瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支*

柳 哲雄†

Budgets of Fresh Water, Nitrogen and Phosphorus in the Seto Inland Sea

Tetsuo Yanagi‡

Abstract

Budgets of fresh water, total nitrogen and total phosphorus in the Seto Inland Sea are summarized and the countermeasure for the eutrophication is discussed.

1. はじめに

1994 (平成 6) 年夏季, 瀬戸内海は深刻な水不足を経験した. 例えば, 松山市では時間断水が 7 月 26 日~11 月 25 日の 4 ヶ月間にも及び, 特に 8 月 22 日~10 月 21 日は 16 時~21 時の 5 時間給水のみという最悪の状態が続いた. 今後も繰り返すかもしれないこのような水不足への対策を考える場合には, まず瀬戸内海地域の淡水収支がどのようなものであるかを明らかにしておくかなければならない.

また, 瀬戸内海は現在年間約 100 件に及ぶ赤潮の多発や大阪湾などでの夏季の貧酸素水塊の発生に象徴されるように, 富栄養化した海域である. 富栄養化は基本的には陸上からの窒素, リンの過剰な負荷によりもたらされるから, 瀬戸内海の富栄養化対策を立案するためには, 瀬戸内海における窒素・リン収支を明らかにしておく必要がある.

本稿はそのような観点から瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支を明らかにすることを試みる. そして得られた収支関係から, 今後瀬戸内海の沿岸住民がとるべき基本的な対策のあり方について論じる. なおここで論じる瀬戸内海とは環境庁により定義された, Fig. 1 の 1 点鎖線で囲まれた海域を指す.

2. 淡水収支

瀬戸内海の流域と主な流入河川は Fig. 1 に示すようであって, 流域面積 (S_c) は 48,789km²に及ぶ. これに対して瀬戸内海自身

の海域面積 (S_s) は 21,827km²で, 流域面積のほぼ半分である. 一方, 瀬戸内海の体積 (V) は 816km³で, 平均水深は約 37m である (環境庁水質保全局, 1995). Fig. 2 に瀬戸内海とその流域の平均年間降水量分布を示す (神戸海洋気象台, 1967). この図より瀬戸内海の海面への平均年間降水量は 1400mm/year 程度, 流域へのそれは 1700mm/year 程度と考えてよいだろう. 一方, 瀬戸内海の平均年間海面蒸発量は 1500mm/year 程度で, 平均年間海面降水量より約 100mm/year 大きいことがわかっている (石崎・斉藤, 1978). また, 瀬戸内海流域の平均地域蒸発散量は 600mm/year であり (大槻ら, 1984), 流域から瀬戸内海に流れ込む河川流量 (R) は 50km³/year (環境庁水質保全局, 1995) である.

以上の数値にそれぞれの面積を乗じて, 瀬戸内海への年間淡水供給量, 年間蒸発散量をまとめたものが Fig. 3 である. これによると, 流域降水量から流域の蒸発散量と河川流量を差し引いたものは 3km³/year で, これが瀬戸内海流域の地下水を涵養していることになる. このうち, いくらが瀬戸内海の海底から瀬戸内海へ流出しているかは不明である. 河川流量と海面降水量の和から海面蒸発量を差し引いた 47km³/year が瀬戸内海から太平洋 (一部日本海) に流出する淡水量となる.

一方, 瀬戸内海の海水中に占める淡水量 F (km³) は太平洋と瀬戸内海の平均塩分から次式により計算出来る.

$$F = \frac{S_0 - S}{S_0} V \quad (1)$$

ここで, S は瀬戸内海の平均塩分, S_0 は隣接する太平洋の平均塩分, V は瀬戸内海の体積を表す. S は 33.06, S_0 は 34.33 なので (速水・宇野木, 1970, ここで関門海峡の断面積は豊後水道・紀伊水道に比較して著しく小さいので, 日本海との海水交換は

* 1996 年 11 月 8 日受理; 1997 年 4 月 4 日受理

† 愛媛大学工学部環境建設工学科; 〒 790 松山市文京町 3

‡ Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University, Matuyama, 790 Japan.
tyanagi@dpc.ehime-u.ac.jp

無視する), F は 30km^3 となる。これは瀬戸内海全域の海水量のわずか4%に過ぎない。この F を瀬戸内海から太平洋への淡水流出量 $47\text{km}^3/\text{year}$ で割って得られる, 瀬戸内海における河川水の平均滞留時間 (τ_f) は 7.7 ヶ月であり, Takeoka (1984) が潮汐・潮流のみを再現した水理模型実験から求めた河川水の平均滞留時間 7.7 ヶ月と等しい。このことは瀬戸内海の河川水が太平洋に輸送される機構としては潮流による混合が最も大きな役割を果たしていることを示唆している。

3. 窒素・リン収支

瀬戸内海的全窒素 (TN)・全リン (TP) 収支を Fig. 4 に示す。浮田 (1996) は原単位法により 1982 年の瀬戸内海沿岸では年平均値として TN が 593 ton/day , TP が 63 ton/day 発生しており, 工場排水処理・下水処理などを経て瀬戸内海へ負荷される TN は 474 ton/day (発生量の 80%), TP は 49 ton/day (発生量の 78%) と推定している。

