

平成 24 年度 卒業論文

渦相関法による霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスの測定
とその変化要因の考察

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

200910820

高橋孝生

2013 年 2 月

目次

要旨	ii
Abstract	iii
表目次	iv
図目次	v
本文	
1. はじめに	
1.1 研究背景	1
1.2 先行研究	1
1.3 研究目的	2
2. 研究方法	
2.1 観測概要	2
2.1.1 独自観測	3
2.1.2 国土交通省による観測	3
2.2 データ処理	3
2.3 フラックスの算出	6
2.4 積算値の算出	6
3. 結果と考察	
3.1 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの時間変化	6
3.2 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの季節変化	7
3.3 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの年変化	10
4. まとめ	11
謝辞	12
参考文献	12
付録	
1. バルク係数について	15
2. アルカリ度について	15

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

高橋孝生

要旨

地球温暖化問題への早急な解決が求められている今、森林や海洋だけでなく湖沼においても二酸化炭素フラックスの動向を調べることは重要である。しかし、これまでの湖沼での研究において、長期間連続して二酸化炭素フラックスを調査・解析したものはなく、また長期間にわたる二酸化炭素フラックスの変動を明らかにしたものはない。そこで、本研究では、渦相関法を用いて霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスを測定し、長期間にわたる変動や二酸化炭素フラックスの変化要因を明らかにした。

2007年6月～2012年11月において、霞ヶ浦湖心観測所で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が行われた。

まず二酸化炭素フラックスの時間変化については、全期間約 $-0.5\sim 0.5\text{ mg/m}^2/\text{s}$ の範囲で変動していた。つまり二酸化炭素の吸収と放出が交互に生じていて、日中でも夜間でも両過程が起きていた。他の地表面でのデータと比較すると、霞ヶ浦湖面における単位面積当たりの二酸化炭素フラックスは森林よりもやや小さく、草原よりは大きい、そして海洋よりは数桁大きかった。

次に二酸化炭素フラックスの季節変化については、まず日平均二酸化炭素放出量は、日によって値が大きく異なり、全期間を通じて変動が激しく、約 $-10\sim 10\text{ g/m}^2/\text{day}$ の範囲で変動していた。続いて10日平均二酸化炭素放出量は、全期間を通じて季節問わず約 $-6\sim 2\text{ g/m}^2/\text{day}$ の範囲で変動していた。そして負の値となっている時期がとても多く、霞ヶ浦は二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった。また、フラックスがなぜ変化するのかについて考察を行った。フラックスの季節変化の要因としては、水中の二酸化炭素濃度 C_w の変化が考えられる。そして C_w の変化要因としては、内部要因と外部要因が挙げられる。霞ヶ浦流入河川水や湖沼水中の C_w 、湖沼水中の植物プランクトンの組成などを調べた結果、これら1つ1つが単独で直接関わっているのではなくて、様々なものが同時に起こり、複雑に絡み合った結果、 C_w は変化する、ということが分かった。

そして次に二酸化炭素フラックスの年変化については、年間放出量は各年全て負の値となり、霞ヶ浦は二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった。ただ年によって積算値が異なっており、気象状況によるものか、補完方法によるものか、を再度検討する必要があると考えられる。

今回のこの結果より、地球温暖化問題を解決する上で海洋だけでなく、湖沼もまた重要な役割を担っている、ということが示唆される。

キーワード：渦相関法、霞ヶ浦、二酸化炭素フラックス、光合成、植物プランクトン

The CO₂ flux observation over the Lake Kasumigaura by using the eddy correlation method and factors determining its variation

Takanari TAKAHASHI

Abstract

It is important to investigate into the characteristics of CO₂ flux not only above a forest or the ocean but also over a lake surface particularly now when the immediate mitigation to the global warming problem is called for. However, in previous researches in a lake, there are only a few studies which investigated into and analyzed the CO₂ flux continuously for a long time, and clarified variation of the CO₂ flux for a long time. Therefore, in this research, the CO₂ flux over the Lake Kasumigaura was measured using the eddy correlation method at the center observatory from June in 2007 to November in 2012 for five years and factors which influence CO₂ flux were clarified.

First, it was found that CO₂ flux of hourly time scale changed in the range of about -0.5~0.5 mg/m²/s. Absorption and release of CO₂ occurred alternatively, and both processes occurred both in the daytime and the night. Comparison with previous studies indicated that the CO₂ flux per unit area over the Lake Kasumigaura was slightly smaller than that of a forest, and larger than that of a prairie, and several orders of magnitude larger than that of the ocean.

With regards CO₂ flux changes on seasonally time scale, it was found that the amount of daily CO₂ release differed greatly in the range of about -10~10 g/m²/day. The amount of the 10-day average CO₂ release changed in the range of about -6~2 g/m²/day regardless of the season through the whole period. However, negative flux was dominant in most of the time. A change of the dissolved CO₂ levels C_w of the lake was found to be a factor of CO₂ flux change on seasonally time scale. There are an internal factors and an external factors that affect C_w values. C_w change cannot be attributed to a single factor, but various factors work simultaneously and intricately.

The annual amount of CO₂ release was negative in all years, and thus the Lake Kasumigaura absorbs CO₂. However the total annual absorption changed year to year. It is necessary to reconsider whether it is because of a weather situation or not, or it is because of gap-fill method of eddy correlation data.

From this result, it is concluded that not only the ocean but the lake plays an important role in solving the global warming problem.

key words : eddy correlation method, Lake Kasumigaura, CO₂ flux, photosynthesis, phytoplankton

表目次

表 1.1	観測項目	17
表 1.2	国土交通省による観測項目	18
表 2	代用データ	19
表 3	各年の除外時間数	20
表 4	西浦流入大河川水中の二酸化炭素濃度	21
表 5	年間放出量と月平均放出量と日平均放出量	22
表 6	他の地表面における二酸化炭素の年間放出量と日平均放出量	23
表 7	アルカリ度を変化させた時の日平均積算値に対する割合	24

図目次

図 1	霞ヶ浦（西浦）	25
図 2.1	霞ヶ浦湖心観測所	26
図 2.2	観測機材	27
図 2.3	観測機材の設置状況（断面図）	28
図 2.4	観測機材の設置状況（平面図）	29
図 2.5	観測機材の配線状況	30
図 3.(a)	2007 年 6 月における各値の時間変化	31
図 3.(b)	2007 年 7 月における各値の時間変化	32
図 3.(c)	2007 年 8 月における各値の時間変化	33
図 3.(d)	2007 年 9 月における各値の時間変化	34
図 3.(e)	2007 年 10 月における各値の時間変化	35
図 3.(f)	2007 年 11 月における各値の時間変化	36
図 3.(g)	2007 年 12 月における各値の時間変化	37
図 4.(a)	2008 年 1 月における各値の時間変化	38
図 4.(b)	2008 年 2 月における各値の時間変化	39
図 4.(c)	2008 年 3 月における各値の時間変化	40
図 4.(d)	2008 年 4 月における各値の時間変化	41
図 4.(e)	2008 年 5 月における各値の時間変化	42
図 4.(f)	2008 年 6 月における各値の時間変化	43
図 4.(g)	2008 年 7 月における各値の時間変化	44
図 4.(h)	2008 年 8 月における各値の時間変化	45
図 4.(i)	2008 年 9 月における各値の時間変化	46
図 4.(j)	2008 年 10 月における各値の時間変化	47
図 4.(k)	2008 年 11 月における各値の時間変化	48
図 4.(l)	2008 年 12 月における各値の時間変化	49
図 5.(a)	2009 年 1 月における各値の時間変化	50
図 5.(b)	2009 年 2 月における各値の時間変化	51
図 5.(c)	2009 年 3 月における各値の時間変化	52
図 5.(d)	2009 年 4 月における各値の時間変化	53
図 5.(e)	2009 年 5 月における各値の時間変化	54
図 5.(f)	2009 年 6 月における各値の時間変化	55
図 5.(g)	2009 年 7 月における各値の時間変化	56
図 5.(h)	2009 年 8 月における各値の時間変化	57
図 5.(i)	2009 年 9 月における各値の時間変化	58
図 5.(j)	2009 年 10 月における各値の時間変化	59
図 5.(k)	2009 年 11 月における各値の時間変化	60
図 5.(l)	2009 年 12 月における各値の時間変化	61

図 6.(a)	2010 年 1 月における各値の時間変化	62
図 6.(b)	2010 年 2 月における各値の時間変化	63
図 6.(c)	2010 年 3 月における各値の時間変化	64
図 6.(d)	2010 年 4 月における各値の時間変化	65
図 6.(e)	2010 年 5 月における各値の時間変化	66
図 6.(f)	2010 年 6 月における各値の時間変化	67
図 6.(g)	2010 年 7 月における各値の時間変化	68
図 6.(h)	2010 年 8 月における各値の時間変化	69
図 6.(i)	2010 年 9 月における各値の時間変化	70
図 6.(j)	2010 年 10 月における各値の時間変化	71
図 6.(k)	2010 年 11 月における各値の時間変化	72
図 6.(l)	2010 年 12 月における各値の時間変化	73
図 7.(a)	2011 年 1 月における各値の時間変化	74
図 7.(b)	2011 年 2 月における各値の時間変化	75
図 7.(c)	2011 年 3 月における各値の時間変化	76
図 7.(d)	2011 年 4 月における各値の時間変化	77
図 7.(e)	2011 年 5 月における各値の時間変化	78
図 7.(f)	2011 年 6 月における各値の時間変化	79
図 7.(g)	2011 年 7 月における各値の時間変化	80
図 7.(h)	2011 年 8 月における各値の時間変化	81
図 7.(i)	2011 年 9 月における各値の時間変化	82
図 7.(j)	2011 年 10 月における各値の時間変化	83
図 7.(k)	2011 年 11 月における各値の時間変化	84
図 7.(l)	2011 年 12 月における各値の時間変化	85
図 8.(a)	2012 年 1 月における各値の時間変化	86
図 8.(b)	2012 年 2 月における各値の時間変化	87
図 8.(c)	2012 年 3 月における各値の時間変化	88
図 8.(d)	2012 年 4 月における各値の時間変化	89
図 8.(e)	2012 年 5 月における各値の時間変化	90
図 8.(f)	2012 年 6 月における各値の時間変化	91
図 8.(g)	2012 年 7 月における各値の時間変化	92
図 8.(h)	2012 年 8 月における各値の時間変化	93
図 8.(i)	2012 年 9 月における各値の時間変化	94
図 8.(j)	2012 年 10 月における各値の時間変化	95
図 8.(k)	2012 年 11 月における各値の時間変化	96
図 8.(l)	2012 年 12 月における各値の時間変化	97
図 9	2008 年 2 月のフラックスの時間変化	98
図 10.(a)	2007 年における各値の日変化	99
図 10.(b)	2008 年における各値の日変化	100
図 10.(c)	2009 年における各値の日変化	101

図 10.(d)	2010 年における各値の日変化	102
図 10.(e)	2011 年における各値の日変化	103
図 10.(f)	2012 年における各値の日変化	104
図 11	2007 年から 2012 年までに おける各値の 10 日平均日変化	105
図 12	各月の月積算値	106
図 13	2008 年 4 月から 2012 年 1 月 における各月平均値	107
図 14	基底流出時の霞ヶ浦流入 河川水・湖沼水中の二酸化炭素濃度	108
図 15.1	フラックスの正負が合わない 時期の日二酸化炭素放出量	109
図 15.2	フラックスの正負が合わない 時期の日平均二酸化炭素濃度	109
図 15.3	フラックスの時間変化 (上図)	109
図 15.4	二酸化炭素濃度の時間変化 (下図)	109
図 16	湖沼における炭素循環の過程	110
図 17	渦相関法で求めたフラックスと バルク式で求めたフラックスの比較 (アルカリ度が測定された時間の 前後 1.5・6 時間のデータを使用)	111
図 18	アルカリ度の月変化 (霞ヶ浦河川事務所の 水質調査データ一覧により作成)	112
図 19	アルカリ度を変化させたときの フラックス積算値の変化	113

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、地球温暖化問題が深刻化してきており、その主要原因である二酸化炭素の削減を目指して地域レベル・国レベル・世界レベルで様々な取り組みが行われている。その中でも二酸化炭素吸収源として海洋が注目されており、大気 - 海洋間における二酸化炭素フラックスの研究が進行中である（宮野, 2008）。

本論文では、二酸化炭素などの交換量のことを、フラックス（flux）と呼ぶことにする。物理学的には、フラックスは単位面積を単位時間当たりには通過する物理量（輸送量）と定義される。二酸化炭素フラックスの単位は、物理量として $\text{mg/m}^2/\text{s}$ がよく用いられる。そして二酸化炭素フラックスは、湖沼が二酸化炭素を吸収している場合はマイナス（-）となり、放出している場合にはプラス（+）となる。本論文でも、同様の単位、正負の向きを採用した。

湖沼や海洋では、水面を介して大気と二酸化炭素や酸素などのガス交換を行っている。したがって、ある湖沼や海洋が二酸化炭素の吸収源か放出源かを判断するには、ごく表面の湖水に溶け込んでいる二酸化炭素濃度が大気に比べて多いか少ないかを調べればよい（武田ほか, 2006）。

水面における二酸化炭素フラックスを直接測定する方法は渦相関法が唯一である（Kondo and Tsukamoto, 2007）とされている。しかし、二酸化炭素濃度の瞬間値を連続的かつ長期的に測定することは難しい（Meyers et al., 1996）。これは主に観測機材が普及していなかったのが問題点であった。そこで、間接的方法としてバルク法が一般的に利用されるようになったが、これは様々な観測要素に左右されるため誤差が生じやすいことが分かっている（Iwata et al., 2004）。つまり、水面における二酸化炭素フラックスを正確に測定する方法はまだ十分に確立されていないのである。

大気 - 海洋間における二酸化炭素フラックス（正味の二酸化炭素吸収量）については、高精度な観測による大気中の酸素と窒素の濃度比に基づく解析や、高精度な海洋観測結果と数値モデルを用いた解析によって、2000～2005年の平均では年間 80 ± 19 億トンと見積もられている。これは、同期間に化石燃料の燃焼やセメント製造により放出された二酸化炭素の約 3 分の 1 に相当する。（気象庁, 2013）

またこの他にも海洋での研究は数多くあるが、湖沼などの淡水面での研究はほとんどされていない。霞ヶ浦において二酸化炭素フラックスが測定されたことは、間接的にガス交換係数を使用して推定した福島ほか（1995）や、直接的に渦相関法によって短期間測定した宮野（2008）ほどしかない。地球温暖化問題への早急な解決が求められている今、森林や海洋だけでなく湖沼においても二酸化炭素の動向を調べることは重要である。

1.2 先行研究

近年の湖沼における二酸化炭素フラックスの研究は、主に以下の 3 つがある。

まず、宮野（2008）では、霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスを、霞ヶ浦湖心観測所で観測されたデータを使用し、渦相関法を用いて測定している。なお、解析対象期間は、2007年6月1日から11月25日までの約6ヶ月間である。結論として、7月を除いた各月で月積算二酸化炭素フラックスは負の値となったので、霞ヶ浦は二酸化炭素を吸収する傾向が強い、と述べているが、年間や季節毎の変動を明らかにしていない。

次に、Huotari et al.（2011）では、フィンランド南部に位置する Valkea-Kotinen 湖において観

測タワーを設置し、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。なお、この Valkea-Kotinen 湖は、毎年 11 月頃から 4 月頃まで凍ってしまい、観測が出来ないので、2003 年から 2007 年までの湖が凍っていない時期を解析対象期間としている。結論として、5 年間の年平均で Valkea-Kotinen 湖は、 $282 \text{ (g/m}^2\text{)}$ の二酸化炭素を放出している、と述べているが、湖が凍る冬の期間の変動は明らかにはしていない。

続いて、Rudorff et al., (2011) では、アマゾンの氾濫原の Curuai 湖において、ガス交換係数を用いて二酸化炭素フラックスを測定している。なお、解析対象期間は、①Curuai 湖の水位が高い時期 (2004 年 6 月 3 日~19 日)、②水位が低下している時期 (2003 年 9 月 25 日~10 月 2 日)、③水位が低い時期 (2003 年 11 月 22 日~12 月 2 日)、④水位が上昇している時期 (2004 年 2 月 3 日~12 日) の計 4 つの期間である。結論として、① $16 \text{ [g/m}^2\text{/day]}$ 、② $11 \text{ [g/m}^2\text{/day]}$ 、③ $15 \text{ [g/m}^2\text{/day]}$ 、④ $16 \text{ [g/m}^2\text{/day]}$ の二酸化炭素を放出している、と述べているが、年間や季節毎の変動を明らかにはしていない。

また、約 20 年前の研究ではあるが、福島ほか (1995) では、霞ヶ浦湖心と琵琶湖南湖湖心における二酸化炭素フラックスを、水中濃度と大気平衡濃度 (水中の飽和濃度) の差にガス交換係数を乗じて求めている。解析対象期間は、1992 年 4 月 1 日から 1993 年 3 月 31 日までの 1 年間である。その結果、霞ヶ浦湖心では平均 $-0.0005 \text{ [mmol/L/hour]}$ ($=-0.53 \text{ [mg/L/day]}$) で、年間 58% 程度の期間負のフラックスが生じており、また琵琶湖南湖湖心では平均 $-0.0002 \text{ [mmol/L/hour]}$ ($=-0.21 \text{ [mg/L/day]}$) で、年間 85% 程度の期間負のフラックスが生じていた、と述べている。しかし、長期間や季節毎の変動については明らかにはしていない。

1.3 研究目的

先行研究の節で述べてきたように、これまでの湖沼での研究において、長期間連続して二酸化炭素フラックスを調査・解析したものはなく、また長期間にわたる二酸化炭素フラックスの変動を明らかにしたものはない。

よって、本研究の目的は、二酸化炭素濃度を直接測定できる最新の機材を使用し、長期間連続して観測データが存在する霞ヶ浦湖面で、渦相関法を用いて二酸化炭素フラックスを測定し、長期間にわたる変動を明らかにすること、そして、測定した二酸化炭素フラックスの変化要因を考察し、明らかにすることである。

2. 研究方法

2.1 観測概要

本研究の対象地点は、茨城県に位置する霞ヶ浦の湖心 ($36^\circ 02' 35'' \text{ N}$, $140^\circ 24' 42'' \text{ E}$) である (図 1)。霞ヶ浦は、日本で琵琶湖に次ぐ湖面積 220km^2 を持ち、平均水深 4m、最大水深 7m と非常に浅い湖である。その流域面積は 2157 km^2 、流域人口は約 96 万人 (2002 年度末) であり、関東平野に住む人々の貴重な水源として大きな役割を果たしている (霞ヶ浦環境科学センター, 2013)。

また、霞ヶ浦湖心におけるフェッチ (吹走距離) は、西および南東 (16 方位) で一部 10 数 km となるほかは、いずれの方角に対しても 8km 以下である (関, 2005)。

2.1.1 独自観測

今回は、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦湖心観測所に設置してある観測機材によって、各気象要素の測定を行った。観測項目の詳細を表 1.1 に、観測機材の設置状況および配線状況を図 2.1~2.5 に示す。機材設置は 2007 年 5 月 24 日に行われ、同日 15:30 からデータを記録している。風速 3 成分 u, v, w [m/s], 気温 T [°C], 水蒸気密度 ρ_v [g/m³], 二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m³] に関しては、

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

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

も 30 分ごとに記録している。なお、添え字の r は生データからの値であることを意味し、 x_i, y_i は任意の物理量の瞬間値、 \bar{x}, \bar{y} はその 30 分平均値を示す。また、 n [=18000] は 30 分間のデータ数である。観測は現在 (2013 年 1 月) も継続中であるが、本研究で使用するデータは 2007 年 6 月 1 日~2012 年 12 月 31 日のものに限ることとする。

また、月に 1 回観測したデータを回収するために、霞ヶ浦湖心観測所へ行っているが、2010 年 11 月からは採水も行い、実験室に持ち帰って酸滴定法により、水中の重炭酸イオン濃度 [mmol/L] を測定している。

2.1.2 国土交通省による観測

国土交通省が観測している項目の詳細を表 1.2 に示した。

なお、2008 年 3 月までは月に 1 回アルカリ度が測定されていたが、それ以降は現在までアルカリ度は測定されていない。

2.2 データ処理

まず、観測機材の不具合により長期に渡ってエラー値となっている項目について、国土交通省の観測値等で代用した。代用項目及びその期間を表 2 にまとめた。

次に、対象期間にある本研究観測データ (代用されたデータを含む) 及び国土交通省観測データ全てについて、時系列変化をグラフ化し、目視により明らかな異常値を除外した。除外したデータは基本的に線形的に変化すると仮定して内挿によって補完した。

また、分散・共分散については別途、以下の手順によりデータ処理を行った。

A) データロガーに記録された値 $\overline{w'x'_r}$ に対して、主風向に対する座標変換を水平方向と鉛直方向について行った。計算方法は Aoki et al. (1998) で示されたものに従って以下の通りに行った。

① 水平方向の主風向変換

計測された風速 3 成分を X, Y, Z とすると、主風向 θ に対する水平成分の変換は、

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

$$U = X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (2.2)$$

$$V = -X \sin \theta + Y \cos \theta \quad (2.3)$$

となる。結果，平均操作に対しては次のようになる。

$$\bar{V} = -\bar{X} \sin \theta + \bar{Y} \cos \theta = (-\bar{X} \tan \theta + \bar{Y}) \cos \theta = 0 \quad (2.4)$$

② 鉛直方向の主風向変換

ここで，平均鉛直風速 $\bar{W} = 0$ とならない場合，更に吹き上げ角 α に対して，主風向成分の変換を

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right) \quad (2.5)$$

$$U_c = U \cos \alpha + W \sin \alpha \quad (2.6)$$

$$W_c = -U \sin \alpha + W \cos \alpha \quad (2.7)$$

とする。結果，平均操作に対しては次のようになる。

$$\bar{W}_c = -\bar{U} \sin \alpha + \bar{W} \cos \alpha = (-\bar{U} \tan \alpha + \bar{W}) \cos \alpha = 0 \quad (2.8)$$

B) 空気密度変動補正 (WPL 補正) (岩田ほか， 2003) を行った。算出方法は以下の通りである。

$$\overline{w' \rho'_v} = \left(1 + \mu \cdot \frac{\rho_v}{\rho_a} \cdot 10^{-3} \right) \left(\overline{w' \rho'_{v,r}} + \frac{\rho_v}{T} \cdot \overline{w' T'_r} \right) \quad (2.9)$$

$$\overline{w' \rho'_c} = \overline{w' \rho'_{c,r}} + \mu \cdot \frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \overline{w' \rho'_{v,r}} \cdot 10^{-3} + \left(1 + \mu \cdot \frac{\rho_v}{\rho_a} \cdot 10^{-3} \right) \frac{\rho_c}{T} \cdot \overline{w' T'_r} \quad (2.10)$$

なお， μ [=1.608] は乾燥空気と水蒸気の物質質量比， ρ_a [kg/m³] は大気密度， T [K] は気温であり，水蒸気圧 e [hPa] 及び大気圧 P [hPa] とともに以下のようにして求められる (近藤，2000)。

$$e = \frac{\rho_v \cdot T}{216.7} \quad (2.11)$$

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{T} \cdot \frac{P - 0.378e}{1013.25} \quad (2.12)$$

- C) オープンパスアナライザの表面に水滴が付くと気体濃度が正確に測定できないことから，雨量 R が0mmでない期間及びその1時間前から3時間後までのデータを除外した(宮田，2003)。
- D) 風が湖心観測所の建物側から吹くと，風向・風速が正確に測定できないことから，風向が60°～160°の場合のデータを除去した(宮田，2003)。
- E) 時系列変化を見て，明らかな異常値があればそれらを除外した。
- F) C), D), E)で除外されたデータについて，2時間未満すなわち3データ以下の欠損は線形的に変化すると仮定して内挿することで補完した。

2 時間以上連続した欠損に関しては、バルク式によって補完を行った。

$$\overline{w'\rho'_c} = \kappa_c U (C_w - C_a) \quad (2.13)$$

なお、 κ_c はバルク係数（バルク係数については、付録を参照のこと）であり、この補完に必要な水平風速 U [m/s]、水中の二酸化炭素濃度 C_w [mmol/L]、大気濃度と平均な水中の二酸化炭素濃度 C_a [mmol/L] の算出方法は次の通りである。また u, v は、風速 3 成分の中の u, v である。

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.14)$$

$$C_w = \frac{A_c \cdot [H^+]^2}{K_1 ([H^+]^2 + 2K_2)} \quad (2.15)$$

$$C_a = \frac{1.19 - 4.38 \times 10^{-2} T_w + 8.4 \times 10^{-4} T_w^2 - 6.38 \times 10^{-6} T_w^3}{44} \times \frac{28.96 \rho_c}{\rho_a} \times \frac{1}{350} \quad (2.16)$$

なお、 A_c [mmol/L] は炭酸アルカリ度、 $[H^+]$ [mmol/L] は水素イオン濃度である。

$$A_c = \frac{A \times ([H^+] + K_2)}{61[H^+] + 60K_2} + [H^+] - \frac{K_w}{[H^+]} \quad (2.17)$$

$$[H^+] = 10^{-pH+3} \quad (2.18)$$

ただし、アルカリ度 A [mg/L] は月に 1 度だけしか測定されていないため、福島ほか (1995) に従い、アルカリ度は時間変化が小さいことから、2 回の測定期間の間のアルカリ度は、線形的に変化すると仮定して内挿により、アルカリ度を推定した（アルカリ度については、付録を参照のこと）。

また、平衡定数 K_1, K_2, K_w [mol/L] は表面水温 T_w [°C] (0.1m) を用いて以下の式から計算した（福島ほか, 1995）。

$$-\log K_1 = \frac{3404.71}{T_w + 273.15} + 0.032786 \times (T_w + 273.15) - 14.712 \quad (2.19)$$

$$-\log K_2 = \frac{2902.39}{T_w + 273.15} + 0.02379 \times (T_w + 273.15) - 6.471 \quad (2.20)$$

$$-\log K_w = \frac{4470.99}{T_w + 273.15} + 0.01706 \times (T_w + 273.15) - 6.0875 \quad (2.21)$$

- G) 補完されたデータの時系列変化を再度確認し、異常値が残っている場合には F) の作業を繰り返した。

以上 A)~G)の過程により補完された分散及び共分散を $\sigma_x, \overline{x'y'}$ とし、これ以降の解析には全てこの補正值を使用する。なお、表 3 が各年の除外時間数を、図 9 が二酸化炭素フラックスの補完の具体例を表している。表 3 より、各年約 40%程データを除外・補完した。

2.3 フラックス等の算出

2.2 で補正された共分散を用いて、二酸化炭素フラックス C [mg/m²/s] を渦相関法により求めた。 M_c [=44mg/mmol] は二酸化炭素のモル質量であり、フラックスは上向きを正とする。また、この方法で求めた値を実測値と呼ぶこととする。

$$C = M_c \overline{w'\rho'_c} \quad (3.1)$$

2.4 積算値の算出

霞ヶ浦湖面における日二酸化炭素放出量 C_T [g/m²] を、30 分ごとのフラックスデータを積算することによって算出し、さらにその 10 日平均値、月平均値、月積算値や年積算値も同様に算出した。 Δt [s] はデータ取得間隔である。ただし、上向きの現象を正としているため、吸収の場合は C_T は負の値となる。

$$C_T = \sum M_c \times 10^{-3} \cdot \overline{w'\rho'_c} \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

3. 結果と考察

3.1 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの時間変化

2007年6月~2012年12月までの二酸化炭素フラックス C の時間変化を各月毎に図 3.(a)~図 8.(l) に示す。そしてそれに加えて、各二酸化炭素濃度、pH 及び水温も示す。

全期間を通して、約-0.5~0.5 mg/m²/s の範囲で変動している。つまり、二酸化炭素の吸収と放出が交互に生じている。明瞭な日変化パターンは見られず、日中でも夜間でも両過程が起きている。フィンランド南部に位置する Valkea-Kotinen 湖では、湖が凍らない期間で、約-0.055~0.17 mg/m²/s の範囲で変動していた (Huotari et al., 2011)。霞ヶ浦はこれと比較してオーダーとしては、同等からやや大きいものが得られた。また、霞ヶ浦湖面ではときどき絶対値が 0.5 mg/m²/s を超える時があり、数時間単位での強い吸収や放出が生じていることが分かる。ただし、欠測や降雨が長時間続く場合に、強いフラックスを正確に再現できなかったことや、数時間単位でのとても細かいフラックスの変動を再現することができなかった点は事実であり、データの補完方法の改善がさらに必要であるといえる。pH 及び水温も細かく変動しており、それに伴って各二酸化炭素濃度もそれぞれ変動していた。なお、pH を見るとおおよそ 7.5~9.5 の間で変動していることが分かるが、この値の範囲では湖水中の全炭酸に占める各状態の炭酸物質の比率は、炭酸水素イオンが約 80%~100%近くになっている (西條ほか, 1995)。

また、地表面状態による C の差異を調べたところ、まず 2010 年の太平洋において月積算値で、 $-1.6 \sim -0.1$ 億トン炭素というデータ (気象庁, 2013) に基づいて計算した結果、 $-0.0015 \sim -0.000091$ $\text{mg/m}^2/\text{s}$ となった。2010 年は平年値と比べて吸収量は多かったみたいだが、それでも霞ヶ浦の方が数桁も値が大きいことから、海洋に比べて霞ヶ浦では強いフラックスが生じていることが分かった。一方、植生域での夏季における C の値としては、森林で $-1.4 \sim -0.8$ $\text{mg/m}^2/\text{s}$ (安田ほか, 1998)、草原で $-0.16 \sim -0.05$ $\text{mg/m}^2/\text{s}$ (Li et al., 2005) などが言われている。よって、霞ヶ浦のフラックスは単位面積当たりで見れば、森林よりもやや小さく、草原よりは大きいということが分かった。植生域では、植生による光合成や呼吸により日中と夜間での変化パターンがはっきりしているが、霞ヶ浦湖面におけるフラックスは明瞭な変化パターンは見られなかったので、光合成や呼吸などの水中の生物活動に加えて、他の何らかの現象が同時に複数起きている、と考えられる。

3.2 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの季節変化

まず、霞ヶ浦湖面で実測された日二酸化炭素放出量 C_T [$\text{g/m}^2/\text{day}$] を各年ごとに図 10.(a)~(f) に示す。そしてそれに加えて、日平均各二酸化炭素濃度も示す。

日二酸化炭素放出量は、日によって値が大きく異なり、全期間を通じて変動が激しく、約 $-10 \sim 10$ $\text{g/m}^2/\text{day}$ の範囲で変動している。霞ヶ浦湖心において、1992 年~1993 年の結果では、水中濃度の激しい日変化のために二酸化炭素フラックスも大きく変動することが示されており (天野ほか, 1998)、2007 年 6 月~11 月の結果 (宮野, 2008) でも、今回と同様な結果が示されていて、フラックスの季節変化を日積算値から読み取るのは難しいと言える。

次に、宮野 (2008) では 10 日平均値でフラックスの季節変化を見ているので、今回も 10 日平均値で見えていくこととする。10 日平均日二酸化炭素放出量と 10 日平均各二酸化炭素濃度、10 日合計雨量、10 日平均 pH、10 日平均水温を図 11 に示す。図 11 より 10 日平均日二酸化炭素放出量は、全期間を通じて季節問わず約 $-6 \sim 2$ $\text{g/m}^2/\text{day}$ の範囲で変動しているものの、負の値となっている時期がとても多く、二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった。ただ、放出量が正の値、つまり二酸化炭素を放出している時期も少なからずある。また、図 11 より、水中の二酸化炭素濃度 C_w [mmol/L]、大気濃度と平衡な水中の二酸化炭素濃度 C_a [mmol/L] もそれぞれ激しく変動していることが分かる。そして、 C_w と pH の変動や、 C_a と水温の変動は、それぞれ逆相関の関係があることも分かる。なお C_a は、気温が高い夏に低く、気温が低い冬に高くなり、明瞭な季節変化をしている。一方、 C_w は激しく変動しているので明瞭とは言えないが、気温が高い夏に高く、気温が低い冬に低くなる傾向は少しあると思われる。これは、二酸化炭素の水中への溶解度が水温の低下に伴って増大することに反しており、他のものによる影響が考えられる。またフラックスは、 $C_w > C_a$ の時に正、つまり二酸化炭素を放出、一方 $C_w < C_a$ の時に負、つまり二酸化炭素を吸収するので、 C_w が激しく変動していることが、このようなフラックスの季節変化の要因であるだろう。

そして次に、月二酸化炭素積算値を図 12 に示す。月積算値も月によって値が大きく異なり、全期間を通じて変動が激しく、約 $-100 \sim 30$ $\text{g/m}^2/\text{month}$ の範囲で変動している。負の値で大きいのは 8 月周辺の夏が多く、夏に値が最大になるように夏前は徐々に増加し、夏後は減少しているようにも見えなくはない。これはやはり、日射量の増減が関わっていると考えられるが、二酸化炭素を放出している月もあり、 C_w の変動に他の要因も関わっていることが示唆される。

以上のようにフラックスの季節変化の要因は C_w が激しく変動していることなので、ここからは C_w の変化要因について考察する。

C_w の変化要因は大きく分けて2つある。内部要因と外部要因である。まず、内部要因についてであるが、これは湖の内部で起こることが C_w に影響を与える。具体的に考えられることは以下の6つである。①水温…水温の低下によって気体の溶解度が増加する。②気圧…気圧の増加によって気体の溶解度が増加する。③植物プランクトンによる光合成…光合成により水中の二酸化炭素が使われるため、 C_w が減少する。④生物による呼吸…水中の生物による呼吸で二酸化炭素が出されるので、 C_w が増加する。⑤動物やバクテリアによる有機物の分解…水中の有機物が分解されることによって、無機物である二酸化炭素が生じて C_w が増加する。⑥湖底や湖岸での堆積・溶出…水中で二酸化炭素が他のイオンと結びついて堆積したり、逆に離れて溶出したりすることによって、 C_w が変化する。この内、先ほど述べたように C_w が二酸化炭素の性質に反する傾向が見受けられることから、①②よりも③～⑥の方が影響力が大きいと考えられる。そして、これらに関わる現象としては例えば、霞ヶ浦は富栄養化して他の湖よりも相対的に栄養塩類濃度が高く、植物プランクトンが増殖しやすいことや、水深が浅いので、微弱な風でも湖底の堆積物が巻き上げられやすい、ということが挙げられるだろう。また宮野（2008）では、③植物プランクトンによる光合成に着目しており、2007年7月は梅雨前線の停滞により日射量が非常に少なく、水中の植物プランクトンによる光合成量もかなり少なかったはずであり、その結果月積算しても二酸化炭素が放出の状態にとどまった、と述べている。今回はそれとは少し違った視点から考えてみたい。

水中には数多くの植物プランクトンが存在する。彼らは、二酸化炭素と水を原料とし、光エネルギーを利用して有機物（糖）や酸素を生産している。そして植物プランクトンは、季節によって数が増える種類が多く、構成する種類も変化する。霞ヶ浦でも、水温、窒素やリン濃度の変化を受けて植物プランクトンの種類と数が増えている。霞ヶ浦は1986年まではアオコを作る藍藻の *Microcystis* が多かったが、その後糸状藍藻の *Planktothrix* が多くなった。また、1999年以降は珪藻の *Cyclotella* が多い傾向であった。近年は、珪藻が多く、4月から8月まで藍藻の割合が高い傾向である（霞ヶ浦環境科学センター、2013）。ここで、図13に2008年4月～2012年1月における月平均二酸化炭素放出量、月平均各二酸化炭素濃度、月平均日射量、各月の霞ヶ浦湖心の植物プランクトンの組成変化を示した。これらを踏まえると、日射量が多くなる（3、4、5月）と、植物プランクトンの組成は違うかもしれないが、表層では表層から水深4mまでほぼ均一に分布する珪藻が優占し、また夏は *Microcystis* などの藍藻が表層に多くいる（霞ヶ浦環境科学センター・湖沼環境研究室、2013）ので、植物プランクトンによる光合成が活発に行われ、水中の CO_2 濃度が減少し、負のフラックスが生じると考えられる。一方、日射量が少なくなる（12、1、2月）と、中層から深層に多く入る *Planktothrix* などの藍藻が優占する（霞ヶ浦環境科学センター・湖沼環境研究室、2013）ので、表層での植物プランクトンが相対的に減少し光合成も活発に行われなくなり、水中の CO_2 濃度が増加し、正のフラックスが生じると考えられる。しかし、必ずしもこのようになっているとは言い難いので、先程述べた①～⑥が複雑に絡み合った結果として、 C_w が変化しているのだろう。

次に、 C_w の変化要因の2つ目、外部要因について見ていこう。外部要因とは、湖に降り注ぐ雨、湖に流入する河川水・農業排水・下水排水・地下水や湖から流出する河川水・上水取水・工業用水取水・農業用水取水のことである。今回は、総量が少なく（山本、2013）、 C_w の変化に大きく寄与しないと考えられる流入農業排水・下水排水・地下水や流出上水取水・工業用水取水・農業用水取水については考慮しないこととする。なので、降雨・流入河川水・流出河川水について考える。

まず、降雨についてであるが、通常でも雨水は大気中の二酸化炭素を吸収するため、pHは5.6とやや酸性を示す。降雨は毎日起こるわけではないが、ずっと起こらないことでもないのだから、湖水より

も高濃度の二酸化炭素を含む雨水が降り注ぐことによって、少なからず瞬間的に C_w は高くなると考えられる。今回は、雨水のサンプルを行わなかったが、もし雨水のサンプルを行えば、雨水中の溶存二酸化炭素濃度が分かり、霞ヶ浦への負荷がどのくらいあるのかも分かると思うので、この点については今後への課題であると言えよう。

続いては流入河川水についてである。現在霞ヶ浦（西浦・北浦・外浪逆浦・鰐川・北利根川・常陸利根川）には、7大河川と呼ばれる桜川・恋瀬川・園部川・清明川・小野川・巴川・銚田川や、花室川など計 51 の中小河川が流入している。今回は、北浦に流入する巴川・銚田川と、常陸利根川に流入する横利根川と与田浦川を除く計 54 河川において、現地では水温・pH 測定及び採水を行い、実験室で酸滴定法により重炭酸イオン濃度を測定し、それらから C_w を計算した。なお、水温が測定できなかった所は、最寄りの観測所の気温から 4 度減じた値を水温として代用した。その結果を表したのが、図 14 である。図 14 では同時に観測した各中小河川の基底流量を点の大ききで表わしている。また、霞ヶ浦湖心での各月の湖沼水の C_w を、折れ線グラフで表している。なお、大河川は流量観測が出来なかったため、図 14 には載せていないが、各大河川の C_w を表 4 にまとめた。今回は、湖心観測所がある西浦についてのみ考えていくことにする。図 14・表 4 より、基底流出時は、湖沼水よりも高濃度の二酸化炭素を含む河川水が流量の大小に関わらず流入していることが分かった。河川には、付近の住民による高濃度の二酸化炭素を含む生活排水や農業排水が流れ込んだり、底泥から二酸化炭素が溶出したりすることが原因であると考えられる。なお、河川水は測定時の濃度のまま霞ヶ浦に流入し、一瞬で湖全体に広がると仮定している。また、今井ほか（2008）では、桜川上流域から下流域、さらに霞ヶ浦湖心に至る過程で DOC（溶存態有機炭素）濃度は増加する傾向を示した、と述べている。このことから、霞ヶ浦には高濃度の DOC が各河川から流れ込んでいて、生物によって DIC（溶存態無機炭素）に分解され、植物プランクトンによる光合成に利用されていると考えられる。そして、高濃度の DOC を分解することができるくらい多くの分解者が、霞ヶ浦には存在するというのもできると思われる。しかし、今回のような調査だけで C_w の変化を明らかにすることは不十分であり、基底流出時の定期的な観測や洪水時の調査も行い、流入負荷の大小を明らかにすることが、今後の課題である。

次は流出河川水についてである。現在霞ヶ浦からは、北利根川だけを通じて湖水が流出している。今回は、その北利根川に流入する前川と北利根川との接続区域付近で、水温・pH 測定及び採水を行い、実験室で酸滴定法により重炭酸イオン濃度を測定し、それらから C_w を計算した。その結果も図 14 に載せてみたが、11 月の折れ線グラフに 1 つだけ重なっている点があるが、この北利根川である。つまり C_w は、湖沼水と同程度の値となった。このことから、湖沼水や流出河川水よりも流入河川水の方が C_w が高いので、湖内で二酸化炭素が非常に多く消費されている、と考えられる。しかし、流入河川水と同様に、今回のような調査だけで C_w の変化を明らかにすることは不十分であり、基底流出時の定期的な観測も行い、流出負荷の大小を明らかにすることが、今後は必要になるであろう。

以上、 C_w の変化要因について見てきたが、内部要因と外部要因で様々なものがあるけれども、これらの内 1 つだけが直接関わっているのではなくて、様々なものが同時に起こり、複雑に絡み合った結果、 C_w は変化するのではないかと考えられる。我々の地球上の生態系では、炭素が循環している。湖沼に現存する有機態炭素は、大気中の二酸化炭素が水に溶け込んで光合成によって固定されたもの（自生性炭素）や、陸上生物が死骸となって分解し流入したもの（他生性炭素）である。また、湖沼には無機態炭素として地表水や地下水によって集水域から運ばれてくる炭酸水素イオンも現存している。生産力の高い湖、すなわち光合成速度の高い湖では、有機態炭素の大半は内生性である（占

部, 2007). 実際霞ヶ浦では, 夏と秋において湖内有機物の 50~80%が, 植物プランクトン起源であることが報告されている(花町ほか, 2010). また, 湖沼の有機態炭素は生物やその死骸, あるいは水に溶けた DOC として存在している. DOC は湖沼の有機態炭素の多くの割合を占めているが, その 90%は分解されにくい(生物に利用されにくい)物質であると考えられている. つまり, DOC のおよそ 10%程度しか利用されないということである(占部, 2007). しかし霞ヶ浦には, *Polynucleo bacter* という分解者として重要と考えられる細菌が多く生息していることが分かっている. 分解されにくい溶存態有機物は, 太陽の光によって有機酸に変質し, 栄養源としてこの有機酸を *Polynucleo bacter* が分解している可能性がある, とのことである(霞ヶ浦環境科学センター年報第 5 号, 2009). 以上のことより, 霞ヶ浦は有機物が集まりやすく, 分解されやすい環境であることが分かった. つまり, このような環境が正に上記した C_w の変化要因である, と考えられる. また, 3.2 節でも述べたように図 11 より, pH を見るとおおよそ 7.5~9.5 の間で変動していることが分かるが, この値の範囲では湖水中の全炭酸に占める各状態の炭酸物質の比率は, 炭酸水素イオンが約 80%~100%近くになっている(西條ほか, 1995). 植物プランクトンの中には光合成をする際, 溶存二酸化炭素だけでなく, 炭酸水素イオンのまま取り込むものも存在する(山本, 2002)ので, 霞ヶ浦湖水中では二酸化炭素の中でも炭酸水素イオンとして循環しているものが非常に多い, ということが考えられる.

なお, これまで述べてきたことを踏まえて, 図 16 に湖沼における炭素循環の過程を簡単にまとめた. 二酸化炭素フラックスと共に, 湖沼内での炭素及び二酸化炭素の流れは定性的にはおおよそ理解することが出来たが, 定量的に詳しく明らかにすることは今回出来なかったもので, この点は今後への課題であると言えよう.

またここで, 図 11 の上下を見比べてみると, フラックスの正負の向きが 2009 年 1 月付近で合わなかった. 10 日平均値なので, 1 つの大きな値が平均値を上げていると考えたが, 図 15.1~15.4 及び表 7 により, 2009 年 1 月の割合は比較的高いので, この時期はアルカリ度が測定されておらず, 過去 5 年間の平均値を用いており, アルカリ度が大きく異なっている可能性があると考えられる. そして, アルカリ度が測定されていない時期(2008 年 4 月~2010 年 10 月)は, このようなフラックスの正負の向きが合わないことが多く起こっているので, アルカリ度が測定されていない時期におけるアルカリ度の補完方法の見直し, 今後は必要になるであろう.

一方で, フラックスが正の時期は, 大部分でフラックスの正負の向きが合っているが, これは高濃度の二酸化炭素を含む雨水が降ったから, あるいは植物プランクトンによる光合成が弱くなったからである, と考えられる. そして, 図 11 を見ると降水量の大小が C_w の増減に直接関係しているとは言いがたいであろう. 今回は, 河川流量なども含めて定量的に詳しく明らかにすることまでは出来なかったもので, この点は今後への課題であると言えよう.

3.3 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの年変化

まず, 霞ヶ浦湖面で実測された日二酸化炭素放出量 C_T [$\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$] を, 各年ごとに積算した年間放出量・月平均放出量・日平均放出量を表 5 に示す. 表 5 より, 年間放出量は各年全て負の値, $-436 \sim -204$ [$\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$], また月平均放出量・日平均放出量も全ての年で負の値, $-45 \sim -17$ [$\text{g}/\text{m}^2/\text{month}$], $-1.5 \sim -0.6$ [$\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$] となり, 霞ヶ浦は二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった. Sasai et al.(2011)では, 衛星データを複合利用できる炭素収支アルゴリズム BEAMS を用いて日本全域の純生態系生産量を推定しているが, 霞ヶ浦周辺では, 約 $-700 \sim -400$ [$\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$] と考えられる. 霞ヶ

浦ではこれより少し小さい値になったので、霞ヶ浦の単位面積当たりの吸収能力が非常に強いことが改めて分かった。また、年間積算値の変化幅は ± 200 (g 炭素/m²/year) = ± 733 (g/m²/year) 程度であり、そしてこれは、梅雨前線の長期停滞などの気象状況による影響が大きい、と述べている。今回の霞ヶ浦における結果でも年によって積算値が異なっており、気象状況によるものか、補完方法によるものか、を再度検討する必要があると考えられる。

次に、他の地表面における二酸化炭素の年間放出量と日平均放出量を表 6 にまとめた。地表面や対象地によって様々な値になった。ここで霞ヶ浦と比較してみると、霞ヶ浦は植生による光合成が活発な森林よりは少し少なく、草原よりは大きい値になった。そして、海洋（太平洋）と比べて数十倍大きい値になり、霞ヶ浦での単位面積当たりの二酸化炭素の吸収能力は非常に高いことが分かった。また、1970 年代の諏訪湖は現在の霞ヶ浦以上に富栄養化していたが、その当時の値が現在の霞ヶ浦とほぼ同程度の値となった (Koyama et al., 1977) ことから、富栄養化が二酸化炭素の吸収能力に大きく関係しているのではないかと考えられる。

霞ヶ浦は、以下の 3 つの自然的特徴があり、元々生物生産活動が活発な環境である。①過栄養湖（富栄養湖基準を大きく上回る湖）で、他の湖よりもリンや窒素といった栄養塩類濃度が高く、植物プランクトンの量も多い。②平均水深が約 4m と浅く、光合成に必要な日射が湖水中に届きやすい。③湖水の滞留時間が約 200 日（年平均）で、湖水の移動が少なく、植物プランクトンが増殖しやすい。これらを踏まえても、霞ヶ浦は他の湖よりも植物プランクトンによる光合成が活発なので、二酸化炭素が多く使われ、 C_w が減少し、負のフラックスが生じやすい、と考えられる。

また、湖沼における炭素循環の過程を表した図 16 を見ると、湖沼の有機物には 2 つの負荷源（自生性・他生性）と、3 つの行方があることが分かる。霞ヶ浦の年間放出量は年によって違いはあるけれども、大きくは変化していないので、湖内での二酸化炭素・炭素の循環がうまくバランスを保っている、と思われる。そして、3.2 節でも述べたように、図 16 での生食連鎖など湖内で様々なものが同時に起こり、複雑に絡み合った結果 C_w は変化し、フラックスも変化するのであろう。しかし、今回は、降雨による C_w の変化への影響や、どの程度堆積・溶出するのかなど、詳しく調査することが出来なかったため、これらの点を調査・観測し二酸化炭素の流れを明らかにすることが今後への課題である。

4. まとめ

2007 年 6 月～2012 年 11 月において、霞ヶ浦湖心観測所で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が行われた。

まず二酸化炭素フラックスの時間変化については、全期間を通して、約-0.5～0.5 mg/m²/s の範囲で変動しており、つまり二酸化炭素の吸収と放出が交互に生じている、ということが分かった。また、明瞭な日変化パターンは見られず、日中でも夜間でも両過程が起きていることも分かった。他の地表面でのデータと比較すると、霞ヶ浦湖面における二酸化炭素フラックスは、単位面積当たりで見れば森林よりもやや小さく、草原よりは大きい、そして海洋よりは数桁大きいということが分かった。

次に二酸化炭素フラックスの季節変化については、まず日二酸化炭素放出量は、日によって値が大きく異なり、全期間を通じて変動が激しく、約-10～10 g/m²/day の範囲で変動していた。続いて 10 日平均日二酸化炭素放出量は、全期間を通じて季節問わず約-6～2 g/m²/day の範囲で変動しているものの、負の値となっている時期がとて多く、二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった。ま

た、月積算値も同様に値は月によって大きくばらついたが、ほとんどの月で負の値になった。ただ、放出量が正の値、つまり二酸化炭素を放出している時期も少なからずあり、フラックスがなぜ変化するののかについて考察を行った。フラックスの季節変化の要因としては、水中の二酸化炭素濃度 C_w の変化が考えられる。そして C_w の変化要因としては、内部要因と外部要因が挙げられる。内部要因には、水温、光合成や呼吸といった水中生物の様々な活動、湖底や湖岸での堆積・溶出がある。また外部要因には、降雨、流入河川水、流出河川水がある。これら 1 つ 1 つが単独で直接関わっているのではなくて、様々なものが同時に起こり、複雑に絡み合った結果、 C_w は変化するのではないかと考えられる。

そして次に二酸化炭素フラックスの年変化については、年間放出量は各年全て負の値、 $-436 \sim -204$ [$\text{g/m}^2/\text{year}$]、また月平均放出量・日平均放出量も全ての年で負の値、 $-45 \sim -17$ [$\text{g/m}^2/\text{month}$]、 $-1.5 \sim -0.6$ [$\text{g/m}^2/\text{day}$] となり、これまでと同様に霞ヶ浦は二酸化炭素を吸収する傾向が強いことが分かった。ただ年によって積算値が異なっており、気象状況によるものか、補完方法によるものか、を再度検討する必要があると考えられる。また、霞ヶ浦の自然的特徴も考慮すると、富栄養化が二酸化炭素の吸収能力に影響を与えているのではないだろうか。しかし、今回は、降雨による C_w の変化への影響や、どの程度堆積・溶出するのかなど、詳しく調査することが出来なかったことも多々あるので、これらの点を調査・観測し二酸化炭素の流れを更に定量的に明らかにすることが今後は必要となる。

霞ヶ浦は、大昔に比べて富栄養化してしまっただが、その結果大気中の二酸化炭素の吸収という地球温暖化の解決につながる働きをするようになった。しかし、逆に霞ヶ浦をきれいにしたら、地球温暖化は進むとも考えられ、それはそれで問題ではあるが、今回明らかになったこの事実は地球温暖化対策として何らかのヒントを与えることになるだろう。また、アルカリ度やバルク式の補完についても精度の良い方法を確立していくことが今後への課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学生命環境系の杉田倫明先生には、現地観測をはじめ、研究方法における丁寧なご指導など、数多くの面で終始お世話になりました。大変感謝申し上げます。筑波大学水文科学分野の諸先生方には、学類ゼミなど機会のある度に貴重なご助言をいただきました。また、杉田研究室の院生の方々には研究室ゼミでの貴重なご助言・ご意見のほか、現地観測を行うに当たって大変お世話になりました。

アイ・シー・エスの稲野辺氏には、毎月のデータ回収に同行させていただくとともに、最新のデータを提供していただくことで研究を円滑に進めることができました。

国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所様には、観測データの提供や測定場所の提供など、多大な御協力をして頂きました。

筑波大学生命環境学群地球学類の吉田新悟君、渡辺拓馬君にも様々な場面で御協力頂き、また互いに励ましあうことでここまで研究を進められてきました。

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

参考文献

- 安部喜也・半谷高久 1974. 一般水質化学, 上巻, 共立出版, 285p.
- 天野耕二・福島武彦・松重一夫 1998. 湖沼における DO と pH の連続モニタリング結果を用いた物質循環, 生物代謝特性の評価方法. 水環境学会誌, 21, 112-118.
- 茨城県霞ヶ浦環境科学センターHP: 調査・研究>霞ヶ浦について
http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04_kenkyu/kasumigaura/kasumigaura.html (最終閲覧日: 2013/01/31).
- 茨城県霞ヶ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影響する環境因子の解明に関する研究
http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04_kenkyu/shoukai/kankyuu/documents/h23/01_algae.pdf (最終閲覧日: 2013/02/14).
- 茨城県霞ヶ浦環境科学センターHP: 調査・研究>調査研究の紹介>センター年報>センター年報(第5号)>研究報告
http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04_kenkyu/shoukai/nenpou/documents/nenpo2009_07.pdf (最終閲覧日: 2013/02/14).
- 今井清太・渡邊圭司・濱健夫 2008. 霞ヶ浦流域における蛍光性溶存態有機物 (F - DOM) の時空間的変動. 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報, 4, 98-106.
- 岩田徹・三枝信子 2003. 渦相関法によるフラックス解析の実際. Asia Flux 運営委員会編: 陸域生態系における二酸化炭素フラックス等のフラックス観測の実際. 国立環境研究所, 25-44.
- 占部城太郎 2007. 湖と池の生物学: 生物の適応から群衆理論・保全まで, 共立出版, 339p.
 気象庁 HP: 気象等の知識>海洋>海洋の温室効果ガスの知識>海洋の二酸化炭素吸収量
http://www.data.kishou.go.jp/db/co2/knowledge/ocean_uptake.html (最終閲覧 2013/01/31)
- 国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所 HP: 霞ヶ浦の水質調査データ>水質調査結果一覧
<http://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/kasumi00145.html> (最終閲覧日: 2013/01/31)
- 近藤純正 2000. 地表面に近い大気 of 科学—理解と応用—, 東京大学出版会, 324p.
- 近藤純正 2006. 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 東京大学出版会, 324p.
- 西條八束・三田村緒佐武 1995. 新編 湖沼調査法, 講談社, 238p.
- 関智弥 2005. 霞ヶ浦における濁度上昇要因, 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 124p.
- 武田博清・占部城太郎 2006. 地球環境と生態系—陸域生態系の科学—, 共立出版, 282p.
- 花町優次・中村剛也 2010. ^{13}C トレーサーを用いた植物プランクトン生産物の分解過程の解析—夏季と秋季の比較—, 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報, 6, 41-47.
- 福島武彦・松重一夫・Weisburd, R.S.J. 1995. DO, pHの連続測定による気液ガス交換, 光合成, 呼吸速度の推定方法について. 水環境学会誌, 18, 279-289.
- 福島武彦・松重一夫・Weisburd, R.S.J. 秦三和子・細見正明 1995. DO, pHの連続測定の結果をもとにした実験池の物質循環, 生物代謝特性の評価. 水環境学会誌, 18, 755-765.
- 宮田明 2003. データの管理, データベース作成の実際. Asia Flux運営委員会編: 陸域生態系における二酸化炭素フラックス等のフラックス観測の実際. 国立環境研究所, 85-114.
- 宮野愛子 2008. 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの測定と評価. 筑波大学第一学群自然学類地球科学主専攻卒業論文, 50p.
- 安田幸生・渡辺力・大谷義一・岡野通明・中山敬一 1998. 落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの季節変化, 水文・水資源学会誌, 11, 575-585.

- 山本和也 2013. 霞ヶ浦の水収支の推定. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士論文, (準備中).
- Aoki, M., Chimura, T., Ishii, K., Kaihotsu, I., Kurauchi, T., Mushiake, K., Nakaegawa, T., Ohte, N., Polsan, P., Semmer, S., Sugita, M., Tanaka, K., Tsukamoto, O. and Yasunari, T. 1998. Evaluation on surface fluxes over a paddy field in tropical environment: Some findings from a preliminary observation of GAME. *J. Japan Soc. Hydrol. Water Resour.*, 11, 39-60.
- Hirata, R., Saigusa, N., Yamamoto, S., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Yoshiko., Li, S. G., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M., and Wang, H. 2008. Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. *Agric. For. Meteorology.*, 148, 761-775.
- Huotari, J., Ojala, A., Peltomaa, E., Nordbo, A., Launiainen, S., Pumpanen, J., Rasilo, T., Hari, P., and Vesala, T., 2011. Long-term direct CO₂ flux measurement over a boreal lake: Five years of eddy covariance data. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L18401, doi:10.1029/2011GL048753.
- Iwata, T., Yoshikawa, K., Nishimura, K., Higuchi, Y., Yamashita, T., Kato, S. and Ohtaki, E. 2004. CO₂ flux measurements over the sea surface by eddy correlation and aerodynamic techniques. *J. Oceanogr.*, 60, 995-1000.
- Iwata, T., Han, Z., Kasai, R. and Kohzu, A. 2007. Carbon dioxide and methane emissions from a hydroelectric reservoir. Annual Report 2006 of 21st Century COE program: Research Education on Intergrated River Basin Management in Asian Monsoon Resion., 21st Century COE program, University of Yamanashi, 85-86.
- Li, S. G., Asanuma, J., Eugster, W., Kotani, A., Jiu, J. J., Urano, T., Oikawa, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D. and Sugita, M. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biol.*, 11, 1941-1955.
- Kondo, F. and Tsukamoto, O. 2007. Air-sea CO₂ flux by eddy covariance technique in the Equatorial Indian Ocean. *J. Oceanogr.*, 63, 449-456.
- Koyama, T., Nishimura, M. and Matsuda, H. 1977. Diurnal and seasonal variations of exchange rate of carbon dioxide across an air-lake water interface. *Japan. J. Limnol.*, 38, 131-137.
- Meyers, T., Hall, M., Lindberg, s. and Kim, K. 1996. Use of the modified Bowen-ratio technique to measure fluxes of trace gases. *Atmosph. Environ.*, 30, 3321-3329.
- Rudorff, C. M., Melack, J. M., MacIntyre, S., Barbosa, C. C. F., and Novo, E. M. L. M., 2011. Seasonal and spatial variability of CO₂ emission from a large floodplain lake in the lower Amazon. *J. Geophys. Res.*, 116, G04007, doi:10.1029/2011JG001699.
- Sasai, T., Saigusa, N., Nasahara, K.N., Ito, A., Hashimoto, H., R.R. Nemani., Hirata, R., Ichii, K., Takagi, K., Saitoh, T.M., Ohta, T., Murakami, K., Yamaguchi, Y., and Oikawa, T. 2011. Satellite-driven estimation of terrestrial carbon flux over Far East Asia with 1-km grid resolution. *Remote Sensing of Environ.*, 115, doi:10.1016/j.rse.2011.03.007.
- Wanninkhof, R. 2007. The Impact of Different Gas Exchange Formulations and Wind Speed Products on Global Air-Sea CO₂ Fluxes. *Transport at the Air Sea Interface.*, pp. 1-23.
- Wei Z-w. 2013. Estimation of surface fluxes using bulk transfer methods over lake surface: an example of Lake Kasumigaura. MS thesis, Graduate School of Life and Environmental Sciences, the University of Tsukuba, 160p.

