

人工海底マウンド整備に係る外部コストの評価 に関する一考察

EVALUATION OF EXTERNAL COST ON DEVELOPING MARINE RIDGE

清田 健¹・本間義規¹・東 健一²・浅川典敬³・古屋温美⁴・長野 章⁵
Takeshi KIYOTA, Yoshinori HOMMA, Kenichi AZUMA, Noritaka ASAKAWA,
Atsumi FURUYA and Akira NAGANO

¹理修 株式会社エコニクス (〒004-0015札幌市厚別区下野幌テクノパーク1-2-14)

²正会員 株式会社アッシュクリート (〒151-0062東京都渋谷区元代々木町30-13)

³水産庁漁港漁場整備部 (〒100-8907東京都千代田区霞が関1-2-1)

⁴正会員 工博 有限会社マリンプランニング (〒062-0053札幌市豊平区月寒東3条15-6-23)

⁵正会員 工博 公立はこだて未来大学 (〒040-0084函館市亀田中野町116-2)

Artificial marine ridge has gotten the attention recently as a tool to increase fishery resources. Ridge requires thousands of cubic meters of materials; rocks or concrete blocks. In these projects, it should be appropriate to choose recycled materials for the sake of environmental conservation. However conventional cost evaluation method, which is only considering internal cost, has prevented from using those recycled.

In this study, the comprehensive construction cost considering external cost is estimated and the estimation technique is examined in order to promote utilization of recycled materials. The comprehensive cost is estimated using four external cost counting methods about a virtual ridge development with three kinds of materials. AHP is utilized to integrate internal cost and several external costs. DEMATEL is applied to consider the wishes of inhabitants. The estimation using AHP resulted in correspondent to the wishes. It is suggested that this technique make it easy to reflect local feelings in the choice of material via cost.

Key Words : Artificial Marine Ridge, Fly-ash, Recycle, External Cost, AHP, DEMATEL

1. はじめに

湧昇流の発生工である人工海底マウンドは有用な漁場造成手法として近年着目されている¹⁾。しかし、人工海底マウンドは栄養塩濃度の十分な水塊が存在する数十～200m 前後の水深帯に整備されるケースが多く²⁾、湧昇高さの約 10 分の 1 程度のマウンド高が必要なため³⁾、数千 m³ といった多量の石材等の資材の使用が要求される。資材の多さによる影響は、整備費用の額に反映されることは当然であるが、同時に環境影響の大きさとしても現れる。したがって、使用する資材の選択が環境影響の大きさに多大な影響を及ぼす。

循環型社会の形成が至上命題となっている今日において、多量の資材を用いる事業には大いに副産物を活用すべきである。しかしながら、従前の内部コストのみによる事業評価は、整備費用が割高になるケースが多い循環資材の使用に大きく立ちはだかっていたのが事実である。そこで本研究では、循環資材の利用促進を目的とし、土木学会等で提唱されて

いる外部コストを考慮した総合的な建設事業コストの概念を導入した事業評価について考察を行った。具体的には、北海道苫小牧沖を仮定の事業地とし、複数の資材（自然石、普通コンクリート、石炭灰コンクリート）による整備について、複数の手法（LCC02, LIME, 便益移転, 資源生産性）により外部コストを加味した事業評価を試みた。また、想定事業と密接な関係にあると考えられる住民等にアンケート調査を行い、それぞれ複数ある資材及び外部コストの評価手法に対する選好性を把握し、AHP による分析を行い、事業コストの算定結果とアンケート分析結果とを対比させ考察を行った。さらに、アンケート結果を基に DEMATEL による解析を行い、住民意向の背景にある問題構造についても検討した。

2. 内外部コストの算定

(1) 内外部コスト

内部コストとは、建設事業の実施に際して公共事

業の事業主体が負担する直接的な費用である。外部コストは、建設活動によってもたらされる好ましくない影響（不経済）で事業者が金銭負担せず、社会一般がなんらかの形で負担しているものと定義されている。総合的建設事業コスト（総合コスト）とは、内部コストと外部コストにて構成される⁴⁾。

