環境資源工学 58 : 146–150 (2011)

特　別
講　演

酒田港におけるリサイクルポートの推進[1]

池　田　　孝[2]*

Promotion of Recycle Port in Sakata Port

Takashi IKEDA[2]

[2]Yamagata Prefectural Government Port and Harbor Management Office

Abstract

A number of cargoes and of company's sites, both of which are related to recycle, have been steadily increasing in Sakata port in Yamagata prefecture since it was designated as a recycle port. In addition, Sakata port will be considered to play a big role from now on regarding reconstruction assistance of the Great East Japan Earthquake and future new energy.

In this regard, we would like to introduce our approach for the promotion of recycle port in Sakata port.

Key words: Removal of the rubble of disaster, Formation of international circulating society

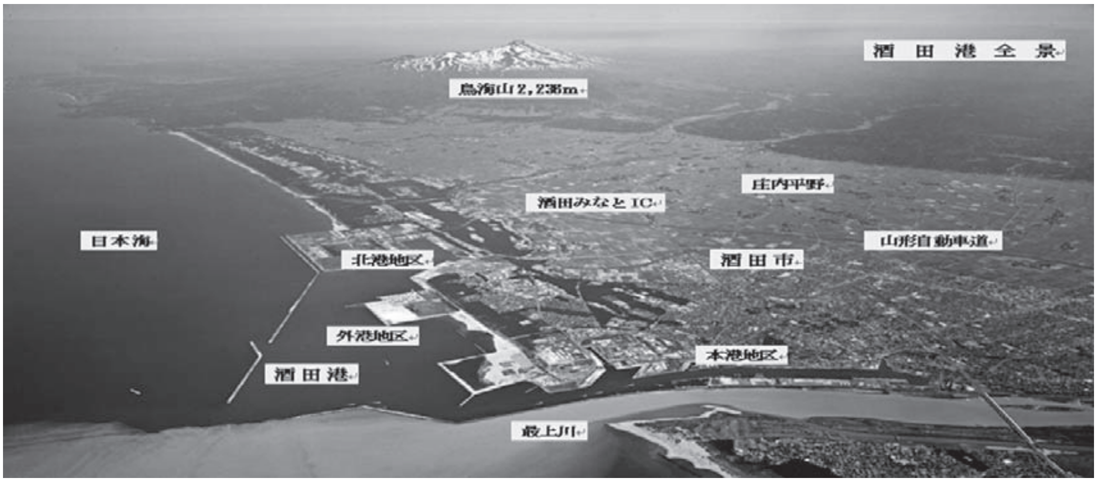


Fig. 1 Panoramic view of Sakata port

1．酒田港の概要

1.1 歴史・沿革

酒田港は最上川の河口に発達した港で，日本海沿岸の北前船航路や最上川舟運による内陸河川交通の要衝として古くから栄えた港である。

近代に入ってから，最上川治水工事や酒田港港湾工事により，大型船の入港が可能となった。昭和 41 年の港湾計画改訂で酒田港拡張計画が決定され，昭和 45 年に北港開発に着手し，昭和 49 年に酒田北港が開港している。

その後，平成 4 年に中国ハルビンとの東方水上シルクロードが開設，平成 7 年に韓国釜山港との間に国際定期コンテナ航路が開設，平成 12 年には酒田港国際ターミナルが完成している。

さらに，平成 15 年にリサイクルポートの指定があり，平成 22 年には重点港湾に選定され，新しい時代の港へと躍進している（Fig.1 に酒田港全景を示す）。

1.2　港湾施設の概要

平成 18 年 3 月に策定された「酒田港長期構想」を受け，平成 18 年 7 月に港湾計画を改訂している。計画の目標年次は平成 30 年代前半で，目標とする取扱貨物量は 600 万トン。計画に対応する主な施設は以下のとおりである。

①係留施設（1 万トン級以上，専用岸壁を含む）

・5 万トン級岸壁（水深 13m, 14m）　4 バース

1. 平成 23 年 11 月 10 日　本会第 127 回例会において発表
2. 山形県港湾事務所
平成 23 年 9 月 1 日受理
*e-mail: ykowan@pref.yamagata.jp

※既設 3 バース，計画 1 バース（耐震岸壁）

・1〜3 万トン級岸壁（水深 9, 10, 12m）11 バース

※既設 8 バース（うち耐震岸壁 1 バース），計画 3 バース

②外郭施設（直轄事業）

・南防波堤　　2,048m, H. 22 末整備済 2,000m

・北防波堤　　2,000m, H. 22 末整備済 1,541m

・第 2 北防波堤　2,050m, H. 22 末整備済 1,206m

1.3　取扱貨物の状況

国際定期コンテナ航路は，韓国釜山港との間に平成 7 年に開設され，平成 20 年 2 月以降週 1 便の運航が続いていたが，平成 23 年 2 月 25 日から週 2 便に復活。平成 23 年 7 月 9 日からは，うち 1 便が中国（天津新港，大連）まで延伸されている。

平成 22 年の酒田港の取扱貨物量は全体で 315 万トン（対前年比＋8.8%），品種別では石炭が 169 万トン（輸入，対全体貨物量比 54%），石油製品が 39 万トン（移入，13%），石材が 39 万トン（移出，10%）となっている。また，国別では中国が 79 万トン（対外貿貨物量比 41%）で最も多くなっている(Fig.2-4)。

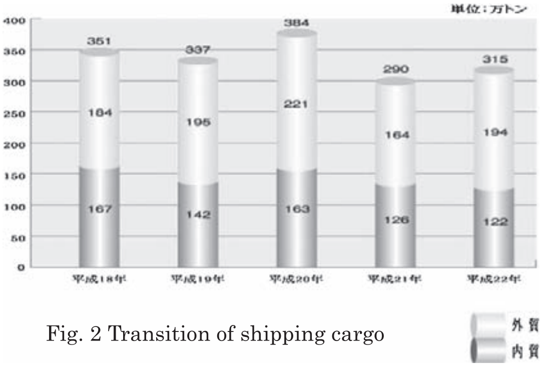


Fig. 2 Transition of shipping cargo

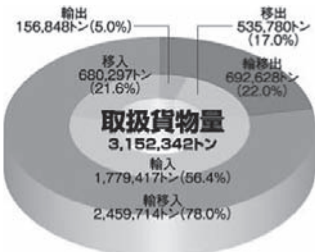


Fig. 3 Dealing cargo by importation and exportation and domestic transportation

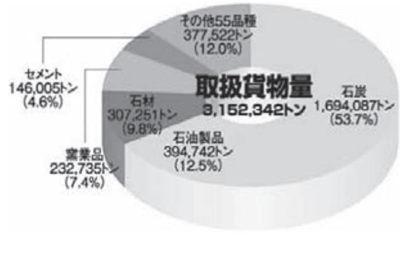


Fig. 4 Dealing cargo by goods

コンテナ貨物取扱量は全体で 5,486TEU（対前年比＋19.1%），輸出が 1,812TEU，輸入が 3,674TEU となっている。輸出主要品目ではレジン（廃プラ），古紙，中古自動車部品の順，輸入主要品目では缶詰，レジン，カーパーツの順である。また，国別では中国が最も多く 3,114TEU（対全体コンテナ貨物量比 57%），次に韓国 945TEU(17%), タイ 441TEU(8%)の順である。

1.4　貨物利用拡大の取組み

主にコンテナ貨物の利用拡大を図る取組みとして，助成制度や使用料減免などの優遇措置を行っている。また，今年8月から小口混載コンテナ貨物輸送(LCL)サービスを展開，酒田港から世界各国へ小口貨物を発送できる体制を整え，多品種・少量生産の企業需要に応えることで酒田港に物流を集約し，貨物量の増加を図っていく。

①「酒田港利用スタートアップ促進助成」

酒田港を新たに利用する荷主に対し助成するもの。

②「酒田港継続利用増加インセンティブ助成」

酒田港を継続利用して年間 25TEU 以上かつ前年より貨物量が増加した荷主に対し助成するもの。

③「酒田港大口利用シフト促進助成」

100TEU 以上の増加又はシフトした荷主に対し助成するもの。

④「港湾施設使用料の減免」

入港料，岸壁，コンテナヤードの使用料は 2 分の 1 減免，荷役機械の使用料は 3 分の 1 減免している。

1.5　企業立地に対する優遇措置

リサイクル関連企業が集積する酒田臨海工業団地に新たに立地や増設する場合，県や市による補助金・助成金や融資などの各種優遇措置がある。

①「山形県企業立地促進補助金」

②「酒田市企業立地促進助成金」

③「山形県産業立地促進資金」（融資）

④「分譲地のリース制度」（山形県）

2．　リサイクルポートの推進

2.1　リサイクルポートの概要

リサイクルポート（総合静脈物流拠点港）とは，広域的なリサイクル施設の立地に対応した静脈物流ネットワークの拠点となる港湾をリサイクルポートとして国が指定し，リサイクル拠点づくりを支援するものである。

平成 14 年 5 月の第 1 次指定に始まり，平成 23 年の 1 月までに 4 次の指定を行い，これまでに全国で 22 港が指定されている。酒田港は平成 15 年 4 月 23 日の第 2 次で

Fig. 5 Allocation of designated ports by Recycle

指定を受け，東北の日本海側では初めての指定となる(Fig.5)。

2.2 酒田港のリサイクルポートの現状

(1)リサイクル関連貨物の推移

リサイクルポートの指定以降，全体の取扱貨物量が横ばい状況の中で，リサイクル関連貨物は年々増加し，指定前の平成 14 年のリサイクル貨物量 179 千トンに比べ，平成 22 年は 343 千トン，リサイクル関連コンテナ数は 766TEU から 1,529TEU といずれも約 2 倍になっている(Fig.6)。

(2)リサイクル関連企業の立地状況

立地するリサイクル関連企業も，リサイクルポート指定前には，廃自動車，古紙，廃プラスチック，アルミ，石炭灰のリサイクル事業者 7 社であったが，リサイクルポート指定後は12社が新規に立地し，現在19社になっている。

新規に立地した業種は，汚泥総合，木くず・汚染土壌，

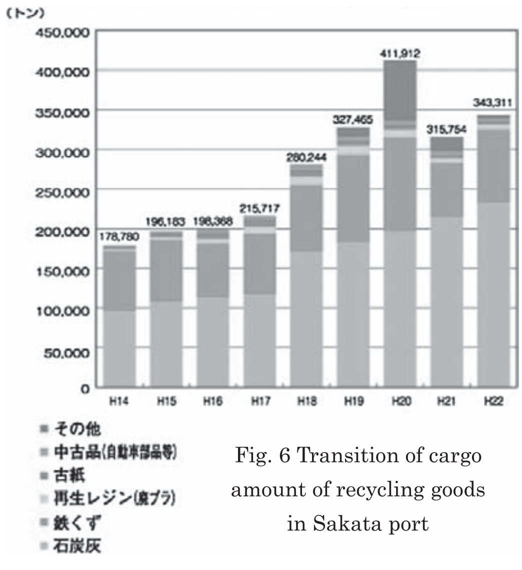


Fig. 6 Transition of cargo amount of recycling goods in Sakata port

遊戯機器，ペットボトル・廃パソコン，廃自動車（専用岸壁），PCB 絶縁油リサイクルなどの他，風力発電事業者が立地している。

また，建設残土や木くずなどの再資源化を目的に，地元企業が中心となった第三セクターの「酒田港リサイクル産業センター」が平成 19 年 4 月から創業している。

さらに，現在，火力発電に使用した石炭灰を利用して再生砕石を製造するリサイクル関連企業（組合形式）が処理施設を建設中で，来年 1 月に操業開始の予定である（Fig.7）。

2.3 酒田港のリサイクルポート推進の取組み

(1)「酒田リサイクルポート推進協議会」の設立

酒田港がリサイクルポートに指定された平成15年に設立された組織で，山形県，酒田市，港湾関係団体，リサイクル関連企業などからなり，酒田臨海工業団地への企業誘致活動，循環資源の利用促進，各種情報交換や情報収集及び広報宣伝活動を行いながら，酒田港のリサイクルポートを推進している。

(2)「庄内リサイクル産業情報センター」の設立

平成 20 年 4 月に 17 企業・団体からなる設立準備会を設置し，平成23年度中にNPO法人形態での設立を予定している。

センターが受持つ機能としては，リサイクル資源の発生・供給・需要情報の発受信，リサイクル企業の販路開拓，営業活動，ビジネスマッチング支援，商取引所の運営，登録事業者によるWeb上取引，品質保証，啓発活動，課題解決のための関係機関への要請などがある。

(3)「リサイクルポートセミナー」の開催

酒田リサイクルポート推進協議会が主体となり，平成 15 年から毎年，企業に対する誘致活動や広報宣伝活動を目的としたセミナーを開催している。これまでに東京都，仙台市，山形市などで開催している。

(4)「姫川港・能代港・酒田港合同リサイクルポート勉強会」の開催

同じリサイクルポートの指定を受けている日本海側の姫川港と能代港のリサイクル関係各機関が，一同に会して情報や意見交換を行う勉強会を平成19年から毎年開催している。

今年も 7 月 29 日に酒田市で開催され，「震災がれきの広域処理」をテーマに連携のあり方などについて意見を交わしている。

3. 東日本大震災の復興支援

山形県では東日本大震災に対して県としての復興支援

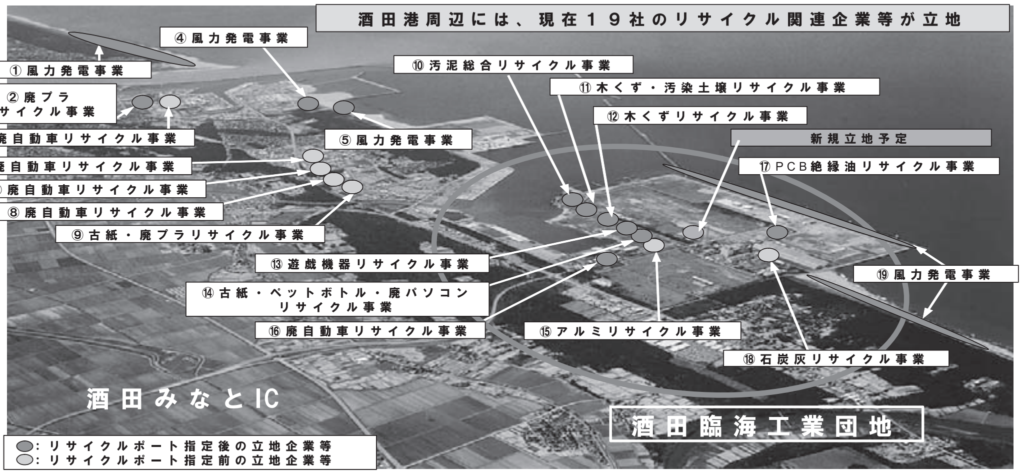


Fig. 7 Businesses related recycling located around Sakata port

を進めるために，平成23年5月9日に県内の総力を挙げた体制として「東日本大震災復興支援山形県会議」を立ち上げた。

その中で，リサイクルポートに指定されている酒田港を活用し，県内リサイクル業者、廃棄物処理業者及び他県のリサイクルポートと連携して被災地の災害廃棄物を処理するスキームが示され，それを基に官民連携による調整が進められ，被災地に対して処理計画が提案されている（Fig.8）。

4．　今後の推進策

4.1　国際循環型社会の形成

対岸地域の経済発展により排出される大量の廃棄物を適正に処理し，リサイクル資源として有効活用を図るべく，国際循環型社会形成のための拠点港の連携が求められている。

これまで培ってきた姫川港や能代港との連携を一層深め，今後は北東アジアの循環型社会の形成へと推進していく。

4.2　環境に優しいエネルギー開発・供給拠点の形成

酒田港では自然エネルギーによる環境に優しいエネルギー開発の取組みが進んでおり，平成元年には波力エネルギーの実証実験が行われ，現在では日本海側の気象特性を活かした風力発電が盛んに行われている。

このような実績から，海洋エネルギー開発に向けた構想が持ち上がってきており，今後はエネルギーの開発・生

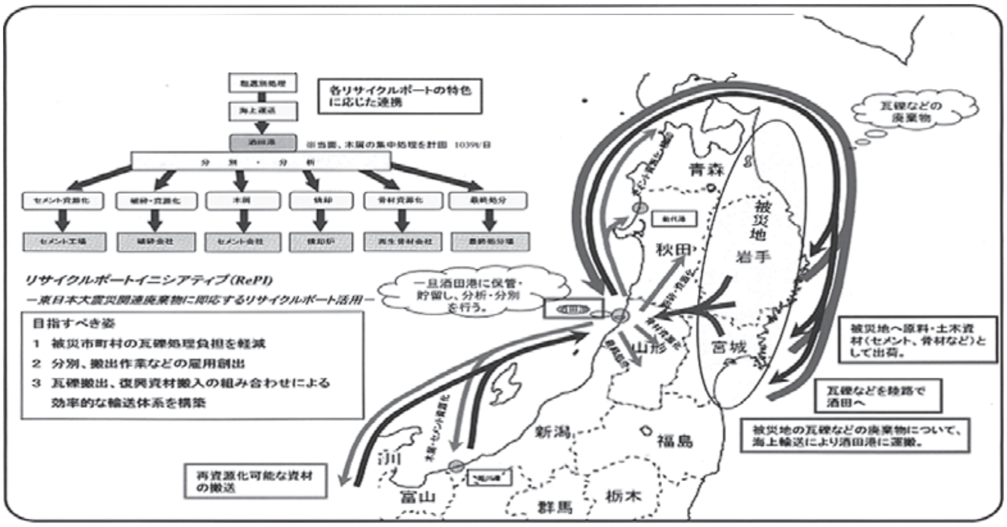


Fig. 8 Debris treatment scheme with wide area
combined port function and marine transport

産だけでなくストックを図り，山形県内や隣県への効果的なエネルギー供給ができるような供給基地の形成に産学官が協力して取組んでいく。

５．　おわりに

東日本大震災以降，震災がれき処理の問題やエネルギー政策の転換が論じられており，リサイクルポートの役割が益々重要になってきていると考える。従って，これまで以上に官民が協力し合って，リサイクルポートの推進並びに循環型社会の形成に取組んでいく。

References

1. Yamagata Prefecture: Port of Sakata 2011(2011)

環境資源工学 58 : 151–156 (2011)

特　別
講　演

鉄鋼スラグの土木工事材料への利用技術について [1]

中川　雅夫 [2*]

Application of Iron & Steel Slag for Civil Engineering

Masao NAKAGAWA[2]

[2]Slag & Cement Division, Nippon Steel Corporation

Abstract

Iron & Steel Slag is the by-product in steel-making process, and generated over 30 million tons in Japan. The slag produced in iron-making is called BF (blast furnace) slag, and the slag produced in steel-making process in converter or electric furnace is called steel slag. In Japan we have tried to use them as the recycling materials for civil engineering materials more than a hundred years ago, and established official technical standards like JIS. But recently, the change of circumstances around slag utilization requires the technical development of new usages for slag.

In this paper, after we introduced the current state of application, the situations in law system and the suitability for environmental quality standards as of iron and steel slag, we would describe the new technology to restore the marine environment for developing the slag market.

