6．海洋風成循環と海面高度

見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

本日の内容

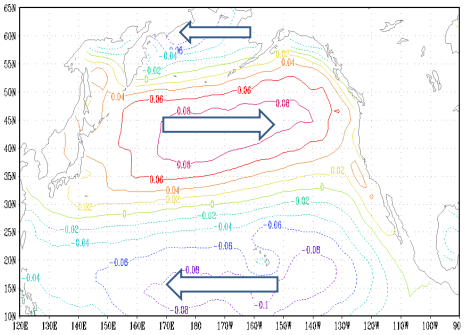
- 前回学んだ風応力は，海洋に循環をもたらす最も主要な要因であり，それによる循環を風成循環という．
- ただし，風応力が直接引き起こすエクマン流は，量的には風成循環のわずかな部分でしかなく，地衡流成分が主である．黒潮や親潮も地衡流として流れている．
- この重要な風成循環がどうして生じるのかを，今回学ぶ．
- また関連して，地球温暖化による海面上昇の基礎を学ぶ．

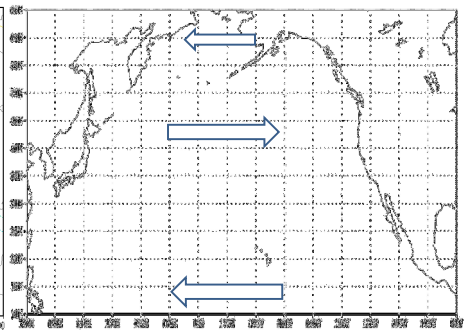
エクマン流と地衡流の関係の仮説

- 前回学んだエクマン流が，どう地衡流と関係するのか？
- 風→エクマン流→地衡流という因果関係で考えるのがよいだろう．
- 地衡流は，圧力場つまり海面高度分布が決まれば決まる．
- 海面高度は，流れの収束発散で決まる．
- エクマン流が収束するなら，海面が上昇し，高気圧性循環が，
- エクマン流が発散するなら，海面が下がって，低気圧性循環が生じるのでは？

簡単なアイディアでの風応力がもたらす地衡流成分の循環

年平均東西風応力(N/m^2)



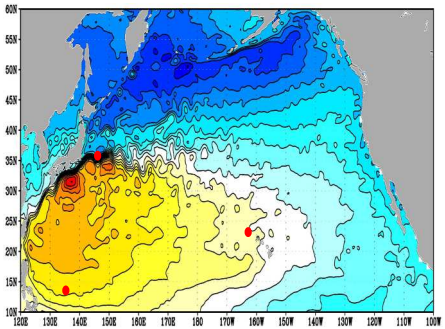


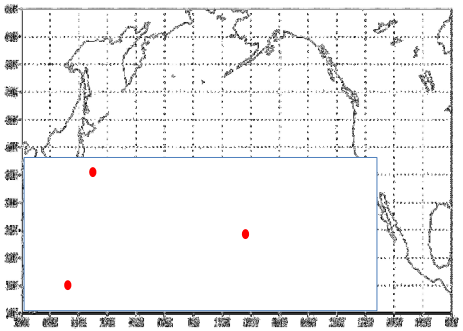
- 風応力が，エクマン流を駆動し，その収束・発散が海面の上がり・下がりを作り，対応する地衡流が生じると仮定する．エクマン流を矢印で，海面高度を等値線で，地衡流を別な矢印で右図に書き込め．

実際の海面高度と海流分布

左下の図の海面高度の分布から，40N以南について，海面高度の概形を等値線で，•の点での流速をベクトルで，右下の図に描け．流速ベクトルの大きさは，流速の大きさを表すこと．ただし流速を計算する必要はなく，だいたいの感覚で描くこと．なお，表面の地衡流と海面高度とは，「地衡流は，海面が高い方を右に見て流れ，その強さは海面高度の勾配に比例する（fが一定なら）」という関係がある．式で表せば既に学んだ通り次の通り：　$fu = -gh_y$，$-fv = -gh_x$

