

# DENCHUKEN REVIEW

## 原子力発電所の人工島式海上立地

電中研レビュー No.42 2001.1



財団法人 電力中央研究所

巻頭言	名古屋大学名誉教授 川本 眺万	2
人工島式海上立地技術に関する研究のあゆみ		4
はじめに	常務理事 平松 紀夫	6
第1章 人工島式海上立地の概要と技術的な課題		7
1 - 1 海上立地とは		9
1 - 2 国内外における海上立地発電所構想		9
1 - 3 海上立地方式の種類		11
1 - 4 人工島建設の歴史		13
1 - 5 原子力発電所人工島式海上立地の技術課題		14
第2章 海底地質・地盤調査技術		15
2 - 1 海底地質調査技術の高度化		17
2 - 2 海底地盤調査技術の高度化		23
第3章 防波護岸の耐波・耐震安定性評価技術		31
3 - 1 防波護岸の設計の基本的な考え方		33
3 - 2 防波護岸の耐波安定性評価技術の高度化		34
3 - 3 防波護岸の耐震安定性評価技術の高度化		42
第4章 周辺海域の波・海浜流・海浜変形の評価技術		53
4 - 1 はじめに		55
4 - 2 既往の評価手法とその適用性		55
4 - 3 新しい海浜変形評価手法の提案とその適用性		57
4 - 4 まとめ		61
第5章 立地支援技術		65
5 - 1 発電所・周辺緑化技術		67
5 - 2 藻場造成技術		75

おわりに	=====	理事 我孫子研究所長 加藤 正進	85
引用文献・資料等	.....		86

コラム目次	=====		
1. 遠心模型実験 ゴジラは東京湾に現れるか?	.....		50
2. トンボロ	.....		63
3. 磯焼け	.....		83

## 重要構造物の海上立地技術に対する期待



海上空間は宇宙空間、地下空間とともに、今後利用しうる魅力ある空間であります。特に、原子力発電所などの大型重要構造物の立地の可能性が大いに期待されます。

原子力発電の着実な進展は我が国のエネルギー政策の中心的課題ですが、そのためには発電所の安全な立地が大前提であります。原子力発電所の安全性確保には原子力工学や土木工学など多くの学問分野とともに、特に防災などの観点からも立地建設技術の果たすべき役割が大きいことは言うまでもありません。

立地地点に関する技術的制約条件を削減することによって立地可能な地点を増大させ、広い選択肢の中からより適切な立地地点を選択することを可能にすることが重要であります。そのために電力中央研究所では、従来の立地地点以外でも立地を可能にするための新立地技術の確立の重要性をいち早く認識され、第四紀地盤立地技術、地下立地技術、海上立地技術の開発に精力的に取り組まれ、数々の研究成果をあげてこられました。これらの研究成果は、土木学会・原子力土木委員会において、我が国の専門家による審議を経て「原子力発電所の立地多様化技術（1996年3月刊行）に反映されました。

「人工島式海上立地技術」は、1991年度から8年間の長きにわたり土木学会・原子力土木委員会において審議され、さらにその成果は追補版（1999年3月刊行）としてとりまとめられています。その内容は人工島式海上立地のための地質・地盤調査技術、

---

---

防波護岸の耐波・耐震安定性評価技術、周辺海域の波・海浜流・海浜変形予測技術など、人工島式海上立地に必要な技術のうち主要なものを網羅したものになっています。このような長期間にわたる詳細な研究・審議により、一般的な立地条件のもとでの新立地の研究は実際に適用可能な段階を迎えています。原子力発電所の新立地技術に関連して開発された技術の多くは、単に原子力のみならず他の重要構造物の建設技術にも広く応用できるものであり、そのような意味でも大変貴重な研究成果であります。

この時期に「人工島式海上立地技術」のレビューが発刊されますことは、非常に好ましいことであると思います。人工島式海上立地技術やそれに関連した立地支援技術の詳細な研究のエッセンスは、海上空間を利用しようとする他の重要構造物の調査・設計・評価技術としても広く応用できるものでありまして、その活用が大いに期待されますとともに、今後とも、実現に向けてさらに実証的研究の継続、体系化技術の信頼性向上などが望まれます。

名古屋大学名誉教授

川 本 眺 万

人工島式海上立地技術に関する研究のあゆみ（一部、第四紀地盤立地技術および地下立地技術を含む）

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1970	油圧式大型振動台の完成	
1971		
1972		米国OPS（Offshore Power Systems）社が浮揚式原子力発電所の概念設計完了を発表
1973		
1974	浮揚式原子力発電所（米国OPS社）に関する調査報告書を刊行	
~		
1979	大型造波水路の完成	
1980		ポートアイランド（第1期）が完成
1981	・海上立地、第四紀地盤立地、地下立地に関する検討を開始	通産省受託研究による海上立地原子力発電所の成立性の検討が開始
1982		
1983		通産省受託研究により、浮揚式は将来的なメリットが多いが、技術課題は着底式より多いこと、着底式は技術的に有望であり、特に埋立人工島式の成立性は高いとの結論が得られた
1984		人工島に建設された関西電力御坊火力発電所が運転開始
1985	浮揚式原子力発電所の成立性評価	
1986		
1987	地下立地技術に関する電中研総合報告（UO1）を刊行	通産省受託研究により、着定式海上立地原子力発電所の成立性評価が行われ、コンクリートケーソン沈設式も含めて着底式の技術的成立性は高いとの結論が得られた
1988	・有効応力に基づく有限要素法（FEM）による地盤の非線形地震応答解析手法の開発 ・人工島外郭施設に変形を許容する設計法を提案	

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1989	外洋施設波浪実験設備が完成	
1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 第四紀地盤立地技術に関する電中研総合報告( U19、U20 ) を刊行</li> <li>・ 地下地立地技術に関する電中研総合報告 ( U16、U17 ) を刊行</li> </ul>	六甲アイランドが完成
1991		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人工島式海上立地技術に関する電力共通研究が開始される</li> <li>・ 土木学会・原子力土木委員会に新立地部会が設置され、人工島式海上立地技術を含む新立地技術に関する審議が開始される</li> </ul>
1992	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 自然模倣の海中林造成技術を実証</li> <li>・ 耐潮風緑化試験を開始</li> </ul>	
1993	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 消波工の波による変形評価法を開発</li> </ul>	
1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 岩盤用セルフボーリング型プレッシャーメータを開発</li> <li>・ 個別要素法 ( DEM ) による消波ブロックの安定性評価法の開発</li> </ul>	人工島に建設された関西国際空港が開港
1995	防波護岸の地震時安定性に関する遠心載荷模型実験を米国で実施	土木学会・原子力土木委員会より、「原子力発電所の立地多様化技術」を刊行
1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2次元海浜変形予測モデルの開発</li> <li>・ 海中林の生産速度予測モデルを開発</li> </ul>	
1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 浅海域における反射法地震探査法を開発</li> <li>・ DEM-FEMカップリング手法による防波護岸の安定性評価法を開発</li> <li>・ 3次元海浜変形予測モデルの開発</li> <li>・ 消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発</li> </ul>	川崎人工島ならびに木更津人工島などを含む東京湾アクアライン開通
1998	CG・VRを用いた緑化デザイン手法を開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土木学会・原子力土木委員会より、「原子力発電所の立地多様化技術 ( 追補版 ) 」を刊行</li> <li>・ 耐力検討用外力条件の設定法を提示</li> </ul>
1999		
2000		

# はじめに

常務理事 平松 紀夫



産業革命以降、今日に至るまで人間活動が放出する二酸化炭素は急激に増加し、地球温暖化による気候変動や海面上昇の脅威が現実のものとなりつつある現在、エネルギー消費の増大とともに、大量の二酸化炭素を放出している我が国がその排出抑制、削減をはかることは世界に対する責務である。適正な利用によるエネルギーの節約、植林や太陽、風力などの自然エネルギーの開発に努力することは勿論のこととして、その効果から見ても引き続き安全性の確保を前提とした原子力発電の推進は二酸化炭素排出削減の重要な柱であると共に、エネルギー

資源の脆弱な我国のセキュリティー確保の意味からもその推進は不可欠であると考えられる。

原子力発電所の立地にあたっての技術的制約としては、地震国である我が国でその安全性を確保するために原子炉を据え付ける堅硬な岩盤があること、大量の冷却水を必要とするため海水を用いざるを得ない事情から海岸沿いにしか立地することができないことがある。

電力中央研究所ではこうした立地の制約を緩和し立地メニューの多様化をはかるため、沿岸海上部への立地拡大を可能とする人工島式海上立地の研究に取り組み、1991年度から電力共通研究として精力的に研究開発を進めた。その中で、海底地質・地盤調査技術、防波護岸の耐波・耐震安定性評価技術、周辺海域の波・海浜流・海浜変形の評価技術、ならびに立地支援技術が開発された。

この電中研レビューではこれまでの研究成果の概要を紹介する。これらの成果は土木学会原子力土木委員会における海上立地技術の体系化の作業(1991-1998年度)に活用されているが、本レビューがさらに多方面の関係者、ならびに広く社会一般の方々の理解を得る上での一助となれば幸いです。



第 1 章

1

人工島式海上立地の  
概要と技術的な課題

## 第1章 人工島式海上立地の概要と技術的な課題 目次

我孫子研究所 副所長 西 好一

前我孫子研究所 上席研究員 研究参事 鹿島 遼一

1 - 1	海上立地とは .....	9
1 - 2	国内外における海上立地発電所構想 .....	9
1 - 3	海上立地方式の種類 .....	11
1 - 4	人工島建設の歴史 .....	13
1 - 5	原子力発電所人工島式海上立地の技術課題 .....	14



西 好一（1975年入所）

地盤工学を専門とし、各種電力施設の立地・建設技術にかかわる研究に従事している。新立地技術の研究には立ち上げの段階から参加し、特に第四紀地盤立地、人工島立地について、地盤調査・評価法や地盤の地震時安定性、立地の成立性評価などの研究を行ってきた。現在、土木学会でまとめた新立地技術の体系化を踏まえ、通産省主催の委員会にて国の指針作成に協力している。



鹿島 遼一（1964年入所。1999年6月退職）

火力・原子力発電所の沿岸立地に伴う耐波設計、海浜変形対策などの海岸工学課題に従事。海上立地技術については、当所の研究の端緒となった昭和50年代の国からの受託研究以来一貫して関わった。電力共通研究成果などに基づいて、土木学会原子力土木委員会における人工島式立地技術の体系化(1996、1999)に尽力した。現在、(株)シー・アール・エス取締役副社長。

## 1 - 1 海上立地とは

海上立地とは、海洋空間を利用した立地方式の総称である。大別すると、海底地盤に基礎を構築し、構造物ならびに構造物に作用する外荷重を支持させる着底式と、浮力を利用して構造物を浮揚させる浮体式の2種類に区分することができる。

原子力発電所を対象とした海上立地を考える時、その特徴として次のような点が挙げられる。

- (1) 立地地点選択の自由度が大きい。特に電力需要地の近接が図りやすい。
- (2) 陸域の土地利用への影響が少なく、発電所からの離隔距離もとりやすい。
- (3) 陸に近接した比較的浅海域に立地する場合、発電所

人工島や防波堤による波の遮蔽効果により陸との間に利用価値の高い静穏海域が生まれる。

- (4) 在来立地方式に比べて波浪などの海象条件が発電所の安全性に与える影響が大きくなる。
- (5) 海岸変形・漁業や船舶の航行などに与える影響を検討しておく必要がある。

このように、海上立地方式は(1)、(2)、(3)のような大きな長所を有した我が国に適した立地方式であり、(4)、(5)のような安全面・環境面などからの課題への対応により、原子力発電所の立地方式として充分実現可能な方式であるものと言える。

## 1 - 2 国内外における海上立地発電所構想

今までに、発電所の海上立地構想が提案され、その成立性に関して我が国および世界各国でかなり以前より検討されてきた。

周知の通り、関西電力により埋立て人工島式による火力発電所が建設され、1984年より運転を開始している。また、湾内ではあるが埋立て地である東扇島でも東京電力により大規模なLNGタンク基地および火力発電所が建設され、運転がなされている。

原子力発電所について、電力中央研究所では他機関に

先駆けて沖合原子力発電所構想を創出し、その成立性に関する予備的な調査を行ってきた。

また、実現はしなかったものの、許認可申請まで漕ぎ着けたものとして、米国のOff-shore Power Systems社(OPS社)が浮揚式海上立地原子力発電所を大西洋岸に建設することを計画したプロジェクトがある。

これらの海上立地構想を一覧表としてまとめたものが表1-2-1である。

表1-2-1 比較的大規模な海上立地発電所構想・プロジェクトの例<sup>(1)</sup>

構想番号	構想例	提案者	利用目的		構造型式			防衛型式	設置水深 (m)	開発状況		備考
			原子力発電所	火力発電所	海上都市・海上空港	洋上備蓄	築島式埋立式			築島式杭立式	沈没式工場の沈没複合式	
1	浮揚式原子力発電所	電力中央研究所・東芝・日立・三菱							0 ~ -20		1987	PWR、BWR型 1100MW x 2基
2	洋上原子力発電所	C. E. G. B (イギリス中央発電局)							-		1981	PWR型 1250MW x 2基
3	ニュークリア・フローティング・アイランド(NUFIS)	日本原子力研究所 (JAERI)							-100 ~ -150		1979	PWR型 1200MW x 1基
4	Artificial Islands off the Belgian Coast	Haecon N. Y.							-12 ~ -145		1978	5,000 ~ 10,000MW
5	着底式海上発電所	藤井 徹							-30		1977	800MW x 4基
6	洋上原子力発電所	脚機械振興協会							-100		1975	BWR型 1000MW x 2基
7	Atlantic Generating Station	Offshore Power Systems Inc							-9.2 ~ -12.8		1970 ~ 1975	PWR型 1150MW x 2基
8	耐震性のある浮上型原子力発電所	オークリッジ国立研究所 (ORNL)							-10		1974	PWR型 1000MW x 1基
9	Tuned Sphere	Sunders Nuclear Corp.							-		1971	1000MW x 1基
10	浮揚型海上原子力発電所	新発電方式総合調査委員会							-100		1971	1000MW x 2基
11	海底原子力発電所	新発電方式総合調査委員会							-100		1971	完全潜体式PWR型 1000MW x 1基
12	築島型原子力発電所	小林健三郎							-11.2		1971	1000MW x 4基
13	Bolsa Island Project	The Metropolitan Water District of Southern California							-10		1971	PWR型 1800MW
14	海底原子力発電所	森田定市							-		1970	
15	沖合原子力発電所	脚電力中央研究所・大成建設(株)							-20		1967	MOSES計画 DSPC-I型 BWR型 1200MW x 24基
16	沖合原子力発電所	脚電力中央研究所・大成建設(株)							-15		1967	MOSES計画 DSPC-II型 BWR型 750MW x 5基
17	沖合人工島石炭クリンエネルギー基地構想	国井大蔵・三井建設(株)							-20 ~ -50		1982	1000MW x 2基
18	埋立式石炭火力発電所(沖合人工島構想)	運輸省・街経団連・街鋼材倶楽部							-20、-50		1981	1000MW x 3基
19	浮体式石炭火力発電所(沖合人工島構想)	運輸省・街経団連・街鋼材倶楽部							-20、-50		1981	1000MW x 3基
20	沖合防波堤併用石炭火力発電所	運輸経済研究センター							-30		1980	500MW x 4基
21	洋上石炭エネルギー基地	運輸省港湾局							-20 ~ -25		1980	1000MW x 3基
22	御坊火力発電所	関西電力(株)							-10 ~ -17		1980	600MW x 3基
23	洋上発電所	資源エネルギー庁							-50		1976	250MW、500MW、1000MW
24	洋上火力発電所	脚機械振興協会							-20		1975	600MW x 4基
25	フローティング式100MW洋上石炭火力発電プラント	ハワイ大学 J. P. Craven							-		1975	50MW x 3基
26	着底式海上火力発電所	新発電方式総合調査委員会							-30		1971	600MW x 4基
27	浮揚式海上火力発電所	新発電方式総合調査委員会							-100		1971	600MW x 4基
28	神戸ポートアイランド*	神戸市							-10 ~ -15		1976 ~ 1981	
29	扇島*	日本鋼管(株)							0 ~ -15		1971 ~ 1976	
30	Offshore Brazilian Artificial Island*	Soros Associates							-20		1975 ~ 1981	1978年に完成
31	関西新空港(埋立式)*	運輸省航空局							-7 ~ -20		1970	
32	白島地区洋上石油備蓄システム*	石油公団							-10 ~ -25		1979	
33	上五島地区洋上石油備蓄システム*	石油公団							-20 ~ -35		1979	
34	志布志地区洋上石油備蓄システム*	石油公団							-5 ~ -12		1979	




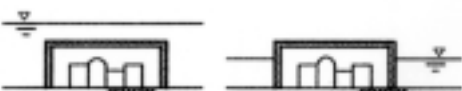

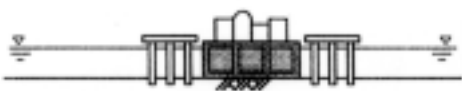


\* ) 印は発電所の例ではないが、大規模かつ実施段階の例であるので掲載した。

# 1 - 3 海上立地方式の種類

以上のように、今までに、国内外において様々な海上立地方式が提案されてきた。これらを考慮し、技術

的に可能な構造型式として分類したのが、表1-3-1である。

表1-3-1 原子力発電所の海上立地構造型式の一般的分類<sup>(1)</sup>

大分類	中分類 原子力発電プラントの建設方法による分類		小分類 海面との関係による分類	概念図	備考
着	現地 施工式	築島式	埋立式		護岸の築造と埋立による敷地造成を行い、その後その敷地にプラントを建設する
			杭式		防波堤を築造し、その内側に杭を打設してその上にプラットフォームを建造し、その後プラントをプラットフォーム上に建設する
底	工場	沈設式	ケーソン・沈設式 (海上沈設式)		防波堤を築造しその内側にプラント基礎となる函体またはプラントを搭載した函体を沈設する
			海底式		プラントを内蔵した構造物を海底に沈設する
	製作	築島・沈設複合式	ケーソン・埋立複合式 (埋立・海上複合式)		プラント基礎は函体構造で沈設し、その周囲を埋立てる
			杭・海上複合式		プラント基礎は函体構造で沈設し、その周囲は杭を打設してその上にプラットフォームを建設する
浮体式	浮体式	浮揚式		防波堤を築造し、その内側にプラントを搭載した浮体を係留する	
		潜水式		プラントを内蔵した浮体構造物の大半を水中に係留する	

我が国の場合、海上立地原子力発電所の当面の立地地点としては、すでに利用度の高い内海よりも外海あるいはそれに近い特性を持った地点が考えられる。また、設置水深は現状の技術水準および経済的な理由により20m程度の浅海域となるであろう。我が国の沿岸の海底勾配を平均1/100と考えると、沖合2km程度に立地することになる。このような条件の下で、表1-3-1の種々の構造形式の中から実現性の高いものを選ぶと埋立人工島式、ケーソン人工島式と浮揚式の3型式が選定される。

これらの概念を示すと次のようである(図1-3-1)。

① 埋立人工島式

防波護岸で囲まれた人工島を埋立て築造し、そこにプラントを在来立地方式と同様の建設方法で建設する方式。

② ケーソン人工島式

防波堤で防護された水域に、プラント全体または一部を搭載したケーソンを沈設する方式(ケーソン沈設式)および埋め立て人工島式とケーソン沈設式の複合型式で、プラント全体またはその一部を搭載したケーソンを沈設

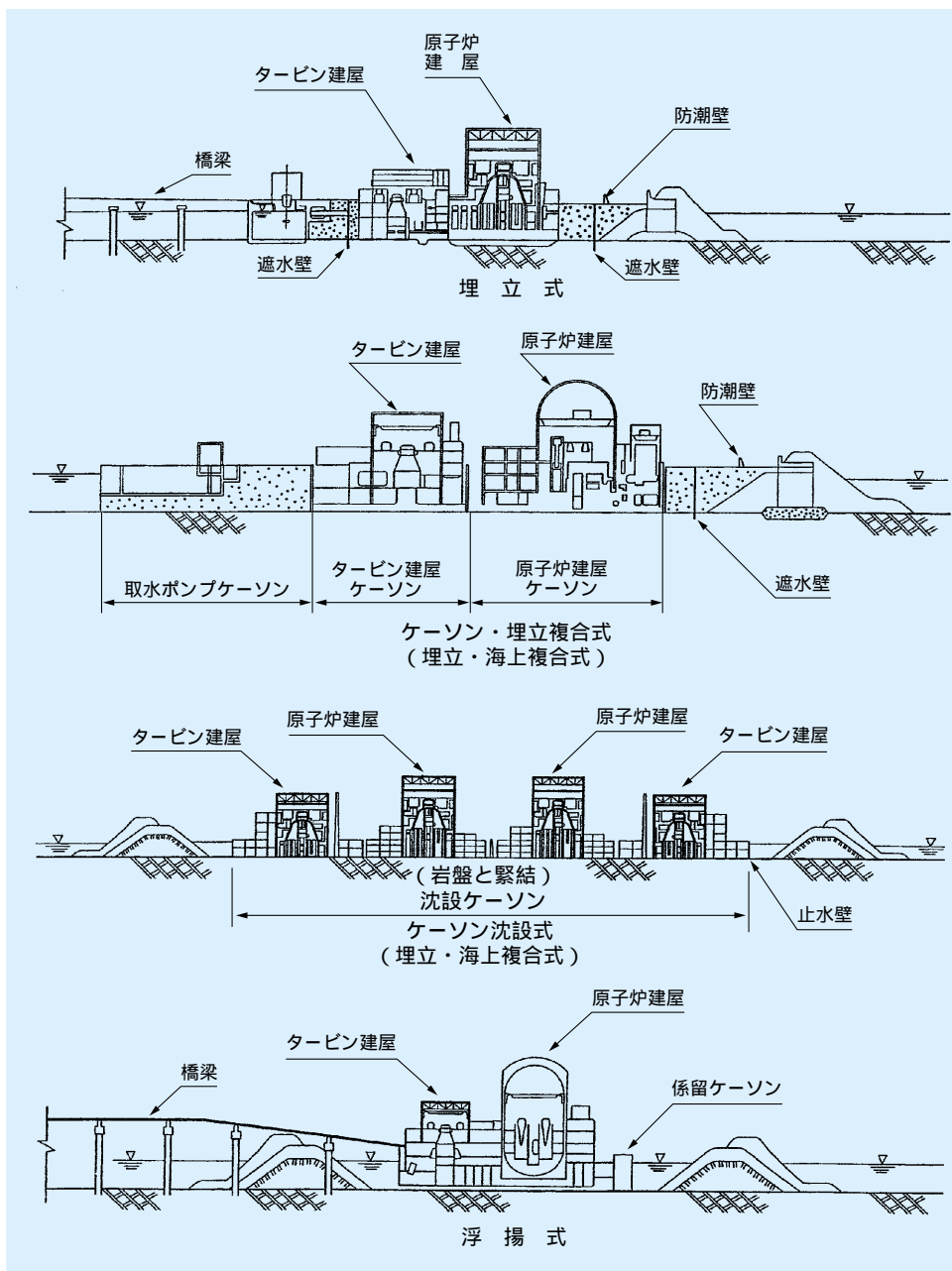


図1-3-1 実現性の高い海上立地の構造型式の概念図<sup>(1)</sup>

し、その周囲を埋立てる方式(ケーソン埋立複合式)。

### ③ 浮揚式

防波堤または護岸で防護された水域にプラントを搭載した浮体を係留する方式。

以上の方式の内、埋立人工島式は海底の浅部に岩盤が

得られるサイトであれば、在来立地方式にきわめて近い立地方式となり、安全評価や建設技術の面から早期の実現が期待される方式と言える。このような見地から以下では埋立式人工島立地を、人工島式海上立地(図1-3-2)と称することとする。



図1-3-2 人工島式海上立地の構想例<sup>1)</sup>

## 1 - 4 人工島建設の歴史

広大な国土を持たない国々の内、特に海岸線を有する国々は沿岸域を埋立てる、あるいは沖合いの海上に人工島を建設することにより、自らの手で国土を造り上げてきた。このような人工島(沿岸域の埋立ても広義の意味で人工島と解釈される)の利用の歴史を大まかに見れば、①農地としての利用、②居住空間、都市空間そして港湾としての利用、③工業施設立地地点としての利用、④交通、輸送そしてエネルギー施設立地地点としての利用、として示すことができる。

①の代表例はオランダそして日本などにおける干拓である。干拓地の地盤は、極めて軟弱な地盤で構成されているのが常である。干拓地を造り上げるためには堤防の築堤が必要である。現在、軟弱地盤の調査・試験および沈下の予測とその対策技術はきわめて高いレベルにあるが、これらの技術はまさにこの軟弱地盤を克服するための技術として発達してきたものと言って良い。

②の例として挙げられるのがイタリアの海上都市ベネチア(表1-3-1に示した杭式人工島に近い)であり、鎖

国時に唯一の外交場所となった長崎・出島である。また、海運の必要性の高まりから、各国で港湾施設の整備も急速に進んだ。

③、④は第2次大戦後の復興に伴う工業・産業の隆盛に対応するもので、大都市臨海埋立て地におけるビッグコンビナートの建設、人工島を利用した空港建設(長崎空港、関西新空港、中部国際新空港など。海外では香港、韓国などに見られる)石油やLNGガスなどの燃料貯蔵基地、先に述べた火力発電所の建設など、枚挙にいとまが無いほどである。

このような近代的人工島の建設に際し、数々の優れた立地・建設技術が開発されてきた。特に、地震国である我が国では、長期にわたる地盤沈下の対策とともに、埋立て地盤の液状化に対する対策が極めて重要な課題となるが、その予測法も合せ、効果的な対策工法に関しても高い技術レベルを保有するに至っている。また、防波護岸などの海岸構造物の建設技術も大規模な港湾施設の整備に伴い、大いに発展してきた。

## 1 - 5 原子力発電所人工島式 海上立地の技術課題

この立地方式は先に述べたように在来立地方式に極めて近く、その成立性に関わるような技術開発課題は少ない。とくに発電プラント本体については、人工島建設後海底の岩盤上に在来と同じ方法で建設されるため、この方式独自の新たな課題はない。しかし、立地の円滑性、経済性や環境への配慮などを考慮した合理的な立地技術を確立する上での主要課題としては次の点が挙げられる。

### 1-5-1 合理的な海底地質・地盤の調査法

在来立地同様、人工島建設前に原子力発電所重要施設を支持する海底基礎岩盤の健全性を地質・地盤調査により評価する必要がある。在来立地方式では、敷地内地質調査としてボーリング調査、試掘坑内調査および岩石・岩盤物性調査として物理特性、強度特性、変形特性などの調査が行われており、従来の指針では、試掘坑内での原位置調査・試験の重要度が高い。海上立地の場合、海底岩盤に試掘坑を掘ることは安全面、コスト面から困難な場合も考えられる。このような場合に対処するためには、海上からの物理探査とボーリング調査、ボーリング孔を利用した調査・試験、ボーリングコアによる室内試験などにより、在来立地に対する調査・試験と同等の精度で調査・試験が行えるシステムを確立することが重要である。

### 1-5-2 防波護岸の合理的な耐震・耐波設計法の確立

人工島立地においては、発電所建屋は海域に設置され、人工的な埋立地盤に囲まれている。また、海から建屋までの距離も短い場合が多いと考えられるため、人工島の外郭を保護する防波護岸の設計上の重要度を適切に設定することが必要である。そしてその重要度に基づいて決められる地震・波浪などの外力条件に基づき、適切な防波護岸の構造形式の選択、合理的な耐

震・耐波浪の評価法ならびに安全評価基準の設定により人工島式原子力発電所の護岸としての合理的設計法を確立する必要がある。

### 1-5-3 人工島周辺の波、海浜流、海浜変形に与える影響評価法の高精度化

人工島の建設は周辺海域の波、海浜流に大きな影響を及ぼすだけでなく、砂の移動により周辺の海岸や海底の地形変化を引き起こす可能性がある。したがって、建設計画立案時にこれらについて十分な評価を行い、それを人工島と陸の間の静穏海域など周辺海域の利用計画に反映させるとともに、必要に応じ海岸変形に対する事前の対応策をとることとなる。波、海浜流、海浜変形については既に開発された評価法があるが、上記の目的に十分応えるためにはさらに信頼性を上げ、長期にわたる海岸変形の評価を行えるよう高精度化を図る必要がある。

### 1-5-4 立地支援技術

発電所の立地計画に際しては、発電所と地域住民との共生が求められることになり、それを実現するための手段として立地支援技術が位置づけられる。発電所の立地に伴うエネルギー、空間、付属施設などに着目すると、立地地域には莫大な資源が与えられることになる。これらを有効に活用することで非立地地域にはできないような地域発展が可能となるはずである。特に、人工島立地の場合、例えば人工島背面に形成される静穏海域の活用など、多様なサイト資源を活用することが可能である。そのためには、発電所構内の緑化や藻場造成に関する技術、砂浜造成技術、温排水・熱利用技術や景観設計技術などの要素技術の開発が必要である。要素技術を集約して地域の特質を考慮した地域振興方策の創出も大きな課題と言える。



第 2 章

2

海底地質・地盤調査技術

我孫子研究所地質部 主任研究員 阿部信太郎  
 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 岡本 敏郎  
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 工藤 康二  
 前我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 谷 和夫

我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 岡田 哲実  
 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 田中 幸久  
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 池見 元宣  
 前我孫子研究所地質地盤部 地下科学グループ(嘱託) 本莊 静光

2 - 1 海底地質調査技術の高度化 .....17  
 2 - 2 海底地盤調査技術の高度化 .....23



阿部信太郎(1992年入所)  
 これまで活断層調査の高精度化に関する研究に物理探査の立場から携わってきた。最近では、湖における3次元反射法地震探査や地下レーダーを用いた高精度3次元反射法探査に取り組んでいる。今後は、マグマや地震発生層の把握を目的として自然地震を用いた深部地殻構造探査にも取り組んでいく。



岡田 哲実(1994年入所)  
 これまで、軟岩地盤を対象とした地盤調査に関する研究を行ってきた。現在は、不均質岩である礫岩の物性評価に関する研究を進めている。今後は、高レベル放射性廃棄物処分を対象とした高温下の岩盤物性に関する研究を行っていきたい。



岡本 敏郎(1977年入所)  
 揚水式発電所ロックフィルダムの調査/設計/施工/管理、原子力発電所の第四紀地盤立地および人工島式立地、火力発電所の軟弱地盤対策や石炭灰処分/灰捨て地調査に従事。現在表面遮水式ロックフィルダムの設計の研究を担当。



田中 幸久(1980年入所)  
 飽和砂地盤の液状化対策、原子力発電所の新立地技術(第四紀地盤立地、人工島式海上立地)などを通じて砂や碎石、砂礫材料などの動的物性の評価やその応用を中心として研究を実施してきた。今後は、高レベル放射性廃棄物処分や地盤環境問題の解決へ向けての研究も実施していきたい。



工藤 康二(1982年入所)  
 入所以来、原子力発電所の新立地(第四紀立地、海上立地)プロジェクトにおいて、砂礫地盤や捨て石マウンド材料といった粗粒材料や軟質岩等の力学特性について、室内試験や現場PS検層を中心に研究を進めてきた。今後は、高レベル放射性廃棄物処分や環境問題の解決へ向けての研究を展開していきたい。



池見 元宣(1970年入所)  
 入所以来、フィルダムの築堤材料物性試験や軟弱地盤や砂礫地盤の原位置試験に関わってきた。近年は、軟岩を中心とした物性試験およびボーリング技術の高度化に関する研究を行ってきた。今後も原位置試験を中心とした研究に従事していきたい。1999年6月より(株)シー・アール・エスに出向。



谷 和夫(1990年入所、1999年3月退職)  
 主に原子力発電所の新立地技術開発や、電力土木の地盤調査と基礎設計に関わる依頼研究に従事した。専門は岩盤工学、応用地質学などで、1999年4月より横浜国立大学工学部建設学科の助教授。今後は地盤情報を活用した国土計画論などにも手を広げる予定。



本莊 静光(1963年入所、1994年6月退職)  
 出身は物理探査であり、当所では岩石・岩盤物性、防災・構造地質等の調査研究に多く携わる。原子力では既往諸地点の広域・敷地内調査の経験に基づいて在来立地地質調査法の標準化に従事し、また各新立地方式における調査システム案の策定に努めた。現在総合地質調査(株)勤務。

## 2 - 1 海底地質調査技術の高度化

### 2-1-1 はじめに

人工島式海上立地のための海底地質調査では、建屋基礎底面位置付近における試掘坑調査の困難な場合が予想される。したがって、**図2-1-1**に示すように各種物理探査とボーリング調査を有効に組み合わせて、詳細地質構造と概略物性分布を把握し、特に必要な場合に限り海底原位置地質調査を実施するというのが、最も現実的な調査システムと考えられる<sup>1)</sup>。

通常、陸域の地質構造については、地表踏査やボーリング調査などの直視的な調査方法と、地表からの反射法地震探査およびボーリング孔を用いたPS検層、弾性波トモグラフィー等の物理探査を組み合わせることによって把握する。

海域の地質構造把握については、反射法地震探査が特に有効とされ、在来立地における広域調査段階でも広く用いられている。当然、人工島式海上立地のための海底

地質調査においても、この反射法地震探査が主流的手法となる。

### 2-1-2 反射法地震探査の基本原則

弾性波は、伝搬速度の異なる物質が接する境界面において反射する性質を有しており、この性質を地球内部に適用した場合、地表面において発震された弾性波は地下の地層境界面において反射し、再び地表に反射波として戻ってくる。反射法地震探査は、この反射波を観測することにより、地下の地質構造を把握する手法である。

**図2-1-2(上)**に示すように、地震計を設置して震源から弾性波を発生させると、発生した弾性波は各地層境界で反射して、地表に戻ってきて地震計に記録される。震源および受震点の位置を移動しながらこの観測を繰り返すと**図2-1-2(下)**に示すような反射記録が得られる。反射波は、地層境界の深さと各地層の弾性波伝搬速度で決

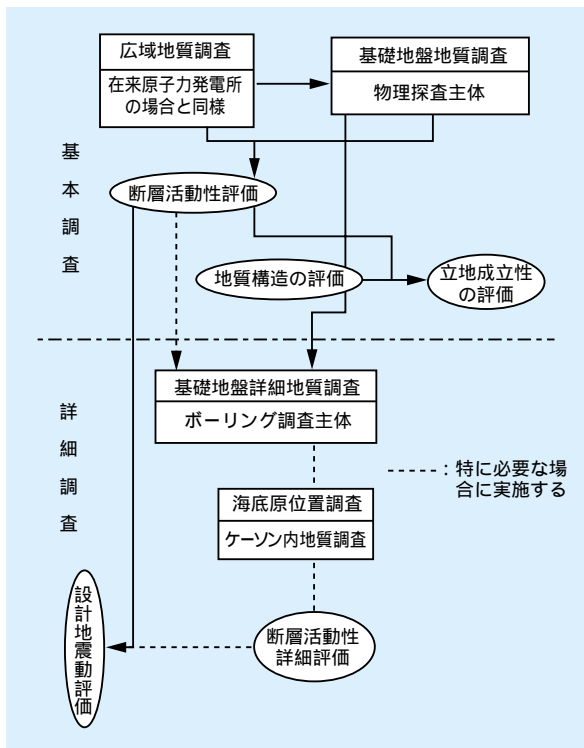


図2-1-1 人工島式海上立地における海底地質調査の流れ

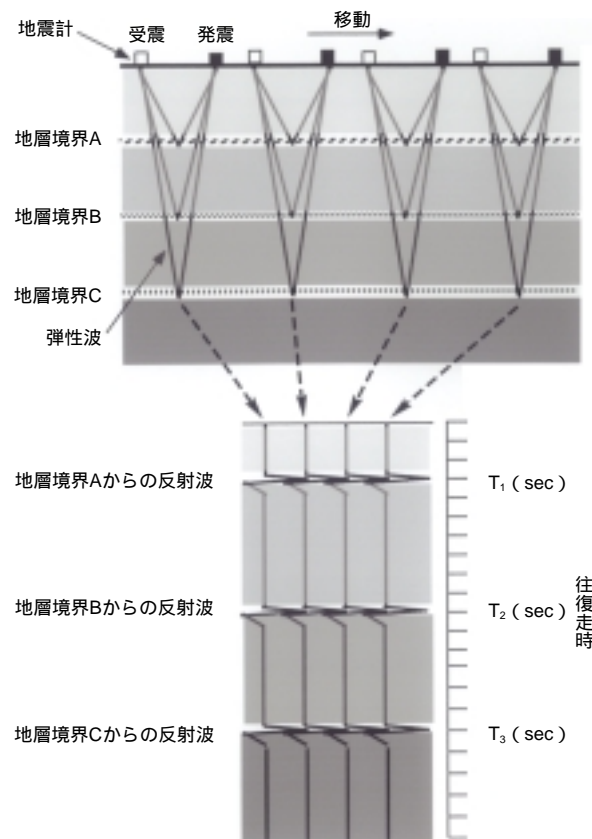


図2-1-2 反射法地震探査の原理

まる時間で地表に置いた地震計に戻ってくるため、記録を並べると地層形状を再現することができる。図2-1-2(下)の反射記録は、往復走時と呼ばれる弾性波が地表から各地層境界まで到達し再び地表に戻ってくるまでの時間を縦軸にして示しているが、各地層の弾性波速度が把握されれば、縦軸を深度に変換した断面図も作ることができる。

海域における反射法地震探査では、図2-1-3に示すように調査船を一定の速度で航行させながら弾性波を一定距離間隔で発震させ、海底下の反射記録を連続的に取得する。

### 2-1-3 反射法地震探査の地質構造解明精度に関する検討

反射法地震探査記録は、地下の地質構造を断面図として表現している。一枚一枚の反射面は、反射面をはさむ上下地層の物性の相対的違いを反映しており、この記録断面図に示される地質現象は、大きいものは地質の構造形態、不整合面といった広域の地質構造から、小さいものは堆積の微細構造までを表わしている。

