

4-4 海表面温度の推定

4-4-1 分光放射輝度による海表面温度推定

ある温度(T K)をもつ物は、放射率(emissivity)(ϵ)をもち、放射エネルギー(B w m^{-2})としてある量のエネルギーを外部へ放射する。この温度と放射エネルギーの関係がステファン・ボルツマンの法則により次式に与えられる。

$$B = \epsilon \sigma T^4$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{ w m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)である。放射率(ϵ)=1.0 の物体を黒体と呼び、その放射を黒体放射と言う。表 4-2 は、非金属物質の放射率を示す。水は、7.9 と 8~14 μm において、0.9 の放射率を示し、雪と並び、低い放射率である。

表 4-2 非金属物質の波長を関数による放射率

波長 非金属物質	放射率		
	5.0 μm	7.9 μm	8-14 μm
アスファルト	0.9	0.95	0.95
粘度	0.85 - 0.95	0.95	0.95
コンクリート	0.9	0.95	0.95
砂利(gravel)	0.95	0.95	0.95
砂	0.9	0.9	0.9
氷		0.98	0.98
雪		0.9	0.9
水		0.93	0.93
土壌(soil)		0.9-0.98	0.9-0.98
樹木	0.9-0.95	0.9-0.95	0.9-0.95

引用: <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/IREducation/EmissivityNonMetals.htm>

リモートセンサーを利用し、物体の放射エネルギーを波長の関数として計測するとき、物体の温度(T K)と観測波長(λ μm)における分光放射輝度(E $\text{mW m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)との間にプランクの法則が成り立つ。

$$E(T, \lambda) = \frac{2 h c^2}{\lambda^3} \left\{ \exp\left(\frac{h c}{k \lambda T}\right) - 1 \right\}^{-1} \quad 4-2$$

ここで、 h はプランクの定数(6.626×10^{-34} J sec)、 c は光の速度(2.998×10^8 m sec⁻¹)、 k はボルツマンの定数(1.380×10^{-23} J K⁻¹)である。4-2式を解いて、求められる温度は輝度温度(brightness temperature : T_b)として、次式に与えられる。

$$T_b = \frac{hc}{k\lambda} \ln^{-1} \left(1 + \frac{2hc^2}{E\lambda^3} \right) \quad 4-3$$

衛星搭載センサーでは、中間赤外($3.7 \mu\text{m}$)、熱赤外($10.5 \mu\text{m}$ 、 $11.5 \mu\text{m}$)の波長帯域において、分光放射輝度を求め、地表面物体の温度を推定する。実際のセンサーは、中心波長に対して短波長側から長波長側にかけて応答を示し、波長を関数とする応答関数をもつ。応答関数を考慮すると、4-2式の分光放射輝度値がごく限られた波長幅について与えられ、これをひとつのバンド間において積分することにより、ひとつのバンドにおいて観測される分光放射輝度値が与えられる。たとえば、 $10.0 \sim 11.0 \mu\text{m}$ の中心波長を $10.5 \mu\text{m}$ とする熱赤外バンドにおいて観測される分光放射輝度値 $E(T, \text{band}_{10.5})$ は、

$$E(T, \text{band}_{10.5}) = \int_{10.0}^{11.0} \phi(\lambda) E(T, \lambda) d\lambda \quad 4-4$$

ここで、 $\text{band}_{10.5}$ は中心波長 $10.5 \mu\text{m}$ の熱赤外波長のバンドを示し、 $\phi(\lambda)$ は $\text{band}_{10.5}$ の応答関数を示す。

実際のセンサーでは、積分後の分光放射輝度値に対するデジタル出力値についての傾き(slope)と切片(offset)が与えられ、利用者は次式により各バンドの分光放射輝度値を求める。

$$E(T, \text{band}_i) = S_i D(\text{band}_i) + I_i \quad 4-5$$

ここで、 $D(\text{band}_i)$ はバンド i のデジタルカウント値であり、レベル0の生データに記録される値である。 S_i と I_i はバンド i の傾き(slope)と切片(offset)である。

センサーから得られた各バンドごとの分光放射輝度値は、センサー内部の一定温度をもつ黒体(blackbody)と深宇宙(deep space)の2点校正法により、校正済みの分光放射輝度値となる。黒体と深宇宙のデータは、走査鏡の1回転ごとに記録され、黒体が基準温度を与え、深宇宙が絶対零度(0 K)を与える。

$$E'(T, \text{band}_i) = \{ E(T, \text{band}_i) - E(T_{ds}, \text{band}_i) \} \frac{\{ E'(T_{bb}, \text{band}_i) - E'(T_{ds}, \text{band}_i) \}}{\{ E(T_{bb}, \text{band}_i) - E(T_{ds}, \text{band}_i) \}} \quad 4-6$$

ここで、 $E'(T, \text{band}_i)$ はバンド i による地表面観測点の二点校正済み温度を示す。 $E(T, \text{band}_i)$ はバンド i における地表面の分光輝度値の実測値、 $E(T_{ds}, \text{band}_i)$ はバンド i における深宇宙の分光輝度値の実測値、 $E(T_{bb}, \text{band}_i)$ はバンド i における黒体の分光輝度値の実測値である。これに対して、 $E'(T_{ds}, \text{band}_i)$ は理論上の深宇宙の分光放射輝度値であり、0である。また、 $E'(T_{bb}, \text{band}_i)$ は黒体の白金温度計による実測の温度から計算される分光放射輝度値である。

この2点校正により、センサーの環境変動と経時劣化について校正が可能となる。この校正方法を、衛星本体のセンサーのみにより校正を行うことから、オンボード校正と言う。

さらに、4-3式を利用し、見かけの温度を求める。この見かけの温度は、大気による減衰効果と、大気中の水蒸気などによる加法の温度効果があり、実際の温度ではない。このように熱赤外センサーにより求められる海表面温度はスキン・テンペレチャと言われ、ごく表面の空気の影響を受ける。これに対して、ブイなど温度計が水中にあり計測される水温をバルク・テンペレチャと言う。スキン・テンペレチャはバルク・テンペレチャよりも 0.5°Cほど低めの水温を示す。

4-4-2 熱赤外バンドの大気補正

前出の温度は、大気効果を含むため、大気効果を補正し、地表面の温度を求める必要がある。4-6式により与えられる分光放射輝度値は、地表面の観測対象物の分光放射輝度 $E_o(T, band_i)$ について、次式に示される。

$$E(T, band_i) = \tau(band_i) E_o(T, band_i) + E_p(band_i) \quad 4-7$$

ここで、 $\tau(band_i)$ はバンド i における大気の透過率であり、 $E_p(band_i)$ は同じく大気のパスラジアンズである。

熱赤外波長帯域では、大気効果を推定するための十分な精度をもつアルゴリズムが開発されていない。多くは、放射伝達モデルを利用した大気効果の推定に終わり、数値解析による大気補正方法は開発されていない。

