

受託研究：令和7年11月10日 ～ 令和8年3月31日

# 博多湾水質の統計解析

九州大学大学院農学研究院 准教授 田畑俊範



## ◆ 博多湾

- ✓ 降雨パターンの変化
- ✓ 下水処理場の高度化

栄養塩の  
時間的偏在化が進行

陸域から海域にかけて  
高度な栄養塩管理が重要

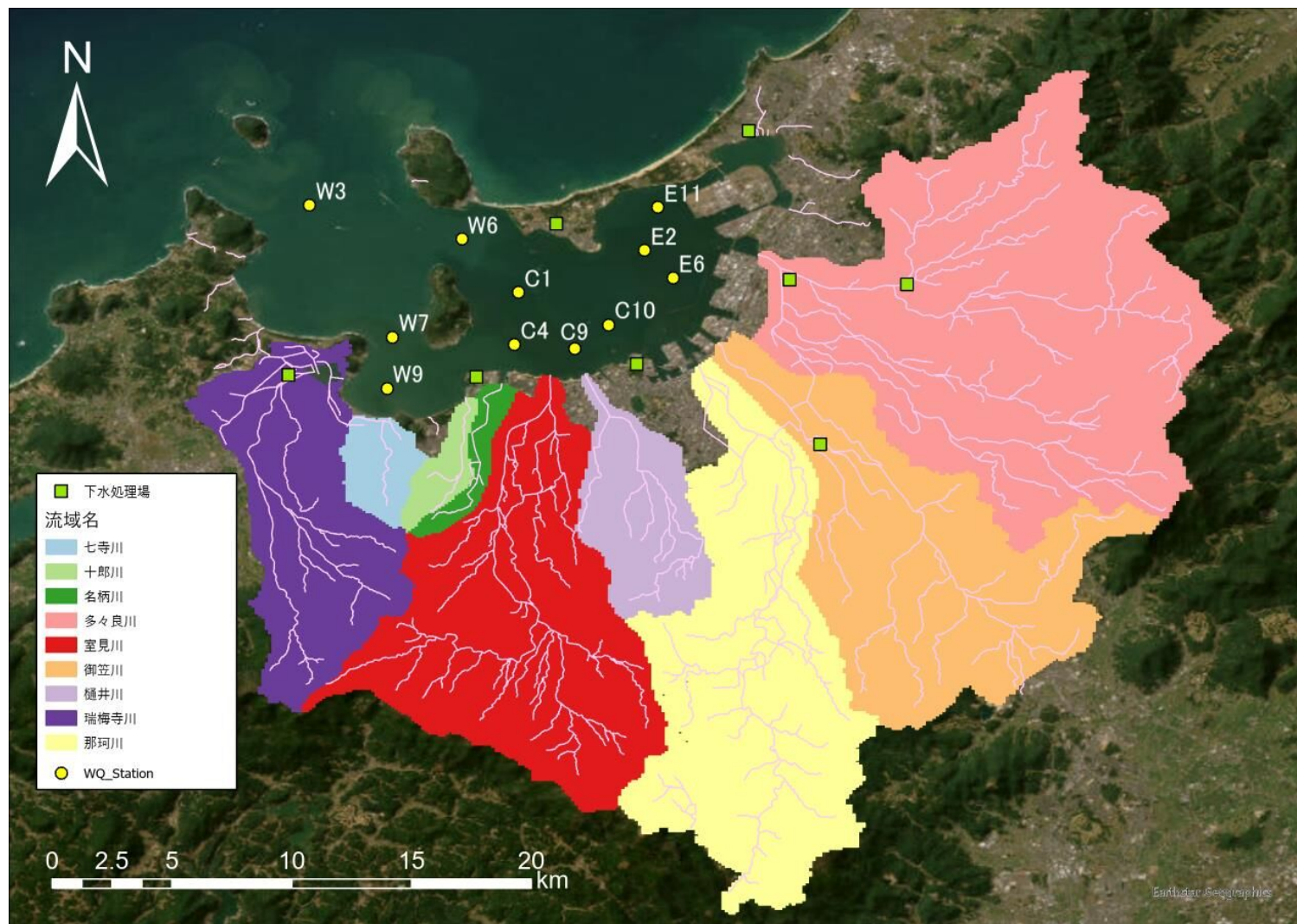


図 博多湾および流入河川流域概要

## ◆ 博多湾

- ✓ 公共用水域の水質観測  
50年以上データ蓄積

海域環境の長期的変遷の  
定量的な評価は不十分

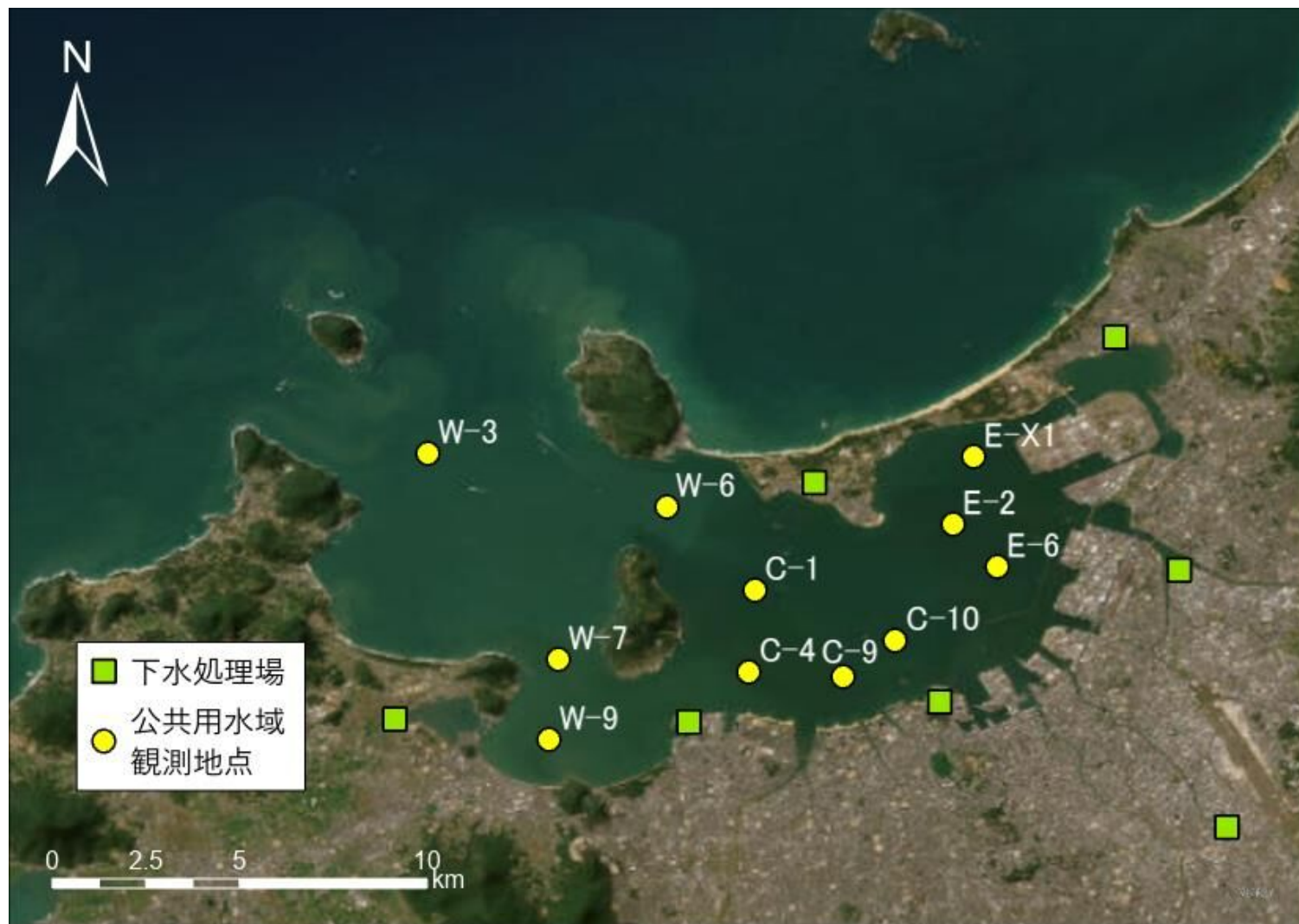


図 博多湾の公共用水域観測地点

## 研究目的

博多湾における海域環境と栄養塩動態の変化特性を明らかにし、  
健全な海域環境評価に向けた科学的基盤の構築を目指す

## 研究手法

### ◆ 主成分分析(**PCA**)

- 多変量解析の一種
- 多数の水質指標の背後に潜む変動要因を抽出

## ◆ 公共用水域水質観測(海域)

### 期間

- 1976年～2024年

