渦相関法とバルク法を用いた霞ヶ浦湖面における

二酸化炭素フラックスの測定

石川浩太郎 201921212

2021年1月

筑波大学大学院

生命環境科学研究科環境科学専攻

2020年度 修士 (環境科学)学位論文

| 要旨•••••  | • • • •   |           | ••••ii            |
|--|-----------|-----------|-------------------|
| Abstract • • • • • • • • • • • • • • • • • • • |           | • • • •   | •••••iii          |
| 表目次・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・        |           |           | •••••iv           |
| 図目次・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・        | ••••      | ••••      | ••••• v           |
| 本文 1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・                    | • • • •   |           | •••••1            |
| 1.1 研究背景・・・・・・・・・・・・・                          |           |           | ••••1             |
| 1.2 富栄養化湖沼を研究対象にした渦相関法は                        | こよる先行     | う研究・・     | •••••1            |
| 1.3 本研究の目的・・・・・・・・・・・                          | • • • •   |           | ••••1             |
| 2研究方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・      | ••••      |           | •••••2            |
| 2.1 観測とデータ・・・・・・・・・・                           | • • • •   |           | •••••2            |
| 2.1.1 観測・・・・・・・・・・・・・                          |           |           | •••••2            |
| 2.1.2 使用したデータ・・・・・・・・・                         |           |           | · · · · · 2       |
| 2.1.2.1 国土交通省による観測・・・・・・                       |           |           | · · · · · 2       |
| 2.1.2.1.1 pH データ・・・・・・・・                       | • • •     |           | ••••3             |
| 2.1.2.1.2 水温データ・・・・・・・・・                       | •••       |           | ••••3             |
| 2.1.2.1.3 降水・平均気温・気圧データ・・・                     | • • • •   |           | ••••3             |
| 2.2 データ処理・・・・・・・・・・・                           | ••••      |           | ••••3             |
| 2.2.1 渦相関法による二酸化炭素フラックスの                       | の算出と      | データ選別     | ۱ <b>J</b> •••••4 |
| 2.2.2 ガス交換係数の算出・・・・・・・                         | ••••      |           | ••••5             |
| 2.2.3 バルク法による二酸化炭素フラックス                        | の推定・      | ••••      | •••• 8            |
| 2.2.4 ガス交換係数の推定・・・・・・・                         | ••••      |           | ••••8             |
| 2.2.5 乱流強度テスト・・・・・・・・                          |           |           | ••••9             |
| 2.2.6 定常性テスト・・・・・・・・・                          |           |           | ••••9             |
| 3 結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・                      | • • • •   | ••••      | •••••10           |
| 3.1 二酸化炭素と水蒸気の現場キャリブレーシ                        | ションの約     | 結果・・・     | •••••10           |
| 3.2 渦相関法のデータ選別と品質管理の結果・                        | • • • • • | • • • • • | •••••11           |
| 3.2.1 乱流強度テスト・・・・・・・・                          |           | • • • •   | •••••11           |
| 3.2.2 定常性テスト・・・・・・・・・・                         |           | ••••      | •••••11           |
| 3.3 ガス交換係数・・・・・・・・・・                           |           | ••••      | •••••11           |
| 3.3.1 ガス交換係数と風速・・・・・・・                         | ••••      | • • • •   | •••••11           |
| 3.3.2 本研究のガス交換係数の精度 ・・・・                       | • • • •   | ••••      | •••••13           |
| 3.3.3 化学的促進が与えるガス交換係数への影                       | 影響・・      |           | •••••13           |
| 3.4 バルク法により補完した二酸化炭素フラッ                        | ックスの      | 年変化・・     | •••••13           |
| 3.5 pH の変動によって引き起こされる二酸化                       | 炭素フラ      | ックスの      | 評価・・・・14          |
| 4まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・                       | • • • •   | ••••      | •••••15           |
| 謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・         | • • • •   | ••••      | · · · · · 17      |
| 参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・       | • • • •   | ••••      | ••••18            |

目次

## 渦相関法とバルク法を用いた二酸化炭素フラックスの測定

石川浩太郎

### 要旨

地球温暖化が問題視されている昨今,二酸化炭素の動向を理解することは重要である.これま で,森林や海洋を研究対象とした二酸化炭素フラックスの多くの先行研究があるが,湖沼を研究 対象とした二酸化炭素フラックスの先行研究は少ない.特に,富栄養化湖沼を研究対象にした二 酸化炭素フラックスの先行研究は少ない.富栄養化湖沼は植物プランクトンの影響を受け,二酸 化炭素のフラックスが変化すると示唆されているが,未だ調査例は少ないため明らかになってい ない.

そのため、本研究では、富栄養化湖沼である霞ヶ浦を研究対象に渦相関法とバルク法を用いて 2019 年 5 月から 2020 年 6 月の期間において二酸化炭素フラックスを連続して調査,解析した.

二酸化炭素フラックスは、-0.01~0.01 m mol/(s m<sup>2</sup>)の範囲で季節変動している場合が多く、 吸収と放出を繰り返していた.また、二酸化炭素フラックスの季節変化はなく、年間を通じて二 酸化炭素フラックスの大きな変動はなかった.年間を通じては、放出の方がやや大きいことが分 かった.全期間における二酸化炭素フラックスの積算値は1.8 g/m<sup>2</sup>/yearであった.これは富栄養 化湖沼を研究対象にしている先行研究の積算値と大きな差異はなかった.

二酸化炭素の吸収と放出の変動には、C<sub>a</sub>\*とC<sub>w</sub>の変動が影響している.特に、C<sub>w</sub>の変動は大きい ことが分かった.また、C<sub>w</sub>の変動は pH が大きく関わっている.よって、二酸化炭素フラックスの 変動を理解するために pH の変動する要因を理解することが重要である.霞ヶ浦の pH の変動の 要因は、降水による pH の低下、植物プランクトンによる光合成による pH の上昇、バクテリアに よる有機物の分解による pH の低下等が考えられる.これらの因子が二酸化炭素フラックスの変 動の要因であることが分かった.

海洋では風速が大きくなるにしたがって、ガス交換係数も大きくなることが知られている.こ れは、風速が発生することによって、波が発生しガス交換係数の増加に寄与するからである.し かしながら、霞ヶ浦では風速に伴ってガス交換係数の値は大きくならなかった.その理由として 海洋では、高風速領域において砕波の発生するのに対して、霞ヶ浦では砕波がめったに発生しな いことが考えられる.海洋では砕波によって気泡補足と海水滴の生成が起こり、ガス交換係数が 急激な増加をする.しかしながら、霞ヶ浦では砕波が生じないため、砕波によって引き起こされ るガス交換係数の増加はめったに生じない.よって、高風速領域における霞ヶ浦のガス交換係数 の増加は目立たなかった.また、霞ヶ浦ではガス交換係数は風速依存性が小さいことから、ガス 交換係数に影響を与える因子が風速以外にもあるのではないかと考えられる.

キーワード:渦相関法,バルク法,富栄養化,ガス交換係数

## CO<sub>2</sub> flux estimation over Lake Kasumigaura by eddy correlation and bulk methods Kotaro Ishikawa

## Abstract

Global warming is regarded as a problem. Therefore, it is important to understand the trend. It can be said that it is important to understand the carbon cycle. So far, there have been many previous studies on  $CO_2$  flux in forests and oceans. However, there are few previous studies on  $CO_2$  flux in lakes. Particularly there are few previous studies on lakes undergoing eutrophication. Although it has been suggested that lakes undergoing eutrophication are affected by phytoplankton and it changes  $CO_2$  flux, it has not been clarified because there are still a few cases of investigation. Therefore, in this study, I continuously investigated and analyzed flux from May 2019 to June 2020 by eddy correlation and bulk methods in Kasumigaura known as lake undergoing eutrophication.

 $CO_2$  fluxes changed in the range of -0.01 to 0.01 m mol/(s  $\cdot m^2$ ).  $CO_2$  is repeatedly absorbed and released. There were few seasonal changes in  $CO_2$  flux. It was no significant variation in  $CO_2$ flux throughout the year. Throughout the year, it was found that the release was a little larger. It was found that the emissions were slightly higher throughout the year. The cumulative value of  $CO_2$ flux over the entire period was 1.8 g /  $m^2$  / year. There was no significant difference from the cumulative values of previous studies targeting lakes undergoing eutrophication.

Fluctuations in  $C_a^*$  and  $C_w$  influence the fluctuations in  $CO_2$  absorption and release. In particular, it was found that fluctuations in  $C_w$  are large. Fluctuations in  $C_w$  are greatly related to pH. Therefore, it is important to understand the factors that cause pH fluctuations to understand the fluctuations in  $CO_2$  flux. The factors that cause pH fluctuations in Kasumigaura are a decrease in pH due to precipitation, an increase in pH due to photosynthesis by phytoplankton, a decrease in pH due to the decomposition of organic substances by bacteria, and so on. It was found that these are the factors of the fluctuation of  $CO_2$  flux.

It is known that the gas exchange coefficient increases as the wind speed increases in the ocean because the generation of wind speed causes waves to contribute to the increase in the gas exchange coefficient. In Kasumigaura, the value of the gas exchange coefficient does not increase with the wind speed. Breaking waves occur in the high wind speed region in the ocean. However, breaking waves rarely occur in Kasumigaura. Breaking waves causes bubble and the generation of a drop of seawater, and the gas exchange coefficient increases rapidly. However, since breaking waves did not occur in Kasumigaura, the increase in gas exchange coefficient caused by breaking waves rarely occurs. Therefore, there has been no rapid increase in the gas exchange coefficient in the high wind speed region. Since the gas exchange coefficient is less dependent on the wind speed in Kasumigaura, it is considered that other factors affect the gas exchange coefficient besides the wind speed. Keywords: eddy correlation method, bulk method, bulk coefficient, eutrophication, gas exchange

coefficien

表目次

| 表1 本研究で使用した霞ヶ浦の観測所の水系,所在地,緯度経度・・・・・・・・・・・                         | 22   |
|---|------|
| 表2 本研究で使用した独自観測項目・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・                      | 23   |
| 表3 本研究で使用した国土交通省による観測項目・・・・・・・・・・・・・・・・・・                         | 24   |
| 表 4 動粘性係数 $\nu(m^2/s)$ と気温の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 25   |
| 表 5 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日における湖心で測定された                 |      |
| 波高範囲毎の最大有義波高と最大波高のデータ数・・・・・・・・・・・・・・・                             | 26   |
| 表 6 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における風速毎のガス交換係                 |      |
| 数K <sub>600</sub> の平均値とその標準偏差およびデータ数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・          | 27   |
| 表 7 湖心で採取した水サンプルから測定したアルカリ度の季節変化・・・・・・・・・                         | 28   |
| 表 8 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 12 月 1 日における湖心で測定された                  |      |
| 30 分平均の pH 毎の平均値とデータ数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・                      | 29   |
| 表 9 2019 年 5 月から 2019 年 12 月における pH 毎におけるバルク法                     |      |
| によって測定された二酸化炭素フラックス[m mol/(s・m²)]の平                               |      |
| 均値と標準偏差とデータ数と積算値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・                         | • 30 |
| 表 10 2019 年 12 月から 2020 年 4 月における pH 毎におけるバルク                     |      |
| 法によって測定された二酸化炭素フラックス[m mol/(s・m²)]                                |      |
| の平均値と標準偏差とデータ数と積算値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・                             | 31   |
| 表 11 富栄養化湖沼における二酸化炭素フラックスの積算・・・・・・・・・・・・・                         | 32   |

図目次

| 図1 データを使用した霞ヶ浦西浦の観測所・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 33                                |
|---|
| 図2 霞ヶ浦湖心観測所(2020年2月12日午前8時32分撮影)・・・・・・・・・・・34                             |
| 図3 動粘性係数と気温Tの関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35                               |
| 図 4 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における現場キャリブレーショ                         |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・36                                 |
| 図 5 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における現場キャリブレーショ                         |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37                                  |
| 図 6 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における現場キャリブレーショ                         |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・38                                   |
| 図 7 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における現場キャリブレーショ                         |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39                                  |
| 図 8 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における現場キャリブレーショ                        |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・40                                   |
| 図 9 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における現場キャリブレーシ                       |
| ョンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41                                   |
| 図 10 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における現場キャリブレーシ                      |
| ョンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42                                  |
| 図 11 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における現場キャリブレーシ                      |
| ョンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・43                                  |
| 図 12 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における現場キャリブレーショ                       |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44                                  |
| 図 13 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における現場キャリブレーショ                       |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・45                                   |
| 図 14 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における現場キャリブレーショ                        |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・46                                  |
| 図 15 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における現場キャリブレーショ                       |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47                                  |
| 図 16 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における現場キャリブレーショ                      |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48                                   |
| 図 17 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における現場キャリブレーショ                       |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・49                                   |
| 図 18 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における現場キャリブレーショ                       |
| ンの結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50                                   |
| 図 19 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における乱流強度テストの結果                        |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51      |
| 図 20 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における乱流強度テストの結果                        |
| (安定度が−0.1 $\leq \frac{z}{L} \leq -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51 |

| 図 21 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における乱流強度テストの結果                           |
|--|
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52            |
| 図 22 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における乱流強度テストの結果                           |
| (安定度が−0.1 $\leq \frac{z}{L} \leq -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52           |
| 図 23 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における乱流強度テストの結果                           |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・53            |
| 図 24 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における乱流強度テストの結果                           |
| (安定度が−0.1 $\leq \frac{z}{L} \leq -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53           |
| 図 25 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における乱流強度テストの結果                           |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・54             |
| 図 26 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における乱流強度テストの結果                           |
| (安定度が−0.1 $\leq \frac{z}{L} \leq -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54           |
| 図 27 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における乱流強度テストの結果                          |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・55              |
| 図 28 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における乱流強度テストの結果                          |
| (安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55           |
| 図 29 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における乱流強度テストの結                         |
| 果(安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56            |
| 図 30 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における乱流強度テストの結                         |
| 果(安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56           |
| 図 31 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における乱流強度テストの結                         |
| 果(安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57            |
| 図 32 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における乱流強度テストの結                         |
| 果(安定度が-0.1 $\leq \frac{z}{L} \leq -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57           |
| 図 33 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における乱流強度テストの結                         |
| 果(安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58            |
| 図 34 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における乱流強度テストの結                         |
| 果(安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58            |
| 図 35 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における乱流強度テストの結果                          |
| (安定度が−10 $\leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59              |
| 図 36 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における乱流強度テストの結果                          |
| (安定度が−0.1 $\leq \frac{z}{L} \leq -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 59           |
| 図 37 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における乱流強度テストの結果                          |
| (安定度が−10 $\leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・60              |
| 図 38 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における乱流強度テストの結果                          |
| (安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・60           |
| 図 39 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における乱流強度テストの結果                           |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ |
|  |

