



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ビーチロック形成機構に学ぶ人工岩の開発に関する基礎的研究
Author(s)	檀上, 堯
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11905号
Issue Date	2015-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11905
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58781
Type	doctoral thesis
File Information	Takashi_Danjo.pdf



ビーチロック形成機構に学ぶ人工岩の開発に関する基礎的研究

Fundamental study on development of artificial rock
learnt from beachrock formation mechanism

2015 年

檀上 堯

目次

第1章 序論

1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 本論文の構成と内容	2
参考文献	3

第2章 ビーチロックに関する文献調査

2.1 緒言	4
2.2 方法	4
2.2.1 分布域	4
2.2.2 形成年代	4
2.2.3 諸特性および形成機構	5
2.3 結果および考察	5
2.3.1 分布域	5
2.3.2 形成年代	7
2.3.3 諸特性および形成機構	14
2.4 結言	21
参考文献	22

第3章 ビーチロックの物理・力学特性

3.1 緒言	29
3.2 方法	29
3.2.1 調査地点	29
3.2.2 原位置試験	35
3.2.3 室内試験	36
3.3 結果	37
3.3.1 原位置試験	37
3.3.2 室内試験	40
3.4 考察	43
3.4.1 原位置試験で得られた物性間の相関関係	43
3.4.2 一軸圧縮強さとその他の物性の相関関係	45
3.4.3 原位置試験と室内試験の物性の相関関係	46
3.5 結言	47

参考文献	47
------	----

第4章 ビーチロックの形成機構に関する考察

4.1 緒言	48
4.2 方法	48
4.2.1 菌数測定	48
4.2.2 元素分析および SEM 観察	49
4.2.3 鉱物分析	49
4.2.4 水質分析	49
4.3 結果	49
4.3.1 菌数測定	49
4.3.2 元素分析および SEM 観察	50
4.3.3 鉱物分析	54
4.3.4 水質分析	56
4.4 考察	57
4.4.1 セメント物質の同定	57
4.4.2 形成機構に関する考察	61
4.4.3 人工岩作製方法の選定	65
4.5 結言	68
参考文献	68

第5章 尿素分解菌を用いたサンゴ砂のシリンジ固化試験

5.1 緒言	70
5.2 方法	70
5.2.1 ウレアーゼ活性試験	70
5.2.2 尿素分解菌の 16S rDNA 塩基配列解析	74
5.2.3 シリンジ固化試験	75
5.3 結果	81
5.3.1 ウレアーゼ活性試験	81
5.3.2 尿素分解菌の 16S rDNA 塩基配列解析	81
5.3.3 シリンジ固化試験	84
5.4 考察	98
5.4.1 16S rDNA の塩基配列解析による帰属分類群の推定	98
5.4.2 試験条件が UCS に与える影響	100
5.4.3 重回帰分析による設計 UCS の検討	109
5.5 結言	112

参考文献	112
第 6 章 尿素分解菌を用いたサンゴ砂のカラム固化試験	
6.1 緒言	115
6.2 方法	115
6.2.1 試験手順	115
6.2.2 試験条件	118
6.3 結果	124
6.3.1 標準条件 (Case 1) での経時変化	124
6.3.2 養生温度 25 °C (Case 2) での経時変化	128
6.3.3 注入間隔 0.5 日 (Case 3) および 2 日 (Case 4) での経時変化	130
6.3.4 固化溶液の Ca^{2+} 濃度 0.15 M (Case 5) での経時変化	134
6.3.5 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 5 g/L (Case 6) での経時変化	136
6.3.6 カラム試料の表面性状	139
6.4 考察	141
6.4.1 UCS とセメント物質析出量の関係	141
6.4.2 重回帰分析による設計 UCS の検討	144
6.5 結言	146
参考文献	146
第 7 章 結論	147
謝辞	152
研究業績	153

第1章 序論

1.1 背景

国内外の沿岸域において、海岸侵食が進行している^{1.1-1.3)}。この問題に対しては、離岸堤、人工リーフ、ヘッドランド等の漂砂抑制施設の整備により漂砂量を抑制することで海浜形状を保つといった対策や、養浜あるいはサンドバイパスによって不足する漂砂量を補給することで海岸を保全する対策がとられている。しかし、漂砂抑制施設の整備は、長大な砂浜において連続的に構造物を配置する必要があり、整備に多大な費用と長時間を要するという問題がある。また、養浜に関しては継続的な実施が必要であり、長期にわたる安定した財源と良質で安価な養浜材料の確保が前提となる^{1.4)}。

一方、国土交通省によれば、建設後50年以上が経過する港湾岸壁施設の割合は2013年が約8%であるのに対し、2033年には約58%にまで高まる^{1.5)}と報告されている。この割合急増の原因は、高度経済成長期に大量に造られた社会資本の影響によるものと考えられる。2020年開催予定の東京五輪大会のための施設の新設等が進む中で、老朽化した港湾岸壁施設の修復・補強のために公共事業費を今後どの程度費やせるかを判断することは難しい。そのため、今ある港湾岸壁施設を低コストで修復・補強し、さらにその修復・補強材が長寿命であることが望ましい。

海岸侵食や港湾岸壁施設の修復・補強への新しい対策案に関する新たな試みとしては、自己修復能力を有する人工岩の開発が考えられる。なお、ここで述べる自己修復能力とは、周辺環境（海水、未固結堆積物、微生物等）を利用して、人の手を可能な限り加えることなく作製した人工岩や既存のコンクリート構造物の強度低下や亀裂の進行を防ぐことを意味している。また、その人工岩のモデルとして、筆者はビーチロック（図1.1参照）の形成機構に注目している。ビーチロックとは、地学事典^{1.6)}によると「砂浜の潮間帯に生ずる非常に新しい石灰質岩。（中略）セメント物質は主に炭酸カルシウムや鉄分から成り、被セメント物質は粒度・質に関係なくあらゆるものを含む。」と定義されている。先行研究^{1.7-1.9)}によれば、ビーチロックは波浪による侵食を受けながらも、未固結堆積物の供給や海水からのセメント物質の析出などによって、数千年前に形成されたビーチロックが現在まで保持されていることが報告されている。

そのため、ビーチロックの形成機構を参考とした人工岩を開発することができれば、施工対象となる現地に存在する未固結堆積物を自然のセメント物質で固結させることが可能となり、従来の侵食対策の問題点を改善できることが期待される。また、既存のコンクリート構造物に生じたひび割れ等の劣化部分に人工岩で用いるセメント物質を析出させることで、修復・補強できる可能性がある。さらに、この人工岩は現地の材料、すなわち、天然の資源を用いて作製されるため、周辺環境への負荷が抑えられるという利点がある。



図 1.1 ビーチロックの一例（沖縄県国頭郡本部町）

1.2 目的

以上のような背景から，本研究は，港湾岸壁などの海岸コンクリート構造物の長寿命化に資するために，自己修復機能を有した低環境負荷かつ低コストの人工岩を開発することを最終的な目的としている。その研究の一環として，本論文では文献調査および現地調査の実施によって自然に形成するビーチロックの形成機構について学び，ビーチロック形成への影響因子に関する考察を行ない，得られた知見をもとにサンゴ砂を用いた室内固化試験により一軸圧縮強さで数 MPa 程度の人工岩供試体を作製する手法を提案することを目的とした。

1.3 本論文の構成と内容

本論文は，7 章から構成されている。各章の内容は，以下のとおりである。

第 1 章「序論」は，研究の背景と目的，本論文の構成について示している。

第 2 章「ビーチロックに関する文献調査」では，人工岩作製のために必要なビーチロックの分布域，形成年代，諸特性および形成機構に関する情報を集め，整理し，把握することを目的として，文献調査を実施している。

第 3 章「ビーチロックの物理・力学特性」では，国内外の文献において報告例が少ない

ビーチロックの物理・力学特性を把握することを目的として、国内で最南部のビーチロック分布地である沖縄県内の4地点と、最北部の分布地である石川県内の1地点のビーチロックを対象とし、原位置試験および室内試験を実施している。

第4章「ビーチロックの形成機構に関する考察」では、沖縄県名護市と石川県輪島市の両地点のビーチロックおよびその周辺環境を対象に、菌数測定、元素分析、鉍物分析、水質分析を実施することで、ビーチロックの形成機構について考察する。

第5章「尿素分解菌を用いたサンゴ砂のシリンジ固化試験」では、沖縄県名護市のビーチロック形成機構を参考として、同地点の土壌から単離した尿素分解菌 *Pararhodobacter* sp. を用いたサンゴ砂の室内シリンジ固化試験（シリンジ内径：2.5 cm）を実施する。また、各試験条件が UCS に与える影響を把握することを目的として、重回帰分析を実施する。

第6章「尿素分解菌を用いたサンゴ砂のカラム固化試験」では、直径 5 cm×高さ 10 cm の円柱形で UCS が数 MPa 以上を満足する供試体を作製することを目的として、室内カラム固化試験を実施する。また、得られた試験結果を用いて、供試体の CaCO_3 総析出率と UCS の関係式や、各試験条件を説明変数とした設計 UCS の式を提案する。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果をまとめている。

参考文献

- 1.1) Uda, T., 2010, Japan's beach erosion, World Scientific, Singapore, ISBN 978-981-4277-12-9.
- 1.2) Pranzini, E., Williams, A., 2013, Coastal erosion and protection in Europe, Routledge, London and New York, ISBN 978-1-84971-339-9.
- 1.3) 宇多高明, 1997, 日本の海岸侵食, 山海堂, 東京, 442p.
- 1.4) 鳥居謙一, 2002, 最近の海岸侵食対策の動向, 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会東京, 38, pp. B-4-1- B-4-16.
- 1.5) 国土交通省, 2014, 平成 25 年度国土交通白書, 第 1 部, 第 1 章, p. 28.
- 1.6) 地学団体研究会, 2007, 新版 地学事典, 平凡社, 東京, pp.1083-1084.
- 1.7) Voudoukas, M. I., Velegrakis, A. F., Plomaritis, T. A., 2007, Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, Earth-Science Reviews, 85, pp. 23-46.
- 1.8) 小元久仁夫, 2005, 南西諸島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代および安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) —測定資料とその分析—, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 40, pp.1-27.
- 1.9) 田中好國, 1990, 石になった砂浜 ビーチロック, 熱い自然—サンゴ礁の環境誌, 古今書院, 東京, pp.137-152.

2 章 ビーチロックに関する文献調査

2.1 緒言

本章では、人工岩作製のために把握すべき情報と考えられるビーチロックの①分布域、②形成年代、③諸特性および形成機構についての情報を国内外の文献から集め、整理し、把握することを目的として文献調査を行なった。なお、これらの項目を選んだ理由としては、まず①分布域を把握することでビーチロックが存在している場所の気候条件などが調べられるため、ビーチロックの形成機構に関する考察ができると考えたからである。また、②形成年代を把握することで、どのくらいの期間、潮の満ち引き等が行なわれていたのかわかるため、人工岩作製の実験条件をより適切に設定できると考えた。さらに、③諸特性および形成機構の把握は、ビーチロックの組成や一軸圧縮強さ等の情報を得ることで人工岩作製に必要な材料や目標強度等を決定でき、また、形成機構を把握することで作製方法の参考とできるため、重要と考えた。

2.2 方法

これまでに報告されているビーチロックに関する文献 134 編（国内 28，国外 106）をもとに、人工岩作製のために必要と考えられる①分布域、②形成年代、③諸特性および形成機構についての情報を整理した。以下に、これらの整理の方法について順を追って述べる。

2.2.1 分布域

ビーチロックの分布地を文献から抽出し、白地図に赤点で示した。

2.2.2 形成年代

国外については、分布図の赤点数が多い上位 5 地域および最北部と最南部の地域を選定し、形成年代について調査した。国内については、北緯 29°～38° はデータ数が少ないためにすべてのデータを対象とし、北緯 29° 以南はデータ数が非常に多いので緯度・経度の座標値が秒単位の整数まで同値で、その地点のサンプル数が 3 つ以上のものを対象とした。ただし、小笠原諸島父島（北緯 27°，東経 142°）は北緯 29 度以南であるが経度が南西諸島のものと大きく異なるため、データ数は 1 つのみであるが対象とした。また、形成年代の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) や海洋リザーバー^{2.1)}の補正の有無については文献ごとに異なるため、厳密な時間尺の正確さに欠けるが、本論文では各文献の値をそのまま用いた。

2.2.3 諸特性および形成機構

ビーチロックの構成物質，セメント物質，周辺の堆積物および水質に関する情報を地域別にまとめ，比較した。また，ビーチロックの物理・力学特性についても整理した。さらに，ビーチロックの形成機構に関して，国内外の文献で報告されている諸説を整理した。

2.3 結果および考察

2.3.1 分布域

国内外のビーチロックの分布域は，図 2.1 のとおりである。同図は，ビーチロックが北緯 40° 付近から南回帰線の間で 90 % 以上分布していることを示している。ただし，この割合は分布面積ではなく，分布地点の数の割合である。特に多くのビーチロックが分布するのは，国内を除くと Aegean coasts (Area A) や Southern India (Area B), Great Barrier Reef (Area C), West Indies (Area D), Eastern Brazil (Area E) の各地域である。また，最北部は Scotland (北緯 57° 40')，最南部は South Africa (南緯 34° 06') である。

ビーチロックの分布域は，赤道付近に特に集中している訳ではなく，Area A のような比較的高緯度に集中している点から考えると，気温や海水温が高いところに分布域が集中し

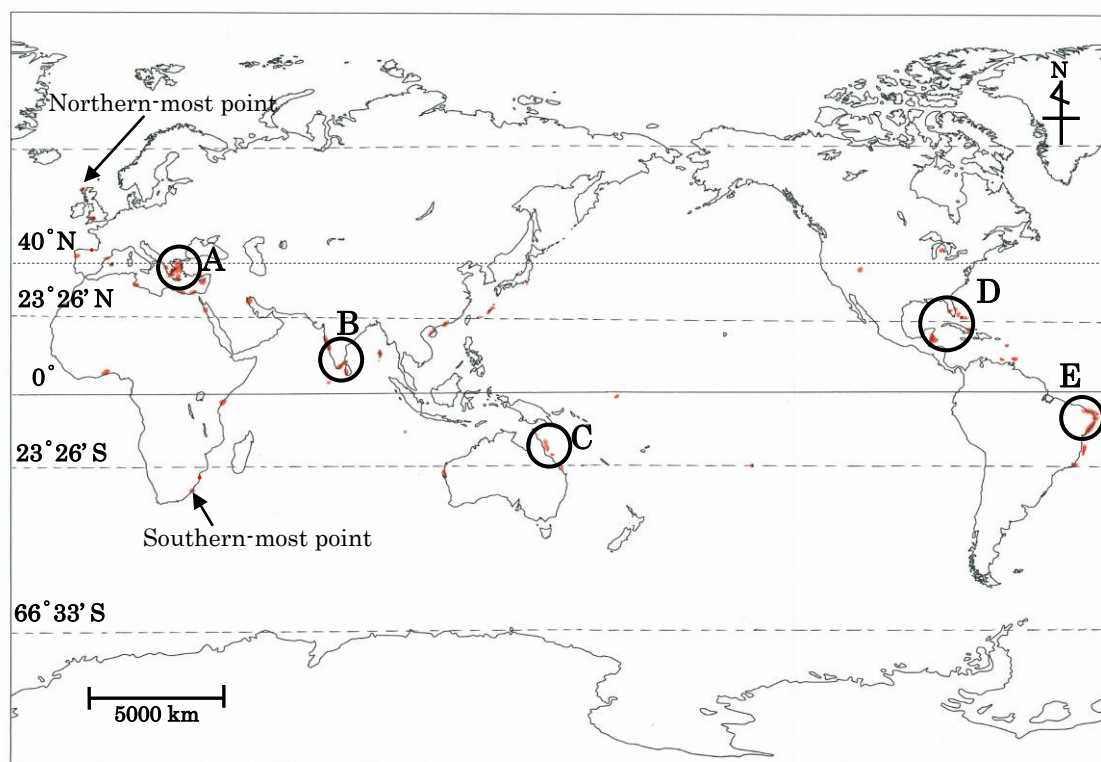


図 2.1 国内外のビーチロック分布域^{2.1)~2.79)}

ているとは必ずしも言い難い。また、例えば Area B のように India の南部と北西部ではビーチロックが分布しているが、南西部には分布していない理由や、Africa の東部で赤道付近以外に分布していない理由の考察が困難である。世界のビーチロック 2.4), 2.63) は図 1.1 の沖縄のビーチロックと同様に、固結したビーチロックと未固結堆積物が隣り合っており、この点にビーチロックの形成条件の複雑さがあると思われる。一方、陸域に囲まれた Area A やサンゴ礁に囲まれた Area C のように、海流が穏やかな場所にビーチロックが分布する傾向が見られた。今後は、ビーチロックと未固結堆積物の構成物質を比較するなどして、ビーチロックがなぜそこに存在するのか、またなぜ存在しないのかを考察していく必要がある。

一方、国内の分布域は、図 2.2 のとおりである。ビーチロックは、北緯 30 度以南の低緯度地域におよそ 95 % が存在している。ただし、この割合も分布面積ではなく、分布地点の数の割合である。北限は、日本海側は石川県珠洲市粟津（北緯 37° 28' 48"）、太平洋側は房総半島の千葉県館山市塩見（北緯 34° 58' 30"）、東シナ海側は五島列島奈留島（北緯 32° 51'）である 2.17), 2.29)。

現在、国内のビーチロックは 260 地点ほど報告されている 2.1), 2.2), 2.17)-2.35), 2.67)-2.71), 2.77)-2.79)。そのうち、大隅海峡以北では 14 地点と少なく、それらの分布地は比較的広範囲である。具体的には、鹿児島県鹿屋市、長崎県長崎市脇岬町および五島列島奈留島、千葉県館山市、

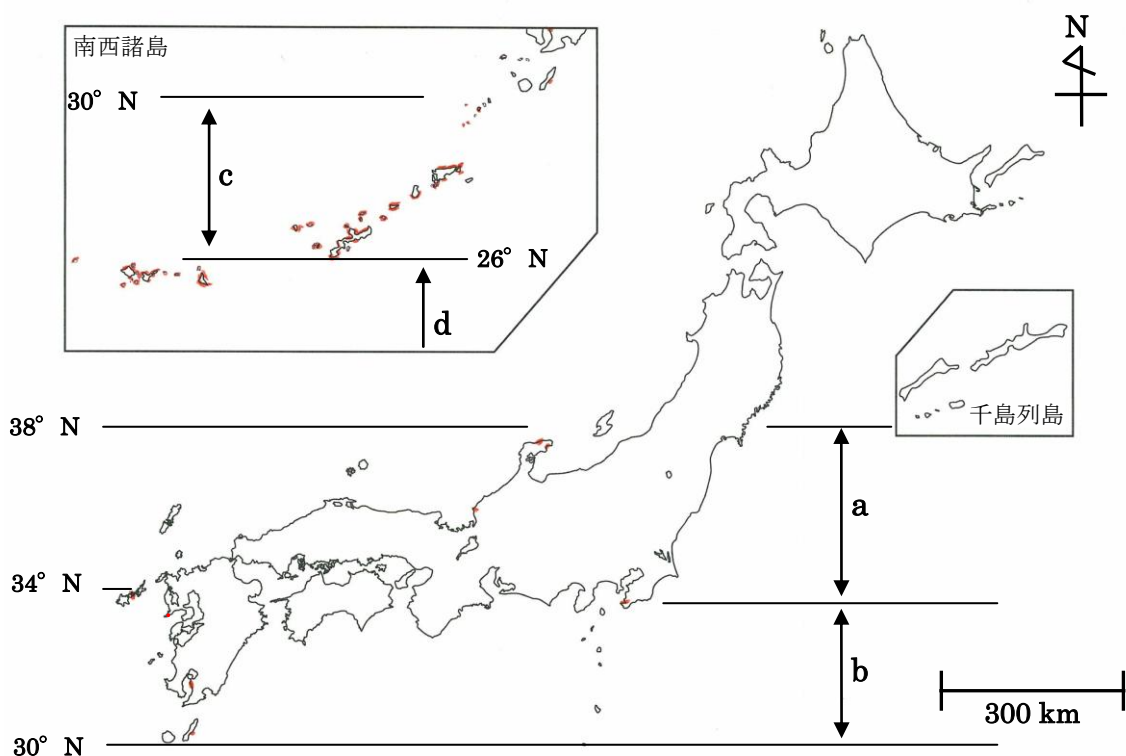


図 2.2 わが国のビーチロックの分布 2.1), 2.2), 2.17)-2.35), 2.67)-2.71), 2.77)-2.79)

福井県福井市，石川県能登半島の 6 地域である。このうち，日本海側の福井県福井市，石川県能登半島以外の 4 地域および大隅海峡以南の島々の周辺には，サンゴ礁が存在する^{2.65)}。よって，ビーチロックとサンゴ礁の分布域には相関があると推定されるが，前述した日本海側に 2 地域が存在することにより，サンゴ礁の存在が絶対的な条件ではない。

2.3.2 形成年代

国外のビーチロックの形成年代を表 2.1 および図 2.3 に，また国内のビーチロックの形成年代について表 2.2 および図 2.4 に示す。なお，年代は，¹⁴C 年代測定法，光ルミネッセンス年代測定法 (Optically Stimulated Luminescence, OSL)，含有物，現在の水位と海水準変動の関係から年代を判断する 4 つの方法によった。また，年代の単位は，¹⁴C 年代測定法は yrBP もしくは y.B.P. (1950 年から～年前という意味)，OSL 年代測定法および含有物から年代を判断する方法では，測定時からの年数である。なお，表 2.1 および表 2.2 において年代表記が“modern” および 100 年以内となっているところは 100 年前として図 2.3 および図 2.4 で取り扱い，誤差を持つものは，その中間値とした。また，図 2.3 および図 2.4 での形成年代の単位は，すべて測定時からにした。

国外のビーチロックの形成年代は，Aegean coasts (Area A) や Southern India (Area B)，Great Barrier Reef (Area C)，West Indies (Area D)，Eastern Brazil (Area E)，最北部の Scotland，最南部の South Africa の 7 地域について比較した。表 2.1 および図 2.3 より，形成年代の範囲は South Africa の Durban の数十年前から False Bay の約 26000 年前である。特に密集している年代はなく，文献数は分布域によって大きく異なる。次に，各分布域ごとに年代を見ていくと，Area A および Area C では緯度・経度が同じでも形成年代に幅があり，幅の広いものではそれぞれ約 300～5400 年前および 200～6500 年前までの幅がある。これは，緯度・経度が同じ範囲内での形成時期の違いやビーチロックの試料を採取した地点の標高の違い，試料の違いなどが原因と思われる。Area B は試料数が 3 件とデータが少ないこともあるが，年代が約 3100～3700 年前と集中している。Area D と Area E は緯度・経度の情報がないが，年代の幅が約 800～4400 年前および約 200～6900 年前と広い。最北部の Scotland については，年代に関する情報は報告されていない。最南部の South Africa は数十年前から約 26000 年前^{2.88)}と年代の幅が最も大きい。

国内のビーチロックの形成年代は，表 2.2 および図 2.4 より形成年代は緯度によらず 1000～4000 年前を中心に分布している。年代の幅は，Area a の輪島市曾々木海岸などの数十年前から Area c の沖縄本島の後備浜原の約 7400 年前までの範囲にある。また，表 2.2 をみると，Area a および Area b は試料数が少ないにもかかわらず，100 年以内～約 4000 年前および 100 年以内～約 2000 年前までと年代の幅が広い。Area c および Area d の南西諸島については，ほぼすべての島においてビーチロックの存在が確認されており，小元をはじめとする多くの報告^{2.1), 2.20)-2.29), 2.31)-2.35), 2.69)-2.71)}がある。さらに，Area c の沖縄県具志頭では緯度・経度が等しいにもかかわらず，試料の違いにより約 1300～4100 年前までの年代の

表 2.1 国外のビーチロックの形成年代 (2.3), (2.4), (2.9), (2.13), (2.37), (2.46), (2.48), (2.61), (2.62)

Area	Location	Latitude, Longitude	Estimation method	Formative age (Lab.No.)	Unit of formative age	Reference
A	Fourni, Delos, Greece	37°23'N, 25°16'E	¹⁴ C	440±25 (Lyon-2079)	yr BP	Desruelles et al. (2009)
	do.	do.	do.	1700±30 (Lyon-2080)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	2545±25 (Lyon-2081)	yr BP	do.
	Sostis, Mykonos, Greece	37°29'N, 25°21'E	do.	970±35 (Lyon-2074)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	1750±25 (Lyon-2075)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	3745±30 (Lyon-2076)	yr BP	do.
	Kormou Ammos, Rhenia, Greece	37°26'N, 25°12'E	do.	1300±25 (Lyon-2082)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	2175±30 (Lyon-2083)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	3815±30 (Lyon-2084)	yr BP	do.
	Kalafati, Mykonos, Greece	37°26'N, 25°25'E	do.	1330±35 (Lyon-2050)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	3185±45 (Lyon-2051)	yr BP	do.
	Steni, Rhenia, Greece	37°24'N, 25°13'E	do.	1610±30 (Lyon-2085)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	1380±30 (Lyon-2086)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	2595±30 (Lyon-2087)	yr BP	do.
	Lazaret, Rhenia, Greece	37°24'N, 25°14'E	do.	1635±25 (Lyon-2088)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	2775±30 (Lyon-2089)	yr BP	do.
	Ioannis, Mykonos, Greece	37°25'N, 25°18'E	do.	1775±40 (Lyon-2052)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	2465±45 (Lyon-2053)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	2265±30 (Lyon-2058)	yr BP	do.
	do.	do.	do.	4860±35 (Lyon-2059)	yr BP	do.
	Bozcaada Island, Turkey	39°48'N, 26°01'E	OSL	330±50 (BYT-01)	a	Ergibal et al. (2010)
	do.	do.	do.	630±70 (BYT-02)	a	do.
	do.	do.	do.	840±130 (BYT-03)	a	do.
	do.	do.	do.	1020±130 (BYT-04)	a	do.
	do.	do.	do.	3650±820 (BYT-05)	a	do.
	do.	do.	do.	5410±580 (BYT-06)	a	do.
	Gelibolu Peninsula, Turkey		do.	1480±80 (YTS-01)	yr BP	Ergibal et al. (2008)
	do.		do.	1420±200 (YTS-02)	yr BP	do.
	do.		do.	1810±280 (YTS-03)	yr BP	do.
	do.		do.	1950±540 (YTS-04)	yr BP	do.
	do.		do.	2280±280 (YTS-05)	yr BP	do.
B	Rameswaram	9°16'55.2"N, 79°14'9"E	OSL	3120±230 (RM3A)	age	Thomas (2009)
	do.	do.	do.	3420±200 (RM3B)	age	do.
	do.	do.	do.	3510±200 (RM1)	age	do.
	Sri Lanka		¹⁴ C	about 3700	age	Katupotha (1988)
C	Bewick		¹⁴ C (Tridacna)	2030±70 (A.N.U.1386)	age	McLean et al. (1978)
	Howick		¹⁴ C (Coral head)	2420±70 (A.N.U.1605)	age	do.
	Houghton Island		Radio carbon	2670±70 (ANU-1596)	a B.P.	Scoffin and McLean (1978)
	Lady Elliot Island	24°07'S, 152°43'E	¹⁴ C (Tridacna)	1830±80 (ANU-3448)	years	Chivas et al. (1986)
	do.	do.	do.	6540±105 (ANU-3449)	years	do.
	do.	do.	do.	220±80 (ANU-3452)	years	do.
	do.	do.	do.	740±80 (ANU-3492)	years	do.
	do.	do.	do.	890±60 (ANU-3481)	years	do.
D	Siesta Key, Florida		¹⁴ C (Worm tube)	750±60 (POR-106)	yrBP	Spurgeon et al. (2003)
	do.		¹⁴ C (Bulk)	1880±60 (POR-069)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Shell)	2250±50 (PRS-001)	yrBP	do.
	do.		do.	2450±60 (PRS-002)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Bulk)	3470±80 (POR-002)	yrBP	do.
	do.		do.	3660±70 (POR-080)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Cement)	3660±180 (POR-015)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Bulk)	3670±80 (POR-066)	yrBP	do.
	do.		do.	3700±70 (POR-101)	yrBP	do.
	do.		do.	3700±70 (POR-104)	yrBP	do.
	do.		do.	3750±70 (POR-109)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Cement)	3830±120 (POR-108)	yrBP	do.
	do.		do.	3830±170 (POR-016)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Bulk)	3860±50 (POR-058)	yrBP	do.
	do.		do.	3900±70 (POR-102)	yrBP	do.
	do.		do.	3900±70 (POR-103)	yrBP	do.
	do.		do.	4030±30 (POR-105)	yrBP	do.
	do.		do.	4320±80 (POR-071)	yrBP	do.

表 2.1 国外のビーチロックの形成年代 [続] 2.39), 2.50), 2.51), 2.54), 2.88)

Area	Location	Latitude, Longitude	Estimation method	Formative age (Lab.No.)	Unit of formative age	Reference
D	San Salvador Island, Bahamas		¹⁴ C	1220±60 (SS73)	yrBP	Kindler and Bain (1993)
	do.		do.	810±50 (SS71)	yrBP	do.
	do.		do.	1120±60 (SS34a)	yrBP	do.
	do.		do.	1120±60 (SS34b)	yrBP	do.
E	Rio Grande do Norte		¹⁴ C (bivalve shells)	110±50 (C14-18)	yrBP	Bezerra et al. (2003)
	do.		do.	1160±70 (C14-25)	yrBP	do.
	do.		do.	1600±40 (MC1)	yrBP	do.
	do.		do.	2700±80 (PG)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (vermetid)	2720±60 (C14-26)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (bivalve shells)	2950±70 (C14-22)	yrBP	do.
	do.		do.	3050±90 (GU)	yrBP	do.
	do.		do.	3060±60 (C14-20)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (coral reef)	3250±70 (C14-28)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (bivalve shells)	3590±70 (C14-19)	yrBP	do.
	do.		do.	3950±110 (SAL)	yrBP	do.
	do.		do.	3960±70 (C14-21)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (oyster)	4960±60 (C14-27)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (bivalve shells)	5100±140 (REC1)	yrBP	do.
	do.		do.	6050±190 (FSA1)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (vermetid)	710±50 (Beta 121250)	yrBP	do.
	do.		do.	1130±50 (Beta 121260)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (bivalve shells)	2420±50 (Beta 121249)	yrBP	do.
	do.		do.	4290±60 (Beta 121258)	yrBP	do.
	do.		do.	4500±120 (UCL 404)	yrBP	do.
	do.		do.	4500±130 (UCL 420)	yrBP	do.
	do.		do.	4700±140 (UCL 403)	yrBP	do.
	do.		do.	4950±150 (UCL 413)	yrBP	do.
	do.		do.	5400±170 (UCL 432)	yrBP	do.
	do.		do.	5470±60 (Beta 121253)	yrBP	do.
	do.		do.	5600±170 (UCL 419)	yrBP	do.
	do.		do.	5950±170 (UCL 405)	yrBP	do.
	do.		do.	6300±200 (UCL 430)	yrBP	do.
	do.		do.	6550±210 (UCL 414)	yrBP	do.
	do.		do.	6550±210 (UCL 421)	yrBP	do.
	do.		¹⁴ C (Biv.Shell)	1810-1730 (KIA14747)	cal yBP	Caldas et al. (2006)
	do.		do.	2390-2340 (KIA14749)	cal yBP	do.
	do.		do.	2460-2350 (KIA14752)	cal yBP	do.
	do.		do.	2960-2880 (KIA12334)	cal yBP	do.
	do.		do.	3240-3140 (KIA14750)	cal yBP	do.
	do.		do.	3350-3300 (KIA12338)	cal yBP	do.
	do.		do.	3810-3690 (KIA14755)	cal yBP	do.
	do.		do.	4090-3990 (KIA14748)	cal yBP	do.
	do.		do.	4770-4600 (KIA14742)	cal yBP	do.
	do.		do.	5760-5680 (KIA14746)	cal yBP	do.
	do.		do.	5940-5900 (KIA14751)	cal yBP	do.
	do.		do.	6850-6740 (KIA12336)	cal yBP	do.
	Boa Viagem		do.	4830±210	yr B.P.	Chaves and Sial (1998)
	Piedade beaches		do.	6200±250	yr B.P.	do.
farthest north	North Uist, Scotland	57°40'N, 7°30'W	-	-	-	Kneale and Viles (2000)
farthest south	Kosi Bay, South Africa		¹⁴ C (Beachrock cement)	8950±80 (Pta-6190)	BP	Ramsay (1995)
	Black Rock, South Africa		¹⁴ C (Shell)	3740±60 (Pta-6300)	BP	do.
	do.		¹⁴ C (Shell)	4350±60 (Pta-6297)	BP	do.
	Mabibi, South Africa		¹⁴ C (Coral)	3780±60 (Pta-5052)	BP	do.
	Sodwana Bay, South Africa		¹⁴ C (Beachrock cement)	3360±60 (Pta-6429)	BP	do.
	Durban, South Africa	29°55'S, 31°00'E	relation between elevation and sea level, human artifacts	36-72	years	Hayley and Ron (2012)
	False Bay, South Africa	34°06'S, 18°36'E	¹⁴ C	24670-26900	yr B.P.	Siesser (1974)

表 2.2 国内のビーチロックの形成年代 (2.17), (2.18), (2.23), (2.27), (2.29), (2.31), (2.32), (2.35), (2.68)-2.71)

Area	Location	Latitude, Longitude	Estimation method	Formative age (Lab.No.)	Unit of formative age	Reference
a	Sosogi, Wajima		The plastic and glass pieces	decades	years ago	Ogasawara et al. (2004)
	Echizen, Fukui		¹⁴ C (Turbo cornutus)	3950±80 (KSU-249)	y.B.P	Azuma et al. (1982)
	Siomi, Tateyama		The position from the seismic terrace	A.D. 1703 – 1923	yr	Suganuma (1979)
b	Kanehama, Kanoya		The yayoi ware	2000	B.P.	Yonetani (1966)
	Kumano, Tanega Island		The medicine bottle	decades	years ago	Tanaka (1990)
c	Shiomisaki, Suwanose Island		The layer of Scoria	within 170	yr	Iwai (1972)
	Sabaku, Takara Island		¹⁴ C	2765±130 (TH-083)	y.B.P.	Nakata et al. (1978)
	Amami Island	28° 25'28"N, 129° 38'37"E	¹⁴ C (Cyphastrea sp.)	2880±85 (NU-1230)	y BP (corrected)	Omoto (2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2980±80 (NU-1231)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2540±80 (NU-1232)	do.	do.
	do.	28° 26'53"N, 129° 39'05"E	¹⁴ C (Calcarenite)	3320±80 (NU-1234)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	3460±85 (NU-1235)	do.	do.
	do.	do.	do.	3310±85 (NU-1236)	do.	do.
	do.	28° 22'34"N, 129° 24'18"E	¹⁴ C (Calcarenite)	2880±80 (NU-1237)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Montipora sp.)	2850±80 (NU-1238)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	2870±80 (NU-1239)	do.	do.
	do.	28° 07'14"N, 129° 36'29"E	¹⁴ C (Calcarenite)	1225±60 (NU-1653)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	1620±60 (NU-1657)	do.	do.
	do.	do.	do.	1080±60 (NU-1658)	do.	do.
	Okaneku, Amami Island		The silver comb	within 200	yr	Yonetani (1963)
	Agon, Tokuno Island	27° 42'00"N, 128° 54'43"E	¹⁴ C (Tridacna sq.)	1970±65 (NU-1173)	y BP (corrected)	Omoto (1999b and 2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Polites sp.)	4870±85 (NU-1174)	do.	do.
	Kametoku, Tokuno Island		The soy bottle	decades	years ago	Takenaga (1965)
	do.	27° 44'43"N, 129° 01'47"E	¹⁴ C (Tridacna sq.)	1530±70 (NU-1184)	y BP (corrected)	Omoto (1999b and 2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2035±65 (NU-1185)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	1180±65 (NU-1186)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1600±65 (NU-1187)	do.	do.
	do.	do.	do.	1410±65 (NU-1188)	do.	do.
	Setahama, Tokuno Island	27° 40'45"N, 128° 55'15"E	¹⁴ C (Tridacna sq.)	1240±65 (NU-1175)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Polites sp.)	1970±65 (NU-1176)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2230±65 (NU-1177)	do.	do.
	Okinoerabu Island	27° 20'34"N, 128° 32'20"E	do.	2950±80 (NU-1103)	do.	Omoto (2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	2710±70 (NU-1104)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Montipora sp.)	2810±70 (NU-1105)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2910±70 (NU-1106)	do.	do.
	do.	do.	do.	3120±70 (NU-1107)	do.	do.
	do.	27° 21'22"N, 128° 31'48"E	do.	1830±70 (NU-1098)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Polites sp.)	2310±75 (NU-1099)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Cyphastrea sp.)	2200±70 (NU-1100)	do.	do.
	do.	27° 23'45"N, 128° 33'41"E	¹⁴ C (Calcarenite)	2050±65 (NU-1095)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	1590±65 (NU-1096)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	3690±85 (NU-1097)	do.	do.
	do.	27° 25'26"N, 128° 39'51"E	¹⁴ C (Tridacna sq.)	2860±75 (NU-1108)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2830±75 (NU-1109)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	3040±75 (NU-1110)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Goniastrea sq.)	2660±75 (NU-1111)	do.	do.
	Futami, Titi Island		The iron bar of the early Showa period	50 – 60	years ago	Kaizuka and Hori (1968)
	Ie Island	26° 42'30"N, 127° 46'26"E	¹⁴ C (Tridacna sq.)	3340±70 (NU-1061)	y BP (corrected)	Omoto (2005)
	do.	do.	do.	2520±70 (NU-1062)	do.	do.
	do.	do.	do.	3025±75 (NU-1086)	do.	do.
	Ie Island	26° 42'31"N, 127° 46'14"E	¹⁴ C (Calcarenite)	3070±70 (NU-1067)	do.	do.
	do.	do.	do.	3090±70 (NU-1068)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	2630±70 (NU-1069)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2680±90 (NU-1077)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	3710±85 (NU-1078)	do.	do.
	do.	do.	do.	3320±80 (NU-1079)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	3535±85 (NU-1080)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2520±80 (NU-1081)	do.	do.
	do.	do.	do.	2910±80 (NU-1082)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1710±70 (NU-1121)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Tridacna sq.)	2600±70 (NU-1122)	do.	do.

表 2.2 国内のビーチロックの形成年代 [続] 2.1), 2.26)-2.28)

Area	Location	Latitude, Longitude	Estimation method	Formative age (Lab.No.)	Unit of formative age	Reference
c	Ie Island	26° 42'31"N, 127° 46'14"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	2280±70 (NU-1123)	y BP (corrected)	Omoto (2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2840±70 (NU-1124)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	2400±90 (NU-1214)	do.	do.
	do.	do.	do.	2290±90 (NU-1215)	do.	do.
	do.	do.	do.	2270±90 (NU-1216)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2800±110 (NU-1217)	do.	do.
	do.	do.	do.	2890±90 (NU-1218)	do.	do.
	Izena Island	26° 58'26"N, 127° 56'48"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	3160±70 (NU-1399)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	830±65 (NU-1400)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	690±65 (NU-1401)	do.	do.
	do.	26° 59'44"N, 127° 56'23"E	do.	3475±70 (NU-1383)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	modern (NU-1384)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	1650±60 (NU-1385)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1135±60 (NU-1372)	do.	do.
	do.	26° 59'27"N, 127° 56'11"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1180±60 (NU-1373)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	1290±60 (NU-1374)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	795±70 (NU-1375)	do.	do.
	do.	26° 59'46"N, 127° 55'38"E	¹⁴ C (Coral)	1510±60 (NU-1376)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	modern (NU-1377)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	1170±60 (NU-1378)	do.	do.
	do.	26° 59'44"N, 127° 55'41"E	¹⁴ C (Coral)	3080±70 (NU-1379)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	995±60 (NU-1380)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	905±60 (NU-1381)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	770±60 (NU-1382)	do.	do.
	Ou Island	26° 20'06"N, 126° 50'09"E	¹⁴ C (Calcarenite)	2660±85 (NU-911)	do.	Omoto (2004)
	do.	do.	do.	2570±100 (NU-912)	do.	do.
	do.	do.	do.	2710±100 (NU-913)	do.	do.
	do.	26° 20'09"N, 126° 49'48"E	do.	2900±75 (NU-923)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2800±75 (NU-953)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	3610±75 (NU-954)	do.	do.
	do.	do.	do.	2070±65 (NU-1294)	do.	do.
	do.	26° 19'56"N, 126° 50'07"E	¹⁴ C (Coral)	1710±75 (NU-1295)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1260±60 (NU-1296)	do.	do.
	do.	do.	do.	2540±65 (NU-1297)	do.	do.
	Ginoza, Okinawa Island	26° 28'09"N, 127° 58'12"E	do.	2040±55 (NU-1662)	do.	Omoto (2005 and 2009)
	do.	do.	do.	1720±50 (NU-1663)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2090±65 (NU-1664)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	2370±65 (NU-1665)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1885±70 (NU-1666)	do.	do.
	do.	do.	do.	2205±65 (NU-1667)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	2140±85 (NU-1668)	do.	do.
	Gushikami, Okinawa Island	26° 07'12"N, 127° 45'03"E	¹⁴ C (Coral)	4050±60 (NU-1690)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1255±65 (NU-1691)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1340±60 (NU-1692)	do.	do.
	do.	do.	do.	3540±70 (NU-1693)	do.	do.
	Atobihamabaru, Okinawa Island	26° 42'10"N, 127° 52'53"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1380±60 (NU-1549)	do.	do.
	do.	26° 42'31"N, 127° 52'46"E	¹⁴ C (Calcarenite)	7290±90 (NU-1598)	do.	do.
	do.	do.	do.	6910±86 (NU-1782)	do.	Omoto (2007)
	do.	26° 42'31"N, 127° 52'46"E	do.	7290±90 (NU-1598)	do.	Omoto (2005 and 2007)
	Sakiyama, Okinawa Island	26° 42'13"N, 127° 58'19"E	do.	1725±60 (NU-1594)	do.	Omoto (2005 and 2009)
	do.	do.	do.	1700±65 (NU-1595)	do.	do.
	do.	26° 42'13"N, 127° 58'19"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1390±65 (NU-1596)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1080±60 (NU-1597)	do.	do.
	Toguchi, Okinawa Island	26° 23'48"N, 127° 43'32"E	¹⁴ C (Calcarenite)	2315±65 (NU-1574)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1830±65 (NU-1575)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1890±75 (NU-1576)	do.	do.
	do.	26° 22'00"N, 127° 44'11"E	¹⁴ C (Coral)	1400±60 (NU-1694)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	1305±50 (NU-1695)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2825±55 (NU-1696)	do.	do.
	The south of Hamahiga Island, Okinawa Island	26° 18'39"N, 127° 57'25"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sq.)	5420±70 (NU-1686)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	3285±55 (NU-1687)	do.	do.

表 2.2 国内のビーチロックの形成年代 [続] 2.1), 2.26), 2.27)

Area	Location	Latitude, Longitude	Estimation method	Formative age (Lab.No.)	Unit of formative age	Reference
c	The south of Hamahiga Island, Okinawa Island	26° 18'39"N, 127° 57'25"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	4220±60 (NU-1688)	y BP (corrected)	Omoto (2005 and 2009)
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	3110±70 (NU-1689)	do.	do.
	The south of Miyagi Island, Okinawa Island	26° 39'38"N, 128° 05'44"E	¹⁴ C (Calcareenite)	2710±55 (NU-1591)	do.	do.
	do.	do.		2680±70 (NU-1592)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	3540±70 (NU-1611)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	950±60 (NU-1612)	do.	do.
	Hatenohama, Kume Island	26° 20'48"N, 126° 53'34"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1800±60 (NU-1621)	do.	Omoto (2004)
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Goniastrea</i> sp.)	modern (NU-1622)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	1880±60 (NU-1623)	do.	do.
	do.	do.	do.	1990±60 (NU-1624)	do.	do.
	do.	do.	do.	1940±60 (NU-1625)	do.	do.
	Shimajiri, Kume Island	26° 18'01"N, 126° 48'31"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	3620±70 (NU-1291)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2280±65 (NU-1292)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	3470±70 (NU-1293)	do.	do.
	Shinrihama, Kume Island	26° 19'56"N, 126° 50'12"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	2580±65 (NU-1298)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	3350±70 (NU-1299)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	2280±65 (NU-1300)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2820±65 (NU-1301)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	2510±65 (NU-1302)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2940±65 (NU-1303)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	2280±65 (NU-1304)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	3360±70 (NU-1305)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	3450±70 (NU-1306)	do.	do.
d	Miyako Island	24° 43'49"N, 125° 27'02"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1645±65 (NU-1137)	do.	Omoto (2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	1790±70 (NU-1138)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1710±65 (NU-1139)	do.	do.
	do.	24° 43'18"N, 125° 27'45"E	¹⁴ C (Calcareenite)	1260±60 (NU-1513)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	880±60 (NU-1514)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1700±60 (NU-1516)	do.	do.
	do.	24° 43'46"N, 125° 26'14"E	¹⁴ C (Calcareenite)	1140±60 (NU-1497)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1155±60 (NU-1498)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	870±60 (NU-1499)	do.	do.
	Ishigaki Island	24° 20'29"N, 124° 11'52"E	¹⁴ C (<i>Cyphastrea</i> sp.)	2060±65 (NU-1147)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Goniastrea</i> sp.)	2225±85 (NU-1148)	do.	do.
	do.	do.	do.	2360±65 (NU-1149)	do.	do.
	do.	24° 26'46"N, 124° 04'45"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1420±65 (NU-1154)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Cyphastrea</i> sp.)	1225±65 (NU-1155)	do.	do.
	do.	24° 26'46"N, 124° 04'45"E	¹⁴ C (Calcirudite)	1715±65 (NU-1156)	do.	do.
	do.	24° 28'26"N, 124° 08'10"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1680±65 (NU-1157)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Goniastrea</i> sp.)	1880±70 (NU-1158)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	2260±65 (NU-1159)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcirudite)	2530±95 (NU-1160)	do.	do.
	do.	24° 27'15"N, 124° 09'27"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1930±65 (NU-1161)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Cyphastrea</i> sp.)	1740±65 (NU-1163)	do.	do.
	do.	do.	do.	1130±75a (N-3710)	do.	do.
	do.	24° 25'14"N, 124° 04'53"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	870±60 (NU-1499)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2000±60 (NU-1517)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Shell)	2000±60 (NU-1518)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	2050±60 (NU-1519)	do.	do.
	do.	24° 28'18"N, 124° 07'20"E	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	4230±70 (NU-1520)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	2840±65 (NU-1265)	do.	do.
	do.	do.	do.	2850±70 (NU-1266)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	2560±70 (NU-1267)	do.	do.
	do.	24° 33'47"N, 124° 16'58"E	do.	3230±85 (NU-1268)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	1500±85 (NU-1486)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1490±80 (NU-1489)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	1540±80 (NU-1490)	do.	do.
	Taketomi Island	24° 19'40"N, 124° 04'53"E	¹⁴ C (Calcareenite)	2210±65 (NU-1314)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna</i> sp.)	1765±60 (NU-1315)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1750±60 (NU-1316)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcareenite)	1660±60 (NU-1317)	do.	do.

表 2.2 国内のビーチロックの形成年代 [続] 2.25), 2.27)

Area	Location	Latitude, Longitude	Estimation method	Formative age (Lab.No.)	Unit of formative age	Reference
d	Taketomi Island	24° 19'08"N, 124° 04'42"E	¹⁴ C (Calcarenite)	1920±65 (NU-1320)	y BP (corrected)	Omoto (2005)
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1645±60 (NU-1321)	do.	do.
	Iriomote Island	24° 26'12"N, 123° 46'41"E	¹⁴ C (Calcirudite)	3840±60 (NU-1165)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Goniatria sq.</i>)	4310±60 (NU-1166)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	3870±60 (NU-1167)	do.	do.
	do.	do.	do.	3770±60 (NU-1168)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcirudite)	3980±60 (NU-1169)	do.	do.
	do.	24° 15'14"N, 123° 51'38"E	¹⁴ C (Calcarenite)	2690±70 (NU-1283)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1690±70 (NU-1284)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	1170±65 (NU-1285)	do.	do.
	Hateruma Island	24° 03'53"N, 123° 46'03"E	¹⁴ C (Coral)	1860±60 (NU-1337)	do.	Omoto (2003 and 2005)
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	1965±60 (NU-1338)	do.	do.
	do.	do.	do.	1960±60 (NU-1339)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Shell)	2020±60 (NU-1340)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Beach sand)	1520±60 (NU-1341)	do.	do.
	do.	24° 03'32"N, 123° 45'40"E	¹⁴ C (Coral)	1630±60 (NU-1334)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	1210±60 (NU-1335)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Calcarenite)	1655±60 (NU-1336)	do.	Omoto (2003)
	Pemuchihama, Hateruma Island	24° 02'38"N, 123° 47'01"E	do.	4265±75 (NU-1325)	do.	Omoto (2003 and 2005)
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	4085±75 (NU-1326)	do.	do.
	do.	do.	do.	4590±80 (NU-1327)	do.	do.
	do.	do.	do.	3500±70 (NU-1328)	do.	do.
	do.	do.	do.	5210±80 (NU-1331)	do.	do.
	Dannuhama, Yonaguni Island	24° 27'40"N, 122° 57'25"E	¹⁴ C (Calcarenite)	4760±75 (NU-1307)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (Coral)	1950±65 (NU-1308)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	1615±60 (NU-1309)	do.	do.
	Kubura, Yonaguni Island	24° 26'38"N, 122° 56'28"E	¹⁴ C (Calcarenite)	940±80 (NU-1310)	do.	do.
	do.	do.	¹⁴ C (<i>Tridacna sq.</i>)	modern (NU-1311)	do.	Omoto (2003)
	do.	do.	¹⁴ C (Beach sand)	995±60 (NU-1312)	do.	do.
	do.	do.	do.	modern (NU-1313)	do.	do.

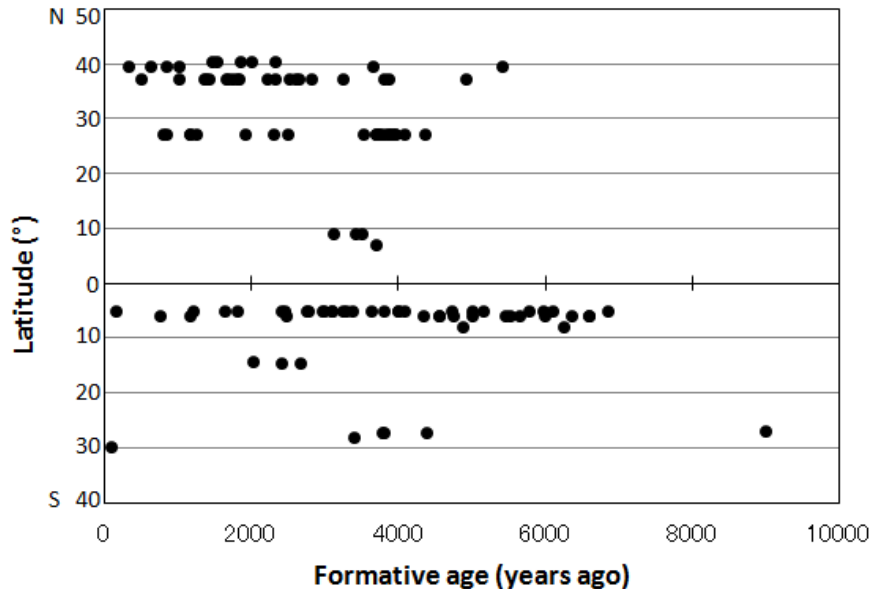


図 2.3 国外ビーチロック分布域の緯度と形成年代の関係 2.1), 2.3), 2.9), 2.13), 2.37), 2.39), 2.46), 2.48), 2.50), 2.51), 2.54), 2.61), 2.62), 2.88)

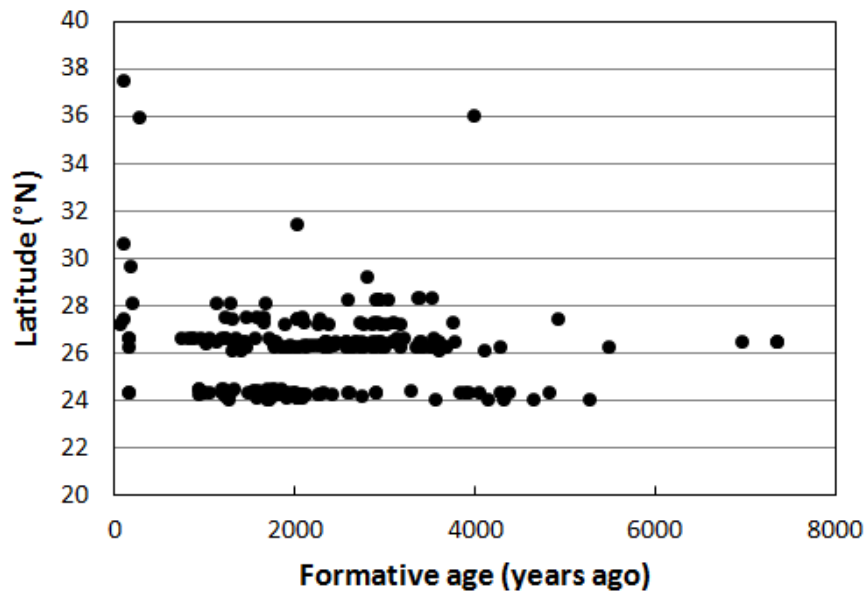


図 2.4 国内ビーチロック分布域の緯度と形成年代の関係 (2.3), (2.17), (2.18), (2.23), (2.25)-(2.29), (2.31), (2.32), (2.35), (2.68)-(2.71))

違いが表れている。

年代推定法は、国内外問わず ^{14}C 年代測定によるものが主流である。国内外の違いとしては、国外では OSL 年代測定法も用いられている点 (2.4), (2.9), (2.46)、国内ではビーチロック中の含有物、特に生活用品（土器や醤油瓶など）から年代を推定している点 (2.17), (2.30), (2.31), (2.35), (2.68), (2.69), (2.71) を指摘することができる。

以上より、形成年代は国外では数十年前～約 26000 年前、国内では数十年前～約 7400 年前までの範囲にあることが示された。

2.3.3 諸特性および形成機構

(A) 諸特性

国外のビーチロックの組成を表 2.3 に示す。この表の評価項目は、ビーチロックおよびビーチロックのセメント物質のみの組成（構成物質、鉱物）、ビーチロック周辺の堆積物の成分である。同表より、どの評価項目についても CaCO_3 もしくは SiO_2 が主となっていることがわかる。また、Area C の Heron Island^{2.59)} は、どの項目についても CaCO_3 と有機物のみから構成されている。 CaCO_3 の生成は、生物や微生物によるものであるとする文献^{2.11), 2.16)}があるため、生物や微生物がビーチロックの形成に与える影響についても注目していく必要がある。

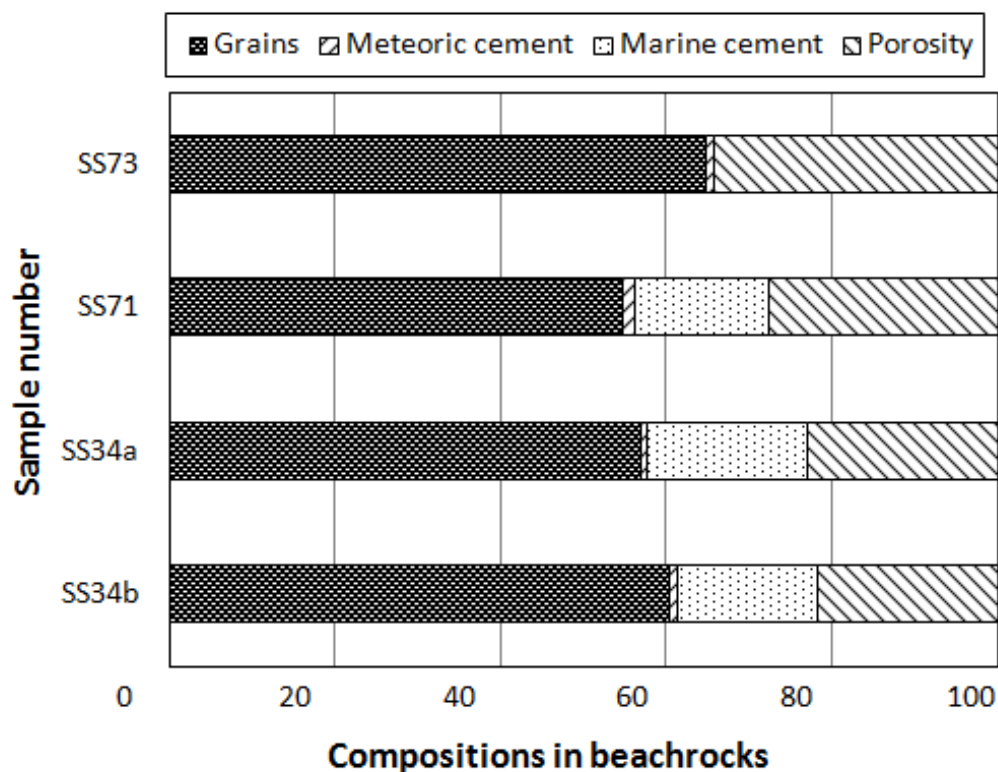
表 2.4 および図 2.5 は、Area D の Bahama の San Salvador Island におけるビーチロック中の粒子、地下水由来のセメント物質、海水由来のセメント物質、空隙の各含有率^{2.39)}を示している。表 2.4 および図 2.5 より、粒子および空隙の含有率はそれぞれ約 55～65 %

表2.3 国外のビーチロック構成物質に関する組成

Area	Location	Component materials of the beachrock	Main mineral component	Component materials of the cement	Main minerals of the cement	Sand	Note	Reference
A	Bozcaada Island, Turkey	coarse sand, small gravels of sandstone, basalt, limestone, and andesite	albite, quartz, potassium feldspars, aragonite		high Mg-calcite	coarse sand, small gravels of sandstone, basalt, limestone, and andesite	Many samples consist of these components in this location.	Erinal et al. (2010)
	do.	do.	albite, quartz, wollastonite		do.	do.	mineral components of the beachrock cements (Table. 7)	do.
	do.	do.		siliciclastic grains	quartz	do.	do.	do.
	do.	coarse sand, small gravels of sandstone, basalt, limestone and andesite, marine algae	quartz, potassium feldspar		high Mg-calcite, calcite, aragonite	do.	do.	do.
	do.	do.		siliciclasts with fungal filaments, calcium carbonate		do.	do.	do.
B	Ariburnu beach, Turkey	sandstone, radiolarite, serpentine, limestone, gneiss, schist	polycrystalline quartz, feldspar, biotite		high Mg-calcite	quartz, sandstone, chert, gneiss, schist, limestone, serpentinite		Erinal et al. (2008)
	Rameshwaram, India		calcite, aragonite, quartz, heavy minerals				mineral components of the beachrock (Table. 6 and Fig. 7)	Ravisankar and Rajalakshmi (2007)
	Pamban, India		do.				do.	do.
	Mandapam, India		do.				do.	do.
	Pudumadam, India		do.				do.	do.
	Keelakarai, India		do.				do.	do.
	Valirockam, India		do.				do.	do.
	Vembar, India		do.				do.	do.
	Sippikulam, India		do.				do.	do.
	Tuticorin, India		do.				do.	do.
	Tiruchendur, India		do.				do.	do.
	Manappad, India		do.				do.	do.
	Ovari, India		do.				do.	do.
	Idinthakarai, India		do.				do.	do.
	Perumanal, India		do.				do.	do.
	Vattakottai, India		do.				do.	do.
	Gulf of Mamar, India	sand, heavy minerals, coral, shelly fragments	quartz, heavy minerals, biogenic carbonate				SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaCO ₃ contents in beachrock (Tble. 5 and Fig. 6)	Sahayam et al. (2010)
C	Heron Island	carbonate grains			aragonite	algae, coral, molluscan, foraminiferal grains		Webb et al. (1999)
	do.	algae, micrite, shell			do.			Davies et al. (1973)
D	Siesta Key, Florida	shell fragments 81%, quartz grains 19%, lithiclasts less than 1%			low Mg-calcite			Spurgeon et al. (2003)
	San Salvador Island, Bahamas	coarse-grained limestones (coral, algal debris, mollusc fragments, benthic foraminifera)					Petrographic database of beachrock (Table. 4 and Fig. 5)	Kindler et al. (1993)
	Grand cayman	algae, mollusk, organic material, coral grains			magnesian calcite, aragonite			Moore (1973)
	Belize	algae, mollusk, foraminifera, miscellaneous particles	high Mg-calcite, aragonite, low Mg-calcite		high Mg-calcite, aragonite, low Mg-calcite			Gischler et al. (1997)
	do.							
E	northeastern Brazil	quartz grains, feldspar, heavy minerals, bioclasts, fragments of hematite-cemented sandstone						Vieira and Ros (2006)
	farthest north	micritic cement 40%, fragmented shells 30%, lithoclasts (mainly quartz, feldspar, glauconite) 30%			calcite, aragonite, quartz, glauconite	mainly CaCO ₃		Kneale and Viles (2000)
	farthest south	do.			micrite, aragonite, iron oxide	quartz, feldspar, bioclast, waste		Cawthra et al. (2012)

表 2.4 岩石学的データ ^{2.39)}

Area	Location	Sample number	Tidal zone	Method	Grains (%)	Cement (%)		Porosity (%)	Reference
						Meteoric	Marine		
D	San Salvador Island, Bahamas	SS73	lower supratidal	SEM	64.8	1	0	34.2	Kindler et.al. (1993)
	do.	SS71	subtidal	do.	54.9	1.3	16.2	27.6	do.
	do.	SS34a	intertidal	do.	57	0.8	19.2	23	do.
	do.	SS34b	subtidal	do.	60.5	1	16.8	21.7	do.

