

2

大気と海洋の相互作用

The Air-Sea Interaction



根田 昌典
京都大学大学院理学研究科

Masanori Konda
Kyoto University

2.1 大気と海洋のフィードバック

Feedback between Ocean and Atmosphere

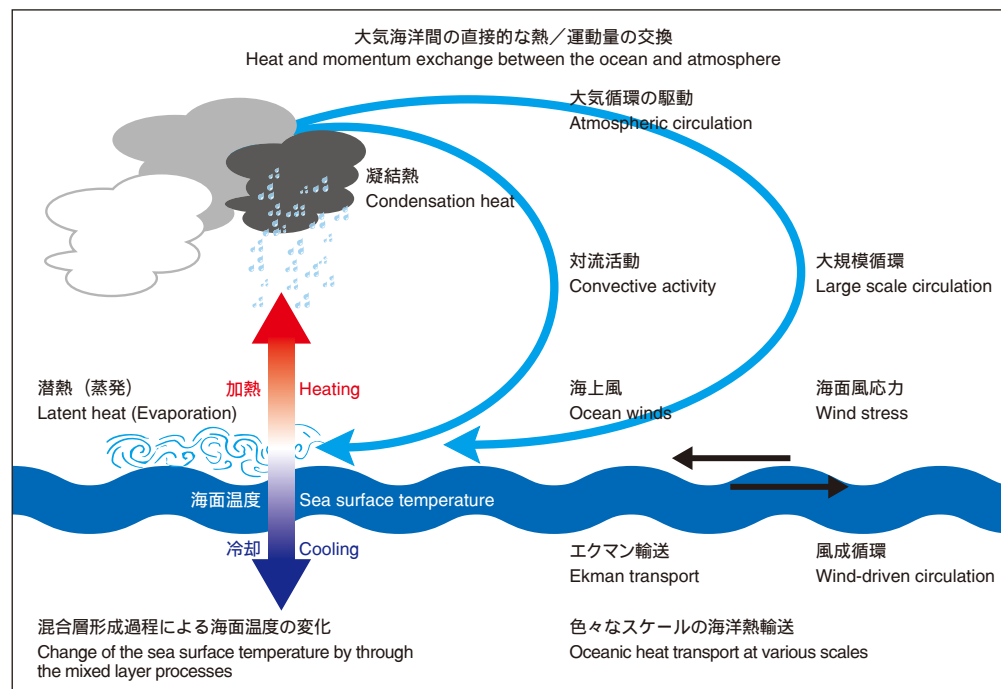


図 2.1.1 大気海洋間の相互作用の概念図

Fig. 2.1.1 Schematic view of the interaction between ocean and atmosphere

大気や海洋といった地球流体の運動のエネルギー源は太陽からの放射エネルギーです。私たちが生活する対流圏(地表からおよそ12kmの高さの間)では、太陽からの放射エネルギーはまず海洋を温めてから、蒸発熱や顕熱として大気に輸送されます。それによって駆動されたさまざまなスケールの大気の運動(風)によって、今度は表層付近の海洋の運動も駆動されるのです。海洋の表層には温度や塩分はほぼ一定である混合層が分布していますが、混合層の水温は海上風や蒸発の影響を受けてさらに変化しますから、大気と海洋はエネルギーを交換し合うことによってそれぞれの運動を維持していることになります。このような相互作用によって生じた大気と海洋の南北循環によって低緯度から高緯度に向かって多くの熱が輸送されることは、地球の気候が全体的に穏やかであることの大きな要因のひとつであると考えられています。海上風は乱流エネルギーの海洋への輸送と、蒸発による密度フラックスを生じさせることで、海洋混合層の発達に寄与しています。その結果、再び蒸発による大気加熱が生じることによるフィードバックシステムが維持されているのです。

The shortwave solar insolation provides the energy that drives the geophysical fluids including ocean and atmosphere. In the troposphere (which ranges from the Earth's surface to a height of 12km) where we live, radiation energy warms the ocean surface before transferring to the atmosphere through sensible heat and the latent heat of evaporation. This force drives atmospheric circulations at various scales. In turn, the wind drives ocean circulation. Wind and evaporative cooling at the sea surface affect the temperature in the ocean mixed layer, where the temperature and the salinity are almost uniform. This important feedback system plays a major role in maintaining the geophysical fluid motion through the exchange of energy between ocean and atmosphere. The calm global climate is attributable to meridional heat transport by oceanic and atmospheric circulation. The oceanic wind contributes to the mixed layer processes through the input of turbulent energy and also through the density flux caused by evaporative cooling. As a result, the feedback system starts again, heating the atmosphere by evaporation at the sea surface.