| 図 40 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における乱流強度テストの結果                               |
|--|
| (安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61      |
| 図 41 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62          |
| 図 42 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における乱流強度テストの結                               |
| 果(安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62           |
| 図 43 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における乱流強度テストの結果                             |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63           |
| 図 44 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における乱流強度テストの結果                             |
| (安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63            |
| 図 45 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における乱流強度テストの結果                              |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・     |
| 図 46 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における乱流強度テストの結果                              |
| (安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ |
| 図 47 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| (安定度が $-10 \leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・65          |
| 図 48 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| (安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65        |
| 図 49 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| によってクラスに分類した渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックス  |
| のデータ数と平均値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66  |
| 図 50 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| がクラス1の場合の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季   |
| 節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67   |
| 図 51 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| がクラス2の場合の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季   |
| 節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68   |
| 図 52 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| がクラス3の場合の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季   |
| 節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69   |
| 図 53 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果                              |
| がクラス4の場合の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季   |
| 節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・  |
| 図 54 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果が                             |
| クラス 5 の場合の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季節   |
| 変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・71   |
| 図 55 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における正常性テストのクラスで                              |
| 分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72                 |

| 図 56 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 6 月 7 日における正常性テストのクラスで分                    |
|---|
| 類したw'ρc'の季節変化(2019 年 6 月 7 日から 2019 年 8 月 5 日欠測) ・・・・・・・・73             |
| 図 57 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における正常性テストのクラスで                     |
| 分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74         |
| 図 58 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における正常性テストのクラスで分                   |
| 類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 75         |
| 図 59 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における正常性テストのクラ                    |
| スで分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76       |
| 図 60 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における正常性テストのクラ                    |
| スで分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77       |
| 図 61 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における正常性テストのクラ                    |
| スで分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ |
| 図 62 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における正常性テストのクラス                     |
| で分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79           |
| 図 63 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における正常性テストのクラス                     |
| で分類した <del>w'ρ<sub>c</sub>'</del> の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80   |
| 図 64 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における正常性テストのクラスで                     |
| 分類した $\overline{w' ho_{c'}}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 81           |
| 図 65 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における正常性テストのクラス                     |
| で分類した <del>ω'ρ<sub>c</sub>'</del> の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82   |
| 図 66 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における正常性テストのクラス                    |
| で分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83           |
| 図 67 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における正常性テストのクラスで                    |
| 分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84         |
| 図 68 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における正常性テストのクラス                     |
| で分類した $\overline{w' ho_c'}$ の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 85          |
| 図 69 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス                     |
| で分類した渦相関法で求めた二酸化炭素フラックスのデータ数と平均値・・・・・・86                                |
| 図 70 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス                     |
| 1の場合の渦相関法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化の季節変化・・・・・・87                               |
| 図 71 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス                     |
| 2の場合の渦相関法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化・・・・・・・・・88                                 |
| 図 72 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス                     |
| 3の場合の渦相関法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化・・・・・・・・・89                                 |
| 図 73 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス                     |
| 4の場合の渦相関法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化・・・・・・・・・90                                 |
| 図 74 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス                     |
| 5 の場合の渦相関法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化・・・・・・・・・・91                               |

| 図 75 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日におけるガス交換係数K <sub>600</sub> と湖                                |
|---|
| 心で測定された高度 10m の風速の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92  |
| 図 76 本研究での 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日におけるガス交換係  |
| 数K <sub>600</sub> , モデル式より算出したK <sub>600</sub> , 先行研究のガス交換係数K <sub>600</sub> , K <sub>660</sub> と |
| 風速の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・93  |
| 図 77 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日における湖心で測定された最大  |
| 有義波高の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・94   |
| 図 78 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日における湖心で測定された最大  |
| 波高の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95  |
| 図 79 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 11 月 30 日における湖心と掛馬沖で測定さ  |
| れた水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・ 96   |
| 図 80 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 11 月 30 日における湖心と麻生沖で測定さ  |
| れた水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・ 97   |
| 図 81 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 11 月 30 日における湖心と平山で測定され  |
| た水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・・ 98   |
| 図 82 2007 年 12 月 1 日から 2008 年 5 月 31 日における湖心と掛馬沖で測定さ  |
| れた水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・ 99   |
| 図 83 2007 年 12 月 1 日から 2008 年 5 月 31 日における湖心と麻生沖で測定さ  |
| れた水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・・100  |
| 図 84 2007 年 12 月 1 日から 2008 年 5 月 31 日における湖心と平山で測定され  |
| た水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・・・101  |
| 図 85 2008 年 6 月 1 日から 2008 年 11 月 10 日における湖心と掛馬沖で測定さ  |
| れた水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・・102  |
| 図 86 2008 年 6 月 1 日から 2008 年 11 月 10 日における湖心と麻生沖で測定さ  |
| れた水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・・103  |
| 図 87 2008 年 6 月 1 日から 2008 年 11 月 10 日における湖心と平山で測定され  |
| た水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較・・・・・・・・・・・104  |
| 図 88 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における湖心と掛馬沖で測定され  |
| た水深 0.1 m の 1 時間平均値の異常値削除後の水温の比較・・・・・・・・・・・105  |
| 図 89 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における湖心と麻生沖で測定され  |
| た水深 0.1 m の 1 時間平均値の異常値削除後の水温の比較・・・・・・・・・・・106  |
| 図 90 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における湖心と平山で測定された  |
| 水深 0.1 m の 1 時間平均値の異常値削除後の水温の比較・・・・・・・・・・・・・107   |
| 図 91 2020 年 9 月 2 日 8:30~12:30 の 1 時間毎に採取した水深 0. 1m 付近の水サ   |
| ンプルから求めたアルカリ度の季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108  |
| 図 92 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 12 月 1 日における湖心で測定された pH の  |
| 頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 109  |
| 図 93 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における二酸化炭素フラックス[上図],   |

ix

| 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・・・110                                   |
|---|
| 図 94 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における二酸化炭素フラックス[上図],                         |
| 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・・・111                                   |
| 図 95 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における二酸化炭素フラックス[上図],                         |
| 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・・・112                                   |
| 図 96 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における二酸化炭素フラックス[上図],                         |
| 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・・・113                                   |
| 図 97 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における二酸化炭素フラックス[上図],                        |
| 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・・・114                                   |
| 図 98 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における二酸化炭素フラックス[上                         |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・115                                 |
| 図 99 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における二酸化炭素フラックス[                          |
| 上図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・116                                 |
| 図 100 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における二酸化炭素フラックス                          |
| [上図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・ 117                                |
| 図 101 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における二酸化炭素フラックス[上                          |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・118                                 |
| 図 102 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における二酸化炭素フラックス[上                          |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・119                                  |
| 図 103 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における二酸化炭素フラックス[上                           |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・120                                 |
| 図 104 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における二酸化炭素フラックス[上                          |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・121                                 |
| 図 105 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における二酸化炭素フラックス[上                         |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・122                                 |
| 図 106 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における二酸化炭素フラックス[上                          |
| 図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・123                                 |
| 図 107 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日にける二酸化炭素フラックス[上図                          |
| ], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化・・・・・・・・・・・・124                                 |
| 図 108 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における渦相関法とバルク法によ                           |
| って求めた二酸化炭素フラックスの季節変化・・・・・・・・・・・・・・・・・ 125                                       |
| 図 109 水深 0.1m で測定された水温, C <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> , 水深 0.5m で測定された pH, 二 |
| 酸化炭素フラックスの積算値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 126                                      |
| 図 110 水深 0.1m で測定された水温, C <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> , 水深 0.5m で測定された pH の平 |
| 均値 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・127  |
| 図 111 2019 年 5 月から 12 月における pH の頻度分布とデータ数とバルク法によっ                               |
| て測定された二酸化炭素フラックス・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 128                                    |
|   |

図 112 2019 年 12 月から 2020 年 4 月における pH の頻度分布とデータ数とバル

| ク法によって測定された二酸化炭素フラックス・・・・・・・・・・・・・・・・ 129   |
|---|
| 図 113 水温が 34.6 度のときにおけるC <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 |
| 21 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH   |
| の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 130   |
| 図 114 水温が 6.5 度のときにおけるC <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月  |
| 21 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH   |
| の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 131   |
| 図 115 水温が 18.3 度のときにおけるC <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 |
| 21 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH   |
| の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 132  |
| 図 116 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬沖,麻生沖,平山で測定され                                |
| た水深 0.1m の水温と水深 0.5m の pH・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・133                                     |
| 図 117 水温が 34.6 度のときにおけるC <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> と 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖   |
| 心で測定された水深 0.5m の pH と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に                               |
| 掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度  |
| 分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 134  |
| 図 118 水温が 6.5 度のときにおけるC <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> と 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖    |
| 心で測定された水深 0.5m の pH と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日                                |
| に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻  |
| 度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 135  |
| 図 119 水温が 18.3 度のときにおけるC <sub>a</sub> *, C <sub>w</sub> と 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に    |
| 湖心で測定された水深 0.5m の pH と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21                                 |
| 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH  |
| の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 136   |
| 図 120 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖心で測定された水深 0.1m の水温と水                                   |
| 深 0.5m の pH・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 137  |
| 図 121 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に湖心で測定された降水量と掛馬                                 |
| 沖, 麻生沖, 平山で測定された水深 0.5m の pH・・・・・・・・・・・・・・・ 138                                       |
| 図 122 2007 年 6 月から 2008 年 5 月に湖心で測定された降水量と水深 0.5m の pH・・・・139                         |
| 図 123 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に湖心で測定された気温と掛馬沖,                                |
| 麻生沖, 平山で測定された水深 0.5m の pH・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・140                                      |
| 図 124 2007 年 6 月から 2008 年 5 月に湖心で気温と湖心で測定された水深 0.5m の pH・・・141                        |

1 はじめに

1.1 研究背景

湖沼は, 炭素循環の役割を果たしている. また, 炭素循環では, 地域の生態系への影響が確認さ れている[Cole et al., 2007]. そのため, 炭素循環の1つである水と大気間における湖での二酸化 炭素のフラックスは極めて重要であると言える. 世界中に分布する 1835 の湖沼から得られた 4665 のサンプルのうち, 87%のサンプルでは二酸化炭素の放出が確認され, 年間0.14×10<sup>15</sup>g の 二酸化炭素が放出していることが分かった[Cole et al., 1994].

富栄養化湖を研究対象にした Pacheco et al., (2013)では,一次生産者の影響を受け,二酸化炭素の吸収が起こっていることが述べられている. 富栄養化湖では,水中の一次生産者の影響を受け,水中の溶存無機炭素の濃度を下がり,大気中の二酸化炭素を吸収していることが示唆された. しかしながら,富栄養化湖を対象にした二酸化炭素フラックスの先行研究は少なく,富栄養化がもたらす二酸化炭素のフラックスへの影響は未だ明らかとなっていない.

1.2 富栄養化湖沼を研究対象にした渦相関法による先行研究

水面における二酸化炭素フラックスを測定する方法として,直接観測法の渦相関法が最も信頼 できる方法である[杉田ほか,2009].しかしながら,湖沼を対象に渦相関法を用いて二酸化炭素フ ラックスを測定した先行研究は少ない[Mammarella et al., 2014].

富栄養化湖沼を研究対象に, 渦相関法を用いて二酸化炭素フラックスを測定した先行研究として, HuiZhi et al., (2015)が知られている. その結果, HuiZhi et al., (2015)は中華人民共和国の洱海において気温の高い時刻や季節に二酸化炭素の吸収が分かった. これは, 植物プラントンの影響が示唆される.

富栄養化湖沼である霞ヶ浦を研究対象に渦相関法を用いて二酸化炭素フラックスを測定してい る先行研究として,宮野(2008),高橋(2009)が知られている.宮野(2008),高橋(2009)では,渦相 関法を用いて二酸化炭素フラックスを測定し,測定できなかったデータに対して,バルク法を用 いて二酸化炭素フラックスを求めている.しかしながら,二酸化炭素フラックスの同様の日変化 や季節変化は示さなかった.

宮野(2008),高橋(2009)では,バルク法で二酸化炭素フラックスを算出する際に利用される赤 外線ガス分析装置で大気中の二酸化炭素濃度の平均値を測定するのに,年に一度のキャリブレー ションで行っているが不十分であり,精度よく測定する必要がある.

1.3本研究の目的

本研究では、渦相関法とバルク法を用いて精度の高い二酸化炭素フラックスを連続して調査, 解析することを目的とした. 富栄養化湖沼である霞ヶ浦の西浦を対象に二酸化炭素濃度と水蒸 気密度の瞬間値を測定し、現場キャリブレーションを行うことで、精度の高い二酸化炭素フラッ クスを渦相関法で算出する. また、二酸化炭素・水蒸気測定装置を使用し、二酸化炭素濃度の平 均値を先行研究に比べ精度よく測定することで、バルク法を用いて精度の高い二酸化炭素フラ ックスを算出する. 2研究方法

2.1 観測とデータ

2.1.1 観測

研究対象地点は, 茨城県の南東部に位置する霞ケ浦の西浦に位置する国土交通省関東地方整備 局霞ケ浦湖心観測所である(図 1, 図 2). 霞ケ浦の湖面積は 220 km<sup>2</sup>であり, 平均水深 4 m, 最大 水深 7m と広く浅い湖である. 流域面積は 2, 156. 7 km<sup>2</sup>である. これは, 茨城県全域の約 35%を 占める. 流域人口は 994 千万人(平成 30 年度末)の水資源として使用されている. 昭和 40 年代後 半から, 流域における人口増加や生活様式の多様化, 産業活動の進展などに伴い水質の汚染が進 行している湖である[茨城県霞ケ浦環境科学センター, 2020]. 年間を通じて, 透明度は 5m 以下, 弱アルカリ性の湖沼である[霞ケ浦河川事務所, 2020]. よって, 霞ケ浦は富栄養化湖沼であると言 える[飯田, 1997].

