— 論 文 —

冬季周防灘の栄養塩収支*

柳 哲雄[†]・白木 喜章[‡]

要 旨

神戸と釜山を結ぶフェリーによって得られた 1992 年冬季の栄養塩データを使って、周防灘の栄養塩収支を明らかにした。溶存態無機リン、溶存態無機窒素の伊予灘から周防灘への渦動拡散フラックスは河川からの負荷フラックスよりそれぞれ 19 倍、6.7 倍ほど大きい。このことは、周防灘の平均栄養塩濃度変動に与える陸上からの栄養塩負荷の影響は大きいことを示唆している。

キーワード：周防灘，伊予灘，関門海峡，リン・窒素・珪素フラックス

1. はじめに

周防灘は瀬戸内海西部に位置し、陸からのリン・窒素負荷がそれほど大きくないので、富栄養化はあまり進んでいないが、灘南西部では夏季の陸水流入に関連して貧酸素水塊が発生する海域として知られている（神園ら，1996）。しかし，昭和 54 年度（1979）から平成 11 年度（1999）にかけて原単位法で見積もられた陸域から周防灘への TP（Total Phosphorus；全リン）負荷量は 5.5 t d^{-1} から 2.5 t d^{-1} へ，TN（Total Nitrogen；全窒素）負荷量は 55 t d^{-1} から 50 t d^{-1} へと減少している（瀬戸内海環境保全協会，2003）にも関わらず，周防灘の TP 濃度は約 0.02 mg L^{-1} で横ばい，TN 濃度は昭和 63（1988）年度の 0.16 mg L^{-1} から平成 10（1998）年度の 0.27 mg L^{-1} へと上昇気味である（北九州市環境局，1999）。

このことは，陸域から以外にも周防灘に対する TP・TN 負荷源があって，そこからの負荷量が増加している

か，周防灘からの TP・TN 流出量が減少しているか，周防灘内の物理・化学・生物過程が変化して TP・TN が近年周防灘に滞留しやすくなっているか，などの可能性を示唆しているが，一体どのような要因で周防灘のリン・窒素濃度変動が決まっているかは全く明らかにされていない。

平成 16 年度を目標年度とした国の第 5 次総量規制では，従来の COD（Chemical Oxygen Demand）に加えて，陸からのリン，窒素の負荷量を総量規制することで，沿岸海域の富栄養化を防止することが目指されている。しかし，陸からのリン・窒素負荷が沿岸海域のリン・窒素濃度変動に与える影響が大きくなければ，陸からの負荷量を総量規制しても，その効果は顕著に現れにくいことが予想される。

本稿では Fig. 1 に破線で示した周防灘の水収支，塩分収支，栄養塩収支を明らかにすることにより，周防灘のリン・窒素濃度変動を決めている主要因を明らかにすることを試みた。

2. 使用データ

環境庁国立環境研究所は神戸と釜山を定期運行するフェリー（Fig. 1 中の実線がその航路）を用いて，瀬戸内

* 2003 年 10 月 23 日 受領；2003 年 12 月 12 日 受理
著作権：日本海洋学会，2004

[†] 九州大学応用力学研究所，〒816-8580 春日市春日公園 6
主著者 e-mail address：tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp

[‡] 九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻
〒816-8580 春日市春日公園 6

Fig. 1. Suo-Nada with observation stations of sea level (full circle), meteorological data (open circle and square), river mouth (open triangle) and route of ferry boat (full line) between Kobe and Pusan. Broken line shows the boundary of Suo-Nada and Iyo-Nada.

