



# 製鋼スラグ添加による栄養塩，金属元素およびフッ素の海水中への溶出挙動

中田 等\*・山内 学\*・森西 義章\*<sup>2</sup>・増田 薫\*<sup>3</sup>

Dissolution Behavior of Nutrients, Metal Elements and Fluorines from Steelmaking Slag to the Sea Water

Hitoshi NAKATA, Manabu YAMAUCHI, Yoshiaki MORINISHI and Kaoru MASUDA

**Synopsis :** For the purpose of reducing CO<sub>2</sub> contents in the atmosphere, one of the solution is said to grow the biomass of phytoplankton by its photosynthesis, that is enhances its biological pump. When steelmaking slag is applied to the sea, the nutrient like phosphate and silicate, and ferrous ion as a micro nutrient, which is indispensable for the growth of phytoplankton, especially diatoms, is considered to be supplied sufficiently.

This time, large tank test adding steelmaking slag was carried out, and increase behavior of phytoplankton was investigated. And at the same time, the behavior of various kinds of chemical elements which dissolves from steelmaking slag to the sea water examined in detail.

The results show that contamination problems from the steelmaking slag which was applied to this experiment cannot be recognized. Behavior of dissolved element is compared to some experimental systems, for example, large tank test and beaker test etc., using analytical model. Furthermore, three dimensional simulation of dissolved nutrients from steelmaking slag was also investigated.

**Key words :** slag; environmental control; nutrient; phytoplankton; heavy metal; fluoride; dissolution.

## 1. 緒言

製鋼スラグなどの産業副産物は「天然資源保護による環境保全」の観点から重要な資源である。製鋼スラグ生成量は年間約1300万トンに達しており、昭和50年代以降、これらのスラグの利用開発を鉄鋼業界は共通の課題として主に、土木用資材としての開発利用を進めてきた。製鋼スラグの海域への利用拡大の一例については1993年より沿岸開発技術研究センターで港湾工用材料としての研究に着手し、海上サンドコンパクションの試験工事を行い、物理的特性等が調査され、この結果、サンドコンパクション材として製鋼スラグが使用可能との評価を得て、海砂代替として1998年に広島港などで採用されている<sup>1)</sup>。また近年、製鋼スラグを海域に積極的に適用する動きの一例として、港湾土木資材としての製鋼スラグ固化体の適用<sup>2)</sup>、人工藻礁としての製鋼スラグ大型炭酸固化体の適用<sup>3)</sup>、ヘドロが堆積した内湾や河口等、汽水域の環境改善技術としての高炉水砕スラグ覆砂材の開発<sup>4)</sup>等が挙げられる。これらはリサイクル資材を沿岸環境の修復に役立てるといふ点にその特徴を有している。

さらに、CO<sub>2</sub>削減に対して製鋼スラグを海洋に利用するというユニークな研究<sup>5,6)</sup>は製鋼スラグから植物プランクトンの栄養塩となるりん、珪素、鉄を溶出させ、その光合成による生物活動、いわゆる生物ポンプの活性化を達成す

ることによりCO<sub>2</sub>の固定化を図るといふ発想に基づくものであり、製鋼スラグと共に窒素源として都市排水を添加することにより植物プランクトンの増殖をより活発にすることができることがピーカーテスト<sup>5)</sup>、および大型水槽を用いた実験<sup>6)</sup>において確認されている。このように製鋼スラグの更なる有効利用の方途としてこれを地球環境保護対策に組み込む技術は優れた技術であることは理解されやすい。しかしながら、従来の生態系に人為的な操作を加えるという観点から生態系の破壊に繋がらないような十分な注意が必要であると共に、製鋼スラグから海水中への各元素の溶出に関して栄養塩のみならず、重金属を含めた各元素についてその挙動を正確に把握しておくことは製鋼スラグを海域に適用する場合の植物プランクトンの増殖挙動、および環境問題に与える影響についての把握という観点から極めて重要であると考えられる。

本論文においては大型海水槽内部に製鋼スラグを約一ヶ月間設置し、植物プランクトンの増殖実験の実施途中における水質環境基準値が定められた各元素の溶出値の測定結果、並びに栄養塩の溶出・拡散シミュレーションを実施した結果について報告する。

## 2. 実験方法

製鋼スラグ添加による植物プランクトン増殖実験は宮城

平成14年8月6日受付 平成14年9月27日受理 (Received on Aug. 6, 2002; Accepted on Sep. 27, 2002)

\* (株) 神戸製鋼所技術総括部 (Technology Administration Department, Kobe Steel, Ltd., 2 Nadahamahigashimachi Nada-ku Kobe 675-0023)

\*2 (株) コベルコ科研 (KOBELCO Research Institute Inc.)

