

北極における地球環境研究とそのデータの取り扱い

大学共同利用法人 情報・システム研究機構
国立極地研究所 国際北極環境研究センター 特任准教授

矢吹 裕伯



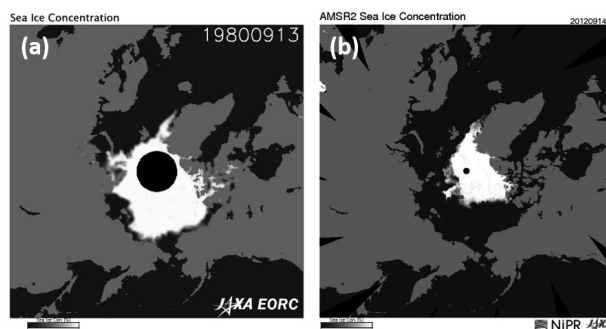
要 約

地球温暖化の影響が著しく大きい北極域では、近年において北極海の夏季の海水面積の減少が続き、特に2000年代に入って急激に減少している。北極域では海水域の減少だけではなく、大気や海洋、雪氷、陸域生態系にも様々な変化が起きている。また北極海の海水域の減少は、北極域に埋蔵する資源や北極海を航行する北極海航路など社会的に大きな関心事と結びついている。北極域での出来事は、日本は北極海沿岸国でないが、北極域での環境変動の解明が日本の気候変動にも大きく関連することも含めて、科学のおよび政治的にも非常に注目を集めている。本稿では北極域で起きている地球温暖化を背景とした国際的な動き、またそれに関連する日本の科学的な流れおよび国家プロジェクトとして北極研究についての現状、またその北極研究で重要視されているデータの取り扱いとその公開について、北極域データアーカイブシステムの開発の経緯と合わせて紹介する。

目次

1. 北極域の環境変化
2. 日本における北極域研究の歴史
3. 北極をめぐる国際的情勢
4. 日本の北極科学的プロジェクト
5. 北極域データアーカイブシステム (ADS)
6. 現場観測データ
 - (1) メタデータ
 - (2) 極 (KIWA)
7. 衛星観測データ
 - (1) 衛星データの可視化公開
 - (2) 船舶用衛星データ配信システム (VENUS)
 - (3) みらい北極航海 2018
8. まとめ

布であった9月13日を示しており、(b)は2012年9月14日の衛星観測史上最少を記録した海水密接度分布をしている。1980年には $7.77 \times 10^6 \text{ km}^2$ であった夏季の海水面積が2012年には衛星観測史上最少の $3.21 \times 10^6 \text{ km}^2$ になった。



(図1 1980年と2012年の衛星搭載マイクロ波放射計がとらえた夏季の北極海の海水分布(a)1980年9月13日の夏季最小海水分布図、(b)衛星観測史上最少を記録した2012年9月14日の海水分布図)

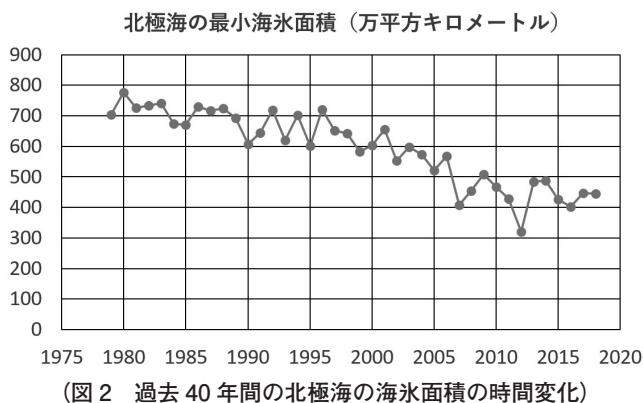
1979年～2018年の40年間の衛星データの蓄積から、北極海の夏季の最小面積の減少傾向を見ることができる(図2)。

海水は、その白さから太陽光のほとんどを反射するが、海水が減少すると海が太陽光を吸収するようになり、北極域がさらに暖まる。一方陸上でも北極域にある多くの氷河は縮小を続けており、広大な氷の塊であるグリーンランド氷床の融解や末端氷河の流出崩壊が

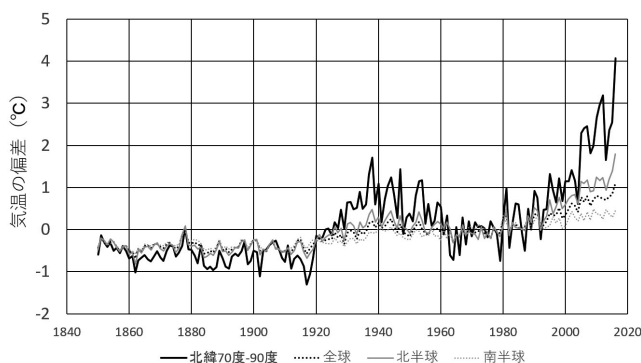
1. 北極域の環境変化

北極域は地球の中でも温暖化が最も顕著に現れている地域であり、大気・海洋・雪氷・陸域が急速に変化している。2013年9月に発表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次報告書(AR5)第1作業部会報告書⁽¹⁾では、1880年以降で世界の平均気温が0.85度上昇していることが述べられている。同報告書は、地球温暖化を示す証拠として北半球の海水域の顕著な減少傾向を示している。図1に1980年と2012年の衛星搭載マイクロ波放射計がとらえた夏季の北極海の海水分布を示している。(a)は1980年の最小海水分

著しく、世界の海面水位の上昇につながると懸念されている。このような雪氷融解による陸水の海洋への淡水供給の増加は、海洋構造や循環等の変化など、海洋へも様々な影響をもたらすことが分かっている。加えて北半球の春季の積雪面積の減少や広範囲な積雪期間の短縮化など雪や氷に関連する変化が著しく、大気の流れや陸上の生態系へも大きな影響を与えることが予想されている。陸上植物の活動に変化が起きると植物が吸収する二酸化炭素の量が変化し、再び地球温暖化を左右することにつながってきている。