### 地点

- E-2
- E-6
- C-1
- C-4
- C-10
- W-3
- W-6
- W-7

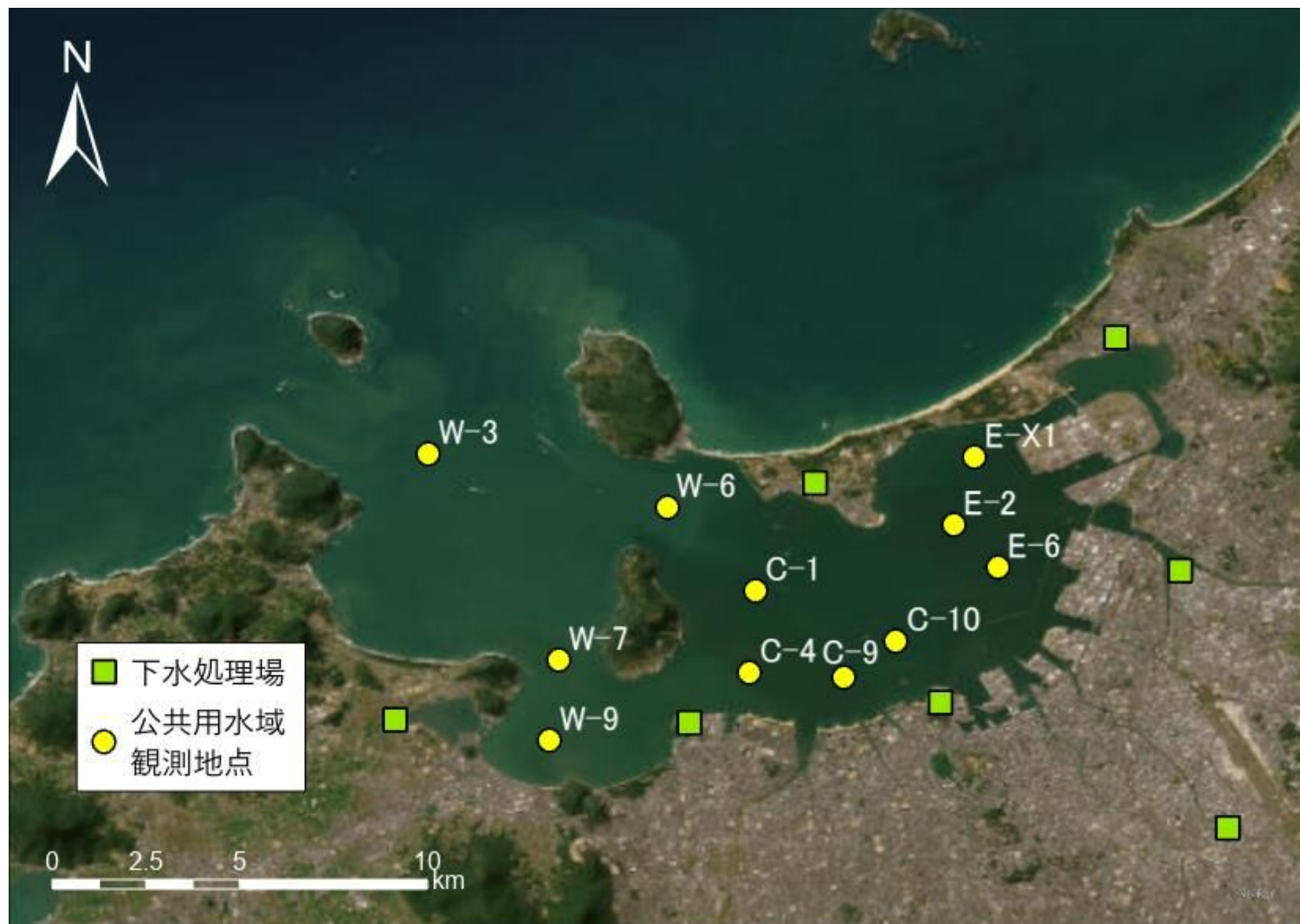


図 博多湾の公共用水域観測地点

## ◆ 公共用水域水質観測(海域)

### 水質項目(16項目)

- 水温(WT)
- 透明度(Trans)
- pH
- 溶存酸素(DO)
- 化学的酸素要求量(COD)
- 浮遊物質(SS)
- 全窒素(TN)
- 全リン(TP)
- 硝酸態窒素( $\text{NO}_3\text{-N}$ )
- 亜硝酸態窒素( $\text{NO}_2\text{-N}$ )
- アンモニア態窒素( $\text{NH}_4\text{-N}$ )
- クロロフィルa(Chl.a)
- 塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )
- ケイ酸( $\text{SiO}_2$ )
- リン酸態リン( $\text{PO}_4\text{-P}$ )
- 溶解性化学的酸素要求量(D-COD)

