

# 製鋼スラグ利用による沿岸海域生態系改善の提案

山本 民次\*

Proposal for the Use of Steelmaking Slag for Remediation of Coastal Marine Ecosystems

Tamiji YAMAMOTO

## 1. 緒言

ここでは、我が国の半閉鎖性海域の代表とも言える瀬戸内海を取り上げ、瀬戸内海がたどった富栄養化と現在進行しつつある貧栄養化の過程を紹介する。貧栄養化は有害・有毒渦鞭毛藻の発生につながり、それにともなって漁獲量が急激に低下してきている実態を報告する。このような瀬戸内海の沿岸海域環境を改善する1つの方法として、製鋼スラグの利用を提案する。

## 2. 富栄養化と貧栄養化

沿岸海域の富栄養化の原因の多くは、人間活動の活発化にともなう沿岸域の土地利用形態の変化や、人口の増加にともなうし尿や生活雑廃水の増加によるものである。したがって、これらは単に「富栄養化」と呼ぶのではなく、「人為的富栄養化」(“cultural eutrophication”)と呼ぶべきものである<sup>1)</sup>。

一方、先進国の多くの湖沼や沿岸域においては、貧栄養化の兆しが現れている<sup>2)</sup>。このような現象を先の「人為的富栄養化」に対し、Stockner *et al.* (2000)<sup>3)</sup>は「人為的貧栄養化」(“cultural oligotrophication”)と呼んでいる。彼らが提示した人為的貧栄養化を進行させるいくつかの原因のうち、ここでは瀬戸内海に当てはまる2つを取り上げる。1つは下水あるいは廃水処理施設における栄養塩類の過剰な除去であり、もう1つはダム建設である。

## 3. 瀬戸内海の環境の変化と現況

瀬戸内海の水質は高度経済成長にともない、物質負荷量の増加に敏感に反応した。りん(P)と窒素(N)の負荷量は1962年から1972年の10年間に約3倍程度増加し(Fig. 1(a)), それにともなって赤潮の発生件数は6倍にも増加した(Fig. 2(a))。まさに急激な人為的富栄養化の過程であっ

た。

これに対して、環境庁(現、環境省)は1973年に「瀬戸内海環境保全臨時措置法」(1979年には「瀬戸内海環境保全特別措置法」となり、恒久化)を施行し、化学的酸素要求量(Chemical Oxygen Demand, 略してCOD)の削減を開始するとともに、Pに関する削減指導を行ってきた。

Fig. 1(a)から明らかなように、1972年から1994年の約20年間に全りん(Total Phosphorus 略してTP)負荷量は半減した。これは廃水処理技術の向上に加え、無りん洗剤の利用促進効果が大きかったといわれている<sup>4)</sup>。TPに比べて全窒素(Total Nitrogen 略してTN)は横ばい状態で推移したので、TN:TP負荷量の比は上昇し(Fig. 1(a)), これに呼応して海水中のTN:TP濃度比も上昇した(Fig. 1(b))。

海域では、細胞殻の形成に珪素(Si)を必要とする珪藻プランクトンが多いため、P, N以外にもSiが不足することが多く、海産植物は通常、それらの無機塩類をもっとも良

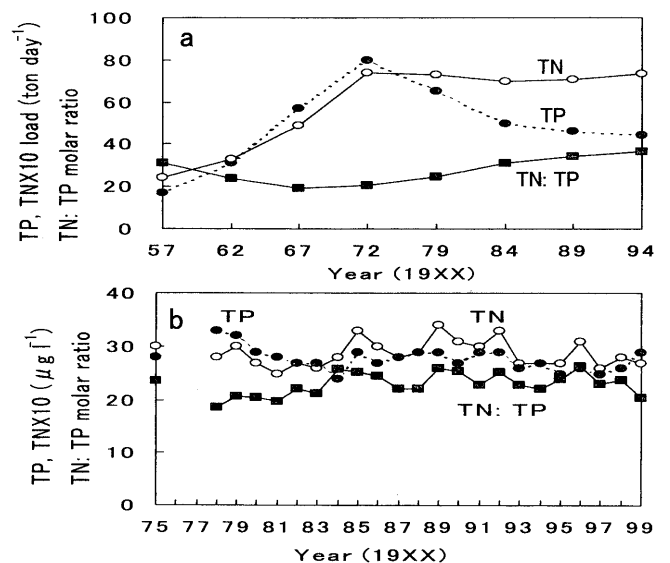


Fig. 1. Long-term variations in (a) discharged loads of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN), and (b) their concentrations in seawater. TN:TP ratio is also shown. Cited from Yamamoto (2003)<sup>18)</sup>.

