

海洋の長期観測による「海洋の健康診断」

中野俊也（気象庁 大気海洋部 環境・海洋気象課 海洋気象情報室）

1. はじめに

地球表面積の 70%、水の存在量の 97%を占める海洋は、地球温暖化の原因となる人為起源二酸化炭素（ CO_2 ）の約 30%を吸収するとともに、気候システムに蓄積された熱エネルギーの増加量の約 90%を蓄えています。つまり、これまで海洋は、地球温暖化を緩和する重要な働きをしてきたと言えます。しかし、これらの働きは、同時に、海洋の「温暖化」、「酸性化」、「貧酸素化」など、海洋環境に顕著なストレスを引き起こしていることが分かってきました（Turley et al., 2013(国連持続可能な開発会議 (Rio+20), 2012); IPCC 第 5 次評価報告書, 2013; IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書, 2019 ほか)。これらの変化は、近年、社会活動に多大な影響を及ぼす豪雨や大型の台風の発生、さらに海洋熱波等を引き起こしています。また、海洋生態系の変化をもたらし、水産業や観光業等の影響を通じて、社会経済活動に広汎で深刻な悪影響を及ぼすことが懸念されています。

海洋環境の変化は、静かに進行する「生活習慣病」のようなものです。変化が誰の目にも明らかになってからでは、修復(治療)は著しく困難となります。いましか観測できない海洋環境の詳細なデータ(記録)を次世代に残しつつ、その微小な変化を監視(定期健診)し、より不確かさの小さい将来予測(診断)をもとに、適切な適応策や緩和策(治療方針)を考え、実行することが肝要です。

本講義では、気象庁等が担っている国際的な海洋観測システムの概要を紹介し、近年明らかになってきた日本周辺から世界の海で起こっている変化について解説します。

2. 気候・地球システムにおける海洋の役割

地球の気候は、大気、海洋、及び陸域における物理過程を中心に様々な現象が起こっており、それぞれの間での相互作用をひとつの「気候システム」として統合的に理解しなければいけません(図 1)。さらに、温暖化の将来予測における不確実性を低減するためには、炭素をはじめとする物質循環や、それに係る生物や化学過程を含めた「地球システム」として考えることが必要です。

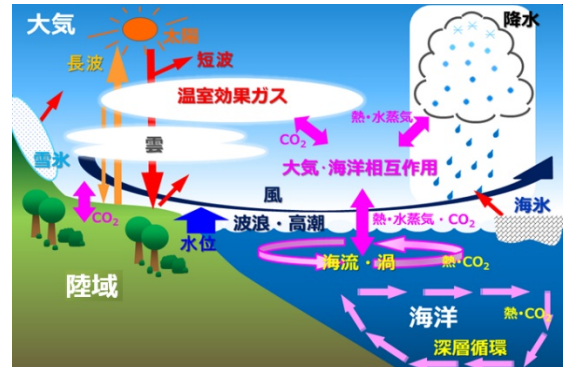


図 1 気候システムの概念図

気候・地球システムにおける海洋の大きな特徴は、熱的慣性が大きく、変動の時間スケールが長く、地球上のほぼすべての元素が存在している、ということです。熱的慣性については、海洋は熱を蓄えることができる量(熱容量)が、大気の約 1000 倍あります。言い換えると海洋が 0.001 度上昇する熱量を大気に与えると大気は 1 度上昇するということであり、熱を蓄積しやすいということです(暖まりにくく冷めにくい)。また、変動の時間スケールが長いということは、何かの原因で生じた変動を長時間保持します。そして、ほぼすべての元素が存在しているということは、いろんな物質が溶け込んでいるということです(Nozaki, 1997)。これらのことから、海洋は、熱や物質の巨大な貯蔵庫であり、海面を通じた熱、淡水や物質の交換過程を理解することが重要なのです。

3. 長期変化を検出するための海洋観測の概要

海洋の状態を把握するには、現場観測が必須です。現在の海洋観測は、多種多様な手法で行われ、観測項目也多岐にわたります。これまでは、主に専用の観測船や商船等の船舶によるものでしたが、近年は自動観測装置の展開や継続的な衛星観測が中心となっており、飛躍的に観測データ数が増加しています。長期変化を把握するための主要な観測手法である観測船、アルゴ(Argo)フロート、検潮所と人工衛星による潮位観測の概要を紹介します。また、データを流通と利用するために必要なことを示します。

