



TOHOKU
UNIVERSITY

東北大学115周年／関西萩友会15周年記念

萩友会関西交流会

2022年3月6日

オンライン開催

海と地球温暖化 ～気候と海の関係から異常気象・災害まで～

東北大学大学院理学研究科

須賀 利雄

話の内容

- 1.地球温暖化の意味
- 2.海の温暖化
- 3.海の温暖化がもたらす極端現象
- 4.海の生態系への影響
- 5.海洋科学の役割

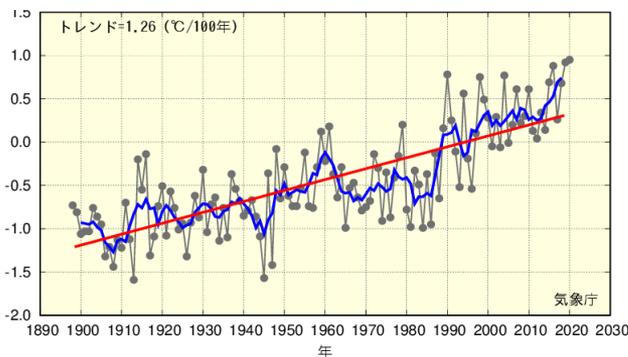
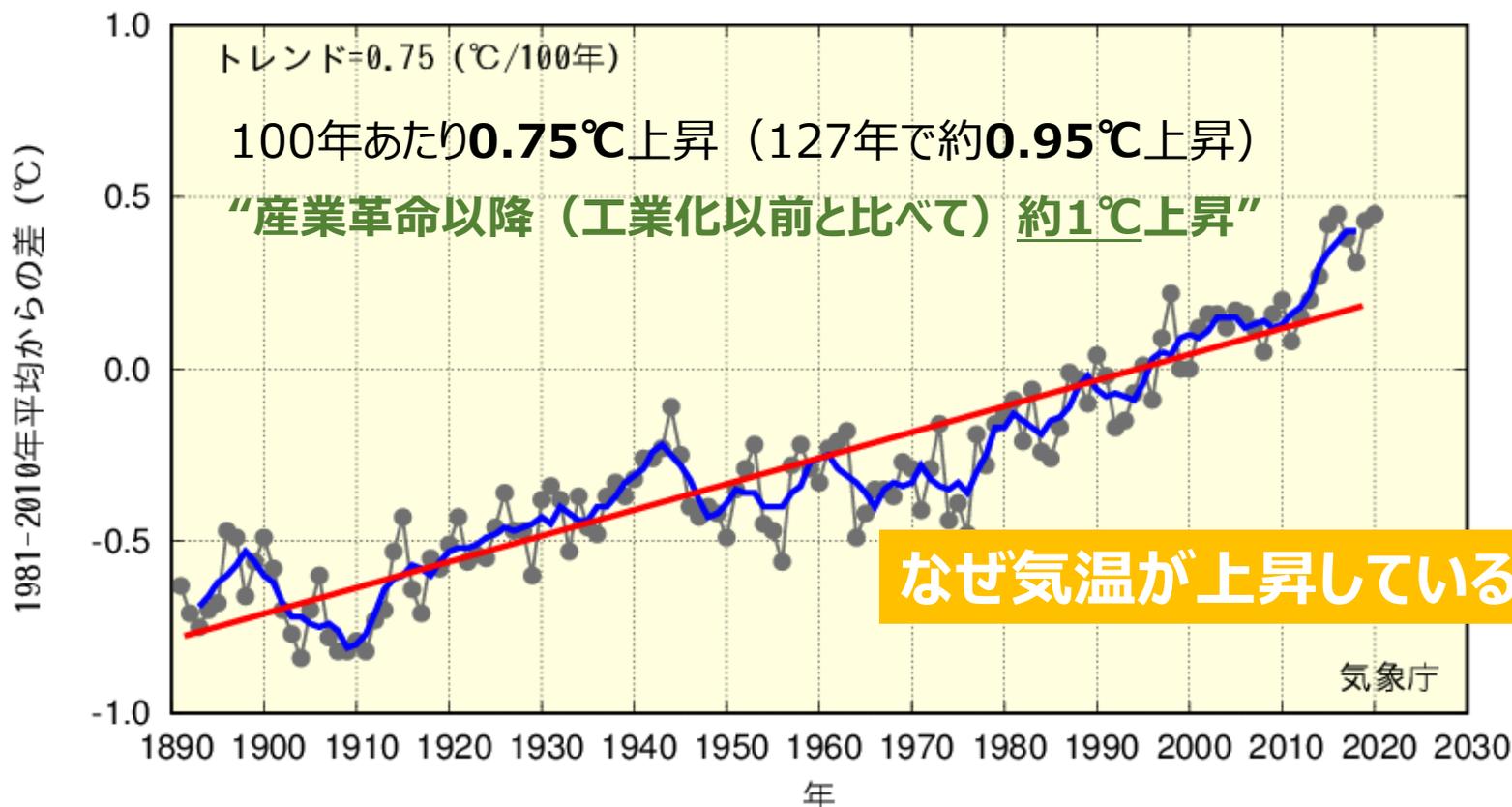
コラム① ノーベル物理学賞

コラム② 温暖化とウミガメ

コラム③ 国連海洋科学の10年

1. 地球温暖化の意味：気温は上昇している

世界の年平均気温偏差（1891～2020年） ※偏差：平均からの差



日本の年平均気温偏差（1898～2020年）

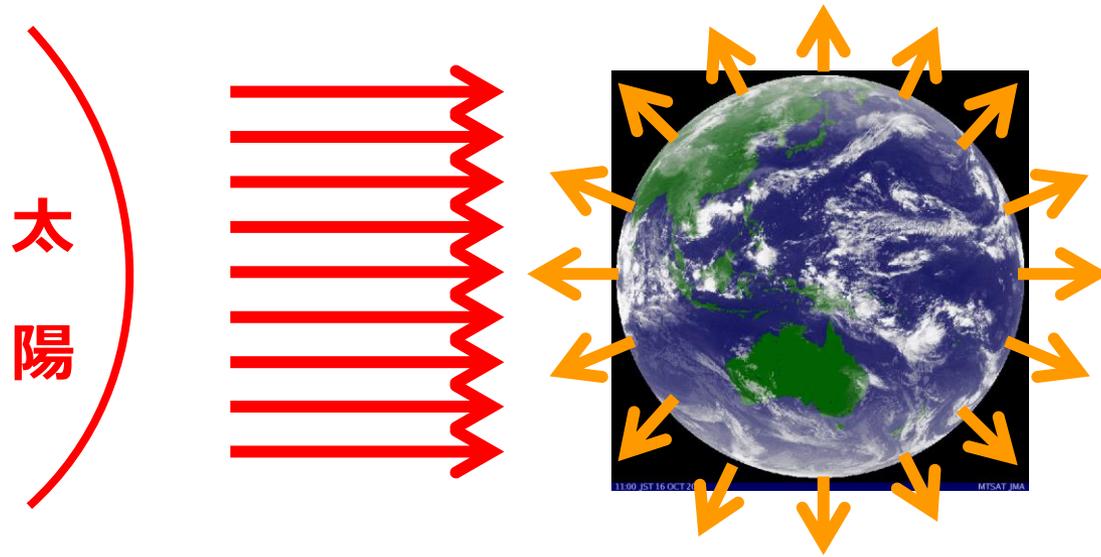
100年あたり**1.26°C**上昇

世界平均の**1.7倍以上**のペースで上昇

1. 地球温暖化の意味

工業化以前の地球：安定した気候

太陽放射は地球を温める。地球の温度が上がらないのはなぜ？

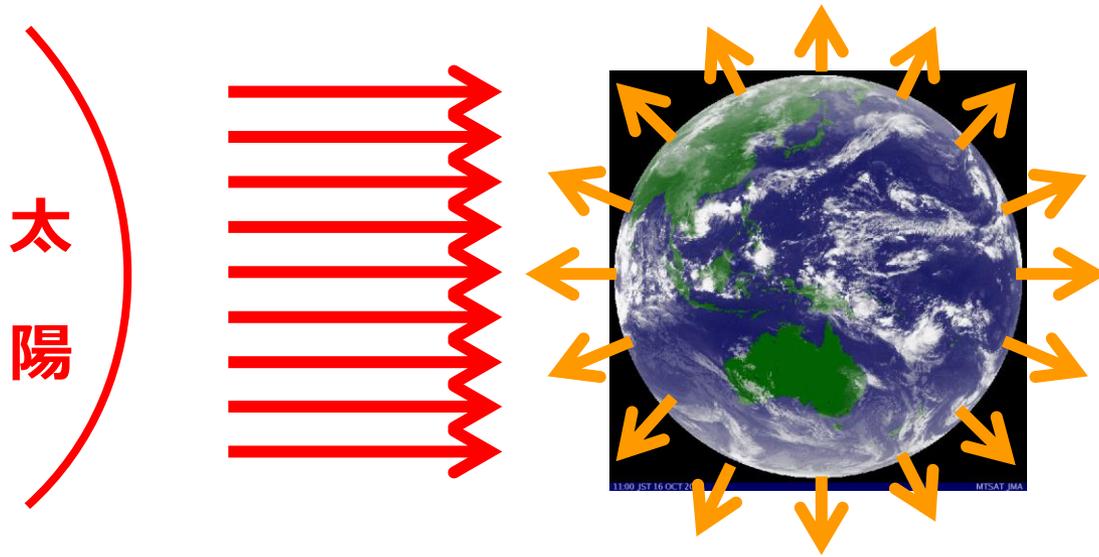


入射する**太陽放射**と同じ量のエネルギーを **赤外線**として放出している。
放射がバランス → 温度（と気候）の安定

1. 地球温暖化の意味

地球温暖化とは・・・

宇宙に放出される**赤外線**が減って、地球に熱がたまりつつある。



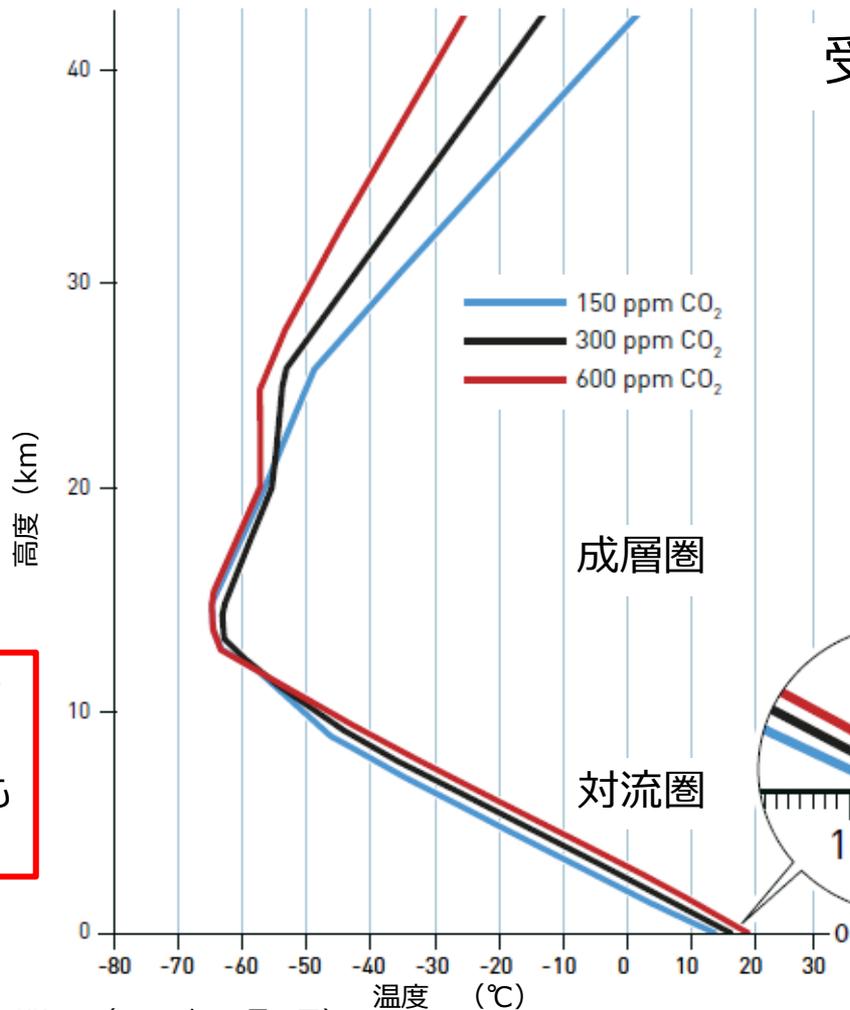
大気中の**温室効果ガス**（**二酸化炭素**など）が増えたため、大気による**赤外線**の吸収が増えて、宇宙に放出される**赤外線**が減った。