海と対馬海峡の水質連続観測を実施した (Harashima, 1995; Harashima *et al.*, 1997)。塚本・柳 (1998) は 1992 年に得られたこの水質データを解析して、瀬戸内海の水温・塩分・pH・栄養塩・クロロフィル a の時間・空間変動特性を明らかにした。

塩分・DIP (Dissolved Inorganic Phosphorus; 溶存態無機リン)・DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen; 溶存態無機窒素)・DSi (Dissolved Silicate; 溶存態珪素) データはフェリーの航路上で 2 週間おきに 30 分あるいは 60 分ごとに冷却水パイプから採水された試料を分析することで得られた。採水深度は海面下 6 m である。今回の解析は塚本・柳 (1998) によって作成されたデータセットの中で、鉛直混合が盛んで塩分・栄養塩濃度が水柱内で鉛直一様になる冬季 (1992 年の 1 月, 2 月, 3 月, 10 月, 11 月) のみのデータを用いて行なった。1992 年 12 月は塩分データが欠測だったので、解析に含めなかった。

3. 水収支

周防灘の 1 か月間の水収支は次式で表される。

$$\frac{dV_S}{dt} = Q + P - E - R_K + R_I \quad (1)$$

ここで、 V は海水の体積、 Q は河川流入量、 P は海面降水量、 E は海面蒸発量、 R は海水通過流量である。添え字の S, K, I は、それぞれ周防灘、関門海峡、伊予灘を表す。上式左辺の周防灘における一か月間の海水体積変化は、長府と徳山の 15 日間移動平均した日平均水位変動を平均して、それに周防灘の面積 (3,800 km²) を掛けて求めた。河川流量は流量年表 (建設省河川局, 1992) を用いて、一級河川はそのまま、二級河川に関しては隣接する一級河川に対する流域面積比を乗じて求め、周防灘に流入する一級、二級河川流量の総和を求めた。降水量は周防灘周囲のアメダス観測点 (Fig. 1 参照) のデータを平均して得た。蒸発量は石崎・斉藤

Fig. 2. 15-day running mean of daily mean sea level difference between Haedomari and Chofu (a), volume transport through the Kanmon Strait (b) and water fluxes in Jan., Feb., Mar., Oct. and Nov. in 1992 (c).

(1978)の方法により求めたが、計算に用いる海面水温はフェリーによる観測データ、大気蒸気圧は下関と大分の地方気象台における月平均観測値の平均、風速は周防灘周囲のアメダスの観測値を平均して得た。関門海峡の海水通過流量 R_K は長府と南風泊の日平均水位差の15日移動平均値 (Fig. 2(a)) に対して、柳ら (2004) の求めた回帰式により推定した (Fig. 2(b))。以上のようにして推定した各項を (1) 式に代入すれば、残差が伊予灘と周防灘の海水通過流量 R_I となる。各月の水収支計算結果を Fig. 2(c) に示す。各月とも、河川流量や降水・蒸発量を上回る海水が関門海峡を経て周防灘から響灘に向かい流出していて、それを補うべく伊予灘から周防灘への海水流入がある。5 か月間の流量平均値を Table 1 に示す。関門海峡を通じての海水流出

量は、河川流量の7.3倍、伊予灘から周防灘への海水流入量は河川流量の6.0倍に達する。

4. 塩分収支

フェリーによる塩分観測値から得た各海域の平均塩分の時間変動は Fig. 3(a) に示すようである。年間平均で見ると、響灘の塩分が最も高く、ついで伊予灘が高く、周防灘の塩分が最も低い。このデータをもとに、以下のような周防灘における毎月の塩分収支式を考える。

$$\frac{d(V_S S_S)}{dt} = -R_K S_S + R_I S_I + R_K^*(S_H - S_S) + R_I^*(S_I - S_S) \quad (2)$$

Fig. 3. Temporal variations in average salinity in Hibiki-Nada, Suo-Nada and Iyo-Nada in 1992 (a) and observed diffusive salinity flux (full line) and estimated one (dotted line) every month (b).