これに対して海洋の分野において、1980年代から続く気象衛星 NOAA 搭載の AVHRR(改良型高解像度放射計)に展開されてきた経験式による大気補正方法が、熱赤外波長帯域の大気補正方法として実用的に利用されている。これは、衛星の打ち上げ直後から約3ヵ月間程度に渡り、衛星観測と同期した船舶観測データ、ブイによる観測データなど現場観測を収集し、衛星から求められる複数バンドの温度データから地表面の温度データを推定するための経験式を求める方法である。McClain 他(1985)は、気象衛星 NOAA 搭載の AVHRR から、海表面温度(SST)を求めるためのマルチ・チャンネル・海表面温度(MCSST)として、次のような経験式を提案した。

夜間用2バンドのウインドウ(Dual window) :

$$SST = 1.5032 T_{b3.7} - 0.5042 T_{b11} - 270.59 \quad 4-8$$

夜間用近接2バンドのウインドウ(Split window) :

$$SST = 3.6535 T_{b11} - 2.6680 T_{b12} - 268.41 \quad 4-9$$

夜間用3バンドのウインドウ(Triple window) :

$$SST = 0.0036 T_{b11} + 0.9825 (T_{b3.7} - T_{b12}) - 269.66 \quad 4-10$$

日中用近接2バンドのウインドウ(Split window) :

$$SST = 3.6569 T_{b11} - 2.6705 T_{b12} - 268.92 \quad 4-11$$

ここで、 $T_{b3.7}$ 、 T_{b11} 、 T_{b12} は、AVHRR のバンド3 (3.55~3.93 μ m)、バンド4 (10.3~11.3 μ m)、バンド5(11.5-12.5 μ m)から推定された輝度温度である。中間赤外のバンドは、日中に太陽の反射光を観測するため温度計測には利用できない。このため、中間赤外バンドは、夜間の海表面温度観測にのみ利用される。この他の研究者によっても、多くの経験式が提案されてきた。また、NOAA 衛星が打ち上げられるたびに経験式が公表されてきた。

Walton 他(1998)は、NOAA 搭載 AVHRR から海表面温度を推定するために、NLSST(ノン・リニア SST)として、非線形応答の経験式を提案した。

$$NLSST = 0.939813 T_{b4} + 0.076066 T_{est}(T_{b4} - T_{b5}) + 0.801458 (T_{b4} - T_{b5})(\sec \theta - 1) - 255.165$$

ここで、 T_{b4} 、 T_{b5} は、AVHRR のバンド 4、5 から推定された輝度温度(K)である。 T_{est} は、NESDIS による $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの全球海表面温度の客観解析データ(°C)である。 T_{est} は $-2\sim 28^\circ\text{C}$ の範囲のものに限定されるが、海表面温度の季候値あるいは MCSST により求められた海表面温度であっても良い。 $\sec \theta$ は衛星の天頂角の正割(secant、セカント、 $=1/\cos \theta$)値である。4-12 式の定数は、NOAA14 号搭載の AVHRR の日中の NLSST を推定するために NESDIS が利用した値である。

4-4-3 MODIS の熱赤外バンドの大気補正

① 中間赤外バンドによる夜間の海表面温度

SeaDAS においては、MODIS の中間赤外バンド(22 と 23)から夜間の海表面温度($sst4$)を求めるため、次式の経験式が適用される。

$$sst4 = a_0 + a_1 T_{b22} + a_2 (T_{b22} - T_{b23}) + a_3 (\sec \theta - 1.0) \quad 4-13$$

ここで、 T_{b22} と T_{b23} は、表 4-3 に示すように、バンド 22 と 23 の輝度温度(°C)、係数の a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 はマイアミ大学の RSMAS(Rosenstiel School of Marine and Atmosphere)において用意された係数であり、期間ごとの値が設定されている。

たとえば、AQUA の 2006 年の 274~304 日の係数、305~334 日の係数、335~365 日の係数は次のように与えられる。

	a_0	a_1	a_2	a_3
AQUA 2006274 2006304	0.532	1.027	0.507	1.497
AQUA 2006305 2006334	0.596	1.026	0.498	1.407
AQUA 2006335 2006365	0.529	1.030	0.499	1.458

② 熱赤外バンドによる日中の海表面温度

さらに、日中の海表面温度は、熱赤外波長帯域のバンドを利用し、次のように経験式が提案されている。

($T_{b31} - T_{b32}$) ≤ 0.5 のとき

$$sst = a_{00} + a_{01} T_{b31} + a_{02} (T_{b31} - T_{b32}) B_{sst} + a_{03} (T_{b31} - T_{b32}) (\sec \theta - 1.0) \quad 4-14$$

($T_{b31} - T_{b32}$) ≥ 0.9 のとき

$$sst = a_{10} + a_{11} T_{b31} + a_{12} (T_{b31} - T_{b32}) B_{sst} + a_{13} (T_{b31} - T_{b32}) (\sec \theta - 1.0) \quad 4-15$$

$0.5 < (T_{b31} - T_{b32}) < 0.9$ のとき

$$sst_{lo} = a_{00} + a_{01} T_{b31} + a_{02} (T_{b31} - T_{b32}) B_{sst} + a_{03} (T_{b31} - T_{b32}) (\sec \theta - 1.0) \quad 4-16$$

$$sst_{hi} = a_{10} + a_{11} T_{b31} + a_{12} (T_{b31} - T_{b32}) B_{sst} + a_{13} (T_{b31} - T_{b32}) (\sec \theta - 1.0) \quad 4-17$$

$$sst = sst_{lo} + ((T_{b31} - T_{b32}) - 0.5) / (0.9 - 0.5) (sst_{hi} - sst_{lo}) \quad 4-18$$

ここで、 $Bsst$ はベースラインの海表面温度である。4-13 式により SST_4 が与えられるときは、 $Bsst = SST_4$ とする。また、 SST_4 が与えられないときは、OISST(NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)のデータを利用する。OISST は海表面温度最適補間データセットであり、NOAA が $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの解像度で、週間単位の補間データを作成する。データは、現場計測データ、衛星観測データ、海氷分布データを組み合わせ、Reynolds の方法により補間するデータセットである(Reynolds 他、2002)。1981 年から現在までのデータセットが利用可能である (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.noaa.oisst.v2.html>)。

