

第11回森羅万象学校
2011年2月13-15日
支笏湖, 北海道

宇宙からみる地球の大気

塩谷 雅人
(京大大学生存圏研究所)

用意している材料と話の流れ

- 衛星観測から 何が分かるようになったのか？
 - 「衛星観測50年」という本をベースにして
- 衛星観測は本当に万能か？
 - オゾンホールにまつわる話
- 衛星観測で発見された現象はあるのか？
 - 熱帯成層圏における水蒸気変動
- 私の衛星観測への関わり
 - 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)

衛星観測から 何が 分かるようになったのか？

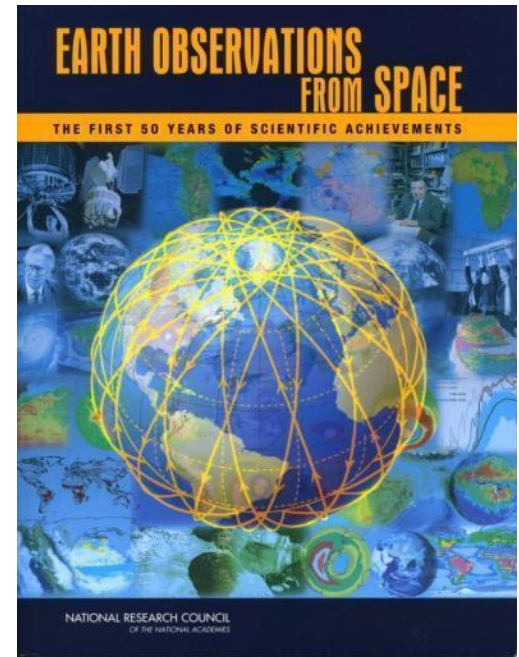
「衛星観測50年」という本をベースにして

“Earth observations from space”

- The first 50 years of scientific achievements -

- 1 INTRODUCTION
- 2 EARTH OBSERVATIONS FROM SPACE: THE EARLY HISTORY
- 3 WEATHER
- 4 EARTH’S RADIATION BUDGET AND THE ROLE OF CLOUDS AND AEROSOLS IN THE CLIMATE SYSTEM
- 5 ATMOSPHERIC COMPOSITION: OZONE DEPLETION AND GLOBAL POLLUTION
- 6 HYDROLOGY
- 7 CRYOSPHERE
- 8 OCEAN DYNAMICS
- 9 ECOSYSTEMS AND THE CARBON CYCLE
- 10 LAND-USE AND LAND-COVER CHANGE
- 11 SOLID EARTH
- 12 CONCLUSIONS

<http://dels.nas.edu/basc/earthobservations/report.shtml>

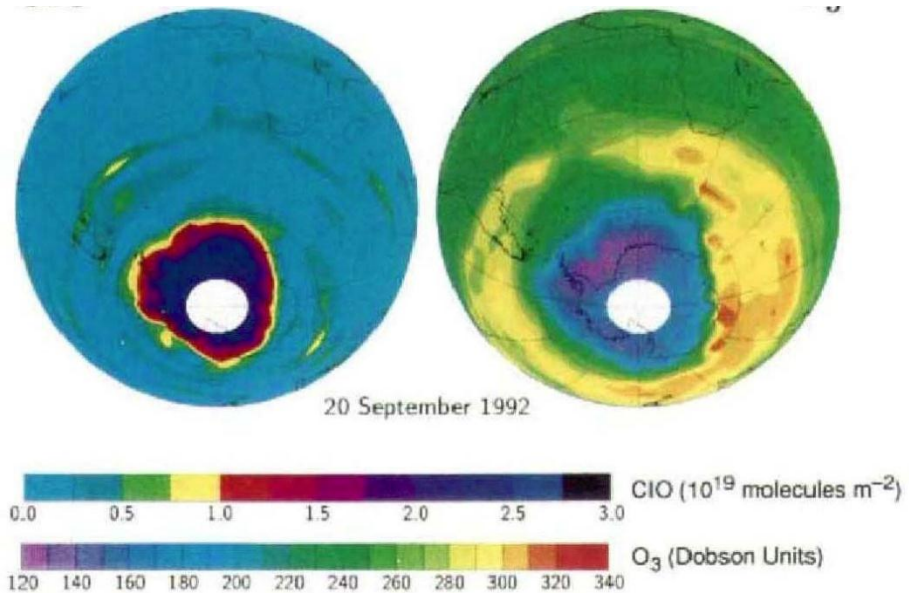
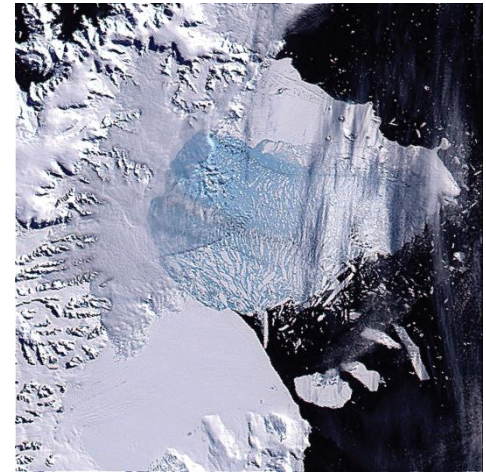
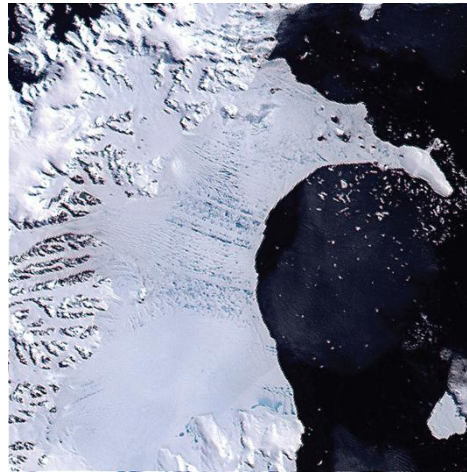


