
4	19.4	2.7	77.3	12.1	146.2	9.3	49.5	18.0
5	18.6	2.6	90.9	14.9	163.3	16.2	52.2	25.5
6	20.8	2.6	88.5	12.2	138.6	21.3	29.3	28.2
7	21.5	2.7	96.1	16.9	166.6	12.0	49.1	23.7
8	24.0	3.6	121.1	27.7	137.8	12.0	-7.3	35.1
9	23.1	2.9	91.7	19.4	102.2	12.0	-12.6	27.2
10	22.2	2.8	81.3	17.1	67.5	12.1	-35.9	25.6
11								
12	23.1	3.0	45.3	8.8	24.1	4.7	-44.3	12.5
年平均(2014)	20.0	2.8	74.7	13.9	105.2	10.9	10.3	21.3

※ 年平均値は、11 月(エラー期間)を除いた平均値を指す。標準偏差は空間分布から求めている。単位は全て Wm^{-2} で統一している。

表 20 湖心における熱収支(先行研究 (Sugita et al., 2014)との比較)

2008-2012 湖心 (5年間の平均値)					2014 湖心				
月	H	LE	Rn	G	月	H	LE	Rn	G
1	58.6	120.3	120.1	-58.8	1	41.6	119.2	115.1	-45.7
2	55.6	103.0	172.0	13.4	2	49.4	115.4	157.0	-7.9
3	70.0	149.4	284.6	65.1	3	43.6	172.1	279.8	64.0
4	71.2	169.1	365.3	125.0	4	56.0	233.1	390.2	101.1
5	88.7	220.4	408.3	99.2	5	56.6	294.6	453.8	102.5
6	85.1	201.7	392.6	105.8	6	54.2	275.9	392.0	61.8
7	84.9	248.7	448.2	114.5	7	61.5	319.6	453.3	72.2
8	90.8	280.5	440.4	69.1	8	73.2	396.7	371.2	-98.6
9	95.7	275.1	304.2	-66.7	9	63.6	280.9	267.2	-77.3
10	83.7	220.1	191.5	-112.3	10	63.4	256.7	174.9	-145.2
11	78.0	171.0	107.7	-141.3	11				
12	71.4	147.9	83.3	-136.0	12	59.9	141.6	66.1	-135.4
年平均値	77.8	194.2	291.9	19.8	年平均値	56.7	236.9	283.7	-9.9

※ 年平均値は, 11 月(エラー期間)を除いた平均値を指す. 単位は全て $\text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$ で統一している.

表 21 熱収支項に対する寄与率

LE			G		
	R^2	t		R^2	t
Ce	0.06	6.9	Rn	0.88	1.25×10^{16}
$qs-q$	0.29	170.2	H	0.02	-7.7×10^{14}
U	0.11	86.6	LE	6.11×10^{-4}	-2.6×10^{15}

H			Rn		
	R^2	t		R^2	t
Ch	3.73×10^{-5}	14.9	$S \downarrow$	0.97	1.3×10^4
$Ts-Ta$	0.23	106	$S \uparrow$	0.35	-817
U	0.001	43.2	$L \downarrow$	5.08×10^{-4}	2.1×10^3
			$L \uparrow$	0.001	-2.1×10^3

表 22 天候に基づいて選定された解析対象日

季節	選択日	快晴指数	日降水量(mm/d)	天気
冬	2014/1/16	0.68	0	快晴
春	2014/4/12	0.66	0	快晴
夏	2014/8/5	0.65	0	快晴
秋	2014/10/18	0.71	0	快晴
冬	2014/1/15	0.16	0	曇天
春	2014/4/20	0.32	0	曇天
夏	2014/8/23	0.35	0	曇天
秋	2014/9/20	0.20	0	曇天
冬	2014/2/15	0.19	72.85	雨天
春	2014/5/21	0.15	30.29	雨天
夏	2014/8/10	0.32	40.04	雨天
秋	2014/10/5	0.06	67.75	雨天

表 23 天候及び季節による変化

季節	選択日	G (Wm^{-2})			Rn (Wm^{-2})			H (Wm^{-2})			LE (Wm^{-2})		
		平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
冬	2014/1/16	-7.4	11.7	-1.6	40.8	7.8	0.2	19.4	2.8	0.1	28.8	4.4	0.2
春	2014/4/12	78.8	12.9	0.2	170.8	5.2	0.0	15.4	2.9	0.2	76.5	11.0	0.1
夏	2014/8/5	-3.0	54.8	-18.3	221.9	7.5	0.0	19.7	4.7	0.2	205.1	50.0	0.2
秋	2014/10/18	-27.3	14.4	-0.5	77.6	5.5	0.1	25.2	2.8	0.1	79.7	13.0	0.2
4日間の平均値		10.3	23.4	-5.1	127.8	6.5	0.1	20.0	3.3	0.2	97.5	19.6	0.2
冬	2014/1/15	-104.1	9.4	-0.1	-24.2	2.0	-0.1	26.4	2.4	0.1	53.5	7.6	0.1
春	2014/4/20	-22.9	20.4	-0.9	94.2	12.7	0.1	35.9	2.1	0.1	81.3	9.2	0.1
夏	2014/8/23	-67.9	35.4	-0.5	73.1	6.3	0.1	23.8	3.7	0.2	117.1	31.3	0.3
秋	2014/9/20	-104.8	17.6	-0.2	2.6	2.8	1.1	24.0	2.1	0.1	83.4	14.8	0.2
4日間の平均値		-74.9	20.7	-0.4	36.4	6.0	0.3	27.5	2.6	0.1	83.8	15.7	0.2
冬	2014/2/15	3.2	20.2	6.4	50.0	7.9	0.2	16.7	7.2	0.4	30.1	10.7	0.4
春	2014/5/21	-123.5	29.8	-0.2	41.4	5.9	0.1	35.3	5.3	0.2	129.6	24.2	0.2
夏	2014/8/10	-99.2	59.2	-0.6	108.4	10.5	0.1	31.8	7.9	0.2	175.9	50.8	0.3
秋	2014/10/5	-129.3	31.0	-0.2	-1.3	5.7	-4.2	29.8	4.8	0.2	98.1	22.5	0.2
4日間の平均値		-87.2	35.0	1.3	49.6	7.5	-1.0	28.4	6.3	0.2	108.4	27.1	0.3

※ 平均値及び標準偏差は空間分布から得られた値である。単位は全て Wm^{-2} である。

表 23 天候及び季節による変化, 続き

季節	選択日	$qs - q$ (kgkg ⁻¹)			$Ts - Ta$ (°C)			U (ms ⁻¹)		
		平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
冬	2014/1/16	0.003	0.000	0.1	4.2	0.6	0.2	2.0	0.6	0.3
春	2014/4/12	0.007	0.000	0.0	3.5	0.7	0.2	2.5	0.6	0.2
夏	2014/8/5	0.011	0.001	0.1	3.3	0.4	0.1	6.3	1.7	0.3
秋	2014/10/18	0.008	0.000	0.0	5.5	0.7	0.1	2.6	0.7	0.3
4日間の平均値		0.007	0.000	0.0	4.1	0.6	0.1	3.3	0.9	0.3
冬	2014/1/15	0.003	0.000	0.0	4.9	0.5	0.1	4.3	0.8	0.2
春	2014/4/20	0.006	0.000	0.0	6.9	0.3	0.0	3.6	0.6	0.2
夏	2014/8/23	0.010	0.001	0.1	5.1	0.4	0.1	3.6	1.3	0.4
秋	2014/9/20	0.007	0.000	0.1	5.2	0.4	0.1	3.0	0.9	0.3
4日間の平均値		0.007	0.000	0.0	5.5	0.4	0.1	3.6	0.9	0.3
冬	2014/2/15	0.001	0.000	0.2	2.2	0.7	0.3	8.4	1.5	0.2
春	2014/5/21	0.006	0.000	0.1	5.1	0.3	0.1	7.0	1.4	0.2
夏	2014/8/10	0.008	0.001	0.1	4.4	0.3	0.1	8.1	2.5	0.3
秋	2014/10/5	0.006	0.000	0.1	5.0	0.3	0.1	5.7	1.7	0.3
4日間の平均値		0.005	0.000	0.1	4.2	0.4	0.1	7.3	1.8	0.2

表 23 天候及び季節による変化, 続き

季節	選択日	C_e			Ch			$S \downarrow$ (Wm^{-2})			T_w ($^{\circ}\text{C}$)		
		平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
冬	2014/1/16	0.002	0.000	0.2	0.002	0.001	0.3	137.8	7.8	0.1	4.5	0.2	0.0
春	2014/4/12	0.002	0.000	0.1	0.002	0.000	0.2	285.1	5.2	0.0	14.4	0.3	0.0
夏	2014/8/5	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.1	291.5	7.6	0.0	29.7	0.4	0.0
秋	2014/10/18	0.001	0.000	0.2	0.002	0.001	0.3	188.9	5.4	0.0	18.9	0.1	0.0
4日間の平均値		0.001	0.000	0.1	0.002	0.000	0.2	225.8	6.5	0.0	16.9	0.3	0.0
冬	2014/1/15	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.2	21.4	2.0	0.1	4.7	0.2	0.0
春	2014/4/20	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.2	141.1	12.7	0.1	14.6	0.2	0.0
夏	2014/8/23	0.001	0.000	0.2	0.002	0.001	0.4	125.5	6.4	0.1	29.0	0.3	0.0
秋	2014/9/20	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.3	58.3	2.8	0.0	22.7	0.2	0.0
4日間の平均値		0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.3	86.6	6.0	0.1	17.7	0.2	0.0
冬	2014/2/15	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.1	60.5	7.9	0.1	4.5	0.3	0.1
春	2014/5/21	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.1	75.9	5.9	0.1	20.6	0.3	0.0
夏	2014/8/10	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.2	135.0	10.5	0.1	27.5	0.2	0.0
秋	2014/10/5	0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.2	18.0	5.7	0.3	21.2	0.2	0.0
4日間の平均値		0.001	0.000	0.1	0.001	0.000	0.2	72.3	7.5	0.2	18.5	0.3	0.0

表 24 各領域の熱収支(年平均値と空間的な標準偏差)

		湖尻			湖心域			高浜入			土浦入		
		年平均値	標準偏差	変動係数	年平均値	標準偏差	変動係数	年平均値	標準偏差	変動係数	年平均値	標準偏差	変動係数
G	Wm^{-2}	-9.29	1.54	-0.17	3.51	8.63	2.46	9.53	3.09	0.32	14.65	12.79	0.87
H	Wm^{-2}	21.57	0.19	0.01	20.75	1.19	0.06	20.73	0.32	0.02	18.69	0.66	0.04
LE	Wm^{-2}	89.35	1.04	0.01	80.87	6.50	0.08	64.78	1.40	0.02	62.48	4.51	0.07
Rn	Wm^{-2}	101.62	0.99	0.01	105.13	3.86	0.04	95.05	2.43	0.03	95.82	11.55	0.12
U	ms^{-1}	4.35	0.06	0.01	3.93	0.46	0.12	2.49	0.09	0.03	3.04	0.29	0.09

※ 年平均値とは, 11 月(エラー期間)を除いた平均値を指す.

表 25 月変化

Month	$G \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$			$Rn \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$			$H \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$			$LE \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
1	-12.0	10.7	-0.9	41.0	6.5	0.2	15.6	2.6	0.2	37.4	6.1	0.2
2	7.9	12.5	1.6	65.2	6.8	0.1	18.4	2.9	0.2	38.9	6.8	0.2
3	37.5	15.4	0.4	104.2	7.4	0.1	13.8	2.9	0.2	53.0	10.5	0.2
4	49.5	18.0	0.4	146.2	9.3	0.1	19.4	2.7	0.1	77.3	12.1	0.2
5	52.2	25.5	0.5	163.3	16.2	0.1	18.6	2.6	0.1	90.9	14.9	0.2
6	29.3	28.2	1.0	138.6	21.3	0.2	20.8	2.6	0.1	88.5	12.2	0.1
7	49.1	23.7	0.5	166.6	12.0	0.1	21.5	2.7	0.1	96.1	16.9	0.2
8	-7.3	35.1	-4.8	137.8	12.0	0.1	24.0	3.6	0.2	121.1	27.7	0.2
9	-12.6	27.2	-2.2	102.2	12.0	0.1	23.1	2.9	0.1	91.7	19.4	0.2
10	-35.9	25.6	-0.7	67.5	12.1	0.2	22.2	2.8	0.1	81.3	17.1	0.2
11												
12	-44.3	12.5	-0.3	24.1	4.7	0.2	23.1	3.0	0.1	45.3	8.8	0.2
年平均値	10.3	21.3	-0.4	105.2	10.9	0.1	20.0	2.8	0.1	74.7	13.9	0.2

※ 平均値は西浦全体の平均値であり，標準偏差は空間的な値である．また，年平均値とは，11月を除いた平均値を指す．単位は全て Wm^{-2} である．

表 25 月変化, 続き

Month	$qs-qa$ (kgkg ⁻¹)			$Ts-Ta$ (°C)			U (ms ⁻¹)		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
1	0.003	0.000	0.047	3.3	0.5	0.2	2.9	0.7	0.2
2	0.003	0.000	0.058	3.4	0.5	0.2	3.8	0.9	0.2
3	0.004	0.000	0.057	2.7	0.5	0.2	4.2	1.0	0.2
4	0.006	0.000	0.050	3.8	0.5	0.1	3.8	0.8	0.2
5	0.007	0.000	0.057	3.7	0.4	0.1	4.0	0.8	0.2
6	0.008	0.000	0.053	4.4	0.5	0.1	3.4	0.6	0.2
7	0.009	0.000	0.054	4.8	0.4	0.1	2.9	0.7	0.3
8	0.010	0.001	0.054	5.0	0.4	0.1	3.7	1.1	0.3
9	0.008	0.000	0.053	4.9	0.4	0.1	3.2	1.0	0.3
10	0.007	0.000	0.057	4.5	0.4	0.1	3.5	1.0	0.3
11									
12	0.004	0.000	0.049	4.6	0.5	0.1	3.1	0.9	0.3
年平均値	0.006	0.000	0.054	4.1	0.5	0.1	3.5	0.9	0.3

表 25 月変化, 続き

Month	<i>Ce</i>			<i>Ch</i>			<i>Sdown</i> (Wm ⁻²)			<i>Tw</i> (°C)		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
1	0.001	0.000	0.130	0.002	0.000	0.254	115.3	6.5	0.1	5.1	0.2	0.0
2	0.001	0.000	0.120	0.002	0.000	0.244	124.8	6.8	0.1	5.3	0.3	0.1
3	0.001	0.000	0.112	0.001	0.000	0.238	170.9	7.4	0.0	9.1	0.4	0.0
4	0.001	0.000	0.099	0.001	0.000	0.211	222.4	9.3	0.0	15.1	0.4	0.0
5	0.001	0.000	0.098	0.001	0.000	0.208	235.4	16.2	0.1	19.9	0.4	0.0
6	0.001	0.000	0.097	0.001	0.000	0.204	192.8	21.3	0.1	24.0	0.3	0.0
7	0.001	0.000	0.148	0.002	0.001	0.294	221.7	12.1	0.1	27.0	0.3	0.0
8	0.001	0.000	0.159	0.002	0.001	0.323	189.4	12.0	0.1	28.1	0.3	0.0
9	0.001	0.000	0.160	0.002	0.001	0.322	166.1	12.0	0.1	23.6	0.2	0.0
10	0.001	0.000	0.149	0.002	0.000	0.304	125.8	11.8	0.1	20.3	0.2	0.0
11												
12	0.001	0.000	0.147	0.002	0.000	0.289	101.4	4.7	0.0	7.6	0.2	0.0
年平均値	0.001	0.000	0.129	0.002	0.000	0.263	169.7	10.9	0.1	16.8	0.3	0.0

表 26 ボックスモデル結果(麻生沖)

Asouoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	0.05	0.13	41.8	-15.9	0.6	57.1	21.6	0.9	77.5
2	2.18	-0.22	-132.1	14.8	0.2	-147.0	9.1	0.1	90.8
3	7.22	0.13	82.8	36.6	0.3	45.9	44.2	0.4	55.5
4	5.14	-0.20	-70.5	25.0	0.1	-95.6	20.7	0.1	79.2
5	3.82	0.03	33.3	46.3	0.6	-13.5	76.6	0.9	22.4
6	1.32	0.02	10.1	5.4	1.6	3.1	53.4	15.9	30.7
7	3.32	0.02	14.2	-2.5	1.1	15.6	13.2	5.5	81.3
8	-3.81	0.01	-5.3	-45.9	1.0	39.5	53.1	1.2	45.7
9	-2.95	0.36	162.1	-57.5	0.8	218.9	20.8	0.3	79.0
10	-8.17	-0.29	-180.2		0.4				
11	-4.19	0.05	9.0		0.2				
年平均値	0.36	0.00	-3.2	0.7	0.6	13.8	34.7	2.8	62.5

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 27 熱容量の計算結果と比較(麻生沖)

Asouoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	1768		1753							
2	1920	1713	1753	1697	1	-58	2.3	207	56	151
3	1680	1947	1766	1780	2	27	0.3	-266	-14	-253
4	1880	1770	1811	1855	3	88	0.7	111	-45	156
5	1668	1956	1841	1887	4	76	0.4	-289	-45	-244
6	1728	1753	1863	1926	5	84	1.0	-25	-63	38
7	1759	1749	1871	1885	6	16	4.9	9	-13	23
8	1801	1754	1890	1867	7	-8	3.2	47	23	24
9	1788	1693	1868	1782	8	-111	2.4	95	87	9
10	2208	1642	1851	1721	9	-149	2.0	567	129	437
Average	1820	1775	1827	1822	Average	-4	2	51	13	38
					正の合計	291	17	1037	295	838
					負の合計	-325	0	-579	-180	-496

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 81 中の S_{const} と同義である.

表 28 ボックスモデル結果(掛馬沖)

Takeumaoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.18	0.12	37.2	-8.2	0.2	45.1	15.3	0.4	84.2
2	1.92	-0.21	-121.1	21.6	0.2	-142.9	13.1	0.1	86.8
3	7.05	0.14	110.7	49.9	0.3	60.5	45.1	0.2	54.6
4	5.50	-0.17	-40.7	45.4	0.1	-86.2	34.5	0.1	65.4
5	5.90	0.04	71.0	82.3	0.6	-11.8	86.9	0.6	12.5
6	0.83	0.01	6.0	38.6	0.6	-33.2	53.3	0.8	45.9
7	1.34	0.01	9.9	89.8	0.1	-80.0	52.9	0.0	47.1
8	-2.94	0.01	-11.4	38.5	0.8	-50.7	42.8	0.8	56.3
9	-3.96	0.34	138.6	20.0	1.1	117.5	14.4	0.8	84.8
10	-5.25	-0.30	-195.2		0.2				
11	-6.30	0.05	-13.2		0.1				
年平均値	0.36	0.00	-0.7	42.0	0.4	-20.2	39.8	0.4	59.7

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 29 熱容量の計算結果と比較(掛馬沖)

Takeumaoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	4391		4379							
2	4525	4362	4376	4350	1	-30	0.9	164	26	138
3	4306	4565	4406	4415	2	39	0.3	-259	-10	-249
4	4574	4427	4514	4527	3	121	0.7	146	-13	159
5	4451	4711	4596	4651	4	137	0.4	-260	-55	-205
6	4579	4601	4682	4746	5	149	1.0	-21	-64	42
7	4597	4698	4694	4800	6	116	1.8	-100	-106	6
8	4627	4869	4713	4966	7	271	0.2	-242	-252	11
9	4600	4722	4671	4808	8	93	1.8	-122	-137	15
10	4958	4654	4614	4726	9	52	2.7	304	-112	416
Average	4561	4623	4565	4666	Average	105	1	-43	-80	37
					正の合計	978	10	614	26	787
					負の合計	-30	0	-1005	-749	-454

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 83 中の S_{const} と同義である.

表 30 ボックスモデル結果(木原沖)

Kiharaoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.28	0.12	36.3	-2.4	0.4	38.3	5.9	1.0	93.1
2	1.62	-0.21	-117.2	29.9	0.2	-147.2	16.9	0.1	83.0
3	7.21	0.14	132.9	59.3	0.3	73.3	44.6	0.3	55.1
4	5.30	-0.17	-29.3	56.9	0.1	-86.4	39.7	0.1	60.2
5	5.92	0.04	93.4	83.0	0.5	9.9	88.8	0.5	10.6
6	0.28	0.00	4.0	35.2	1.0	-32.2	51.4	1.5	47.1
7	2.26	0.01	19.2	69.9	0.4	-51.1	57.6	0.3	42.1
8	-2.93	0.01	-19.6	20.7	1.0	-41.3	32.9	1.6	65.5
9	-4.15	0.34	126.2	7.6	1.1	117.6	6.0	0.9	93.1
10	-4.95	-0.30	-208.9		0.2				
11	-6.36	0.05	-27.6		0.1				
年平均値	0.36	0.00	0.9	40.0	0.5	-13.2	38.2	0.7	61.1

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 31 熱容量の計算結果と比較(木原沖)

Kiharaoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	6428		6417							
2	6560	6421	6411	6410	1	-9	1.5	139	1	138
3	6348	6615	6448	6465	2	54	0.3	-267	-18	-249
4	6669	6492	6609	6592	3	143	0.8	177	18	159
5	6581	6841	6725	6782	4	172	0.4	-261	-56	-205
6	6750	6732	6852	6877	5	150	0.9	18	-24	42
7	6762	6859	6858	6962	6	106	3.0	-97	-103	6
8	6820	6974	6906	7071	7	211	1.2	-154	-165	10
9	6773	6872	6844	6959	8	50	2.4	-100	-115	15
10	7099	6795	6755	6866	9	20	2.8	304	-112	416
Average	6679	6733	6683	6776	Average	100	1	-27	-64	37
					正の合計	907	13	638	19	787
					負の合計	-9	0	-879	-592	-454

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 85 中の S_{const} と同義である.

表 32 ボックスモデル結果(湖心)

Koshin									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.52	0.13	36.5	-15.7	0.4	51.8	23.1	0.5	76.4
2	1.91	-0.20	-101.7	10.3	0.2	-112.2	8.4	0.1	91.4
3	6.92	0.13	135.2	41.9	0.4	92.9	31.0	0.3	68.7
4	5.34	-0.19	-34.8	34.1	0.1	-69.0	33.1	0.1	66.8
5	5.04	0.03	82.5	58.2	0.5	23.8	70.6	0.6	28.8
6	1.33	0.01	15.4	16.3	1.4	-2.3	81.5	6.8	11.7
7	1.95	0.01	17.5	3.7	0.4	13.5	20.9	2.1	76.9
8	-2.74	0.01	-19.8	-28.5	1.0	7.8	76.5	2.6	20.9
9	-3.79	0.35	130.7	-40.1	0.7	170.0	19.0	0.3	80.7
10	-4.90	-0.30	-214.2		0.2				
11	-6.33	0.05	-30.1		0.1				
年平均値	0.38	0.00	1.6	8.9	0.5	19.6	40.5	1.5	58.0

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 33 熱容量の計算結果と比較(湖心)

Koshin										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	7014		7003							
2	7146	6958	6990	6947	1	-57	1.3	188	42	145
3	6962	7165	7037	7009	2	19	0.3	-203	28	-231
4	7288	7064	7207	7139	3	101	0.8	224	68	157
5	7183	7392	7333	7310	4	103	0.3	-208	23	-232
6	7332	7289	7453	7440	5	105	0.9	43	13	30
7	7379	7386	7484	7506	6	49	4.1	-7	-22	15
8	7432	7391	7528	7496	7	11	1.1	41	32	9
9	7384	7365	7466	7462	8	-69	2.3	19	4	15
10	7722	7282	7377	7364	9	-104	1.9	440	13	427
Average	7284	7255	7288	7297	Average	18	1	60	22	37
					正の合計	389	13	955	224	798
					負の合計	-229	0	-419	-22	-463

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 87 中の S_{const} と同義である.

表 34 ボックスモデル結果(西の洲沖)

Nishinosuoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.41	0.13	37.4	-13.5	0.5	50.4	20.9	0.8	78.3
2	1.68	-0.20	-106.8	14.5	0.1	-121.4	10.6	0.1	89.3
3	7.10	0.13	130.2	41.7	0.3	88.2	32.0	0.2	67.8
4	4.94	-0.19	-41.1	34.7	0.1	-75.9	31.3	0.1	68.6
5	5.32	0.03	78.9	59.9	0.5	18.6	75.9	0.6	23.5
6	0.97	0.01	12.0	25.9	1.4	-15.2	60.9	3.3	35.9
7	2.35	0.01	19.0	16.6	0.6	1.8	87.2	3.2	9.6
8	-3.02	0.01	-20.0	-35.9	1.0	14.9	69.3	2.0	28.7
9	-3.42	0.35	137.0	-45.3	0.8	181.6	19.9	0.4	79.7
10	-5.20	-0.30	-212.8		0.3				
11	-6.07	0.05	-23.3		0.1				
年平均値	0.39	0.00	1.0	10.9	0.5	15.9	45.3	1.2	53.5

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 35 熱容量の計算結果と比較(西の洲沖)

Nishinosuoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	6373		6362							
2	6508	6325	6352	6315	1	-49	1.8	183	37	145
3	6315	6535	6390	6379	2	26	0.2	-220	12	-232
4	6629	6416	6548	6492	3	101	0.7	213	56	157
5	6505	6734	6655	6653	4	105	0.3	-229	2	-232
6	6648	6614	6768	6765	5	108	0.8	34	4	30
7	6684	6730	6790	6851	6	78	4.2	-46	-61	15
8	6742	6736	6838	6841	7	50	1.8	6	-3	9
9	6694	6658	6775	6754	8	-87	2.4	36	21	15
10	7048	6578	6703	6660	9	-117	2.1	470	43	427
Average	6615	6592	6618	6634	Average	24	2	50	12	37
					正の合計	468	14	941	175	798
					負の合計	-253	0	-495	-64	-463

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 89 中の S_{const} と同義である.

表 36 ボックスモデル結果(沖宿沖)

Okijukuoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	0.38	0.12	38.6	-7.6	0.3	45.8	14.1	0.6	85.3
2	1.74	-0.21	-133.4	25.6	0.2	-159.1	13.8	0.1	86.1
3	7.07	0.14	79.6	53.6	0.4	25.6	67.4	0.5	32.2
4	6.09	-0.17	-58.7	52.8	0.2	-111.7	32.1	0.1	67.8
5	5.67	0.04	36.8	64.6	0.7	-28.5	68.9	0.7	30.4
6	0.86	0.01	3.2	29.2	1.1	-27.1	50.9	2.0	47.2
7	1.34	0.01	5.7	75.8	0.3	-70.5	51.7	0.2	48.1
8	-3.33	0.01	-0.2	26.8	1.2	-28.2	47.8	2.1	50.2
9	-3.83	0.34	154.5	15.8	1.3	137.4	10.2	0.8	88.9
10	-7.40	-0.30	-176.5		0.3				
11	-4.82	0.05	12.2		0.2				
年平均値	0.34	0.00	-3.5	37.4	0.6	-24.0	39.6	0.8	59.6

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 37 熱容量の計算結果と比較(沖宿沖)

Okijukuoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	1330		1318							
2	1469	1303	1320	1292	1	-27	1.2	166	28	138
3	1228	1516	1328	1366	2	46	0.4	-288	-38	-250
4	1420	1358	1360	1458	3	130	0.9	62	-98	160
5	1243	1580	1389	1520	4	160	0.5	-338	-132	-206
6	1309	1361	1412	1507	5	117	1.2	-52	-94	43
7	1319	1401	1416	1504	6	88	3.4	-82	-88	6
8	1336	1549	1423	1646	7	229	1.0	-213	-223	11
9	1336	1404	1407	1490	8	65	2.8	-68	-83	15
10	1736	1380	1390	1452	9	41	3.3	356	-61	417
Average	1373	1428	1376	1471	Average	94	2	-51	-88	37
					正の合計	875	15	584	28	789
					負の合計	-27	0	-1040	-818	-455

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $\text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 91 中の S_{const} と同義である.

表 38 ボックスモデル結果(高浜沖)

Takahamaoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.13	0.11	35.9	-7.6	0.7	42.8	14.9	1.4	83.7
2	1.96	-0.22	-123.0	27.9	0.2	-151.1	15.5	0.1	84.3
3	7.56	0.13	115.1	58.8	0.4	55.9	51.1	0.3	48.6
4	4.88	-0.16	-37.3	53.5	0.2	-91.0	37.0	0.1	62.9
5	6.38	0.03	76.5	61.7	0.7	14.1	80.6	0.9	18.5
6	-0.64	0.00	-1.8	23.2	1.9	-26.8	44.6	3.7	51.7
7	2.67	0.02	20.2	43.7	0.8	-24.3	63.5	1.2	35.3
8	-3.12	0.01	-15.7	2.3	1.4	-19.5	10.1	6.0	83.9
9	-4.13	0.35	140.6	-7.4	1.1	146.9	4.8	0.7	94.5
10	-5.01	-0.32	-209.7		0.3				
11	-6.46	0.05	-12.7		0.2				
年平均値	0.36	0.00	-1.1	28.4	0.7	-5.9	35.8	1.6	62.6

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 39 熱容量の計算結果と比較(高浜沖)

Takahamaoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	4634		4620							
2	4765	4610	4618	4595	1	-28	2.7	155	23	132
3	4542	4816	4650	4668	2	50	0.4	-274	-18	-255
4	4820	4685	4772	4793	3	142	0.9	135	-21	156
5	4708	4982	4849	4934	4	162	0.6	-275	-85	-190
6	4846	4821	4947	4962	5	112	1.3	26	-15	41
7	4841	4922	4937	5023	6	70	5.8	-81	-86	5
8	4902	4975	4979	5071	7	132	2.5	-73	-93	20
9	4864	4911	4930	4988	8	6	3.4	-47	-57	10
10	5228	4848	4866	4914	9	-19	2.9	380	-48	428
Average	4815	4841	4817	4883	Average	70	2	-6	-45	39
					正の合計	673	20	696	23	792
					負の合計	-47	0	-750	-423	-445

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 93 中の S_{const} と同義である.

表 40 ボックスモデル結果(高崎沖)

Takasakioki									
Period	°C	m	Wm ⁻²				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	0.41	0.11	38.5	-6.2	0.6	44.2	12.2	1.1	86.7
2	2.02	-0.22	-121.7	30.2	0.3	-152.1	16.5	0.2	83.3
3	7.17	0.13	115.1	59.2	0.6	55.3	51.5	0.5	48.0
4	5.54	-0.16	-32.9	56.4	0.3	-89.6	38.5	0.2	61.3
5	6.60	0.03	81.5	55.5	0.8	25.1	68.2	1.0	30.8
6	-0.61	0.00	-1.5	20.1	2.2	-23.8	43.7	4.7	51.6
7	1.71	0.02	15.4	48.3	0.9	-33.7	58.2	1.1	40.7
8	-2.98	0.01	-15.8	6.5	1.5	-23.8	20.6	4.7	74.7
9	-4.26	0.35	138.8	-1.2	1.5	138.5	0.9	1.1	98.1
10	-4.72	-0.32	-209.0		0.3				
11	-6.92	0.05	-16.7		0.2				
年平均値	0.36	0.00	-0.8	29.9	0.8	-6.7	34.5	1.6	63.9

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 41 熱容量の計算結果と比較(高崎沖)

Takasakioki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	4852		4837							
2	4991	4831	4844	4816	1	-23	2.0	160	28	132
3	4771	5047	4879	4899	2	55	0.5	-275	-20	-256
4	5049	4916	5001	5024	3	143	1.3	134	-23	157
5	4950	5220	5092	5172	4	170	1.0	-271	-80	-190
6	5097	5052	5198	5194	5	101	1.5	45	5	41
7	5093	5164	5189	5266	6	61	6.5	-72	-77	5
8	5139	5241	5216	5338	7	146	2.8	-102	-122	20
9	5101	5159	5168	5235	8	16	3.6	-57	-68	10
10	5460	5102	5099	5168	9	-3	3.9	358	-70	428
Average	5050	5081	5052	5124	Average	74	3	-9	-47	39
					正の合計	691	23	698	32	793
					負の合計	-26	0	-777	-459	-446

※ S の単位は MJm⁻² で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は MJm⁻²month⁻¹ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 95 中の S_{const} と同義である.

表 42 ボックスモデル結果(玉造沖)

Tamatsukurioki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.32	0.13	38.3	-2.6	0.5	40.5	6.0	1.1	92.9
2	1.86	-0.22	-112.6	29.8	0.2	-142.6	17.2	0.1	82.6
3	7.58	0.13	151.2	63.8	0.5	86.9	42.2	0.3	57.5
4	4.60	-0.16	-25.3	61.1	0.2	-86.6	41.3	0.1	58.5
5	5.79	0.03	98.1	78.1	0.6	19.4	79.6	0.6	19.7
6	0.98	0.00	10.9	39.8	1.7	-30.7	55.1	2.4	42.5
7	1.87	0.01	21.8	44.8	0.6	-23.6	64.9	0.9	34.2
8	-3.08	0.01	-26.4	0.5	1.2	-28.1	1.8	4.1	94.2
9	-3.98	0.34	122.8	-9.8	1.0	131.6	6.9	0.7	92.4
10	-4.64	-0.31	-220.2		0.3				
11	-6.62	0.05	-38.8		0.2				
年平均値	0.37	0.00	1.8	33.9	0.6	-3.7	35.0	1.2	63.8

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 43 熱容量の計算結果と比較(玉造沖)

Tamatsukurioki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	7826		7817							
2	7964	7818	7808	7809	1	-10	1.7	147	-1	148
3	7761	8019	7859	7862	2	54	0.4	-258	-3	-255
4	8126	7916	8066	8014	3	154	1.2	210	52	158
5	8049	8311	8187	8251	4	185	0.6	-261	-64	-197
6	8227	8192	8336	8329	5	141	1.1	35	7	29
7	8260	8353	8363	8461	6	120	5.3	-93	-99	6
8	8326	8397	8412	8500	7	135	1.9	-71	-88	17
9	8262	8330	8334	8416	8	1	2.9	-68	-83	15
10	8580	8239	8229	8311	9	-25	2.6	341	-81	422
Average	8138	8175	8141	8217	Average	84	2	-2	-40	38
					正の合計	791	18	733	58	794
					負の合計	-35	0	-751	-419	-452

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 97 中の S_{const} と同義である.

表 44 ボックスモデル結果(牛込沖)

Ushigomeoki									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.47	0.13	37.6	-4.1	0.5	41.2	8.9	1.0	90.0
2	1.86	-0.22	-114.8	28.3	0.2	-143.3	16.5	0.1	83.4
3	6.91	0.13	136.5	58.5	0.3	77.7	42.8	0.3	56.9
4	5.48	-0.16	-21.2	52.5	0.1	-73.8	41.5	0.1	58.4
5	5.23	0.03	84.0	73.2	0.5	10.4	87.1	0.6	12.3
6	0.82	0.00	8.8	22.3	1.2	-14.7	58.3	3.2	38.5
7	2.42	0.01	24.1	34.5	0.4	-10.8	75.5	0.9	23.6
8	-3.09	0.01	-23.8	-7.4	1.0	-17.4	28.8	4.0	67.2
9	-3.74	0.34	128.7	-19.1	0.9	146.9	11.4	0.6	88.0
10	-5.05	-0.31	-220.3		0.2				
11	-6.20	0.05	-29.6		0.1				
年平均値	0.38	0.00	0.9	26.5	0.5	1.8	41.2	1.2	57.6

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 45 熱容量の計算結果と比較(牛込沖)

Ushigomeoki										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	7127		7119							
2	7264	7114	7107	7106	1	-15	149.2	143	1	142
3	7056	7315	7154	7159	2	51	-259.5	-257	-5	-252
4	7385	7198	7326	7296	3	141	187.7	194	30	164
5	7321	7544	7459	7485	4	158	-223.0	-232	-26	-206
6	7473	7455	7582	7592	5	133	18.8	21	-10	31
7	7500	7545	7603	7653	6	67	-44.4	-49	-50	1
8	7573	7606	7659	7708	7	104	-32.6	-45	-49	4
9	7516	7558	7587	7644	8	-18	-42.0	-49	-57	8
10	7849	7469	7498	7540	9	-49	380.2	374	-42	416
Average	7406	7423	7409	7465	Average	64	15	11	-23	34
					正の合計	655	736	732	31	766
					負の合計	-82	-602	-632	-239	-459

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 99 中の S_{const} と同義である.

表 46 ボックスモデル結果(Station.1)

Station.1									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.62	0.17	62.0	-8.3	0.2	70.1	10.5	0.2	89.3
2	3.58	-0.27	-110.7	26.8	0.8	-138.3	16.1	0.5	83.4
3	6.46	0.13	101.8	60.3	0.5	40.9	59.3	0.5	40.2
4	3.93	-0.17	-62.7	58.3	0.3	-121.3	32.4	0.2	67.4
5	4.55	0.43	196.0	38.4	1.2	156.3	19.6	0.6	79.8
6	3.17	-0.38	-178.0	34.5	1.6	-214.1	13.8	0.6	85.6
7	1.72	0.04	25.8	53.6	0.8	-28.5	64.6	1.0	34.4
8		-0.03		6.0	1.2		82.9	17.1	0.0
9		0.65		3.0	1.6		64.3	35.7	0.0
10	-4.67	-0.68	-296.0		0.2				
11	-6.77	0.13	22.5		0.2				
年平均値	1.26	0.00	-26.6	30.3	0.8	-33.5	40.4	6.3	53.3

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 47 熱容量の計算結果と比較(Station.1)

Station.1										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	3975		4025							
2	4163	3951	4017	4001	1	-25	0.5	212	16	196
3	3895	4229	4069	4084	2	65	2.0	-334	-14	-320
4	4141	4042	4160	4216	3	146	1.3	99	-56	155
5	3990	4283	4212	4301	4	141	0.7	-293	-89	-204
6	4582	4109	4277	4332	5	116	3.7	472	-55	528
7	4152	4669	4318	4364	6	83	3.9	-517	-46	-471
8	4228	4311	4341	4477	7	157	2.4	-84	-136	52
9		4249		4363	8	18	3.7			0
10	4884		4233		9	6	3.1			0
Average	4223	4231	4184	4267	Average	78	2	-64	-54	-7
					正の合計	731	21	783	16	931
					負の合計	-25	0	-1228	-397	-995

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 101 中の S_{const} と同義である.

表 48 ボックスモデル結果(Station.3)

Station.3									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-1.36	0.17	57.4	-10.3	0.2	67.5	13.2	0.2	86.6
2	3.48	-0.27	-108.5	22.8	0.7	-132.1	14.7	0.5	84.9
3	7.09	0.13	110.3	59.3	0.5	50.6	53.7	0.4	45.8
4	4.11	-0.17	-58.1	54.0	0.2	-112.3	32.4	0.1	67.4
5	3.80	0.43	194.7	43.2	1.1	150.3	22.2	0.6	77.2
6	2.61	-0.38	-180.0	37.9	1.6	-219.4	14.6	0.6	84.8
7	2.79	0.04	31.5	46.2	0.7	-15.4	74.1	1.2	24.7
8	-3.53	-0.02	-27.5	0.5	1.2	-29.2	1.5	4.0	94.5
9	-4.03	0.65	387.3	-9.8	1.3	395.8	2.4	0.3	97.3
10	-4.91	-0.68	-300.0		0.2				
11	-6.29	0.12	21.1		0.2				
年平均値	0.34	0.00	11.7	27.1	0.7	17.3	25.4	0.9	73.7

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 49 熱容量の計算結果と比較(Station.3)

Station.3										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	4473		4523							
2	4647	4443	4501	4493	1	-31	0.5	204	8	196
3	4385	4704	4558	4558	2	55	1.8	-319	0	-319
4	4651	4529	4670	4703	3	143	1.2	122	-33	155
5	4511	4782	4734	4801	4	131	0.6	-271	-67	-204
6	5099	4645	4794	4868	5	131	3.4	454	-74	528
7	4664	5194	4830	4889	6	91	3.7	-530	-60	-470
8	4757	4802	4870	4967	7	136	2.2	-45	-97	52
9	4674	4762	4817	4875	8	1	3.7	-88	-59	-30
10	5408	4657	4757	4801	9	-19	2.5	751	-44	795
Average	4727	4724	4705	4773	Average	71	2	31	-47	78
					正の合計	688	20	1531	8	1725
					負の合計	-50	0	-1254	-433	-1023

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 103 中の S_{const} と同義である.

表 50 ボックスモデル結果(Station.7)

Station.7									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-0.97	0.20	72.4	-16.7	0.1	89.0	15.8	0.1	84.1
2	2.82	-0.30	-126.2	19.4	0.5	-146.1	11.7	0.3	88.0
3	6.87	0.14	103.9	48.2	0.3	55.4	46.4	0.3	53.3
4	4.56	-0.18	-65.0	52.0	0.1	-117.1	30.7	0.1	69.2
5	4.13	0.44	196.6	17.1	0.9	178.6	8.7	0.4	90.9
6	4.06	-0.39	-178.3	31.2	0.4	-209.9	12.9	0.2	86.9
7	0.78	0.03	14.1	69.6	0.2	-55.8	55.4	0.2	44.4
8	-3.42	-0.02	-20.3	16.6	1.1	-38.0	29.8	1.9	68.2
9	-3.75	0.66	403.4	23.8	1.2	378.5	5.9	0.3	93.8
10	-4.76	-0.69	-300.0		0.2				
11	-6.69	0.13	28.2		0.2				
年平均値	0.33	0.00	11.7	29.0	0.5	15.0	24.2	0.4	75.4

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 51 熱容量の計算結果と比較(Station.7)

Station.7										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	3798		3855							
2	4016	3747	3842	3805	1	-50	0.3	269	37	232
3	3712	4065	3880	3890	2	47	1.2	-353	-9	-344
4	3963	3829	3974	3998	3	116	0.7	134	-24	158
5	3806	4089	4034	4100	4	126	0.3	-283	-65	-218
6	4399	3860	4085	4089	5	52	2.6	539	-3	543
7	3969	4476	4139	4162	6	75	0.9	-507	-23	-485
8	4010	4174	4148	4344	7	204	0.7	-164	-196	32
9	3949	4063	4104	4202	8	50	3.2	-115	-98	-17
10	4714	3996	4056	4151	9	45	2.2	718	-95	813
Average	4033	4033	4012	4082	Average	74	1	27	-53	79
					正の合計	716	12	1660	37	1778
					負の合計	-50	0	-1421	-513	-1063

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 105 中の S_{const} と同義である.

表 52 ボックスモデル結果(Station.9)

Station.9									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-1.35	0.20	65.5	-17.1	0.2	82.4	17.1	0.2	82.7
2	2.72	-0.27	-104.0	7.0	0.4	-111.3	5.9	0.3	93.8
3	6.80	0.13	132.1	42.6	0.3	89.2	32.2	0.2	67.5
4	4.23	-0.18	-49.1	35.5	0.1	-84.7	29.5	0.1	70.4
5	4.84	0.41	204.9	33.6	0.8	170.5	16.4	0.4	83.2
6	2.61	-0.39	-172.7	30.9	0.9	-204.5	13.1	0.4	86.6
7	2.34	0.03	30.8	6.4	0.3	24.0	20.8	1.1	78.1
8	-3.52	-0.02	-34.0	-28.8	0.9	-6.0	80.6	2.5	16.9
9	-3.39	0.65	363.6	-49.3	0.7	412.2	10.7	0.2	89.2
10	-5.00	-0.68	-300.2		0.2				
11	-6.21	0.13	4.9		0.1				
年平均値	0.37	0.00	12.9	6.7	0.4	41.3	25.1	0.6	74.3

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 53 熱容量の計算結果と比較(Station.9)

Station.9										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	6838		6898							
2	7036	6787	6864	6847	1	-52	0.6	249	17	232
3	6785	7054	6931	6881	2	17	1.0	-269	50	-319
4	7104	6888	7095	7035	3	103	0.7	216	60	155
5	6985	7190	7193	7181	4	86	0.2	-205	12	-217
6	7604	7089	7308	7297	5	101	2.3	515	11	504
7	7187	7681	7367	7385	6	75	2.1	-494	-18	-476
8	7277	7207	7418	7387	7	19	1.0	70	31	39
9	7175	7193	7339	7334	8	-87	2.7	-18	5	-23
10	7865	7083	7229	7247	9	-94	1.4	782	-18	800
Average	7186	7130	7164	7177	Average	19	1	94	17	77
					正の合計	400	12	1832	186	1731
					負の合計	-232	0	-986	-36	-1035

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 107 中の S_{const} と同義である.

表 54 ボックスモデル結果(Station.12)

Station.12									
Period	°C	m	Wm^{-2}				%		
	ΔTw	Δh	dS/dt	G	Q_{rain}	Q_{ad}	G	Q_{rain}	Q_{ad}
1	-1.07	0.23	81.9	-17.3	0.3	99.0	14.9	0.2	84.9
2	2.65	-0.31	-133.9	9.6	0.8	-144.4	6.2	0.5	93.2
3	6.98	0.13	108.0	38.2	0.3	69.5	35.4	0.3	64.3
4	3.51	-0.18	-67.1	26.5	0.1	-93.8	22.0	0.1	77.9
5	5.00	0.41	191.9	29.0	0.9	162.1	15.1	0.5	84.4
6	2.62	-0.39	-181.1	26.6	1.1	-208.9	11.3	0.5	88.3
7	2.43	0.04	26.9	8.8	0.8	17.3	32.8	3.1	64.0
8	-3.25	-0.01	-19.4	-41.0	0.9	20.7	65.5	1.4	33.0
9	-3.44	0.65	397.0	-64.1	0.8	460.3	12.2	0.2	87.6
10	-4.79	-0.67	-294.9		0.3				
11	-6.72	0.13	21.1		0.2				
年平均値	0.36	0.00	11.9	-5.6	0.6	42.4	23.9	0.8	75.3

※ G と Q_{ad} の年平均値は, Period1~9 の平均値を指す.

※ 割合の分母は G と Q_{rain} と Q_{ad} の絶対値の合計である.

※ ΔTw は水温差, Δh は水位差を表す.

表 55 熱容量の計算結果と比較(Station.12)

Station.12										
Month	$S(m)$	$S(c)$	$S(一定)$	$S(一定, c)$	Period	G	Q_{rain}	Q_{ad}	$Q_{ad}(一定)$	ΔQ_{ad}
1	4333		4391							
2	4580	4281	4375	4340	1	-52	0.8	299	35	264
3	4257	4606	4417	4400	2	23	2.0	-349	16	-365
4	4518	4350	4524	4510	3	92	0.8	168	14	153
5	4356	4582	4576	4589	4	64	0.2	-227	-13	-214
6	4935	4446	4649	4666	5	87	2.8	489	-17	506
7	4498	5002	4689	4716	6	64	2.7	-505	-27	-477
8	4577	4526	4724	4718	7	26	2.5	51	7	44
9	4518	4456	4676	4603	8	-124	2.7	63	73	-11
10	5271	4398	4627	4556	9	-122	1.6	873	70	803
Average	4584	4516	4565	4566	Average	7	2	96	18	78
					正の合計	357	16	1943	216	1770
					負の合計	-298	0	-1080	-57	-1067

※ S の単位は MJm^{-2} で, G と Q_{rain} , Q_{ad} の単位は $MJm^{-2}month^{-1}$ である.

※ $S(一定, c)$ とは, 図 109 中の S_{const} と同義である.

表 56 各地点の熱収支(年合計値)

		掛馬沖	木原沖	牛込沖	高崎沖	玉造沖	湖心	西の洲沖	麻生沖	高浜沖	沖宿沖	St.1	St.3	St.7	St.9	St.12
G	合計(正)	2655	2596	2447	2399	2486	2340	2343	2185	2398	2531	2394	2392	2323	2328	2248
	合計(負)	-1706	-1697	-1873	-1734	-1730	-2180	-2127	-2220	-1771	-1682	-1687	-1753	-1657	-2160	-2189
	積算	4361	4293	4320	4133	4216	4520	4470	4405	4169	4213	4082	4146	3979	4489	4437
Rn	合計(正)	3548	3513	3506	3381	3464	3557	3537	3430	3411	3434	3342	3395	3217	3535	3467
	合計(負)	-651	-647	-647	-643	-646	-651	-650	-654	-644	-647	-637	-638	-645	-644	-646
	積算	4198	4161	4154	4024	4111	4208	4187	4084	4055	4081	3980	4033	3862	4179	4113
LE	合計(正)	1527	1544	1830	1610	1607	2240	2176	2312	1669	1516	1546	1653	1496	2219	2268
	合計(負)	-2.0	-1.0	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.5	-1.7	-0.5	-1.4	-0.5	-0.5	-2.1	-0.2	-1.1
	積算	1529	1545	1831	1611	1608	2240	2176	2313	1670	1517	1546	1653	1498	2219	2269
H	合計(正)	1527	1544	1830	1610	1607	2240	2176	2312	1669	1516	1546	1653	1496	2219	2268
	合計(負)	-10.8	-9.8	-8.7	-12.0	-6.9	-6.9	-10.9	-17.2	-10.8	-10.6	-12.7	-10.4	-12.6	-7.0	-16.2
	積算	1538	1553	1839	1622	1614	2246	2186	2329	1680	1527	1559	1663	1509	2226	2284

※ 単位は MJm^{-2} で, Period1~9 の合計値であり, 積算値は合計(正)－合計(負)である.

表 57 流入出河川と湖面の熱交換量

	桜川		恋瀬川		小野川		潮来		西浦湖面
Month	A	B	A	B	A	B	A	B	
1	2111	-35	1778	811	661	44	231	-13	-58847
2	2157	354	1666	1286	505	177	207	-3	29953
3	3889	446	2841	316	2320	471	415	-15	174240
4	17793	-556	7243	-14	4898	205	1411	-41	216147
5	19170	-433	9136	-152	6035	-21	1822	-77	245469
6	22605	-801	4673	-5479	6506	-254	1826	-65	115738
7	13792	-544	3759	-3108	4906	-198	1602	-38	214148
8	63460	-4542	17501	-2876	10673	-785	1844	-35	-36091
9	38949	-4936	12020	-2254	7577	-676	1380	-35	-65283
10	21152	-1545	9427	-1325	3904	-251	1062	-16	315847
11	7222	-940	4244	-798	1984	-246	600	-14	
12	3025	-113	2239	13	1690	42	367	-3	-78699
年平均値	17944	-1137	6377	-1132	4305	-124	1064	-30	97511

※ 単位は 100000MJmonth⁻¹

※ A は河川水温から求めた熱量, B は河川水温と湖水温の差から求めた熱量.

表 57 流入出河川と湖面の熱交換量, 続き

	桜川		恋瀬川		小野川		潮来		西浦湖面
Month	A	B	A	B	A	B	A	B	
1	109	-2	92	43	44	3	30	-2	-3.4×10^{-4}
2	109	18	85	65	33	12	28	0	1.7×10^{-4}
3	203	24	147	17	151	31	65	-1	1.0×10^{-3}
4	537	-2	311	3	245	13	130	-3	1.2×10^{-3}
5	659	-11	397	-6	314	-1	155	-6	1.4×10^{-3}
6	788	-22	218	-242	355	-11	168	-4	6.7×10^{-3}
7	606	-24	201	-150	317	-13	104	-1	1.2×10^{-3}
8	937	-68	545	-109	482	-37	168	-3	-2.0×10^{-4}
9	1134	-147	531	-100	413	-37	294	-2	-3.7×10^{-4}
10	676	-59	411	-57	245	-17	168	-1	1.8×10^{-3}
11	321	-43	207	-39	137	-18	55	0	
12	147	-8	112	-1	113	1	29	0	-4.5×10^{-4}
年平均値	519	-29	271	-48	237	-6	116	-2	5.6×10^{-4}

※ 単位は 100000MJm⁻²month⁻¹

※ A は河川水温から求めた熱量, B は河川水温と湖水温の差から求めた熱量.

表 58 大気との熱交換による水温への影響（国土交通省調査日）

	掛馬沖		木原沖		牛込沖		高崎沖		玉造沖		湖心		西の洲沖		麻生沖		高浜沖		沖宿沖	
月	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	5.3		5.4		5.5		5.2		5.5		5.4		5.6		5.7		5.4		5.4	
2	5.0	-6.0	5.1	-1.5	5.0	-1.3	5.6	-4.7	5.2	-0.6	4.9	-2.5	5.2	-3.0	5.7	-24.7	5.3	-5.1	5.7	-29.7
3	6.9	22.4	6.7	17.3	6.9	16.0	7.6	22.0	7.0	15.2	6.8	14.0	6.8	15.5	7.9	47.6	7.2	22.1	7.4	67.5
4	13.8	2.5	13.8	4.7	13.6	5.0	14.6	5.1	14.4	5.6	13.5	3.1	13.7	2.9	14.9	-6.7	14.6	4.4	14.3	-4.7
5	19.0	35.9	18.8	30.4	18.8	28.1	19.8	36.1	18.7	28.6	18.6	27.8	18.4	29.3	19.8	72.4	19.2	37.0	20.3	98.9
6	24.5	23.5	24.3	22.3	23.6	21.9	26.0	23.1	24.0	21.9	23.3	20.2	23.4	20.3	23.3	22.6	25.1	22.7	25.3	34.0
7	25.3	31.8	24.6	29.2	24.4	26.8	25.4	29.1	24.9	28.5	24.6	25.6	24.3	27.1	24.6	26.5	24.5	29.5	26.1	42.0
8	26.5	41.9	26.6	33.5	26.7	29.0	27.0	33.2	26.7	30.5	26.3	27.5	26.5	29.7	27.6	31.5	27.0	32.2	27.6	75.2
9	23.8	34.0	24.0	29.7	23.8	25.8	24.2	28.8	23.9	26.7	23.8	22.2	23.7	21.4	24.1	4.6	24.1	28.1	24.3	46.5
10	20.2	3.7	20.1	8.3	20.3	6.9	20.2	1.4	20.2	9.1	20.3	4.4	20.5	2.0	21.3	-51.1	20.2	-0.4	20.7	-37.5
11	15.3	42.4	15.4	34.6	15.6	32.2	15.7	40.7	15.9	31.6	15.7	30.1	15.6	30.7	14.0	54.9	15.4	41.0	13.5	95.8
12	9.1		9.3		9.6		9.1		9.4		9.6		9.8		9.6		9.3		9.1	

※ A は水柱の平均水温(実測値), B は水中熱流量のみを入力値として与えた場合の平均水温.

※ 単位は℃である.

表 59 大気との熱交換による水温への影響（環境省調査日）

月	St.1		St.3		St.7		St.9		St.12	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	5.1		5.5		5.3		5.5		5.3	
2	4.5	-10.4	4.1	-8.5	4.3	-14.9	4.1	-5.5	4.2	-13.8
3	8.1	30.0	7.6	26.0	7.1	31.8	6.9	17.1	6.9	28.1
4	14.4	5.3	14.5	4.8	13.8	2.2	13.5	3.2	13.7	1.0
5	18.0	39.6	18.5	36.6	18.2	39.2	17.4	26.5	17.0	32.9
6	22.4	-4.9	22.2	-2.1	21.9	-9.4	22.1	2.8	21.6	-6.9
7	25.3	59.4	24.4	56.2	25.8	58.6	24.5	44.2	24.2	56.4
8	26.9	32.6	26.9	30.1	26.4	38.4	26.5	26.1	26.4	27.5
9		33.4	23.6	30.9	23.2	35.4	23.3	22.9	23.3	17.2
10	19.5		19.9	-20.1	19.8	-25.7	18.9	-8.9	20.2	-26.3
11	15.1	76.9	15.4	69.2	15.4	84.2	15.6	46.3	15.7	61.5
12	8.4		9.2		8.8		9.6		9.2	

※ A は水柱の平均水温(実測値), B は水中熱流量のみを入力値として与えた場合の平均水温.

※ 単位は℃である.

