

## 中海および浜名湖表層堆積物の有機炭素・ 窒素・イオウ濃度分布

倉門由紀子<sup>1</sup>・三瓶良和<sup>1</sup>・高安克己<sup>2</sup>・徳岡隆夫<sup>1</sup>・井内美郎<sup>3</sup>

### Distribution of organic carbon, nitrogen and sulfur contents in surface sediments of brackish coastal lakes Nakaumi and Hamana, Japan

Yukiko Kurakado<sup>1</sup>, Yoshikazu Sampei<sup>1</sup>, Katsumi Takayasu<sup>2</sup>,  
Takao Tokuoka<sup>1</sup> and Yoshiro Inouchi<sup>3</sup>

**Abstract:** To clarify relationships between the oxic-anoxic environments on the bottoms of the brackish coastal lake and the effect of the tidal current, the distributions of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and total sulfur (TS) contents have been investigated in the surface sediments of Lakes Nakaumi and Hamana. Cored sediments in Lake Nakaumi were obtained at 83 stations. And surface sediment samples in Lake Hamana were obtained at 40 stations. Top 1cm of the sediments from the two lakes were analyzed using a CHNS elemental analyzer. TOC contents of Lakes Nakaumi and Hamana ranged within 0.14-4.40% and 0.01-4.94%, respectively. TN contents ranged within 0.05-0.65% in Lake Nakaumi and 0.02-0.53% in Lake Hamana, and TS contents ranged within 0.09-5.42% and 0.05-3.11%, respectively. C/N ratios showed about 7-8 at most area of the two lakes. C/S ratios showed 1.0-1.5 in Lake Nakaumi and 1.5-2.0 in Lake Hamana, respectively. TOC, TN and TS contents showed lower values and C/S ratios showed higher values near mouths of the both lakes. With increase in the distance from the mouth, TOC, TN and TS contents increased and C/S ratios decreased. In addition, C/S ratios in Lake Nakaumi are generally lower than that in Lake Hamana. These suggest that the areas near the mouth of lake have more oxic bottom environments, and the bottom of Lake Nakaumi is more anoxic than that of Lake Hamana. This is probably related with the tidal effect.

**Key words:** Lake Nakaumi, Lake Hamana, TOC・TN・TS contents, oxic-anoxic environments, tidal current

### はじめに

堆積物の全有機炭素 (TOC), 全窒素 (TN) およ  
び全イオウ (TS) 濃度は, 堆積環境と密接な関わ

りを持っている. このうち, TOC および TN 濃度  
は湖水表層における一次生産性, 湖底の酸化還元状  
態 (有機物の分解), 堆積速度の変化等を反映して  
いる. また, 堆積物中のイオウは汽水湖においては

<sup>1</sup> 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室, 〒690-8504 松江市西川津町 1060

Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

<sup>2</sup> 島根大学汽水域研究センター, 〒690-8504 松江市西川津町 1060

Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

<sup>3</sup> 愛媛大学理学部生物地球圏科学科, 〒790-8577 松山市文京町 2-5

Department of Science, Faculty of Biology and Earth Science, Ehime University, 2-5 Bunkyo, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

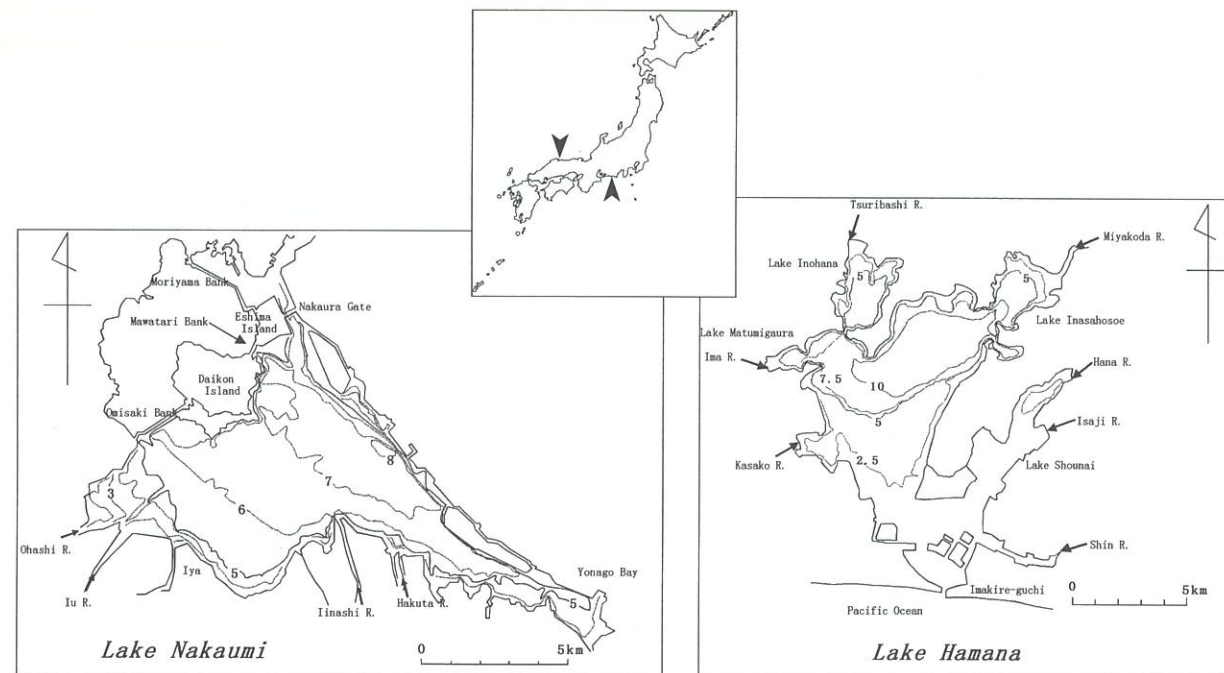


図1. 中海 (a) および浜名湖 (b) の水深分布  
Fig.1 Bathymetry in Lake Nakaumi (a) and Lake Hamana (b)

ほとんどがパイライト態のイオウおよびその他の硫化鉄として存在していると考えられ、その濃度は堆積物の TOC 濃度、湖底の塩分および酸化還元状態の変化に規制される (Berner and Raiswell, 1984; Berner, 1984). これらのことから、TOC, TN, TS 濃度およびその相互関係は、堆積環境の推定のための重要な指標の1つと考えられているが、必ずしも十分な研究は成されておらず、様々な堆積環境下での特徴は明らかにされていない。

汽水域では一般的に一次生産が高く、また、塩分躍層が形成されやすく湖底が貧酸素状態になりやすい。更に、潮流、潮汐がそれらの環境に影響を与えている。汽水域底質では、これらの堆積環境が TOC, TN および TS 濃度に反映されているものと考えられるが、汽水域におけるこれらの平面分布の特徴を明らかにしたものは、サロマ湖、網走湖等に限られている (三瓶ほか, 1997 など)。本研究では、潮汐による影響が汽水域堆積物の TOC, TN および TS 濃度分布に与える影響を明らかにするため、潮位差の明瞭に異なる中海および浜名湖表層堆積物の TOC, TN および TS 濃度分布とそれらの相互関係について検討を行った。中海は日本海に面した汽水湖であり、日本海の潮位変化は約 0.5m 程度に過ぎず、更に狭い境水道が間にあるため潮汐によって引き起こされる中海の水位変化は、日本海の潮位変化の 2/3 前後しかない (伊達, 1991)。一方浜名湖は、今切口によって直接太平洋と連結しており、太平洋の潮位差は約 1.5m 程度である。更に 1956 年に湖口

が改修されて以来、浜名湖では、潮汐の影響は顕著に表れるようになったと考えられている。

### 中海および浜名湖の概要

中海は、島根、鳥取両県にまたがる汽水湖であり、流入してきた淡水は表層を流れ、境水道を通して流入してくる海水とは十分に混ざり合わず、そのため、水深 3~4m 付近に安定した強い塩分躍層が形成されている。このため湖底は特に夏季には無酸素で還元的環境となることが知られている (徳岡ほか, 1994 など)。湖面積は 86.8km<sup>2</sup> で、湖底は西から東に向かって徐々に深くなり、大根島の南東、弓ヶ浜半島の西側の水域の水深が最も深くなっている (最大水深: 約 8m, 平均水深: 5.4m; Fig.1)。島根半島と弓ヶ浜半島によって中海は日本海から隔てられており、長さ 7.5km, 幅 0.2~0.4km の境水道によって日本海とつながり、中浦水門を通じて海水が出入りしている。また流域面積は、644km<sup>2</sup> で大橋川、飯梨川、伯太川、意宇川など合計 13 本の流入河川を持ち、長さ 7.3km の大橋川によって宍道湖と連結している (伊達ほか, 1989; 伊達, 1991)。

浜名湖は、太平洋岸最大の汽水湖であり、湖北部の湖盆域で特に夏季に密度成層を形成し、主湖北北部、各付属湖の水深 5~6m 以下の湖底は無酸素状態となることが知られている。湖面積 68.8km<sup>2</sup>, 最大水深 12.2m, 平均水深 5m で、主湖のほぼ中央部