冒頭のSummaryの書き出し

Just as the invention of the mirror allowed humans to see their own image with clarity for the first time, Earth observations from space have allowed humans to see themselves for the first time living on and altering a dynamic planet.

その少し後に、1957-1958におこなわれた International Geophysical Year (IGY)とちょうど同時期(1957年10月)に打ち上げられた世界初の人工衛星Sputnikの話が象徴的に述べられている。

Summaryで取り上げられている3枚の図



衛星からの地球観測 - 初期の歴史

1957 1960

1970

1980

1990

2000

2010

1957年 世界初の人工衛星

1960年気象衛星TIROS 1 – その後もTIROS-N/NOAAとして継続

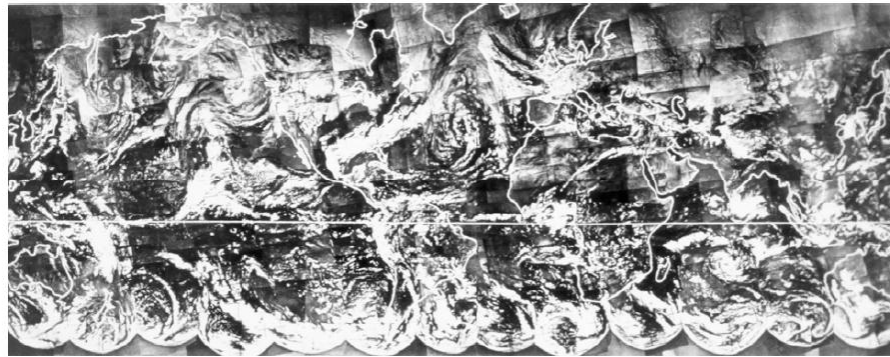
1964- 78年Nimbusシリーズ

1966年ATS-1静止軌道に投入

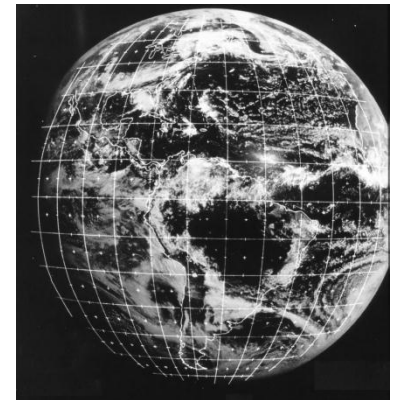
1977年日本最初の静止気象衛星(ひまわり)



1960年TIROS-I
による初画像



1965年2月13日TIROS-9による全球合成画像
(Earth Observations from Space, 2008)