3.1 観測船による海洋観測

観測船による海洋観測は、その時のある深さにおける、最も確かな測定値が得られます。これは、観測に使用する測器の校正履歴等が管理されており、測器の経年変化や劣化の影響が非常に小さいからです。また、化学成分の測定値は、標準物質を適切に用いることで、測定値の不確かさは、ほかの手法の測定値に比べて小さく、より信頼性が高いものとなります。気象庁の観測項目は、水温、塩分、流れ、溶存酸素量(O_2)、栄養塩(リン酸塩、硝酸塩、亜硝酸塩、ケイ酸塩)、炭酸系(全炭酸、アルカリ度、水素イオン濃度指数(pH))、フロン、植物色素量等です(https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/description/obssystem.html)。これらの項目は、世界気象機関(WMO)やユネスコ政府間海洋学委員会(IOC/UNESCO)が推進する国際的な海洋観測システム(GOOS)が定めた必須海洋変数(EOVs)となっています。なお、EOVsは、WMOやIOC/UNESCO等による全球気候観測システム(GCOS)の必須気候変数(ECVs;<https://gcoss.wmo.int/en/essential-climate-variables>)の概念を海洋に適用して定められました。

主要な海洋観測は、電気伝導度水温水深計(CTD)と多筒採水器を組み合わせたシステムで最大 6000m の深さまで行います(写真 1)。



写真 1 気象庁の海洋気象観測船における CTD システム

CTD システムでは、専用のワイヤーにより、センサーの圧力、水温、電気伝導度(塩分に変換)を 1 秒間に 24 個データを取得し、船上の計算機によりリアルタイムでモニターしています。気象庁のシステムでは、10L の採水器が 36 本付いており(採水器の容量は 12L や 5L 等のものもあり、本数も 24 本や 12 本などがあります)、揚収する途中で、36 層の任意の深さで採水し、化学成分の分析を行います。CTD システムには、ほかのセンサーのデータを取り込むことが可能で、気象庁では海水中に溶け込んでいる O_2

を測定するセンサーを追加しています。

3.2 Argo フロートによる観測

技術的な進歩により、長期間安定して動作する各種センサーが開発され、自動観測装置による観測が増加しています。特に、2000 年に開始された 2000m までの深さを 10 日毎に上下し、水温と塩分を測定する Argo フロートが、国際 Argo 計画のもと、各国の協力で、展開されたことが大きく貢献しています(図 2: 日本では 2000 年から 5 年間ミレニアムプロジェクトとして開始)。現在、約 4000 台のフロートが稼働しており、長年観測船で得られてきた鉛直プロファイルの数を超えています。最近では、水温、塩分だけでなく、 O_2 、硝酸塩、pH、クロロフィル等の生物地球化学に関する成分を測定するフロート(BGC(Biogeochemical) Argo)や、最大 6000m まで観測できる Deep Argo が展開されています。

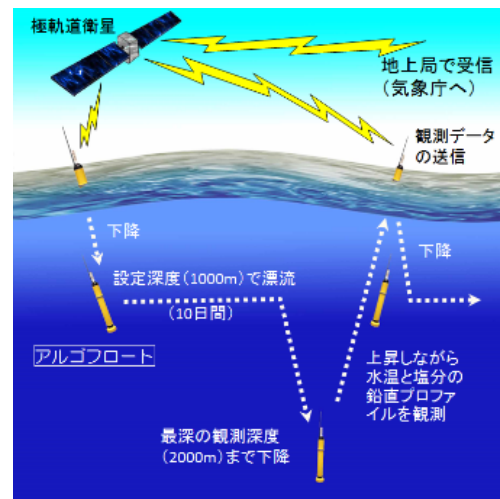


図 2 アルゴフロートの観測サイクル

(https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/el_nino/learning/faq/faq6.html)

