

連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究

玉井元治*・河合 章**

本研究は、生物環境を早期に創造する効果のある、連続空隙を有するコンクリート(NFC)の性質と、その内・外部表面へ付着する海洋生物の遷移を検討した。NFCが海に沈漬されると、その粗い表面と同様に連続した内部空隙は、水に暴露され早期に中性化し、海洋微生物が付着・繁殖し、生物膜層の形成へと繋がる。その結果、これは海水中の有機物を分解し無機化を進行させると同時に、藻類の成長やバクテリア、動物類の付着を速めバランスのとれた生物環境を早期に創造する材料として有効である。

Keywords : no-fines concrete, marine, epilithic organisms, environment

1. まえがき

わが国の大都市圏を後背地にもつ多くの湾岸部では、沿岸域の埋め立て等に伴って、自然海岸は年々少なくなっている。大阪湾を例に挙げれば、総延長260 kmの海岸線の95%は人工海岸で占められ、その約7割はケーソンやコンクリートの垂直護岸となっている¹⁾。このような垂直護岸は渚線を保つ砂浜に比べ水域における生態系の多様化を減退させ、水質の自然浄化作用を含む、生物環境を悪化させている。

本研究は水域の自然浄化能を推進することを目的に、生物環境を早期に再生する可能性の高い、連続した空隙を有するコンクリート(まぶしコンクリート: No-Fines Concrete: NFC)への海洋生物の付着性状について調査し、NFCが沿岸水域の環境保全用の材料として利用可能であることを示唆するものである。

まだ固まらないNFCのレオロジカルな充填形式は、それに使用される骨材を固相、結合材を液相、空気を気相と仮定すると、それぞれの相が独自に連続した領域、即ちFunicularの第一領域(F-I)として示すことができる(Table 1参照)。そして結合材のコンシステンシーが適切であれば硬化後においても内部に連続した空隙を有する硬化体が形成される²⁾。従って、これらの材料は、水や空気を自由に通すため、降雨による路面水の排水を目的とした透水舗装材や、浸透水の集水を目的としたポーラスなヒューム管として使用されている^{3),4)}。また最近、新しい透水性材料の製造方法も研究されてきた⁵⁾。

既に筆者の一人は連続した空隙を作るための配合条件を与え、各条件と透水性との関係を明らかにした²⁾。ま

た高性能減水剤や活性シリカを結合材に添加し、高強度化等の機械的性質と凍結融解に対する耐久性の向上を図ることに成果を得た⁶⁾⁻⁸⁾。

この種の硬化体を海面付近から海面下約4 mまでに沈漬すると、凹凸の多い表面は勿論のこと、内部の連続空隙に海水が浸入・浸出し、それぞれの表面が早期に中性化すると共に海水中に棲息する微生物が付着・繁殖し、生物膜層を形成することを確認した⁹⁾⁻¹²⁾。その結果、海水中に有機物を分解し無機化を進行させると同時に、新たに藻類や着生動物並びにそれらの表面に付着する微生物の棲息を早め、海域の生物環境を早期に良好ならしめることが期待される。

生物膜を利用した水処理法は回転円板法¹³⁾に代表されるように、主としてプラントに組み込まれ、既に広く実用に供されている。本研究は生物膜法の自然な海域に対する適用例と見做すこともできる。

また古川ら^{14),15)}は、筆者らの提供したNFCの供試体($\phi 10 \times 20$ cm) 300個を用い、汚濁河川水の直接浄化の可能性につきパイロットプラントを利用して検討し、NFCに付着した微生物や藻類の効果等によってTOC(全有機体炭素量)の除去効率が高いこと、SS成分の捕捉が良好なこと等を明らかにしている。

これまで筆者ら¹⁶⁾は沿岸海域の自然浄化能を把握する基礎的資料を得るため、大阪湾における「渚線の環境構造とその役割に関する調査研究」を行い、ケーソンおよびコンクリート垂直護岸、消波テトラポットならびに砂浜に棲息する細菌群を測定し計数した。その結果、鉄板およびコンクリート表面の1 cm²に棲息する細菌数は、渚線の砂1 g当たりの細菌数とほぼ同じであることを明らかにした。即ち、ある水深までの単位水平透視断面当たりで考えると、垂直岸壁よりもテトラポット、さらに砂浜のほうが、はるかに菌数が多く、渚線の環境浄化機能の面から砂浜が最も優れているといえる。

* 正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科
(〒577 東大阪市小若江3-4-1)

** 農博 近畿大学教授 農学部水産学科

Table 1 Packing model and void ratio of glass ball

Packing model		Number of contact point	Void ratio(%), without filling, (1)	40% of the voids filled with paste (F-1), (2)	Void ratio(%), critical point of (F-2) range, (3)	Largest radius of independent air (R') (4)
Simple cubic		6	47.64	28.58	19.75	0.723R
Simple stagger		8	39.54	23.72	8.89	0.528R
Schematic explanation of filling condition of voids						

Note; F-1: First range of funicular, F-2: Second range of funicular

しかしながら、沿岸域の埋め立てや離岸島の造成において、人工の砂浜を構築することは容易ではない。渚線を埋め立て、繫船岸壁として使用するほかに、近年行われている水深20m以上の埋立地で緩傾斜の砂浜を造成することは、莫大な土砂量、漂砂による砂浜の不安定性等を考慮すると、人工砂浜の造成可能なケースは極めて限定されることになる。

本研究は上記の諸点を考慮し、特に連続した空隙を有するコンクリートが大きな内部表面積を持ち、渚線の砂浜が有する水質の浄化機能がある程度代用でき¹⁷⁾、かつまた、藻類および動物類の棲息に適した環境創造用材料として利用可能と考え、次の項目につき検討した。

- 1) NFCの必要な性質と内部表面積の算定 (2.1, 2.2).
- 2) NFCの特性 (4.1). 一般的性質と特に実際1年間自然海水に沈漬したときの強度低下の程度
- 3) 各種海洋生物の経時的な付着性状 (4.2). 特に有機汚濁を無機化する細菌群に重点をおいている。また生物の一次、二次生産の過程でNFCの表面に階層構造をなして付着する単細胞・大型藻類、微小動物類の調査を行い、生物循環の形成過程とその安定な生物膜の構成の把握を試みた。
- 4) NFCを作成する結合材の種類が強度および付着生物相におよぼす影響 (4.1, 4.2).
- 5) 付着生物の遷移 (4.3).