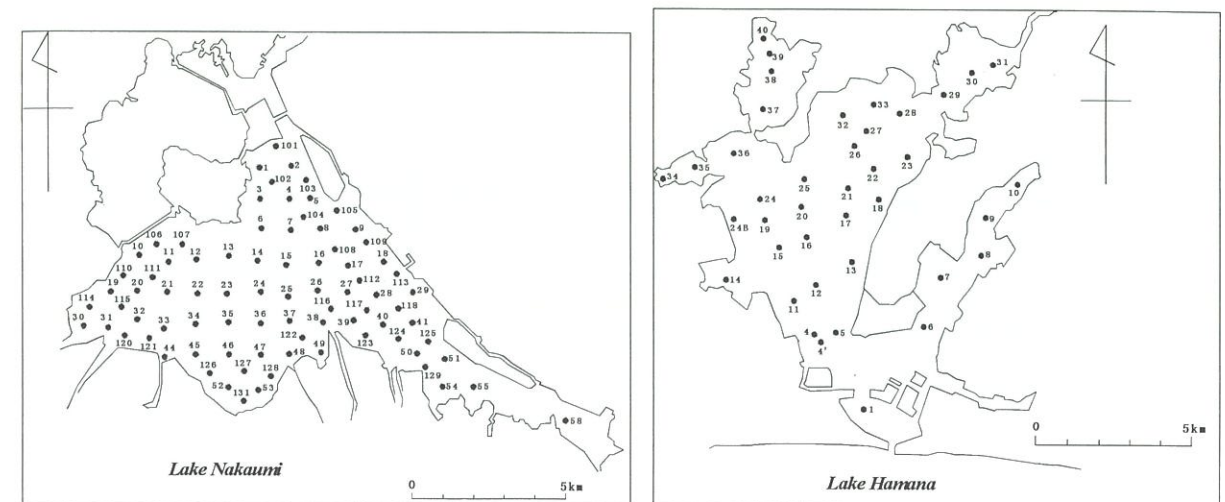


図2. 試料採取地点; (a) 中海, (b) 浜名湖  
Fig.2 Sampling stations in Lake Nakaumi (a) and Lake Hamana (b)

に存在する比高約 5m の湖棚崖が主湖を大きく南北に2分し、北半部は水深 6~12m と深いのに対して、南半部は 4m 以下と浅い地形を成している (池谷ほか, 1990; 池谷, 1991)。また、浜名湖は主湖と付属湖である松見が浦、猪鼻湖、引佐細江、庄内湖から成り、都田川を最大河川とする合計 14 本の河川が各付属湖に流入している。主湖南端の今切口における幅 0.2km の人工的導水路によって直接太平洋と連結している。

### 試料および分析方法

中海の表層試料は、1996 年 9 月 25~28 日に 75 地点で、1997 年 9 月 5~11 日に 8 地点で約 1m の柱状試料を採取し、上部 1cm を分析試料とした。浜名湖の表層試料は、1996 年 10 月 5~8 日に 40 地点でエクマンバージ採泥器を用いて採泥し、表層部約 1cm を分析試料とした。試料採取地点を Fig.2 に示した。試料は、70℃で 24 時間乾燥後、メノウ乳鉢で 200 メッシュ程度まで粉碎し、110℃で 30 分乾燥させた。その後 1M の塩酸を加えて炭酸塩炭素を除去し、FISONS 社製 CHNS 元素分析計 E.A.1108 によって TOC, TN および TS 濃度の分析を行った。TOC, TN および TS 濃度の分析精度は、それぞれ  $\pm 0.03\%$ ,  $\pm 0.03\%$ , および  $\pm 0.04\%$  以内で、検出限界値はそれぞれ 0.01%, 0.005%, および 0.1% である。また、浜名湖の試料について、TS 濃度が CHNS 元素分析計の検出限界以下で検出できなかった試料があったため、堀場社製イオウ分析装置 EMIA-120 (検出限界値: 0.001%) による分析を行った。

### 結 果

#### 1) 中海表層堆積物

TOC 濃度は、0.14~4.40% の範囲にあり (Table.1; Appendix.1-a~1-e), 湖心から北西部、南部にかけて 3.5~4.0% の高い値を示し、米子湾でも高い値 (3.8~4.4%) を示した (Fig.3-a)。また、海水の流入が行われる中浦水門付近で、2.5% 以下の低い値を示し、大橋川、意宇川河口付近でも 0.1~0.2% の低い値を示した。TN 濃度は、0.05~0.65% の範囲にあり、TOC 濃度と同様に湖心から北西部、南部にかけて 0.4~0.5% の高い値を示し (Fig.3-b), 米子湾でも 0.4~0.6% の高い値を示した。また中浦水門付近と大橋川、意宇川河口付近で 0.1~0.2% の低い値を示した。TS 濃度は、0.09~5.42% の範囲にあり、南部、東部で 3.5~5.4% の高い値を示し、北部で 2.5% 以下の低い値を示した (Fig.3-c)。

TOC/TN 重量比 (C/N 比) は、ほぼ全域で 7~8 台の値を示し (Fig.3-d), 飯梨川、意宇川河口周辺で 8.5~10.8 の高い値を示した。また、湖東縁で局所的に 5 以下の低い値を示し、楯屋付近でも 2.8 の低い値を示した。

TOC/TS 重量比 (C/S 比) は、1.0~1.5 の値の範囲が広く (Fig.3-e), 特に南部と東部で 0.5~0.9 と低い値を示し、中浦水門付近と大橋川河口付近で 1.6~2.6 の高い値を示した。また、米子湾付近は 1.1~1.6 のやや高い値を示した。

#### 2) 浜名湖表層堆積物

TOC 濃度は、0.01~4.94% の範囲にあり (Table.2; Appendix.2-a~2-e), 主湖北部、松見が浦、猪鼻湖、庄内湖北部で 3.0~4.9% の高い値を示し、湖口から広い範囲にわたって 1% 以下の低濃度域が広がっている (Fig.4-a)。また、引佐細江では 2.2~2.5% の値

表 1. 中海の表層堆積物における全有機炭素 (TOC) 濃度, 全窒素 (TN) 濃度, 全イオウ (TS) 濃度, TOC/TN (C/N) 比, TOC/TS (C/S) 比

Table.1 Total organic carbon (TOC) content, total nitrogen (TN) content, total sulfur (TS) content, TOC/TN (C/N) ratio, TOC/TS (C/S) ratio in the surface sediments for Lake Nakaumi