反射法地震探査記録による地質構造の解明精度を左右する要因は、計画段階における測線間隔および測線方向の設定、探査段階における船位測定 of 誤差、機器精度とそのパラメータ設定条件、解析段階における弾性波の物理的性質の解釈、地質学的解釈など、調査過程の各段階において様々な形で含まれ、それぞれが相互に関連し、最終的に地質構造の解明精度として現われる。特に探査段階において、どのような仕様の震源を選択するかが、得られる記録の分解能、把握深度、S/N比に大きな影響を与える。

現在、反射法地震探査において用いられている各種の震源は、周波数特性、発震出力がそれぞれ異なっている。浅海域においては、主にエアガン、ウォーターガン、スパーカーが震源として用いられている。一般的にはエアガンは、発震出力が大きく低周波数、ウォーターガンは中程度の発震出力でやや高周波数、スパーカーは、発震出力が小さく最も高周波数の震源として使用されている。これらの震源を用いて同一測線上で反射法地震探査を実施し、各震源の地質構造解明精度について比較検討を実施した<sup>(2)</sup>。記録システムおよびデータ処理条件は全て共通である。図2-1-4に示す通り、深部の地質構造については、発震出力の大きさに応じてエアガン、ウォーターガン、スパーカーの順に明瞭であり、地質構造の分解能については、発震周波数の高さに応じてスパーカー、ウォーターガン、エアガンの順に高分解能である。

以上のように各震源の周波数特性と発震出力の違いによって、地質構造の解明精度、把握深度に顕著な差異が生じている。海域の反射法地震探査において、種類の震源で分解能と探査深度の双方を満足することは原理的に困難である。したがって、地形および地質条件を十分に考慮し、把握対象に応じた震源を選択する事が、反射法地震探査による地質構造解明精度を確保する上で、極めて重要である。

### 2-1-4 音響学的層序の岩質および地層形成年代との対比

海域においては、陸域における地表地質調査に相当する情報がきわめて少ない。従って、反射法地震探査から得られる音響的な層区分を、実際の岩質や地層形成年代に対応付けるためには、既往のピストンコアリングや海

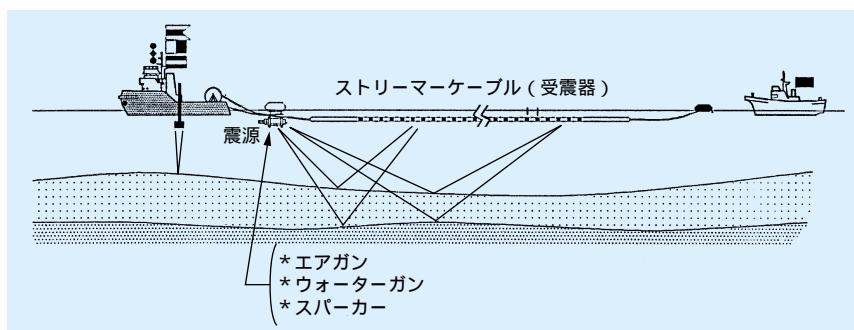


図2-1-3 海域における反射法地震探査の概念図

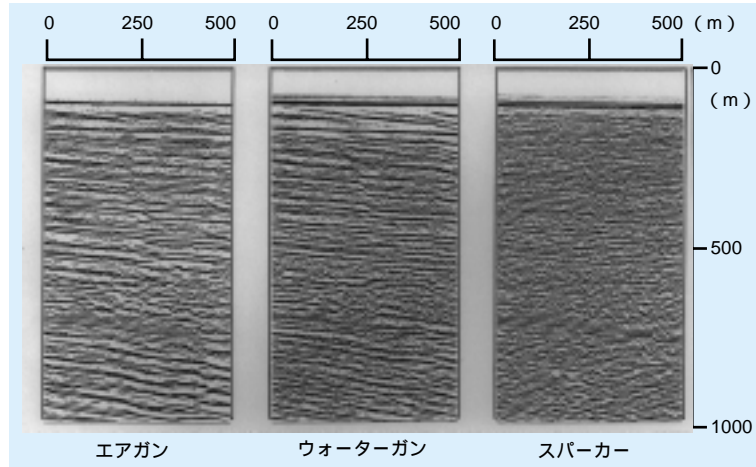


図2-1-4 各種震源による反射法地震探査記録断面の比較

底ボーリング調査により把握された地層区分、隣接陸域における地質調査結果を参照し、総合的に検討する必要がある。反射法地震探査記録と既往文献に記載されている海底ボーリング調査結果<sup>3)</sup>を対比した例を図2-1-5に示す。ただし、現実的にはこのような対比が可能な場合は少数で、対象とする海域に関して適当な文献が存在しない場合も多い。また、海域と陸域では過去の堆積環境の違い、例えば海進、海退などの影響により、陸域と海域の地層区分を対応付けられるとも限らない。

このような場合には、音響学的層序と地質層序の対応付けが既になされている海域から対象海域まで反射法地

震探査により層序を追跡するか、ピストンコアリング、もしくは海底ボーリングを反射法地震探査の測線において実施し、直接的に対象海域の岩質および地層形成年代を把握する以外に方法はない。

### 2-1-5 反射法地震探査記録断面による断層の判定

断層の種類は、正断層、逆断層、横ずれ断層に大別される。反射法地震探査記録では、断層は図2-1-6に示すようにある場所を境に反射面が切れて、その両側で反射

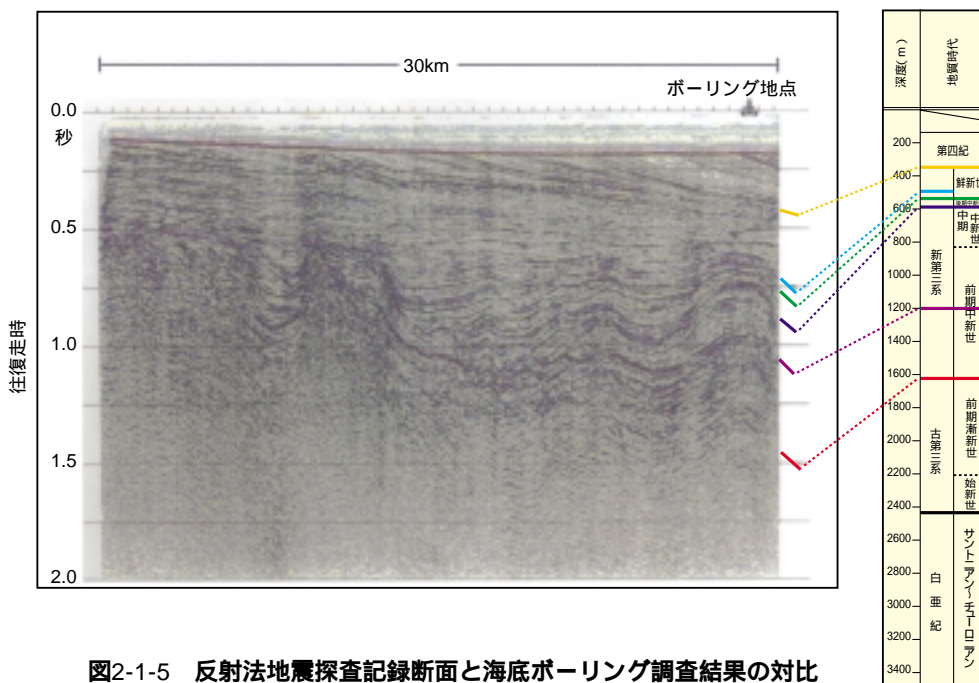


図2-1-5 反射法地震探査記録断面と海底ボーリング調査結果の対比

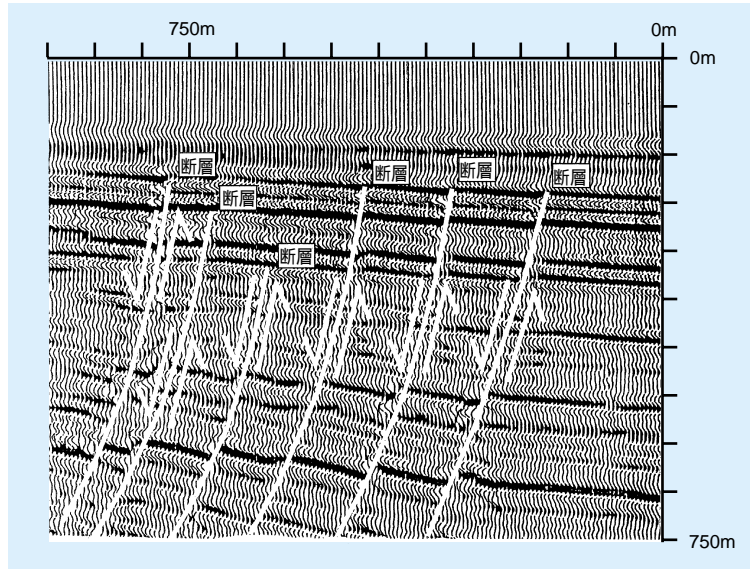


図2-1-6 反射法地震探査でとらえられた断面

面がずれている場合に認定される。しかし、断層の存在が確認された場合においても、断層の傾斜角が低角度で、すべり量が小さい場合は、断層を挟んだ反射面の上下方向での変位量は見掛け上、さらに小さくなってしまいうため、ずれの判定は困難になる。このような場合は、反射法地震探査記録断面の縦軸と横軸の比率を変えて、深度方向を強調した断面を作成することにより、判定が可能となる場合もある。また、幾何学上、一本の反射法地震探査記録上で判定出来る断層の変位は上下方向のみである。すなわち、完璧な横ずれ断層が存在した場合には、一本の反射法地震探査記録断面からだけでは、その存在の有無、横ずれ変位量を推定することはできない。ただし、現実的には完全な横ずれ変位のみで形成されている断層はなく、若干なりとも必ず上下変位を伴っており、断層の存在を見落とす可能性は極めて低い。

いずれにしても、ある測線において断層の可能性を示す反射パターンが確認された場合には、隣り合う測線において同一の反射パターンが存在するか否か、反射パターンから推定される断層の種類が同一か否かについて検討する必要がある。

我々が実施する反射法地震探査記録断面上における断層の判定には、データの質や地質構造の多様性などを考慮する必要があり、データ解析者の経験に基づく主観性も少なからず含まれている。どのような状況に対しても適用可能な、データ解析者の主観性を完璧に排除した判定基準というものを設定することは現時点においては困

難である。ただし、最近では、人工知能的な概念を用いて、反射法地震探査記録断面から自動的に断層を抽出して変位量等を見積もる地質構造解釈システムに関する研究が資源探査分野ではなされている。このような解析システムが実用化されれば現在よりも遥かに客観性の高い断層の判定が可能となる。

#### 2-1-6 海底に存在する断層の活動性評価

断層は、規模と性状、活動履歴、最終活動年代を検討することによって、発生する地震規模、活動間隔が活動性として評価される。海底に存在する断層の活動性を評価する際に最も重要なポイントは、「対象とする断層が、どの時代の地層まで変形を与えているか」にある。具体的には、地層形成年代と反射法地震探査によって得られる音響学的層序の対比、および反射法地震探査記録断面より認識される断層の存在と変位の範囲を考慮し、活動性が評価される。反射法地震探査記録から読み取れる地層の連続性を検討することにより、最終的に断層の活動性を評価するまでの手順をフローチャート化したものを図2-1-7に示す。ただし、全ての事例がこのフローに沿って評価が可能なわけではない。たとえば、海底地形にあらわれている海底面の段差は、断層の最近の活動を示す可能性もあるが、断層変位以外の形成要因についても検討する必要がある。また、断層自体は直接的には確認されていない場合でも、断層の存在が地下深部に示唆さ

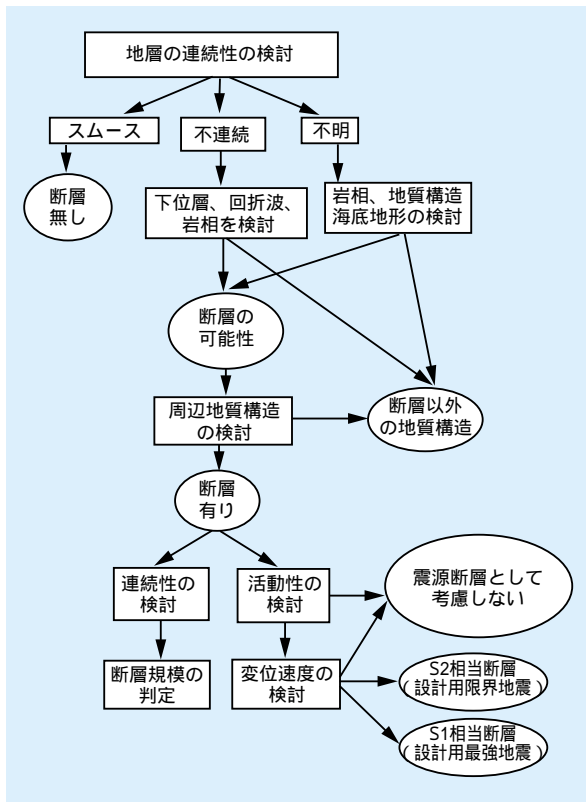


図2-1-7 反射法地震探査記録に基づく断層活動評価の流れ

れるような地層変形が確認される場合は、陸域も含めた周辺地域の地質構造発達史を検討し、深部断層の活動性を評価する。さらに、断層を被覆する地層が存在しない場合、もしくは被覆する地層の形成年代が把握できない場合については、周辺地域の地質構造および周辺に存在する断層の雁行性、断続性等の分布形態、性状から断層帯としての地質構造発達史を検討し、対象とする断層の成因と活動性について、総合的に評価する。

## 2-1-7 海底から陸上まで連続する地質構造の把握

人工島式海上立地の広域地質調査段階において、海底から陸上に至る連続した地質構造を反射法地震探査により把握できるとすれば、立地成立性確認のために極めて有効な判断材料となる<sup>(4)</sup>。ただし、人工島式海上立地においては、水深十数メートル以浅が建設対象となり、ストリーマーケーブルと呼ばれる受震用ケーブルを船尾から100m以上曳航する通常仕様の反射法地震探査では、調査船の航行にも水深5m以上は必要であり、陸域と

の間に測定出来ない範囲が生じてしまう。また、この範囲においては、陸上反射法地震探査の受震器を海底に設置することも、耐水性の観点から困難である。このような浅海域においては、センサーを海底に設置するベイケーブルと呼ばれる受震ケーブルを用いる探査方式が有効である。

沿岸域に空白域をつくることなく反射法地震探査を実施するために、ベイケーブルを用いた反射法地震探査と通常仕様の海域、陸域における反射法地震探査を併用する図2-1-8に示すような探査システムを実フィールドに適用した<sup>(5)</sup>。この探査システムの特徴は、海域反射法地震探査、ベイケーブル反射法地震探査、陸上反射法地震探査の各探査手法を独立したレイアウトの探査として実施するのではなく、一体化した一つのレイアウトの探査として実施するところにある。すなわち、陸域から発震された弾性波は海底でも受震され、その反対に海域から発震された弾性波は陸上でも受震される。データ処理は、通常の反射法地震探査のデータ処理とほぼ同様であるが、各探査手法間におけるデータ特性の違いを補正するためのデジタルフィルター処理を施した。得られた反射法記録断面は図2-1-9に示すように極めて良好であり、海底から陸上に連続する地層の堆積状況が深度2000m程度まで明らかになった。

## 2-1-8 まとめ

人工島式海上立地の海底地質調査においては、試掘坑調査が困難であることが想定される。したがって、陸域における調査比重が必然的に高くなるを得ない。このため、陸域における調査結果を海域のボーリング調査や物理探査結果と結び付ける必要があり、陸上から海底までの連続した地質構造断面、物性構造断面を得ることが重要となる。本節に示した海底から陸上に至る連続した地質構造断面を取得するための反射法地震探査システムは、在来立地における広域調査段階で、既に海底地質調査法として用いられているものの組み合わせにより構成されている。すなわち、探査装置などは従来までのものをそのまま適用することが可能である。

海域における物理探査のさらなる高精度化に向けた研究は日々進歩しているが、現状よりも高精度なデータを得るためには、より厳密なデータ計測、より微弱な信号

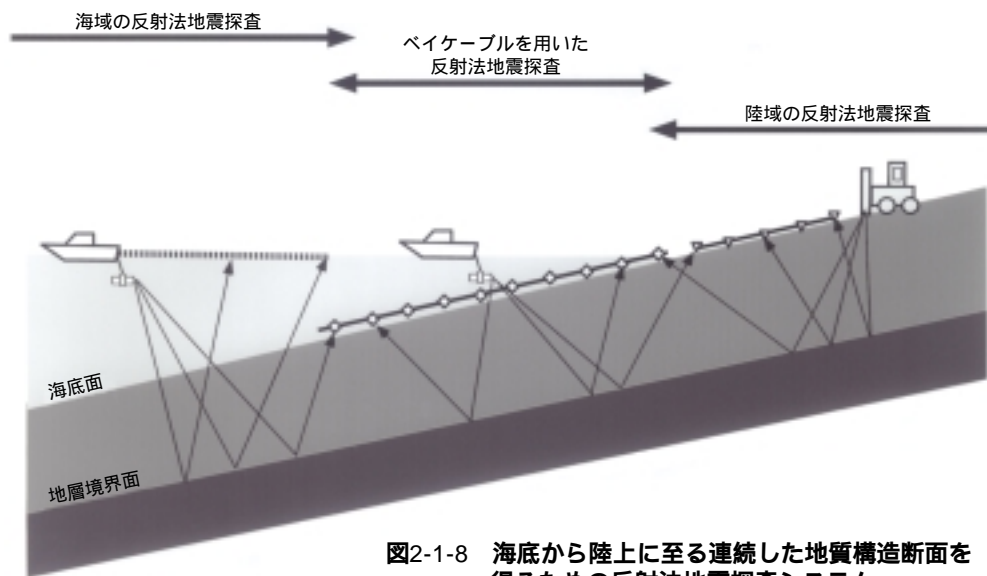


図2-1-8 海底から陸上に至る連続した地質構造断面を得るための反射法地震探査システム

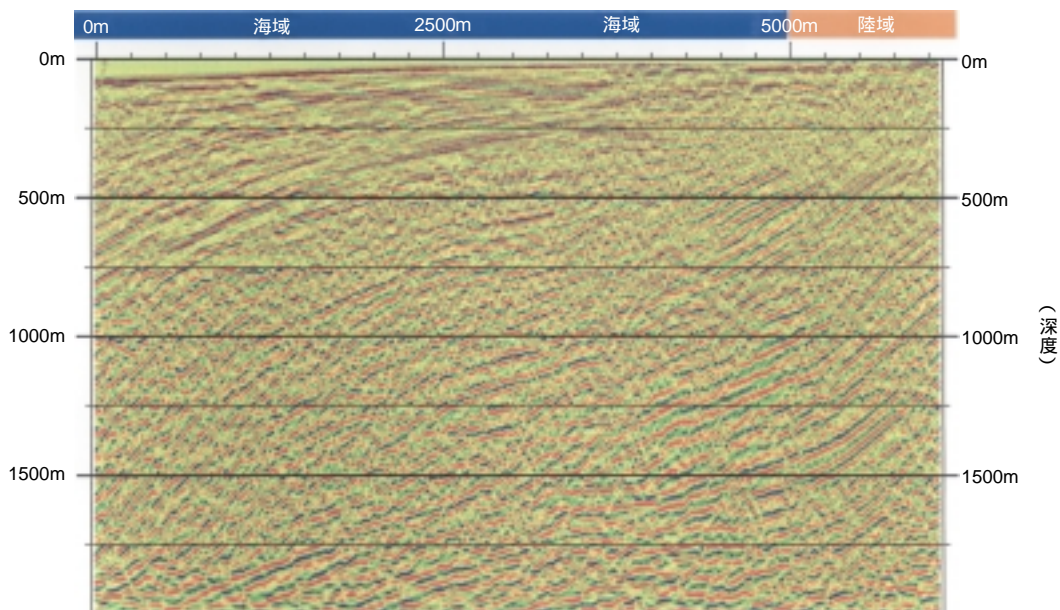


図2-1-9 海底から陸上に至る連続した反射法地震探査記録断面

をとらえる観測を実施する必要があり、そのための観測機器、観測技術開発も必要である。最近の電子工学分野における技術動向からすると、この分野が必要とする仕様を満たす観測機器については、既存技術の組み合わせにより、理論的には製作可能な状態になっている。また、観測技術についても、土木から資源開発、地球科学に至

る広い研究分野において、海城における物理探査が用いられている現状からすると、ノウハウの蓄積は十分になされている。したがって、人工島式海上立地のための海底地質調査技術は、本節で示した事例も含めて必要とされる要素技術に関する検討段階は終了し、実用化へ向けた実践段階に到達していると言える。



## 2 - 2 海底地盤調査技術の高度化

1-5-1で述べたように人工島式海上立地における海底基礎岩盤の調査では在来立地と異なり試掘坑を設けることが困難な場合も考えられるので、岩盤せん断試験結果と平板載荷試験結果など従来、試掘坑内で実施されてきた試験の実施が困難である場合も想定される。従って、人工島式海上立地においては、試掘坑によらずに、従来得られた情報に近いレベルの情報を得ることのできる地盤調査・試験方法ならびにそれらによる地盤特性の評価方法の確立が望まれる。

具体的な方法としては、岩盤の特性に応じて

- ① 現地より採取した不攪乱試料を用いた室内試験
- ② ボーリング孔や地盤調査用ケーソン内など試掘坑以外で行う原位置速度検層や各種原位置試験

を適切に組合せた調査を実施して、その結果を総合的に判断して地盤物性を評価することが考えられる。また、上記①、②の他に、場合によっては陸域に存在する類似岩盤に対する地盤調査を行うことも考えられる。

ここでは、不攪乱試料を用いた室内試験による地盤物性評価方法とボーリング孔を利用した地盤調査による岩盤物性評価方法のうちの一つであり、当研究所が開発した岩盤用プレッシャーメータ試験について述べる。

プレッシャーメータ試験は、後述するようにボーリング孔壁をゴム膜を介して載・除荷する試験方法である。ボーリング孔やゴム膜の寸法には限りがあるので、一回の試験から得られる地盤情報は岩盤全体からみれば点に近い局所的なものにならざるを得ない。このことは、不攪乱試料を用いた室内試験でも同様である。このような試験方法による結果から岩盤全体の特性を評価する場合に問題となるのは、岩盤中の亀裂の存在である。

一般に、岩盤は、その内部に亀裂が存在し、岩盤全体の挙動に影響を及ぼす。従って、局所的な地盤情報から岩盤全体の特性を評価する場合には亀裂の影響を考慮しなければならない。岩盤には、亀裂が多いものと少ないものがある。一般に、地質年代が古く硬質な岩盤は亀裂

を多く含むが、地質年代の新しい堆積軟岩は比較的亀裂が少ない。従って、地質年代の新しい堆積軟岩を対象とした場合には、不攪乱試料を用いた室内試験やプレッシャーメータ試験から岩盤全体の特性を評価できる可能性が高い。そこでここでは、比較的均質で亀裂の少ない堆積軟岩からなる岩盤を対象として、不攪乱試料を用いた室内試験やプレッシャーメータ試験による地盤物性評価法について述べる。

### 2-2-1 室内試験による堆積軟岩の地盤物性評価

ここでは、室内試験結果と原位置岩盤試験結果の対応を明確にすることを目指して、比較的均質な堆積軟岩を対象として以下の検討を行った。

- ① 一般に、岩盤の内部には亀裂が存在するため、岩盤から採取した室内試験供試体の寸法が大きいくほど、供試体に含まれる亀裂が増加する(図2-2-1)。その結果、大きな供試体に対する室内試験から得られた強度ならびに剛性は小さな供試体に比べて小さい。これを寸法効果と呼ぶ。そこで、代表的な室内力学試験である三軸圧縮試験によって寸法効果の影響を検討する。
- ② 三軸圧縮試験結果と比較することにより代表的な原位置岩盤試験である岩盤せん断試験と平板載荷試験の位置づけを検討する。さらに三軸圧縮試験結果を用いて岩盤せん断試験結果と平板載荷試験結果の数値シミュレーションを行う。

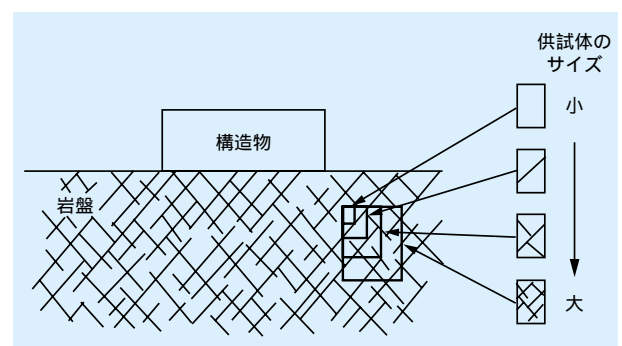


図2-2-1 岩石の寸法効果

(1) 力学特性に及ぼす寸法効果の影響の検討

三軸圧縮試験では、供試体の端部の乱れ(ベッディングエラー)<sup>1)</sup>の影響を受けないように、正確な変位計測を実施し、強度特性だけでなく変形特性の寸法効果についても検討を行った。

試料は、1種類の自然の堆積軟岩と人工軟岩(堆積軟岩を模擬した2種類の人工の岩石)を使用した。自然の堆積軟岩は、外見上は割れ目を含まない新第三紀鮮新統に属するシルト岩を用いた。人工軟岩は、砂岩を模擬した砂質系の岩石(配合S3)と泥岩を模擬した泥質系の岩石(配合M2)である<sup>2)</sup>。ただし、砂質系の人工軟岩では、供試体の表面に亀裂が見られない均質な試料を作製することができたが、泥質系の人工軟岩の大きな供試体には、供試体作製中に発生した亀裂が数本観察された。

以上3種類の試料に対して、供試体の直径が10、20、35、50、100、300、500mmの寸法で三軸圧縮試験を行った。

試験結果から得られた軸差応力(供試体の軸方向の応力から軸直角方向の応力を差し引いたもの)と軸ひずみ(供試体の軸方向の直ひずみ)の関係の代表例を図2-2-2に示す。強度特性としては、ピーク時の応力 $q_f$ と残留時の応力 $q_{res}$ を求め、それらに対する寸法効果を検討した。また、変形特性としては、初期(微小なひずみレベル)のヤング率 $E_{sec,i}$ 、ピークの半分の応力時( $q/q_f=0.5$ )のヤング率 $E_{50}$ 、およびピーク時の軸ひずみ $\epsilon_f$ を求め、それらに対する寸法効果を検討した。

表2-2-1に寸法効果の影響をまとめた。人工軟岩(配

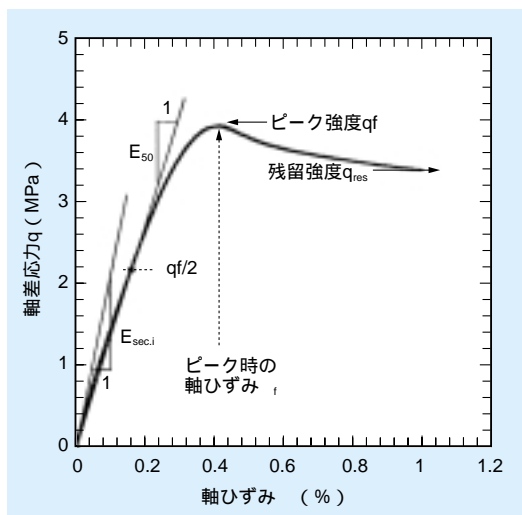


図2-2-2 三軸試験結果の一例<sup>3)</sup>

表2-2-1 寸法効果のまとめ<sup>3)</sup>

		人工軟岩		堆積軟岩
		配合S3	配合M2	シルト岩
強度特性	ピーク時の軸差応力 $q_f$	×		×
	残留時の軸差応力 $q_{res}$	×	×	×
変形特性	ヤング率の初期値 $E_{sec,i}$	×	×	
	$q/q_f = 0.5$ の時のヤング率 $E_{50}$	×	×	×
	ピーク時の軸ひずみ $\epsilon_f$	×	×	

○ : 寸法効果が認められる。  
 △ : 寸法効果がやや認められる。  
 × : 寸法効果は認められない。

合M2)におけるピーク時の応力 $q_f$ に若干の寸法効果が認められる。その低下割合は、直径が10倍大きくなると約10%低下する程度である。これは、人工軟岩(配合M2)の作製中に発生した割れ目の影響と考えられるため、実際には問題とならない。また、自然の堆積軟岩における初期のヤング率 $E_{sec,i}$ とピーク時の軸ひずみ $\epsilon_f$ に僅かに寸法効果が認められるが、工学的には無視できる程度だった。

以上により、比較的均質で亀裂の少ない堆積軟岩では、強度・変形特性に明瞭な寸法効果は認められず、通常行う直径が50mm程度の供試体を用いた三軸圧縮試験により、堆積軟岩から成る地盤の強度・変形特性が求められることがわかった。

(2) 岩盤せん断試験結果との比較

ここでは、サンプリングしたコアに対する三軸圧縮試験結果と岩盤せん断試験結果との相互関係を明らかにすることを旨として、両試験から得られた強度特性を比較するとともに、三軸圧縮試験結果に基づく応力ひずみモデルを用いた岩盤せん断試験の数値シミュレーションを行った。

1) 破壊時の応力の比較

岩盤せん断試験は、図2-2-3に示すように室内模型実験により行った。せん断面の大きさは30cm x 30cmで、原位置試験で一般的な60cm x 60cmと比較して1/2のスケールである。実験に用いた試料は、2-2-1の寸法効果に関する検討と同様に、砂質系および泥質系の人工軟岩と自然の堆積軟岩(シルト岩)である。本試験では、破壊のメカニズムを詳細に検討するため、せん断する岩盤ブロックのせん断面に作用する直応力とせん断応力の分

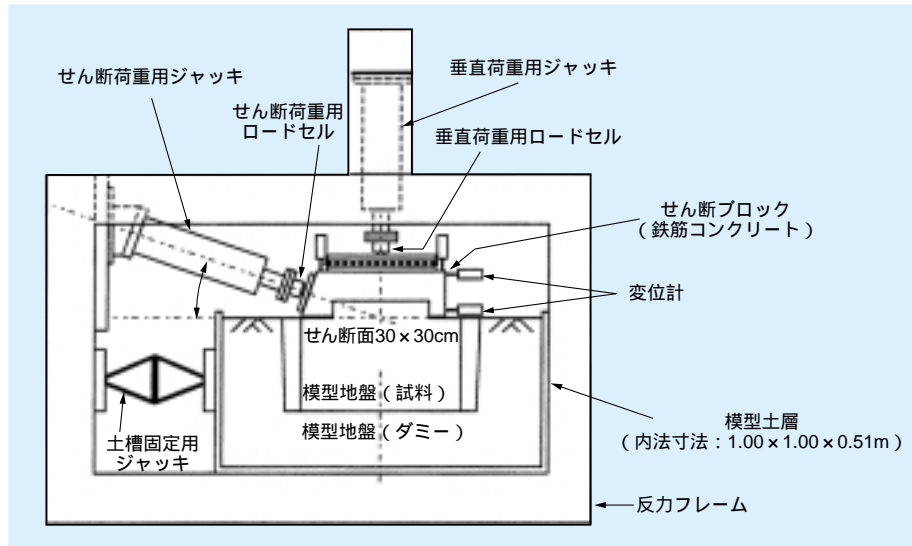


図2-2-3 岩盤せん断の模型実験装置<sup>(3)</sup>

布やひずみ分布の計測も行った<sup>(4)</sup>。

図2-2-4に岩盤せん断試験と三軸圧縮試験から得られた強度特性を比較した。これより、粒度が粗い砂質系の人工軟岩(配合S2とS3)では、直応力が2.5MPa以下の範囲でせん断強度に全般的な差がなく、粒度が細かい泥質系の人工軟岩(配合M2)と自然の堆積軟岩では、それぞれ0.5MPa、1.0MPa以下の領域で岩盤せん断試験による強度が三軸圧縮試験による強度よりかなり低く評価されることがわかる。

この原因を調べるために、岩盤せん断試験における破壊面上の応力分布やひずみ分布が計測された。その結果、破壊面上ではせん断破壊だけでなく引張り破壊も生じていることが主たる原因であることが明らかになった<sup>(3)</sup>。

## 2) 数値解析による検討

岩盤せん断試験から評価される強度特性の位置づけを検討することを目的として、岩盤せん断試験の有限要素法(FEM)による数値解析を実施した。岩盤の応力ひずみ関係は、破壊前は線形弾性、破壊後は完全塑性になるバイリニア型とした。地盤物性値は、三軸圧縮試験の結果を用いて定めた。

図2-2-5は岩盤せん断試験結果、岩盤せん断試験の数値解析結果、および三軸圧縮試験結果を比較したものである。図2-2-5によれば、岩盤せん断試験のシミュレーション結果は岩盤せん断試験結果とほぼ一致しているかまたはやや小さく、数値シミュレーションによりほぼ妥当

またはやや安全側の評価ができていることがわかる。また、岩盤せん断試験のシミュレーション結果は岩盤せん断試験結果と同様に三軸試験の結果と高い応力レベルで調和的だが、低い応力レベルでは小さくなる傾向がある。

数値シミュレーション結果を詳細に検討したところ、この原因は、1)と同様に引張り破壊の影響であることが明らかとなった。

## (3) 平板載荷試験結果との比較

ここでは、自然の堆積軟岩(シルト岩)地盤においてサンプリングした試料の三軸圧縮試験結果と平板載荷試験結果の相互関係を明らかにすることを目指して、三軸圧縮試験結果および原位置弾性波速度試験結果から地盤物性値を定め、原位置平板載荷試験結果のシミュレーション計算を行った。

### 1) 原位置平板載荷試験の概要

試験地点は、新第三紀鮮新統のシルト岩からなり、試験面近傍に割れ目は認められず、おおむね均質である。試験位置は、地表から約30m下の試掘坑内である。地下水面は地表面とほぼ一致している。平板載荷試験とともに、弾性波速度計測とブロックサンプリングした試料を用いて、三軸圧縮試験を実施した。

試掘坑内では、計4回の平板載荷試験を行った(表2-2-2)。Case1とCase2については変形試験のみを行い、Case3とCase4については変形試験の後に支持力試験を

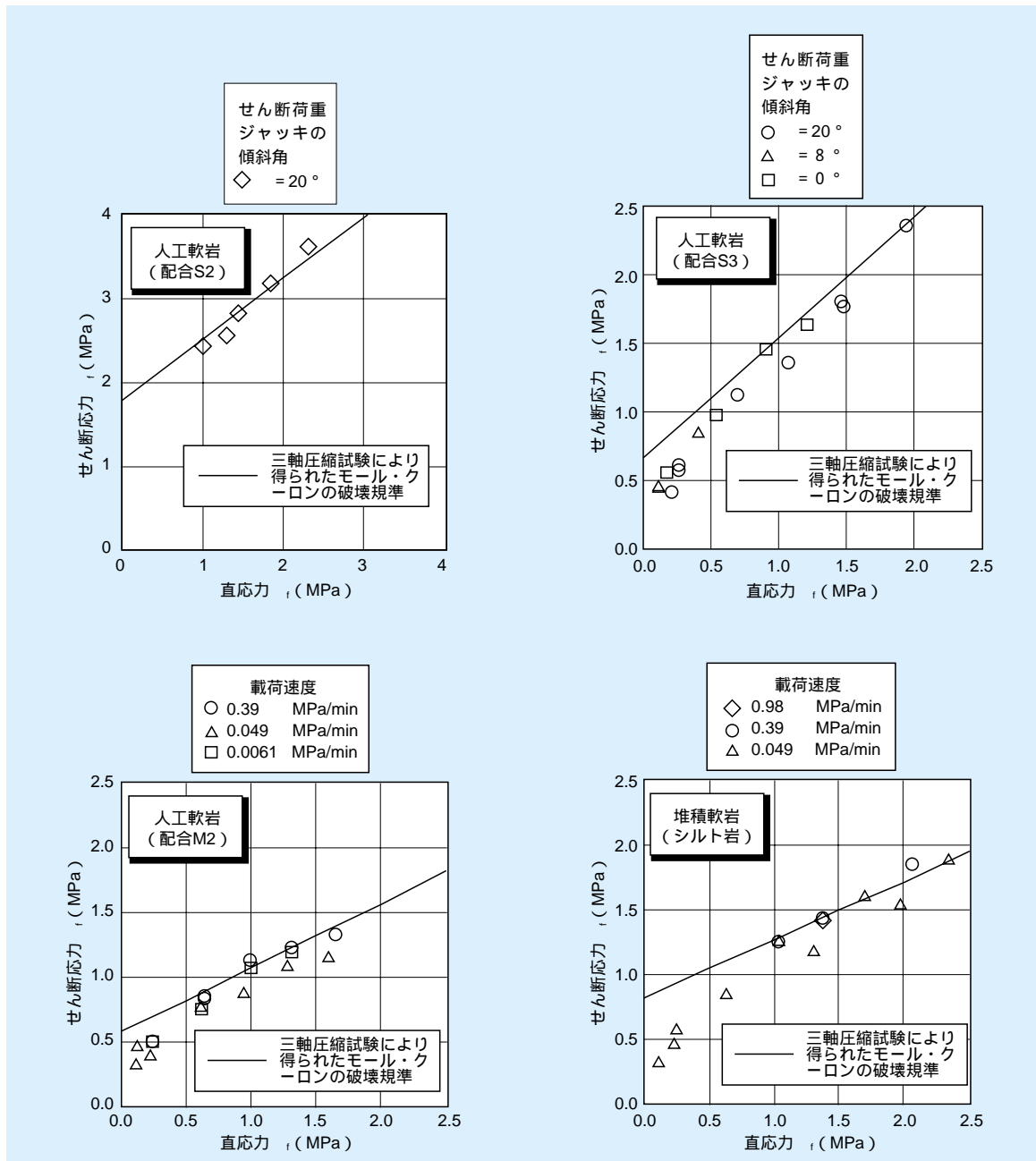


図2-2-4 岩盤せん断試験と三軸圧縮試験による強度の比較<sup>3)</sup>

行った。Case2のダイアフラムとは、地盤を等応力分布で載荷することを目的とした載荷板である。剛な載荷板を用いた場合、載荷板端部の応力集中による局所破壊から、弾性理論と整合しない可能性があるが、等応力の載荷ではこの問題を排除できる利点がある。Case4では、地盤中に水圧計を埋め込み、載荷中の間隙水圧の変化を測定した。

