

[研究成果]

20年を超える衛星海面水温画像の超高速大量処理

川村宏・細田皇太郎・Huiling Qin・境田太樹・戸間幸大
東北大学大学院・理学研究科

現在進行中の20年を超える毎日の衛星海面水温(Sea Surface Temperature: SST)画像を、サイバーサイエンスセンターの設備を用いて一気に解析する研究計画を紹介する。1988年から開始したNOAA衛星データ直接受信は現在まで途切れることなく継続し、貴重な長期・広域・高解像度地域環境データベースとなった。それから作成された0.01度格子のSST画像、約80,000シーンが蓄積されている。これを用いてSST長期変動やSST変動強度のトレンドに関する研究を実施するためには、このすべての画像の個々のピクセルのSST値が、同様の高い品質を持っていなければならない。20年を超える衛星SST画像の統一的な品質管理について紹介する。

1. はじめに

可視赤外放射計を搭載した複数の静止気象衛星と極軌道衛星を用い、全球の気象観測を行うシステムが世界気象機関において構想され、1970年代後半に実現した。1978年、世界中の雲を観測する改良型高解像度放射計(AVHRR)を搭載したNOAAシリーズ衛星の運用が開始された。AVHRR計測の分解能を落とすことなく、センサー計測値を即時に直接地上にデジタル送信する方式(HRPT: High Resolution Picture Transmission)の利便性により、その後広く研究者や現業利用に利用されることになった。

東北大学大学院理学研究科では、1988年より、NOAA衛星のHRPTデータの直接受信を開始した。それ以来、22年が経過したが、受信はほとんど途切れることなく継続し、受信データもすべて保管されている。この間、サイバーサイエンスセンターへの受信局設置と管理移管(1996年頃)、東北アジア研究センター工藤研究室への管理運営移管などがあった。しかし、東北大学において確立された衛星直接受信と地域画像データベースJapan Image Database (JAIDAS、日本画像データベース)は、当初の開発意図に沿って、高解像度衛星画像データを配信し続けている(<http://asiadb.cneas.tohoku.ac.jp/jaidas/>、<http://asiadb.cneas.tohoku.ac.jp/>)。JAIDASを開始してから10年ほどたった頃、それまでの経緯と即時衛星画像データベースの意義を論じた解説記事をSENACに掲載した(川村、2000)。

私たちのグループでは、AVHRRデータを用いて海洋の研究を行っている。その際、高解像度SST画像を作成する。SST観測に関し、AVHRRセンサーは大変優れた特性を持っていた。AVHRR赤外バンドの感度がこれまでより格段に向上し、しかも1kmの空間分解能をもっていたので、海洋の100kmスケールの総観規模現象を捉えるうえで極めて有効であった。また、ブイなどによるSST観測を真値とした場合、標準誤差0.7度程度で衛星海面水温を推定できることが明らかとなり、大気海洋現象の解析に大きな威力を発揮した。

1988年に開設された地球観測データ受信解析室において、AVHRR海面水温計測に関する研究は大いに進み、高精度推定技術の開発を経て(例えば、Sakaida and Kawamura, 1992)、蓄積された毎日の受信データを処理し、長期広域のSST画像データベース(Highersと呼ぶ)を作成して(Sakaida and Kawamura, 1996)、研究に使用する(例えば、Sakaida et al., 1998)ことができるようになった。しかし、Highers作成に当たって、受信解析室設置のミニ・コンピュータを使用していたので、その処理能力には限界があった(表1)。

1988年以降のHRPT受信データが10年分ほど蓄積された頃、この長期観測データを一括して処

理・解析することを考え始めた。数年かけて、理学部の地球観測衛星データ受信解析室の光ディスク装置（川村・木津、1991）に蓄積された HRPT データを大型計算機センターに設置されていた読み取り装置で読み込み、DTF テープに格納する作業を行った。ワーク・ステーションや大型計算機センターで処理するためである。10 年分の大量衛星データ処理を高速で行うことには大きな意味がある。処理能力の向上は、様々な研究開発を促進するので、最終プロダクトである SST 画像の高度化につながり、それに引き続く海洋学・海洋気象学研究を加速させるからである。そこで、HRPT データを当時最速の SX-3/44R(25.6Gflops)で行うことを考え、開発研究を行った（Kawamura et al., 1997）。