\*3 (株) 神戸製鋼所化学環境研究所 (Chemical and Environmental Technology Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

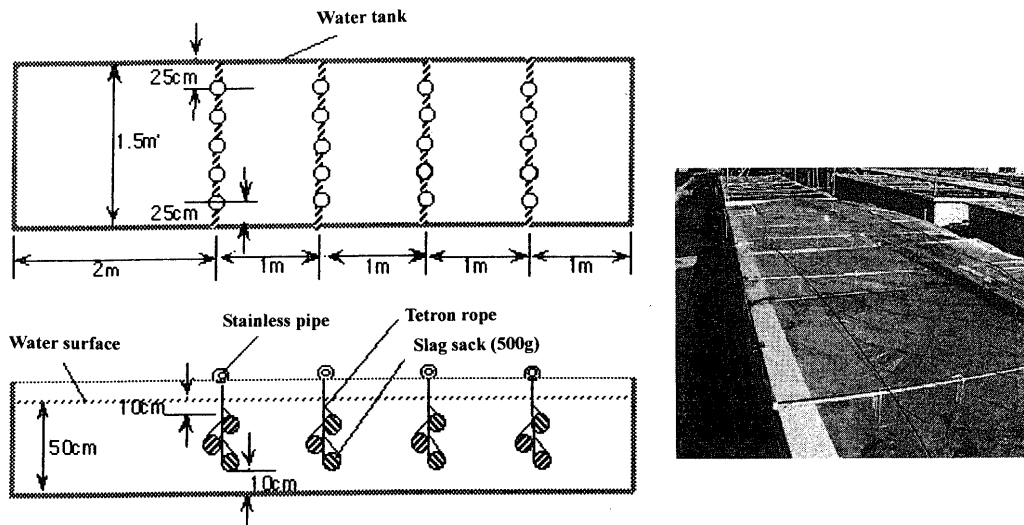


Fig. 1. Experimental apparatus of large tank test.

Table 1. Chemical composition of steel slag used for large tank test (mass%).

	FeO	CaO	F-CaO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	MnO	F	S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>
Desiliconized slag	20.9	35.0	1.53	30.8	1.97	5.58	3.88	0.13	0.04	1.78	1.14
Dephosphorized slag	19.5	38.0	1.04	30.5	2.60	7.93	3.06	0.21	0.03	0.96	1.24

Table 2. Contents of chemical elements of steel slag listed up environmental issue (mg/kg).

	Cd	CN	Pb	T-Cr	As	Hg	Se	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
Desiliconized slag	<1	<1	20	2080	2.38	<0.1	<0.1	11.88%	5.13%
Dephosphorized slag	<1	<1	<1	2270	1.22	<0.1	<0.1	11.75%	4.57%
Limit of quantitative analysis	1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.01%	0.01%

県松島湾の一角にあるアワビ養殖施設内の大型水槽を利用して実施した。本水槽中の海水は松島湾内から汲み上げ、隣接する火力発電所の温排水と混合した後、圧力式砂濾過装置で100 μm以上のサイズの塵芥、土砂、および生物を除去した後、水槽内で循環させている（循環流量4.5トン/h）。実験ではFig. 1に示す水槽（容積4.5 m<sup>3</sup>）3基を使用し、この内の2基にそれぞれ脱Siスラグ、脱Pスラグを30 kg投入し、残りの1基はスラグ添加なしの対象区とした。スラグの水槽への設置方法はFig. 1に示すようにナイロン製メッシュ袋に0.5 kg詰め、テトロン製ロープ1本につき3個ずつ等間隔に吊り下げ、幅方向に5本、長さ方向に4列、合計60袋(30 kg)設置した。

海水中への環境基準元素の溶出値の測定に関しては実験期間中、海水1 lを適宜サンプリングし、フィルターで濾過、冷凍保存した後、各種機器分析を行った。

### 3. 実験に供した溶銑予備処理スラグ組成

Table 1に本実験に使用したスラグ組成を示す。尚、本実

験においては海水中へのフッ素の溶出挙動を調査するためにあえてフッ素を含有しているスラグを選定した。

また、スラグからの溶出に関して、水質環境特性の把握を行うために本スラグ中に含有されている環境基準対象元素であるCd, CN, Pb, Cr, As, Hg, Se, Fの含有分析、および植物プランクトンの増殖に必要な微量元素であるFeの分析も併せて実施した。その結果をTable 2に示す。環境基準対象元素についてはAs, Cr, Pbを除いて測定定量下限値以下であり、これら以外の元素は基本的にスラグに含有されないことがわかる。ただし、各元素イオンの溶出については単に含有量のみでは整理できず、その溶出特性は鉱物組成に大きく依存すると考えられ、その挙動については栄養塩の溶出も含めて、海水への溶出試験の結果が必要である。