→ 放出される**赤外線**（**地球放射**）が**太陽放射**とバランスするまで温度が上がり続ける。

コラム① 真鍋淑郎先生 ノーベル物理学賞受賞おめでとうございます！



真鍋博士は、放射のバランスと対流による空気塊の鉛直輸送との相互作用を、水循環による熱も考慮しながら研究した最初の研究者である。



受賞対象となった研究

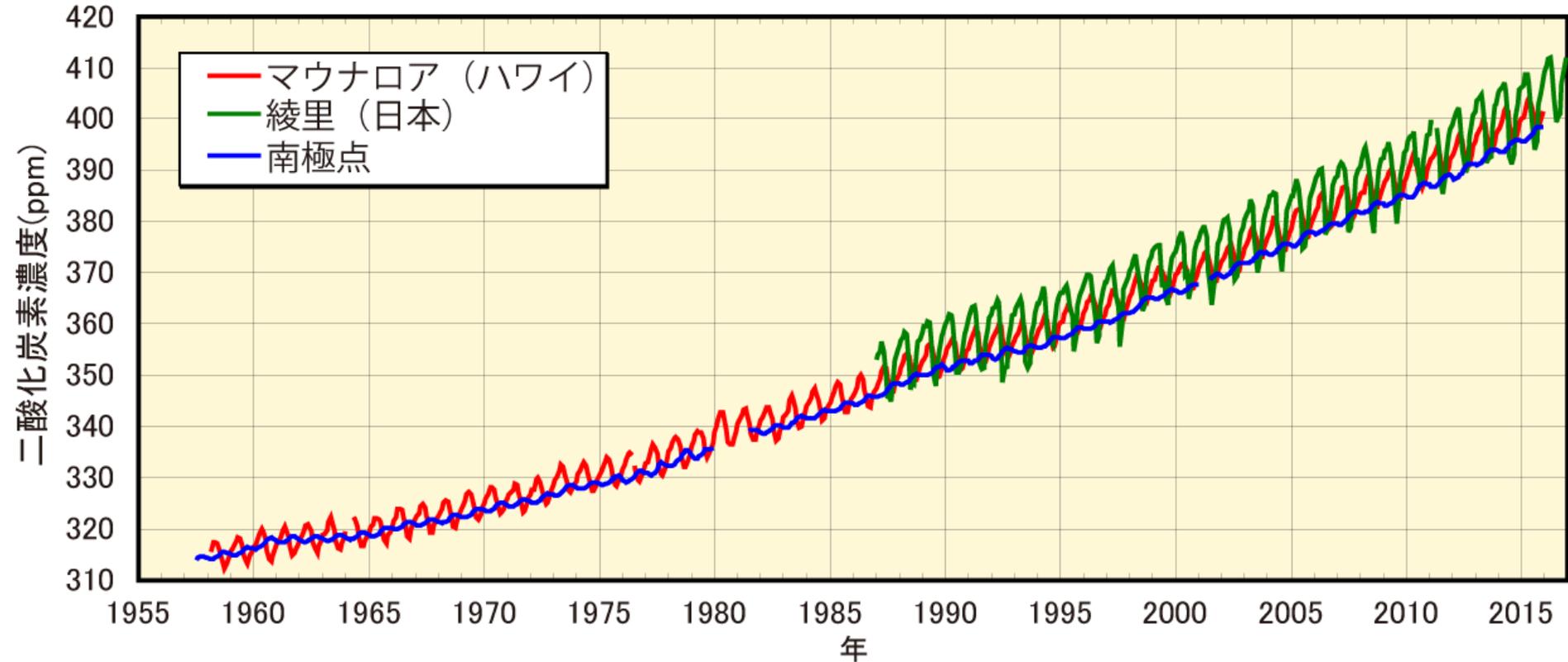
二酸化炭素の量を増やすと、**下層大気**の温度が上がり、**上層大気**では低下した。これにより、真鍋博士は、気温の変化が二酸化炭素の増加によることを確認した。（もし、日射量の増加が原因であれば、大気全体が暖かくなるはず。）

海と大気の数値モデルを結合させて**気候モデル**を作った最初の研究者でもある。

地表の温度は、二酸化炭素の量が半分になると**2.28°C**下がり、二酸化炭素の量が2倍になると**2.36°C**上昇した。

1. 地球温暖化の意味：二酸化炭素濃度は増加し続けている

大気中の二酸化炭素濃度（月平均値）の経年変化



気候変動監視レポート2016（気象庁）

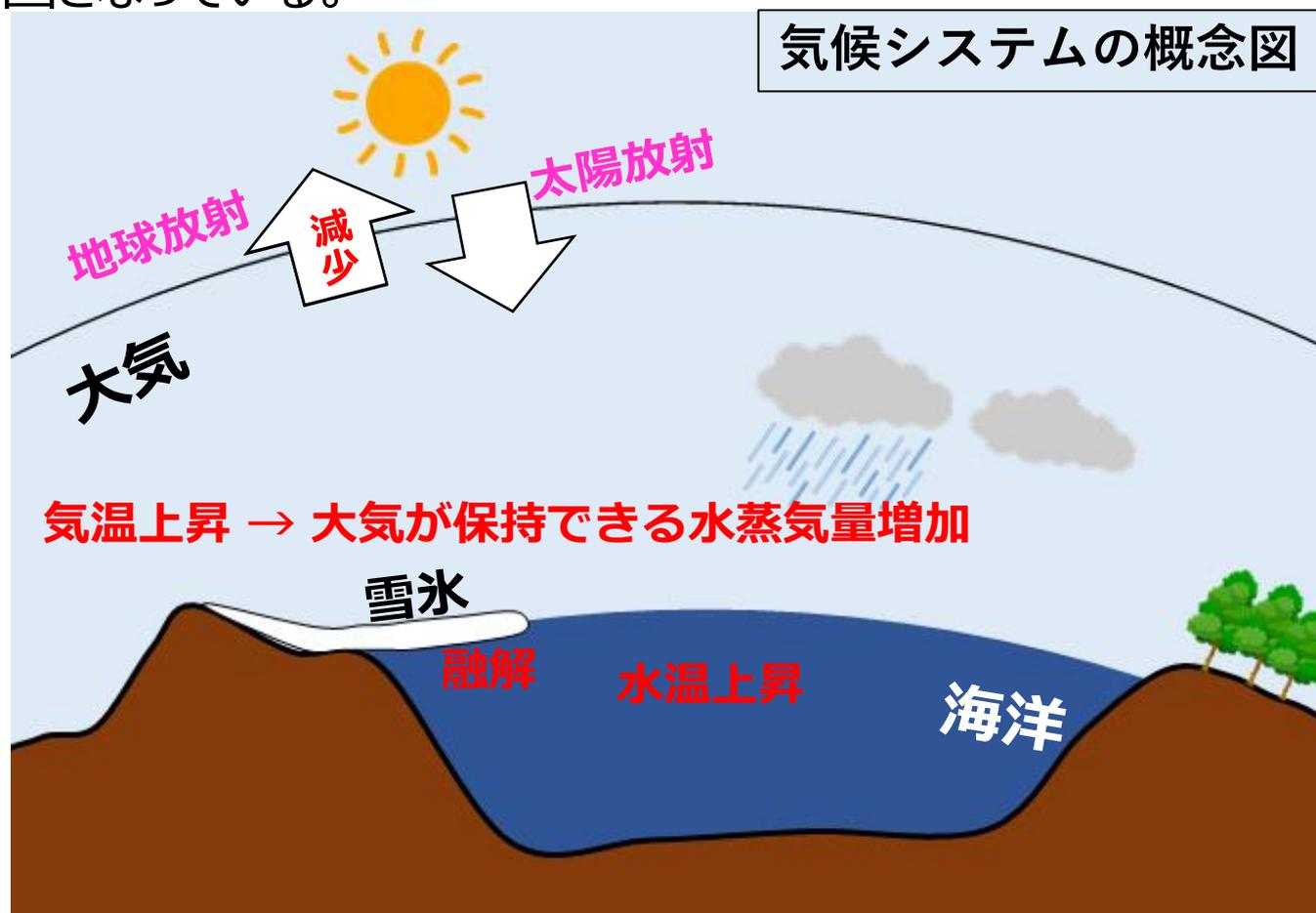
2020年の地表付近の世界平均濃度：**413.2 ppm**

(温室効果ガス世界資料センター-WDCGG)

1. 地球温暖化の意味

地球温暖化は気候システムの変化

- **太陽放射**と**地球放射**の均衡が崩れ、宇宙に出ていく**地球放射**が減ったため、**地球に熱が溜まりつつある**。
- その結果、気候の仕組みに様々な変化が生じて、**異常気象・極端現象**が増加する要因となっている。

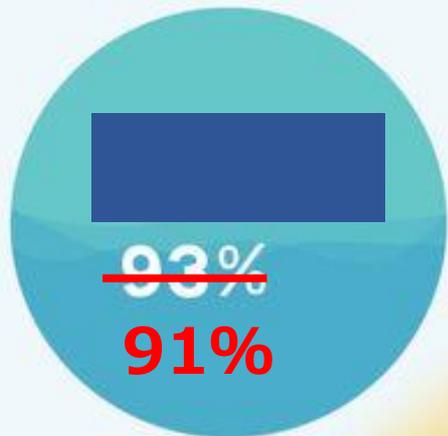


2. 海の温暖化

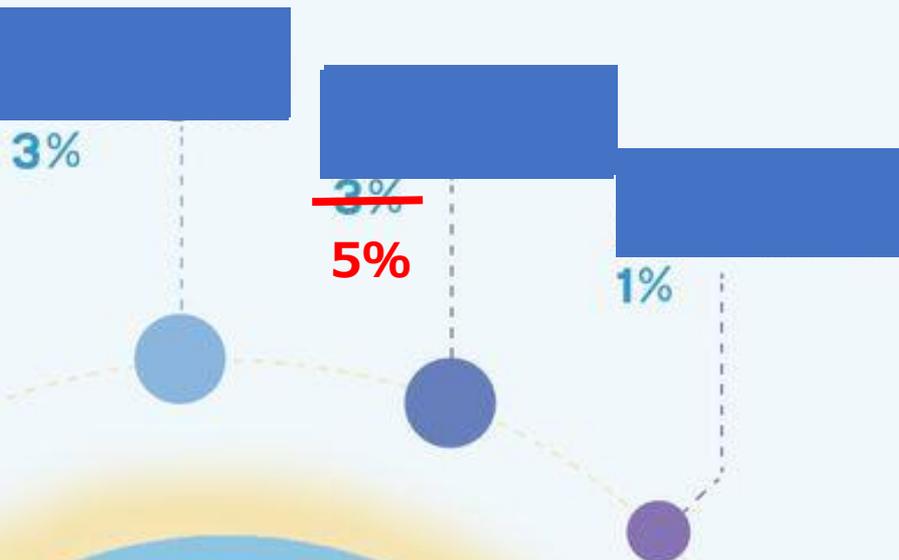
地球がためこんだ熱はどこへ？

大気？ 海？ 陸地？ 氷？

過去~~40~~⁵⁰年間に地球が蓄えた熱の行き先
(2013年の見積もり)