霞ヶ浦の観測所からデータを取得した(表 1). 湖心には超音波風速計, 赤外線ガス分析装置, 放 射よけ通風筒つき温湿度計, 二酸化炭素・水蒸気測定装置を設置した(表 2). 超音波風速温度計で は, 温度・風速 3 成分の瞬間値を測定した. 赤外線ガス分析装置では, 二酸化炭素濃度と水蒸気密 度の瞬間値をした. 放射よけ通風筒つき温湿度計では, 温度と湿度の平均値を測定した. 二酸化 炭素・水蒸気圧測定装置では, 二酸化炭素濃度と水蒸気密度の平均値を測定した. 風速 3 成分 *X*, *Y*, *Z*[m/s], 気温 *T*[°C], 水蒸気密度 $\rho_v$ [g/m<sup>2</sup>], 二酸化炭素濃度 $\rho_c$ [m mol/m<sup>3</sup>]に関しては分散, 共 分散も 30 分毎に計算され記録されている. 以下に, 分散と共分散の求め方を示した.

分散: 
$$\sigma_{xr} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}$$
(1.1)

共分散:
$$\overline{x'y'} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}$$
 (1.2)

ここでのx<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>は 2 変数の瞬間値を表し, 30 分平均値をx̄, ȳとした. n は 30 分間のデータ数である. 研究対象期間は, 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日までとした.

基本的に月1回湖心で水深 0.1 m 付近から採取した水サンプルから水中のアルカリ度A<sub>c</sub>を求めた.酸標準溶液として硫酸を用いて,湖心で取得した水深 0.1 m 付近で採取した水サンプルを pH4.8 まで滴定を行った.使用した硫酸の濃度は 1/100N である.指示薬としてメチルレッドプ ロムクレゾールグリーン使用した.ファクターを 1 であるものとし,次式に従い滴定に要した酸 の量から,1L あたりのミリ当量(m mol/L)に換算した(日本分析化学会北海道支部 2005).

アルカリ度
$$A_c = \frac{1000}{\text{it} X_{\text{kl}} \times ($$
滴定標準液の濃度 $) \times ($ 滴定標準液のファクター $)$  (1.3)

2.1.2 使用したデータ

2.1.2.1 国土交通省による観測

湖心観測所で国土交通省によって,雨量,気温,気圧は,それぞれ転倒ます式雨量計,強制通風 式放射シェルター型気温計,アネロイド型気圧計で測定された.湖心,掛馬沖,麻生沖,平山で, pH,水温を水質自動監視装置で測定された(表 3).本研究の研究対象期間において,湖心では pH が欠損だったため,掛馬沖,麻生沖,平山に位置する観測所で観測された pH を代用した.湖心の 観測で観測された水温が欠測または異常値の場合は,霞ヶ浦西浦の掛馬沖,麻生沖,平山に位置 する観測所で観測された水温を代用した.

2.1.2.1.1 pH データ

掛馬沖の観測所で測定された水深 0.5m の pH データを使用した. pH が異常値または欠測の場 合は,麻生沖の観測所で測定された水深 0.5m の pH データを使用した. 霞ケ浦では,富栄養化湖 沼であるため,弱アルカリ性を示すことが多い[飯田, 1997]. よって,掛馬沖の観測所で測定され た pH データが pH7.5 未満の場合かつ麻生沖の pH データが pH7.5 以上のときは,麻生沖のデ ータを使用した. pH7.5 未満の場合かつ麻生沖の pH データが pH7.5 未満のときは,掛馬沖のデ ータを使用した. それでもなお, pH データに異常値または欠測の場合は,平山の観測所で測定さ れた水深 0.5m の pH データを使用した. 異常値の判別としては,時系列から明らかに離れている データを目視で確認し異常値とした.

2.1.2.1.2 水温データ

湖心において,水深 0.1 m で測定された水温を使用した. 湖心で測定された水温が異常値の場合は,掛馬沖において,水深 0.1 m で測定された水温を使用した. 掛馬沖で測定された水温も異常値の場合は,麻生沖において,水深 0.1 m で測定された水温を代用した. 麻生沖で測定された水温も異常値の場合は,平山において,水深 0.1 m で測定された水温で代用した. なお,異常値の判別としては,時系列から明らかに離れているデータを目視で確認し異常値とした.

2.1.2.1.3 降水・平均気温・気圧データ

雨量・気温・気圧に関しては、湖心で測定されたデータを使用した. 欠測しているデータが3時間未満のデータに関しては、前後の平均値を用いて欠測値を補った.

2.2 データ処理

A) 風速の座標変換

観測された風速 3 成分より, 主風向に対する座標変換を行った. 座標変換は, 水平方向と鉛 直方向で行った. 岩田ほか(2003)に従って以下のように計算を行った.

① 水平方向の主風向変換

主風向 θ における水平成分の変換を以下に示した.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{Y}}{\bar{X}} \right) \tag{2.1}$$

$$U = X\cos\theta + Y\sin\theta \tag{2.2}$$

このとき, U: 主風向変換後の X方向の風速, V: 主風向変換後の Y方向の風速である. ② 鉛直方向の吹き上げ(下げ)の変換

鉛直方向の 30 分間の平均風速が 0 とならない場合, 鉛直方向の風速変換を行った. 吹き 上げ角度αに対して主風向・鉛直成分の変換する方法を以下に示した.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{Z}}{\bar{U}} \right) \tag{2.4}$$

$$u = U\cos\alpha + Z\sin\alpha \tag{2.5}$$

$$w = -U\sin\alpha + Z\cos\alpha \tag{2.6}$$

このとき, u: 鉛直方向の吹き上げ(下げ)変換後の X方向の風速, w: 鉛直方向の吹き上げ (下げ)変換後の Z方向の風速である.

B) データ選別

赤外線ガス分析装置の赤外線光面に水滴が付くと、気体濃度を正確に測定することができ ない.そのため、雨量が0mmではない期間及びその1時間前と3時間後のデータを除去した. また、湿度90%以上の期間及びその1時間前と3時間後のデータを除去した.観測所から観 測機材の方向から風が吹くと、正確に風速、風向を測定することができない.そのため、60° から160°までのデータを除去した.

赤外線ガス分析装置で測定された水蒸気密度,二酸化炭素濃度の瞬間値の 30 分平均値を, 二酸化炭素・水蒸気圧測定装置で測定された 30 分平均値を用いて現場キャリブレーションし た.赤外線ガス分析装置(LI7500)で測定された瞬間値の 30 分平均値を横軸,二酸化炭素・水 蒸気圧測定装置(LI840)で測定された 30 分平均の平均値を縦軸としプロットした.ここで,近 似線を作成し,近似線からあからさまに離れているデータ(水蒸気密度:絶対値 2 g/m<sup>2</sup>以上,二 酸化炭素濃度:絶対値 20ppm 以上)を異常値として削除した.その後,近似線を作成し傾きを 求めた.ここで求めた傾きを水蒸気密度と二酸化炭素濃度の瞬間値に乗ずることによって,水 蒸気密度と二酸化炭素濃度の瞬間値を補正した.

二酸化炭素フラックスデータの時系列のなかに,前後から突出したデータがある場合は異常値と判定した.そのため,各測定時刻について前後5項の移動平均値とその標準偏差 $\sigma$ を計算し,測定値が移動平均値から $2\sigma$ 以上離れている場合を異常値とし除去した.その後,時系列変化から見て明らかな異常値( $F_{ce} > 0.05 \text{ m mol/s m}^2$ )があれば除去した.二酸化炭素フラックス $F_{ce}$ の値が,有効数字以下の値は除去した.

2.2.1 渦相関法による二酸化炭素フラックスの算出とデータ選別

A)渦相関法に二酸化炭素フラックスの算出

渦相関法を用いて,二酸化炭素フラックスを計算した.微量気体のフラックスを正確に評価

する為に, 潜熱・顕熱による影響を空気密度補正(WPL 補正)によって補正した. 以下に算出方 法を示した[岩田ほか, 2003].

$$F_{ce} = \overline{w'\rho_{c}}' + \mu \frac{\overline{\rho_{c}}}{\rho_{a}} \overline{w'\rho_{v}}' + \left(1 + \frac{\overline{e}}{\overline{P_{a}}}\right) \frac{\overline{\rho_{c}}}{\overline{T}} \overline{w'T'}$$
(2.7)

ここで、 $F_{ce}$ :渦相関法によって算出した二酸化炭素フラックスである. 乱流測定によって直接 得られるフラックス(第1項)に加えて、顕熱、潜熱による影響を第2,3項によって補正した.な お、 $\mu$ :乾燥空気と水蒸気の物質量比( $\mu$ =1.6077)、 $\rho_a$ :乾燥空気密度[m $\frac{mol}{m^3}$ ]( $\rho_a$  = 44,657 m mol/m<sup>3</sup>)、T:気温[K]、 $P_a$ (= P - e)[hPa]、e:水蒸気圧[hPa]とした. 水蒸気圧 eは、以下の計 算方法によって求めた[杉田ほか、2009].

$$e = re^* \tag{2.8}$$

このときの r:相対湿度, e\*:飽和水蒸気圧[hPa]とする. 飽和水蒸気圧e\*は, Bolton(1980)に従い以下の式によって求めた.

$$e^*(T) = c \exp\left(\frac{aT}{T+b}\right)$$
(2.9)

このとき, a = 17.67, b=243.5, c=6.112 である.

## 2.2.2 ガス交換係数の算出

A) ガス交換係数 K の算出

 $C_w - C_a^*$ の値が有効数字以下のデータを取り除いた.

このときの*C<sub>a</sub>*\*: 水面から 10 m 付近における二酸化炭素の分圧と平衡を保つ水中の二酸化炭 素濃度[m mol/L], *C<sub>w</sub>*:水深 0.1m 付近における溶存ガス濃度[m mol/L]である.水面から 10 m 付近における二酸化炭素の分圧と平衡を保つ水中の二酸化炭素濃度*C<sub>a</sub>*\*の算出方法を以下に示 した[西村ほか, 1998].

$$C_a^{\ *} = K_0 p C O_2 \tag{2.10}$$

このときの,  $K_0$ :比例定数 $[m \mod/(L \operatorname{atm})]$ ,  $pCO_2$ :二酸化炭素の分圧 $[\operatorname{atm}]$ である. 比例定数 $K_0$ は, Weiss の式を使用した[Weiss, 1974]. 算出方法を以下に示した.

$$lnK_0 = -58.0931 + 90.5069 \left(\frac{100}{T_w - 273.15}\right) + 22.294 ln \left(\frac{T_w - 273.15100}{100}\right)$$
(2.11)

ここで, T<sub>w</sub>:水深 0.1 m における水温(K)である.

二酸化炭素の分圧*pCO*<sub>2</sub>は, ボイル・シャルルの法則を用いて求めた[原田, 2012]. 算出方法を 以下に示した.

$$pCO_2 = \frac{n}{V}RT \tag{2.12}$$

このときの, n:物質量 [mol], V:体積 [ $m^3$ ], R:気体定数(0.0820 L atm/K/mol)である.  $\frac{n}{v}$ [mol/ $m^3$ ]は, 測定された二酸化炭素濃度[ppm]より, 次の計算式を用いて単位変換した[岩田 ほか, 2003].

$$C[\text{ppm}] \times \frac{273.15}{22.4T} \times 10^{-3} = C[\text{mol}/m^3]$$
 (2.13)

水深 0.1m 付近における溶存ガス濃度Cwの算出方法を以下に示した.

$$C_w = \frac{A_c [H^+]^2}{K_1([H^+] + 2K_2)}$$
(2.14)

 $K_1, K_2$  [m mol/L] は解離常数である. [ $H^+$ ] は水素イオン濃度 [m mol/L],  $A_c$  はアルカリ度 [m mol/L]である. 水素イオン濃度は[ $H^+$ ]= $10^{-pH}$ である[西村ほか, 1998]. 解離定数の計算は, 次の計算式を用いた[猿橋, 1974].

$$-\log K_1 = \frac{3404.71}{T_w} + 0.032786 T_w - 14.712$$
(2.15)

$$-logK_2 = \frac{2902.39}{T_w} + 0.02379T_w - 6.471$$
(2.16)

渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックス $F_{ce}$ と $C_w - C_a^*$ の正負の向きが同じ場合に限って, K[m/s]を以下の式によって求めた.

$$K = \frac{F_{ce}}{C_w - C_a^*}$$
(2.17)

# B) ガス交換係数K<sub>600</sub>の算出

算出した K から以下の式によって, K<sub>600</sub>算出した[Jähne et al., 1987].

$$\frac{K_{600}}{K} = \left(\frac{S_{c20}}{S_c}\right)^s$$
(2.18)

ここで,  $S_{c20}$ :水温 20°Cでの淡水での水中の二酸化炭素のシュミット数である ( $S_{c20}$ =600)[Jähne et al., 1987].  $S_c$ :淡水での水中の二酸化炭素のシュミット数である. 淡水での水中の二酸化炭素のシュミット数 $S_c$ は,以下の計算式によって求めた[Wanninkhof, 1992].