### 4. 溶銑予備処理スラグからの各元素の溶出挙動結果

#### 4.1 スラグからの環境基準元素の水中への溶出特性

本スラグの環境特性の把握を行うために土壌の汚染に関

しての指針を与える環境庁告示46号法（環告46号法）に基づいた溶出試験結果を Table 3に示す。本方法はpH 5.8~6.3に調整された水に粒径2mm以下のスラグを液固比10の条件で6h連続振とうし、試料液を採取して検液とする方法である。尚、本結果から各スラグからの溶出値はフッ素を除いて、いずれも水質環境基準値以下であり、特に問題は認められない。またフッ素については水中には環境基準値以上に溶出しているが、後に示すように、海水中においては元々、フッ素イオン、およびCaイオンが多量に含有されており、CaF<sub>2</sub>と平衡していることから、新たなフッ素溶出の駆動力がなく、フッ素溶出量は増加しないことがわかる。

#### 4.2 スラグからの環境基準元素の海水中への溶出特性

3基の大型水槽（内2基はスラグ添加を実施）を用いた実験期間は37日であり、実験開始より21日目以降は水槽内の海水を入れ替え、第2期試験として植物プランクトンの増殖を図るため、海水の連続エアバブリングを実施した。バブリングは直径13mm丸の空気吹き出しノズル管に直径1mmのドリル穴を14個あけ、水槽内の流れ方向に垂直に

ほぼ均等に4本設置した。各ノズル管の空気流量は0.016m<sup>3</sup>/minであり、水槽一基あたりの流量は0.064m<sup>3</sup>/minとなる。各元素の溶出について、無添加区、脱Siスラグ添加区、脱Pスラグ添加区の結果を各々、Table 4~6に示す。重金属元素の海水中への溶出はA（無添加区）は当然のことながら、B（脱Siスラグ添加区）、C（脱Pスラグ添加区）共に基準値以下であった。重金属が溶出するのであれば、スラグ添加区においては経過日数と共に、溶出値が増加し、また、バブリングを実施した実験においても海水の攪拌により溶出が促進されると考えられるものの、実際の現象はそのようになっておらず、溶出値の増加は認められていない。

表層海水の重金属含有量の参考値としてAsは約0.00075mg/l（北太平洋）、Pbが5×10<sup>-6</sup>mg/l（北太平洋）~1.2×10<sup>-5</sup>mg/l（北大西洋）程度含有されており、Cdはほとんど含まれていない<sup>7)</sup>。A（無添加区）でフッ素を除いた中で唯一測定値が認められるのはAsであり、松島湾の海水は環境基準値以下とはいえ北太平洋の表層海水に比べ、2.7~6.7倍のAsが含有されており、人間活動の影響

Table 3. Results of leaching test (Environmental Agency's notice No. 46) (mg/l).

	Cd	CN	Pb	Cr <sup>6+</sup>	As	Hg	Se	F
Desiliconized slag	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.001	<0.0005	<0.001	2.67
Dephosphorized slag	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.001	<0.0005	<0.001	1.82
Limit of quantitative analysis	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.0005	0.001	0.1
Water environment sandard	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01	0.8

Table 4. Leaching behavior of chemical elements to the sea water (mg/l). [A: adding no slag]

Time development(day)	Cd	CN	Pb	Cr <sup>6+</sup>	As	Hg	Se	F
1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.85
2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.79
7	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	1.3
11	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.004	<0.0005	<0.001	0.58
15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.004	<0.0005	<0.001	0.34
20	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.004	<0.0005	<0.001	0.74
21 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.84
27 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.005	<0.0005	<0.001	0.69
34 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.44
37 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	0.91
Water environmental standard	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01	0.8

Table 5. Leaching behavior of chemical elements to the sea water (mg/l). [B: adding desiliconized slag]

Time development(day)	Cd	CN	Pb	Cr <sup>6+</sup>	As	Hg	Se	F
1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	1.03
2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	0.75
7	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	0.99
11	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	0.91
15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.005	<0.0005	<0.001	0.45
20	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.81
21 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.4
27 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.79
34 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.004	<0.0005	<0.001	0.91
37 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.001	<0.0005	<0.001	0.84
Water environmental standard	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01	0.8

Table 6. Leaching behavior of chemical elements to the sea water (mg/l). [C: adding dephosphorized slag]

Time development(day)	Cd	CN	Pb	Cr <sup>6+</sup>	As	Hg	Se	F
1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	0.76
2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	<0.0005	<0.001	0.88
7	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.94
11	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.004	<0.0005	<0.001	0.74
15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.004	<0.0005	<0.001	0.87
20	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.68
21 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.85
27 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.94
34 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.003	<0.0005	<0.001	0.95
37 (with air bubbling)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.001	<0.0005	<0.001	0.82
Water environmental standard	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01	0.8