付録

1. バルク係数について

バルク式とは、ある物理量に対して地表面での値 x_s と大気中の値 x_a の差から、フラックスを算出する方法であり、バルク係数 κ_x が与えられなければならない。本研究では、渦相関法で使用する共分散を以下の式によって定義し、欠損値を補完している。

$$\overline{w'x'} = \kappa_x U (x_s - x_a) \quad (\text{A1})$$

ただし、 U は水平風速 [m/s] ($=\sqrt{u^2 + v^2}$) であり、二酸化炭素フラックス C に対するバルク係数を κ_C とし、変数 x は二酸化炭素濃度 ρ_c である。

また、バルク係数 κ_C は以下の式から求めた (Wanninkhof, 2007)。

$$\frac{\kappa_C}{Ce} = \left(\frac{Sc_{CO_2}}{Sc_{水蒸気}} \right)^{-2/3} (U_{10} \leq 3m/s) \quad (\text{A2})$$

$$\frac{\kappa_C}{Ce} = \left(\frac{Sc_{CO_2}}{Sc_{水蒸気}} \right)^{-1/2} (U_{10} > 3m/s) \quad (\text{A3})$$

ただし、 Ce は霞ヶ浦湖心観測所で 2008 年から 2010 年にかけて求められた潜熱のバルク係数の平均値 (=0.001) (Wei, 2013)、 Sc はシュミット数であり、 $Sc_{CO_2} = 0.947$ 、 $Sc_{水蒸気} = 0.60$ (近藤, 2006) とした。

ここで、求めたバルク係数を用いてバルク式で計算したフラックスと、渦相関法で求めたフラックスを比較したものが、図 17 である。アルカリ度が測定された時間の前後 1 時間半のデータを使用したもの (上図) は、ある程度相関が見られた。しかし、データの範囲をさらに広げる (下図) と相関が悪くなったため、アルカリ度が測定されていない時間の補完方法の精度の向上が今後の課題である。

2. アルカリ度について

まず、アルカリ度とは、水に溶けている重炭酸イオン、炭酸イオンなどのアルカリをある所定の pH にするまでに要する酸の量のことである。アルカリ度は、酸に相当する炭酸カルシウムの量に換算して試料 1L についての mg 数で表すことが多い。

今回、バルク式による補完で用いるアルカリ度は、2008 年 3 月までは国土交通省によって月に 1 回測定されていたため、その測定値を使用した。なお、福島ほか (1995) により、アルカリ度は時間変化が小さいことから、2 回の測定期間の間のアルカリ度は、線形的に変化すると仮定して内挿により、アルカリ度を推定した。以後もこの方法を採用した。

次に、2008 年 4 月～2010 年 10 月の期間は、アルカリ度のデータがないため、過去 5 年間の平均値を今回は使用した。図 18 がアルカリ度の各月の変化の様子を表している。そして、図 19 は、2008 年 4 月～2009 年 3 月までの 1 年間の、各月 15 日の 24 時にアルカリ度 (過去 5 年間の平均値と過去 5 年間の中での最大値と最小値の計 3 種類) を設定し、15 日と 16 日のフラックスデータを積算して 1 日当たりのフラックスの積算値の変化の様子を表している。2009 年 1 月が特に変化が大きいこと

が分かる。そして表 7 が、図 19 でアルカリ度を変化させた時の日平均積算値に対する割合を表している。こちらからも 2009 年 1 月が特に割合が高いことが分かる。

また、2010 年 11 月から現在までの期間は、採水を行い、実験室に持ち帰って酸滴定法により、水中の重炭酸イオン濃度 [mmol/L] を測定している。この測定値を用いて以下の式からアルカリ度を計算した (安部ほか, 1974)。

$$[HCO_3^-] = Ct \cdot \alpha_1 \quad (B1)$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{[H^+]}{K_1} + 1 + \frac{K_2}{[H^+]} \right)^{-1} \quad (B2)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{[H^+]^2}{K_1 K_2} + \frac{[H^+]}{K_2} + 1 \right)^{-1} \quad (B3)$$

$$A = Ct \cdot (\alpha_1 + 2\alpha_2) + [OH^-] - [H^+] \quad (B4)$$

ただし、 $Ct = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$ [mmol/L] である。

表 1.1 観測項目

観測項目	測器	高度	サンプリング時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
風速 3 成分 u, v, w [m/s]	超音波風速温度計 (Gill Instruments Ltd., R3A)	9.80 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
気温 T [°C]					
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)	9.80 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m ³]					
気温 T_a [°C]	通風温湿度計 (REBS, Inc., AEM)	2.00 m, 3.72 m	毎 5 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
水面温度 T_a [°C]	放射温度計 (Minorta, CML-303N)	4.27 m	毎 5 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
水温 T_w [°C]	白金測温抵抗体	-0.1 m, -1.0 m, -2.5 m	毎 5 分, 35 分	(瞬間値)	毎時 5 分, 35 分
炭酸水素イオン濃 度 [mmol/L] (2010年11月より 測定)	酸滴定法	-0.1 m	毎月	(瞬間値)	

* 観測高度は平水位面 (Y.P.+1.0m) からの高さとする。

表 1.2 国土交通省による観測項目

観測項目	測器	高度	サンプリング時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
雨量 R [mm]	転倒ます式雨量計	8.85 m	毎時 0 分	(積算値)	毎時 0 分
気圧 P [hPa]	アネロイド型気圧計	6.75 m	毎時 0 分	(瞬間値)	毎時 0 分
風向 WD [°], 風速 WS [m/s]	風車型風向風速計	9.45 m	毎 0.25 秒	前 1 時間	毎時 0 分
日射量 SS [W/m ²]	全天日射計	8.75 m	毎秒	前 1 時間	毎時 0 分
気温 TT [°C]	白金測温抵抗体	8.25 m	毎秒	前 1 時間	毎時 0 分
水温 $TW1s, TW1b$ [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m, -5.5 m	毎 5 秒	前 20 分	毎時 0 分(上層), 30 分(下層)
気温 $TW2$ [°C]	白金測温抵抗体	-1 m 毎	毎月	(瞬間値)	—
pH	pH メーター	-0.5 m, -3.5 m	毎秒	前 20 分	毎時 0 分(上層), 30 分(下層)
アルカリ度 A [mg/L] (2007年6月～2008年 3月まで)			毎月	(瞬間値)	—

* 観測高度は平水位面 (Y.P.+1.0m) からの高さとする。

表2 代用データ

項目	機材の問題点	代用データ	代用期間
0.1 m 深水温 $T_w(0.1 \text{ m})$ [°C]	水温計の故障	国土交通省の上層 水温観測値 TWs [°C]	2007年8～11月
			2010年5月
			2012年10～11月
二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m ³]	データ回収時の不具合	茨城県大気汚染常 時観測測定データ (水戸石川局) : 二酸化炭素濃度 [ppm]	2011年1月6日～ 3月7日
風速3成分 u, v, w [m/s]			

表 3. 各年の除外時間数

		2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
全時間数		5136	8784	8760	8760	8760	8784
除外時間数		1950	3501.5	3412.5	3601	3176.5	3651
割合 (%)		38	39.9	39	41.1	36.3	41.6
除外項目	雨 (時間)	486.5	1135.5	791	1350	1220	1498.5
	(割合 (%))	9.5	12.9	9	15.4	13.9	17.1
	風向 (時間)	1240.5	2013	2303	1723.5	1461.5	1678
	(割合 (%))	24.2	22.9	26.3	19.7	16.7	19.1
	雨及び風向 (時間)	192	240.5	116	386.5	415	372
	(割合 (%))	3.7	2.7	1.3	4.4	4.7	4.2
	エラー・異常値 (時間)	31	112.5	202.5	141	80	102.5
	(割合 (%))	0.6	1.3	2.3	1.6	0.9	1.2
備考	(6~12月までの7か月間)	(うるう年の為24時間長い)			(1~3月の1435時間データ代用)	(うるう年の為24時間長い)	

表 4. 西浦流入大河川水中の二酸化炭素濃度

河川名	採水日時	測定地点	測定場所	$C_w(\text{mmol/L})$
桜川	2012/11/4 9:45	36° 06' 51.0" N	栄利橋中央付近	0.16
		140° 08' 34.0" E		
恋瀬川	2012/11/10 13:35	36° 09' 41.111" N	愛郷橋より少し上 流側の左岸	0.23
		140° 17' 56.410" E		
園部川	2012/11/10 14:43	36° 09' 51.664" N	園部新橋の下の左 岸	0.11
		140° 21' 15.399" E		
清明川	2012/11/11 12:25	36° 01' 58.605" N	川沿橋より少し下 流側の左岸	0.11
		140° 16' 34.265" E		
小野川	2012/11/11 13:45	35° 58' 16.743" N	新古渡橋より少し 下流側の右岸	0.10
		140° 21' 14.788" E		

表 5. 年間放出量と月平均放出量と日平均放出量

	年間放出量 (g/m ² /year)	月平均放出量 (g/m ² /month)	日平均放出量 (g/m ² /day)
2007年(6～12月までの 7か月間)	—	-45	-1.5
2008年	-304	-25	-0.8
2009年	-204	-17	-0.6
2010年	-436	-36	-1.2
2011年(1月～3月を除く 約10か月間)	—	-27	-0.9
2012年	-386	-32	-1.1

表 6. 他の地表面における二酸化炭素の年間放出量と日平均放出量

地表面	対象地・対象物	年間放出量[g/m ² /year]	日平均放出量[g/m ² /day]	観測期間	<参考文献>
湖	諏訪湖		-1.4	1973/4/1~2	Koyama et al. (1977)
			-4.8	1973/7/17~18	
			2.5	1973/9/21~22	
			1.6	1972/11/1~2	
	Valkea-Kotinen 湖 (フィンランド南部)	282	1.9	2003~2007/5	Huotari et al. (2011)
			0.29	2003~2007/6	
			0.70	2003~2007/7	
			2.1	2003~2007/8	
			1.9	2003~2007/9	
	Curuai 湖(アマゾンの氾濫原)	5846	16	水位が高い時期 (2004/6/3~19)	Rudorff et al. (2011)
		3919	11	水位が低下している時期 (2003/9/25~10/2)	
		5589	15	水位が低い時期 (2003/11/22~12/2)	
		5958	16	水位が上昇している時期 (2004/2/3~12)	
海	太平洋	-22		2000~2005	気象庁(2010) より計算
森林	カラマツ (モンゴル)	-550		2003/3/25~2004/3/24	Hirata et al. (2008)
	カラマツ (苫小牧)	-1173		2000/9~2001/8	
	温帯落葉樹林 (高山)	-550		1998/7/25~1999/7/24	
	ヒノキ (桐生)	-1980		2001/1/1~2002/12/31	
	熱帯泥炭湿原林 (インドネシア)	2123		2001/11~2005/1	
草原	ステップ (モンゴル)	-150	-8.4~3.6	2003/3/25~2004/3/24	Li et al. (2005)

表 7. アルカリ度を変化させた時の日平均積算値に対する割合

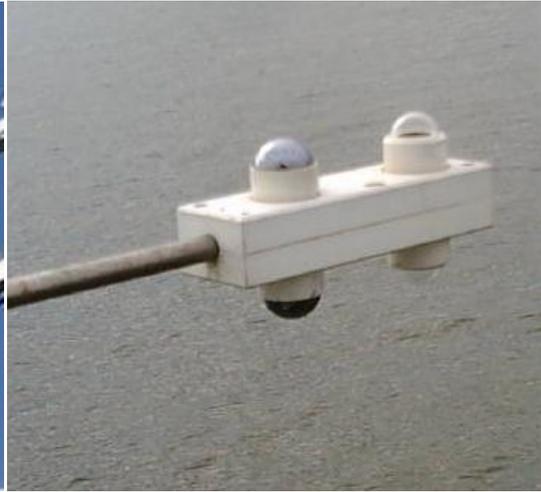
	2008年 4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2009年 1月	2月	3月
アルカリ度最大時の日平均積算値に対する割合 (%)	0.06	0.3	1.3	0.8	0.4	1.2	2.3	0.2	1.6	5.1	2.9	2.1
アルカリ度最小時の日平均積算値に対する割合 (%)	0.5	0.3	1.5	0.9	0.7	0.9	2.5	0.2	2.0	5.2	2.2	0.7



図1 霞ヶ浦（西浦）



図 2.1 霞ヶ浦湖心観測所(2012年12月7日午前8時54分撮影)



(a) 左：オープンパスアナライザー
右：超音波風速温度計
(2012年12月7日午前9時34分撮影)

(b) 4成分放射計
(2012年11月5日午前9時47分撮影)



(c) 通風温湿度計
(2012年11月5日
午前9時46分撮影)



(d) 放射温度計
(2012年12月7日
午前9時26分撮影)



(e) 水温計
(2013年2月7日
午前9時44分撮影)

図 2.2 観測機材

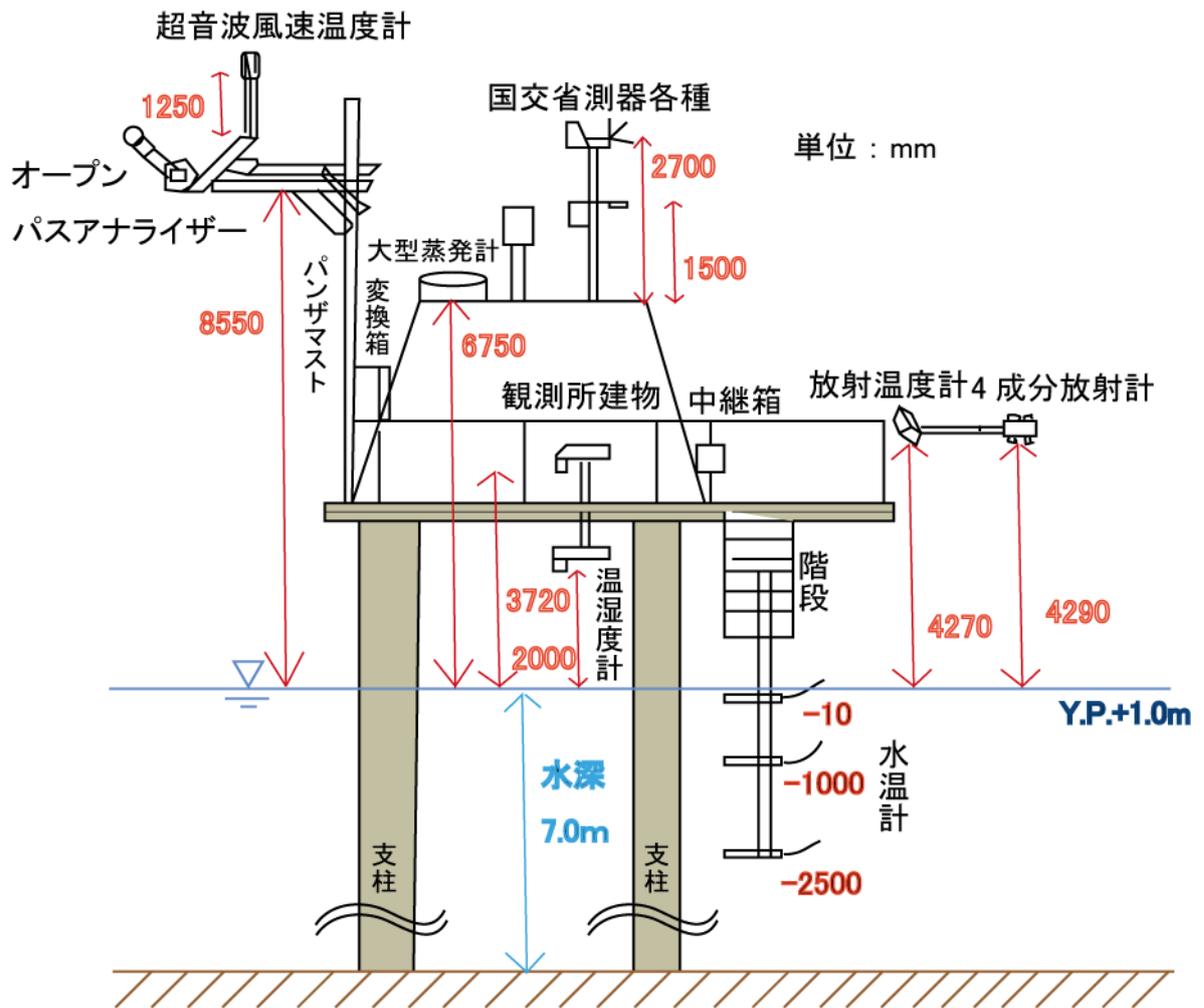


図 2.3 観測機材の設置状況（断面図）

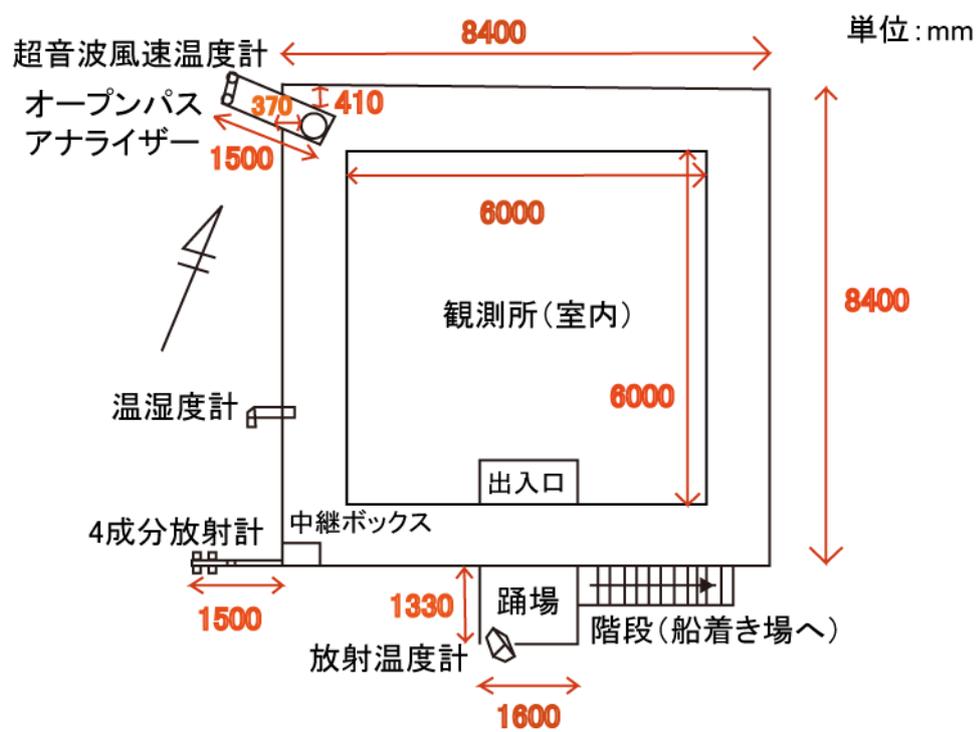


図 2.4 観測機材の設置状況 (平面図)

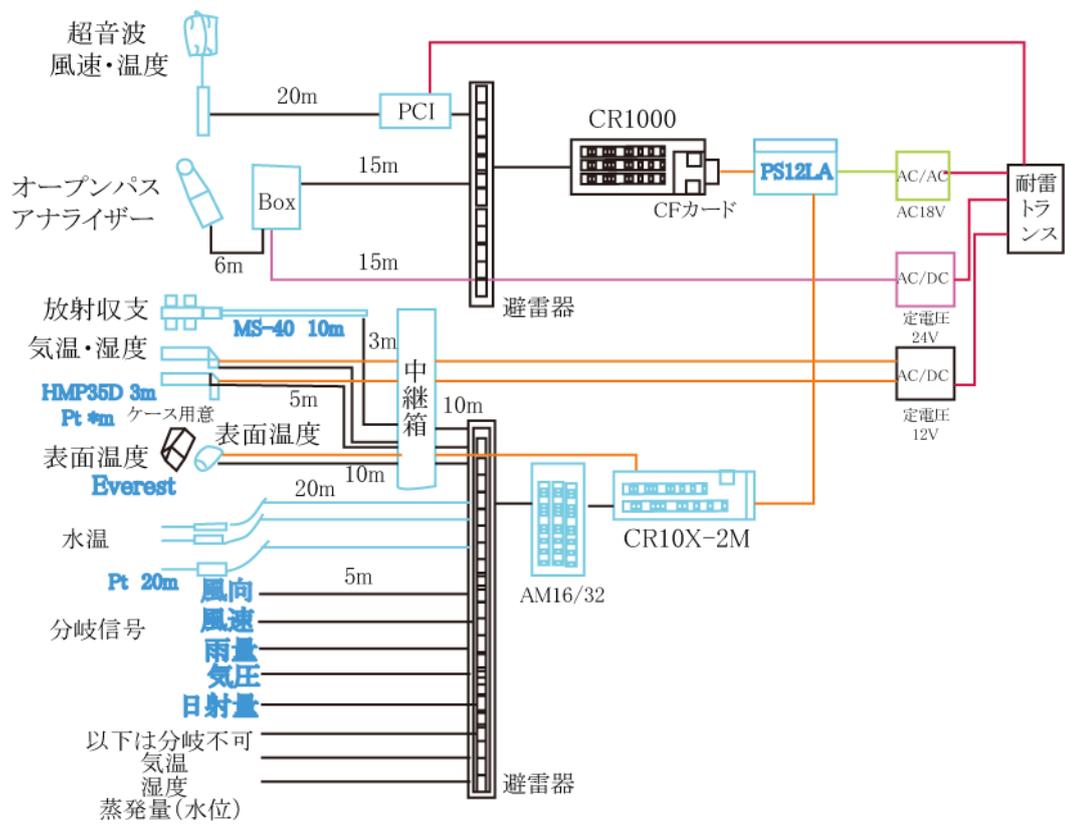


図 2.5 観測機材の配線状況

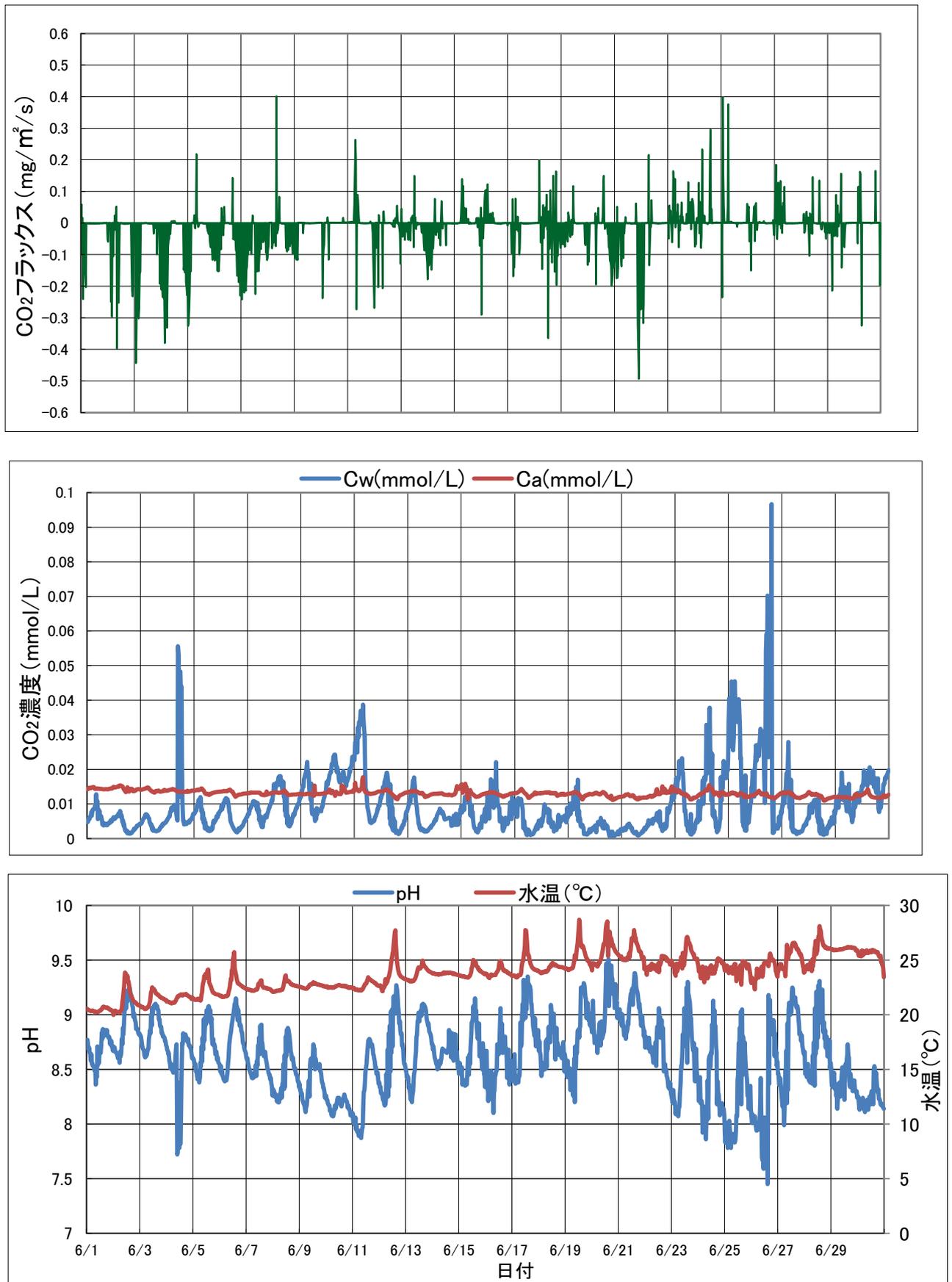


図 3.(a) 2007 年 6 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

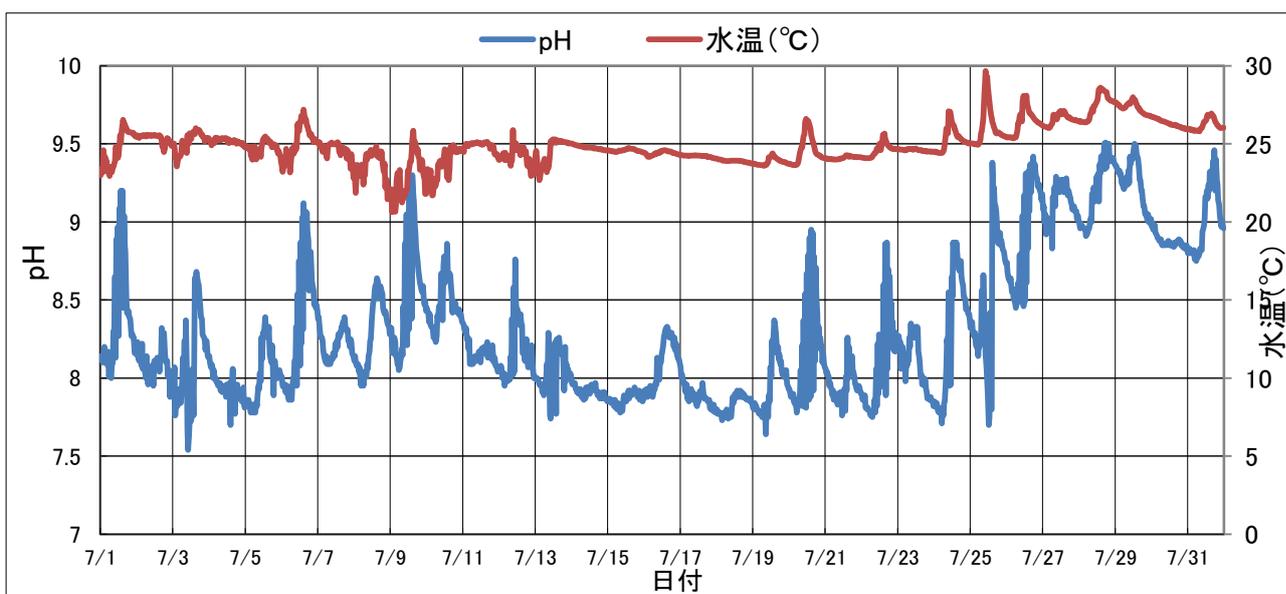
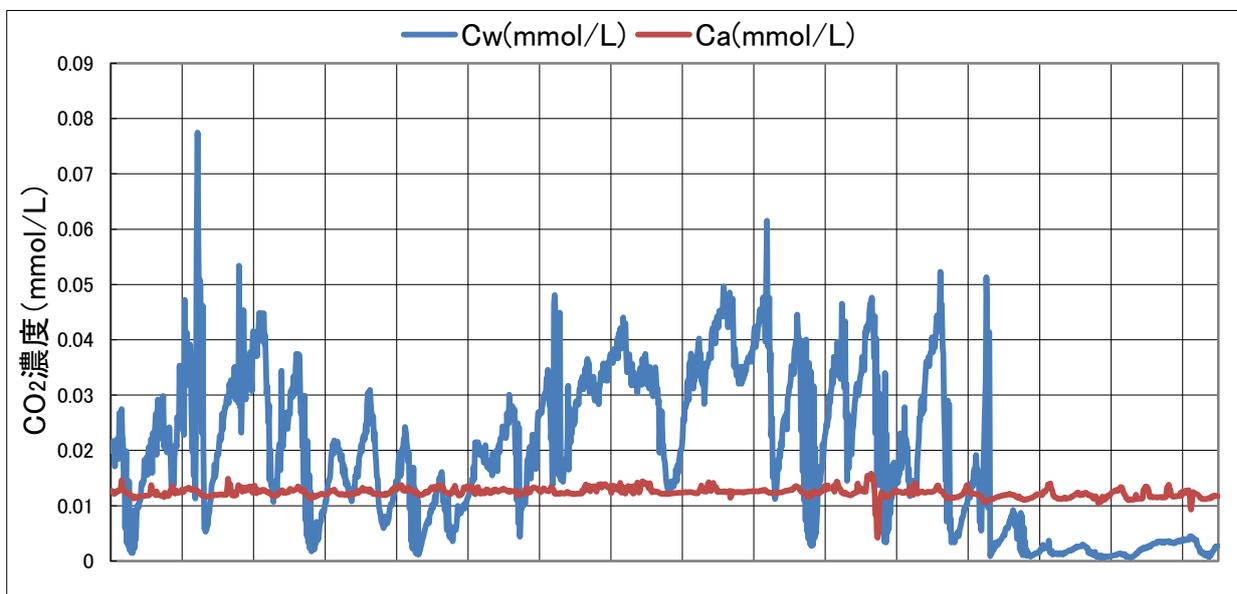
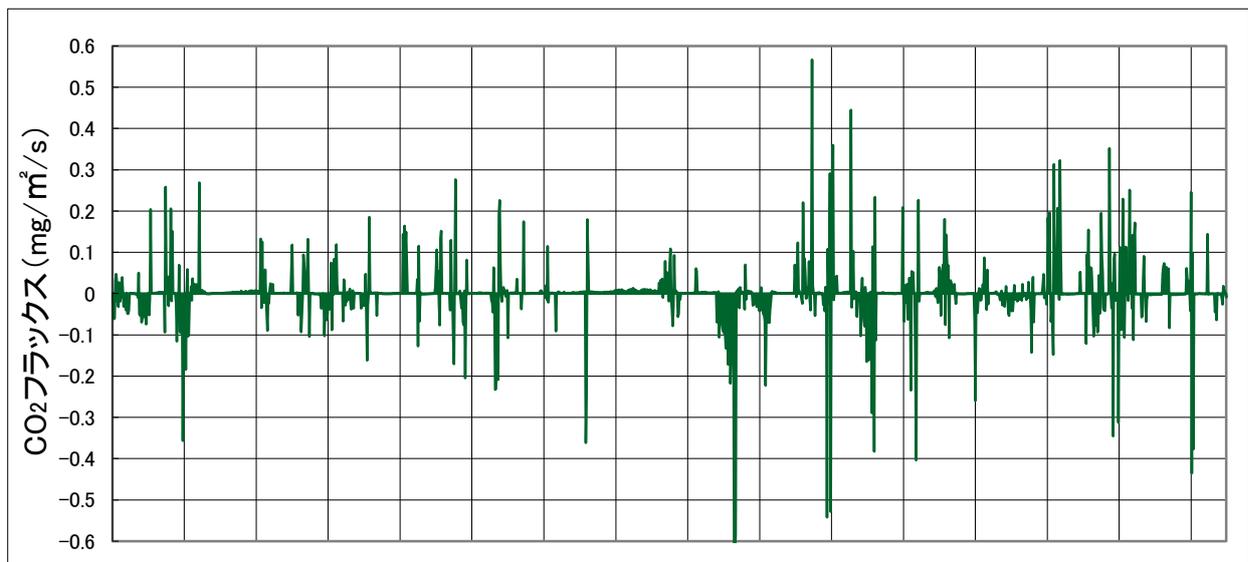


図 3.(b) 2007 年 7 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

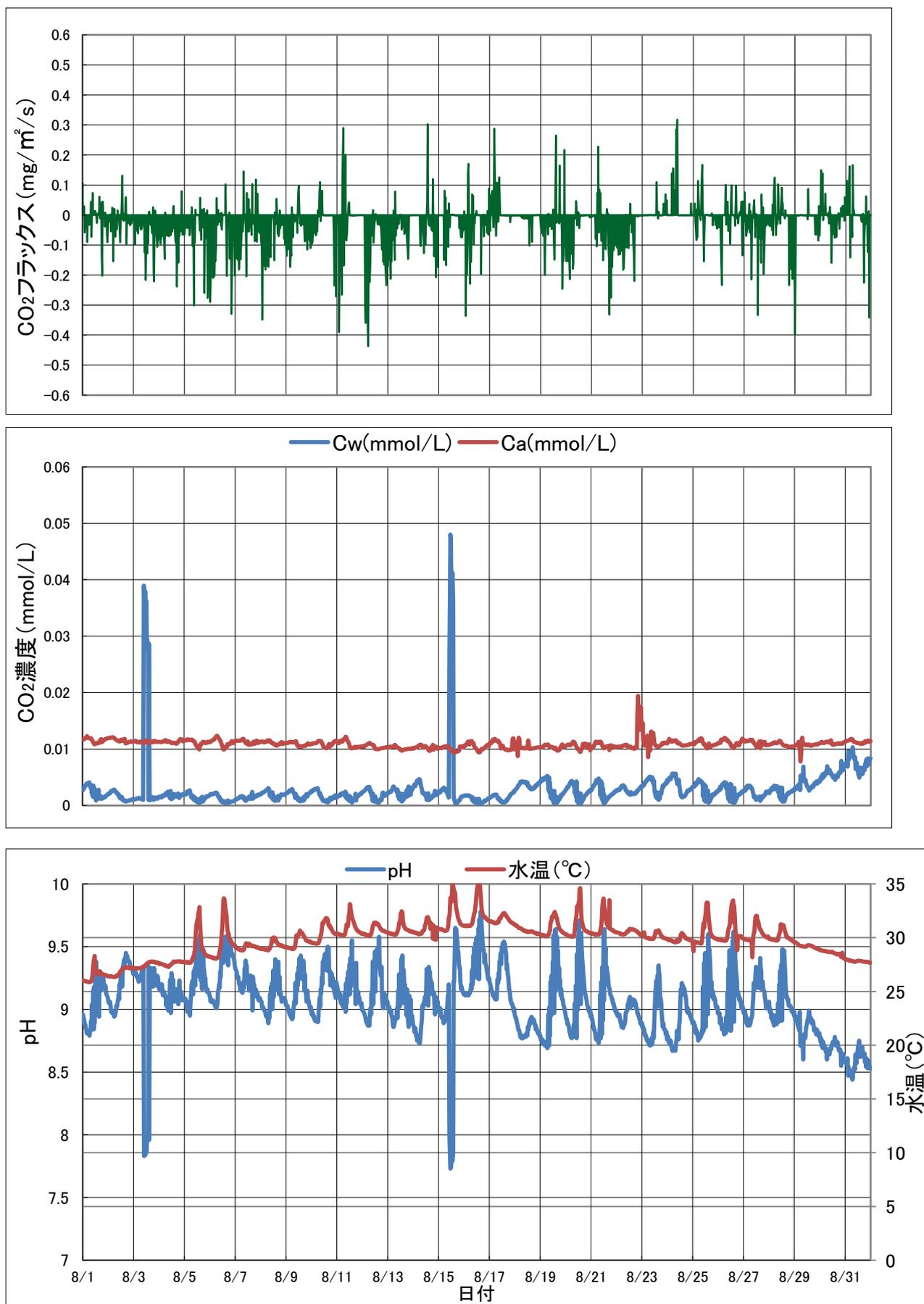


図 3.(c) 2007 年 8 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

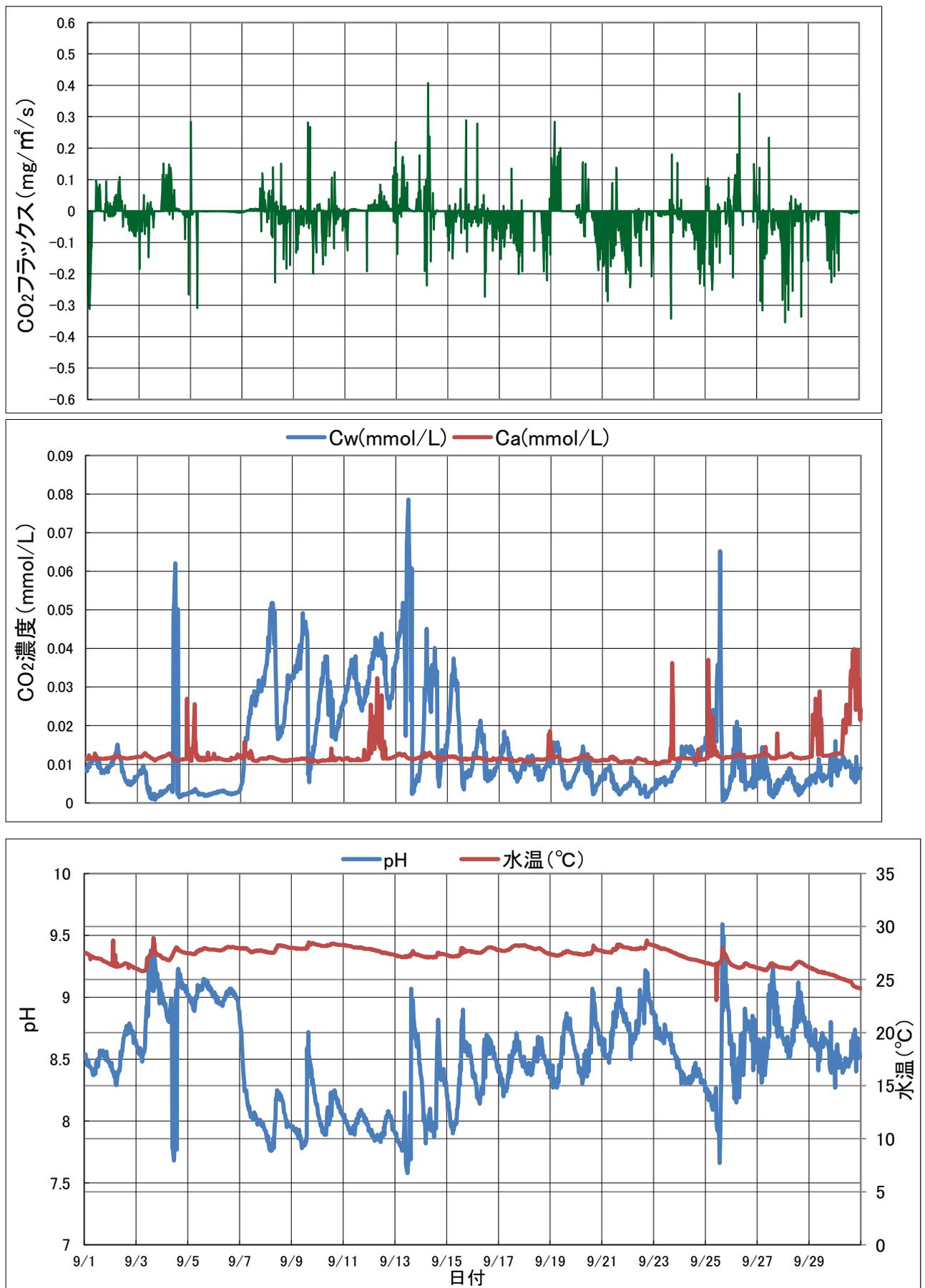


図 3.(d) 2007 年 9 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

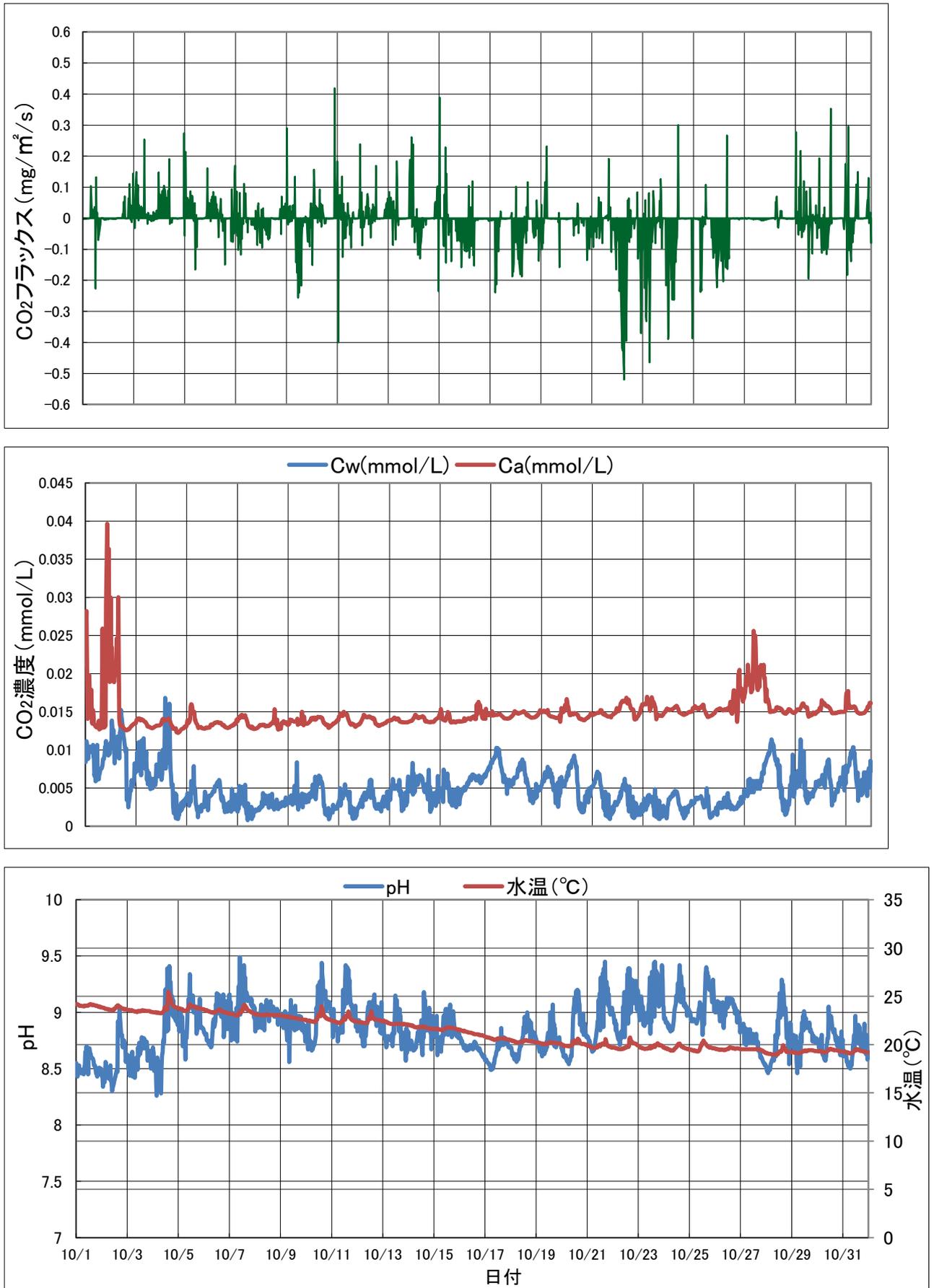


図 3.(e) 2007 年 10 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

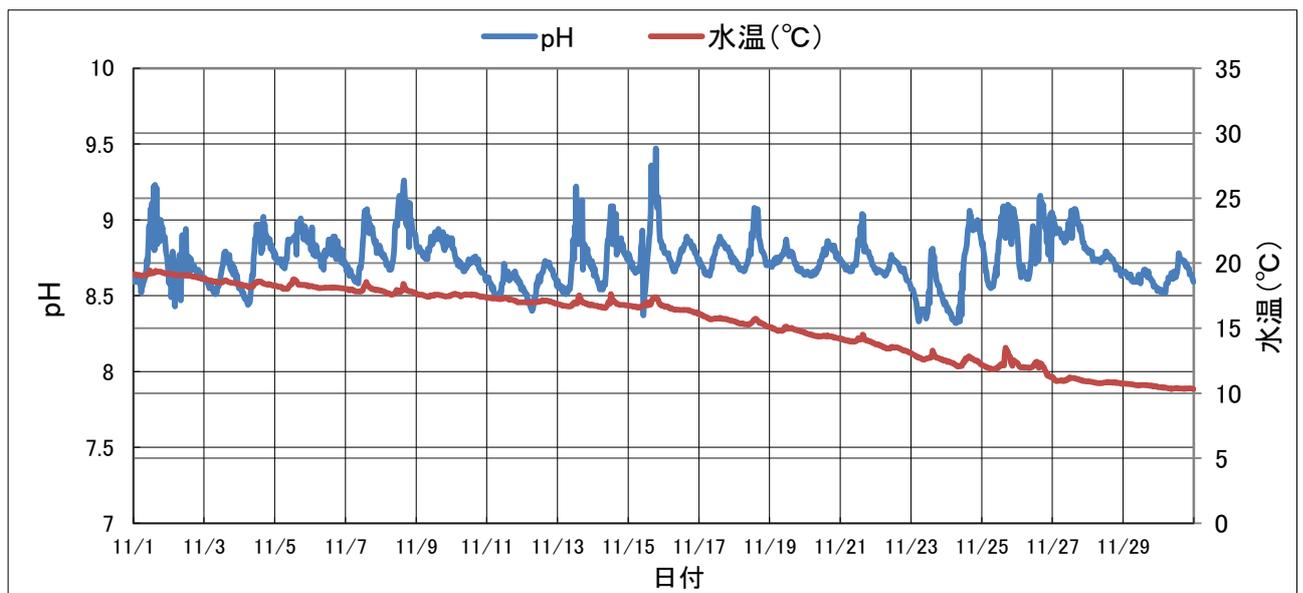
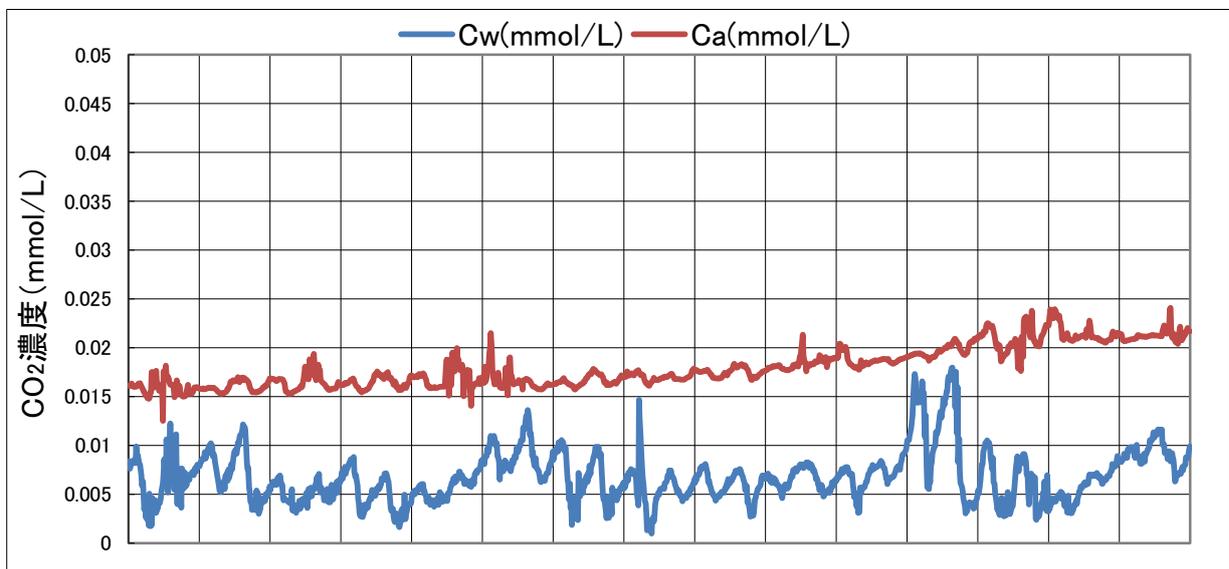
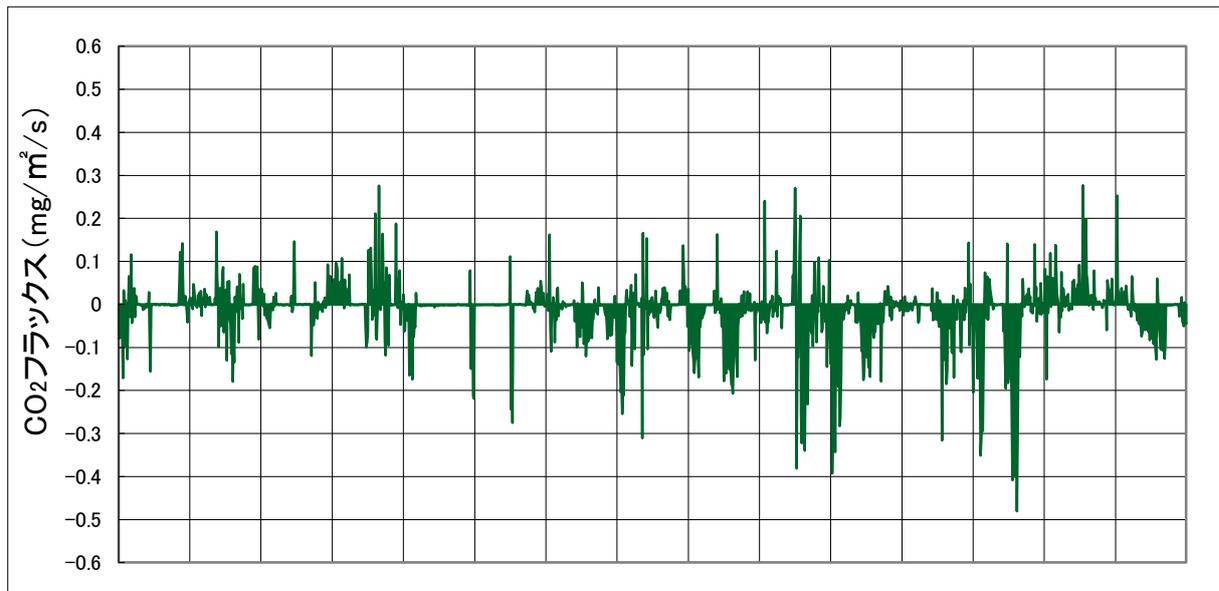


図 3.(f) 2007 年 11 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

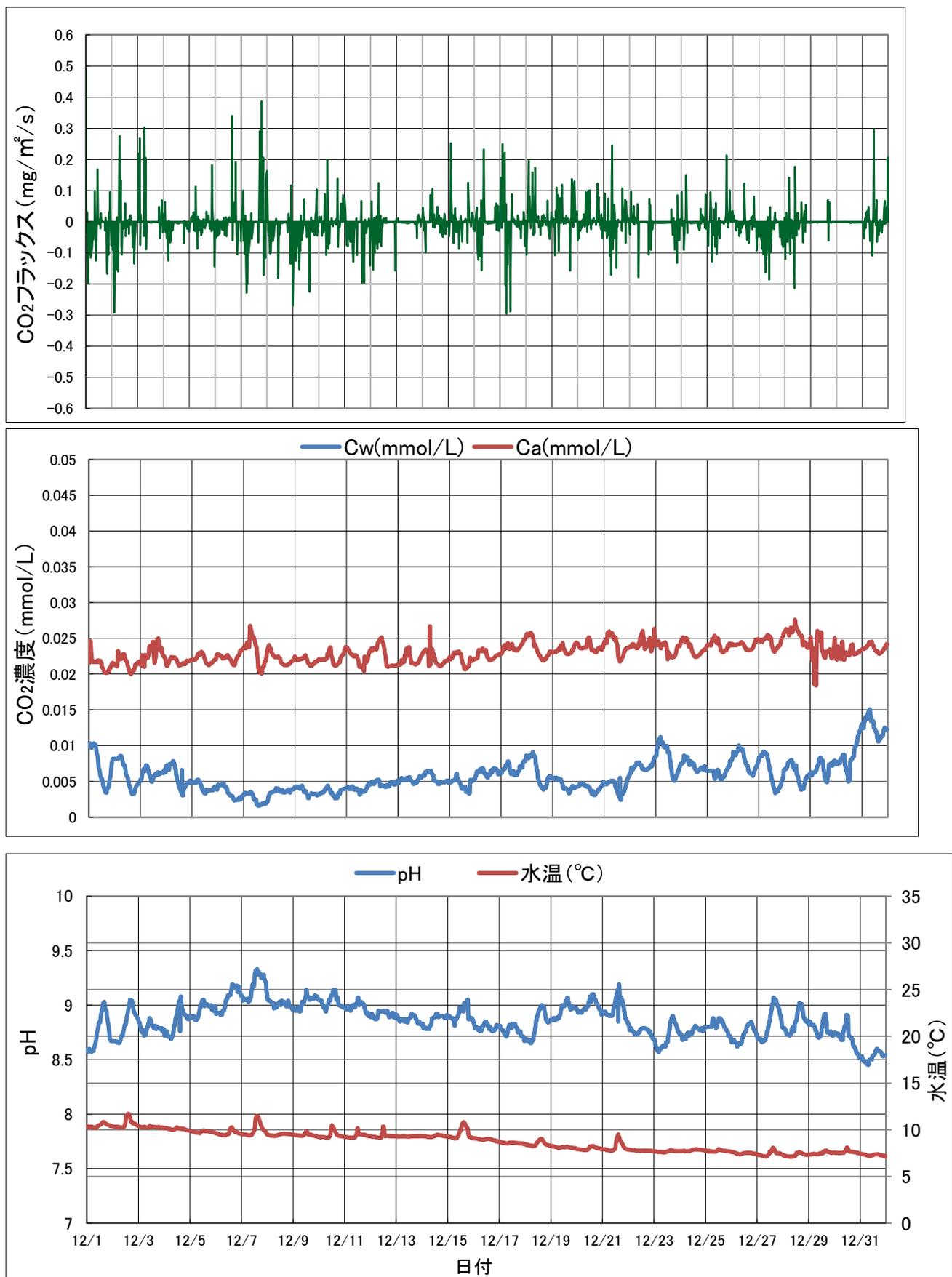


図 3.(g) 2007 年 12 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)，各二酸化炭素濃度(中図)，pH 及び水温(下図)である。

