

・研究課題名・研究番号=廃石膏ボードの再利用技術システムの構築に関する研究

・研究番号 = K 2 1 1 6, K 2 2 0 7 9

・国庫補助金精算所要額 (円) = 73,363,940 円

・研究期間 (西暦) =2010～2011

・代表研究者名= 井上 雄三 (独立行政法人国立環境研究所)

・共同研究者名= 遠藤和人 (独立行政法人国立環境研究所)、肴倉宏史 (独立行政法人国立環境研究所)、
亀井健史 (宮崎大学)、鶴飼恵三 (群馬大学)、森啓年 (独立行政法人土木研究所)、今岡
務 (広島工業大学)、西嶋渉 (広島大学大学院)、井真宏 ((株) エフイ石灰技術研究所)

・研究目的 =具体的用途として①地盤安定化資材 (基礎地盤改良, ため池堤体遮水資材, 各種建設残土等の建設資材化), ②建設資材フィルター, ③魚礁ブロック資材に対して再生石膏を地盤や海底等の自然空間に使用した場合の環境安全性や環境修復・改善機能を検討し, 最終処分を回避できる持続可能な再利用技術システムを構築する。

(1)再利用用途開発と技術及び材料の質的量的要件に関して調査し, これらの用途に対する需給市場を明らかにする。(2)地盤改良資材等建設資材への適用に関する機能及び環境安全性評価: 地盤環境等へ適用した場合のフッ素等の含有有害物質の溶出動態及びその防止対策を検討するとともに適用地盤等における改善効果を明らかにする。また地盤環境等へ適用した場合の硫化水素発生条件及び抑制条件を明らかにする。(3)本研究成果を基に環境安全性及び修復・改善機能を考慮した再生石膏の建設材料としての技術基準及び施工基準の素案を提案する。

・研究方法 =本研究で取り扱った主要用途 (地盤改良資材, 農業用ため池堤体改修資材, 建設発生土等の改良資材, 各種建設資材への添加材, 魚礁ブロック資材) に対して, 現場適用を想定した実験的研究を行うことにより, 再生石膏の資材製品としての力学的性能や藻類定着性能を評価し, 既存製品と同等の性能を明らかにする。環境安全性に関しては, フッ素や有害重金属の溶出並びに捕捉メカズムを解明し, さらに適用地盤中での硫化水素非発生条件を明らかにする。これらの実験結果を基に環境安全性を配慮した主要用途への適用技術の評価方法を確立する。即ち, 環境安全を配慮した再生石膏の再利用用途の提示とその技術基準及び施工基準の素案を提案する。また, 地域特性や将来予測を踏まえた需給バランスの解析に基づいた量的評価方法を確立する。

・結果と考察 = 我が国の代表的な土質材料 10 種類を選定し, 鉱物組成, 無機・有機化学組成, 細菌叢から土質材料の基礎的な特性をまとめた (表-1,2)。また, 廃石膏ボードの年代別, 製造メーカー別特性を整理し, 微量含有物質 (F, Fe, P, K, Mg, Y, Al, As, Cl, Mn, Na, Si, Ti, Zn) および溶出試験から類型化とフッ素溶出特性 (図-1,2) を明らかにした。バイアル培養法により代表的な土質材料と再生石膏混合試料からの硫化水素発生特性を検討し, 標準的な硫化水素発生判定試験法として温度 (図-3)、バイアルの固液比 (図-4)、液気比, 土質材料の粒度 (図-5)、植種 (図-6) として培養温度 40°C、液固比: L/S = 2、ヘッドスペース比: LS/G = 1、土質材料の粒度: 1 mm under、殺菌: なし、植種: なし、が選定され, 図-7 に示した試験法を確立した。

用途場 (利用環境) として地盤改良, 堤体修復・改善, 残土改良, アスファルト舗装, 増殖礁における力学的な機能改善や水準到達, および施工現場への有害物質溶出 (特にフッ素) と硫化水素ガスの漏洩に関する環境安全性が検討された。力学的検討では運搬を想定したトラフィカビリティやため池腹付け盛り土などの地盤支持力 (図-8,9)、アスファルト道路における車両通行特性 (図-10, 11, 12)、増殖礁ブロック

のへのコンブの着床性 (図-13, 14) は、標準使用資材と同等あるいはそれ以上の性能を有していることを実験的に明らかにした。一方、環境安全性に関しては用途場の土質特性により変動はあるが、高炉 B 種セメントや石炭灰等の機能補強資材を加えることにより (図-15,16,17、表-3)、また締固めによる力学特性改善のための標準施工により、フッ素溶出 (図-18) および硫化水素ガス発生ポテンシャル (図-19,20) ともに低く抑えることが示された。また、実施工を想定した乾湿繰り返しによる改良地盤の劣化が少ないことを明らかにした (図-21,22)。

廃石膏ボードの発生から再生石膏の製造とその利用並びに利用された環境における施工後のモニタリングに関する全行程における利用基準のあり方を検討し、提案した (図-23)。

表-1 供試土質材料および再生石膏の物理・化学特性

試料	試験時含水比 (%)	粒子密度 (g/cm ³)	強熱減量 (%)	TOC含量 (%)	鉄含量 ^{*3)} (%)	Al含量 ^{*3)} (%)	糖含量 (%)
砂質土 美浦砂	12.6	2.69 ^{*1)}	3.4	0.01	2.8	3.0	—
沖積粘土 トチクレー	1.3	2.76 ^{*1)}	3.7	0.19	2.5	2.4	—
ローム 関東ローム	86.7	2.78 ^{*1)}	14.3	1.37	6.4	10.0	—
真砂土 真砂土	1.4	2.68 ^{*2)}	1.1	0.02	2.0	4.1	—
浚渫土 霞ヶ浦浚渫土	43.1	2.71 ^{*1)}	3.8	0.17	2.9	3.4	—
	有明浚渫土	83.4	—	7.0	—	—	—
再生石膏 二水	16.3	2.37 ^{*2)}	6.6	0.91	0.09	0.58	0.74
	半水	4.8	—	4.3	—	—	1.29