また、 a_{00} から a_{13} の係数は観測期間によりそれぞれ設定される。たとえば、AQUA の 2006 年の 274~304 日の係数、305~334 日の係数、335~365 日の係数は次のように与えられる。

	a_{00}/a_{10}	a_{01}/a_{11}	a_{02}/a_{12}	a_{03}/a_{13}	
AQUA 2006274 2006304	1.1580	0.9530	0.1560	1.5940	0.000 ! $T_{b31}-T_{b32} = < 0.7$
AQUA 2006274 2006304	2.0230	0.9270	0.1240	1.2930	0.000 ! $0.7 < T_{b31}-T_{b32}$
AQUA 2006305 2006334	1.1090	0.9470	0.1710	1.5000	0.000 ! $T_{b31}-T_{b32} = < 0.7$
AQUA 2006305 2006334	1.9890	0.9280	0.1240	1.3110	0.000 ! $0.7 < T_{b31}-T_{b32}$
AQUA 2006335 2006365	1.1010	0.9470	0.1710	1.4210	0.000 ! $T_{b31}-T_{b32} = < 0.7$
AQUA 2006335 2006365	1.8820	0.9350	0.1230	1.3720	0.000 ! $0.7 < T_{b31}-T_{b32}$

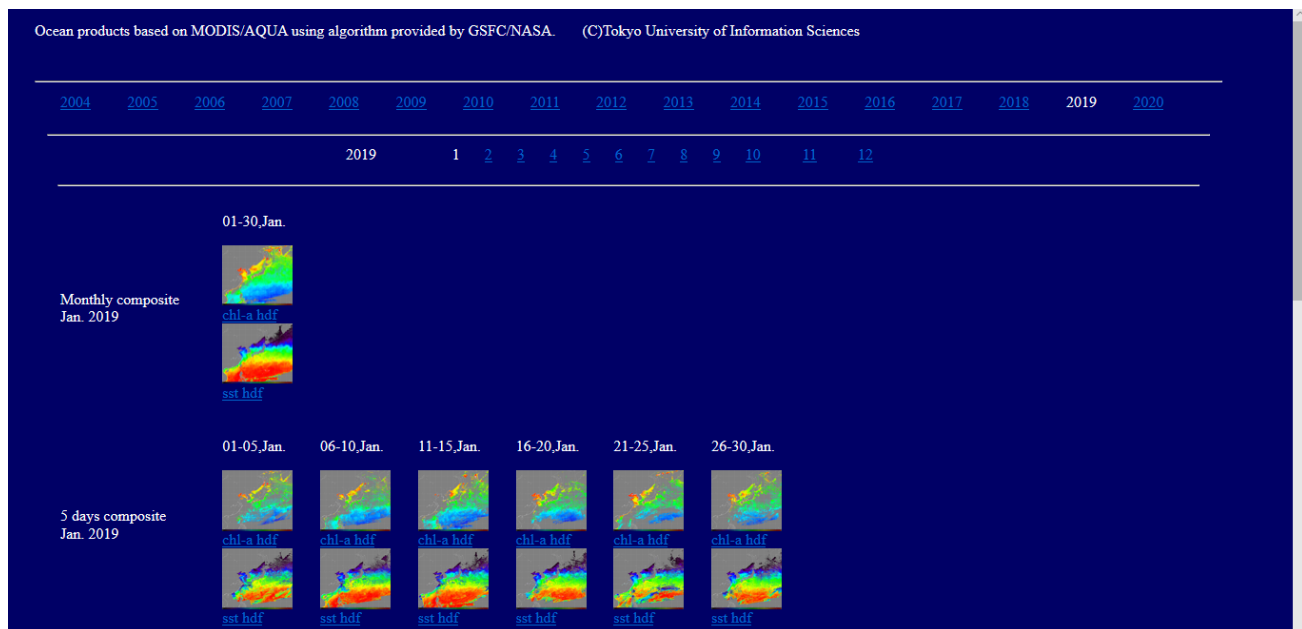
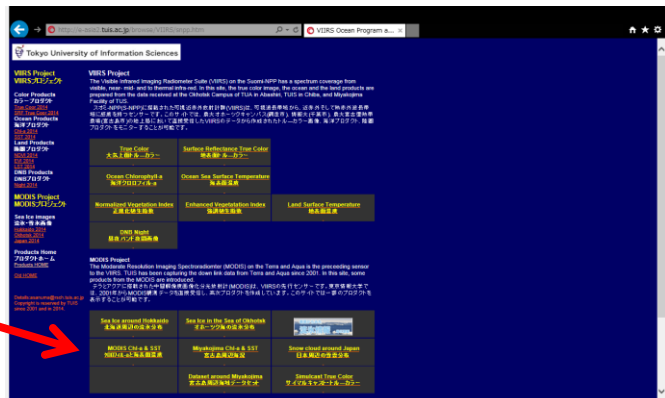
表 4-3 MODIS の海表面温度観測に利用されるバンド

バンド NO.	バンド中心波長 (μm)	バンド幅 (μm)	雑音レベル温度差 NE Δ d(K)
20	3.750	0.1800	0.05
22	3.959	0.0594	0.07
23	4.050	0.0608	0.07
31	11.030	0.5000	0.05
32	12.020	0.5000	0.05

課題 7-1 海表面温度の期間合成 (SeaDAS が利用できない場合)

1. PNG 画像のダウンロード

<http://simulcast.tuis.ac.jp/>の画面の
MODIS Chl-a & SST 「海表面温度、クロ
ロフィル-a、日本周辺」のアイコンをクリ
ックする。



2019 年の 9 月をクリックする。

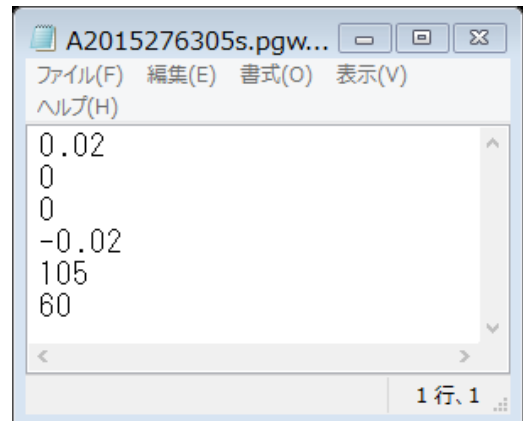
- ・ 日合成の PNG の「251」、「252」、「253」、「254」、「255」
A2019251s.png
A2019252s.png
A2019253s.png
A2019254s.png
A2019255s.png
- ・ 5 日間合成の PNG の「from 251 to 255」、
A2019251255s.png
- ・ 30 日間合成の PNG の「201909」
A2019246275s.png