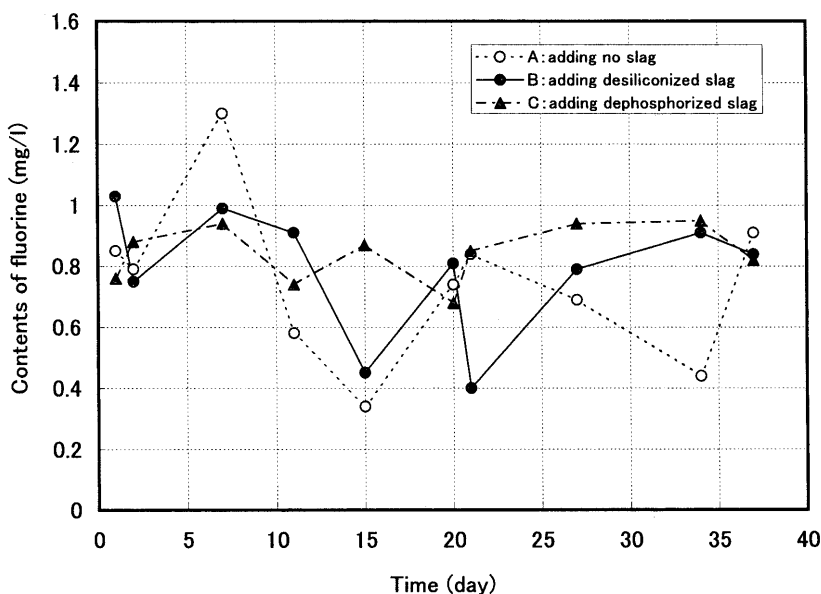


Fig. 2. Behavior of fluorine contents in the sea water.

が現れているものと考えられる。一方、Pbに関しては大洋表層海水と比較して含有量が多いか少ないかは精度の良い分析ができていないため、ここでは議論することは不可能である。

Asに関してはB(脱Siスラグ添加区)、C(脱Pスラグ添加区)とも海水への溶出量は無添加区と比較して同等である。スラグ中にはTable 2に示す通り、Asは各々、2.38 mg/kg、1.22 mg/kgとわずかながら含有されているものの、環境庁告示46号法に基づいた溶出試験においても定量下限値以下であるという結果が海水においても再現されている。

A、B、C各水槽のフッ素の海水中の含有量の時間経過による変化をFig. 2に示す。A(無添加区)では0.34~1.3 mg/l、B(脱Siスラグ添加区)では0.4~1.03 mg/l、C(脱Pスラグ添加区)では0.68~0.95 mg/lの範囲で変化している。標準的な海水中には元々、フッ素含有量が1.8 mg/lと環境基準値以上が含有されており<sup>8)</sup>、この値と比較すると本実験で使用した海水中のフッ素濃度は若干低い値を示している。またスラグ添加によっても海水中のフッ素濃度が高くなるという現象は認められておらず、また、データのばらつきは大きいものの、溶出量が増加すると考えられる実験

後期においても海水中のフッ素濃度は増加していない。

海水中にはNa<sup>+</sup>に次いでMg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>イオンが多く含まれており、標準的な海水1kgにはMg<sup>2+</sup>イオンは1.27 g、Ca<sup>2+</sup>イオンは0.4 g含まれている<sup>7)</sup>。Table 1に示すようにスラグ中にはMg、Caが多く含まれており、Ca溶出による海水pHの上昇が懸念される。今回、これら2種のイオンの挙動についても調査を実施した。結果をFig. 3、Fig. 4に示す。Mgイオン、Caイオンに関しては各水槽ともほぼ同じ値を示しており、Mgイオンは1.0~1.2 mg/l、Caイオンは0.31~0.4 mg/lであり、標準的な海水の含有量とほぼ同じ値である。またpHと関係が深いCaイオン量は3水槽ともほとんど変化がないことがわかる。Fig. 5に大型水槽内のpHの変化について示す。バブリング前のpHの変化はA(無添加区)で7.9~8.8、B(脱Siスラグ添加区)では8.2~9.2、C(脱Pスラグ添加区)では8.5~9.2であり、スラグ添加によりわずかながらpHは上昇したものの、その程度は極めて小さく、また、スラグ種によっても明確な変化はなかった。また、海水を入れ替え空気バブリングを施した20日目以降は各水槽におけるpH変化はさらに小さくなっている。

