

函館湾における物質収支について

Nitrogen and Phosphorus Budget in Hakodate Bay, Hokkaido, Japan

北海道大学工学部土木工学科
北海道大学工学研究科
北海道大学工学研究科教授

○学生員 國分佑太 (Yuta Kokubun)
研究員 奥西武 (Takeshi Okunishi)
フェロー 山下俊彦 (Toshihiko Yamashita)

1. はじめに

沿岸海域において、過剰量の窒素とリンの供給により富栄養海域となることがある。富栄養化した海域では、赤潮の発生や貧酸素水塊の生成がしばしば起きる。その結果、魚介類が死滅するなど、生態系のバランスが崩れてしまう恐れがある。したがって、生態系に影響を与える窒素やリンを適正な量に制御することが、沿岸海域における環境保全において望まれる。沿岸海域への窒素やリンの負荷量および、外洋への流出量を正確に把握することは、富栄養化抑制、ひいては沿岸海域の環境保全において重要である。

函館湾は、1990 年ごろから水質汚濁に係る環境基準（COD 値）が未達成である海域である。函館湾の窒素およびリンの供給源については明確にした報告はなく、湾内を富栄養化させている要因は不明である。そこで、本論文ではボックスモデルを用い函館湾の窒素・リンの収支を明らかにすることを目的とした。

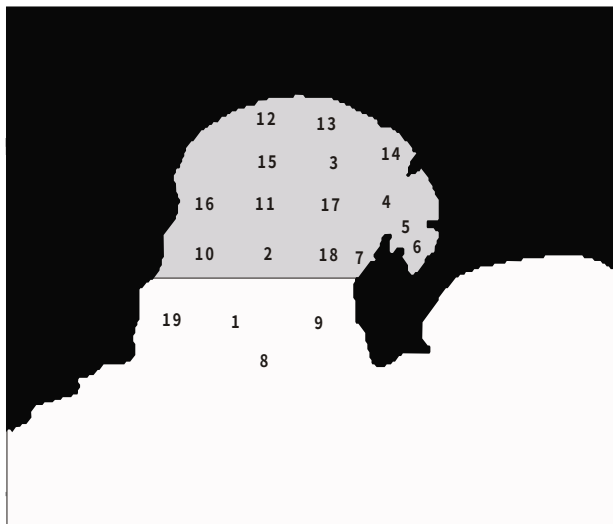


図 1 函館湾モデル海域。数字は観測地点，グレーで塗られた海域は設定したボックスの海域を示す。

2. 解析手法

1998 年 4 月～1999 年 3 月までの偶数月に北海道が図 1 に示す 19 地点で採取した水質データ（北海道, 2000）を用いて、柳（1997）の方法によりボックスモデル解析を行った。モデル領域はグレーで塗られた海域の単一ボックスである（図 1）。モデル海域の容積は 0.53km^3 、表面積は 46.1km^2 、平均水深は 11.5m である。まず、水収支によりモデル海域から外洋への淡水流出量、塩分収

支により外洋との海水交換量を求め、これらの値を用いて、窒素・リン収支を求めた。

2.1 淡水収支

函館湾における工場排水・下水・地下水からの水の流入量は、他の要素と比較して微小で無視できるものとし、モデル海域の水量の時間変動が無いものとする、式 (1) が成り立つ。

$$R=Q+P-E \quad (1)$$

ここで、 Q は流域河川からの淡水流入量、 P はモデル海域表面への降水量、 E はモデル海域表面からの蒸発量、 R は湾外への淡水流出量である。湾内に注ぎ込む 20 河川の流量を考慮して淡水流入量を算出した。降水量は函館におけるアメダスデータ（気象庁）を利用し、蒸発量はアメダスデータおよび湾内の水温データを用いて算出した。ここで、 Q, P, E は既知の値となり、式 (1) の水収支式により淡水流出量 R を求めた。

2.2 塩分収支

湾内の塩分収支は式 (2) で表すことができる。

$$V \frac{dS_i}{dt} = -RS_i - R^*(S_i - S_o) \quad (2)$$

ここで、 S_i はモデル海域の平均塩分、 R^* は外洋境界を通じての海水交換量、 S_o は外洋の代表塩分である。 R^* 以外は、観測値および水収支解析より求めることができる。よって、未知な値である R^* を式 (2) より求めた。