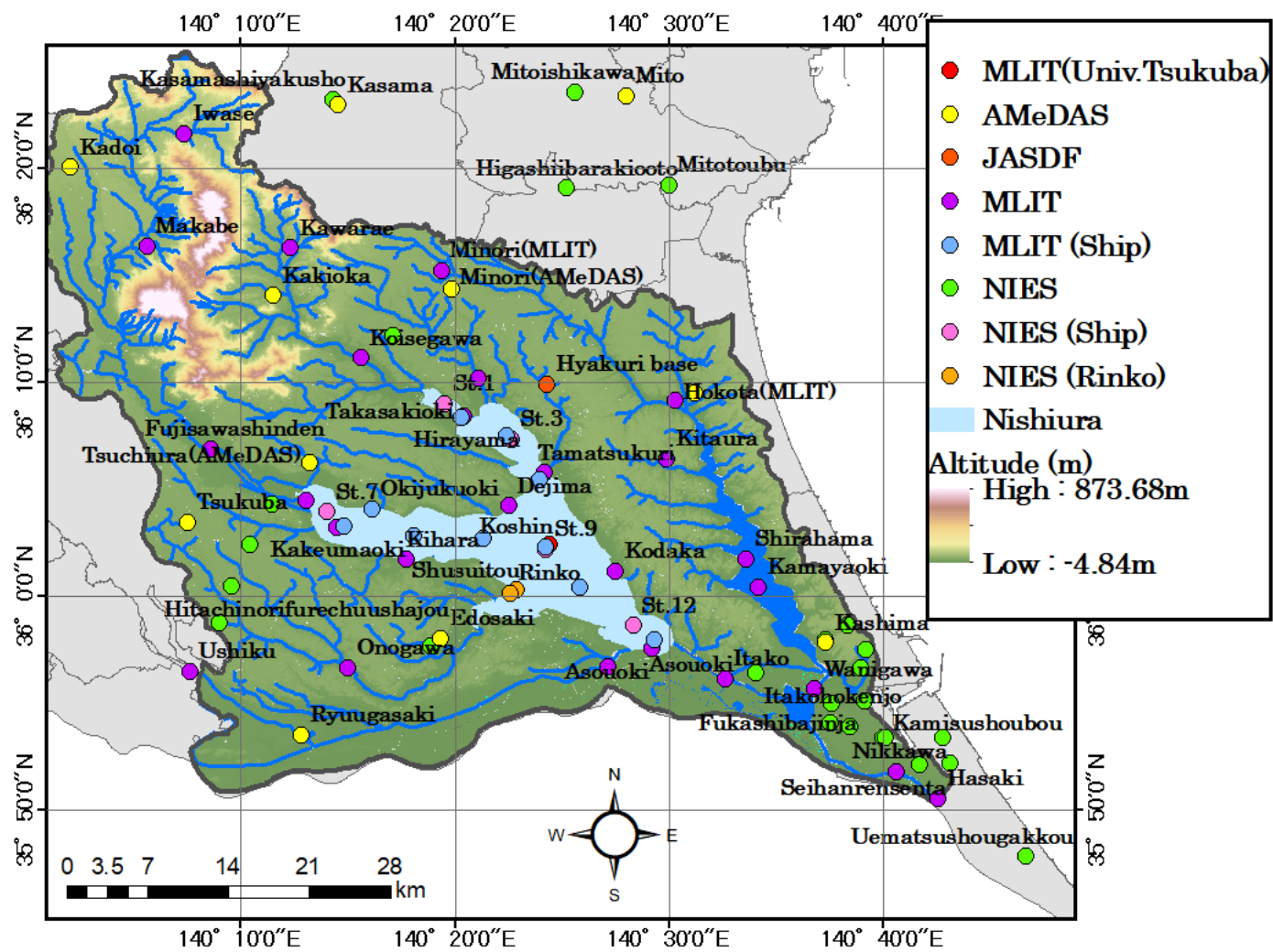


図 1 研究対象地域の観測地点

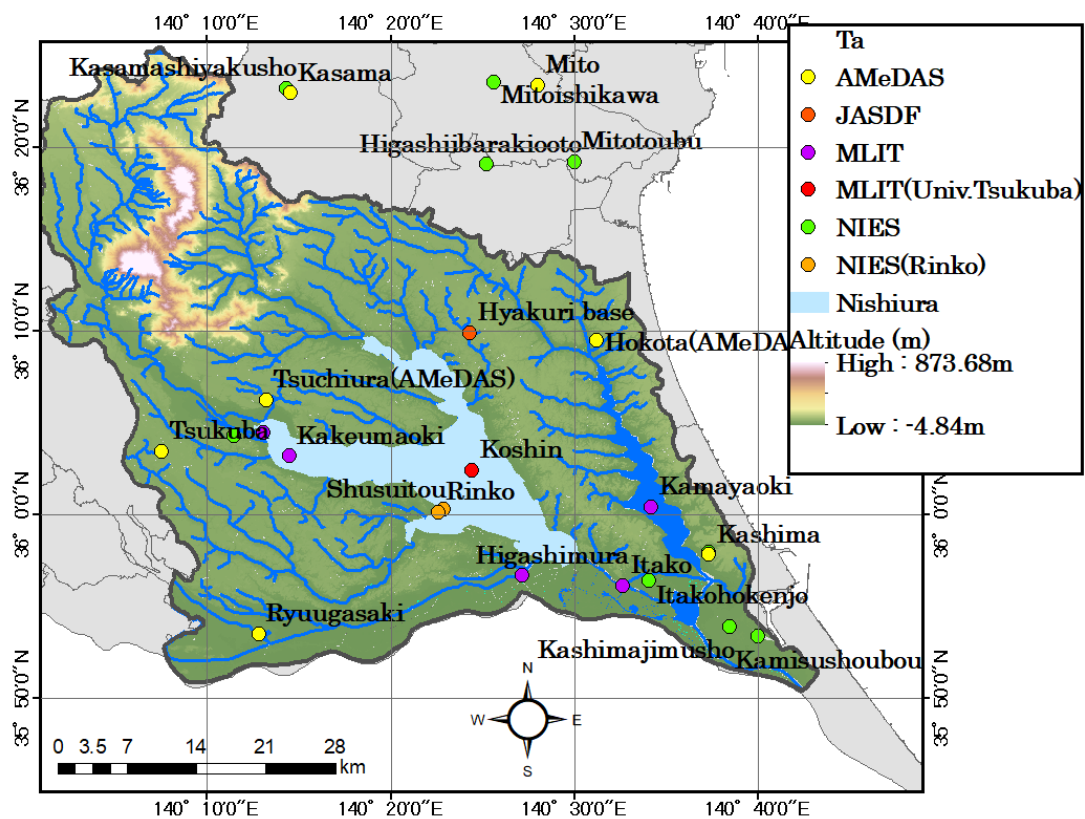


図 2 気温の観測地点

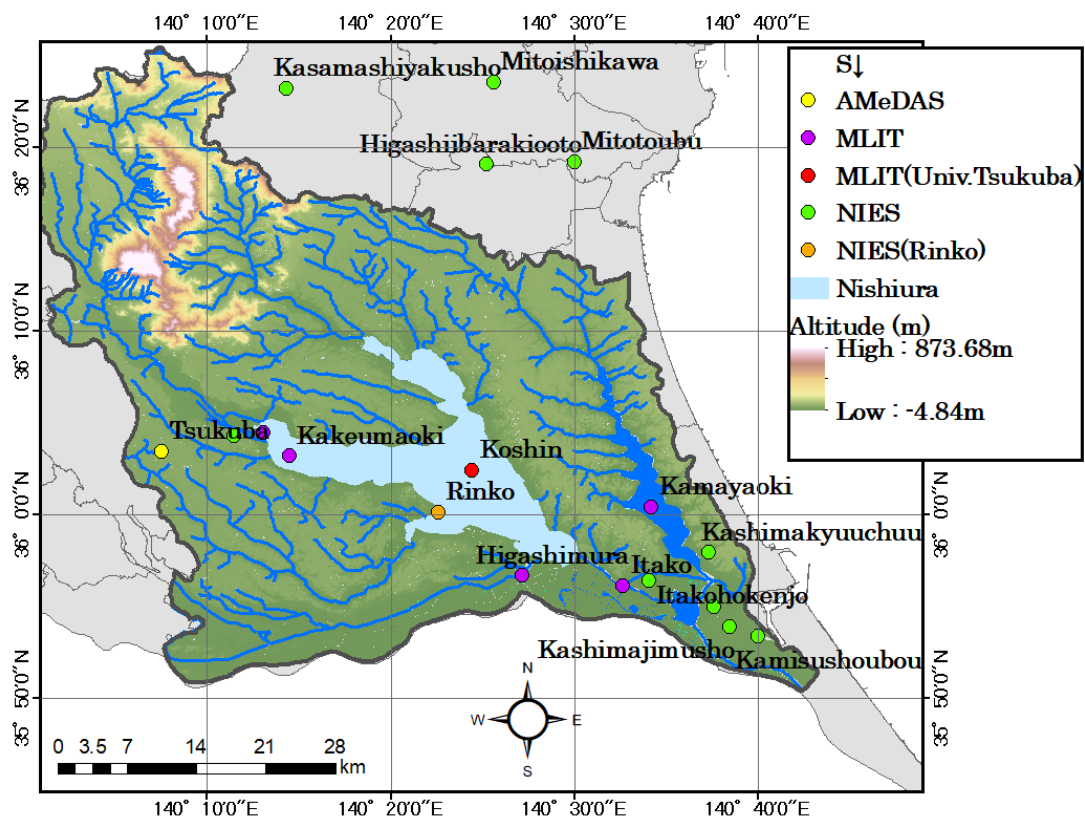


図 3 日射量の観測地点

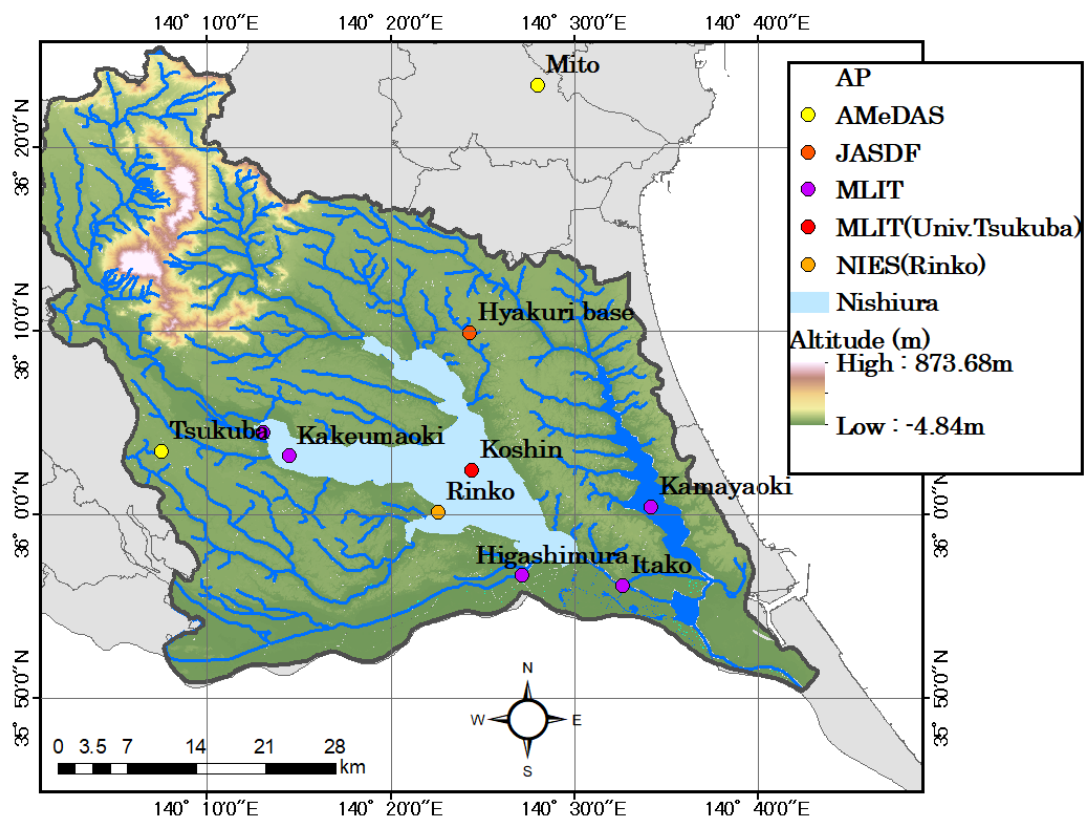


図 4 大気圧の観測地点

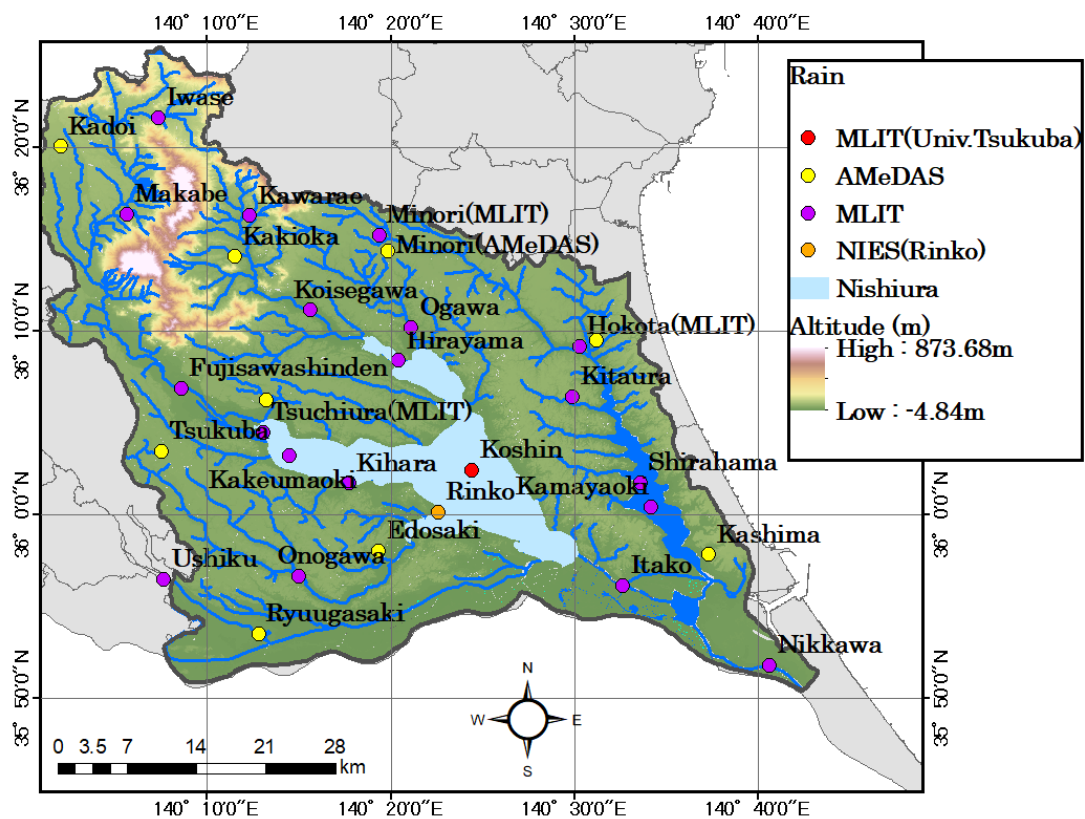


図 5 降水量の観測地点

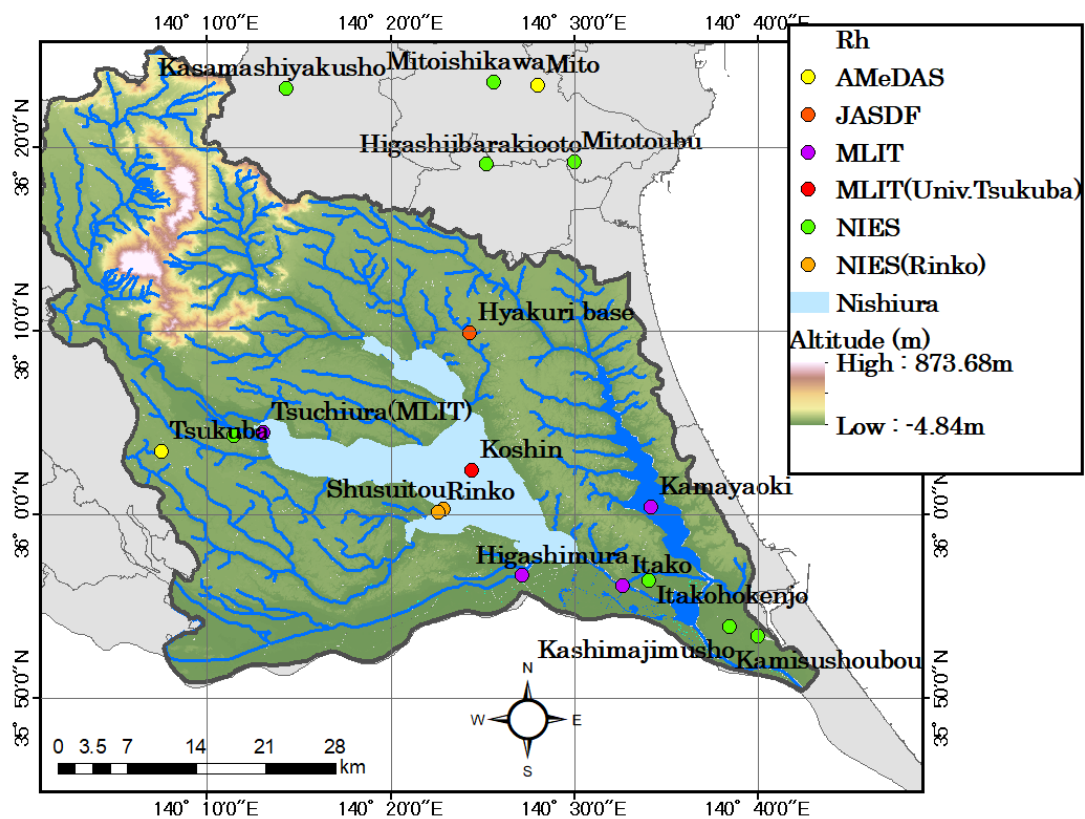


図 6 相対湿度の観測地点

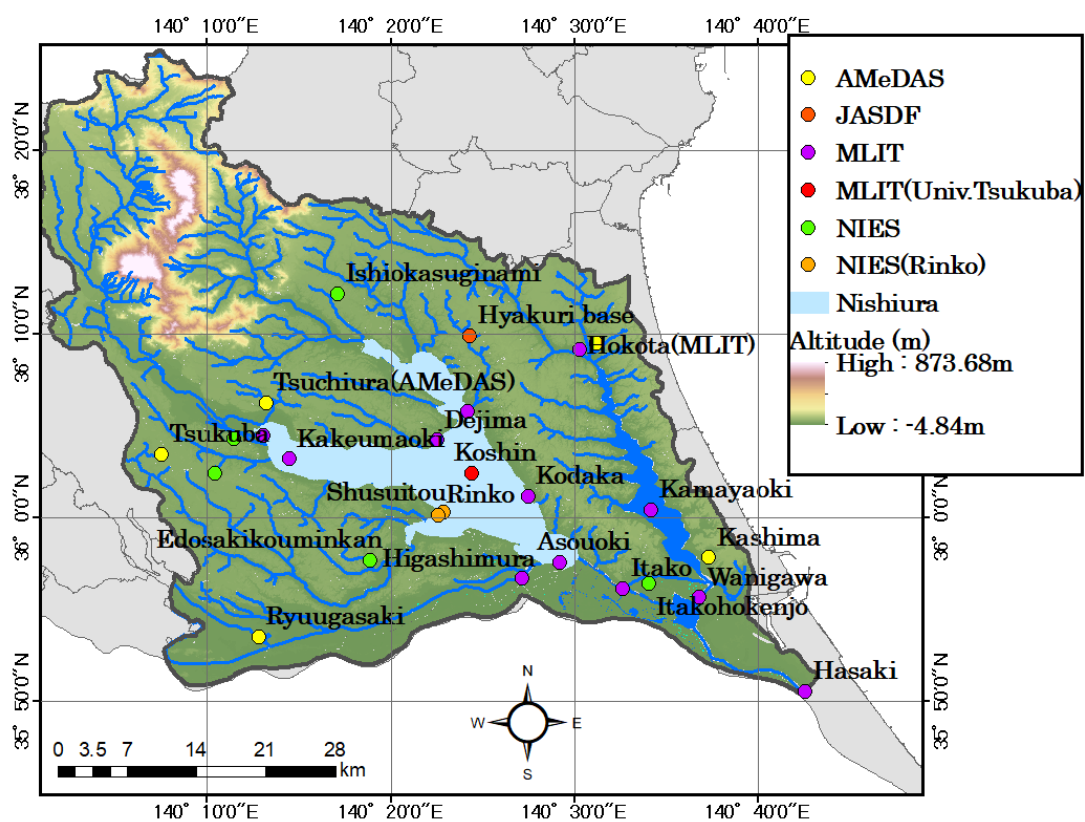


図 7 風速・風速の観測地点

※ 図 7 は、データを利用した地点のみを表示している。

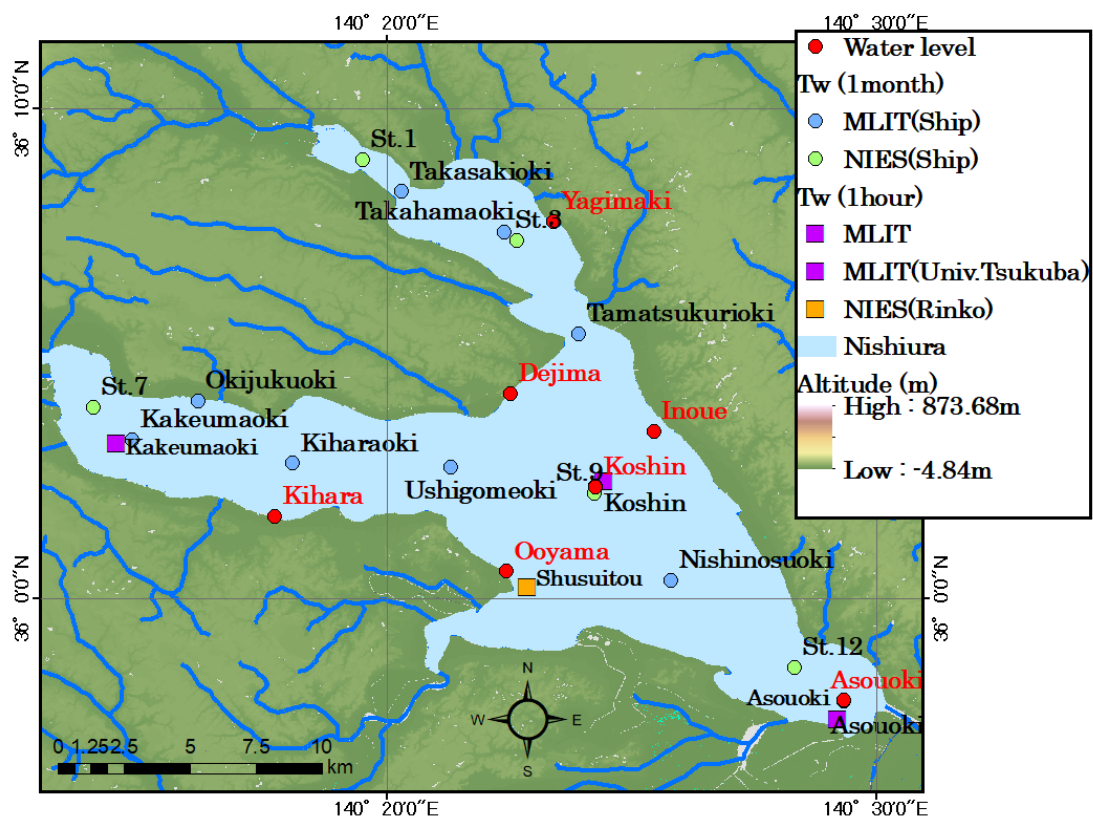


図 8 水温・水位観測地点

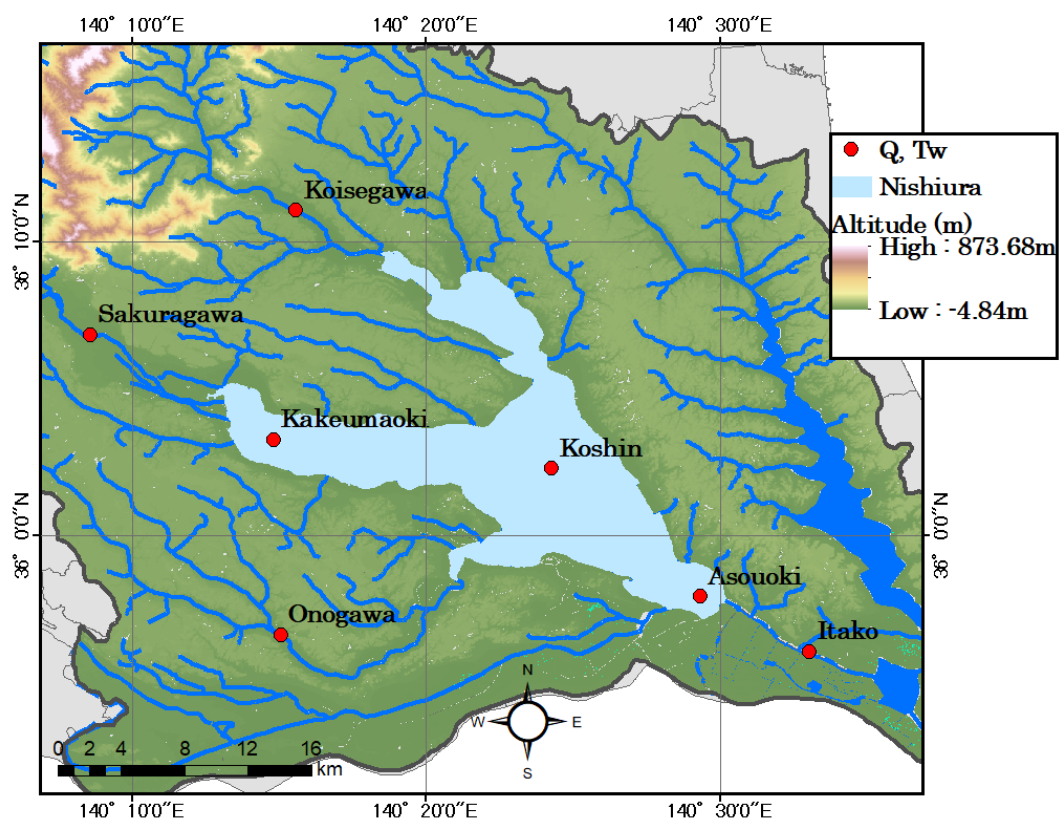


図 9 西浦・流入出河川の観測地点(2007, 2008)

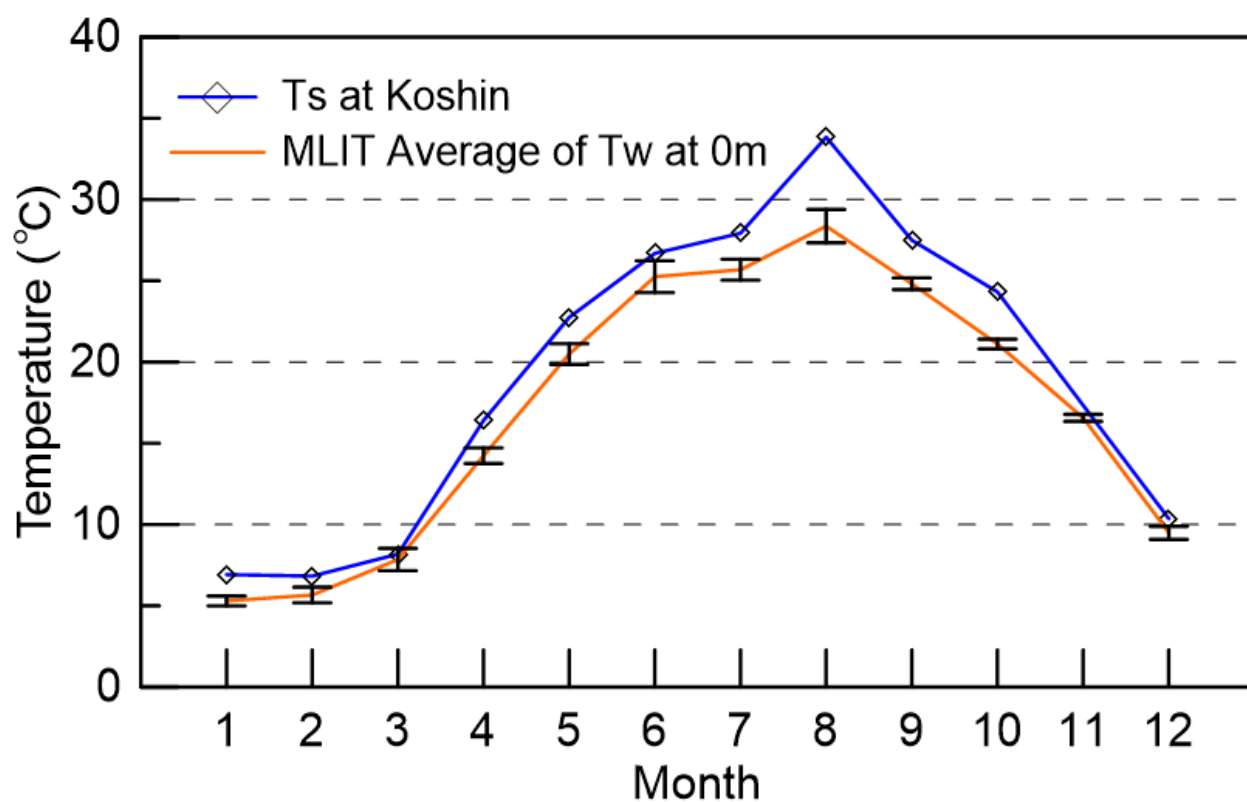


図 10 水面温度と水深 0m 水温の年変動と標準偏差
 ※ 水深 0m 水温は、国土交通省調査地点(10 地点)の平均値と標準偏差である。

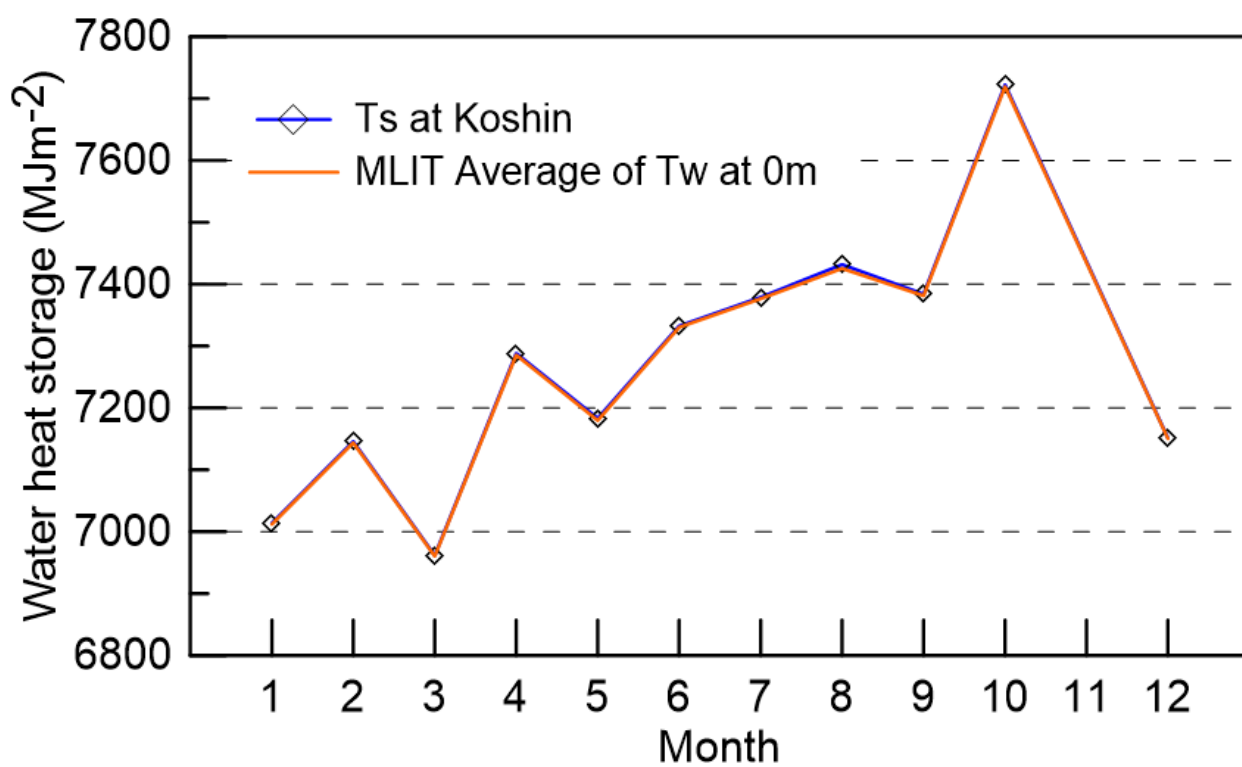


図 11 湖心における水面温度と水深 0m 水温の比較と熱容量への影響

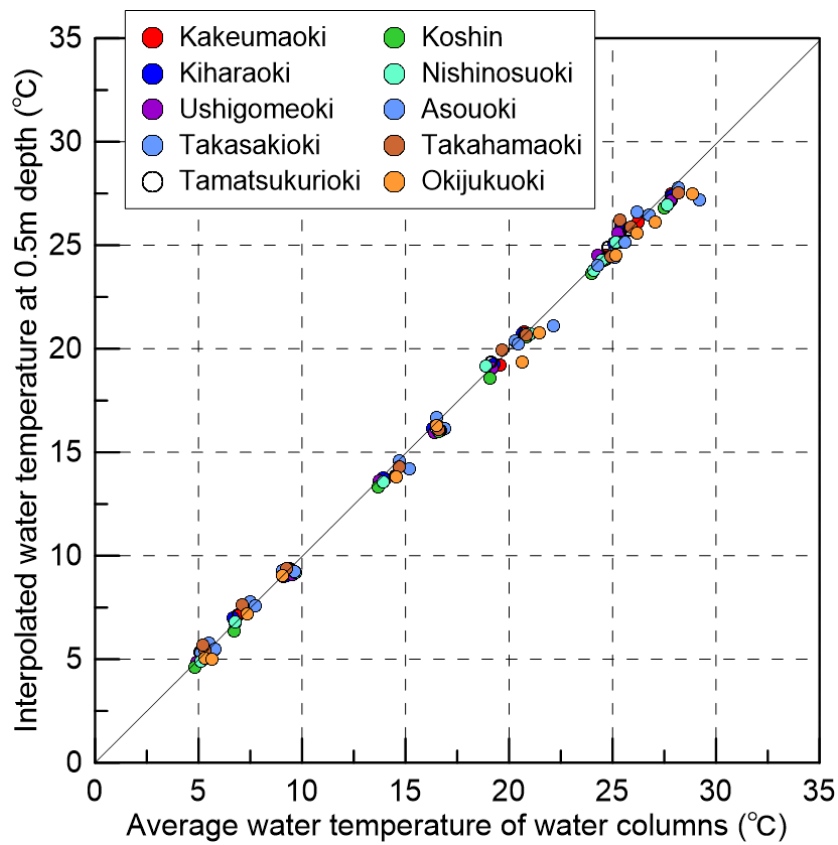


図 12 水深 0.5m 水温と水温の鉛直平均値の比較(国交省)

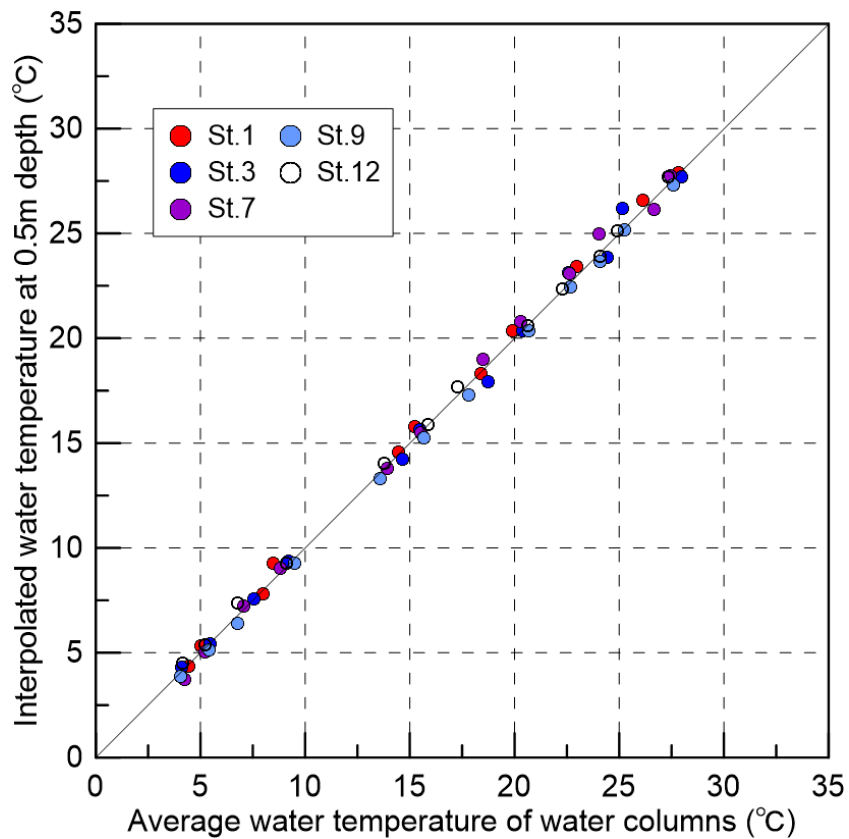


図 13 水深 0.5m 水温と水温の鉛直平均値の比較(環境省)

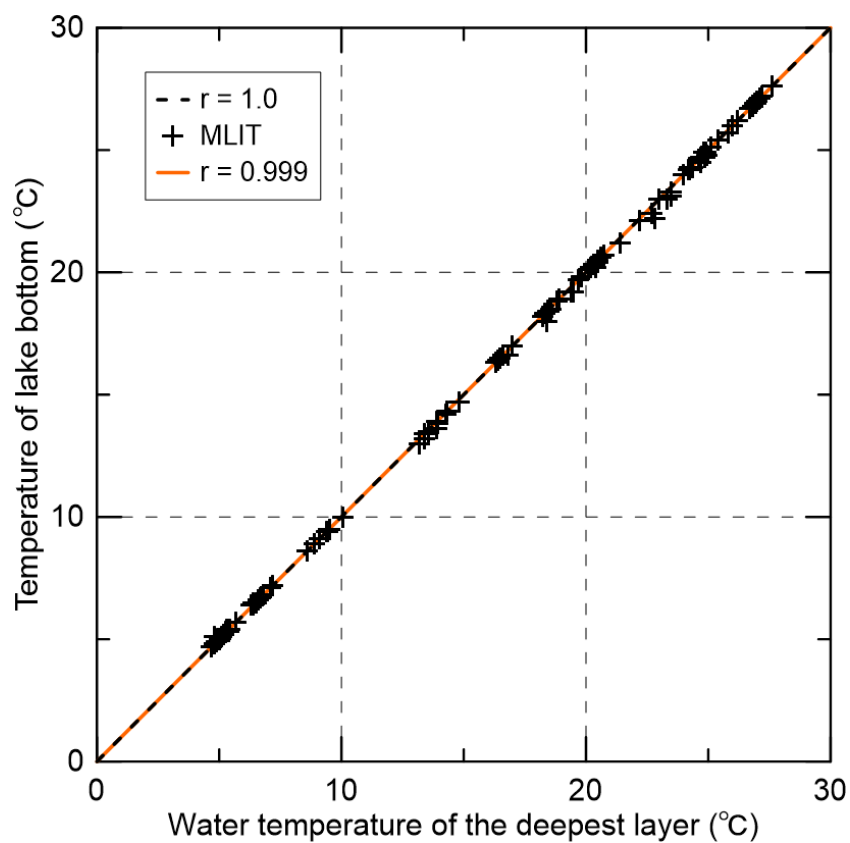


図 14 湖底と最深層の温度比較

※ 比較は国土交通省(MLIT)調査地点のみで行っている。

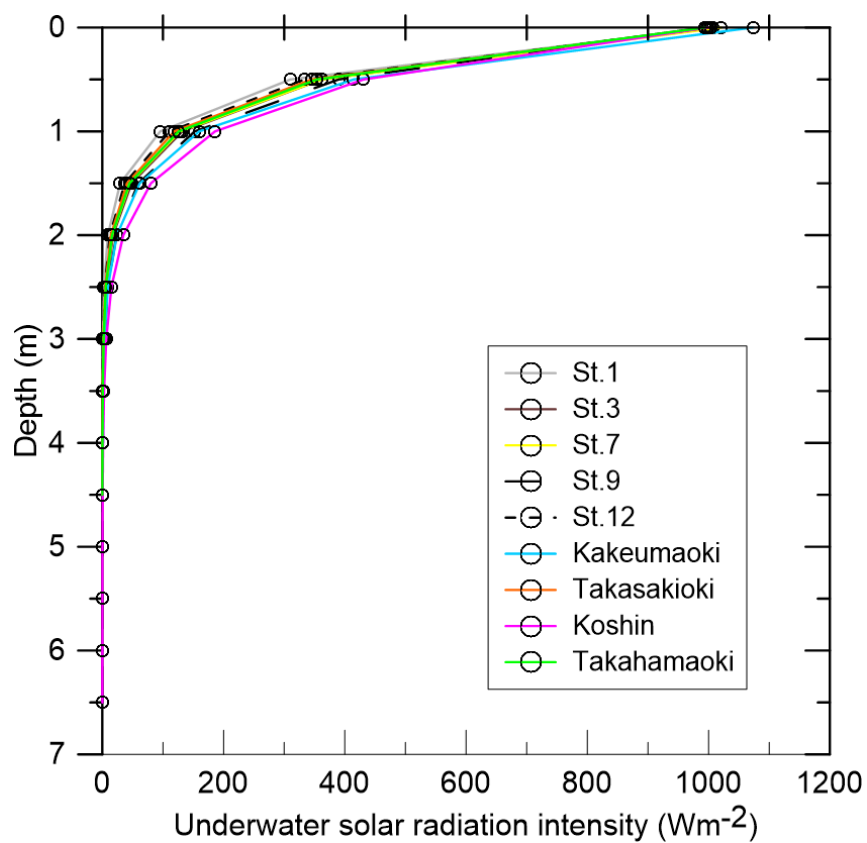


図 15 水中日射量

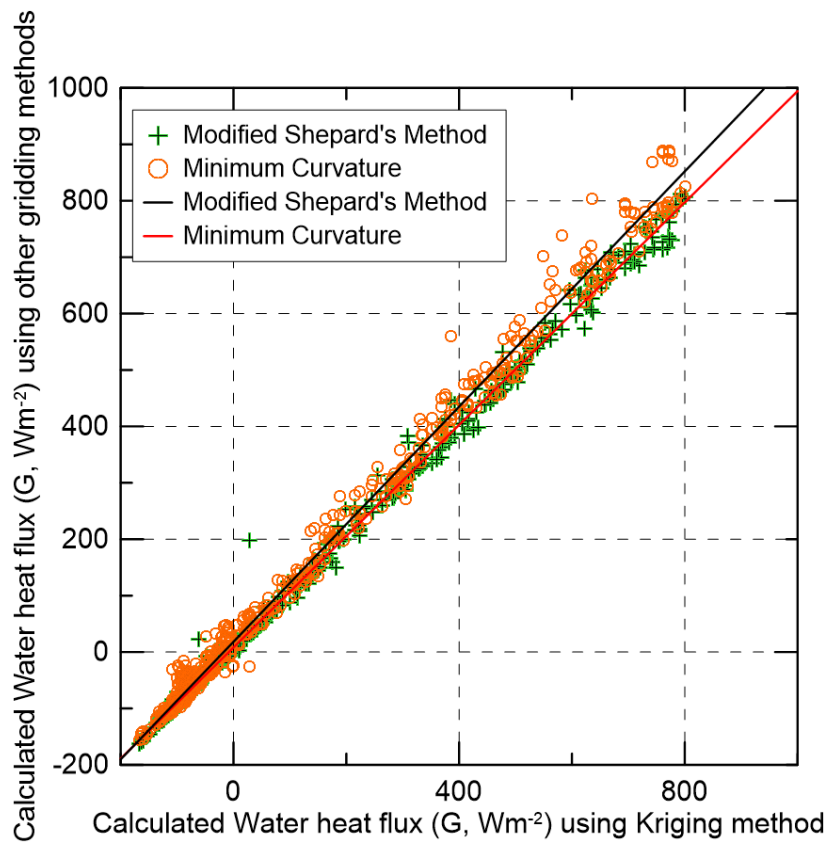


図 16 内挿法の比較(G)

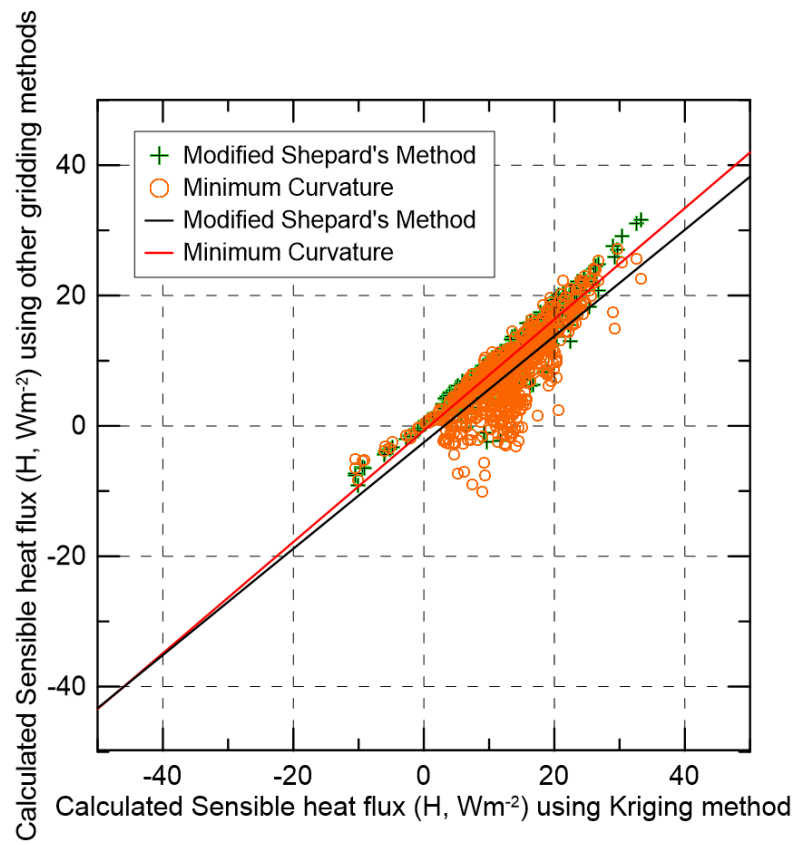


図 17 内挿法の比較(H)

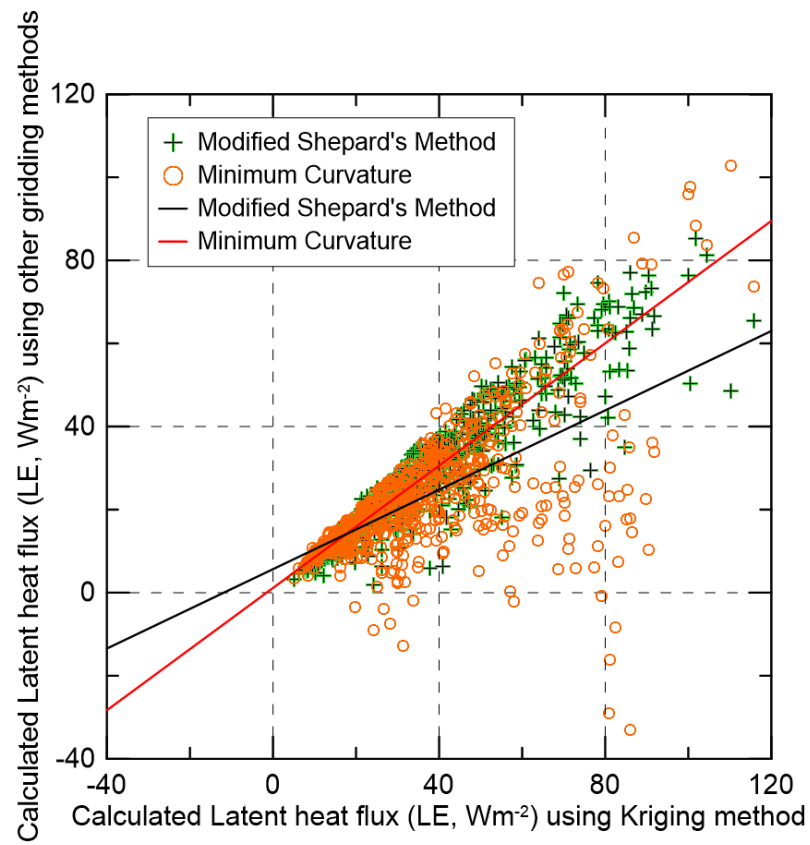


図 18 内挿法の比較(LE)

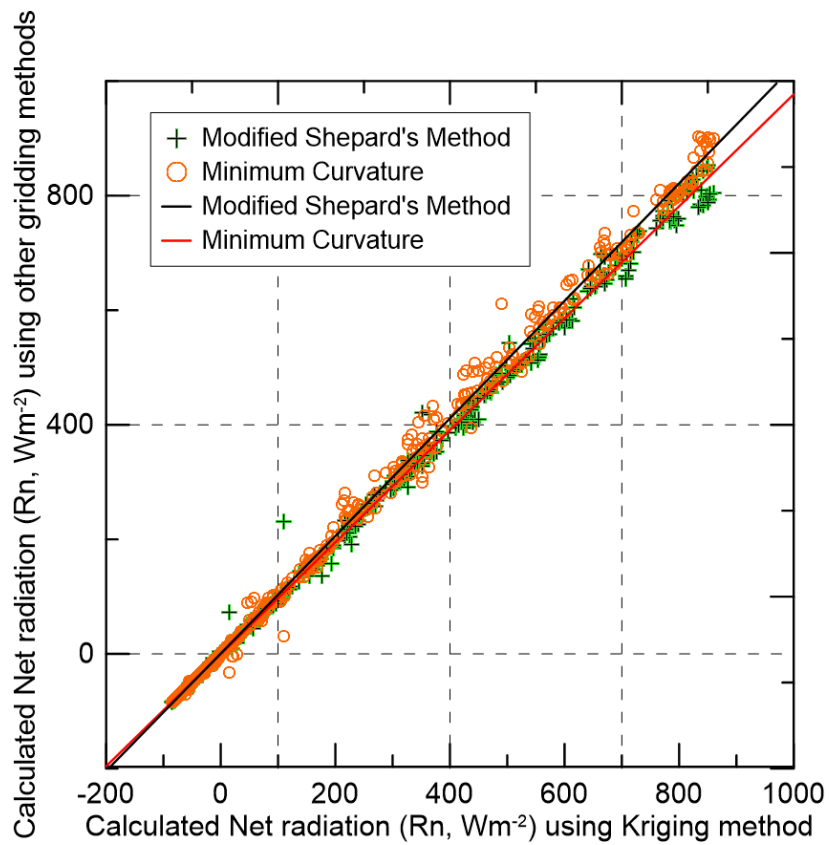


図 19 内挿法の比較(Rn)

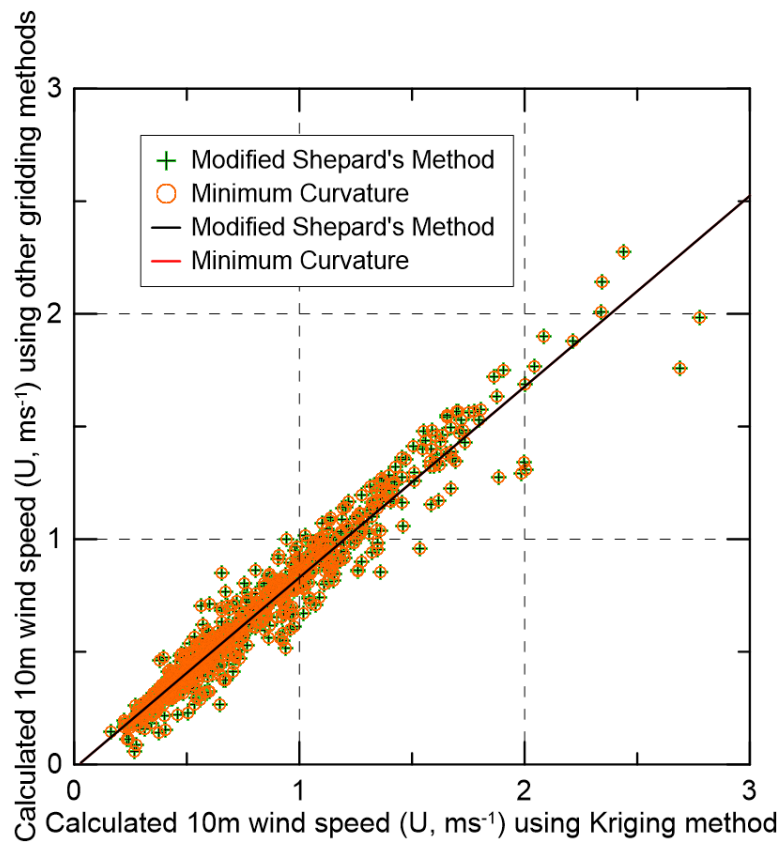


図 20 内挿法の比較(U_{10})

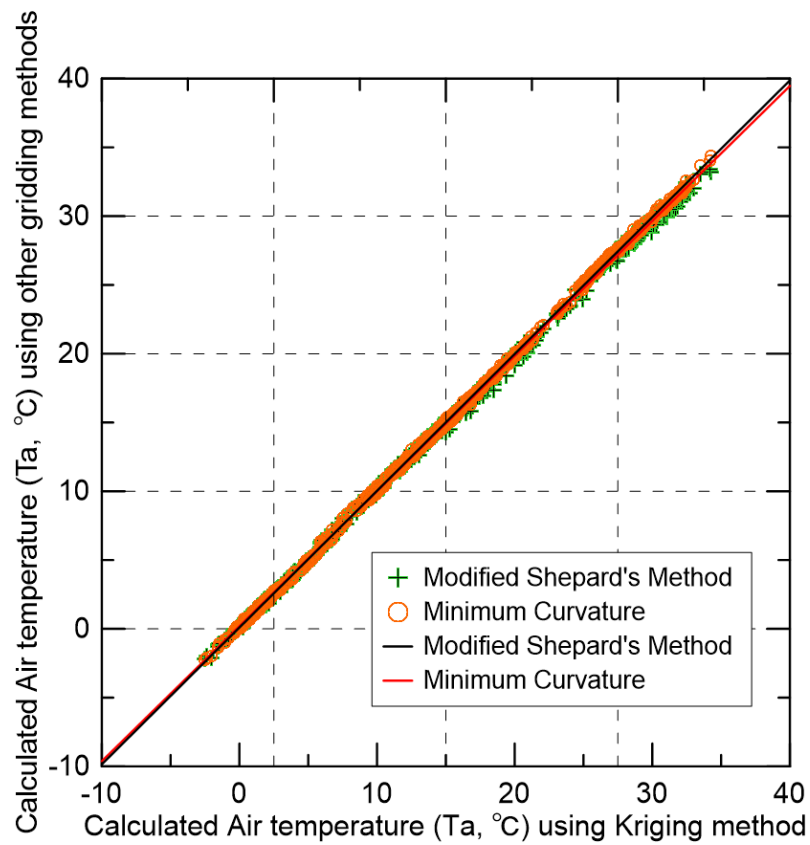


図 21 内挿法の比較(T_a)

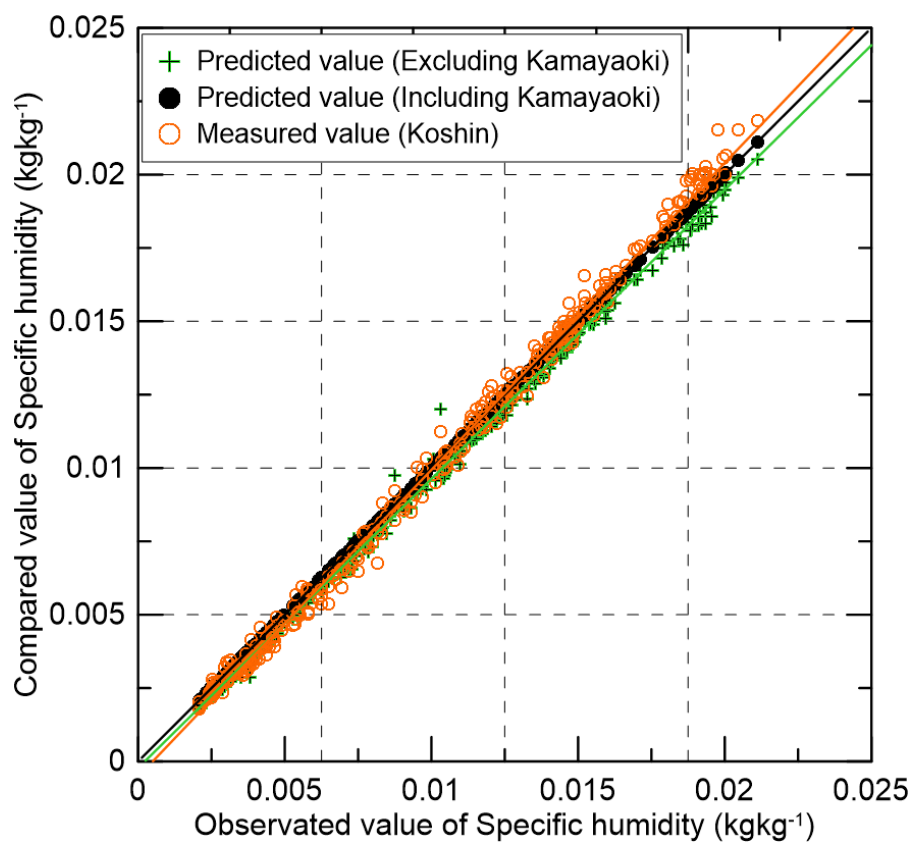


図 22 交差検証 q (釜谷沖を対象)

※ オレンジ色は湖心の観測値, 緑色は釜谷沖を除いた予測値, 黒色は釜谷沖を含めた予測値

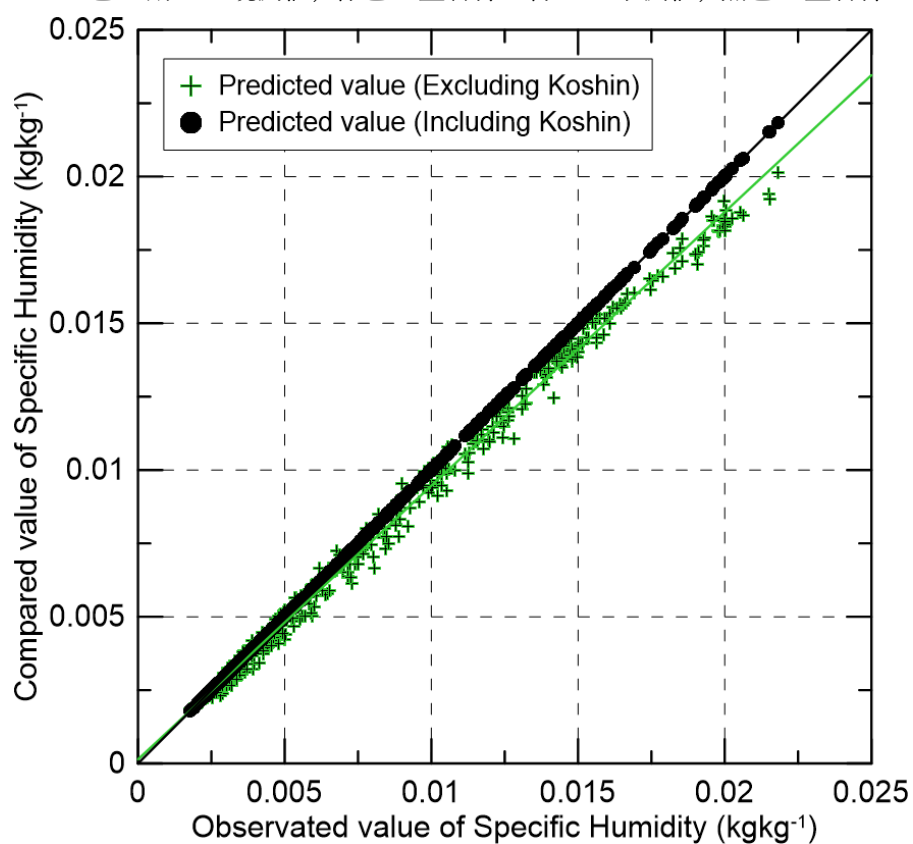


図 23 交差検証 q (湖心を対象)

※ 緑色は湖心を除いた予測値, 黒色は湖心を含めた予測値

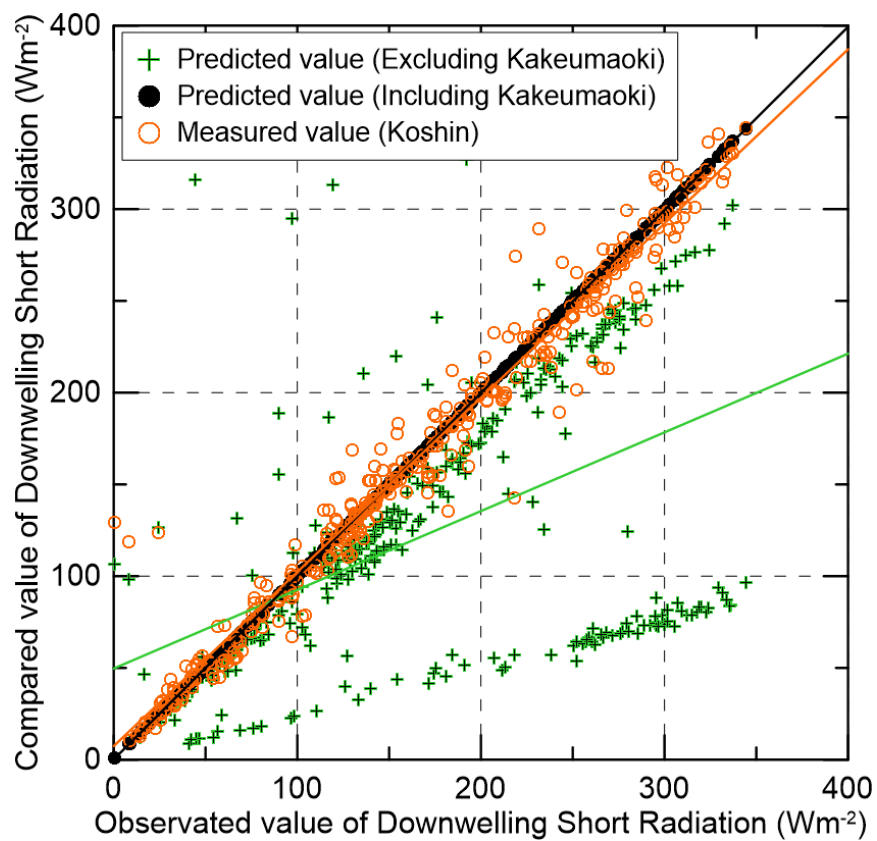


図 24 交差検証 $S \downarrow$ (掛馬沖を対象)

※ オレンジ色は湖心の観測値，緑色は掛馬沖を除いた予測値，黒色は掛馬沖を含めた予測値

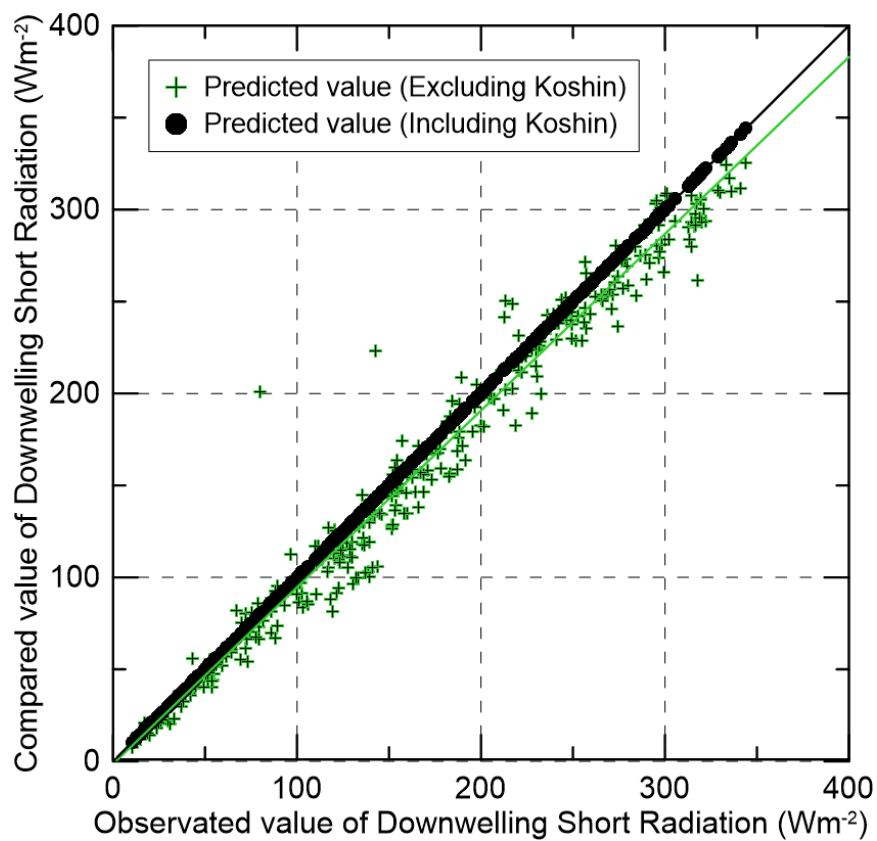


図 25 交差検証 $S \downarrow$ (湖心を対象)

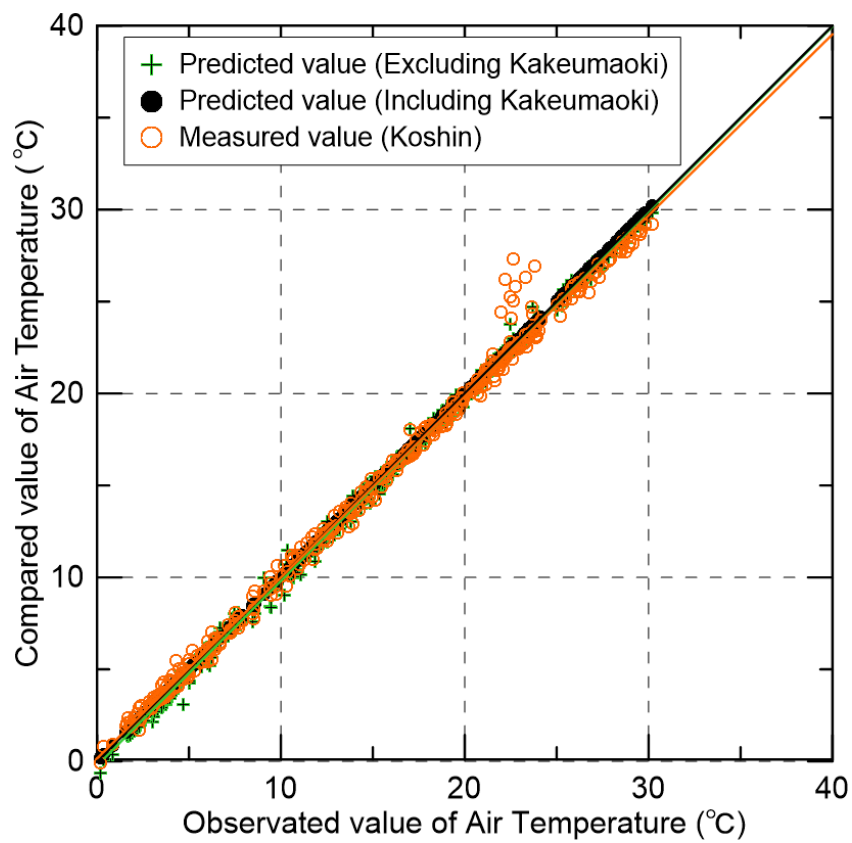


図 26 交差検証 T_a (掛馬沖を対象)

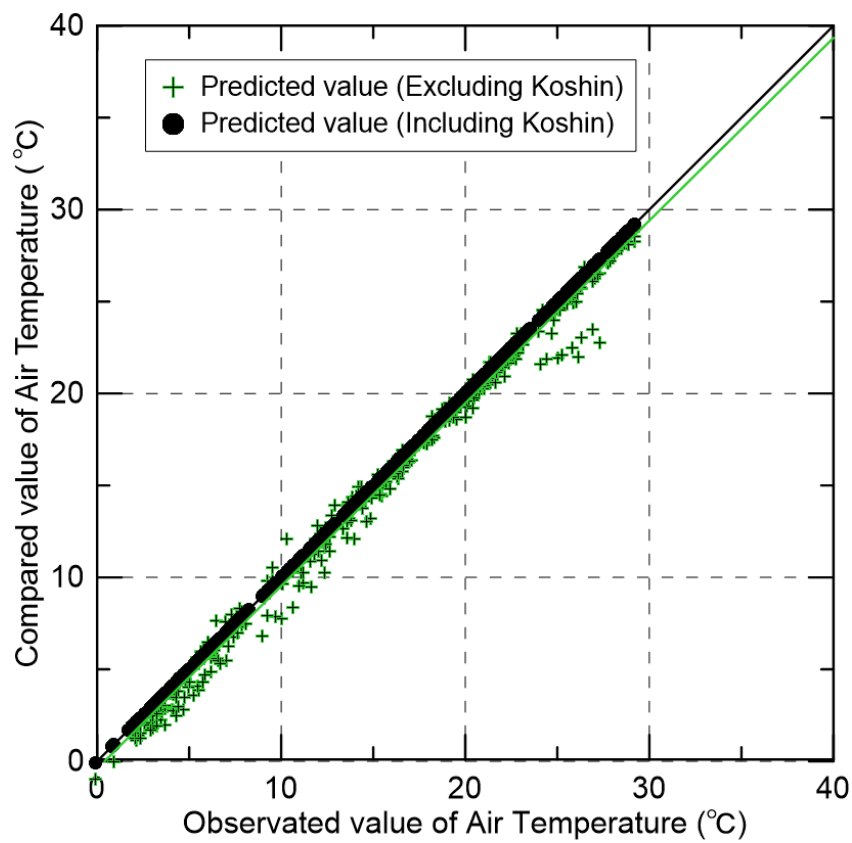


図 27 交差検証 T_a (湖心を対象)

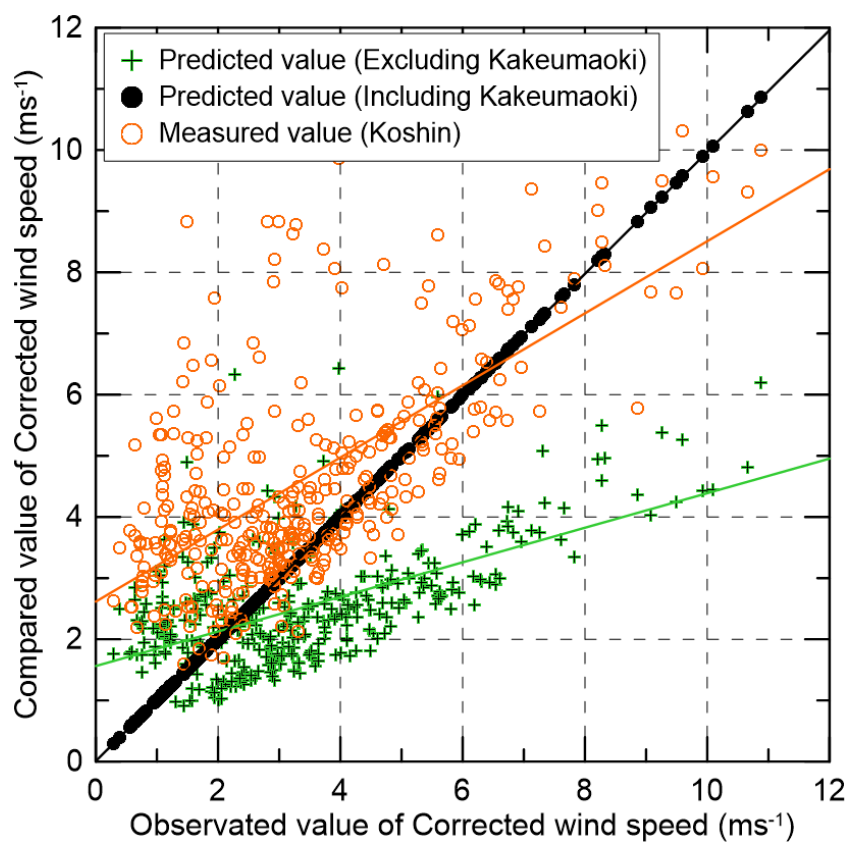


図 28 交差検証 U_{10} (掛馬沖を対象)

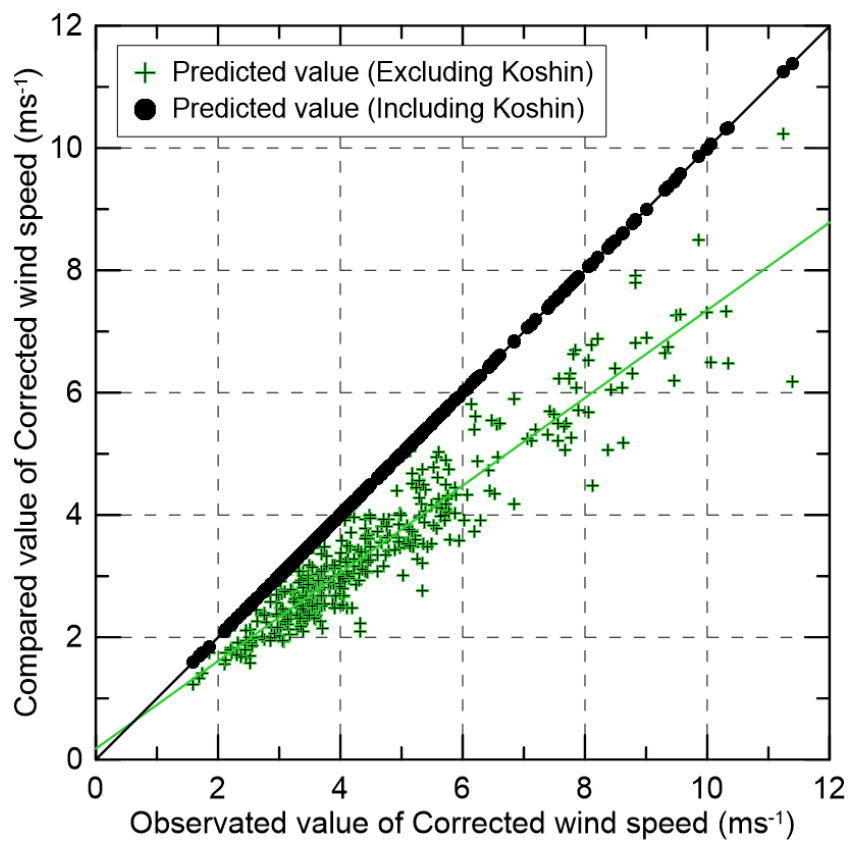


図 29 交差検証 U_{10} (湖心を対象)

