

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⁽¹⁾、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

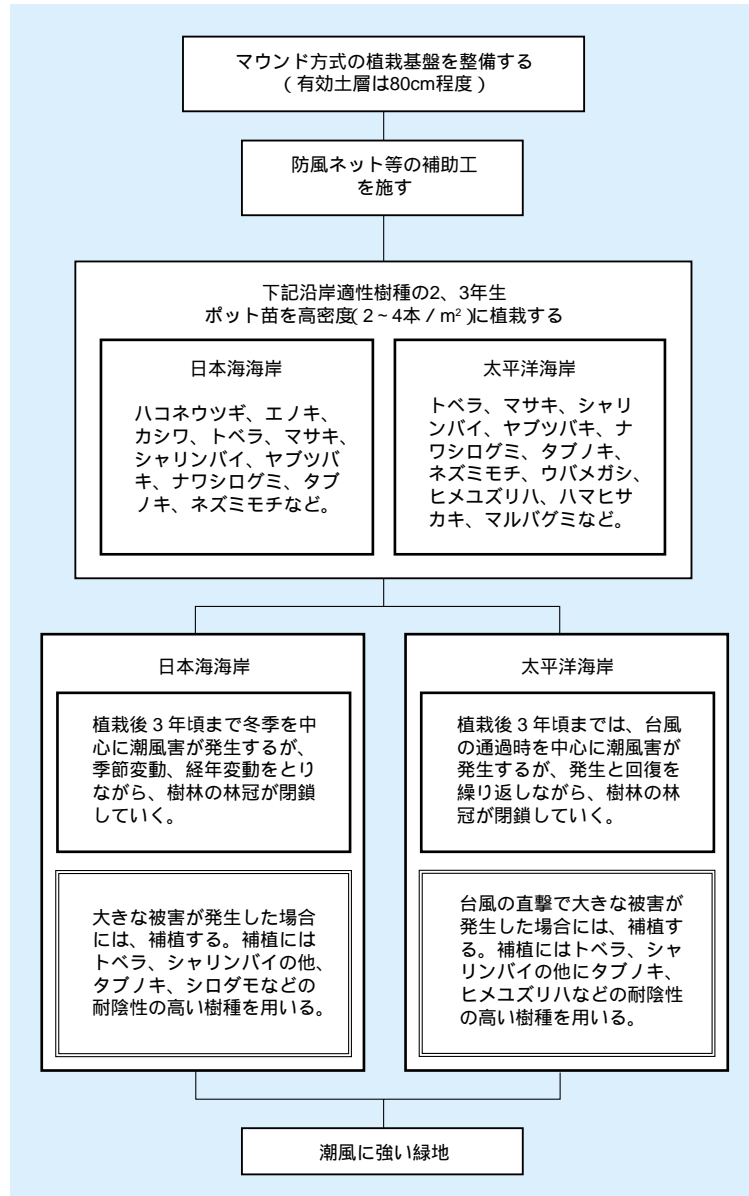


図5-1-1 沿岸緑地(人工島)の緑化手法

おける潮風の卓越時期、樹木的生活型の違い(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。日本海沿岸においては冬季に潮風が卓越し、太平洋沿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⁽²⁾。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/m²)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。