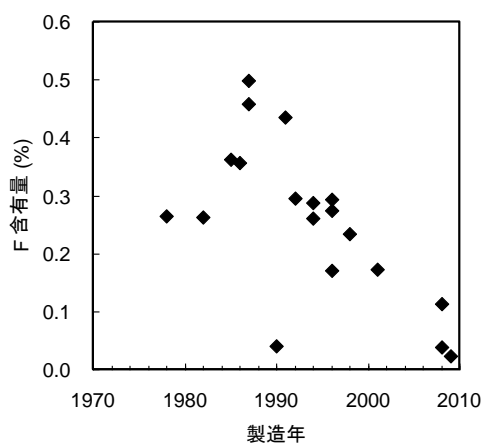


図-1 フッ素含有量と製造年の関係

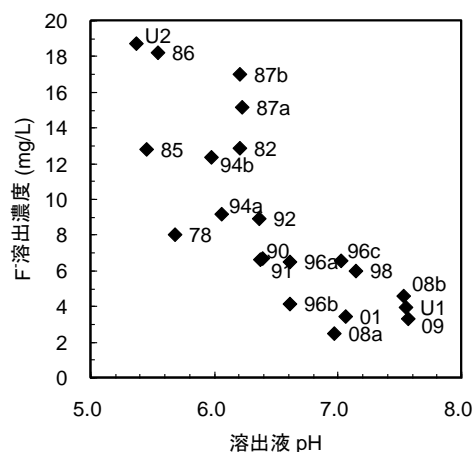
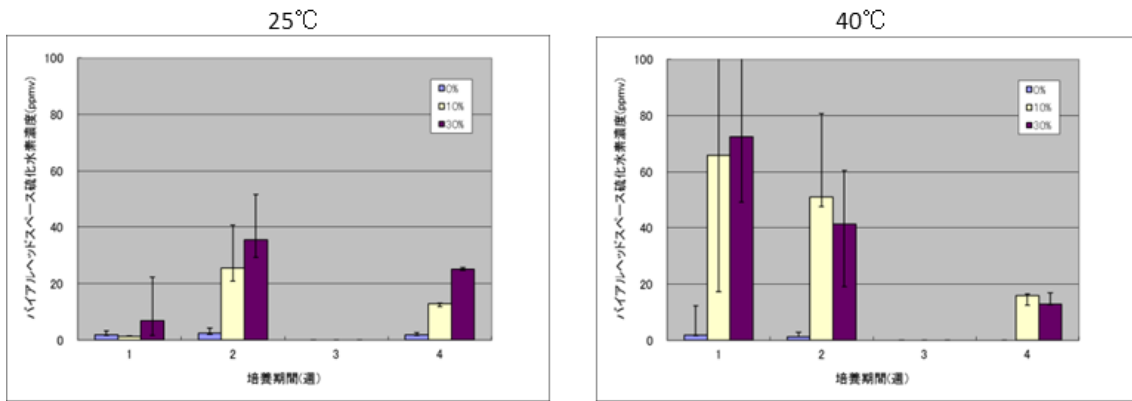
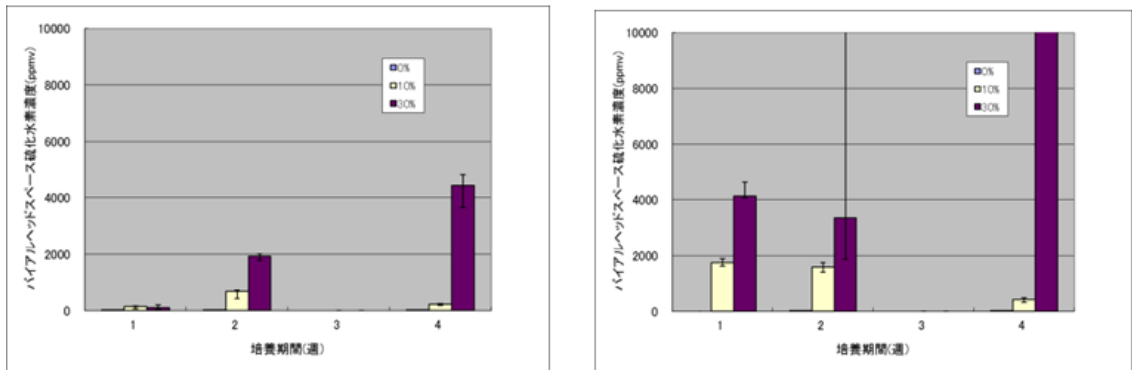