| No.      | TOC(%) | TN(%) | TS(%) | C/N ratio | C/S ratio | Water depth(m) |
|----------|--------|-------|-------|-----------|-----------|----------------|
| NU96-1   | 2.63   | 0.336 | 2.63  | 7.83      | 1.00      | 7.2            |
| NU96-2   | 2.02   | 0.251 | 0.67  | 8.04      | 3.00      | 12.9           |
| NU96-3   | 2.54   | 0.308 | 3.02  | 8.25      | 0.84      | 6.8            |
| NU96-4   | 2.92   | 0.333 | 2.13  | 8.77      | 1.37      | 7.6            |
| NU96-5   | 1.25   | 0.172 | 1.34  | 7.27      | 0.93      | 10.5           |
| NU96-6   | 2.35   | 0.305 | 1.40  | 7.70      | 1.68      | 7.8            |
| NU96-7   | 2.86   | 0.351 | 2.21  | 8.14      | 1.29      | 7.6            |
| NU96-8   | 2.48   | 0.309 | 2.31  | 8.03      | 1.07      | 7.8            |
| NU96-9   | 1.91   | 0.241 | 2.97  | 7.93      | 0.64      | 9.0            |
| NU96-10  | 3.92   | 0.539 | 2.51  | 7.27      | 1.56      | 5.1            |
| NU96-11  | 3.45   | 0.447 | 2.51  | 7.72      | 1.37      | 5.7            |
| NU96-12  | 2.50   | 0.378 | 1.99  | 6.61      | 1.26      | 6.9            |
| NU96-13  | 2.67   | 0.351 | 1.77  | 7.61      | 1.51      | 7.1            |
| NU96-14  | 2.65   | 0.344 | 1.51  | 7.70      | 1.75      | 7.4            |
| NU96-15  | 3.44   | 0.431 | 2.36  | 7.98      | 1.46      | 7.6            |
| NU96-16  | 3.25   | 0.389 | 3.38  | 8.35      | 0.96      | 7.9            |
| NU96-17  | 2.98   | 0.343 | 4.74  | 8.69      | 0.63      | 7.9            |
| NU96-18  | 2.87   | 0.355 | 3.41  | 8.08      | 0.84      | 12.5           |
| NU96-19  | 3.73   | 0.496 | 3.37  | 7.52      | 1.11      | 3.7            |
| NU96-20  | 3.92   | 0.538 | 3.16  | 7.29      | 1.24      | 4.6            |
| NU96-21  | 3.13   | 0.288 | 2.27  | 10.87     | 1.38      | 5.8            |
| NU96-22  | 3.76   | 0.466 | 2.87  | 8.07      | 1.31      | 6.8            |
| NU96-23  | 3.47   | 0.446 | 2.84  | 7.78      | 1.22      | 6.9            |
| NU96-24  | 3.98   | 0.436 | 0.78  | 9.13      | 5.10      | 7.2            |
| NU96-25  | 3.70   | 0.427 | 2.95  | 8.67      | 1.25      | 7.3            |
| NU96-26  | 3.74   | 0.424 | 3.22  | 8.82      | 1.16      | 7.7            |
| NU96-27  | 3.33   | 0.387 | 3.61  | 8.60      | 0.92      | 7.7            |
| NU96-28  | 2.84   | 0.330 | 3.84  | 8.61      | 0.74      | 7.8            |
| NU96-29  | 2.88   | 0.345 | 3.05  | 8.35      | 0.94      | 8.0            |
| NU96-30  | 0.80   | 0.142 | 0.36  | 5.63      | 2.22      | 2.1            |
| NU96-31  | 1.83   | 0.226 | 1.62  | 8.09      | 1.13      | 2.8            |
| NU96-32  | 3.34   | 0.445 | 3.29  | 7.51      | 1.02      | 4.2            |
| NU96-33  | 2.80   | 0.344 | 3.39  | 8.14      | 0.83      | 5.2            |
| NU96-34  | 3.62   | 0.460 | 3.30  | 7.87      | 1.10      | 6.5            |
| NU96-35  | 2.79   | 0.334 | 3.09  | 8.35      | 0.90      | 6.5            |
| NU96-36  | 3.78   | 0.455 | 3.39  | 8.30      | 1.11      | 6.9            |
| NU96-37  | 3.30   | 0.380 | 4.39  | 8.68      | 0.75      | 7.1            |
| NU96-38  | 3.25   | 0.323 | 2.19  | 10.06     | 1.48      | 6.2            |
| NU96-39  | 2.98   | 0.331 | 3.38  | 8.99      | 0.88      | 6.7            |
| NU96-40  | 3.07   | 0.361 | 3.44  | 8.50      | 0.89      | 7.2            |
| NU96-41  | 3.19   | 0.388 | 4.39  | 8.22      | 0.73      | 12.9           |
| NU96-44  | 0.14   | 0.050 | 0.09  | 2.79      | 1.56      | 2.3            |
| NU96-45  | 3.27   | 0.425 | 3.25  | 7.69      | 1.01      | 5.5            |
| NU96-46  | 3.65   | 0.459 | 3.66  | 7.95      | 1.00      | 6.0            |
| NU96-47  | 3.44   | 0.421 | 4.14  | 8.17      | 0.83      | 6.4            |
| NU96-48  | 2.73   | 0.316 | 3.63  | 8.64      | 0.75      | 6.0            |
| NU96-49  | 1.74   | 0.240 | 2.11  | 7.24      | 0.82      | 4.4            |
| NU96-50  | 3.27   | 0.370 | 3.44  | 8.83      | 0.95      | 6.4            |
| NU96-51  | 3.11   | 0.378 | 5.42  | 8.23      | 0.57      | 9.9            |
| NU96-52  | 4.08   | 0.543 | 4.18  | 7.51      | 0.98      | 5.4            |
| NU96-53  | 3.41   | 0.435 | 4.40  | 7.84      | 0.78      | 5.5            |
| NU97-54  | 4.40   | 0.659 | 2.67  | 6.68      | 1.65      | 4.7            |
| NU97-55  | 3.08   | 0.435 | 2.64  | 7.08      | 1.16      | 5.9            |
| NU97-58  | 3.88   | 0.607 | 2.78  | 6.39      | 1.39      | 3.5            |
| NU97-101 | 1.20   | 0.187 | 0.71  | 6.41      | 1.69      | 6.0            |
| NU96-102 | 3.22   | 0.380 | 4.79  | 8.47      | 0.67      | 7.1            |
| NU97-103 | 2.78   | 0.403 | 1.38  | 6.90      | 2.01      | 4.3            |
| NU96-104 | 2.58   | 0.324 | 2.62  | 7.96      | 0.98      | 7.6            |
| NU97-105 | 0.36   | 0.116 | 0.54  | 3.10      | 0.67      | 5.2            |
| NU96-106 | 4.06   | 0.545 | 3.05  | 7.45      | 1.33      | 5.7            |
| NU96-107 | 3.49   | 0.437 | 2.96  | 7.98      | 1.18      | 5.4            |
| NU96-108 | 3.15   | 0.333 | 1.83  | 9.46      | 1.72      | 8.0            |
| NU97-109 | 0.27   | 0.116 | 0.72  | 2.33      | 0.37      | 6.3            |
| NU96-110 | 3.74   | 0.500 | 4.00  | 7.48      | 0.93      | 4.1            |
| NU96-111 | 3.76   | 0.515 | 3.29  | 7.30      | 1.14      | 5.5            |
| NU96-112 | 3.51   | 0.425 | 3.69  | 8.26      | 0.95      | 7.7            |
| NU97-113 | 1.77   | 0.251 | 2.50  | 7.05      | 0.71      | 7.1            |
| NU96-114 | 1.57   | 0.221 | 0.58  | 7.10      | 2.71      | 2.6            |
| NU96-115 | 3.40   | 0.437 | 3.64  | 7.78      | 0.93      | 3.9            |
| NU96-116 | 3.05   | 0.356 | 2.73  | 8.56      | 1.12      | 7.0            |
| NU96-117 | 3.50   | 0.467 | 1.47  | 7.49      | 2.37      | 7.3            |
| NU96-118 | 3.05   | 0.381 | 3.26  | 8.01      | 0.94      | 7.4            |
| NU96-120 | 2.03   | 0.276 | 1.98  | 7.34      | 1.02      | 3.2            |
| NU96-121 | 1.48   | 0.159 | 1.43  | 9.31      | 1.03      | 3.4            |
| NU96-122 | 3.38   | 0.394 | 3.78  | 8.58      | 0.89      | 5.9            |
| NU96-123 | 3.49   | 0.381 | 4.57  | 9.16      | 0.76      | 5.7            |
| NU96-124 | 3.03   | 0.342 | 3.64  | 8.86      | 0.83      | 6.4            |
| NU96-125 | 0.17   | 0.035 | 0.31  | 4.86      | 0.54      | 10.0           |
| NU96-126 | 2.97   | 0.367 | 4.48  | 8.09      | 0.66      | 4.7            |
| NU96-127 | 3.92   | 0.493 | 4.07  | 7.94      | 0.96      | 5.4            |
| NU96-128 | 3.04   | 0.343 | 5.24  | 8.86      | 0.58      | 4.7            |
| NU96-129 | 0.75   | 0.110 | 2.16  | 6.80      | 0.35      | 5.3            |
| NU96-131 | 3.73   | 0.458 | 5.00  | 8.14      | 0.75      | 4.4            |

表 2. 浜名湖の表層堆積物における全有機炭素 (TOC) 濃度, 全窒素 (TN) 濃度, 全イオウ (TS) 濃度, TOC/TN (C/N) 比, TOC/TS (C/S) 比

Table.2 Total organic carbon (TOC) content, total nitrogen (TN) content, total sulfur (TS) content, TOC/TN (C/N) ratio, TOC/TS (C/S) ratio in the surface sediments for Lake Hamana