Key words: Iron & steel slag, Cement, Marine environment, Soil improvement, Algae beds

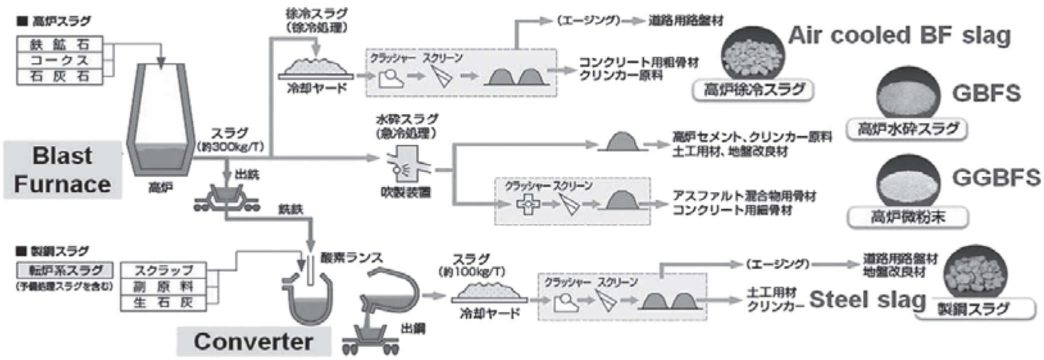


Fig.1 Process flow of iron & steel slag products[1]

1.　はじめに

鉄鋼スラグは，鉄を製造する工程において副次的に生産され，日本全国で約 33 百万トンが生成される産業副産物である。鉄鉱石とコークス，石灰石を溶融して銑鉄を取りだす工程で発生する高炉スラグと，銑鉄や冷鉄源から「鋼」を製造する工程から発生する製鋼スラグを総称して鉄鋼スラグと呼んでいる（Fig. 1 参照）。天然資源に乏しい日本では，古くから，この大量に生成される無機材料を，国土創造のための有用な資源として活用するための技術開発と公的規格化に取り組んできた。

その結果，近年では，生成される鉄鋼スラグのほぼ全量が，セメント，道路路盤材，コンクリート骨材や土工材料として有効利用されるまでに至っている。

しかしながら，昨今の建設需要の低減，競合リサイクル材料の台頭や環境基準の厳格化等の環境変化により，鉄鋼スラグの需給を取り巻く環境は急速に厳しくなっており，新たな大規模用途の開拓への期待も高まっている。

ここでは，鉄鋼スラグの生成・利用の現況と最近の利活用の動向，法的位置づけと環境基準への適合性等を紹介した上で，昨今の鉄鋼スラグを取り巻く課題と新たな市場開拓に向けた取り組みについて紹介する。

1. 平成 23 年 11 月 10 日　本会第 127 回例会において発表
2. 新日本製鐵株式會社

平成 23 年 8 月 23 日受理

*e-mail: nakagawa.masao@nsc.co.jp

２． 鉄鋼スラグの生成・利用の概要

Table 1に2009年度の鉄鋼スラグと生成・利用量を示す。2009年度には高炉・製鋼を合わせて33百万トンの鉄鋼スラグが生成されているが，自家使用分を含めれば，高炉スラグ，製鋼スラグとも生成量と利用量がほぼバランスしていることがわかる[2]。

Table 2に鉄鋼スラグの化学組成の一例を示すが，高炉スラグ，製鋼スラグともに，一般の土石材に比べてCaO分が高いため，水と反応して硬化する性質（水硬性）や溶出水はアルカリ性を呈するという固有の性質を持つ。

特に高炉水砕スラグは溶融状態のスラグを高圧水で急冷して製造することで，ガラス質で強い水硬性があるため，セメント原料として多く利用されている。また，他には，天然骨材代替の細骨材や，固結する性質を活用して液状化対策用の埋立材としても活用されている。

高炉徐冷スラグは溶融状態のスラグを大気中で徐冷後，砕石状に加工され，道路用路盤材やコンクリート粗骨材として利用されている。

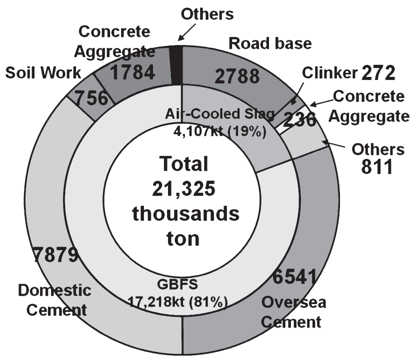


Fig.2 Usage of BF slag

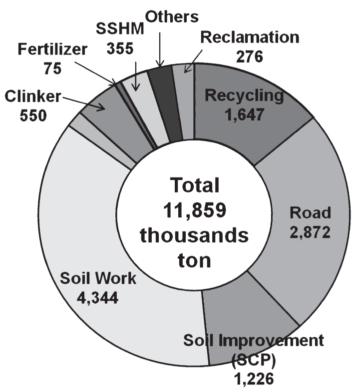


Fig.3 Usage of steel slag

Table 1 Production of iron & steel slag

		Production	Utilization
Iron Production		72,526	–
Crude Steel Production		96,449	–
	Air-Cooled	4,124	4,107
	Glanurated	17,551	17,218
	BF Slag Total	21,675	21,325
	Converter	9,174	9,425
	EAF	2,330	2,158
	Steel Slag Total	11,504	11,583
Total Slag		33,179	32,908

（thousants ton）

Table 2 Chemical components of slag

Chemical Components	BF Slag	Steel Slag (Converter)	Natural Stone (Andesite)
CaO	41.7	45.8	5.8
SiO_2	33.8	11.0	59.6
T-Fe	0.4	17.4	3.1
MgO	7.4	6.5	2.8
Al2O3	13.4	1.9	17.3
S	0.8	0.1	0.0
P2O5	0.1	1.7	0.0
MnO	0.3	5.3	0.2

（weight %）

一方，製鋼スラグは鉄分を多く含むことや遊離石灰(f−CaO)分を含むため，セメント用には不適で用途開発が遅れていたが，道路用JIS取得や，地盤改良材，土工事用材料，肥料としての規格化を行ってきた結果，現在では90%以上の有効利用が進んできている。Fig.2，Fig.3に高炉スラグ，製鋼スラグの用途別利用状況を示す[1]。

３． 鉄鋼スラグの法的位置づけと環境基準への適合性

3.1 鉄鋼スラグの法的位置づけ

Fig.4に循環型社会形成のための法体系を示す[2]。

「循環型社会形成推進基本法」は，増大する廃棄物の発生を抑制し，環境負荷の小さい循環型社会の形成を推進するための基本フレーム法であり，「廃棄物等」の概念を導入した上で、処理の優先順位や国・自治体や事業者の責務を定めている。

「資源有効利用促進法」においては，特定省資源業種として，製鉄業及び製鋼・圧延業が指定されており，当該業種に属する製鉄事業者は，製造法等の合理化によって，副産物である鉄鋼スラグの発生抑制と資源として

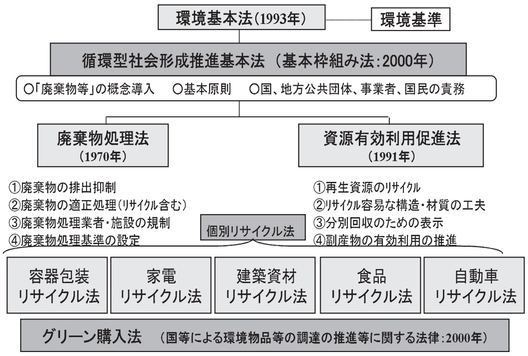


Fig.4 Law system to establish the recycling –based society

の有効利用の促進に取り組むことが同法および関連省令（経済産業省令第55号）の中で義務付けられている。

一方，「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下，廃棄物処理法)」は，廃棄物の排出抑制と廃棄物の適正処理を定めた規制法である。同法では，廃棄物とは，「ごみ，粗大ごみ，燃え殻，汚泥，ふん尿，廃油，廃酸，廃アルカリ，動物の死体その他の汚物又は不要物であって，固形状又は液状のもの（放射性物質及びこれによって汚染された物を除く。）をいう。」と定義されており，同法および政令で定める指定産業廃棄物の中に「鉱さい」が含まれている。そこで，鉄鋼スラグは同法および政令で定める「鉱さい」にあたり産業廃棄物に該当するのかという疑念が生じる。現在では，廃棄物か否かの判断は, 2005年8月12日付で環境省廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長「行政処分の指針について（通知)」によって、物の性状，排出の状況，通常の取り扱い形態（市場性），取引価値の有無，占有者の意思の5要件に基づいて検討し，総合的に判断して不要物となった場合は廃棄物として扱うこととなっている。したがって，セメントや道路用路盤材等の有用物として利用される鉄鋼スラグ製品は廃棄物には該当しないが，環境基準を満たさず，市場性のない鉄鋼スラグは廃棄物という判断になる。

「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律（グリーン購入法)」は、国や自治体等にリサイクル製品等の調達を推進させるために制定された。鉄鋼スラグ製品は，2010年度までに9製品が，省エネルギー効果やCO_2排出削減効果が高い製品として認定される「特定調達品目」(Table 3 参照)に指定されており、その活用が奨励されている。

Table 3　Green purchasing products

特定調達品	規格等
1.高炉セメント	JIS R 5211
2.高炉スラグ骨材	JIS A 5011-2
3.鉄鋼スラグ混入路盤材	JIS A 5015
4.鉄鋼スラグ混入アスファルト混合物	JIS A 5015
5.鉄鋼スラグを原料としたロックウール	(鉄鋼スラグ85%以上使用)
6.土工用水砕スラグ	水砕スラグ技術マニュアル (沿岸C)
7.地盤改良用製鋼スラグ	港湾工事用製鋼スラグ利用手引書 (沿岸C)
8.コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材	JIS A 5011-4
9.鉄鋼スラグ水和固化体ブロック	鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル (沿岸C)

3.2　鉄鋼スラグの環境基準への適合性

環境基本法の中で，人の健康の保護及び生活環境の保全の上で，維持されることが望ましい基準として定められたのが環境基準であり，行政上の政策目標として設定されている基準である。環境基準には，大気汚染に係る環境基準，騒音に係る環境基準，水質汚濁に係る環境基準，土壌の汚染に係る環境基準，ダイオキシン類による汚染に係る環境基準が定められている。

その他，水質汚濁の防止や海洋汚染の防止を目的とする規制法としては，「水質汚濁防止法(水濁法)」や「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律 (海防法)」が規定されており，それぞれ罰則を伴って遵守すべき水質保全に係る基準等が規定されている。鉄鋼スラグ製品を利用して建設工事等を行う場合には，種々の用途において，それぞれ要求される環境基準に適合するような製品を供給して，環境トラブルを生じさせることのないように留意しなければならない。

Table 4に転炉系製鋼スラグの土壌環境基準(環境省告示46号法)への適合性を試験した結果の一例を示す。製品として流通している鉄鋼スラグ製品は，一般的に土壌環境基準を満たすが，利用にあたっては出荷するメーカーに品質基準を確認することが望ましい。

Table 5に各種鉄鋼スラグの溶出水のpH試験結果例を示すが，水砕スラグ，徐冷スラグ，製鋼スラグの順番で高いpH値を示す。コンクリート用，アスファルト骨材やアスファルト舗装下の路盤材の場合には，溶出水が外部に浸出しないため問題がないが，無被覆の道路や置き場の整地材等の陸上土工事用材料に適用する場合には，鉄鋼スラグからの高pH水の溶出によって周辺水域(河川，水路，地下水等)への影響を及ぼさないような対策を講じることが必要となる。

Table 4 Environmental quality standards for soil pollution

	Elution（mg/L）		Content（mg/kg）	
	measured	Criteria	measured	Criteria
Cd	＜0.001	＜0.01	＜0.03	＜150
Pb	＜0.005	＜0.01	1.0	＜150
Cr(VI)	＜0.04	＜0.05	＜0.7	＜250
As	＜0.005	＜0.01	＜0.1	＜150
Hg	＜0.0005	＜0.0005	＜0.1	＜15
Se	＜0.002	＜0.01	＜0.2	＜150
F	0.2	＜0.8	300	＜4000
B	0.2	＜1	83	＜4000

Table 5 pH elution from slag products

pH	Steel Slag	Air-cooled BF Slag	Granulated BF Slag	Cement Concrete
Pure Water	12.4	10.4	9.4	10.6
Seawater	10.7	8.8	8.3	8.9

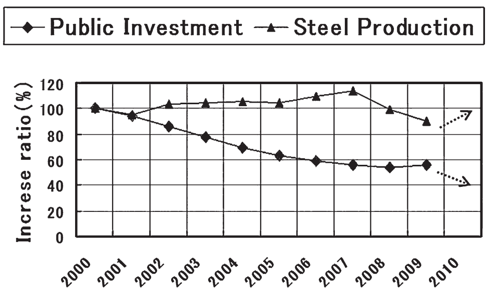


Fig5 Demand and supply of steel slag

4. 鉄鋼スラグを取り巻く環境変化と課題

Fig.5は，日本の建設公共投資額と粗鋼生産量の推移を示しているが，過去 10 年間，アジアでの新興国需要の獲得等により，粗鋼生産量は漸増しているが，国内の建設公共投資は半減しており，建設需要が大部分を占める鉄鋼スラグ製品の国内需給ギャップは広がりつつある。高炉スラグについては，海外のセメント需要の増大に呼応して輸出を拡大することで対応しているが，輸出需要の乏しい製鋼スラグの需給バランスを均衡させていくためには，製鉄所内でのリサイクル促進によるスラグ発生量低減と，新たな技術開発による新規の大規模需要の開拓を図っていく必要がある。

5. 鉄鋼スラグの新たな市場開拓に向けた技術開発

5.1 鉄鋼スラグを活用した海域環境修復技術

近年，我が国の沿岸海域においては，海水中の窒素やリン，シリカ，鉄といった栄養塩が不足し，磯焼け現象（大型海藻群落の衰退）を引き起こす「貧栄養化」と，閉鎖性海域の窒素・リンが過多となり赤潮を発生させたり，堆積硫化物による貧酸素水塊の形成に起因する青潮を発生させたりする「富栄養化」が問題となっている。

Fig.6に，これらの対策技術として，製鋼スラグ製品を用いた海域環境修復技術の概要を示す[3]。

まず第一に，製鋼スラグには海藻生育に必要な鉄分等のミネラル分を含むため，アルカリ溶出を抑制する加工を行うことで，貧栄養化した沿岸域の藻場造成をおこなうための基質材や海藻用肥料として活用することが可能である。そこで，鉄鋼スラグを藻礁・漁礁材として活用するための「鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材・ブロック」と，鉄分を肥料成分として海域に供給する「鉄分供給ユニット」を新規開発した[3]。

第二には、製鋼スラグはカルシア(CaO)を多く含むことから，閉鎖性水域で富栄養化の原因となるリンをアパタ

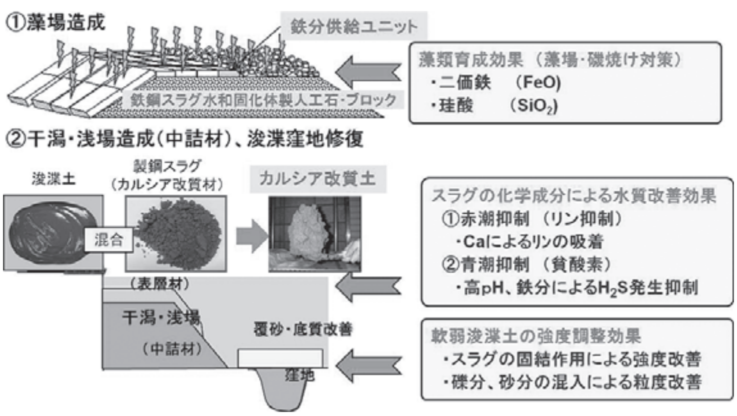


Fig6 Technology for restoring marine environment

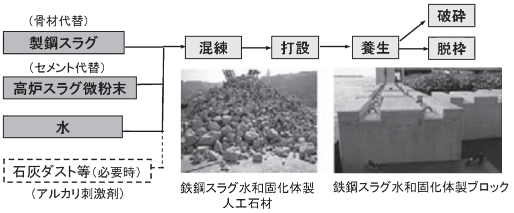


Fig7 Steel slag hydrated matrix (SSHM)

イト化して固定する効果や，アルカリ性でかつ鉄分を含むことから，浚渫窪地や海底底質に沈降した硫化物が硫化水素に還元されることを抑制する効果，すなわち富栄養化物質の発生を抑制し，底質を浄化する効果を有する。更には，港湾の浚渫工事から発生する軟弱な浚渫土は，一般に軟弱で利用が困難であるが，これに製鋼スラグを原料とする改質材と混合して「カルシア改質土」として利用することで浚渫土の強度が改善され，工事段階の濁りを抑制して，干潟・浅場造成材や浚渫窪地の埋戻し材として活用する技術開発に取り組んでいる[3]。以下に，これらの内容について，詳述する。

5.2　鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材・ブロック

鉄鋼スラグ水和固化体は，砂利，砂等の天然骨材を全く使用しない，環境負荷が少ないセメントコンクリート代替のリサイクル材料である。コンクリートの骨材の代替に製鋼スラグを，セメントの代替に高炉スラグ微粉末を利用し，必要に応じて硬化を促進させるアルカリ刺激材を添加して，水と混練して成型することにより，石材状やブロック状の自由な形状の製品を製造することが可能である（Fig.7　参照）。

鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材・ブロックは，港湾工事用の石材・ブロック代替材や，水産基盤整備用の漁場造成用資器材への適用が可能で，非液状化埋立材料（羽田空港再拡張プロジェクトに約100万t適用）や漁場造成用の藻礁石材（東京湾保田漁港藻礁石材工事に約2万t適用）等に活用されている。

なお鉄鋼スラグ水和固化体については，製造・利用技術の規格化，マニュアル化が図られている[4,5]。

5.3　鉄分供給ユニット（「ビバリー®ユニット」）

鉄分供給ユニット（ビバリー®ユニット）は，森の栄養分が川を通じて海に供給され，海藻に吸収されるという自然現象を人工的に生じさせ，貧栄養のため磯焼けした海域の藻場を修復する目的で開発された。

鉄分供給ユニットは，製鋼スラグと廃木材チップを発酵させた人工腐植土を混合したもので，製鋼スラグに含まれる鉄イオンを人工腐植土中に生成される腐植酸（フルボ等）で錯体化し，安定的に腐植酸鉄（鉄イオン）を海藻に供給するための「海藻用肥料」である。

Fig8 Ferrous supply unit

鉄分イオン供給ユニットの藻場造成への有用性について，2004年11月より北海道増毛町舎熊海岸にて実施した実海域実験の事例をFig.8　に示すが，ユニット埋設後8ヶ月後には，磯焼け海域にホソメコンブが再生され，対策の有用性が確認された[6-8]。

その後，鉄イオンの海藻生育に対する有用性が培養実験と水槽実験で確認されたことや，全国の異なる海域での海藻生育効果が確認されたことにより，(一社）全国水産技術者協会の「漁場造成・再生用資器材の技術認定登録」を受けるとともに全国漁業協同組合連合会の「鉄鋼スラグ製品安全確認認証」も受領している。

5.4　カルシア系改質材による浚渫土改質技術

カルシア改質土は，軟弱な浚渫土にカルシア系改質材（転炉系製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施した材料）を混合することで，浚渫土の物理的，化学的性状を改善した材料であり，干潟・浅場造成材や深掘り窪地の埋戻材等の海域環境修復や港湾工事等への用材として活用可能な材料である。

カルシア改質土の特長をFig.9に示す。第一に，カルシア改質材のCaと浚渫土中のSi, Al等が反応して軟弱な浚渫土の強度を上昇させるため，浅場等の法面を造成することが可能になる。第二に，混合によりカルシア改質材が透水性の低い浚渫土に覆われるため高pH水の溶出が抑制される。更に，第三にカルシア系改質材のCaやFeにより，浚渫土に含有されたリン酸や溶存硫化物等の富栄養化物質の発生が抑制され浚渫土の浄化作用がある。

カルシア改質土を適用した浅場造成や窪地修復の実海域実験が大阪湾，三河湾，東京湾，瀬戸内海等で実行されており，その効果が実証されつつある[9]。三大湾や瀬戸内海では，港湾の大水深化が推進されつつあり，航路浚渫による多量の浚渫土の活用技術が求められている。カルシア改質土の今後の適用拡大が大いに期待される。

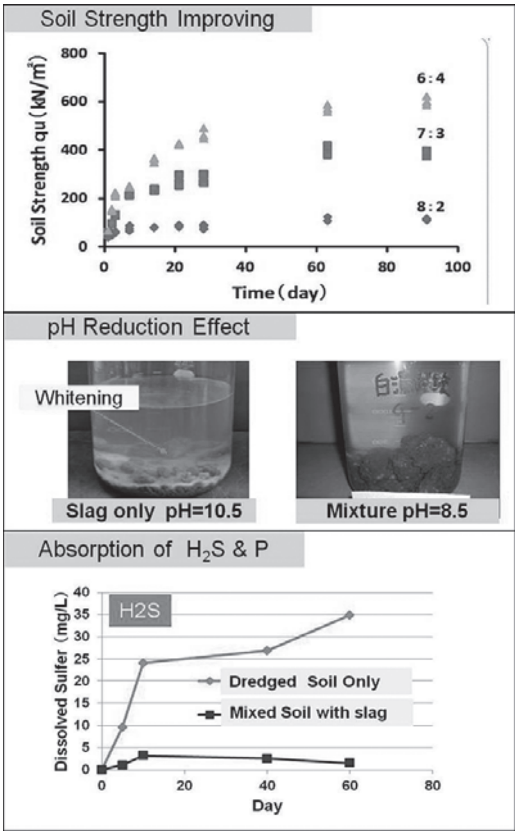


Fig.9　Characteristics of “CaO improved soil”

６．　おわりに

以上, 鉄鋼スラグの土木工事材料への活用状況と, 法的位置づけや環境基準への適合性, 新たな市場開拓のための新技術開発の状況と今後の展望等について述べた。今後とも, 環境との調和を図り, 利害関係者のご理解を得ながら, 真の循環型社会創出に貢献可能な, 鉄鋼スラグ製品の有効利用促進に取り組んでいきたい。

References

1. Nippon Slag Association Home Page (http://www.slg.jp/)
2. Ministry of Environment Home Page (http://www.env.go.jp/recycle/circul/pamph/index.html)
3. M. Nakagawa, et al.: HEDORO, **108**, pp.37-46 (2010)
4. Tekkou Suragu Suiwakokatai Gijutsu Manual, Engan Gijutsu Library **No.28** (2008)
5. Kouwan Kanren Minkan Gijutsu no Kakuninn Shinsa Houkokusho, **07001** (2007)
6. E. Kiso, et al.:20th Ocean Engineering Symposium of JFOES & JASNAOE (2008)
7. N. Tsutsumi, et al.:20th Ocean Engineering Symposium of JFOES & JASNAOE (2008)
8. T. Kato et al.:20th Ocean Engineering Symposium of JFOES & JASNAOE (2008)
9. H. Taguchi, T. Nagatome, et al.: 7th Jiban Kougakkai Kantou-Sibu Happyoukai (2010)

環境資源工学 58 : 157–160 (2011)

特別講演

遊佐風力発電所について [1]

鈴木　和夫 [2*]

YUZAS Wind Power Station

Kazuo SUZUKI[2]

[2]Hitachi Engineering & Services Co.,Ltd.