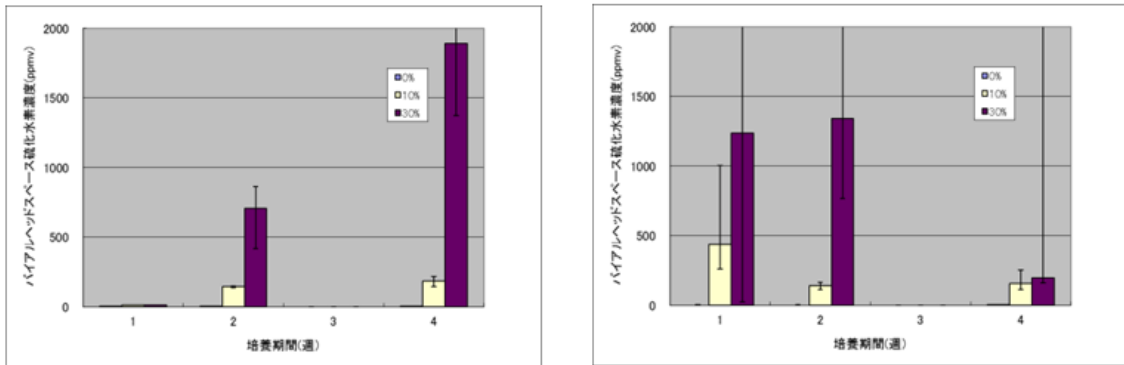
図-2 溶出液 pH と F 溶出濃度の関係



関東ロームA

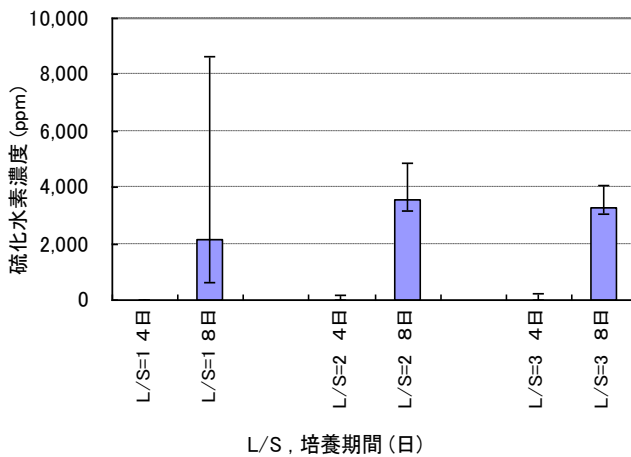


海成浚渫土



真砂土

図-3 バイアル試験培養温度 25°C、40°Cにおけるヘッドスペース硫化水素ガス発生濃度

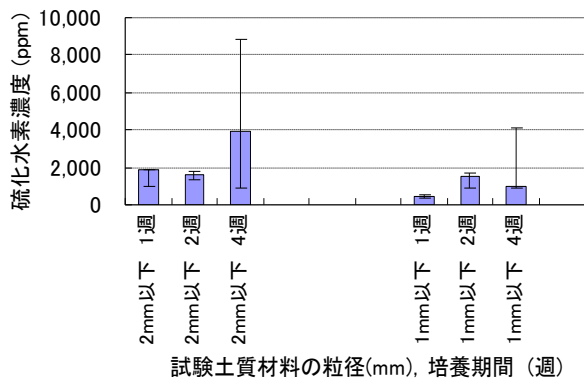


試料組成

L/S	再生2水石膏 (g)	蒸留水 (g)
L/S=1	29.4	20.6
L/S=2	19.6	30.4
L/S=3	14.7	35.3

液固相/気相LS/G = 1, 培養温度: 35°C
供試材料は2水石膏のみ

図-4 硫化水素発生量に及ぼす液固比 (L/S) の影響



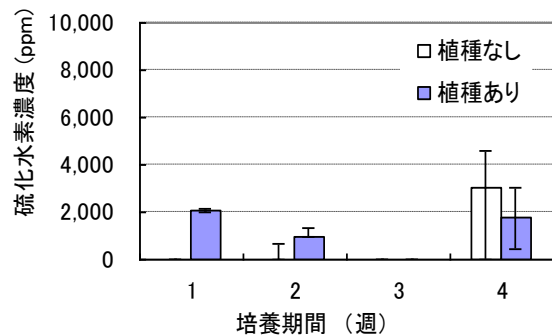
土質材料の組成

粒度	土質材料 (g)	再生半水石膏 (g)	蒸留水(g)
1mm以下	14.2	6.3	39.6
2mm以下	14.2	6.3	39.6

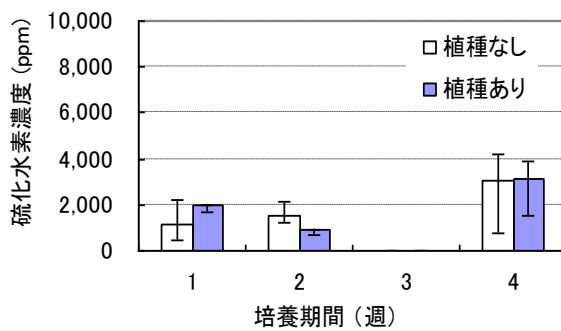
液固比L/S=2, 土質材料、再生石膏混合比率30%

土質材料:真砂土, 培養温度:40°C

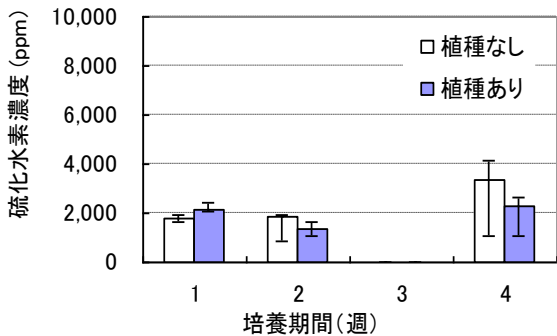
図-5 硫化水素発生量に及ぼす土質材料粒度の影響



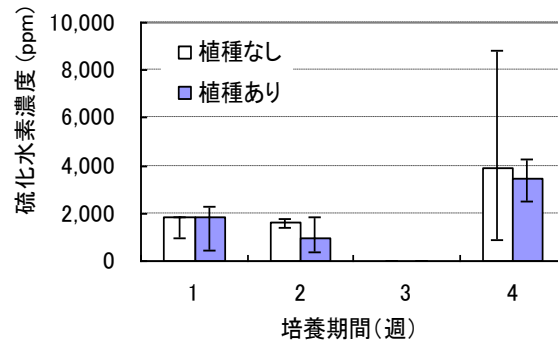
Run 1 (土試料加熱, 石膏加熱)