図 2.5 ビーチロック中の粒子，地下水由来のセメント，海水由来のセメント，空隙の含有率（表 2.4 による） ^{2.39)}

および約 22～34 %であり，残りの約 1～20 %をセメント物質が占めている。また，潮上帯は潮間帯や潮下帯と異なり，海水由来のセメント物質を含んでいない。なお，セメント物質の由来については，セメント物質の鉱物から判断している ^{2.39)}。

表 2.5 および図 2.6 は，Area B の India の Gulf of Mannar におけるビーチロック構成物質の SiO_2 ， Al_2O_3 ， CaCO_3 の含有率 ^{2.43)}を示している。表 2.5 および図 2.6 より，合計 25 試料の中の 22 試料は CaCO_3 が 90 %前後を占めている。一方，残りの 3 試料は SiO_2 が最も豊富で 50 %程度を占め，残りは Al_2O_3 ， CaCO_3 である。

表 2.5 ビーチロック構成物質の SiO₂, Al₂O₃, CaCO₃ の含有率^{2.43)}

Area	Location	Latitude (°)	Longitude (°)	Sample No.	Sediment type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaCO ₃ (%)	Reference
B	Rameswaram, India	09°17'26"	79°19'21"	1	Biogenic Calcareous	3.16	1.32	87.38	Sahayam et al. (2010)
	do.	do.	do.	2	Sandy Calcareous	3.23	0.84	92.46	do.
	Mandapam, India	09°17'33"	79°14'42"	3	Calcareous	5.12	1.35	86.99	do.
	do.	do.	do.	4	do.	3.32	1.45	88.37	do.
	do.	do.	do.	5	do.	3.07	1.18	91.77	do.
	do.	do.	do.	6	do.	1.84	0.52	89.44	do.
	Valinokkam, India	09°17'19"	79°13'07"	7	Sandy Calcareous	1.16	0.52	90.03	do.
	do.	09°16'23"	79°08'25"	8	Sandy	3.16	1.12	86.26	do.
	do.	09°15'52"	79°08'25"	9	do.	1.94	0.36	89.15	do.
	Tuticorin, India	08°29'40"	78°08'01"	10	do.	3.64	1.35	88.23	do.
	do.	do.	do.	11	do.	2.33	1.09	88.42	do.
	do.	08°22'07"	78°03'59"	12	do.	3.16	0.91	90.27	do.
	do.	do.	do.	13	do.	4.17	1.59	90.49	do.
	Tiruchendur, India	do.	do.	14	do.	4.01	1.09	90.14	do.
	do.	do.	do.	15	do.	3.99	0.87	91.49	do.
	Manapad, India	08°11'08"	77°48'10"	16	Biogenic Calcareous	3.99	0.96	91.93	do.
	do.	08°10'21"	77°45'42"	17	Sandy	2.01	1.02	89.73	do.
	do.	do.	do.	18	do.	3.16	1.62	90.52	do.
	do.	08°59'50"	78°14'34"	19	do.	4.27	1.01	88.07	do.
	do.	08°25'17"	78°04'01"	20	do.	2.96	1.45	90.33	do.
	Kanyakumari, India	08°22'46"	78°03'09"	21	Calcareous	2.67	1.27	90.95	do.
	do.	08°10'55"	77°44'06"	22	Sandy	3.17	1.65	91.52	do.
	do.	08°21'22"	78°03'59"	23	Silica rich	49.92	18.06	25.02	do.
	do.	09°09'29"	78°39'26"	24	do.	49.57	17.68	24.75	do.
	do.	08°57'56"	78°12'51"	25	do.	57.22	15.95	19.73	do.

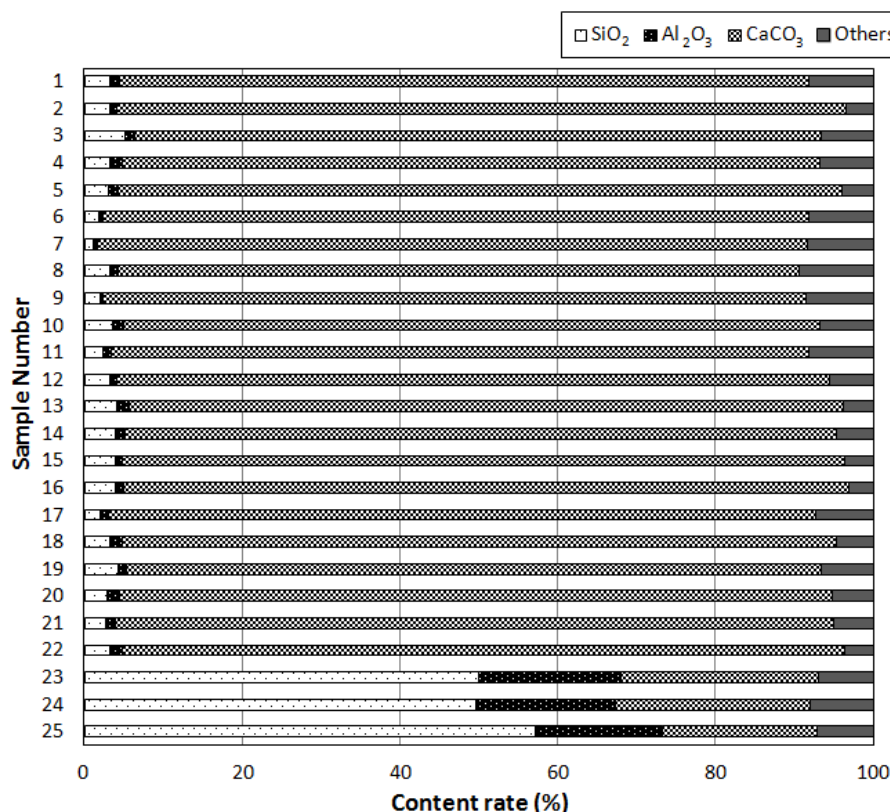


図 2.6 ビーチロック構成物質の SiO₂, Al₂O₃, CaCO₃ の含有率 (表 2.5 による) ^{2.43)}

続く表 2.6 および図 2.7 は, India の Coast of Tamilnadu におけるビーチロック構成物質の元素含有率 ^{2.44)}を示しており, Ca が占める割合が他の元素より高いものでは 13~26 % を占めていることがわかる。また, 試料によっては Fe や Ti を多く含んでいるもの (Sippikulam, Vattakottai) があるが, この理由はその地域にこれらの重金属が含まれている ^{2.44)}ためである。なお, 図 2.7 に凡例を載せていないのは, 試料数が多いためである。

表 2.7 は, Area A の Turkey の Bozcaada Island および Ariburnu beach におけるビーチロックのセメント部のみの元素含有率 ^{2.4), 2.9)}を表している。EDX すなわち EDS (Energy dispersive X-Ray spectroscopy : エネルギー分散型 X 線分析) や ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy : 誘導結合プラズマ発光分光分析) により分析対象が異なるため, 元素含有率に違いがあるが, ビーチロックのセメント部は C, O, Si, Ca が特に多く, 続いて Al, Fe, Mg が多い。また, Si と Ca はどちらか一方に偏っているものもあれば, 同程度であるものもあることがわかった。

以上より, 元素に関する評価の点においても表 2.3 における構成物質や鉱物についての評価と同様に, CaCO₃ や SiO₂ が主となっている。また, その地域に存在する重金属なども取り込んで固化することがある。

表 2.6 ビーチロック構成物質の元素含有率^{2.44)}

Area	Location	Main mineral component	Mineral components of the beachrock									Reference
			method	Na (%)	Mg (%)	Al (%)	Ca (%)	Ti (%)	Mn (%)	Fe (%)	Zr (%)	
B	Rameshwaram, India	calcite, aragonite, quartz, heavy minerals	PIXE	0.4	0.63	0.13	16	0.08	0.02	0.8	–	Ravisankar and Rajalakshmi (2007)
	Pamban, India	do.	do.	0.5	0.8	1.17	21	1.15	0.04	2.3	–	do.
	Mandapam, India	do.	do.	0.2	2.9	0.72	20.1	0.35	0.04	1.9	0.23	do.
	Pudumadam, India	do.	do.	0.6	1.1	2.4	26	0.2	0.02	0.3	–	do.
	Keelakarai, India	do.	do.	0.5	1.8	0.63	19	0.03	0.02	0.2	–	do.
	Valinockam, India	do.	do.	0.7	1.2	3.2	13	0.3	0.07	1.4	–	do.
	Vembar, India	do.	do.	0.5	2.4	2	17	0.11	0.02	0.66	0.15	do.
	Sippikulam, India	do.	do.	0.1	3.55	2.25	11.7	7	0.27	14.8	0.26	do.
	Tuticorin, India	do.	do.	0.5	1.9	1.3	13	–	0.08	0.4	–	do.
	Tiruchendur, India	do.	do.	0.1	2.1	0.67	25	0.11	0.04	0.94	0.11	do.
	Manappad, India	do.	do.	0.3	0.68	1.75	23	0.45	0.01	0.72	0.2	do.
	Ovari, India	do.	do.	1	1.1	1.9	17	0.37	0.01	1.02	0.14	do.
	Idinthakarai, India	do.	do.	1.7	3.2	6.84	8.45	0.29	0.06	4.95	0.16	do.
	Perumanal, India	do.	do.	0.2	0.6	0.68	20	0.14	0.05	0.48	0.1	do.
	Vattakottai, India	do.	do.	0.5	2.35	3.35	4.14	16.6	0.25	24.8	0.47	do.

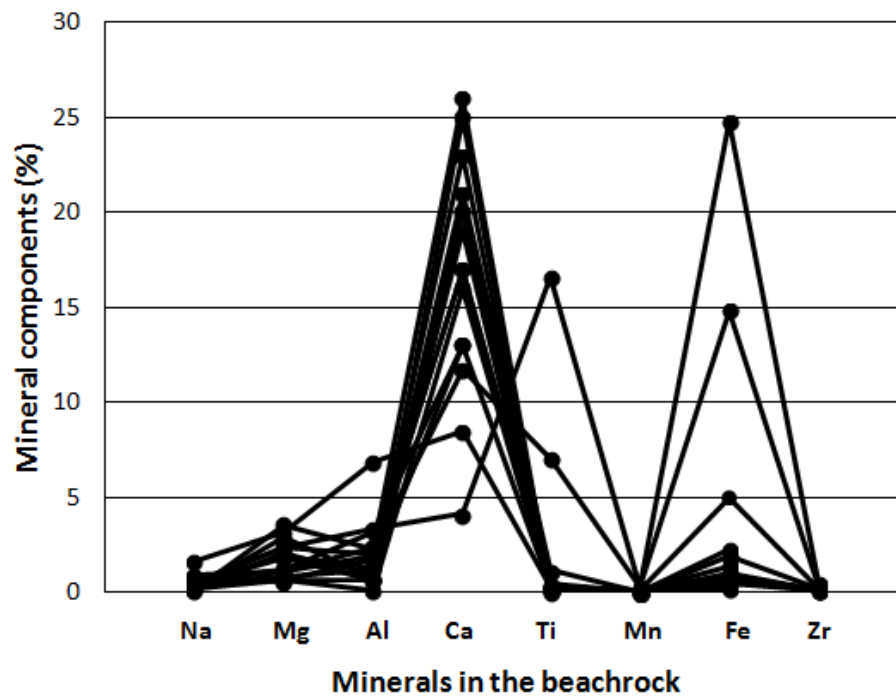


図 2.7 ビーチロック構成物質の元素含有率（表 2.6 による）^{2.44)}

表 2.7 ビーチロックのセメント部のみの元素含有率 2.4), 2.9)

Area	Location	method	C (%)	O (%)	Na (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	Cl (%)	K (%)	Ca (%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn (%)	Ba (%)	Pb (%)	Reference
A	Bozcaada Island, Turkey	EDX	14.93	58.39	1.43	1.32	0.62	10.83	1.15	0.34	10.14	0.85	-	-	-	-	Erginal et al. (2010)
	do.	do.	14.56	62.4	-	0.67	-	18.33	0.52	-	1.88	0.76	-	-	-	-	do.
	do.	do.	16.33	56.46	0.93	1.32	1.19	3.74	1.12	-	16.46	2.35	-	-	-	-	do.
	Ariburnu beach, Turkey	ICP-AES	-	-	4	2	11	-	-	2	70.3	9.65	-	-	-	-	Erginal et al. (2008)
	do.	EDS	-	-	-	2.75	11	36.2	-	2.6	32.68	5	3.6	1.7	2.56	2.72	do.

一方、わが国のビーチロックの組成（表 2.8 参照）も国外と同様に、 CaCO_3 や SiO_2 が大部分である。ビーチロックの主なセメント部について注目してみると、石川県輪島市^{2.17)}は Si や Al であり、石川県珠洲市^{2.18)}、五島列島の奈留島^{2.19)}、奄美大島^{2.31)}は CaCO_3 と場所により異なっていることがわかる。しかし、わが国のビーチロックの元素含有率や鉱物の分析データは非常に少なく、表 2.8 のデータは国内に存在するビーチロックのごく一部分のデータであるため、今後把握していく必要がある。

ビーチロックの物理・力学特性に関する室内試験を実施した文献は、今回調査した中では石川県輪島市曾々木海岸^{2.17)}と Scotland^{2.8)}のビーチロックの 2 件だけであった。石川県および Scotland のビーチロックの一軸圧縮強さは、それぞれ約 6 MPa および平均 1 MPa 以下であり、石川県の方が大きい傾向がみられる。これらは、人工岩を作製する上で参考となる物性値であり、有益な情報であるが、データが少ないため、次章では、実際に原位置試験および室内試験を行なって測定したビーチロックの物理・力学特性の結果について述べる。

表 2.8 わが国のビーチロック構成物質に関する組成 2.17)-2.19), 2.31), 2.32)

Area	Location	Component materials of the beachrock	Main minerals of the beachrock	Component materials of the cement	Reference
a	Sosogi, Wajima, Ishikawa	sand, gravel, plastic piece, glass piece, iron chain		Si, Al	H.Ogasawara. et.al (2004)
	Suzu, Ishikawa	shell sand, foraminifer, sand, gravel	quartz, feldspar, CaCO_3	CaCO_3	Y.Azuma.et.al (1982)
b	Naru Island, Goto Iaslands	shell piece, sand, calcareous alga, foraminifer	calcite, aragonite	calcareous mud	K.Tachibana (1964)
c	The north of Amami Island	foraminifer, coral fragment, shell fragment, gravel, sand, silt, clay		CaCO_3	S.Yonetani (1963)
	Otsukan, Okinoerabu Island	foraminifer, coral fragment, shell fragment			S.Yonetani (1966)

(B) 形成機構

国内外のビーチロックの主な形成機構は、①海水からの析出、②淡水からの析出、③CO₂の脱気による析出、④生物学的影響、⑤海水と淡水の混合、⑥物理化学的要因の 6 種類があり、これらの形成機構についての簡単な説明は以下のとおりである。詳細については、Voudoukas らの報告^{2.11)}を参照していただきたい。

① 海水からの析出^{2.40), 2.80)-2.82)}

海水からのセメント物質の析出は、潮間帯で起こるとされている。すなわち、ビーチロック表面での乾湿の繰り返しや太陽光による潮間帯の海水の温度上昇に伴う炭酸塩の溶解度の低下によってセメント物質の析出が起こると考えられる。

② 淡水からの析出^{2.83)}

地下水をはじめとする淡水の Ca²⁺濃度が高い環境のもとで、日射等の影響によって水温が上昇して CaCO₃が析出する。

③ CO₂の脱気による析出

炭酸塩が飽和している地下水で CO₂の脱気が起こることによってセメント物質が析出し、ビーチロックが形成される^{2.83)}。また、Hanor^{2.84)}による海岸での実験により、CO₂分圧を高めて淡水の地下水から CO₂を脱気させることによって 12~48 時間以内に CaCO₃が析出したことが報告されている。

④ 生物学的影響

微生物を含む有機物の存在によって炭酸塩の飽和度を部分的に高めることで、炭酸塩の析出を促進する可能性がある^{2.59)}。淡水では、光合成独立栄養生物が行う光合成によって pH が上昇し、CO₂の脱気や炭酸塩の溶解度の低下が起こり、炭酸塩の析出が生じる^{2.85), 2.86)}。

⑤ 海水と淡水の混合

CaCO₃の溶解度は、塩分濃度の低下に伴って低下する。そのため、海水と淡水が混ざることによって CaCO₃が析出し、ビーチロックが形成される^{2.87)}。

⑥ 物理化学的要因

セメンテーションの初期段階は、土中での圧密作用が要因となっており、その後、地下水面での地球化学的かつ流体力学的条件からセメント物質の析出が促進される^{2.16)}。

2.4 結言

今回の文献調査によって、ビーチロックを模擬した人工岩を作製していく上で有益な情報である国内外のビーチロックの「分布域」、「形成年代」、「諸特性」および「形成機構」についてのデータを把握することができた。本章で得られた主な知見は、以下に示すとおりである。

- ・ 分布域については、北緯 40° 付近から南回帰線の間に 90 %以上のビーチロックが分布する。また、最北部のビーチロックは Scotland (北緯 57° 40'), 最南部は South Africa (南緯 34° 06') である。国内のビーチロックは、北緯 30° 以南におよそ 95%が分布している。また、ビーチロックの北限は、日本海側は石川県珠洲市粟津、太平洋側は房総半島の千葉県館山市塩見、東シナ海側は五島列島奈留島である。
- ・ 形成年代では、South Africa の Durban や石川県輪島市曾々木海岸などの数十年前から South Africa の Flase Bay の約 26000 年までの範囲にある。
- ・ 諸特性に関しては、ビーチロックおよびそのセメント物質の組成は CaCO_3 や SiO_2 が主となっている。力学特性については、Scotland および石川県のビーチロックの一軸圧縮強さに関する 2 編の報告しかない。
- ・ 形成機構としては、海水からの析出、淡水からの析出、 CO_2 の脱気による析出、生物学的影響、海水と淡水の混合、物理化学的要因の 6 種類が主である。

参考文献

- 2.1) 小元久仁夫, 2009, 沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロック試料の較正年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) , 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 44, pp.1-17.
- 2.2) Danjo, T., Kawasaki, S., 2014, Formation mechanisms of beachrocks in Okinawa and Ishikawa, Japan, with a focus on cements, Materials Transactions, 55, pp.493-500.
- 2.3) Chivas, A., Chappell, J., Polach, H., Pillans, B., Flood, P., 1986, Radiocarbon evidence for the timing and rate of island development, beach-rock formation and hosphatization at Lady Elliot Island, Queensland, Australia, Mar. Geol., 69, pp. 273-287.
- 2.4) ERGINAL, A. E., KIYAK, N. G., ÖZTÜRK, B., 2010, Investigation of Beachrock Using Microanalyses and OSL Dating: A Case Study from Bozcada Island, Turkey, Journal of Coastal Research, 26, pp.350-358.
- 2.5) CALVET, F., CABRERA, M. C., CARRACEDO, J. C., MANGAS, J., PÉREZ-TORRADO, F. J., RECIO, C., TRAVÉ, A., 2003, Beachrocks from the island of La Palma (Canary Islands, Spain), Marine Geology, 197, pp.75-93.
- 2.6) REY, D., RUBIO, B., BERNABEU, A. M., VILAS, F., 2004, Formation, exposure, and evolution of a high-latitude beachrock in the intertidal zone of the Corrubedocomplex (Ria de Arousa, Galicia, NW Spain), Sedimentary Geology, 169, pp.93-105.

- 2.7) FELTON, A., JEWELL, P. W., CHAN, M., CURREY, D., 2006, Controls of Tufa Development in Pleistocene Lake Bonneville, Utah, *The Journal of Geology*, 114, pp.377-389.
- 2.8) KNEALE, D., VILES, H. A., 2000, Beach cement: incipient CaCO₃-cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland, *Sedimentary Geology*, 132, pp.165-170.
- 2.9) ERGINAL, A. E., KIYAK, N. G., BOZCU, M., ERTEK, A., GÜNGÜNES, H., SUNGUR, A., TÜRKER, G., 2008, On the Origin and Age of the Ariburnu Beachrock, Gelibolu Peninsula, Turkey, *Turkish Journal of Earth Science*, 17, pp.803-819.
- 2.10) VÖTT, A., BRÜCKNER, H., MAY, M., LANG, F., HERD, R., BROCKMÜLLER, S., 2008, Strong tsunami impact on the Bay of Aghios Nikolaos and its environs (NW Greece) during Classical – Hellenistic times, *Quaternary International*, 181, pp.105-122.
- 2.11) VOUSDOKAS, M. I., VELEGRAKIS, A. F., KARAMBAS, T. V., 2009, Morphology and sedimentology of a microtidal beach with beachrocks: Vatera, Lesbos, NE Mediterranean, *Continental Shelf Research*, 29, pp.1937-1947.
- 2.12) DAVID, P., PANAGIOTIS, T., KONSTANTINOS, A., 2009, Electrical resistivity tomography mapping of beachrocks: application to the island of Thassos (N. Greece), *Environ. Earth. Sci.*, 59, pp. 233-240.
- 2.13) DESRUELLES, S., FOUACHE, É., CINER, A., DALONGEVILLE, R., PAVLOPOULOS, K., KOSUN, E., COQUINOT, Y., POTDEVIN, J., 2009, Beachrocks and sea level changes since Middle Holocene: Comparison between the insular group of Mykonos-Delos-Rhenia (Cyclades, Greece) and the southern coast of Turkey, *Global and Planetary Change*, 66, pp.19-33.
- 2.14) EL-SAYED, M. K., 1988, Beachrock cementation in Alexandria, Egypt, *Marine Geology*, 80, pp.29-35.
- 2.15) HOLAIL, H., RASHED, M., 1992, Stable isotopic composition of carbonate -cemented recent beachrock along the Mediterranean and the Red Sea coasts of Egypt, *Marine Geology*, 106, pp.141-148.
- 2.16) STRASSER, A., DAVAUD, E., JEDOUI, Y., 1989, Carbonate cements in Holocene beachrock: example from Bahiret el Biban, southeastern Tunisia, *Sedimentary Geology*, 62, pp.89-100.
- 2.17) 小笠原洋, 吉富健一, 次重克敏, 2004, 能登半島, 輪島市曾々木海岸のビーチロック, 日本応用地質学会中国四国支部平成 16 年度研究発表会, pp. 31-34.
- 2.18) 東洋一, 藤井昭二, 畑中つとむ, 竹山憲市, 1982, 北陸地域にみられるビーチロックに

- ついて, 第四紀研究, 20, pp. 271-280.
- 2.19) 橘行一, 1964, 五島の beachrock について (その I), Bulletin of Faculty of Liberal Arts, Nagasaki University, 4, pp.50-77.
- 2.20) 小元久仁夫, 1995, 宮古島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代, 地理誌叢, 36, pp.18-21.
- 2.21) 小元久仁夫, 1997, 八重島列島黒島から採取したビーチロックおよび化石サンゴの ^{14}C 年代, 地理誌叢, 39, pp.24-33.
- 2.22) 小元久仁夫, 1999, 沖縄諸島栗国島から採取したビーチロックと化石サンゴの ^{14}C 年代—栗国島における後期完新世の海水準変動—, 地理誌叢, 40, pp.15-28.
- 2.23) 小元久仁夫, 2000, 徳之島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代資料, 地理誌叢, 41, pp.15-30.
- 2.24) 小元久仁夫, 2000, 西表島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代, 地理誌叢, 42, pp.17-30.
- 2.25) 小元久仁夫, 2003, 与那国島および波照間島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$), 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 38, pp.1-17.
- 2.26) 小元久仁夫, 2004, 久米島, 奥武島およびハテノ浜から採取したビーチロックの ^{14}C 年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$), 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 39, pp.15-31.
- 2.27) 小元久仁夫, 2005, 南西諸島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代および安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$)—測定資料とその分析—, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 40, pp.1-27.
- 2.28) 小元久仁夫, 2007, 南西諸島で最古のビーチロックとその意義. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 42, pp.1-14.
- 2.29) 田中好國, 1990, 石になった砂浜ビーチロック, 熱い自然—サンゴ礁の環境誌, 古今書院, pp.137-152.
- 2.30) 田中好國, 1983, ビーチロックの形成に関する一考察, 地理科学, 38, pp.91-101.
- 2.31) 米谷静二, 1963, 奄美大島本島北部におけるビーチロックの予察的研究, 地理学評論, 36, pp. 519-527.
- 2.32) 米谷静二, 1966, ビーチロックとその類似地形, 地理学評論, 39, pp.240-250.
- 2.33) 河名俊男, 2004, 波の回折から示唆される完新統の堆積現象—琉球列島多良間島の津波堆積物および黒島のビーチロックを例にして—, 琉球大学教育学部紀要, 64, pp. 1-7.
- 2.34) 河名俊男, 2006, 沖縄島東南部とその周辺島のサンゴ質堆積物から推定される約 3400 年前の大波の襲来, 琉球大学教育学部紀要, 68, pp.265-271.
- 2.35) 武永健一郎, 1965, Beach rock の成因について, 地理学評論, 38, pp.739-755.
- 2.36) GRAIG, A. K., DOBKIN, S., GRIMN, R. B., DAVIDSON, J. B., 1969, The Gastropod, Siphonaria pectinata: a Factor in Destruction of Beach Rock, AM.

- ZOOLOGIST, 9, pp. 895-901.
- 2.37) SPURGEON, D., DAVIS JR., R. A., SHINNU, E. A., 2003, Formation of 'Beach Rock' at Siesta Key, Florida and its influence on barrier island development, *Marine Geology*, 200, pp.19-29.
 - 2.38) SCHUBERT, C., VALASTRO, JR, S., 1976, Quaternary geology of La Orchila Island, central Venezuelan offshore, Caribbean Sea, *Geological Society of America Bulletin*, 87, pp. 1131-1142.
 - 2.39) KINDLER, P., BAIN, R. J., 1993, Submerged Upper Holocene beachrock on San Salvador Island, Bahamas: implications for recent sea-level history, *Geologische Rundschau*, 82, pp.241-247.
 - 2.40) GISCHLER, E., LOMANDO, A. J., 1997, Holocene cemented beach deposits in Belize, *Sedimentary Geology*, 110, pp.277-297.
 - 2.41) HIS-LIN, T., 1962, BEACH ROCK OBSERVATION ON PING CHAU, HONG KONG, *The Chung Chi Journal*, pp.117-122.
 - 2.42) JIANBIN, T., JIANWEI, S., 2008, Microbial carbonates in Holocene beachrocks, Shuiweiling, Luhuitou Peninsula, Hainan Island, *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, 51, pp.30-40.
 - 2.43) SAHAYAM, J. D., CHANDRASEKAR, N., KUMAR, S. K., RAJAMANICKAM, G. V., 2010, Distribution of arsenic and mercury in subtropical coastal beachrock, Gulf of Mannar, India, *Journal of Earth System Science*, 119, pp.129-135.
 - 2.44) RAVISANKAR, R., RAJALAKSHMI, A., 2007, GAMMA-RAY SPECTROSCOPIC AND PIXE ANALYSIS OF BEACH ROCK SAMPLE OF SOUTHERN EAST COAST OF TAMILNADU, INDIA, *International Journal of PIXE*, 17, pp.193-203.
 - 2.45) WAGLE, B. G., 1990, Beach Rocks of the Central West Coast of India, *Geo-Marine Letters*, 10, pp. 111-115.
 - 2.46) THOMAS, P. J., 2009, Luminescence Dating of Beachrock in the Southeast Coast of India – Potential for Holocene Shoreline Reconstruction, *Journal of Coastal Research*, 25, pp. 1-7.
 - 2.47) KHADKIKAR, A. S., RAJSHEKHAR, C., 2003, Microbial cements in Holocene beachrocks of Southern Andaman Islands, Bay of Bengal, *CURRENT SCIENCE*, 84, pp. 933-936.
 - 2.48) KATUPOTHA, J., 1988, Evolution of Coastal Landforms in the Western Part of Sri Lanka, *Geographical Science*, 43, pp.18-36.
 - 2.49) Amieux, P., Bernier, P., Dalongeville, R., Medwecki, V., 1989, Cathodoluminescence of carbonate-cemented Holocene beachrock from the Togo coastline (West Africa): an approach to early diagenesis, *Sediment Geol.*, 65, pp. 261-272.

- 2.50) CHAVES, N. S., SIAL, A. N., 1998, Mixed Oceanic and Freshwater Depositional Conditions for Beachrocks of Northeast Brazil: Evidence from Carbon and Oxygen Isotopes, *International Geology Review*, 40, pp.748-754.
- 2.51) CALDAS, L. H. O., STATTEGGER, K., VITAL, H., 2006, Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil, *Marine Geology*, 228, pp.39-53.
- 2.52) VIEIRA, M. M. , ROS, L. F. D., BEZERRA, F. H. R., 2007, Lithofaciology and Palaeoenvironmental Analysis of Holocene Beachrocks in Northeastern Brazil, *Journal of Coastal Research*, 23, pp. 1535-1548.
- 2.53) VIEIRA, M. M., ROS, L. F. D., 2006, Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil, *Sedimentary Geology*, 192, pp. 207-230.
- 2.54) BEZERRA, F. H. R., BARRETO, A. M. F., SUGUIO, K., 2003, Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil, *Marine Geology*, 196, pp. 73-89.
- 2.55) WOODROFFE, C. D., FALKLAND, A. C., 1997, GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY OF THE COCOS (KEELING) ISLANDS, *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Developments in Sedimentology*, 54, pp. 885-908.
- 2.56) JACOBSON, G., HILL, P.J., GHASSEMI, F., 1997, GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY OF THE COCOS (KEELING) ISLANDS, *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Developments in Sedimentology*, 54, pp. 707-742.
- 2.57) HOPLEY, D., 1997, GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY OF THE COCOS (KEELING) ISLANDS, *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Developments in Sedimentology* 54, pp. 835-866.
- 2.58) CHEN, D., KROL, A., 1997, GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY OF THE COCOS (KEELING) ISLANDS, *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Developments in Sdimentology*, 54, pp. 867-884.
- 2.59) WEBB, G. E., JELL, J. S., BAKER, J. C., 1999, Cryptic intertidal microbialites in beachrock, Heron Island, Great Barrier Reef: implications for the origin of microcrystalline beachrock cement, *Sedimentary Geology*, 126, pp.317-334.
- 2.60) DÍEZ, B., BAUER, K., BERGMAN, B., 2007, Epilithic Cyanobacterial Communities of a Marine Tropical Beach Rock (Heron Island, Great Barrier Reef): Diversity and Diazotrophy, *Applied and environmental Microbiology*, 73, pp. 3656-3668.

- 2.61) SCOFFIN, T. P., MCLEAN, R. F., 1978, Exposed limestones of the Northern Province of the Great Barrier Reef, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 291, pp.119-138.
- 2.62) MCLEAN, R. F., STODDART, D. R., HOPLEY, D., POLACH, H., 1978, Sea level change in the Holocene on the northern Great Barrier Reef, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 291, pp.167-186.
- 2.63) 小元久仁夫, 2008, 南太平洋ソシエテ諸島ボラボラ島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 43, pp. 77-86.
- 2.64) COOPER, J. A. G., 1991, Beachrock formation in low latitudes: implications for coastal evolutionary models, *Marine Geology*, 98, pp. 145-154.
- 2.65) 環境省・日本サンゴ礁学会, 2004, 日本のサンゴ礁, JWRC, pp. 161-288.
- 2.66) Wiens, H. J., 1959, Atoll environment and morphology, *A.A.A.G.*, 49, pp.31-54.
- 2.67) 笹嶋貞雄ほか, 1979, 放射年代測定法の開発と改良による考古資料の測年と編年, 昭和 53 年度特定研究「古文化財」年次報告書, pp.16-30.
- 2.68) 菅沼健, 1979, 房総半島南部・館山付近のビーチロック, *東北地理*, 31, p.70.
- 2.69) 岩井克己, 1972, 与論島と諏訪瀬島における Beach rock の観察, *地域研究*, 13, pp. 27-32.
- 2.70) 中田高, 高橋達郎, 木庭元晴, 1978, 琉球列島の完新世離水サンゴ礁と海水準変動, *地理学評論*, 51, pp. 87-108.
- 2.71) 貝塚爽平, 堀信行, 1968, 地形と地質, 東京都立大学小笠原調査報告, pp.15-38.
- 2.72) Ramsay. P. J., 1995, 9000 Years of Sea-level Change Along the Southern Africa coastline, *Quaternary International*, 31, pp. 71-75.
- 2.73) Hayley, C., Ron, U., 2012, Modern beachrock formation in Durban, KwaZulu-Natal, *S. Afr. J. Sci.*, 108, 7-8.
- 2.74) Arrieta, N., Goienaga, N., Martinez-Arkarazo, I., Murelaga, X., Baceta, J. I., Sarmiento, A., Madariaga, J. M., 2011, Beachrock formation in temperate coastlines: Examples in sand-gravel beaches adjacent to the Nerbioi-Ibaizabal Estuary (Bilbao, Bay of Biscay, North of Spain), *Spectrochimica Acta Part A*, 80, pp. 55-65.
- 2.75) Matteo, V., Alessio, R., Nickolas, Z., Stéphane, D., Vincent, C., Marco, F., 2012, Spatial distribution of sea-level markers on Lesbos Island (NE Aegean Sea): Evidence of differential relative sea-level changes and the neotectonic implications, *Geomorphology*, 159-160, pp. 50-62.
- 2.76) Evelpidou, N., Pavlopoulos, K., Vassilopoulos, A., Triandafyllou, M., Vouvalidis, K., Syrides, G., 2012, Holocene palaeogeographical reconstruction of the western part of Naxos island (Greece), *Quaternary International*, 266, pp. 81-93.
- 2.77) 小元久仁夫, 伊藤佑始, 2006, 長崎県天然記念物『脇岬のビーチロック』の ^{14}C 年代

と地形発達, 日本地理学会発表要旨集, 70, p.35.

- 2.78) 田中好國, 1994, サンゴ礁海岸における微地形: ビーチロックのターミノロジーと研究小史, 兵庫地理, 39, pp. 1-12.
- 2.79) 橘行一, 阪口和則, 1971, 五島列島の縄文土器を含むビーチロックの年代, 第四紀研究, 10, pp. 54-59.
- 2.80) Scoffin, T. P., 1970, A conglomeratic beachrock at Bimini, Bahamas, J. Sediment. Petrol., 40, pp. 756-758.
- 2.81) Moore, C. H., Billings, G. K., 1971, Preliminary model of beachrock cementation, Grand Cayman island, B.W.I. In: Bricker, O.P. (Ed.), Johns Hopkins Press, pp. 40-43.
- 2.82) Tietz, G., Muller, G., 1971, High-magnesian calcite and aragonite cementation in recent beachrocks, Fuerteventura, Canary Island, Spain, In: Bricker, O.P. (Ed.), Carbonate Cement. Johns Hopkins Press, Baltimore, pp. 4-8.
- 2.83) Field, R.M., 1919, Investigations regarding calcium carbonate oozes at Tortugas and the beachrock at Loggerhead Key, Carnegie Inst. of Wash., Yearbook, vol. 18, pp. 197-198.
- 2.84) Hanor, J.S., 1978, Precipitation of beachrock cements: mixing of marine and meteoric waters vs. CO₂-degassing, J. Sediment. Petrol., 48, pp. 489-501.
- 2.85) Pentecost, A., Riding, R., 1986, Calcification in cyanobacteria. In: Riding, R. (Ed.), Biomineralization in Lower Plants and Animals, Systematics Association Special Volume, Clarendon Press, New York, pp. 73-90.
- 2.86) Merz, M.U.E., 1992, The biology of carbonate precipitation by cyanobacteria, Facies, 26, pp. 81-102.
- 2.87) Milliman, J.D., 1974, Marine Carbonates, Springer-Verlag, Berlin, 375 p.
- 2.88) Siesser, W. G., 1974, Relict and recent beachrock from Southern Africa, Geological Society of America Bulletin, 85, pp. 1849-1854.

第3章 ビーチロックの物理・力学特性

3.1 緒言

前章では、人工岩の作製のために必要な情報を把握するため、ビーチロックに関する国内外の文献を集めて整理した。その結果、ビーチロックの物理・力学特性に関するデータが非常に少ないことがわかった。一軸圧縮強さ（UCS）や弾性波速度、密度などの物理・力学特性の把握は、ビーチロックが人工岩のモデルに適しているか、すなわち厳しい気象条件に耐えるための要件を満たしているかを判断する上で重要である。さらに、UCS と相関が高いビーチロックの物理・力学特性を把握することは、人工岩を開発していく上で重要である。

以上のことから、本章では試験データが非常に不足しているビーチロックの物理・力学特性を把握し、UCS と各種特性の相関を検討することを目的とした。そこで、国内で調査報告が多く、かつ、国内で最南部のビーチロック分布地である沖縄県内の 4 地点と、最北部の分布地である石川県内の 1 地点のビーチロックを対象とし、原位置および室内において物理・力学試験を実施した。

3.2 方法

3.2.1 調査地点

調査は、沖縄県の国頭郡本部町備瀬後備浜原（調査地点 A）、国頭郡恩納村真栄田（調査地点 M）、中頭郡読谷村儀間（調査地点 G）、名護市済井出（調査地点 S）と石川県の輪島市渋田町曾々木海岸ミツ子浜（調査地点 W）で実施した（図 3.1 参照）。なお、沖縄県を対象とした理由は、強度に与える影響を評価する際にビーチロックの形成年代や構成物質などに関する既存のデータが多い地域が、より多角的に検討できると考えたためである。また、石川県を対象とした理由は、沖縄県と異なる地点を対象とすることで、人工岩の適用先をより広くするためである。すなわち、国内最北部のビーチロックの分布地点である調査地点 W 周辺は基盤が珪藻泥岩（ SiO_2 が主）であり、国内最南部の分布地の沖縄県の調査地点 A, M, G, S 周辺は基盤が琉球石灰岩（ CaCO_3 が主）と主要な元素が異なるため、ビーチロックの諸特性も異なることが予想され、異なるビーチロックの物理・力学特性を把握しておくことは、様々な特性の人工岩を作製するための情報になると考えたからである。

(A) 沖縄県国頭郡本部町備瀬後備浜原

沖縄県国頭郡本部町備瀬後備浜原（調査地点 A）で調査したビーチロックは、図 3.2 のとおりである。試験箇所（ P_{A1} , P_{A2} , P_{A3} ）は、汀線に対してほぼ平行（ $\overline{P_{A1}P_{A2}}$ ）および直行

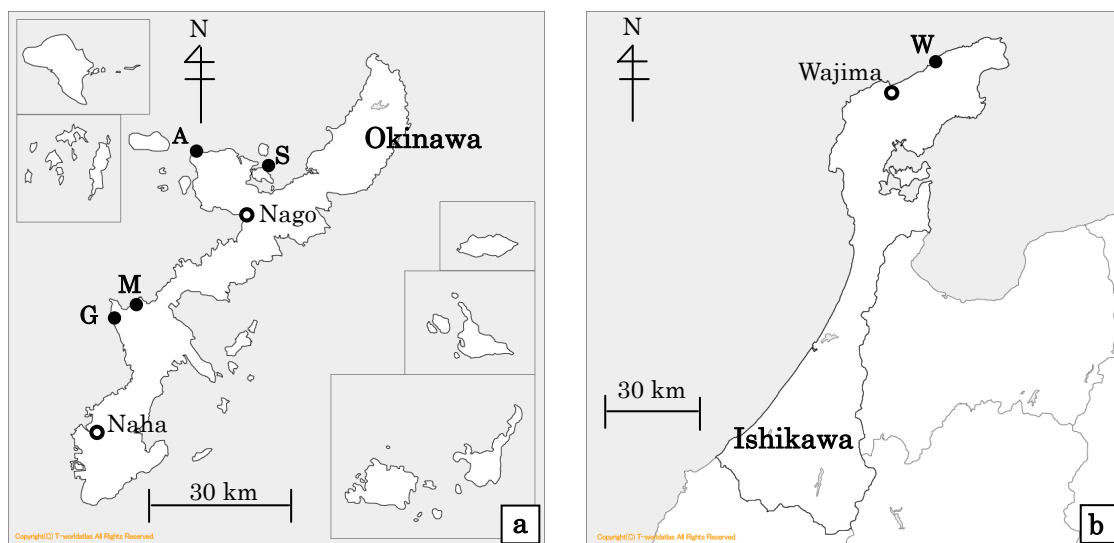


図 3.1 調査地点 ((a) 沖縄県の後備浜原 (A)，真栄田 (M)，儀間 (G)，済井出 (S)，
(b) 石川県の輪島市 (W))

表 3.1 試験箇所の特徴 (調査地点 A, M, G)

調査地点	試験箇所	GPS座標値	試験箇所どうしの関係
A(後備浜原)	P _{A1}	26°42'13.6"N, 127°52'48.4"E	$\overline{P_{A1}P_{A2}} = 5\text{m}$ (汀線とほぼ平行) $\overline{P_{A2}P_{A3}} = 5\text{m}$ (汀線とほぼ垂直)
	P _{A2}	26°42'13.7"N, 127°52'48.5"E	
	P _{A3}	26°42'13.7"N, 127°52'48.3"E	
M(真栄田)	P _{M1}	26°25'35.4"N, 127°44'48.4"E	$\overline{P_{M1}P_{M2}} = 5\text{m}$ (汀線とほぼ平行) $\overline{P_{M1}P_{M3}} = 4\text{m}$ (汀線とほぼ垂直)
	P _{M2}	26°25'35.5"N, 127°44'48.4"E	
	P _{M3}	26°25'35.5"N, 127°44'48.2"E	
G(儀間)	P _{G1}	26°25'03.0"N, 127°42'49.0"E	$\overline{P_{G1}P_{G2}} = 5\text{m}$ (汀線とほぼ平行) $\overline{P_{G1}P_{G3}} = 3\text{m}$ (汀線とほぼ垂直)
	P _{G2}	26°25'03.1"N, 127°42'49.0"E	
	P _{G3}	26°25'02.9"N, 127°42'48.9"E	

($\overline{P_{A2}P_{A3}}$) となるように配置し、測定間隔を 3～5 m とした (表 3.1 参照)。緯度・経度の座標値は、携帯型の GPS 測定器 (GARMIN 社製, eTrex Venture HC) により求めた。なお、後記の GPS 座標値もすべて同測定器により実施した。

(B) 沖縄県国頭郡恩納村真栄田

沖縄県国頭郡恩納村真栄田 (調査地点 M) で調査したビーチロックおよび試験箇所の位置関係については、図 3.3 および表 3.1 のとおりである。

(C) 沖縄県中頭郡読谷村儀間

沖縄県中頭郡読谷村儀間 (調査地点 G) で調査したビーチロックおよび試験箇所の位置関係については、図 3.4 および表 3.1 のとおりである。

(D) 沖縄県名護市済井出

沖縄県名護市済井出（調査地点 S，図 3.5 参照）では，表 3.2 で示すように固化の程度の異なる試験箇所を対象とした。なお，「土中のビーチロック」とは深さ 10 cm 前後の未固結堆積物の下で固結しているビーチロックのことである。なお，土中のビーチロックは，露頭したビーチロックに比べて形成年代が若く，セメント結合部分が少ない^{3.1)}と報告されている。

(E) 石川県輪島市渋田町曾々木海岸ミツ子浜

石川県輪島市渋田町曾々木海岸ミツ子浜（調査地点 W，図 3.6 参照）では，始点を P_{W1} ($37^{\circ}26'20.1''N$, $137^{\circ}02'16.9''E$)，終点を P_{W48} ($37^{\circ}26'20.0''N$, $137^{\circ}02'17.1''E$) とする長さ 470 cm の線分 $\overline{P_{W1}P_{W48}}$ を 10 cm 間隔でマークし，その合計 48 点を試験箇所とした。線分 $\overline{P_{W1}P_{W48}}$ の範囲の未固結堆積物は掘り起こして一時的に取り除いたため，試験箇所の状態としては，露頭しているビーチロック（掘り起こす前の時点で露頭しているビーチロック），土中のビーチロック，基盤である珪藻泥岩，未固結堆積物が不規則に並んでいた。さらに，土中のビーチロックである P_{W36} を覆っていた未固結堆積物 (P_{W49}) についても試験対象とした。



図 3.2 調査地点 A

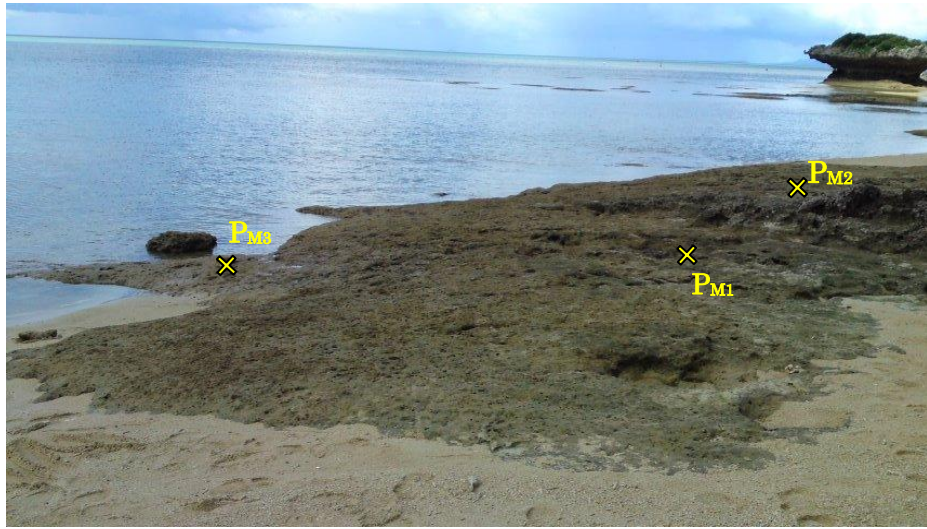


図 3.3 調査地点 M



図 3.4 調査地点 G



図 3.5 調査地点 S

表 3.2 試験箇所の特徴（調査地点 S）

試験箇所	状態	GPS座標値	試験箇所どうしの関係
P _{S1}	露頭しているビーチロック①	26° 40'44.3″N, 128° 00'44.1″E	$\overline{P_{S1}P_{S2}} = 9.1\text{m}$ （汀線とほぼ平行） $\overline{P_{S2}P_{S4}} = 6.5\text{m}$ （汀線とほぼ垂直）
P _{S2}	露頭しているビーチロック②	26° 40'44.3″N, 128° 00'43.7″E	
P _{S3}	土中のビーチロック	26° 40'44.2″N, 128° 00'43.7″E	
P _{S4}	土中のビーチロック上の未固結堆積物	26° 40'44.2″N, 128° 00'43.7″E	



図 3.6 調査地点 W (線分 $\overline{P_{W1}P_{W48}}$ に対して(a)平行方向および(b)垂直方向から撮影)

3.2.2 原位置試験

原位置試験を実施した調査地点は、5ヶ所すべてである。調査地点 A, M, G の試験項目は、弾性波速度測定 (P 波)、シュミット式ハンマー試験、エコーチップ硬度試験、元素分析である。また、調査地点 S, W の試験項目は、針貫入試験のみとした。非破壊試験を中心にこれらの試験項目を選んだ理由としては、岩盤への破壊的影響が大きい試験を現地で行なうことは望ましくないと考えたためである。これらの試験項目について、それぞれの調査地点のビーチロック上の各試験箇所に対して、測定を行なった。

次に、各試験方法について説明する。

(A) 弾性波速度測定 (P 波)

弾性波速度測定装置 (北斗理研製, PHG-3000) で P 波の発生 (周波数特性は 10~150 kHz) および波形の表示を行ない、この PHG-3000 に 15 m の BNC ケーブル 2 本をつなぎ、そのケーブルと発信子および受信子である圧電素子 2 本を接続した。なお、PHG-3000 は AC-DC アダプタを経由して電力供給源である発電機をつないだ。発信子と受信子の距離は 10 cm とし、その 2 点間の方向は汀線と平行および直交とし、1 つの試験箇所につき各 3 回ずつ素子の先端をビーチロックに直接押し着けて測定した。P 波速度の値は、3 回ずつ測定した値の平均値とした。

(B) シュミット式ハンマー試験

シュミット式ハンマー試験により、岩盤の反発硬度を求めた。シュミット式ハンマー (PROCEQ 社製, MODEL KS) の試験方法は、地盤工学会基準 (JGS 3411-2004) に準拠して行なった。ハンマー本体を持って先端部を測定点にあて、測定面に対して垂直にハンマーを押し着け打撃作用によってハンマー反発硬度を得た。測定面に凹凸がある場合は測定点を移動させ、打撃は 1 つの試験箇所に対して 9 回行ない、その平均値をシュミットハンマー反発硬度の値とした。

(C) エコーチップ硬度試験

エコーチップ硬度試験により、岩盤の反発硬度を求めた。エコーチップ (PROCEQ 社製, D 型) を使用し、各試験箇所に対して打撃箇所を変えながら計 10 回の試験を行ない、その平均値をエコーチップ反発硬度の値とした。

(D) 針貫入試験

調査地点 S, W の固化の程度が異なるビーチロック (海側で露頭しているビーチロックと陸側で未固結堆積物の下に存在する土中のビーチロック) に対して、軟岩ペネトロ計 (丸東製作所製, SH-70) により現場試験を実施した。測定値から針貫入勾配である N_P (N/mm) を求め、 N_P の値から、本装置説明書の回帰式 $\log_{10} y = 0.978 \log_{10} x + 2.621$ (相関係数: 0.941, x : 針貫入勾配, y : 推定 UCS) を用いて推定 UCS を求めた。なお、本式は、天然岩石 114 個、セメント処理試料 50 個を対象に導かれたものである。

3.2.3 室内試験

調査地点 A, M, G において, 原位置試験を行なった各ビーチロックの岩盤周辺から 15 cm × 15 cm × 25 cm 程度の岩石を 1 つずつ採取し, それらについて室内試験を行なった。試験項目は, 一軸圧縮試験, 密度測定, 含水比測定, 弾性波速度測定である。

次に, 各試験項目の試験方法を説明する。

(A) 一軸圧縮試験

採取した岩石を直径 3 cm × 高さ 6 cm の円柱形供試体に成形した。コアリングの方向は直交する 2 方向 (X 方向, Y 方向) とし, 現地から採取する前の岩石の上下方向を X 方向とした。また, 成形した供試体を試験に供するまで水道水に浸けて湿潤状態に保ったものと, 80℃の高温乾燥炉に 3 日間入れて乾燥状態にしたものに分けた。なお, 3 日間の炉乾燥により, 各供試体が一定の質量になることを確認した。供試体数の内訳は, 表 3.3 のとおりである。これらの供試体に対して, インストロン万能試験機 (INSTRON 社製, 5586) を用いて一軸圧縮試験を実施した。なお, 軸ひずみ速度は 0.03 mm/min, データサンプリング間隔は 0.10 s とした。

(B) 密度測定

前述(A)の供試体について, 一軸圧縮試験を行なう前に, 供試体の高さ, 直径, 質量の測定を行ない, 湿潤および乾燥状態の密度を計算により求めた。

(C) 含水比試験

含水比試験の方法は, 地盤工学会基準 (JGS 2134- 2009) に準拠して行なった。ただし, 炉乾燥の方法が基準と異なり, 80 °C の恒温乾燥炉に入れ, 一定質量となるまで炉乾燥させた。また, 本試験は, 前述(A)で試験した供試体のうち, 湿潤状態の試料を用いて行なった。

(D) 弾性波速度測定 (P 波, S 波)

前述(A)の供試体について, 一軸圧縮試験を行なう前に弾性波速度測定装置 (応用地質製, MODEL-5251) によって無拘束圧下における P 波速度および S 波速度の測定を各 3 回ずつ実施した。測定は超音波の周波数 200 kHz および 100 kHz の振動子を用い, P 波速度測定において振動子と供試体を圧着する際には, 供試体の端面にグリスを塗布した。

表 3.3 供試体の条件と本数

供試体の種類	調査地点	方向	状態	供試体数
AXW	A(後備浜原)	X	湿潤	3
AYW		Y		3
AXD		X	乾燥	2
AYD		Y		3
MXW	M(真栄田)	X	湿潤	3
MYW		Y		0
MXD		X	乾燥	3
MYD		Y		0
GXW	G(儀間)	X	湿潤	3
GYW		Y		3
GXD		X	乾燥	3
GYD		Y		3

3.3 結果

3.3.1 原位置試験

(A) P 波速度測定

P 波速度の測定結果を表 3.4 の V_{PP} , V_{PO} に示す。なお、各試験箇所において、測定時の発信子と受信子の 2 点の方向は汀線と平行および直交の 2 方向で測定した P 波速度を、それぞれ V_{PP} , V_{PO} と表記している。

同一の調査地点の中でも、試験箇所によって P 波速度が異なっていた。例えば、調査地点 A と調査地点 G のデータを比較すると、調査地点 A は、汀線からより離れた P_{A1} および P_{A2} が汀線に近い P_{A3} に比べて P 波速度が速いが、調査地点 G は調査地点 A と反対の結果を示した (表 3.1, 表 3.4, 図 3.2, 図 3.4 参照)。また、表 3.3 より、調査地点ごとに P 波速度を比べると、調査地点 A は調査地点 M と調査地点 G に比べて P 波速度が遅い傾向が見られた。なお、3 つの調査地点での P 波速度の範囲としては、1.58~6.02 km/s であった。

(B) シュミット式ハンマー試験

シュミットハンマー反発硬度 S の結果を表 3.4 の S に示す。 S は調査地点 M が最も低く、調査地点 G が最も高かった。

(C) エコーチップ硬度試験

エコーチップ反発硬度 L の結果を表 3.4 の L に示す。 L はシュミットハンマー反発硬度 S の結果と同様に、調査地点 M が最も低く、調査地点 G が最も高かった。

(D) 針貫入試験

調査地点 S および W の針貫入試験結果を、表 3.5 および表 3.6 と図 3.7 に示す。表 3.5 と表 3.6 より、 N_F から換算した推定 UCS は、露頭しているビーチロックおよび土中のビーチロックでそれぞれ、調査地点 W より調査地点 S の方が大きかった。また、両地点に共通

して、露頭しているビーチロックは土中のビーチロックよりも推定 UCS が大きい傾向がみられた。これは、M. I. Vousdoukas. et al. ^{3.1)}の「海側で露頭しているビーチロックよりも陸側で土中に埋まっているビーチロックの方が固化の程度が低い」という報告と調和的である。ビーチロックの力学特性に関する報告は、前章で述べたとおり、わずか 2 編であり、これらの文献では露頭しているビーチロックについてのみの報告であるため、土中のビーチロックの UCS について報告した例は、筆者が知る限りでは本結果が世界で初めてである。

表 3.4 汀線と平行方向および垂直方向の P 波速度 V_{PFP} および V_{PFO} , シュミットハンマー反発硬度 S , エコーチップ反発硬度 L の現位置試験結果

調査地点	試験箇所	V_{PFP} (km/s)	V_{PFO} (km/s)	S	L
A(後備浜原)	P _{A1}	2.04	2.31	31	347
	P _{A2}	2.18	2.29	29	261
	P _{A3}	1.58	1.59	18	143
M(真栄田)	P _{M1}	4.85	5.63	22	134
	P _{M2}	3.53	3.49	19	127
	P _{M3}	2.86	3.34	13	140
G(儀間)	P _{G1}	3.78	3.26	28	456
	P _{G2}	3.85	4.00	34	354
	P _{G3}	6.02	4.92	45	444

表 3.5 調査地点 S の針貫入試験結果

試験箇所	状態	N_p	推定 UCS
		N/mm	MPa
P _{S1}	露出しているビーチロック	80	27
P _{S2}	露出しているビーチロック	51	18
P _{S3}	土中のビーチロック	8.9	3.4

表 3.6 調査地点 W の針貫入試験結果

試験箇所	状態	N_p N/mm	推定UCS MPa
P_{W1}	露出しているビーチロック	4.8	1.8
P_{W2}	同上	3.0	1.2
P_{W3}	同上	5.0	2.0
P_{W4}	同上	5.1	2.0
P_{W5}	同上	5.9	2.3
P_{W6}	同上	4.3	1.7
P_{W7}	同上	5.3	2.1
P_{W8}	同上	7.3	2.9
P_{W9}	同上	8.8	3.3
P_{W10}	同上	6.2	2.4
P_{W11}	同上	2.2	0.9
P_{W12}	同上	6.3	2.5
P_{W13}	同上	4.8	1.9
P_{W14}	同上	4.3	1.7
P_{W15}	同上	3.7	1.4
P_{W16}	同上	4.2	1.7
P_{W17}	同上	4.2	1.7
$P_{W18}-P_{W22}$	礫	—	—
P_{W23}, P_{W24}	珪藻泥岩	—	—
P_{W25}	礫	—	—
P_{W26}	土中のビーチロック	2.0	0.8
P_{W27}	同上	2.3	0.9
P_{W28}	同上	4.2	1.7
P_{W29}	同上	2.3	0.9
P_{W30}	同上	3.1	1.4
P_{W31}	同上	1.2	0.5
P_{W32}	同上	2.4	1.0
P_{W33}	同上	1.8	0.8
P_{W34}	同上	1.8	0.8
P_{W35}	同上	0.9	0.4
P_{W36}	同上	1.1	0.5
P_{W37}	礫	—	—
P_{W38}	土中のビーチロック	2.0	0.8
$P_{W39}-P_{W45}$	礫	—	—
P_{W46}	土中のビーチロック	2.0	0.8
P_{W47}, P_{W48}	礫	—	—

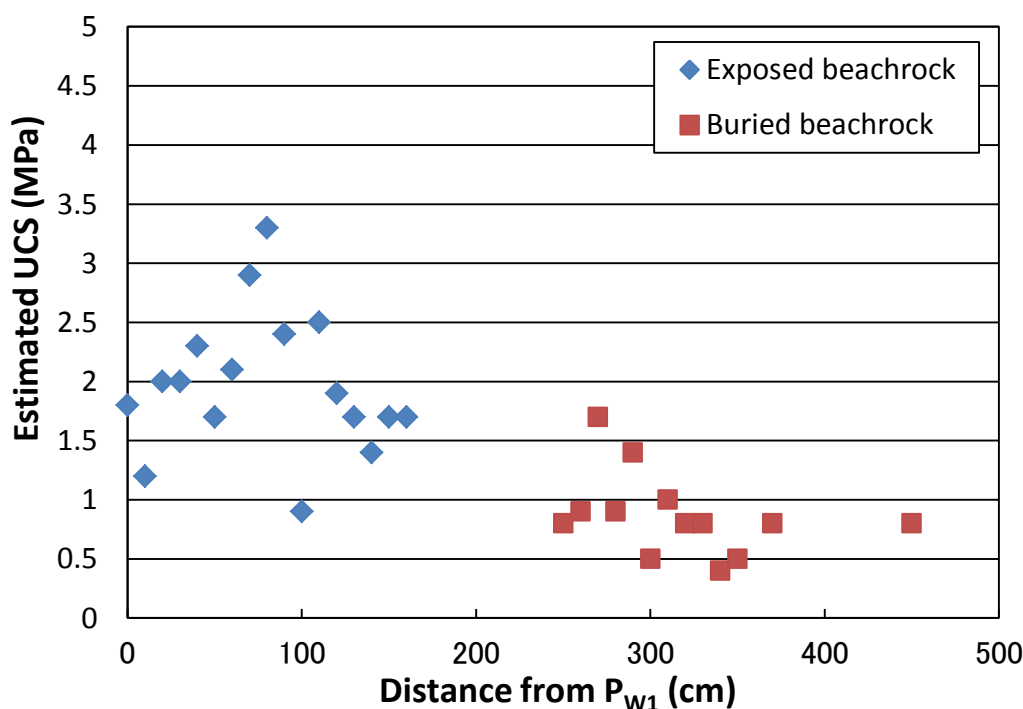


図 3.7 調査地点 W の各試験箇所の針貫入試験結果

3.3.2 室内試験

(A) 表面性状の特徴

表面性状の不均質性を把握するため、各調査地点における供試体の表面性状について観察した。図 3.8 は、それぞれの調査地点におけるビーチロック供試体の一例である。本項では、紙面の都合上、各調査地点 1 本ずつの写真であるが、その他の供試体についても調査地点ごとに同様の傾向が見られた。