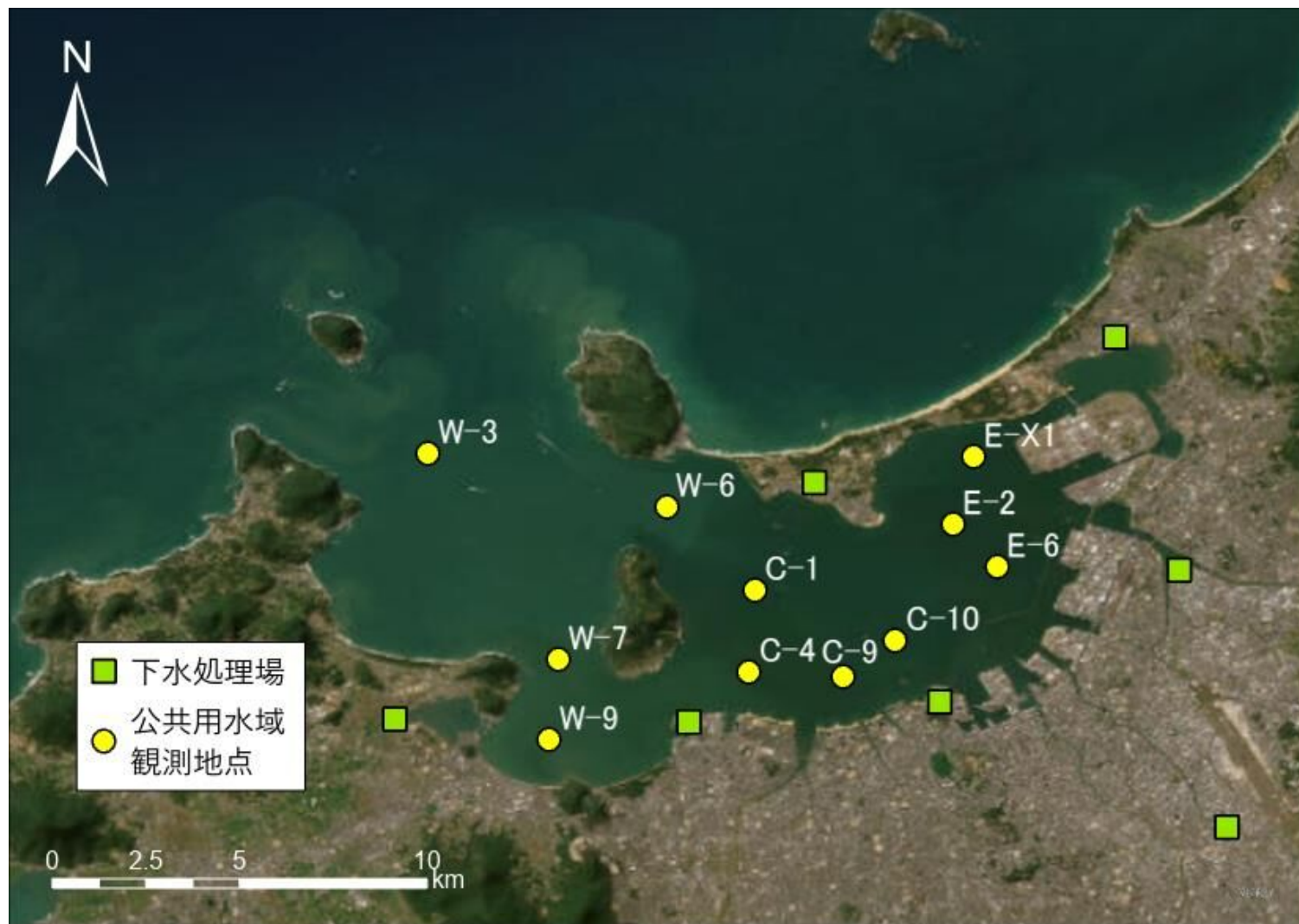


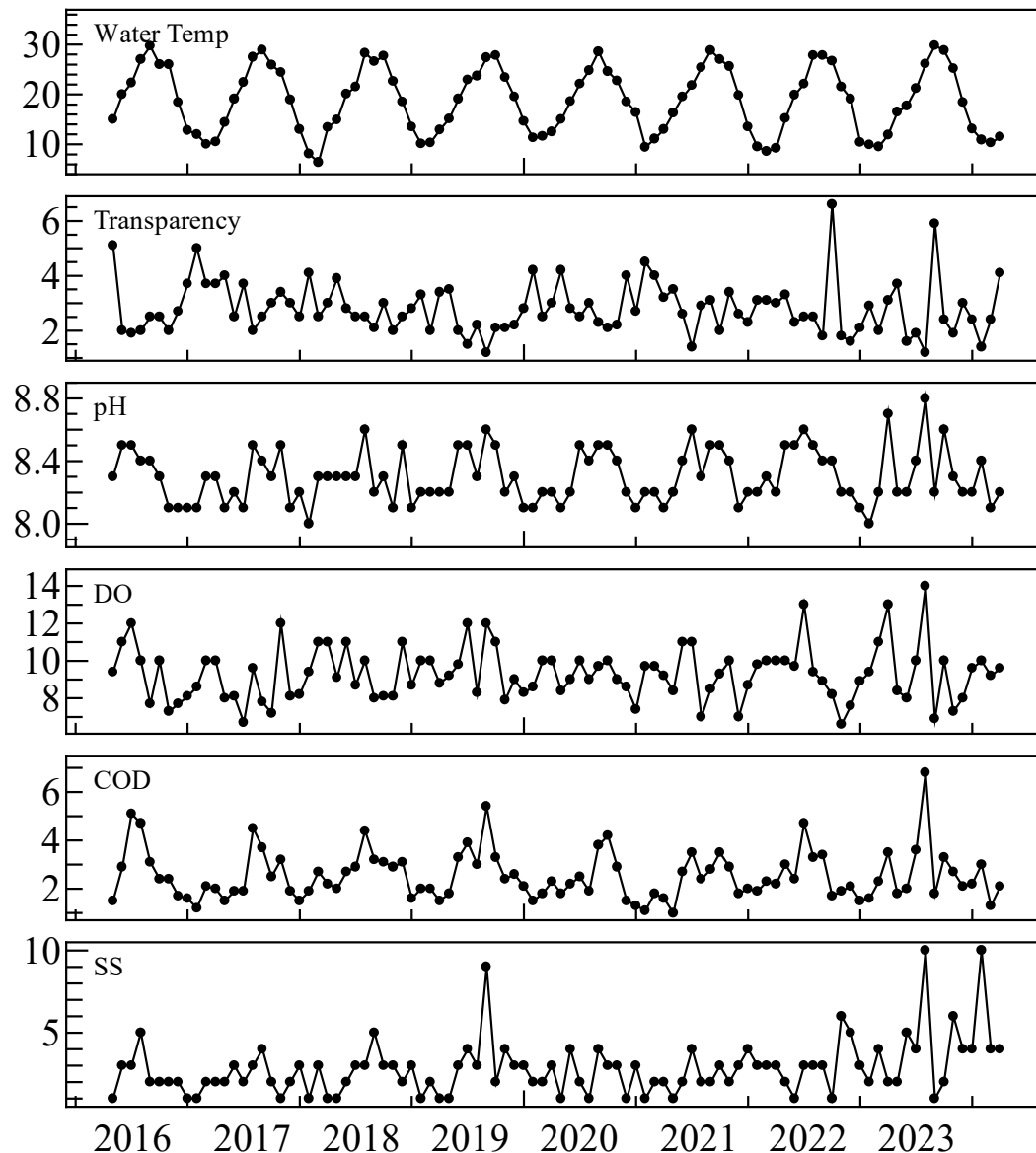
図 博多湾の公共用水域観測地点

## ◆ 公共用水域水質観測(海域)

### データ例



図 博多湾の公共用水域観測地点



◆ 主成分分析

多数の変数に含まれる情報を少数の指標(主成分)に集約し、データの特徴や傾向を把握するための統計手法である. 相関のある複数の変数を統合することで、データのばらつきや類似性を視覚的・定量的に評価できる.

例

| 学生 | 数学 | 物理 | 英語 | 国語 |
|----|----|----|----|----|
| A  | 92 | 88 | 70 | 68 |
| B  | 85 | 82 | 65 | 60 |
| C  | 78 | 75 | 90 | 92 |
| D  | 60 | 58 | 85 | 88 |
| E  | 95 | 93 | 72 | 70 |



□ 第1主成分

$PC1 = -0.50【数学】 - 0.50【物理】 + 0.50【英語】 + 0.50【国語】$   
(【数学】，【物理】に-0.50の係数，【英語】，【国語】に+0.50の係数)

➡ 第一主成分は、文系型⇔理系型の特徴を示す

学生Aの第1主成分得点:  
 $-0.50 \times 92 - 0.50 \times 88 + 0.50 \times 70 + 0.50 \times 68 = -21$

➡ 学生Aは、理系科目を得意とする傾向を有する

## ◆ 主成分分析

### データの前処理

#### ◆ 標準化

目的: 単位や変動幅の差異により評価が偏らないようにするため

対象: 16水質項目すべて

#### ◆ 対数変換

目的: 分布の対称性を改善するため

対象: 透明度, COD, SS, TN, TP,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , Chl.a, Si,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , D-COD

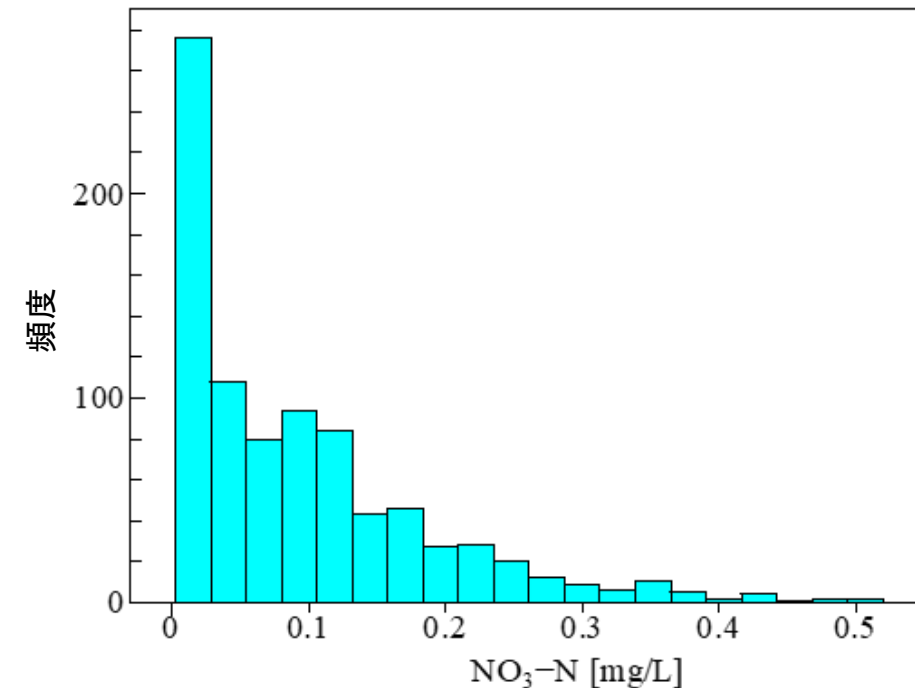


図 硝酸態窒素のヒストグラム

## ◆ 主成分分析

### 解析対象データ

- 期間: 2016年4月  
～2024年3月
- 地点: E-2, E-6, C-1, C-4,  
C-10, W-3, W-6, W-7
- 水深: 表層, 底層  
(それぞれ別に解析)

