

## 第5章 建設資材等用途への応用



## 5. 1 廃石膏ボードの無水石膏化による建設系フィラー材としての再資源化

今岡 務 広島工業大学

### 5.1.1 研究目的

広島県では、県内で排出された 25,000 トン前後の廃石膏ボードを 2 か所の公共関与の海面埋立処分場で受け入れてきた。そのうちの 1 か所が平成 21 年 3 月末をもって埋立を完了したのに伴い、他の産業廃棄物の処分容量を確保するため、もう一方の処分場においても廃石膏ボードの受け入れが中止された。結果として、広島県においてはこれらの廃石膏ボードのリサイクルが全国的な状況に先んじて、喫急の課題となっている。

廃石膏ボードのリサイクルについては、ボードから破碎分離した石膏粉体（二水石膏）を加熱処理して生成される半水石膏を土木用資材として活用する試みなどが行われているが、安全性の確認などを含めた技術確立や適用分野の拡大は十分なされていないのが現状である。

本研究は、廃石膏ボード破碎加熱処理物の建設系フィラー材としての再利用法の確立を目的に、道路舗装材であるアスファルト混合物のフィラー材として用いた場合の性能に関して、実道路での試験舗装などを通して、検討ならびに評価を図るとともに、塗料フィラーとしての利用可能性についても検討を加えたものである。

### 5.1.2 研究方法

#### (1) 供試試料

道路の表面舗装材でアスファルト混合物のフィラーは、アスファルトの見かけの粘度を高め、骨材として混合物の空隙を充填する鉱物質粉末であり、混合物中に通常 3～6% 混合される資材である。本研究では、廃石膏ボードから紙分を分離した破碎処理物（二水石膏）およびその加熱処理物（半水石膏、無水石膏）に着目し、通常使用される石粉（石灰石粉、 $\text{CaCO}_3$ ）とともにフィラー試料として用いて、配合構成比を変えて密粒度アスファルト混合物の配合試験用供試体を作成した。これらの供試体について、標準マーシャル試験、水浸マーシャル試験およびホイールトラッキング試験を実施し、強度等の評価を行った後、試験舗装用のアスファルト混合物を製造した。フィラー試料は、いずれも粒径が 0.6 mm 以下のものを用いた。塗料フィラーに関しても、再生無水石膏を試料として実験に供した。



図 5.1-1 無水石膏製造用実験実証炉



図 5.1-2 製造した無水石膏

なお、半水石膏は既存施設で製造されたものを用い、無水石膏に関しては広島県の産業廃棄物埋立税をもとにした循環型社会形成推進技術研究開発事業によって整備された実験実証炉（処理能力：80 kg/時、図 5.1-1）において、処理温度 650℃で廃石膏ボード粉碎物（二水石膏）から製造されたⅡ型無水石膏（以下、再生無水石膏：図 5.1-2）を用いた。

## (2) アスファルト混合物の配合試験項目および方法

アスファルト混合物の配合、以下の項目の試験を実施し、決定した。これらの試験は、舗装調査・試験法便覧（社団法人日本道路協会、平成 19 年版）<sup>1)</sup>に従って実施した。

### 1) 安定度（kN）

安定度は、標準マーシャル安定度試験により、アスファルト混合物の塑性流動に対する抵抗性を測定するものであり、円筒供試体を規定の一定速度で載荷し、耐荷重の最大値を安定度とする。

### 2) 残留安定度（%）

残留安定度とは、アスファルト混合物の剥離に対する水浸抵抗性を示すものであり、長時間水浸（60℃、48 時間水浸）した後の安定度の測定値を標準試験値（60℃、30 分水浸）に対する百分率で表す。本試験は、水浸マーシャル安定度試験と呼ばれる。

### 3) 動的安定度（回/mm）

動的安定度は、アスファルト混合物の高温時における流動抵抗性を示す指標であり、供試体が 1mm 変形するのに必要な車輪の通過回数で示され、その試験はホイールトラッキング試験と呼ばれる。

## (3) 試験舗装の工区および概要

### 1) 試験舗装場所

再生石膏をアスファルトフィラー材として用いた試験舗装は、図 5.1-3 に示す広島市中区の市道において実施した。二水石膏および半水石膏をフィラー材とした試験舗装は平成 19 年 3 月 13 日に実施し、無水石膏を用いた舗装は平成 21 年 1 月 22 日に行った。

なお、本道路の断面交通量としては一昼夜の計測（平成 19 年 10 月）の結果、大型車が 496 台/日、小型車が 7,076 台/日が得られており、大型車混入率は 6.6%となっている。



図 5.1-3 試験舗装場所

2) 工区の概要および舗装の構成

二水石膏および半水石膏を用いた平成 18 年度施工区間と無水石膏を用いた平成 20 年度施工区間の工区設定を、図 5.1-4 にまとめて示した。平成 18 年度施工区では、片側一車線を 30 m ごとに 6 工区に分け、図 5.1-5 に示す配合で製造したアスファルト混合物を用いて、平成 19 年 3 月 13 日に舗装工事を行った。また、平成 21 年 1 月 22 日に実施した平成 20 年度施工区の舗装は図 5.1-6 に示すように、II 型無水石膏を 100% 石粉と代替して 100m の区長設定で行った。いずれも、舗装厚は 5cm であり、対照工区として石粉のみをフィラーとした通常のアスファルト舗装も行った。なお、二水石膏および半水石膏の場合、代替率が最大 50% となっているのは配合試験の結果から 100% の代替は困難であると判断されたためである。

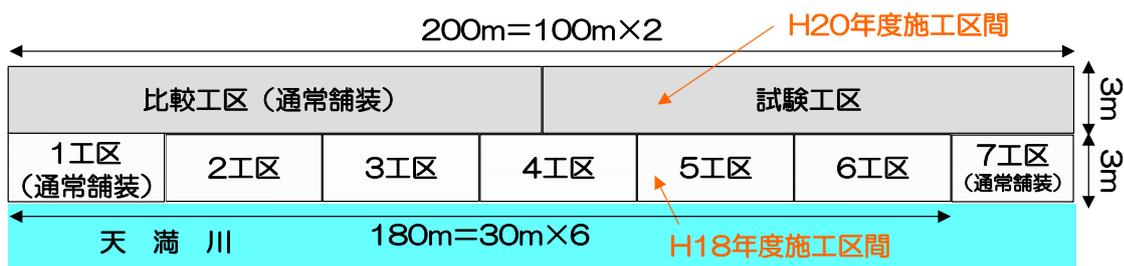


図 5.1-4 試験舗装の工区設定

舗装構成	1工区 (通常舗装)	2工区	3工区	4工区	5工区	6工区
表層 t=5cm	As混合物 【フィラー構成】 石粉：100%	As混合物 【フィラー構成】 石粉：100%	As混合物 【フィラー構成】 半水石膏：20% 石粉：80%	As混合物 【フィラー構成】 半水石膏：50% 石粉：50%	As混合物 【フィラー構成】 二水石膏：20% 石粉：80%	As混合物 【フィラー構成】 二水石膏：50% 石粉：50%
上層路盤 t=10cm	M-30	RM-30				
下層路盤	RC材（既設利用）					

※赤字は再生材であることを示す。

図 5.1-5 平成 18 年度施工区の舗装構成

舗装構成	比較工区（通常舗装）	試験工区
表層 t=5cm	アスファルト混合物 【フィラー構成】 石粉100%	アスファルト混合物 【フィラー構成】 II型無水石膏100%
上層路盤	既設舗装	
下層路盤	既設舗装	

※赤字は再生材であることを示す。

図 5.1-6 平成 20 年度施工区の舗装構成

#### (4) 路面性状調査の概要と方法

##### 1) 路面性状調査の項目と方法

施工後の舗装路面の性状変化を、平坦性、わだち掘れ量ならびにすべり抵抗の各項目を調査することにより、評価した。

##### ① 平坦性に関する調査方法

平坦性は、車両の走行快適性をしめす縦断形状のことで、舗装路面の高低差を測定することで得られる。施工直後の基準値は 2.4 mm である。本研究では、3m プロフィールメータを用いてレーザー光で凸凹の波高を計測し、記録することにより路面の形状を測定した。通常の 3m プロフィールメータ測定器は、計測車輪の上下作用によって路面の凹凸を記録紙に波高を記録するが、本研究で使用した測定器はレーザー光による非接触形方式である。

レーザー光による非接触計測方式は、従来型が問題とする急カーブや急勾配等の計測を可能とするとともに、計測の高精度化と高速化を実現している。

測定は以下の手順で行う。

- i) 測定区間の始点と終点の間を踏査し、始点および終点の位置を確認するとともに、橋梁取り付け部、マンホールなど、平坦性測定の障害となる構造物の位置を確認する。また、路面の清掃を行い石やゴミを除去する。
- ii) 1 車線につき 1 本の測定線を、区間の始点から終点まで連続して測定車線の中心線に沿って平行に設ける。測定位置は、舗装道の車道（2 以上の車線を有する道路では各車線）において、車線の中心から 1m 離れた地点を結ぶ、中心線に並行する 2 本の線のいずれか一方の上に延長 1.5m 間隔で設定された任意の地点とする。

iii) 測定開始点と測定終了点の間を、通常の歩行速度で 3m プロフィールメーターを牽引し、路面の凹凸を記録する。

次に、結果の算出方法を示す。

i) 測定線を表層の厚さおよび材質が同一である区間、または、評価の基準長さ（100～300m）に分割する。

ii) 記録紙に記録された波形から、舗装路面と想定平坦路面（路面を平坦となるよう補正した場合に想定される舗装路面をいう）との高低差を 1.5m 間隔で読み取る。

iii) 各区間ごとに標準偏差を計算し、平坦性の測定値とする。単位はmmとし、小数点以下 2 桁までとする。ただし、平坦性測定の障害となるマンホール等の部分のデータは除外する。

舗装の構造に関する技術基準によれば、平坦性は「舗装道の車道（1 以上の車線を有する道路にあっては、各車線）において、車道の中心線から 1m 離れた地点を結ぶ、中心線に平行する 2 本の線いずれか一方の線（道路構造令第 31 条の 2 の規定に基づき凸部が設置された路面上の区間に係るものを除く）上に延長 1.5mにつき 1ヶ所以上の割合で選定された任意の地点について、舗装路面と想定平坦舗装路面（路面を平坦となるよう補正した場合に想定される舗装路面をいう）との高低差を測定することにより得られる、当該高低差のその平均値に対する標準偏差で、舗装の表層の厚さおよび材質が同一である区間ごとに定められるものをいう。」と定義されている。



図 5.1-7 平坦性の測定（レーザー光式 3m プロフィールメータ）

## ②わだち掘れ量の調査方法

わだち掘れは、車両の走行快適性を示す横断形状のことで、舗装路面の摩擦、路盤の沈下、アスファルト混合物の流動等によって、車輪の走行位置に発生し、水はね、騒音、振動などの被害の原因となる。本研究では、横断プロファイラーを用いて直線状に波形記録機を移動させて横断形状を記録することで測定した。

横断プロファイラーは、主に舗装の出来方管理や舗装の路面性状調査で、わだち掘れ量について詳細な調査を行うときに用いられている。直線定規の上を移動しながら路面の横断形状を記録でき、少なくとも 1 車線をまたぐことができる長さを有するものでなければならな

い。測定前に測定区間の始点と終点の間を踏査し、測定開始点および測定終了点の位置を確認し、測定位置をマーキングするとともに、橋梁取付部、マンホール等、わだち掘れ量測定  
の障害となる構造物の位置を確認したのち、各測定装置により以下の手順で測定を行う。

- i) 横断プロファイラーを各車線の路肩側レーンマークの外側を基準として設置する。ただし、中央分離帯等の障害物のため、路肩側レーンマーク外側を基準とできない場合には、センターライン側のレーンマークの外側基準として、横断プロファイラーを設置する。
- ii) 高さ調整ねじにより左右の高さを同一にする。
- iii) 直線定規上の波形記録機を移動させて横断形状を記録する。

測定結果をもとにしたわだち掘れ量の算出方法を、以下に示す。

- 1) 車線中央の凸部が、両側の凸部より高い場合には、中央凸部を基準として左右部のわだち掘れ量  $D_1$ 、 $D_2$  をmm単位でそれぞれ読み取る。
- 2) 車線中央の凸部が、両側の凸部より低い場合には、両側のレーンマークを結んだ高さを基準として、左右部のわだち掘れ量  $D_1$ 、 $D_2$  をmm単位でそれぞれ読み取る。
- 3)  $D_1$ 、 $D_2$  のうち、大きいほうの値を測定断面のわだち掘れ量とする。



図 5.1-8 わだち掘れ量の測定（横断プロファイラー）

### ③ すべり抵抗値の調査方法

すべり抵抗は、雨天や冬季の路面のすべり具合を表すものである。本研究では振子式スキッドレジスタンステストを用いて測定を実施した。なお、施工直後のすべり抵抗値（BPN：British Pendulum Number）の基準値は 60BPN である。測定には、以下の器具を使用した。

#### i) 振子式スキッドレジスタンステスト

スライダーとスライダー取り付け部を含む振子の質量は  $1,500\pm 30$  g、振れの中心から振子の重心までの距離は  $411\pm 5$  mm とする。テストはスライダーの接地長が  $125\pm 1.6$  mm となるように垂直方向の調節が可能なものとする。スプリングレバー機構は、幅 76.2 mm のスライダーと試験面との間に、「ASTM E 303 : 1993」に規定された方法に従い測定した時に、 $24.5\pm 0.98$  N の平均垂直荷重を与えるものである。

#### ii) スライダー

スライダーは、アルミニウム製のプレートに  $6.35\times 25.4\times 76.2$  mm のゴム片を 1 枚付着

させたもので、ゴム片は「BS 812」の規格に合格する天然ゴムまたは「ASTM E 501 : 1994」に規定された合成ゴムである。新しいスライダは付着している油類を落とすため、使用に先立って振子を振り、乾いた布に 10 回程度こすって調整する。スライダの接地縁の磨耗量は、スライダの面で 3.2 mm またはこれと垂直な面で 1.6mm を越えないものとされている。

iii) 定規

スライダの接地長を正しくセットするために、124～127mm の長さが目盛られた定規を用いる。

iv) 路面温度計

以下に、すべり抵抗値の測定方法を示す。

i) 測定面の準備

測定面は、ごみや砂を除去するためブラシと清浄な水を用いて十分洗浄する。テストは水平調整ネジを用いて水平に設置するが、スイングの方向と垂直な方向の測定面の傾きとテストの傾きが大きく異なると、スライダをスイングさせた時、スライダ以外の箇所が測定面に接触することがあるため、スイングの方向と垂直な方向は測定面の勾配と平行になるよう設置してもよいとされる。

ii) 測定器の準備

測定器に関して、水平調整、ゼロ点調整および接地長さの調整等を行う。

iii) 測定

測定は、以下の手順で行う。

- ・ 測定に先立って測定面に十分に散水する。
- ・ リリースボタンを押し、振子を離す。
- ・ 振子が路面を通過した後、振子の逆振れがあるのでスライダが路面に再接触する前に振子を手で止め、目盛を 1 BPN 単位で読み取る。振子をスタートの位置に戻す時、リフティングハンドルでスライダをあげ、スライダと測定面が接触しないようにするドラッグポインターもその都度、元の位置に戻す。
- ・ 測定は 4 回繰り返し行い、1 回目を除いた 3 回の目盛の読みを BPN 単位で記録する。

iv) 結果の算出

1 回目を除いた 3 回の測定値を算術平均し、整数に丸めた値をすべり抵抗値 (BPN: British Pendulum (Test) Number) とする。



図 5.1-9 すべり抵抗値の測定

2) 調査時期および調査日

平成 18 年度施工区および平成 20 年度施工区の路面調査時期と調査日を表 5.1-1 に示した。これらの調査は、舗装した路面の性能評価に必要であるが、道路管理者に対する安全性の確認報告のためでもある。