## 2) 変形特性の評価

原位置弾性波速度試験結果と三軸圧縮試験結果から岩

盤の応力ひずみ関係をモデル化し、有限要素法(FEM)により平板載荷試験のシミュレーション解析を行った。

Case4における載荷板直下の間隙水圧の計測結果などから、載荷時に載荷板直下の地盤内で発生した過剰間隙水圧は速やかに消散することが明らかとなったため<sup>5)</sup>、シミュレーション解析に用いる三軸圧縮試験結果は、圧密排水(CD)条件で得られた結果を用いた。また、原位置弾性波速度試験結果によれば、地盤表面付近のせん断波速度の低下が認められたが<sup>5)</sup>、このこともシミュレーション解析モデルに反映させた。

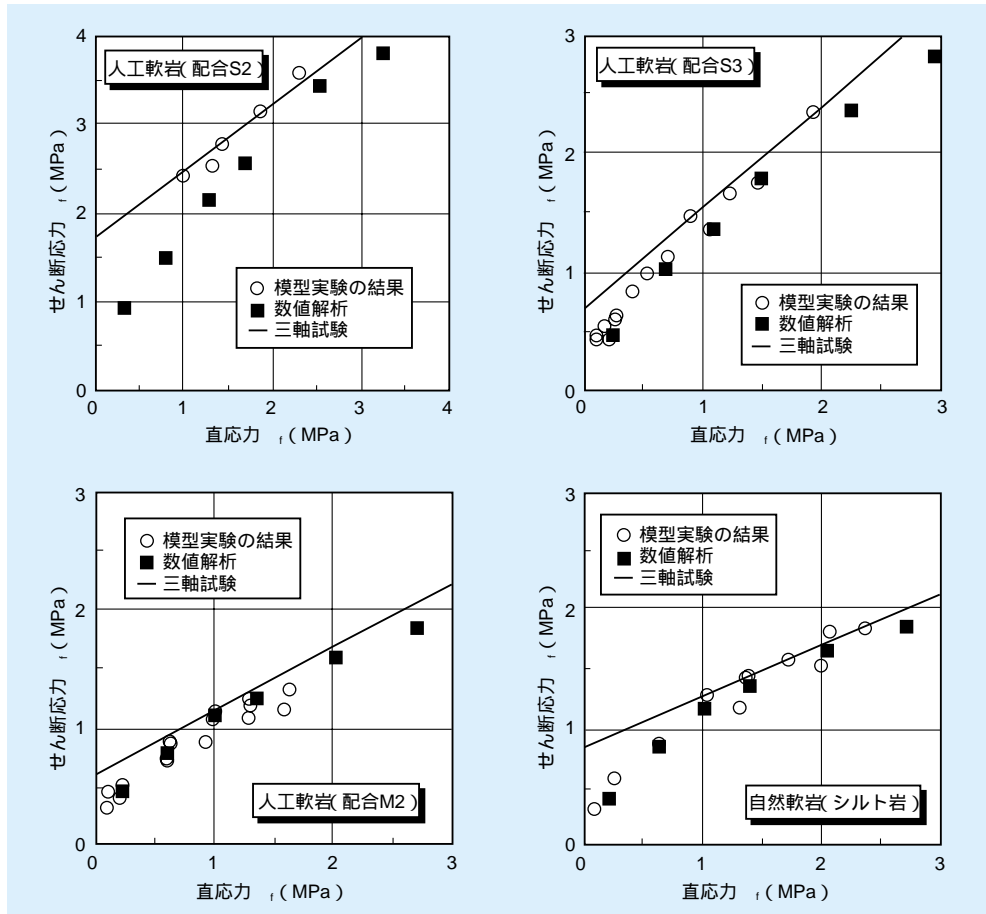


図2-2-5 数値解析の結果<sup>3)</sup>

表2-2-2 平板載荷試験一覧<sup>3)</sup>

Case	載荷板	寸法(cm)	試験内容	その他
1	円形剛板	直径60	変形試験のみ	地盤内ひずみ計測
2	円形ダイヤフラム	直径60	変形試験のみ	地盤内ひずみ計測
3	円形剛板	直径30	変形+支持力試験	
4	長方形剛板	30×90	変形+支持力試験	間隙水圧計測

図2-2-6にCase1、2、3の平板載荷試験の試験結果と数値解析の結果を示す。図より、Case1、2、3のいずれの場合も試験結果と解析結果の一致度が高いことがわかる。

### 3) 支持力特性の評価

Case3とCase4で行った平板載荷試験から得られる降伏支持力(平板載荷試験から得られる単位面積あたりの載荷重と沈下量の関係を両対数グラフ上にプロットし、グラフ上に現れる折れ曲がり点の単位面積あたりの載荷重)と計算により評価した降伏支持力を比較した。ただ

し、計算による降伏支持力は、2次元弾性地盤表面に帯基礎を載荷した場合に地盤の一部がせん断破壊するときの単位面積あたりの載荷重と定義した。

降伏支持力の実測値は、Case3とCase4でそれぞれ5.6MPa、6.2MPaである。一方、降伏支持力の計算値は5.9MPaであり、実測値とほぼ一致していた。

以上により、排水条件や地表面付近のせん断波速度の低下を考慮すれば、三軸試験結果により平板載荷試験結果から得られる変形特性を推定できること、支持力特性についても排水条件を考慮すれば推定できることがわかった。

### 2-2-2 岩盤用プレッシャーメータ試験による地盤物性評価

図2-2-7は、当所の開発した自己掘進式岩盤用プレッシャーメータ試験装置による試験方法を模式的に表した

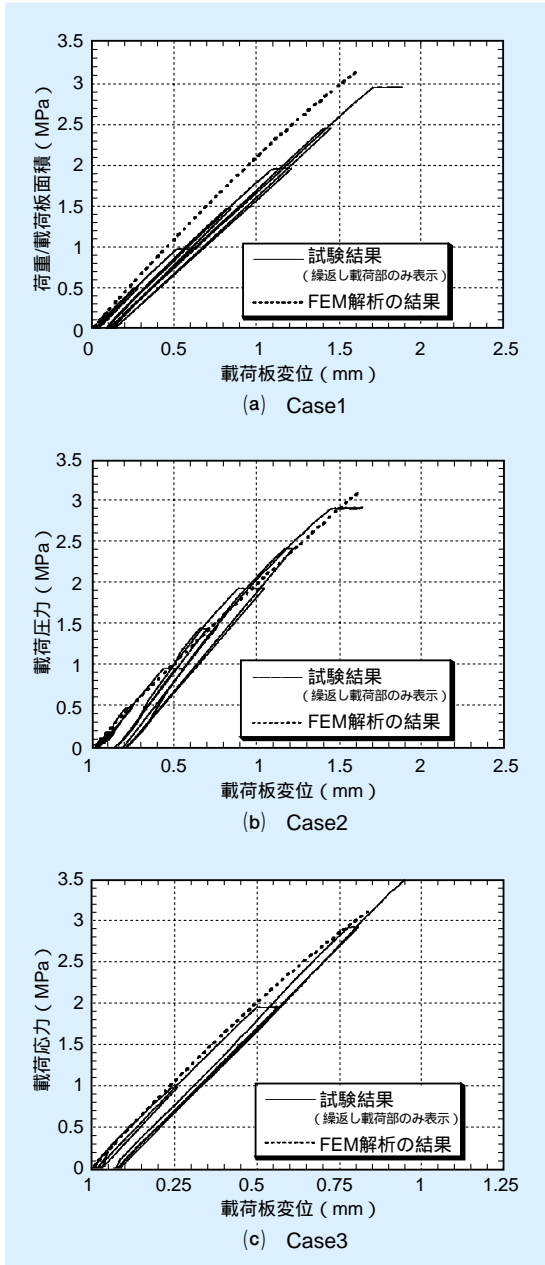


図2-2-6 試験の結果と解析結果の比較<sup>3)</sup>

ものである。装置本体は、下端に取り付けられた自己掘進用掘削装置によりボーリング孔底より地盤内に掘進し、加圧部分は地盤内に挿入される。加圧部分は、ゴム膜がゴム膜保護用のメタルシース (短冊状の薄い金属片) で覆われたものであり、地表面から供給している圧力によりゴム膜を膨らませることにより孔壁を加圧する。ゴム膜内の圧力と孔径の変化を測定することにより地盤の強度・変形特性を把握する。

図2-2-8は、当所で開発した軟質岩盤のためのプレッシャーメータ試験装置である。図中で、ボーリング機械

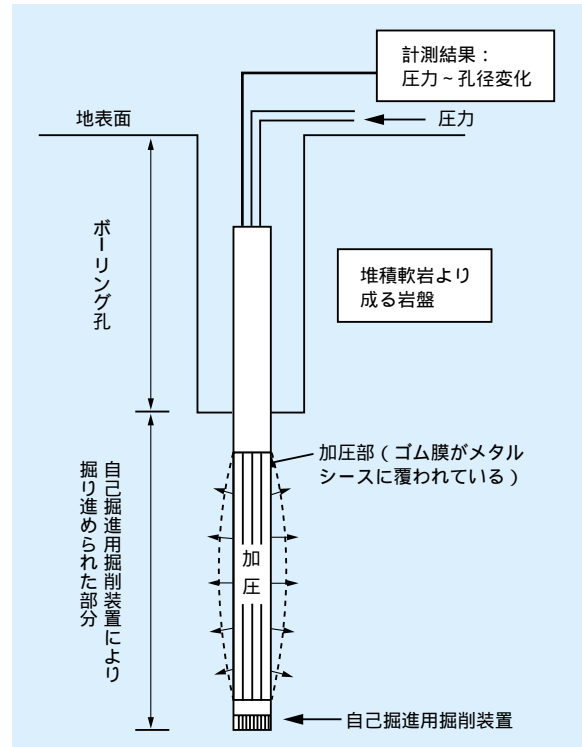


図2-2-7 当所で開発した自己掘進式岩盤用プレッシャーメータ試験装置による試験概要

のマストに支えられた棒状のものが装置本体であり、装置本体の下半分に見える黒い部分はメタルシースである。本装置では、測定値の信頼性を向上させるため、以下のような工夫がなされている。

- ① 孔壁の乱れの影響が小さくするため、メタルシースで覆われた加圧部分の地盤への挿入は、装置本体の先端に取り付けられた掘削装置による自己掘進により行われる(図2-2-7)。
- ② ボーリング孔径の変化の測定はメタルシースの変位を直接測定するなどの工夫をしており、変位の測定誤差が生じにくい。

図2-2-9(a)、(b)は、それぞれ、新鮮で均質なシルト岩に対するプレッシャーメータ試験より得られたせん断強度ならびに剛性のひずみ依存性を現地より採取した不攪乱試料に対する三軸試験結果から得られた結果と比較したものである。プレッシャーメータ試験から得られたせん断強度と剛性は、いずれも三軸試験結果から得られた結果よりやや小さいが、概略的な評価は可能であることがわかる。ただし、せん断強度評価を目的としたプレッ



図2-2-8 当所で開発した岩盤用プレッシャーメータの全景<sup>(1)</sup>

シャーメータ試験では加圧中に地盤内で引張り破壊が生じる場合があるので、実験結果を解釈する上で、このことに留意する必要がある<sup>(1)</sup>。

### 2-2-3 ま と め

比較的均質で亀裂の少ない堆積軟岩からなる岩盤を対象として、不攪乱試料に対する室内試験ならびに岩盤用プレッシャーメータ試験による地盤物性評価法を検討した。その結果次のような結論が得られた。

- ① 外見上均質で亀裂が目立たない堆積軟岩試料であれば三軸圧縮試験の結果に及ぼす寸法効果の影響は小さい。
- ② 岩盤せん断試験による岩盤のせん断強度は、直応力が小さい場合を除いて、三軸圧縮試験による供試体のせん断強度にほぼ一致していた。また、岩盤せん断試験と平板載荷試験の結果は、原位置弾性波速度や室内

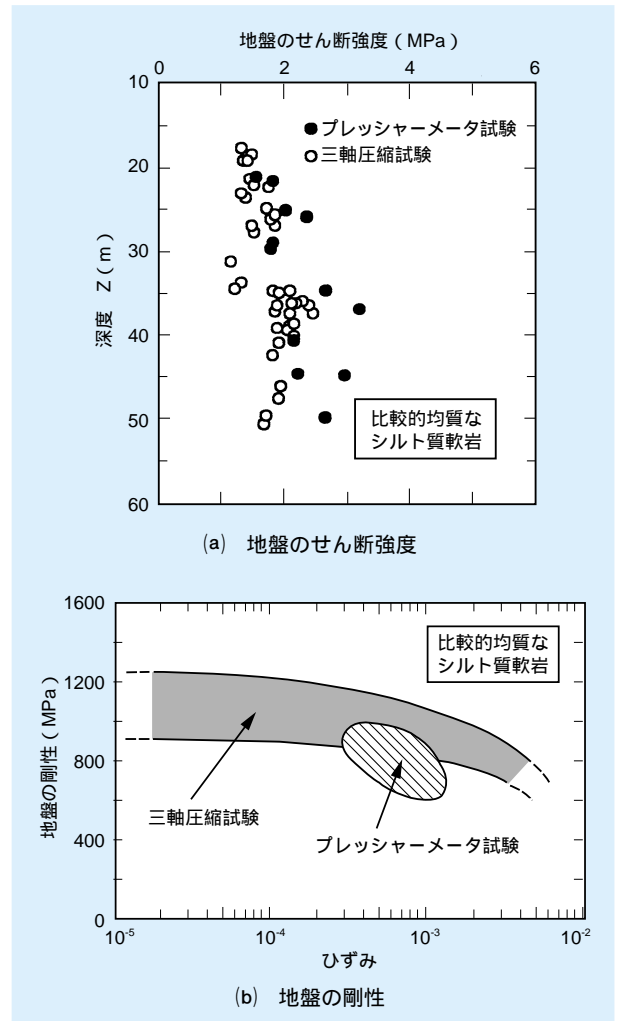


図2-2-9 岩盤用プレッシャーメータ試験と三軸圧縮試験による結果の比較<sup>(3)</sup>

要素試験によって評価される要素特性によって境界値問題として説明できることがわかった。

このことにより、今後更に精度向上に関する検討の余地は残されているものの、比較的均質な堆積軟岩においては、原位置から採取した不攪乱試料による室内試験結果から、従来試掘坑内で行われていた岩盤せん断試験結果と平板載荷試験結果を推定することが可能となった。

- ③ 岩盤用プレッシャーメータ試験においては、精度向上の余地や実験結果解釈上の留意点はあるものの、概略的な地盤のせん断強度や剛性の評価が可能であることがわかった。





第 3 章

防波護岸の耐波・耐震  
安定性評価技術

我孫子研究所 水理部 上席研究員 榊山 勉  
 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 金谷 守  
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 栃木 均  
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 河井 正  
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 工藤 康二  
 前我孫子研究所 上席研究員 研究参事 鹿島 遼一

3 - 1 防波護岸の設計の基本的な考え方 ..... 33  
 3 - 2 防波護岸の耐波安定性評価技術の高度化 ..... 34  
 3 - 3 防波護岸の耐震安定性評価技術の高度化 ..... 42



榊山 勉（1981年入所）  
 海岸・港湾構造物と波とに関わる研究のなかで、特に消波ブロックに作用する波力や護岸の越波の実験スケール効果をテーマにしてきた。越波現象に関しては数値計算モデルを構築した。現象の解明から設計への対応にわたる研究に取り組んでいる。



金谷 守（1984年入所）  
 入所以来、原子力発電所の新立地技術の研究開発に携わってきた。第四紀立地では、基礎地盤の安定性評価技術として地盤の有効応力解析手法を開発し、海上立地では、防波護岸の地震時変形解析手法を中心に研究を行ってきた。今後は、電力施設の性能設計に関する技術開発に取り組んでいきたい。



栃木 均（1985年入所）  
 これまで、原子力発電所の人工島式立地方式に係わる防波堤・護岸の耐震安定性に関する研究を行い、DEM-FEMハイブリッド手法によるケーソン式護岸の滑動解析など、消波ブロックとの動的相互作用を考慮した解析手法の検討を行った。今後は、ロックフィルダムなどの耐震性の問題に取り組んでいきたい。



河井 正（1993年入所）  
 入所以来これまで、原子力発電所の人工島式立地技術に係わる研究に参加し、特に、カリフォルニア大学デービス校において防波護岸の地震時変形を詳細に把握するための遠心力載荷模型実験を行ってきた。今後は、地盤・構造物系の地震時変形予測、耐震性能評価技術の開発に関する研究に取り組む予定である。

工藤 康二（16ページに掲載）

鹿島 遼一（8ページに掲載）

コラム1 遠心模型実験 ゴジラは東京湾に現れるか? ..... 50

田中 幸久（16ページに掲載）  
 河井 正（上記掲載）

## 3-1 防波護岸の設計の基本的な考え方

### 3-1-1 防波護岸に関する新たな設計概念

外洋に面した海域に構築される人工島式立地発電所の防波護岸は、外洋波浪を直接に受けるので、在来立地の陸地を防護する護岸に比べて重要度の高い護岸として設計する必要がある。人工島の防波護岸に関しては、それ自体は放射性物質の流出防止を目的とした構造物ではないが、これが損傷することによりプラントの安全上許容できない事象の発生(地震あるいは越波に起因する原子炉建屋周辺地盤内の地下水位上昇による建屋の安定性不足、越波による埋立土の流出による屋外安全系設備および屋外放射性流体内包設備基礎の支持機能損傷など)が想定されるため、然るべき機能が維持できる設計が必要となる。機能維持を検討するに当たり、対象とする自然外部事象は波浪と地震である。

防波護岸に要求される機能は、波浪や地震による護岸自身の崩壊を防止する耐波、耐震機能と、埋立地ならびに埋立地内の施設を護るのに必要な防波機能である。ここで、防波機能としては、1)越波を過度に生じさせるような変形を引き起こさず護岸の安定性を保持する機能、2)越波を抑制し、生じた越波水を安全に排水する機能が要求される。

防波護岸の設計の基本的な流れを図3-1-1に示す。ここでは、以下に示すような二段階の設計法を採用することにした。第一段階として、現行の設計法に則り「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>(1)</sup>に基づいて、所要の安全率を満足する基本断面の設計を行う。第二段階として、さらに厳しい耐力検討用外力に対して、上記1)と2)の防波機能を満足することを確認する<sup>(2)(3)</sup>。このため、まず波浪に対して基本断面を対象に耐力検討海象条件(耐力検討波)に対する消波工の変形および越波制御条件を満たすように構造の修正や排水路などの設定を行い、耐力検討波に対しても越波制御機能が維持される断面構造を決定する。次いで、この断面に対して地震(設計用限界地震)に対する応答解析を行い、ケーソン、背後地盤などの変形を評価する。最後に地震による変形が生じた場合を想定して、応答解析などに基づいて評価した変

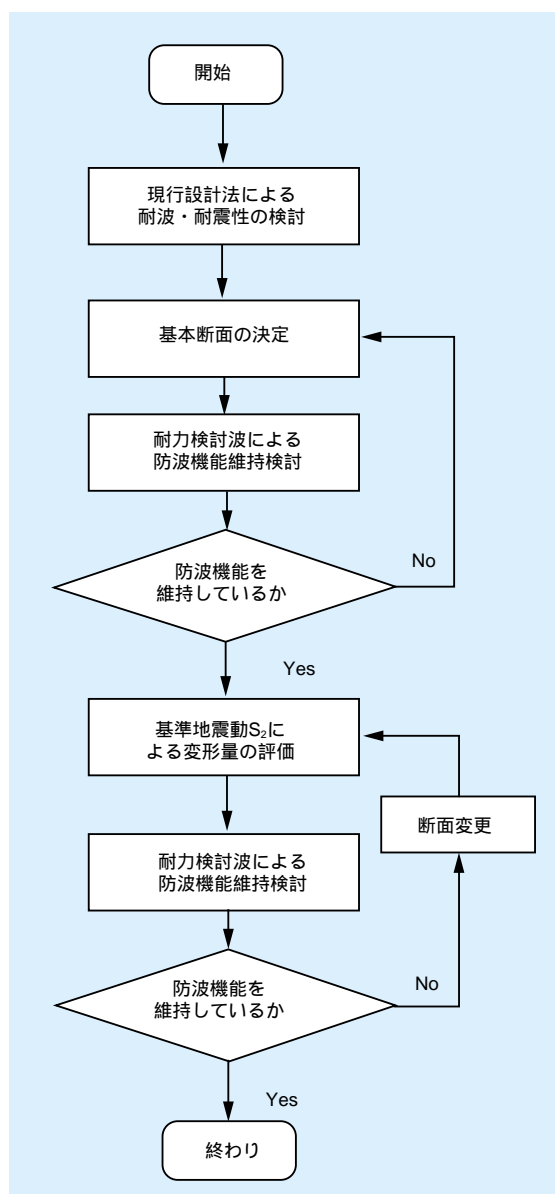


図3-1-1 防波護岸の設計の基本的な流れ

形後の断面が、耐力検討波に対し機能上問題を生じないことを確認し、最終的な護岸構造を決定する。

なお、耐力検討の段階では、波浪と地震を同時に作用させた機能維持の検討は、それぞれの再現期間を考慮した確率的検討から必要ないものとされており、先行事象として地震を想定し、地震により損傷を受けた防波護岸が所要の機能を確保しているかを検討すればよい。

### 3-1-2 防波護岸の基本設計

防波護岸の構造形式としては、消波工の変形後の修復性と越波の抑制とを考慮して、消波ブロック被覆式護岸を選定し、さらに越波水を排水するための大規模な越波排水路を備える、図3-1-2に示す構造を当面の設計対象とした<sup>(4)</sup>。

人工島式原子力発電所の防波護岸に対する2段階設計法の概念の成立性を確かめるために、以下の条件を設定して検討を進めた。人工島の設置水深を20mとし、基本設計条件として沖波条件で波高10m、周期16s(100年確率波)を採用した。また、耐力検討用外力の波浪条件としては、基本設計波高の1.5倍の沖波波高を有するきわめて希な厳しい波浪条件を設定した。図3-1-2の断面形状の設計には、水位として、朔望平均潮位差1.5m、高潮偏差を基本設計で1m、耐力検討条件で1.5mとした。基本設計波の沖波波高10mは、構造物設置水深では10.3mに、耐力検討波の沖波波高15mは12.8mとなる。設置位置での基本設計波高10.3mに対して、所要プロッ

クは、法面勾配を1:2としたときに80t型が必要となる。護岸パラペット天端高さは、許容越波流量(基本設計波に対して $0.05\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、耐力検討波に対して $0.2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )に対して、厳しい基本設計波の条件から決定された。越波排水路は、耐力検討波による越波水に対して余裕をもって排水できる水路断面を確保し、発電所敷地内への越波水の浸入を所定の流量以下に抑えるために敷地側の壁の高さを決定した。埋立地の地盤高さは、既往の考えに準じて津波を考慮し、6mと想定した。一方、ケーソンの幅は、以下の耐震設計から決定される。震度法に基づく静的解析により、ケーソンの滑動・転倒、ケーソンの端し圧によるマウンドのすべりに対する安全率を算定し、すべての安全率が基準値を満足することが要求される<sup>(1)</sup>。ここでは、設計震度として、水平震度 $K_H=0.2$ 、鉛直震度 $K_V=0.0$ を採用した。

以下においては、人工島式原子力発電所の防波護岸を対象に新たに提案した設計概念に対して、解決すべき耐波設計ならびに耐震設計に関わる研究課題とその検討結果を示す。

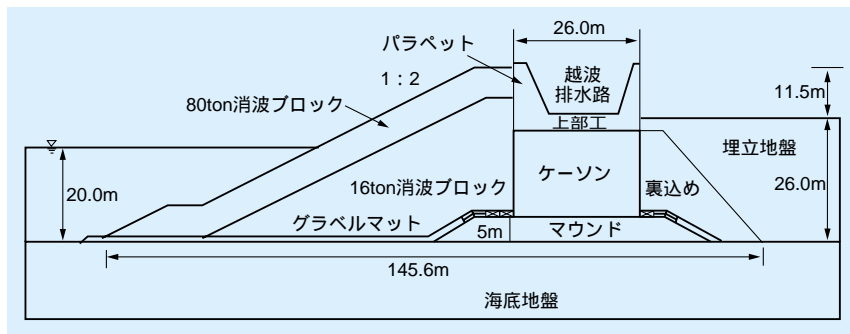


図3-1-2 防波護岸の断面図

## 3 - 2 防波護岸の耐波安定性評価技術の高度化

### 3-2-1 はじめに

人工島式立地発電所の防波護岸の設計に関して、3-1-1

で述べたように、その重要度を考慮して現行の設計法で設定される外力を越えるきわめて希な外力(耐力検討外力とよぶ)に対する護岸の機能維持を確認するという新たな設計概念を提案した。そこで、最初の課題となるの

は、基本設計波を越えるきわめて希な波である「耐力検討波」の設定に対する考え方と設定方法である。この耐力検討波に対する消波工の変形を許容した防波護岸の耐波安定性の評価、護岸の機能維持の観点から越波量の評価が耐波設計技術の高度化のための課題となる。

以下では、1) 耐力検討波の設定、2) 消波工の変形の評価、3) 越波特性などに関する検討結果を示す。

### 3-2-2 耐力検討波の設定

耐力検討波は、基本設計波(100年確率波)を越えるきわめて希な波に対して、防波護岸に多少の変形は生じても防波機能が維持されることを確認するための機能維持検討に用いる波浪条件である。基本設計波高に対して、適切に割り増しをすることにより設定する。確率論的な考えに立てば、再現期間1000年オーダーの波を想定することになる。

このような超長期の確率波を推定するためには、ここでは、波浪データよりも長い期間にわたって観測データが得られている気象擾乱を用いて波浪推算を行う方法を採用した。まず、太平洋側に高波浪をもたらす台風と日本海側に高波浪をもたらす低気圧を対象に確率的な気象擾乱モデルを用いて風、気圧の場を算出する。さらに、これらの結果を外力条件として波浪推算モデル<sup>(1)</sup>を用いて波浪を推算する。台風は気圧分布を同心円でモデル化できる。しかし、低気圧の気圧分布は台風とは性質が異なるので、低気圧に対しては、長軸と短軸の異なる楕円を4分割して組み合わせた楕円状の気圧分布を仮定した。これらの台風や低気圧の気象擾乱について、発生から移動を確率的にモデル化し、移動にともなう中心気圧、大きさなどの属性をモンテカルロ法を用いて推定し、仮定の気象擾乱をシミュレートする<sup>(2)(3)</sup>。

図3-2-1は、台風のシミュレーションの1例であり、1年間に発生した台風の経路と台風半径を示している。台風の北上にともなう転向や減衰などが、実際のとり得る経路とよく類似している。

図3-2-2は、1つの低気圧の経路と大きさの変化をシミュレートした例である。作図の便宜上、楕円の長軸と短軸の頂点を結んだ四角形で表示してある。低気圧は時間の経過につれて発達しながら西から北東へ進行し、楕円長軸の傾斜角が反時計方向に回転することが再現され

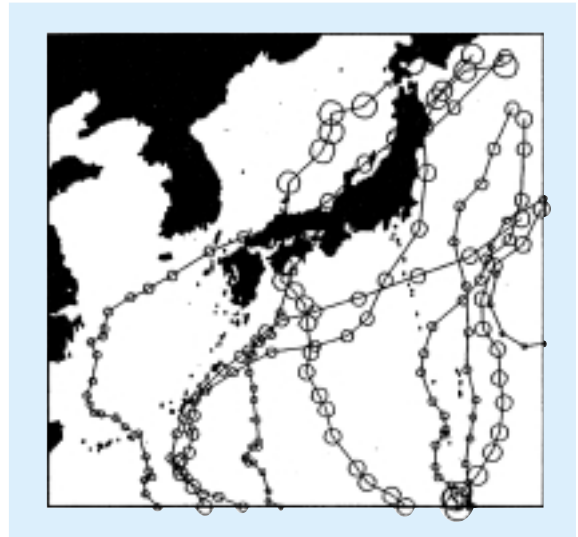


図3-2-1 台風経路のシミュレーション例<sup>(6)</sup>

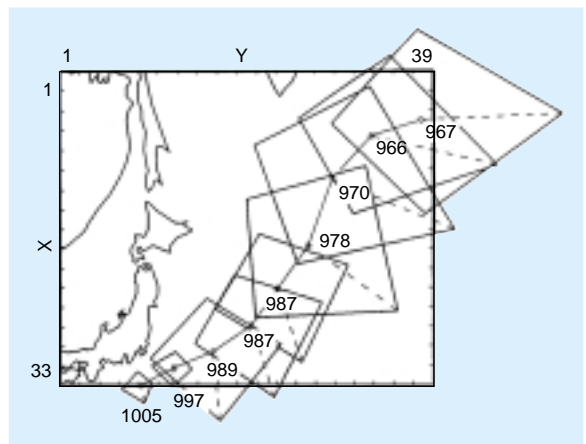


図3-2-2 低気圧経路のシミュレーション例<sup>(7)</sup>

ている。

このような気象擾乱を1000年間分発生させ、それぞれの風、気圧の場を外力条件として用いて波浪推算モデルにより特定地点での波高、周期を推算する。これらを仮定の波浪観測データとして、通常の観測で得られたデータと同様に極値統計解析を行い、基本設計波である100年確率波と耐力検討波の目安となる1000年確率波を推定する。

表3-2-1に推定結果を示す。100年確率波高 $H_{100}$ に対する1000年確率波高 $H_{1000}$ の比は、台風の場合は1.1～1.3、低気圧の場合は1.2～1.4であった。基本設計波高に対する耐力検討波高の割り増率は、通常1.2～1.3、最大でも1.5程度で設定することができる<sup>(2)</sup>。気象擾乱に

表3-2-1 100年確率波に対する1000年確率波の波高比と周期の比較

(a) 波高比

	$H_{1000} / H_{100}$	計算対象地点
確率的台風モデル	1.1 ~ 1.3	福島沖、石廊崎、高知沖、油津、喜屋武岬
確率的低気圧モデル	1.2 ~ 1.4	福島、柏崎、直江津

(b) 周期

	$T_{100}$	$T_{1000}$	計算対象地点
確率的台風モデル	15 ~ 16s	16 ~ 17s	石廊崎沖
確率的低気圧モデル	13 ~ 14s 12 ~ 14s	16s 14 ~ 15s	福島 柏崎、直江津

関する確率モデルを用いた結果は、これらの結果の範囲とほぼ一致し、耐力検討波の設定に確率論的な観点からの説明ができた。また、周期については、1000 確率波のような超長期の周期を予測するための情報がこれまでなかったが、100 年確率波の周期よりも 1 ~ 2 秒程度長くなることが明らかになった。

### 3-2-3 消波工の変形の評価

これまで、防波護岸の消波工に使われる消波ブロックなどの変形を定量的に評価するに当たっては、水理実験で消波ブロックの移動個数を調べ、移動個数の検査領域内の消波ブロック総数に対する比率で定義された被害率が用いられてきた。ここで、消波ブロック 1 個の長さ以上移動したものを移動したとみなしている。従来のように、消波ブロックが動くかどうかの初期の移動段階のみを対象とする場合にはこのような被害率の定義で充分であったが、消波ブロックの一部が移動しても構造物の重要度に応じて機能が失われなければよいという考え方に立てば、相対的な量で被災と判断するのは妥当ではない。また、この定義では被害率が法面勾配や被覆材の総数に依存するため、異なる断面の研究結果と直接比較することが困難である。

そこで、本研究では消波工の変形量の評価に当たって図 3-2-3 に示すように消波工の侵食面積  $A$  を変形量のパラメータと取り、次式で定義される damage level  $S$  を用いることにした<sup>(4)</sup>。

$$S = \frac{A}{D_n^2}$$

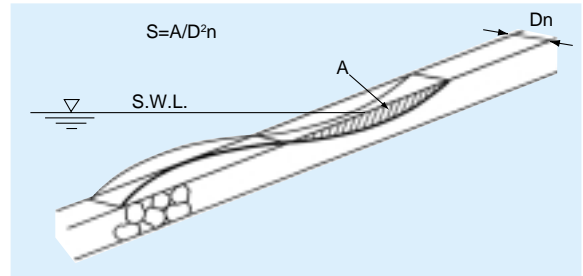


図3-2-3 変形レベルの定義<sup>(7)</sup>

ここに、 $D_n = (W / \rho)^{1/3}$  は消波ブロックを同重量の立方体に置き換えた場合の 1 辺の長さを表す。W は消波ブロックの重量、 $\rho$  は消波ブロックの単位体積当たりの重量である。したがって、damage level  $S$  は幅  $D_n$  当たりの侵食面積内の消波ブロック移動個数を示す。ただし、消波工の変形を必ずしもそのまま被災とみなさないため、damage level  $S$  を本研究では“変形レベル  $S$ ”と呼ぶことにした<sup>(5)</sup>。

本研究では、防波護岸の消波ブロックの変形量と波浪条件との関係について、模型縮尺 1/22.7、1/60、1/87.5 の 3 種類の断面 2 次元造波水路実験と模型縮尺 1/88 の 3 次元多方向不規則波水槽実験を実施した。ここでは主として断面 2 次元造波水路実験に基づいた検討結果を紹介する。

図 3-2-4 は、当研究所の所有する、長さ 205m、幅 3.4m、深さ 6.0m の大型造波水路を使用して実施した防波護岸の実験の様子を示したものである。実験では、設計波高以上の高波浪の作用による消波工の断面形状の変化を調べた。また同時に後述する護岸の機能維持を調べるために、消波工の変形にともなう越波量の変化を調べた。

図 3-2-5 は、基本設計波を越える大きな波の作用により消波工が変形した前後の断面形状を比較したものである。実験結果の変形レベル  $S$  の値は 12 であった。この実験では波の作用を 3000 波まで行った。実際の波の作用時間に換算すると約 13 時間に相当する。実際にはこのような高波浪は 13 時間も長時間にわたって作用するものではないが、消波工の変形特性を把握するために、同一の波浪条件のもとで長時間の波を作用させて、消波工の変形の様子を調べた。

図 3-2-6 は基本設計波高  $H_D$  を越える種々の波高  $H$  の波を作用させた場合の変形レベル  $S$  の時間変化を示した



図3-2-4 防波護岸の大型模型水理実験

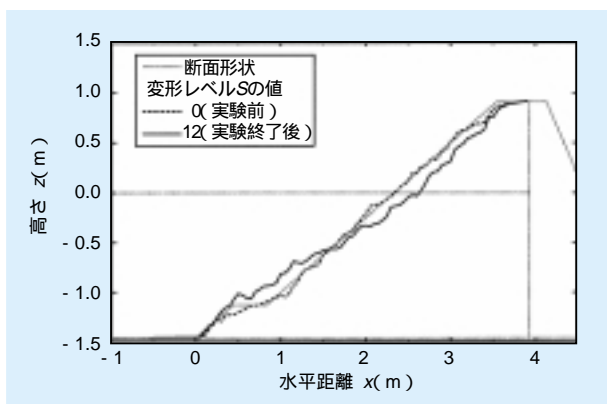


図3-2-5 防波護岸消波工の変形形状

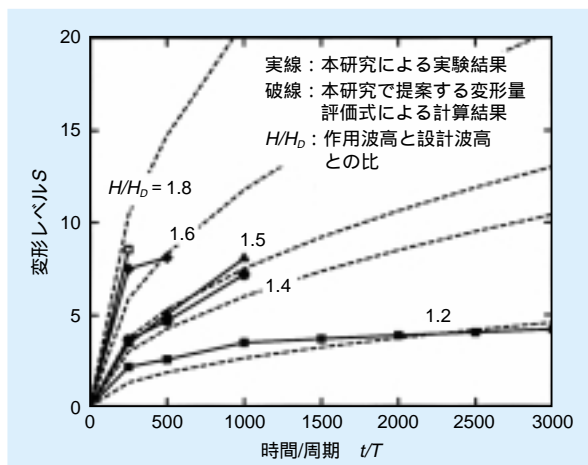


図3-2-6 消波工の断面変形の経時変化と変形量評価式による推定値との比較

ものである。点線で示した結果は、本研究で行った数多くの実験結果を整理して作成した変形量評価式<sup>(6)</sup>を用いて推定した結果である。この変形量評価式を用いて、基

本設計波を越える任意の波高、周期の波が作用する場合に、消波工の断面形状の変化を、波の作用時間に応じて推定できる。また、本評価式は波の波高や周期が時間的に変化した場合にも適用可能である。

基本設計波高 $H_0$ に対して安定な消波ブロックを用いているので、消波工の変形は波作用初期の若干の移動を除いてほとんどないので掲載していない。消波工の変形は、基本設計波高を越える波高の大きさに応じて大きくなる。また、変形の時間的な変化は、変形が進むにつれて変形の進行が緩やかになる。このことは、安定限界を超える波浪に対して、消波工が急激に破壊することはなく、防波護岸に波に対する耐力の余裕があることを意味している。また、本研究で提案した変形量評価式により消波工の変形を定量的に推定することができることが確認できた。

実際には、100年確率波を対象とする基本設計波や1000年オーダーの確率波に相当する耐力検討波が一定の波高で長時間にわたって作用するのではなく、波高や周期が変化する一時化(ひとしけ)中のピークとして出現する。

図3-2-7は、耐力検討波 $H_0=15\text{m}$ を含む一時化の波高の時間的な変化をモデル化した波高の経時変化を示したものである。一時化のピーク値として耐力検討波の波高を設定し、これが来襲する前後で波高の増減を模擬したものである。