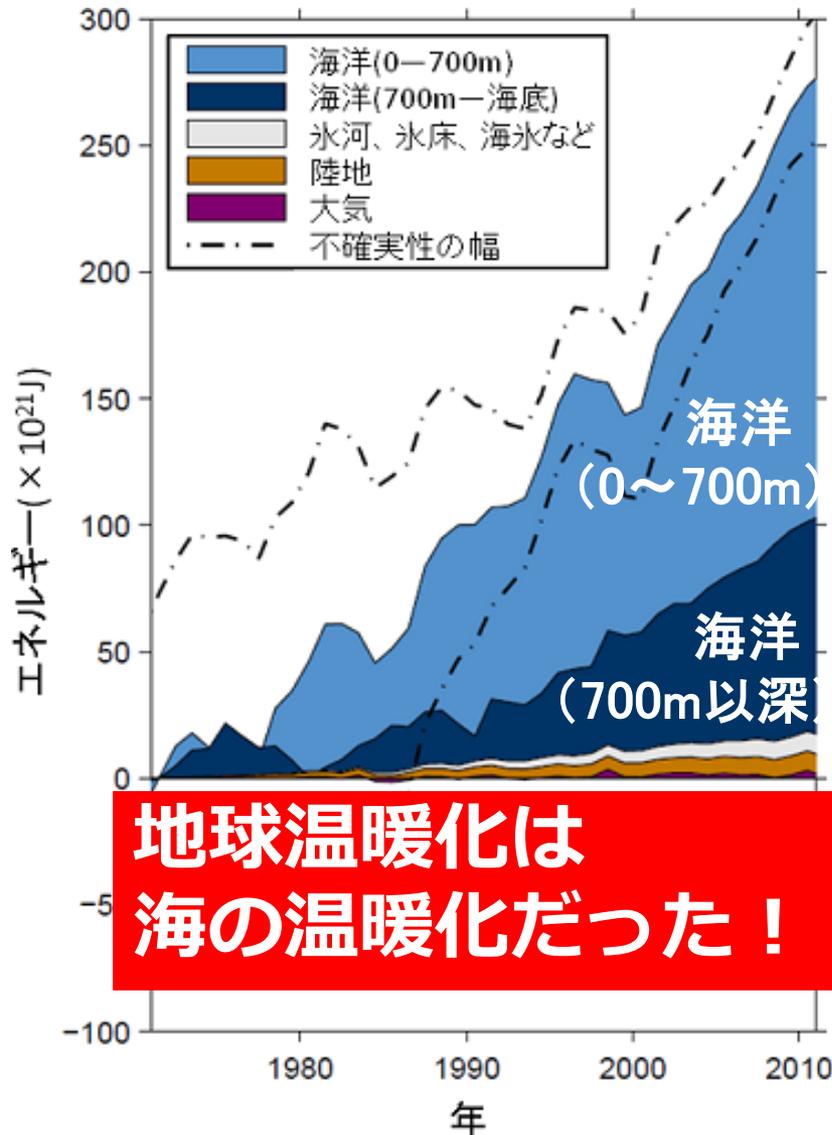


2021年の見積もり



2. 海の温暖化

地球がためこんだ熱はどこへ？



最近までのデータを加え

過去50年間に地球がたくわえた熱を年々積み重ねていくと… 434×10^{21} J (ゼタジュール)

日本のエネルギー消費量(2018年)の約24000年分になる。

海はそのうちの91%を吸収することで、気温の上昇を大幅に和らげてきた！

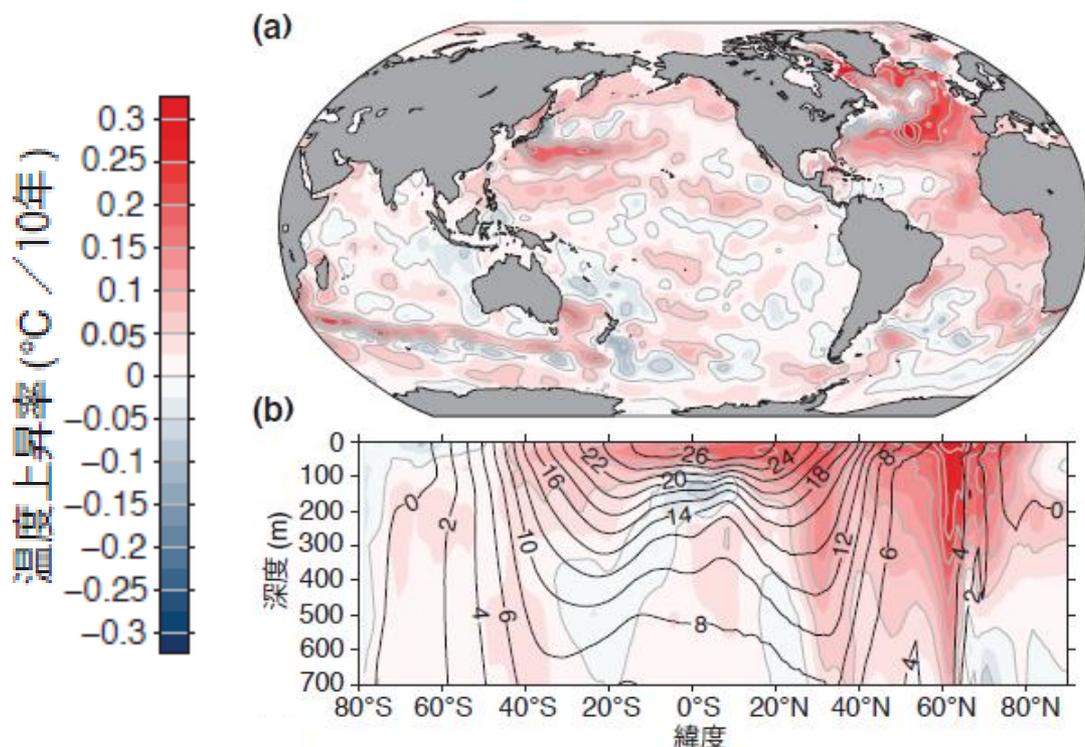
しかし、その結果、海の温度は上昇し、気候や生態系にさまざまな影響があらわれてきた！！

IPCC第5次評価報告書(2013)・第6次評価報告書(2021)

2. 海の温暖化

海のどこが温まっているのか？

- 緯度・経度、深度ごとに温度上昇傾向は異なる。
- 地球温暖化の実態を正確に把握するためには、世界の全体の海を万遍なく観測する必要がある。
- 700m以深にも熱が溜まっていることが示されている。



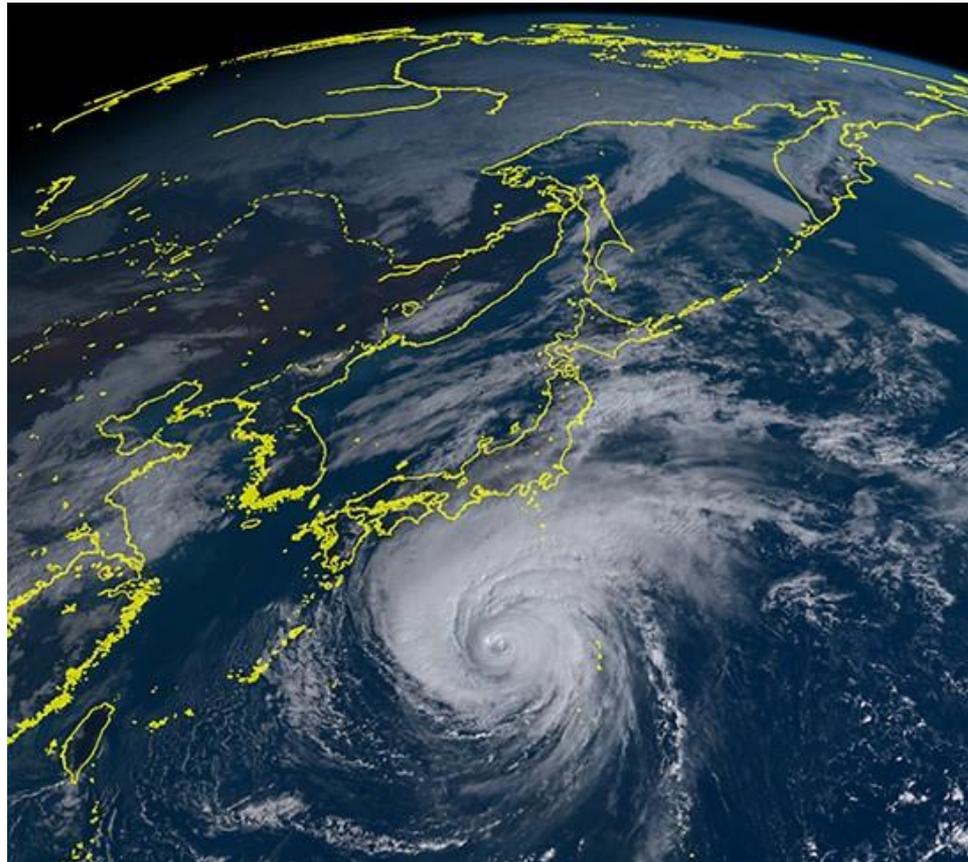
1971年から2010年までの
海洋表層（海面～700m）の
平均温度の上昇率

1971年から2010年までの
東西平均した温度の上昇率

IPCC第5次評価報告書（2013）

3. 海の温暖化がもたらす極端現象

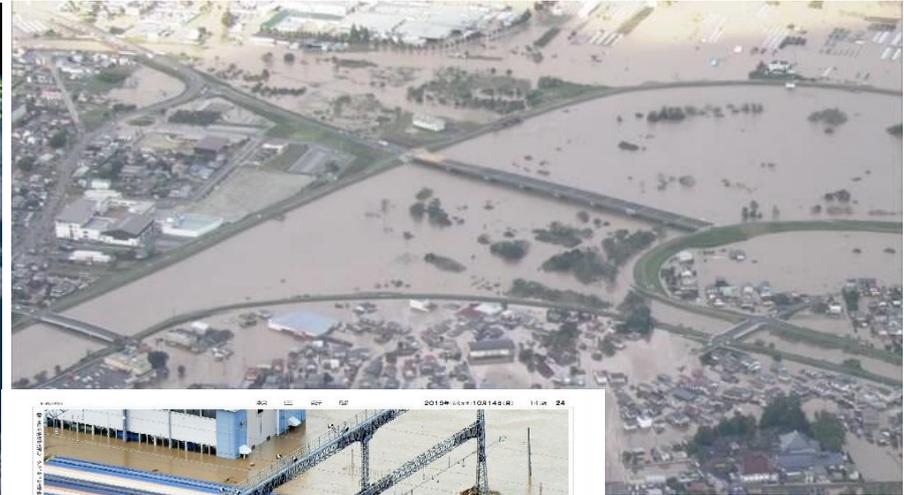
2019年 台風19号 “スーパー台風”