表 5.1-1 路面調査時期と調査日

平成 18 年度施工区間		平成 20 年度施工区間	
調査時期	調査年月日	調査時期	調査年月日
施工日	平成 19 年 3 月 13 日	施工日	平成 21 年 1 月 22 日
施工直後	平成 19 年 3 月 13 日	施工直後	平成 21 年 1 月 23 日
4 ヶ月後	平成 19 年 7 月 11 日	4 ヶ月後	平成 21 年 6 月 6 日
7 ヶ月後	平成 19 年 10 月 13 日		
10 ヶ月後	平成 20 年 1 月 17 日	10 ヶ月後	平成 21 年 11 月 20 日
1 年後	平成 20 年 3 月 13 日	1 年後	平成 22 年 1 月 27 日
1 年 7 ヶ月後	平成 20 年 10 月 25 日	1 年 7 ヶ月後	平成 22 年 8 月 30 日
2 年後	平成 21 年 3 月 14 日	2 年後	平成 23 年 1 月 28 日
3 年後	平成 22 年 3 月 11 日	3 年後	未定

3) 調査箇所および測線(点)数

平成 18 年度施工区および 20 年度施工区におけるそれぞれの 1 工区当りの測線・測点数を表 5.1-2 にまとめた。また、それぞれの測定地点を図 5.1-10 ならびに図 5.1-11 に示した。

表 5.1-2 各施工区の測線・測点数

測定項目		平坦性	わだち掘れ量	すべり抵抗
測定地点	平成 18 年度施工区間	1 測線/工区	3 測線/工区	3 測点/工区
	平成 20 年度施工区間	1 測線/工区	5 測線/工区	5 測点/工区

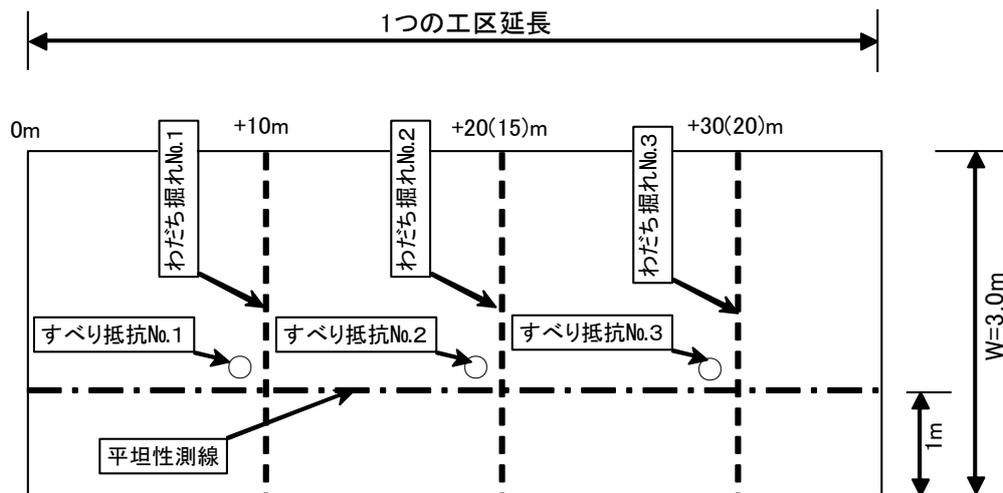


図 5.1-10 平成 18 年度施工区における測定地点

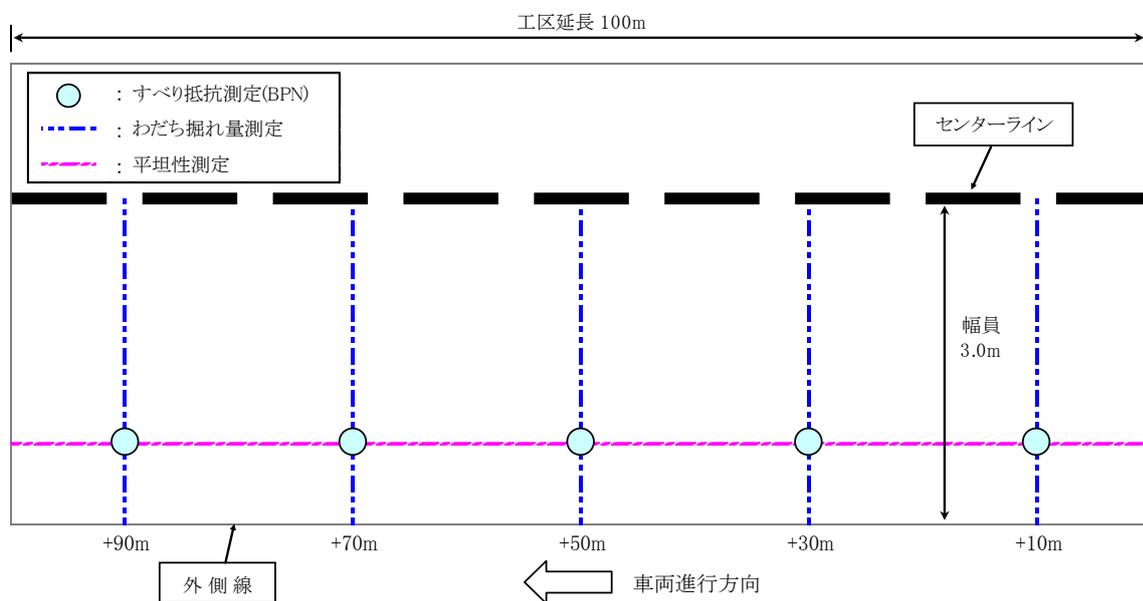


図 5.1-11 平成 20 年度施工区における測定地点

### (3) 塗料フィラー試験の方法

再生無水石膏の塗料フィラー（体質顔料）としての代替可能性について、塗膜付着力と断熱効果を調べることによって検討した。実験には再生無水石膏を用い、体質顔料として用いられている炭酸カルシウムとカオリン（白陶土）を対照試料とした。塗布塗料試料は、市販の下塗り塗料：純水：添加試料＝1：1：0.1，0.2，0.5の重量比で混練りし、調整した。

塗膜付着力は、供試塗料をインターロッキングブロックに塗布し、図 5.1-12 に示す引っ張り式塗膜付着力試験機アドヒージョンテスター（エルコメーターモデル 106-2 および 106-4、いずれもインネクスト社製）を用いて測定した。なお、モデル 106-2 の付着力測定範囲は 0～7 N/mm<sup>2</sup> であり、モデル 106-4 の測定付着力は 0～22N/mm<sup>2</sup> である。

また、断熱効果は塗料試料を塗布したポリカーボネートシート（厚さ：5mm）をトレー上に置き、ライト（100W白熱電球）直下（シート上）とトレー内の温度をデータロガー（柵ア

ズワン TL3632) で連続測定することにより調査した。図 5.1-13 に測定装置概要を示した。



図 5.1-12 塗膜付着力試験機アドヒージョンテスター  
(左：モデル 106-2、右：モデル 106-4)

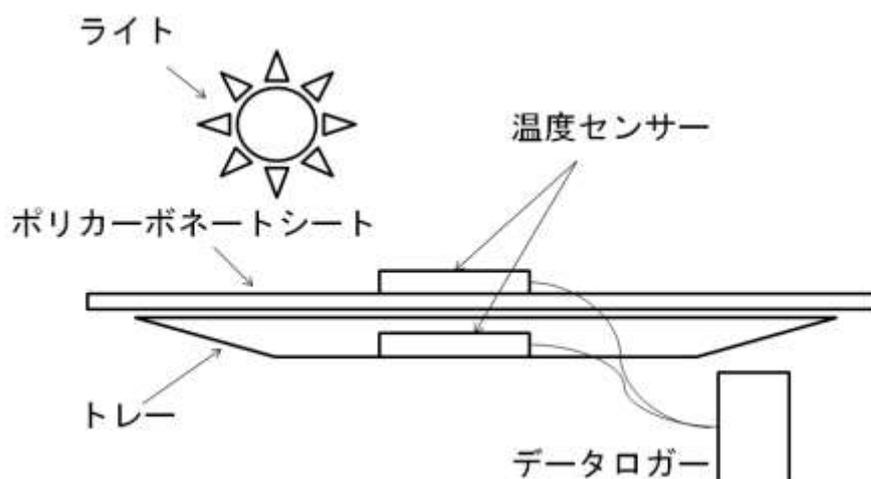


図 5.1-13 断熱試験装置の概要

### 5.1.3 研究結果

#### (1) アスファルトフィラーとしての検討結果

##### 1) 配合試験結果

二水石膏、半水石膏および無水石膏をフィラー材として用いて供試体を作成して行った安定度試験の結果を、図 5.1-12～14 に示した。

安定度は 8.75～13.83kN の範囲にあり、すべての供試体について規格値 7.35kN 以上<sup>2)</sup>を満足していた。残留安定度は 29.2～88.36%の値を示し、半水石膏：石粉＝100：0、50：50 および二水石膏：石粉＝100：0 の供試体については、規格値 75%以上<sup>2)</sup>を満足していなかった。二水石膏に関してはアスファルト混合物の製造時の 165℃の高温で結晶水が蒸発すること、また半水石膏については、結晶水の蒸発あるいは水との反応による膨張などの理由で、残留安定度が大きく低下するものと推測された。また、動的安定度は 250～1660 回/mm であり、二水石膏：石粉＝100:0 の供試体については規格値 500 回/mm 以上<sup>2)</sup>を満足していなかった。

二水石膏および半水石膏に関してはすべての試験項目において、混合量が増加すると試験

値が低下する傾向にあり、混合量が 100%の場合、試験値が規格値を満足しなかった。したがって、これらを用いた試験舗装の施工については混合量を最大 50%として実施した。

一方、無水石膏の場合は、100%代替した場合でも、通常のフィラー材である石粉を用いた供試体とほぼ同等な安定度が得られ、ファイラー材としての利用が可能であると判断された。

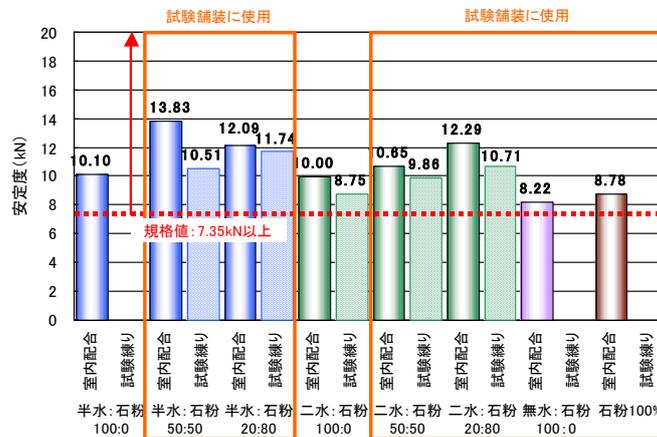


図 5.1-14 安定度の測定結果

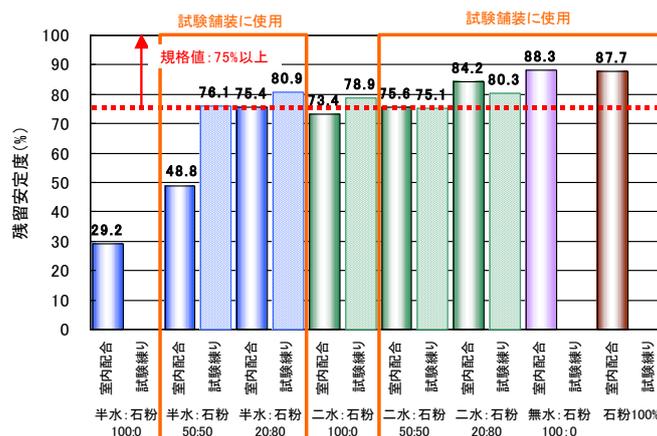


図 5.1-15 残留安定度の測定結果

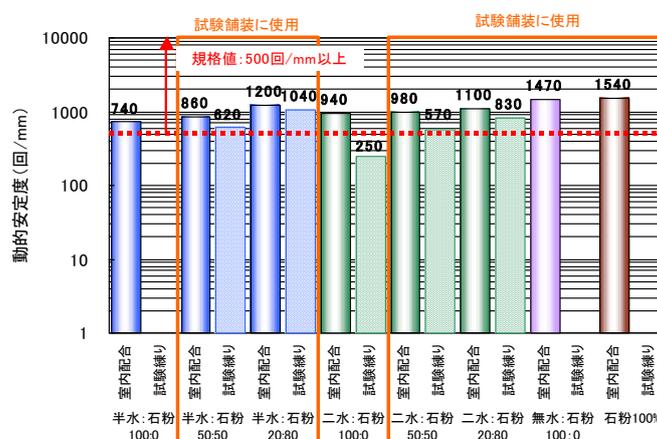


図 5.1-16 動的安定度の測定結果

## 2) 平成 18 年度施工区における路面性状調査結果

### ① 平坦性

平成 18 年度施工区における平坦性の測定結果を、図 5.1-17 に示した。

施工直後から 3 年経過後までの平坦性は通常舗装区の 1 年 7 カ月後の値を除いて、1.24～2.35mm の範囲にあり、全工区において施工直後の出来形規格値 2.4mm 以下<sup>3)</sup>を満足していた。施工直後からの平坦性の変化を見ると、全工区において当初増加傾向を示したが、石粉を用いた通常舗装の工区の推移にも示されているように、この増加傾向は一般的なものと言え、10 カ月以降はほぼ安定した数値を示していることを考えると、舗装路面はいずれの工区においても安定した状態を維持しているものと判断された。なお、通常舗装区と再生石膏使用区を比較すると、通常舗装の平坦性が高い値となっている。これは、通常舗装工区が交差点部に近く、発進・停車による影響を他工区より受けているためと考えられた。

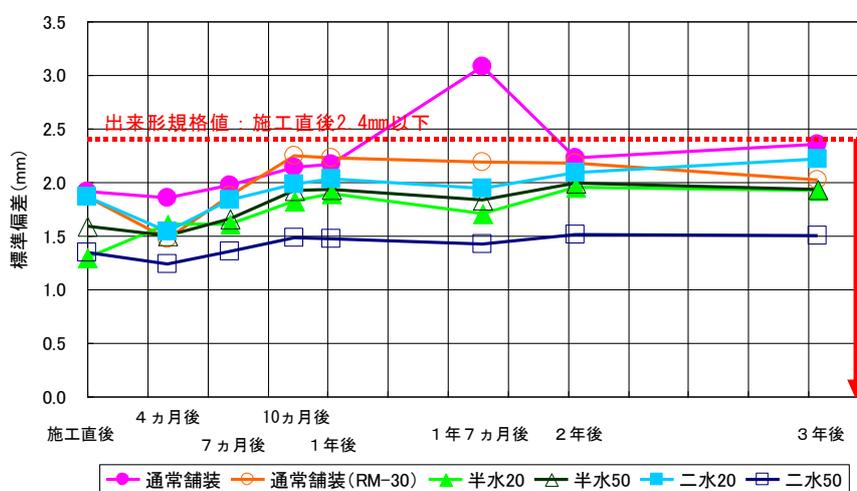


図 5.1-17 平坦性の測定結果 (平成 18 年度施工区)

### ② わだち掘れ量

わだち掘れの測定結果を、図 5.1-18 に示した。各工区のわだち掘れ量は施工直後から 3 年経過後までで 3～16mm の範囲で計測され、全工区において維持修繕要否の判断基準である 40mm 以下<sup>3)</sup>を十分満足していた。施工直後からのわだち掘れ量の変化を見ると、7 カ月経過後までは全工区において増加傾向にあるが、通常舗装工区も同様であることから、一般的傾向と考えられた。7 カ月以降は、わだち掘れの増加は鈍化し、いずれの工区においても顕著なわだち掘れは形成されていないと言える。また、下層路盤材として再生砕石 (RM-30) を用いた通常舗装区において、再生石膏使用区を上回るわだち掘れ量が計測されているが、これは本工区が交差点部に近いことから、発進・停車による影響が大きいと考えられる。