| No.     | TOC(%) | TN(%) | TS(%) | C/N ratio | C/S ratio | Water depth(m) |
|---------|--------|-------|-------|-----------|-----------|----------------|
| 96HM01  | 0.35   | 0.025 | 0.08  | 14.00     | 4.38      | 4.4            |
| 96HM04  | 0.74   | 0.082 | 0.15  | 9.02      | 4.93      | 1.4            |
| 96HM04' | 1.29   | 0.091 | 0.16  | 14.18     | 8.06      | 1.8            |
| 96HM05  | 0.10   | 0.023 | 0.07  | 4.42      | 1.46      | 2.9            |
| 96HM06  | 0.90   | 0.100 | 0.44  | 9.00      | 2.03      | 3              |
| 96HM07  | 1.52   | 0.156 | 0.71  | 9.74      | 2.14      | 1.5            |
| 96HM08  | 3.52   | 0.386 | 0.93  | 9.13      | 3.78      | 1.5            |
| 96HM09  | 3.52   | 0.443 | 1.12  | 7.95      | 3.14      | 2.7            |
| 96HM10  | 3.60   | 0.406 | 1.60  | 8.87      | 2.25      | 3.1            |
| 96HM11  | 0.17   | 0.031 | 0.14  | 5.53      | 1.23      | 2.4            |
| 96HM12  | 0.27   | 0.036 | 0.16  | 7.51      | 1.70      | 3.1            |
| 96HM13  | 0.27   | 0.038 | 0.19  | 7.12      | 1.42      | 2.9            |
| 96HM14  | 3.38   | 0.450 | 1.28  | 7.51      | 2.64      | 2.8            |
| 96HM15  | 0.40   | 0.065 | 0.20  | 6.18      | 2.00      | 3.1            |
| 96HM16  | 0.43   | 0.052 | 0.17  | 8.27      | 2.49      | 4.2            |
| 96HM17  | 0.22   | 0.043 | 0.12  | 5.18      | 1.87      | 2.8            |
| 96HM18  | 0.24   | 0.043 | 0.11  | 5.63      | 2.18      | 2.9            |
| 96HM19  | 2.60   | 0.341 | 1.12  | 7.63      | 2.32      | 7.7            |
| 96HM20  | 2.91   | 0.382 | 1.41  | 7.62      | 2.06      | 9.8            |
| 96HM21  | 2.58   | 0.328 | 1.18  | 7.88      | 2.19      | 10.1           |
| 96HM22  | 2.33   | 0.292 | 1.15  | 7.98      | 2.03      | 11.1           |
| 96HM23  | 2.59   | 0.303 | 1.45  | 8.56      | 1.79      | 11.1           |
| 96HM24  | 3.59   | 0.447 | 1.64  | 8.03      | 2.19      | 8.9            |
| 96HM24B | 0.12   | 0.030 | 0.05  | 4.18      | 2.33      | 8.9            |
| 96HM25  | 3.57   | 0.461 | 1.74  | 7.76      | 2.05      | 10.6           |
| 96HM26  | 3.08   | 0.382 | 1.86  | 8.07      | 1.66      | 11.6           |
| 96HM27  | 2.85   | 0.361 | 1.69  | 7.91      | 1.69      | 12.2           |
| 96HM28  | 2.84   | 0.352 | 1.78  | 8.07      | 1.60      | 10.6           |
| 96HM29  | 2.25   | 0.271 | 2.33  | 8.30      | 0.97      | 9.6            |
| 96HM30  | 2.36   | 0.265 | 1.61  | 8.91      | 1.47      | 7.5            |
| 96HM31  | 2.59   | 0.271 | 1.23  | 9.56      | 2.11      | 2.6            |
| 96HM32  | 3.58   | 0.452 | 2.11  | 7.93      | 1.70      | 11.6           |
| 96HM33  | 3.15   | 0.399 | 2.16  | 7.90      | 1.46      | 9.1            |
| 96HM34  | 4.21   | 0.346 | 1.44  | 12.18     | 2.93      | 1.6            |
| 96HM35  | 4.24   | 0.532 | 2.19  | 7.97      | 1.94      | 6.2            |
| 96HM36  | 4.49   | 0.512 | 2.36  | 8.78      | 1.90      | 7.1            |
| 96HM37  | 3.43   | 0.380 | 3.11  | 9.02      | 1.10      | 6.4            |
| 96HM38  | 3.07   | 0.376 | 2.66  | 8.16      | 1.15      | 5.6            |
| 96HM39  | 3.05   | 0.357 | 2.19  | 8.56      | 1.39      | 4.2            |
| 96HM40  | 4.94   | 0.406 | 1.15  | 12.17     | 4.28      | 1.7            |

を示した。TN 濃度は、0.02~0.53%の範囲にあり、TOC と同様に主湖北部、松見が浦、猪鼻湖、庄内湖で 0.3~0.5%の高い値を示し (Fig.4-b)、湖口から広い範囲で 0.1%以下の地域が広がっていた。TS 濃度は、0.05~3.11%の範囲にあり、主湖北部、各付属湖で 1.1~3.1%の高い値を示し (Fig.4-c)、主湖南半部で 0.2%以下の非常に低い値を示した。

C/N 比は、ほぼ全域で 7~8 台の値を示していた (Fig.4-d)。また、松見が浦、猪鼻湖、引佐細江、庄内湖南部で 9.0~12.1 の高い値を示していた。また、湖岸域で局所的に 6 以下の低い値を示した。

C/S 比は、1.5~2.0 の値の範囲が広く (Fig.4-e)、猪鼻湖、引佐細江において 0.9~1.4 の低い値を示した。また、主湖南部において 1.1~1.6 の低い値を示していた。庄内湖においては、2.0~3.7 の高い値を示した。

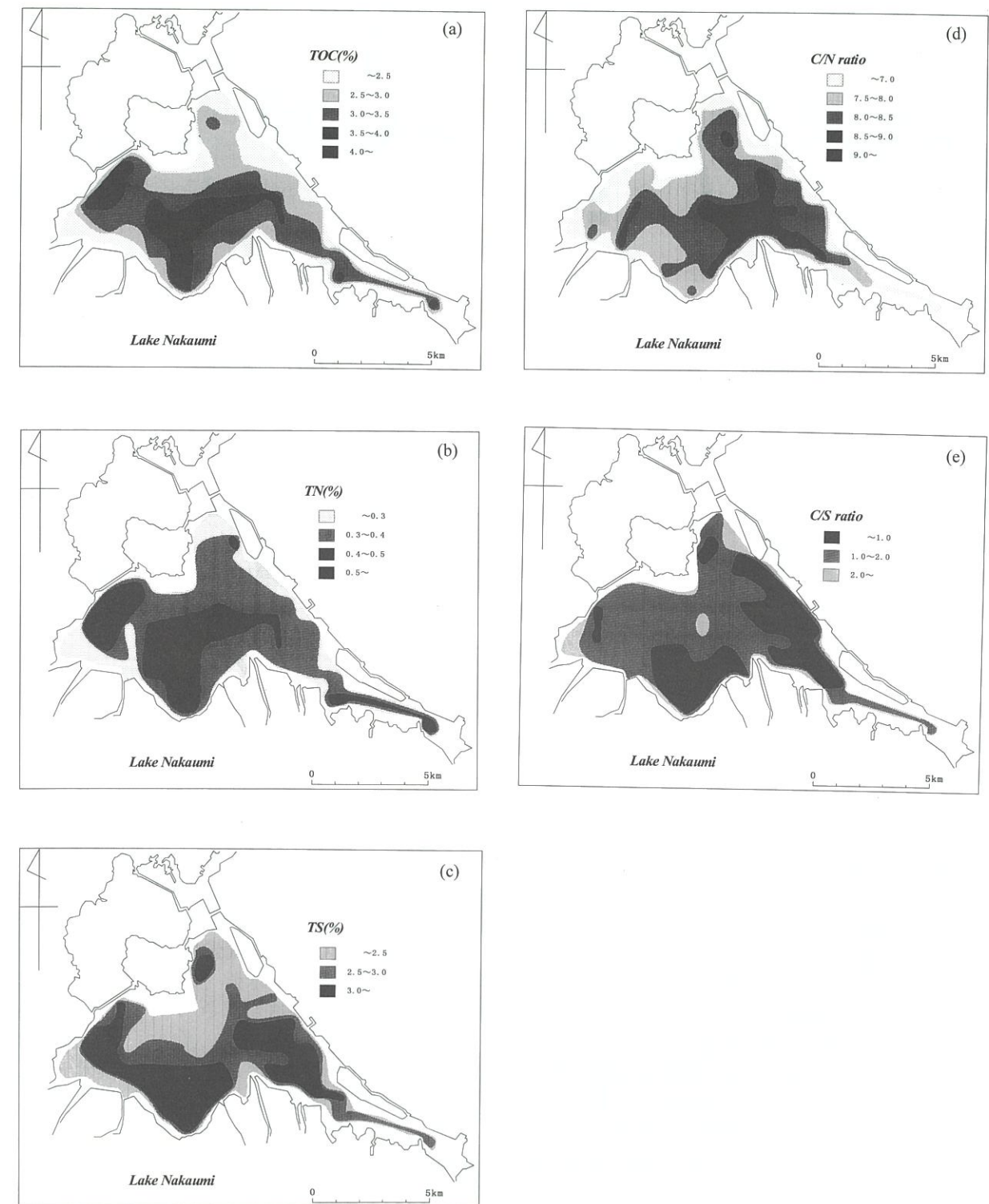


図 3. 中海における全有機炭素 (TOC : a) 濃度, 全窒素 (TN : b) 濃度, 全イオウ (TS : c) 濃度, TOC/TN (C/N : d) 比, TOC/TS (C/S : e) 比の堆積物表層分布

Fig.3 Distributions of total organic carbon (TOC : a) content, total nitrogen (TN : b) content, total sulfur (TS : c) content, TOC/TN (C/N : d) ratio, TOC/TS (C/S : e) ratio in surface sediments for Lake Nakaumi