himawari8.nict.go.jp/ja/himawari8-image.htm

令和元年東日本台風（台風第19号）による
大雨、暴風等

2019年10月10日～10月13日



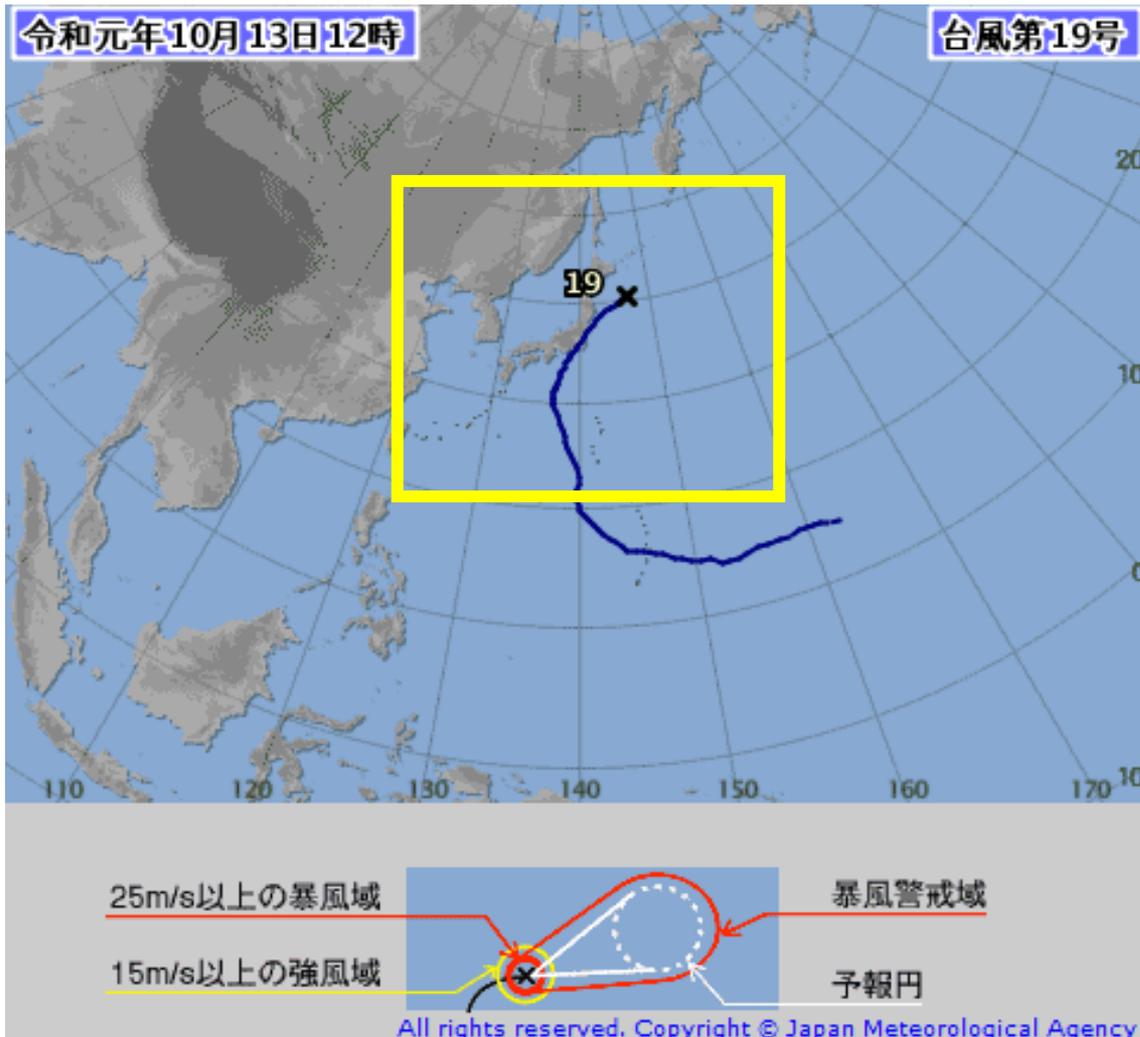
水の暴威



東日本を
直撃し、
未曾有の
被害をも
たらした

3. 海の温暖化がもたらす極端現象

なぜ台風19号はあれほど強烈だったのか？



台風が発達し、維持されるためには、海面水温がある程度以上高い必要がある。

10月の日本付近の海面水温は十分に低いため、台風は日本に接近するまでに勢力を弱めるのがふつう。

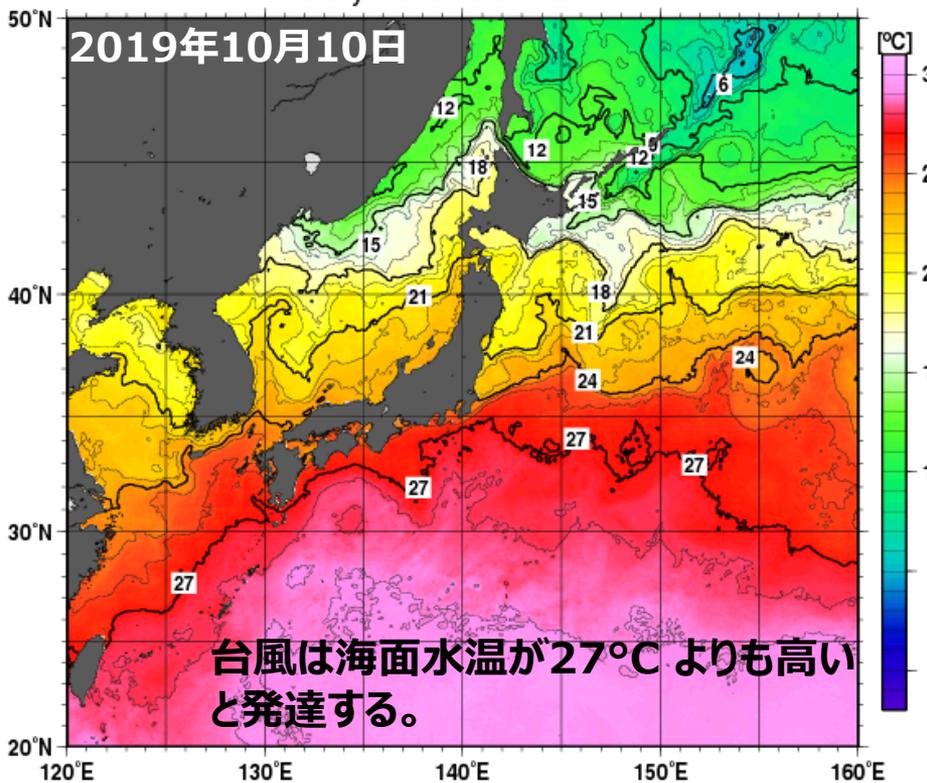
しかし、このときは違った。

3. 海の温暖化がもたらす極端現象

台風19号襲来時の 日本付近の海面水温は異常に高かった。

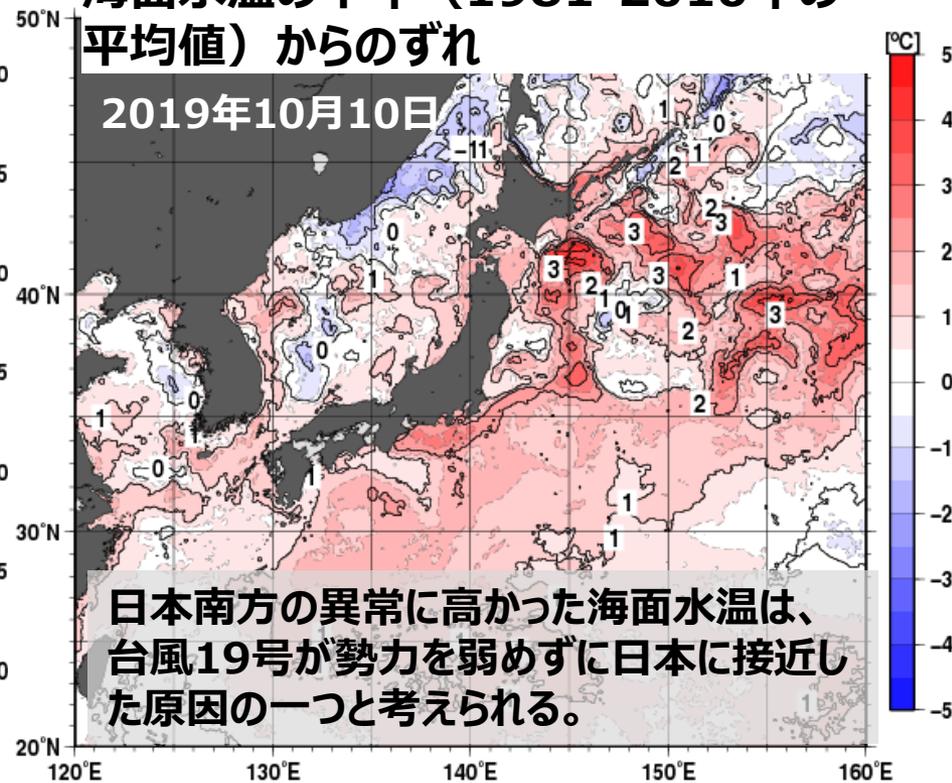
海面水温

Daily SSTs 10 Oct. 2019.



www.jma.go.jpの図に基づく

海面水温の平年（1981-2010年の 平均値）からのずれ

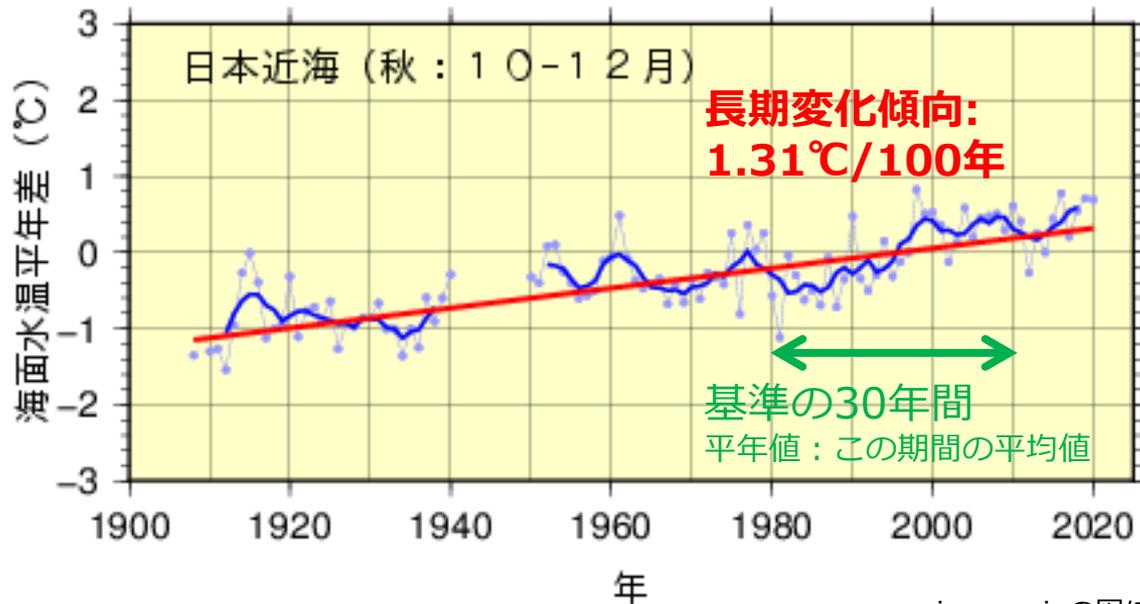


www.jma.go.jpの図に基づく

3. 海の温暖化がもたらす極端現象

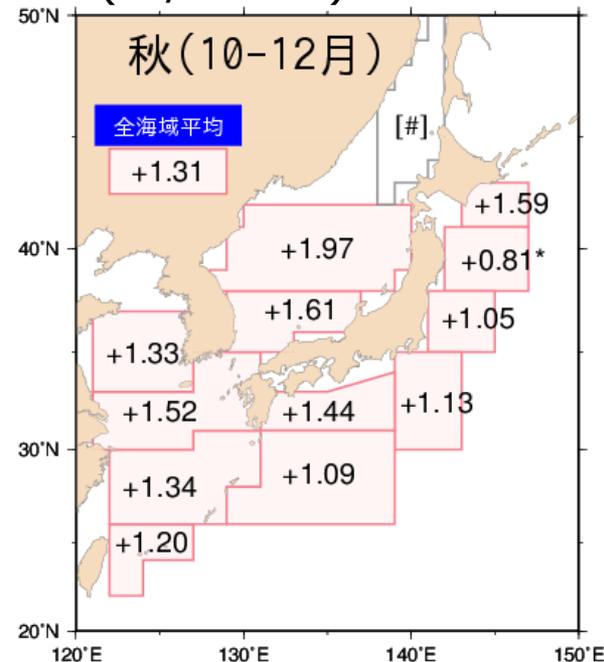
日本の周辺の海面水温の変動と長期変化傾向

日本付近の秋季（10-12月）の海面水温平年差



www.jma.go.jpの図に基づく

長期変化傾向：
1902-2020年の秋季
(°C/100年)



www.jma.go.jp

海面水温は毎年的高低差が大きいものの、**長期的な上昇傾向**が明らかである。

海面水温が長期的に上昇した結果、10月の日本付近に 27°C より高い海面水温が出現する可能性は高まったといえる。

今後、その可能性は増大すると予想され、強い台風が日本を襲うリスクは高まると考えられる。

日本付近の海面水温の上昇傾向は、世界平均の2倍以上の速さ!

