

令和7年度気象研究所研究成果発表会
2月21日（土）13:30～ 気象庁講堂



歩み続けて150年
防ぐ災害・守る未来

日本沿岸水位の長期変動について

中野 英之

全球大気海洋研究部

全体の流れ

1. はじめに (4枚)

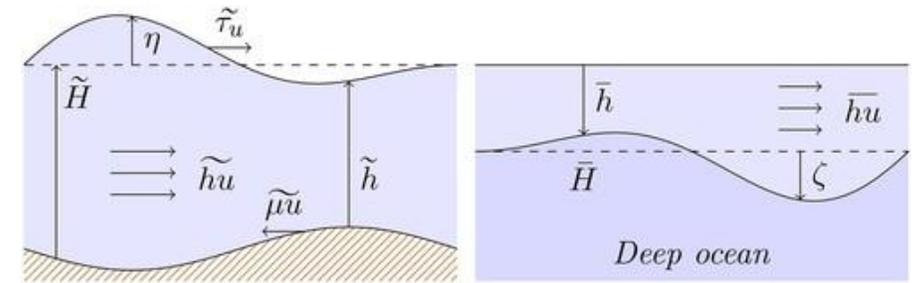
- 日本付近の海面水位変動の長期変動を引き起こす要因
- 温暖化による海面水位上昇の予測

2. 海面水位変動の見積もりの技術的及び理論的な背景 (8枚)

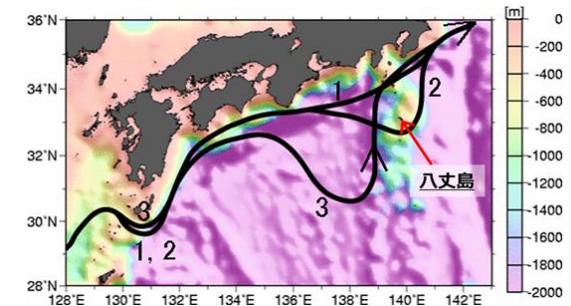
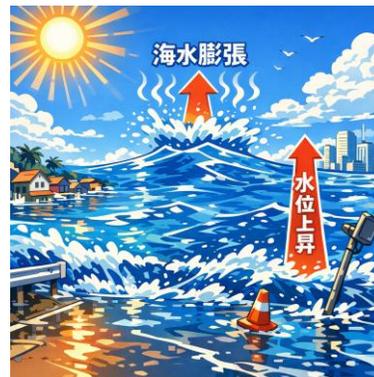
- 海洋モデルの紹介
- 海面水位上昇における **順圧の波** と **傾圧の波** の働き

3. 日本沿岸の海面水位の長期変動の見積もり (12枚)

- 温暖化による世界全体でほぼ一様の海面水位上昇 [最大の寄与] 氷床の融解
- 黒潮流路の沿岸の海面水位への効果
- 地殻変動による影響
- その他(高潮など)



順圧(深さに依らない)の波 傾圧(深さにより変化する)波



黒潮の3つの典型的流路

海面水位変動を決める要因

- 海面水位変動は独特の力学で決まります。
- また、一つの分野で全ての見積もりを行うことはできず、**学際的**です。
- 海面水位の長期変動は以下の3つに大きく分かります。

A) (数ヶ月では)全世界一様とみなしてもよいもの[最大の寄与]

- 水が海に注ぎ込まれること (南極及びグリーンランドの氷床の融解)
- 水温変化による体積変化の**世界平均**

青色： 海洋大循環モデルでは表現できない
緑色： 海洋大循環モデルで表現できる

B) 局所的なもの

- エルニーニョ、北太平洋十年変動等大規模な風系の変化に対する海洋の応答
- 水温変化による体積変化の**地域的**なもの
- **沿岸捕捉波**による沿岸域での**平滑化**

C) その他

- 地殻変動 (日本では無視できない大きさを持ちます。)

温暖化と海面水位上昇

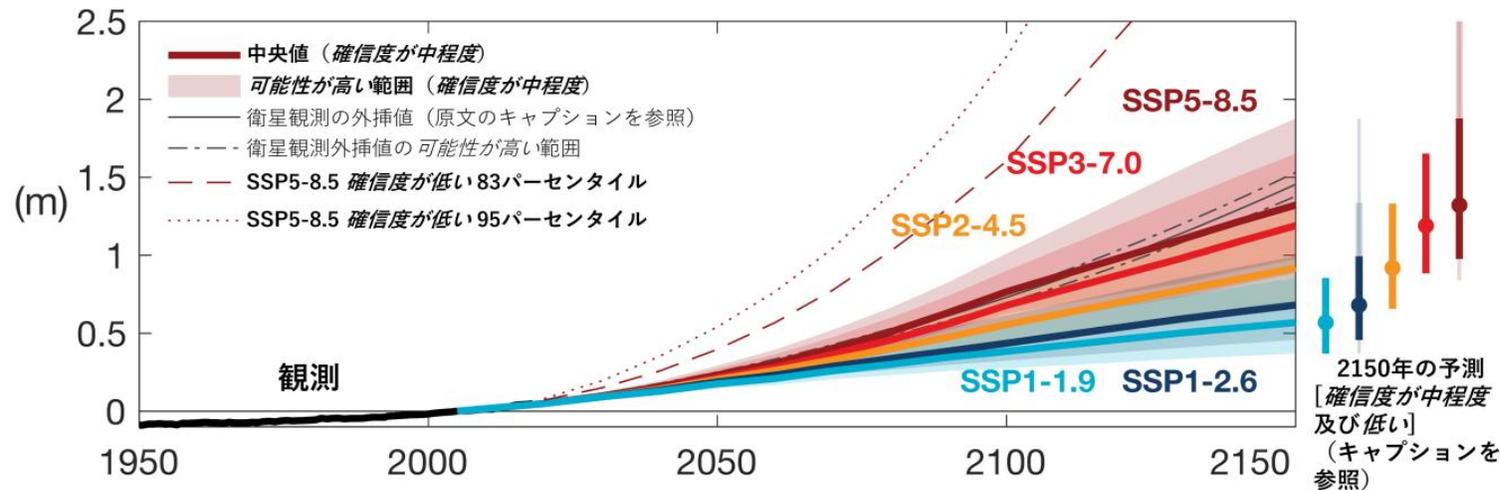
1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

来世紀にかけて、地球温暖化が人類の生活に与える最も直接的かつ重大な影響の一つが海面水位の上昇です。（特に人口が多い沿岸域）

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)レポートにおいても強調されています。2006～2018年の間には1年あたり世界平均の海面水位が約3.7mm上昇しました。

日本沿岸でもほぼ同程度で海面水位が上昇しています。

IPCC レポートによる世界平均海面水位上昇の予測



- 沿岸の都市には海拔1~2m以下の地域が広がっています。
- 海面水位が1m上昇すると、日本の砂浜の9割が失われると予測されています。

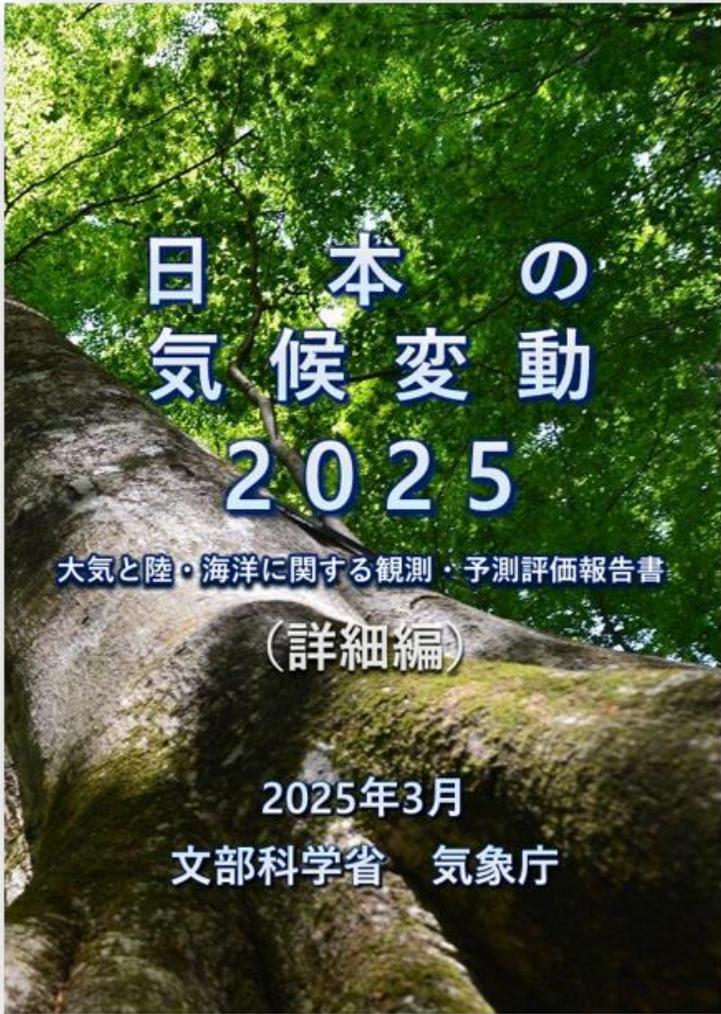
SSP5-8.5: 気候政策を導入しないシナリオ
SSP1-2.6: 気温上昇を2°C未満に抑えるシナリオ

SSPシナリオ: 将来の経済状況が不確定なため、世界経済が辿るいくつかのシナリオを仮定しています。共通社会経済経路(**Shared Socio-economics Pathways**)の略語。