Abstract

To cause a voltage fluctuation and a frequency fluctuation by the output fluctuation of the wind power generator has been pointed out from the power company from before.

Each power company provides the limitation for the capacity of the wind power generator which it is possible to connect to the each electric power network.

At this article, it reports the technical development which eases the output fluctuation of the wind power station and on the measured data in Yuza wind power station (Yamagata Prefecture Akumi District Yuza-Town) which is a world's first output fluctuation relaxation type wind power plant.

As the conclusion, it is the prospect which is recognized as the output fluctuation relaxation type wind power station for the short period fluctuation absorption of which is possible.

Key words: Smoothing of Power Fluctuation, Wind Power Generator, Battery System

1．　緒　　言

国内の風力発電設備導入量，2010年度末で，約244万kWで，設備容量で1.2%程度，発電電力量で0.5%未満に止まっており，世界的に見て，ほとんど導入が進んでいないのが実態である[1]。

この理由として，①発電コストと買取価格がほぼ同一で，事業採算性から見て積極投融資対象にならない点，②電力各社毎に風力の出力変動を吸収し，周波数を維持しなければならないため，風力発電の連系容量を一定量以下に制限している点，③騒音問題，低周波騒音問題に関して，騒音規制値の見直しが遅れていたため，サイト周辺以外でも一部風評被害も含めたアレルギーを生んでいる点が考えられる。

この中でも，①と③については，再生可能エネルギー全量買取法案成立，環境影響調査法の一部改正により対応が図られつつあるが（個々の改正に問題点はあるが），②の系統連系課題には、現在でも電力会社が自主的に連系量を規制するしかない状態のままである。

特に、東北電力管内では，日本海側に好風況地点が多いため，自社規制値の約90万kWを超える連系申し込みがあり，平成18年以降は、蓄電池併設による出力一定制御型と出力変動緩和制御型の抽選募集枠を設けている。

本稿では，上記出力変動緩和制御型募集枠に最初に当選し，現在実証運転中である遊佐風力発電所と出力変動緩和技術について紹介する。

2．　東北電力の系統連系技術要件

蓄電池併設型風力発電の技術要件は，平成18年に東北電力株式会社が公表した周波数変動対策に関する技術要件がある[2]。この技術要件には，Fig.1に示すような出力一定制御型とFig.2に示すような出力変動緩和制御型の2種類がある。

一定出力型は，発電計画に基づいた出力と風力発電（1分平均値）の偏差を2%以内にするものである。この一定出力型の発電所は，青森県六ヶ所村に建設され，発電所出力40MW(現在51MW)，風力発電機1.5MW×34基

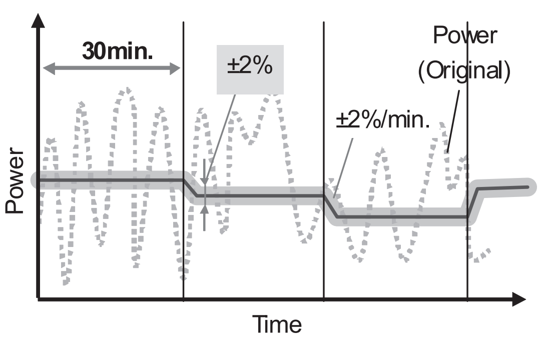


Fig.1 Constant output control type

1. 平成23年11月10日　本会第127回例会において発表
2. ㈱日立エンジニアリング･アンド･サービス
平成23年9月5日受理

*e-mail: kazuo.suzuki.eq@hitachi-hes.com

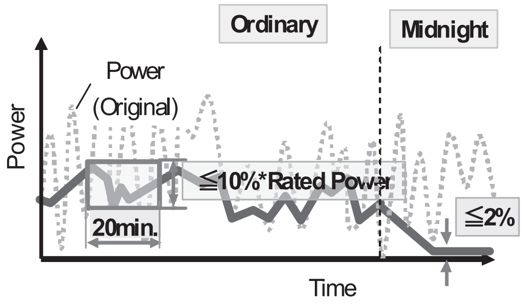


Fig.2 Output fluctuation relief control type

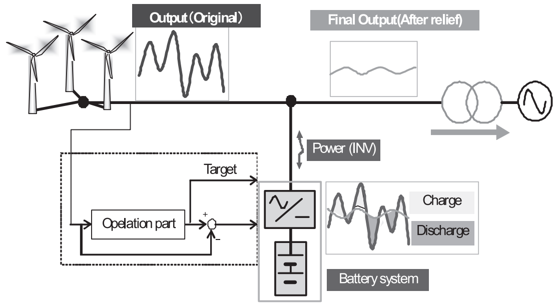


Fig. 4 Outline of output fluctuation relief control system

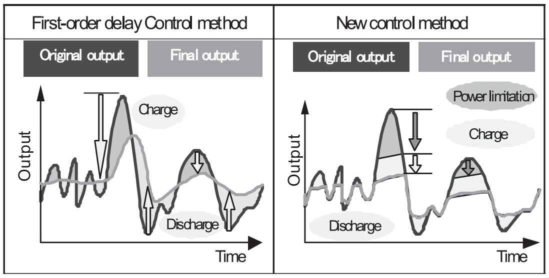


Fig. 5 Comparison of the control method

合計 51MW, NAS 電池 2MW×17 基　合計 34MW で構成され，二又風力開発株式会社が事業運営している[3]。

次に，出力変動緩和制御型は，任意の時刻から 20 分間において，周波数変動対策後の風力発電設備合成出力（1 分間平均値）の［最大値－最小値］を，風力発電設備定格出力の 10%以下にする必要がある(Fig.2)。

当社では、この出力変動緩和制御型風力発電システムを開発し､青森県五所川原市と山形県遊佐町に建設した。

本稿では、この遊佐風力発電所を紹介する。

３．　出力変動緩和型風力発電システムについて

3.1　風力発電所の出力変動

風力発電所の出力変動実測データについて Fig.3 に示す。この風力発電所は 20MW 規模のウィンドファームであるが，本図に示すように出力は数時間の内にゼロ～定格出力まで変化している。この変動を技術要件で定められた 20 分間の変動率で表すと，右軸のように最大で 80%程度変動していることがわかる。この変動を蓄電池で緩和する場合には，許容変動率が 10%であるため，その差分の 70%蓄電池システムが必要になる。

3.2　出力変動緩和制御概要

出力変動緩和制御概要について Fig.4 に示す。風力発電出力から合成出力目標値を算出し、この目標値になるように蓄電池システムの充放電制御により変動緩和を行うものである。

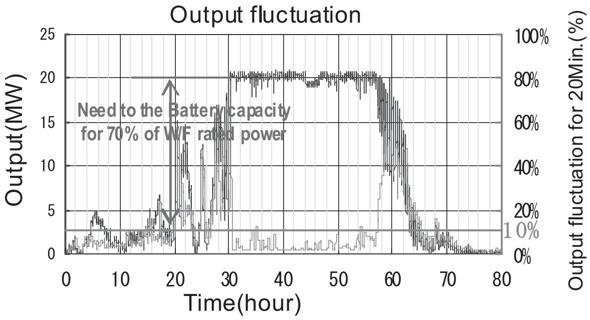


Fig.3 Power fluctuation of wind turbine

Fig. 5 に変動緩和制御方法の比較を示す。

Fig. 5 の左図に示すように，蓄電池の充放電のみで総合出力目標値になるように制御した場合には，差分を補償するため，前項で示したように大容量の蓄電池システムが必要になる。

今回開発した制御方式は, Fig. 5 右図に示すように，風力発電の出力制限機能を使用し，上昇側の出力変動を蓄電池システムが充電可能な変動量に抑制するものである。また，上昇側の出力変化を遅くすることで下降側の変化幅の低減効果もあり変動緩和効果が向上する。

蓄電池の容量は本制御方式により低減され，且つ充放電量の低減により蓄電池寿命の延命も可能になる。

４．　遊佐風力発電所の概要

4.1　遊佐風力発電所

遊佐風力発電所は，国内初の出力変動緩和制御型風力発電所として，山形県飽海郡遊佐町の海岸線に建設したもので，総出力 14,560kW，風力発電機 7 基と蓄電池設備建屋及び変電設備で構成されている(Fig. 6, Fig. 7)。

各設備仕様を Table 1 に示す。蓄電池には，1500Ah/セルの鉛電池が 3,456 個(Fig. 8)使用されている。

この鉛電池は，4500 サイクル（放電深度 70%）または 17 年間の期待寿命を有し，充放電頻度を少なくできる制御システムと組合せて，事業期間である 17 年間を

Fig. 6 Yuza wind power station

Fig. 7 Building of battery system and substation

Table 1 Specification of Yuza wind power station

Rated power	14,560kW
Wind turbine	ENERCON E82 2,080kW-7 units
Battery System	Battery：LL1500-W-3,456 units （288 series-2 pararel-6 set） Lifetime(expectation)： 4500 Cycles or 17years } 20% Discharge：3,700kW(24%) Charge ：2,600kW(17%) Inverter ：750kVA-6 units

Fig. 8 Lead battery LL1500-W-3,456 units

交換せずに使用予定である。運転開始後約 0.75 年経過したが，充放電電流量は許容値の約 80%になっており，17 年間使用できる見込みが得られている。

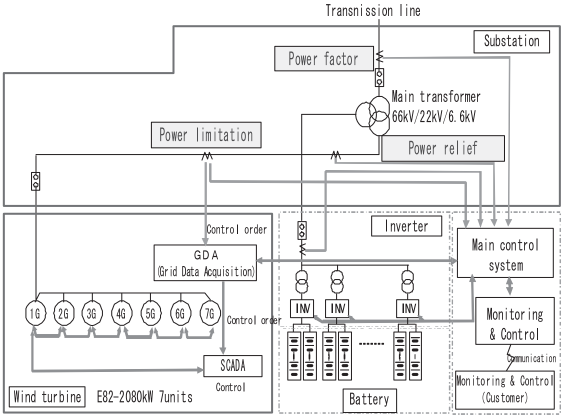


Fig. 9 System configuration

4.2 システム構成

Fig. 9 は，この全体システム構成図を示す。風力発電設備の出力制御する GDA(Grid Data Acquisition)システムと，蓄電池および交直変換器であるインバータから構成される蓄電池システムと，全体を制御するウィンドファームコントローラ及び監視制御装置から構成され，外部変電設備および遮断器が併設している。

4.3 出力変動緩和制御データ

変動緩和実測データを Fig. 10 に示す。本データは，風力発電機出力と，合成出力であるシステム出力を時系列で示したもので，蓄電池システムの充放電状況および最下部に 20 分間の出力変動率を示している。

通常は，20 分間の出力変動率が 10%以下になるように蓄電池の充放電を制御しているが，横軸（時間）の中ほどから急激に風速が上昇した時は，蓄電池の充電レベルが満充電に近づくため，風車単体での出力制限を階段状に制御し，変動抑制を行っている。また，図中の推定風車出力（出力制限無し）は，風速から逆算して推定したもので，出力制限しない場合の推定波形である。

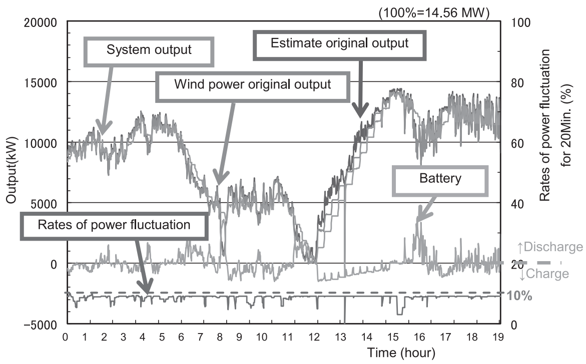


Fig. 10 Measuring data of power relief

本図最下部の 20 分間の出力変動率データからわかる様に，変動率は, 10%を超えないように，且つ 10%付近にとどまる様に制御することで蓄電池の充放電を出来るだけ少なく抑えていることがわかる。

また，現在計測中であるが，風力発電機の出力制限機能を使用せずに蓄電池システムだけで変動緩和を行うと，現在の蓄電池容量の約 3 倍の容量が必要になり，風力発電所の建設コストは約 2 倍近くになり，それに応じて発電コストも約 2 倍近くになるため，発電所建設を実現することは困難になると考えられる。

5．結　　言

本稿では，当社で開発した世界初の出力変動緩和制御型風力発電所である遊佐風力発電所の運転状況を示した。

本発電所と同時期に東北電力が募集する出力変動緩和枠抽選会で合格した青森県五所川原市に建設した市浦風力発電所においては，すでに1年半の実証試験が進んでおり，本稿以上の実証データを取得し，今年末には，変動緩和制御仕様を概ね満足できる見通しにある。

本稿の遊佐風力発電所は，現在も実証データ取得中であるが，今後1年程度の実証確認運転を行い，東北電力殿とのデータ確認により，出力変動緩和制御の実証を行う予定である。

風力発電の変動出力は，以前より電力系統に直接変動電力を供給するため，電圧変動，周波数変動の要因となるため，その電力品質改善が必要であった。

特に，20 分以内の短周期変動，それ以上の時間周期の長周期変動の技術開発が急務であったが，本稿紹介の風力発電所は，蓄電池システムおよび風力発電機の出力制限機能を有効に活用制御することで，経済性低下を最小限に抑え，短周期変動抑制を可能とする技術と言える。

今後，実証運転を継続し，合わせて長周期変動予測と対応策について検討を進めたい。

References

1. JWPA report(http://jwpa.jp/pdf/NEWS_20110816.pdf)
2. Tohoku E.P.C;The technology requirement for the frequency fluctuation measure (Feb.2006)
3. M.Bando; JWEA report(Apr.2010)

環境資源工学 58 : 161–164 (2011)

特別講演

窒素栄養欠乏下におけるオイル産生藻のメタボローム解析 [1]

伊藤　卓朗 [2*]，田中　美穂 [2]，新川　はるか [2]，阿野　嘉孝 [3]，
藏野　憲秀 [3]，曽我　朋義 [2]，冨田　勝 [2]

Metabolome Analysis Under Nitrogen-deficient Condition in Oil-rich Microalga

Takuro ITO[2], Miho TANAKA[2], Haruka SHINKAWA[2], Yoshitaka ANO[3],
Norihide KURANO[3], Tomoyoshi SOGA[2] and Masaru TOMITA[2]

[2]Institute for Advanced Biosciences, Keio University
[3]Research Laboratories, DENSO CORPORATION

Abstract

Neutral lipids or hydrocarbons derived from oil-rich microalgae have promising potential for a next-generation biofuel. However, reduction of the production cost is necessary for their commercialization. Understanding the metabolic change under oil accumulating conditions in microalgae is a first step to develop the more highly oil-accumulating algal strains using metabolic engineering techniques. "*Pseudochoricystis ellipsoidea*", a unicellular green alga, accumulates a large amount of oil under nitrogen-deficient conditions. In this study, "*P. ellipsoidea*" was grown in flat flasks under continuous illumination and aeration with 1% CO_2 at 25°C. Metabolome profiles were obtained from "*P. ellipsoidea*" under both nitrogen-rich (rapid growth) and nitrogen-deficient (oil accumulating) conditions using capillary electrophoresis mass spectrometry and liquid chromatography mass spectrometry. Relative quantities of 329 metabolites including central metabolites, free fatty acids, neutral lipids, phospholipids and glycolipids are systematically compared between these two conditions. As a result, the quantities of more than 170 metabolites were found to significantly differ by the Mann–Whitney *U*-test. We found that some of decreased metabolites are involved in nitric acid metabolism, which is closely related to *de novo* synthesis of amino acids. In lipid metabolisms, the quantities of neutral lipids were greatly increased in nitrogen-deficient conditions; however, those of nearly all the other lipids were either decreased or only slightly altered.

Key words: Oil accumulation, Central metabolism, Glycerolipids, Mass spectrometry

1．緒　　言

一般に藻類と言うと，コンブやワカメなど食用に利用されている大型藻類がよく知られているが，藻類の大部分は，観察に顕微鏡を必要とする，大きさが 100 µm 以下の微小な単細胞生物であり，微細藻類と呼ばれる。微細藻類の多くは，無機栄養素（窒素やリン，カリウムなどを含む化合物）の存在下で光を受けて光合成することにより二酸化炭素を固定して生育する独立栄養生物である。これらの中でも，オイル産生藻は，栄養素や生育環境（光強度や温度など）が最適条件から大きく変化すると，オイル（中性脂質や炭化水素など）を蓄積することが知られている [1]。特に窒素栄養欠乏下においては，素早くオイルを蓄積する [2]。

世界中から様々なオイルを蓄積する藻類が報告されているが，"*Pseudochoricystis ellipsoidea*"は日本で発見されたオイル産生藻である [3]。独立栄養条件での倍加時間が 8 時間と増殖能力に優れ，窒素栄養欠乏下で細胞内に大きな油滴を形成する(Fig. 1)。さらに，炭素鎖長が軽油相

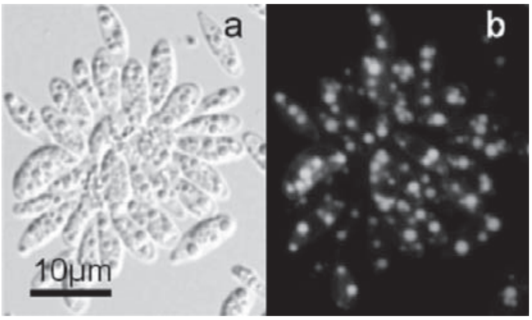


Fig. 1 Oil droplets of "*P. ellipsoidea*"
under nitrogen-deficient condition
a: Differential interference image
b: Fluorescent image of oil droplets by nile red stain

1.平成 23 年 11 月 10 日　本会第 127 回例会において発表
2.慶應義塾大学先端生命科学研究所
3.株式会社デンソー基礎研究所
平成 23 年 8 月 23 日受理
*e-mail: takuro@ttck.keio.ac.jp

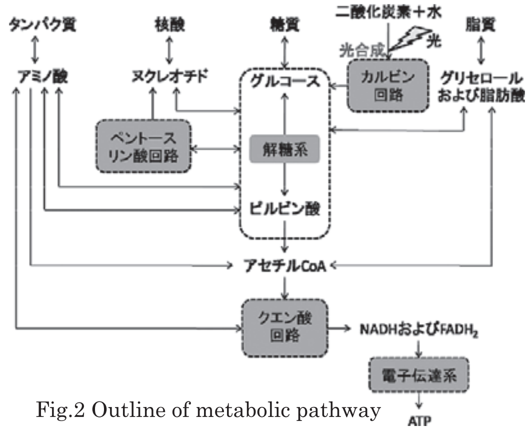


Fig.2 Outline of metabolic pathway

当の脂質を多く含むため，バイオディーゼル原料としての実用化が期待されている[3]。

光合成で増殖する微細藻が蓄積するオイルは大気中の二酸化炭素に由来するため，このオイルを燃焼させても大気中の二酸化炭素濃度は上昇しないと見なされる。そのため，この利用を促進する事で，人類が直面する「二酸化炭素濃度上昇」と「石油枯渇」という 2 つの大きな問題を同時に解決できる可能性がある。しかし，その実用化には，培養効率の向上や生産システムの低エネルギー化などによるコスト削減が必要とされる。

コスト削減に資する生物学的アプローチとして，代謝改変による高オイル産生藻の作出があげられる[4]。これまでの代謝研究は，細胞中の存在量が多い物質における *de novo* 合成など，細分化された代謝経路に関する知見が大部分を占めた[1-4]。また，温度や pH，栄養欠乏，薬剤添加などの環境変化に対する微細藻の応答については，生存率や増殖率，一部の代謝物質量の変化といったわずかな情報から細胞の状態を推測しなければならなかった。しかし，炭素固定を行う光合成から貯蔵物質であるオイル（脂質）の蓄積までの広範囲な代謝をオイル生産に最適化するためには，細胞全体を俯瞰した代謝の流れ(Fig.2)を明らかにする必要がある。

物質を一斉に解析する手法としては，以前から高速液体クロマトグラフィー－質量分析計(LC-MS)や，ガスクロマトグラフィー－MS などを利用する方法があった。しかし，これらの測定法では生体内の一次代謝物質に多いイオン性物質を測定することが困難であった。近年，慶應義塾大学先端生命科学研究所において開発されたキャピラリー電気泳動－MS(CE-MS)を用いたメタボローム（代謝物質網羅的）解析技術により，多くの一次代謝物質を含む数千の代謝物質を定量的に一斉分析する事が可能となり[5,6]，代謝を俯瞰的に解析する道が開けた。