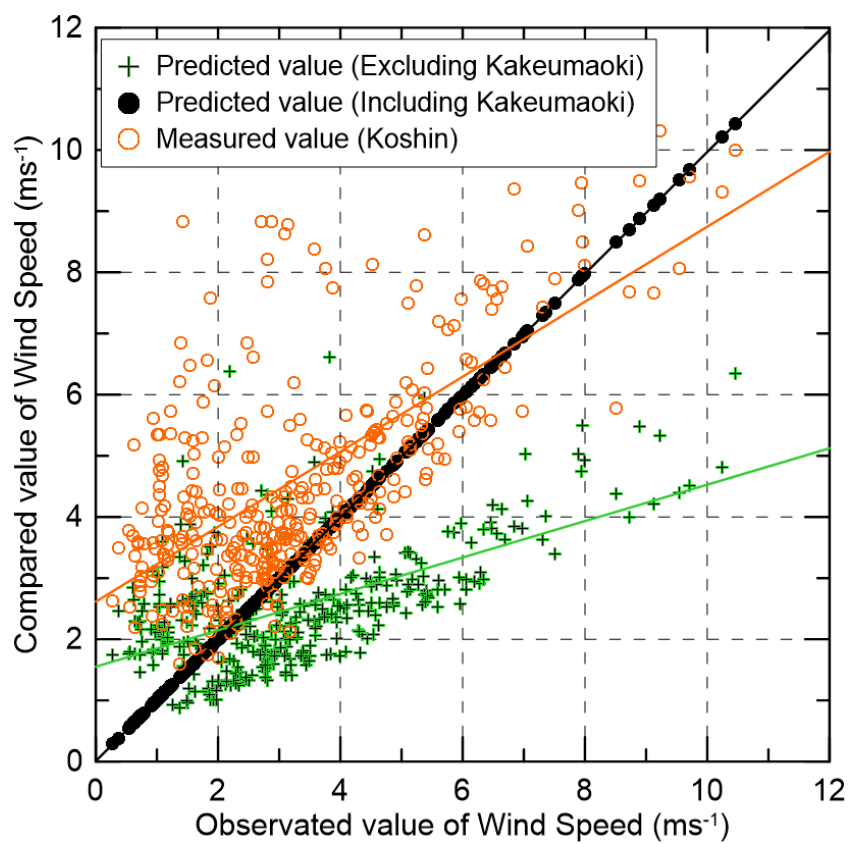


図 30 交差検証 WS(掛馬沖を対象)

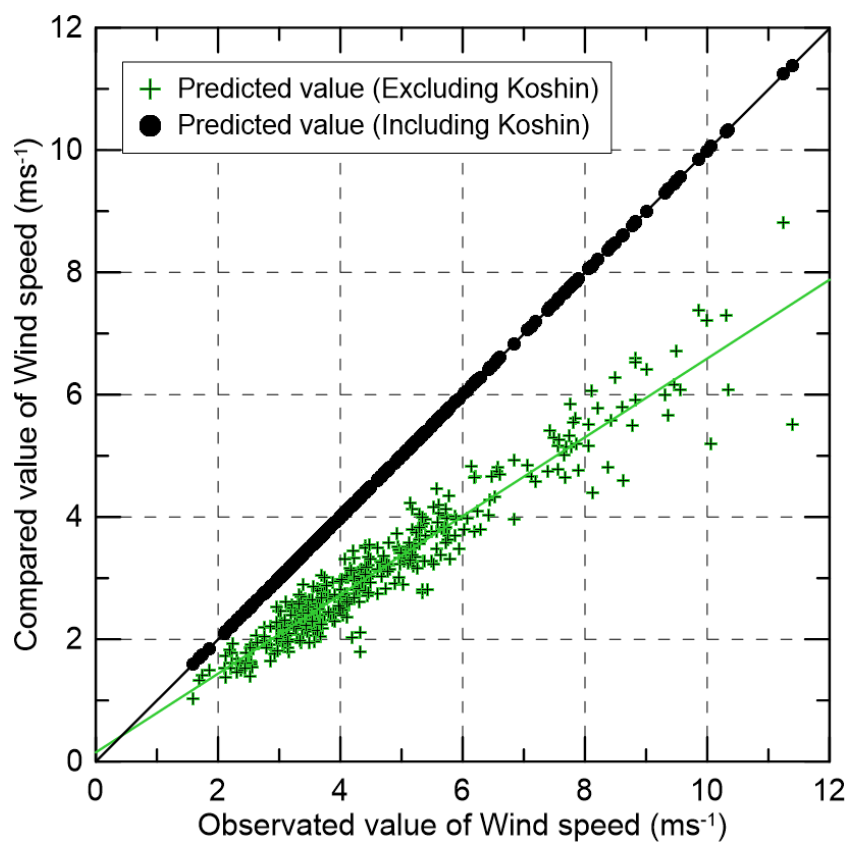


図 31 交差検証 WS(湖心を対象)

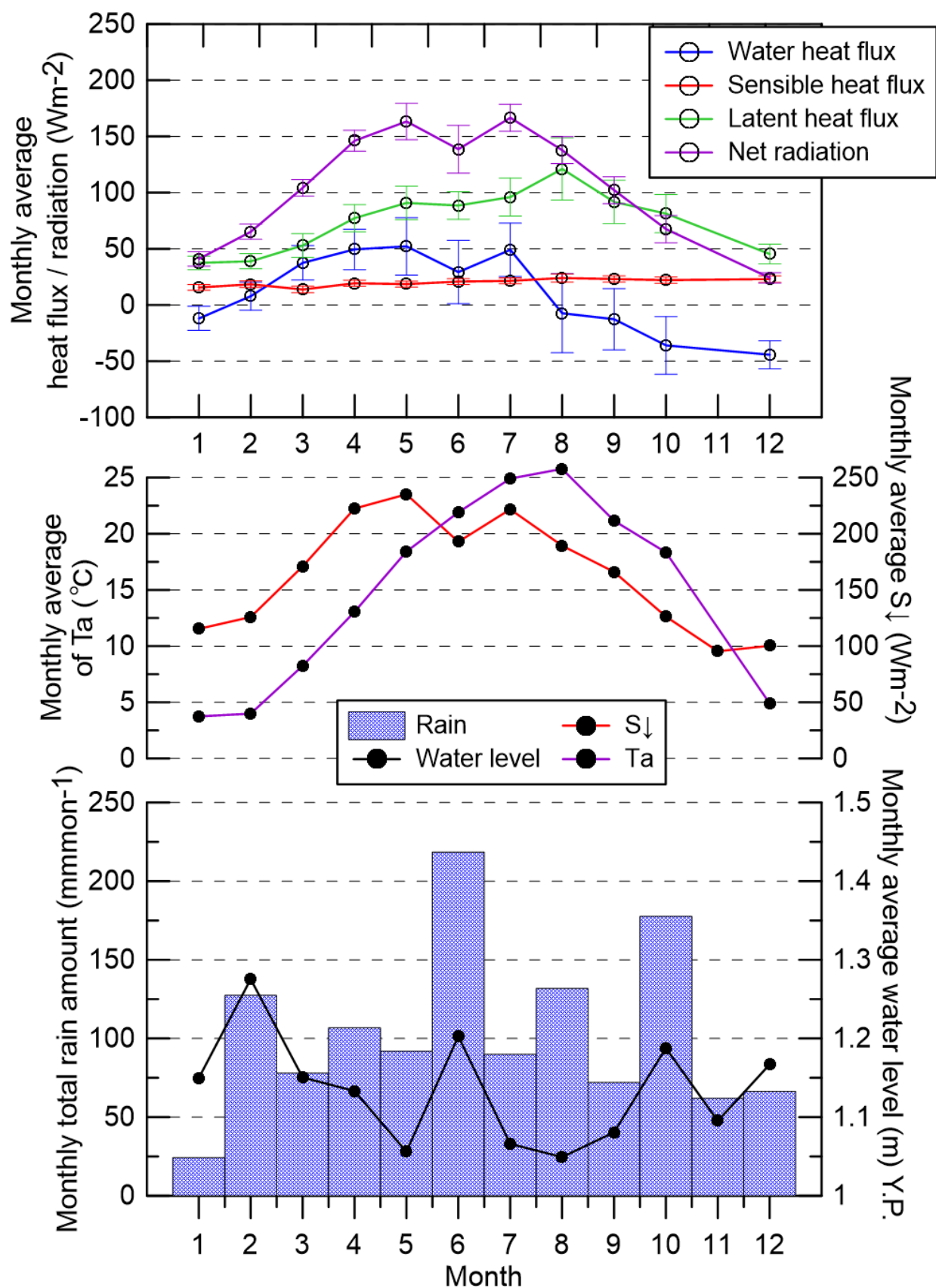


図 32 月平均値(熱収支, 気温, 日射量, 水位)と月積算値(降水量)

※ 表示されているデータは全て西浦湖面の平均値または合計値である。

※ 標準偏差は空間的な値である。

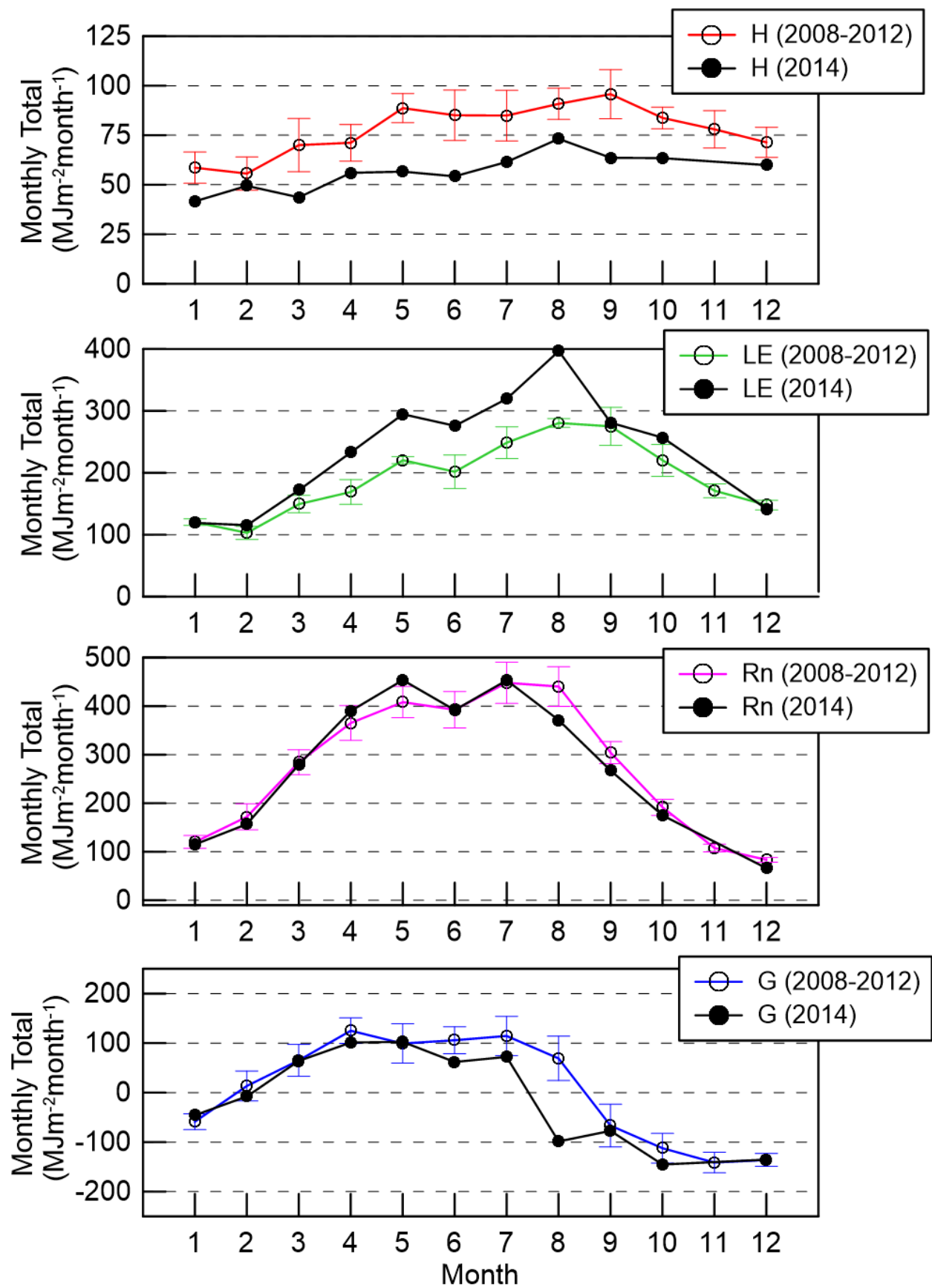


図 33 湖心における熱収支(先行研究との比較)

※ 標準偏差は 2008~2012 の間で、同じ時間軸から求めた値である。

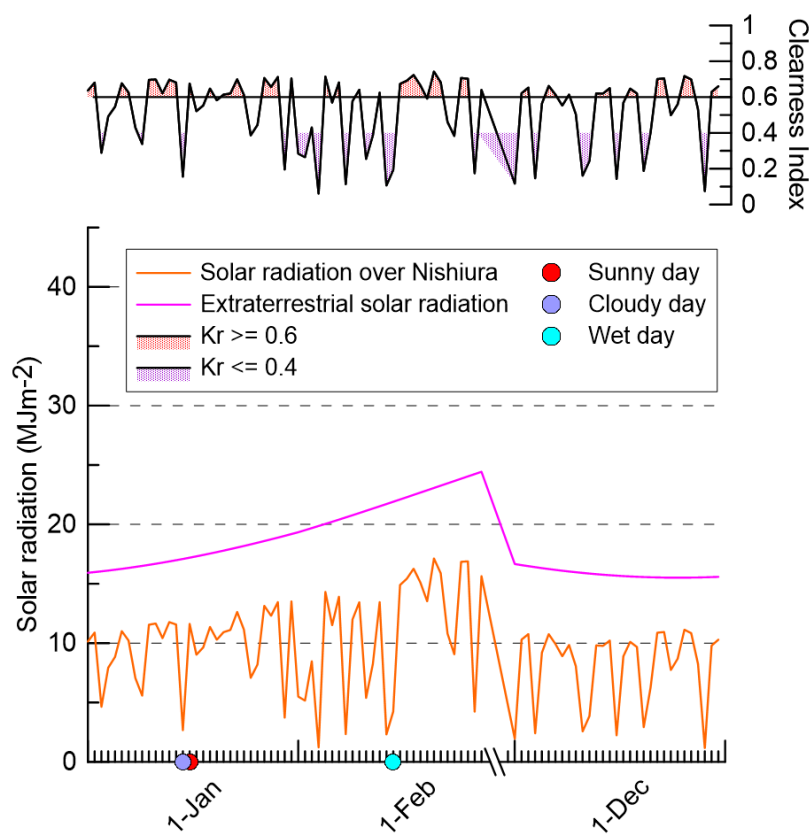


图 34 晴天指数(冬)

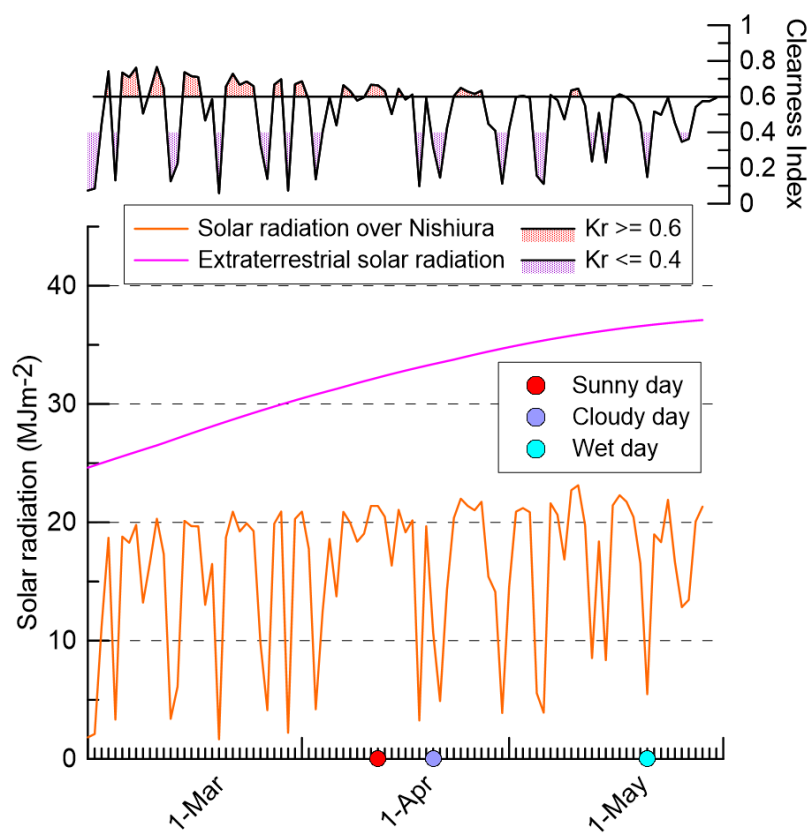


图 35 晴天指数(春)

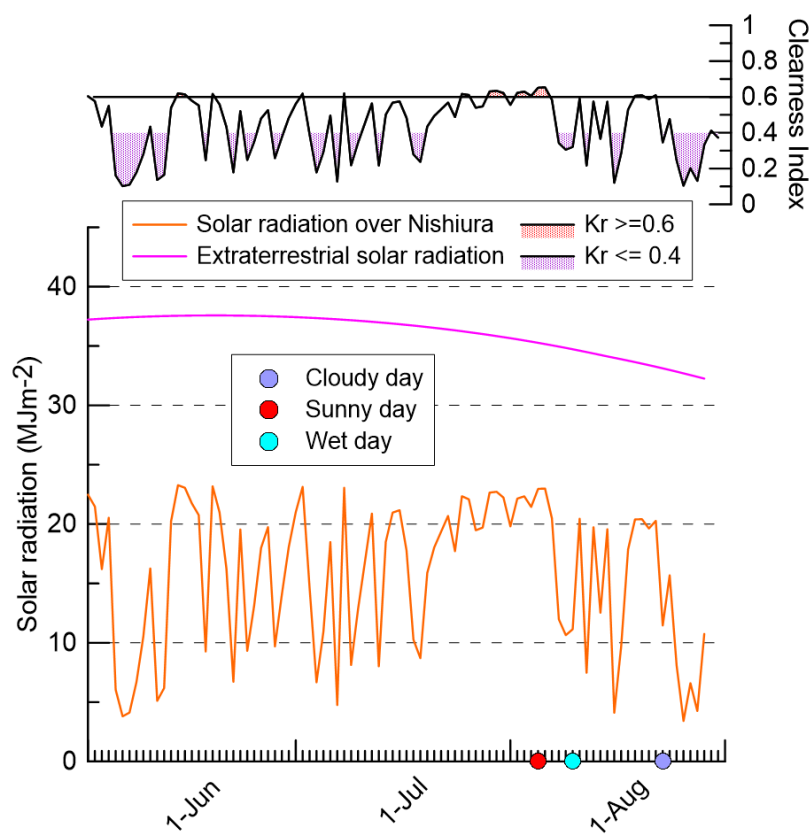


图 36 晴天指数(夏)

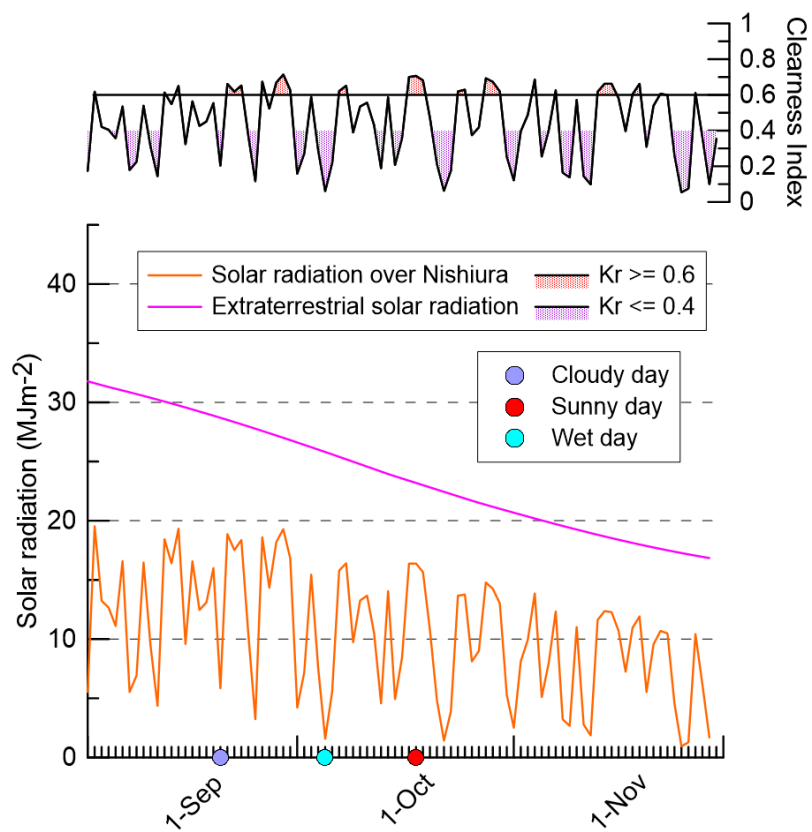
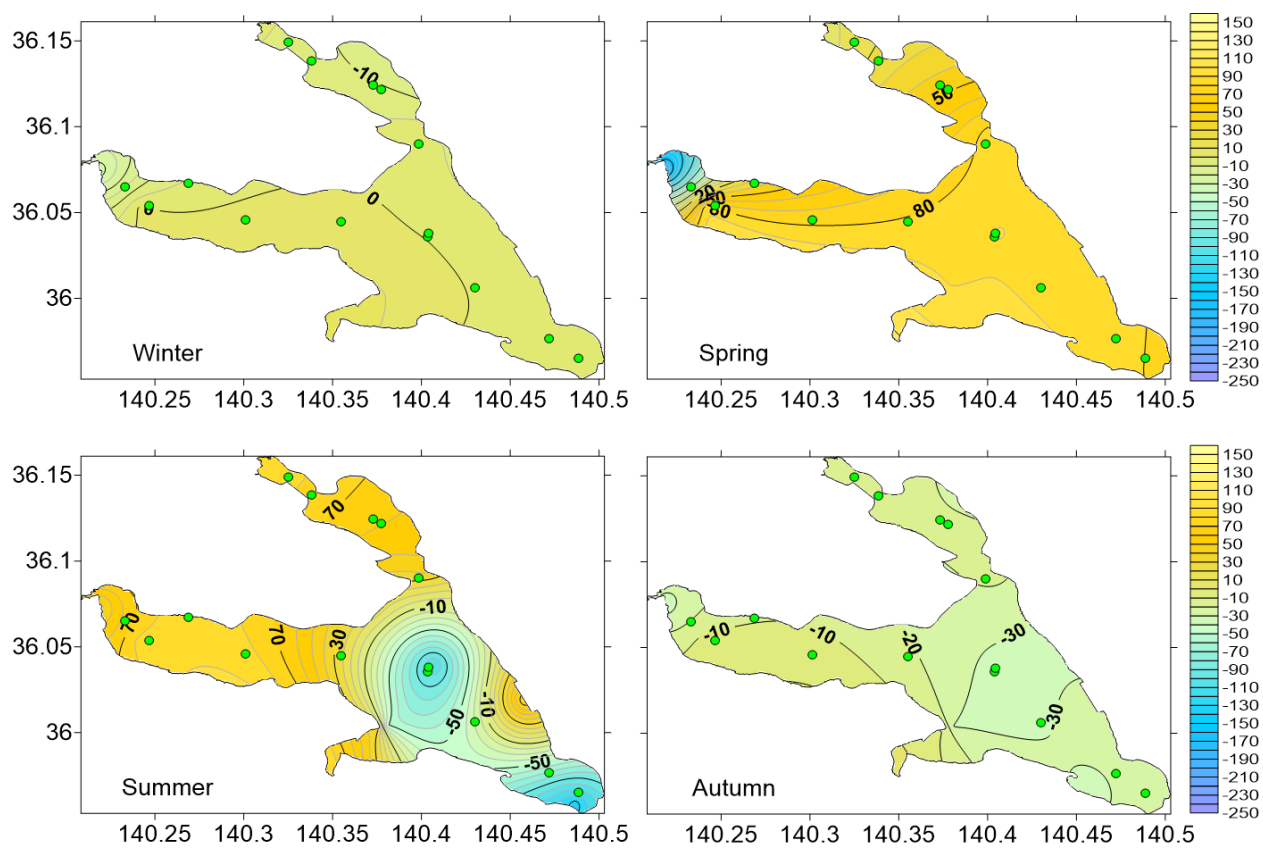


图 37 晴天指数(秋)



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

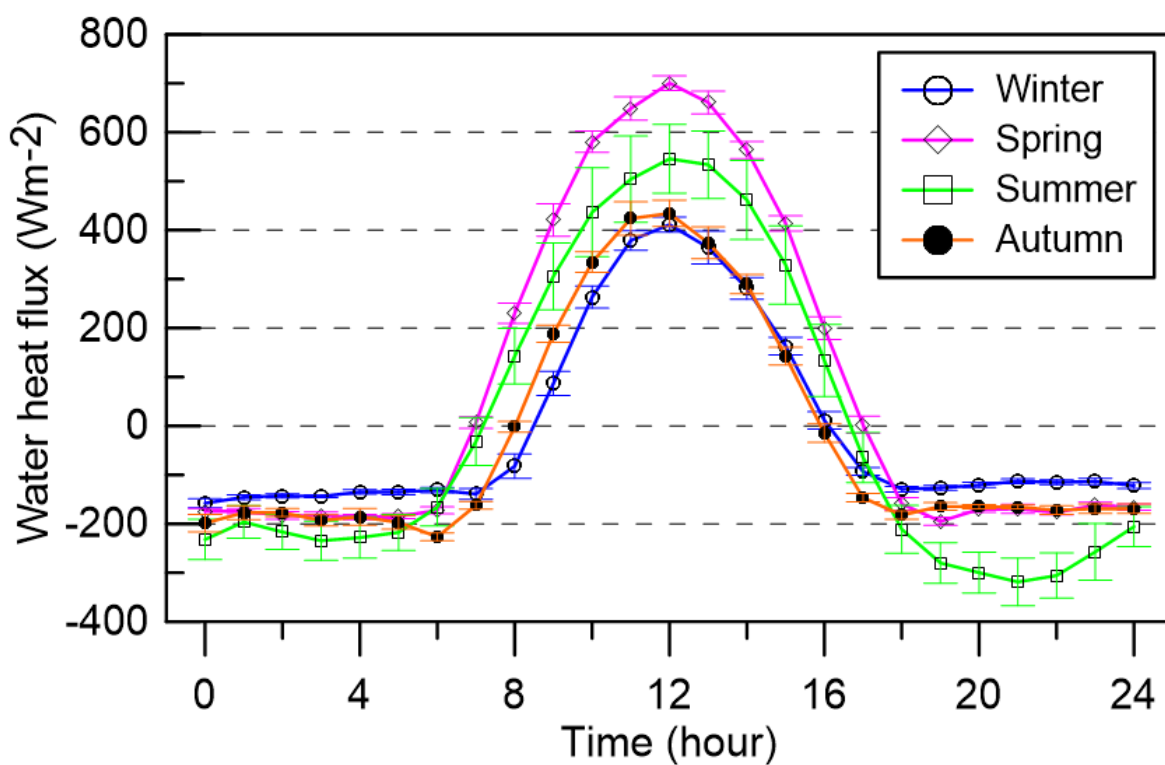
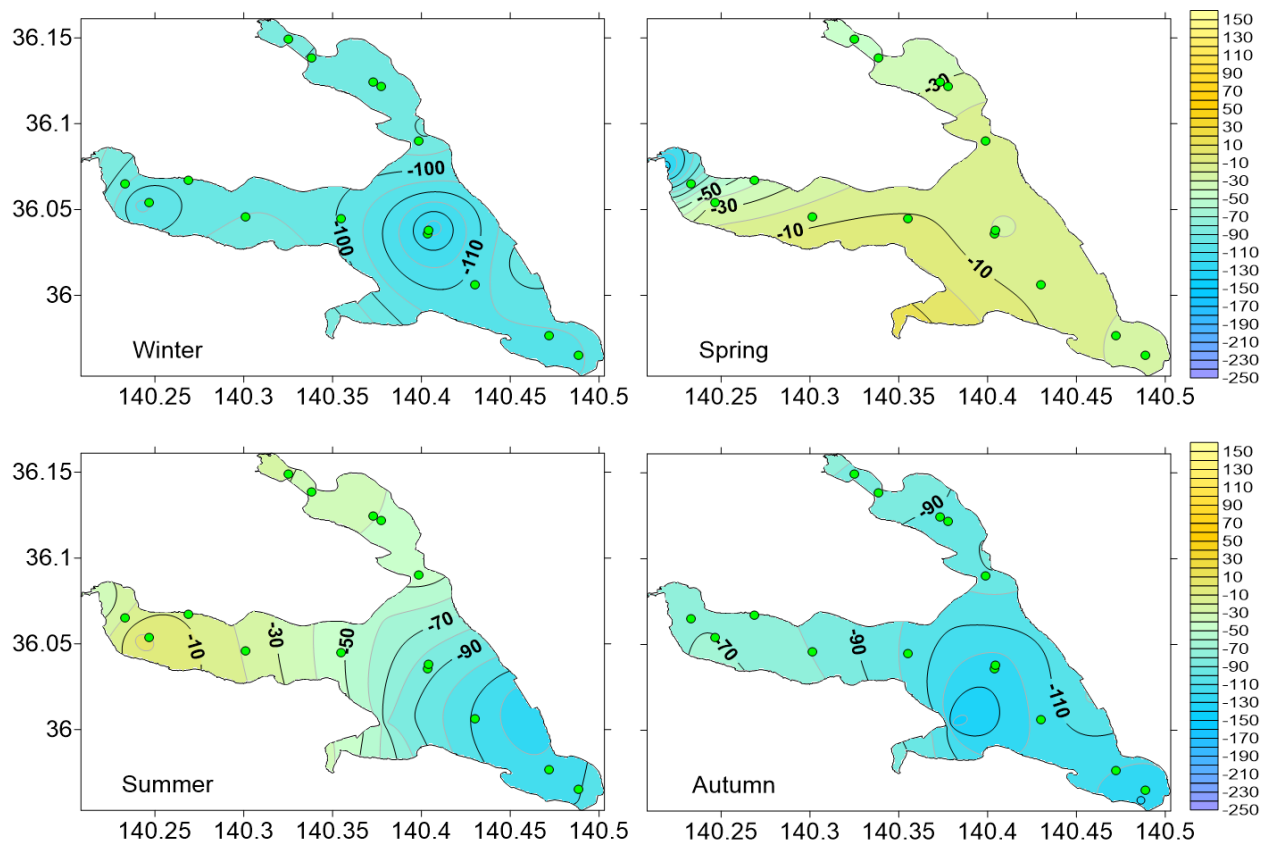


図 38 $G(\text{晴})$ の空間分布(日平均)と時間変化

※ エラーバーは空間的な標準偏差を示している。



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

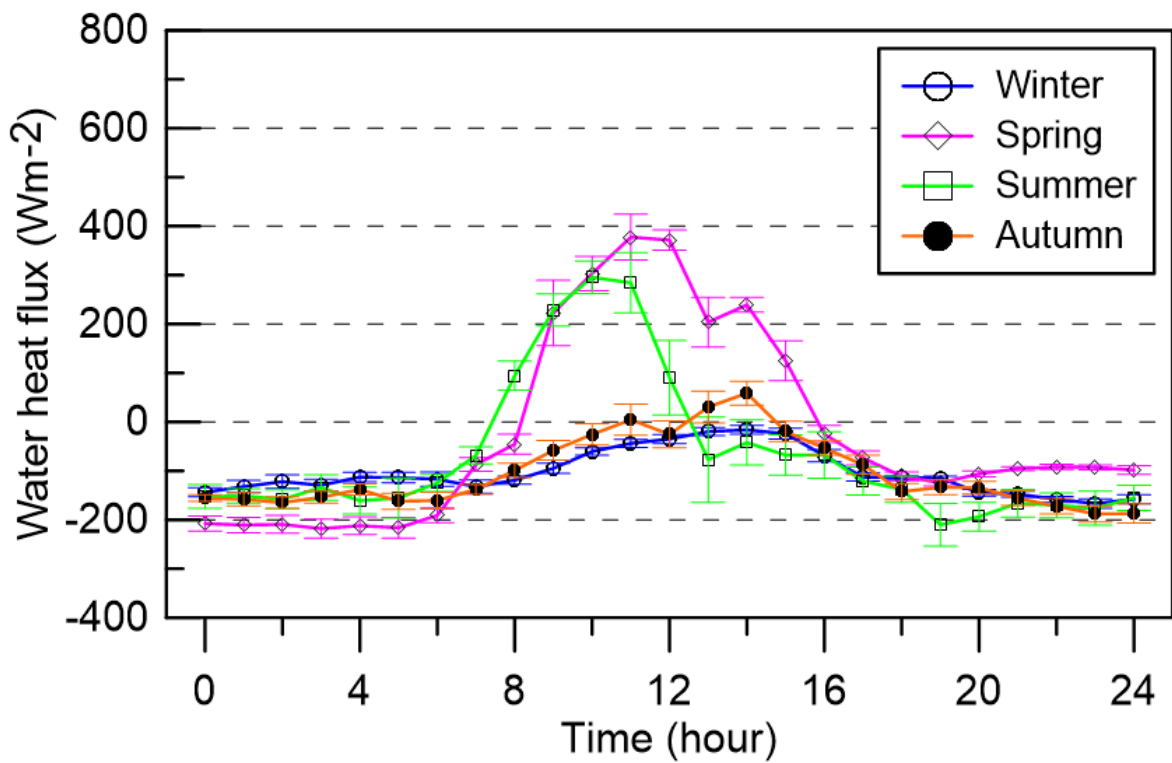
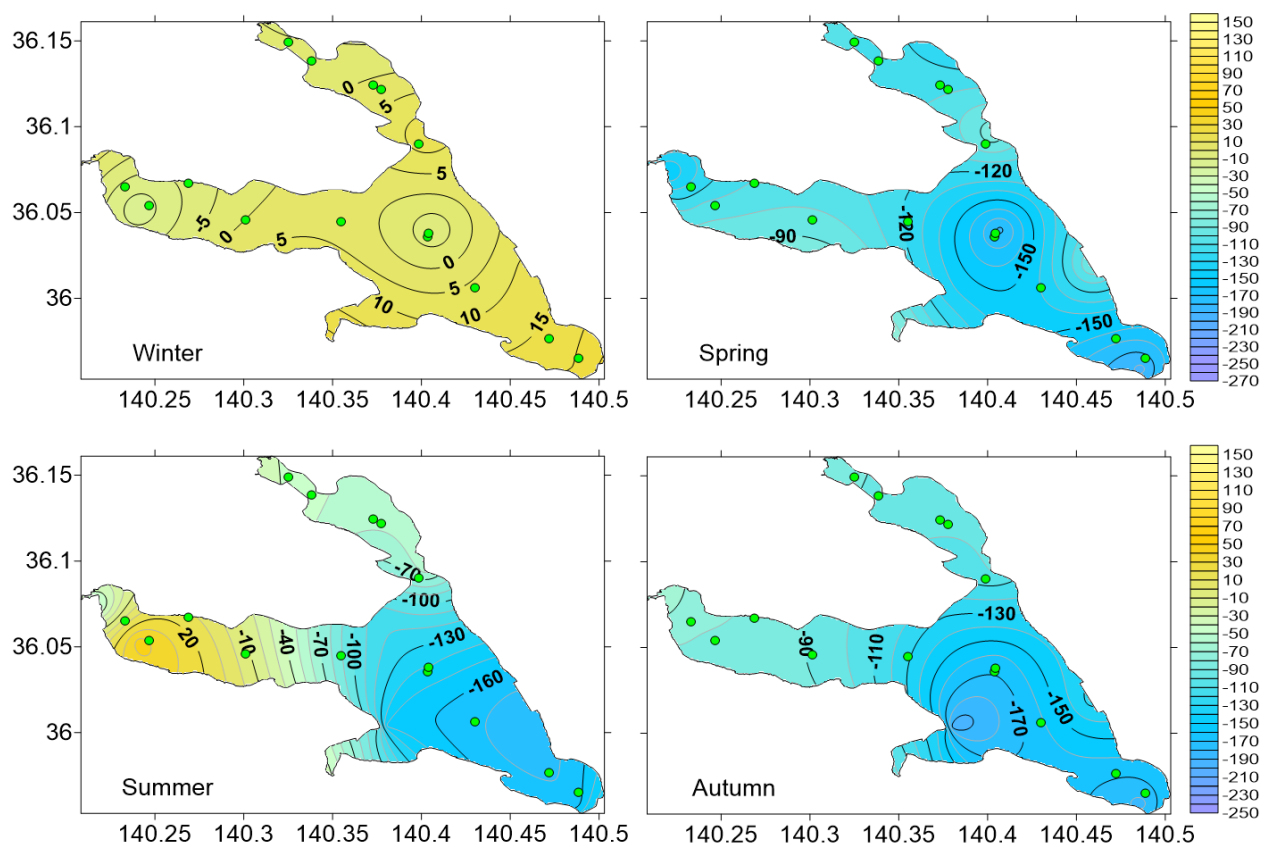


図 39 $G(\text{雲})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

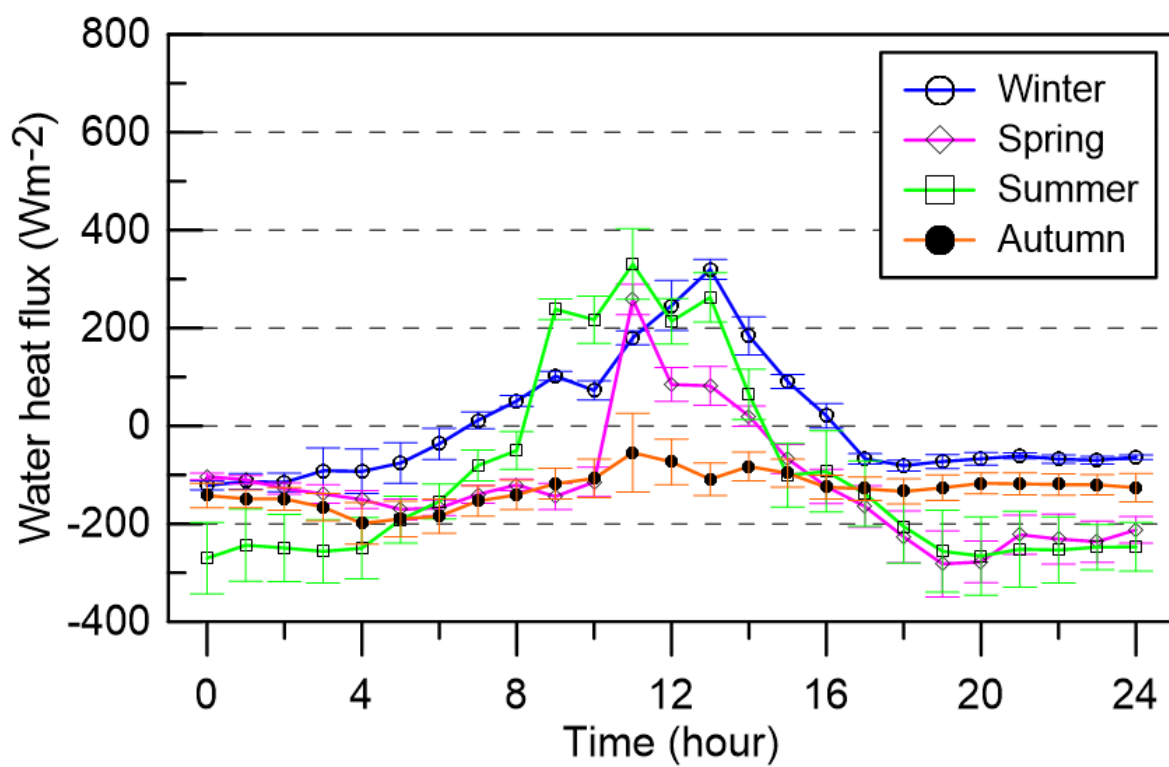
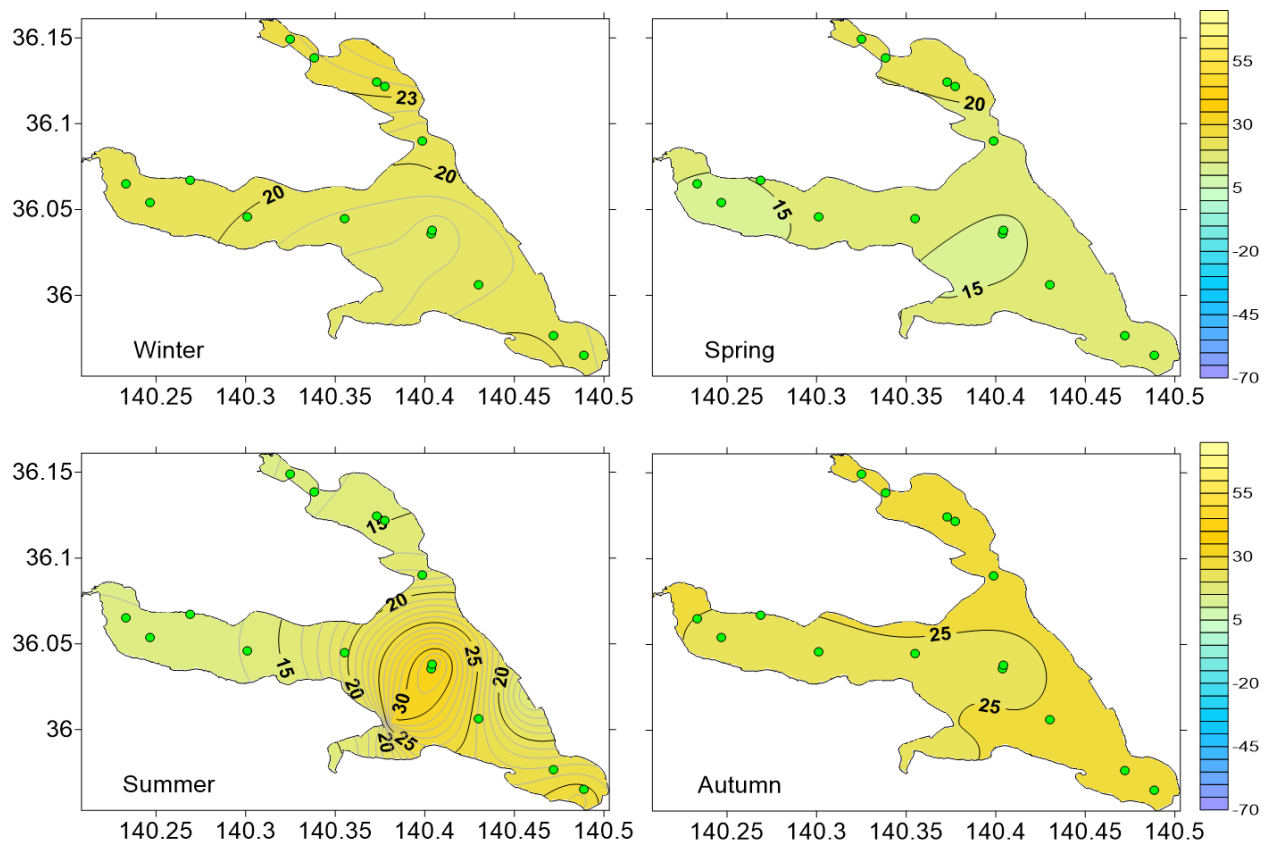


図 40 $G(\text{雨})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である.

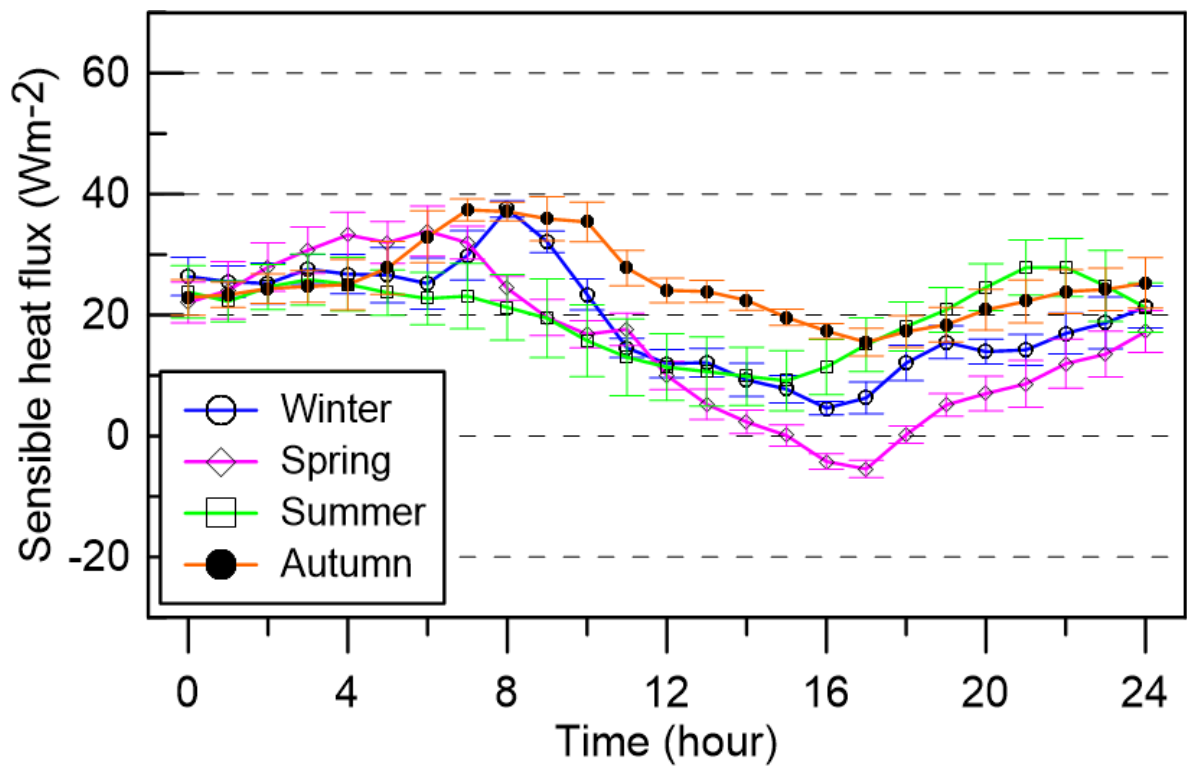
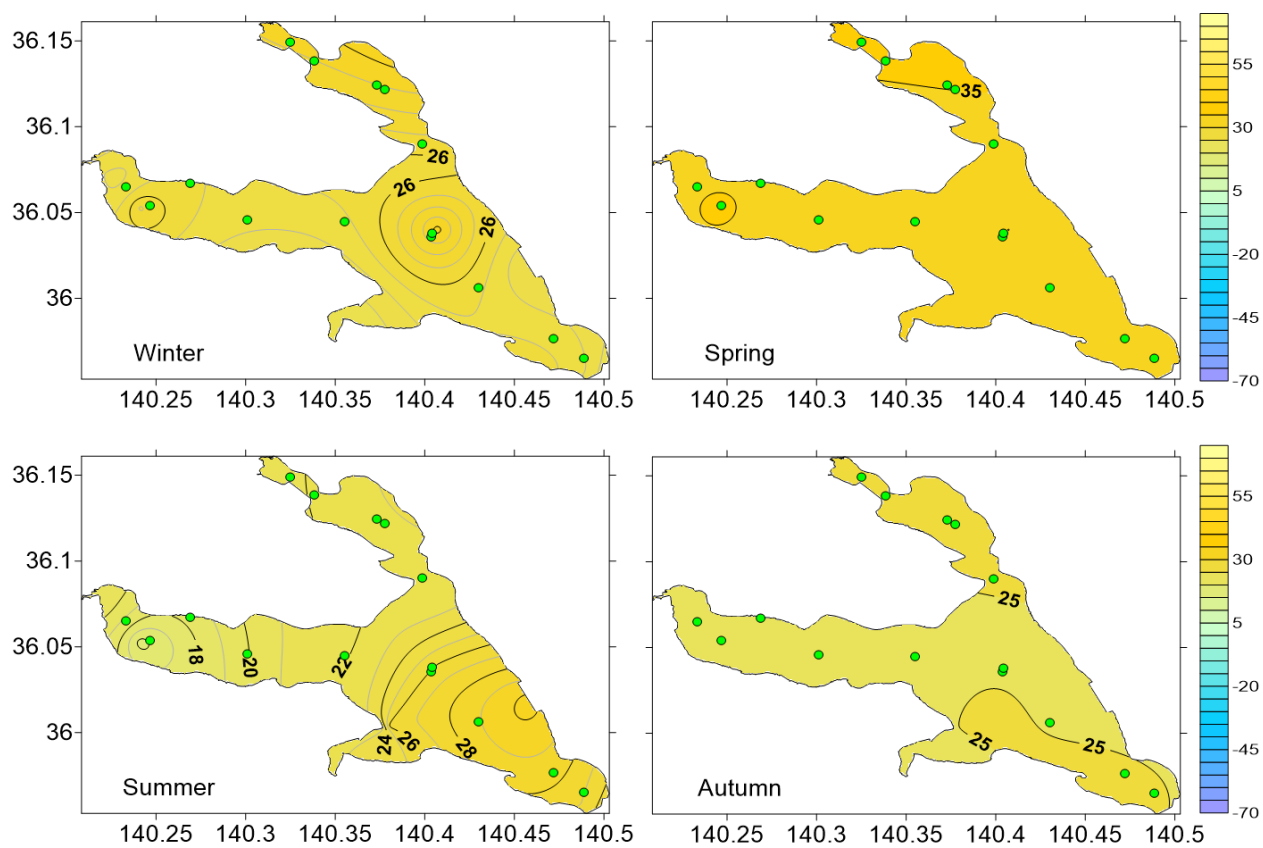


図 41 H (晴)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である.

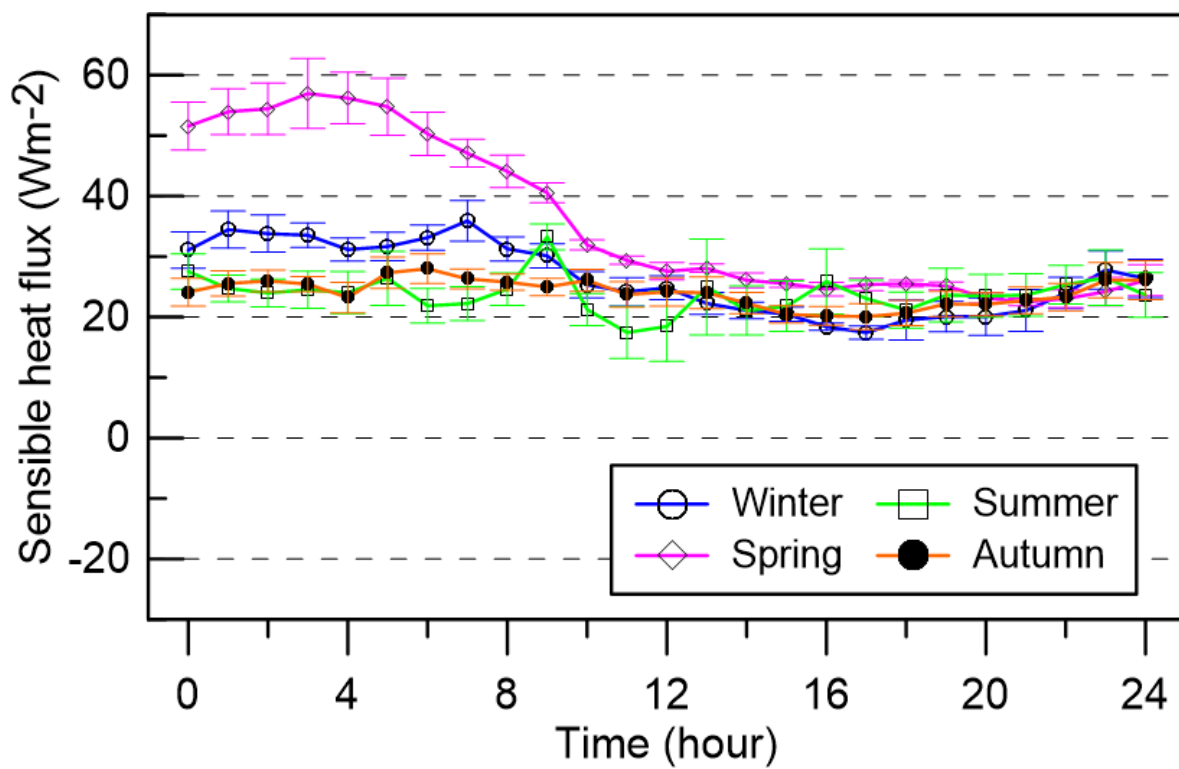
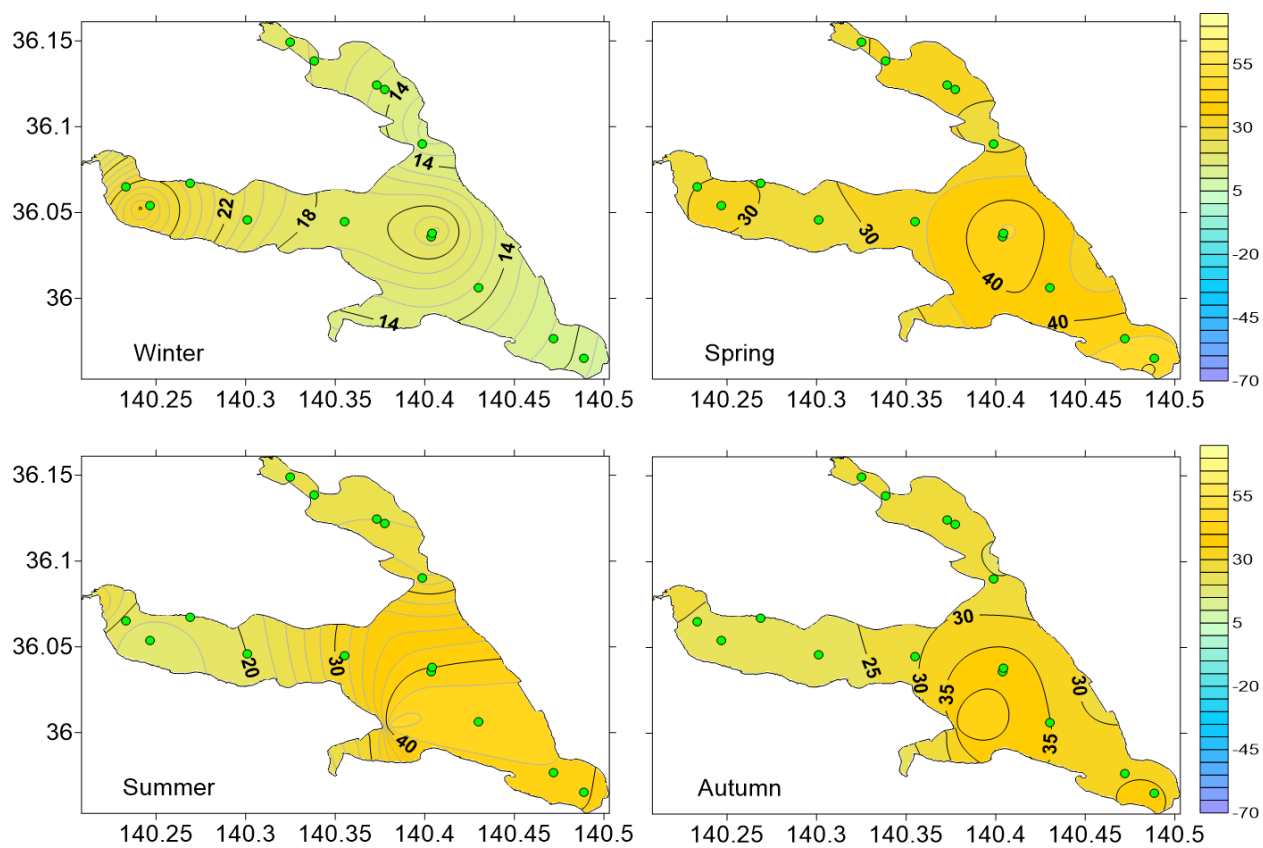


図 42 $H(\text{曇})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

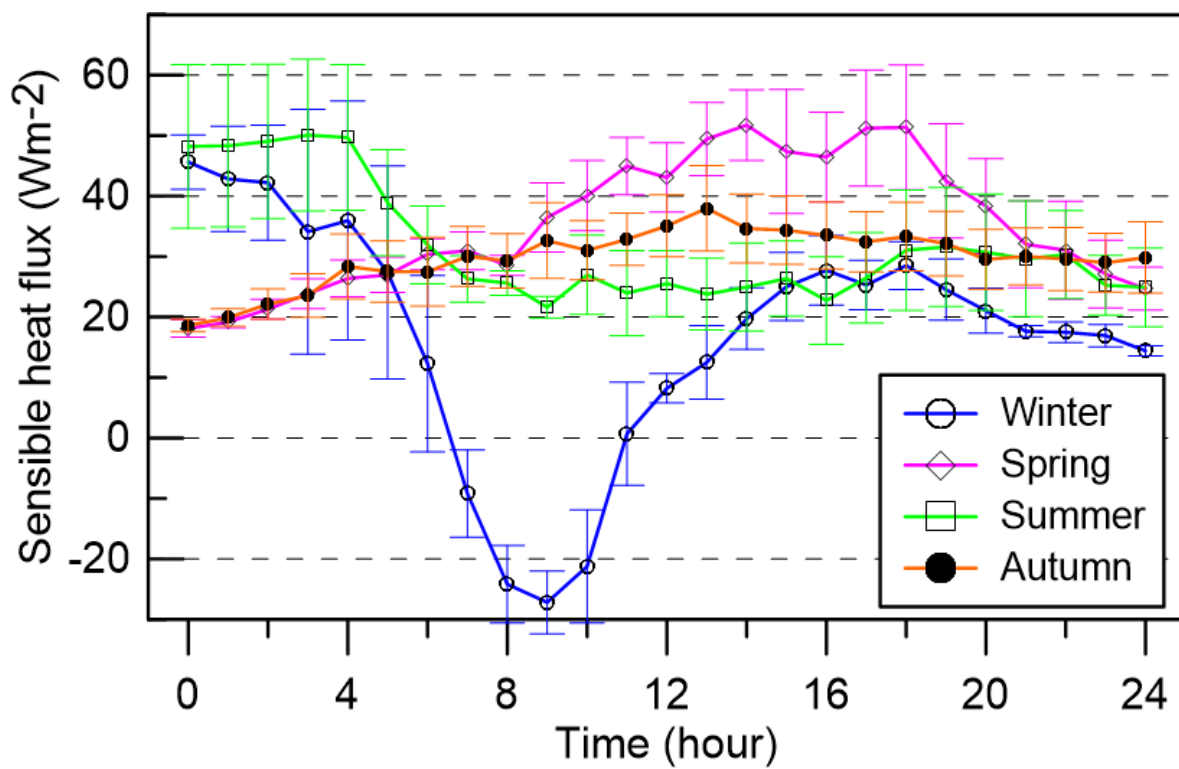
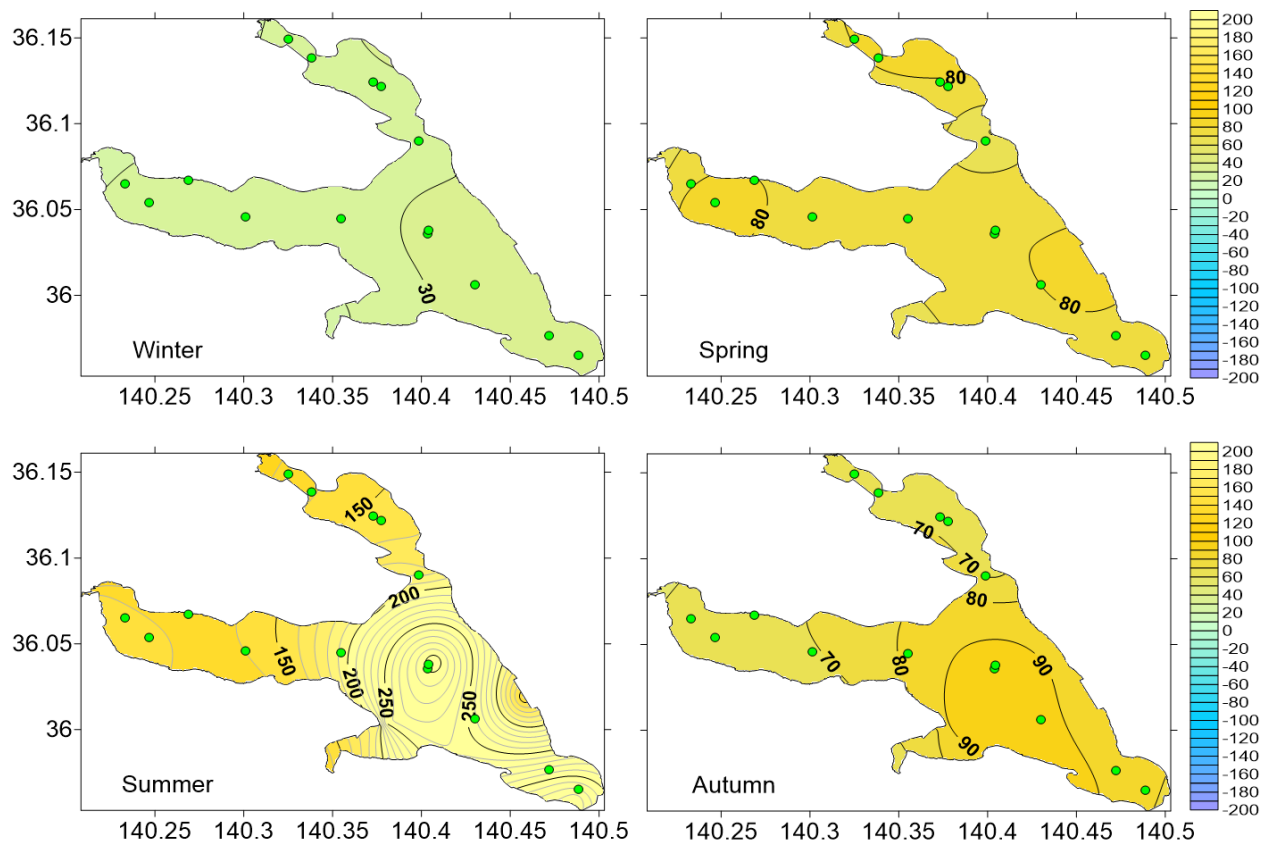