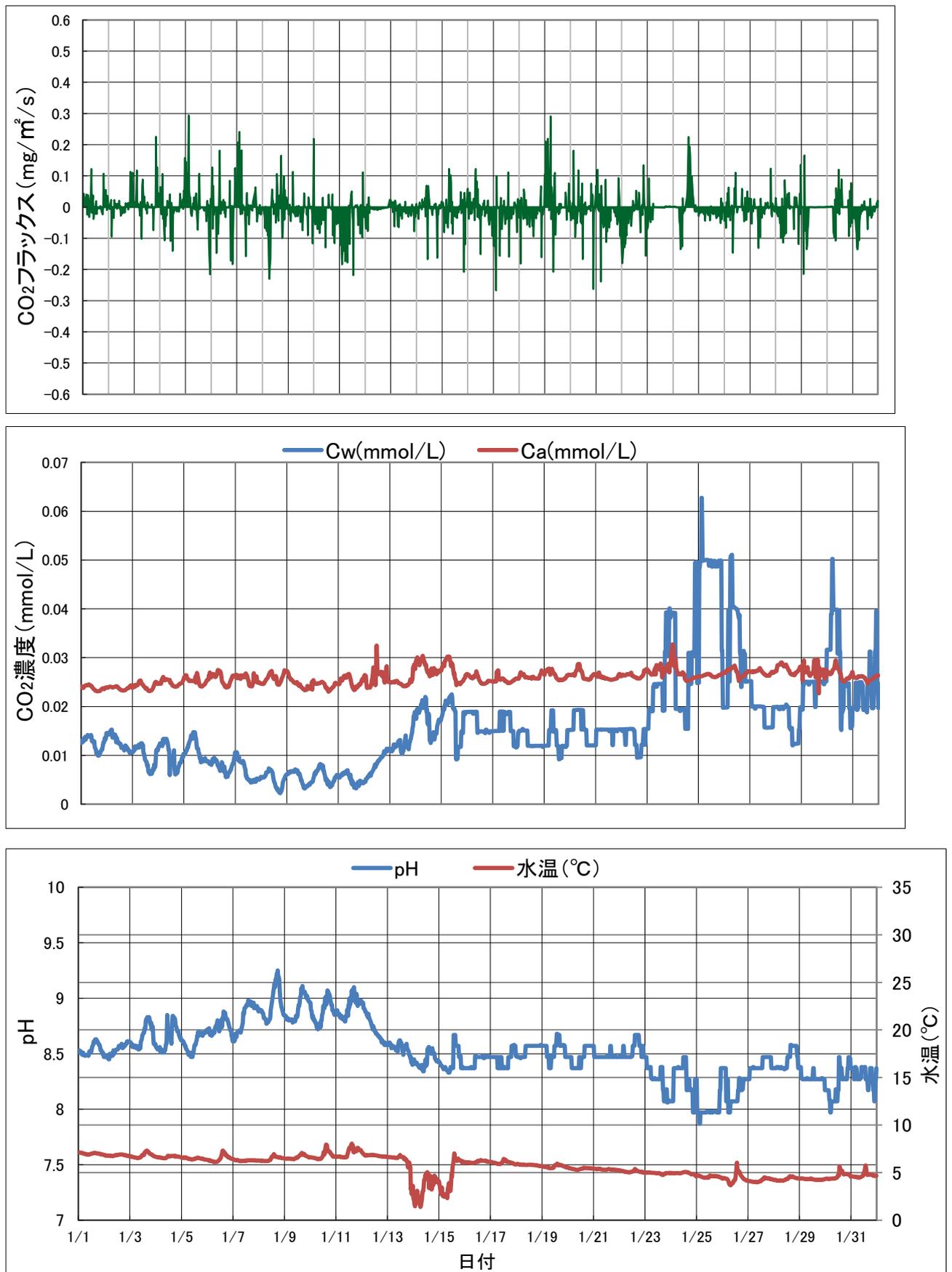


図 4.(a) 2008 年 1 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

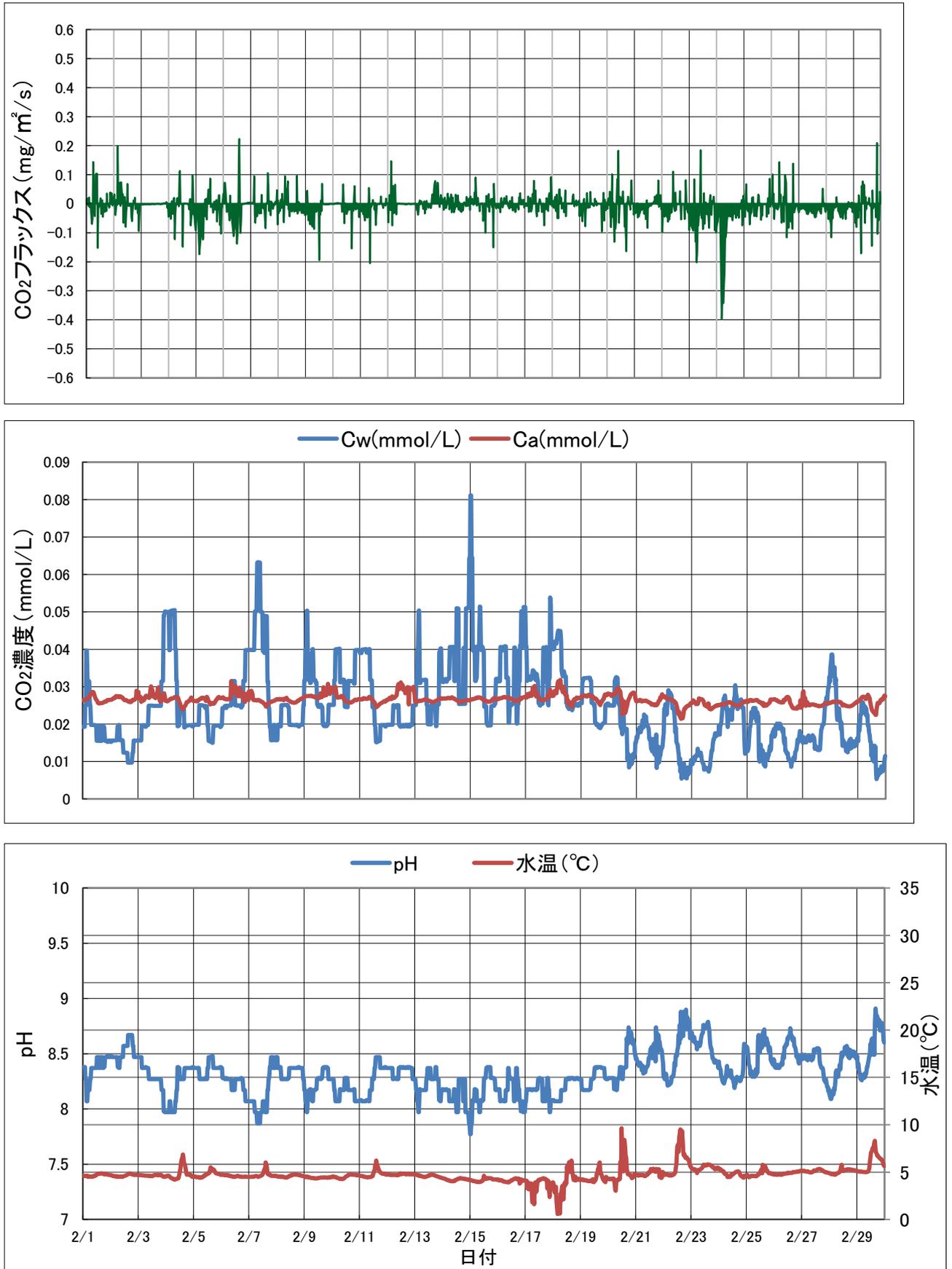


図 4.(b) 2008 年 2 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

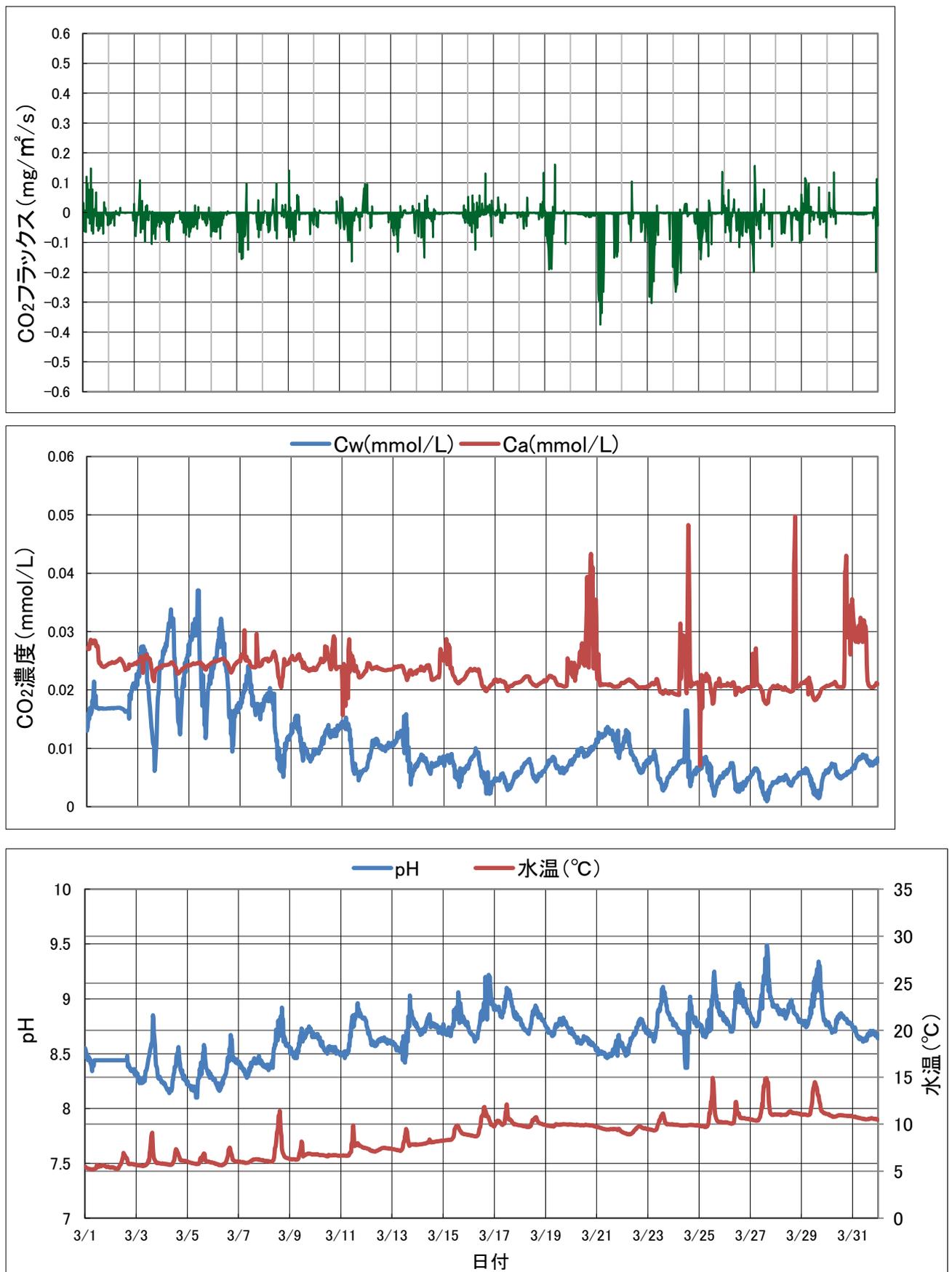


図 4.(c) 2008 年 3 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

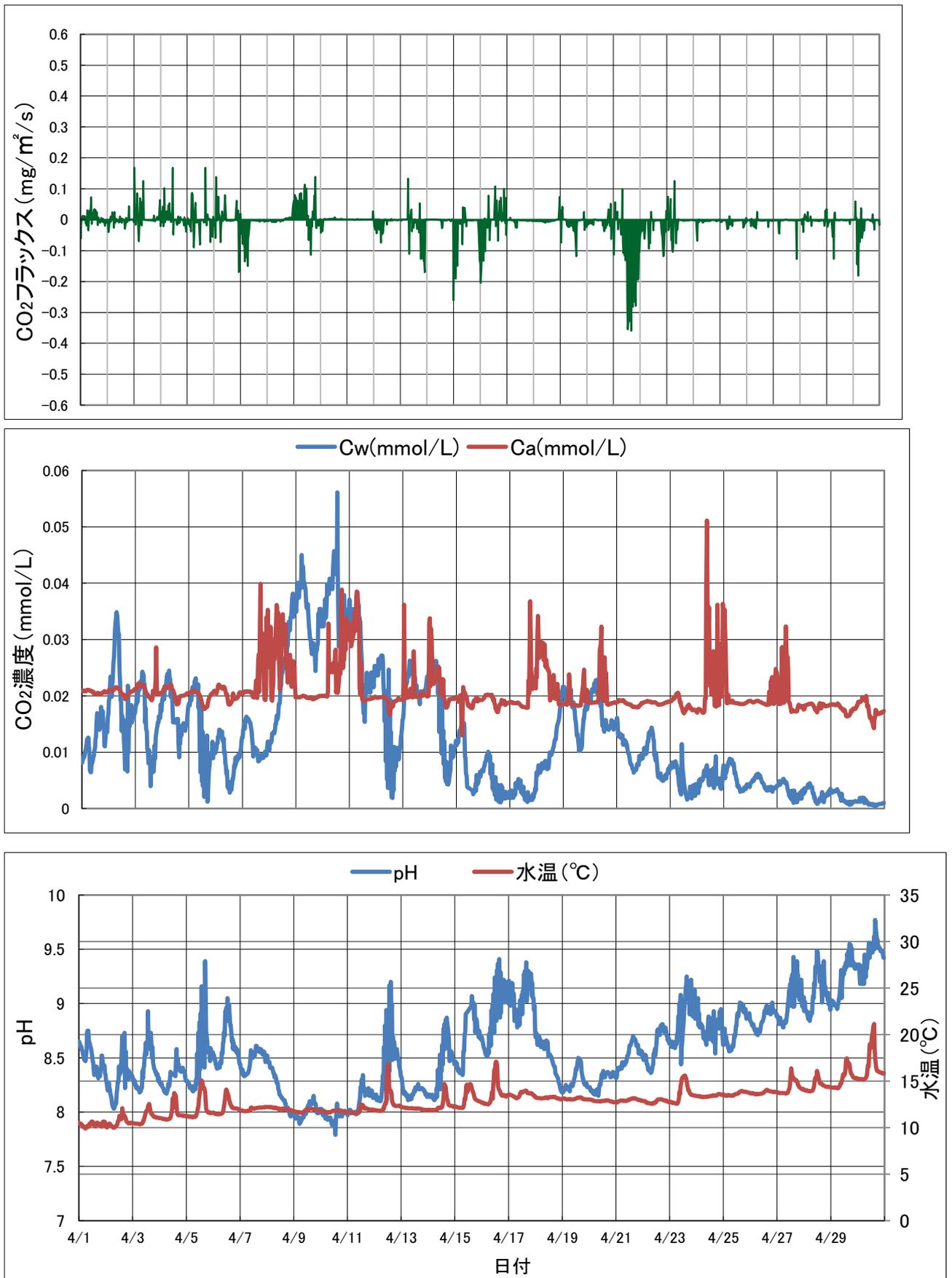


図 4.(d) 2008 年 4 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

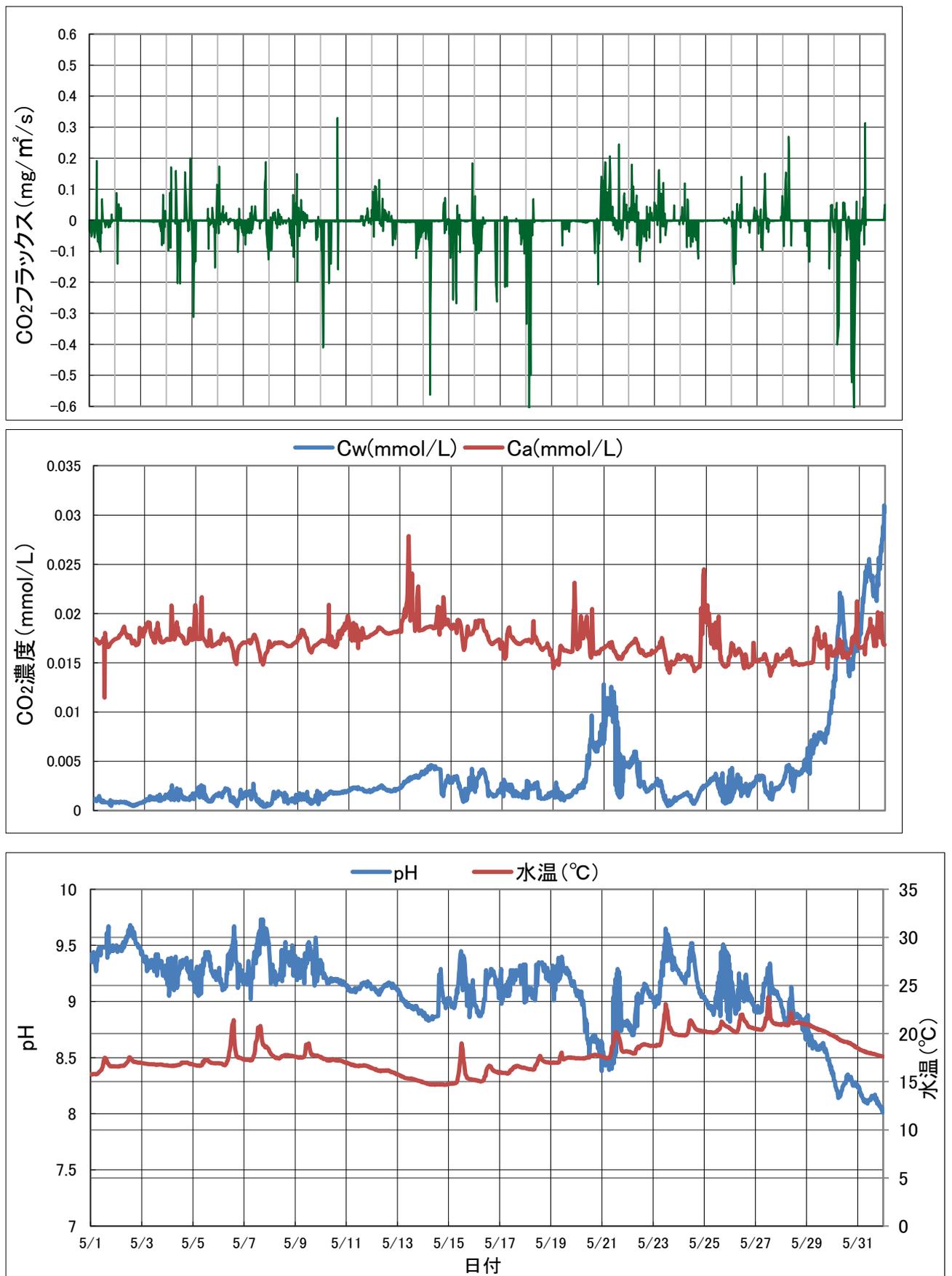


図 4.(e) 2008 年 5 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

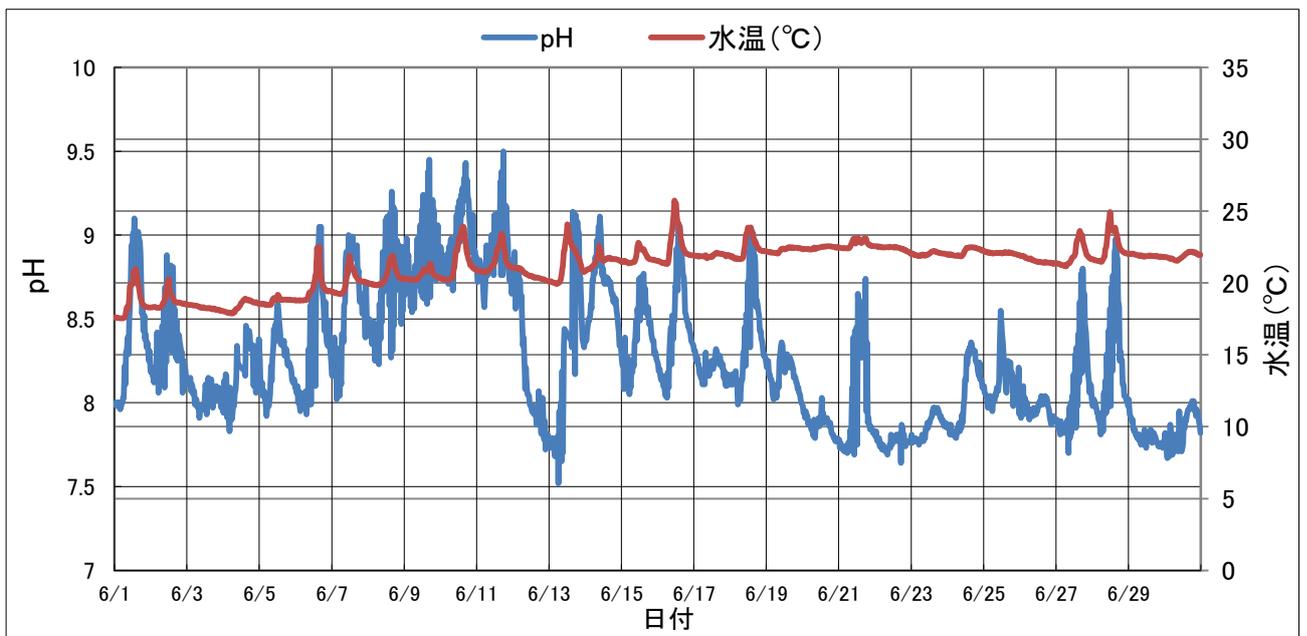
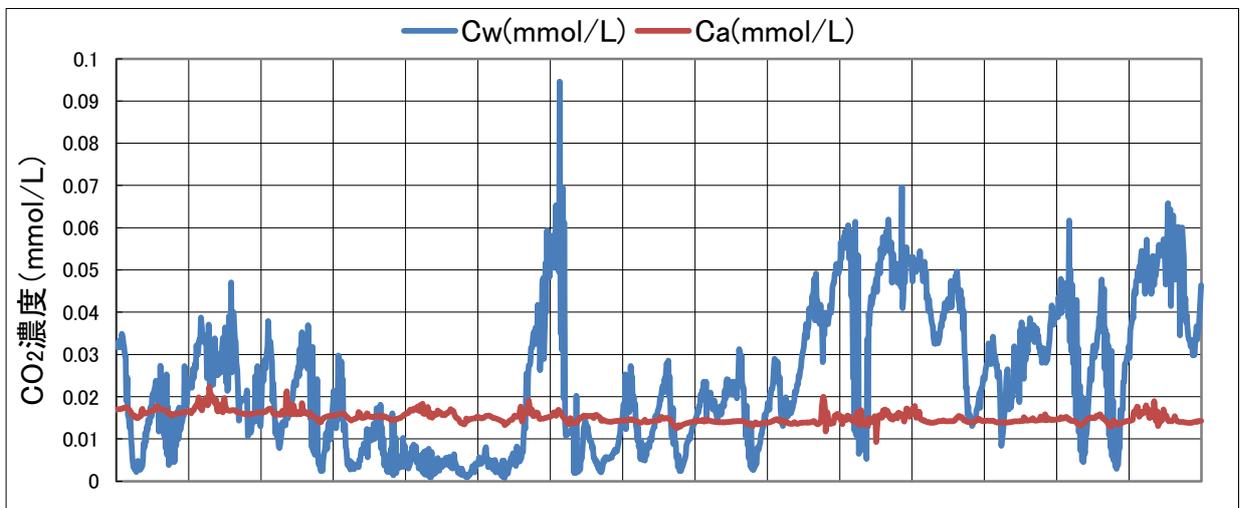
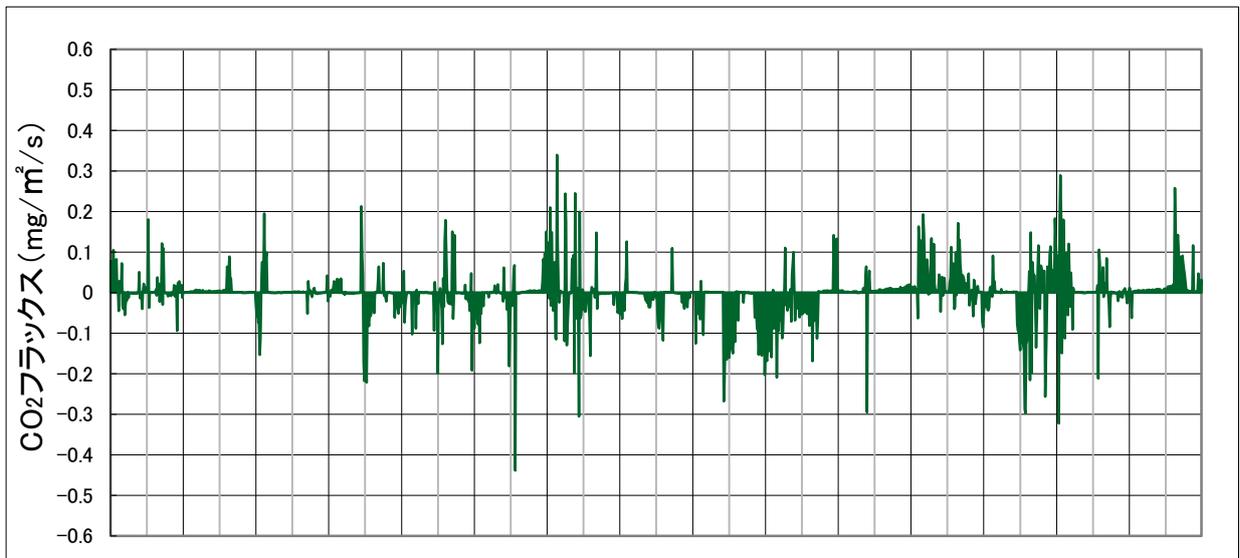


図 4.(f) 2008 年 6 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

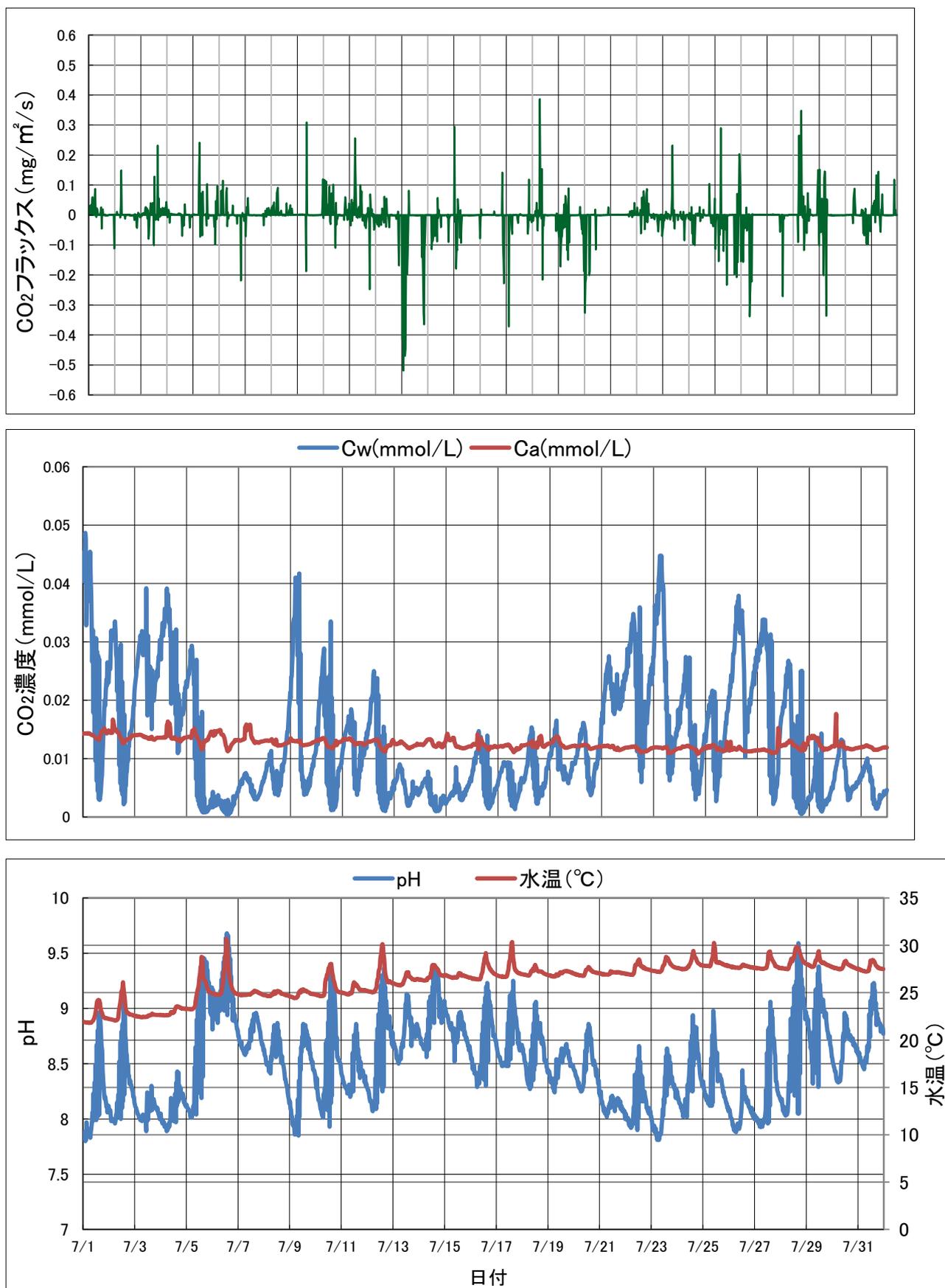


図 4.(g) 2008 年 7 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

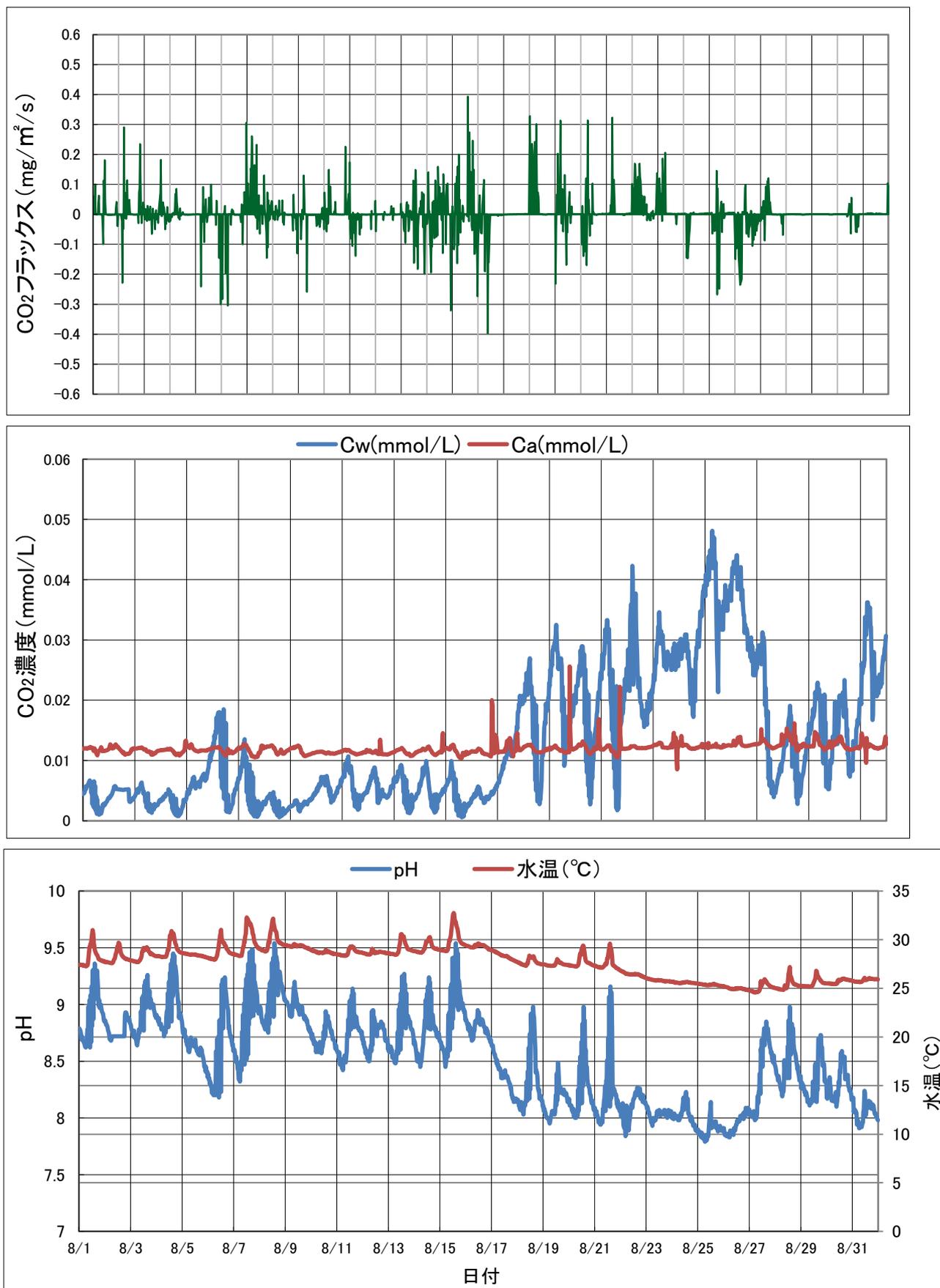


図 4.(h) 2008 年 8 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

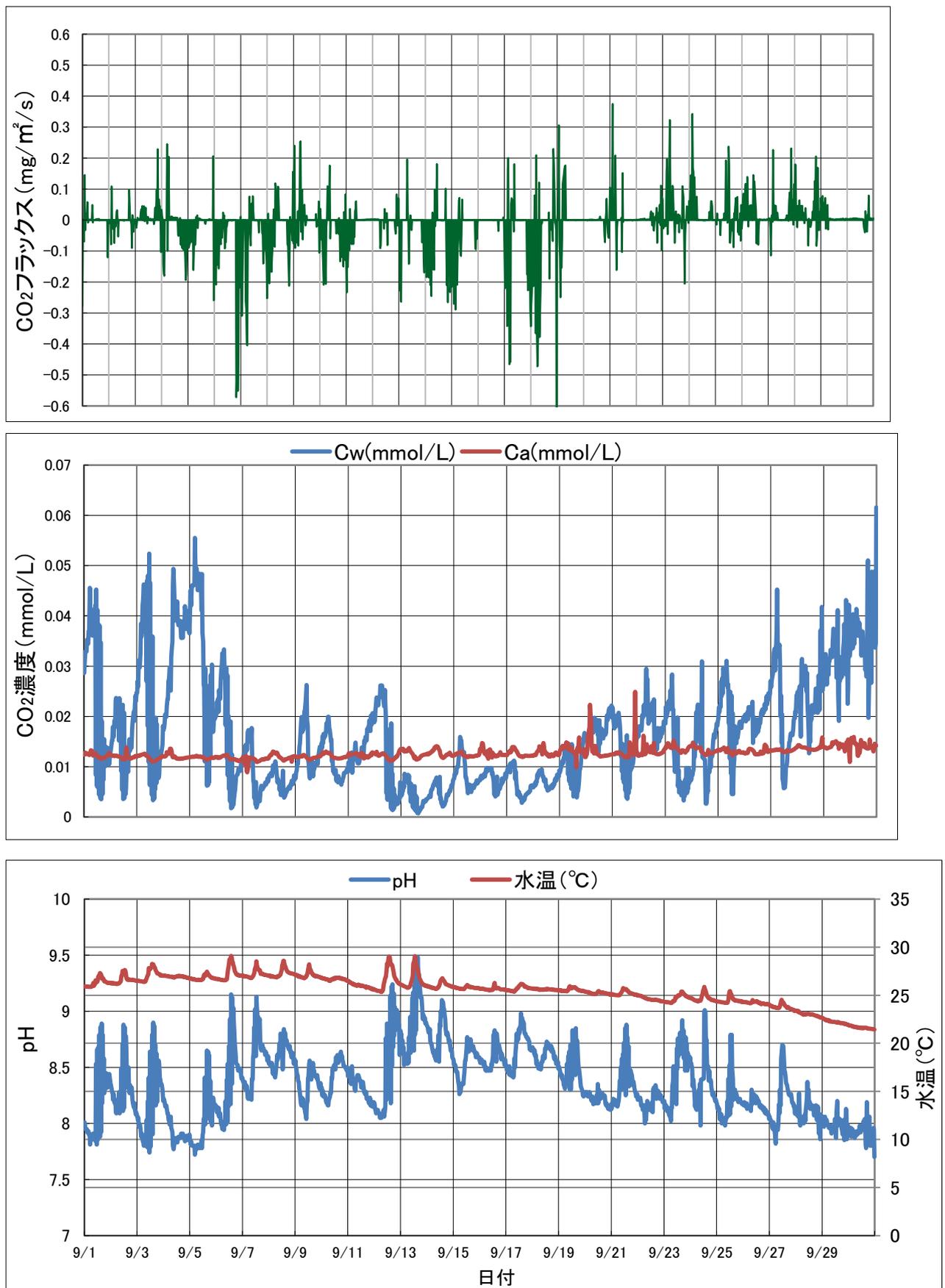


図 4.(i) 2008 年 9 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

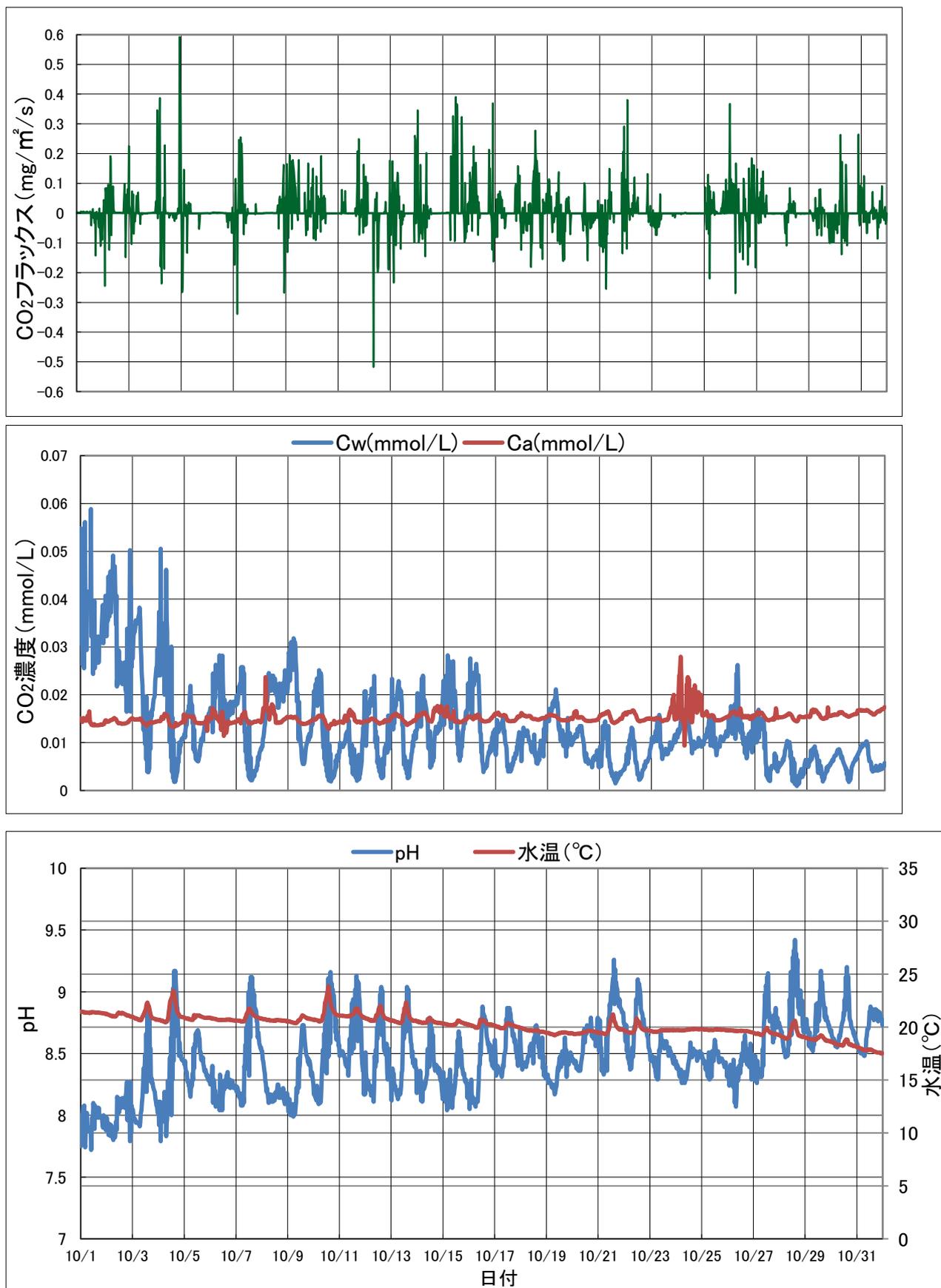


図 4.(j) 2008 年 10 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)，各二酸化炭素濃度(中図)，pH 及び水温(下図)である。

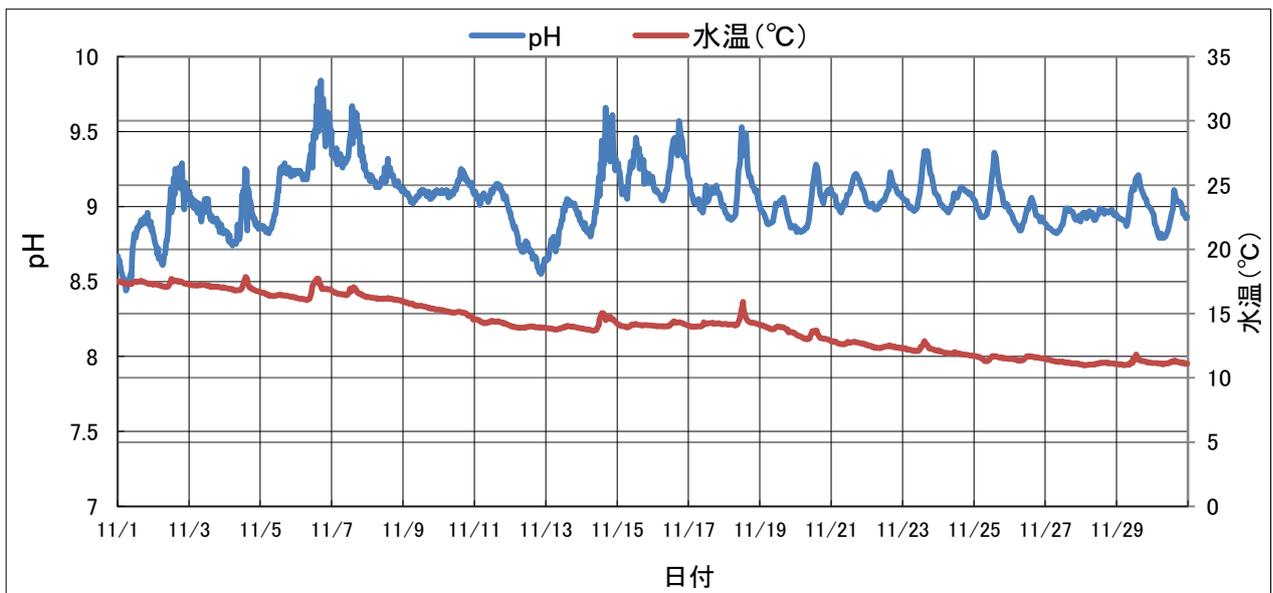
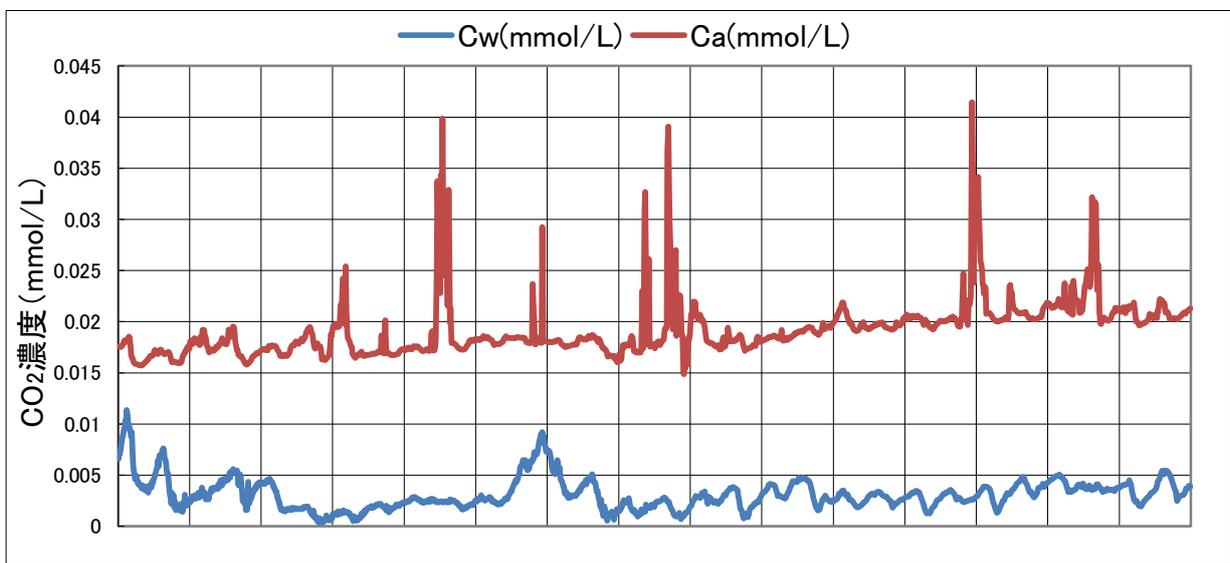
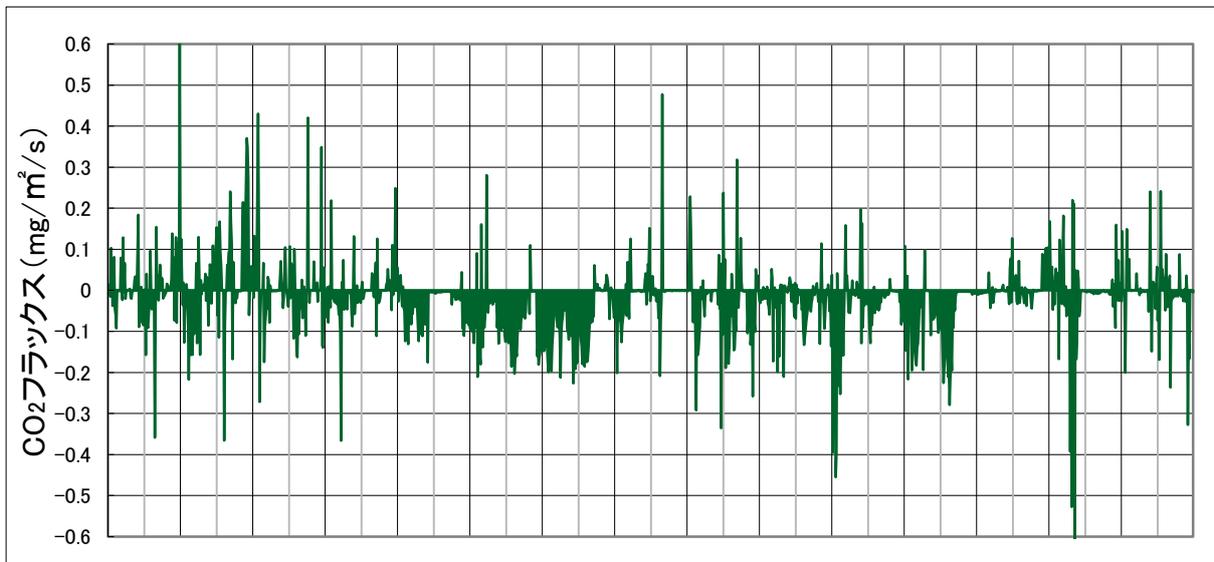


図 4.(k) 2008 年 11 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

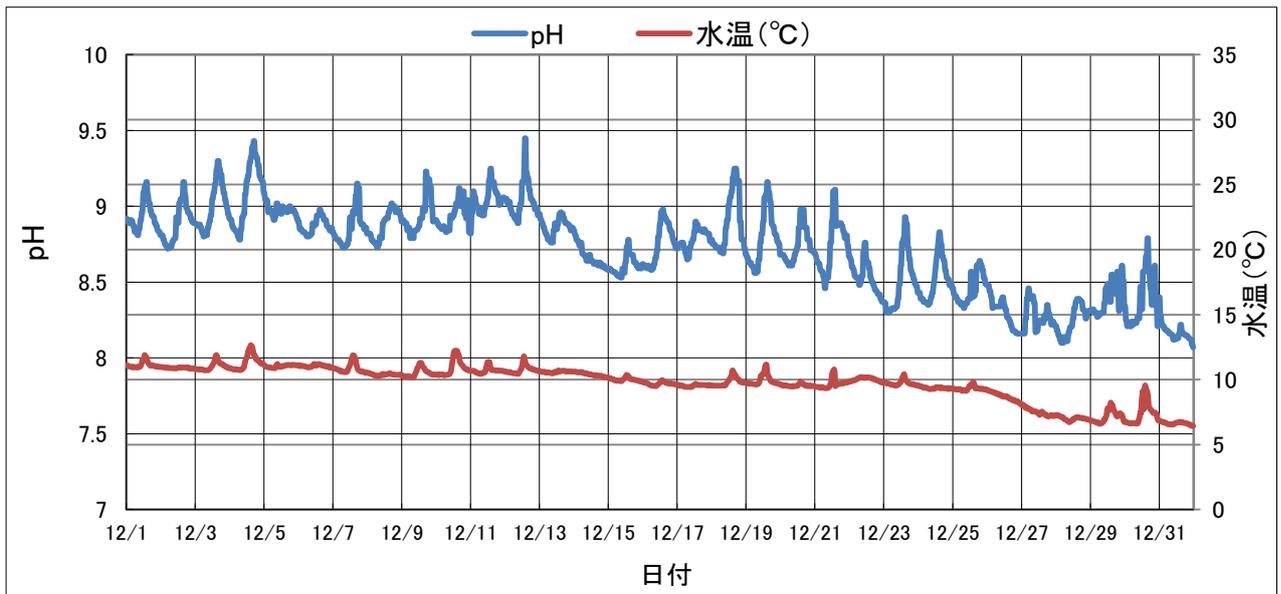
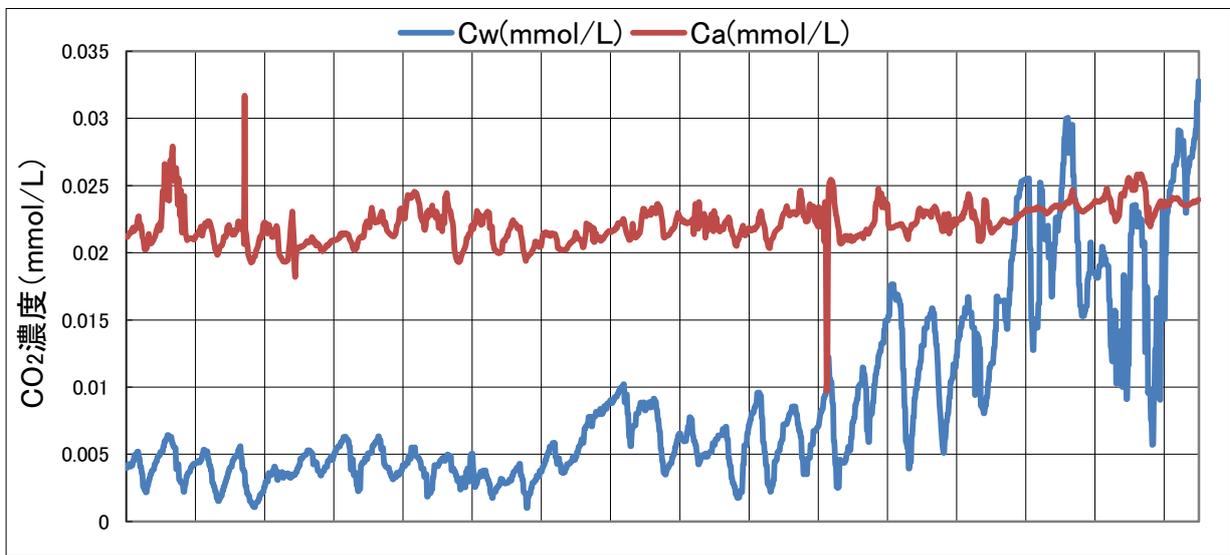
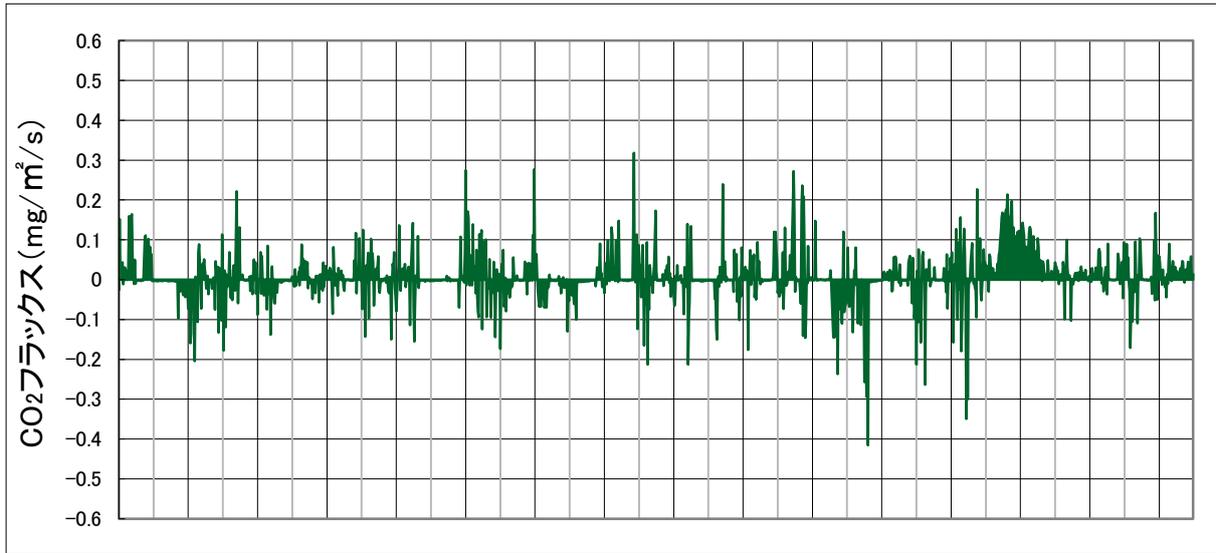


図 4.(1) 2008 年 12 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

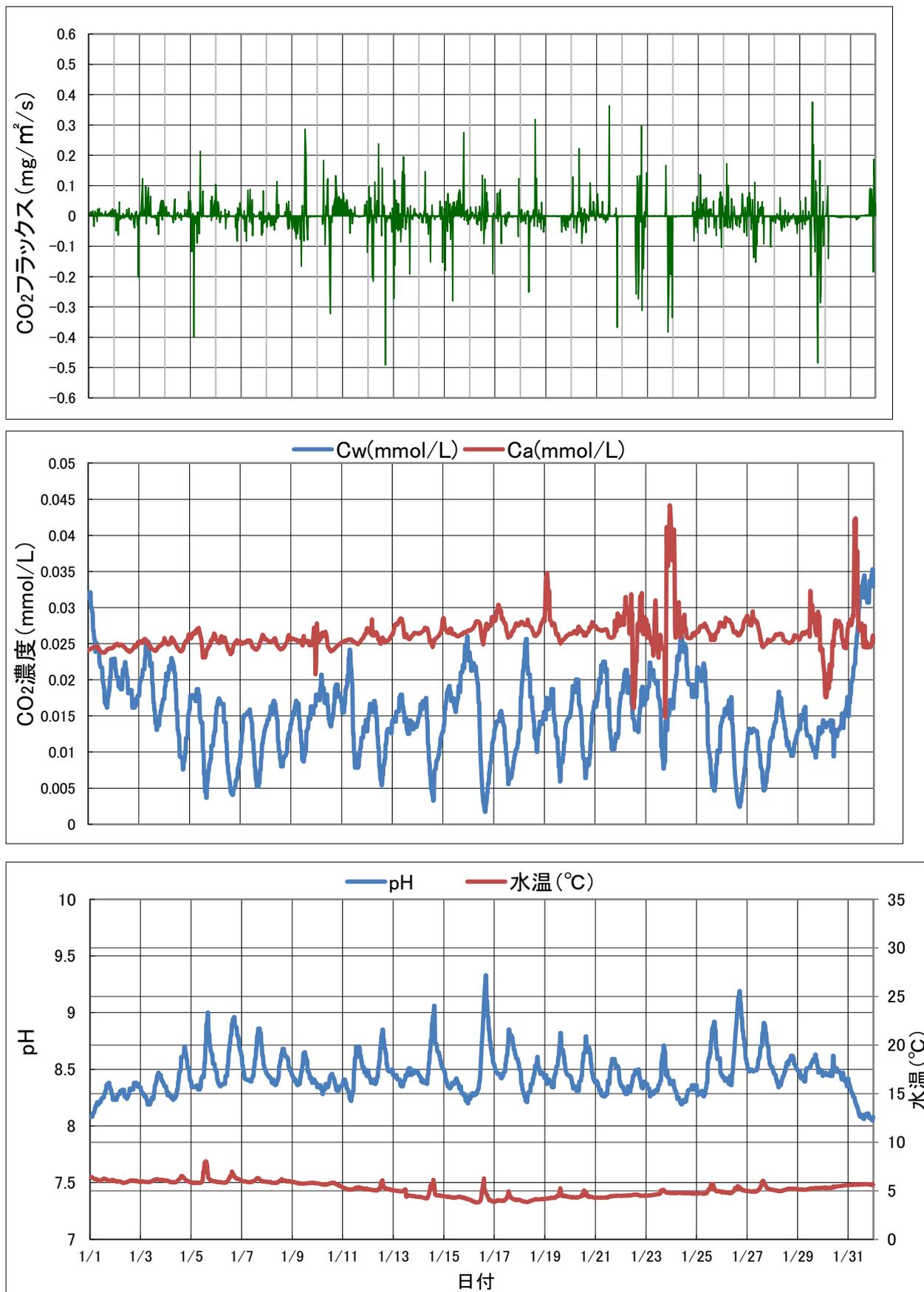


図 5.(a) 2009 年 1 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

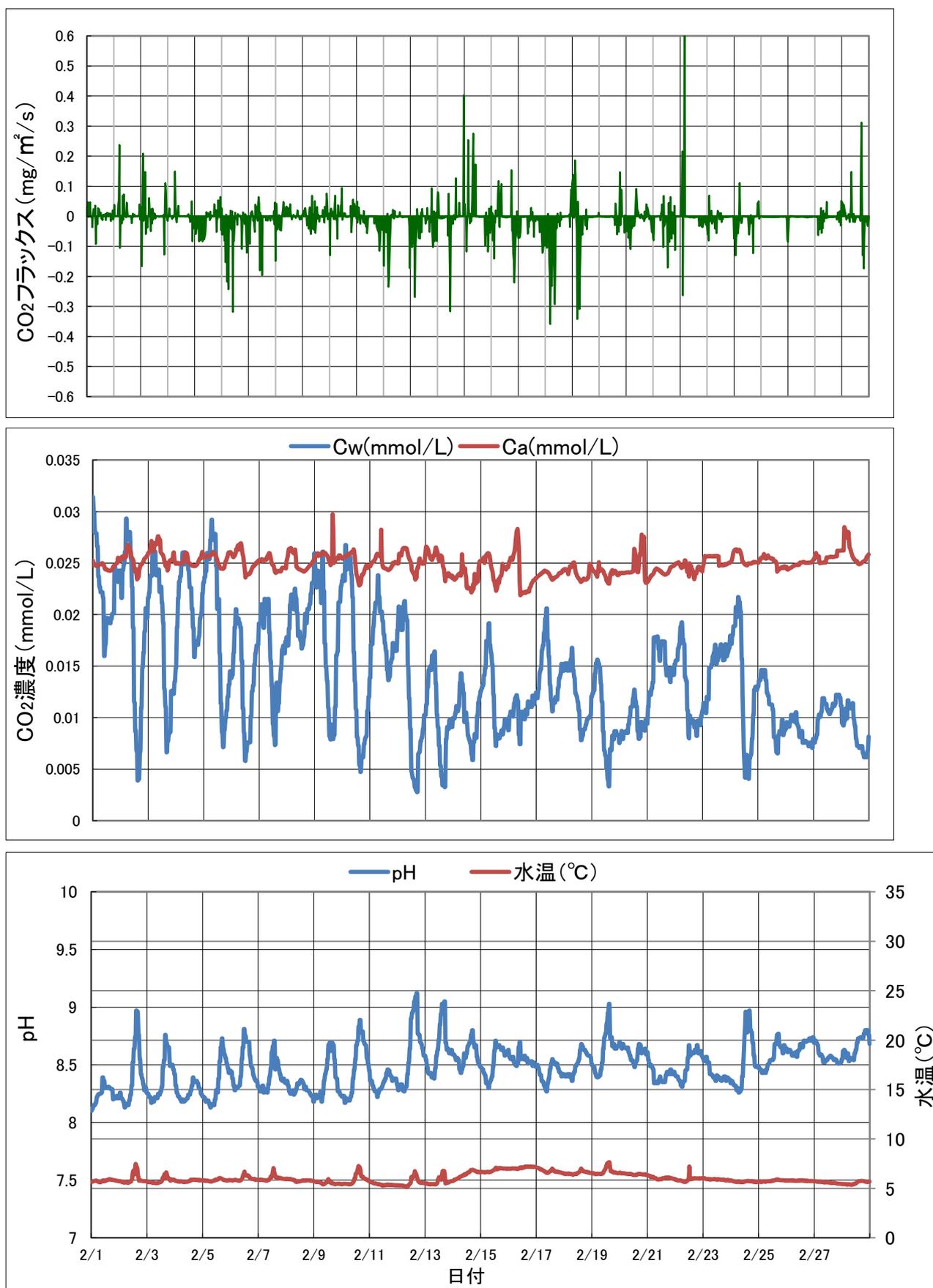


図 5.(b) 2009 年 2 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

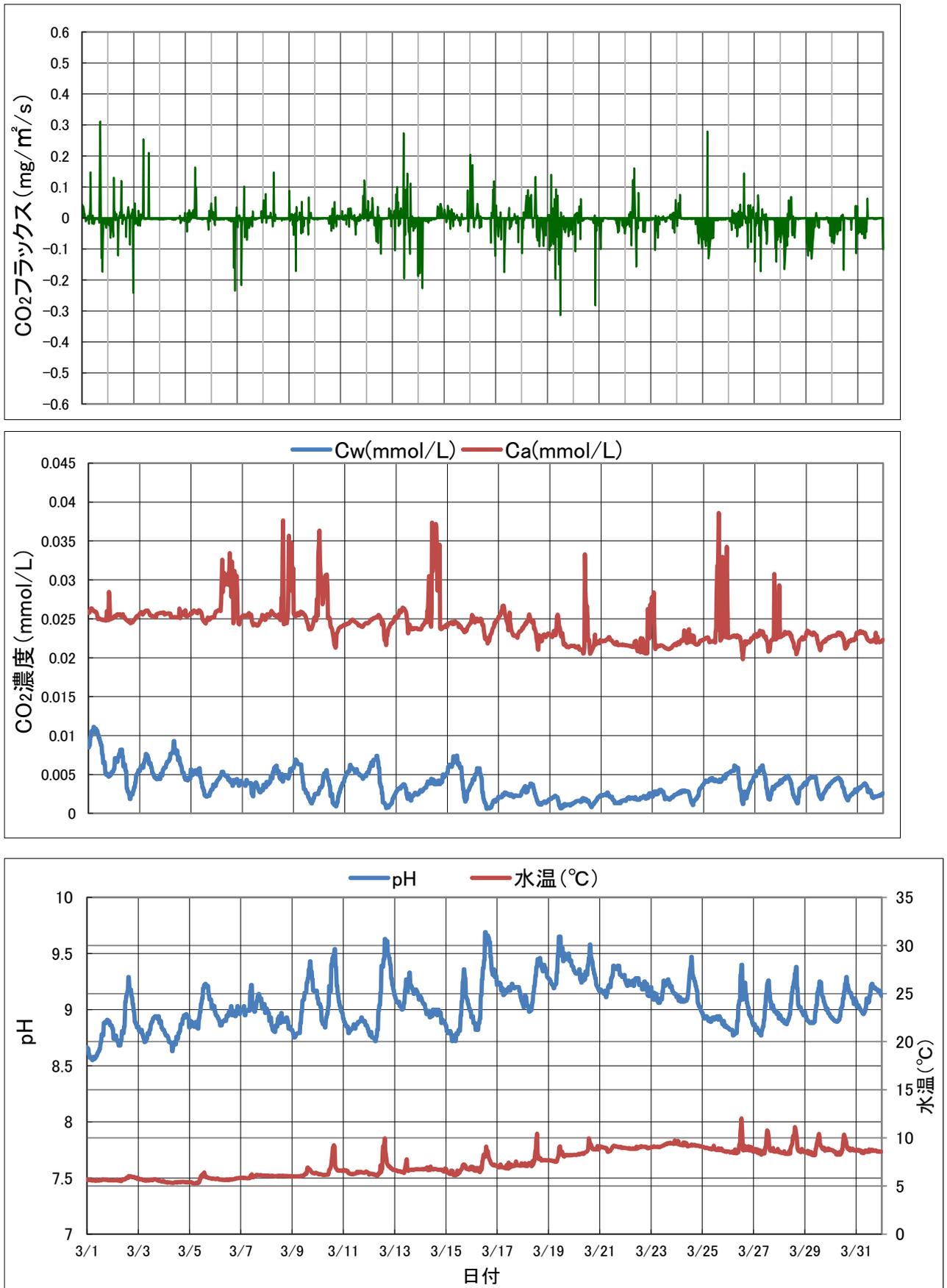


図 5.(c) 2009 年 3 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

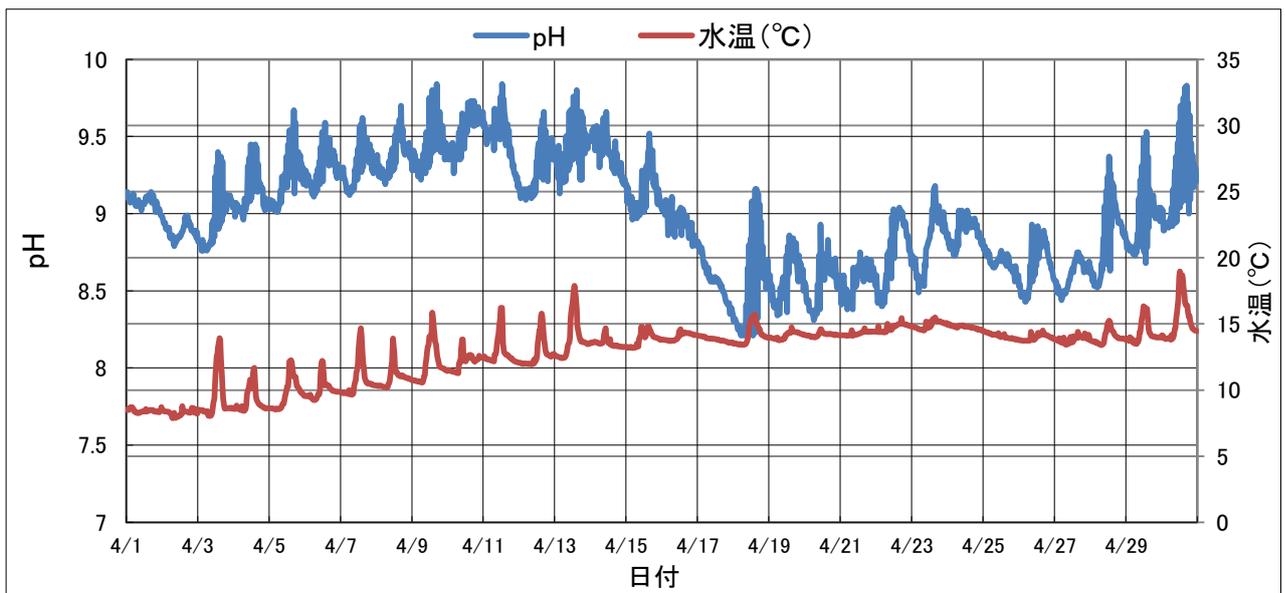
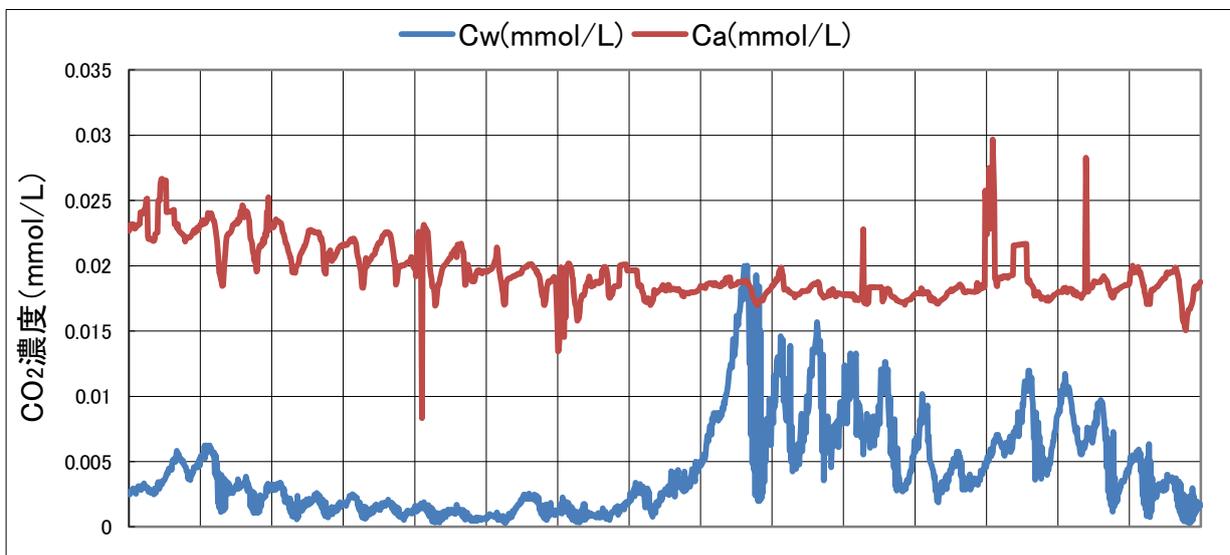
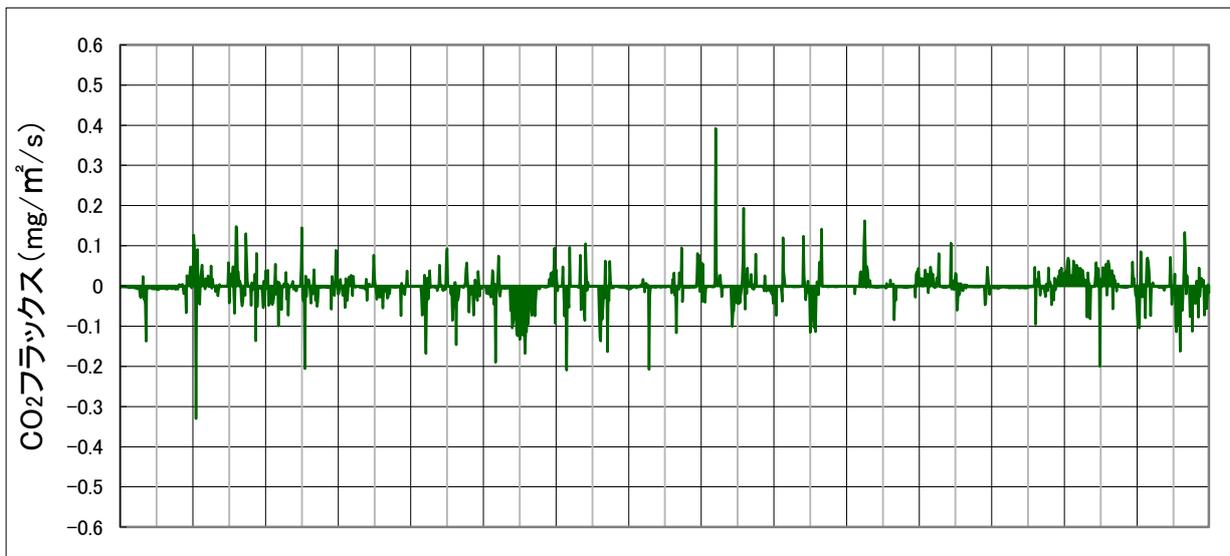