本研究では，オイル産生に関わる代謝解明への第一歩として，“*P. ellipsoidea*”の富栄養下と窒素栄養欠乏下における

Fig.3 Analytical systems (CE- and LC-MS) for metabolomics

るオイル産生藻の一次代謝物質とグリセロ脂質の量的変化を, CE-MS と LC-MS を組み合わせたメタボローム解析により比較した(Fig.3)。

2． 実験方法

本研究には，オイル産生微細藻“*P. ellipsoidea*” MBIC 11204 を用いた。培養には扁平フラスコを使用し，無機培地 A5[6]，または, A5-N（$NaNO_3$ を除いた A5）500 ml に細胞を加え，25ºC に保ちながら蛍光灯を連続照射(180 μmol m^{-2} s^{-1})し培養した。培養液中には，二酸化炭素を 1%添加した大気を 300 ml/min で通気した。また，スターラーを用いて細胞の沈殿を抑制した。細胞は A5 を用いて上記の条件で前培養され, A5 に継代して対数増殖中期に達したところと，それを A5-N に継代して 3 日目にそれぞれサンプリングされた。これらの培養は, 5 反復行われた。

遠心分離された約 1×10^8 細胞に直径 0.5 mm のジルコニアビーズとメタノールを加えて, Micro Smash（トミー精工）を用いて細胞壁を破砕した。これに，等量のクロロホルムと 0.4 倍量の超純水を加え，液－液分配により代謝物質を抽出した。水層は限外濾過後に乾燥し，超純水に再溶解して CE-MS による一次物質の解析に，クロロホルム層はそのまま LC-MS によるグリセロ脂質の解析に用いられた。予め，メタノールには CE-MS 用内部標準物質として、それぞれ 20 μM の Methionine sulfone（和光純薬）と 2-(N-morpho-lino) ethanesulfonic acid（同仁化学）, D-camphor-10-sulfonic acid（和光純薬）を，クロロホルムには LC-MS 用内部標準物質として 10 μM の 1,2-dihexanoyl(d22)-*sn*-glycero-3-phosphocholine と 1,2-dimyristoyl(d54)-*sn*-glycero-3-phosphocholine （いずれも Avanti Polar Lipids Inc.）を加えた。データ解析には, MasterHands 2[7] を用いた。また，細胞懸濁液中に含まれるゲノム DNA 量を定量し，サンプル間の細胞数補正に

用いた。

３．　実験結果および考察

本研究においては，CE-MSとLC-MSによるメタボローム解析により“*P. ellipsoidea*”から329物質を検出し，富栄養下と窒素栄養欠乏下での細胞あたりの代謝物質量を比較した。その結果, 140物質は窒素栄養欠乏下で優位に減少し, 36物質は優位に増加した。また, 72物質は，いずれかの条件でしか検出されなかった。

脂質量の変化を脂質クラスごとにまとめて比較すると，窒素栄養欠乏下においてバイオディーゼル原料となる中性脂質（TAGs:トリアシルグリセロールとDAGs:ジアシルグリセロール）が想定通り優位に増加した(Fig.4)。一方で，色素(Pigments)と遊離脂肪酸(FAs), PCsを除くリン脂質（PEsとPGs, PSs），糖脂質（MGDGsとDGDGs, SQDGs）はいずれも優位に減少した(Fig.4)。このことから，窒素栄養欠乏下では，リン脂質を主成分とする細胞膜や細胞小器官膜，糖脂質を主成分とする葉緑体膜などが縮小していると考えられる。

一次代謝物質では，アミノ酸代謝やプリン—ピリミジン代謝など多くの一次代謝物も減少した。特にアスパラギン(Asn)，アスパラギン酸(Asp)，アルギニン(Arginine), グルタミン(Gln)，プロリン(Pro)などが大幅に減少することが明らかとなった(Fig.5)。アミノ酸は，アミノ基(H_2N)とカルボキシル基(COOH)を持つ化合物の総称で,“*P. ellipsoidea*”においては培地中の硝酸と光合成由来の炭素骨格から生合成しているが，窒素栄養欠乏下では新たな硝酸を獲得できないため新しくアミノ酸を合成できなくなり，その結果，減少したと考えられる。しかしながら，これら硝酸代謝に炭素骨格を供給するTCA回路上には，増加している物質と減少している物質があり, TCA回路の流れについては考察できなかった。

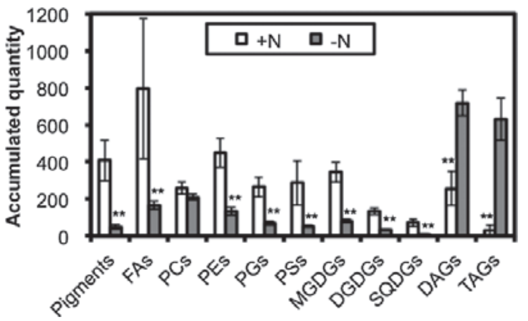


Fig. 4 The quantitative comparison of lipid class under nitrogen-rich and -deficient condition
White bars: +N conditions;
Gray bars: –N conditions;
**: p<0.01 of the Mann–Whitney *U*-test

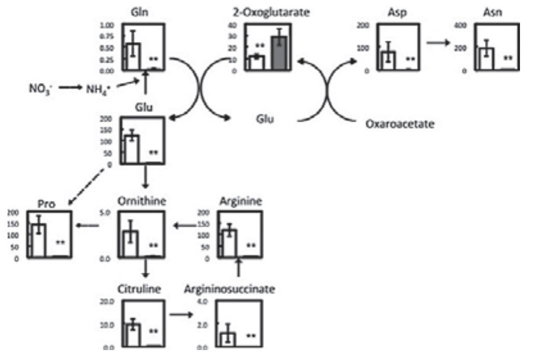


Fig.5 Metabolic change in nitric acid metabolism
White bars: +N conditions
Gray bars: –N conditions
**: p<0.01 of the Mann–Whitney *U*-test

一次代謝経路の中でも糖代謝と解糖系に関わる物質は，いくつか増加している物質があり，窒素栄養欠乏下において，これらの代謝が変化している可能性がある。

４．　結　　　言

日本で発見されたオイル産生藻“*P. ellipsoidea*”について，CE-MSとLC-MSを用いて一次代謝物質とグリセロ脂質を中心にメタボローム解析を行い, 300以上の代謝物質を検出した。富栄養下と窒素栄養欠乏下での細胞あたりの代謝物質量を比較したところ，窒素栄養欠乏下で増加する物質は10%ほどだが，減少する物質は40%以上あり，全体的に減少傾向にあることが分かった。しかし, バイオディーゼル原料となる中性脂質は大幅に増加した。また，細胞生理学的には，中性脂質以外のグリセロ脂質の減少から“*P. ellipsoidea*”は窒素栄養欠乏下で細胞内の膜構造を縮小する事が示唆された。一次代謝においては，窒素栄養欠乏によりアミノ酸生合成が停止したと考えられる。

メタボローム解析により，複数の培養条件で大規模に代謝物質量を比較する事で，代謝を俯瞰的に解析する事が出来た。実際に, “*P. ellipsoidea*”において，想定通りに中性脂質は大幅に増加し，窒素代謝に近いアミノ酸は大幅に減少していた。しかし，本研究で取得したデータは代謝物質量のスナップショットであり，代謝物質量に変化が見られたとしてもTCA回路や解糖系のように，培養条件や他の実験からの関連情報が無い場合は，代謝の流れについて考察できなかった。著者らは, この問題を解決するために，質量分析計がアイソトポマー（同位体ピーク）を検出できる事を利用し，同位体

標識した物質を取り込ませ，その標識物質が代謝される様子を経時的にメタボローム解析する大規模な同位体標識実験に取り組んでいる。今後，メタボローム解析をさらに応用し，オイル産生微細藻の代謝解明を加速させ，いち早く代謝改変による高オイル産生株の作出を実現させたい。

References

1. P. Schenk, S. Thomas-Hall, E. Stephens, U. Marx, J. Mussgnug, C. Posten, O. Kruse, B. Hankamer: Bioenerg. Res., **1**, pp.20–43(2008)
2. A.M. Illman, A.H. Scragg, S.W. Shales: Enzyme Microb. Technol., **27**, pp.631-635(2000)
3. A. Satoh, M. Kato, K. Yamato, M. Ishibashi, H. Sekiguchi, N. Kurano, S. Miyachi: J. Jpn. Inst. Energy, **89**, pp.909–913(2010)
4. J.N. Rosenberg, G.A. Oyler, L. Wilkinson, M.J. Betenbaugh: Curr. Opin. Biotechnol., **19**, pp.430–436 (2008)
5. T. Soga, Y. Ohashi, Y. Ueno, H. Naraoka, M. Tomita, T. Nishioka: J. Proteome Res., **2**, pp.488–494(2003)
6. T. Soga, K. Igarashi, C. Ito, K. Mizobuchi, H.P. Zimmermann, M. Tomita: Anal. Chem., **81**, pp.6165–6174 (2009)
7. M. Sugimoto, T. Koseki, A. Hirayama, S. Abe, T. Sano, M. Tomita, T. Soga: J. Agric. Food Chem., **58**, pp.374–383 (2010)

環境資源工学 58 : 165–169 (2011)

特　別
講　演

庄内地域の大気・水環境について [1]

大歳　恒彦 [2*]

Atmospheric and Aquatic Environment in Shonai Area

Tsunehiko OTOSHI[2*]

[2]Tohoku University of Community Service and Science

Abstract

Shonai area is located in northwestern part of Yamagata prefecture facing Japan Sea.　The main part of Shonai area, Shonai plain and port city Sakata, are surrounded by Dewa mountains and wide forest.　Basically, property of atmospheric environment of this area is clean, but affected by the sea and Asian Continent.　Na concentration in aerosol originated from sea salt is around double of the average value of Japan.　Al and Ca concentration in aerosol rise in spring season with yellow sand storm from Asian Continent.　Most of precipitation are still “acid rain” or “acid snow”, however pH value of the precipitation has been recovering since 2008.

Shonai plain is known as famous producer of rice.　Plenty of fresh water from Mogami River including its branch rivers and fountains support the agricultural production.　Though most of the aquatic environment is also clean, but it is affected by seawater and human activities such as fertilizer in some regions.

Key words: Aerosol, Forest, Japan Sea, Precipitation, River

1.　はじめに

庄内地域は山形県北西部の日本海側に位置し，北は秋田県，南は新潟県とそれぞれ県境を接し，稲作が盛んな庄内平野を中心に鳥海山および月山などの出羽山地に囲まれている。大気環境は一般的に清浄であるが，日本海および大陸の影響を受けやすい。水環境は山形県の母なる川，最上川やその支流をはじめとする河川や湧水などの豊富な水資源に恵まれている。ここでは，著者がこの数年間に観測したデータを中心に本地域の環境について概観する。

2.　大気環境

2.1　エアロゾル

粒子径10μm以下のエアロゾルの重量濃度は季節による変動が大きく，特に春先の黄砂時には高い濃度となった。2002年の春季には最も高濃度の黄砂が大陸から飛来し，この時期にはエアロゾルのうち特に粗大粒子濃度が高くなった。一方，夏季には 2 次粒子が生成して微小粒子の濃度が上昇する(Fig. 1)。多くの元素濃度は全国平均と同等かそれよりも低い値となっており，大気の清浄性を示しているが、Al, Cl, Na, W など一部の元素では全国平均よりも高い濃度となっている(Table 1)。高い濃度を示したもののうち W を除いた元素は粗大粒子に含まれる自然発生源を持つ元素であると推測される。特に濃度の高い Cl 及び Na は海塩粒子が主な発生源と考えられ海からの距離が約 1km と近い調査地点の状況を反映している。経時変化及び相関係数の検討から，人為的な発生源を持つと考えられる元素は一様の挙動を示さず，発生源の多様性を示唆するものと考えられた。W の高濃度については風向などから付近の工場群の影響などが考えられる。Al, Ca, Fe, K, Mn の元素のグループはいずれもお互いに相関係数が高く，土壌などの同じ発生源の影響が大きいと考えられる。また，海塩を発生源に持つ Cl と Na は高い相関がある [1]。黄砂時の総濃度の高い時期には硫酸イオン濃度も高くなり，硫酸イオンの発生源としての黄砂の影響を考慮する必要がある。

中国，韓国，フィリピン，タイ，マレイシア，ベトナムなどの東アジアの各国および日本の東京を調査地点に加えた比較研究では，酒田は ”Rural Site” という位置付けとなり，V, As, Se, Br, Sb などの人為的な発生源を持つ元素の濃度の合計が最も少ない地点となった [2]。

2.2　酸性雨 [3]

酒田市における降水量は毎年 2,000mm 前後であり, 2004 年, 2005 年は降水量が平年よりも多めであった。ほとんどの降水が酸性雨の定義とされる pH5.7 以下である。2003 年から 2007 年にかけて、硝酸イオン濃度および硫酸イオン濃度の増加傾向が続き, pH は低下した(Table 2)。酸性化の原因のひとつとし

1. 平成 23 年 11 月 10 日　本会第 127 回例会において発表
2. 東北公益文科大学
平成 23 年 8 月 24 日受理
*e-mail: otoshi@koeki-u.ac.jp

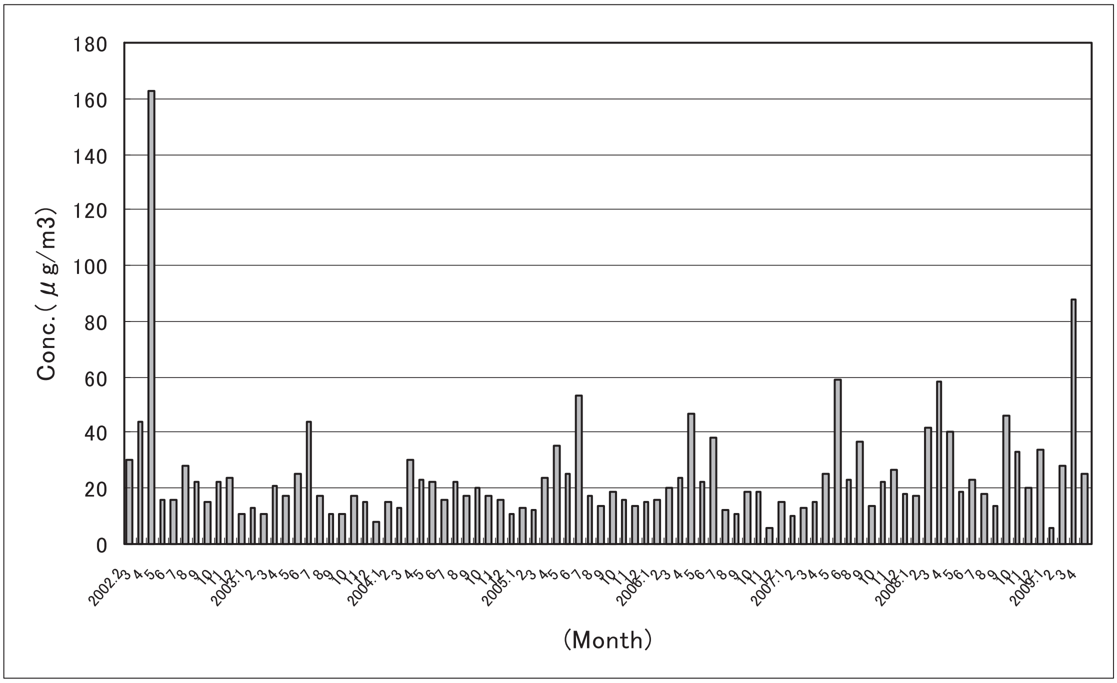


Fig. 1 Aerosol (<10μm) concentration at Sakata (2002～2009)

Table 1 Comparison of elemental concentration of aerosol (2002～2003)

Element	①Sakata (ng/m^3)	②Japanese Ave. (ng/m^3)*	Ratio (①／②)
Al	450	305	1.5
As	1.5	3.3	0.5
Br	6.1	15	0.4
Ca	260	270	1.0
Cl	1270	170	7.7
Fe	280	440	0.6
K	250	210	1.2
Mn	10	19	0.5
Na	1200	520	2.3
Sb	0.95	6.6	0.1
Se	0.41	1.1	0.4
V	2.7	4.6	0.6
W	1.6	0.37	4.2
Zn	29	140	0.2

Note) *National Air Surveillance Network (<10μm, 16 monitoring sites, 1996)

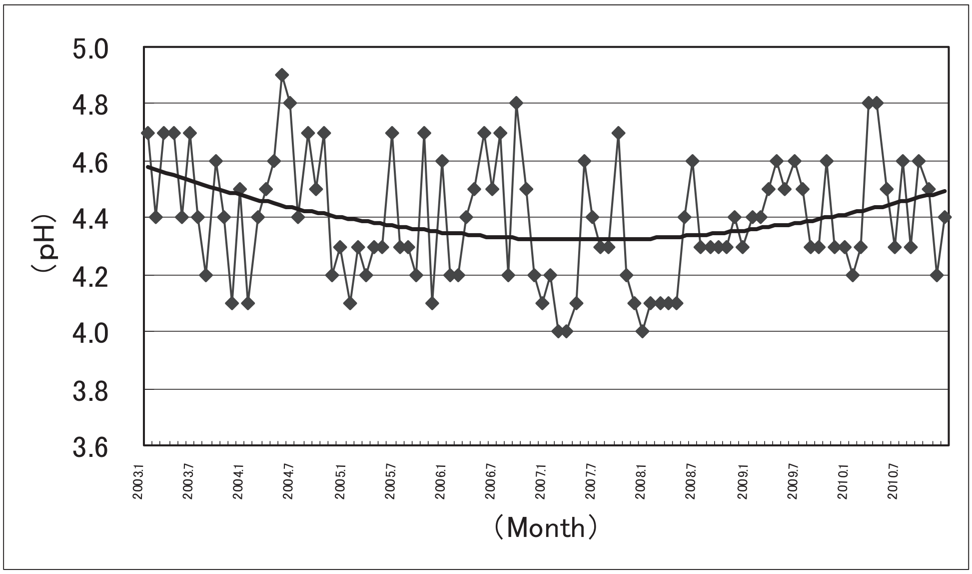


Fig. 2 Monthly pH value of precipitation at Sakata (2003-2010)

てはこれら陰イオン成分の増加が考えられる。2008 年以降は，硝酸イオン，硫酸イオン濃度ともに減少傾向であり，pH の低下傾向には歯止めがかかっている。月別の pH 平均値（Fig. 2）をみると変動が大きいが，季節的に見ると春季～秋季にかけて pH が高く，冬季は pH が低くなっており，季節風による大陸からの影響が考えられる。

酸性雨と周辺の森林の関係を調べるため，2004 年にクロマツ林, 2006 年に広葉樹林について，それぞれ林内雨と，同時期に採取した通常の降雨（大学屋上）との比較を行った。それぞれ並行して採取した十数降雨を試料として採用した。その結果，通常の降水(pH4.5)と比較して 2 ヶ所のクロマツ林の林内雨は pH5.3 および pH5.5 となった。また，広葉樹林でも通常の降雨(pH4.5)と比較してやはり林内雨が pH5.3 というように，酸性化の緩和がみられた。

2004 年 8 月から 9 月にかけ，台風が日本海側を北上して東北地方の沿岸に大きな被害をもたらした（台風 15 号 8 月 20 日, 16 号 8 月 31 日, 18 号 9 月 7 日)。山形県の損失は主に庄内地方で，水稲や果樹などの農業被害だけで約 74 億円にも上った。普通の台風では，雨が降ることで海からの塩分を洗い流してくれるが，この台風では，降雨がきわめて少なかったことで，農作物に海塩が直接吹きつけ，甚大な塩害が生じた。クロマツ林は被害が少なかったが，多くの広葉樹の葉が枯れる現象があらわれた。一方，台風の数日後の降雨では，通常降雨と比較して，クロマツ林の林内雨に非常に高い濃度の塩化物イオン(Cl^-)が測定され，林内に多量の塩分が捕捉されたことがわかった。

Table 2 Property of precipitation at Sakata (2003-2010)

Year	Precipitation (mm)*	pH	Cl^-(mg/l)	NO_3^-(mg/l)	SO_4^{2-}(mg/l)
2003	2012	4.5	5.0	1.1	2.0
2004	2217	4.5	17.8	1.2	4.0
2005	2244	4.3	18.3	1.7	5.2
2006	1915	4.3	10.8	1.6	4.0
2007	1774	4.2	16.5	1.8	4.9
2008	1625	4.3	16.5	1.5	4.2
2009	1836	4.4	12.2	1.4	3.5
2010	1988	4.4	18.3	1.6	4.4

Note）*Sakata observatory

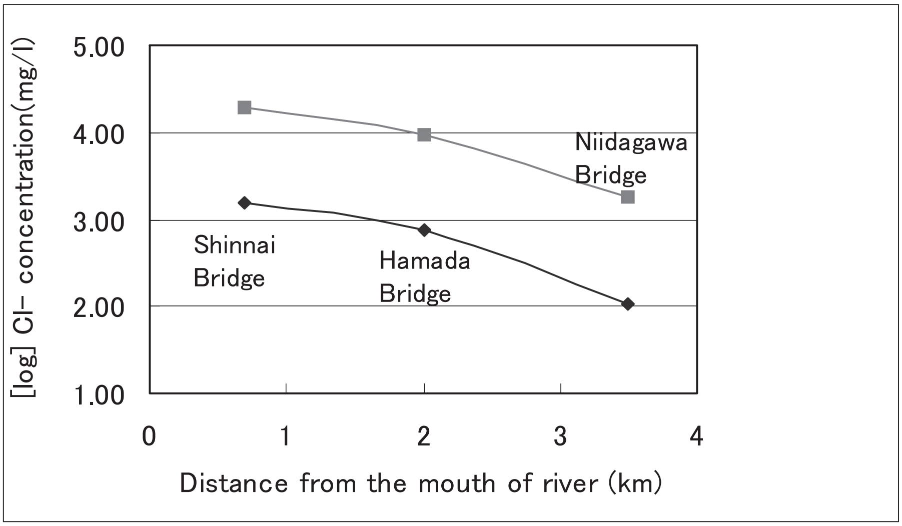


Fig.3 Cl$^-$ concentration of Niidagawa River (2005-2010)