Run 2 (土試料非加熱, 石膏加熱)



Run 3 (土試料加熱, 石膏非加熱)



Run 4 (土試料非加熱, 石膏非加熱)

殺菌条件: 乾熱殺菌(110°C, 6時間), 植種: 再生石膏を蒸留水のもと嫌気培養を行い, 黒色変化した培養液 0.5 mL, 培養条件: L/S=2, 培養温度: 40°C, 土質材料14g, 再生半水石膏6g, 蒸留水 39.0-40 mL

図-6 硫化水素発生量に及ぼす土質材料の加熱殺菌および植種の影響

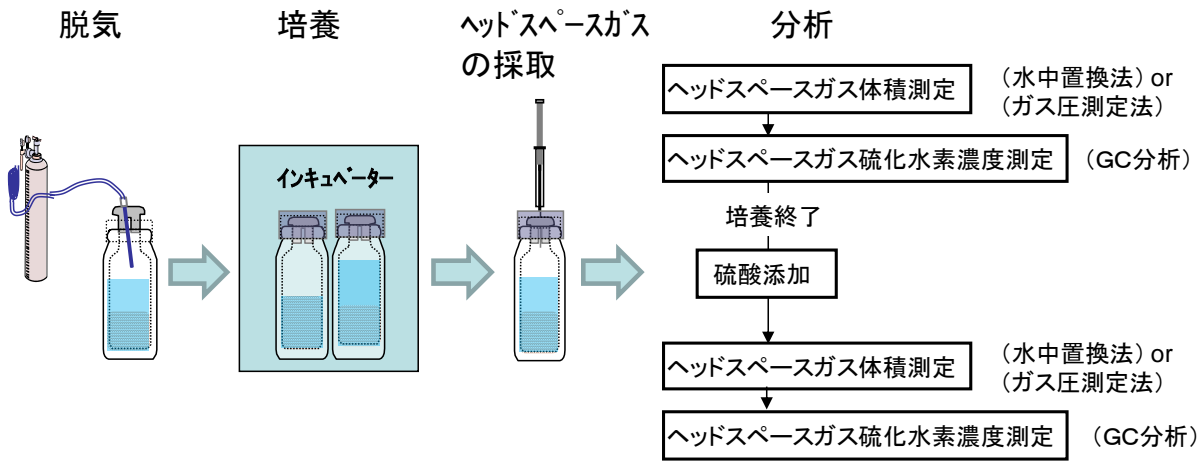


図-7 実験方法の概要

- ・培養ビン：内容量 116mL、外径 40mm×内径 36mm×丈 120mm、口径 22mm のスクリューキャップ付きのバイアルビン

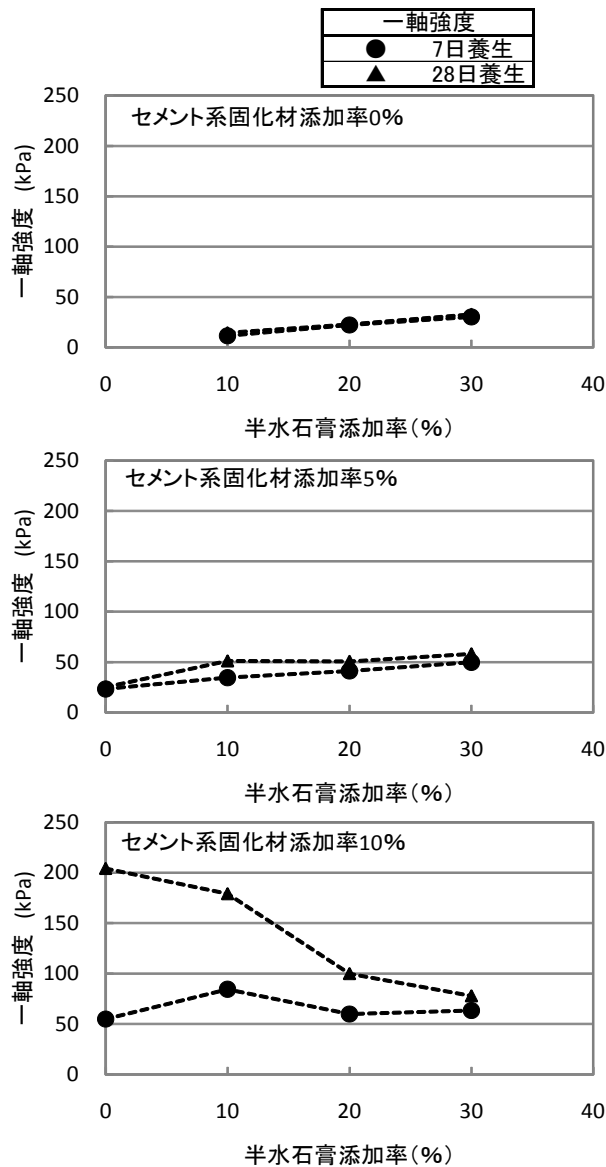


図-8 荒川浚渫土の一軸強度と半水石膏添加率の関係