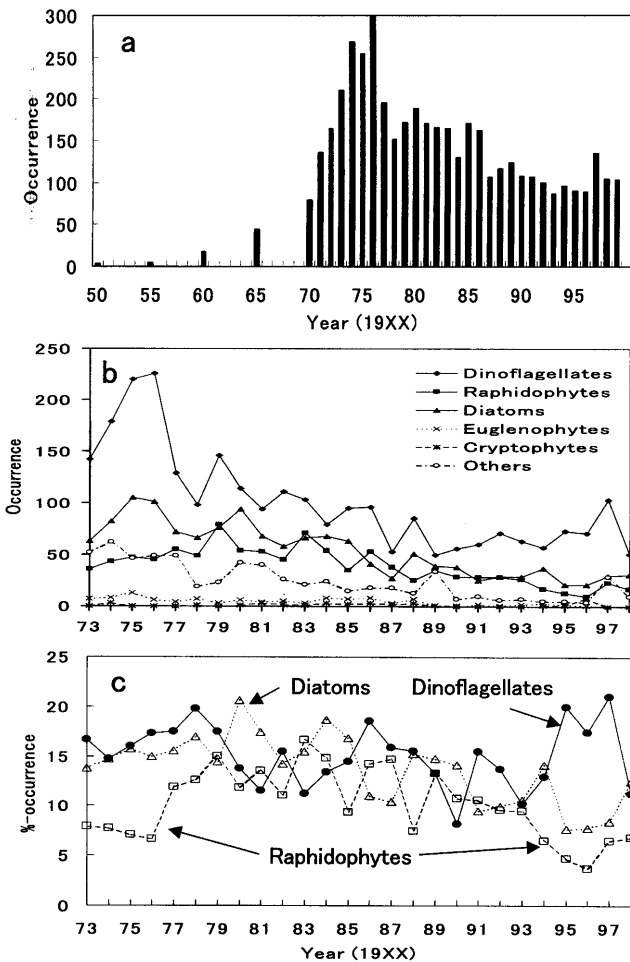


Fig. 2. (a) Variations of the number of red tide occurrence and (b) the major taxa. (c) %-occurrences of the dominant three taxa. The Seto Inland Sea, Japan. Note that the dinoflagellate *Noctiluca scintillans* is omitted from the calculation in (c) because of its heterotrophic character. Cited from Yamamoto (2003)<sup>18</sup>.

く利用する。それらは溶存態無機りん、窒素および珪素 (Dissolved Inorganic Phosphorus, Nitrogen and Silicon, 略して DIP, DIN, DSi) であり、これらを栄養塩類と呼んでいる。

DIP, DIN, DSi のうち、瀬戸内海ではいずれが植物プランクトンの生長に対して不足しているであろうか？すでに述べたように P の削減効果は明らかであるが、中でも DIP の減少が著しいということが注目される<sup>5,6</sup>。一方、Si に関するデータは少ないが、例えば我々が広島湾で10年間行った調査結果では、DSi は DIN 以上に十分量存在している<sup>7</sup>。これらの結果を、植物プランクトン細胞の平均元素構成比 N:P:Si 比=16:1:15<sup>8,9,10</sup>と比較すると、瀬戸内海の海水は明らかに DIP 不足であると結論される<sup>5,7</sup>。

P 負荷の削減は首尾良く赤潮発生件数を低下させたが、赤潮構成種の推移には水産業を続けてゆく上で見逃せない現象が現れている。1970年代には無害な渦鞭毛藻 *Noctiluca scintillans* や *Skeletonema costatum* などの珪藻類が卓越していたのに対して、1980年代には有害な *Chattonella anti-*

*qua* を代表とするラフィド藻が優占し、1990年代には有害・有毒な渦鞭毛藻が明らかに増えてきている (Fig. 2(b), (c))。

植物プランクトンの種組成が、負荷される栄養塩類の比の違いで変化することは良く知られている<sup>11,12</sup>。N 負荷量を下げると窒素固定能を持つラン藻が優占する。一方、N を過剰に負荷しても一部は自然海域では脱窒作用によって大気中へ逸散する。そこで得られた結論としては、人為的制御の難しい N よりも P を削減する方が、植物プランクトン・ブルームの抑制は容易であろうということである<sup>11</sup>。汚水処理技術上、P の除去が容易であるという現実問題も助け、先進国ではこれまで P の削減が優先されてきた。瀬戸内海において DIP の削減がターゲットとなった理由もここにあったと想像される。