2. ワールドファイルの作成

PNG のワールドファイルを作成する。

メモ帳を利用し、経度方向の画素サイズ(0.02 度)、経度方向の傾き(0 度)、緯度方向の傾き(0 度)、緯度方向の画素サイズ(-0.02 度)、左上の経度(東経 105 度)、左上の緯度(北緯 60 度)から構成される PNG のワールドファイルを作成する。

ファイル名は、PNG 画像のファイル名、ファイルタイプは、pgw とする。7 組作成する。



A2019251s.pgw

A2019252s.pgw

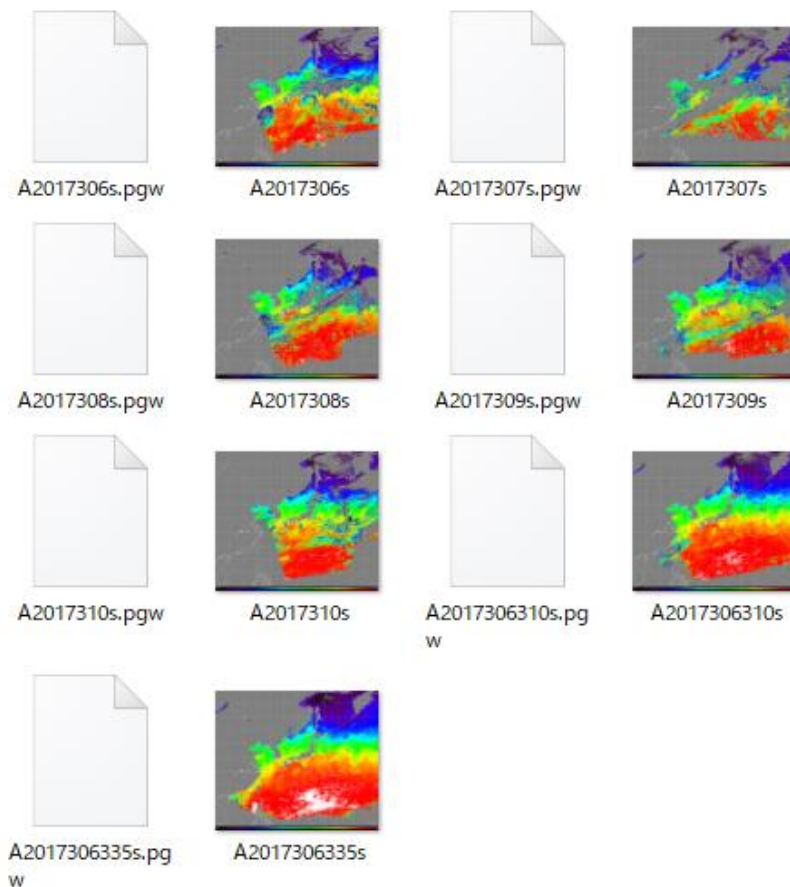
A2019253s.pgw

A2019254s.pgw

A2019255s.pgw

A2019251255s.pgw

A2019246275s.pgw



3. ArcMAP の準備

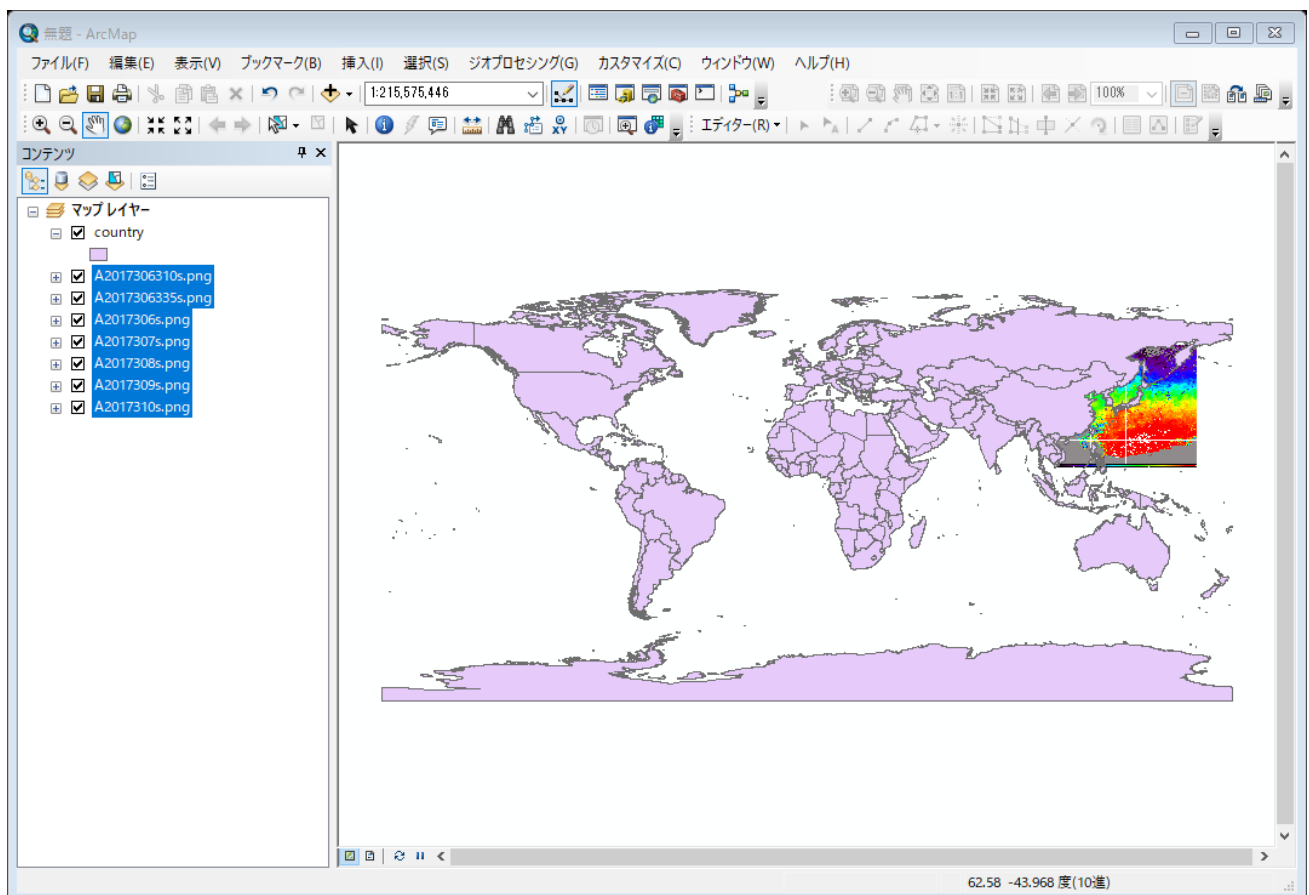
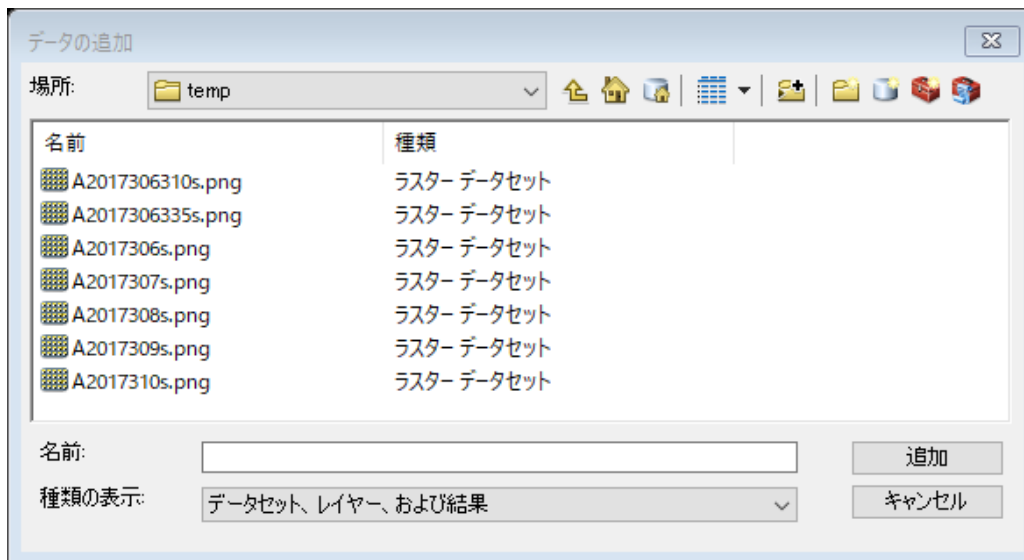
(1) 教材フォルダーから WorldCoast のデータをダウンロードする。