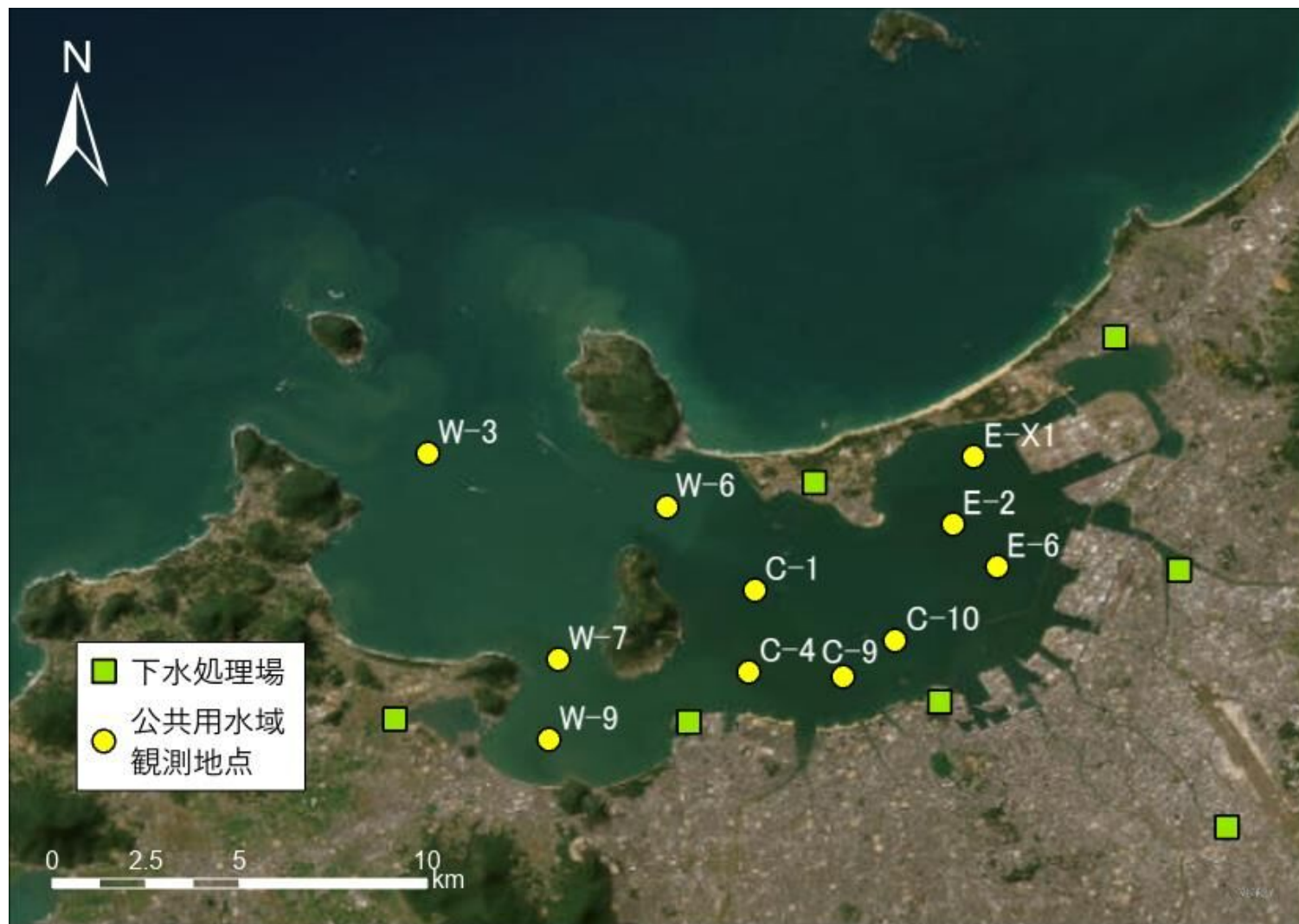


図 博多湾の公共用水域観測地点

表1 表層の全地点水質16項目に対する主成分分析結果

| 主成分      |                    | 1      | 2      | 3      | 4      |
|----------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| 固有値      |                    | 5.12   | 4.71   | 1.60   | 0.91   |
| 固有ベクトル   | WT                 | 0.215  | -0.220 | -0.488 | 0.093  |
|          | Trans              | -0.334 | -0.167 | -0.033 | -0.306 |
|          | pH                 | 0.311  | -0.224 | 0.159  | -0.298 |
|          | DO                 | 0.218  | -0.033 | 0.519  | -0.481 |
|          | COD                | 0.408  | -0.035 | 0.044  | -0.016 |
|          | SS                 | 0.315  | 0.119  | 0.038  | 0.458  |
|          | TN                 | 0.126  | 0.410  | 0.123  | -0.048 |
|          | TP                 | 0.244  | 0.255  | -0.250 | 0.003  |
|          | NO <sub>3</sub> -N | -0.054 | 0.399  | 0.184  | -0.075 |
|          | NO <sub>2</sub> -N | -0.033 | 0.357  | 0.105  | 0.149  |
|          | NH <sub>4</sub> -N | -0.058 | 0.387  | 0.133  | 0.022  |
|          | Chl.a              | 0.363  | 0.021  | 0.094  | 0.184  |
|          | Cl <sup>-</sup>    | -0.265 | -0.080 | 0.349  | 0.386  |
|          | SiO <sub>2</sub>   | -0.014 | 0.293  | -0.310 | -0.298 |
|          | PO <sub>4</sub> -P | -0.117 | 0.309  | -0.309 | -0.219 |
|          | DCOD               | 0.365  | -0.003 | -0.039 | -0.135 |
| 寄与率(%)   |                    | 34.48  | 29.42  | 10.03  | 5.73   |
| 累積寄与率(%) |                    | 34.48  | 63.90  | 73.93  | 79.65  |

表1 表層の全地点水質16項目に対する主成分分析結果

| 主成分      |                    | 1      | 2      | 3      | 4      |
|----------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| 固有値      |                    | 5.12   | 4.71   | 1.60   | 0.91   |
| 固有ベクトル   | WT                 | 0.215  | -0.220 | -0.488 | 0.093  |
|          | Trans              | -0.334 | -0.167 | -0.033 |        |
|          | pH                 | 0.311  | -0.224 | 0.159  |        |
|          | DO                 | 0.218  | -0.033 | 0.519  |        |
|          | COD                | 0.408  | -0.035 | 0.044  | -0.016 |
|          | SS                 | 0.315  | 0.119  | 0.038  | 0.458  |
|          | TN                 | 0.126  | 0.410  | 0.123  | -0.048 |
|          | TP                 | 0.244  | 0.255  | -0.250 | 0.003  |
|          | NO <sub>3</sub> -N | -0.054 | 0.399  | 0.184  | -0.075 |
|          | NO <sub>2</sub> -N | -0.033 | 0.357  | 0.105  | 0.149  |
|          | NH <sub>4</sub> -N | -0.058 | 0.387  | 0.133  | 0.022  |
|          | Chl.a              | 0.363  | 0.021  | 0.094  | 0.184  |
|          | Cl <sup>-</sup>    | -0.265 | -0.080 | 0.349  | 0.386  |
|          | SiO <sub>2</sub>   | -0.014 | 0.293  | -0.310 | -0.298 |
|          | PO <sub>4</sub> -P | -0.117 | 0.309  | -0.309 | -0.219 |
|          | DCOD               | 0.365  | -0.003 | -0.039 | -0.135 |
| 寄与率(%)   |                    | 34.48  | 29.42  | 10.03  | 5.73   |
| 累積寄与率(%) |                    | 34.48  | 63.90  | 73.93  | 79.65  |

第1～第3主成分まで  
を考察

表1 表層の全地点水質16項目に対する主成分分析結果

| 主成分      |                    | 1      | 2                                                                    | 3      |
|----------|--------------------|--------|----------------------------------------------------------------------|--------|
| 固有値      |                    | 5.12   |                                                                      |        |
| 固有ベクトル   | WT                 | 0.215  | <div>第1主成分<br/>透明度, pH, DO, SS, Chl.a, DCODの<br/>固有ベクトルの絶対値が高い</div> |        |
|          | Trans              | -0.334 |                                                                      |        |
|          | pH                 | 0.311  |                                                                      |        |
|          | DO                 | 0.218  |                                                                      |        |
|          | COD                | 0.408  | -0.033                                                               | 0.519  |
|          | SS                 | 0.315  | -0.035                                                               | 0.044  |
|          | TN                 | 0.126  | 0.119                                                                | 0.038  |
|          | TP                 | 0.244  | <div>表層の第1主成分は,<br/>生物生産(有機物生成)の指標</div>                             |        |
|          | NO <sub>3</sub> -N | -0.054 |                                                                      |        |
|          | NO <sub>2</sub> -N | -0.033 |                                                                      |        |
|          | NH <sub>4</sub> -N | -0.058 |                                                                      |        |
|          | Chl.a              | 0.363  | 0.387                                                                | 0.133  |
|          | Cl <sup>-</sup>    | -0.265 | 0.021                                                                | 0.094  |
|          | SiO <sub>2</sub>   | -0.014 | -0.080                                                               | 0.349  |
|          | PO <sub>4</sub> -P | -0.117 | 0.293                                                                | -0.310 |
|          | DCOD               | 0.365  | 0.309                                                                | -0.309 |
| 寄与率(%)   |                    | -0.003 | -0.003                                                               | -0.039 |
| 累積寄与率(%) |                    | 34.48  | 29.42                                                                | 10.03  |
|          |                    | 34.48  | 63.90                                                                | 73.93  |

## ◆ 表層における各主成分の解釈

- PC1 生物生産(有機物の生成)
- PC2 栄養塩の残存量
- PC3 栄養塩組成の季節変化(冬季 $\text{SiO}_2 \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ 低)

表層の【PC1】・【PC2】は一般的な沿岸海域に見られる環境変動を反映

【PC3】は季節変動に伴う栄養塩構造の変化の指標を表現

→博多湾(2016年以降)では冬季にケイ酸およびリン酸態リンが低下, 夏季に増加  
冬季における栄養塩組成の偏りが本海域の特徴として示唆された.