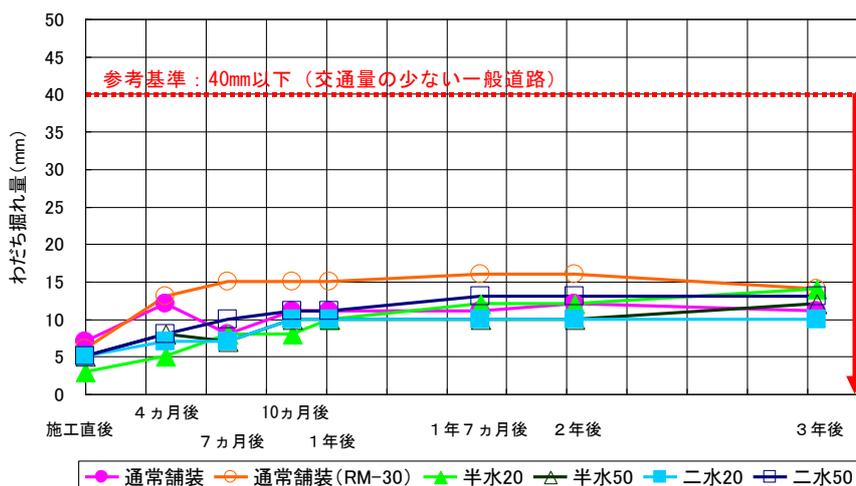


図 5.1-18 わだち掘れ量の測定結果 (平成 18 年度施工区)

### ③ すべり抵抗値

すべり抵抗の測定結果は、図 5.1-19 に示すとおりである。施工直後から 3 年経過後までのすべり抵抗値は 57~78 BPN であり、施工から 7 カ月経過後までは低下傾向が認められたが、1 年経過後においても全工区において施工直後の出来形規格値 60 BPN 以上<sup>3)</sup>を満足していた(二水 50%工区の 7 ヵ月後の測定結果の 58 BPN を除く)。それ以降もすべり抵抗値の顕著な低下はなく、3 年経過後において、ようやく全工区で 57~59 BPN と出来高規格値を下回る結果となったが、スリップ等の原因となるような路面の摩耗は生じていないものと推測された。これらの結果から、通常フィラーの石粉の代わりに二水石膏ならびに半水石膏によって 50%代替しても、路面性能の低下は生じさせないものと考えられた。

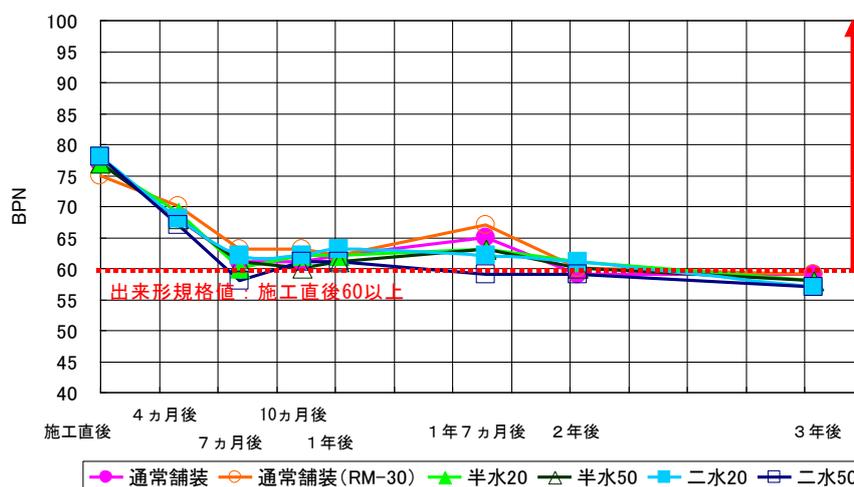


図 5.1-19 すべり抵抗値の測定結果 (平成 18 年度施工区)

### ④ 外観 (ひび割れ等)

施工直後から 3 年経過後までの観測の結果、再生石膏使用区の舗装路面において団粒化した石膏が露出している箇所やひび割れ発生箇所は認められなかった。

本研究で得られた調査値を表 5.1-3 にまとめた。以上の平坦性、わだち掘れ、すべり抵抗

および外観の測定・観測結果より、再生石膏をフィラー材の一部として利用した舗装においても、通常舗装と同等の路面性能を発揮するものと評価された。

表 5.1-3 平成 18 年度施工区の調査結果一覧

調査項目	工区	舗装構成		調査結果							
		表層	上層路盤	H19.3 (施工直後)	H19.7 (4ヶ月後)	H19.10 (7ヶ月後)	H20.1 (10ヶ月後)	H20.3 (12ヶ月後)	H20.10 (19ヶ月後)	H21.3 (24ヶ月後)	H22.3 (36ヶ月後)
				0	120	214	310	366	592	732	1094
平坦性 (mm)	1工区	通常	M-30	1.91	1.85	1.97	2.14	2.17	3.08	2.23	2.35
	2工区	通常	RM-30	1.86	1.47	1.87	2.25	2.23	2.19	2.18	2.02
	3工区	半水20	RM-30	1.29	1.61	1.61	1.82	1.89	1.71	1.95	1.92
	4工区	半水50	RM-30	1.59	1.50	1.66	1.92	1.93	1.83	1.99	1.93
	5工区	二水20	RM-30	1.86	1.54	1.83	1.98	2.03	1.94	2.09	2.22
	6工区	二水50	RM-30	1.34	1.24	1.35	1.48	1.47	1.42	1.51	1.50
わだち掘れ量 (mm)	1工区	通常	M-30	7	12	8	11	11	11	12	11
	2工区	通常	RM-30	6	13	15	15	15	16	16	14
	3工区	半水20	RM-30	3	5	8	8	10	12	12	14
	4工区	半水50	RM-30	5	8	7	10	10	10	10	12
	5工区	二水20	RM-30	5	7	7	10	10	10	10	10
	6工区	二水50	RM-30	5	8	10	11	11	13	13	13
すべり抵抗 (BPN)	1工区	通常	M-30	77	68	61	61	62	65	59	59
	2工区	通常	RM-30	75	70	63	63	62	67	60	59
	3工区	半水20	RM-30	77	69	60	62	62	63	61	58
	4工区	半水50	RM-30	77	68	61	60	61	63	60	58
	5工区	二水20	RM-30	78	68	62	62	63	62	61	57
	6工区	二水50	RM-30	78	67	58	61	61	59	59	57

### 3) 平成 20 年度施工区における路面性状調査結果

#### ① 平坦性 (縦断形状)

車両の走行快適性を示す平坦性 (縦断形状) について、施工直後からの調査結果を表 5.1-4 および図 5.1-20 に示した。

各工区ともに、1年半後との比較ではほぼ数値は横ばいであり、ほとんど変化は見られないという結果であった。また、平坦性の値は施工直後の基準値である  $\sigma=2.4\text{mm}$  以下を満足しており車両の走行快適性は保持されているものと判断された。

表 5.1-4 平成 20 年度施工区の平坦性測定結果

調査項目	比較工区						施工直後 からの 偏差	廃石膏工区						施工直後 からの 偏差
	施工 直後	5ヶ 月後	10ヶ 月後	1年後	1年 半後	2年後		施工 直後	5ヶ 月後	10ヶ 月後	1年後	1年 半後	2年後	
平坦性 (縦断形状)	1.25	2.01	1.89	1.83	2.03	<b>2.05</b>	<b>0.80</b>	1.24	1.51	1.58	1.61	1.60	<b>1.55</b>	<b>0.31</b>
備 考 [維持修繕要否の判断基準]														
・自動車専用道路						: $\sigma=3.5\text{mm}$						※基準値		
・交通量の多い一般道路						: $\sigma=4\sim 5\text{mm}$						施工直後		
・交通量の少ない一般道路						: -						$\sigma=2.4\text{mm}$ 以下		

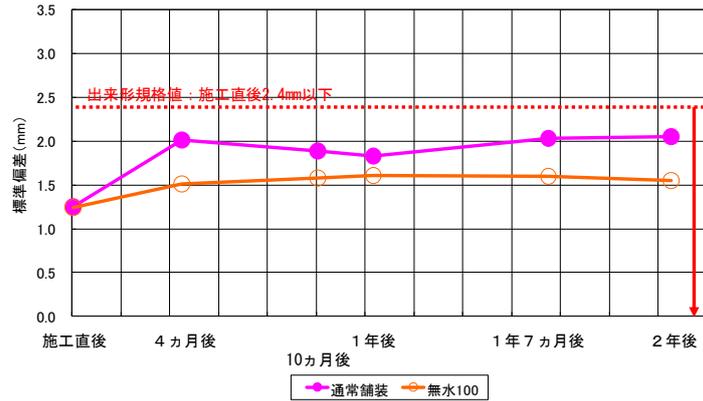


図 5.1-8 平坦性測定結果（平成 20 年度施工区、経年変化比較）

② わだち掘れ量（横断形状）

わだち掘れ量（横断形状）の調査結果を、表 5.1-5 および図 5.1-21 にまとめた。

各工区ともに供用 1 年半後との比較においてわだち掘れ量は小さくなっていることがわかる。全測点においてわだち掘れ量は変化なし、あるいは小さくなっており、これは、路面が横断方向において全体的に摩耗していると考えられる。また、全体的に再生無水石膏(廃石膏)区 わだち掘れ量が小さい値となっており、通常舗装と比較してわだち掘れが出来にくいことを示唆しているものと考えられた。

表 5.1-5 平成 20 年度施工区のわだち掘れ量測定結果

調査項目	測点	比較工区						施工直後からの偏差	廃石膏工区						施工直後からの偏差
		施工直後	5ヶ月後	10ヶ月後	1年後	1年半後	2年後		施工直後	5ヶ月後	10ヶ月後	1年後	1年半後	2年後	
わだち掘れ (横断形状) 合格判定値	+10m	0	6	4	4	8	4	4	2	4	4	3	12	5	3
	+30m	3	5	5	4	8	8	5	2	3	3	2	3	3	1
	+50m	1	3	3	3	9	4	3	2	3	4	4	4	4	2
	+70m	2	6	6	6	6	7	5	1	4	5	8	10	4	3
	+90m	3	4	6	7	16	13	10	1	4	4	6	12	5	4
	平均値	2	5	5	5	9	7	5	2	4	4	5	8	4	2
備考	〔維持修繕要否の判断基準〕 ・自動車専用道路 : 25mm ・交通量の多い一般道路 : 30~40mm ・交通量の少ない一般道路 : 40mm														

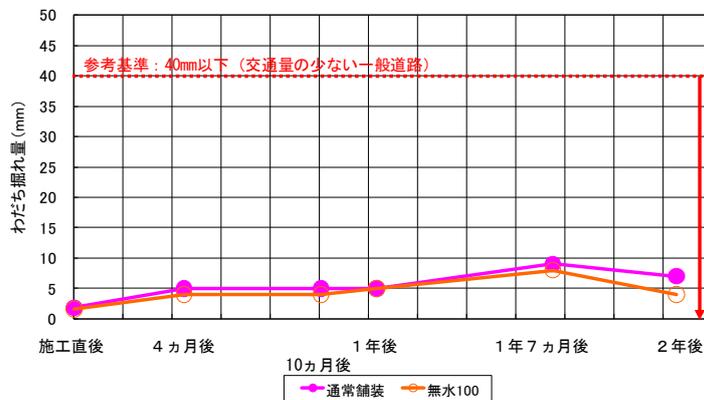


図 5.1-21 わだち掘れ量測定結果（経年変化比較）



円形タンク内で6時間および24時間浸漬することにより行った。浸漬液の攪拌には、攪拌機を用いた。

採取したコアサンプルの概要を表 5.1-7 に、また分析項目・方法を表 5.1-8 に示す。

表 5.1-7 採取したコアサンプルの概要

試料名	採取箇所		施工日	採取日	数量
半水 20	3 工区 (H18 施工区)	半水石膏 20%	平成 19 年 3 月 13 日	平成 22 年 1 月 27 日	2 個
半水 50	4 工区 (H18 施工区)	半水石膏 50%			2 個
二水 20	5 工区 (H18 施工区)	二水石膏 20%			2 個
二水 50	6 工区 (H18 施工区)	二水石膏 50%			2 個
無水 100	2 工区 (H20 施工区)	無水石膏 100%	平成 21 年 1 月 22 日		2 個
通常	7 工区 (H18 施工区)	通常舗装	平成 19 年 3 月 13 日		2 個

表 5.1-8 分析項目および分析方法

分析項目	分析方法
カドミウム	JIS K 0102 55.3
鉛	JIS K 0102 54.3
六価クロム	JIS K 0102 65.2.1
ヒ素	JIS K 0102 61.2
総水銀	環告第 59 号 付表 1
セレン	JIS K 0102 67.2
フッ素	JIS K 0102 34.1

浸漬液の重金属等の分析結果を、表 5.1-9 および表 5.1-10 にまとめた。

6時間浸漬液および24時間浸漬液のいずれも、フッ素も含め、重金属等の分析値は、定量下限値未満であり、再生石膏を道路舗装材として用いた場合のこれらに関する環境影響は無いものと判断された。

表 5.1-9 浸漬溶出試験結果 (6 時間浸漬)

分析項目	半水 20	半水 50	二水 20	二水 50	無水 100	通常舗装	定量下限値
カドミウム	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001
鉛	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.005
六価クロム	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.02
ヒ素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.005
総水銀	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0005
セレン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.002
フッ素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.08

(注) 単位 : mg/l 、 ND : 定量下限値未満

表 5.1-10 浸漬溶出試験結果（24 時間浸漬）

分析項目	半水 20	半水 50	二水 20	二水 50	無水 100	通常舗装	定量下限値
カドミウム	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001
鉛	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.005
六価クロム	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.02
ヒ素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.005
総水銀	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0005
セレン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.002
フッ素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.08

（注）単位：mg/l、ND：定量下限値未満

## (2) 塗料フィラー試験結果

### 1) 塗膜付着力測定結果

試料をインターロッキングブロックに塗布し、塗膜付着力を測定した結果を表 5.1-11 にまとめた。無添加・無希釈の塗料と比べると、塗膜の付着力はやや低下したが、他の試料と比較した場合では、カオリン添加割合 0.5 の試料を除き、概ね無水石膏添加塗料の方が高い付着力を示す結果となった。

表 5.1-11 塗膜付着力測定結果

添加試料	添加割合	付着力(N/mm <sup>2</sup> )	
		2日後	30日後
無添加	0	3.0	3.0
再生無水石膏	0.1	2.0	2.8
	0.2	1.9	1.9
	0.5	1.9	1.9
炭酸カルシウム	0.1	2.1	1.9
	0.2	1.2	1.2
	0.5	1.5	1.1
カオリン	0.1	2.1	1.9
	0.2	1.2	1.2
	0.5	1.5	2.3

### 2) 断熱効果試験結果

図 5.1-23 は、室温を 20℃に設定し、エアコンを運転した場合のトレー内等各温度の時間変化を示したものである。ライト点灯後、約 1 時間でいずれの温度もほぼ一定の値となった。平均値は、ライト下 60.9℃、トレー内 38.9℃、室内温度 22.8℃であった。なお、シートに塗布した塗料試料は、塗料：水=1：1 で作成したものである。

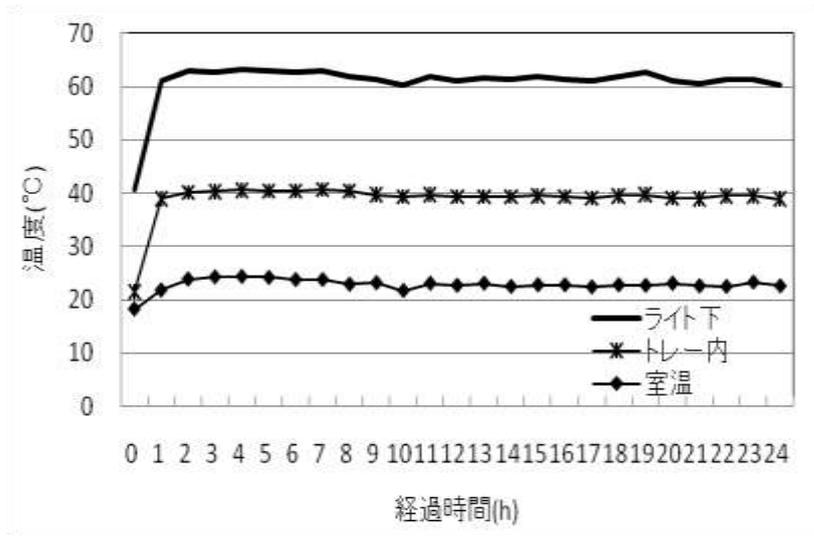


図 5.1-23 データロガーによる温度の連続測定結果

図 5.1-24 は、24 時間のライト照射による温度上昇の測定結果をもとに、ライト直下とトレイ内の平均温度差を求めて図示したものである。実験は、いずれもエアコンの室内温度設定を 20°C として実施した。その結果、ライト直下の平均温度は 60°C 前後であり、トレイ内の温度は 36~40°C となった。トレイ内の温度上昇は無水石膏の添加割合が高いほど、抑制される傾向が認められ、その効果は炭酸カルシウムを上回る結果となった。