3.3 検潮所と人工衛星による潮位(水位)観測

長い歴史を持つ観測として、港湾に設置された検潮所による潮位観測があります(機関によって名称が異なり、気象庁は検潮所、海上保安庁は験潮所、国土地理院は験潮場)。これまで、高潮や津波等の防災、港湾工事、航海、漁業や潮汐予報等の基礎資料としての役割が大きかったのですが、近年は温暖化に伴う水位上昇の監視として重要になっています。潮位データには、地震や地下水のくみ上げによる地盤変動を含んでいますので、その変化を把握するための測量や検潮所の近くでの GPS 観測により、デー

タを補正する必要があります。

検潮所で検出できる水位変動は、沿岸域に限られますが、海面高度計を搭載した人工衛星 (TOPEX/Poseidon と ERS-1) が 1992 年に打ち上げられ、本格的に運用されたことで、外洋も含めた水位変動が評価できるようになりました (市川, 2014)。全球の水位変動については、季節変動やエルニーニョ等による変動を区別して知ることができ、海洋の表層循環の強さの変化に伴う海域による上昇率の違いがわかりました。また、詳細な海面高度 (SSH) の分布が分かるようになり、海洋における直径約 200 km 中規模渦の挙動や、黒潮等の流路変動の把握等、海洋物理学の進展に貢献しています。

3.4 観測データに必要な情報

全球の海洋観測は、ある国のある機関だけで行うことはできないので、国際協力が必要です。また、観測データは、品質管理を行い、各機関がいつでも利用できるようにしておくことが重要です。

海洋環境の微小な長期変化を短期間でより正確に検出するためには、自分が計測したデータと別の機関が異なる時期のデータを信頼して使用するための情報 (メタデータ) が必要になります。従って観測は、計測標準を適切に使い、測定値は国際単位系 SI (BIPM, 2019) に準拠し、追跡可能性 (traceability) と比較可能性 (comparability) を確保し、かつ、その不確かさ (uncertainty) が付与されていなければいけません。

具体的な情報としては、測器のメーカーや型式、その装置のセンサーの校正履歴、及び公表している値の補正方法等です。また化学成分の場合は、分析方法や用いた試薬のメーカー等の情報です。さらに、観測手法や測器のメンテナンス等を、できるだけ同じようにするためのマニュアルが必要です。国際的には GO-SHIP マニュアル (2019) が、国内では日本海洋学会による「海洋観測ガイドライン第 4 版 (2018)」があります。このガイドラインは、海洋観測を行う機関に広く使ってもらえるように、学会の Web サイトから入手することができます。

また、データの流通に関しては、関係機関や研究者が利用しやすいようにデータを統合して公開するデータセンターが必要になります。日本では、各機関は、海上保安庁海洋情報部「日本海洋データセンター (JODC)」に提出し、そこから米国海洋大気庁

(NOAA) の NCEI に送られます。また、項目によっては国際的な観測プログラムのデータセンターが収集・管理しています。

4. 海洋の長期変化に関する観測事実

ここでは、全球規模と日本周辺で確認されている海洋の長期変化と、気象庁の代表的な観測定線 (137 度線) における長期変化について紹介します。

4.1 全球と日本周辺での長期変化

まず、海洋が熱を吸収・蓄積したことによる、海水温の長期変化について示します。気象庁の解析では、全球平均水温 (SST) は $+0.56^{\circ}\text{C}/100$ 年の上昇です (https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/glb_warm/glb_warm.html)。上昇率は海域によって異なり、黒潮や湾流といった西岸境界流領域が顕著であることがわかっています (Wu et al., 2012)。

一方、日本近海 SST は、 $+1.16^{\circ}\text{C}/100$ 年の上昇で (https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html)、上昇率は、全球平均よりも大きく、日本の気温の上昇率 ($+1.26^{\circ}\text{C}/100$ 年) と同程度となっています (https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html)。ただし、上昇率は海域によって異なり、日本海北部で最も高く $+1.75^{\circ}\text{C}/100$ 年です。

また、深さ 2000m までの海洋貯熱量 (海洋が蓄積した熱エネルギー) は、長期的に増加しています (https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/ohc/ohc_global2000.html)。また昇温は、南極大陸周辺の南大洋を中心に 4000m 以深でも確認されており (図 3)、北西太平洋においては、1990 年代半ばから、 $0.005 \sim 0.01^{\circ}\text{C}$ 昇温しています (https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/b_1/deep/137e_deep.html)。