2.3 窒素・リン収支

窒素とリンのような栄養塩は海中の化学・生物過程により、溶存態・懸濁態とその形態を変化させる。このような物質を非保存物質という。非保存物質の収支は式 (3) のように表せる。

$$V \frac{dC_i}{dt} = QC_Q + PC_P - RC_i - R^*(C_i - C_o) + \Delta C \quad (3)$$

ここで、 C_Q 河川水の濃度、 C_P 降雨の濃度、 C_i 湾内の平均濃度、 C_o 外洋水の濃度 ΔC 生成・消滅項である。非保存物質として、全窒素 (T-N)、溶存無機態窒素 (DIN)、全リン (T-P)、溶存無機態リン (DIP) の

収支解析を行った。窒素は T-N と DIN に分けて解析を行う。これは T-N と DIN を別々に解析にする事によって、T-N に含まれる DIN の割合が把握でき、モデル海域の中で有機物と無機物がどのようにして生産・消費されているかを予測するためである。同じ理由でリンも T-P と DIP に分けて解析を行う。非保存物質の生成・消滅項 ΔC 以外は観測データ、水収支解析、塩分収支解析より求めることができる。よって、未知な値である ΔC を (3) 式より求めた。 $\Delta C > 0$ になると、非保存物質はモデル海域内で生成量 > 消費量という状態に、 $\Delta C < 0$ だと生成量 < 消費量という状態となる。解析期間における函館周辺の降水中の窒素濃度データは存在しなかったため、苫小牧のデータを代用した（北海道環境科学研究センター，2004）。また、降水中の窒素濃度は無機態窒素のみを考慮した。リンについては、函館周辺の降水中のリン濃度データが無かったため、降水負荷量については考慮しなかった。そのため未知数である $\Delta T-P$ と ΔDIP には、モデル海域内での生成・消滅量だけでなく、降水負荷量も含まれている。

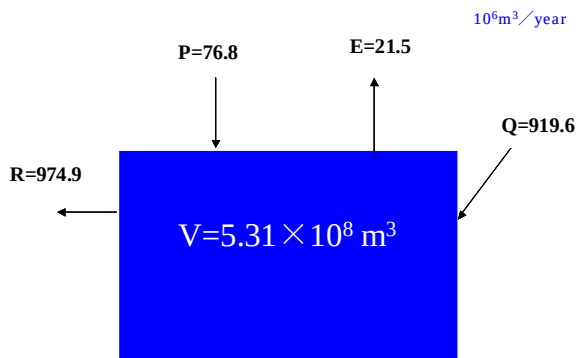
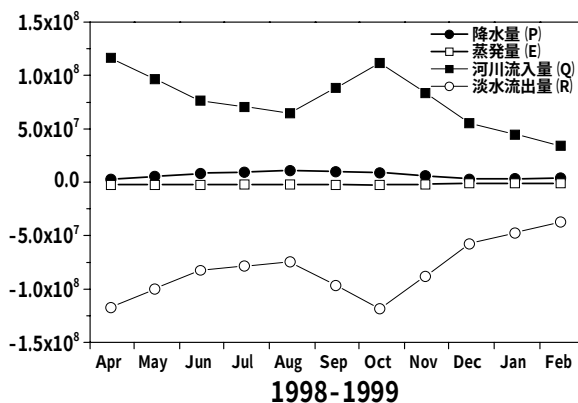