3. 海の温暖化がもたらす極端現象

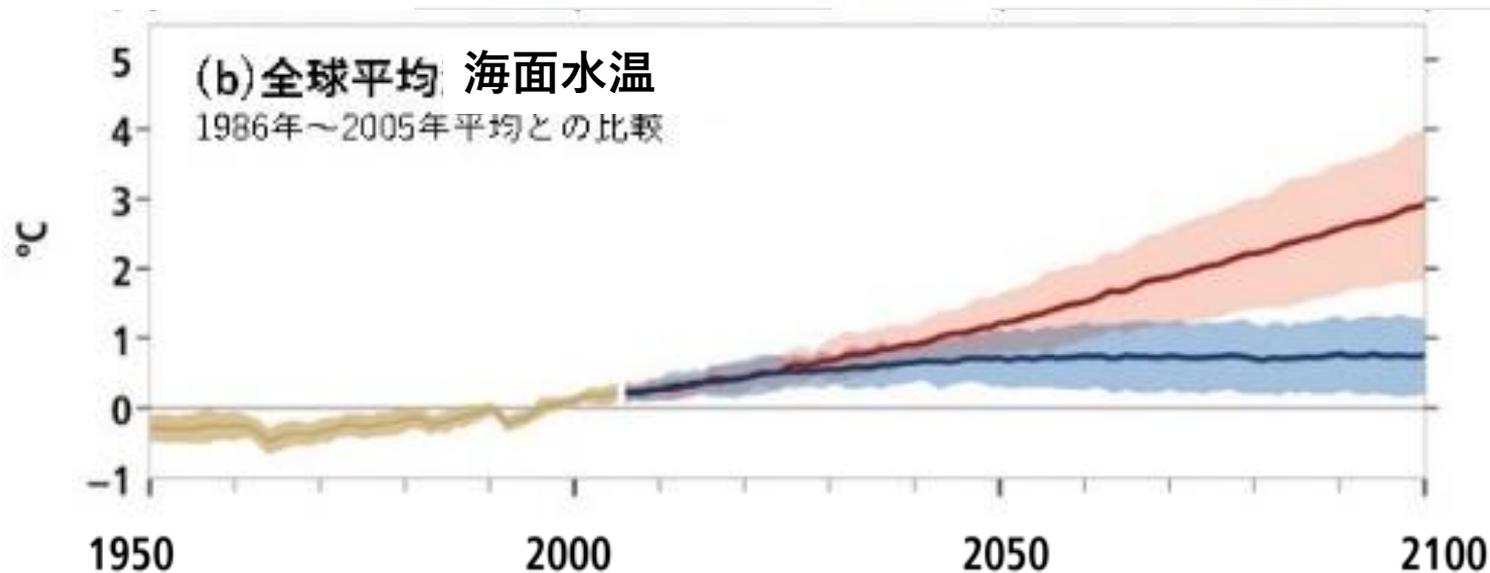
海面水温の上昇は、地球温暖化にともなう過剰な熱を海が吸収したためであり、それは今後も続くと予想される。

→ 極端現象の発生頻度の増大が予想される。

海洋と雪氷圏の過去と未来における変化

重要な指標の（観測された、あるいはモデルによって計算された）経年変化とRCP2.6およびRCP8.5の下での予測

■ 経年変化（モデル値） ■ 予測値(RCP2.6) ■ 予測値(RCP8.5)



日本付近の海面水温の上昇速度は世界平均よりも速いことに注意

3. 海の温暖化がもたらす極端現象

海洋熱波：

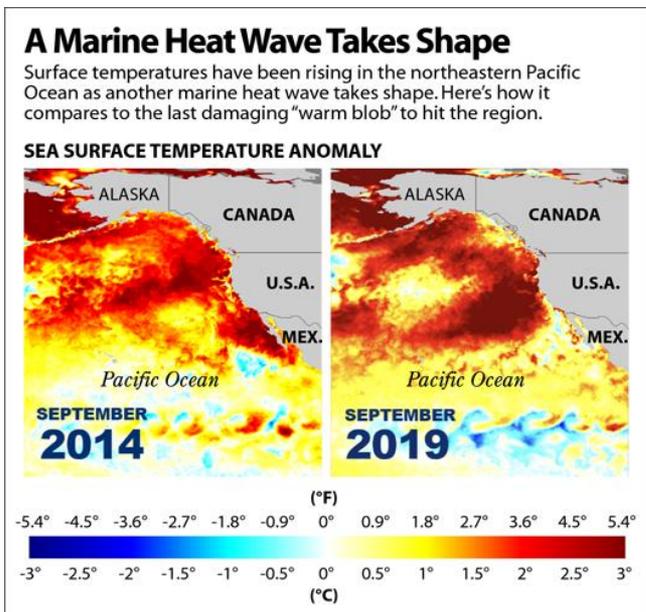
特定の海域の海水温が極端に高い状態が続く現象

極端な気象現象や**生態系・水産業へのダメージ**を引き起こす

2014～16年に北米西海岸で発生したものと同様の海洋熱波の発生を報ずるニュース記事

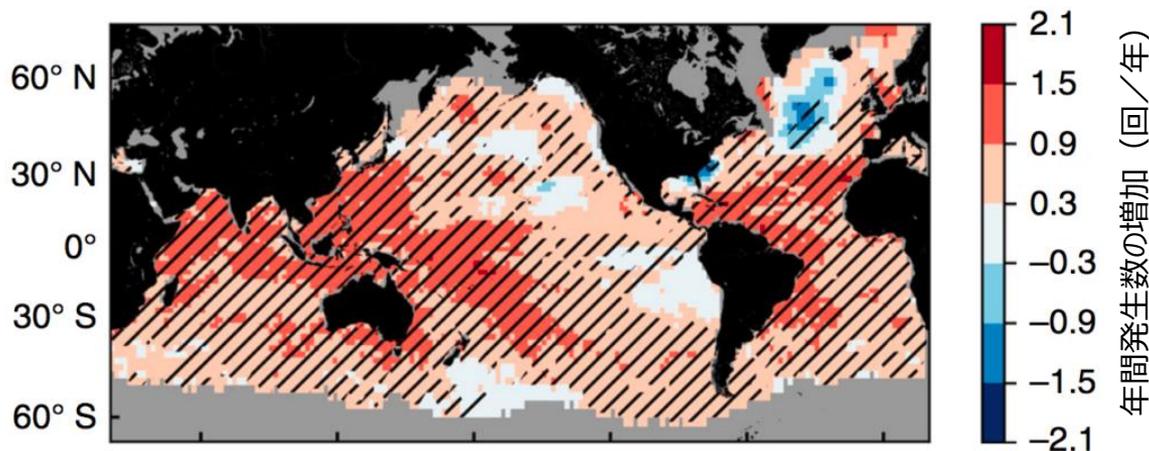
1925～54年から1987～2016年にかけての**海洋熱波の発生頻度の変化：年間発生数の増加**

(斜線は統計的に有意な差であることを示す)



SOURCE: NOAA

InsideClimate News



(Oliver et al., 2018)

IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書： 海洋熱波は頻度、持続時間、空間的な広がり及び強度（最高水温）に関してさらに増加すると予測（確信度が非常に高い）

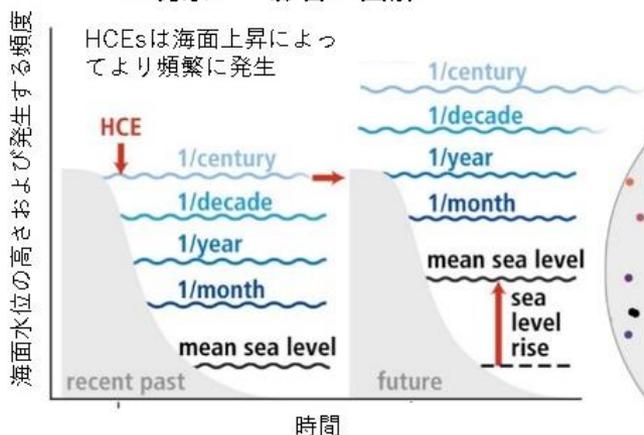
3. 海の温暖化がもたらす極端現象

地球温暖化に伴う海水温の上昇と氷床等の融解による海面水位が上昇

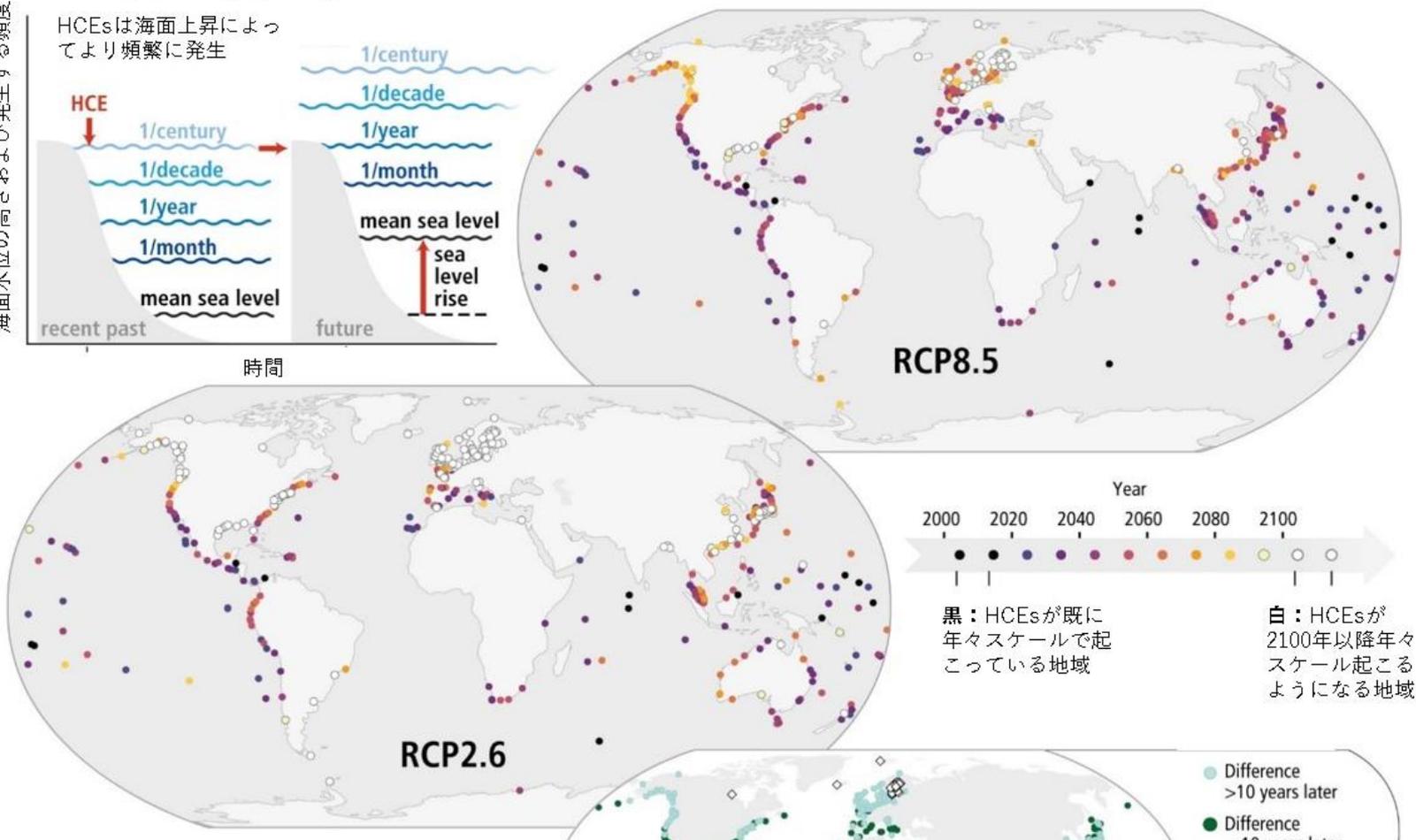
→ **高潮（極端な海面水位の現象）** のリスクが増大

これまで**100年に1回程度発生**していた極端な海面水位（HCEs）が毎年発生するようになると予測される。
（IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書）