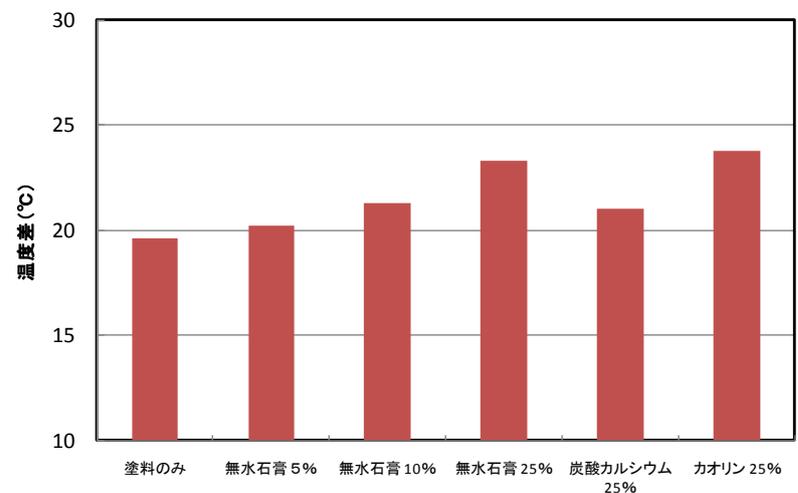


図 5.1-24 各種塗料試料の断熱効果測定結果

### 5.1.4 まとめと課題

本研究では、主として廃石膏ボードから製造された再生石膏（二水石膏、半水石膏およびⅡ型無水石膏）をアスファルトフィラー材として用いて実施した試験舗装路面の性状調査を行うとともに、塗料フィラーとしての再生無水石膏の利用可能性について、塗膜付着試験と断熱効果試験により基礎的検討を行った。路面性状調査の対象は、二水石膏と半水石膏を用いて平成 19 年 3 月 13 日に行った試験舗装区（平成 18 年度施工区）とⅡ型無水石膏を用いて平成 21 年 1 月 22 日に実施した平成 20 年度施工区である。なお、無水石膏に関しては配合試

験の結果から、通常のフィラー材（石粉）を 100%代替してのアスファルト混合物の製造と舗装の実施が可能であると判断されたが、二水石膏および半水石膏については、100%の代替が困難であることを示唆する結果が得られたため、50%代替および 20%代替の 2 条件でのアスファルト混合物を製造し、試験舗装工区も各 2 工区、計 4 工区で実施した。路面調査項目は、①平坦性、②わだち掘れ量、③すべり抵抗とした。

本研究での成果と課題は、以下のとおりである。

#### 1) 平成 18 年度試験舗装工区での路面性状調査結果

平坦性の測定値は、施工直後から 3 年経過後まで通常舗装区の 1 年 7 カ月後の値を除いて、1.24~2.35mm の範囲にあり、全工区において施工直後の出来形規格値 2.4mm 以下<sup>3)</sup>を満足していた。施工 10 カ月後以降、ほぼ安定した数値が得られており、舗装路面はいずれの工区においても安定した状態を維持しているものと判断された。

わだち掘れ量に関しては、施工直後から 3 年経過後までで 3~16mm の範囲で計測され、全工区において維持修繕要否の判断基準である 40mm 以下を十分満足していた。当初のわだち掘れ量の増加は鈍化し、いずれの工区においても顕著な路面の劣化はないものと言えた。

すべり抵抗値は、施工直後から 3 年経過後までの計測で 57~78 BPN の範囲にあり、1 観測値（二水 50%工区の 7 カ月後測定値）を除き 1 年経過後においても全工区において施工直後の出来形規格値 60 BPN 以上を満足していた。それ以降もすべり抵抗値の顕著な低下はなく、3 年経過後において、ようやく全工区で 57~59 BPN と出来高規格値を下回る結果となったが、スリップ等の原因となるような路面の摩耗は生じていないものと推測された。

これらの結果から、通常フィラーの石粉の代わりに二水石膏ならびに半水石膏によって 50%代替しても、路面性能の低下は生じさせないものと考えられた。

#### 2) 平成 20 年度試験舗装工区での路面性状調査結果

平坦性に関しては、通常舗装区（比較工区）も無水石膏区も施工直後の測定値は 1.2 mm と、出来形規格値の 2.4 mm を十分満足し、2 年経過後も再生無水石膏区では 2.0 mm 以下の良好な値を示した。

わだち掘れ量についても、一般道路での維持補修の参考基準値 40 mm と比較して 2 年経過後においても、比較工区で 7 mm、再生無水石膏区で 4 mm と良好な値が得られた。

すべり抵抗値に関しては、比較工区および再生無水石膏工区とも、施工直後の測定値は出来形規格値 60BPN を大きく上回る 78、80 BPN が得られたが、10 か月経過後に出来形規格値を下回り、1 年経過後の値にもやや低下傾向が見られたが、2 年経過後では再生無水石膏区においても 53 BPN と低下は認められなかった。

平成 20 年度施工区に関しては、舗装後 2 年経過したところであり、今後の長期的な調査の結果を待たないと断定は出来ないが、平成 18 年度施工区の結果から、施工後 1 年経過以降も顕著な変化は生じないことが推測され、再生無水石膏をフィラー材として 100%使用しても路面性能の維持は可能であると考えられた。

ただし、再生無水石膏区路面においてクラックの発生が認められており、長期的な継続調査と無水石膏の配合割合等についての検討が必要であると考えられた。

#### 3) 試験舗装路面のコアサンプルを用いた浸漬溶出試験結果

試験舗装を行った路面のコアサンプルを採取し、浸漬溶出試験を実施した結果、6 時間浸漬液および 24 時間浸漬液の全ての試料において、カドミウム、ヒ素、総水銀等の分析値は、フッ素も含め、定量下限値未満であった。

#### 4) 塗料フィラーとしての利用可能性の検討

再生無水石膏の塗料フィラー（体質顔料）としての代替可能性について、塗膜付着力と断熱効果を調べることによって検討した。実験には再生無水石膏を用い、体質顔料として用いられている炭酸カルシウムとカオリン（白陶土）を対照試料とした。塗布塗料試料をインターロッキングブロックに塗布し、塗膜付着力を測定した結果、無添加・無希釈の塗料と比較すると、塗膜の付着力はやや低下したが、他の試料と比較した場合には、カオリン添加割合 0.5 の試料を除き、概ね無水石膏添加塗料の方が高い付着力を示す結果となった。

断熱効果試験を、エアコンにより室内の温度を約 25℃に保って実施した結果、トレー内の温度上昇は無水石膏の添加割合が高いほど、抑制される傾向が認められ、その効果は炭酸カルシウムを上回る結果となった。

#### 5) 今後の課題

アスファルトフィラー材として再生無水石膏で全量（アスファルト混合物の 6%相当）代替した試験舗装区の路面性状調査を行った結果、施工 2 年経過後も平坦性、わだち掘れ量およびすべり抵抗値のいずれも通常舗装と同程度の性状が維持されていることが確認されたが、クラック発生率に相違が認められており、長期的な調査と無水石膏の配合割合等についての検討の必要性を示唆した。

また、塗料フィラー（体質顔料）としての無水石膏の利用可能性について、塗膜付着力および断熱性の点から検討を行い、いずれも体質顔料として多く利用されている炭酸カルシウムを上回る結果が得られたが、本研究での使用した塗料試料は、体質顔料として無水石膏等を添加するために同量の水で希釈したものであり、本来であれば塗料製造用の樹脂溶剤を用いるべきであり、正式な塗料配合での試料作成を行った上で、試験の実施が必要であると言える。

### 5.1.5 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成 19 年版）、2007.
- 2) 社団法人日本道路協会：アスファルト舗装要綱、pp.95（1993.1）
- 3) 社団法人日本道路協会：道路維持修繕要綱（1987.10）

### 5.1.6 関連する発表論文

- 1) 今岡、広田、新畑、西本、長江、恵谷、細井：廃石膏ボード等建設系廃棄物の道路舗装材への再利用の検討、第 18 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 I、pp.461～463、2007.
- 2) 小原、今岡、山崎、細井、菅野、恵谷：廃石膏ボードのアスファルトフィラー材としてのリサイクルに関する研究、第 60 回土木学会中国支部研究発表会概要集、第 7 部門-17、2008.
- 3) 今岡、広田、新畑、恵谷：廃石膏ボード粉砕処理物のフィラー材としての再資源化、舗装、Vol.43、No.11、pp.13～17、2008.
- 4) 今岡、広田、新畑、長江、菅野、恵谷、細井：廃石膏ボード粉砕処理物のフィラー材としての再資源化に関する研究、第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集、B4-2、pp.221-222、2010.

### 5.1.7 知的所有権の取得状況

- ・特許出願：特願 2008-250724 「道路舗装用アスファルト混合物」、2008.9.29.

### 3.1.3 研究結果と課題の概要

本研究では、廃石膏ボードから製造された再生石膏（二水石膏、半水石膏およびⅡ型無水石膏）をアスファルトフィラー材として用いて実施した試験舗装路面の性状調査を行った。対象は、二水石膏と半水石膏を用いて平成19年3月13日に行った試験舗装区（平成18年度施工区）とⅡ型無水石膏を用いて平成21年1月22日に実施した平成20年度施工区である。なお、無水石膏に関しては通常のフィラー材（石粉）を100%代替して舗装を実施したが、二水石膏および半水石膏については配合試験の結果から、100%の代替は困難であると判断されたため、最大50%代替として各2工区、計4工区を設けた。

路面調査項目は、①平坦性、②わだち掘れ量、③すべり抵抗とした。平成18年度施工区および20年度施工区いずれの工区においても、平坦性、わだち掘れ量およびすべり抵抗とも施工直後において、出来形規格値を満足していた。平成18年度施工区では、施工直後から3年後までの変化を見ても、通常工区での値と大きな相違は無く、正常な路面が維持されていると判断された。また、平成20年度施工区の無水石膏工区の平坦性、わだち掘れ量についても、通常舗装とほぼ同じ値であり、路面の変化の終息が示唆された。すべり抵抗については、数値的な路面の劣化は進行しているが、通常舗装とほぼ同じ値を示しており、フィラー材の違いによるものではないと考えられた。

今後、さらに長期的な調査を実施し、路面性状の変化を確認するとともに、施工実績を増やし、データを集積することが課題となる。

また、試験舗装を行った路面のコアサンプルを採取し、浸漬溶出試験を実施した結果、6時間浸漬液および24時間浸漬液の全ての試料において、カドミウム、ヒ素、総水銀等の分析値は、フッ素も含め、定量下限値未満であった。

なお、アスファルトフィラー以外の用途として塗料原料（体質顔料）に着目し、再生無水石膏の吸油量の測定なども本年度に予備的に実施した。結果として、水系塗料あるいは溶剤系塗料に従来使用されているカオリンとほぼ同等の数値を得ており、来年度に詳細な検討を行う予定である。

## 5. 2 廃石膏ボードの魚礁ブロックへの再利用

西嶋 渉 広島大学

### 5.2.1 研究目的

藻場は、産卵場、幼稚仔の保育場の提供、産卵・保育場の提供、餌の提供等の機能を有しているが、高度経済成長期における開発等の影響によって藻場の消失が進んでおり、造成・保全の重要性が増している<sup>1)</sup>。一方、高度経済成長期以降、海砂はコンクリート骨材など多様な用途に利用されてきた。現在、海砂の採取は、ほぼ全国的に禁止されているが、海砂採取跡地は依然として残されている。海砂採取跡地では、水深の増大に伴う魚類加入の阻害や跡地での底質の礫質化や泥化による底棲魚類の生息地の減少などが懸念されるだけでなく<sup>2)</sup>、海砂採取跡地に由来する貧酸素水塊により、周辺の浅場生態系におダメージを与えるなど<sup>3)</sup>、周辺の漁場価値を著しく失わせる。従って、海砂採取跡地の埋め戻し修復が必要となっている。

これまで人工礁として自然石およびコンクリートブロックが広く利用されてきた。コンクリートブロックには骨材として砂や砂利が使われており、これらの代わりに廃棄物を用いた研究がなされてきた。粗骨材に高炉徐冷スラグを用いたブロックへの海藻付着状況が良好であったこと<sup>4)</sup>、製鋼スラグを炭酸化し、貝殻の主成分である炭酸カルシウムとしたブロックにホンダワラ類の海藻の付着が多い結果となったこと<sup>5)</sup>等が報告されている。しかし、既往の研究では海に一定の期間ブロックを設置する手法がとられており、食害等の外的要因を排除できないため、純粋に基盤の違いのみによる付着・成長性の違いが明確になっていない。よって、どのような基盤材が藻類の付着・成長性に適しているかは十分理解されておらず、廃棄物の藻場ブロックとしての適用可能性を検証する必要がある。また、海砂採取跡地の埋め戻し材料として港湾維持浚渫土が用いられてきた。浚渫土投入後の流出や汚濁の発生防止のため、転炉系製鋼スラグが有望であるが、必要とされる強度を得るために30vol%程度での添加も検討されたが<sup>6)</sup>、含水比が高い浚渫土を利用する場合、さらなる添加が必要となりうることは容易に想像できる。浚渫土に対する転炉系製鋼スラグの添加量がさらに多くなれば、これは埋め戻し材と見なされうる。

そこで、魚礁ブロックの骨材として再生石膏の利用、漁場価値を失わせる海砂採取跡地の埋め戻しに用いる浚渫土の固化材として廃石膏の焼成によって得られる半水石膏の利用に着目した。本研究では、再生石膏を混入させたブロックを作成し、作成したブロックへの海藻類胞子の付着性・成長性を評価すると共に、海砂採取跡地修復など漁場価値が失われた場の整備に用いる浚渫土の固化材としての再生石膏の可能性を検討した。この際、炭酸化による影響も検討することとした。なお、コントロール実験では、山砂ブロックを使用した。

### 5.2.2 研究方法

#### 5.2.2.1 サンプルブロックの作製

コンクリートブロックの材料はセメント、水、粗骨材、細骨材である。本研究では粗骨材を用いず細骨材のみを用い、モルタルブロックを作製した。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は全て0.85~2mmに調整したものをを用いた。なお、細骨材として、再生石膏の他に、新品の製品石膏ボードの粉碎物、一般廃棄物熔融スラグ、高炉徐冷、水砕、

脱リン、脱ケイ、脱炭、フェロマンガンスラグや各スラグと再生石膏の混合物、山砂（対照系）を用いてモルタルブロックをプラスチックシャーレに作成した。まず、9 cm シャーレにセメント、水、細骨材を入れ混ぜ合わせ、1 日間静置した。そして、46°Cの湯中に入れ、5 日間養生を行った。この際、表面に付着した灰汁を擦り落とした。各ブロックの調合は表 5.2-1 に示した。なお、製品石膏ボード、廃石膏ボードは吸水性を持つため、水の割合を他の細骨材よりも多く設定した。

表 5.2-1 (a) 材料単独のブロック (RUN 1)