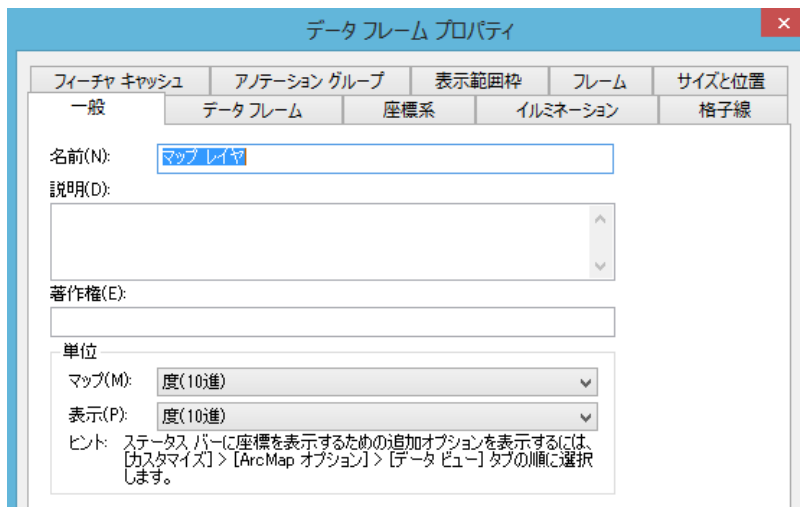
(2) ArcMAP による海岸線表示

データの追加から、WorldCoast を追加する。

(3) 衛星画像の表示

データの追加から、PNG 画像を追加する。





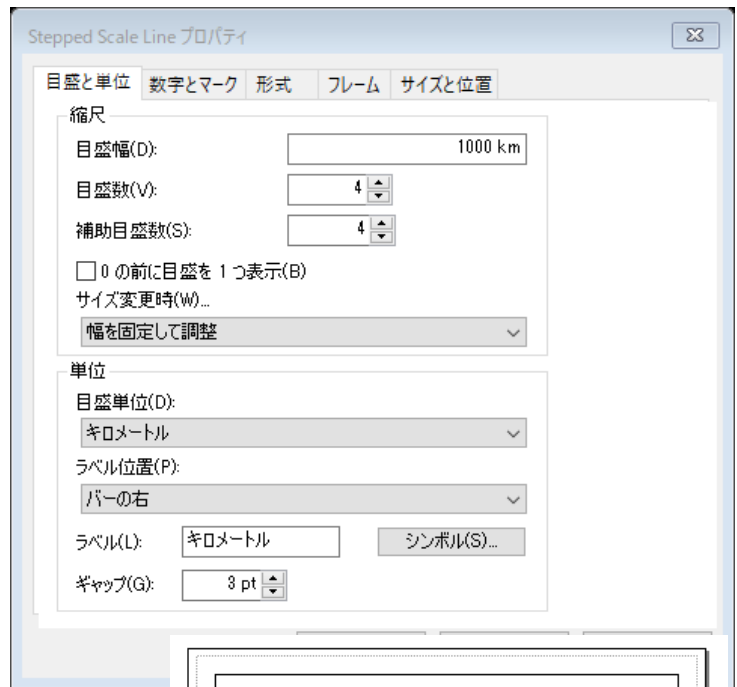
(5) 座標系の単位を設定する
 マップをダブルクリック
 すると、データフレームプロパ
 ティのウィンドウが表示され
 る。「一般」タブのマップと表
 示を「度(10進)」とする。