図 5.(d) 2009 年 4 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

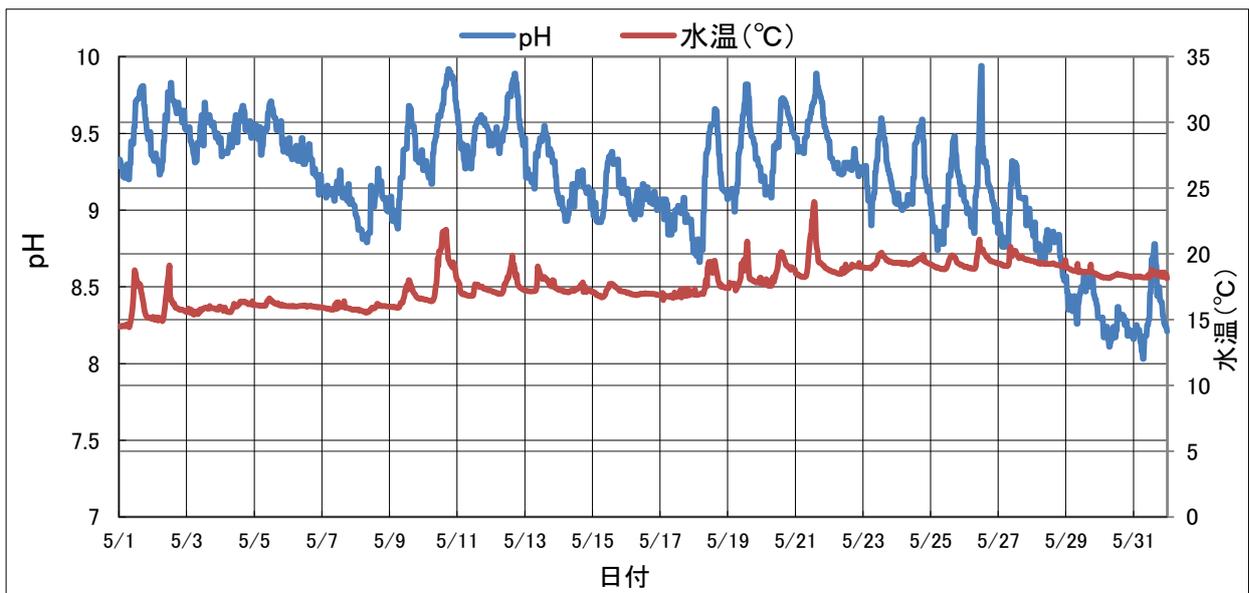
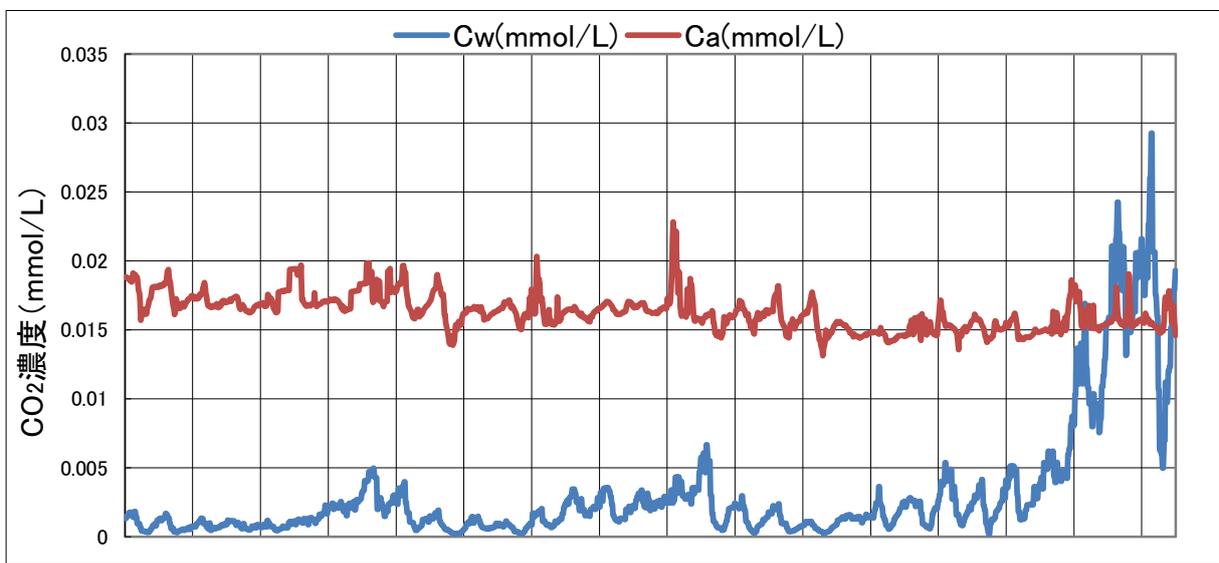
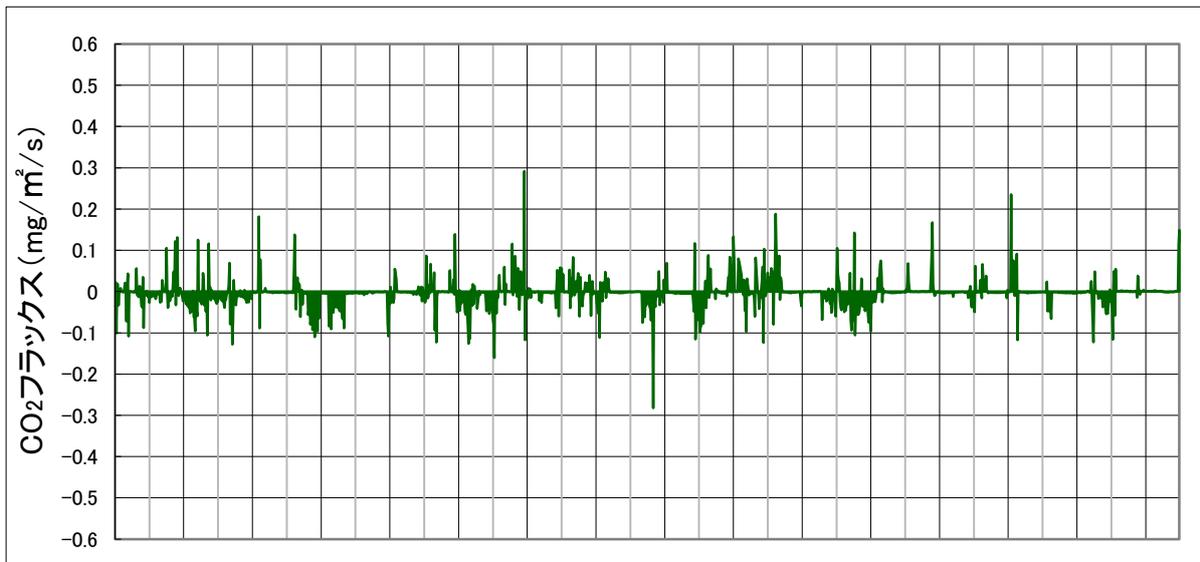


図 5.(e) 2009 年 5 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

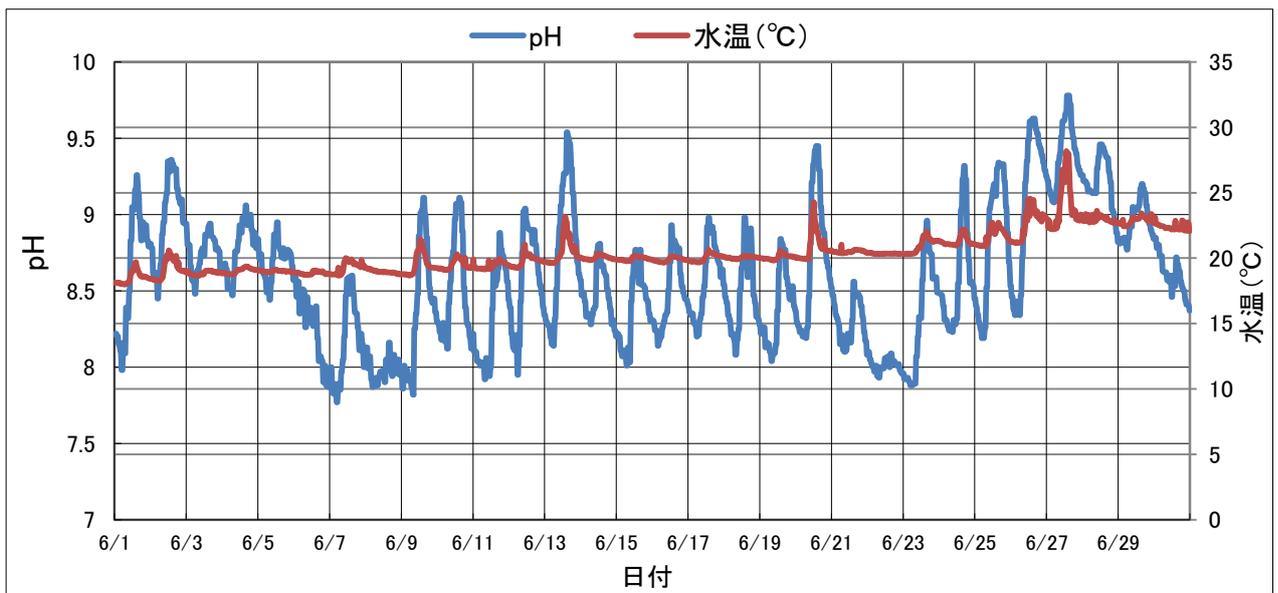
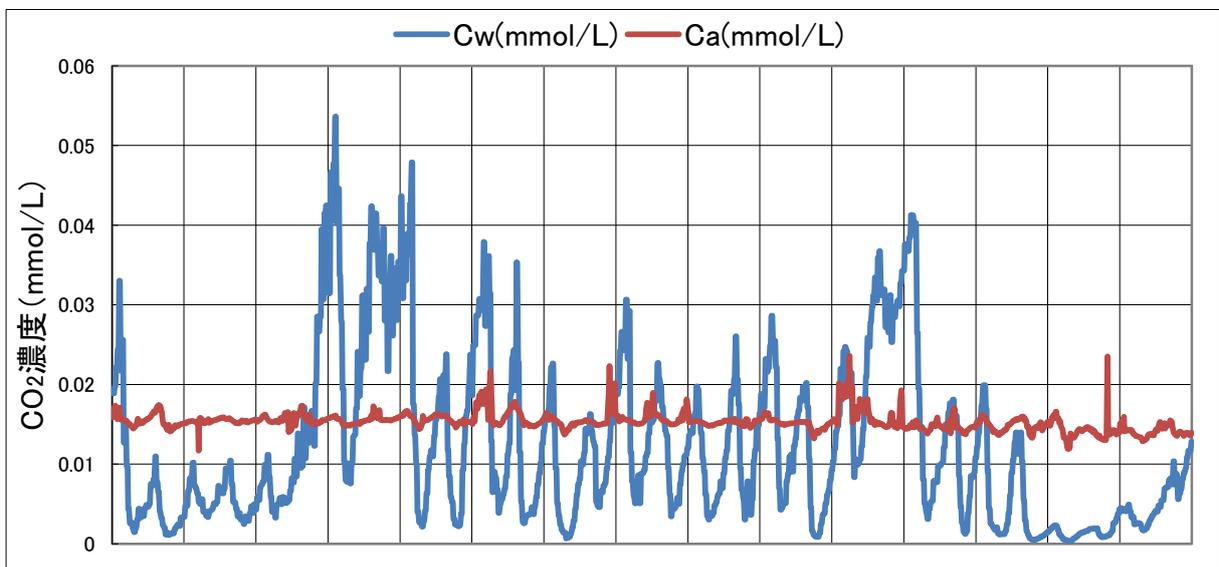
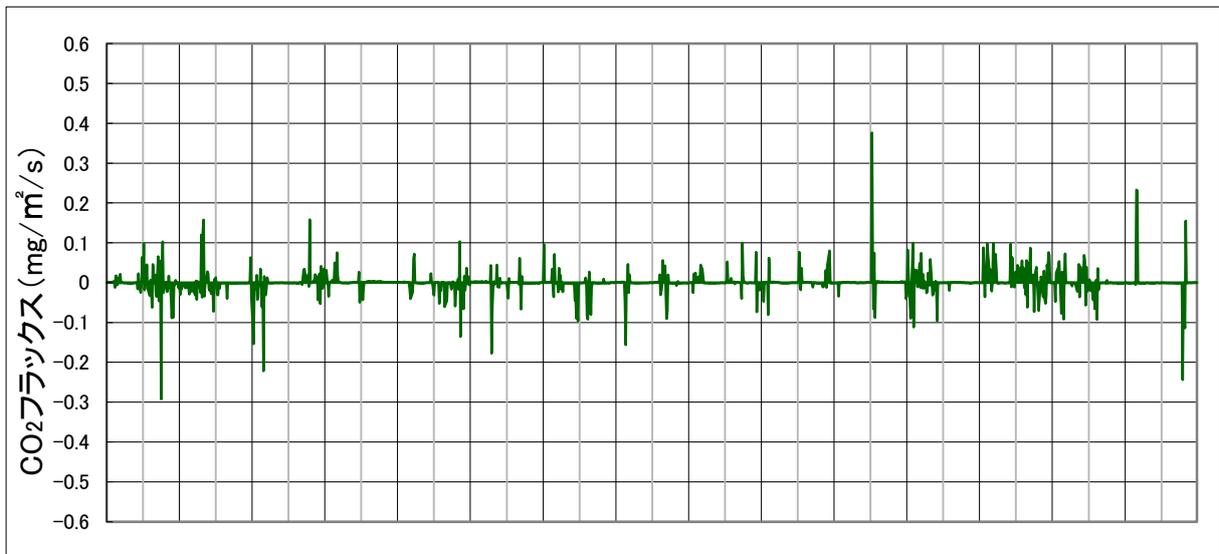


図 5.(f) 2009 年 6 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

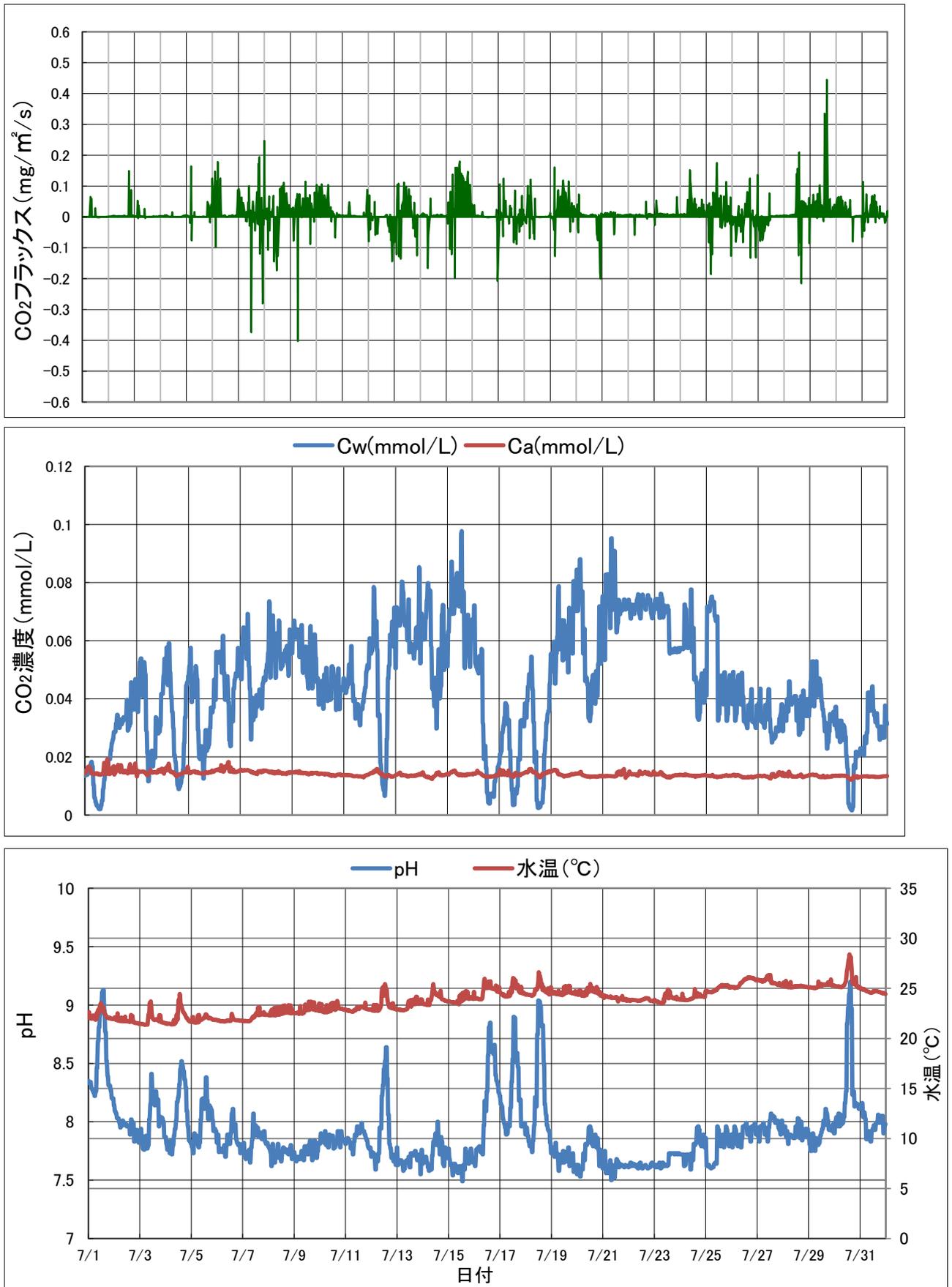


図 5.(g) 2009 年 7 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

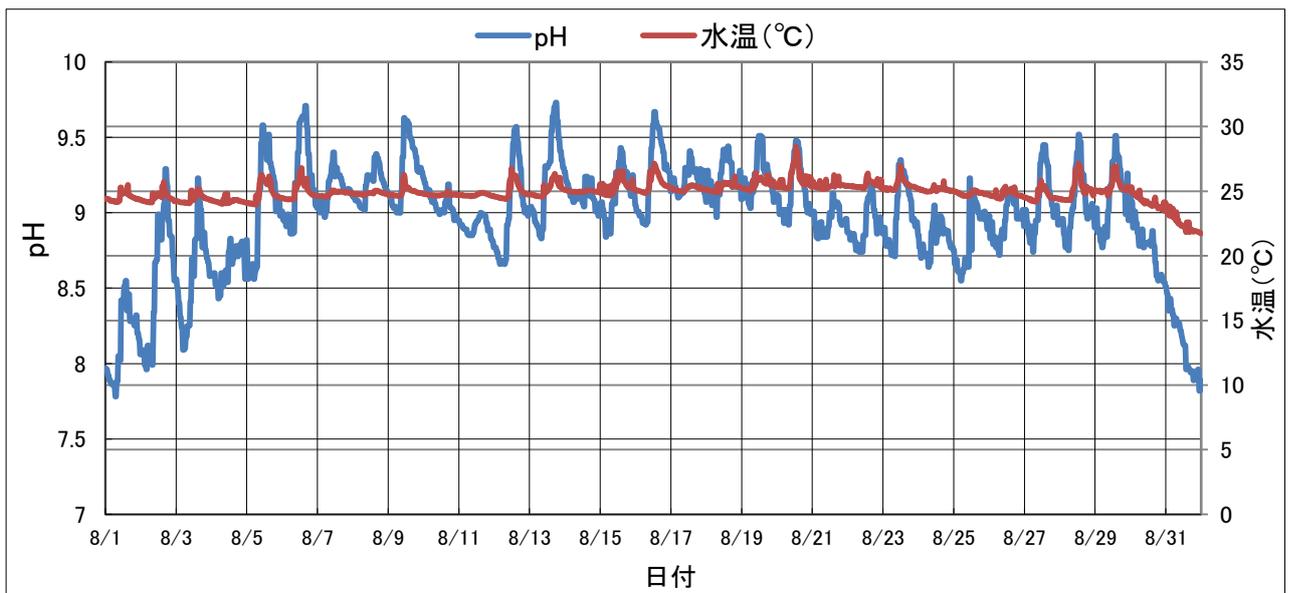
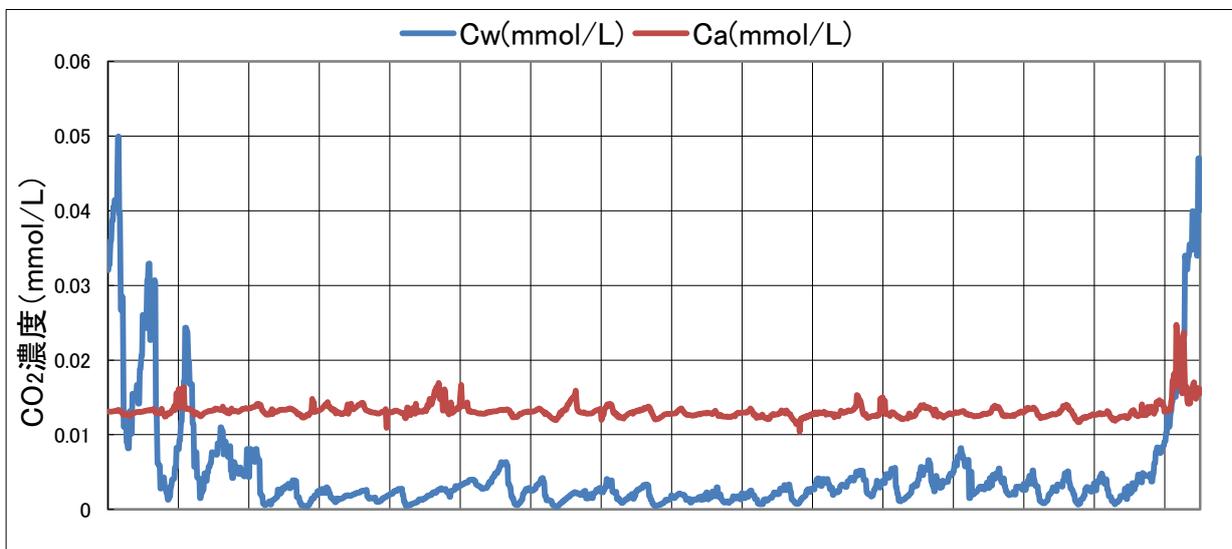
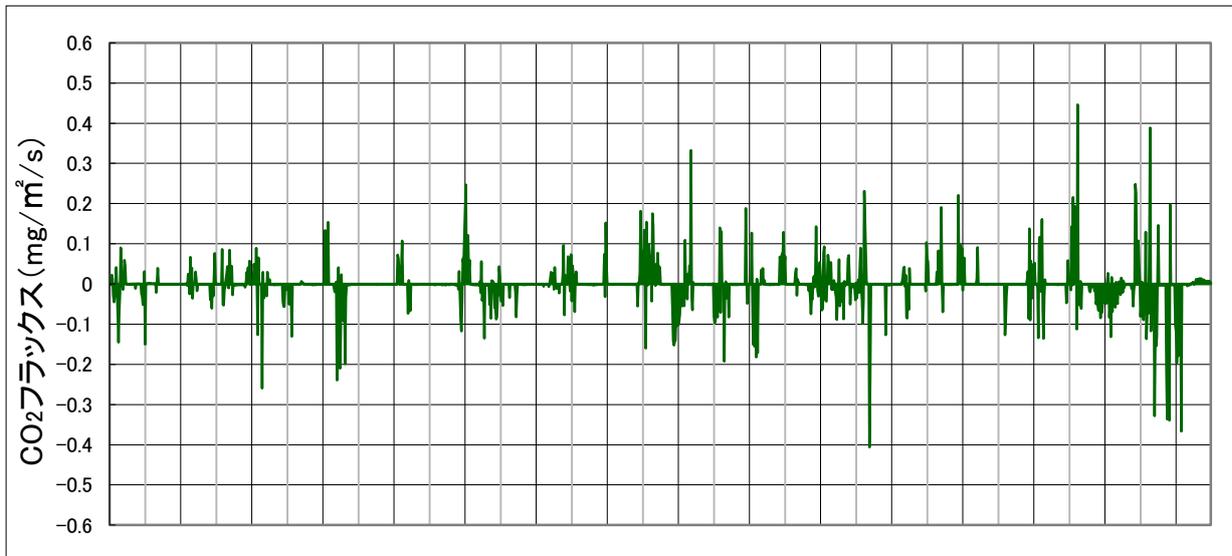


図 5.(h) 2009 年 8 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

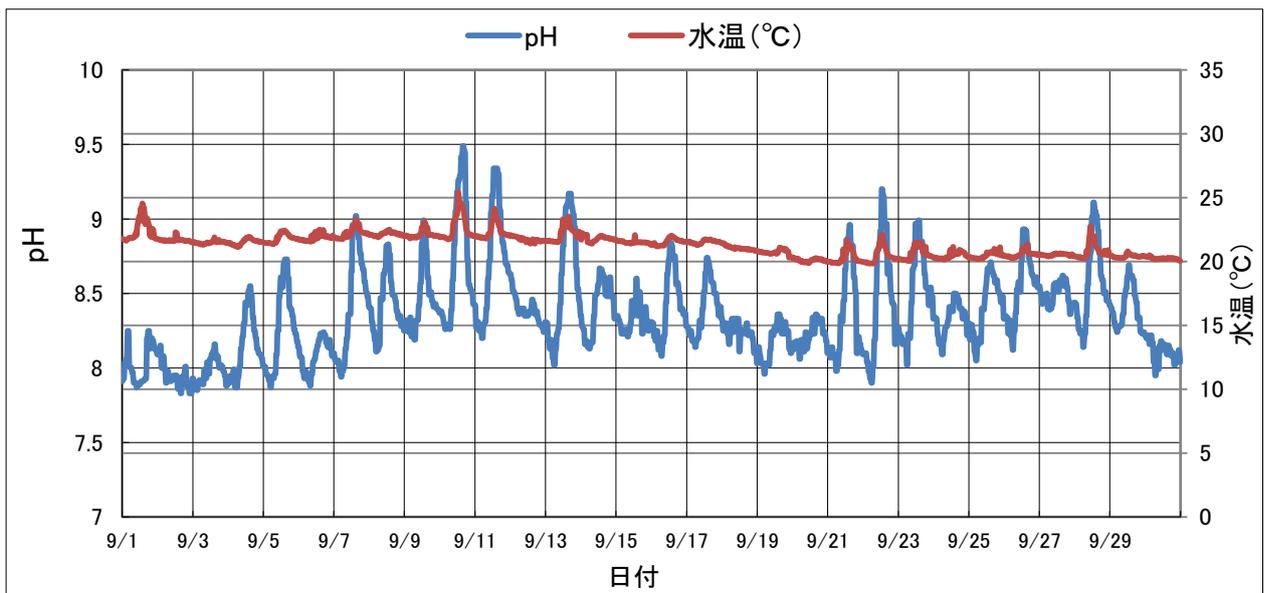
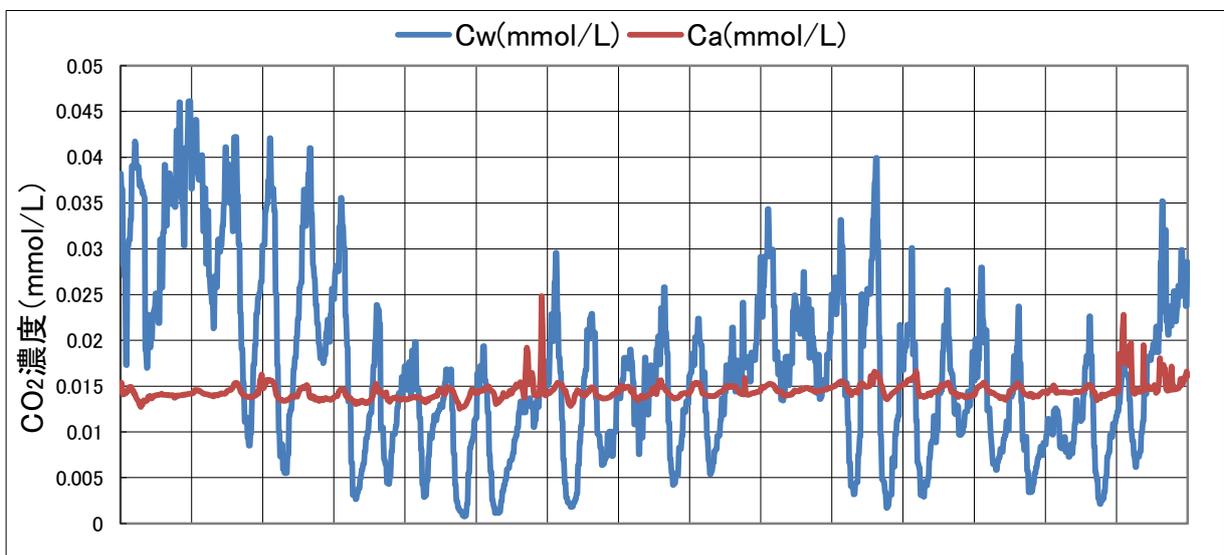
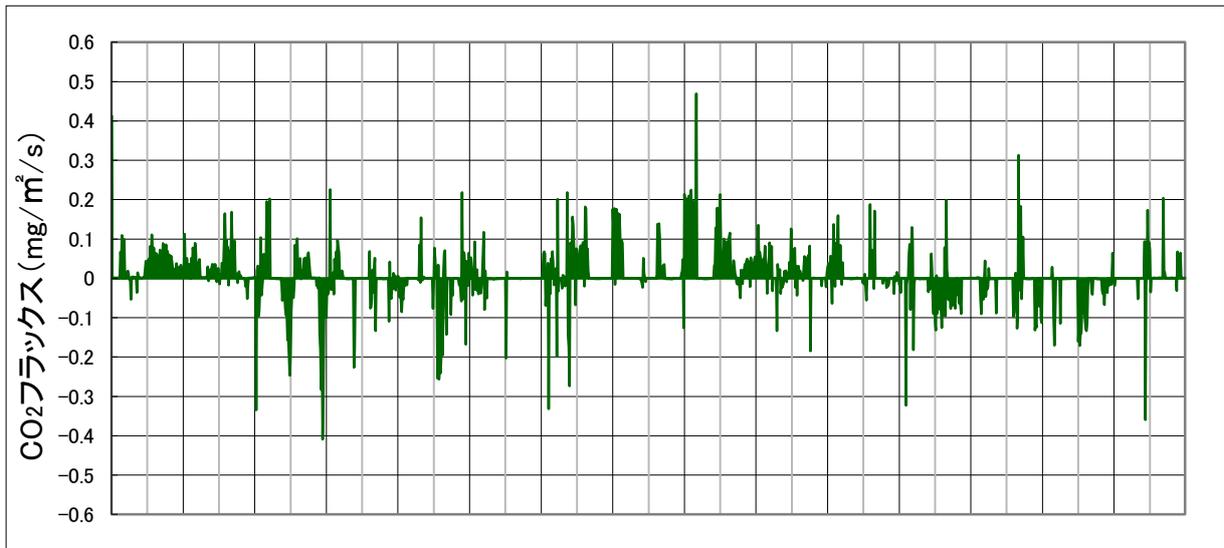


図 5.(i) 2009 年 9 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

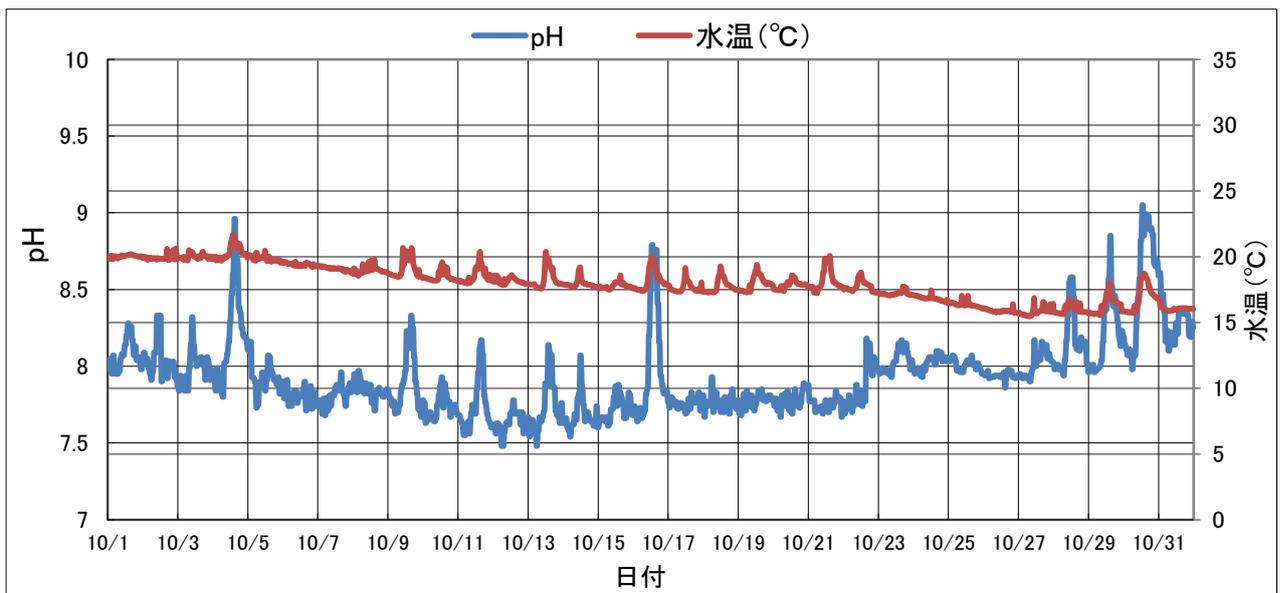
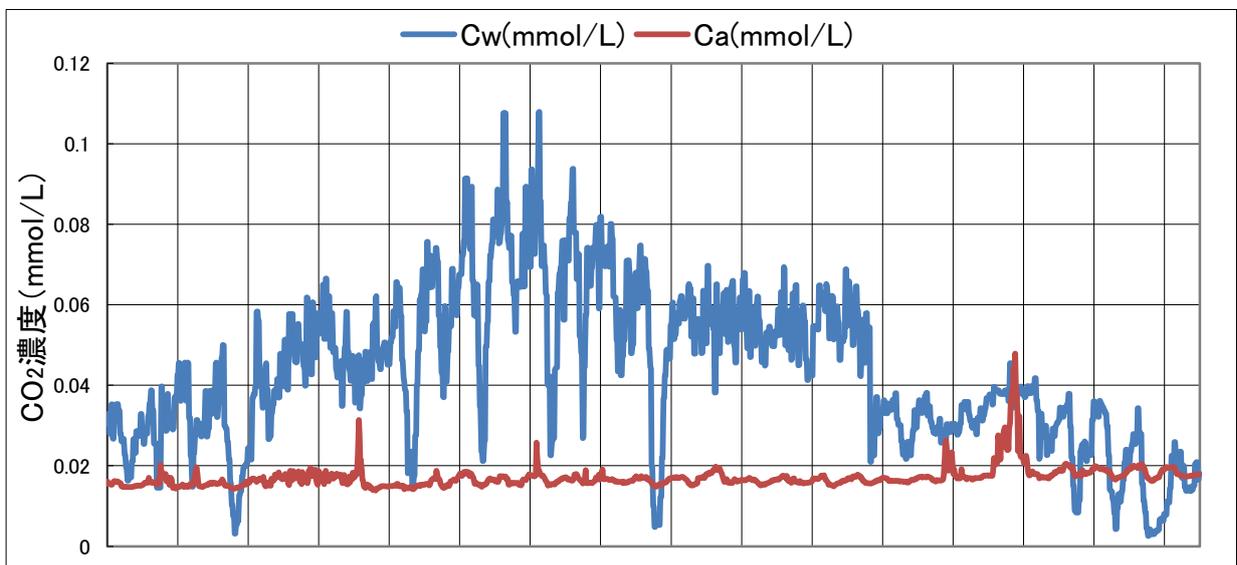
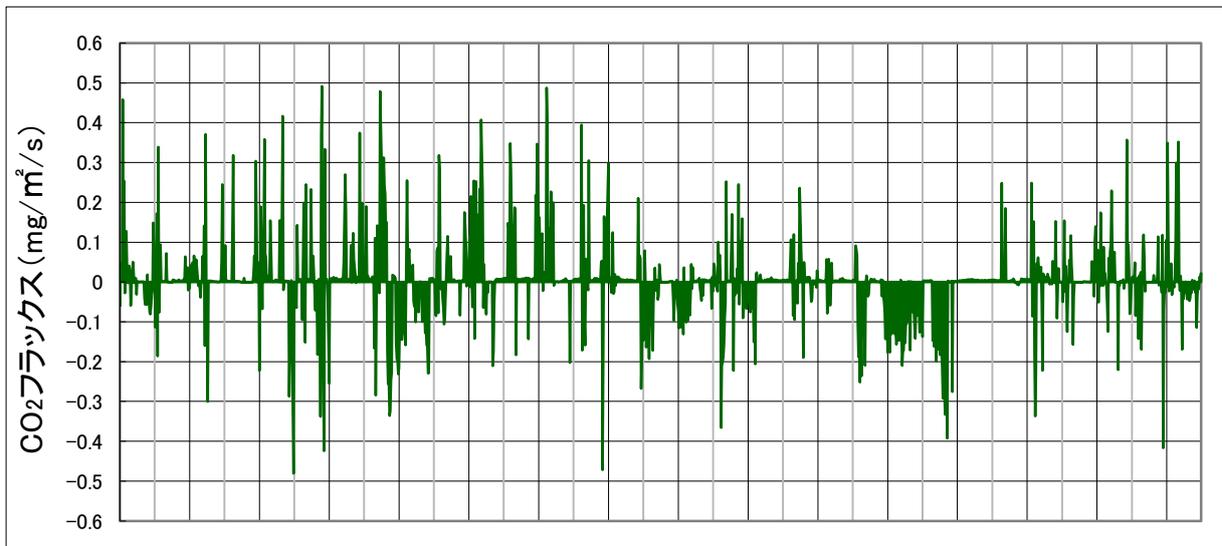


図 5.(j) 2009 年 10 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

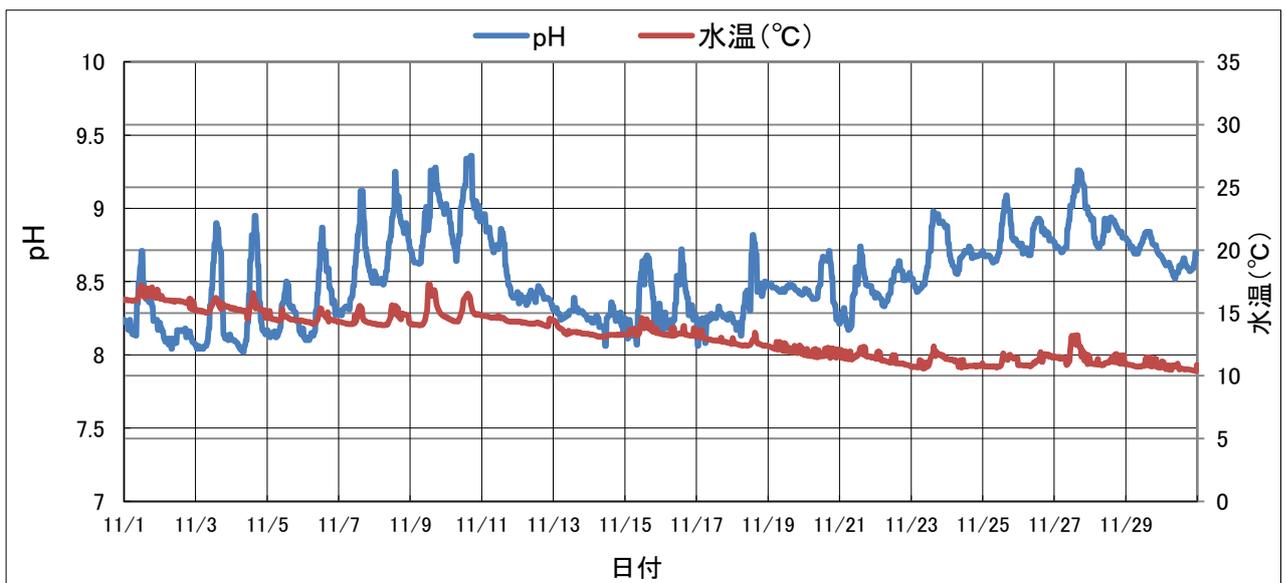
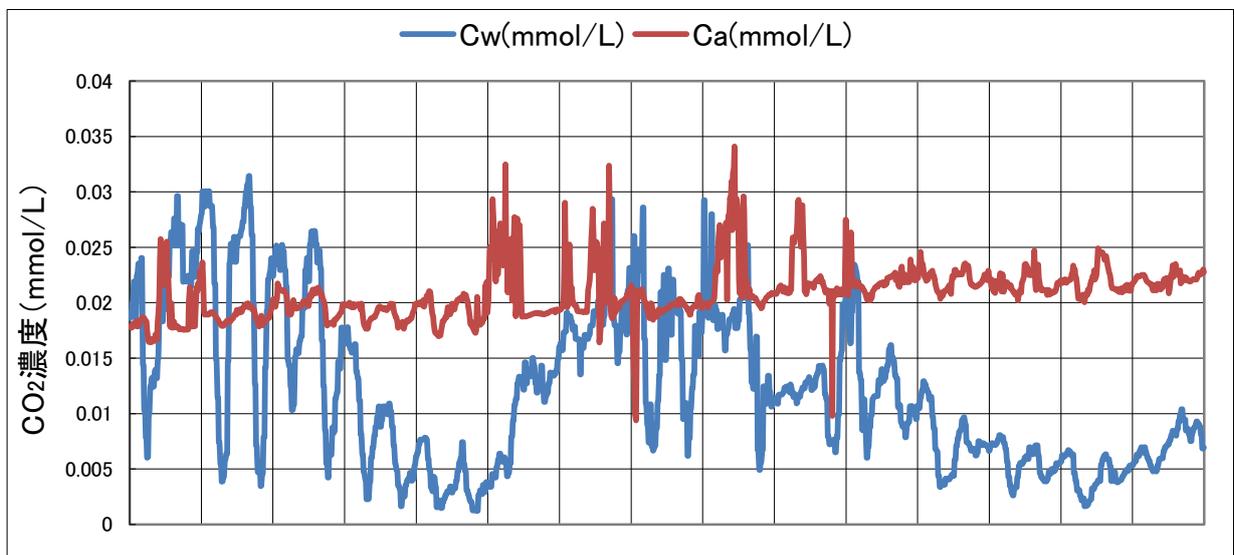
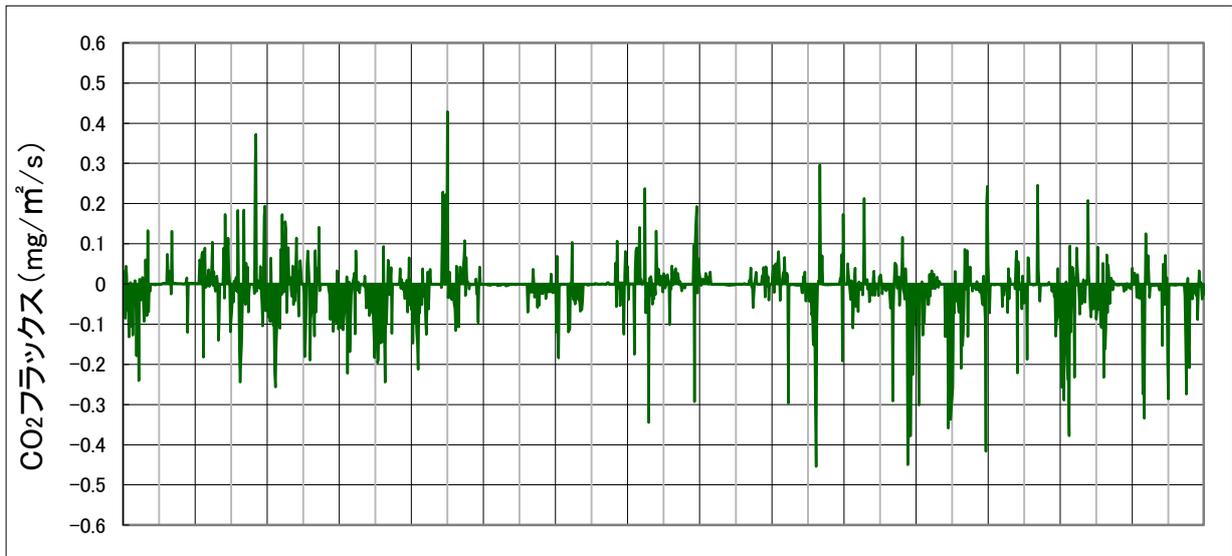


図 5.(k) 2009 年 11 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

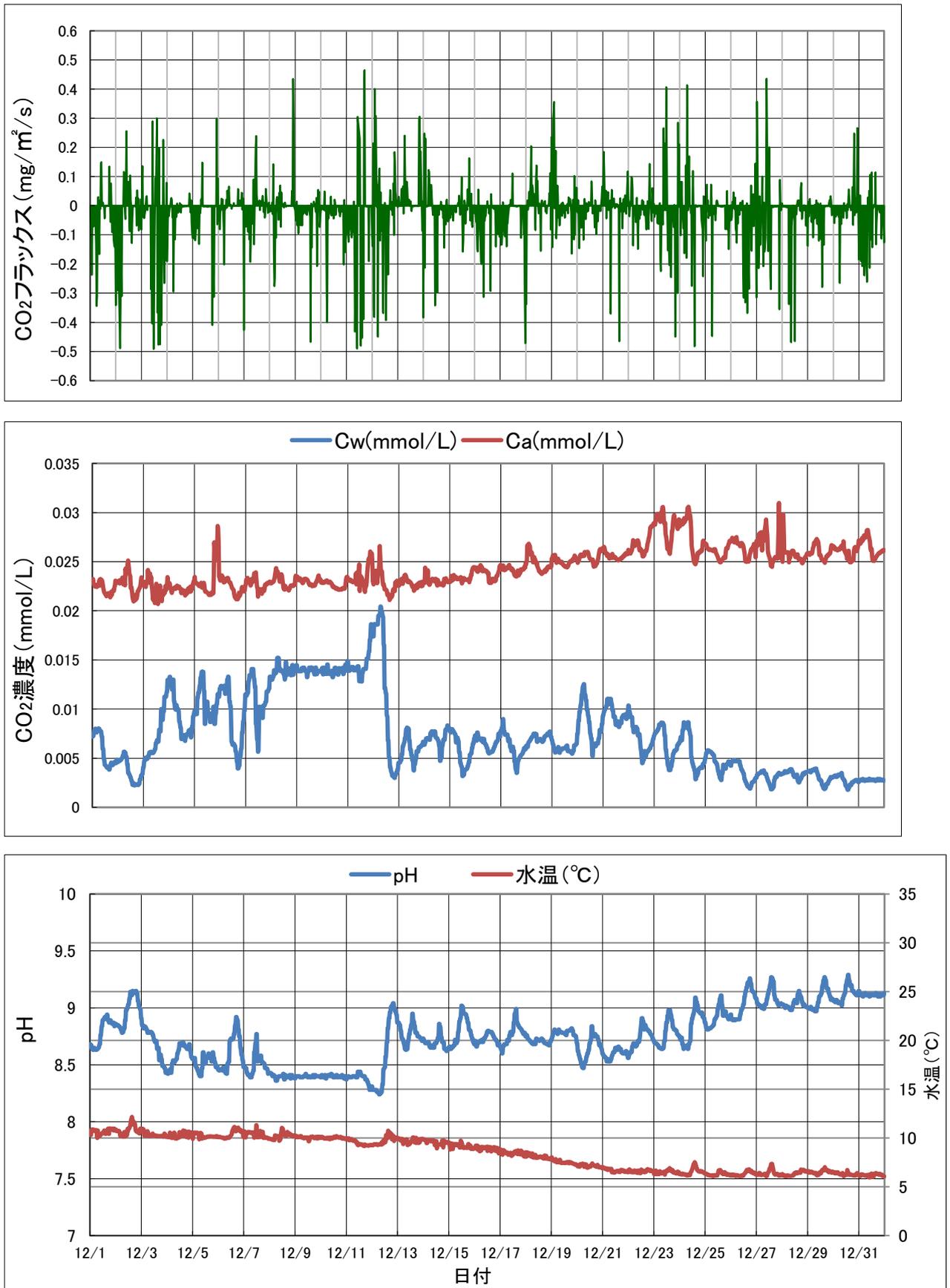


図 5.(1) 2009 年 12 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

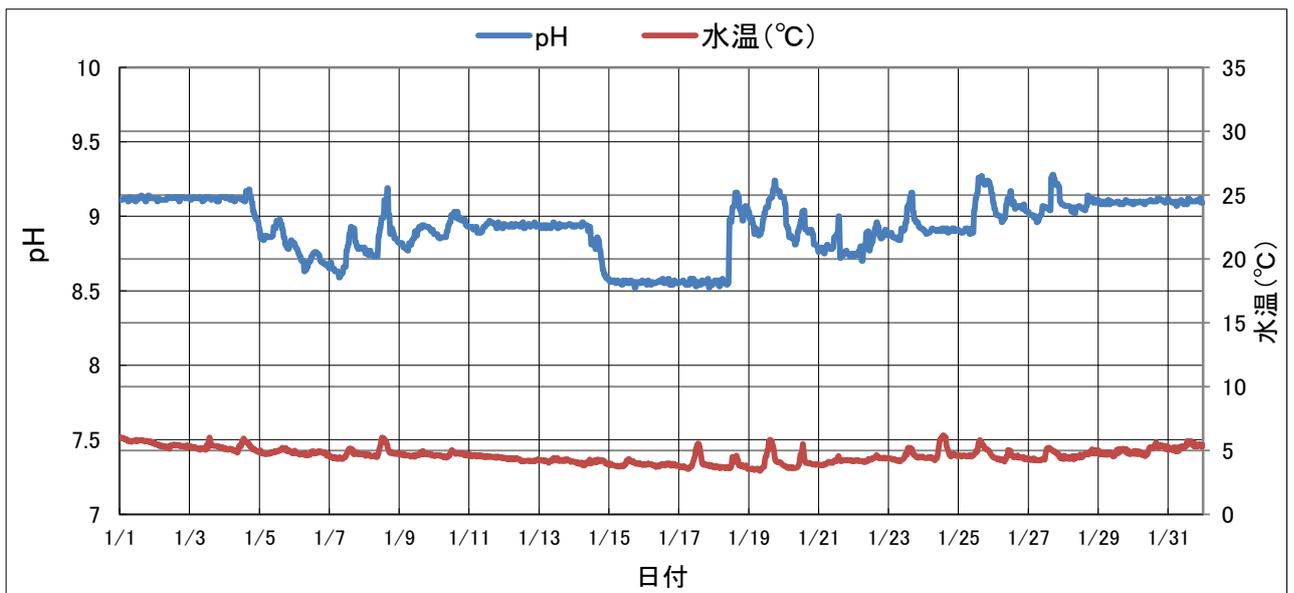
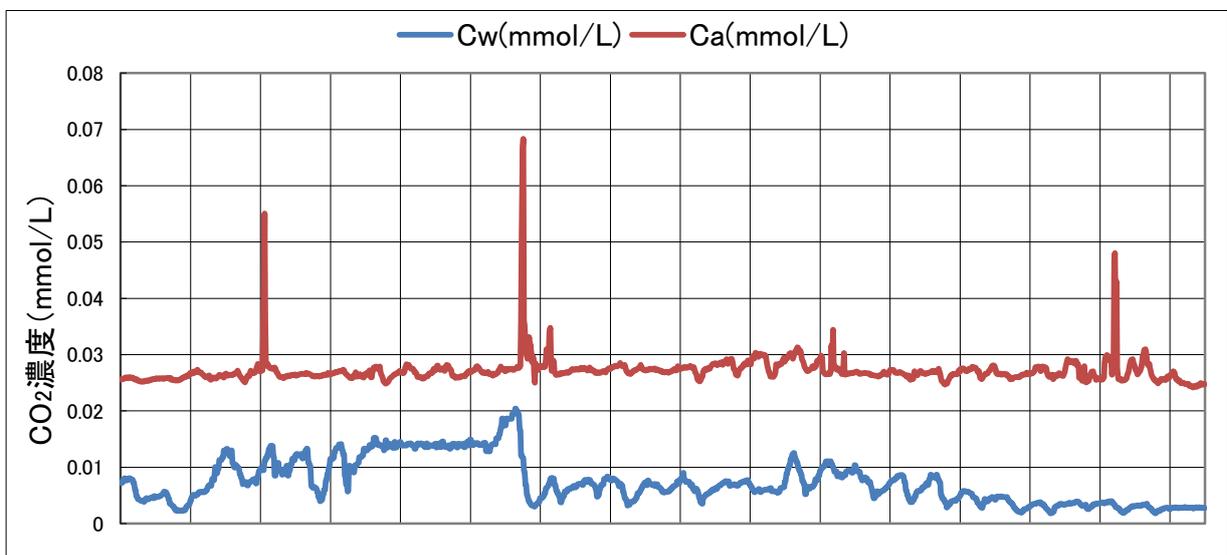
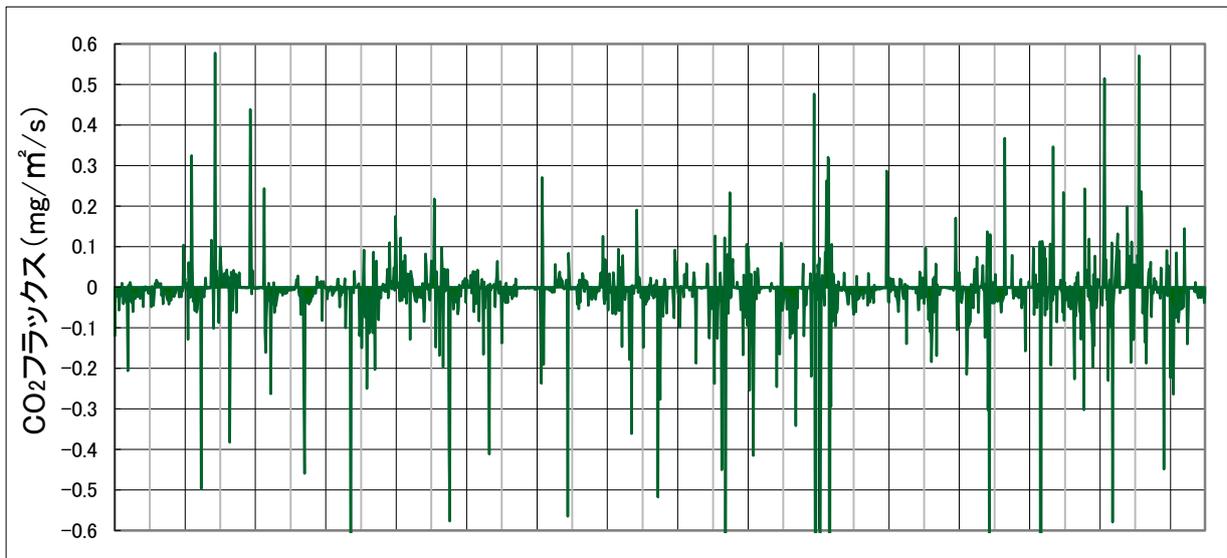


図 6.(a) 2010 年 1 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

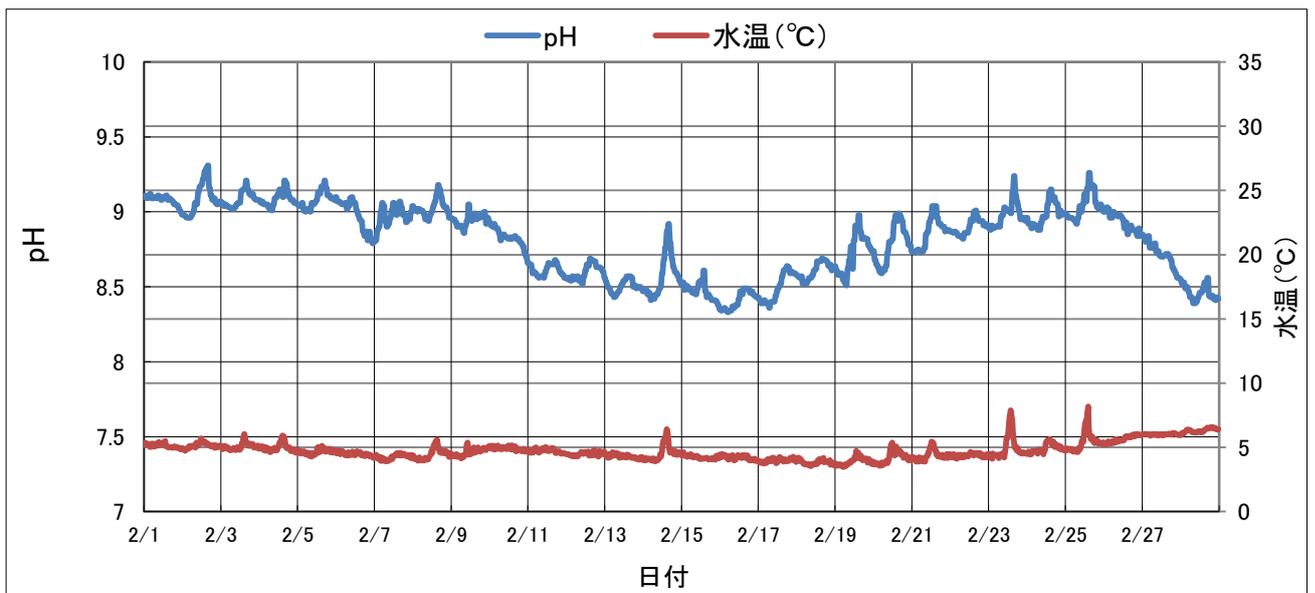
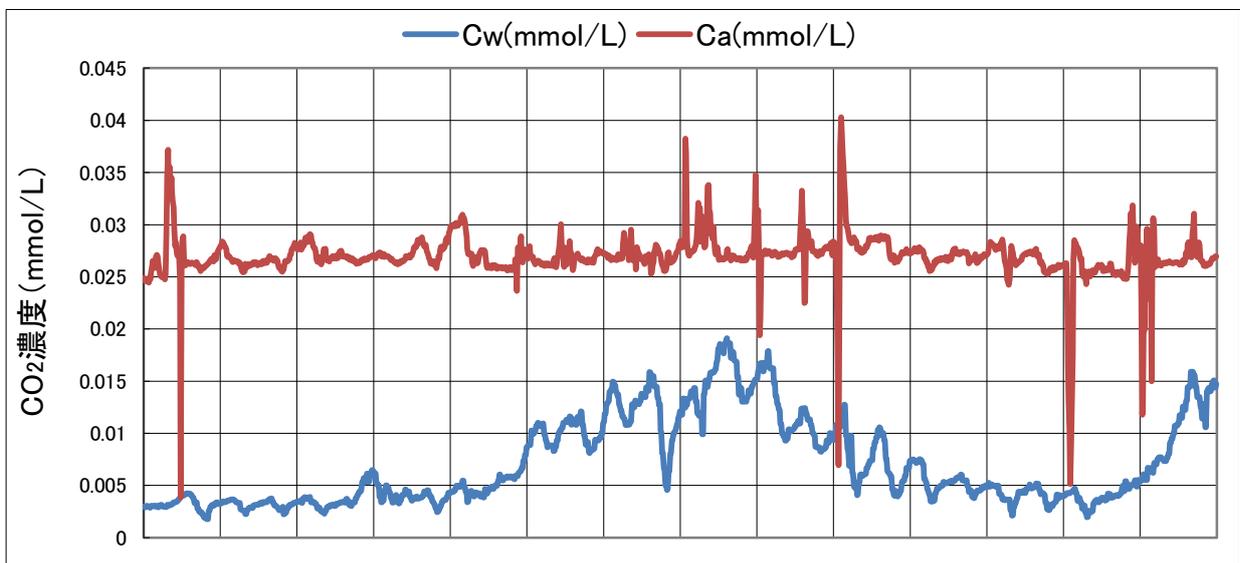
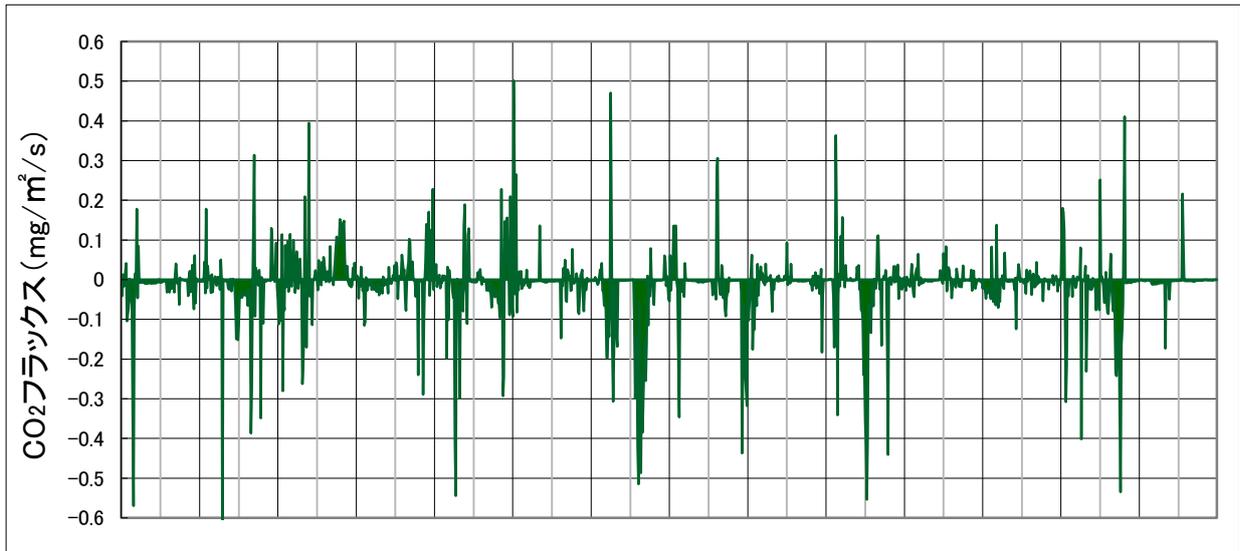


図 6.(b) 2010 年 2 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

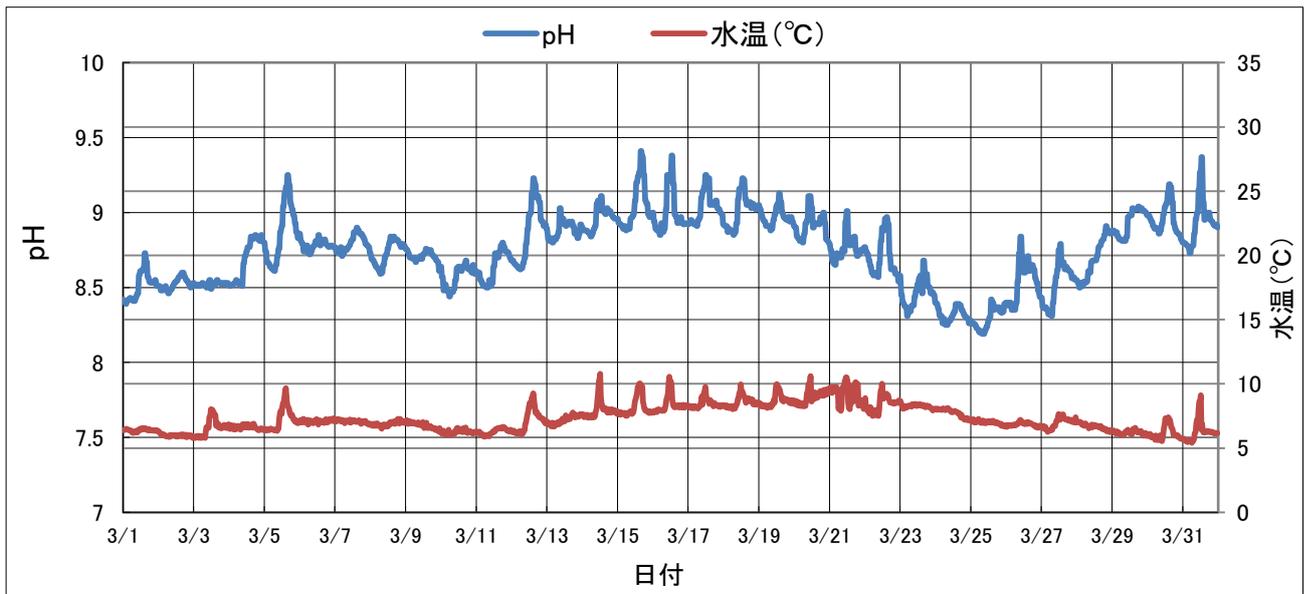
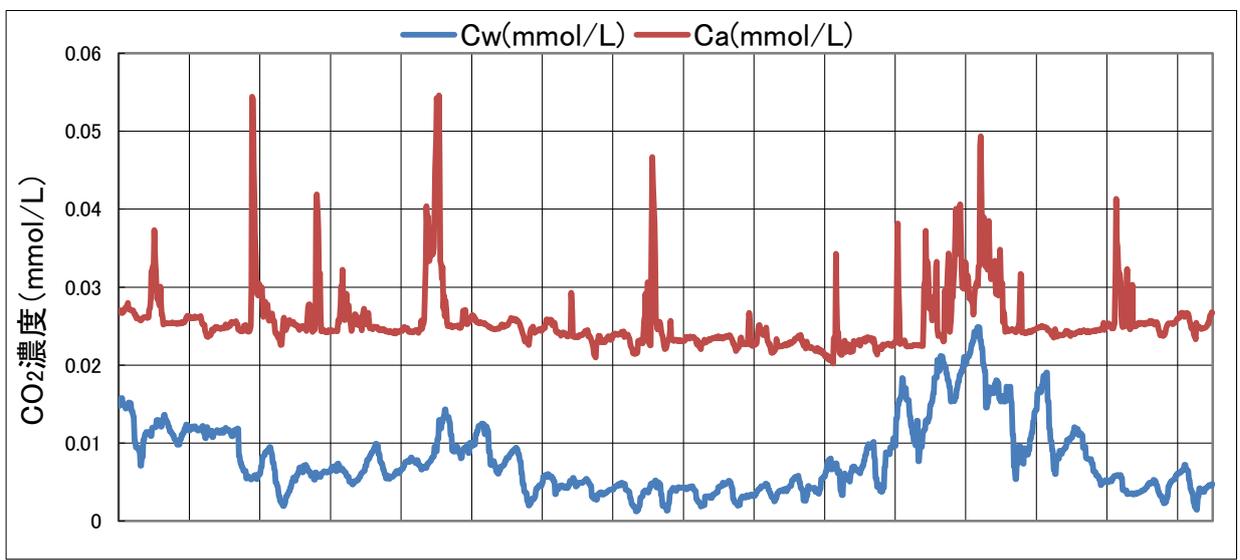
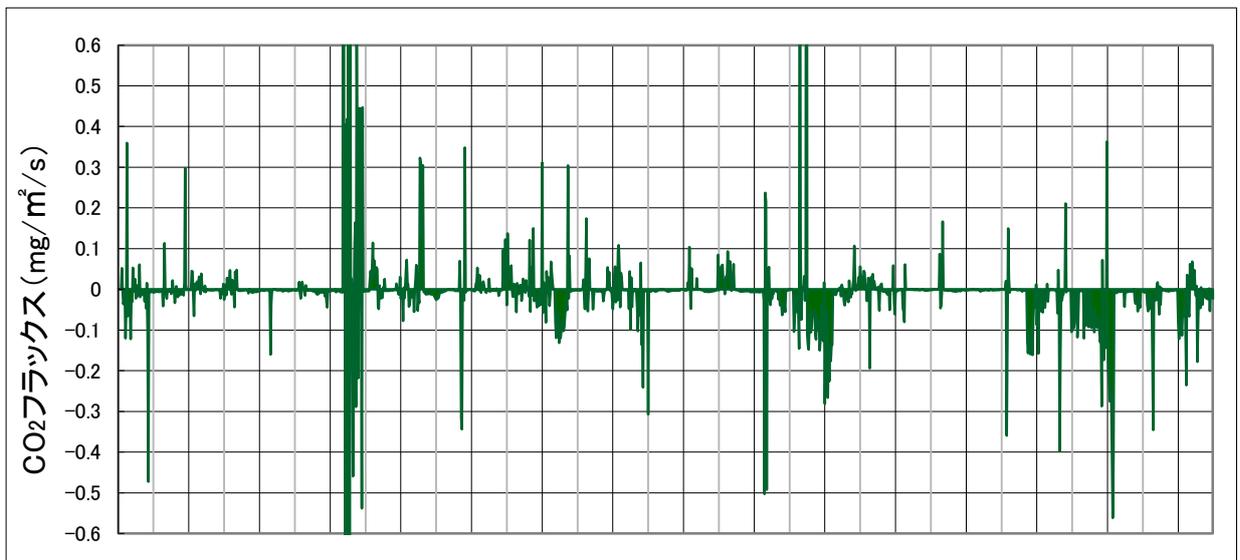