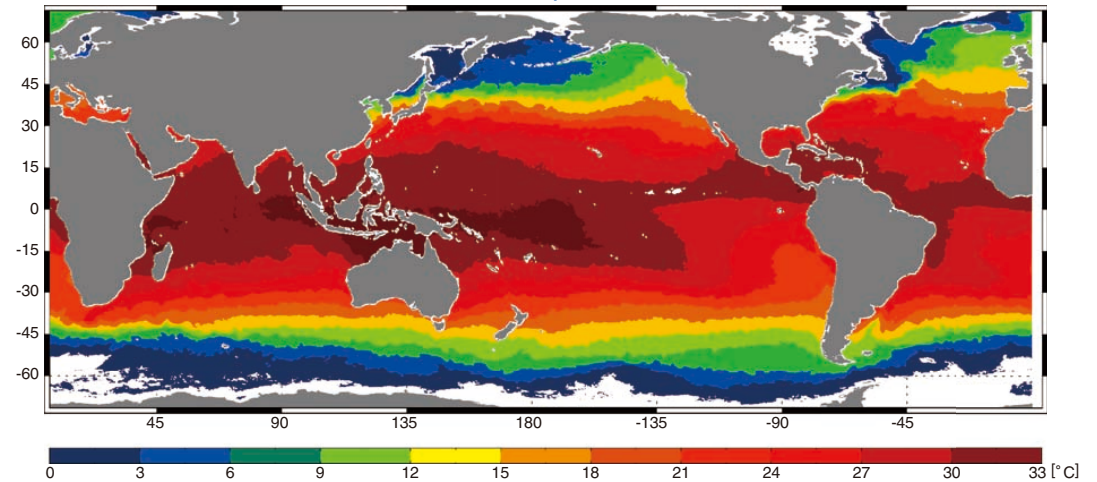
2.2 海面温度と海上風の年々変動

Interannual Variation of Sea Surface Temperature and Ocean Wind

長い時間をかけた大気と海洋の相互作用の結果、現在の地球においては水温や風のおおまかな分布はほぼ平衡状態に達しています。例えば、海面温度は低緯度域の温度が高く、高緯度になるにつれて温度が下がっています。しかし、よく見ると、北太平洋の東部や北大西洋などのように、等温線が南北に斜めに傾いている様子が見られます。このような分布はある程度、海の流れ分布を反映しています。一番海面温度が高いのはインドネシア多島海域で、この高温域は暖水プールと呼ばれていて、貿易風による吹き寄せ効果によって維持されています。熱帯太平洋東部には冷水舌とよばれる低水温域が赤道に沿って東西に延びています。海上風速の分布も同様に特徴的な分布をしています。中緯度域で風速が強いのは、この緯度帯に非常に強い低気圧と高気圧が分布していることを反映しています。また、インドネシア多島海域などでは地表付近で大気が収束しているために、平均的に低風速になっています。

The sea surface temperature (SST) and the wind field over the oceans are almost in a steady state due to the persistent air-sea global-interaction system. For example, SST is generally high at low latitudes, and low at middle and high latitudes. However, careful inspection of SST distribution demonstrates that some contours are not parallel to the latitude, such as in the northeast Pacific and the north Atlantic. This meridional inclination of the SST distribution should reflect to some extent the ocean currents. We see the highest SST in the Indonesian archipelago, known as the “warm water pool,” which is maintained by the Trade wind. In contrast, we also see a low SST along the equator in the eastern tropical Pacific known as “the cold tongue.” The map of the ocean wind in the figures demonstrates the typical distribution in the boreal winter. The high wind speed in the mid latitudes should reflect the marked stationary high and low pressures. The wind speed is low over the Indonesian archipelago and the other notable atmospheric convergence zones.