10 年分の大量処理を経て作成される SST 画像は、Advanced-Highers (A-Highers) と呼ばれることになった(Sakaida et al., 2000)。作成された A-Highers 画像を図 1 に示す。北緯 20-60 度、東経 60-120 度の範囲について、約 1km の空間解像度(0.01 度格子)で SST 値が算出される。この画像は、4001x4001 ピクセルから構成され、1 画像 30.5MByte の容量を持つ。開発中に計算機の入替えがあり、実際の処理は主に SX-4 で行われた。その結果、10 年分の A-Highers 画像作成を、約 3 週間で行えるようになった（表 1）。

現在、A-Highers 画像はサイバーサイエンスセンターの並列コンピューター（2010 年 4 月の入れ替えて、Express5800 が導入された）で、受信後、即時処理されている。これは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）など共同で行っている新世代海面水温実証運用 (<http://www.ocean.caos.tohoku.ac.jp/~merge/sstbinary/actvalbm.cgi>) で使用するためである (Sakaida et al., 2009)。即時処理を行うためには、高速のネットワーク環境と計算機環境が不可欠である。また、HRPT データの保管領域として、磁気媒体に加えて大容量ハードディスクを使用するようになった（表 1）。

2. 1km 解像度で見る地球温暖化を含む地域の海面水温変動

2.1 新しい課題

A-Higher 画像大量処理に関する諸問題は、サイバーサイエンスセンターの計算機・ネットワーク環境を使用することによってほぼ解決された。2008 年までに作成された A-Highers 画像の年ごとの分布を図 2 に示す。NOAA 衛星データの直接受信は 1988 年に開始されたが、それ以前に日本の他の受信局で受信された HRPT データを収集していたので、それらについても A-Highers 画像を作成している。1982 年から 2008 年まで、84,067 画像が蓄積されている（図 2）。

SST は地球温暖化の重要な指標である。最近の 20 年間で、地球温暖化の影響が多くの地域で顕在化するようになった。全球 SST の増加傾向は、気象機関や専門家によって詳細に調べられ、報告されている（例えば、IPCC, 2007）。しかし、温暖化の現れ方は地域によって異なる。A-Highers 画像は北東アジア海域の SST 分布を捉えている。地球環境変動の影響は、この海域にも及んでいる（例えば、川村、2006）。しかし、北東アジア海域は大変広く、そこに含まれる縁辺海と名のつく海でさえ、オホーツク海、日本海、黄海、東シナ海があり、さらに北西太平洋がそれらの東につながっている。湾や入り江は数え切れないほど在る。1km 格子空間分解能は、縁辺海はもちろんのこと、大きな湾を充分解像することができる。陸奥湾の東湾に生じる昇温現象を捉えた海面水温画像の例を図 3 に示す(川村、1992)。後に、この現象は陸奥湾固有の海陸分布と日射による陸域加熱に起因する大気循環によって生じていることが明らかとなった(Kawai et al., 2005)。

20 年以上継続して受信された AVHRR データから作成される、A-Highers SST 画像の 1km 空間解像度の特性をフルに活かし、長期にわたる SST 変動を詳細に解析するためには、何が必要か？ A-Highers 画像は、これまでにない多くの優れた特徴を持っているが、それでも 1km 格子の 1 点 1 点を詳細に調べると不具合が見つかる。その例を図 4 に示す。図 4a では、中央部の雲（白）の内部と周辺に青の海面水温値が点在しているが、これは雲域除去の失敗による。海洋の 100km スケールの変動現象を解析する場合、このような小さな低温点は無視するか空間フィルターを適用して取り除