細骨材種類	セメント [g]	水 [g]	細骨材 [g]	水/セメント比 [wt%]	セメント/骨材 比[vol%]
山砂	21	12.6	18	60	100
製品石膏ボード	21	15.75	6.9	75	100
廃石膏ボード	21	15.75	6.9	75	100
一般廃棄物溶融スラグ	21	12.6	24.7	60	100
高炉水砕スラグ	21	12.6	20.3	60	100

表 5.2-1 (b) 材料単独のブロック (RUN 2)

	山砂	廃石膏	徐冷	水砕	脱リン	脱ケイ	フェロマンガン	脱炭
セメント [g]	21	21	21	21	21	21	21	21
細骨材 [g]	20	7	20	20	20	20	20	20

表 5.2-1 (c) 各スラグに石膏を添加したブロック (RUN 3)

	徐冷 +石膏	水砕 +石膏	脱リン +石膏	脱ケイ +石膏	フェロマンガン +石膏	脱炭+石膏
セメント [g]	21	21	21	21	21	21
スラグ [g]	10	10	10	10	10	10
石膏 [g]	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5

### 5.2.2.2 サンプルブロックの炭酸化

サンプルブロックの炭酸化の有無による付着性の違いを評価するため、RUN 1 のブロックに NaHCO<sub>3</sub> 飽和溶液を流し入れ、24 時間静置することで予め炭酸化した系列を別に用意した。

### 5.2.2.3 屋内培養実験

本研究では、純粋に基盤の違いのみによる付着・成長性の違いを明確にするため、屋内の水槽にて培養を行うこととした。コンブは青森県泊漁業協同組合から供与されたものを用いた。

まず、室温 10°C に設定した恒温室内に設置した 10L パンライト水槽に人工海水を満たし、コンブを入れ、蛍光灯で光を当てながら約 3 時間静置し、孢子囊から遊走子(図 5.2-1)と呼ばれるコンブの孢子を放出させた。次に、水槽内からコンブを取り出し、遊走子懸濁液(6×10<sup>4</sup> ind./mL)を得た。一方、室温 10°C に設定した恒温室内に設置した、予めブロック (RUN 1~3)

を設置し人工海水を満たしておいた3本の100 Lアルテミア水槽を準備し、これに遊走子懸濁液0.1 Lずつを投入した。水槽は明期12時間に設定した蛍光灯で光を当てた。なお、人工海水はUV殺菌を行い、循環させた。培地にはPESI培地を調製し、20日ごとの海水交換と同時に交換した。培養20日目にはデジタル顕微鏡でブロック表面の665  $\mu\text{m}$ ×886  $\mu\text{m}$ の範囲の写真を各ブロック10枚ずつ撮影し、コンブの株数を測定した。培養70日目には、ブロックの表面の約1 cm四方を3ヶ所削ぎ落とし、実体顕微鏡でコンブの葉の枚数を測定した。削ぎ落とした面積は、ノギスを用いて測定し1  $\text{cm}^2$ あたりの葉の枚数を算出した。



図 5.2-1 コンブ遊走子

#### 5.2.2.4 屋外実験(1)

RUN 1 で作成したブロックを網に入れ、動かないように釣り糸で固定し、広島大学生物生産学部の施設、竹原ステーションにあるイカダに網を取り付け、ブロックが水深 1~2 m に位置するように設定した。55 日間海中に設置した後、ブロックの表面で直径約 4 mm の範囲をランダムに 5ヶ所選定し、実体顕微鏡で藻の個体数を測定した。

#### 5.2.2.5 屋外実験(2)

RUN 2 及び RUN 3 で作成したブロックを呉市阿賀にある産業総合研究所の臨海実験施設内の水槽に 60 日間設置し(図 5.2-2)、ブロック上に形成された生物膜重量、ならびにクロロフィル a 量を測定した。なお、ブロックは水深 20 cm に位置するように設定した。引き上げ後、ブロックの表面の生物膜を採取し、クロロフィル a ならびに乾燥重量を測定した。

#### 5.2.2.6 pH 試験・金属溶出試験

RUN 1 のブロックについては、金属溶出や pH による付着性の違いを検証するため、pH 試験と金属溶出試験を行った。対象金属は、Ca, Cr, Co, Cu, Mn, Fe, Pb, Zn とした。サンプルブロックのシャーレに人工海水を 30 mL ずつ流し入れ、1 日間静置した後、人工海水を採取し、ICP にて溶出金属量を、pH 計にて pH を測定した。



図 5.2-2 屋外試験の概観

### 5.2.2.7 浚渫土固化試験

試験に用いた浚渫土は、岡山県水島港から採取した浚渫土（含水比 120%）を用いた。使用前には、必要に応じて人工海水（Sealife, マリンテック）を添加、もしくは蒸発により含水比を調整した。一方、改質処理には転炉系製鋼スラグの一つである脱炭スラグを用いた。粒度組成は表 5.2-2 の通りである。また、半水石膏（<2.0 mm）は廃石膏ボードを原料として作成されたものである。

表 5.2-2 脱炭スラグの粒度組成

粒径 [mm]	< 0.85	0.85~2.0	2.0~4.75
含有率 [%]	40.1	23.2	36.7

実際の処理においては、港湾維持作業で採取した浚渫土に改質材を加えて海砂採取跡地まで運搬し、投入することが想定される。本研究では、養生（運搬）時間 2 h で、ベーンせん断力  $0.5 \text{ kN/m}^2$  以上を満たす増粘効果を目指した処理を行った。この強度は、土砂を投入した時のマウンド形状として、1 : 10 の傾斜の安定を想定し、設定された数値である<sup>7)</sup>。

電動ハンドミキサーで浚渫土を攪拌し、均質化した浚渫土 3 kg をステンレス製ボールに取り、半水石膏を加えて攪拌した。その後、直ちに脱炭スラグを添加して 10 min 攪拌した。そして、処理土壌を約 3.2 L の容器に入れ、ベーンせん断力の経時変化を測定した。

## 5.2.3 研究結果

### 5.2.3.1 ブロックの炭酸化結果

RUN 1 のブロックの表面の 2~3mm を削り落とし、 $\text{NaHCO}_3$  飽和溶液による炭酸化の影響を見るため XRD にて測定を行った。山砂ブロックについての結果を図 5.2-3 に示す。炭酸化前は  $\text{CaCO}_3$  のピークは見当たらないが、 $\text{NaHCO}_3$  処理を行うことで  $\text{CaCO}_3$  と同様のピークが現れたことから、ブロック表面は炭酸化され、 $\text{CaCO}_3$  となることを確認した。

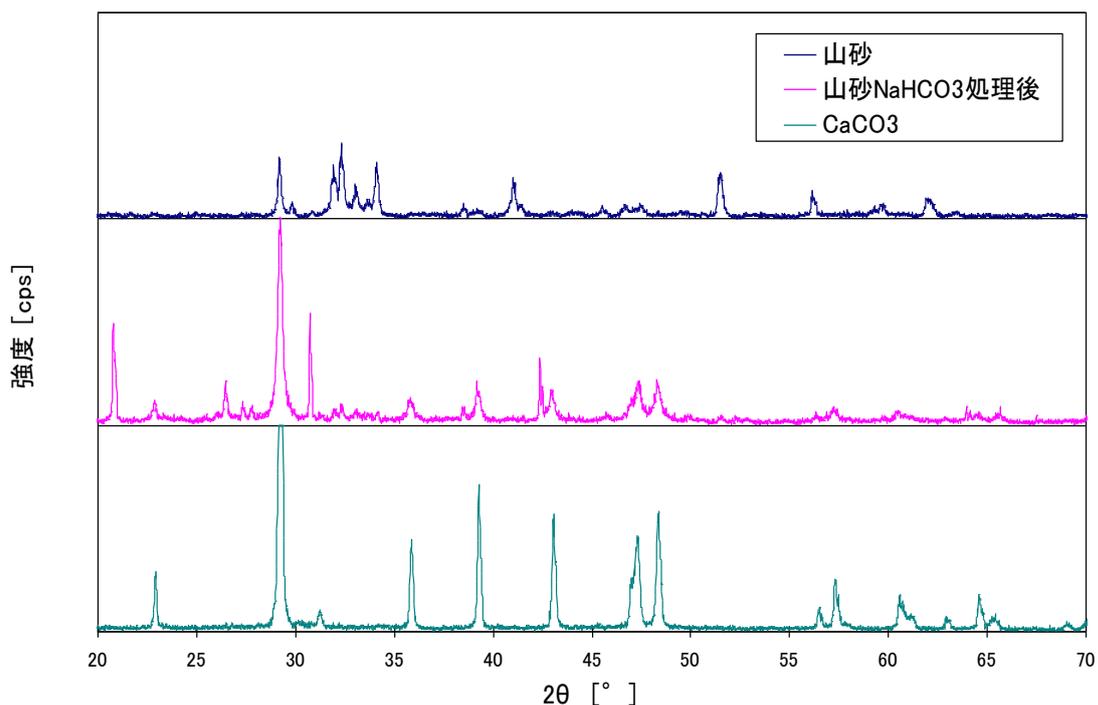


図 5.2-3 山砂ブロックの XRD 測定結果

同様に、石膏ボードブロック、廃石膏ボードブロックについての結果をそれぞれ図 5.2-4、図 5.2-5 に示すが、炭酸化前は  $\text{CaCO}_3$  のピークは見当たらないが、 $\text{NaHCO}_3$  処理を行うことで  $\text{CaCO}_3$  と同様のピークが現れた。また、30~35 度付近のピークは  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  のピークであるが、これらは炭酸化後には目立たなくなっている。これらのことから、ブロック表面は炭酸化され、 $\text{CaCO}_3$  となることを確認した。また、スラグはアモルファスであるため XRD による測定はできなかったが、主成分として酸化カルシウムを含んでおり、炭酸化された可能性が考えられる。

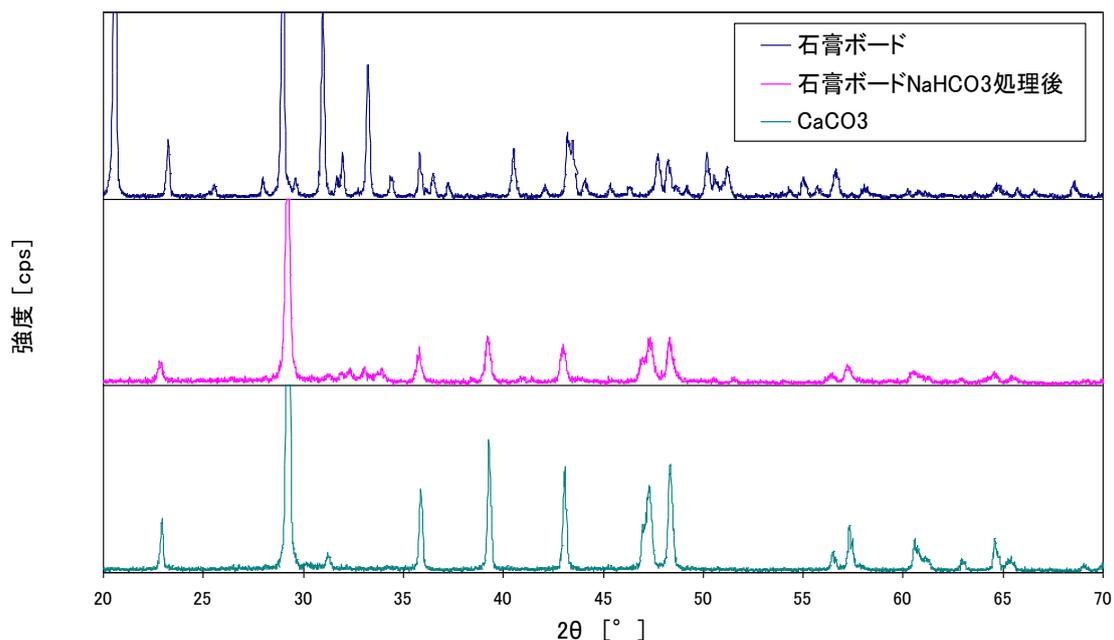


図 5.2-4 石膏ボードブロックの XRD 測定結果

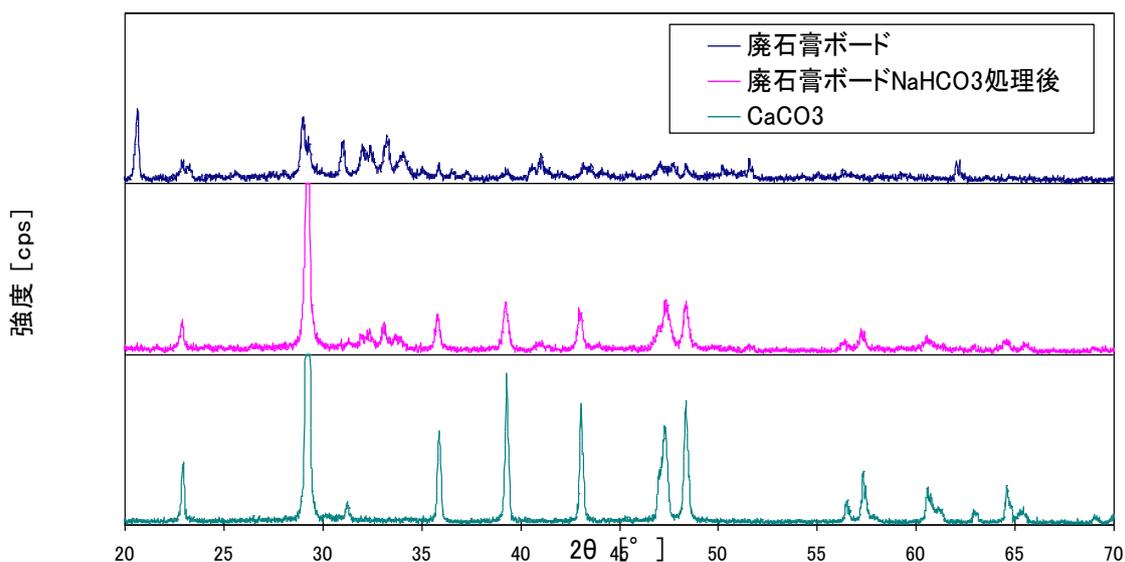


図 5.2-5 廃石膏ボードブロックの XRD 測定結果

### 5.2.3.2 屋内培養試験 (RUN 1)

培養 20 日目の各ブロックへの付着株数を 3 本の水槽で平均化し、山砂ブロックの値で除して得た付着株数比を図 5.2-6 に示す。測定値のバラツキが大きいため統計的な比較はできないが、廃棄物を利用したブロックは山砂と同等かそれ以上の付着性が見られた。また山砂ブロックを除き、平均的には炭酸化することにより付着株数の増加が見られた。

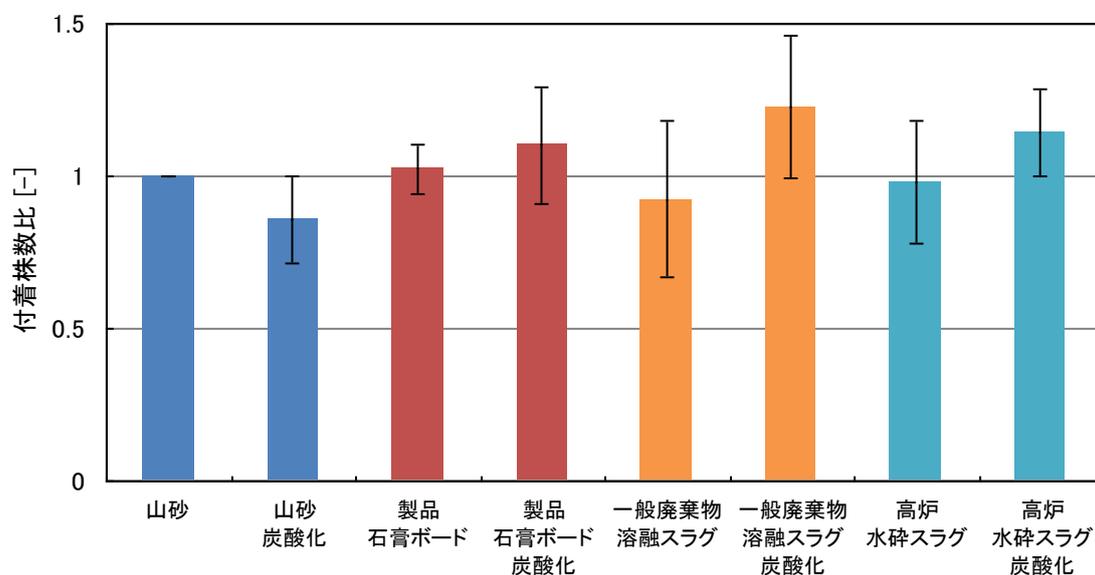


図 5.2-6 付着株数比(20 日目)