図2 函館湾の年間水収支の概略

図3 水収支各要素の季節変動。縦軸の単位は $m^3/month$ 、y軸正の値が流入量、負の値が流出量となっている。

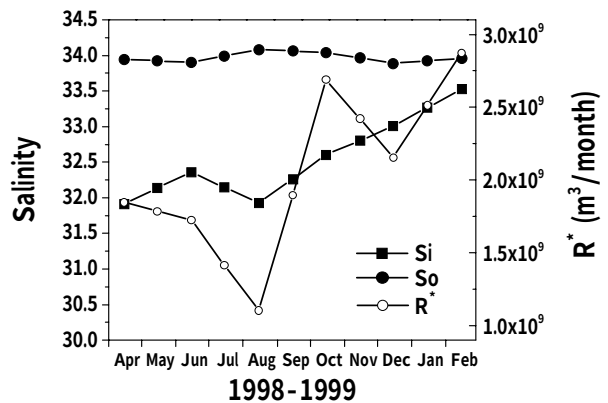
3. 結果

3.1 水収支

水の年間収支より、淡水流出量に一番大きな影響を与えているのは、河川流入量でありことが分かる（図2）。また、河川流入量は春季および秋季に大きくなっている（図3）。

3.2 塩分収支

モデル海域と外洋間での塩分差は、春季から夏季にかけてに大きく、冬季に小さくなる傾向にあり、河川流入量の大小が、この塩分差に影響を与えている。そして、海水交換量が最小となるのは8月で、最大となるのは2月である（図4）。

図4 外洋の平均塩分 (S_o) とモデル海域内の平均塩分 (S_i) および外洋との海水交換量の季節変動

3.3 窒素・リン収支

図5に T-N の年間収支、図6に DIN の年間収支を示す。 $\Delta T-N$ および ΔDIN は正の値を示し、T-N、DIN とともに湾内で生成している。特に湾内における T-N の生成量は大きく、淡水負荷量に匹敵する量である。また、図7に T-P の年間収支、図8に DIP の年間収支を示す。 ΔTN および ΔDIN も同様に、正の値を示し、T-P、DIP とともに湾内で生成している。湾内における T-P の生成量も大きく、淡水負荷量の約倍量が生成されていることになる。