図3-2-8は、この一時化の波の作用による防波護岸の消波工の変形について、変形レベルSの時間変化を示し

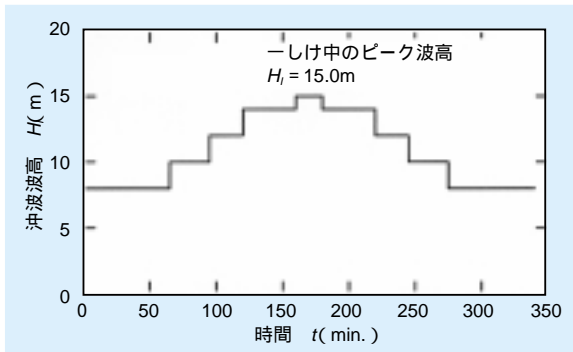


図3-2-7 モデル時系列

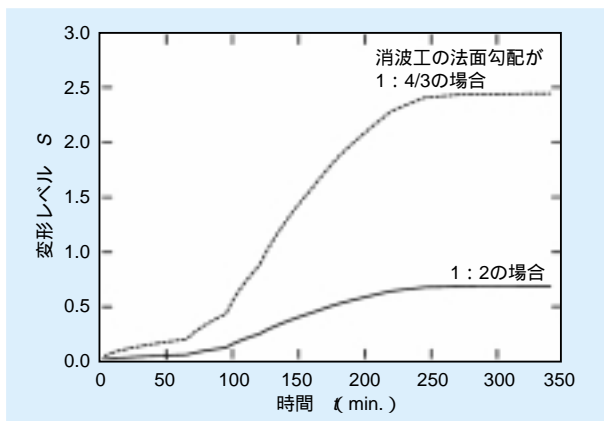


図3-2-8 変形レベルの経時変化

たものである。防波護岸の消波工の法面勾配は、1:2であり、変形レベルは $S < 1$ と比較的小さな値であることが推定された。参考のために、国内で標準的に用いられている法面勾配の1:4/3の消波工に対する推定結果も例示した。法面勾配が急になり変形しやすくなった場合でも変形レベルは $S = 2.4$ である。基礎的な実験で調べた図3-2-5の $S = 12$ の結果に比べて変形レベル $S$ の値は小さく、実際の波浪に対しては消波工の変形は非常に小さいものと推測できる。このことは、消波工被覆護岸が設計波を越える波浪により急激に破壊に至ることはなく、構造的に耐力を有していることを示すものである。

### 3-2-4 越波特性

#### (1) 消波護岸の越波に関する水理実験

基本設計波高を越える高波浪に対して、防波護岸の機能維持を確保できる範囲の消波工の変形を許容するという設計概念から、消波工の変形にともなう越波流量の変化を水理実験により調べた。

図3-2-9は、消波工の変形にともなう越波流量の変化を示したものである。この結果は、一定の波高の波が作用する条件のもとで、消波工の変形にともなう越波流量の変化を示したものである。同図では2種類の異なる縮尺模型を用いた実験結果を示した。波高が大きくなるにしたがって、越波流量、変形レベルともに増加する。一定の波高の結果について変形レベルと越波流量との関係を見ると、変形レベル $S$ が大きくなり変形が進むにしたがって越波流量も増加する傾向にある。その増加率は、変形が小さい初期の越波流量の最大2倍程度であることがわかった。

さらに、縮尺模型の異なる2種類の実験結果を比較すると、小スケールの実験結果の越波流量のほうが小さくなっていることがわかる。これは消波工による波のエネルギー減衰に実験スケールの影響があるためである。通常、水理実験では慣性力と重力の比を実物値と模型値で一致させた、フルードの相似則に従って実験諸量を定めて実験を行う。この場合、粘性力に関する相似則は満足されていないので、粘性力による波のエネルギー減衰に関わる水理実験では模型縮尺の影響(実験スケール効果とよぶ)が出る場合がある。特に、消波工内で著しいエネルギー減衰がある現象には実験スケール効果が現れる可能性が高い。そこで、本研究では消波護岸の越波流量に及ぼす実験スケール効果について検討を加えた。

図3-2-10は3種類の縮尺模型を用いた越波流量に関する実験結果を越波流量とレイノルズ数(慣性力と粘性力との比)との関係で表したものである。3種類の縮尺模型実験結果を、実線で示した同じ波高のもとで比較す

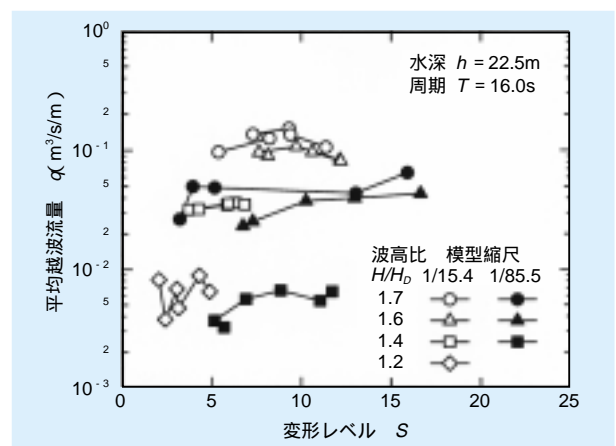


図3-2-9 消波工の変形にともなう越波流量の変化



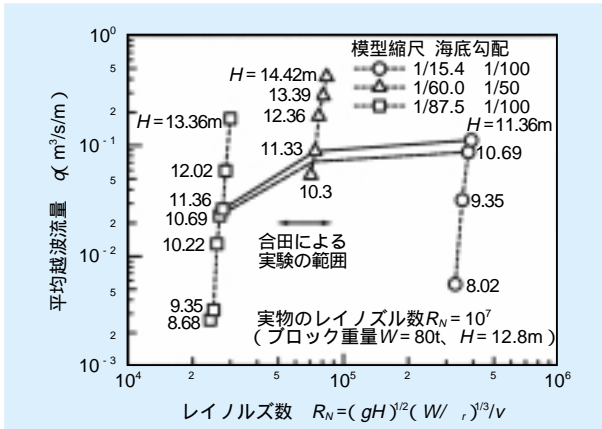


図3-2-10 越波流量に関する実験スケール効果

ると、レイノルズ数が大きくなるにしたがって越波流量も増加する傾向にある。しかし、その増加率は緩やかになり、ある程度の大きさの実験を行えば実験スケールの影響が小さくなることを示している。本実験結果から、この実験スケールの影響がないレイノルズ数を限界レイノルズ数  $R_{NC}$  と定義し、次の値が妥当であると判断した。この限界レイノルズ数以上で実験を行えば越波量に関する再現性は十分に保証されるものと考えられる。

$$R_{NC} = \frac{\sqrt{gH}(W/\gamma r)^{1/3}}{\nu} = 5 \times 10^4 \sim 10^5$$

ここに、 $g$ は重力の加速度を表し、 $\nu$ は動粘性係数を表す。

図3-2-11は、限界レイノルズ数を満足する消波ブロックと波高の大きさとの関係を示したものである。通常の模型実験では安定した重量の消波ブロックを使用するので、重量  $W$  と波高  $H$  との関係は法面勾配の余接

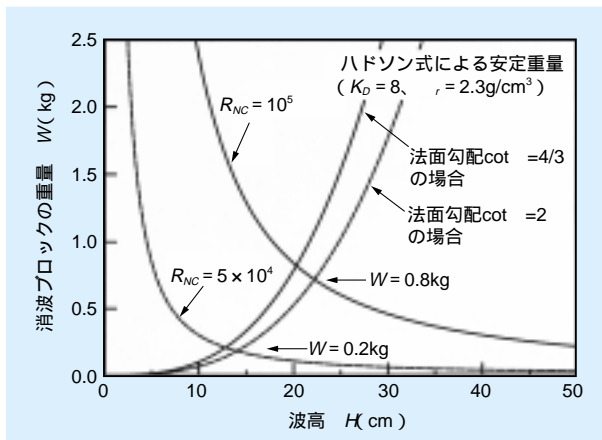


図3-2-11 スケール効果が無視できる消波ブロックの所要重量

$\cot$  をパラメタとして表される。実験スケール効果を回避するためには、 $R_{NC} = 10^5$  の曲線で示されるように、約 0.8kg の消波ブロック(例えば、テトラポッドの高さで約 11cm)を使用し、作用波高は  $H = 20$ cm 程度とする必要がある。ただし、図 3-2-10 から推定されるように、 $R_N = 5 \times 10^4$  程度の実験でも越波流量のオーダーが変わるような過小評価にはならない。このことから、図中の  $R_{NC} = 5 \times 10^4$  のとの交点から、少なくとも消波ブロックの重量は約 0.2kg(テトラポッドの高さで約 7cm)、波高は 13cm 程度で実験を行うことが望ましい。

### (2) 消波護岸の越波に関する数値解析コードの開発と適用(解析コード名 PS-WAVE)

上述のように、これまで越波に関する検討は主として水理実験により行われてきた。しかし、水理実験における実験スケール効果の問題の解明や越波量の推定精度の向上、さらに将来的には水理実験に代わる手段として使用することを目的に、消波ブロックによる波の変形を計算できる数値解析コード(コード名 PS-WAVE)を開発した<sup>(7)(8)</sup>。

本数値解析コードは有限差分法に基づき構築され、砕波や越波時の複雑な水面形状が計算可能である。本解析コードの概要は以下の通りである。透過性構造物の幾何学的・物理的效果を Navier-Stokes 方程式に取り込んだポラスポディモデルの支配方程式を基本とし、水面形状の追跡計算に VOF (Volume of Fluid) 法<sup>(9)</sup>を適用した。自由表面運動は流体の体積率を表す VOF 関数の移流計算で行う。また、造波境界条件には有限振幅波理論の摂動解を適用した。

図 3-2-12 は海底斜面上で砕波した波が消波護岸を越波する様子を計算したものである。水中の色の変化は圧力の変化を表す。本解析コードを用いて流速や圧力も同時に計算できる。本計算では規則的な波を対象としている。本計算結果による越波流量と水理実験結果の越波流量との差は約 20% であった。越波は変動の大きい現象であり、越波流量のオーダーの推定が基本的な課題であることから、本解析コードによる越波流量の推定精度は実務上充分であることが確認できた。

### (3) 越波現地観測

護岸の越波流量は、水理実験に基づく越波流量算定<sup>(10)</sup>

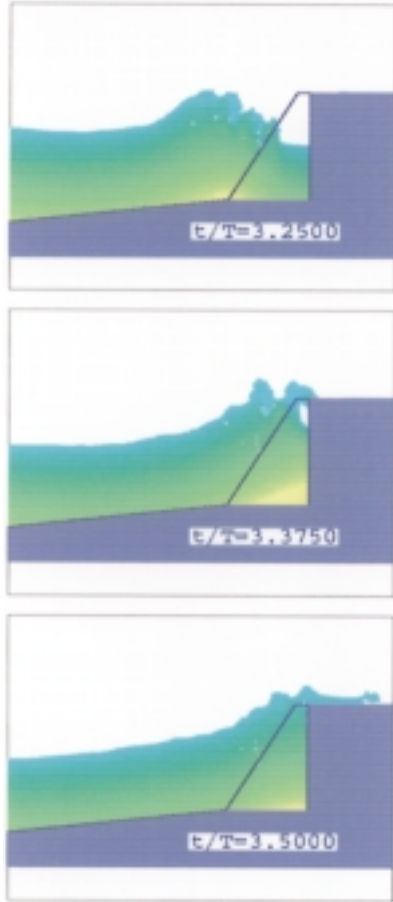


図3-2-12 越波の数値計算例

やこの算定図を定式化した実験式<sup>(1)</sup>を用いて算定している。しかし、人工島式原子力発電所の防波護岸のような重要な構造物や、上記の方法の適用範囲外の条件に対し

ては水理実験により確認する必要がある。消波護岸の越波のように波のエネルギー減衰を伴う水理実験ではレイノルズ数が小さいと越波量を過小評価する場合がある。実験スケール効果を検討するに当たっては、縮尺を変えた実験データに加えて現地観測データが重要な役割を果たす。しかし、越波の現地観測事例はきわめて少ない<sup>(2)</sup>。また、不規則波を対象にした水理模型実験結果と現地観測による越波量との比較も行われていない。

そこで、越波に関する現地データの取得方法の検討や現地観測結果と水理実験結果との比較を行うために現地観測を行った<sup>(3)</sup>。現地観測は、1996年1月11日から3月2日期间に、福井港の護岸(総延長2350m)のほぼ中央において行った。護岸の前面水深は8.0mで、被覆工には16t型の消波ブロックが使用されている。図3-2-13に観測施設と越波の状況を示す。幅10mの越波排水路を兼ねた管理用道路を横断方向に遮蔽し、長さ30mの観測施設を建設した。越波流量はこの30mの区間に越波して貯まった水を長さ8m、幅2mの水路内の堰で排水させながら、堰の越流水深を測定することにより算定した。この測定方法により、通常設計の指針に用いられている平均越波流量(1時間もしくは2時間の平均値、越波流量の指標になっているが、実際には越波現象の実態を現していない)のみならず、高波が連続して続く数波(時間にして30秒から1分間の平均値で、より実態に近い現象を把握できる)の越波流量(短時間越波流量とよぶ)を求めることができた。



図3-2-13 越波量現地観測

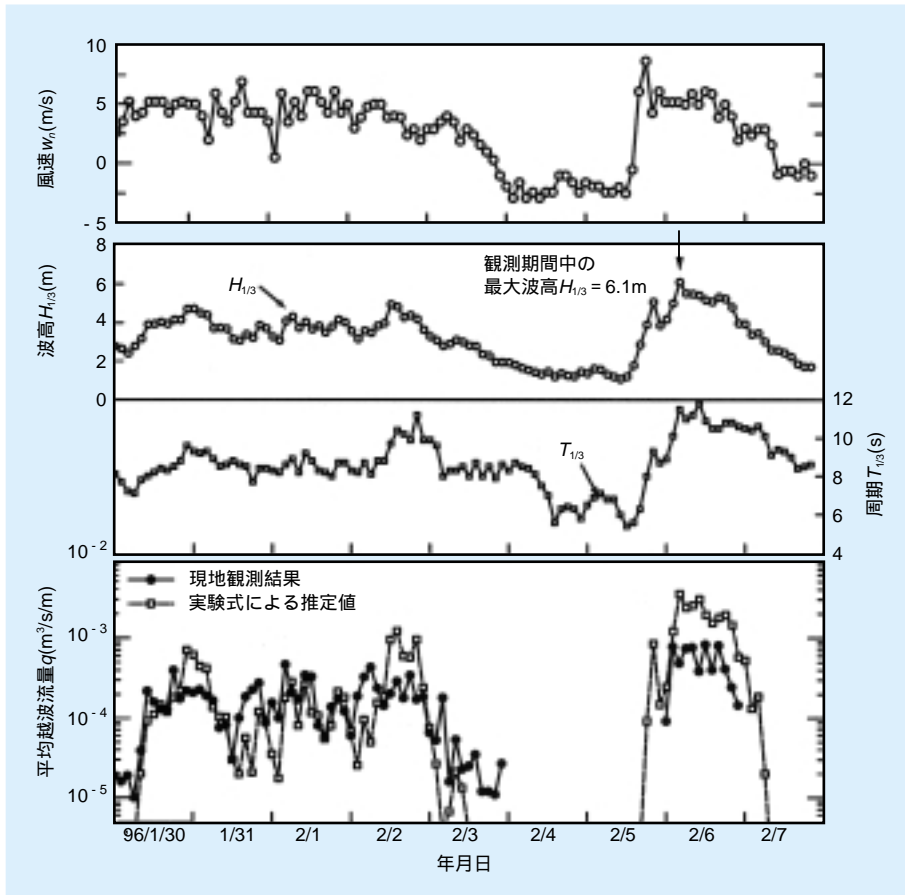


図3-2-14 現地観測結果

図3-2-14に現地観測結果を示す。上段から風速の護岸に対する垂直成分、中段に波高と周期、下段に観測結果の平均越波流量(1時間平均値)の経時変化と波浪条件から実験式を用いて算出した平均越波流量の経時変化を示した。観測された平均越波流量の変化は波高と周期の変化に対応し、実験式の傾向とほぼ一致している。

短時間越波流量は平均越波流量の大きさに依存するが、平均越波流量が $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ から $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の範囲で、これらの10倍から数倍となることが分かった。このような短時間越波流量の情報は、越波排水路の設計に考慮される。

### 3-2-5 まとめ

人工島式立地原子力発電所の防波護岸の耐波設計技術を高度化するために、耐波機能、防波機能に関する検討を実施した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- ① 耐力検討外力の設定方法に関して、確率的台風モデル、確率的低気圧モデルと波浪推算モデルを適用し、100年確率波である基本設計波に対する1000年確率波の波高の割増率や周期の増加分を示し、その設定方法の妥当性を確認した。
- ② 防波護岸の消波工の変形量を評価するために、広範条件の下での水理実験結果から作成した変形量評価式の適用性を基礎的な波浪条件のもとで検証した。また、実際のな波浪条件のもとでは消波工の変形量は小さく、防波護岸の消波工が設計波を越える波浪に対して構造的に耐力があることが明らかになった。
- ③ 消波工の変形に伴う越波流量の変化を把握し、越波に対する防波機能が維持されることを確認した。
- ④ 越波に関して、水理実験の実施、数値解析コードの適用、現地観測など多くの観点から検討し、人工島式発電所の重要構造物である防波護岸の防波機能としての越波制御、越波排水路の設計に反映するための基本的情報を詳細に取得できた。

## 3 - 3 防波護岸の耐震安定性 評価技術の高度化

### 3-3-1 はじめに

機能維持の観点から防波護岸の耐震性を考えた場合、3-1-1に示したように、現行の設計法で設計された防波護岸の基本断面に対して、地震(設計用限界地震)によって変形を生じた後の防波機能、とりわけ越波によって敷地が過度に浸水することを防ぐ越波防止機能を確保できるかどうかを適切に評価することが要求される。この場合、防波護岸が地震を受けたときの変形量を高い精度で予測することが重要となる。人工島式原子力発電所では、防波護岸も発電プラント本体と同様に、海底の岩盤上に本体を設置することが基本とされているが、海底砂層の厚さや密度条件、必要に応じて海底地盤を改良することなどにより、要求される機能を維持できる範囲内に地震時変形を留めることも可能であると考えられる。

以下では、主に防波護岸直下に海底砂層が存在する条件を想定し、(1)地震時における防波護岸の変形挙動を把握するための模型振動実験、(2)防波護岸の地震時変形を数値解析によって予測するための解析手法の開発とその適用性の検証、(3)これらの成果に基づく実規模防波護岸の地震時変形量の予測と機能維持の検討、を行った結果について示す。

### 3-3-2 遠心載荷模型振動実験による防波護岸の地震時変形挙動の把握

地震による防波護岸の変形モードを把握し、変形量を適切に評価する方法のひとつとして、模型振動実験による検討がある。この場合の実験手法としては、1Gの重力場において可能な限り実防波護岸と幾何学的に相似な模型を作成し振動を加える方法と、模型に大きな遠心力をかけ、幾何学的に相似な模型内により実物に近い応力場を再現した状態で振動を加える方法が挙げられる。しかし、地盤材料のように強度・変形特性が拘束圧すなわち応力レベルに依存する材料を含む模型の変形問題を対

象とする場合には、後者の方法を用いることが、変形量の定量的評価という観点からも有効であるといえる。したがって、本研究では、遠心力載荷試験装置(コラム参照)を用いた防波護岸の模型振動実験を実施した<sup>(1)</sup>。

#### (1) 模型実験の概要

実験には、世界最大級のカリフォルニア大学デービス校の遠心載荷装置(有効回転半径9.1m、最大遠心加速度53G、最大搭載重量4.9ton)を用いた。実験は、図3-3-1に示す防波護岸のモデルを土槽内に作成し、30Gの遠心加速度のもとで加振する。模型は、実規模防波護岸を1/120に縮尺したモデルであり、遠心加速度が30Gであることから、実物に対して1/4(=30/120)のスケールおよび応力場を再現した実験に相当する。今回の実験では、海底砂層の厚さ(実規模換算で0m~5m)、海底砂層の密度(相対密度60%~90%)、海底砂層の改良範囲(マウンド直下~消波ブロック下)を変化させた実験を行い、それぞれが防波護岸の地震時変形に及ぼす影響を比較した。加振時の波形は、振動数約90Hz、波数12波の正弦波とし、ひとつのモデルに対して最大加速度振幅を3G、10G、15Gと順次増加させる多段階加振を行った。

#### (2) 実験結果の考察

振動による防波護岸の変形モードの特徴は、以下の通りである。

- ① ケーソンは、海側への水平変位と傾斜、沈下をともなうように変位する。
- ② 海底砂層では、海向きに残留変形をともなうせん断変形モードが卓越する。
- ③ 消波ブロックは、斜面に沿うように海側に移動し、全体的には天端の沈下と海側への斜面のはらみだしをともなう変形モードを示す。

一方、海底砂層の厚さ、密度、改良範囲がケーソン上のパラペット天端における残留変位量に及ぼす影響については、以下の傾向が得られた。

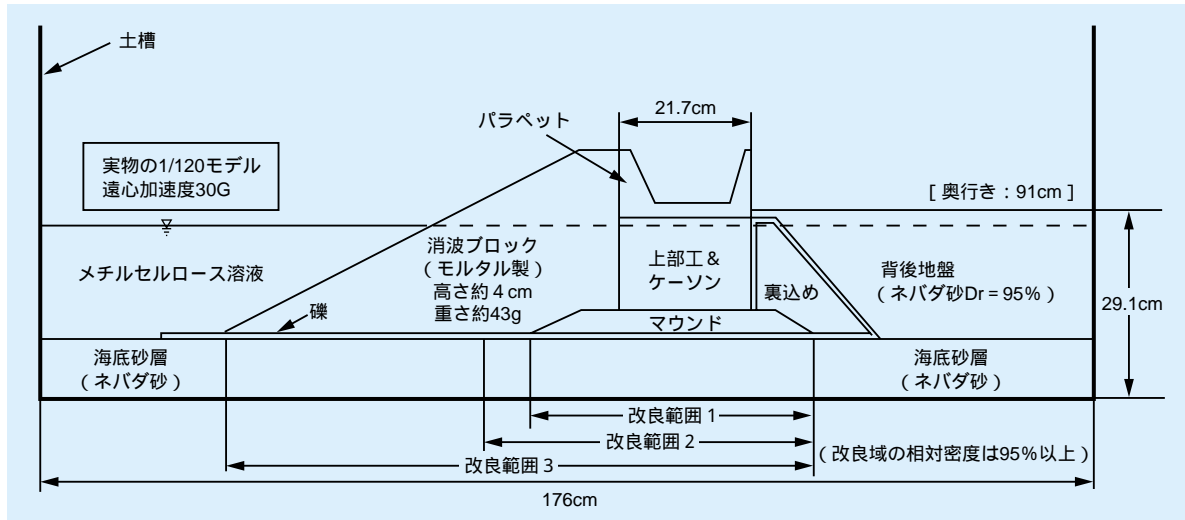


図3-3-1 遠心载荷模型振動実験における防波護岸の実験モデルの概要

- ① 海底砂層が厚くなるほど、パラペット天端の水平・鉛直残留変位は大きくなる。ただし、砂層厚さがゼロ、すなわち岩盤上に防波護岸が設置された場合には、残留変位はほとんど生じない(図3-3-2)。
- ② パラペット天端の水平・鉛直残留変位は、海底砂層の密度が大きく、締まった状態であるほど小さくなる傾向がある。しかし、相対密度が70%程度以上になると、パラペット天端の残留変位に対して、密度の違いによる影響はほとんどない。
- ③ 海底砂層を締めことによって地盤改良することは、パラペット天端の残留変位の低減につながる。この場合、改良範囲が広がるほど残留変位が小さくなる傾向があるが、マウンド直下のみ改良を施すだけでも残留変位の低減効果が大きく、合理的改良範囲を設定する上で有用な情報を与えるものである(図3-3-2)。

### 3-3-3 防波護岸の地震時変形予測解析手法 (SEAWALL-2D) の開発と適用性の検討

#### (1) 地震時変形解析手法 (SEAWALL-2D) の開発

昨今の計算技術の進歩により、地盤や構造物の非線形挙動ならびに塑性変形についてもかなりの精度で解析的に予測することが可能になってきた。一方、人工島式原子力発電所を対象とする防波護岸の地震時変形解析に要求される主な項目を列挙すると、以下のようになる。

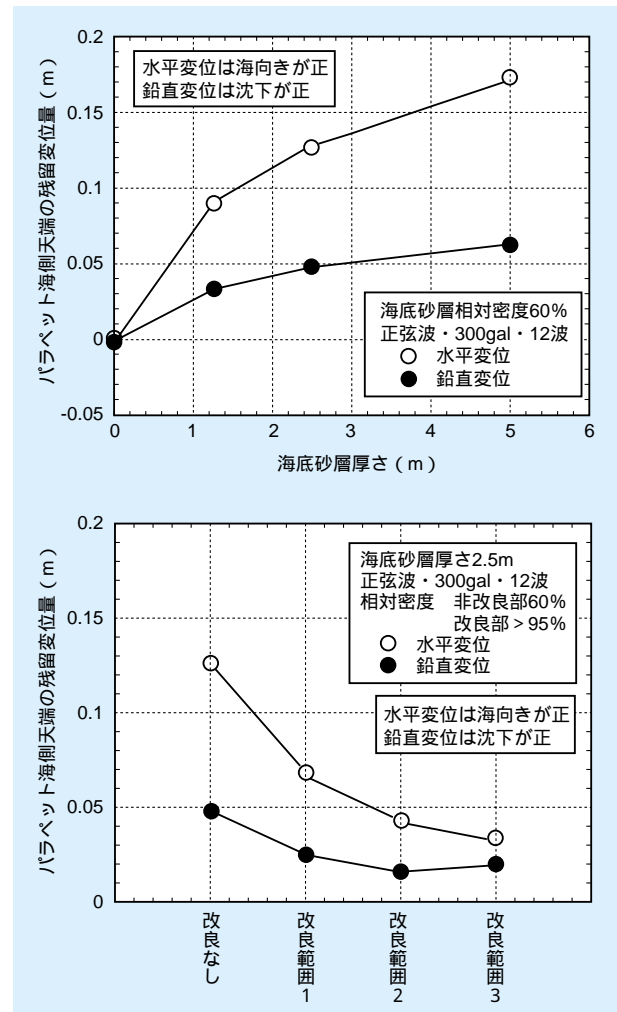


図3-3-2 パラペット天端の変位量に及ぼす海底砂層厚さ、海底砂層の改良範囲の影響

- ① 海底地盤、マウンド、背後地盤などの地盤材料に対して、材料の非線形性を考慮できる。
- ② ケーソンの滑動や海底地盤・背後地盤・マウンドなどの残留変形(塑性変形)を求めることができる。
- ③ 液状化現象など水の存在の影響を考慮できる。
- ④ 消波ブロックの影響を考慮できる。

これらの内、①～③の要求に対しては、有限要素法(FEM)などの連続体力学をベースにして、ケーソンの滑動を表現するためのジョイント要素を適用した有効応力解析手法などを用いることにより対応することができる。防波護岸の地震時変形解析で最も重要な点のひとつは、④に示すように複雑な形状をした消波ブロックの動的挙動をいかにして適切にモデル化するかにある。この点を克服するため、当研究所では、消波ブロックの領域を個別要素法(DEM)による非連続体解析領域とし、ケーソン、マウンド、海底地盤、背後地盤などの領域を有限要素法(FEM)による連続体解析領域とすることによって、合理的かつ高精度で防波護岸の地震時変形を予測できるDEM-FEMカップリング解析手法(SEAWALL-2D)を新たに開発した<sup>(2)</sup>。

SEAWALL-2Dは、図3-3-3に示すように2つの大きな解析コードで構成されている。ひとつは、DEMによる消波ブロックの2次元動的応答解析手法(TSLIDE-2D)であり、消波ブロックのような形状をもつ材料の集合体が地震を受けたときの個々のブロックのすべりや転がりといった現象を考慮した解析を行うことができる<sup>(3)</sup>。もう一方は、地震時における地盤の液状化現象や塑性変形

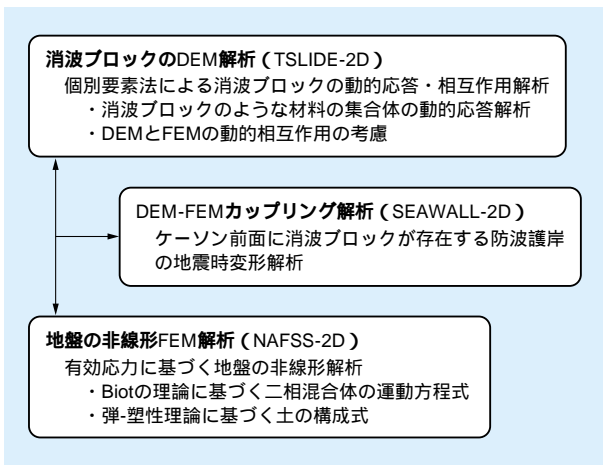


図3-3-3 防波護岸の地震時変形解析手法(SEAWALL-2D)の構成

を予測することを目的としたFEMによる地盤の2次元有効応力解析手法(NAFSS-2D)である<sup>(4)</sup>。NAFSS-2Dは、繰り返し載荷時の土の変形挙動を弾・塑性理論に立脚した構成式で表現し、Biotの二相混合体理論に基づく土粒子骨格-間隙水の連成運動方程式を適用することによって、震動中の地盤の透水も考慮し得る真の有効応力解析手法である。

SEAWALL-2Dでは、DEM解析を行う消波ブロック部と、FEM解析を行うケーソンや地盤部に対して、それぞれ時間領域において別々に応答解析が行われる。しかし、地震時に両者はそれぞれ独立に運動しているのではなく、互いに相互作用を及ぼし合いながら運動しており、それは防波護岸の地震時変形に大きな影響を及ぼすと考えられる。このような動的相互作用を考慮するためSEAWALL-2Dでは、震動中の各時刻において、DEM解析領域とFEM解析領域の境界面に作用する荷重を合理的に算定し、それらの荷重を境界面荷重として運動方程式に組み込んだ上で、個々の運動方程式を短い時間ステップで解析することにより、相互の力のやり取りを再現している<sup>(2)</sup>。

## (2) 模型振動実験の数値シミュレーション

SEAWALL-2Dの適用性を検証するため、図3-3-1で示した防波護岸の遠心載荷模型振動実験のうち、代表的なケースを取り上げ、数値シミュレーションを行った。

図3-3-4に解析モデルを示す。本ケースでは、海底に相対密度 $Dr=70\%$ 程度の比較的緩い砂層が存在し、消波ブロック下の一部から裏込め下にかけて海底砂層を締固め改良( $Dr=95\%$ )しており、背後地盤については $Dr=95\%$ 程度の締まった地盤とする条件になっている。

FEM解析部では図のようなメッシュ分割を行い、ケーソンの陸側側面ならびに底面に、震動時の滑動を考慮するためのジョイント要素を配置している。非線形解析領域となる海底砂層、背後地盤といった砂層の解析用物性値については、模型実験時と同等の相対密度、拘束圧条件下で行われた液状化試験結果から決定した。同様に、砕石で構成されたマウンド、裏込めについては、動的変形試験の結果を参考に解析用物性値を決定した。DEM解析部である消波ブロックについては、ブロックの積み上げ解析を行うことにより、図のような初期状態を設定した。解析用入力物性値については、模型実験に用いた

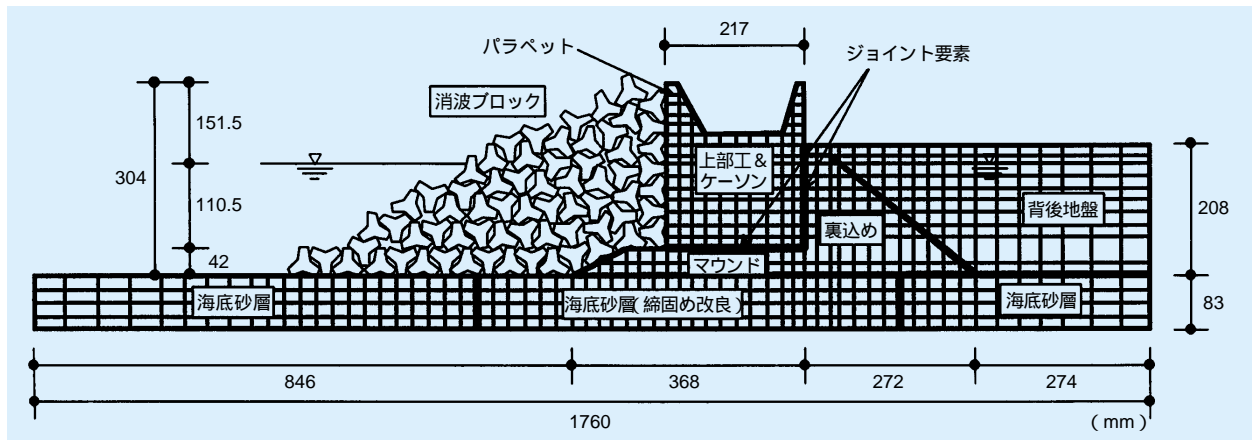


図3-3-4 遠心模型実験の数値シミュレーションに用いた解析モデル

消波ブロックの载荷試験結果から接触点でのばね定数を推定し、すべりに対する摩擦係数については、静止摩擦係数  $\mu_s = 0.6$ 、動摩擦係数  $\mu_d = 0.5$  を用いた。また、本来3次元的な形状を持つ消波ブロックに対して、2次元平面ひずみ条件で解析を行うため、要素の質量、慣性モーメントなどについても3次元と等価となるような値に調整して、設定した。

入力波(振動数約90Hz、波数12波の正弦波)は、模型実験時に実際に振動台上で計測された加速度波形とし、最大加速度振幅3G、10G、15Gの3通りの解析を行った。

図3-3-5に、解析による消波ブロックの移動状態を示す。模型実験によると、消波ブロックは斜面に沿って海側に移動するような変位を示していたが、解析でも実験結果と同様の傾向を示す。図3-3-6には、入力加速度振幅とケーソン上部工の水平変位(DH1)、鉛直変位(DV1、DV2)の残留値の比較を示す。水平変位については解析による変位が小さめになっているが、全体的に実験値と解析値は良い一致を示しており、防波護岸の機能維持の

検討で最も重要となるケーソンの残留変位予測に対して、SEAWALL-2Dが十分な適用性を有することが示された。

### 3-3-4 実規模防波護岸の地震時変形と機能維持検討

#### (1) 遠心模型実験による地震時変形量の評価

遠心模型実験は、実規模の防波護岸に対して1/4のスケールに縮尺されたモデルを再現したものである。したがって、遠心模型実験によるパラベット天端での変位量から、実規模の防波護岸におけるパラベット天端の変位量を予測するためには、少なくとも、

- ① 海底砂層の厚さの差が変位に及ぼす影響
- ② ケーソンの幅の差が変位に及ぼす影響

について定性的な検討を行っておく必要がある。そこで、ケーソン式護岸に対する過去の地震被災事例を分析し、これらの影響を検討した結果、以下のことが判明した<sup>(5)</sup>。

- ① 海底砂層が厚いほど沈下量が大きく、おおむね海底

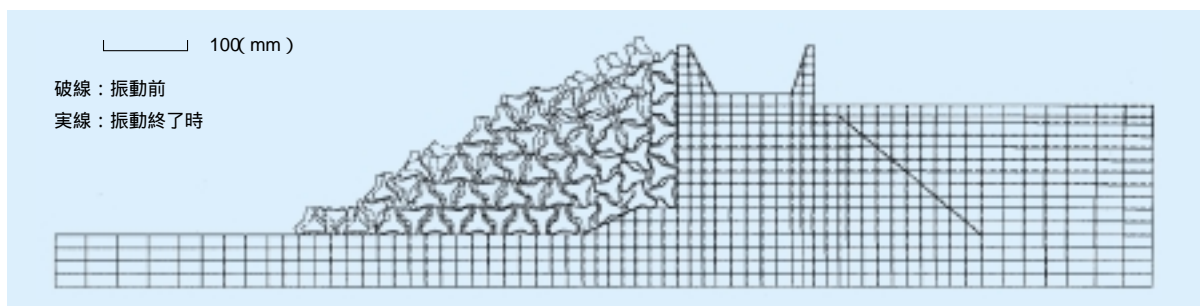


図3-3-5 解析によって得られた振動による消波ブロックの移動状態

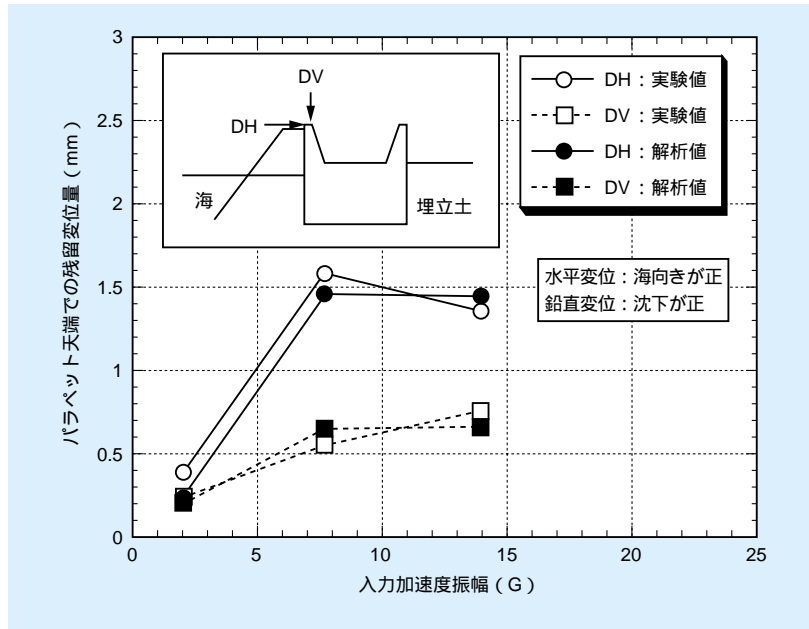


図3-3-6 パラベット天端の残留変位に関する実験と解析の比較

砂層厚さと比例的に沈下量が大きくなる傾向がある。

- ② 対象とする防波護岸のケーソン寸法と比較的相似的な護岸では、ケーソンの幅と沈下量の間には明瞭な相関性は認められない。

これらの分析結果より、1/4スケール遠心模型実験で得られた沈下量を4倍して実規模の防波護岸に生じる変位量とすることは、実際に生じる変位と工学的にほぼ同等と見なすことができ、遠心模型実験で計測されたパラ