このような北極域の変化は、温暖化を加速し、全球的な気候システムにも大きな影響をもたらすことが分かっている。現在の温暖化は、人為起源の二酸化炭素の増加によるものと考えられている。中でも北極域では全球平均の2倍以上の速さで温暖化が進行している(図3)。これを「北極温暖化増幅」と呼び、その原因の解明が早急に求められている。このような北極域の温暖化のプロセスの解明や、気候システムを理解し、将来予測を行うことが研究面で非常に注目されている。



(図3 1961年から1990年までの領域毎の平均から気温の偏差(°C) Cowtan and Way (2014) のデータセットを元に作図)

温暖化は、図2で示すように、北極海の海水面積の減少が続き、特に2000年代に入って急激に減少して

いるように、北極海の利用可能性が広がっている。これにより、産業界からも北極域の資源の活用や、北極海で持続的に船舶が行き来できる可能性による北極海航路が注目されるようになってきている。

2. 日本における北極域研究の歴史

日本の中でいち早く北極研究に取り組んだ研究者は北海道帝国大学理学部物理学教授の中谷宇吉郎といわれている。人工雪結晶の作成に成功し、「雪は天からの手紙である」という言葉が有名であるが、中谷宇吉郎は戦後1949年、国際雪氷委員会の招きで米国・カナダ出張、1952年より米国雪氷永久凍土研究所(Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, SIPRE)主任研究員として、アラスカ・メンデンホール氷河の単結晶氷の研究を始めた。また1957年には米国IGY(国際地球観測年: International Geophysical Year)遠征隊としてグリーンランドにおいて氷の物性研究を行い、また1959年には北極海の氷島T-3視察、主に海水・海洋観測を期待され、六車二郎、楠宏、樋口敬二が2年にわたって参加した。これらが日本で最初の北極研究といわれている。その後国立極地研究所は、1991年にノルウェー極地研究所の協力の下、スバルバル・ニーオルスン観測所を設置した。また1997年にはアラスカのフェアバンクスにJAMSTEC(海洋科学技術センター、後の海洋研究開発機構)とNASDA(宇宙開発事業団、後の宇宙航空研究開発機構;以下「JAXA」と記す)の支援を受けてアラスカ大学は国際北極圏研究センター(International Arctic Research Center, IARC)を設立した。その間も含めて現在まで、国立極地研究所、JAMSTEC、JAXA、北海道大学、名古屋大学、国立環境研究所等をはじめとする日本国内の大学や研究機関によって日本の北極研究は継続している、その詳細は山内(2016)⁽²⁾に詳細が書かれているのでそちらを参照してほしい。

3. 北極をめぐる国際的情勢

日本は北極研究を行ってきたとはいえ、非北極圏国としては、1980年代後半までの冷戦構造の中では、北極域の観測には行き難かった。その中で1987年ソ連にゴルバチョフ書記長の北極解放に関するムルマンスク宣言がなされると、国際的に北極研究が注目されるようになり、国際北極科学委員会(International Arctic Science Committee, IASC)⁽³⁾が1990年に発足

し、日本もそれまでの北極研究の実績が認められることで、1991年に加盟している。一方科学以外の政治面でも1996年に北極圏国（8ヶ国：米国、カナダ、フィンランド、アイスランド、スウェーデン、ノルウェー、デンマーク、ロシア）によって北極評議会（Arctic Council：AC）⁽⁴⁾が設立された。そのACの目的は北極圏に係る共通の課題（持続可能な開発、環境保護等）に関し、先住民社会等の関与を得つつ北極圏諸国間の協力・調和・交流を促進することであった。日本は2009年7月にACのオブザーバー申請を行い、その後、2013年にACのオブザーバー参加が認められた。ACオブザーバー資格の承認基準として、“ACの活動に関連してオブザーバー資格申請国が北極圏に有している関心、専門知識を示すこと”，“AC加盟国および常時参加者と協力して北極圏が抱える問題の国際機関への提示などの協力を通じて、ACの活動を支援する具体的な関心を示すこと”，とある。日本のACにおけるオブザーバー資格承認の背景には、これまでの日本の大学、研究所が蓄積してきた、北極研究の実績が寄与していることは言うまでもない。北極評議会は国際機関ではないものの、実質的に北極に係る国際協力の調整、ルール形成をリードする動きがある。日本が北極評議会へ関与することのメリットは、北極を巡りどのような議論があるのか関係国の動きを知る機会であると共に、国際ルール作りへ関与する機会であるといえる。

日本では、北極をめぐる様々なステークホルダーからの要請に対して、より新しい科学成果の公開、それを環境政策や経済活動などに生かしていく体制が検討されている。このような北極をめぐる国際社会の関心の高まりは、地球温暖化による北極海の海水の融解という現象だけでなく、温暖化によって減少した北極海の海水がない時期や範囲において北極海航路の活用やエネルギー資源の活用の可能性等様々な要因による。我が国も北極をめぐる様々な事柄に関わるためには、北極政策を取り組む国家意思を表明し、北極問題の主要プレーヤーとして国際的な取り組みに参画し、貢献する方針であることを内外に明らかにする必要がある。またその主な方策は、北極域における観測・研究、環境対策等、日本の強みである科学技術を基盤とした取組方針をアピールし、国際ルール作りに主導的役割を果たすと共に、多国間、二国間の緊密な国際協力関係を構築することにある。

日本はこのような国際的な背景のもと、2013年4月に閣議決定された第2期海洋基本計画⁽⁵⁾において、北極に関する取組の記載を行うなど北極への関心を内外に示した。また2015年10月には内閣府の総合海洋政策本部によって「我が国の北極政策」⁽⁶⁾を発表した。さらに2018年5月に閣議決定された、第3期海洋基本計画⁽⁵⁾では主要施策としてはじめて“北極政策の推進”が位置づけられた。このようにわが国では、政府レベルで積極的な北極への関与が行われているというのが現状である。