図 6.(c) 2010 年 3 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

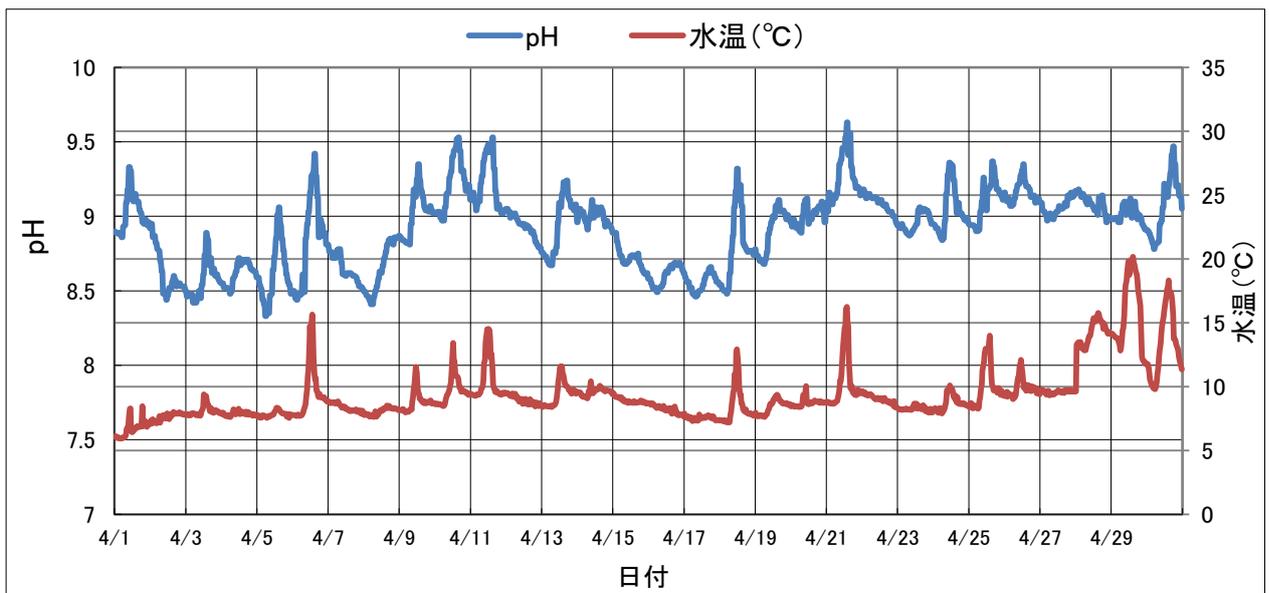
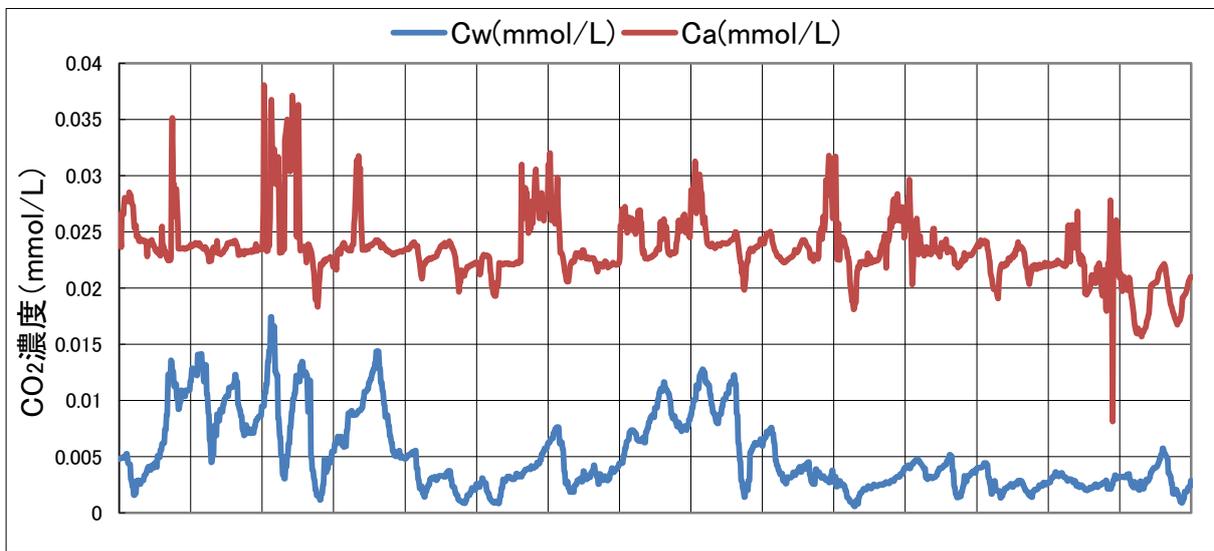
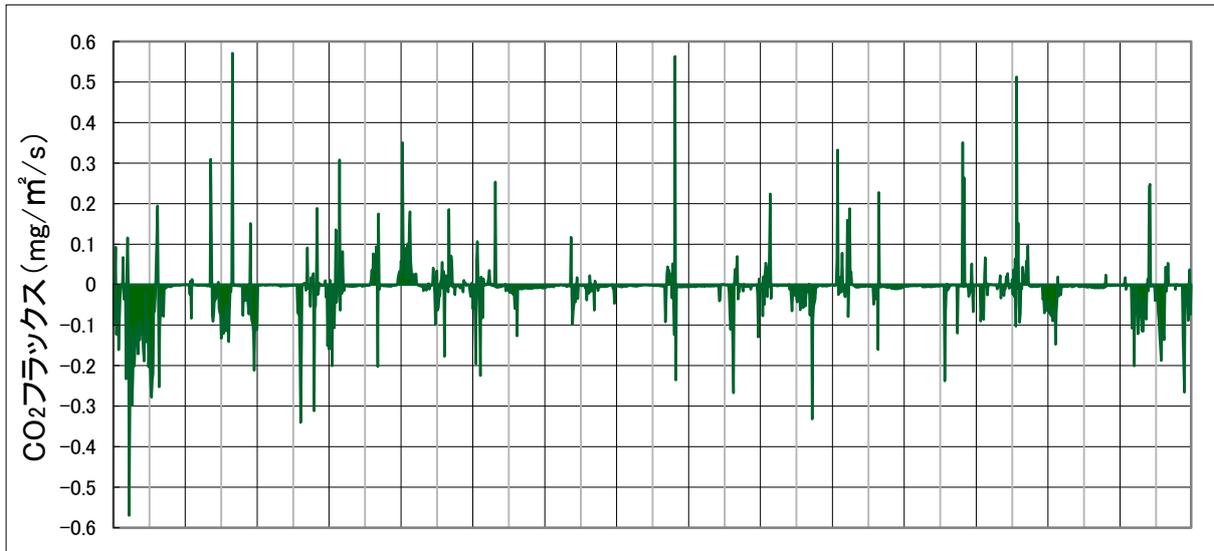


図 6.(d) 2010 年 4 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

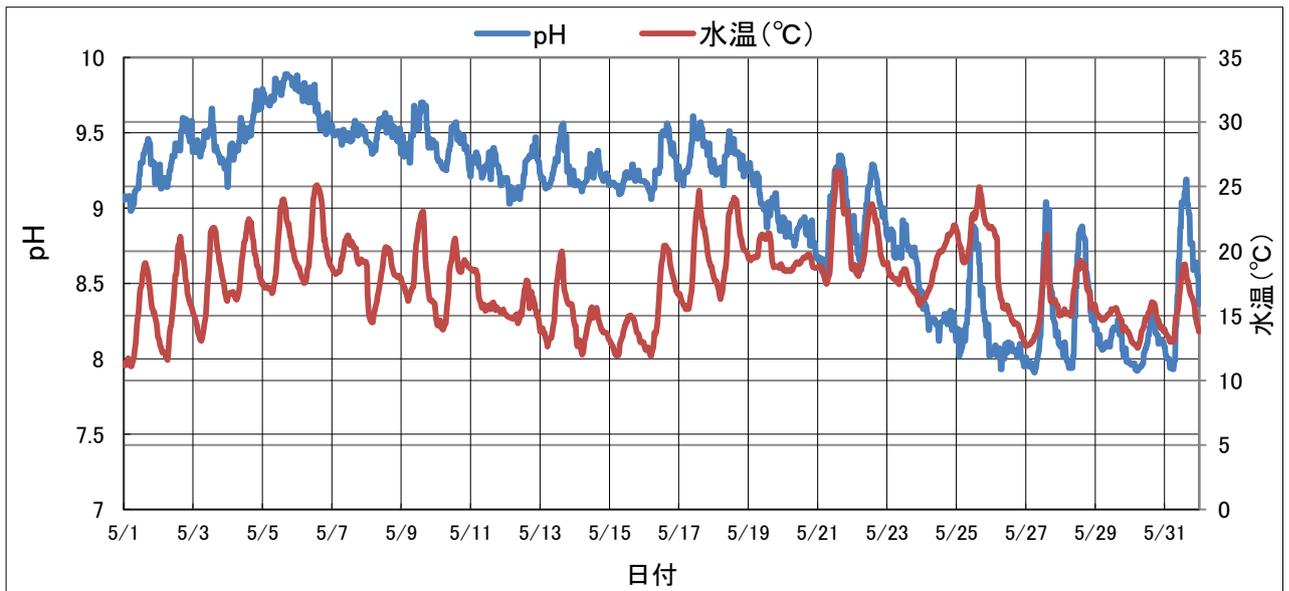
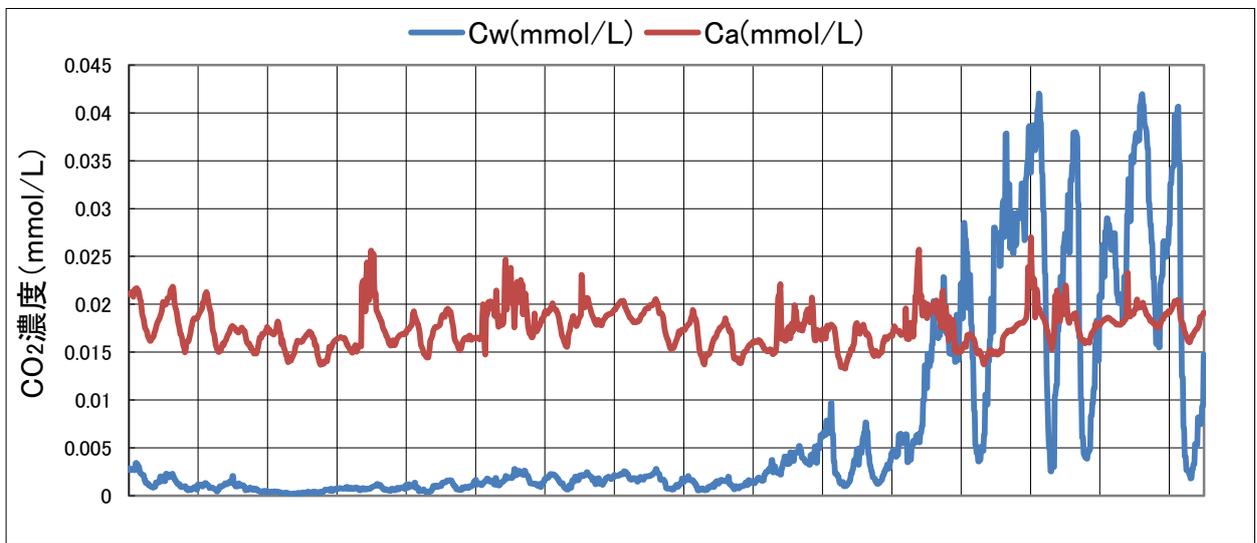
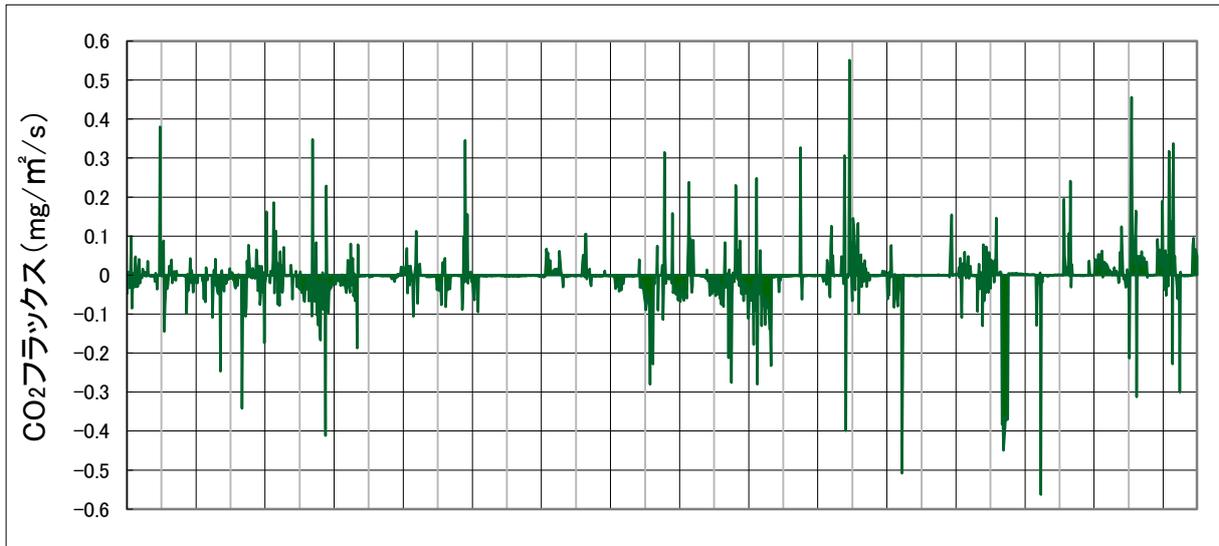


図 6.(e) 2010 年 5 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

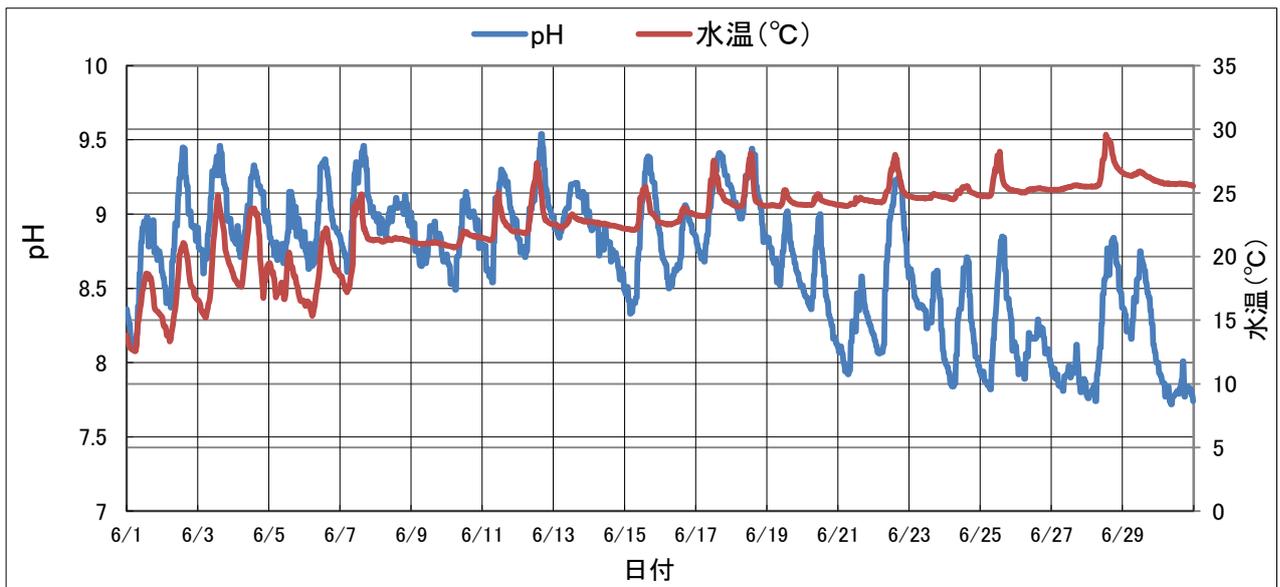
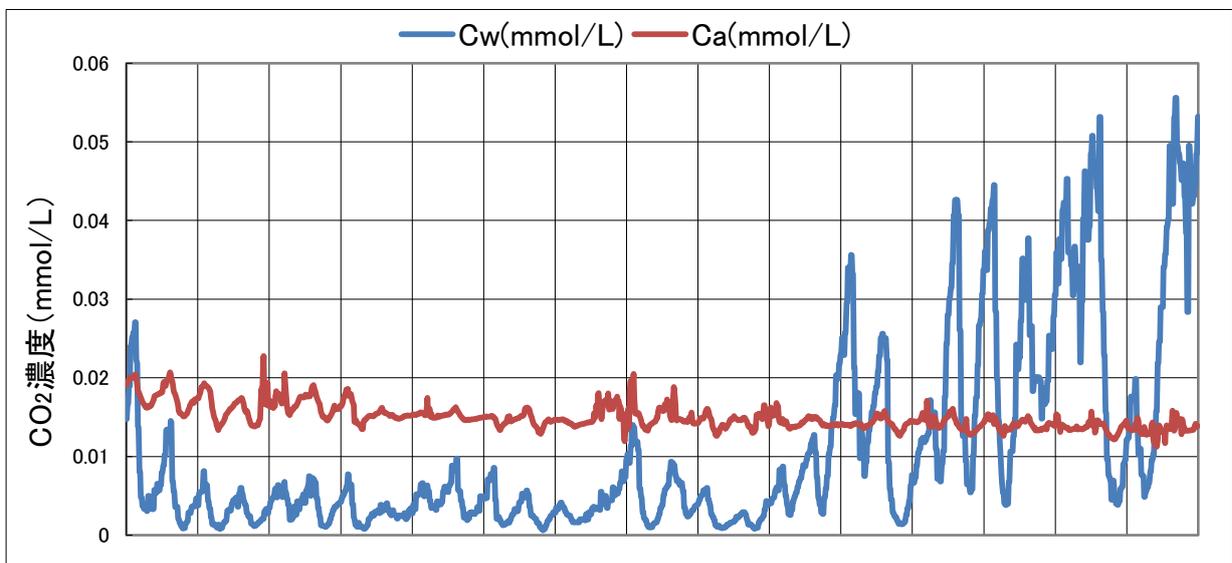
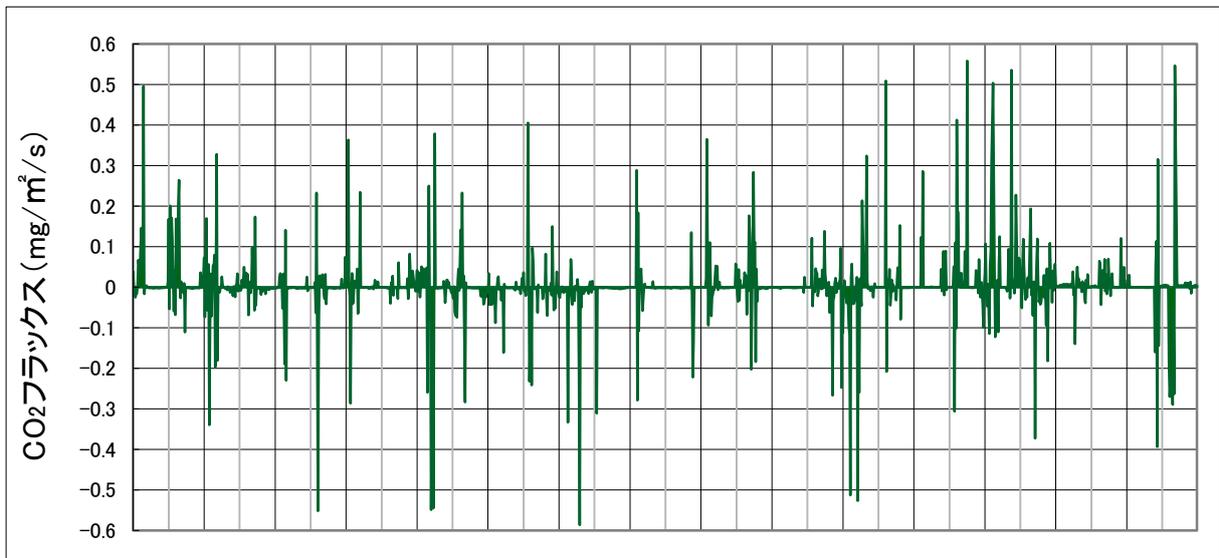


図 6.(f) 2010 年 6 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

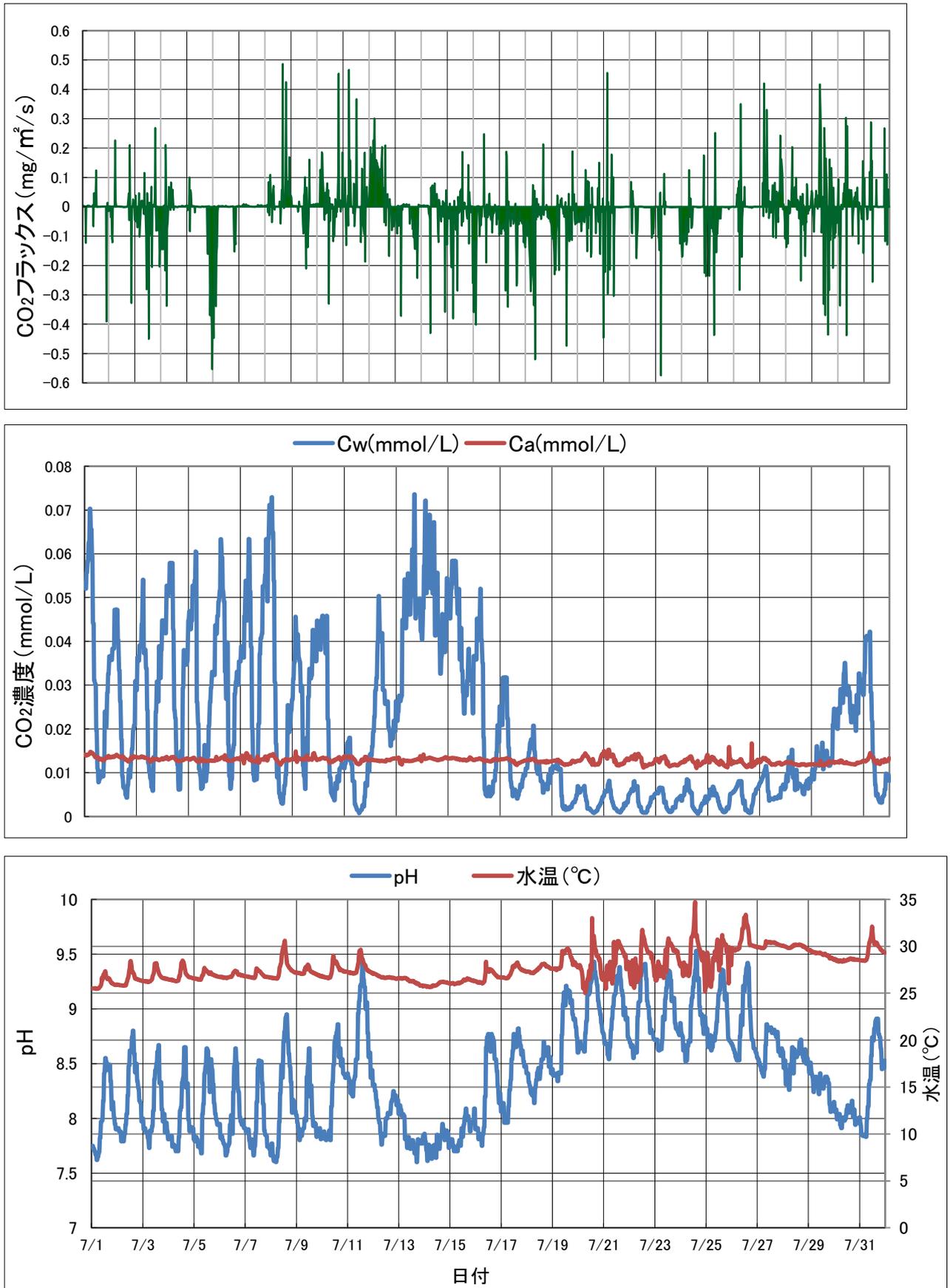


図 6.(g) 2010 年 7 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

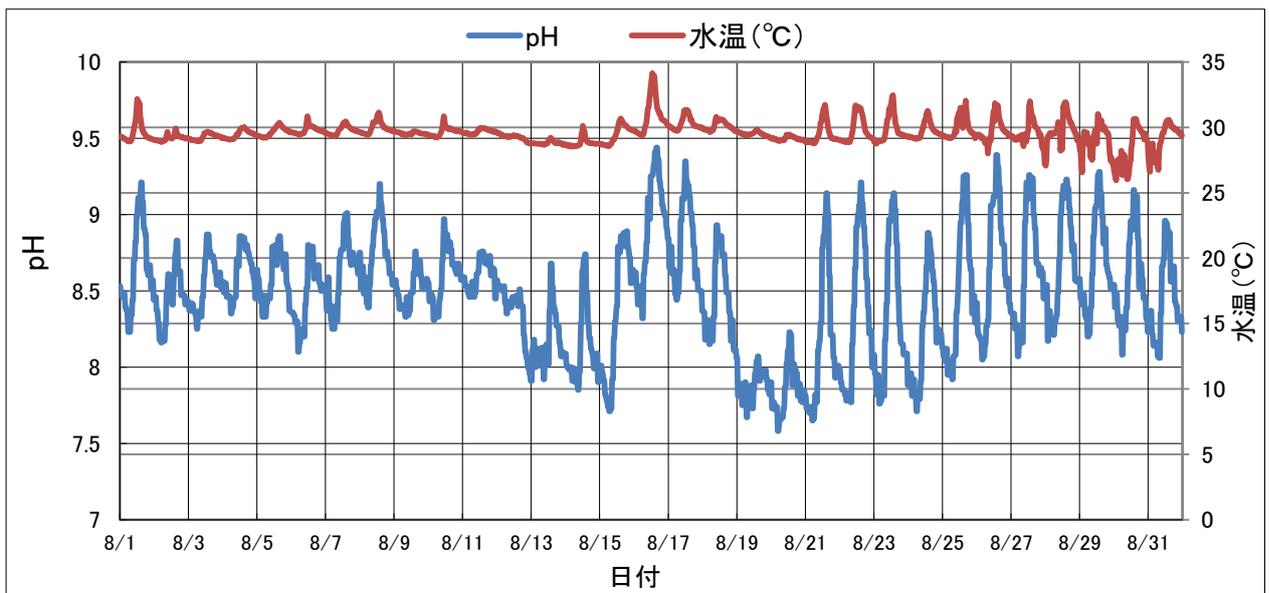
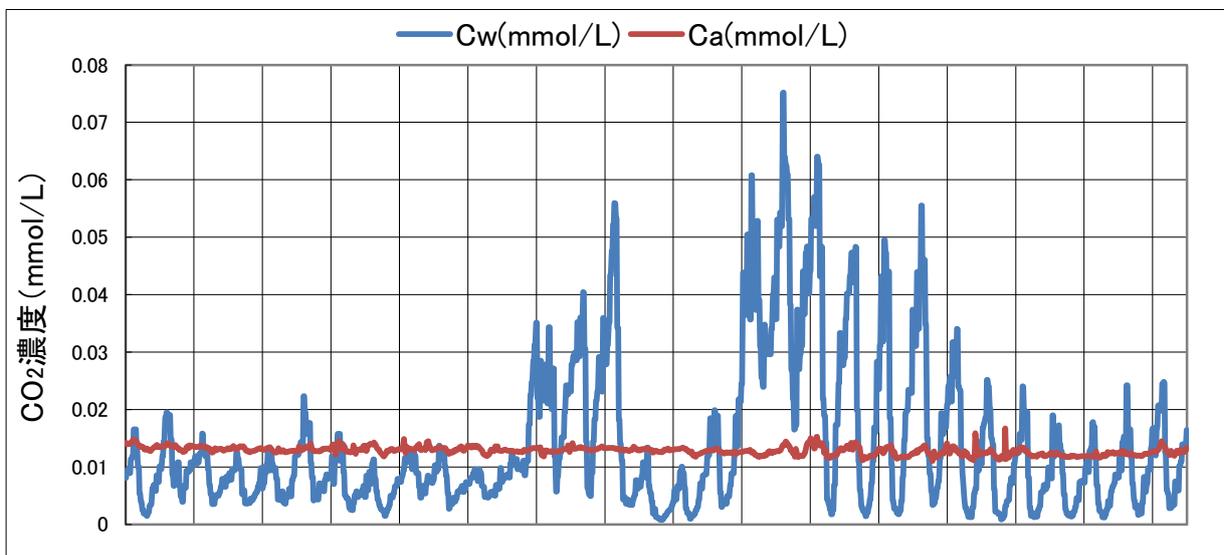
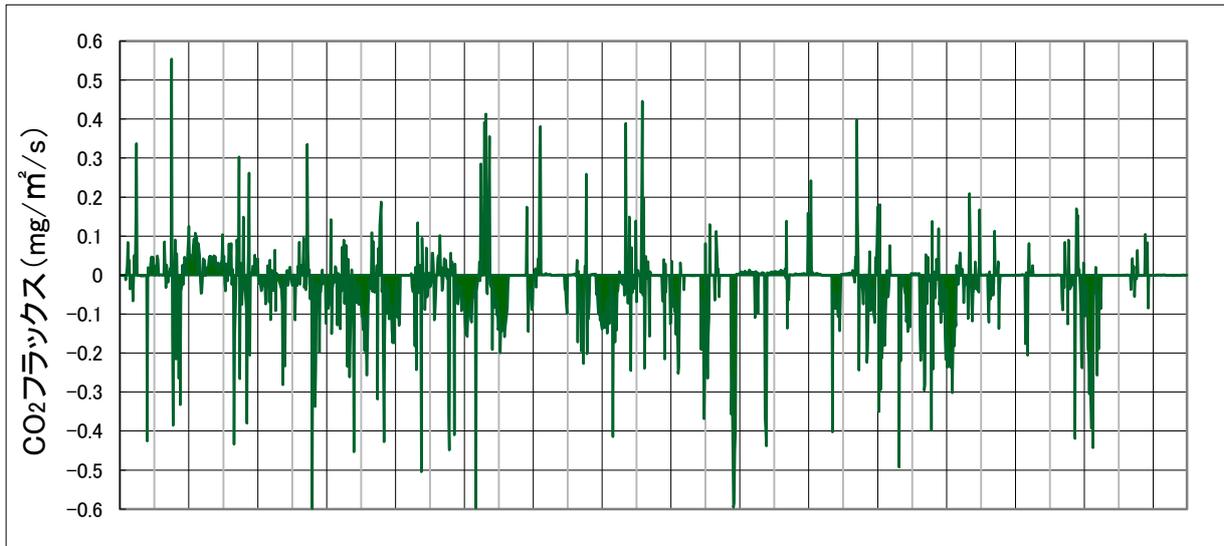


図 6.(h) 2010 年 8 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

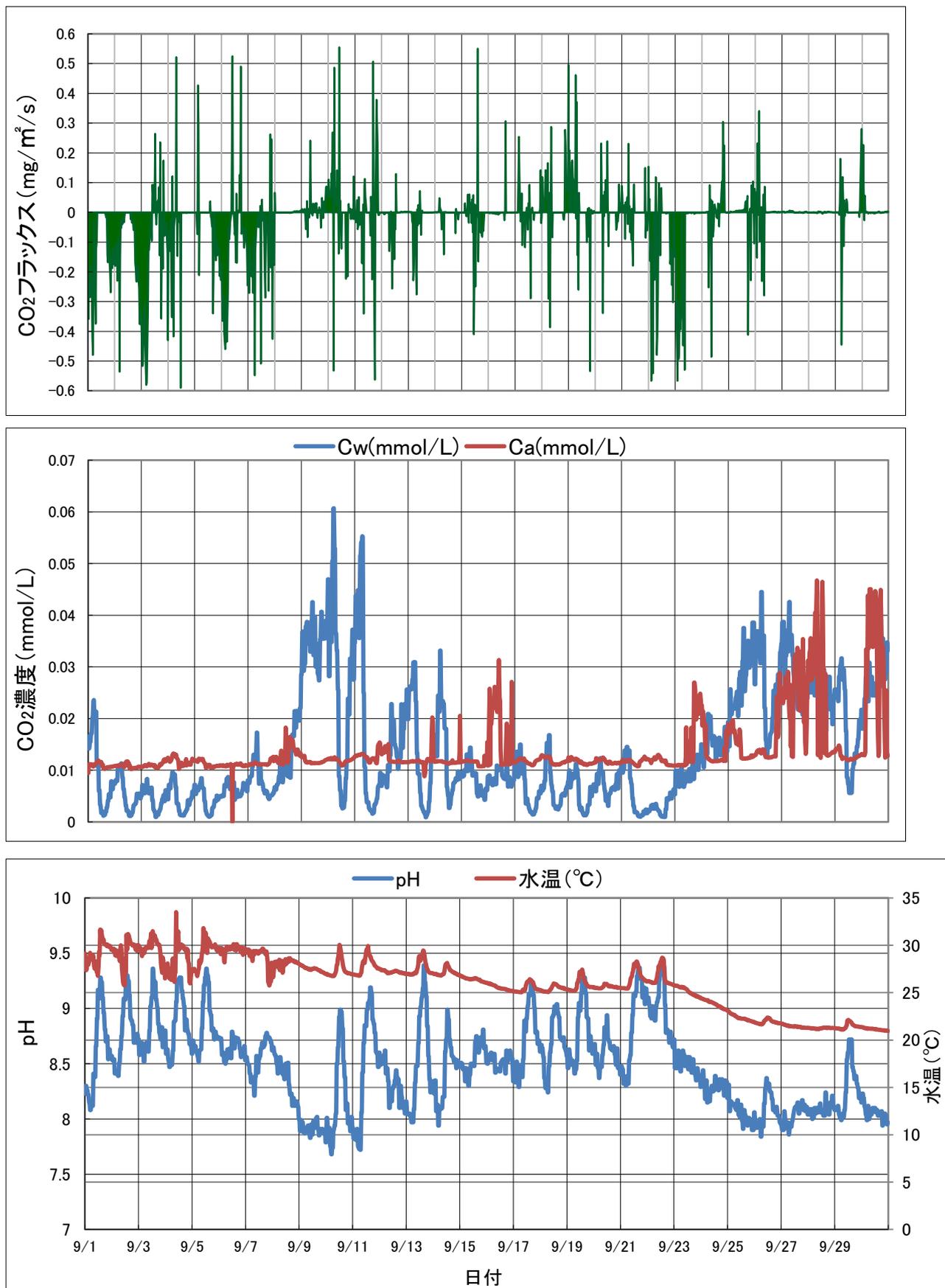


図 6.(i) 2010 年 9 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

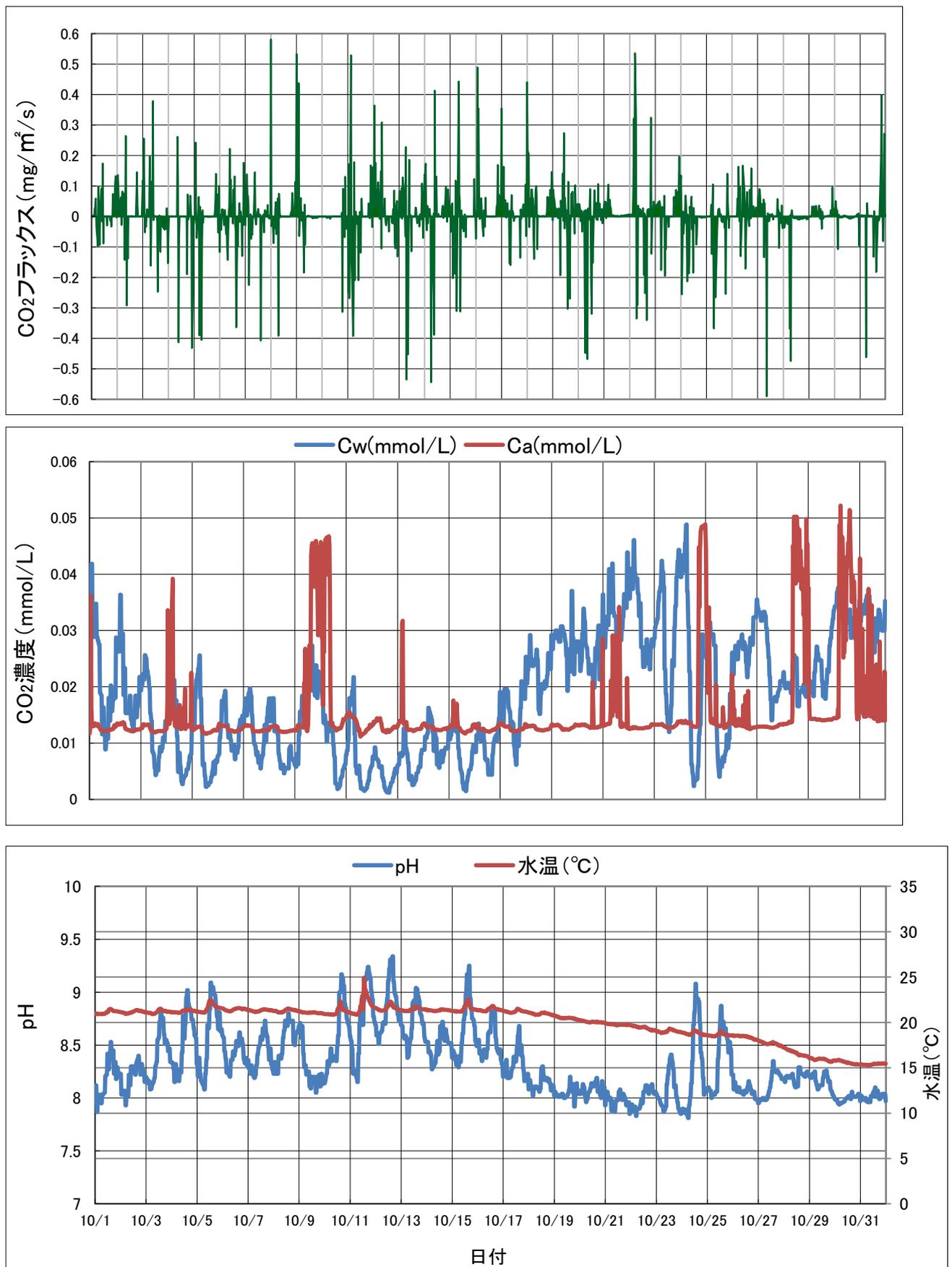


図 6.(j) 2010 年 10 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

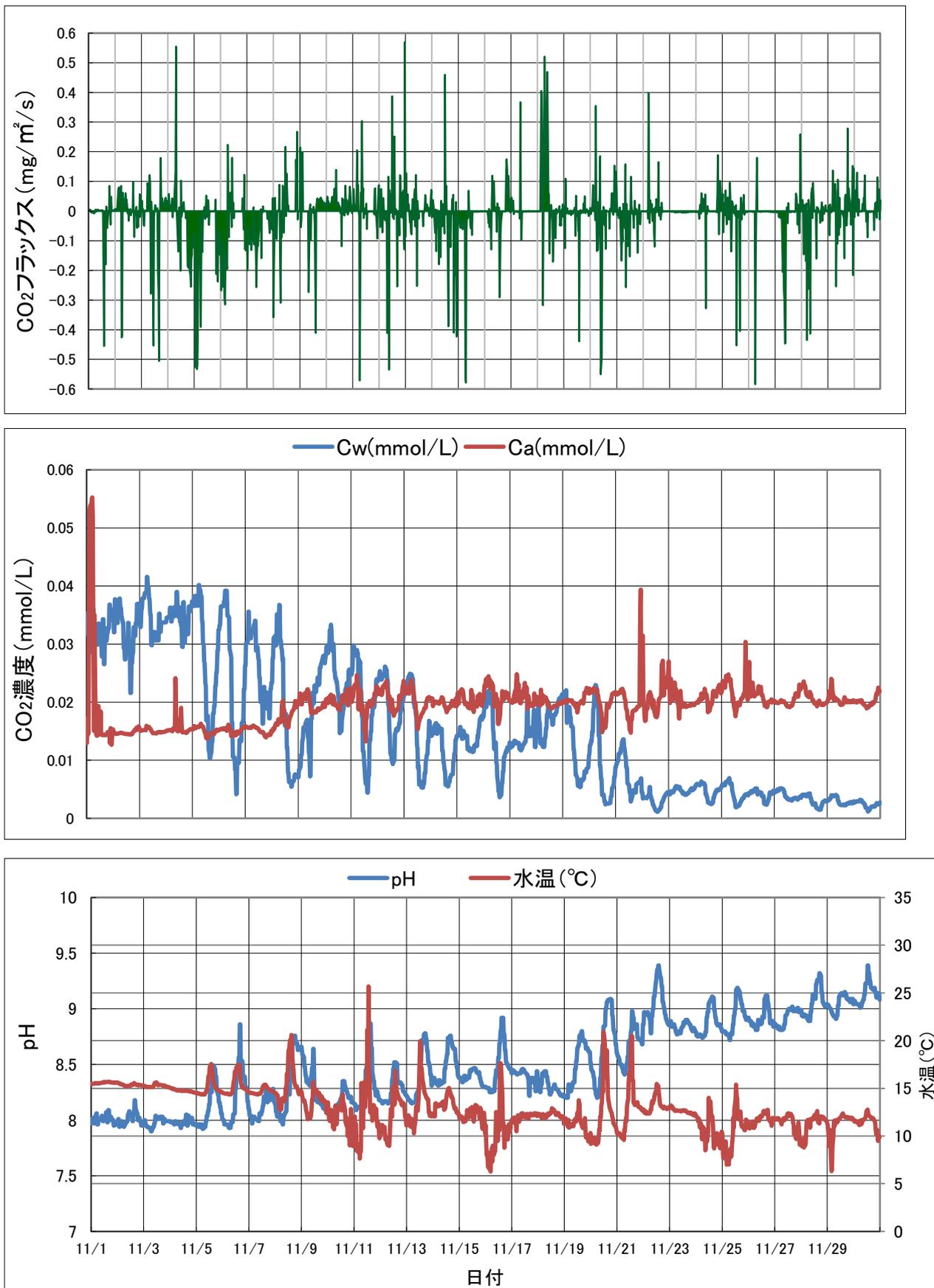


図 6.(k) 2010 年 11 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

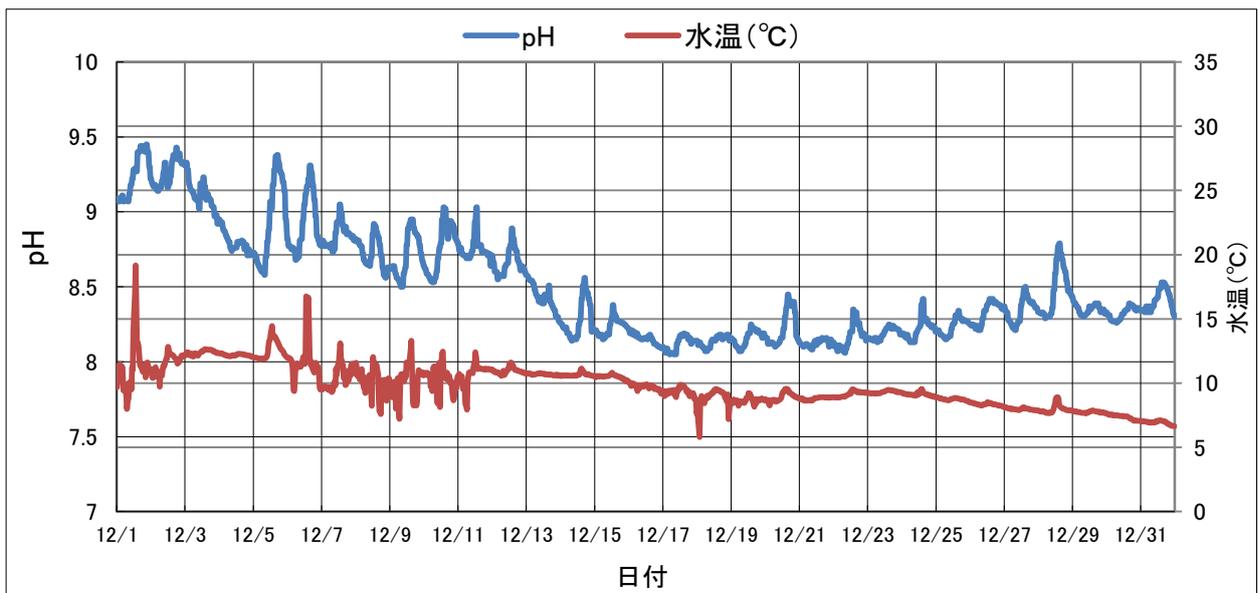
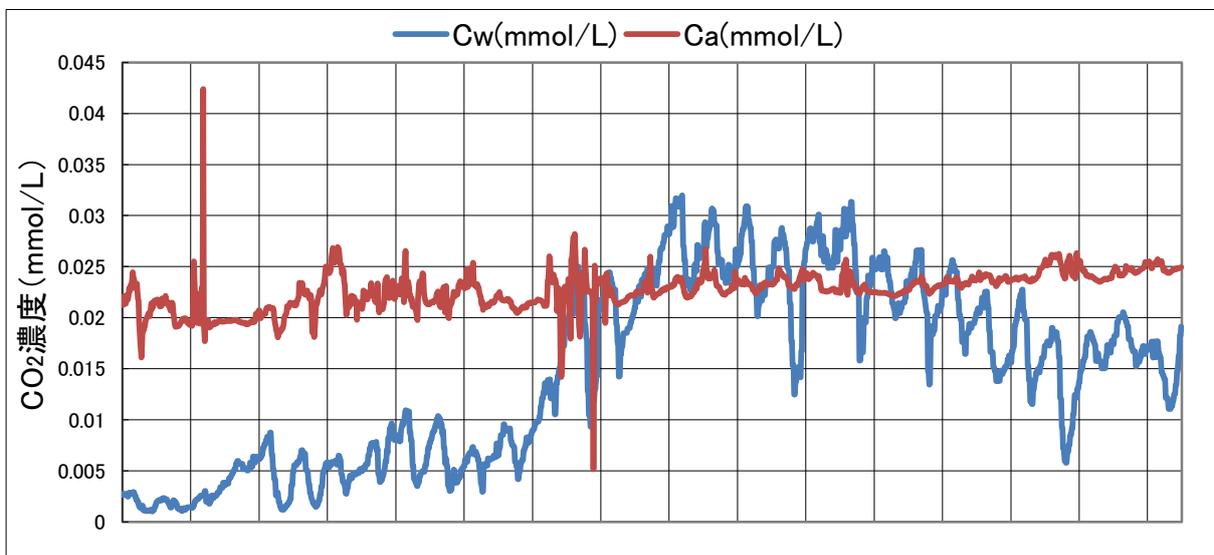
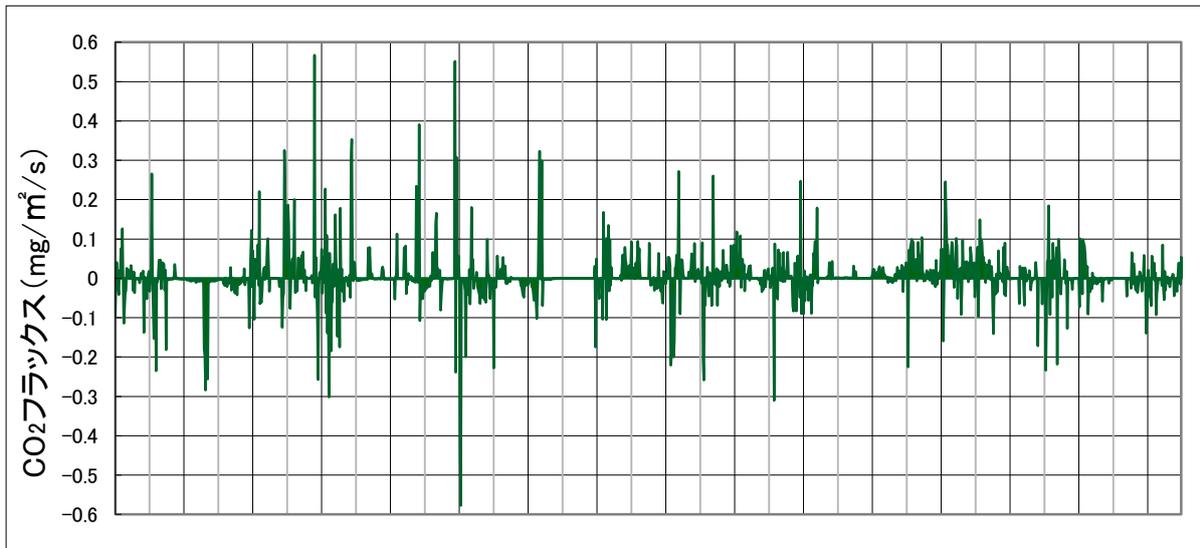


図 6.(1) 2010 年 12 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

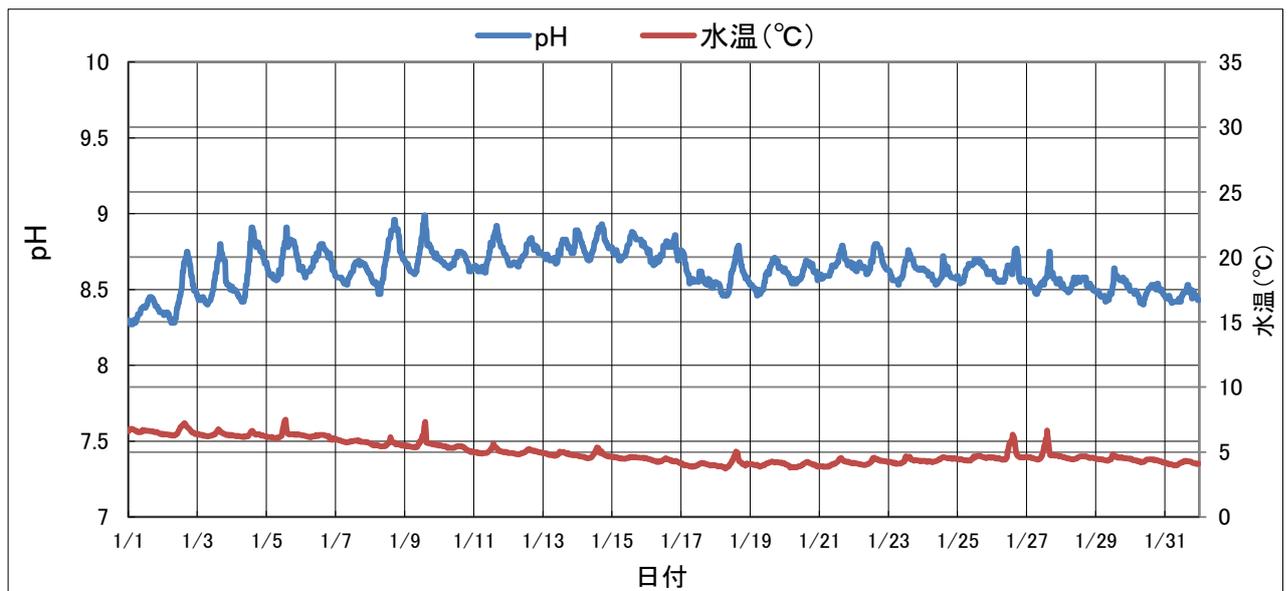
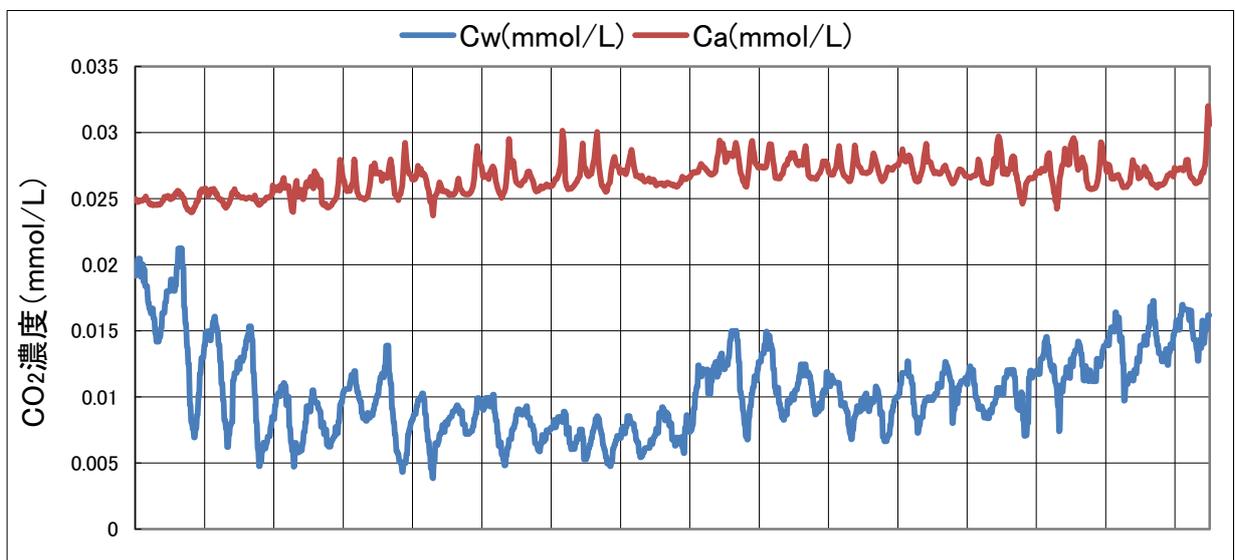
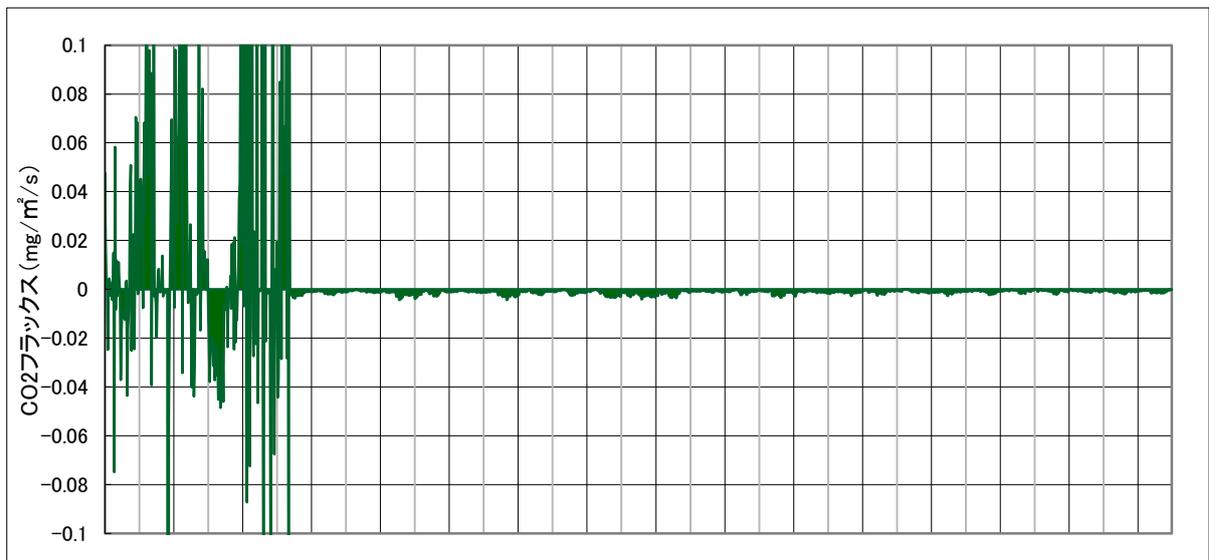


図 7.(a) 2011 年 1 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

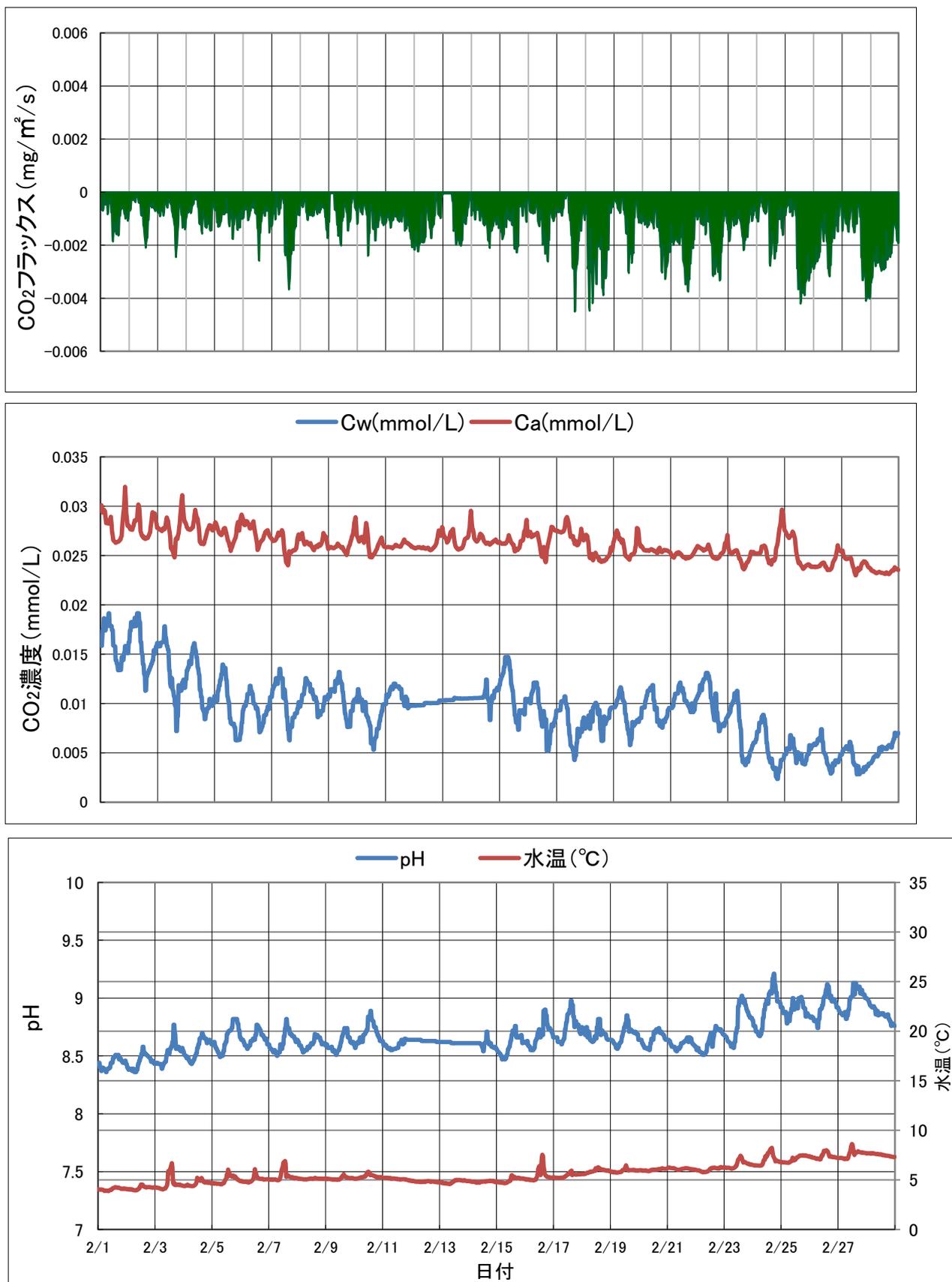


図 7.(b) 2011 年 2 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

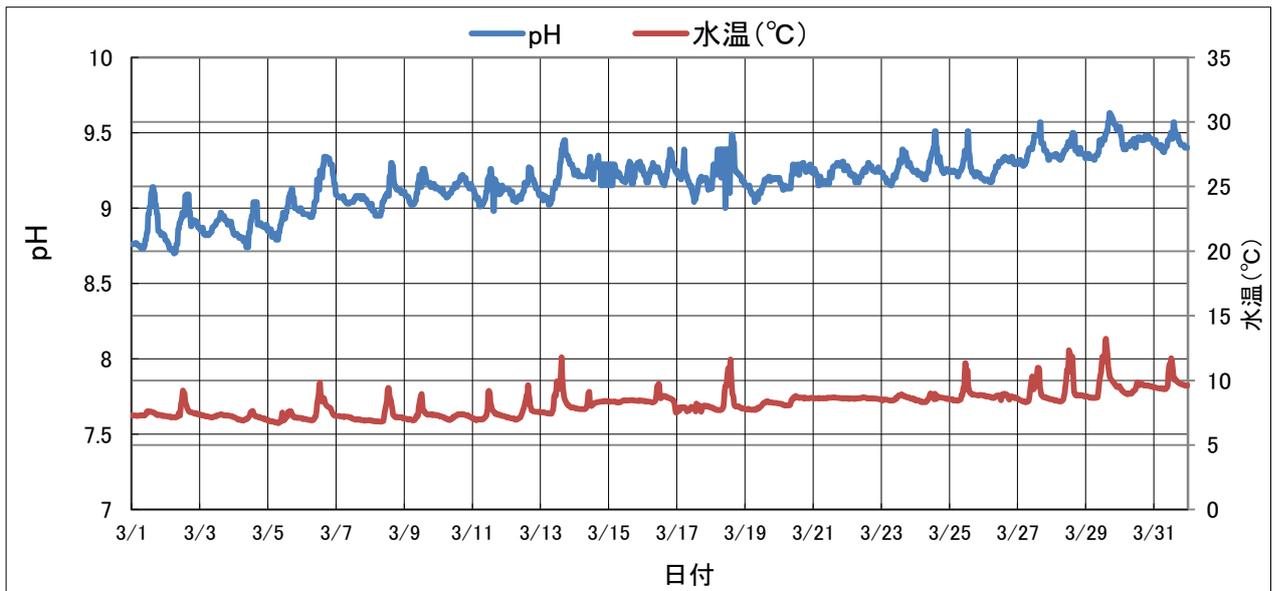
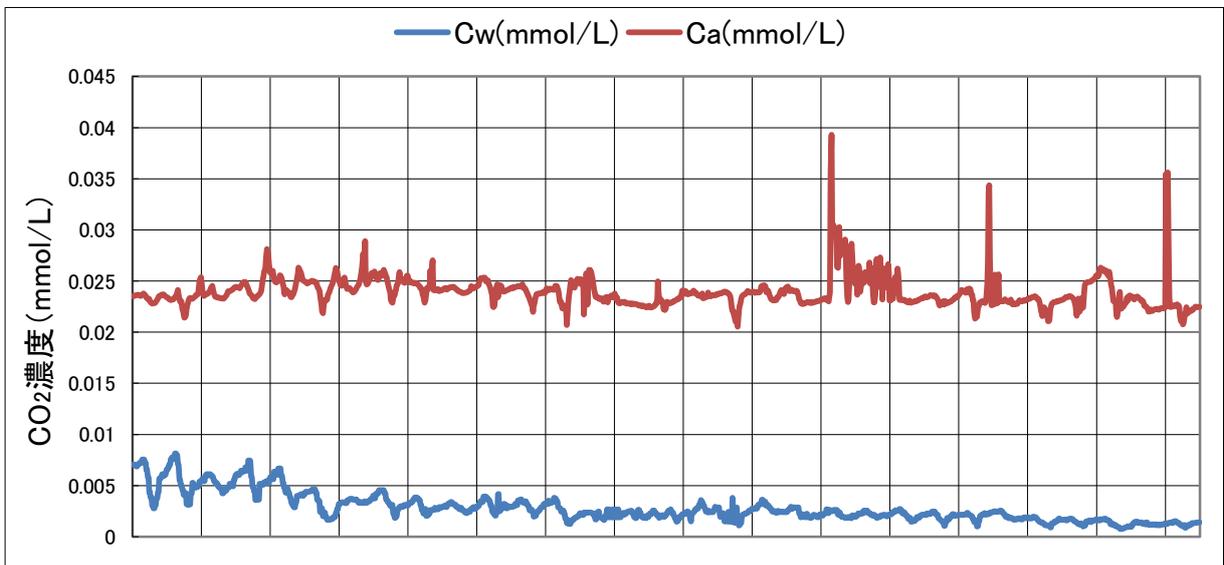
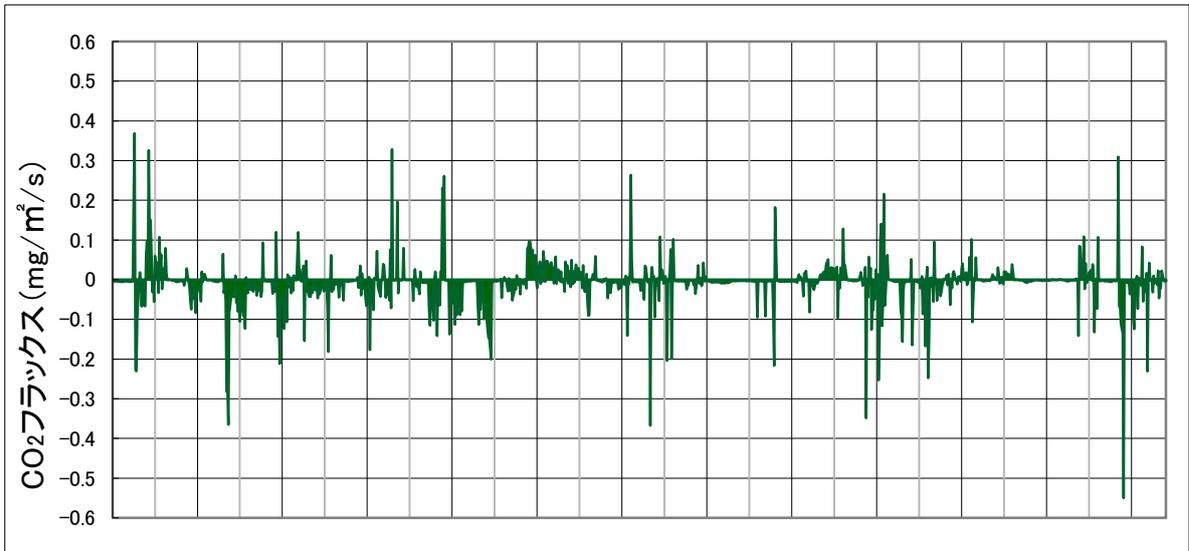