ベット天端での沈下量を4倍し、海底砂層厚さとの関係をまとめた。その結果を図3-3-7に示す。データの採用にあたっては、基準地震動S<sub>2</sub>クラスの地震動と同程度の加振条件を想定し、正弦波、300gal、12波の入力を行った結果に限定した。図より、海底砂層の相対密度がDr=60%程度で、砂層の厚さが10m程度である場合のパラベット天端での沈下量は約0.2m程度であることがわかる。

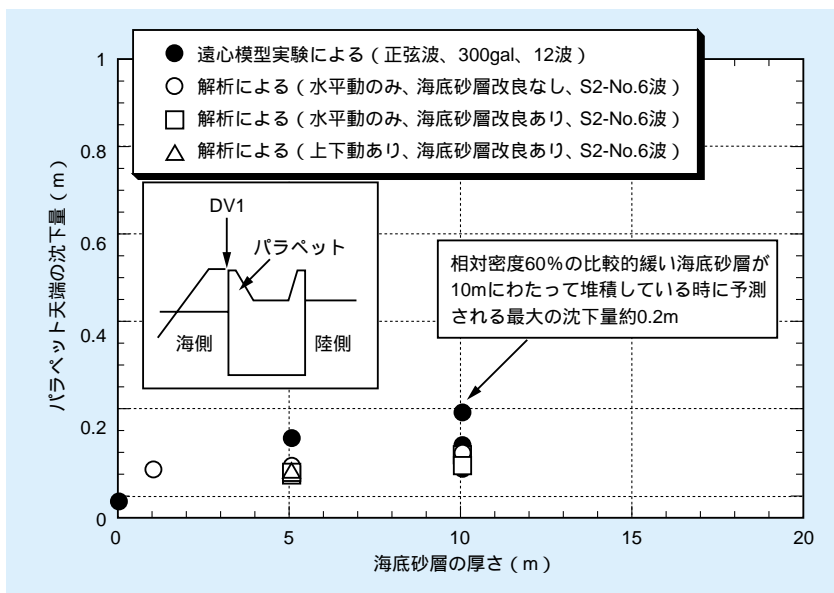


図3-3-7 遠心模型実験や数値解析による実規模防波護岸の地震時沈下量



(2) 数値解析による実規模防波護岸の地震時変形量の評価

実規模の防波護岸が基準地震動  $S_2$  クラスの地震を受けた時の変形量を数値解析によって予測するため、海底砂層の条件や上下動の有無をパラメータとしたケーススタディを実施した<sup>(5)</sup>。解析には、遠心模型実験の数値シミュレーションによりその適用性が確認されたDEM-FEMカップリング解析手法(SEAWALL-2D)を用いた。

1) 解析ケースと解析モデル

解析では、海底砂層の厚さを1m、5m、10mの3種類に設定した。海底砂層の密度条件(締め具合)については、本来建設地点ごとに異なるものであるが、ここでは相対密度で50～60%程度の中密な状態を想定した。また、海底砂層厚さ5mと10mのケースについては、原地盤のままの状態(改良なし)と、基礎捨石下を相対密度80%程度に一部締め改良した状態(改良あり)の2種類を設定した。埋立土については、地震時に激しい液状化が発生することがないように、相対密度で80%程度まで締めることを前提とした。

入力地震動については、海底岩盤のS波速度が700m/sであることから、海底岩盤表面を解放基盤表面とし、 $S_2$ クラスの模擬地震動(最大加速度388.4gal)を海底岩盤表面に設定した。ただし解析では、海底岩盤表面から20mの位置を解析上の入力基盤と定め、解放基盤表面に設定した模擬地震動の引き戻し計算によって得られた入射波を解析用の入力地震動とした。

機能維持に関する検討では、震度0.1の上下動を不利な方向に作用させて検討することになっている。ここで

は、海底砂層厚さ5mで改良ありの条件に対して、上下方向の震度0.1を考慮した解析も行い、上下動の有無の影響を比較した。

解析モデルの代表例として、図3-3-8に海底砂層厚さが5mで、海底砂層の一部を締め改良したケースのモデルを示す。

2) 解析用物性値の設定

FEM解析領域のうち、埋立土、海底砂層などの砂層については、各々の相対密度に対応した液状化強度を参考にして解析用物性値を設定した。透水係数は、 $k=10^{-2} \text{cm/s}$ である。一方、基礎捨石、裏込めなどの捨石の解析用物性値については、実物のケーソン護岸を対象とした地震観測結果や、実物と相似な粒径を持つ碎石の室内動的変形試験結果を参考にして推定した。捨石の透水係数については、遠心模型実験などから、この領域ではほとんど間隙水圧が上昇しないことを考慮して、いずれも十分大きな値( $k=10^2 \text{cm/s}$ )とした。ケーソンの陸側側面ならびに底面には、模型実験のシミュレーション解析と同様、震動時の滑動を考慮するためのジョイント要素を配置した。

DEM解析領域である消波ブロックの諸元については、解析が2次元解析であることを考慮して、重量、個数、密度、慣性モーメントを換算した。また、消波ブロック間の接触点におけるばね定数については、コンクリートの一般的なヤング係数、ポアソン比から解析的に推定した。接触点における摩擦係数は、静止摩擦係数 $\mu_s=0.6$ 、動摩擦係数 $\mu_d=0.5$ とした。

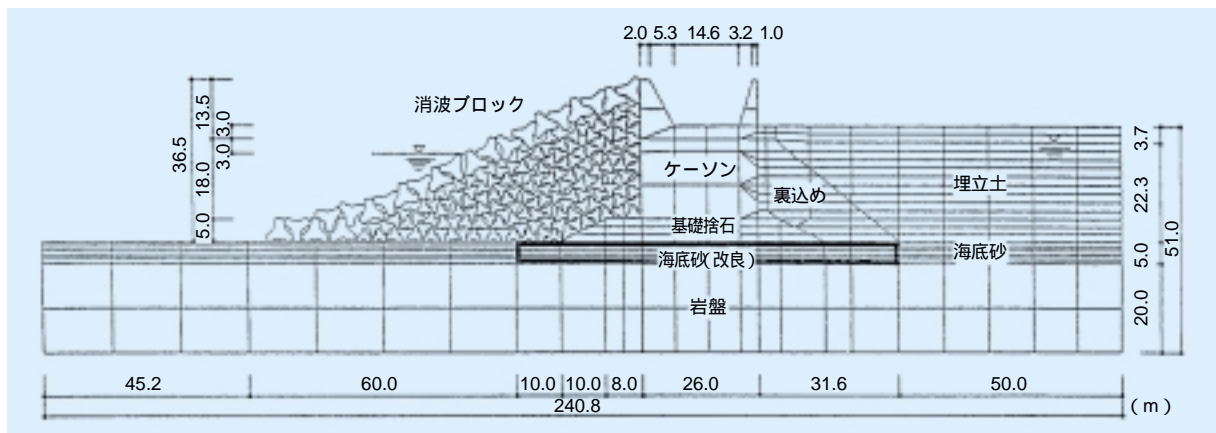


図3-3-8 実規模防波護岸の数値解析に用いた解析モデル(海底砂層厚5m、海底砂層の改良あり)

### 3) 解析によるパラペット天端の沈下量の評価

解析によって得られたパラペット天端の沈下量と海底砂層の厚さの関係を図3-3-7に併記した。図より、海底砂層厚が厚くなるにしたがって沈下量が大きくなる傾向が認められる。また、海底地盤の改良の有無による沈下量の違いに着目すると、砂層厚さ5m、10mのいずれの場合にも改良を施した方が沈下量が小さく、海底砂層が厚くなるほど改良効果が大きくなる傾向が認められる。ただし、海底砂層厚さが10mで、海底砂層に改良を施していない場合でも、パラペット天端の沈下量は0.12m程度であり、海底砂層に対してケーソン自重や消波ブロックによる押さえ効果が沈下の低減につながっているものと推測される。図3-3-7には、上下動の有無によるパラペット天端の沈下量の比較も示している。震度0.1程度の上下動は、パラペット天端の沈下量にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

### (3) 地震後の変形量からみた防波護岸の機能維持検討

防波護岸に要求される最も重要な機能のひとつは、地震によって変形を生じた防波護岸に大きな波浪が来襲し、それともなって越波量が増大しても、敷地が過度に浸水することを防ぐ越波防止機能である。越波量の変化につながる防波護岸の地震時変形は、地震による消波ブロックの変形とケーソン上のパラペット天端の沈下であると考えられる。言うまでもなく、機能維持に対する具体的な許容値は、防波護岸の立地条件や構造上の差など、様々な条件に依存することから、特定の値を一律に定めることはできないが、ここでは図3-1-2に示す基本断面を対象に、地震による消波ブロックの変形およびパラペット天端の沈下の2つの事象に対して、地震後の越波防止機能の検討を行った<sup>(5)</sup>。

#### 1) 地震による消波工の変形と越波防止機能

防波護岸の遠心模型実験より、消波ブロックは加振によって法面勾配が緩やかになるとともに、天端高さが低下する傾向があった。模型実験で得られたこれらの知見をもとに、地震による消波ブロックの法面勾配と天端高さの変化が越波流量に及ぼす影響を調べるために水理実験を行った。実験には、長さ51m、深さ1.2m、幅0.9mの反射波吸収式2次元造波水路を用い、実規模防波護岸の1/60スケールの模型を対象に、フルードの相似則に

基づいた実験を行った。消波ブロックの法面勾配および天端の沈下量は、模型実験の結果を参考に、法面勾配を設計断面における1:2.0を基準に1:2.2、1:2.5の3種類、天端の沈下量を0m、-1.5m、-3.0m、-4.5mの4種類に設定した。実験は、これらを組み合わせた12断面を対象に越波流量を測定した。

図3-3-9に実験結果の代表例を示す。同図は、横軸に作用波高と基本設計波高の比 $H/H_0$ をとり、現地換算越波流量 $q$ の変化を示したものである。これより、地震による消波ブロック法面勾配の緩勾配化、天端の沈下による越波流量の減少がわかる。すなわち、遠心模型実験で得られた程度の地震による消波ブロックの変形量では、地震後に大きな波浪が来襲しても越波流量が増加することはなく、越波防止機能を維持する上で問題ないことが示された。

#### 2) 地震によるパラペット天端の沈下量と越波防止機能

遠心模型実験ならびに実規模防波護岸を対象とした数値解析結果から、防波護岸が基準地震動 $S_2$ クラスの地震動を受けた時のパラペット天端における沈下量を海底砂層の厚さに対してプロットしたのが、図3-3-7である。これによると、海底砂層の厚さが10m以下で、相対密度が60%程度以上である場合に、実規模防波護岸のパラペット天端に生じる沈下量は0.2m程度以下であることがわかる。

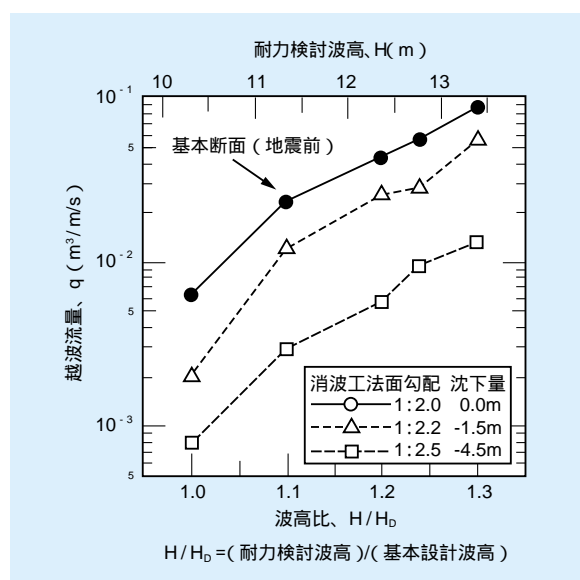


図3-3-9 消波ブロックの法面勾配の変化や天端の沈下が越波流量に及ぼす影響

ところで、越波した海水はケーソン上に設けられた越波排水路を流下し、**図3-3-10**の人工島平面図に示す越波排水路の左右隅角部に設けられた排水口より再度海に戻される。この場合、越波水の水深が最大となる位置は、2つの排水口の間付近となる。この中心点から排水口までの距離を500mと想定した場合の中心点付近における最大水深は、数値解析的検討により6.25mと推算されている。一方、パラペット天端高さとの越波流量の関係については、合田ら<sup>(6)</sup>の越波流量の算定図や高山ら<sup>(7)</sup>の式で評価することができる。これらを参考に、パラペット天端の沈下量と越波流量比の関係を示したのが**図3-3-11**である。越波流量比は、地震前の状態(パラペット天端の沈下0m)での越波流量に対するパラペット天端沈下後の越波流量の比を表している。ここで、最大水深位置である排水路中心点での水深として、上記の最も厳しい条件である6.25mに対する安全性を検討するとすると、

越波排水路高さが10.5mであることから、越波排水路が許容し得る最大の越波流量比は $1.68 (=10.5/6.25)$ となる。これは、パラペット天端の沈下量に換算すると1.36mとなり、最大限1.36mまでの沈下を許容できることになる。それに対して、地震によって生じるパラペット天端の沈下量は、海底砂層の厚さが10m程度で、相対密度が60%程度であっても0.2m程度であり、想定される立地条件下(岩盤もしくは数メートル程度の砂層上に防波護岸を建設する)において、地震後の越波防止機能は十分に維持できるものと判断される。

### 3-3-5 ま と め

防波護岸の耐震安定性評価技術の高度化研究によって得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ① 遠心載荷装置を用いた模型振動実験により、地震時における防波護岸の変形挙動を明らかにした。
- ② 地震時における防波護岸の変形量を数値解析によって予測するための数値解析手法を開発し、模型振動実験の数値シミュレーションにより、その適用性を確認した。
- ③ 基本設計で設定された防波護岸の基本断面を対象に、地震によって変形を生じた防波護岸の越波防止機能について検討し、想定される立地条件下において防波護岸は地震後の越波防止機能を十分に維持できることを明らかにした。

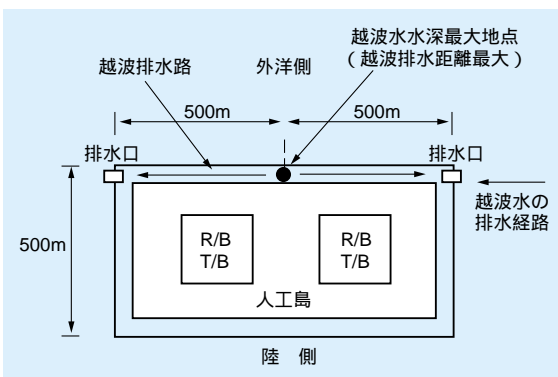


図3-3-10 人工島平面図と越波水の排水口の位置

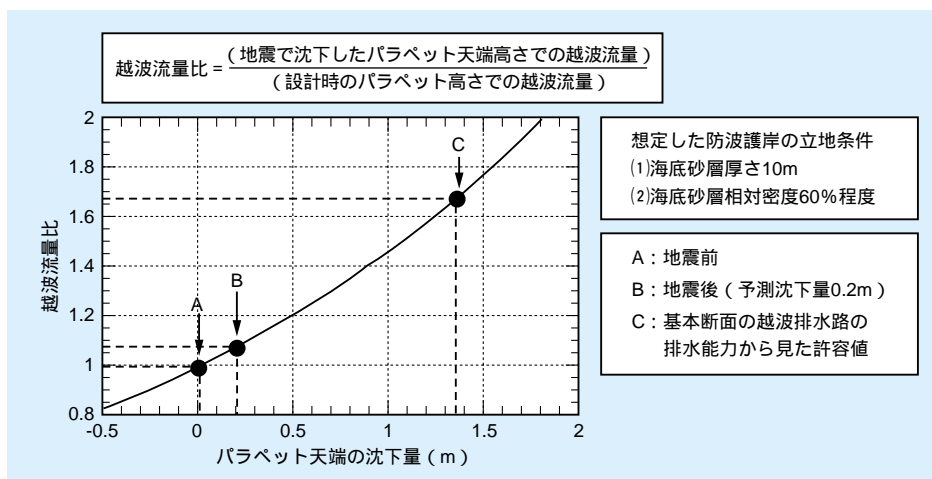


図3-3-11 パラペット天端の沈下量と越波流量比の関係

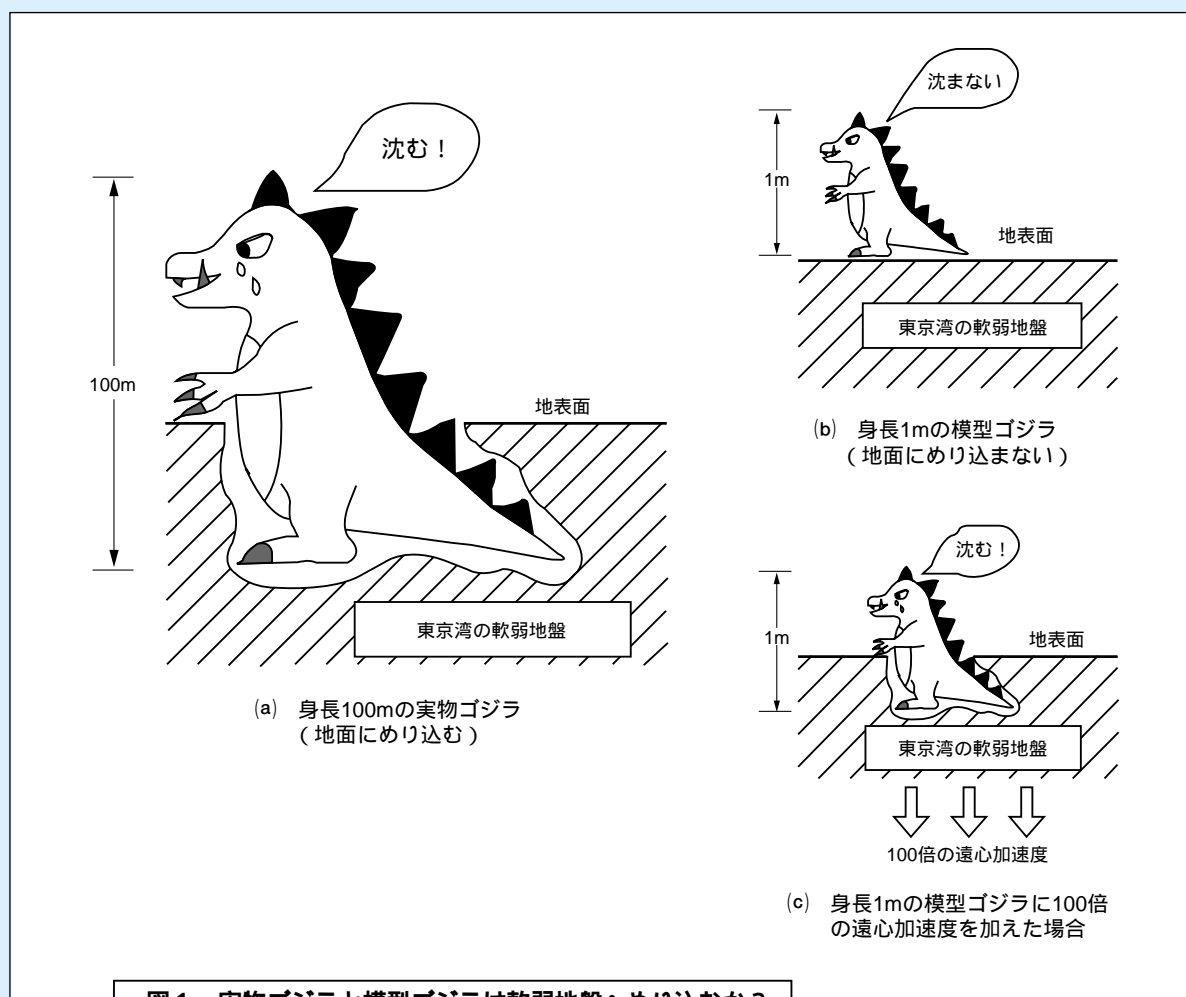
## コラム1 遠心模型実験 - ゴジラは東京湾に現れるか? -

2～3年前ゴジラの映画がアメリカで製作され、評判になりました。日本でも公開され、昔懐かしく御覧になった方もあると思います。日本製ゴジラの名場面の中に、ゴジラが東京湾に現れるシーンがあります。子供の頃にワクワクしたシーンですが、子供心に「本当かな」と思った人も多いはず。大人の目から見ると、東京湾は軟弱地盤が大半であるため、身長100mのゴジラの体重を支え切れず、ゴジラは軟弱地盤の中へズボズボめり込んでしまうことが容易に想像できます(図1(a))。したがって、子供心の直観は正しく、仮にゴジラが存在したとしても東京湾にはゴジラは出現できません。

このことをもっとマジメに考えてみましょう。仮にゴジラの1/100の模型を作って同じ地盤上に置いたらどうなるでしょうか。この場合は、模型ゴジラの重量が軽いので地盤中へめり込みません

(図1(a))。これも子供の頃の潮干狩りの経験を思い出せばわかると思います。以上で述べたことは、「なーんだ。あたり前じゃないか。」と思われることばかりですが、ここに遠心模型実験の秘密があります。模型ゴジラと地盤に100G(重力の加速度の100倍)の遠心加速度を下向きに加えてやれば模型ゴジラの体重は100倍になり、模型ゴジラの足の裏の地面を押し圧力は実物ゴジラと同じ大きさとなり、実物ゴジラと同様に地盤にズボズボめり込みます(図1(c))。つまり、自重(図1ではゴジラの体重)が関与する現象では、小規模な模型実験でも遠心加速度を下向きに加えてれば実物と同様な現象を生じさせることができます。このことを「力学的相似性が成立する」と言います。これが遠心模型実験の原理のざっぱな説明です。

地盤の安定問題には、土の自重が関係するものが多いため、遠心模型実験がよく行われます。図



2は斜面の安定問題の説明したのですが、すべり落ちる土塊の重量をゴジラの体重に置き換えて考えれば、遠心模型実験の有効性がわかると思います。ただし、土の性質も土の自重によって生じる土中の圧力の大きさによって変化するので、遠心模型実験の原理は前述したほど簡単ではありません。しかし、詳しい検討結果によれば、そうし

た影響を考慮しても力学的相似性が成立することがわかっています。

本レビュー第3章では、防波護岸の地震時変形問題に遠心模型実験を使用していますが、その理由は、上述した原理により遠心模型の変形量から実物の変形量を容易に推定できるためです。

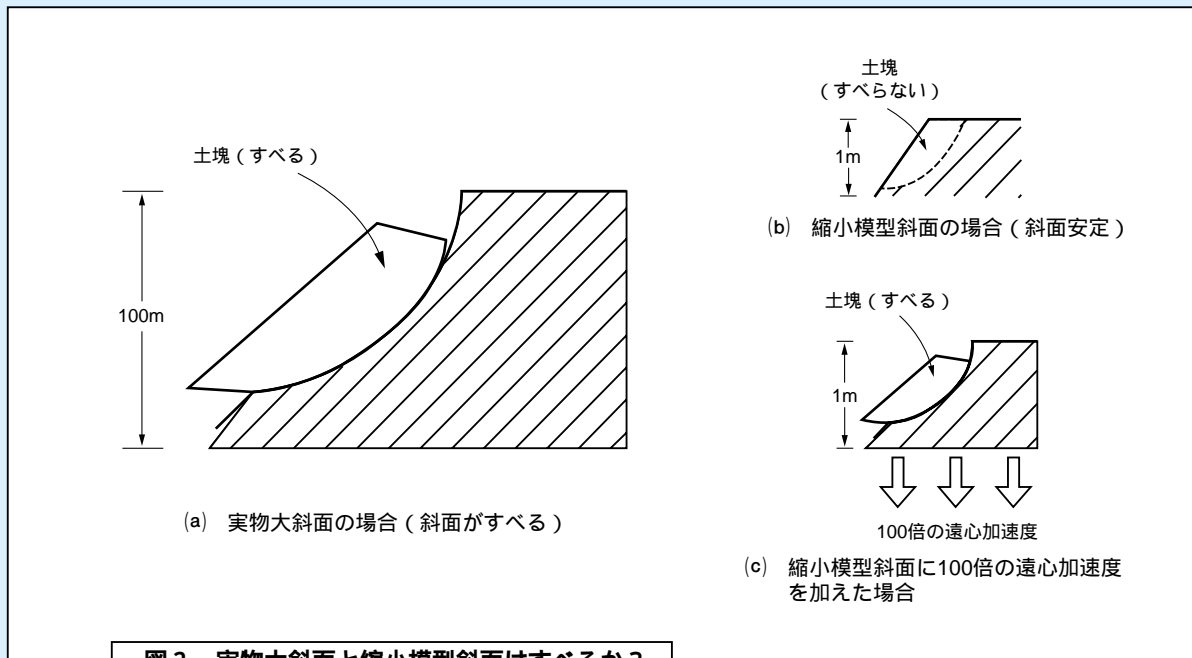


図2 実物大斜面と縮小模型斜面はすべるか？



第 4 章

**周辺海域の波・海浜流  
・海浜変形の評価技術**

第4章 周辺海域の波・海浜流・海浜変形の評価技術 目次

我孫子研究所 水理部 主任研究員 池野 正明  
我孫子研究所 水理部 上席研究員 清水 隆夫  
前我孫子研究所 上席研究員 研究参事 鹿島 遼一

4 - 1 はじめに .....55  
4 - 2 既往の評価手法とその適用性 .....55  
4 - 3 新しい海浜変形評価手法の提案とその適用性 .....57  
4 - 4 まとめ .....61



池野 正明（1987年入所）  
人工島式海上立地方式の原子力発電所や既存の臨海発電所周辺の海浜変形予測手法の開発、浮揚式海上立地方式の原子力発電所の風波や津波に対する動揺評価手法や既存の臨海発電所港湾施設の耐波浪・耐津波設計手法の開発に従事。今回開発した海浜変形予測手法を現地へ適用するための実用化および混合粒径砂海浜へ適用するための改良に努めている。



清水 隆夫（1979年入所）  
入所と同時期に完成した当時世界最大の大型造波水路で海浜変形実験に従事して以来、海浜変形の予測、放水口前面の洗掘対策、海上工事中の濁りの予測に取り組んできた。最近はウェットランドの保全・修復に向けた干潟の地形変化に関する研究を開始した。

鹿島 遼一（8ページに掲載）

コラム2 トンボロ .....63

清水 隆夫（上記掲載）



## 4 - 1 はじめに

砂浜海岸の沖合いに人工島式原子力発電所が建設されると周辺海域の波、海浜流が大きな影響を受け、人工島背後の静穏海域に砂が堆積してトンボ口(コラム参照)ができたり、少し離れたところでは逆に砂浜が侵食されたりすることが考えられる。これらは波、ならびに波によって生じる海浜流が海岸の砂を運ぶ「漂砂」によって起こる海浜変形と呼ばれる現象である。したがって、建

設計画立案時にこれらについて十分な評価を行い、それを人工島と陸の間の静穏海域など周辺海域の利用計画に反映させるとともに、必要に応じ海岸変形に対する事前の対応策をとることが考えられる。

波、海浜流、海浜変形については既に開発された評価法があるが、ここでは上記の目的に十分応えるための高精度化の検討を行う。

## 4 - 2 既往の評価手法とその適用性

海浜変形は、古くから重要な研究課題であり、我が国では、昭和50年代に大規模な現地観測と水理実験ならびにそれらに立脚した数値シミュレーション手法の開発に関する研究プロジェクトが精力的かつ組織的に実施された<sup>(1)</sup>。これを契機として、数値シミュレーションによる海浜変形モデルの実務問題への適用が盛んに試みられるようになってきた<sup>(2)(3)(4)</sup>。その結果、既に開発された評価法が存在する。

図4-2-1は、既存の3次元海浜変形モデルのひとつである3D-SHOREの計算フローを示したものである。このモデルは比較的簡便なため、計算に要する時間も短くて済む実用的な手法である。しかし、人工島式原子力発電所の周辺海域における海浜変形問題への適用を考えた場合には、次のような問題点を有している。

① このモデルは、規則波実験によりその妥当性が確かめられているが、人工島式海上立地の場合に重要な不規則波作用下の海浜変形に対する適用性は十分に調べられていない。

そこで、不規則波を用いて海浜変形の模型実験を行い、3次元海浜変形モデル3D-SHOREによる計算結果と比較検討した(清水ほか、1996)<sup>(1)</sup>。

図4-2-2に、3D-SHOREによる海底地形変化の計算結果と、縮尺1/150の人工島を対象とした移動床上での模型実験結果<sup>(7)</sup>との比較を示す。用いた砂の粒径は0.2mm、

初期海底地形は1/50勾配一様斜面である。図は波作用後58hr後の結果である。3D-SHOREによる計算結果は、突堤間に砂が堆積する様子や両突堤の外側が侵食される様子を定性的に再現できている。3D-SHOREは、流れによる漂砂量のみを考慮しているため、長時間波を作用しつづけた結果、人工島の設置に伴う回折波による漂砂が平衡状態に達し、人工島背後に生じる循環流による漂砂が卓越した状態となるような長期的な地形変化予測に優れている。しかし、実験では2つの突堤間に凸状に堆積するのに対し、計算では凹状に堆積しているなど、実験結果と計算結果が一致しない点がある。

図4-2-2の計算結果は、用いる漂砂量係数の値を変えれば当然変化する。そこで、実験結果を最も説明できるように漂砂量係数の値を定めたと、その値は従来推奨されている規則波実験を対象とした場合の値よりも小さかった。このことの原因は以下のように考えられる。

② このモデルでは、砂は海底面近傍を動く掃流漂砂を仮定して漂砂量を計算している。このため、人工島周辺海域のように砕波等により水面付近まで海底砂が巻き上げられ、浮遊状態で輸送される浮遊漂砂の評価は十分でない。

また、3D-SHOREによる計算結果を現地観測や現地規模の大型実験と室内実験規模の海浜変形の実測結果と一致させるためには、対象のスケールに応じて3D-

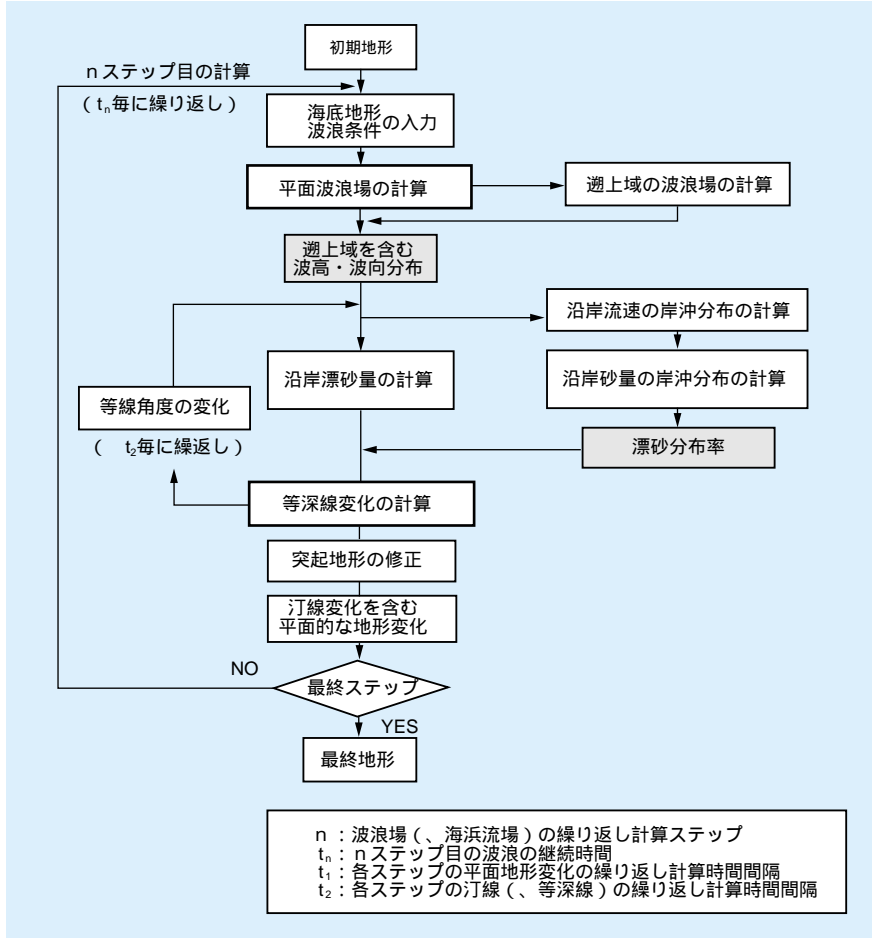


図4-2-1 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデル(3D-SHORE)の計算フロー(土木学会、1996)<sup>5)</sup>

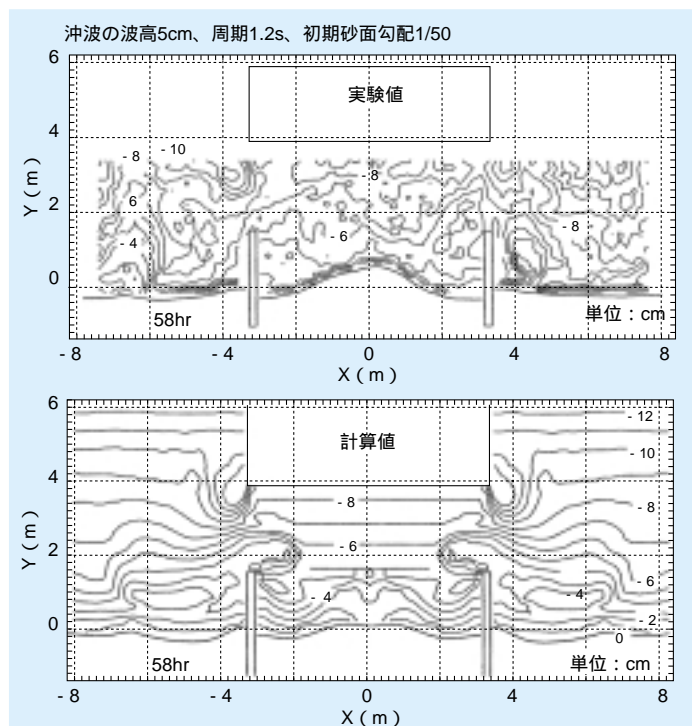


図4-2-2 3D-SHOREによる海底地形変化の再現例(対策工あり)

SHORE 中で用いる漂砂量係数を変化させなければならぬという不整合が生じることが報告されている。

このように、既存の 3 次元海浜変形モデルでは実験結果を合理的に説明できない場合があることが明らかにな

った。従って、人工島式原子力発電所の周辺海域における海浜変形を高精度に予測するためには、既存の 3 次元海浜変形モデルを改良する必要がある。

## 4 - 3 新しい海浜変形評価手法の提案とその適用性

### 4-3-1 新しい海浜変形評価手法の提案

砕波帯内では、海底砂が顕著に巻き上げられ、浮遊砂現象が卓越する。海浜変形予測モデルの精度向上のためには、浮遊漂砂の特性を十分把握し漂砂量の算定に適切に反映させる必要がある。さらに、実際の海の波は多方向不規則波である。例えば、海浜斜面に波が直入射する場合を想定すると、海浜変形を引き起こす外力となる水位や流速が沿岸方向に空間変動し巻き上げられるタイミングが同時刻ではない。さらに、巻き上げられた砂は浮遊漂砂として輸送される。このような不規則波としての諸特性を適切に反映できる 3 次元海浜変形モデルはこれまでに無かった。また、前節の既往モデル 3D-SHORE では、上記のような諸特性が十分考慮されていないので、前述のような漂砂量係数の不整合性が生じる原因の一つとなる。そこで、波の多方向不規則性と砕波帯内の浮遊漂砂現象を考慮した新たな 3 次元海浜変形数値予測モデルを開発したのでその概要を示す。

図 4-3-1 に本モデルの計算フローを示す。本モデルでは、波と海浜流を区別することなく同時に計算し、その海底面付近の流速を外力として、底質巻き上げ量の判定、巻き上げられた砂の浮遊砂濃度としての鉛直移流・拡散の計算、これと流速との積を水深方向に積分することによる浮遊漂砂量の算定および掃流砂量公式による掃流漂砂量の算定により、地形変化の連続式にあてはめ海底地形変化を計算するものである(池野・清水、1998)<sup>7)(8)</sup>。

まず、不規則波 100 波分相当の時間内で、多方向不規則波による波浪変形計算、浮遊砂濃度計算、浮遊砂量や掃流砂量の計算を実施し、時々刻々不規則変動する物理

量を計算する。そして、海底地形変化の連続式に、全漂砂量(掃流漂砂量と浮遊漂砂量の和)の時系列を入力し、海底地形の更新時間が来るまで連続式を計算しつづける。その際、汀線付近より陸上側の遡上域では、代表遡上高まで全漂砂量を外挿する。つぎに、海底地形の更新時間に新たな海底地形に更新し、新しい海底地形を用いて再び多方向不規則波による波浪変形計算、浮遊砂濃度計算、浮遊砂量・掃流砂量計算を実施し上記を繰り返す。また、更新後の地形で、局所的なパ - の形成等により、浮遊砂濃度の鉛直移流・拡散を計算するのに最低必要となる鉛直方向の 1 計算格子分よりも水深が浅くなった場合には、浮遊砂量の計算は行わず近接した計算格子点での漂砂量を内挿して求める。

ここで、波浪場の計算には、外力波の多方向不規則性、有限振幅性および砕波減衰を考慮できる修正ブシネスク方程式を用いる<sup>(9)(10)</sup>。これには、砕波による戻り流れが考慮されていない。そこで、渦粘性を仮定したモデルに基づき、砕波による戻り流れの鉛直分布を付加する<sup>(11)(12)(13)</sup>。また、浮遊砂濃度については、巻き上げ時の鉛直移流効果を付加した鉛直 1 次元拡散方程式により計算する<sup>(14)</sup>。底質の巻き上げ量は、底面流速の向きが沖から岸あるいは岸から沖へ反転した際に巻き上がると仮定し、巻き上げ量を実験結果からモデル化した。