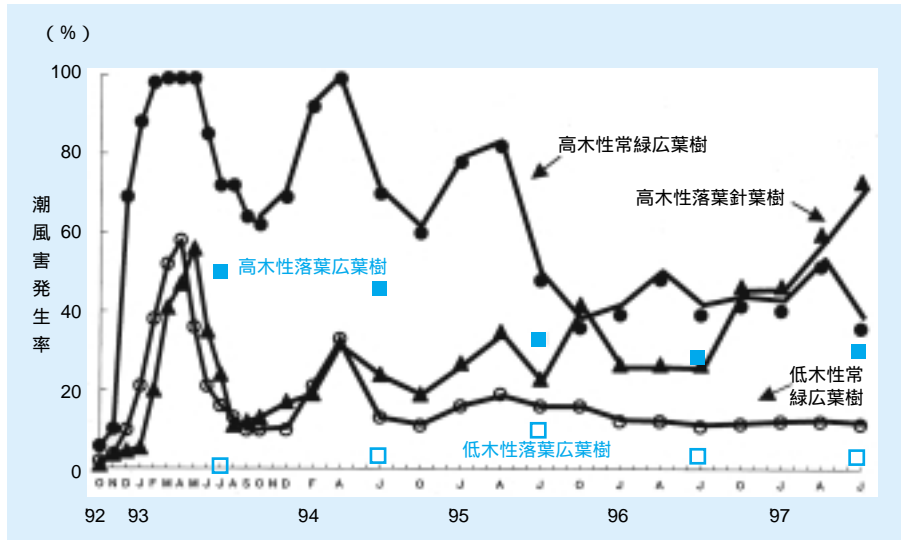


図5-1-2 植栽後の植栽木の生育状況（潮風害発生率）の変動

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⁽³⁾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⁽⁴⁾。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)。

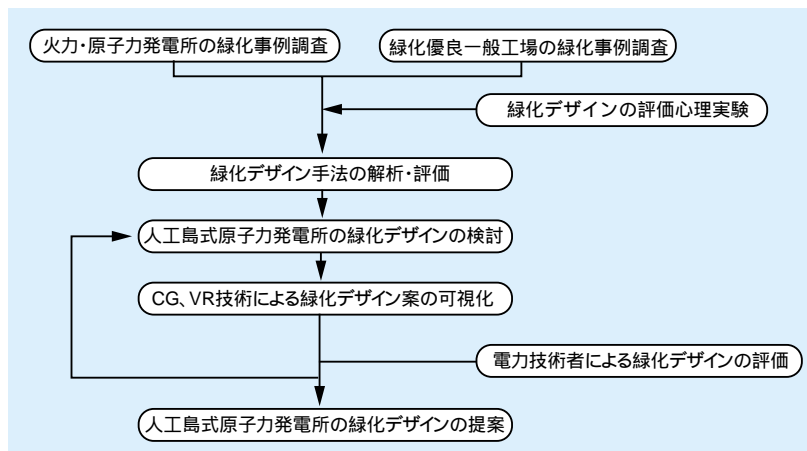


図5-1-3 緑化デザインの検討手順

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

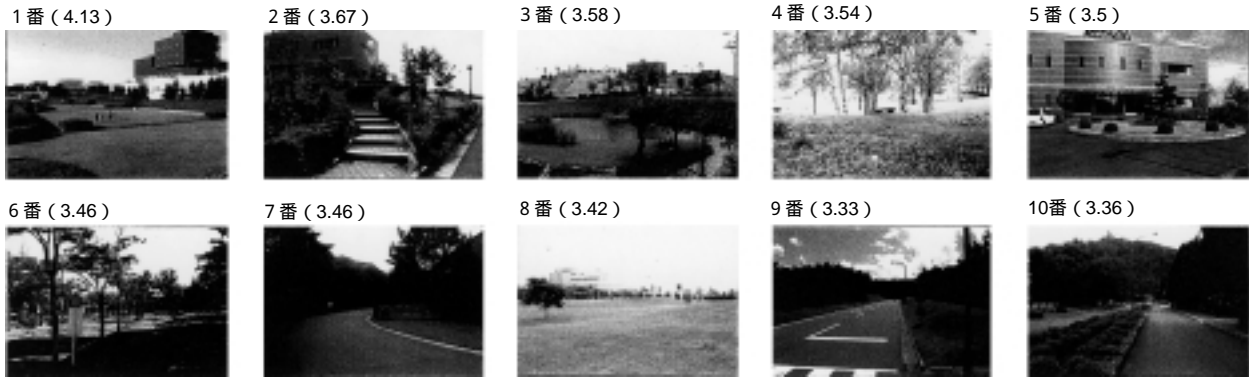


図5-1-4 サンプル画像（総合得点上位10番）

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



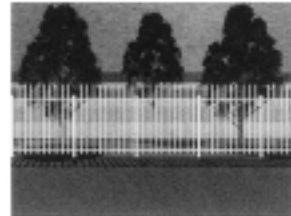
ネイチャータイプのイメージ



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⁽¹⁾(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