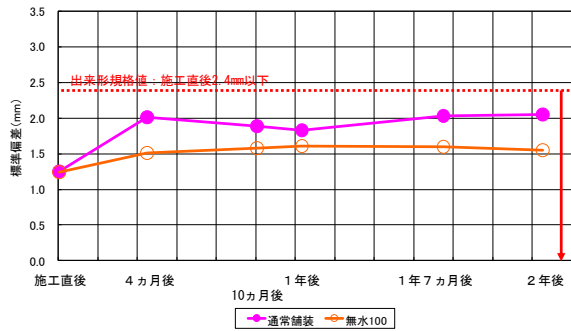


図-10 平成 20 年度施工区の平坦性調査結果

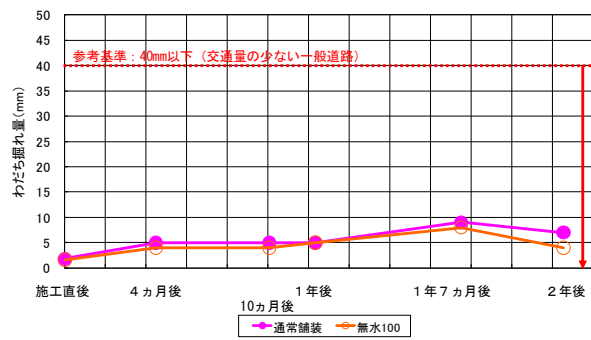


図-11 平成 20 年度施工区のわだち堀れ量調査結果

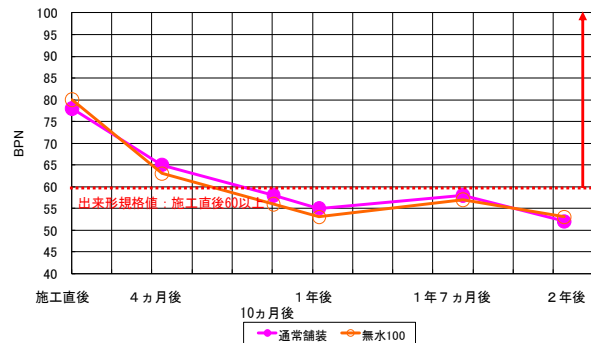


図-12 平成 20 年度施工区のすべり抵抗値調査結果

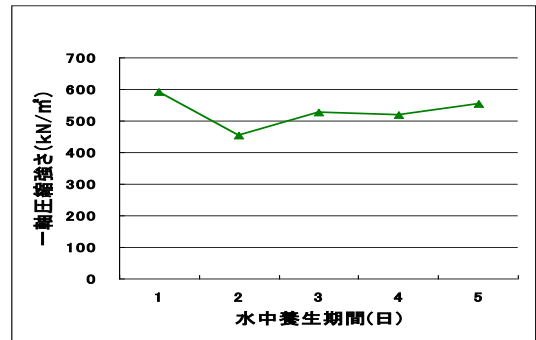


図-9 再生石膏による改良ため池底泥の腹付け盛り土の安定性

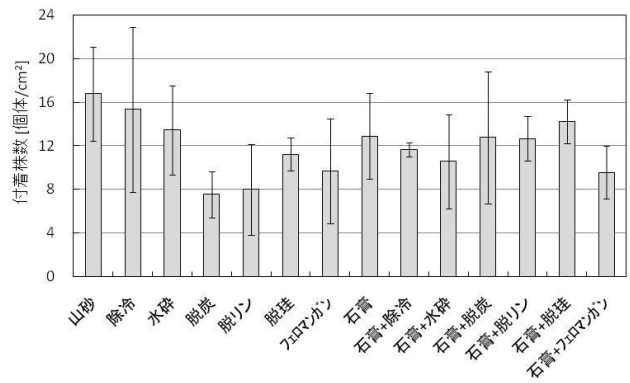


図-13 ブロックへのコンブ付着株数比 (n=9)

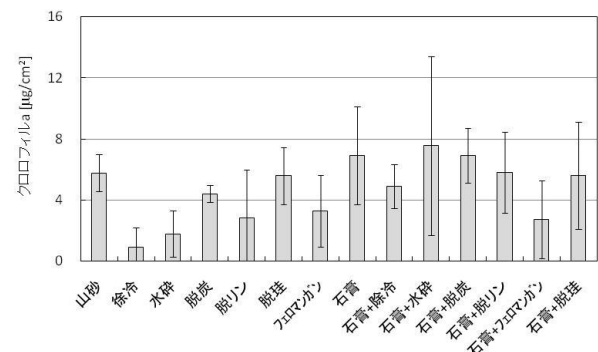


図-14 ブロック上に発達したシオグサのクロロフィル a 量 (n=3)