日本付近の海面水位の将来予測

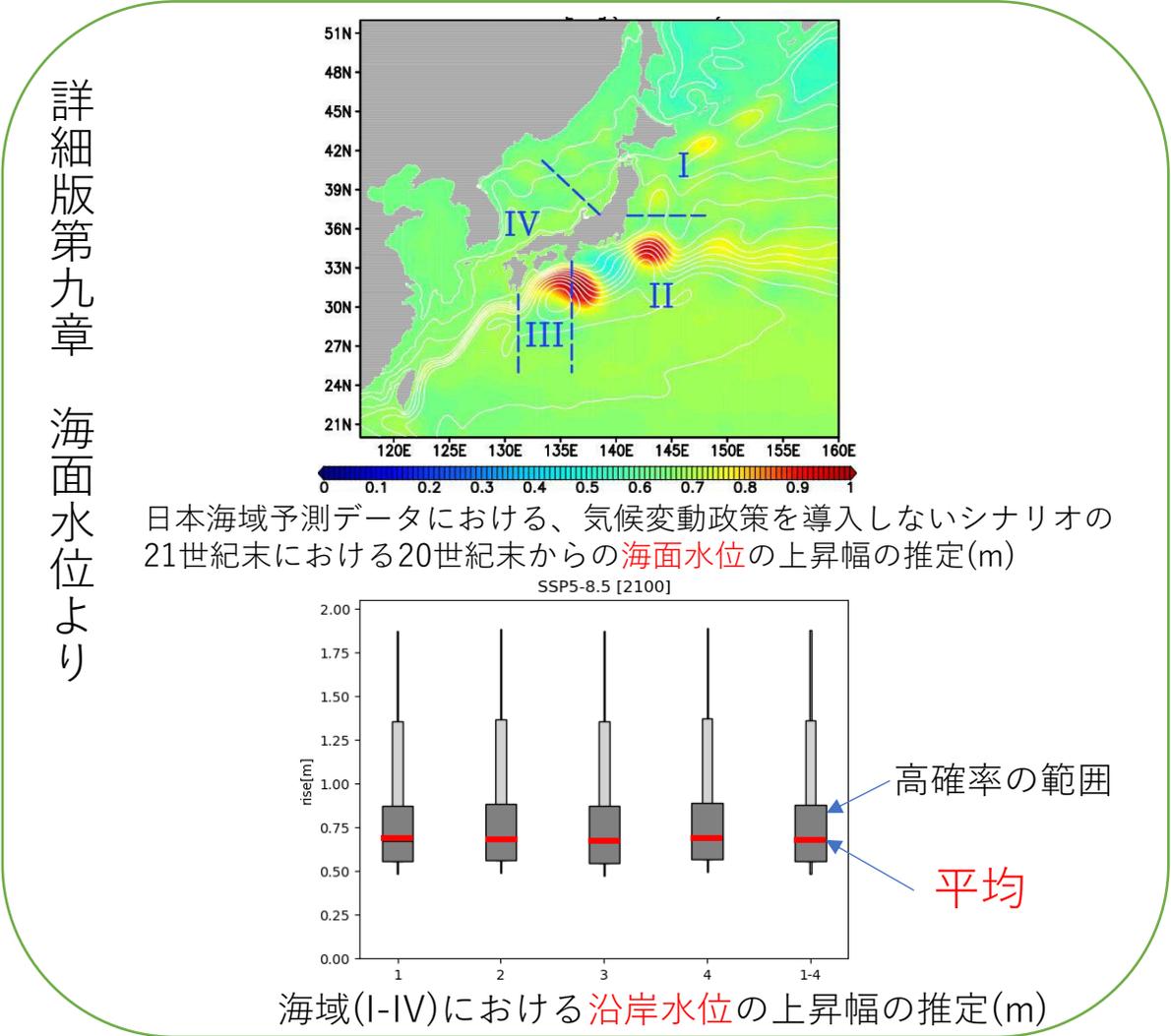
- 1. はじめに
- 2. 理論的背景
- 3. 海面水位変動の見積

気象研究所は気象庁公表の「日本の気候変動2025」の海面水位の将来予測に貢献しています。



<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>

21世紀末における20世紀末からの上昇幅の推定

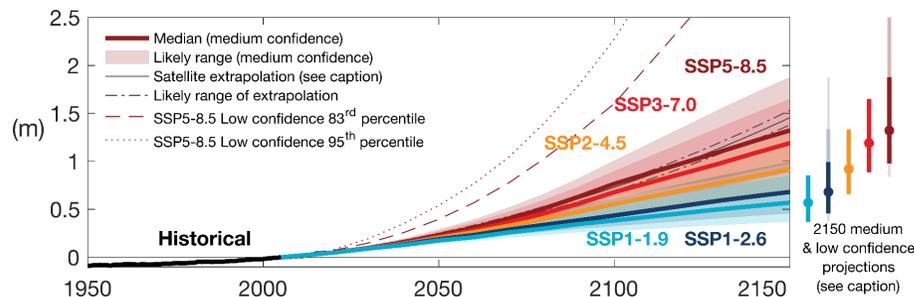


先ほどの「世界平均海面水位上昇の予測」に加えて「海洋モデル」を見積もりに使用しています。

海洋モデルの計算結果を用いた将来の海面水位変化の見積もり方

A 世界の海洋で一様の変化

「(氷床、氷河の融解等の)淡水流入」 + 「熱膨張」による海面水位の変化



B. 空間分布を持つ変化 (ただし世界の海洋の平均するとゼロになる。)

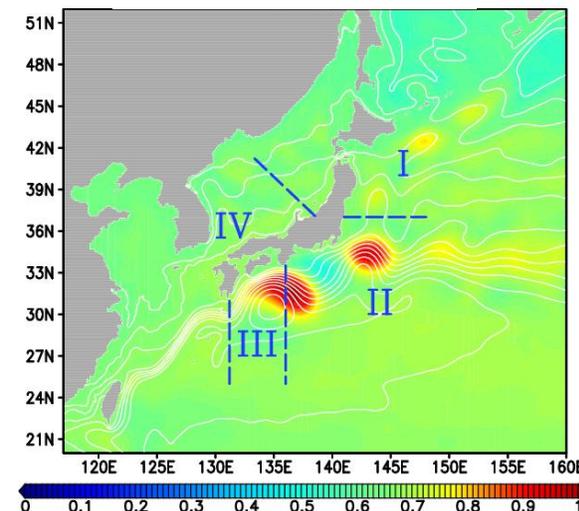
海洋モデル(気象研モデルも含む)はこれを計算できます。

海水面の変化は単純に両者を足し合わせることで計算できます。

さらに、(日本付近の将来予測では)地殻変動の影響の考慮が必要です。

Bの変化は、沖合に比べて沿岸で空間的な違いが小さくなっています。

AとBを足して見積もった例
(日本の気候変動2025より)

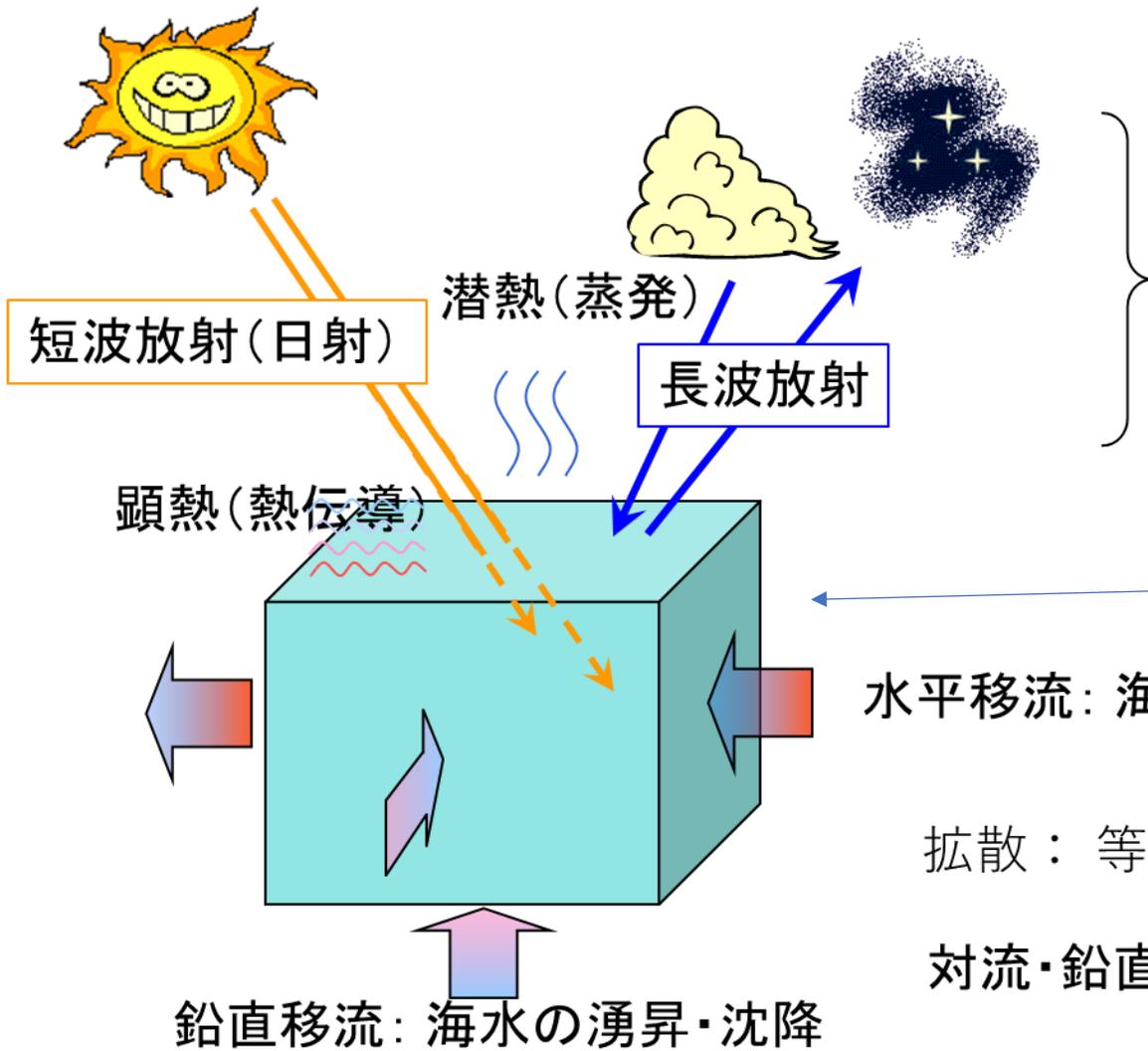


この理屈の概要を話します。

日本海域予測データにおける、気候変動政策を導入しないシナリオの21世紀末における20世紀末からの上昇幅の推定(m)

海洋モデルの概要

- 1. はじめに
- 2. 理論的背景
- 3. 海面水位変動の見積



海面熱フラックス

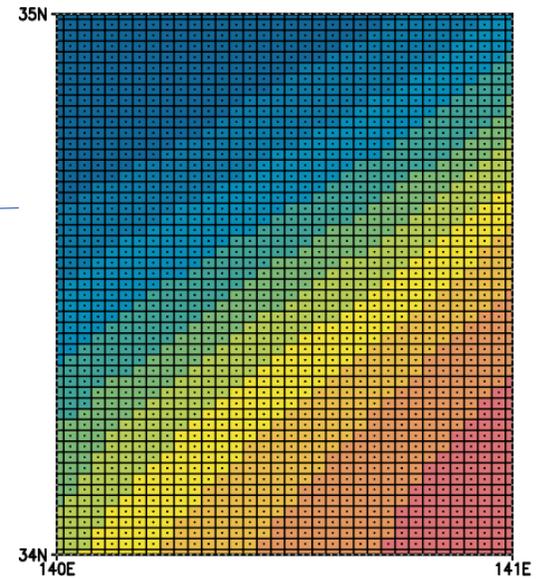
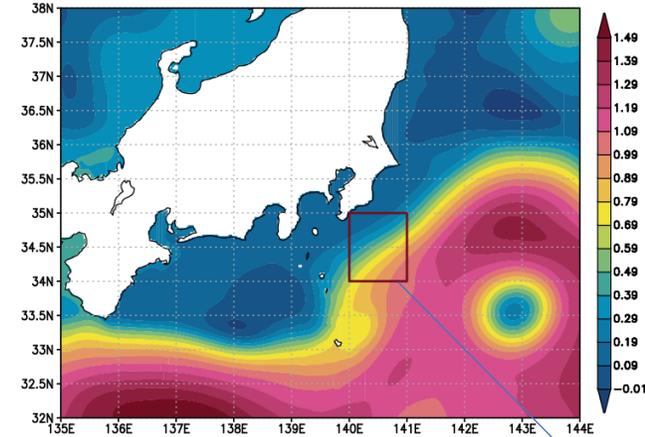
一つ一つの格子で海面高度、温度、流速等を計算
左図は(わかりやすい)温度の例

水平移流：海水の流入・流出

拡散：等密度面混合

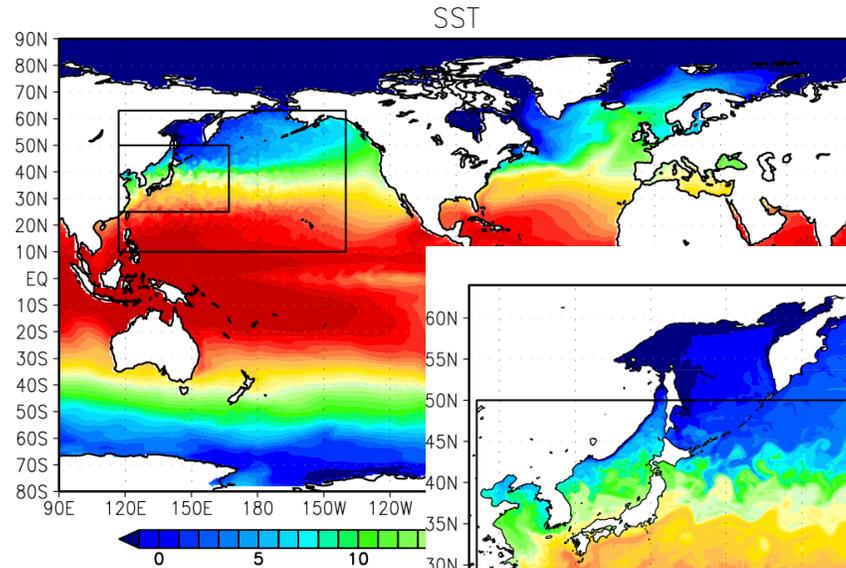
対流・鉛直混合：下層の海水と混合

海面水位

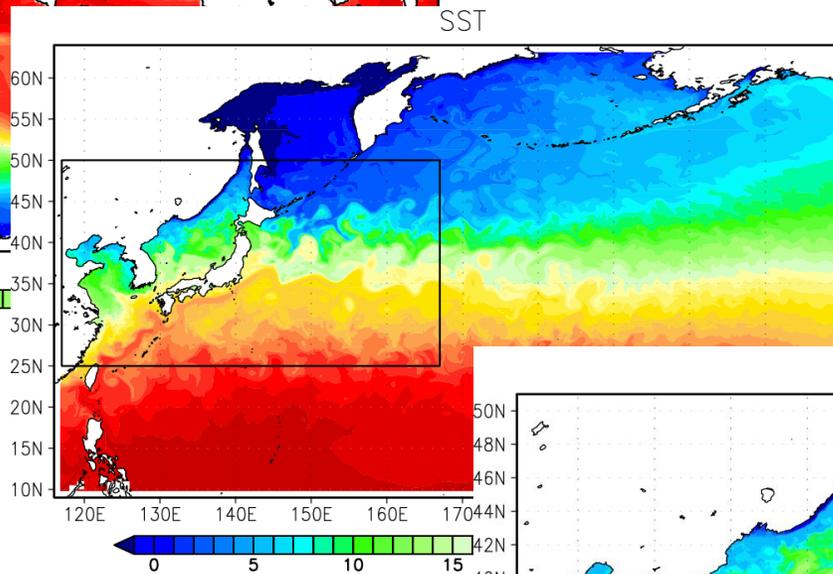


入れ子構造による海洋モデルの計算(計算量の節約)