ここで、 V は海水の容積、 S は塩分、 R は海水通過流量、 R^* は海水交換量である。添え字の S, K, I, H は、それぞれ周防灘、関門海峡、伊予灘、響灘を表す。(2) 式で未知数は R_K^* と R_I^* の二つであるが、収支式は 1 月、2 月、3 月、10 月、11 月の各月得られるので、計五つ立てられる。そこで、(2) 式を最小二乗法で解いて、関門海峡と伊予灘・周防灘境界断面における海水交換量 R_K^* と R_I^* を推定した。得られた海水交換量を水平渦動拡散係数化すると、関門海峡と伊予灘・周防灘境界における水平渦動拡散係数はそれぞれ $3 \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $9 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ となった。各月の観測された海水交換塩分フラックス ($R_K^*(S_H - S_S) + R_I^*(S_I - S_S)$) と計算された海水交換塩分フラックスの比較を Fig. 3(b) に示す。計算値は観測値をほぼ再現している。

5 か月間の塩分フラックスの平均値を Table 1 に示す。関門海峡を通じて移流により流出する塩分フラックスと伊予灘からの移流塩分フラックスがほぼバランスしていて、渦動拡散塩分フラックスは移流塩分フラックスよりかなり小さい値となっている。

5. 栄養塩収支

フェリーで観測された各海域の平均栄養塩濃度の時間変動を Fig. 4 に示す。鉛直混合している冬季のデータを見ると、伊予灘の栄養塩濃度が最も高く、響灘と周防灘は DIP に関してはほぼ同じ濃度、DIN と DSi に関しては響灘が伊予灘よりやや高めの濃度になっている。このデータと「3. 水収支」で求めた海水通過流量、「4. 塩分収支」で求めた海水交換量を用いて、次式により周防灘における毎月の DIP、DIN 収支を計算した。

$$\frac{d(V_S C_S)}{dt} = Q C_Q + P C_P - R_K C_S + R_I C_I + R_K^*(C_H - C_S) + R_I^*(C_I - C_S) + \Delta C \quad (3)$$

ここで C は栄養塩濃度を表し、添え字の S, K, I, H は周防灘、関門海峡、伊予灘、響灘、 Q は河川、 P は降雨を示し、 ΔC は光合成・分解・溶出などの生化学過程による栄養塩の消失・生成を表す。

河川からの DIP と DIN の負荷量に関しては、一級河川 (佐波川 (山口)、山国川 (大分)) の TP と TN の濃

Table 1. Averages for salinity, DIP, DIN and DSi fluxes in 5 months of 1992.

	River	Precipitation	Evaporation	Advection		Diffusion		ΔC
				Iyo-Nada	Hibiki-Nada	Iyo-Nada	Hibiki-Nada	
Water flux ($\times 10^9 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$)	0.3	0.4	-0.4	1.8	-2.2	—	—	—
Salinity Flux ($\times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$)	—	—	—	6.2	-7.2	1.8	0.2	—
DIP flux (t min^{-1})	9	5	—	21	-15	170	0	-210
DIN flux (t min^{-1})	180	120	—	100	-50	1,200	30	-1,600
DSi flux (t min^{-1})	1,600	—	—	490	-360	3,500	40	-9,400

Fig. 4. Temporal variations in average DIP (a), DIN (b) and DSi (c) in Hibiki-Nada, Suo-Nada and Iyo-Nada in 1992.

度を公共用水域の水質測定結果 (山口県, 1991, 1992; 大分県, 1991, 1992) より, 二級河川 (厚東川, 樺野川, 厚狭川, 木屋川 (山口), 駅館川, 桂川 (大分)) に関しては山口県と大分県の水質課から提供された TP と TN

の濃度より, それ以外の二級河川に関しては最も近い一級または二級河川の濃度値を用いた。そして「3. 水収支」で求めた河川流量を乗じ, DIP 負荷は TP 負荷の 60% (Yanagi, 1999), DIN 負荷は TN 負荷の 67% (山

Fig. 5. Estimated DIP (a), DIN (b) and DSi (c) fluxes in Jan., Feb., Mar., Oct. and Nov. 1992.