湯浅 (1994) は 1973~1975 年の観測データをもとに, 年平均値としては, 降水により瀬戸内海全域で 76 ton/day の TN と 2 ton/day の TP が大気から海面に負荷されると見積もっている。一方, 瀬戸内海の 1979, 80, 82 年の各灘の平均硝酸・亜硝酸濃度 (中西, 1985) をもとに, 小池 (1993) の方法により推算した瀬戸内海全域の脱窒量は 8 ton/day となり, 海面から大気中へ出ていく TN は小さいことがわかる。さらに門谷ら (1991) によるハマチの N と P の体重比 (それぞれ 2.5% と 0.25%) と瀬戸内海の 1980 年の年間漁獲量 (45 万トン, 永井, 1996) から推定した漁獲による TN と TP の取り上げ量はそれぞれ 31 ton/day , 3 ton/day となる。

海底への堆積フラックスは次によりに見積もった。まず瀬戸内海の底質分布図 (環境庁水質保全局, 1994) から含泥率 60% 以上の領域の面積を求めた ($7,100\text{km}^2$)。さらに同じ図からこの地域の底質の TN, TP 濃度を求めた (それぞれ, 2.0mg/g と 0.4mg/g)。この地域の平均堆積速度を $0.2\text{g/cm}^2/\text{year}$ (門谷ら, 1991) とすると, 瀬戸内海全域の TN と TP の堆積速度はそれぞれ 78 ton/day , 16 ton/day となる。懸濁粒子の沈降フラックスから底泥の溶出フラックスを差し引いたものが, この堆積フラックスに相当する。

1979, 80, 82 年の各灘の年間平均観測値データ (中西, 1985) を容積で加重平均して得た瀬戸内海の TN, TP の平均濃度はそれぞれ 0.218mg/l , 0.0250mg/l である。したがって, この濃度に体積をかけて得られる瀬戸内海の TN と TP の存在量は 17.8 万 ton と 2.04 万 ton となる。一方, 瀬戸内海に隣接する太平洋表層 (200m 以浅) の 1979, 80, 82 年の TN と TP の年間平均濃

度は, それぞれ, 0.076mg/l と 0.0142mg/l である (中西, 1985)。

瀬戸内海への陸上・大気からの窒素・リン負荷量が 0 になれば, 瀬戸内海の TN と TP の濃度は太平洋表層のそれらと等しくなることが期待される。太平洋表層の濃度が瀬戸内海の濃度の影響を受けないと仮定すれば, このことは, 瀬戸内海が存在する TN と TP のうち, $0.076 \times V = 6.2$ 万 ton と $0.0142 \times V = 1.14$ 万 ton が太平洋起源であることを意味している。したがって, 瀬戸内海沿岸の人為・自然・大気起源の TN と TP の瀬戸内海での存在量はそれぞれ, 現在の存在量から太平洋起源の窒素・リンを差し引いて, 11.6 万 ton, 0.88 万 ton と推定される。それ故に, 人為・自然・大気起源の TN の瀬戸内海での平均滞留時間は 8.9 ヶ月, TP のそれは 9.2 ヶ月となり, 河川水の平均滞留時間 7.7 ヶ月とほぼ等しくなる。このことは瀬戸内海沿岸から流入した全窒素・全リンは瀬戸内海でほぼ保存的に振る舞うことを意味している。

4. 考察

瀬戸内海沿岸で使用可能な淡水量は Fig. 3 より河川流量と地下水量を合わせた $53\text{km}^3/\text{year}$ である。現在瀬戸内海沿岸の総人口は約 3000 万人である。沿岸の人々の平均上水道利用量は $0.5\text{m}^3/\text{man/day}$ なので, $5.5\text{km}^3/\text{year}$ の淡水がまず必要である。次に瀬戸内海流域の河川維持のための最低流量は 2mm/day と言われているので (高瀬, 私信), この数字に瀬戸内海流域の面積を乗じた $35.6\text{km}^3/\text{year}$ が必要とされる。この他工場用水の淡水使用量は近年約 $10\text{km}^3/\text{year}$ 程度 (工業統計表, 1985) なので, 農業用水を河川最低流量内で循環させるとすれば, これらの数字の合計は $51.1\text{km}^3/\text{year}$ となり, 先述した $53\text{km}^3/\text{year}$ におさまる。このことは基本的には, 管路などによる流域変更も含め, 淡水の使用分配をうまく行えば, 瀬戸内海の淡水問題は平年の雨量がある場合は解決可能であると考えられる。逆に言えば, 渇水年には水不足が生じ, 瀬戸内海沿岸で淡水利用量を現在より増やすと, 水不足が日常化することになる。

一方, 窒素・リンに関しては, 夏季に赤潮や貧酸素水塊が発生する状態をなくして, 健全な漁業が営める瀬戸内海を取り戻すために, 永井 (1996) は瀬戸内海の海域別に望ましい TN・TP 濃度を提案している。この値を瀬戸内海全域で加重平均すると, 望ましい瀬戸内海全域の TN・TP の平均濃度はそれぞれ 0.192mg/l , 0.022mg/l となる。この濃度を実現するためには, 太平洋の TN, TP 濃度が瀬戸内海濃度が変化した後も変化しないと仮定すれば, TN・TP の瀬戸内海沿岸からの負荷量をそれぞれ現在の 18%, 27%ほど削減しなければならない。

瀬戸内海への TN・TP 負荷は Fig. 5 (浮田, 1996) に示すよ

Fig. 1. Catchment basin and sea area of the Seto Inland Sea.