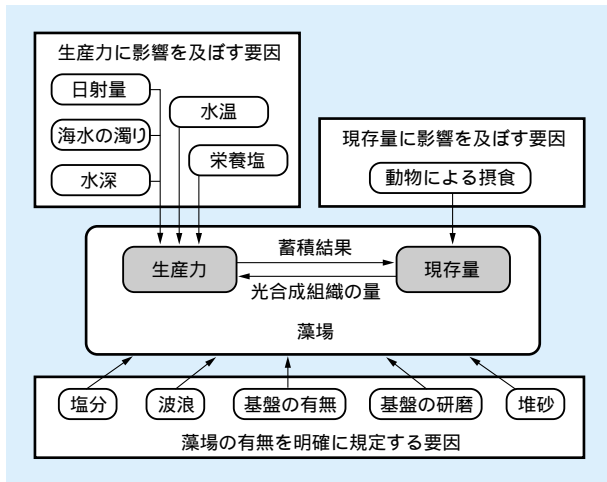
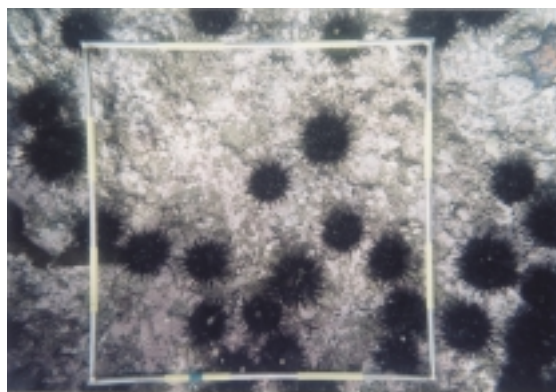


図5-2-1 藻場の生産力、現存量を左右する要因の模式図



繁茂したコンブ場



磯焼け

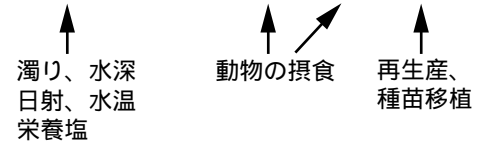
図5-2-2 コンブ場とそれが磯焼けした海底の状況

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柵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^{(2)、(3)、(4)}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⁽⁵⁾。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⁽⁶⁾。