特に現地沈漬試験ではこれまで得られなかった量重な資料が得られた。その詳細については別に記録を残した¹⁸⁾、本報ではその概要につき取りまとめた。

2. NFCの必要な性質と内部表面積の算定

(1) 具備すべき要件

渚線の砂が有する水質浄化機能を代用するNFCの要件は、次に示す項目を具備していることが望ましい。

- 1) 海水や波浪に対して破壊しない強度を保持する。
- 2) 初期から長期にわたり微生物をはじめ各種生物に悪影響を与えない。

Table 2 Specimens and interior surface area of NFC (40% of the voids filled with paste)

Packing model	Ball size (mm)	Interior surface area (cm ² /l)			#15×30cm specimen		Thickness:10cm specimen	
		0%*	F-2**	40%	interior S.A. (cm ²)	ratio of surface area***	interior S.A. (cm ²)**	ratio of surface area***
Simple cubic	10	3141	1642	2116	11,217	6.34	19,044	21.16
	5	6282	3284	4232	22,433	12.68	38,088	42.32
Simple stagger	10	3627	1011	2277	12,090	6.83	20,493	22.77
	5	7254	2022	4554	24,180	13.66	40,986	45.54

S.A.: Surface area, * 0% filling, ** At the critical point of F-2
*** interior S.A./exterior S.A., *30×30×10cm specimen

3) 海水が自由に浸入、浸出する透水性と、できるだけ大きな内部表面積を有する。

(2) NFCの空隙率と内部の表面積

NFC硬化体内を海水が自由に流入通過し、流入する水と共に多くの酸素を供給し、空隙内を好気性雰囲気とするためには、均等にして出来るだけ大きな連続空隙 (Funicularの第1領域:F-1領域) が形成されている必要がある。またNFC中に形成された透水性を維持する空隙径と表面積は、それらが大きいほど水中のBODやCODを内部表面に付着した生物膜層で低下させる能力も大きいと考えられる。

Table 1は球の充填モデルと空隙率の関係を示す。対象は一般に充填形式である立方格子 (Simple cubic) および斜方格子充填 (Simple stagger) である。それぞれについて充填材が無い場合および40%充填とした場合の個々の空隙率と、Funicularの第2領域、即ち各空隙が独立となる領域における最大独立球の直径と、それぞれの空隙率を示した。

連続空隙をもつNFCの表面積は次の方法によって算出した (Table 2参照)。

- 1) NFCの骨材は球と仮定し、その直径はそれぞれ5および10mmとした。
- 2) 充填形式は立方格子と斜方格子充填とした。
- 3) 結合材がない場合 (Table 1の(1))の骨材表面積は、それぞれ球の充填個数から求めた。
- 4) 結合材を増加させ一度連続空隙がなくなり、独立空隙 (Table 1の(3))に移行する直前の内部表面積は、独立空隙の個数とその直径 (R') から算出した。

Table 3 Physical properties and chemical analysis of cement and silica fume

Physical Tests			Chemical Analysis			
Fineness-Blaine m ² /kg	CN ^{#1}	CB ^{#2}	Insoluble residue	CN	CB	SF ^{#3}
	329	341	Silicon dioxide(SiO ₂)	0.20	0.1	—
Specific gravity	3.16	3.03	Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	22.2	26.1	95.8
Setting time, min			Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	5.5	9.1	—
- Initial	160	160	Calcium oxide (CaO)	3.1	1.9	—
- Final	259	226	Magnesium oxide (MgO)	63.6	54.1	0.14
Compressive strength			Sulphur trioxide (SO ₃)	1.6	3.4	—
MPa: 7-day	24.3	22.0	Sodium oxide (Na ₂ O)	1.9	2.2	—
28-day	41.0	43.1	Potassium oxide (K ₂ O)	—	0.22	0.13
Flexural strength			Carbon (C)	—	0.50	0.42
MPa: 7-day	5.3	4.7	Phosphorus oxide(P ₂ O ₅)	—	0.58	1.6
28-day	7.3	7.8	Loss on ignition	0.7	1.1	1.8

#1 CN: Normal portland cement
 #2 CB: Portland blast-furnace slag cement
 #3 SF: Silica fume

Table 4 Physical properties of aggregate

Class of crushed stone (No.)	Size(mm)	Unit weight (kg/m ³)	Specific gravity	Void ratio (%)
6	5-13	1540	2.69	42.7

Table 5 Mix proportions of NFC

Mixing Type	Kind of Binder	SF/(C+SF) (%)	W/(C+SF) (%)	Unit Weight (kg/m ³)				
				W	C	SF	G	Sp
A	CN	—	25	74.0	296	—	1540	2.96
B	CB	—	25	72.5	290	—	1540	2.18
C	CN+SF	20	25	69.5	222	55.6	1540	5.6

5) 連続空隙をもつ NFC (Table 1 の (2)) の表面積は、前述の 2 つの極限值 (Table 1 の (3), (4)) から空隙率の関数とし線形式で補間し所定の空隙における値を推算した。

6) 各充填状態の骨材空隙に、結合材により 40% 充填 (実質空隙率: 28.58%, 23.72% となる) した場合の 10×10×10cm 立方体当たりの連続空隙の表面積を示す (Table 2 の 5 列目)。

7) 供試体寸法が φ15×30cm と厚さ 10cm の普通コンクリートの表面積と同寸法の NFC の内部連続空隙の表面積比を示した (Table 2 の 7 と 9 列目)。

この結果によれば、斜方格子充填として球の直径が 5 mm の球状骨材を用いた φ15×30cm の NFC と普通コンクリートとの内・外部の表面積比は 13.66 倍となる (Table 2 の 7 列目下)。また 10cm の版とした場合には、45.54 倍となり NFC を用いることにより、水に接するコンクリートの表面積は数十倍にもなることが分かる。

本研究に使用した 6 号砕石の空隙率は JIS A 1234 によって測定すると 42.7% である。また砕石の細かい凹凸を含む表面積は、筆者等が既に開発した粘性溶液ディップ法¹⁹⁾によって測定すると 8 600cm²/l となった。これらの値から推測すると、6 号砕石の空隙率は等球形の粒子を立方格子充填と斜方格子充填のほぼ中間領域に充填した場合に相応し、また内部表面積は直径が 4.85mm の球を斜方格子充填とした場合に近い。上記の表面積比の試算では、これらの値を考慮して条件を設定した。

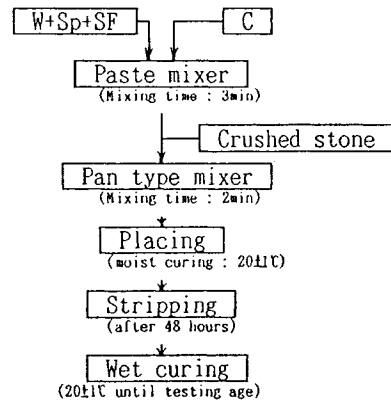


Fig.1 Mixing and fabrication of the specimen

3. 実験の概要

(1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは O 社製の普通ポルトランドセメント (CN) および O_N 社製の高炉 B 種セメント (CB) を、シリカフェームは、E 社製のスラリー状物 (SF) を用いた。それらの物理的性質および化学分析結果は Table 3 に示す。また、高性能減水剤は、K 社製のナフタリン系物 (Sp) を用いた。