1970年静止衛星
ATS-3による画像

衛星からの地球観測 – 最近の歴史

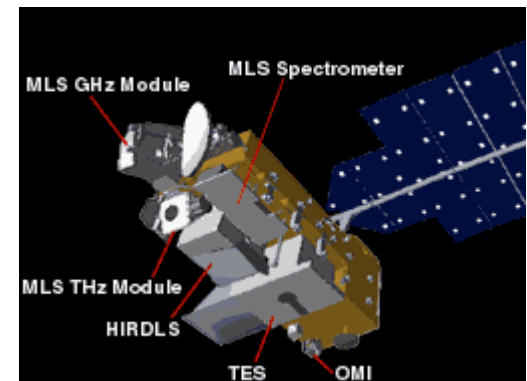
- 1991年 UARS の打ち上げ; 高層大気観測衛星
- 1996年 ADEOS の打ち上げ; 日本の地球観測衛星
- 1999年 TERRA の打ち上げ; 大気や雲の放射の観測
- 2002年 AQUA の打ち上げ; 水循環(雲, 雨...)に関する観測
- 2004年 AURA 打ち上げ; 大気微量成分の観測



(UARS)

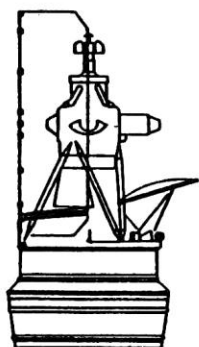


(ILAS)



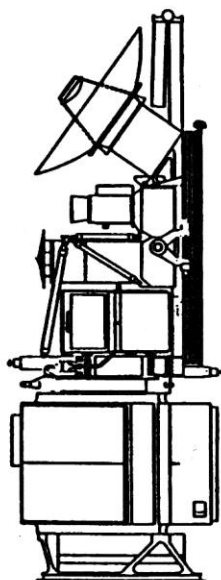
(AURA)