これらの写真について一つ一つ見ていくと、AXW-3 (表 3.3 中の AXW の 3 本の供試体のうちの 1 本) は全体的に比較的多孔質であるといえる。また、凹部 (大きな空隙) の位置や大きさが不規則であるため、このことが後述する密度や含水比などが不均質になる原因の一つであると考えられる。次に、MXW-1 は凹部の方向性が縦方向に卓越しており、このことは一軸圧縮強さの異方性と考えられるが、調査地点 M の岩石は大きさが小さくコアリングが一方 (X 方向) からしか行なえなかったため、今後調べていく必要がある。さらに、GXW-2 は結晶化が進んで空隙が見られない部分と、凹部の大きさにばらつきが見られる部分に分かれている。この結晶化が進んで空隙が見られない部分によって、後述する供試体の密度が高くなっている可能性が高いと思われる。また、調査地点 G の供試体の表面性状は、結晶化が進んで空隙が見られない部分と、凹部の大きさにばらつきが見られる部分に分かれている点で琉球石灰岩の供試体の表面性状^{3.2)}と類似している。さらに、調査地点 A と調査地点 G を比べると、凹部の方向が一方に卓越していない点や凹部の位置や大きさが不規則である点で共通しているが、異なる点としては、結晶化が進んで

空隙が見られない部分の有無である。

以上のことから、本論文で対象とした 3 調査地点 A, M, G のビーチロックの供試体の表面性状は、調査地点によって異なる傾向がみられた。

(B) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の結果は、表 3.7 のとおりであり、同表は室内試験結果である供試体の密度 ρ 、含水比 w 、UCS q_u 、50%ヤング率 E_{50} 、50%ポアソン比 ν_{50} 、P 波速度 V_{PL} 、S 波速度 V_{SL} に関する結果の一覧である。 q_u の範囲は 5.63～57.80 MPa であった。また、 q_u は調査地点によって大きく異なっており、調査地点 G が最も q_u が高く、調査地点 A が最も q_u が低いことがわかった。

(C) 密度測定

ρ の範囲は 1.57～2.50 g/cm³ であった。また、 ρ は調査地点による違いが小さく、調査地点 G が他の 2 つに比べて大きかった。さらに、 ρ の乾燥と湿潤の差異は顕著でない。

(D) 含水比試験

w は調査地点によって大きく異なり、調査地点 A では 9.3～12.5 %、調査地点 M では 25.2～26.0 %、調査地点 G では 3.4～4.2 %であることがわかった。

(E) P 波および S 波速度測定

V_{PL} の範囲は 3.00～5.14 km/s であり、 V_{SL} の範囲は 2.05～3.49 km/s であった。また、 V_{PL} 、 V_{SL} ともに、調査地点 G における湿潤状態の供試体が他の条件の供試体に比べて高かった。



図 3.8 左から供試体 AXW-3, MXW-1, GXW-2

表 3.7 室内試験結果（物理・力学特性）

サンプル番号	ρ (g/cm ³)	w (%)	q_u (MPa)	E_{50} (GPa)	v_{50}	V_{PL} (km/s)	V_{SL} (km/s)
AXW-1	2.01	12.2	10.88	0.230	0.130	3.60	2.50
AXW-2	2.10	10.3	13.99	0.219	0.106	3.49	2.44
AXW-3	2.05	11.3	5.63	0.076	0.180	3.37	2.29
AYW-1	2.09	—	17.97	0.308	0.150	3.37	2.32
AYW-2	2.01	12.5	7.11	0.207	0.119	3.41	2.15
AYW-3	2.08	9.3	11.23	0.259	0.067	3.73	2.35
平均値	2.06	11.1	11.14	0.216	0.125	3.50	2.34
標準偏差	0.04	1.3	4.50	0.078	0.039	0.14	0.12
AXD-1	1.98		25.69	0.368	0.159	3.75	2.28
AXD-2	1.91		15.29	0.206	0.089	3.46	2.08
AYD-1	1.76		7.92	0.233	0.110	3.00	2.05
AYD-2	2.00		19.11	0.329	0.149	3.85	2.22
AYD-3	2.00		27.10	0.309	0.185	3.80	2.42
平均値	1.93		19.02	0.289	0.138	3.57	2.21
標準偏差	0.10		7.86	0.068	0.039	0.35	0.15
MXW-1	1.96	25.2	24.31	0.166	0.027	3.74	2.14
MXW-2	1.96	26.0	11.04	0.129	0.041	3.44	2.26
MXW-3	1.98	25.2	24.38	0.217	0.119	3.88	2.54
平均値	1.97	25.4	19.91	0.170	0.062	3.69	2.31
標準偏差	0.01	0.5	7.68	0.044	0.050	0.22	0.21
MXD-1	1.60		43.03	0.364	0.127	3.94	2.77
MXD-2	1.60		26.37	0.321	0.083	3.80	2.83
MXD-3	1.57		18.25	0.295	0.123	3.80	2.60
平均値	1.59		29.22	0.327	0.111	3.85	2.73
標準偏差	0.02		12.63	0.035	0.024	0.08	0.12
GXW-1	2.49	3.4	49.71	0.326	0.111	5.14	—
GXW-2	2.49	3.6	57.80	0.546	0.157	5.05	3.49
GXW-3	2.50	3.4	50.45	1.243	0.338	4.77	3.40
GYW-1	2.44	3.7	31.48	0.349	0.140	4.82	2.98
GYW-2	2.40	4.2	24.66	0.592	0.248	4.57	2.78
GYW-3	2.47	4.1	39.25	0.512	0.169	4.11	2.76
平均値	2.47	3.7	42.23	0.594	0.194	4.74	3.08
標準偏差	0.04	0.3	12.64	0.335	0.084	0.37	0.34
GXD-1	2.38		36.61	0.362	0.073	4.09	2.48
GXD-2	2.36		21.86	0.665	0.240	4.09	2.32
GXD-3	2.24		30.98	0.220	0.061	3.84	2.46
GYD-1	2.37		39.33	0.617	0.153	4.20	2.43
GYD-2	2.31		30.39	0.322	0.077	4.20	2.72
GYD-3	2.39		27.50	0.671	0.157	3.99	2.62
平均値	2.34		31.11	0.476	0.127	4.07	2.51
標準偏差	0.06		6.28	0.198	0.070	0.13	0.14

3.4 考察

3.4.1 原位置試験で得られた物性間の相関関係

地盤の物性間の相関を見ることは工学的、応用地質学的に有益であるため、ビーチロックにおける原位置試験で得られた物性間の相関関係を検討する。前節で求めた P 波速度 V_{PFP} および V_{PFO} 、シュミットハンマー反発硬度 S 、エコーチップ反発硬度 L の物性間の相関係数は、表 3.8 のとおりである。また、 V_{PFP} と V_{PFO} 、 S と L の関係を図 3.9、図 3.10 にそれぞれ示す。

図 3.9 より、 V_{PFP} と V_{PFO} は、概ね 1 対 1 に対応しているため、ビーチロック表面付近での水平距離が約 10 cm 四方の範囲では、汀線に対して平行な方向と直交な方向での V_{PFP} および V_{PFO} における異方性がないと考えられる。また、 S と L の間にも比較的強い正の相関があった（図 3.10 参照）。シュミット式ハンマー試験は岩盤内部までの硬さ、エコーチップ硬度試験は岩盤表面の硬さを示すと考えられるが、 S と L には比較的強い相関があるため、岩盤内部と表面の硬さについても相関があるといえる。さらに、表 3.8 より、 V_{PFO} と S の相関係数が 0.300 に対し、 V_{PFP} と S の相関係数は 0.527 と相関が比較的高いため、汀線に直交方向の測定結果（ V_{PFO} ）より平行方向の測定結果（ V_{PFP} ）の方がばらつきが少ない可能性がみられた。加えて、 L より S の方が V_{PFP} および V_{PFO} との相関が高かった。

以上のことから、本調査地点のビーチロックに対して原位置試験を行なう場合には次のことがいえる。それは、① V_{PFP} もしくは V_{PFO} を把握したい場合は、測定面が約 10 cm 四方の範囲内であれば、 V_{PFP} および V_{PFO} における異方性を考慮せずに測定してよいこと、② S もしくは L を把握したいときは、そのどちらか一方の測定を行なえばもう一方の値をおおよそ推測できること、③ V_{PFP} と S にも正の相関がみられるため、どちらか一方を測定すればもう一方の傾向は推察できるということである。ただし、これらの見解は少ない数の測定データに基づいているため、データ数を増やして再検討するなどの課題が残されている。

表 3.8 原位置試験によって求めた P 波速度 V_{PFP} および V_{PFO} 、シュミットハンマー反発硬度 S 、エコーチップ反発硬度 L の物性間の相関係数

	V_{PFP}	V_{PFO}	S	L
V_{PFP}	1.000			
V_{PFO}	0.906	1.000		
S	0.527	0.300	1.000	
L	0.356	0.097	0.842	1.000

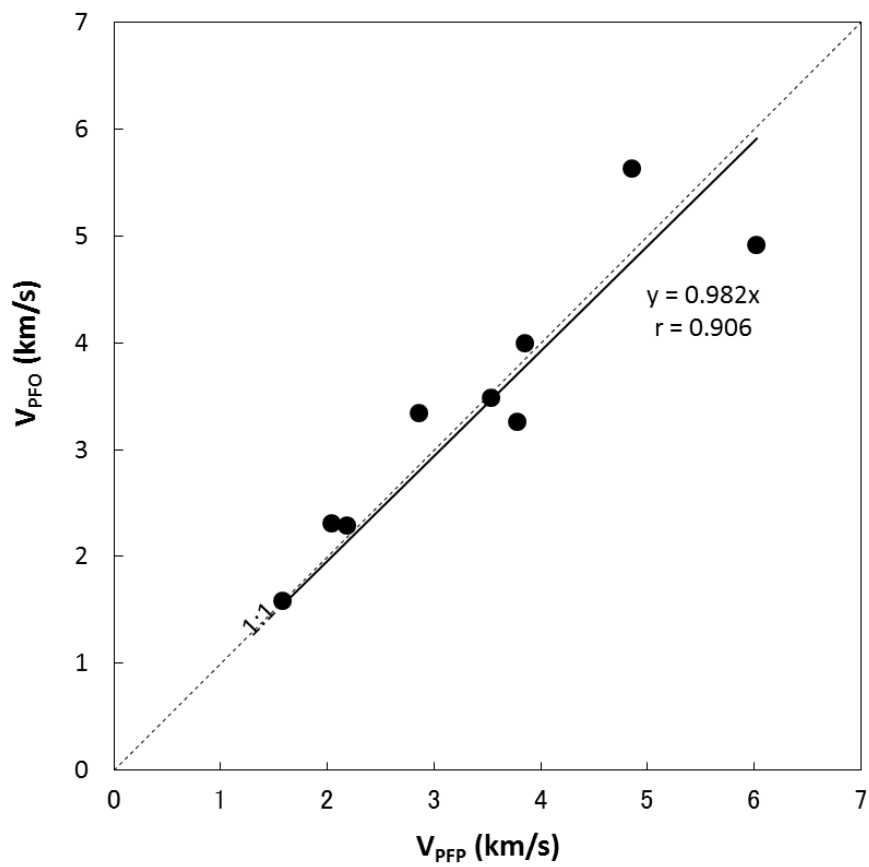


図 3.9 汀線に平行な P 波速度 V_{PFP} と汀線に垂直な P 波速度 V_{PFO} の関係

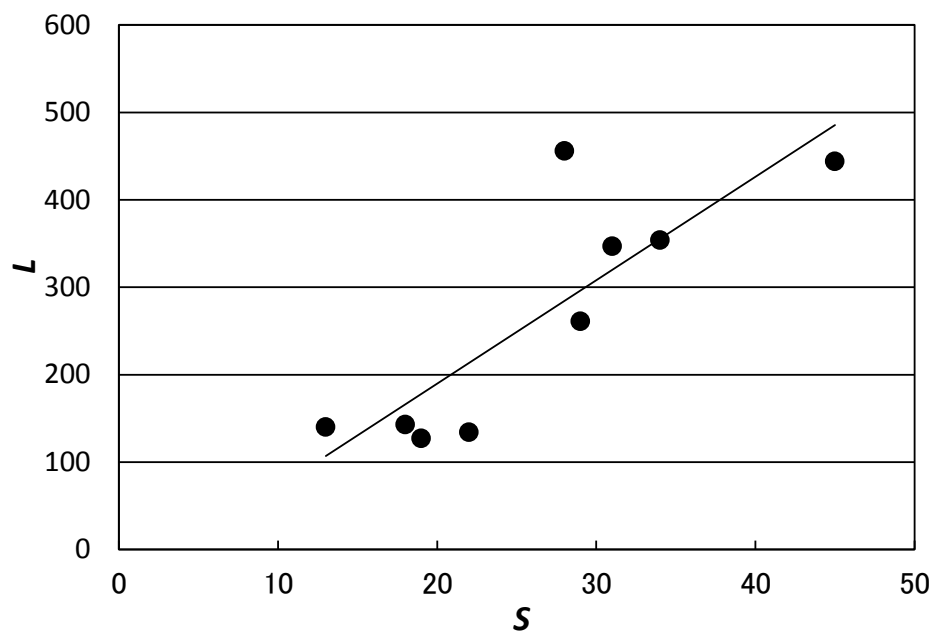


図 3.10 シュミットハンマー反発硬度 S とエコーチップ反発硬度 L の関係

3.4.2 UCS とその他の物性の相関関係

図 3.11 は、UCS q_u とその他の室内試験による物性の相関関係を示している。なお、物性間の相関関係については調査地点を分けずに議論する。 q_u と相関が高いのは、湿潤状態であれば大きい順に V_{PL} , V_{SL} , ρ であることがわかった。さらに、 q_u と最も相関が高い V_{PL} の関係を、図 3.12 に示す。同図より、 q_u と V_{PL} の間には次式の関係がみられた。

$$V_{PL} = 0.0345 q_u + 3.16 \quad (\text{相関係数 } r \text{ は } 0.893) \quad (3.1)$$

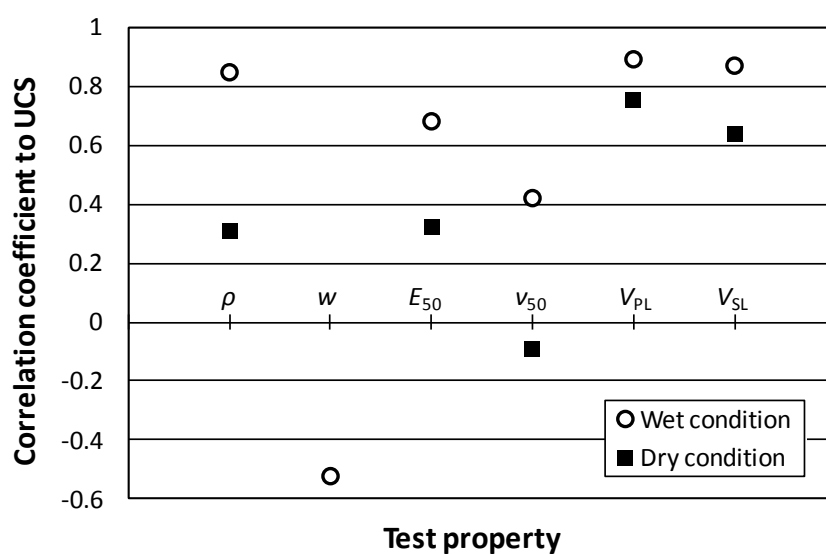


図 3.11 UCS と各試験物性の相関係数

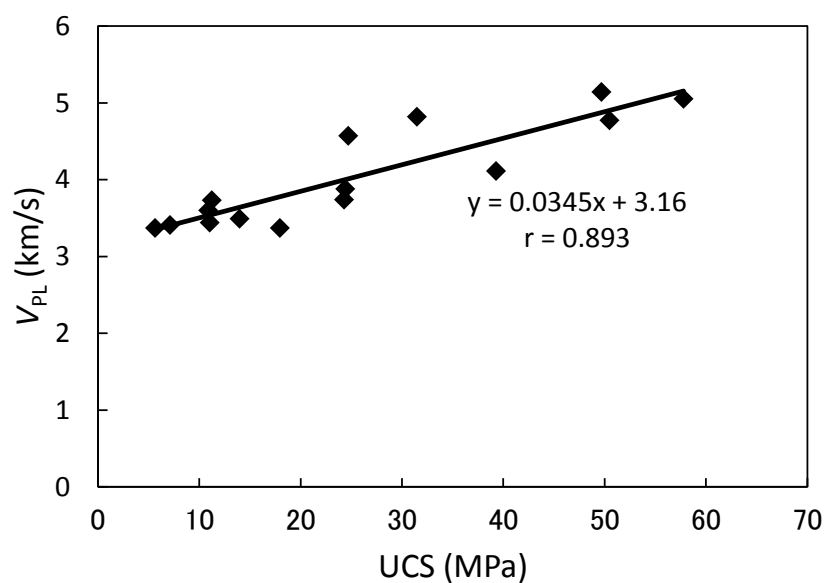


図 3.12 UCS と V_{PL} の関係

3.4.3 原位置試験と室内試験の物性間の相関関係

原位置と室内の両方で実施した V_P について、原位置試験と室内試験の物性間の相関関係は以下のとおりである。

図 3.13 は、原位置での P 波速度 V_{PF} と室内での P 波速度 V_{PL} の関係を示している。なお、 V_{PF} は 3 つの試験箇所における V_{PFP} と V_{PFO} の 6 つの値で、 V_{PL} は湿潤状態における各供試体の値とした。そして、調査地点ごとに V_{PF} と V_{PL} それぞれの最大値、最小値で囲まれる範囲を求め、 V_{PF} と V_{PL} に相関がみられるか検討した。 V_P についての原位置試験と室内試験の相関は調査地点によって異なり、調査地点 M、G については相関を有することがわかった。一方、調査地点 A で V_{PF} と V_{PL} の相関が認められない原因は、ビーチロックの不均質性の影響が最も顕著に表れたためであると思われる。そのため、今後は同調査地点のサンプル数を増やして、 V_{PF} と V_{PL} の相関関係をさらに検討していく必要がある。

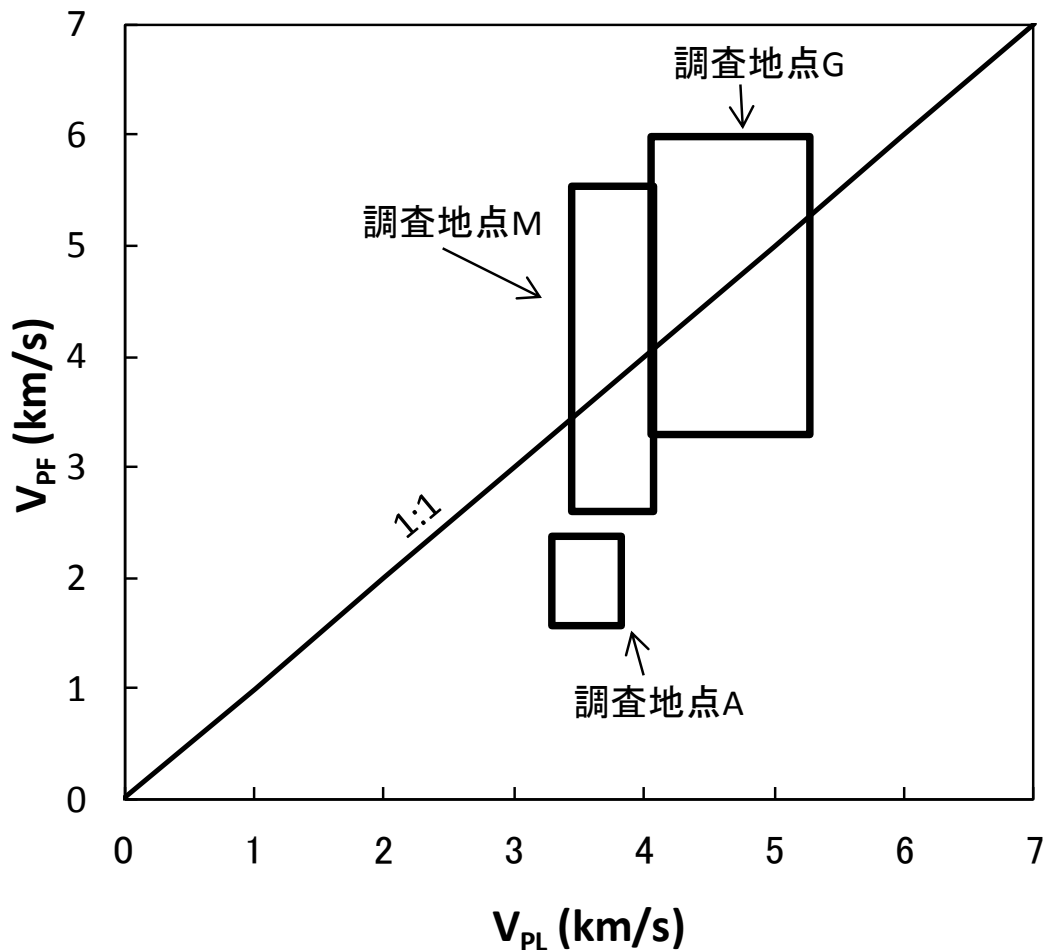


図 3.13 V_{PF} と V_{PL} の関係

3.5 結言

本章では、試験データが非常に不足しているビーチロックの物理・力学特性および得られた諸試験物性間の相関関係について把握するとともに、それらに関する実験的検討を実施した結果について報告した。試験数としては決して十分とはいえないが、本研究によって沖縄県 4 地点および石川県 1 地点のビーチロックに関する物理・力学特性の一部を大略把握することができたと考えられる。

本論文で得られた主な知見をまとめると、以下に示すとおりである。

- ビーチロックの物理学特性について、湿潤状態における密度は、調査地点 A, M, G でそれぞれ $2.06 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$, $1.97 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, $2.47 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ であった。また、含水比はそれぞれ $11.1 \pm 1.3 \%$, $25.4 \pm 0.5 \%$, $3.7 \pm 0.3 \%$ であった。
- ビーチロックの力学特性について、湿潤状態における一軸圧縮強さ UCS は、調査地点 A, M, G でそれぞれ $11.14 \pm 4.50 \text{ MPa}$, $19.91 \pm 7.68 \text{ MPa}$, $42.23 \pm 12.64 \text{ MPa}$ であった。また、P 波速度(室内試験)はそれぞれ $3.50 \pm 0.14 \text{ km/s}$, $3.69 \pm 0.22 \text{ km/s}$, $4.74 \pm 0.37 \text{ km/s}$ であった。
- ビーチロックの力学特性について、調査地点 S, W は他の 3 地点と異なり、露頭しているビーチロックだけではなく固結の程度が弱い土中のビーチロックが確認できた。針貫入試験によって求めた推定 UCS は、調査地点 S および W でそれぞれ $23 \pm 6.4 \text{ MPa}$ (露頭しているビーチロック), 3.4 MPa (土中のビーチロック), および, $2.0 \pm 0.6 \text{ MPa}$ (露頭しているビーチロック), $0.9 \pm 0.4 \text{ MPa}$ (土中のビーチロック) であった。
- UCS q_u に対する密度、含水比、50 %ヤング率、50 %ポアソン比、P 波速度、S 波速度の相関性の大小を比較したところ、P 波速度 V_{PL} が最も相関が高かった。なお、 q_u と V_{PL} の間には $V_{PL} = 0.0345 q_u + 3.16$ (相関係数 r は 0.893) なる関係がみられた。

参考文献

- 3.1) Voudoukas, M. I., Velegrakis, A. F., Plomaritis, T. A., 2007, Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, *Earth-Science Reviews*, 85, pp. 23-46.
- 3.2) 小暮哲也, 2009, 八重島諸島・黒島および竹富島に分布する琉球石灰岩の物理・力学的性質, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 10, p.62.

第4章 ビーチロックの形成機構に関する考察

4.1 緒言

本章では，ビーチロックを模擬した人工岩を作製する上で重要な情報となるビーチロックの形成機構について考察することを目的として，前章で対象とした固結の程度が異なるビーチロックを有する沖縄県名護市済井出（調査地点 S）と石川県輪島市渋田町（調査地点 W）の両地点のビーチロックおよびその周辺環境を対象に，菌数測定，元素分析，鉍物分析，水質分析を実施した。

4.2 方法

4.2.1 菌数測定

両地点において，海水，ビーチロック，ビーチロック周辺の未固結堆積物（主に砂や貝殻片等）を，それぞれ滅菌済みの遠沈管に採取して実験室に持ち帰り，4℃で冷蔵保存した。その後，室内にて各試料 1.0 g をオートクレーブ滅菌した人工海水（八州薬品，アクアマリン）および生理食塩水 9 mL と混ぜ合わせ，その上澄み液 10 μ L を ZoBell2216E 寒天培地（海洋細菌用）および標準寒天培地（一般細菌用）に添加した。また，これらの土壌希釈液の上澄み液を，それぞれの同溶媒を用いて 10¹，10²，10³，10⁴ 倍に希釈し，各培地に添加した。さらに，25℃の恒温槽で両培地を 7 日間養生した後，平板法によりコロニー数を計測した。なお，生理食塩水，ZoBell2216E 寒天培地，標準寒天培地の各組成を，表 4.1～4.3 にそれぞれ示す。

表 4.1 生理食塩水の配合（溶媒：蒸留水）

Reagent	Content(g/L)
Polypeptone	1.0
NaCl	8.5

表 4.2 ZoBell2216E 寒天培地（溶媒：人工海水）

Reagent	Content(g/L)
Polypeptone	5.0 g
Yeast extract	1.0 g
FePO ₄	0.1 g
Agar	15.0 g
pH	7.6～7.8

表 4.3 標準寒天培地（溶媒：蒸留水）

Reagent	Content(g/L)
Polypeptone	5.0 g
Yeast extract	2.5 g
Glucose	1.0 g
Agar	20.0 g

4.2.2 元素分析および SEM 観察

両地点における固結の程度が異なるビーチロックおよびビーチロック周辺の未固結堆積物を試料として室内に持ち帰り、蛍光 X 線分析装置（リガク社製，EDXL300，以下 XRF）を用いて元素分析を行った。また，試料表面の微視的な観察と元素分析を行うため，走査型電子顕微鏡（島津製作所製，SUPERSCAN SS-550，以下 SEM）とエネルギー分散型 X 線分析装置（島津製作所製，SEDX-500，以下 EDX）を使用した。なお，元素分析に用いたビーチロック試料は，針貫入試験を実施した各測定箇所から採取したものを用いた。

4.2.3 鉱物分析

前記 4.2.2 項と同じ試料に対し，X 線回折装置（リガク社製，MultiFlex 2kW）により鉱物分析を行った。なお，各試料はボールミルによって粉砕したものを使用した。測定条件は，X 線源に Cu-K α 線を用い，管電圧 40 kV，管電流 40 mA，発散スリット 0.5°，散乱スリット 0.5°，受光スリット 0.3 mm，走査範囲 5～70° とした。

4.2.4 水質分析

両地点の海水と調査地点 W のビーチロック周辺の湧水を対象とする水質分析を実施した。なお，調査地点 S のビーチロック周辺には湧水がみられなかった。調査地点 S と調査地点 W では分析対象のイオンが異なるため，調査地点 S の海水はイオンクロマトグラフ（DIONEX 製，ICS-1000）を用いて Na⁺，Mg²⁺，K⁺，Ca²⁺，Cl⁻，SO₄²⁻の各濃度について，調査地点 W の海水および湧水は ICP - AES（島津製作所製，ICPE - 9000）を用いて Cl⁻を除いた上記の各イオンに加えて Al³⁺，SiO₂を含めた各濃度について測定した。

4.3 結果

4.3.1 菌数測定

調査地点 S，W の各試験箇所において，測定した菌数の結果を表 4.4，表 4.5 に示す。海洋細菌用と一般細菌用の両培地で得られた菌数を比較すると，すべての試験箇所に共通して海洋細菌用の培地の方が多い。また，調査地点 S の海洋細菌用および一般細菌用の両培

地で得られたビーチロック中の菌数は、 $410 \times 10^4 \sim 460 \times 10^4$ CFU/mL および $14 \times 10^4 \sim 45 \times 10^4$ CFU/mL，調査地点 W では $7.7 \times 10^4 \sim 13 \times 10^4$ CFU/mL および $3.0 \times 10^4 \sim 6.5 \times 10^4$ CFU/mL であった。通常の地盤は $10^7 \sim 10^9$ の微生物を含んでいる^{4.1)}ため，通常の地盤の菌数と比べると両地点ともに少ない傾向がみられた。

表 4.4 調査地点 S の針貫入試験（前章より引用）と菌数測定の結果

Measurement point	Needle penetration test		Microbial population count	
	N_p N/mm	Estimated UCS MPa	Marine 10^4 CFU/mL	Viable 10^4 CFU/mL
Seawater	—	—	1.3	0
Exposed beachrock (P_{S1})	80	27	410	45
Buried beachrock (P_{S3})	8.9	3.4	460	14
Sand (P_{S4})	—	—	500	5.4

表 4.4 調査地点 W の針貫入試験（前章より引用）と菌数測定の結果

Measurement point	Needle penetration test		Microbial population count	
	N_p N/mm	Estimated UCS MPa	Marine 10^4 CFU/mL	Viable 10^4 CFU/mL
Seawater	—	—	0.68	0
Exposed beachrock (P_{W9})	8.8	3.3	13	3.0
Buried beachrock (P_{W36})	1.1	0.5	7.7	6.5
Sand (P_{W49})	—	—	3.0	0.8

4.3.2 元素分析および SEM 観察

調査地点 S および調査地点 W について，XRF による露頭しているビーチロック，土中のビーチロック，未固結堆積物の各試料の元素分析結果（酸化物表示）を図 4.1 および図 4.2 に示す。図 4.1 より，調査地点 S のビーチロックおよび未固結堆積物は CaO が主成分であることがわかる。また，MgO 含有率の増加および SiO₂ 含有率の低下に伴って，推定 UCS が増加する傾向がみられた。一方，調査地点 W のビーチロックおよび未固結堆積物の構成元素（図 4.2 参照）は，調査地点 S の構成元素とは大きく異なっており，Al₂O₃，SiO₂，K₂O，CaO，FeO 等の複数の元素により構成されていた。また，調査地点 W における元素含有率と推定 UCS の相関は顕著でなかった。

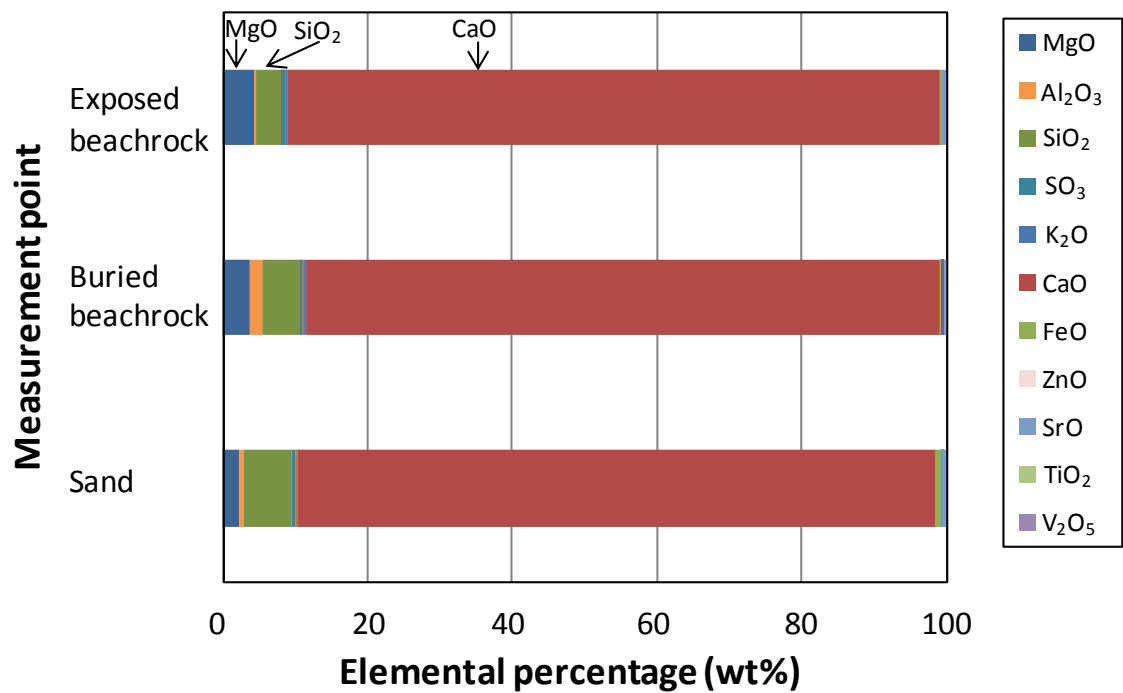


図4.1 XRFによる各試料の元素分析結果（調査地点S）

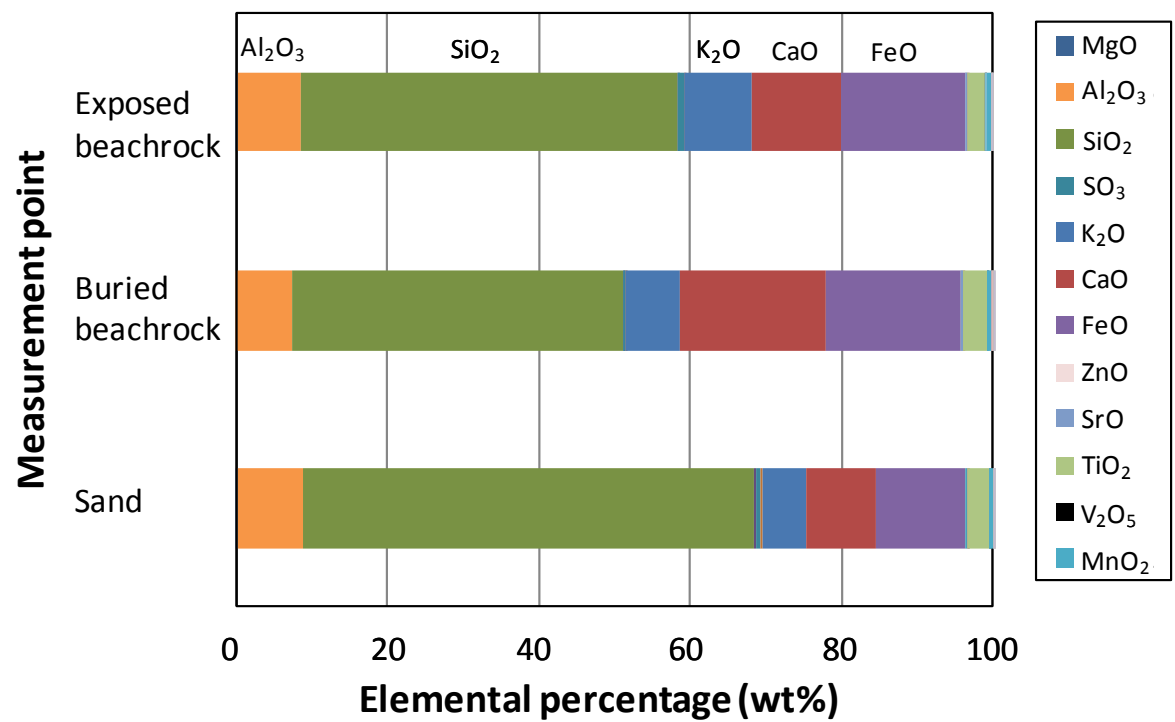


図4.2 XRFによる各試料の元素分析結果（調査地点W）

次に、調査地点 S の露頭しているビーチロックの試料表面の代表的な SEM 画像および EDX による元素分析の結果を図 4.3, 図 4.4 に示す。なお、図 4.4 は、図 4.3 中の 4 点（丸印）PO1～PO4 に対して実施した分析結果である。図 4.3, 図 4.4 より、試料表面は PO1～PO3 のように MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO, FeO を含んだ微粒子が母材の砂粒子上にみられる部分と PO4 のように CaO および MgO を主成分とする母材の砂粒子が露頭している部分がみられた。なお、母材の砂粒子によっては、CaO のみを主成分とするものもみられた。また、土中のビーチロックの表面観察および元素分析の結果は露頭しているビーチロックと同様の傾向であったが、未固結堆積物の表面にはビーチロック表面に見られるような微粒子はみられなかった。

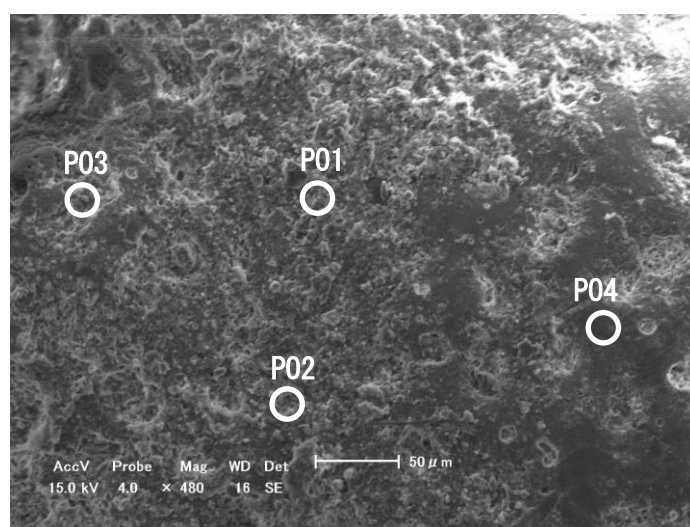


図 4.3 調査地点 S の露頭しているビーチロックの SEM 画像 (×480)

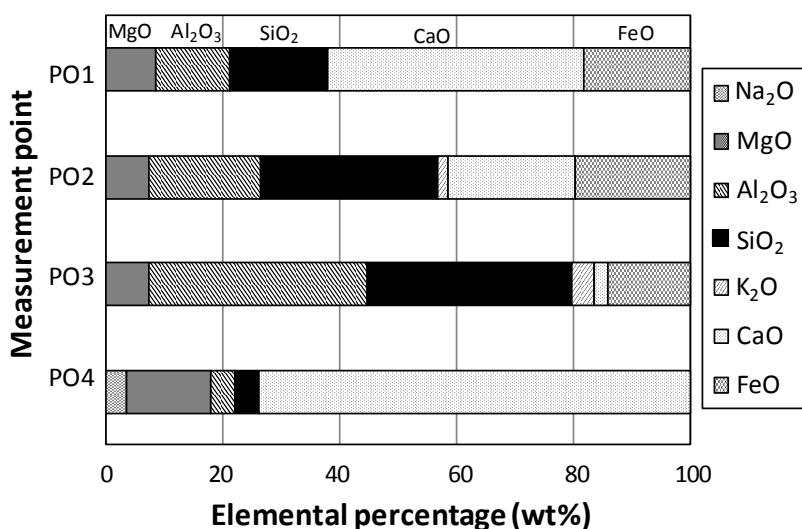


図 4.4 EDX によって求めた図 4.3 中の PO1～PO4 の各元素含有率

一方、調査地点 W については、露頭しているビーチロックの試料表面の SEM 画像の一例を図 4.5 に示す。また、同図中の 4 点（丸印）についての EDX による点分析の結果を図 4.6 に示す。図 4.5 より、PI1 および PI2 が位置する画像中央部を除き、膜状のセメント物質が砂粒子を覆っていることがわかる。これは、小笠原らの報告^{4.2)}と一致している。また、図 4.5 の中央部は、セメント物質が剥がれている部分であると推察される。さらに、図 4.6 より、セメント物質である PI3 および PI4 は、砂粒子である PI1 および PI2 に比べて Al_2O_3 、 SO_3 が占める割合が高い。この Al_2O_3 、 SiO_2 を主成分とするセメント物質は、露頭しているビーチロック、土中のビーチロックに共通して見られたが、未固結堆積物の試料表面には見られなかった。

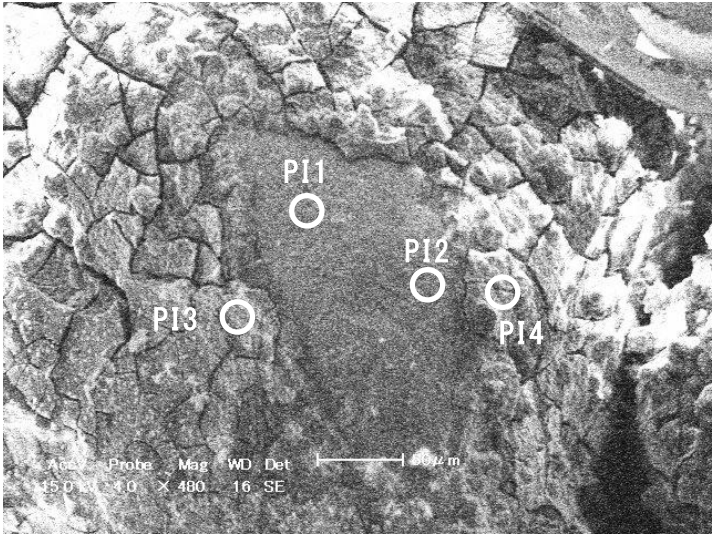


図 4.5 調査地点 W の露頭しているビーチロックの SEM 画像 (×480)

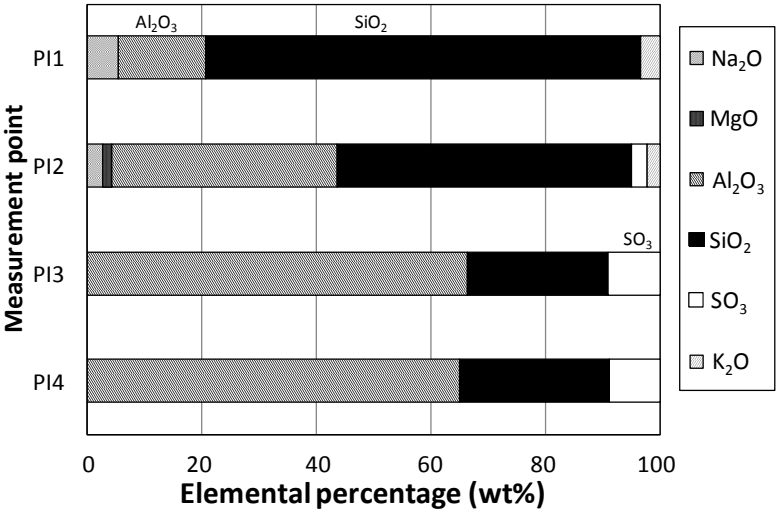


図 4.6 EDX によって求めた図 4.5 中の PI1～PI4 の各元素含有率

4.3.3 鉱物分析

調査地点 S および調査地点 W の露頭しているビーチロック、土中のビーチロック、未固結堆積物の含有鉱物の種類は、固結の程度によらず、地点ごとに共通していた。すなわち、調査地点 S (図 4.7 参照) では Mg calcite (以下、MC と略す), aragonite, quartz に、

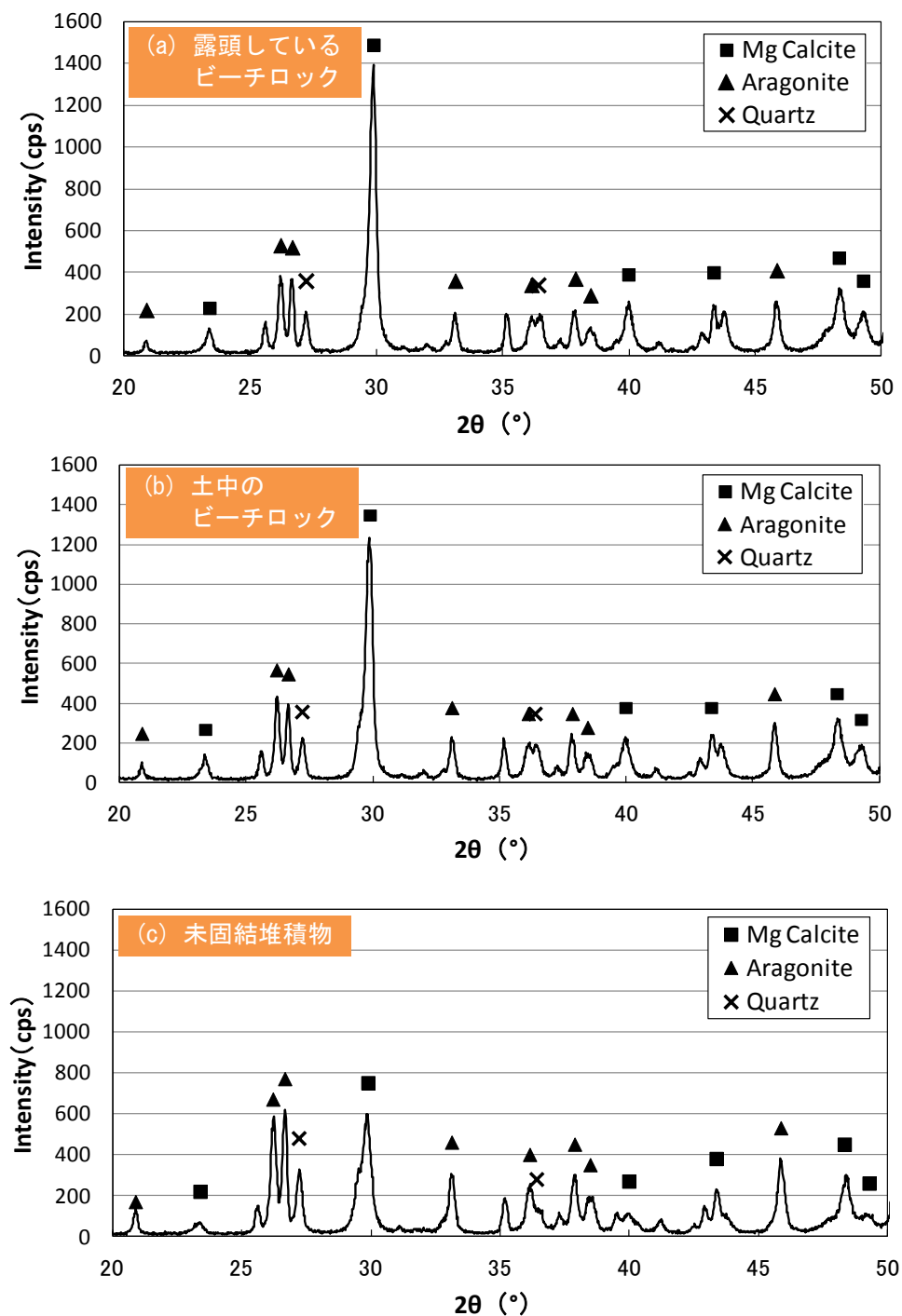


図4.7 調査地点Sの各試料のXRD分析結果

調査地点 W (図 4.8 参照) では quartz, albite, calcite, montmorillonite に、それぞれピークが見られた。なお、MC とは、 MgCO_3 を含む CaCO_3 の多形体のことであり、 MgCO_3 の含有率が 1.2 wt% より大きいものを High Mg calcite (以下、HMC と略す) といい、1.2 wt% より小さいものを Low Mg calcite (以下、LMC と略す) という^{4.3)}。また、図 4.7

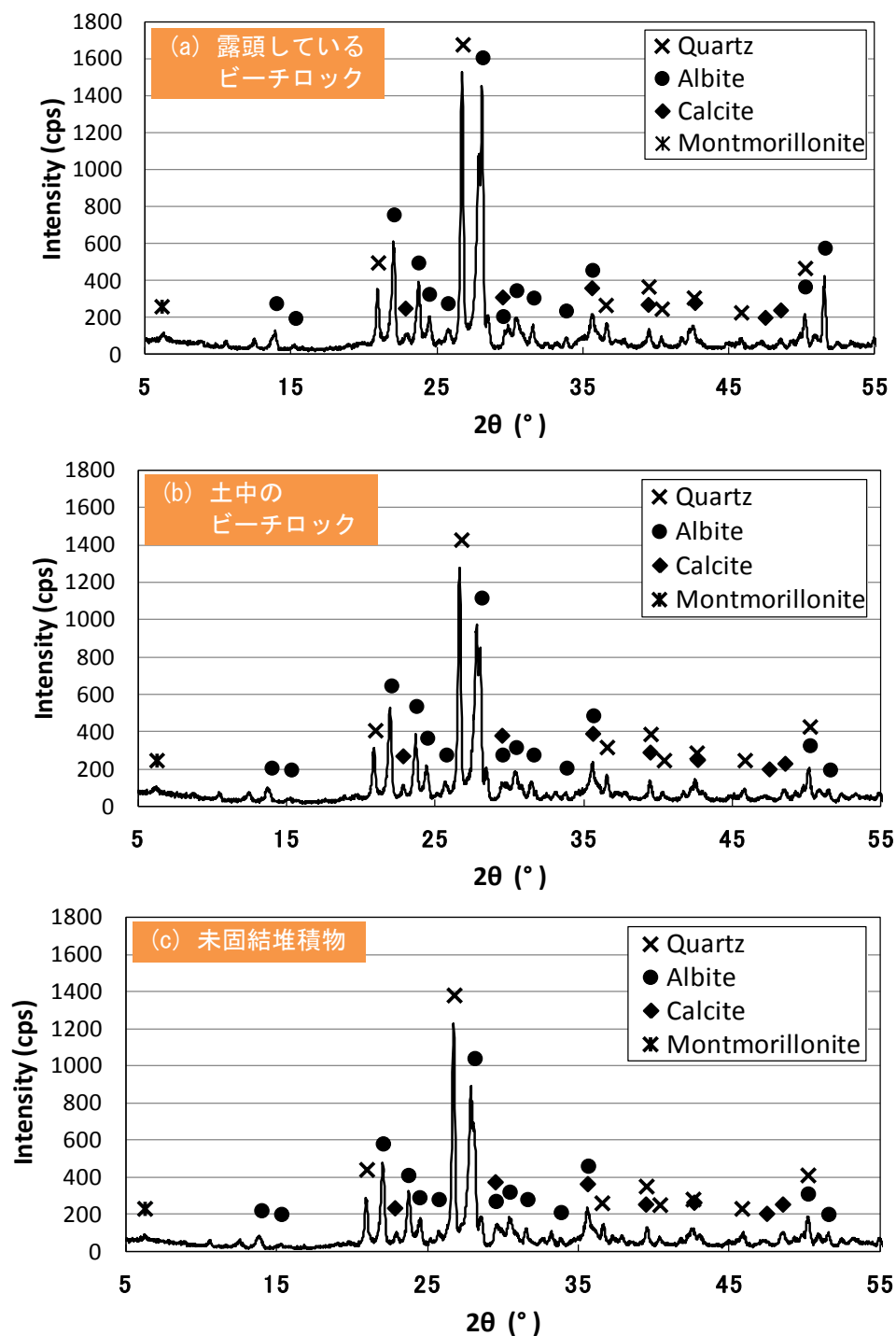


図4.8 調査地点Wの各試料のXRD分析結果

の(a)～(c)は calcite よりも MC^{4.4), 4.5)}と 2θ のピーク位置がいずれも類似していたため、calcite ではなく MC であると判断した。

4.3.4 水質分析

両地点のビーチロック周辺の水質分析の結果は、表 4.5 のとおりである。なお、同表には比較のため、全海洋平均濃度^{4.6)}を載せている。同表より、調査地点 S の海水の濃度は SO_4^{2-} を除いて概ね全海洋平均濃度と同程度であった。また、調査地点 W の海水は、調査地点 S の海水と同様に全海洋平均濃度に比べて SO_4^{2-} において違いが顕著であったことに加えて、 Na^+ および Mg^{2+} についても全海洋平均濃度や調査地点 S の海水濃度に比べて 20～30 %程度低い傾向がみられた。さらに、調査地点 W の湧水は Al^{3+} 、 SiO_2 の濃度が同地点の海水濃度や全海洋平均濃度に比べて非常に高く、かつ、酸性 (pH 4.7) であった。

表4.5 調査地点S, Wの海水, 調査地点Wの湧水の水質分析結果
(全海洋平均濃度^{4.6)}を比較のために記載)

Site	S	W		World
Sample	Seawater (ppm)	Seawater (ppm)	Spring (ppm)	Seawater (ppm)
Na^+	11000	7420	125	10800
Mg^{2+}	1330	1010	64	1300
K^+	486	443	8	390
Ca^{2+}	348	412	112	410
Al^{3+}	—	0	15.4	0.0003
Cl^-	20700	—	—	19400
SO_4^{2-}	2740	1570	392	8980
SiO_2	—	0	32.5	2.5
pH (—)	7.9	8.3	4.7	—
EC (mS/cm)	51	70	6.3	—

4.4 考察

4.4.1 セメント物質の同定

調査地点 S のビーチロックに関しては, 図 4.3, 図 4.4 の結果からわかるように低倍率(480 倍)の EDX 測定では複数の元素が不均質にみられるため, セメント物質を特定することが難しい。そこで, 高倍率(1200 倍および 4800 倍)で SEM, EDX による分析を実施した。その代表的な分析結果を, 図 4.9, 図 4.10 に示す。SEM 画像より, ビーチロックの表面(図

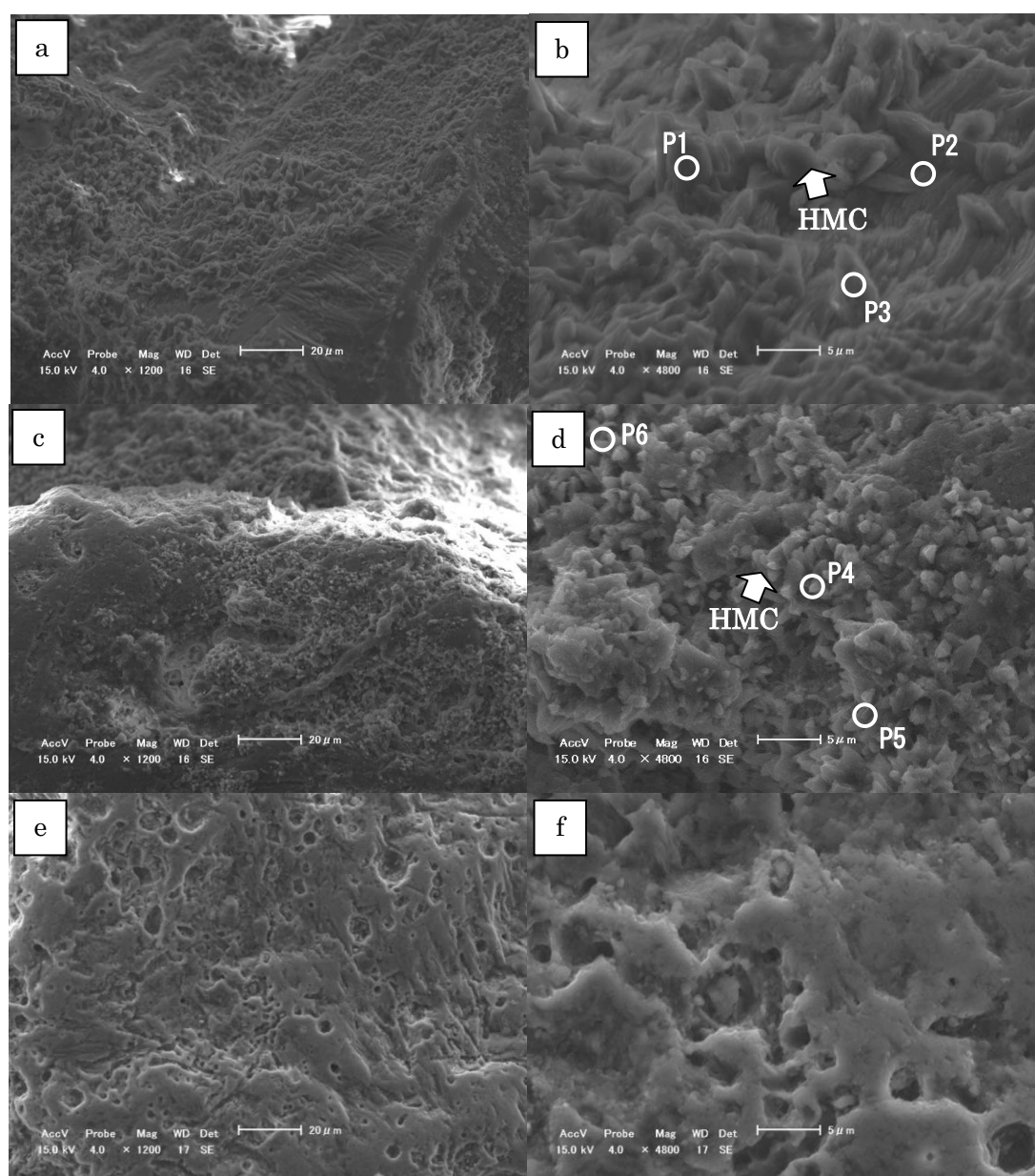


図 4.9 調査地点 S の各試料の SEM 画像 (a, b: 露頭しているビーチロック (×1200, ×4800), c, d: 土中のビーチロック (×1200, ×4800), e, f: 未固結堆積物 (×1200, ×4800))

4.9 (a)～(d)) にはビーチロック周辺の未固結堆積物中の砂粒子表面 (図 4.9 (e), (f)) にはほとんど存在しない直径およそ $10\ \mu\text{m}$ 以下の微粒子 (図 4.9 (b), (d)中の矢印) が付着しており, この微粒子は直径およそ $100\ \mu\text{m}$ 以上の母材となる砂粒子の間にも存在していたため, セメント物質である可能性がある。この微粒子の形状は A. E. Erginal. et al.^{4.7)}が示す HMC の形状と類似している。HMC をセメント物質とするビーチロックは海外の 16 地点で報告されており, これらのセメント物質としての HMC の特定方法はビーチロック片に対して実施した SEM および EDX での分析による結晶形および元素含有率の結果を合わせて特定する方法^{4.7-4.9)}と薄片の観察結果によって特定する方法^{4.10)}がある。

そこで, 本論文では前者の SEM および EDX による結果から特定する方法によりセメント物質を特定することとした。SEM での結果は前述のとおり, 本地点のビーチロックのセメント物質は HMC の結晶と類似していたため, 続いて EDX の結果について考察する。EDX による元素分析の結果, ビーチロック表面上の微粒子は C, O, Mg, Ca を主成分としていることがわかる (図 4.10 参照)。また, 図 4.10 の Mg の含有率 (重量パーセント) を MgCO_3 の含有率 (重量パーセント) に換算したところ, 露頭しているビーチロック, 土中のビーチロックでそれぞれ 16～18 wt%, 12～14 wt%であった。なお, 本報告で EDX 分析に使用した試料は, すべてカーボン蒸着したものであるため, C の含有率は図 4.10 のものより実際は小さく, C 以外の元素含有率は大きくなる。したがって, MgCO_3 の含有率は, 実際には前述した割合よりも高い。

以上のことから, 本地点のビーチロックのセメント物質の MgCO_3 の含有率は 1.2 wt% より大きく, また主要な元素は C, O, Ca であるため, 4.3.3 項で前述した HMC の定義を満たしていることがわかる。したがって, 以上の SEM, EDX の結果より, 調査地点 S の本報告で対象としているビーチロックのセメント物質は, HMC であるといえる。

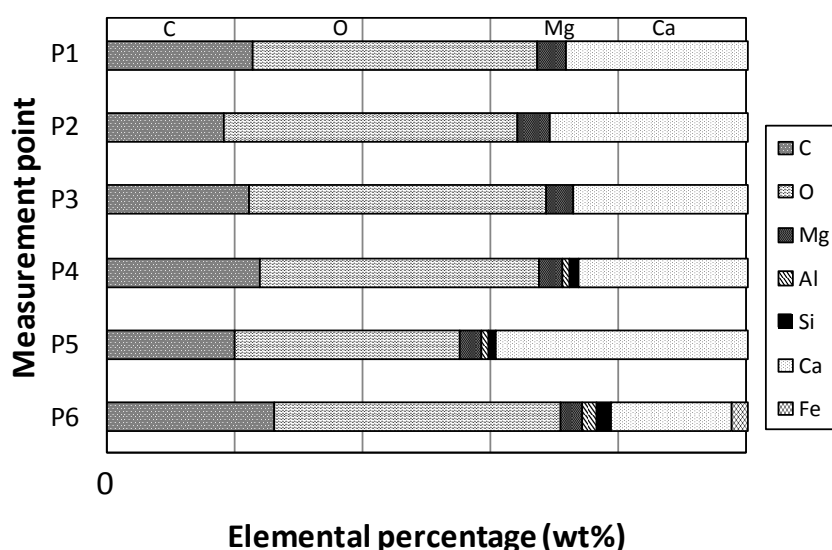


図 4.10 EDX によって分析した図 4.9 の P1～P6 の各元素含有率

一方、調査地点 W のビーチロックに関しては、調査地点 S のビーチロックのセメント物質とは形状が異なり、ひびわれた膜状のものが砂粒子を覆っていた（図 4.5 参照）。また、EDX の結果より、セメント物質の主要元素は Al および Si であった。さらに、XRD の結果（図 4.8 (a), (b)）に関しては、Al と Si の両方を含むビーチロックの鉱物は Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) と Montmorillonite ($(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) であった。Albite は高温で形成される^{4.11)}ため、常温で形成されるビーチロックのセメント物質としては考えにくく、Montmorillonite に関してもビーチロックと未固結堆積物のピーク強度およびピークの位置に違いは見られないため、セメント物質ではないと考えられる。以上を踏まえると、調査地点 W のビーチロックのセメント物質は Al と Si を主成分とする非晶質であると推定される。