# 解析結果【表層】

## 【各主成分の解釈】

PC1 : 生物生産

PC2 : 栄養塩の残存量

PC3 : 栄養塩組成の季節変化

### ■ PCS1

夏季・秋季【高】

春季・冬季【低】

### ■ PCS2, PCS3

夏季・秋季【低】

春季・冬季【高】



冬季 $\text{SiO}_2 \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ 【低】

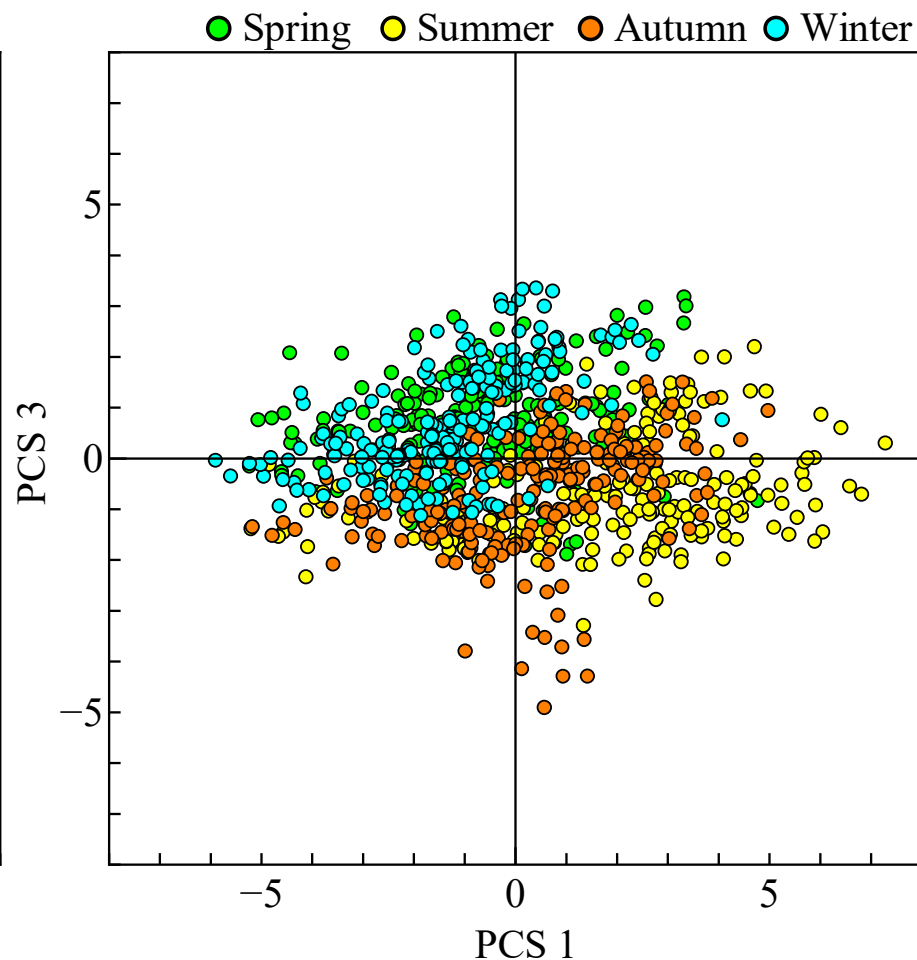
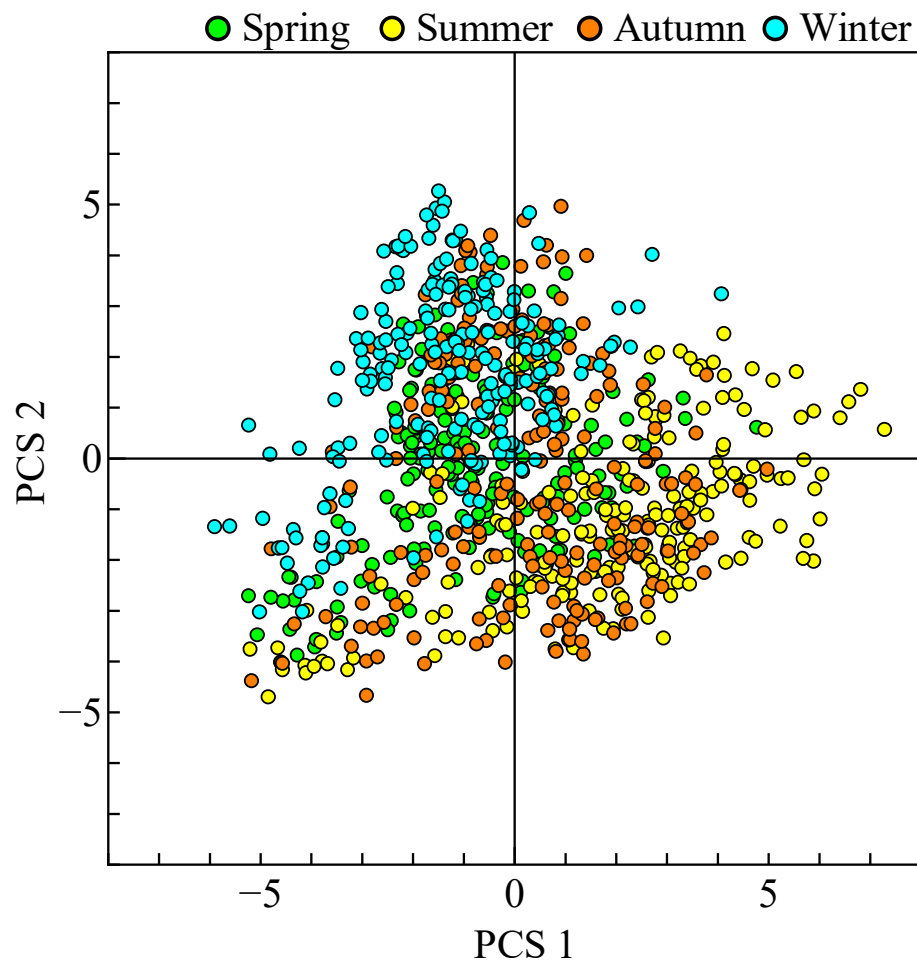
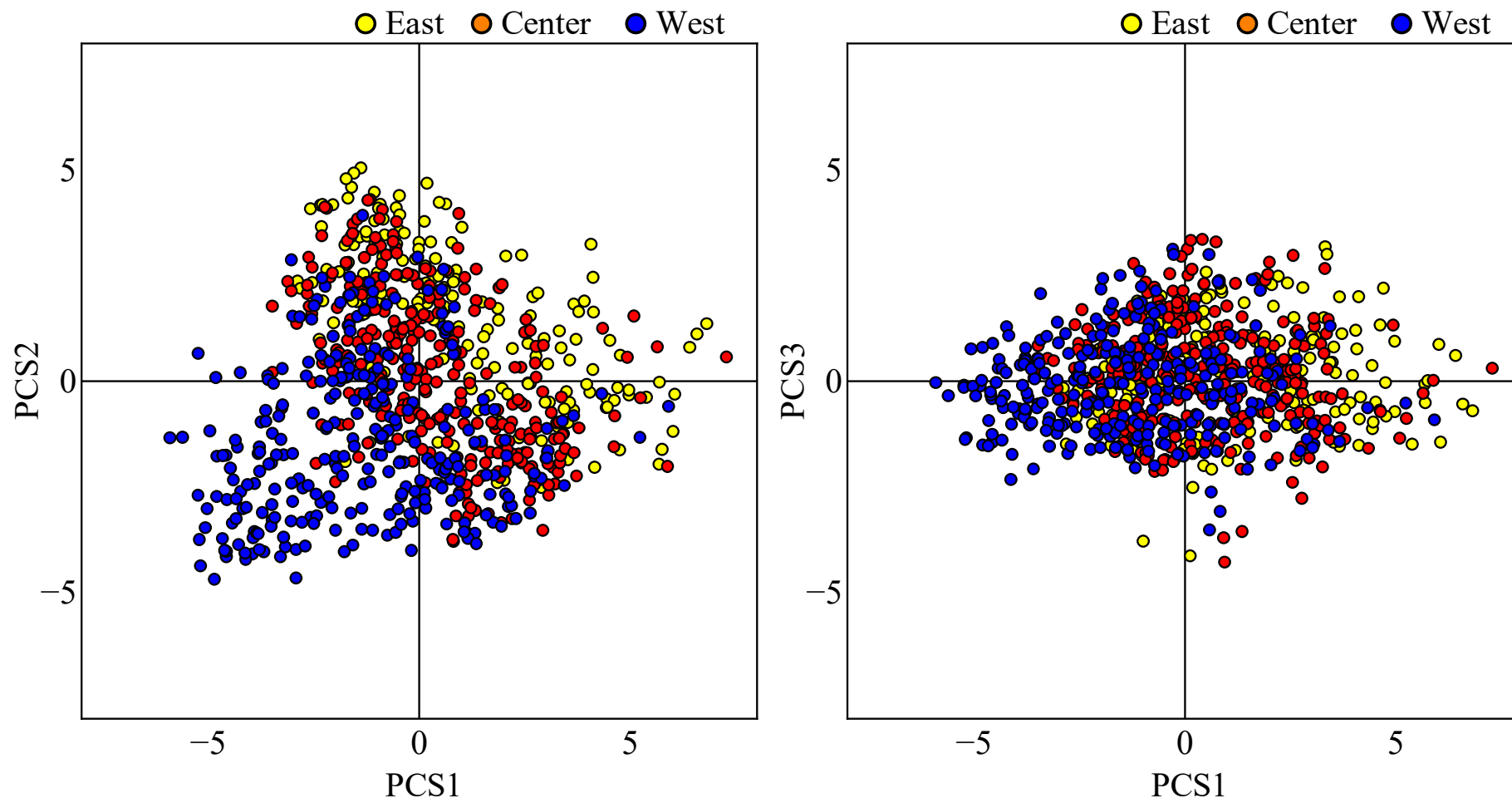


図 表層の主成分得点の季節別分布  
(左: PCS1—PCS2, 右: PCS1—PCS3)

## 解析結果【表層】



### 【各主成分の解釈】

PC1 : 生物生産

PC2 : 栄養塩の残存量

PC3 : 栄養塩組成の季節変化

- PCS1, PCS2  
湾奥【高】  
湾口【低】
- PCS3  
空間的傾向無し

図 表層の主成分得点の領域別(西部・中部・東部)分布  
(左:PCS1-PCS2, 右:PCS1-PCS3)

表 年度合計降雨量と海域別年度平均主成分得点の相関係数

| 年度            | 年降雨量<br>(mm) | 西部海域  |        |        | 中部海域   |       |        | 東部海域   |        |        |
|---------------|--------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|               |              | PCS1  | PCS2   | PCS3   | PCS1   | PCS2  | PCS3   | PCS1   | PCS2   | PCS3   |
| 2016          | 2317.5       | 1.009 | 0.827  | -0.460 | 0.308  | 0.011 | -0.240 | -1.276 | -1.373 | -0.266 |
| 2017          | 1447.5       | 0.522 | 1.491  | -0.102 | -0.002 | 0.344 | 0.090  | -1.920 | -1.477 | -0.151 |
| 2018          | 1518.5       | 1.000 | 1.391  | 0.080  | 0.529  | 0.137 | 0.185  | -1.433 | -1.657 | -0.010 |
| 2019          | 1789.0       | 1.466 | 1.410  | 0.100  | 1.034  | 0.143 | 0.205  | -0.605 | -1.506 | -0.046 |
| 2020          | 2078.0       | 0.968 | 1.144  | -0.046 | 0.149  | 0.204 | -0.089 | -1.465 | -1.599 | -0.360 |
| 2021          | 1917.0       | 1.464 | 1.567  | 0.384  | 0.608  | 0.023 | 0.353  | -1.408 | -1.519 | -0.032 |
| 2022          | 1299.5       | 1.171 | 1.155  | 0.717  | 0.537  | 0.023 | 0.511  | -1.589 | -1.541 | -0.063 |
| 2023          | 1909.5       | 1.232 | 2.260  | 0.204  | 0.645  | 0.948 | 0.240  | -1.066 | -1.025 | -0.159 |
| 降雨量との<br>相関係数 |              | 0.226 | -0.160 | -0.619 | -0.035 | 0.033 | -0.707 | 0.395  | 0.318  | -0.629 |