4. 日本の北極科学的プロジェクト

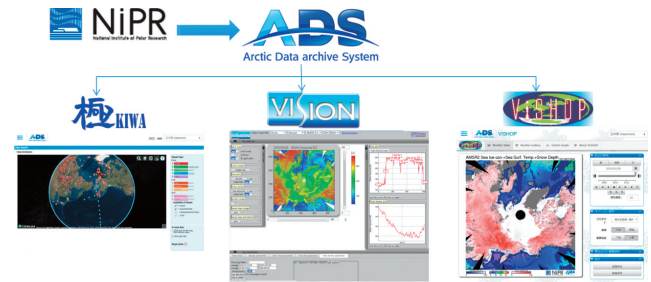
このような科学的、政治的背景により、日本では、2010年7月に北極に関する組織的・継続的な観測・研究体制を整備、関係省庁・機関間の連携強化、および我が国の北極研究に一層の推進を図るため文部科学省、科学技術審議会、緩急計画・評価分科会、地球観測推進部会において、北極研究検討作業部会（安成哲三主査：研究開発局環境エネルギー課所掌）が設置された。その中で、わが国の北極研究のあり方、研究を効率的に進め、かつわが国の存在感を増すためにオールジャパンの研究体制が必要であること、北極研究コミュニティをまとめるべく北極環境研究コンソーシアム（JCAR: Japan Consortium for Arctic environmental Research）⁽⁷⁾を結成することの方向性が答申され、2011年度予算にて、グリーンネットワークオブエクセレンス（GRENE）事業の中に北極気候変動分野が認められた。そのプロジェクトは2016年まで継続し、世界をリードする研究として「北極温暖化と中緯度リンク」や北極海航路の本格実利用に向けた研究が行われた（Honda et al. 2009⁽⁸⁾，Inoue et al. 2012⁽⁹⁾，Nakamura et al., 2015⁽¹⁰⁾）。このプロジェクトは文部科学省からのトップダウンの戦略研究目標提示とコミュニティからのボトムアップの研究課題の提案の両者がうまく組み合わさったユニークな研究プロジェクトであった。また、その後2015年より後継プロジェクトは、AC対応の科学外交を背景とする国際共同研究を推進する北極研究推進プロジェクト（ArCS）として立ち上がり現在も継続している。現在日本国内では、このように国家事業としての北極研究プロジェクトが行われている。

5. 北極域データアーカイブシステム (ADS)

このような地球温暖化や様々な政治的背景の下、国立極地研究所（以下「極地研」）では、GRENE 事業北極気候変動分野（2011 年～2015 年）⁽¹¹⁾および ArCS（北極域研究推進プロジェクト：2015 年～2020 年）⁽¹²⁾のもと、大気、海洋、雪氷、陸域、生態、モデル等の複数分野にまたがるデータの集積・共有を行い、分野間連携及び融合を目的として、北極域データアーカイブシステム (ADS)⁽¹³⁾の構築を行っている。ADS は、各分野間でのデータの相互利用を図り、現場観測、収集データ、衛星データ、数値実験データ等のデータセットの構築を通して北極域の大気—海洋—陸域システムの変動の実態とプロセスの解明、地球温暖化における北極域の環境変動の影響を評価、将来予測精度の向上に貢献する。

一方データに関わる国際的な動きの主なものとして、2013 年 6 月にロンドンで開催された G8 科学大臣会合共同声明があり、その中で科学的発見やイノベーション、科学の透明化や科学への国民参画等を加速させるための科学研究データのオープン化の提言が行われた。また 2016 年 5 月の G7 茨城・つくば科学技術大臣会合「つくばコミュニケ」においては、“オープンサイエンスに関する世界共通の原則の必要性、オープンサイエンスは学術論文へのオープンアクセスとオープンデータを含む必要性を認識”と記載されている。ここでオープンサイエンスとは、“公的研究資金を用いた研究成果（論文、研究データ）を専門分野・産業界・社会一般から広く容易なアクセスを可能にし、効果的に科学技術研究を推進する、とともに追試験・再検証により研究結果の再現・検証が可能となるようなサイエンスの進め方のこと。”をいう。このようなデータをめぐる国際的な流れからも、国際的なデータの共有および相互利用の重要性からも、ADS の構築・国際的な位置づけが要求されている。また、GRENE 事業においては、衛星観測データの利用の推進と高度化方策を検討することが条件とされ、ADS では、積極的な衛星利用のツールの開発が望まれた。図 4 に ADS の 3 つの基本ツールを示す。1 つは現場観測データをはじめとする研究データを管理検索するシステム（極：KIWA）、2 つ目はリアルタイムに配信される衛星データを可視化公開する極域環境監視モニター（VISHOP）、ブラウザ上でグリッドデータや時系列データを可視化し、解析を可能にするオンライン可視

化アプリケーション（VISION）がある。



（図4 北極域データアーカイブシステム (ADS) の主な3つのサービス、左：極 (KIWA)：研究データ管理・検索システム、VISION：オンライン可視化解析システム、VISHOP：極域環境監視モニター）

6. 現場観測データ

北極域の地球環境変動を理解するためには、北極全域にわたる観測データを集結させて統合し解析する必要がある。しかし、北極域は気象データのみならず、あらゆる科学的かつ社会的なデータが不足している空白域が多い。よって北極域における地球環境変動を理解するためには、北極域における観測を全体として調整する制度・組織が必要である、との認識より政府系の AC および学術系の IASC の国際組織によって、持続的北極観測ネットワーク (SAON; Sustaining Arctic Observing Networks)⁽¹⁴⁾が組織された。SAON は、北極において、持続的で費用負担なく、公開された、かつタイムリーな質の高い観測データへのアクセスを可能とする北極観測活動をどのように実現するかについての提言を行っている。この中で SAON は、様々な国々が取得した現場観測の共有化を求めている。前述した通り、日本の研究者コミュニティは北極域において広範囲かつ長期間にわたって研究を行っており、様々な現場観測データが豊富である。またこれまで実施された GRENE 北極プロジェクトや現在実施中の ArCS プロジェクトでは現場観測を積極的に行っている。ADS はこれらの現場観測データのプロジェクト内での共有化を進めると共に、国際的な観測ネットワークとのデータ共有を進めた。