 $S_c = 1911.1 - 118.11(T_w - 273.15) + 3.4527(T_w - 273.15)^2 - 0.04132(T_w - 273.15)^3$  (2.19)

s は粗度レイノルズ数 $Z_{0+}$ [m]を用いて,以下のように場合分けを行いsの値を決定した [Wanninkhof, 2007].

$$Z_{0+} \ge 0.13$$
のとき  $s = -\frac{1}{2}$   
 $Z_{0+} < 0.13$ のとき  $s = -\frac{2}{3}$ 

また, 粗度レイノルズ数Z<sub>0+</sub>は, 以下の式によって求めた[Woods Hole Oceanographic Institution, 1982].

$$Z_{0+} = \frac{u_* z_0}{\nu} \tag{2.20}$$

このときの*u*<sub>\*</sub>:摩擦速度[m/s], *z*<sub>0</sub>:粗度長[m], *v*:動粘性係数[m/s]である. 摩擦速度*u*<sub>\*</sub>は, 以下の式を用いて求めた[杉田ほか, 2009].

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho} \tag{2.21}$$

このときの, 空気密度 p [kg/m<sup>3</sup>]とする. 運動量フラックス r [kg/ms<sup>2</sup>]は以下の式によって求めた[杉田ほか, 2009].

$$\tau = -\rho \overline{w'u'} \tag{2.22}$$

粗度長Z<sub>0</sub>は,以下の計算式によって求めた[Woods Hole Oceanographic Institution, 1982].

$$Z_0 = e^{\ln z - \frac{\bar{u}k}{u_*}} \tag{2.23}$$

ここで, z:高度[m],  $\overline{u}$ :風速[m/s], k:カルマン係数(k=0.4), e:ネイピア数である. 動粘性係数 vの値は, 気温 Tに依存している[Woods Hole Oceanographic Institution, 1982]. 動粘性係数 と気温の値より, 近似式を作成した(表 4, 図 3). 作成した近似線より気温 T から動粘性係数v の値を求めた. 粗度長 $Z_0$ は  $-8 < \ln Z_0 < 0$ の範囲にあることが多い. そのため,  $\ln Z_0$ の値が $-8 < \ln Z_0 < 0$ の範囲にないデータを異常値であるとみなし,  $Z_0$ のデータを削除した. 削除した $Z_0$ に関しては, 風速と $\ln Z_0$ の関係式より求めた. 求めた $\ln Z_0$ より $Z_0$ を算出した. 関係式を以下に示した. 以下の関係式は, 杉田 (2020, 私信)が Wei et al., (2016)の Fig. 3 に 4 次の多項式をあてはめて求めた.

$$\ln Z_0 = 3.397 - 4.063u_c^2 - 0.02371u_c^3 + 0.004093u_c^4$$
 (2.24)

ここで, ucは次式によって求めた.

$$u_c = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
(2.25)

D)風速とK<sub>600</sub>の関係

C)求めたK<sub>600</sub>を用いて,風速とK<sub>600</sub>の関係式を求めた.

E)風速から求めたK<sub>600</sub>の算出
 D)で求めた関係式より,風速からK<sub>600</sub>を算出した.

F)  $K_{600}$ から求めたガス交換係数 $k_c$ の算出 E)で算出した $K_{600}$ を用いて、 $k_c$ の値を次式によって求め、これをガス交換係数とした.

$$k_c = \frac{K_{600}}{\left(\frac{S_{c20}}{S_c}\right)^s}$$
(2.26)

2.2.3 バルク法による二酸化炭素フラックスの推定

渦相関法で測定できなかった二酸化炭素フラックスは, バルク法を用いて, 以下の算出方法に よって求めた[Cole et al., 1998].

$$F_{cb} = k_c \left( C_w - C_a^* \right) \tag{2.27}$$

ここで, F<sub>ch</sub>:バルク法によって算出した二酸化炭素フラックスである.

2.2.4 ガス交換係数の推定

ガス交換係数*K*<sub>600</sub>をモデル式より推定できる.以下のモデル式より霞ヶ浦のガス交換係数*K*<sub>600</sub> を求めた[Vachon et al., 2013].

 $K_{600} = (0.328 \pm 0.087 \log_{10}(LA) + 1.581 \pm 0.161)u_c - 0.066 \pm 0.028 \operatorname{logit}(SIN) + 1.266 \pm 0.347$ 

このとき, LA: 湖面積である. なお, 西浦の面積である 172km<sup>2</sup>とする[茨城県霞ケ浦環境科学セ

ンター, 2020]. SINは以下の式により求めた[Vachon et al., 2013].

このとき, 杉田(2020, 私信)より footprint areaを 0.14052 km<sup>2</sup>とした.

2.2.5 乱流強度テスト

乱流強度テストで, Monin-Obukhov 相似則によるフラックスと分散の関係が成り立っているか を判定した[岩田ほか, 2003].

A) 観測されたデータより算出した無次元標準偏差

二酸化炭素濃度 $\rho_c$ について, 無次元化された標準偏差 $\frac{\sigma_c}{|c_*|}$ を計算した. このときの $\sigma_c$ :二酸化炭

素濃度の標準偏差,  $c_* = \overline{w' \rho_c'} / u_*$ である.

B) 相似則から予測される無次元標準偏差の算出

相似則から予測される無次元標準偏差と安定度との関係式から、 $\frac{\sigma_c}{|c_*|}$ を求めた [Ohtaki, 1985].

$$\frac{\sigma_c}{|c_*|} = 1.1(-z/L)^{\frac{1}{3}} \left(-10 \le \frac{z}{L} \le -0.1\right)$$
(2.28)

$$\frac{\sigma_c}{|c_*|} = 2.5 \left( -0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02 \right)$$
(2.29)

ここで, *L*:Obukhov 長[m], *z*:高度[m]である. このときの Obukhov 長 *L*を従って以下の式に よって求めた[Brutsaert, 2008].

$$L = \frac{-Tu_*{}^3}{kgw'T'}$$
(2.30)

ここで, g:重力加速度[m/s<sup>2</sup>]である.

C) クラス分け

A)で算出した観測されたデータから計算した無次元化された標準偏差とB)で算出した相似則 から予測される無次元標準差の値を比較した.両者の無次元標準偏差の値の差が 10%未満, 10%以上 20%未満, 20%以上 30%未満, 30%以上 40%未満, 40%以上のデータをそれぞれク ラス 1,2,3,4,5 とクラス分けをした.両者の無次元標準偏差の値の差が 30%以内にクラス分け されたクラス 1,2,3 のデータに関しては, Monin-Obukhov 相似則によるフラックスと分散の 関係が成り立ち,品質がよいと判定した[Foken et al., 1996].

2.2.6 定常性テスト

1run(30分)内の定常性が満たされているのかを確認する品質判定法として定常性テストを行った. 定常性が満たされていれば, 1run の平均値や共分散と 1run を複数に分割した平均値や分散を 全区間にわたって平均した値と等しくなる[Foken et al., 1996]. これを確認するため, 以下の手順 で行った[岩田ほか, 2003].

A) 1run を小区間へ分割 1run(サンプル数を Nと定義する)を5つの小区間(サンプル数を Mと定義する)に分割した.
B) 小区間の共分散COV1の算出 小区間での共分散COV1を計算した.i 番目(i=1, 2, ... N/M)の小区間についての共分散を以

下の式で与えられる。

$$COV1 = \frac{1}{N/M} \sum_{i=1}^{N/M} (\overline{w'\rho_c})_i$$
(2.31)

このときの $(\overline{w'\rho_c'})_i$ を以下の式によって求めた.

$$(\overline{w'\rho_c'})_i = \frac{1}{M-1} \left[ \sum_{k=1}^M w_{(i-1)M+k} \, c_{(i-1)M+k} - \frac{1}{M} \left( \sum_{k=1}^M w_{(i-1)M+k} \right) \left( \sum_{k=1}^M c_{(i-1)M+k} \right) \right] \tag{2.32}$$

C) 全区間の共分散COV2の算出
 全区間(1run)の共分散COV2を計算した.以下に式を記した.

$$COV2 = \overline{w'\rho_c}' = \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{M} w_{(i-1)M+k} c_{(i-1)M+k} -\frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{M} w_{(i-1)M+k} \right) \left( \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{M} c_{(i-1)M+k} \right) \right]$$
(2.33)

D) クラス分け

判定基準は, *COV*1と*COV*2の差が10%未満,10%以上20%未満,20%以上30%未満,30%以上40%未満,40%以上のデータをそれぞれクラス1,2,3,4,5 とクラス分けをした.クラス1,2,3,4 のデータを品質のいいと判定した[Fokenet al., 1996].

3結果と考察

3.1 二酸化炭素と水蒸気の現場キャリブレーションの結果

赤外線ガス分析装置(LI7500)で測定された異常値削除後の瞬間値の30分平均値を横軸,二酸化 炭素・水蒸気圧測定装置(LI840)で測定された異常値削除後の30分平均の平均値を縦軸としてプ ロットし、決定係数と近似線を求めた結果を図 4~18 に示す.

本キャリブレーションにおける決定係数R<sup>2</sup>とは,推計に使用した赤外線ガス分析装置(LI7500) で観測したデータが,推計された近似線にどのくらい適応しているのかを表している[井上, 1994].そのため,決定係数の値が低いとき,近似式より赤外線ガス分析装置(LI7500)で測定され た異常値削除後の瞬間値の 30 分平均値のキャリブレーションをすることが難しいと言える.

本研究の結果では,決定係数の値は全期間を通じて高く,キャリブレーションが適切に行えて いたと判断できる.しかしながら,決定係数が低い期間もあり,キャリブレーションが適切に行 えていなかった期間もある.その点は今後の課題となるだろう.

3.2 渦相関法のデータ選別と品質管理の結果

3.2.1 乱流強度テスト

2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日の全期間における湖心で測定されたデータから求めた 無次元化した標準偏差と相似測から予測される無次元標準偏差を z/L に対してクラス毎にプロッ トした結果を図 19~48 に示す.その結果,測定されたデータから求めた無次元標準偏差の値は, 近似則から予測される無次元標準偏差と z/L の関係式で示される近似線,近似曲線に沿って分布 していることが分かる.

全期間における乱流強度テストにおいて相似則から予測される無次元標準差の値と観測された データから求めた値の差によってクラス分けした渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックス の平均値とデータ数を図 49 に示した.品質のいいデータと判定したクラス 1,2,3 のデータの割合 は,全体の約 23%であった.品質のいいデータを取得できていないことになる.

2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストにおいてクラスに分類したデ ータにおけるそれぞれの渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの値を図 50~54 に示し た.その結果,両者の差がクラス 1,2,3 の二酸化炭素フラックスの値は,日々の変化は大きくなか ったが,クラス 4,5 と判定された二酸化炭素フラックスでは,変化が大きい場合が見られた.

3.2.2 定常性テスト

2019年5月8日から2020年6月21日の全期間における定常性テストの結果を図55~68に示 す. 全期間における定常性テストにおいて*COV*1と*COV*2の差によってクラス分けした渦相関法で 求めた二酸化炭素フラックスのデータ数と平均値を図69に示す.その結果,定常性テストで品質 が高いと判定したデータは全体の約61%にあたる.そのことから,定常性を満たしているデータ が多く,品質のいいデータが多く取得できていると言える.

*COV1* と*COV2* の両者の差によってクラス分けしたそれぞれの渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの値を図 70~74 に示した. その結果, クラス 5 と判定された渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスは, 大きな変動がみられた.

- 3.3 ガス交換係数
- 3.3.1 ガス交換係数と風速

霞ヶ浦では、ガス交換係数と風速の関係性が見られなかった(表 6,図 75).海洋の先行研究では、

風速に伴ってガス交換係数の値が大きくなっている(図 76)[Jonsson et al., 2008; Wanninkhof et al., 2007; Atlas et al., 2011; McGillis et al., 2001].

風速が大きくなると,波形勾配が最大に達した重力波の峰の崩壊が,風波の気泡補足,海水滴 のおもな機構となり,ガス交換係数に寄与する[鳥羽,1996].この重力波の峰の崩壊のことを砕波 という.海洋では 5 m/s 以上の風が吹き続けると,砕波が発生することが知られている[鳥羽, 1996].また,大きな波になるほど,水面に乱れを生じさせ,ガス交換係数に寄与する[Broecker et at., 1978].そのため,風速が大きくなるに伴い,ガス交換係数も大きくなる[Liss, 1986; Anderson et al., 2011; Wanninlhof, 1992].

湖沼を研究対象とした先行研究では,風速に伴ってガス交換係数は大きくなっていることに加 えて,湖沼の大きさもガス交換係数に関わってくることが分かっている[Vachon et al., 2013].発 生した波は,発生域を離れて非常に遠方まで伝播するからである[磯崎ほか, 1999].よって,面積 が大きい湖沼ほど,大きな波が発生し,その波がガス交換係数に寄与しているのではないかと考 えられる.

霞ヶ浦では、面積が大きいが風速に伴うガス交換係数の増加は見られなかった.風速に伴うガス交換係数の増加が見られなかった 1 つの理由として、霞ヶ浦では砕波がめったに発生しないことが考えられる.ストーク理論によると、波が砕波を起こさない極限の波形勾配は 1/7 である [Stokes, 1880].波形勾配 H/Lとは、波長 Lと波高 Hによる比である.波長 Lは、水深と波高周期より求めることができる.霞ヶ浦は、平均水深 4m である[茨城県霞ケ浦環境科学センター, 2020].波高周期は、最大でも 3s ほどである[宮野, 2010].水深 4m,波高周期3s とすると、波長 L は 13.99 m と予測できる[土木学会, 1985].砕波を起こさない最大の波高は約 1.9 m である.霞ヶ 浦 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日の最大有義波高の頻度分布を表 5,図 77 に示す.また、最大波高の頻度分布を表 5,図 78 に示す.これによると、霞ヶ浦では 1.9 m を超える波高は最大有義波高、最大波高ともに存在しない.よって、砕波の発生は霞ヶ浦ではめったに発生しない ことが考えられる.そのため、風速の増加によって砕波が発生しないことが、ガス交換係数の増加に寄与していない大きな原因の一つであることが考えられる.