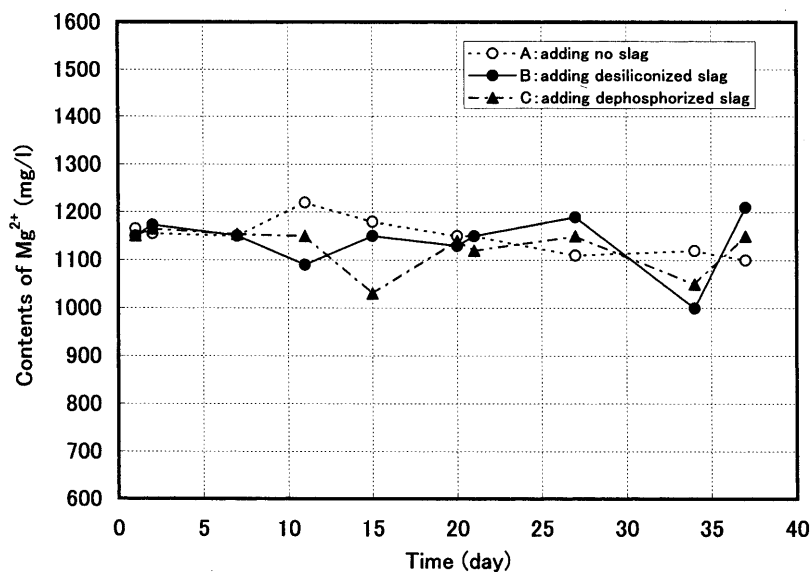


Fig. 3. Behavior of Mg<sup>2+</sup> contents in the sea water.

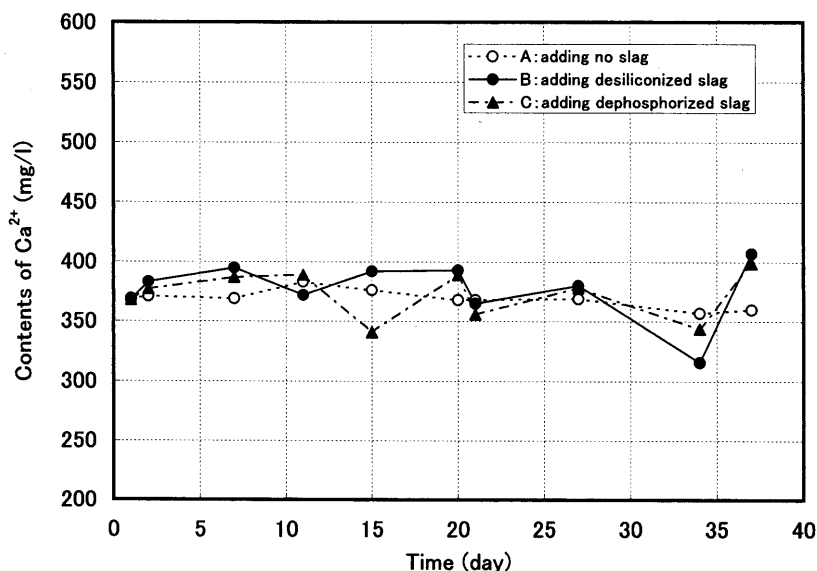


Fig. 4. Behavior of Ca<sup>2+</sup> contents in the sea water.

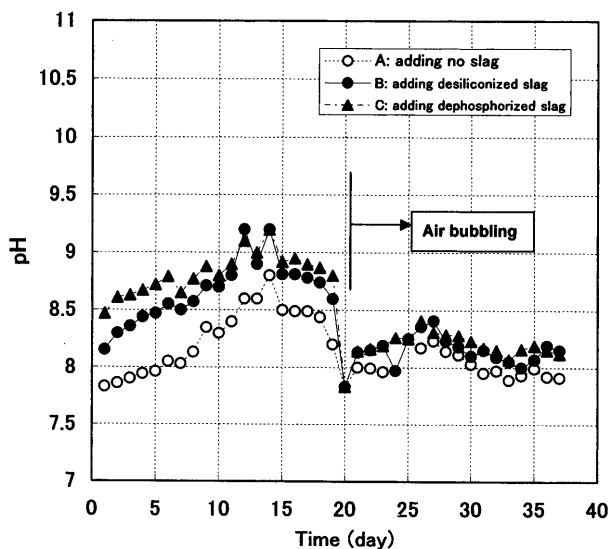


Fig. 5. Behavior of pH change in a large tank test.

## 5. 大型水槽実験とビーカーテストおよび環告46号法における溶出挙動の比較検討

### 5.1 解析解による溶出挙動把握

大型水槽内の溶出挙動の詳細な解析は後に述べることにし、本項では溶出に絡む各因子の影響を簡単に把握可能な解析解を用いて議論を進める。また、前もってスラグからの栄養塩元素がどの程度溶出するかを把握するために基礎実験として、ビーカーテストを実施しており<sup>5,6)</sup>、これは270メッシュ以下に整粒した粉末試料1gを容器内に入れ、人工海水500mlを注入し、80rpmで振動させ、溶出挙動を調査したものである。

今、各実験系の容器内の溶出元素分布は均一であると仮定し、溶出はスラグ表面から生じ、その表面濃度は $C_s$ に保たれており、母相濃度 $C$ との差に比例して溶出するとす