(1) メタデータ

国際的な観測ネットワークとデータを共有するためには、ルール作りが必要である。通常研究者はデータ利用を始めるにあたり、それぞれの機関がどのようなデータを持っているかを検索することから始める。つまり現場観測データを持つ機関（データプロバイダ）

では、それぞれ観測データが何時、何処で、どのような方法で、どのようなデータを取得したかの情報を作成する必要がある、通常これらの情報を記載したものをメタデータと呼ぶ。

データの相互流通を行うためには守らなくてはならない、国際的に認知されている決まり事としてメタデータの FAIR⁽¹⁵⁾ の原則というものが存在する。つまり、F: Findable (発見), A: ACCESSIBLE (アクセス), I: INTEROPERABLE (相互利用), R: RE-USABLE (再使用) である。現在このようなメタデータの検索は全てインターネットで行われるため、すべての情報がマシンリーダブルである必要がある。F: Findable で注目すべき点は、グローバルに一意でかつ永続的なデジタル識別子を持たせることを要求されている。また A: ACCESSIBLE では、メタデータを流通するための国際的に認知されたプロトコルを実装し誰にでもそのプロトコルを利用してメタデータにアクセスできるようにしなくてはならないことを要求されている。I: INTEROPERABLE ではそのデータを記述する Keyword に関しても決められた語彙を用いて、さらにはメタデータ Format に関しても国際的に認識されている Format を利用するように要求している。また R: RE-USABLE では再利用可能なような明確なデータ使用のライセンスを付与することを要求している。ADS では国際的な観測ネットワークとのデータ連携を進めるために、FAIR の原則を順守しつつ構築を行った。ADS での実装を行ったプロコルを表 1 に示す。

表 1：ADS で利用しているプロトコル

原則	利用プロトコル
F	永続識別子：データ DOI
A	メタデータ交換プロトコル：OAI - PMH2
I	メタデータ Format：ISO19115, ISO19139, NASA-GCMD-DIF Keyword: NASA GCMD Science Keyword
R	データライセンス：Creative Common

F: (発見) として ADS はデータ DOI (Digital Object Identifier) を実装した。DOI はインターネット上のドキュメントに恒久的に与えられる識別子であり、学術論文の分野でよく利用されている。通常 DOI は国際 DOI 財団⁽¹⁶⁾ が付与する識別子であり、日本でも 2012 年よりジャパンリンクセンター (JaLC) が DOI 登録機関として認定され、DOI 付与のサービスを開始している。ADS は実装を行ったデータ DOI は

これまで用いている学術論文等に用いる DOI をデータにも拡張したもので日本では 2015 年より付与が可能になった。ADS は極地研のファシリティーであるため、極地研の図書が JaLC の会員になることで機関として DOI 付与ができることになった。

次に、A (アクセス) で実装を行ったプロトコルは OAI - PMH (Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting) 2 である。この OAI - PMH2 は図書館等で利用されることが多く、相互の図書館でお互いの書誌情報を検索できるサービスとして用いられている。このプロトコルをデータ分野でも利用し、データプロバイダー間のデータ検索を可能にしている。

I (相互利用) として ADS が用いたメタデータ Format は地理空間メタデータ規格と呼ばれる ISO19115 および ISO19139 である。現場観測データは、観測場所として位置情報を持つことから、このメタデータ Format を用いている。また同時に ADS では NASA-GCMD-DIF (Global Change Master Directory - Directory Interchange Format) も同時に採用している。この GCMD-DIF は名前の通り米国の NASA が開発したものであり、NASA が取得する全地球科学データセットとサービスの完全なカタログを維持することを目的として作成された。その後、NASA 以外の地球科学データセットのカタログにも用いられることになり様々な機関で用いられている。ADS は、基本的には現場観測データを記述する独自のメタデータ Format を作成し登録に用いているが、相互交換のためにデータ登録時に ISO19139 および DIF 形式のメタデータを自動的に作成している。また I (相互利用) を進めるために、データを記述するキーワードの語彙集として NASA GCMD Science Keyword を用いている。データは分野が異なると、異なる言葉で表現されることがあり、相互の共通理解をすすめるためには語彙集の共通化を進める必要があり、地球観測データの分野でよく用いられている語彙集を用いることとした。

R (再利用) では、再利用可能にするためには明確なデータライセンスを利用する必要がある、ADS はクリエイティブ・コモンズ・ライセンス (CC ライセンス: Creative Commons license)⁽¹⁷⁾ を利用している。CC ライセンスはインターネット時代のための新しい著作権ルールで、作品 (デジタルコンテンツ) を公開

する作者（我々の場合はデータ作成者）が「この条件を守れば作品を自由に使って構いません。」という意思表示をするためのツールである。CC ライセンスを利用することで、データ作成者は著作権を保持したままデジタルデータを自由に流通させることができ、利用者はライセンス条件の範囲で再配布や利用などを行うことができるものである。CC ライセンスの種類は次の4種類ある。

- ・表示：作品のクレジットを表示すること、
- ・非営利：営業目的での利用をしないこと、
- ・改変禁止：元の作品を改変しないこと、
- ・継承：元の作品と同じ組み合わせの CC ライセンスで公開すること。

CC ライセンスはこれらの条件の組み合わせで形成され全部で下記の6種類ある。

- ・表示 (CC-BY), ・表示—継承 (CC-BY-SA),
- ・表示—改変禁止 (CC-BY-ND),
- ・表示—非営利 (CC-BY-NC), ・表示—非営利—継承 (CC-BY-NC-SA),
- ・表示—非営利—改変禁止 (CC-BY-NC-ND)

ADS では、このようなライセンスを用いることで再利用を可能にしている。ただし、前述したオープンサイエンスという考え方より、ADS では CC-BY, CC-BY-SA の利用を推奨している。