同様に、培養 70 日目の各ブロックへの付着株数を 3 本の水槽で平均化し、山砂ブロックの値で除して得た付着株数比を図 5.2-7 に示す。廃棄物を利用したブロックは山砂と同等かそれ以上の成長性が見られた。また、炭酸化することにより葉の枚数の増加が見られた。

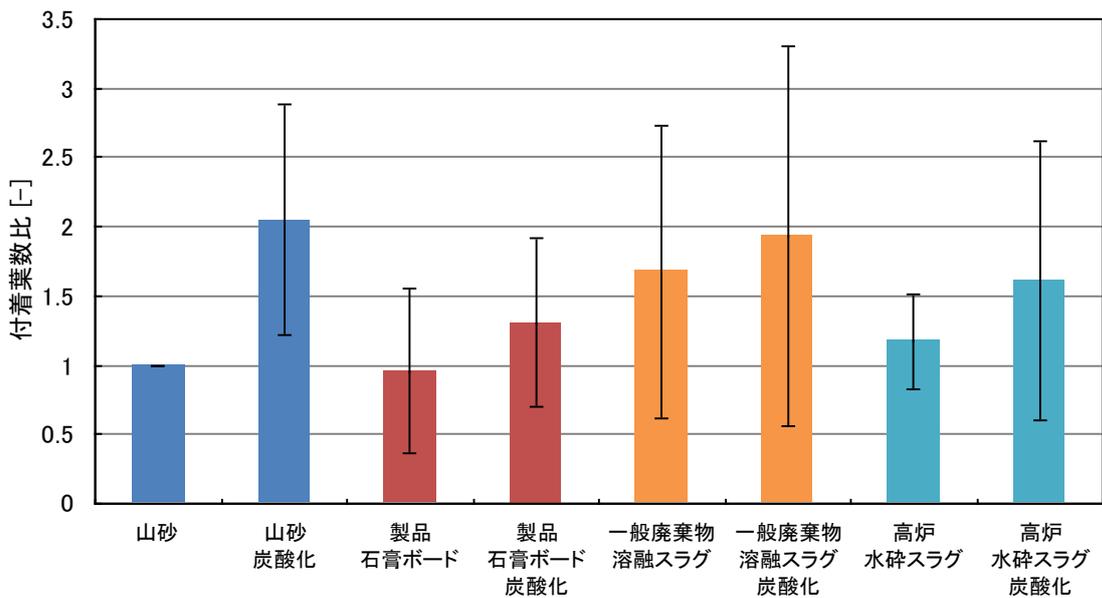


図 5.2-7 付着株数比(70 日目)

### 5.2.3.3 屋内培養試験 (RUN 2, 3)

図 5.2-8 に各ブロックへのコンブの付着株数を示す。再生石膏ボードを利用したブロックと山砂ブロックへの付着数に有意な差は認められなかった。この結果は RUN 1 と一貫しており、再生石膏へのコンブ遊走子の付着性は山砂と比較して遜色ないことが確認された。

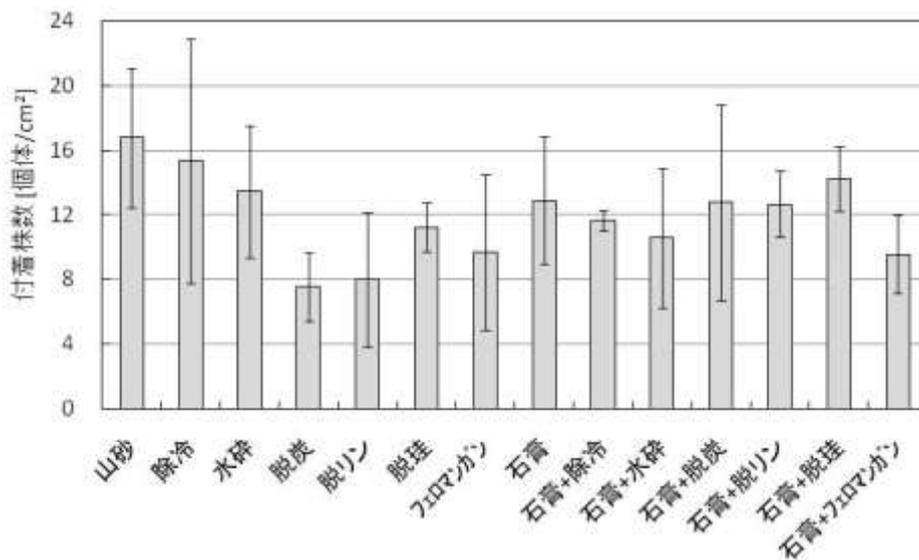


図 5.2-8 ブロックへのコンブ付着株数比(n=9)

### 5.2.3.4 屋外培養実験 (RUN 1)

各ブロックへの各種藻類の付着株数を 3 個の網で平均化し、山砂ブロックの値で除して得た付着株数比を図 5.2-9 に示す。ブロックには 200~300 μm 程度の褐藻、緑藻、紅藻が付着し

ていた。泥や潮流等の影響が大きかったためか、各種ブロック間・炭酸化前後での付着数の違いにはっきりとした傾向は得られなかった。

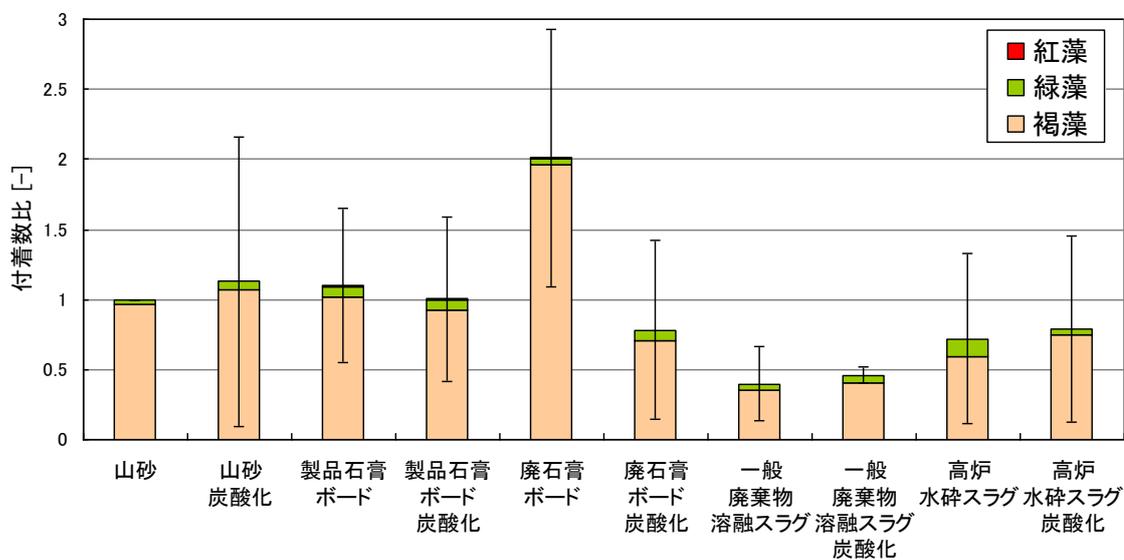


図 5.2-9 付着株数比

### 5.2.3.5 屋外培養実験 (RUN 2, 3)

全てのブロック上にはアオサ藻綱のシオグサが認められた(図 5.2-10)。また、クロロフィル

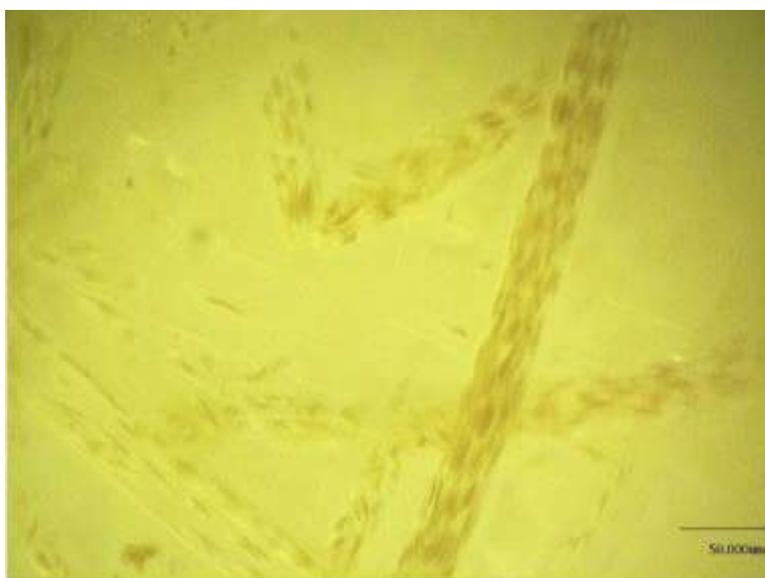


図 5.2-10 ブロックに付着したシオグサ

a 量において山砂と再生石膏に差異は認められなかった(図 5.2-11)。この結果は、再生石膏を使用したブロック上でも山砂と同様のシオグサの増殖が生じることを示した。

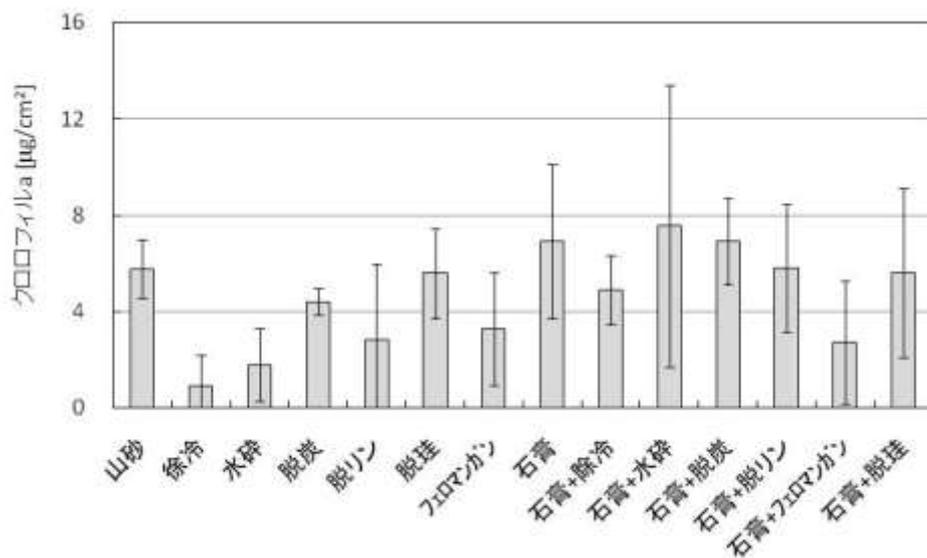


図 5.2-11 ブロック上に発達したシオグサのクロロフィル a 量(n=3)

#### 5.2.3.6 pH 試験・金属溶出試験 (RUN 1)

pH の測定結果を図 5.2-12 に示す。サンプルブロックは予め湯中で 5 日間養生したが、pH は上昇した。普通、約 1 ヶ月の培養で、胞子体は約 1cm 前後の藻体になるが今回の培養実験では培養 100 日間で 2~3mm 程度にしか成長しなかった。これは、ブロックのアルカリ分が十分に抜けきっていなかったことで藻類の成長を阻害した可能性が考えられる。