骨材は高機産の 6 号砕石を用いた。それらの物理的性質を Table 4 に示す。コンクリートの配合は、透水性を考慮して砕石自体の空隙に対し結合材の充填率を 40% とし、Table 5 に示すような質量配合とした。

B, C 配合はそれぞれ結合材に CB と CN+SF を用い、A 配合に比べ遊離石灰の溶出を押さえ、後者はさらに高強度化を図ることを目的とした。

(2) 供試体の作成と養生

供試体の作成は、Fig.1 に示す方法とし、セメントペーストは HPH-30 型のペーストミキサーにより、低速 30 秒、高速で 3 分間練り混ぜ、続いて所定量の骨材とペーストを計量し、パン型強制ミキサーにより、2 分間練り混ぜた。

コンクリートの打設は、JIS 法による締め固めと表面振動用パイプレータ (圧力: 6~7×10⁴Pa) により φ10×20 cm (圧縮試験用) の供試体では 2 層に、また、φ15×30 cm (生物調査用) 供試体では 3 層に打設した。

供試体の養生は、2 日間空中湿布養生、以降強度試験まで 20±1°C において水中養生とした。

海水養生とした供試体は、2 日間空中湿布養生、以降 5 日間 20±1°C において水中養生とし、その後下記に示す東播現場の海水中に試験日まで沈漬した。

(3) 試験方法

a) コンクリートの試験

コンクリートの圧縮試験は、JIS A 1108 により、ま

Table 6 Water quality at experiment sites

Date	'89.09.01	'89.12.01	'90.03.05	'90.06.04	'90.09.03
Temp. (°C)	26.0	17.5	11.0	18.2	26.5
DO(%)	82	93	93	98	91
pH	8.12	8.23	8.28	8.14	8.10
NH ₄ (µg at/l)	1.4	0.4	2.6	1.3	2.2
aDIN (µg at/l)	7.1	13.2	12.5	4.5	5.3
PO ₄ (µg at/l)	0.63	0.73	0.37	0.18	0.33
TCHL (µg/l)	1.4	1.4	1.1	0.9	3.6

Note: DO: dissolved oxygen (saturation rate), NH₄: NH₄-N, NO₂: NO₂-N, NO₃: NO₃-N, aDIN: NH₄+NO₂+NO₃, PO₄: PO₄-P, TCHL: CHL(chlorophyll)+PHAЕ(phaeophytin)

た透水試験は、内径φ10×20 cmの塩ビ製パイプに2層に打設し水頭をH=30 mmとしてJIS A 1218に準じ実施した。

b) 付着随伴生物群試験用供試体とその設置

コンクリートの付着生物の試験は、φ15×30 cm供試体を打設後48時間空中養生、以降7日まで水中養生とし、一試験体毎に目の開き30 mmの網に入れ、1989年9月に沈漬した。地点は流水のある桟橋下(i)と流水の少ない港内(ii)から1地点ずつ選び、次の2地点を設定した。供試体数は一地点当り各配合20本3種類合計60本とした。

i) 淡路桟橋ヤード(兵庫県津名郡北淡町野島江崎字青梨733-3)明石海峡に面す。

ii) 東播ヤード(兵庫県加古郡播磨町新島17-1)

沈漬した深度は、平均海面±0 mから-2 mの点を選定し、好気性従属栄養細菌の付着を主目的とした。測定時期は目視による生物の分析を1, 2ヶ月後からとし、各種微生物を含む生物分析は3, 6, 9および12ヶ月後とした。

Table 6は明石海峡の江崎地点(実験点(i)に隣接)の水質²⁰⁾を示す。また環境庁「広域総合水質調査」²¹⁾によると実験点(i)(ii)の水質は、ほぼ同じ結果になっている。しかし実験点(ii)は、港内であるためNH₄, aDIN, PO₄等は、実験点(i)の値よりやや高い値を示すものと考えられる。

(4) 生物試料の分取

a) 供試体全面を対象とする場合

大型海藻と貝類が該当し、肉眼的に採取できるものをピンセットにより剥ぎ取り、分析試料に供した。

b) 供試体表面の細菌群の採取

好気性従属栄養細菌、硝化細菌の採取は、コンクリート供試体の側表面の中央部に5×5 cm中空の殺菌シリコンゴムを当て、付着物を吸引ポンプによって捕集した。実質の表面積は凹凸部を含むためやや大きな値となる。

c) 供試体内部の細菌群の採取

コンクリート供試体を割裂法により縦割し、内部の中央部に5×5 cm中空の殺菌シリコンゴムを当て前述と同様の方法で細菌群を採取した。

d) 空気の暴露に注意を要する生物群の採取

硫酸還元菌等嫌気性菌の採取を目的として、炭酸ガスを用い供試体表面および内部の菌類を吸引採取した。

(5) 生物群の調査方法

a) 大型海藻

出現種を同定し、各出現種毎の固体数を計数とした。また、分類の終了した試料は種類毎にまとめ湿重量の測定に供した。

b) 付着生物

3.(4), b)により得られた生物膜の試料(25 cm²)のうち10 cm²に相当する試水を定量分取し15 cm²試料と10 cm²に相当する試水を調製する。10 cm²に相当する試料は2%のホルマリンによって固定し、単細胞藻類をはじめ付着生物の分析に供した。一方15 cm²に付着する試料は、全量を蒸発残留量試料として生物膜の乾燥重量とした。

c) 好気性従属栄養細菌数

先の方法によって得られた生物膜試料(25 cm²/100 ml)を原試料として好気性従属栄養細菌の定量培養を行った。培養条件は以下の通りである。

培養基: 平板寒天

培地: ORI培地²²⁾

: ORI/10培地

希釈倍率: ×10²~×10⁶ (4段階)

原試料を滅菌海水により希釈

期間: 10日間, 温度: 20±1°C

判定: コロニー計数法

d) 硫酸還元細菌数

培養基: 平板寒天(嫌気ジャー, CO₂置換)

培地: 硫酸還元細菌用培地²³⁾

希釈倍率: ×1, ×10, ×100 (3段階)

原試料をCO₂ばっ気滅菌海水により希釈

期間: 14~30日間, 温度: 30±1°C

判定: コロニー計数法

e) 硝化系細菌数

培養基: 液体(試験管5 cc)