このような FAIR 原則に従い、ADS の現場観測データは国際的に流通を行っている。ADS が、相互運用しているサイトとして GEOSS-Portal⁽¹⁸⁾があり、ここを通して現場観測データの国際的な流通を行っている。尚、GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) とは 2005 年の第3回地球観測サミットにおいて、衛星観測が地上観測といった複数の観測システムを連携させた包括的な全球地球観測システム (GEOSS) が提唱されそれを実現するための GEOSS10 年実施計画が策定され、その計画を推進する組織として地球観測に関する政府間会合 (GEO : Group on Earth Observations) が設立された。GEOSS は公共部門だけでなく民間部門等への幅広いユーザーからの独立した地球観測データを提供し、GEOSS-Portal は世界中の地球観測データの入り口を提供する場である。

(2) 極 (KIWA)

極 (KIWA) は現場観測メタデータを地図上で可視

化して検索するツールである。KIWA は ADS において最初に開発されたツールであり 2012 年より運用を行っている。KIWA は北極地域に広く分布する現場観測地点を空間的かつ時間的に検索できるツールである。北極域全域を表示するためには極座標であることが検索の効率をよくすることと考え、地図検索機能として無料のツールである GoogleEarth (登録商標) を利用していた。GoogleEarth は最新でかつ詳細な衛星画像を利用し、かつ分解能は悪いが、標高データを持ち、衛星画像の3次元表現に優れており、現地観測地点がどのような場所かを判断するためには非常に優れた性能を有していた。また北極域の表示に関しても、極座標で衛星画像を表示しており、性能的には全く問題なかった。このような理由から ADS では GoogleEarth を Web 画面上の組み込み、現場観測地点を可視化検索が可能なツールとしていた。しかし GoogleEarth のデメリットは、デベロッパーの都合によって仕様が変わるところであり、利用者側は仕様の変更のたびにアプリケーションの見直しを必要としたことだった。このようなデメリットも考慮して ADS では GoogleEarth の利用を取りやめたが、利用を止めた決定的な要因は、2013 年頃にネット上の地図 (名指しこそしていないが実質的には GoogleEarth および Map) の地名表記が日本の政府方針と反する名称で表記されているケースがあるとして、政府が全国の自治体や極地研を含む国立研究機関等へ修正通知をしたことだった。政府からの通知は利用を中止することの通知ではなく、政府方針に反する地名表記を修正する依頼であった。しかし ADS では、Google 地図の地名表記を変更することもできずに対策ができるまでサイトを非公開にした。その後、Google ジャパンでは Google ジャパンのサイトからのリンクの場合のみ地名表記を修正するパッチを当てたが、ADS の利用者は国内のみならず、国外のユーザーもいたため、この対策では不十分であり、ADS では GoogleEarth の利用を完全に中止した経緯がある。現在 ADS で利用する埋め込み地図は主に CesiumJS (登録商標) を用いている。CesiumJS は GoogleEarth と同様な 3D 地球儀と地図のオープンソースの JavaScript ライブラリであり、デベロッパーの都合による急な仕様変更もないので安定的に利用可能である。

7. 衛星観測データ

衛星観測データは、国内の研究者だけでなく、北極圏諸国が期待する日本の科学技術の一つである。最新のセンサーを備えた衛星という観測プラットフォームによる国境を超えた探査活動は、北極に領土を持たない非北極圏国である日本が北極域で展開できる活動の中でも、国際協力を推進できるものである。

極域における地上観測の問題点は、広域、遠隔、低温や悪天による滞在の困難性、低温・着雪などによる観測センサーの問題点が多い。また北極圏の国々の領土・領海での観測になるため、観測立ち入りや観測許可の制約があり、その制約領域や国境を越えての広域連続観測も困難である。それら問題点の中で、気候変動の実態把握、将来予測を行うためには、広域にわたる観測データを空間的に広げ、時間的に連続した情報にするためには、衛星観測を積極的に活用する必要がある。日本は、北極をめぐる様々なステークホルダーの要請に対し、より新しい科学の成果の公開や、それを環境政策や経済活動などに生かしていく体制の検討を行っている。北極では、科学研究の成果を通しての外交活動も行われており、科学者はその必要性に答えることを要請されている。北極圏諸国の日本の衛星観測に対する要請は強く、その技術、データや得られた成果を提供することが、北極での科学技術外交に寄与していると考えられる。

(1) 衛星データの可視化公開

ADS に与えられた使命としては、地球衛星観測データの利用の推進と高度化方策を検討し、地球観測衛星データの積極的な利用を推進することにあった。極域の雪氷観測に有効なものとして衛星搭載マイクロ波放射計があり、JAXA は水循環変動観測衛星「しずく (GCOM-W)」の提供を行っている。JAXA と極地研は 2013 年以降、地球観測衛星データを利用した南北極域の科学研究を進めることを目的とした協定を締結した。

極地研は南北極域の海水密接度、海面水温および積雪状況を研究者だけではなく、一般の方々に広く紹介することを目的として、準リアルタイム極域環境監視モニターウェブサイト VISHOP (Visualization Service of Horizontal scale Observations Polar region) も公開した。本ツールでは、GCOM-W に搭載するマイクロ波放射計 (AMSR2) 観測データから、南極・

北極の海水密接度、海面水温および積雪深を可視化して合成画像ほかを作成、公開すること、また時系列変化のアニメーションも含めて閲覧することも可能である。AMSR2 による観測プロダクトは、海水分布だけでなく、海水がなくなった水面の海水温、風速、可降水量があり、海水消滅後の海の状況、または結氷前の海洋表面の状態がわかる。VISHOP はこれらを一度に表示比較することができる。複合する南北極域の環境変化を考えるために AMSR2 で得られる複数の情報を引き出すシステムである。VISHOP で公開する主なデータは JAXA が所有する地球観測衛星データを用いている。極地研は JAXA が所有する地球観測衛星データの利用権を持っておりそのデータを公開するアプリケーションの開発を ADS が行うこととした。