モデル式によって推定したガス交換係数と本研究のガス交換係数を比較した(図 76). モデル式 によって推定されたガス交換係数では風速に伴ってガス交換係数の値が大きくなっている.しか しながら,本研究では風速に伴ってガス交換係数は大きくならなかった.

本モデル式では,湖面積の違いによって引き起こされるガス交換係数と風速の関係性への影響 を考慮しているが,湖面積が引き起こすガス交換係数と風速の関係性への影響は小さい[Vachon et al., 2013].また,風速を基にガス交換係数を推定しているモデル式では全ての湖沼に対してガ ス交換係数を評価することはできない[Vachon et al., 2013].

これは湖岸の違いによって引き起こされる風速の違いや,吹送距離の違いがあるからである [Vachon et al., 2013]. 霞ヶ浦の湖岸は滑らであり森林が周りになく,風を妨げる要因が少ない. また,霞ヶ浦の面積は大きく,吹送距離も長い. そのため,ガス交換係数は風速依存性が大きくな ると予測できる.しかしながら,霞ヶ浦のガス交換係数は風速依存性が小さかった.よって,未だ ガス交換係数に影響を与えるすべての因子は明らかになっていないことが分かる[Vachon et al., 2013]. そのため,ガス交換係数に影響を与える因子を解明することが今後の課題である. 3.3.2本研究のガス交換係数の精度

風速毎のガス交換係数のデータ数を表 6, 図 75 に示した. その結果, 高風速領域におけるガス 交換係数のデータ数は小さかった. そのため, 高風速領域におけるガス交換係数の精度が低いこ とが考えられる. 風速に伴ってガス交換係数の増加が見られなかった一つの原因である可能性が ある.

本研究で使用した pH の精度を評価するため, 湖心が pH を測定されていた期間である 2007 年 6月から 2008 年 6 月までの 1 年間に取得された pH と同期間に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定され たそれぞれの pH を半年ごとに比較した. 横軸に湖心で測定した pH を縦軸に各観測所で測定さ れた pH をプロットし近似線を引いた. その近似線から, 測定された pH が 1 以上離れている値に 関しては, 異常値と判断し削除した(図 79~87). その結果, 湖心で測定された pH と他の観測所 で測定された pH には, 正の相関関係はあるものの, 決定係数は小さいことが分かった. しかしな がら, 決定係数が小さい理由として, pH の値が狭い範囲にあるからであると考えられる. そのた め, pH の精度を評価することができなかった.

水温に関しては,研究対象期間においては湖心で測定されている.そのため,湖心で水温を適切に測定できなかったデータを掛馬沖,麻生沖,平山の観測所で測定された水温で代用すること は適切であるのかを評価すべく,研究対象期間である 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に 湖心で測定された水温と同期間における掛馬沖,麻生沖,平山で測定された水温をそれぞれ比較 した(図 88~90).その結果,湖心で測定された水温と掛馬沖,麻生沖,平山で測定されたそれぞれ の水温の決定係数は高く,湖心のデータで代用することは問題ないと考える.

アルカリ度の関しては,時間変化は小さい(表 7,図 91).また,C<sub>w</sub>の値に大きな変化はもたら さないことから,基本的に月1度の水サンプルにより求めても精度に問題ないと考えられる.

3.3.3化学的促進が与えるガス交換係数への影響

pHが8を超える淡水の湖沼において,低風速域では化学的促進の影響を受け,ガス交換係数の 増加に寄与することが知られている[Smith et al., 1985]. 霞ヶ浦のpH は比較的高いため,化学的 促進の影響を受けていることが考えられる(表 8,図 92). しかしながら,低風速域では,ガス交 換係数は先行研究と比較して,大きな違いが見られない. そのため,霞ヶ浦において,化学的促進 の影響は大きくない.

3.4 バルク法により補完した二酸化炭素フラックスの年変化

2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日までの二酸化炭素フラックス,水面から 10 m 付近にお ける二酸化炭素の分圧と平衡を保つ水中の二酸化炭素ガス濃度,水中の溶存二酸化炭素濃度,pH, 水温の季節変化を図 93~107 に示す.

全期間における二酸化炭素フラックスの季節変化を図 108 に示した. 全期間を通じて, 二酸化炭素の吸収と放出を繰り返していることが分かる. 二酸化炭素フラックスは, -0.01~0.01 m mol/(s·m<sup>2</sup>)の範囲で季節変化している場合が多い.

全期間における水面から 10 m 付近における二酸化炭素の分圧と平衡を保つ水中の二酸化炭素

ガス濃度,水中の溶存二酸化炭素濃度,pH,水温の季節変化と二酸化炭素フラックスの積算値を 図 109 に示した.また,水面から 10 m 付近における二酸化炭素の分圧と平衡を保つ水中の二酸化 炭素ガス濃度,水中の溶存二酸化炭素濃度,pH,水温の平均値を図 110 に示した.その結果,霞ヶ 浦は季節変化に伴って水温が変化することで,溶解度が変化するためC<sub>a</sub>\*の値も変化していること が分かる.水温が高くなると溶解度が小さくなるため,C<sub>a</sub>\*も小さくなっている.また,C<sub>w</sub>は pH によって大きく変化する.そのため,pH の変化に伴いC<sub>w</sub>も変化していることが分かる.pH7.9 以 下になるとC<sub>w</sub>の値が非常に大きくなり,放出量が大きくなる.

二酸化炭素の積算値では,特に 2019 年 5 月から 2019 年 12 月までは二酸化炭素を放出する傾向が強く,2019 年 12 月から 2020 年 4 月までは二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった. 2019 年 5 月から 2019 年 12 月までにおける pH の頻度分布とバルク法によって求めた二酸化炭 素フラックスを示した(表 9,図 111). 2019 年 5 月から 2019 年 12 月では, pH8.3 付近より小さい データを二酸化炭素の放出していることが分かる. pH8.3 未満のデータは 2019 年 5 月から 2019 年 12 月に取得されたデータの 70%である.よって,積算値として二酸化炭素の放出が上回ったこ とが分かる.

2019 年 12 月から 2020 年 4 月までにおける pH の頻度分布とバルク法によって求めた二酸化 炭素フラックスを示した(表 10, 図 112). その結果, pH8.1 付近より小さいデータでは二酸化炭素 が放出していることが分かる. pH8.1 未満のデータは 2019 年 12 月から 2020 年 4 月に取得したデ ータの 33%である. よって, 積算値として吸収が上回った.

全期間における二酸化炭素フラックスの積算値は 1.8 g/m<sup>2</sup>/yearであった. 5 つの富栄養化湖沼 を対象に二酸化炭素フラックスを求めた Pacheco et al., (2013)は, -18~10 g/m<sup>2</sup>/yearであること から, 大きな二酸化炭素フラックスの差異はなかった(表 11).

3.5 pH の変動によって引き起こされる二酸化炭素フラックスの評価

バルク法より二酸化炭素が放出と吸収を繰り返した要因は、 $C_a^* \ge C_w$ の変動によるものである と言える、 $C_a^*$ が $C_w$ より大きくなると二酸化炭素を吸収しており、小さくなると二酸化炭素を放出 している.

図 113~115 には,研究対象期間における最大水温(34.6°C),最低水温(6.5°C),平均水温 (18.3°C)によって分類し,バルク法で使用した pH ごとの $C_a^*$ と $C_w$ の値を表している.  $C_a^*$ は水面か ら 10m 付近における二酸化炭素濃度と水温と気温に依存しているため,研究期間における水面か ら 10m 付近における二酸化炭素濃度の最大値(523.8 ppm)と最小値(398.1 ppm)より $C_a^*$ の変動範 囲を決定した.気温に関しては $C_a^*$ に大きな影響を与えないため 20°Cであるものとして計算した.  $C_w$ は,水温とアルカリ度と pH に依存しているため,研究対象期間におけるアルカリ度の最大値 (1.36 m mol/L),最小値(0.96 m mol/L),平均値(16.3 m mol/L)から求めた $C_w$ を pH 毎に求めた. このときの pH の頻度分布は全期間のデータである.pH は水温と多少の関係性があることが分か る(図 116).しかしながら,水温が与える pH への影響はそれほど大きくないため,それぞれの水 温によって pH の頻度分布を変更はしていない.

 $C_a^*$ の変動は小さく、 $C_w$ の変動は大きかった.よって、二酸化炭素の吸収と放出のプロセスには  $C_w$ の変動が大きく関わっている、本研究で使用した掛馬沖、麻生沖、平山で測定された pH は pH7.6 から pH8.6 付近にデータが集中している. そのことから, 二酸化炭素の吸収と放出をして いることが分かる. 全期間を通じては, 放出がやや上回った. しかしながら, 宮野 (2008), 高橋 (2013)においては, 全期間を通じて吸収が上回っている. これは, 本研究では掛馬沖, 麻生沖, 平 山で測定された pH を使用したことが原因であることが考えられる.

2007 年 6 月から 2008 年 6 月まで湖心で取得された pH と本研究のバルク法で使用した pH の 頻度分布と本研究期間における水面から 10m 付近における二酸化炭素濃度の最大値と最小値よ り求めた $C_a$ \*の変動範囲とアルカリ度の最大値と最小値と平均値から求めた $C_w$ を水温毎に示した (図 117~119). 湖心においても水温が与える pH への影響はそれほど大きくないため,それぞれ の水温によって pH の頻度分布を変更はしていない(図 120). その結果, 湖心ではデータが pH8.8 付近に集中しており, pH8.8 付近では二酸化炭素の吸収が起こっていることが分かる. そのため, 湖心観測所で測定された pH を使用している宮野 (2008), 高橋 (2013)においては, 積算値は吸 収を示していると考えられる.

pH が変化した原因として,降水の影響が考えられる.図 121 は,本研究で使用した掛馬沖,麻 生沖,平山で測定された pH と降水量の関係である.また,2007 年 5 月から 2008 年 6 月までにお ける湖心で測定された pH と降水量の関係を示している(図 122).降水の pH は霞ヶ浦の pH より も低いため,降雨によって pH の低下する[相崎, 2001].湖心で測定された pH に比べ掛馬沖,麻 生沖,平山で測定された pH の方が降水の影響を受けていることが分かる.

その理由として,降雨後に河川から降水が流れ込むため降雨の影響を受けやすいからではない かと考える.また,降雨が少ないときには,pH が高くなった.その理由として,植物プランクトン の光合成が要因であると考えられる.植物プランクトンの光合成は,水中から無機炭酸を取り込 むため pH が上昇する[相崎, 2001]. 霞ヶ浦では,季節変化によって植物プランクトンの種類が変 化し,年中において光合成が行われている[霞ヶ浦環境科学センター, 2013].そのため,水温,光 強度の影響を受け植物プランクトンの光合成が活発になるため,夏季には光合成活性が高くなる [岩崎ほか,1996].よって,水温と pH には関係性があると考えられる(図 123~124).

また,全期間を通じて掛馬沖,麻生沖,平山で測定された pH は湖心で測定された pH に比べ低い. その理由として,河川流入とバクテリアによる影響が大きかったのではないかと考える. 河川水の pH は湖水の pH に比べ低い[薮崎ほか, 2006]. そのため,河川流入による影響を受けることが考えられる.

バクテリアの有機物の分解する過程によって水中の二酸化炭素濃度の増加し pH が上昇する. バクテリアは有機物が存在するとさかんに増殖する[藤井ほか, 1991].掛馬沖,麻生沖,平山は沿 岸部にあり生活排水等による影響を受けるため,有機物が多くバクテリアの影響を受けやすかっ たのではないかと予測される.しかしながら,pH に影響を及ぼす要因として降水量,水温,バク テリアのみでは説明できない場合がある.そのため,pH に影響を及ぼすその他の要因については 今後の課題であると考えられる.

#### 4まとめ

本研究では,2019年5月から2020年6月の期間において,渦相関法とバルク法を併合することで,二酸化炭素フラックスの測定を行った.

ガス交換係数は,他の海洋・湖沼において風速が大きくなるにしたがって,ガス交換係数も大き くなることが知られている[Broecker et at., 1978; Vachon, 2013].しかしながら,霞ヶ浦では,風 速が大きくなるにしたがって,ガス交換係数は大きくならなかった.その理由としては,ガス交 換係数に寄与する砕波が発生しないため,砕波による影響が霞ヶ浦にはないことが要因の一つで あると考えられる.砕波の影響以外にも他の要因がガス交換係数に影響を及ぼしている可能性も 考えられる.この要因の解明は今後の課題である.また,高風速領域におけるデータ数が少ない. よって,高風速領域におけるガス交換係数の精度の低さも考えられる.

二酸化炭素フラックスは, -0.01~0.01 m mol/(s m<sup>2</sup>)の範囲で季節変動している場合が多い. つまり, 二酸化炭素の放出と吸収が繰り返されていると言える. これは, 霞ヶ浦の先行研究の宮 野(2008), 高橋(2013)と比較しても二酸化炭素フラックスの絶対値は, 大きく変わらなかった. 宮野(2008), 高橋(2013)では全期間を通じて二酸化炭素の吸収が上回った. しかしながら, 本 研究では二酸化炭素の放出が上回った. その理由として, 本研究で使用した pH は掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定しており, 湖心で測定された pH より低いため, Cwの値が大きくなったことが考えら れる. 掛馬沖, 麻生沖, 平山は, 湖心に比べ河川流入により降水の影響を受ける. よって, 降水の 影響は湖心に比べ大きく, 降水量の多い月には pH の低下が顕著にみられた. また, 生活排水等の 影響を受け, 沿岸部ではバクテリアの有機物の分解によって pH の低下が考えられる. そのため, 湖心に比べ全期間を通じて pH の値は低い. また, 先行研究との差異として, 本研究では二酸化炭 素・水蒸気圧測定装置(LI840)を用いることで大気中の二酸化炭素濃度の平均値を測定できた点で ある.そのため,水面から10m付近における二酸化炭素の分圧と平衡を保つ水中の二酸化炭素濃 度C<sub>a</sub>\*の値を精度よく算出することができた. 先行研究では, C<sub>a</sub>\*を実際よりも小さく評価してい たことが原因で, 二酸化炭素の吸収が年間を通じて上回ったと評価したのではないかと考えられ る.しかしながら, C<sub>a</sub>\*の変動はそれほど大きくないため, C<sub>a</sub>\*による違いが二酸化炭素フラックス に大きな影響を与えないと考えられる.