図 43 $H(\text{雨})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

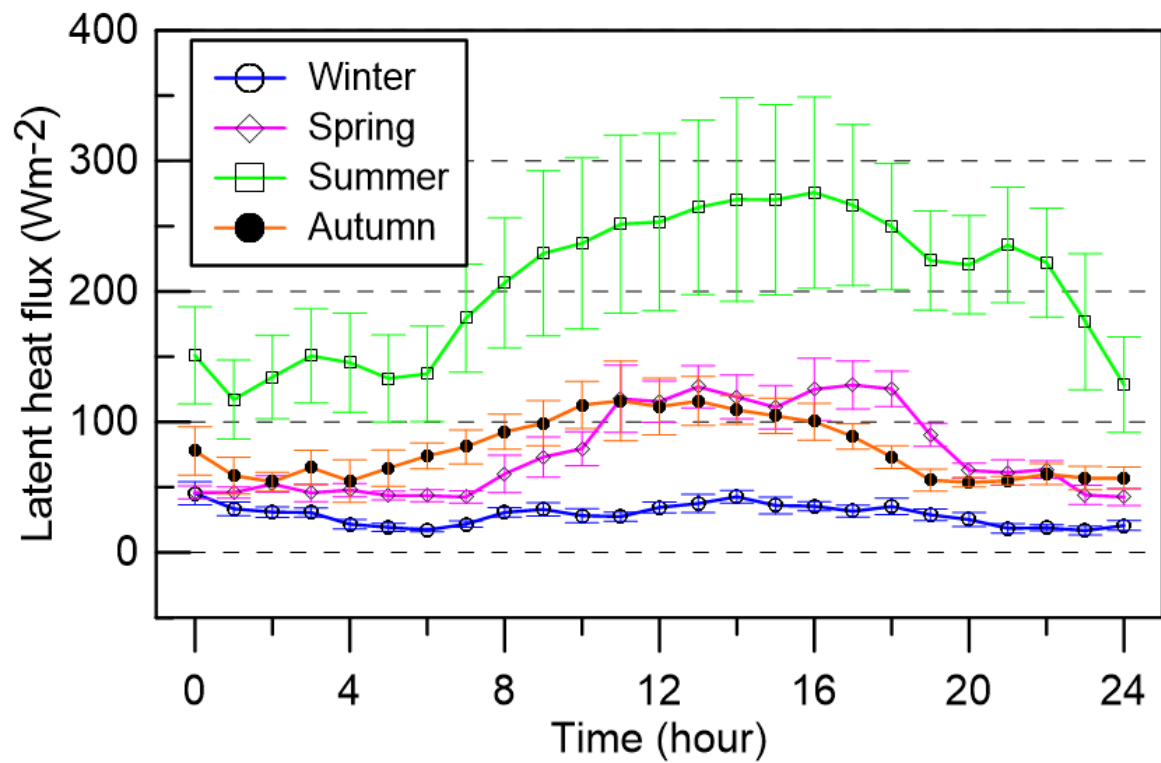
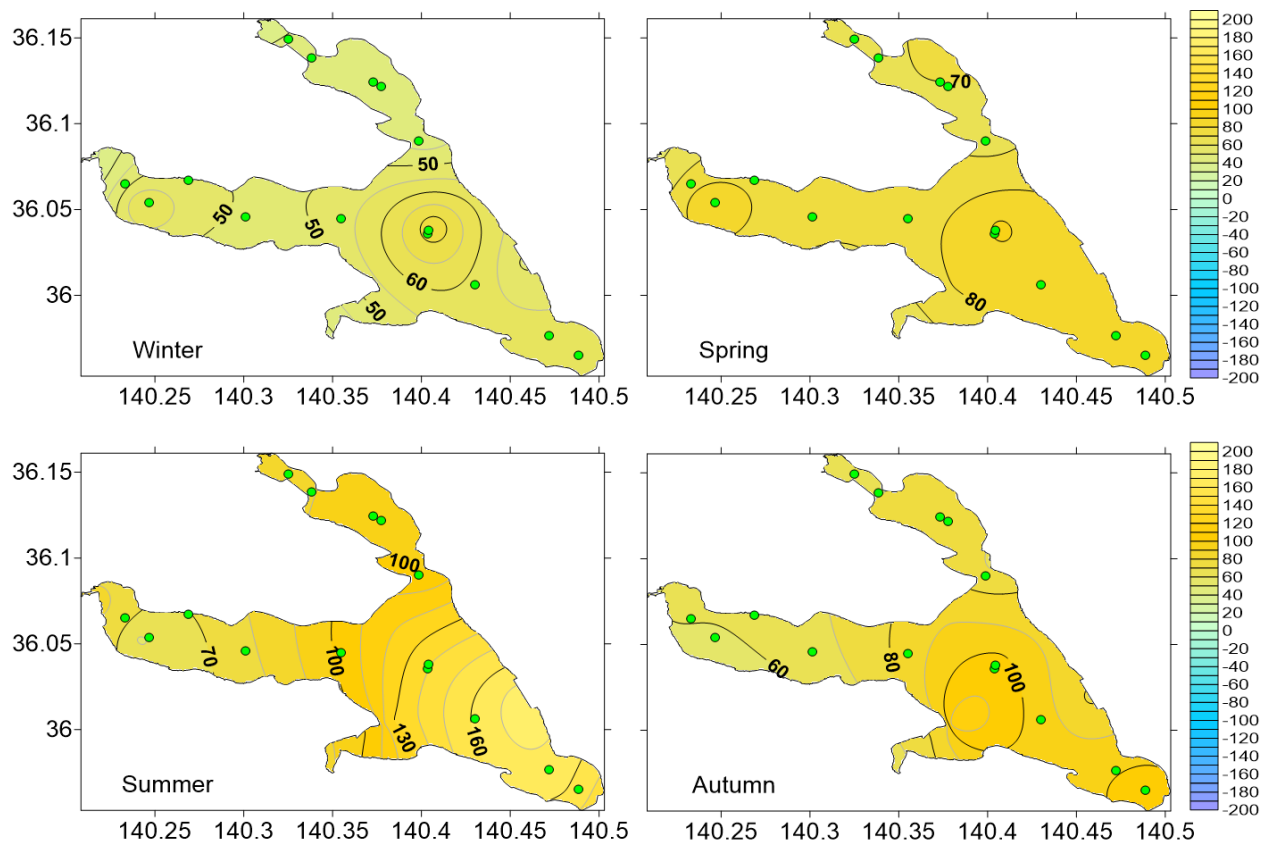


図 44 $LE(\text{晴})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

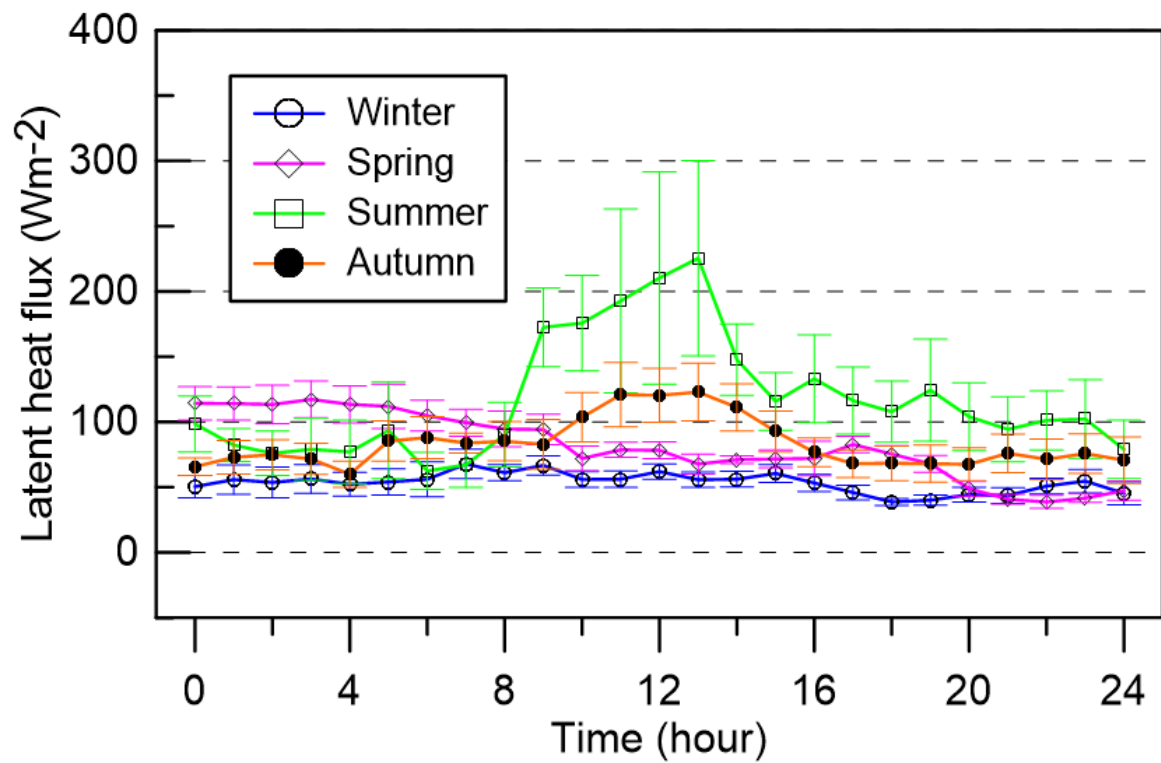
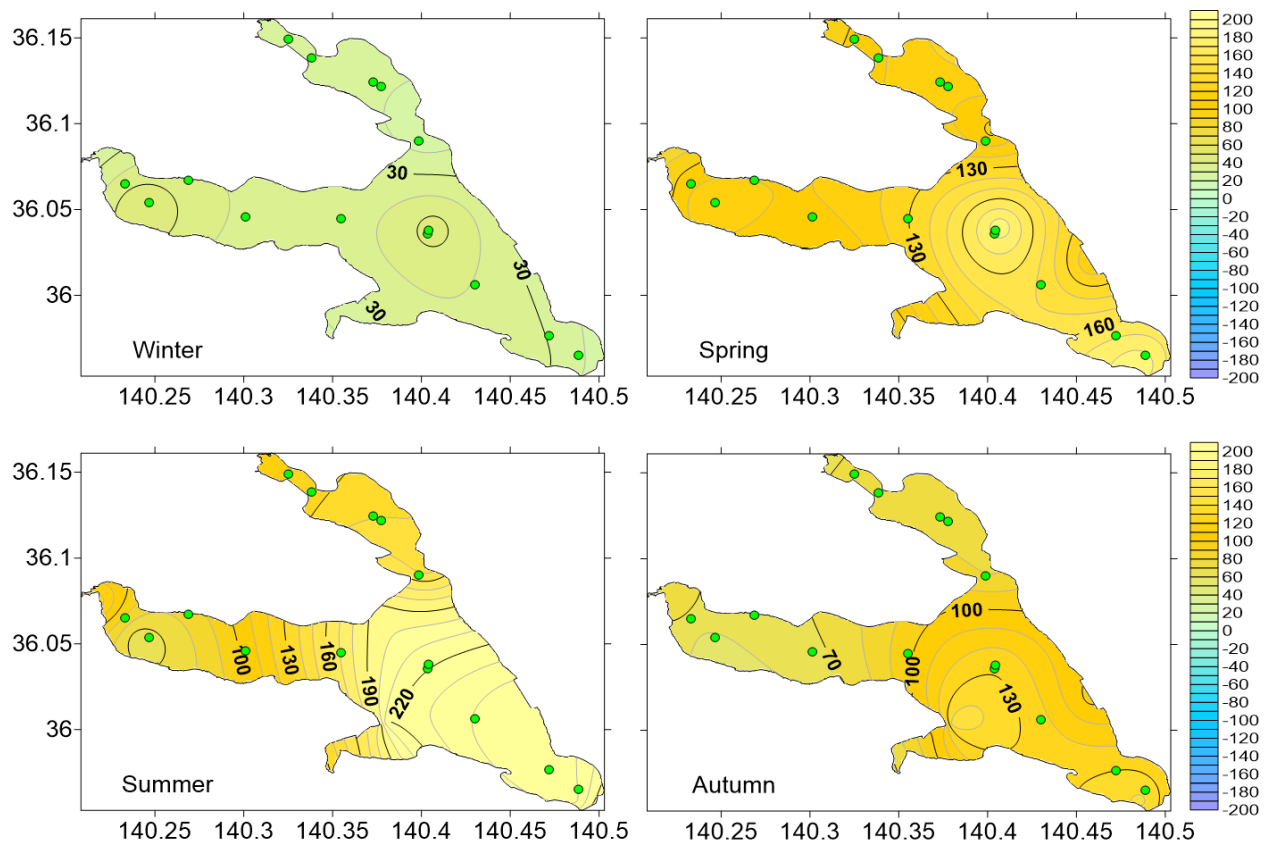


図 45 $LE(\text{曇})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である。

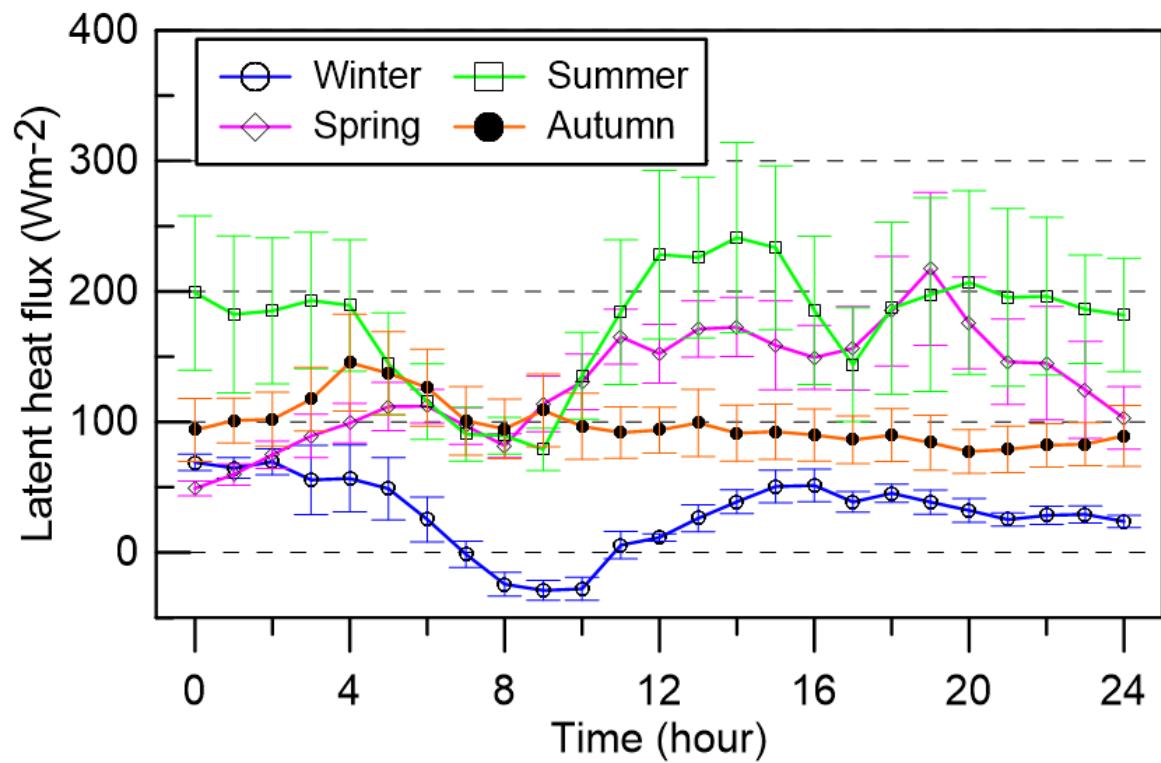


図 46 $LE(\text{雨})$ の空間分布(日平均)と時間変化

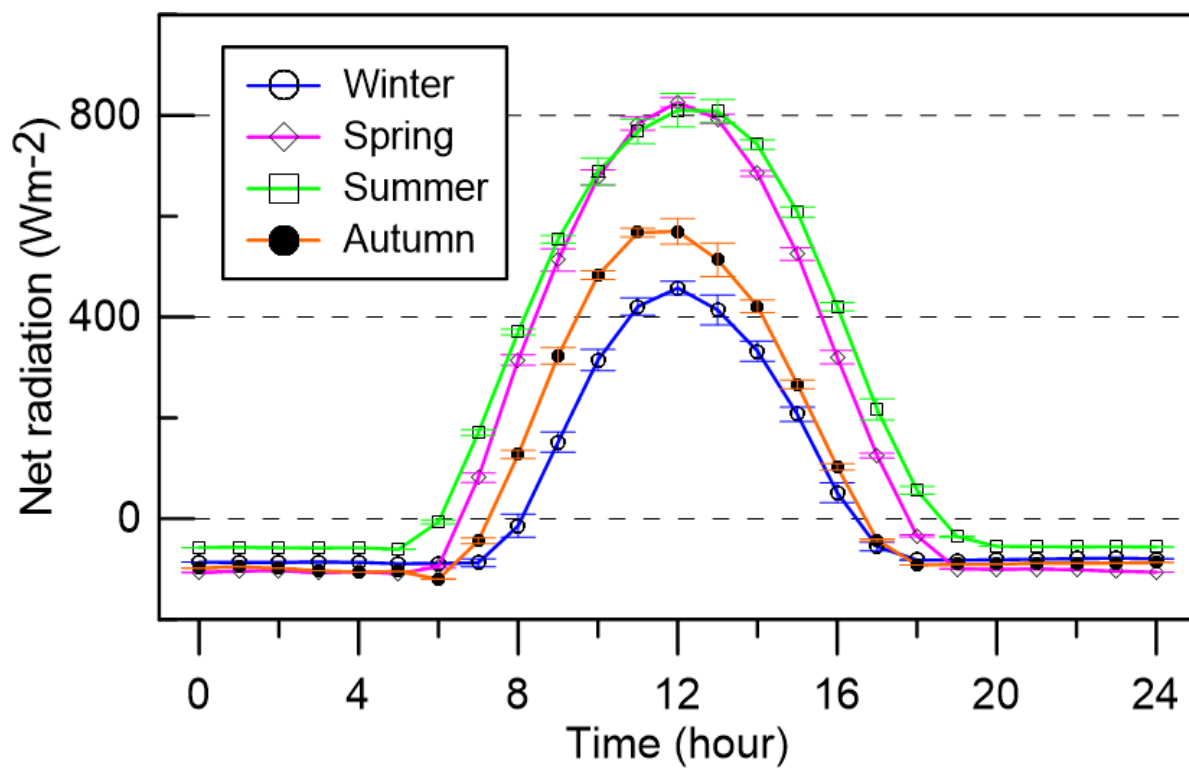
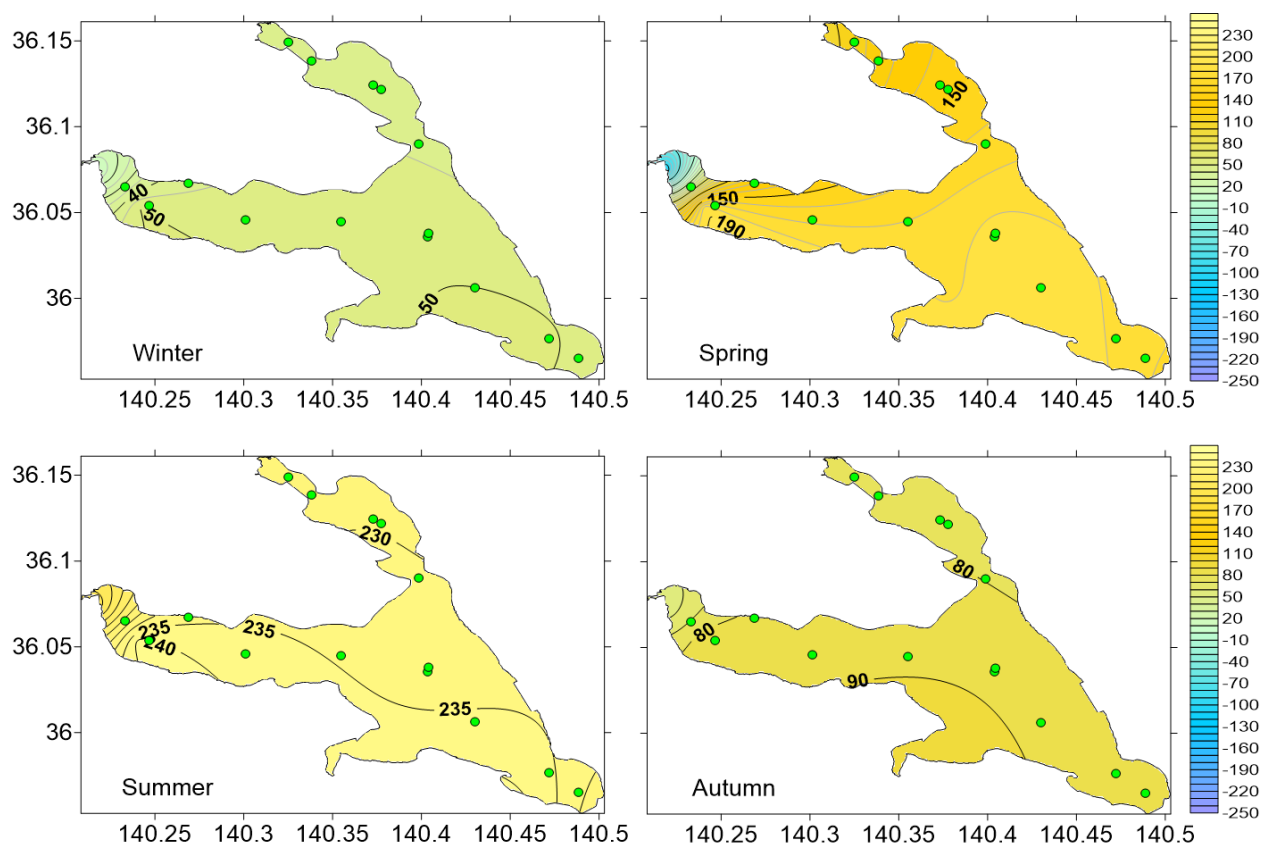


図 47 R_n (晴)の空間分布(日平均)と時間変化

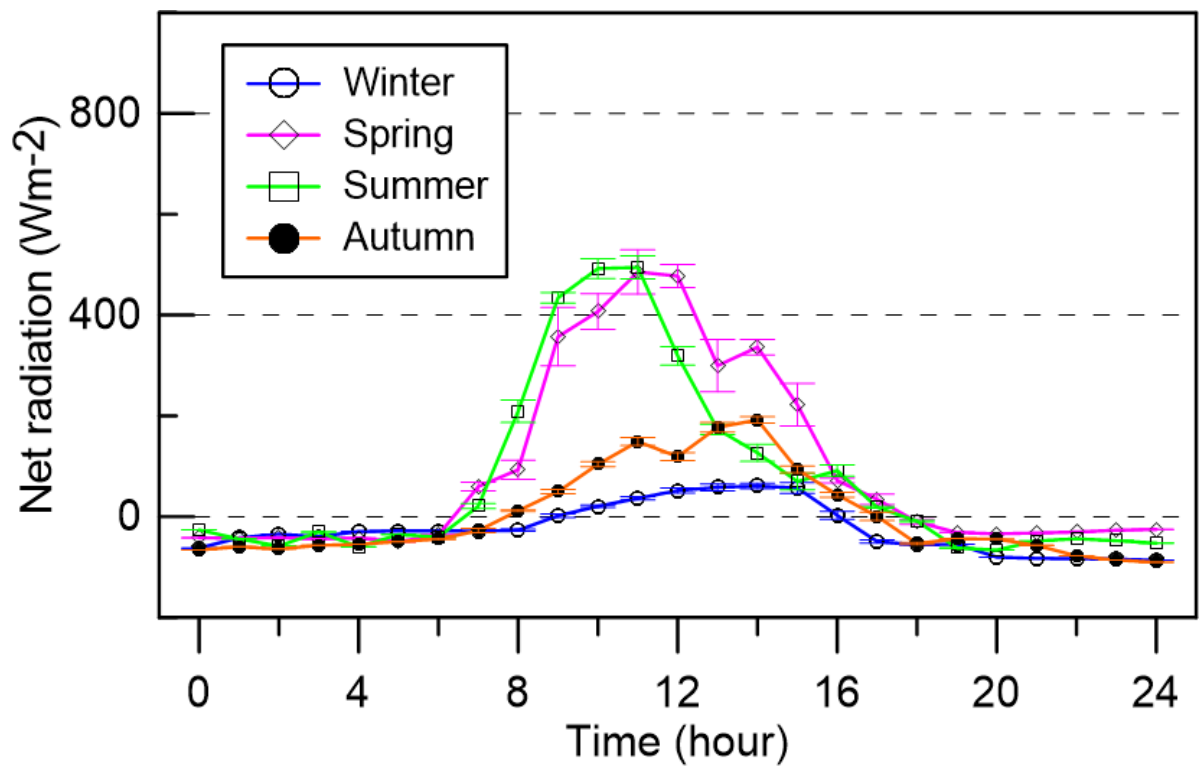
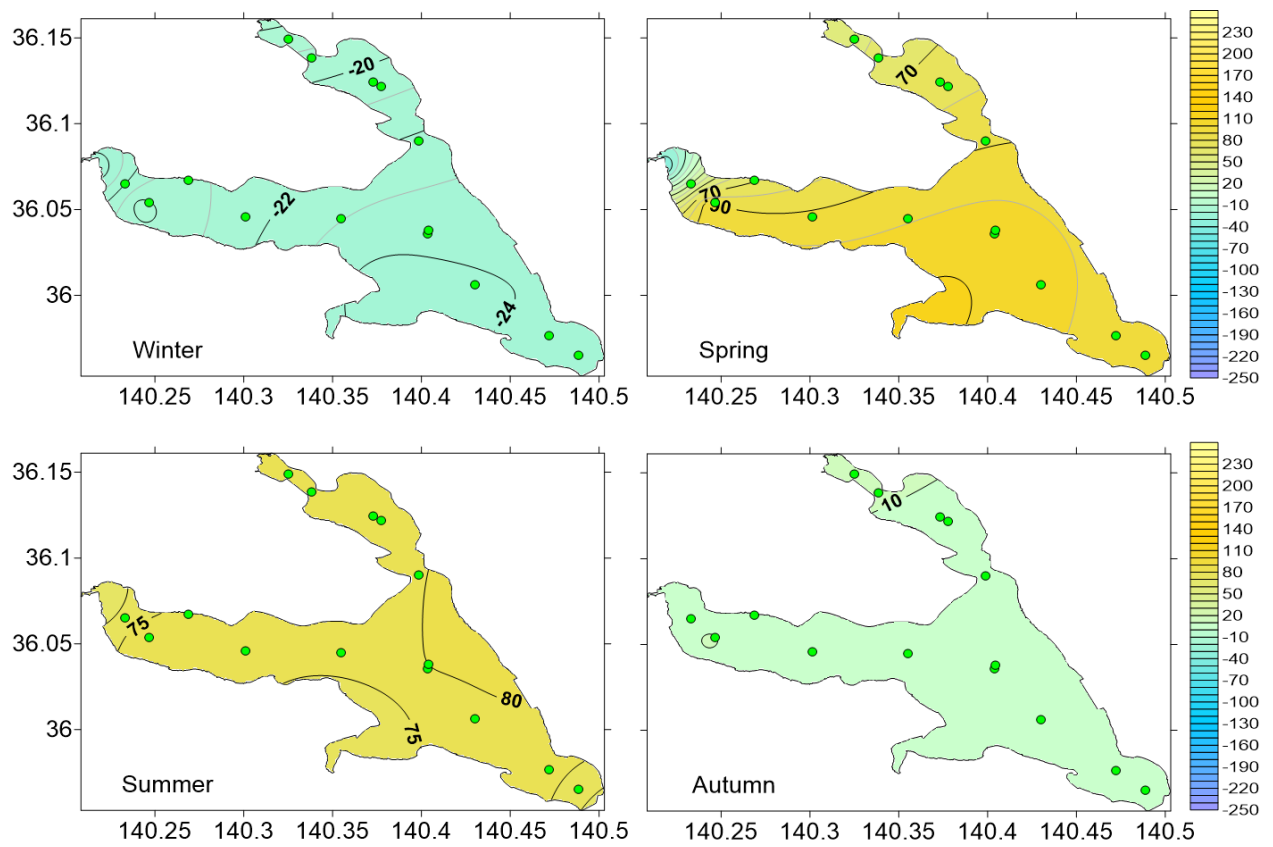
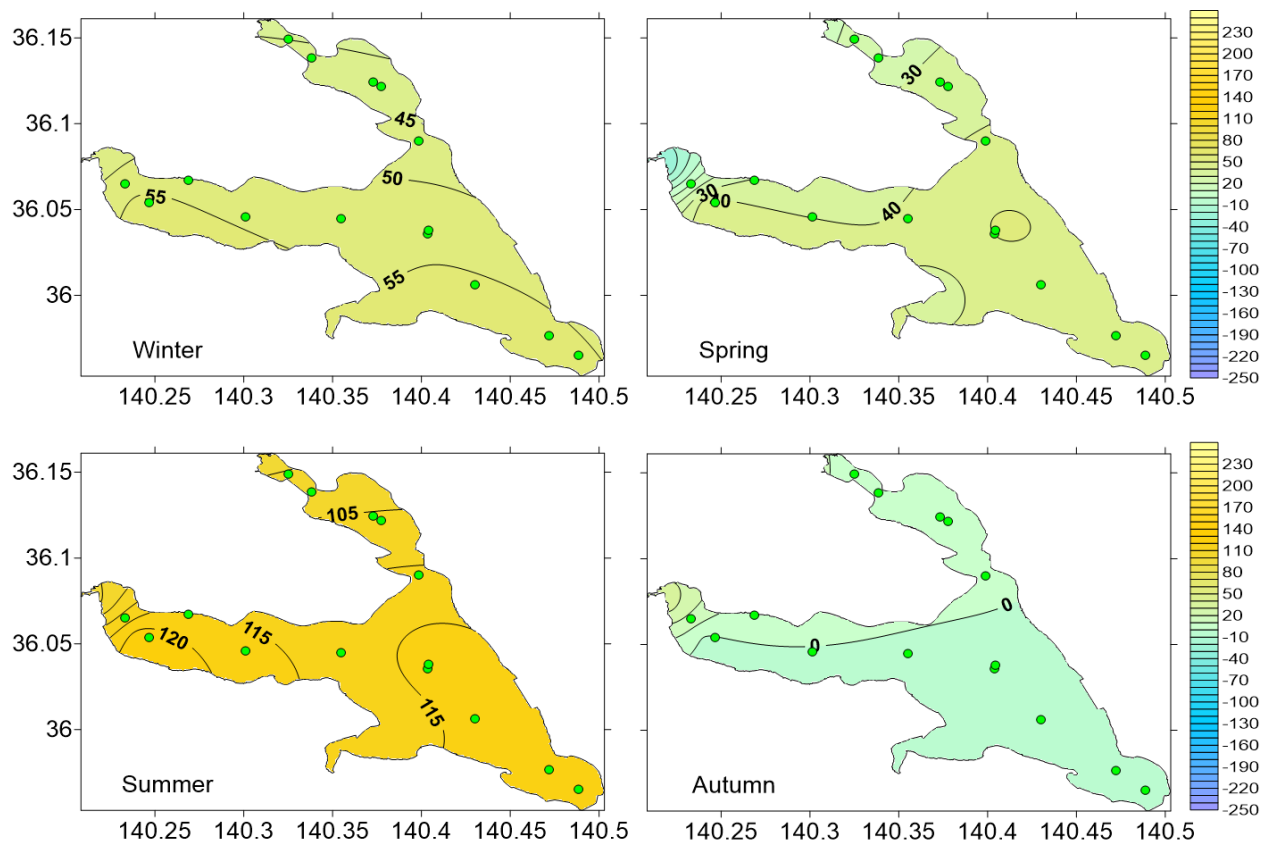


図 48 $Rn(\text{曇})$ の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て Wm^{-2} である.

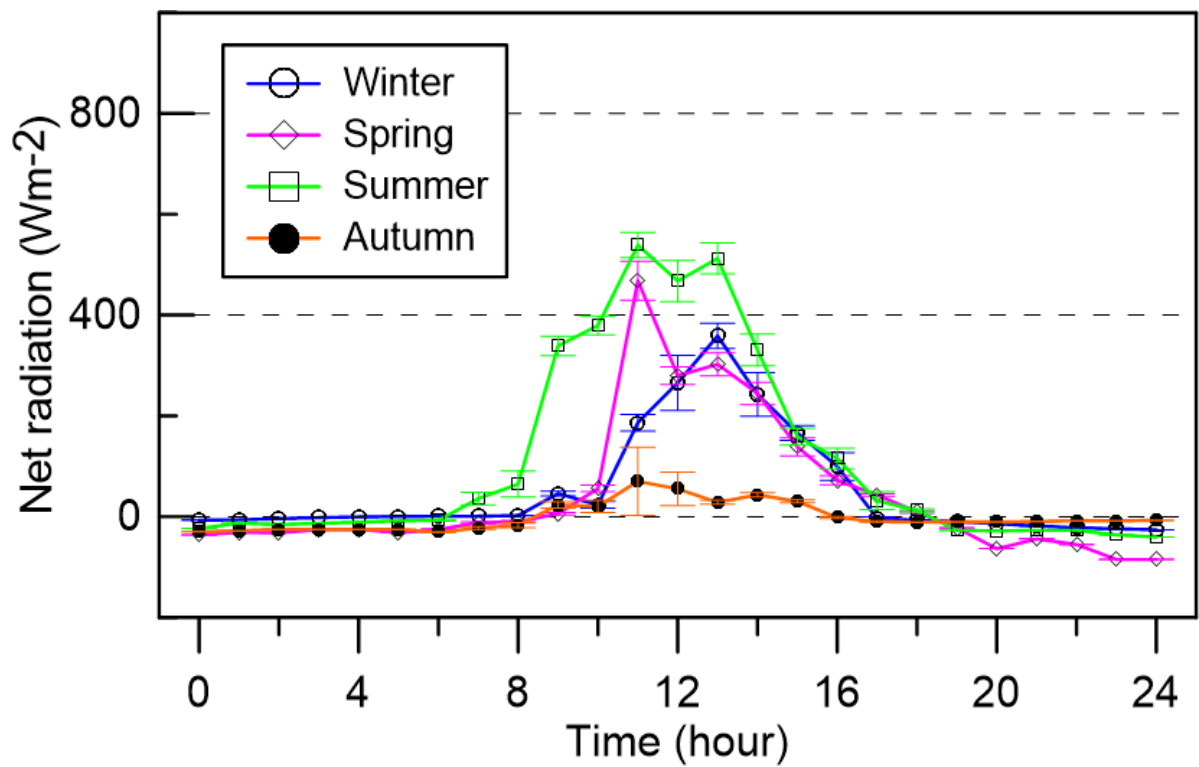
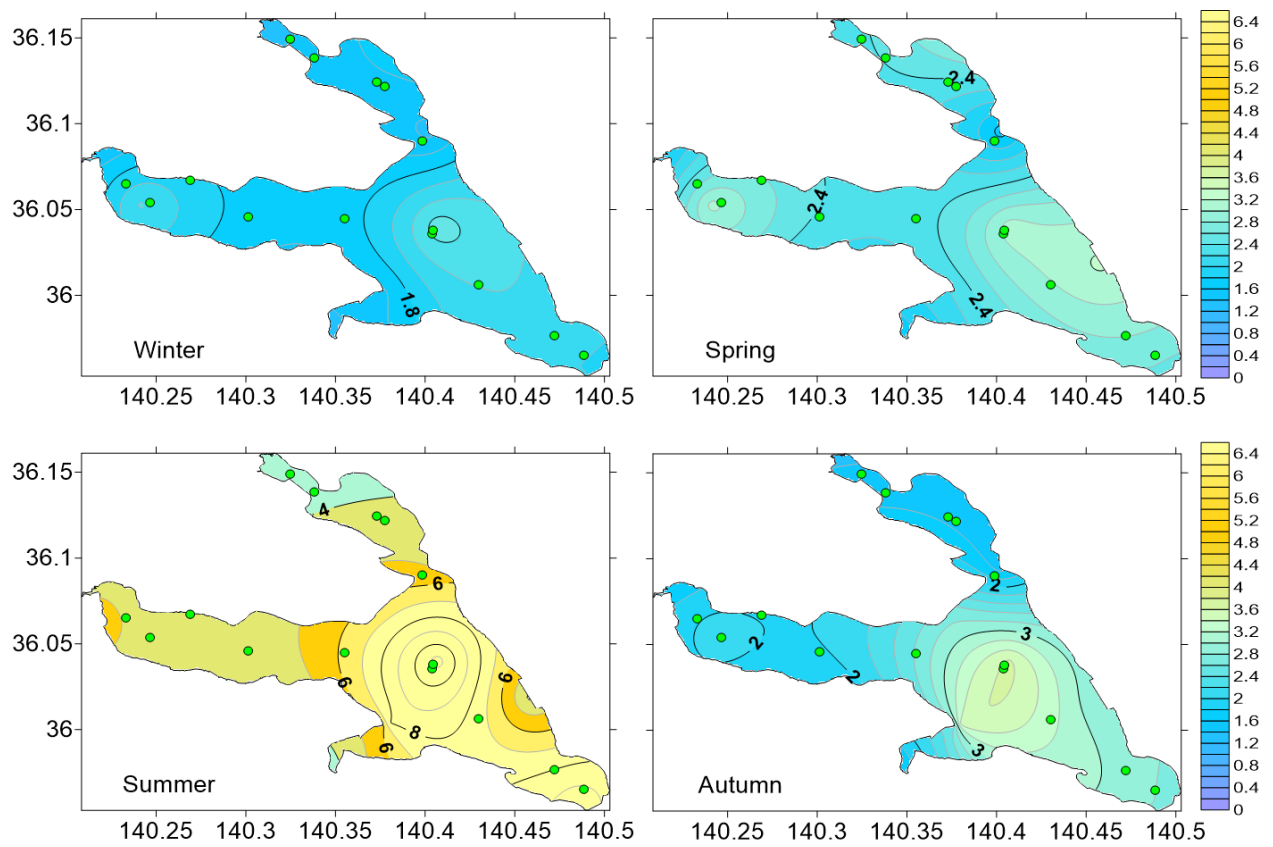


図 49 R_n (雨)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て ms^{-1} である.

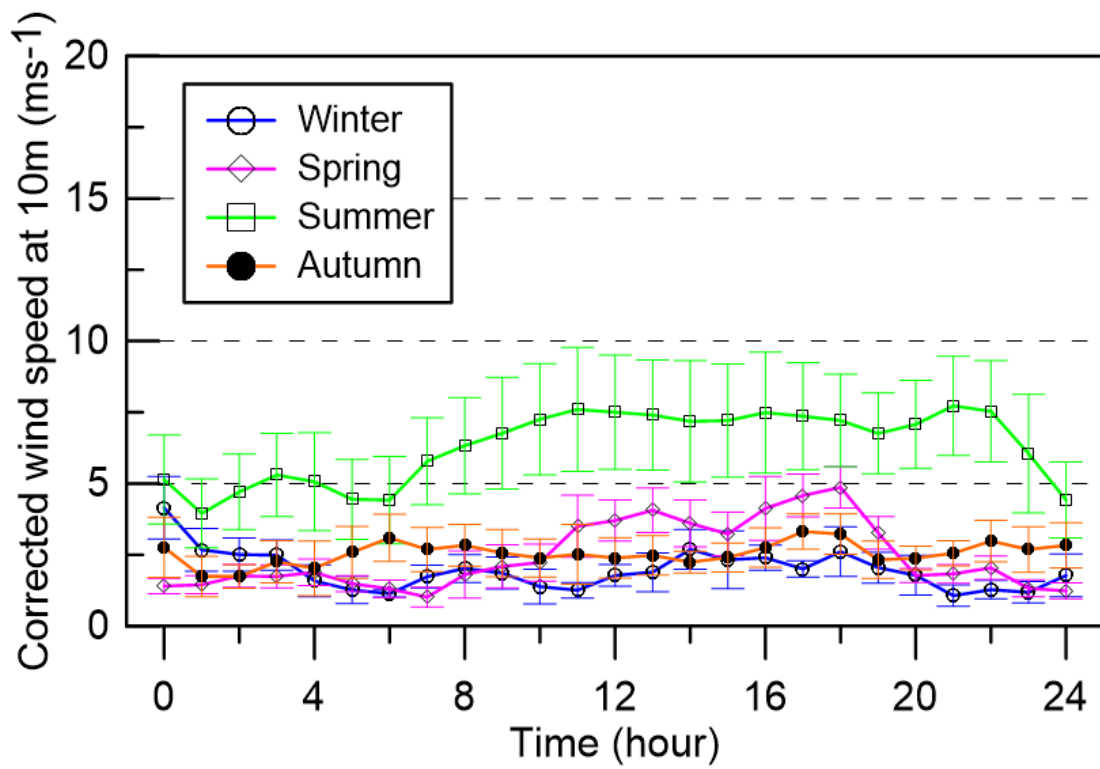
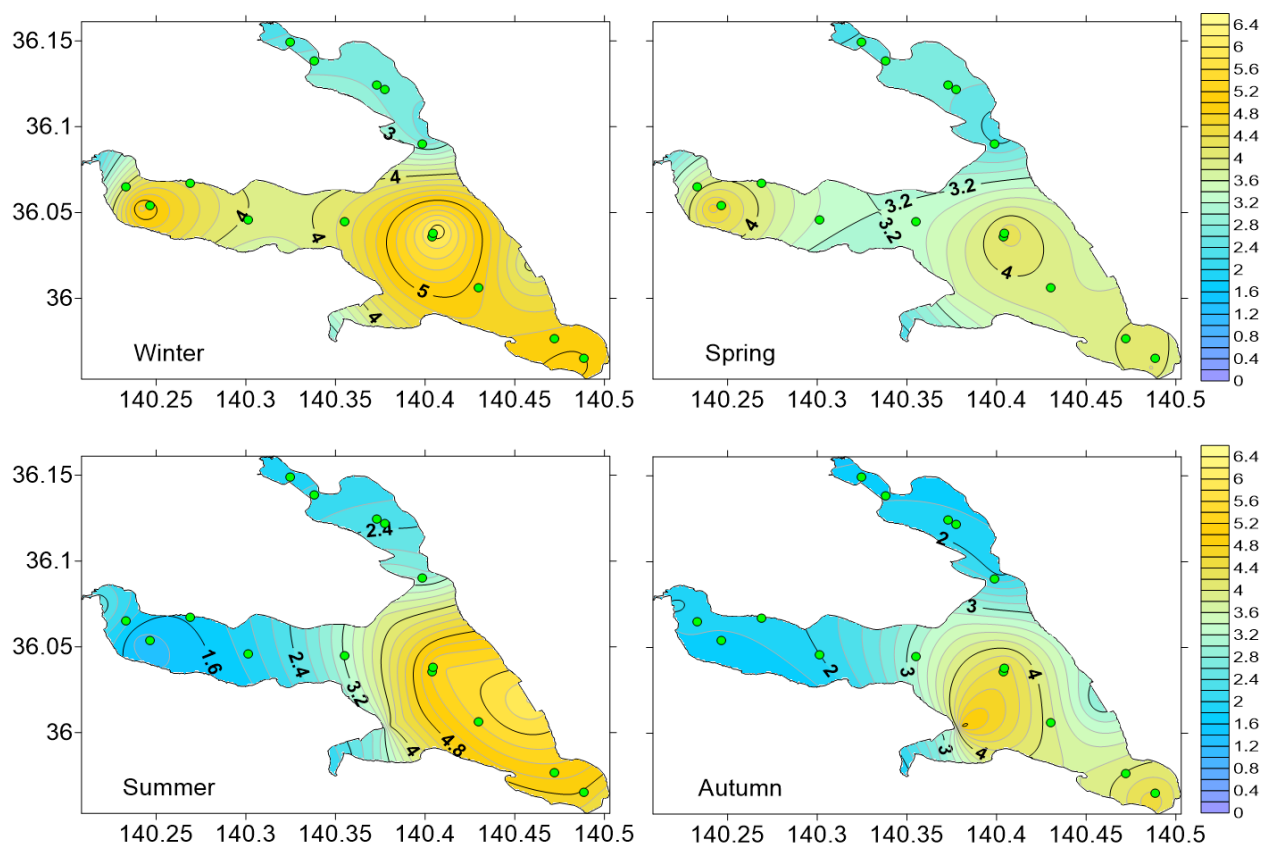


図 50 U_{10} (晴)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て ms^{-1} である.

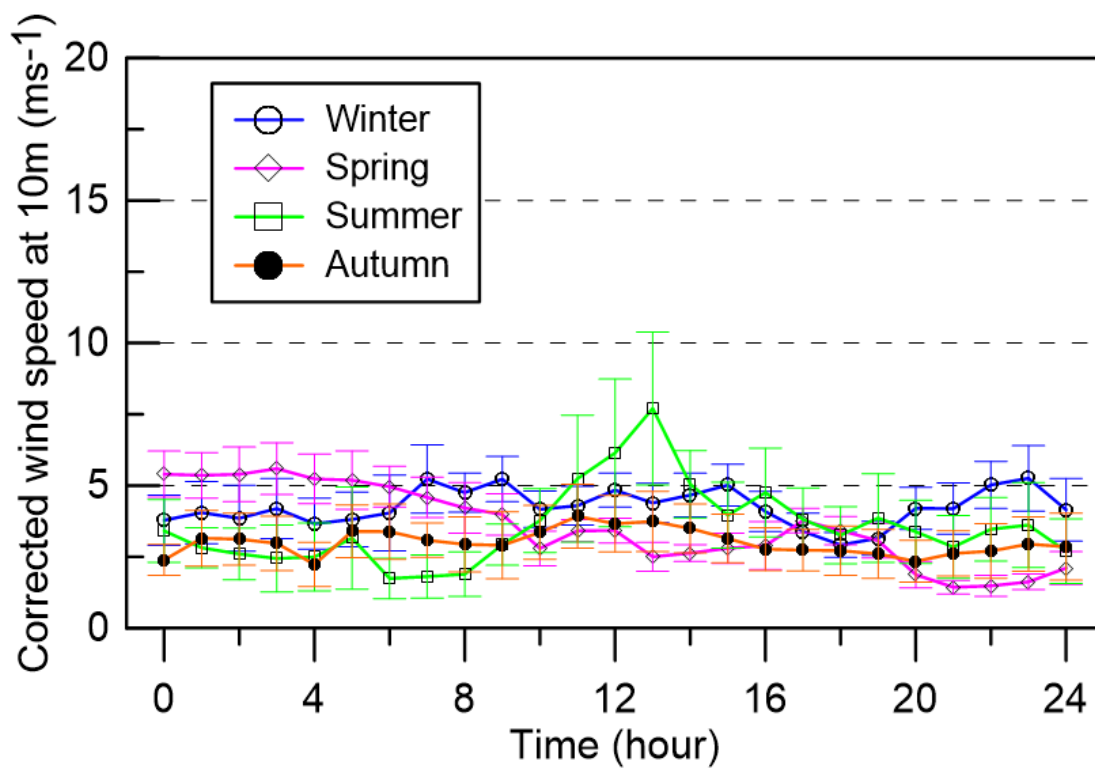
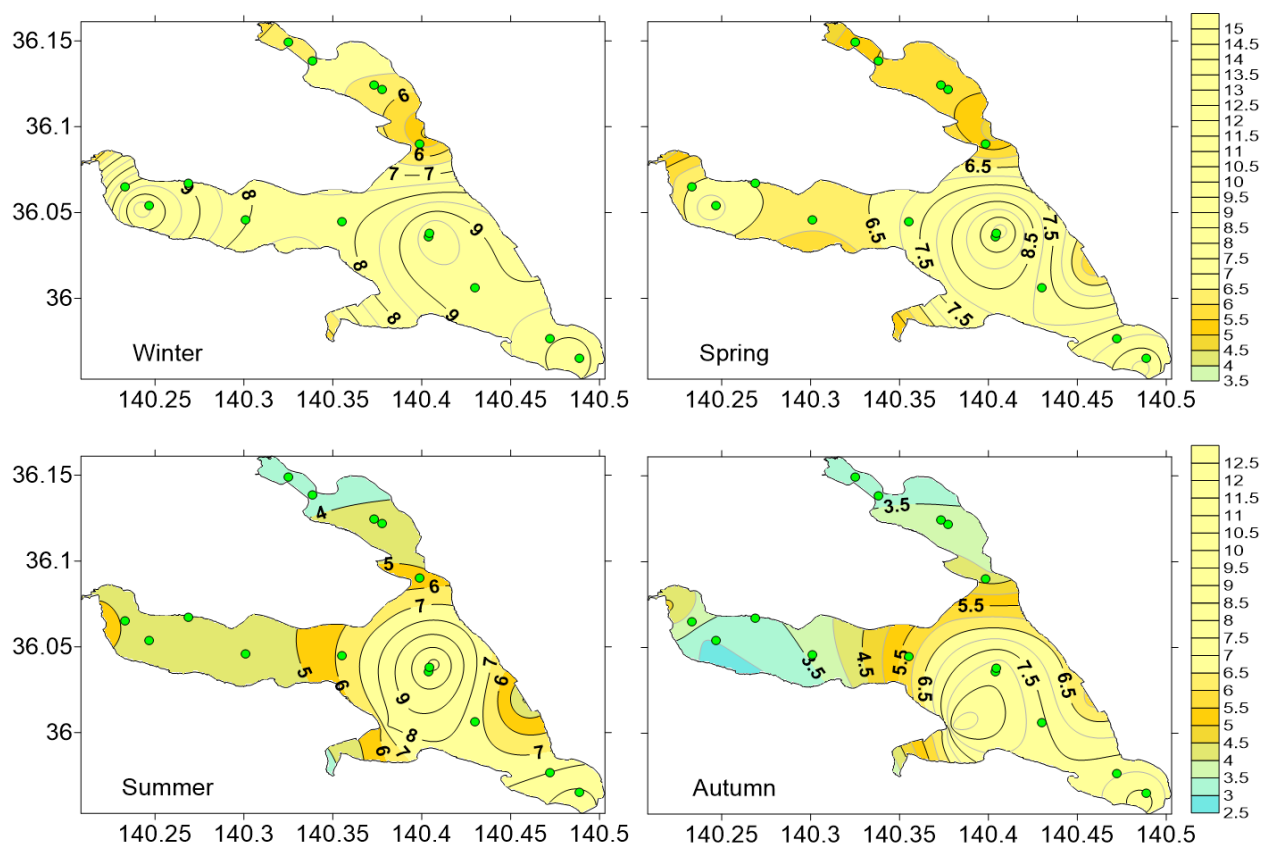


図 51 U_{10} (曇) の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て ms^{-1} である。

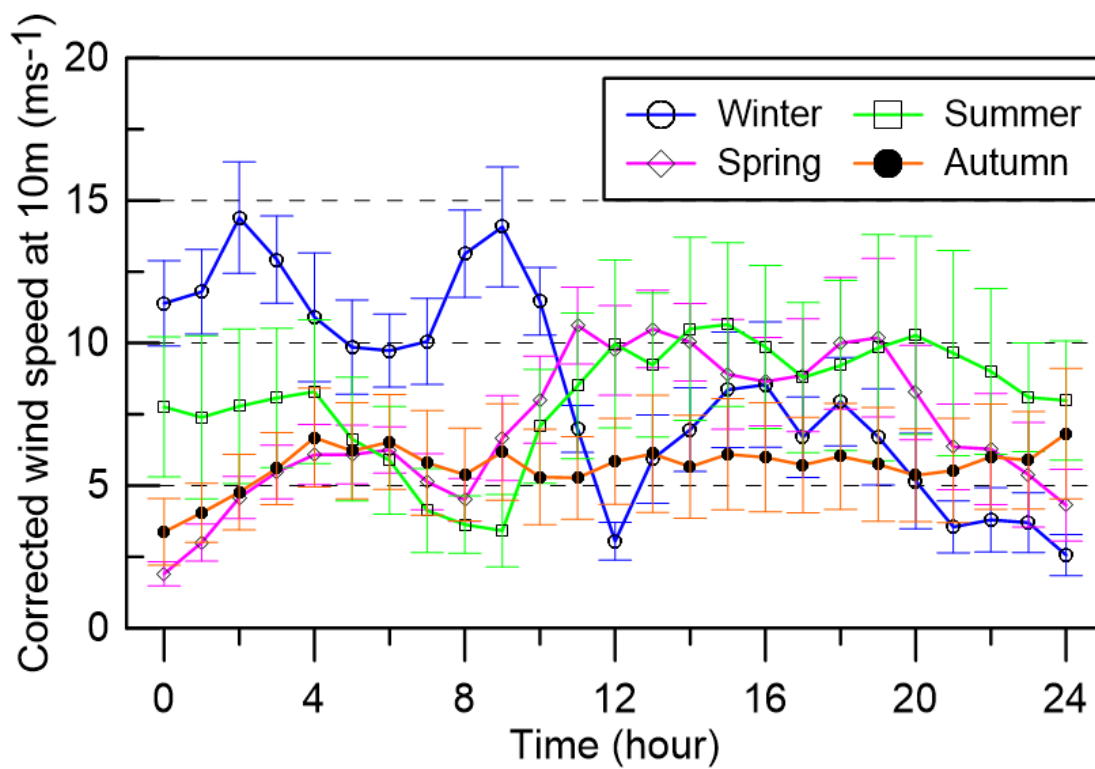


図 52 U_{10} (雨) の空間分布(日平均)と時間変化

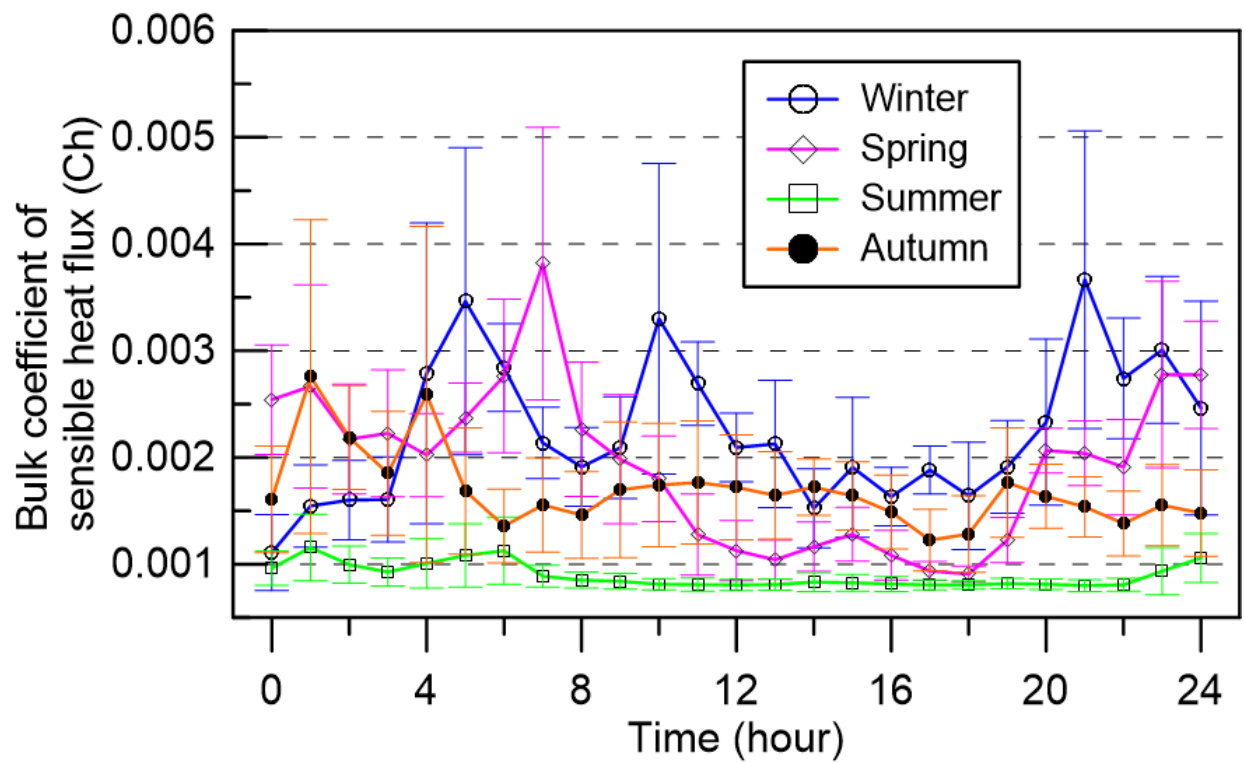
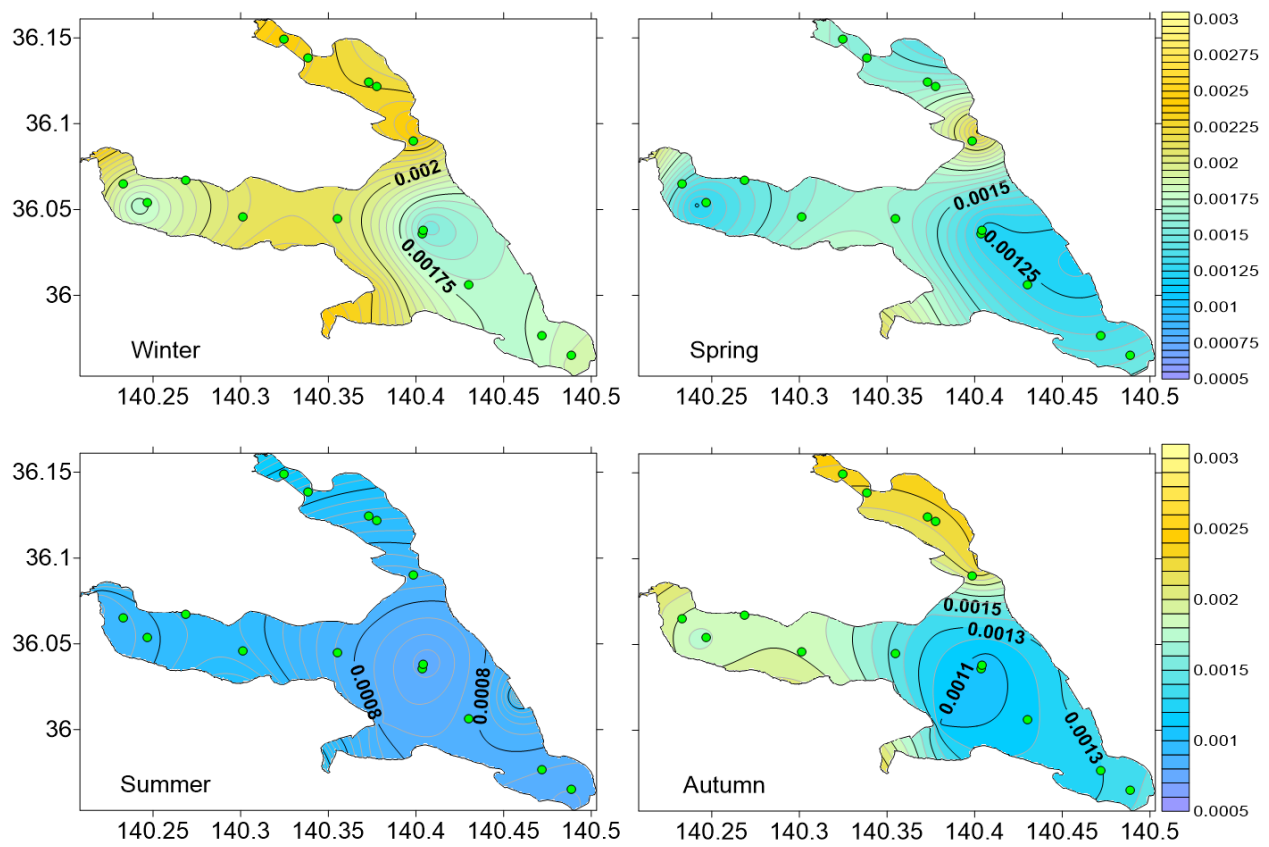


図 53 Ch (晴)の空間分布(日平均)と時間変化

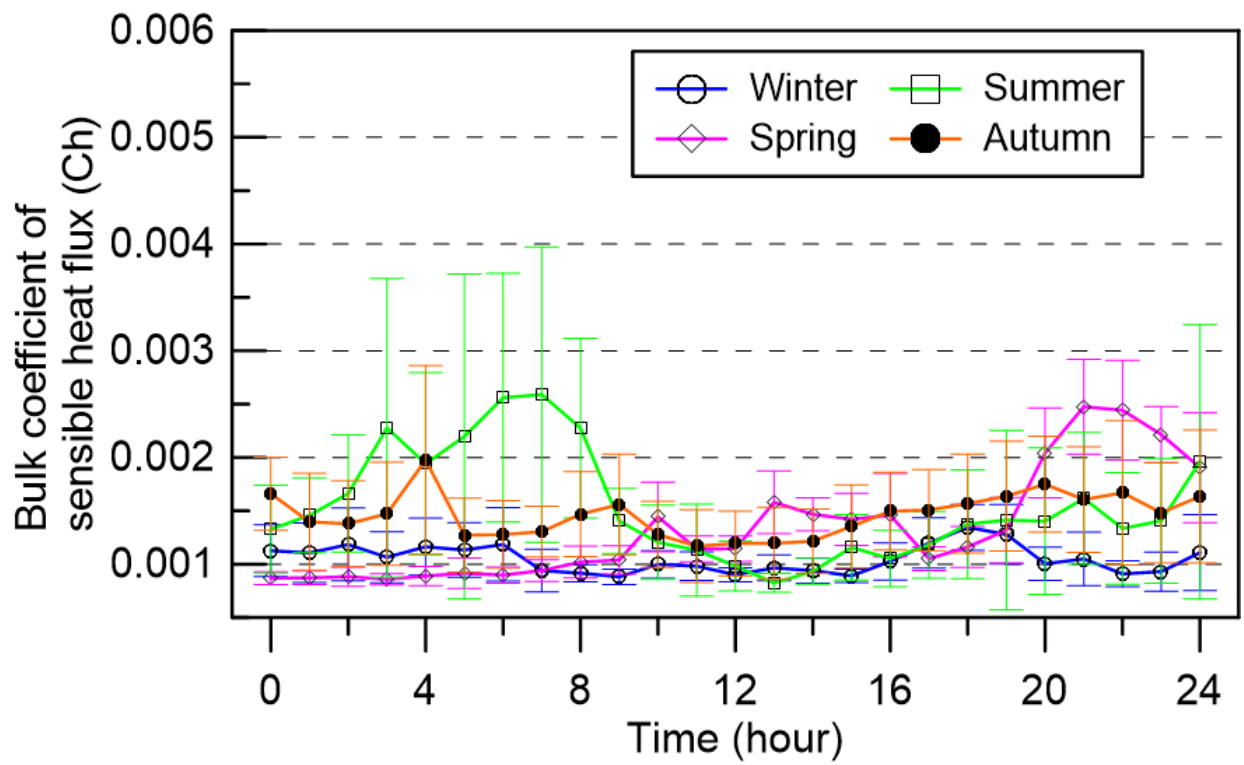
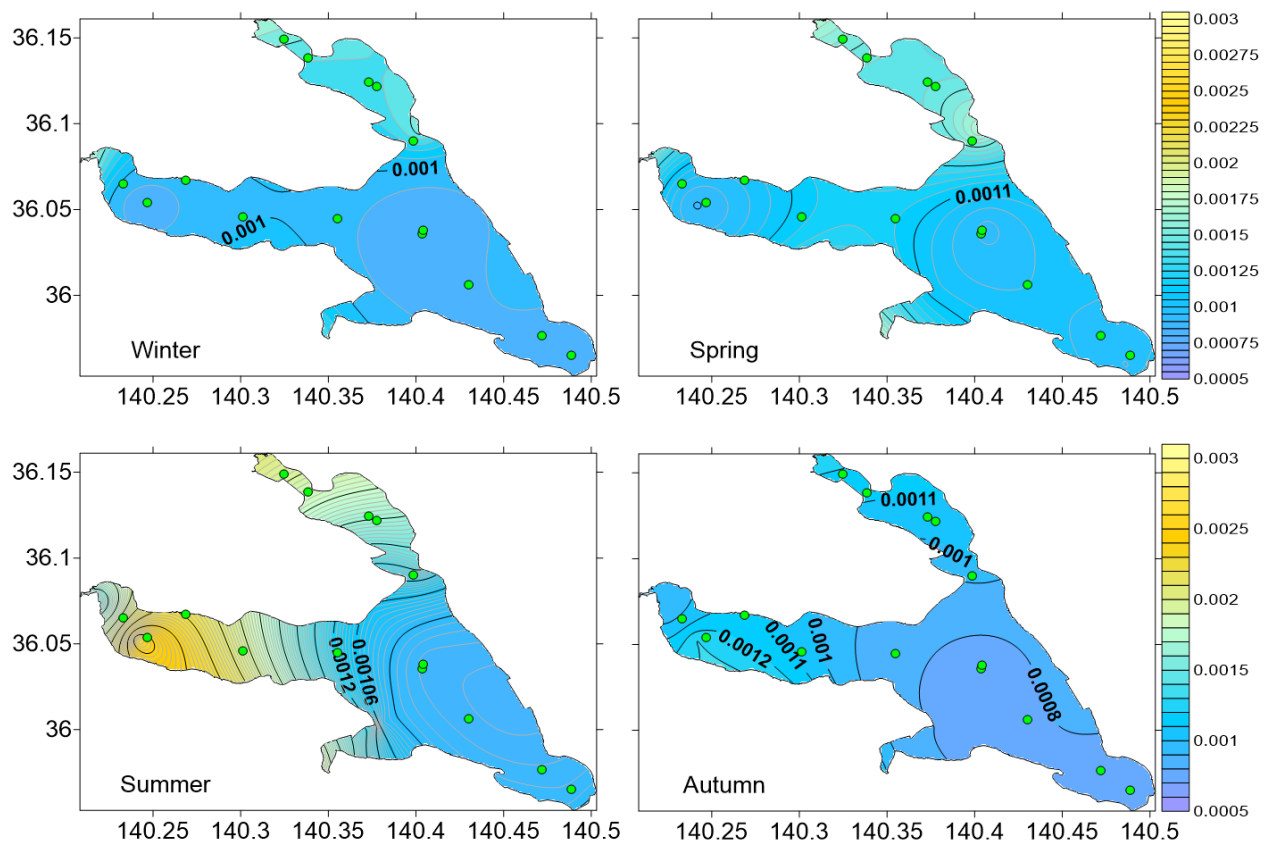