衛星のサイズ



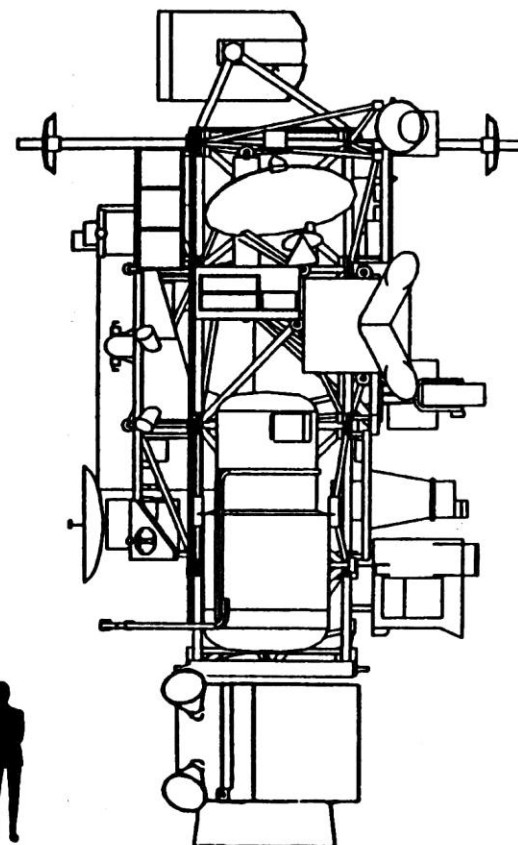
NIMBUS-7

2150 LBS
66" DIAMETER
12' HIGH



LANDSAT-D

3800 LBS
86" DIAMETER
18.5' HIGH

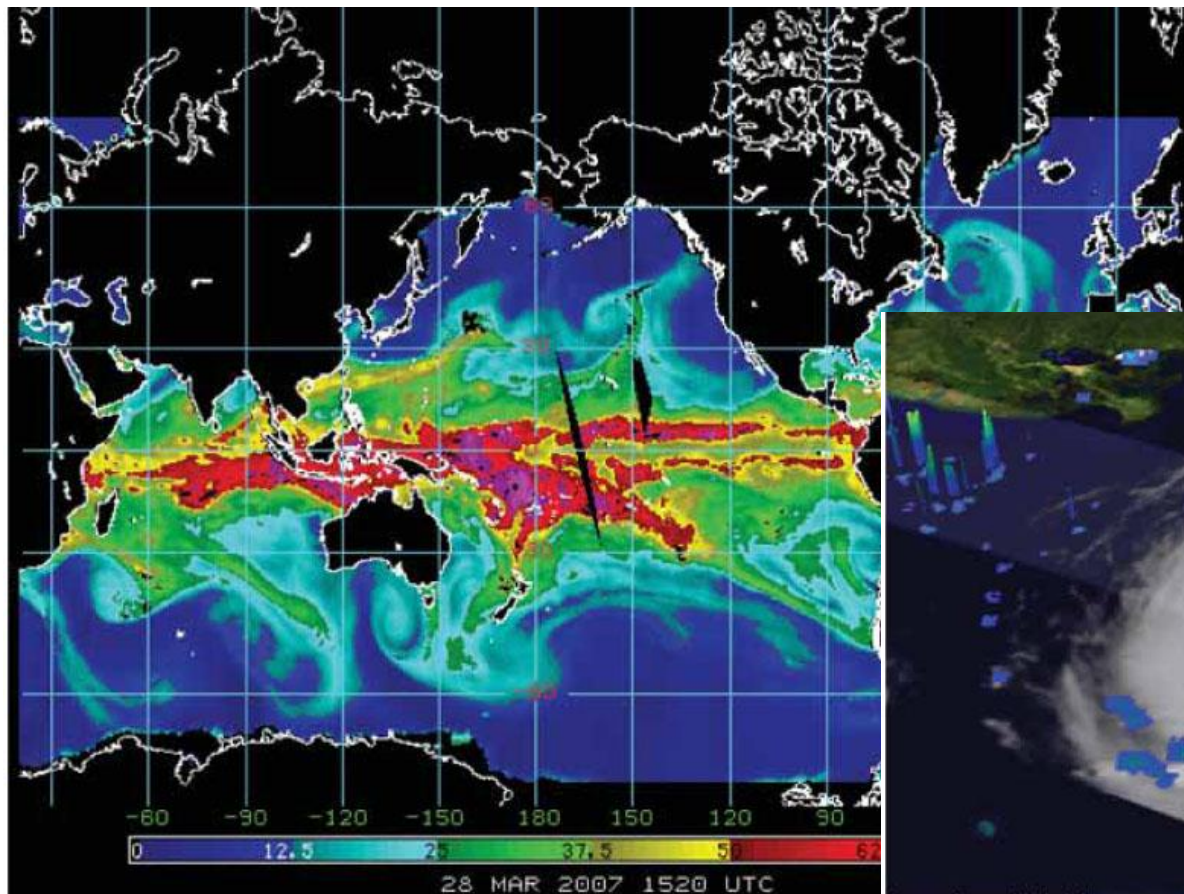


UARS

10,000 LBS
170" DIAMETER
29' 2" HIGH

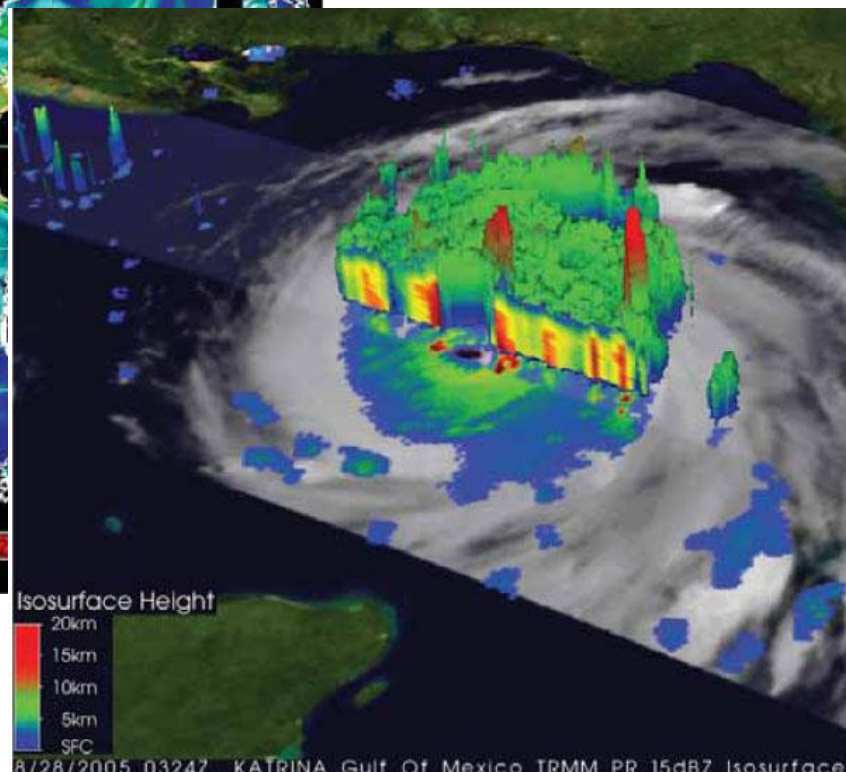
(NASA, Report No. 430-1003-001, 1985)