本研究では,風速に伴ってガス交換係数の増加が見られなかった.そのため,今後の課題とし て,ガス交換係数が増加しないことが適切であるかを判断すべく,ガス交換係数が風速に伴い増 加しない湖沼を対象に増加しない要因の解明が必要である.また,風速がガス交換係数に及ぼす 影響よりも大きい要因が考えられる湖沼に対して,その要因の解明も必要である.二酸化炭素の 吸収と放出のプロセスを理解においては,pHが大きく関わってくる.そのため,pHの変化に及ぼ す影響を解明がすることで吸収と放出のプロセスを理解できる.よって,pHの変化の要因を解明 することは一つの課題である.本研究の今後の課題としては,ガス交換係数の精度の向上が重要 である.また,pH とアルカリ度の測定をより正確にするとともに,高風速領域でのデータ数を増 やすため,長期間の測定が必要である. 謝辞

本研究をする過程で多くの方にお世話になりました. 国土交通省 関東地方整備局 霞ヶ浦河川 事務所には、データの提供していただきありがとうございました.また、湖心観測所の利用をさ せていただくことで,研究で必要なデータを取得することができました.本当にありがとうござ いました. 筑波大学生命環境系の杉田倫明先生にはご指導いただきました. 筑波大学生命環境系 の山中勤先生・浅沼順・辻村真貴先生には、ご助言いただきました. 心より御礼申し上げます. 岐 阜大学工学部付属応用気象研究センター長の吉野純先生には気象データを用いて, Python の使い 方を教えていただきありがとうございました.メトロームジャパン株式会社タイトレーション部 市場計輔さんには、メトロームの使用方法の詳細について教えていただきありがとうございまし た. 筑波大学生命環境科学研究科地球科学専攻の安達郁哉君には、アルカリ度の測定についての 助言をいただきありがとうございました. 筑波大学生命環境科学研究科環境科学専攻の Yatfai Yeung 君には, Python を使ったグラフの作成の方法を教えていただきました. 筑波大学人間系の 三盃亜美先生・中野泰伺先生ならびに筑波大学学生部就職課ディレクターの末富真弓さんには研 究をするにあたり様々なサポート・ご助言いただきありがとうございました. 筑波大学人文文化 学群の安部照史君には生活習慣等をはじめとする研究をするに必要な体調管理等の助言をしてい ただき体を壊さずに研究を続けることができました. 筑波大学生命環境科学研究科環境科学科の アブドルジャバール君のサポートがあり、コロナ渦でも研究をすることができました. 私は家族 のサポートなしでは研究をすることができなかったと考えております.特に,弟である福岡県立 八幡高校普通科の石川健太郎君からは多く励まされ、そのお陰でめげずに研究を続けることがで きました. 近くのコンビニの店員さん、食堂で働いている方など皆さまのおかげで論文を作成す ることができました.ありがとうございました.

参考文献

- 相崎守弘(2001)霞ヶ浦データベース各測定項目に関する詳細な解説,生物・生態系環境研究セン ター,p6-p7
- Atlas, R. , R. N. Hoffman, J. Ardizzone, S. M. Leidner , J. C. jusem, D. K. Smith, D. Gombos (2011) A cross-calibrated multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological application, American Meteorological Society, 92(2), p157-p174
- Baugh(1999)Estimating lake atmosphere CO<sub>2</sub> exchange, Limnology and Oceanography, 44(4), p998-p1001
- Bolton, D. (1980)The computation of equivalent potential temperature, Monthly Weather Review, 108(7), p1046-p1053
- Broecker, W. S., J. Petermann, W. Siems(1978) The influence of wind on CO<sub>2</sub>-exchange in windwave tunnel, including the effects of monolayers, Journal of Marine Research, 36(4), p595-p610
- Brutsaert, W. (2008):「水文学」(杉田倫明訳),共立出版, p502
- Cole. J. J., George W. Kling, N. F. Caraco, T. Kratz(1994)Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes, Science New Series, 265(5178)p1568-p1570
- Cole, J. J., N. F. Caraco(1998)Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>, Limnology and Oceanography, 43(4), p647-p657
- Cole, J. J., N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tanvik, R. G. Striegl, G. M. Duarte, P. Kortelainen, Downing, Middelburg, Melack(2007)Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget, Ecosystems, 10, p171-p184

土木学会(1985):水理公式集,昭和 60 年度版,土木学会, p498-p498

- Foken, T., Wichura, B. (1996)Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, Agricultural and Forest Meteorology, 78(1-2), p83-p105
- Garratt, J. R. (1992) The atmospheric Boundary Layer, Cambridge University Press, p316
- 原田義也(2012)化学熱力学(物理化学入門シリーズ), 裳華房出版, p1-p21
- Holgerson, M. A., E. R. Farr, P. A. Raymond(2007)Gas transfer velocities in small forested ponds, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122, p1011-p1021
- 福島武彦, 松重一夫, R. S. J. Weisburd(1995)Do, pH の連続測定による気液ガス交換, 光合成, 呼 吸速度の推定方法について, 水環境学会誌, 18 巻 4 号 p279-p289
- HuiZhi, L , F. JianWu, S. JiHua, W. Lei, X. AnLun(2015)Eddy corviance measurements of water vapor and CO<sub>2</sub> fluxes above the Erhai Lake, Science China Earth Science, 58(3), p317p328
- 藤井滋穂, 宗宮功, 小倉啓宏(1991)バクテリアによる富栄養化水域での有機物分解活性の定量化, 水質汚濁研究, 第 14 巻第 5 号, p334~p342
- 茨城県霞ケ浦環境科学センターHP:調査・研究>調査研究の紹介>湖沼環境研究室>植物プラン クトンの群集構造による影響する環境要因の解明に関する研究
  - http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04\_kenkyu/shoukai/kankyou/documents/h23/0

1\_algae.pdf (最終閲覧日:2013/02/14).

- 茨城県霞ケ浦環境科学センターHP>調査・研究>霞ヶ浦について
  - https://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/04\_kenkyu/kasumi gaura/kasumigaura. htm(最終閲覧日 2020/12/9)
- 茨城県霞ケ浦環境科学センターHP>茨城で暮らす > 環境・自然 > 霞ケ浦 > 霞ヶ浦流域 https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kantai/kasumigaura/lake/kasumigauraryuui ki.html(最終閲覧日 2020/1/24)
- 飯田貞夫(1997)やさしい陸水学:地下水・河川・湖沼の環境, 文化書房博文社, p129-p130
- 磯崎一郎, 鈴木靖(1999)波浪の解析と予測, 東海大学出版会, p9-p15
- 井上勝雄(1994)決定係数に関する覚え書き,経済学論究,48巻3号p107~p124
- 岩崎 順,外岡健夫(1996)霞ヶ浦における植物プランクトンの現存量と光合成活性の季節変化,茨 城県内水面水産試験場研究報告, 32, p50-p60
- 岩田徹, 三枝信子(2003)渦相関法によるフラックス解析の実際, AsiaFlux 運営員会編:域生態系に おける二酸化炭素等のフラックス観測の実際, 国立環境研究所, p25-44, p86-89
- Jähne, B., K. Münnich, R. Dutzi, W. Huber, P. Libner(1987)On the parameters influencing airwater gas exchange, Journal of Geophysical Research, 92, p1937-p1949
- Jonsson, J. A., A. Lindroth, M. Jansson(2008)Gas transfer rate and CO<sub>2</sub> flux between an unproductive lake and the atmosphere in northern Sweden, Journal of Geophysical Reserch 113, G04006, p1-p13
- Jensen, K. S., P. A. Staehr(2007)Scaling of pelagic metabolism to size, trophy and forest cover in small Danish lakes, Ecosystems, 10, p127-p142
- 霞ヶ浦河川事務所 HP > 防災情報 > 霞ヶ浦の水質調査データ > 水質調査結果一覧 https://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/kasumi00145.html(最終閲覧日 2020/11/10)
- Kelly, C. A., E. Fee, P. S. Ramlal, J. W. M. Rudd, R. H. Hesslein, C. Anema, W. U. Schindler (2001)Natural variability of carbon dioxide and net eqilimnetic production in the surface waters of boreal lakes of different sizes, Limnol. Oceanogr, 46, p1054-p1064
- Kuss, J., B. Schneider(2004)Chemical enhancement of CO<sub>2</sub> gas exchange at a smooth seawater surface, Marine Chemistry 91, p165-174
- Liss, P. S., L. Maerlivat(1986) Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis and synthesis, the Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling, 185, p113-p129
- Mammarella, AnnikaNordbo, Ü. Ranni, S. Haapanala, J. Levula, H. Laakso, A. Ojala, O. Peltola, J. heiskanen, J. Pumpanen, T. Vesala(2014)Carbon dioxide and energy fluxes over a small boreal lake in Southern Finland, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 120, p1296–p1314
- Matthews C. I. D., V. L. StLouis, R. H. Hesslein(2003)Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces, Environmental Science & Technology, 37(4), p772-p780

McGillis, W. R., J. B. Edson(2001)Direct covariance air-sea CO2 fluxes, Journal of Geophysical

Research 106(16), p729-p745

- 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,筑波大学生命環境科学群地球 学類地球環境学主専攻卒業論文, p1-p45
- 宮野愛子(2010)バルク法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 研究科環境科学専攻修士学位論文,p1-p70
- 日本分析化学北海道支部(2005)水の分析第5版 p186-p191
- 西村典子,渡辺桂一郎,岸田巧,岩田徹,大滝栄治(1998)河川水中の二酸化炭素濃度(ρCO<sub>2</sub>)の変動特性,環境科学学会誌 11 巻 3 号:p297-p304
- Ohtaki, E. (1985)On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over and energy exchanges, Boundary Layer Meteorology, 32, p25-p37
- Pacheco, F. S., F. Roland, J. A. Downing(2013)Eutrophication reverses whole lake carbon budgets, Inland Waters(4), p41-p48
- Podgrajsek, E., E.Sahlée, A. Rutgersson(2015)Diel cycle of lake-air CO<sub>2</sub> flux from a shallow lake and the impact of waterside convection on the transfer velocity, Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 120(1), p29-38
- Roehm, C. L., Y. T. Prairie, P. A.Giorgio(2009) The pCO<sub>2</sub> dynamics in lakes in the boreal region of northern Québec, Canada Global Biogeochem Cycles, 23(3), p1-p9
- 猿橋勝子(1974)海洋科学基礎講座 10, 海水の化学, 東海大学出版, p242-p269
- Stokes (1880): On the theory of oscillatory waves, Cambridge University Press, 1, p197-p229
- Smith, S. V. (1985) Physical, chemical and biological characteristics of CO<sub>2</sub> gas flux across the airwater interface, plant cell and Environment, 8, p389-398
- 杉田倫明・田中正(2009)水文科学 Hydrogic Science, 共立出版株式会社, p38, p83
- 高橋孝生(2013) 渦相関法による霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスの測定とその変化要因の考察,筑波大学生命環境科学群地球学類地球環境学主専攻卒業論文,p1-p113
- 鳥羽良明(1996)大気・海洋の相互作用,東京大学出版,p298-p299
- Vachon,D., Y. T.Prairie(2013)The ecosystem size and shape dependence of gas transfer versus wind speed relationships in lakes, Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 70, p1757p1764
- Wanninkhof, R. (1992), Relationship between wind and gas exchange over the ocean, Journal of Geophysical Research, 97, p7373-p7382
- Wanninkhof, R. (2007)The impact of different gas exchage formulations and wind speed productions and wind speed products on global Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes, transport at the Air Sea Interface, p1-p23
- Wanninkhof, R. (2014) Relationship between wind speed and gas exchange and gas excahgen over the ocean revisited , the American Society of Limnology and Oceangraphy, 12(6), p351p362

渡辺真利代,原田健一,藤気博太(1994)アオコ\_その出現と毒素\_\_,東京大学出版会

Wei Zhongwang, Aiko Miyano, Michiaki Sugita (2016)Drang and Bulk Transfer Coefficients Over

Water Surface in Light Winds, Boundary Layer Meteorology 160, p319-p346

- Weiss, R. F. (1974) Carbon dioxide in water and seawater the solubility of a nanideal gas, Marine Chemistry, 2, p203-p215
- Woods Hole Oceanographic Institution (1982)Evaporation into the Atmosphere, d. reidel publishing company, 3(2), p219
- Xiao, S., H. Yang, D. Liu(2014)Gas transfer velocities of methane and carbon dioxide in a subtropical shallow pond, Swedish Geophysical Society, 66(1), p1-p14
- 薮崎志穂,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・流量特 性について,筑波大学陸域研究センター報告,7,p3-p13

| 観測所名 | 水系名 | 所在地          | 緯度経度                       |
|------|-----|--------------|----------------------------|
| 湖心   | 利根川 | 茨城県稲敷郡美浦村    | 北緯 36度02分16秒 東経 140度24分14秒 |
| 掛馬沖  | 利根川 | 茨城県稲敷郡阿見町掛馬沖 | 北緯 36度03分15秒 東経 140度14分48秒 |
| 麻生沖  | 利根川 | 茨城県行方市麻生麻生沖  | 北緯 35度57分53秒 東経 140度29分20秒 |
| 平山   | 利根川 | 茨城県小美玉市玉里町平山 | 北緯 36度08分21秒 東経 140度20分23秒 |