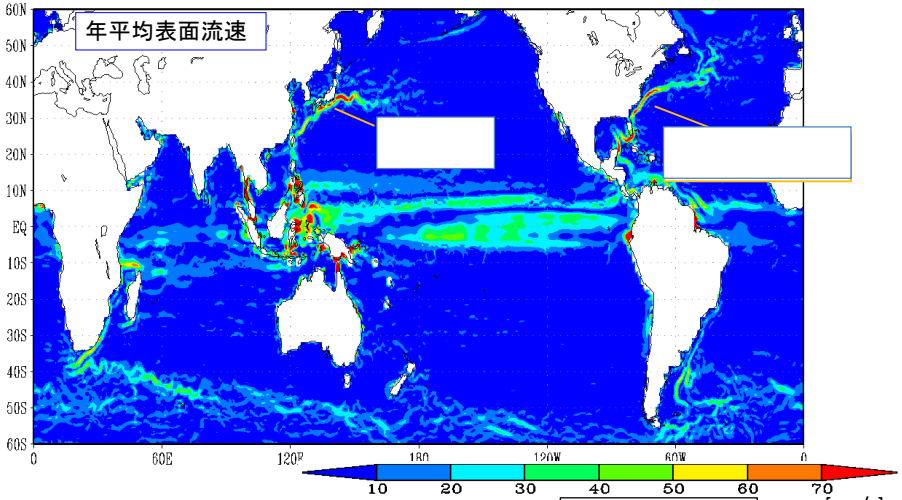
2010年の平均海面高度





等値線は10 cm間隔.

太洋の西に強い流れ



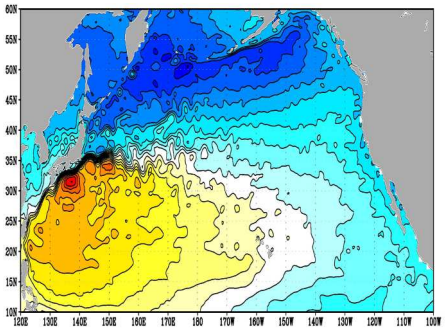
- 大洋の西部に極向きに向かう強い海流：

海流の可視化アニメーション：
https://www.youtube.com/watch?v=KhB9zLlN6BQ&ab_channel=CopernicusMarineService　1:47-2:06

西岸境界流は内部領域流の補償流

- 亜熱帯循環において，西岸境界付近以外の　　では，南北流は全体に　　向き．
- 西岸境界流は，その補償流として，　　向きに流れる．
- 内部領域の南北流の流量は，これまで学んだ枠組みで求めることができる．

2010年の平均海面高度



等値線は10 cm間隔.

コリオリパラメータの緯度変化とスウェルドラップ流

簡単な仮説でダメだったのは．．．

- コリオリパラメータの緯度変化，が海面高度分布に及ぼす影響を無視したため

$$\beta \equiv \frac{df}{dy} > 0$$ 第4回スライド14で登場

- したがってコリオリ・パラメータは南で□く北で□い．

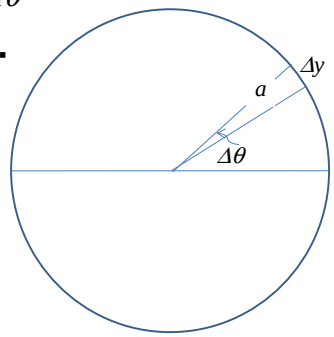
コリオリの微分=β

- コリオリ・パラメータのy微分を慣例としてβで表す　$f = 2\Omega \sin\theta$

$$\beta = \frac{df}{dy} = 2\Omega \frac{d}{dy}\sin\theta = 2\Omega \frac{d\theta}{dy}\frac{d}{d\theta}\sin\theta$$