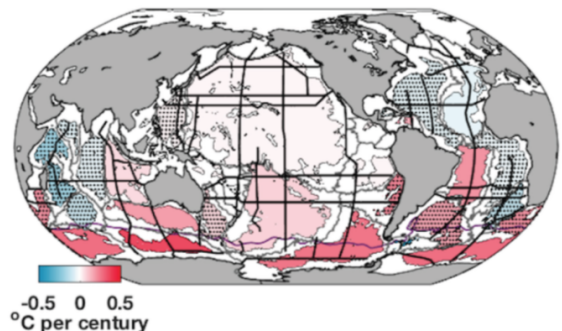


図 3 1981~2019 年の間で 4000m 以深における 100 年あた

りの水温上昇率（海洋・雪氷圏特別報告書 5 章 図 5.4）

昇温の影響は、海面水位の上昇として現れています。海水の熱膨張や、グリーンランド及び南極の氷床の減少、さらに氷河の減少により、1902 年～2010 年の期間に、世界平均海面水位は 0.16m [0.12～0.21m(95%信頼区間)] 上昇し、最近の数十年は加速しています(IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書, 2019; https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/knownledge/sl_trend/sl_ipcc.html)。今後も水位上昇が続けば、日本では高潮等による被害が大きくなることが懸念されています。

次に、海洋が CO₂ を吸収してきたことによる長期変化について示します。まず、人為起源 CO₂ 排出量は、2000 年代の平均として 1 年あたり約 90 億トン炭素とされています(IPCC, 2013)。そのうち、全海洋の海面を通じてやりとりされている CO₂ 吸収量は、1990～2019 年平均で 20±7 億トン炭素/年です(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_2/co2_flux_glob/co2_flux_glob.html)。ここで、トン炭素は炭素の重さに換算した CO₂ の量、±は 90%信頼区間です。このように、海洋が CO₂ を吸収し続けたことで、「もうひとつの二酸化炭素問題」と言われる酸性化が起っています。酸性化を示す指標は、水素イオン濃度指数 (pH) を用います。海面での pH は約 8.1 の弱アルカリ性なので、酸性ではありませんが、長期的に徐々に pH が低下し酸性に近づくということで、酸性化と呼ばれています。IPCC 第 5 次評価報告書(2013)では、産業革命以降すでに 0.1 低下(水素イオン濃度は約 26%増加に相当)しています。1990 年以降、海面における pH の全球平均低下速度は 0.018/10 年で、約 0.05 低下しています(https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_3/pHglob/pH-glob.html)。各大洋においてもほぼ同じくらいの低下速度となっており、全球規模で酸性化が進んでいます。

最後に、生態系への影響が懸念され、CO₂ や栄養塩といった物質循環にとって重要な役割がある O₂ が減少しているという長期変化(貧酸素化)について示します(図 4)。貧酸素化は、多くの海域で確認されており、特に赤道域で顕著で、北太平洋では亜寒帯域で、減少しています。

4.2 気象庁 137 度線における長期変化

気象庁は、日本周辺を含む北西太平洋海域に観測

定線を設定して観測を行っています。その中で東経 137 度線に沿った観測は、1967 年(昭和 42 年)の冬季に凌風丸 II 世によって開始され、50 年以上継続している世界に類を見ない観測定線です(https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/OI/137E_summary.html)。東経 137 度線は、日本南岸から赤道域に至り、北西太平洋の主要な海流を横断し、水温・塩分等の観測データはエルニーニョ/ラニーニャ現象を始めとする気候変動に係わる長期変動を捉えています。137 度線の観測データは、気象庁だけでなく国内外の研究者に解析研究のために利用され、北西太平洋の海洋構造や気候変動に係わる海洋の長期変動解明等に関する多くの知見が得られています(Oka et al., 2018)。特に、特定の形成過程を持ち、特有の水温や塩分の値で定義することができる北西太平洋域の代表的な三つの「水塊」(亜熱帯モード水、中層水、回帰線水)を利用し、長期変化だけでなく、北太平洋で卓越する 10 年スケールの変動(PDO)に関する多くの研究があります。