る。表面積  $S$  のスラグから  $\Delta t$  時間の溶出量は  $k \cdot S \cdot (C_s - C) \cdot \Delta t$  である。一方、母相側の濃度の増加分を  $\Delta C$  とすると母相側の溶出増加量は  $\Delta C \cdot V$  ( $V$ : 母相体積) となる。両者を等値し、微分方程式化を行うと

$$dC/dt = -k \cdot S/V \cdot (C - C_s) \dots\dots\dots (1)$$

となり、 $t=0$  で  $C=0$  の初期条件下で (1) 式を解くと

$$C = C_s \cdot \{1 - \exp(-k \cdot S \cdot t/V)\} \dots\dots\dots (2)$$

さらに  $S$  を容器内に存在するスラグ重量  $W$ 、スラグ粒半径  $r$ 、スラグ密度  $\rho$  で関係付けると  $S = 3W/(\rho \cdot r)$  となり、(2) 式に代入すると以下のように整理できる。

$$C = C_s \cdot \{1 - \exp(-3Wkt/\rho rV)\} \dots\dots\dots (3)$$

当然のことであるが、スラグからの溶出は投入スラグ量が多いほど、スラグ粒径が小さいほど、母相体積が小さいほど促進されることがわかる。速度定数  $k$ 、スラグ密度  $\rho$  が同じなら、すなわち同一スラグで同一元素の溶出挙動に着目した場合、 $W \cdot t / (r \cdot V)$  の値が同じ時に溶出濃度も等しくなると考えられる。Table 7 に各実験系における  $W, r, V$  の代表的な数値を示す。また、Table 7 の数値を用い、(3) 式から各場合の溶出変化挙動を算出した結果を Fig. 6 に示す。

尚、 $k$  の値についてはビーカートテストの Si の溶出<sup>5)</sup>において  $C/C_s = 0.9$  になる時間を 5 日と置くことにより求めた。当然のことながら Fig. 6 においてビーカートテストの場合、5 日後に  $C/C_s = 0.9$  になっていることがわかる。飽和濃度に達する時間は環告 46 号法が最も短く、ビーカートテスト、大型水槽実験の順になっていることがわかる。

本解析解が実挙動を正しく表しているとの前提の下において溶出値が同じになる時間を  $t_0$  (大型水槽)、 $t_1$  (ビーカート)、 $t_2$  (環告 46 号法) とすれば、 $t_0 \sim 12 \times t_1$ 、 $t_0 \sim 57 \times t_2$  となる。海水中への重金属の溶出に関しては、環告 46 号法では溶媒が水と海水という違いはあるものの 6h 後の分析値で評価している。溶媒が海水と仮定して、環告 46 号法の 6h 後と同じ溶出濃度となる経過時間は大型水槽実験の系では約 340h 後、すなわち約 14 日経過後である。実際の大型水槽実験期間はこれよりはるかに長期にわたって実施されており、溶出については十分な時間が確保されている。逆にいえば、大型水槽を用いて 1 ヶ月程度の溶出実験を行い、水質環境基準元素の溶出が認められなければ環告 46 号法において水を海水に変えた場合の結果においても問題がない可能性が高いことを意味している。Table 3 に示す結果は溶媒が真水の場合であり、一義的な比較は困難であるが本事実を裏付けるものと考えられる。

Table 7. Characteristic value used for every experimental system.

	Large tank test (sea water)	Beaker test (sea water)	Environmental Agency's notice No.46 (water)
Volume (m <sup>3</sup> )	4.5	5 × 10 <sup>-4</sup>	5 × 10 <sup>-4</sup>
Mass of added slag (kg)	30	10 <sup>-3</sup>	0.05
Slag radius (mm)	1.25~2.5	0.047	0.5
Slag density (kg/m <sup>3</sup> )	2500	2500	2500

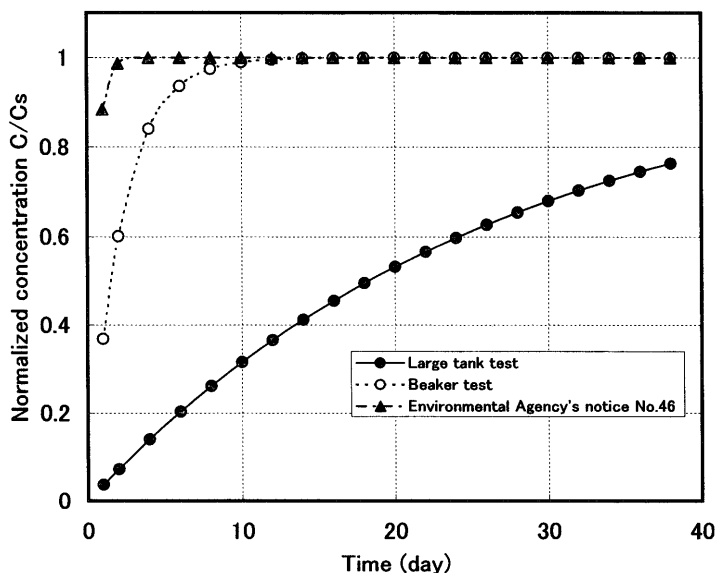


Fig. 6. Leaching behavior of every system.