そこで、セメント物質の Al と Si の比率やセメント物質が非晶質であることを確認するために、ビーチロック試料に対して水簸を行うことで母材である砂粒子とセメント物質を分離し、セメント物質に対して元素分析、鉱物分析を行った。その方法および結果は、次のとおりである。ビーチロック試料を母材の砂粒子を砕かないように注意しながら押しつぶして粒子ごとに粗く分け、乾燥した後、試料 10 g を 400 mL の蒸留水の中に入れて超音波洗浄器を用いて 5 分間攪拌した。攪拌後、懸濁液中の微粒子（主にセメント物質）と沈澱している粒子（主に砂粒子）を別々に回収、乾燥し、SEM および EDX により表面観察および元素分析を実施した。その結果、懸濁液中の微粒子は、形状、元素（図 4.11 参照）ともにビーチロックのセメント物質、すなわち、ひびわれた膜状のもの（図 4.5, 図 4.6 参照）と類似しており、構成元素である Al, Si, S のモル比はおおよそ 6 : 3 : 1 であった。また、鉱物分析の結果、鉱物ピークは見られなかったため、非晶質であるといえる。したがって、調査地点 W のビーチロックのセメント物質は、Al と Si を主成分とする非晶質であると考えられる。

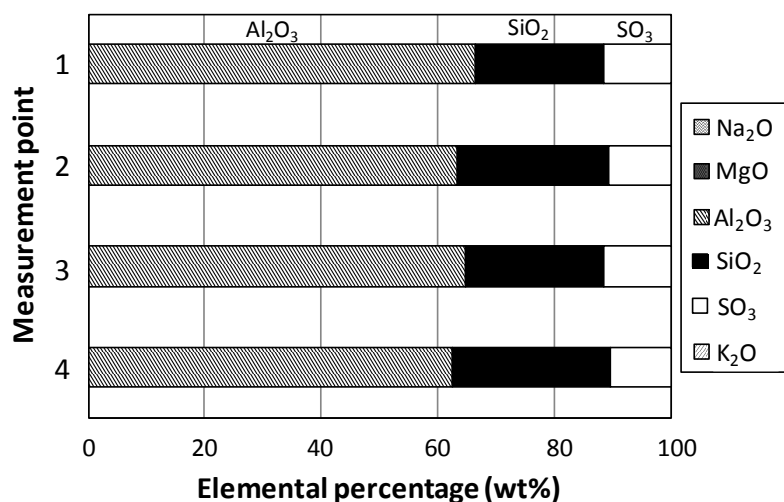


図 4.11 水簸後の懸濁液中に含有する微粒子の元素含有率（EDX 分析）

ここで、これまでに報告されている国内外のビーチロックのセメント物質^{4.2), 4.3), 4.8), 4.12)}を図 4.12 に示す。同図より、ビーチロックが多く分布するエーゲ海周辺、インド南部、グレートバリアリーフ、西インド諸島、ブラジル東部の 5 つの分布域をすべて含んだ国内外の 77 地点のビーチロックのセメント物質は、77 地点中 75 地点において CaCO_3 の多形体を主成分とすることが報告されている。ただし、この 75 地点の中には、その他の元素を主成分とする試料も一部見つかっており、例えば Turkey の Bozcaada Island のビーチロックのセメント物質は HMC を主成分とするものの、同地点の一部のビーチロック試料のセメント物質は Si を主成分とすることが報告されている^{4.8)}。また、 CaCO_3 の多形体以外を主成分とする地点は、小笠原ら^{4.12)}により報告されている本調査地点の 1 つと同じ石川県輪島市洪田町のミツ子浜 (Al と Si を主成分とする) と New Zealand の Lake Taupo (silica を主成分とする)^{4.14)}の 2 地点のみである。したがって、HMC すなわち CaCO_3 の多形体の一つをセメント物質とする調査地点 S のビーチロックのセメント物質は、国内外の多くのセメント物質と同様であるといえる。一方、Al と Si を主成分とする調査地点 W のビーチロックのセメント物質は、世界的に見ても稀なケースであることが示された。そのため、調査地点 S のビーチロックをモデルにして開発した人工岩の方が、調査地点 W のものに比べて適用先が広く、将来性や発展性があると考えられる。

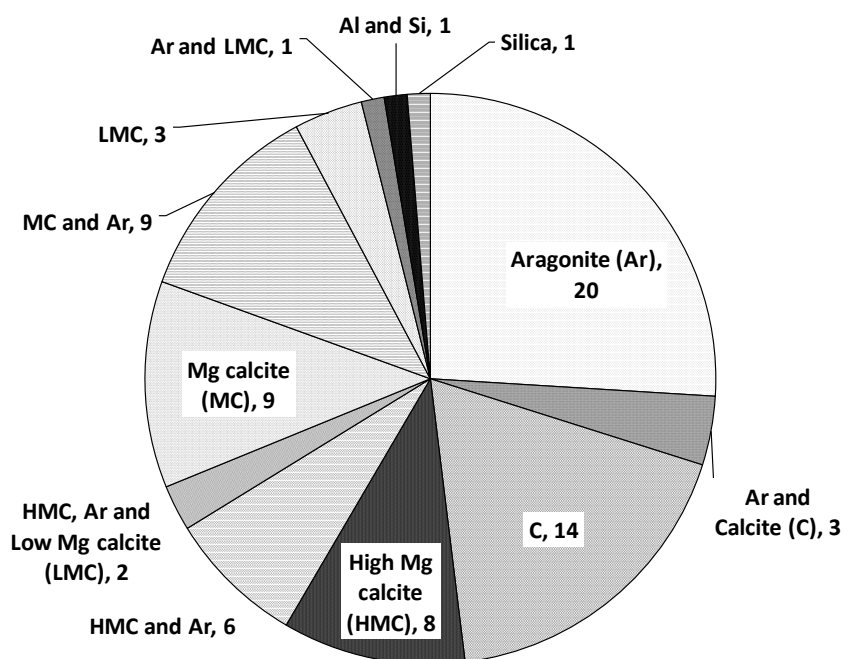


図 4.12 国内外のビーチロックのセメント物質とその報告数^{4.2), 4.3), 4.8), 4.12)}

4.4.2 形成機構に関する考察

前項で、調査地点 S のビーチロックのセメント物質は HMC であることを示した。図 4.12 より、HMC をセメント物質とするビーチロックは、筆者が調べた限りでは本地点を除いて 16 地点に存在している。この 16 地点のビーチロックの形成機構を図 4.13 にまとめた。同図より、形成機構に関する情報が記載されているのは 13 地点であり、そのうち海水からの析出および海水の蒸発を起源とするものが 10 地点、海水と淡水の混合、淡水からの析出、生物による影響や物理化学的な影響を起源とするものが各 1 地点ずつであった。そこで、本論文では最も報告の多い海水からの析出による影響と、菌数測定の結果より可能性のある微生物による影響（生物による影響の一つ）について議論する。また、これら以外の影響については、今後の課題とする。

まず、海水からの析出による影響についてであるが、Y. Kitano. et al.^{4.13)}は有機物の必要性を報告している。すなわち、 Mg^{2+} を含有している溶液中では calcite ではなく aragonite が優先的に生成されるが、海水と同程度の Ca^{2+} 濃度である $Ca(HCO_3)_2$ の溶液 (Ca^{2+} , 360 ppm) に Mg^{2+} と有機物である citrate や malate を含有している場合、実験によって HMC が生成されると示している。なお、 Mg^{2+} や上記の有機物の含有率が高いほど、HMC の $MgCO_3$ の含有率は高くなる傾向がみられた。また、S. Raz et al.^{4.14)}は、 Mg/Ca のモル比が 1 もしくは 4 以上の溶液中において、多くの有機物が HMC を含んだ骨を形成すると報告している。本調査地点の海水 (表 4.5 参照) の Mg/Ca のモル比はおよそ 6.3 であるため、S. Raz et al.によれば Mg/Ca 比は HMC の形成条件を満足している。さらに、有機物に関しては、本調査地点の未固結堆積物中には海藻、貝殻、サンゴ礁、微生物等の有機物が存在している。そのため、これらの有機物から citrate や malate が海水に溶出することで、

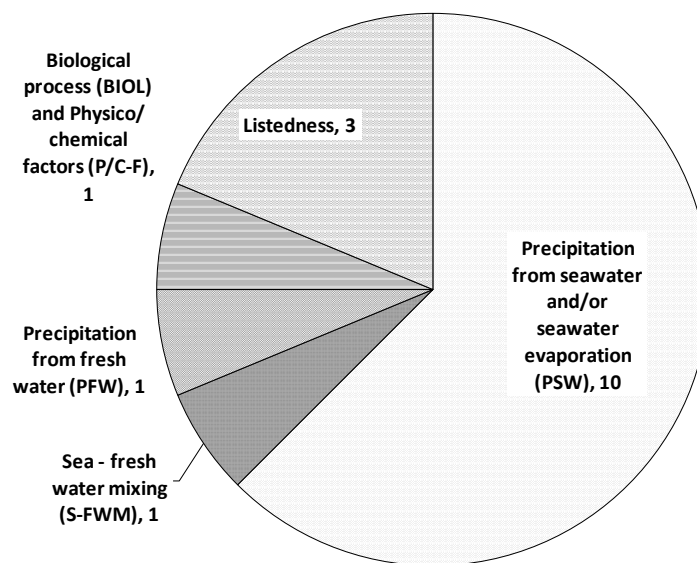
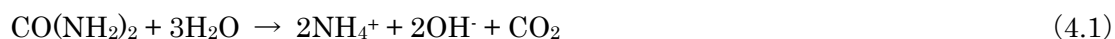


図 4.13 high Mg-calcite をセメント物質とするビーチロックの形成機構^{4.3), 4.8), 4.13)}

HMC が析出し、砂粒子同士を膠結してビーチロックが形成される可能性がある。なお、未固結堆積物から citrate や malate をはじめとする有機物が実際に溶出しているかについては、今後の検討課題である。

次に、微生物の影響について検討するため、本調査地点の未固結堆積物中に含まれる微生物を対象としてウレアーゼ活性試験を実施した結果、ウレアーゼ活性を有する微生物（尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ の加水分解を促進する微生物）が 7 株見つかった（詳細は、後述 5.3.1 項に記載）。したがって、以下の式(4.1)～(4.3) ^{4.15)}のような一連の反応によって CaCO_3 が析出し、その際に海水由来の MgCO_3 が CaCO_3 とともに HMC として析出する可能性がある。なお、尿素は、哺乳類、両生類、魚類の尿や、魚類の死後の分解等 ^{4.16)}によって供給されと考えられる。



生物 ^{4.17)}、その中でも微生物 ^{4.18), 4.19)}がビーチロック形成に寄与しているといった説はいくつか報告されているが、ウレアーゼ活性を有する微生物をビーチロックまたはその周辺部から発見したという報告は、筆者が調べた限り存在しない。

一方、調査地点 W のビーチロックのセメント物質は、Al と Si を主成分とする非晶質であった。最初に、このセメント物質がどのようにして析出するのかを考えることで、本調査地点のビーチロックの形成機構について考察する。表 4.5 より、本調査地点の湧水は Al^{3+} の濃度が 15.4 ppm と非常に高く、また pH は 4.7 と酸性であった。Al は、pH4.0 以下であると、ほとんどが Al^{3+} として溶解し、pH4.0 以上では Al^{3+} から、 AlOH^{2+} 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ などの比率が増加し、さらに pH が上昇すると、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ やそのポリマーとなり段階的に不溶化し、アルカリ環境で再び溶解する ^{4.20)}ため、上記の湧水が海側に流入して海水と潮間帯で混ざり合うことで湧水の pH が中性付近まで上昇し、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ として析出すると考えられる。さらに、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ が析出する際に湧水や海水中の SiO_2 や SO_4^{2-} が一緒に取り込まれたため、本調査地点のビーチロックのセメント物質は Al, Si, S で構成されていると推察される。

以上より、両地点の形成機構の概要は次のとおりであると考えられる。なお、両地点の形成機構の模式図を、図 4.14、図 4.15 にそれぞれ示す。

調査地点 S のビーチロックに関しては、海水の蒸発やウレアーゼ活性を有する微生物による尿素分解反応等によって CaCO_3 が析出する際に、潮間帯の有機物の影響によって MgCO_3 が CaCO_3 とともに HMC として析出し、砂粒子同士を膠結することでビーチロックが形成されたと考えられる。

一方、調査地点 W のビーチロックは、海水より高濃度の Al^{3+} を含む酸性の湧水が陸側から海側に流れていき、海水と潮間帯で混ざり合うことで湧水の pH が中性付近まで上昇する

ことで $\text{Al}(\text{OH})_3$ が析出する。その際、湧水や海水中の SiO_2 や SO_4^{2-} が一緒に取り込まれ、 Al と Si を主成分とする非晶質のセメント物質が未固結堆積物の砂粒子間で析出し、ビーチ

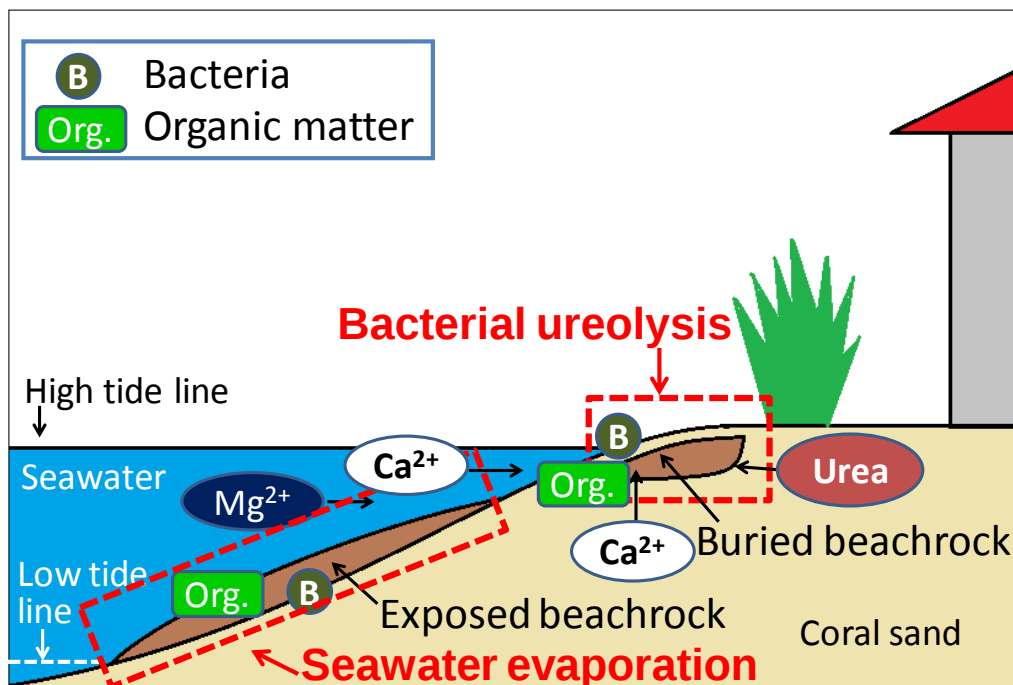


図 4.14 調査地点 S のビーチロック形成機構の模式図

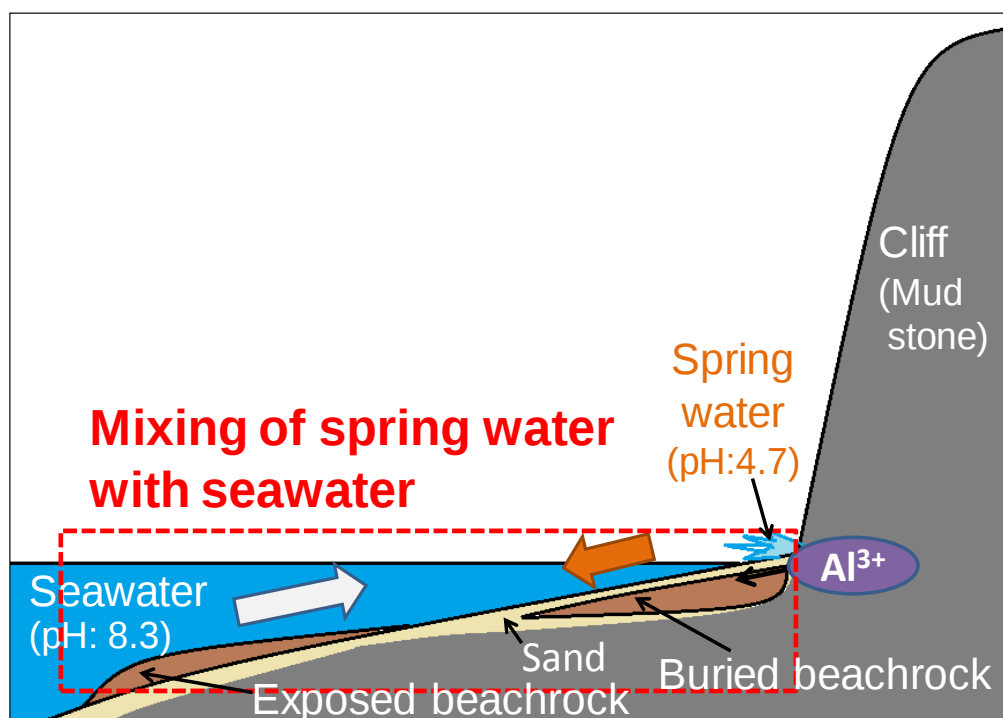


図 4.15 調査地点 W のビーチロック形成機構の模式図

ロックが形成されたと考えられる。

ここで、本調査地点と図 4.12 で示した国内外のビーチロックのセメント物質と形成機構の関係についてまとめたものを図 4.16 に示す。同図より、形成機構は①海水からの析出 (PSW)、②淡水からの析出 (PFW)、③CO₂の脱気による析出 (CO₂-DEG)、④生物学的影響 (BIOL)、⑤海水と淡水の混合 (S-FWM)、⑥物理化学的要因 (P/C-F) の 6 種類であった。これらの 6 つの形成機構に関する説明は前述 2.3.3 項(B)を参照していただきたい。

図 4.16 より、上記 6 種類の形成機構が単一もしくは 2 種類以上組み合わせることでビーチロックが形成されていることがわかる。このように、これまでに報告されている形成機構は多種多様であるが、calcite をセメント物質とするビーチロックは淡水からの析出 (PFW) すなわち淡水由来のものが多く、aragonite や MC (HMC, LMC を含む) をセメント物質とするものは海水由来のものが多く傾向がみられた (図 4.16 参照)。これは、海水

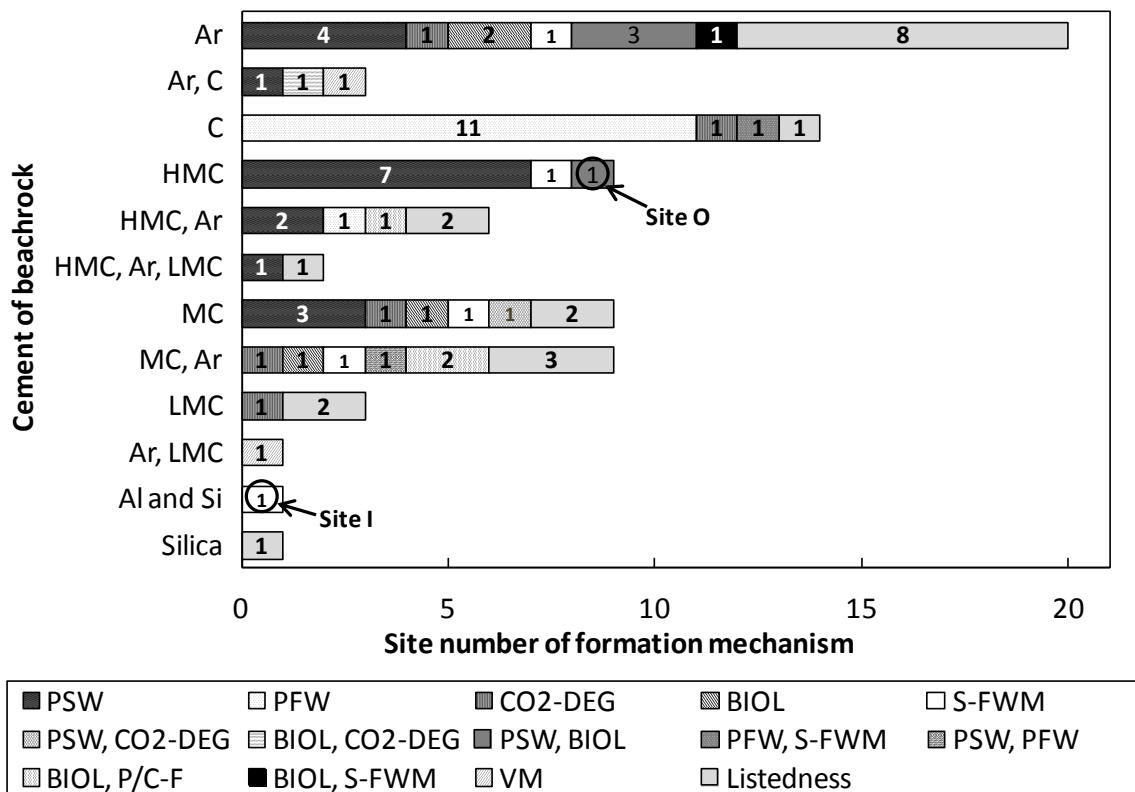


図 4.16 国内外のビーチロックのセメント物質と形成機構の地点数^{4.3), 4.12)}(セメント物質: Ar, Aragonite ; C, Calcite ; HMC, high Mg-calcite ; LMC, low Mg-calcite ; MC, Mg calcite ; Al, Al の元素 ; Si, Si の元素。形成機構: PSW, 海水の蒸発または海水からの析出 ; PFW, 淡水からの析出 ; CO₂-DEG, CO₂の脱気による析出 ; BIOL, 生物学的影響 ; S-FWM, 海水と淡水の混合 ; P/C-F, 物理化学的要因 ; VM, 多様な形成機構)

は Mg を含んでいるために calcite よりも aragonite が生成されやすく、また、MC (HMC, LMC を含む) の生成には Mg の存在が不可欠であるというセメント物質の生成条件と合致している。また、同じく図 4.16 より、形成機構において生物学的な影響がみられるビーチロックは、Ar, HMC, MC をセメント物質とするものであった。さらに、 CaCO_3 の多形体以外をセメント物質とするビーチロックの形成機構に関する報告は、筆者の知る限りでは本論文が初めてであるため、調査地点 W のビーチロックの形成機構に関する知見およびその考察は新規性、独創性が大きいと考えられる。

4.4.3 人工岩作製方法の選定

本章では、沖縄県名護市（調査地点 S）と石川県輪島市（調査地点 W）のビーチロックの形成機構について考察してきた。また、前章では、両地調査点のビーチロックの力学特性を把握した。その結果、調査地点 S のビーチロックは形成機構に微生物が影響している可能性が示された。また、調査地点 S のビーチロックは国内外の多くのビーチロックと同じ CaCO_3 系のセメント物質であり、一軸圧縮強さ（UCS）が調査地点 W のビーチロックよりも大きい値を示した。そのため、生物学的影響、セメント物質、UCS の点で工学的価値がある調査地点 S のビーチロックの形成機構を参考とした固化試験を実施した。

調査地点 S のビーチロック形成機構には、海水の蒸発および微生物による尿素分解反応が寄与している可能性が前節で示された。そこで、以下の海水の蒸発試験および次章で述べる調査地点 S から採取した尿素分解菌を用いた固化試験を実施した。

まず、海水の蒸発試験^{4.22)}について述べる。

試験で用いる砂は、沖縄県読谷村波平の海岸から採取したサンゴ砂であり、これは次章で用いた砂と同じである。試験方法は、まず乾燥状態のサンゴ砂 50 g をメッシュケース（semitec 社製）に加える。その砂試料（幅：約 20 mm，奥行：約 30 mm，高さ：約 30 mm）を、溶液（人工海水（AS）または $\text{AS} + 0.1 \text{ M CaCl}_2$ ）に 10 分間それぞれ浸した。この試験の様子を、図 4.17 に示す。なお、浸漬時はビー玉を用いて嵩増しすることで溶液の使用

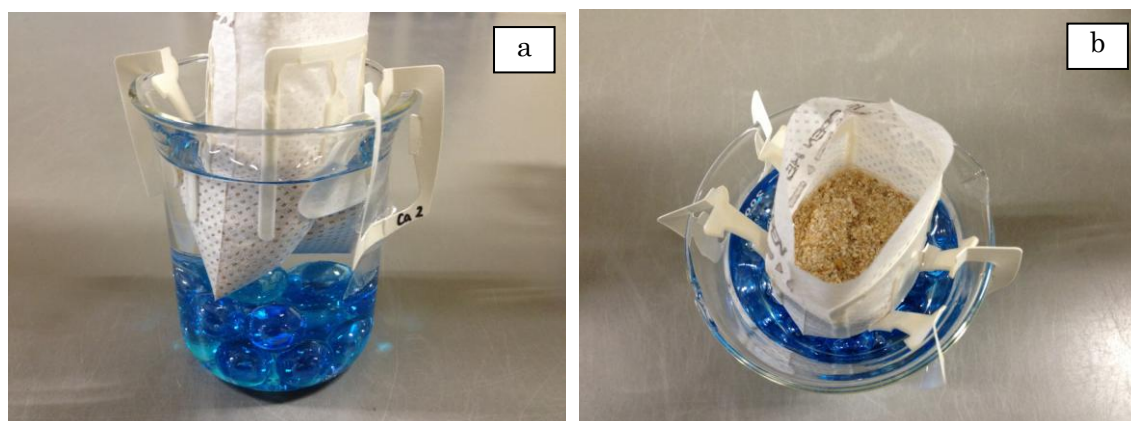


図 4.17 海水蒸発試験の様子（試料の(a) 側面および(b) 上面）

量を節約した。浸漬後、試料の入ったメッシュケースを空のビーカーに移し、60℃の乾燥炉で22時間乾燥させた。乾燥後、試料の入ったメッシュケースをビーカーごと実験室内のデシケーターに移し、2時間静置することで室温に冷ました後、試料の入ったメッシュケースの質量を測定した。そして、再び同様の溶液に浸漬し、乾燥させた。この1日のサイクル（浸漬、乾燥、室内静置、質量測定）を14日間または28日間繰り返した。以上の4ケース、すなわち2種類の溶液×2つの試験期間で各1試料ずつとした。

上記の試験結果である各溶液に浸漬させた各供試体の質量に関する経時変化を、図4.18に示す。同図より、AS + 0.1 M CaCl₂の溶液に浸した供試体の方が、ASに浸した供試体よりも重くなった。これは、AS + 0.1 M CaCl₂の溶液に浸した方が、析出量が増加することであることを示している。蒸発試験終了後（14日後および28日後）に、各試料の入ったメッシュケースを開き、蒸留水で試料を洗った。開封後のケース上の様子を図4.19に示す。同図より、ASに浸した試料（試験期間：14日および28日）は固化していないために洗い流されてしまったが、AS + 0.1 M CaCl₂の溶液に浸した試料（試験期間：14日および28日）は、試料表面すなわちメッシュとの接触面が固化していたために一部は洗い流されずに残った。この固化した試料を図4.20に示す。なお、固化した試料の厚みは約3 mmであった。

したがって、Ca²⁺濃度が人工海水よりも高い方がCaCO₃析出および砂試料の固化が促進されることが示された。しかし、短期間では固化するのは試料表面のみであり、試料全体を固化することができなかった。

一方、尿素分解菌を用いた固化試験では、次章で述べるように同じ試験期間14日間で供試体全体（直径2.5 cm×高さ7 cm）を固化することに成功した。

以上より、尿素分解菌を用いた固化試験の方が短期間でより広い範囲を固化する傾向が示された。そこで次章では、調査地点Sのビーチロック形成機構の一つである微生物の尿素分解作用を利用した固化試験について検討する。

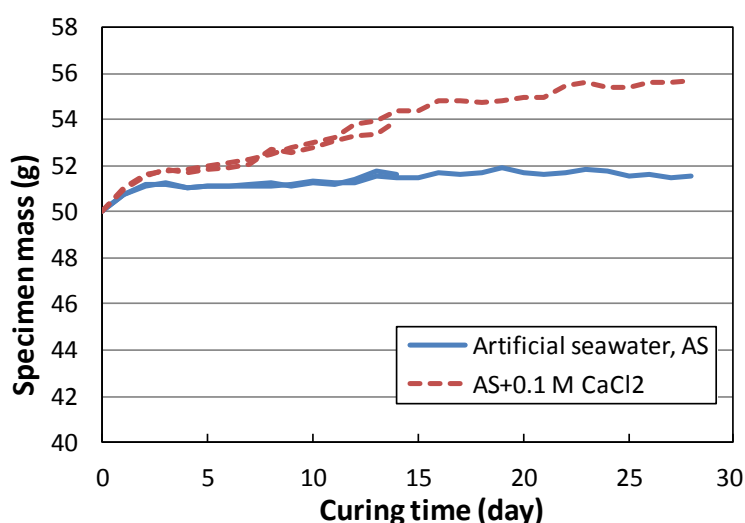


図4.18 各溶液に浸漬させた各供試体の質量に関する経時変化

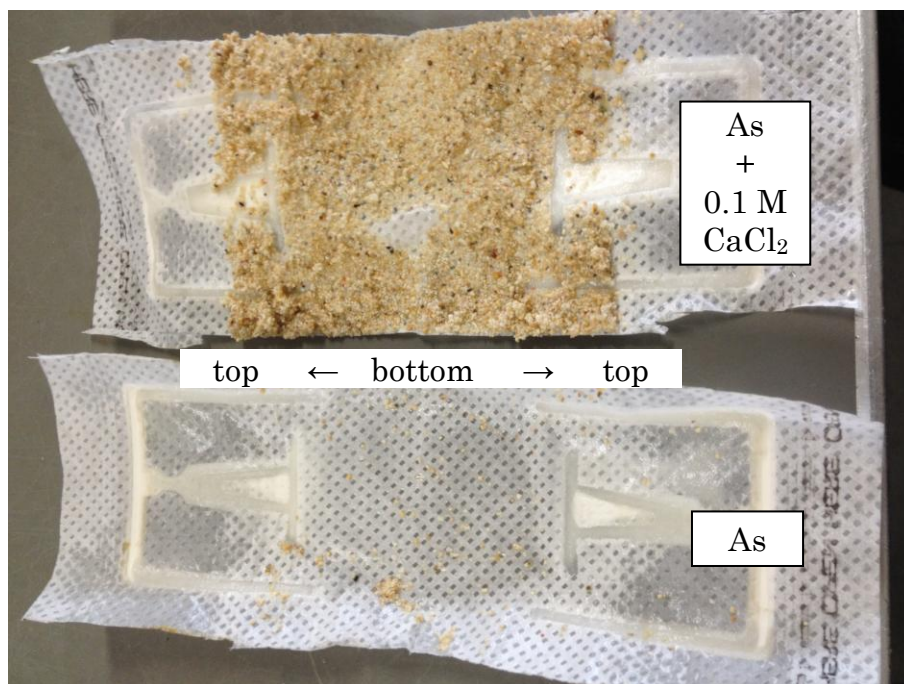


図 4.19 メッシュケース開封・蒸留水洗浄後の各ケース上の様子
(上 : As + 0.1 M CaCl_2 浸漬, 下 : As 浸漬)



図 4.20 As + 0.1 M CaCl_2 に浸漬した試料の固化部分

4.5 結言

ビーチロックを模擬した人工岩を作製する上で重要な情報であるビーチロックの形成機構について考察することを目的として、沖縄県名護市済井出（調査地点 S）と石川県輪島市浜田町（調査地点 W）のビーチロックを対象に、化学、鉱物および微生物に関する分析を行なった。その結果、両地点のビーチロックの形成機構は、以下のように結論づけられる。

- ・ 調査地点 S のビーチロックは、海水の蒸発やウレアーゼ活性を有する微生物の尿素分解反応に伴って CaCO_3 が析出する際に、有機物の影響によって MgCO_3 が CaCO_3 とともに high Mg-calcite として析出し、砂粒子同士を膠結することで形成されたと考えられる。
- ・ 調査地点 W のビーチロックは、 Al^{3+} を含んだ酸性の湧水が潮間帯で海水と混合することで $\text{Al}(\text{OH})_3$ として析出する際に、湧水や海水中の SiO_2 や SO_4^{2-} が一緒に取り込まれるため、Al と Si を主成分とする非晶質のセメント物質が砂粒子間で析出して形成されたと考えられる。

参考文献

- 4.1) 堀越弘毅, 井上明, 2009, ベーシックマスター 微生物学, オーム社, 東京, 328p.
- 4.2) 小笠原洋, 吉富健一, 次重克敏, 2004, 能登半島, 輪島市曾々木海岸のビーチロック, 日本応用地質学会中国四国支部平成 16 年度研究発表会, pp. 31-34.
- 4.3) Voudoukas, M. I., Velegarakis, A. F., Plomaritis, T. A., 2007, Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, *Earth-Science Reviews*, 85, pp. 23-46.
- 4.4) Althoff, P. L., 1977, Structural refinements of dolomite and a magnesian calcite and implications for dolomite formation in the marine environment, *American Mineralogist*, 62, pp. 772-783.
- 4.5) 北野康, 1990, 炭酸塩堆積物の地球化学, 東海大学出版会, 東京, 391p.
- 4.6) 国立天文台, 2011, 理科年表, 丸善出版, 東京, p. 963.
- 4.7) Erginal, A. E., Kiyak, N. G., Bozcu, M., Ertek, A., Gungunes, H., Sungur, A., Turker, G., 2008, On the origin and age of the Arıburnu Beachrock, Gelibolu Peninsula, Turkey, *Turkish J. Earth Sci.*, 17, pp. 803-819.
- 4.8) Erginal, A. E., Kiyak, N. G., Ozturk, B., 2010, Investigation of Beachrock Using Microanalyses and OSL Dating: A Case Study from Bozcaada Island, Turkey, *Journal of Coastal research*, 26, pp. 350-358.
- 4.9) Vieira, M.M., De Ros, L. F., 2006, Cementation patterns and genetic implications

- of Holocene beachrocks from northeastern Brazil, *Sedimentary Geology*, 192, pp. 207-230.
- 4.10) Whittle, G. L., Kendall, C. G. S. C., Dill, R. F., Rouch, L., 1993, Carbonate cement fabrics displayed: a traverse across the margin of the Bahamas Platform near Lee Stocking Island in the Exuma Cays, *Marine Geology*, 110, pp. 213-243.
- 4.11) Prewitt, C. T., Sueno S., Papike, J. J., 1976, The crystal structures of high albite and monalbite at high temperatures, *Am. Miner.*, 61, pp. 1213-1225.
- 4.12) Kneale, D., Viles, H. A., 2000, Beach cement: incipient CaCO_3 cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland, *Sedimentary Geology*, 132, pp. 165-170.
- 4.13) Kitano, Y., Kanamori, N. 1966, Synthesis of magnesian calcite at low temperatures and pressures, *Geochemical Journal*, 1, pp. 1-13.
- 4.14) Raz, S., Weiner, S., Addadi, L., 2000, Formation of high-magnesian calcites via an amorphous precursor phase: possible biological implications, *Adv. Mater.*, 12, pp. 38-42.
- 4.15) 川崎了, 2011, 微生物機能を利用した地盤改良技術, 地盤工学会中国支部論文報告集, 29, pp. 11-18.
- 4.16) 米田義昭, 松永勝彦, 西村雅吉, 1973, 海洋砂菌によるアミノ酸からの尿素の生成量の見積り, 北海道大学水産学部研究集報, 23, pp. 185-190.
- 4.17) 檀上堯, 川崎了, 2012, 文献調査によるビーチロックの諸特性ービーチロックを模擬した人工岩の開発を目指してー, 応用地質, 53, pp. 129-141.
- 4.18) Neumeier, U., 1999, Experimental modelling of beachrock cementation under microbial influence, *Sedimentary Geology*, 126, pp. 35-46.
- 4.19) Webb, G. E., Jell, J. S., Baker, J. C., 1999, Cryptic intertidal microbialites in beachrock, Heron Island, Great Barrier Reef: implications for the origin of microcrystalline beachrock cement, *Sedimentary Geology*, 126, pp. 317-334.
- 4.20) 惣田昱夫, 河合富佐子, 2009, 特殊環境微生物の発見, 合同出版, 東京, 148p.
- 4.21) Danjo, T., Kawasaki, S., Shimazaki, S. Koizuka, K., 2014, Effects of bacterial ureolysis and seawater evaporation on beachrock formation, In: *Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium*, RP4-1.

第5章 尿素分解菌を用いたサンゴ砂のシリンジ固化試験

5.1 緒言

前章では、沖縄県名護市（調査地点 S）と石川県輪島市（調査地点 W）のビーチロックの形成機構について検討した。その結果、調査地点 S のビーチロックは形成機構に微生物が影響している可能性が示された。また、調査地点 S のビーチロックは国内外の多くのビーチロックと同じ CaCO_3 系のセメント物質であり、一軸圧縮強さ（UCS）が調査地点 W のビーチロックよりも大きい値を示した。そのため、生物学的影響、セメント物質、UCS の点で工学的価値がある調査地点 S のビーチロックの形成機構を参考とした固化試験を実施した。

予備試験 5.1) の結果、調査地点 S のビーチロックの形成要因と考えられる海水の蒸発と微生物の尿素分解では、後者の方がサンゴ砂供試体を短期間でより広い範囲を固化することが示された。そこで本章では、尿素分解菌を利用したサンゴ砂の固化試験について述べる。すなわち、尿素分解菌を用いたサンゴ砂のシリンジ固化試験を実施することによって、各種試験条件の UCS への影響を把握することとした。なお、試験期間は 14 日に固定した。

5.2 方法

5.2.1 ウレアーゼ活性試験

(A) 土壌採取

調査地点 S のビーチロック周辺の 7 カ所（表 5.1 参照）から、土壌を滅菌済 50 mL 遠沈管にそれぞれ採取した。その後、実験室に持ち帰って 4 °C に設定した冷蔵庫内で保存した。

(B) 菌の分離試験

菌の分離試験は、以下の手順で実施した。

- (1) 100 mL の三角フラスコに人工海水（八州薬品、アクアマリン、表 5.2 参照）約 70 mL を入れ、アルミホイルでフラスコの口を覆った。その後、人工海水の入った三角フラスコを、オートクレーブを用いて高温高圧滅菌処理（121 °C，15 分）を行なった。滅菌処理した三角フラスコは、クリーンベンチに移して室温に冷ました。
- (2) エタノール消毒した薬さじを用いて、採取土の入った遠沈管から土壌 1.0 g を量りとり、滅菌済の 15 mL 遠沈管に移した。
- (3) クリーンベンチ内において、新しい 15 mL 遠沈管を 4 本用意した。そして、土壌の入った遠沈管とともに試験管立てに立てた。

表 5.1 沖縄県名護市済井出のビーチロック周辺の土壌採取箇所の GPS 座標値

Sampling point	GPS value		Eroor
1	N 26° 40' 43.8"	E 128° 00' 47.0"	± 5 m
2	N 26° 40' 43.9"	E 128° 00' 46.3"	± 4 m
3	N 26° 40' 43.7"	E 128° 00' 40.9"	± 5 m
4	N 26° 40' 43.8"	E 128° 00' 41.6"	± 4 m
5	N 26° 40' 43.8"	E 128° 00' 42.3"	± 3 m
6	N 26° 40' 43.8"	E 128° 00' 43.1"	± 5 m
7	N 26° 40' 43.7"	E 128° 00' 43.1"	± 5 m

表 5.2 人工海水の成分（溶媒：蒸留水）

Reagent	(g/20 L)
MgCl ₂ ・6H ₂ O	222.23
CaCl ₂ ・2H ₂ O	30.7
SrCl ₂ ・6H ₂ O	0.85
KCl	13.89
NaHCO ₃	4.02
KBr	2.01
H ₃ BO ₃	0.54
NaF	0.06
NaCl	490.68
Na ₂ SO ₄	81.88

- (4) 土壌の入っていない 4 本の遠沈管に、1 本あたり 9 mL ずつ滅菌処理した人工海水を入れた。なお、滅菌したマイクロピペットを用いて行い、マイクロピペットのチップを遠沈管の内壁以外には接触させないようにした。
- (5) マイクロピペットを用いて、人工海水 10 mL を土壌 1.0 g が入った遠沈管に加え、往復 20 回上下に振り混ぜた。この希釈液を 10¹ 倍希釈液とした。
- (6) マイクロピペットを用いて、10¹ 倍希釈液 1 mL を、9 mL の人工海水のみが入った遠沈管 1 本に加え、往復 20 回上下に振り混ぜた。この希釈液を 10² 倍希釈液とした。
- (7) 新しいマイクロピペットを用いて、攪拌した 10² 倍希釈液 1 mL を 9 mL の人工海水のみが入った遠沈管 1 本に加え、往復 20 回上下に振り混ぜた。この希釈液を 10³ 倍希釈液とした。
- (8) 同様の手順で、10⁴、10⁵ 倍希釈液を作製した。
- (9) 作製した希釈液の入った遠沈管に、マジックでそれぞれの希釈倍率を記入した。
- (10) ZoBell2216E 培地のプレート 5 枚を、クリーンベンチに移した。
- (11) マジックで各プレート裏面に希釈倍率および実験日等を記入した。
- (12) プレートを表にして、5 枚すべてのふたを開けた。これ以降の作業でも、引き続きコンタミネーションに注意した。

- (13) マイクロピペットを用いて、希釈倍率の高い希釈液（より濃度の薄い希釈液）から順に、希釈液を 10 μ L ずつ各培地に添加した。例えば、 10^5 倍希釈液 10 μ L を 10^5 と記入した培地に添加し、同じピペットで 10^4 倍希釈液 10 μ L を 10^4 と記入した培地に添加した。
- (14) 高い希釈倍率の希釈液を添加した培地から順に、培地上でコーンラージ棒を回転させて希釈液を培地全体に広げた。
- (15) プレーートのふたをして、プレートを裏返して重ね、プレート 5 枚を 1 枚のジップロックに入れた。
- (16) クリーンベンチ外の恒温槽（30 $^{\circ}$ C）で 72 時間培養した。
- (17) 恒温槽から 72 時間培養した培地を取り出し、クリーンベンチに入れた。
- (18) 20～70 コロニー程度生えている培地を探し、その培地を分離試験の対象とした。
- (19) 対象培地の裏面にマジックで境界線を複数本入れた。これは、分離漏れのコロニーをなくするためである。
- (20) 新しい ZoBell2216E 培地の裏面に、20 マス程度になるようにマジックでマス目を入れ、番号をつけた。
- (21) 滅菌処理した爪楊枝を用いて、対象培地に生えている各コロニーを新しい培地の各マス目の中に添加した。コロニーが小さい場合は、新しい培地に爪楊枝の先端を軽く刺して湿らせたのち、コロニーを採取するとより多くの量を新しい培地に添加できる。なお、爪楊枝はコロニーごとに新しいものを使用した。
- (22) コロニーを植えた培地のプレートのふたをして、裏返して重ね、恒温槽（30 $^{\circ}$ C）で 24 時間培養した。
- (23) 恒温槽から 24 時間培養した培地を取り出し、クリーンベンチに入れた。
- (24) 再び生えた各コロニーを、爪楊枝を用いて新たな ZoBell2216E 培地のプレートの各マス目に再び添加した。
- (25) コロニーを植えた培地のプレートのふたをして、裏返して重ね、恒温槽（30 $^{\circ}$ C）で 24 時間培養した。
- (26) 恒温槽から 24 時間培養した培地を取り出し、クリーンベンチに入れた。
- (27) 再び生えた各コロニーを、爪楊枝を用いて 1 コロニーにつき新たな培地 1 枚に添加し、30 $^{\circ}$ C で 24 時間培養した。

(C) クレゾールレッド溶液の作製

クレゾールレッド溶液の作製方法は、次の手順である。

- (1) 99.5 %濃度のエタノール 7.6 mL と蒸留水 0.4 mL を混ぜ合わせ、95 %濃度のエタノール水溶液 8 mL を調整した。
- (2) 調整したエタノール水溶液 8 mL を 50 mL ビーカー内で攪拌子を用いて攪拌しながら、クレゾールレッド 0.04 g を添加した。なお、クレゾールレッドについては、溶けてい

ることを確認しながら、ゆっくりと少量ずつ（30 分程度かけて）添加した。

- (3) クレゾールレッドの溶解を確認した後、100 mL ビーカーにクレゾールレッドの入った溶液を移した。
- (4) クレゾール溶液をさらに攪拌しながら、蒸留水 80 mL 程度をゆっくりと溶解を確認しながら加えた。
- (5) その後、100 mL メスフラスコに溶液を移し、蒸留水を加えてメスアップした後、溶液を振り混ぜた。
- (6) 作製した溶液 100 mL を、100 mL または 200 mL の試薬瓶に移して保存した。

(D) ウレアーゼ活性試験

以下の手順で、試験を実施した。

- (1) pH メーター（OAKTON 製，ラコムテスターpH 計）を校正した。
- (2) 表 5.3 の配合で、蒸留水，尿素，クレゾールレッド溶液の順にビーカーに加えた。なお，攪拌子を用いて攪拌しながら加えた。
- (3) 攪拌後，溶液をメスフラスコに移し，蒸留水でメスアップした後，振り混ぜることでウレアーゼ活性測定溶液を作製した。
- (4) 上記(B)で最終的に分離したコロニー数+コントロール 1 本分の 20 mL スチロールねじ瓶を用意した。
- (5) ウレアーゼ活性測定溶液を，各容器に 20 mL ずつ分注した（非滅菌）。
- (6) クリーンベンチ内において，各コロニーを直径 2～3 mm 程度滅菌した爪楊枝の先にとり，各スチロールねじ瓶内のウレアーゼ活性測定溶液にそれぞれ添加した。そして，容器を密栓した後、上下に 20 回振り混ぜた。ただし，コントロール用のスチロールねじ瓶には，ウレアーゼ活性測定溶液以外加えない。
- (7) 各容器を密栓したまま，45℃の恒温槽で 2 時間静置した。
- (8) クレゾールレッドは，pH 7.2（黄色）～pH 8.8（紫色）が変色域である^{5.2)}ため，2 時間後，溶液を紫色に変色させたコロニーをウレアーゼ陽性菌と判定し，変色した溶液の pH を測定した。なお，ウレアーゼ陽性菌とは，ウレアーゼ活性を有する微生物，すなわち尿素の加水分解を促進する微生物のことである。この尿素の加水分解反応によって，pH が上昇する（前述 4.4.2 項の式（4.1）参照）。

表 5.3 ウレアーゼ活性測定溶液の配合（溶媒：蒸留水）

Additive	Content
Urea	25 g/L
Cresol red solution	20 mL/L

5.2.2 尿素分解菌の 16S rDNA 塩基配列解析

前項(D)でウレアーゼ活性陽性と判定した菌株を、以下の手順で単離した。

- (1) クリーンベンチ内において、ウレアーゼ活性試験のために採取した菌株周辺に生えている培地上の菌株を、滅菌した爪楊枝で直径 1 mm 程度採取し、滅菌済の 15 mL 遠沈管に入った滅菌処理した人工海水 10 mL に添加し、上下に 20 回程度振り混ぜた。
- (2) その希釈液を、前項(2)の希釈方法と同様の方法で $10^1 \sim 10^4$ 倍にさらに希釈し、各希釈液 10 μ L を新しい ZoBell 2216E 寒天培地にそれぞれ添加した。その後、コーンラージ棒で培地全体に希釈液を広げた。
- (3) 各培地を、クリーンベンチ外の恒温槽 (30 $^{\circ}$ C) で 24 時間培養した。
- (4) 培養後、クリーンベンチ内で、数十株ほど生えた倍率の培地を対象として、色や形の異なる菌株 3 つ程度を、滅菌した爪楊枝を用いて新たな ZoBell 2216E 寒天培地にそれぞれ波状に添加して、クリーンベンチ外の恒温槽内で 24 時間 30 $^{\circ}$ C で培養した。
- (5) 養生後、ウレアーゼ活性試験を再度実施し、再び溶液を紫色に変えた菌株を真の尿素分解菌 (ウレアーゼ陽性菌) とした。
- (6) 以上の方法で単離した尿素分解菌から、直接 DNA の抽出を行なった。PCR 増幅からサイクルシーケンスまでの操作は、各プロトコールに基づいて実施した。なお、DNA 抽出から簡易分子系統解析までの装置およびキットを表 5.4 に示す。
- (7) 菌株のサイズや形を把握するため、単離した尿素分解菌に対してグラム染色を行なった。

表 5.4 16S rDNA 塩基配列解析の操作と使用した装置・キット

DNA抽出	アクロモペプチダーゼ (和光純薬、大阪)
PCR増殖	PrimeSTAR HS DNA Polymetase (タカラバイオ、滋賀)
サイクルシーケンス	BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, CA, USA)
使用プライマー	PCR増幅: 9F, 1510R シーケンス: 9F, 785F, 802R, 1510R
シーケンス	ABI PRISM 3130 xl Genetic Analyzer System (Applied Biosystems, CA, USA)
塩基配列決定	ChromasPro 1.7 (Technelysium Pty Ltd., Tewantin, AUS)
BLAST相同性検索および簡易分子系統解析	ソフトウェア: アポロン2.0 (テクノスルガ・ラボ、静岡) データベース: アポロン DB-BA9.0 (テクノスルガ・ラボ、静岡)、 国際塩基配列データベース (GenBank/DDBJ/EMBL)

5.2.3 シリンジ固化試験

(A) 菌の継代および培養液の作製

前項までの試験で単離した 1 種類の尿素分解菌 *Pararhodobacter* sp. (本菌株の詳細は、5.3.2 項で後述する) を用いて、シリンジ固化試験を実施した。

本菌株の継代方法は、次のとおりである。

- (1) ZoBell 2216E 寒天培地に生えている菌を、滅菌した爪楊枝を用いて直径 2~3 mm 程度新たな培地に波状に 1, 2 回添加した。
- (2) 添加した培地と添加もとの培地を、30℃の恒温槽で培養した。
- (3) 培養開始から 1 日程度で、添加した培地に継代もとと同様の菌株のみが生えてきたら、経代は成功である。

培養液の作製方法は、次のとおりである。

- (4) 上記の経代方法に従って菌株を新たな培地に添加した後、1 週間恒温槽 (30 °C) で培養した。
- (5) ZoBell 2216E 培養液 (ZoBell 2216E 寒天培地の配合 (前述 4.2.1 項参照) から寒天を除いたもの) 100 mL を作製し、300 mL 三角フラスコに移した。
- (6) 上記の三角フラスコ、シリコ栓、薬さじをオートクレーブで滅菌した後、クリーンベンチに移して室温まで冷ました。
- (7) クリーンベンチ内において、1 週間培養した菌株 0.1 g を滅菌した薬さじを使って量りつつ。すなわち、菌株の生えた培地プレートの質量を量り、薬さじで菌株を採り、菌株の減った培地プレートの質量を再び量ることで 0.1 g の菌株を採取した。なお、この作業は可能な限り素早く行った方がよい。
- (8) クリーンベンチ内で、量りつつの菌株 0.1 g を ZoBell 2216E 培養液 100 mL に小さくかき混ぜながら添加し、滅菌したシリコ栓で三角フラスコの口を閉めた。
- (9) クリーンベンチ外の 30 °C の恒温槽で 72 時間振とう培養 (回転数 : 80 rpm) した。なお、本論文では、以上の方法で 72 時間培養した後の懸濁液を「培養液」と称する。

(B) 固化試験 (供試体の作製~開封前)

シリンジ固化試験での供試体サイズは直径 2.5 cm×高さ 7 cm とし、本試験の様子を図 5.1 に示す。供試体の作製から開封前までの手順は、以下のとおりである。

- (1) サンゴ砂を 110 °C の乾燥炉で 2 日間乾燥・滅菌した。なお、本試験に用いたサンゴ砂は沖縄県読谷村波平の海岸から採取したものであり、その粒度分布は図 5.2 のとおりである。
- (2) 2 日後、サンゴ砂を恒温槽から取り出して実験室に移し、室温に冷ました。
- (3) 段ボール紙 3 枚を重ね、4 辺にガムテープを巻いて 1 枚にした。その後、シリンジ容器外径程度の大きさの穴を複数あけた。
- (4) 成形した段ボールを、恒温槽内の、固化溶液を注入・排出しやすい高さに設置した。

この設置した段ボールを、シリンジ台とする。

- (5) 不織布を 30 mL シリンジ容器の内径 2.5 cm より若干小さい円形に切り、エタノール消毒した。
- (6) 滅菌済 30 mL シリンジ容器の底面に、上記の不織布 1 枚を敷いた。これは、サンゴ砂の流出を防ぐためである。
- (7) サンゴ砂 40 g を、3 層に分けて加えた。3 層に分けて添加するサンゴ砂の 1 層目と 2



図 5.1 シリンジ固化試験の様子

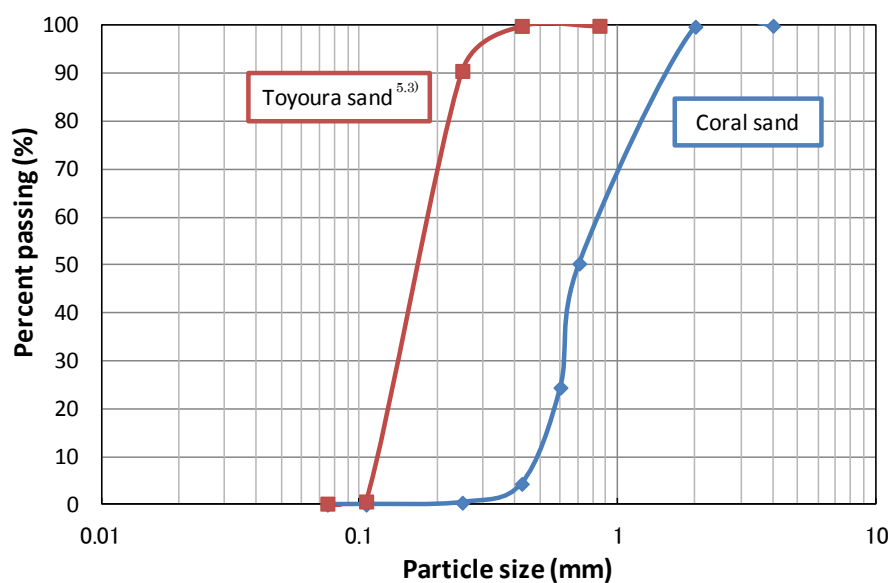


図 5.2 サンゴ砂と豊浦砂^{5.3)}の粒度分布

層目の質量はおよそ 13.3 g ずつとし、3 層目を加えた後の最終的な供試体の高さはシリンジ容器の約 29 mL の目盛りの高さとした。なお、各層投入後に直径約 1 cm のステンレス棒で、砂粒子を壊さない程度の強さで 20 回ずつ突き固めた。また、層同士をなじませるために、1 層、2 層の砂試料をそれぞれ突き固めた後、葉さじの持ち手先端で 3 本の線を各層の試料表面に加えた。さらに、3 層の砂試料を突き固めた後に葉さじの持ち手先端で供試体表面を水平にならした。

- (8) 落下菌の混入を防ぐため、アルミホイルでシリンジ容器上面を覆った。
- (9) シリンジ容器をシリンジ台に設置した。
- (10) 長さ 27 cm に切断したシリコンチューブ（内径 3 mm，外径 5 mm）をシリンジ容器の排出口に取り付けて、チューブの先にピンチコックを取り付けた。
- (11) その後、ピンチコックを閉じたまま、供試体上面から培養液 16 mL を供試体にゆっくり（供試体上面をなるべく乱さぬように）注入した。その後、水位が供試体上面より高くなったら、ピンチコックを開いて 10 mL / 3.5 分ペースでチューブより排出し、最終的な水位が供試体上面となるようにした。なお、排出速度はチューブ先端の高さを変えることで調整した。
- (12) ここで、固化溶液を作製した。なお、固化溶液の標準配合を表 5.5 に示す。添加試薬を同表の上から順に溶媒の人工海水（非滅菌）の入ったビーカーに添加・攪拌した。その後、適当なメスフラスコに移して、人工海水でメスアップした。これで、固化溶液の完成である。
- (13) 10 mL シリンジと 0.45 μm フィルターを用いることで、固化溶液 20 mL を滅菌しながら供試体の上面より注入し、チューブより排水した。なお、排出速度は 10 mL / 3.5 分程度とした。また、固化溶液の水位が、砂供試体の入ったシリンジ容器の目盛で 31 ~ 34 mL の間を維持するようにチューブ先端の高さを変えながら注入・排出した。20 mL 注入後、水位がシリンジ容器の目盛で 31 mL となったところで、ピンチコックを使って排出を止めた（湿潤状態を維持した）。その後、再びアルミホイルでシリンジ容器表面を覆い、恒温槽を閉めて、養生した。
- (14) 上記と同様の手順で、定期的に固化溶液の作製・注入・排出を繰り返した。
- (15) 間隙溶液の pH や炭酸カルシウムの推定析出量の経時変化を把握するために、定期的に次の手順で排液（シリンジ容器から排出した溶液）を回収した。まず、シリコンチューブに入っていた最初の排液 2 mL を捨てた後、次の排液 3 mL を採水し、残りの排液は捨てた。その後、採水した 3 mL のうち 2 mL を、スチロールねじ瓶に移して pH を測定した。残りの排液 1 mL を蒸留水 9 mL で 10 倍希釈した後、希釈液に対して Ca^{2+} 濃度を測定した。

(C) 固化試験（開封およびそれ以降）

試験開始から 14 日後に、次の手順でシリンジを開封した。

- (1) シリンジ容器内の溶液を、10 mL / 3.5 分程度のペースで排出した。
- (2) 排水が自然に止まったら、シリンジ台からシリンジ容器を取り出した。
- (3) チューブをシリンジ容器から外し、チューブと接続していたシリンジ容器の排出口である突起部分をはさみで切り落とした。そのあと、シリンジ底面の円錐部分とシリンジ側面の円柱部分の境界面をのこぎり刃で静かに切り落とした。
- (4) シリンジ容器側面の上端から下端まで一直線にカッターで何度も同じところに切れ目を加え、供試体にカッターの刃が当たる直前まで切れ目を入れた後、シリンジ容器上端をはさみで切り、切れ目に沿ってシリンジ容器を開封し、砂供試体を取り出した。
- (5) 開封後、供試体の上・中・下の任意の高さ各 1 カ所ずつに対して、軟岩ペネトロ計（丸東製作所製、SH-70）を用いて針貫入試験を実施した。本試験によって求めた針貫入勾配の値から、本装置説明書の回帰式 $\log_{10} y = 0.978 \log_{10} x + 2.621$ （相関係数: 0.941, x : 針貫入勾配, y : 推定 UCS）を用いて推定 UCS をもとめた。なお、本式は、天然岩石 114 個、セメント処理試料 50 個を対象に導かれたものである。
- (6) 針貫入試験後、供試体の中央部分から試料 1.0 g を採取し、次の方法によって菌数測定を行なった。上記の試料 1.0 g を対象として、前述 5.2.1 項 (B) の手順(1)～(15)に従って試験を進めた。その後、クリーンベンチ外の恒温槽（30 ℃）で 7 日間培養した。培養後、およそ 200 以下のコロニーが生えた培地（1～複数枚）を対象として、菌数を測定した。
- (7) 供試体のセメント物質を SEM・EDX によって分析するため、まず、供試体から試料片 5 g 程度を採取した。次に、母材の砂粒子を砕かないように注意しながら、屋宇佐時の裏面等で試料を押しつぶして砂粒子ごとに粗く分けた後、蒸留水で砂粒子表面に付着している溶液を洗い流した。そして、110 ℃で 2 日程度乾燥した後、室温で保存した。その後、試料を炭素蒸着して、SEM・EDX 分析装置を用いて試料表面を分析した。

(D) 試験条件

試験条件は全 14 ケースであり、その一覧表を表 5.6 に示す。標準の試験条件は、同表中の Case 1 であり、その固化溶液は標準配合（表 5.5）である。標準の試験条件から、UCS に影響を与えると思われる要因、すなわち、①養生温度、②固化溶液の注入間隔、③砂の種類、④固化溶液の Ca^{2+} 濃度（固化溶液の尿素と CaCl_2 の濃度）、⑤固化溶液の pH、⑥固化溶液の sodium malate（リンゴ酸ナトリウム）の濃度のいずれか一つの試験条件を変え、UCS への各試験条件の影響を検討した。

なお、上記 6 つの要因以外にも、UCS に影響を与える可能性がある要因は存在する。例えば、砂の粒径や形状、供試体の密度、含水比、土圧、固化溶液の成分、添加する菌量、栄養源の種類、等である。しかし、本固化試験は、微生物の尿素分解反応によってセメント物質である CaCO_3 を析出させて砂供試体を固化させる原理であるため、微生物に影響を与える要因を重視した。また、ビーチロックの形成機構を参考にしているため、ビーチロ