表1 本研究で使用した霞ヶ浦の観測所の水系,所在地,緯度経度

| 装置名                   | 仕様   | 備考                                  | 水面からの高さ |
|-----------------------|--|-------------------------------------|---------|
|                       | 超音波測定による温度, 湿度測定(超音波サンプリングレート:100s <sup>-1</sup> )                             |                                     | 9.8 m   |
|                       | 風速(X, Y, Z3成分, レンジと分解能:0-45 m/s, 0.01 m/s, 精度<±1%RMS)                          | —<br>— 30分平均のデータ,10Hz毎デー<br>        |         |
| 超音波風速温度計              | 風向(レンジと分解能:0-360°,1°,精度<1°)  |                                     |         |
|                       | 温度(音速測定値より算出.音速のレンジと分解能:300-370 m/s, 0.01 m/s, 精度<±                            |                                     |         |
|                       | 0.5%)  |                                     |         |
|                       | CO <sub>2</sub> (測定範囲:0-3000 $\mu$ mol/mol, RMS誤差:0.08 $\mu$ mol/mol)          | — 30分平均のデータ, 10Hz毎デー                |         |
| 赤外線ガス分析装置             | H <sub>2</sub> O(測定範囲:0-42 g/m <sup>3</sup> , RMS誤差:0.2-0.4 g/m <sup>3</sup> ) | S誤差:0.2-0.4 g/m <sup>3</sup> ) タを記録 |         |
| お計とは通回答へを泪泪在計         | 温度,湿度:Vaisala社製VMP155Dセンサー(範囲:0-100%,精度:0.17°C, ±                              | 20八亚                                | 8.55 m  |
| 成射より<br>通風同うさ<br>温湿度計 | 1%RH), 通風装置付き  | 30万十均を記録                            |         |
| 二酸化炭素・水蒸与圧測空粘置        | CO <sub>2</sub> (測定範囲:0-3000 ppm, RMS誤差:<1 ppm)                                | 30公平均を記録                            | 9.8 m   |
| ——取10灰米 小黑刈江周足衣直      | H <sub>2</sub> O(測定範囲:0-80 ppt, RMS誤差:<0.01 ppt)                               | — 50 刀 〒*ブと 叱翊                      |         |

# 表2 本研究で使用した独自観測項目

| 観測所名          | 要素 | 機器名称             | 測定水深   | 記録値      | 使用期間  | 説明                                       |
|---------------|----|------------------|--------|----------|---|--|
| <br>湖心<br>    | 雨量 | 転倒ます式雨量計         | 8.85 m | 連続積算雨量   | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | 電源投入時からの連続積算雨量                           |
|               | 気温 | 強制通風式放射シェルター型気温計 | 8.25 m | 5分移動平均   | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | 1秒サンプリングの300データの移動平均                     |
|               | 気圧 | アネロイド型気圧計        | 6.75 m | 瞬間値      | 2019/05/08~2020/06/21                         | ベローズ動作による瞬間値                             |
|               | pН | 水質自動監視装置         | 0.5 m  | 毎時5分の瞬間値 | (2007/06/01~2008/06/01)*                      | ガラス電極法による測定,測定範囲2~12pH,総合精度±0.2pH        |
|               | 水温 | 水質自動監視装置         | 0.1 m  | 毎時5分の瞬間値 | (2007/06/01~2008/06/01)*                      | 白金抵抗法による測定,測定範囲-10~40°C,総合精度±0.5°C以内     |
| p<br>掛馬沖<br>水 | pН | 水質自動監視装置         | 0.5 m  | 毎時5分の瞬間値 | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | ガラス電極法による測定,測定範囲2~12pH,総合精度±0.2pH        |
|               | 水温 | 水質自動監視装置         | 0.1 m  | 毎時5分の瞬間値 | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | 白金抵抗法による測定,測定範囲-10~40°C,総合精度±0.1°C以内     |
| 麻生沖 — pH<br>水 | pН | 水質自動監視装置         | 0.5 m  | 毎時5分の瞬間値 | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | ガラス電極法による測定,測定範囲2~12pH,総合精度±0.2pH        |
|               | 水温 | 水質自動監視装置         | 0.1 m  | 毎時5分の瞬間値 | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | <br>白金抵抗法による測定,測定範囲-10~40°C,総合精度±0.5°C以内 |
| 平山            | pН | 水質自動監視装置         | 0.5 m  | 毎時5分の瞬間値 | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | ガラス電極法による測定,測定範囲2~12pH,総合精度±0.2pH        |
|               | 水温 | 水質自動監視装置         | 0.1 m  | 毎時5分の瞬間値 | 2019/05/08~2020/06/21(2007/06/01~2008/06/01)* | <br>白金抵抗法による測定,測定範囲-10~40℃,総合精度±0.5℃以内   |

表3 本研究で使用した国土交通省による観測項目

\*精度の評価等のみに使用
表 4 動粘性係数ν(m<sup>2</sup>/s)と気温の関係

| 気温 T(K) | 動粘性係数 v | $\times 10^{-5} (m^2/s)$ |
|---------|---------|--------------------------|
| 253.15  | 5       | 1.158                    |
| 263.15  | 5       | 1.243                    |
| 273.15  | 5       | 1.328                    |
| 283.15  | 5       | 1.418                    |
| 293.15  | 5       | 1.509                    |
| 303.15  | 5       | 1.602                    |
| 313.15  | 5       | 1.7                      |

| 波高範囲(m)      | 最大有義波高のデータ数 | 最大波高のデータ数 |
|--------------|-------------|-----------|
| 0 ≦波高< 0.1   | 3108        | 1715      |
| 0.1 ≦波高< 0.2 | 3203        | 1928      |
| 0.2 ≦波高< 0.3 | 1378        | 1925      |
| 0.3 ≦波高< 0.4 | 494         | 1372      |
| 0.4 ≦波高< 0.5 | 238         | 667       |
| 0.5 ≦波高< 0.6 | 116         | 378       |
| 0.6 ≦波高< 0.7 | 59          | 229       |
| 0.7 ≦波高< 0.8 | 21          | 145       |
| 0.8 ≦波高< 0.9 | 13          | 108       |
| 0.9 ≦波高< 1   | 7           | 68        |
| 1 ≦波高< 1.1   | 1           | 36        |
| 1.1 ≦波高< 1.2 | 1           | 21        |
| 1.2 ≦波高< 1.3 | 1           | 17        |
| 1.3 ≦波高< 1.4 | 3           | 14        |
| 1.4 ≦波高< 1.5 | 1           | 10        |
| 1.5 ≦波高< 1.6 | 1           | 5         |
| 1.6 ≦波高< 1.7 | 0           | 1         |
| 1.7 ≦波高< 1.8 | 0           | 0         |
| 1.8 ≦波高< 1.9 | 0           | 2         |
| 1.9 ≦波高< 2   | 0           | 0         |
| 2 ≦波高< 2.1   | 0           | 4         |
| 2.1 ≦波高< 2.2 | 0           | 0         |
| 2.2 ≦波高< 2.3 | 0           | 0         |
| 2.3 ≦波高< 2.4 | 0           | 1         |
| 2.4 ≦波高< 2.5 | 0           | 0         |
| 2.5 ≦波高< 2.6 | 0           | 0         |
| 2.6 ≦波高< 2.7 | 0           | 0         |
| 2.7 ≦波高< 2.8 | 0           | 0         |

表 5 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日における湖心で測定された波高範囲毎の最大有義 波高と最大波高のデータ数

## 表 6 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における風速毎のガス交換係数K<sub>600</sub>の平均値とその 標準偏差およびデータ数

| 風速u。(m/s)            | K <sub>600</sub> (m/s) | 標準偏差(m/s) | データ数 |
|----------------------|------------------------|-----------|------|
| $0 \le u_c < 0.5$    | 0.1465                 | 0.1204    | 28   |
| $0.5 \le u_c < 1$    | 0.1303                 | 0.1611    | 76   |
| $1 \leq u_c < 1.5$   | 0.1031                 | 0.1338    | 132  |
| $1.5 \le u_c < 2$    | 0.1542                 | 0.4633    | 173  |
| $2 \leq u_c < 2.5$   | 0.1767                 | 0.4664    | 150  |
| 2.5 ≦uc<3            | 0.1100                 | 0.1949    | 149  |
| $3 \le u_c < 3.5$    | 0.1957                 | 0.4086    | 196  |
| $3.5 \leq u_c < 4$   | 0.1748                 | 0.5195    | 208  |
| $4 \le u_c < 4.5$    | 0.1467                 | 0.2176    | 214  |
| $4.5 \le u_c < 5$    | 0.1569                 | 0.5092    | 225  |
| 5 ≦uc<5.5            | 0.1370                 | 0.2650    | 203  |
| 5.5 ≦uc<6            | 0.1221                 | 0.1715    | 155  |
| $6 \leq u_c < 6.5$   | 0.1296                 | 0.2268    | 138  |
| $6.5 \le u_c < 7$    | 0.1121                 | 0.1107    | 112  |
| 7 ≦uc<7.5            | 0.1989                 | 0.3352    | 73   |
| 7.5 ≦uc<8            | 0.1500                 | 0.2059    | 58   |
| $8 \le u_c < 8.5$    | 0.1609                 | 0.3323    | 50   |
| 8.5 ≦uc<9            | 0.2012                 | 0.5059    | 41   |
| $9 \le u_c < 9.5$    | 0.2956                 | 0.4682    | 20   |
| $9.5 \le u_c < 10$   | 0.3088                 | 0.6024    | 20   |
| $10 \le u_c < 10.5$  | 0.1802                 | 0.1977    | 19   |
| $10.5 \le u_c < 11$  | 0.1803                 | 0.1505    | 13   |
| $11 \leq u_c < 11.5$ | 0.1235                 | 0.1295    | 6    |
| $11.5 \le u_c < 12$  | 0.0971                 | 0.0365    | 4    |
| $12 \leq u_c < 12.5$ | 0.0644                 | 0.0617    | 3    |
| $12.5 \le u_c < 13$  | 0.5906                 | 0.7634    | 8    |
| $13 \leq u_c < 13.5$ | 0.1481                 | 0.0264    | 3    |
| $13.5 \leq u_c < 14$ | 6.3065                 | 4.2401    | 31   |

表7 湖心で採取した水サンプルから測定したアルカリ度の季節変化

| 水サンプルを取得  | 导した時刻 | アルカリ度(mg/L) |
|-----------|-------|-------------|
| 2020年9月2日 | 8:30  | 65.88       |
| 2020年9月2日 | 9:30  | 68.32       |
| 2020年9月2日 | 10:30 | 68.32       |
| 2020年9月2日 | 11:30 | 68.32       |
| 2020年9月2日 | 12:30 | 68.32       |

表82007年6月1日から2007年12月1日における湖心で測定された30分平均のpH毎の平

|                    | 平均値  | データ数 |
|--------------------|------|------|
| 7.1 ≦pH< 7.2       | 7.02 | 2    |
| 7.2 ≦pH< 7.3       |      | 0    |
| 7.3 ≦pH< 7.4       | 7.26 | 2    |
| 7.4 ≦pH< 7.5       | 7.34 | 2    |
| 7.5 ≦pH< 7.6       | 7.46 | 8    |
| 7.6 ≦pH< 7.7       | 7.54 | 7    |
| 7.7 ≦pH< 7.8       | 7.66 | 12   |
| 7.8 ≦pH< 7.9       | 7.77 | 51   |
| 7.9 ≦pH< 8         | 7.85 | 148  |
| 8 ≦pH< 8.1         | 7.94 | 166  |
| 8.1 ≦pH< 8.2       | 8.04 | 126  |
| 8.2 ≦pH< 8.3       | 8.14 | 146  |
| 8.3 ≦pH< 8.4       | 8.24 | 157  |
| 8.4 ≦pH< 8.5       | 8.35 | 172  |
| $8.5 \le pH < 8.6$ | 8.45 | 226  |
| $8.6 \le pH < 8.7$ | 8.55 | 328  |
| 8.7 ≦pH< 8.8       | 8.65 | 478  |
| $8.8 \le pH < 8.9$ | 8.75 | 530  |
| 8.9 ≦pH< 9         | 8.84 | 434  |
| 9 ≦pH< 9.1         | 8.94 | 371  |
| 9.1 ≦pH< 9.2       | 9.05 | 380  |
| $9.2 \le pH < 9.3$ | 9.14 | 209  |
| $9.3 \le pH < 9.4$ | 9.24 | 183  |
| $9.4 \le pH < 9.5$ | 9.34 | 116  |
| $9.5 \le pH < 9.6$ | 9.44 | 78   |
| $9.6 \le pH < 9.7$ | 9.55 | 29   |
| 9.7 ≦pH< 9.8       | 9.63 | 12   |

均値とデータ数

| pН         |     | 平均值     | 標準偏差(m/s) | データ数 | 積算値   |
|------------|-----|---------|-----------|------|-------|
| 7 ≦pH<     | 7.1 | 0.054   | 0.0018    | 8    | 0.43  |
| 7.1 ≦pH<   | 7.2 | 0.044   | 0.0032    | 20   | 0.88  |
| 7.2 ≦pH<   | 7.3 | 0.034   | 0.0044    | 18   | 0.61  |
| 7.3 ≦pH<   | 7.4 | 0.025   | 0.0026    | 71   | 1.79  |
| 7.4 ≦pH<   | 7.5 | 0.021   | 0.0023    | 63   | 1.33  |
| 7.5 ≦pH<   | 7.6 | 0.015   | 0.0019    | 865  | 13.12 |
| 7.6 ≦pH<   | 7.7 | 0.012   | 0.0015    | 830  | 9.63  |
| 7.7 ≦pH<   | 7.8 | 0.0082  | 0.0012    | 1081 | 8.84  |
| 7.8 ≦pH<   | 7.9 | 0.0058  | 0.0009    | 1095 | 6.39  |
| 7.9 ≦pH< 8 | 8   | 0.0039  | 0.0007    | 870  | 3.42  |
| 8 ≦pH< 8   | 8.1 | 0.0024  | 0.0006    | 637  | 1.52  |
| 8.1 ≦pH< 8 | 8.2 | 0.0012  | 0.0005    | 428  | 0.51  |
| 8.2 ≦pH< 8 | 8.3 | 0.0001  | 0.0005    | 343  | 0.04  |
| 8.3 ≦pH< 8 | 8.4 | -0.0006 | 0.0004    | 312  | -0.19 |
| 8.4 ≦pH< 8 | 8.5 | -0.0013 | 0.0003    | 342  | -0.45 |
| 8.5 ≦pH< 8 | 8.6 | -0.0018 | 0.0003    | 282  | -0.50 |
| 8.6 ≦pH< 8 | 8.7 | -0.0021 | 0.0002    | 290  | -0.62 |
| 8.7 ≦pH< 8 | 8.8 | -0.0024 | 0.0002    | 226  | -0.55 |
| 8.8 ≦pH< 8 | 8.9 | -0.0026 | 0.0002    | 238  | -0.63 |
| 8.9 ≦pH< 9 | 9   | -0.0028 | 0.0002    | 190  | -0.54 |
| 9 ≦pH< 9   | 9.1 | -0.0029 | 0.0001    | 175  | -0.52 |
| 9.1 ≦pH< 9 | 9.2 | -0.0030 | 0.0001    | 97   | -0.29 |
| 9.2 ≦pH< 9 | 9.3 | -0.0031 | 0.0001    | 77   | -0.24 |
| 9.3 ≦pH< 9 | 9.4 | -0.0033 | 0.0002    | 8    | -0.03 |
| 9.4 ≦pH< 9 | 9.5 | -0.0032 | 0.0000    | 4    | -0.01 |
| 9.5 ≦pH< 9 | 9.6 | -0.0032 | 0.0000    | 3    | -0.01 |

