

海面水温と陸上気温の同時解析

安井 壯一郎（気象庁 地球環境・海洋部）

石井 正好（気象研究所 気候研究部）

1. はじめに

長期にわたる海面水温（SST）と陸上気温（LST）の客観解析は気候変動を理解するために欠かせないデータとなっている。

客観解析の精度は、観測データのサンプリングに大きく依存する。特に、観測データが時空間的に均質でないことが解析精度を低下させる要因となる。また、過去 150 年にわたって使用できる観測データには限りがある。そのような条件の下、不確実性をできるだけ減らすため、各グループによって様々な解析手法が開発されている。

一般的に SST と LST は別々に解析が行われ（例えば SST は、Kennedy et al. (2011b)、Smith et al. (2004)、Hirahara et al. (2014)、LST は Jones et al. (2012)、Hansen et al. (2010)、Rohde et al. (2013)）、SST（LST）解析を行う際は SST（LST）の観測データのみ使用されている。本開発では、限りがある観測データの下で、少しでも不確実性を減らすために、別々に解析を行うよりも SST と LST を同時に解析することが有効であると考え。そこで、SST と LST の観測データを使用した双方の同時解析の開発を行った。

本報告では、SST と LST の同時解析により双方の解析精度を向上させることを目的とする。異種観測データの導入によって、精度にどのような効果を与えるかをまとめる。

2. 使用した観測データ

LST の現場観測データには、GHCN ver.3

（Lawrimore et al., 2011）と ISTI ver.1.1（Rennie et al., 2014）を使用した。GHCN は補正されたデータであるのに対して、ISTI は品質管理や補正が行われていないため観測ノイズを含んでいる。これら 2 つの観測データセットのうち、本報告では主に ISTI を使用し、GHCN による解析と比較することで、観測ノイズによる影響の有無を評価する。SST の現場観測データには、ICOADS rel.2.5（Woodruff et al., 2011）を使用した。

GHCN、ISTI 及び ICOADS の観測カバレッジの変遷を図 1 に示す。ISTI は GHCN に比べ 1960～1990 年において 10% 程度高いカバレッジ（観測地点数でいうと約 3 倍）を保有する膨大なデータセットである。

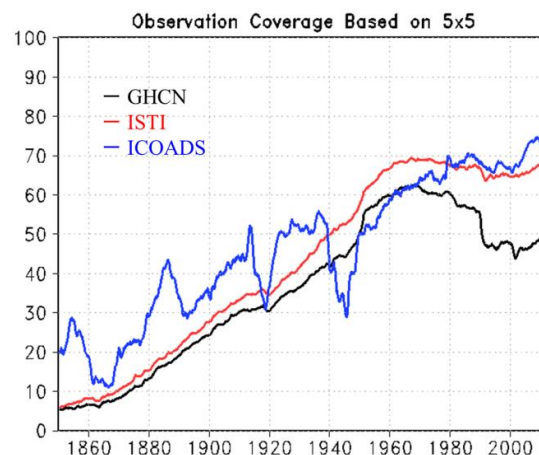


図 1 GHCN、ISTI 及び ICOADS の観測カバレッジの時系列

GHCN（黒線）、ISTI（赤線）、ICOADS（青線）の緯度経度 5×5 度格子から計算した海陸別面積に対する割合 [%] を示す。

GHCN で問題となっている 1990 年以降の減少は ISTI にはみられない。また、ISTI は地点数が多いだけでなく、観測データの有効期間が GHCN よりも長い地点が数多くみられる (Rennie et al., 2014)。SST は年代によって戦争等の影響により観測が減少している様子がみられるが、LST は単調に増加し観測は継続的に持たれている。

3. 同時解析の解析手法

本節では、SST と LST の同時解析の解析手法を示す (以下、SSTTS 解析と呼ぶ)。今回、SSTTS 解析を開発するにあたって、COBE には LST を扱った解析手法が構築されていないため、新たな要素として LST のみの解析の開発を行った (以下、TS 解析と呼ぶ)。解析は、緯度経度 1×1 度の全球すべての格子において 1850 年から 2012 年の月別値を対象に計算される。SST 及び LST の解析値は、トレンド成分と年々変動成分の和で構成される。SSTTS 解析の解析手法を成分別に説明する。

3-1. 長期トレンド成分

観測によるノイズをできるだけ除くため、時空間的に十分粗くした緯度経度 5×5 度格子の年平均値を用いて EOF 解析を行い、EOF 第一成分を長期トレンド成分とする。EOF 解析は 1850~2010 年の期間で行う。ただし、Hirahara et al. (2014) にならって、緯度経度 5×5 度格子の欠損値を埋めるための処理を施す。