外部コストの算定手法の主なものについては、「LCC02（生涯二酸化炭素放出量）⁵⁾」、LIME（日本版被害算定型影響評価手法）⁶⁾、便益移転法⁷⁾が提案されている。また、外部コストに準ずる指標として、循環型社会形成基本計画の数値目標である「資源生産性」⁸⁾が挙げられる。

a) 内部コスト

内部コストの算定は「漁港漁場関係工事積算基準」「建設機械損料算定表」等を用いて行った。

1) LCC02

LCC02は建設事業におけるCO2排出量である。具体的には、マウンド構築に使用する各種材料の製造過程におけるCO2と施工時のCO2を合算した。

c) LIME

単位の異なる複数の環境負荷物質を単一指標に統合化する手法で、日本版被害算定型影響評価手法と呼ばれる。環境への負荷の発生（インベントリ）から私たち人間が受けると想定される被害にたどり着くまでの過程を計算式の中に組み込み、最終的にお金の単位でその被害を表す手法である。

d) 便益移転法

建設事業等によって影響を受ける環境の機能等の金額で表しにくい事象を、先に行った類似の調査事例の評価額等を代用することで計測する手法である。

e) 資源生産性

単位量あたりの天然資源等投入量から生じる国内総生産（実質GDP）を算出することによって、産業や人々の生活が有効に物を使っているかを総合的に表す指標であり次式で表される。本法は厳密にはコストではなく、大きい方が環境に良いとされる。

$$\text{資源生産性} = \text{GDP} \div \text{天然資源等投入量} \quad (1)$$

(2) 算定の条件

a) コストの計測範囲

計測対象とする範囲は各手法の算定要領^{5) 6) 7)}に従い、材料を入手するところからとした。すなわち、バージン材は天然資源を得るところから、循環資材は副産物が排出されたところから、をそれぞれ計測範囲とした。

b) 地域条件

人工海底マウンド設置位置は、北海道苫小牧市沖合約10-20kmの水深約80mの平坦な海域とした。

c) マウンドの規模、材質（ブロック方式）

人工海底マウンドの高さについては、施工事例をもとに高さ15m、のり面勾配1:2、延長120mに設定した。図-1に本方式による人工海底マウンドの概要

を示す。ブロック方式（石炭灰コンクリート、コンクリートブロック）とともに、使用するブロックの個数は、6,500個となる。

d) マウンドの規模、材質（石材方式）

人工海底マウンドの高さについては、ブロック方式と同様に、15mとした。一方、のり面勾配については、石材単体の粒径がブロック方式の50%程度となることから安息角を考慮し1:2.5とした。図-2に石材方式人工海底マウンドの概要を示す。石材方式に要する石材量は、55,840(m³)（出来型）となる。

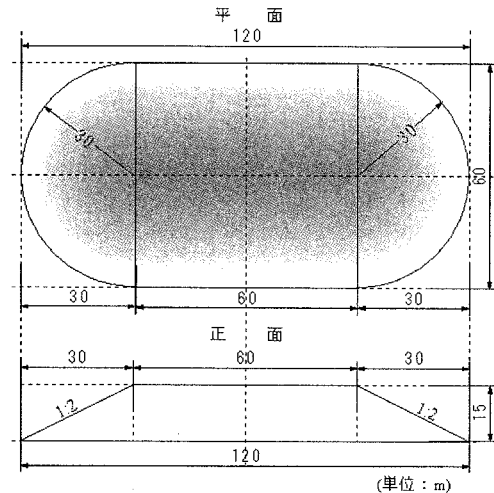


図-1 ブロック方式 人工海底マウンド概要

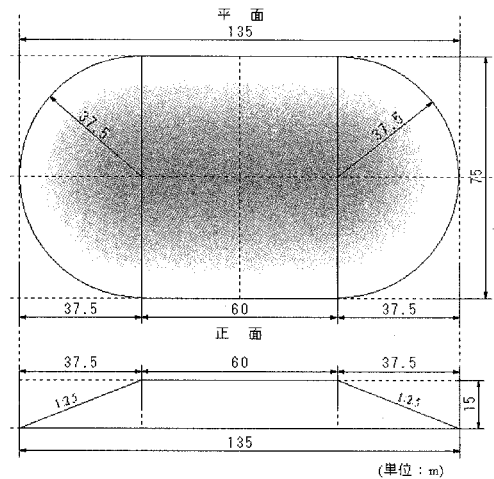


図-2 石材方式 人工海底マウンド概要

(3) 算定の結果⁹⁾

a) 総合コスト（内部+LCC02）

総合コストのうち、内部+LCC02の算定結果を図-3に示す。ここで、CO2の外部コスト算定のための単価は、3,000（円/CO2-t）とした¹⁰⁾。コストは内部コストのみの場合とかわらず次の順となった。