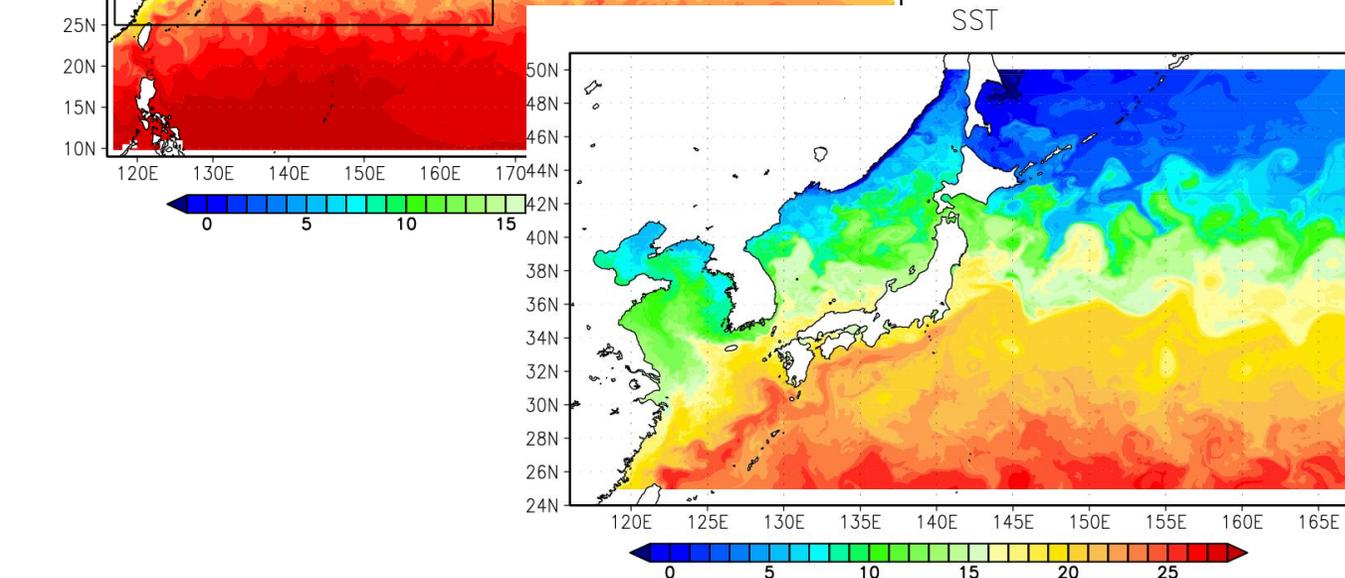
1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積



全球モデル (世界全体)
(水平解像度 50~100km)



北西太平洋モデル
(水平解像度10km)

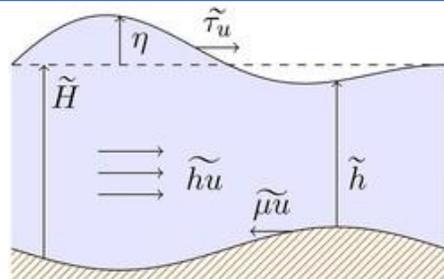


日本近海モデル
(水平解像度
2.5~3km)

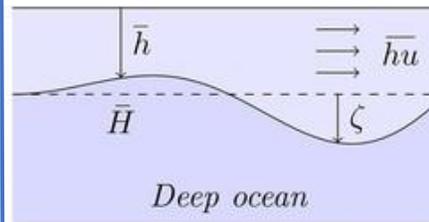
海洋における順圧の波と傾圧の波

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

空気における音波が音を伝えるように、海でも様々な波が情報を伝えます。
ここで触れる波は、よく見かける海面の波ではなく、海面から海底までの波です。
大きく分けて二つの波があります。



順圧(深さに依らない)の波



密度差($\Delta \rho$)

傾圧(深さにより変化する)波

順圧の波

順圧の重力波

$\sqrt{gH} \sim H=4000\text{m}$ で **200m/s** 程度

順圧の惑星波 **数m/s** (緯度による、西に進む)

順圧の沿岸捕捉波 **200m/s** 程度(重力波と同じ)

海に水が注ぎこまれる場合
こちらの波で伝わります。

100倍程度
順圧の方が速い

傾圧の波

傾圧の重力波

$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \sqrt{gH} \sim H=4000\text{m}$ で **2m/s** 程度

傾圧の惑星波 **数cm/s** (緯度による、西に進む)

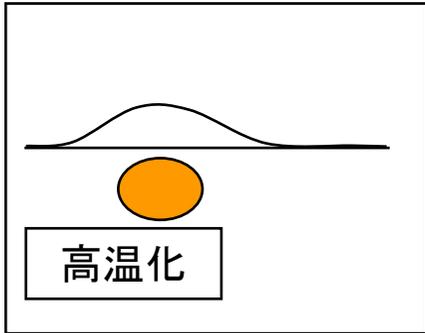
傾圧の沿岸捕捉波 **2m/s** 程度 (重力波と同じ)

風による海流の長期変化や、
水温変化による体積変化の地域性などは
こちらの波で伝わります。

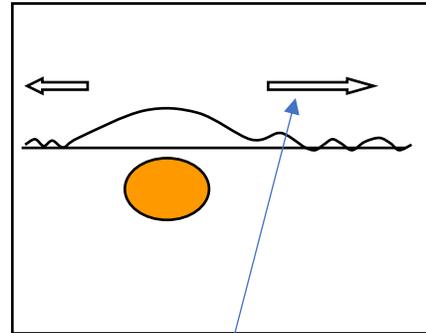
海水の温度変化による体積変化の効果(その1)

- 1. はじめに
- 2. 理論的背景
- 3. 海面水位変動の見積

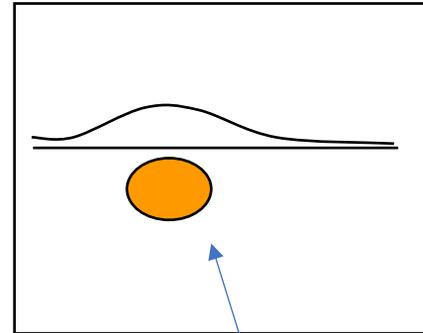
体積膨張による
水位上昇



地衡流平衡の状態への
遷移(地衡流調節)



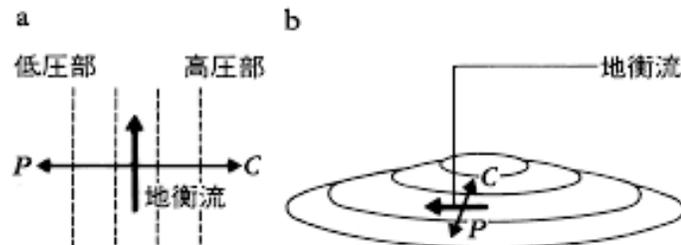
海洋全体の平均の体積変化による
水位上昇と地衡流でつりあった成分



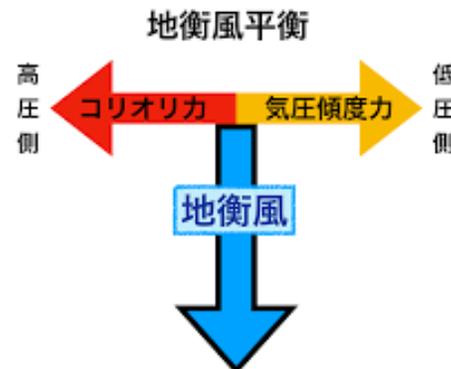
順圧の重力波
(地衡流平衡でない成分の全世界への高速な伝播)

回転系で、気圧傾度力(高压から低压へ向かう力)
とコリオリ力が釣り合って安定な状態 (地衡流平衡)

図3-北半球における地衡流平衡



C-コリオリの力 P-圧力傾度力
注-aの破線は等圧線. bは流れの循環を表す.



この地衡流平衡の状態が
傾圧の惑星波などで
おおよそ地衡流平衡を保ったまま
ゆっくりと移動していきます

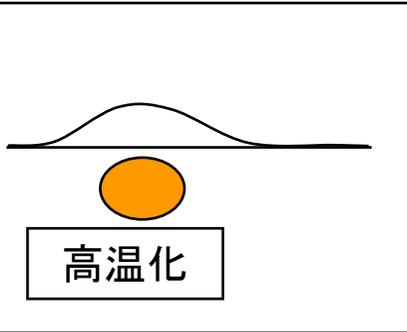
海水の温度変化による体積変化の効果(その2)

- 1. はじめに
- 2. 理論的背景
- 3. 海面水位変動の見積

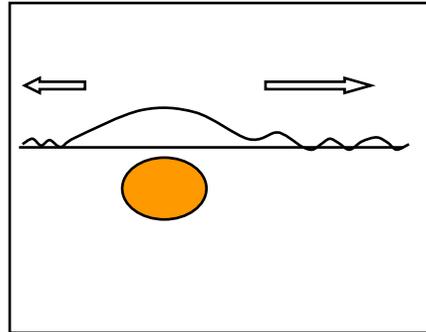
(多くの)海洋モデルでは水温が変化したときに体積が変化するのではなく、**体積はそのまま密度が変化する**ように作られています。

現実の熱膨張の効果

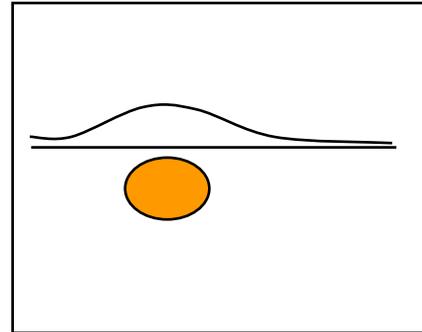
体積膨張による
水位上昇



地衡流調節

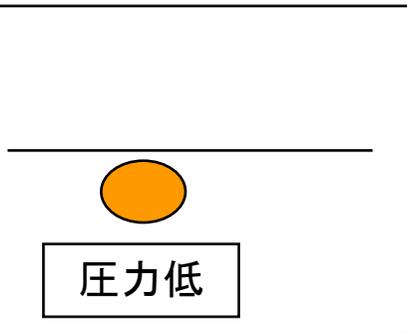


海洋全体の体積変化による水
位上昇の平均と地衡流成分

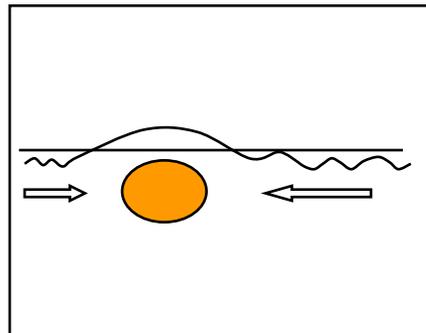


熱膨張の効果が
体積保存の海洋モデルでの

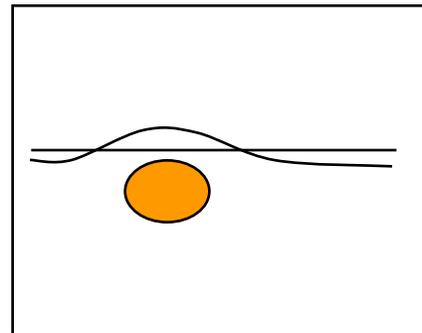
密度低下による
内部圧力変化



地衡流調節と
水位上昇



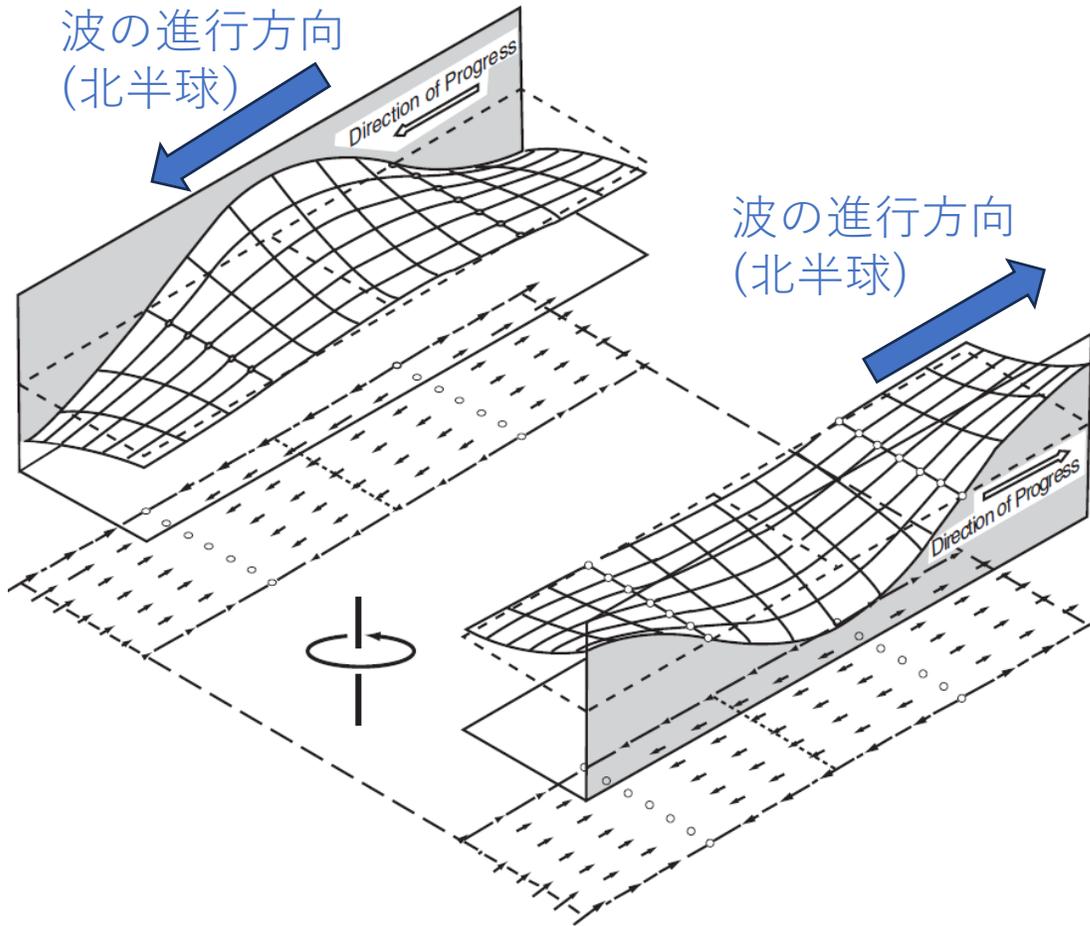
地衡流成分のみ



下の海洋モデルで上の現象を再現するには、海水の**体積変化による水位変化**を**世界全体の海洋で平均**して足しこめば(長期変動を見る分には)よいことになります。