3-2. 年々変動成分

年々変動成分は、変動の 95% を説明する EOF モード群として定義する。LST の年々変動は、トレンドを除去した JRA-55 の緯度

経度 1×1 度格子の月平均地上 2m 気温を用いて、変動の 95% を説明する 1~200 番目の EOF モードを採用した。SST の年々変動は、Hirahara et al. (2014) にならい衛星観測とバイアス補正を施した現場観測データを用いて、変動の 95% を説明する 1~204 番目の EOF モードを採用した。EOF で代表的な変動を抽出するために、空間被覆率が高い 1961~2005 年の期間で解析を行い、他の年代にも同じ空間パターンを適用した。ただし、LST の再解析データや SST の衛星観測データは EOF の空間パターンを算出する際のみ使用され、最終プロダクトには使用されない。SSTTS 解析の年々変動成分は、LST と SST のそれぞれの EOF モードを基に観測データを用いてリコンストラクションを行う。双方への影響は EOF モードから構成した共分散により考慮される。

3-3. 解析間比較

SSTTS 解析の精度評価をするにあたり、TS 解析と比較することで、SST の効果による LST 解析値への寄与を評価することができる。また、COBE-SST2 と比較することで、LST の効果による SST 解析値への寄与を評価することができる。

TS 解析は、SSTTS 解析の陸上のみの過程である (詳細は省略)。TS 解析は年々変動成分の部分が SSTTS 解析と異なり、長期トレンド成分は SSTTS 解析と同様のものを使用している。

4. 解析結果

本節では、LST を中心に解析結果を確認する。1901~2012 年のトレンド分布を図 2 に示す。両解析とも、温暖化を示す地域的特長が MLOST とよく似ている。また、期間

を区切って数十年規模の変化をみても、よく整合することを確認している（1911～1940年、1951～1980年、1981～2012年；図略）。

1850～2012年の年々変動の標準偏差を図3に示す。TS解析とSSTTS解析では分散の大きさが異なる。これは、観測データが存在しない領域において、SSTの効果があるSSTTS解析とSSTの効果がないTS解析によって解析結果が若干異なるためである。観測の存在しない領域でTS解析は過小評価されやすいのに対して、SSTTS解析はもっともらしい変動を表現することができる。

より細かいスケールで解析値をみるために、日本域で平均したLSTの時系列を図4示す。LST振幅が大きな年に注目すると、TS解析は変動の大きさが過小評価されている。一方、SSTTS解析は変動の大きさが良く合っていることがわかる。TS解析のRMSEは 0.36°C 、SSTTS解析は 0.15°C であり、SSTTS解析は年々変動の大きさに対して十分小さい。SSTTS解析は上記の解析結果が示す通り、過去150年においてトレンドと年々変動をマップでよく表現できる。

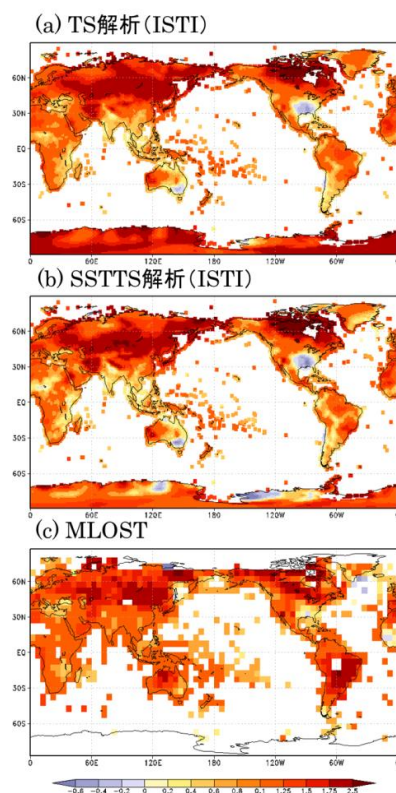


図2 1901～2012年のLSTトレンド分布
(a) TS解析、(b) SSTTS解析、(c) NOAAのMLOST ver.4 (Vose et al., 2012b)を示す。MLOSTは海域格子をマスクしている。単位は $^{\circ}\text{C}/122$ 年。LST観測データはISTIを用いた。