### 4-3-2 新しい海浜変形モデルの適用性

#### (1) 戻り流れと浮遊砂フラックスおよび岸沖地形変化の再現性

図 4-3-2 は、大型岸沖海浜変形実験<sup>(15)(16)(17)(18)</sup>における砕波帯内の岸沖定常流速および浮遊砂フラックスの鉛直分

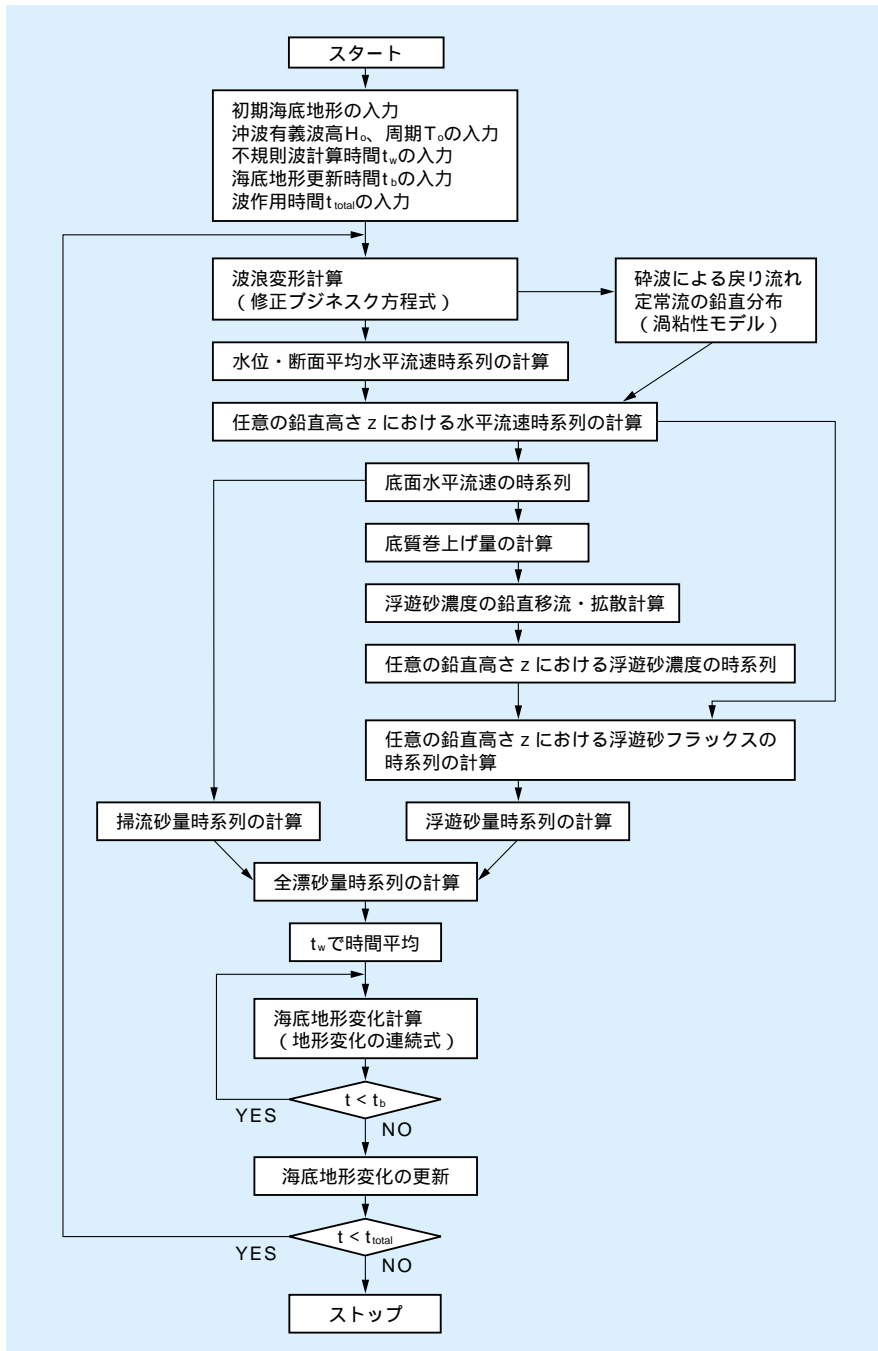


図4-3-1 本海浜変形モデルの計算フロー（土木学会、1999）<sup>6)</sup>

布と本計算結果とを比較した例である。図4-3-2によると、本提案式による砕波帯内定常流速の鉛直分布の再現性とこれを考慮した浮遊砂フラックスの鉛直分布の再現性は良好である。

図4-3-3は、大型岸沖海浜変形実験における有義波高分布と岸沖地形変化の実験結果と本計算結果を比較した例である。用いた砂の粒径は1mm、初期海底地形は1/10勾配一様斜面である。図4-3-4は、岸沖地形変化が

ら求めた全漂砂量の実験結果と本計算結果を比較した例である。また、図中に示した計算結果は、浮遊漂砂量のみ、掃流漂砂量のみ、全漂砂量を入力して地形変化を計算した場合を示している。図4-3-3および図4-3-4によると、バ - 形成地点やその背後の侵食域および冲向き全漂砂量のピークが生じる場所やピーク値の再現性は良好である。また、高波浪の場合は、掃流漂砂量よりも浮遊漂砂量がかなり卓越することがわかる。

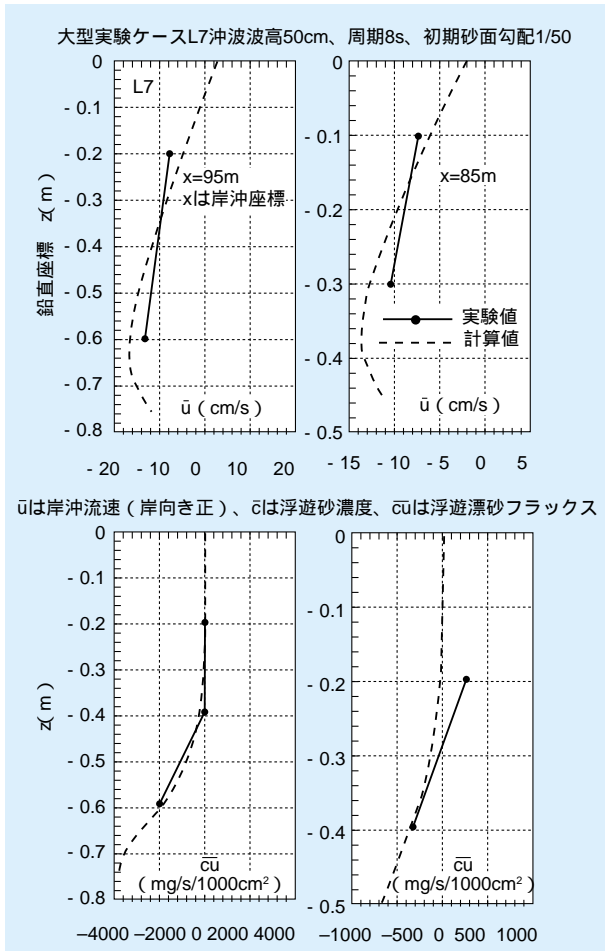


図4-3-2 碎波帯内の定常流速と浮遊砂フラックスの鉛直分布の比較

## (2) 人工島周辺海域への適用性

図4-3-5および図4-3-6に、対策工ありの場合の人工島背後の有義波高分布と海浜流分布について、縮尺1/150の人工島を対象とした移動床上での模型実験結果<sup>(7)</sup>と本計算結果との比較を示す。用いた砂の粒径は0.2mm、初期海底地形は1/50勾配一様斜面である。図4-3-5によると、波高分布の計算結果と実験結果の対応は概して良好である。図4-3-6によれば、海浜流分布の計算結果と実験結果の対応は概ね良好であり、人工島背後の循環流が突堤により遮られて弱くなる特徴を再現している。

図4-3-7は、対策工がある場合の人工島周辺の海底地形の侵食・堆積量について、計算結果と実験結果を比較した代表例である。図では波作用後20～40hrの間の海底地形変化量を示している。

図4-3-7によれば、人工島斜め背後域では、本海浜変形モデルによる侵食・堆積場所や地形変化量の再現性は良好である。直背後域では堆積が若干過大評価となっている。また、突堤が人工島背後に形成されるトンボ口の発達を抑制する効果を再現できている。

前出の図4-3-3および図4-3-4に示した実規模スケールの実験と図4-3-7の小スケールの室内実験への適用時の浮遊砂・掃流砂モデル中に含まれる無次元係数値は前節の既往モデルの場合と異なり、統一した値を使用してい

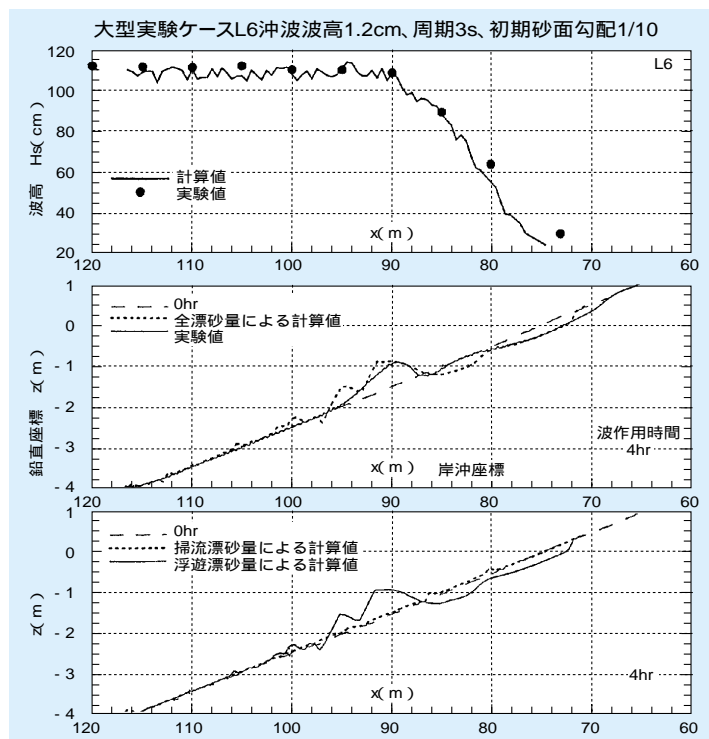


図4-3-3 岸沖地形変化の比較

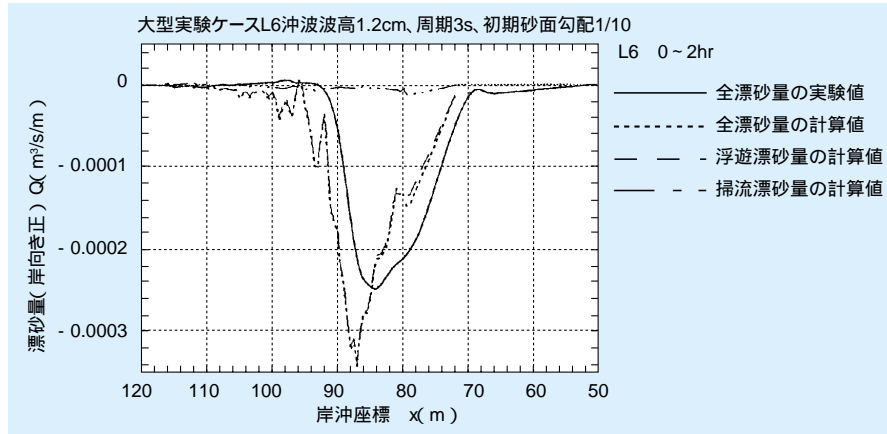


図4-3-4 岸沖漂砂量の比較

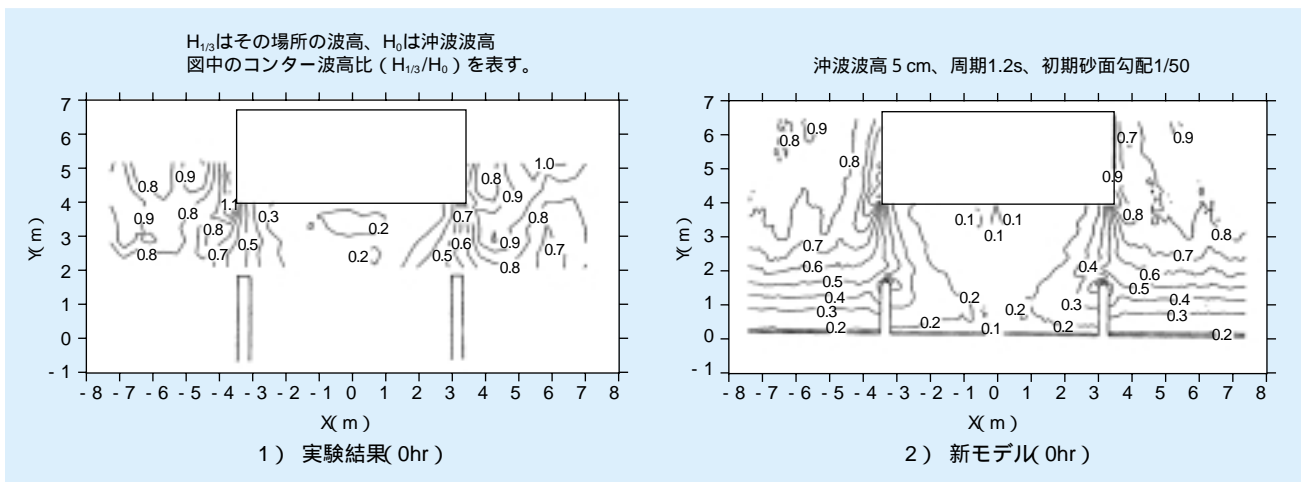


図4-3-5 人工島背後の波高分布の比較 (多方向不規則波、移動床、対策工あり)

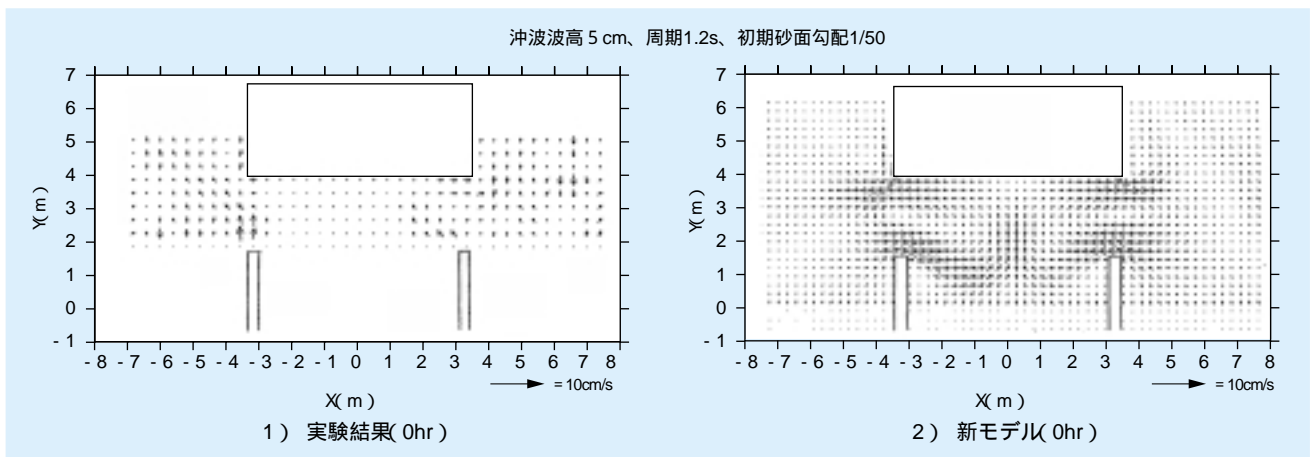


図4-3-6 人工島背後の海浜流分布の比較 (多方向不規則波、移動床、対策工あり)

る。すなわち、既往モデルの漂砂量係数中に含まれるスケール効果に関する部分がある程度排除したより普遍性のあるモデルとなっている。

しかしながら、本モデルでは、遡上域での漂砂量を使

宜上岸側計算点から代表遡上点までの外挿値として算定しているため、実験でのスオッシュゾーンでの砂の動きと異なっていると考えられる。今後はこれについても本海浜変形モデルに取り込む必要がある。

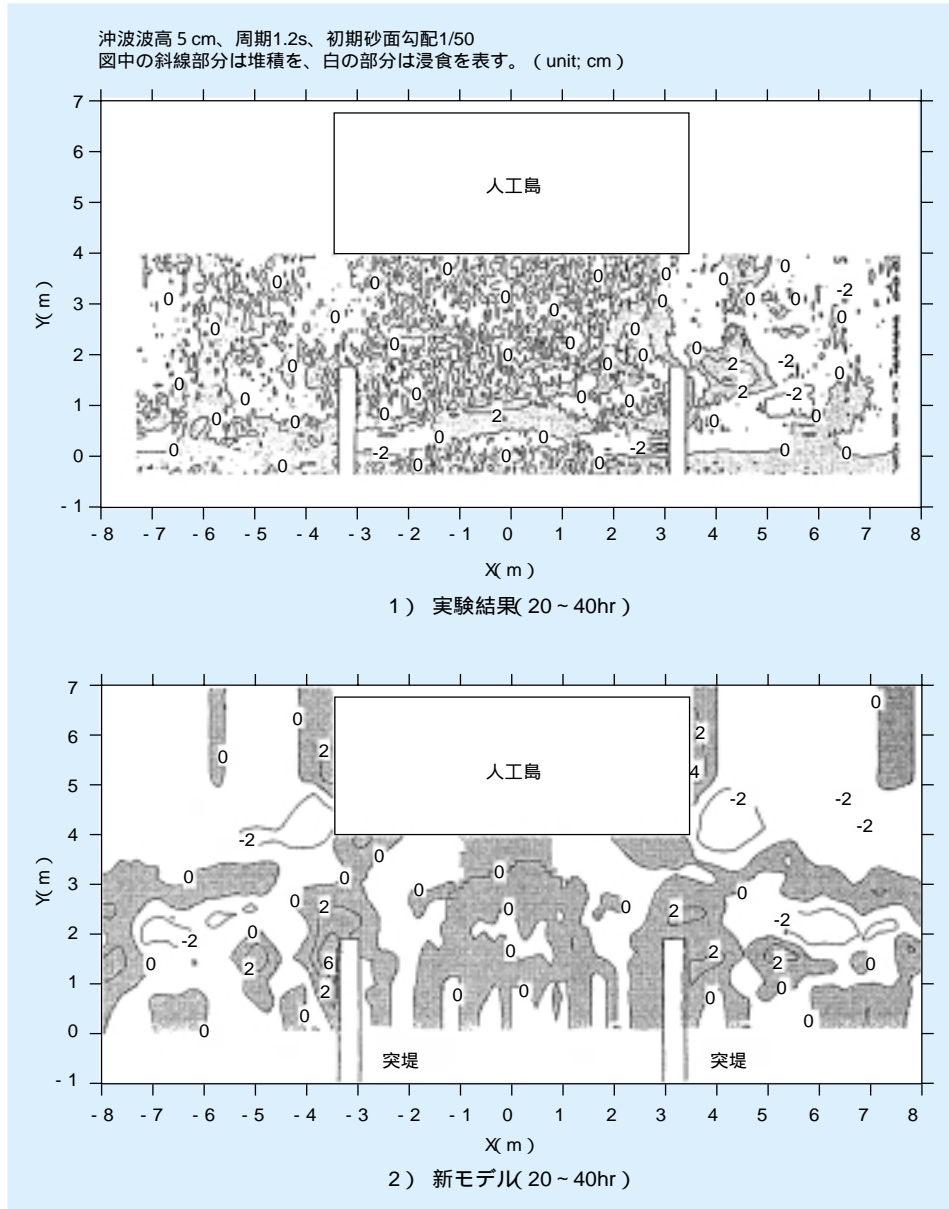


図4-3-7 人工島背後の侵食・堆積量の実験結果と計算結果の比較(対策工あり)

## 4 - 4 ま と め

- ① 既存の海浜変形評価手法の多方向不規則波への適用性を検討した結果、用いる漂砂量係数を従来の推奨値よりも小さくすることにより、実験結果の再現が可能であることがわかった。この手法は、計算時間が比較的短いため、長さ 1km 程度の沖合人工島を含む 3km 四方程度の海域を計算対象とし、数年間の海浜変形計算を容易に行うことができるので、実用上有益な手法である。
- ② ただし、既往モデルでは、掃流漂砂量式を使用し考慮されていない現象を漂砂量係数の中に押し込めているので、漂砂量係数の不整合性が生じる。そこで、波の多方向不規則性と碎波帯内の浮遊漂砂現象を考慮した新たな 3 次元海浜変形数値予測モデルを開発した。
- ③ 新しい海浜変形モデルの適用性を検討した結果、波高分布、碎波帯内もどり流れの鉛直分布、海浜流、海底地形変化量を概ね再現できる。

④ 提案したモデルは、従来では考慮できなかった、砂の粒径、海底勾配、入射波諸元等の変化に伴う掃流・浮遊漂砂量の割合や各々の向きの変化を反映することができるので、既往モデルの漂砂量係数中に含まれるスケール効果に関する部分がある程度排除したより普遍性のあるモデルである。このため、将来的に岩礁

が露出している場合や混合粒径砂を対象とした場合にも容易に拡張できる。

今後は、本提案モデルに取り入れられていない遡上域での漂砂量を実現現象に則してモデル化する必要がある。さらに、既存モデルよりも計算時間がかかるので、実用化を図り現地での適用性を高めていく必要がある。



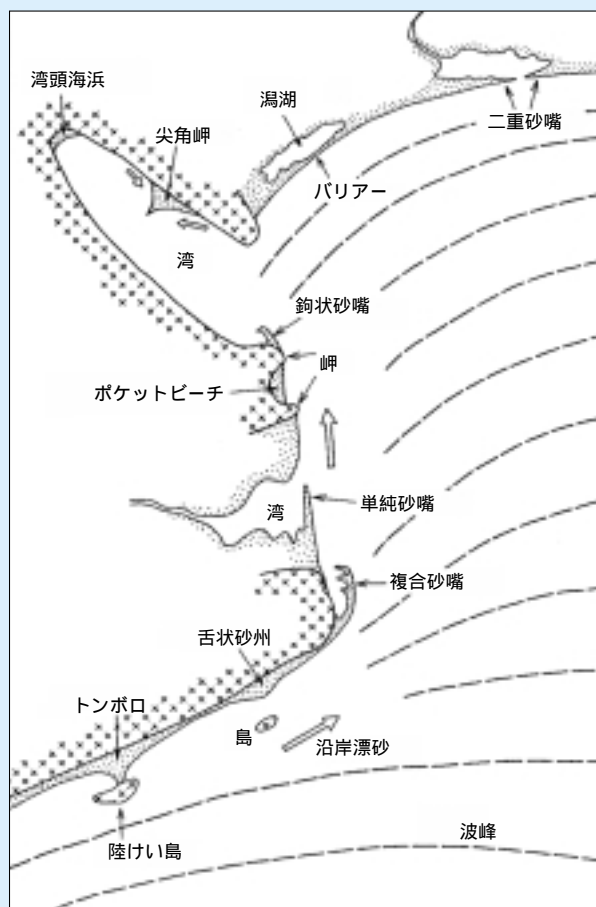
## コラム2 トンボロ

トンボロ？ 初めて聞く人はこれが砂浜の形を表わす言葉であることなど思いもよらないことでしょう。トンボロは島と対岸の陸地が砂浜でつながった地形をさします。日本では江ノ島などが有名です。実は函館市街も函館山と亀田半島をつなぐトンボロの上にあります。トンボロは島の背後に回りこむ回折波と海浜流によって砂が運ばれ島の背後の静穏な海域に貯まってできます。男鹿半島や島根半島はあまりにスケールが大きくて、トンボロの中に八郎潟や宍道湖、中海が残っています。小さなものでは離岸堤の背後に必ずといってよいほどトンボロが見られます。

ところで、トンボロ、妙な名前ですが辞書を調べてみると、この言葉がラテン語のテムラス、塚とか古墳という意味の言葉に由来するものであることが分かります。なるほど、盛り上げた土の上に墓石をのせた塚の形に似ています。島と陸地

がつながりきっていないものは舌状砂州といいます。舌状砂州では潮が大きく引くときだけ島が陸続きになるところがあります。特に昼間大きく潮が引く春の大潮の日に人々が太鼓をたたいて歩いて島に渡るのが習わしになっているというところもあります。

砂浜の形には他にも面白いものが沢山あります。日本地図を開いて海岸の形を見ると、半島やリアス式海岸のような男性的な形と、砂浜海岸の優美な曲線を連ねた女性的な形があります。砂浜の形をつぶさに見ていくとトンボロ以外にも様々なバリエーションがあることに気が付きます。万葉集に歌われた片男波の砂嘴、日本三景の一つ天橋立のバリアー、三保の松原や野付半島の鉤状砂嘴、富津岬の尖角岬など、波と流れによる自然の造形の美しさに感心します。



本間仁監修「海岸環境工学」から転載



第 5 章

5

立地支援技術

我孫子研究所水理部	上席研究員	清水 隆夫	我孫子研究所応用生物部	上席研究員	梨本 真
経済社会研究所	主任研究員	井内 正直	経済社会研究所	上席研究員	山本 公夫
我孫子研究所応用生物部	主任研究員	本多 正樹	我孫子研究所応用生物部	上席研究員	川崎 保夫
我孫子研究所応用生物部	上席研究員	品田 泰	前我孫子研究所環境科学部	海洋生態グループ	
				主査研究員	寺脇 利信

5 - 1 発電所・周辺緑化技術 .....	67
5 - 2 藻場造成技術 .....	75

清水 隆夫 (54ページに掲載)



梨本 真 (1981年入所)  
樹木や植生と環境要因との関連性をおもに森林生態学の立場から研究している。大気汚染物質の植生影響やスギ衰退現象の解明、発電所緑化手法の調査、森林の再生機構の解明などに従事。現在は新アセス法における陸域生態系の調査評価手法の研究に取り組んでいる。



井内 正直 (1989年入所)

これまで、火力・原子力発電所の景観影響評価、環境調和対策、ビオトープ創造を中心に、都市のアメニティ(快適性) ライトアップ等の都市・地域環境保全・創造に関する研究を行ってきた。今後も、循環型社会構築を目指して、地域環境保全・創造型社会システムに関する研究を進めていきたい。



山本 公夫 (1981年入所)  
これまで火力・原子力発電所の景観アセスメント手法や環境デザイン支援システムの開発や、電源立地地域の振興方策などに係わる研究に従事してきた。現在は、循環型社会の構築に向けたエネルギー・環境調和技術の社会的受容性に関する研究に従事している。



本多 正樹 (1986年入所)

藻場造成および環境影響評価に関する研究、特に環境要因が藻場現存量動態に及ぼす影響を定量的に予測・評価する手法開発を目指し、藻場生産力モデル構築に従事してきた。



川崎 保夫 (1976年入所)  
植物プランクトンの発電所復水器通過の影響やアマモへの温度影響の解明、アマモ場、アラメ・カジメ場の造成技術の開発、人工海中林でのアワビ、サザエの生息環境調査など温排水の生物影響や海域環境創造の研究を行ってきた。現在は、藻場生態系のアセス手法に関する研究などに取り組んでいる。



品田 泰 (1974年入所)

入所以来、立地点周辺の植生調査、地熱発電所周辺の樹木活力調査、送電線下の樹木生長量調査などの環境調査に携わるとともに、発電所緑化、海岸緑化、ダム法面緑化、ビオトープなどの環境創造技術の研究に携わってきた。1999年6月より 環境リサーチに出向。



寺脇 利信 (1981年入所、1994年3月退職)  
入所以来、沿岸埋め立てを伴う発電所立地の際の藻場の修復・代替技術の開発に携わるとともに、大型海藻アラメ・カジメ類の群落形成に関する数々の新しい知見を得た。1996年4月から水産庁瀬戸内海区水産研究所・藻場・干潟生産研究室長に就任した。今後は、沿岸域管理の円滑な運営の実現に努力したい。

コラム3 磯焼け .....83

川崎 保夫 (上記掲載)

## 5 - 1 発電所・周辺緑化技術

### 5-1-1 はじめに

火力・原子力発電所の立地は燃料輸送や冷却水確保の便から沿岸に立地してきた。しかし、沿岸の多様な土地利用と絡み沿岸での電源立地は困難になりつつあり、近年では人工島が新立地として視野に入ってきた。

人工島の立地においては、極めて潮風が強い点が上げられ、立地支援の一技術として潮風に耐える緑化技術の確立が求められる。また、造成された発電所の緑地は有効に利用されることが望ましく、この観点から緑化デザインを検討する必要がある。

このような背景から、当研究所では人工島緑化のための適性樹種や維持・管理技術に関する検討を1991年から進め<sup>(1)</sup>、1995年から最新の仮想現実感シミュレーション技術やフォトリアリスティックCGを使った修景緑化デザイン手法の検討を行ってきた。

本章では、発電所・周辺緑化技術として、人工島緑化の適性樹種、維持・管理手法、緑化デザイン手法に関する検討結果を紹介する。

### 5-1-2 潮風に耐える緑化

人工島の中で最も強い潮風を受ける敷地周辺部の緑化については、図5-1-1に示す手法を用いることで実現できる見通しを得た。

すなわち、マウンド状の基盤を整備し、防風ネットを設置した上で潮風に適性のある樹木の苗を高密度に植栽することにより、数年で潮風に強い林冠の閉鎖した緑地が完成する。植栽後、3年間位は潮風害が発生するが、その被害が大きい場合は補植を行う。

林冠が閉鎖した緑地においては、個々の樹木が受ける潮風の強さが緩和される反面、光が不足してこれを巡る競争が激化する。この結果、横の枝張りが不十分で背丈のみ高くなったひよる長い形状の樹木や枯死する

林冠 (forest canopy) : 樹冠 (樹木の上部にある枝と葉の集まり) 同士が横に相接して森林を覆うようになった時、これを林冠と呼ぶ。

樹木も生じるが、根元を伐採して密度をコントロールし、枝を剪定して風抵抗の少ない林冠線を導くことでこの問題が解決される。

#### (1) 植栽基盤整備と補助工

勾配7～20°のマウンド状の植栽基盤は、下層基盤と客土層から構成されるが、いずれも緑化でしばしば生育不良の原因となる滞水を避けるため、凹状部ができないように注意する必要がある。客土の厚さは、高木で100cm以上、低木で50cm以上が理想とされるが、潮風の強い立地では高木林の形成は望めないことから、80cm程度で十分である。

補助工では、防風ネット、支柱、敷き藁マルチの設置が効果的である。防風ネットは、一定間隔で複数列設置するのが望ましいが、当研究所の試験結果から1列でもその後方の樹木が保護され、その樹木の存在でさらに後方の風当たりが弱まる効果が認められた。

強風条件下では、支柱は、樹体の動揺による葉の損傷や根の切断を避けるために必要であり、敷き藁マルチは、土壌面の乾燥や降雨等による土壌流亡を避ける上で有効である。

#### (2) 適性樹種の選定

人工島に適する樹種については、海域(日本海海岸、太平洋海岸)や気候帯(暖温帯、冷温帯)の違い、集団条件下において各樹種が示す特性に配慮して選ぶ必要がある。

日本海海岸での5年間にわたる植栽試験結果を表5-1-1に示した。ハコネウツギ、エノキ、カシワ(以上は落葉樹)、トベラ、シャリンバイ、マサキ、ヤブツバキ、ナワシログミ、タブノキ、ネズミモチ(以上、常緑樹)は日本海側の人工島の緑化に適する樹種である。

一方、太平洋側の人工島の緑化に適する樹種については、海岸線の現地調査から、前述の常緑樹の他、ウバメガシ、ハマヒサカキ、ヒメユズリハ、マルバグミ、ハマビワ、マルバニッケイなどが適するものと考えられるが、厳密には以上の他にヤブニッケイ、クロマツなどを加えた太平洋海岸での植栽試験から抽出するのが適当であろう。

このような海域ごとの適性樹種を選定する場合には、潮風害の発生メカニズムはもとより、それぞれの海域に

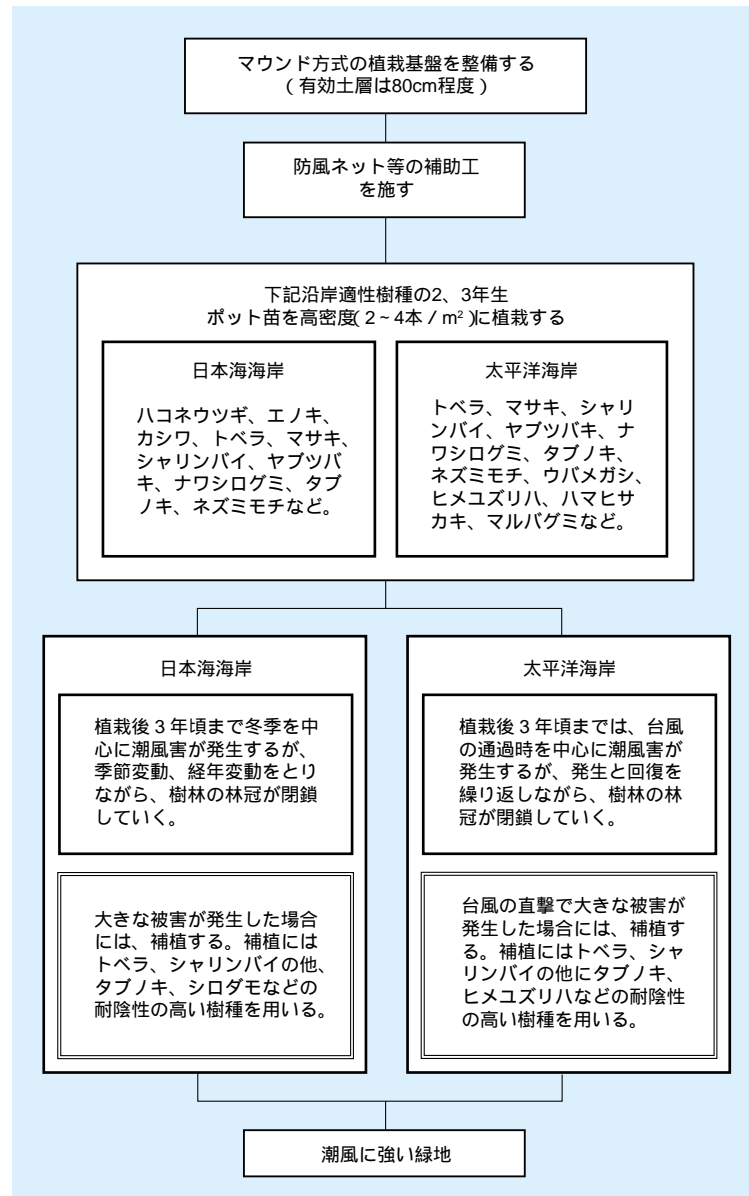


図5-1-1 沿岸緑地(人工島)の緑化手法

おける潮風の卓越時期、樹木の生活型の違い(常緑樹と落葉樹の違い)、葉の構造などに留意する必要がある。

潮風害の発生は、葉の表面に付着した塩分が葉内に侵入し、塩素イオンの毒性作用で組織が破壊することに起因する。日本海海岸においては冬季に潮風が卓越し、太平洋海岸においては台風の襲来時(夏~秋)に短期的に潮風が卓越する。また、常緑樹と落葉樹を比較すると、常緑樹は、周年的に葉を着けているが、葉表面は厚いクチクラ層(蠟状物質で覆われた層)で被覆されて付着塩分が葉内に侵入しにくい構造になっている(ただし葉のこすれや飛砂などで生じた傷口からは塩分が侵入する)。これに対し、落葉樹は、葉のクチクラ層が発達しない関係

から着葉期(春~秋)には付着塩分が葉内に侵入しやすいが、冬期には葉を落として冬芽(塩分は侵入しにくい)で越冬するために潮風害を受けにくい傾向がある。

自然の海岸林では汀線側に低木性樹種が出現し、その後方に高木性樹種が出現する<sup>(2)</sup>。低木性樹種の存在は後方に対して風当たりを緩和している。

### (3) 植栽の方法

発電所の周辺緑化などの大規模緑化(ここでは緑地面積が10haを超えるものをこのように仮称する)では、苗木の確保や植栽後の活着などの面から、植栽材料にポット苗(鉢で育てた苗)を利用するのが便利である。2、3年

表5-1-1 日本海海岸における人工島緑化の適性樹種に関する最終評価

樹種名(生活型)	中間評価	最終評価(5年間の観測結果からの評価)			
	耐潮風性・生育性	耐潮風性	枯死率(%)	生長ランク(樹高)(直径)	沿岸緑化への適性
1. ハコネウツギ(落葉低木)			数%未満	A B	十分適する
2. トベラ(常緑低木)			"	B C	
3. マサキ(常緑低木)			"	C D	
4. シャリンバイ(常緑低木)			"	C D	
5. ヤブツバキ(常緑高木)			"	C D	
6. エノキ(落葉高木)			"	A A	
7. カシワ(落葉高木)			"	A B	
8. ナワシログミ(常緑低木)			20%未満	B C	適する
9. タブノキ(常緑高木)			"	D D	
10. ネズミモチ(常緑高木)			"	C D	
11. アカメガシワ(落葉高木)	x		20%	A A	適さない
12. ケヤキ(落葉高木)	x		21-30%	C C	
13. スダジイ(常緑高木)	x		"	B D	
14. シロダモ(常緑高木)			"	D D	
15. アキグミ(落葉低木)			"	A A	
16. ネムノキ(落葉高木)	x		31-40%	C C	
17. クロマツ(常緑高木)			"	B B	
18. ハゼノキ(落葉高木)	x		41-50%	C C	
19. ヤブニツケイ(常緑高木)			"	D D	
20. アオキ(常緑低木)	x		51-75%	D D	
21. カクレミノ(常緑高木)	x		"	D D	
22. クスノキ(常緑高木)	x		75%以上	- -	
23. エゴノキ(落葉高木)	x		"	- -	
24. アラカシ(常緑高木)	x		"	- -	

注) ; 適する。 ; 生長は遅いが適する。 ; 生育可能だが生長は不良。 x ; 適さない。  
 は5年間の枯死率が数%未満で、夏季(7月)の潮風発生率がすべて20%以下の樹種。  
 は5年間の枯死率が20%未満で潮風発生率が30%未満の樹種。  
 は5年間の枯死率が20%以上の樹種。  
 生長ランク(樹高)はAが25-35cm/年、Bが15-25cm/年、Cが5-15cm/年、Dが5cm未満/年を示す。  
 生長ランク(直径)はAが9-12mm/年、Bが6-9mm/年、Cが3-6mm/年、Dが3mm未満/年を示す。  
 - は枯死個体が多い(集計本数少ない)ため表示しないものを指す。