図 7.(c) 2011 年 3 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

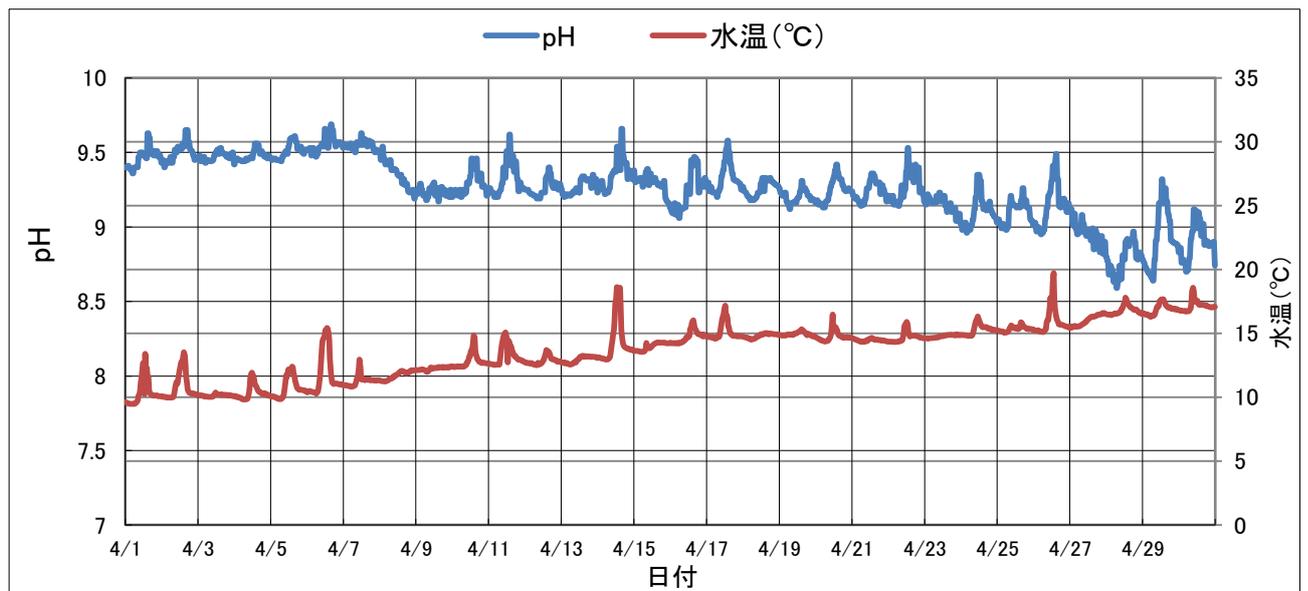
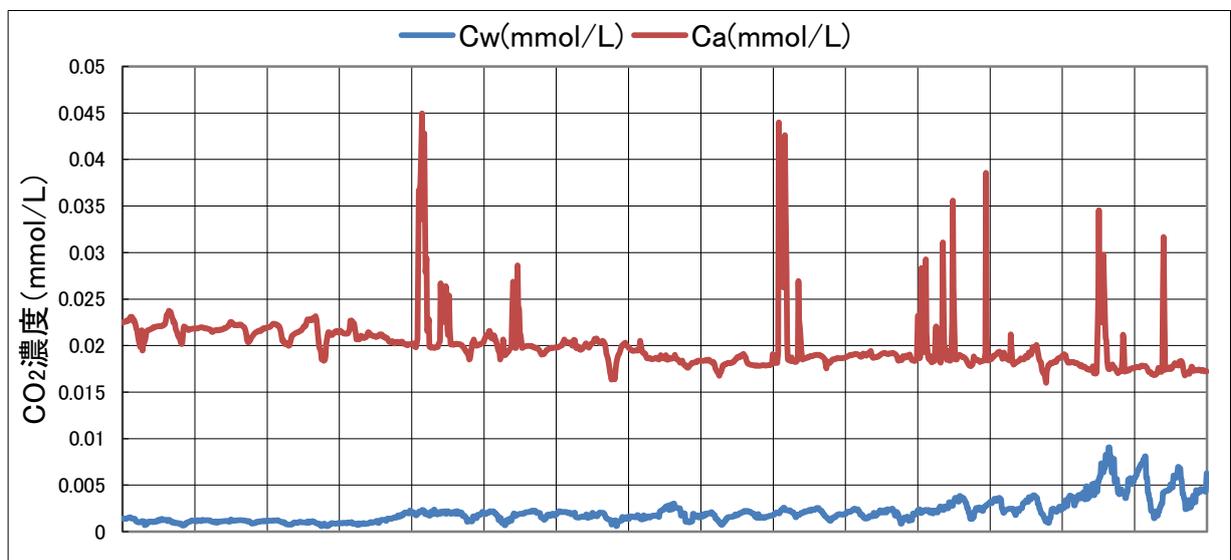
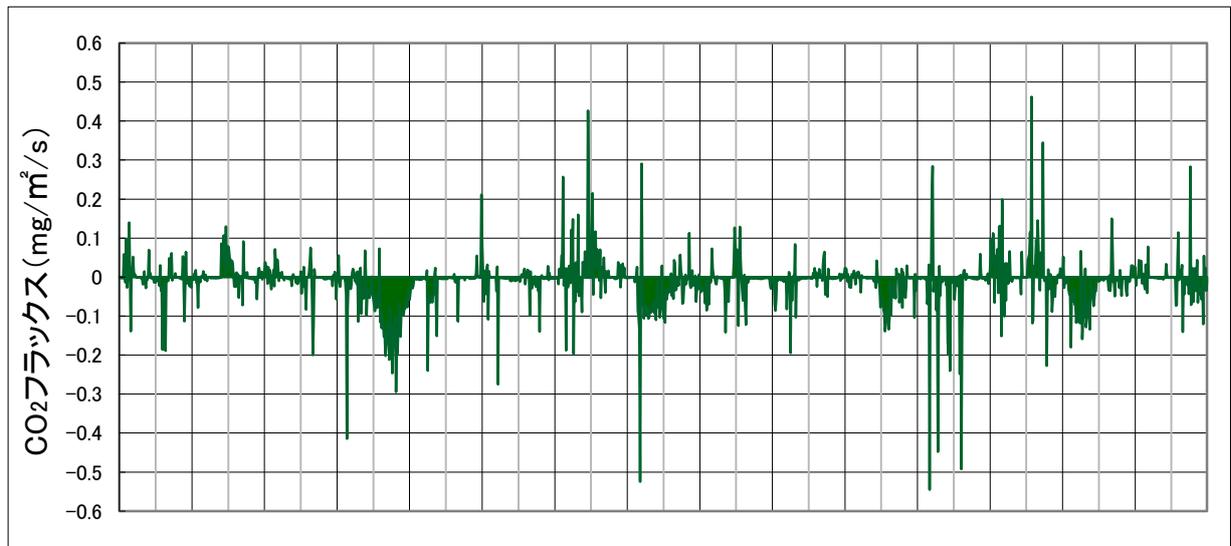


図 7.(d) 2011 年 4 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

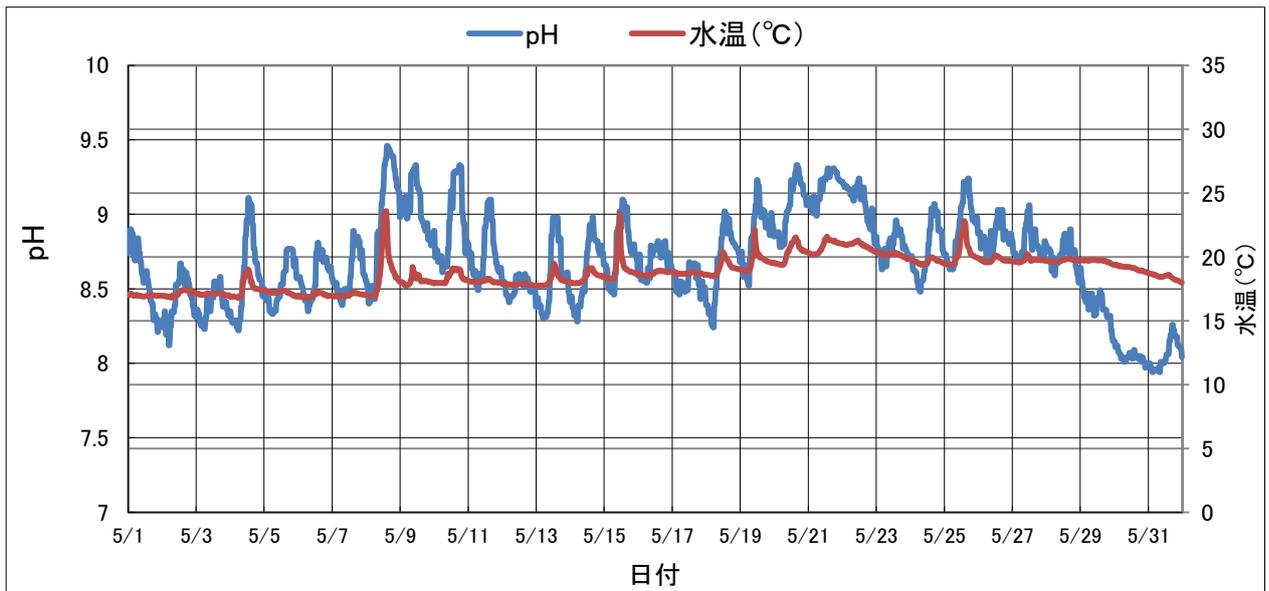
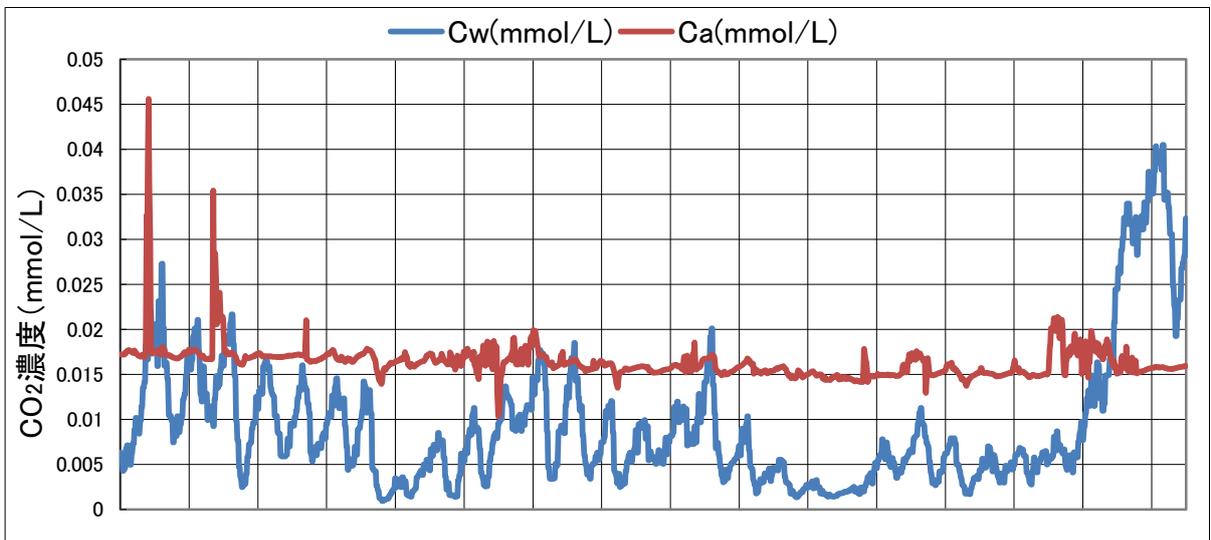
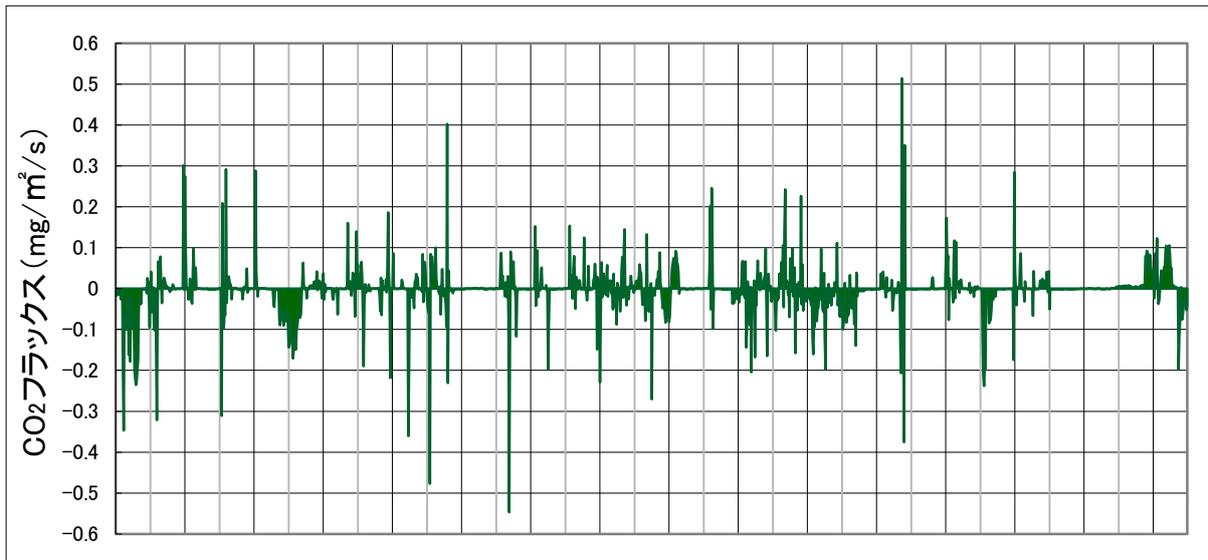


図 7.(e) 2011 年 5 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

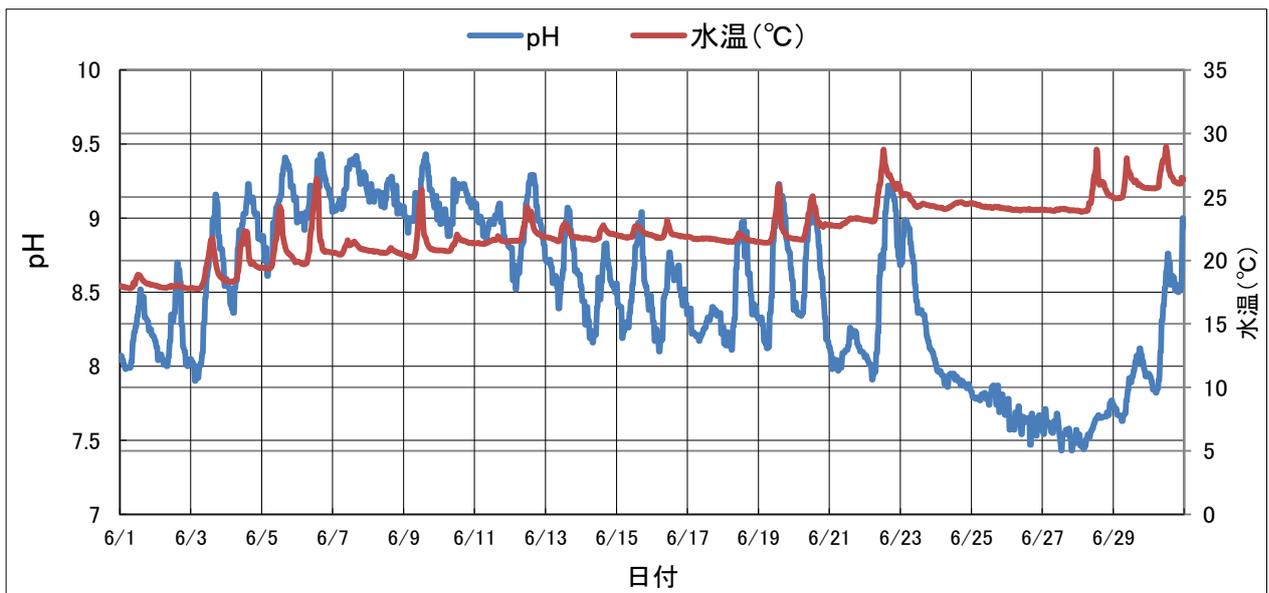
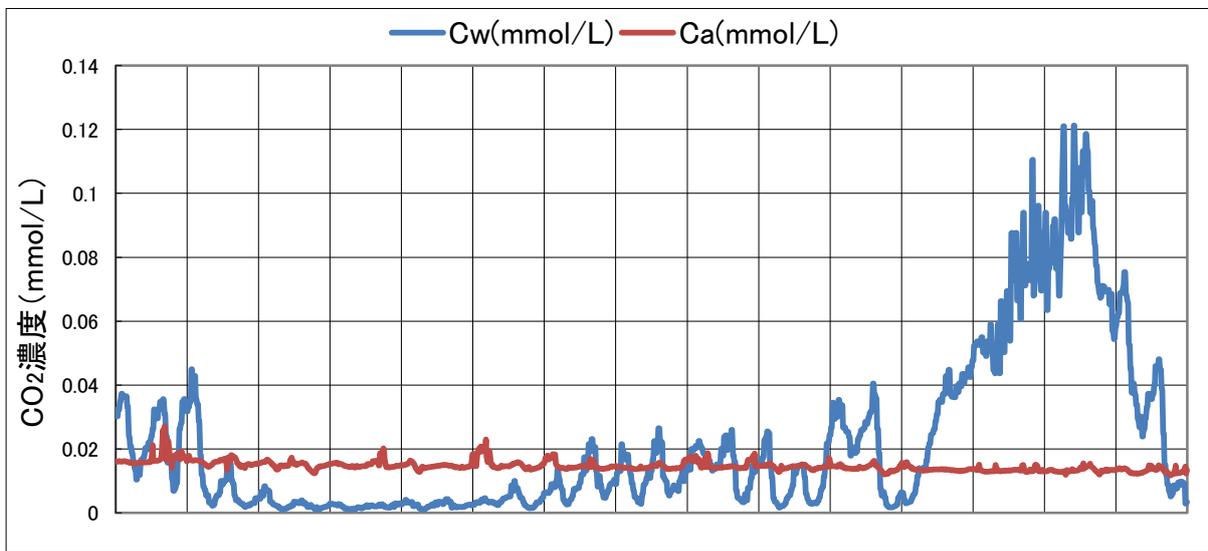
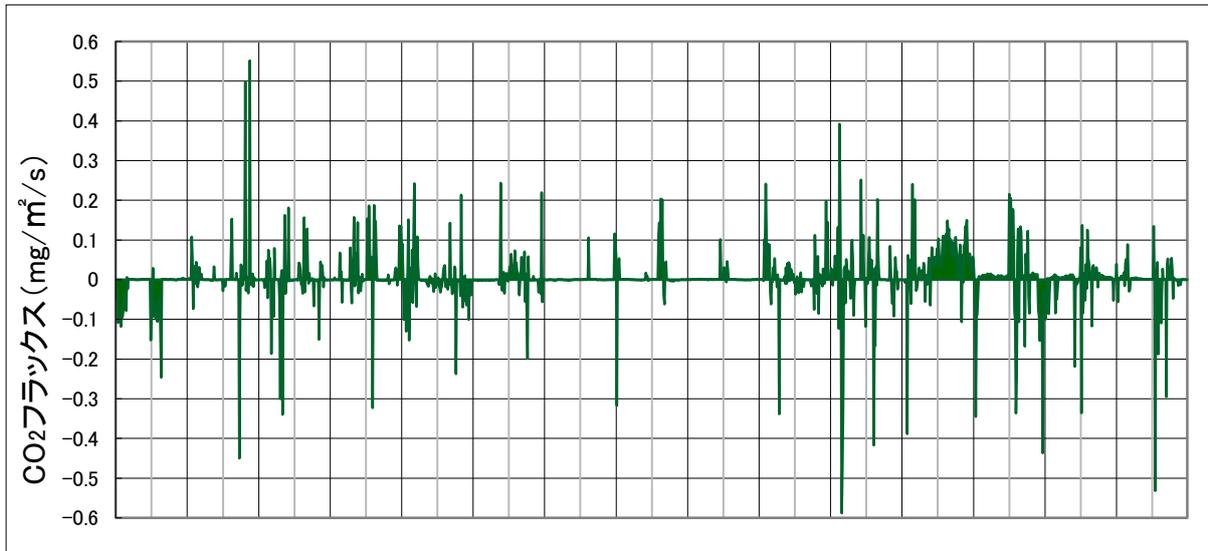


図 7.(f) 2011 年 6 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

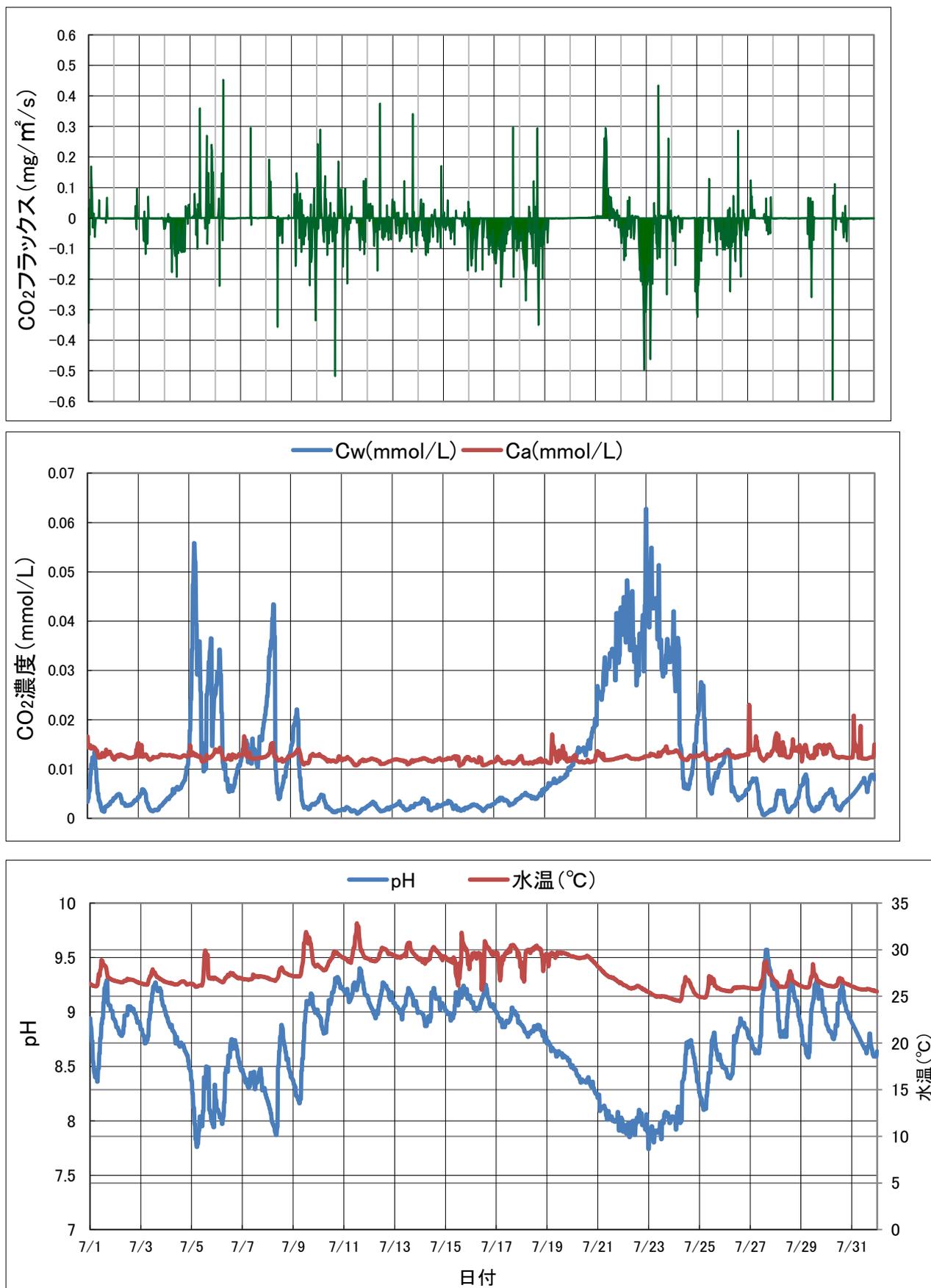


図 7.(g) 2011 年 7 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

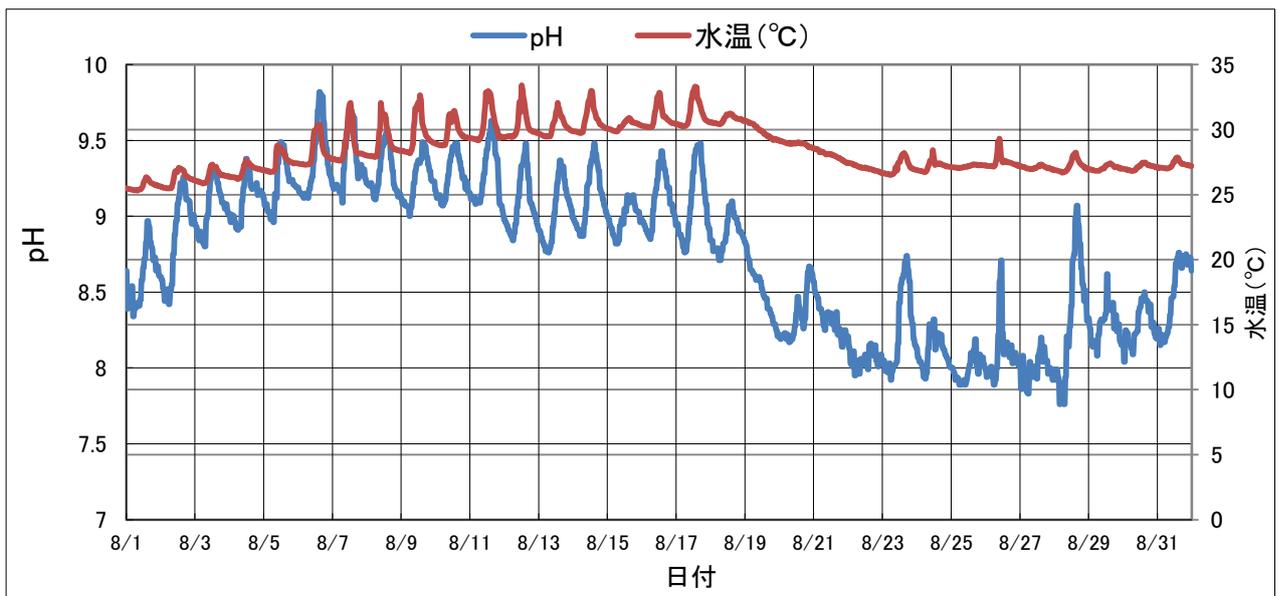
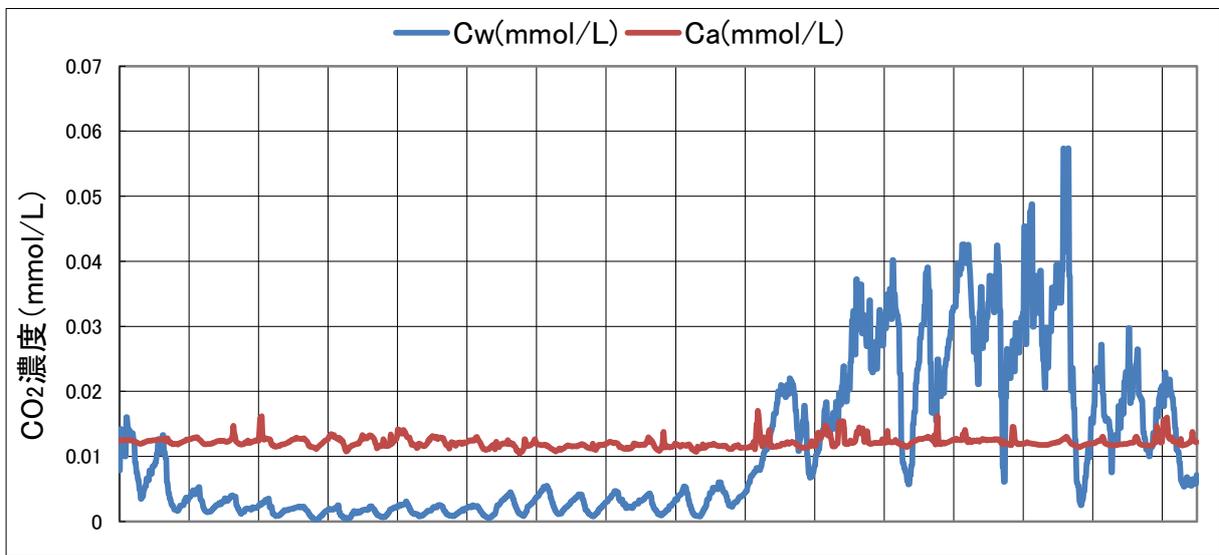
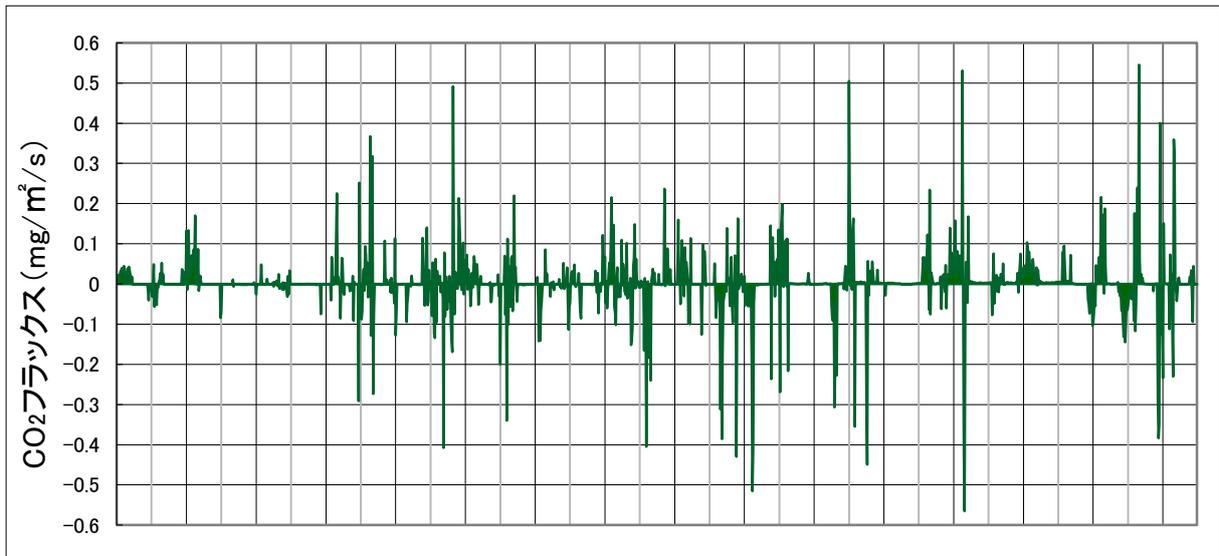


図 7.(h) 2011 年 8 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

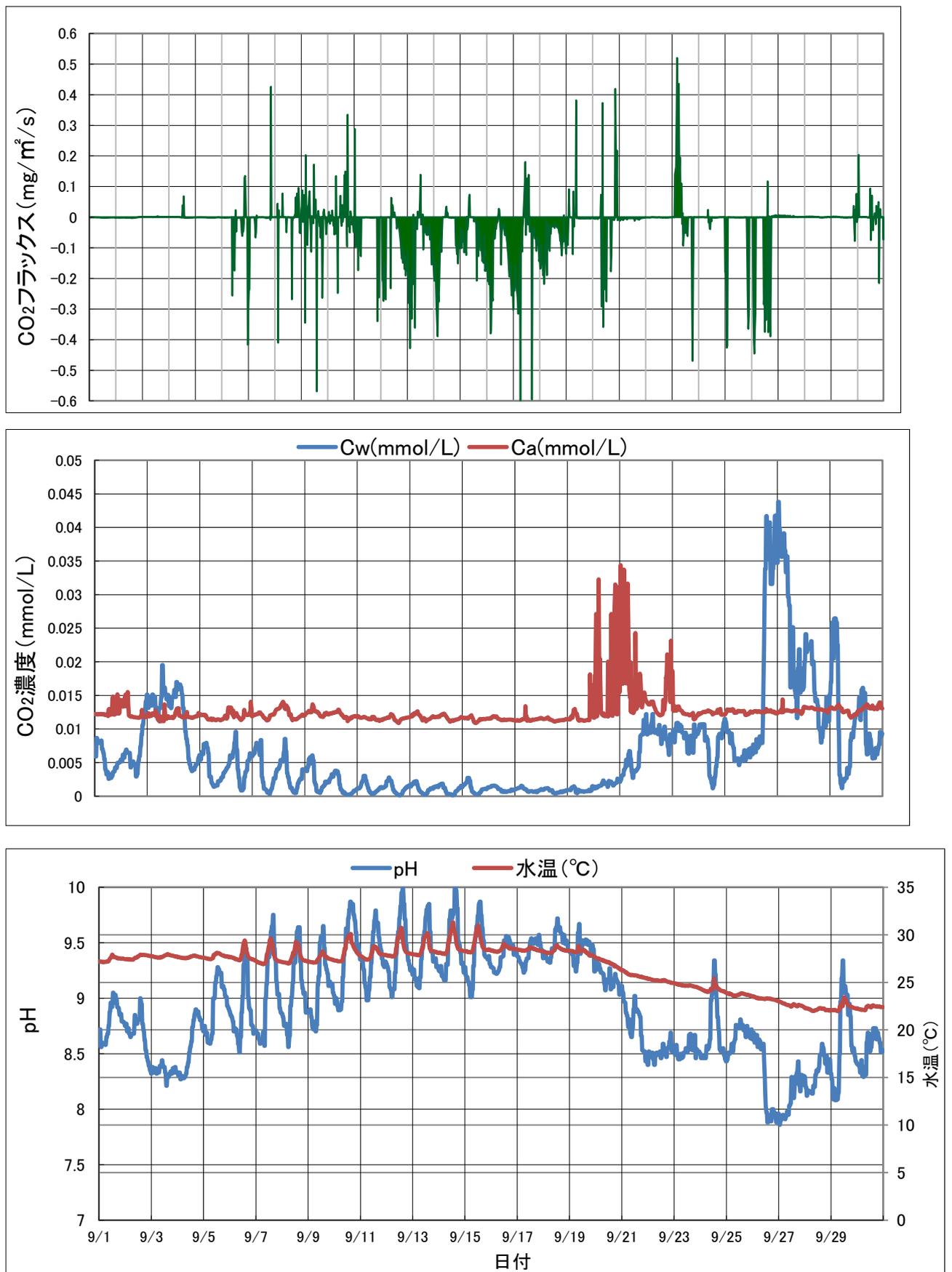


図 7.(i) 2011 年 9 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

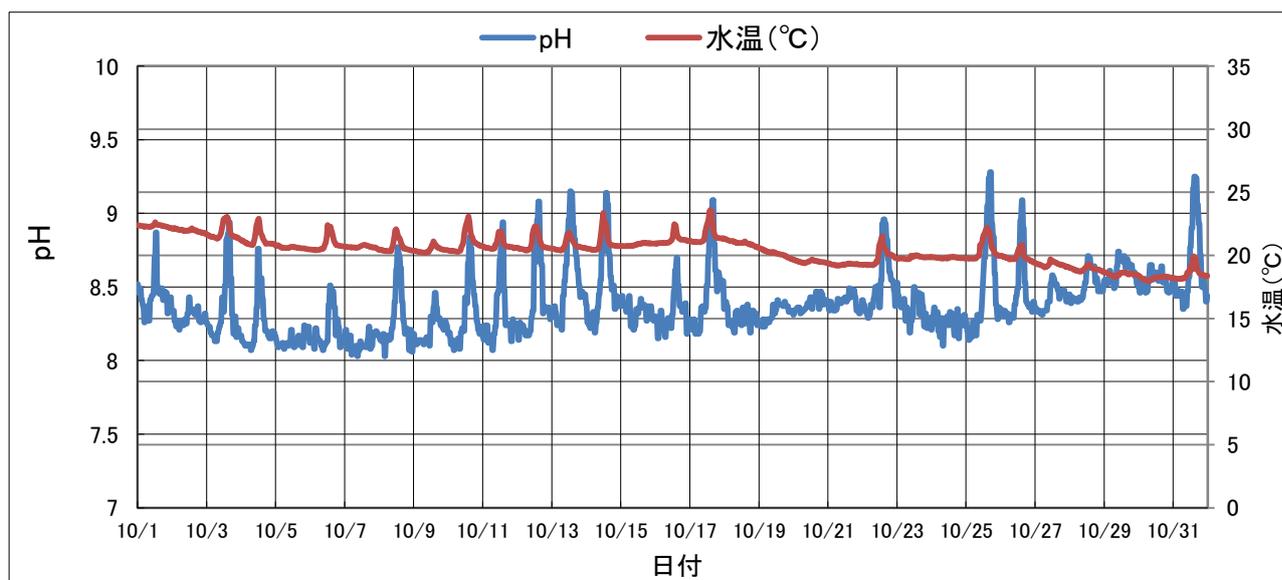
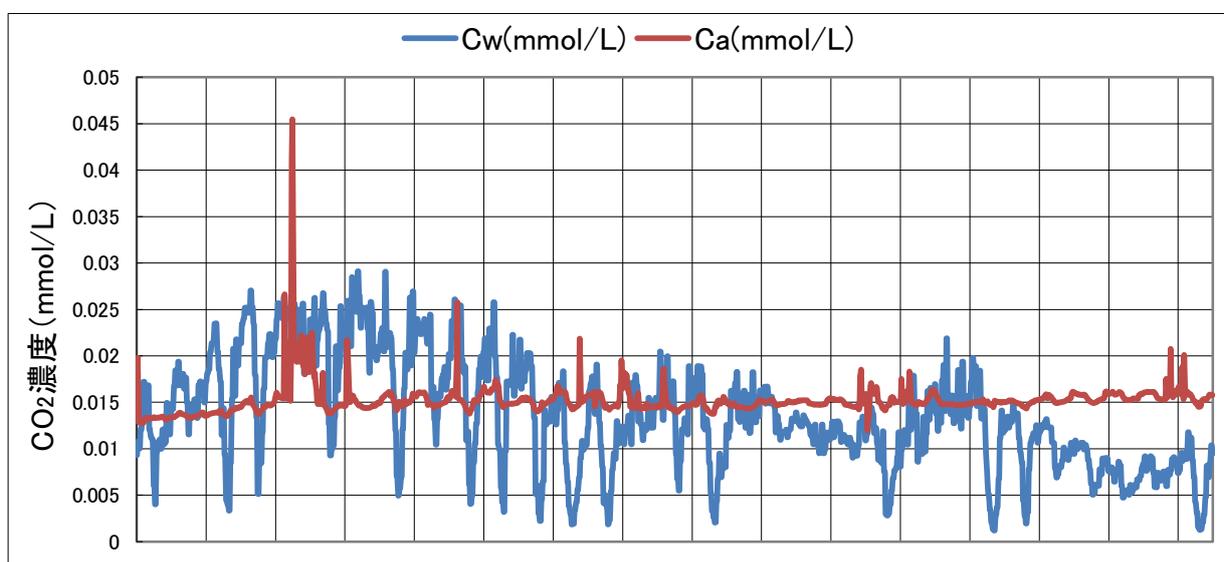
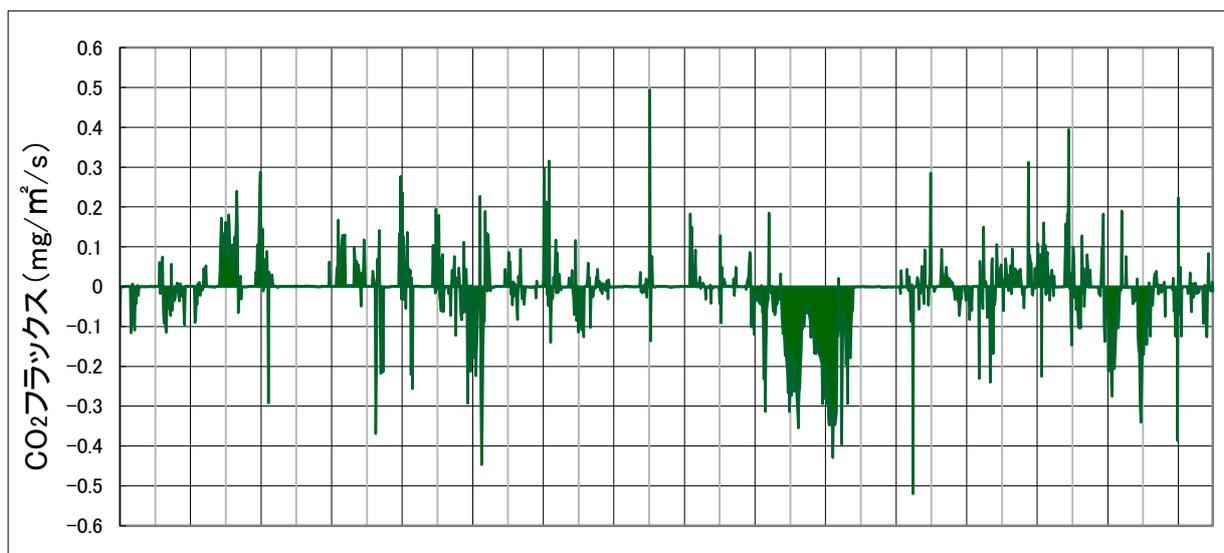


図 7.(j) 2011 年 10 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

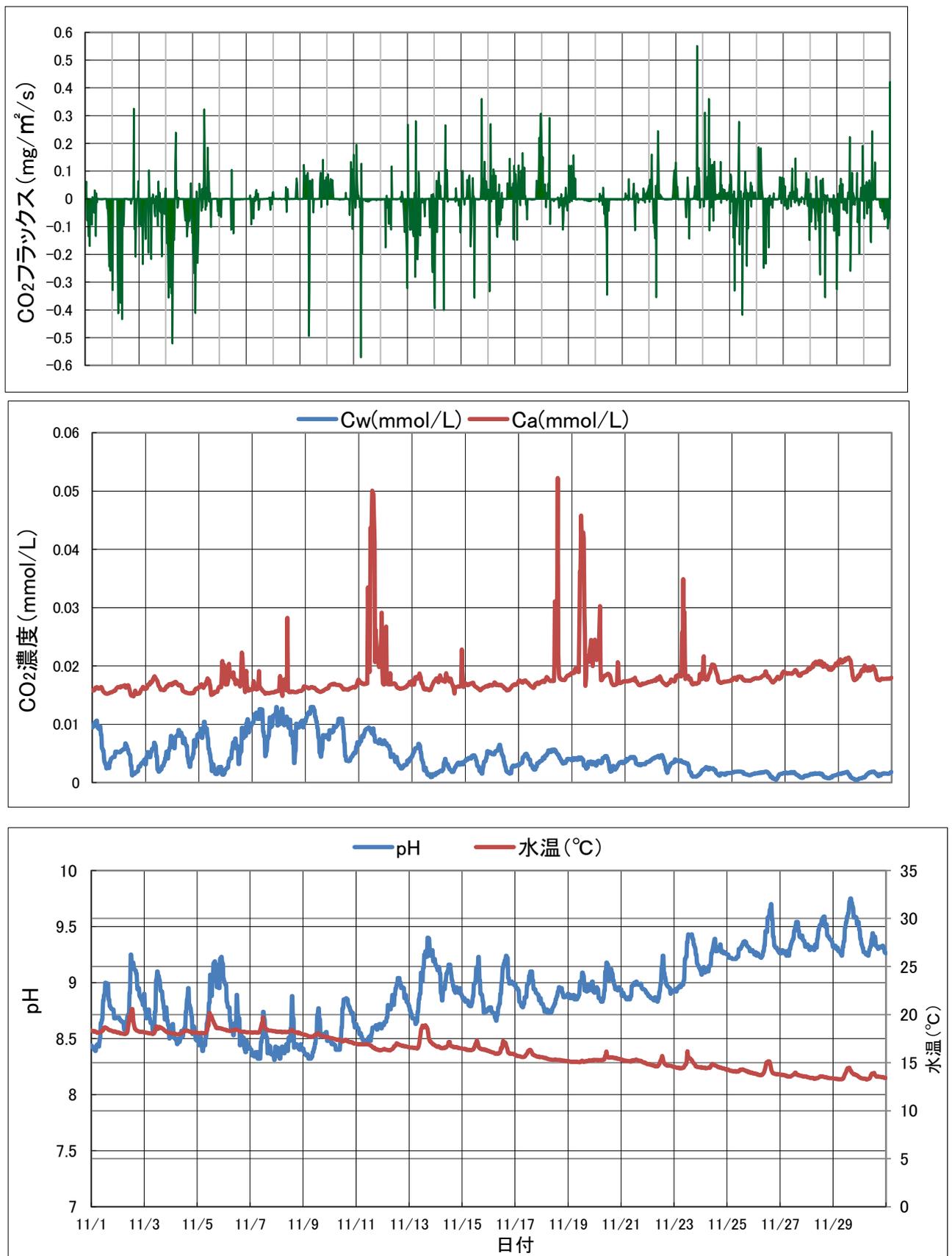


図 7.(k) 2011 年 11 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

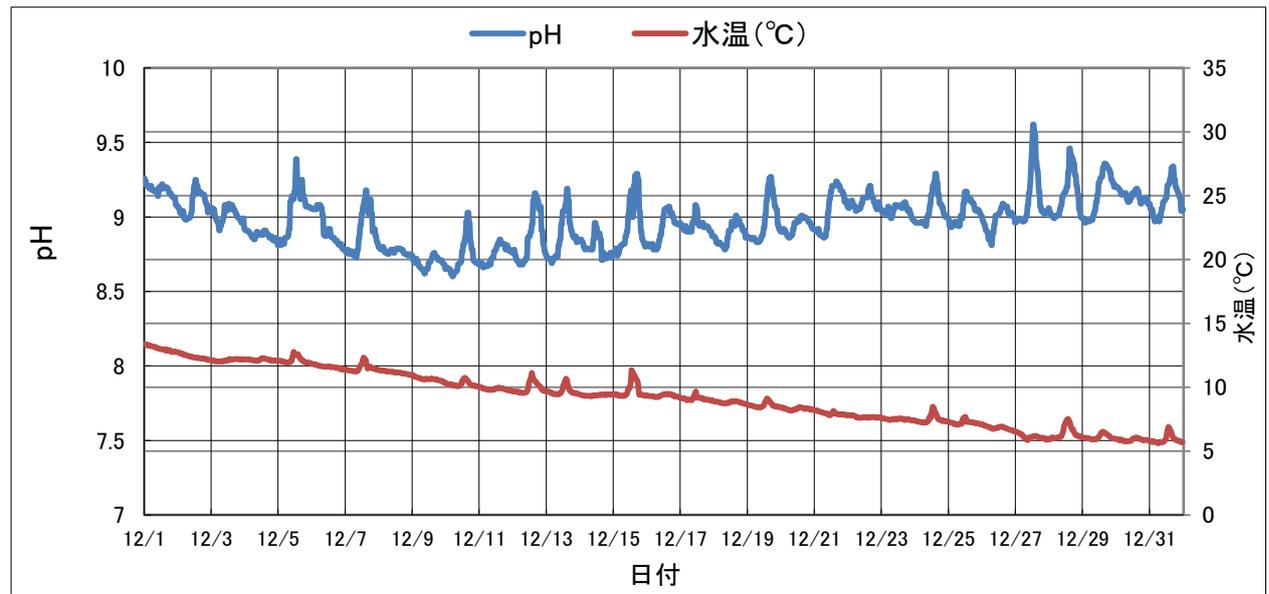
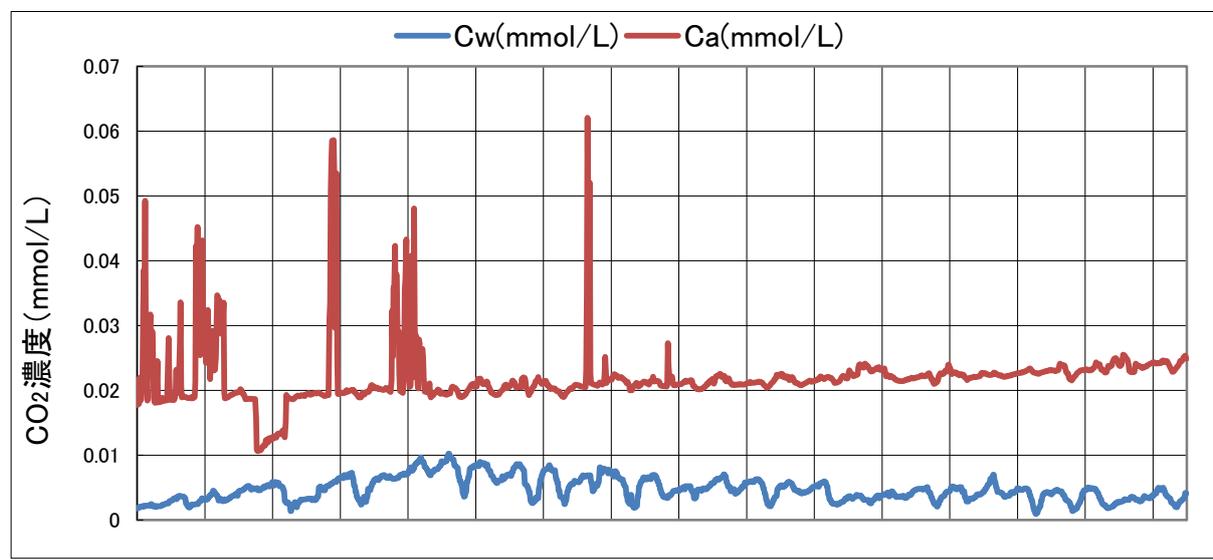
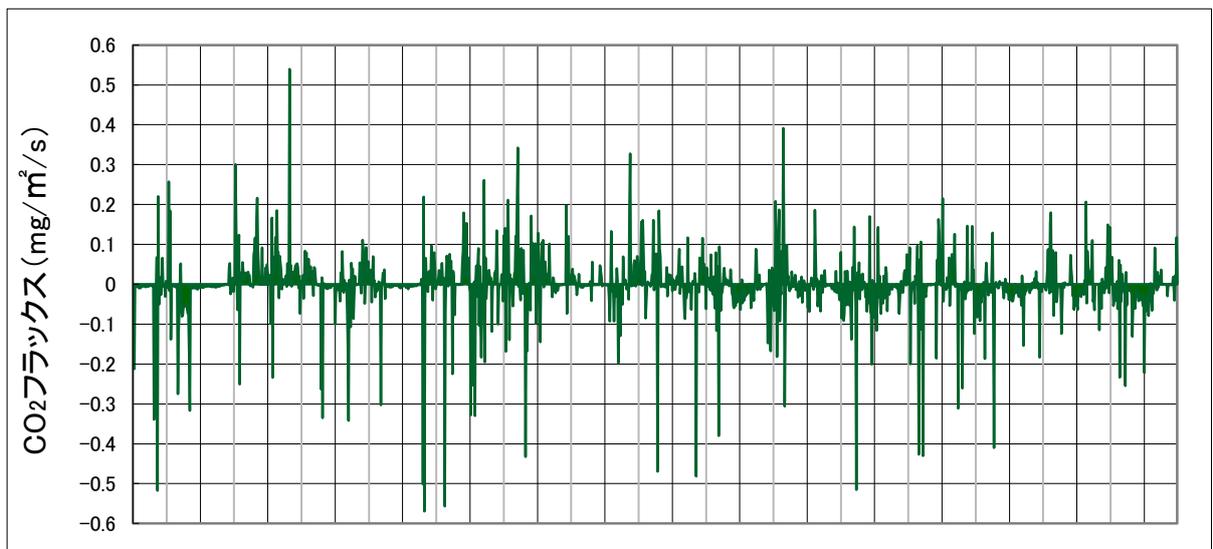


図 7.(1) 2011 年 12 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

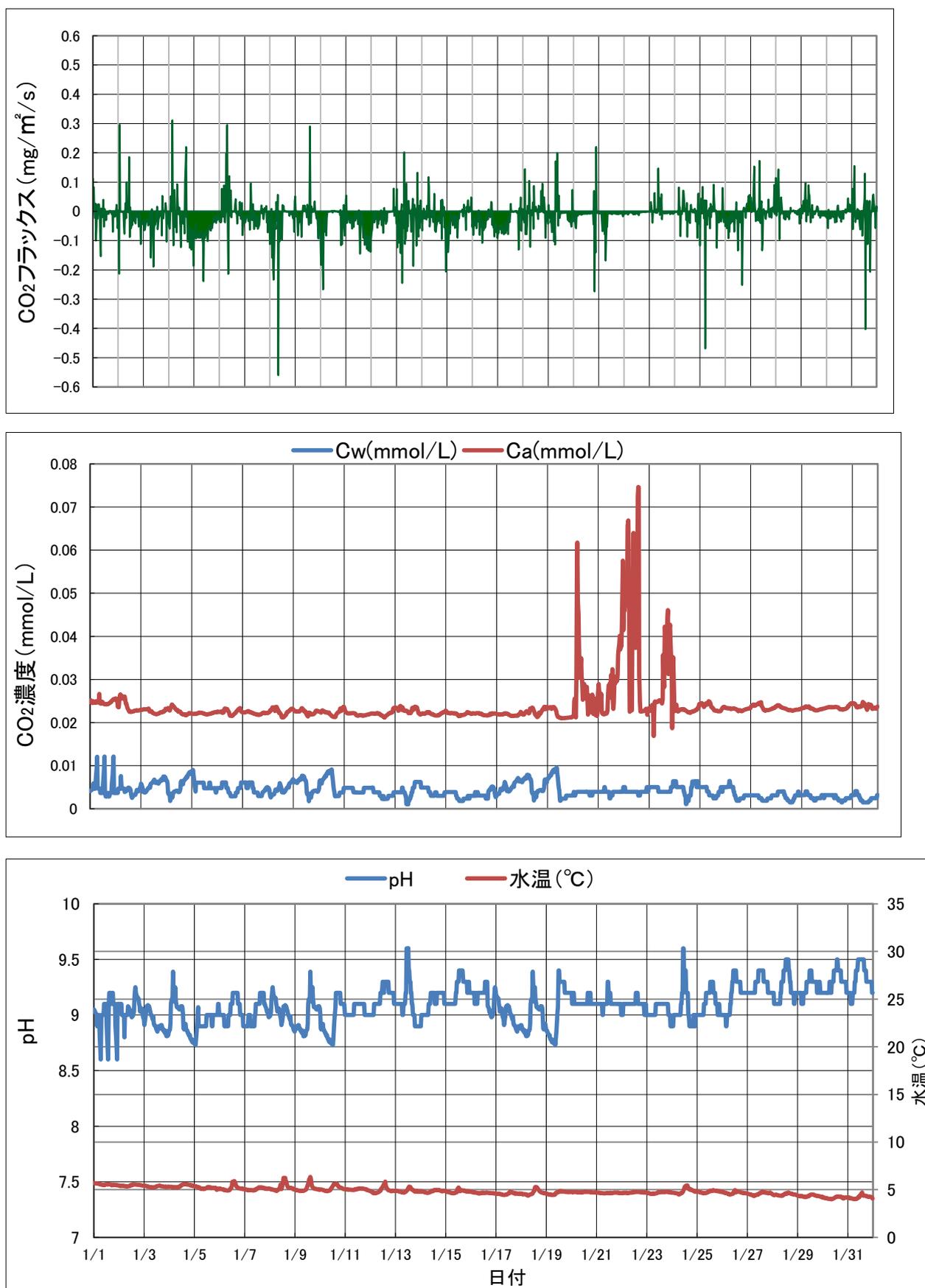


図 8.(a) 2012 年 1 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

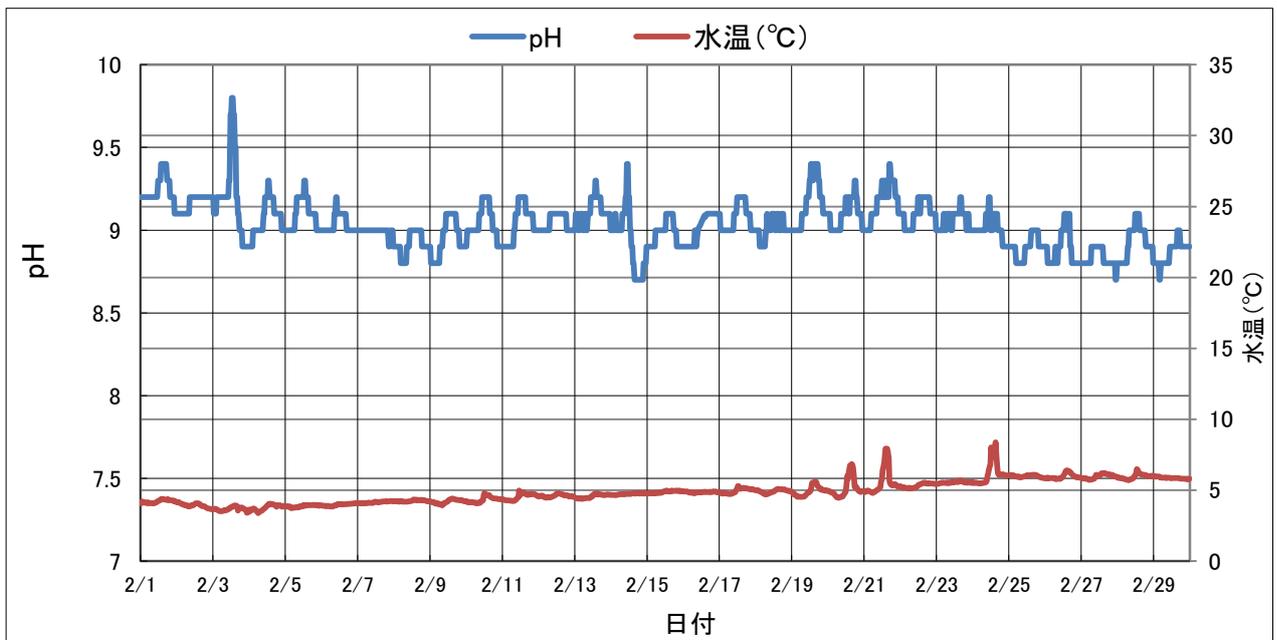
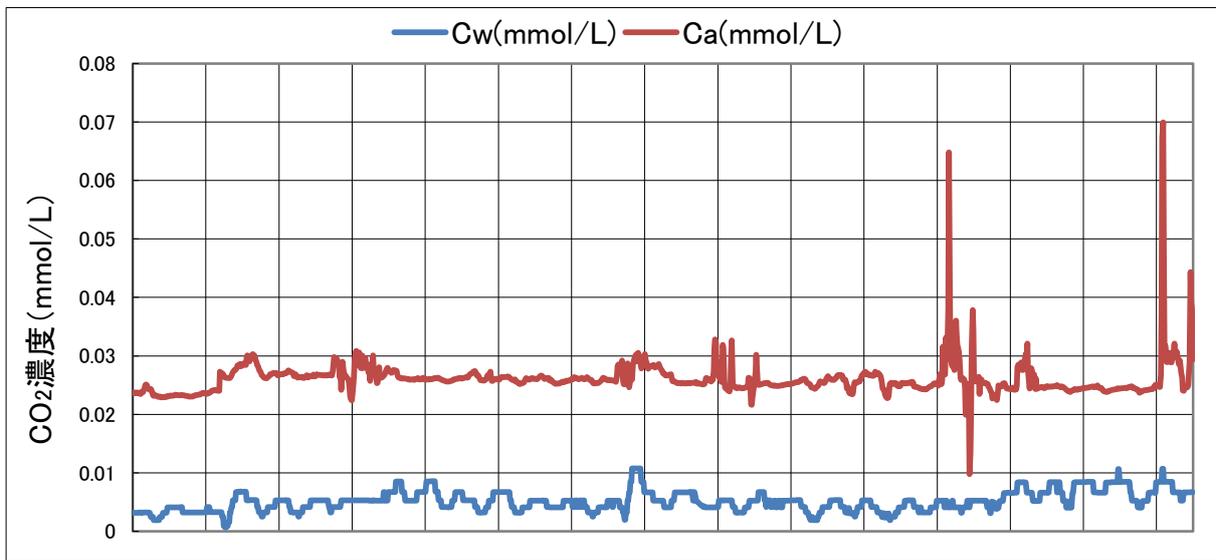
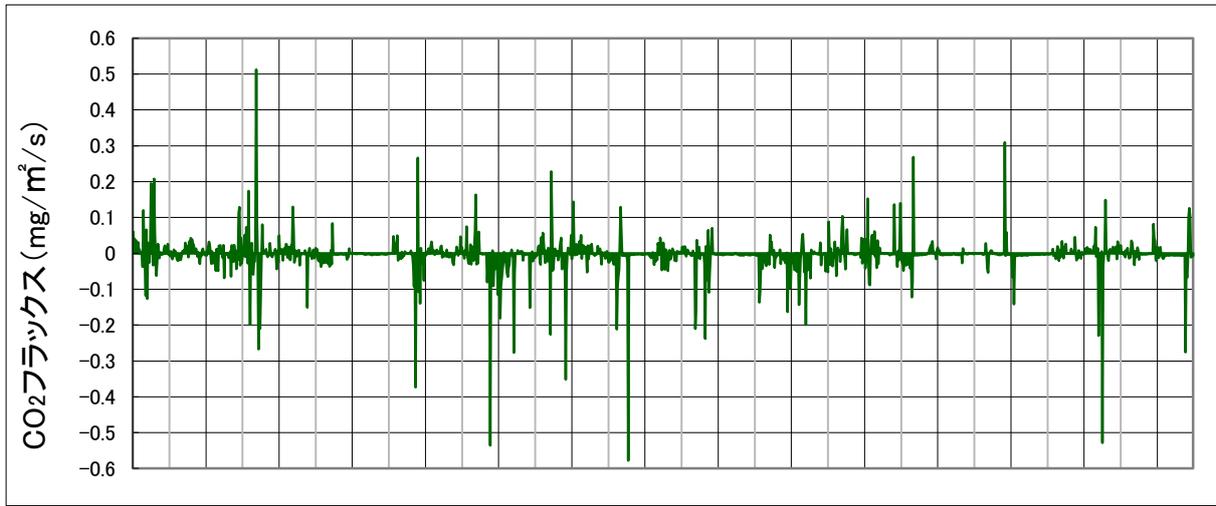