(a) 海面上昇による極端な海面水位の現象への影響の図解



(b) HCEsが平均で1年に一度発生するようになると予測される時期



コラム②

海水温の上昇が海の生き物（生態系）に与える影響の例： ウミガメのメス化



海に帰るアオウミガメの赤ちゃん。(Photograph by Norbert Wu, Minden Pictures, National Geographic Creative)

グレート・バリア・
リーフ北部での調査



1970～80年代
メス：オス = 6：1



2018年
メス：オス = 116：1

「ウミガメの性は、卵にいるときの温度で決まる。温度が高くなればメスが増えるため、気温や海水温が上昇している昨今、メスの方がわずかに多いだろうと科学者たちは予想していた。ところが実際は予想をはるかに上回っていた。」

ナショナルジオグラフィック (2018.01.10) <https://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/18/011000008/?P=1>

温暖化のスピードが生物の進化のスピードに比べて早すぎる

4. 海の生態系への影響

サンマの不漁



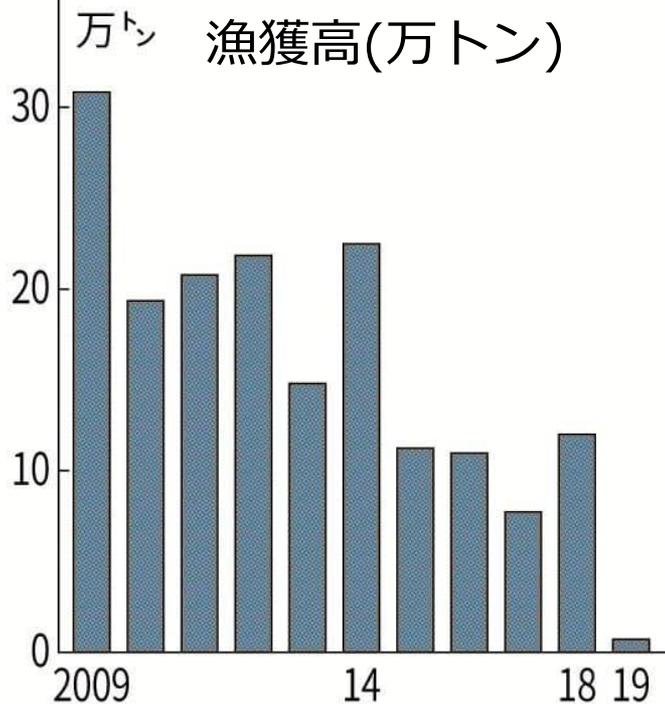
日本近海の水温が通常より高かったことがサンマの不漁の要因の一つと考えられる。

それは、**地球温暖化**とも関係している。

不漁の原因は、それだけではなく、**海の生態系**の複雑な変化の一部と考えられる。

サンマは記録的な不漁だ

(2019年は10月9日時点)

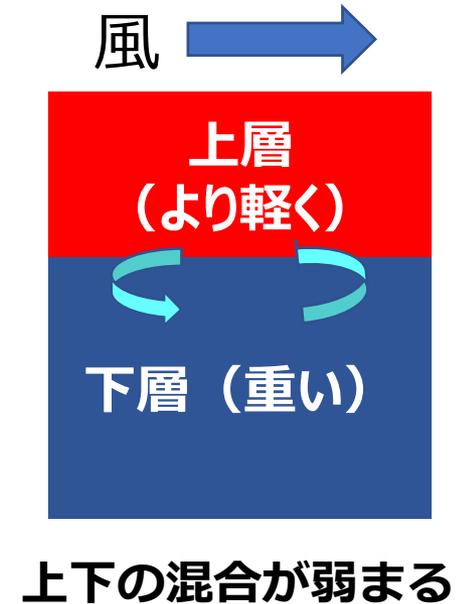
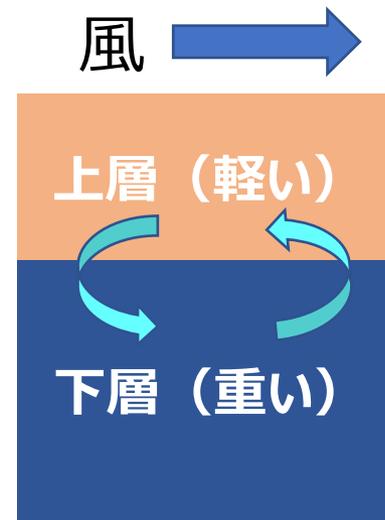
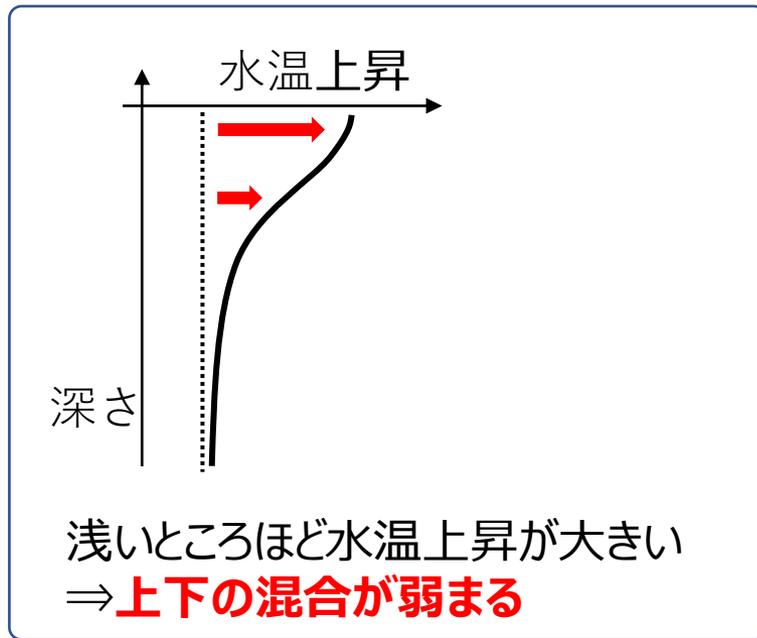


(出所) 全国さんま棒受網漁協・水産庁

日本経済新聞 Nikkei.com

4. 海の生態系への影響

海の温暖化の影響：成層の強化



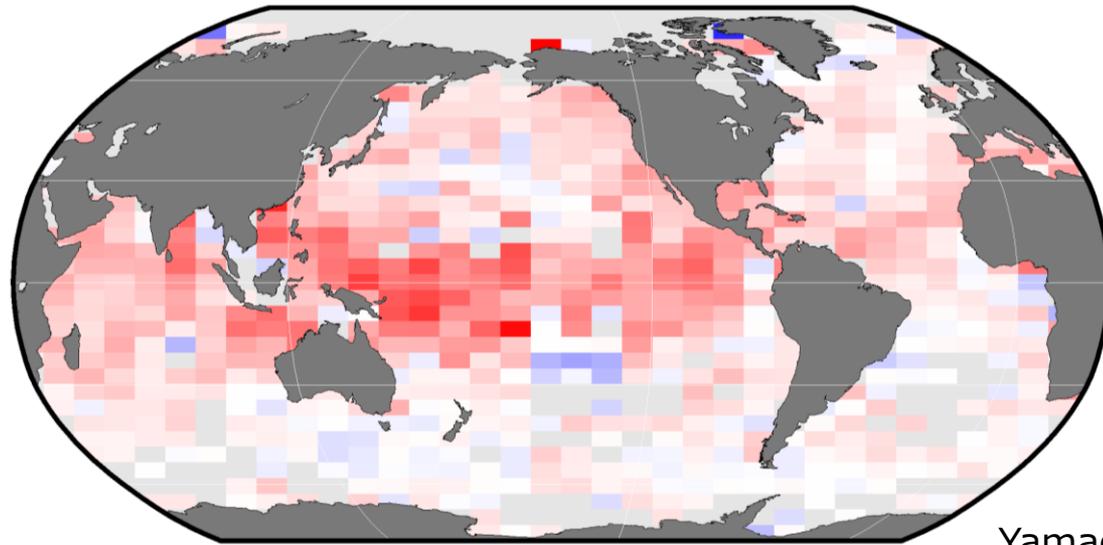
- 表層への栄養塩供給の減少
⇒ 基礎生産（植物プランクトンの生産）の減少
- 海洋内部の貧酸素化（酸素の減少）
⇒ 生物の分布の変化

4. 海の生態系への影響

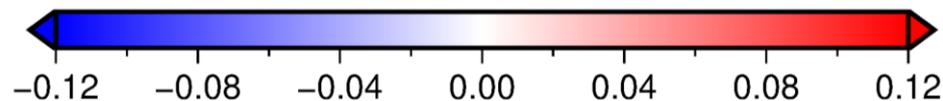
成層（上下の混合の起こりにくさの度合い）の長期変化

海面と深度200mの密度差で表される**成層強度**は世界の海洋の8割以上で**強まってきた**。

1960年代-2017年の海洋密度成層（200 m深と海面の密度差）の変化傾向
[kg/m³/10年]



Yamaguchi & Suga (2019)



⇒ 世界の海の広い範囲で、海水の上下の混合が弱まって、基礎生産の低下や海洋貧酸素化を招いていることを示唆。

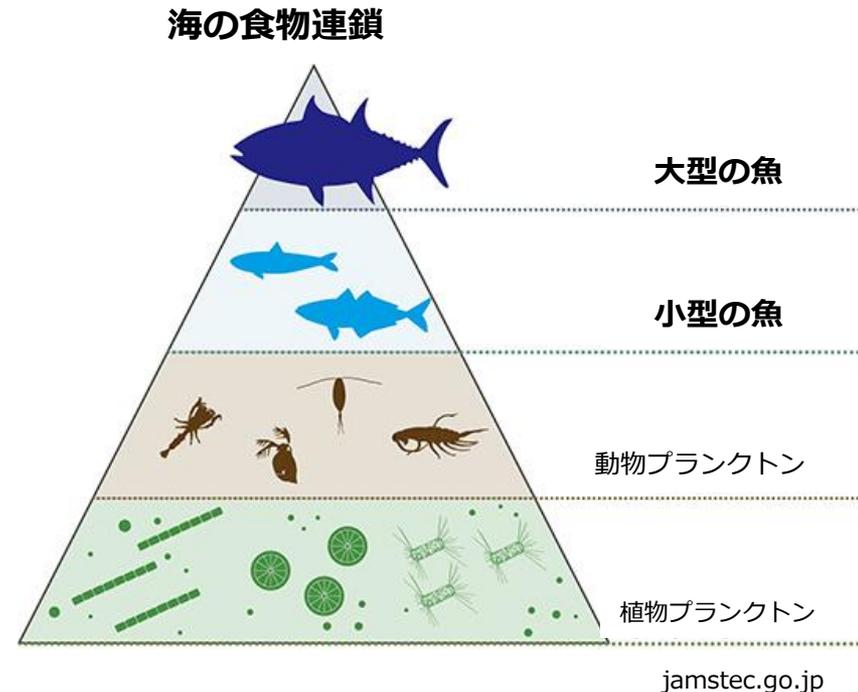
4. 海の生態系への影響

地球温暖化は海にさまざまな変化を引き起こす

- **水温上昇**
- 成層の強化
 - **酸素と栄養塩の供給を減らす**
- 二酸化炭素の吸収による**酸性化**

これらの変化は、人間活動に伴うストレス要因とともに、海の**食物連鎖**のさまざまな要素を通して、**海の生態系**に影響を及ぼし、

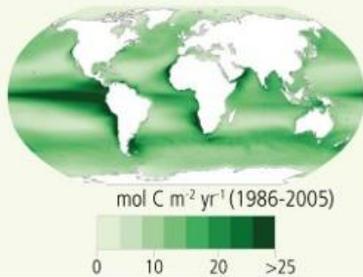
- 基礎生産（一次生産）と生物量（バイオマス）を変化させる
- 水産資源量・分布を変える