Mean Sea Surface Temperature in Dec. 2002



Mean Sea Surface Wind in Dec. 2002

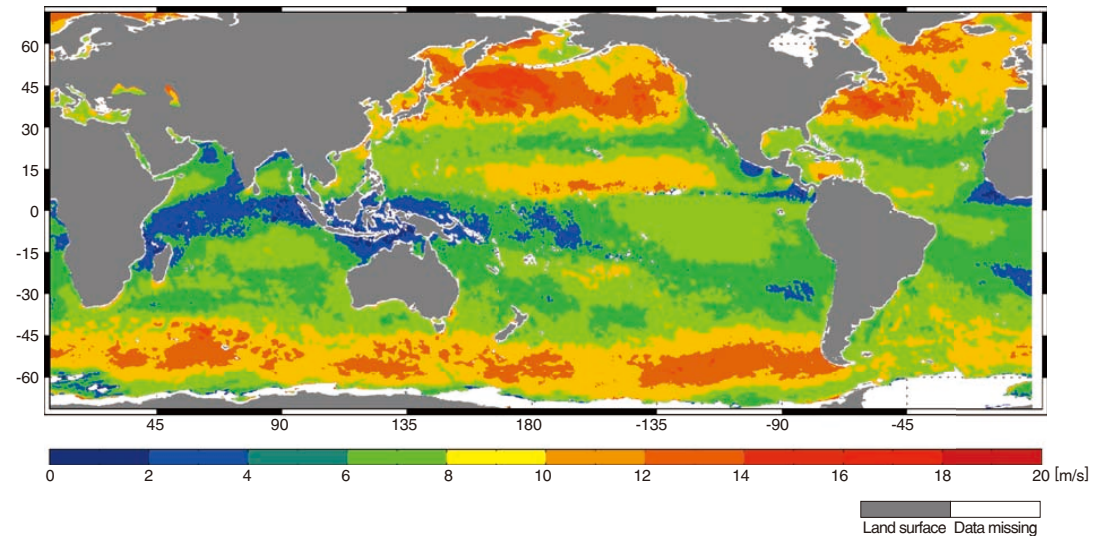
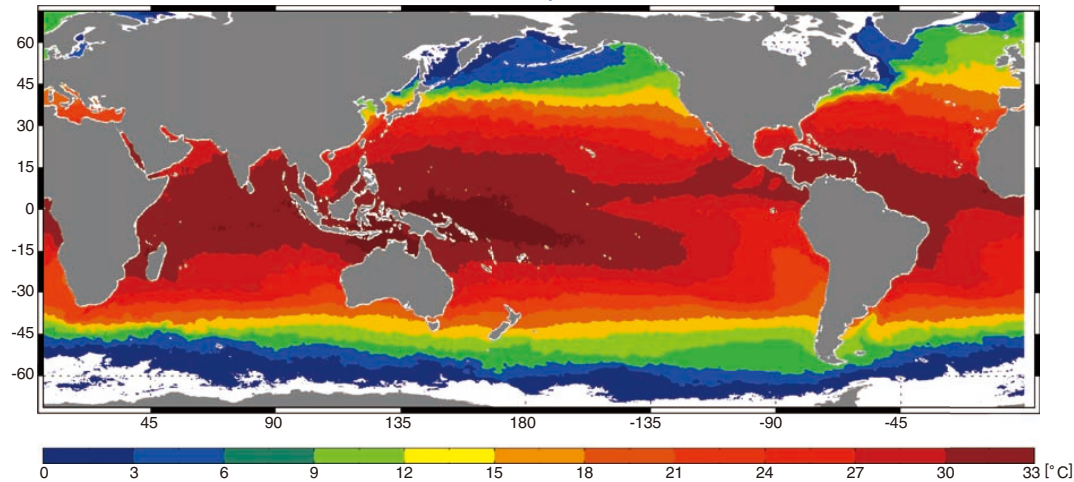


図 2.2.1 AMSR-Eによる2002年12月の月平均海面温度(上段)と海上風速(下段)の全球分布
Fig. 2.2.1 Global distribution of monthly averaged SST and wind speed in December 2002 as observed by AMSR-E