培地: 亜硝酸還元細菌用培地²⁴⁾

硝酸還元細菌用培地²⁴⁾

希釈倍率: ×10²~10⁶ (5段階)

原試料を滅菌海水により希釈

期間: 50±10日間, 温度: 20±1°C

判定: MPN法

4. 実験結果

(1) NFCの特性

a) 一般的性質と水質浄化機能の関係

まず圧縮強度と生物付着との関係はないが、浄化能を長期的に維持するためには、強度は耐久である必要が

Table 7 Compressive strenght of NFC

Mixing Type	Compressive Strength (MPa)		
	7 days	28 days	56 days
A	14.8	18.6	20.5
B	12.2	17.5	20.1
C	13.5	20.4	21.8

あり沈漬時に約 20 MPa 以上あることが望ましい。

本実験に使用したコンクリートの水中標準養生における材令と圧縮強度の関係は Table 7 に示す。結合材の種類の違い (Table 5 参照) による影響を見ると、A 配合即ち普通セメントの方が B 配合の高炉セメントを使用したものより何れの材令においても高い値を示した。またシリカフェームを混入した C 配合の圧縮強度は初期材令では B 配合並みであるが、材令が 28 日以降となると何れの配合よりも高くなることを示す。これは既報⁹⁾の傾向と同様に継続的なポズラン反応によるものである。

セメント硬化体が水中または水際に棲息する生物に悪影響を与える因子は、強アルカリの遊離石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が溶出することである。特に NFC は表面積が大きいため、その溶出量は普通コンクリートに比べ数十倍にも及ぶことがあるが、早期に中性化する。これを阻止するには、表面を炭酸化したり、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応性物質を塗布または含浸する方法もあるが、スラグ微粉末 (B 配合)、活性シリカ (C 配合) や活性アルミナ等ポズラン質材料を混和材としてセメントに混入することが適切である。

次に、海水が自由に浸入・浸出するとされている渚線の砂の透水係数は、中砂 (0.25~0.50 mm) で 0.85 mm/sec、粗砂 (0.5~1.0 mm) で 3.5 mm/sec 程度とされている。本実験の A, B, C 配合 (結合材の充填率を 40%) とした場合の NFC の透水係数は、それぞれ 12.4, 12.6, 12.5 mm/sec となり、何れの値も粗砂の約 3.5 倍を示し、これらは内部への生物付着が十分期待できる値である。

b) 海水中に浸漬した NFC の強度

供試体はコンクリート打設 48 時間後脱型し、材令 7 日まで淡水中で養生後、東播ヤードの海水中に浸漬した。各配合の材令と圧縮強度の関係は、材令 154 日において A : 12.5, B : 11.4, C : 14.5 MPa となり、Table 7 の標準水中養生に比べやや低くなる。その後、材令 360 日では横這いの傾向を示した。これらの原因は次のようであると考えられる。連続空隙を有する NFC では海水が自由に浸入・浸出し、海水中の各種塩類 (NaCl , MgCl_2 , MgSO_4 等) とセメント硬化体中の主として $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が反応して淡水中の場合より溶出量を加速し、NFC を構成するセメントフィルムの強度を低下させ

る。C 配合の場合は活性シリカと $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との間でポズラン反応を起こし CSH-gel を生成するため $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶出が減少し強度低下も少なくなるようである。また長期的には結合材の中性化と生物膜の形成も一要因となって NFC からの遊離石灰の溶出は阻止される傾向を示す。

(2) 生物付着試験結果

a) 目視観察

ポーラスコンクリートへの海洋生物の付着は、設置 (9 月) 後 1 ヶ月を経過したとき、i) 淡路ヤードでは、試料表面に微小動物からなる生物膜が形成され、散在的にアカフジツボ幼体の付着がみられた。ii) 東播港内水域に沈漬した一部の試料には部分的にアナアオサの幼体付着がみられた。なお試料の内面は、いずれも付着物は認められなかった。

3 ヶ月後、(i) 地点に設置した試料は全面がアカフジツボに被われ更にその表面を微小生物群からなる厚い生物膜に被われていた。(ii) 地点に設置した試料には大きな変化は認められないが、B 配合の試料に緑藻類と紅藻類の大量付着が認められた。概して当地点の試料の生物膜は薄層であった。試料内面は何れも付着物は認めたいが、生物膜試料採取時表面付着物の多い供試体程、付着物量も多くなることが確認された。他方高炉セメントを用いた空隙のない普通コンクリートへの付着状態を比較すると、散在的にアカフジツボが付着する程度であり、その性状に大きな相違があることが確認された。

6 ヶ月後、(i) 地点の何れの試料も全面がアカフジツボ、カキ、カイメンで被われ、更にその表面を微小生物群からなる厚い生物膜に被われていた。また散在的に緑藻類のミルも付着していた。試料の表面付近の連続空隙は付着生物により閉塞されているようにみえたが、間隙部にはゴカイ類 (クサゴカイ) が各試料一個当たり平均して 20 体程度棲息していた。試料内面は、ほぼ中心まで褐色化し微生物の侵入をうかがわせた。(ii) 地点の試料もまばらにカキの付着と B 配合の試料に引き続き緑藻類と紅藻類の大量付着が認められた。

9~12 ヶ月後、(i) 地点の各試料にはイガイ、ミル、カイメン、コケムシ、ヒラムシ等の大量付着がみられ、生物循環が構成されているように観察された。(ii) 地点の各試料の全面が小さなフジツボ、カイメン、カキ等で覆われ、また一部の試料にアナアオサ、コメノリの幼体の大量付着がみられた。また両地点における各試料の内面は褐色化し生物膜の形成を示し、同様に体長 5~7 cm のクサゴカイやエゾカサネカンザシの棲息が $\phi 15 \times 30$ cm 供試体の表面近くに多く、中心部まで確認された。これらは生物膜が厚くなる多くなる傾向を示し、内部空隙の目詰まり防止にも関与するものと考えられる。

一部試料への生物付着の状態を Photo.1, 2 に示す。

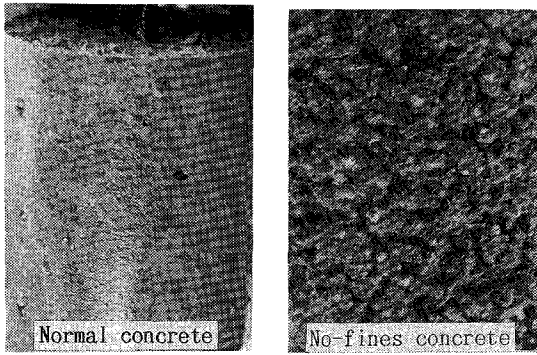


Photo.1 Specimens after 1 month immersion in seawater (Awaji site)