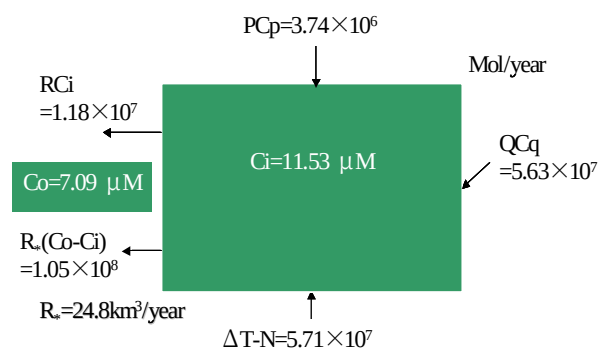


図5 函館湾の年間 T-N 収支の概略

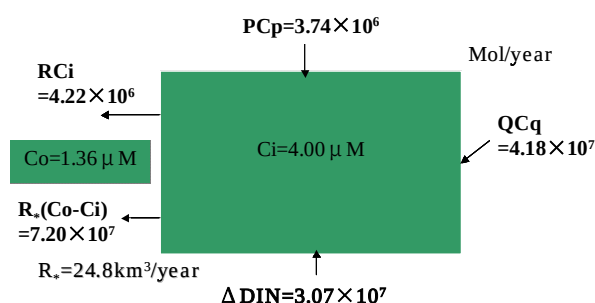


図6 函館湾の年間 DIN 収支の概略

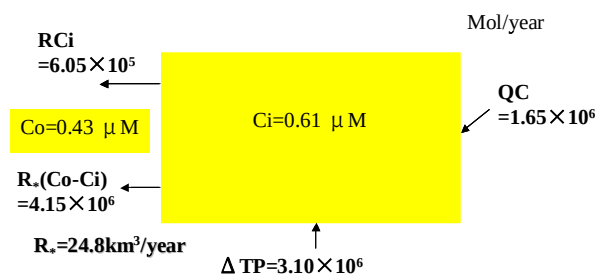


図7 函館湾の年間 T-P 収支の概略

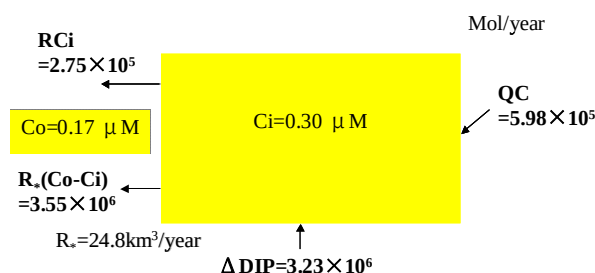


図8 函館湾の年間 DIP 収支の概略

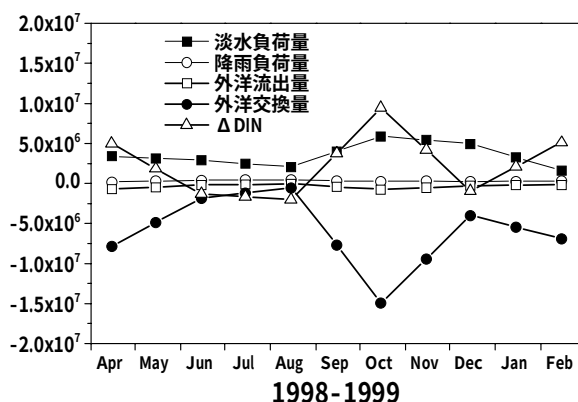


図9 湾内の DIN 濃度を変化させる因子の変動。縦軸の単位は m^3/month で、縦軸正の数値は函館湾内に流入する DIN の量で、負の数値は外洋への流出量である。ΔDIN の値については、正のは生成を表し、負の時は消滅を表している。

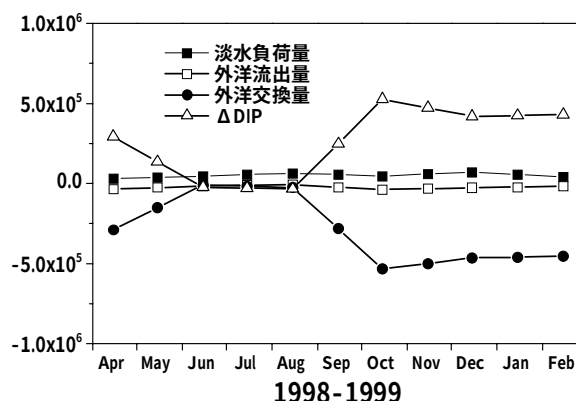


図10 湾内の DIP 濃度を変化させる因子の変動。縦軸の単位は m^3/month で、縦軸正の数値は函館湾内に流入する DIP の量で、負の数値は外洋への流出量である。ΔDIP の値については、正のは生成を表し、負の時は消滅を表している。

4.考察

モデル海域内では、一年で平均すると、T-N, DIN, T-P, DIP 全て、過剰に生成されている(図5～図8)。T-N および T-P が生成する要素として、窒素およびリンが堆積物から供給されている可能性が強い。秋季から冬季にかけてΔDIN およびΔDIP は正の値を示し、DIN および DIP は湾内で生成される傾向である(図9, 10)。これは、強い季節風と海面冷却によって鉛直混合が活発になる季節であるので、堆積物からの DIN および DIP の供給が活発になったと推察できる。また、夏季にΔDIN およびΔDIP は負の値を示し、湾内で DIN および DIP が消費されている(図9, 10)。これは、夏季は成層化しやすいので、鉛直混合が起きにくくなり堆積物からの供給が少なくなることで、水温が高く生物活性が高くなるので植物プランクトンによる DIN および DIP の消費が活発になることが原因であると推察できる。全窒素・全リンの中には溶存態無機物、溶存態有機物および懸濁態有機物が含まれている。溶存態有機窒素および懸濁態有機窒素の合計量(有機窒素)の生成・消費量をΔT-N の値からΔDIN の値を引いて求めたのが図11である。同様に、図12は有機リンの生成・消費量を表している。有機窒素および有機リンともに春季に生成量が多い。これは、春季ブルームによる影響と考えられ、水域の内部生産によって湾内の有機物量を高くしていると思われる。

図13は、湾内の DIN と DIP 平均濃度の比を示している。N/P=16 のレッドフィールド比(Redfield, 1934)と比べて、低い値なら植物プランクトンの成長が DIN 濃度によって制限を受ける可能性があり、高い値なら DIP 濃度によって制限を受ける可能性がある。有機物の生成量が多い春季は DIP 濃度によって植物プランクトンの成長が制限される可能性が強い。つまり、湾内の有機リン濃度は植物プランクトンによって生産された有機物量としての変動を明確に示していると考えられる。また、湾

内の有機リンと COD の平均濃度には有意な正の相関が認められる (図 14, $r=0.86$, $p<0.01$, $n=11$)。これらのことは、函館湾でしばしば観測される環境基準より高い COD 値は、湾内の内部生産がもたらしていることを示唆している。