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

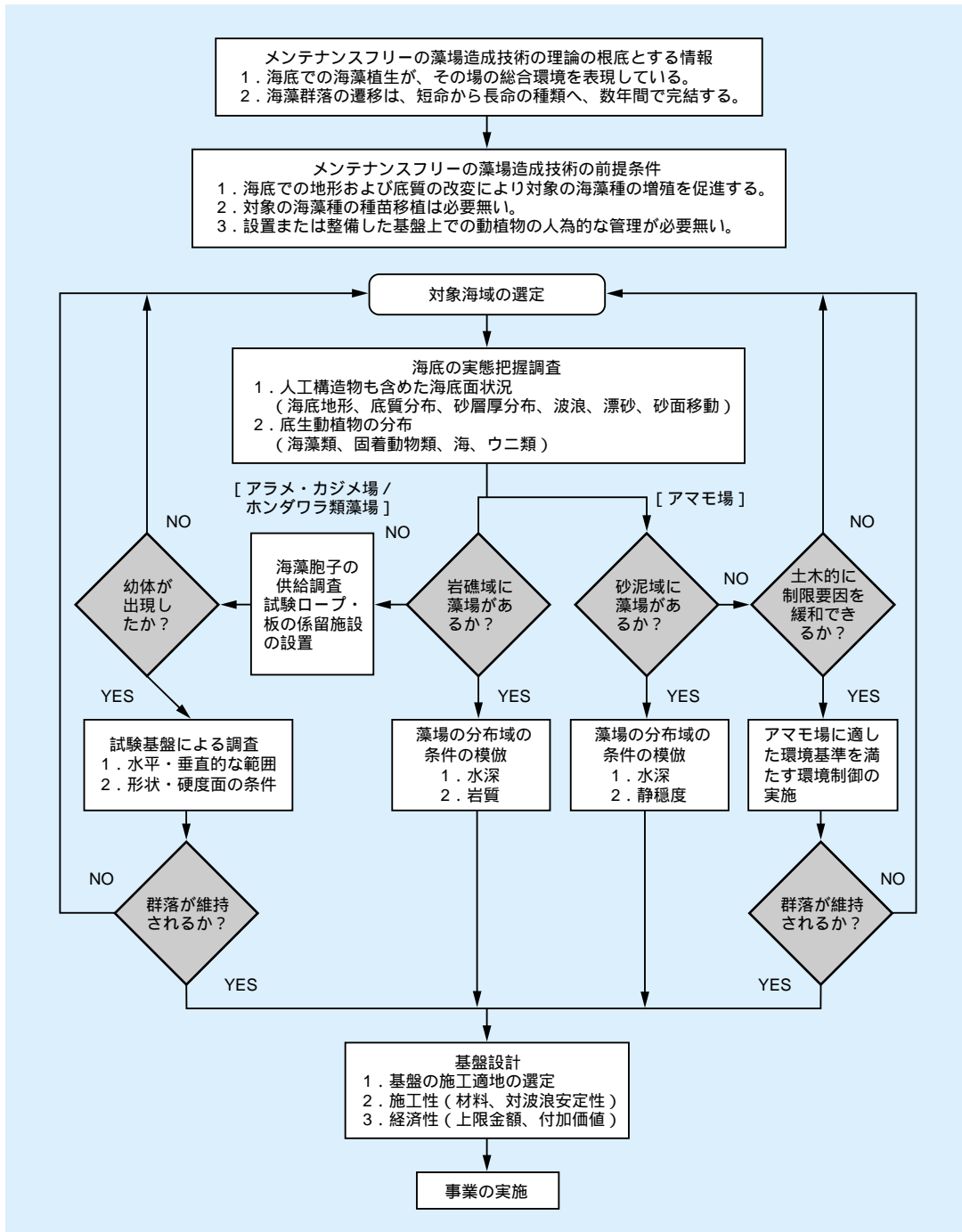


図5-2-3 自然模倣の藻場造成手順

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⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