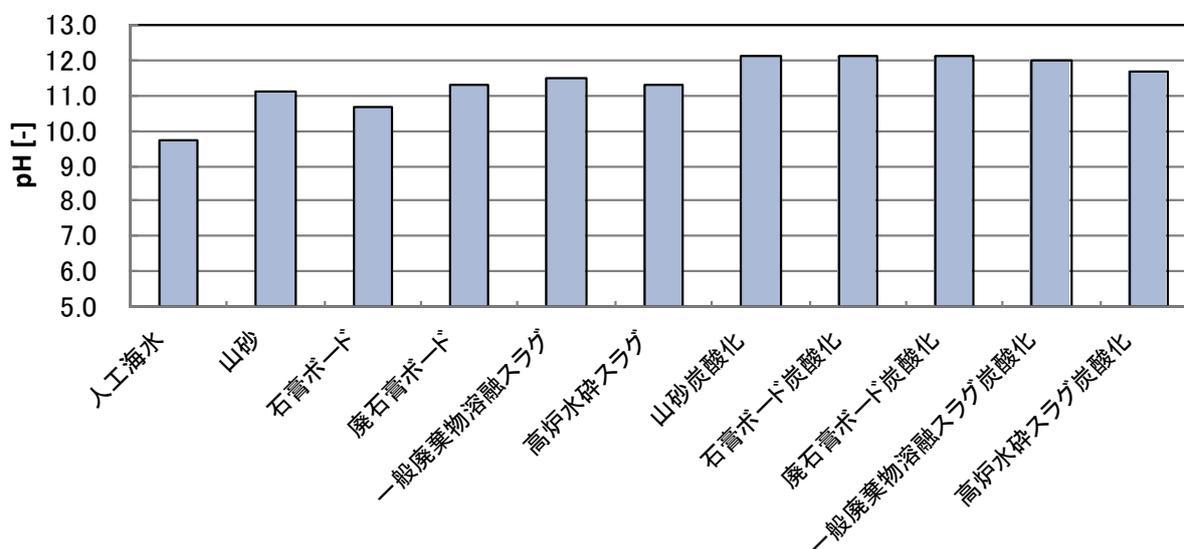
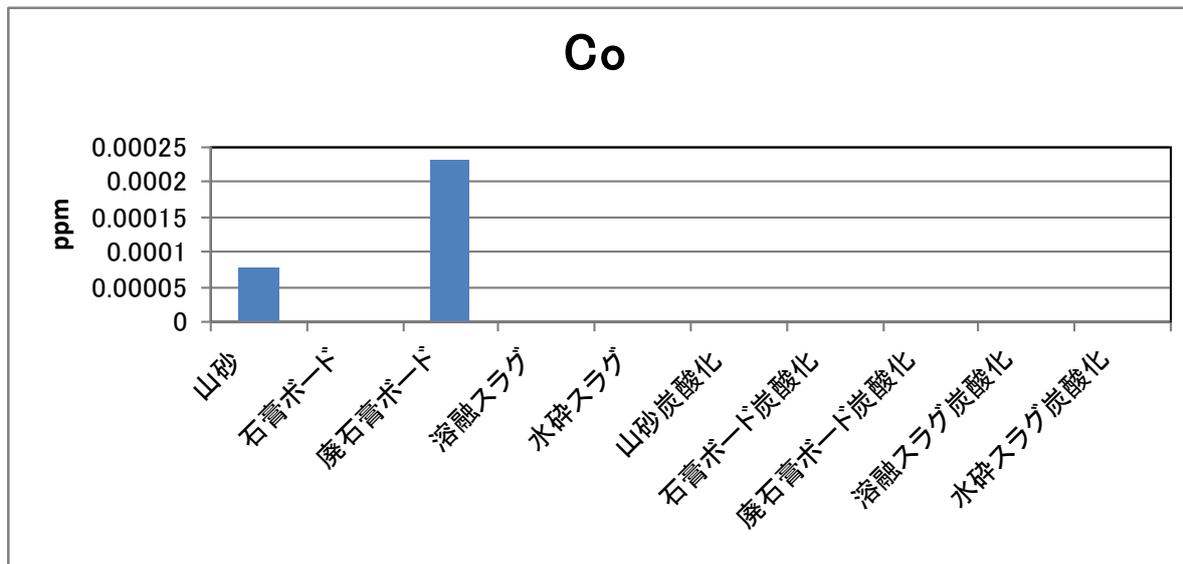
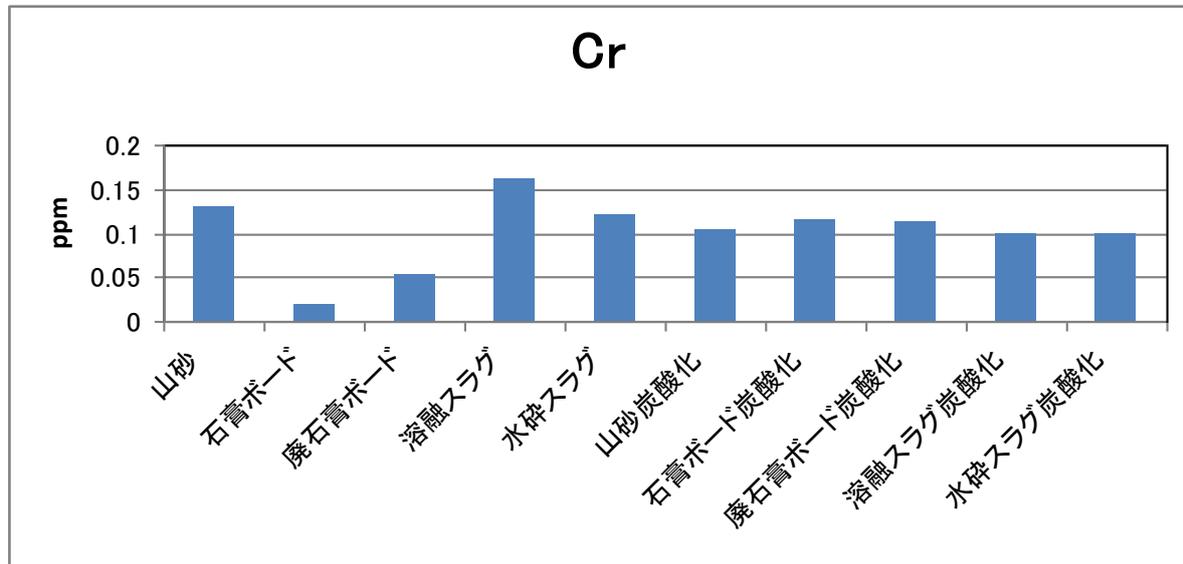
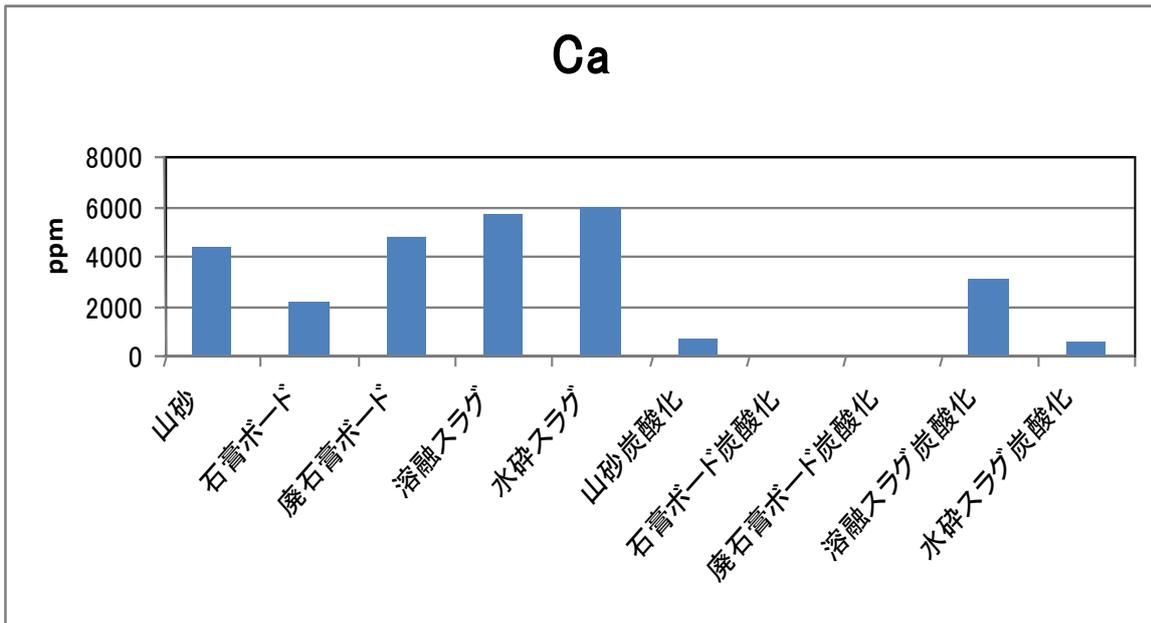
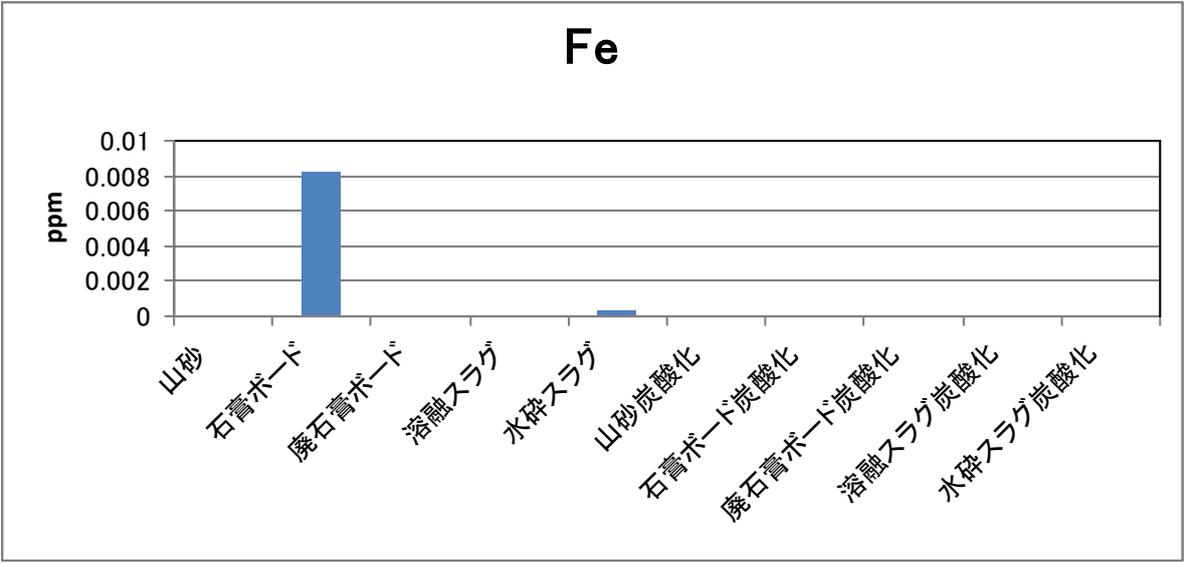
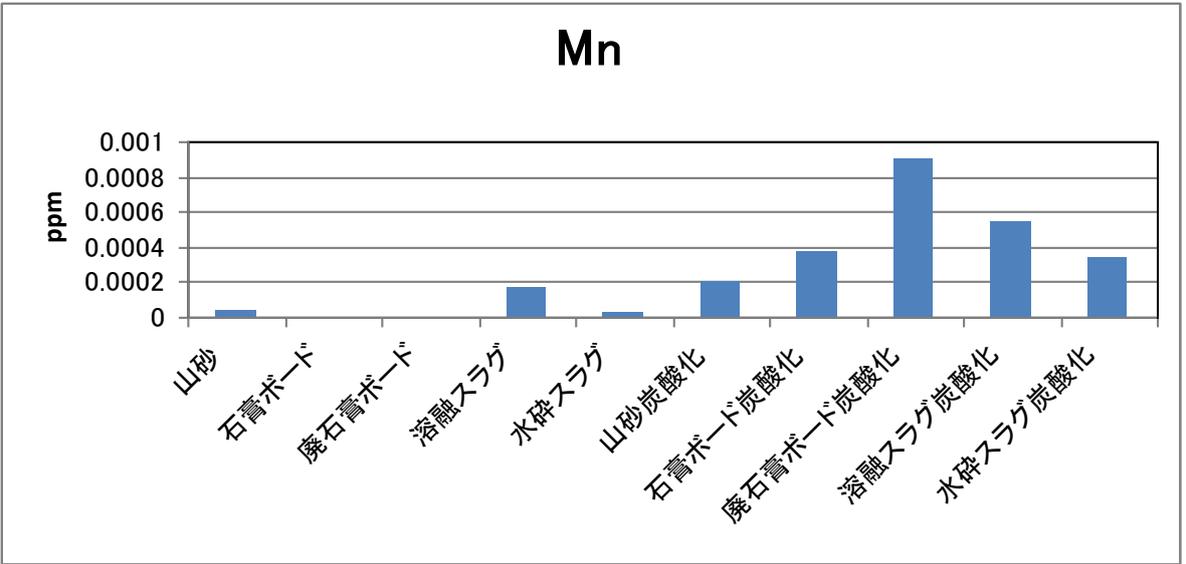
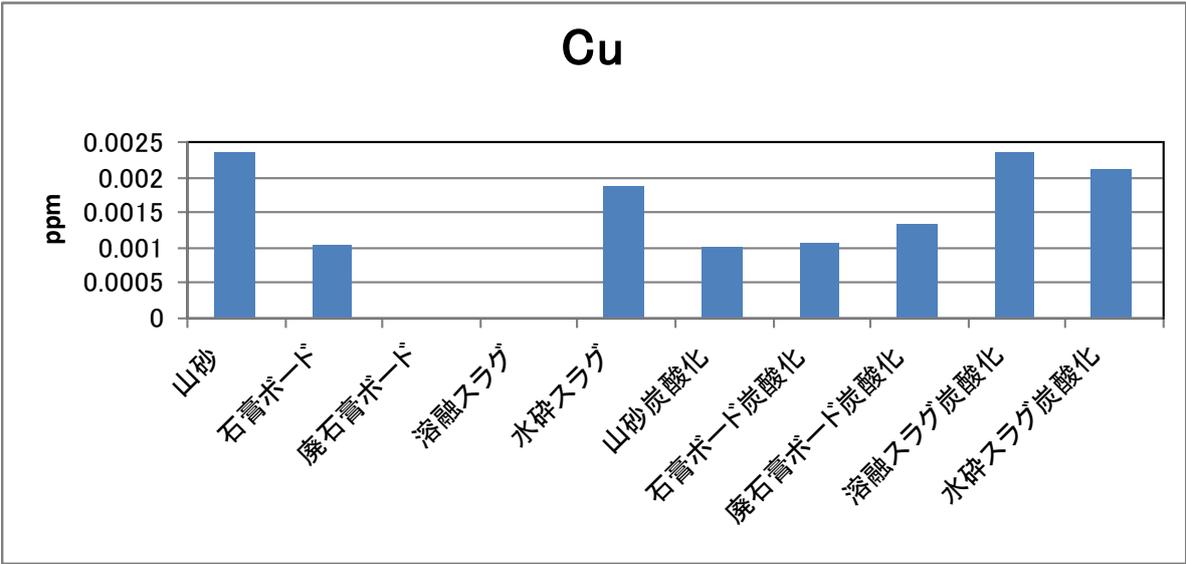


図 5.2-12 pH 測定結果

金属溶出試験の結果を図 5.2-13 に示すが、特に溶出量が高いものは見当たらなかった。





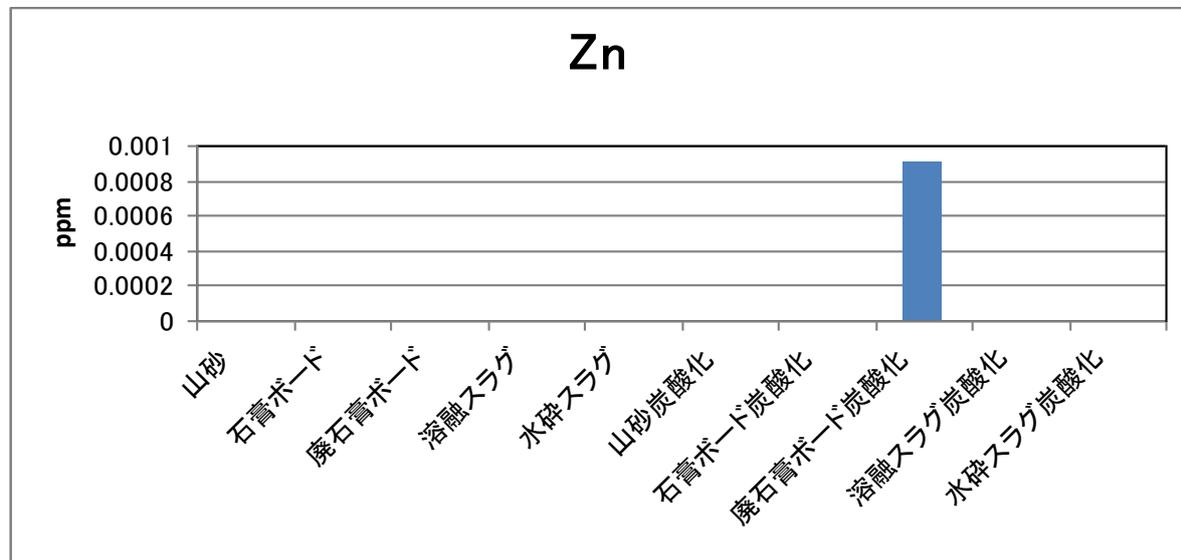
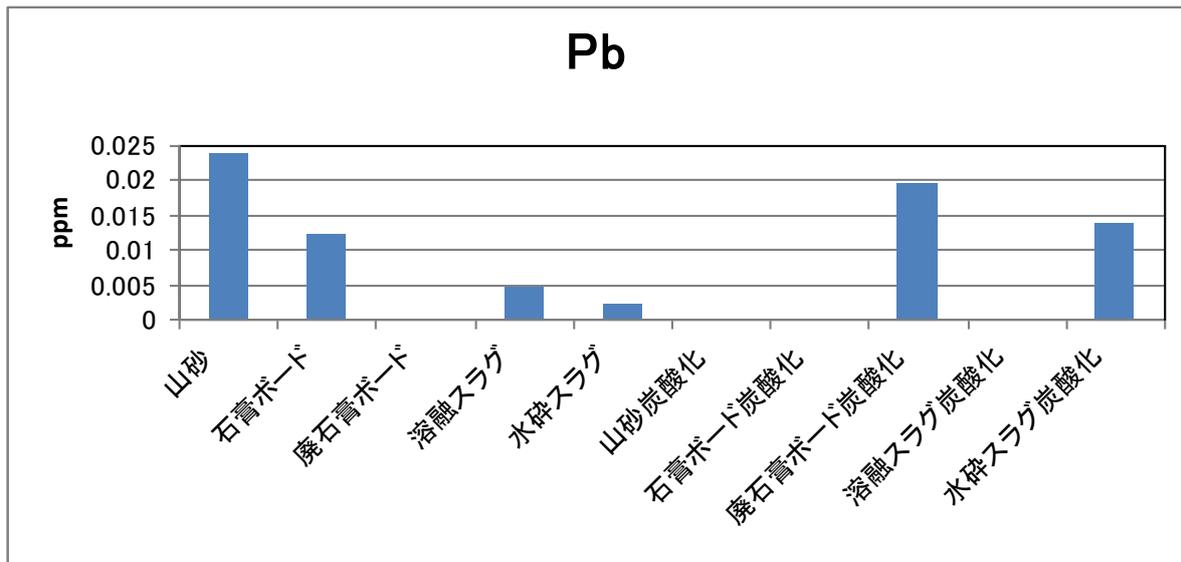