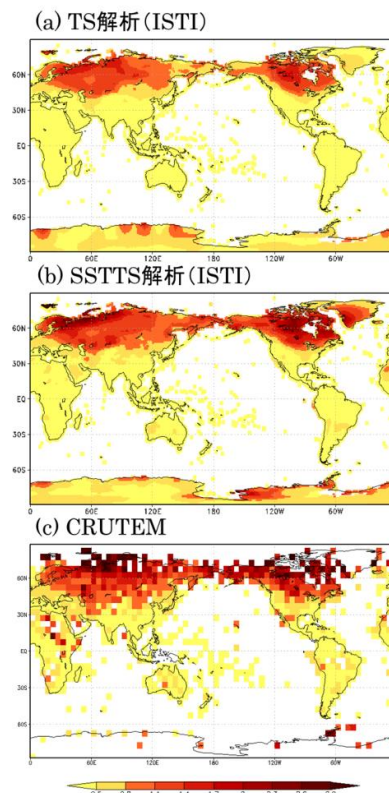


図3 1850～2012年のLST年々変動の標準偏差分布
(a) TS解析、(b) SSTTS解析、(c) Jones et al. (2012)のCRUTEM ver.4を示す。LST観測データはISTIを用いた。

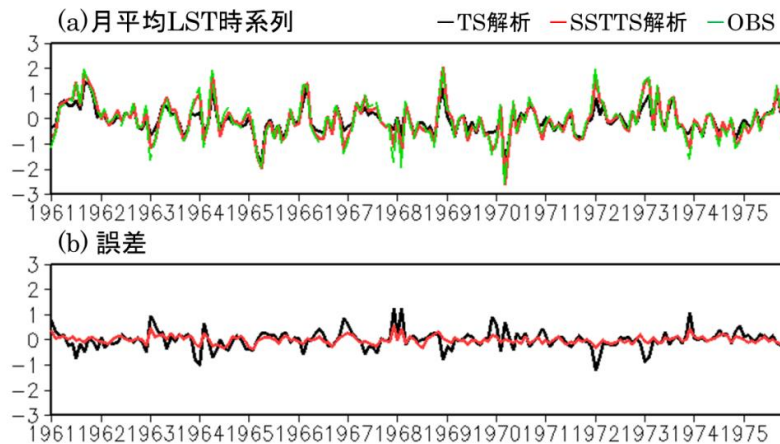


図 4 日本平均 LST の時系列とその誤差

1961 年 1 月～1975 年 12 月の日本域で平均した月平均 LST 偏差を示す。(a) ISTI を用いた TS 解析（黒線）と SSTTS 解析（赤線）、観測として気象庁が監視している日本平均気温（緑線）。ただし、日本平均気温に使用された観測地点は ISTI と独立ではない。(b) 観測に対する誤差。

5. 誤差評価

本節では SSTTS 解析と TS 解析のサンプリング誤差を評価する。解析の精度を決める主な要因であるサンプリングによって、解析が各年でどの程度信頼できるものであるか知りたい。そこでサンプリング誤差を評価するために、十分な観測データ数のある年代を選び、過去の観測データ分布に合わせて観測データを減らした条件の下、どの程度再現できるかを調べた。具体的には、品質管理を通過した 1961 年 1 月～1990 年 12 月における現場観測を用いて、1850～2005 年の各年の観測データ分布に合わせて間引いた LST と SST 観測の模擬データを作成する。その模擬データをインプットした SSTTS 解析、また比較のために TS 解析と COBE-SST2 解析を行い、真値と仮定したデータセットとの RMSE をみることでサンプリング誤差を評価する。

1850～2005 年のサンプリングに合わせた

模擬データにより解析された全球月平均 LST の誤差を図 5 に示す。SSTTS 解析は、TS 解析より RMSE が小さい。つまり、同時解析で SST を取り入れた効果により、解析精度が向上していることを示している。観測疎な時代ほどその傾向が強くみられ、RMSE 比改善は 30～40% 程度である（図略）。3 機関によるデータセット間の平均的な差（一点鎖線）を下回るのは、TS 解析は 1930 年代以降であるのに対して、SSTTS 解析は 1890 年代以降であり、かなり早い年代から信頼できるデータセットであることがわかる。SSTTS 解析の RMSE は期間を通して年々変動の大きさに対して十分小さい。

次に、1850～2005 年のサンプリングに合わせた模擬データにより解析された各格子 LST の誤差を図 6 に示す。図 6 (b) のヨーロッパ（青線）や北米（ピンク線）で大陸平均した RMSE 比をみると、観測疎な時代ほど SSTTS 解析の精度が高い。これは同時解

析により SST が LST 観測の不足を補っていることを示唆している。オセアニア（黄線）に注目すると、1880 年代の海上気象日誌により観測数が増えた時期に RMSE 比が増加し、観測数が減った戦争時に RMSE 比が低下していることから、LST 解析の精度は SST 観測数の変化に影響を受けていることがわかる。