普通コンクリート > 石炭灰コンクリート > 自然石

b) 総合コスト（内部+LIME）

総合コストのうち、内部+LIMEによる計算結果を図-4に示す。コストの順はLCC02と同様であった。

c) 総合コスト（内部+便益移転法）

総合コストのうち、内部+便益移転法による算定

結果を図-5に示す。コストは次の順となった。

普通コンクリート > 自然石 > 石炭灰コンクリート

d) 資源生産性

資源生産性の算定結果を図-6に示す。人工海底マウンドの GDP は 15 億円とした¹¹⁾。結果は総合コストよりも顕著な差がみられ、次の順となった。

石炭灰コンクリート ≫ 普通コンクリート > 自然石

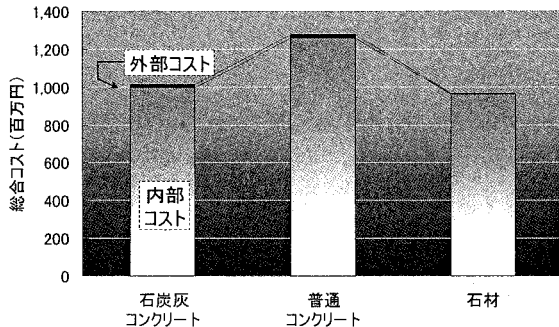


図-3 総合コスト (内部+LCC02) 算定結果

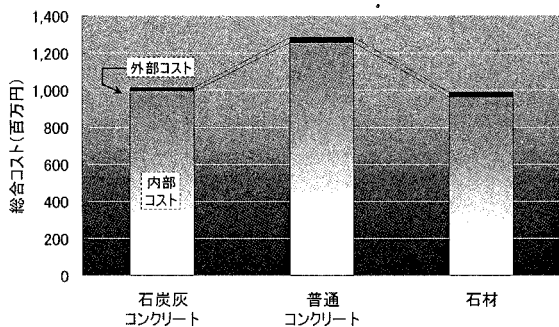


図-4 総合コスト (内部+LIME) 算定結果

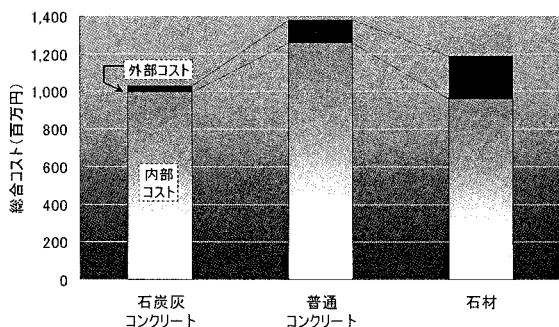


図-5 総合コスト (内部+便益移転法) 算定結果

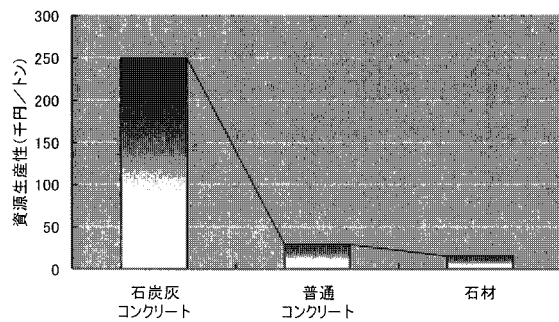


図-6 資源生産性 算定結果

3. 住民等の意向の把握

(1) 意向の把握の方法

AHP や DEMATEL は複雑化する社会問題に対して、住民等の意向を反映した合理的な施策選択を行うための手法として用いられている¹²⁾。これを用いて事業に対する住民らの意向を把握するため、事業地域である胆振地域（ここでは漁村とする）と比較対象として札幌（都市とする）においてアンケートを行った。被験者の選定と人数については児玉ら¹³⁾が詳しく述べているが、AHP 等により地域問題を分析する場合、当該地域の産業や環境、文化等について総合的に把握した者であることが重要であり、サンプルの多少は問題とならないとされる。このため被験者は漁村では自治体の課長クラス及び漁協幹部クラスとした。一方、AHP における比較対象とした都市については、全般的な住民意向の把握を主眼とし、簡便のため筆者と親しい一般市民を被験者とした。漁村都市とも被験者数は 10 である。アンケートは対面で行った。まず、事業の概要を説明し、資材及び建設コストの評価手法についてそれぞれ一対比較を行った。比較における重みは、良い=5、やや良=3、同等=1 とした。