Mean Sea Surface Temperature in Dec. 2003



Mean Sea Surface Wind in Dec. 2003

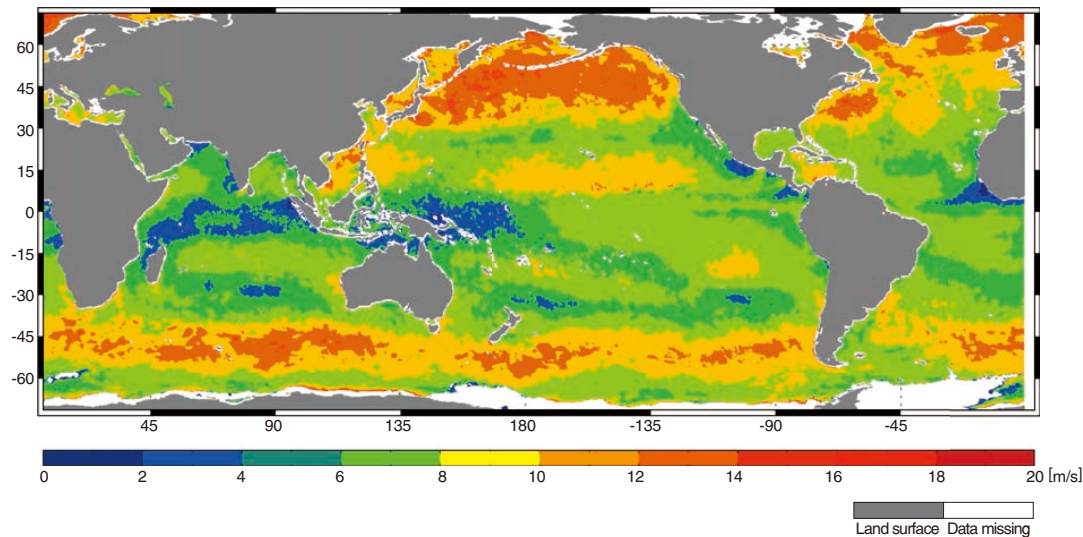


図 2.2.2 AMSR-Eによる2003年12月の月平均海面温度(上段)と海上風速(下段)の全球分布
Fig. 2.2.2 Global distribution of monthly averaged SST and wind speed in December 2003 as observed by AMSR-E

他方、大気と海洋はその相互作用によって常に変動しています。海洋表面の水温分布もグローバルなスケールで変化しています。なかでもエルニーニョ現象は熱帯太平洋全体の水温変化を伴う大規模な変動現象であり、大気と海洋の相互作用が非常に重要な働きをしていることが知られています。2002年はエルニーニョが発生し、その冬には最盛期を迎えました。エルニーニョが発生しなかった2003年の海面温度分布と比較すると、2002年は明らかに冷水舌が後退していて、東部で海面温度がいつもより高いことが分かります。反対に西部では海面温度が2003年に比べて低くなっています。これに伴って、低風速域が2002年では東部に移動している傾向が見られます。これは、水温の高い領域が東方向に移動するために熱帯域の大気の収束帯の場所が変移していることを示しています。

On the other hand, air-sea interaction changes both the ocean and the atmosphere. One of the most notable large-scale variations of the SST is the El Niño, which cause the SST over the equatorial Pacific to change interannually. The close air-sea interaction plays an important role in this phenomenon. El Niño began developing in spring of 2002, and reached its mature phase in winter. A comparison of SST in 2002 with those in 2003, when El Niño did not occur, reveals a warmer SST in the eastern Pacific with a suppressed “cold tongue” and lower SST in the western Pacific in 2002. Simultaneously, the region with low wind, representing the atmospheric convergence at the surface level, moved eastward in 2002. This indicated a strong air-sea coupling, and it shifted both the anomalously high SST and the atmospheric convergence zone to the east.

2.3 フロリダ海流-メキシコ湾流域での膨大な熱放出

Large Heat Release over the Florida Current and the Gulf Stream

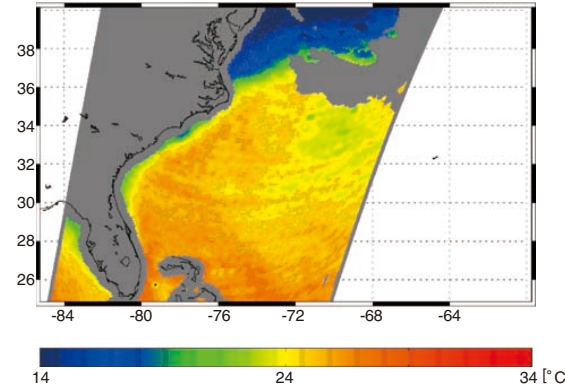
フロリダ海流は黒潮と同じように大洋の西岸に接して流れる強い海流で西岸境界流と呼ばれ、低緯度から中緯度への大量の熱を輸送する役割を担っています。メキシコ湾流はその続流です。海流上で海面温度が周囲よりも高く、潜熱フラックスが特に大きいことが分かります。これは、温度が高くなると大気中に含むことのできる水蒸気量が急激に多くなり、蒸発がより活発になるからです。例えば、 500W/m^2 の潜熱フラックスは水温が一ヶ月間に表面から100mまで約 3°C も下げられる量に相当することからもその熱放出量が膨大であることが分かります。