図 54 Ch (曇)の空間分布(日平均)と時間変化

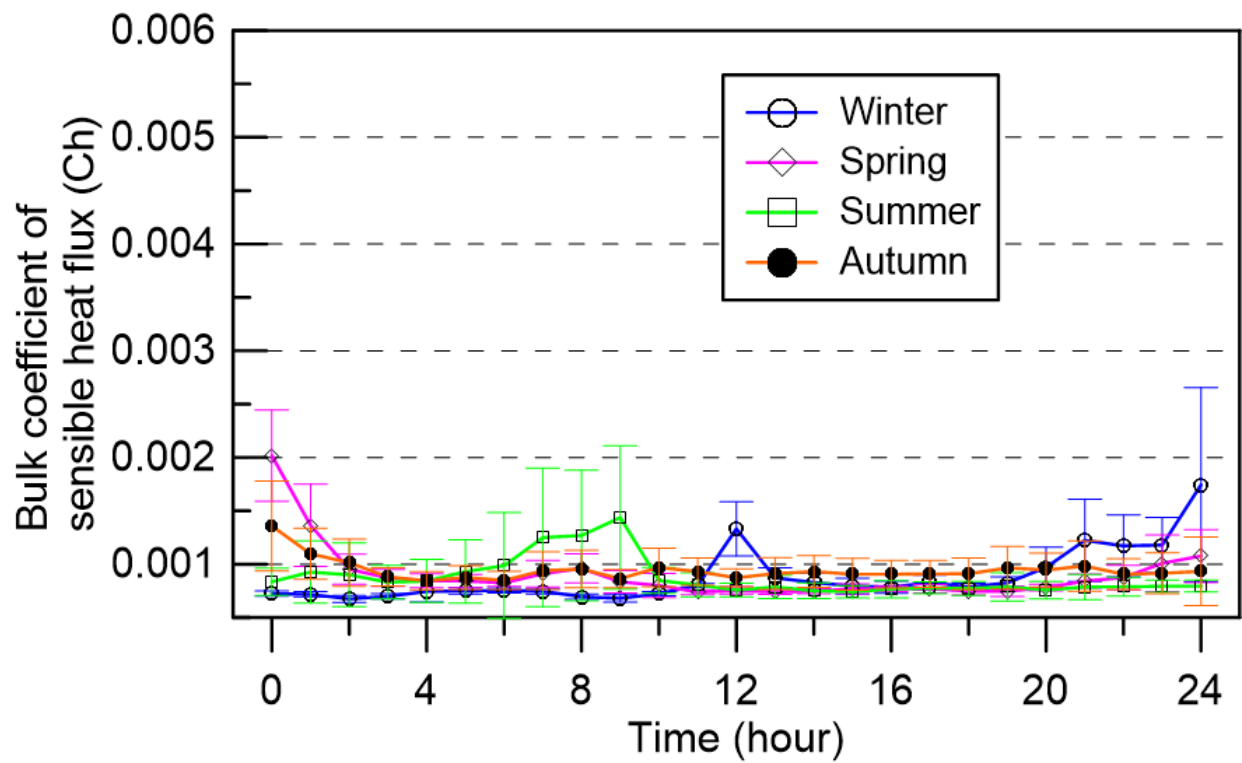
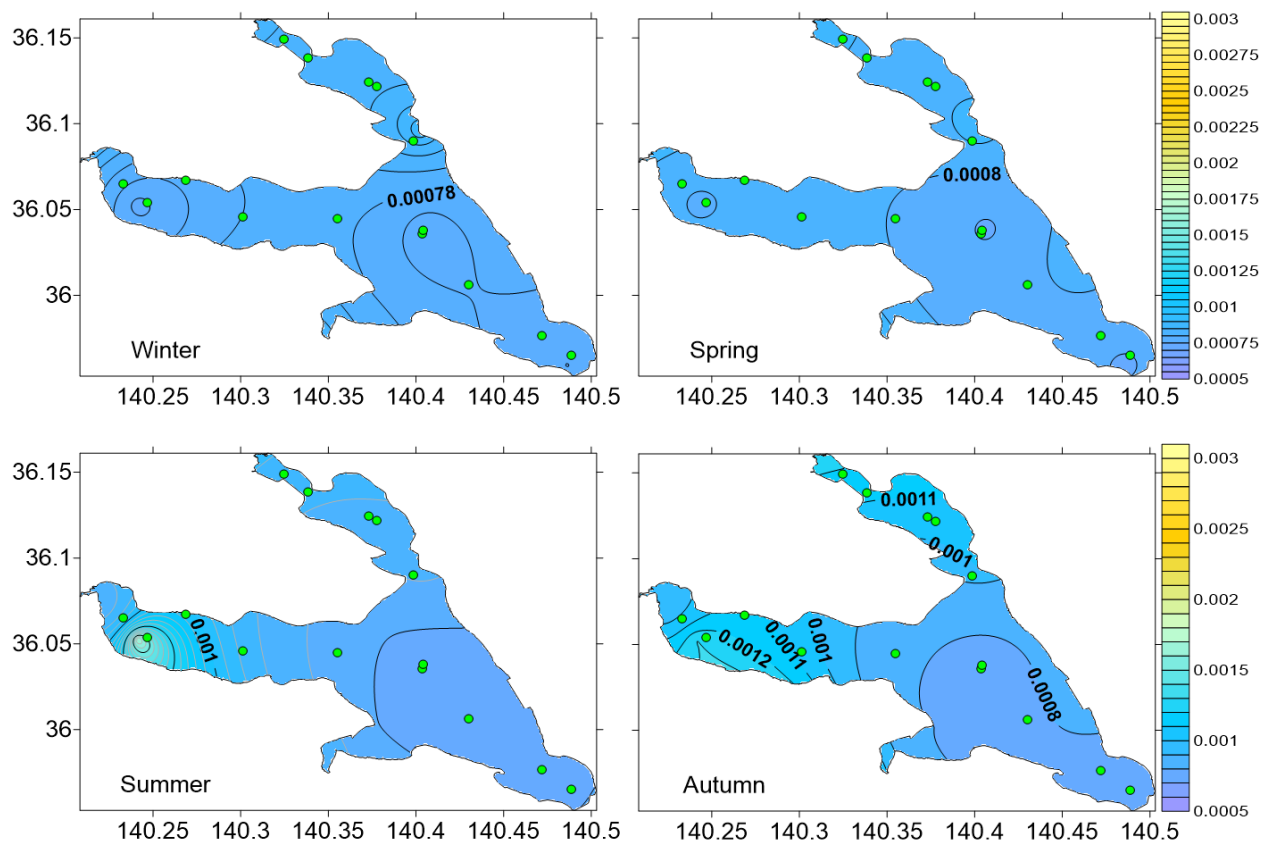


図 55 Ch (雨)の空間分布(日平均)と時間変化

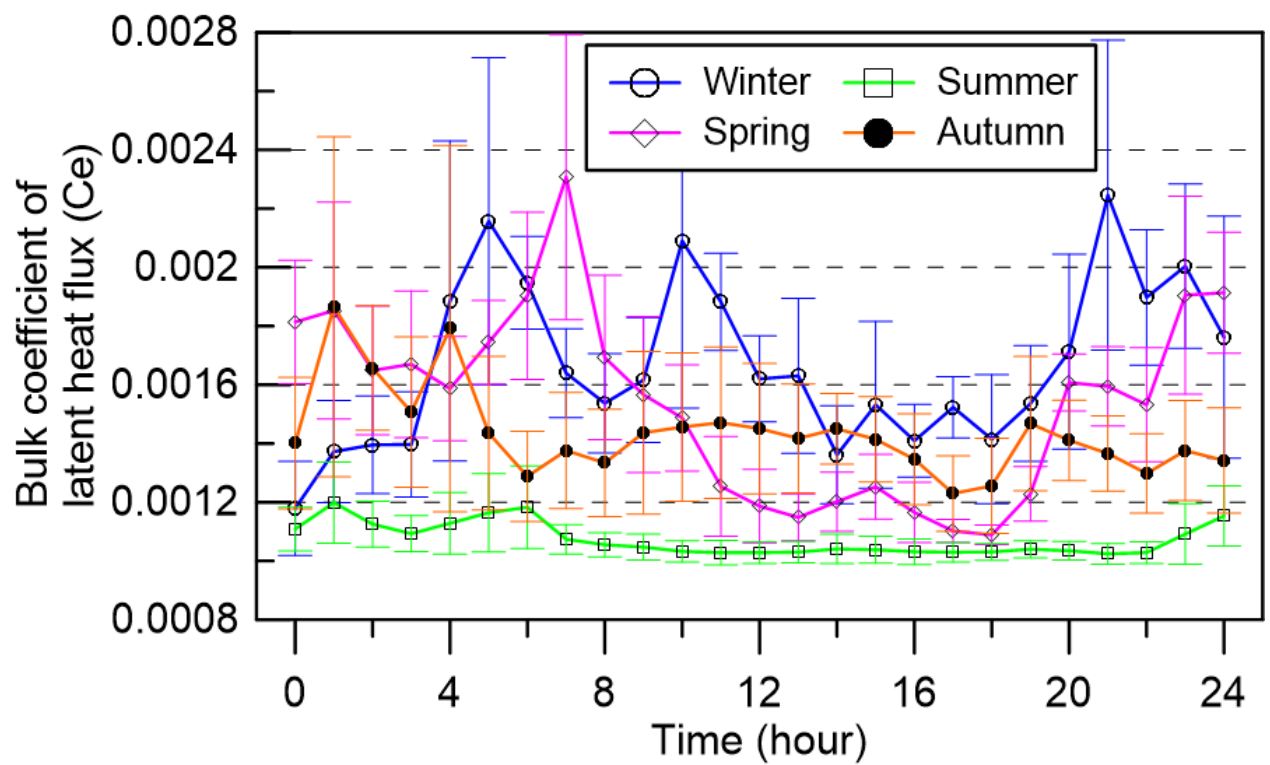
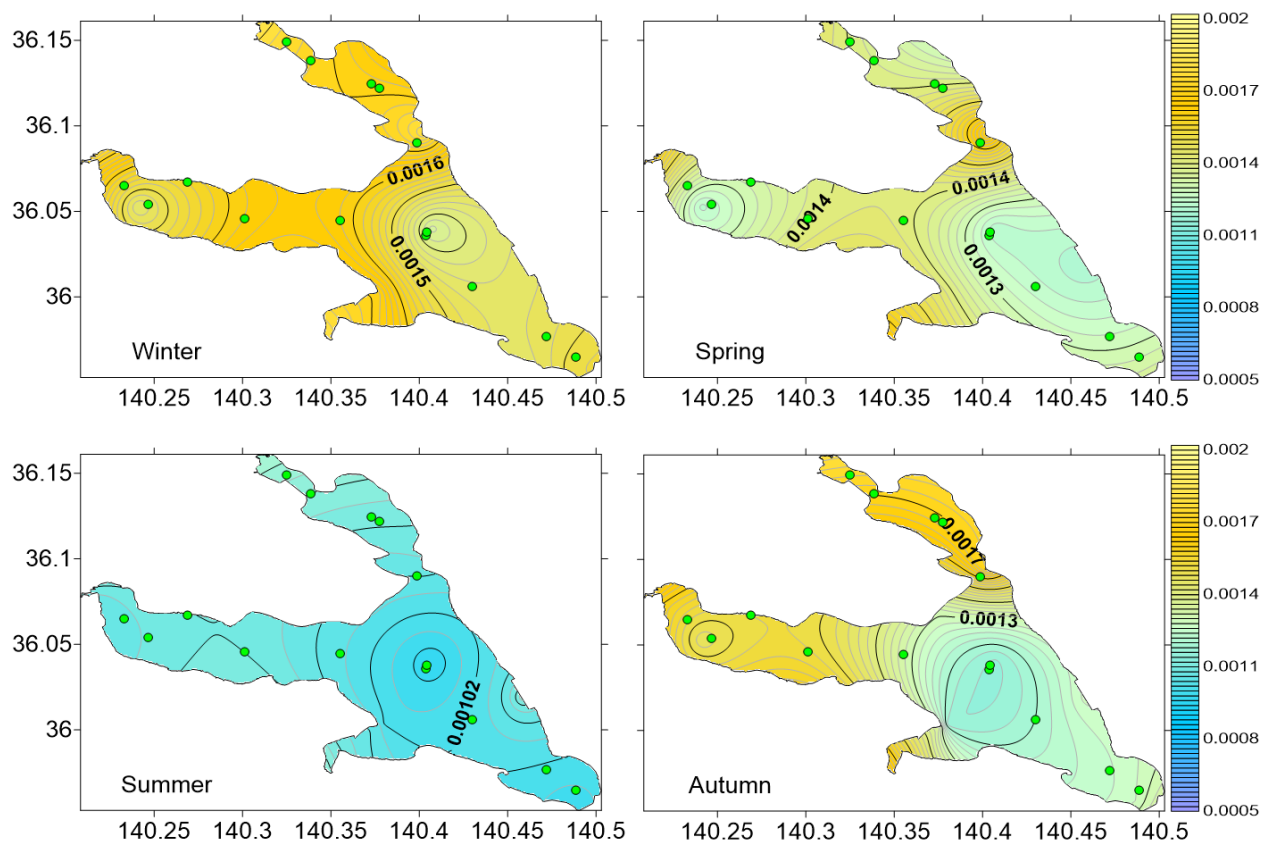


図 56 Ce (晴)の空間分布(日平均)と時間変化

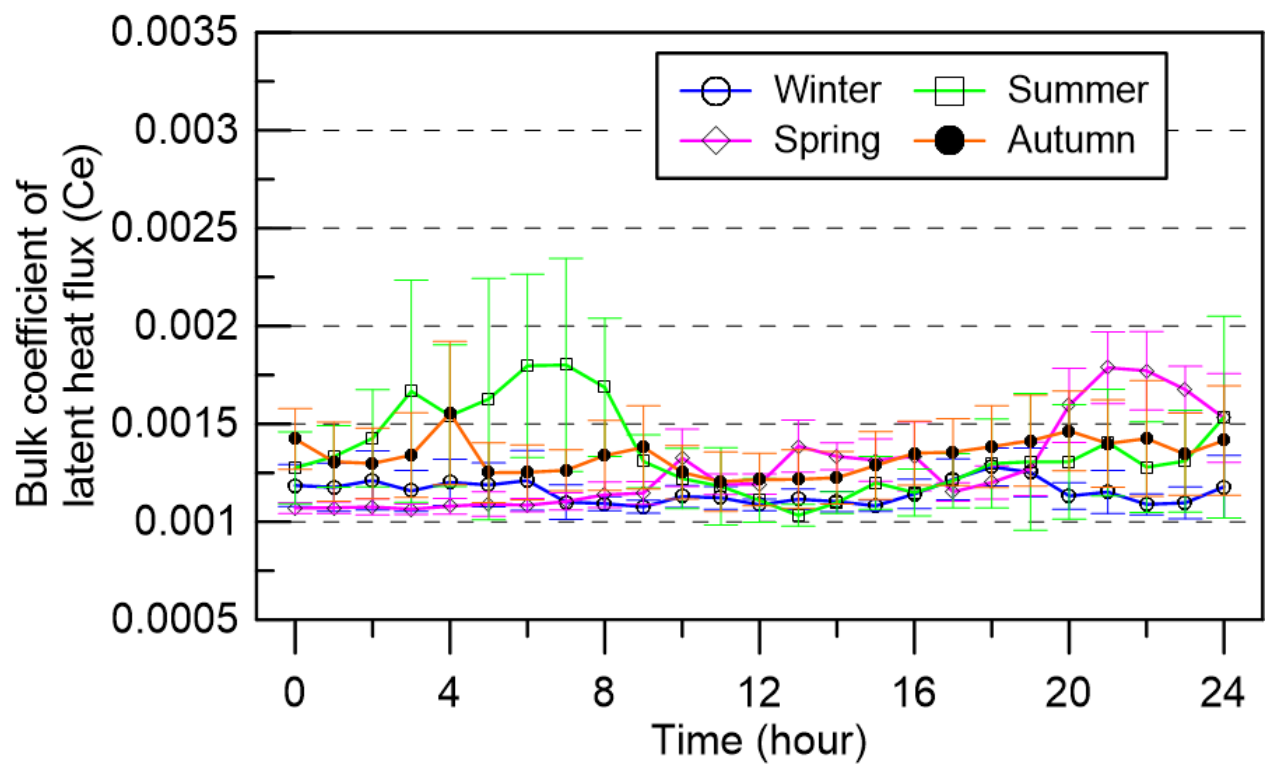
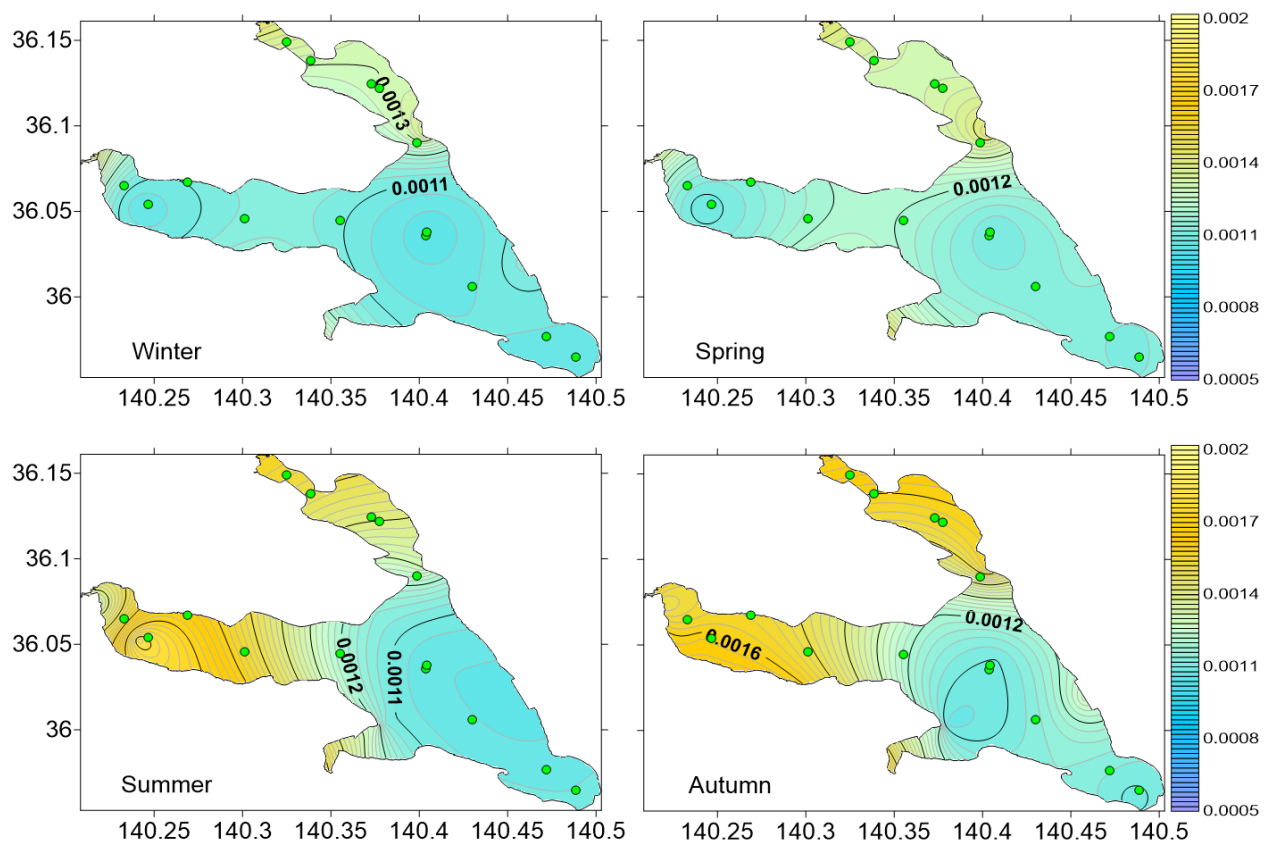


図 57 C_e (曇)の空間分布(日平均)と時間変化

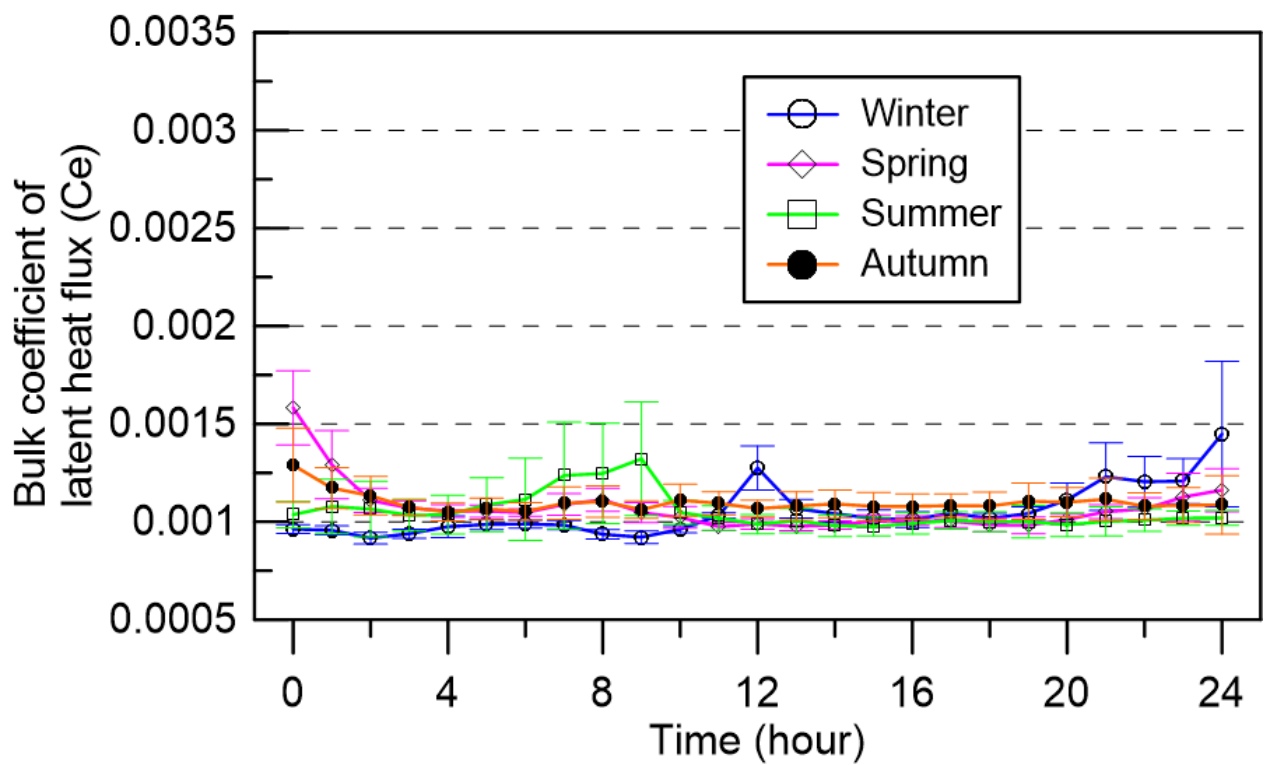
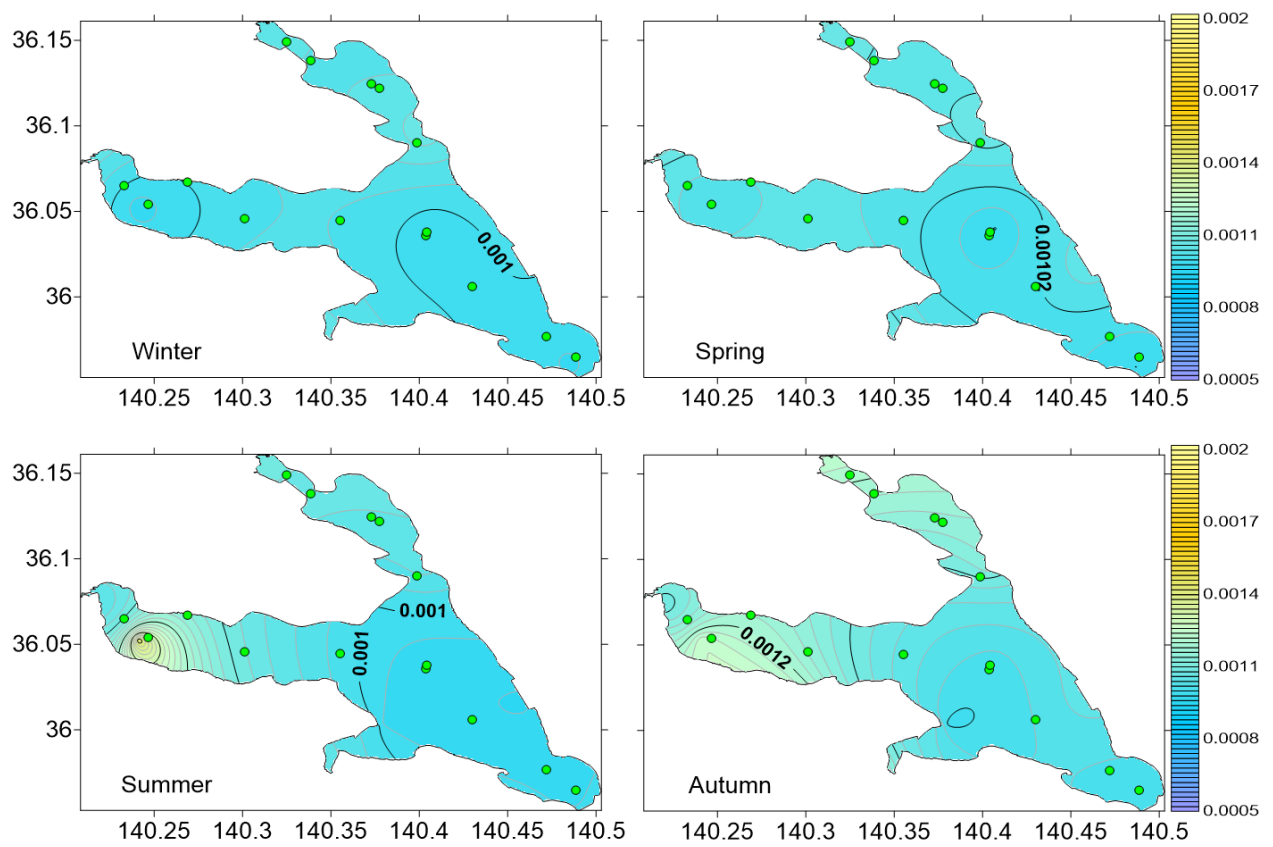


図 58 C_e (雨)の空間分布(日平均)と時間変化

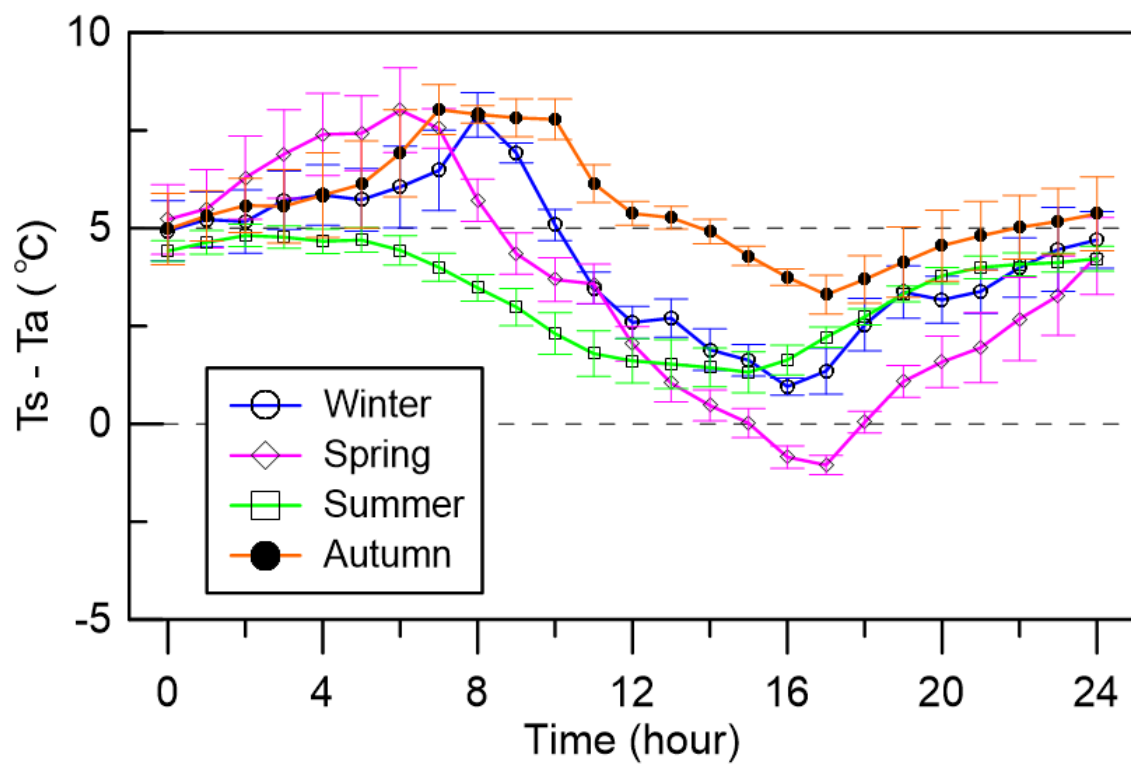
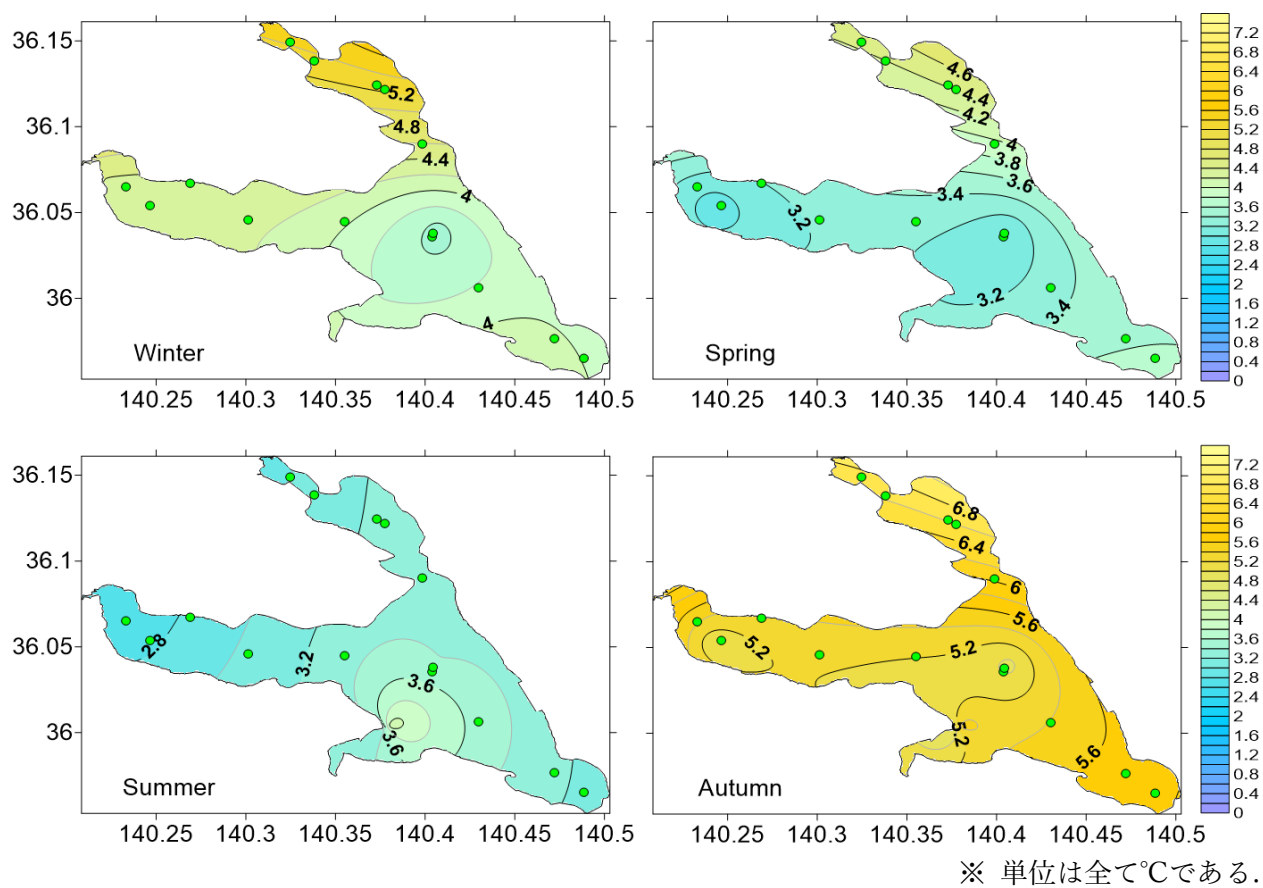


図 59 $T_s - T_a$ (晴)の空間分布(日平均)と時間変化

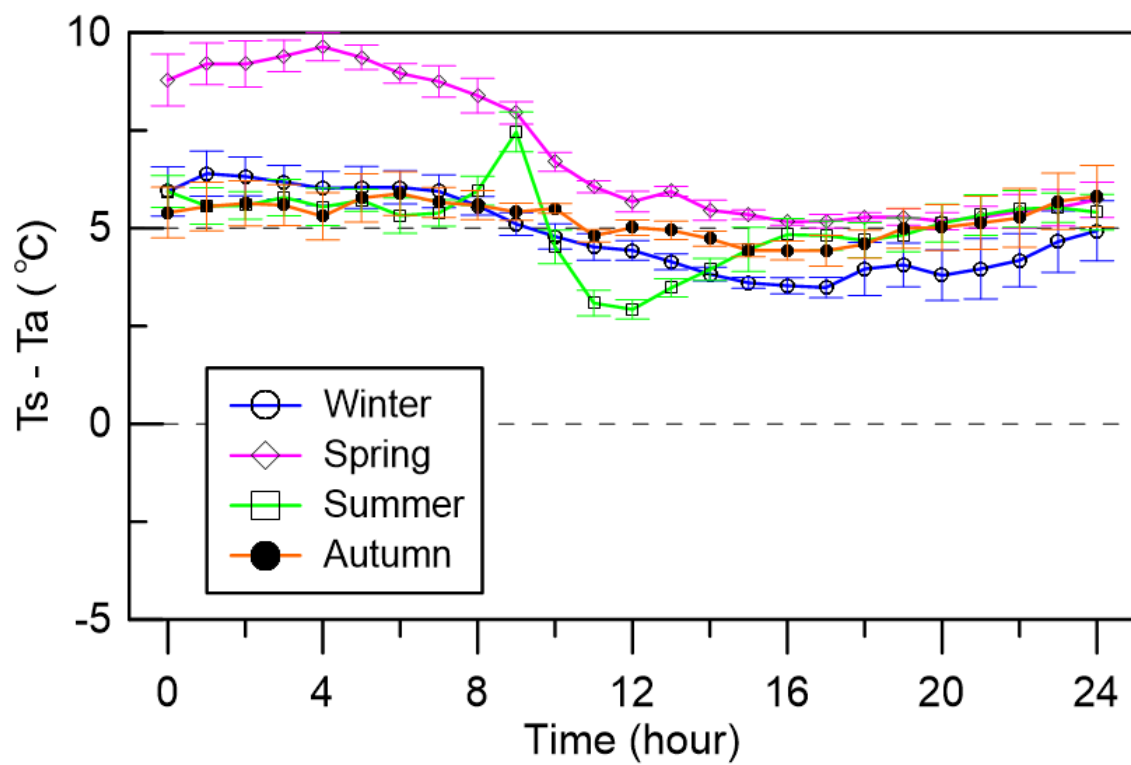
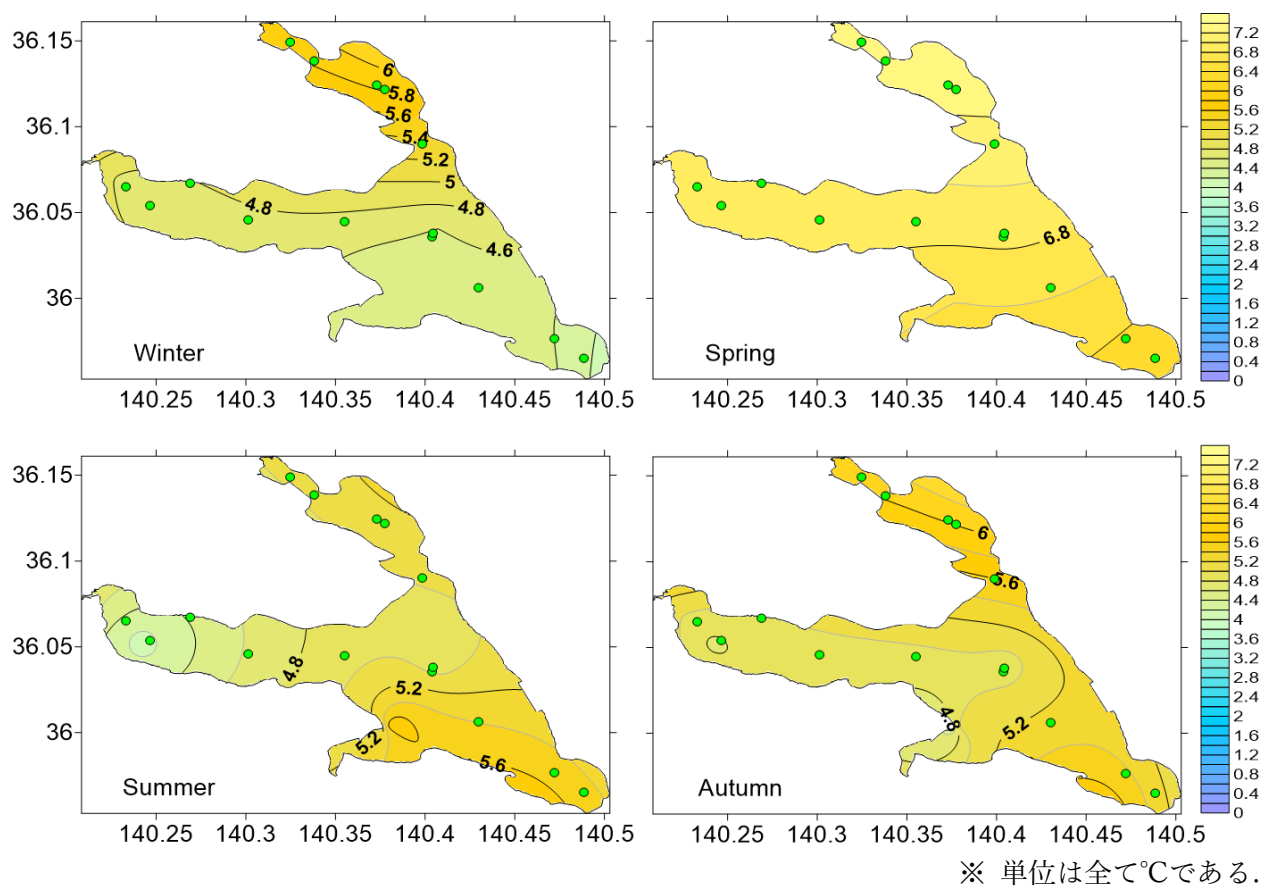
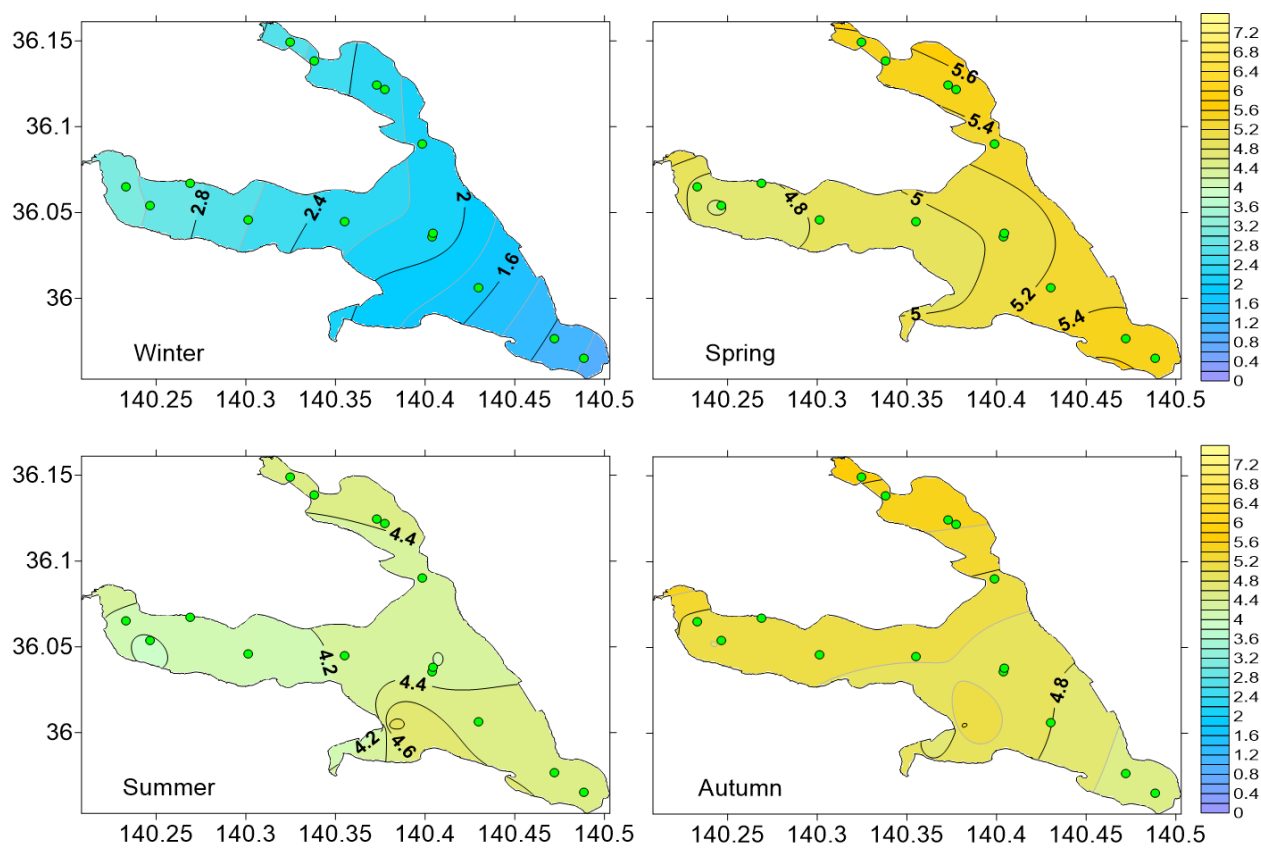


図 60 $T_s - T_a$ (曇)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て $^{\circ}\text{C}$ である。

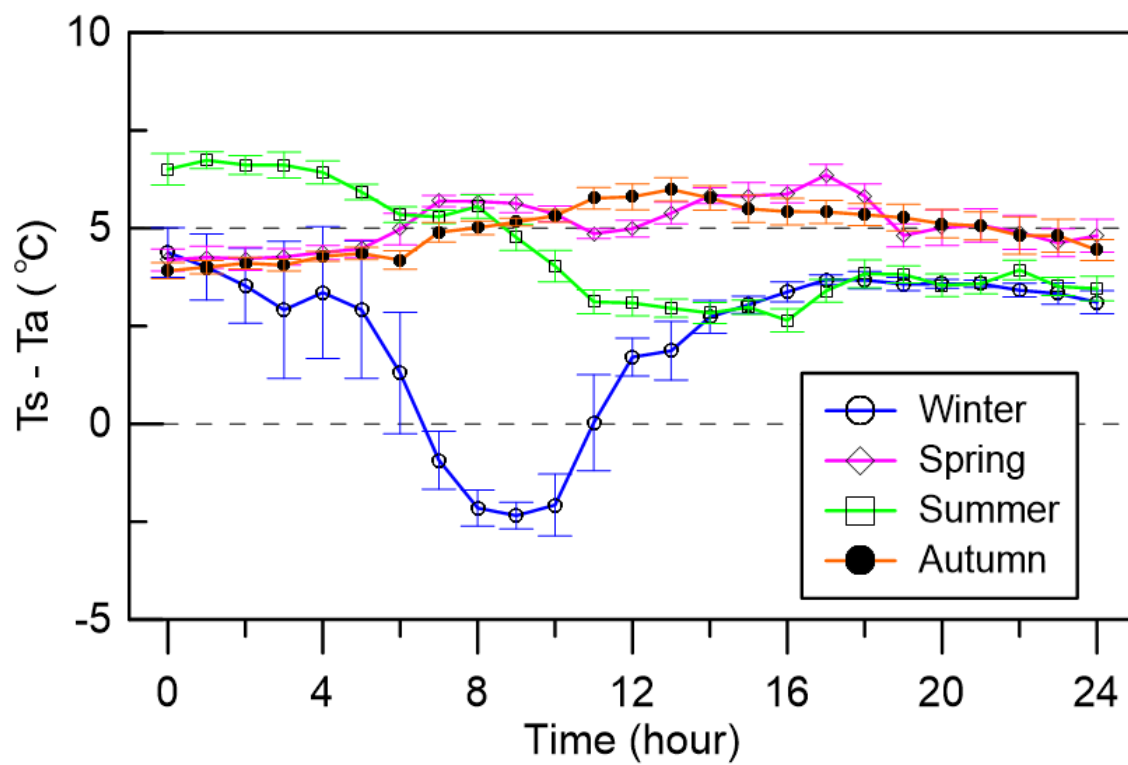
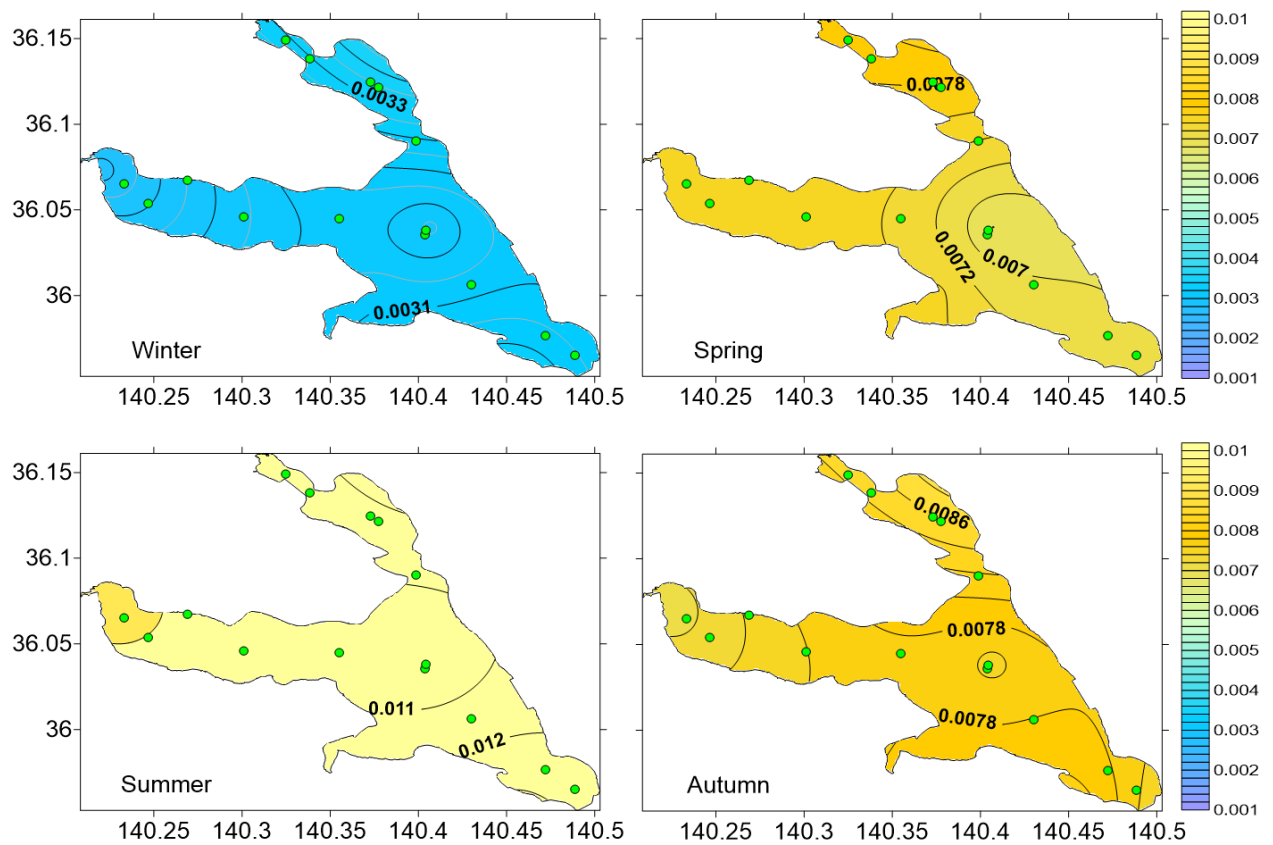


図 61 $T_s - T_a$ (雨)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て kg kg^{-1} である。

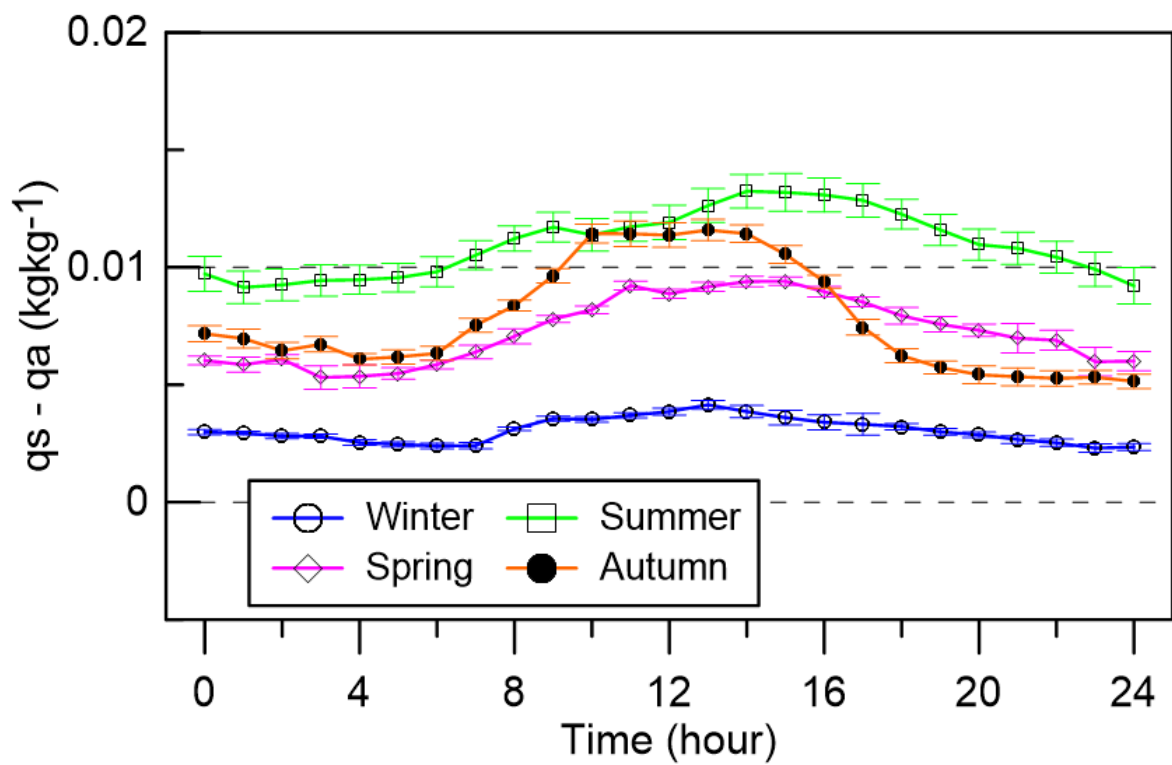
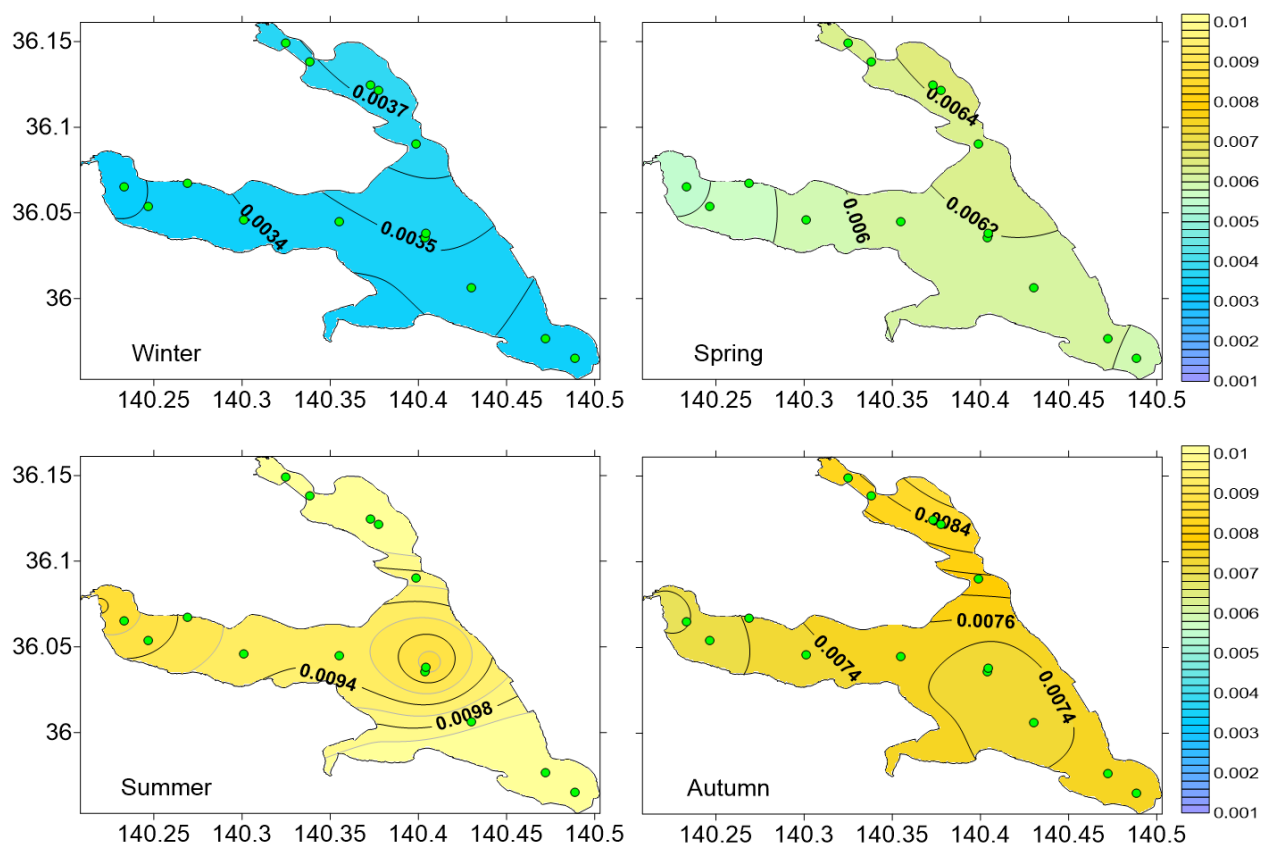


図 62 $q_s - q_a$ (晴)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て kgkg⁻¹である。

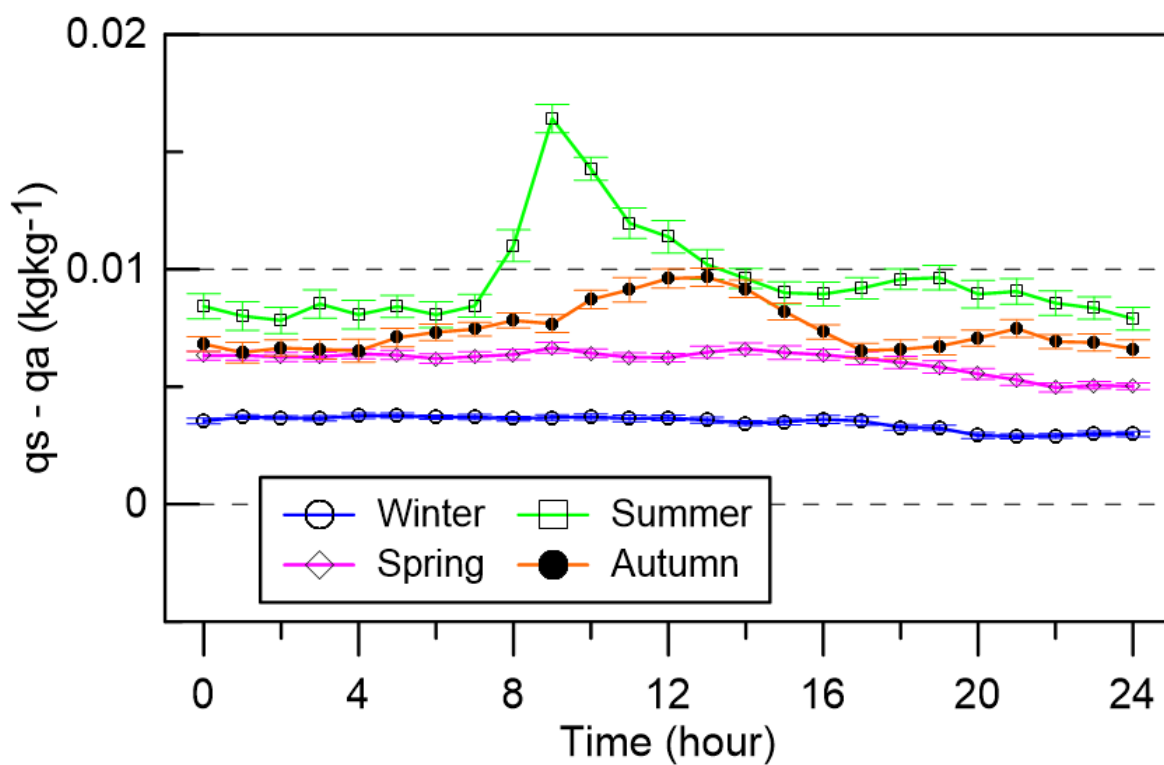
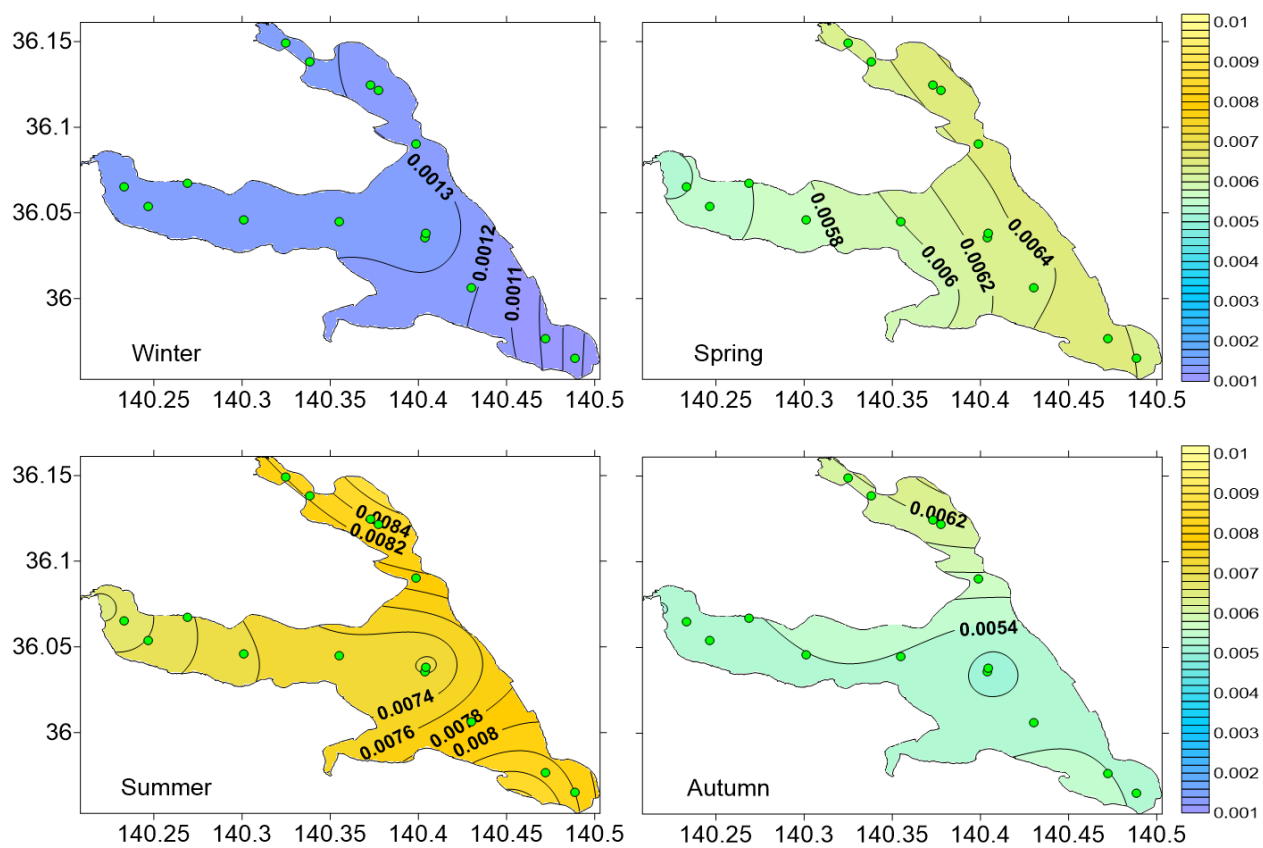


図 63 $q_s - q_a$ (曇)の空間分布(日平均)と時間変化



※ 単位は全て kg kg^{-1} である。

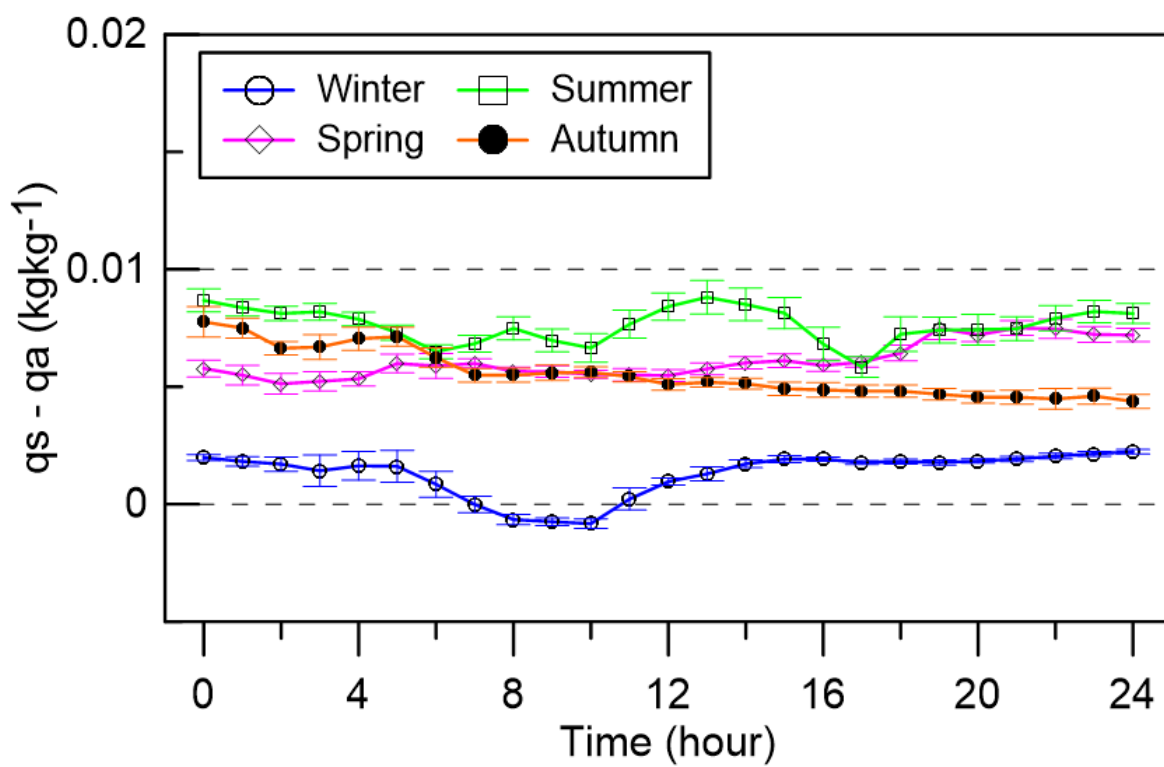


図 64 $q_s - q_a(\text{雨})$ の空間分布(日平均)と時間変化

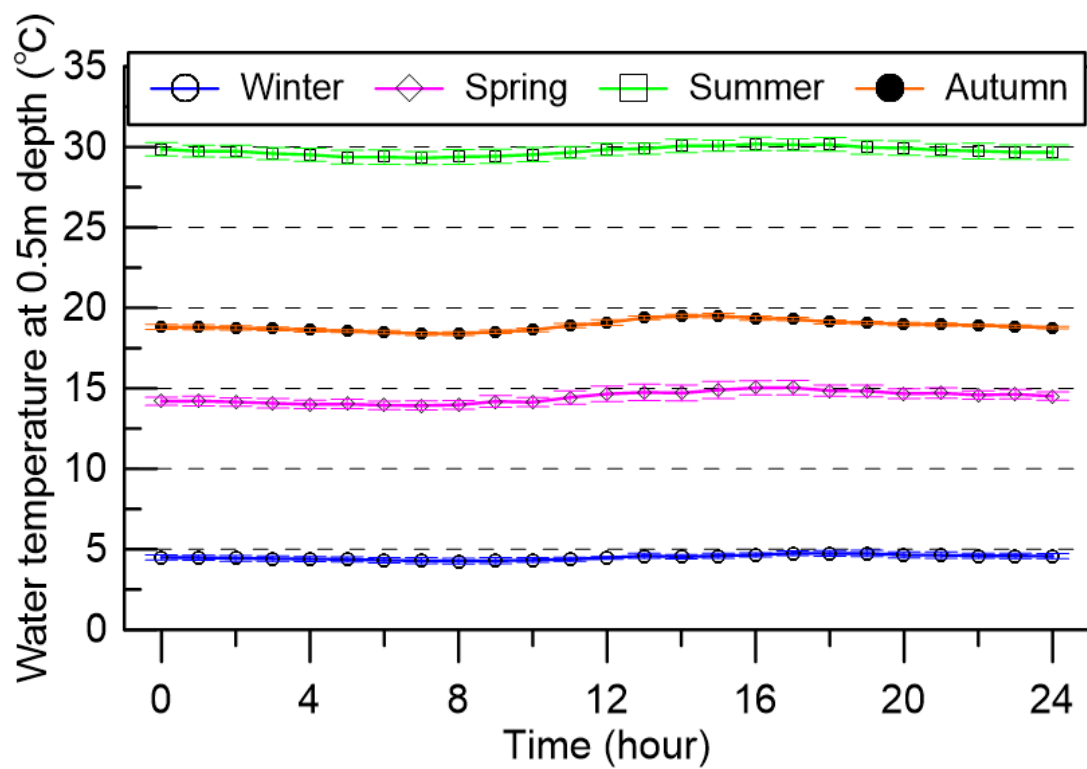
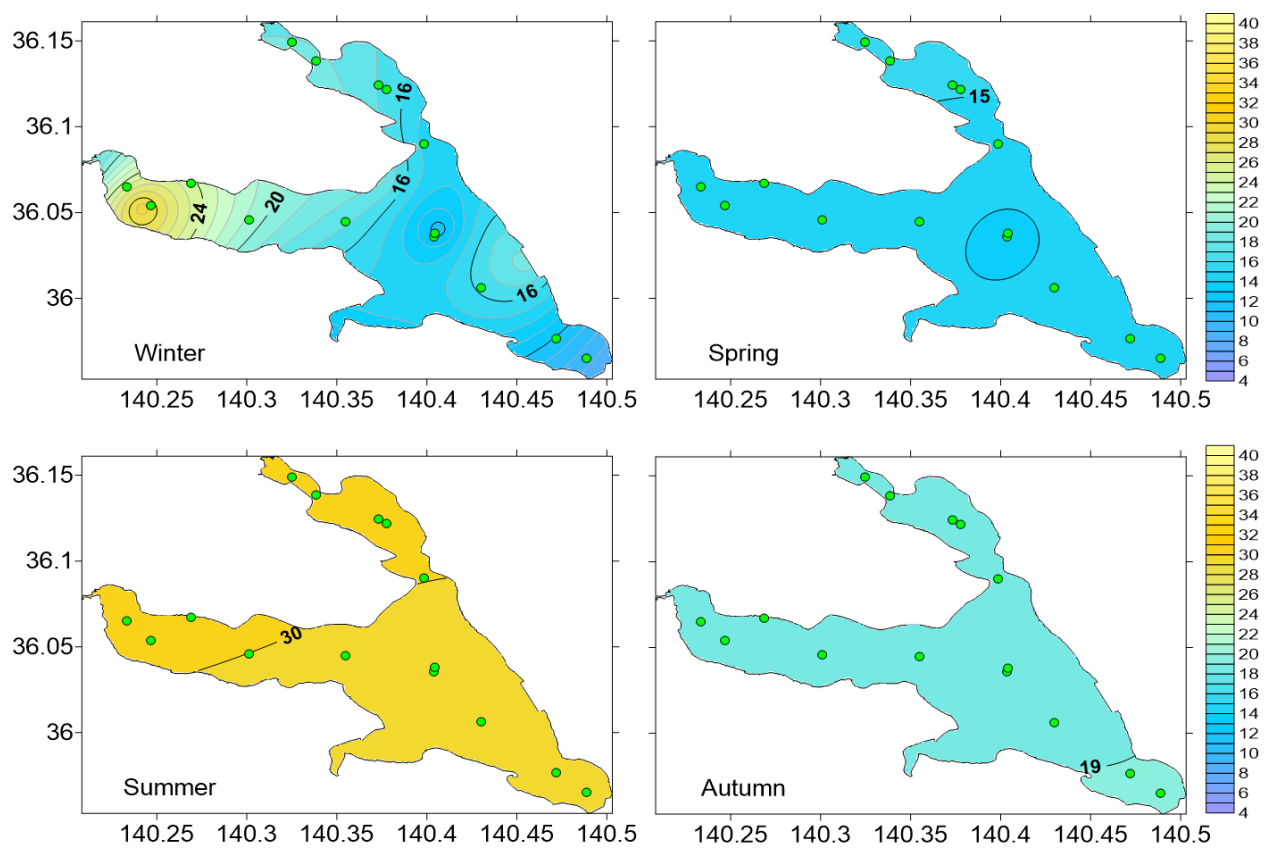