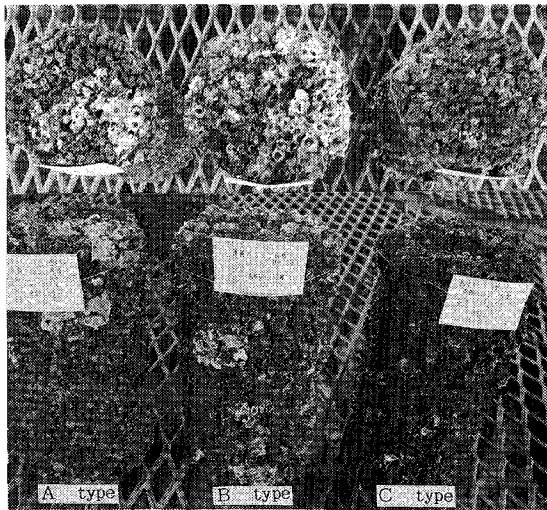


Photo.2 Specimens after 3 months immersion in seawater (Awaji site)

b) 細菌群の付着状況

1) 好気性従属栄養細菌

Fig.2 は、各供試体に付着した細菌群のうち主として有機汚濁物質を好気域で分解する好気性従属栄養細菌を3ヶ月毎1年間にわたり採取し定量培養した細菌数を示す。この結果から、好気性従属栄養細菌は、早期にかつ多量に付着し、しかも港内の(ii)地点の付着量(80~480×10⁵ cells/cm²)に比べ潮流のある(i)地点の供試体の表面には1100~3200×10⁵ cells/cm²のように多く、また沈漬3ヶ月以内から内部空隙にも棲息していることを示す。その後時間の経過と共にC配合の供試体を除き付着量は、表面および内部共減少する傾向を示す。この理由は後述するが単細胞藻類や大型動植物の急激な多量付着にも起因するものと考えられる。NFCの配合の相違による影響をみると(i)地点では早期にB配合即ち、高炉B種セメントを使用したものが優位となるが、6ヶ月を経過およびそれ以降となると、それぞれ同等かまたは、(ii)地点においてC配合の供試体にやや多く

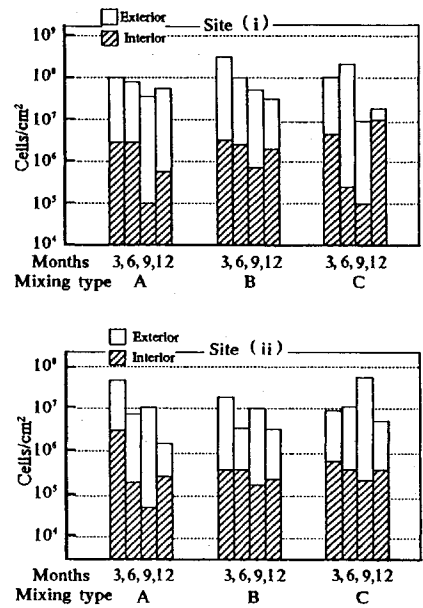


Fig.2 Number of aerobic heterotrophic bacteria

付着することが認められた。

2) 硫酸還元細菌

嫌気性雰囲気中で有機汚濁を分解する硫酸還元細菌の付着数はFig.3に示すように相対的に少ないが、経過時間に比例して増加する傾向がある。(i)地点の付着量は(ii)地点のそれ(0~5000 cells/cm²)に比べ多く、3~6ヶ月ではB配合の供試体に、9ヶ月以降ではA、C配合供試体の表面部に比較的多く、特にA配合供試体(234~147×10³ cells/cm²)にその傾向がみられた。また硫酸還元細菌の付着状態は、生物膜が複層化した各種付着物の層間に棲息しているものとみられ、生物膜量が多いほど多くなるようである。一般にNFCの内部空隙は表面部よりも酸素の供給量が少ないと考えられ、嫌気域で活動する硫酸還元細菌の付着量は多いものと予測したが、各供試体の定量培養結果によれば、先に示した好気性従属栄養細菌の付着量に比べ極めて少ないことが明らかになった。

3) 硝化細菌(群)

Fig.4 Fig.5はそれぞれアンモニア酸化細菌である亜硝酸菌と亜硝酸酸化細菌である硝酸菌の経時的な付着数を示した。亜硝酸菌の供試体表面への付着は3ヶ月以内から始まり、その量は5.2~52×10³ cells/cm²となり6ヶ月で急激に増加し、1年で70~520×10³ cells/cm²まで上昇し、この範囲では沈漬時間とともに増加するようである。設置場所の相違による影響をみると、(i)地点での付着がやや多い結果を得た。

次に高アルカリを嫌うとされている硝酸菌の付着は、亜硝酸菌に比べ0.7~150×10³ cells/cm²となり、量は経

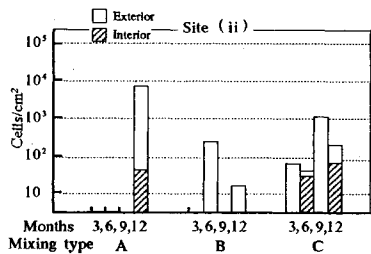
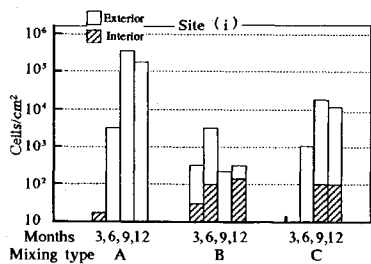


Fig. 3 Number of sulfate reducing bacteria

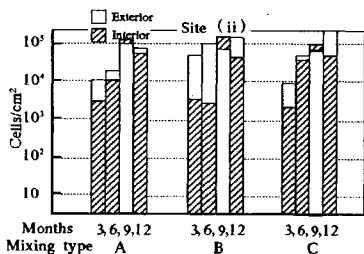
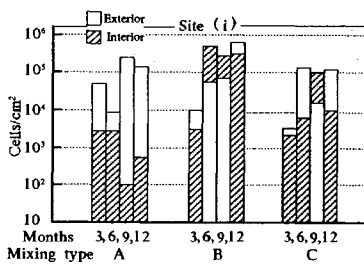