(6) レイアウトモードにおける装飾

画像表示を「データビューモード」から「レイアウトビューモード」へ変更し、日
 本周辺を拡大表示する。

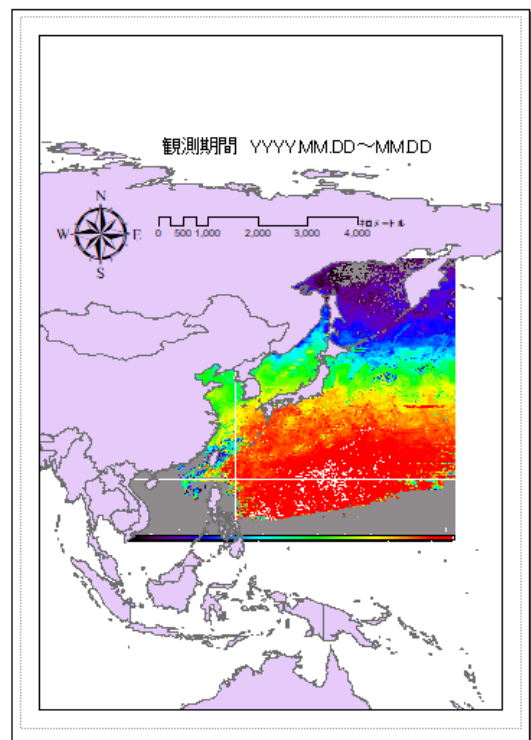
方位記号、縮尺、タイトル(観測期間)を挿入する

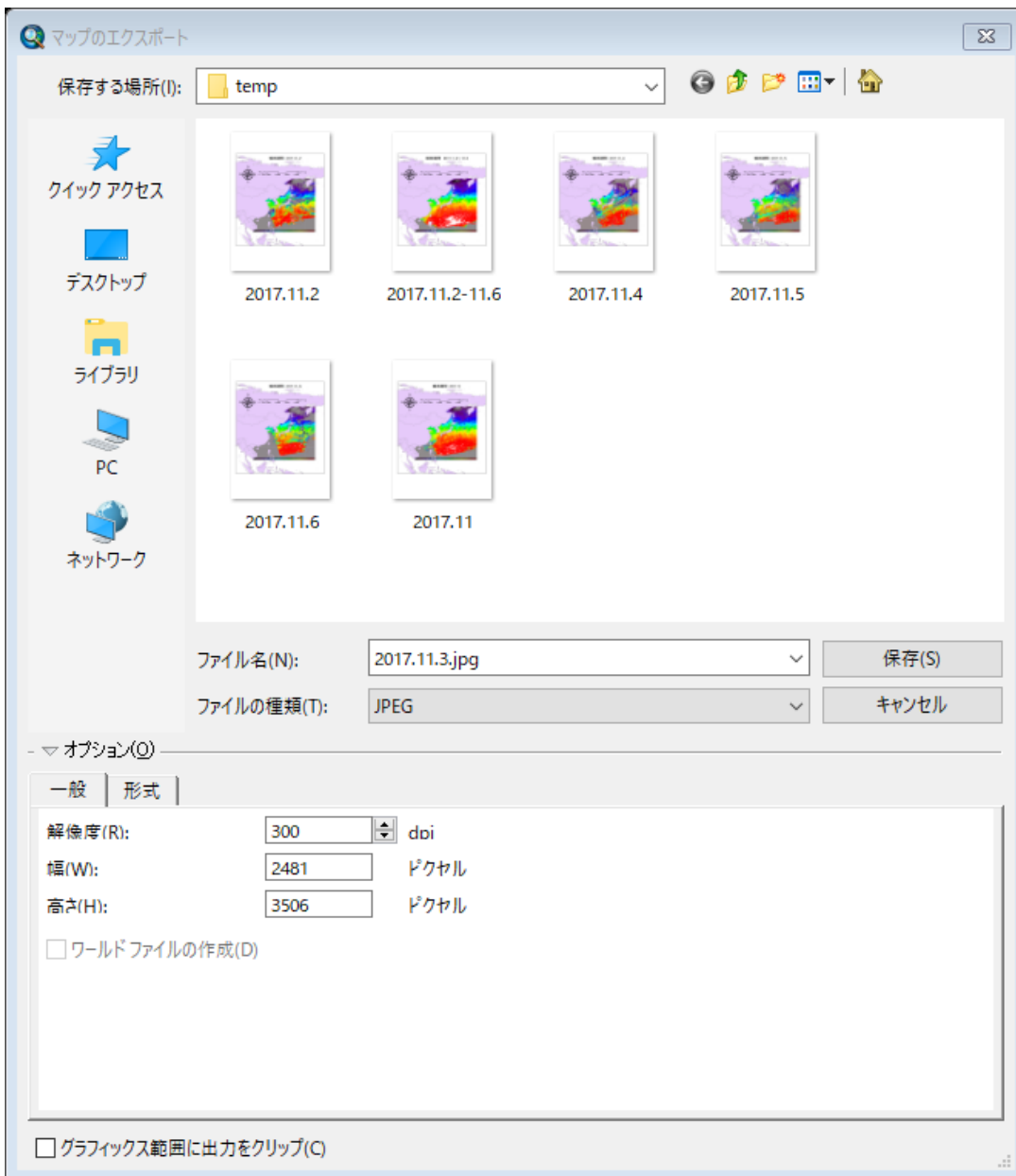
観測期間 2019.9.8 (251)
 2019.9.9 (252)
 2019.9.10(253)
 2019.9.11(254)
 2019.9.12(255)
 2019.9.8～9.12(251255)
 2019.09 (246275)