ックが形成される環境を再現することも考慮した。さらに、現場への適用性を評価することも重視した。

そこで、以下の理由によって上記①～⑥を試験条件とした。なお、上記①～⑥以外の UCS に影響を与える可能性がある要因については、今後の課題とする。

①養生温度 (20, 25, 30, 35 °C) は、微生物の成長や代謝活動にとって重要な要因である。また、ビーチロックが熱帯や亜熱帯といった気温の高いところに多いことから考えると、気温はビーチロック形成にとっても重要な要因の一つといえると思われる。さらに、人工岩の適用先を広げるためにも、適用可能温度の把握と幅広い温度範囲での作製方法の提案は重要である。なお、温度範囲は、形成機構を参考とする沖縄県の気温を考慮して設定した。

②固化溶液の注入間隔 (0.5, 1, 2 日) は、Ca 源、尿素、栄養源を含んだ固化溶液をどのような注入間隔で注入すると、UCS を効率よく大きくできるかを考えるために必要である。なお、注入間隔は、潮の満ち引きが 1 日 2 回行なわれることを考慮した 0.5 日から、施工の簡素化を考慮した 2 日までとした。

③砂の種類 (サンゴ砂、豊浦砂) に関しては、砂はビーチロックの主な構成物質であるため、砂の種類は形成にとって重要であると推察される。そこで、形成機構の参考にしていく沖縄県のビーチロックの母材である砂がサンゴ砂であることから、サンゴ砂を使用した。また、適用先をより広げるために、シリカ系の砂である豊浦砂を用いた場合についても検討した。なお、サンゴ砂と豊浦砂では土粒子密度が異なるため、その点を考慮に入れた上で供試体の高さを同じとした。すなわち、豊浦砂 (密度 2.64 g/cm³, 空隙体積約 11 cm³) の場合は、供試体 1 本あたりの砂の質量を 48 g, 培養液を 13 mL, 固化溶液を 17 mL とし、サンゴ砂 (密度 2.74 g/cm³, 空隙体積約 14 cm³) の場合は前述 (同項 (B)) のとおりとした。

④固化溶液の Ca²⁺濃度 (0.1, 0.2, 0.3 M) は、人工岩のセメント物質として想定している CaCO₃ の析出量と比例し、その析出量は UCS に影響を与えると考えられるため、重要である。また、環境への負荷を抑えるために、固化溶液の Ca²⁺濃度を低くした時の UCS を把握することは、現場での適用方法を広げるために有益である。なお、CaCl₂ 濃度の変更に伴い、尿素の濃度も同様に変更している。これは、CaCl₂ が溶解した Ca²⁺ が CaCO₃ として析出する際に、同モル数の尿素が消費されるためである (式 (4.1) ~ 式 (4.3) 参照)。なお、Ca²⁺濃度は、稲垣の微生物固化実験の試験方法^{5.4)}等を参考として 0.3M を標準とし、前述の理由から低濃度についても試みた。

⑤固化溶液の pH (pH 6.9, pH8.0, pH9.0) に関しては、微生物の成長・代謝活動やセメント物質 CaCO₃ の析出にとって pH が重要であるため、より UCS を大きくすることのできる pH を把握するために変化させた。なお、固化溶液の pH は、試薬 NaOH を添加することで調整した。すなわち、固化溶液の pH 範囲は、NaOH を加えない pH6.9 を標準として、CaCO₃ 析出量をより大きくするためにより高い pH である 9.0 までを設定した。

⑥固化溶液の sodium malate の濃度 (0, 0.1, 1.0, 5.0 g/L) に関しては, sodium malate を添加することで形成機構の参考とする沖縄県名護市のビーチロックのセメント物質である HMC を析出させることを想定している。セメント物質をビーチロックと同じものとした時に, sodium malate が UCS にどのような影響を与えるかを把握するために実施した。sodium malate の濃度は, HMC の析出に関する北野の報告^{5.5, 5.6)}を参考に 5.0 g/L までとした。

表 5.5 固化溶液の標準配合 (溶媒: 人工海水)

Reagent	Content (g/L)
Nutrient broth	3.00
NH ₄ Cl	10.00
NaHCO ₃	2.12
Urea, Co(NH ₂) ₂	18.02
CaCl ₂	33.3

表 5.6 シリンジ固化試験条件の一覧表

Case No.	Temperature (°C)				Injection interval (day)			Sand		Solution for consolidation		
	20	25	30	35	1	0.5	2	Coral	Toyoura	Urea and CaCl ₂ (M)	pH	Sodium malate (g/L)
1			×		×			×		0.3	6.9	0
2	×				×			×		0.3	6.9	0
3		×			×			×		0.3	6.9	0
4				×	×			×		0.3	6.9	0
5			×			×		×		0.3	6.9	0
6			×				×	×		0.3	6.9	0
7			×		×				×	0.3	6.9	0
8			×		×			×		0.1	6.9	0
9			×		×			×		0.2	6.9	0
10			×		×			×		0.3	8	0
11			×		×			×		0.3	9	0
12			×		×			×		0.3	6.9	0.1
13			×		×			×		0.3	6.9	1
14			×		×			×		0.3	6.9	5

Standard condition

5.3 結果

5.3.1 ウレアーゼ活性試験

沖縄県名護市済井出のビーチロック周辺の7カ所から採取した土壌より合計214株を分離し、それらの菌株に対して実施したウレアーゼ活性試験の結果を表5.7に示す。同表より、1つの海岸内でも尿素分解菌の分布状況は異なっており、7カ所のうち、尿素分解菌が見つかったのは2カ所であった。見つかった尿素分解菌を用いて、試験開始2時間後のpHについて測定した結果を表5.8に示す。Sampling point 5に、pHを9以上に高める菌が集中していた。

表 5.7 ウレアーゼ活性試験結果①

Sampling point	Testing number	Number of ureolytic bacteria
1	69	0
2	21	0
3	35	2
4	17	0
5	30	5
6	27	0
7	43	0
Total	242	7

表 5.8 ウレアーゼ活性試験結果②

Sampling point	Bacterium	pH (2h later)
3	1	8.3
	2	8.0
5	1	9.0
	2	9.1
	3	9.0
	4	9.1
	5	9.0

5.3.2 16S rDNA の塩基配列解析

前項で見つけた Sampling point 5 の尿素分解菌 5 株を単離した結果、各菌株の色や形がよく似ており、またウレアーゼ活性試験の2時間後のpH値が同程度であったため、全て同じ菌であると推定された。そこで、5株のうち1株に対して、以下の解析を実施した。

アポロン DB-BA9.0 に対する BLAST 相同性検索の結果（表 5.9）、対象株の 16S rDNA 塩基配列は *Roseicitreum* 属や *Haematobacter* 属などの *Rhodobacteraceae* 科の 16S rDNA 塩基配列に対し高い相同性を示し、*R. antarcticum* ZS2-28 株に対し相同率 95.6 %の最も

高い相同性を示した。また, GenBank/DDBJ/EMBL に対する相同性検索の結果(表 5.3.2-2)においても, 対象株は *Rhodobacteraceae* 科の 16S rDNA 塩基配列に対し高い相同性を示し, 基準株では *R. antarcticum* ZS2-28 株に対し相同率 95.6 %の相同性を示した。

詳細は, 後述 5.4.1 項の考察で述べるが, 当解析結果によって本菌株は *Pararhodobacter* sp.と推定された。その菌株のグラム染色結果を図 5.3 に示す。同図より, 本菌株はグラム陰性であり, 直径 1 μm 程度, 長さ 3 μm 程度の大きさを有する桿菌であることがわかった。本菌株は, 微生物を用いた地盤固化に関する国内外での研究で最も用いられている *Sporosarcina pasteurii* (平均直径 0.58 μm および長さ 2.90 μm)^{5,7)}の大きさと同程度であった。

表 5.9 アポロン DB-BA9.0 に対する対象菌株の BLAST 検索結果
(上位 30 塩基配列との相同率)

登録名	株名	Accession No.	相同率	BSL
<i>Roseicitreum antarcticum</i>	ZS2-28	FJ196006	1330/1391 (95.6%)	1
<i>Haematobacter massiliensis</i>	Framboise	AF452106	1318/1391 (94.8%)	1
<i>Haematobacter missouriensis</i>	H1892	DQ342315	1315/1388 (94.7%)	1
<i>Rhodobacter johrii</i>	JA192	AM398152	1316/1390 (94.7%)	1
<i>Rhodobacter sphaeroides</i>	ATCC17023	DQ342321	1313/1387 (94.7%)	1
<i>Pseudorhodobacter aquimaris</i>	HDW-19	GU086365	1314/1389 (94.6%)	1
<i>Roseinatronobacter monicus</i>	ROS35	DQ659236	1322/1397 (94.6%)	1
<i>Rhodobacter azotoformans</i>	JCM9340	AB607332	1314/1390 (94.5%)	1
<i>Rhodobacter veldkampii</i>	ATCC35703	D16421	1314/1390 (94.5%)	1
<i>Paracoccus marinus</i>	KKL-A5	AB185957	1316/1394 (94.4%)	1
<i>Rhodobacter megalophilus</i>	JA194	AM421024	1311/1388 (94.5%)	1
<i>Roseibaca ekhonensis</i>	EL-50	AJ605746	1309/1385 (94.5%)	1
<i>Rhodobaca bogoriensis</i>	LBB1	AF248638	1312/1393 (94.2%)	1
<i>Rhodobaca barguzinensis</i>	VKM_B-2406	EF554833	1299/1371 (94.7%)	1
<i>Paracoccus koreensis</i>	Ch05	AB187584	1303/1387 (93.9%)	1
<i>Rhodobacter ovatus</i>	JA234	AM690348	1298/1374 (94.5%)	1
<i>Rhodobacter capsulatus</i>	ATCC11166	DQ342320	1302/1389 (93.7%)	1
<i>Paracoccus niistensis</i>	NII-0918	FJ842690	1299/1386 (93.7%)	1
<i>Paracoccus isopora</i>	sw-3	FJ593906	1305/1394 (93.6%)	1
<i>Rhodobacter vinaykumarii</i>	JA123	AM408117	1284/1365 (94.1%)	1
<i>Tropicimonas aquimaris</i>	DPG-21	HQ340608	1298/1392 (93.2%)	1
<i>Tropicimonas sediminicola</i>	M97	JF748735	1297/1391 (93.2%)	1
<i>Paracoccus fistulariae</i>	5月22日	GQ260189	1297/1392 (93.2%)	1
<i>Rhodobacter blasticus</i>	ATCC33485	DQ342322	1298/1392 (93.2%)	1
<i>Rhodobacter aestuarii</i>	JA296	AM748926	1278/1369 (93.4%)	1
<i>Roseovarius pacificus</i>	Feb-81	DQ120726	1295/1393 (93.0%)	1
<i>Paracoccus chinensis</i>	KS-11	EU660389	1268/1352 (93.8%)	1
<i>Rhodobacter maris</i>	JA276	AM745438	1278/1366 (93.6%)	1
<i>Pseudorhodobacter antarcticus</i>	ZS3-33	FJ196030	1297/1405 (92.3%)	1
<i>Profundibacterium mesophilum</i>	KAUST-100406-0324	JF776971	1303/1400 (93.1%)	1

注) BSL はバイオセーフティレベルを意味する。

表 5.10 国際塩基配列データベースに対する対象菌株の BLAST 検索結果
(上位 30 塩基配列との相同率)

登録名	株名	Accession No.	相同率
<i>Rhodobacter</i> sp.	SS12.40	KC160928	1378/1392 (99.0%)
<i>Rhodobacter</i> sp.	SS12.28	KC160919	1375/1392 (98.8%)
<i>Rhodobacteraceae bacterium</i>	SK1	JF951963	1353/1390 (97.3%)
<i>Rhodobacter</i> sp.	Bo10-19	EU839358	1332/1388 (96.0%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	DQ813946	1333/1390 (95.9%)
<i>Rhodobacter</i> sp.	R18	AB607872	1332/1390 (95.8%)
<i>uncultured Rhodobacter</i> sp.	-	HM003638	1333/1388 (96.0%)
<i>uncultured Rhodobacter</i> sp.	-	JQ624272	1336/1394 (95.8%)
<i>uncultured Rhodobacteraceae bacterium</i>	-	JQ624307	1332/1392 (95.7%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JN684001	1332/1393 (95.6%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JN683961	1332/1393 (95.6%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JN683954	1332/1393 (95.6%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JN245810	1331/1393 (95.5%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JN245772	1331/1393 (95.5%)
<i>Roseicetrum antarcticum</i>	ZS2-28	FJ196006	1330/1391 (95.6%)
<i>bacterium enrichment culture</i>	clone AOM-SR-B5	HQ405622	1328/1391 (95.5%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JN683991	1330/1393 (95.5%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	JF935177	1327/1390 (95.5%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	FJ623306	1327/1390 (95.5%)
<i>bacterium enrichment culture</i>	clone R1492-6	JF449939	1326/1392 (95.3%)
<i>bacterium enrichment culture</i>	clone R1492-7	JF449940	1324/1392 (95.1%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	DQ521542	1322/1389 (95.2%)
<i>Rhodobacter</i> sp.	2002-65602	AY244771	1325/1393 (95.1%)
<i>uncultured Rhodobacter</i> sp.	-	FJ542844	1326/1393 (95.2%)
<i>Rhodobacter</i> sp.	CR07-5	EU979473	1326/1394 (95.1%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	EF632943	1323/1389 (95.2%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	KC211848	1322/1389 (95.2%)
<i>uncultured Rhodobacter</i> sp.	-	FJ542904	1325/1393 (95.1%)
<i>uncultured alpha proteobacterium</i>	-	DQ432231	1320/1390 (95.0%)
<i>uncultured bacterium</i>	-	KC211849	1322/1389 (95.2%)

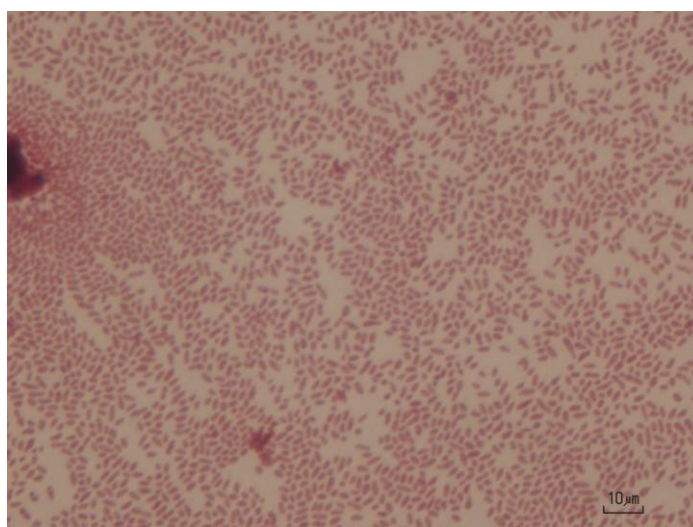


図 5.3 対象菌株 *Pararhodobacter* sp. のグラム染色結果

5.3.3 シリンジ固化試験

本項では、前記した各試験条件（養生温度、注入間隔、砂の種類、 Ca^{2+} 濃度、pH、リンゴ酸ナトリウム）の UCS への影響について把握することを目的として実施したシリンジ固化試験の結果を示す。

(A) 養生温度

対象とした供試体の試験条件は表 5.6 の Case 1～4 の 4 ケースであり、供試体数は 20 °C が 1 本、25 °C が 2 本、30 °C が 3 本、35 °C が 1 本である。なお、各温度の供試体数は最低各 1 本とした。30 °C の本数が他の温度に比べて多い理由は、そのケースが本研究における標準の試験条件であるために、他の試験条件との比較試験にも用いられるためである。

養生温度と推定 UCS の関係を示した図 5.4 より、養生温度が大きくなるにつれて推定 UCS も大きくなる傾向がみられた。養生温度 25～35 °C の範囲における平均推定 UCS を比較すると、温度が 5 °C 大きくなるごとに UCS が 0.5 MPa 程度大きくなった。また、20 °C で養生した供試体は、上端から 0.5 cm の厚みしか固結しておらず、針貫入試験が実施できなかった。さらに、養生温度の違いによるシリンジ開封後の供試体中の菌数（最終的な菌数）の違いは顕著でなかった（図 5.5 参照）。

さらに、経過時間と排液の Ca^{2+} 濃度の関係を示した図 5.6 より、養生温度が高いほど、経過日数が短い間は排液中の Ca^{2+} 濃度が低い傾向がみられた。これは、養生温度が高いほど Ca 化合物の析出量が多いことを示している。なお、注入時の固化溶液の Ca^{2+} 濃度は 12400 ppm である。経過日数が長くなるにつれて、排液の Ca^{2+} 濃度が高くなる傾向がみられ、特に養生温度が 35 °C の供試体で顕著だった。

図 5.7 には、経過時間と排液の pH の関係を示している。同図より、pH は時間の経過に伴って低下し、最終的には養生温度に関係なく、6.7～6.8 に落ち着いた。経過日数 9 日ま

では、35 °Cで養生した供試体からの排液の pH が 30 °Cより 0.2 上回っていた。なお、20 °C、25 °Cについては、測定を実施した経過日数 9 日以降の結果のみを示す。

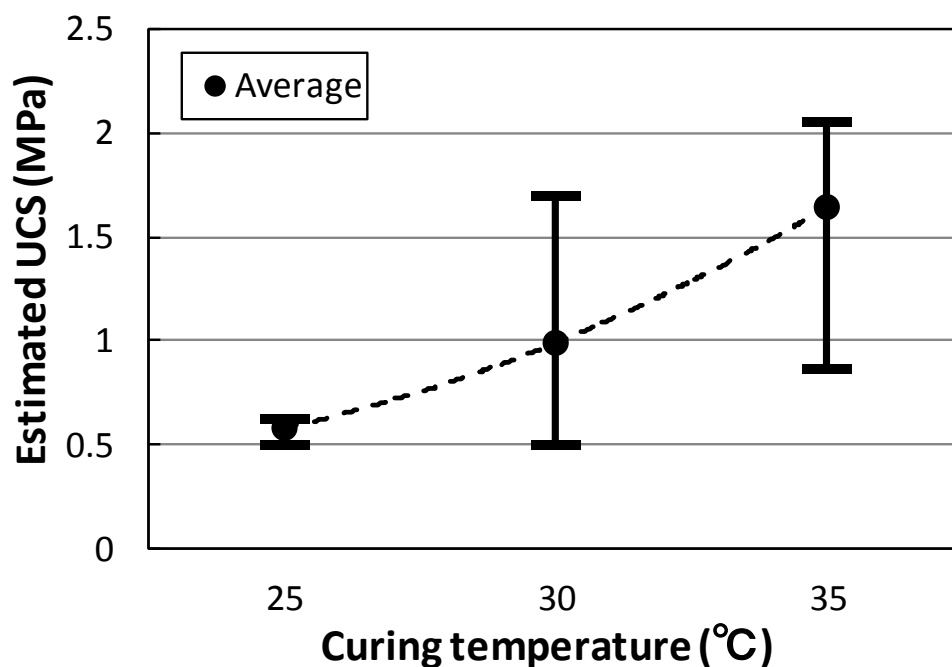


図 5.4 養生温度と推定 UCS の関係

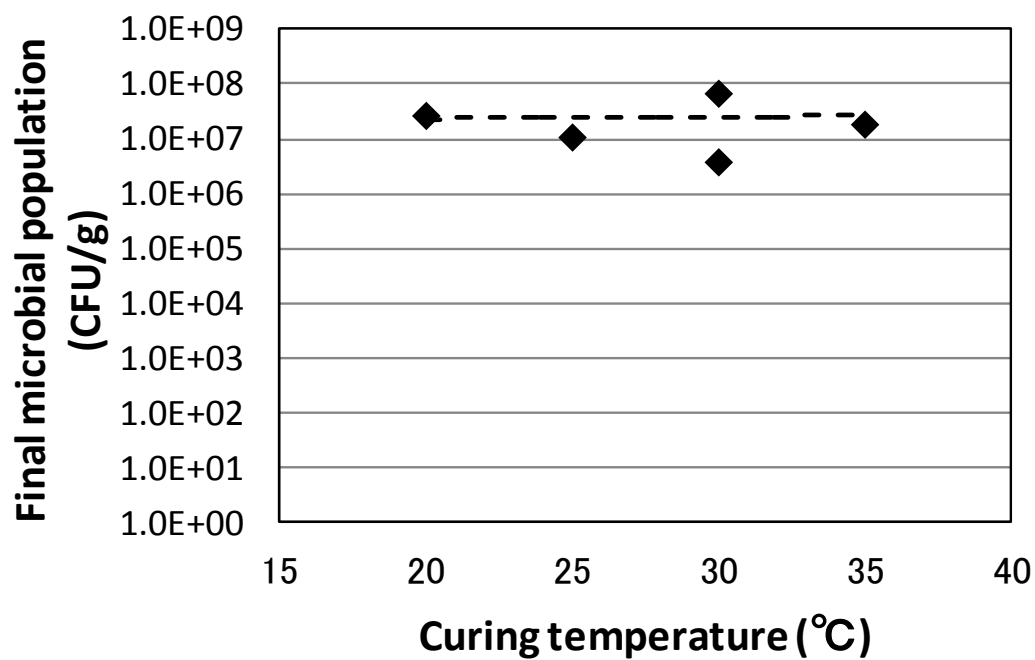


図 5.5 養生温度と最終的な菌数の関係

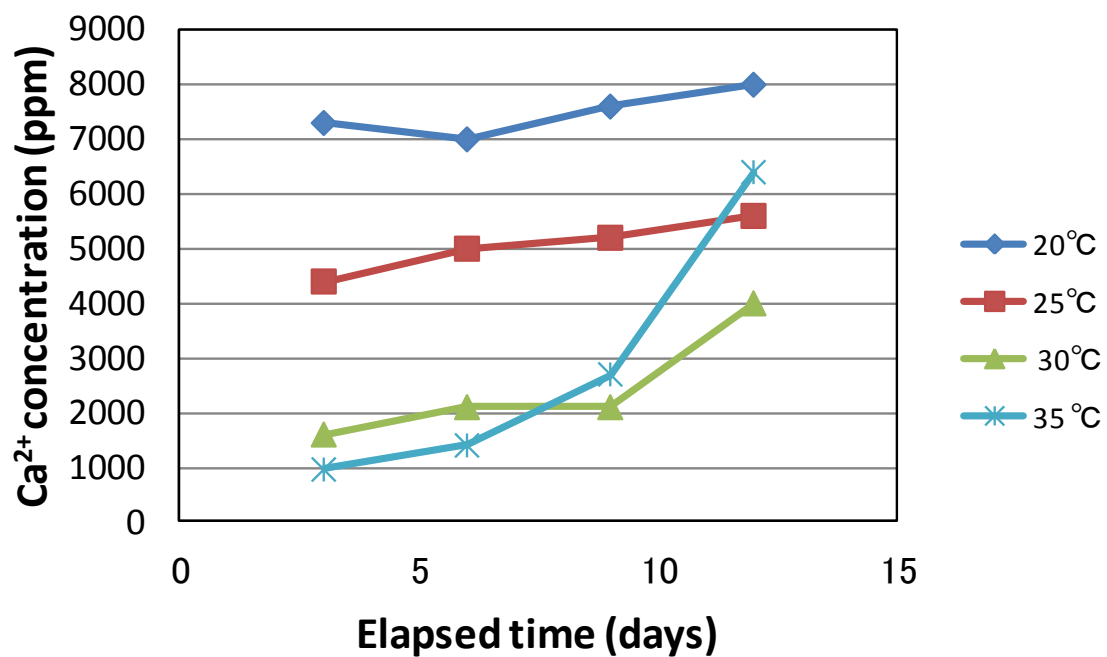


図 5.6 経過時間と排液の Ca²⁺濃度の関係

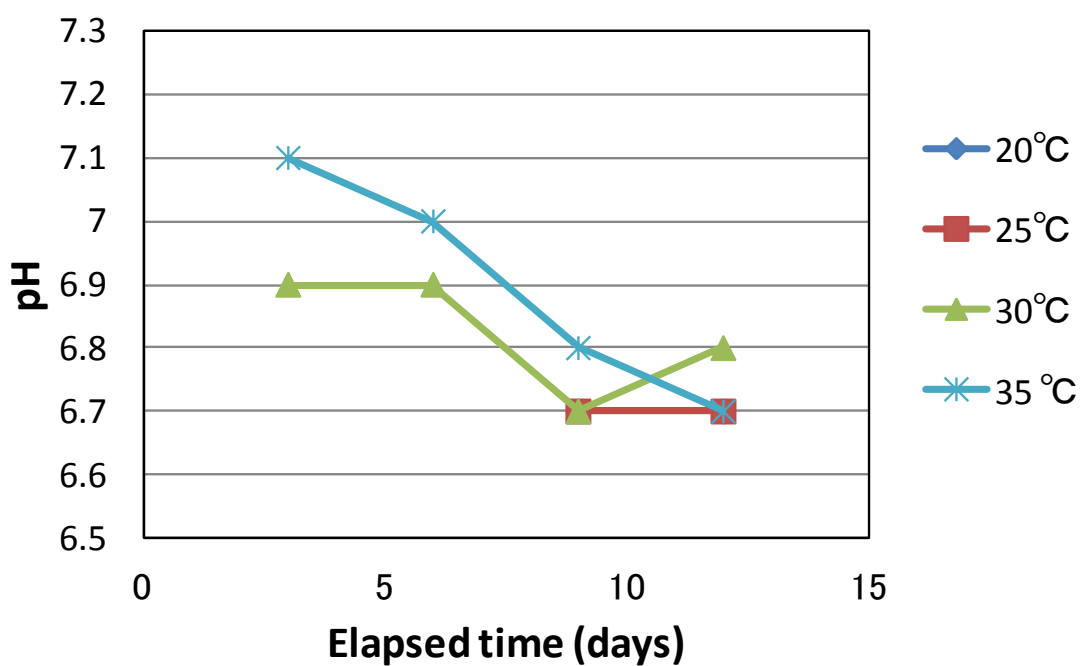


図 5.7 経過時間と排液の pH の関係

(B) 注入間隔

各供試体の本数は、注入間隔 0.5 日、1 日、2 日でそれぞれ 1 本、2 本、1 本とし、試験条件は表 5.6 の Case 1, 5, 6 の 3 ケースとした。

注入間隔と推定 UCS の関係を示した図 5.8 より、注入間隔 0.5～2 日の間において、注入間隔が短いほど、推定 UCS が大きくなった。また、注入間隔 2 日では、供試体上部しか固結しなかった。0.5 日および 1 日の間隔で注入した供試体の平均推定 UCS 値は、2 日間隔で注入した供試体上部の推定 UCS である 0.6 MPa のそれぞれ約 4 倍および約 3 倍であった。また、シリンジ開封後の供試体中の菌数は、図 5.9 のように注入間隔によらず同程度 ($10^7 \sim 10^8$ CFU/g) であった。

注入間隔 0.5 日と 1 日の供試体各 1 本に対して、排液の Ca^{2+} 濃度および pH の経時変化について測定した結果を図 5.10 および図 5.11 に示す。注入時の固化溶液の Ca^{2+} 濃度は 12400 ppm (CaCl_2 0.3 M の 12000 ppm と人工海水の 400 ppm の合計) であるため、この注入時の濃度と図 5.10 の各測定濃度の差が CaCO_3 析出量と比例する値と考えられる(この考え方の詳細は、後項 5.4.2 の(4)で述べる)。したがって、1 日間隔では半日間隔の 2 倍以上が析出していると言える。一方、排液の pH (図 5.11 参照) については、注入間隔 1 日の方が 0.5 日間隔よりも 0.1～0.3 だけ大きい傾向がみられた。

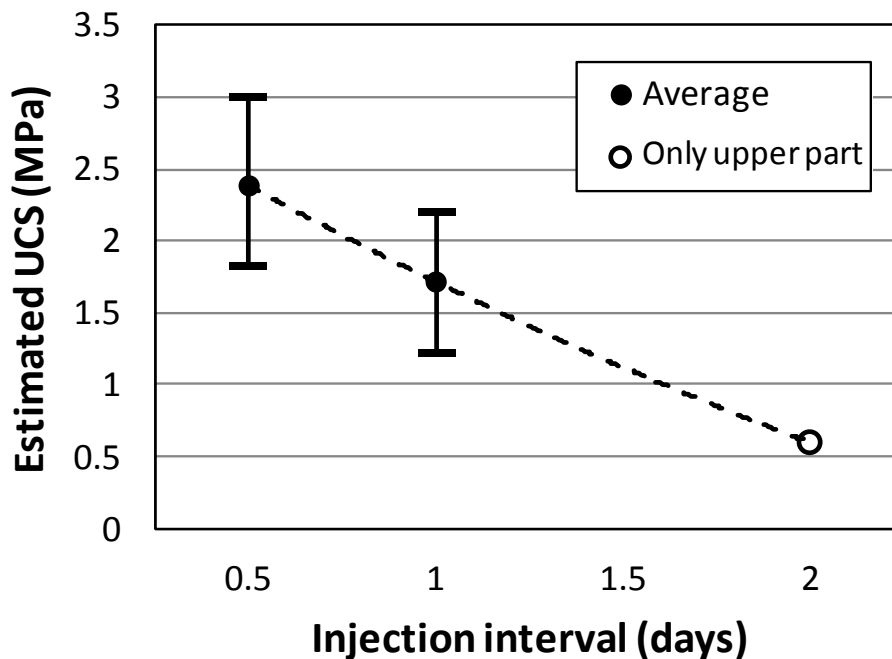


図 5.8 注入間隔と推定 UCS の関係

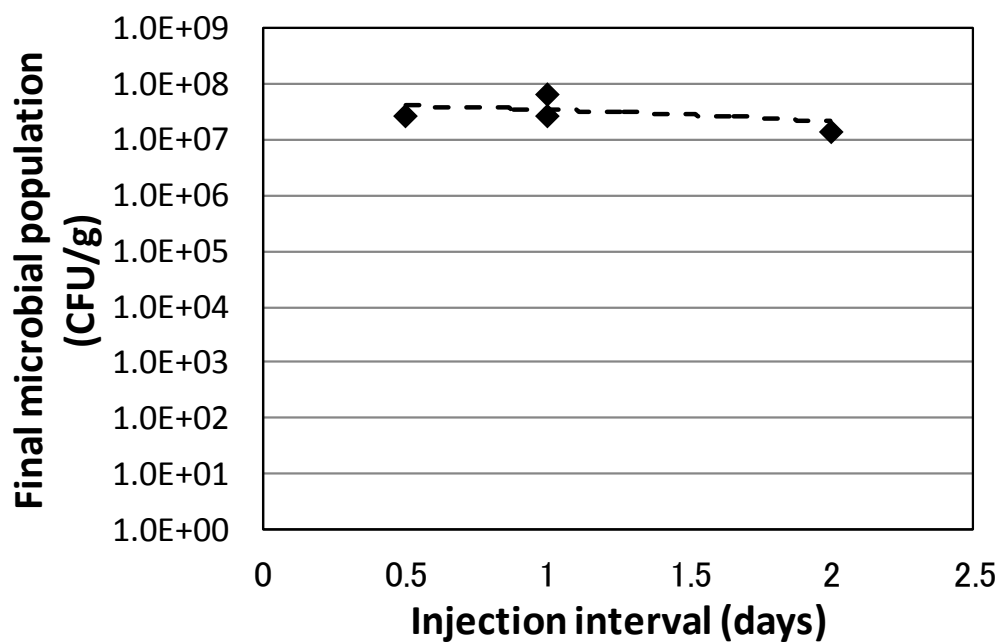


図 5.9 注入間隔と最終的な菌数の関係

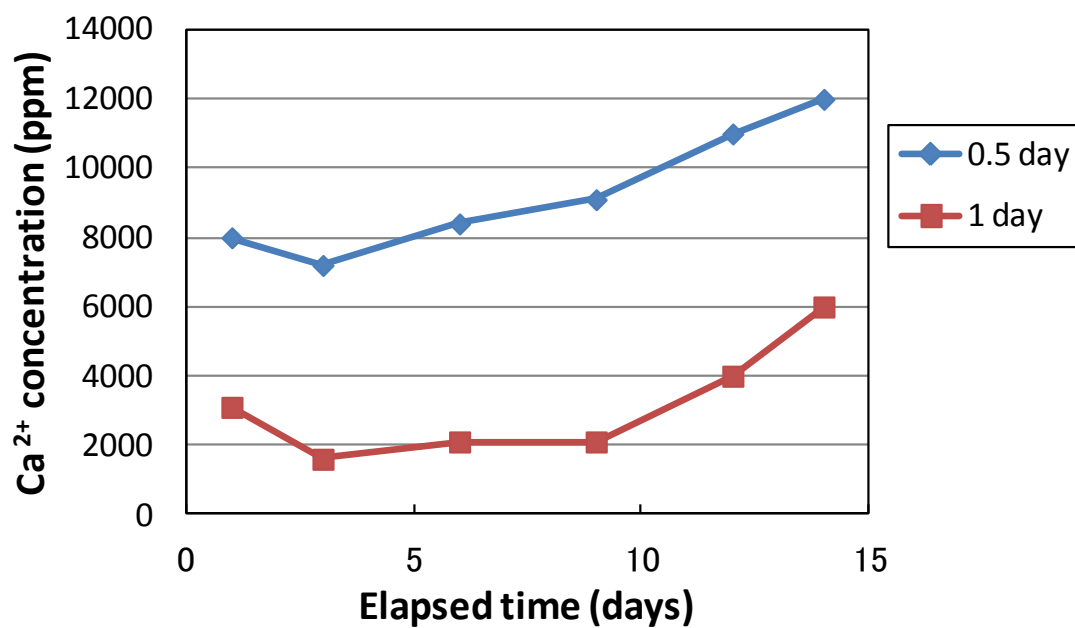


図 5.10 経過時間と排液の Ca²⁺濃度の関係

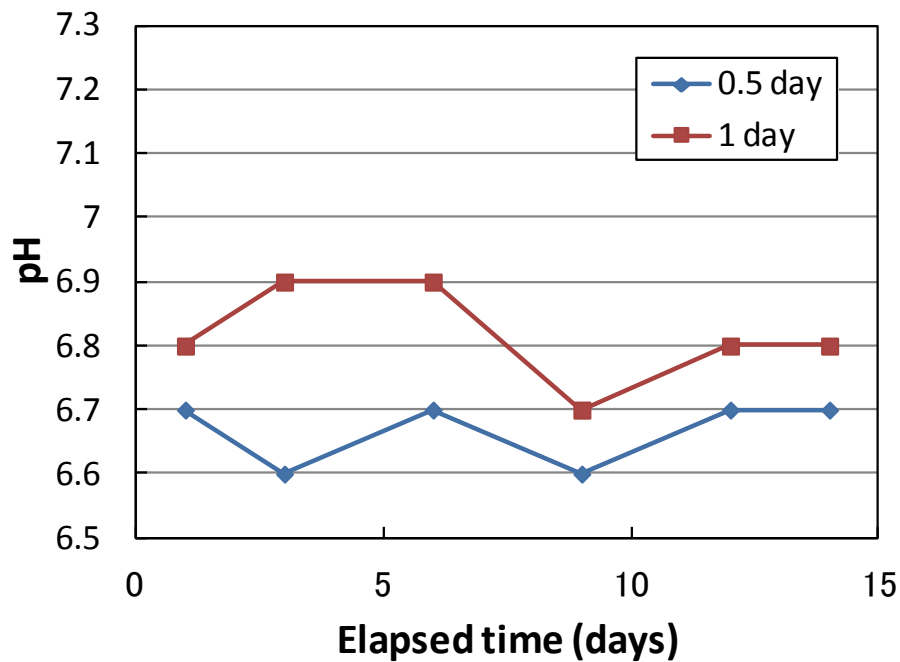


図 5.11 経過時間と排液の pH の関係

(C) 砂の種類

本試験条件は、表 5.6 の Case 1, 7 の 2 ケースとし、供試体数はサンゴ砂 6 本、豊浦砂 3 本とした。

図 5.12 は、それぞれの砂における最も平均的な推定 UCS を示した供試体 1 本ずつのシリンジ開封時の様子を示している。両供試体とも上端から 2 cm 程度は固結が進行しているため、表面の凹凸があまり見られない。しかし、それより下部は、特に豊浦砂供試体において緩く固結していることが形状から確認できる。

また、各供試体の高さごとの推定 UCS を示した図 5.13 より、供試体上部の推定 UCS 値は砂の種類によらず 1.5 ± 0.5 MPa 程度であった。また、供試体上端から 4 cm 以下では豊浦砂供試体 3 本のうち 2 本が未固結である一方、サンゴ砂供試体 6 本はいずれも 0.5 MPa 以上であった。

以上より、サンゴ砂供試体は全体が固結するのに対して、豊浦砂供試体は上部しか固結しないという傾向がみられた。

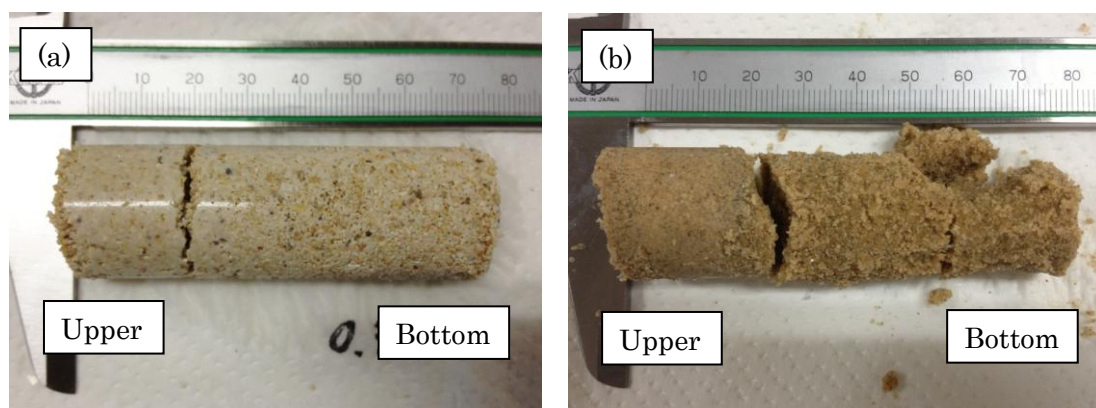


図 5.12 経過日数 14 日後の(a)サンゴ砂供試体 (Case 1) と(b)豊浦砂供試体 (Case 7)

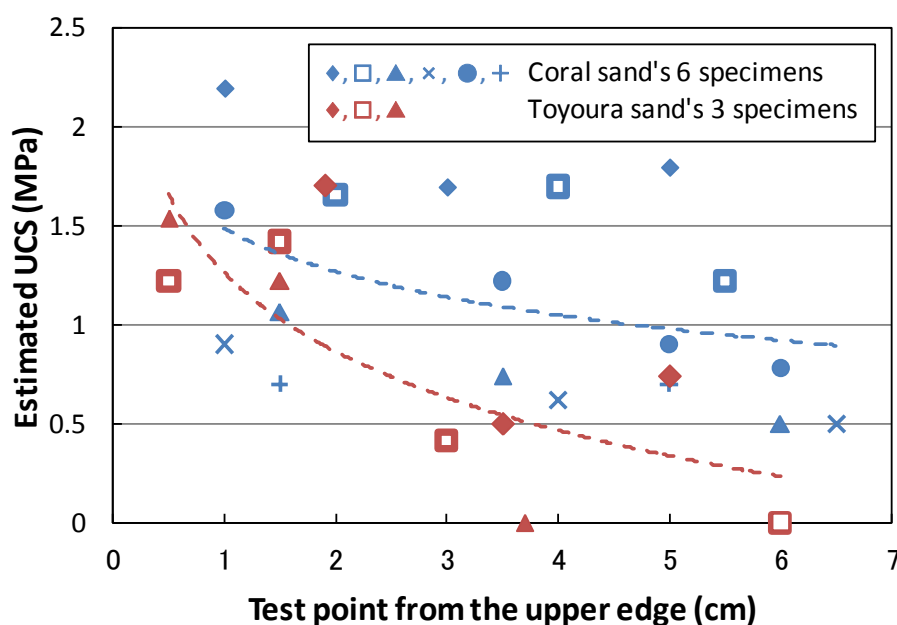


図 5.13 サンゴ砂と豊浦砂の供試体の推定 UCS 比較

(D) 固化溶液の Ca^{2+} 濃度

試験条件は、表 5.6 の Case 1, 8, 9 の 3 ケースとし、供試体数は各濃度 1 本ずつとした。なお、5.2.3 項の(D)で前述したとおり、 CaCl_2 濃度の変更に伴い、尿素のモル濃度も同様に変更している。

図 5.14 より、固化溶液中の CaCl_2 および尿素の濃度が高いほど、推定 UCS の値も大きくなる傾向がみられた。なお、シリンジを開封した際、0.2 M および 0.1 M の固化溶液を注入した供試体は、それぞれ上部のみが固結および未固結の状態であった。

図 5.15 より、3 種の異なる濃度の固化溶液を注入した供試体の排液中の Ca^{2+} 濃度は、0.1 M および 0.2 M の場合は 1000 ppm 前後を維持したが、0.3 M の場合は 2000 ppm～5000

ppm 程度に時間とともに大きくなる傾向がみられた。

図 5.16 より，注入時の固化溶液の pH は固化溶液中の CaCl_2 と尿素の濃度の違いによって pH の値が 0.1~0.2 異なっていることがわかる。また，排液の pH は注入時の溶液よりもそれぞれ 0.1~0.3（最大 0.5）低くなる傾向がみられた。すなわち，注入から排出までの 1 日間の養生の間に，pH が 0.1~0.3 小さくなっているということになる。

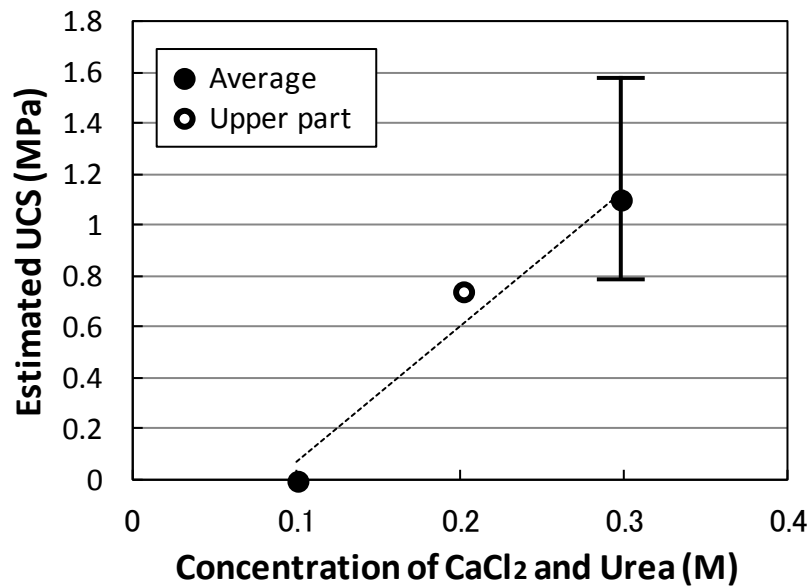


図 5.14 固化溶液中の CaCl_2 および尿素の濃度と推定 UCS の関係

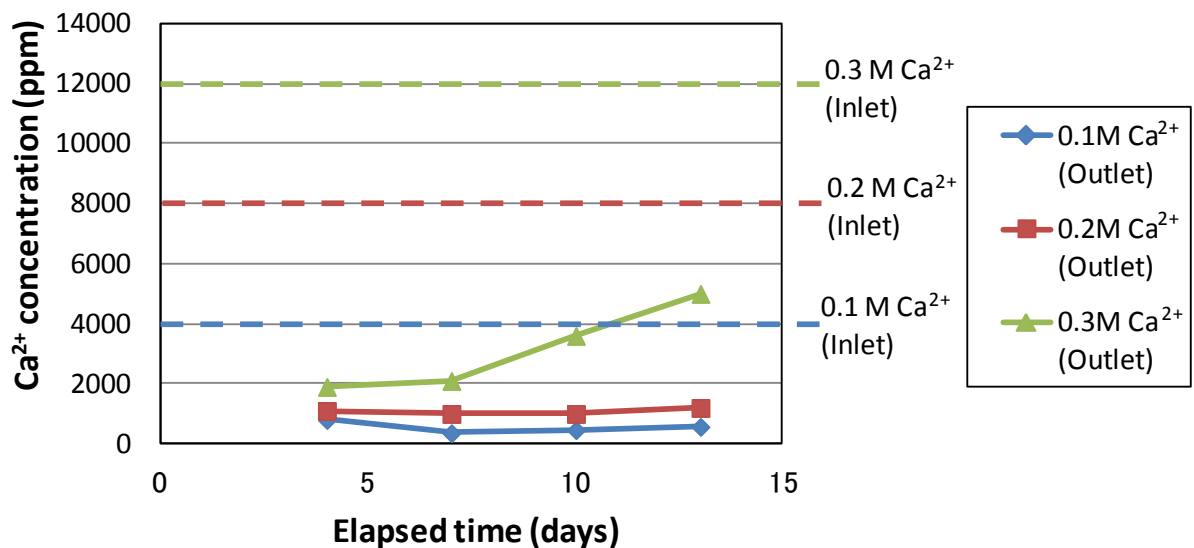


図 5.15 注入・排水した溶液の Ca^{2+} 濃度の経時変化

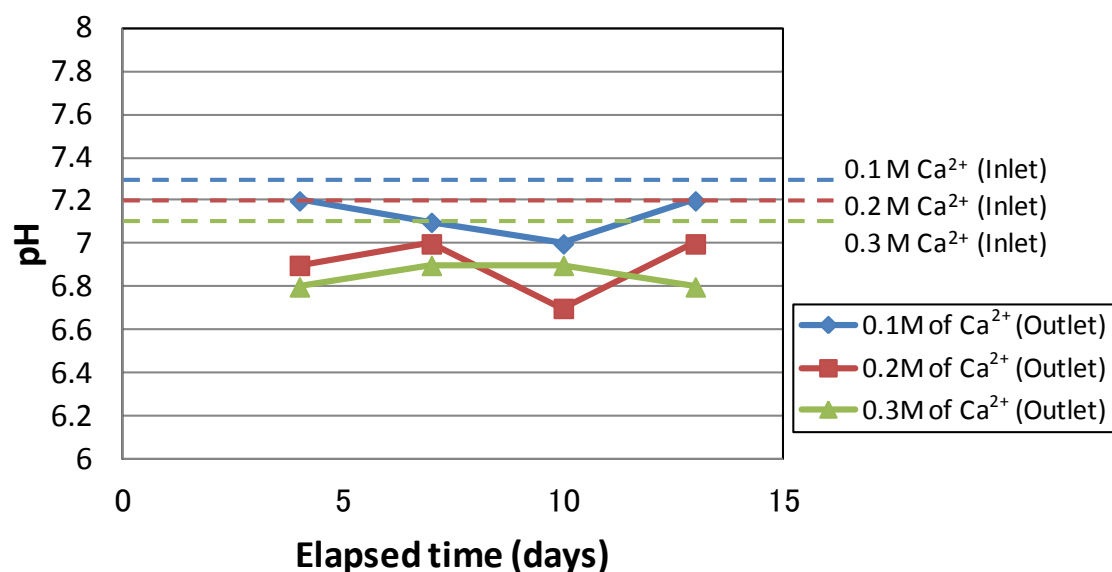


図 5.16 注入・排出した溶液の pH の経時変化

(E) 固化溶液の pH

試験条件は、表 5.6 の Case 1, 10, 11 の 3 ケースとし、pH の異なる 3 種類 (pH: 6.9, 8.0 および 9.0) の固化溶液をそれぞれ注入した供試体各 1 本ずつの推定 UCS の結果を図 5.17 に示す。同図より、試験範囲内では固化溶液の pH が低いほど UCS は大きくなる傾向がみられた。なお、pH 9.0 の固化溶液を注入した供試体は固結の程度が弱く、供試体上部しか針貫入試験を実施できなかった。また、固化溶液の pH の違いによる最終的な菌数の違いは小さく、いずれも 10^8 CFU/g 程度であった (図 5.18 参照)。さらに、図 5.19 より、排液の Ca²⁺濃度は pH8.0 の固化溶液を注入した供試体において最も低い値であった。経過日数 6 日までは、pH9.0 の固化溶液を注入した供試体の排液の Ca²⁺濃度が pH8.0 の供試体に次いで低かったが、経過日数 9 日以降は最も濃度が高い傾向となった。標準の固化溶液 (pH6.9) を注入した供試体の Ca²⁺濃度は、試験期間の間、比較的高い値を維持した。

排液の pH の経時変化を図 5.20 に示す。同図より、注入した固化溶液の pH が高いほど、排液の pH も高い傾向がみられた。また、pH6.9 の固化溶液を注入した供試体の排液の経過 6 日までの pH 変化を除くと、いずれの供試体の排液でも注入時の固化溶液の pH より低くなる傾向がみられた。

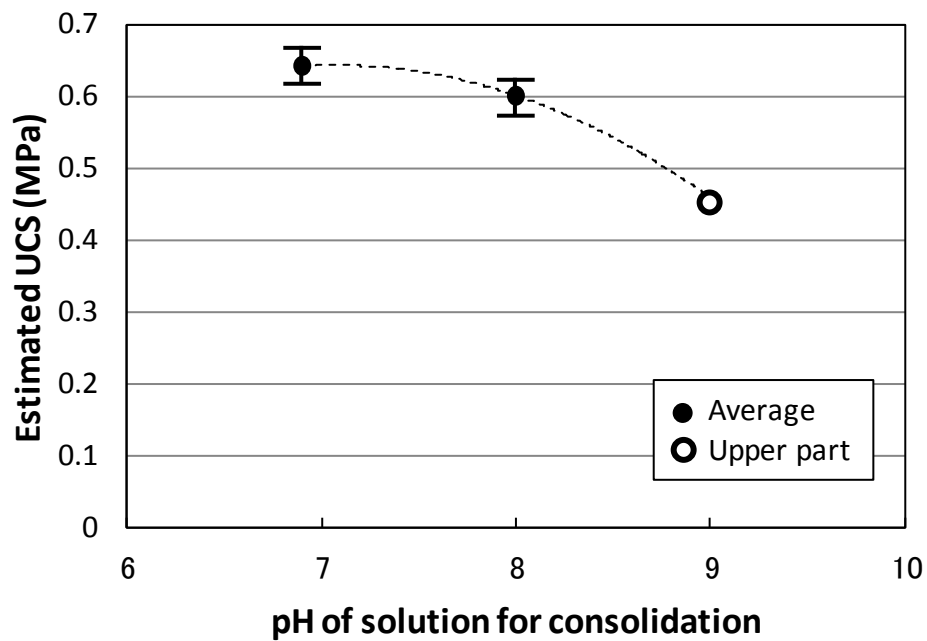


図 5.17 固化溶液の pH（注入時）と推定 UCS の関係

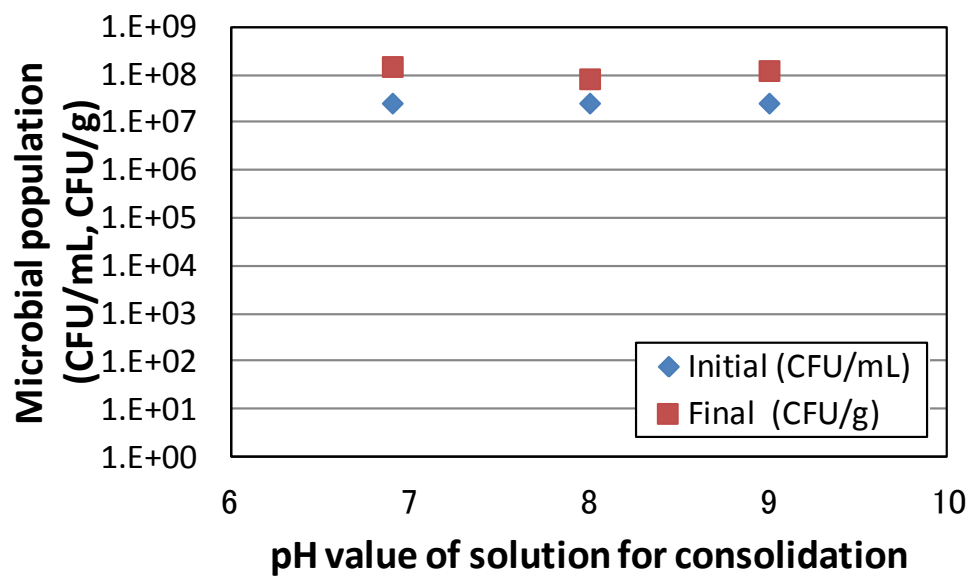


図 5.18 固化溶液の pH（注入時）と菌数（注入した培養液と開封時の供試体）の関係

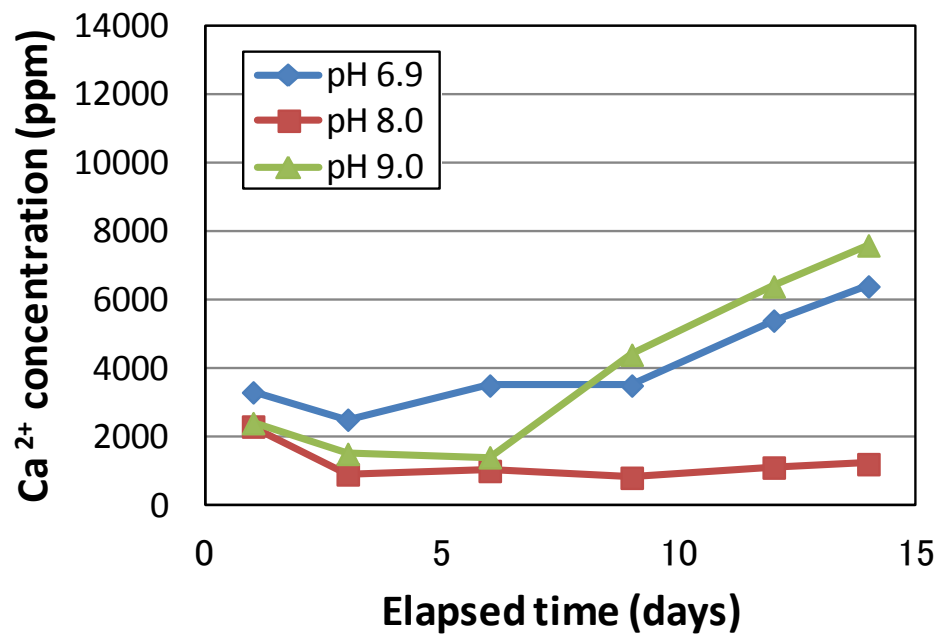


図 5.19 各供試体の排液の Ca^{2+} 濃度に関する経時変化

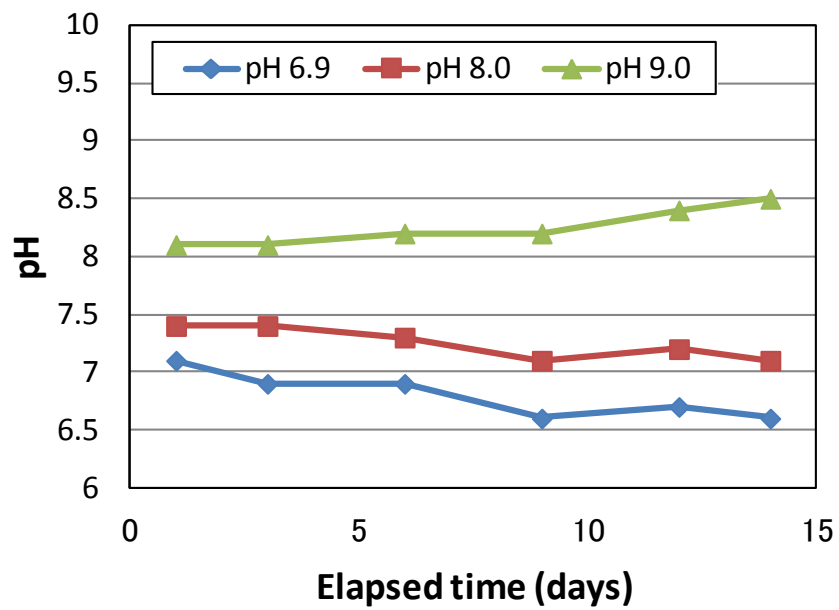


図 5.20 各供試体の排液の pH に関する経時変化

(F) 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度

固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度と推定 UCS の関係を、図 5.21 に示す。なお、試験ケースは表 5.6 の Case 1, 12~14 の 4 ケースとし、供試体数は各濃度で 1 本ずつとした。同図より、固化溶液にリンゴ酸ナトリウムが含有していると、含んでいない場合に比べて推定 UCS が小さくなる傾向がみられた。また、5 g/L 添加した場合は、添加量を 0.1 g/L や 1.0 g/L の場合に比べて、平均推定 UCS がおよそ 2 倍の 1 MPa 程度になることが示された。

図 5.22 および表 5.11 に、SEM-EDX の結果を示す。図 5.22 より、リンゴ酸ナトリウムを添加しない場合には結晶形が針状であったが、リンゴ酸ナトリウムを加えると針状ではない結晶が析出し、添加量によって結晶形が異なることがわかる。また、表 5.11 より、リンゴ酸ナトリウム添加の有無に関わらず主要元素は C, O, Ca であり、リンゴ酸ナトリウムを添加すると Mg の含有が確認できた。

表 5.11 の各元素含有率については、試料をカーボン蒸着しているために、C の含有率（分析値）は、試料自体の C の含有率に蒸着した C の含有率が足された値として表示されているため、試料の C 含有率ではない。このため、その他の元素含有率が試料の真の元素含有率より低く表示されている。よって、この分析結果（表 5.11 参照）はあくまで C 以外の相対的な検討にとどめておく必要がある。

シリンジ開封後の供試体中の菌数（図 5.23 参照）は、リンゴ酸ナトリウムの添加によらず $10^7 \sim 10^8$ CFU/g と同程度であった。

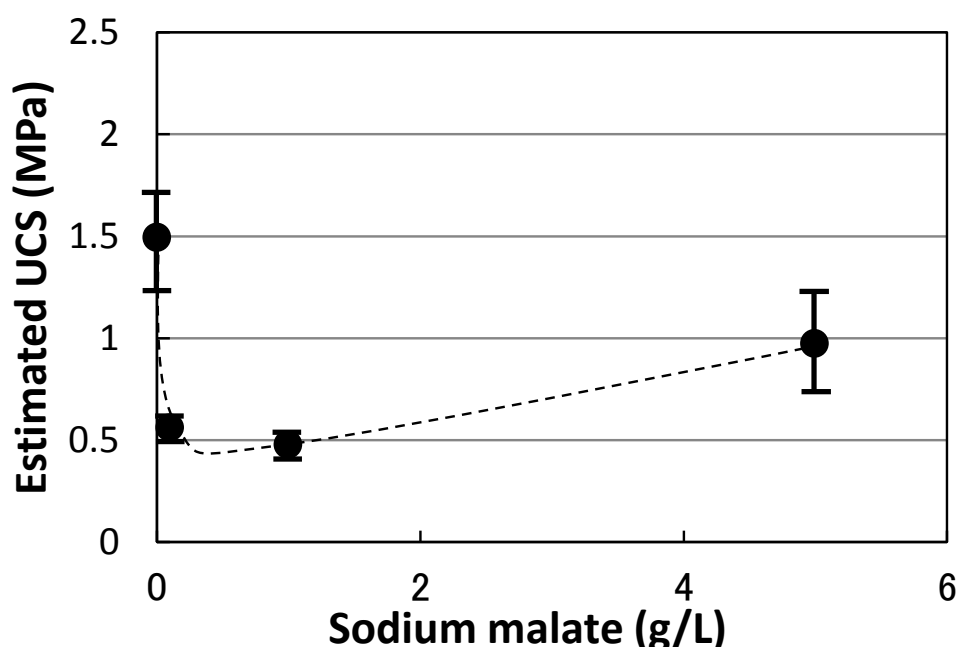


図 5.21 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度と推定 UCS の関係

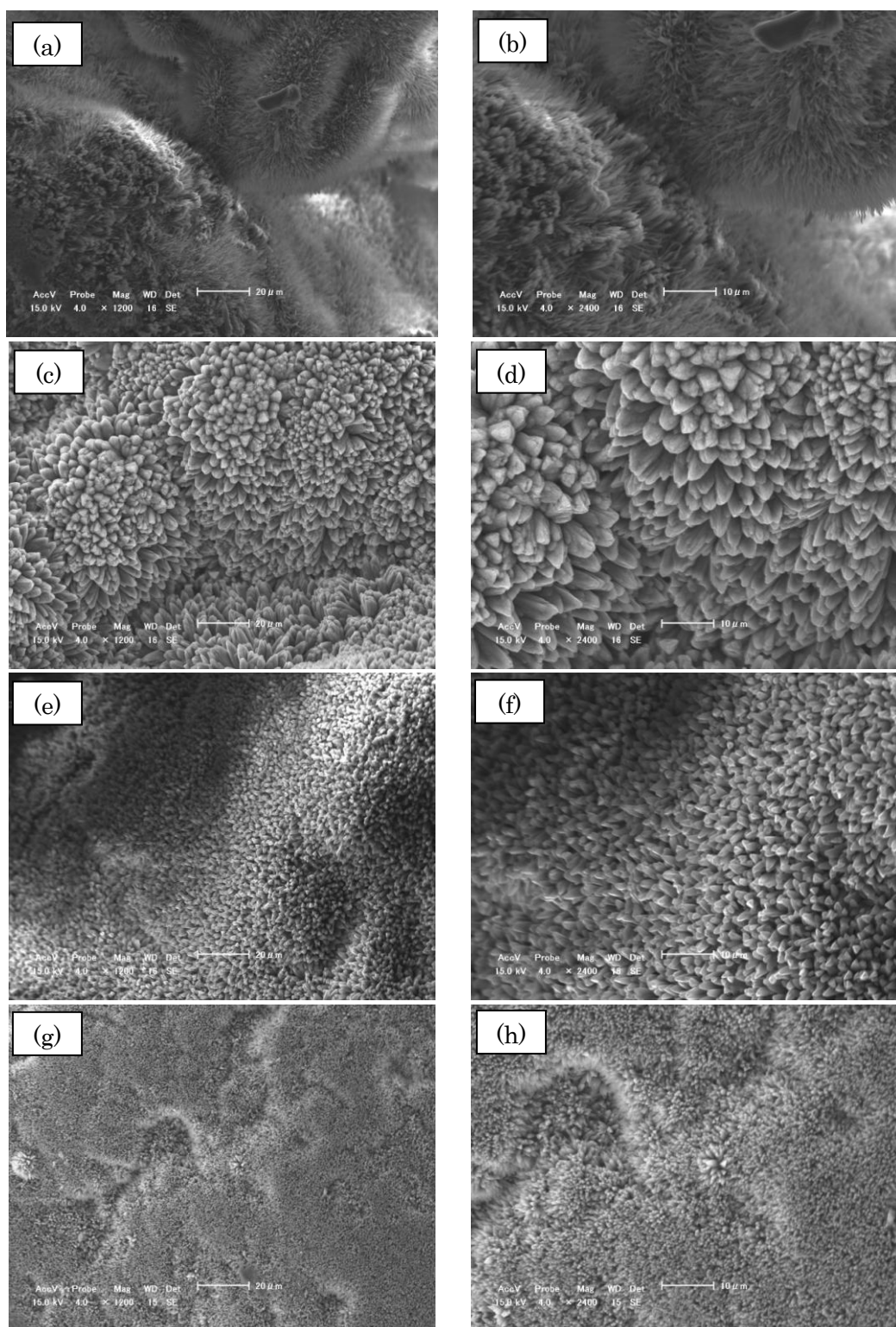


図 5.22 各供試体の試料表面の SEM 画像(固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L ((a) 1200 倍, (b) 2400 倍), 0.1 g/L ((c) 1200 倍, (d) 2400 倍), 1.0 g/L ((e) 1200 倍, (f) 2400 倍), 5.0 g/L ((g) 1200 倍, (h) 2400 倍))