最近の植物プランクトン生理に関する研究では、DIP とともに DOP (溶存態有機りん, Dissolved Organic Phosphorus の略) を良く利用する植物プランクトンが多くいることが分かってきた。それらは特に渦鞭毛藻類に多く、例えば、*G. mikimotoi*<sup>13</sup> や *H. circularisquama*<sup>14</sup> ではさまざまな化学種の DOP を利用する。一方、珪藻 *Skeletonema costatum* は DIP を利用するが、DOP は利用しない<sup>15</sup>。また、ラフィド藻 *C. antiqua* も DOP の利用に欠かせない酵素を持っていないことが分かっている<sup>15,16</sup>。これらのことは、瀬戸内海における長期にわたる DIP の負荷削減が、DIP をもっぱら利用する珪藻やラフィド藻から DOP を利用できる渦鞭毛藻にシフトさせたのではないかと示唆する<sup>5,17</sup>。

P 負荷の削減は漁業生産量も著しく低下させた (Fig. 3(a))。特に、近年 (1984~1994年) の漁獲量の低下は危機的状況にあり (Fig. 3(b))、行き過ぎた P 削減によって人為的貧栄養化を引き起こしていることは明らかである。一方、人為的富栄養化の初期 (1972年まで) に、漁獲量の増大が見られたという点も見逃せない事実であり、このことは適切な漁獲量が得られる中程度の栄養レベルを探ることが重要であることを示唆している<sup>17</sup>。

瀬戸内海が貧栄養化した原因はさらにもう一つ考えられる。ダム建設である。瀬戸内海に注ぐ河川の upstream には無数のダムが存在する<sup>18</sup>。ダムは流れをせき止めることで、ダム湖内に植物プランクトンのブルームを引き起こし、それらを粒状態の P, N, Si として湖底に貯留する。下流の河口域に対して栄養塩負荷量を低下させるという意味では、廃水処理施設による栄養塩除去と同様の効果を持つ。N が分解によって比較的帰しやすいのに対して、P は鉱物粒子などに吸着しやすく、還元状態にならないと溶出しにくい。また、Si は珪藻プランクトンの殻として堆積しているので分解速度が遅い。したがって、P と Si が特に湖底にトラップされやすい元素ということになる<sup>3,19</sup>。

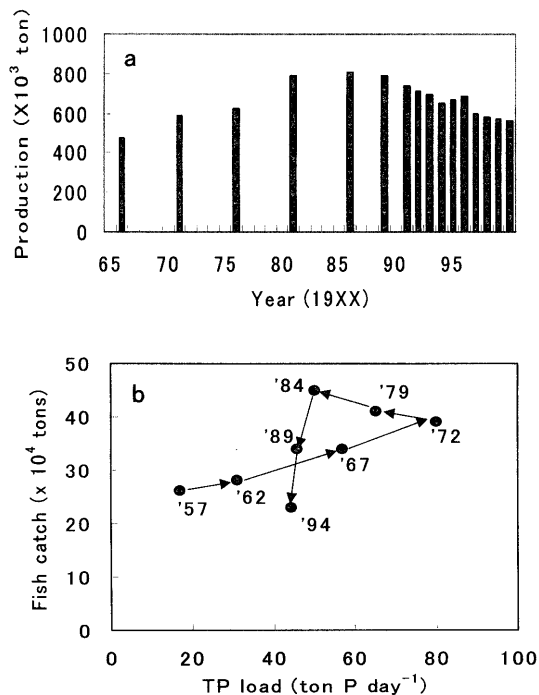


Fig. 3. (a) Variation in total fishery production including bivalve, seaweed and aquacultured species. (b) Relationship between discharged load of total phosphorus (TP) and the fish catch. Cited from Yamamoto (2003)<sup>18</sup>.