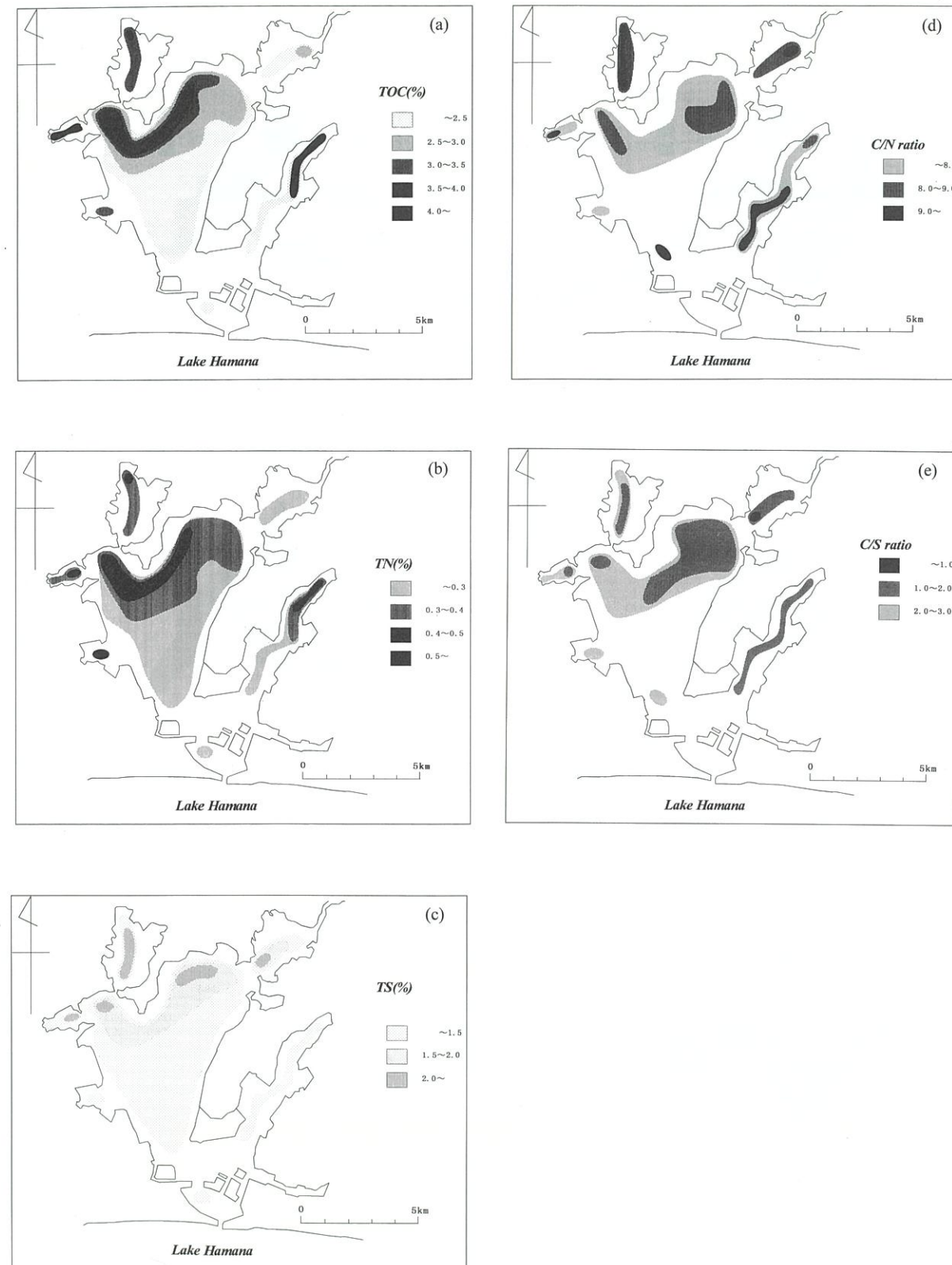


図4. 浜名湖における全有機炭素 (TOC : a) 濃度, 全窒素 (TN : b) 濃度, 全イオウ (TS : c) 濃度, TOC/TN (C/N : d) 比, TOC/TS (C/S : e) 比の堆積物表層分布

Fig.4 Distributions of total organic carbon (TOC : a) content, total nitrogen (TN : b) content, total sulfur (TS : c) content, TOC/TN (C/N : d) ratio, TOC/TS (C/S : e) ratio in surface sediments for Lake Hamana

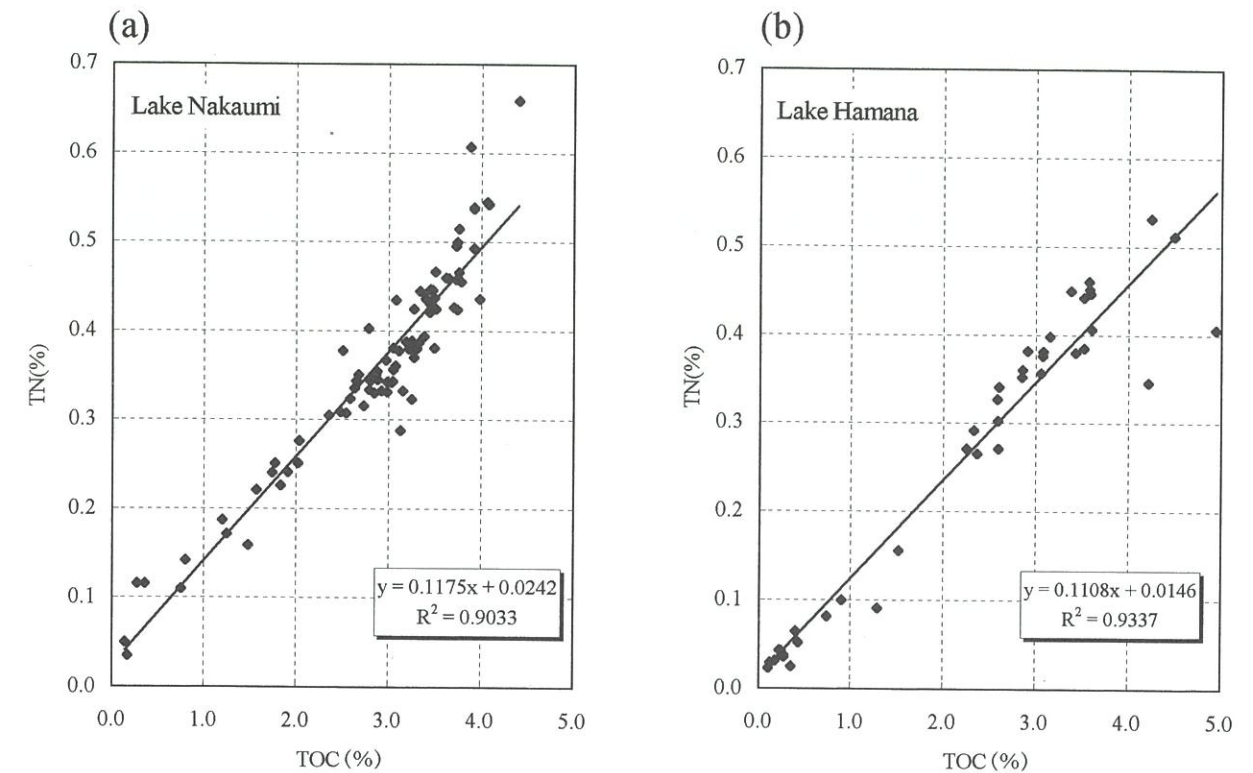


図5. 中海 (a) および浜名湖 (b) における TOC-TN クロスプロット  
Fig.5 TOC-TN crossplots for Lake Nakaumi (a) and Lake Hamana (b)

## 考 察

### 1) 中海の湖底環境

Fig.3-d および Fig.3-e に示した C/N および C/S 比の分布は、湖底の酸化還元状態および、これと密接な関係を持つ有機物の起源が地域的に異なることを示している。一般に堆積物の C/S 比は、塩分や酸化還元状態によって単位炭素あたりの固定されるイオウ濃度が変化するため、淡水-海水成堆積物を区別する指標として用いられ (Berner and Raiswell, 1984; Berner, 1984), 汽水-海水の環境下では、酸化還元状態も推定することができる。C/S 比が、5 以上では淡水環境, 3~5 では酸化的海水-汽水環境, 3 以下では還元的海水-汽水環境 (Berner and Raiswell, 1984), また 1 前後では夏季に無酸素となりやすい汽水-内湾環境 (Sampei et al., 1997) を示すとされている。このことから、中海ではほぼ全域で夏季に無酸素となりやすい汽水-内湾環境を示しており (Fig.3-e), 特に南部と東部ではより還元的になっていると考えられる。

これらのことは TS 濃度分布 (Fig.3-c) ともほぼ一致している。この理由には、南部、東部の水域では海水が停滞しやすいことが考えられる。また、プランクトンの生産性の地域差と関係していることも考えられるが、以下に述べる理由からこの可能性は

低いと思われる。すなわち、硫酸還元バクテリアはプランクトン有機物の供給によって活性が高まるが (Berner, 1984), プランクトン起源有機物が卓越することを示す低い C/N 比を示す水域と、硫酸還元がより活発に行われたことを示す低い C/S 比を示す水域が必ずしも一致していないことである。なお、一般に C/N 比はプランクトン起源有機物で 6 前後、陸源有機物で 15 以上といわれている (Müller, 1977; 中井ほか, 1982 など)。

このことから、中海では堆積した有機物はほとんどがプランクトン起源であり、飯梨川、意宇川河口付近で陸源有機物の割合が高くなっていると考えられる。また、湖東縁と榊屋付近で C/N 比が、プランクトン起源の有機物よりも低い値を示しているのは、TOC 濃度が 0.1~0.8% と低いために、無機態の窒素の影響が大きく表れたためと考えられる。