最後に SST のサンプリング誤差を評価す

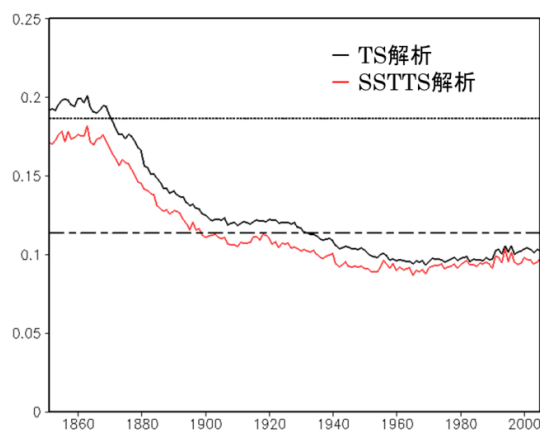


図 5 1850～2005 年のサンプリングを用いた模擬実験による全球月平均 LST の RMSE

JRA-55 の地上 2m 気温に対する SSTTS 解析（赤線）と TS 解析（黒線）の全球月平均 LST の RMSE を示す。検証した期間は 1961 年 1 月～1990 年 12 月である。点線は、SSTTS 解析のデトレンドした年々変動の標準偏差の 1/2 (1961 年 1 月～2005 年 12 月)。一点鎖線は、各センターのデータセット間（CRUTEM と MLOST と SSTTS 解析）の全球平均 LST の平均的な差。LST 観測データは GHCN を用いた。

る。1850～2005 年のサンプリングに合わせた模擬データにより解析された全球月平均 SST と NINO.3 の誤差を図 7 に示す。

COBE-SST2 に比べ SSTTS 解析の RMSE が小さいことから、同時解析で LST を取り入れた効果により全球平均 SST や NINO.3 SST の不確実性を減らすことができることを示している。

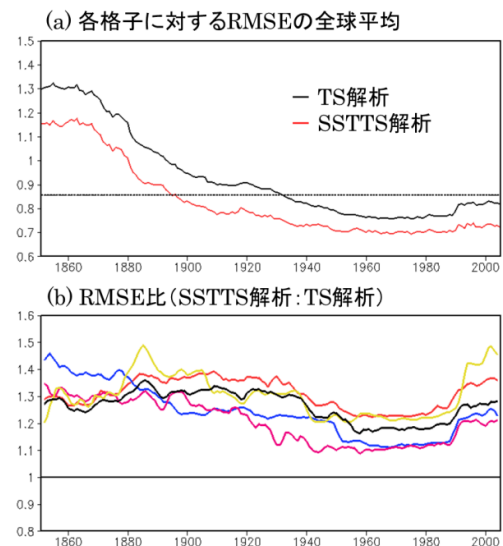


図 6 1850～2005 年のサンプリングを用いた模擬実験による各格子 LST の RMSE

(a) JRA-55 の地上 2m 気温に対する SSTTS 解析（赤線）と TS 解析（黒線）の各格子 LST での RMSE の全球平均を示す。検証した期間は 1961 年 1 月～1990 年 12 月である。点線は、SSTTS 解析のデトレンドした年々変動の標準偏差の 1/2 (1961 年 1 月～2005 年 12 月)。(b) SSTTS 解析と TS 解析の RMSE 比。全球平均（黒線）、ヨーロッパ（青線）、アジア（赤線）、オセアニア（黄線）、北米（ピンク線）で大陸別平均した解析間 RMSE 比である。RMSE 比が大きいほど、SSTTS 解析の精度が高い。LST 観測データは GHCN を用いた。

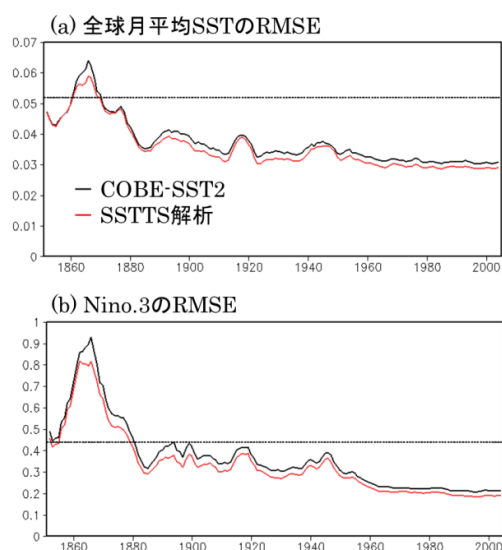


図 7 1850～2005 年のサンプリングを用いた模擬実験による全球月平均 SST 及び NINO.3 の RMSE

(a) NOAA の OISST に対する SSTTS 解析 (赤線) と COBE-SST2 (黒線) の全球月平均 SST の RMSE、(b) NINO.3 の RMSE を示す。検証した期間は 1982 年 1 月～1990 年 12 月である。点線は、SSTTS 解析のトレンドした年々変動の標準偏差の 1/2 (1961 年 1 月～2005 年 12 月)。LST 観測データは GHCN を用いた。