また、漁村については、選好性を左右している要因を把握するためのアンケートも行った。アンケートは DEMATEL による分析を行うために、地域を代表する 11 のキーワードとそれぞれの資材を用いた事業実施との影響・被影響の関係を 5 段階評価で聞き取る方式で実施した。なお、11 のキーワードは、事前に地域の 50 名にアンケートを行い選定した。

(2) 結果

a) 資材に対する選好性

資材に関する一対比較の結果を表-1に示す。資材に対する選好性は、石炭灰コンクリート（循環資材）が他の資材の 2 倍近く、順位は漁村と都市とでわずかに異なった。

表-1 資材に対する住民等の選好性(B_0)

資 材	漁村	都市
石炭灰コンクリート	0.553	0.631
普通コンクリート	0.187	0.222
石材	0.260	0.147

b) 評価手法に対する選好性

評価手法に関する一対比較の結果を表-2に示す。評価手法に対する選好性は、資源生産性への支持が大きかった。漁村と都市を比較すると順位の変動は無いものの、都市よりも漁村で資源生産性への選好性が強い傾向を示した。

表-2 評価手法に対する住民等の選好性(A)

評価手法	漁村	都市
内部コストのみで良い	0.108	0.114
LCC02	0.174	0.204
LIME	0.203	0.238
便益移転	0.138	0.156
資源生産性	0.377	0.288

4. 評価結果の検討

(1) 選好性を考慮したコスト評価

AHP により、外部コスト計算結果と評価手法に対する選好性を組み合わせ、次式により資材の選好性 (B) を求めることが可能である。

$$Y \times A = B \quad (2)$$

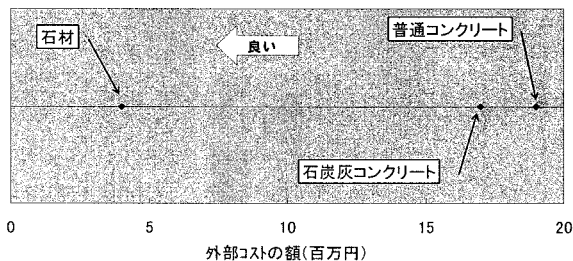
ここで、 Y : 評価手法からみた資材に対する重みを示す行列、 A : 評価手法に対する選好性を示す行列、 B : 資材に対する選好性を示す行列である。

式(2)のうち行列 Y は外部コストの計算結果から求まり、行列 A はアンケートで把握した評価手法に対する住民等の選好性である。故に、計算によって得られる行列 B と、住民等に直接聞き取った選好性 B_0 とが一致すれば、それは住民等の意向を計算によって推定できたことになる。

この原理を応用すると、事前に外部コストの評価手法に対する選好性についての意向調査を実施しておけば、人工海底マウンド以外の事業についても、外部コストを基に住民等の意向の把握が可能となる。すなわち、今後多くの事業に対して同様の事業評価を行う際に有効に機能すると考えられる。

Y は、それぞれの評価手法について、外部コストの算定結果を用いて一対比較を行うことにより求めた。例として LCC02 についての一対比較を図-7に示す。ここで比較は相対コスト指数 (式(3)) を用い、資材同志の指数の差が 0.34 未満=「同等」、0.34~0.67=「やや良」、0.67 以上=「良い」とした。ただし、資源生産性についてはコストとは観点が異なり、数字の大きい方が良いため、式(4)のように取り扱った。

得られた行列 Y は表-3のとおりである。



	良い	やや良	同等	やや良	良い	
石炭灰			○			普通コン
石炭灰					○	石材
普通コン					○	石材

図-7 各資材の外部コストの比較 (LCC02の場合)

$$\text{相対コスト指数} = \frac{C_{\max} - C}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (3)$$

$$\text{相対コスト指数 (資源生産性)} = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (4)$$

ここで、 C : 当該資材の外部コスト、 $C_{\max}$: その評価手法における外部コストの最大値、 $C_{\min}$: 同最小値である。

表-3 行列 Y (評価手法からみた資材に対する重み)

	内部のみ	LCC02	LIME	便益移転	資源生産性
石炭灰	0.455	0.143	0.659	0.637	0.714
普通コン	0.091	0.143	0.156	0.258	0.143
石材	0.455	0.714	0.185	0.105	0.143

(2) 計算結果と住民意向との比較

行列 Y と A を式(2)に代入して得られた資材の選好性の結果 (行列 B) を表-4に示す。この結果、直接住民等に聞いて得られた結果 (行列 B_0) とは、特に漁村でよく一致していた。

表-4 資材の選好性

	計算 (B)		直接 (B_0)	
	漁村	都市	漁村	都市
石炭灰コンクリート	0.565	0.543	0.553	0.631
普通コンクリート	0.156	0.158	0.187	0.222
石材	0.279	0.299	0.260	0.147

(3) 重み付けを行った総合コスト

B と B_0 の一致がみられた漁村について、 Y の代わりに評価手法ごとの外部コストの額を要素とした Y を式(2)に用いることにより、手法ごとに重み付けを行った外部コストが得られる。これを総合コスト化した結果、次の順となった (図-8)。

普通コンクリート > 自然石 > 石炭灰コンクリート

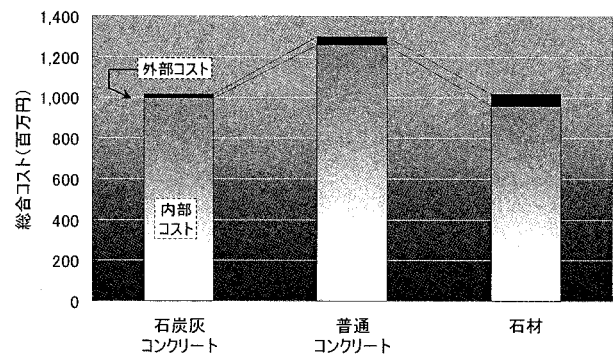


図-8 重み付けを行った総合コスト算定結果

(4) 選好性の背景

選好性の背景を探るため、アンケート調査を基にして DEMATEL による分析を行った。

DEMATEL は問題要因間の影響、非影響の一対比較調査から要因間の直接影響行列を求め、その逆行列を計算して、要因間の間接影響も含めた総合影響行列を求めるものである。

$$T = X(I - X)^{-1} \quad (5)$$

ここで、 T : 総合影響行列 X : 直接影響行列 I : 単位行列である。

総合影響行列の要素である数字は要因間の影響の大きさを表し、影響係数という。一対の要因間の影響係数の和は要因間の相互関係の強さを表し、総合影響係数という。行和はその行要因の影響の強さを表し、影響度という。列和はその列要因の被影響の強さを表し、被影響度という。影響度と被影響度の

和は総合影響行列の中でその要因の中心的な位置づけの度合いを表し、中心度という。影響度と被影響度の差は総合影響行列の中でその要因の原因的な位置づけの度合いを表し、原因度という。

今回の分析では、資材別に総合影響行列を求めた。影響度、被影響度、原因度及び中心度を表-5に示す。

表-5 総合影響の特性値

	影響度	被影響度	原因度	中心度	中心度の順位
◆石材					
A 石材でマウンドを整備すること	5.04	4.92	0.12	9.97	2
E 胆振海岸を保全すること	4.26	4.37	-0.11	8.64	10
F 廃棄物を削減すること	4.45	4.14	0.31	8.59	11
G 天然資源を消費したり、CO2を排出したりすること	4.62	4.67	-0.05	9.29	5
H 森林が破壊されたり、土砂が流出したりすること	5.51	5.34	0.17	10.85	1
I リサイクルを推進すること	4.47	4.28	0.19	8.74	8
J 窯業や土石産業の需要創出されること	4.79	4.69	0.10	9.48	3
K 景観が悪化すること	4.73	4.68	0.06	9.41	4
L サケ、カレイ、イカなどの資源量が変動すること	4.36	4.62	-0.26	8.98	7
M 漁業資源(魚種)が多様化すること	3.93	4.48	-0.55	8.41	12
N 新たな漁場を創出すること	4.43	4.61	-0.17	9.04	6
O 藻場を創出すること	4.46	4.27	0.19	8.74	9
平均値			0.00	9.18	
◆普通コンクリート					
B 普通コンクリートでマウンドを整備すること	4.30	4.64	-0.35	8.94	4
E 胆振海岸を保全すること	4.21	4.32	-0.11	8.53	11
F 廃棄物を削減すること	4.41	4.15	0.27	8.56	10
G 天然資源を消費したり、CO2を排出したりすること	4.59	4.53	0.05	9.12	3
H 森林が破壊されたり、土砂が流出したりすること	5.40	5.07	0.32	10.47	1
I リサイクルを推進すること	4.49	4.27	0.23	8.76	8
J 窯業や土石産業の需要創出されること	4.75	4.61	0.14	9.36	2
K 景観が悪化すること	4.53	4.39	0.14	8.92	5
L サケ、カレイ、イカなどの資源量が変動すること	4.32	4.59	-0.26	8.91	7
M 漁業資源(魚種)が多様化すること	3.90	4.45	-0.55	8.35	12
N 新たな漁場を創出すること	4.39	4.53	-0.13	8.92	6
O 藻場を創出すること	4.44	4.18	0.25	8.62	9
平均値			0.00	8.96	
◆石炭灰コンクリート					
C 石炭灰コンクリートでマウンドを整備すること	5.04	5.17	-0.13	10.21	4
E 胆振海岸を保全すること	4.65	4.77	-0.12	9.42	11
F 廃棄物を削減すること	5.04	4.86	0.18	9.91	8
G 天然資源を消費したり、CO2を排出したりすること	5.06	5.02	0.05	10.08	5
H 森林が破壊されたり、土砂が流出したりすること	5.92	5.56	0.36	11.48	1
I リサイクルを推進すること	5.20	5.06	0.14	10.26	3
J 窯業や土石産業の需要創出されること	5.26	5.04	0.22	10.30	2
K 景観が悪化すること	4.89	4.75	0.14	9.64	10
L サケ、カレイ、イカなどの資源量が変動すること	4.82	5.09	-0.27	9.92	7
M 漁業資源(魚種)が多様化すること	4.37	5.02	-0.65	9.39	12
N 新たな漁場を創出すること	4.92	5.10	-0.18	10.02	6
O 藻場を創出すること	4.96	4.69	0.27	9.65	9
平均値			0.00	10.02	
影響度：その要素が他のすべての要素に与える直接・間接の影響の強さの総和 被影響度：その要素が他のすべての要素から受ける直接・間接の影響の強さの総和 原因度：影響度と被影響度の差 中心度：影響度と被影響度の合計 例：影響度、被影響度及び中心度の順位					
影響度、被影響度及び中心度の順位 原因度の上位5位 上位3位 下位3位					

この表では、どの問題要因が大きな影響を持っているか、原因要因であるか、中心的要因であるかがわかる。結果、いずれの資材の場合でも、中心度では「森林が破壊されたり、土砂が流出したりすること」「整備をすること」「窯業・土石産業の需要が創出されること」が、原因度では「森林が破壊されたり、土砂が流出したりすること」「藻場を創出すること」等の要因が大きい値を示し、共通している。これらは資材に無関係であることから、事業そのものに関する意識の表れと捉えられる。一方、相違がみられるものとして、中心度では、石材や普通コンクリートで「景観が悪化すること」、石炭灰では「リサイクルを推進すること」が大きい値を示している。また、原因度では、石材と他の二つの資材と

で「整備すること」の正負が異なっている。正の値を示す石材の方が他の二つの資材よりも多くの影響を地域に与えるとの意識の表れであろう。

総合影響行列において、要素の影響要因と被影響要因間を影響する方向の矢印で結んだものを図-9に示す。この図において要因間における影響と被影響の関係が分かる。当然であるが、中心度の大きい問題要因に矢印の出入りが集まる。また、中心度の大きい問題要因間相互において関係が強いことがわかる。