く。図 4b では、沿岸部の岸に沿った低温域は NOAA 衛星軌道計算の誤差に起因する画像の位置ずれで生じており、沿岸海域の解析の際に障害となる。80,000 を越えるシーンの 4001x4001=16M ピクセルのすべてを精査し、図 4 のようなこれまではあまり気にしていなかった小スケールのエラーを検出することが、新たな課題となった。

新しい課題：「個々の A-Highers 画像 4001x4001 ピクセルのすべての SST 値を、沿岸海域の気候変動が議論できるほどの高精度で品質管理を行うこと。」

2.2 サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムを用いた取り組み

現在、AVHRR データのすべての処理に関し、様々な角度から見直しを行っているところである。それらの詳細は、衛星海面水温計測に係わる様々な科学技術、大量高速処理、応用分野の観測要求など多岐に及ぶので、この解説で全部を紹介することはできない。その中で、全データを一括処理して行う品質管理は、大量の SST 画像を一気に扱うので、サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムの利用が大きなメリットとなる。その処理の概要を図 5 に示す。

仙台受信局で得られる AVHRR データが観測する海面水温変動の中で、最も大きな振幅を有する変動は季節変動である。季節は天文学的要因に支配され、毎年決まったサイクルで出現する。海面到達日射量の変動は、地表付近の大気・海水温度の大きな変動、季節変動を引き起こす。したがって、大気海洋変動解析の基本的な考え方の一つとして、ある観測地点の温度時系列を 1 年のサイクルで切り出し、季節毎に重ね合わせて平均し、季節変動を算出することがよく行われる。例えば、各月毎に平均値を算出すれば、12 点の平均値時系列が算出され、その観測地点のある月の温度はその平均値の周りに分布し、自然現象の常としておおむねガウス分布に従うので、それから大きく外れる観測値をエラーとして取り除くことができる。

新しい高速大量計算の課題：「A-Highers 画像のすべての海面ピクセル（観測点）に関し、季節平均値（気候値）と標準偏差(σ)を計算し、それをベースに SST 値の品質管理を行う。客観的な手法でカレンダー日気候値（365 日、0.01 度格子）を作成する。」

図 5 に示した処理は、1997-2006 年の 10 年間について上の課題解決を試みた作業の流れである。この手法では、まず、時間解像度が粗い気候値を作成し、それを参照データとして時間解像度を上げていく方法をとった。まず、すべての海面ピクセルに対して月平均値・標準偏差を計算し、それを第一推定値として 5 日平均値・標準偏差を計算し、さらに日気候値・標準偏差を求める。最後に EOF 解析を行って日ごと気候値を再構築することも試みた（図 5）。データを一気に計算機のメモリに読み込み、単純ではあるが多量の計算を実施し、1 点 1 点に品質管理（閾値処理）を実施していくので、大規模科学計算システムの大容量ディスクと並列コンピュータを利用することのメリットは大変大きい。

図 5 の処理で作成された品質管理済み海面水温値と年変動から再構築した「気候値」を用い、仙台湾の海面水温変動の解析を行った。QC 済み 15 日平均 SST 時系列(1997-2006)を作成し、仙台湾の全格子が埋まる日時をとりだし、EOF 解析を行った。EOF 第一モードの空間パターンと時係数を図 6a、b に示す。気候値（365 日、1km）を差し引くことで、SST 変動偏差を求め、解析の感度を向上させている。仙台湾全体が夏季に急激に昇温し、春季・秋季に急激に降温する現象が抽出されている。EOF 第一モードは、SST 変動偏差の 47.9%を説明する(Hosoda et al., 2010)。

3. 最後に

人工衛星による新しい地球観測体制がまもなく幕を開けようとしている。1978年に運用を開始し、衛星海洋学の展開に大きく貢献した NOAA 衛星シリーズによる全球観測は、まもなくその役目を終える。現在の最新機、NOAA19号がその最後となる。AVHRR という単一センサーによる、長期・広域・高解像度海面水温観測の一括品質管理を考え、実行しようと思いついた背景の一つは、このような衛星地球観測の新展開がある。