ここで$\Delta y = a\Delta\theta$ を用いると，1・2行の計算の後に次式を得る

$$\beta = \square \qquad (6.1)$$



スウェルドラップ流

風応力を考慮した定常1.5層モデルで，風応力の回転成分が南北流速(したがって流量も)と海面高度の東西勾配とを，決定することを示そう．

$$\cancel{u_t} - fv = -g'h_x + \tau^x/(\rho_0 H) \quad ①$$

$$\cancel{v_t} + fu = -g'h_y + \tau^y/(\rho_0 H) \quad ②$$

$$\cancel{h_t} + H(u_x + v_y) = 0 \quad ③$$

- クロス微分(∂②/ ∂x – ∂①/ ∂y)の結果に③を代入して，$\beta = df/dy$ を使うと（草稿用紙に数行の式展開が必要），

$$\beta vH = \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial}{\partial x}\square - \frac{\partial}{\partial y}\square\right) \qquad (6.2)$$

- したがって，南北流 は風の回転成分 □ =curl($\vec{\tau}$) □ という）で決まる．この流れを，□ という．

風応力のカールは東西風応力が支配的

- 風応力に関しては，東西成分>>南北成分，かつ，南北スケール<<東西スケールなので，風応力カールは次のように近似できる

$$\frac{\partial}{\partial x}\tau^y - \frac{\partial}{\partial y}\tau^x \sim \square \qquad (6.3)$$

- したがって，ある緯度でのスウェルドラップ流量の東西積分は

$$\int_{x_1}^{x_2} vHdx \sim \square \qquad (6.4)$$

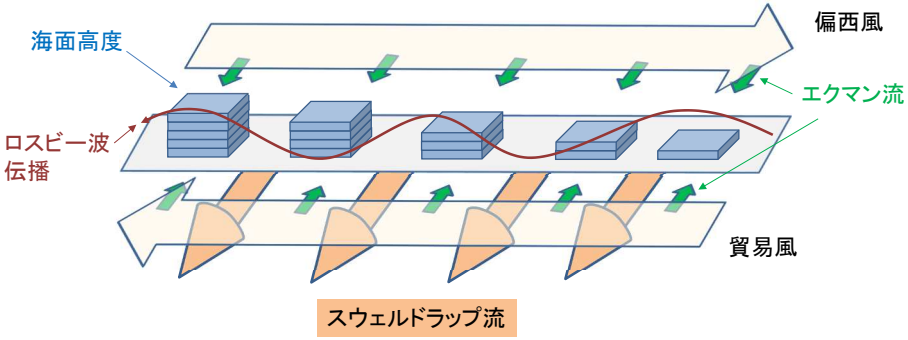
- であり，6枚目のスライドから北太平洋の亜熱帯循環では，$\partial\tau^x/\partial y >$ □ であるので，スウェルドラップ流は □ 向きである．
- 南北流はほとんど地衡流なので（エクマン流は小さい），海面高度の東西微分は(6.1)と①，そして(6.2)より

$$h_x \sim \square = \square\, \tau^x \qquad (6.5)$$

- となるので，海面高度は西に向かって □ なる．

海面高度構造の力学的解釈

- なぜこうなるかというと，エクマン流の水平収束で海面水位を高くする傾向が，ロスビー波で西に伝播するためである．西に動くコンベヤーベルトにいたるところで荷物を載せれば，積み重なって西で高くなることと同じ．