一方、海面温度に顕著に見られる温度前線と海上風の分布から、この海域で特に大きな蒸発が起こっているのは低緯度から運ばれてくる高水温の水と冬季の強い海上風の影響であることがわかります。

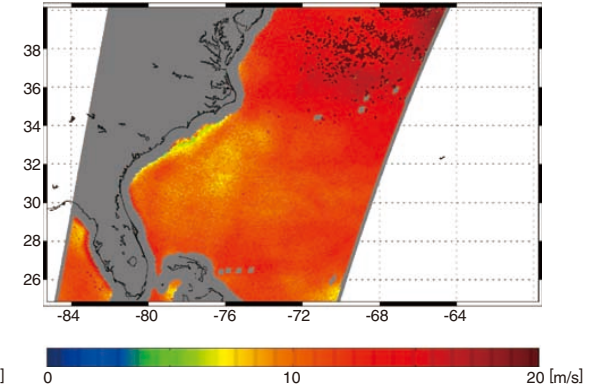
The Florida Current is a strong western boundary current similar to the Kuroshio, and the Gulf Stream is its extension. The figure shows an area of extremely large latent heat flux just over the warm current. The rapid increase of evaporation over the warm SST is attributable to the nonlinear increase of water vapor capacity in the atmosphere, proportional to the temperature. A cooling of 500W/m^2 in latent heat flux would decrease the temperature of the ocean from the surface to a depth of 100m by 3°C in one month, indicating the magnitude of the thermal effect of the strong meridional flow.

On the other hand, the strong temperature front and the strong wind prevailing in this region indicate that the warm water carried by the strong meridional current and the strong wind in the winter both contribute to the significant levels of latent heat flux.

(a) AMSR-E Sea Surface Temperature on Dec. 03, 2003



(b) AMSR-E Sea Surface Wind on Dec. 03, 2003



(c) AMSR-E Latent Heat Flux on Dec. 03, 2003

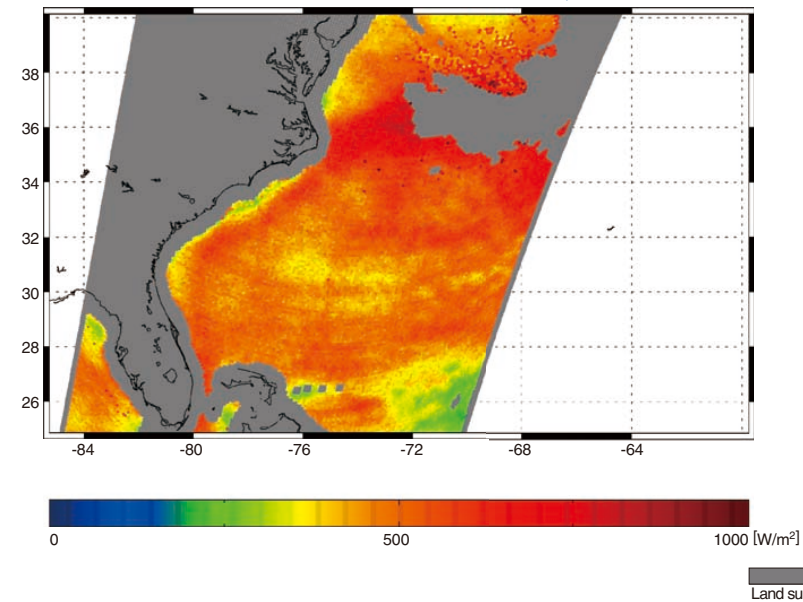


図 2.3.1 AMSR-Eによる2003年12月3日のアメリカ東岸域における (a) 海面温度、(b) 海上風速、(c) 潜熱フラックスの分布

Fig. 2.3.1 Snapshots from AMSR-E on the east coast of America on December 3, 2003 depicting (a) SST, (b) wind speed, and (c) latent heat flux