表 5.11 各供試体の EDX 分析結果* (図 5.22 の 1200 倍の各 SEM 画像と対応)

Elements	Sodium malate (g/L)			
	0	0.1	1.0	5.0
C (wt%)	18.3	14.3	12.6	15.6
O (wt%)	49.6	46.7	43.6	40.3
Na (wt%)	0.5	0.5	0.4	0.0
Mg (wt%)	0.0	0.4	0.4	0.6
P (wt%)	0.0	0.5	0.7	0.0
S (wt%)	0.0	1.7	1.5	0.8
Cl (wt%)	0.0	1.6	0.6	0.0
Ca (wt%)	31.5	34.2	40.2	42.7

*カーボン蒸着しているため、C の含有率は蒸着量も含んでいるため、あくまで C 以外の元素含有率の相対的な評価にしか用いられない。

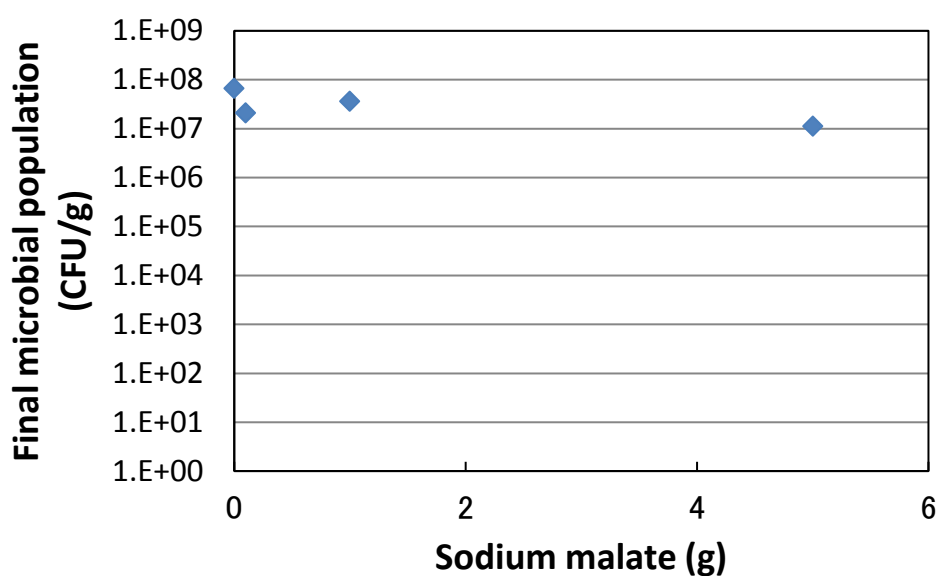


図 5.23 リンゴ酸ナトリウム濃度の異なる各供試体の
シリンジ開封時の供試体中の菌数

5.4 考察

5.4.1 16S rDNA の塩基配列解析による帰属分類群の推定

5.3.2 項で述べたとおり、アポロン DB-BA9.0 に対する BLAST 相同性検索の結果、対象株の 16S rDNA 塩基配列は *Rhodobacteraceae* 科の *R. antarcticum*^{5.8)} ZS2-28 株に対し相同率 95.6 % の最も高い相同性を示した。GenBank/DDBJ/EMBL に対する相同性検索の結果においても、対象株は同科の 16S rDNA 塩基配列に対して高い相同性を示した。一方、*Rhodobacteraceae* 科では、2013 年に *Pararhodobacter aggregans*^{5.9, 5.10)} が新属新種として提唱された。*P. aggregans* の基準株 D1-19 株に由来する 16S rDNA 塩基配列はアポロン DB-BA9.0 にも登録されているが、塩基配列長が約 1200 塩基と短く、上位 30 位には検索されなかった (表 5.9 参照)。そこで、別に *P. aggregans* D1-19 株に対して BLAST 相同性検索を行なった結果、対象株は相同率 97.2 % の高い相同性を示した。そこで、アポロン DB-BA9.0 での相同性検索結果に加え、*P. aggregans* D1-19 株の 16S rDNA 塩基配列を取得し簡易分子系統解析に供した。

アポロン DB-BA9.0 に対する相同性検索で得られた上位 15 塩基配列に、*P. aggregans* D1-19 株を加えて行なった 16S rDNA 塩基配列に基づく簡易分子系統解析の結果、対象株は *P. aggregans* とクラスターを形成した (図 5.24 参照)。同図より、このクラスターは、96 % の高いブートストラップ値で支持され近縁であることが示されたが、両者の間には距離が認められた。

一般に、16S rDNA 塩基配列の相同率において属を分ける境界は、相同率 95 % 程度であると報告されている (化学分類学的性状などとの総合的な判断を要する)^{5.11)}。また、互いに相同率 98.7 % 以上の相同性を示す菌株同士は、同種である可能性を考慮する必要がある^{5.12)}。今回、対象株と最も高い相同性を示した *P. aggregans* は *Pararhodobacter* 属の基準種であり、検体と *P. aggregans* の 16S rDNA 塩基配列の相同率は 97.2 % を示した。さらに、今回の簡易分子系統樹において対象株は *P. aggregans* とクラスターを形成し、このクラスターは 96 % の高いブートストラップ値で支持された (図 5.24 参照)。これらのことから、対象株は属レベルでは *Pararhodobacter* 属に帰属する可能性が高いと考えられる。その一方で、検体は *P. aggregans* とは種として異なり、さらに、現時点で検体は *Pararhodobacter* 属の新種を構成する可能性が考えられる。

したがって、対象株の種レベルでの帰属分類群を推定することはできなかったが、16S rDNA 塩基配列解析の結果から、対象株を *Pararhodobacter* sp. と推定した。

Foesel らの報告^{5.10)}によると、*Pararhodobacter* sp. は、非運動性・好気性の有機栄養細菌であり、光合成をしない中度好塩菌である。中度好塩菌は、NaCl 濃度で 0.5~2.5 M を最適増殖濃度とする微生物のことである。大部分の海洋細菌は、低度好塩菌 (最適増殖 NaCl 濃度 : 0.2~0.5 M) である^{5.13)} ため、本菌株は多くの海洋細菌よりも塩分への耐性が強いということがわかる。表 5.5 より、固化溶液は、溶媒の人工海水に NH₄Cl, NaHCO₃, CaCl₂

が含有しているため、通常の海水よりも塩分濃度が高くなっている。このような環境で本菌株が尿素分解反応を進めた理由の一つに、塩分への耐性の強さがあると言える。

アポロン DB-BA データベース Ver 9.0(2013 年 3 月現在) 検索日 2013 年 9 月 13 日

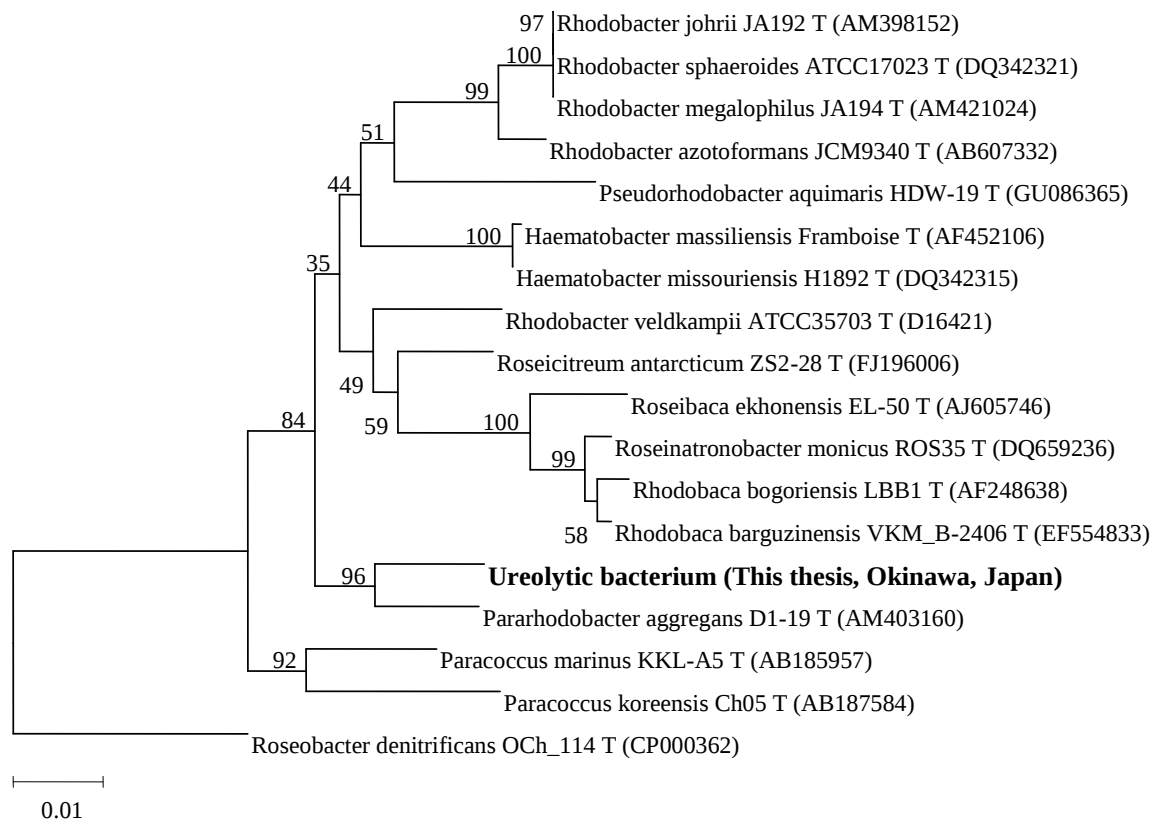


図 5.24 対象株の 16S rDNA 部分塩基配列に基づく簡易分子系統樹（左下の線はスケールバー，系統枝の分岐に位置する数字はブートストラップ値，株名の末尾の T はその種の基準株 (Type strain))

5.4.2 試験条件が UCS に与える影響

(A) 養生温度

図 5.4 より、養生温度（20～35 °C の範囲）が高いほど、推定 UCS が大きくなる傾向がみられた。この理由について、菌の最適増殖温度と CaCO_3 の溶解度特性の点から考察する。まず、菌の最適増殖温度については、Foessel et al.^{5.10)}によると本試験で用いた菌株と同属の *Pararhodobacter aggregans* の最適成長温度は 30～40°C である。属とは 1 つ、または、それ以上の主要な特性を共通にもった種の集まりである^{5.14)}ため、本試験で用いた菌株の最適増殖温度は *Pararhodobacter aggregans* と同程度である可能性がある。一方、 CaCO_3 の溶解度は温度が高いほど低くなるため、尿素分解作用によって生成された CaCO_3 は温度が高い条件でより析出しやすいといえる。

以上より、養生温度 20～35°C の範囲では、菌の最適増殖温度と CaCO_3 の溶解度特性の理由によって、温度がより高い条件で CaCO_3 の析出量がより多くなり、その結果として UCS が大きくなると考えられる。

(B) 注入間隔

注入間隔 0.5～2 日において、注入間隔が短いほど、供試体の推定 UCS 値が大きくなる傾向がみられた。この理由として、カルシウム源の添加量と比例関係にある注入回数に注目する。注入回数と推定 UCS の関係図（図 5.25 参照）をみると、そこには正の相関がみられた。

ここで、排液の Ca^{2+} 濃度を測定していた注入間隔 0.5 日と 1 日の両供試体の CaCO_3 総析出率を、図 5.10 の結果を用いて以下の方法によって計算した。

・ Ca^{2+} 濃度を測定したのは、経過日数 1, 3, 6, 9, 12, 14 日であるため、その他の経過

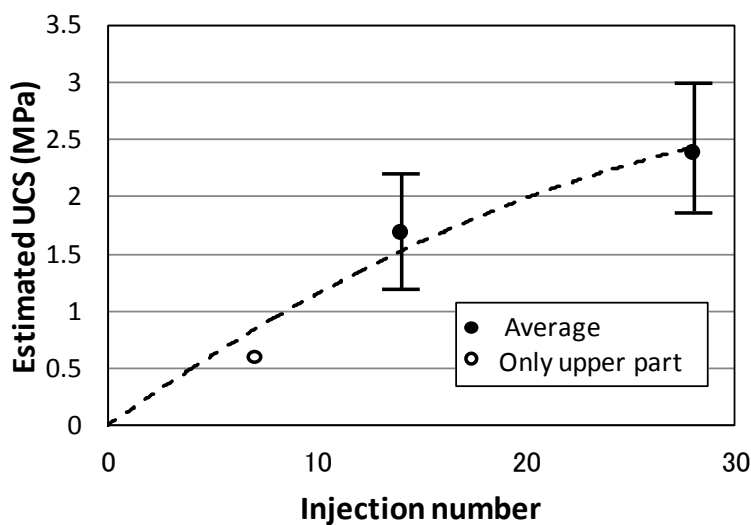


図 5.25 注入回数と推定 UCS の関係

日数における排液中の Ca^{2+} 濃度 C_i は、2 日は 3 日目の測定値と同じ、4、5 日は 6 日目の値と同じ、7、8 日は 9 日目の値と同じ、10、11 日は 12 日目の値と同じ、13 日は 14 日目の測定値と同じ、と仮定した。

- ・注入時の固化溶液の Ca^{2+} 濃度 C_i (ppm) は、12000 ppm である。これらの注入時の溶液の濃度 C_i と経過日数 n 日の排液の濃度 C_{on} (ppm) の差が、経過日数 n 日の析出した Ca^{2+} 濃度 C_{pn} (ppm) となる。

$$C_{pn} = C_i - C_{on} \quad (5.1)$$

- ・サンゴ砂の土粒子密度 ρ_s (g/cm^3) は、久保の報告^{5.15)}によると平均 $2.74 \text{ g}/\text{cm}^3$ であった。

$$\rho_s = (2.688 + 2.700 + 2.772 + 2.763 + 2.763 + 2.764) / 6 = 2.741667 \quad (5.2)$$

- ・供試体の体積 V_t は 28.5 cm^3 、供試体の砂の乾燥質量 m_{sd} は 40.0 g であるため、初期間隙体積 V_{v0} は 13.9 cm^3 である。

$$V_{v0} = V_t - V_s = 28.5 - 40.0 / 2.74 = 13.9 \quad (5.3)$$

- ・経過日数 $n-1$ 日～ n 日までの 1 日間の CaCO_3 析出量 m_{pn} (g) は、次式のとおりである。

$$m_{pn} = (C_{pn} / 1000 \cdot V_{vn-1} / 1000) \cdot 100.1 / 40.1 \quad (5.4)$$

なお、経過日数 n 日での空隙体積 V_{vn} (cm^3) は、次のとおりである。

$$V_{vn} = V_{v0} - \sum_{i=0}^n (m_{pi} / \rho_{\text{CaCO}_3}) \quad (5.5)$$

ここで対象とする CaCO_3 析出物は、SEM-EDX の結果から aragonite である（本項(F)参照）ため、aragonite の密度 $2.93 \text{ g}/\text{cm}^3$ を ρ_{CaCO_3} に代入した。

- ・経過日数 $n-1$ 日～ n 日の養生 1 日間における CaCO_3 の析出率 X_{pn} は、次式のとおりである。

$$X_{pn} = m_{pn} / m_{sd} \quad (5.6)$$

上記の方法によって求めた X_{pn} から求めた CaCO_3 総析出率の経時変化を、図 5.26 に示す。同図より、 CaCO_3 総析出率は、1 日間隔の方が 0.5 日間隔よりも大きい。それにも関わらず、注入回数が多いほど推定 UCS が大きくなる理由を、以下で考察する。

まず、Cheng et al. (2013)^{5.16)}によれば、供試体中の飽和度を小さくすると砂粒子同士の接点周辺で優先的に析出が生じ、析出総量が少なくても UCS がより大きくなることが示されている。次に、半日間隔は 1 日間隔の 2 倍の回数、固化溶液を注入するため、微生物が砂粒子間の接点周辺を含む砂粒子表面に押し流されて引っ掛かる機会が 1 日間隔の 2 倍あるといえる。さらに、微生物が砂粒子表面に分布している場合、砂粒子間の接点周辺を含む砂粒子表面で尿素分解反応および CaCO_3 析出が進行する。以上のことから、半日間隔では、1 日間隔よりも砂粒子間の接点周辺での CaCO_3 析出が進行したことによって、UCS がより大きくなった可能性がある。

以上より、注入間隔 0.5 日と 1 日では、固化溶液を短い間隔で注入すると、析出量は少なくなる。しかし、0.5 日間隔で注入すると、砂粒子間の接点周辺で CaCO_3 析出がより進行するため、UCS が 1 日間隔より大きくなると考えられる。

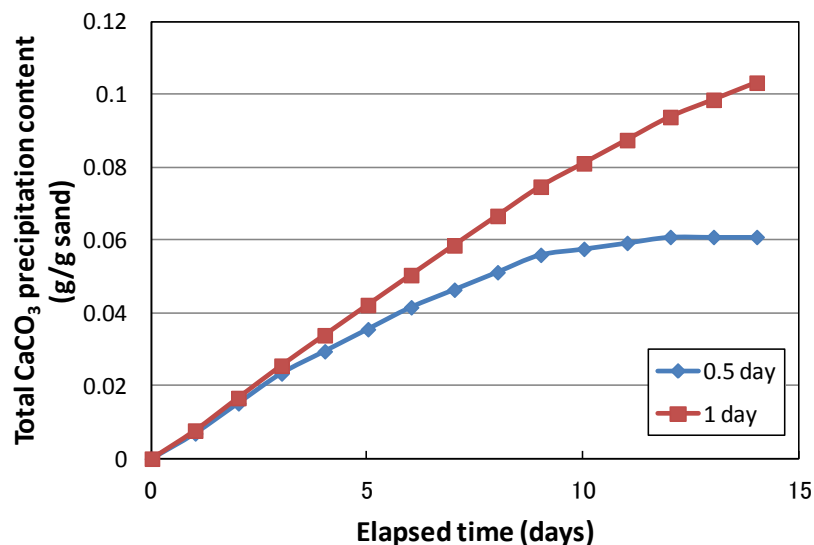


図 5.26 固化溶液の各注入間隔で作製した供試体中の CaCO_3 総析出率の経時変化

(C) 砂の種類

豊浦砂供試体は上部のみが固まり，サンゴ砂供試体は全体が固まる傾向がみられた。その原因として，いくつかの理由が考えられる。

第一に，砂の粒形である。山内の報告^{5.17)}によると，沖縄本島周辺の島々のサンゴ礁海岸の砂は，主にサンゴ破片，貝殻破片，有孔虫である *baculogypsina* および *calcarina* で構成されている。本試験に使用したサンゴ砂は，沖縄本島から採取したものであるため，上記の構成物質と同様であると考えられる。サンゴ砂の主な構成物質であるサンゴ破片は多孔質であり，また貝殻破片や有孔虫は表面の凹凸が顕著である。無作為に当倍率で撮影したサンゴ砂粒子表面の SEM 画像である図 5.27 の(a)からも，同様の傾向がみられた。一方，豊浦砂の表面は，図 5.27(b)よりわかるようにサンゴ砂に比して凹凸が少ない。そのため，サンゴ砂表面の方がより微生物や析出物が留まりやすく，引っ掛かりやすいと推察できる。逆に，豊浦砂表面には微生物や析出物が留まりにくいいため，供試体上部で微生物の増殖およびセメント物質の析出が進行した可能性がある。したがって，サンゴ砂の方が供試体全体に微生物や析出物が存在しやすいため，供試体全体の固化につながったと考えられる。

第二に，砂の表面電荷についてである。サンゴ砂は主に CaCO_3 から成り， CaCO_3 表面は水中では露出した CO_3^{2-} イオンに溶液中の Ca^{2+} イオンが吸着し，正電荷を帯びている^{5.18)}。一方，豊浦砂の主成分である SiO_2 の表面は負に帯電している^{5.19)}。微生物の体表面が一般的に負の電荷を帯びている^{5.20)}ため，微生物にとって豊浦砂表面よりもサンゴ砂表面の方が付着しやすいといえる。したがって，サンゴ砂表面では微生物による尿素分解反応および CaCO_3 の析出がより進行したと考えられる。

第三に，粒径の違いである。両砂の粒度分布について示した図 5.2 より，サンゴ砂と豊浦砂では粒径が異なっていることがわかる。平均粒径 D_{50} を比較すると，サンゴ砂は 0.70 mm，

豊浦砂は 0.17 mm と、約 4 倍の差がみられた。また、前述 5.2.3 項の(D)で述べたように、シリンジ供試体(体積:約 29 cm³)中の空隙体積は、サンゴ砂, 豊浦砂でそれぞれ約 14 cm³, 11 cm³ と、豊浦砂供試体の空隙体積はサンゴ砂の約 80 %であった。以上より、豊浦砂はサンゴ砂に比べて粒径が小さく、かつ空隙体積も小さいため、サンゴ砂よりもセメント物質や微生物の目詰まりが生じやすいため、豊浦砂供試体は上部のみしか固化しなかった可能性がある。

以上のことから、サンゴ砂と豊浦砂の供試体では、砂の粒形、表面電荷、粒径の違いによってサンゴ砂の方がより広い範囲を固化する可能性が示された。

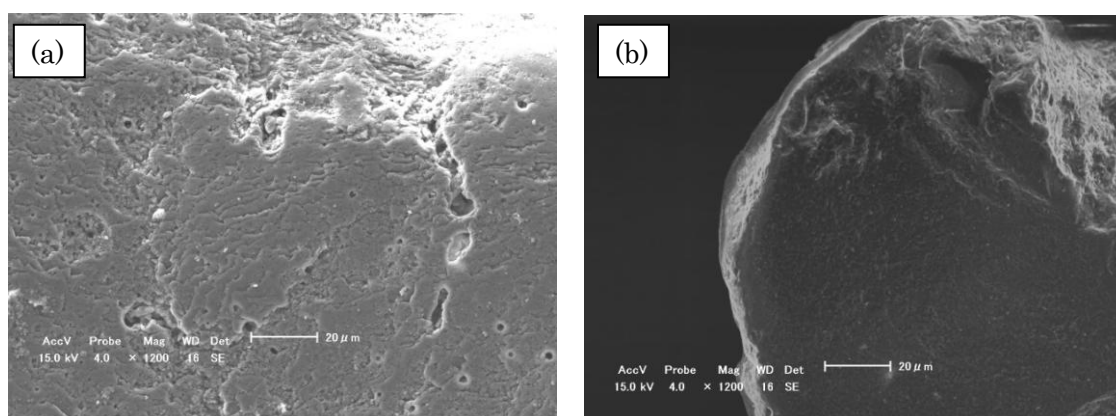


図 5.27 (a)サンゴ砂と(b)豊浦砂の SEM 画像 (1200 倍)

(D) 固化溶液の Ca²⁺濃度

固化溶液中の CaCl₂および尿素の濃度が高いほど、推定 UCS が大きくなる傾向がみられた。Ca²⁺濃度が 0.3 M, 0.2 M および 0.1 M の固化溶液を注入した供試体は、それぞれ全体が固結、上部のみが固結、未固結の状態となった。

このように固結の程度が異なった原因を検討するため、図 5.15 より、同項(B)で前述した CaCO₃析出率を求める方法で、3 種類の Ca²⁺濃度を注入した各供試体の CaCO₃析出率を計算した。ただし、前記(B)の方法とは、以下の点が異なる。

- ・ Ca²⁺濃度を測定したのは、経過日数 4, 7, 10, 13 日のみであるため、その他の経過日数における排液中の Ca²⁺濃度 C_t は、1～3 日は 4 日目の測定値と同じ、5～6 日は 7 日目の値と同じ、8～9 日は 10 日目の値と同じ、11～12 日および 14 日は 13 日目の値と同じと仮定した。
- ・ 注入時の固化溶液の Ca²⁺濃度 C_i (ppm) は、0.1, 0.2, 0.3 M でそれぞれ 4400, 8400, 12000 ppm である。

上記の方法によって求めた 1 日あたりの CaCO₃の析出率 (X_{pn}) の経時変化を、図 5.28 に示す。同図より、CaCO₃の析出率は 0.3 M の固化溶液を注入した供試体が経過日数 10 日までは最も大きいことが分かる。特に経過日数 7 日までは、1 日あたり 0.82～0.88 %

(0.0082~0.0088 g/g sand) と他の 2 供試体に比べて大きい析出率を示した。

また、試験期間 14 日での CaCO_3 析出率（合計）と平均推定 UCS（供試体ごとの 3 点平均。供試体の高さごとの議論は、供試体サイズの大きい次章で述べる。）の関係（図 5.29 参照）をみると、析出率 8.5~10 %に増加する間に平均推定 UCS は 0.2~1.2 MPa へと増加している。Cheng et al.^{5.16)}も、析出率と UCS の間に同様の傾向があることを示している。この合計の析出率の違いは小さくても UCS に大きな差が生じる原因の 1 つとして、図 5.28 より、1 日あたりの析出率の小さな違いが結果的に供試体全体の UCS の違いにつながっている可能性が考えられる。すなわち、1 日あたりの析出率が 0.6 %程度では砂粒子同士の接点周辺での析出率として不十分であり、試験期間 14 日で平均推定 UCS を 1 MPa 以上に固化するためには、供試体が未固結であるために不安定な試験開始から 7 日までは 1 日あたりの析出率が 0.8~0.9 %程度必要であると推察される。

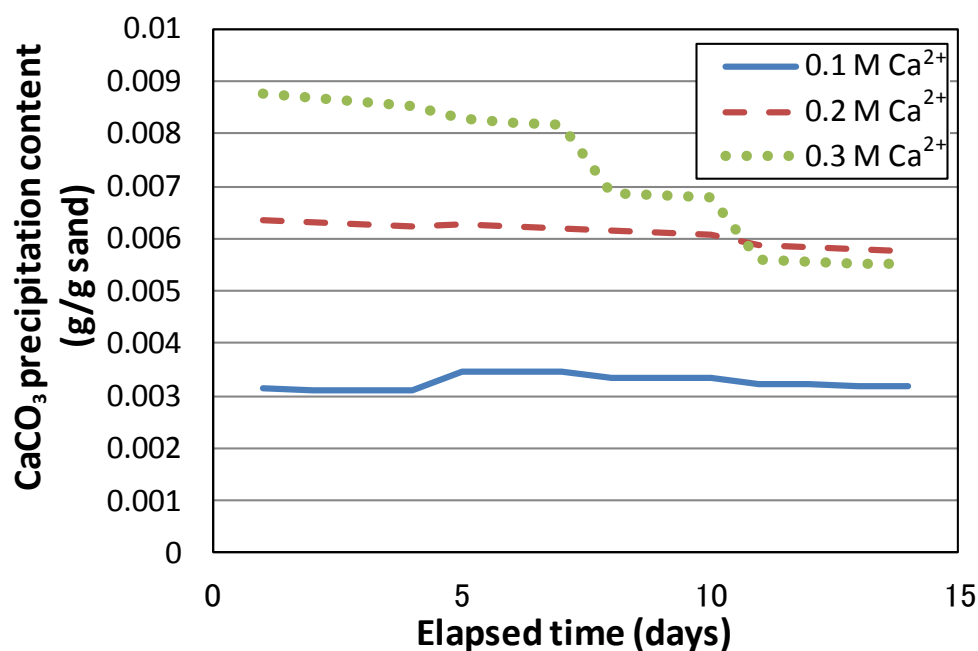


図 5.28 1 日あたりの CaCO_3 の析出率の経時変化

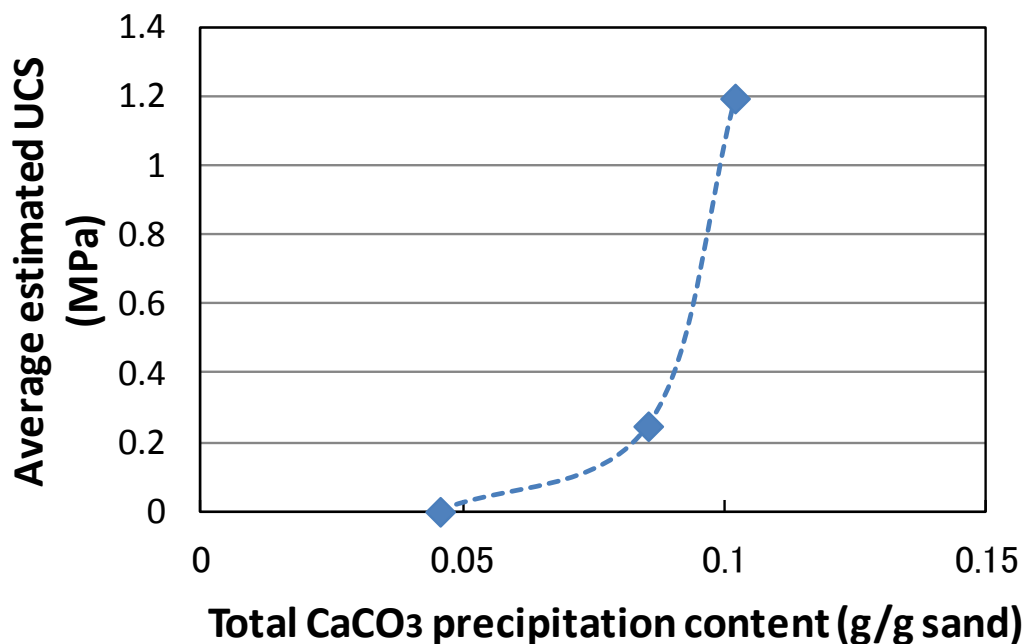


図 5.29 CaCO₃ 総析出率と平均推定 UCS の関係

(E) 固化溶液の pH

固化溶液の pH 6.9～9.0 の範囲において、pH の低い固化溶液を注入した供試体の方が、より大きな UCS となる傾向がみられた (図 5.17 参照)。この原因について、以下に考察する。

第一に、固化溶液作成時 (固化溶液に加える試薬をすべて加えた後の攪拌時) と固化溶液作成後に 24 時間静置した後の両溶液の Ca²⁺濃度の測定結果を図 5.30 に示す。なお、測定に用いた Ca²⁺濃度計は 20 %のエラーを含んでいる。また、10000 ppm 以上の濃度は 1000 ppm 単位で表示される。そのため、12400 ppm が実際の値の場合、表示される値 (測定値) は 12000 または 12000±2000 ppm となる。本試験においても、作成直後の固化溶液 (12400 ppm 濃度) の測定値が、12000 ppm より大きな値である 13000 もしくは 14000 ppm と表示されることがあったが、Ca²⁺の実際の添加濃度に最も近い 12000 ppm を上限とし、12000 ppm より大きな値を示した場合のみ 12000 ppm と修正し、図 5.30 を作成した。同図より、標準の固化溶液 (pH 6.9) では時間の経過によらず 12000 ppm を維持したが、pH 8.0 および 9.0 の固化溶液では、1 日間静置している間に Ca²⁺が析出することが示された。

第二に、図 5.30 の試験時の pH 変化を図 5.31 に示す。同図より、いずれの固化溶液においても pH は 0.1～0.2 低下する傾向がみられた。しかし、CaCO₃が析出する化学的な反応は pH 上昇に伴って生ずることを考慮した上で、図 5.30 および 5.31 をみると、pH8.0 および pH9.0 の固化溶液は標準溶液 (pH 6.9) に比べて pH が高いため、pH と溶解度の関係 (pH7～9 の範囲では、pH が高いほど Ca²⁺の溶解度は低い) から溶液を作製した時点で飽和度を

超えていた可能性がある。それにもかかわらず、作製時においていずれの固化溶液でも 12000 ppm となった理由は、攪拌中であつたため、一時的にすべて溶解されていたためであると推測できる。

ここまですとまとめると、標準の固化溶液 (pH 6.9) では添加した Ca^{2+} 濃度が飽和度に達していないため、1 日間静置しても添加した Ca^{2+} はすべて溶けていたが、pH 8.0 および 9.0 の固化溶液は pH が標準のものよりも大きいために溶解度がより低いため、作製後に一部析出したと考えられる。

第三に、図 5.19 と図 5.30 から化学的および生物学的な反応による析出率をそれぞれ推定すると表 5.12 のとおりとなる。なお、同表の初期濃度 (Initial concentration) は、図 5.30 と同じ 12000 ppm とした。また、化学的な析出率 (Non-biological reaction) は、図 5.30 に示す静置している間に析出した濃度とした。この反応は、前述したとおり pH と溶解度の関係によるもので、注入直後に生じたと推察される。さらに、最終濃度 (Final concentration)、すなわち注入して 1 日養生した後に排水した排水の濃度は、図 5.19 の各供試体の全測定値の平均とした。そして、初期濃度から化学的な析出率と最終濃度を引いた値を、生物学的な析出率 (Biological reaction) とした。同表より、化学的な析出率は固化溶液の pH が大きいものほど大きく、生物学的な析出率は大きい順に固化溶液の pH が 8.0, 6.9, 9.0 となった。

この化学的および生物学的析出はどこで生じるかを考察すると、化学的析出は間隙水中であればどこでも生じ得る。一方、一般的に負に帯電している微生物は正に帯電しているサンゴ砂粒子表面や CaCO_3 析出物表面に静置しやすいと推察されるため、生物学的な析出は砂粒子表面で生じやすく、その結果、砂粒子同士の接点周辺での析出も生じやすいと推察できる。ただし、実際の微生物の分布場所については今後の課題とする。したがって、化学的析出は間隙を埋めるケミカルクロッキング、生物学的析出は砂粒子や CaCO_3 析出物同士を接着するバイオセメンテーションとなりやすいと考えられる。

以上をまとめると、 CaCO_3 析出率は pH 8.0 の固化溶液を注入した供試体で最も大きい、ケミカルクロッキングが一部生ずるため、ケミカルクロッキングによって目詰まりが起こりやすくなり、また粒子 (砂粒子や CaCO_3 粒子) 数の増加に伴って全粒子の表面積が増加するために粒子間接点周辺で析出する割合が低下し、全体の固化が進行しづらくなつたと推察される。同様に、pH 6.9 および pH 9.0 の固化溶液を注入した供試体の UCS に違いが生じた理由は、それぞれ生物学的析出によるバイオセメンテーションおよび化学的析出によるケミカルクロッキングが優先的に生じたためであると考えられる。なお、実際の生物学的析出量や化学的析出量については、レーザーラマン顕微鏡や薄片観察による鉱物分析や、示差熱分析による有機物含有量の測定を行なうことで、より正確に分析できると考えられる。

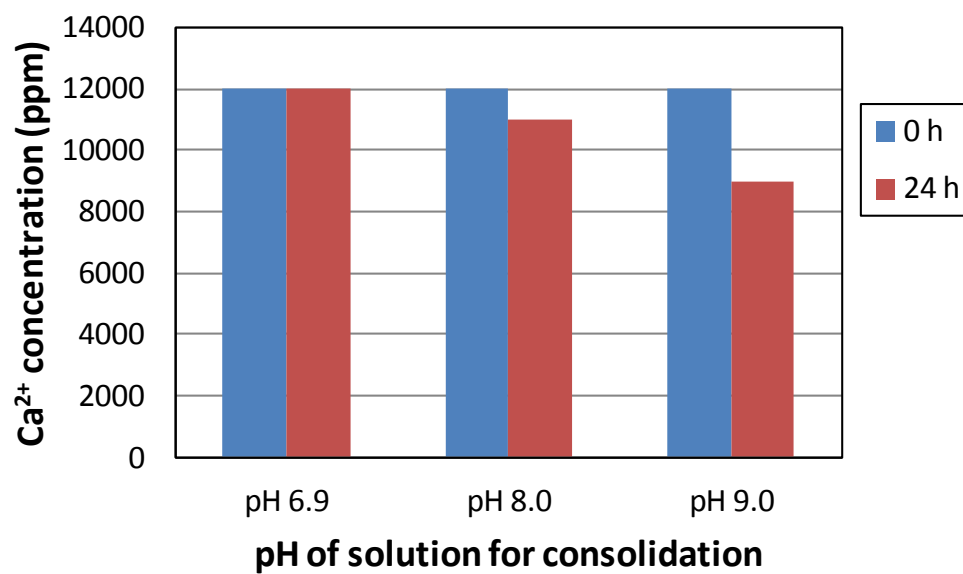


図 5.30 pH の異なる固化溶液の作成時と 24 時間静置後の Ca^{2+} 濃度

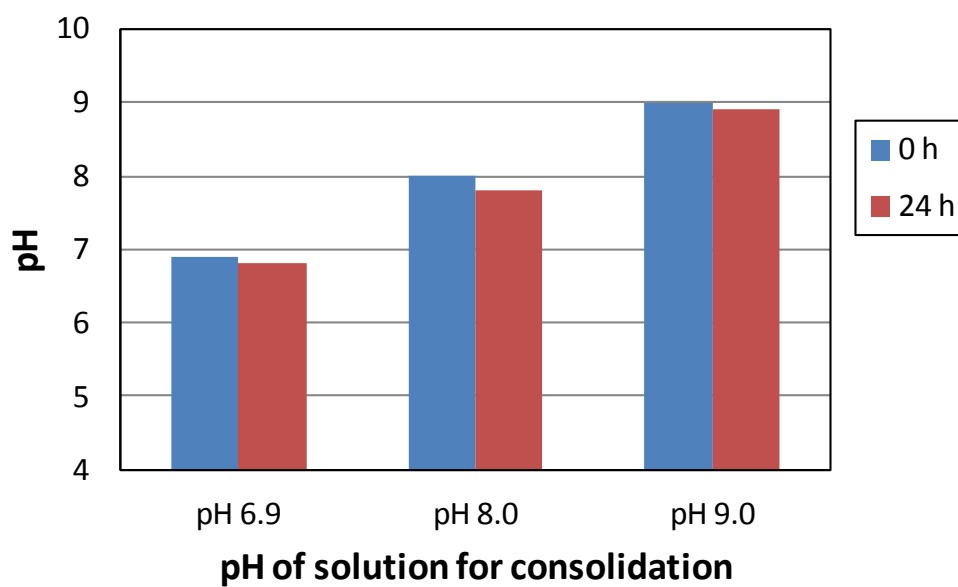


図 5.31 pH の異なる固化溶液の作成時と 24 時間静置後の pH

表 5.12 pH の異なる固化溶液を注入した際の供試体間隙溶液の Ca^{2+} 濃度の変化

Pore solution	pH value of solution for consolidation		
	6.9	8.0	9.0
Initial concentration (Inlet)	12000 ppm	12000 ppm	12000 ppm
Non-biological reaction	0 ppm	1000 ppm	3000 ppm
Biological reaction	7900 ppm	9800 ppm	5000 ppm
Final concentration (Outlet)	4100 ppm	1200 ppm	4000 ppm

(F) 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度

固化溶液へのリンゴ酸ナトリウム添加の有無およびその添加量の違いによって、供試体のセメント物質や UCS が異なることが示された。すなわち、リンゴ酸ナトリウムを添加する場合、その添加量が多いほど、UCS も大きくなる傾向がみられた。また、添加した場合としない場合では、しない方が UCS は 1.5～3 倍程度大きかった。リンゴ酸ナトリウムの添加の有無による本試験結果について、以下考察する。

まず、セメント物質について特定すると、リンゴ酸ナトリウムを添加しない場合のセメント物質は、針状の結晶形および C, O, Ca から成る主要元素より、aragonite であると推定できる。また、リンゴ酸ナトリウムを 5.0 g/L 添加した場合のセメント物質の結晶形（図 5.22 (g, h)）は、high Mg-calcite (HMC) の結晶形^{5.21)}と類似している。なお、HMC とは、 MgCO_3 の含有率が 1.2 wt% より大きい CaCO_3 の多形体のことである^{5.22)}。また、HMC はその X 線回折の結果から、calcite 形の CaCO_3 中に calcite 形の MgCO_3 または $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ が固溶体の形で入り込んでいることが明らかにされている^{5.6, 5.23)}。表 5.11 より、リンゴ酸ナトリウムを 5.0 g/L 添加した場合のセメント物質は、主要元素である C, O, Ca に加えて、Mg を 0.6 wt% 含有していた。ただし、前述したようにカーボン蒸着試料に対して行なった元素分析の結果であるため、実際の試料の C 含有率よりも C 含有率が大きく定量されており、それに伴って他の元素含有率は実際の含有率よりも小さく表示されている。そのため、Mg 含有率から MgCO_3 に換算した値 2.1 wt% も実際は 2.1 wt% よりも大きい。したがって、試料の MgCO_3 含有率は、HMC の定義である 1.2 wt% より大きい。以上の結晶形、元素含有率が示す理由によって、リンゴ酸ナトリウムを 5.0 g/L 添加した場合のセメント物質は HMC であると推定される。リンゴ酸ナトリウムを 0.1 g/L および 1.0 g/L 添加した場合のセメント物質は、上記 2 つのセメント物質と同様に C, O, Ca を主要元素とするが、その結晶形は aragonite や HMC、さらに calcite と異なることから CaCO_3 系のその他の結晶または非晶質であると推察される。

次に、北野^{5.6)}の報告（抜粋）から関連事項を以下に一部抜粋した。

- (1) citrate, malate (リンゴ酸), glycogen などのように Ca^{2+} との錯体の生成定数が大きく、錯体を作りやすく、したがって炭酸塩の生成速度を小さくさせる有機物質が母液に溶けていると calcite 形の CaCO_3 が非常に生じやすい。母液に Mg^{2+} が存在すると aragonite

形の CaCO_3 ができやすいが、この種の有機物が母液にある濃度以上溶存すると Mg^{2+} が存在していても、 Mg^{2+} の影響に打ち勝って calcite 形の CaCO_3 を生成する。

- (2) 炭酸塩を生成する母液の Mg^{2+} の濃度が高く、 Ca^{2+} と錯体を作る有機物の濃度が低いときは、 $0\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ くらいの温度範囲では、aragonite のみを生ずる。また、母液の Mg^{2+} の濃度に較べて Ca^{2+} と錯体を強く作る有機物の濃度が高いときは、温度に無関係に calcite のみが生成する。さらに、母液の Mg^{2+} と有機物の結晶晶出への影響力がほぼ拮抗するときには、calcite と aragonite の両方の結晶が生成する。
- (3) リンゴ酸ナトリウムなどの有機物が含有している溶液中では、HMC が析出する。また、有機物濃度(本試験ではリンゴ酸ナトリウム濃度)が高いほど、生ずる HMC 中の MgCO_3 含有量が大きくなることを実験によって明らかにした。

以上より、リンゴ酸ナトリウム添加の有無による UCS への影響は、次のとおりであると考えられる。リンゴ酸ナトリウムを添加しない場合は、固化溶液に Mg^{2+} が溶存しているために、aragonite がセメント物質として析出する。なお、固化溶液には溶媒の人工海水以外に Mg^{2+} は含有していないため、固化溶液に溶存している Mg^{2+} 濃度は人工海水中の Mg^{2+} 濃度 1.33 g/L とほぼ等しい。上記の北野の報告に従えば、リンゴ酸ナトリウムを 0.1 g/L 添加した場合は、その添加濃度が Mg^{2+} 濃度より低いため aragonite が生成し、リンゴ酸ナトリウムを 1.0 g/L 添加した場合は、添加濃度が Mg^{2+} 濃度と近いので、calcite と aragonite の両方の結晶が生成されることが考えられる。しかし、実際には aragonite や HMC、さらに calcite と異なる結晶形であることから、 CaCO_3 系のその他の結晶または非晶質が析出した。これは、北野が行った実験とは微生物の添加の有無や溶液の配合が異なることに起因すると考えられるが、詳細は今後の課題とする。さらに、リンゴ酸ナトリウムを 5.0 g/L 添加した場合は、添加濃度が Mg^{2+} 濃度より高いこととリンゴ酸ナトリウムを添加したことによって、calcite 形の結晶である HMC が析出したと考えられる。最後に、リンゴ酸は錯体を作ることによって炭酸塩の生成速度が低くなるため、セメント物質の析出量がリンゴ酸ナトリウムを加えない場合に比べて少なくなり、その結果 UCS も小さくなったと推察される。

5.4.3 重回帰分析による設計 UCS の検討

前項では、各試験条件が UCS に与える影響について評価した。本項では、少ない実験回数で重要要因が絞り込め、その重要度が算出できる統計的手法である重回帰分析^{5.24)}を実施し、UCS にとって重要な試験条件および設計 UCS (各試験条件を説明変数とした UCS の予測式) について検討する。

各試験条件を説明変数とし、前述の固化試験によって得られた推定 UCS を目的変数とした場合の重回帰分析の結果は、式 (5.7)、表 5.13 のとおりである。

$$q_{\text{ud14}} = -1.227\,f + 0.1180\,T - 0.417\,S + 6.01\,C_{\text{ca}} - 0.0496\,C_{\text{so}} - 0.328\,pH - 0.351 \quad (5.7)$$

(決定係数 : 0.65)

ここに、

- q_{ud14} : 試験期間 14 日の設計 UCS (MPa)
- I_i : 注入間隔 (日)
- T : 養生温度 (°C)
- S : 砂の種類 (サンゴ砂を 1, 豊浦砂を 2 とする)
- C_{ca} : 固化溶液の Ca イオン濃度 (M)
- C_{so} : 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 (g/L)
- pH : 固化溶液の pH

である。

表 5.13 の各要素について説明すると、次のとおりである^{5.25)}。

偏回帰係数 (Partial regression coefficient) は、重回帰分析によって求めた重回帰式の各係数のことであり、実績値と理論値が近くなるように定めたものである。

標準誤差 (Standard error) は、次のとおりである。ある集団の n 人を対象とした調査を行ない、任意の変数 x_1, x_2 , について重回帰式を当てはめて、 $y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_0$ を求めたとする。現実的にはあり得ないことだが、このような調査を何回か行い、調査ごとに重回帰式を得たとする。求めた偏回帰係数 a_1, a_2 , および定数項 a_0 の度数分布を計算しヒストグラムを作成する。このとき、ヒストグラムは正規分布に従うことが分かっている。正規分布の標準偏差を標準誤差という。

t 値は、偏回帰係数を標準誤差で割った値である。 t 値を用い、重要度ランキングが判定できる。そのため、表 5.13 より各 t 値の絶対値を比較すると、値が大きい、すなわち重要度が高い順に、注入間隔、養生温度、固化溶液の Ca イオン濃度、固化溶液の pH、砂の種類、固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度、であることが示された。

P 値は、 t 分布における t 値の上側確率の 2 倍の値である。 P 値を用い、次のように説明変数の有意差判定すなわち重要度を検定することができる。

- ・ $P \leq 0.01$ 有意水準 1 % で有意, 重要といえる。
- ・ $0.01 < P \leq 0.05$ 有意水準 5 % で有意, 重要といえる。
- ・ $P > 0.05$ 重要といえない。

表 5.13 をみると、有意限界 ($P = 0.05$) よりも大きい説明変数が複数存在したため、 P が 0.05 より小さい変数を重要要因として選定し、再度重回帰分析を実施した(表 5.14 参照)。その結果、試験期間 14 日、シリンジサイズの供試体における設計 UCS の式は次のとおりとなった。

$$q_{ud14} = -1.286 I_i + 0.1307 T + 6.90 C_{ca} - 3.47 \quad (5.8)$$

(決定係数 : 0.77)

なお、説明変数を絞ったことで決定係数が大きくなった。これは、予想式としての当てはまりの良さが向上したことを示している。

以上の結果から、試験期間 14 日、シリンジサイズの供試体において、試験条件（注入間隔・養生温度・砂の種類・固化溶液の Ca^{2+} 濃度・固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度・固化溶液の pH）の中で、UCS の重要要因は重要度の大きい順に注入間隔，養生温度，固化溶液の Ca^{2+} 濃度であり，設計 UCS（試験期間 14 日）は式（5.8）となることが示された。

表 5.13 重回帰分析による出力結果（式（5.7）と対応）

	Partial regression coefficient	Standard error	t	P- value
Intercept	-0.351	1.795	-0.196	0.847
Injection interval (days)	0.118	0.0347	3.399	0.00396
Temperature (°C)	-1.227	0.394	-3.112	0.00714
Sand (1:Coral, 2: Toyoura)	-0.417	0.281	-1.482	0.1590
Ca^{2+} in SC (M)	6.01	2.09	2.873	0.01161
Sodium malate in SC (g/L)	-0.0496	0.0905	-0.548	0.592
pH	-0.328	0.1975	-1.662	0.1173

表 5.14 重回帰分析による出力結果（式（5.8）と対応）

	Partial regression coefficient	Standard error	t	P- value
Intercept	-3.47	1.276	-2.72	0.0235
Injection interval (days)	-1.286	0.392	-3.28	0.00950
Temperature (°C)	0.1307	0.0349	3.75	0.00457
Ca^{2+} in SC (M)	6.90	2.11	3.27	0.00971

5.5 結言

沖縄県名護市済井出（調査地点 S）のビーチロック周辺から採取した尿素分解菌 *Pararhodobacter* sp. を用いて、シリンジ固化試験を実施した。試験期間は 14 日とし、6 つの異なる各試験条件（養生温度、固化溶液の注入間隔、砂の種類、固化溶液の Ca^{2+} 濃度、固化溶液の pH、固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度）が UCS に与える影響を把握することを目的とした試験を行なった。一連の試験で得られた主な知見は、以下のとおりである。

- ・ 養生温度 20～35 °C の範囲では、温度が大きいほど推定 UCS が大きくなる傾向がみられ、20 °C では未固結、25, 30, 35 °C ではそれぞれ平均 0.6, 1.0, 1.7 MPa となった。
- ・ 固化溶液の注入間隔を 0.5, 1, 2 日で比較したところ、注入間隔が短いほど推定 UCS が大きくなり、0.5, 1 日ではそれぞれ平均 2.4, 1.7 MPa, 2 日では供試体上部しか固化しなかった。
- ・ 砂の種類をサンゴ砂と豊浦砂で比較したところ、サンゴ砂は供試体全体が固化したが、豊浦砂は供試体の上半分程度しか固化しない傾向がみられた。また、供試体上部は、どちらの砂でも平均 1.5 MPa となった。
- ・ 固化溶液の Ca^{2+} 濃度を 0.1, 0.2, 0.3 M で比較したところ、供試体全体が固化したのは 0.3 M だけ（平均 1.1 MPa）であり、0.2 M では供試体上部のみが固化し、0.1 M では未固化であった。
- ・ 固化溶液の pH を 6.9（NaOH 添加なし）、8.0, 9.0 で比較したところ、pH が低いほど推定 UCS は大きくなる傾向がみられ、pH6.9 では平均 0.6 MPa であった。
- ・ 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度を 0～5.0 g/L の範囲で変えたところ、推定 UCS とセメント物質に違いがみられた。すなわち、リンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L のもとで最も大きい推定 UCS 値を示した（平均 1.5 MPa、セメント物質は aragonite）。また、リンゴ酸ナトリウムを添加した場合は、添加量が多いほど推定 UCS も大きくなり、5.0 g/L 添加した場合は平均 1.0 MPa となった（セメント物質は high Mg-calcite）。
- ・ 重回帰分析の結果から、試験期間 14 日、シリンジサイズ（直径 2.5 cm×高さ 7 cm）の供試体において、上記(1)～(6)の 6 つの試験条件の中で UCS の重要要因は、重要度の大きい順に養生温度 T 、注入間隔 I 、固化溶液の Ca イオン濃度 C_{Ca} であり、設計 UCS $q_{\text{ud}14}$ は $q_{\text{ud}14} = -1.286 I + 0.1307 T + 6.90 C_{\text{Ca}} - 3.47$ （決定係数：0.773）となること が示された。

参考文献

- 5.1) Danjo, T., Kawasaki, S., Shimazaki, S., Koizuka, K., 2014, Effects of bacterial ureolysis and seawater evaporation on beachrock formation, Proc. 8th Asian Rock

Mechanics Symposium, RP4-1.

- 5.2) Kim, S. J., Hoppe, H. G., 1986, Proc. Colloque International de Bacteriologie Marine, pp. 175-183.
- 5.3) 細野康代, 吉嶺充俊, 2009, 豊浦砂の粒度分布, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp. 335-336.
- 5.4) 稲垣由紀子, 塚本将康, 森啓年, 中島進, 佐々木哲也, 川崎了, 2011, 微生物代謝による液状化対策に関する動的遠心模型実験, 地盤工学ジャーナル, 6, pp. 157-167.
- 5.5) Kitano, Y., Kanamori, N., 1966, Synthesis of magnesian calcite at low temperatures and pressures, Geochemical J. 1, pp. 1-13.
- 5.6) 北野康, 1990, 炭酸塩堆積物の地球化学, 東海大学出版会, 東京, 391p.
- 5.7) Banga, S. S., Lipperta, J. J., Yerrab, U., Mulukutlab, S., Ramakrishnanb, V., 2010, Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation, Int. J. of Smart and Nano Materials, 1, pp. 28-39.
- 5.8) Yu, Y., Yan, S.L., Li, H.R., Zhang, X.H., 2011, *Roseicitreum antarcticum* gen. nov., sp. nov., an aerobic bacteriochlorophyll a-containing alphaproteobacterium isolated from Antarctic sandy intertidal sediment, Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 61, pp. 2173-2179.
- 5.9) Validation list no. 149, 2013, List of new names and new combinations previously effectively, but not validly, Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 63, pp. 1-5.
- 5.10) Foesel, B. U., Drake, H. L., Schramm, A., 2011, *Defluviimonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., and *Pararhodobacter aggregans* gen. nov., sp. nov., non-phototrophic *Rhodobacteraceae* from the biofilter of a marine aquaculture, Syst. Appl. Microbiol. 34, pp. 498-502.
- 5.11) Tindall, B. J., Rossello, M. R., Busse, H. J., Ludwig, W., Kampfer, P., 2010, Notes on the characterization of prokaryote strains for taxonomic purposes, Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 60, pp. 249-266.
- 5.12) Stackebrandt, E., Ebers, J., 2006, Taxonomic parameters revisited: tarnished gold standards, Microbiol Today 33, pp. 152-155.
- 5.13) 仲山英樹, 2012, 好塩菌の塩ストレス適応機構とその応用, 生物工程, 90, pp. 696-700.
- 5.14) Madigan, M. T., Parker, J., Martinko, J. M., 2003, Brock biseibutsugaku, オーム社, 東京.
- 5.15) 久保良介, 2014, ビーチロックおよびその周辺地盤への物理探査の適用, 北海道大学大学院修士論文, 93 p..
- 5.16) Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., Shahin, M. A., 2013, Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation, Can.

Geotech. J. 50, pp. 81–90.

- 5.17) 山内秀夫, 1990, サンゴ礁海岸の砂, 熱い自然—サンゴ礁の環境誌, 古今書院, 東京, pp. 101-117.
- 5.18) 渡邊健, 2012, アミノ酸添加溶液から析出する炭酸カルシウムの多形と形態, 法政大学大学院修士論文, p. 16.
- 5.19) 近澤正敏, 田嶋和夫, 2001, 界面化学, 丸善, 東京, 215 p..
- 5.20) 川崎了, 2011, 微生物機能を利用した地盤改良技術, 地盤と建設, 地盤工学会中国支部論文報告集, 29, pp. 11-18.
- 5.21) Erginal, A. E., Kiyak, N. G., Bozcu, M., Ertek, A., Gungunes, H., Sungur, A., Turker, G., 2008, On the Origin and Age of the Ariburnu Beachrock, Gelibolu Peninsula, Turkey, Turkish J. Earth Sci. 17, pp. 803-819.
- 5.22) Voudoukas, M. I., Velegrakis, A. F., Plomaritis, T. A., 2007, Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, Earth-Science Reviews 85, pp. 23-46.
- 5.23) Chave, K. E., 1954, Aspects of the biogeochemistry of magnesium, 1. Calcareous marine organisms, J. Geol. 62, pp. 266-283.
- 5.24) 松尾稔, 1999, 地盤環境工学の新しい視点—建設発生土類の有効活用, 技報堂出版, 東京, 373p..
- 5.25) 管民郎, 2007, Excel で学ぶ多変量解析入門, オーム社, 東京, 273p..