本ら, 1996) と仮定して, 周防灘への DIP と DIN の負荷量とした。

降水による負荷量に関しては湯浅 (1994) をもとに, TP の場合には, 降水負荷量が原単位法による TP 負

荷量の 10.3%, TN の場合には, 降水負荷量が原単位法による TN 発生負荷量の 15.0%として, 1992 年の周防灘への原単位法による TP と TN の発生負荷量 (瀬戸内海環境保全協会, 2003) から年間降水負荷量を求

Table 2. Month-to-month variations in ΔC per unit area in Suo Nada and its average.
(unit: $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

	January	February	March	October	November	Average
ΔDIP	-3.83	-2.45	-1.23	-0.69	-1.03	-1.85
ΔDIN	-21.0	-16.8	-15.9	-8.8	-6.6	-13.8
ΔDSi	-76	-138	-65	-144	17	-81

め、年間総降水量に対する各月の降水量の割合を元に、各月の降水による TP と TN の負荷量を求めた。さらに、 $\text{TP/DIP} = 1.5$, $\text{TN/DIN} = 1.5$ (湯浅, 1994) として、降水による周防灘への DIP と DIN の負荷量を推定した。

DSi の場合は降水中に DSi が含まれないので、(3) 式の右辺第二項を省いた。河川水中の DSi 濃度に関しては小林 (1971) のデータに基づいて概算された原島 (2003) の見積もりにより、 $200 \mu\text{M}$ として河川から周防灘への DSi 負荷量を推定した (Fig. 5)。DIP と DIN に関しては、伊予灘から周防灘への渦動拡散フラックスが非常に大きいことが目をひく。この渦動拡散フラックスが各月とも生化学過程による DIP や DIN の有機化フラックス (ΔDIP , ΔDIN) とほぼ釣り合っている。DSi に関しては 3 月に河川からの DSi 負荷が大きい (大雨が降った) ことを除けば、DIP や DIN と同様、伊予灘からの渦動拡散フラックスが最も大きく、それが生化学過程による DSi の有機化フラックス (ΔDSi) とほぼ釣り合っている。

それぞれのフラックスの 5 か月間における平均値を Table 1 に示す。伊予灘からの渦動拡散フラックスは河川からの流入フラックスに対して、DIP の場合 19 倍、DIN の場合 6.7 倍に達する。

各月の ΔC の変動を Table 2 に示す。単位面積あたりの平均 ΔDIP は $1.85 \text{ mgP m}^{-2} \text{d}^{-1}$ となる。1994 年 1 月に Tada *et al.* (1998) により実測された周防灘の冬季の基礎生産速度は $190 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ である。レッドフィールド比を仮定すれば、この値は $4.63 \text{ mgP m}^{-2} \text{d}^{-1}$ となり、今回推定された有機化フラックス $1.85 \text{ mgP m}^{-2} \text{d}^{-1}$ は基礎生産速度の約 40% となっている。Tada *et al.* (1998) の 1994 年冬季の実測値が 1992 年冬季に

もあてはまるとすれば、基礎生産 (4.63) から ΔDIP (1.85) を差し引いたフラックス (2.78) は、分解と溶出による無機化フラックスが $2.78 \text{ mgP m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 程度存在していたことを意味する。このリンの分解・溶出による無機化フラックスは基礎生産速度の 60% に相当する。同様な計算を行うと窒素の分解・溶出による無機化フラックスは基礎生産速度の 59% に相当する。しかし、窒素の場合は脱窒過程が計算に含まれないために、この値は過小評価になっている。さらに、珪素の分解・溶出による無機化フラックスは基礎生産速度の 41% ($\text{C} : \text{Si} = 106 : 33$ の場合) に相当する。

林・柳 (2002) は窒素を指標とした周防灘の数値生態系モデル計算により、年間平均した新生産と再生産の比は 25 : 75 であることを明らかにした。今回の DIN 収支計算から推定された周防灘の冬季の新生産と再生産の比は上述したように 41 : 59 である。冬季は水温が低下して栄養塩の再生速度が小さくなることを考慮すれば、今回求めた新生産と再生産の比は林・柳 (2002) の求めた値と整合性を持っている。