(■: bottom water, ◆: surface water)

3. 水環境

3.1 河川水

最上川の水質について特徴的なことは，上流域の酸性河川および蔵王温泉などから流入する硫黄化合物によって，全域にわたって硫酸イオン濃度が高めとなっていること，および上流，中流に比べて水量の多い下流域である庄内地域の汚染度が低めになっていることである[4]。海水の影響として，従来から酒田市内の最上川，小牧川などでも1,000mg/l を超える高い濃度の塩化物イオンが検出されており、新井田川においても下流に行くにしたがって塩化物イオンの濃度が高くなる事例が示されている。一般に塩分濃度が500mg/l 以下を淡水，それ以上を塩水と呼んでいるが，新井田川ではコイなどの淡水魚とともに，ボラ，ハゼ，スズキなどの汽水域に生息する魚も観察されており，恒常的に海水が浸入していることがわかる。海水は淡水よりも比重が高く，重いことから，いわゆる「塩水くさび」として，同じ地点においても表層には淡水が，下層には塩分濃度の高い海水の層が構成されることが知られている。調査結果から，いずれの採取地点においても上層に比べて下層で塩化物イオン濃度が高くなっていることから，「塩水くさび」の状態が新井田川にも起こっていることがわかる。海水中の塩化物イオン濃度は約19,400mg/l といわれており，最下流の新内橋（下）では，ほとんど海水が飽和状態となっていると推測され，上流に行くほど，また上層になるほど淡水の比率が多くなる(Fig. 3)[5]。

3.2 湧水

鳥海山（標高2,236m）に降った雨や雪は，森を通り土壌に浸透した後，透水性の良い火山岩の隙間を地下水となって流れる。この過程で不純物はろ過・分解され，土壌や岩石に含まれていたミネラルは水に溶ける。地下水の一部は湧水となって再び地上に現れる。鳥海山の周辺には百以上もの湧水が知られている[6]。

湧水をほぼ100%の水源とする牛渡川（遊佐町）で，珪藻類がここ数年見られるようになり，水質の悪化が心配されていたことから2005～07 年度に学生参加による水質調査を行った。牛渡川は，河川としては全長1.7km ほどの小さな川であり，水温は年間を通じて 10～15℃と，変動が極めて小さい。バイカモが美しい貧栄養の川であり，十数種類の淡水魚が生息しているとともに，毎年冬季にはサケが遡上してくることでも知られている。この調査では，中流部に影響を及ぼす周辺地域や，時には上流部においても，硝酸イオンなどの値が高くなる結果となった。このため，周辺集落の生活排水や酸性雨の影響など，種々の要因が考えられた。原因の究明には至らなかったものの，その後の水質は改善傾向となっている[7]。

庄内地域には、上記のような湧水がほぼ全域に分布し，農業・漁業をはじめ地域住民はその恩恵を大いに受けている。しかし，ごく一部の湧水では，過剰な施肥などの影響によっ

て高い濃度の硝酸イオンなどが検出される場合があることから，これらの湧水の適正な管理が求められるところである。

４． 最近のトピックス

従来は首都圏周辺の大気汚染問題と考えられていた，光化学オキシダントに関する注意報が山形県においてはじめて2009年4月に発令されたことから，本地域においてもこのような広域大気汚染に無関心ではいられなくなった。

光化学オキシダント注意報が発令された当日は，山形県の内陸部である長井市で午前中の 1 時間値として最高の0.12ppm，山形市，米沢市，寒河江市などでも 0.10ppm を超過し，庄内地域の酒田市においても 0.09ppm に達している。前日からこの季節としては気温が高く，当日は日本海側に高気圧が発達し，弱い北西風が吹いていた。また，衛星画像の解析から大陸からの汚染物質の流れが山形県に流れ込んでおり、オキシダントのベースラインを引き上げたことも高濃度要因のひとつとされている。このように，高い気温，日射，微風により大気の安定度が高いところで光化学反応が進行して警報発令に至ったものと考えられている[8]。このたびの事例では農作物被害の報告には至っていないが，山形県のように一般には大気環境が清浄と認識されるような地域においても，このような高濃度事例が観察されていることに留意する必要がある。

５． まとめ

山形県庄内地域におけるエアロゾル，降水などの大気環境および河川や湧水などの水環境について概観した。

庄内地域は日本海に面しており，内陸とは出羽山地などによって隔離されている。大気環境は一般的に清浄であるが，海洋の影響を受け，エアロゾル中の海洋起源の元素であるNaなどの濃度が高い。また，季節風が強くなる冬季には，降水中の Cl^-イオンなども同様に高くなる。春季には，大陸から黄砂が飛来し，エアロゾル濃度の上昇とともに土壌起源の Al, Ca などの元素が高くなる。多くの降水は酸性雨または酸性雪の状態であるが，酸性化の傾向は2008年以降はおさまりつつある。今後，光化学オキシダントなども含めて，森林や農作物への，海洋や大陸からの大気環境による影響を注視する必要がある。

最上川やその支流の河川水および豊富な湧水などの水資源が，この地方の農業活動などの原動力となっている。最上川は上流から中流にかけての，酸性河川や生活排水などの影響を受けるが，下流の庄内地域では清浄な支流河川から水量を得るなどして，水質としては改善される。沿岸に近い新井田川などには海水の浸入が日常的に起こっている。また，牛渡川のように，ほぼ湧水のみを水源とする河川の存在も特筆すべきものである。湧水の一部に人間活動の影響によるとみられる硝酸イオンなどの汚染がみられることから，これらの湧水の適切な管理が必要と考えられる。

謝　　辞

本研究の実施にあたっては、地元の庄内地域および山形県の関係者の方々から幅広いご協力やご教示などをいただいた。また、エアロゾルの放射化分析にあたっては、文部科学省 FNCA 研究炉利用・中性子放射化分析プロジェクト活動の一環として首都大学東京大学院の海老原充教授、大浦泰嗣准教授にお世話になった。深く感謝の意を表します。

References

1. Y. Oura et al.,: Elemental compositions of atmospheric particulates collected in Japan from 2002 to 2004, J.Radioanal. Chem., **272**(2), pp.381-385(2007)
2. M. Ebihara et al.: Collaborative monitoring study of airborne particulate matters among seven Asian countries, J.Radioanal. Chem., **269**(2), pp.259-266(2006)
3. T. Otoshi: Acid rain and forest in Sakata, Environ. Preservation, No.14, pp.54-56, Environ. Preservation Center, Yamagata Univ.(2011)
4. Water quality of Mogami - the Mother River, Science Club of Yonezawa-chuo High School, pp.15-20(2005)
5. T.Otoshi: Sea water contribution to water quality of downstream Niidagawa River, Research Papers of Tohoku Univ. of Community Service and Science, No.20, pp.49-56(2011).
6. T.Akimichi et. al.: Water and life – A report from Mt.Chokai, Tohoku Shuppan Kikaku, p.71(2010)
7. N.Go et. al.: Water quality research around Ushiwatari River, Proc. 3rd Mogami River Aquatic Environment Conference, pp.27-29 (2007)
8. E.Watanabe et. al.: Episode of high concentration photochemical oxidant in Yamagata Prefecture, Proc. 17th Annual Meeting of Hokkaido/Tohoku Branch of Japan Soc. For Atmos. Environ., pp.32-33(2010)

環境資源工学 58 : 170–175 (2011)

特　別
講　演

嫌気性微生物群集とその資源工学的利活用 [1]

上木勝司 [2*]

Anaerobic microbial community and its application to the resources processing

Katsuji Ueki[2*]

[2]Faculty of Agriculture, Yamagata University

Abstract

The anaerobic microbial community is distributed in anoxic environments, forming the anaerobic microbial ecosystem. The anaerobic microbial community is composed of anaerobic microorganisms with different trophic properties, and in the anaerobic microbial ecosystem, organic matter is degraded by the collaborative activity of microbial consortium via the process consisting of the acidogenic stage, H_2-producing acetogenic stage and methanogenic stage, yielding CH_4 and CO_2 as the end product. Sulfate reducers play a role not only as an acetogen, but also, as well as methnogens, as the terminal electron scavenger in the anaerobic ecosystem. In the present report, attempts carried out to apply the microbial community in anaerobic digester slurry of cattle waste to the mitigation of acid mine drainage and that in the rice field soil to plant biomass conversion at low temperatures were presented.

Keywords: Anaerobic microbial community, Acid mine drainage, Sulfate reduction, Removal of heavy metals, Microbial conversion of biomass, Cold-adapted anaerobic microorganisms

1.　緒　　言

O_2発生型光合成生物の出現以前は, 地球の生物圏はO_2が存在しない無酸素（嫌気的）世界であった。地球生命の系統の基本である 3 ドメイン（Domain）, 細菌(*Bacteria*)と古細菌(*Archaea*), 真核生物(*Eucarya*)への系統的分岐も嫌気的世界での出来事であった。大気中 O_2濃度の上昇に伴って地球表面には有酸素環境（好気環境）が拡大したが, 現在の生物圏でも嫌気環境は好気環境の背後に確実に存在している。嫌気環境には偏性や通性の嫌気性微生物が構成する嫌気性微生物群集による微生物生態系が成立し[1], 地球の物質循環系は嫌気環境での生物活動抜きには完結できない仕組みになっている。本稿では嫌気微生物生態系の各種微生物機能の資源工学的活用に向けて行った筆者らの試みを報告する。

2.　嫌気環境下の有機物分解過程とそれを担う微生物群集

嫌気微生物生態系へのエネルギー的・物質的入力は, 光合成細菌が生息する環境や地殻エネルギーが供給される海底の熱水噴出口などを除くと, 好気環境からの有機物の流入に依る。嫌気環境下での有機物の酸化分解過程は, 多様な微生物による発酵や硫酸塩, 硝酸塩又は金属酸化物などを電子受容体とする嫌気呼吸による部分的酸化反応が組み合わさった食物網(Food web)を形成して進行し, 一般に 3 段階に分けて理解される(Fig. 1)[1]。すなわち, 多糖やたんぱく質などの高分子有機化合物が酸生成微生物と総称される多様な微生物の作用で最終的に揮発性脂肪酸(VFAs)（酢酸, プロピオン酸, 酪酸など）へと酸化される酸生成(Acidogenesis), 栄養共生細菌(Syntrophs)によるプロピオン酸や酪酸などの C3 以上の VFAs の H^+還元を伴った酢酸への分解(H_2-producing acetogenesis), そして最終段階であるメタン生成古細菌による H_2＋CO_2や酢酸などからのメタン生成(Methanogenesis)である。

なお, VFAs の嫌気的酸化分解は吸エルゴン反応で, 熱力学的に本来進行不可能であるが, 栄養共生細菌とH_2をエネルギー源にするメタン生成古細菌や硫酸還元微生物との間の種間水素転移による栄養共生関係(Syntrophic association) で, 反応産物のH_2が 10^{-4}-10^{-3} atm 以下の濃度に保たれることで進行する。こうした異種微生物間の共存関係は嫌気環境における微生物間の相互作用を代表するものである。一方, 硫酸還元微生物は, H_2や有機酸, アルコール, アミノ酸, そして種によっては糖や高級脂肪酸, 脂肪族や芳香族の炭化水素を電子供与体として酸化し, 硫酸塩を電子受容体にして硫化水素へと還元してエ

1. 平成 23 年 11 月 10 日　本会第 127 回例会において発表
2. 山形大学農学部
平成 23 年 8 月 30 日受理
*e-mail: kueki@tds1.tr.yamagata-u.ac.jp

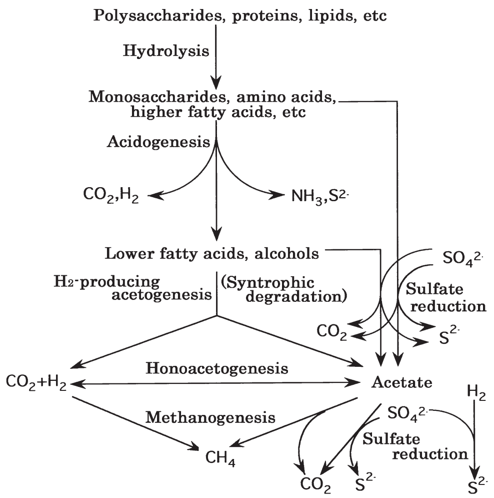


Fig. 1 Degradation of organic matter in anaerobic environments

ネルギーを獲得する偏性嫌気性微生物であり，系統的には多様な属の細菌と 1 属の古細菌が含まれる [2]。嫌気微生物生態系では，メタン生成と硫酸還元はともに有機物の分解過程で生成する還元当量の最終処理反応として働くが，H_2 や酢酸の利用で競合し，硫酸塩存在下では一般に硫酸還元が優先して進行するとされている。しかし，一方で，家畜舎廃水や下水汚泥の嫌気消化液のような有機物が豊富な系では，硫酸塩を海水相当の高濃度で添加しても，メタン生成を顕著に抑えることなく硫酸還元が活発に進行することが知られている [3-5]。

３．　嫌気微生物生態系の異化的硫酸還元反応を活用した硫酸酸性重金属含有排水からの硫酸と重金属の除去

一般に，硫化鉱やイオウ，石炭の採掘地や廃滓堆積地からは硫酸酸性で重金属を高濃度で含む酸性鉱山排水(Acid mine drainage, AMD)が流出してくる。AMD の水系への流入は水質を悪化させ，水利用を困難にし，また何よりも流域生態系に深刻な打撃を与える。AMD の浄化は広く消石灰や炭酸カルシウム投与による中和処理法で行われてきたが，コストに加えて，処理産物として重金属を高濃度で含む大量の石膏が生成することが問題であった。そのため，微生物作用による処理が注目されてきた。特に硫酸還元細菌の利用は，異化的硫酸還元で硫酸が除去され，AMD の pH が改善されるとともに，重金属を難溶性の硫化物にして沈殿除去できることから注目されてきた。しかし，硫酸還元を進行させるためには，AMD に硫酸還元細菌の電子供与体基質を供給しなければならず，加えて，酸性条件で利用可能な硫酸還元細菌が得られていないことから，処理に先立って AMD の pH を中性近くに調整する必要がある。

以下，　牛舎廃水嫌気消化液微生物群集の生態的特性に着目して行った, AMD からの硫酸と重金属の除去処理への利用の試み [6, 7] を紹介する。

3.1　牛舎廃水嫌気消化液添加嫌気保温処理による AMD からの硫酸及び重金属除去の試み

AMD は山形県寒河江市の亜鉛と銅の鉱山であった旧幸生鉱山の廃坑から採取した。AMD 試料は pH が 3.0-3.2 であり，SO_4^{2-}, Mn, Fe, Zn, Cu を，それぞれ, 471.0 ± 103.8, 13.8 ± 3.7, 9.70 ± 2.43, 9.10 ± 1.40, 0.55 ± 0.08 mg/l（平均値 ± S.D.），さらに微量の Pb と Cd を含んでいた。牛舎廃水嫌気消化液（嫌気消化液）は山形大学農学部付属農場の牛舎廃水貯留槽から採取した。嫌気消化液試料は COD_{Mn} が 8,000-10,000 mg/l, SS が 6-9 g/l で, pH は 8 前後であった。37℃で 2 週間保温した嫌気消化液試料を 6,500 Xg で 30 分間遠心して上清を回収し，嫌気消化液上清(SDF-sup)とした。SDF-sup は低濃度の VFA（主に酢酸）を含み, pH は 8.8 であった。以下, AMD または重金属水溶液の嫌気消化液添加保温処理試験は，全てブチルゴム栓で密栓した試験管(18×180 mm)中で, O_2 除去 N_2 気相下, 37℃で保温して行った。硫酸イオンは硫酸バリウム沈殿法又はイオンクロマトグラフィーで，ガス，有機酸及びアルコールはガスクロマトグラフィーで，重金属は原子吸光法で測定した。

Fig. 2 に AMD 試料への SDF-sup 添加の影響を示した。AMD 試料は pH が 3.2 で，硫酸イオン，Fe, Mn をそれぞれ 670.0, 9.2, 16.9 mg/l 含んでいたが，わずか 1%(v/v) の SDF-sup 添加で pH が 5.25 へと激しく上昇し, Fe の約 99% が沈殿したが, Mn は全く沈殿しなかった。SDF-sup 10% (v/v)添加では処理液の pH が 8.21 に上昇したが, Mn は約

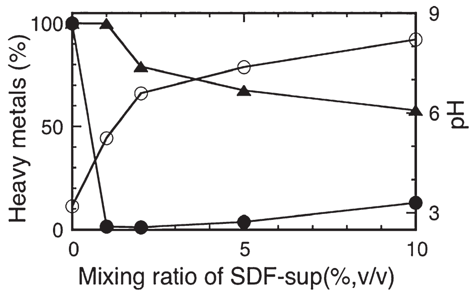


Fig. 2 pH and concentrations of heavy metals in the soluble fraction of AMD (acid mine drainage) supplemented with the supernatant of digester slurry of cattle waste (SDF-sup). pH (○) and percentages of Fe (●) and Mn (▲) remaining in the soluble fraction of AMD supplemented with SDF-sup at different ratios are shown. SDF-sup was prepared by centrifuging digester slurry, which had been incubated anaerobically at 37°C for 2 weeks, at 6,500 X g for 30 min.

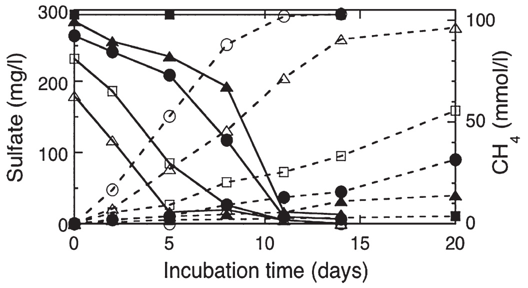


Fig. 3 Sulfate reduction (solid line) and CH_4 production (dashed line) in AMD supplemented with digester slurry. AMD pretreated with 5%(v/v) SDF-sup (■) was supplemented with digester slurry at the ratio of 5 (▲), 10 (●), 20 (□) or 40% (v/v) (△). Digester slurry (○).

40％しか沈殿しなかった。

AMD 試料に SDF-sup を 5% (v/v)添加して pH の中和と重金属除去の処理を行った後，様々な割合で嫌気消化液を加えて保温し，硫酸還元とメタン生成の進行を調べた (Fig. 3)。用いた AMD の硫酸イオン濃度は約 310 mg/l であった。前処理排水中の約 300 mg/l の硫酸イオンは嫌気消化液 5%(v/v)添加処理でも約 11 日でほぼ還元されつくした。一方，20 日間保温での処理液 1 リットル当たりのメタン生成量は，嫌気消化液のみでは約 100 mmoles であったが，嫌気消化液 40%(v/v)添加処理で約 97 mmoles，また 5% (v/v)添加処理でも約 14 mmoles と，AMD への添加で嫌気消化液のメタン生成効率がかえって上昇した。

なお，硫酸第一鉄添加後に 5%(v/v)SDF-sup 添加処理して鉄を除去し，硫酸イオン濃度を約 900 mg/l と 1500 mg/l に調整した AMD 試料に嫌気消化液を 5%(v/v)添加して保温し，硫酸還元を調べた。硫酸還元は硫酸イオン濃度が高いほど速い速度で進行し，20 日間の処理期間中の最高速度は硫酸イオン濃度が 310, 917 及び 1,496 mg/l の AMD でそれぞれ 26.2, 73.0 及び 118 mg/l/day であった。

3.2 牛舎廃水嫌気消化液添加処理における硫酸還元への重金属の影響

嫌気消化液では硫酸還元とメタン生成の間に電子供与体基質の使い分けがあると思われた。嫌気消化液中に豊富に検出される硫酸還元とメタン生成の可能な電子供与体基質は酢酸，プロピオン酸並びに H_2 であった。そこで，硫酸第一鉄を添加し，5% (v/v) SDF-sup で前処理して，硫酸イオン濃度と pH を調整した AMD 試料に，5%(v/v)嫌気消化液とともに，酢酸塩，プロピオン酸塩又は H_2 を添加して保温し，硫酸還元とメタン生成を調べた(Fig. 4)。硫酸還元はプロピオン酸塩と H_2 の添加処理で活発に進行した。メタン生成は酢酸塩添加処理で活発に進行し，プロピオン酸塩添加処理でもプロピオン酸からの酢酸の生成に伴って進行したが，H_2 添加保温ではほとんど進行しなかった。硫酸還元は H_2 利用でメタン生成と競合するが，プロピオン酸を酢酸へと分解し，メタン生成への酢酸の供給を円滑にする役割を果たすと考えられた。

蒸留水で希釈して調製した 5%(v/v)牛舎廃水嫌気消化液（希釈嫌気消化液）に硫酸塩とプロピオン酸塩を各 10 mM 添加し,電子供与体基質と電子受容体基質が十分存在する条件にして，硫酸還元への重金属の影響を調べた。Fig. 5 に $CoCl_2$ 添加の影響を示した。硫酸塩とプロピオン酸塩を添加した希釈嫌気消化液（コントロール）では 5 日目以降硫酸還元が急速に進み，それに対応してプロピオン酸が酢酸へと分解され，メタンが生成された。一方，硫酸塩無添加希釈嫌気消化液ではプロピオン酸は全く分解されず，メタンも生成されなかった。0.5 mM $CoCl_2$ 添加希釈嫌気消化液では，硫酸還元もプロピオン酸分解も全く起こらず，メタンも生成されなかったが，0.1 mM 添加処理では，硫酸還元とプロピオン酸分解がコントロールよりも低い速度で進行し，対応してメタンが生成された。

$MnCl_2$, $NiCl_2$, $CuCl_2$, $ZnCl_2$, $CdCl_2$ 及び $HgCl_2$ についても同様に検討した。Mn 以外は, Co と同様に, 0.5 mM 以上で硫酸還元とプロピオン酸分解を完全に阻害した。0.1 mM 添加処理では Ni と Zn は顕著には影響せず，Cu は Co 同様に硫酸還元速度を低下させた。また, Cd と Hg の各 0.1 mM 添加処理では, それぞれ約 10 日と 20 日の遅滞期の後に，低い速度で硫酸還元が進行した。Mn は，1 mM 添加では全く影響せず，5 mM 添加で硫酸還元速度を低下さ

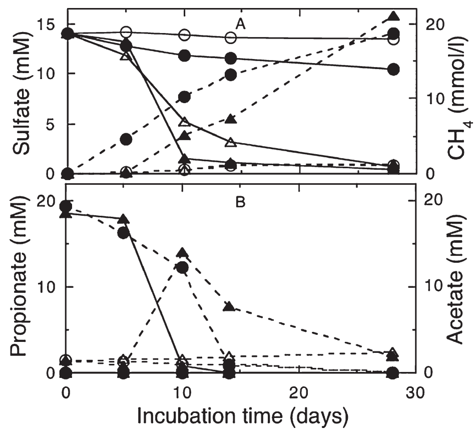


Fig. 4 Sulfate reduction, CH_4 production and degradation of volatile fatty acids in AMD supplemented with digester slurry during incubation with acetate, propionate or H_2. AMD amended with $FeSO_4$ to adjust sulfate concentration and with SDF-sup to mitigate the acidity was used. The pretreated AMD was supplemented with 5%(v/v) digester slurry and incubated at 37℃ under H_2/N_2(80/20) (△) or N_2 (○), or with 20 mM acetate(●) or propionate (▲) under N_2. Solid line: sulfate(A) and propionate(B), dashed line: CH_4 (A) and acetate (B).