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⁽⁵⁾。

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⁽⁷⁾(図5-2-8)。

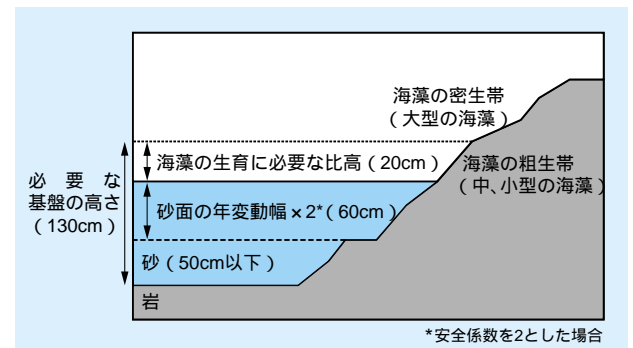


図5-2-4 基盤の高さの決定例

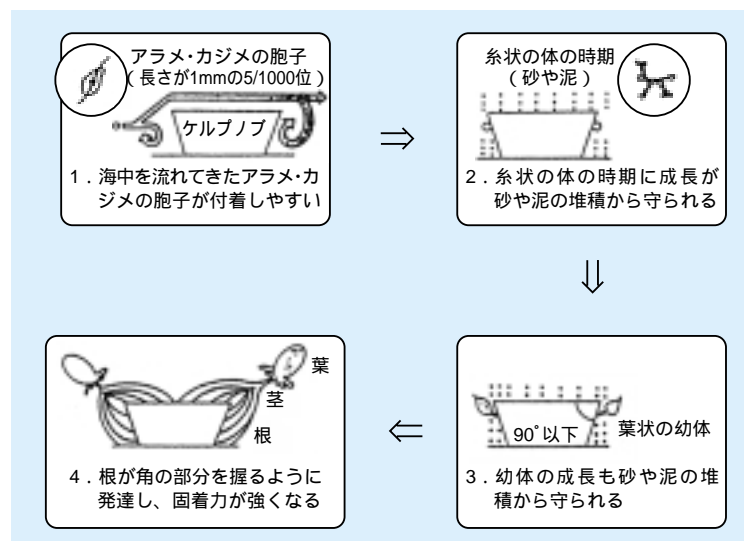


図5-2-5 基盤の上に取り付けるケルプノブの効果の模式図

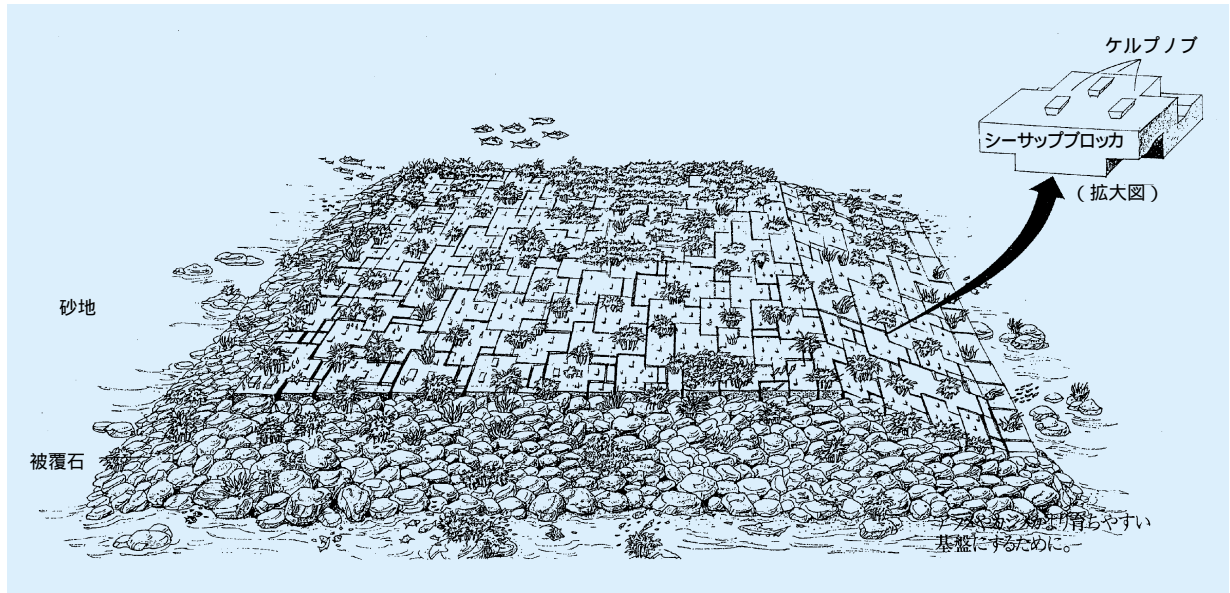