表 年度合計降雨量と海域別年度平均主成分得点の相関係数

| 年度            | 年降雨量<br>(mm) | 西部海域                                                                       |        |        | 中部海域   |       |        | 東部海域   |        |        |
|---------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|               |              | PCS1                                                                       | PCS2   | PCS3   | PCS1   | PCS2  | PCS3   | PCS1   | PCS2   | PCS3   |
| 2016          | 2317.5       | 1.000                                                                      | 0.827  | 0.460  | 0.208  | 0.011 | -0.240 | -1.276 | -1.373 | -0.266 |
| 2017          | 1447.5       | <div>【各主成分の解釈】<br/>PC1 : 生物生産<br/>PC2 : 栄養塩の残存量<br/>PC3 : 栄養塩組成の季節変化</div> |        |        |        | 0.44  | 0.090  | -1.920 | -1.477 | -0.151 |
| 2018          | 1518.5       |                                                                            |        |        |        | 0.37  | 0.185  | -1.433 | -1.657 | -0.010 |
| 2019          | 1789.0       |                                                                            |        |        |        | 0.43  | 0.205  | -0.605 | -1.506 | -0.046 |
| 2020          | 2078.0       |                                                                            |        |        |        | 0.04  | -0.089 | -1.465 | -1.599 | -0.360 |
| 2021          | 1917.0       |                                                                            |        |        |        | 0.23  | 0.353  | -1.408 | -1.519 | -0.032 |
| 2022          | 1299.5       |                                                                            |        |        |        | 0.23  | 0.511  | -1.589 | -1.541 | -0.063 |
| 2023          | 1909.5       |                                                                            |        |        |        | 0.948 | 0.240  | -1.066 | -1.025 | -0.159 |
| 降雨量との<br>相関係数 |              | 0.226                                                                      | -0.160 | -0.619 | -0.035 | 0.033 | -0.707 | 0.395  | 0.318  | -0.629 |

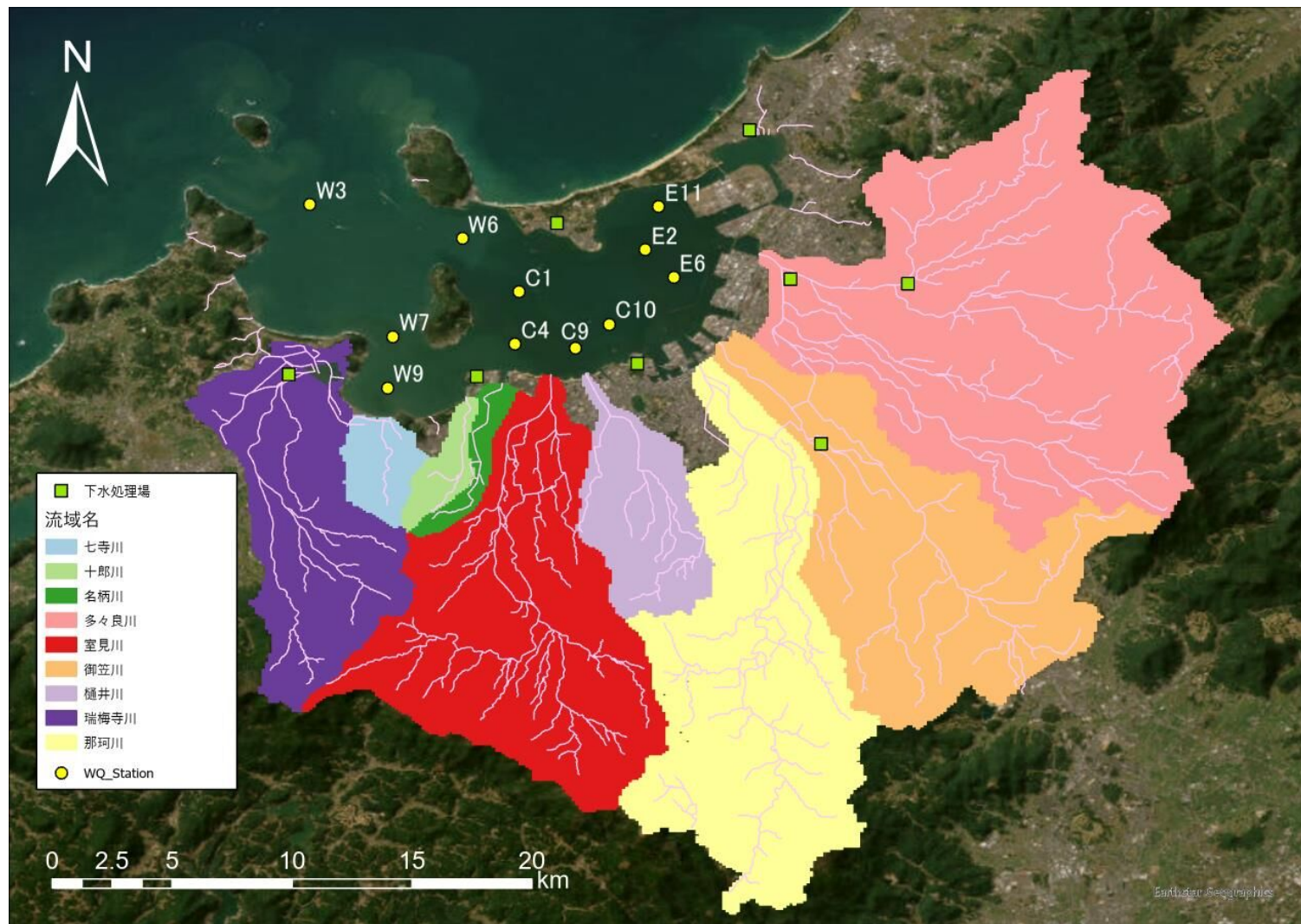
どの海域においても【PCS3】と【降雨量】の間に負の相関



降雨量の増加に伴い、 $\text{SiO}_2 \cdot \text{PO}_4\text{-P}$ が上昇する傾向

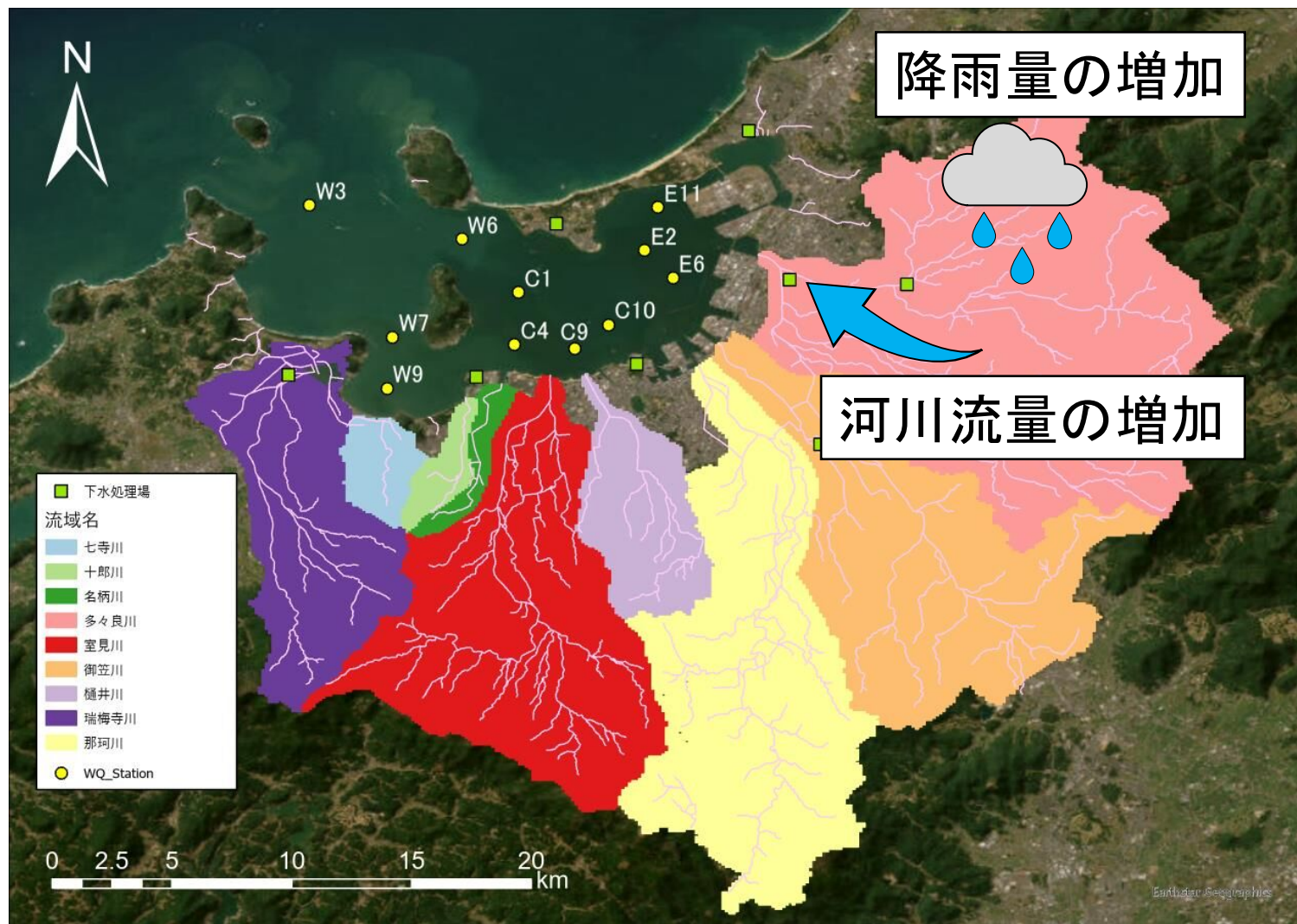
## ◆ 博多湾の水質について

- 下水処理場のからの流入量  
→ 降雨量に寄らない  
(N/P比:【高】)
- 陸域からの河川流入量  
→ 降雨量の増加と一致  
(N/P比:【低】)