沿岸捕捉波 (沿岸ケルビン波)

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積



- 海岸に沿う方向では**重力波**のふるまい
- 海岸から離れる方向は地衡流バランス

北半球では海岸を右に見て伝播し、
沿岸に沿った情報を素早く伝えます。

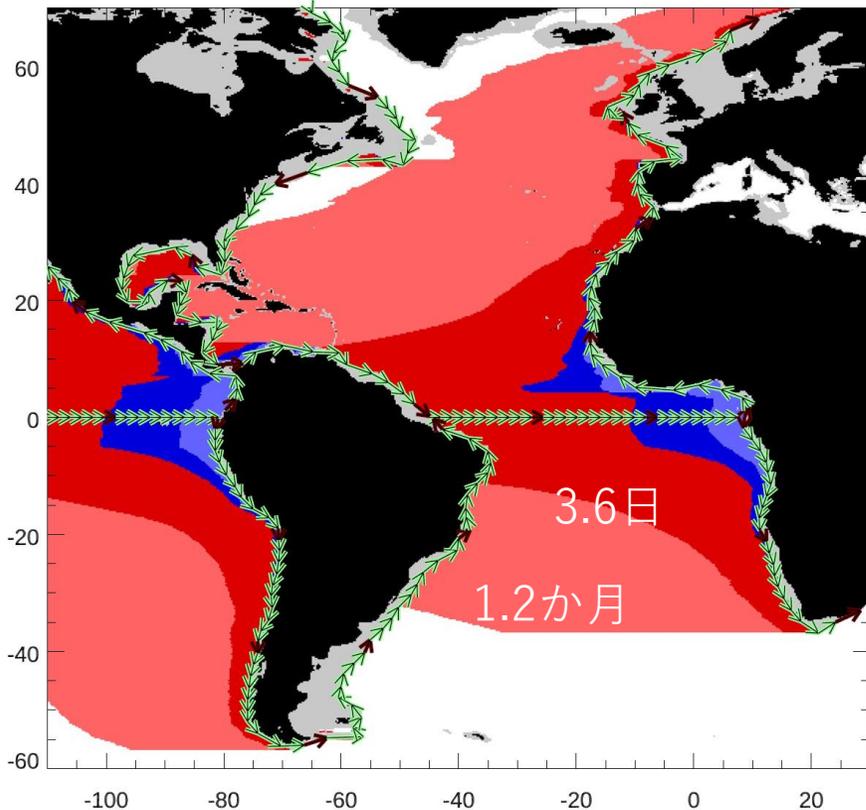
一般的に沿岸に沿った情報をかき集める
ことで**平滑化**に働きます。

応答の時間スケール

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

順圧の波

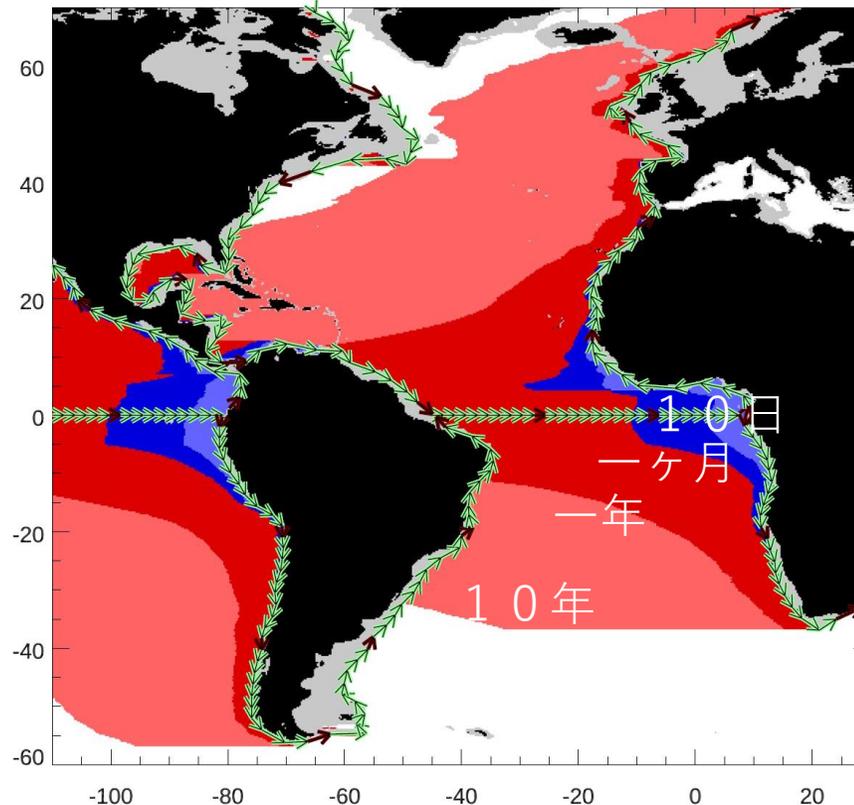
Schematic Wave Speeds



順圧の沿岸捕捉波の
10分の到達距離

傾圧の波

Schematic Wave Speeds



傾圧の沿岸捕捉波の
一日の到達距離

海岸線に沿って素早く伝わる
沿岸捕捉波の影響で
沿岸では応答が速く、
かつ、沖合に比べて空間的な
差が少なくなります。

Hughes et al. 2019

応答速度による違いのまとめ

- 早い応答 → **素早く全海洋で一様**に変化
 - 担い手： 順圧の沿岸捕捉波、順圧惑星波、重力波
 - 現象の例： 淡水流入、海水による体積変化のうち、海面水位上昇に寄与するもの。
- 少し早い応答 → **沿岸域で素早く一様**に変化
 - 担い手： 傾圧の沿岸捕捉波
 - 現象の例： 外洋の海面水位変化が海岸に到達したことによる沿岸の海面水位変化の伝播
- 遅い応答 → **沖合で分布**を持つ変化
 - 担い手： 傾圧の惑星波、渦や流れ場による輸送
 - 現象の例： 風による海洋内部の温度構造の変化
内部の温度/塩分による密度の違い

海洋に淡水が流入した場合、海面水位はどのようになるでしょうか？

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

- 海の上にある海氷(北極の海氷など)が解けても水位が変わらないことはよく知られています。
- 陸地の氷床等が融解し海洋に流れ込むと水位が上昇することもよく知られています。
- では、**グリーンランド氷床が融解した場合**、その海面水位の水平分布はどのようになるでしょうか？
 - 例えば日本にその海面水位上昇の直接の結果がみられるのはいつごろ？

1. 数時間程度
2. 数日程度
3. 数か月程度
4. 数年程度
5. 数十年程度
6. 数百年程度

答えは 2.
(数日程度)

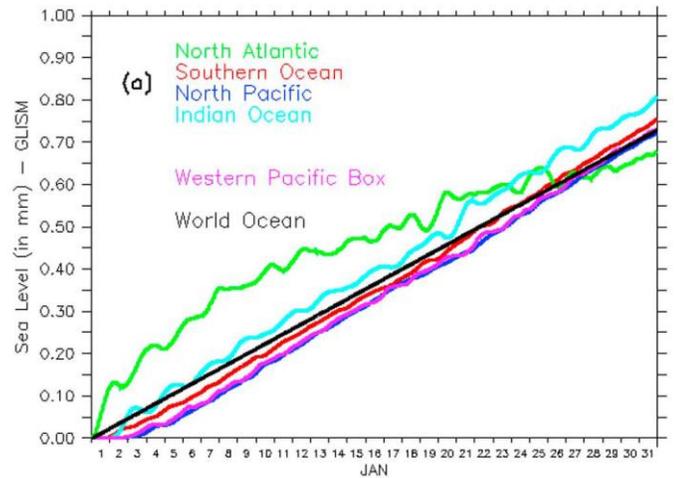
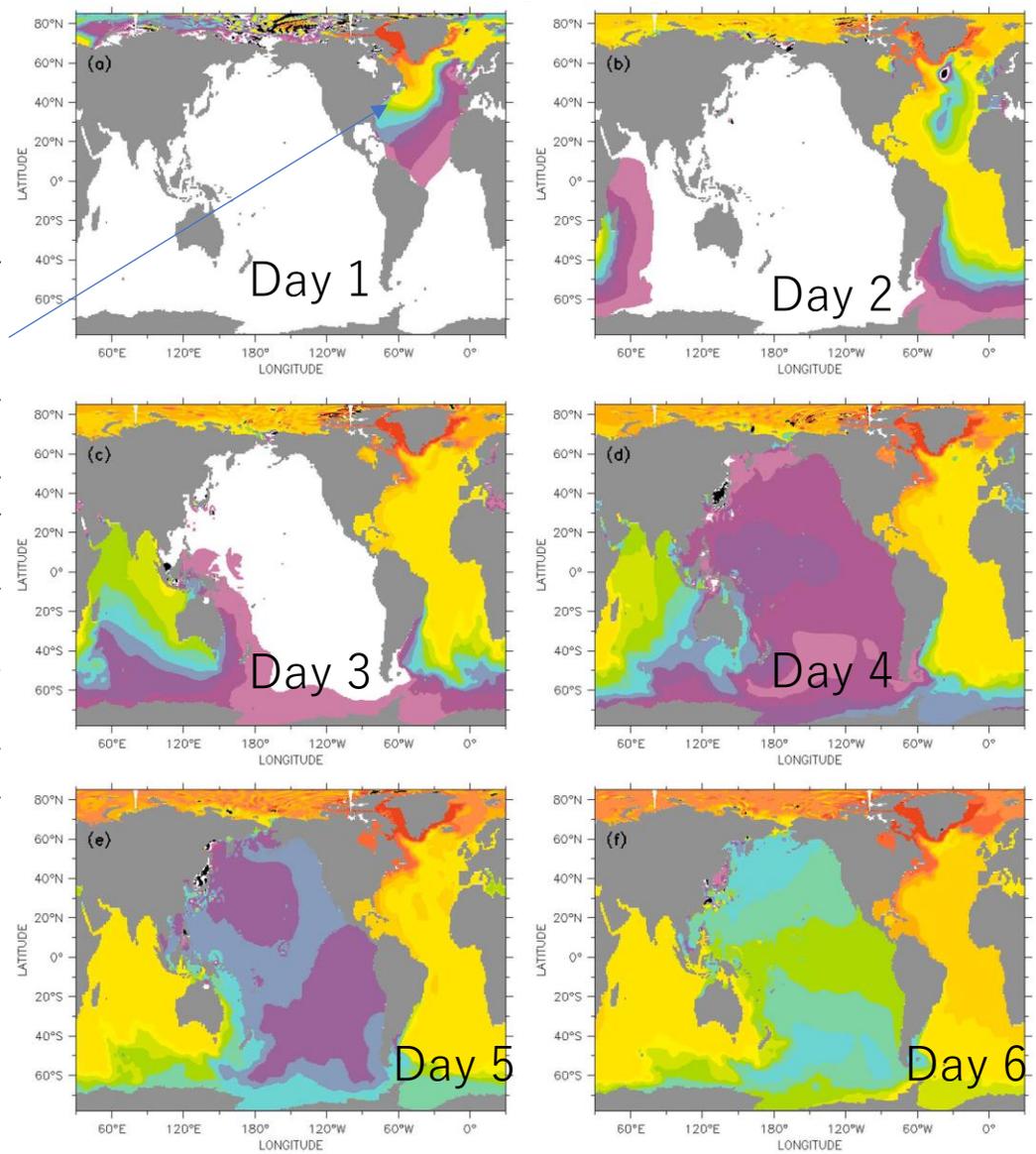