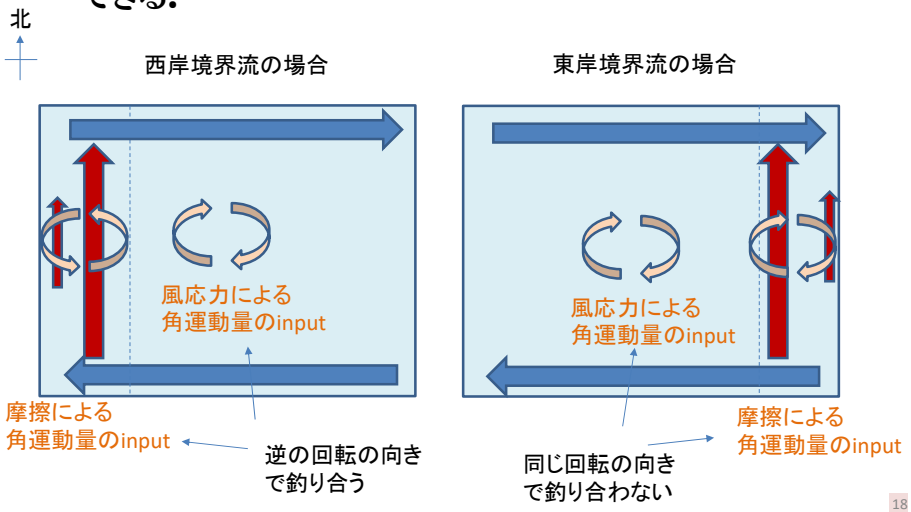


流量収支で考える黒潮

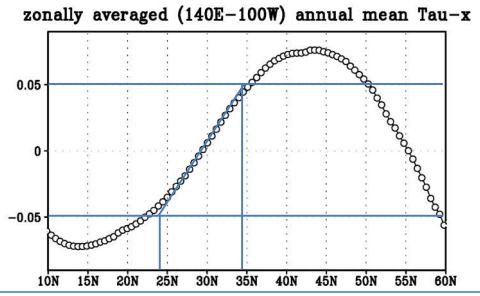
- 亜熱帯循環の海洋内部領域では，地衡流は南に流れる．
- この内部領域の南下流量は，大洋の西岸付近で，北に戻る．この流れが北太平洋では，[　　]である．
- また亜熱帯循環の海洋内部領域では，南下流に伴って，海面高度が西向きに[　　]なる．一方，西岸境界では，西向きに海面高度が[　　]なる．

角運動量収支で考える黒潮

- 流量の収支だけでは，西岸に補償流が生じる理由にならないが，[　　]の収支から西岸に生じることを理解できる．



黒潮流量を風応力カールから求めよう

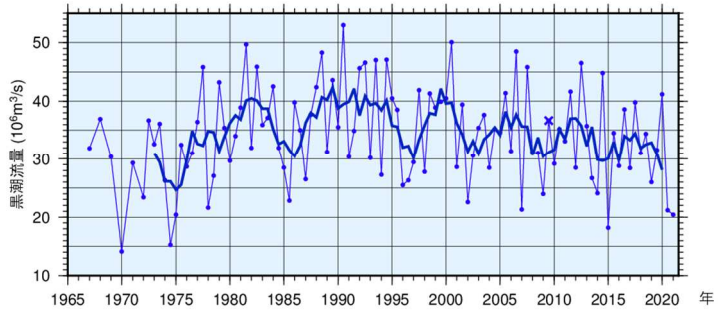


Q.　風応力カールのよい近似である，東西風応力の南北微分が最も強いのは30N付近(図より緯度11度で 0.1 N/m^{2}の変化)，そこでは，β=2×10^{-11} m^{-1}s^{-1}，緯度一度あたりの距離は110 km，経度一度あたりの距離は95 km，太平洋の内部領域の東西範囲が140°E～120°Wとして，黒潮流量を求めよう．