また、栄養塩の溶出の観点からみれば、 $C_s$ はピーカーテストで得られている栄養塩溶出の飽和濃度に対応するものであり<sup>6)</sup>、ばらつきはあるもののSiで10~15 ppm, Pで約1 ppm程度である。一方、栄養塩が豊富な海洋深層水には各々、Siで4.2 ppm, Pで0.1 ppm含有されており<sup>8)</sup>、海洋表層にはほとんど栄養塩が含まれていない。以上を考えると、大型水槽実験においても初期の段階からSi, P等の栄養塩元素が十分に溶出していると考えられ、植物プランクトンの増殖効果が期待できることがわかる。

5.2 3次元シミュレーションによる溶出挙動把握

前節では完全混合モデルを用いて溶出挙動解析を実施したが、実際の溶出値はこれより低くなると考えられる。そこで流れ場の存在する、より実際に近い現象をシミュレートするために、スラグからの栄養塩成分の溶出と拡散に関して以下に示すように3次元の移流拡散方程式にスラグか

らの栄養塩成分の溶出項を組み込んで計算を行った。

$$\partial C/\partial t + (u \cdot \nabla)C = D_m \cdot \Delta C + S \dots\dots\dots (4)$$

- $C$  : 溶出成分濃度
- $u$  : 速度ベクトル (m/s)
- $D_m$  : 拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)
- $S$  : スラグからの各成分の溶出速度 (kg/s)

Fig. 7に大型水槽の解析モデルを示す。メッシュ分割数は84880で図中に示した各々の吊り下げたスラグのセルから栄養塩が湧き出し、水槽内を拡散する。水槽内の海水の循環は水槽断面全体から平均流速  $1.67 \times 10^{-3}$  m/s (循環流量: 4.5 t/h) で流入し、反対側の断面全体から流出後、再び流入断面へ戻る周期境界とする。

大型試験水槽内の製鋼スラグからの栄養塩溶出拡散解析結果の一例として Fig. 8にスラグ添加後12日目における水

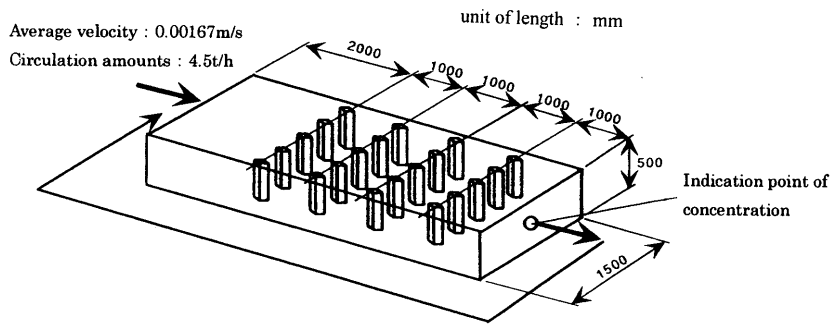


Fig. 7. Analytical model used for large tank test.