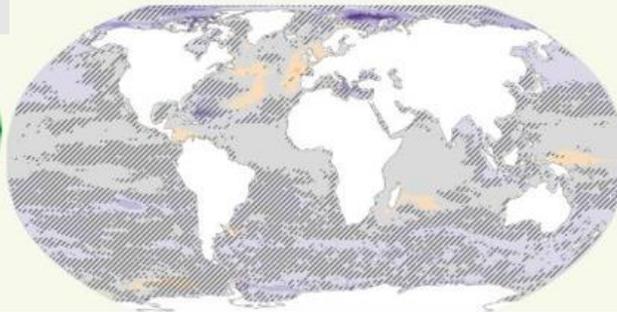
4. 海の生態系への影響：将来予測

IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書

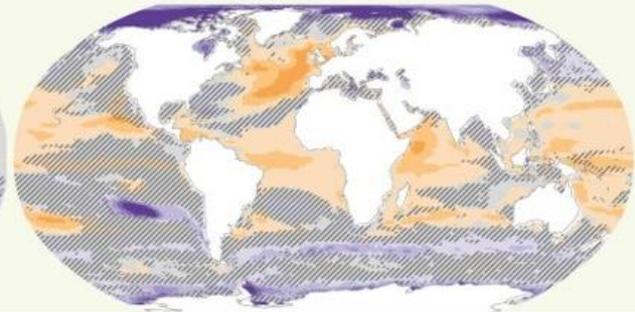
基礎生産



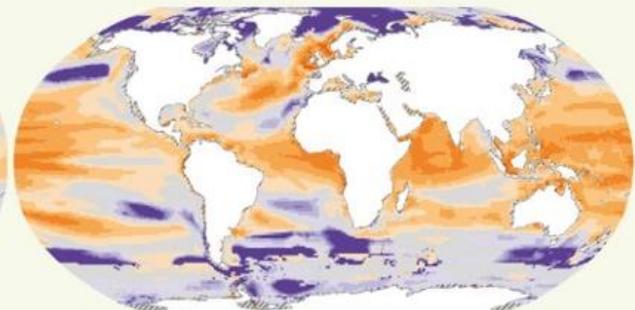
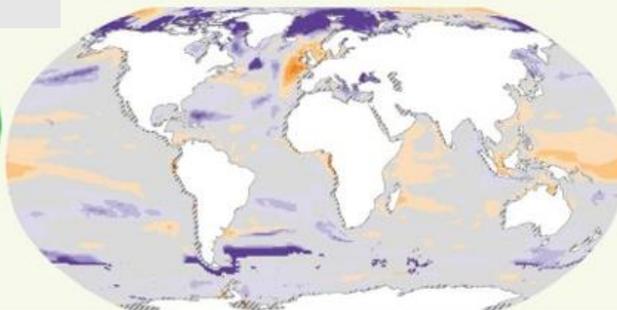
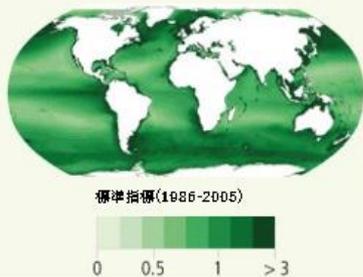
RCP2.6



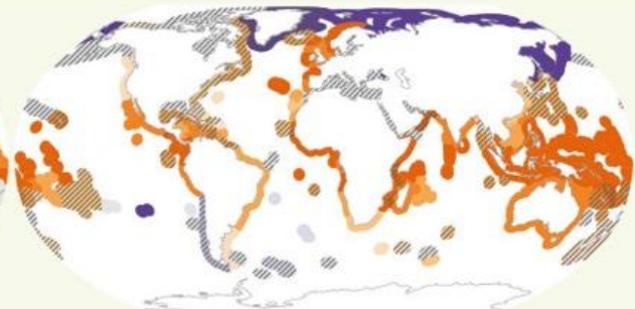
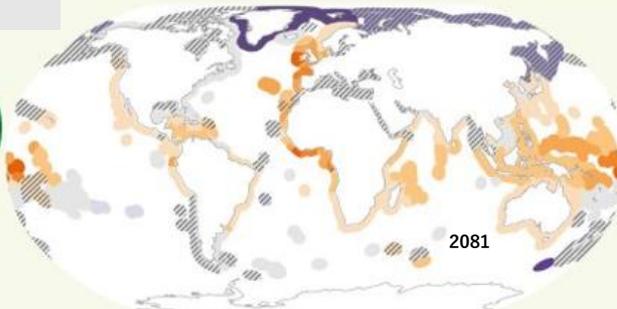
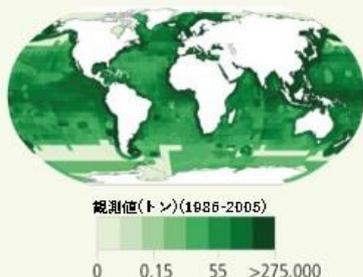
RCP8.5



全動物の現存量



最大潜在漁獲量

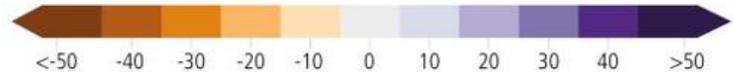


いずれも中・低緯度の広範な海域で減少

* See figure caption for details

変化率

2018-2100年と1986-2005年の平均値の比較



 モデルの不一致
 データなし

より精度のいい予測のためには、海洋環境と生態系に関する観測・研究が不可欠

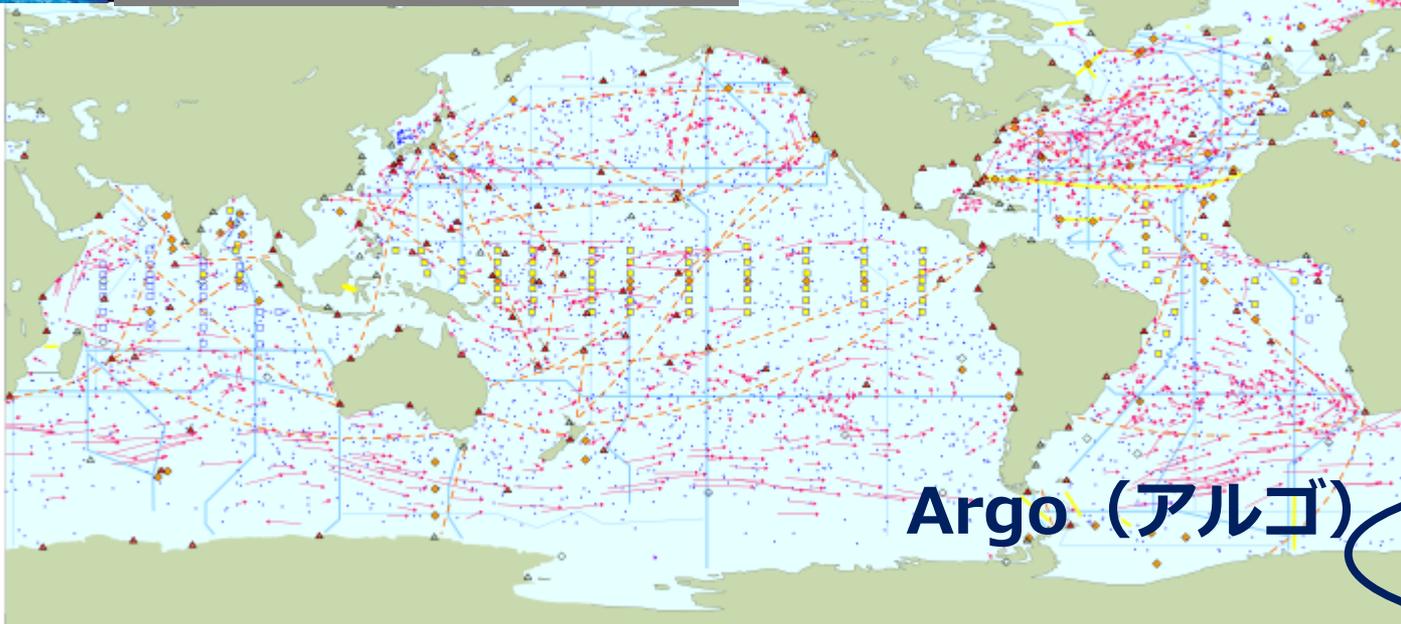
5. 海洋科学の役割

全球海洋観測システム (GOOS)

衛星観測：海面水温、海面高度、風、海色、海水

現場観測 達成率 66%

2015年3月



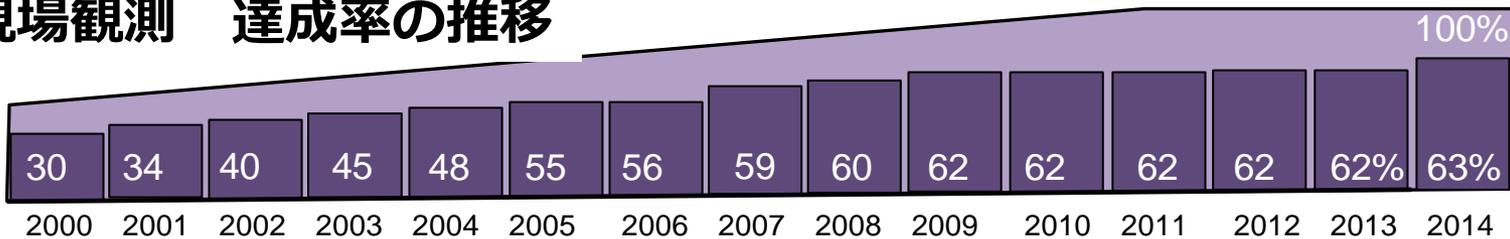
Argo (アルゴ)

- 100%** Surface measurements from volunteer ships (VOS)
 250 ships in VOSclim pilot project
- 100%** Global drifting surface buoy array
 5° resolution array: 1250 floats
 → ice buoys
- 40%** Tide gauge network (GLOSS committed)
 300 real-time reporting gauges
- 39%** XBT sub-surface temperature section network
 37000 XBTs deployed
- 100%** Argo profiling float network
 3° resolution array: 3200 floats
- 62%** Repeat hydrography and carbon inventory
 (Planned)
 Full ocean survey in 10 years