図 65 T_w (晴)の空間分布(日平均)と時間変化

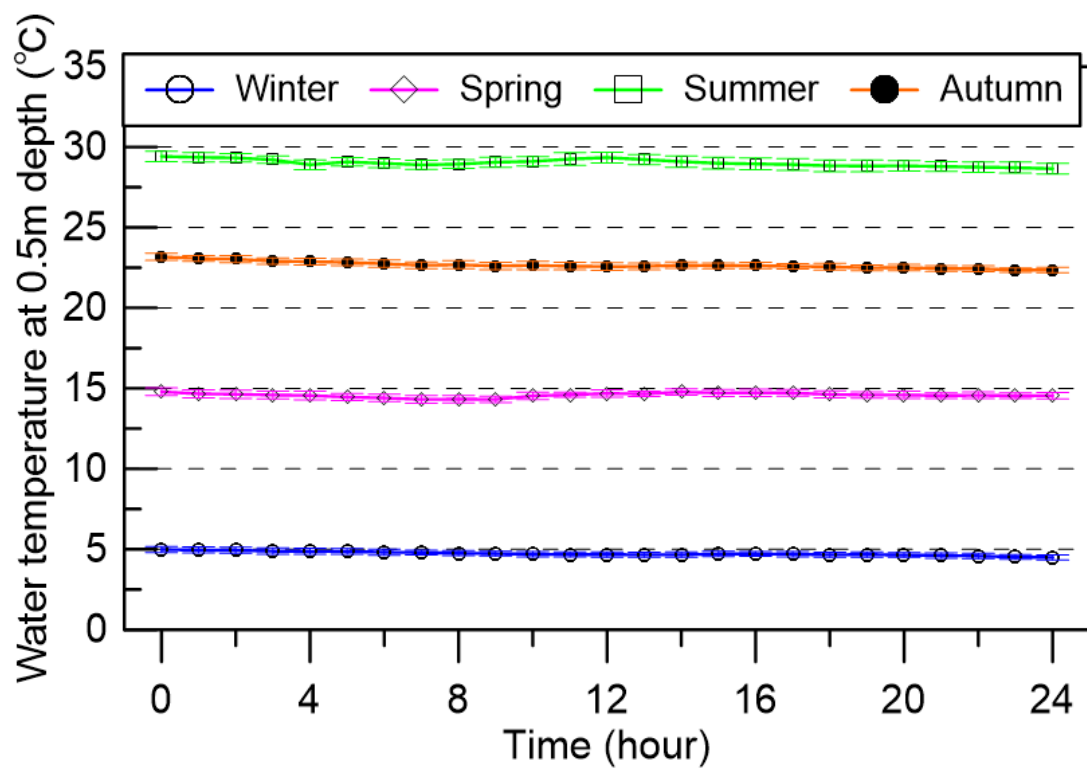
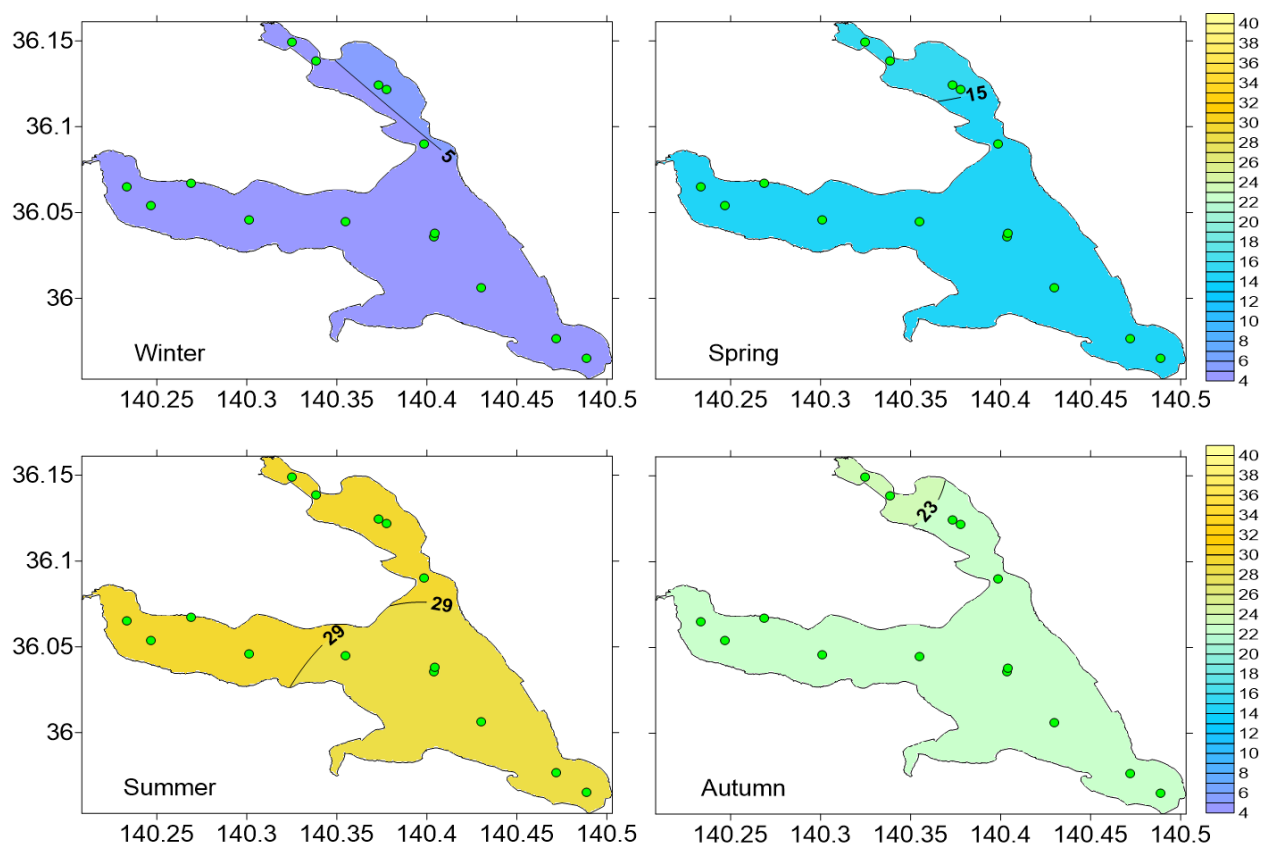


図 66 T_w (曇)の空間分布(日平均)と時間変化

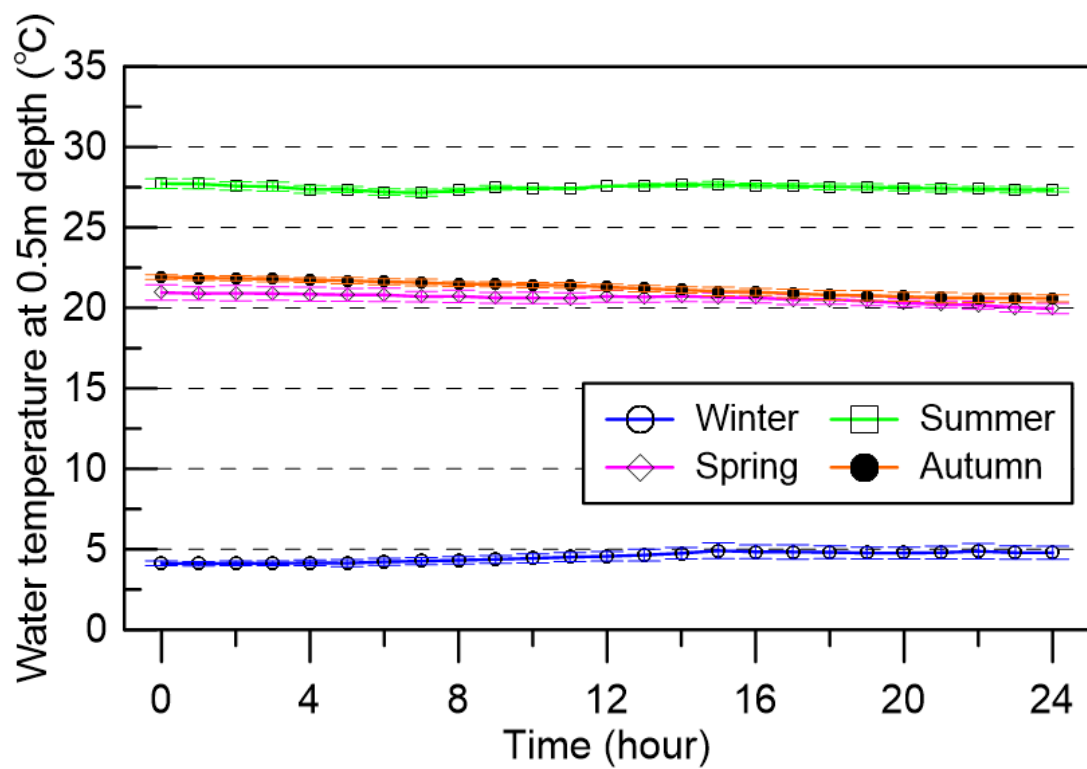
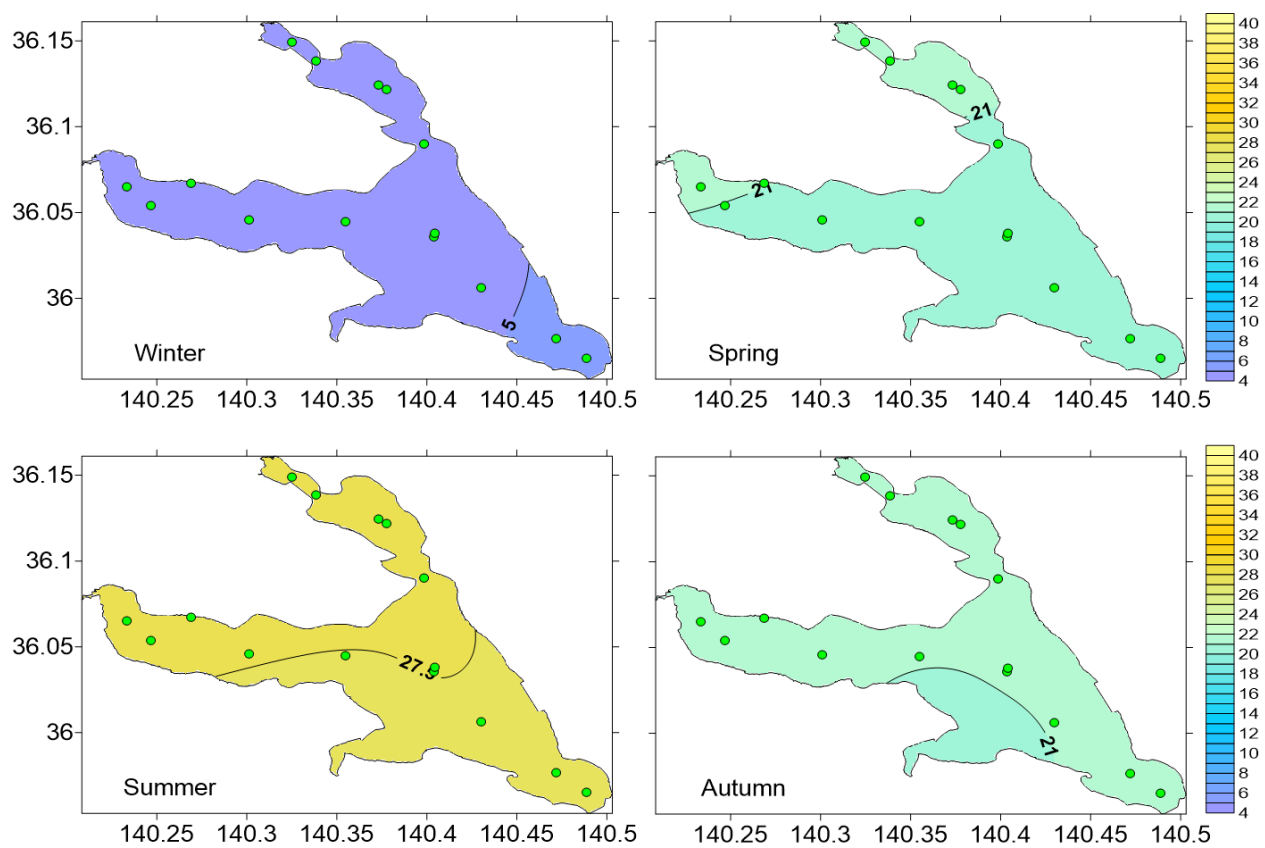


図 67 $T_w(\text{雨})$ の空間分布(日平均)と時間変化

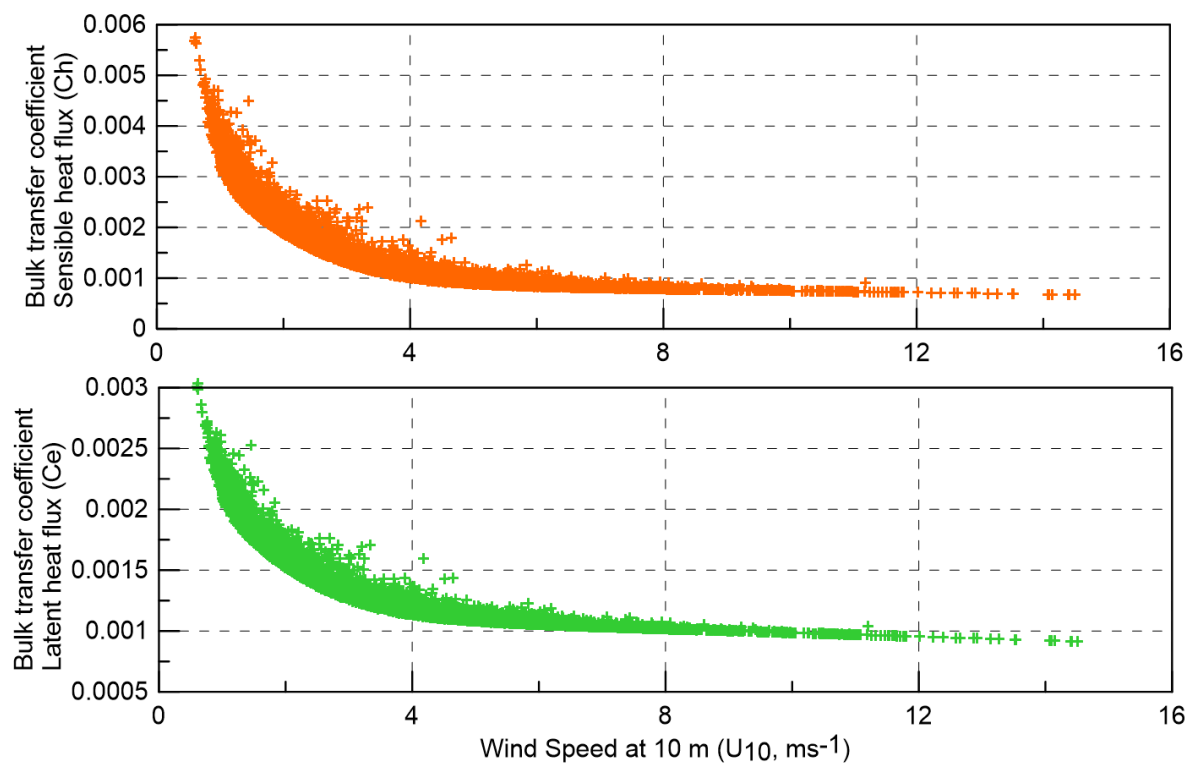


図 68 バルク輸送係数と風速の関係

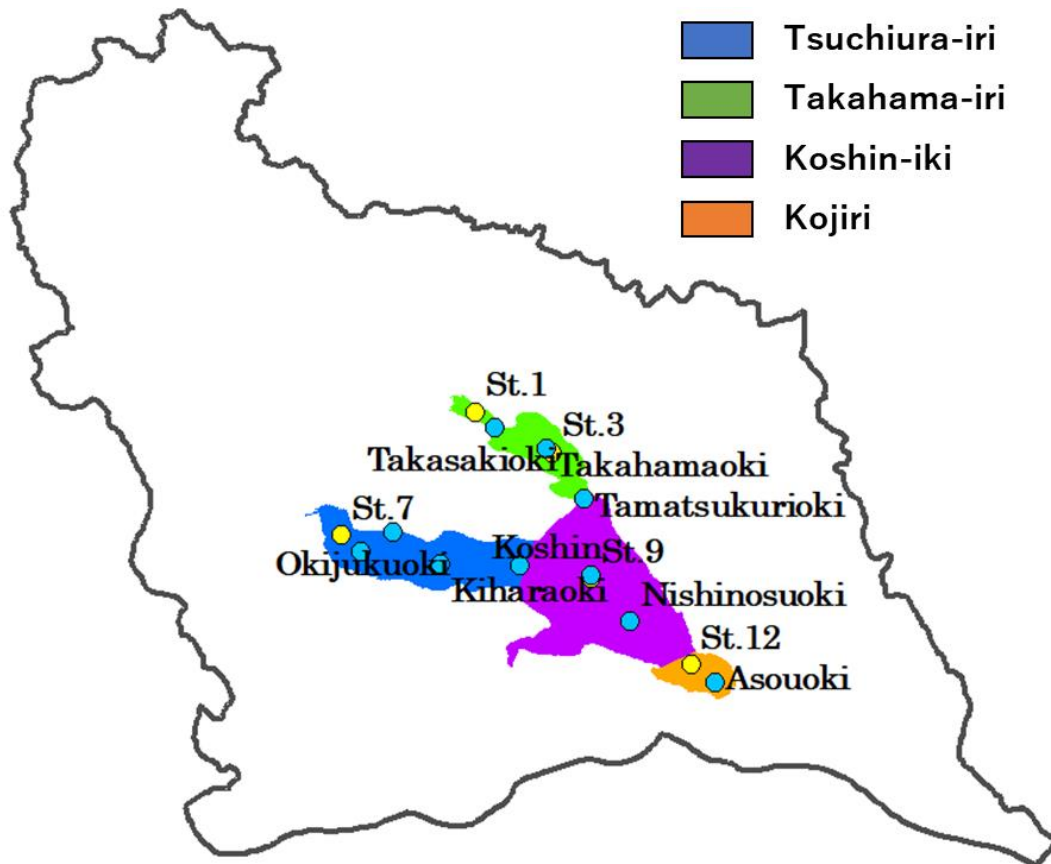


図 69 分割領域

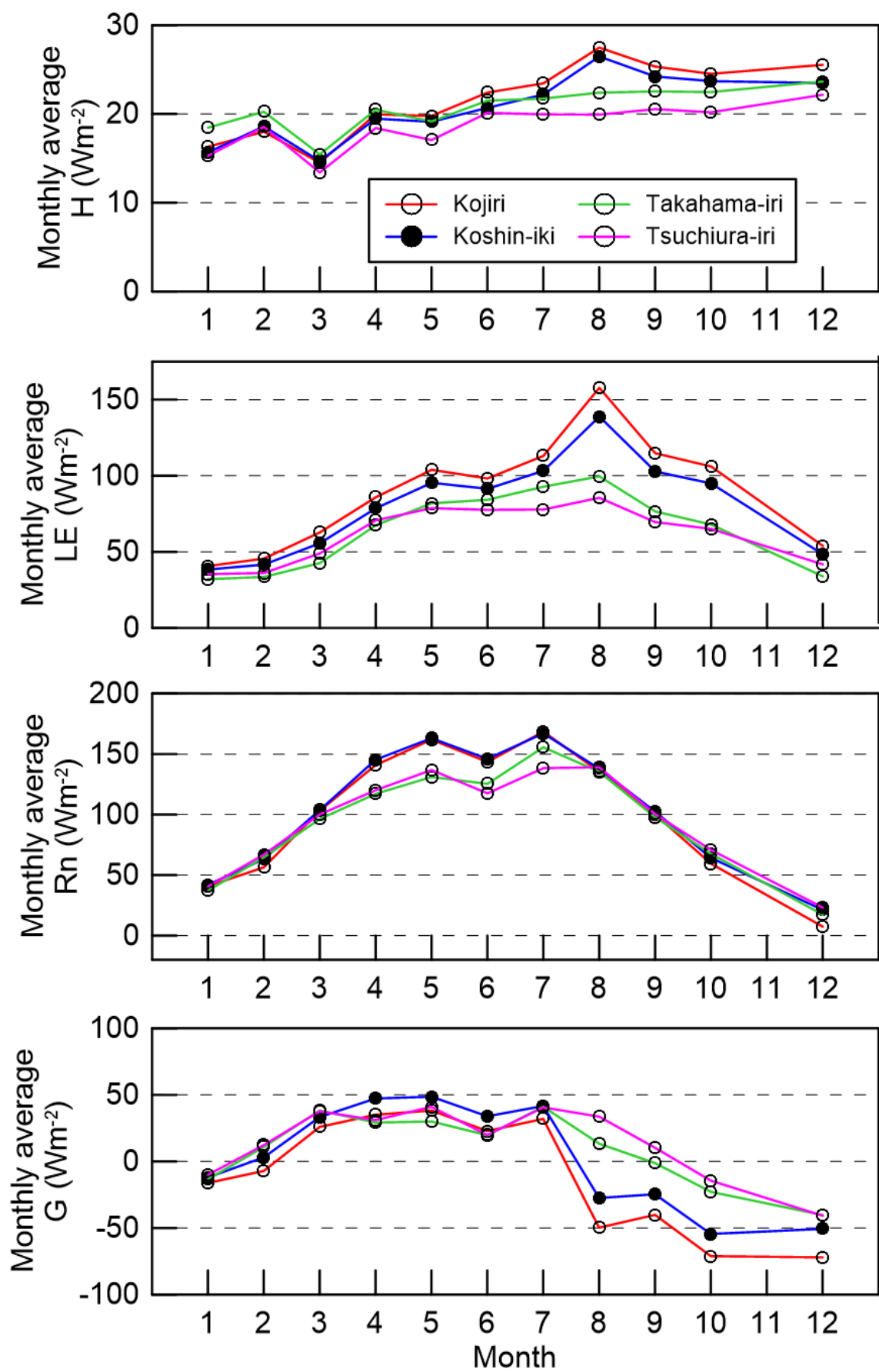


図 70 熱収支の時間変化(各水域全体の平均値)

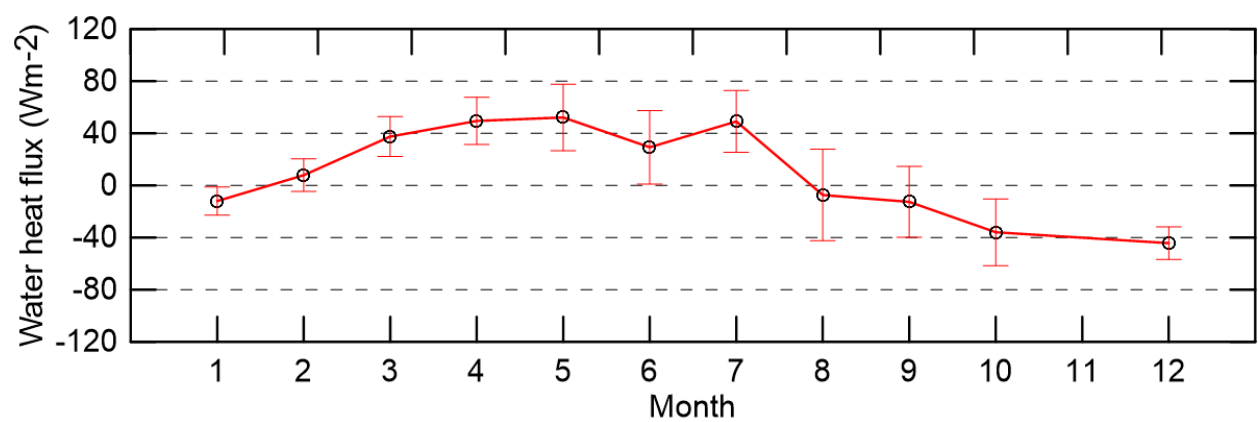
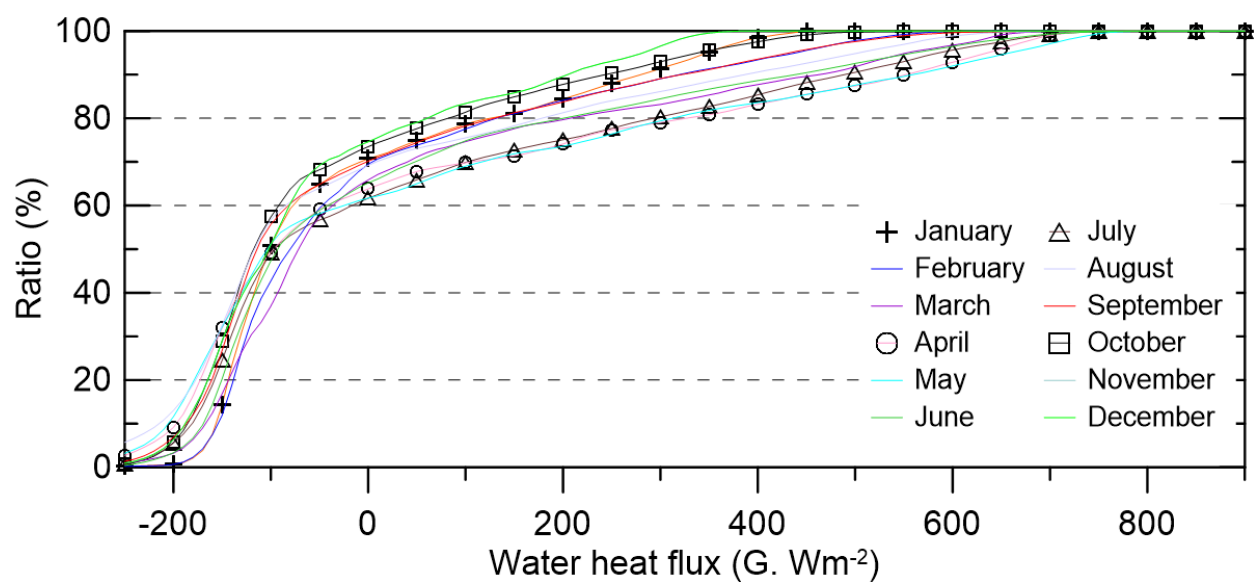
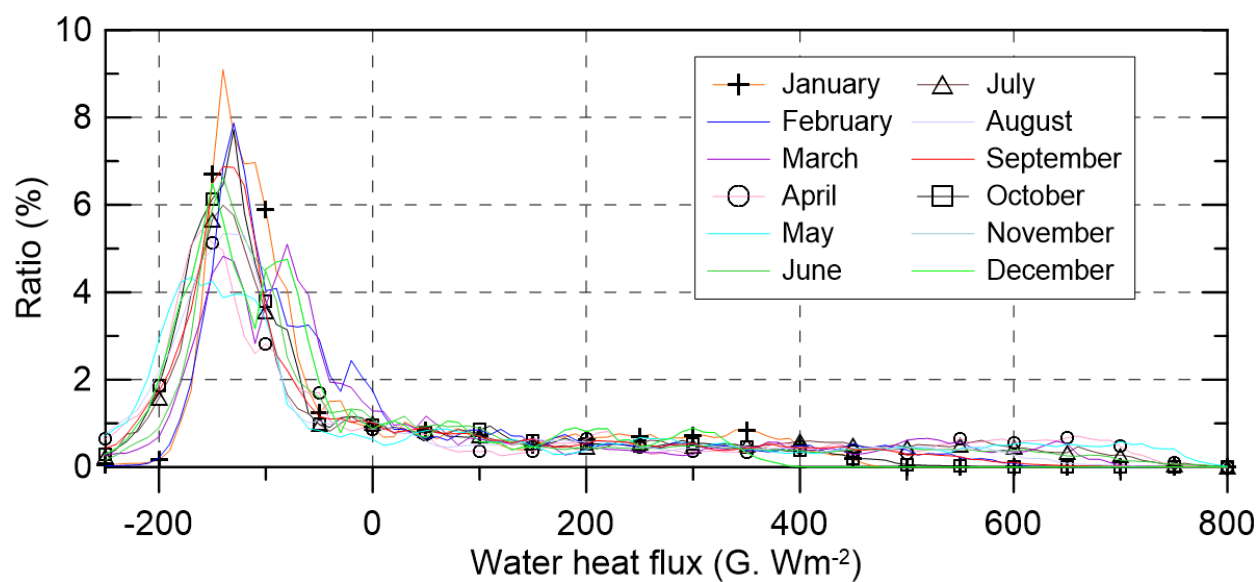


図 71 G ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

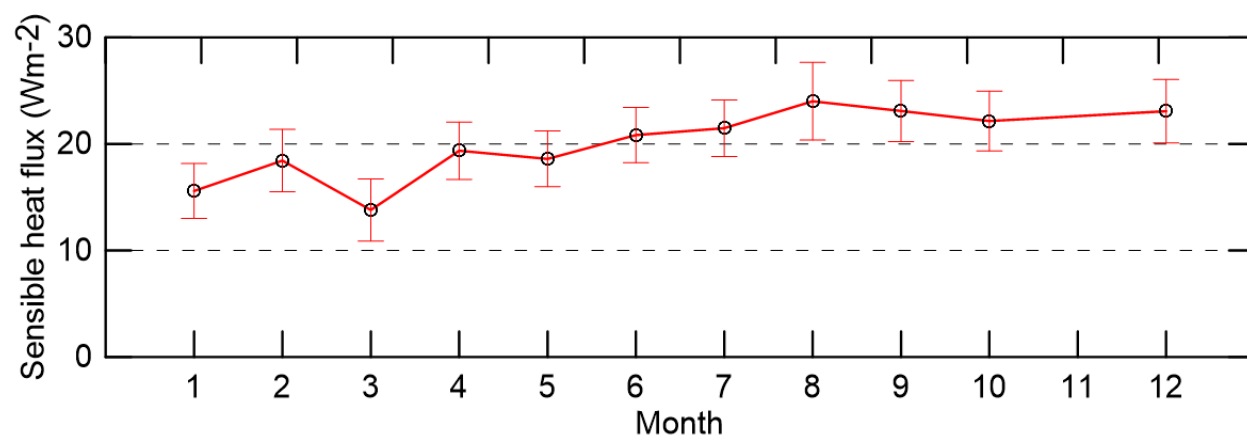
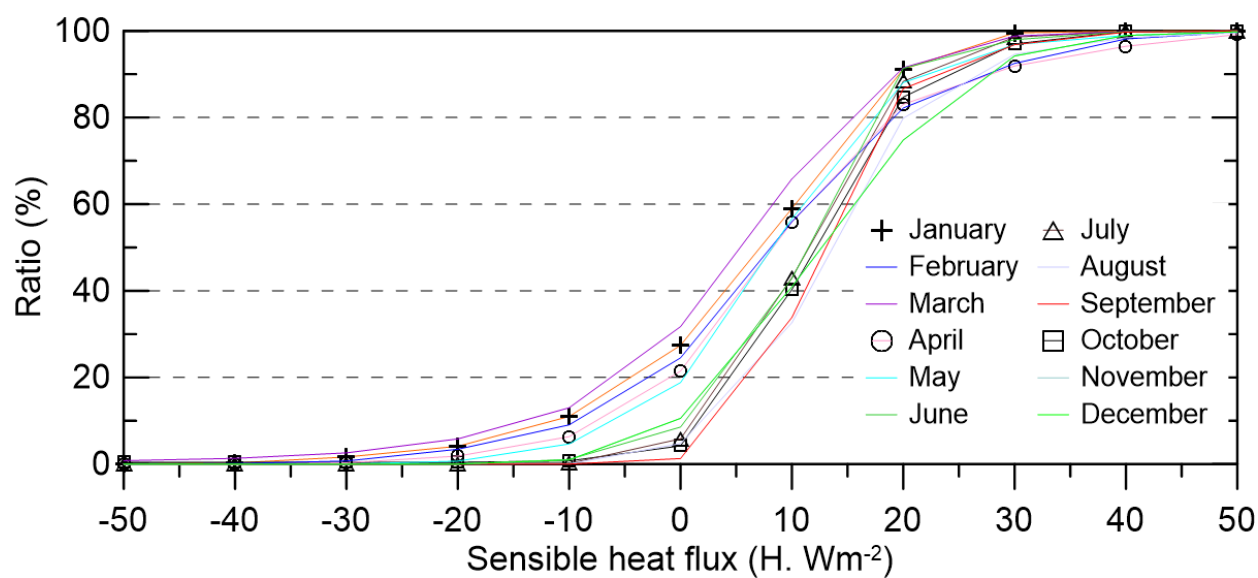
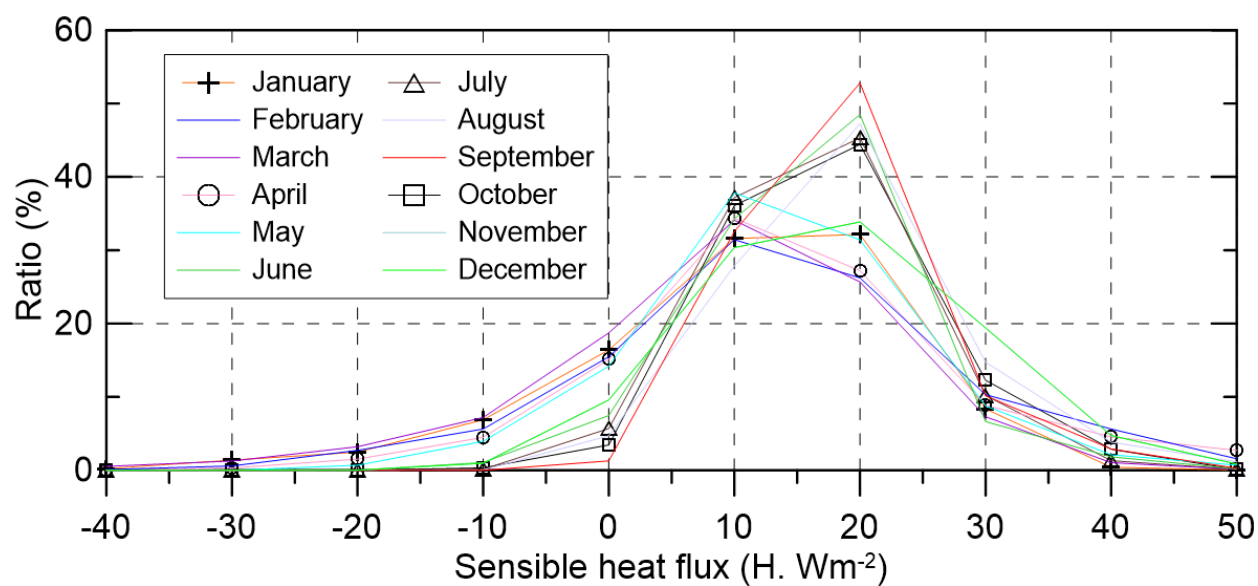


図 72 H ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

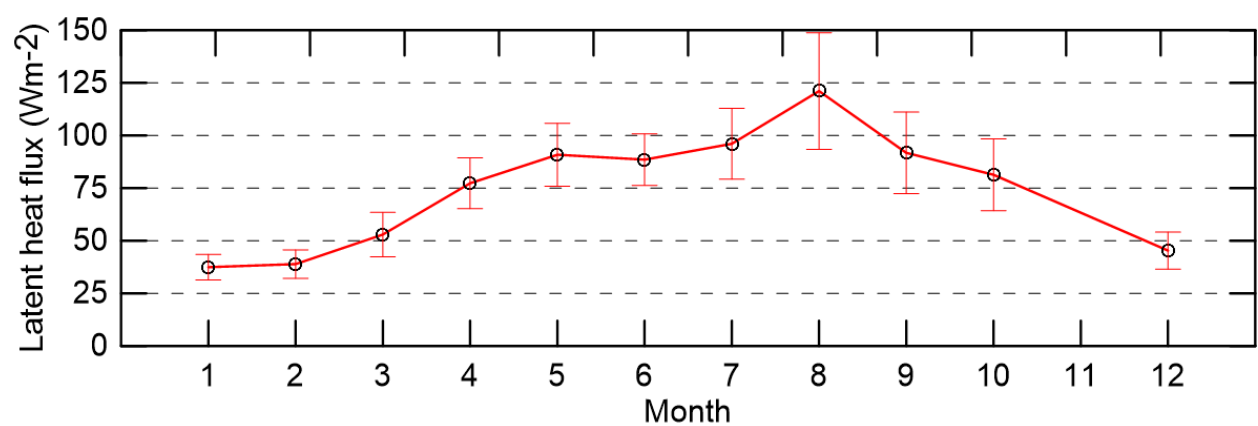
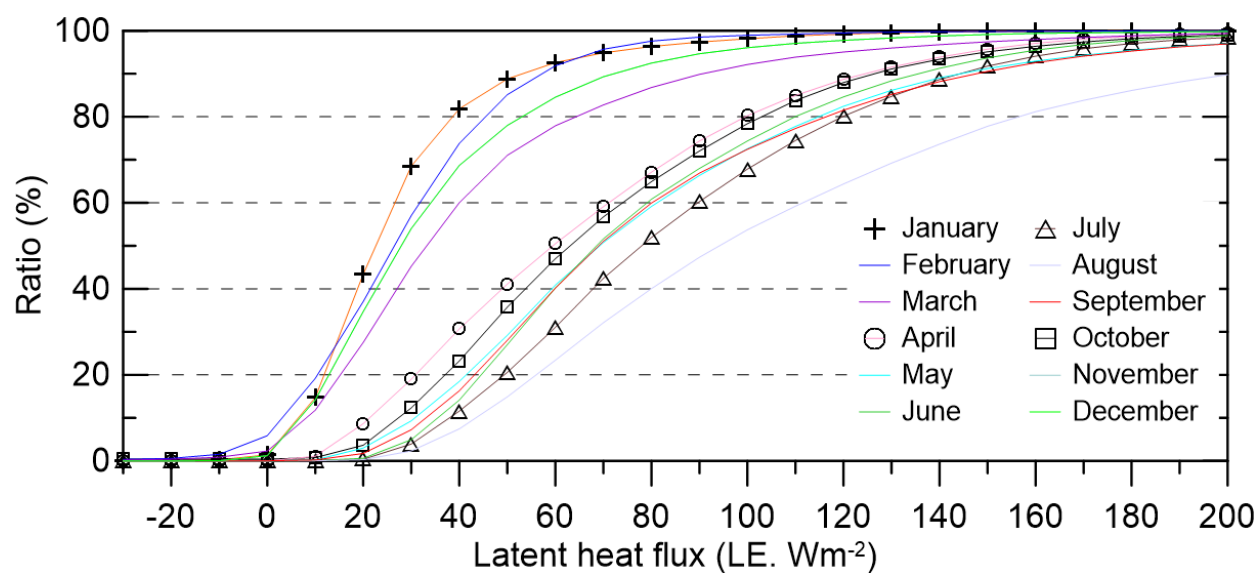
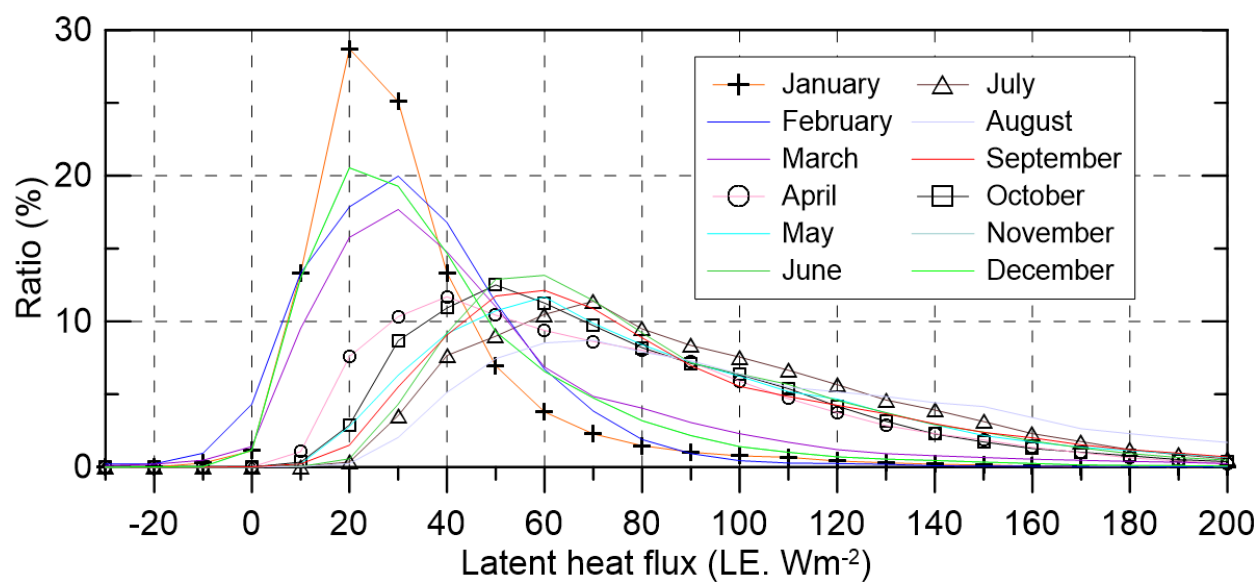


図 73 LEヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

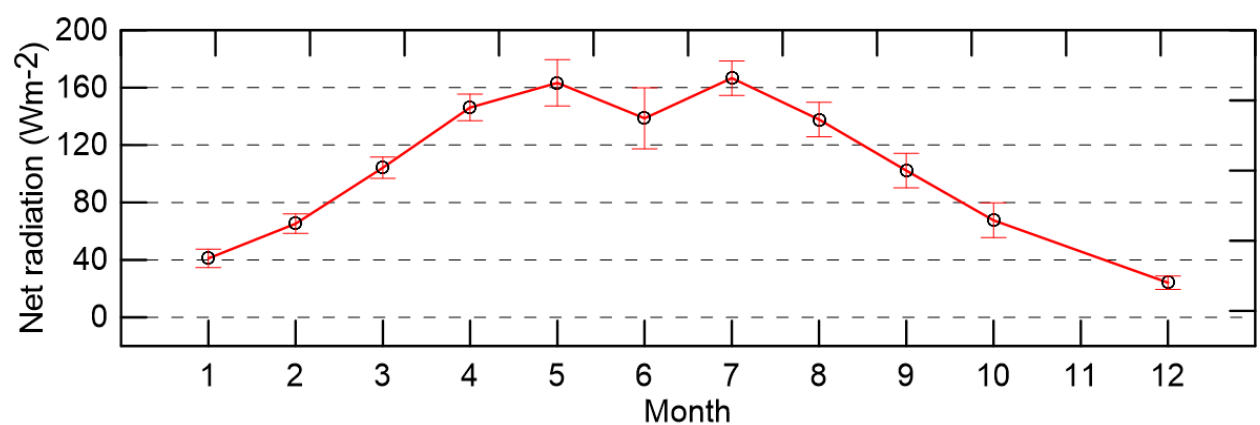
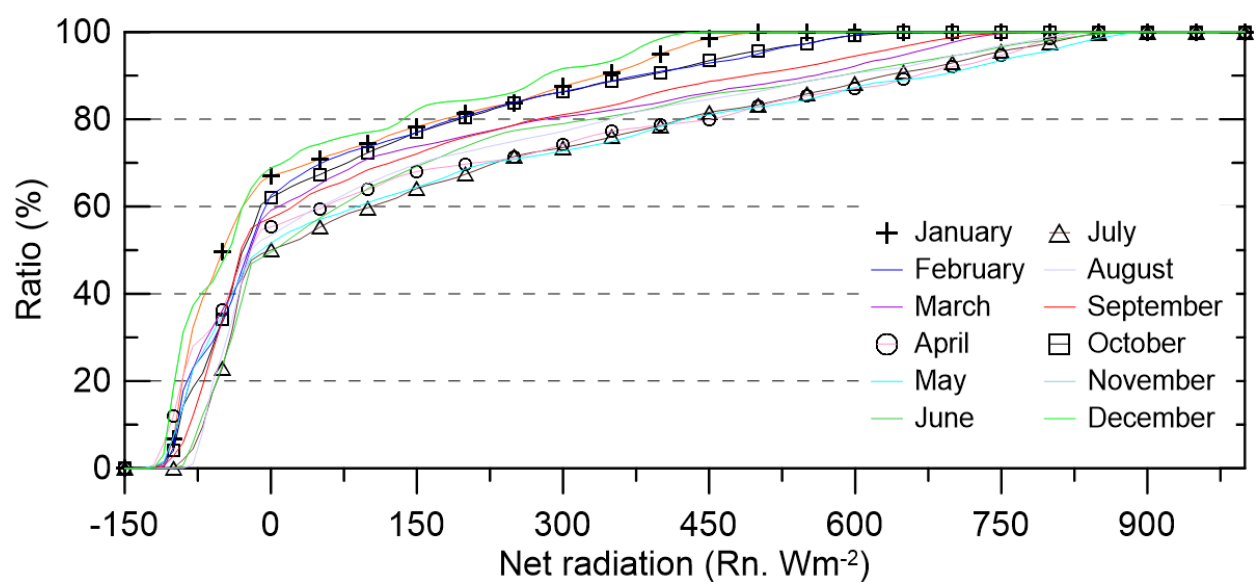
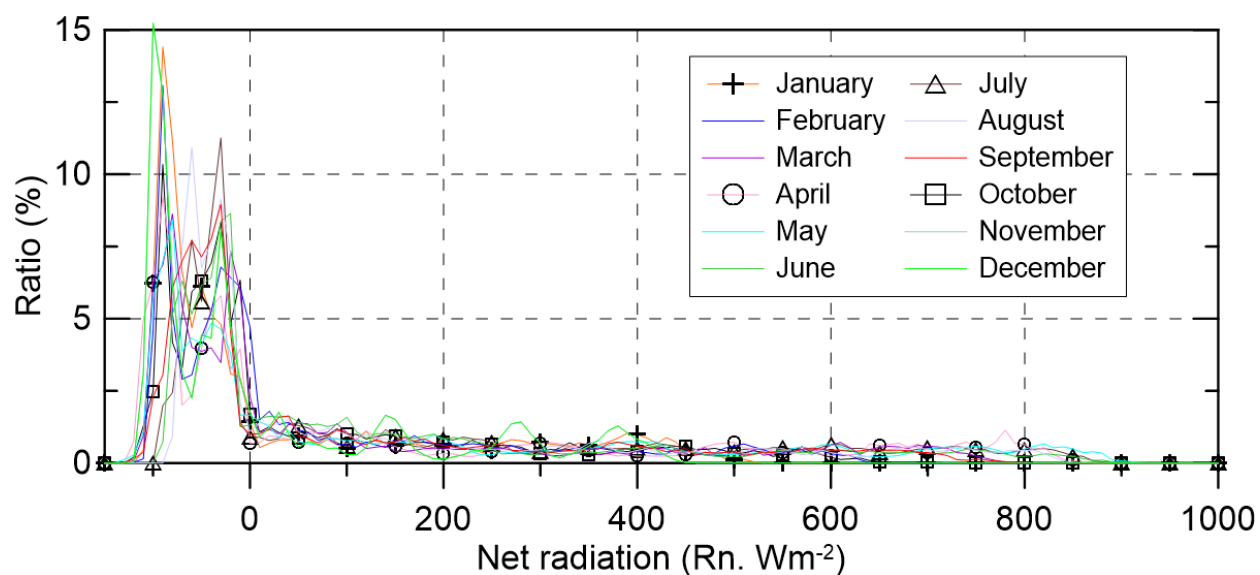


図 74 Rn ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

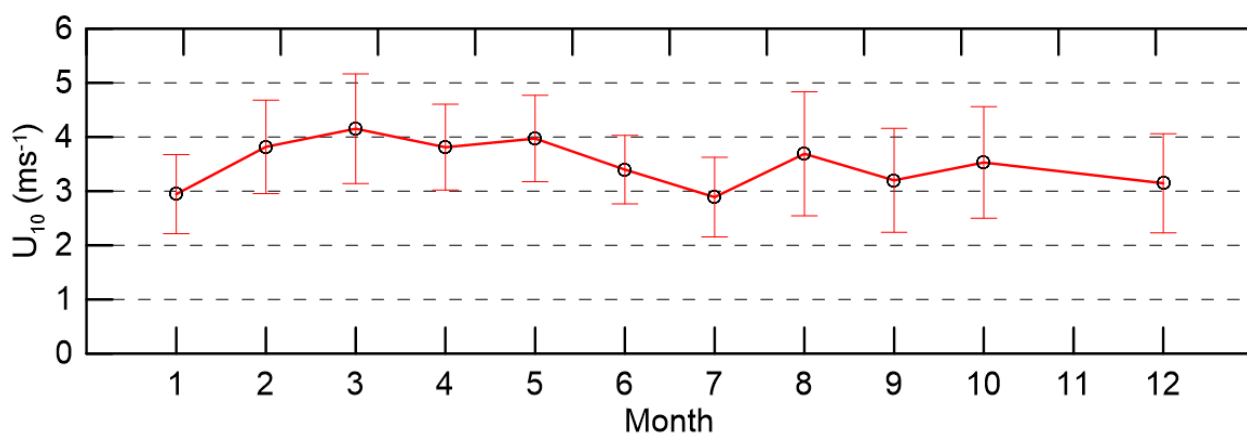
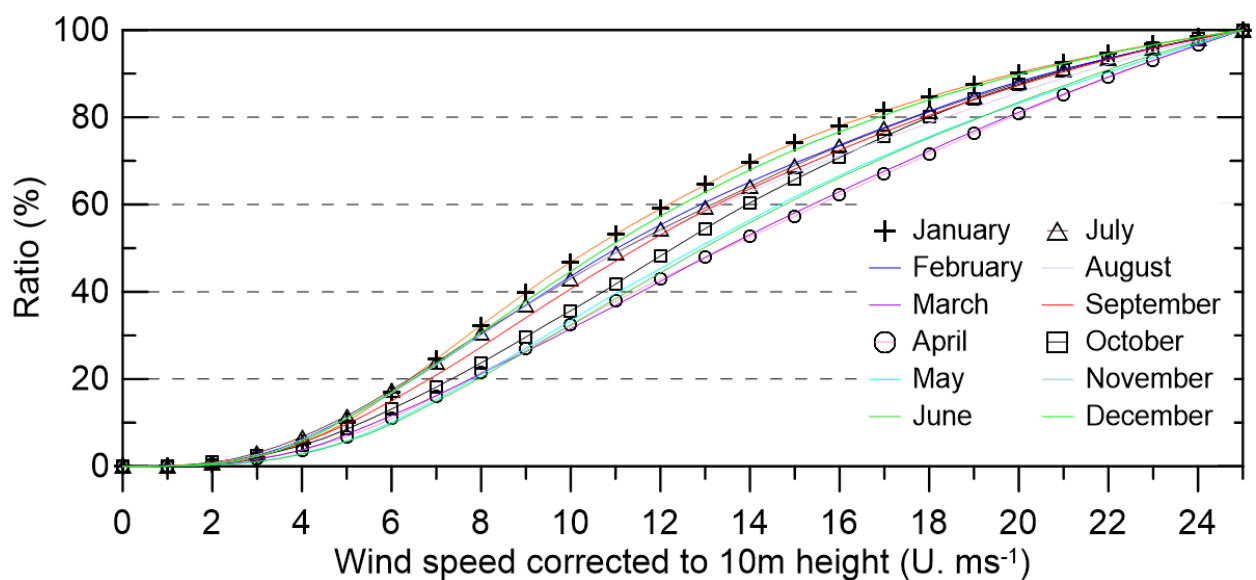
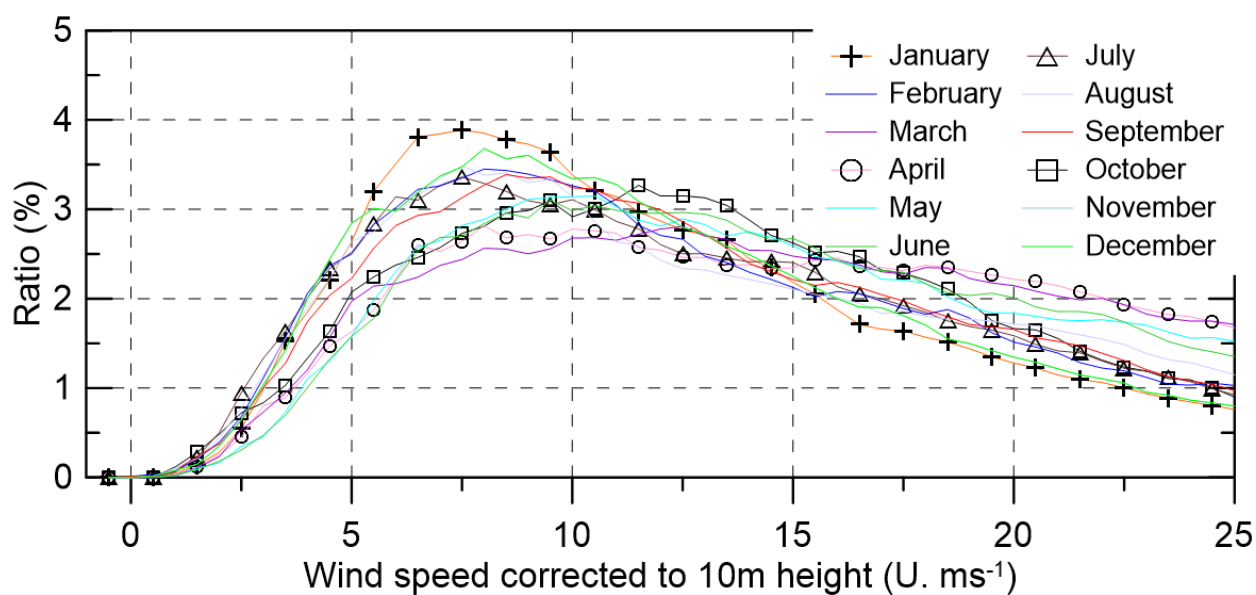


図 75 U_{10} ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

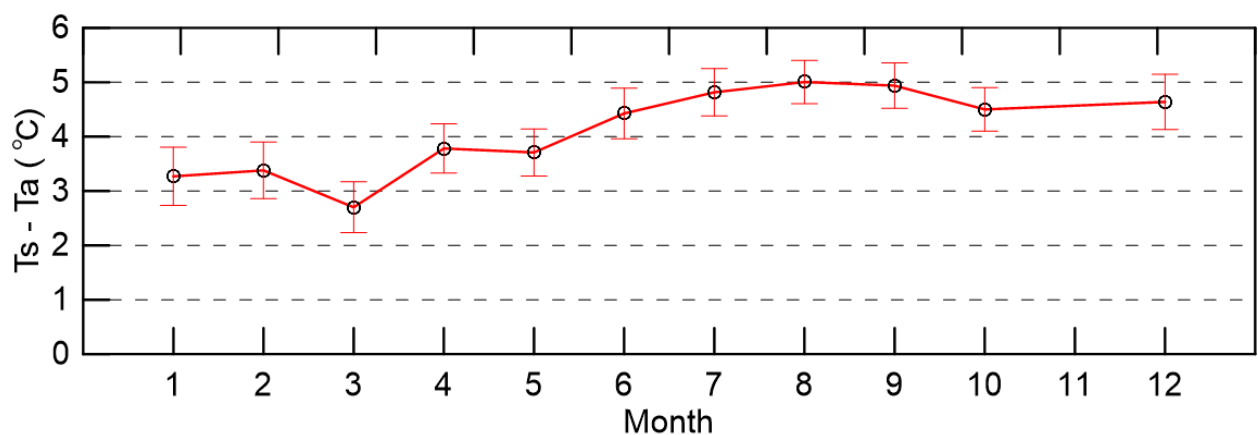
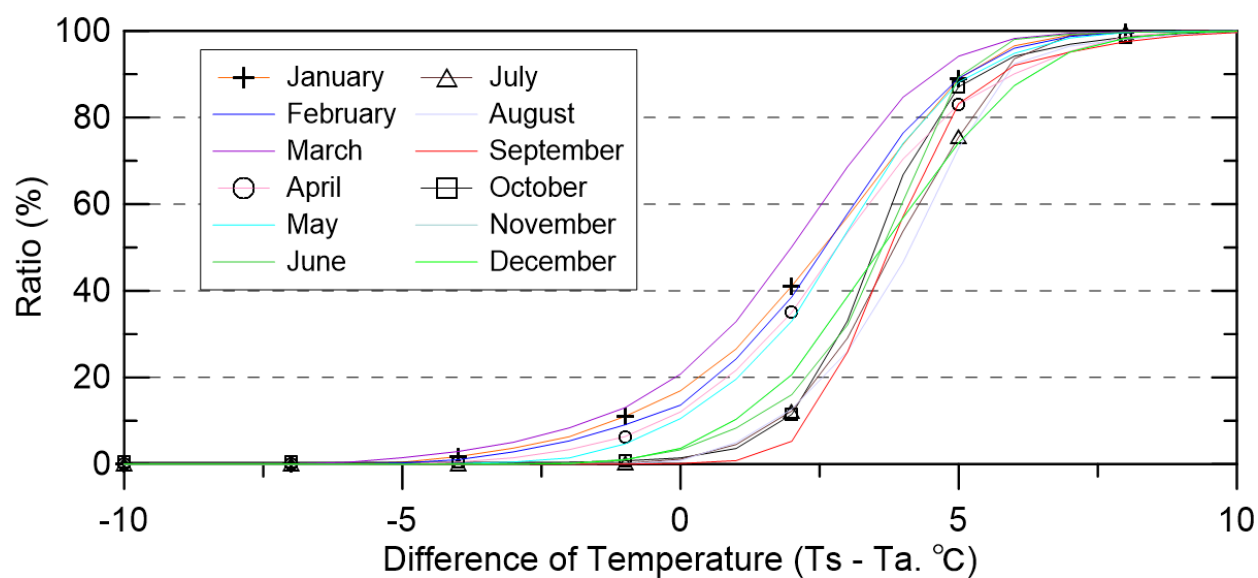
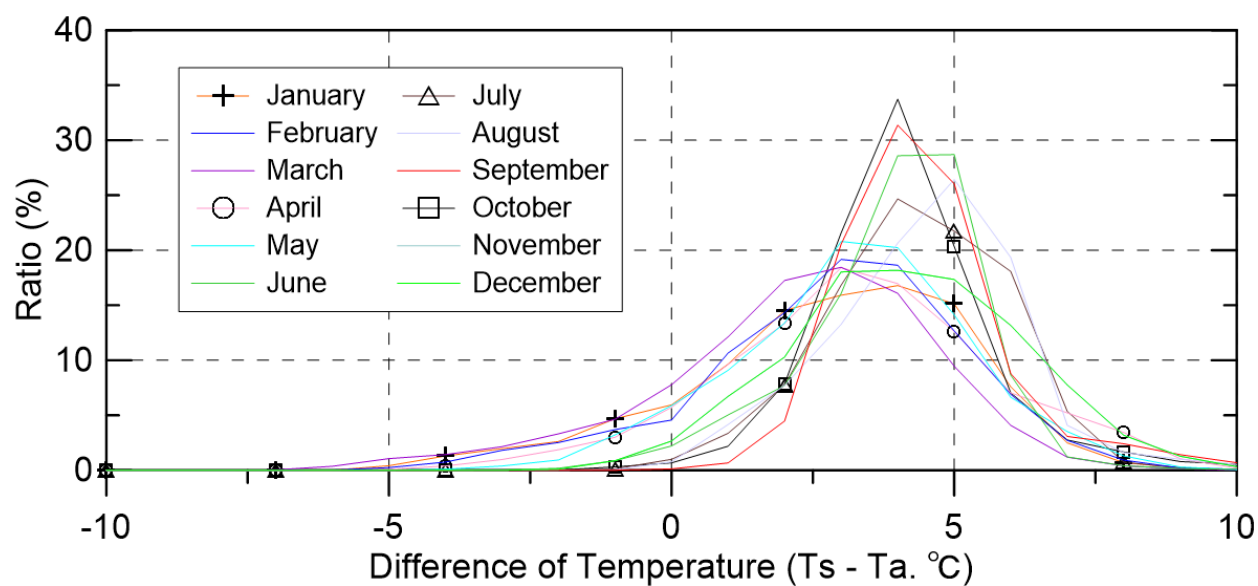