約 30 年間に及ぶ AVHRR 観測をひとまとめのデータセットとして扱うことで、これまで判らなかった多くのことが明らかになるはずである。そして、このような活動が次世代の衛星地球観測につながっていくものと考えている。

4. 謝辞

本研究を実施するに当たり、小林センター長をはじめサイバーサイエンスセンターの皆様には大変お世話になりました。感謝いたします。

5. 参考論文

- 川村宏: 陸奥湾における昇温期の大気海洋相互作用について. 月刊海洋, 24(6), 385-388, 1992.
- 川村宏: JAIDAS10年, SENAC, 33(1), 3-14, 2000.
- 川村宏: 地球環境変動下における北東アジア海域の課題, 沿岸海洋研究, 44(1), 3-8, 2006.
- 川村宏、木津昭一: 大型計算機センターにおける光ディスク装置の利用について, SENAC, 24(3), 88-98, 1991.
- Hosoda, K., H. Kawamura, H. Qin and F. Sakaida: Characteristics of sea surface temperature variation patterns in Sendai Bay, (in preparation).
- IPCC: IPCC Fourth Assessment Report, 73pp, 2007.
- Kawai, Y., K. Otsuka and H. Kawamura: Study on diurnal sea surface warming and a local atmospheric circulation over Mutsu Bay, J. Meteorol. Soc. Japan, 84(4), 725-744, 2006.
- Kawamura, H., F. Sakaida and J. Kudo: Super computing of 10-years HRPT data set for analyses of AVHRR-derived SSTs. IGARSS'97, Spons. by IEEE, Pan Pacific Hotel, Singapore, August 1997, 1499-1501, 1997.
- Sakaida, F. and H. Kawamura: Estimation of sea surface temperatures around Japan using the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)/NOAA11, J. Oceanogr, 48(2), 179-192, 1992.
- Sakaida, F. and H. Kawamura: HIGHERS The AVHRR-based higher spatial resolution sea surface temperature data set intended for studying the ocean south of Japan, J. Oceanogr., 52(4), 441-455, 1996.
- Sakaida, F., H. Kawamura and Y. Toba: Sea surface cooling caused by typhoons in the Tohoku Area in August 1989, J. Geophys. Res., 103, 1053-1065, 1998.
- Sakaida, F., J. Kudoh, and H. Kawamura: A-HIGHERS - The system to produce the high spatial resolution sea surface temperature maps of the western North Pacific using AVHRR/NOAA, J. Oceanogr., 56(6), 707-716, 2000.
- Sakaida, F., H. Kawamura, S. Takahashi, T. Shimada, Y. Kawai, K. Hosoda, and L. Guan: Research and development of the New Generation Sea Surface Temperature for Open Ocean (NGSST-O) product and its demonstration operation, J. Oceanogr., 65, 859-870, 2009.

表1 東北大学大学院理学研究科におけるNOAA/AVHRRによる海面水温画像データセット作成の変遷

時期	SST画像仕様	計算機環境	HRPT 格納媒体	備考
1992年頃	名前: Highers 解像度: 0.075度格子 範囲: 北緯19.925-36.05度 東経126.75-149.25度 サイズ: 301x216ピクセル	NEC MS-4170 (ミニコン)、ネットワーク無し	光ディスク (5G/枚)	初めての長期広域衛星海面水温画像データベース
2000年頃	名前: A-Highers 解像度: 0.01度格子 範囲: 北緯20-60度 東経60-120度 サイズ: 4001x4001ピクセル	SX-4	DTFテープ (30G/巻)	10年分の海面水温画像作成
2008年頃	名前: A-Highers 解像度: 0.01度格子 範囲: 観測範囲の全域 (シーンによって異なる) サイズ: 4001x4001ピクセル	並列スカラー計算機、高速ネットワーク	パソコン・ハードディスク	即時処理、融合海面水温作成