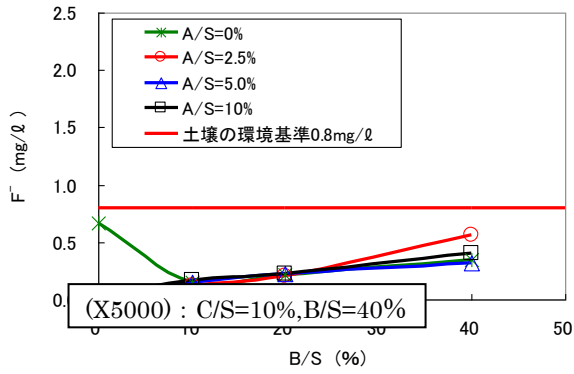


図-15 C/S=5%の半水石膏添加率とフッ素溶出濃度との関係

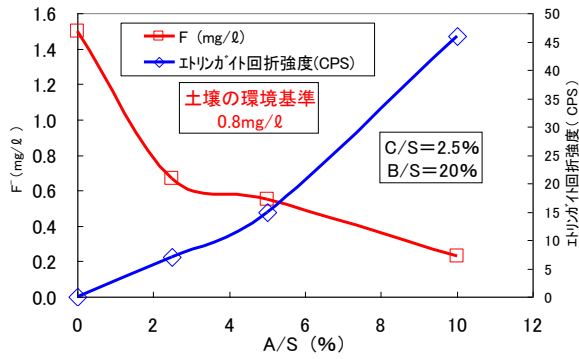


図-16 石炭灰添加率がエトリンガイト生成量とフッ素溶出濃度に及ぼす影響

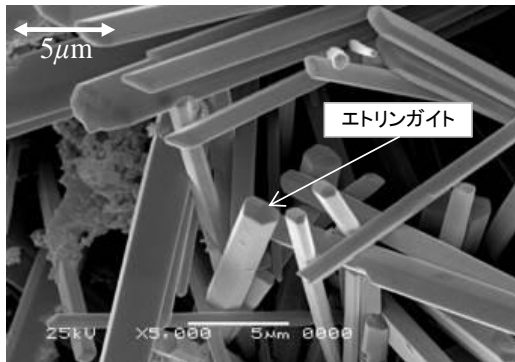


図-17 本実験に用いた供試体の代表的な SEM 写真

表-3 再生石膏によって改良されたため池低泥の溶出試験結果

試験試料	フッ素(F) mg/L	ホウ素(B) mg/L	六価クロム(Cr6+) mg/L
添加率(28日養生のみ)			
15%(B:C=1:1)	0.11	0.17	<0.01
17.5%(B:C=1:1)	0.17	0.15	<0.01
20%(B:C=1:1)	0.12	0.16	<0.01
22.5%(B:C=1:1)	0.18	0.25	<0.01
環境基準	0.8mg/L 以下	1.1mg/L 以下	0.05mg/L 以下

B: 再生半水石膏、C: 高炉セメント

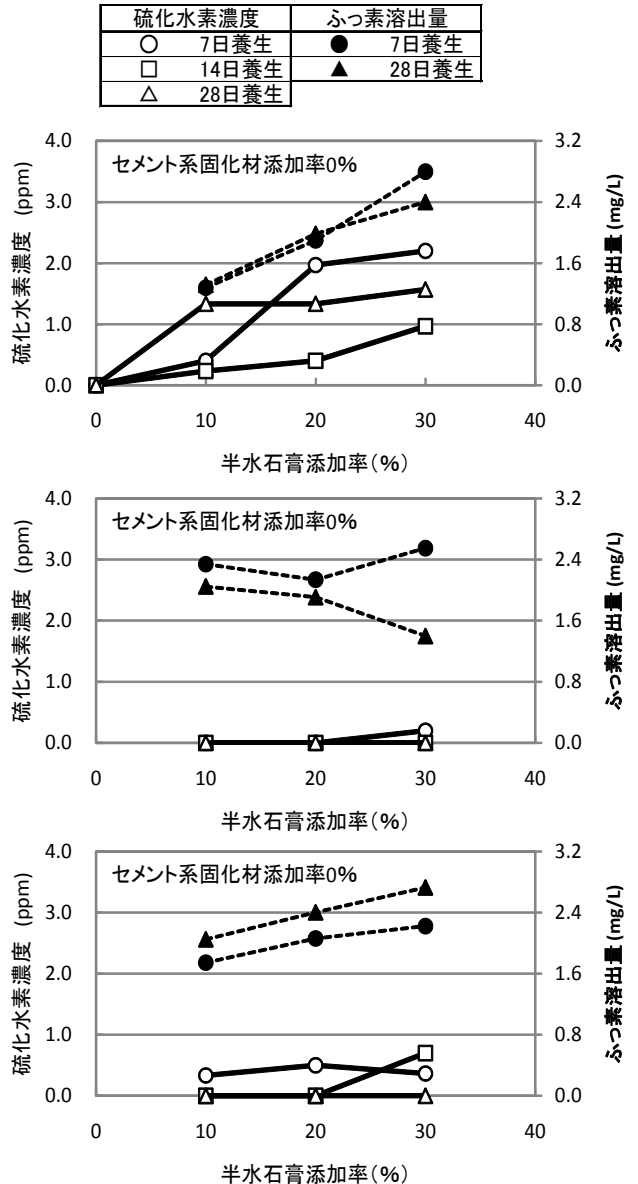


図-18 荒川浚渫土の硫化水素、ふっ素溶出量と半水石膏添加率の関係

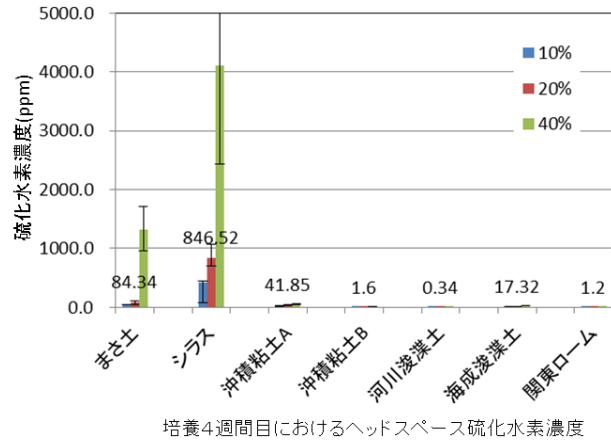
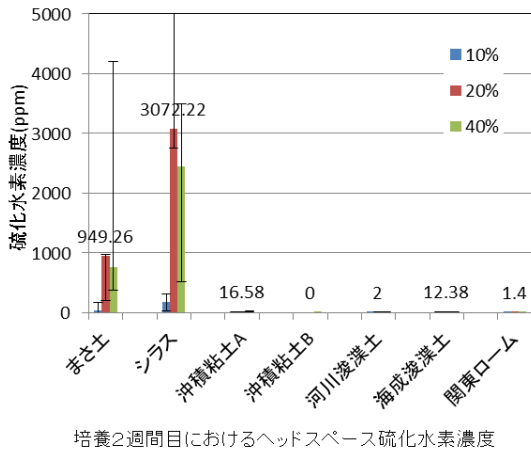