グリーンランド氷床がじわじわと融解したときの海面高度の上昇の空間分布

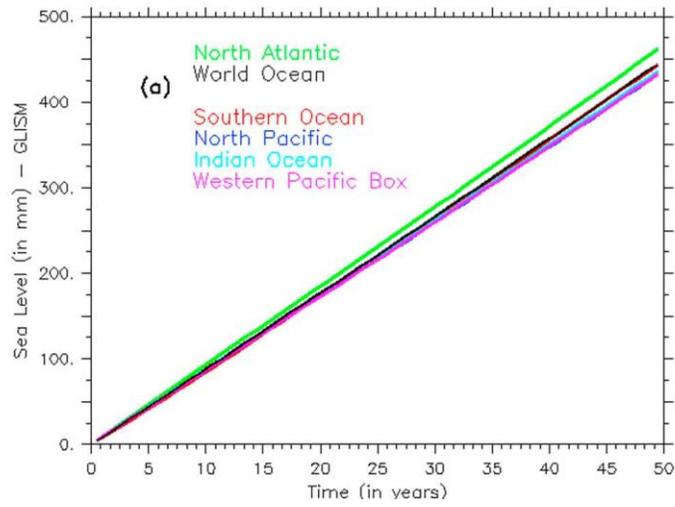
順圧の波により海面が応答する様子

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

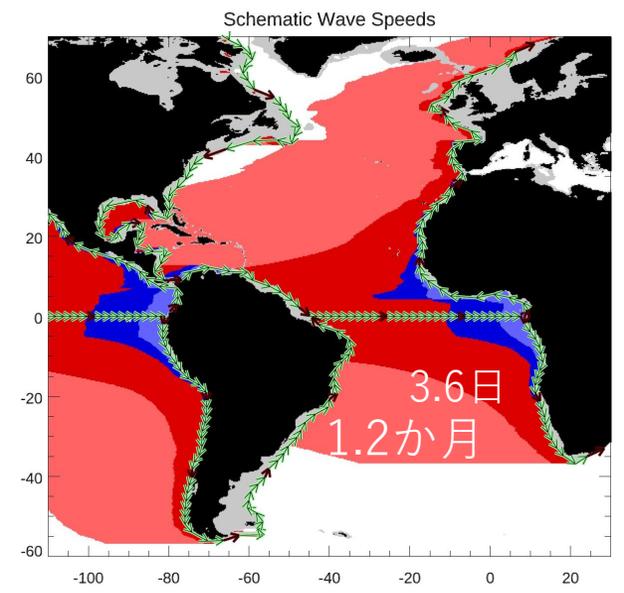
海岸に沿う順圧沿岸捕捉波



答えは 2.
(数日程度)



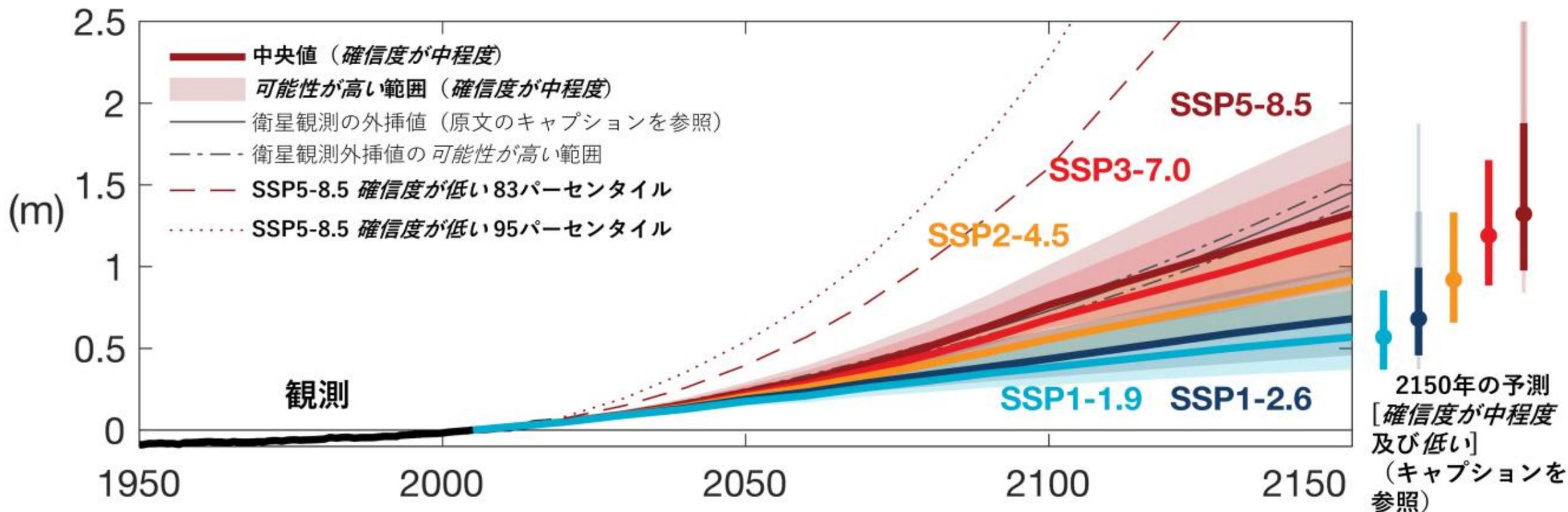
Lorbacher et al (2012)



**結局、どこで淡水が入ろうとも
(1ヶ月スケールでは)世界全体でほぼ一様！**

IPCCレポートによる世界平均海面水位上昇の予測

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

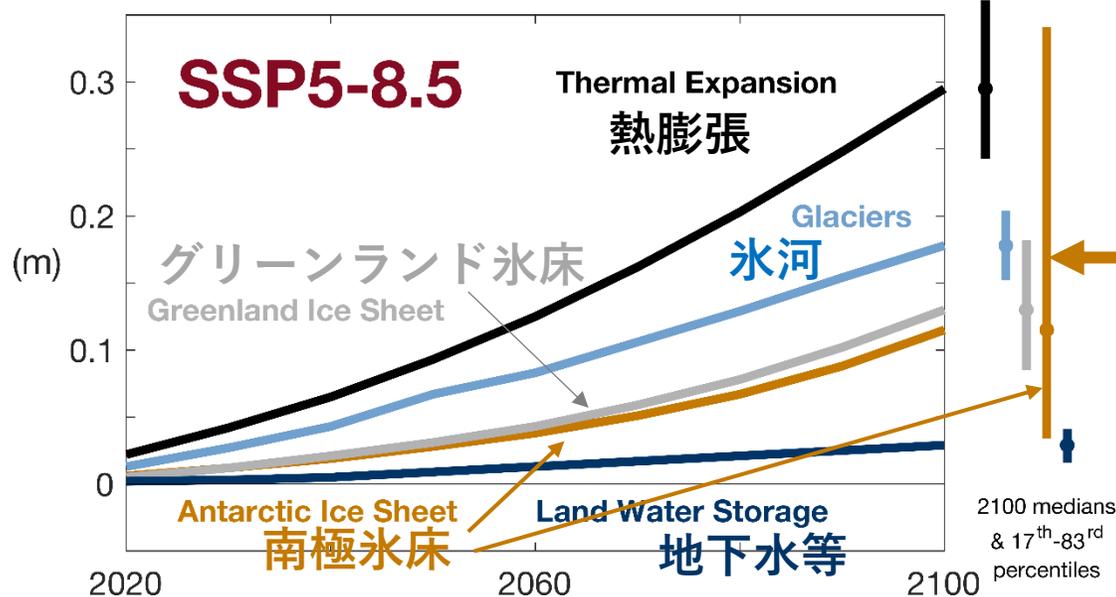
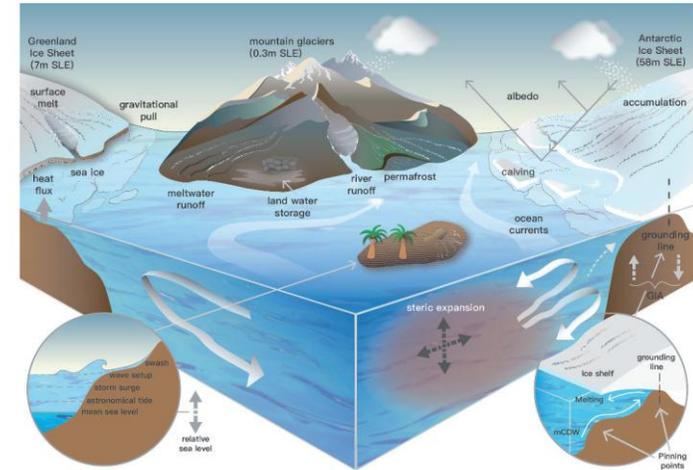
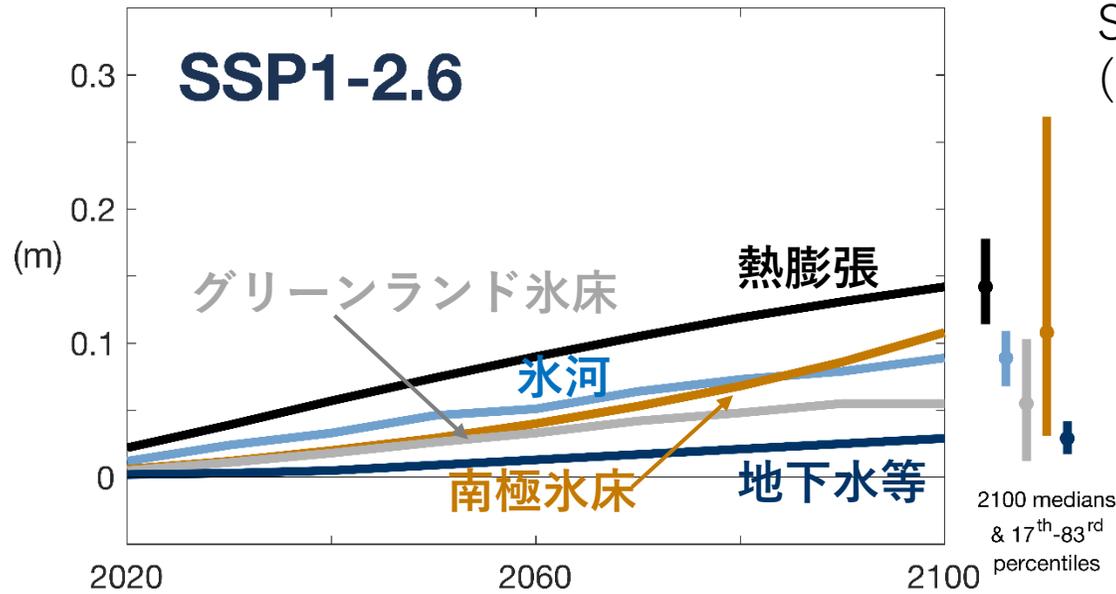


SSP5-8.5: 気候政策を導入しないシナリオ

SSP1-2.6: 気温上昇を2°C未満に抑えるシナリオ

全球平均の海面水位上昇見積もりの内訳

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

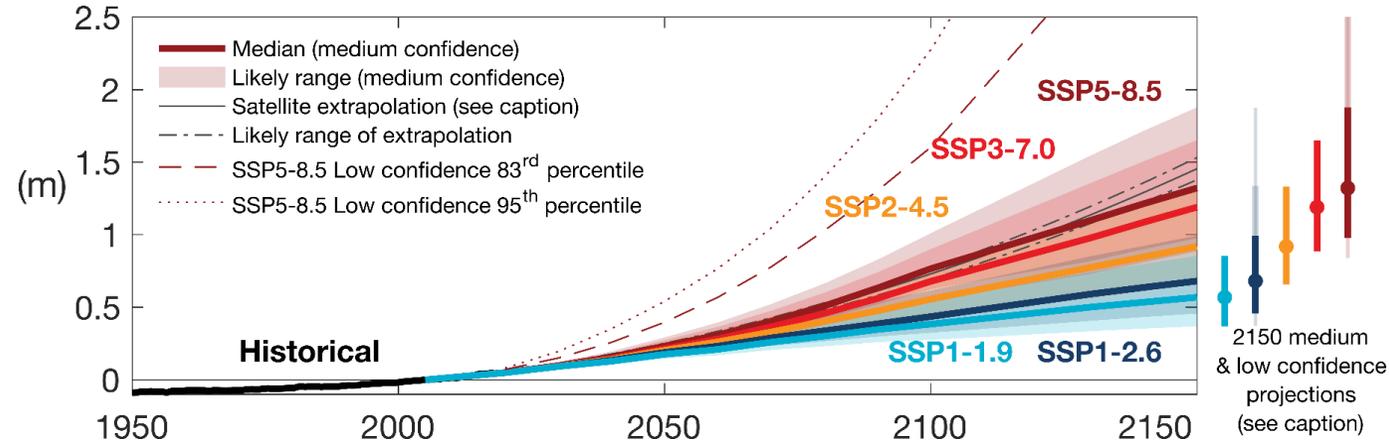


SSP5-8.5
(気候政策を導入しないシナリオ)

寄与が大きい順に、**熱膨張** > **氷河** > **グリーンランド氷床** > **南極氷床**の順ですが、確率は低いものの、南極氷床は大規模に融解する可能性があります。