Fig. 4 Number of ammonia oxidizing bacteria

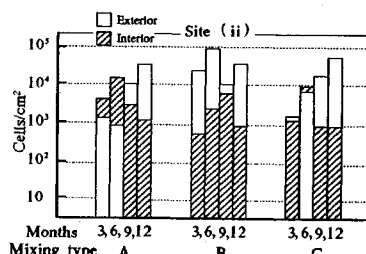
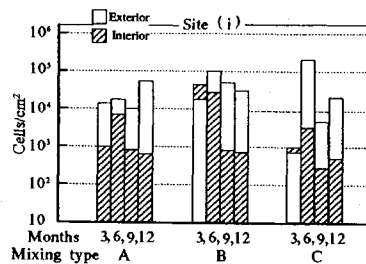


Fig. 5 Number of nitrite oxidizing bacteria

Table 8 Number of epilithic organisms (unicellular algae), unit : 10³ cells/cm²

Site		Awaji				Toban			
Immersed age		3 months	6 months	9 months	1 year	3 months	6 months	9 months	1 year
A Type	Sns	13	22	18	29	5	10	7	31
	Acns	23.04	200.92	55.99	13.04	0.67	132.36	2.00	4.05
B Type	Sns	17	23	18	28	9	15	9	30
	Acns	29.95	33.04	84.28	11.44	2.69	93.78	5.53	2.28
C Type	Sns	9	14	19	27	4	18	11	29
	Acns	2.59	310.02	104.88	14.82	0.77	452.42	5.28	54.85

* Sns : Species numbers, Acns : Amount of cell numbers

じて少ないが、沈漬後表面が中性化すると始まり3ヶ月から6ヶ月へと時間の経過に従い増加する。しかしそれ以降減少し季節変化の影響とみられる変動を示す。また硝酸菌の付着は沈漬期間が6ヶ月までは両地点とも、中性化しやすいB配合の供試体に比較的多くみられた。なお亜硝酸酸化細菌と硝酸菌は、内部空隙への付着量が他の細菌類に比べ多い傾向を示す点に関して、内部の富栄養化も考えられ、興味深い点であり現在検討中である。

以上の結果から NFC の表面と連続した内部空隙への細菌群の付着は3ヶ月以内の早期に進行し、しかも好気性従属栄養細菌を主とし酸化的環境で活動する亜硝酸菌および硝酸菌と相俟って好気性域で水質汚濁を浄化する可能性を示し、また嫌気性域でも少数ではあるが硫酸還元細菌もそれに関与することを示している。

c) 単細胞藻類の付着

単細胞藻類は、塩類や無機体窒素（その一部は細菌群が好気性域で有機汚濁物質を分解したものを）を光合成で再び有機化する。このように単細胞藻類の多量付着は有機物の一次生産のみならず海水中に溶存する炭酸ガスの固定にも寄与する。

Table 8 は沈漬時間を3~12ヶ月とした場合単細胞藻類のうち藍藻綱 (Cyanophyceae) と珪藻綱 (Bacillariophyceae) および緑藻綱 (Chlorophyceae) の各種類を含む細胞の付着数を示す。

このうち付着する藻類の種類は珪藻綱が大部分をしめている¹⁸⁾。沈漬一年後の種類数は、(i)、(ii) 地点が平均28と29種類となり、細胞数の範囲は、それぞれ11.4~14.8×10³、2.3~54.8×10³cells/cm²となり、港内と流水のある海域に沈漬した供試体では有意な差は見られない。NFCの配合の違いによる影響をみると、(ii) 地点ではA、C配合が、(i) 地点では特に6ヶ月以降C配合の供試体への付着量が多くなった。

また両地点の各供試体に付着する単細胞藻類の細胞数を経時的にみると、藻類が付着する時期は早いのが特に3ヶ月から6ヶ月で急激に増加することが解る。その後9~12ヶ月では概して減少傾向を示す。この急激な付着の過程で先に示した好気性従属栄養細菌の付着数は減少する傾向を示し、付着生物の遷移がうかがえる。

d) 微小動物の付着

海洋に棲息する微小動物は、主として一次生産された

Table 9 Number of epilithic small animals, unit : inds/cm²

Site	Awaji				Toban				
	Months	3	6	9	12	3	6	9	12
A	*	5	10	5	6	3	2	2	5
	**	10.4	70.0	9.2	12.0	1.4	5.0	0.6	3.2
B	*	3	4	6	5	4	6	2	4
	**	9.6	20.0	8.7	3.3	1.0	15.0	0.9	2.2
C	*	5	8	4	4	1	3	4	2
	**	6.8	30.0	9.2	8.0	0.2	13.0	5.0	1.1

* : species number
** : amount of individual numbers

Table 10 Weight analyses of macro algae, unit : g/specimen

Site	Awaji				Toban				
	Months	3	6	9	12	3	6	9	12
A	*	5	4	4	1	2	4	3	2
	**	0.11	4.70	68.00	1.80	0.10	0.59	2.00	0.05
B	*	1	2	4	3	4	4	2	9
	**	0.01	2.30	0.11	0.21	11.00	2.10	1.90	1.90
C	*	4	7	7	2	3	1	3	4
	**	0.22	4.70	38.00	2.10	0.09	0.06	5.20	5.20

* : species number, ** : g/specimen

単細胞藻類や藻類および同系統または異系統の微小動物を摂取し徐々に高次生産する生物へと発展する。

Table 9は、沈漬時間を3~12ヶ月とした場合、付着する微小動物のうち繊毛虫綱 (Ciliata), 線中綱 (Metazoa), 多毛綱 (Polychaeta), 甲殻綱 (Crustacea) 等を含む付着数を示している。

この結果も、前述と同様に (i) 地点が (ii) 地点より付着する種類数および個体数はともに多く、配合の差による相違は殆どみられないが、(i) 地点ではA配合が (ii) 地点ではB配合としたものが付着数が多い結果を得た。

また両地点の各供試体に微小動物が付着する時期は、目視観察から1ヶ月程度と予測され、個体数を経時的にみると、(i) 地点での付着が早く特に3ヶ月から6ヶ月で急激に増加し、以降減少し一定化する傾向を示し、単細胞藻類の付着と連動することが解る。

e) 大型海藻類の同定

Table 10は沈漬3~12ヶ月で付着した大型海藻類の内緑藻綱 (Chlorophyceae), 真正紅藻綱 (Florideophyceae), 褐藻綱 (Phaeophyceae), 原始紅藻綱 (Protoflorideophyceae) の種類数と各供試体に付着した質量の分析結果を示す。

(i), (ii) 地点の供試体に付着した大型海藻類はそれぞれ9種類と6種類であり、前者の付着が良好である。配合の相違による影響は付着量の多い順に並べると (i) 地点ではA, C, B, (ii) 地点ではB, C, Aとなるが判定しがたい。