Fig. 2. Precipitation around the Seto Inland Sea.

うに, 1972 年に最大となり, 1973 年の瀬戸内海環境保全臨時措置法の施行後, 汚水処理が進んでやや減少したが, 近年横這い

状態にある。その主な中身は Fig. 5 に示すように, 産業排水と生活排水がほぼ半分づつを占めている。浮田 (1996) によれば,

Fig. 3. Budget of fresh water in the Seto Inland Sea.

Fig. 4. Budgets of total nitrogen and total phosphorus in the Seto Inland Sea. Nitrogen fluxes of 8 and 31 ton/day to the air are due to denitrification and fisheries, respectively. 11.6×10^4 ton N and 0.88×10^4 ton P are loaded from land.

Fig. 5. Year-to-year variations in nitrogen and phosphorus loads to the Seto Inland Sea (Ukita, 1996).

処理費用単価 (円/㎥) を { 原水濃度 (g/㎥) × (1 - 除去率) } で除して得られる排出単価 (正味排出負荷量当たりの処理費用) は産業排水が 22~186 円であるのに対して、生活排水は 233~355 円である。したがって、排出単価の低い (少ない努力で改善効率の高い) 産業排水の処理に重点をおくことで (その結果、両者の環境負荷が経済的に平等となる)、瀬戸内海への TN・TP の負荷量削減は十分実現可能であると言える。

もちろん、瀬戸内海の富栄養化は全海域で平均的に起こっているわけではなく、広島湾奥や大阪湾・播磨灘などの瀬戸内海東部で特に顕著なので、TN・TP の負荷削減はこのような海域の沿岸で主に行われる必要があることは言うまでもない。

今後、窒素・リンの負荷量削減に努力して、貧酸素水塊や赤潮が発生せず、健全な漁業が営める瀬戸内海を取り戻す必要がある。

5. おわりに

以上、瀬戸内海の淡水・窒素・リンの収支結果をもとに、瀬戸内海で淡水資源の適切な分配、沿岸からの窒素・リンの負荷量

を削減すれば、瀬戸内海沿岸は「持続可能な地域」、すなわち沿岸住民の経済活動が環境保全と調和した状態に維持出来る地域、として 21 世紀も発展可能であることを指摘した。

本稿の結果が今後の瀬戸内海のランドデザインを考える際のひとつの材料となれば幸いである。

本稿をまとめる機会を与えて頂いた愛媛大学農学部佐藤晃一教授、貴重な議論をして頂いた愛媛大学工学部武岡英隆助教授、愛媛大学農学部高瀬恵次助教授に感謝の意を表する。

References

- 速水頌一郎・宇野木早苗 (1970): 瀬戸内海における海水交換と物質拡散. 第 17 回海岸工学講演会論文集, 385-393.
- 石崎 廣・斉藤 実 (1978): 瀬戸内海における蒸発量について. 沿岸海洋研究ノート, **16**, 11-20.
- 環境庁水質保全局監修・(社) 瀬戸内海環境保全協会 (1995): 瀬戸内海の環境保全-資料集-. 159p.
- 神戸海洋気象台 (1967): 瀬戸内海の家象と気象. 360p.
- 工業統計表-用地・用水編 (1985): 通商産業大臣官房調査統計部編, 380p.
- 小池勲夫 (1993): 微生物. 「東京湾」, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, 102-117.
- 門谷 茂・三島康史・岡市友利 (1991): 大阪湾の富栄養化の現状と生物による N と P の循環. 沿岸海洋研究ノート, **29**, 13-27.
- 中西 弘 (1985): 瀬戸内海環境のマクロ評価. 「瀬戸内海の家象」, 小坂淳夫編, 恒星社厚生閣, 279-298.
- 永井達樹 (1996): 望ましい漁業. 「瀬戸内海の生物資源と環境」, 岡市友利・小森星児・中西 弘編, 恒星社厚生閣, 83-108.
- 大槻恭一・三野 徹・丸山利輔 (1984): 気象資料から推定したわが国の蒸発散量-実蒸発散量推定に関する研究 (III)-. 農業土木学会誌, **112**, 25-32.
- Takeoka, H. (1984): Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. Continental Shelf Research, **3**, 327-341.
- 湯浅一郎 (1994): 内海における循環流・フロントと栄養塩類の挙動に関する研究. 中国工業技術研究所報告, 第 12 号, 1-184.
- 浮田正夫 (1996): 流入負荷を削減させるためには. 「瀬戸内海の生物資源と環境」, 岡市友利・小森星児・中西 弘編, 恒星社厚生閣, 144-157.