海面水位上昇の見積もり

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

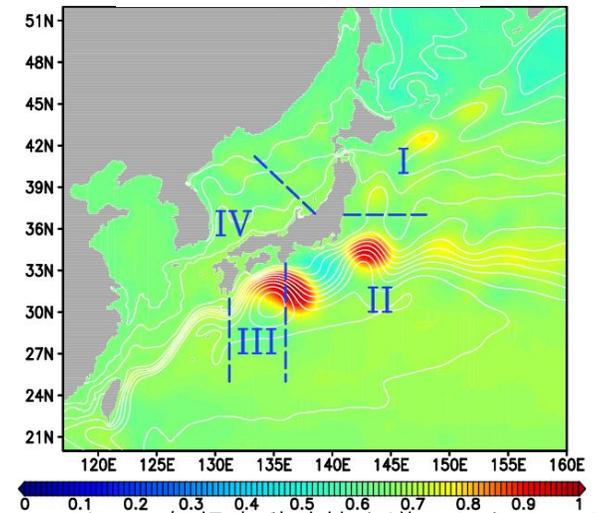


上の見積もりは、世界の海洋平均の「淡水流入」 + 「熱膨張」による海面水位の変化

一方、**海洋モデル単体で計算をする際に、温暖化による大規模な氷床の水を直接加えることを行わない場合には、**降水+河川流入が蒸発とおおよそ釣り合った状態の**世界平均の**水位上昇が**ほぼゼロ**で、(風と熱などに対する)地衡流応答による**地域性**がある海面水位の変化を計算します。

直接水を加えない場合でも、(数ヶ月より長いスケールでは)海面水位を単純に両者を足し合わせることで計算できます。

足して見積もった例
(日本の気候変動2025原稿より)



日本海域予測データにおける、気候変動政策を導入しないシナリオの21世紀末における20世紀末からの上昇幅の推定(m)

沿岸の海面水位変化と沖合の海面水位変化

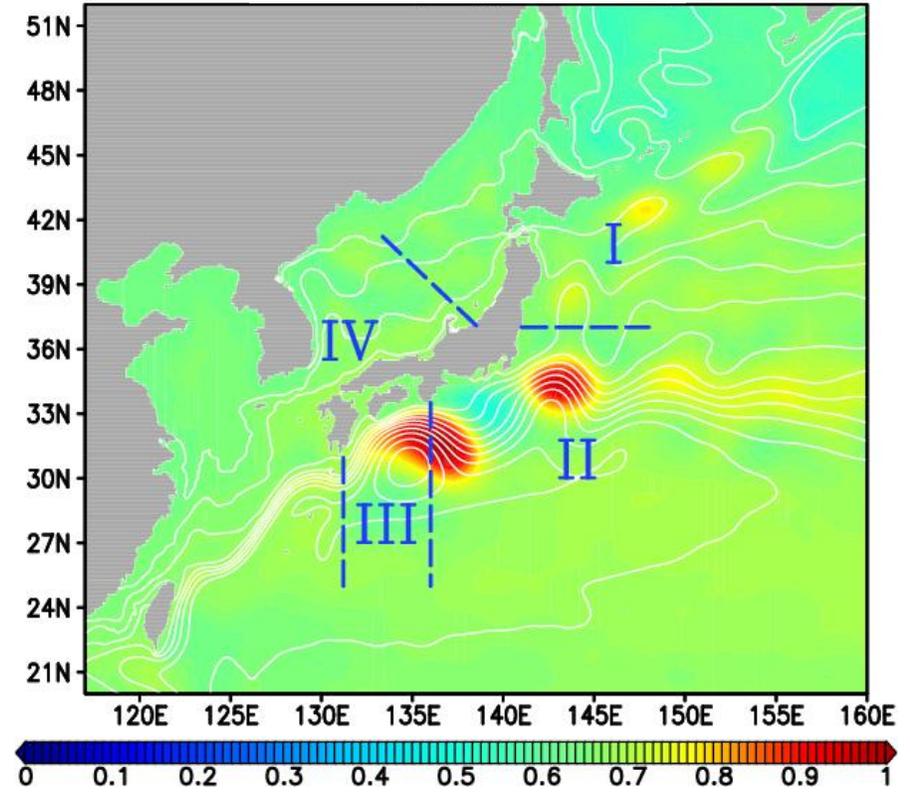
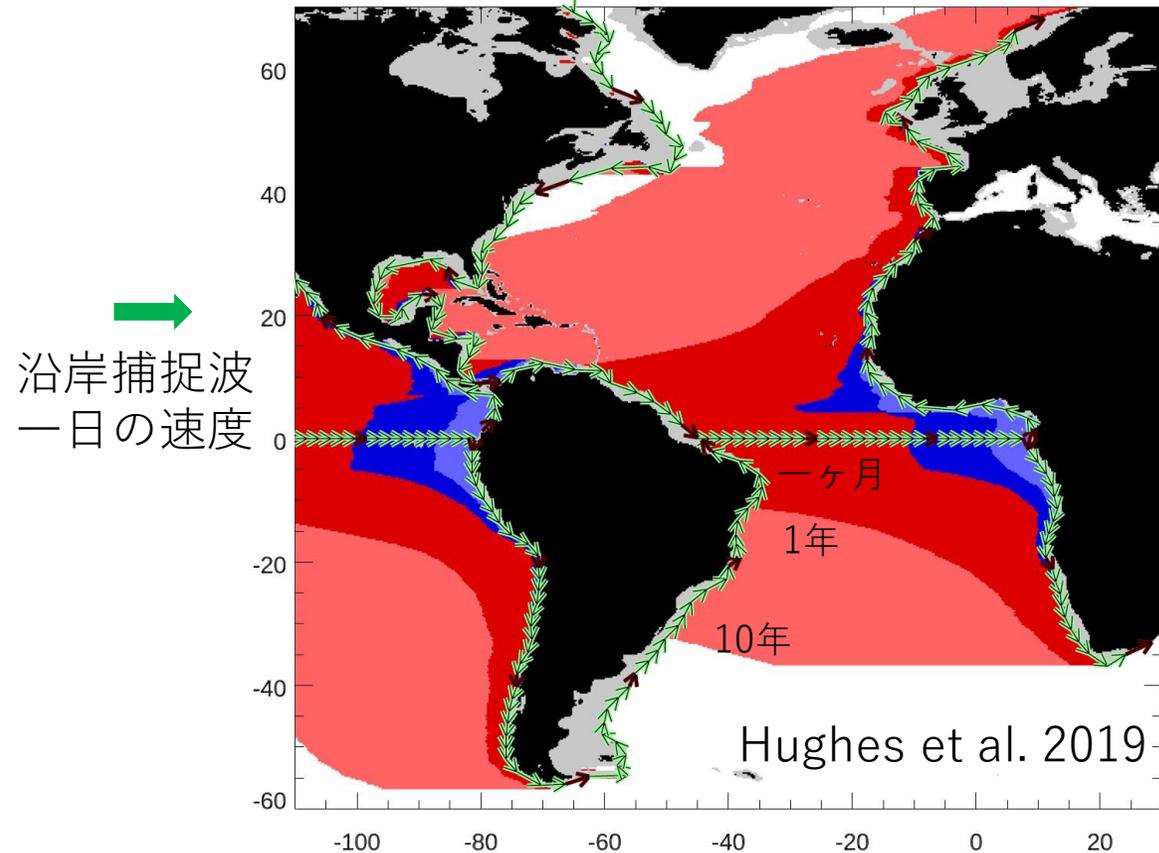
- 1. はじめに
- 2. 理論的背景
- 3. 海面水位変動の見積

• 沿岸の海面水位は沖合の海面水位とかなり異なります。

傾圧の波による応答は順圧応答より遅いのですが、それでも傾圧応答の中でも比較的速い沿岸捕捉波によって数年単位では海岸に沿って海面水位変化は平滑化されます。

傾圧の波による海面水位変動の応答に必要な時間

Schematic Wave Speeds



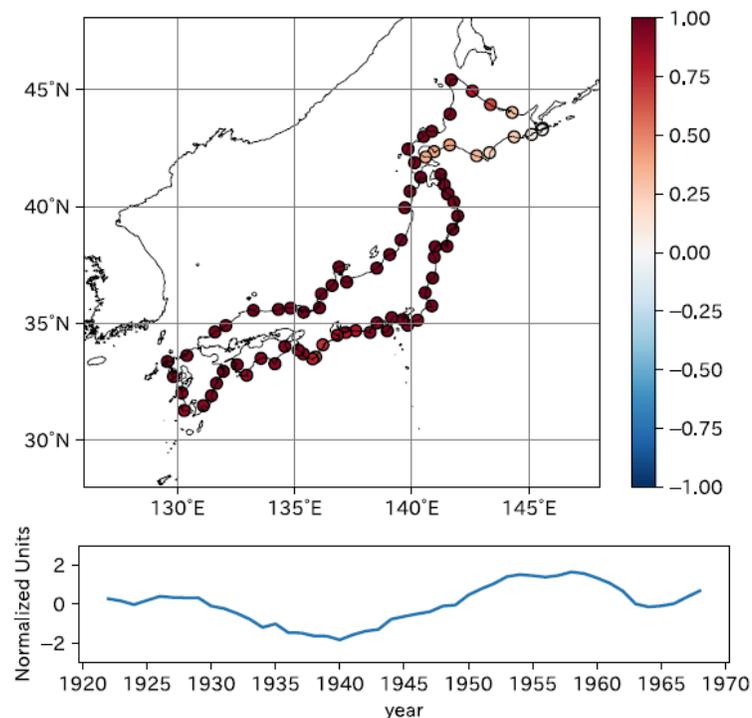
よくみると、この図でも沿岸の海面水位変化は沖合に比べて空間的な変化が小さくなっています。 20

日本沿岸の海面水位の変動のパターンについて

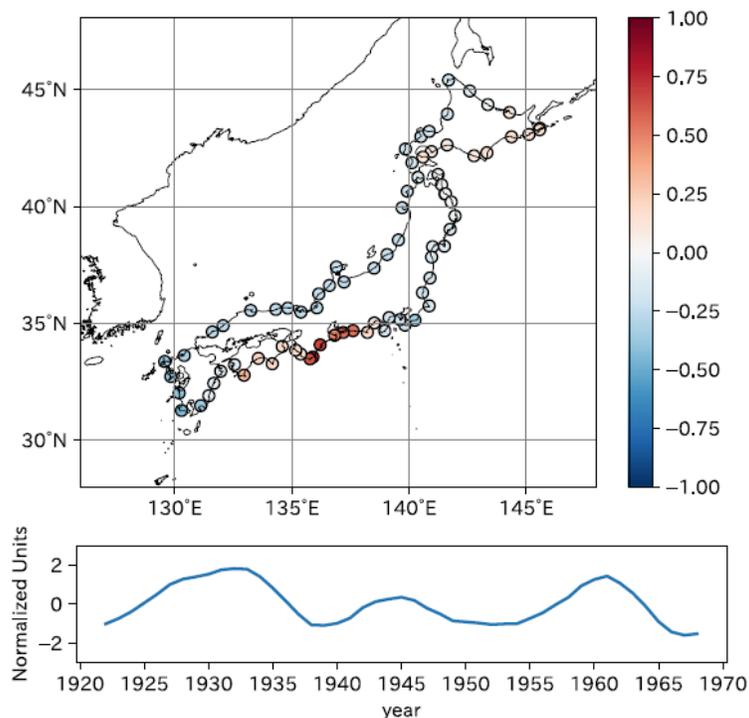
1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

海洋モデルを用いた20世紀の海面水位の再現実験について、沿岸水位における変動のパターンを調べると、**全体でほぼ一様の変動パターンが卓越していました(60-80%)**。

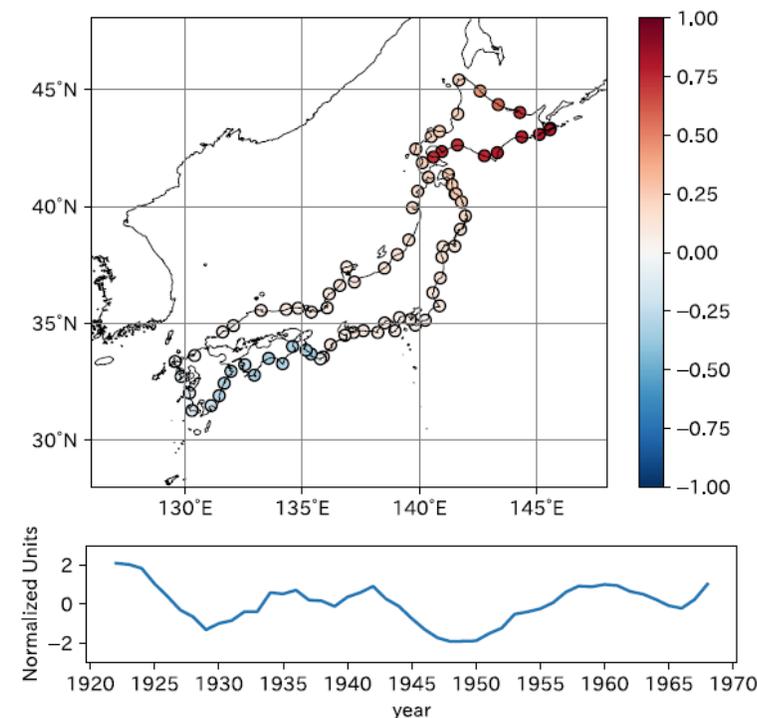
(a) 変動パターンA (80.7%)



(b) 変動パターンB (12.1%)



(c) 変動パターンC (4.3%)



Nakano et al. (2023, J. Oceanogr.)