図-19 締固め水浸養生試料培養2週間及び4週間目におけるヘッドスペース硫化水素ガス濃度

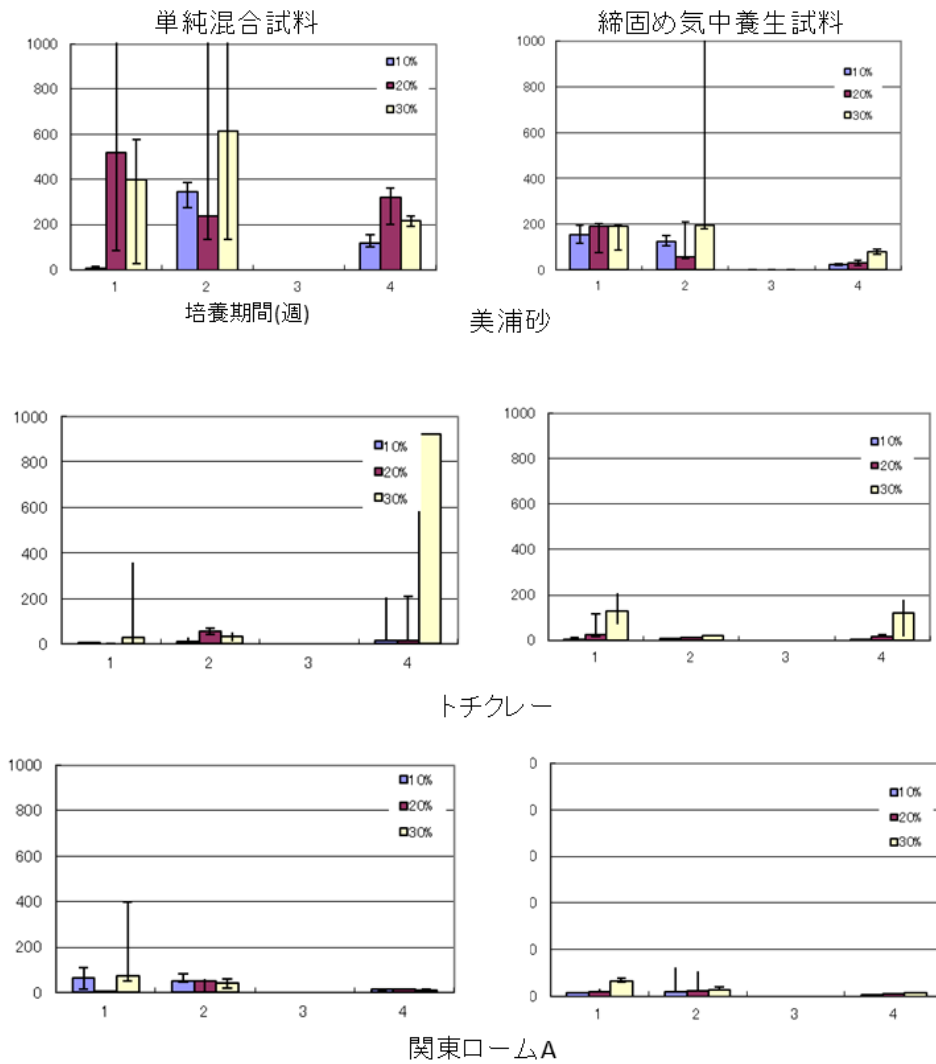


図-20 硫化水素ガス発生量に及ぼす締固め工程の影響

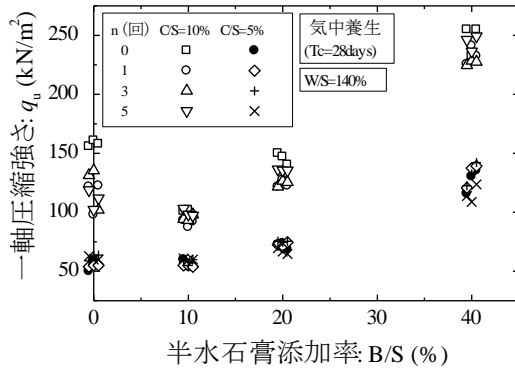


図-21 乾湿繰返し作用が一軸圧縮強さと半水石膏添加率に及ぼす影響

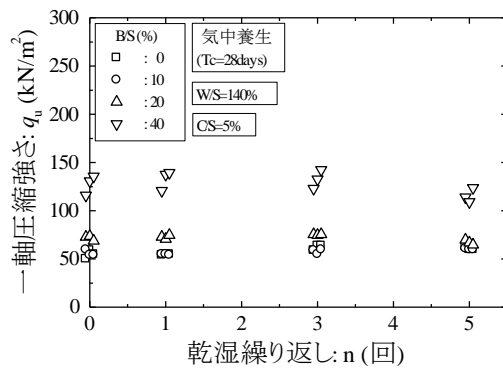


図-22 一軸圧縮強さと乾湿繰返し回数の関係

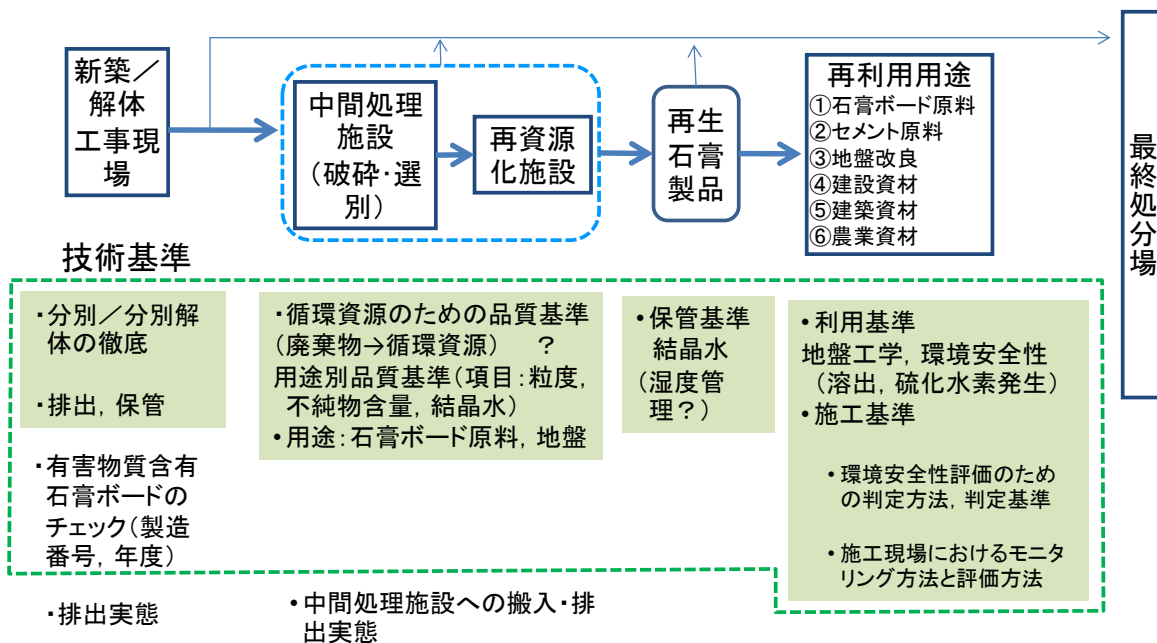


図-23 廃石膏ボードの資源循環フローと技術要件

・結論 = 廃石膏ボード（再生石膏）の主要な用途となる地盤改良においては、その構成材料としての土質材料の物理化学的な特性が、力学的な機能改善だけでなく、石膏ボードに含まれる有害化学物質の溶出や硫化水素ガスの発生に関する環境安全性に影響を与えることが示された。また、石膏ボードが製造された年代により微量元素の含有率が異なること、含有成分比率の違いから廃石膏ボードの類型化が示された。再生石膏の地盤環境への適用に関して環境安全性の観点から問題となる硫化水素発生ポテンシャルに関するバイアル培養判定法を開発した。提案した用途場において石灰や高炉 B 種セメントを併用することによって再生石膏利用による力学的機能改善が実験的に検証され、トラフィカビリティ等の地盤支持力の許容水準を満足することが示された。一方、高炉 B 種セメントおよび石炭灰の併用によるエトリンサイト形成の促進によってフッ素の溶出が基準以下に抑制されること、および硫化水素ガスの発生に関しては関係する微生物の増殖に影響を与える因子である pH、空隙率と密接な関係がある締固めや石灰併用により著しく抑制されることを明らかにした。以上より、廃石膏ボードおよび再生石膏の排出から利用並びに利用後のモニタリングにわたる再利用フローにおける技術基準、施工基準の枠組みを構築した。

英語概要

・研究課題名 = 「Development of the recycling technology and its system of used gypsum boards」
・研究代表者名および所属 = Yuzo Inoue (Senior Visiting Researcher、 National Institute for Environmental Studies)、 Kazuto Endo (National Institute for Environmental Studies)、 Hirofumi Sakanakura (National Institute for Environmental Studies)、 Takeshi Kamei (University of Miyazaki)、 Keizo Ugai (Gunma University)、 Hirotooshi Mori (Public Works Research Institute)、 Tsutomu Imaoka (Hiroshima Institute of Technology)、 Wataru Nishijima (Hiroshima University)、 Masahiro I (Ferrum-Lime Stabilization Institute)

・要旨 = It was shown that in improving ground soil becoming main uses of used gypsum boards (recycled gypsum), physicochemical characteristics of soil materials as its component influences not only mechanical improvement of the function but also environmental security on elution of hazardous chemicals containing gypsum boards and generation of hydrogen sulfide. The patternizing of used gypsum boards was also shown through the facts that content of the fluorine content is different depending on the manufactured period and content ratio of many trace elements. A culture method using vial vessels was developed to judge the generation of hydrogen gas. It was shown that mechanical improvement with using recycled gypsum has been verified by in the proposed usage sites of the recycled gypsum by taking it and the functional materials like slaked lime or blast furnace slag cement in the proposed use sites and the improvement of soil has fulfilled the permissible level of subgrade bearing capacity for trafficability and so on. On the other hand leaching of fluorine is restrained below the elution criteria by formation of ettringite with using of it and blast furnace slag cement and coal ash. Generation of hydrogen sulfide gas has been strongly controlled by compaction or using together of slaked lime. The framework of technological and implementing standards has made in a whole process from discharge of used gypsum to use and to monitoring after using it.

・キーワード (5 語以内) = used gypsum boards, recycling technology, soil stabilization, fluorine, hydrogen sulfide