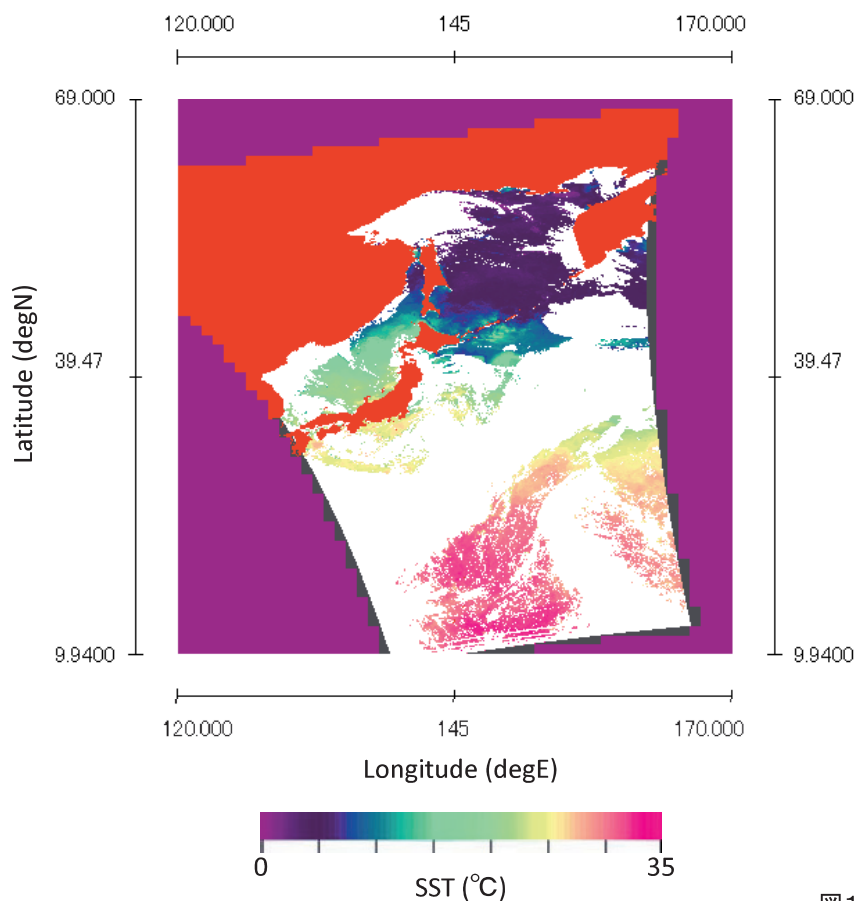


図1 A-Highers海面水温画像の例。

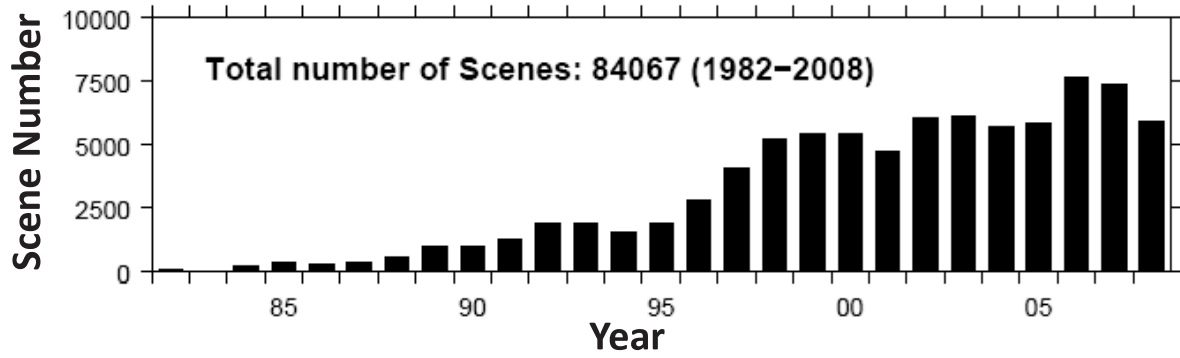


図2 各年のA-Highers画像のシーン数

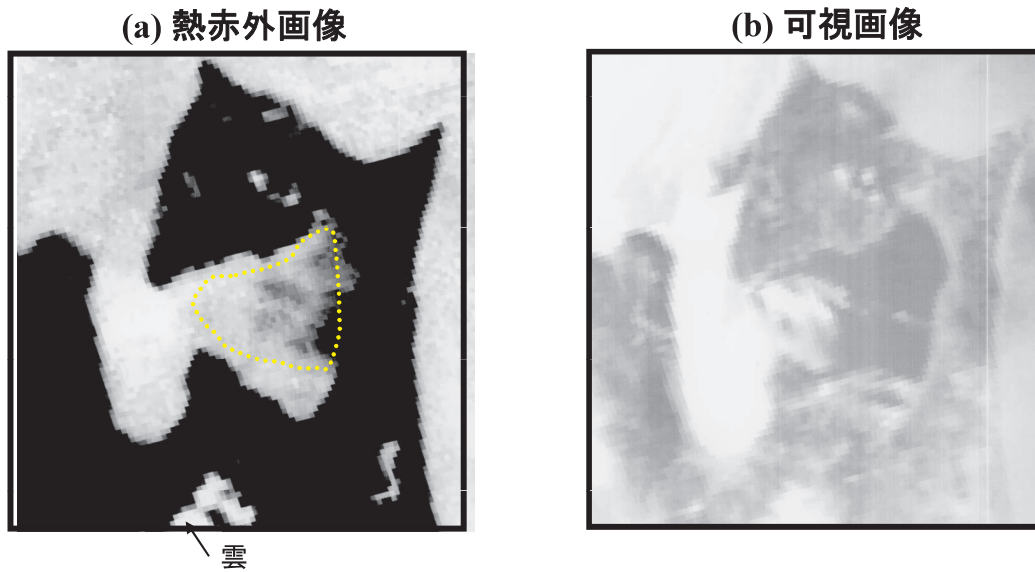


図3 1987年5月7日13:50のNOAA衛星AVHRR画像。(a)熱赤外画像、黄色の破線で示した範囲が周囲より著しく昇温している、(b)可視画像、海上風で波立っている海面が白く、静穏海面(弱風~無風海域)は暗い。暗い海面の範囲と高海面水温海域がよく対応している。