66% Global time series network
 87 combined sites

76% Global tropical moored buoy network
 125 moorings planned

現場観測 達成率の推移



Original goal for full implementation by 2010

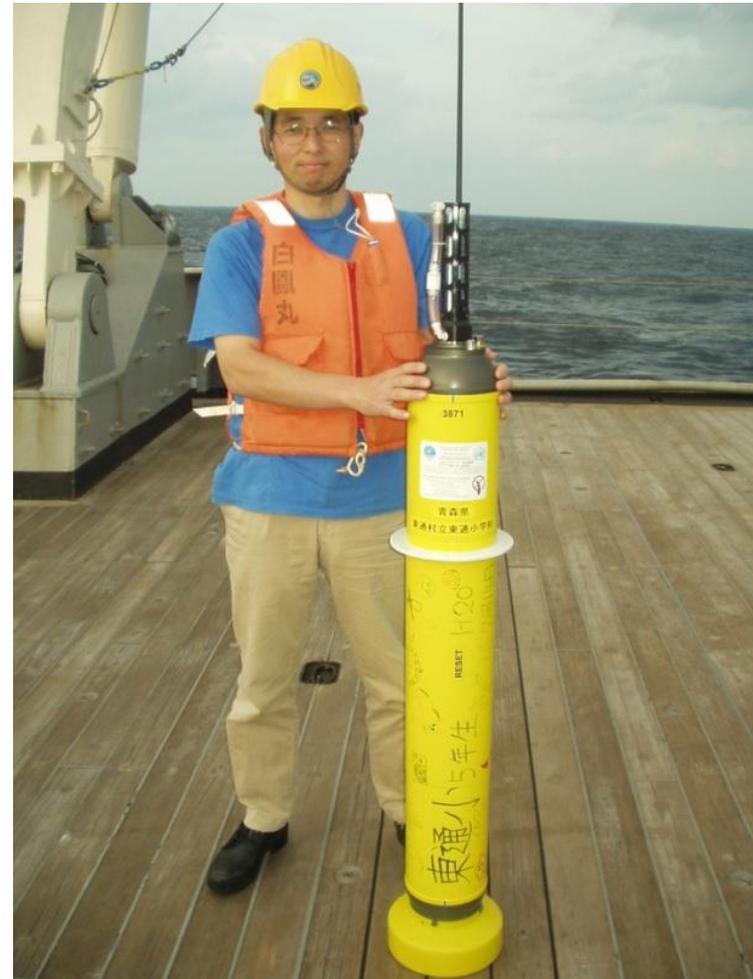
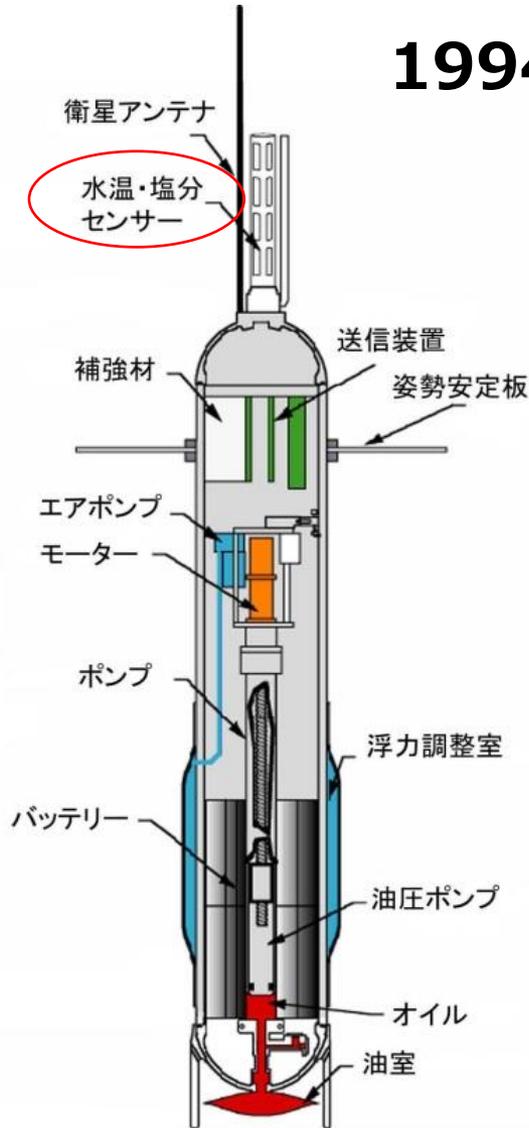
System % sustained, of initial goals

5. 海洋科学の役割



自動観測ロボット：プロファイリング フロート

1994年ごろ登場



5. 海洋科学の役割

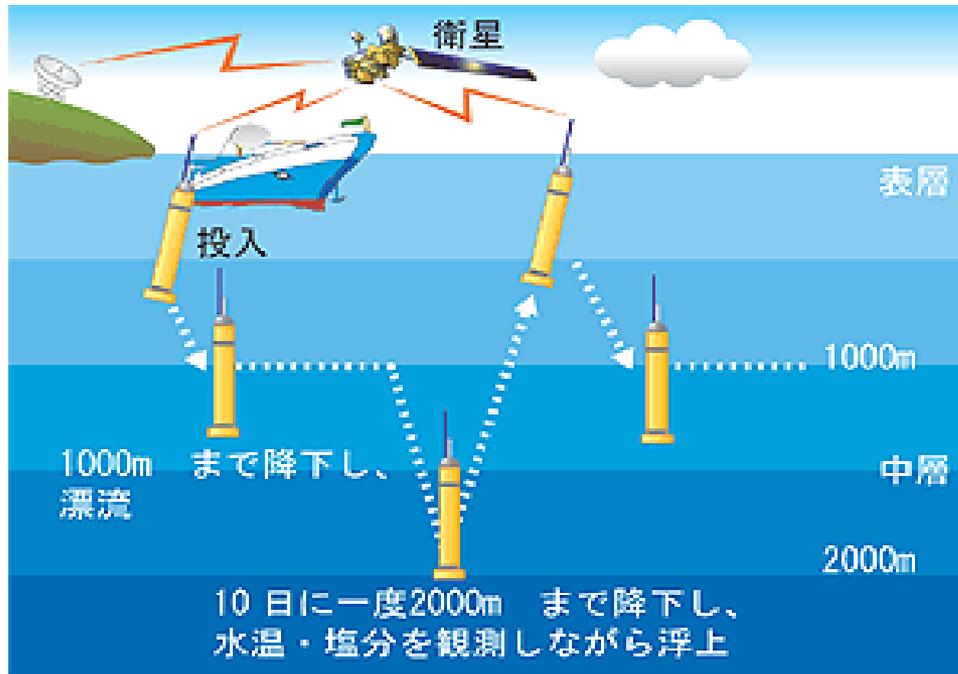


国際アルゴ計画 (Argo) : プロファイリングフロートによる観測網

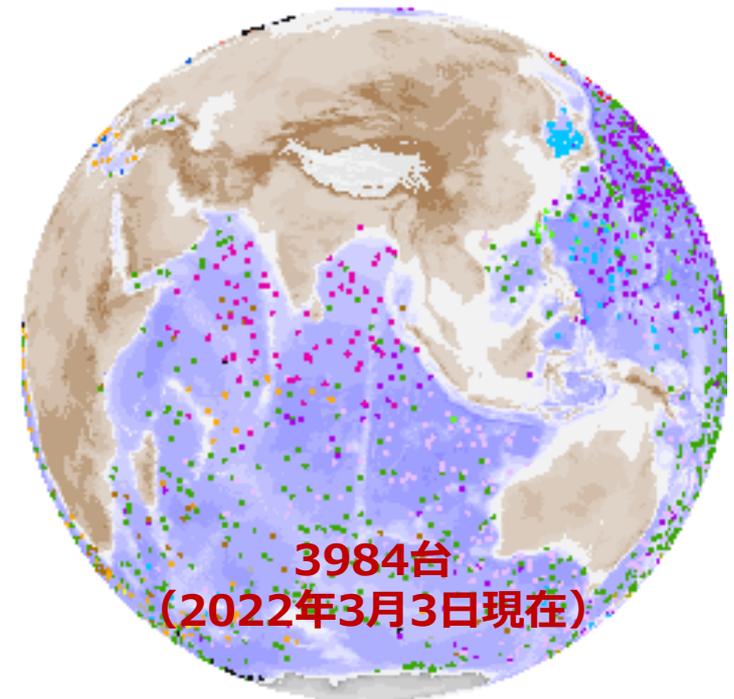
世界の海の温度と塩分を継続的にくまなく測るために、20カ国以上が協力して1999年から構築を開始し、2005年ごろから世界の海をカバーしている。

→ “海の温暖化”の把握に大きな貢献

アルゴフロートによる観測



アルゴフロート観測網



5. 海洋科学の役割

新たな技術と新たなニーズに応えたアルゴ (Argo) の拡張

- **Deep (深海) Argo:**

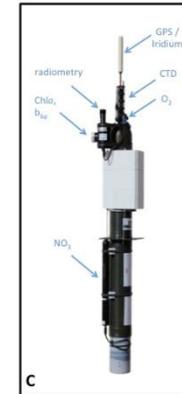
海面から海底までの水温、塩分、海洋循環の変動をサンプリングし、熱、淡水、海水位の地域的、全球的な収支を明らかにする。



深海 (~6000m) の圧力に耐える装置

- **BGC (生物地球化学) Argo:**

生物地球化学的特性をサンプリングし、炭素循環、海洋酸性化、海洋貧酸素化、海洋資源管理などに対応する。



新たなセンサー:
酸素, pH, 硝酸塩,
Chl-a, ...

5. 海洋科学の役割

全球海洋観測システム

Global Ocean Observing System

GOOS

3つのテーマに貢献

- ・海の健康
 - ・気候
 - ・オペレーショナル・サービス
- Operational Service



SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

世界を変えるための17の目標

1 貧困をなくそう	2 気候をゼロに	3 すべての人に健康と福祉を	4 質の高い教育をみんなに	5 ジェンダー平等を實現しよう	6 安全な水とトイレを世界中に
7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに	8 働きがいも経済成長も	9 産業と技術革新の基盤をつくろう	10 人や国の不平等をなくそう	11 住み続けられるまちづくりを	12 つくる責任 つかう責任
13 気候変動に具体的な対策を	14 海の豊かさを守ろう	15 陸の豊かさを守ろう	16 平和と公正をすべての人に	17 パートナシップで目標を達成しよう	SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS 2030年に向けて世界が共通した「持続可能な開発目標」です

アルゴもGOOSの構成要素

コラム③

持続可能な開発のための国連海洋科学の10年（2021-2030年） UN Ocean Decade

ビジョン：

“私たちが望む海”のために必要な科学を。

‘the science we need for the ocean we want’

ミッション：

人類と海洋との関係を一変させるような**海洋科学の変革**と幅広いパートナーシップによって、SDGs に関わる諸課題の解決を目指す。



2021 United Nations Decade
2030 of Ocean Science
for Sustainable Development



CLEAN OCEAN
きれいな海



HEALTHY AND
RESILIENT OCEAN
健全で回復力のある海



PRODUCTIVE OCEAN
生産的な海



SAFE OCEAN
安全な海



ACCESSIBLE OCEAN
万人に開かれた海



PREDICTED OCEAN
予測できる海



INSPIRING AND
ENGAGING OCEAN
夢のある魅力的な海



Understand and beat marine pollution
海洋汚染の減少



Protect and restore ecosystems and biodiversity
海洋生態系の保全



Sustainably feed the global population
海からの食料資源の確保



Develop a sustainable and equitable ocean economy
海洋経済の活性化



Unlock ocean-based solutions to climate change
海と気候変動の理解と予測の促進



Increase community resilience to ocean hazards
海洋災害の警報



Expand the Global Ocean Observing System
海洋観測の促進



Create a digital representation of the ocean
海洋情報のデジタル化の促進



Deliver data, knowledge and technology to all
能力の向上とデータや情報へのアクセス、知識の向上



Change humanity relationship with the ocean
リテラシーの向上と人類の行動変容

6. おわりに

未来を考えるために

- 人間活動にともなう炭素の排出は海の**温度上昇**、**酸性化**、**貧酸素化**をもたらした。さらに、**栄養塩循環**と**基礎生産も変化**させているという証拠がある。
- これらの変化は**気象・海象（高潮など）**や**海の生態系**に影響を与え、**災害のリスク**を高め、**食糧確保**を危うくするなど、わたしたちの**生命・暮らし**に大きな影響を及ぼす。
- 今後、数十年にわたり、これらの影響は大きくなると予測されている。**変化へ適応するための行動・対策**が求められる。また、**脱炭素化社会を目指し、変化をできるだけ緩やかにする**ことで、適応するための時間を確保することができる。
- 海洋科学には、物理学的・化学的・生物学的な側面を統合した理解の追求と海の現状と将来に関する有用な情報を社会に供給することが求められている。