6. まとめ

SST 解析と LST 解析の双方の精度向上を目指して、SST と LST 観測データを用いた同時解析を開発した。同時解析を開発するにあたり、Hirahara et al. (2014) の COBE-SST2 の解析手法を応用した。同時解析は、SST (LST) 観測データを取り入れた効果によって LST (SST) 解析の不確実性を少しでも減らすことを目的としている。

同時解析による LST 解析は、過去 150 年のトレンドや年々変動をよく表現できる。

年代ごとに变化する観測サンプリングが

客観解析に与える誤差を評価したところ、SSTTS 解析は TS 解析に比べて全球平均 LST はもちろんのこと、格子スケールでも高い信頼性を得ることができることがわかった。さらに、SSTTS 解析は COBE-SST2 に比べて全球平均 SST や NINO.3 の不確実性を減らすことができる。同時解析により、双方の解析精度を向上させる結果を示すことができた。

図 7 (b) のサンプリング誤差評価より、COBE-SST2 の場合、NINO.3 は 1880 年以前の不確実性が高いことから、エルニーニョ現象が起きていたのかを知ることは難しい。今回、SSTTS 解析はこの期間の不確実性を減らすことができる可能性を示した。今後さらなる改良を行い、こうした不確実性をできるだけ減らせるように開発に取り組んでいきたい。

謝辞

GHCN、ICODS、MLOST は NOAA/NCEI より、ISTI は ISTI のウェブサイト¹より、CRUTEM はイーストアングリア大学より提供された。本研究を進めるにあたり JMA/CPD の平原翔二氏と JMA/仙台の福田義和氏には有益なコメントをいただいた。本研究は、環境省環境研究総合推進費「歴史的海洋表層水温観測データの再整備とその気候学的評価」課題により支援を受けた。ここに記して感謝申し上げたい。

参考文献

Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, **27**, 57-75.

¹ <http://www.surfacetemperatures.org>

- Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo, 2010: Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, **48**, RG4004.
- Ishii, M., M. Kimoto, and M. Kachi, 2003: Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 51–73.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879.
- Jones, P. D., D. H. Lister, T. J. Osborn, C. Harpham, M. Salmon, and C. P. Morice, 2012: Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010, *J. Geophys. Res.*, **117**, D05127.
- Kennedy, J. J., N. A. Rayner, R. O. Smith, D. E. Parker, , and M. Saunby, 2011: Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations measured in situ since 1850, part 2: biases and homogenisation. *J. Geophys. Res.*, **116**, D14104, doi:10.1029/2010JD015220.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Lawrimore, J. H., M. J. Menne, B. E. Gleason, C. N. Williams, D. B. Wuertz, R. S. Vose, and J. Rennie, 2011: An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**, D19121.
- Rennie, J.J. and coauthors, 2014: The International Surface Temperature Initiative Global Land Surface Databank: Monthly Temperature Data Version 1 Release Description and Methods. *Geoscience Data Journal*. **1**, 75–102.
- Rohde, R., et al., 2013a: A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinfor. Geostat.: An Overview*, **1**, doi:10.4172/gigs.1000101.
- Rohde, R., et al., 2013b: Berkeley Earth temperature averaging process. *Geoinfor Geostat: An Overview*, **1**, doi:10.4172/gigs.1000103.
- Smith, T. M. and R. W. Reynolds, 2004: Improved Extended Reconstruction of SST (1854–1997). *J. Climate*, **16**, 1495–1510.
- Vose, R. S., et al., 2012b: NOAA's Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **93**, 1677–1685.
- Woodruff, S. D., S. J. Worley, S. J. Lubker, Z. Ji, J. E. Freeman, D. I. Berry, P. Brohan, E. C. Kent, R. W. Reynolds, S. R. Smith, and C. Wilkinson, 2011: ICOADS Release 2.5: Extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. *Int. J. Climatol.*, **31**, 951–967, doi:10.1002/joc.2103.