ほぼ一様な変動パターンよりも振幅は小さいのですが、沿岸の海面水位変動の地域差を作り出す要因の一つとして、日本に大きな影響を与える**黒潮**との関係を見ていきます。

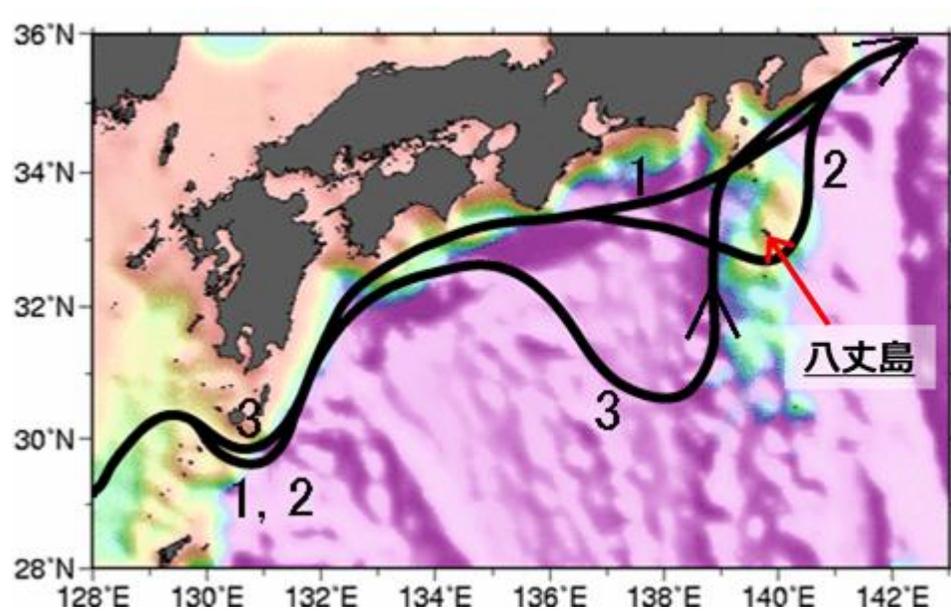
黒潮の流路

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

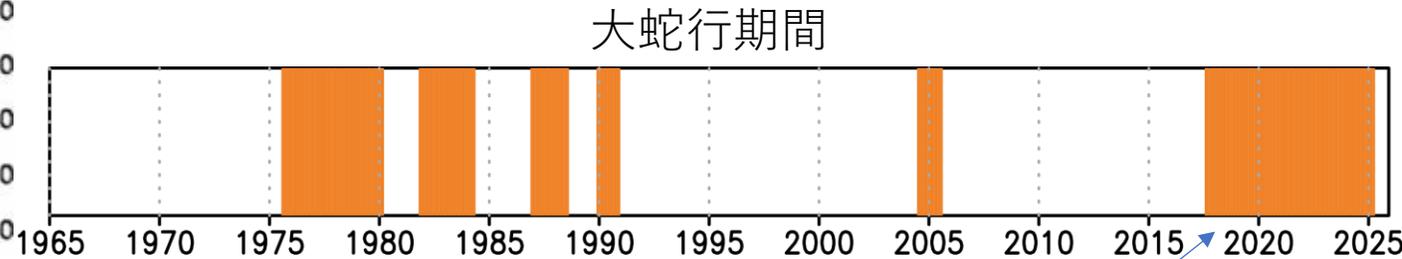
黒潮には、大きく分けて2種類の安定した流路のパターンがあります。

- 「大蛇行流路」(図の3)、
- 「非大蛇行流路」(図の1と2)
 - 「非大蛇行離岸流路」(図2)
 - 「非大蛇行接岸流路」(図1)

黒潮の北側より南側の方がおおよそ**1 m**ほど海面水位が高くなっています。そのため、黒潮の流路により日本の沿岸の海面水位が変わります。



- 1 : 非大蛇行接岸流路
- 2 : 非大蛇行離岸流路
- 3 : 大蛇行流路

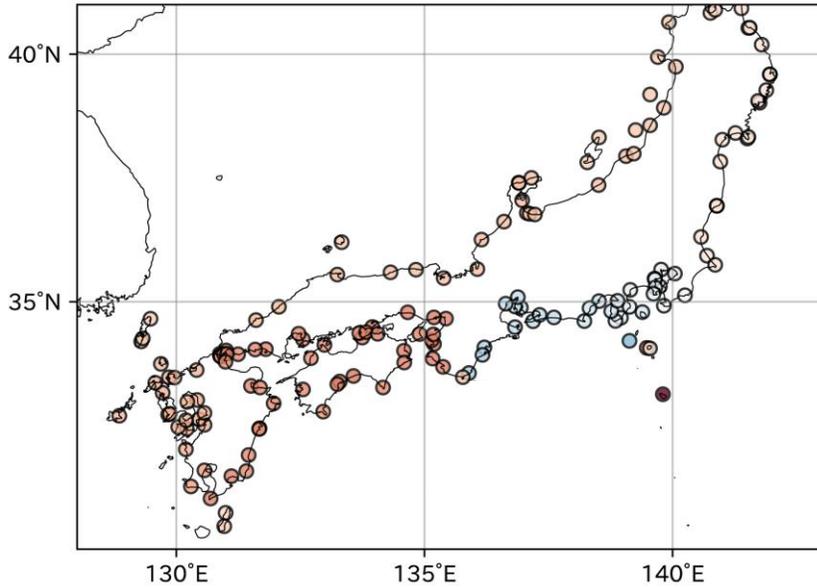


2017/8 から 2025/4 の7年9か月

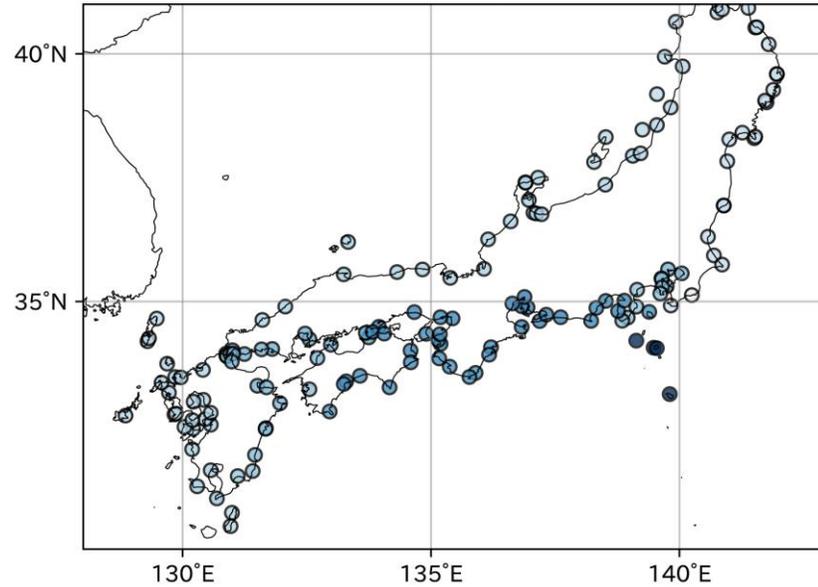
黒潮の流路による沿岸の海面水位変動

- 1. はじめに
- 2. 理論的背景
- 3. 海面水位変動の見積

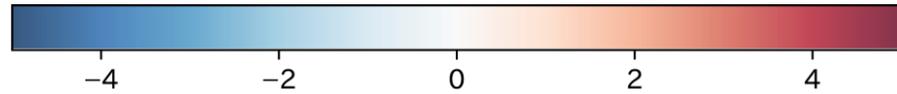
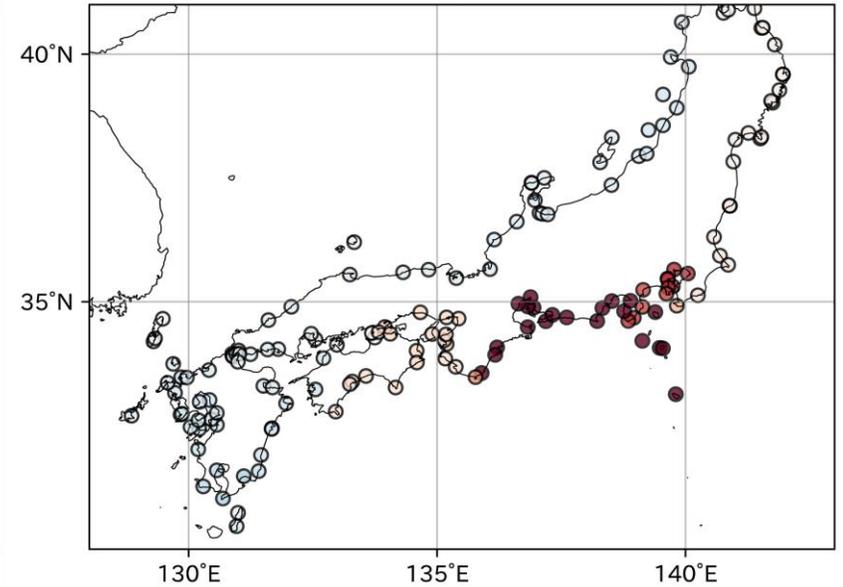
非大蛇行接岸流路 (図の1)



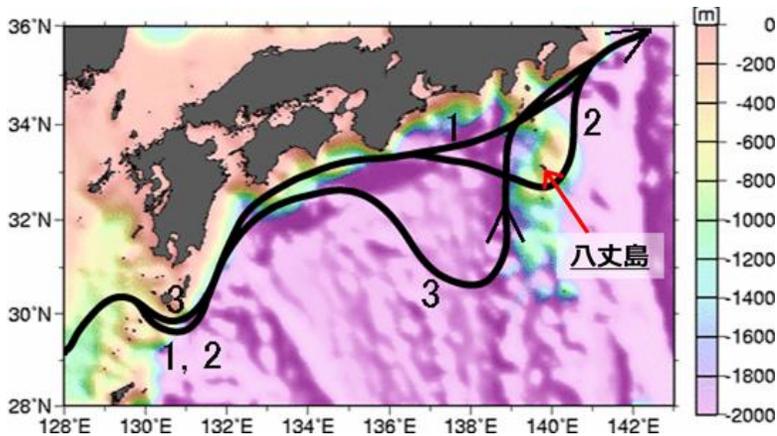
非大蛇行離岸流路 (図の2)



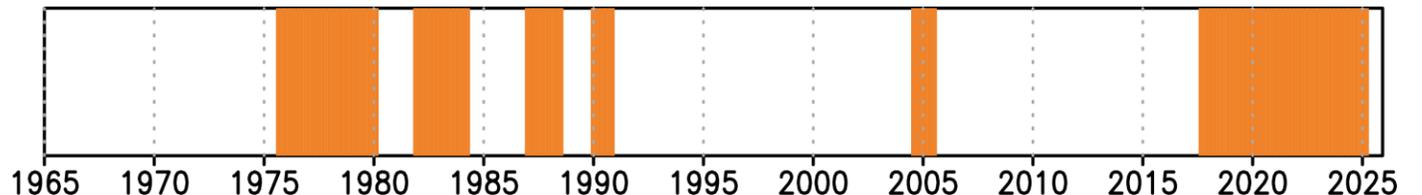
大蛇行流路 (図の3)