第 6 章 尿素分解菌を用いたサンゴ砂のカラム固化試験

6.1 緒言

前章では、小さい供試体サイズ（直径 2.5 cm）および比較的短い試験期間（14 日間）のもとでシリンジ固化試験を行ない、6 つの異なる試験条件が UCS に与える影響について検討した。その結果を踏まえ、本章では UCS の重要要因として前章で示された試験条件を中心として、直径 5 cm×高さ 10 cm のカラム供試体の固化試験を実施した。試験期間を最大で 28 日間とし、UCS で数 MPa 以上を満足する供試体を作製することを目的とした。

なお、目標 UCS を数 MPa 以上とした理由は、前章のシリンジ供試体において推定 UCS が最大 2.4 MPa に固化したことを踏まえ、試験期間をシリンジ試験よりも長くすることで同程度もしくはそれ以上の UCS を有する供試体を作製できる可能性があると期待されたためである。また、人工岩開発に向けた初期段階として、ビーチロックやコンクリート構造物が有する UCS の 1/5 程度である数 MPa 以上を発現する作製方法を提案することが重要であると考えたからである。

6.2 方法

6.2.1 試験手順

基本的には、シリンジ固化試験の手順と同じであるが、供試体サイズが異なることに伴って各種容量が異なる。以下に、試験手順を説明する。

(A) 菌の継代および培養液の作製

前章の 5.2.3 (A)と同様の方法である。なお、本試験で用いた菌株は、前章と同じ *Pararhodobacter* sp.である。

(B) 固化試験（供試体の作製～開封前）

カラム固化試験の供試体サイズは直径 5 cm×高さ 11.5 cm（一軸圧縮試験のための成形前までのサイズ）とし、本試験の様子を図 6.1 に示す。供試体の作製からカラム容器開封前までの手順は、以下のとおりである。

- (1) 前章と同じサンゴ砂を 110 °C で 2 日間乾燥・滅菌した。
- (2) 2 日後、サンゴ砂を恒温槽から取り出して実験室に移し、室温になるまで冷ました。
- (3) カラム（直径 5 cm×高さ 14.5 cm のプラスチック製円筒管）の底をカッターで切り落とし、容器の内側を 70 %エタノールを吹きかけたプロワイプで拭くことでエタノール消毒した（以下では、単に「エタノール消毒した」と略す）。



図 6.1 カラム固化試験の様子

- (4) エタノール消毒したカラム容器を、カラム台（図 6.2 参照）に取り付けた。
- (5) カラム下端部の排出口を塞ぐように、エタノール消毒した不織布（内径 4.5 cm 程度の円状）を 1 枚敷いた。
- (6) サンゴ砂 300 g を約 100 g ずつ 3 回に分けて投入し、約 100 g 投入ごとにハンドランマーで 20 回ずつ砂粒子を壊さない程度に突き固め、また 1 回目と 2 回目においては各層の接着部のなじみをよくするために、突き固め後に葉さじなどで 4 本の線を各層上面に入れた。
- (7) 装置の排出口に長さ 45 cm のチューブを付け、チューブ先端にピンチコックを付けた。
- (8) 上記(A)で作製した *Pararhodobacter* sp. の培養液を攪拌機およびエタノール消毒した攪拌子を用いて攪拌しながら、培養液 120 mL（>空隙体積約 100 mL）を供試体上面から注入した。なお、注入時には、以下の点に注意が必要であった。
 - ・ 注入開始時、ピンチコックは外し、チューブはカラム台を載せている実験機にたらし、地面と水平にしておいた。
 - ・ 供試体上面をなるべく乱さぬように、ゆっくりと上面全体に培養液を 10 mL ずつ注いだ。注入のペースが速いと、空隙中の空気が試料面まで一気に上がってきて供試体に大きな割れ目や穴を生む原因となる。
 - ・ 培養液を数十 mL 加えるとチューブより培養液が流れてくるため、ゆっくりとチューブの先端を上げて排出速度約 4 mL/分ペースで排出した。排液は、ビーカーなどに回収した。
 - ・ 排出と注入は、並行して行った。
- (9) 培養液 120 mL をすべて加えたら、水位が供試体上面より 1, 2 mm 高い所でピンチコ

ックを使って排出を止めた。

- (10) 固化溶液 200 mL を作製した。なお、固化溶液の標準配合は、前章のシリンジ固化試験のもの（表 5.5 参照）と同じである。添加試薬を同表の上から順に溶媒の人工海水（非滅菌）に添加・攪拌した後、200 mL メスフラスコに移して人工海水でメスアップし、振り混ぜて、固化溶液を作製した。
- (11) 固化溶液 150 mL を 30 mL シリンジと 0.45 μm フィルターを用いることで滅菌しながら供試体上面から注入し、チューブより排出した。なお、排出速度は 30 mL / 8 分程度とし、水位が砂供試体上面より 1~2 cm 高い範囲を維持するようにチューブ先端の高さを変えながら注入・排出した。
- (12) 注入後、水位が供試体上面より 1 cm 高いところで、ピンチコックを使って排出を止めた。なお、供試体上面より 1 cm 高い所にマジックで線を入れておくとよい。これにより、供試体は飽和状態が保たれた。また、排液はオートクレーブで滅菌処理して捨てた。
- (13) 落下菌の混入を防ぐため、エタノール消毒したアルミホイルでカラム容器上面を覆った。
- (14) 恒温槽を閉めて、養生した。
- (15) 上記と同様の手順で、定期的に固化溶液の作製・注入・排出を繰り返した。なお、この試験は、新しく固化溶液を注入した際に前回注入した間隙中の固化溶液が押し出され、排出する仕組みとなっている。
- (16) 間隙溶液の pH や CaCO_3 の推定析出量の経時変化を把握するために、定期的（経過日数 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26 日）に次の手順で排液を回収した。まず、シリコンチューブに入っていた最初の排液 3 mL を捨てた後、排液 10 mL を採水し、残りは排出して捨てた。その後、採水した 10 mL から採水した 1 mL を蒸留水 9 mL で 10 倍希釈し、希釈液 10 mL に対して Ca^{2+} 濃度を測定した。また、残りの 9 mL をスチロールねじ瓶に移して攪拌しながら、pH を測定した。

(C) 固化試験（開封およびそれ以降）

試験開始から 10, 14, 21, 28 日後のいずれかの時点で、カラムを開封した。開封の手順は、以下のとおりである。

- (1) 間隙中の固化溶液を 30 mL / 8 分ペースで排出し、排出が自然に止まったらカラム台の排出口を取り外した。そして、カラム台のねじを全て緩めてカラム供試体を容器ごと引き抜いた。
- (2) 供試体まで切らないように注意しながら、カラム容器の上端から下端まで一直線の切れ目をカッターで複数回同じところに加えて容器のみを切断して開封し、砂供試体を取り出した。
- (3) 開封後、マイターボックスとたこ引き包丁を用いて供試体を高さ 10 cm に整形した。固化が進行していたたこ引き包丁で整形できない場合は、ダイヤモンドカッターで供試体を高さ 10 cm に切断した後、マイターボックスとたこ引き包丁で端面整形した。
- (4) 整形後、供試体の直径と高さおよび質量を、ノギスおよび電子天秤を用いて測定した。

- (5) 供試体に対して、インストロン万能試験機（INSTRON 社製，5586）を用いて一軸圧縮試験を実施した。なお，軸ひずみ速度は 0.1 mm/min とした。ただし，固結の程度が弱い（UCS が 1 MPa 以下の）供試体に対しては，卓上型高容量圧縮試験機（誠研舎株式会社製，T266-31100）を用いて一軸圧縮試験を実施した。同試験機の軸ひずみ速度は，1 mm/min とした。
- (6) 一軸圧縮試験後，目で見て供試体の破壊の影響が小さいと推定できる箇所に対して，軟岩ペネトロ計（丸東製作所製，SH-70）を用いて針貫入試験を実施した。本試験によって求めた針貫入勾配の値から，本装置説明書の回帰式 $\log_{10} y = 0.978 \log_{10} x + 2.621$ （相関係数: 0.941, x : 針貫入勾配, y : 推定 UCS 値）を用いて推定 UCS 値をもとめた。なお，針貫入試験を実施した箇所について，供試体上面（0 cm）から 3.3 cm を上部，3.4 cm～6.6 cm を中央部，6.7 cm～底面（10 cm）を下部として区別した。
- (7) 供試体の上部・中央部・下部から試料各 1.0 g を採取し，滅菌した人工海水および ZoBell 2216E 寒天培地を用いて，平板法によって菌数測定を行なった（菌数測定の方法は，4 章で述べたとおりである）。

6.2.2 試験条件

試験条件（表 6.1 参照）は，シリンジ固化試験の結果をもとに以下のように設定した。

- ・ 標準条件は，シリンジ固化試験の標準条件と同じとした。
- ・ 前章で UCS の重要要因と示された養生温度，注入間隔，固化溶液の Ca^{2+} 濃度を，本試験でも変数とした。
- ・ 養生温度は，より広い地域での適用を目指し，30 °C の他に 25 °C での挙動もみることにした。
- ・ 注入間隔は，シリンジ固化試験と同様に 0.5，1，2 日とした。
- ・ 固化溶液の Ca^{2+} 濃度は，0.1 M では 14 日で固化しないということを踏まえつつ，環境負荷の少ない低濃度での挙動を把握するために 0.15 M を 0.3 M の場合と比較した。
- ・ 上記 3 つの試験条件に加えて，ビーチロックと同じセメント物質が析出した供試体の経時変化についても把握するため，リンゴ酸ナトリウム 5 g/L を固化溶液に加えたケースを試みた。
- ・ 試験期間は，全体が固化し始める 10 日から，14 日，21 日，26 日，そして 28 日までとし，各試験条件での UCS の経時変化を把握した。ただし，Case4 は注入間隔が 2 日と他のケースに比べて長く，また Case5 は固化溶液の CaCl_2 濃度が他のケースの 1/2 であるため，この 2 ケースは比較的短い試験期間では全体が固化しない可能性があるため，本論文では Case4, 5 の試験期間を 28 日のみとした。

表 6.1 カラム固化試験条件の一覧表

Case No.	Temperature (°C)		Injection interval (days)			Solution for consolidation		Testing period (days)
	25	30	1	0.5	2	Urea and CaCl ₂ (M)	Sodium malate (g/L)	
1		×	×			0.3	0	10, 14, 21, 26, 28
2	×		×			0.3	0	14, 28
3		×		×		0.3	0	14, 28
4		×			×	0.3	0	28
5		×				0.15	0	28
6		×				0.3	5	14, 28

Standard condition

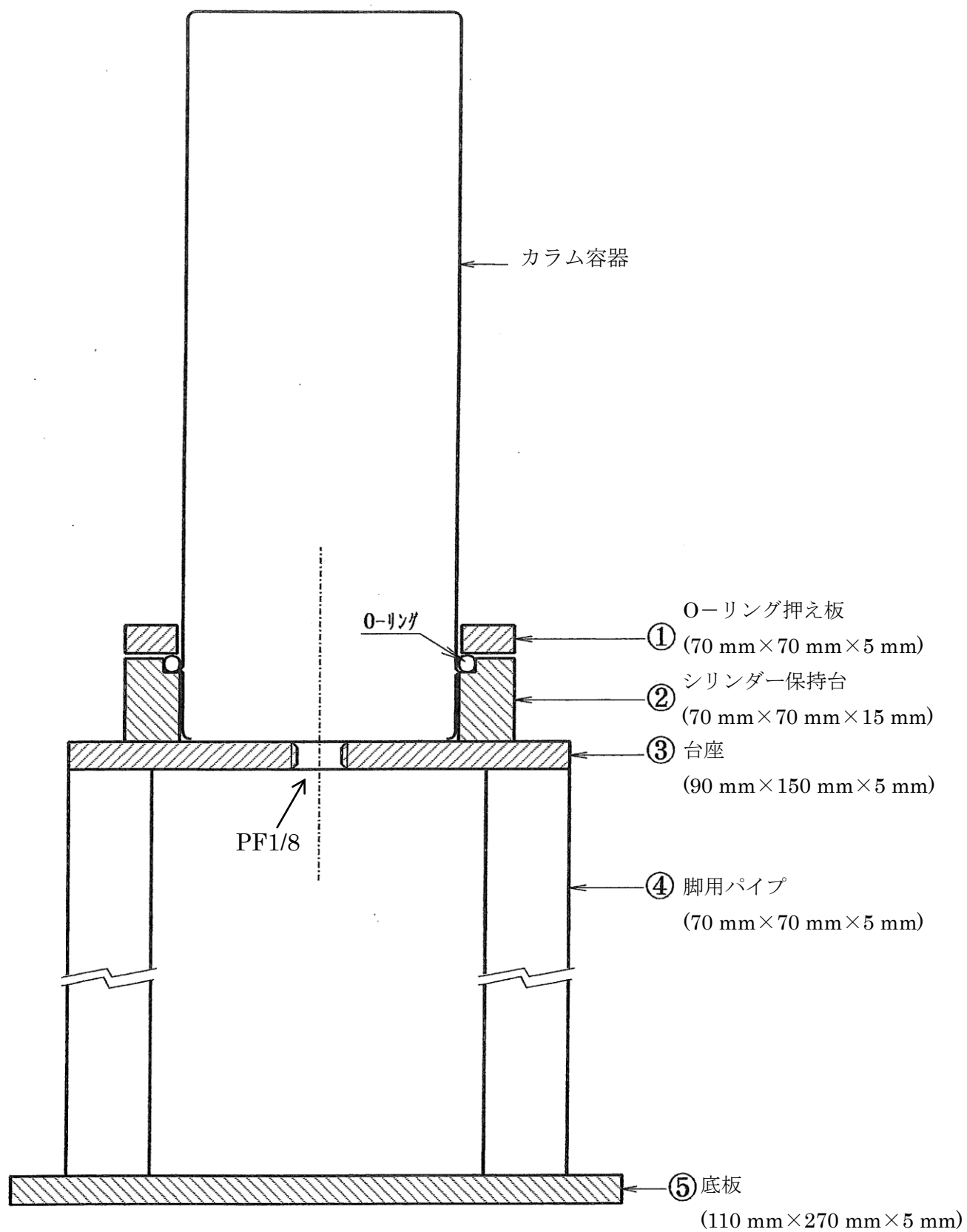
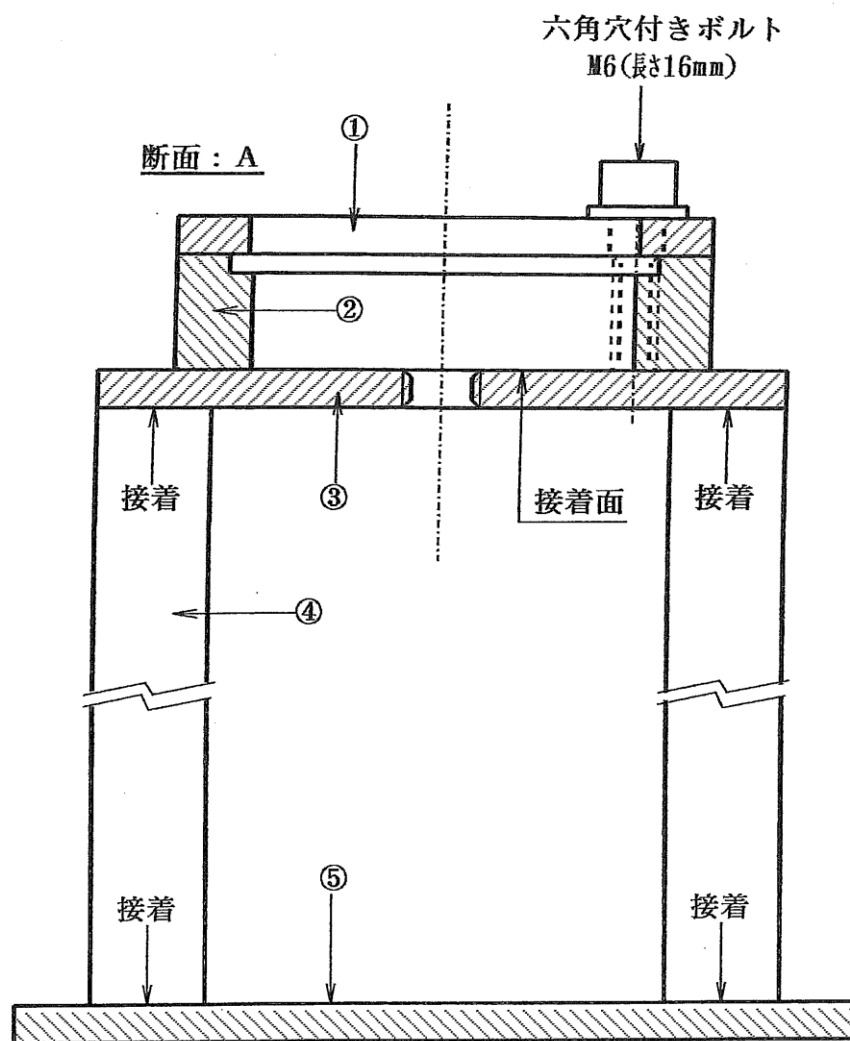


図 6.2 カラム台の組立図



- ① Oーリング押え板 (70 mm×70 mm×5 mm／透明アクリル樹脂)
- ② シリンダー保持台 (70 mm×70 mm×15 mm／透明アクリル樹脂)
- ③ 台座 (90 mm×250 mm×5 mm／透明アクリル樹脂)
- ④ 脚用パイプ (外径 15 mm, 内径 10 mm 程度, 長さ 150 mm／透明アクリルパイプ)
- ⑤ 底板 (110 mm×270 mm×5 mm／透明アクリル樹脂)

図 6.2 カラム台の組立図 (続 1)

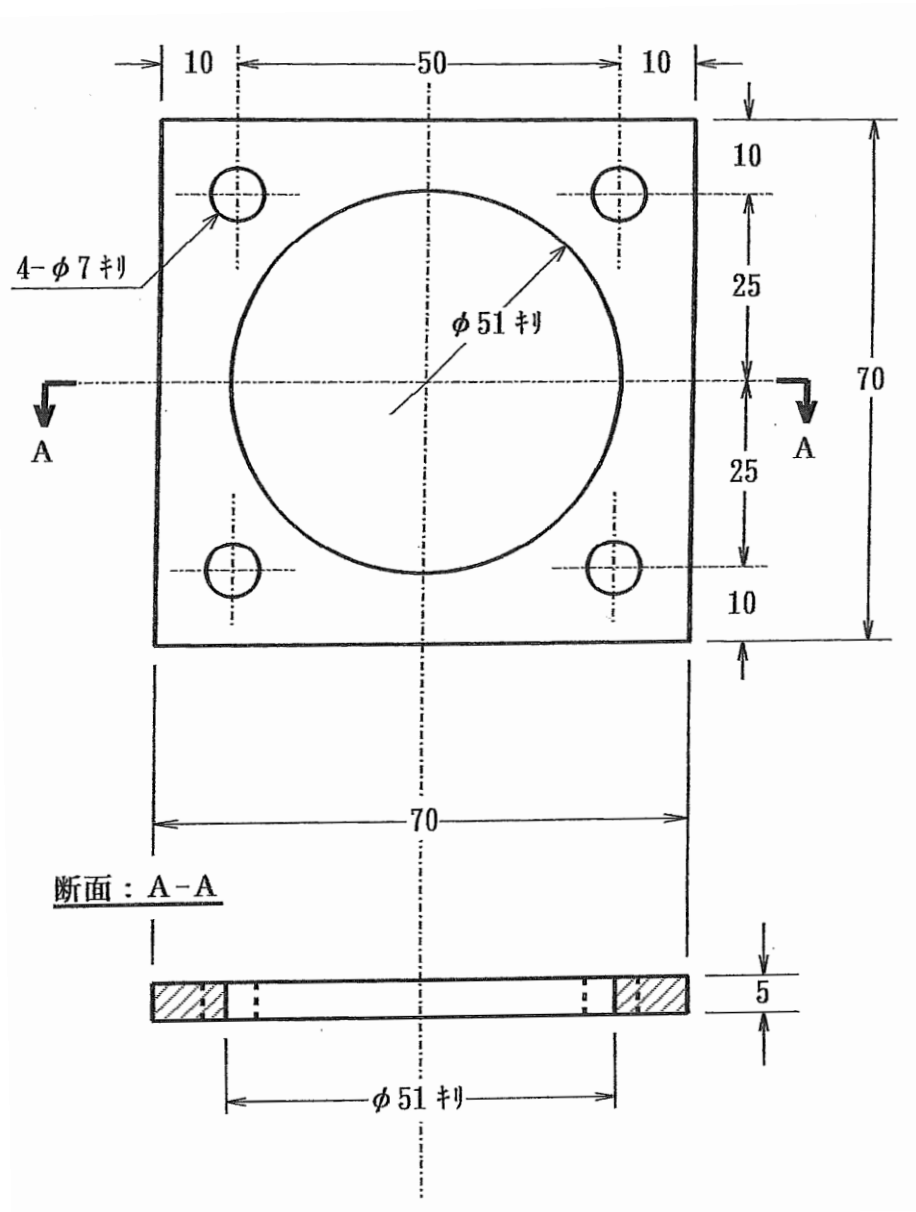


図 6.2 カラム台の組立図 (続 2/①O-リング押え板について)

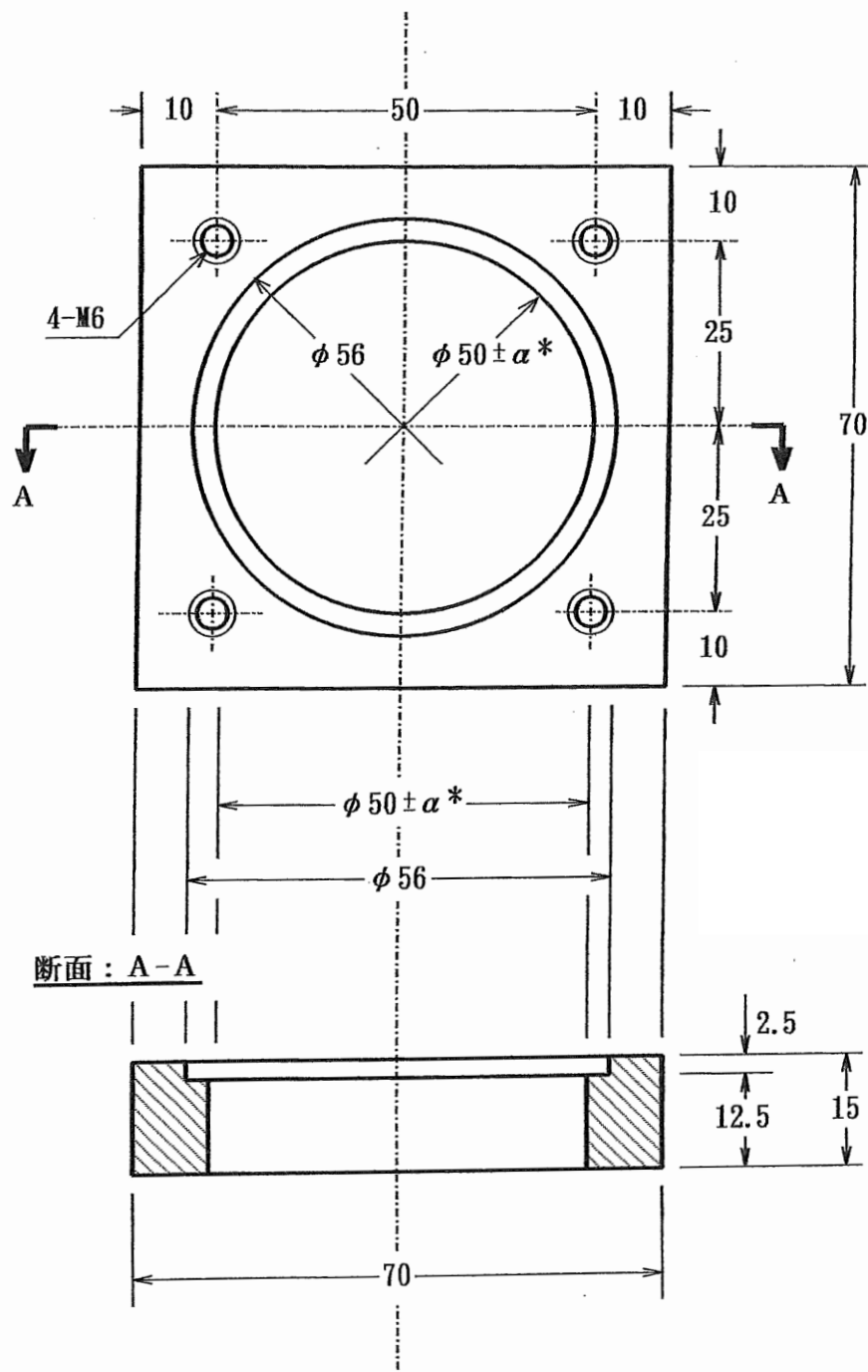


図 6.2 カラム台の組立図 (続 3/②シリンダー保持台について)

6.3 結果

6.3.1 標準条件 (Case 1) での経時変化

試験期間は、10, 14, 21, 26, 28 日とした。また、供試体の本数は、試験期間 28 日の供試体のみ 2 本とし、それ以外の試験期間では各期間供試体 1 本とした。

一軸圧縮試験の結果、各試験期間の供試体から得られた応力-ひずみ曲線を図 6.3 に示す。同図より、UCS が大きくなるにつれて破壊ひずみが小さくなっていることがわかる。

図 6.4 に、一軸圧縮試験および針貫入試験によって求めた UCS および推定 UCS (上部, 中央部) の経時変化を示す。なお、供試体下部の推定 UCS は、一軸圧縮試験の影響により、経時的に測定できなかった。同図より、UCS および推定 UCS は、試験期間が長くなるにつれていずれも指数関数的に大きくなり、試験期間 28 日の供試体で最大となった。また、推定 UCS (上部), 推定 UCS (中央部), UCS の順番に小さくなる傾向がみられた。さらに、UCS の最大値は、9.9 MPa (試験期間 28 日) であった。海洋細菌を用いて、約 10 MPa まで砂供試体を固めた例は、本試験結果が世界で初めてである。なお、全微生物の中では、*Sporsarcina pasteurii*^{6.1)}に次ぐ 2 例目である。

針貫入試験によって測定した各供試体の高さごとの推定 UCS 結果を図 6.5 に示す。同図より、推定 UCS は上部ほど大きく、下部になるにつれて徐々に小さくなる傾向、あるいは高さによらずほぼ一定となる傾向がみられた。なお、試験期間 14, 26, 28 (Sample B) の供試体で、中央部から下部の範囲で測定値が一部ない理由は、一軸圧縮試験によって破壊が進行したために針貫入試験を実施できなかったからである。

表 6.2 に、Case 1~Case 6 の全供試体の菌数測定結果を示す。同表より、標準条件 (Case 1) の供試体について、試験期間 10, 21, 28 日 (Sample B) は初期の菌数 (培養液中の菌数) を測定していないが、同じ培養液を注入し、同じ日から固化試験を開始したため、初期の菌数は同程度であると推定される。これらのケースのカラム開封時の供試体中の菌数 (最終的な菌数) は、試験期間が長くなるにつれて減っていることがわかる。さらに、各供試体 (Case 1) の最終的な菌数を供試体の高さごと (上・中・下) に比較すると、下部が上部より少ない供試体と、ほぼ均質な供試体の 2 種類に分かれた。

排液 pH の結果 (図 6.6 参照) をみると、測定を実施した試験期間 26, 28 日 (Sample A) は、概ね注入時と同程度以上の pH を維持した。また、その排液の Ca^{2+} 濃度 (図 6.7 参照) は、2 g/L (2000 ppm) 以下を維持した。注入時の固化溶液の Ca^{2+} 濃度は 12 g/L であるため、固化試験の間、毎日継続して 10 g/L の Ca を析出していたということになる。ただし、実際には Ca は CaCO_3 として析出した。

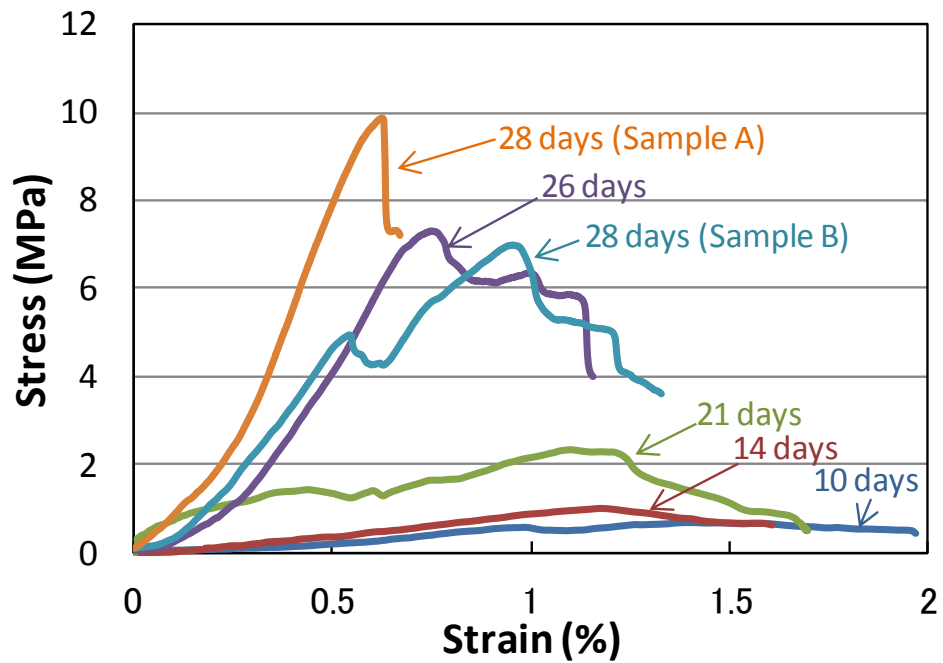


図 6.3 各試験期間の供試体から得られた応力-ひずみ曲線 (Case 1)

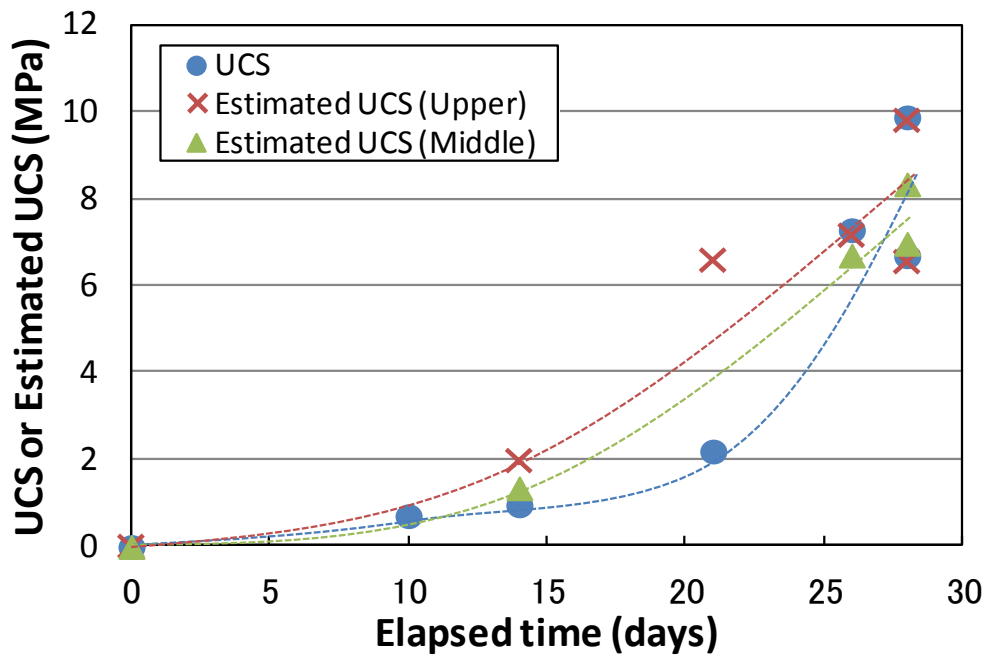


図 6.4 標準条件で試験した供試体の UCS および推定 UCS (上部・中央部) の経時変化

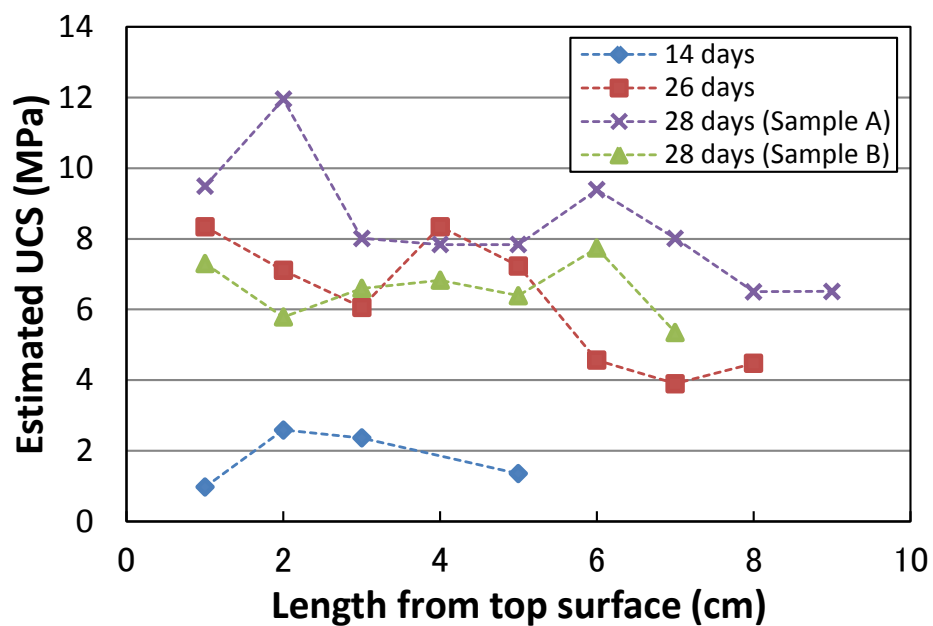


図 6.5 各供試体の高さごとの推定 UCS (Case 1)

表 6.2 Case 1～Case 6 の全供試体の菌数測定結果（－は測定なし）

Case No.	Test period (days)	UCS (MPa)	Initial (10 ⁶ CFU/mL)	Final_average (10 ⁶ CFU/g)	Final_upper (10 ⁶ CFU/g)	Final_middle (10 ⁶ CFU/g)	Final_lower (10 ⁶ CFU/g)
1-1	10	0.71	－	7.700	15.000	－	0.420
1-2	14	0.96	－	4.200	3.800	1.350	7.500
1-3	21	2.2	－	2.700	3.360	4.100	0.700
1-4	26	7.3	550.000	2.000	4.700	1.000	0.400
1-5	28 (A)	9.9	200.000	5.400	16.300	0.015	0.009
1-6	28 (B)	6.7	－	0.840	0.610	0.720	1.180
2-1	14	0.50	3.600	2.400	5.900	0.970	0.300
2-2	28	2.4	3.600	34.000	80.000	10.400	11.100
3-1	14	2.4	200.000	10.500	14.500	7.000	9.900
3-2	28	4.6	200.000	8.300	12.800	3.000	9.000
4	28	1.20	3.600	9.500	22.000	3.900	3.100
5	28	0.50	440.000	157.000	350.000	40.000	80.000
6-1	14	2.6	200.000	15.300	21.000	14.900	10.100
6-2	28	4.0	200.000	5.000	7.700	4.900	2.300

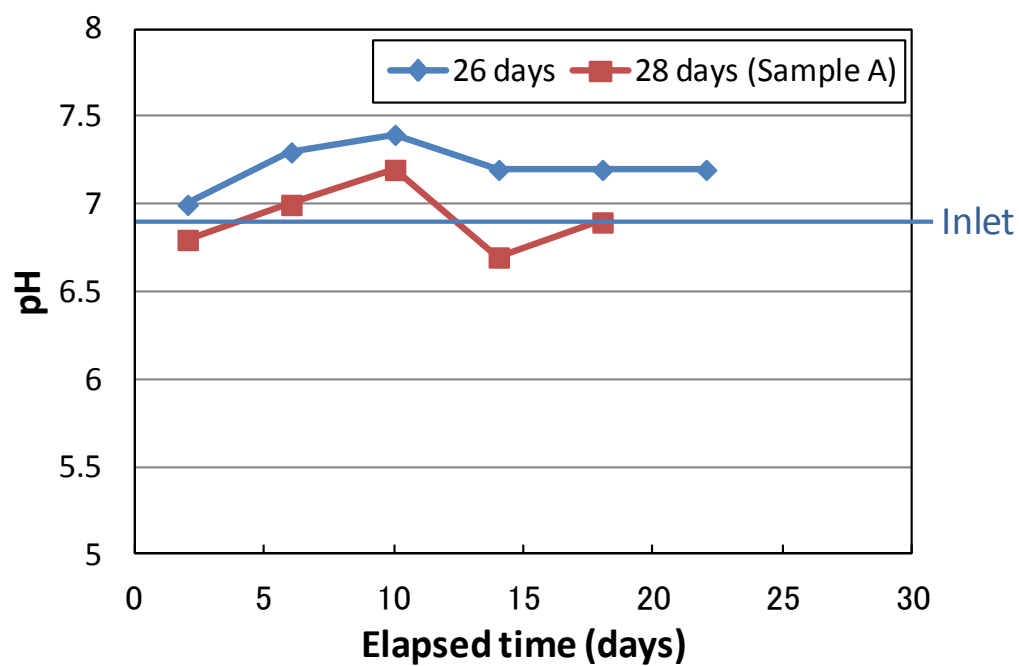


図 6.6 排液 pH の経時変化 (Case 1)

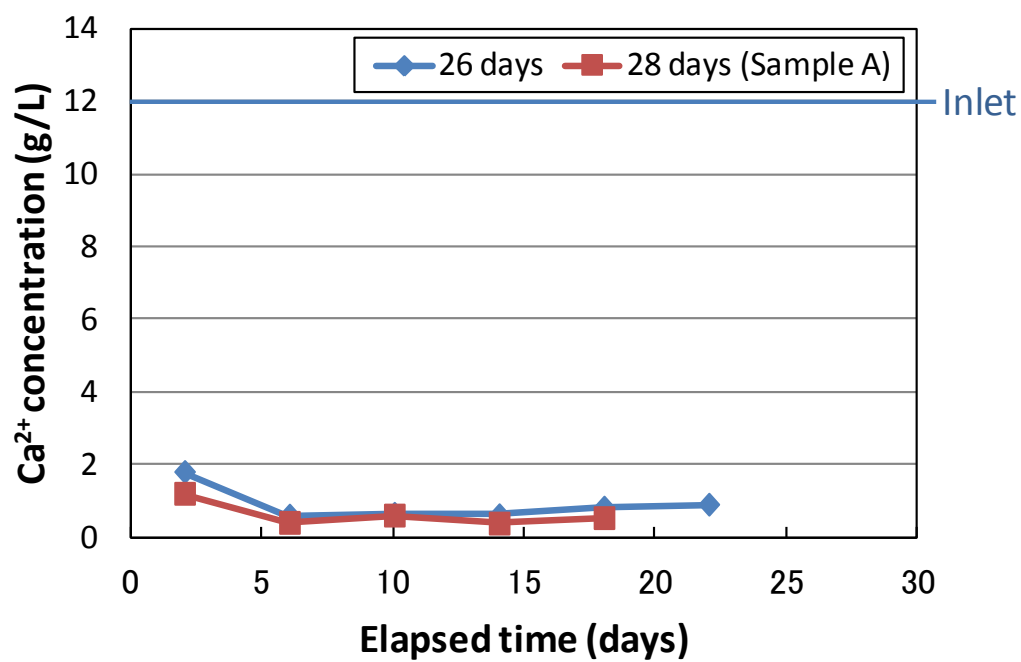


図 6.7 排液 Ca²⁺濃度の経時変化 (Case 1)

6.3.2 養生温度 25 °C (Case 2) での経時変化

各試験期間 (14, 28 日) における供試体を 1 本ずつとし、それらの供試体から得られた応力-ひずみ曲線を図 6.8 に示す。同図より、UCS が大きくなるにつれて破壊ひずみも大きくなる傾向がみられた。また、試験期間 28 日の破壊ひずみと、その UCS と同程度の UCS を有する Case 1 の試験期間 21 日の破壊ひずみ (図 6.1 参照) を比較すると、前者は 0.8 % で後者は 1.1 % と、0.3 % の違いがみられた。

図 6.9 に、供試体の UCS および推定 UCS (上部・中央部) の経時変化を示す。同図より、UCS および推定 UCS はいずれも経過時間とともに増加しており、その強度は大きい方から供試体上部の推定 UCS、中央部の推定 UCS、UCS の順であった。また、一軸圧縮試験による破壊は下部で起こっていたため、上部ほど固化の程度が大きくなる傾向がみられた。

菌数測定の結果 (表 6.2 の Case 2 参照) では、初期の菌数を同じにしたところ、供試体の最終的な菌数は試験期間 28 日の方が 14 日より 1 桁大きくなった。

排液 pH の経時変化 (図 6.10 参照) は、試験期間 14 日と 28 日でよく似た挙動を示し、pH 6.5~6.8 の範囲に分布した。また、排液の Ca^{2+} 濃度 (図 6.11 参照) は、約 10 日間経過後より大きくなる傾向がみられた。さらに、試験期間 28 日の養生温度 30 °C と 25 °C の両供試体の排液の Ca^{2+} 濃度 (図 6.7, 6.11 参照) を比較すると、前者の方が低い濃度を維持した。すなわち、高い析出率を保っていたことが分かる。

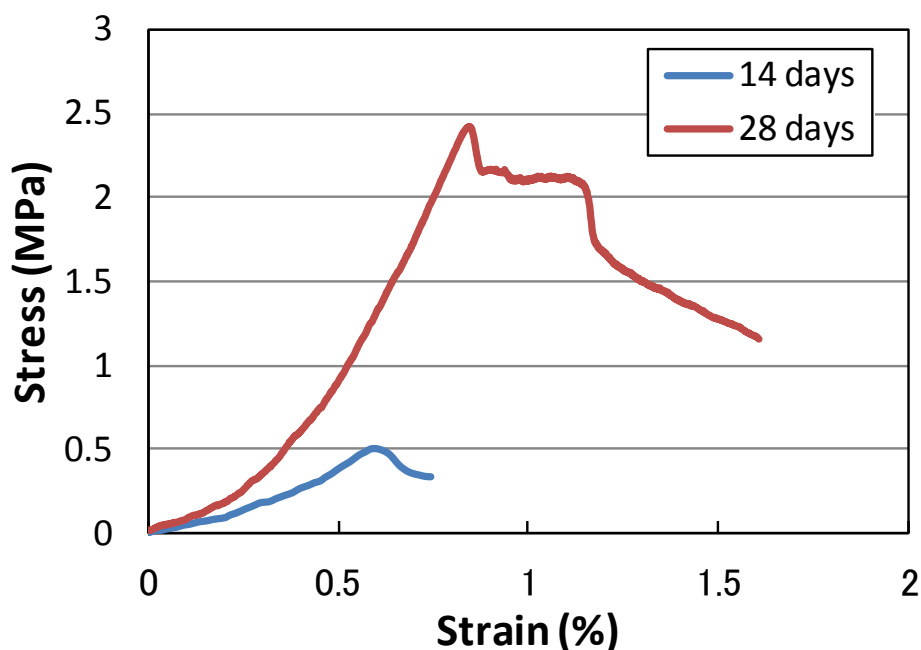


図 6.8 各試験期間の供試体から得られた応力-ひずみ曲線 (Case 2)

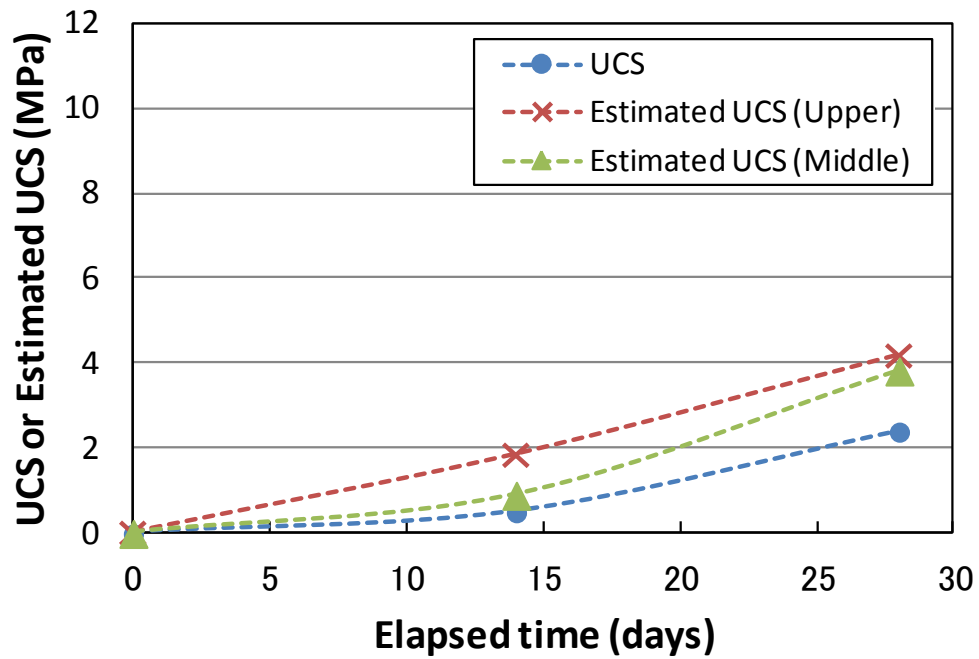


図 6.9 養生温度 25 °C で試験した供試体の UCS および推定 UCS（上部・中央部）の経時変化

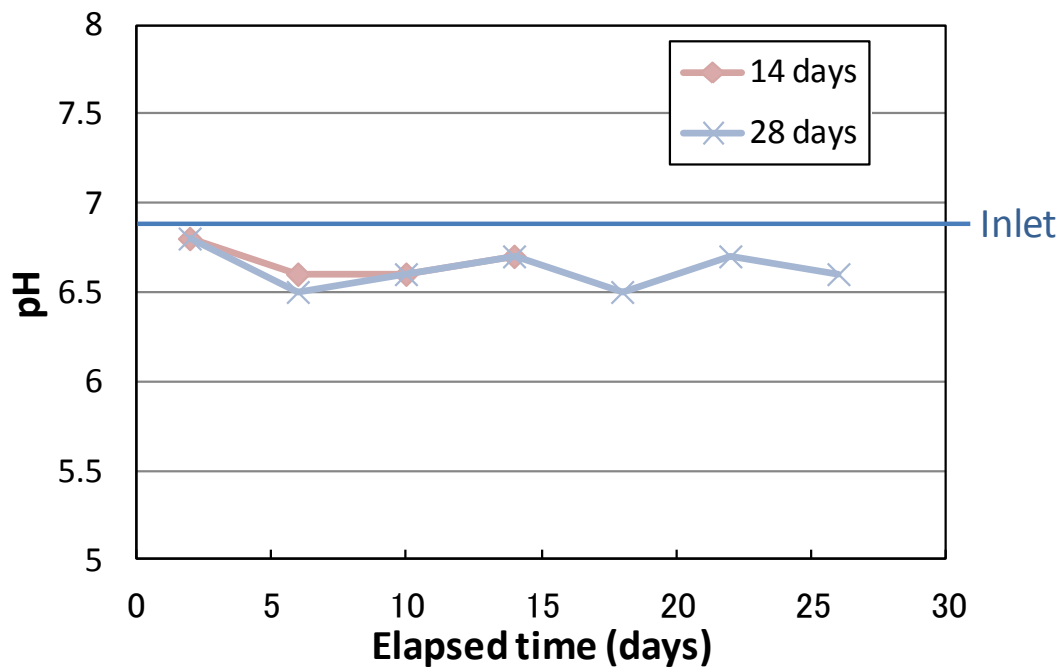


図 6.10 排液 pH の経時変化 (Case 2)

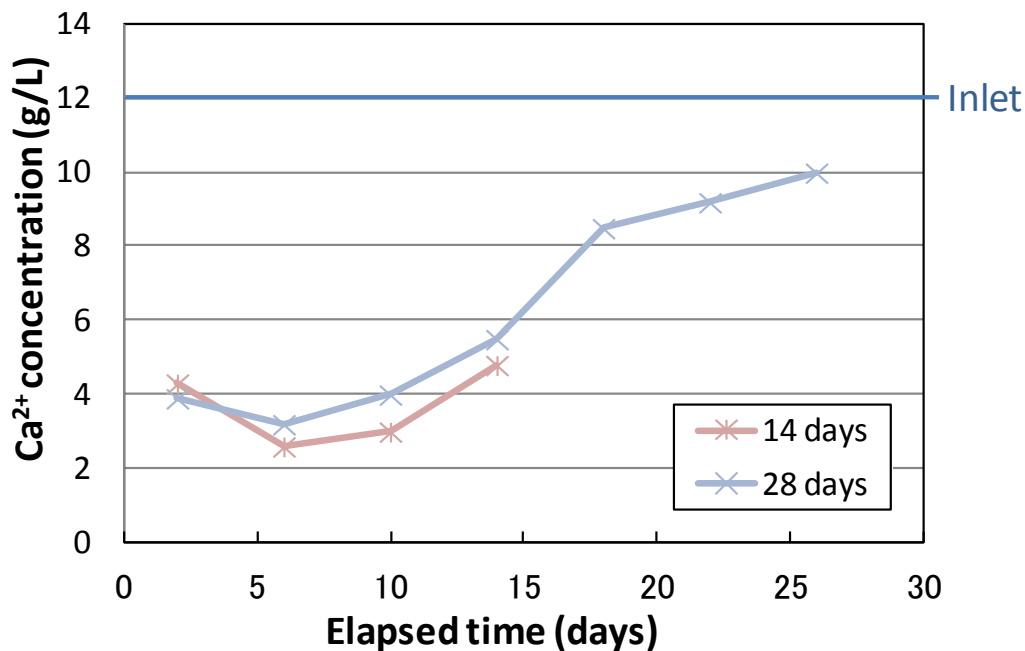


図 6.11 排液 Ca^{2+} 濃度の経時変化 (Case 2)

6.3.3 注入間隔 0.5 日 (Case 3) および 2 日 (Case 4) での経時変化

注入間隔 0.5 日の各供試体から得られた応力-ひずみ曲線を図 6.12 に示す。同図より、試験期間が長くなると UCS は大きくなり、試験期間 28 日で 4.9 MPa となった。破壊ひずみは、試験期間 14 日と 28 日でそれぞれ 0.85 %と 0.82 %となり、同程度であった。また、注入間隔 2 日の供試体から得られた応力-ひずみ曲線は、図 6.13 のとおりである。同図より、UCS は 1.28 MPa、破壊ひずみは 0.67 %であった。

UCS および供試体の上部・中央部の推定 UCS の経時変化を、図 6.14 (注入間隔 0.5 日) と図 6.15 (注入間隔 2 日) に示す。図 6.14 より、注入間隔 0.5 日の供試体は試験期間 28 日の UCS が 4 MPa に達する結果が得られた。一方、注入間隔 2 日の供試体 (図 6.15 参照) は、供試体上部と中央部の推定 UCS はおよそ 3 MPa であったが、UCS は 1.2 MPa であり、UCS にばらつきがみられた。

表 6.2 の Case 1, 3, 4 より、注入間隔 0.5 日, 1 日, 2 日で試験した供試体の菌数測定結果を比べると、注入間隔 0.5 日, 1 日は初期の菌量より開封時の菌量の方が少なかったが、2 日間隔では菌量が増加した。ただし、初期菌量は注入間隔 2 日が最も少なかった。また、最終的な菌数に大きな違いは見られなかった。

各供試体 (Case 3 と 4) の排液 pH の結果を、図 6.16 に示す。同図より、注入間隔 0.5 日の排液 pH は時間の経過に伴って緩やかに低下し、経過日数 6 日以降は pH6.6~6.7 に落ち着いた。また、注入間隔 2 日の場合は経過日数が 14 日までは注入時の固化溶液の pH よりも高い値であったが、それ以降は 0.2~0.4 ほど下回った。

排液 Ca^{2+} 濃度の経時変化 (図 6.17) に関しては、注入間隔が 0.5 日の方が 2 日よりも Ca の析出量が少なかった (Ca^{2+} 濃度が高かった)。また、両注入間隔ともに、時間の経過に伴って析出量が低下し、経過日数 26 日 (Case 3) には析出量が 0 g/L となった。

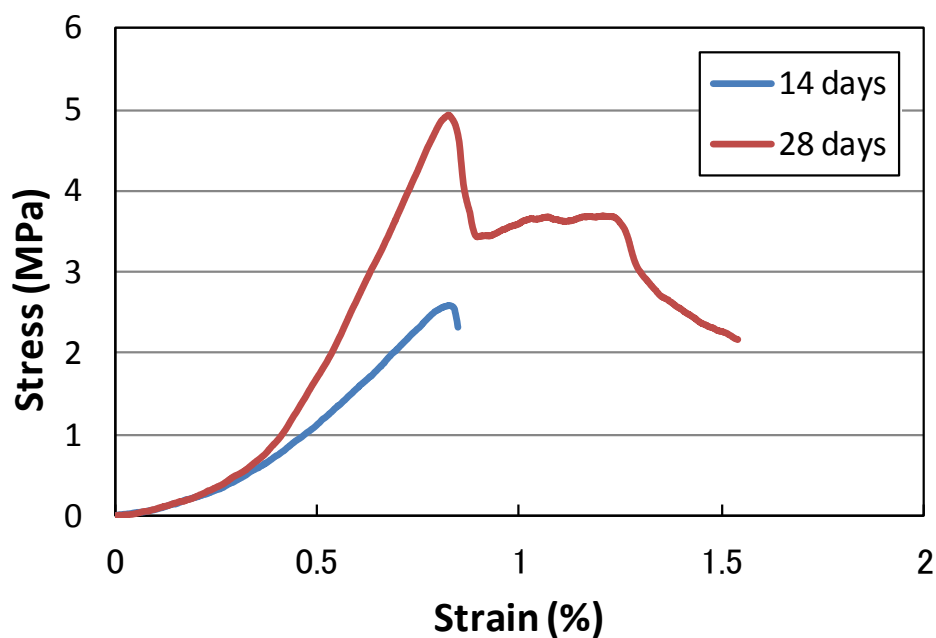


図 6.12 各試験期間の供試体から得られた応力-ひずみ曲線 (Case 3)

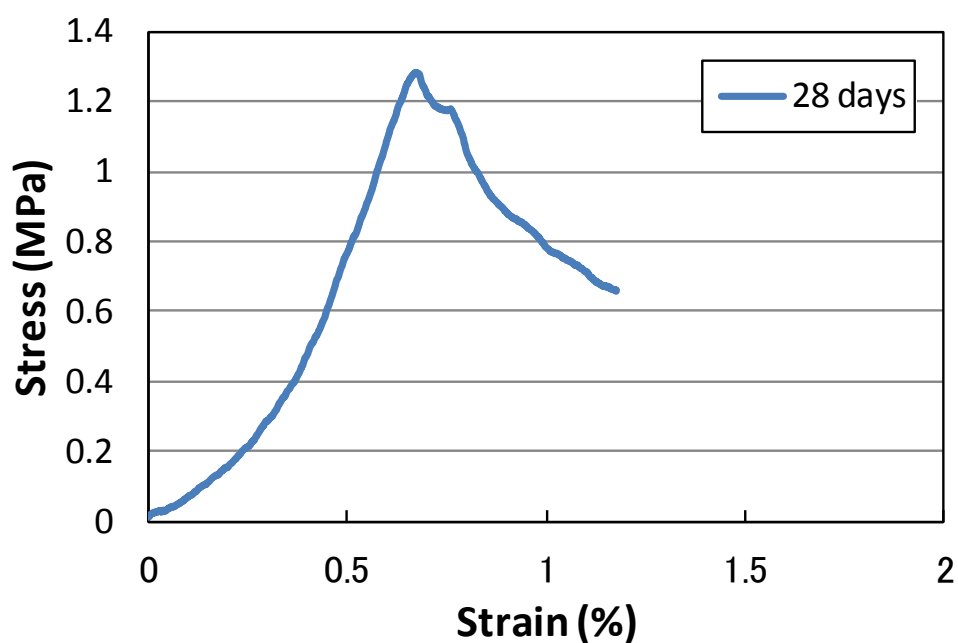


図 6.13 各試験期間の供試体から得られた応力-ひずみ曲線 (Case 4)

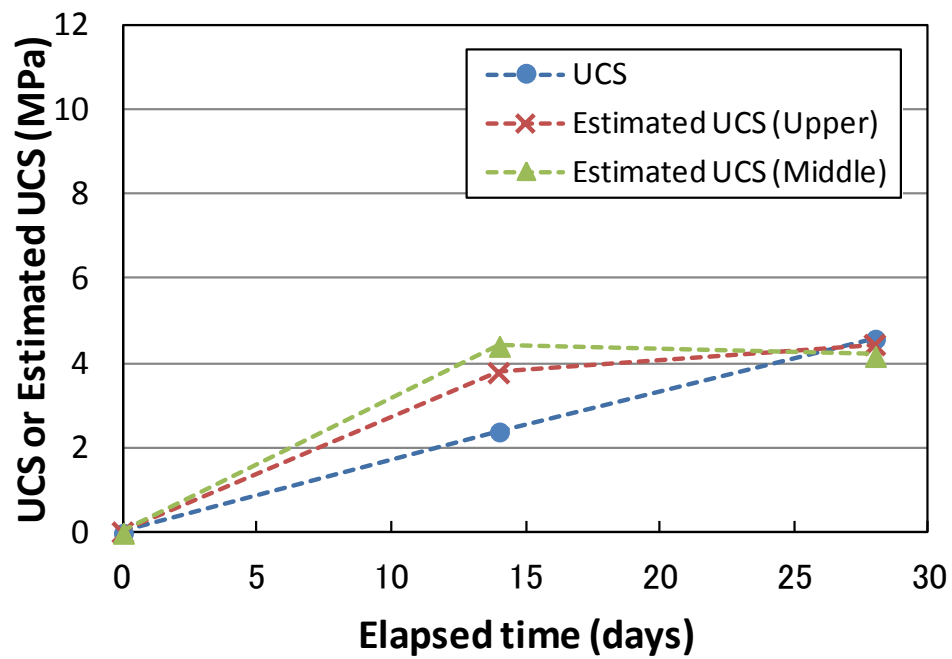


図 6.14 注入間隔 0.5 日で試験した供試体の UCS および推定 UCS（上部・中央部）の経時変化

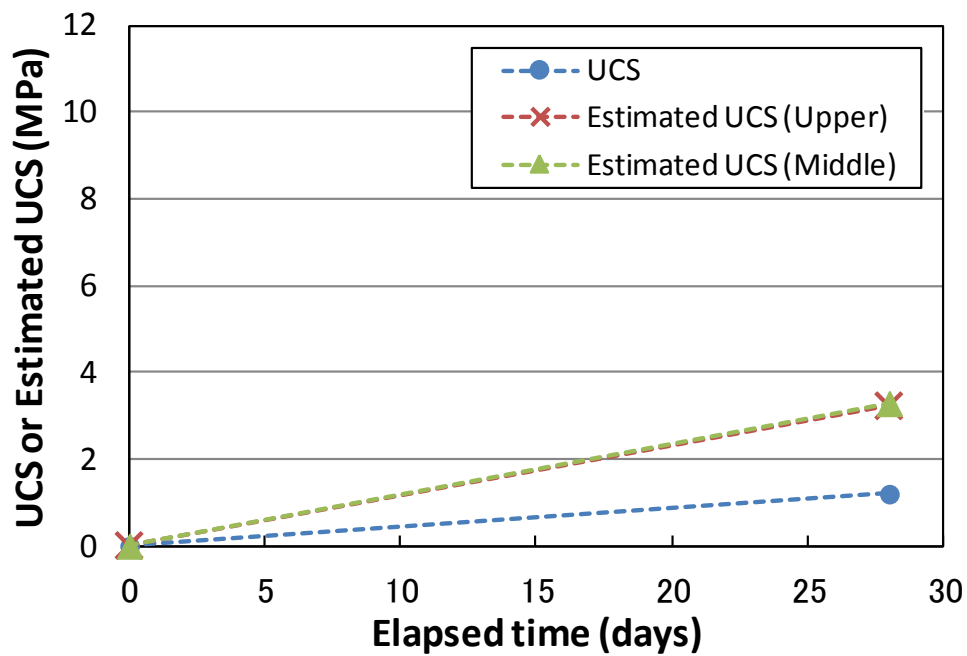


図 6.15 注入間隔 2 日で試験した供試体の UCS および推定 UCS（上部・中央部）の経時変化

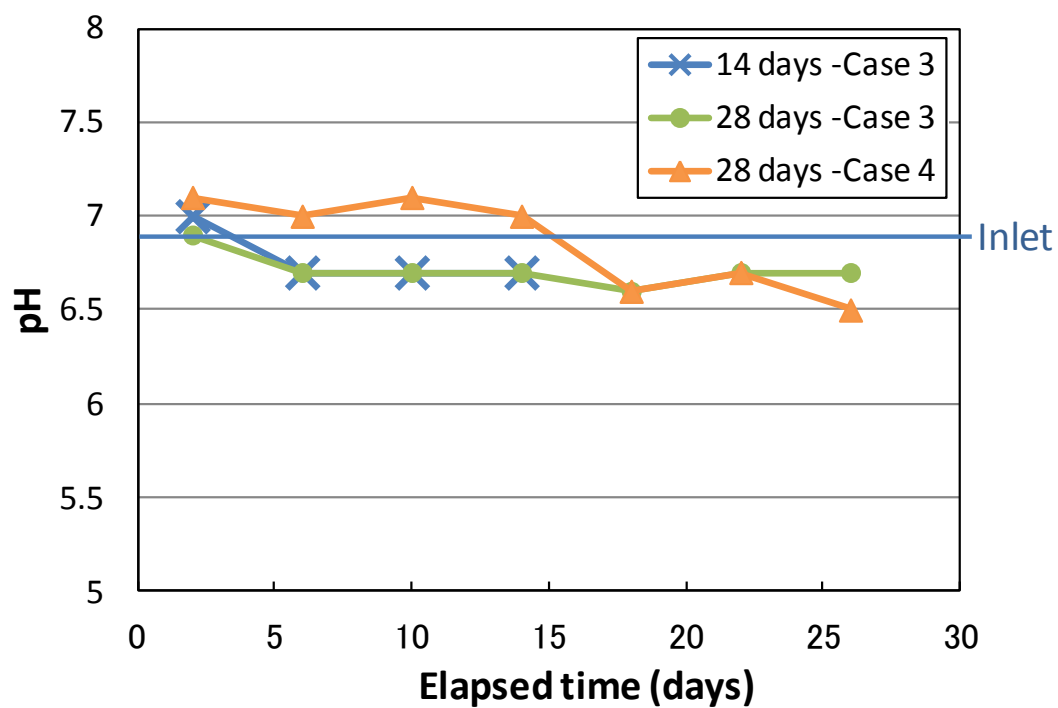


図 6.16 排液 pH の経時変化 (Case 3 と Case 4)