図 8.(b) 2012 年 2 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

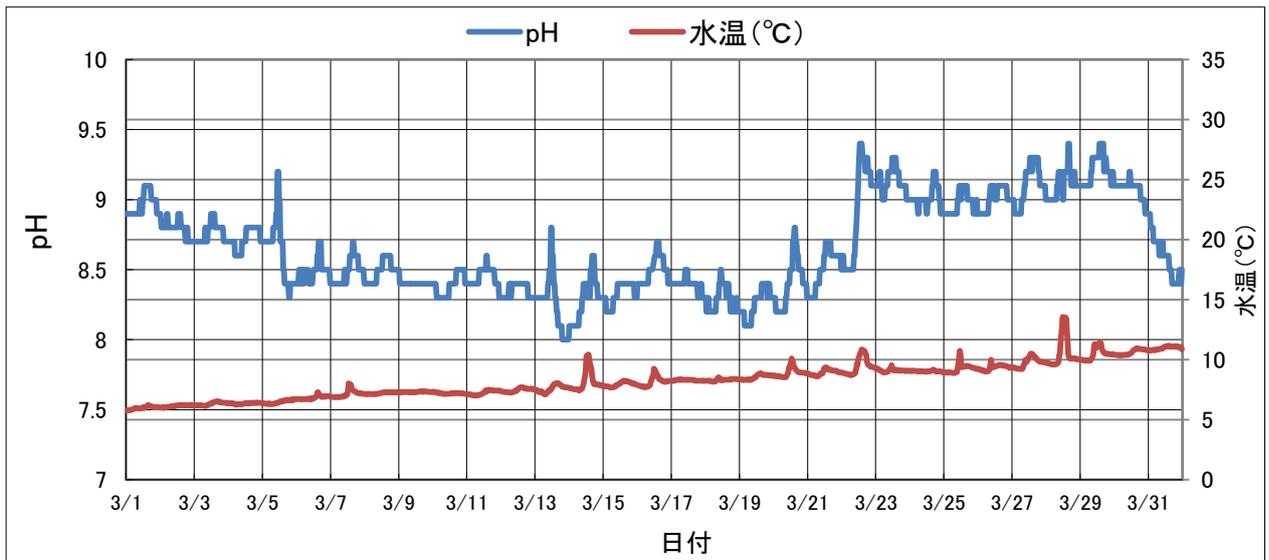
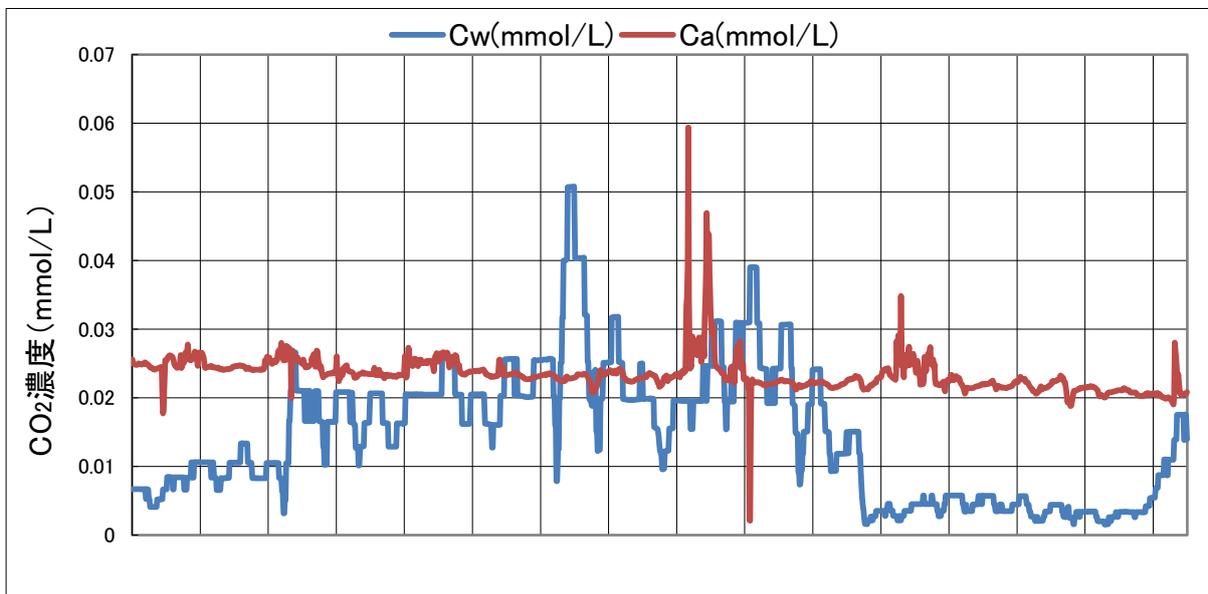
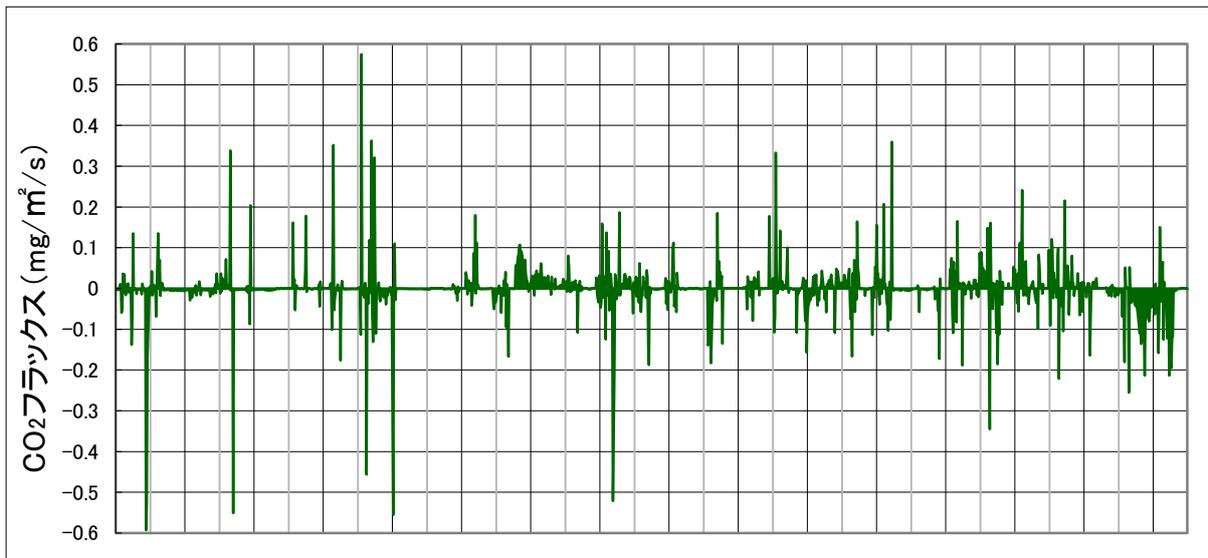


図 8.(c) 2012 年 3 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

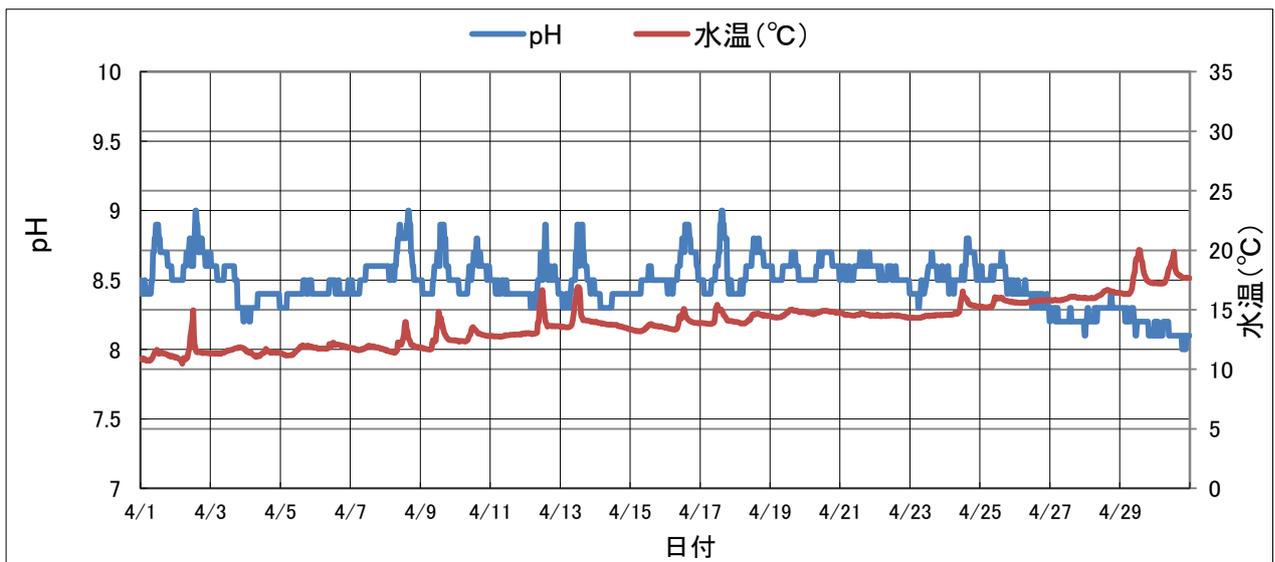
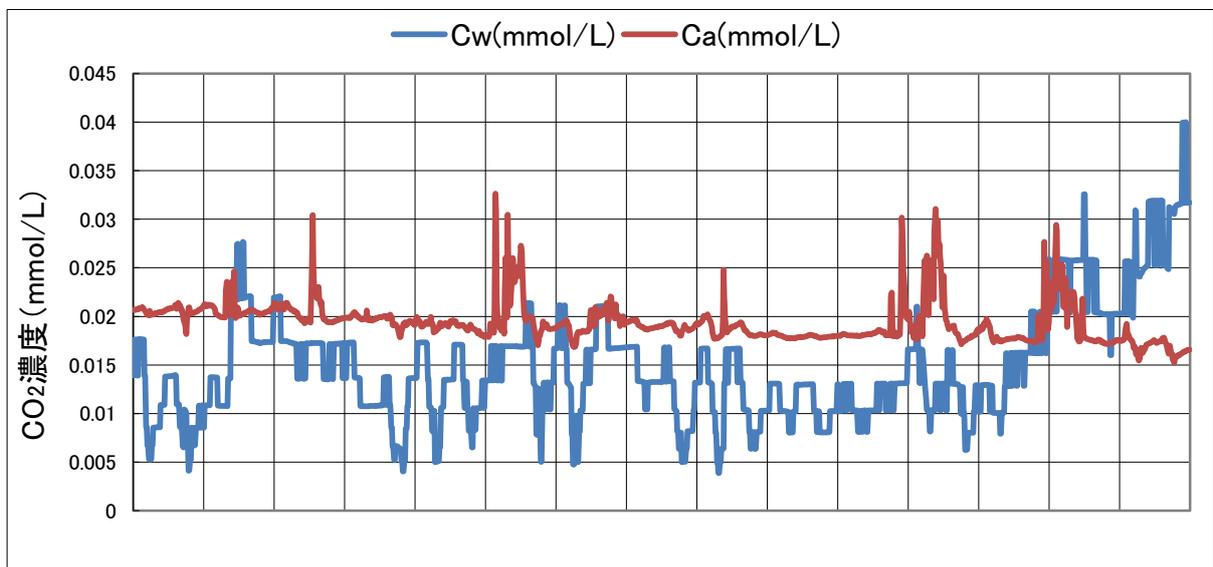
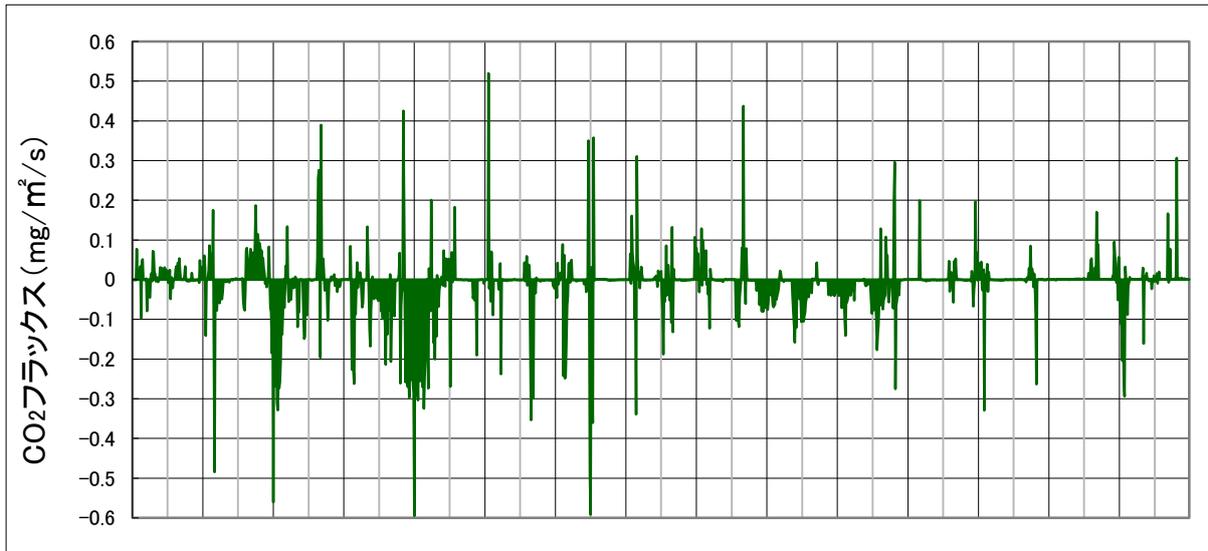


図 8.(d) 2012 年 4 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図)、各二酸化炭素濃度(中図)、pH 及び水温(下図)である。

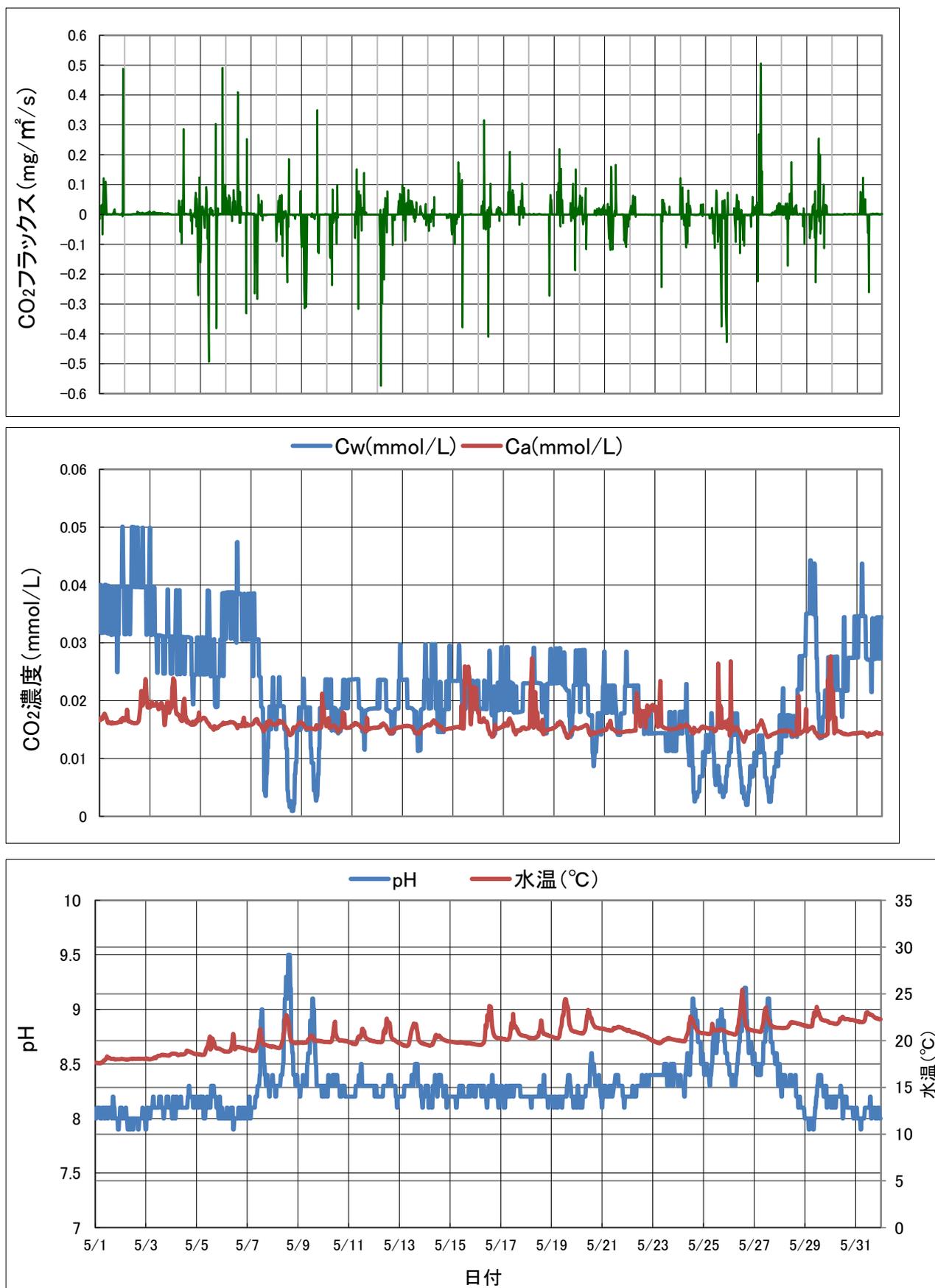


図 8.(e) 2012 年 5 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

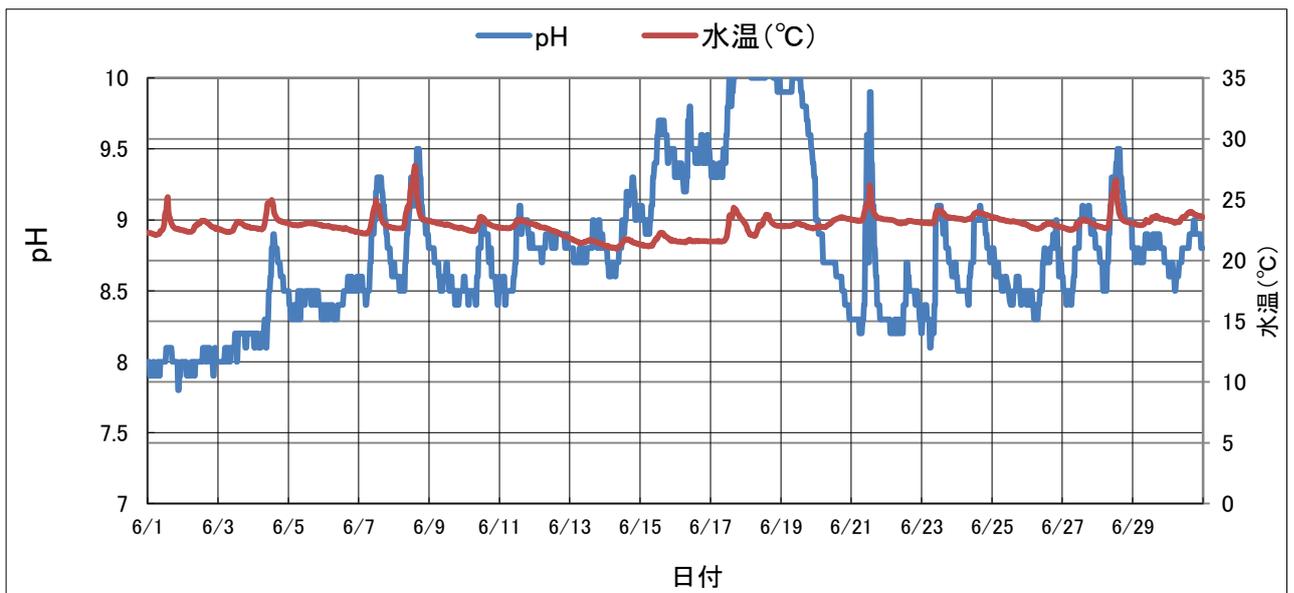
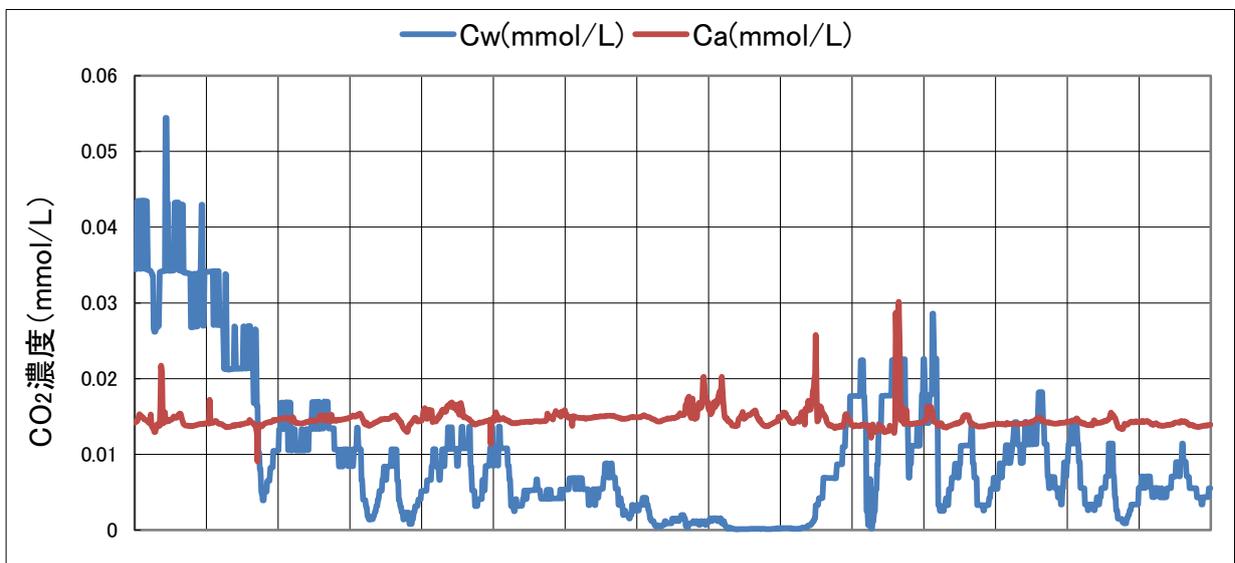
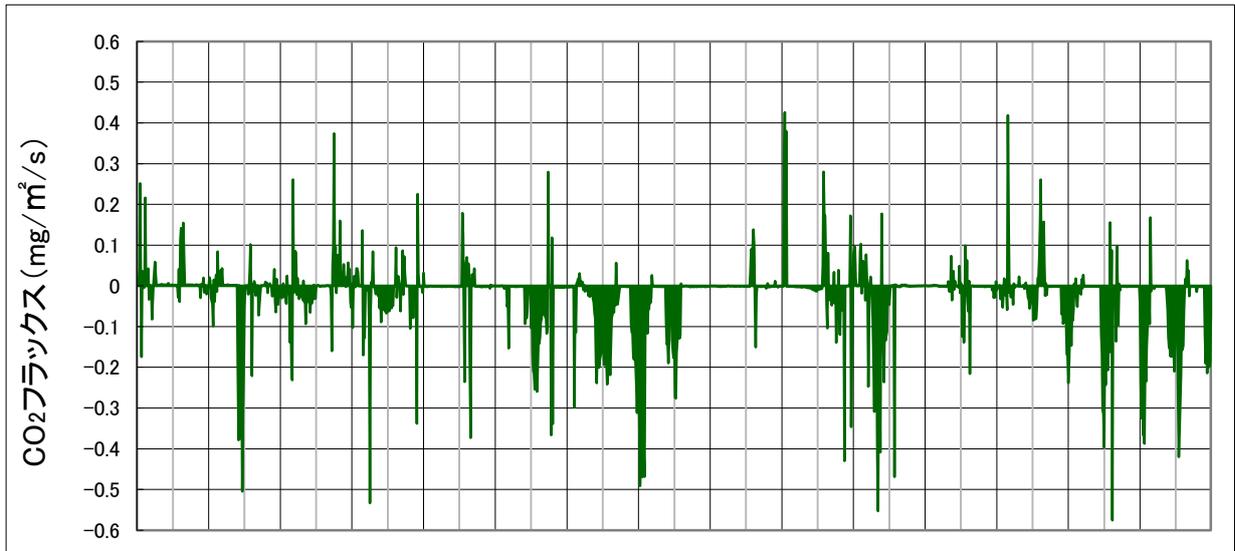


図 8.(f) 2012 年 6 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

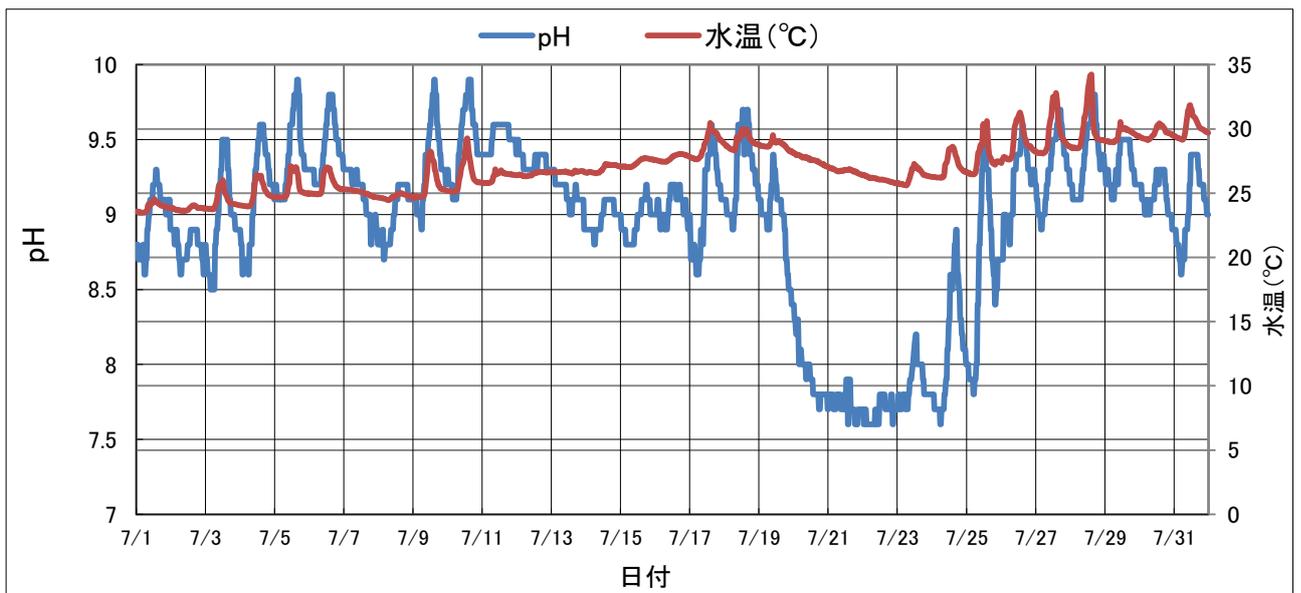
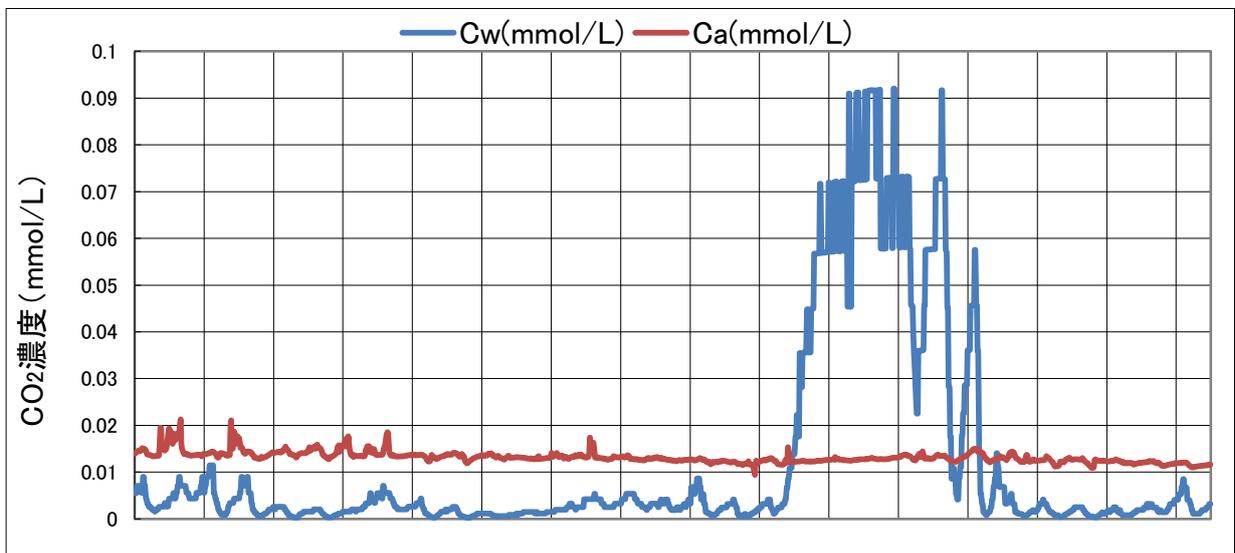
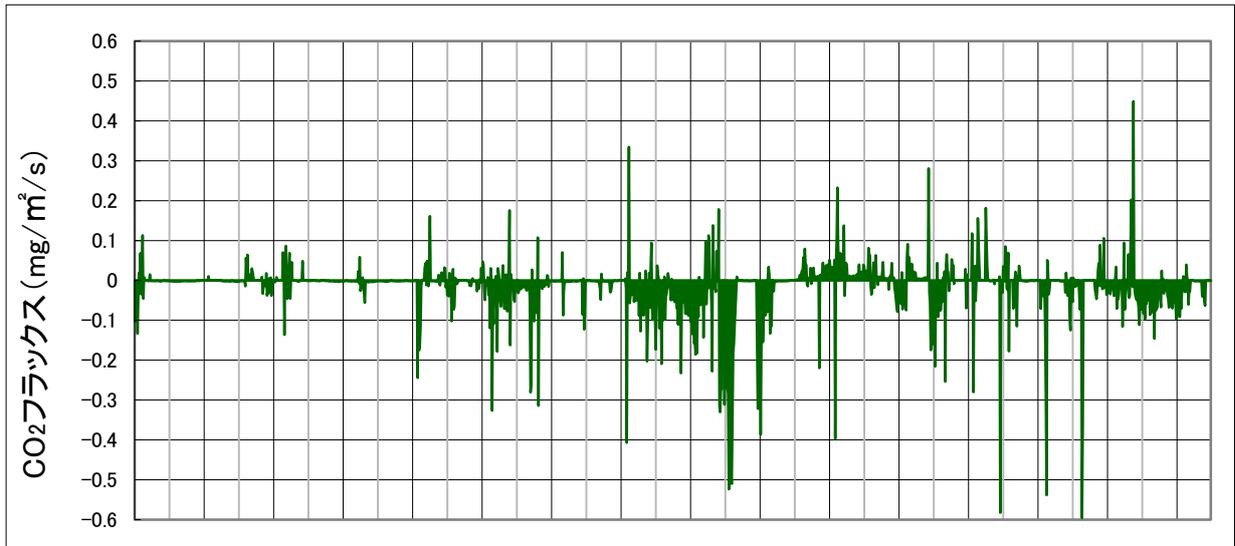


図 8.(g) 2012 年 7 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

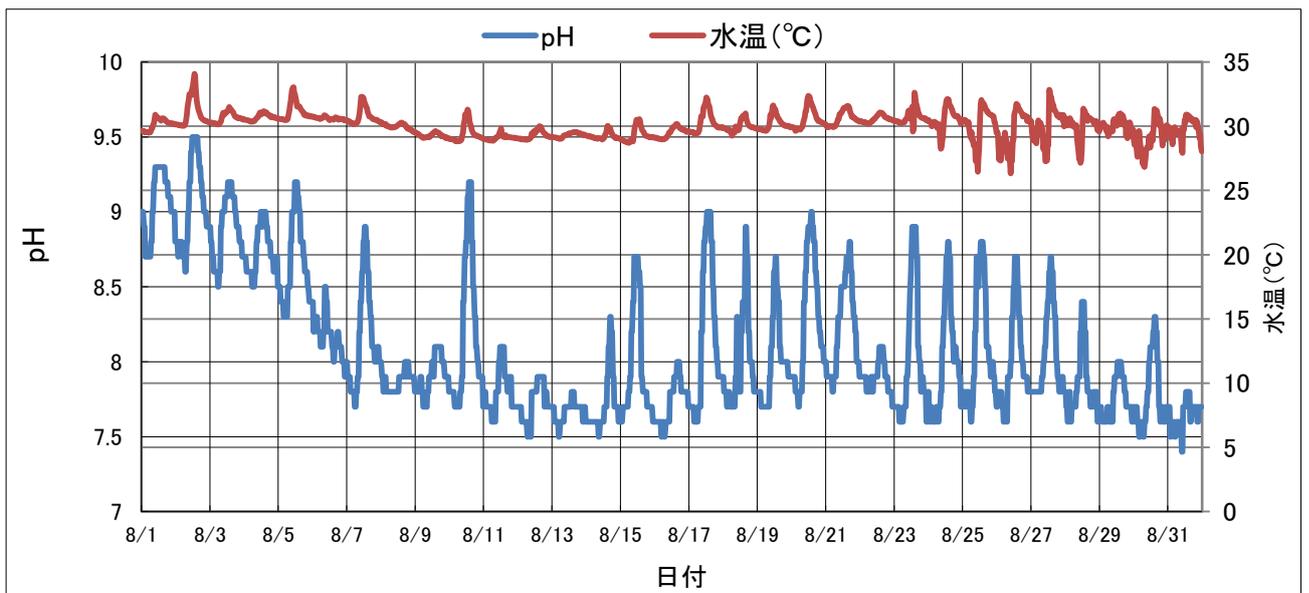
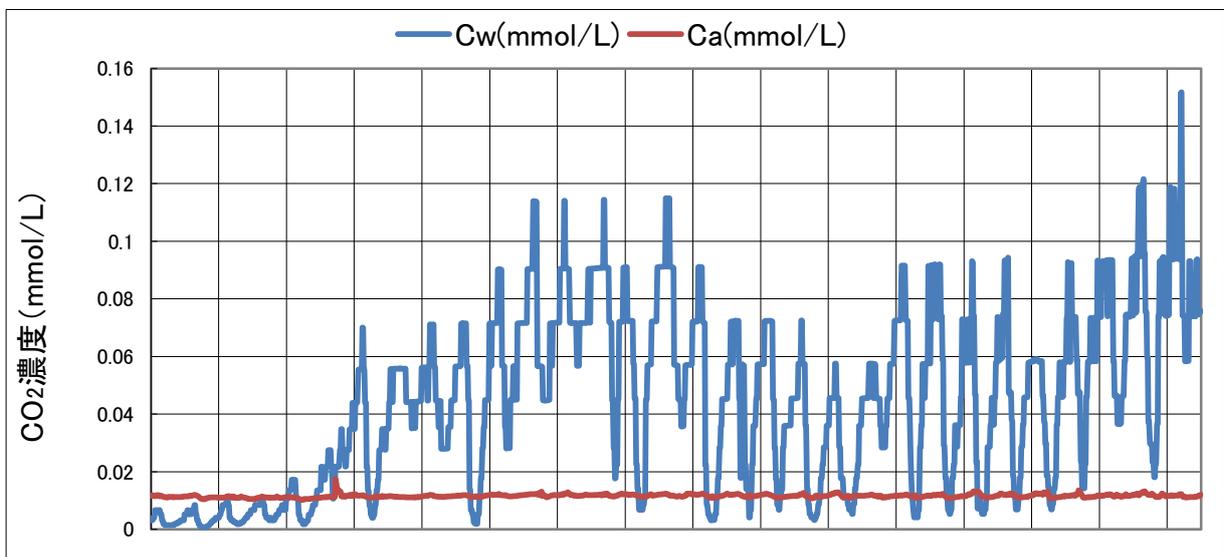
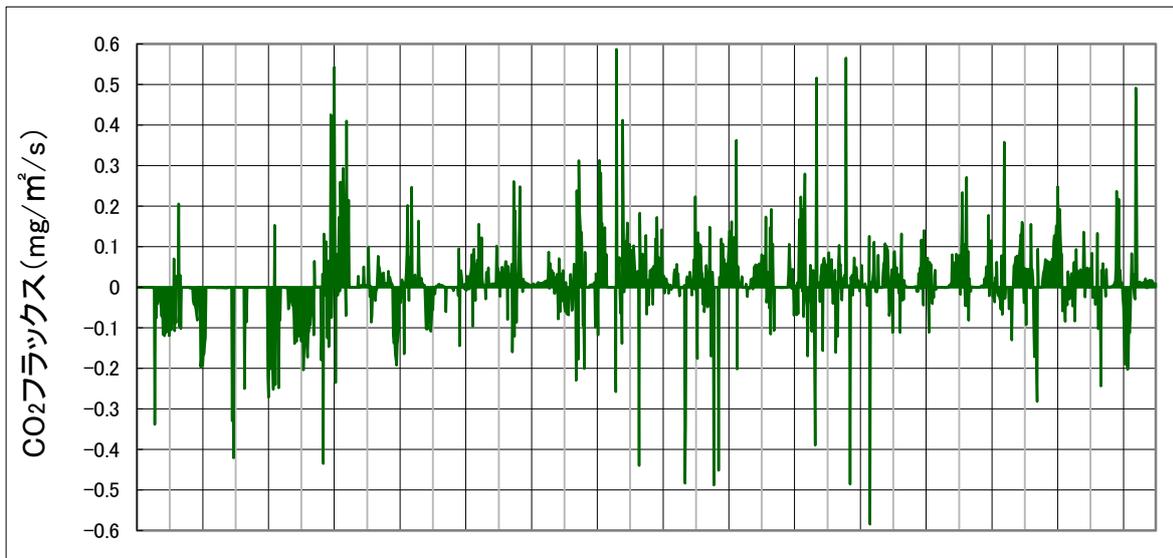


図 8.(h) 2012 年 8 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

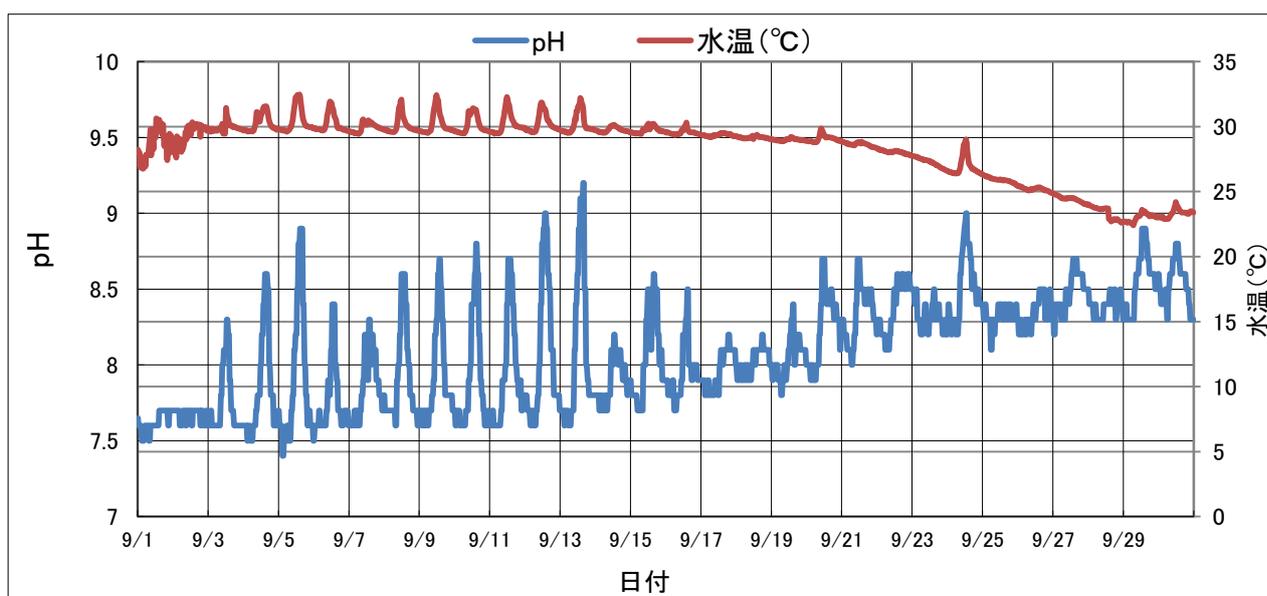
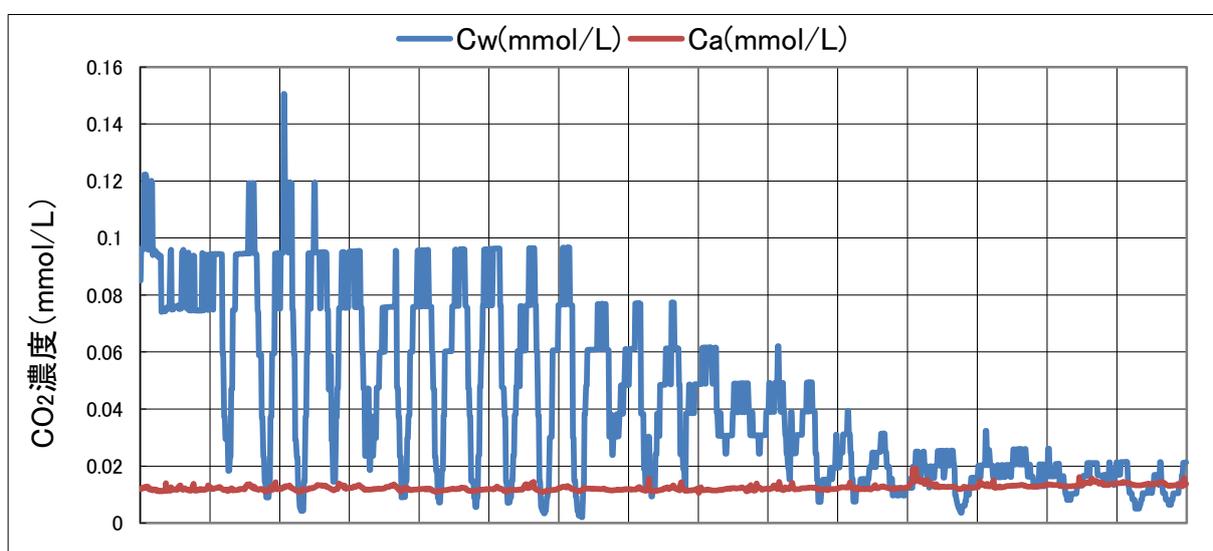
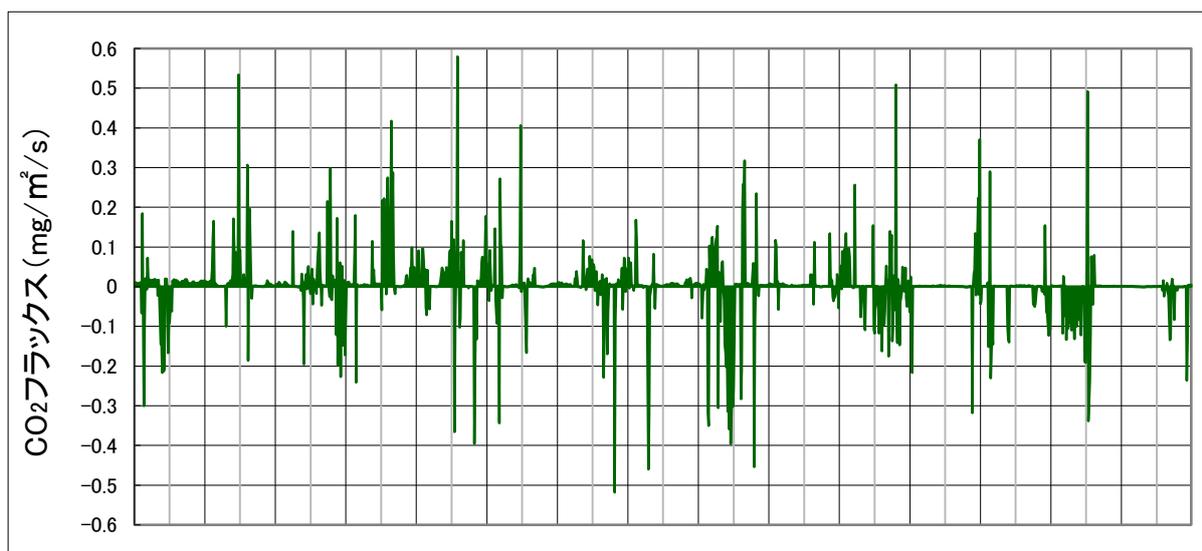


図 8.(i) 2012 年 9 月における各値の時間変化
 ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

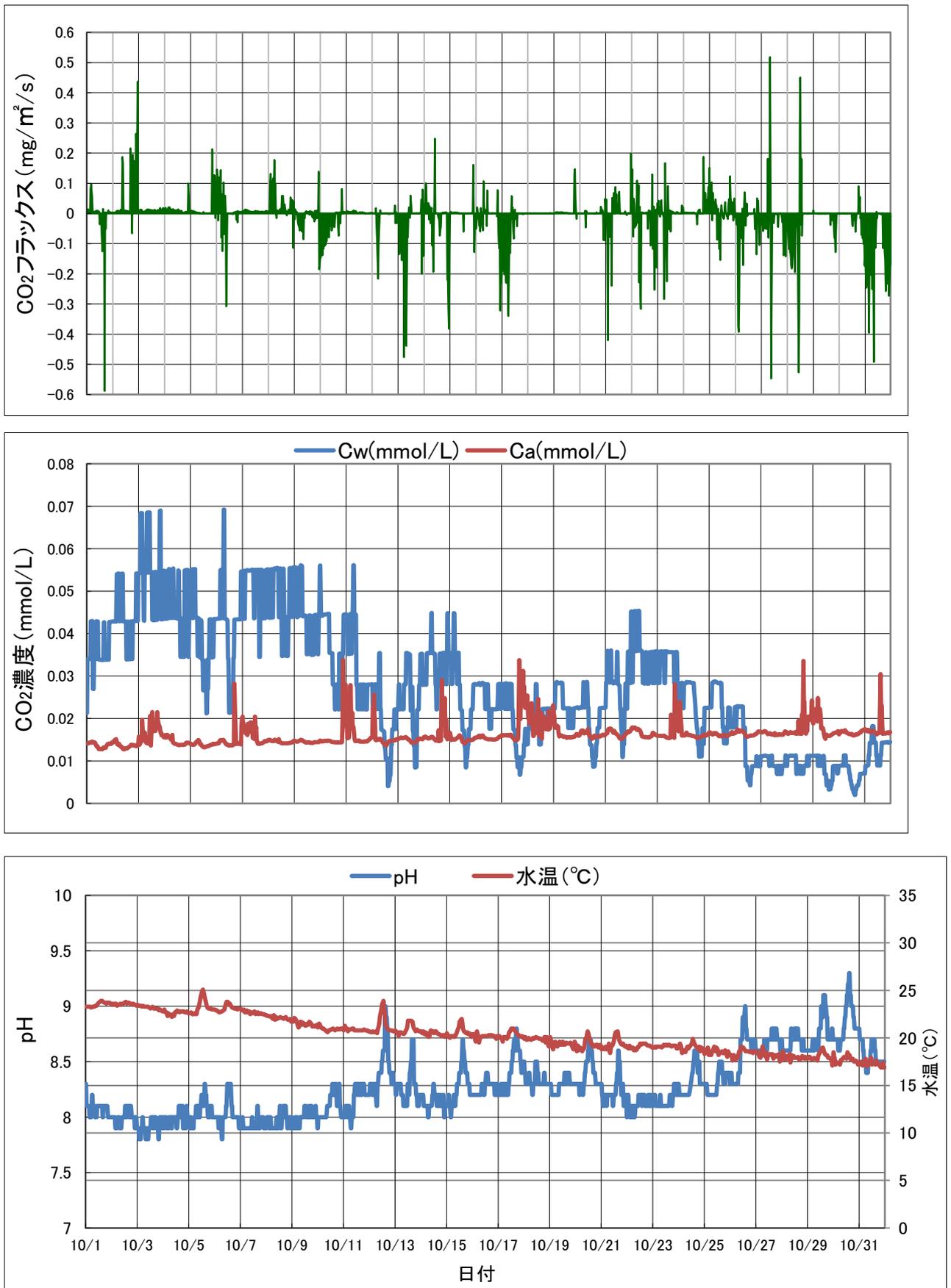


図 8.(j) 2012 年 10 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

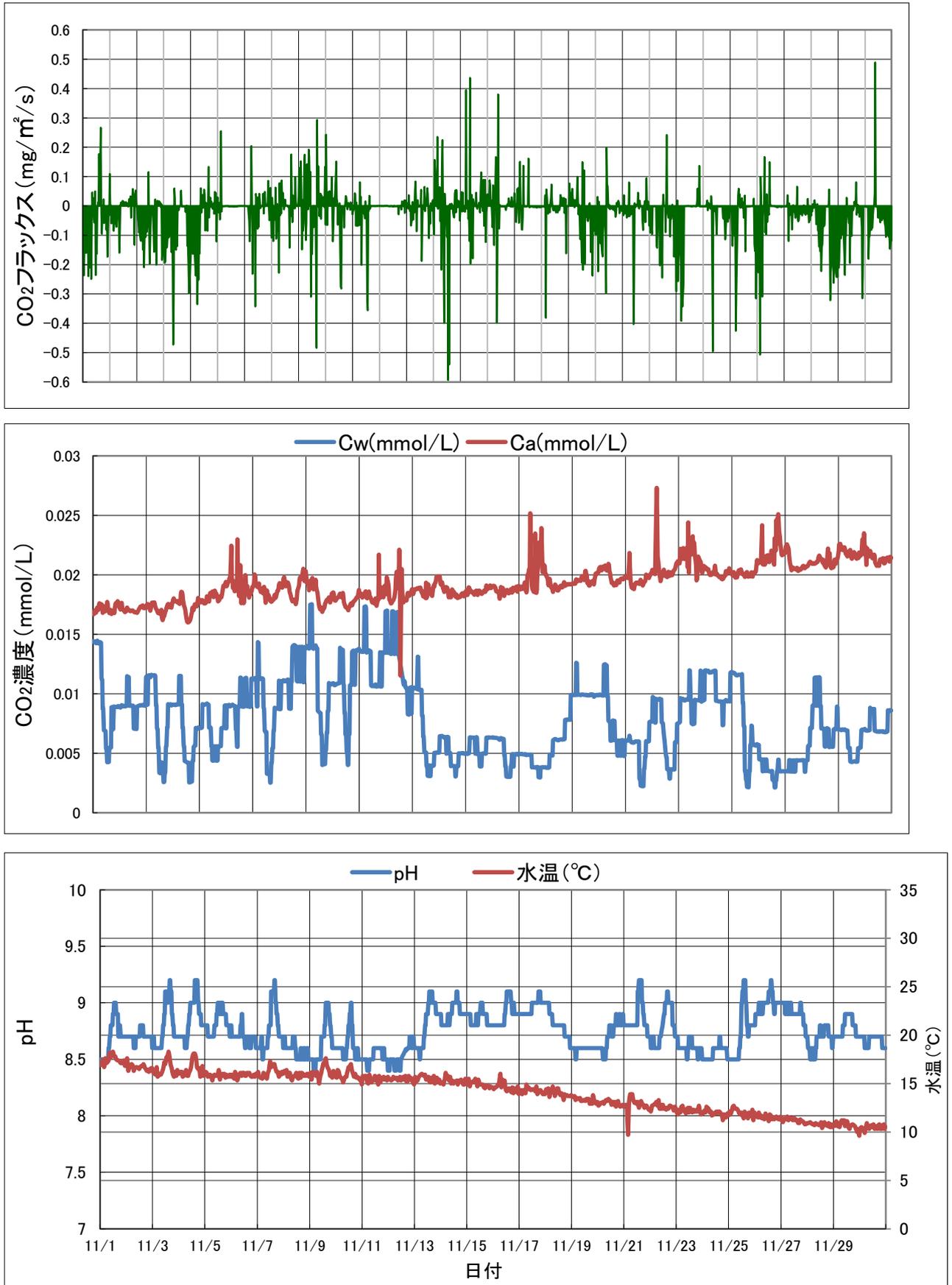


図 8.(k) 2012 年 11 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である。

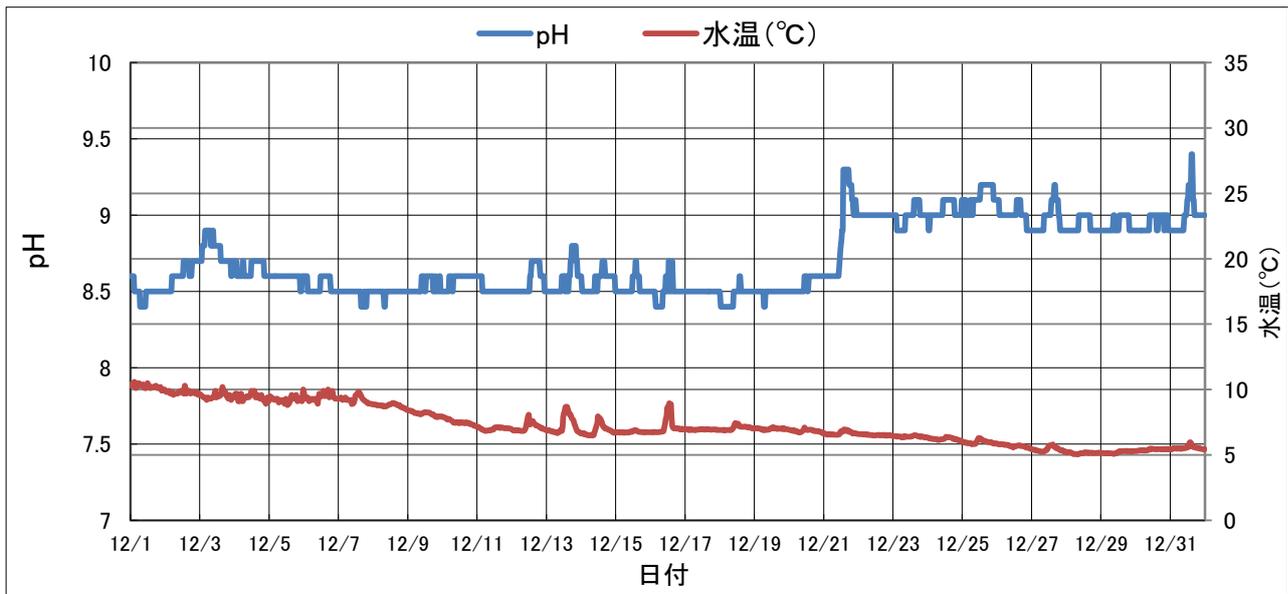
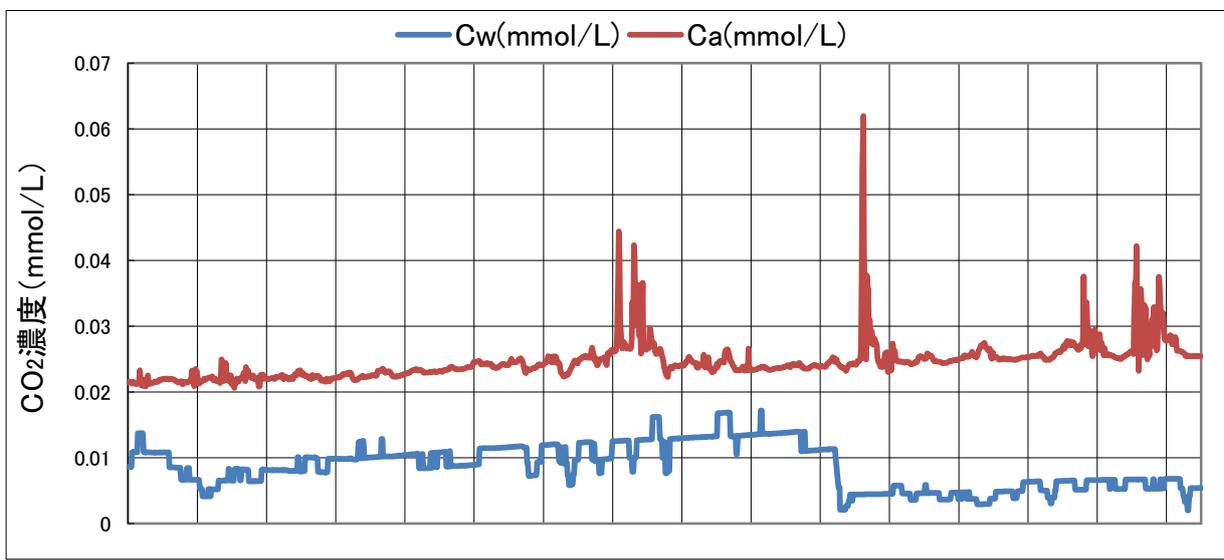
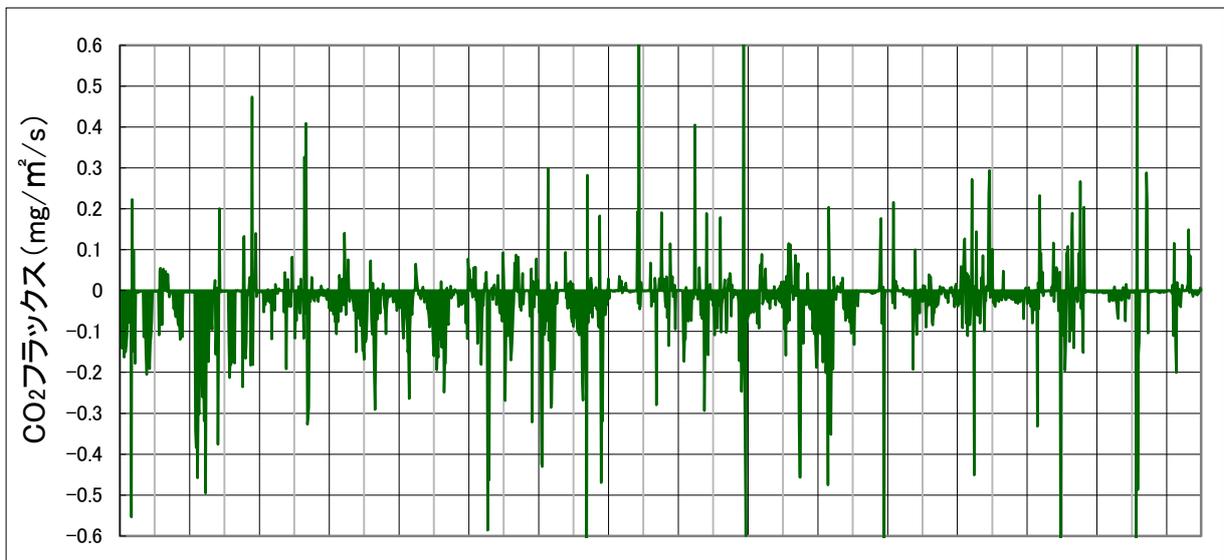


図 8.(1) 2012 年 12 月における各値の時間変化

ただし、二酸化炭素フラックス(上図), 各二酸化炭素濃度(中図), pH 及び水温(下図)である.