表9 2019 年 5 月から 2019 年 12 月における pH 毎におけるバルク法によって測定された二酸化 炭素フラックス[m mol/(s・m<sup>2</sup>)]の平均値と標準偏差とデータ数と積算値

| рH       |     | 平均値     | 標準偏差(m/s) | データ数 | 積算値   |
|----------|-----|---------|-----------|------|-------|
| 7 ≦pH<   | 7.1 |         |           | 0    | 0.00  |
| 7.1 ≦pH< | 7.2 |         |           | 0    | 0.00  |
| 7.2 ≦pH< | 7.3 |         |           | 0    | 0.00  |
| 7.3 ≦pH< | 7.4 |         |           | 0    | 0.00  |
| 7.4 ≦pH< | 7.5 |         |           | 0    | 0.00  |
| 7.5 ≦pH< | 7.6 | 0.0088  | 0.0008    | 60   | 0.53  |
| 7.6 ≦pH< | 7.7 | 0.0063  | 0.0006    | 79   | 0.50  |
| 7.7 ≦pH< | 7.8 | 0.0043  | 0.0005    | 132  | 0.57  |
| 7.8 ≦pH< | 7.9 | 0.0026  | 0.0004    | 220  | 0.57  |
| 7.9 ≦pH< | 8   | 0.0012  | 0.0004    | 287  | 0.36  |
| 8 ≦pH<   | 8.1 | 0.0002  | 0.0003    | 324  | 0.06  |
| 8.1 ≦pH< | 8.2 | -0.0007 | 0.0003    | 342  | -0.22 |
| 8.2 ≦pH< | 8.3 | -0.0013 | 0.0002    | 426  | -0.57 |
| 8.3 ≦pH< | 8.4 | -0.0019 | 0.0002    | 459  | -0.85 |
| 8.4 ≦pH< | 8.5 | -0.0023 | 0.0001    | 559  | -1.27 |
| 8.5 ≦pH< | 8.6 | -0.0026 | 0.0001    | 487  | -1.26 |
| 8.6 ≦pH< | 8.7 | -0.0029 | 0.0001    | 410  | -1.17 |
| 8.7 ≦pH< | 8.8 | -0.0030 | 0.0001    | 253  | -0.77 |
| 8.8 ≦pH< | 8.9 | -0.0032 | 0.0001    | 182  | -0.58 |
| 8.9 ≦pH< | 9   | -0.0033 | 0.0001    | 103  | -0.34 |
| 9 ≦pH<   | 9.1 | -0.0036 | 0.0001    | 47   | -0.17 |
| 9.1 ≦pH< | 9.2 | -0.0036 | 0.0001    | 36   | -0.13 |
| 9.2 ≦pH< | 9.3 | -0.0036 | 0.0001    | 13   | -0.05 |
| 9.3 ≦pH< | 9.4 | -0.0036 | 0.0000    | 2    | -0.01 |

表 10 2019 年 12 月から 2020 年 4 月における pH 毎におけるバルク法によって測定された二酸化 炭素フラックス[m mol/(s・m<sup>2</sup>)]の平均値と標準偏差とデータ数と積算値

| 湖沼名               | CO <sub>2</sub> flux | (g/m²/year) |
|-------------------|----------------------|-------------|
| Lizard Lake       |                      | -18         |
| Green Valley Lake |                      | -12         |
| Lake Darling      |                      | -6          |
| Prairie Rose Lake |                      | -6          |
| Black Hawk Lake   |                      | 10          |

## 表 11 富栄養化湖沼における二酸化炭素フラックスの積算値



図1 データを使用した霞ヶ浦西浦の観測所



図2 霞ヶ浦湖心観測所(2020年2月12日午前8時32分撮影)







異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 4 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である





図 5 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







図 6 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







図 7 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







図 8 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 9 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 10 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である



異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の水蒸気量(g/m<sup>2</sup>)



図 11 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 12 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である



異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 13 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 14 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である



異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の水蒸気量(g/m<sup>2</sup>)



図 15 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である



異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の水蒸気量(g/m<sup>2</sup>)



図 16 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である







異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 17 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である



異常値削除後の LI7500 で測定された高度 9.8m の 30 分平均の二酸化炭素濃度(ppm)

図 18 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における現場キャリブレーションの結果 ただし、上図は水蒸気、下図は二酸化炭素である



図 19 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



図 20 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における乱流強度テストの結果(安定度が−0.1 ≤ <sup>ヹ</sup><sub>L</sub> ≤ −0.02の場合) ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5



図 21 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における乱流強度テストの結果(安定度が−10 ≤ <sup>z</sup>/<sub>L</sub> < −0.1の場合)



図 22 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における乱流強度テストの結果(安定度が $-0.1 \le \frac{z}{L} \le -0.02$ の場合) ただし、黄:相似則から予測した値、緑:クラス 1,2,3、赤:クラス 4,5



図 23 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における乱流強度テストの結果(安定度が−10 ≤ <sup>z</sup>/<sub>L</sub> < −0.1の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5

ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 25 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における乱流強度テストの結果(安定度が−10 ≤ <sup>z</sup>/<sub>L</sub> < −0.1の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 27 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



図 28 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における乱流強度テストの結果(安定度が−0.1 ≤ <sup>
<u>z</u></sup><sub>L</sub> ≤ −0.02の場合) ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5



図 29 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 31 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 33 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



<sup>ヹ</sup><sub>し</sub>≤−0.02の場合) ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5



図 35 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10  $\leq \frac{z}{L} < -0.1$ の場合)

ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 37 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5


図 39 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における乱流強度テストの結果(安定度が−10 ≤ <sup>z</sup>/<sub>L</sub> < −0.1の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5

ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 41 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{\iota} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 43 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5



図 45 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3 , 赤:クラス 4,5



図 47 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果(安定度が-10 <  $\frac{z}{L} < -0.1$ の場合)



ただし, 黄:相似則から予測した値, 緑:クラス 1,2,3, 赤:クラス 4,5



図 49 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果によってクラスに 分類した渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスのデータ数と平均値



図 50 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果がクラス 1 の場合 の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 51 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果がクラス 2 の場合 の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 52 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果がクラス 3 の場合 の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 53 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果がクラス 4 の場合 の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 54 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における乱流強度テストの結果がクラス 5 の場合 の渦相関法によって求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 55 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρc'の季 節変化



図 56 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 6 月 7 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρc'の季 節変化(2019 年 6 月 7 日から 2019 年 8 月 5 日欠測)



図 57 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρc'の季 節変化



図 58 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の 季節変化



図 59 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の季節変化



図 60 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の季節変化



図 61 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の季節変化



図 62 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の 季節変化



図 63 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の 季節変化



図 64 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρc'の季 節変化



図 65 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の 季節変化



図 66 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の季節変化



図 67 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の 季節変化



図 68 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日における正常性テストのクラスで分類したw'ρ<sub>c</sub>'の 季節変化



図 69 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラスで分類した渦相関 法で求めた二酸化炭素フラックスのデータ数と平均値



図 70 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス 1 の場合の渦相関 法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化の季節変化



図 71 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス 2 の場合の渦相関 法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 72 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス 3 の場合の渦相関 法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 73 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス 4 の場合の渦相関 法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 74 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における定常性テストのクラス 5 の場合の渦相関 法で求めた二酸化炭素フラックスの季節変化



図 75 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日におけるガス交換係数K<sub>600</sub>と湖心で測定された高度 10mの風速の関係



図 76 本研究での 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日におけるガス交換係数K<sub>600</sub>, モデル式 より算出したK<sub>600</sub>, 先行研究のガス交換係数K<sub>600</sub>, K<sub>660</sub>と風速の関係



図 77 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日における湖心で測定された最大有義波高の頻度分 布



図 78 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日における湖心で測定された最大波高の頻度分布



図 79 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 11 月 30 日における湖心と掛馬沖で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較


図 80 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 11 月 30 日における湖心と麻生沖で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 81 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 11 月 30 日における湖心と平山で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 82 2007 年 12 月 1 日から 2008 年 5 月 31 日における湖心と掛馬沖で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 83 2007 年 12 月 1 日から 2008 年 5 月 31 日における湖心と麻生沖で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 84 2007 年 12 月 1 日から 2008 年 5 月 31 日における湖心と平山で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 85 2008 年 6 月 1 日から 2008 年 11 月 10 日における湖心と掛馬沖で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 86 2008 年 6 月 1 日から 2008 年 11 月 10 日における湖心と麻生沖で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 87 2008 年 6 月 1 日から 2008 年 11 月 10 日における湖心と平山で測定された水深 0.5 m の 1 時間平均値の異常値削除後の pH の比較



図 88 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における湖心と掛馬沖で測定された水深 0.1 m の 1 時間平均値の異常値削除後の水温の比較



図 89 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における湖心と麻生沖で測定された水深 0.1 m の 1 時間平均値の異常値削除後の水温の比較



図 90 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日における湖心と平山で測定された水深 0.1 m の 1 時間平均値の異常値削除後の水温の比較



図 91 2020 年 9 月 2 日 8:30~12:30 の 1 時間毎に採取した水深 0.1m 付近の水サンプルから求め たアルカリ度の季節変化



図 92 2007 年 6 月 1 日から 2007 年 12 月 1 日における湖心で測定された pH の頻度分布



図 93 2019 年 5 月 8 日から 2019 年 6 月 5 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 94 2019 年 6 月 5 日から 2019 年 7 月 3 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 95 2019 年 7 月 3 日から 2019 年 8 月 5 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 96 2019 年 8 月 5 日から 2019 年 9 月 4 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 97 2019 年 9 月 4 日から 2019 年 10 月 2 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 98 2019 年 10 月 2 日から 2019 年 10 月 27 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 99 2019 年 10 月 27 日から 2019 年 12 月 4 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 100 2019 年 12 月 4 日から 2019 年 12 月 31 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 101 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 2 月 12 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭 素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 102 2020 年 2 月 12 日から 2020 年 3 月 6 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭 素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 103 2020 年 3 月 6 日から 2020 年 4 月 1 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 104 2020 年 4 月 1 日から 2020 年 4 月 21 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭 素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 105 2020 年 4 月 21 日から 2020 年 5 月 13 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭 素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 106 2020 年 5 月 13 日から 2020 年 6 月 3 日における二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭 素濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化



図 107 2020 年 6 月 3 日から 2020 年 6 月 21 日にける二酸化炭素フラックス[上図], 二酸化炭素 濃度[中図], pH 及び水温[下図]の季節変化





図 109 水深 0.1m で測定された水温,  $C_a^*$ ,  $C_w$ , 水深 0.5m で測定された pH, 二酸化炭素フラックスの積算値



図 110 水深 0.1m で測定された水温, C<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>, 水深 0.5m で測定された pH の平均値



2019 年 5 月から 12 月における pH の頻度分布

図 111 2019 年 5 月から 12 月における pH の頻度分布とデータ数とバルク法によって測定され た二酸化炭素フラックス



2019 年 12 月から 2020 年 4 月における pH の頻度分布

図 112 2019 年 12 月から 2020 年 4 月における pH の頻度分布とデータ数とバルク法によって 測定された二酸化炭素フラックス



図 113 水温が 34.6 度のときにおけるC<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬 沖,麻生沖,平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度分布



図 114 水温が 6.5 度のときにおけるC<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬沖, 麻生沖,平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度分布



図 115 水温が 18.3 度のときにおけるC<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬 沖, 麻生沖, 平山で測定されバルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度分布


図 116 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬沖,麻生沖,平山で測定された水深 0.1mの 水温と水深 0.5m の pH



図 117 水温が 34.6 度のときにおけるC<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>と 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖心で測定され た水深 0.5m の pH と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定され バルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度分布



図 118 水温が 6.5 度のときにおけるC<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>と 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖心で測定された 水深 0.5m の pH と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定されバ ルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度分布



図 119 水温が 18.3 度のときにおけるC<sub>a</sub>\*, C<sub>w</sub>と 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖心で測定され た水深 0.5m の pH と 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定され バルク法で使用した水深 0.5m の pH の頻度分布



図 120 2007 年 6 月から 2008 年 6 月に湖心で測定された水深 0.1m の水温と水深 0.5m の pH



図 121 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に湖心で測定された降水量と掛馬沖, 麻生沖, 平山で測定された水深 0.5m の pH



図 122 2007 年 6 月から 2008 年 5 月に湖心で測定された降水量と水深 0.5m の pH



図 123 2019 年 5 月 8 日から 2020 年 6 月 21 日に湖心で測定された気温と掛馬沖, 麻生沖, 平山 で測定された水深 0.5m の pH



図 124 2007 年 6 月から 2008 年 5 月に湖心で気温と湖心で測定された水深 0.5m の pH