6. おわりに

以上の結果は、我々の予想に反して、周防灘の栄養塩濃度変動は陸からの栄養塩負荷フラックスによってではなく、伊予灘からの渦動拡散フラックスによって主に決まっていることを示唆している。近年の周防灘における DIN 濃度の上昇は伊予灘からの DIN 渦動拡散フラックスが増加していることを予想させるが、それを確認するためのデータセットは今のところ存在しない。今後のさらなる研究が必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な二級河川の栄養塩データを提供して頂いた山口県・大分県水質課に感謝の意を表する。また本研究は、環境省地球環境研究総合推進費 D3 課題「グローバル水循環系のリン、窒素負荷増大とシリカ減少による海洋環境変質に関する研究」により行ったことを付記する。

References

- 林 美鶴・柳 哲雄 (2002) : 周防灘と大阪湾奥部の低次生産の比較. 海の研究, **10**, 203-217.
- Harashima, A. (1995) : Collected data of high temporal-spatial resolution marine biogeochemical monitoring by Japan-Korea ferry. CD-ROM and attached booklet, June 1991 to February 1993 results. CGER-D007 (CD-ROM)-'95, 1995.
- Harashima, A., R. Tsuda, Y. Tanaka, T. Kimoto, and K. Furusawa (1997) : Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes by a flow-through system deployed on ferries in the adjacent seas of Japan, p. 85-112. In *Monitoring Algal Blooms*, edited by Kahru, M. and C. W. Brown, Springer-Verlag, Berlin.
- 原島 省 (2003) : 陸水域のシリカ欠損と海域生態系の変質. 水環境学会誌, **26**, 621-625.
- 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.
- 神園 真人・江藤 拓也・佐藤 博之 (1996) : 周防灘西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係. 沿岸海洋研究, **33**, 179-190.
- 北九州市環境局 (1999) : 平成 11 年度版北九州市の環境 (資料編), 171 pp.
- 建設省河川局 (1992) : 流量年表 (平成 4 年). 日本河川協会, 439 pp.
- 小林 純 (1971) : 水の健康診断. 岩波新書, 207 pp.
- 大分県 (1991) : 公共用水域の水質測定結果 (平成 3 年度).
- 大分県 (1992) : 公共用水域の水質測定結果 (平成 4 年度).
- 瀬戸内海環境保全協会 (2003) : 瀬戸内海水域の地域特性を踏まえた有機汚濁機構の解明に関する研究報告書. 179 pp.
- Tada, K., K. Monaka, M. Morisita, and T. Hashimoto (1998) : Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr.*, **54**, 285-295.
- 塚本 秀史・柳 哲雄 (1998) : 瀬戸内海の水温・塩分・pH・栄養塩とクロロフィル a の時間空間変動. 海の研究, **7**, 11-19.
- 山口県 (1991) : 公共用水域の水質測定結果 (平成 3 年度).
- 山口県 (1992) : 公共用水域の水質測定結果 (平成 4 年度).
- 山本 民次・北村 智顕・松田 治 (1996) : 瀬戸内海に対する河川流入による淡水・全窒素および全リンの負荷. 広島大学生物生産学部紀要, **35**, 81-104.
- Yanagi, T. (1999) : Seasonal variations in nutrient budgets of Hakata Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **55**, 439-448.
- 柳 哲雄・白木 喜章・山田 真知子 (2004) : 関門海峡の通過流量とリン・窒素フラックス. 沿岸海洋研究, **41**, 153-160.
- 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研究報告, **12**, 1-184.

Nutrient Budgets of Suo-Nada during the Winter

Tetsuo Yanagi * and Yoshiaki Shiraki †

Abstract

The budgets for Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP) and Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) at Suo-Nada in the Seto Inland Sea during winter of 1992 were calculated using the data observed by a commercial ferry boat between Kobe and Pusan. The DIP and DIN fluxes by eddy diffusion from Iyo-Nada to Suo-Nada are 19 times and 6.7 times, respectively, greater than the DIP and DIN loads from the land. Such a result suggests that the DIP and DIN loads from land has little effect on the variations of DIP and DIN concentrations in Suo-Nada.

Key words: Suo-Nada, Iyo-Nada, Kanmon Strait, nutrients budgets

(Corresponding author's e-mail address: tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp)

(Received October 23, 2003; accepted December 12, 2003)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2004)

* Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan

† Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan