

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

京都大学 防災研究所
間瀬 肇

発表内容

- 日本周辺の冬季波候とテレコネクションパターンの関係
- 地球温暖化に伴う海象要因変化が海岸護岸の安全性能に及ぼす影響評価
- 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

日本周辺の冬季波候と テレコネクションパターンの関係

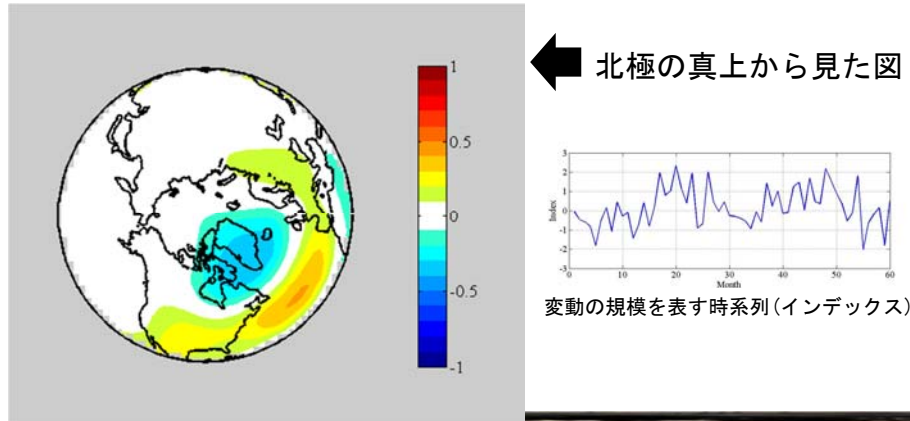
背景

- 気候変動が波浪特性の長期変化に影響を及ぼすことが報告されており(Graham et al. 2001), 沿岸域への影響評価のためには, 気候変動に対応した全球および領域の長期波浪変化予測が重要である.
- 最近では、気候変動に対応した海洋波浪特性の長期変動について予測が行われつつある(Hemer et al., 2011).

テレコネクションパターンとは？

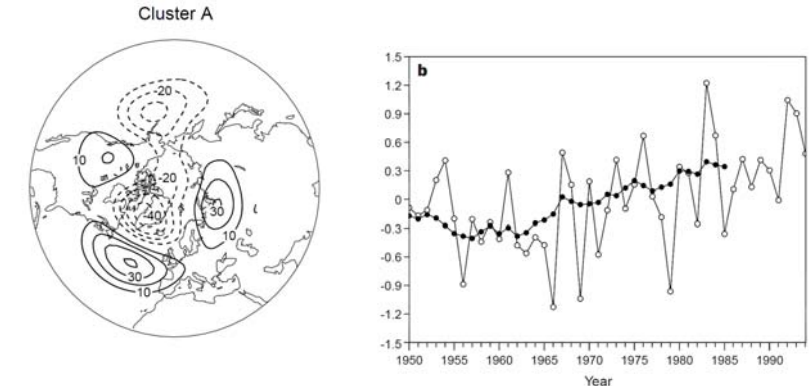
大規模な循環場の組織的な変動

- North Atlantic Oscillation (NAO): アイスランド低気圧とアゾレス高気圧の強弱のシーソー現象



気候変動とテレコネクションパターン変化

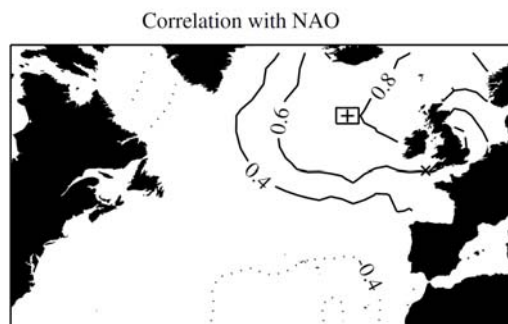
- テレコネクションパターンの変化は、地域ごとの気候変動・変化の中心的な役割を持つ (IPCC, 2007)



(Corti et al. 1999).

北大西洋における波浪場

North Atlantic Oscillation (NAO)



NAOインデックスと冬季平均波高の相関係数 (Woolf et al., 2002)

- 極大波高 (e.g. Izaguirre et al. 2010)
- 20世紀後半40年間の波高トレンド (e.g. Wang et al. 2000)

本研究のアプローチ

大気場と波浪場の局所的な関係

- 特定の地点における気圧、海上風、波高の変化の対応
→ 波高の回帰式での予測手法の検討

大気場の大規模な変動（テレコネクションパターン）と波浪場の関係

- ✓ 気候変動における波浪場の変化の解釈が可能になる
- ✓ 波浪場の面的な変化を予測ができる
- ✓ 気候モデルの再現性の検証ができる
- ✓ 様々な気候変動と関連付けができる

アプローチ

Target: 月平均量, 北西太平洋, 冬季 (12~2月)

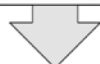
1. 大気場と波浪場の局所的な関係

気圧, 海上風から波高を求める回帰式の構築



2. テレコネクションパターンと波浪場の関係

過去の気候の解析値を用いる



3. 温暖化条件下におけるテレコネクションパターンと波浪場の変化の関係

温暖化条件下の将来気候の予測結果を用いる

略語と使用データ

□略語

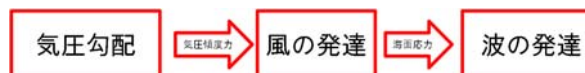
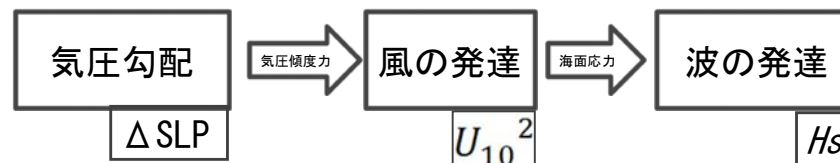
- SLP : Sea Level Pressure 海面更正気圧
- Z500 : 500hPa面高度
- U_{10} : 10m高度風速

□使用データ (解析値)

気候モデル	期間	データ
NCEP/NCAR	1959-2001	Z500, SLP
ERA-40	1951-2000	Z500, SLP, U_{10} , Hs
MRI-AGCM + SWAN (森ら, 2009)	1979-2003 2075-2099	Z500, SLP, U_{10} , Hs

大気場と波浪場の局所的な関係

大気場と波浪場の局所的な関係



$$\frac{du}{dt} = fv - \left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial x} + F_x$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial y} + F_y$$

(u, v) : 速度の x, y 成分
 f : コリオリ因子, p : 気圧
 ρ : 密度, F : 摩擦力

$$\tau = \rho C_D U_{10}^2$$

τ : 風の海面応力
 C_D : 海面摩擦係数
 U_{10} : 10m高度平均風速

$$\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$U_{10}^2$$

$$H_{1/3}$$

大気場と波浪場の局所的な関係

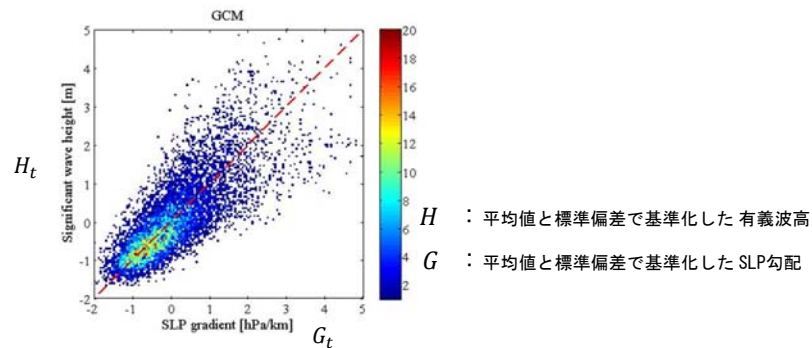
気圧勾配

ΔSLP



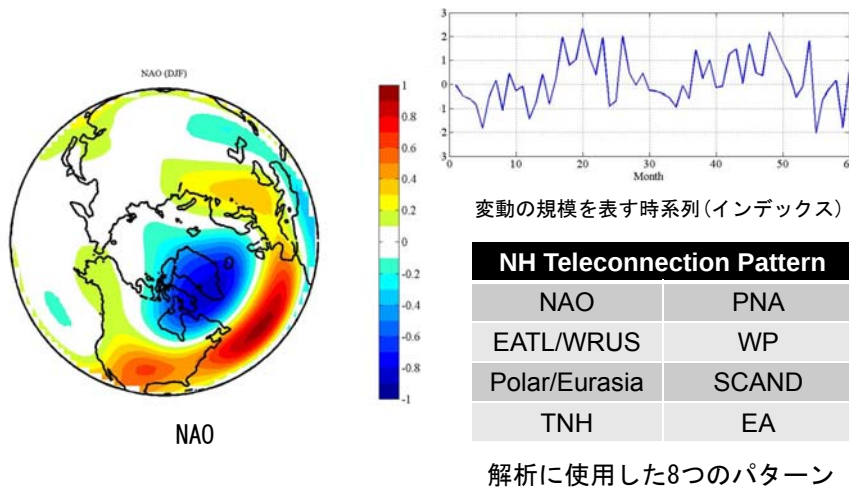
波の発達

H_s

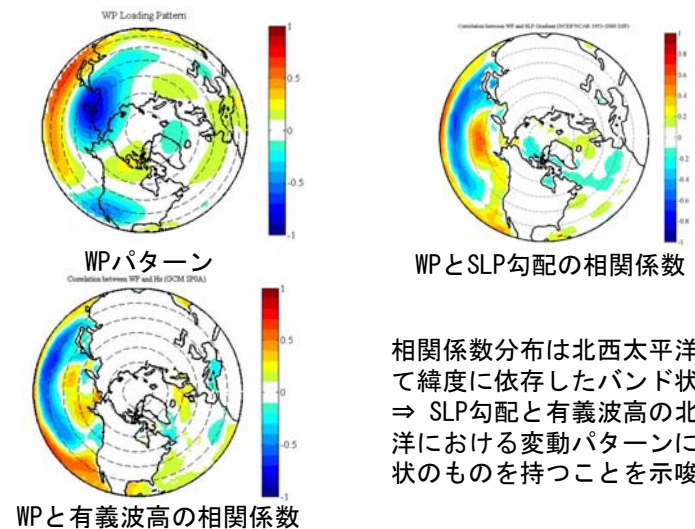


テレコネクションパターンと波浪場の関係

テレコネクションパターン

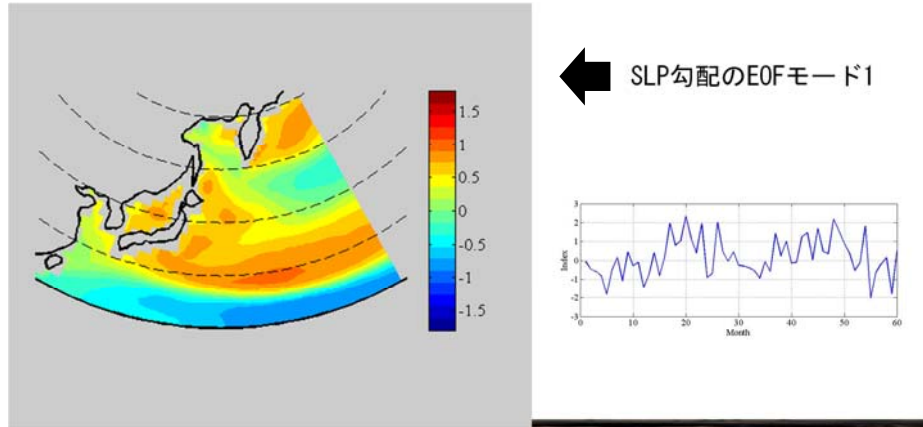


テレコネクションパターンと波浪場の相関解析



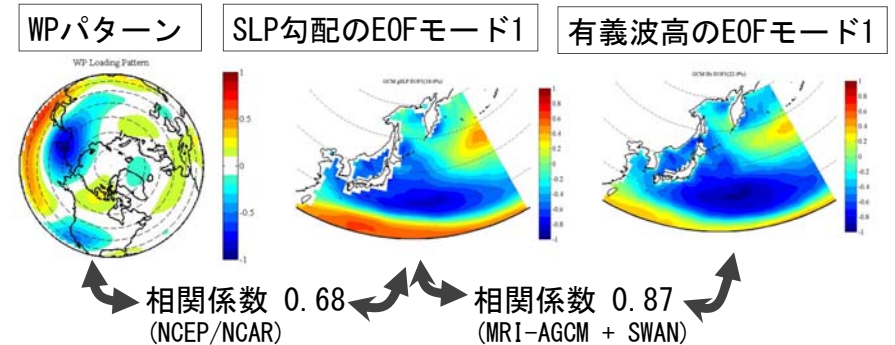
大気場の大規模な変動と波浪の関係

- 北西太平洋(東経120-180, 北緯20-60)における有義波高, SLP勾配に主成分分析(EOF解析)を適用し卓越する変動成分を抽出.



テレコネクションパターンと波浪場 EOF解析

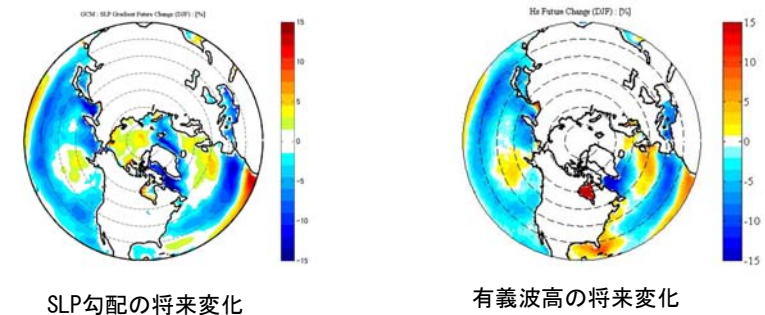
- 北西太平洋における有義波高, SLP勾配に主成分分析(EOF解析)を適用し卓越する変動成分を抽出.
 - SLP勾配・有義波高の変動パターン(EOFモード)はバンド状の構造を持ち, WPパターンと相関が高い



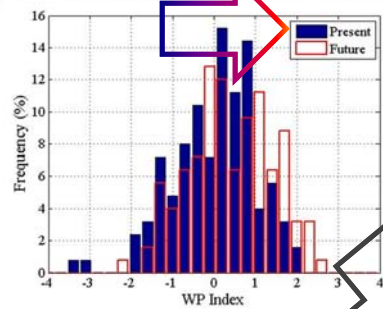
温暖化条件下における テレコネクションパターンと 波浪場の変化の関係

温暖化条件下における関係

MRI-AGCMとSWANの現在気候(1979-2003)と温暖化条件下(A1Bシナリオ)の将来気候(2075-2099)のデータを用いて解析を行った.

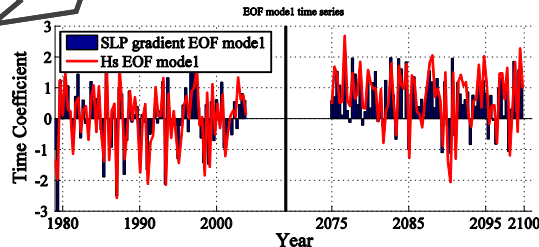


温暖化条件下における関係

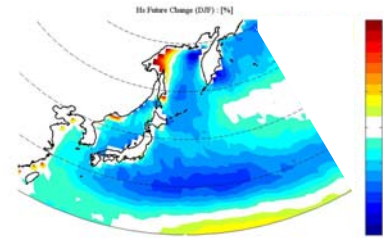


WPパターンが将来気候では正の方向に変化する（シベリア東部の気圧が低い月が増加する）。

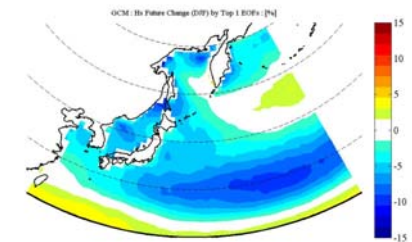
WPパターンが正の方向に変化するに伴い、SLP勾配と有義波高のEOFモード1が正の方向に変化する。



温暖化条件下における関係



有義波高の将来変化



EOFモード1の変化により表現される有義波高の将来変化

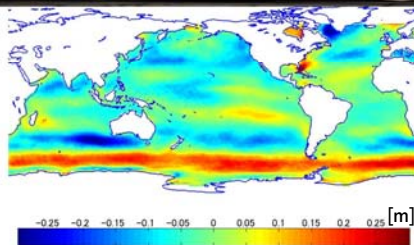
WPパターンの正の方向への変化

SLP勾配EOFモード1の正の方向への変化

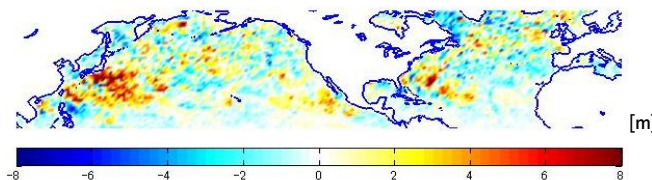
有義波高EOFモード1の正の方向への変化

日本近海冬季平均波高の減少

波浪の将来変化予測



平均波高の将来変化



50年確率波高の将来変化

まとめ

- 大気場と波高の関係を把握し、気圧から波高を推定する統計的予測方法の検討を行った。
- 日本の冬季平均波高に関して、WPパターンの影響が強いことが分かった。
- 温暖化条件下において、WPパターンの変化に伴い、SLP勾配、Hsの変動パターンの偏りが発生し、日本近海の冬季平均波高が減少することが分かった。



地球温暖化に伴う海象要因変化が 海岸構造物の安全性能に及ぼす影響評価



25

発表内容

1. 研究目的
2. 信頼性設計法および性能関数
3. 対象海岸における地形・海象条件の設定
4. 被災確率の算定
5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察
6. まとめ

26

発表内容



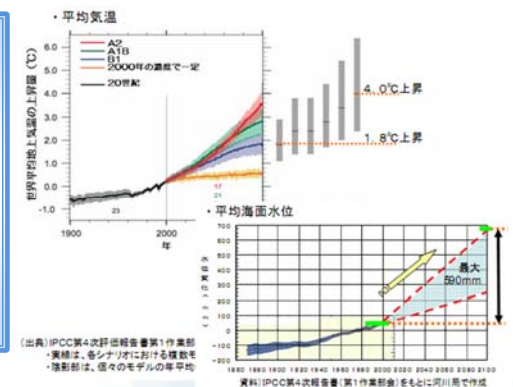
1. 研究目的
2. 信頼性設計法および性能関数
3. 対象海岸における地形・海象条件の設定
4. 被災確率の算定
5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察
6. まとめ



27

研究目的

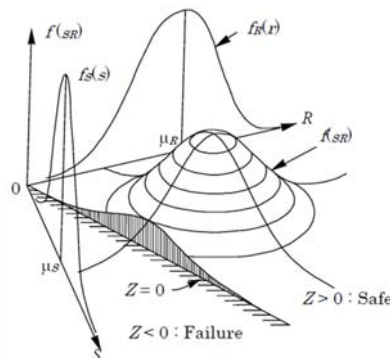
- 近年、観測事実から**地球温暖化**がほぼ明らかになっている。
- 種々の**温暖化シナリオ**のもとで**気候変動の長期予測**が行われている（例えば、IPCC, 2007）。
- 我が国の多くの海岸では、**昭和30年代後半に設定された計画外力を確定値として**、海岸構造物が設計されてきた。



地球温暖化に伴う海面上昇や波の将来変化といった**計画外力**の変化を考慮して、**今後は海岸構造物の設計や維持管理を図らなければならない。**

28

- 不確定な要素を合理的かつ定量的に取り扱う設計法 ⇒ **信頼性設計法**
- 現況の設計条件に対しては、防波堤や消波ブロックの耐波安定性、越波流量に及ぼす影響等が検討されている(下迫ら,1997;河合ら,1997;長尾ら,2005)。
- 将来気候における外力状況のもとで、海岸構造物の安全性能を評価した事例は見当たらない。



不確定要因を確率的に取り扱うことができ、合理的な設計が可能となる**設計水準レベル3の信頼性設計法**に基づき、**海象要因の変化が海岸構造物の安全性能に及ぼす影響を評価したうえで、海岸特性に応じた適応策を検討するための方法**を提案する。

29

1. はじめに(研究背景&目的)
2. 信頼性設計法および性能関数
3. 対象海岸における地形・海象条件の設定
4. 被災確率の算定
5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察
6. まとめ

30

安全率に基づく設計法

既往の海岸構造物の設計では、安全率が設計基準値以上であれば構造物の安全性が確保されていると見なす設計法を採用

信頼性設計法

構造物の被災モードを特定し、被災が生じる確率を定量的に評価して、各モードに関する被災確率を許容値以下に抑える設計法

設計水準
レベル 1

設計水準
レベル 2

設計水準
レベル 3

部分係数法
個別に破壊確率を求めようとはせず、設計因子のそれぞれに予め設定した部分係数を乗じて安全性を判定する方法

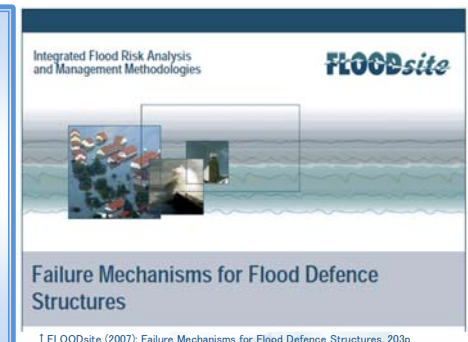
信頼性指標
設計因子の確率分布を平均値と標準偏差で表せる正規分布で近似し、破壊確率も正規分布で表現できるとして、信頼性指標で安全性を評価する方法

構造物の破壊に関わる設計上の不確定性を定量的に評価し、それらの確率分布を明らかにしたうえで、破壊モードの生起確率を多重積分などの方法で計算する方法

設計水準レベル3を採用し、不確定要因の統計的特性やパラメータがすべて既知として与え、**破壊生起確率をモンテカルロ法により直接計算で算出した。**

31

- 信頼性設計法では、まず特定した**各被災モード**に対し、それぞれの被災モードを規定する**性能関数Z**を定義する。
- 性能関数は被災モードごとに各々に関係する**設計因子**を抽出して、**抵抗力と作用力**の差などとした数式として表す。
- $Z > 0$: 被災の事象が生起しない
- $Z \leq 0$: 被災が生じる。

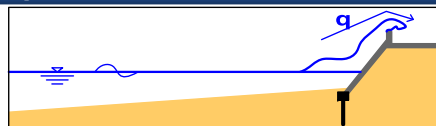


- 1) 越波による堤防・護岸の崩壊
- 2) 空洞化した堤防・護岸天端の打込み波圧による陥没
- 3) 波圧によるパラペットの倒壊

※ 越波・打上げに関連した被災モードを抽出した。

32

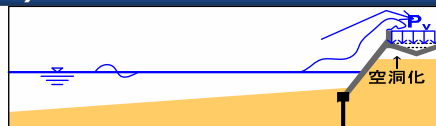
1) 越波による堤防・護岸の崩壊



$$Z = q_a - q \leq 0$$

- Z : 性能関数,
- q_a : 許容越波流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)
- q : 越波流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

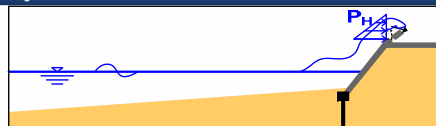
2) 堤防・護岸天端の打込み波圧による陥没



$$Z = \sigma_y - M(P_v, B) / Z_d \leq 0$$

- σ_y : 天端被覆工の引張り降伏応力度 (N/mm^2)
- $M(P_v, B)$: は鉛直力と空洞幅から求まる曲げモーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}$)
- Z_d : 天端被覆工の断面係数 (cm^3)

3) 波圧によるパラペットの倒壊



$$Z = f_{yk} - M(P_H, E_p) / Z_d \leq 0$$

- f_{yk} : 鉄筋の引張り降伏応力度 (N/mm^2)
- P_H : パラペットに作用する波圧強度 (kN/m)
- E_p : 裏込め土砂による受動土圧抵抗力 (kN/m)

33

1. はじめに(研究背景&目的)

2. 信頼性設計法および性能関数

3. 対象海岸における地形・海象条件の設定

4. 被災確率の算定

5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察

6. まとめ

34

既往の研究成果として、太平洋側での地球温暖化に伴う波浪の将来変化の予測結果はある(例えば、森ら、2010)日本海側や瀬戸内海側のものは見当たらない。

↓
予測結果のある太平洋側の3海岸をモデル海岸として選定した。

- ① 仙台湾南部海岸
- ② 駿河海岸
- ③ 高知海岸

← 仙台湾南部海岸

↑ 駿河海岸

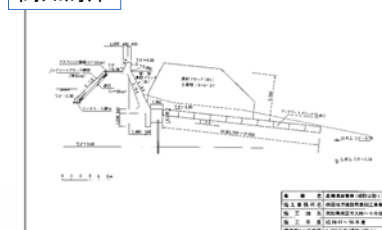
↑ 高知海岸

35

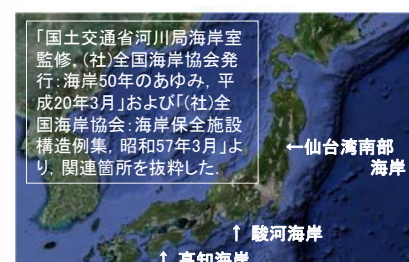
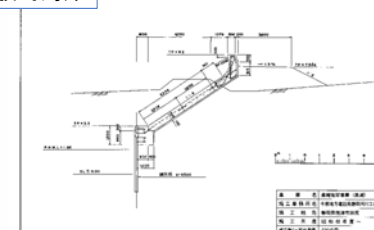
仙台湾南部海岸(蒲崎海岸)



高知海岸



駿河海岸



36

現在気候における設計諸元 および確率分布パラメータ

	単位	仙台湾南部海岸	駿河海岸	高知海岸
法面勾配	$\cot\alpha$	1:3	1:1.5	1:0.5
海底勾配	$\tan\beta$	1/20	1/10	1/20
設計沖波波高	m	7.7	4.45	13.0
沖波周期	s	13.0	14.0	15.5
計画高潮位	T.P.m	1.60	1.66	2.20
堤防天端高	T.P.m	6.2	8.2	9.3
法先地盤高	T.P.m	2.0	3.3	3.9

	仙台湾南部海岸	駿河海岸	高知海岸
設計沖波波高の確率分布	Weibull分布 1) $k=0.75, A=1.249$ 2) $k=1.0, A=1.969$ 3) $k=1.4, A=2.908$ 4) $k=2.0, A=3.895$	Weibull分布 1) $k=0.75, A=0.721$ 2) $k=1.0, A=1.137$ 3) $k=1.4, A=1.680$ 4) $k=2.0, A=2.248$	Weibull分布 1) $k=0.75, A=2.109$ 2) $k=1.0, A=3.322$ 3) $k=1.4, A=4.908$ 4) $k=2.0, A=6.575$
沖波周期の確率分布	正規分布 $\mu=13.0, \sigma=0.013$	正規分布 $\mu=14.0, \sigma=0.014$	正規分布 $\mu=15.5, \sigma=0.016$
計画高潮位の確率分布	正規分布 $\mu=1.6, \sigma=0.16$	正規分布 $\mu=1.66, \sigma=0.17$	正規分布 $\mu=2.20, \sigma=0.22$

※ k :形状母数, A :尺度母数, μ :平均, σ :標準偏差 37

将来気候の設計諸元の設定

- 「海面上昇量」はIPCC (2007) のA1Bシナリオの全世界平均である+0.3mを設定した。(野口ら(2010)の研究成果とも整合)
- 「将来気候の設計波高」は、森ら(2010)を参考に設定した。
 - 仙台湾南部海岸: 現在設計波の1.08倍
 - 駿河海岸: 現在設計波の1.22倍
 - 高知海岸: 現在設計波の1.12倍
 ※それらを50年確率有義波高とした。
- 「波の周期」は現在気候のそれに比べて5%長くなると仮定した。

森ら(2010)の研究成果

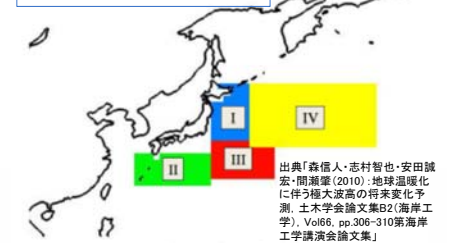


図-6 解析対象領域の分割図

	現在気候	将来気候
仙台湾南部海岸 [エリアI]	$(H_0)_{pre}=7.7m$	$(H_0)_{fut}=8.316m$ 現在気候×1.08
高知海岸 [エリアII]	$(H_0)_{pre}=13.0m$	$(H_0)_{fut}=14.573m$ 現在気候×1.121
駿河海岸 [エリアIII]	$(H_0)_{pre}=9.0m$	$(H_0)_{fut}=10.98m$ 現在気候×1.220

38

将来気候における設計諸元 および確率分布パラメータ

	単位	仙台湾南部海岸	駿河海岸	高知海岸
法面勾配	$\cot\alpha$	1:3	1:1.5	1:0.5
海底勾配	$\tan\beta$	1/20	1/10	1/20
設計沖波波高	m	8.32	5.42	14.57
沖波周期	s	13.7	14.7	16.3
計画高潮位	T.P.m	1.90	1.96	2.50
堤防天端高	T.P.m	6.2	8.2	9.3
法先地盤高	T.P.m	2.0	3.3	3.9

	仙台湾南部海岸	駿河海岸	高知海岸
設計沖波波高の確率分布	Weibull分布 1) $k=0.75, A=1.349$ 2) $k=1.0, A=2.126$ 3) $k=1.4, A=3.140$ 4) $k=2.0, A=4.205$	Weibull分布 1) $k=0.75, A=1.003$ 2) $k=1.0, A=1.580$ 3) $k=1.4, A=2.331$ 4) $k=2.0, A=3.123$	Weibull分布 1) $k=0.75, A=2.363$ 2) $k=1.0, A=3.725$ 3) $k=1.4, A=5.500$ 4) $k=2.0, A=7.365$
沖波周期の確率分布	正規分布 $\mu=13.7, \sigma=0.0137$	正規分布 $\mu=14.7, \sigma=0.0147$	正規分布 $\mu=16.3, \sigma=0.0163$
計画高潮位の確率分布	正規分布 $\mu=1.9, \sigma=0.19$	正規分布 $\mu=1.96, \sigma=0.20$	正規分布 $\mu=2.50, \sigma=0.25$

※ k :形状母数, A :尺度母数, μ :平均, σ :標準偏差 39

抵抗力と作用力

抵抗力

(1) 許容越波流量 q_s ($m^3/s/m$)

許容越波流量 q_s は対象としたモデル海岸が、いずれも3面張り構造の堤防形式であったため、合田(2008)に準じて $0.05 (m^3/s/m)$ とした。

(2) 天端被覆工の引張り降伏応力度 s_y (N/mm^2)

横道・藤田(1971)および日本道路協会(2002)から $0.67 (N/mm^2)$ を設定。

(3) 鉄筋の引張り降伏応力度 f_{yk} (N/mm^2)

岡安(2005)の数値を参考に $295 (N/mm^2)$ を設定。

※ σ_y や f_{yk} の算出時に必要となる部材の分布間数パラメータは、国土交通省港湾局監修(2007)に基づいて設定した。

作用力

(a) 越波流量の算定

玉田ら(2010)の越波流量算定式を採用

$$\frac{q}{\sqrt{gH_0^3}} = 0.018 \sqrt{\frac{R_{max}}{H_0}} \left\{ 1 - \left(\frac{R_c}{H_0} \right) \right\} \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right)^{6.240}$$

for $0 \leq R_c \leq R_{max}$
0 for $R_{max} \leq R_c$

(b) 打込み波圧の算定

今井ら(2010)および清水ら(2010)を参考に打込み波圧算定式を定式化した。今井ら(2010)および清水ら(2010)は、道路護岸を対象に越波による打込み波圧に関する水理模型実験を実施し、打込み波圧と波浪の関係、波浪と越波流量の関係をjている。

$$P_r = 10.828 q$$

(c) パラペットへ作用する波圧

富永・久津見(1971)の波圧式

$$P_H = 1.8 \rho_0 g \tan \beta (\sqrt{H_0} \cdot L_0 - x)$$

$$R_0 = 1.7 \tan \beta (\sqrt{H_0} \cdot L_0 - x)$$

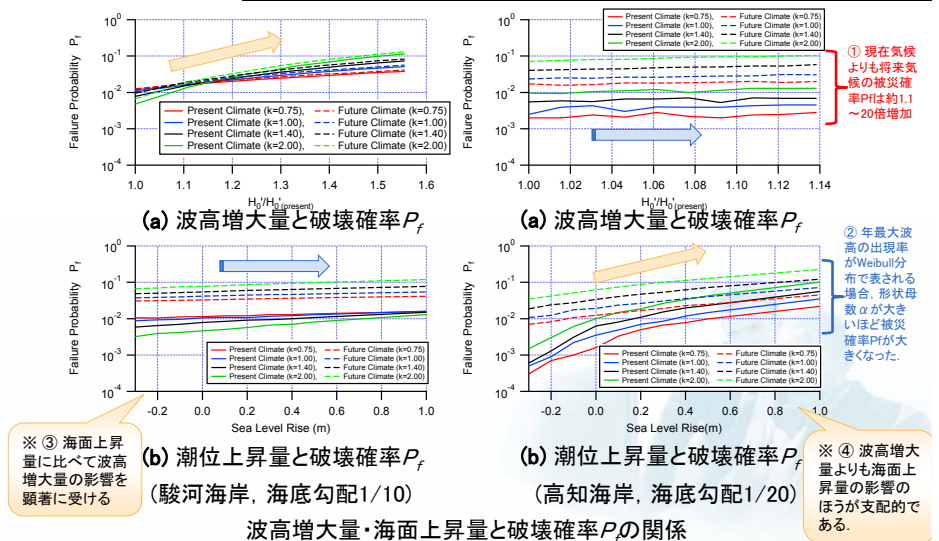
40

発表内容

1. はじめに(研究背景&目的)
2. 信頼性設計法および性能関数
3. 対象海岸における地形・海象条件の設定
4. 被災確率の算定
5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察
6. まとめ

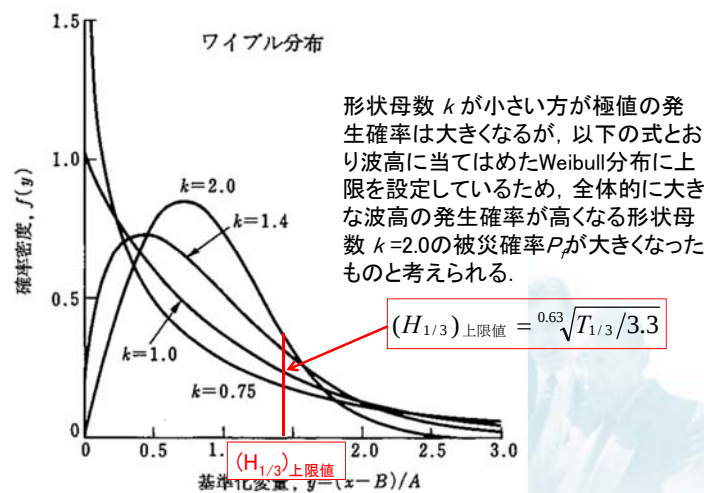
41

越波による堤防・護岸の崩壊



42

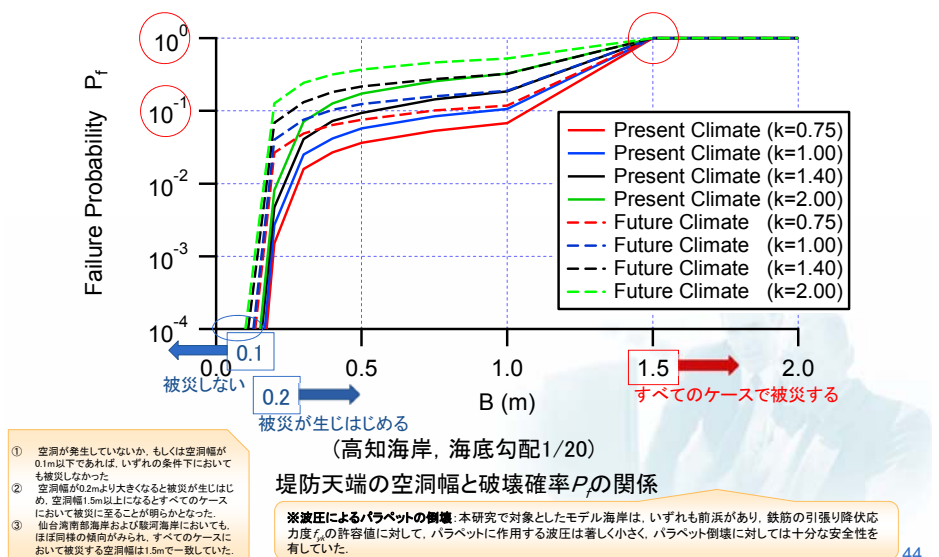
形状母数による安全性の違い



Weibull 分布の確率密度関数の形状

43

堤防・護岸天端の打込み波圧による陥没



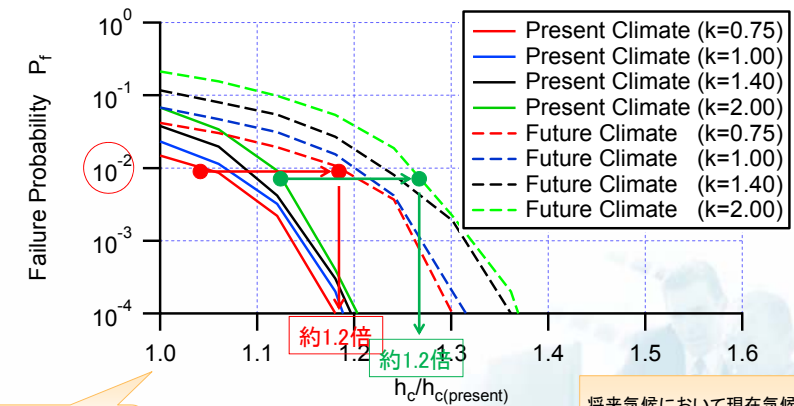
44

発表内容

1. はじめに(研究背景 & 目的)
2. 信頼性設計法および性能関数
3. 対象海岸における地形・海象条件の設定
4. 被災確率の算定
5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察
6. まとめ

45

堤防天端高の嵩上げ効果



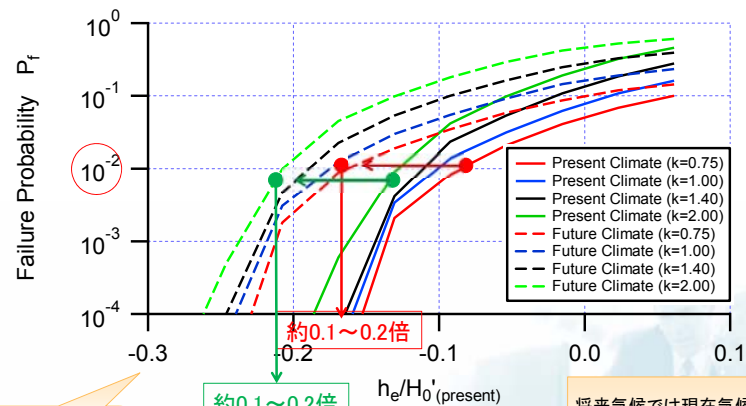
※この傾向は、仙台湾南部海岸および駿河海岸においても同様に確認された。

(高知海岸, 海底勾配1/20)
堤防天端高と被災確率 P_f の関係

将来気候において現在気候と同程度の安全性能を確保する、すなわち、被災確率 P_f を同じにするためには、堤防天端高を現在よりも1.2倍程度嵩上げする必要がある。

46

養浜の効果



※この傾向は、仙台湾南部海岸および駿河海岸においても同様に確認された。

(高知海岸, 海底勾配1/20)
法先水深と被災確率 P_f の関係

将来気候では現在気候における換算沖波波高 H_0' の0.1~0.2倍法先水深を浅くする対策(例えば前浜の養浜等)を講じることで、現在気候と同程度の安全性が確保される

47

内容

1. はじめに(研究背景 & 目的)
2. 信頼性設計法および性能関数
3. 対象海岸における地形・海象条件の設定
4. 被災確率の算定
5. 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察
6. まとめ

48



1. 本研究で対象としたモデル海岸では、**現在気候よりも将来気候の各モードの被災確率は約1.1～20倍増加する**。また、**年最大波高の出現率がWeibull分布で表される場合、形状母数 κ が大きいほど被災確率は大きくなる**。
2. いずれの被災モードにおいても、構造物の安全性能に及ぼす影響は、**海底勾配が1/10程度の急勾配の場合には波高増大量の影響が大きく、海底勾配が1/20よりも緩い海岸では海面上昇量の影響が支配的であった**。
3. 将来気候では現在気候に比べて越波による被災確率が増加するが、**現在気候と同程度の安全性能を確保するためには、堤防天端高を1.2倍程度嵩上げする必要がある**。また、**法先水深と被災確率の関係から、将来気候では0.1～0.2倍法先水深を浅くする対策（例えば養浜等）を講じることで、現在気候と同程度の安全性が確保される**。
4. 空洞化護岸に対する打込み波圧による天端陥没の被災では、**空洞幅1.5m以上になるとほぼ被災に至ることが明らかとなった**。

49

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

発表内容

1. 研究背景と目的
2. 検討対象外力と解析方法
3. 滑動量解析
期待滑動量・必要堤体幅
4. 考察
水深波高比・増加率
5. まとめ

51

研究背景と目的

○地球温暖化に伴う沿岸外力の変化

気候変動による海面上昇、台風の強大化が懸念。
沿岸外力要因→**海面上昇による水深増大**
→**台風の強大化による高潮や波浪の増大**

➡ 気象変化に対する海岸・港湾構造物の安定性を照査することが重要。

○性能照査（港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007）

単にコストを削減するだけでなく、設計条件を上回る異常外力に対する性能等を総合的に照査することが重要となる。

52

研究背景と目的

○変形量を考慮した防波堤の設計法

■消波ブロック被覆堤

●下迫ら(2006)は水理模型実験から波力の時系列モデルを求め、下迫・高橋(1998)の混成堤の解析法から**消波ブロック被覆堤へ拡張**。

➡ しかし、設計供用期間中の**ブロック被災**を考慮していない。

●高山ら(2007)はブロック被災、**不完全被覆による波力増大**を考慮できる滑動量算定法を提案した。

●辻尾・安田(2009)は**設計供用期間中のブロック補修**も考慮

➡ しかし、地球温暖化に伴う沿岸外力の変化を考慮していない

53

研究背景と目的

○地球温暖化に伴う沿岸外力の変化

●酒井・岡安(2004)は海面上昇のみを考慮。

●高木ら(2007)は現在と将来の期待滑動量を比較。

➡ しかし、**将来変化は仮想的に与え**、高潮偏差が考慮されていない。**経年的な変化**も考慮されていない。

○本研究では、

地球温暖化に伴って変化すると予測される設計供用期間内の**沿岸外力の変化を考慮**した消波ブロック被覆堤の滑動量解析を実施し、**外力特性の変化が滑動安定性に及ぼす影響を検討する。**

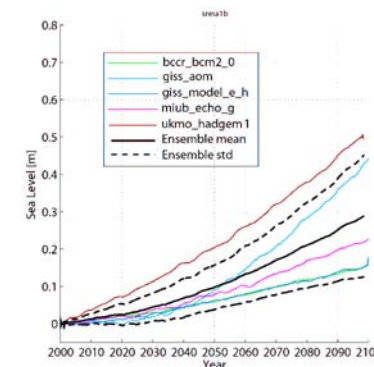
54

検討対象外力と解析手法

地球温暖化による外力への影響

①海面水位の上昇

森ら(2011)の将来変化の平均値を採用する。



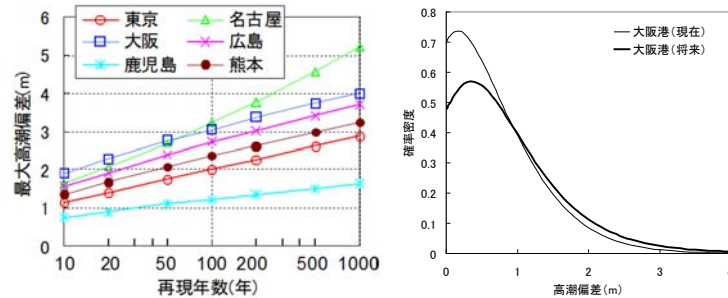
0.3m/100年の上昇

56

地球温暖化による外力への影響

②高潮偏差の増大

河合ら(2007)などの確率モデル台風を用いて温暖化後に発生する台風から高潮偏差の増大傾向を把握し、モデル化する。

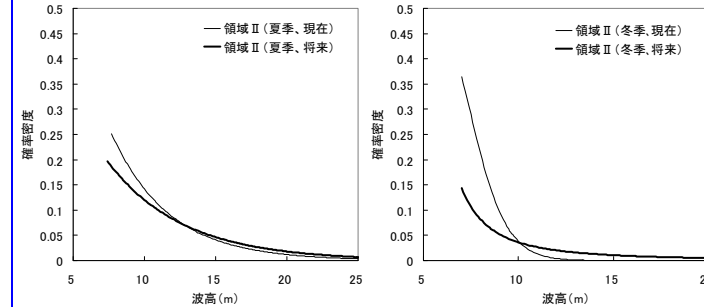


57

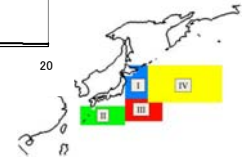
地球温暖化による外力への影響

③波浪の増大

A1Bシナリオに基づくGCMの海上風からSWANによって推算した森ら(2009)の研究結果から領域ⅡとⅢの波浪の増大傾向を把握し、モデル化する。



領域Ⅱ: 波高の増大傾向が小さい
領域Ⅲ: 波高の増大傾向が大きい



58

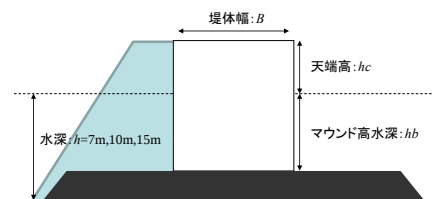
計算条件と計算手法

○外力変化の設定方法

設計供用期間中の沿岸外力は基本的に線形増大すると仮定。現在気候と将来気候の極値分布から算定される高潮偏差と波浪は次式で発生年次を考慮して線形補完して求めた。

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

○計算対象断面



項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 13.1m (λ=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 (λ=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 (λ=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 (λ=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

59

滑動量解析の計算条件

各波浪条件に対して、温暖化による沿岸外力増大の考慮の有無を設定。

また、設計供用期間中に被災した消波ブロックの補修の有無、設置水深(7m、10m、15m)、16種類のブロック型(2t~80t)を対象とした。

★滑動量算出モデル

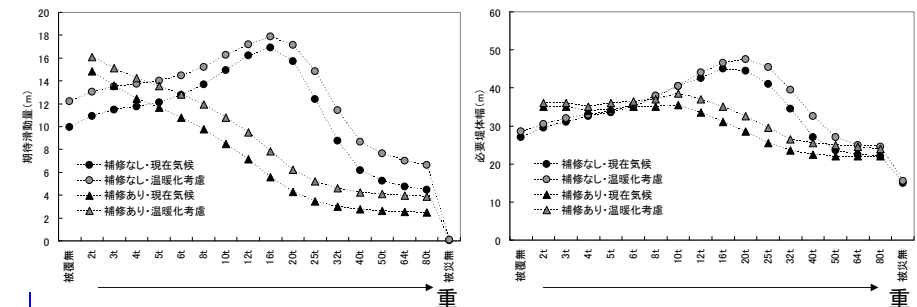
・下迫・高橋(1994)に基づく高山ら(2007)の滑動量算出モデルを用いた。

対象領域	屈折係数	温暖化有無	補修有無	設置水深	ブロック型
領域Ⅱ	1.0	O	O	7m, 10m, 15m	2t~80t
			X	7m, 10m, 15m	2t~80t
			O	7m, 10m, 15m	2t~80t
	0.5	X	X	7m, 10m, 15m	2t~80t
			O	7m, 10m, 15m	2t~80t
			X	7m, 10m, 15m	2t~80t
領域Ⅲ	0.5	O	O	7m, 10m, 15m	2t~80t
			X	7m, 10m, 15m	2t~80t
			O	7m, 10m, 15m	2t~80t
	0.3	X	X	7m, 10m, 15m	2t~80t
			O	7m, 10m, 15m	2t~80t
			X	7m, 10m, 15m	2t~80t

60

滑動量解析と考察

期待滑動量と必要堤体幅



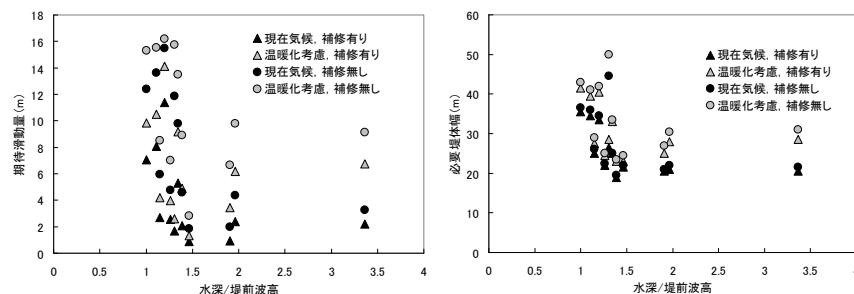
期待滑動量

必要堤体幅

消波ブロックの補修を考慮しない場合、16tや20tでピークをとる。
これは、消波ブロックが不完全被覆された時に、非常に大きい衝撃波圧が作用し、軽いブロックを用いた場合よりも滑動量が大きくなるためである。

62

考察一水深波高比の影響



期待滑動量

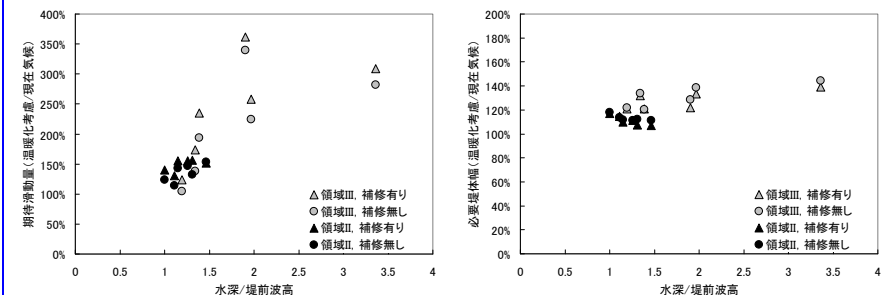
必要堤体幅

■水深波高比 1.5～2.0 で最低値を取り、水深波高比が小さくなるか、大きくなると期待滑動量や必要堤体幅が大きくなる。

→モンテカルロシミュレーションで大きな波高が発生した場合、水深が深いと大きいまま防波堤に到達する。水深が浅い場合、周期が長いと碎波限界波高が大きくなり、大きいまま堤体に作用し、滑動が大きくなる。

63

温暖化による滑動量・堤体幅の増加率



期待滑動量

必要堤体幅

■水深波高比が 1.0～1.5 程度では、150% や 110% 程度で変化は小さい。水深波高比が 1.5 を超えると、増加し、最大で 350% と 140% になった。

→これは、水深波高比が大きい場合、増大した波高がそのまま来襲しやすいが、水深波高比が小さい場合は、波高が増大しても、波高が碎波限界波高よりも大きくならないため、増加率は小さい。

64

まとめ

地球温暖化に伴う設計供用期間中の外力変化の影響を考慮して、消波ブロック被覆堤の滑動量解析を実施した。

- 本計算条件では、地球温暖化を考慮すると、期待滑動量が100～350%程度に増加し、必要堤体幅が100～140%程度に増加する。
- 温暖化による期待滑動量と必要堤体幅への影響は、想定される波高変化だけでなく、水深波高比に大きく依存する。
- 滑動を許容した防波堤の設計では、地球温暖化に伴う設計供用期間中の長期的な沿岸外力変化を考慮する必要があり、特に大水深域に設置する場合、その影響が大きくなることがわかった。

65

全体のまとめ

- マルチアンサンブル波浪予測への適用を目指し、波浪の直接計算結果と再解析値を用いて、テレコネクションパターンと大気場と波浪のマクロ的な関係を明らかにした。
- 不確定要因を確率的に取り扱うことができ、合理的な設計が可能となる設計水準レベル3の信頼性設計法に基づき、海象要因の変化が海岸護岸の安全性能に及ぼす影響を評価したうえで、海岸特性に応じた適応策を検討するための方法を提案した。
- 地球温暖化に伴って変化すると予測される沿岸外力の変化を考慮した消波ブロック被覆堤の滑動量解析を行い、外力特性の変化が滑動安定性に及ぼす影響を検討した。

ご静聴ありがとうございました。

67