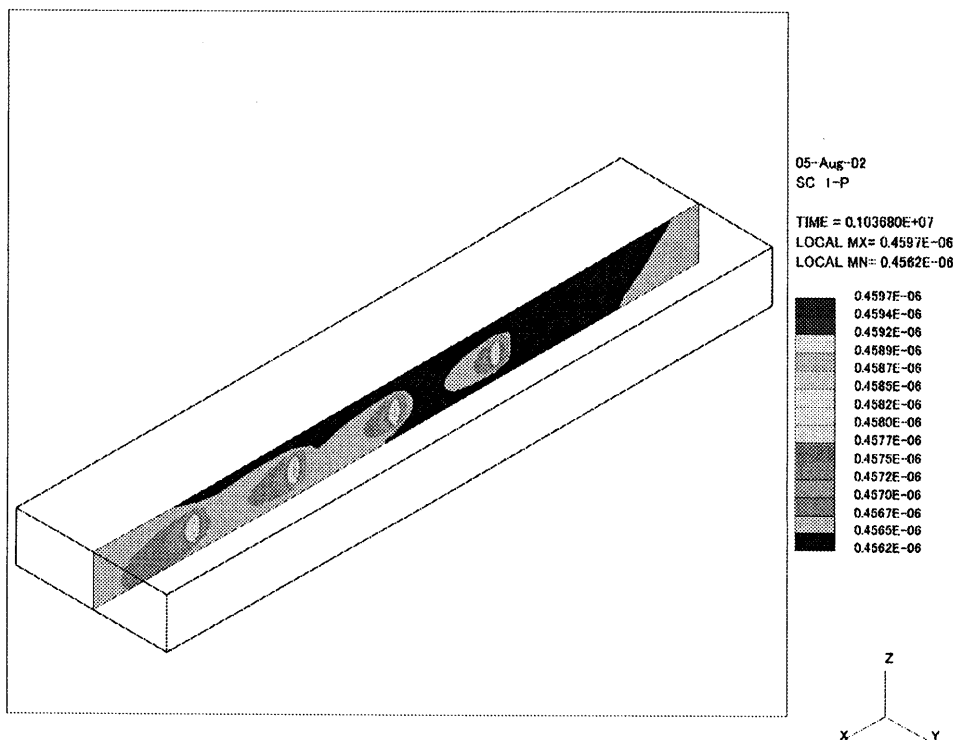


Fig. 8. Distribution of Si concentration in a large tank after adding slag (12 days after).

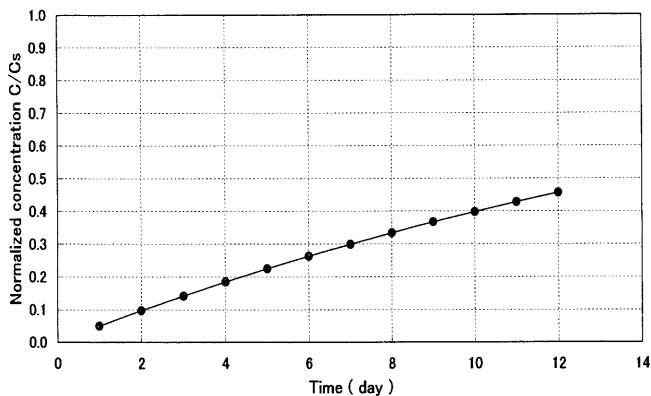


Fig. 9. Leaching behavior of Si in a large tank test.

槽内の珪素の濃度分布を示す。スラグからの栄養塩の溶出速度  $S$  については  $A \cdot (C_s - C)$  の形におき、Fig. 6 に示した大型水槽での溶出濃度にほぼ近い値を示す様に選定した。本解析結果はスラグを設置してある箇所から栄養塩が溶出し、下流側に流されていく様子がよく表されている。また、Fig. 7 中に表示した濃度変化表示位置（循環海水出側位置）における珪素の濃度変化を Fig. 9 に示す。本結果の溶出程度は当然のことながら、液相内完全拡散の場合の結果 (Fig. 6) に比較してほぼ同一の挙動を示す等、定性的に現象を正しく把握していることが明らかとなった。解析結果が定量的に正しいかどうかは今後の検討課題である。

## 6. 結言

植物プランクトンの増殖を目的として、大型水槽を用いた海水中への鉄鋼スラグ添加実験を行うことにより、以下の結果が得られた。

(1) 水質環境基準に定められた重金属元素の鉄鋼スラグからの海水中への溶出は実験期間が一月以上の長期に

わたる循環タイプの試験であるにもかかわらず、認められておらず問題がないことが判明した。

(2) フッ素については水質環境基準値が指定されているが、海水中には元々基準値以上のフッ素が含有されており、さらにスラグ添加により新たなフッ素の溶出は認められなかった。

(3) 植物プランクトンの増殖に必要な不可欠である栄養塩の溶出挙動に関して解析モデルを用いて推定した結果、大型水槽実験においても比較的初期の段階から十分な栄養塩が溶出していると考えられ、植物プランクトンの増殖効果が期待できることが判明した。

(4) 解析を3次元に拡張し、流動場中における溶出拡散シミュレーションを実施した結果、濃度パターンは定性的に実現現象をよく表していることが判明した。ただし、計算された溶出値と実測値との定量的な比較検討については今後の課題である。

## 文 献

- 藤原 稔：第44・45回白石記念講座，日本鉄鋼協会編，東京，(2001)，1.
- 松永久宏，高木正人，小菊史男，谷敷多穂，櫻谷敏和：鉄鋼スラグ利用拡大に関するシンポジウム，日本鉄鋼協会編，東京，(2001)，16.
- 磯尾典男，高橋達人：鉄鋼スラグ利用拡大に関するシンポジウム，日本鉄鋼協会編，東京，(2001)，20.
- 宮田康人，沼田哲始，高橋達人，豊田恵聖，佐藤義夫：シンポジウム 鉄鋼スラグの用途拡大に向けて，日本鉄鋼協会，東京，(2002)，24.
- 廃棄物の高度再資源化処理技術等の調査・検討事業報告書（溶銑予備処理スラグ），クリーン・ジャパンセンター，東京，(2000)，1.
- 廃棄物の高度再資源化処理技術等の調査・検討事業報告書（溶銑予備処理スラグ），クリーン・ジャパンセンター，東京，(2001)，1.
- 海と地球環境，日本海洋学会編，東京大学出版会，東京，(1998)，147.
- 海と環境，日本海洋学会編，講談社，東京，(2001)，1.