Fig.5-a に中海の TOC-TN クロスプロットを示した。この TOC-TN クロスプロットの回帰直線の切片が無機態窒素の含有量を表しており、中海では 0.02% となった。この無機態窒素の起源は、粘土鉱物層間に存在するアンモニウム態の窒素等と考えられる (Müller, 1977)。Fig.6-a に中海の TOC-TS クロスプロットを示した。この Fig.6-a には、Berner (1984) および Sampei et al. (1997) で示された酸化的な Normal Marine と夏季に無酸素とな

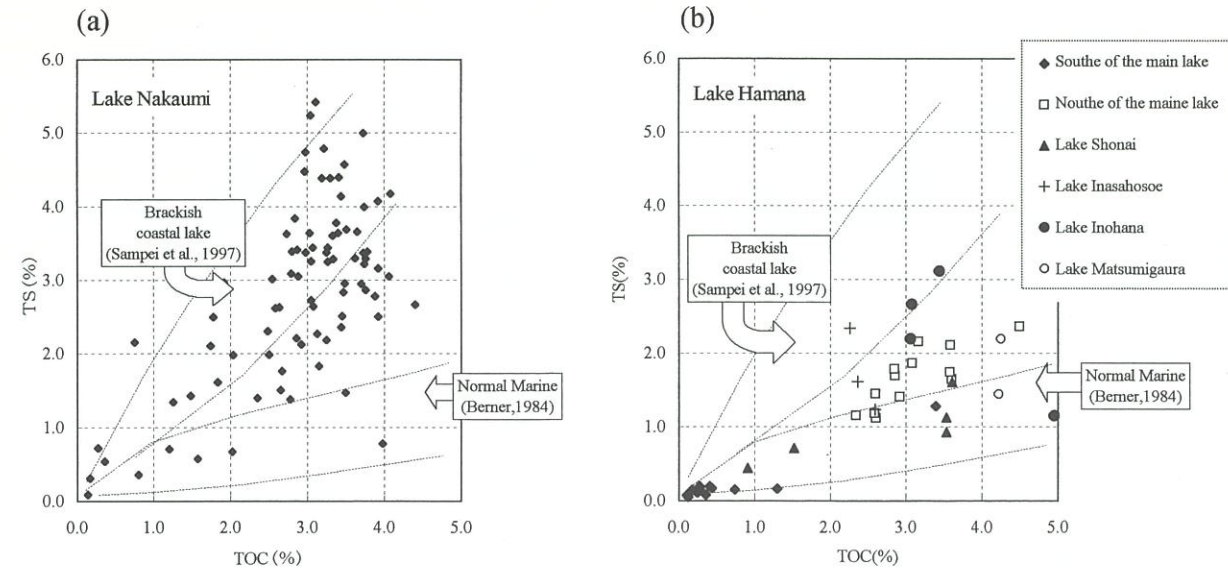


図6. 中海 (a) および浜名湖 (b) における TOC-TS クロスプロット  
Fig.6 TOC-TS crossplots for Lake Nakaumi (a) and Lake Hamana (b)

る Brackish coastal lake の領域を示している。本研究では、硫酸還元が完了していない表層試料であるが目安として比較検討した。中海では、83 地点中 6 地点（中浦水門付近、大橋川河口、湖心部）のみが酸化的な Normal Marine の領域内にプロットされ、残りの半数以上が Brackish coastal lake の領域にプロットされた。また、C/S 比分布で比較的酸化的な環境を示していた湖中央部は、Normal Marine と Brackish coastal lake の間の領域にプロットされ、南部、東部ほど酸化的な Normal Marine の領域から上方に離れ、単位有機炭素あたりのイオウの量が多くなっており還元環境を示していた。これらの C/S 比の相対的に高い値を示す水域は、海水の流入路と調和的である。これは流入する海水が溶存酸素を多く供給して、湖底をやや酸化的にしていることを示唆している。C/S 比が相対的に高く、やや酸化的湖底環境となっている水域では、TOC 濃度も 2.5% 以下の低い値を示すところが多く、有機物の酸化分解を示唆している。この考えは、以下に示す 1960 年代の TOC 濃度分布からも支持される。

中海では、1968 年に干拓工事が着工され、1981 年までに大海崎堤、馬渡堤、森山堤などの北西水域を取り囲む堤防 (Fig.1) が完成した。これにより、干拓工事着工以前は、海水も大橋川から流入してくる斐伊川水系の淡水-低塩分水も大根島の北西水域を経由していたが (Fig.7)、現在は海水も斐伊川水系の水も大根島の南東水域を経由して、中浦水門を通っている。このことから中海の湖底環境は、干拓工事着工以前と工事完了後の現在とでは、明確な違いがあると考えられる。水野ほか (1969) と小野、小野寺 (1976) では、干拓工事着工以前の 1965、1966

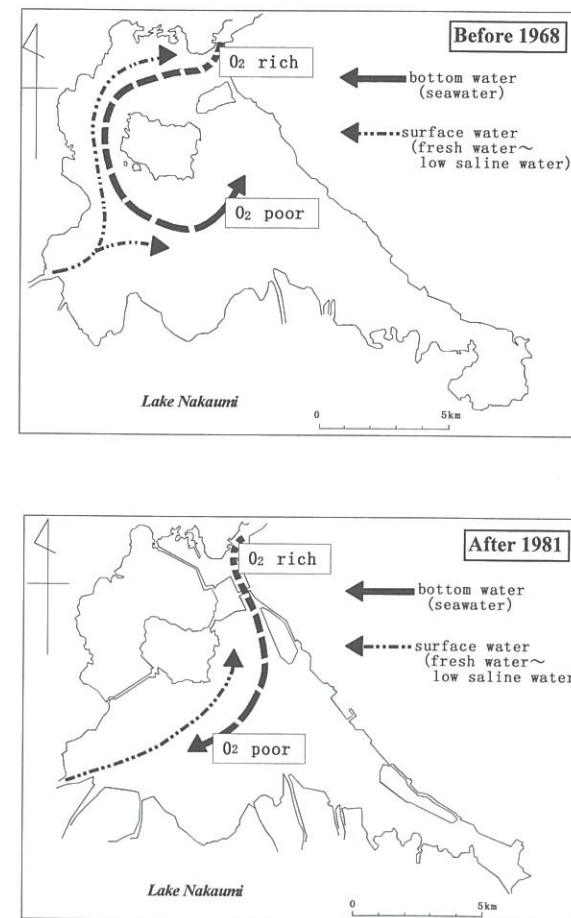


図7. 中海における流路変化の概要  
Fig.7 Schematic of flow-path changes in Lake Nakaumi

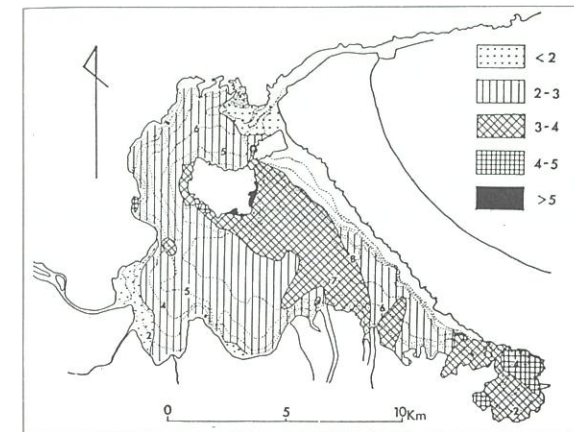


図8. 干拓工事による堤防の建設以前の中海の TOC 濃度分布 (小野・小野寺, 1976)  
Fig.8 Distributions of total organic carbon (TOC) contents before 1968 (before reclamation works; Ono and Onodera, 1976)

年に調査がされており、中海の水深 6m 以下の水域は常に高塩分で、成層、停滞構造がほぼ年間を通じて表れているとし、また境水道と飯梨川河口を結ぶ線以西は酸化型で、以东は還元型であると報告している。更に大根島から米子湾に向かって弱還元型から最強還元型へ推移していくとしている。この時の湖底表層堆積物の TOC 濃度分布 (Fig.8) は、境水道入口付近と大橋川河口付近で 2% 以下の低い値を示し、大根島北西方から南方にかけての主部のほとんどが 2~3% の値を示している。また北部を除いた大根島沿岸、江島-大根島南東-飯梨川河口を結ぶ線以东と米子湾で、3% 以上の高い値を示す。これは、海水の流出入口に近い水域で低い値を示しているように見え、有機物の酸化還元を示唆しており今回の結果と調和的である。

## 2) 浜名湖の湖底環境

浜名湖では、TOC、TN 濃度は共に湖口から広い範囲に渡ってかなり低い値を示していた。この低濃度域は、堆積物の粒度も粗く (sand ~ sandy silt: 池谷ほか, 1990; Ikeya and Handa, 1972; Sanukida and Matsushita, 1986)、海水の流出入の流れの速い地域に対応しているように見える。また、引佐細江で比較的低い値を示しているのは、都田川からの碎屑物の流入のため堆積速度が速くなり希釈効果が働いているためと考えられる。TS 濃度分布は、中海とは異なり、TOC 濃度分布と似た分布を示した。