A. $\int_{140E}^{120W} vHdx \sim$

復習課題
次回提出してもらいます

風応力から求めた流量を観測と比較

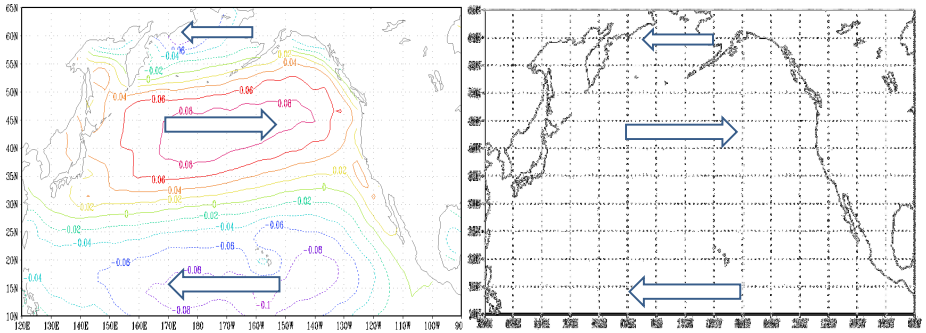


東経137度線を横切る冬季・夏季の黒潮の流量の経年変化（1967年冬季～2021年冬季）
気象庁の海洋気象観測船による冬季と夏季の観測に基づいて深さ約1250mを基準とした地衡流量を計算し、本州南方における東向き流量からその南側の西向き流量（黒潮反流）を差し引いた正味の東向きの流量を黒潮の流量としています。細線は観測値、太線はその3年移動平均を表します。2009年夏季（図中'x'）は、気象庁の海洋気象観測船以外のデータも利用しています。詳細については「2009年夏季の東経137度線の解析」をご覧ください。
解析には、2017年の診断（2018年5月発表）より、2018年3月に公開した「東経137度定線の長期解析結果」を使用しています。そのため、2016年の診断（2017年5月発表）以前の数値と一部異なります。

http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/b_2/kuroshio_flow/kuroshio_flow.html
2021年11月05日アクセス

正しい理解に基づく風応力がもたらす地衡流成分の循環

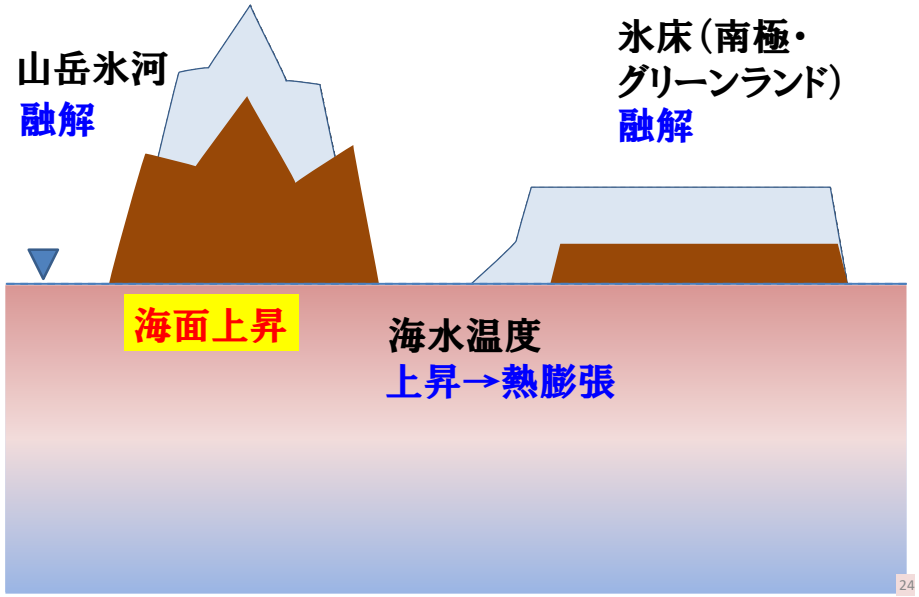
年平均東西風応力(N/m²)

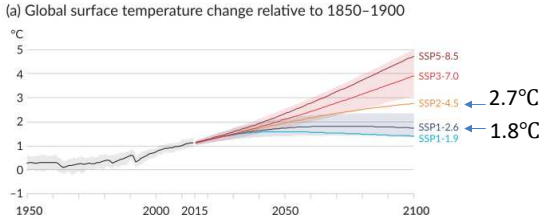


- 風応力が，エクマン流を駆動し，その収束・発散とコリオリ力の緯度変化の効果が（ロスビー波の存在が）海面の上がり・下がりを作り，対応する地衡流が生じると仮定する．エクマン流を矢印で，海面高度を等値線で，地衡流を別な矢印で右図に書き込め．

海洋循環変化と海面上昇

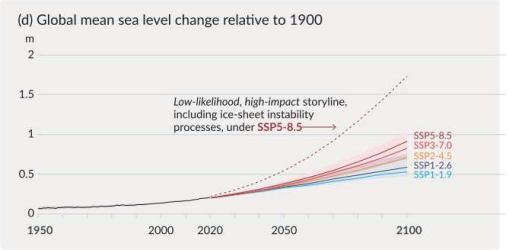
Global Sea Level Rise





2021/10/28報道：国連環境計画(UNEP)が，各国の従来目標(COP26前)では，今世紀末までの気温上昇が2.7 ℃になる恐れがあると公表．

2021/11/5報道：国際エネルギー機関(IAEA)がCOP26での新たな温室効果ガス削減の各国目標が
完全に実行されれば気温上昇は1.8℃に抑えられると分析．



これらの気温上昇に対応するシナリオはSSP1-2.6, SSP2-4.5.