図 76 $T_s - T_a$ ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

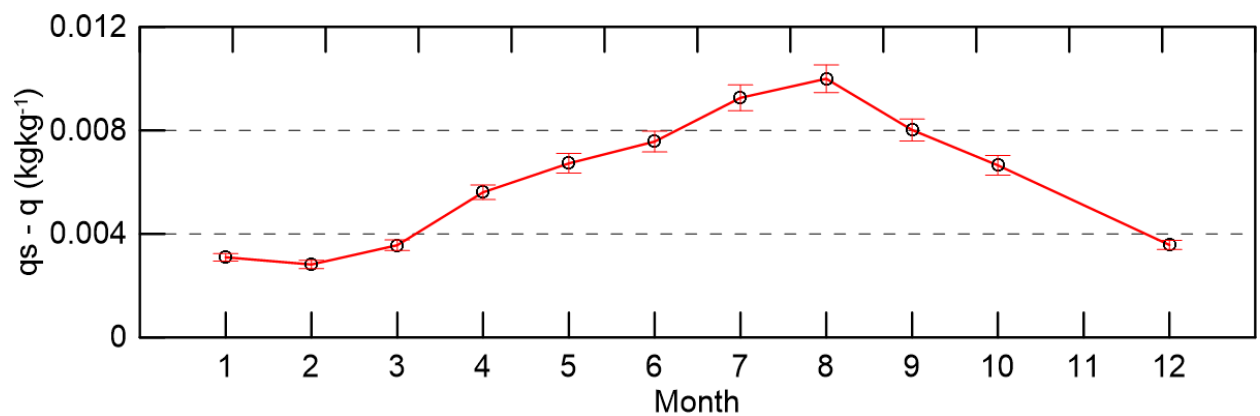
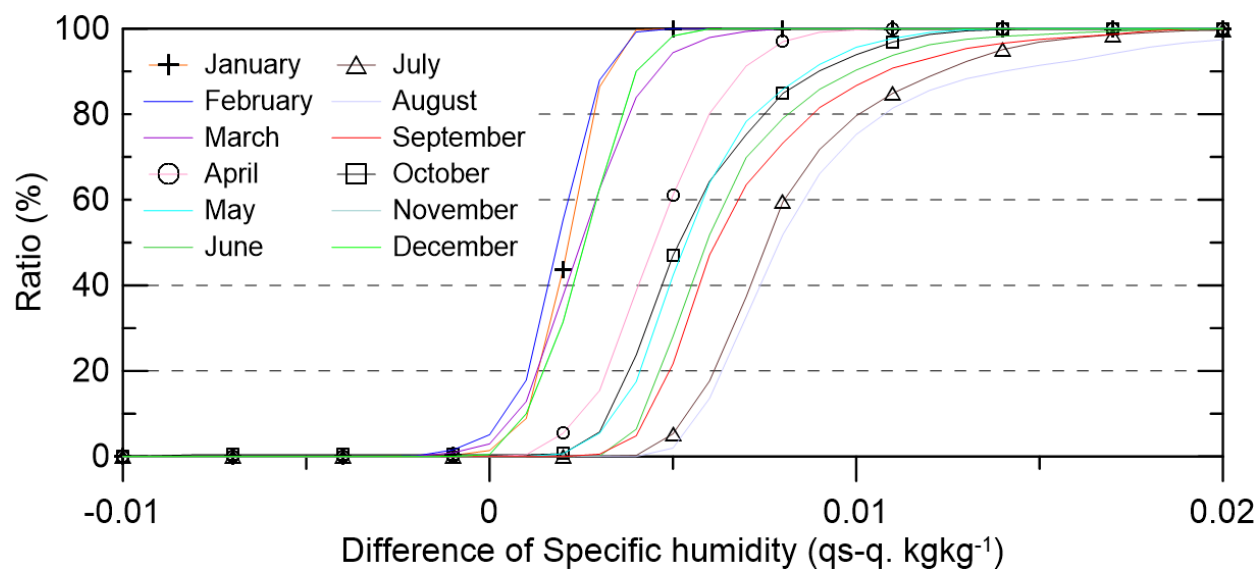
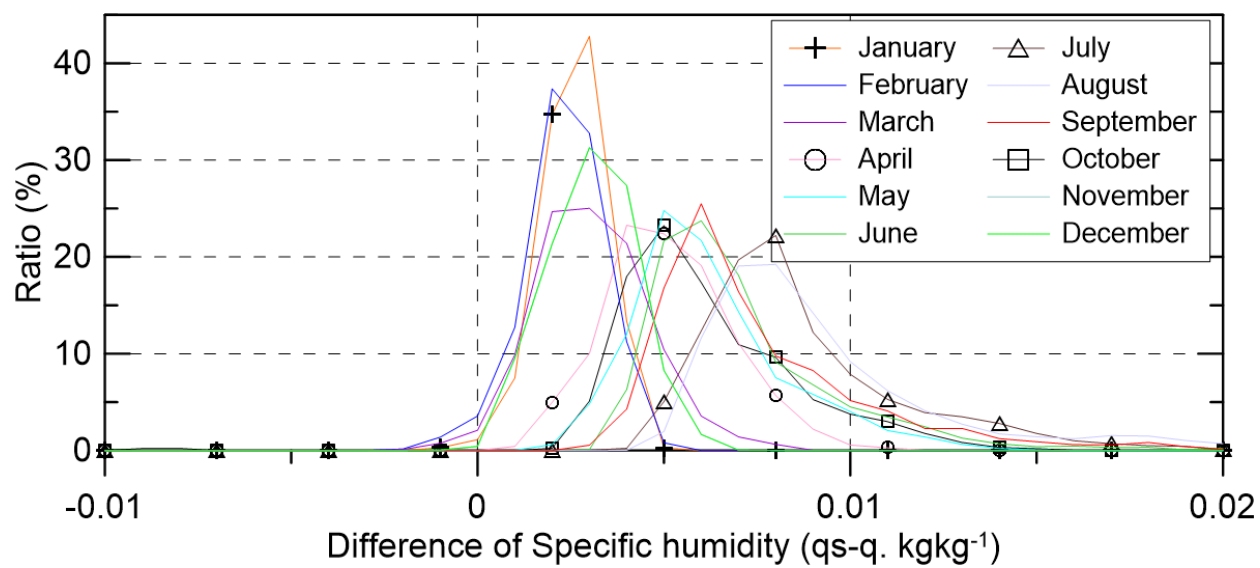


図 77 $q_s - q$ ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

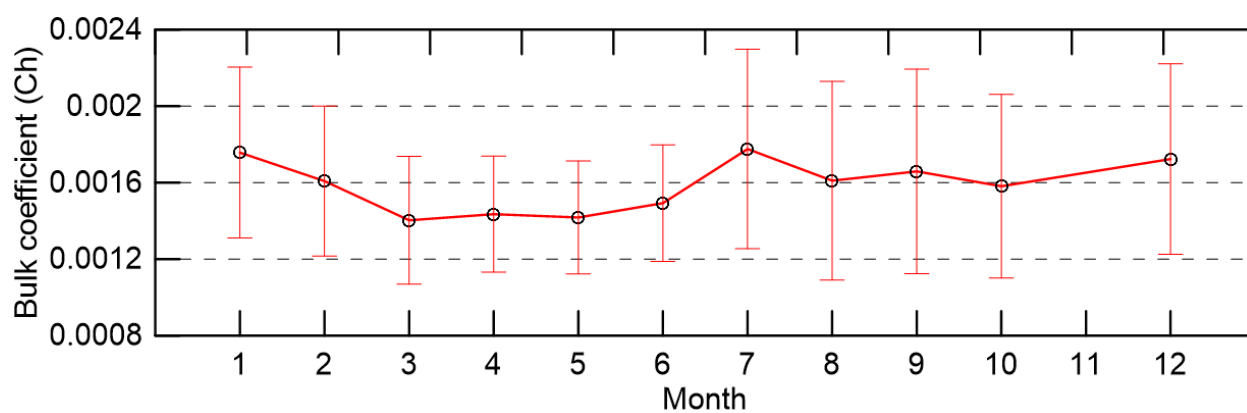
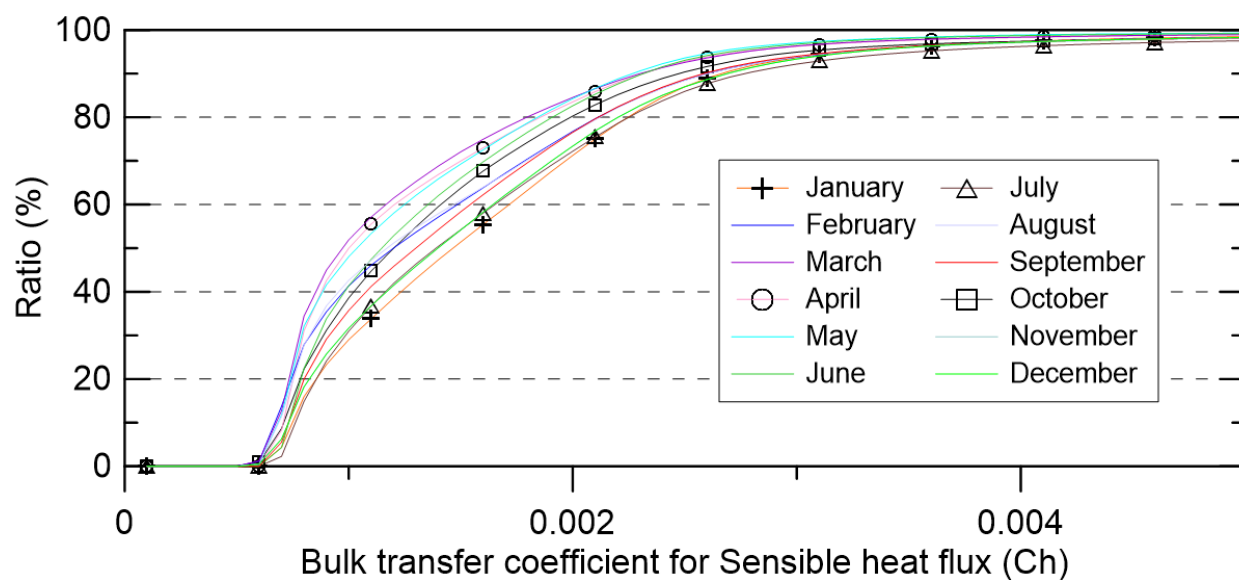
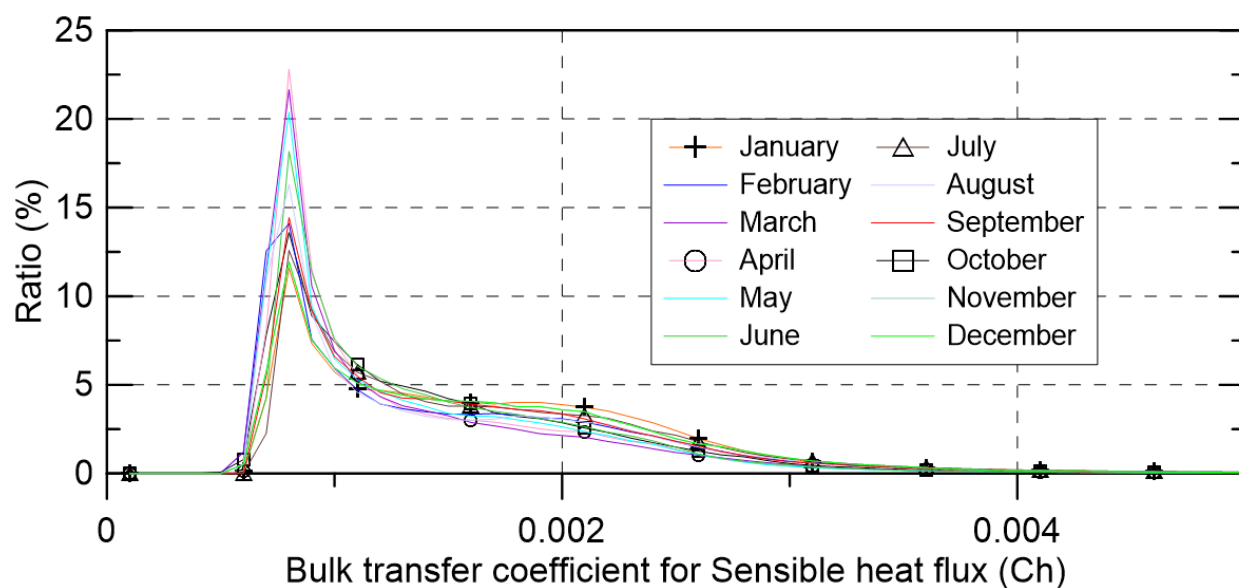


図 78 Ch ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

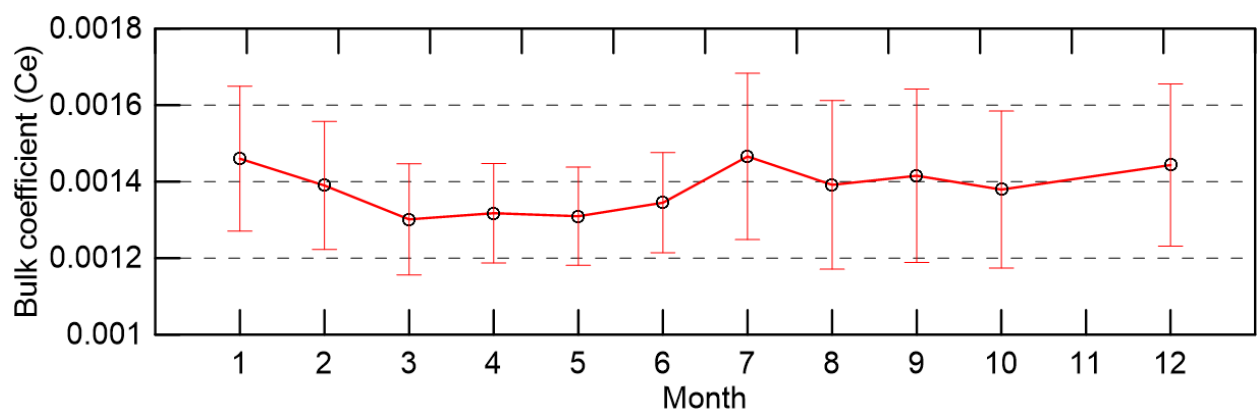
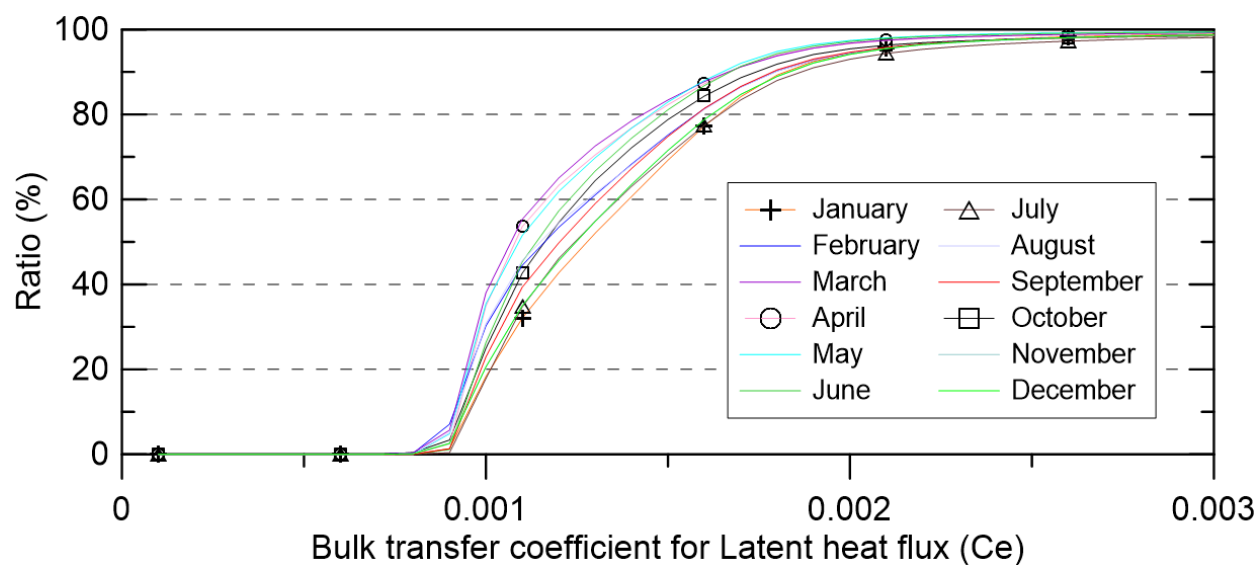
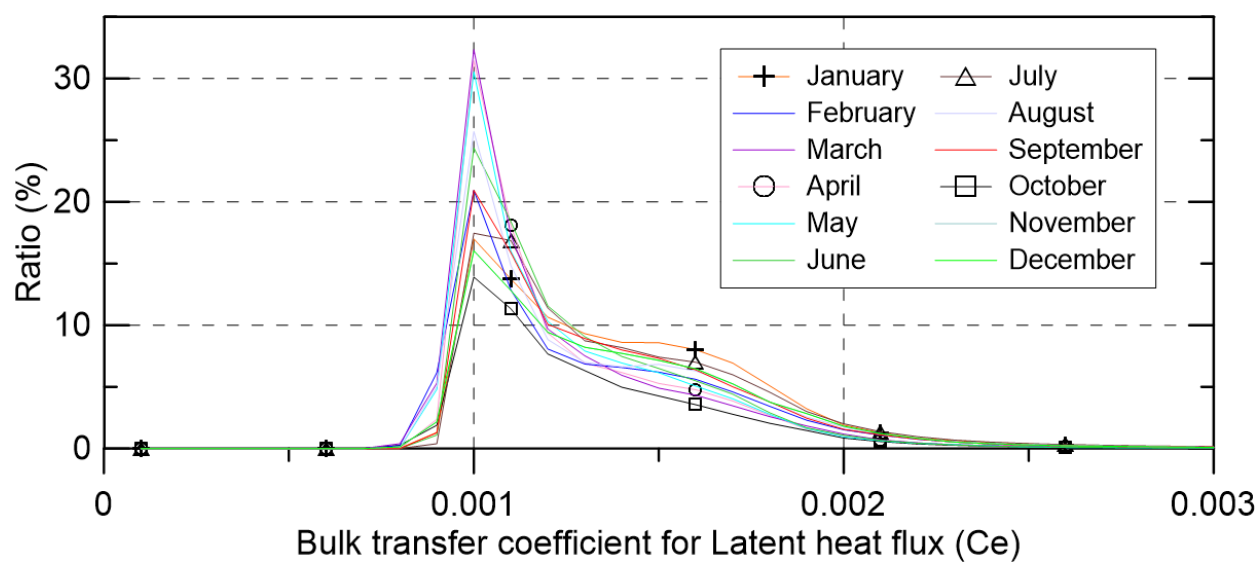


図 79 C_e ヒストグラム, 相対累積度数, 月変化

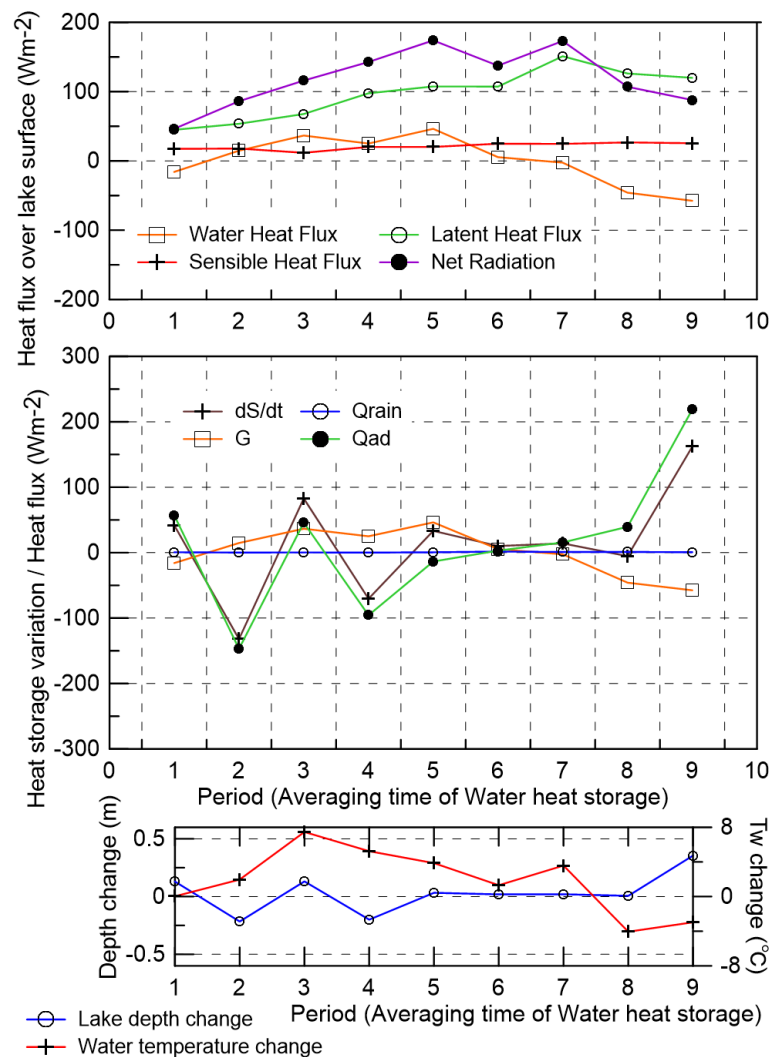


図 80 ボックスモデル結果(麻生沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

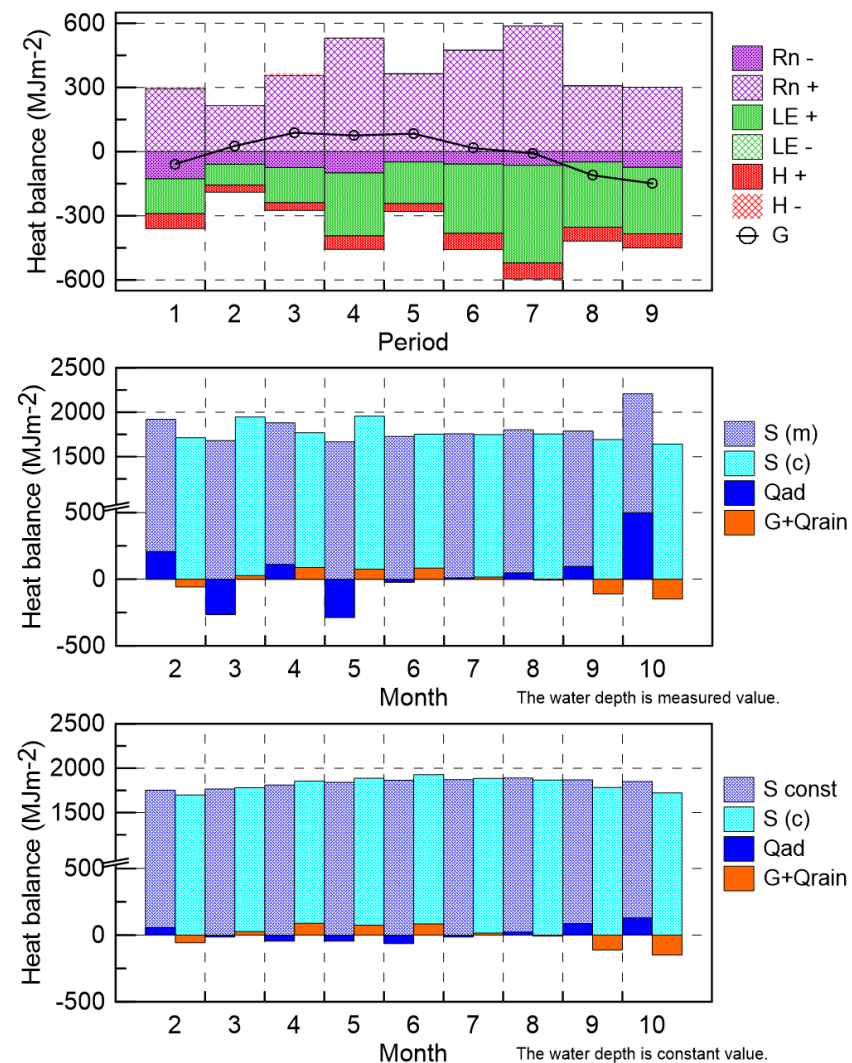


図 81 熱収支・熱容量の比較(麻生沖)

※ (m)は実測値, (c)は($G + Q_{\text{rain}}$)を入力した計算値, const は水深固定値。

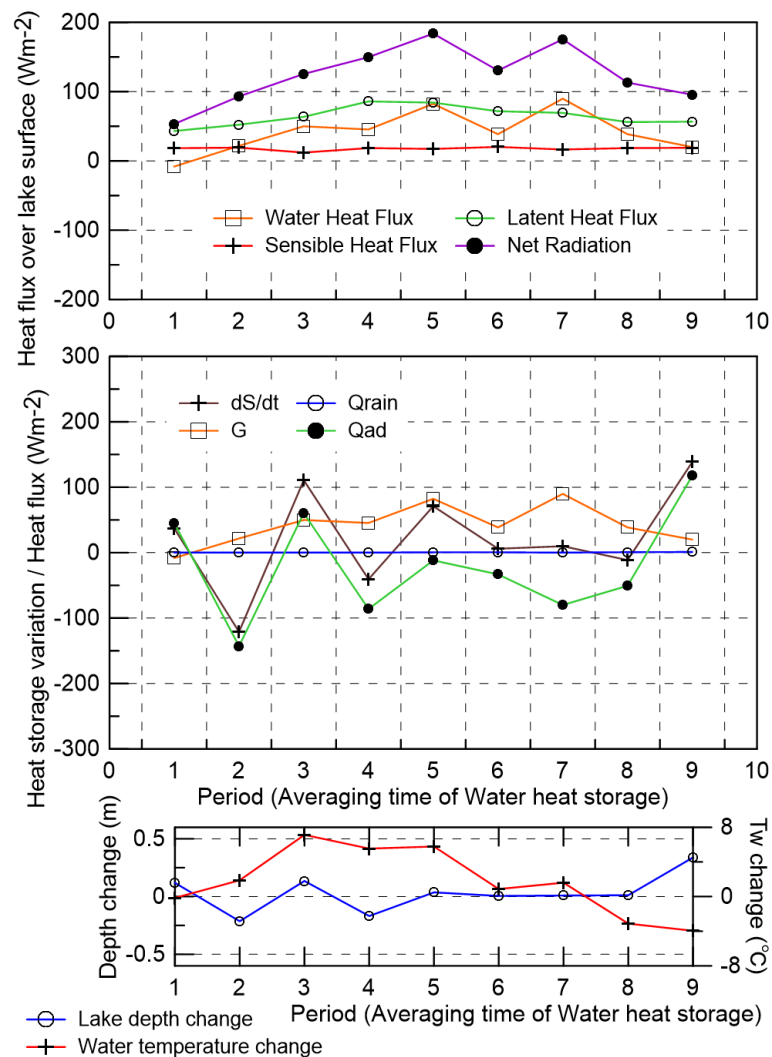


図 82 ボックスモデル結果(掛馬沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

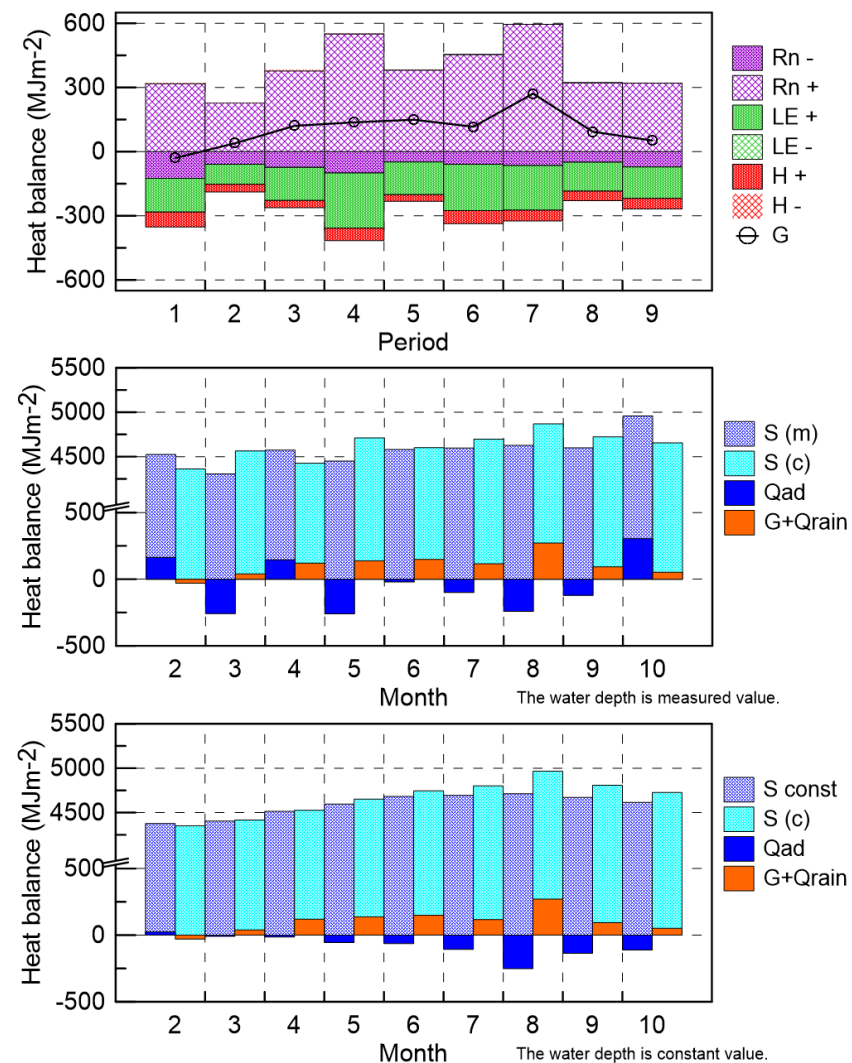


図 83 熱収支・熱容量の比較(掛馬沖)

※ (m)は実測値, (c)は($G+Q_{\text{rain}}$)を入力した計算値, const は水深固定値。

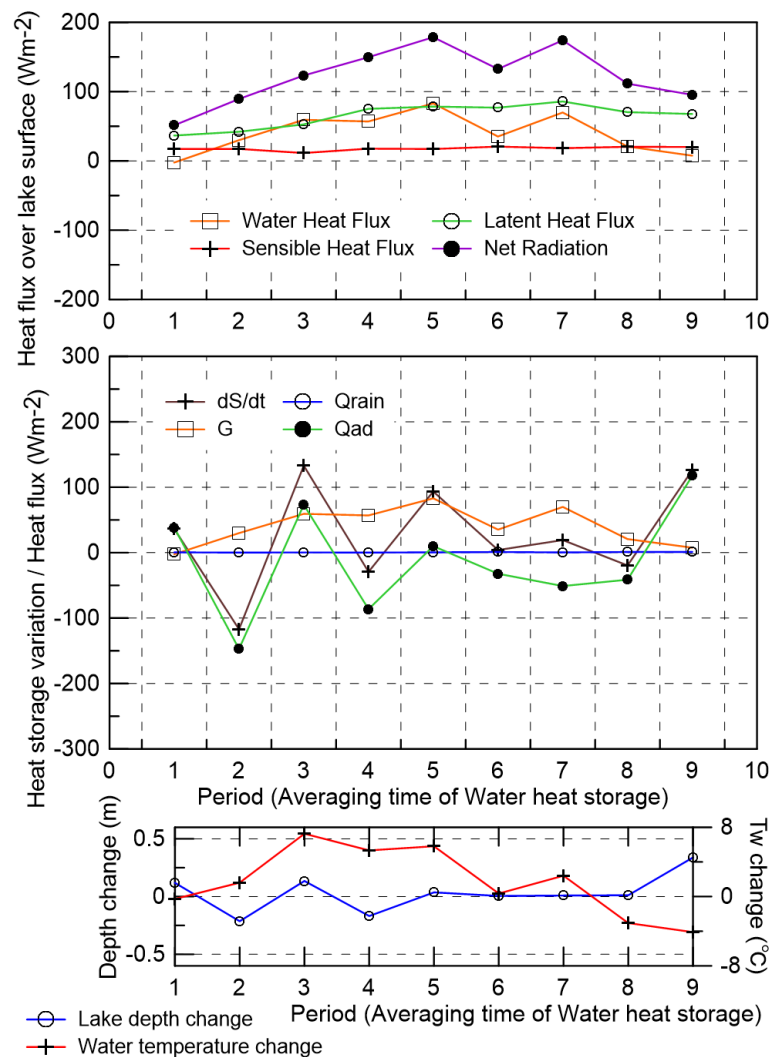


図 84 ボックスモデル結果(木原沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

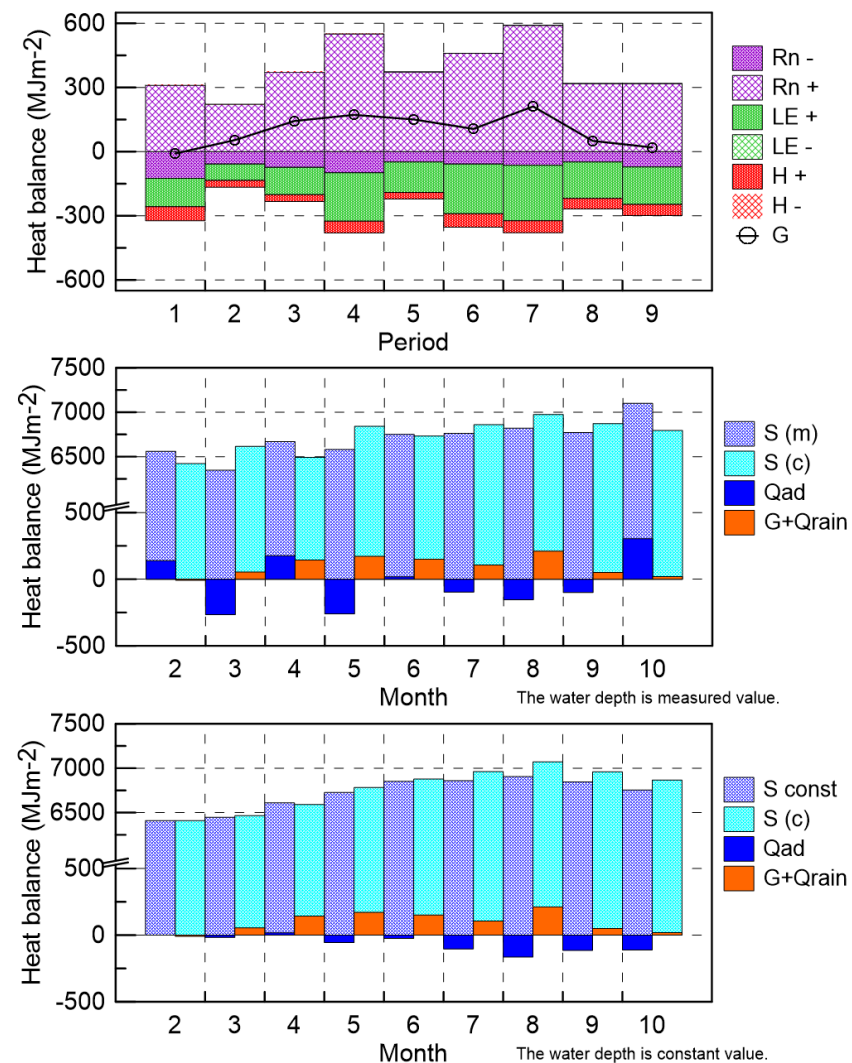


図 85 熱収支・熱容量の比較(木原沖)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{\text{rain}})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

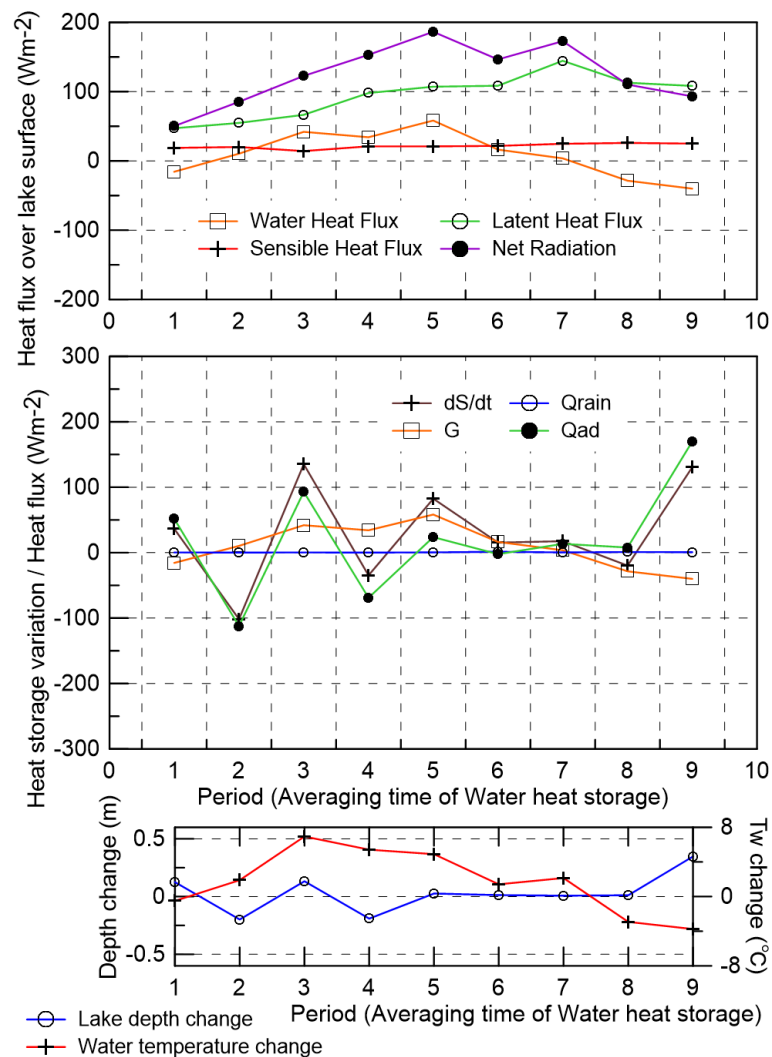


図 86 ボックスモデル結果(湖心)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

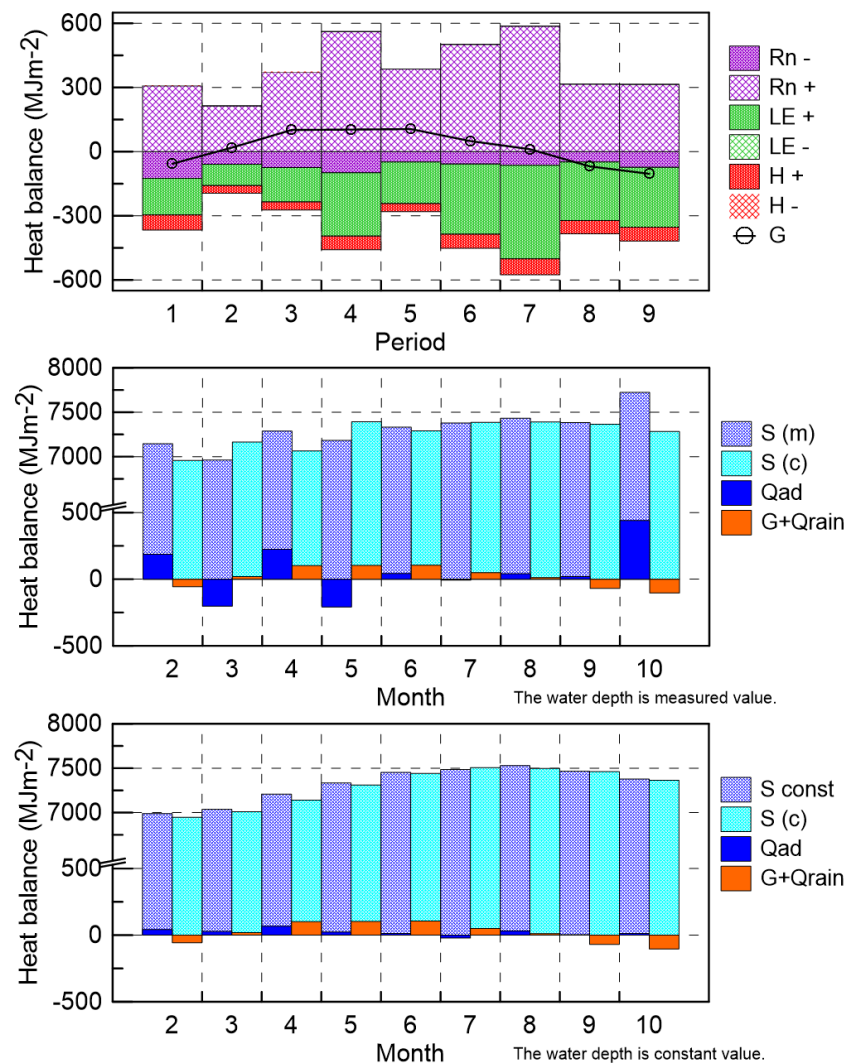


図 87 熱収支・熱容量の比較(湖心)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

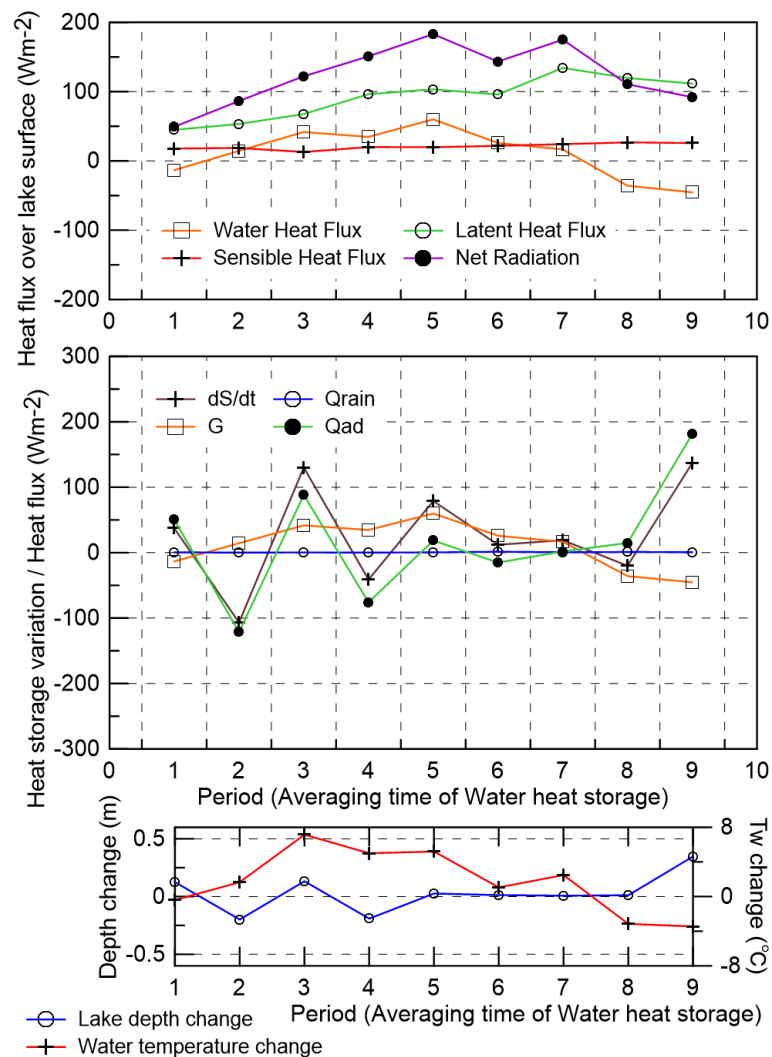


図 88 ボックスモデル結果(西の洲沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

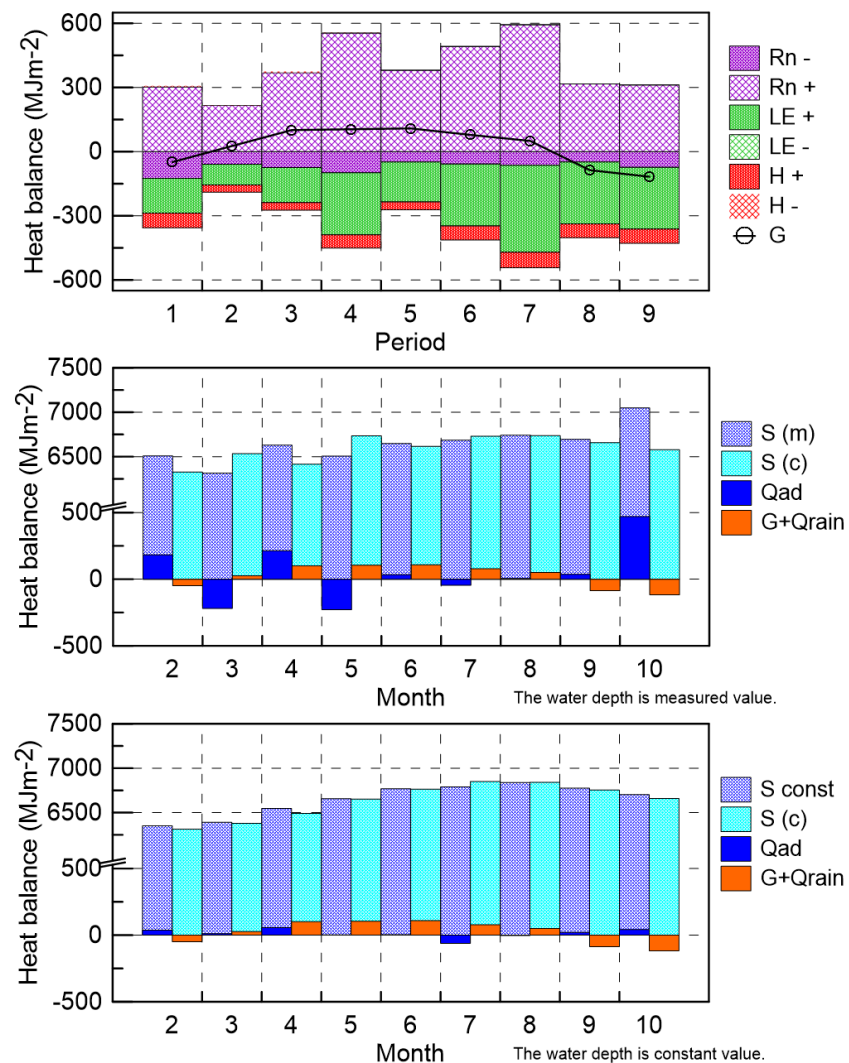


図 89 熱収支・熱容量の比較(西の洲沖)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

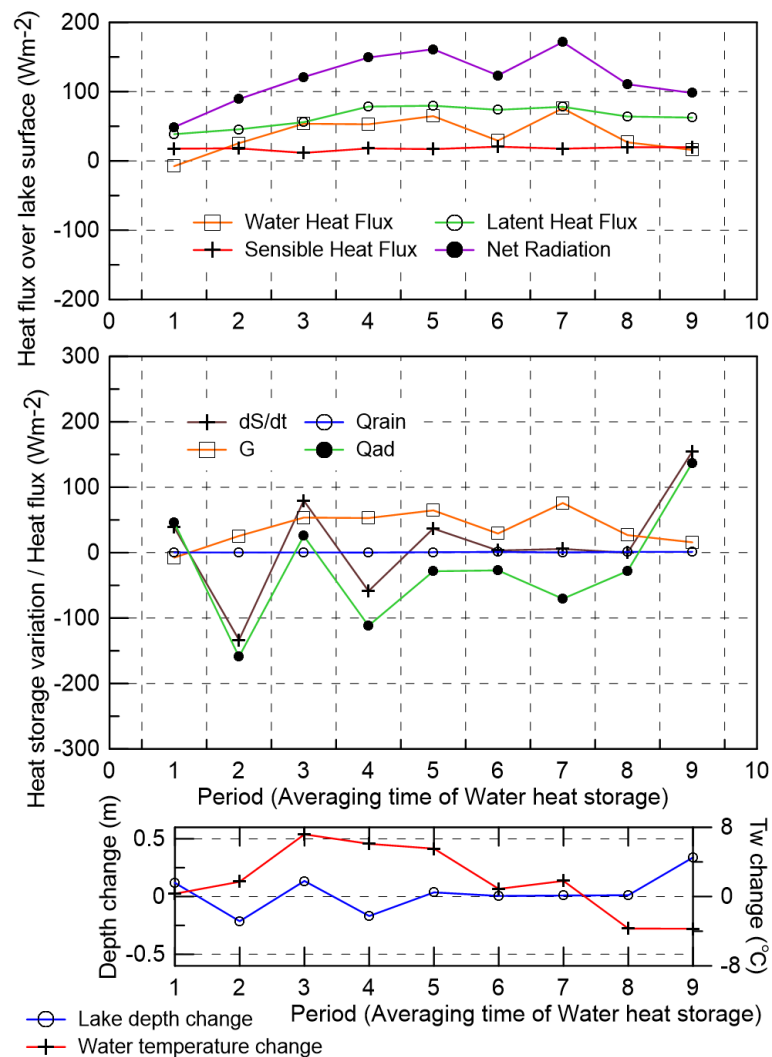


図 90 ボックスモデル結果(沖宿沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

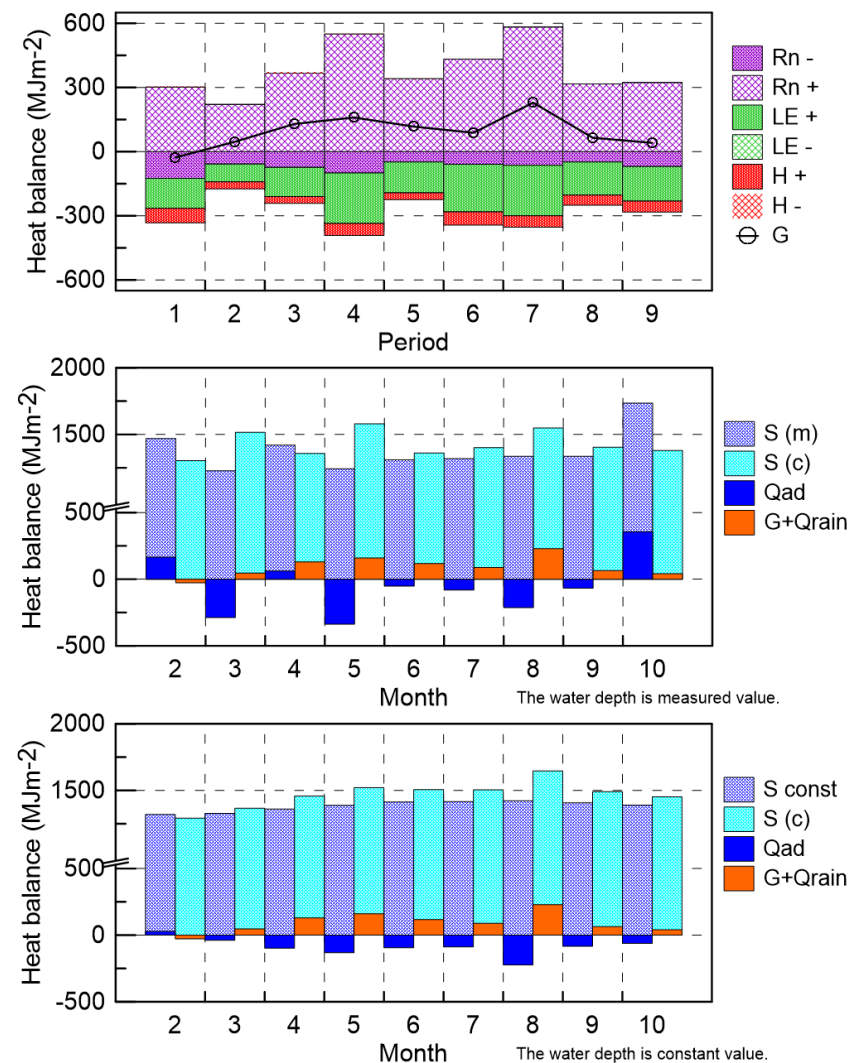


図 91 熱収支・熱容量の比較(沖宿沖)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{\text{rain}})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

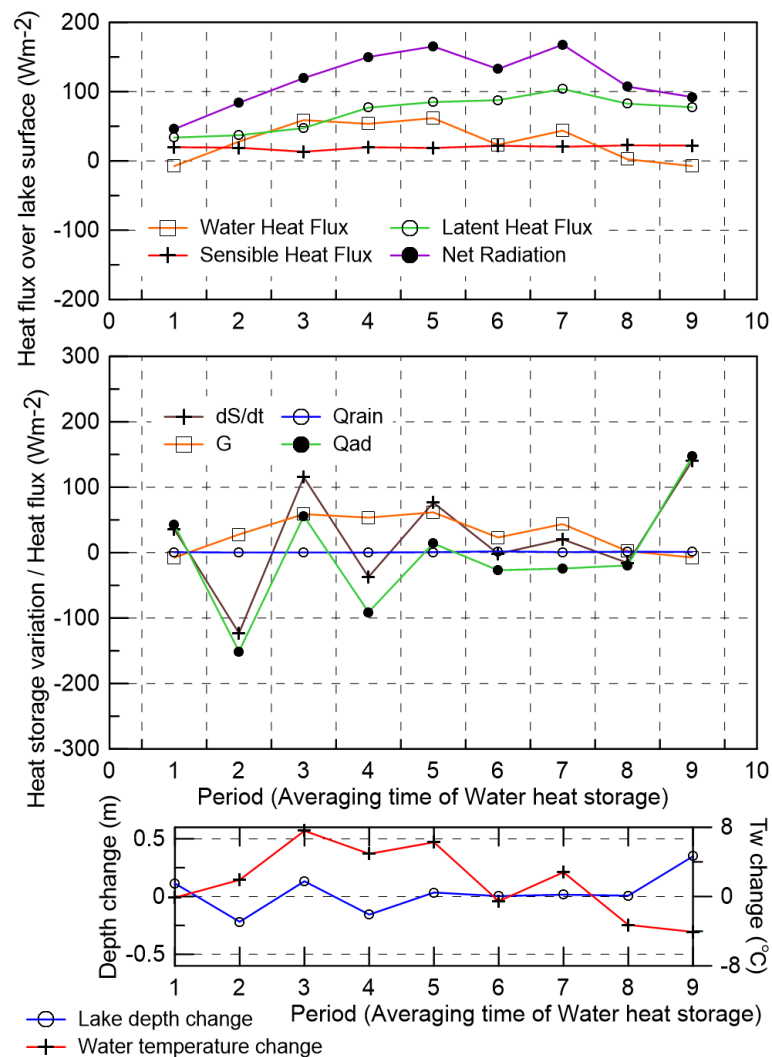


図 92 ボックスモデル結果(高浜沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

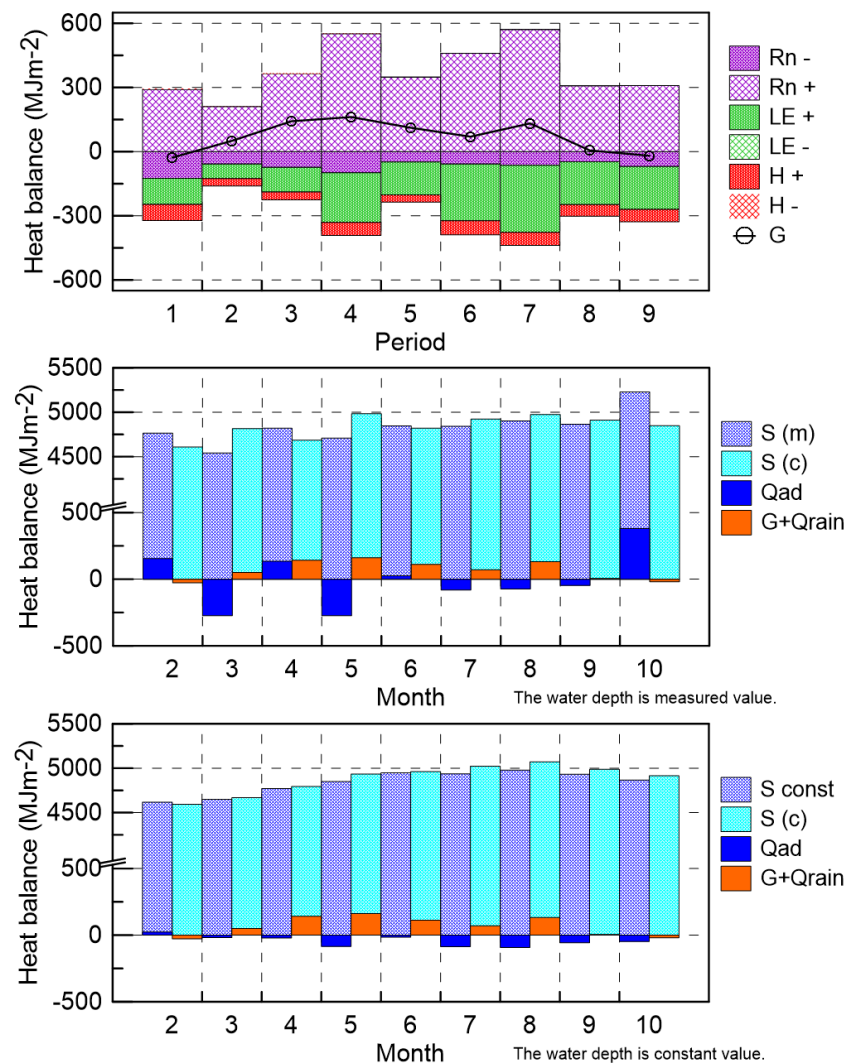


図 93 熱収支・熱容量の比較(高浜沖)

※ (m)は実測値, (c)は $(G + Q_{\text{rain}})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

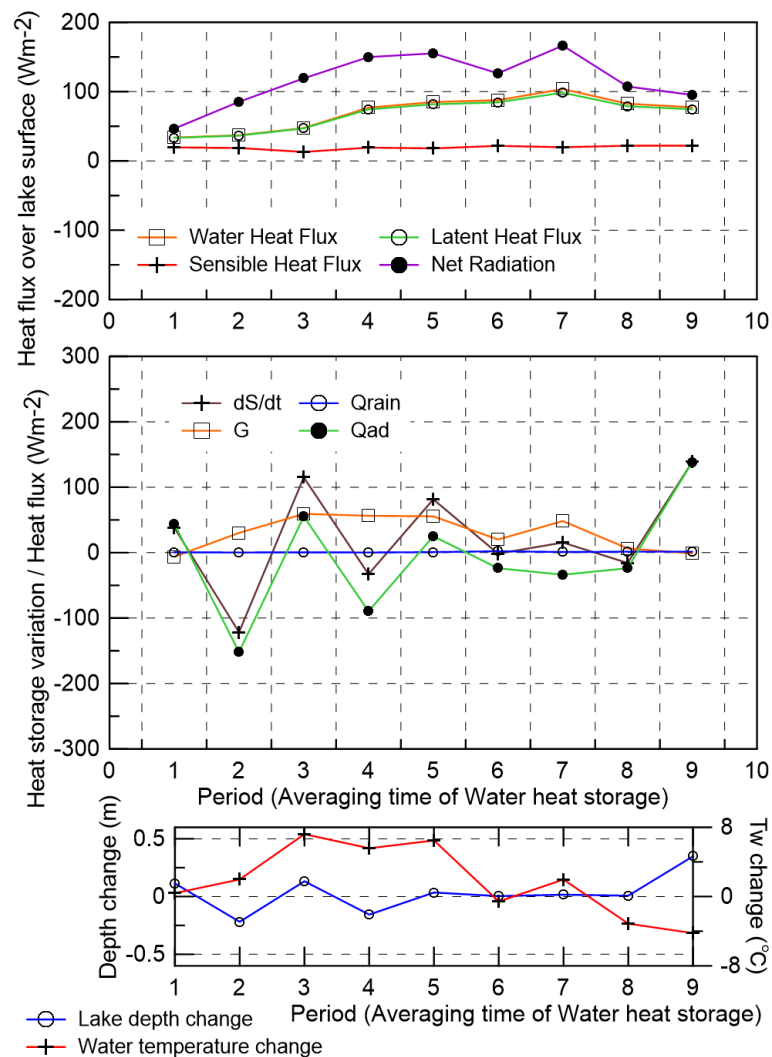


図 94 ボックスモデル結果(高崎沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

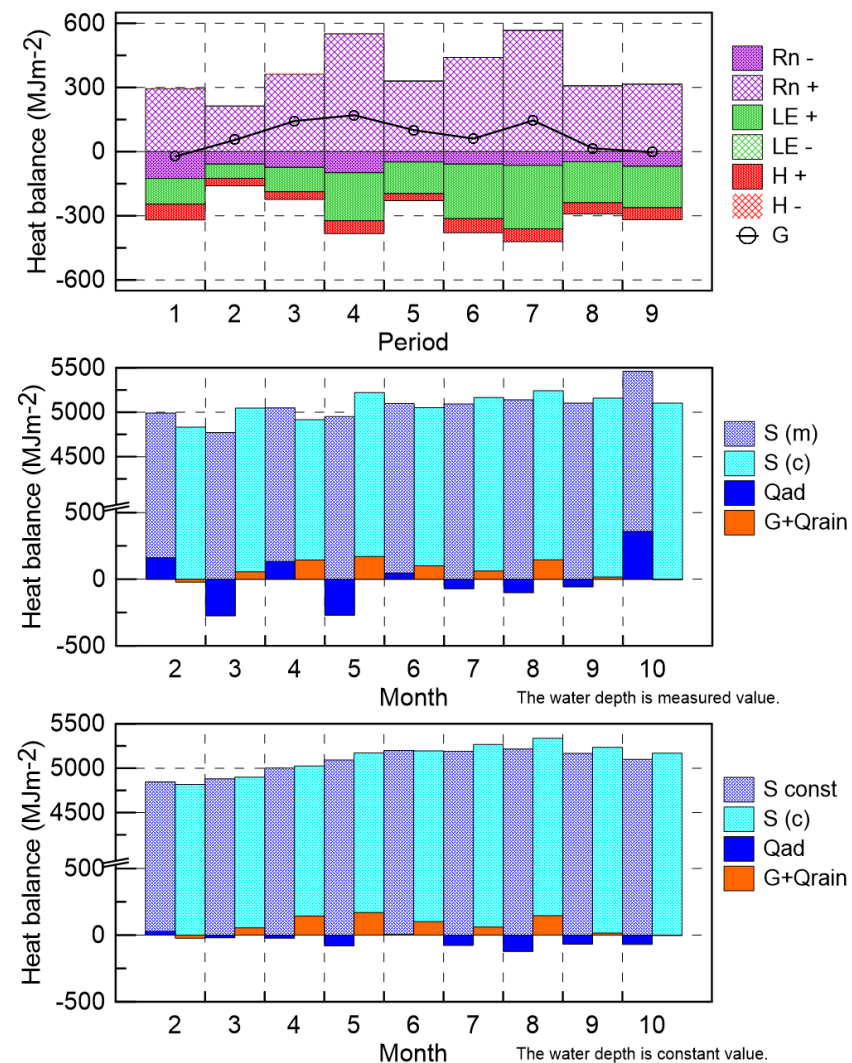


図 95 熱収支・熱容量の比較(高崎沖)

※ (m)は実測値, (c)は($G+Q_{\text{rain}}$)を入力した計算値, const は水深固定値.