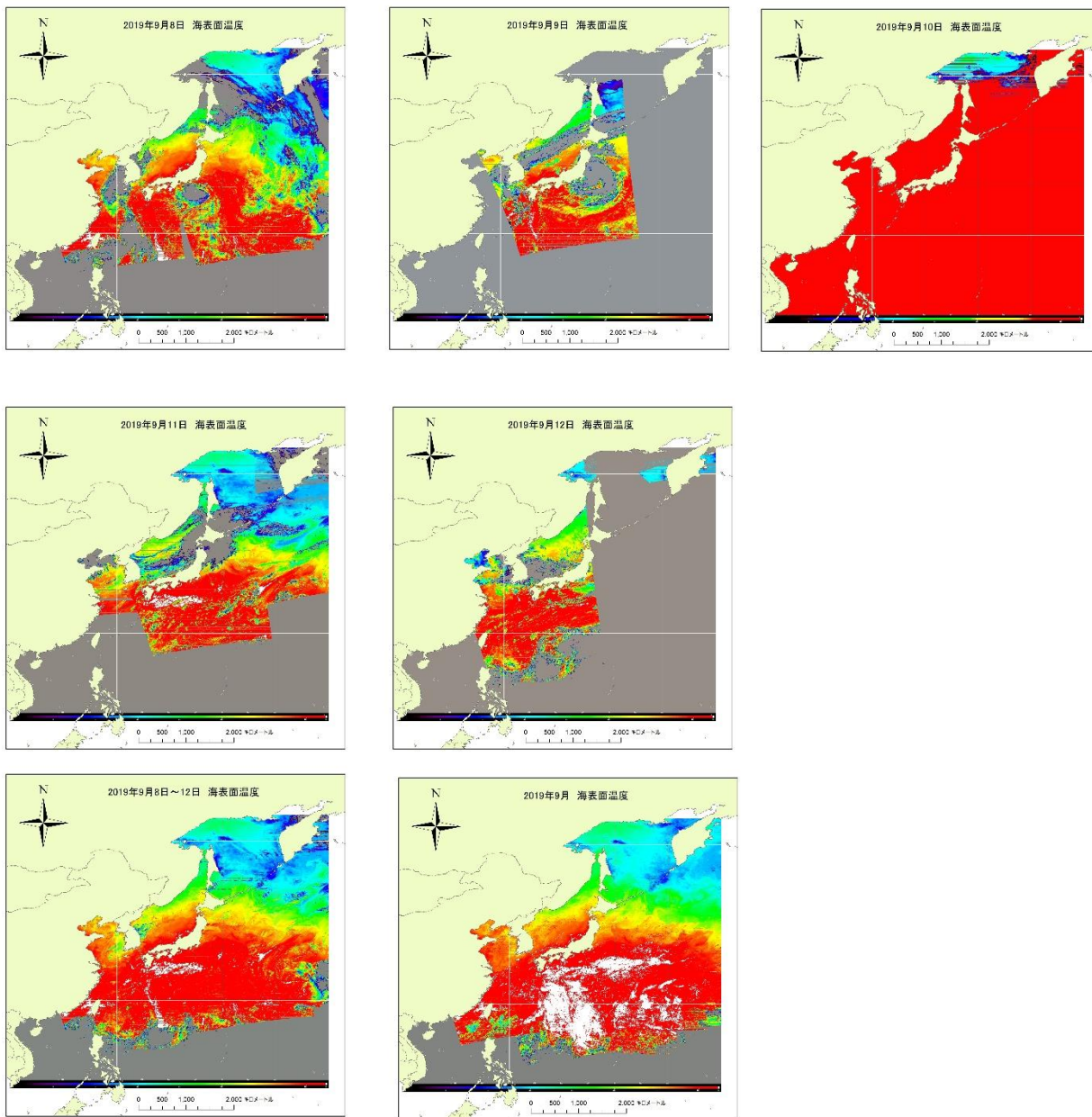


縮尺記号

- (7) マップのエクスポート
 ファイルからマップのエクスポートを選択し、JPEG 画像として出力する。







日合成画像に注目すると、_____海表面温度の観測の困難な海域が存在する。雲の分布から2019年9月8日から9日にかけて、台風15号が房総半島を通過したことが分かる。台風進路の右側の危険半円の房総半島に大きな被害をもたらした。

5日間の合成画像によると、_____が除去され、台風の雨雲を判読することは困難である。

月間合成画像によると、黒潮を含む日本の南東海域の昇温状態が明らかであり、台風発達の要因であることが分かる。

課題 7-2 海表面温度の期間合成

一つのパスによる海表面温度観測において、ほとんどの場合、雲が存在するため、観測対象海域の海表面温度分布を網羅することが困難である。多くの衛星データ提供機関は、期間合成された海表面温度を提供する。あるいは、マイクロ波により観測される海表面温度のデータを組み合わせた海表面温度のデータセットも提供される。マイクロ波センサーは、1km の空間分解能を達成することが困難であるため、全く同じ条件での合成データではないが、おおよその海表面温度を知ることができる。

海表面温度の期間合成を行う場合、雲のない有効なデータを集め、平均値を求める方法と、最大値を求める方法が考えられる。MODIS あるいは AVHRR などのように、2000km の広域にわたる観測幅をもつセンサーの場合、走査角の大きい場合の気象効果を見逃すことが困難である。走査角が大きいときの気象効果により、海表面温度が低めに観測される。このため、平均値を求めると、低めの海表面温度とともに平均値を求めると、誤差の大きい海表面温度となる可能性がある。

ここでは、雲のない有効な画素の最大値を求める方法で海表面温度の期間合成を試みる。

① データの準備

a) Windows における作業

教材フォルダに、東京情報大学において受信処理し、2013年11月2(306)日から6(310)日までの各日の合成海表面温度のデータを用意した。教材フォルダの`¥env¥asanuma¥SSTDayComposite` のフォルダを D:ドライブの TEMP 下へコピーする。

b) VMwarePlayer を立ち上げ(Undersame=CentOS-SeaDAS, password=tuistuis)、ファイルを解凍する。

```
cd /mnt/hgfs/TEMP/SSTDayComposite
gunzip *.gz
```

② SeaDAS の起動

SeaDAS を次のように起動する。

```
source /home/SeaDAS/config/seadas.env      (動作環境変数をソースコマンドにより設定)
seadas -em                                (-em スイッチにより、IDL のエンベッド・モードでの動作)
```

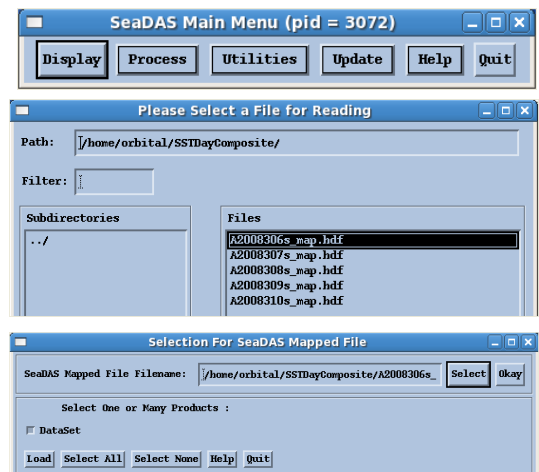
③ データのロード

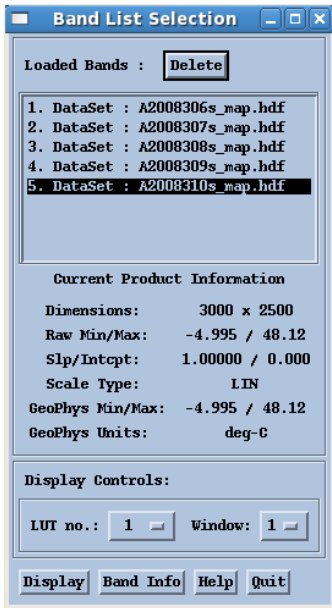
Display コマンドにより、5 日分の海表面温度のデータをロードする。

【SeaDAS Main Menu】 → [Display]

【Please Select a File for Reading】 → ファイル選択
for Reading]