IPCC第六次評価報告書：政策決定者のための要約

1995-2014年基準の海面上昇 (IPCC AR6 WGI)

Final Government Distribution　　Chapter 9　　IPCC AR6 WGI

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 *Low Confidence*
Total (2030)	0.09 (0.08-0.12)	0.09 (0.08-0.12)	0.09 (0.08-0.12)	0.10 (0.08-0.12)	0.10 (0.09-0.12)	0.10 (0.09-0.15)
Total (2050)	0.18 (0.15-0.23)	0.19 (0.16-0.25)	0.21 (0.18-0.26)	0.22 (0.19-0.28)	0.23 (0.20-0.30)	0.24 (0.20-0.40)
Total (2090)	0.35 (0.26-0.49)	0.39 (0.30-0.54)	0.48 (0.38-0.65)	0.56 (0.46-0.74)	0.64 (0.52-0.83)	0.71 (0.52-1.31)
Total (2100)	0.38 (0.28-0.55)	0.44 (0.33-0.61)	0.56 (0.44-0.76)	0.68 (0.55-0.90)	0.77 (0.63-1.02)	0.88 (0.63-1.61)

- 1995-2014年基準の海面上昇は，SSP1-2.6シナリオでは□cm，SSP2-4.5シナリオでは□cm．
  - シナリオの意味については後の回に説明します．
- 2017/10/24の静岡新聞によると、2017年の台風21号で高潮被害が広まったのは、黒潮大蛇行で20-30 cm水位が高くなっていたため。たった20-30 cm!

1995-2014年基準の2100年までの海面上昇の内訳(IPCC AR6 WGI)

Final Government Distribution　　Chapter 9　　IPCC AR6 WGI

		SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 *Low Confidence*
海水熱膨張	**Thermal expansion**	0.12 (0.09-0.15)	0.14 (0.11-0.18)	0.20 (0.16-0.24)	0.25 (0.21-0.30)	0.30 (0.24-0.36)	0.30 (0.24-0.36)
陸氷融解	**Greenland**	0.05 (0.00-0.09)	0.06 (0.01-0.10)	0.08 (0.04-0.13)	0.11 (0.07-0.16)	0.13 (0.09-0.18)	0.15 (0.09-0.59)
	Antarctica	0.10 (0.03-0.25)	0.11 (0.03-0.27)	0.11 (0.03-0.29)	0.11 (0.03-0.32)	0.12 (0.03-0.34)	0.19 (0.02-0.56)
	Glaciers	0.08 (0.06-0.10)	0.09 (0.07-0.11)	0.12 (0.10-0.15)	0.16 (0.13-0.18)	0.18 (0.15-0.21)	0.17 (0.12-0.22)
地下水放出	**Land Water Storage**	0.03 (0.02-0.04)	0.03 (0.02-0.04)	0.03 (0.02-0.04)	0.04 (0.02-0.05)	0.03 (0.02-0.04)	0.03 (0.02-0.04)
	Total (2100)	0.38 (0.28-0.55)	0.44 (0.33-0.61)	0.56 (0.44-0.76)	0.68 (0.55-0.90)	0.77 (0.63-1.02)	0.88 (0.63-1.61)
熱膨張(%)		32	31	35	37	39	34
陸氷融解(%)		61	59	55	56	56	58

熱膨張が□　陸氷融解が□の寄与.

2007 OECD report

OECD　RMS　University of Southampton

RANKING OF THE WORLD'S CITIES MOST EXPOSED TO COASTAL FLOODING TODAY AND IN THE FUTURE

Executive Summary

Economic damages are evaluated.

#17 Nagoya, Japan

$624 billion in exposed asses ts

and an unknown population are threatened by a 1.6 foot rise in sea level by 2070. The average elevation is 46 feet.