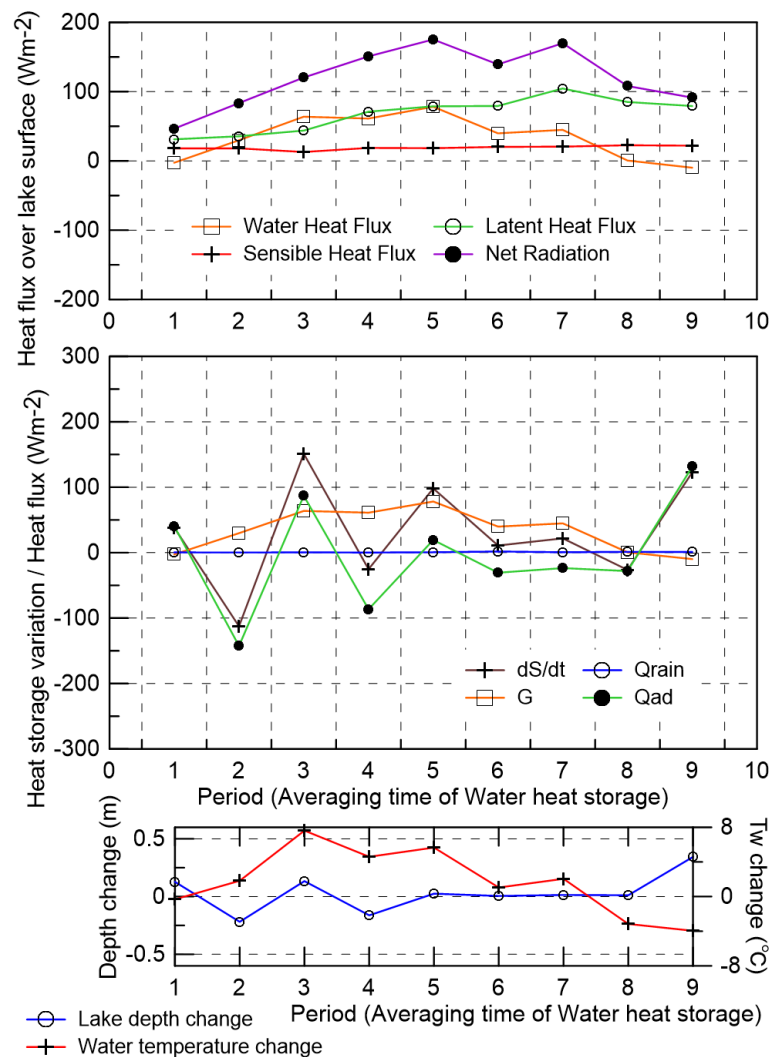


図 96 ボックスモデル結果(玉造沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

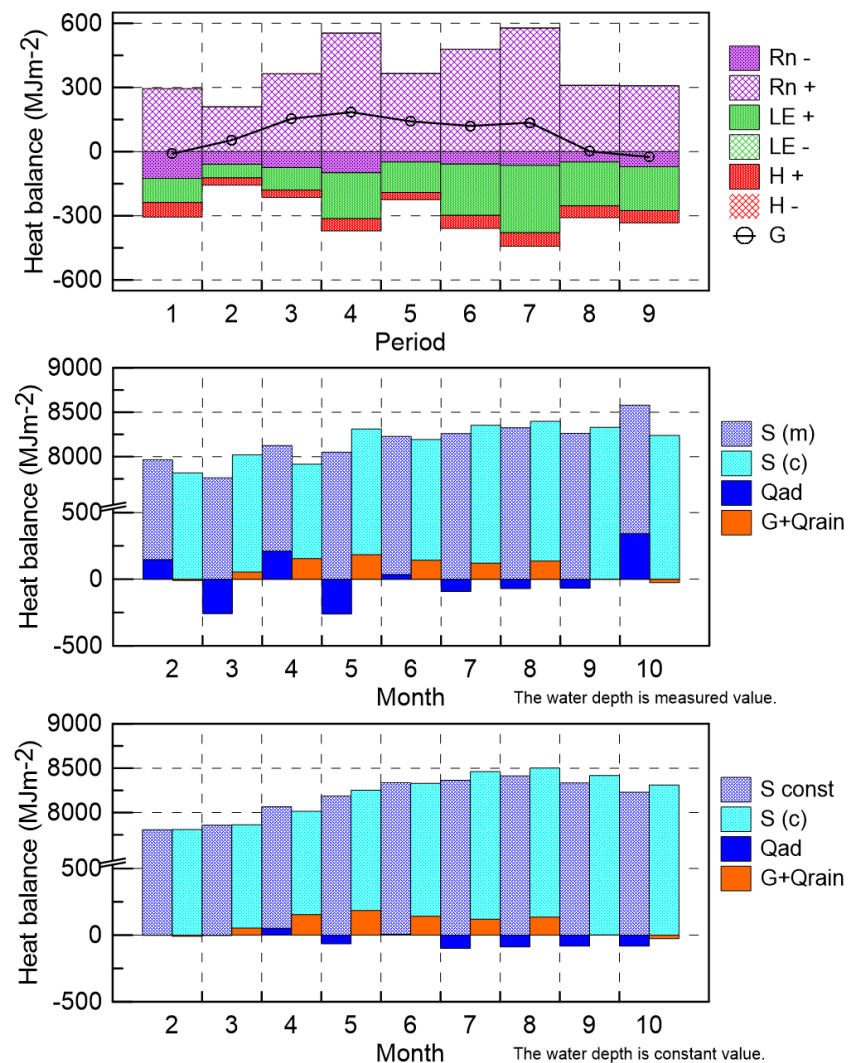


図 97 熱収支・熱容量の比較(玉造沖)

※ (m)は実測値, (c)は($G+Q_{\text{rain}}$)を入力した計算値, const は水深固定値。

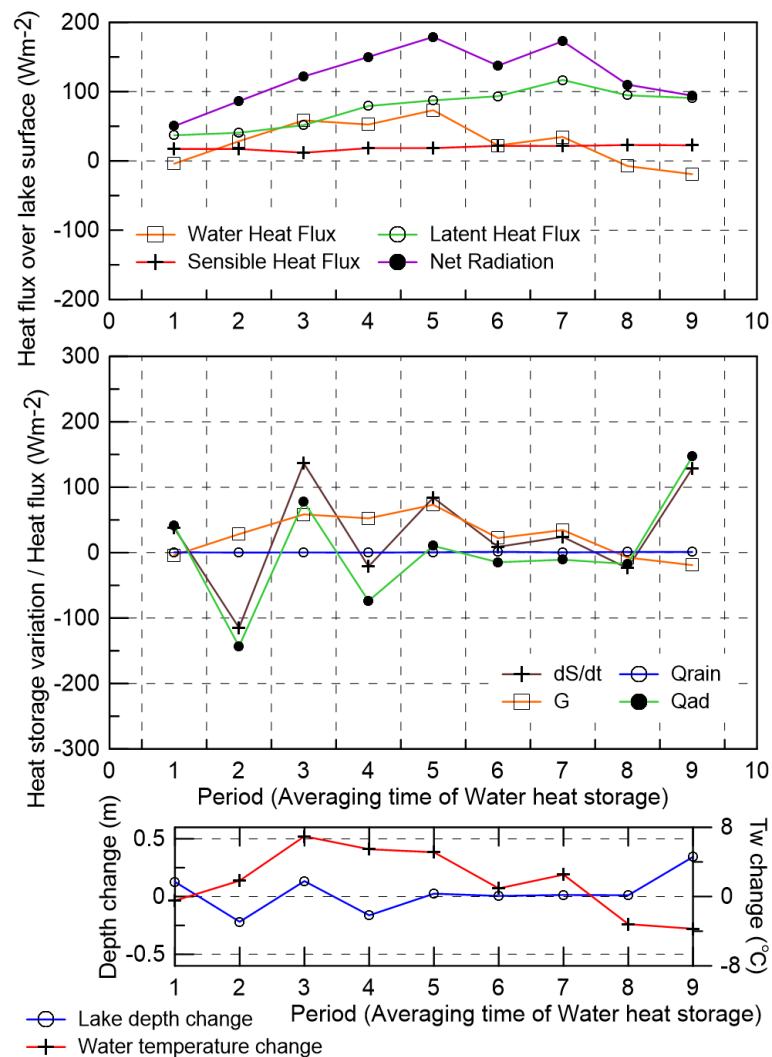


図 98 ボックスモデル結果(牛込沖)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

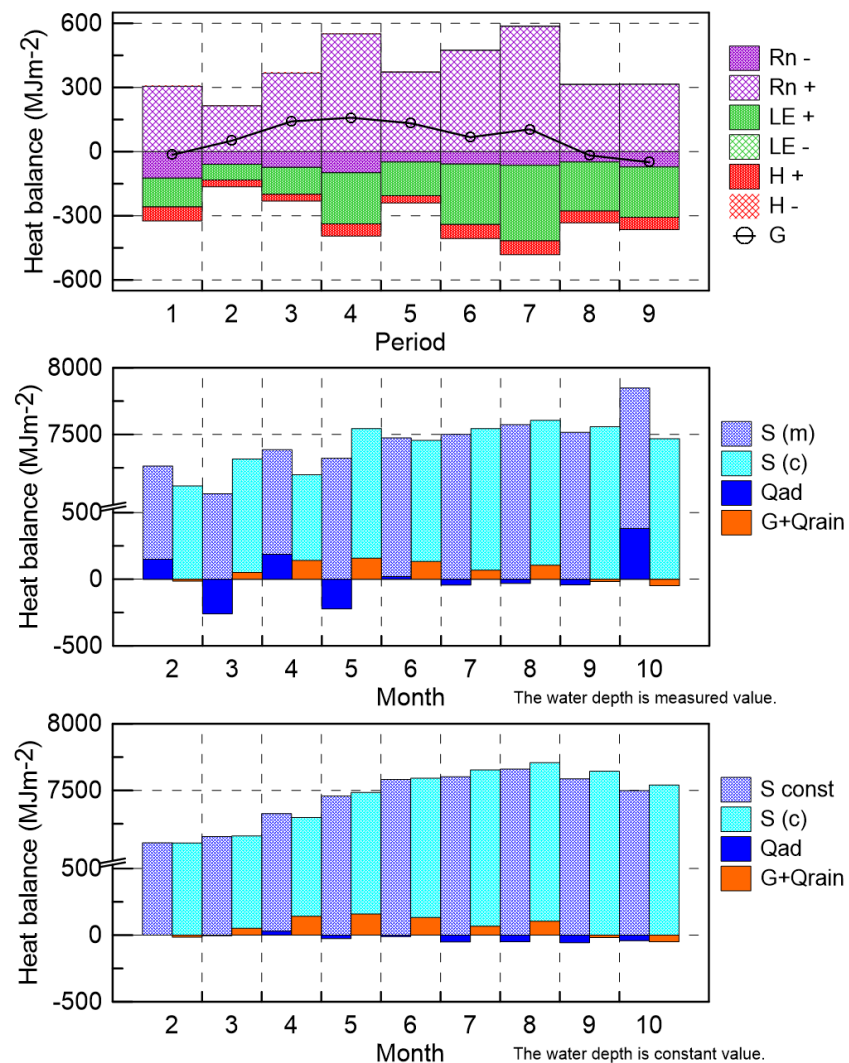


図 99 熱収支・熱容量の比較(牛込沖)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

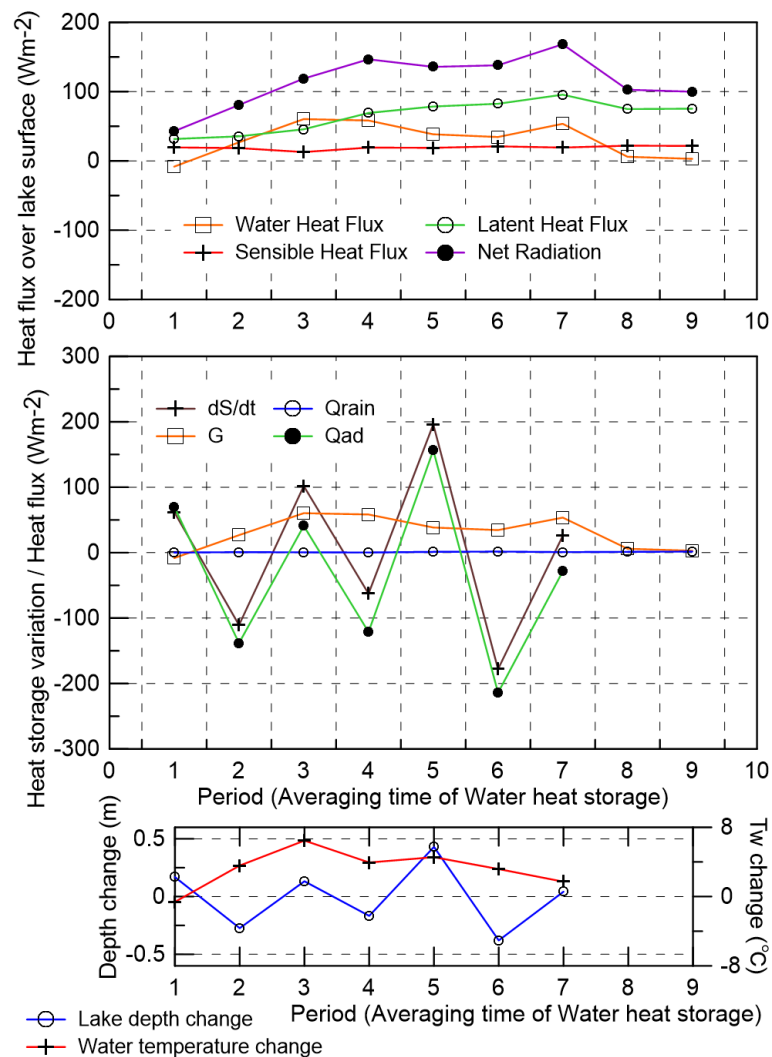


図 100 ボックスモデル結果(Station.1)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

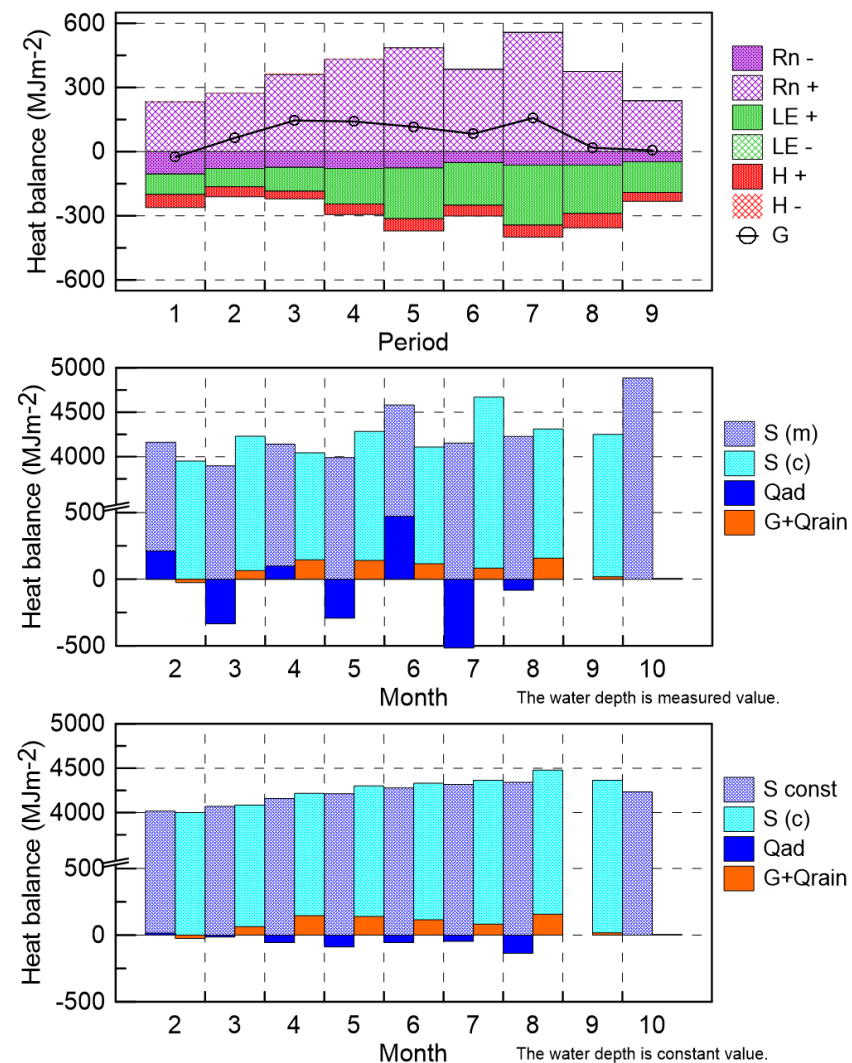


図 101 熱収支・熱容量の比較(Station. 1)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

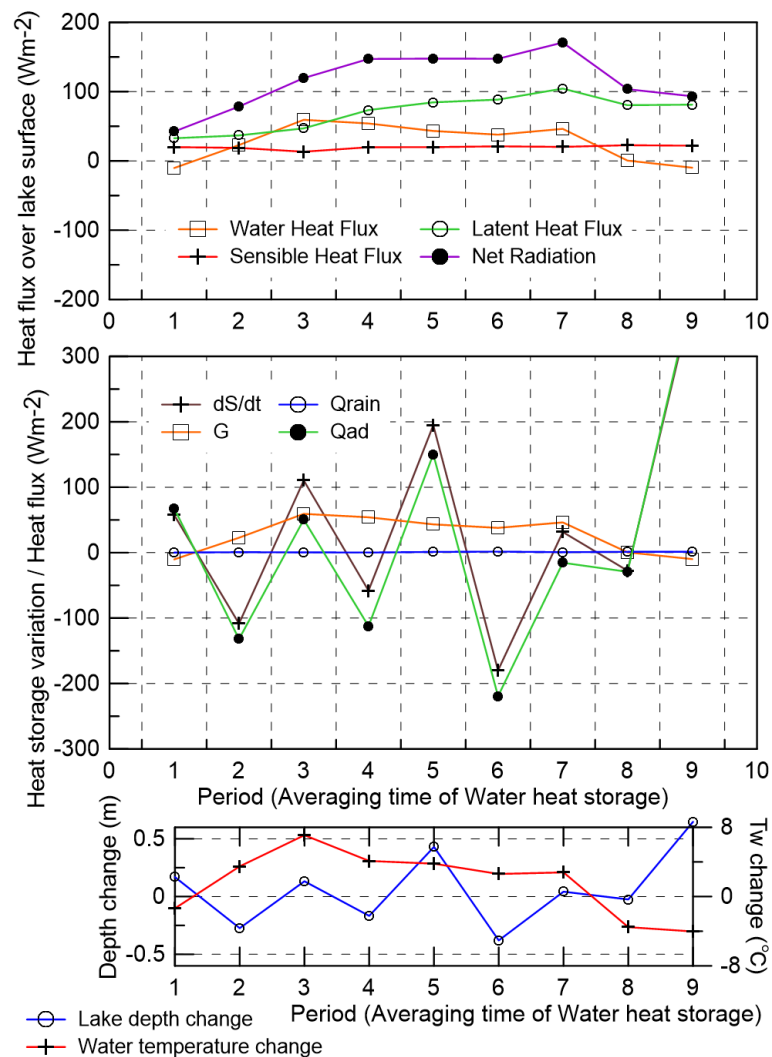


図 102 ボックスモデル結果(Station.3)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

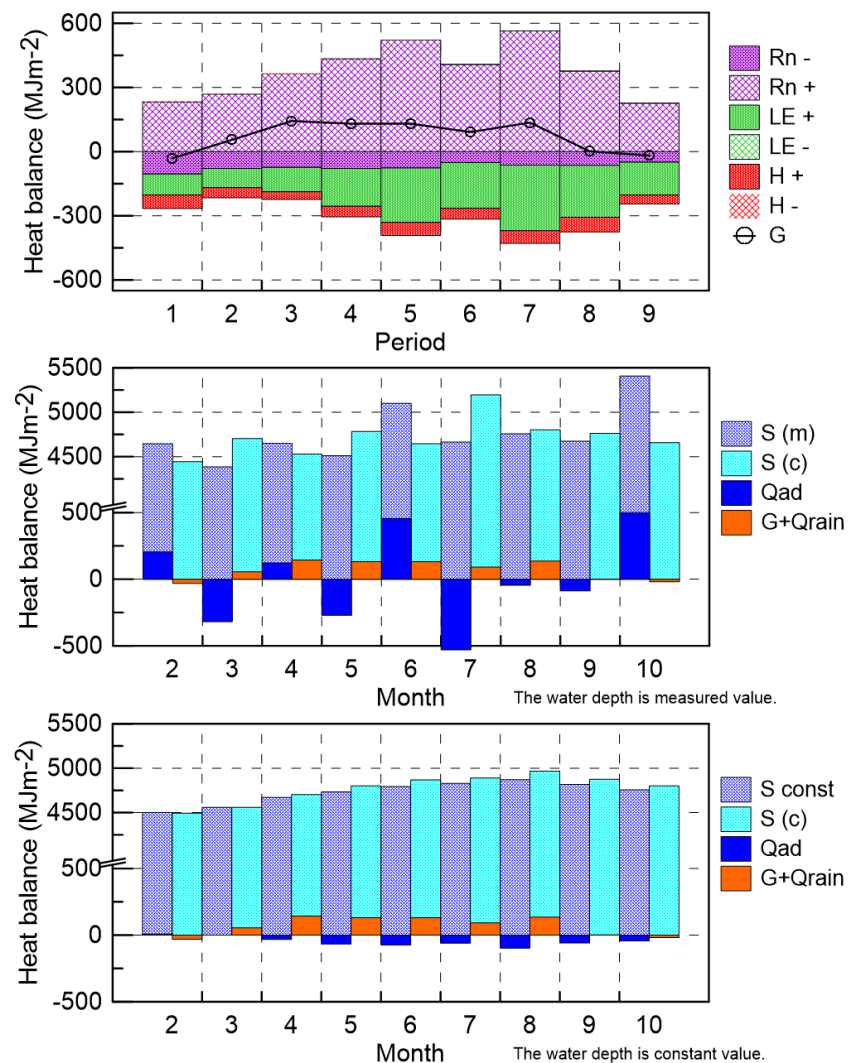


図 103 熱収支・熱容量の比較(Station. 3)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

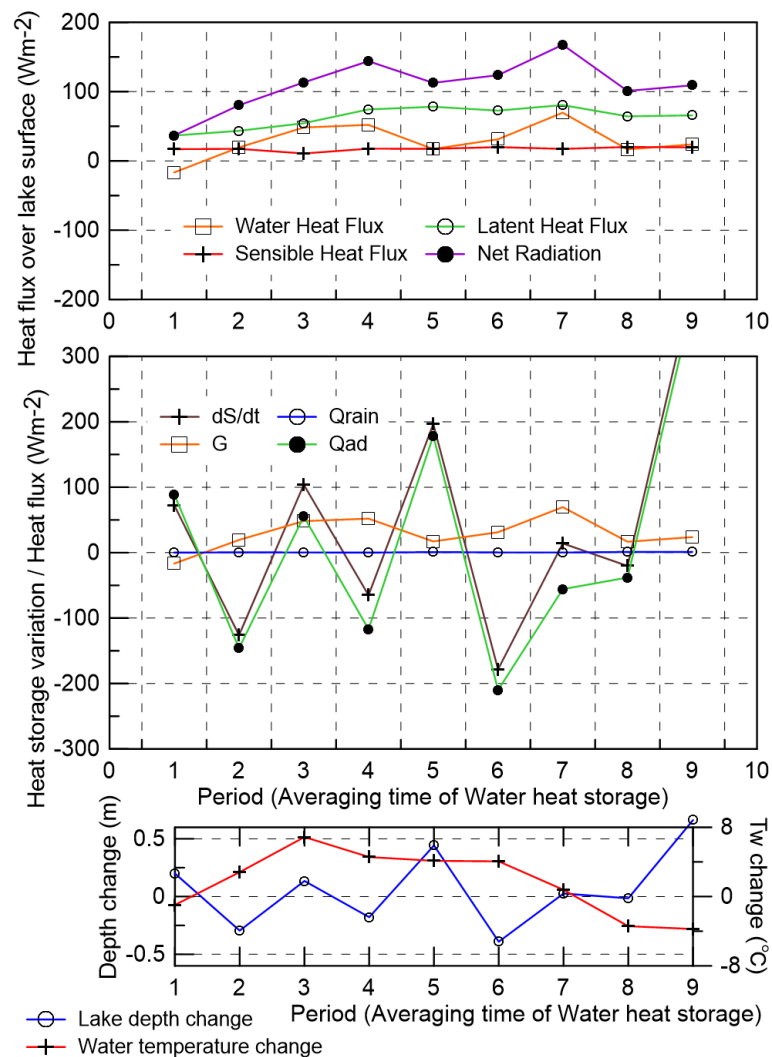


図 104 ボックスモデル結果(Station.7)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

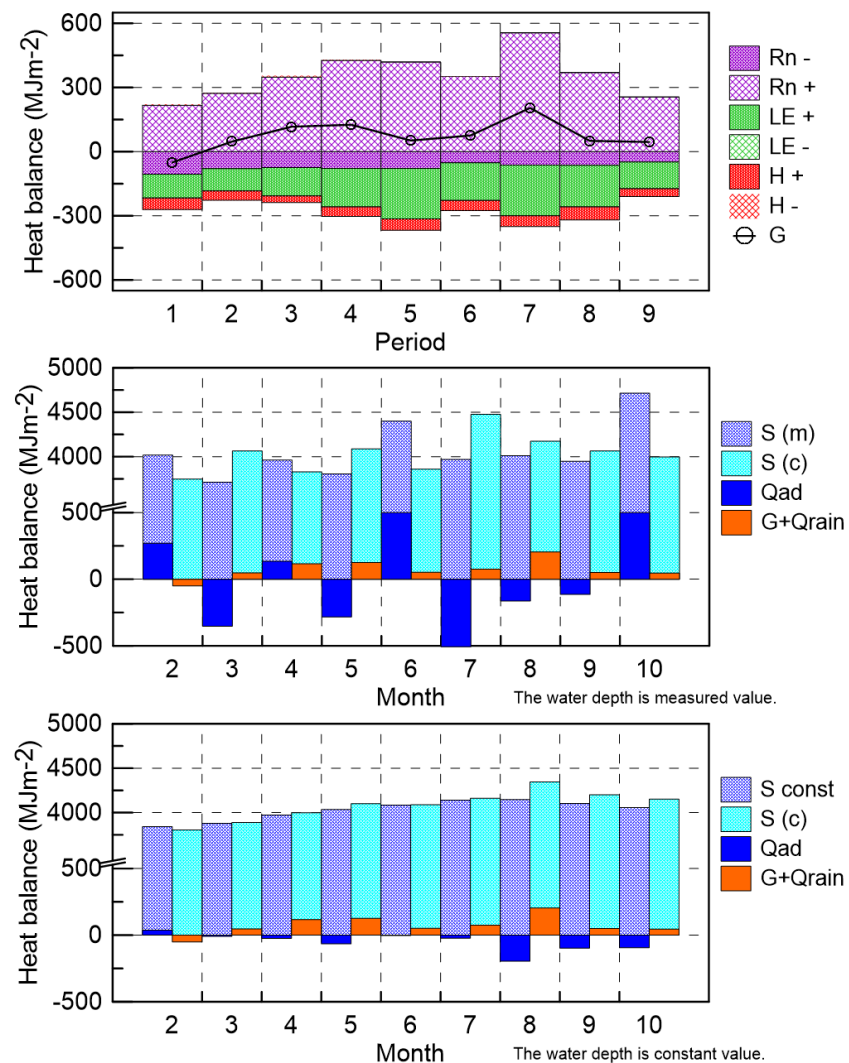


図 105 熱収支・熱容量の比較(Station. 7)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

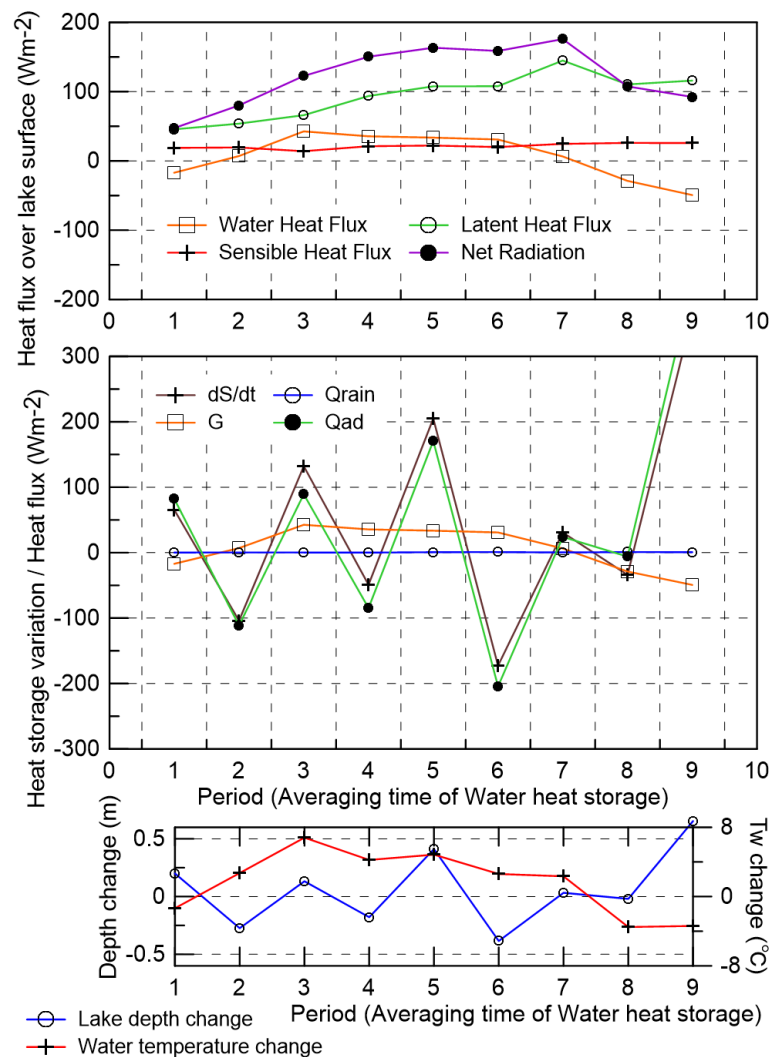


図 106 ボックスモデル結果(Station.9)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

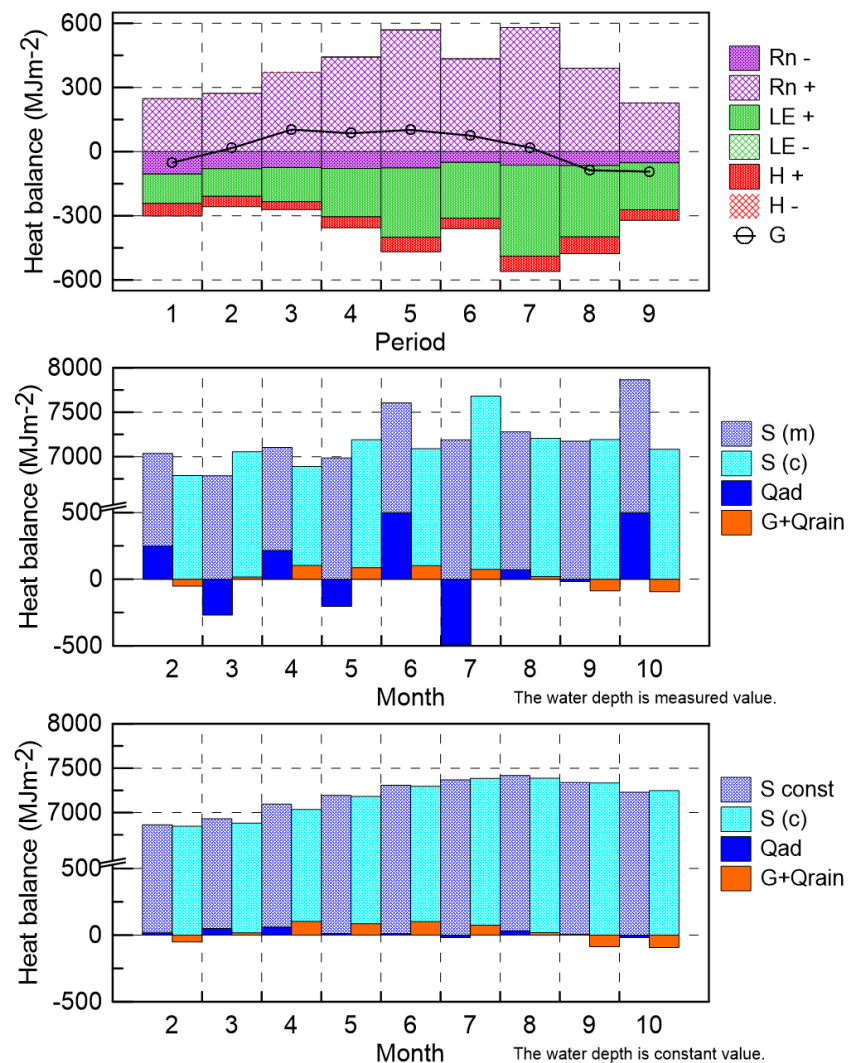


図 107 熱収支・熱容量の比較(Station. 9)

※ (m)は実測値, (c)は $(G+Q_{rain})$ を入力した計算値, const は水深固定値。

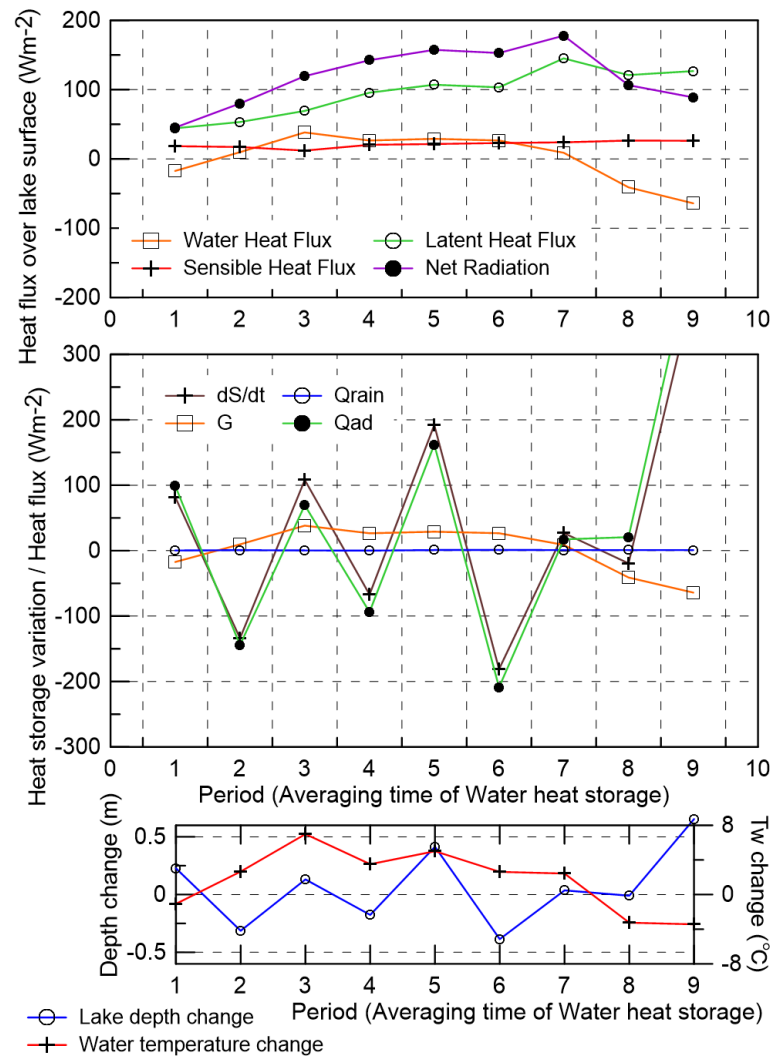


図 108 ボックスモデル結果(Station.12)

※ 右の棒グラフについて、上段の図以外は積み上げではない。

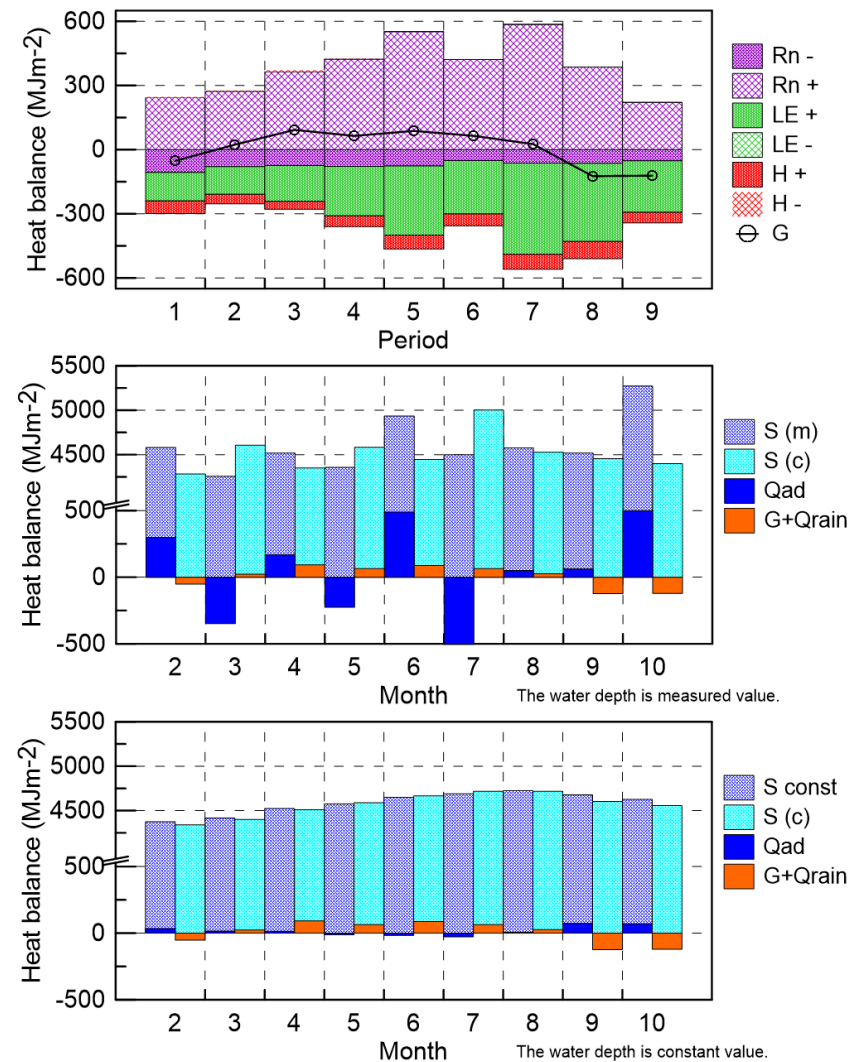


図 109 熱収支・熱容量の比較(Station. 12)

※ (m)は実測値, (c)は($G+Q_{rain}$)を入力した計算値, const は水深固定値.

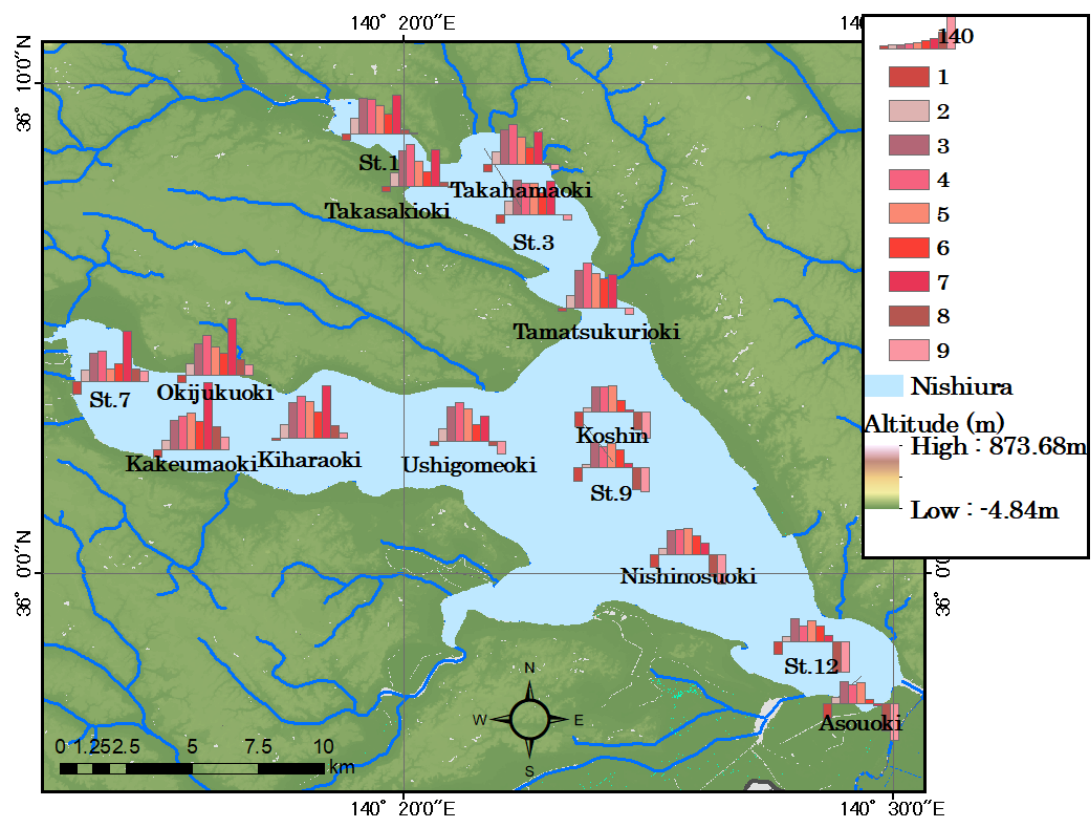


図 110 大気由来の熱輸送量($G + Q_{rain}$)の時空間変動

※ 単位は $\text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$. 1~9 は Period を表す.

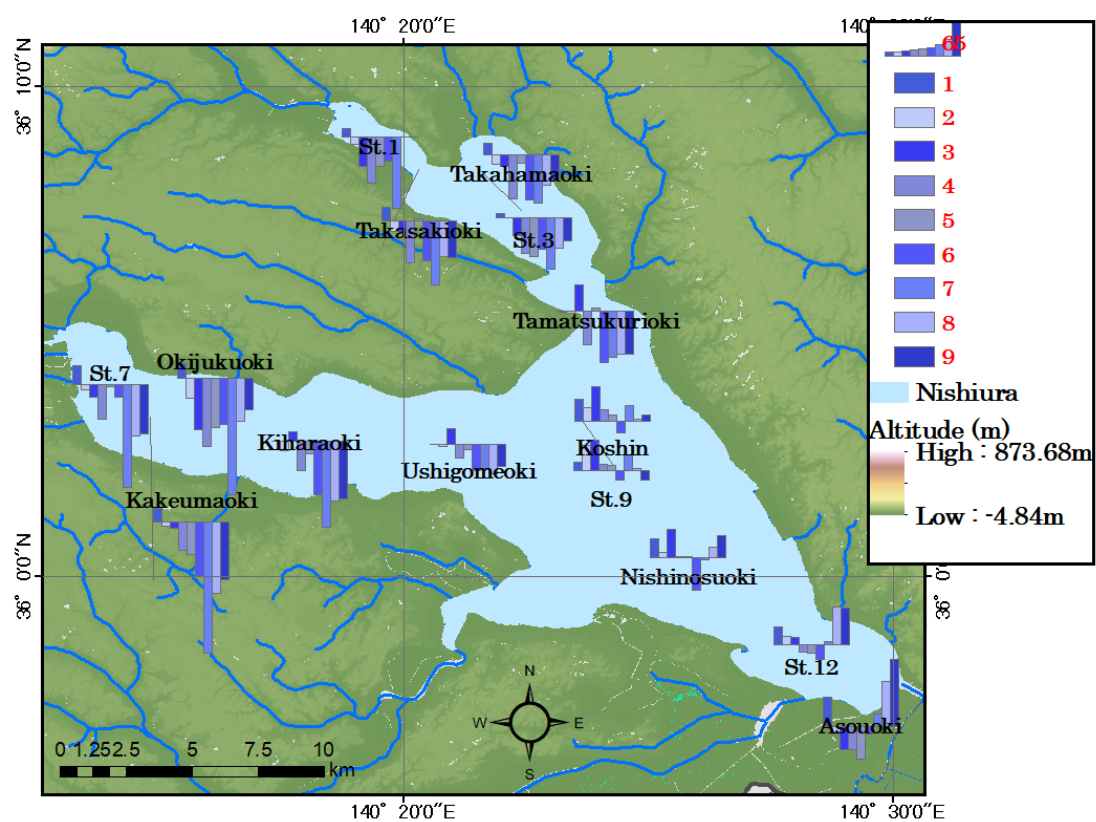


図 111 移流 Q_{ad} の時空間変動(水深一定)

※ 単位は $\text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$. 1~9 は Period を表す.

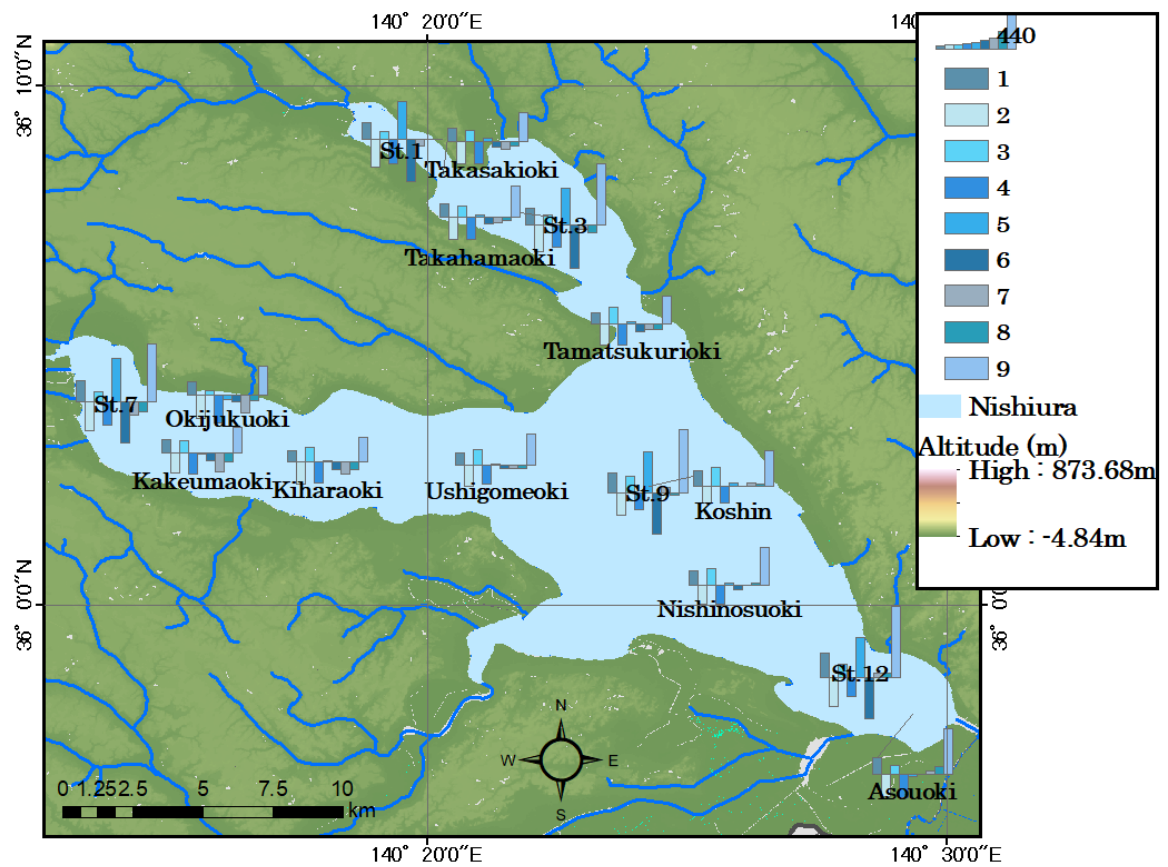


図 112 移流 Q_{ad} の時空間変動(水深変動)

※ 単位は $\text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$. 1~9 は Period を表す.

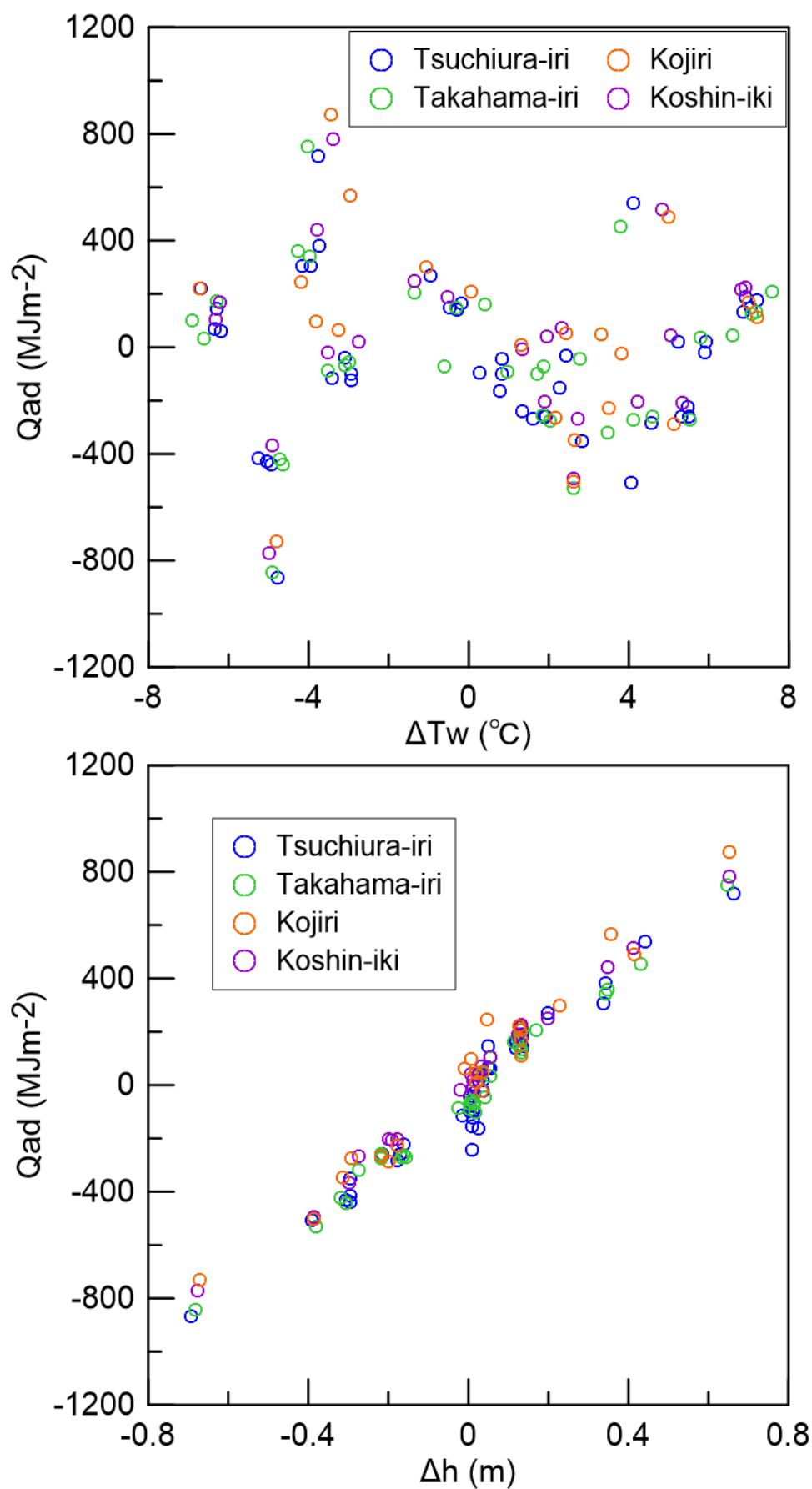


図 113 移流熱輸送量と水位変化・水温変化の関係性

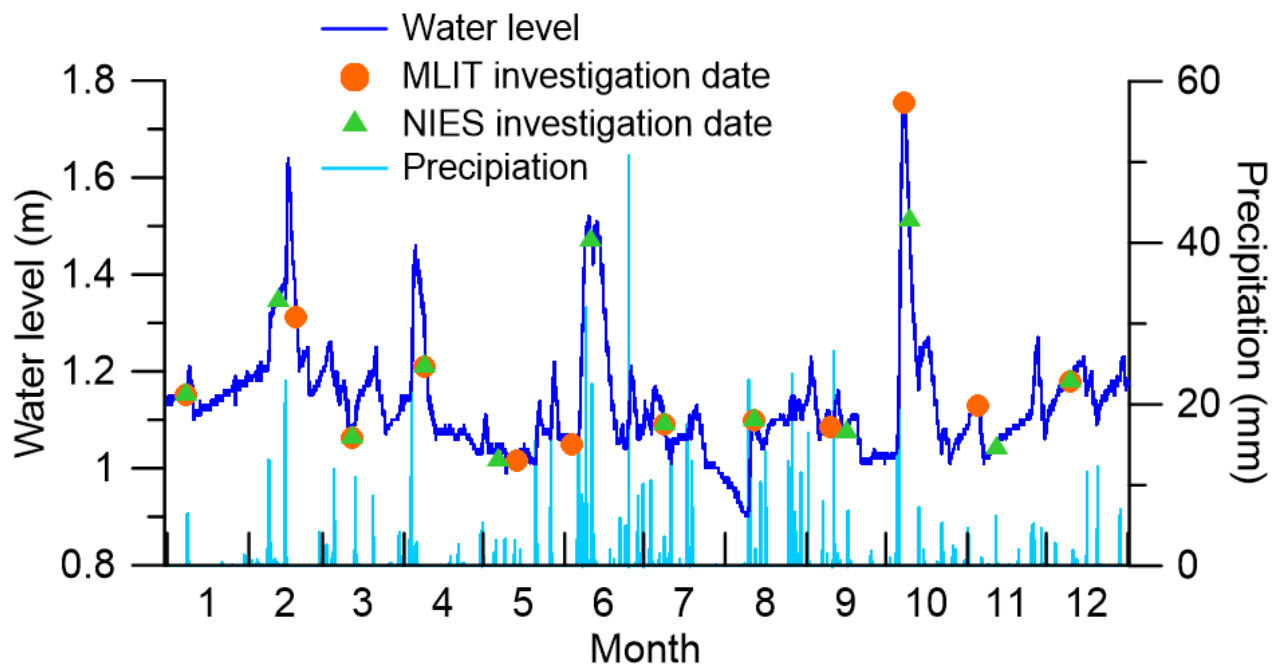


図 114 水位と調査日

※ 水位は Y.P.で表されている.

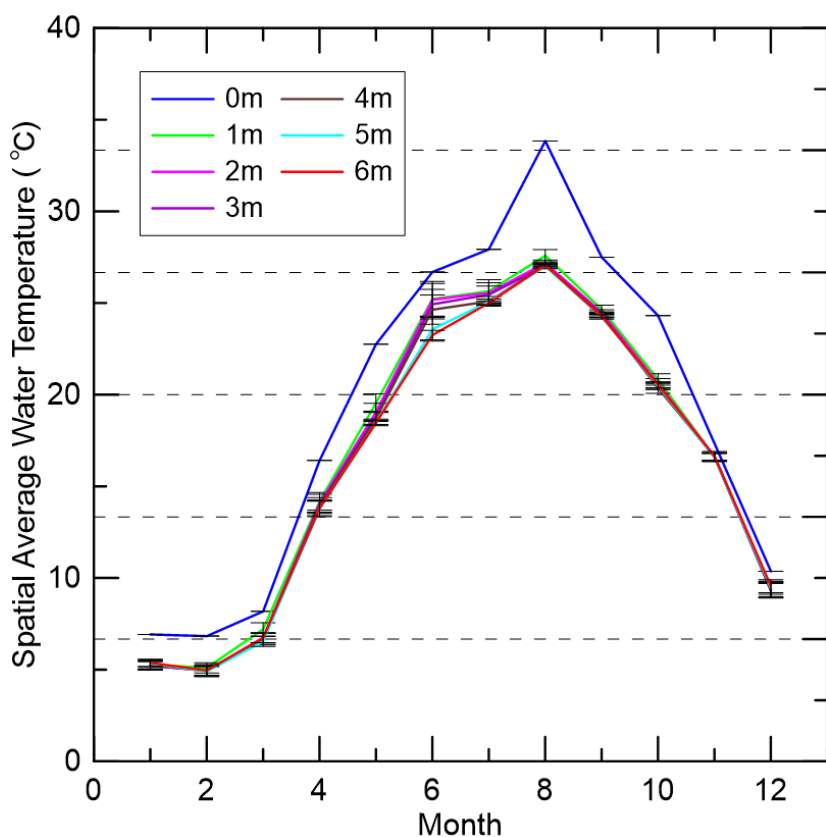


図 115 水温の水平方向平均値・標準偏差

※ 水温鉛直分布調査の結果から導出.

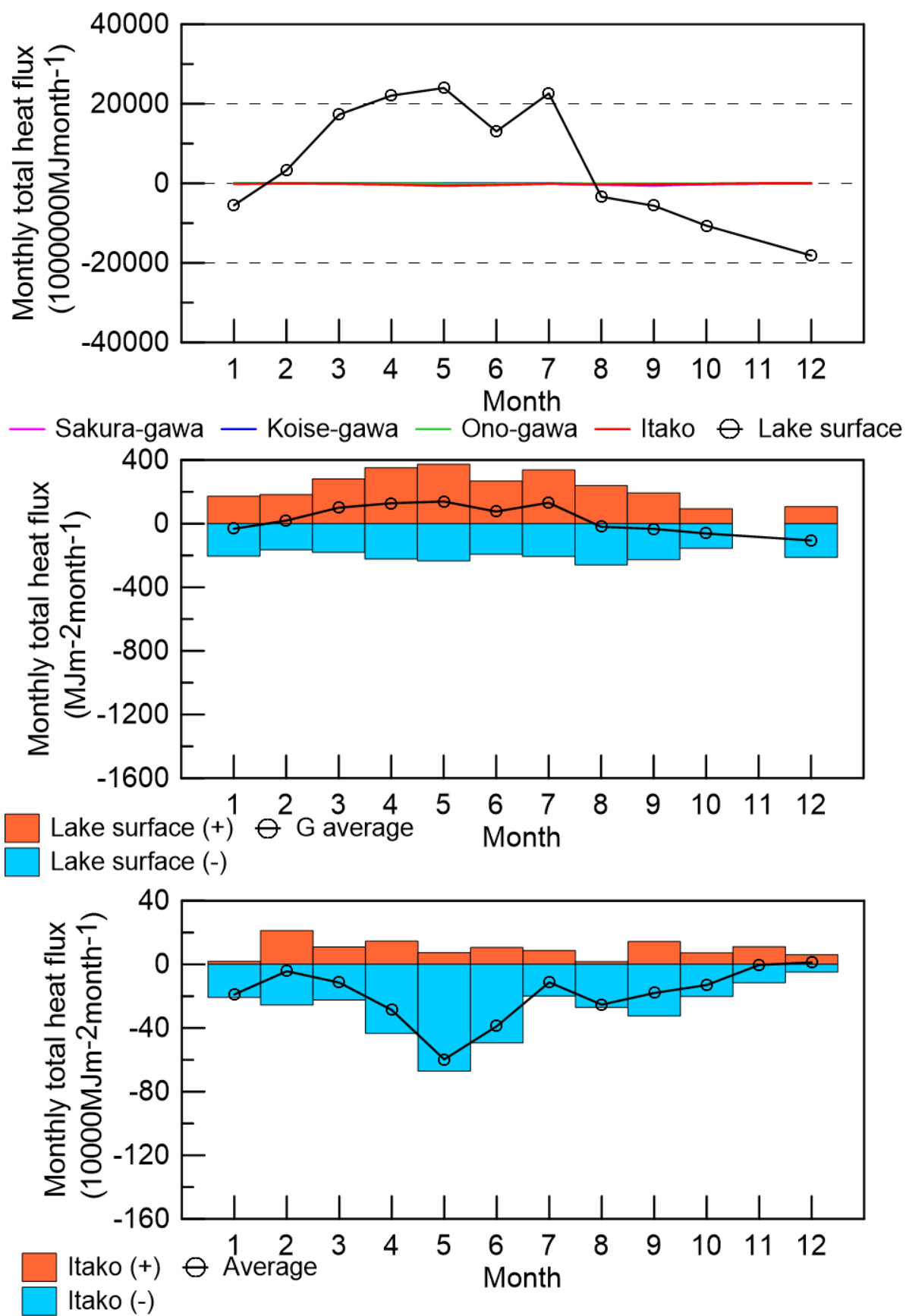


図 116 河川と湖面の熱交換量

※ 潮来は流出河川(式 28)であるため、符号が逆転して示されている。

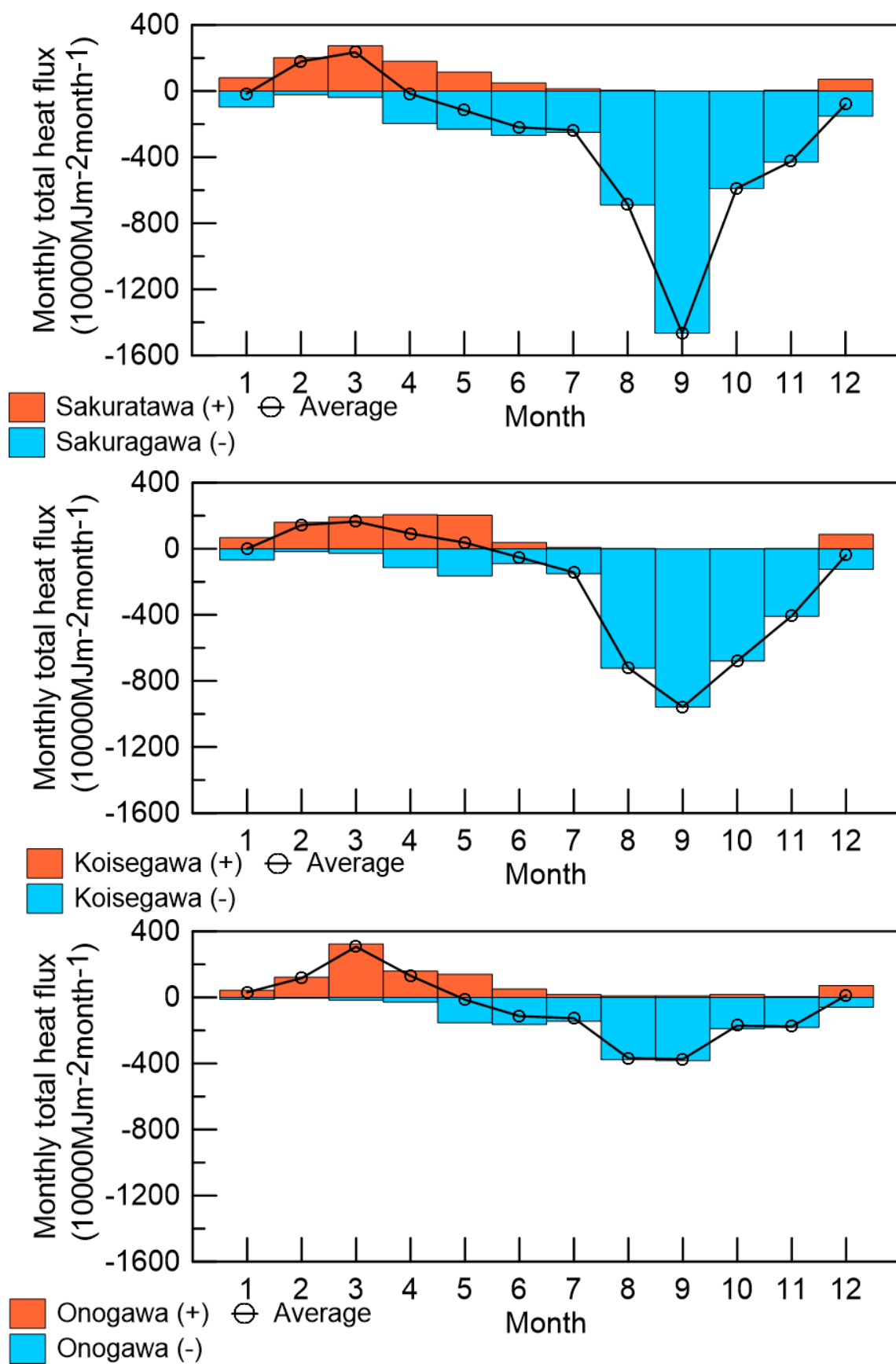


図 116 河川と湖面の熱交換量, 続き

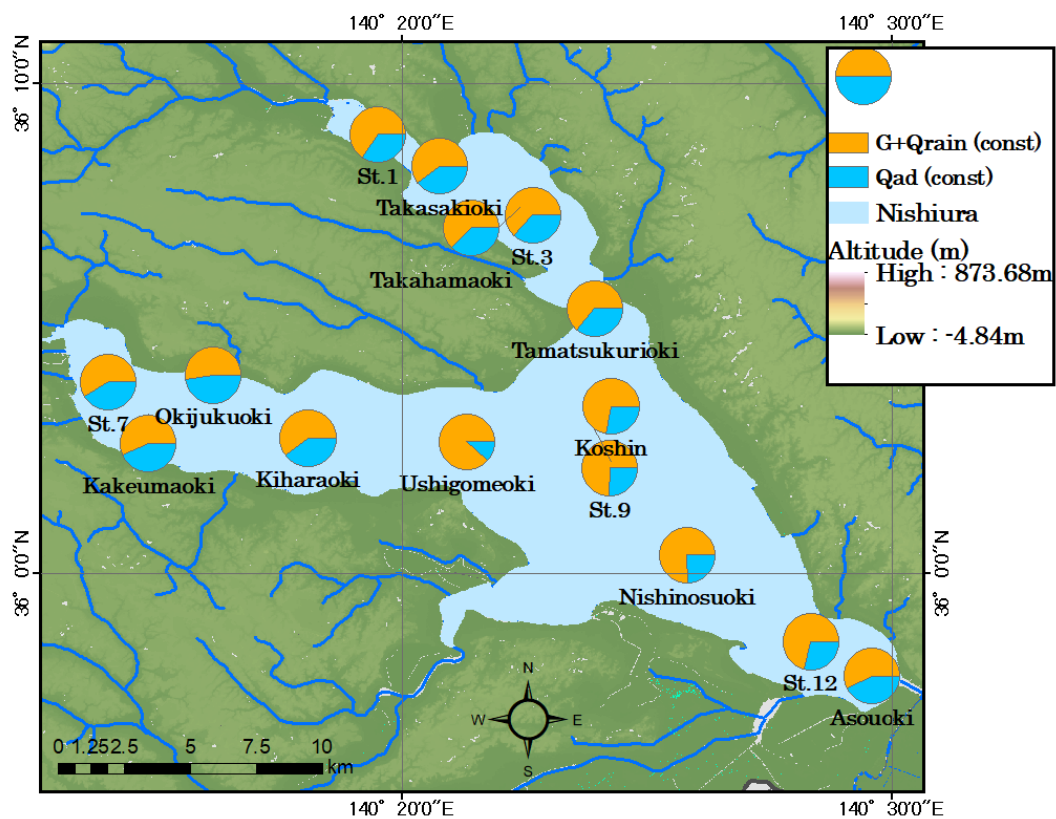


図 117 大気と移流の熱輸送量比(水深一定)

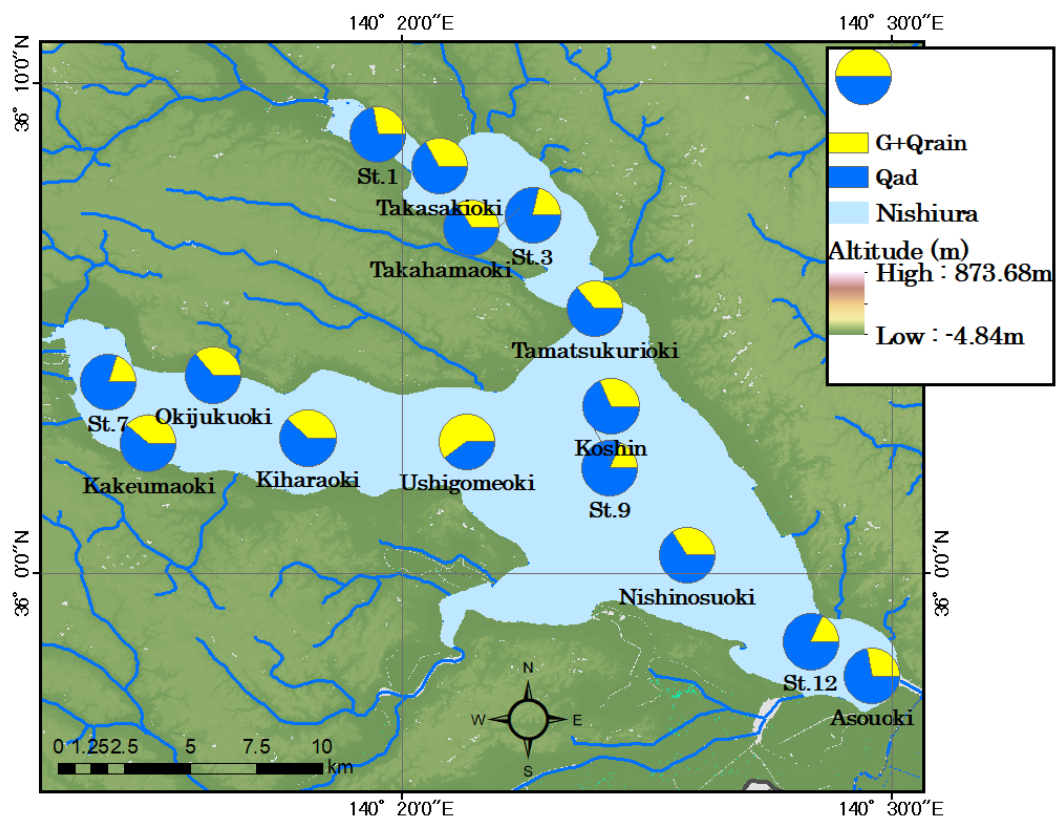


図 118 大気と移流の熱輸送量比(水深変動)