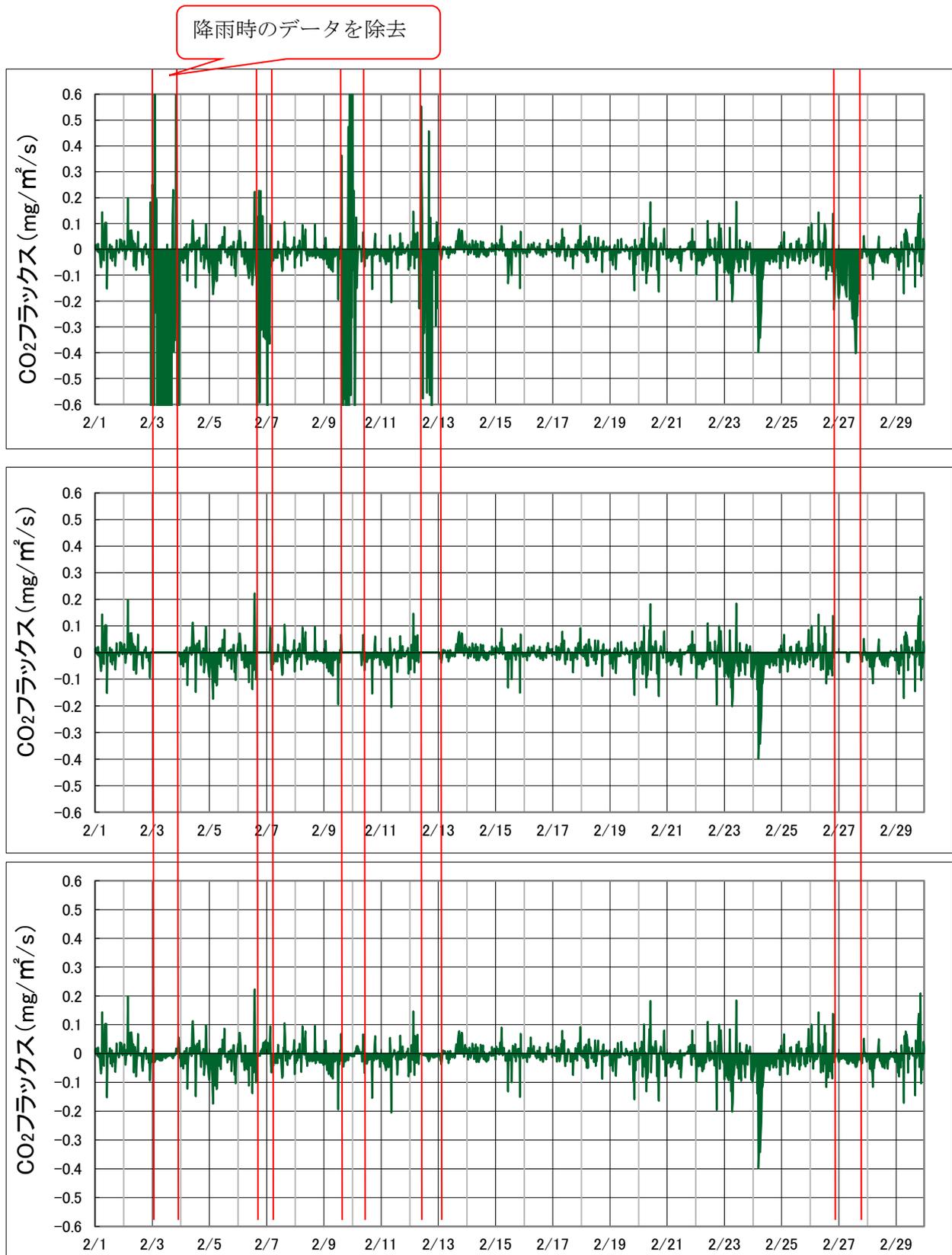


図9 2008年2月のフラックスの時間変化
 ただし、補完前（上図）、データ除去時（中図）、補完後（下図）である。

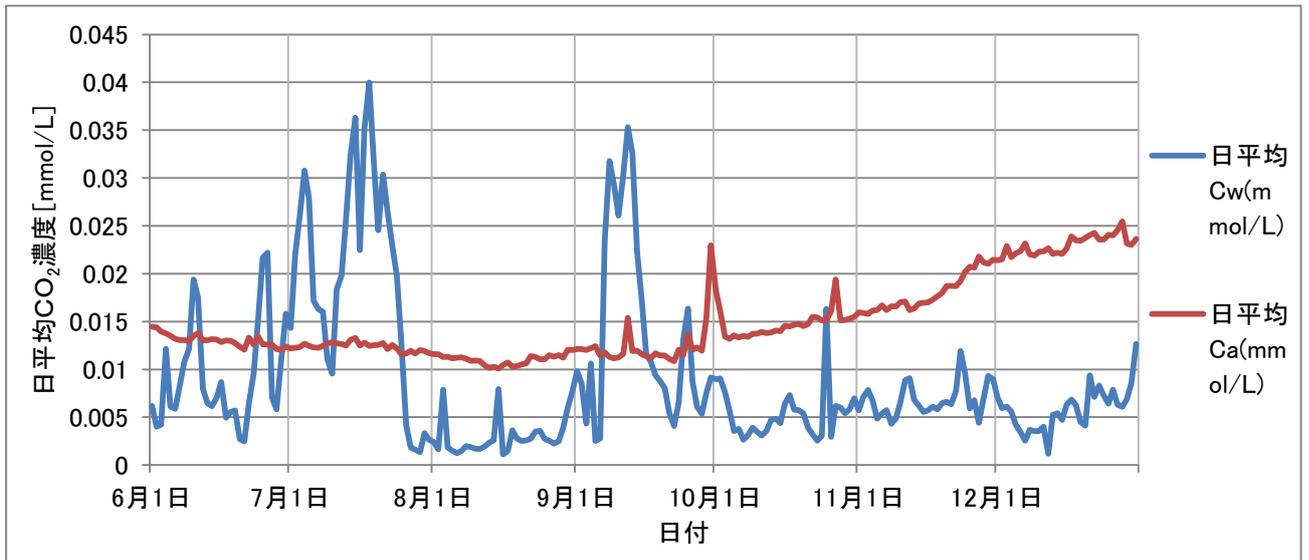
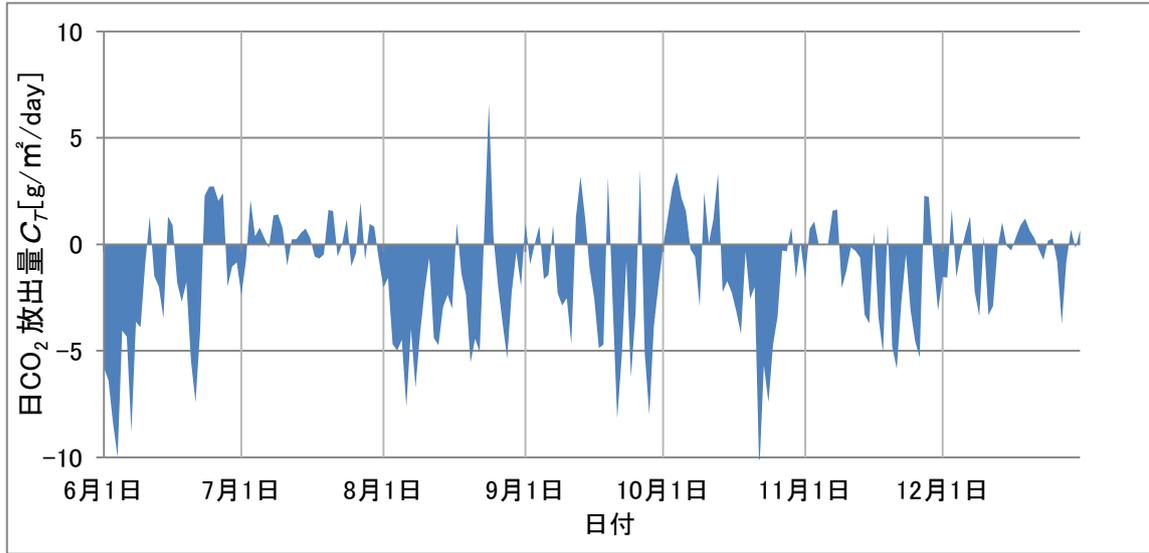


図 10.(a) 2007 年における各値の日変化

ただし、日二酸化炭素フラックス(上図), 各日平均二酸化炭素濃度(下図)である.

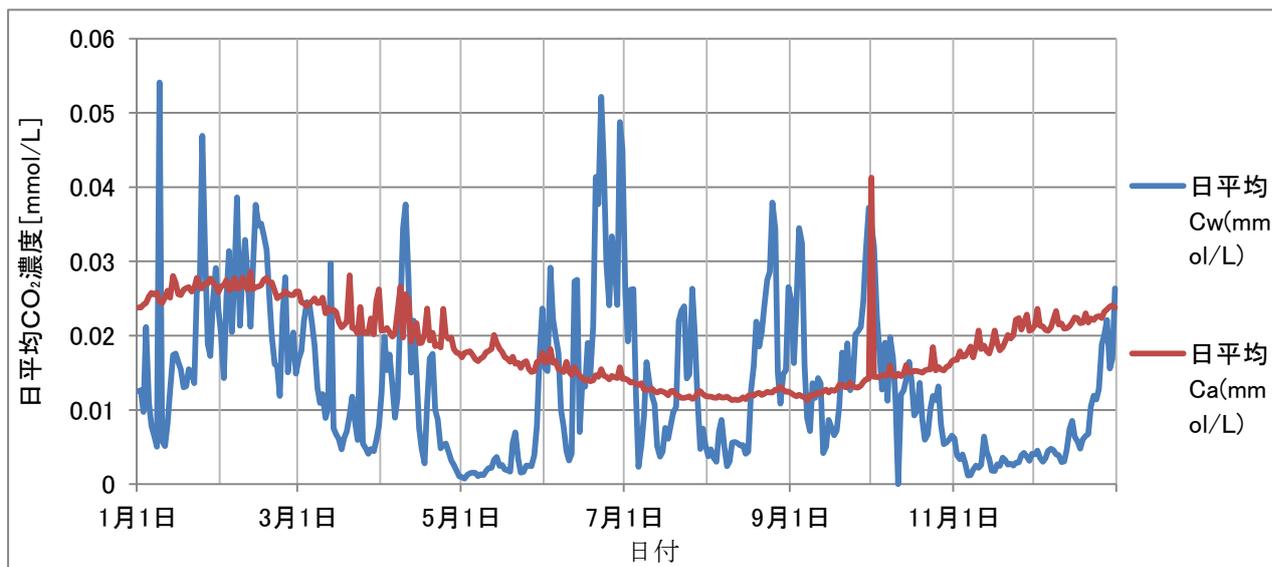
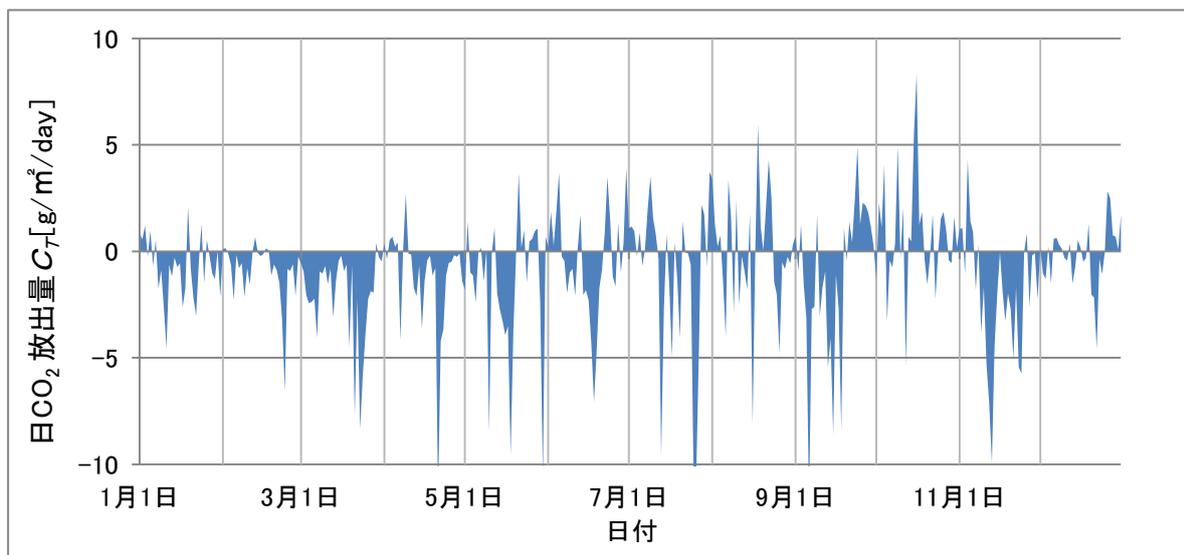


図 10.(b) 2008 年における各値の日変化

ただし、日二酸化炭素フラックス(上図), 各日平均二酸化炭素濃度(下図)である.

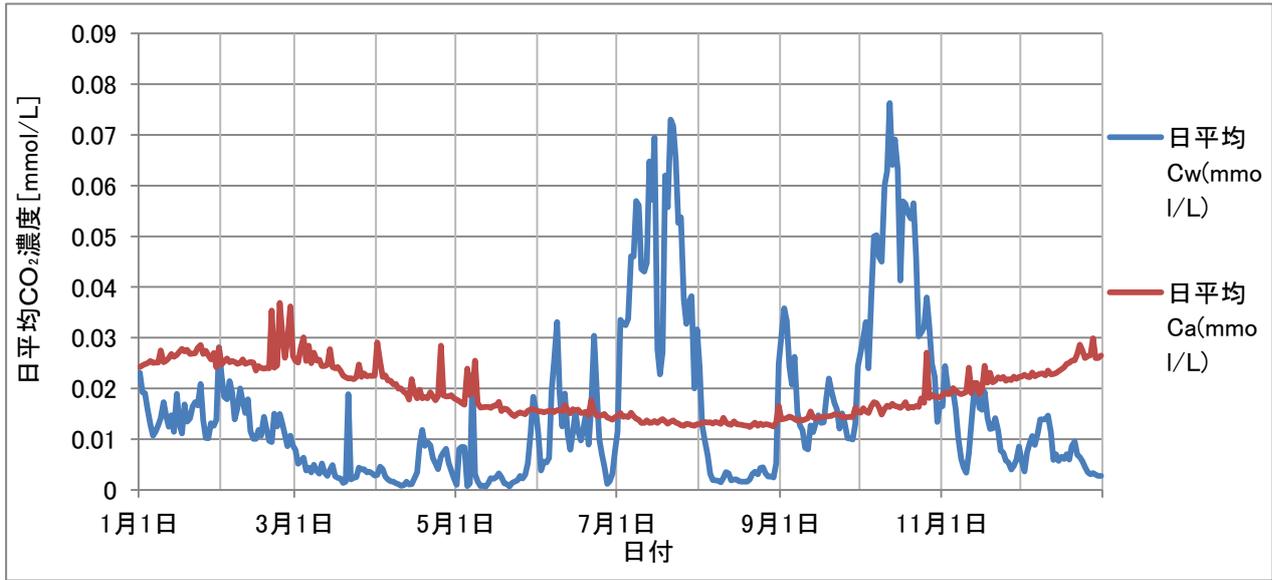
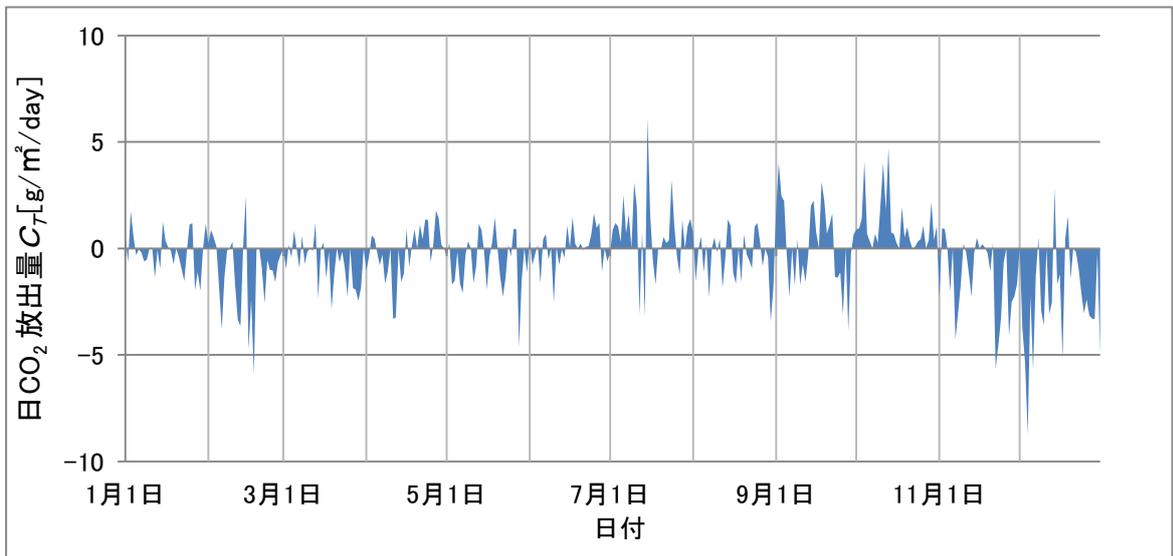


図 10.(c) 2009 年における各値の日変化
 ただし、日二酸化炭素フラックス(上図), 各日平均二酸化炭素濃度(下図)である.

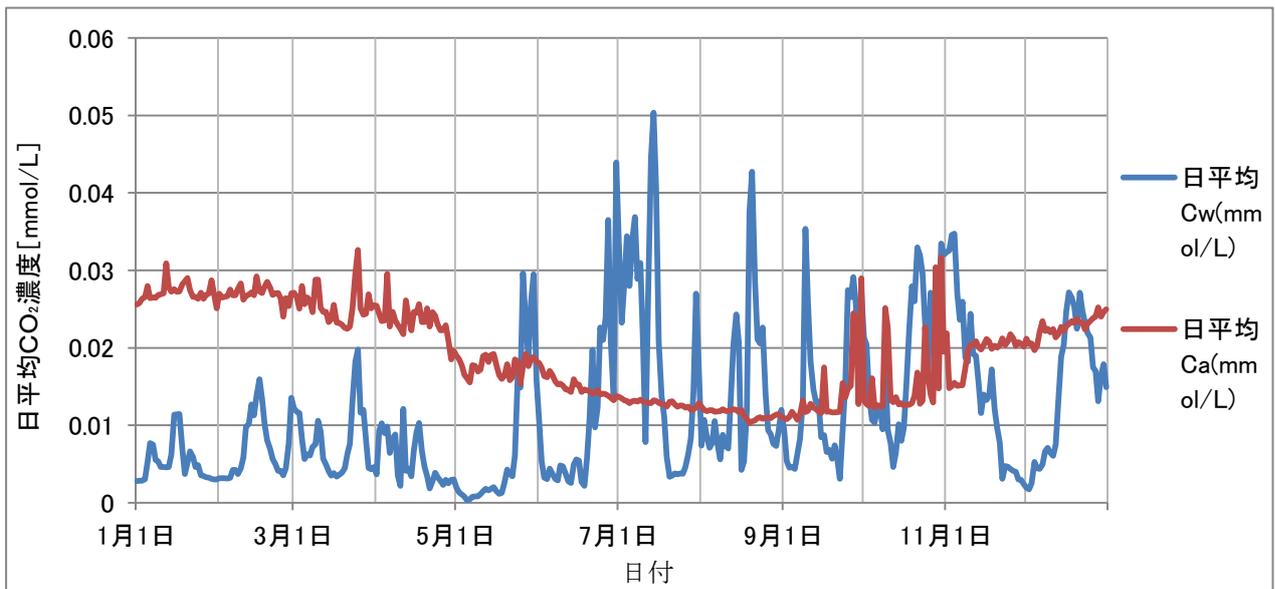
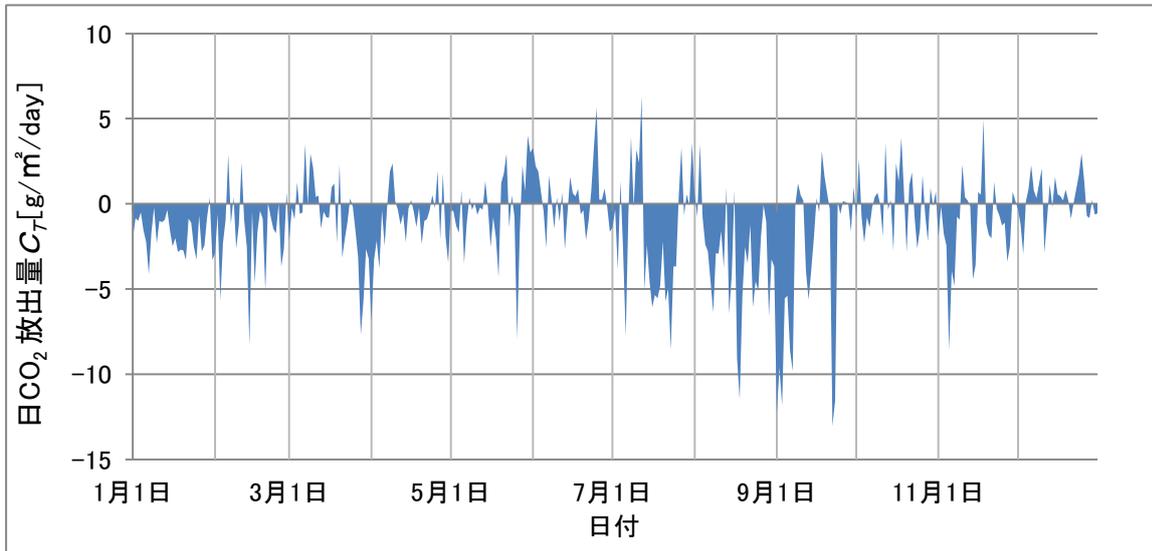


図 10.(d) 2010 年における各値の日変化

ただし、日二酸化炭素フラックス(上図), 各日平均二酸化炭素濃度(下図)である.

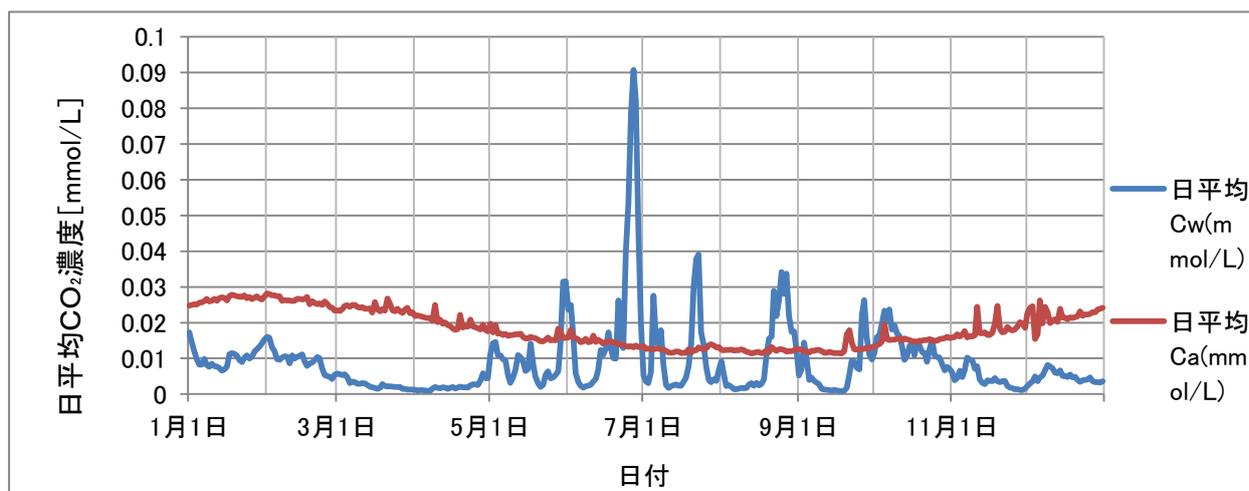
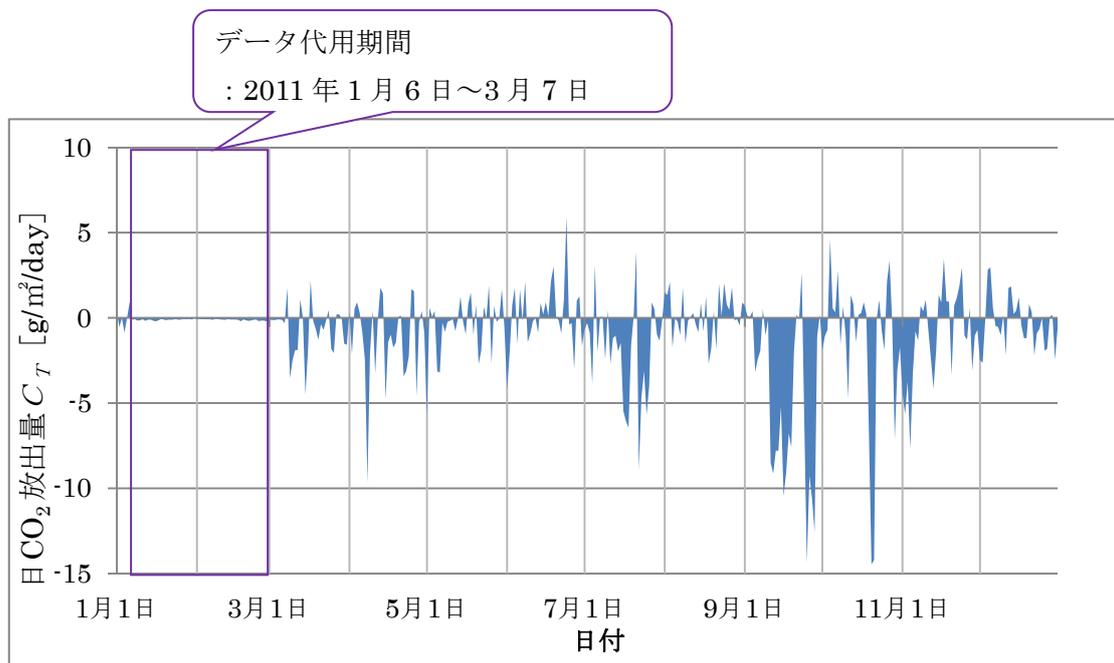


図 10.(e) 2011 年における各値の日変化

ただし、日二酸化炭素フラックス(上図), 各日平均二酸化炭素濃度(下図)である.

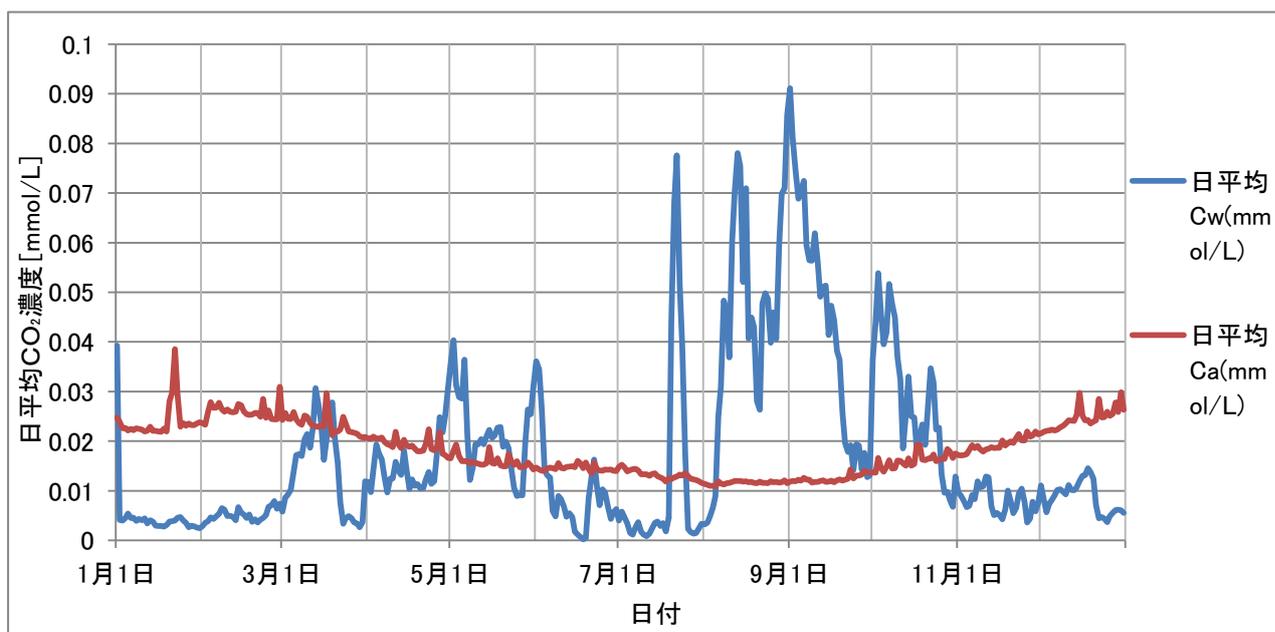
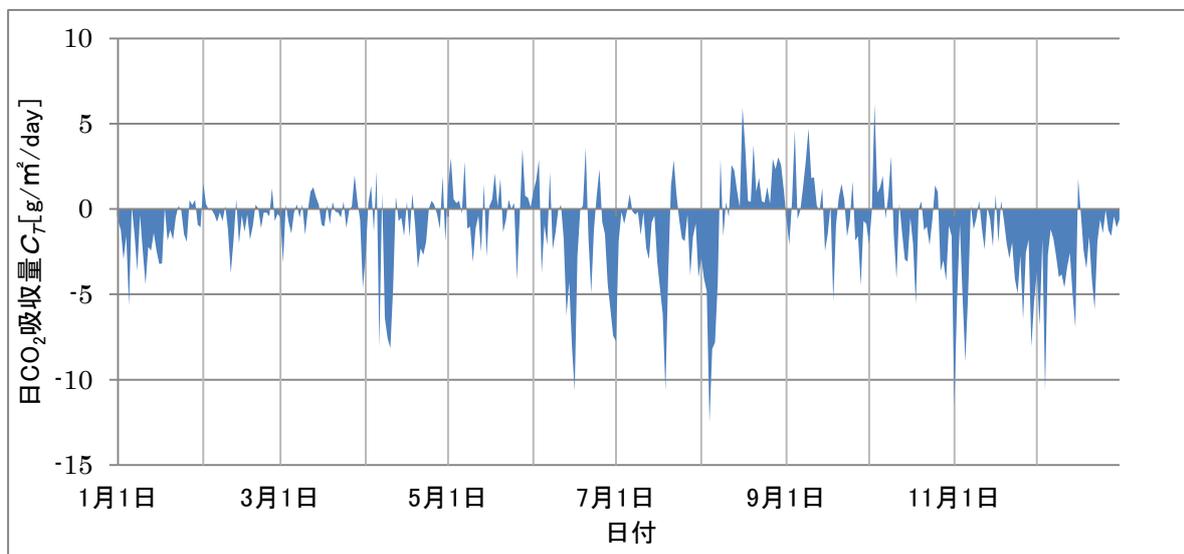


図 10.(f) 2012 年における各値の日変化

ただし、日二酸化炭素フラックス(上図)、各日平均二酸化炭素濃度(下図)である。

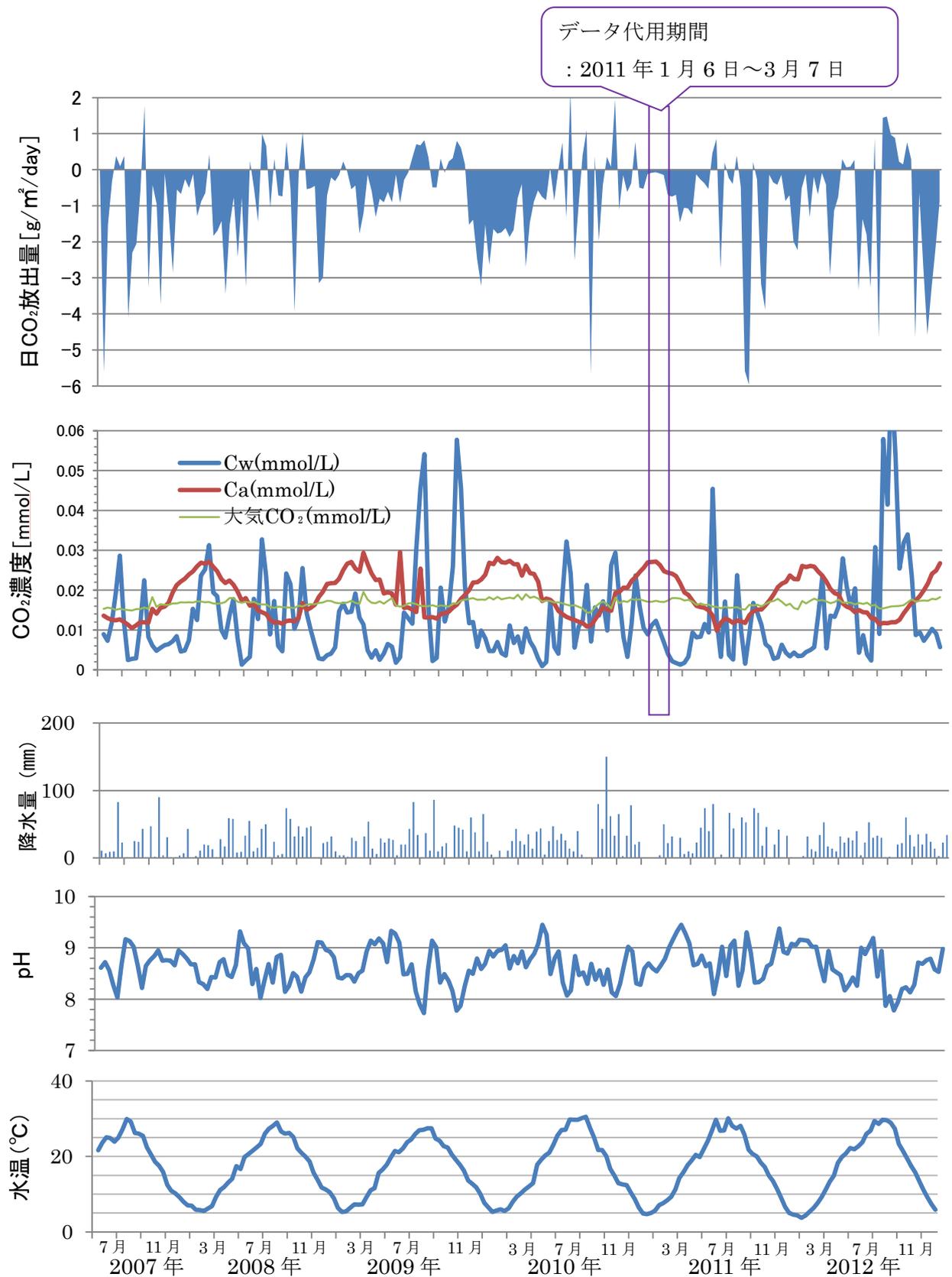


図 11 2007年から2012年までにおける各値の10日平均日変化

ただし、10日平均日二酸化炭素フラックス(上図)、各10日平均二酸化炭素濃度(中上図)、10日合計雨量(中図)、10日平均pH(中下図)、10日平均水温(下図)である。

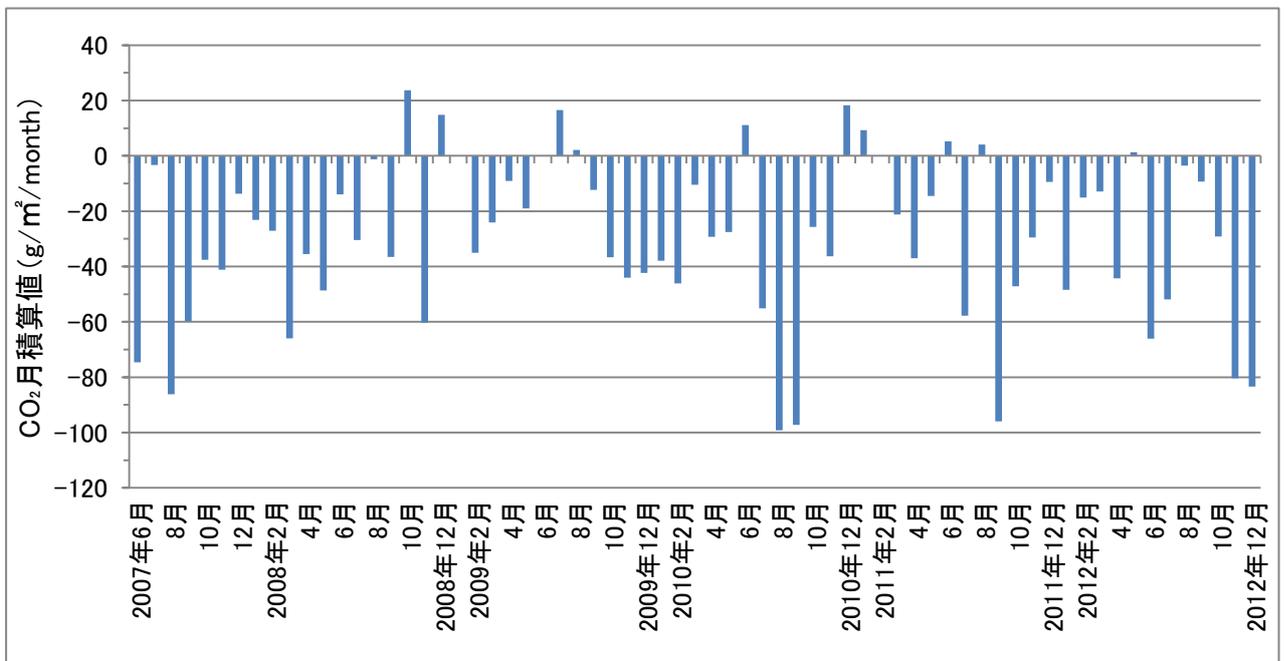


図 12 各月の月積算値

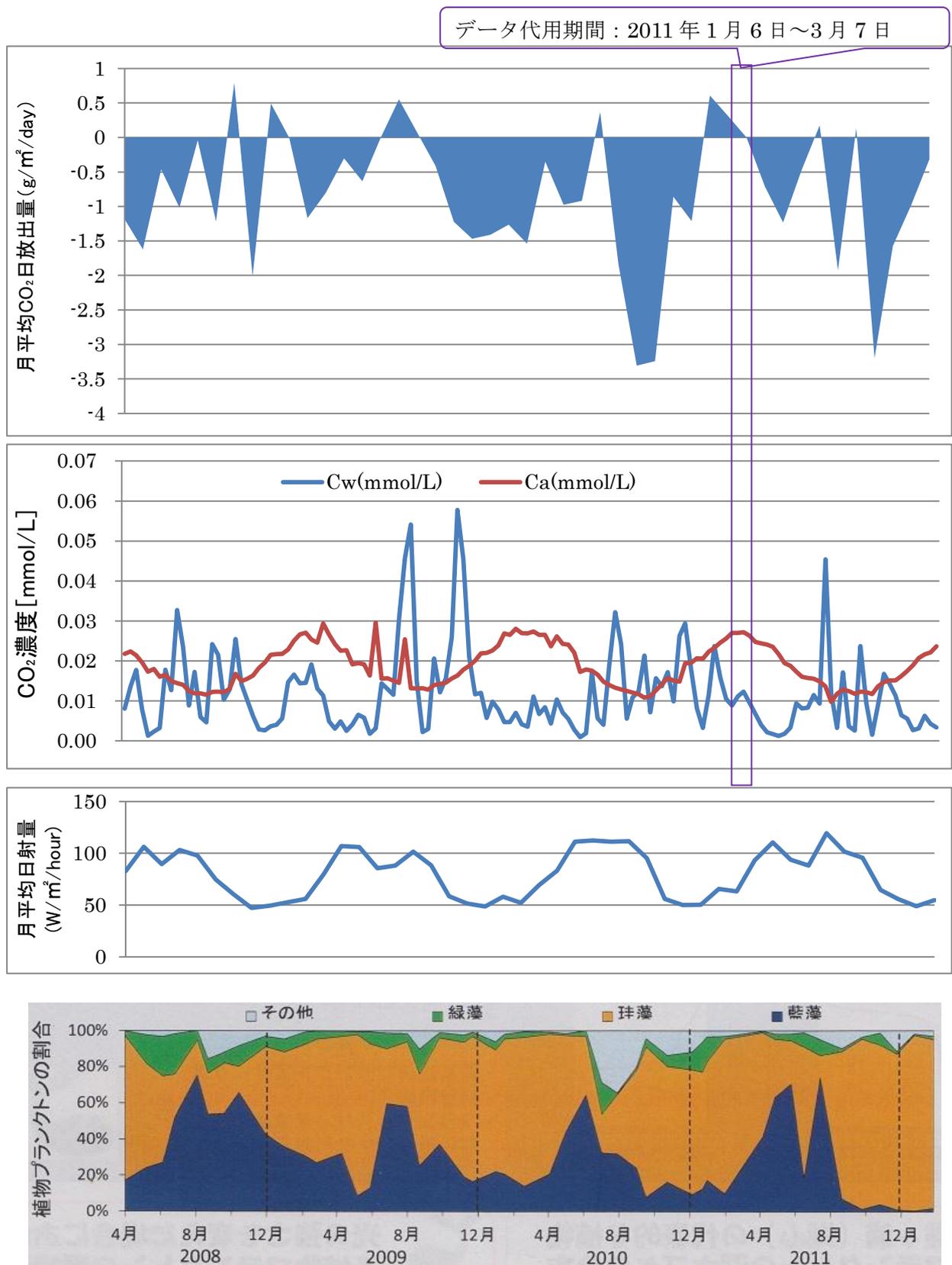


図13 2008年4月から2012年1月における各月平均値
 ただし、月平均日二酸化炭素フラックス（上図）、月平均各二酸化炭素濃度（中上図）、
 月平均日射量（中下図）、霞ヶ浦湖心の植物プランクトンの組成変化（下図）
 （霞ヶ浦環境科学センター，2013より引用）である。

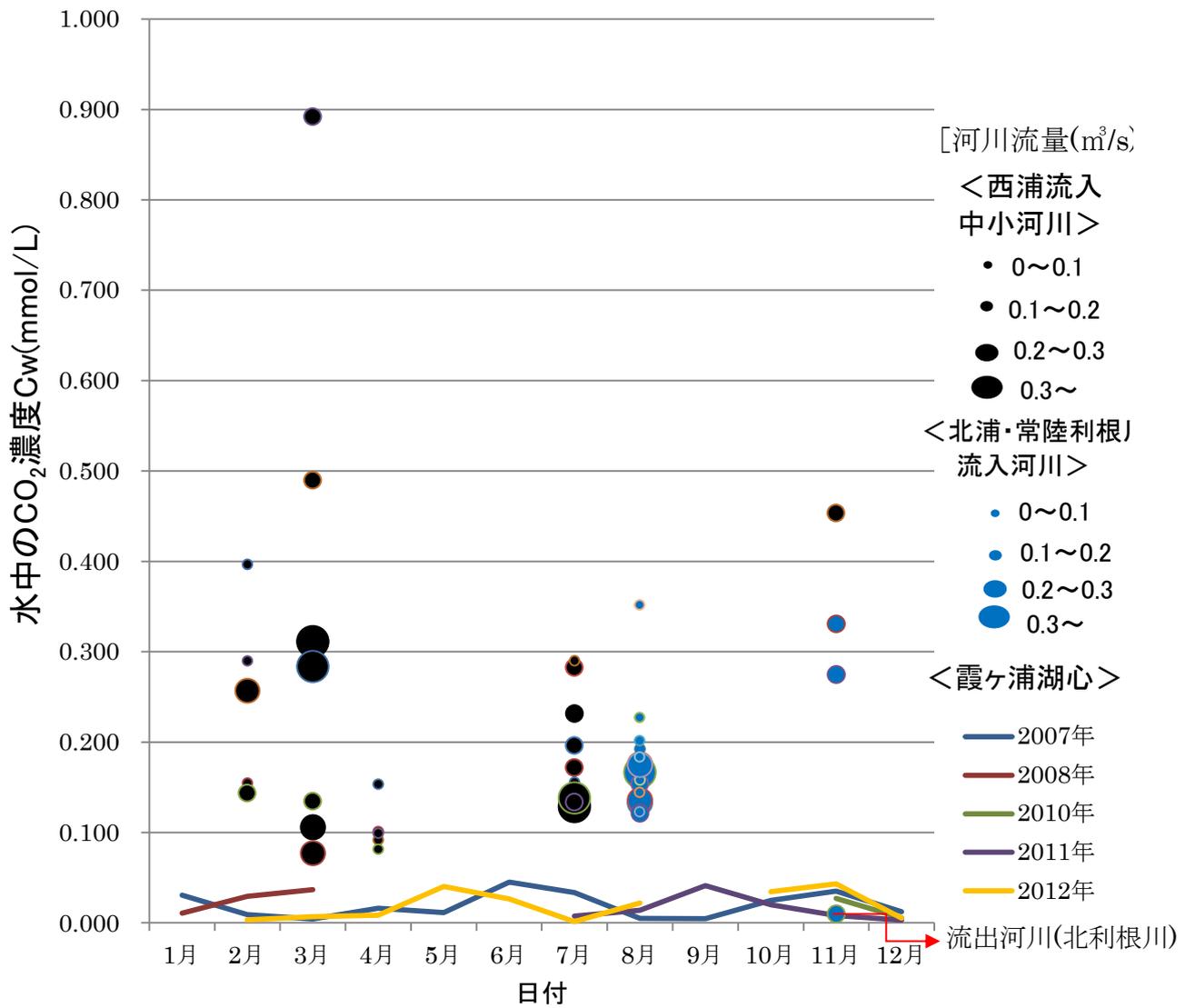


図 14 基底流出時の霞ヶ浦流入河川水・湖沼水中の二酸化炭素濃度

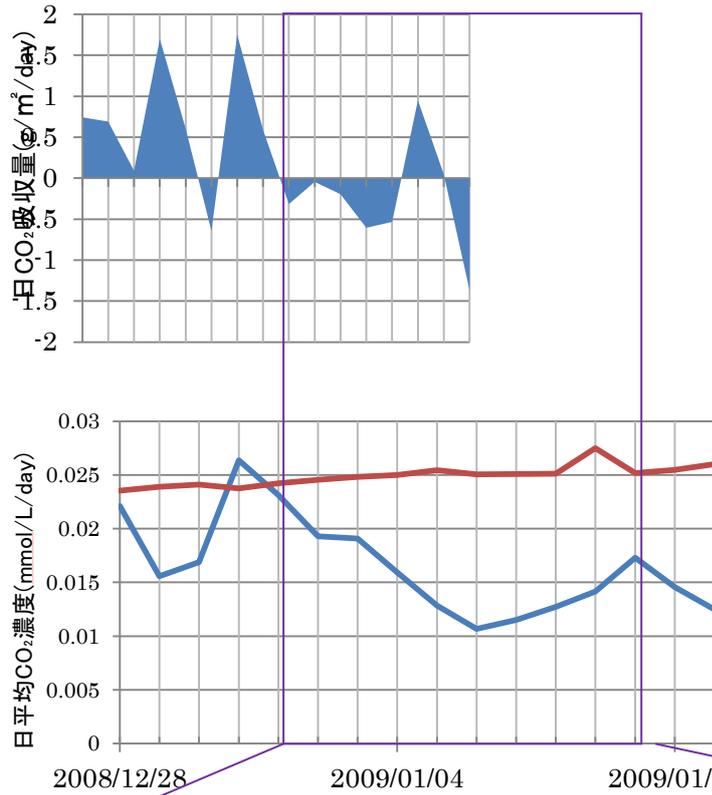


図 15.1 フラックスの正負が合わない時期の日二酸化炭素放出量

図 15.2 フラックスの正負が合わない時期の日平均二酸化炭素濃度

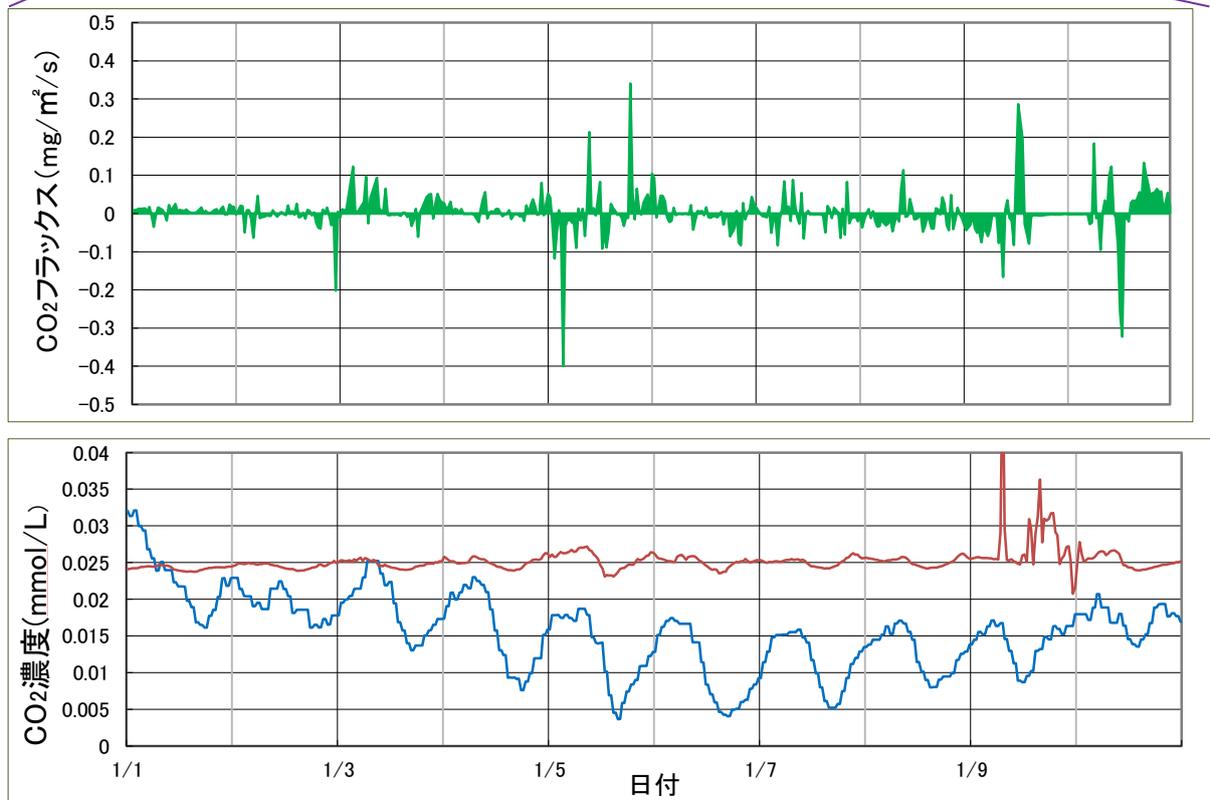


図 15.3 フラックスの時間変化（上図）

図 15.4 二酸化炭素濃度の時間変化（下図）

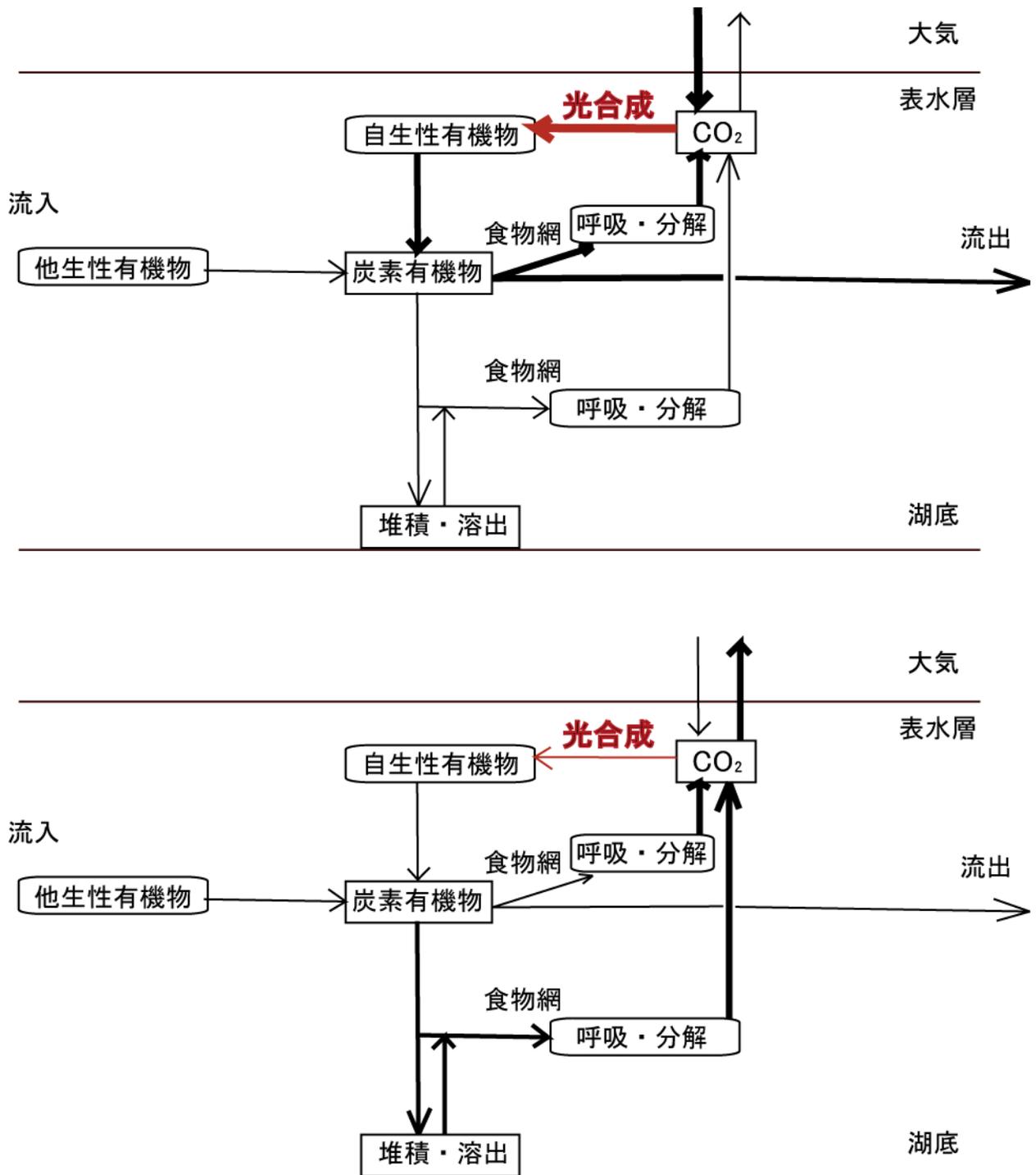


図 16 湖沼における炭素循環の過程

ただし，二酸化炭素フラックスが負の時（上図），二酸化炭素フラックスが正の時（下図）である。

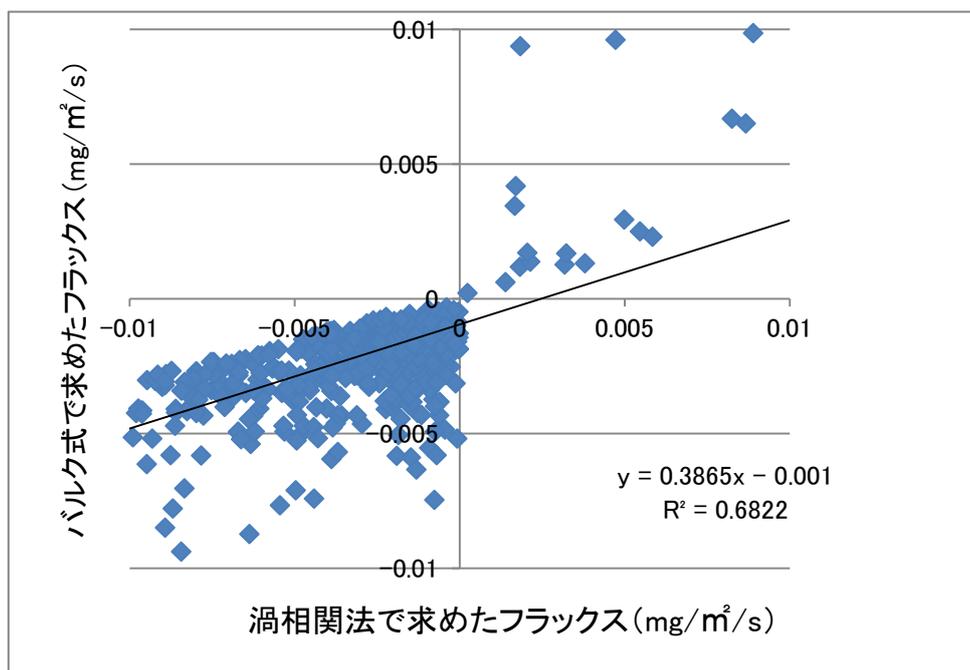
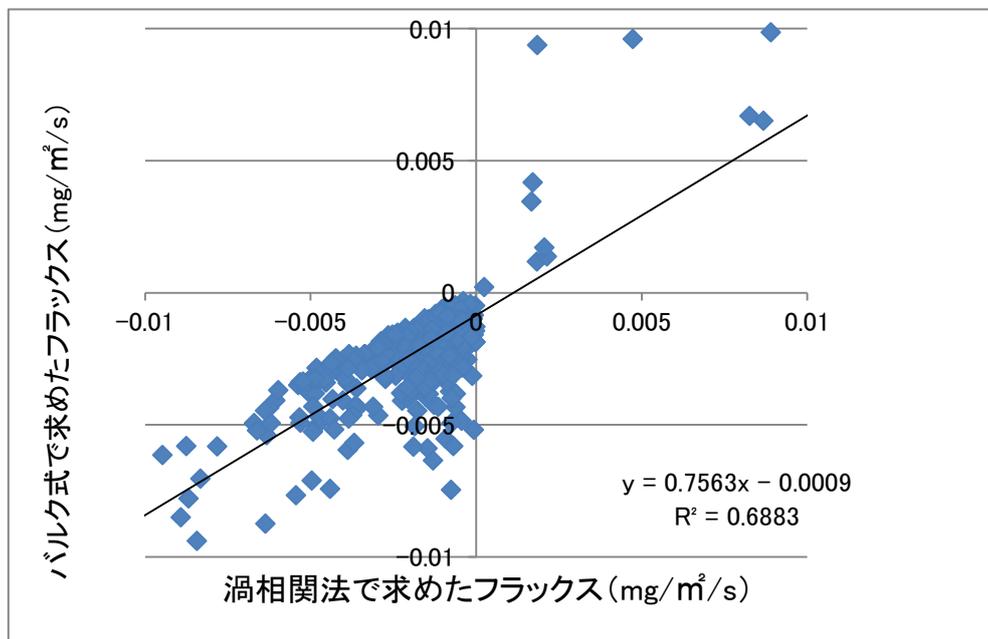


図 17 渦相関法で求めたフラックスとバルク式で求めたフラックスの比較
 (上図：アルカリ度が測定された時間の前後 1.5 時間のデータを使用
 下図：アルカリ度が測定された時間の前後 6 時間のデータを使用)

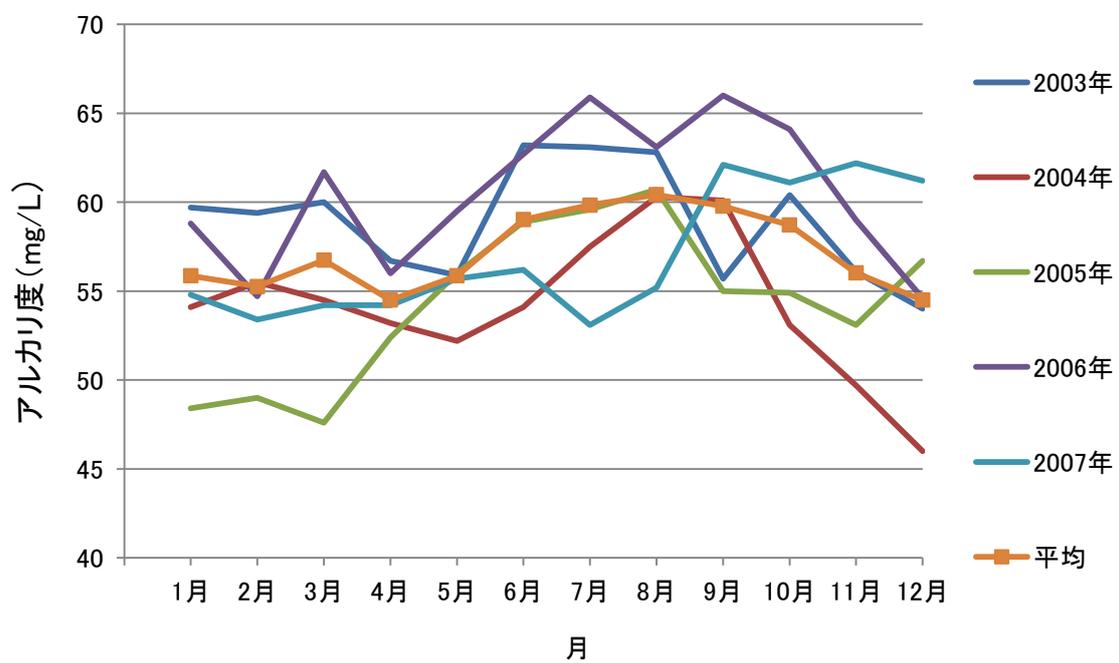


図 18 アルカリ度の月変化（霞ヶ浦河川事務所の水質調査データ一覧により作成）

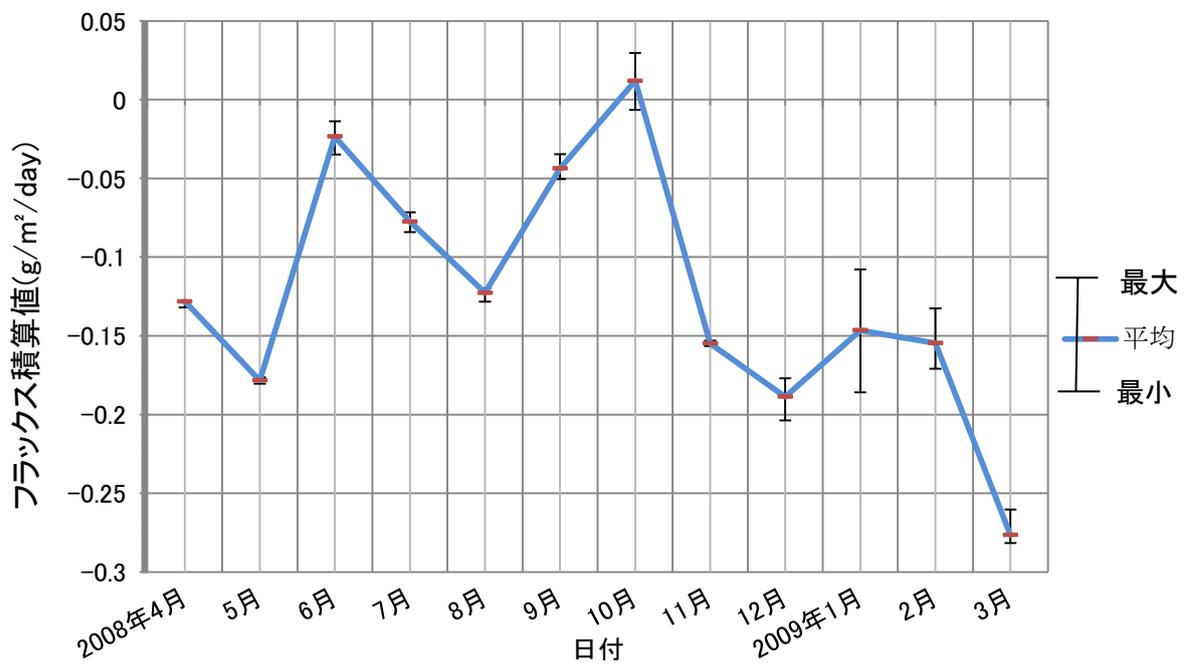


図 19 アルカリ度を変化させたときのフラックス積算値の変化