データセンターの基盤として位置づけられる ADS は、長期安定的な運営が望まれるものである。その考えからすると、運営交付金等のような安定した資金によって運営され则认为するのが普通であるが、ADS は文部科学省の補助金によって運営されるものであり、資金的には安定していない。そのような資金的背景を考えると、有料のツールを利用してシステムを構築すると、ライセンス料金は ADS の運営の足かせになると考えた。そこで ADS での開発方針は、無料のツールを利用しそれを組み合わせることでシステムを構築することとした。2014 年 5 月にバージョン 1 をリリースし、その後 2016 年 7 月にバージョン 2 のリリースを行った。バージョン 1 からバージョン 2 への変更時点で利用しているジャバスクリプトライブラリが古くなったものや、新規更新を行っていないものなど多数あり、大幅な変更を余儀なくされた。しかしこれは、無料のツールを利用している上で仕方のないことかもしれない。

またプロジェクトの一環として、2014 年からは東京大学と共同で夏季の北極海の海水の中期予測、また 2016 年からは冬期拡大期の予測結果も可視化して公開している。VISHOP では、AMSR2 観測データの可視化だけでなく、海水面積の年、日変動等の数値もグラフ化して公開している。このサイトは単なる画像データ化されたグラフデータでなく、ユーザーの要望にインタラクティブに描画できるグラフサイトとなっており、多くのユーザーに支持を得ている。

ADS では、さらにデータのオンライン可視化解析

システム VISION (VISualizaon Interactive tool for Online Network) も開発している。衛星を専門としない研究者が、観測域周辺の広域、長期情報の確認、観測に対する付加情報として衛星データを利用することを目的に、ADS では衛星データ可視化解析ツールを開発した。

ADS では、極域衛星観測データユーザーの拡大を期待している。これまで衛星専門家、あるいは専門家に処理を依頼するなど衛星利用研究者にコネクションをもつ研究者に限られていた衛星データ利用が、誰でも短時間のうちに、思いついたアイデアの確認、観測計画の検討、毎日のモニターに利用できるさらに、科学調査以外に、漁業や防災といった現場の利用も可能になる。

また、ADS では観測研究者がこれまであまり得意としてこなかった、グリッドデータ（衛星やモデルシミュレーション）の時系列データの可視化システムを構築中である。広域の変動を解析するために必要なデータとして、衛星データやモデルシミュレーションデータがある。これらのデータはポイントスケールで解析を行う観測研究者にとっては得意な部分ではなかった。これらの空間変動を簡単に可視化できるツールは、観測研究者にとっては、現象の理解だけでなく、さらには観測の設計にとっても有効なものとなり得る。

（２）船舶用衛星データ配信システム（VENUS）

ADS では、ステークホルダーへの情報提供と産学連携の一つの事例として、北極海を航海する船舶に対して、海水データのリアルタイム配信システム（VENUS）を開発した。尚、VENUS は、2018 年 10 月にレイキャビック（アイスランド）で開催された「北極サークル」に日本の外務大臣として初めて参加した河野太郎大臣の“我が国の北極政策に関する基調講演”で取り上げられた。

北極海を航行する船舶は、航海の安全性を確保するうえで、海水状況のデータが不可欠である。前述した通り、極地研では、JAXA より AMSR2 のデータのリアルタイム配信を受けている。AMSR2 のプロダクトである海水密度や海水厚等は、氷海域を航行するために必要不可欠な海水状況データである。氷海域を航海する船舶は、これらのデータのリアルタイム配信を受けることで安全かつ効果的な航海が可能になる。

VENUS は ADS より e-mail によって配信をされた数値データを受信し、可視化を行い、可視化された様々な情報を統合表示できるシステムである。通常、船舶ではデータ送信容量に制限がある。VENUS に用いるデータは、送信容量を小さくするため、必要領域を切り出し、生データを圧縮して送信している。VENUS は、送信された生データを用いて可視化を行い、船舶内で Web サービスによって情報を統合化するものである。また船上ユーザーは生データをダウンロードすることも可能である。ユーザーはそれらのデータを利用してそれぞれの目的に合った作図も可能である。VENUS の表示プラットフォームの基本は衛星データの海水密度、海水温度を表示し、任意の期間をアニメ表示できるものである。ADS では VENUS を海洋研究開発機構の研究船「みらい」や東京海洋大学の実習船「海鷹丸」、南極観測船「しらせ」、また北極航路を利用する一部の民間船舶に設置し、それぞれの氷海域での航海の安全の運航のためにデータの配信を行ってきている。

（３）みらい北極航海 2018

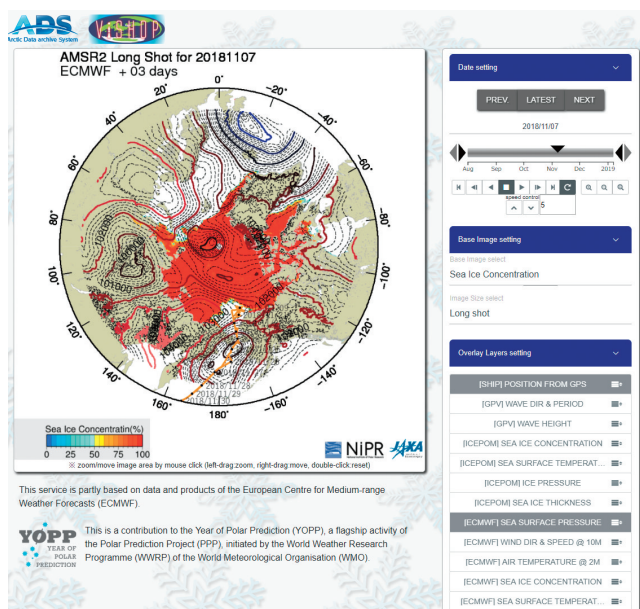
ArCS プロジェクトでは、海洋研究開発機構の「みらい」（写真 1）を用いて、“みらい北極航海 2018”を実施した。みらい北極航海 2018 は、これまで観測データが得られなかった、秋季から初冬の氷の張りだす時期において実施された。みらい北極航海 2018 は、近年の海水減少域における海水の生成機構や大気・海洋の実態把握を行うとともに、波浪ブイを投入することで、氷海域における波浪の実態把握を目的として実施された。みらいは耐氷船の為、この時期に北極海で観測を行うには、最新の海水データやそれにかかわるデータを入手する必要がある。ADS は、VENUS（写真 2）を用いて様々なグループとの共同で、海水データおよび予測データをリアルタイムに送る試みを行った。図 5 に実際にサービスを行った VENUS の画面⁽¹⁹⁾を示した。