Source: OECD

#13 Osaka-Kobe, Japan

$969 billion in exposed asses ts

and an unknown population are threatened by a 1.6 foot rise in sea level by 2070. The average elevation is 9.8 feet.

Source: OECD

#8 Tokyo, Japan

$1,207 billion in exposed asses ts

and

2,521,000 in exposed population

are threatened by a 1.6 foot rise in sea level by 2070. The average elevation is 66 feet.

Source: OECD

WG2の範疇の内容

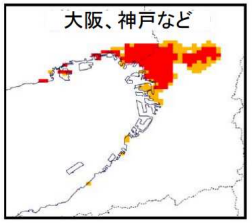
(参考) 海面上昇で影響を受ける？

- 平均海面水位が59cm※上昇した場合、影響を受ける日本の三大湾のゼロメートル地帯の面積は5割増大すると予測される。(国交省 地球温暖化に伴う気候変動について)

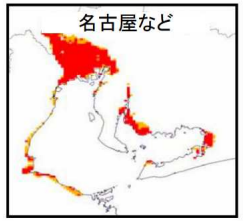
（※）59cmはAR4で21世紀末（2090～2099年）に予測される世界平均海面上昇量の予測の上限を想定。

最新より二つ古いIPCC第四次評価報告書。

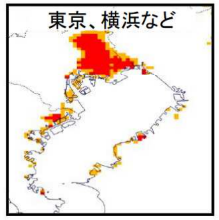
大阪湾



伊勢湾



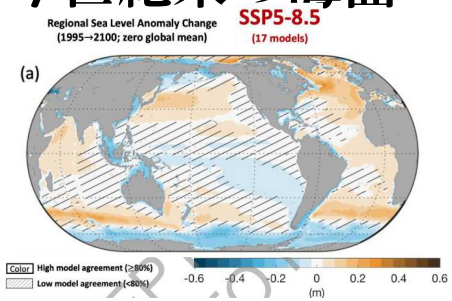
東京湾



	現状	海面上昇後	倍率
面積(km²)	577	879	1.5

出典：国土交通省（2007）第7回大規模水害対策に関する専門調査会 「地球温暖化に伴う気候変動について」

今世紀末の海面パターン



IPCC AR5, RCP8.5シナリオでの，多数モデル平均で得られた2081-2100年の海洋の循環変化と昇温とによる海面高度が1986-2005年からどれだけ高くなったかの差．陸氷の融解の効果は入っていない。

- 日本の東で比較的高い海面上昇。海の熱吸収と黒潮続流の北上による(Terada & Minobe 2018)。
- ただし沿岸までは来ないのは，沿岸に沿って伝播する波である沿岸[　　]波 が高緯度の比較的低い海面高度を南に伝える、盾（シールド）効果のため (Liu Minobe et al. 2016)。
- 一方、ニューヨーク付近で海面上昇が高いのは、その北のラブラドル海の強い海面上昇がケルビン波で伝播するため(Minobe et al. 2017)
- とはいえ日本沿岸も全球平均程度には上昇する．

第６回のまとめ 1/2

- コリオリパラメータの南北微分は $\beta =$ [　　]
- 海洋循環で，風が直接駆動する エクマン 流自体はわずか．
- β効果があるために，海洋内部領域では，風応力の[　]成分が，[　　]流を作り出し，

$$\beta vH = \boxed{}$$

- 北半球の亜熱帯循環では，その北側の偏西風と南側の貿易風とによって，風応力の回転成分は[　]，スウェルドラップ流は[　]向き
- 風応力の回転成分はまた，海面高度の東西微分を決め，亜熱帯循環では海面高度は西に向って[　]くなる．

第6回のまとめ 2/2

- 1995-2014年基準の全球海面上昇は，SSP1-2.6シナリオでは ___ cm, SSP2-4.5シナリオでは___ cm.
- 全球平均の海面上昇への寄与は，海水の熱膨張熱膨張が ___ 割，陸氷融解が___ 割の寄与.
- 日本の東方では全球平均よりも ___ い海面上昇が，に予想されている．ただし主要四島沿岸の水位上昇は平均程度である．これは，高緯度の低水位を伝える ___ 波による.