生ポット苗を使い、枝張りの良いものを選ぶ必要がある。

植栽方法については、密度を高く(2~4本/m<sup>2</sup>)し、その集団効果により、個々の苗の受ける風当たりや乾燥を緩和することが重要である。植栽樹種の配置については、基本的に海側に低木性樹種を植え、その後方に高木性樹種を植える。

(4) 植栽後2、3年の監視

植栽後2、3年までは苗木と苗木の間が空いているため、乾燥や潮風などの影響を受けやすく、樹木の生育状況も変動が大きい。この時期には、周年的な目で生育推移を見守る必要がある。

当研究所の日本海側での試験では、植栽後の生育状況の変動として、図5-1-2のような季節変動と経年変動が観察された。季節変動は日本海海岸の潮風強度の季節変化および植物季節(夏季の新梢・葉の伸長・展開)に対応

したものであり、植栽後3年位まで繰り返された。経年変動については、年を追って生育状況が改善され一定の生育状況に収斂した。これは、生長に伴う個々の木の枝葉の込み合いによる風当たりの減衰と、樹木の潮風に対する順化などが関係するものと推定される。

(5) 大きな被害が生じた時の対策(補植)

林冠が閉鎖する前に多数の枯死木が発生すると、個々の木の受ける風当りは強まり、潮風害が拡大する危険性がある。このような場合には、最初の植栽時よりもさらに密度が高まるような補植を行うことが有効である。

潮風の厳しい環境下での補植は、①補植木が既存木の受ける風当たりを緩和してその生育を助ける効果、②既存木が補植木の受ける風当たりを緩和してその活着・生育を助ける効果があり、特に前者は耐潮風性の弱い樹種で顕著である。

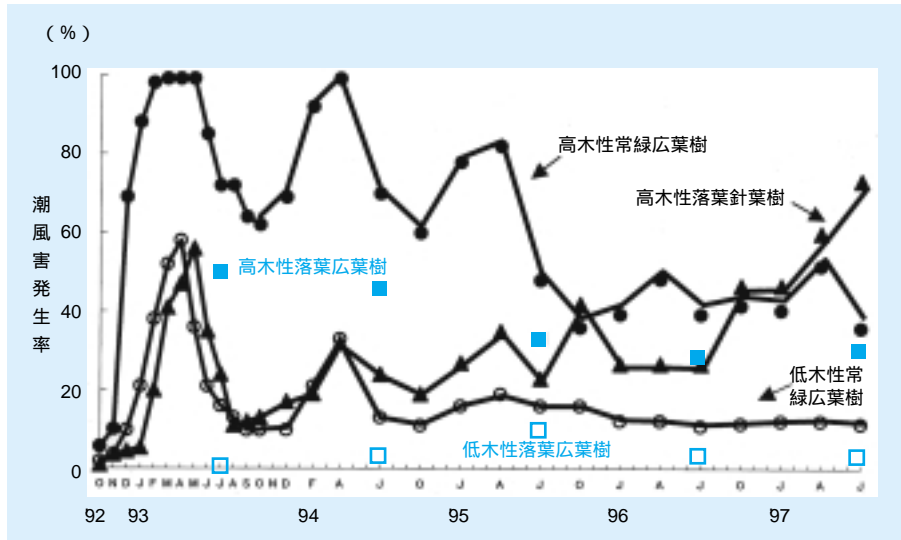


図5-1-2 植栽後の植栽木の生育状況（潮風害発生率）の変動

一方、光条件については、補植木は既存木に被陰されて光が不足することから、すべての樹種が補植に適するとは考えにくい。そこで、植栽木に適する樹種を検討した結果、シロダモ、タブノキなどは補植に適するが、クロマツは適さないことが分かった。また、補植に適する樹種の要件として、ある程度の耐潮風性をもつことに加えて、耐陰性(弱い光で生育できる性質)が強いが、伸長速度が大きいことが必要であることも分かった。

#### (6) 維持管理の考え方

人工島の緑化においては、まず高密度で植栽して活着率を高め、その後で適正密度を確保すること、また、潮風に強い林縁・林冠構造<sup>(3)</sup>を引き出し、緑地全体の耐潮風性を高めることが望ましい。このような緑地構造の誘導方法として、密度コントロールを行うための剪定法(根元伐採)と林冠線の早期形成を図るための剪定法(枝剪定)について検討した。

密度コントロールのための根元伐採は、この処理で枯死しやすい(生存率が低い)トベラやナワシログミに適用でき、林冠線を形成するための枝剪定は、その処理で多くの萌芽枝が発生・生存するトベラ、マサキ、シャリンバイ、ナワシログミに適用できることが分かった(表5-1-2)。また、マサキやシャリンバイは、多数の萌芽枝を発生することから、海側林縁に植栽した後に根元を伐採することにより、林内に風を入りにくい株状(叢生)樹形に仕立てられる可能性が示唆された。

### 5-1-3. 緑化デザイン

人工島式原子力発電所の緑化デザインを、景観、地域共生の観点から検討した。手順としては、既設の火力・原子力発電所および海岸部に立地している一般の工場等から収集した最新の緑化デザイン事例を分析するとともに、心理実験を通じて得られたデータ等を参考に、人工島式原子力発電所の緑化デザイン案を検討した。さらにコンピュータ・グラフィックス(CG)、バーチャル・リアリティ(仮想現実感:VR)技術を用いて視覚的に表現し、電力技術者等の評価を加えて最終的な緑化デザイン案を提案した。検討手順を図5-1-3に示す。

#### (1) 工場等緑化デザインの最新動向

昭和49年に工場立地法が改正され、一定規模以上の工場(特定工場)に対して新增設時に20%以上の緑地整備が義務づけられた。その後、我が国の工場環境はめざましく進展し、かつては3K(きつい、汚い、危険)と呼ばれた工場も、新3K(きれい、快適、貢献)へと様変わりした<sup>(4)</sup>。これら工場緑化の発展を期待して、通産省が主導となって緑化優良工場を毎年選定し、表彰を行っている。そこで、これまでに緑化優良工場として表彰を受けたことのある発電所や一般工場を対象に現地調査を行い、緑化デザインの特徴、整備手法等について明らかにした。調査事例は、表5-1-3に示す通りである。



表5-1-2 剪定処理に伴う萌芽枝の発生と生存率の推移

処理区	樹種	萌芽枝の発生状況		発生萌芽枝の生存本数(生存率%)		
		発生率(%)	本数(n)	(1995.11) (n) (%)	(1996.4) (n) (%)	(1996.10) (n) (%)
根元伐採	トベラ	78	91	90 (99)	19 (21)	7 (8)
	マサキ	100	66	64 (97)	55 (83)	41 (62)
	シャリンバイ	100	74	71 (96)	56 (76)	40 (54)
	ナワシログミ	100	17	17 (100)	13 (77)	12 (71)
	アキグミ	100	53	48 (91)	43 (81)	25 (47)
	ハコネウツギ	100	104	100 (96)	90 (87)	-
枝剪定	トベラ	100	900	835 (93)	382 (42)	278 (31)
	マサキ	100	194	194 (100)	171 (88)	139 (72)
	シャリンバイ	100	126	123 (98)	105 (83)	78 (62)
	ナワシログミ	100	88	87 (99)	80 (91)	58 (66)
	アキグミ	100	114	104 (91)	48 (42)	12 (11)
	ハコネウツギ	100	421	369 (88)	284 (68)	-

注) 萌芽枝発生率は根元伐採または枝剪定の処理を行った個体数に対する萌芽枝の発生した個体数の割合。萌芽枝の本数は各供試個体から発生した萌芽枝の総和を示す(例えばマサキでは供試個体数が根元伐採で10本、枝剪定11本であるので、根元伐採により平均6.6本、枝剪定により平均17.6本の萌芽枝が発生したことを示す)。

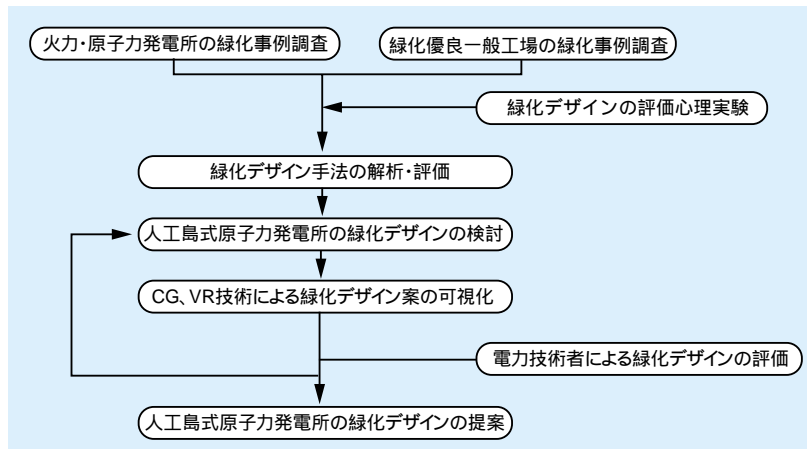


図5-1-3 緑化デザインの検討手順

現地調査の結果をもとに、これら緑化優良事例を、①ガーデンタイプ(造園的手法)、②パークタイプ(公園的手法)、③ランドスケープタイプ(自然風景的手法)、④ネイチャータイプ(自然環境保全・復元手法)の4タイプに整理・分類した。分類された4タイプの緑化デザインの特徴は、以下の通りである。

1) ガーデンタイプ(造園的手法)

伝統的な日本庭園をイメージさせる緑化デザインを随所に採用している工場等が該当する。刈り込みされた樹木と岩や池などがコンパクトに配置され、緑は豊かであるが、若干閉鎖的な空間となるのが特徴である。日本庭

園風緑化に重点をおいたノーリツ鋼機梅原工場がこのタイプである。

2) パークタイプ(公園的手法)

人工的で、見通しの良い、美しい整形的な緑化に重点をおいている発電所・工場である。緑地の内容はシバや低木刈り込みなどを整形的に配置したものが多く、西洋庭園風緑化や芝生地と低木の刈り込みなどに重点を置いた秋田火力、東新潟火力などが該当する。

3) ランドスケープタイプ(自然風景的手法)

見通しの良い広々とした芝生地主体の開放的な緑地を

表5-1-3 緑化デザイン調査事例一覧

発 電 所			
発電所名	種 別	事業者名	所 在 地
苫東厚真	火 力	北海道電力(株)	北海道厚真町
秋 田	火 力	東北電力(株)	秋田県秋田市
仙 台	火 力	東北電力(株)	宮城県七ヶ浜町
新 仙 台	火 力	東北電力(株)	宮城県仙台市
東 新 潟	火 力	東北電力(株)	新潟県聖籠町
広 野	火 力	東京電力(株)	福島県広野町
新 清 水	火 力	中部電力(株)	静岡県清水市
七尾大田	火 力	北陸電力(株)	石川県七尾市
海 南	火 力	関西電力(株)	和歌山県海南市
御 坊	火 力	関西電力(株)	和歌山県御坊町
玉 島	火 力	中国電力(株)	岡山県倉敷市
川 内	火 力	九州電力(株)	鹿児島県川内町
柏崎刈羽	原子力	東京電力(株)	新潟県柏崎市・刈羽村
浜 岡	原子力	中部電力(株)	静岡県浜岡町
伊 方	原子力	四国電力(株)	愛媛県伊方町
川 内	原子力	九州電力(株)	鹿児島県川内町

一 般 工 場 等	
会社・工場等の名称	所 在 地
キリンビール(株) 千歳工場	北海道千歳市
新王子製紙(株) 江別工場	北海道江別市
ピーエス工業(株) 札幌工場	北海道広島町
ニッカウイスキー(株) 仙台工場	宮城県仙台市
第一製薬(株) 秋田工場	秋田県秋田市
三協化学(株) 広野工場	福島県広野町
北越工業(株) 吉田工場	新潟県吉田町
花王(株) 和歌山工場	和歌山県和歌山市
ノーリツ鋼機(株) 梅原工場	和歌山県和歌山市
九州耐火煉瓦(株)	岡山県備前市
サッポロワイン(株) 岡山ワイナリー	岡山県赤坂町
(株)林原生物化学研究所 吉備製薬工業	岡山県賀陽町
富田工業(株) 岡山工場	岡山県吉永町
ニッポン高度紙工業(株) 安芸工場	高知県安芸市
ハマナカホビール(株) 新富工場	宮崎県新富町
(株)ワールドインダストリー宮崎	宮崎県山田町

有し、人が芝生地の中に入って散策などに利用できる緑化に重点をおいている発電所・工場がこのタイプである。緑地の内容はシバなどを主体とし、樹木を非整形的に疎に配置したデザインが多く、芝山を多く採用していることも特徴である。キリンビール千歳工場やニッカウイスキー仙台工場などが該当する。

#### 4) ネイチャータイプ(自然環境保全・復元手法)

自然なイメージ、自然環境の保全・復元を緑化のポイントとしている発電所・工場である。敷地面積が大きくかつ既存林面積が大きい原子力発電所では、自然環境の保全を中心とした緑化デザインが多く採用されている。緑地の内容は、既存林の保全や、エコロジー緑化(幼苗植栽と呼ばれる植栽手法で、潜在自然植生による樹種選定と密植により大規模な樹林を造成することができる)、高木林の設置、ピオトープ(野生生物の生息・生育空間)の設定などであり、自然環境の保全を緑化の目標とする多くの発電所や工場が、ここに位置づけられる。

#### (2) 緑化デザインのイメージ分析

次に、上記の4タイプで用いられている緑化デザイン手法の評価・効果を明らかにするために、スライドを用いた評価実験を行い、人工島式原子力発電所で検討する

具体的な緑化デザイン手法選定の際に役立てた。

4タイプのデザイン事例の中から、外周部、エントランス、構内道路等といった緑化空間と緑化デザイン手法の組み合わせに考慮して心理実験に用いるサンプルを42枚に絞り込んだ。それぞれのサンプルを被験者に提示し、各サンプルのデザイン性、景観性、快適性の評価及びそれらを総合的に判断した総合性に関する評価(5段階)と、21対の形容詞によるイメージ(7段階)をアンケート用紙に回答する方法で行った。被験者は、性別、年齢等に配慮して、24名を選定した。

まず、最初に実験に使用したサンプルを総合評価値の平均値の高い順番に並べて、評価の傾向を分析した。「どちらでもない」より高い評価を得た写真は19事例、低い評価の写真は22事例である。図5-1-4に評価の高いサンプルを示す。芝生が広がり開放感の感じられる事例が最も総合評価が高く、次いで、ブロックの階段周囲を低木の刈り込み及び高木で植栽が行われている事例、池の水面と芝生地が前面に広がり、池の対岸には芝で覆われている丘がある事例、白樺の林内にベンチがある事例と続く。逆に総合評価が最も低いのは、構内道路沿いにクロマツの列植がある事例で、構内道路沿いの法面を草本で覆った事例、金網のフェンス越しにクロマツの自然林が見える事例、発電所施設の外壁の前面に高木が数

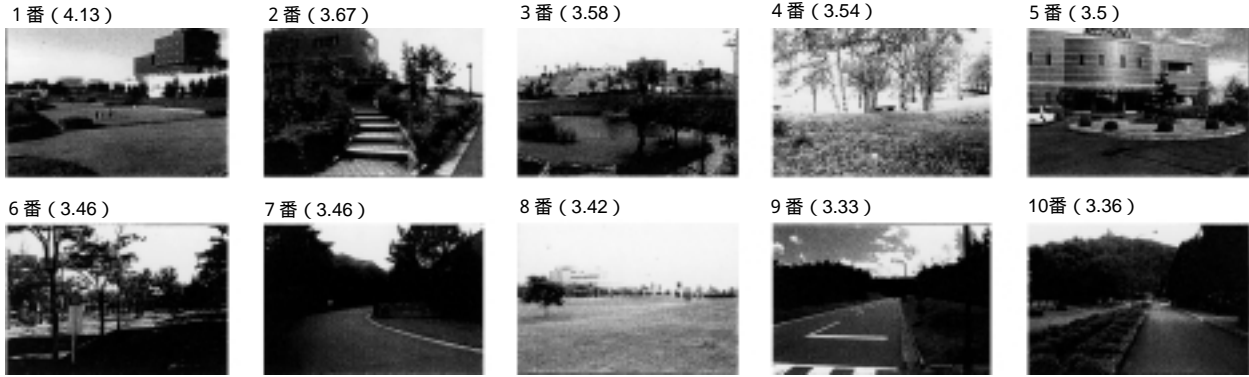


図5-1-4 サンプル画像（総合得点上位10番）

十本および芝生地となっている事例となっている。4つのタイプ別に順位をみると、上位3番までは、パークタイプで占められている。また各タイプに属するサンプル平均値は、パークタイプ、ネイチャータイプ、ランドスケープタイプの評価が高く、ガーデンタイプは「どちらでもない」の値に近い結果となった。

次に、緑化デザイン手法の異なるサンプル間のイメージの違いを明らかにするために、多変量解析手法である因子分析を行い、イメージの軸を抽出するとともに、それぞれの緑化デザイン手法のイメージを明らかにした。因子分析の結果、第1～4までの因子を抽出した。第1因子は、豊かな、雰囲気のある、親しみがある等の形容詞で表され、「雰囲気」の因子と言える。第2因子は、開放的な、圧迫感のある、軽快な等の形容詞で表され、「空間の評価」という因子と言える。第3因子は、整形的な、整然とした等で代表される緑化デザインの「様式」という因子。第4因子は、にぎやかなに代表される「空間の活力」という因子といえる。

### (3) 人工島式原子力発電所の緑化デザイン

事例調査結果および緑化デザインのイメージ調査の結果から、人工島式原子力発電所の緑化タイプを「パークタイプ」、「ランドスケープタイプ」および「ネイチャータイプ」の3つとし、詳細な緑化デザインを検討した。

#### 1) パークタイプ

外周部のマウンド上にエコロジー緑化を行い、防潮、防風や遮蔽効果を高めるとともに、外周部緑化マウンドに高低差をつけることにより柔らかさを演出した。発電施設を遮蔽するために、視線方向にマウンドを設け、そ

の天端から法尻までの法面にエコロジー緑化を行い、遮蔽効果を高めるとともに防潮、防風効果を持たせた。これらと反対側の構内道路側法面には、整形的な低木の刈り込みをダイナミックに階段状に配置することにより、人工的で開放的なイメージを演出した。使用した樹種は、耐潮風性の優れた低木性常緑広葉樹であるトベラ、シャリンバイ、ナワシログミとした。事務本館、PR館周辺では高い修景性が求められるため、芝と低木性常緑広葉樹であるトベラ、ハマヒサカキとオカメザサを整形的に幾何学的にデザインし、人工的で開放的なイメージを演出した。また、アクセントとして耐潮風性の強い高木性常緑広葉樹のタブノキを単木状に配置した。

#### 2) ランドスケープタイプ

外周部のマウンドおよび構内のマウンド上にエコロジー緑化を行い、防潮、防風や遮蔽効果を高めるとともに、敷地内にまとまった樹林を創出することにより、丘陵の林のイメージを演出した。逆に、道路沿いの平坦部では、芝生を広い面積で配置することにより、来訪者などが散策に利用しやすい空間とし、明るく開放的なイメージを演出した。また、単調なイメージを避けるため、広い芝生地にリズムカルに芝山を配置した。さらに、エコロジー緑化の林縁部分には平坦部に樹林を付加し、林縁が曲線的になるように配植することにより、柔らかなイメージを演出した。道路沿いでは潮風が吹き抜けるため、単木植栽をせず、複数で植栽することにより、樹木が集団で潮風に抵抗できるように配慮した。このような高木の疎植という手法は、密植よりも潮風害に弱いために、潮風害に強い高木性常緑広葉樹のタブノキを採用した。事務本館、PR館周辺では、シバを主体とし、開放的な

イメージを演出した。さらにここでは、アクセントとしてシバのピラミッドをデザインし、修景性を高めた。樹木は森林にならないように2～5本と少ない本数で小群状に植栽し、開放感を阻害しないように配慮した。樹種は、高木性常緑広葉樹では耐潮風性の強いタブノキと緑陰樹として高木性落葉広葉樹のエノキを配置することとした。

### 3) ネイチャータイプ

外周部のマウンド上にエコロジー緑化を行い、防潮、防風や遮蔽効果を高めた。構内のマウンド上にもエコロジー緑化を行い、防潮、防風や遮蔽効果を高めるとともに、敷地内にまとまった樹林を創出することにより多様性がある、野生生物などが利用しやすい環境(ピオトープ)を創造する。来訪者や、見学者など多数の人が通行する構内道路周辺にもエコロジー緑化により樹林を創出し、「緑の中の発電所」を演出した。事務本館、PR館周辺では、来訪者や職員などが滞留するため、人がゆったりと歩ける程度に樹木の密度を低く抑えた樹林を創出し、散策などに利用できるように配慮した。樹林は自然林の構成を参考とし、高木・低木、落葉・常緑の樹種を混植した構成として自然林のイメージを演出した。樹種選定は、植栽試験結果を参考に、潮風に強く自然の林にみられる樹種から選定した。具体的には、高木性常緑広葉樹ではタブノキ、シロダモ、ヤブニッケイ、ネズミモチ、ヤブツバキ、低木性常緑広葉樹ではトベラ、マサキ、シャリンバイ、高木性落葉広葉樹ではエノキ、カシワ、アカメガシワ、高木性常緑針葉樹のクロマツの12種を混植する計画とした。

### (4) 緑化デザインのビジュアル化

上記の考え方に沿って図面上に作成した緑化デザイン案をCGを用いて視覚表示させるとともに、VR技術を利用して緑化シミュレーションを作成した。まず、潮風害に強い特殊な樹木CGを作成する必要があるため、樹木作成アプリケーションソフトを用いた。作成したのは、高木性常緑広葉樹のタブノキ、シロダモ、スダジイ、ネズミモチ、カクレミノ、ウバメガシ、ヤブツバキ、の8種類、高木性落葉樹のエノキ、カシワ、アカメガシワの3種類、低木性常緑広葉樹のシャリンバイ、トベラ、ハマヒサカキ、マサキの4種類、合計15種類である。人

工島全体では、高木で約4千～6千本、低木で2千～4千本の樹木が植栽されている。そのためCG樹木をすべて3次元データとして取り込むと、データが非常に重くなり処理にかなりの時間がかかるため、透明なボード上にCG樹木のテクスチャーをマッピングする方法を用いてデータ量を抑える工夫を行った。原子炉建屋等の施設については、CADソフトにより作成したモデルをVRシミュレーションに組み込んだ。

VRシミュレーションでは、緑化デザインを検討した人工島式原子力発電所の仮想空間をリアルタイムに体験することが可能となる。このシステムを用いて、視点を自由に变化させながら、外周マウンドの高さ・形状、植栽場所、樹種等の変更を随時行いながら、最終的なデザイン案を煮詰めていく作業を行った。また、各電力会社等の技術者を対象にシミュレーションを実施し、その評価結果もデザイン案に反映させた。

VRシミュレーションで検討し、修正したCGをそのまま静止画として出力し、成果物として扱うには、影がないなどの点で精度が低すぎるといった問題がある。そこでレンダリング機能を強化したシステムを用いることによって、図5-1-5に示すフォトリアリスティック(写真画質)なCG画像を作成した。

## 5-1-4 ま と め

耐潮風緑化技術として以下のような方法を取りまとめた。

- ① 防風ネット、支柱、敷き藁マルチを施したマウンド状植栽基盤の構成
- ② 冬の潮風が強い日本海側と台風シーズンに短期的に潮風が卓越する太平洋側それぞれの適性樹種
- ③ 海側に低木性樹種、後方に高木性樹種を配置したポット苗による高密度植栽方法
- ④ 植栽後2、3年の周年的な監視とその後の経年的な監視
- ⑤ 枯死害が出たときの補植法
- ⑥ 根元伐採による適性密度の確保と枝選定による林冠の形成

また、人工島式原子力発電所の緑化デザインを以下の手順で取りまとめた。

- ① 工場緑化デザインの最新動向としてガーデンタイプ、



人工島式原子力発電所の鳥瞰3イメージ



ランドスケープタイプのイメージ



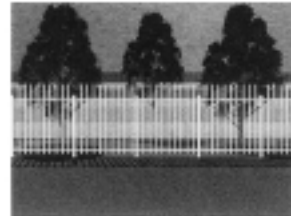
ネイチャータイプのイメージ



パークタイプのイメージ



ネイチャータイプのイメージ



外周部(防波護岸内側)緑化イメージ

図5-1-5 緑化デザインのイメージCG

パークタイプ、ランドスケープタイプ、ならびにネイチャータイプを整理・分類した。

- ② 心理実験によってパークタイプが人工島式原子力発電所の緑化デザインとして最も優れており、ついでネイチャータイプとランドスケープタイプが適していることが分った。

- ③ 上でまとめた耐潮風緑化技術に基づいて上記3タイプの人工島式原子力発電所の緑化デザインを作成した。
- ④ 作成した緑化デザインをCGとバーチャルリアリティシミュレーションを用いて立体的にビジュアル化した。

## 5 - 2 藻場造成技術

人工島式原子力発電所の建設は、自然の海岸線を残して、さらに新たな海岸線と静穏域を生み出す。こうした発電所周辺海域に多様な生物が生息し、魚介類の産卵場、ウニ・アワビなどの餌海藻の供給源、水質浄化などさまざまな機能を持つ藻場を造成することができれば、水産振興ならびに地域と発電所の共生に大いに役立つ。

当研究所ではアマモ場、アラメ、カジメ場などの造成技術の開発に取り組んできており、ここでは特に、藻場の持続性とコスト面を考慮し、できるだけ維持・管理を行わないですむ、自然模倣の藻場造成技術について、その研究成果を中心に紹介する。

### 5-2-1 藻場形成を制限している主要な要因

藻場、特に岩礁性藻場の生産力や現存量を左右する要

因のうち非生物的なものは、日射量、海水の濁り、水深、水温、塩分、栄養塩、波浪、着生できる基質(岩盤、転石)の有無、砂礫による着生基質の研磨、着生基質への堆砂などが挙げられる。また、生物的要因として動物による摂食などが挙げられる<sup>(1)</sup>(図5-2-1)。

藻場の現存量が小さくなり、ついには藻場が衰退・消失する減少を磯焼け(コラム参照)と呼ぶ(図5-2-2)。この藻場衰退を引き起こす要因として、海況(主に水温)の変化、栄養塩の欠乏、淡水の流入、天候の異変、藻食動物の摂食、付着生物による海底基質の占有、堆積物による海底基質の埋没などが考えられている。また、藻場の現存量変化は、式(1)に示すように、光合成、呼吸、葉の脱落、死亡、加入で表され、光合成は水深、海の濁り、天候、水温、栄養塩に影響される。動物による摂食は、葉の脱落と死亡に影響を与える。再生産による新たな芽生えや

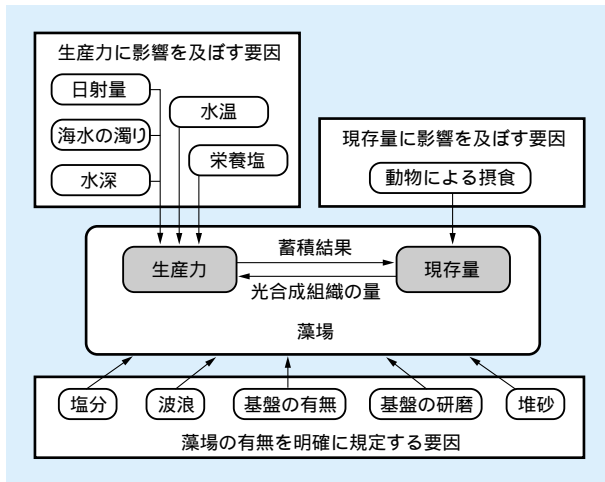
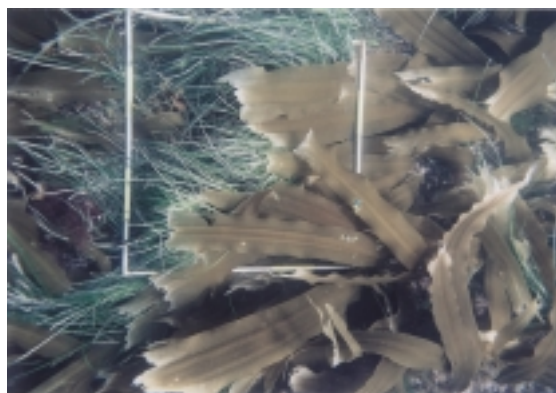
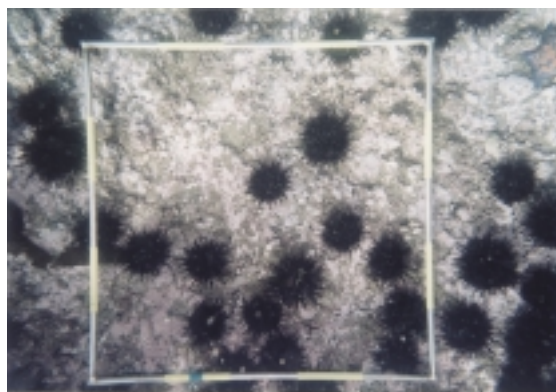


図5-2-1 藻場の生産力、現存量を左右する要因の模式図



繁茂したコンブ場



磯焼け

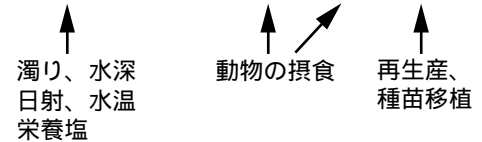
図5-2-2 コンブ場とそれが磯焼けした海底の状況

人為的な種苗移植による加入と光合成が、呼吸、葉の脱落、死亡に比べて大きければ現存量は増え、逆に小さければ、現存量は小さくなり、藻場の衰退や消失に向かう。

藻食動物による摂食が藻場の生産力を上回る場合には、藻場の現存量が徐々に小さくなり、ついには藻場の消失を引き起こすことが考えられる。過剰な摂食により藻場

を衰退させる食害動物として、寒流域ではウニ類、暖流域ではウニ類、巻貝類に加え藻食性魚類が知られている。

$$\text{現存量変化} = \text{光合成} - \text{呼吸} - \text{葉の脱落} - \text{死亡} + \text{加入} \quad (1)$$



磯焼け状態の海底から藻食動物を継続的に取り除いたり、藻食動物が侵入できないように枠などで囲うことによって、藻場が形成されることが報告されている<sup>(2)、(3)、(4)</sup>が、これは動物を取り除くことにより、葉の脱落や死亡の項が小さくなり、現存量が大きくなったことによる。

## 5-2-2 自然模倣の藻場造成技術

### (1) 自然模倣の藻場造成技術とは

藻場造成では、できるだけ維持管理を必要としないものが望ましい。そのためには、自然模倣に基づく藻場造成を行うことが考えられる。この方法は、自然の状態では海藻草類が生育している場所と生育していない場所の環境条件を調査し、それらと比較することにより、海藻草類の生育を制限している要因を見いだす。そして、その要因を人為的に海藻草類の生育に適したものに改善し、藻場を造成しようとするものである。しかし、人為的に改善できる環境要因は限られており、基本的には既存の土木技術を用いて、海藻草類の着生面が動かないよう安定化する、あるいは、海底面の嵩上げにより必要な光が得られるようにするなどの方法により、藻場造成を行うものである<sup>(5)</sup>。これまでの藻場造成に関する知見および当研究所での研究成果を踏まえ、自然模倣の藻場造成法の手順を図5-2-3に示した<sup>(6)</sup>。

前提条件は、①海底地形や底質の改変により対象とする海藻草類の増殖を促進する、②対象とする海藻草類の種苗は移植しない、③設置または整備した基盤上での動植物の人為的な管理をしないの3つである。

対象海域がこれらの前提条件を満足する可能性のある海域かどうかを判定する重要な情報は、海域の物理環境(海底地形や底質、波浪など)と対応した底生生物の分布である。特に、海藻草類が生育し、貝・ウニ類など藻食動物が少ないかどうか、海藻草類の生育水深帯に砂地が

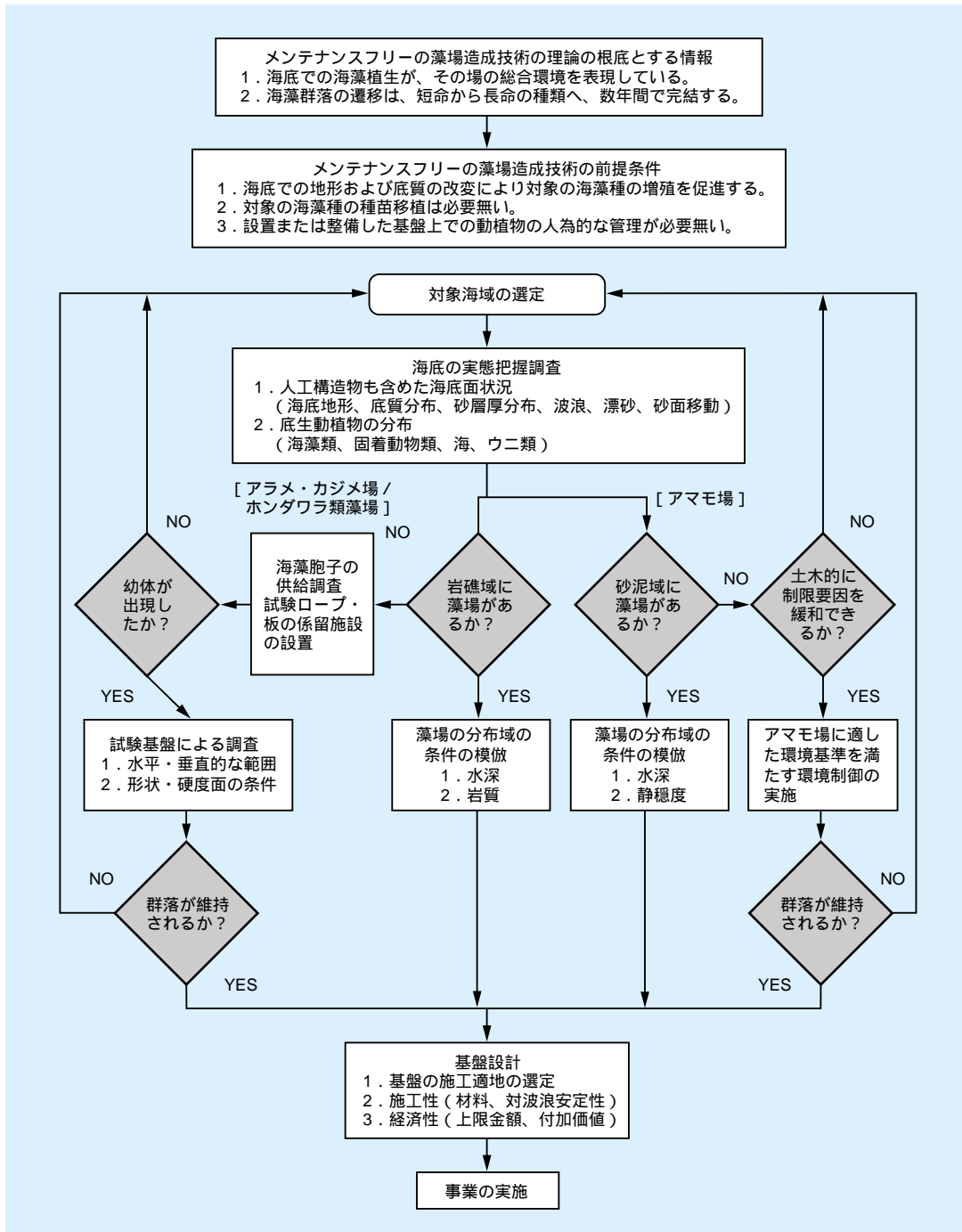


図5-2-3 自然模倣の藻場造成手順

あるかどうか重要なポイントになる。

フロー図の海底の実態把握調査と基盤設計との間の部分では、対象とする海藻の種類を何にするか、また近くに自然の藻場があるかどうかによって、藻場造成適地の選定手法や調査項目が異なってくる。

基盤設計では、基盤の施工適地や施工性(材料や対波浪安定性)、経済性(上限金額や付加価値)の観点から最適なものを選定した後、事業の実施(藻場造成基盤の設

置)とその後のモニタリングを行う。

## (2) 自然模倣の藻場造成技術に関する実証試験例

砂地海底に安定な人工基盤を設置するのみで岩礁性の藻場がつかられ、維持されることを確認するため、自然模倣の藻場造成技術の実証試験を三浦半島西岸の横須賀市秋谷地先海域で行った<sup>(7)(8)</sup>。

まず、海底の地形(水深)と底質(砂と岩)の分布を、音

響測深機やサイドスキャンソナーを用いて、正確に調査した。次に、音響測深機や潜水観察などの調査から、岩礁域で優先する海藻種が、アラメ、カジメであることが分かった。それらの分布域は、アラメが8 m以浅、カジメが5 ~ 23m、また、現存量は、アラメが5 m付近、カジメが5 ~ 10 mで多かった。

通常、砂地海底に設置された構造物は、砂の層に覆われた岩盤に着岩するまで沈下するので、砂地海底に設置した藻場造成用の基盤は、砂層厚分以上の高さが必要である。そこで、砂層厚が50cm以下の砂地域を音波探査機で調査し、把握した。

また、自然の藻場から500m程離れた場所でもローブなどの着生基質を置けば、アラメ、カジメの幼体が出現するが、100 m以内の場所の方が、その出現密度の高いことが分かった。

以上のことから、基盤の設置に適した場所は海藻の現存量から決めた水深の適地(アラメは3 m、カジメは10 m)と砂層厚および幼体の出現範囲から決めた平面的な適地の範囲の両方を満足するところとした。

また、基盤の設置時期は、目的とする海藻の幼体が多数出現し、速やかに成長する秋季から冬季とした。

基盤の設計に関しては、被覆材の重量、基盤の高さ、被覆材の表面形状について検討した<sup>(5)</sup>。

被覆材重量は、波浪観測結果から設計波を求め、水理

：現存量から判断すると、水深5mがアラメにとって適地であるが、カジメが混成するため、今回は3mとした。

模型実験によって安定な最低重量を決定した。また、被覆材重量と基盤造成コストとの関係についても検討し、コンクリートブロックの場合は4トン、割石の場合は500kgに決定した。