(写真1 青森県むつ関根浜港で北極航海出発前の海洋地球研究船みらい)



(写真2 みらい船内 LAN で利用される VENUS のオペレーション画面)



(図5 VENUS のオペレーション画面，図では2018年の海水分布と（北極海），みらいの航路（線），ECMWFの72時間（3日）の気圧配置予報（コンター）)

初冬の北極域での航海において最も重要なものは、気象予測データの他に海水予測情報である。通常、気象予報データとしては、日本域の場合、気象庁の全球

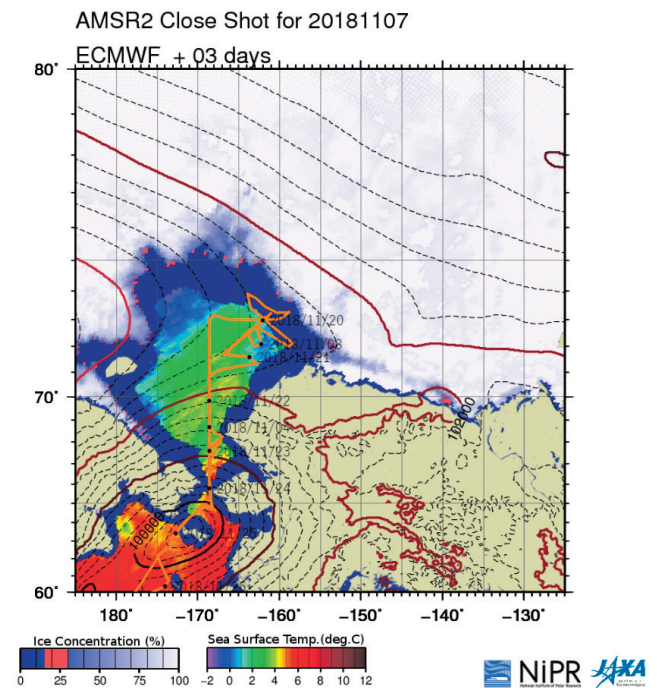
予報モデルデータを用いることが多い。しかし今回は北極域において予測精度に信頼性の高いヨーロッパ中期予測センター（ECMWF）のデータを用いた。通常ECMWFの気象予報データは有料であるが、本航海の観測はWMOが主導する極域予報年（YoPP：Year of Polar Prediction）プロジェクトへの貢献を目的として行っていることもあり、リアルタイムかつ無料で入手することが可能になった。海水予測モデルは東京大学が開発を行う海水予測モデル（IcePOM）を利用した。配信を受けるECMWFの気象予報値は1日2回（00UTC及び12UTC）においてそれぞれ10日間の予測値である。IcePOMモデルは、ECMWFの00UTCに出される気象予報値を外力として用いて10日間の予測値を行った。今回の航行支援で利用したIcePOMの予測値は、海水密度、海水厚、海水面温度等であった。ECMWFからのデータは国立極地研究所の大型計算機センターのサーバーで受け取り、東京大学は極地研のサーバーよりダウンロードを行いIcePOMの外力として用いた。東京大学はIcePOMの予測値を計算終了後ADSへデータの送付を行った。またADSはECMWFの気象予測値、IcePOMの海水予報値、さらにはAMSR2の海水プロダクト、気象庁GPVデータを順次船舶へ送ることとした。ECMWFの予報値は約5時間遅れで配信されることが分かっている。またIcePOMの10日間の予報計算も約5時間程度かかることが予想されていた。今回利用するデータは多種多様にわたり、配信はリアルタイム性が求められるものである。しかし予報値並びに衛星プロダクトともに、それぞれリアルタイムに生成されるものであり、入手タイミングが大きく異なる。今回はデータのリアルタイム性を重視するために、それらのデータの配信スケジュールを十分考慮する必要がある。またVENUSにおける可視化するデータセットの総数が1回あたり125セットもあった。それらの可視化に関しても時間がかかるため、可視化のスケジュールリングについても十分考慮する必要がある。1回あたりの全データ容量は圧縮後約80MBとなった。通常船舶通信で、1回あたり80MBのデータ容量を可能にすることは稀であり、今回は氷海域での安全な調査を確保するために必要なことであった。表2にVENUSで利用したデータセット及びそのデータサイズを示す。

表2 みらい北極航海 2018 で VENUS が利用した衛星、
予報データの種類およびそのサイズ

親プロダクト	コード	要素	データ種類	解像度	データ数	圧縮サイズ (MB)
JAXA AMSR2	IC0	海水氷接度 (%)	衛星	0.1 度 900 × 900	1	0.02
	SST	海水面温度 (°C)			1	0.10
	SIT	海水厚 (cm)			1	0.05
JMA GPM	HTSGW	波高 (m)	予測モデル	0.5 度	4	0.09
	DIRPW	波向 (度)			4	0.03
	PERPW	波周期			4	0.03
ECMWF	MSL	海面気圧 (Pa)	予測モデル	0.1 度	11	5.04
	10U	地上 10m 風速 (m/s)			11	8.56
	10V	地上 10m 風速 (m/s)			11	8.56
	T2M	地上 2m 気温 (°C)			11	6.78
	CI	海水氷接度 (%)			11	0.82
	SST	海水面温度 (°C)			11	7.90
	CON	海水氷接度 (%)			11	4.49
	SST	海水面温度 (°C)			11	9.70
U-Tokyo IcePOM	THI	海水厚 (cm)	2km 613x684		11	4.81
	STR	氷圧 (N/m ²)			11	5.00
					11	5.00