図5-2-6 海中林造成の実証試験用に設置した基盤の模式図



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⁽⁶⁾。

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

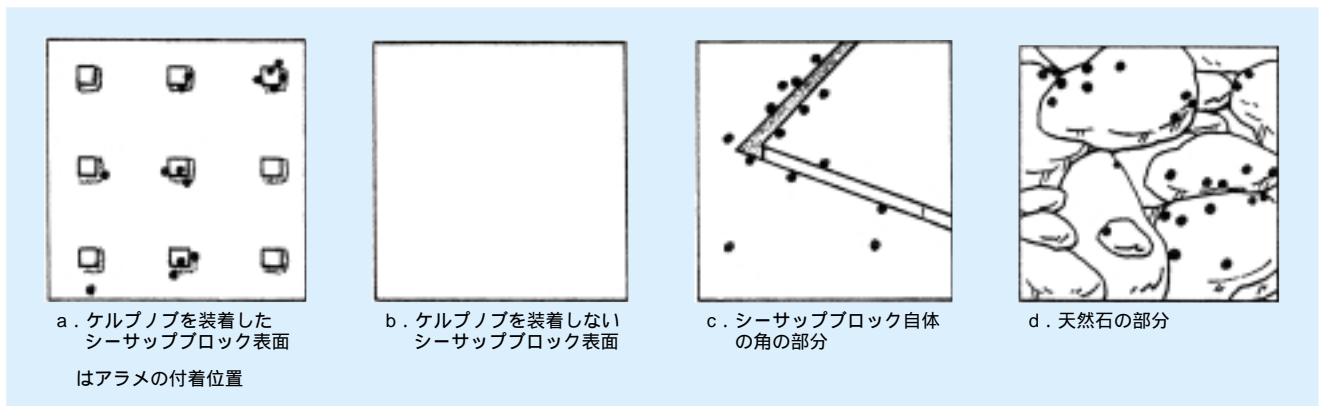


図5-2-8 ケルプノブの効果

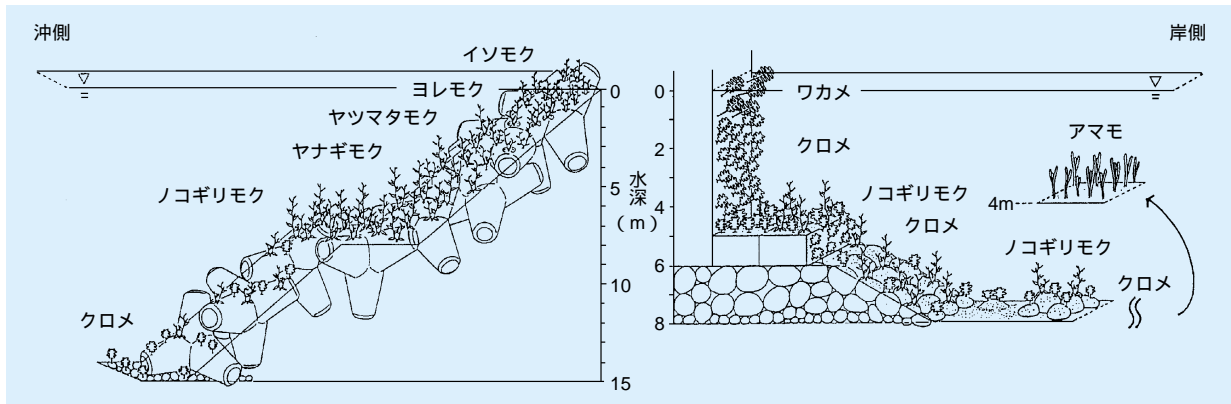


図5-2-9 日本海側中～北部の人工島護岸で予想される藻場の模式図

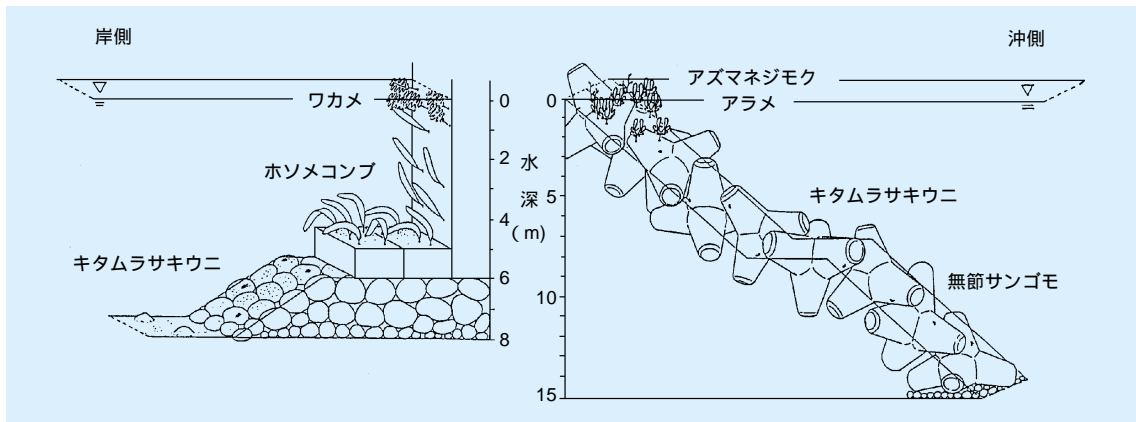