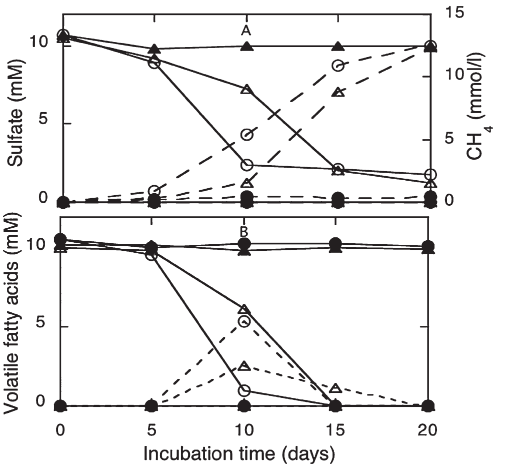


Fig. 5 Sulfate reduction and CH_4 production in diluted digester slurry incubated in the presence of cobalt. Final 5%(v/v) digester slurry supplemented with 10 mM Na_2SO_4 and 10 mM propionate-Na was incubated with $CoCl_2$ at 0.1 mM(△) or 0.5 mM (▲) or without $CoCl_2$(○) under N_2. Diluted digester slurry (5%) supplemented only with 10 mM propionate was also incubated under N_2 (●). Solid line: sulfate (A) and propionate (B), dashed line: CH_4 (A) and acetate (B).

せ，そして 10 mM 添加で完全に硫酸還元を阻害した。

各重金属添加希釈嫌気消化液について，1,000X g, 30 分間の遠心上清中の重金属濃度を測定した(Table 1)。硫酸還元が完全に阻害された処理液については保温期間を通して採取した試料での，硫酸還元が進行した処理液については硫酸還元が顕著に進行する以前の保温期間に採取した試料での平均値を示した。硫酸還元が完全に阻害されたNi, Cu, Zn, Cd 及び Hg の各 0.5 mM 添加処理液では，保温開始時でも，Cd の約 0.03 mM から Ni の約 0.17 mM まで，上清中の重金属濃度は添加濃度を著しく下回った。希釈嫌気消化液に添加した重金属の大半が嫌気消化液中の浮遊固形物(SS)に吸着されたものと考えられた。硫酸還元阻害は可溶態の重金属イオンの作用であり，吸着等で SS などの固形物に固着した不溶態の重金属は基本的に阻害作用を及ぼさないと思われる。可溶態の重金属は上清中に回収されることから，強い阻害作用を示した Cd と Hg は約 30 μM で硫酸還元を完全に阻害すると判断された。なお、硫酸還元が進行した処理液では,硫酸還元の進行に対応して上清中の重金属濃度が低下した。

Table 1 Concentrations of non-sedimentable heavy metals and effects on sulfate reduction[1)]

Heavy metals	Concentration (mM)		Sulfate reduction[3)]
	Added	Not sedimented[2)]	
Mn	1.0	(0.103±0.006)	-
	5.0	(1.073±0.154)	+
	10.0	4.878±0.453	+++
Co	0.1	nd	+
	0.5	nd	+++
Ni	0.1	(0.019±0.008)	-
	0.5	0.167±0.018	+++
Cu	0.1	0.027±0.003	+
	0.5	0.134±0.022	+++
Zn	0.1	(0.020±0.002)	-
	0.5	0.038±0.010	+++
Cd	0.1	(0.019±0.006)	++
	0.5	0.027±0.004	+++
Hg	0.1	(0.022±0.006)	++
	0.5	0.036±0.007	+++

1) Final 5% digester slurry supplemented with both Na_2SO_4 and propionate-Na at 10 mM was incubated with heavy metal chlorides under N_2 and heavy metals in the supernatant recovered from the incubation mixture after centrifugation at 1,000 X g for 30 min were measured.

2) Averages±S.D. (n = 4-12) are presented. In parentheses, concentrations before sulfate reduction significantly proceeded are shown. The concentrations decreased after sulfate reduction began. nd, not determined.

3) -, no significant effect; +, proceeded at reduced rates; ++, proceeded after prolonged lag periods; +++, completely blocked.

以上，牛舎廃水嫌気消化液微生物性態系を活用した，メタン生成を伴った AMD からの硫酸と重金属の除去の試みを紹介した。一方, AMD は硫化鉱床の母岩から重金属類とともにレアアース類を高濃度で溶解させてくることが知られており, AMD を豊富に鉱物を溶解させている資源と捉えることも重要である。また，近年, AMD の流出現場に石灰岩と有機物（セルロース性の廃棄物やコンポストなど）を充填した処理槽(Passive reactor)を設置し, AMD を微生物処理する試みも多く行われている。今回報告した嫌気消化液生態系による処理も, 以上の視点から改めて捉え直してみるのも意味あることと考える。

4．　低温活性嫌気性微生物群集による低温保温植物バイオマス分解システムの構築

未利用バイオマスのエネルギー資源や再生資源などの有用物質への変換処理法の一つに微生物や酵素を用いた方法がある。特にメタン生成嫌気性微生物群集を用いた処理は，エネルギー資源であるメタンが回収できることから，廃水や生ごみなどの処理で広く用いられている。微生物や酵素の機能を効果的に発揮させるためには，使用する微生物や酵素に応じて，適切な温度でバイオマス処理槽を保温する必要がある。現在のところ，中温性(30-35℃)と高温性(50-55℃)の保温処理が一般的であるが，寒冷地では，特に冬期には，どちらの処理法でも保温に多大なエネルギーを投入する必要があり，処理システムの稼働コストを引き上げる主な原因の一つとなっている。従って，地下水温程度(15-18℃)の保温温度でも有効に活動する微生物を用いた低温保温処理システムが開発できれば，寒冷地での未利用バイオマスの有効利用に大きく貢献できると思われる。本稿では，現在進めている，未利用植物バイオマスの効率的低温保温嫌気的微生物変換処理システムの開発に向けた基礎的取り組みについて報告する。

4.1　低温適応嫌気性微生物の分布と多様性[8]

低温で効率的に稼働する嫌気的バイオマス変換処理システムを実現するには，まず低温条件で活動する嫌気性微生物を入手する必要がある。これまでそのような微生物は，一般に，極地やその近傍などの恒久的な寒冷環境の土壌や水試料などで探索されてきた。一方，我が国のような中緯度温帯地域では，環境中の微生物群集は冬期に 0℃前後の低温に普通に曝される。そして，秋に水田に散布された稲ワラは,冬期間に一定程度分解され,春になると速やかに分解され尽くす。このことは，水田土壌に低温下でも活動する植物バイオマス分解微生物が生息していることを示唆していた。そこで，本研究では水田土壌中の低温適応（好冷性と耐冷性）嫌気性微生物の生息密度を調べた。水田土壌試料は山形県農研センター（鶴岡市）の試験水田から採取した。嫌気性微生物の計数は嫌気条件での最確値(Most probable number, MPN)培養で行い，培地には発酵性の微生物の培養に広く使用される PY 培地を改変して用いた。2007 年 12 月から 2009 年 8 月までの間に採取した土壌試料についての 5, 10, 20 又は 30℃保温 MPN 培養での計数結果を Table 2 に示した。5℃と 10℃保温では，それぞれ, 30℃保温での値の約 0.1-20%と 0.3-50%の値で計数された。10℃以下では中温性微生物は基本的に増殖できないことから，土壌試料には今回の MPN 培養の条件で増殖可能な低温適応嫌気性微生物がかなり高い密度で生息していることが明らかになった。

土壌試料に生息する低温適応嫌気性微生物の系統的多様性を，各保温温度での MPN 培養から微生物細胞を回収し, 16S rRNA 遺伝子配列(16S rDNA)の V3 領域を PCR 増幅し，DGGE（変性剤濃度勾配電気泳動）にかけ，DGGE バンドの塩基配列を決定して系統解析することで調べた。DGGE は変性剤濃度勾配が 25-55%(v/v)[100%は 7 M 尿素/40%(v/v)ホルムアミド溶液］で行った。PCR 増幅産物は細菌特異的プライマー対 B341fGC/534r でのみ得られた。

Fig. 6 に 2009 年 1 月採取土壌試料の各保温温度での

Table 2 Enumeration of cold-adapted anaerobic microorganisms inhabiting the soil of rice field

Soil samples	MPN counts (/cm^3 fresh soil) at different temperatures[1)]			
	5℃	10℃	20℃	30℃
Dec. 18, 2007	2.3 X 10^5(n=2)	6.5 X 10^5(n=2)	4.0 X 10^7(n=2)	2.0 X 10^8(n=2)
Mar. 21, 2008	2.3 X 10^6(n=2)	1.2 X 10^7(n=2)	3.15 X 10^6(n=2)	3.05 X 10^7(n=2)
Jun. 16, 2008	9.0 X 10^6(n=2)	nd	1.45 X 10^9(n=2)	4.0 X 10^8(n=2)
Oct. 6, 2008	3.40 X 10^6± 0.98 X 10^6(n=3)	7.30 X 10^6± 2.9 X 10^6(n=3)	2.3 X 10^7(n=2)	1.25 X 10^8(n=2)
Jan. 13, 2009	1.30 X 10^7± 0.87 X 10^7(n=3)	3.40 X 10^7± 1.1 X 10^7(n=3)	3.2 X 10^8(n=2)	6.5 X 10^7(n=2)
Aug. 26, 2009	9.0 X 10^5(n=2)	9.0 X 10^6(n=2)	nt	2.1 X 10^7(n=2)

1) Averages of two or three series of MPN-cultures derived from two dilution series of soil samples were shown with or without S.D., respectively. nd: not determined, nt: not tested.

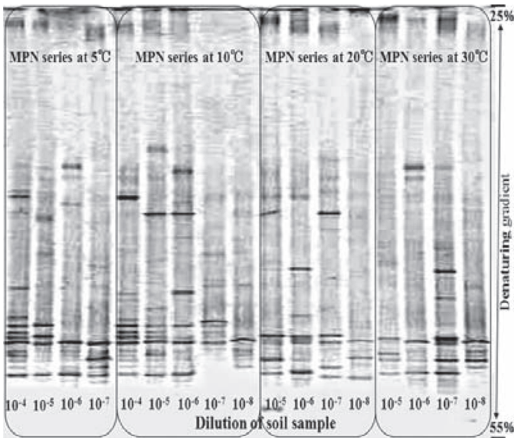


Fig. 6 DGGE profiles of 16S rDNA V3 region sequences of anaerobic bacteria grown in MPN-cultures incubated at different temperatures. The soil was sampled on 13 January 2009. Ten μg of DNA was loaded for each lane.

MPN 培養についての DGGE プロファイルを示した。5℃保温の 10^{-4} 希釈土壌試料接種培養では 15 本前後の明確なバンドが認められ，10^{-7} 希釈試料接種培養でも 6 本以上のバンドが認められた。16S rDNA を複数コピー持つ細菌も多く，DGGE バンドの各一本が必ずしも別々の細菌系統を代表しているわけではないが，それでもかなり多様な系統の低温適応嫌気性微生物の生息が示唆された。

なお, 5℃と 10℃の培養は多くのバンドを共有し，また,採取時期の異なる土壌試料でも一貫して類似した DGGE プロファイルを示し，土壌試料には季節にかかわらず多様な低温適応嫌気性細菌が生息していることを示唆した。

2009 年 1 月採取土壌試料の 5℃, 10℃, 20℃及び 30℃保温の MPN 培養について，それぞれ, 16, 10, 14 及び 13 の異なる位置の DGGE バンドについて塩基配列を決定し，系統解析した。5℃保温培養では，16 バンドの内の 14 バンドが *Firmicutes* 門の *Clostridiaceae* 科の *Clostridium* cluster I に位置づけられ, 7 バンドが *Clostridium bowmanii* などの南極の湖の湖水や堆積物から分離された種に最近縁に関係づけられるなど，ほぼ全てが好冷性や耐冷性の種に関係づけられた。他の系統の 2 バンドはそれぞれ *Gammaproteobacteria* 綱と *Fusobacteria* 門に位置づけられ,いずれも最近縁種は好冷性や耐冷性であった。10℃保温培養でも, 10 バンド中の 4 バンドに *C. bowmanii* などの南極分離細菌が最近縁種として関係づけられた。

以上のように, 5℃や 10℃保温の MPN 培養では低温適応嫌気性細菌が増殖してくると思われたことから，それらの培養から細菌を純粋分離し，実際に増殖温度と系統を調べた。分離株の系統はプライマー対 27f/1492r での PCR 増幅で得られた 16S rDNA の全長塩基配列を基にして解析した。系統樹は近隣結合法で作成した。

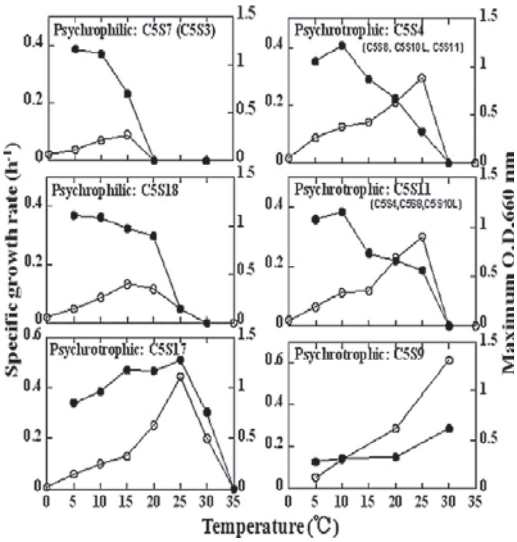


Fig. 7 Effects of temperature on growth of strains isolated from MPN-cultures at 5℃. Specific growth rates (○) and maximum O.D. values (●) at different temperatures are shown.

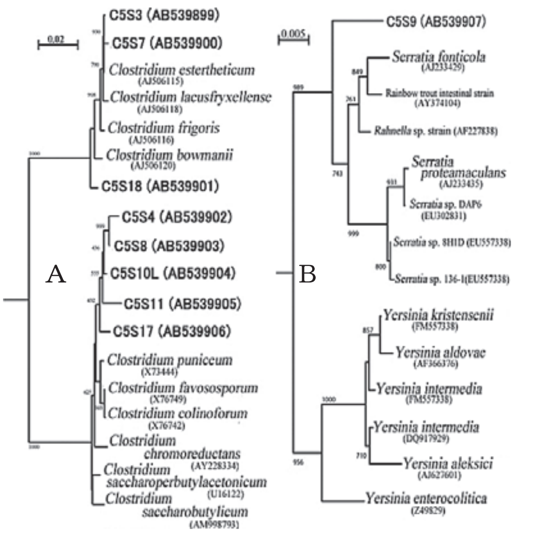


Fig. 8 Phylogenetic trees based on the full-length sequence of 16S rDNA showing the relationship of isolates from MPN-cultures at 5℃with their closest relatives.The strains were isolated from cultures on the soil sampled on 18 Dec 2007. The outgroup: *Bacillus subtilis* (A), *Escherichia coli* (B). The bar represents substitution per nucleotide position.

5℃と 10℃保温の培養からはそれぞれ 20 菌株と 32 菌株の嫌気性細菌を純粋分離した。5℃保温培養分離株の代表 9 菌株の増殖温度を Fig. 7 に示した。最高増殖速度が 15℃で，増殖収率（最高 O.D.値）も 5℃で最高と，好冷性としての特徴をよく示した 3 菌株 (C5S3, C5S7, C5S18) は *Clostridium* cluster I 内で *C. bowmanii* などの南極分離細菌に近縁に位置付けられた(Fig. 8)。他の菌株も, C5S9 菌株を除くと, *Clostridium* cluster I に属し、最高増殖速度は 25℃であったが，低温域での増殖収率が高く，耐冷性細菌として，高い低温適応性を示した。*Gammaproteobacteria* 綱 *Enterobacteriaceae* 科に位置づけられた C5S9 株は，中温性の特性が強かったが，5℃での増殖と低温での高い増殖収率からやはり耐冷性と判断された。

4.2　植物バイオマス分解低温活性嫌気微生物群集の集積

以上のように，水田土壌には好冷性細菌を含んだ低温適応嫌気性細菌群がかなり高い密度で生息していることが明らかになった。そこで,セルロース等の多糖の分解細菌からメタン生成古細菌までの多様な低温適応微生物で構成される低温活性微生物群集の集積を目的にして，水田土壌を集積源にして，稲ワラ又はロ紙を炭素源及びエネルギー源とする 10℃から 30℃までの各種保温温度での培養を継代してきた。今のところ, 10℃保温でも稲ワラ分解メタン生成が進行するが，18℃以下の保温温度の集積培養ではメタン生成が不安定であること, 15℃−18℃の温度域で植物バイオマスを活発に分解する培養系が安定して得られること，また30℃保温集積培養には18℃でも比較的活発に植物バイオマスを分解してメタン生成する微生物群集が集積されることなどが明らかになっている。

謝　　辞

低温保温バイオマス変換についての研究は，科学研究費補助金〔平成 21 年度～23 年度, 基盤研究(C), 課題番号 No. 21510078〕よって一部助成を受けて行っている。

References

1. K. Ueki and S. Nagai ed.　*Kenkibiseibutsugaku*, Youkendo, Tokyo (1993)
2. D. Suzuki and K. Ueki: Nihonbiseibutsuseitaigakkaishi, **21**, pp. 51-59 (2006)
3. A. Ueki, K. Matsuda, C. Ohtsuki: J. Gen. Appl. Microbiol., **32**, pp. 111-123 (1986)
4. A. Ueki, K. Ueki, K. Matsuda: J. Gen. Appl. Microbiol., **34**, pp. 297-301 (1988)
5. K. Ueki, A. Ueki, Y. Simogoh: J. Gen. Appl. Microbiol., **34**, pp. 425-432 (1988)
6. K. Ueki, K. Kotaka, K. Itoh, A. Ueki: J. Ferment. Technol., **66**, pp. 43-50 (1988)
7. K. Ueki, A. Ueki, K. Itoh, T. Tanaka, A. Satoh: J. Environ. Sci. Health, **A26**, pp. 1471-1489 (1991)
8. K. Ueki, K. Suzuki, S. Saitou, A. Ichimura, N. Kaku, A. Ueki: 13th International Symposium on Microbial Ecology, Seattle, USA (2010)

環境資源工学 58 : 176–180 (2011)

特　別
講　演

地下水を熱源とした無散水消雪システム[1]

桂木　聖彦[2*]，堀野　義人[2]，沼澤　喜一[2]，山谷　睦[2]

Snow Melting System using Groundwater

Masahiko KATSURAGI[2*], Yoshito HORINO[2], Kiichi NUMAZAWA[2]
and Mutsumi YAMAYA[2]

[2]Japan Groundwater Development Co., LTD.

