

平成23年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号 ：平成24年1月31日付 第11—2号

研究開発項目：(④) 建設マネジメントに関するもの

気候変動を考慮した海岸防護施設の耐波 設計とライフサイクルマネジメントに 関する研究

平成25年4月30日

京都大学防災研究所

間瀬 肇

1. はじめに

沿岸域の外力として中心的な将来波浪特性を知るために、テレコネクションパターンと波候変動の関係を調べた。その解析研究を第2章に示す。次に、地球温暖化による沿岸外力の変化を考慮した消波ブロック被覆堤の最適設計法を第3章に述べる。ここでは、ライフサイクルコスト最小化についても取り扱った。第4章では、高潮対策工法の選定に関して階層分析法を用いたシステムを作成した上で、実海岸での高潮防護施設の設計に適用してその有用性を検討した。

2. 北半球における波候変動とテレコネクションパターンの関係についての解析研究

気候変動を表す指標としてテレコネクションパターンがしばしば用いられ、1990年代以降テレコネクションパターンの変動トレンドと気候変動を関連付ける研究が活発となった。現在では、テレコネクションパターンは気候値におけるテレコネクション現象自体を示すことより、気候変動指数として扱われることが多い。

海岸工学分野においても、気候変動に対応した波浪の長期的変動を明らかにするため、波浪の長期変動をテレコネクションパターンで説明することが試みられている。北大西洋における波高の長期変動は、NAOと強い関係にあることが良く知られている（例えば Woolf ら, 2002）。その他に EA, EAWR, SCA（正式名称は次章）等との関係が論じられている（Izaguirre ら, 2010）。一方、北太平洋に関しては、El Nino や PNA, PDO との関連で波高の変動が論じられている（Menendez ら, 2008; Seymour, 2011）。日本沿岸の波浪の長期変動については、El Nino, PNA, AO, PDO 等による説明が試みられている（間瀬ら, 2009; Kuriyama ら, 2012; 関ら, 2011）。既往の研究では、ある観測点における波高の長期的変動をテレコネクションパターンでどの程度説明できるかということに注目しているが、テレコネクションパターンの影響範囲や強い影響を有するパターンの種類は、特に北太平洋で曖昧である。そこで北半球を対象に、いくつかのテレコネクションパターンに対する波浪の応答の空間分布を明らかにする。これにより、波浪の長期変動予測や、気候変動に対応した波浪の長期変動の理解に役立つ。

2.1 用いたデータおよび解析手法

本研究において用いるテレコネクションパターン（以降、TCP と略記、TCP インデックスは TCPI と略記）について説明する。北半球の 500hPa 面高度(Z500)で定義される 9 つの TCP, North Atlantic Oscillation (NAO), East Atlantic (EA), East Atlantic/Western Russia (EAWR), Scandinavia (SCA), Polar/Eurasia (POL), West Pacific (WP), East Pacific-North Pacific (EPNP), Pacific/North American (PNA), Tropical/Northern Hemisphere (TNH) を用いた。本研究において、TCPI は、NOAA の Climate Prediction Center を参考に、NCEP/NCAR 再解析値の Z500 月平均データに回転 EOF 解析(主成分分析)を適用して求めた。ERA-40 再解析値の波高データと TCP の関係を解析する際の ERA-40 再解析値における TCPI は、NCEP/NCAR 再解析値によって求めた TCP の空間パターンを ERA-40 再解析値の Z500 データに投射することにより求めた。これに加え、北半球の海面更正気圧(SLP)に EOF 解析を適用して第 1 モードとして定義される Arctic Oscillation (AO), 北半球の海面温度に EOF 解析を適用して第 1 モードとして定義される Pacific Decadal Oscillation (PDO), El Nino 3.4 領域の海面温度偏差で定義される El Nino インデックスを用いた。使用したデータの期間は、1960-1990 年の 31 年分である。1960-1990 年のデータを用いた理由は、ERA-40 再解析値の波高データが 1990 年代に衛星観測データを同期し始めて、それ以前と以後で波高データにギャップがあるためである（Sterl・Caires, 2005）。

2.2 解析結果

(1) TCP と波高の時間相関

冬季(DJF), 春季(MAM), 夏季(JJA), 秋季(SON)と区分して解析を行った結果、TCP と波高の長期変動の関係は冬季に最も明瞭に現れる傾向にあった（図-2.1）。このため、冬季に絞って解析を進める。

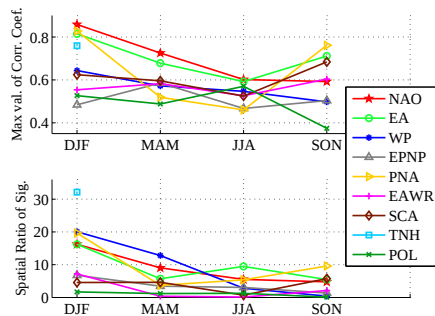


図-2.1 Z500 で定義される TCPI と月平均波高の相関係数最大値(上)と相関が有意な領域の北半球における割合(下)の季節変化 (TNH は DJF のみ)

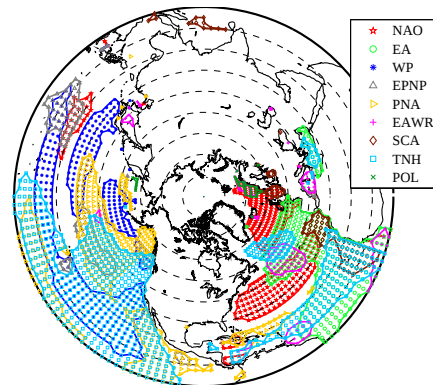


図-2.2 Z500 で定義される TCPI と $\bar{H}$ に有意な相関がある領域

冬季において、すべての TCPI と波高の月平均値($\bar{H}$)および月 95%値(H_{95})との相関係数の分布図を求めた。ここでは、図-2.2 に $\bar{H}$ についてのみ、Z500 で定義される TCPI と有意な相関がある領域を示す。31 年分×3 か月の 93 個のデータを用いているが、93 個のデータが独立ならば、無相関であるという仮説は、相関係数が 0.2 より大きければ 5%水準で棄却できる。ただし、連続な月は独立なデータではないと考えられ、独立なデータ数を年数分の 31 と考えて、相関係数が 0.36 より大きい場合、5%水準で有意とする。 H_{95} (図は省略) より $\bar{H}$ の方が相関が有意な領域は広いが、分布は類似している。このことから、 $\bar{H}$ に絞って議論していく。

有意な相関係数が得られた領域は海洋の東部において広く、西部で小さくなる。これは、うねりの影響があると考えられる。気候変動指数として頻繁に用いられる El Nino, PDO, AO と冬季 $\bar{H}$ の相関係数分布図については図-2.3 に示す。

以下、波高変動に対する TCP の影響範囲を既往の研究で観測値から得られた結果を比較しながら考察する。

北大西洋に影響のある TCP: 北大西洋の広い範囲においては、NAO と EA が波高変動に重要な指標となる。NAO インデックスと冬季月平均波高の相関係数分布は、北緯 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 付近において負の相関、北緯 50° 以北で正の相関で特徴づけられ、衛星観測結果と同様な結果となっている (Woolf ら, 2002; Izaguirre ら, 2010)。NAO および AO インデックスと冬季 $\bar{H}$ の相関係数分布は類似している。これは両者のインデックスが、高い相関 (冬季: 0.80, 春季: 0.58, 夏季: 0.60, 秋季: 0.73) を有するためである。日本海においては、NAO および AO インデックスと冬季 $\bar{H}$ は -0.4 から -0.3 程度の相関係数を示したが、間瀬ら(2009) が観測資料を解析した結果では、日本海沿岸の年最大有義波高と AO インデ

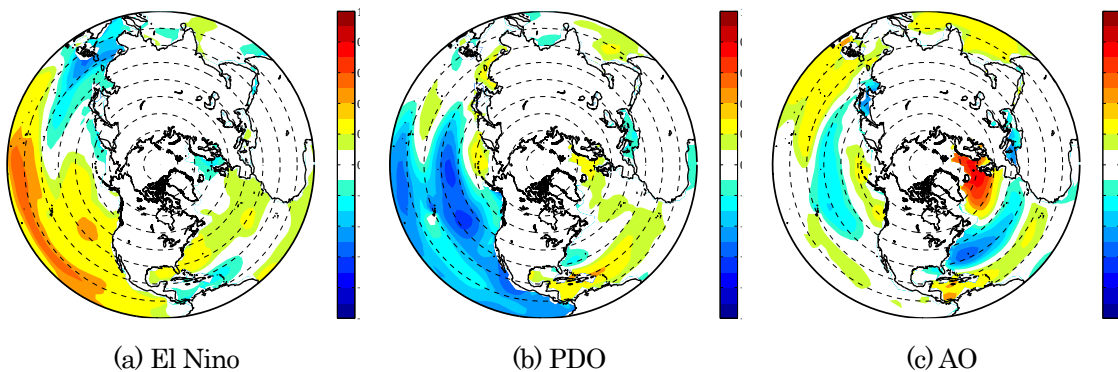


図-2.3 冬季月平均波高と相関係数分布

ックスの相関係数は約 -0.1 から -0.4 である。EA インデックスと $\bar{H}$ は、北大西洋東部で正相関、地中海で負相関となる。これは、Izaguirre ら(2010) の観測波高の極値統計における、EA インデックスを関数とする位置母数の分布と対応している。EAWR は地中海に、SCA は北海において有意な相関をもつ。Izaguirre ら(2010) の結果は EAWR、SCA についても本研究と整合性がある。

北太平洋に影響のある TCP: 北太平洋の波高変動には、PNA、TNH、WP が強い相関を持つ。PNA は北太平洋東部で影響が強く、北太平洋東部全域で波高と正の相関となり、北太平洋中央部で特に相関が大きい。Menendez ら(2008)は、ブイによる波高観測データの解析から、PNA は北東太平洋の極大波高に強い影響があり、海岸沿いよりも、沖合方向に対して強い影響があるとしており、本研究での北太平洋中央部でより強い相関があるということと一致している。TNH についても北東太平洋に影響範囲が広がるが、PNA より東寄りに影響範囲の極大点を持つ。すなわち、北アメリカ西岸の波高に関しては PNA より影響が強い。WP インデックスと $\bar{H}$ の相関係数分布は、北太平洋においてバンド状の相関係数分布を持ち、低・中・高緯度で正・負・正の相関がある。TNH と WP に関して、波高との関係は既往の研究で論じられていない。PDO と $\bar{H}$ の相関係数分布 (図-2.3(b)) は PNA のものを反転したような分布である。PNA インデックスと PDO インデックスは、冬季において -0.6 と高い相関にある。Kuriyama ら(2012) は波崎における冬季の波エネルギーフラックスは、PDO および AO と有意な相関があることを示しているが、本研究の $\bar{H}$ に関しては同様な結果は得られなかった。波エネルギーフラックスは周期を含んだパラメーターであり、今後は周期を含めた解析が望まれる。El Nino に関しては、北太平洋において西部の $\bar{H}$ と負、東部の $\bar{H}$ と正の関係にある。低緯度で ± 0.4 程度の相関係数を示し、北緯 20° 以北では高い相関はない(図-2.3(a))。Menendez ら(2008) は、北東太平洋の極大波高と El Nino については関係は弱いものの、有意な正の関係にあるとしている。関ら(2011) は、日本付近の平均波高の変動と El Nino は全体的に弱い負の相関にあることを示しており、図-2.3(a)はこれに対応している。

(2) 冬季月平均波高の空間変動分布と TCP

ここでは、 $\bar{H}$ の空間的な変動成分を取り出し、TCP との関係調べる。具体的には、北大西洋と北太平洋の冬季 $\bar{H}$ に EOF 解析を適用し、卓越する変動パターンについて解析を行う。北太平洋は、0° N ~ 60° N, 100° W ~ 100° E, 北大西洋は、0° N ~ 70° N, 90° E ~ 20° W として定義する。まず、北太平洋、北大西洋それぞれにおいて、1960-1990 年の 31 年分×3 か月の $\bar{H}$ データに EOF 解析を適用する。EOF 解析によって得られた空間パターンを北太平洋のみ図-2.4 に示す。この空間パターンは、EOF の時係数と $\bar{H}$ との相関係数分布として表している。

北太平洋、北大西洋の第 1 モードは、海洋の東側および低緯度の広範囲にわたる変動を表す。分散寄与率は 30%以上である。北太平洋の第 2 モードは、主に北太平洋南西部の変動を捉えている。北大西洋の第 2 モードは、緯度に依存したバンド状の変動を表している。北太平洋の第 3 モードはバンド状の変動で、北大西洋の第 3 モードは主に南西部の変動を捉えたものである。このように、北太平洋および北大西洋の $\bar{H}$ に EOF 解析を適用すると、いずれの海洋においても、上位 3 モードで、海洋東側

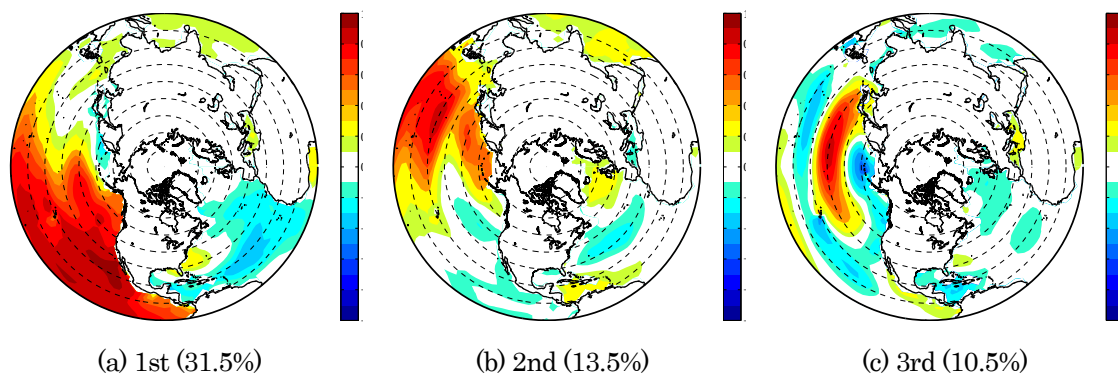


図-2.4 北太平洋冬季月平均波高の EOF 空間パターン, ()内は分散寄与率

表-1 冬季月平均波高のEOF時係数とTCPIの相関係数（太字は相関が有意であることを示す）

	NAO	EA	WP	EPNP	PNA	EAWR	SCA	TNH	POL	El Niño	PDO	AO
北太平洋												
1st	0.01	-0.03	0.35	0.06	0.46	-0.17	-0.08	-0.55	-0.06	0.44	-0.50	-0.00
2nd	0.31	-0.01	0.12	-0.41	-0.20	0.01	0.10	0.17	-0.18	-0.03	0.06	0.21
3rd	-0.08	-0.26	-0.80	0.37	0.40	-0.18	-0.09	0.03	-0.09	-0.11	-0.39	-0.37
北大西洋												
1st	-0.18	0.62	0.01	0.04	-0.29	0.34	0.29	0.41	-0.08	0.14	0.13	0.00
2nd	-0.86	-0.23	-0.08	0.24	0.17	-0.20	-0.03	-0.34	-0.16	0.19	-0.18	-0.75
3rd	-0.23	0.35	-0.08	0.26	0.29	-0.19	0.26	-0.15	-0.01	0.18	-0.39	-0.23

の変動，バンド状の変動，南西部の変動が得られる．分散寄与率は3モード合計で55～60%である．

ここで得られた3モードの時係数とTCPIとの相関係数を表-1に示す．北太平洋の第1モードの時係数は，冬季でPNA，TNH，El Niño，PDOと有意な相関がある．北太平洋の第1モードは，低緯度の貿易風の強弱による波高の変動，中緯度における偏西風の強弱による波高の変動，さらに北太平洋東側における北寄りの風の強弱による波高の変動を表し，また，それらによるうねりの変動を含んでいると考えられる．このため，低緯度の貿易風の変動に影響するWP，中緯度における偏西風の変動に影響するPNAもしくはPDO，北太平洋東側における北寄りの風の変動に影響するTNHの3つインデックスの線形結合したものと冬季北太平洋の第1モードの時係数は約0.7の高い正の相関を示す．北太平洋の第2モードは，低緯度南西部における変動を表しており，EPNPと有意な相関がある．第3モードに関しては，WPインデックスと-0.8の高い負の相関がある．この第3モードとWPの関係については次節で詳細に述べる．

北大西洋については，第1，2モードの空間パターンは，それぞれEAおよびNAOインデックスと冬季 $\bar{H}$ の相関係数分布に類似しており，EAおよびNAOと比較的高い相関がある．特に，NAOインデックスと第2モード時係数の相関係数は-0.86と絶対値は大きい値を示す．第3モードは，PDOと有意な相関がある．

冬季 $\bar{H}$ のEOF解析により，北太平洋，北大西洋ともに同様な空間変動パターンを持ち，特に緯度方向にバンド状に広がる変動は，TCP(北大西洋はNAO，北太平洋はWP)と良く対応していることがわかった．

(3) West Pacific (WP) と北太平洋冬季波高変動

前節までで，波高の空間変動パターンとTCPの関係を明らかにした．その中で，北太平洋に卓越する冬季波高変動パターン(北太平洋のEOF第3モード)とWPパターンは強い相関があることを示したが，既往の研究では議論されていない．そこで，本節ではその関係について，観測結果と比較しつつ詳細に解析した．本節では以後，北太平洋のEOF第3モードをNP3と記述する．

観測値にブイおよび船による冬季の波高観測値を用いた．ブイについては，日本気象庁のものを2点(#21001,21004)，NOAAのものを4点(#46003,46006,46035,51004)用いた．それぞれのブイの観測開始から2009年までの観測値を使用した．船によるものは，International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set (ICOADS)の北緯27.5°～32.5°，東経162.5°～167.5°における1958年から2009年の波高観測値を用いた．観測点#21001と#21004は，NP3が正の変動を示す位置にあり，そのほかのブイは負の変動を示す位置にある．また，ICOADSのデータについては，NP3の最も正の変動が大きい場所に位置している．波高観測値は，月平均値($\bar{H}$)を用いた． $\bar{H}$ はそれぞれの月で規格化した．つまり一月のデータは一月の平均値と標準偏差で規格化した．WPインデックスを横軸に，ICOADSによる $\bar{H}$ 観測値を縦軸にとったものを図-2.5に示す(ブイ観測値の図は省略)．WPインデックスと $\bar{H}$ 観測値の相関係数は，#46035で0.33，#46003で0.50，#21001で-0.30，#21004で-0.22，#51004で0.56，#46006で0.33，ICOADSで-0.66となる．これらの相関係数の正負の傾向は，その観測点が位置する場所のNP3の変動傾向と逆の傾向となる．また，それぞれの相関係数の大きさが，NP3のそれぞれの地点における変動の大きさと良く対応する．この結果は，NP3が統計的にではなく実際に存在するということの意味し，また，NP3の時係数とWPインデックスが-0.8の強い逆相関にあるという先述の結果を

支持する。

WP パターンと NP3 の関係の物理的な意味について考察する。これについては、Wallace ら(1990)が示した偏西風と貿易風の同期した変動と WP パターンの関係によってある程度説明できる。冬季の SLP の平均値は、北太平洋において北緯 20° から北緯 30° でバンド状に高くなっている。この緯度帯を境に、気圧勾配によって北には偏西風が吹き、南には貿易風が吹く。WP パターンが正のときは、もともと SLP が高い北緯 20° から北緯 40° で気圧が高くなる。このことから、WP パターンが正のときは、この緯度帯を境にさらに気圧勾配が大きくなり偏西風と貿易風が同期して強化される。また逆もいえる。その風の変動に伴い NP3 が緯度方向に広がるバンド状になる。ただし、この説明では北緯 30° 付近の波高の変動を説明することができない。

北緯 30° 付近の波高の変動については、温帯低気圧のトラックによって説明できる。ここで、ERA-40 再解析値の 1958 年から 2001 年までの冬季 SLP データから温帯低気圧を抽出する。抽出条件には、Geng・Sugi (2001) のものに (1)気圧が 1010hPa 以下、(2)地上は対象としない、という条件を加えた。WP インデックスが正の月はストームトラックが北寄りであり、負の月は南寄りの経路をとり正の月に比べ東に経路が伸びる。WP インデックスが 0.5 より大きい月と、-0.5 より小さい月に分けて月平均通過個数を求め、その差を $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ の平滑化を行って図-2.6 に示す。図より、WP インデックスの値と温帯低気圧の数の間には明瞭なパターンが存在し、WP インデックスが正のときは、ストームトラックが北にシフトすることがわかる。これより、WP パターンインデックスが正のときは北緯 30° 付近にストームの影響が及ばず、WP が負のときはストームの影響が及ぶ。このため、WP パターンインデックスの正負により北緯 30° 付近の波高の変動が起こる。

NAO は、波浪長期変動に重要な指標であると認知されているが、北太平洋においては WP パターンが、北大西洋における NAO 同様、重要な指標となることがわかった。NAO と WP に対応して、波高同様、海上風がバンド状の変動パターンを示す。つまり、NAO および WP とバンド状の波高変動パターンとの対応は、風波の変動パターンとの対応と言い換えることができる。一方で、EOF 第 1 モードで表されるような海洋東側の波高変動パターンは、風波およびうねりの変動成分を含むと考えられる。このことがバンド状の波高変動パターンに比べて、EOF 第 1 モードと大気の変動現象である TCP との相関が小さくなる理由と考えられる。

2.3 まとめ

これまで個別に扱われてきた様々な TCP に対する波高の数 km・月スケールの応答を再解析値を用いて明らかにした。TCP に対する波高の応答は、海洋東側で顕著に現れる。また、TCP と波高の関係は冬季に最も明瞭になる傾向にある。再解析値を用いて得られた結果は、既往の観測値と整合性があった。北太平洋冬季波高の緯度に依存したバンド状の空間変動パターンと West Pacific (WP) の関係を新たに見出し、観測値によってその関係を確認することができた。

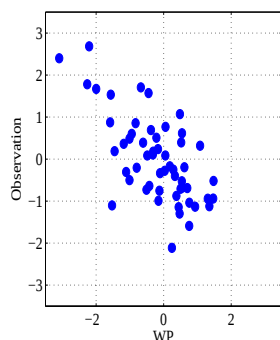


図-2.5 WP インデックスと ICOADS による波高観測値

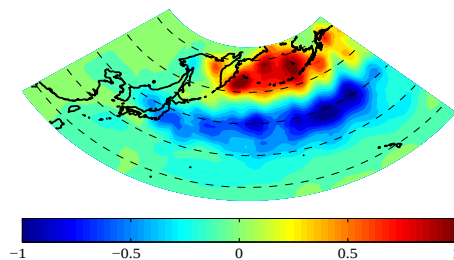


図-2.6 WP が 0.5 (-0.5) より大きい (小さい) 月の温帯低気圧の月平均通過個数の差

第2章参考文献

- 関 克己・河合弘泰・佐藤 誠・川口浩二 (2011) : 全国港湾海洋波浪観測長期データに基づく日本沿岸の季節別波浪特性の経年変化, 港湾空港技術研究所資料, No. 1241.
- 間瀬 肇・田中 遼・森 信人・安田誠宏 (2009) : 日本海沿岸における波浪の経年変化特性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, pp.1251-1255.
- Geng, Q., and M. Sugi (2001): Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NCEPNCAR reanalysis data, *J. Clim.*, 14, pp.3863-3873.
- Izaguirre, C., F.J. Mendez, M. Menendez, A. Luceno, and I.J. Losada (2010): Extreme wave climate variability in southern Europe using satellite data, *J. Geophys. Res.*, 115, C04009.
- Kuriyama, Y., M Banno, and T Suzuki (2012): Linkages among interannual variations of shorelines, wave and climate at Hasaki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 39, L06604.
- Menendez, M., F.J.Mendez, I.J. Losada, and N.E. Graham (2008): Variability of extreme wave heights in the Northeast Pacific Ocean based on buoy measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L22607.
- Seymour, R.J., (2011): Evidence for change to the Northeast Pacific wave climate, *J. Coastal Res.*, 27(1), pp.194-201.
- Sterl, A., and S. Caires (2005): Climatology, variability and extrema of ocean waves: the web-based KNMI/era-40 wave atlas, *Intl. J. Climatol.*, 25, pp.963-977.
- Wallace, J.M., C. Smith, and Q. Jiang (1990): Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter, *J.Clim.*, 3, pp.990-998.
- Woolf, D.K., PG Challenor, and PD Cotton (2002): Variability and predictability of the North Atlantic wave climate, *J.Geophys. Res.*, 107(C10), 3145.

3. 地球温暖化による沿岸外力の変化を考慮した消波ブロック被覆堤の最適設計

2007年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(社)日本港湾協会, 2007)では, 性能設計が採用された。設計波としての50年確率波だけではなく, 設計供用期間に発生する高波浪を対象として, 変形量を考慮した防波堤の設計法の確立に向けた研究が進められている。一般的な消波ブロック被覆堤の滑動量を考慮した設計法における既往の研究として, 下迫ら(2006)は, 下迫・高橋(1998)の混成堤の滑動量算定手法を消波ブロック被覆堤に拡張し, 実海域の構造物設計を行った。高山ら(2007)は, 設計供用期間中の消波ブロックの被災を考慮し, 不完全被覆による波圧増大を考慮した滑動量算出法を提案している。地球温暖化による外力変化を考慮して, 防波堤の安定性を検討した例がいくつかある(例えば, 酒井・岡安, 2004)。しかし, 将来変化の設定は最近の気候変動予測に基づくものではない。本研究では, 地球温暖化に伴って漸近的に変化すると予測される供用期間内の沿岸外力の変化を考慮して, 消波ブロック被覆堤の滑動量を解析し, 消波ブロックの補修費を算出して, 外力特性の変化を考慮した消波ブロック被覆堤の最適設計法を提案する。さらに, LCCの算定に経済指標を導入し, その影響度についても評価する。

3.1 検討対象外力と解析方法

防波堤の滑動安定性に影響を及ぼす沿岸外力として, 本研究では, (1) 地球温暖化に伴う海面上昇, (2) 台風の強大化等に伴う高潮偏差の増大, (3) 台風の強大化等に伴う来襲波浪の増大を対象とする。計算条件は, 辻尾ら(2012)と同様であり, その計算結果の一部を用いた。2007年に発表された気候変動に関する政府間パネルの第4次報告書では, 温暖化シナリオとして6種類のシナリオを想定しており, それぞれに対する気温変化の最良の推定値, 予測幅と海面水位上昇の予測幅が報告されている。今世紀末の海面水位に関しては, 最低でも0.18m, 最大で0.59m上昇すると指摘されている。

森ら(2011)は, 図-3.1に示すように, CMIP3の結果(A1B)をもとに, シナリオ・モデル・アンサンブル平均として日本近海の海面水位の将来変化を(0.26m/100年)を計算している。本研究ではこれを設定条件として採用する。

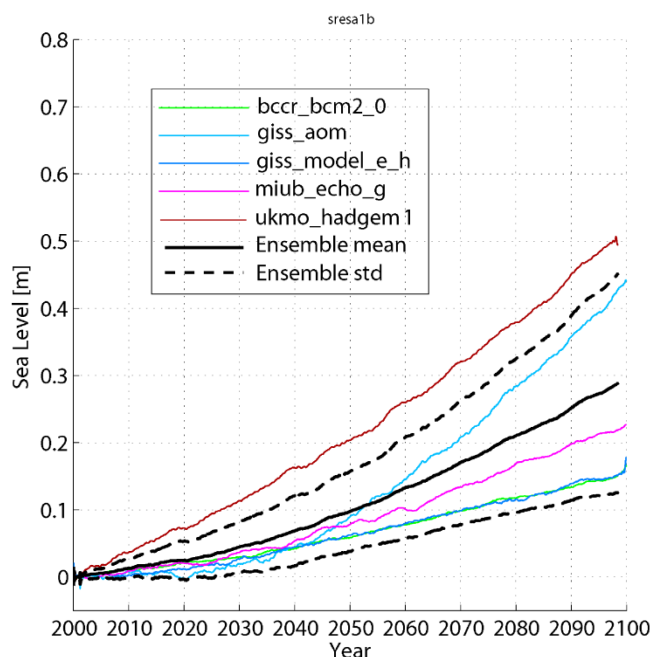


図-3.1 日本近海の海面上昇の予測値 : SRES A1B (森ら, 2011)

(黒実線 : モデル平均, 黒破線 : 平均+標準偏差, その他 : 各 GCM の結果)

高潮偏差の将来変化については、高波の条件と同一の気候変動の条件から考えることが望ましいが、高潮は高波よりも台風の経路に鋭敏に依存するため、決定論的に将来変化を推定することは難しい(Mori, 2012)。

このような気候変動に従う台風特性の変化に伴う高潮の変化については、いくつか検討されている(例えば、河合ら, 2007 ; 安田ら, 2011)。河合ら(2007) は、橋本ら(2005) が、SRES A2 シナリオの領域気候モデルの計算結果に基づいて示した、将来気候下における日本周辺の台風特性の変化に準じて、高潮がどのように変化するかを検討している。海面上昇と比べて、高潮の将来変化予測の不確実性は大きく、地域に大きく依存するが、本研究では、高潮の将来変化の1つの可能性として、河合らが予測した大阪港での極値分布(図-3.2)を採用した。

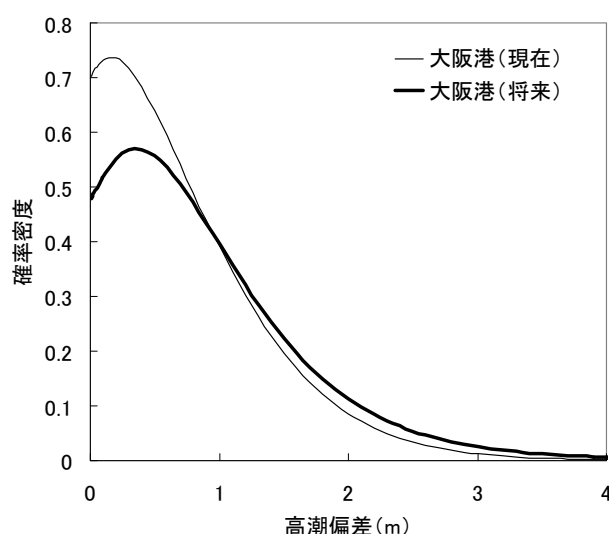


図-3.2 大阪港の現在と将来の高潮偏差の極値分布(河合ら, 2007)

気候変動による台風の強化化、極端化によって変化する来襲波浪特性について、森ら(2010) は、SRES A1B シナリオに基づく全球気候モデル GCM による気候変動予測実験結果(Kitoh ら, 2009)をもとに、現在から今世紀末の全球における風速場や波浪場の将来変化予測を行った。波浪解析には GCM の海上風を外力としてスペクトル型波浪モデルを用いて予測計算を行い、図-3.3 に示す I ~ IV の領域に対して、現在と将来の極値分布の変化を示している。

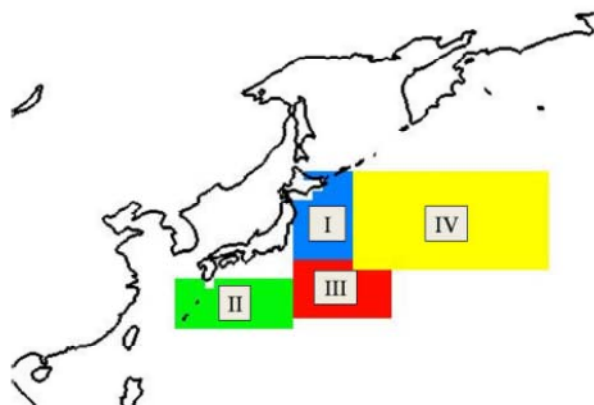


図-3.3 波浪の極値統計解析対象領域(森ら, 2010)

本研究では、来襲波浪として、森らの現在気候 25 年間と今世紀末（2075 ～ 2100 年）の波浪解析値から得た領域 II と III の極大値分布を用いた。例として領域 II の極大値分布を図-3.4、図-3.5 に示す。なお、周期は波形勾配を一定として算出した。森らの結果は、一年を夏季と冬季に分けた極大値資料に基づく極値分布であるので、それぞれの季節における年平均発生数 λ_j を求めた上で年最大値分布を次式で求めた。

$$F(x) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \lambda_j [1 - F_j(x)] \right\} \quad (3.1)$$

ここに、 $F(x)$ ：年最大値分布の発生確率 x の確率値、 $F_j(x)$ ： j 番目の極大値分布の発生確率 x の確率値、 n ：極大値分布の数、 λ_j ：各季の極大値分布に対応する年平均発生数である。森ら(2010) ではそれぞれに領域に対して夏季（6 ヶ月）と冬季（6 ヶ月）の極値分布を求めているため、ここでは、 $n=2$ である。

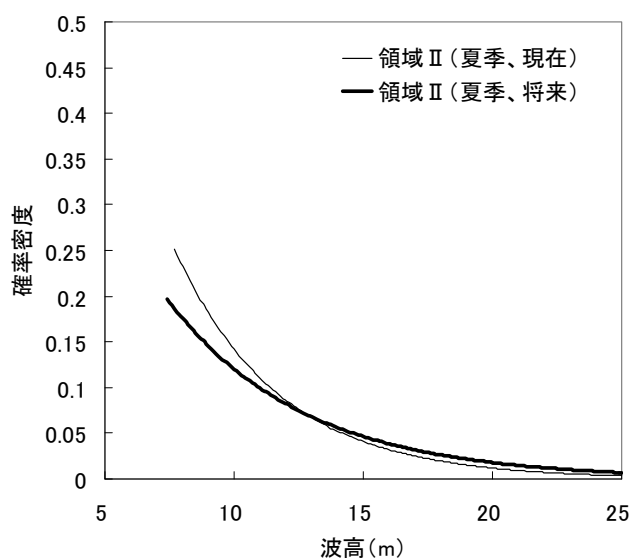


図-3.4 現在と将来の波高極値分布（森ら、領域 II の夏季）

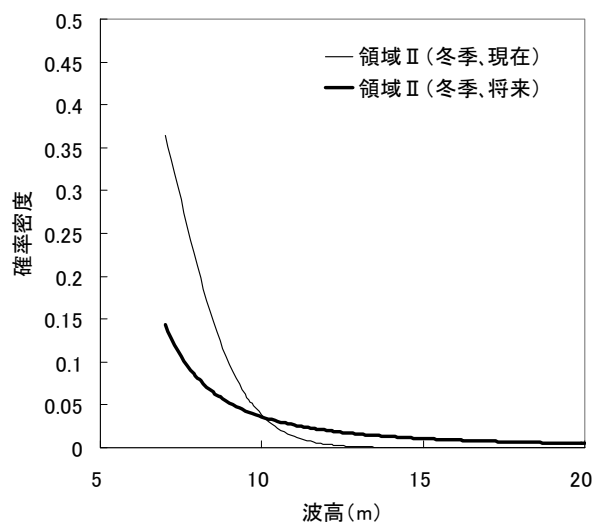


図-3.5 現在と将来の波高極値分布（森ら、領域 II の冬季）

3.2 外力変化の考慮方法

設計供用期間中の外力は、基本的に線形増大すると仮定する。海面上昇については、モデルアンサンブルから平均値として 0.26m/100 年の上昇が予測されているため、検討対象年に応じて、年間 0.0026 m の海面上昇から L.W.L. を設定し、その後に天文潮位による水位変化を考慮した。ここで、天文潮位は将来変化しないと仮定している。また、現在気候と将来気候における極値分布から算定される高潮偏差と沖波波浪は、次式のように、発生年次を考慮して線形補完することで、その年に発生する高潮偏差と沖波波浪を求めた。

$$H(x) = H_1(x) + \frac{y}{Y} [H_2(x) - H_1(x)] \quad (3.2)$$

ここに、 $H(x)$ ：年最大値分布の発生確率 x の確率値 $H_1(x)$ ：現在の年最大値分布の発生確率 x の確率値、 $H_2(x)$ ：将来の年最大値分布の発生確率 x の確率値、 Y ：将来の基準年（本研究では 100 年後を対象としているため $Y=100$ ）、 y ：検討対象の経過年（発生年次）、である。

3.3 解析方法・条件

設計供用期間中における防波堤の滑動量解析には、高山ら(2007)の滑動量算定モデルを用いた。期待補修費の算出には、辻尾・安田(2009)と同様に、算定した滑動量から、滑動に伴うブロック沈下と波浪によるブロック散乱に伴うブロック沈下を考慮して、ブロックの補修費を算定した。計算条件は、日本近海領域Ⅱを表-3.1に、領域Ⅲを表-3.2に示す。各領域の堤体幅と天端高は、領域Ⅱの50年確率波に対して、屈折係数0.5と1.0の2通りの設計波を基に安全率が1.2となる断面とし、領域Ⅲに対しても同様に屈折係数0.3と0.5の2通りを対象とした。前面には2t～80tまでの16種類の消波ブロックを設置し、計算ケースとして、温暖化を考慮する場合と考慮しない場合、さらに、消波ブロックを補修する場合と補修しない場合を設定した。

また、既往研究において、社会的割引率（以下、SDRと略す）とGDPデフレーターは考慮されていない例が多い。設計供用期間中の補修費に、SDRとGDPデフレーターによる価値の変化を考慮し、その影響を調べておくことは、最適設計に重要と考える。本研究では、SDRとGDPデフレーターによる最適LCCの変化を検討するために、1) SDR、GDPデフレーター考慮無し、2) SDRのみ考慮、3) SDRと日本のGDPデフレーターを考慮、3) SDRと中国のGDPデフレーターを考慮、の計4ケースを設定し、現在価値に換算して補修費を算出した。SDRは、一般に公共事業で用いられている4%を適用した。GDPデフレーターは過去のものしか存在せず、GDP成長率をGDPデフレーターとして、将来の価値変動を取り入れた。なお、デフレターの将来予測は「長期経済予測（2006～2050年）」（社）日本経済研究センター、2007）を採用した。設定した4ケースの経過年数に対する現在価値の変化を、図-3.6に示す。

表-3.1 計算条件（領域Ⅱ）

項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 20.07m($\lambda=0.43$) Weibull分布 $k=1.0, A=4.02, B=7.74$		
沖波波浪 (現在, 冬)	50年確率波浪 10.82m($\lambda=1.47$) Weibull分布 $k=1.4, A=1.80, B=5.72$		
沖波波浪 (将来, 夏)	50年確率波浪 24.79m($\lambda=0.53$) Weibull分布 $k=1.0, A=5.25, B=7.58$		
沖波波浪 (将来, 冬)	50年確率波浪 10.84m($\lambda=0.91$) Weibull分布 $k=1.0, A=1.26, B=6.03$		
設置水深 (h)	7m	10m	15m
堤体幅 : $K_r=1.0$	16.8m	18.3m	21.3m
堤体幅 : $K_r=0.5$	14.3m	16.1m	19.3m
天端高 : $K_r=1.0$	4.2m	5.2m	6.8m
天端高 : $K_r=0.5$	3.8m	4.8m	6.4m
高潮偏差	50年確率偏差 2.616m Weibull分布 $k=1.4, A=0.998, B=-0.248$		
高潮偏差 (将来)	50年確率偏差 3.199m Gumbel分布 $A=0.646, B=0.358$		
水位上昇	0.0026m/yr (0.26m/100yrs)		
継続時間	2時間		
設計供用期間	50年		
繰返し回数	10,000回		
要補修被災度	全被覆面積の5%		

表-3.2 計算条件（領域Ⅲ）

項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 13.1m($\lambda=0.14$) Weibull分布 $k=1.4, A=3.42, B=7.63$		
沖波波浪 (現在, 冬)	50年確率波浪 12.3m($\lambda=0.77$) Weibull分布 $k=1.0, A=1.42, B=7.12$		
沖波波浪 (将来, 夏)	50年確率波浪 21.5m($\lambda=0.42$) Weibull分布 $k=1.4, A=6.41, B=7.30$		
沖波波浪 (将来, 冬)	50年確率波浪 13.46m($\lambda=1.16$) FT-II分布 $k=5.0, A=0.90, B=7.84$		
設置水深 (h)	7m	10m	15m
堤体幅 : $K_r=0.5$	12.5m	14.1m	17.4m
堤体幅 : $K_r=0.3$	12.0m	13.5m	13.8m
天端高 : $K_r=0.5$	3.5m	4.5m	4.5m
天端高 : $K_r=0.3$	3.2m	3.2m	2.8m

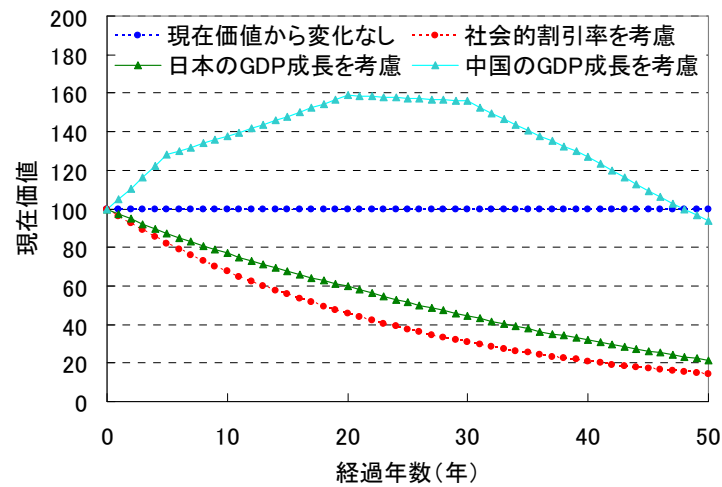


図-3.6 現在価値の変化（社会的割引率と GDP デフレーター）

3.4 LCC の算出

(1) 初期建設費

まず、表-3.1 の計算条件の下、辻尾ら(2012) が算出したブロック質量毎の必要堤体幅を用いて、それらに対する初期建設費を算出した。各ブロック質量に対する初期建設費は図-3.7 に示す通りである。なお、初期建設費の算出には、ケーソン費用：15 千円/m³、マウンド+被覆材費用：18 千円/m³等を用いた。ブロック質量が大きくなるほど、ケーソン幅が小さくなるため、ケーソン費用は安くなるが、ブロック費用、マウンド被覆材費用は、ブロックが大きくなると、大きくなる傾向がわかる。本ケースでは、12t型を用いた場合の初期建設費が最も安いことになる。

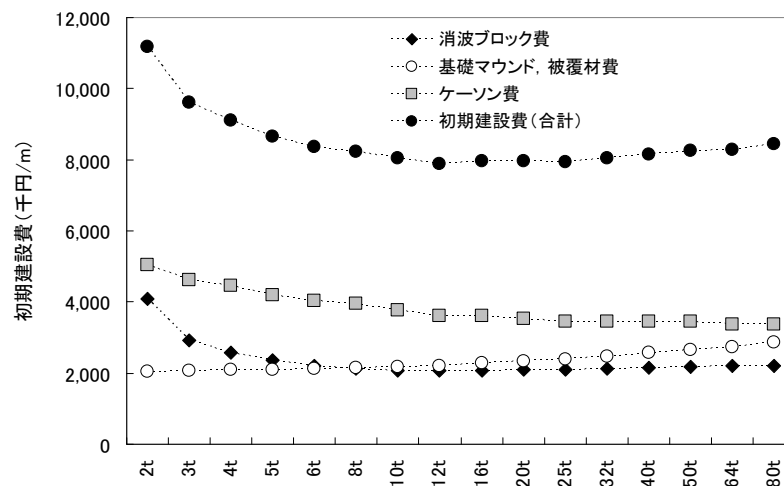


図-3.7 ブロック質量別の初期建設費の算出例

(領域 II, Kr=0.5, h=7m)

(2) 期待補修費

次に、辻尾ら(2012) が算出した、設計供用期間中に発生した滑動量およびブロック沈下量から、50年間の期待補修費を算出した。その際、SDR や GDP デフレータの考慮の有無で4 ケースの期待補修費を算出した。図-3.8 に期待補修費の算出例を示す。本ケースでは社会的割引率や GDP デフレータの設定の違いは、被害が大きいブロック質量の小さい場合に顕著となり、期待補修費の差は最大で2〜3倍程度になった。

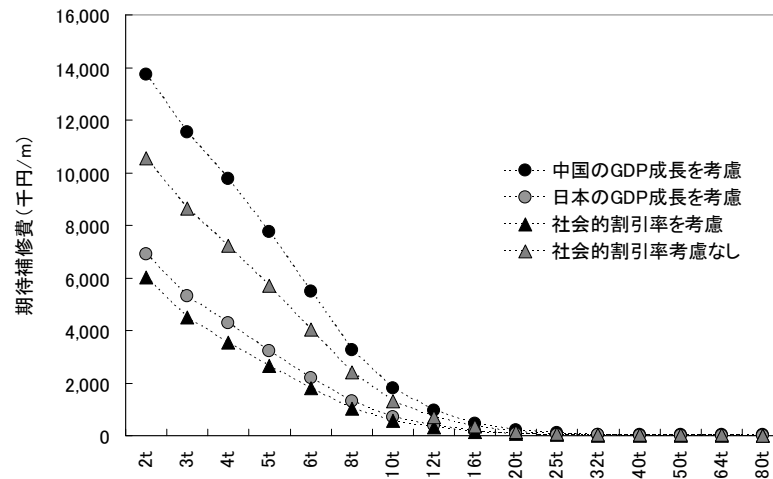


図-3.8 ブロック質量別の初期建設費の算出例
(領域 II, $Kr=0.5$, $h=7m$)

(3) LCC

1.3.1 初期建設費に1.3.2 期待補修費を加えて、各ブロック質量を用いた場合のLCCを求めた。

図-3.9 に LCC の算出例を示す。SDR や GDP デフレータの考慮の有無による期待補修費の差は大きいですが、LCC が最小となるような期待補修費が小さい場合では、社会的割引率等の考慮方法による変化は小さいことがわかった。なお、本ケースでは、ブロックに 16t 型を用いた場合の LCC が最小となった。

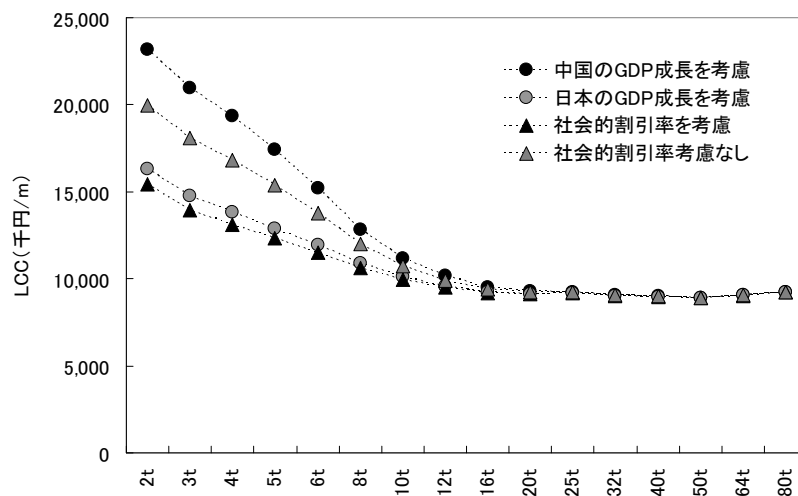


図-3.9 LCC の算出例 (領域 II, $Kr=0.5$, $h=7m$, 温暖化考慮)

(4) 考察

地球温暖化の考慮の有無による最適なブロック質量の違いを検討するために、各検討ケースのハドソン式による必要質量に対するLCC最適となったブロック質量の比(最適ブロック質量比)を求めた。まず、最適ブロック質量比と堤前波高との関係を図-3.10 に示す。8m 以下の堤前波高の場合、必要質量よりも大きなブロックを用いる方がLCCを低減させることができる。また、辻尾ら(2012)と同様に水深波高比に着目し、最適ブロック質量比と水深波高比の関係を調べ、図-3.11 に示す。最適なブロック質量は、温暖化の考慮の有無によって変わらない場合がほとんどであるが、水深波高比が2.0程度以上の場合、LCCを最小にするには、消波ブロックを大きくする必要があることがわかった。これは、辻尾ら(2012)での期待滑動量や必要堤体幅の増加率と整合する結果であり、水深が深く、設計波が比較的小さい場合に地球温暖化による安定性低下の影響が大きくなるためと考えられる。

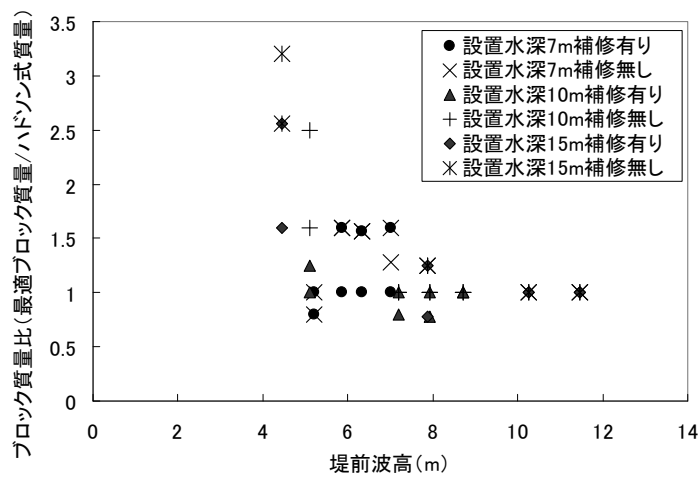


図-3.10 堤前波高に対する最適ブロック質量比

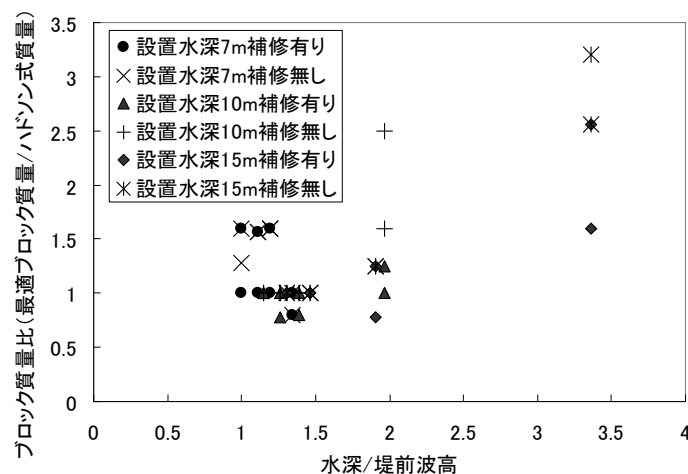


図-3.11 水深波高比に対する最適ブロック質量比

次に、地球温暖化の考慮の有無による LCC の増加率（温暖化を考慮した場合の最小 LCC／現在気候での最小 LCC）に着目した。LCC 増加率と水深波高比の関係を調べたが、顕著な傾向が得られなかったため、LCC 増加率と堤前波高との関係を調べたものを、図-3.12 に示す。堤前波高が大きい場合、温暖化による LCC 増加率は 5%程度であるのに対し、堤前波高が小さくなるにつれて増加率が大きくなり、4m 程度では 20% 程度の増加率となった。

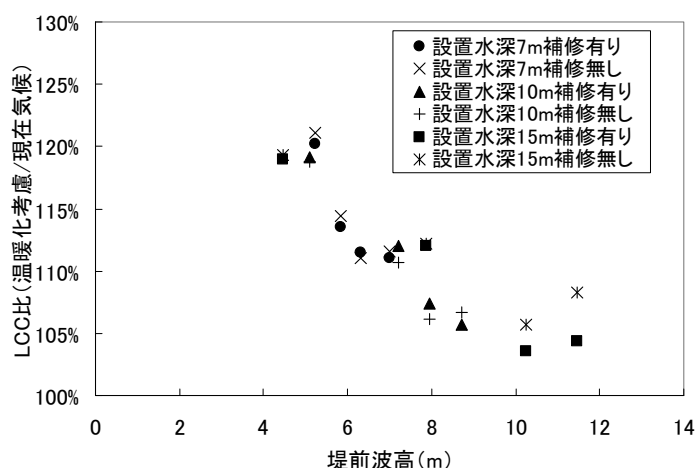


図-3.12 堤前波高に対する LCC 比

3.5 まとめ

本研究では、消波ブロック被覆堤を対象として、地球温暖化による沿岸外力の変化を考慮して、最適設計を実施した。以下に、主要な知見を示す。

- 1) 本検討ケースでは、堤前波高が比較的小さい場合（ここでは 8m 以下）、必要質量よりも大きなブロックを用いることが LCC 最適となる。
- 2) 期待補修費が小さい場合には、社会的割引率や GDP デフレーター等の経済指標による影響は小さい。
- 3) 地球温暖化を考慮すると、堤前波高が小さい場合に、LCC の増加率は大きくなる。

地球温暖化を考慮することで、LCC や最適断面諸元が変化することから、今後の防波堤の最適設計には設計供用期間中の沿岸外力変化を考慮する必要があるとわかった。ここに示した解析結果は、将来外力変化をこれまでの知見をもとにして与えた結果である。検討ケースが少ないことから、一般化できる段階には至っていないが、今後より確実な外力推定が出てくれば、それらの値を使うことができ、本方法論は普遍であることを述べておく。

第3章参考文献

- 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明 (2007): 確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 301-305.
- 酒井和彦・岡安章夫 (2004): 温暖化による海面上昇を考慮した防波堤の信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 686-690.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.
- 下迫健一郎・大寄菜々子・中野史丈 (2006): 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港湾空港技術研究所報告, 第45巻, 第3号, pp. 1-20.
- (社) 日本経済研究センター (2007): 長期経済予測 (2006～2050年), 147p.
- (社) 日本港湾協会 (2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1485p.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2007): 消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 906-910.
- 辻尾大樹・安田誠宏 (2009): ライフサイクルコストを考慮した消波ブロック被覆堤の最適設計に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 916-920.
- 辻尾大樹・間瀬 肇・森 信人・安田誠宏 (2012): 地球温暖化による沿岸外力変化を考慮した消波ブロック被覆堤の滑動量解析, 海洋開発論文集, 第28巻 (印刷中).
- 橋本典明・河合泰弘・松浦邦明 (2005): 地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルの導入, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1221-1225.
- 森 信人・志村智也・安田誠宏・間瀬 肇 (2010): 地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 1231-1235.
- 森 信人・志村智也・中條壮太・安田誠宏・間瀬 肇 (2011): マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. I_1191-I_1195.
- 安田誠宏・中條壮太・金 洙列・森 信人・間瀬 肇・Kevin Horsburgh (2011): 気候変動予測実験出力を直接用いた高潮リスクの評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I_1171-I_1175.
- IPCC AR4 (2007): IPCC fourth assessment report (AR4), <http://www.ipcc.ch/>.
- Kitoh A, Ose T, Kurihara K, Kusunoki S, Sugi M, KAKUSHIN Team-3 Modeling Group. 2009. Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments. Hydrological Research Letters, 3, 49-53. doi:10.3178/hrl.3.49.
- Mori, N. (2012): Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics based on Statistical Model, In Cyclones Formation, Triggers and Control, Nova Science Publishers, Inc., 24p.

4. 高潮対策施設選定法のシステム化

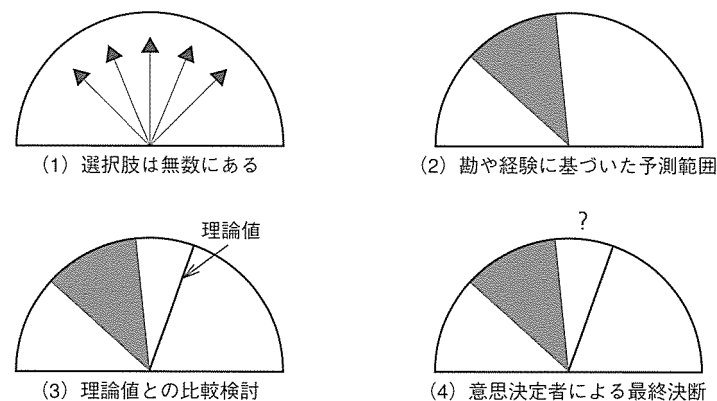
本章は、高潮対策工法の選定に必要な複合的な視点を、客観的、定量的かつ明瞭に評価できる階層分析法（意思決定支援システムの1つ）を用いた高潮対策工法選定法をシステム化したうえで、実海岸での高潮防護施設の設計に適用してその有用性を検討したものである。

4.1 多基準意思決定問題

(1) 多基準分析法

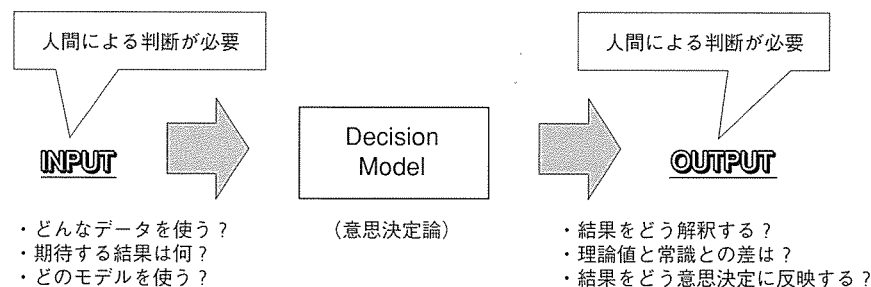
複数の選択肢から多様な価値を判断して一つの選択肢を選ぶことは意思決定と呼ばれ、それらをシステム化したものが意思決定支援システム（DSS: Decision Support System）である。DSSには、決定木（Decision Tree）、オペレーションズ・リサーチ（OR）、階層分析法（AHP: Analytic Hierarchy Process）、ゲーム理論（Game Theory）等の種々のモデルがある。DSSは主に評価基準・代替案の価値を数値化することで、意思決定を支援するものである。種々の意思決定システムの中から、意思決定のために現状にあった条件を備えたモデルを構築することは、モデリング（Decision Modeling）と呼ばれる。柏木（2006）は、Decision Modelingの位置づけについて、図-4.1に示すような理論値と経験範囲に基づくものであるとしている。

通常、意思決定を行う場合、無限の選択肢の中から（図-4.1（1）を参照）、自分の勘や経験に基づい



出典「柏木(2006)：Excelで学ぶ意思決定論，p.9」

図-4.1 理論値と経験範囲



出典「柏木(2006)：Excelで学ぶ意思決定論，p.9」

図-4.2 Decision Model の範囲

た結果の予測により、複数の選択肢（予測範囲）に絞りこまれる（図-4.1 (2) を参照）。ここで、これらの選択肢から最適案を選定するか、客観的な理論モデルによる分析により「リスク」への対応の質を高めるかの判断をすることとなる。これが **Decision Modeling** である。すなわち、もしモデルにより算出した結果が、先に自分の勘や経験によって見積もった選択肢と一致していれば、その選択肢を選定すれば良い。しかし、時に人間の判断にはバイアスがかかることもあるため、その他の様々な要因によって、自分の予想した選択肢以外の答えが、モデルにより得られることがある。その場合には、その理論値をもとに、いかに自分の経験や勘で得られた複数の選択肢の中から答えを出すかということ、自らの判断でする必要がある（図-4.1 (3) および (4)）。つまり、**Decision Model** そのものは、あくまでもサポートツールであることを理解しなければならない。

柏木（2006）は、**Decision Model** の範囲として、図-4.2 のような考え方を提示しており、**Decision Model** を活用するポイントとして、以下の4点を挙げている。

- ・勘や経験だけでなく客観的に事実を把握し、意思決定に繋げることが重要である。
- ・平均を見るだけでは見えない事実を様々なデータ分析で知ることができる。
- ・リスク（不確実性）をコントロールすることはできないが、不確実な事象を把握し、適切に意思決定に役立てることが重要である。
- ・意思決定ツールは万能ツールではなく、人間による判断が入るべき部分がある。

高潮対策工法には、表-4.1 に整理したとおり、越波防止対策と越波許容対策に大別される（土木学会海岸工学委員会, 2000; 海岸保全施設技術委員会, 2004）。そのうち、越波防止対策には陸域対策、沖合対策、複合対策等があり、堤防・護岸とあわせて高潮災害から背後地を防護するために実施するものである。

現行の技術基準（土木学会海岸工学委員会, 2000; 海岸保全施設技術委員会, 2004）では、これら種々の高潮対策工法のうち、防護・利用・環境の調和のとれた対策箇所での最適な工法を選定することとしている。これは、1999年の海岸法の改正によって、防災という単一目的の計画から、防災、環境保全、多様な利用を総合的に実現する複合的な視点をもった計画への発展と、施設整備中心の計画から海岸空間の総合管理を目指す計画への転換が図られたためである。

このようなことから高潮対策工法の選定は、多基準の選択問題といえる。先述のとおり、種々のDSSモデルのうち、多基準の選択問題に適したモデルとしてAHPがある。そこで、DSSモデルの特性と高潮対策工法の選定過程を参考にして、本研究ではAHPによる高潮対策工法選定法を構築する。

表-4.1 各種高潮対策工法

項 目	細 目	対策工法
越波防止対策	陸域対策	堤防の嵩上げ
		波返し工の設置
		消波堤の設置
		越波防止柵の設置
	沖合消波施設	離岸堤の設置 新型離岸堤の設置 人工リーフの設置
	複合対策	沖合消波施設＋養浜
越波許容対策	越波許容対策	排水工の設置
		副堤（二線堤）の設置

(2) 階層分析法

階層分析法は、意思決定における問題の分析において、人間の主観的判断とシステムアプローチとの両面からこれを決定する問題解決型の意味決定手法であり、AHP (Analytic Hierarchy Process) とも呼ばれる。AHP は Saaty (1977, 1980) によって提唱された手法であり、人間の勘や感覚などの曖昧な尺度を含め、各代替案を合理的に評価する方法である。高萩ら (2005) は、この手法を極めて独特かつ優れた解法と表現している。AHP については数多くの研究や書籍があるが、特に、Saaty (1980)、刀根 (1986)、森ら (1989)、刀根・眞鍋 (1990) および木下 (1992) 等において、現実の意思決定問題に対して数多くの適用例が示されている。

AHP は多基準の選択問題があるとき、これを目標・評価基準・代替案の階層構造に整理したうえで、一対比較を通じて、各階層における要素同士の相対的な重要度を系統的に導き出し、それらを総合することで最適な評価・選択を図ることが可能なモデルである。一対比較が言葉を通じて行われるところが AHP の特徴である。

高潮対策工法のように多岐に渡る工法が存在するうえ、防護、利用、環境、景観、経済性等の、それぞれが共通の尺度を持たない評価基準の比較を行わなければならない場合、それらの問題を解決する方法として非常に有効である。

AHP は主たる 2 つのフェーズから成り立っている。一つは、代替案と評価基準の関係を階層モデルで構造化するフェーズである。その際には、評価基準を網羅的に列挙したあとで、それらをグルーピングして構造化する等の課程が必要となる。いま一つは、構造化された評価基準の関係のもとで、代替案や評価基準の重要度 (ウェイト) を推定するフェーズである。

AHP における最も重要な問題は、逆数正行列のクラス $R_M(n)$ に属する一対比較行列 A から各項目のウェイトをどのように推定するかである。

$$R_M(n) = \left\{ A = (a_{ij}) \in R^{n \times n} \mid a_{ij} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Saaty (1977) は A の主固有ベクトルをウェイトの推定量とする固有値法を提唱している。すなわち、次式を満たす要素の和が 1 となるベクトルをウェイトとするものである。

$$Ah = \lambda_{\max} h \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

一方、Saaty・Vargas (1984) は、対数最小 2 乗法により、次式で表される A の各行列の幾何平均 (Geometric Mean) がウェイトの最小 2 乗推定法であることを示した。

$$G_i = \sqrt[n]{a_{i1}a_{i2}a_{i3}\cdots a_{in}}, \quad i = 1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$R_M(n) = \left\{ A = (a_{ij}) \in R^{n \times n} \mid a_{ij} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

固有値法と幾何平均法の違いは、一対比較行列に対する考え方の違いである。固有値法では、与えられた一対比較行列は誤差を含まない結果であり、それを w_i/w_j であてはめるときにその違いを最小にするウェイトを決定しようとするものである。一方、幾何平均法は、真の一対比較値は w_i/w_j であり、一対比較行列にはそれを判定する際の誤差が含まれているので、誤差の 2 乗和を最小にしようという考え方に立っている。

4.2 階層分析法を用いた高潮対策施設の選定法

本提案手法（AHPを用いた選定方法）の主な過程は、図-4.3のように、「階層構造の構築」、「一対比較」、「ウェイトの計算」、「総合評価値の計算」から構成される。本提案手法（AHPを用いた選定方法）では、以降の(1)～(4)項の手順により最適な高潮対策工法が選定される。

(1) 階層構造の構築

階層構造の構築では、問題の要素を「最終目標」、「評価基準」、「代替案」の3階層に分類する。最終目標は、高潮防護の目標水準を満足することであり、評価基準は代替案の選択基準となるもの、代替案は最終目標を達成するために必要な項目である。

階層構造、特に基準を設けるにあたっては、次の2点に留意しなければならない（高萩ら, 2005）。

- (1) 基準は互いに（ほぼ）独立でなければならない。
- (2) 各基準が二重の意味・方向性を持つてはならない。

高潮対策工法の選定に当てはめて、評価基準および代替案は図-4.4に示す階層図のようにした。ここに、評価基準は「背後地の重要度」、「前浜の保全」、「海岸の利用」、「生物生息環境」、「景観」、「施工性」、「維持管理性」および「地球温暖化への影響」の8項目であり、代替案は、「堤防・護岸の嵩上げ」、「波返工の設置」、「消波工の設置」、「消波堤の設置」、「越波防止柵の設置」、「離岸堤の設置」、「人工リーフの設置」、「越波排水路の設置」および「副堤の設置」等の高潮対策工法の具体的な9つの対策工法のことである。

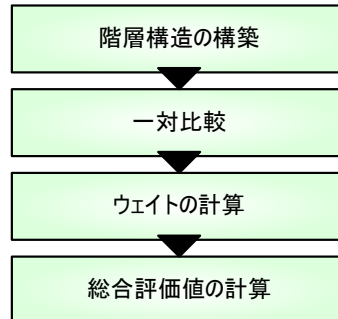


図-4.3 AHPの手順

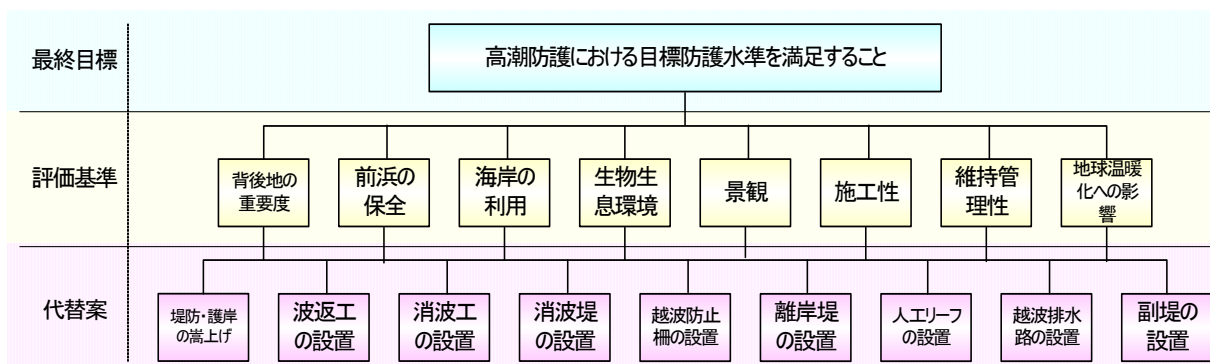


図-4.4 高潮防護についての階層構造

評価基準の設置や対策工は、土木学会海岸工学委員会（2000）や海岸保全施設技術委員会（2004）等の実務で使用する技術基準を参照した。なお、海岸保全施設技術委員会（2004）では、高潮対策工法は、陸域対策、沖合対策、越波を許容する対策等に区分している。

（2）一対比較

一対比較とは、まず図-4.4の階層図の直下の要素（代替案あるいは評価基準）を2つずつ抽出し、対として、次に直上の基準（評価基準あるいは最終目的）からみて、そのどちらの対が重要か、あるいは有意かを比較・評価することをいう。AHPでは、代替案あるいは評価基準ごとに得られる一対比較値の集合を一対行列として扱うことにより、一対比較要素の重要度を解析的に求める。一般に、一対比較による要素間の重み付けには9点法が用いられる。すなわち、代替案および評価基準の重み付けは、それぞれ評価基準ごとおよび最終目標に対して決定される相対的重み付けである。ここに、9点法とは、一対比較値として、1（同じくらい重要）から9（圧倒的に重要）までの整数値を用いるものである。

一対比較では、評価基準や代替案の全ての組み合わせを比較する必要がある。通常、評価基準と代替案が複数ある場合には、その手続きが非常に煩雑となる。例えば、図-4.4の階層図のように、評価基準が8項目ある場合には、8項目から2つずつを抽出し一対比較を行うので、28通りの組み合わせ（ C_2^8 ）となる。ここではさらに9項目の代替案があるため、9項目から2つずつを抽出する36通りの組み合わせ（ C_2^9 ）の一対比較を、8つの評価基準すべてに対して実施しなければならないため、代替案の一対比較は288通りに達する。

本提案手法では、表-4.2のような、対象海岸に関する8つの設問に答えるだけで、I～IVのランクごとのウェイト配点を容易に設定でき、AHPにおける設定の煩雑さを大幅に削減できるようにした。ここで、実際に実施する一対比較は評価基準の28通りのみである。なお、経済性は概算工事費から簡単に定量化できるため、AHPでの評価基準からは除外した。表-4.3は9点法による一対比較値と各ランクの重み付け配点表である。この配点表は、各ランクの対角の欄を1として、評価基準ごとに一対比較値を入力すると、行列間で逆数をとるものである。

表-4.2に示した評価指標において、高潮対策工法を実施するうえで、検討箇所の制約条件（背後地の重要度、海岸の利用、生物生息環境）によっては、選定できない対策工法が存在する。例えば、越波を許さない対策が求められる場合には、越波を許容する越波排水路や副堤は採用できず、堤防天端高を変えることができない場合には、堤防の嵩上げは適用できない。また、堤防前面や沖合を対策できない場合には、それぞれ消波工や離岸堤・人工リーフは採用できない。これらから、背後地の重要度、海岸の利用および生物生息環境の制約条件に対しては、それぞれ図-4.5～図-4.7に示す制約条件ごとの判別に基づき、対策工ごとの配点表をマトリックスごとに変えるようにした。表-4.4は9点法で使用する対策工ごとの配点表であり、評価項目ごとの有効な対策工の順に高い配点とし、適用できないもの（図-4.5～図-4.7の制約条件により選定できない工法）は配点をゼロとした。ただし、配点をゼロとした場合には、一対比較の計算が発散するため、便宜的に0.001に置き換えた。

表-4.2 評価基準として対象海岸に関する8つの設問

項 目	ランク区分
背後地の重要度	ランクⅠ：堤防の背後に人口・資産が集中し、重要度が高い(市街地、住宅密集地等) ランクⅡ：堤防の背後に人口・資産が集中し、重要度がやや高い(集落密集地、工業地帯、主要道路等) ランクⅢ：堤防の背後に人口・資産が集中しておらず、重要度がやや低い(散在した民家、生活道路等) ランクⅣ：堤防の背後に人口・資産が集中しておらず、重要度が低い(田畑、農地、荒地、休耕地等)
前浜の保全	ランクⅠ：前浜を積極的に保全する一現状よりも砂浜を回復させる ランクⅡ：前浜の現状維持 ランクⅢ：前浜が多少侵食しても良い ランクⅣ：前浜のことを考えなくても良い or 前浜が存在しない
海岸の利用	ランクⅠ：海岸および海域が利用されている ランクⅡ：海岸が利用されている(海水浴、ビーチバレー等) ランクⅢ：海域が利用されている(サーフィン、漁業) ランクⅣ：海岸がほとんど利用されていない
生物生息環境	ランクⅠ：希少生物があり、生態系への配慮が優先される ランクⅡ：希少生物はいないが、漁業等の観点から生態系への配慮が必要 ランクⅢ：希少生物はおらず、生態系への配慮がそれほど必要ない ランクⅣ：生物生息環境は気にしなくても良い
景観	ランクⅠ：景観を積極的に保全する一現状よりも美しさが求められる(景勝地、自然公園等の指定済み) ランクⅡ：景観の現状維持 ランクⅢ：ある程度景観に配慮する ランクⅣ：景観に配慮しなくても良い
施工性	ランクⅠ：施工性を考慮する必要がある ランクⅡ：施工性をやや考慮する必要がある ランクⅢ：施工性をあまり考慮しなくても良い ランクⅣ：施工性を考慮しなくても良い
維持管理性	ランクⅠ：維持管理性を考慮する必要がある ランクⅡ：維持管理性をやや考慮する必要がある ランクⅢ：維持管理性をあまり考慮しなくても良い ランクⅣ：維持管理性を考慮しなくても良い
気候変化の影響	ランクⅠ：潮位変化および波高増大のいずれも考慮する必要がある ランクⅡ：潮位変化を考慮する必要がある ランクⅢ：波高増大を考慮する必要がある ランクⅣ：気候変化を考慮する必要がない

表-4.3 9点法による一対比較値と各ランクの重み付け

副 詞	数値(一対比較値)		ランクⅠ	ランクⅡ	ランクⅢ	ランクⅣ
同じくらい重要	1	ランクⅠ	1	3	6	9
少し重要	3	ランクⅡ	1/3	1	3	6
かなり重要	6	ランクⅢ	1/6	1/3	1	3
圧倒的に重要	9	ランクⅣ	1/9	1/6	1/3	1

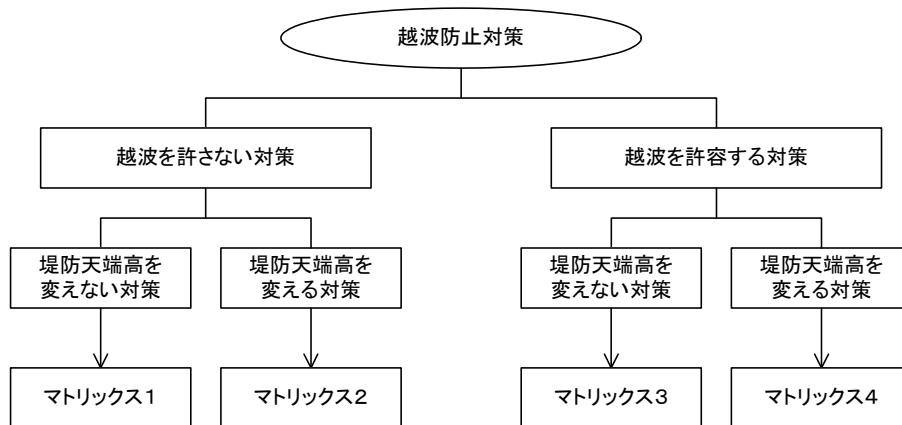


図-4.5 背後地の重要度に対する制約条件ごとの判別

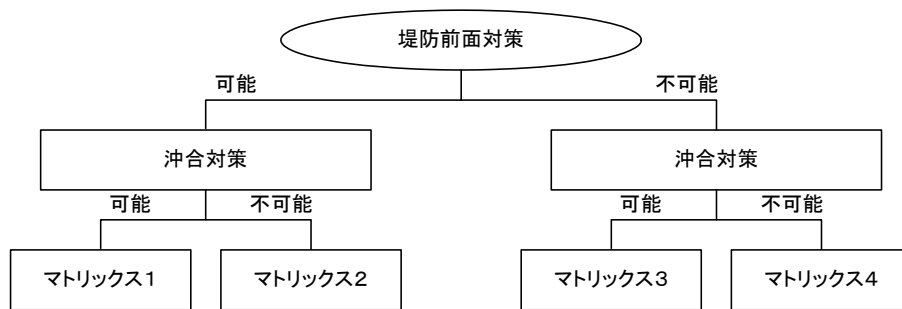


図-4.6 海岸の利用に対する制約条件ごとの判別

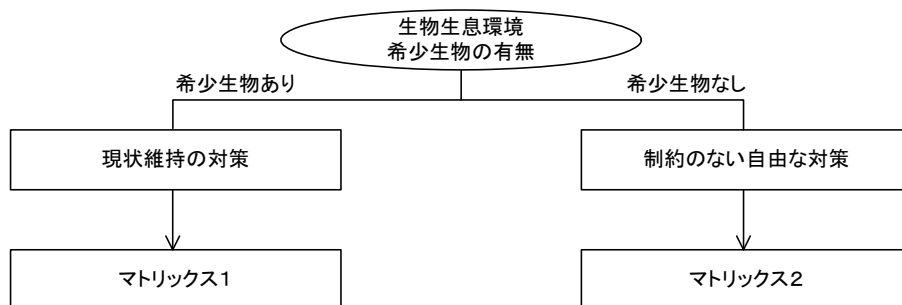


図-4.7 生物生息環境に対する制約条件ごとの判別

表-4.4 9点法で使用する対策工ごとの配点表

	背後地の重要度				前浜の 保全	海岸の利用				生物生息環境		景観	施工性	維持 管理性	気候 変化
	マトリックス1	マトリックス2	マトリックス3	マトリックス4		マトリックス1	マトリックス2	マトリックス3	マトリックス4	マトリックス1	マトリックス2				
堤防・護岸の嵩上げ	0.001	9	0.001	9	6	4	6	4	6	9	6	1	3	9	5
波返工の設置	5	7	5	7	2	4	6	4	6	5	2	6	2	9	5
消波工の設置	8	7	8	7	1	1	4	0.001	0.001	1	1	4	8	5	5
消波堤の設置	8	7	8	7	7	2	3	0.001	0.001	2	7	3	7	4	9
越波防止柵の設置	0.001	7	0.001	7	6	5	7	5	7	9	6	5	9	2	1
離岸堤の設置	9	9	9	9	9	9	0.001	9	0.001	3	8	2	6	3	9
人工リーフの設置	6	4	6	4	8	8	0.001	8	0.001	4	9	9	4	1	1
越波排水路の設置	0.001	0.001	4	2	6	7	9	7	9	9	6	9	5	6	5
副堤の設置	0.001	0.001	4	2	6	7	9	7	9	9	6	9	1	9	5

(3) ウェイトの設定

一対比較の結果を基にして、ウェイトを設定する。ウェイトの設定方法には、固有値法と幾何平均法とがある（高萩ら, 2005）。固有値法と幾何平均法の違いは、(2) 項で紹介したとおりであるが、ここでは計算負荷が少なく直感的に理解し易いことと、一対比較行列にはそれを判定する際の誤差が含まれていることを鑑みて、幾何平均法によりウェイトを設定する。なお、ウェイトとは代替案の重要度を表すものであり、対象海岸の地形・外力特性等の地域ごとに左右されない評価点となるよう留意した。

ここに、ウェイトを計算するにあたっては、高萩ら（2005）と同様に、次の2点を仮定した。

- (1) 目的からみた基準、各基準からみた代替案には、それぞれ意思決定者の主観によるウェイト（評価値）がある。
- (2) 一対比較値はそれらのウェイト（評価値）の比で決まる。

(4) 総合評価による選定

(1) ～ (4) 項の結果を踏まえ、各代替案の総合評価値を算出する。この総合評価値の計算式は加重和であり、各評価基準のウェイト×各代替案のウェイトの合計をもって総合評価値を求めるものである。得られた各代替案の最終的な総合評価値をもとに、最適な高潮対策工法を選択する。

4.3 選定法のシステム化と現地海岸への適用

(1) 従来法による高潮対策施設の選定事例

(a) 現地海岸の選定

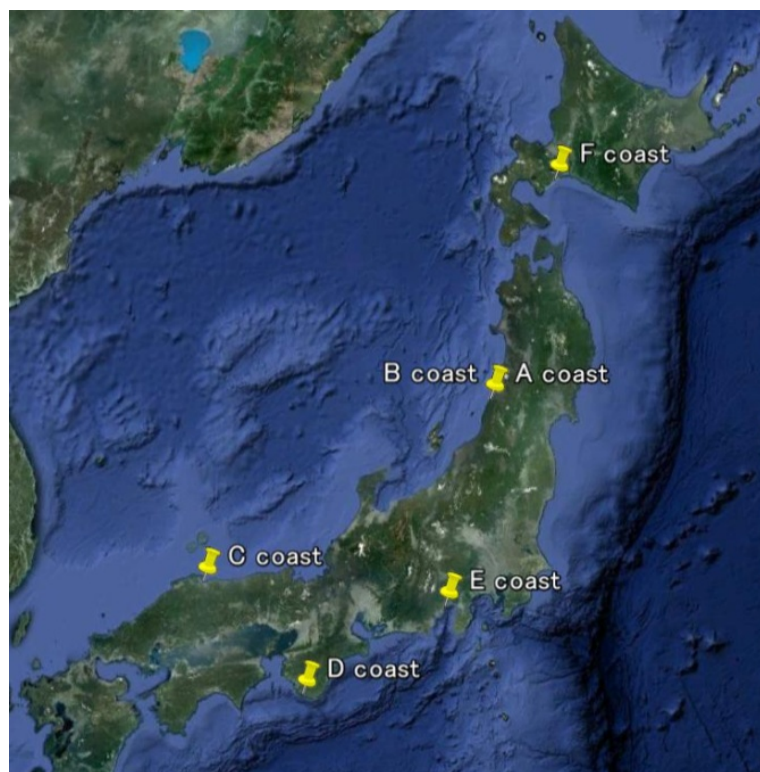
地形・外力特性の異なる現地6海岸を対象に、従来の選定方法と本提案手法により、それぞれの最適な高潮防護対策工法を選定した結果を比較する。なお、従来の選定方法は、本項(2)で詳述する。現地海岸は、冬期風浪が卓越する日本海側と台風の影響を顕著に受ける太平洋側から選定することとし、検討に際して必要となる計画高潮位、計画波浪(波高、周期、波向)、地形条件(海底勾配、前浜勾配)、護岸構造(勾配、諸元)が全て収集できる海岸を対象とした。

選定した現地海岸は図-4.8に示すA～Fの6海岸である。日本海側の3海岸(A～C)、太平洋側の2海岸(DおよびE)、北海道の1海岸(F)を対象海岸として選定した。

A海岸は日本海に面する山形県の南西部に位置する砂浜海岸である。同海岸は海水浴場として利用されており、背後は海岸線を並走するように国道がある。A海岸は、冬期風浪時には越波や砂の沖への流出がみられ、国道の通行止めや砂浜の減少等の被害が発生してきた。このようなことから、越波防止対策と海水浴場としての砂浜の確保および造成が主要な制約条件である。

A海岸に程近いB海岸は岩礁海岸である。背後には国道が走っており、冬期風浪来襲時には度々越波が発生し、国道が通行止めとなることがあったため、国道への越波防止を目的に高潮防護施設の設置が検討された。B海岸は岩礁の利用はほとんどないが、海域には良好な漁場が広がっている。高潮対策の実施にあたっては、その他に施工性と国道から景観および維持管理性も求められる。

C海岸は美保湾に臨む弓ヶ浜半島のほぼ中央に位置する砂浜海岸である。C海岸は海水浴、散策、釣り、キャンプなど地域住民の憩いの場として広く利用されている一方で、海岸線の背後には公共施設や住宅地、工業団地が多くある。



下図 : Google Earth

図-4.8 検討対象海岸位置図

紀伊半島南部に位置する D 海岸は、台風常襲地帯である紀州灘の外海に面した礫浜海岸である。海岸背後には地域最大の幹線道路である国道が接しており、その背後は住宅地となっている。また、約 15m の磯浜が広がっているが、その礫浜の保全も求められている。

駿河湾に面する E 海岸は、背後に日本の大動脈を担う主要な高速道路が走っている地区である。この地区は、すでに消波工が設置されているが、台風来襲時には、しばしば越波に伴う通行止めにより交通が寸断されている。したがって、越波防止が特に重要な目的であるが、高潮防止対策を実施する際の施工性が他の海岸に比べて重視される。

北海道中央南部に位置する F 海岸は、太平洋に直面した緩い弧状の単調な砂浜海岸である。1960 年代後半（昭和 35 年）からの地域開発に伴う沿岸漂砂の変化に伴い、全体的に汀線が後退し、前浜が少ない海岸となってきた。F 海岸には緩傾斜護岸が設置されているが、高波浪時には未だ越波が発生している。背後には市街地が隣接しており、越波を許容することができないうえ、水産生物にとって住み良い環境の創出が求められている。

(b) 従来の高潮対策施設の選定法

高潮堤防の設計に際しては、求められる要求性能を明確にしたうえで、それらの性能をいずれも満足する対策工法を選定する。ここに、要求性能は、目標達成性能と安全性能からなる。海岸保全施設技術研究会編（2004）によると、「堤防の要求性能は、目的達成性能として、高潮または津波による海水の侵入を防止し、波浪による越波を減少させることであり、安全性能としては、堤防は高潮、津波、波浪、地震動およびその他の作用に対して適切な安全性を有することである。」との記述があり、これらが高潮防護対策の検討のための前提条件となる。

高潮対策工法の選定においては、これらの要求性能のいずれも満足したうえで、防護・利用・環境等の複合的な視点から総合的に判断し、最適な高潮対策工法を選定する。ここで用いる評価項目は、背後地の重要度、前浜の保全、海岸の利用、生物生息環境、景観、施工性、維持管理性、経済性および場合によっては地球温暖化への影響等である。

従来の高潮対策施設の選定法では、人間の感性に依存する海岸の利用や景観等の指標の定量的な評価は難しく、あくまでも定性的な評価をもとに、最適工法の選定してきた。本項で対象とした現地海岸に従来の選定法を当てはめたところ、A および D 海岸で離岸堤、B 海岸で消波工、C および F 海岸で人工リーフ、E 海岸で越波防止柵が最適案として選定された。

(2) 選定法のシステム化と現地海岸への適用結果

表-4.6 には、背後地の重要度を 1 としたときの、他の評価基準のウェイトをランクごとに整理した。これらは、現地海岸を対象に、評価基準や代替案をキャリブレーションしたものであり、対象海岸の地形・外力特性等の地域特性に左右されないウェイトである。表-4.7 は、それぞれの現地海岸における評価基準のランクを設定したものである。いずれの海岸も、諸事情により現行の堤防天端高を変えることができないうえ、越波を許さない対策が求められた。また、A、C、D および F 海岸は海水浴場としての利用があるため、前浜の積極的な保全が求められ、堤防前面对策は実施できず、沖合対策のみが実施可能であるという制約条件であった。生物生息環境については、いずれの地区も希少生物は存在していなかったが、C、D および F 海岸は、漁業等の観点から生態系への影響を十分に考慮する必要があった。

表-4.6 で整理した評価基準ごとの各ランクに対するウェイトと、表-4.7 で設定した地区ごとの評価基準ランクに基づいて、現地海岸における評価基準のウェイトを数値化したものを、表-4.8 に示す。この数値は各海岸での総合評価を検討する上で重要となる、それぞれの海岸ごとの重要度補正係数である。

現地海岸での適用事例として、(1) で選定した 6 海岸を対象に、検討方法および結果を示す。表-4.9 (1) は、日本海側 A 海岸における評価基準の一对比較結果である。当該地区は、背後地に住宅密集地が隣接しているうえ、海水浴場として利用されているため、前浜の保全および海岸の利用の重み付けが高くなった。また、図-4.5～図-4.7 で設定した制約条件ごとの判別により、表-4.4 で作成した対策工ごとのウェイト配点表において、背後地の重要度はマトリックス 1 を、海岸の利用および生物生息環境は、それぞれマトリックス 3 および 2 を選択した。表-4.4 と表-4.9 (1) での一对比較結果から得られるウェイトから、総合評価と表-4.10 (1) のような解析結果が得られ、A 海岸では最適工法として、「離岸堤の設置」が選定された。

同様の手順で、B～F 海岸についても検討した。表-4.9 (2)～(6) にはそれぞれ B～F 海岸における評価基準の一对比較結果を整理した。まず、B 海岸は、この海岸は背後を走る国道への越波災害防止が主たる高潮対策の主たる目的であるが、施工性、国道から景観および維持管理性が重要視されたため、表-4.9 (2) に示すとおり、これらの重み付けが高くなっている。制約条件ごとの判別においては、背後地の重要度はマトリックス 1 を選択した。また、護岸前面は岩礁であり、利用はほとんどないが、海域には良好な漁場が広がっているため、海岸の利用および生物生息環境は、いずれもマトリックス 2 とした。

次に、C 海岸は背後地の防護のほか、海岸利用の観点から砂浜の保全と景観の確保が重要な制約条件の一つであった。そのため、重み付けが高い項目は、表-4.9 (3) に示すとおり、前浜の保全と景観である。制約条件ごとの判別より、背後地の重要度はマトリックス 1 を、海岸の利用および生物生息環境は、それぞれマトリックス 1 および 3 である。

D 海岸の背後には国道が接しており、その背後は住宅地となっている。また、15m 程度磯浜が広がっているが、その保全も求められており、前浜の保全および海岸の利用の重み付けが高い (表-4.9 (4) を参照)。制約条件ごとの判別では、背後地の重要度はマトリックス 1、海岸の利用のマトリックスは 3 であり、生物生息環境はマトリックス 2 である。

E 海岸は背後に日本の大動脈を担う主要な高速道路が走っている地区であり、越波防止が特に重要な目的であるが、高潮防止対策を実施する際の施工性が他の海岸に比べて重視される (表-4.9 (5) を参照)。制約条件ごとの判別より、背後地の重要度はマトリックス 1 を、海岸の利用および生物生息環境は、それぞれマトリックス 3 および 2 を選択した。

最後に、F 海岸は砂浜の保全、水産生物にとって住み良い環境の創出、景観への配慮が求められている。重み付けが高い項目は、表-4.9 (6) のとおりである。また、制約条件ごとの判別より、背後地の重要度はマトリックス 1 を、海岸の利用および生物生息環境は、それぞれマトリックス 1 および 2 を選択した。

表-4.6 評価基準ごとの各ランクに対するウェイト

	ランク (Rank)			
	I	II	III	IV
背後地の重要度	1.00	1.00	1.00	1.00
前浜の保全	0.40	0.20	0.10	0.01
海岸の利用	0.30	0.10	0.05	0.01
生物生息環境	0.40	0.30	0.20	0.01
景観	0.80	0.50	0.30	0.01
施工性	0.50	0.40	0.20	0.01
維持管理性	0.50	0.40	0.20	0.01
地球温暖化	0.20	0.10	0.05	0.01

表-4.7 現地海岸における評価基準のランク

	日本海側			太平洋側		北海道
	A	B	C	D	E	F
背後地の重要度	I	II	I	I	I	I
前浜の保全	I	IV	I	I	IV	I
海岸の利用	I	III	I	I	II	I
生物生息環境	IV	IV	II	II	IV	II
景観	II	II	I	II	II	I
施工性	II	II	III	III	I	III
維持管理性	II	II	III	III	II	III
地球温暖化	IV	IV	IV	IV	IV	IV

表-4.8 現地海岸における評価基準のウェイト

	日本海側			太平洋側		北海道
	A	B	C	D	E	F
背後地の重要度	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
前浜の保全	0.40	0.01	0.40	0.40	0.01	0.40
海岸の利用	0.30	0.05	0.30	0.30	0.10	0.30
生物生息環境	0.01	0.01	0.30	0.30	0.01	0.30
景観	0.50	0.50	0.80	0.50	0.50	0.80
施工性	0.40	0.40	0.20	0.20	0.50	0.20
維持管理性	0.40	0.40	0.20	0.20	0.40	0.20
地球温暖化	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表-4.4 と表-4.9 (1)～(6) での一対比較結果から得られるウェイトから、B 海岸は「消波工の設置」、C 海岸は「人工リーフの設置」、D 海岸は「離岸堤の設置」、E 海岸は「越波防止策の設置」、F 海岸は「人工リーフの設置」がそれぞれ最適工法として選定された。

表-4.10 (1) A 海岸における対策工ごとのウェイト配点表, 重要度補正係数, 総合評価の検討結果

	背後地の重要度	前浜の保全	海岸の利用	生物生息環境	景観	施工性	維持管理性	地球温暖化	総合評価	順位
ウェイト	0.45105	0.18042	0.13532	0.00039	0.08940	0.07152	0.07152	0.00039	(1.00000)	
堤防・護岸の嵩上げ	0.00001	0.02123	0.01230	0.00005	0.00186	0.00477	0.01341	0.00004	0.05367	9
波返工の設置	0.06264	0.00708	0.01230	0.00002	0.01117	0.00318	0.01341	0.00004	0.10984	5
消波工の設置	0.10022	0.00354	0.00000	0.00001	0.00745	0.01271	0.00745	0.00004	0.13143	4
消波堤の設置	0.10022	0.02476	0.00000	0.00005	0.00559	0.01113	0.00596	0.00008	0.14779	3
越波防止柵の設置	0.00001	0.02123	0.01538	0.00005	0.00931	0.01430	0.00298	0.00001	0.06326	8
離岸堤の設置	0.11275	0.03184	0.02768	0.00006	0.00372	0.00954	0.00447	0.00008	0.19014	1
人工リーフの設置	0.07517	0.02830	0.02460	0.00007	0.01676	0.00636	0.00149	0.00001	0.15276	2
越波排水路の設置	0.00001	0.02123	0.02153	0.00005	0.01676	0.00795	0.00894	0.00004	0.07650	6
副堤の設置	0.00001	0.02123	0.02153	0.00005	0.01676	0.00159	0.01341	0.00004	0.07461	7

表-4.10 (2) B 海岸における対策工ごとのウェイト配点表, 重要度補正係数, 総合評価の検討結果

	背後地の重要度	前浜の保全	海岸の利用	生物生息環境	景観	施工性	維持管理性	地球温暖化	総合評価	順位
ウェイト	0.42996	0.00068	0.00910	0.00068	0.21498	0.17199	0.17199	0.00062	(1.00000)	
堤防・護岸の嵩上げ	0.00001	0.00008	0.00124	0.00008	0.00448	0.01147	0.03225	0.00007	0.04967	9
波返工の設置	0.05971	0.00003	0.00124	0.00003	0.02687	0.00764	0.03225	0.00007	0.12784	5
消波工の設置	0.09554	0.00001	0.00083	0.00001	0.01792	0.03058	0.01792	0.00007	0.16287	1
消波堤の設置	0.09554	0.00009	0.00062	0.00009	0.01344	0.02675	0.01433	0.00012	0.15099	2
越波防止柵の設置	0.00001	0.00008	0.00145	0.00008	0.02239	0.03440	0.00717	0.00001	0.06559	8
離岸堤の設置	0.10748	0.00012	0.00000	0.00011	0.00896	0.02293	0.01075	0.00012	0.15047	3
人工リーフの設置	0.07165	0.00011	0.00000	0.00012	0.04031	0.01529	0.00358	0.00001	0.13107	4
越波排水路の設置	0.00001	0.00008	0.00186	0.00008	0.04031	0.01911	0.02150	0.00007	0.08302	6
副堤の設置	0.00001	0.00008	0.00186	0.00008	0.04031	0.00382	0.03225	0.00007	0.07848	7

表-4.10 (3) C 海岸における対策工ごとのウェイト配点表, 重要度補正係数, 総合評価の検討結果

	背後地の重要度	前浜の保全	海岸の利用	生物生息環境	景観	施工性	維持管理性	地球温暖化	総合評価	順位
ウェイト	0.39565	0.14512	0.09981	0.04379	0.29025	0.01254	0.01254	0.00031	(1.00000)	
堤防・護岸の嵩上げ	0.00001	0.01707	0.00849	0.00515	0.00605	0.00084	0.00235	0.00003	0.04000	9
波返工の設置	0.05494	0.00569	0.00849	0.00172	0.03628	0.00056	0.00235	0.00003	0.11007	5
消波工の設置	0.08791	0.00285	0.00212	0.00086	0.02419	0.00223	0.00131	0.00003	0.12150	4
消波堤の設置	0.08791	0.01992	0.00425	0.00601	0.01814	0.00195	0.00104	0.00006	0.13929	3
越波防止柵の設置	0.00001	0.01707	0.01062	0.00515	0.03023	0.00251	0.00052	0.00001	0.06612	8
離岸堤の設置	0.09890	0.02561	0.01911	0.00687	0.01209	0.00167	0.00078	0.00006	0.16510	2
人工リーフの設置	0.06593	0.02276	0.01699	0.00773	0.05442	0.00111	0.00026	0.00001	0.16922	1
越波排水路の設置	0.00001	0.01707	0.01487	0.00515	0.05442	0.00139	0.00157	0.00003	0.09452	6
副堤の設置	0.00001	0.01707	0.01487	0.00515	0.05442	0.00028	0.00235	0.00003	0.09419	7

表-4.10 (4) D 海岸における対策工ごとのウェイト配点表, 重要度補正係数, 総合評価の検討結果

	背後地の重要度	前浜の保全	海岸の利用	生物生息環境	景観	施工性	維持管理性	地球温暖化	総合評価	順位
ウェイト	0.47886	0.19154	0.14366	0.05779	0.09632	0.01573	0.01573	0.00038	(1.00000)	
堤防・護岸の嵩上げ	0.00001	0.02253	0.01306	0.00680	0.00201	0.00105	0.00295	0.00004	0.04845	9
波返工の設置	0.06650	0.00751	0.01306	0.00227	0.01204	0.00070	0.00295	0.00004	0.10507	5
消波工の設置	0.10640	0.00376	0.00000	0.00113	0.00803	0.00280	0.00164	0.00004	0.12380	4
消波堤の設置	0.10640	0.02629	0.00000	0.00793	0.00602	0.00245	0.00131	0.00008	0.15048	3
越波防止柵の設置	0.00001	0.02253	0.01632	0.00680	0.01003	0.00315	0.00066	0.00001	0.05951	8
離岸堤の設置	0.11970	0.03380	0.02938	0.00907	0.00401	0.00210	0.00098	0.00008	0.19912	1
人工リーフの設置	0.07980	0.03005	0.02612	0.01020	0.01806	0.00140	0.00033	0.00001	0.16596	2
越波排水路の設置	0.00001	0.02253	0.02285	0.00680	0.01806	0.00175	0.00197	0.00004	0.07402	6
副堤の設置	0.00001	0.02253	0.02285	0.00680	0.01806	0.00035	0.00295	0.00004	0.07360	7

表-4.10 (5) E 海岸における対策工ごとのウェイト配点表, 重要度補正係数, 総合評価の検討結果

	背後地の重要度	前浜の保全	海岸の利用	生物生息環境	景観	施工性	維持管理性	地球温暖化	総合評価	順位
ウェイト	0.51684	0.00044	0.02234	0.00044	0.11171	0.25842	0.08937	0.00044	(1.00000)	
堤防・護岸の嵩上げ	0.09303	0.00005	0.00305	0.00008	0.00233	0.01723	0.01676	0.00005	0.13256	4
波返工の設置	0.07235	0.00002	0.00305	0.00004	0.01396	0.01149	0.01676	0.00005	0.11772	6
消波工の設置	0.07235	0.00001	0.00203	0.00001	0.00931	0.04594	0.00931	0.00005	0.13901	2
消波堤の設置	0.07235	0.00006	0.00152	0.00002	0.00698	0.04020	0.00745	0.00009	0.12867	5
越波防止柵の設置	0.07235	0.00005	0.00355	0.00008	0.01164	0.05168	0.00372	0.00001	0.14309	1
離岸堤の設置	0.09303	0.00008	0.00000	0.00003	0.00465	0.03446	0.00559	0.00009	0.13792	3
人工リーフの設置	0.04135	0.00007	0.00000	0.00003	0.02095	0.02297	0.00186	0.00001	0.08724	7
越波排水路の設置	0.00001	0.00005	0.00457	0.00008	0.02095	0.02871	0.01117	0.00005	0.06559	8
副堤の設置	0.00001	0.00005	0.00457	0.00008	0.02095	0.00574	0.01676	0.00005	0.04820	9

表-4.10 (6) F 海岸における対策工ごとのウェイト配点表, 重要度補正係数, 総合評価の検討結果

	背後地の重要度	前浜の保全	海岸の利用	生物生息環境	景観	施工性	維持管理性	地球温暖化	総合評価	順位
ウェイト	0.36931	0.14772	0.11079	0.05300	0.29545	0.01170	0.01170	0.00032	(1.00000)	
堤防・護岸の嵩上げ	0.00001	0.01738	0.00943	0.00935	0.00616	0.00078	0.00219	0.00004	0.04534	9
波返工の設置	0.05129	0.00579	0.00943	0.00520	0.03693	0.00052	0.00219	0.00004	0.11139	5
消波工の設置	0.08206	0.00290	0.00236	0.00104	0.02462	0.00208	0.00122	0.00004	0.11631	4
消波堤の設置	0.08206	0.02028	0.00471	0.00208	0.01847	0.00182	0.00098	0.00006	0.13045	3
越波防止柵の設置	0.00001	0.01738	0.01179	0.00935	0.03078	0.00234	0.00049	0.00001	0.07214	8
離岸堤の設置	0.09232	0.02607	0.02122	0.00312	0.01231	0.00156	0.00073	0.00006	0.15739	2
人工リーフの設置	0.06154	0.02317	0.01886	0.00416	0.05540	0.00104	0.00024	0.00001	0.16442	1
越波排水路の設置	0.00001	0.01738	0.01650	0.00935	0.05540	0.00130	0.00146	0.00004	0.10144	6
副堤の設置	0.00001	0.01738	0.01650	0.00935	0.05540	0.00026	0.00219	0.00004	0.10113	7

(3) 従来の経験的な選定法による結果との比較

図-4.9 は現地 6 海岸を対象に、従来の選定方法と本提案手法により選定された高潮対策工法を比較したものである。それぞれの方法での選定結果は(1) 項および(2) 項を参照されたい。図中の横軸は高潮対策工法であり、縦軸は順位である。順位は 1 が最適工法であり、順位が下がれば下がるほど、現地には適用しにくい工法（最も現地に適さない工法は順位 9）であることを意味している。また、凡例は白抜きが従来の選定法による結果であり、塗りつぶしたものが本提案手法によるものである。

これらによると、E 海岸を除くすべての海岸において、これまで経験的に選定してきた対策工法と、本提案手法の最適案を含む上位 5 工法は一致した。A 海岸では、いずれの手法においても沖合対策の順位が高く、消波堤、消波工、波返工等の海岸堤防・護岸前面の対策が続いた。B 海岸は海岸堤防・護岸前面の対策、沖合対策の順に適用度が高かったが、ここでも A 海岸と同様に、従来の選定方法と本提案手法は一致していた。

また、C 海岸および F 海岸では、沖合対策、堤防・護岸前面の対策の順に適用度が高かった。いずれの海岸も景観が重要な制約条件の一つであったため、最適案は人工リーフとなったが、この 2 つの海岸のいずれにおいても、従来の選定方法と本提案手法は同様の結果が得られた。

D 海岸は、いずれの手法を用いても、A 海岸と同様の対策工が推奨されたが、従来の選定方法と本提案手法では、波返工と消波工とが上位 4 位と 5 位で入れ替わった。

一方、E 海岸は背後に主要な高速道路が走っている地区であり、海岸の利用や環境、景観という評価基準ではなく、防護、施工性および維持管理性が重視されたため、離岸堤の設置の順位が、従来の選定方法よりも高くなった。ただし、E 海岸においても、順位 1 および 2 は一致している。

他方、現地には適用しにくい対策工法である下位の順位（6～9 位）は、E 海岸を除いて選定法により異なる傾向がみられた。越波を許容しない対策と堤防・護岸天端の嵩上げを許さない対策の 2 つの制約条件に対して、従来の選定方法では越波を許容しない制約条件が重要視されるのに対して、本提案手法では、堤防・護岸の嵩上げをしない制約条件の方が、解に占める割合が大きくなった。ただし、下位の順位は現地海岸には適用しにくい工法であるため、最適工法を選定するという目的においては、本提案手法で従来の選定方法を再現できることが確認された。

これまで各地区で選定されてきた高潮対策工法は、経験に基づくもので、客観性に欠けるという点は否めないが、概ね地域特性を踏まえた最適工法であることがわかった。本提案手法を用いることで、個々の実務者の主観によらない客観的、定量的かつ明瞭な評価に基づく高潮対策工法を、容易に効率よく選定することが可能となる。

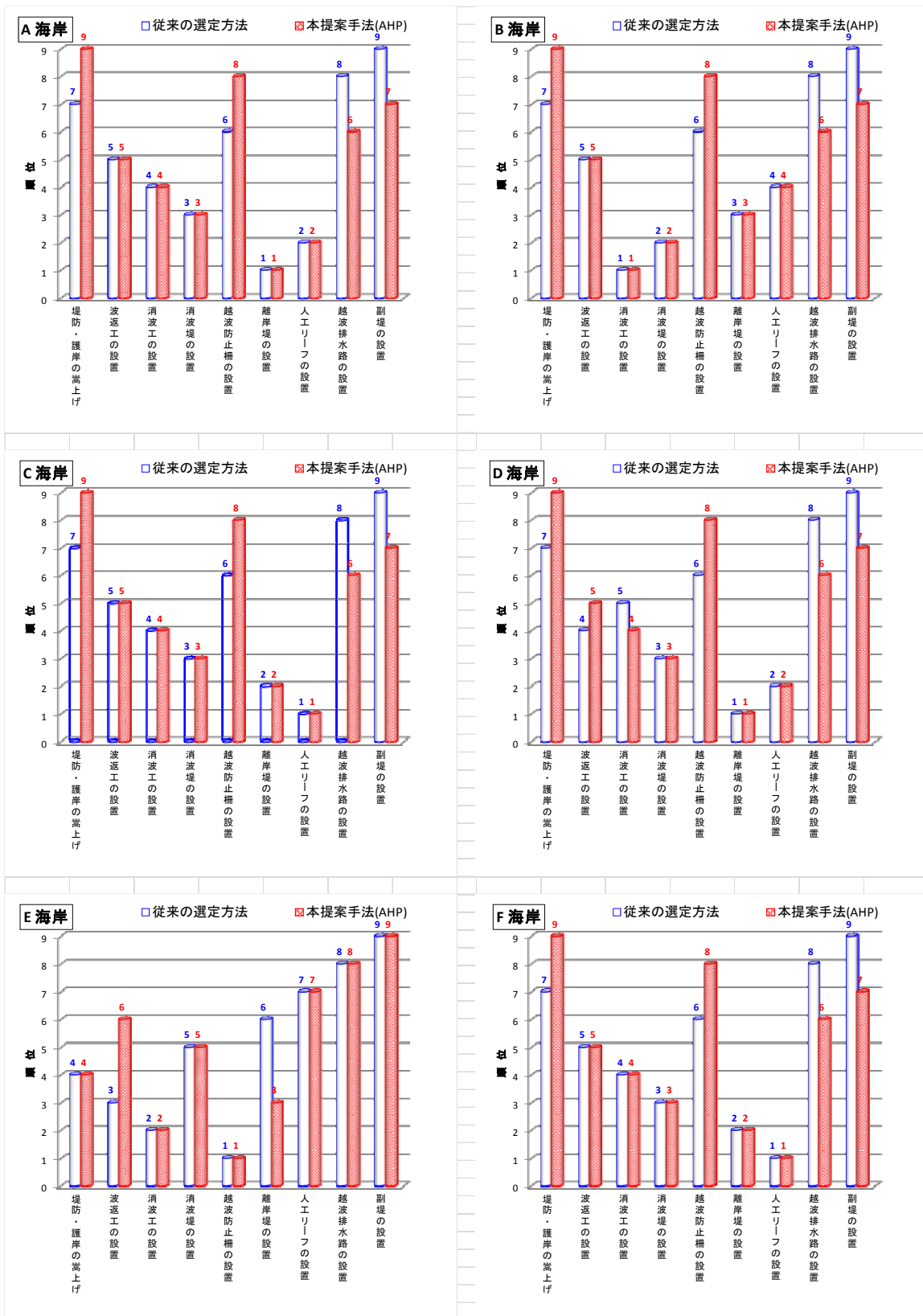


図-4.9 従来の選定方法と本提案手法（AHPを用いた選定方法）による対策工法選定順位の比較

4.4 まとめ

本章は、階層分析法（AHP）を用いた高潮対策工法選定法をシステム化した上で、実海岸での高潮防護施設の設計に適用してその有用性を検討したものである。得られた主要な結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) AHP では評価基準と代替案が複数ある場合、一対比較の手続きが非常に煩雑となるが、本提案手法では、8つの設問に答えるだけで、I～IVのランクごとのウェイト配点を容易に設定でき、AHPにおける設定の煩雑さを大幅に削減することができる。
- 2) これまで経験的に選定してきた対策工法と、本提案手法の最適案を含む上位5工法はほぼ一致し、本提案手法の実用性が確認された。
- 3) 本提案手法を用いることで、個々の実務者の主観によらない客観的、定量的かつ明瞭な評価に基づく高潮対策工法を、容易に効率よく選定することが可能となった。

第4章参考文献

- 大鹿譲・一森哲男 (1993)：オペレーションズ・リサーチ モデル化と最適化，共立出版，182p.
- 海岸保全施設技術委員会編 (2004)：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，322p.
- 柏木吉基 (2006)：Excel で学ぶ意思決定論，オーム社，216p.
- 木下栄蔵 (1992)：意思決定入門，啓学出版，221p.
- 土木学会海岸工学委員会編 (2000)：海岸施設設計便覧，pp.1-8.
- 高萩栄一郎・中島信之 (2005)：Excel で学ぶ AHP 入門，オーム社，162p.
- 刀根 薫 (1986)：ゲーム感覚意志決定法－AHP 入門，日科技連，232p.
- 刀根 薫・眞鍋龍太郎 (1990)：AHP 事例集，日科技連，264p.
- 日本オペレーションズ・リサーチ学会：<http://www.orsj.or.jp/index.html>
- 森 雅夫・宮沢政清・生田誠三・森戸晋・山田善靖 (1989)：オペレーションズ・リサーチ II -意思決定モデル-，朝倉書店，189p.
- Saaty, T. L. (1977)：A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, Journal of Mathematical Psychology, Vol.15,pp.234-281.
- Saaty,T.L. (1980)：The Analytic Hierarch Process, McGraw-Hill.
- Saaty, T. L., and Vargas, L. G.(1984)：Inconsistency and rank preservation, Journal of Mathematical Psychology 28, pp.205-214.
- Von Neumann, John and Morgenstern, Oskar (1944)：Theory of Games and Economic Behavior, Princeton Classic Editions ed., Princeton Univ Press., ISBN 0691130612.
- Witten, I.H. and Frank E. (2005)：Data Mining: MORGAN KAUFMANN: ISBN 1-55860-552-5.