ADS では、船舶に搭載するものと同じものを、北極航海の陸上支援用かつ本研究の宣伝のために外部公開する予定であった。船舶上で利用することには問題は起こらなかったが、外部公開を検討する上で問題があることが分かった。今回我々が外部公開する計算結果は、10 日間の ECMWF の気象予測結果と、IcePOM の海水予測結果である。ここで問題となるのが昭和 27 年に制定された「気象業務法」の規程だった。気象庁による「予報業務」の定義⁽²⁰⁾は、『予報とは気象業務法によって「観測の成果に基づく現象の予想の発表」と定義されています。具体的には、「時」と「場所」を特定して、今後生じる自然現象の状況を、観測の成果を基に自然科学的方法によって予想し、その結果を利用者（第三者）へ提供することをいいます。業務とは「反復・継続して行われる行為」をいいます。』とあり、今回の予報結果を公開することは予報業務にあたることを理解した。また、この法律では、『気象庁以外の者が気象、地象、津波、高潮、波浪又は洪水の予報の業務を行おうとする場合は、気象庁長官の許可を受けなければならない』（17 条 1 項）と定められている。また法律の施行規則では、予報を出す時間の長さにあわせて、原則、「2 人以上の気象予報士を配置しなければならない」とされている。我々はこのようなことをすることはそもそも無理であることを理解した。さらに問題となるのが、気象業務法施行規則の第 8 条の予報区で、『全般海上予報区（東は東経百八十度、西は東経百度、南は緯度零度、北は北緯六十度の線により限ら

れた海域を範囲とするものをいう。』で我々が公開する気象予測データはこの範囲内にあり、船舶で利用しているものと同じものの一般公開は断念した。しかしこの気象業務法の予報区外の予報情報は公開可能であると判断し、北緯 60 度以北の北極海域のデータの一般公開を行った（図 6）。このように最先端の研究成果を公開するにも、気象業務法の規定が壁になって公開できないことがあることを理解した。



(図 6 一般公開を行った北緯 60 度以北のオペレーション画面)

8. まとめ

本稿では北極域で起きている地球温暖化を背景とした国際的な動き、またそれに関連する日本の科学的な流れおよび国家プロジェクトとして北極研究についての現状を紹介した。またその北極研究で重要視されているデータの取り扱いとその公開について、北極域データアーカイブシステムの開発の経緯を紹介した。ADS は、2012 年よりサービスを開始し、様々な経緯を経て多くの利用者を獲得しており、2016 年度以降年間 200 万を超えるアクセスを毎年カウントしている。またその利用者の約 80% は海外からのアクセスであり、国際的に広く認知されるようになった。

ADS を構成する KIWA、VISHOP および VISION 等のアプリケーション群は維持の足かせにならないよう、開発スタッフのアイデアの集結により様々な無料のジャバスクリプトライブラリの組み合わせで構築している。その利用には、日本国内外を含めて共同開発

を打診されており、これらのアプリケーションにライセンスを付与してオープンソース化をしていく予定である。

一方海氷予報を含む天気予報という最先端研究を外部公開する時には法律の壁というものが存在することが明らかになった。幸い、我々は北極という日本より離れた地域での研究であったので、大きな問題にはならなかった。今後地球温暖化と共に、日本の企業により北極域の利用が進み、このような最先端の研究成果を実利用に役に立てるためにも、法律を検討してもよい時期に来ていると思われる。

参考文献

- (1) Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, International Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2013, 1535pp, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA (2013)
- (2) 山内 恭, 極域気象研究の系譜と極域・寒冷域研究連絡会, 天気, 60, 3, 157-171, (2016)
- (3) 国際北極科学委員会, <https://iasc.info/>, 2019年1月10日
- (4) 北極評議会, <https://arctic-council.org>, 2019年1月10日
- (5) 内閣府, 海洋基本計画, <https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan.html>, 2019年1月10日
- (6) 内閣府, 北極政策, <https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/arcticpolicy/arcticpolicy.html>, 2019年1月10日
- (7) 北極環境研究コンソーシアム, <https://www.jcar.org>, 2019年1月10日
- (8) Honda, M., J. Inoue and S. Yamane, Influence of low Arctic Sea-Ice minima on anomalously cold Eurasian

winters, Geophys. Res. Lett., 36, L08707, doi: 10.1029/2008GL037079. (2009)

- (9) Inoue, J., M. E. Hori and K. Takaya, The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly. J. Climate, 25, pp2561-2568 (2012)
- (10) Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa and J. Ukita, A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic Sea-ice reduction in late autumn. J. Geophys. Res. Atmos., 120, pp3209-3227 (2015)
- (11) GRENE 事業北極気候変動分野, <https://www.nipr.ac.jp/grene/>, 2019年1月10日
- (12) ArCS, <https://www.arcs-pro.jp/>, 2019年1月10日
- (13) 北極域データアーカイブシステム, <https://ads.nipr.ac.jp/>, 2019年1月10日
- (14) 持続的北極観測ネットワーク, <https://www.arcticobserving.org/>, 2019年1月10日
- (15) FAIR, <https://fairsharing.org/>, 2019年1月10日
- (16) 国際 DOI 財団, <http://www.doi.org/index.html>, 2019年1月10日
- (17) クリエーティブ・コモンズ, クリエーティブ・コモンズ・ライセンス, <https://creativecommons.jp/licenses/>, 2019年1月10日
- (18) GEOSS-Portal, <http://www.geoportal.org/>, 2019年1月10日
- (19) VENUS, <https://ads.nipr.ac.jp/venus.mirai/>, 2019年1月10日
- (20) 気象庁, 気象等の予報業務許可についてよくお寄せいただくご質問, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/q_a_m.html, 2019年1月10日

(原稿受領 2019. 1. 11)