図 5.2-13 金属溶出物の分析結果

### 5.2.3.7 浚渫土固化

半水石膏の添加による含水比の調整結果と含水比調整後の浚渫土のベーンせん断力を図 5.2-14 に示す。なお、ここでの添加率とは、浚渫土に対して加えた改質材の重量ベースでの割合を示す。半水石膏の添加によって浚渫土の含水比は減少したことから（図 5.2-14 a）、半水石膏を用いて所定の含水比に調整することは可能であることが確認された。また、図 5.2-14 b に示すように、半水石膏を加えた浚渫土のベーンせん断力は、同含水比で無添加の浚渫土よりも若干高かった。これより、半水石膏による増粘が認められた。しかしながら、ベーンせん断力の増加は添加直後のみで、目標値である  $0.5 \text{ kN/m}^2$  を上回るほどではなかった。

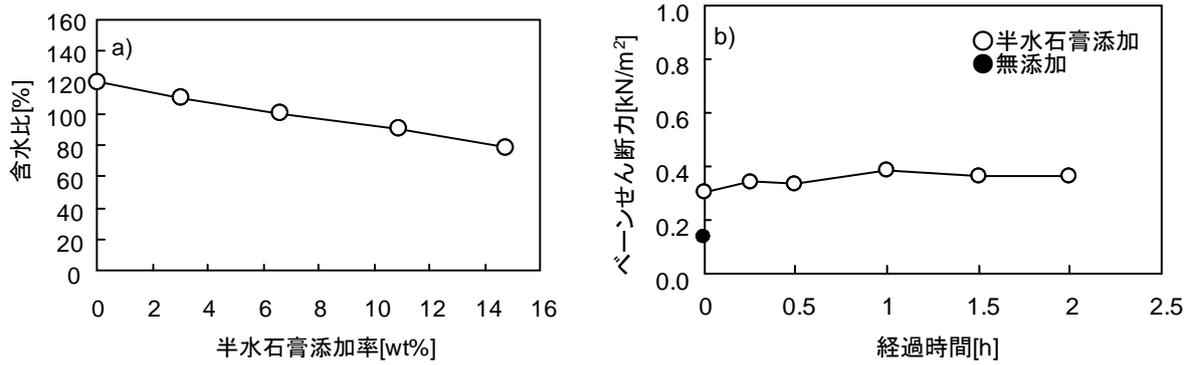


図 5.2-14 半水石膏の添加による効果(a 含水比調整, b 含水比 80%浚渫土のペーンせん断力)

半水石膏を用いず、蒸発により含水比を 100%とした浚渫土を脱炭スラグで処理した結果を図 5.2-15 に示す. 脱炭スラグ 20 wt% の添加処理により, 2 h 後のペーンせん断力は  $0.5 \text{ kN/m}^2$  を上回り, 脱炭スラグは増粘のために有効であることが確認された. また, 無添加のケースとの比較より, ペーンせん断力の増加は, 攪拌時とその後に生じていることが認められた.

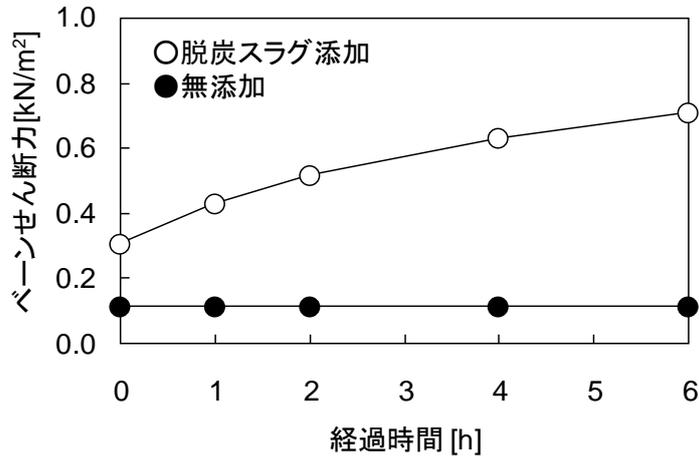


図 5.2-15 脱炭スラグ(20wt%添加)による含水比 100%浚渫土の処理結果

次に, 含水比が脱炭スラグによる浚渫土の増粘に与える影響を評価するため, 蒸発あるいは加水により含水比を調整した浚渫土に対して脱炭スラグを 10wt%刻みで変化させながら添加した. この結果, 2 h でペーンせん断力  $0.5 \text{ kN/m}^2$  を上回るために必要な脱炭スラグ量は 100%以上で特に増加すること, 含水比 120%では浚渫土の半分の量(50wt%)が必要であることが示された(図 5.2-16).

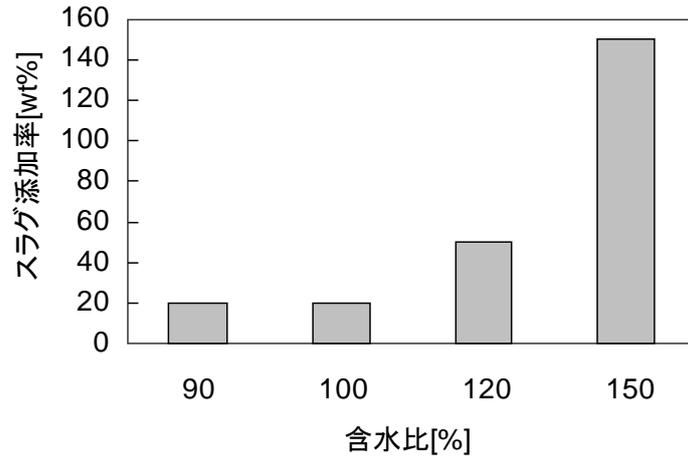


図 5.2-16 目標ベーンせん断力 ( $0.5 \text{ kN/m}^2$ ) を 2 h で達成するために必要な脱炭スラグの添加率

そこで、半水石膏と脱炭スラグとの共添加を行った。含水比 120%の浚渫土に半水石膏を 11wt%加えて含水比 90%に調整し、脱炭スラグ 20wt%を添加する処理を行った結果、1 h で目標ベーンせん断力 ( $0.5 \text{ kN/m}^2$ ) を上回ることが確認された (図 5.2-17)。この時、含水比 120%の浚渫土 1 kg あたりに添加した半水石膏は 0.11 kg、脱炭スラグは 0.2 kg であった。これに対し、含水比 120%にて目標ベーンせん断力を達成するために必要な脱炭スラグは、浚渫土 1 kg あたり 0.5 kg であり (図 5.2-16)、半水石膏を用いることで脱炭スラグの使用量は 6 割低減できることが明らかとなった。また、半水石膏を使用した場合でも、浚渫土に加えられた改質材は合計で 0.31 kg であり、脱炭スラグのみを用いたケースの約 6 割にとどまった。従って、半水石膏を用いた含水比の調整により、浚渫土増粘に使用する脱炭スラグの使用量を単に減らせるだけでなく、浚渫土に加える改質材の全量も低減できることが明らかとなった。

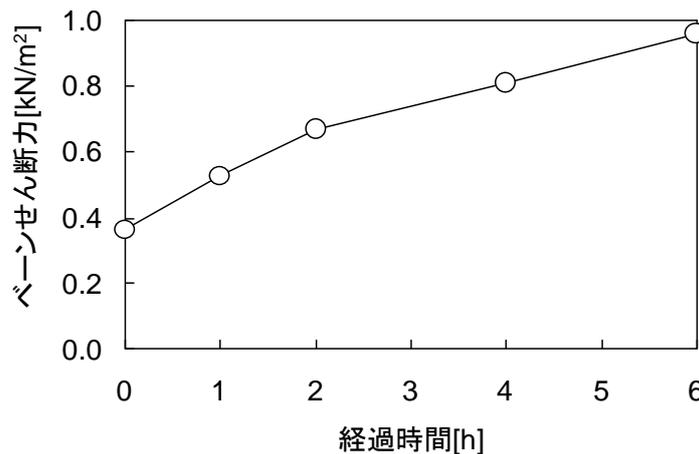


図 5.2-17 半水石膏により含水比 90%とした浚渫土の脱炭スラグ(20wt%添加)を用いた処理結果

脱炭スラグなどの転炉系製鋼スラグには、シリカや酸化カルシウムが含まれており<sup>6)</sup>、浚渫土と混合後にポズラン反応によってカルシウムシリケート系水和物が生成することが知られる。一方、半水石膏には硫酸カルシウムが含まれており、半水石膏由来のカルシウムが脱

炭スラグの増粘効果に影響する可能性が考えられた。そこで、脱炭スラグ(< 0.85 mm)を用い、半水石膏 11wt%添加もしくは蒸発により含水比 90%とした浚渫土を処理し、この可能性を検証した。その結果、図 5.2-18 に示すように、半水石膏の添加、無添加共に同様のベーンせん断力の増加を示した。従って、半水石膏成分は脱炭スラグの増粘効果に影響しないことが認められた。

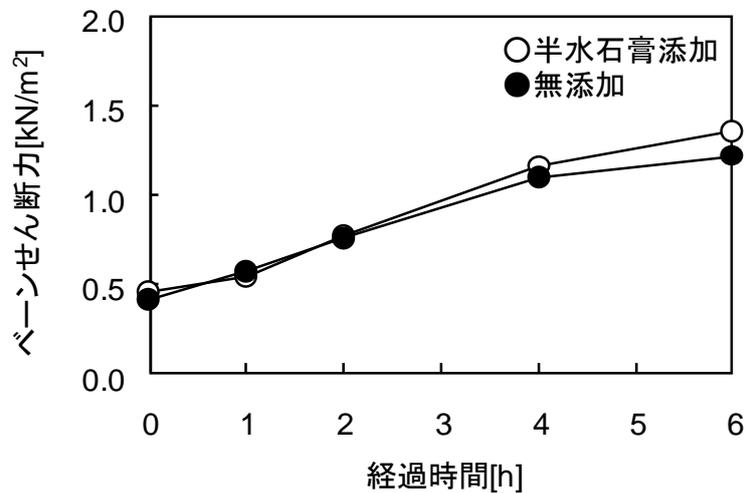


図 5.2-18 脱炭スラグ(10wt%添加, 粒径<0.85 mm)による含水比 90%浚渫土の処理結果に及ぼす半水石膏の影響

半水石膏もしくは蒸発により含水比 90%とした浚渫土を脱炭スラグ(20wt%添加)により処理し、人工海水に浸漬した際のベーンせん断力、ならびに直上水の pH の変化を図 5.2-19 に示す。半水石膏添加の有無にかかわらず、処理した浚渫土のベーンせん断力は海中投入直後も同様の増加を示し、最終的には  $2.0 \text{ kN/m}^2$  にてほぼ一定となった。これより、施工期間が 30 d に及ぶ場合でも、浚渫土の強度は低下しないことが示唆された。

一方、改質浚渫土を投入する前の人工海水は pH9 であったが、投入直後も増加しなかった。これより、改質浚渫土からのアルカリ溶出は無視できる程度であることが示された。なお、実際に改質浚渫土の間隙水は pH10.2 前後にて安定していた。また、投入後の人工海水の pH が徐々に低下した原因は未確認であるが、有機物の分解などが考えられる。一方、30 d での海水中の硫酸イオンを分析した結果、 $1808 \text{ mg/L}$  (半水石膏添加)、 $1814 \text{ mg/L}$  (無添加) となり、半水石膏由来の硫酸イオンの溶出は認められなかった。従って、止水状態の 30 d では改質材の溶出はほとんど起こらなかったことが示唆された。

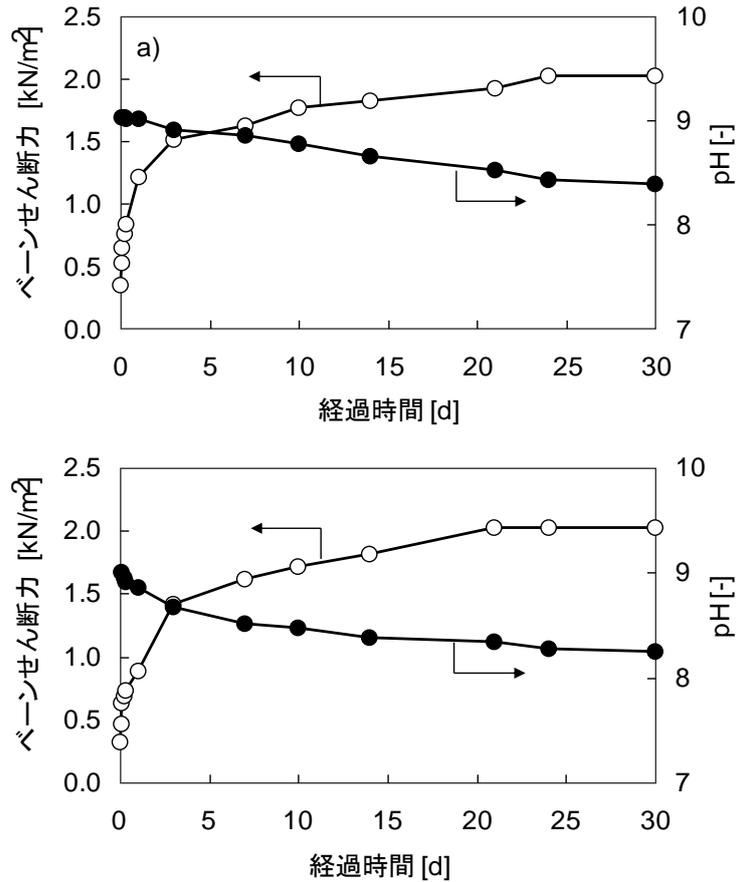


図 5.2-19 脱炭スラグ(20wt%添加)を用いて処理した含水比 90%浚渫土の人工海水投入後のベーンせん断力と人工海水の pH (a 半水石膏添加, b 無添加)

#### 5.2.4 まとめと課題

再生石膏を混入させたブロックを作成し、作成したブロックへのコンブ遊走子の付着性・成長性を評価すると共に、海砂利採取跡地修復など漁場価値が失われた場の整備に用いる浚渫土の固化材としての再生石膏の可能性を検討した。再生石膏ボードを骨材として加えたブロックへのコンブの付着性、シオグサの成長性は、山砂を骨材としたブロックと同じであった。従って、再生石膏は、山砂に替わる藻場ブロックの骨材として有望であることが明らかとなった。また、炭酸化によって付着性が向上する可能性も見出されたが、結果の再現性を確認する必要があった。さらに、再生石膏ブロックからの重金属溶出による問題はないと考えられた。一方、再生石膏には、浚渫土の含水比を調整する機能があり、再生石膏と脱炭スラグとを組み合わせることで、浚渫土の強度を海砂利採取跡地の埋め戻しに必要な強度を上回らせることができた。今後、汎用性を把握するため、種々の海藻に対する親和性について検討する必要がある。

#### 5.2.5 参考文献

- 1) 藻場の働きと現状－水産業・漁村の多面的機能（水産庁）  
<http://www.jfa.maff.go.jp/tamenteki/multiple/01-03.html>
- 2) 国土交通省中国地方整備局・同四国地方整備局（2009）：備讃瀬戸環境修復計画～恵み豊かな備讃瀬戸をめざして～(オンライン),

<http://seto-eicweb.pa.cgr.mlit.go.jp/img/bisan-seto-honbun.pdf>

- 3) 中村由行 (2010) : 全国の浚渫窪地の現況と三河湾における埋め戻し修復, 水産工学, Vol. 46, No. 3, pp. 229-233.
- 4) 骨材に産業副産物を有効利用した藻場復元用ポーラスコンクリートに関する研究  
三島 剛ら, 日本建築学会研究報告. 九州支部 42:29-32 (2003)
- 5) A field test of porous carbonated blocks used as artificial reef in seaweed beds of *Ecklonia cava*  
Kumi Oyamada et al. J Appl Phycol 20:863-868 (2008)
- 6) 日本鉄鋼連盟 (2008) : 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き 別冊「転炉系施工スラグ  
と浚渫土との混合改良工法」
- 7) 国土交通省中国地方整備局宇野港湾事務所・港湾空間高度化環境研究センター (2010) :  
平成 21 年度備讃瀬戸環境修復計画技術検討業務 報告書 (抜粋版), pp.7-3.

#### 5.2.6 関連する発表論文

平成 22 年度では、特にない。

#### 5.2.7 関連する発表論文

平成 22 年度では、特にない。