Abstract
A large part of Japan is subject to severe winter weather. Currently, 22% of the population (approximately 28 million people) lives in such regions, which have a total area of 230,000km^2. This is about 60 % area of Japan. In 1961, snow melting system with sprinkling groundwater was developed. But use of excessive amounts of groundwater resulted in lowered ground water levels, which ultimately led to ground subsidence. However, Japan Groundwater Development Co., LTD. developed new, better solution, which is Snow Melting System without groundwater sprinkling.

Key words: Groundwater, Snow, Snow melting system, Heat storage, Energy saving

はじめに

「私たちが自然の世界をコントロールできると考えたらそれはどこかにズレを生じ，間違いを起こす。科学の力でコントロールできないものがあるという真実を受け入れるのは難しいかもしれないが，それが自然の法則だとわかったときには，尊重するしかない」

ジュラシック・パークの中で，はるか昔に絶滅した恐竜をよみがえらせたマイケル・クライトンは，1993年に来日した際のインタビューでこう語っています。

東日本大震災によって引き起こされた福島第一原発の事故は，私たちが自らの力で制御しきれない途方もないリスクと共に生活していることをあからさまにしました。平成22年のエネルギー基本計画で原発を軸に据えたエネルギー政策を打ち出していた日本政府としても路線転換は必至です。ただし，現時点ですべての原発の代替となるエネルギーを私たちは保有しておりません。社会全体で省エネ・脱原発を真剣に考えなければならない状況の中，自然エネルギーの一つである地下水を利用した無散水消雪システムが，今後の再生可能エネルギー開発の一つのヒントとなれば幸いです。

1. 平成23年11月10日　本会第127回例会において発表
2. 日本地下水開発株式会社
　平成23年8月23日受理
　*e-mail: m-katsuragi@jgd.co.jp

1.　システム開発の背景

大震災の影に隠れてしまいましたが，2010年〜2011年にかけて，この冬の日本は各地で例年以上の大雪に見舞われました。山形県内でも，酒田で1月の降雪量が208cmと，1953年（昭和28年）の統計開始以来最多となるなど，庄内北部や北村山，最上，置賜地方において平年の1.4倍〜1.5倍に達しました。

昨今「地球温暖化」と言われてきていますが，「温暖化」が必ずしも少雪には繋がらない状況となっています。「温暖化」の影響により日本海の海水温が上昇し，海水の蒸発量が増え，シベリアから日本海へと向けて吹き込む季節風が増える結果，海からの水分と乾いた寒気とが出会うことで，雪をもたらす雲が次々に発達し，重く湿った雪が降りしきることにつながります。気温が上昇することで北陸地方はミゾレの状況が多くなり，東北北部から北海道南部にかけてはこれまでとは違う雪質の降るケースが多くなると言われる所以です。雪が降れば多量の雪が一気に街を覆い尽くし，一時的にせよ交通障害を引き起こす今日，高齢化社会の到来とともに，消融雪施設の必要性が再認識されています。

さて，昭和32(1957)年4月，道路交通確保に関する特別措置法が施行され，この法のなかで「積雪寒冷特別地域」が示されました。現在，積雪寒冷地域は国土面積の約60%に当たる23万m^{2}に拡がっており，人口の約22%およそ2,800万人が生活しています。

Fig. 1 Snow melting system with sprinkling water

積雪寒冷地域では，冬期間の降雪により，歩車道の積雪堆雪および路面凍結といった雪国特有のバリアにより，交通途絶や，集落の孤立などの深刻な問題が発生し，地域住民の生活を支えるための道路通行の確保が重要な課題となっていました。

法施行されてから 6 年目となる昭和 38（1963）年，北陸地方を中心とする日本海側地域に雪が降り注ぎ，後にサンパチ豪雪と命名されました。このとき，道路通行の確保に大きな威力を発揮したのが，昭和 36（1961）年に新潟県長岡市ではじめて公共工事に採用施工された，地下水を利用した散水消雪施設でありました。Fig.1 にその施設を示します。このシステムはその後の消雪技術の主流を占め，北陸のみならず東北地方でも数多くの施設が建設され冬期の人々の生活を支えてきました。

その後，昭和 56（1980）年に再び襲ってきた豪雪を機に，当時の建設省北陸地方建設局により散水消雪に関する技術指針が定められました。この年の豪雪はちょうど 12 月 24 日に激しい降雪があったことから「クリスマス豪雪」と呼ばれています。

私たち日本地下水開発株式会社は，昭和 37（1962）年の創業以来，「水」「大地」「雪」を事業の三本柱とし，さらに「環境」を含めた「地下水の有効利用」をキーワードに，半世紀にわたり業務を進めてまいりました。

前述した散水消雪施設が積雪寒冷地の各地に普及拡大するにつれ，地下水の適切な利用方法を早急に講じなければ，水位低下や枯渇等の問題が惹起され，さらに激しさが増せば地盤沈下などの問題が生ずることを当時から懸念し，昭和 50（1975）年（昭和 50 年代）以来，地下水を一方通行で使用する従来の散水方式に変わるべく，地下水の熱エネルギーのみを利用した「地下水還元方式無散水消雪技術」の研究開発に取り組み今日に至っています。

2． 無散水消雪システムの概要と特徴

地下水還元方式無散水消雪システムの基本構成は Fig.2 の通りです。

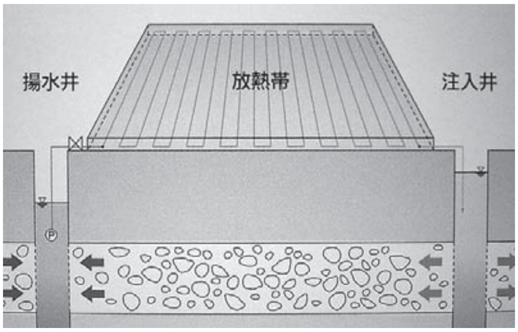


Fig. 2 Rudiments structure of snow melting system without sprinkling water

このシステムは基本的に、次に示す施設で構成されます。

1) 水中モーターポンプを設置し地下水を汲み上げる揚水井
2) 歩車道や構内駐車場等の舗装体に放熱管を埋設した放熱帯
3) 放熱後の地下水をそのまま再び地下へ還元させるための注入井

舗装体に埋設された放熱管に地下水を送り込み，地下水の持つ熱エネルギーを効率よく舗装体に伝えることで路面の温度を上昇させ，降ってくる雪を融かし，なおかつ路面の凍結をも防ぐシステムです。

特徴を整理すると次の通りです。

1) 散水消雪とは違い，路面に地下水を撒かずに雪を消すこと
2) 降雪時には、路面上には融雪水のみの状態となるため，車道においては通行車両による水はねも無く，歩道での通行も極めて快適になる
3) 路面の勾配，摩耗などの状態に関係なく，全面無雪化ができる
4) 温度（熱エネルギー）だけを使用した放熱後の地下水は，そのままに注入井から再び地下へと還元されるため，地下水の枯渇防止に非常に有効
5) 地下水のもつ熱エネルギー（自然エネルギー）だけで消雪および凍結防止を行うため，省エネルギータイプのシステムとして環境負荷の低減に役立つ昭和 55（1980）年に秋田市内の県道歩道で試験施工を実施し効果を確認した後，翌年の昭和 56（1981）年には山形市内の車道に最初の実用施設 660m^2 を導入し充分な成果を上げました。

さらに同年 10 月には，いまだ破られていない，気象官署で記録されている国内最低気温−41.0℃（明治 35 年（1902）年 1 月 25 日）を保持している北海道旭川市の道道歩道に本

Fig. 3 State of snow melting in Yamagata

Fig. 4 Installation of heat radiation pipes

システムを設置しました。

極寒の地でも地下水を利用したこの無散水消雪システムが，その効果を遺憾なく発揮することが可能であるとの実証もさることながら，放熱帯を夏期のソーラーコレクターとして兼用することも踏まえて運用を続け，後々の帯水層蓄熱システムの先駆けとしての役割も担った施設でありました。

ちなみに地下水の温度ですが，深度 100m の井戸から得られる地下水の温度は，その土地の年間平均気温にほぼ匹敵すると言われており，私たちの住んでいる山形市内では 14℃～15℃です。山形市内での消雪状況を Fig. 3 に示します。

旭川において弊社が掘削した 100m 深度の井戸からは，11℃の地下水が得られ，この温度で消雪施設を運用し，結果的に充分な効果が得られることが確認立証され，本システムに対する自信をさらに深めることができました。この地下水還元方式無散水消雪システムは，その後“山形方式” と呼ばれ全国へ広まっていきました。

地下水という比較的低温域の熱源をより有効に活用するには，放熱管およびこの放熱管を埋設する舗装体はできるだけ熱伝導率の高い材料を使用することが求められます。舗装材料とすれば，コンクリート，アスファルトが代表されます。コンクリートはアスファルトに比較してより密な状態で放熱管を巻立てることが出来る反面，養生期間を充分にとることが必要です。アスファルト舗装の場合はグースアスファルトを使用することでコンクリートと同様の消雪効果を得ることが可能となります。舗装材料については，価格的要素はもちろんのこと，消雪計画対象域の目的，用途などの条件に応じ適宜検討する必要があります。

放熱管は，熱伝導率，汎用性，価格などを総合的に勘案し，弊社では第一義的に鋼管製（口径 15A）を採用しています。放熱管製造にあたって問題となるのは管の接続方法です。鋼管を連続的に配管していく場合，通常はネジ切り加工を施しつないでいくか，あるいはカップリングと呼ばれる配管継手を使用しますが，ネジを切れば当然管厚が薄くなり耐久性が損なわれます。継手を多用すれば断面形状も変化し，また施工速度にも影響することなどを踏まえ，弊社では鋼管製放熱管において継手を使用せずとも管を一本化する技術を開発しました。しかも，製作工場に於いて，可能な限り現場の形状に応じた形で加工することとし，製品の精度向上を実現しています。放熱管の埋設間隔ピッチは，計画地域の気象条件や舗装構成等を考慮し算定しますが，経済性実用性から 150mm または 200mm が一般的です。なお 1 セット当たりの放熱管延長は 100m を基準としており，ゆえに放熱管の面積は 150mm ピッチの場合 15m^2，200mm ピッチの場合は 20m^2 を標準としています。Fig. 4 に放熱管の敷設の様子を示します。

平成に入り，積雪寒冷地でのスパイクタイヤ規制開始に伴い，各地で消雪計画立案件数が増え，地下水以外にも様々なエネルギーを熱源とした消雪施設が普及してきましたが，自然エネルギーとしての地下水を利用するシステムの最大の利点は、ランニングコストが他の熱源方式に比べ格段に廉価だということが挙げられます。Table 1 に主な消雪システムの費用一覧を示します。

Table 1 List of approximate cost for major systems of snow melting

消雪システム	熱 源	放熱材	イニシャルコスト	ランニングコスト
地下水還元	地 熱	放熱管	50～70	0.4～0.6
散水消雪	地 熱	散水ノズル	12～30	0.2～0.5
電 熱 線	電 力	電熱線	40～70	2.0～3.0
温泉熱利用	廃 湯	ヒートパイプ	30～40	0
温水ボイラー	灯 油	放熱管	45～70	1.0～1.5
	灯 油	ヒートパイプ	58～83	1.2～1.7

(設計放熱量200W /m^2 イニシャルコスト: 1,000円/m^2 ランニングコスト: 1,000円/m^2/年)

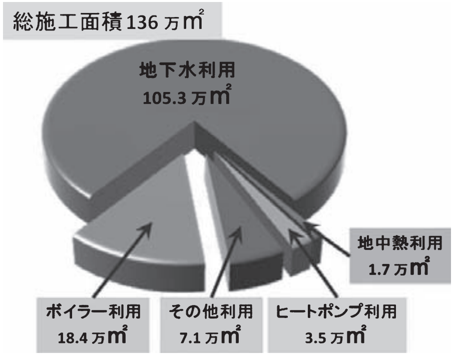


Fig. 5 List of heat source at snow melting facilities without sprinkling water

使用する動力は，地下水を汲み上げるための水中モーターポンプのみであり，現在注目されているCO_2削減の観点からも時代を先取りした消雪システムと自負しております。

弊社の無散水消雪システム施設は，北海道から山口県までの積雪寒冷地において，平成22年12月末での延敷設面積136万m^2を超えております。弊社の無散水消雪施設の熱源別一覧をFig. 5に示します。

このうち，地下水を利用する施設は全体の約8割を占めています。なお，Fig. 5の“その他利用”で使用している熱源については，「温泉熱」「トンネル湧水」が9割を超えており、目新しいところでは「ペレットボイラー」を利用している施設も近年手がけています。

3．　地下水の利用と地中熱

地下水のような低温域エネルギーでも充分消雪可能であることを，弊社が長年取り組んできた無散水消雪技術が実証してきたことはこれまで述べてきたとおりです。

道路消雪施設は，利用者の要求レベルが，安全性から利便性，さらに快適性へと高度化してきています。また，地域の活性化や今後予想される少子高齢化社会の到来も踏まえ，冬期バリアの解消については，点から線，線から面へと拡がりをみせています。国土交通省から平成12(2000)年5月に施行された「交通バリアフリー法」において“安心して移動できる社会を目指して，誰もが安全で快適に歩ける空間づくり”が推進されたことを踏まえ，より自然と調和した循環型社会の構築が課題とされており，消雪施設へ利用する自然エネルギーの種類も多様化してきているのが現状です。

具体的には，空気熱，太陽熱，風力，前述したような木質ペレットに代表されるバイオマスなどですが，これらの自然エネルギーは，エネルギー密度が小さく熱源施設の規模が大となるため，設備費も割高になる傾向にあります。

繰り返しになりますが，地下水は非常に有用なエネルギー

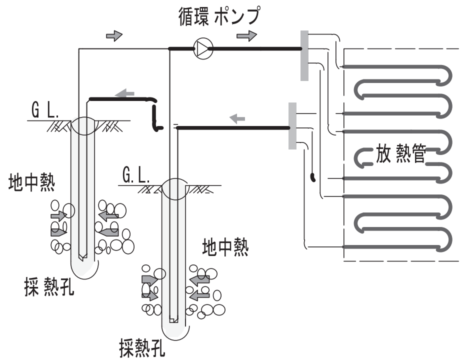


Fig. 6 Direct system of ground source

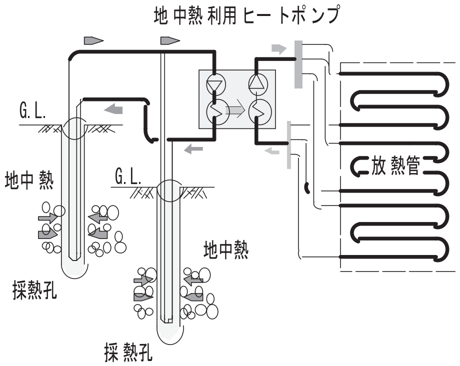


Fig. 7 Heat pump system of ground source

であり，かつ限りのある貴重な資源です。しかしながら，積雪寒冷地全域で利用できるものでは無く，また取水規制などの法的な縛りを受ける場合もあります。

これらのことを踏まえ，地下水を汲み上げずに全国どこでも利用できる地中熱だけを有効利用するシステムが開発され，徐々に施工実績も増えてきています。以下に地中熱利用消雪システムの概要を述べます。

地中熱利用消雪システムは，地中熱のみを利用する方式と，地中熱をヒートポンプの熱源として利用する方式に区分されます。

Fig. 6に示す地中熱直接利用方式では，地下水の熱をそのまま利用する方式に比較して，循環液を熱交換するために，放熱管への送水温度は低くならざるを得ません。また，送水温度も消雪負荷に影響を受け変動するため，消雪能力には自ずと限界が生じます。このことから本方式の計画に当たっては，熱源条件を適切に踏まえ，計画地の使用目的や使用箇所に応じた消雪レベルの設定に十分に配慮することが必要となります。

Fig. 7に示す地中熱をヒートポンプの熱源とするシステムでは，ヒートポンプの性能に応じ，地下水温以上の温度で循環液を放熱管に送水することができるため，消雪効果を

向上させることが可能となります。本方式の特徴を下記にまとめます。

1） 採熱管入口温度が高い場合は，採熱量も増加します。これは，ヒートポンプの採熱側の熱交換器が，循環液の温度が高いほど熱交換効率がよく（循環液から熱を良く奪う）からです。また地中熱の温度利用幅は，地中熱直接利用方式に比べ大きいものとなります。

2） 同様に，採熱管入口温度が高い場合，ヒートポンプ出力（放熱量）も大きくなります。
即ち，エネルギー効率が向上しヒートポンプ単体の成績係数(COP)が大きくなると同時に，システム成績係数(SCOP)も大きくなるということです。

地中熱を利用するシステムの場合は，採熱孔内の熱交換器を循環する温度が消雪側の負荷条件（放熱量）によって変化するため，模擬解析で採熱量を予測することが必要となります。採熱孔掘削完了後に熱応答試験(TRT)を実施し，得られた地盤の熱伝導率から採熱量を求め，適正な採熱孔の本数を決定することになります。

採熱孔は工事費に占める割合が大きいため，施設が大規模になればなるほど本数を吟味する必要があります。地中熱に限らず，エネルギー密度の小さい自然エネルギーを利用する場合，消雪レベルをどの程度にするかによって、設備費やランニングコストにも大きく影響を与えるので十分な検討が必要です。

地中熱・地下水熱といった自然エネルギーへの関心が高まるにつれ、井戸掘削速度向上が要求されてきました。弊社では，平成15（2003）年，自走式の新型ボーリングマシン「ソニックドリル」（Fig. 8 参照）を全国に先駆け導入し，深度100mの井戸を最短6時間で掘削するという驚異的スピードを実現しました。これまでの8年間で700本に迫る掘削実績を上げ，多くの皆様から高い評価をいただいております。

弊社では，昭和59（1984）年から，消雪のみならず，帯水層蓄熱による地下水利用ヒートポンプ冷暖房システムを本社屋に導入し，これまで27年間運用してきました。灯油ボイラー＋空気熱源エアコンの従来型冷暖房利用との比較でCO_2削減量約518トンと試算されています。

帯水層蓄熱冷暖房システムは，地下水熱を有効活用するシステムであり，CO_2排出量削減効果が高いほか，大気中へ空調排熱をださないことからヒートアイランド抑制効果があることが認められている優れた技術です。しかしながら，欧米各国では広く普及しているものの，日本国内においては，地下水揚水規制が行われている地域が多く存在するほか，井戸設置やヒートポンプにかかるイニシャルコストが高いこと，稼働に伴う地下環境に対する影響評価が行われていないこと，優れた技術であることの認知度が低いなどの阻害要因から普及が進んでいないのが現状です。

Fig. 8 Sonic drill

弊社では，こうした状況を打開するための研究開発に取り組んでおり，2009年には環境省クールシティ推進事業より「帯水層蓄熱による地下水利用ヒートポンプ冷暖房システムの実証試験」を受託し，地下水使用量，地下水温度，電力等を測定，地下水や地盤環境への影響評価を行っています。

2011年からは，新たに環境省地球温暖化対策技術開発等事業の中で，弊社の「帯水層蓄熱冷暖房システムの地下環境への影響評価とその軽減のための技術開発」が採択され，帯水層蓄熱に関する更なる検証作業が進められております。

震災後の電力不足に伴う節電指向を背景に，環境に優しい省エネ・省資源社会，そして低炭素社会の構築に貢献できるよう，これからも研究開発を続けてまいります。

References

1. M. Katsuragi: Snow melting system without sprinkling water using groundwater as a heat source, Monthly Clean Energy, Aug. 2009, pp. 34-40(2009)

＜連絡先＞ 日本地下水開発株式会社
〒990-2313　山形市松原 777 番地
TEL 023-688-6000

環境資源工学 58 : 181–185 (2011)

特 別
講 演

酒田地区広域行政組合のごみ処理の現状 [1]

松山 正雄 [2]，佐藤 努 [2*]

The Present Situation of Garbage Treatment of Integrated Administration Union in Sakata Area

Masao MATSUYAMA[2] and Tsutomu SATOH[2*]

[2]The Integrated Administration Union in Sakata Area

Abstract
The integrated administration union in Sakata area conducts the treatment of general wastes. In the union facility, the treatment varies the kinds of the wastes. The effective utilization of the wastes and energy has been carried out making use of the characteristic of incinerators in the facility.