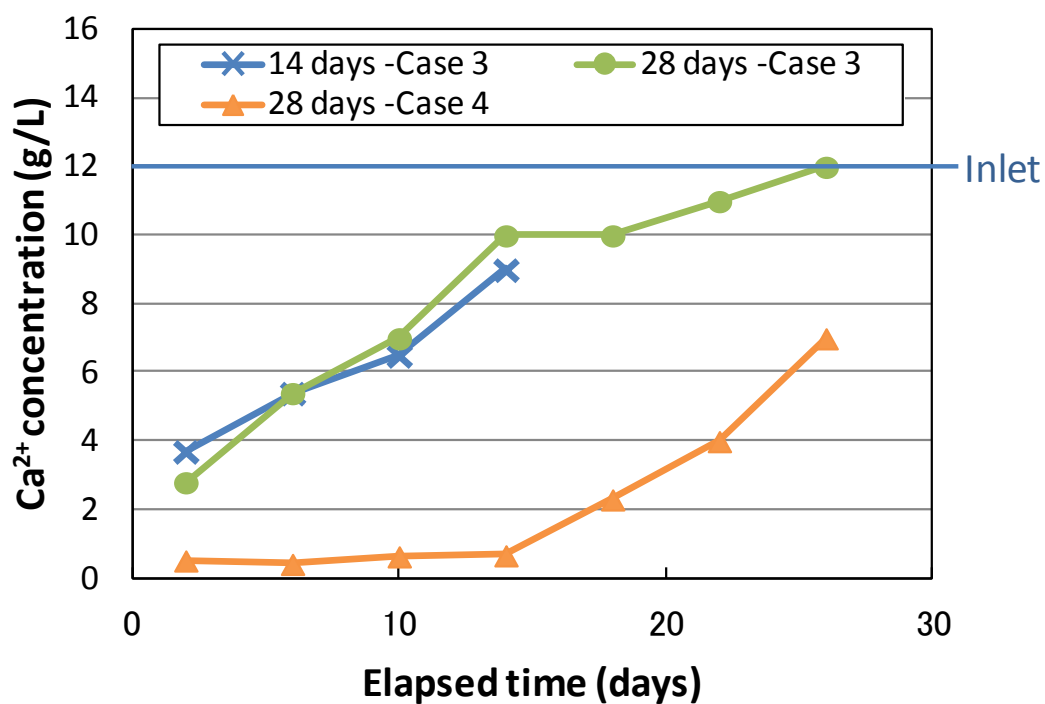


図 6.17 排液 Ca^{2+} 濃度の経時変化 (Case 3 と Case 4)

6.3.4 固化溶液の Ca^{2+} 濃度 0.15 M (Case 5) での経時変化

試験期間 28 日の供試体の応力-ひずみ曲線を図 6.18 に示す。同図の UCS が、本論文に記載する全カラム供試体の中で最も小さい値である。次に、UCS と供試体上部および中央部の推定 UCS の値を図 6.19 に示す。一軸圧縮試験による破壊面が供試体下部であったことを考慮すると、供試体の上部ほど UCS が大きい傾向となっていることが同図よりわかる。すなわち、UCS の値を供試体下部の推定 UCS と考えると、供試体上部および中央部の推定 UCS は下部の約 7 倍および約 3 倍であった。

開封時の供試体中の菌数（表 6.2 の Case 5 参照）は、 1.57×10^8 CFU/g であった。この値は、他の試験条件の菌数に比べて 1~2 桁大きかった。

図 6.20 に示した排液の pH は、試験期間中 7.0~7.2 の範囲を維持した。また、排液の Ca^{2+} 濃度（図 6.21 参照）は、時間とともに緩やかに増加した。

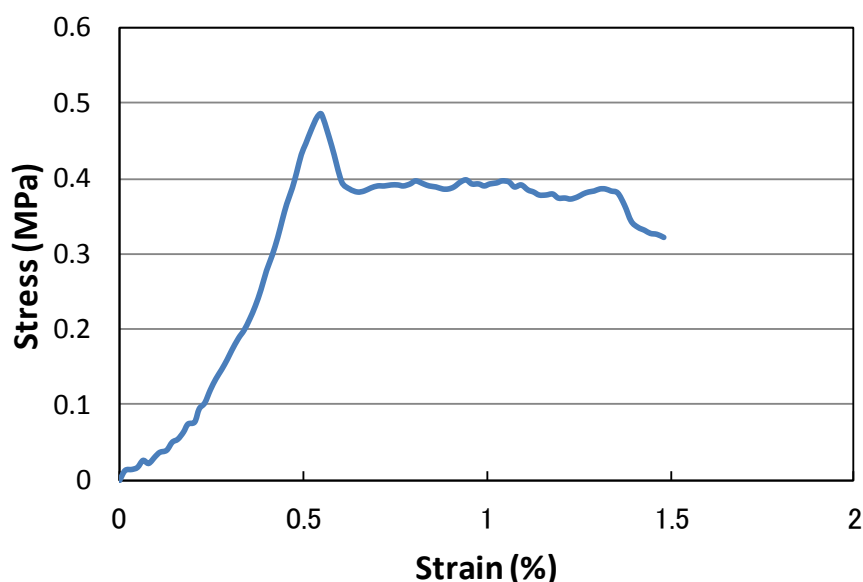


図 6.18 試験期間 28 日の供試体から得られた応力-ひずみ曲線 (Case 5)

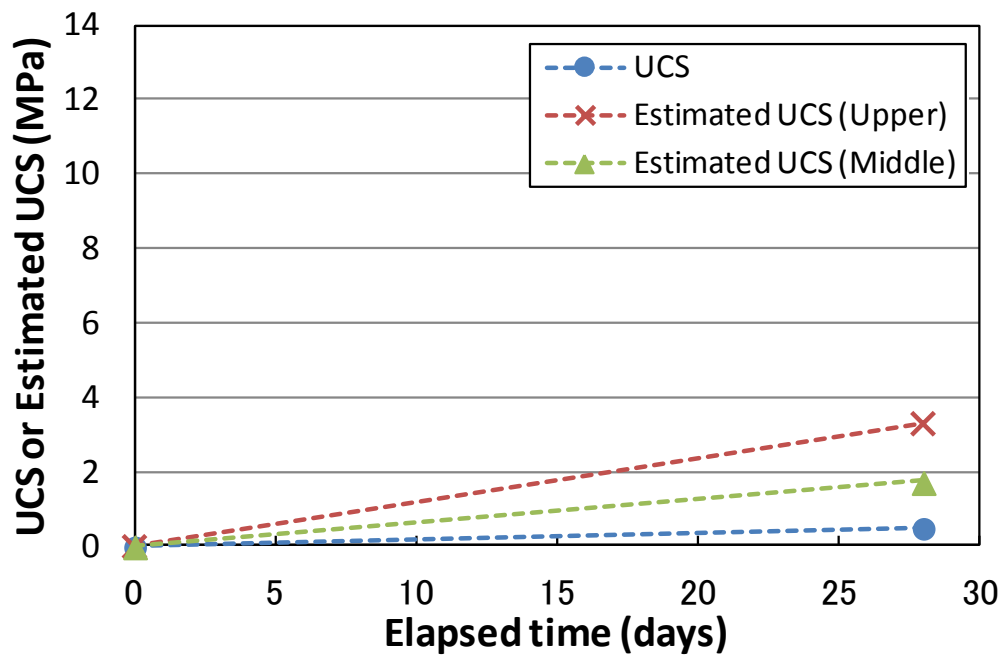


図 6.19 Ca^{2+} 濃度 0.15 M の固化溶液を注入した供試体の UCS および推定 UCS（上部・中央部）の経時変化

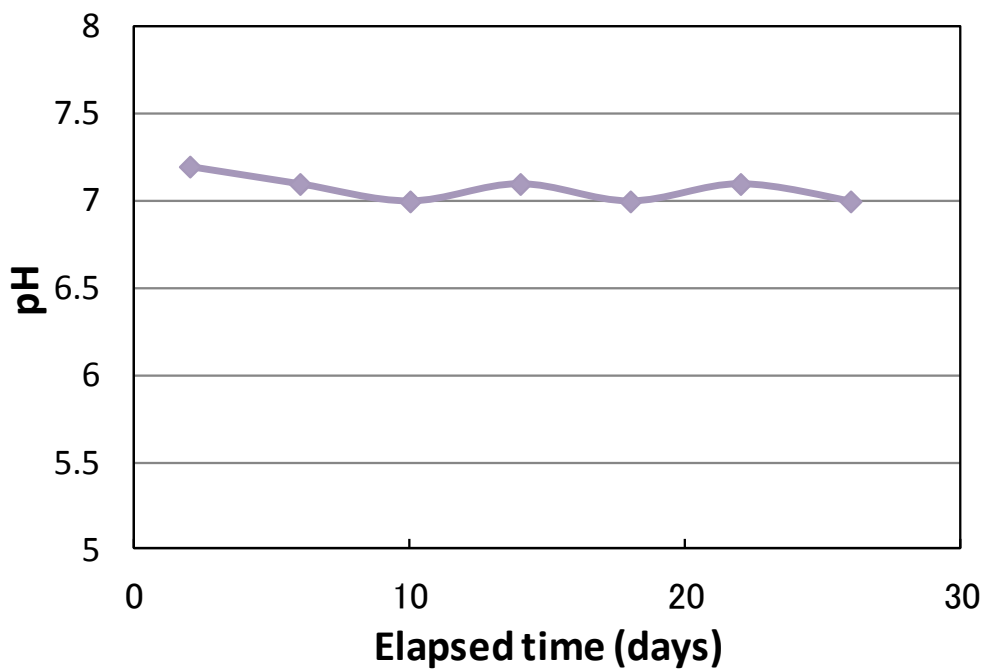


図 6.20 排液 pH の経時変化 (Case 5)

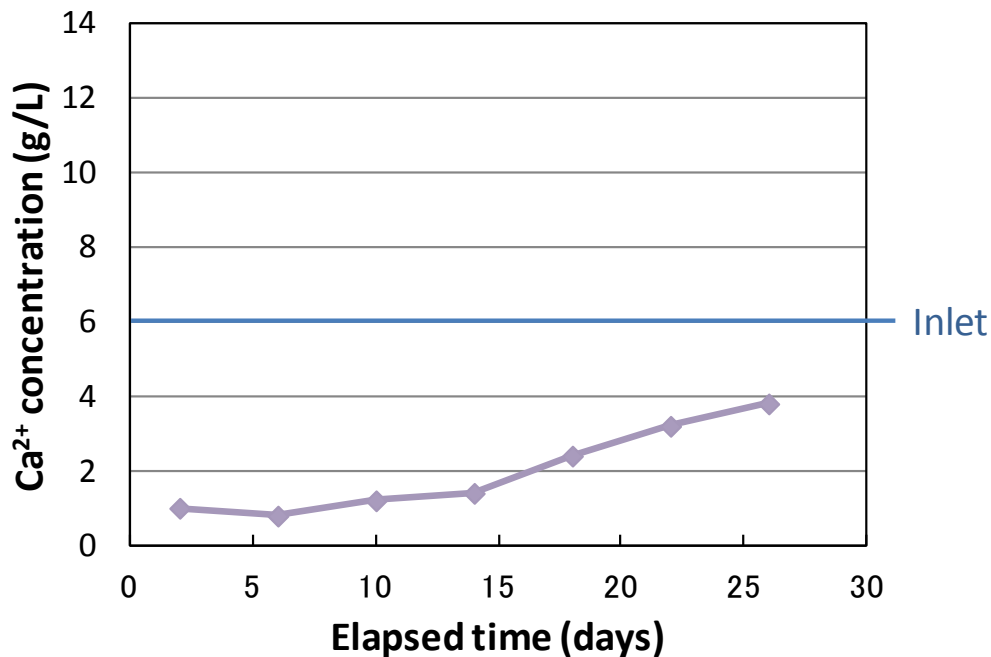


図 6.21 排液 Ca^{2+} 濃度の経時変化 (Case 5)

6.3.5 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 5 g/L (Case 6) での経時変化

試験期間 14 日、28 日の各供試体の応力-ひずみ曲線を図 6.22 に示す。同図より、UCS は時間の経過とともに 2.8 MPa から 4.1 MPa まで大きくなった。また、破壊ひずみは 1.0 % から 0.5 % に低下した。

図 6.23 に示す UCS および推定 UCS (上部・中央部) の経時変化に関しては、UCS と推定 UCS がよく一致していた。このことから、リンゴ酸ナトリウムを添加することで、より均質な供試体を作製できる可能性があるといえる。なお、試験期間 28 日の供試体上部の推定 UCS は、一軸圧縮試験による破断面が上部に集中したため、測定できなかった。

さらに、菌数測定の結果 (表 6.2 の Case 6 参照) について見ると、供試体の上部・中央部・下部における菌数のばらつきが小さいことがわかる。また、菌数は時間とともに減少する傾向がみられた。さらに、初期菌量が同じ Case 1 の試験期間 28 日 (Sample A) と Case 6 の同期間の最終的な菌数について比べると、同程度であった (1 桁以内の違いであった)。したがって、菌数の経時変化は、リンゴ酸ナトリウムの添加の有無に影響されない傾向が示された。

最後に、排液の pH (図 6.24 参照) は、pH 7.5 から時間とともに低下し、経過日数 22 日以降は pH 6.8 を維持した。また、排液の Ca^{2+} 濃度 (図 6.25 参照) は、経過日数 10 日付近から加速的に高まった。これは、同日付近から CaCO_3 の析出が急激に減速しているということになる。

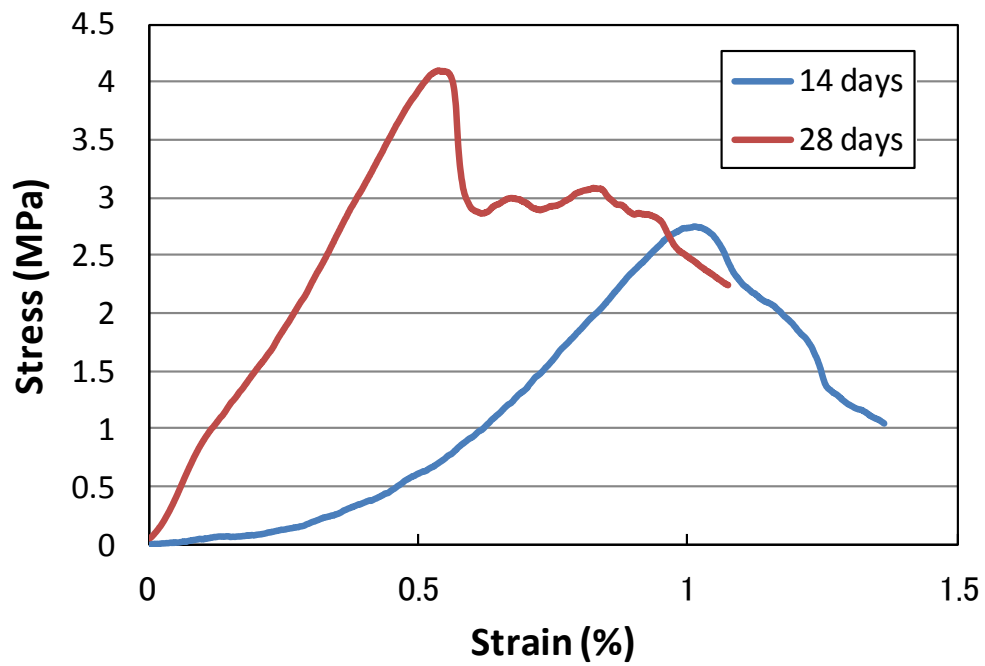


図 6.22 各試験期間の供試体から得られた応力-ひずみ曲線 (Case 6)

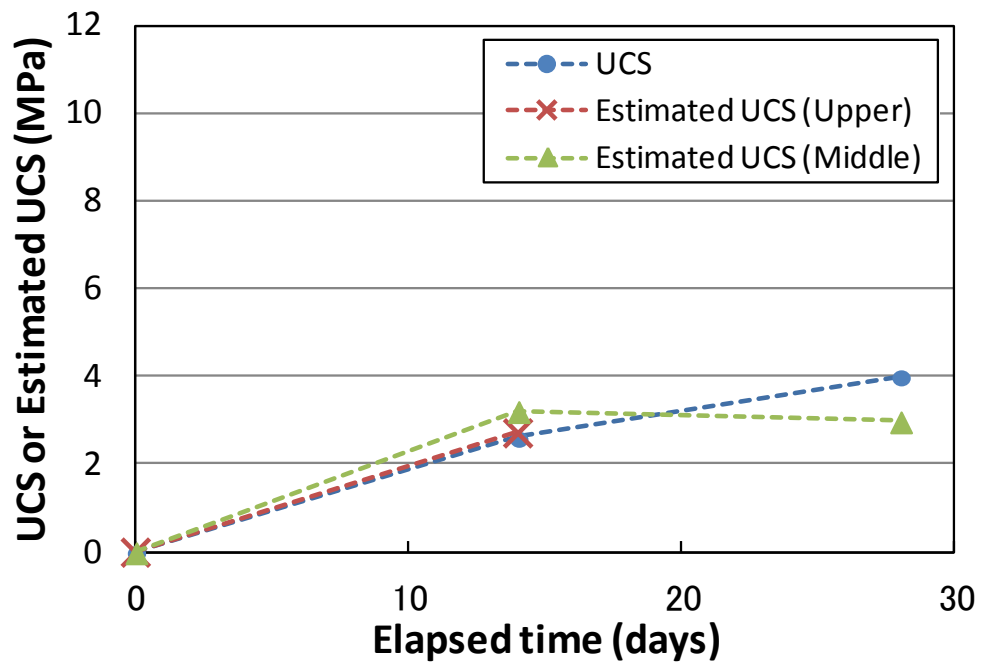


図 6.23 リンゴ酸ナトリウム濃度 5 g/L の固化溶液を注入した供試体の UCS および推定 UCS (上部・中央部) の経時変化

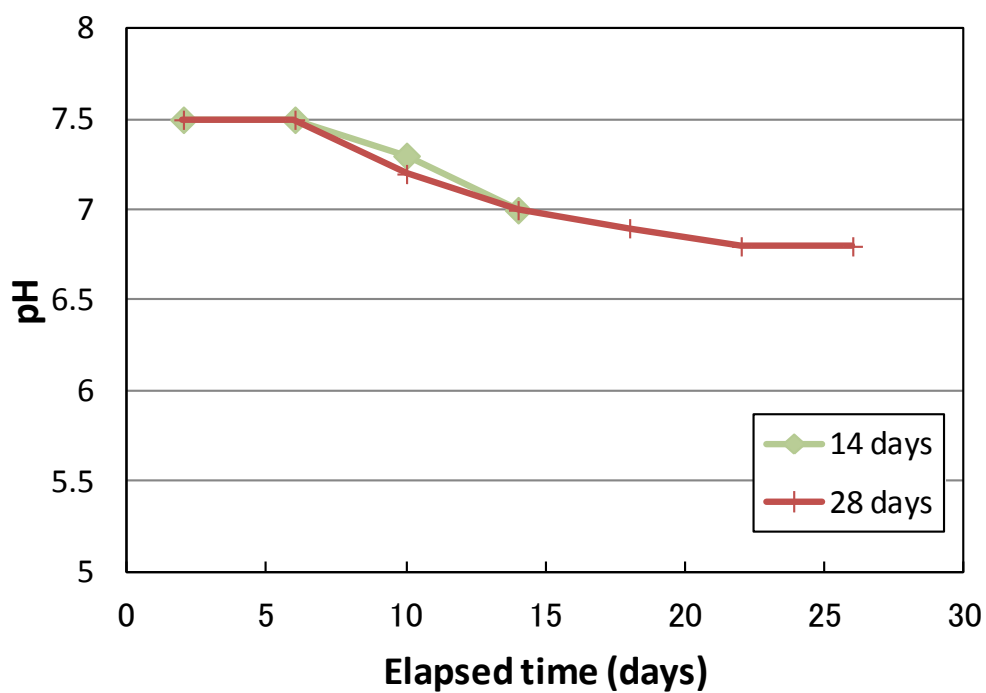


図 6.24 排液 pH の経時変化 (Case 6)

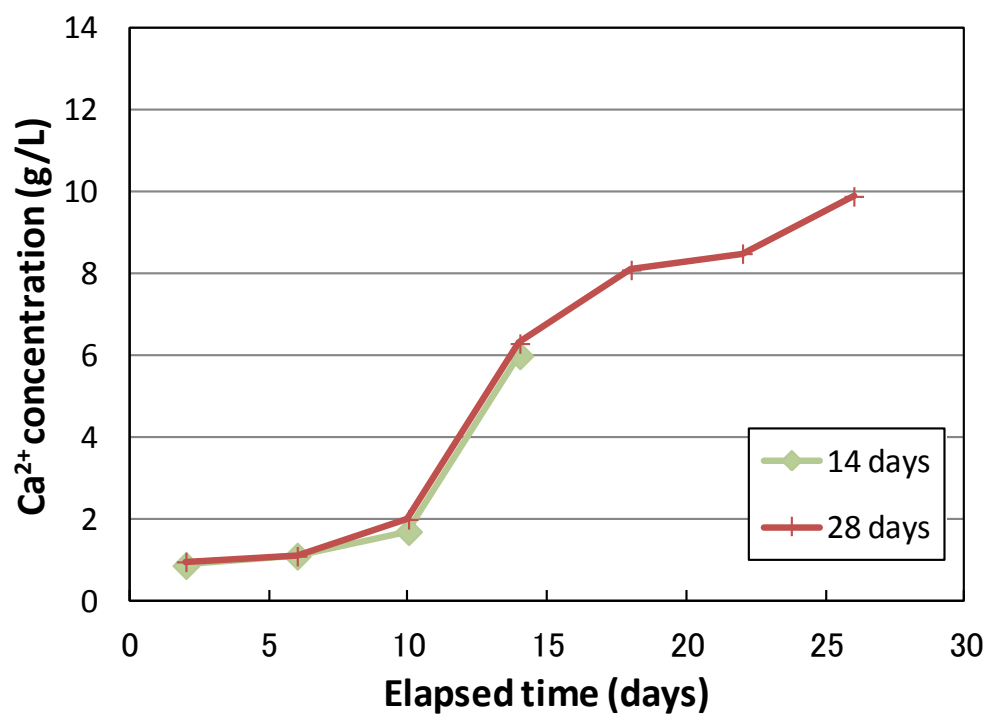


図 6.25 排液 Ca²⁺濃度の経時変化 (Case 6)

6.3.6 カラム試料の表面性状

試験期間を 28 日とした各試料 (Case 1～Case 6) のカラム開封後・整形前の様子を図 6.26 に示す。同図より、Case 1 は全ケースの中で最も光沢の範囲が広く、試料全体がより白い。Case 2 と Case 5 は似ており、試料上部に光沢がみられた。Case 3, 4, 6 は、Case 2, 5 に比べて供試体全体の光沢や色合いにむらがなかった。光沢にむらが小さい 4 ケースについて、光沢・白さの程度を比べると度合いが大きい順に Case1>Case 3≒Case 6>Case 4 という傾向がみられた。

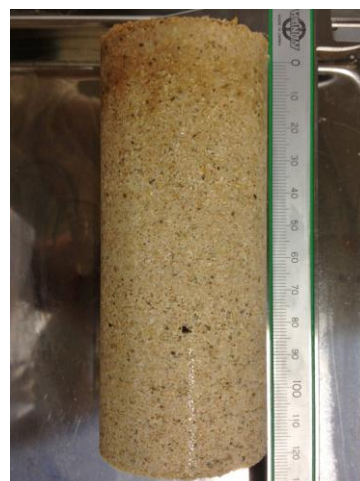
また、Case 1 の各試験期間での試料の表面性状を、図 6.27 に示す。同図より、時間の経過に伴って徐々に砂粒を確認しづらくなり、白さと光沢が増す傾向がみられた。また、試験期間 28 日 (Sample A) の試料が、最も全体的に白く、かつ光沢があった。



Case 1—Sample A



Case 2



Case 3



Case 4



Case 5



Case 6

図 6.26 試験期間を 28 日とした各試料 (Case 1～Case 6) のカラム開封後・整形前の様子



10 日



14 日



21 日



26 日



28 日—Sample A



28 日—Sample B

図 6.27 Case 1 の各試験期間での試料の様子（カラム開封後・整形前）

6.4 考察

6.4.1 UCS とセメント物質析出量の関係

セメント物質の析出量を、排液 Ca^{2+} 濃度の結果を用いて、5.4.2 項で前述した方法と同じ方法によって推定する。ただし、以下の点は異なる。

- ・ Ca^{2+} 濃度測定を実施した 10 本の供試体（表 6.3 参照）を、対象とする。
- ・ 固化溶液の Ca^{2+} 濃度は、12000 ppm（Case 5 以外のケース）または 6400 ppm（Case 5 のみ）とした。
- ・ Ca^{2+} 濃度測定は、経過日数 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26 日に測定したため、経過日数 1, 2 日の析出量は 2 日、3～6 日の析出量は 6 日、7～10 日の析出量は 10 日、11～14 日の析出量は 14 日、15～18 日の析出量は 18 日、19～22 日の析出量は 22 日、23～26 日または 23～28 日の析出量は 26 日、とそれぞれ同じと仮定した。
- ・ 注入間隔 0.5 日および 2 日のケースに関して、測定値から求めた 1 測定あたりの析出量の 2 倍および 0.5 倍を、それぞれの 1 日あたりの析出量として計算した。
- ・ 5 章の結果より、Case 1～5 のセメント物質は aragonite, Case 6 は HMC と考えられるため、セメント物質の密度 ρ_{CaCO_3} をそれぞれ 2.93, 2.71 g/cm³ とした。なお、HMC の密度を calcite の密度 2.71 にした理由は、HMC は calcite 形の CaCO_3 中に calcite 形の MgCO_3 または $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ が固溶体の形で入り込んだものであり、元素分析の結果、Mg の含有率はわずか 1 wt%以下である（5.4.2 (F)参照）ことから、calcite と同じ密度とみなしてよいと考えられるためである。

上記の点を踏まえて、セメント物質析出量および析出率を推定した。その結果を、表 6.3 および図 6.28 に示す。同図より、 CaCO_3 総析出率 x と UCS y の間には正の相関がみられた。その関係式は、次式のとおりであった。

$$y = 113 x^2 + 1.97 x \quad (\text{決定係数 } 0.91) \quad (6.1)$$

表 6.3 供試体の CaCO_3 総析出率とその析出率を求めるために用いた各測定値

Case	Elapsed time (days)	UCS (MPa)	Specimen diameter (mm)	Specimen height (mm)	Specimen volume (cm ³)	Sand volume (cm ³)	Initial void volume (cm ³)	Sand mass (g)	Total CaCO_3 precipitation (g)	Total CaCO_3 precipitation content (g/g sand)
1	26	7.3	48.9	102.3	192.3	97.4	94.9	267	69.2	0.259
1	28 (A)	9.9	48.8	101.7	190.1	96.8	93.3	265	74.9	0.282
2	14	0.5	49.7	100.2	194.4	95.4	99.0	261	29.1	0.1114
2	28	2.4	50.1	100.3	197.7	95.5	102.2	262	37.4	0.1430
3	14	2.4	48.7	100.2	186.7	95.4	91.3	261	35.1	0.1342
3	28	4.6	49.1	98.3	185.7	93.5	92.1	256	39.0	0.1521
4	28	1.2	50.0	100.1	196.5	95.3	101.2	261	33.0	0.1262
5	28	0.5	49.2	101.1	192.1	96.2	95.9	264	28.4	0.1076
6	14	2.6	49.0	97.2	183.2	92.5	90.7	253	29.7	0.1171
6	28	4.0	49.7	98.8	191.3	94.1	97.2	258	41.4	0.1607

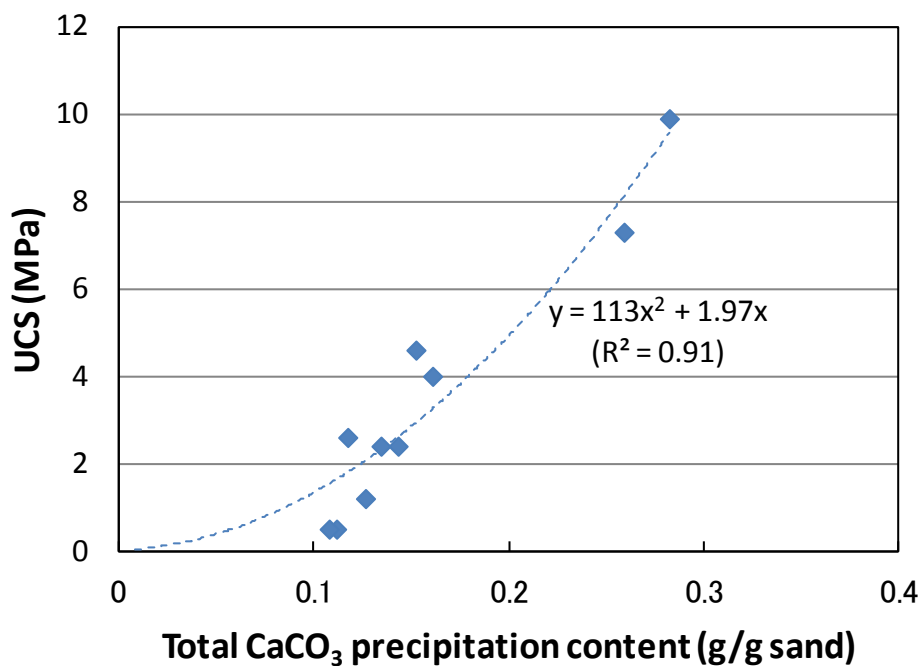


図 6.28 CaCO₃ 総析出率と UCS の関係

同式より，UCS で約 10 MPa，20MPa，30 MPa を有する供試体を作製するには，CaCO₃ 総析出率でそれぞれ 0.3, 0.4, 0.5 g/g sand 程度を析出させる必要がある可能性が示された。

また，セメント物質の種類別に CaCO₃ 総析出率と UCS の関係を求めると，図 6.29 のとおりであった。ここでは，aragonite がセメント物質である Case1～5 と HMC がセメント物質である Case 6 の 2 つに分けた。同図と図 6.28 より，セメント物質の種類によって区別した方が，区別しない場合に比べて各式の決定係数が大きくなっているが，その差は小さいことがわかる。ただし，HMC に関してはデータが少ないため，より正確な関係式を導くためにはさらなる実験データの蓄積が必要である。また，aragonite 総析出率 x と UCS y の間には，次式の関係がみられた。

$$y = 126 x^2 + 1.79 x \quad (\text{決定係数 } 0.92) \quad (6.2)$$

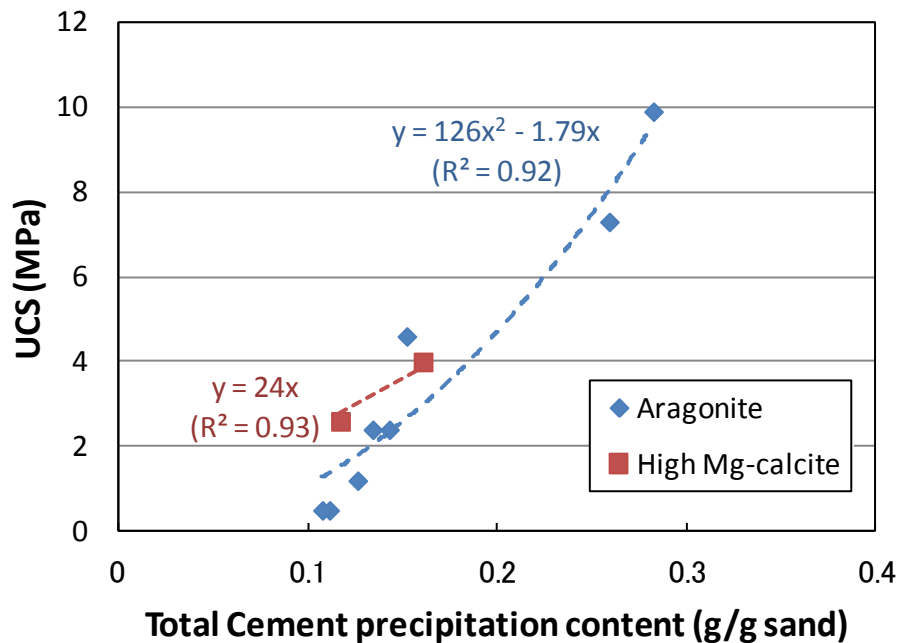


図 6.29 CaCO_3 総析出率と UCS の関係（セメント物質の種類が異なる場合）

以下に、図 6.28 に示した本試験結果と微生物を用いた地盤固化に関する既往研究の結果を比較する。本菌株 *Pararhodobacter* sp., 国内外において広く用いられている *Sporsarcina pasteurii* ^{6.1)}, Al-Thawadi and Cord-Ruwisch ^{6.2)}によって単離された *Bacillus sphaericus* ^{6.3)}を用いた固化試験によって得られた CaCO_3 総析出率と UCS の関係を図 6.30 に示す。同図より、同じ CaCO_3 総析出率では、本菌株の方が *Sporsarcina pasteurii* より大きな UCS となる傾向が示された。ただし、セメント物質の種類や砂の種類、固化溶液等が異なるため、一概にどちらの菌株が地盤固化に優れているとは言えない。また、本菌株および *Sporsarcina pasteurii* の 2 株をそれぞれ用いた供試体と、*Bacillus sphaericus* を用いた供試体では CaCO_3 総析出率の範囲に違いがみられ、その結果として UCS に違いが生じたと考えられる。

以上より、本菌株は *Sporsarcina pasteurii* と同様に微生物固化技術への適用可能性が大きいことが示された。

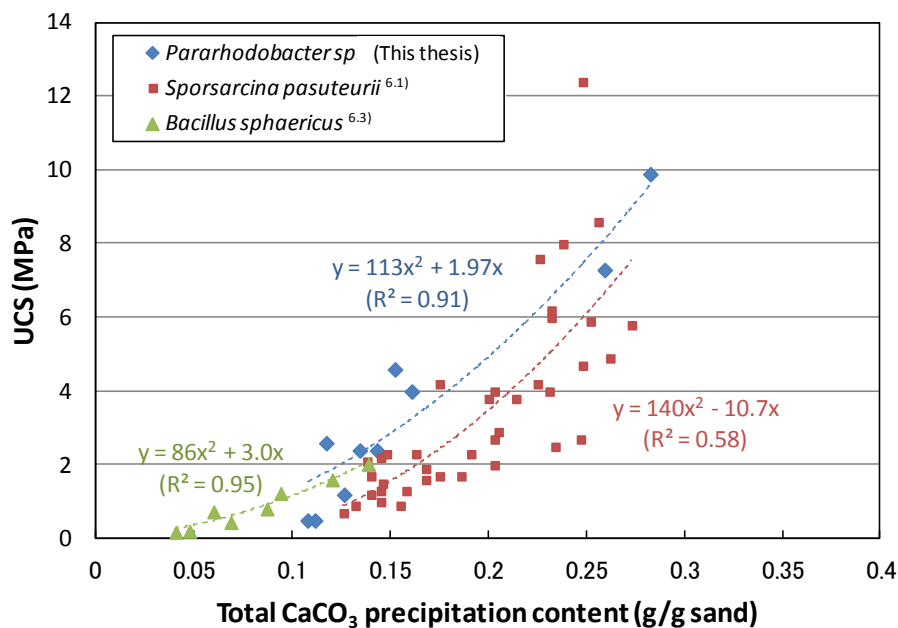


図 6.30 本菌株と他尿素分解菌^{6.1), 6.3)}の比較 (CaCO₃ 総析出率と UCS の関係)

6.4.2 重回帰分析による設計 UCS の検討

各試験条件や試験期間といった初期に設定できる値から UCS を予測する式を提案するために、各試験条件や試験期間を説明変数、UCS の実測値を目的変数として、重回帰分析を行なった。その設計 UCS (UCS の予測式) は、次式のとおりである。

$$q_{ud} = -2.82 I_i + 0.461 T + 34.5 C_{ca} - 0.0907 C_{so} + 0.275 D - 23.4 \quad (6.3)$$

(決定係数 : 0.62)

ここに、

q_{ud} : 設計 UCS (MPa)

I_i : 注入間隔 (日)

T : 養生温度 (°C)

C_{ca} : 固化溶液の Ca²⁺濃度 (M)

C_{so} : 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 (g/L)

D : 試験期間 (日)

である。

上記の重回帰分析による出力結果を表 6.4 に示す。5.4.3 項で前述したように、P-値が 0.01 ~ 0.05 の範囲にある説明変数は有意水準 5 % で有意であり、重要といえる。同図より、P-値が 0.05 以下の説明変数は試験期間のみであった。また、目的変数に対する説明変数の重

要度ランキングが判定できる t 値から本説明変数を述べると、重要度の大きい順に試験期間、固化溶液の Ca^{2+} 濃度、注入間隔、養生温度、固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度となることが示された。

次に、式 (6.3) よりも信頼性の高い設計 UCS の式を提案すべく、説明変数を厳選する。そこで P 値に注目すると、0.05 以下の説明変数は試験期間のみであるが、固化溶液の Ca^{2+} 濃度の P 値は 0.0685 と比較的低い値であることがわかる。そこで、試験期間と固化溶液の Ca^{2+} 濃度のみを説明変数として、それ以外の試験条件は標準（養生温度 30 °C，注入間隔 1

表 6.4 重回帰分析による出力結果（式 6.3 と対応）

	Partial regression coefficient	Standard error	t	P -value
Intercept	-23.4	12.25	-1.908	0.0928
Injection interval (days)	-2.82	1.905	-1.478	0.1776
Temperature (°C)	0.461	0.355	1.296	0.231
Ca^{2+} in SC (M)	34.5	16.40	2.10	0.0685
Sodium malate in SC (g/L)	-0.0907	0.355	-0.255	0.805
Test period (days)	0.275	0.0930	2.95	0.01831

日、リンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L) である試験ケースから得られた UCS を目的変数として、重回帰分析を行なった結果、次の設計 UCS の式が得られた。なお、本分析の出力結果は、表 6.5 のとおりである。

$$q_{ud} = 48.3 C_{\text{Ca}} + 0.456 D - 19.51 \quad (\text{決定係数 : 0.85}) \quad (6.4)$$

式 (6.4) の決定係数は 0.85 と高い値であり、加えて表 6.5 に示す説明変数の P 値はいずれも 0.05 を下回っている。したがって、式 (6.3) よりも信頼性の高い設計 UCS の式を提案できたといえる。ただし、式 (6.4) は、養生温度、注入間隔、リンゴ酸ナトリウム濃度を固定する必要がある、また説明変数に関しても本試験で対象とした範囲内でしか同式の信頼性は保証できない。式 (6.4) 以上に信頼性が高く、かつ様々な試験ケースに対応できる設計 UCS の式を提案するためには、今後さらなる実験が必要である。加えて、本式 (6.4) は、あくまで実験的に求めた今後の固化試験および現場施工につながる設計 UCS の提案式であることを、本章考察の最後に述べておきたい。

表 6.5 重回帰分析による出力結果（式 (6.4) と対応）

	Partial regression coefficient	Standard error	t	P -value
Intercept	-19.51	5.19	-3.758	0.01981
Ca^{2+} in SC (M)	48.3	13.83	3.49	0.0251
Test period (days)	0.456	0.1053	4.33	0.01233

6.5 結言

本章では、前章のシリンジ固化試験の結果から、UCS にとって重要だと示された試験条件に絞り、供試体サイズおよび試験期間を大きくすることで、直径 5 cm×高さ 10 cm の供試体を数 MPa 以上に固化することを目的として、カラム固化試験を実施した。その結果得られた主な知見は、以下のとおりである。

- ・ 試験期間 28 日, 養生温度 30 °C, 固化溶液の注入間隔 1 日, 固化溶液の Ca^{2+} 濃度 0.3 M, 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L の試験条件のもとでカラム固化試験を実施した結果, UCS で 10 MPa の供試体の作製に成功した。
- ・ 供試体の CaCO_3 総析出率 x と UCS y の間には, 正の相関がみられた。また, その関係式は, $y = 113 x^2 + 1.97 x$ (決定係数 0.91) であった。
- ・ UCS に重要な影響を与える試験条件である試験期間 D と固化溶液の Ca^{2+} 濃度 C_{ca} を説明変数として重回帰分析を実施した結果, 設計 UCS q_{ud} の式は $q_{\text{ud}} = 48.3 C_{\text{ca}} + 0.456 D - 19.51$ となることが示された。なお, 本式は, 試験期間と固化溶液の Ca^{2+} 濃度がそれぞれ 10~28 日と 0.15~0.3 M の範囲内で, かつ, 養生温度 30 °C, 注入間隔 1 日, リンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L の条件下で作製した同サイズの供試体に適用できる式である。

参考文献

- 6.1) Van Paassen, L. A., Ghose, R., Van der Linden, T. J. M., Van der Star, W. R. L., Van Loosdrecht, M. C. M., 2010, Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 136, pp. 1721–1728.
- 6.2) Al-Thawadi, S., Cord-Ruwisch, R., 2012, Calcium carbonate crystals formation by ureolytic bacteria isolated from Australian soil and sludge, Journal of Advance Science and Engineering Research. 2, pp. 13–26.
- 6.3) Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., Shahin, M. A., 2013, Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation, Can. Geotech. J. 50, pp. 81–90.

第7章 結論

本研究は、港湾岸壁などの海岸コンクリート構造物の長寿命化に資するために、自己修復機能を有した低環境負荷かつ低コストの人工岩を開発することを最終的な目的としている。本論文では文献調査および現地調査の実施によって自然に形成するビーチロックの形成機構について学び、ビーチロック形成への影響因子に関する考察を行ない、得られた知見をもとにサンゴ砂を用いた室内固化試験により一軸圧縮強さ（UCS）で数 MPa 程度の人工岩供試体を作製する手法を提案することを目的とした。

本論文で得られた主な知見は、以下のとおりである。

第2章

これまでに報告されているビーチロックに関する文献 134 編（国内 28、国外 106）をもとに、ビーチロックを模擬した人工岩を作製していく上で有益な情報であるビーチロックの「分布域」、「形成年代」、「諸特性」および「形成機構」についてのデータを整理、把握した。本章で得られた主な知見は、以下に示すとおりである。

- ・ 分布域については、北緯 40° 付近から南回帰線の間に 90 %以上のビーチロックが分布する。また、最北部のビーチロックは Scotland（北緯 57° 40'），最南部は South Africa（南緯 34° 06'）である。国内のビーチロックは、北緯 30° 以南におよそ 95%が分布している。また、ビーチロックの北限は、日本海側は石川県珠洲市粟津、太平洋側は房総半島の千葉県館山市塩見、東シナ海側は五島列島奈留島である。
- ・ 形成年代では、South Africa の Durban や石川県輪島市曾々木海岸などの数十年前から South Africa の Flase Bay の約 26000 年までの範囲にある。
- ・ 諸特性に関しては、ビーチロックおよびそのセメント物質の組成は CaCO_3 や SiO_2 が主となっている。力学特性については、Scotland および石川県のビーチロックの一軸圧縮強さに関する 2 編の報告しかない。
- ・ 形成機構としては、海水からの析出、淡水からの析出、 CO_2 の脱気による析出、生物学的影響、海水と淡水の混合、物理化学的要因の 6 種類が主である。

第3章

本章では、試験データが非常に不足しているビーチロックの物理・力学特性および得られた諸試験物性間の相関関係について把握するとともに、それらに関する実験的検討を実施した結果について報告した。試験数としては決して十分とはいえないが、本研究によって沖縄県 4 地点および石川県 1 地点のビーチロックに関する物理・力学特性の一部を大略把握することができたと考えられる。

本章で対象とした調査地点は、沖縄県の国頭郡本部町備瀬後備浜原（調査地点 A）、国頭

郡恩納村真栄田（調査地点 M）、中頭郡読谷村儀間（調査地点 G）、名護市済井出（調査地点 S）と石川県の輪島市渋田町曾々木海岸ミツ子浜（調査地点 W）の合計 5 地点である。

本論文で得られた主な知見をまとめると、以下に示すとおりである。

- ・ ビーチロックの物理学特性について、湿潤状態における密度は、調査地点 A, M, G でそれぞれ $2.06 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$, $1.97 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, $2.47 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ であった。また、含水比はそれぞれ $11.1 \pm 1.3 \%$, $25.4 \pm 0.5 \%$, $3.7 \pm 0.3 \%$ であった。
- ・ ビーチロックの力学特性について、湿潤状態における UCS は、調査地点 A, M, G でそれぞれ $11.14 \pm 4.50 \text{ MPa}$, $19.91 \pm 7.68 \text{ MPa}$, $42.23 \pm 12.64 \text{ MPa}$ であった。また、P 波速度（室内試験）はそれぞれ $3.50 \pm 0.14 \text{ km/s}$, $3.69 \pm 0.22 \text{ km/s}$, $4.74 \pm 0.37 \text{ km/s}$ であった。
- ・ ビーチロックの力学特性について、調査地点 S, W は他の 3 地点と異なり、露出しているビーチロックだけではなく固結の程度が弱い土中のビーチロックについても測定できた。すなわち、針貫入試験によって求めた推定 UCS は、調査地点 S および W でそれぞれ $23 \pm 6.4 \text{ MPa}$ （露出しているビーチロック）、 3.4 MPa （土中のビーチロック）、および、 $2.0 \pm 0.6 \text{ MPa}$ （露出しているビーチロック）、 $0.9 \pm 0.4 \text{ MPa}$ （土中のビーチロック）であった。
- ・ UCS q_u に対する密度、含水比、50 %ヤング率、50 %ポアソン比、P 波速度、S 波速度の相関性の大小を比較したところ、P 波速度 V_{PL} が最も相関が高かった。なお、 q_u と V_{PL} の間には $V_{PL} = 0.0345 q_u + 3.16$ （相関係数 r は 0.893）なる関係がみられた。

第 4 章

本章では、ビーチロックを模擬した人工岩を作製する上で重要な情報となるビーチロックの形成機構について考察することを目的とした。そこで、前章で対象とした固結の程度が異なるビーチロックを有する沖縄県名護市済井出（調査地点 S）と石川県輪島市渋田町（調査地点 W）の両地点のビーチロックおよびその周辺環境を対象に、菌数測定、元素分析、鉍物分析、水質分析を実施した。その結果、両地点のビーチロックの形成機構は、以下のよう結論づけられる。

- ・ 調査地点 S のビーチロックは、海水の蒸発やウレアーゼ活性を有する微生物の尿素分解反応に伴って CaCO_3 が析出する際に、有機物の影響によって MgCO_3 が CaCO_3 とともに high Mg-calcite として析出し、砂粒子同士を膠結することで形成されたと考えられる。
- ・ 調査地点 W のビーチロックは、 Al^{3+} を含んだ酸性の湧水が潮間帯で海水と混合することで $\text{Al}(\text{OH})_3$ として析出する際に、湧水や海水中の SiO_2 や SO_4^{2-} が一緒に取り込まれるため、Al と Si を主成分とする非晶質のセメント物質が砂粒子間で析出して形成されたと考えられる。

第5章

沖縄県名護市済井出（調査地点 S）のビーチロック周辺から採取した尿素分解菌 *Pararhodobacter* sp.を用いて、シリンジ固化試験を実施した。試験期間は14日とし、6つの異なる各試験条件（養生温度、固化溶液の注入間隔、砂の種類、固化溶液の Ca^{2+} 濃度、固化溶液の pH、固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度）が UCS に与える影響を把握することを目的とした試験を行なった。一連の試験で得られた主な知見は、以下のとおりである。

- ・ 養生温度 20～35 °C の範囲では、温度が大きいほど推定 UCS が大きくなる傾向がみられ、20 °C では未固結、25, 30, 35 °C ではそれぞれ平均 0.6, 1.0, 1.7 MPa となった。
- ・ 固化溶液の注入間隔を 0.5, 1, 2 日で比較したところ、注入間隔が短いほど推定 UCS が大きくなり、0.5, 1 日ではそれぞれ平均 2.4, 1.7 MPa, 2 日では供試体上部しか固化しなかった。
- ・ 砂の種類をサンゴ砂と豊浦砂で比較したところ、サンゴ砂は供試体全体が固化したが、豊浦砂は供試体の上半分程度しか固化しない傾向がみられた。また、供試体上部は、どちらの砂でも平均 1.5 MPa となった。
- ・ 固化溶液の Ca^{2+} 濃度を 0.1, 0.2, 0.3 M で比較したところ、供試体全体が固化したのは 0.3 M だけ（平均 1.1 MPa）であり、0.2 M では供試体上部のみが固化し、0.1 M では未固化であった。
- ・ 固化溶液の pH を 6.9（NaOH 添加なし）、8.0, 9.0 で比較したところ、pH が低いほど推定 UCS は大きくなる傾向がみられ、pH 6.9 では平均 0.6 MPa であった。
- ・ 固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度を 0～5.0 g/L の範囲で変えたところ、推定 UCS とセメント物質に違いがみられた。すなわち、リンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L のもとで最も大きい推定 UCS 値を示した（平均 1.5 MPa, セメント物質は aragonite）。また、リンゴ酸ナトリウムを添加した場合は、添加量が多いほど推定 UCS も大きくなり、5.0 g/L 添加した場合は平均 1.0 MPa となった（セメント物質は high Mg-calcite）。
- ・ 重回帰分析の結果から、試験期間 14 日、シリンジサイズ（直径 2.5 cm×高さ 7 cm）の供試体において、上記(1)～(6)の 6 つの試験条件の中で UCS の重要要因は、重要度の大きい順に養生温度 T , 注入間隔 I , 固化溶液の Ca イオン濃度 C_{Ca} であり、設計 UCS $q_{\text{ud}14}$ は $q_{\text{ud}14} = -1.286 I + 0.1307 T + 6.90 C_{\text{Ca}} - 3.47$ （決定係数：0.773）となることが示された。

第6章

本章では、前章のシリンジ固化試験の結果から、UCS にとって重要だと示された試験条件に絞り、供試体サイズおよび試験期間を大きくすることで、直径 5 cm×高さ 10 cm の供試体を数 MPa 以上に固化することを目的として、カラム固化試験を実施した。その結果得られた主な知見は、以下のとおりである。

- ・ 試験期間 28 日, 養生温度 30 °C, 固化溶液の注入間隔 1 日, 固化溶液の Ca^{2+} 濃度 0.3 M,

固化溶液のリンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L の試験条件のもとでカラム固化試験を実施した結果、UCS で 10 MPa の供試体の作製に成功した。

- ・ 供試体の CaCO_3 総析出率 x と UCS y の間には、正の相関がみられた。また、その関係式は、 $y = 113 x^2 + 1.97 x$ (決定係数 0.91) であった。
- ・ UCS に重要な影響を与える試験条件である試験期間 D と固化溶液の Ca^{2+} 濃度 C_{Ca} を説明変数として重回帰分析を実施した結果、設計 UCS q_{ud} の式は $q_{\text{ud}} = 48.3 C_{\text{Ca}} + 0.456 D - 19.51$ (決定係数 0.85) となることが示された。なお、本式は、試験期間と固化溶液の Ca^{2+} 濃度がそれぞれ 10~28 日と 0.15~0.3 M の範囲内で、かつ、養生温度 30 °C、注入間隔 1 日、リンゴ酸ナトリウム濃度 0 g/L の条件下で作製した同サイズの供試体に適用できる式である。

以上をまとめると、次のとおりである。本論文では、まず、文献調査を実施することによって、人工岩を作製する上で重要なビーチロックに関する情報を整理・把握した。次に、国内外の報告例が極めて少ないビーチロックの物理・力学特性について、国内 5 地点のビーチロックを対象に測定した。その後、力学試験を実施したビーチロックを対象として、その形成機構を力学・化学・生物学・鉱物学の多角的な視点から分析・考察した。そして、ビーチロック形成への影響因子である微生物の尿素分解作用を利用した固化試験を実施した。試験条件を複数試みることによって、現地のビーチロック周辺から採取した尿素分解菌を用いて、直径 5 cm × 高さ 10 cm の供試体を 28 日の試験期間で 10 MPa の UCS に固める手法を提案することに成功した。

本論文で得られた知見は、海岸コンクリート構造物の長寿命化に資する自己修復機能を有した低環境負荷かつ低コストの人工岩を開発する上で大いに役立つものであると考える。また、本論文では現地の微生物を用いた沿岸域での地盤固化方法に関する世界で初めての提案をしているため、本論文は沿岸域での微生物促進型地盤改良に関する研究の今後の発展に貢献するものであるといえる。

今後は、本人工岩の現場適用に向けて、本固化試験の環境影響評価試験、土槽での固化試験、現場試験を順に進めていく必要がある。最後に、本論文で得られた知見に基づく本人工岩の適用先と適用方法の計画に関する概案は、以下のとおりである。

- (1) 侵食が進む海岸の砂をその場で固める。
 - ・ 対象の海岸やその周辺の別海岸に存在する尿素分解菌を単離培養し、その培養液を対象とする砂浜に注入する。その後、固化溶液を定期的に注入する。なお、海水中に Ca^{2+} が含まれているため、施工期間に余裕があれば、培養液を注入するだけで目標強度まで固化できる可能性がある（カラム試験で求めた設計 UCS (式 (6.4)) と海水中の Ca^{2+} 濃度から外挿)。
- (2) 海岸侵食対策として既設のコンクリート構造物を人工岩に置き替える。
 - ・ 室内で本カラム容器より大きい容器を用いて、人工岩を複数作製する。その後、作製

した人工岩を現地に運び、劣化したコンクリート構造物と置き替える。

- ・ 現地で、長さ数 m のパイプを潮間帯の砂浜に複数突き刺して固定し、メッシュでパイプの周りを覆った空間の中に海岸砂を供給し、定期的に培養液や固化溶液を添加することで人工岩を作製する。
- (3) 劣化した港湾岸壁のひび割れ部分に、人工岩のセメント物質を析出させて修復する。
- ・ 干潮時に培養液（や固化溶液）をひび割れ部分に注入することを定期的に繰り返すことで、ひび割れの修復を行なう。
 - ・ 尿素分解菌が好む環境を港湾岸壁周辺に作ることで、港湾岸壁の自己修復を起こす。
- (4) 沿岸域以外においても、コンクリート代替品としての需要に期待する。
- ・ 本人工岩は自然の堆積物に近い外観を持ち、自然に優しい作製方法であるため、沿岸域に限らず陸域においてもコンクリートの代替品としての需要があることも期待している。

謝辞

指導教員の川崎了教授，同研究室の金子勝比古名誉教授（前教授），加藤昌治助教，中島一紀准教授，秘書の多田仁美さん，前秘書の石岡優香さん，同研究室の先輩・同期・後輩の皆様（特にビーチロックチームの久保良介君，島崎傑君，肥塚啓佑君，八重樫彩さん），環境循環システム専攻の先生方や学生の方々，他学部も含めた同大学の関係者の方々，富山県立大学の畠俊郎准教授，株式会社地層科学研究所の秋山克氏，そして青木菜穂氏には大変お世話になりました。誠にありがとうございました。また，日本学術振興会には特別研究員 DC1 の一人として，研究・生活の両面において金銭的に援助していただきました。さらに，家族の皆にも大いに支えられました。

今後は，皆様のご協力のお陰で得られた大学での様々な経験を，少しでも多く社会に還元していけるよう，日々精進を続けていきます。

研 究 業 績

1. 論 文（学位論文関係）

- (1) T. Danjo and S. Kawasaki : 「Formation mechanisms of beachrocks in Okinawa and Ishikawa, Japan, with a focus on cements」 *Materials Transactions*, Vol.55, No.3, pp.493-500 (2014 年)
- (2) T. Danjo and S. Kawasaki : 「Characteristics of Beachrocks: A Review, Geotechnical and Geological Engineering」 *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 32, pp. 215- 246 (2014 年)
- (3) T. Danjo and S. Kawasaki : 「A Study of the Formation Mechanism of Beachrock in Okinawa, Japan: Toward Making Artificial Rock」 *International Journal of GEOMATE*, Vol.5, No.1, pp. 633-638 (2013 年)
- (4) 檀上 堯, 川崎 了 : 「セメント物質に着目したビーチロックの形成メカニズムに関する考察」 *Journal of MMIJ*, Vol.129, No.7, pp.520-528 (2013 年)
- (5) 檀上 堯, 川崎 了 : 「沖縄本島ビーチロックの物理・力学特性」 *応用地質*, Vol. 53, No. 4, pp. 191-200 (2012 年)
- (6) 檀上 堯, 川崎 了 : 「文献調査によるビーチロックの諸特性ービーチロックを模擬した人工岩の開発を目指してー」 *応用地質*, Vol. 53, No. 3, pp. 129-141 (2012 年)

2. 論 文（その他）

- (1) 檀上 堯 : 「国際会議参加報告 (The International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro (IS-Cambridge 2014))」 *材料*, Vol. 64, No. 1, p. 63 (2015 年)

3. 講 演（学位論文関係）

- (1) T. Danjo, S. Kawasaki, S. Shimazaki and K. Koizuka : 「Effects of bacterial ureolysis and seawater evaporation on beachrock formation」 *8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8)*, RP4-1 (2014 年)
- (2) T. Danjo, S. Kawasaki, S. Shimazaki and K. Koizuka : 「Coral sand solidification test using ureolytic bacteria」 *the International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro (IS-Cambridge 2014)*, pp. 1521-1526 (2014 年)
- (3) T. Danjo and S. Kawasaki : 「A Study of the Formation Mechanism of Beachrock in Okinawa, Japan: Toward Making Artificial Rock」 *the Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE2013)*, pp. 101-106 (2013 年)
- (4) T. Danjo, S. Kawasaki and T. Hata : 「Formation mechanisms of beachrocks in

- Okinawa and Ishikawa, Japan」 the 47th U. S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, Paper218 (2013 年)
- (5) T. Danjo, S. Kawasaki and T. Hata : 「Properties of beachrocks in Okinawa and Ishikawa, Japan」 34th International Geological Congress (2012 年)
 - (6) T. Danjo : 「Relationship between Cement Content and Unconfined Compressive Strength of Beachrocks」 the 2nd Joint Seminar in Geo-Environmental Engineering, pp. 82-90 (2012 年)
 - (7) T. Danjo and S. Kawasaki : 「Property evaluation of beachrock based on field investigation in Okinawa Island, Japan」 the 12th International Congress on Rock Mechanics, pp.949-952 (2011 年)
 - (8) 檀上 堯, 川崎 了, 島崎 傑, 肥塚 啓佑 : 「尿素分解菌 *Pararhodobacter* sp.を用いた砂供試体の固化試験」 日本応用地質学会平成 26 年度研究発表会, pp. 21-22 (2014 年)
 - (9) 肥塚 啓佑, 川崎 了, 檀上 堯 : 「尿素分解菌を用いた砂の固化試験」 資源・素材学会北海道支部 平成 26 年度 春季講演会 (2014 年)
 - (10) 檀上 堯, 川崎 了 : 「低環境負荷型人工岩開発に向けたビーチロック形成機構に関する研究」 資源・素材学会平成 25 年度秋季大会, p. 643 (2013 年)
 - (11) 島崎 傑, 川崎 了, 檀上 堯 : 「尿素分解菌を用いた人工ビーチロック作製に関する基礎実験」 資源・素材学会平成 25 年度秋季大会, p. 575 (2013 年)
 - (12) 島崎 傑, 川崎 了, 檀上 堯 : 「尿素分解菌を用いた人工ビーチロックの形成に関する基礎的研究」 資源・素材学会北海道支部 平成 25 年度 春季講演会 (2013 年)
 - (13) 檀上 堯, 川崎 了, 畠 俊郎 : 「ビーチロックの強度増加に及ぼす影響因子に関する考察」 第 13 回岩の力学国内シンポジウム&第 6 回日韓ジョイントシンポジウム, pp. 617-622 (2013 年)
 - (14) 檀上 堯, 川崎 了, 畠 俊郎 : 「ビーチロックの形成メカニズムに関する考察」 日本応用地質学会平成 24 年度研究発表会, pp. 189-190 (2012 年)
 - (15) 檀上 堯, 川崎 了, 畠 俊郎 : 「ビーチロックのセメント物質含有量と一軸圧縮強さの相関に関する検討」 平成 24 年度日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会 (2012 年)
 - (16) 久保 良介, 川崎 了, 檀上 堯 : 「室内ビーチロック加速固化試験」 資源・素材学会北海道支部 平成 24 年度 春季講演会 (2012 年)
 - (17) 檀上 堯, 川崎 了 : 「ビーチロックの物理・力学特性」 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 89-94 (2012 年)
 - (18) 檀上 堯, 川崎 了 : 「ビーチロックを模擬した人工岩の開発に関する基礎的研究ー沖縄本島ビーチロックの力学試験および元素分析ー」 日本地球惑星科学連合 2011 年大会 (2011 年)

4. 講演（その他）

- (1) B. Jeong, T. Danjo, T. Koreeda, S. Kawasaki and K. Nam : 「Biocementation of Soil using Calcium carbonate and Calcium phosphate compounds」 Korean society of Groundwater and Soil environment (2012 年)
- (2) 檀上 堯, 川崎 了, 寺島 麗, 金子 勝比古 : 「バイオグラウト改良土の力学特性」 資源・素材学会平成 22 年度秋季大会（若手ポスター発表）, p. 89 (2010 年)
- (3) 檀上 堯, 川崎 了, 寺島 麗, 金子 勝比古 : 「バイオグラウト供試体の力学特性に関する検討」 資源・素材学会北海道支部 平成 22 年度 春季講演会 (2010 年)