## ◆ 博多湾の水質について

- 下水処理場のからの流入量  
→ 降雨量に寄らない  
(N/P比:【高】)
- 陸域からの河川流入量  
→ 降雨量の増加と一致  
(N/P比:【低】)



## ◆ 博多湾の水質について

- 下水処理場のからの流入量  
→ 降雨量に寄らない  
(N/P比:【高】)
- 陸域からの河川流入量  
→ 降雨量の増加と一致  
(N/P比:【低】)



降雨パターンの変動(豪雨の激甚化・頻発化)が、  
流入負荷のN/P比を変化させ、海域の栄養塩組成に影響を及ぼしている

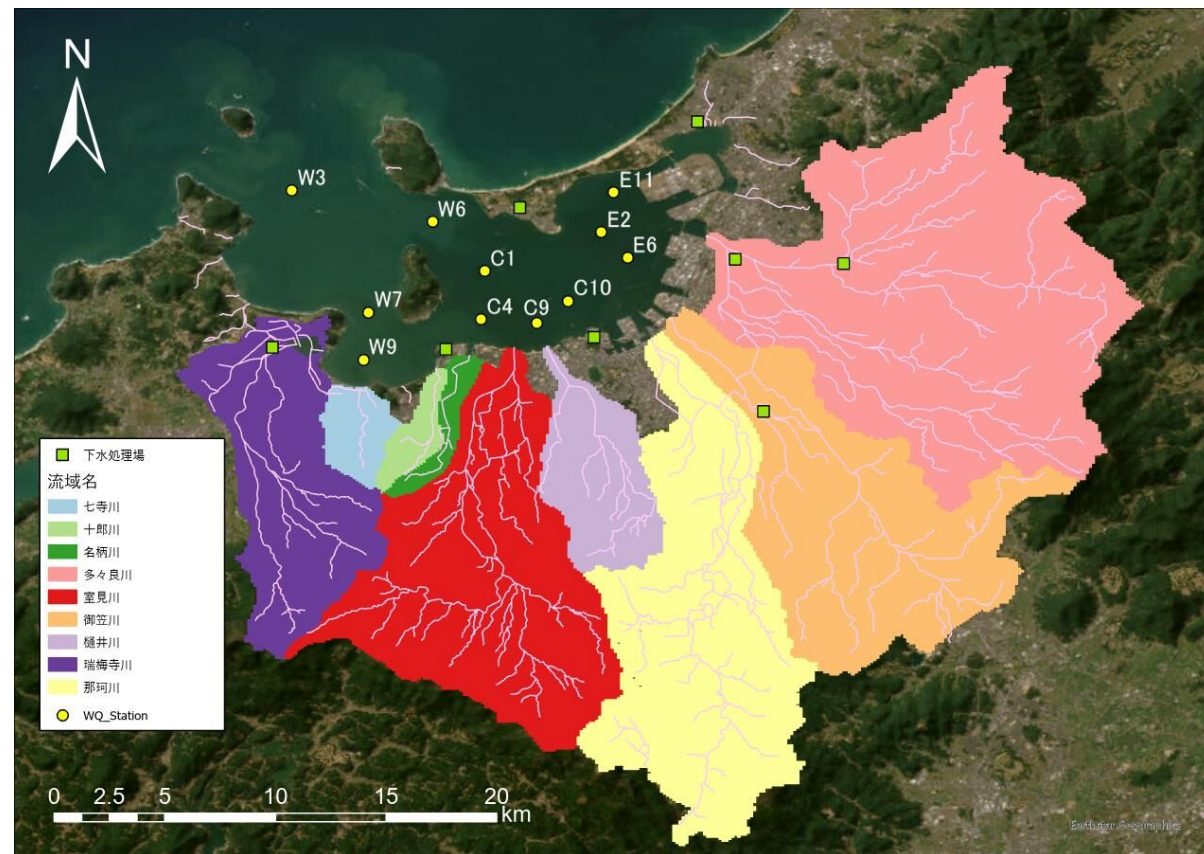


表1 底層の全地点水質16項目に対する主成分分析結果

| 主成分      |                    | 1      | 2      | 3      | 4      |
|----------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| 固有値      |                    | 5.42   | 3.43   | 2.48   | 0.95   |
| 固有ベクトル   | WT                 | 0.008  | 0.317  | 0.436  | -0.218 |
|          | Trans              | -0.277 | 0.005  | -0.223 | -0.410 |
|          | pH                 | -0.109 | -0.422 | 0.105  | -0.184 |
|          | DO                 | -0.075 | -0.439 | -0.285 | -0.038 |
|          | COD                | 0.270  | -0.279 | 0.301  | -0.046 |
|          | SS                 | 0.276  | -0.017 | 0.106  | 0.502  |
|          | TN                 | 0.382  | -0.119 | -0.177 | -0.027 |
|          | TP                 | 0.371  | 0.122  | 0.081  | 0.073  |
|          | NO <sub>3</sub> -N | 0.235  | -0.182 | -0.425 | -0.006 |
|          | NO <sub>2</sub> -N | 0.271  | -0.037 | -0.295 | -0.245 |
|          | NH <sub>4</sub> -N | 0.327  | 0.082  | -0.221 | 0.058  |
|          | Chl.a              | 0.210  | -0.311 | 0.259  | 0.098  |
|          | Cl <sup>-</sup>    | -0.266 | -0.075 | -0.102 | 0.545  |
|          | SiO <sub>2</sub>   | 0.201  | 0.317  | -0.061 | -0.053 |
|          | PO <sub>4</sub> -P | 0.136  | 0.383  | -0.245 | -0.065 |
|          | DCOD               | 0.253  | -0.175 | 0.268  | -0.334 |
| 寄与率(%)   |                    | 33.88  | 21.43  | 15.50  | 5.94   |
| 累積寄与率(%) |                    | 33.88  | 55.30  | 70.80  | 76.74  |

### ◆ 底層における各主成分の解釈

- PC1 有機物の蓄積
- PC2 貧酸素環境における溶出
- PC3 底層環境の季節変化

(夏季:有機物量増加, 冬季:窒素(特に硝酸態窒素)が相対的に高)