Key words: Garbage-disposal facility, Bulky garbage item processing facilities, Recovery of resources, Fluidized bed gasification melting furnace

1．緒 言

酒田地区広域行政組合は酒田市，遊佐町，庄内町の一市二町で構成され，山形県北西部に位置しており，北は秋田県南部に接し，西に庄内砂丘を隔て日本海に臨み，庄内平野が広がる穀倉地帯を形成している。県内唯一の重要港湾酒田港は平成 15 年に国のリサイクルポート指定を受け，関連企業と共にリサイクル産業の拠点としての機能を果している。本組合は家庭系廃棄物を中心とした一般廃棄物の処理を行う一部事務組合であり，組合管内面積は 1,060.46km^2，人口は 151,425 人（平成 23 年 3 月 31 日現在）となっている。

本組合は一般廃棄物処理施設としてごみ処理施設，粗大ごみ処理施設（ごみ処理施設に併設），資源化処理施設（リサイクルセンター），最終処分場（埋立地），し尿処理施設の管理運営を行っている。特にごみ処理施設においては，循環型社会の構築のための特色といえるガス化溶融炉を採用するとともに，ごみの資源化及びごみエネルギーの活用による環境への負荷を軽減させることを目的として建設された施設である。

2．ごみ処理の概要

本組合で処理を行う廃棄物の区分は，もやすごみ，粗大ごみ，資源物，ペットボトル，埋立ごみの 5 種類であり，これら以外の紙類資源や廃食用油，一部生ごみなどの収集は市町村独自の収集として回収，資源化を行っている。家電リサイクル法の対象となる家電や資源有効利用促進法の対象となる家庭用パソコンについては収集および処理を行っていない。施設で処理を行う廃棄物は，収集車や専用トラックなどで回収され，もやすごみと粗大ごみはごみ処理施設へ，ビンや缶・金属類・ペットボトルなどの資源物，ガラスや陶器類・乾電池などの埋立ごみは資源化処理施設へ運ばれ処理を行っている。ごみ処理施設からの石や貝殻などといった不燃物やキレート処理された処理灰，資源化処理施設に搬入される埋立ごみや処理後に発生する残渣等は最終処分場で埋め立て処分される。搬入される総ごみ量は，平成 22 年度で 50,756t，組合管内一人 1 日あたりの平均ごみ量は約 914g である。ごみ量は毎年わずかであるが減少傾向にあり，市町が主

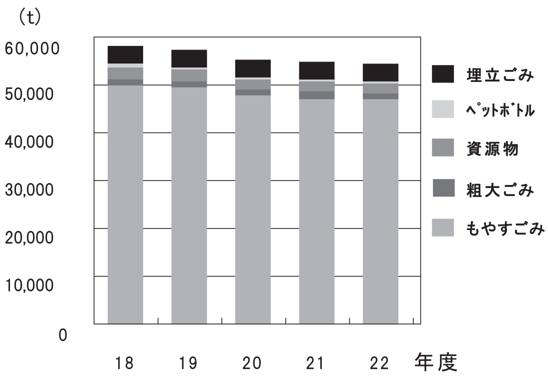


Fig.1 Transition of garbage amount

1. 平成 23 年 11 月 10 日 本会第 127 回例会において発表
2. 酒田地区広域行政組合総務課施設係
平成 23 年 8 月 25 日受理
*e-mail: koiki-soumu@city.sakata.lg.jp

体となってのごみの減量化の推進や環境教育，リサイクルに関する意識啓発を図っているほか，地域内人口の減少が要因といえる。組合管内でのごみの有料化は行っておらず,今後はごみ減量化も併せて検討するとしている[1]。ごみ量の推移を Fig.1 に示す。

３． ごみの種類

資源として回収されるスチール缶，アルミ缶，ビン類，ペットボトルなどは単一素材のものであり，ガラス瓶を除いては有償としての価値があり，リサイクルルートも確立されている。本組合でもペットボトルは専用の袋を使用しており，スチール缶，アルミ缶は他の金属類やガラス瓶と同じ袋で回収し，資源化処理施設にて機械及び手選別を行っている。

複合素材のものや電子部品を使った製品がごみとなった場合の取り扱いとして，小さなものでプラ系の割合が多く強固な金属が少ない場合は可燃ごみ（例として電子玩具やコード類など），金属部分やガラスが多いものは埋立ごみ（例としてカメラや傘など）という区分をしている。本組合では，大型の家具や家電製品，自転車などは粗大ごみとして受け入れを行っている。

傘などはビニール部分と骨組の部分を分けることでもやすごみや資源物に分別できることから現在呼びかけを行っているところである。

受入を行う粗大ごみは，種類に応じて係員による中身確認や手作業による解体が必要なものがある。処理手数料は一律 10kg つき 105 円となっている。主な粗大ごみの搬入台数と処理方法を Table 1 に示す。

４． 粗大ごみ処理概要

粗大ごみの処理区分は材質や内容物で処理方法が異なることから，施設内での受入段階で選別する方法をとっている。粗大ごみの選別について Fig.2 に示す。

Table 1 Number of carry main bulky refuse and treatment way

年度	Ｈ２１年度（台）	Ｈ２２年度（台）	処理方法
電子レンジ	408	302	PCBを含む製品か確認
ストーブ	3,005	2,010	灯油の抜取
ベットマットレス	689	647	バネの分離
ソファー	786	671	バネ、金具の分離
座椅子	1,208	1,284	金具の分離
パラソル	139	112	ビニール、金具の分離
除湿器	259	193	圧力タンクの分離
流し台	49	58	金属、木製部品の分離
ガラス	53	17	枠からの取り外し
アコーディオンカーテン	125	149	ビニール、金具の分離
畳	6,166	6,056	前処理装置切断処理
自転車	1,879	858	破砕処理

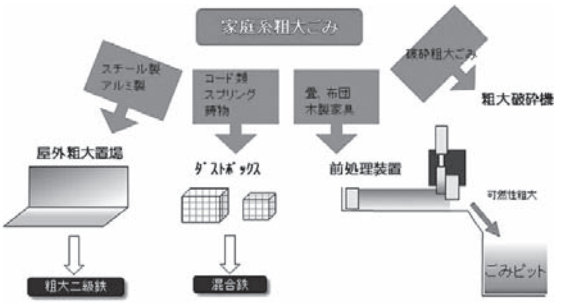


Fig.2 Sorting of bulky refuse

スチール製の棚や机，パイプ及びアルミ製のサッシの枠や脚立などは屋外粗大置場に仮置きを行い，粗大二級鉄としてスクラップ業者に引き渡ししている。

コード類となる延長コードやコンセントコード，配線などは本体からの切り離しをしてからダストボックスへ入れられる。また，鋳物品やチェーン，ワイヤー，パラソルの解体骨組，ソファー解体時のスプリング等，破砕処理に適さないものはダストボックスへと入れられ，混合鉄としてスクラップ業者へ引き渡している。

大型の可燃ごみとなる畳，布団，絨毯，枝木，木製家具，ビニールシートなどは焼却炉の性能上，約 20cm 幅に切断する必要があることから前処理装置で切断を行ってからごみピットに投入される。

(1) 前処理装置

処理能力：1ton/1 h

型　　式：全自動油圧せん断式

ケース寸法：1100W×800H×4000L

単一素材や切断処理を行う粗大ごみ以外は破砕処理を行う。ただし，破砕時に爆発の危険性があるものについては受け入れ段階で係員が確認し，ストーブやファンヒータの石油は完全に抜き，ガスコンロのボンベやスプレー缶などは取り除く作業を行う。除湿機の圧力タンクやモータ類なども破砕機のロータを傷める原因となるため取り除いている。電子レンジの古い機種では PCB が含まれるものがあることから未だ，型番の確認を行いメーカーの抜き取りが完了してから破砕処理を行っている。粗大ごみ処理施設のフロー図を Fig.3 に示す。

(2) 粗大ごみ処理施設

処理能力：12ｔ/5h

① 受入供給設備

供給コンベヤ、エプロンコンベヤ・・・1 式

② 破砕設備

ごみ破砕機、衝撃せん断併用回転式・・1 式

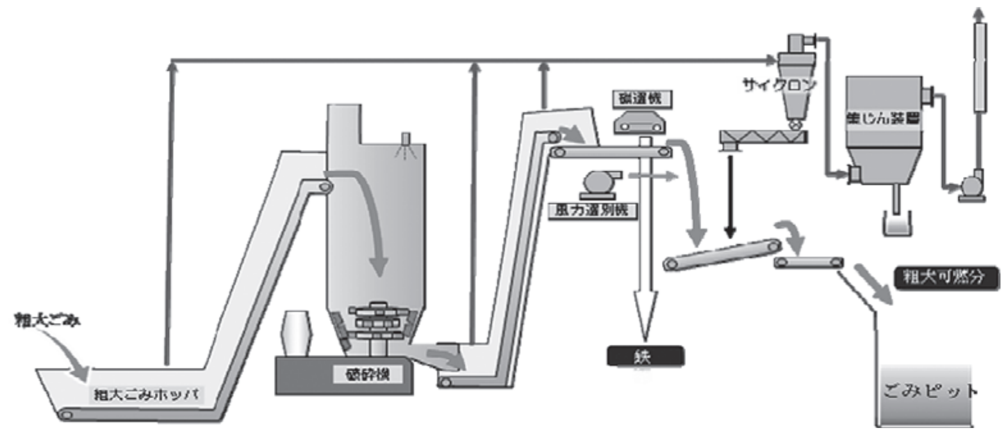


Fig.3 Flow of bulky refuse treatment

③　搬送送設備

ベルトコンベヤ・・・・・・・・・・・・1 式

④　選別設備

ベルト式磁選機、風力選別機・・・・・1 式

⑤　貯留・搬出設備

鉄類バンカ・・・・・・・・・・・・・・1 式

⑥　集じん設備

ろ過式集じん方式・・・・・・・・・・・1 式

粗大ごみ処理施設で破砕される粗大ごみは，ストックヤードからショベルを使いホッパへ投入される。ホッパからコンベヤで破砕機へ搬送し，破砕機内では約 3m 上から粗大ごみは落下させ，衝撃やロータの回転による圧縮，剪断，摩砕により 15cm 以下に破砕される。破砕物はコンベヤで搬送され，鉄類は磁選機で選別されバンカへと入る。バンカで貯留された鉄類はスクラップ業者へ引き渡される。鉄以外のものはごみピットへ投入され可燃ごみに混ぜ焼却されるが，この中にアルミや銅といった非鉄金属も含まれる。

5．　可燃ごみ処理概要

ごみ処理施設のフロー図を Fig. 4 に示す。

(1)　ごみ処理施設

処理能力：196 t /日（98 t /24 h ×2炉）

①　受入供給設備

ごみピット&クレーン方式・・・・・・・・1式

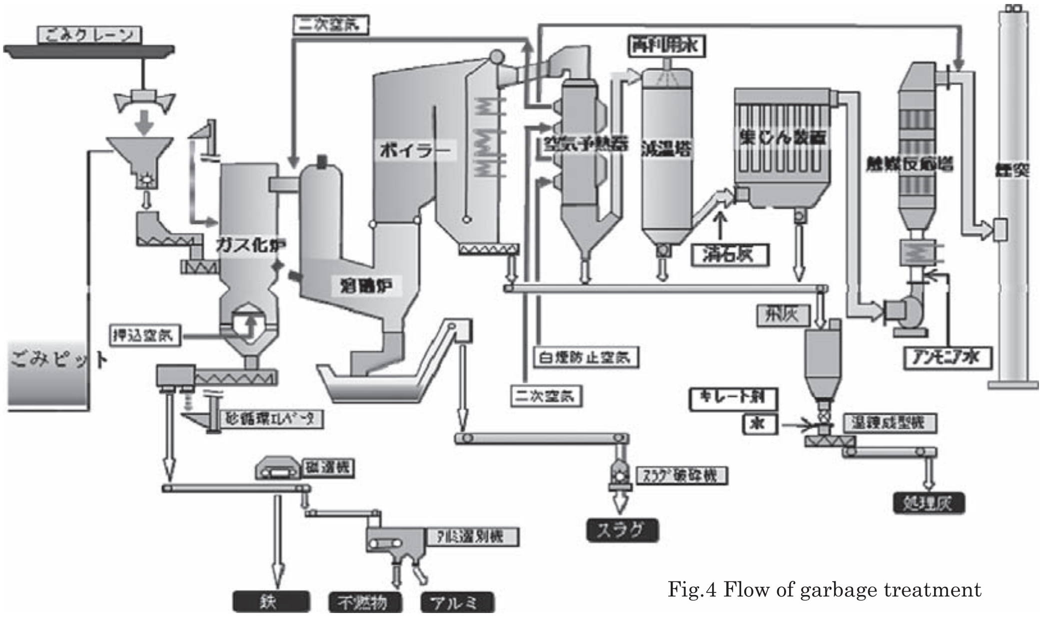


Fig.4 Flow of garbage treatment

② 溶融燃焼設備

流動床ガス化溶融炉・・・・・・・・・・・・2基

③ 燃焼ガス冷却設備

廃熱ボイラー方式・・・・・・・・・・・2基

④ 排ガス処理設備

ろ過式集じん方式、触媒脱硝・・・・・2式

⑤ 余熱利用設備

蒸気タービン発電機・・・・・・・・・・1基

⑥ 通風設備

押込送風機、二次送風機、誘引通風機・2式

煙突（59m）・・・・・・・・・・・・・1基

⑦ 溶融固化物及び飛灰処理設備

水冷方式、キレート添加方式・・・・・1式

⑧ 給水設備

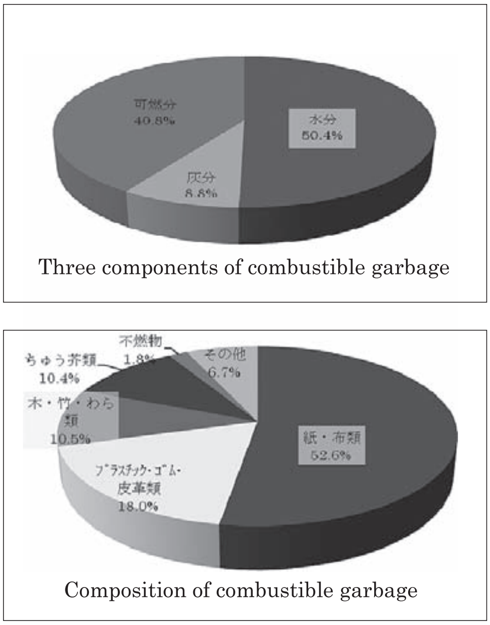
上水利用（クローズドシステム） ・・1 式

⑨ 排水処理設備

凝集沈殿方式、ろ過方式 ・・・・・・1 式

ごみ処理施設の炉形式は流動床式ガス化溶融炉で，ガス化炉では炉の中の直径約 1mm の砂が空気により浮いた状態で 500℃～600℃に熱せられごみを乾燥させガス化させる。このガス化炉で発生したガスを旋回溶融炉に送り，燃焼空気とともに 1,300℃～1,400℃の高温で燃焼し灰分をスラグ化する。

本組合のガス化溶融炉は，ごみの発熱量だけでスラグ化するため，助燃バーナーを極力使用しない高温燃焼が大きな特徴といえる。施設稼働前には埋立てしていた発熱量の大きいプラスチック類をもやすごみに区分することによりごみ全体の熱量が上がり高温燃焼を実現することができた。このことから灰分をスラグ化することで埋立地の延命化が図られる結果となった。ごみの性状は，平成 22 年度平均で水分が 50.4%,低位発熱量 1,815kcal/kg であった。可燃ごみの性状を Fig. 5 に示す。



Three components of combustible garbage

Composition of combustible garbage

Fig. 5 Properties of combustible garbage

山形県リサイクル製品認定・
リサイクルシステム
認証マーク

Fig. 6 Certified mark

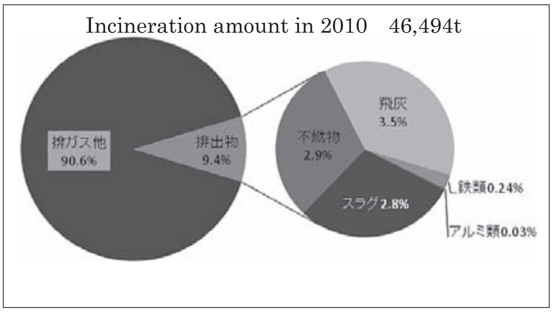


Fig.7 Proportion of products

1) 可燃ごみ焼却

ごみピットに貯められた可燃ごみ及び粗大設備からの可燃物は，ごみクレーンによってピット内で破袋，撹拌を行い，ホッパに投入される。投入されたごみは一軸回転破砕機によって 10cm 以下に破砕された後，給じん装置のコンベヤによりガス化炉に連続供給される。

ガス化溶融炉は，連続した高温燃焼を行うためになるべく細かくしたごみを安定的に投入することが要求される。そのため，ごみピットに入れる可燃ごみの性状について制限しているものがある。例えば長い枝木，ビニール，ワイヤーロープなどが混入すると投入ホッパでのブリッジや破砕機での破砕不良，給じん装置でのスクリューコンベヤへの巻付きなどが発生する要因となる。その結果，ごみの供給切れが生じ溶融炉の温度が下がることになる。可燃ごみは大きさで焼却に影響を与えることからも受入の制限が必要であり，枝であれば太さ3cm以内，長さ 1m をもやすごみとして区分しており，これを超える大きさであれば粗大ごみとなる。ビニールホースやロープも 1m 以内に切ったものをもやすごみとしている。他にもスクリューコンベヤの羽根の摩耗やカーボンの付着によりごみの送りが悪くなりガス化炉へ定量ではなく一度に多くのごみが落ちることで炉内圧の変動が大きくなり安定供給が崩れ，結果的に全体の温度を下げることとなり灰溶融の妨げとなる場合がある。

2) 資源回収

ガス化炉では投入された可燃ごみを 500℃～600℃で

乾燥，ガス化させると同時に不燃物が炉下へ自重で沈み，砂とともに搬送され，磁選機により鉄分，アルミ選別機によりアルミ分を回収する。粗大ごみ処理施設からの鉄分を除くアルミ類も回収される。いずれも有価物としてスクラップ業者に引き渡しを行っている。ガス化炉の炉砂は，可燃ごみに含まれて入ってくる砂で補充されている状態であり，現状ではトラブルはなく新砂の入替など必要としない。

溶融炉では，灰分が高温燃焼により溶融しスラグが生成され，水中に落ちることで水砕され，更に破砕機により粒度調整されたスラグがバンカに貯留される。このスラグは「酒田地区広域行政組合溶融スラグ資源化指針」に基づき溶出・成分試験等を実施し，品質管理を行っている。平成 22 年度は，焼却量 46,494 t に対してスラグの発生量が約 2. 8%, 1,297.8 t 発生している。現在は，スラグ全量を有価物として売り払い，コンクリート二次製品や舗装用アスファルト合材等に再利用され，一部製品となったものは山形県リサイクル製品認定制度により「山形県リサイクル製品」として認定され利用されている。認証マークを Fig. 6 に示す。

スラグ化しない灰は，飛灰としてボイラー下や減温塔，集じん装置等から排出され，飛灰処理設備にてキレート処理を行い，処理灰として不燃物とともに埋立処分される。焼却量に対する埋立物の割合は約 6.4%である。焼却によって発生する生成物の割合を Fig. 7 に示す。

3) 熱回収

溶融炉からボイラーにかけて炉壁を形成する水管構造となっており全体で熱回収を行う仕組となっている。発生した蒸気はボイラー出口で 2.94MPa, 300℃の過熱蒸気にすることで蒸気タービン発電機により最大 1,990kW の発電をすることができる。発電による電気は，ごみ・粗大ごみ処理施設のほか，し尿処理施設の電力量のほとんどを賄うことができ，余剰電力は東北電力へ売電している。ごみ及び燃料の入熱に対する発電効率は約 12%で，平成 22 年度の発電電力量は年間 12,264,940kWh であった。電力収支表を Table2 に示す。

その他，発電以外の熱利用として給湯，吸収式冷凍機，熱交換器にて冷温水を作り冷暖房として場内及びし尿処理施設に供給している。冬期間は蒸気タービンの排気を熱交換して構内道路の融雪を行うロードヒーティングに利用される。フローをFig. 8に示す。

Table 2 Balance table of electric power

発電電力量	12,264,940	k Wh
購入電力量	1,066,460	k Wh
売電電力量	513,860	k Wh
構内消費電力量	12,817,540	k Wh

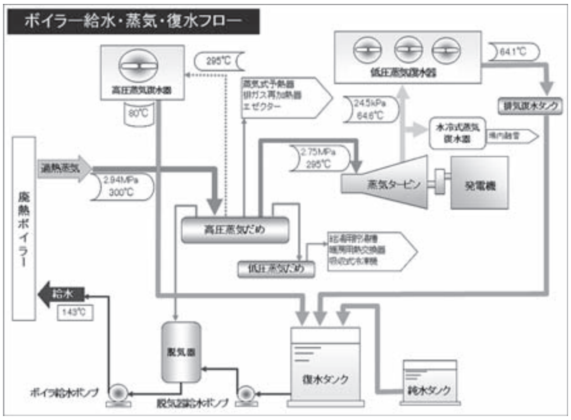


Fig.8 Flow of heat utilization

6．結　言

ごみ処理施設には毎日のように多種多様なごみが搬入され，処理され排出される。そのまま再使用できそうな粗大ごみから僅かな希少金属が含まれているであろう家電製品，野焼きの禁止で大量に持ち込みされる剪定枝木，未だ事業者によるリサイクルシステムが構築されない廃スプリングマットレスなど，循環型社会を構築するうえで課題として取り組んでいかなければならないものは数多くあるのが現状である。処分方法やコスト，効率性などトータルで考えた場合の適正な方法を今後も模索していかなければならず，当組合として厳しい財政状況のなか効率的な処理を行うため関係機関，市民，事業者の理解と協力を得られるようこれからも取り組んでいかなければならない。

References

1. Sakatashi: Sakatashi gomisyori kihonkeikaku (2007)