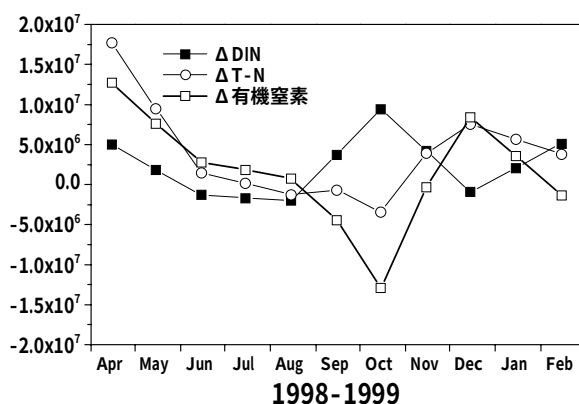


図 11 函館湾での T-N・DIN・有機窒素の生成・消滅
縦軸の単位は m^3/month 、縦軸正は生成を表し、負は消滅を表す。

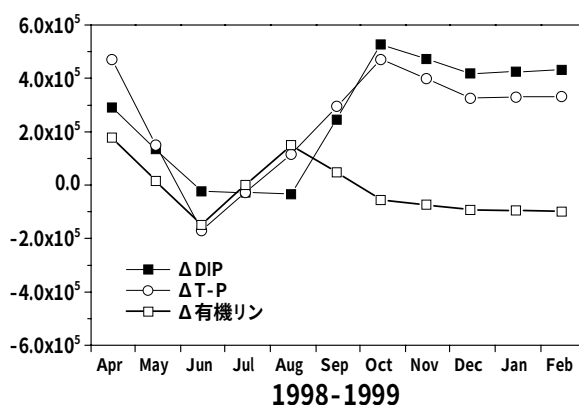


図 12 函館湾での T-P・DIP・有機リンの生成・消滅
縦軸の単位は m^3/month 、縦軸正は生成を表し、負は消滅を表す。

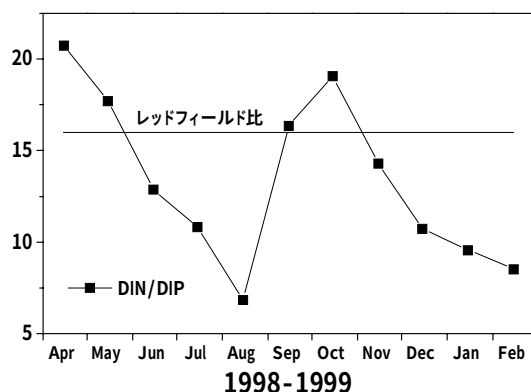


図 13 湾内の平均 DIN 濃度、平均 DIP の比の変動

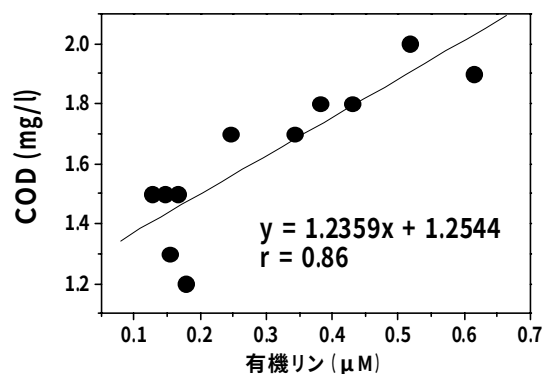


図 14 湾内の平均有機リン濃度と平均 COD 濃度の関係。
有機リンは T-P から DIP を差し引いた値である。

5.終わりに

ボックスモデル解析により、函館湾における窒素およびリンは河川負荷量と同レベルまたはそれ以上の負荷が堆積物より供給されていると推察できる。これは、河川負荷量を抑えても短期的は湾内の窒素量およびリン量は大きく減少することは出来ないことを示唆している。

参考文献

- 1)北海道：平成 11 年度 函館海域環境基準未達成原因 解明調査報告書，平成 12 年 3 月，北海道，pp15-pp86., 2000
- 2)北海道環境科学研究センター（2004）降水成分長期トレンド調査
http://www.hokkaidoies.go.jp/seisakuka/acid_rain/index.html#rain%20mokuji
- 3)Redfield：On the proportion of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton, James Johnstone Memorial Volume, Liverpool, pp177-192, 1934
- 4)柳哲雄：沿岸海域の物質収支モデル，海の研究，Vol.6/No.3, pp163-171, 1997