表層:生物生産過程が支配的

底層:有機物の蓄積および分解過程が支配的

## 解析結果【底層】

### 【各主成分の解釈】

PC1 : 有機物の蓄積

PC2 : 貧酸素環境下の溶出

PC3 : 底層環境の季節変化

■ PCS1  
季節的変動無し

■ PCS2, PCS3  
夏季・秋季【高】  
春季・冬季【低】

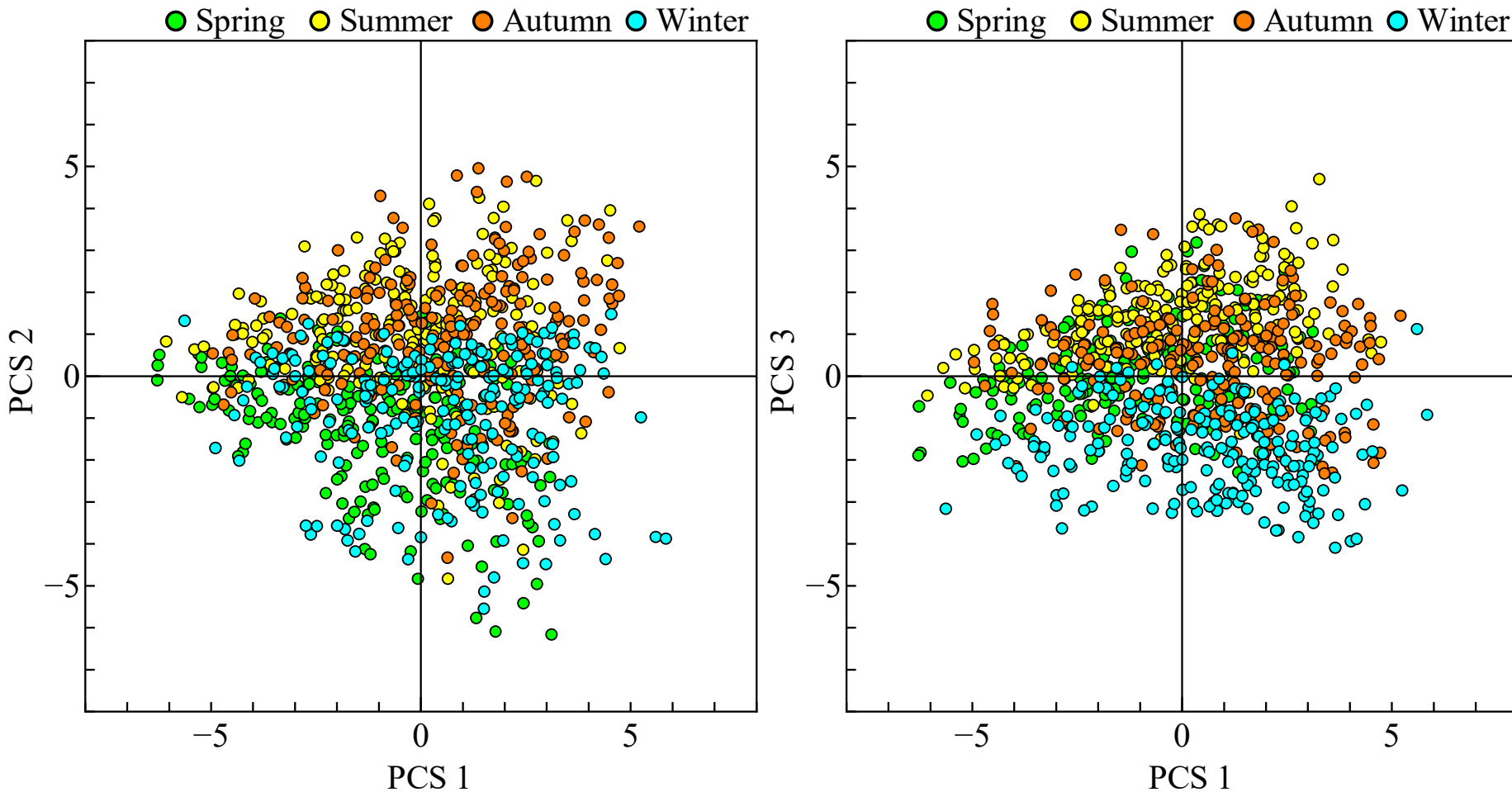
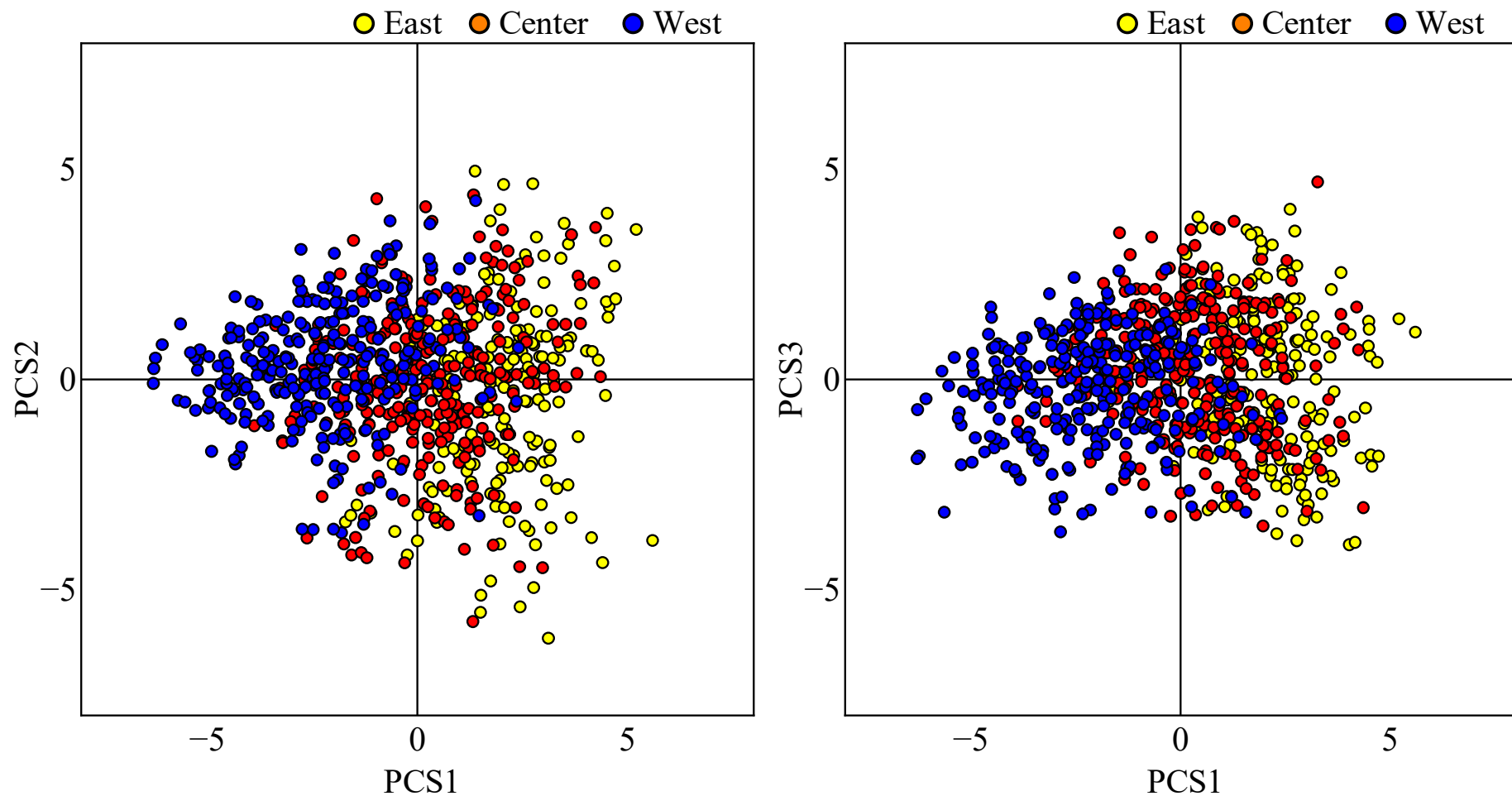


図 底層の主成分得点の季節別分布  
(左:PCS1—PCS2, 右:PCS1—PCS3)

## 解析結果【底層】



### 【各主成分の解釈】

PC1 : 有機物の蓄積

PC2 : 貧酸素環境下の溶出

PC3 : 底層環境の季節変化

■ PCS1

湾奥【高】

湾口【低】

■ PCS2, PCS3

空間的変動無し

図 底層の主成分得点の領域別(西部・中部・東部)分布  
(左:PCS1-PCS2, 右:PCS1-PCS3)

表 年度合計降雨量と海域別年度平均主成分得点の相関係数

| 年度        | 年降雨量<br>(mm) | 西部海域                                                                          |       |       | 中部海域   |       |        | 東部海域   |       |        |
|-----------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|           |              | PCS1                                                                          | PCS2  | PCS3  | PCS1   | PCS2  | PCS3   | PCS1   | PCS2  | PCS3   |
| 2016      | 2317.5       | 0.676                                                                         | 0.206 | 0.225 | 0.875  | 0.612 | -0.064 | -3.079 | 0.885 | -0.550 |
| 2017      | 1447.5       | <div>【各主成分の解釈】<br/>PC1 : 有機物の蓄積<br/>PC2 : 貧酸素環境下の溶出<br/>PC3 : 底層環境の季節変化</div> |       |       |        | 0.241 | -0.230 | -2.311 | 0.365 | -0.643 |
| 2018      | 1518.5       |                                                                               |       |       |        | 0.399 | 0.294  | -2.788 | 0.207 | -0.242 |
| 2019      | 1789.0       |                                                                               |       |       |        | 0.192 | 0.412  | -1.415 | 0.455 | 0.087  |
| 2020      | 2078.0       |                                                                               |       |       |        | 0.229 | 0.131  | -2.094 | 0.667 | -0.480 |
| 2021      | 1917.0       |                                                                               |       |       |        | 0.324 | 0.502  | -1.570 | 0.229 | -0.158 |
| 2022      | 1299.5       |                                                                               |       |       |        | 0.829 | 0.576  | -2.163 | 0.015 | 0.142  |
| 2023      | 1909.5       |                                                                               |       |       |        | 0.207 | 0.204  | -1.799 | 0.158 | -0.063 |
| 降雨量との相関係数 |              | -0.384                                                                        | 0.457 | 0.070 | -0.282 | 0.680 | -0.273 | -0.091 | 0.775 | -0.354 |

【PCS2】と【降雨量】の間に正の相関. 特に東部は0.775と高い相関



降雨量が多い年には貧酸素環境が進行し栄養塩再生過程が活発化

# まとめ【表層・底層における水質構造の特徴】

## □ 主成分分析の結果

- 表層【PCS1】生物生産, 【PCS2】栄養塩の残存量, 【PCS3】栄養塩組成の季節変化  
夏季・秋季には, 降雨に伴う河川流入の増加により栄養塩供給が強化され, 生物生産が活発化する傾向が認められた. 一方, 冬季には $\text{SiO}_2$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の相対的低下が確認され, 湾外水流入や珪藻によるケイ酸消費の影響が示唆された.
- 底層【PCS1】有機物の蓄積, 【PCS2】貧酸素下の溶出, 【PCS3】底層環境の季節変化  
夏季の成層強化に伴い, 底層で貧酸素化および栄養塩再生が進行する傾向が認められた. 東部海域では年間を通じて有機物蓄積傾向が強く, 湾奥特有の地形・流況構造の影響が示唆された.

## まとめ【降雨影響と栄養塩管理への示唆】

### □ 降雨量との関係

- 表層では、降雨時に $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{SiO}_2$ が増加する傾向が認められ、河川からの直接流出の影響が示唆された。
- 底層では、降雨量増加に伴い貧酸素化および栄養塩再生が強化される傾向が認められた。
- 降雨は、表層では「供給・混合過程」、底層では「分解・再生過程」として異なる時間スケールで作用していることが示唆された。

### □ 栄養塩管理への示唆

- 博多湾では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{SiO}_2$ が降雨に対して特徴的な応答を示した。
- 平常時には高度処理下水により $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給が制約される一方、降雨時には河川由来の $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷が相対的に増加する構造が示唆された。
- 栄養塩管理には、「流入負荷形態」、「成層・混合」、「生産・沈降・再生」、「降雨変動」を統合的に考慮する必要がある。