図5-2-10 太平洋側中～北部の人工島護岸で予想される藻場の模式図

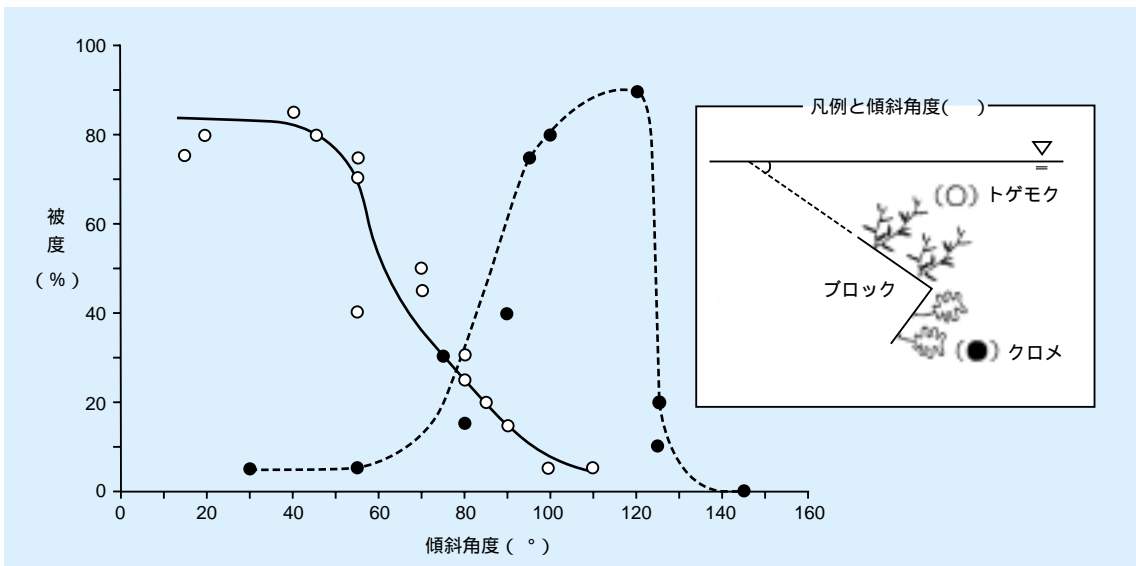


図5-2-11 消波ブロック表面の傾斜角度と生育海藻との関係 (富山県小境海岸の場合)

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⁽⁹⁾。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⁽¹⁰⁾、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。