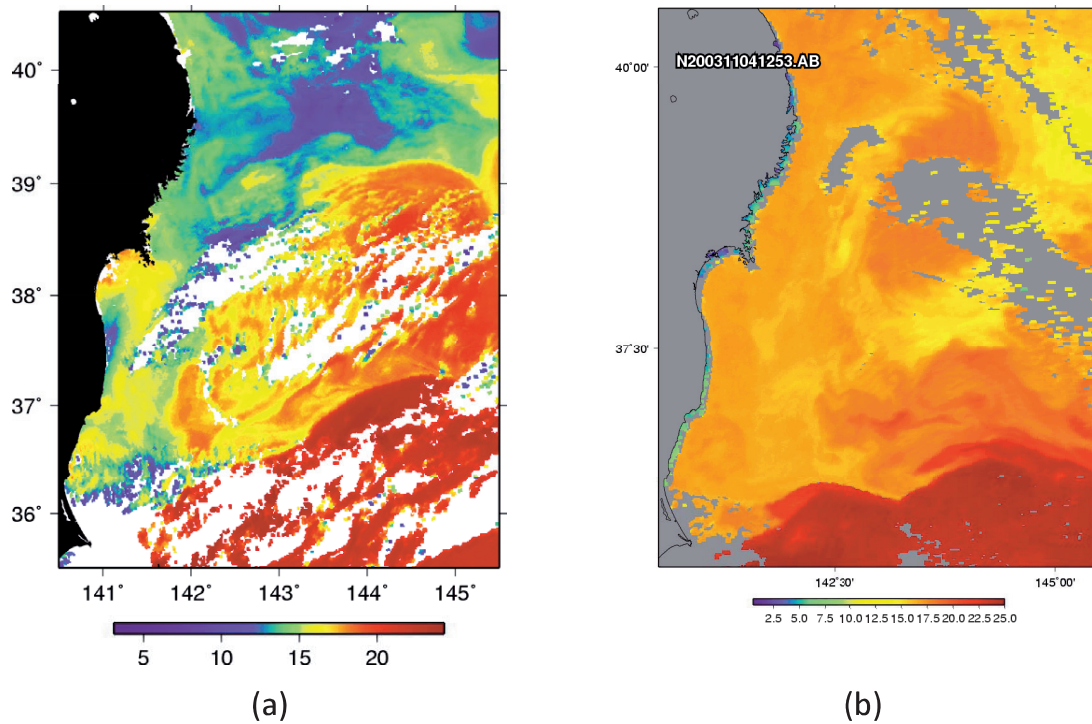


図4 品質管理対象のA-Highers画像の例。(a) 中央部の雲(白)の内部と周辺に青の海面水温値が点在しているが、これは雲域除去の失敗による。(b) 沿岸部の岸に沿った低温域はNOAA衛星軌道計算の誤差に起因する画像の位置ずれで生じており、沿岸海域の解析の際に障害となる。