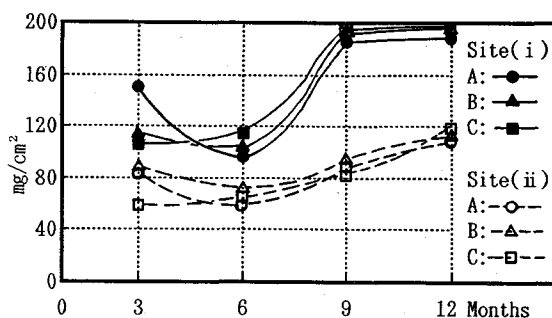


Fig.6 Dry weight of adhered matter vs. immersion time

付着量を経時的にみると、特に沈漬3ヶ月間で異常に多く付着したものは、(ii) 地点のB配合供試体である。この異常な付着物はアナオサ (*Ulva pertusa*) とシラモ (*Gracilaria bursapastoris*) が確認された。B配合以外の供試体への大型海藻類の付着量は、前述の付着物と同様個体により、また季節的要因により変動するが、経時的に増加し9ヶ月で最大となり、以降やや低下する傾向を示す。

f) 生物膜

Fig.6は、各供試体表面への貝類を除く付着物蒸発残量の分析結果を示した。この結果からも (i) 地点の供試体に付着物が多いことを示し、これは時間の経過に従い増加傾向を示す。また、シリカフームを混入したC配合の供試体は3ヶ月間までは付着量が少ないが、6ヶ月間を経過すると他の配合物と同等になる結果を得た。

生物膜がNFCの内部空隙に多量に付着すると、空隙が減少すると考えられるが、内部には甲殻類の幼体やクサゴカイやエゾカサネカンザシ等のゴカイ類が棲息し生物膜や有機物を含有する水垢を捕食することにより清掃する働きをし、ここでも生物循環を形成している。

(3) NFCに付着する海洋生物の遷移

NFCへの生物群集の付着は前述の結果から経時的に変化することが認められたが、適切な生物循環が形成されているか否かを検討する。一般に、生物群集の付着はこれら群集間によって相互に構成された生物環境のもとで、共存、競争や捕食、寄生等の相互作用と、季節的要因により変化する。例えば大阪湾長崎鼻 (岬町) の潮間帯に棲息する動物数は6~7月が最も多く、9月が最低になると報じている²⁵⁾。また海藻は、緑藻類や紅藻類のうちのり科は冬季に最盛期を迎えるものが多いが、一般に3月頃から発育が盛んとなり5~6月にかけて成熟し、盛夏では胞子を放出し、その後自体は流出するとされている²⁵⁾。一方細菌群は何れの種類も海水温度が上昇すると活発化するが、他の微小動物植物や大型動物の急激な発生により大きく変動するようである。

Fig.7は、前述の資料をもとにNFCの配合(3種類)

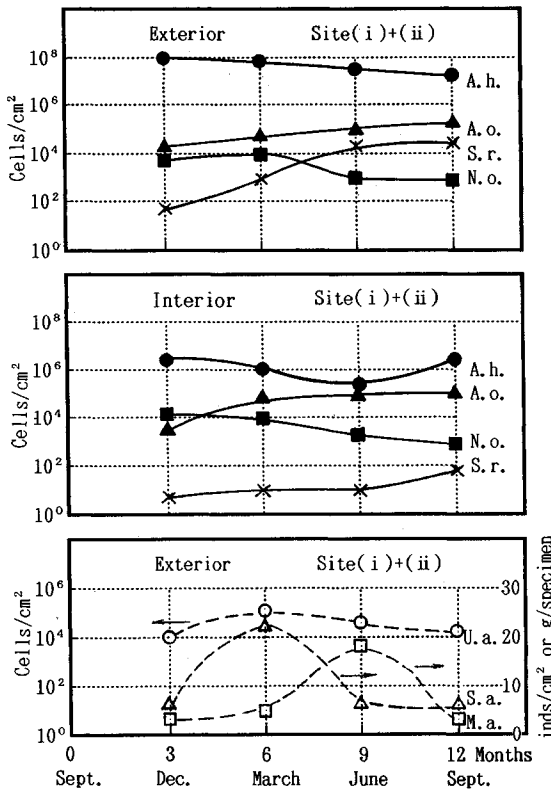


Fig.7 Changes of epilithic organisms on the NFC

と沈漬位置（2地点）に関係なく、同一時点に引き揚げられたすべての供試体の計測値を平均して、一供試体当りに付着する各種生物群集のマクロな付着総量を経時的に示したものである。この結果によると外部表面への細菌類の付着は、先ず好気性従属栄養細菌が3ヶ月（12月）迄に顕著に付着し、以降減少するがなお9~12ヶ月においても付着量は、10⁷cells/cm²以上を示す。硝化細菌のうち亜硝酸菌と硝酸菌は共に3ヶ月以内から付着し、前者は12ヶ月（9月）へと継続して増加傾向を示すが、後者は6ヶ月（3月）まで上昇し、9ヶ月（6月）で減少し以後一定化する傾向を示す。硫酸還元細菌の付着は生物膜層の厚さに比例し、特に9ヶ月からの付着が多い。しかしその量は比較的少なく周辺に棲息する生物に悪影響を与える範囲ではない。次に内部表面への細菌類の付着は、外部表面への場合と同様に好気性従属栄養細菌は3ヶ月までに顕著に付着し、以降減少または横這い状態を示すが、平均して付着量は、10⁶cells/cm²以上を示す。亜硝酸菌と硝酸菌の経時的な付着量は共に外部表面への場合と同様の傾向を示す。単細胞藻類の付着はやや微小動物と連動し沈漬3ヶ月以内から始まり、6ヶ月（3月）

で好気性従属栄養細菌の減少に代わり急激に増加する。単細胞藻類の種類は珪藻綱が大部分であり、これらは連鎖群体を形成し、細菌群を覆う働きをするものと考えられる。しかし大型海藻類が9ヶ月（6月）で急激に増加するため単細胞藻類の付着は減少し以降季節的要因により変動するものと考えられる。

以上のように海水中にNFCを長期に沈漬すると、細菌類から単細胞藻類、微小動物類、大型海藻類と付着する海洋生物の主役は季節的要因も含み経時的に遷移する。12ヶ月を経過すると種々な生物が複合化して付着し、海岸域の状態は、自然サイクルに近い環境状態を形成するものと考えられる。

5. 結 論

水域、特に海洋の生物環境の保全に適したコンクリートの開発を目的として、セメントの種類の変化やシリカフュームの添加を行ったNFCの性質と、それへの海洋生物の付着について広範囲に検討を行った。最も重要な成果は、これまで得られていなかった実際の海中における沈漬試験により、大量の具体的なデータが得られたことである。これらについては分析の視点により種々な利用法があると考えられるので、文献¹⁸⁾にできるだけ詳細に、かつ生に近いデータを記録することにした。本報告ではそれらの概要につき取りまとめた。これらを要約すると以下のようなものである。