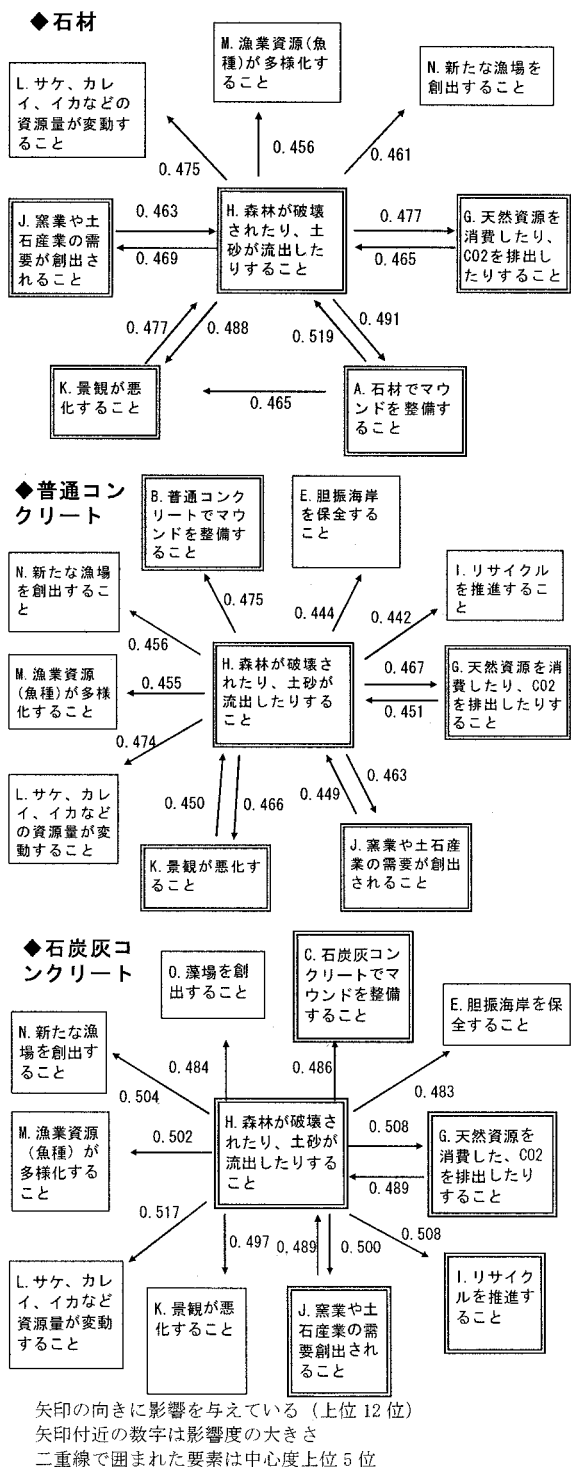
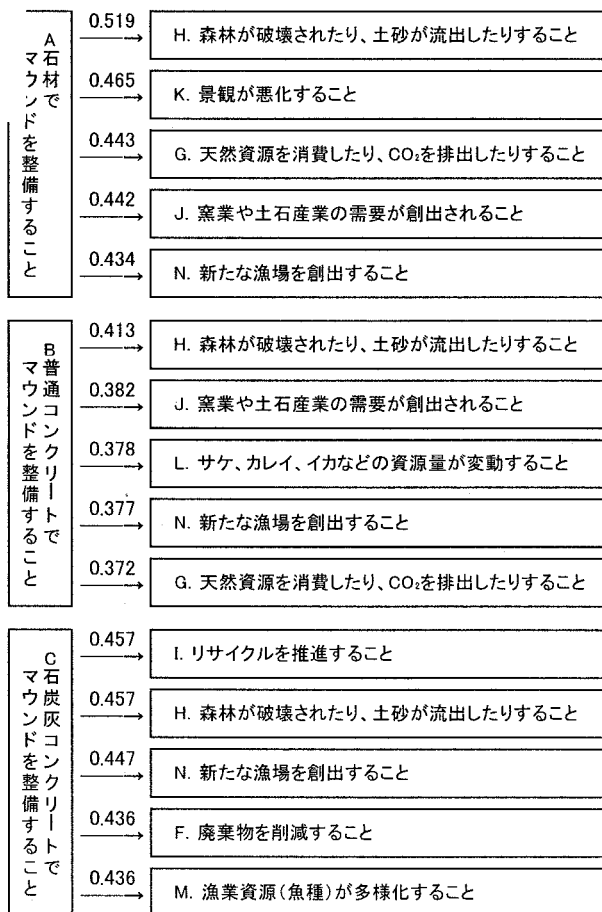