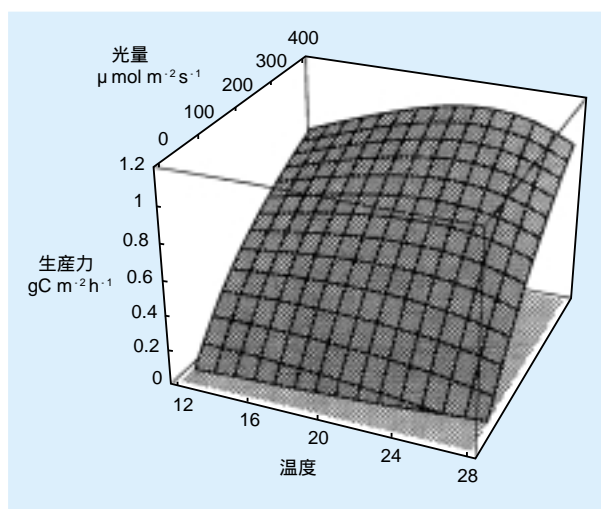


図5-2-12 カジメの光量・温度 生産力関係

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}

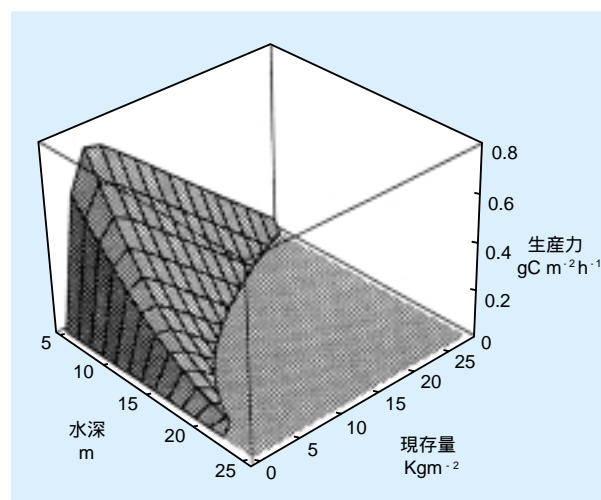


図5-2-13 カジメの現存量・水深 生産力関係

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

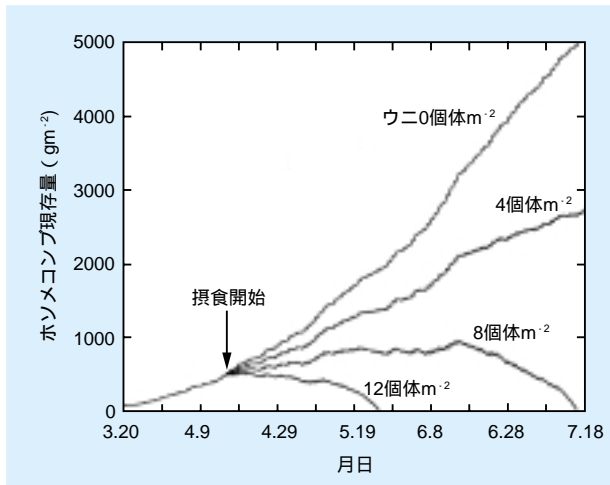


図5-2-14 ホソメコンブ現存量動態に与えるキタムラサキウニの摂食影響の計算例

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⁽¹⁾(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

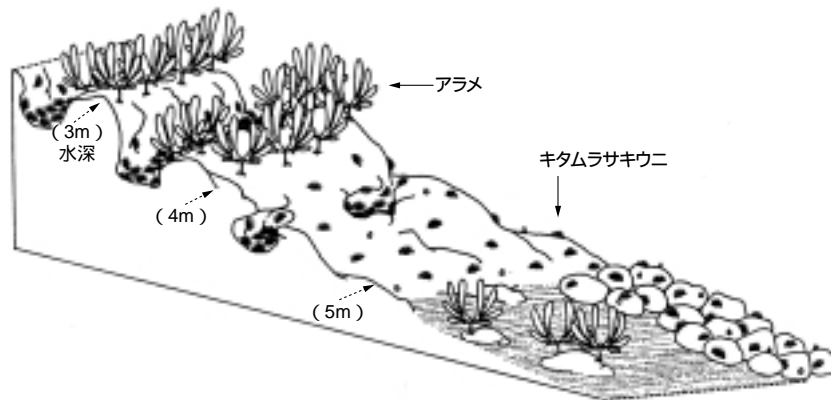


図1 磯焼け海域の海底の模式図(いわき市竜ヶ崎地点)