C/N 比は、主湖ではプランクトン起源の有機物の割合が高いことを示していたが、松見が浦、猪鼻湖、引佐細江、庄内湖南部等の河口域では高い値を示し、各付属湖に流入する河川からの碎屑物の供給によって陸源有機物の割合が高くなっていることを示唆していた。なお、前述したように TOC 濃度が非常に低

いと無機態の窒素の影響が大きく表れ、C/N 比による正確な議論はできないため、Fig.4-d では TOC 濃度が 0.5% 以下の地点（主湖南半部）はプロットしていない。Fig.5-b に浜名湖の TOC-TN クロスプロットを示した。これによれば浜名湖表層堆積物の無機態窒素の平均含有量は 0.01% である。

C/S 比は、ほぼ全域で貧酸素環境を示しているが中海よりもやや酸化的である。ただし、TOC 濃度が 1% 以下の場合には、堆積物中に硫化物として固定された S に対して間隙水中に残った硫酸イオウ態の S の影響が大きくなり見かけ上低くなることがあるため、Fig.4-e では TOC 濃度が 0.5% 以下の地点（主湖南半部）はプロットしていない。TOC-TS クロスプロットから浜名湖の酸化還元環境を見てみると (Fig.6-b)、浜名湖では、40 地点中 13 地点が酸化的な Normal Marine の領域にプロットされ、残りのほとんどが Normal Marine と還元的な Brackish coastal lake の間の領域にプロットされた。引佐細江湖口と猪鼻湖湖口の 3 地点のみが Brackish coastal lake の領域内にプロットされた。また、主湖南半部では Normal Marine の下方にプロットされ、酸化的環境を示していた。主湖において、南部から北部に向かう（湖口から離れる）ほど単位有機炭素あたりのイオウの量が多くなり、還元性になっていく傾向が見られ、この傾向は湖地形とは一致していない。

## 3) 中海および浜名湖の底質環境と潮汐差の関係

前述したように、中海では、東部、南部の水域で広く C/S 比が 1 以下の値を示しており、この水域が還元性になっていることを示し、海水の流入路に当たる水域でやや酸化的になっていることが示された。また、流入路に当たる水域においても中浦水門に近いところほど酸化的であることが示唆された。一方浜名湖では、C/S 比が 1 以下の低い値を示す水域は、引佐細江湖口のみであり、浜名湖湖底の方が中海湖底より酸化的であるということが示唆された。中海および浜名湖の TOC-TS クロスプロットを見ると、浜名湖の主湖では中海よりも C/S 比の低いやや酸化的な領域にほとんどがプロットされる。この理由は、湖底への溶存酸素の供給量の差によるものと考えられる。潮汐差の大きい浜名湖では、溶存酸素を含んだ海水が底層を通してより広く供給されていると考えられる。潮汐によって引き起こされる中海および浜名湖の海水流入・水位変化のモデル図を Fig.9 に示した。浜名湖においては、高潮位時には酸素を含む海水は主湖北半部にまで進入すると考えられる。

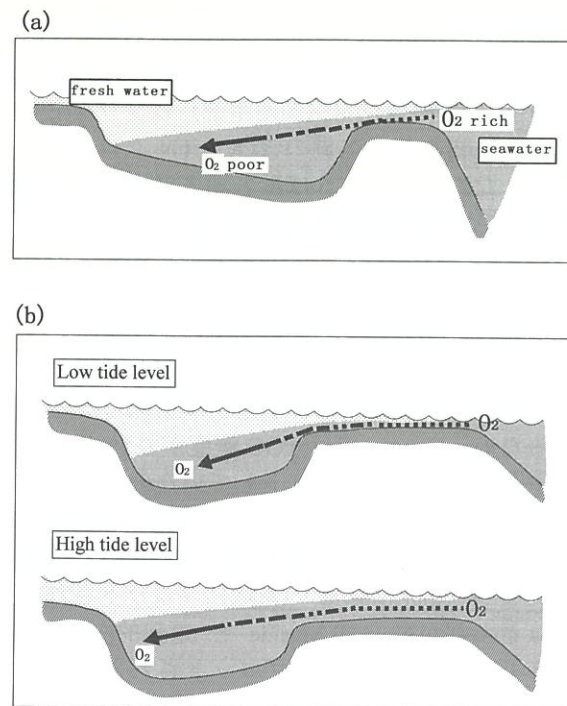


図9. 潮汐による水位変化のモデル図  
Fig.9 Model for level of lakewater changes in Lake Nakaumi (a) and Lake Hamana (b)

## ま と め

中海および浜名湖の表層堆積物の TOC, TN および TS 濃度分布とその規制要因を検討したところ、以下のような特徴が明らかとなった。

中海および浜名湖の TOC 濃度は、それぞれ 0.14~4.40% および 0.01~4.94%, TN 濃度は、それぞれ 0.05~0.65% および 0.02~0.53% の範囲にあり、両湖とも湖口付近で低い値を示すがその分布域は浜名湖の方が広がった。また TS 濃度は、それぞれ 0.09~5.42% および 0.05~3.11% であり、中海ではほとんど全域で 2% 以上の値を示したが、浜名湖では 2% 以上の値を示すのは、主湖北端、猪鼻湖に限られていた。

C/N 比から見ると、両湖ともほぼ全域で 7~8 台の値を示しプランクトン起源の有機物の割合が高くなっていたが、河口付近では陸源有機物の影響がみられた。また、C/S 比からは、両湖とも全般に外洋よりも還元的な湖底環境を示し、河口、湖口付近で比較的酸化的环境になっていることが明らかとなった。しかし中海と浜名湖を比較してみると、C/S 比が 1 以下の値を示す水域が中海では東部、南部に広く分布していたのに対し、浜名湖では引佐細江湖口のみであったことや、TOC-TS クロスプロットから、浜名湖湖底の方が中海湖底よりもやや酸化的環境であることが示唆された。この理由は、海水によ

って湖底にもたらされる溶存酸素に関係しているものと考えられ、潮汐差の大きな浜名湖の方がその影響が大きいことによると考えられる。

## 謝辞

静岡県水産試験場分場の方々と、地質調査所の方々には、試料の採取および処理に際し、多大なるご配慮をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## 引用文献

- Berner, R. A. (1984) Sedimentary pyrite formation. *Geochimica et Cosmochimica acta*, **48**:605-615.
- Berner, R. A. and Raiswell, R. (1984) C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *GEOLOGY*, **12**: 365-368.
- 伊達義夫・橋谷博・清家泰・近藤邦男・奥村稔・藤永薫 (1989) 12 年間の定期調査からみた中海、宍道湖の水質—季節変化, 経年変化, 平年値—。山陰地域研究 (自然環境), **5**: 89-102, 島根大学山陰地域研究総合センター。
- 伊達善夫 (1991) 中海, 宍道湖。空から見る日本の湖沼 (奥田節夫ほか編; 理科年表読本), 丸善: 206-210.
- Ikeya N. and Handa T. (1972) Surface Sediments in Hamana Lake, the Pacific Coast of Central Japan. *Reports of Faculty of Science, Shizuoka University*, **7**: 129-148.
- 池谷仙之・和田秀樹・阿久津浩・高橋実 (1990) 浜名湖の起源と地史の変遷。地質学論集, **36**: 129-150.
- 池谷仙之 (1991) 浜名湖。空から見る日本の湖沼 (奥田節夫ほか編; 理科年表読本), 丸善: 174-177.
- 水野篤行・関根節郎・中沢次郎・高久昭子・小野寺公児・小野美代子 (1969) 宍道湖, 中海底泥中の U 分布, とくに沈積環境との関係 (予報)。地質調査書報告, **232**: 317-352.
- Müller, P. J. (1977) C/N ratios in Pacific deep-sea sediments; Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochimica et Cosmochimica acta*, **41**: 765-776.
- 中井信之・太田友子・藤澤寛・吉田正夫 (1982) 堆積物コアの炭素同位体比, C/N 比および FeS<sub>2</sub> 含有量からみた名古屋港周辺の古気候, 古海水準変動。第四紀研究 (The Quaternary Research), **21** (3): 169-177.
- 小野美代子・小野寺公児 (1976) 宍道湖, 中海の堆積物中の炭素分布について。地質調査所月報, **27**:

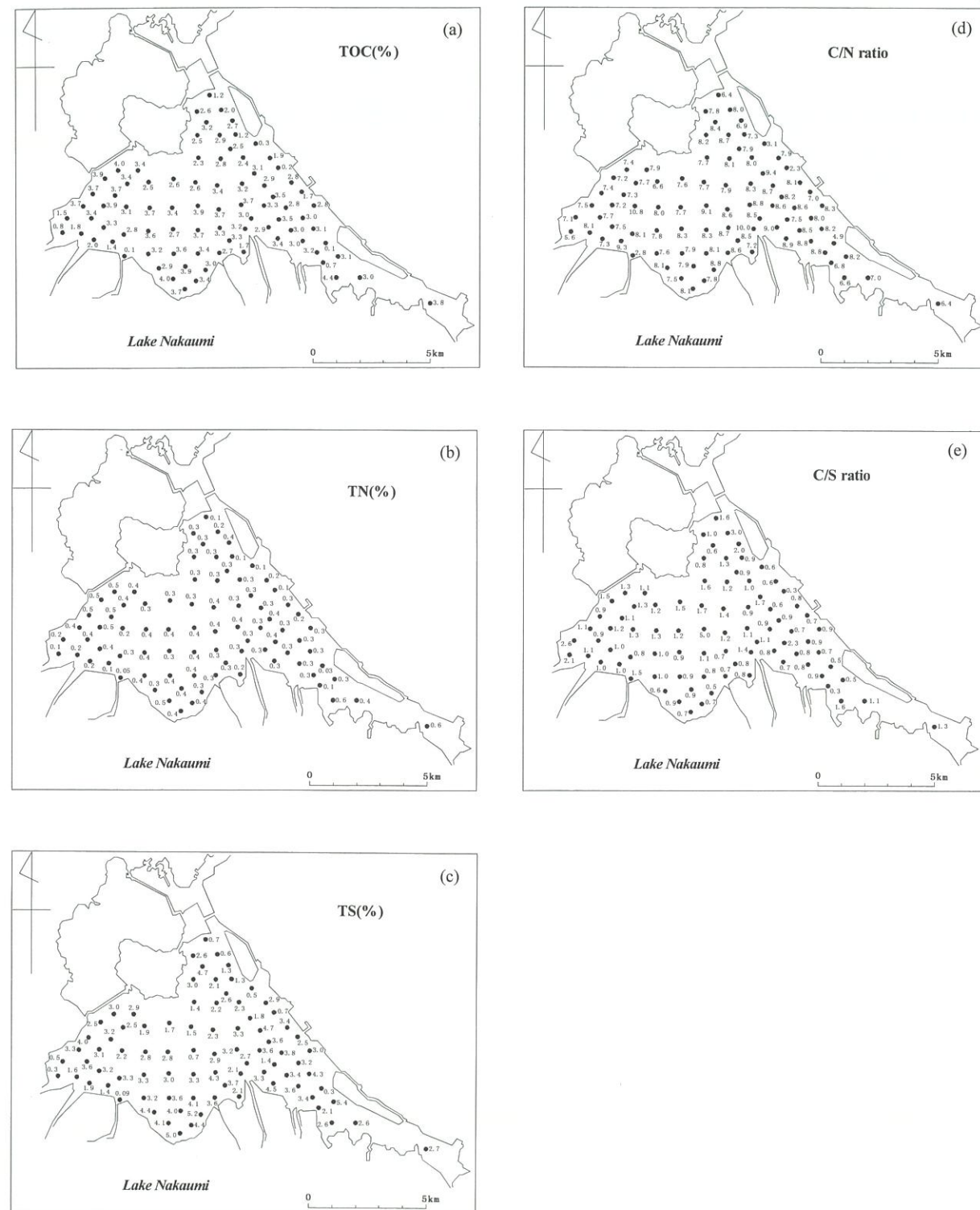
535-553.

三瓶良和・倉門由紀子・清水紋・高安克己・石田聖 (1997) サロマ湖, 網走湖底質の有機炭素, 窒素, イオウ濃度。 *Res. Org. Geochem.*, **12**: 51-60.

Sampei Y., Matsumoto E., Kamei T. and Tokuoka T. (1997) Sulfur and organic relationship in sediments from coastal brackish lakes in the Shimane peninsula district, southwest Japan. *Geochemical Journal*, **31**: 245-262.

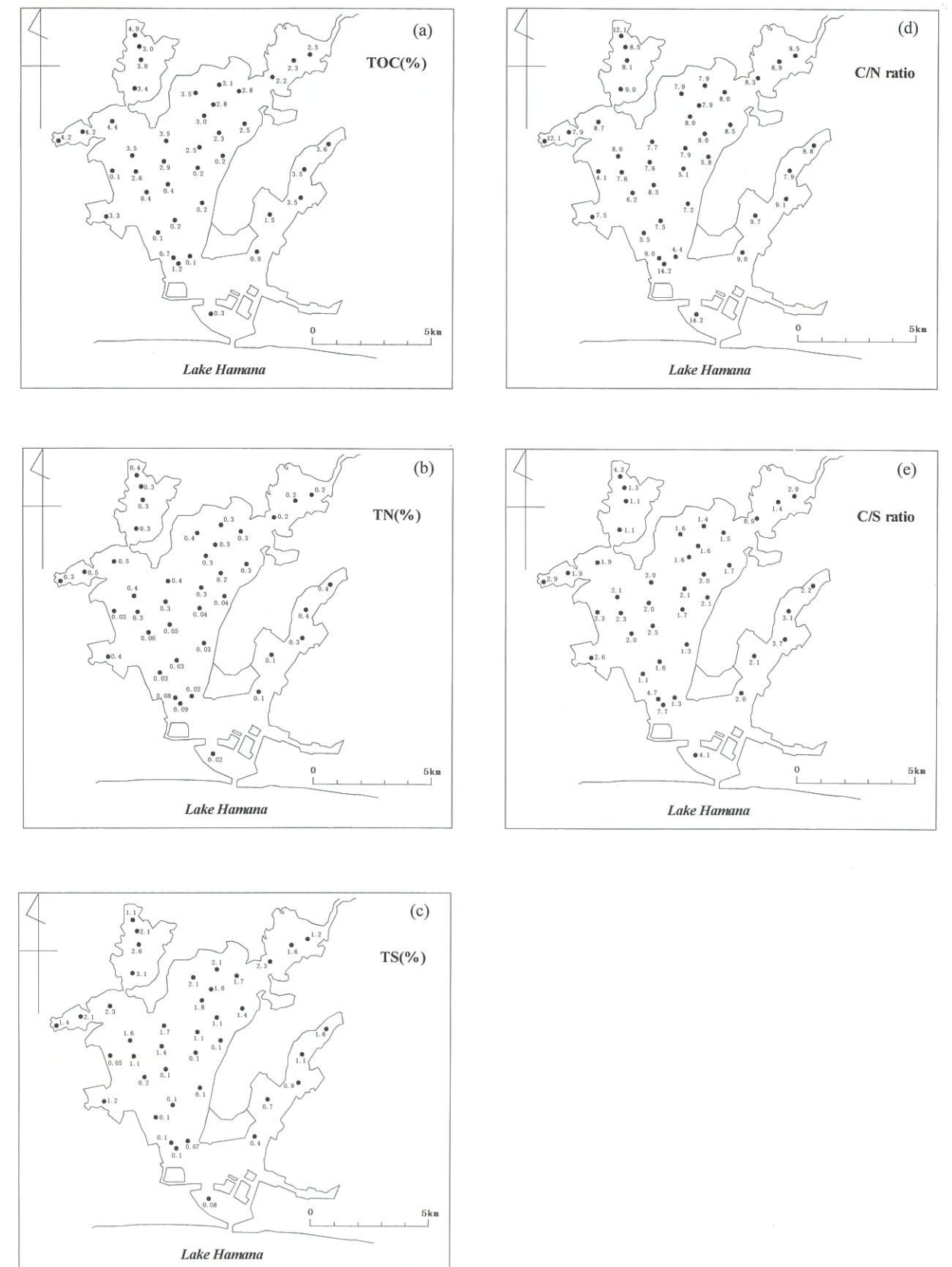
Sanukida S. and Matsushita M. (1986) Studies on the Modern Sedimentary Environment in Lake Hamana on the Pacific Coast of Central Japan. 第四紀研究 (the Quaternary Research), **25**: 1-12.

徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克己・安間恵・土屋洋一・松田滋夫・井内美郎・西村清和 (1994) 音波調査による中海・宍道湖の塩分躍層の検討とその意義。LAGUNA (汽水域研究), **1**: 11-26



付図1. 中海における全有機炭素 (TOC : a) 濃度, 全窒素 (TN : b) 濃度, 全イオウ (TS : c) 濃度, TOC/TN (C/N : d) 比, TOC/TS (C/S : e) 比の堆積物表層分布

**Appendix1** Distributions of total organic carbon (TOC : a) content, total nitrogen (TN : b) content, total sulfur (TS : c) content, TOC/TN (C/N : d) ratio, TOC/TS (C/S : e) ratio in surface sediments for Lake Nakaumi



付図2. 浜名湖における全有機炭素 (TOC : a) 濃度, 全窒素 (TN : b) 濃度, 全イオウ (TS : c) 濃度, TOC/TN (C/N : d) 比, TOC/TS (C/S : e) 比の堆積物表層分布

**Appendix2** Distributions of total organic carbon (TOC : a) content, total nitrogen (TN : b) content, total sulfur (TS : c) content, TOC/TN (C/N : d) ratio, TOC/TS (C/S : e) ratio in surface sediments for Lake Hamana