単位は cm



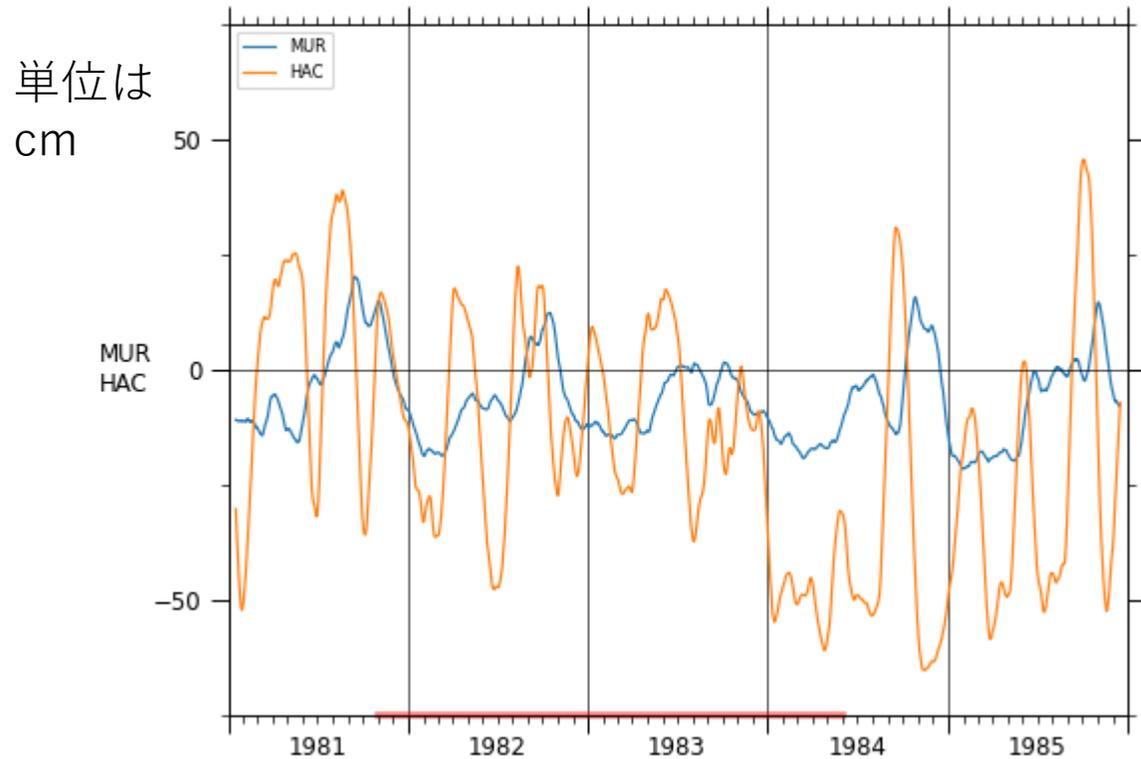
大蛇行期間



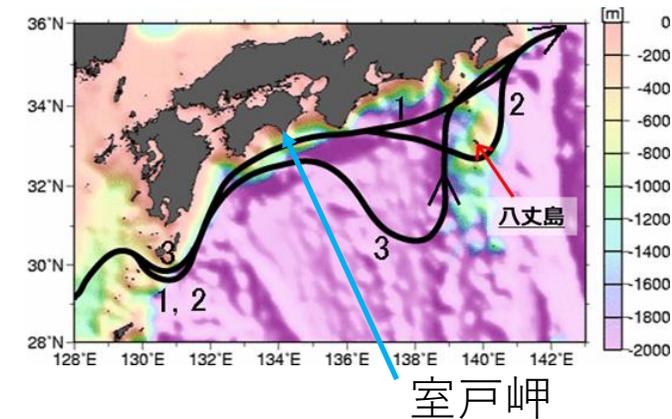
黒潮の流路による沿岸と島の海面水位変動の違い

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

日本列島の沿岸でない島では
黒潮の変動の影響を直接受けます。 (黒潮を挟んで1mほど水位差があります。)



オレンジ色 (八丈島)
青色 (室戸岬)



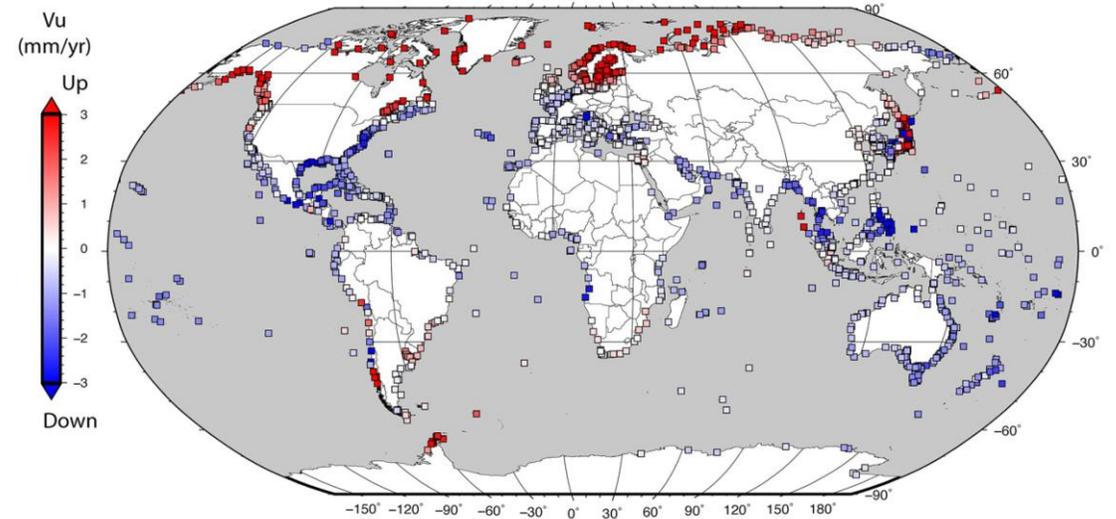
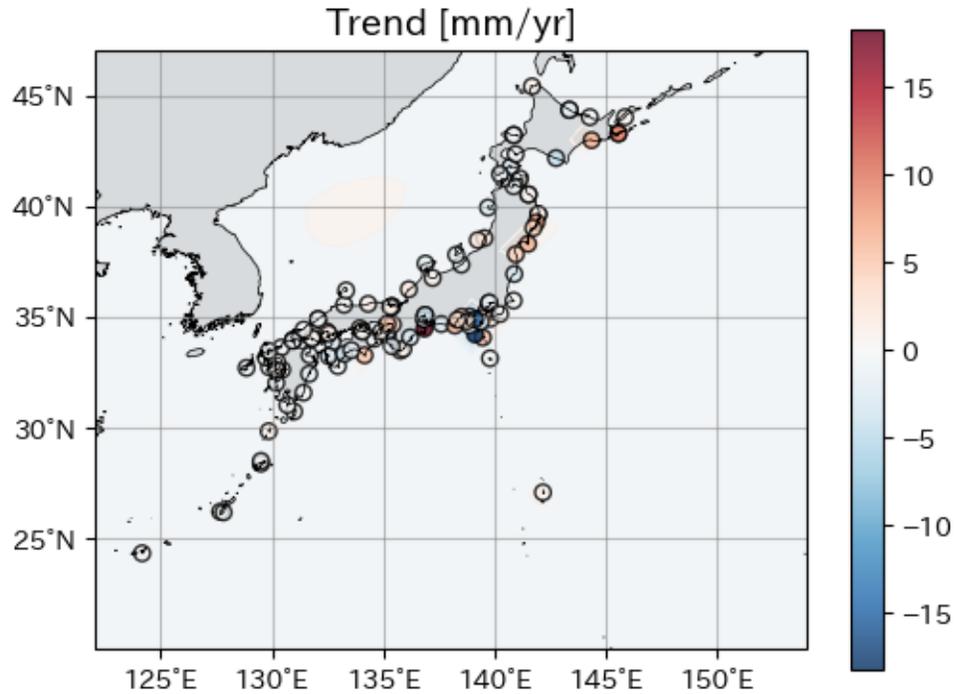
東京大学大気海洋研究所
「潮位データを用いた黒潮モニタリング」
の各潮位データの図示を使用。
30日の移動平均を使用。

大陸や列島は、沿岸捕捉波により、海面水位変動が抑えられて**守られている**とも言えます。

地殻変動の影響

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

日本付近では海面水位変動に比べて、**地殻変動**の大きさが**無視できない大きさを持ちます**。長期間での日本沿岸での地域性は場所によってはむしろこちらの影響が大きい可能性があります。



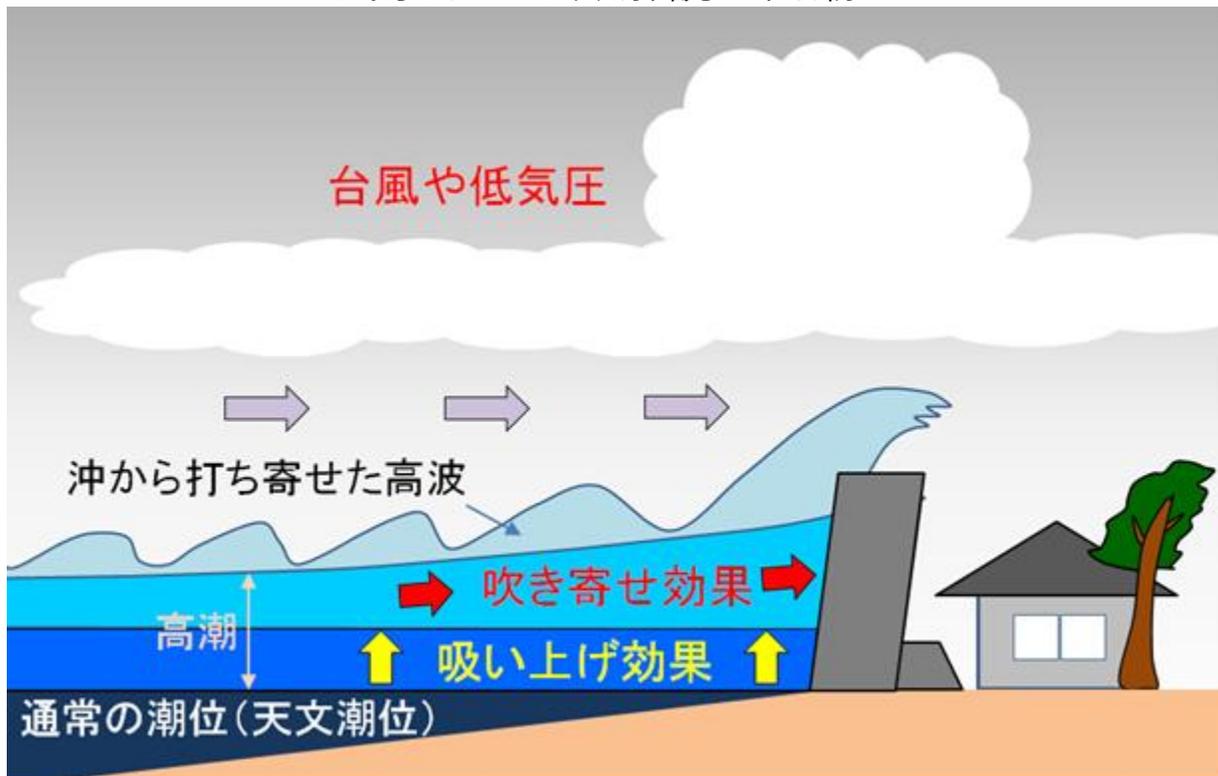
スカンジナビア半島を中心として地殻が上昇しているなどの大きなパターンは氷期の氷床が消失したことによる。一方、**日本付近は非常に複雑なパターン。**

IPCC(2021) 図9.26 のVertical Land Motion (VLM) の図の日本付近の拡大図に相当する図を、データソースから長期変化傾向を見積もり作成した。VLMは時間変化しないと仮定されている。

浸水対策ではさらにより短い時間スケールの要素を考慮する必要があります（例：高潮）

1. はじめに
2. 理論的背景
3. 海面水位変動の見積

気象庁 知識解説 高潮



台風や発達した低気圧が通過するとき、海面水位が大きく上昇することがあり、これを「高潮」といいます。

吸い上げ効果

台風や低気圧の中心では気圧が周辺より低いため、気圧の高い周辺の空気は海水を押し下げ、中心付近の空気が海水を吸い上げるように作用する結果、海面が上昇します。

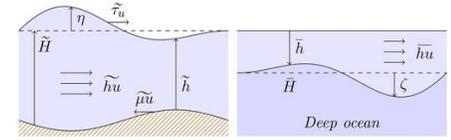
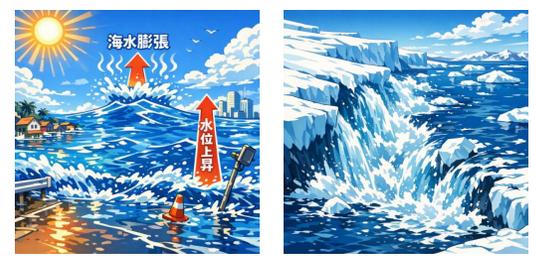
吹き寄せ効果

台風や低気圧に伴う強い風が沖から海岸に向かって吹くと、海水は海岸に吹き寄せられ、海岸付近の海面が上昇します。

今回の話は、短期間の気象現象を含まない海面水位上昇の長期変動について行いました。

まとめ

- (沿岸)水位上昇に対する理論の概要を説明しました。
- 海面水位の長期変動は以下の3つに大きく分かります。



(A, 場所によってはC) がBよりも大きくなります。

A) (数ヶ月では)全球一様とみなしてもよいもの (これが最大の寄与)

2006-2018で年間約3.7mm上昇。日本沿岸水位の上昇もほぼ同程度。

- 淡水供給 (南極及びグリーンランドの氷床の融解)
- 水温上昇の全球平均の寄与

青色： 海洋モデルでは表現できない
緑色： 海洋モデルで表現できる

B. 局所的なもの

- 流れ場の変動などに伴うもの(例えば、黒潮流路変動)
- 沿岸捕捉波による平滑化により、沖合よりも地域分布は小さくなります。

C. その他

- 地殻変動 (日本ではAやBと大きさが同程度以上の場合があります)
- 浸水対策ではより短いスケールの現象の影響を調べる必要があります。