また、北西太平洋域における海洋による CO₂ の吸収や酸性化に関する解析結果を公開しています(https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/index_co2.html)。

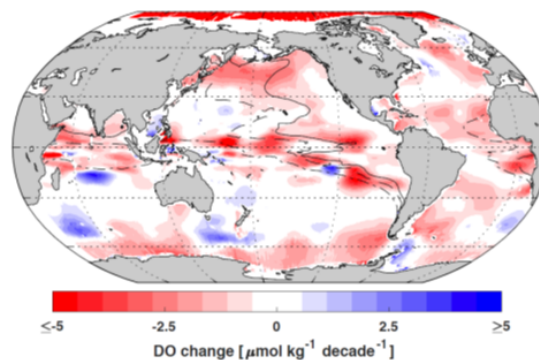


図 4 1960～2010 年の間で 1200m 以浅における 10 年あたりの O₂ の変化率(海洋・雪氷圏特別報告書 5 章 図 5.9)

5. おわりに

海洋環境の変化は、海域はもちろん、深さによっても異なるので、代表的な海域だけ観測すれば良いというものではなく、万遍なく観測しなければいけません。また、海洋環境の変化に関する諸現象は、時空間的に幅広いので、それらを総合的に理解するには、観測船によるより正確な観測に加え、Argo フロートや人工衛星等の多様なプラットフォームによる時空間的に密なデータが得られる観測も必要です。

そして、観測されたデータは、品質管理をし、アーカイブして、各国の関係機関の方が容易に使えるようにしておくことが重要です。一方、長期変化の把握やその原因の理解には、観測データが増加しただけでなく、計算機資源が増大したことで、数値モデルの高精度化や精緻化、さらに高度な同化手法が開発され、過去から現在に至る海洋環境が再現されたこと(再解析データの構築)も忘れてはいけません。

海洋環境監視と将来予測モデルの開発には、それぞれの特徴を生かした相補的な関係による観測システムを構築していくことが不可欠です。世界中の海洋の微小な変化をより短期間に正確に検出する海洋観測システムは、国際的な連携のもと、今後も継続していかなければいけません。現在の状態をより正確に記録し将来に残すことが、いまを生きる私たちの責任であると考えます。

参考文献

- BIPM (2019): The International System of Units (SI). 9th edition.
<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>
- 市川 (2014): 21 世紀初頭の衛星海面高度計. 海の研究, 23(1), 13-27.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/23/1/23_13/_article/-char/ja/
- GO-SHIP Repeat Hydrographic Manual (2019) :
<https://www.go-ship.org/HydroMan.html>
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
<https://www.ipcc.ch/srocc/>
- 日本海洋学会海洋観測ガイドライン第 4 版(2018):
<https://kaiyo-gakkai.jp/jos/guide>
- Nozaki (1997): A Fresh look at element distribution in the North Pacific Ocean. *EOS. Trans* 78, 221.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/97E000148>
- Oka et al. (2018): Fifty years of the 137°E repeat hydrographic section in the western North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.* 74, 115-145.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10872-017-0461-x>
- Turley et al. (2013): Sour and Breathless-Ocean under stress.
<https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/hot-sour-and-breathless-%E2%80%93-ocean-under-stress>
- Wu et al. (2012): Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, 2, 161-166.
<https://www.nature.com/articles/nclimate1353>

略語

- CTD : Conductivity, Temperature, Depth profiler
 ECVs : Essential Climate Variables
 EOVs : Essential Ocean Variables
 GCOS : Global Climate Observing System
 GOOS : Global Ocean Observing System
 GO-SHIP : Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigation Program
 IOC : Intergovernmental Oceanographic Commission
 IOCCP : International Ocean Carbon Coordination Project
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
 JODC : Japan Ocean Data Center
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
 NCEI : National Centers for Environmental Information
 PDO : Pacific Decadal Oscillation
 SSH : Sea Surface Height
 SST : Sea Surface Temperature
 UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
 WMO : World Meteorological Organization