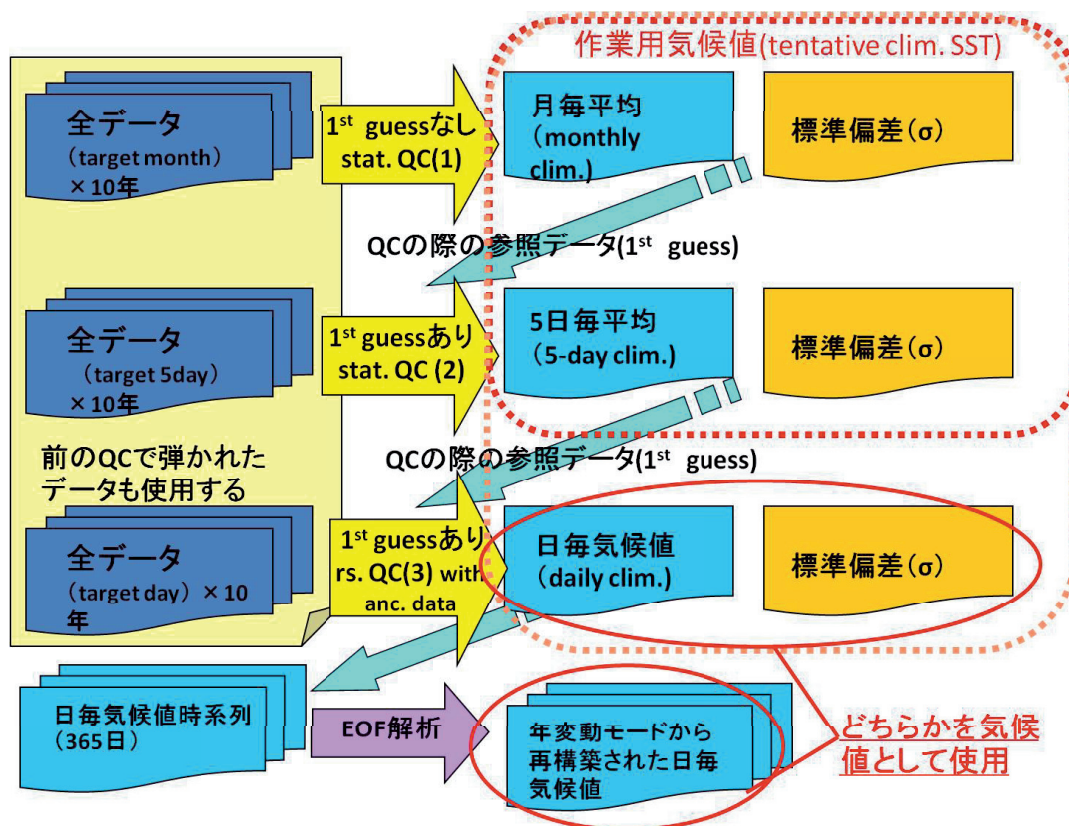


図5 長期間のA-Highers画像データを用いた品質管理の流れ図。

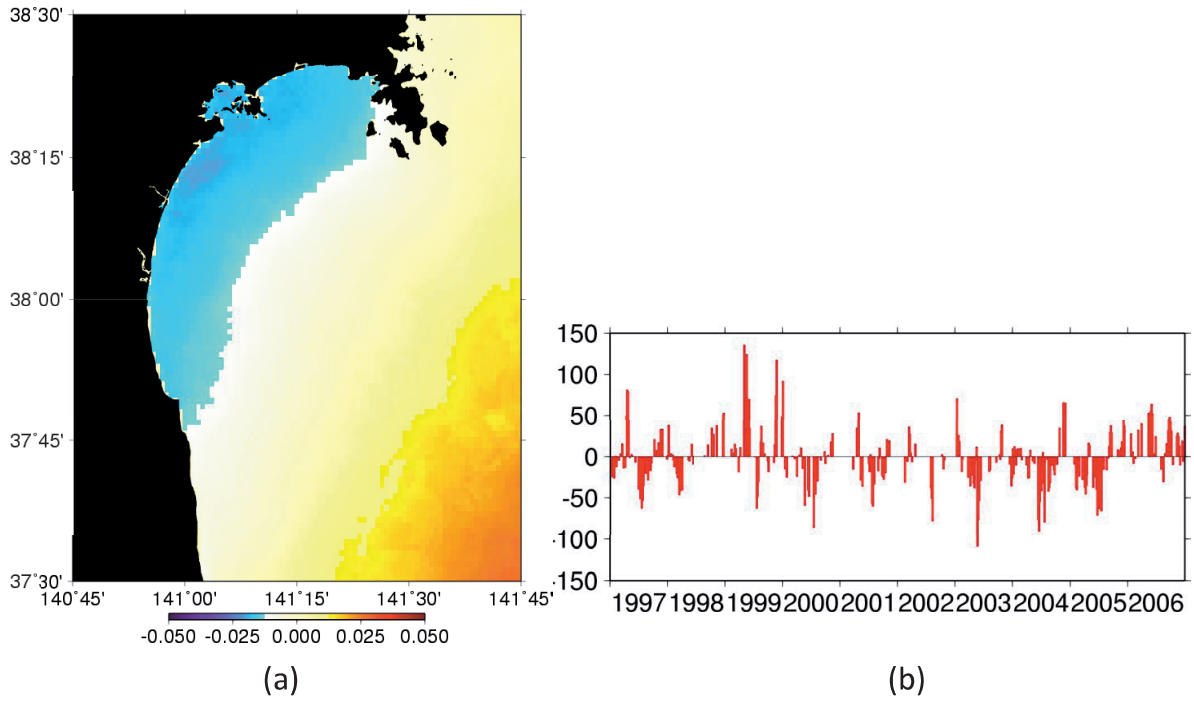


図6 仙台湾の海面水温変動EOF第一モードの(a)空間パターンと(b)時係数。気候値(365日、1km)を差し引くことで、SST変動偏差を求め、解析の感度を向上させている。仙台湾全体が夏季に急激に昇温し、春季・秋季に急激に降温する現象が抽出されている。EOF第一モードは、SST変動偏差の47.9%を説明する。