図-9 相互関連図

各資材による整備が与える地域への影響について比較するため、図-10では「〇〇でマウンドを整備すること」を軸として、影響関係の強さを表す総合影響係数のうち大きいものから上位5要素への影響関係を示した。石材での整備は「森林が破壊されたり、土砂が流出したりすること」「景観が悪化すること」に、普通コンクリートでは「窯業や土石産業の需要が創出されること」に影響しているのに対し、石炭灰コンクリートでは「リサイクルを推進すること」への影響が大きく、他にはみられない「廃棄物を削減すること」への影響が上位5位に入っている。こうした住民等の意識が石炭灰コンクリートへの選好性を押し上げた要因といえる。



※総合影響係数の上位5位、影響係数の大きい順

図-10 整備を軸とした上位5位の影響関係

5. おわりに

本調査研究から以下の結論が導かれた。

1. 内部コストは石材が最も小さいが、総合的な順位では変化がみられ、外部コストの評価手法によって順位が異なった。
2. 住民等への意向調査では、使用資材に対する選好性は石炭灰ブロックが他の資材の2倍近かった。

また、評価手法に対する選好性は、資源生産性への支持が大きかった。なお、漁村と都市で順位の相違は無かった。

3. AHPによる資材の選好性の推算結果は意向調査の結果と一致しており、計算によって住民意向の概要の把握が可能であることが示唆された。
4. 住民等は事業と森林破壊の関係を最も懸念しているもののほか、資材の如何によって景観の悪化や廃棄物の削減への影響力が異なるという意識があることがわかり、資材の選好性の背景が伺えた。本報では住民意向を反映する事業評価の一手法を提言したが、今後はこうした手法が政策にも導入され、循環資材の利用推進が図られるべきと考える。

なお、選好性の値ほど総合コストで循環資材が支持されない点については今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究は財団法人北海道科学技術総合振興センターの補助により実施したものである。また、北海道東胆振管内を中心に活動する石炭灰利用人工海底マウンド研究会には多大なご協力を頂いた。ここに記載し謝意を表す。

参考文献

- 1) 鈴木達雄：石炭灰を活用した海洋における食糧増産，土木学会誌，Vol. 89 (12)，2004。
- 2) 武田真典，佐々木洋之：人工海底山脈による漁場造成の現状と課題について，全国漁港漁場整備技術研究発表会 講演集，Vol. 5，pp.105-120，2006。
- 3) 社団法人マリノフォーラム21 水産増殖研究会 マウンド漁場造成システムの開発グループ：マウンド漁場造成事業に係わる技術資料，pp. II34-36，2001。
- 4) 国土技術政策総合研究所編：総合的な建設事業コスト評価指針，2004。
- 5) 土木学会地球環境委員会編：土木建設業における環境負荷評価（LCA）研究小委員会講演要旨集，1997。
- 6) 土木学会編：コンクリートの環境負荷評価（その2），2004。
- 7) 地盤工学会九州支部編：環境と経済を考慮した建設発生土と廃棄物の有効利用報告書，2003。
- 8) 環境省：循環型社会推進計画，2003。
- 9) 東 健一，清田 健，古屋 温美，山内 繁樹，浅川 典敬，長野 章：人工海底マウンド漁場整備における総合的建設事業コストの算定について，平成19年度水産工学会学術講演会 論文集，pp.195-198，2007。
- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構編：平成15年度石炭生産・利用技術振興事業「人工湧昇流発生構造物構築素材としての石炭利用効果に関する調査」報告書，p66，2004。
- 11) 長崎県：平成18年度事業評価調査，2005。
- 12) 古屋温美，関いずみ，松本卓也，長野 章：問題の構造と対策の分析手法について（漁業後継者問題を中心にして），土木学会 海洋開発論文集，Vol. 18，pp.797-802，2002。
- 13) 児玉いずみ，松本卓也，本田耕一，長野 章：DEMATEL法による環境社会システムの構造分析手法について，環境システム研究 Vol.28，土木学会，pp.391-398，2000。