【Selection For SeaDAS Mapped file】 → Dataset の On を確認。

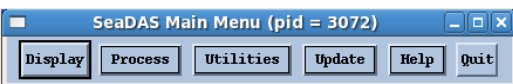




上記の[Select]を繰り返し、5件のデータをロードする。

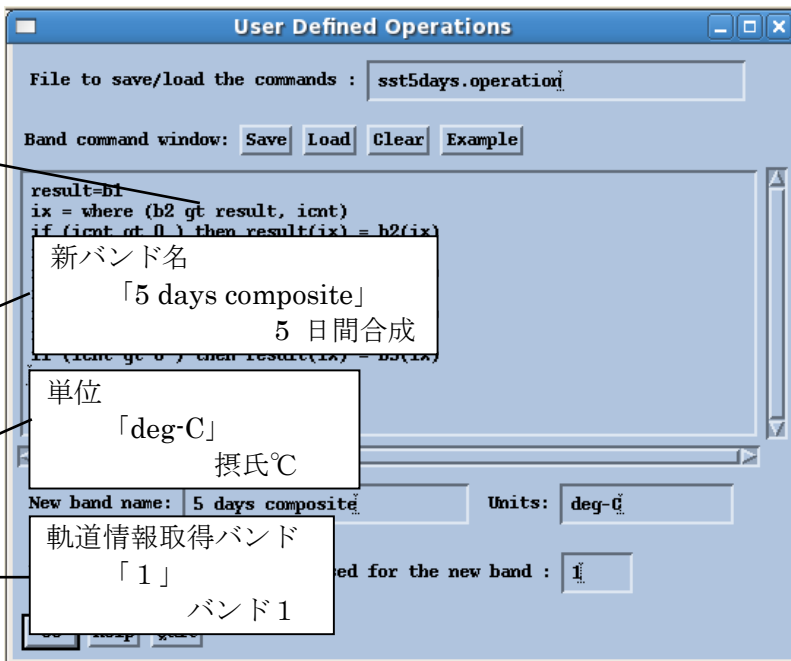
- A2013306s_map.hdf (306 = 11月1日)
- A2013307s_map.hdf (307 = 11月2日)
- A2013308s_map.hdf (308 = 11月3日)
- A2013309s_map.hdf (309 = 11月4日)
- A2013310s_map.hdf (310 = 11月5日)

306、307・・・ ユリウス日(Julian day)



【SeaDAS Main Menu】 → [Utilities]

→ [Data manipulation] → [User defined operation]



④ ユーザ定義の演算機能の利用

次のようにプログラムを組む。

演算を保存するファイル名

<sst5days.operation>

```

result = b1
ix = where (b2 gt result, icnt)
  if (icnt gt 0) then result(ix) = b2 (ix)
ix = where (b3 gt result, icnt)
  if (icnt gt 0) then result(ix) = b3 (ix)
ix = where (b4 gt result, icnt)
  if (icnt gt 0) then result(ix) = b4 (ix)
ix = where (b5 gt result, icnt)
  if (icnt gt 0) then result(ix) = b5 (ix)

```

result : 演算結果を格納する新しいバッファ(バンド)

ix : 条件を満たすピクセルのアドレス

icnt : 条件を満たすピクセルの個数

b1、b2、b3、b4、b5 : 入力バッファ(バンド)

⑤ 表示

海岸線 : [Setup] → [Coast Lines] → 白を選択 → [OK]

緯経線 : [Setup] → [Grid] → 白を選択、5度間隔へ設定 → [OK]

配色 : [Functions] → [Color LUT] → [Load LUT] → 「Chlorophyll」を選択

カラーバー : [Functions] → [Color Bar] → [ON]

スケール : [Functions] → [Rescale] → Min:0.0、Max : 30.0 → [OK]

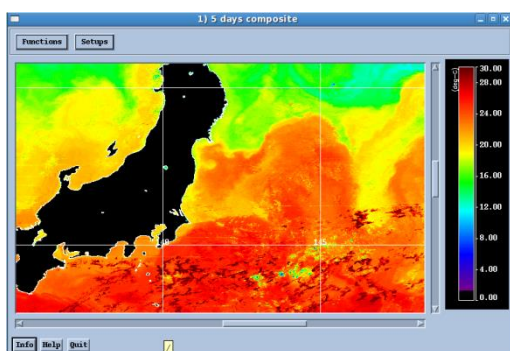


図 4-9 SeaDAS による表示

⑥ パワーポイント作成

[Functions] → [Output] → [Display] → **[Output Setup]**

「File type」 : [PNG] を選択する。

「Output file」 : <mnt/hgfs/TEMP/5days.composite.png> と、ファイル名を入力する。

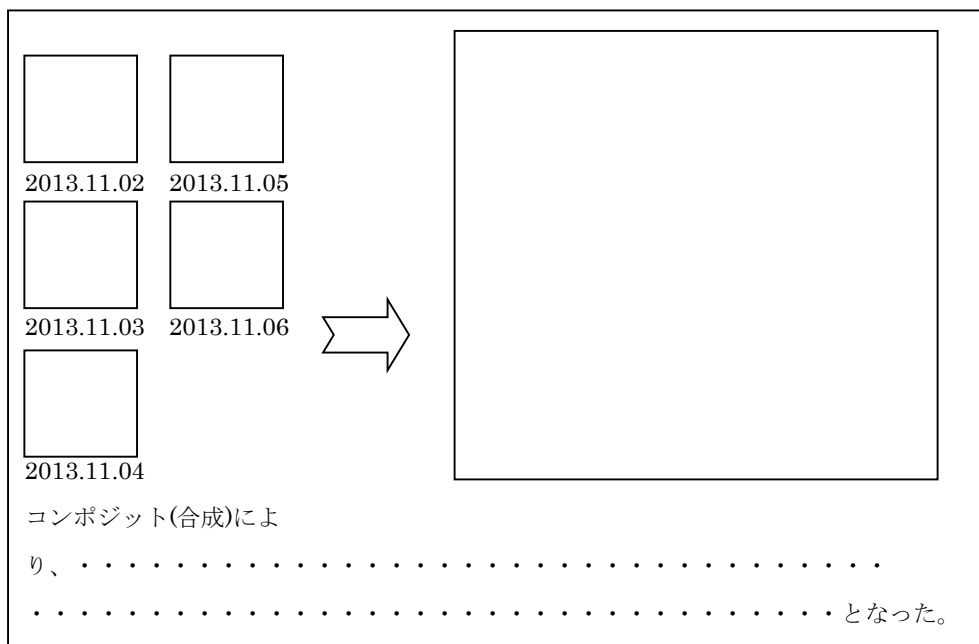


図 4-10 パワーポイント配置例