基盤の高さは、砂面からの高さで海藻の生育状況との関係、砂面の年変動幅、砂層厚を考慮し(図5-2-4)、余裕を見て1.5mとした。

砂地海底に設置された基盤を取りまく環境は、舞い上げられた底泥の沈降・堆積などにより、海藻の生育にとっては厳しいものとなる。そこで、基盤の表面形状の工夫から、より目的とする海藻の生残と成長に効果的な逆台形の突起物(ケルプノブ)を付けた(図5-2-5)。

以上のようにして、基盤の設置場所や形状などを決め、基盤を造成した結果(図5-2-6)約2年後には濃密なアラメとカジメの藻場が形成され(図5-2-7)自然模倣の造成技術が実証された。また、基盤の表面に取り付けたケルプノブの効果も、水深の浅いアラメ基盤で認められた<sup>(7)</sup>(図5-2-8)。

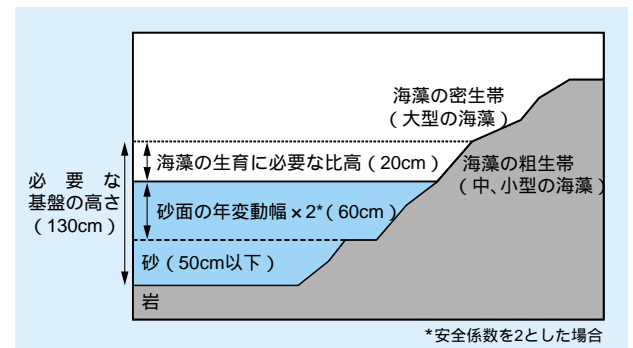


図5-2-4 基盤の高さの決定例

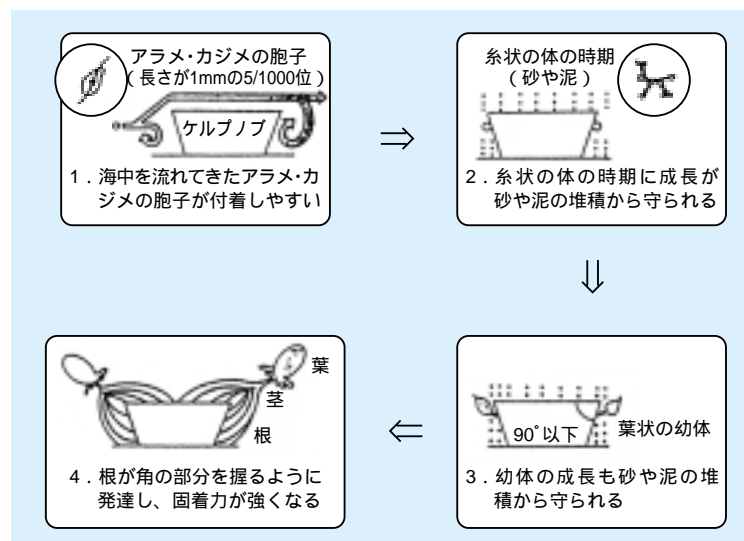


図5-2-5 基盤の上に取り付けるケルプノブの効果の模式図



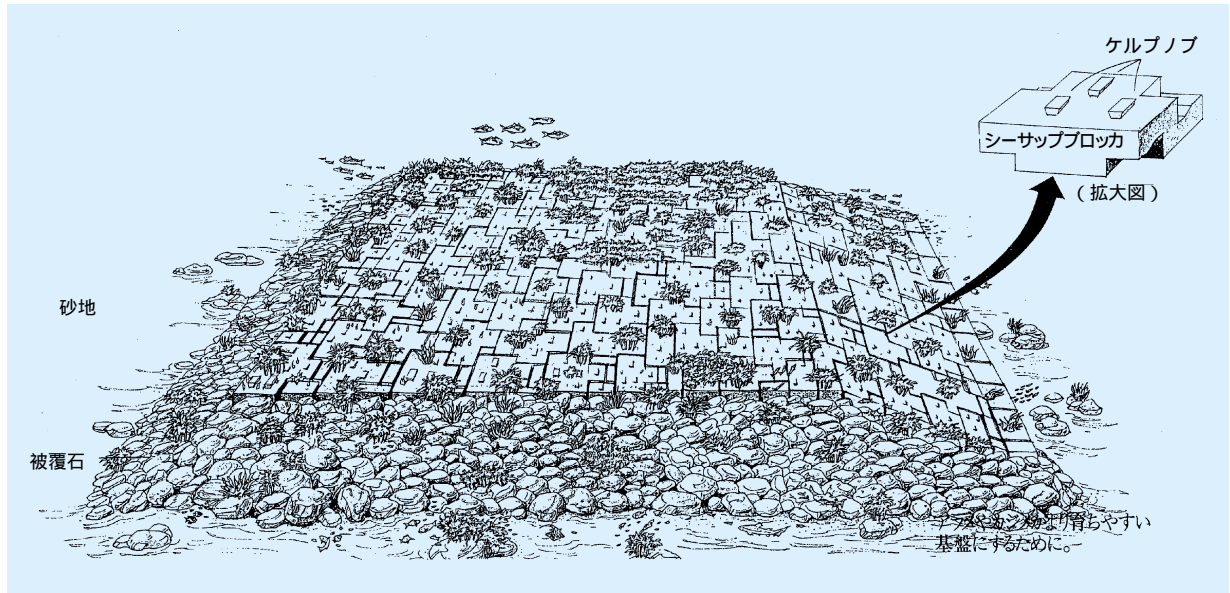


図5-2-6 海中林造成の実証試験用に設置した基盤の模式図



図5-2-7 造成したコンクリートブロック基盤上に形成されたカジメ場の状況（2年後）

(3) 人工島の護岸等を基盤とする藻場の形成状況の予想例示

人工島の建設が想定される海域の海底は、水深が15m前後と深く、基本的に砂が薄く被覆した岩礁域であるた

め、模倣すべき藻場が近くにない可能性が大きい。

しかし、外海に面した比較的単調な海岸線の場所であれば、模倣すべき藻場の調査対象範囲を拡大することができる。

本州中～北部の日本海側と太平洋側の自然岩礁や消波堤などについて、そこにみられる底生生物と海底地形や波当たりなどとの関連性についての調査結果に基づき、その沖合に人工島を建設した場合、その護岸に形成される藻場の状況についての予想例を模式図として図5-2-9と図5-2-10に示した<sup>(6)</sup>。

なお、藻場の調査結果から、ブロックの傾斜によって作り出される微小空間の環境条件の違いにより、生育する海藻の種類が変わることも分かった(図5-2-11)。このことは護岸に着生する海藻の種類を、ブロックの形状

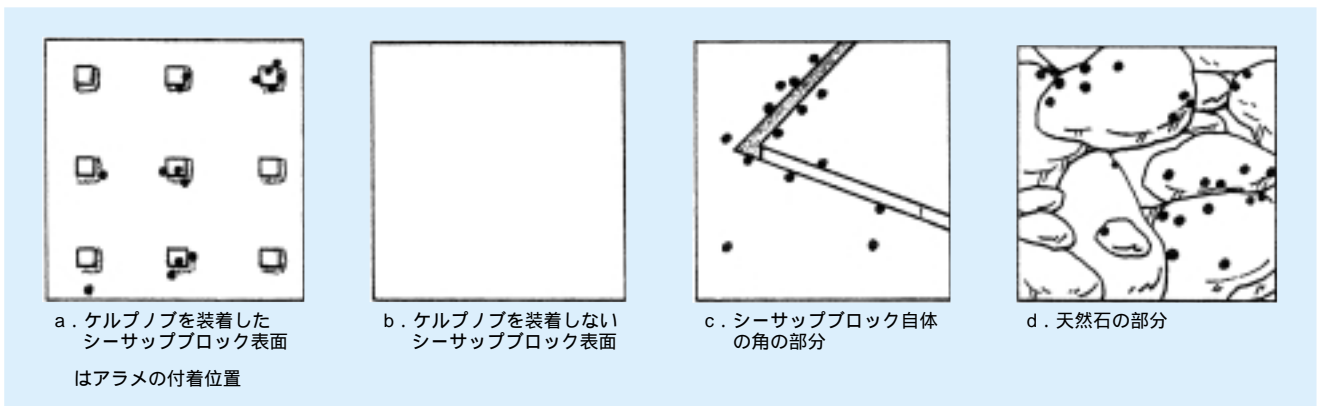


図5-2-8 ケルプノブの効果

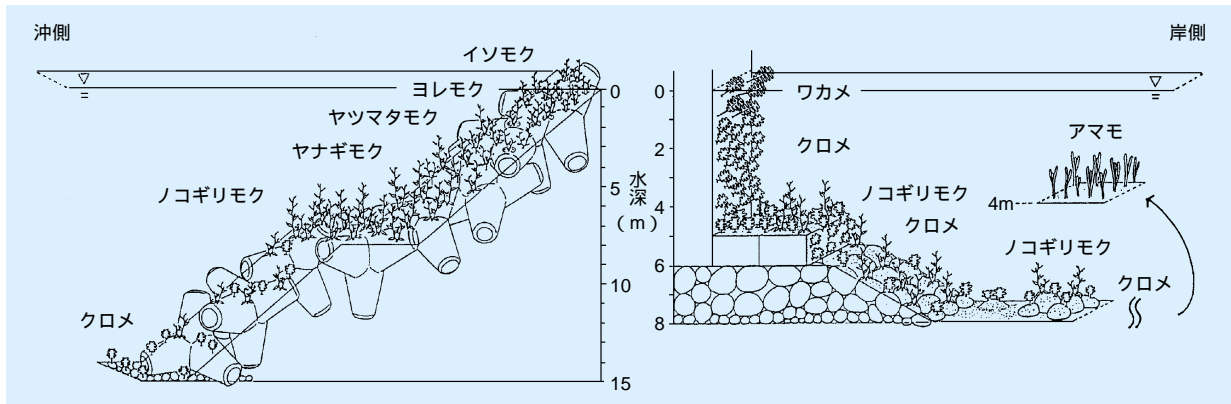


図5-2-9 日本海側中～北部の人工島護岸で予想される藻場の模式図

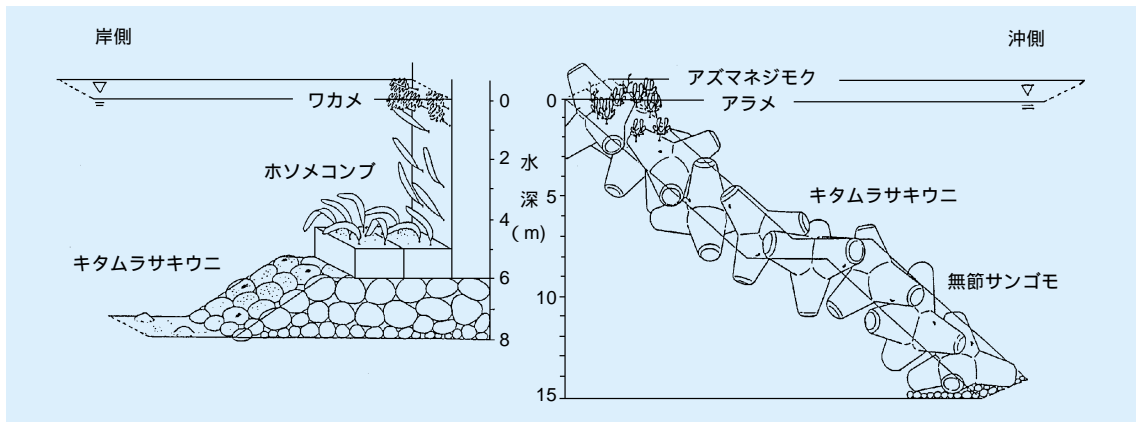


図5-2-10 太平洋側中～北部の人工島護岸で予想される藻場の模式図

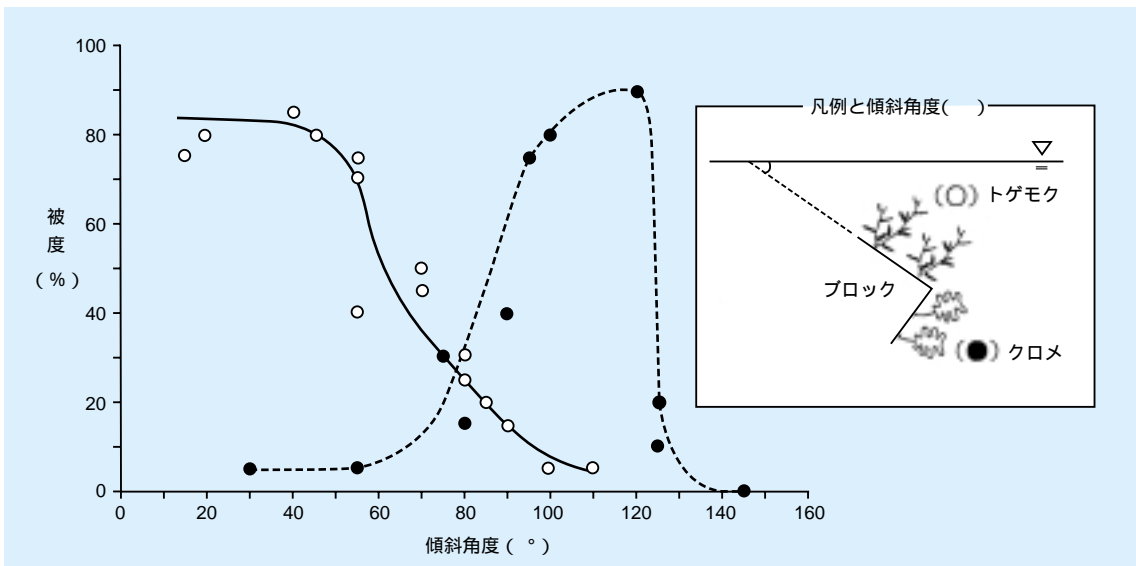


図5-2-11 消波ブロック表面の傾斜角度と生育海藻との関係 (富山県小境海岸の場合)

によりある程度選択できる可能性を示唆している。

### 5-2-3 藻場造成の高度化

自然模倣の藻場造成技術では、近くに既存の藻場があるか、あるいは試験基盤に藻場が形成される必要がある。藻場が存在しない場合、なぜ存在しないのかを見出せても、それをどの程度改善すればよいかを知ることができない。また、たとえ藻場を造成することができても、将来の環境変化に伴って、その藻場がどのように変化するのかを予測することもできない。そこで、海藻草類とその生長や生残などに影響する環境要因との関係を定量的に表現できる数値モデルを開発することにより、藻場造成技術がより確かなものになると考えられる。また、それは藻場への定量的な環境影響評価にも使えるものである。

藻場が維持されるか衰退するかは、光合成、呼吸、葉の脱落、死亡そして加入を合計した現存量変化が正となるか負となるかで決まることは先に記した通りである。この現存量変化を予想するために、光合成や呼吸などそれぞれを定量的に見積もることが望まれる。

当研究所では、藻場生産力、現存量変化を定量的に予測、評価するための道具として藻場生産力モデルを開発してきた<sup>(9)</sup>。このモデルは、優占種が明瞭であり、通年、藻場を形成する海藻を対象とする場合、その種特有の生物パラメータを入力することにより、藻場の生産力と現存量の変化を計算できる。なお、単一種が優先する藻場を通年形成するのは、カジメ、アラメやクロメといった海中林を形成するコンブ類海藻である。ホンダワラ類では複数種が混在することが多く、これらに適用するモデルについては、今後開発する必要がある。

中部太平洋岸の藻場構成種カジメについて、光量と温度に対する生産力計算結果の一例を、**図5-2-12**に示した。藻場生産力が最大になる温度は、光量が小さい場合に低くなる特徴がある。

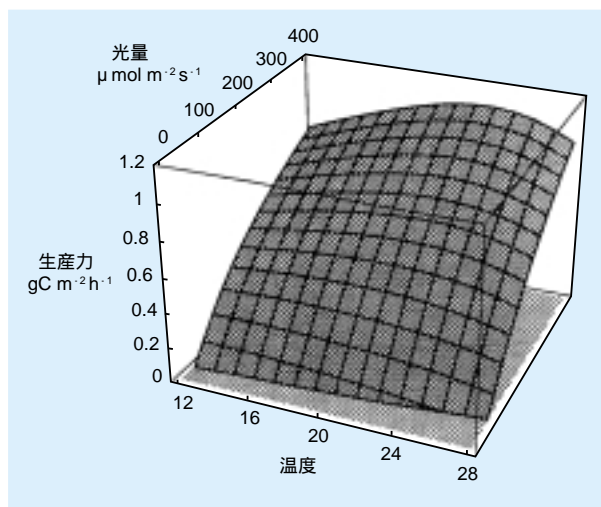
水深と現存量に対する生産力計算結果の一例を、**図5-2-13**に示した。現存量が一定でも水深が深くなるに従い、生産力が低くなり、**図5-2-13**の条件では水深22m以深では生産力は0となること分かる。

北海道の日本海側に繁茂するホソメコンブの現存量動態に対するキタムラサキウニの摂食影響の計算例を、**図5-2-14**に示した。ウニの密度が高くなることにより摂

食影響が大きくなり、コンブ現存量が抑えられる。この計算では、コンブ現存量が小さくなくても、ウニがコンブを見つけて摂食できる条件で計算した。しかし、海藻現存量が小さくなるに従い、ウニが海藻を見つけられない確率が高くなることが知られており<sup>(10)</sup>、この計算では、コンブ現存量が小さい場合にウニの摂食影響を過大に評価していると考えられる。

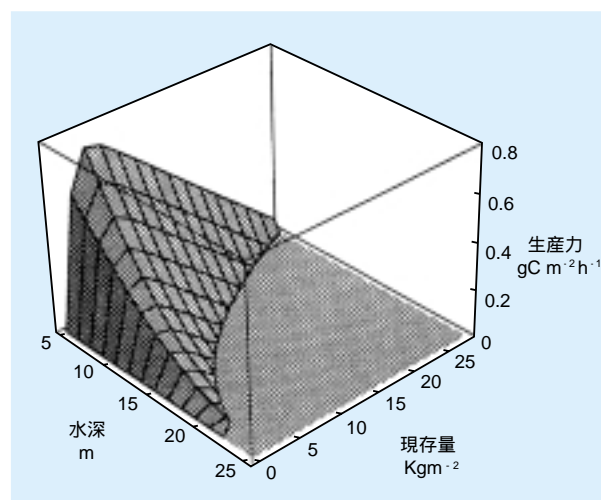
### 5-2-4 ま と め

以下のような自然模倣の藻場造成技術を提案・実証した。



**図5-2-12 カジメの光量・温度 生産力関係**

計算条件：吸光係数0.4、単位葉面積あたりの重量400g $m^{-2}$ 、葉部現存量4kg $m^{-2}$ 、茎部現存量2kg $m^{-2}$



**図5-2-13 カジメの現存量・水深 生産力関係**

計算条件：吸光係数0.4、単位葉面積あたりの重量400g $m^{-2}$ 、葉部現存量：茎部現存量2:1、海面での光量500  $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ 、海水の消散係数0.15 $m^{-1}$ 、温度20

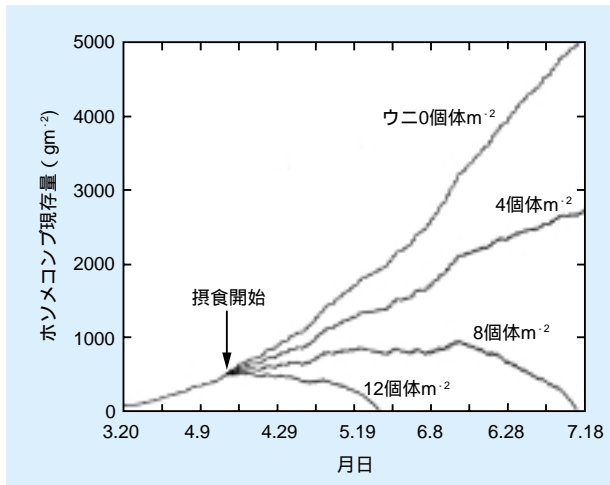


図5-2-14 ホソメコンブ現存量動態に与えるキタムラサキウニの摂食影響の計算例

① 海藻草類の移植や管理をしなくても底質の改変だけで藻場を造成できる適地の選定法。

② 海藻の着生を助ける逆台形状の突起(ケルプノブ)をつけたコンクリートブロック等による基盤造成法。

③ 海岸構造物上に形成される藻場の予測手法。

また、藻場の現存量変化を予測するための以下の藻場生産力モデルを開発した。

① 光や温度などによって変化する藻場の生産力を評価するモデル。

② ウニなどによる摂食影響を考慮した現存量予測モデル。

さらに、今後は動物の摂食行動を考慮した海藻生育限界評価法や、動物の生息密度制御法の開発が望まれる。

### コラム3 磯焼け

藻場(海藻の林)は藻食動物やそれを食べる肉食動物からなる食物連鎖を支えるとともに、魚介類の産卵場でもあり、沿岸生態系の重要な場所である。藻場が消失して何年も回復しないことを「磯焼け」と呼ぶ。もともと伊豆東部地方の漁師が、有用海藻が消失して、岩面を覆うピンク色の海藻(無節サンゴモ類)が目立ち、磯が焼けたような景観になるので、このように呼んだのが語源である。磯焼けすると有用海藻が採取出来ないばかりでなく、海藻を餌としているアワビやサザエなどさまざまな動物にも影響が現れ、沿岸漁業にも少なからぬ影響を与える。磯焼けの原因としては藻食動物による過剰な摂食、水温や濁りなどの海況変化などさまざまな要因が考えられている。なかでも近年注目されているのは、底生動物や魚類による過剰な摂食影響による磯焼けである。海藻の体は光合成により生産される一方、死亡や葉の脱落により減っている。生産される量が減る量より多ければ藻場の現存量は大きくなるが、動物による摂食が余りに多く、生産が追いつかなければ、やがて藻場は衰退し磯焼けになってしまう。

キタムラサキウニとコンブの磯焼け関係は近年研究が進んでいる。キタムラサキウニはコンブを旺盛に食べるが、海底面の流速が速くなると摂食

量が低下することが知られている。水深が深くなると磯焼け状態にある海域でも水面際ではコンブの小群落が見られる場所があるが、このような場所ではウニの分布が流速に影響されており、コンブが生育していると考えられている。これと同じようなことが、福島県いわき市竜ヶ崎地先海域でも観察された<sup>(1)</sup>(図1)。この地点はコンブではなく、アラメであるが、ウニの種類は同じキタムラサキウニである。キタムラサキウニのいるところの岩は、無節サンゴモでピンク色をしていた。浅いところにもキタムラサキウニがいたが、これは凹地があるからである。波の高いときには吹き飛ばされないよう凹地に生息し、静穏になると凹地から出て海藻などを食べると推察される。また、深い方の砂地に露出した小さな岩にもアラメが生育していたが、これは波による流動でキタムラサキウニが転がり、砂地を渡れないためであると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 寺脇利信、川崎保夫、山田貞夫、1989、海中砂漠緑化技術の開発 第2報 アラメ・カジメ類の生育制限要因に関する現地調査、電力中央研究所研究報告 U89033

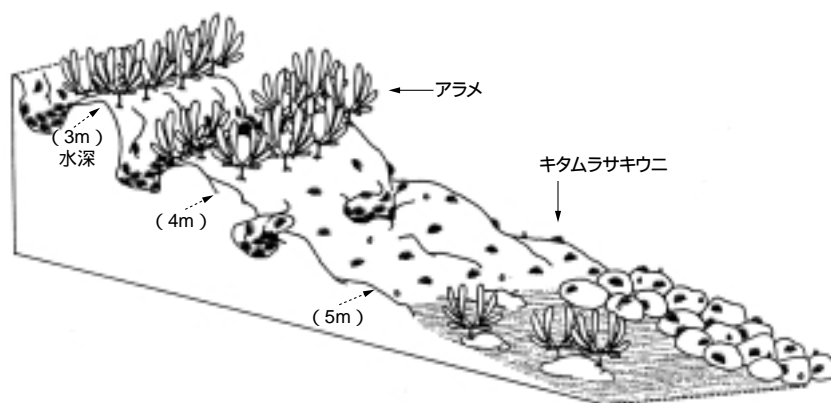


図1 磯焼け海域の海底の模式図(いわき市竜ヶ崎地点)



# お わ り に

理事 我孫子研究所長 加藤 正進



原子力発電は、我が国のエネルギーを安定的に供給するとともに、エネルギー消費に伴う環境負荷を最小限に抑えることが可能な発電方式であり、21世紀においても我が国の基幹電源としての役割を担う有力な技術的選択肢の一つと考えられる。しかし一方で、原子力発電所の新規立地地点を確保することは次第に困難になりつつあり、原子力発電所の立地を円滑に推進するために多くの課題を解決しなければならない。このような情勢のなかで、当研究所では、立地の制約を緩和するための新しい立地方式のひとつとして、人工島式海上立地の研究に取り

組んできた。本研究では、電力共通研究の場などを通じて、海底地質・地盤調査技術、防波護岸の耐波・耐震安定性評価技術、周辺海域の波・海浜流・海浜変形の評価技術などハード面での技術開発に加え、広く社会に受け入れられやすい発電所の立地を目的とした立地支援技術といったソフト面での技術開発にも挑戦してきた。これらの成果は、土木学会・原子力土木委員会の原子力発電所の立地多様化技術の体系化作業に活用されている。その間、ご指導、ご協力を賜った大学、研究機関、電力会社の関係各位に心より御礼申し上げます。

今後、これらの成果が、国、電気事業における指針化、基準化など多方面に活用されることはもとより、社会の理解を得た円滑な原子力発電所の立地に益々貢献できるよう研究を進めて参る所存ですので、関係各位のご指導、ご鞭撻をお願いする次第であります。

## 引用文献・資料等

### 第1章

- (1) 社土木学会 原子力土木委員会 (1996): 原子力発電所の立地多様化技術、第4編 人工島式海上立地技術

### 第2章

- (1) 社土木学会 原子力土木委員会 (1996): 原子力発電所の立地多様化技術、第4編 人工島式海上立地技術
- (2) 阿部信太郎 (1997): 浅海域における反射法地震探査記録の地質構造解釈とデータ処理法の検討、電力中央研究所報告
- (3) 加藤進・秋葉文雄・守屋成博 (1996): 相馬沖海域における上部白亜系・新生界の層序と地質構造、地質学雑誌、第102巻、第12号、p1039-1051
- (4) 社土木学会 原子力土木委員会 (1999): 原子力発電所の立地多様化技術(追補版) 人工島式海上立地技術の高度化。
- (5) 阿部信太郎 (2000): 日本海沿岸・褶曲帯における反射法地震探査、日本地震学会2000年秋季大会講演予稿集
- (6) 谷和夫・西好一・吉田保夫・岡本敏郎 (1995): 岩盤用セルフ・ボーリング型プレッシャーメータの開発、電中研研究報告、U95012
- (7) 池見元宣・谷和夫・岡田哲実・田中幸久 (1998): 直径35?500mmの軟岩供試体を用いた三軸圧縮試験、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- (8) 社土木学会 原子力土木委員会 (1999): 原子力発電所の立地多様化技術(追補版) 人工島式海上立地技術の高度化、pp. 70-84
- (9) 谷和夫 (1998): 人工の泥質軟岩を用いた室内岩盤せん断試験、第10回岩の力学国内シンポジウム、pp. 767-772
- (10) 岡田哲実・谷和夫・田中幸久・百瀬和夫 (1999): 堆積軟岩上の平板載荷試験におけるポアソン比の検討、第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 216-220

### 第3章

- (1) 社日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上・下)
- (2) 社土木学会 原子力土木委員会 (1996): 原子力発電所の立地多様化技術、第4編人工島式海上立地技術、396p
- (3) 社土木学会 原子力土木委員会 (1999): 原子力発電所の立地多様化技術(追補版) 人工島式海上立地技術の高度化、437p
- (4) 鹿島遼一・榊山勉 (1999): 人工島式原子力発電所の防波護岸の耐波設計法、電力土木、No.284、pp. 65-69
- (5) 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博 (1987): 一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性、土木学会論文集、第381号/ -7、pp. 151~160

- (6) 山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲 (1994): わが国太平洋岸における超長期の台風発生波高の極値の推定、海岸工学論文集、第41巻、pp206~210
- (7) 山口正隆・大木泰憲・畑田佳男・前川浩章 (1996): 確率的低気圧モデルに関する研究、海岸工学論文集、第43巻、pp. 246-250
- (8) Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layers design formulae, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239
- (9) 鹿島遼一・榊山勉・清水琢三・関本恒浩・京谷修 (1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性、海岸工学論文集、第40巻、pp. 686-690
- (10) 鹿島遼一・榊山勉・清水琢三・関本恒浩・京谷修 (1994): 消波工の変形量の時間変化の予測と変形に及ぼすコアの影響、海岸工学論文集、第41巻、pp. 771-775
- (11) 榊山勉・今井澄雄 (1996): 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション、海岸工学論文集、第43巻、pp.696-700
- (12) 榊山勉 (1998): 消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発と検証、電力中央研究所報告、研究報告: U97103、27p
- (13) Nichols, B.D., Hirt,C.W., Hotchkiss,R.S. (1980): SOLA-VOF -A solutionalgorithm for transient fluid with multiple free boundaries, Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California
- (14) 合田良実・岸良安治・神山豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第14巻、第4号、pp. 3-44
- (15) 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果、港湾技術研究所報告、第21巻、第2号、pp. 151-205
- (16) 福田伸男・宇野俊泰・入江功 (1973): 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報)、第20回海岸工学講演会論文集、pp. 113-118
- (17) 榊山勉・鹿島遼一 (1997): 消波護岸の越波に関する現地観測と水理実験との比較、海岸工学論文集、第44巻、pp. 736-741
- (18) 河井正・金谷守・栃木均 (1999): 人工島防波護岸の耐震性に関する研究(その2) - 遠心力載荷装置を用いた防波護岸の模型振動実験 -、電中研研究報告U98023
- (19) 金谷守・栃木均・河井正 (1999): 人工島防波護岸の耐震性に関する研究(その4) - DEM-FEMカップリング解析手法(SEAWALL-2D)による防波護岸の地震時変形解析 -、電中研研究報告U98025
- (20) 栃木均・金谷守・河井正 (1999): 人工島防波護岸の耐震性に関する研究(その3) - 消波ブロックとの動的相互作用を考慮したケーソン式護岸の耐震性評価手法の開発 -、電中研研究報告U98024
- (21) 金谷守・西好一・当麻純一・大波正行 (1994): 有効応力



に基づく地盤の非線形解析手法の開発とその検証、土木学会論文集、No. 505、 -29、 49-58

- (22) 金谷守・柄木均・河井正・榊山勉・工藤康二 (1999): 人工島防波護岸の耐震性に関する研究 (その5) - 実規模防波護岸の地震時変形と機能維持検討 -、電中研研究報告 U99011
- (23) 合田良実・岸良安治・神山豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第14巻、第4号、pp. 3-44
- (24) 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果、港湾技術研究所報告、第21巻、第2号、pp. 151-205

#### 第4章

- (1) 堀川清司編 (1985): 海岸環境工学 海岸過程の理論・観測・予測方法、東京大学出版会、582p
- (2) 渡辺晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル、第31回海岸工学講演会論文集、pp.406-410
- (3) 丸山康樹 (1987): 海底地形変化予測モデルの現地適用性、電力中央研究所報告、研究報告 U87012
- (4) 清水琢三 (1996): 海浜変形シミュレ - ション、水工学シリ - ズ96-B-5、土木学会、pp.1-26
- (5) 社土木学会 原子力土木委員会 (1996): 原子力発電所の立地多様化技術、第4編人工島式海上立地技術、pp.163-191
- (6) 社土木学会 原子力土木委員会 (1999): 原子力発電所の立地多様化技術 (追補版) 人工島式海上立地技術の高度化、pp.284-379
- (7) 池野正明・清水隆夫 (1998a): 波の多方向不規則性と浮遊漂砂を考慮した3次元海浜変形数値予測モデルの開発と人工島周辺海域への適用、電力中央研究所報告、研究報告 U97091
- (8) 池野正明・清水隆夫・久保道仁・定森良夫 (1998b): 波の多方向不規則性と浮遊漂砂を考慮した3次元海浜変形数値予測モデルの開発と検証、海岸工学論文集、第45巻、pp.531-535
- (9) Madsen, P. A., R. Murraray and O. R. Sorensen (1991): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388
- (10) 佐藤慎司・M.B.Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル、海岸工学論文集、第41巻、pp. 401-405
- (11) 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺晃 (1989): 砕波帯におけるエネルギー - 収支と戻り流れのモデリング、海岸工学論文集、第36巻、pp. 31-35
- (12) 柴山知也・W. Rattanapitikon (1995): 浮遊漂砂量予測を取り入れた二次元海浜変形モデル、海岸工学論文集、第42巻、pp. 446-450
- (13) Ikeno, M. and T. Shimizu (1998): Characteristics of

suspended sediment transport in the surf zone of irregular waves and their reproduction by a cross-shore beach deformation model, Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng., pp.2317-2330

- (14) 池野正明・清水隆夫 (1997): 不規則波砕波帯内における浮遊砂フラックスの特性とこれを考慮した2次元海浜変形モデルの提案、電力中央研究所報告、研究報告U96037
- (15) 清水隆夫・池野正明・鹿島遼一・今井澄雄 (1996b): swash zoneにおける波毎の岸沖漂砂量と前浜地形変化について、海工論文集、第43巻、pp. 511-515 .
- (16) Shimizu, T. & M. Ikeno (1998): Experimental study on sand transport and diffusion due to multi-directional random waves, Book of Abstracts, the 26th Int. Conf. on Coastal Eng., pp.154-155
- (17) 榊山勉・清水隆夫・斎藤昭三・鹿島遼一・丸山康樹 (1986): 砂漣の形状特性と消滅限界、電力中央研究所、研究報告、No.385050、36p
- (18) 清水隆夫・斎藤昭三・丸山康樹・長谷川寛・鹿島遼一 (1985): 大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布のモデル化、電力中央研究所、研究報告、No.384028、60p

#### 第5章

- (1) 社土木学会 原子力土木委員会 (1999): 原子力発電所の立地多様化技術 (追補版) 人工島式海上立地技術の高度化
- (2) 菊地省吾 (1978): 海中造林とその理論、増殖技術の基礎と理論、水産学シリーズ23、恒星社厚生閣
- (3) 沢田満・三木文興・足助光久 (1981): コンブ藻場・藻場・海中林、恒星社厚生閣
- (4) 四井敏夫・前迫信彦 (1993): 対馬東岸の磯焼け地帯における藻場回復実験、水産増殖、41、67-70
- (5) 川崎保夫・寺脇利信・長谷川寛・平口博丸・後藤弘・荒木洋・飯塚貞二 (1991): 海中林造成技術の実証、第3報三浦半島西部でのアラメおよびカジメの生態と生育特性、電力中央研究所研究報告U91022
- (6) 社土木学会 原子力土木委員会 (1996): 原子力発電所の立地多様化技術、付属編 2 立地支援技術
- (7) 電力中央研究所 (1994): 海中林、新しい海域環境の創造、(パンフレット)
- (8) 寺脇利信・川崎保夫・本多正樹・山田貞夫・丸山康樹・五十嵐由雄 (1991): 海中林造成技術の実証 第2報 三浦半島西部でのアラメおよびカジメの生態と生育特性、電力中央研究所研究報告U91022
- (9) 本多正樹 (1996): 海中林 (カジメ群落) の生産速度モデルの開発 - 光・温度因子と生産速度の関係 -、電中研研究報告U95058
- (10) Hayakawa Y. and J. Kittaka (1984): Simulation of Feeding Behavior of Sea Urchin *Strongylocentrotus nudus*. Bull. Japan Soc. Sci. Fish., 50: 2, 233-240



## 既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 32 「人間と技術の調和に向けて ヒューマンファクター研究 」1995. 3  
NO. 33 「放射線ホルミシス 研究の意義と取り組み 」1996. 3  
NO. 34 「ガスタービン研究 高効率発電の主役を担う 」1997. 1  
NO. 35 「地下の探査・可視化技術」1997. 5  
NO. 36 「送電線コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用 」1998. 3  
NO. 37 「乾式リサイクル技術・金属燃料FBRの実現に向けて」2000. 1  
NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3  
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6  
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11  
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える  
需要家の特性解明と省エネ技術 」2000. 11

## 編 集 後 記

電力中央研究所では、早くから原子力発電所の立地に対する制約条件の削減を目指して、海上空間を利用した人口島式海上立地技術に関する研究を実施してきました。

これらの研究成果は、土木学会・原子力土木委員会により審議され、「原子力発電所の立地多様化技術」として取り纏められています。

本レビューでは、原子力発電所ばかりでなく、海上空間を利用した大型重要構造物の建設にも適用可能な技術課題として、①地質・地盤調査技術、②防波堤護岸の耐波、耐震安定性評価技術、③人工島周辺海域の波・海浜

流・海浜変形評価技術、および④環境および地域の共生を考慮した立地支援技術 について、その研究成果を取り纏めました。

関連の技術者の方々にも、大いに参考となることと思います。

読者の皆様のご意見、ご叱責を賜れば、幸いです。

最後に、巻頭言に暖かいお言葉を頂戴するとともに、本研究の推進等にご尽力をいただいた名古屋大学名誉教授 川本兆万先生に厚くお礼申し上げます。



---

## 電中研レビュー NO.42

平成13年1月31日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]  
☎ (03) 3201-6601 (代表)  
E-mail: [www-pc-m1@criepi.denken.or.jp](http://www-pc-m1.criepi.denken.or.jp)  
<http://criepi.denken.or.jp/index-j.html>  
印刷・株式会社 電友社

---

本部 / 経済社会研究所 〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎ (03) 3201-6601 我孫子研究所 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎ (0471) 362-1181  
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター 横須賀研究所 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎ (0468) 366-2121  
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター 赤城試験センター 〒371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎ (027) 283-2721  
〒201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1 ☎ (03) 3480-2111 塩原実験場 〒329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎ (0287) 35-2048

---