- 1) 骨材に6号碎石を用いセメントペーストによって空隙充填率を40%としたNFCの内部表面積は大きく、例えば骨材の充填状態にもよるが、厚さ10cm NFC版の内部表面積は、空隙の無い普通コンクリートの片側表面積の30~40倍となる。
- 2) NFCの強度は結合材の性質が同一の場合、その量によって決まる。また海水中の遊離石灰の溶出防止や長期にわたる耐久性を考慮すると、シリカフュームのようなポゾラン質材料の使用が望ましい。
- 3) 普通コンクリートへの海洋生物の付着は一般に3ヶ月以上を要するとされているが、この種のコンクリートは、海水の浸入・浸出が自由である点や中性化が内部空隙まで早期に完了することから、海洋生物の棲息環境に適し表面には1ヶ月程度で、また内部空隙には3ヶ月以内で生物が付着することを確認した。
- 4) この種の硬化体は、コンクリート表面の凹凸部のみならず内部空隙にも主として好気性従属栄養細菌類が付着し、また亜硫酸菌および硝酸菌と相俟って好気性域で有機性水質汚濁を浄化する可能性を示し、他方嫌気性域でも少数ではあるが硫酸還元細菌もそれに関与することを示している。
- 5) 1~3ヶ月の生物付着は、普通セメントを使用したものより、高炉セメントを用いたものが良好であり、

またシリカフェームを混入したものは表面の平滑さから初期の付着は相対的にやや劣るようである。しかし6ヶ月以上を経過するとその傾向は縮小し、同等またはそれ以上の場合もある。

6) 海水の交流の大きい外洋部と海水の停滞する内湾では、生物付着に相違がみられ、付着量は沈漬した海域の位置の生物量等、外部環境に関係すると考えられる。

7) NFC への付着生物は、細菌類、藻類、微小生物、大型海藻、貝類等が相互に複層化して早期に付着するようであり、この種の硬化体は、細菌類による海岸水域の自然浄化と各種生物の育成材料として利用可能と考えられる。

謝辞：海域への供試体の沈漬と管理は寄神建設に援助を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大阪府水産試験所：大阪の渚，大阪府，1990。
- 2) 玉井元治：連続空隙を有する固化体の透水性，セメント技術年報，42，pp.591～594，1988。
- 3) 柳田力，他：透水コンクリート，コンクリート材料工法ハンドブック，建設産業調査会，pp.444～449，1969。
- 4) Meininger, R.C. : No-Fines Pervious Concrete for Paving, Concrete International (Design & Construction), Vol.10, No.8, pp.20～27, 1988.
- 5) 大友武臣・丸山久一・清水敬二，他：透水性コンクリートの開発に関する研究，第45回セメント技術大会講演集，pp.750～755，1991。
- 6) Tamai, M. : Properties of No-fines Concrete with Superplasticizer, Pacific Concrete Conf. Proc., Vol.2, pp.483～492, 1988.
- 7) Tamai, M. : Properties of N.F.C. Containing Silica Fume, ACI SP-114, pp.799～814, 1989.
- 8) 玉井元治：まぶしコンクリートの動弾性係数と耐久性，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.376～381，1989。
- 9) 玉井元治：連続空隙を有する硬化体の性質と水質浄化へ

- の利用，月刊「水」，Vol.32，No.13，pp.22～27，1990。
- 10) 玉井元治・河合章・西脇裕二：ポーラスコンクリートへの海洋生物付着に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.708～713，1990。
- 11) 玉井元治・西脇裕二：連続空隙を有するコンクリートを用いた水質浄化の可能性，環境技術，Vol.20，No.3，pp.28～31，1991。
- 12) 片倉徳男：多孔質担体を利用した海域浄化手法，環境技術 Vol.20，No.3，pp.32～34，1991。
- 13) 石黒政儀：日本における回転円板法の現状と展望第4回生物膜法研究シンポジウム論文集，pp.13～21，1990。
- 14) 古川憲治・藤田正憲，他：多孔性コンクリートブロックを充填した開水路による汚濁河川水の水質浄化，土木学会第46回年講，第2部門，1991。
- 15) 古川憲治・中川雅世・藤田正憲，他：多孔性コンクリートブロックを用いた開水路の水質浄化機能に関する研究，日本水処理生物学会誌，Vol.27，No.1，pp.67～75，1991。
- 16) 河合章 他：渚線の環境構造とその役割に関する調査研究，大阪府，1991。
- 17) 玉井元治・河合章 他：砂浜の機能を有する多孔質コンクリートへの生物付着と水質浄化，第6回生物膜法研究シンポジウム論文集，pp.73～76，1991。
- 18) 玉井元治：まぶしコンクリートへの海洋生物付着に関する研究，近畿大学理工学部研究報告，No.28，投稿中。
- 19) Tamai, M. and Kawahigashi, T. : Properties of No-fines Concrete with Bentonite, Transactions of the JCI, Vol.2, pp.31～38, 1980.
- 20) 兵庫県立水産試験場：県海域の水質試験内部資料，1990。
- 21) (社)瀬戸内海環境保全協会：瀬戸内海の水質試験内部資料集，1989。
- 22) 清水 潮：微生物の分離法（海洋細菌），pp.121～125，R&D プランニング，1986。
- 23) 畑 幸彦：海洋微生物研究法（硫酸還元細菌および無色硫黄細菌），pp.117～127，学会出版センター，1985。
- 24) 吉田陽一：海洋微生物研究法（硝化および脱窒細菌），pp.117～127，学会出版センター，1985。
- 25) 瀬川宗吉，他：原色日本海藻図鑑，pp.128，保育社，1985。（1991.9.10 受付）

CHANGES OF MARINE EPILITHIC ORGANISMS ON THE CONCRETE WITH CONTINUOUS VOIDS

Motoharu TAMAI and Akira KAWAI

Changes of marine epilithic organisms are examined to the surface of the concrete with continuous voids (NFC) which may be effective in the prompt establishment of biologically favorable environments. When NFC is immersed in the seawater, its continuous interior voids as well as its rough surface are fully exposed to the water and rapidly neutralized. This then leads to the attachment and growth of marine microbes and eventually to the formation of a layer of biotic membranes. As a result, decomposition and mineralization of the marine organic matters and the growth of algae, attached bacteria and animals are accelerated. Thus, this type of concrete may be useful in the establishment of well-balanced biological environment.