2.4 冬季の東シナ海の蒸発量の変化

Gradual Increase of Evaporation in the East China Sea in Winter

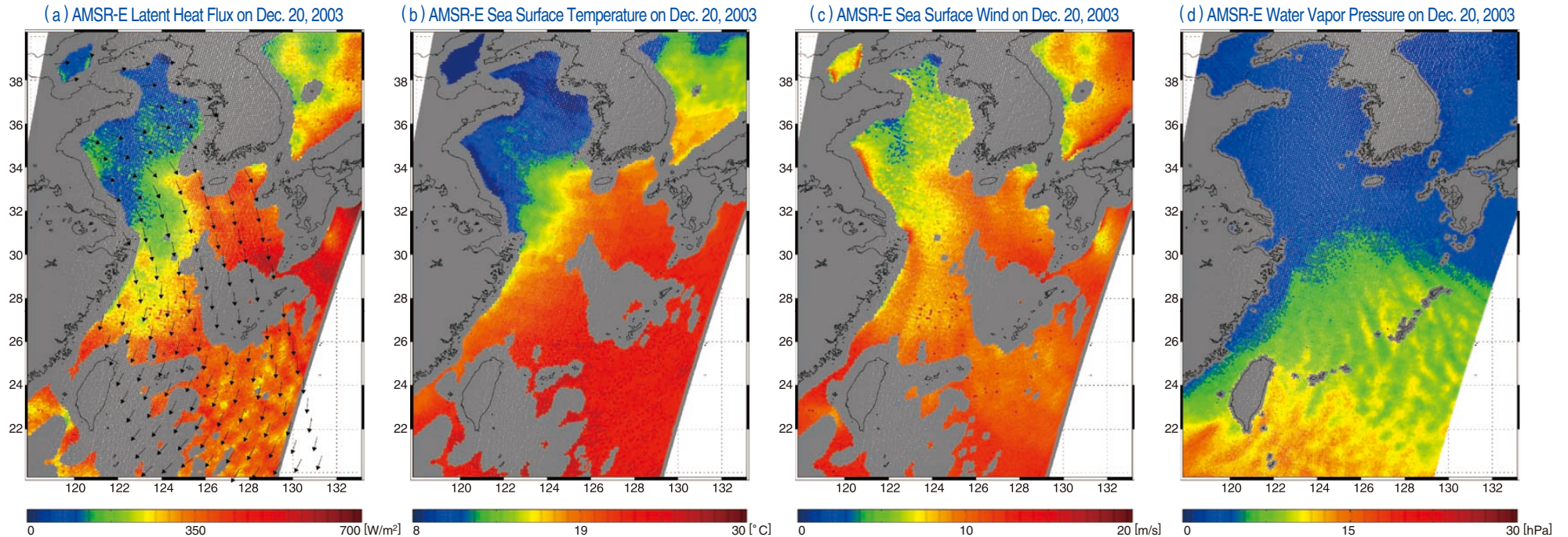


図 2.4.1 AMSR-Eによる2003年12月20日の東シナ海における (a) 潜熱フラックス、(b) 海面温度、(c) 海上風速、(d) 海上水蒸気圧の分布 (a) の黒矢印は、QuikSCAT搭載SeaWindsによる同日の海上風ベクトル。

Fig. 2.4.1 Snapshots from AMSR-E in the East China Sea on December 20, 2003 depicting (a) latent heat flux, (b) SST, (c) wind speed, and (d) water vapor pressure. Black arrows in (a) indicate wind vector in the same day observed by SeaWinds on QuikSCAT.

冬季の日本周辺域では、大陸からの冷たく乾いた空気の吹き出しと、それによる海上の活発な蒸発が特徴的です。ところが、蒸発は単に乾いた風が吹いただけでは活発に起こりません。大陸から吹き出す乾いた空気は、まず、暖かい海水によって徐々に気温を上昇させてから初めて爆発的な蒸発を引き起こします。2003年の12月20日の観測データからは、大陸からの強い吹き出しが東シナ海全体で強いにもかかわらず、 600W/m^2 もの蒸発が起こるのは九州南方であることがわかります。また、海面の水蒸気圧の分布からは、乾いた空気が蒸発によって徐々に加熱されて湿度を上げていく様子がはっきりと見られます。

The strong blowout of the cold, dry atmosphere from the continent is a typical phenomenon in the winter near Japan, and it causes strong evaporation downstream. However, the dry atmosphere itself is not enough to cause active evaporation. Before it is able to cool the sea surface by evaporation, the cold, dry atmosphere must first be warmed by the sea surface, becoming a warm, dry atmosphere that can contain a large amount of water vapor. It is obvious from the December 20, 2003 data that maximum evaporation occurs south of Kyushu, even though the strong blowout is prevailing over the East China Sea. The distribution of water vapor near the sea surface clearly demonstrates that the humidity of the atmosphere increases in proportion to the enhanced evaporation in the downstream winds.