#### 4. 製鋼スラグ利用による沿岸生態系の改善

製鋼スラグはPとSiに富み (Table 1), DIPとDSiを溶出させるという点で、植物プランクトンを増殖させるための栄養添加剤として優れている<sup>20</sup>。つまり、スラグから溶出するPやSiは、漁業生産を回復するために必要な珪藻類を増殖させるのに最適な肥料なのである。陸上の農業では作物を栽培するのに施肥はあたり前である。海洋でも同様の発想が必要である。人口増加を支えるために漁業生産を増やすことは国家レベルの政策として重要な課題であるので、海水中の元素比を適切に保つことで、有用な植物プランクトンを増やし、持続的な漁業生産を行うことを積極的に考えねばならない。

ただし、スラグの投入を実際に現場に適用するにはいくつかの問題を解決せねばならない。有害な重金属を含まず、自然生態系に優しいものでなければならないことは当然である。Table 1に示したものはこの条件を満足しており、地球上におけるP資源の枯渇を考えると、スラグを資源として利用する視点はさらに重要性を増す。PとSiの溶出メカニズムと有用植物プランクトンの増殖の確認に関する実験を、フラスコレベル<sup>20,21</sup>から擬似現場スケール<sup>22,23</sup>へと次第に広げてゆく必要がある。

#### 文 献

1) W.T.Edmondson: Eutrophication: Causes, Consequences and Correc-

Table 1. An example of %-composition of elements contained in slag after making steel. Test results for toxic substances are also shown. ND: not detected (detection limits for each substance are shown in  $mg\ l^{-1}$ ). Cited from Yamamoto *et al.* (2003)<sup>20</sup>.

Substances	%	Substances	
CaO	41.47	Cd and its compounds	ND
SiO <sub>2</sub>	23.54		(0.01)
Total-Fe	15.06	Hg and its compounds	ND
MgO	6.20		(0.0005)
MnO	3.74	Pb and its compounds	ND
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.33		(0.01)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.62	As and its compounds	ND
TiO <sub>2</sub>	1.04		(0.01)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.62	Cr(IV) and its compounds	ND
S	0.05		(0.05)

tives, National Academy of Sciences Pub., Washington DC, (1969), 249.

2) H.Sas: Lake Restoration by Reduction of Nutrient Loading, Academia Verlag Richarz GmbH, St. Augustin, (1989), 497.

3) J.G. Stockner, E. Rydin and P. Hyenstrand: *Fisheries*, **25** (2000), 7.

4) 瀬戸内海環境保全協会: 平成12年度瀬戸内海の環境保全, 資料集, 瀬戸内海環境保全協会, 神戸, (2001), 91.

5) T.Yamamoto, M.Ishida and T.Seiki: *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.*, **66** (2002), 102.

6) T.Yamamoto, O.Matsuda and T.Hashimoto: Red Tides, ed. by T. Okaichi, Terra Sci. Publ., Tokyo, (2002), 272.

7) T.Yamamoto, T.Hashimoto, K.Tsuji, O.Matsuda and K.Tarutani: *Bull. Coast. Oceanogr.*, **39** (2002), 163.

8) R.C.Dugdale and F.P.Wilkerson: *Nature*, **391** (1998), 270.

9) J.E.G.Raymont: Plankton and Productivity in the Oceans, Pergamon Press, Oxford, (1980), 489.

10) A.C.Redfield: James Johnstone Mem. Vol., Lancashire Sea Fisheries, Liverpool, (1934), 176.

11) D.W.Shindler: *Science*, **195** (1977), 260.

12) D.Tilman, S.S.Kilham and P.Kilham: *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **13** (1982), 349.

13) M.Yamaguchi and S.Itakura: *Fish. Sci.*, **65** (1999), 367.

14) M.Yamaguchi, S.Itakura and T.Uchida: *Phycologia*, **40** (2001), 313.

15) M.Yamaguchi and Y.Matsuyama: *Nansei Natl. Rep. Fish. Res. Inst.*, (1994), 19.

16) Y.Nakamura and M.M.Watanabe: *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **39** (1983), 151.

17) T.Yamamoto: *Fish. Sci.*, **68** (2002), 538.

18) T.Yamamoto: *Mar. Poll. Bull.*, accepted.

19) C.Humborg, V.Ittekkot, A.Cociasu and B.V.Bodungen: *Nature*, **386** (1997), 385.

20) T.Yamamoto, M.Suzuki, S.J.Oh and O.Matsuda: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 482.

21) K.Haraguchi and A.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 430.

22) Y.Nakamura, T.Sato, K.Shitogiden, Y.Saito, H.Nakata and A.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 438.

23) Y.Nakamura and A.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 446.