グローバルな気象観測



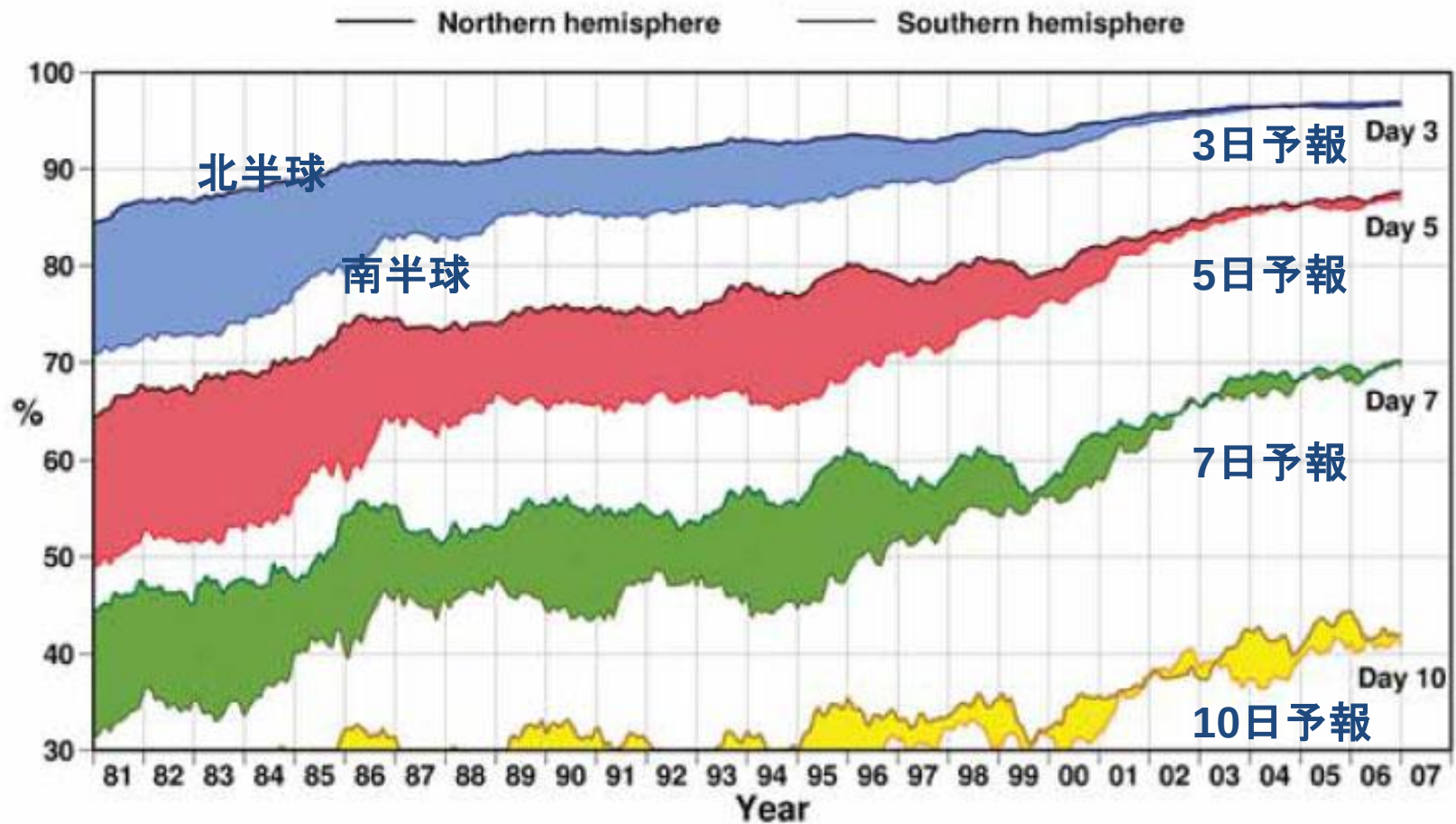
← 鉛直に積算した
水蒸気量

台風Katrinaにともなう
降雨強度 →



(Earth Observations from Space, 2008)

天気予報精度の向上



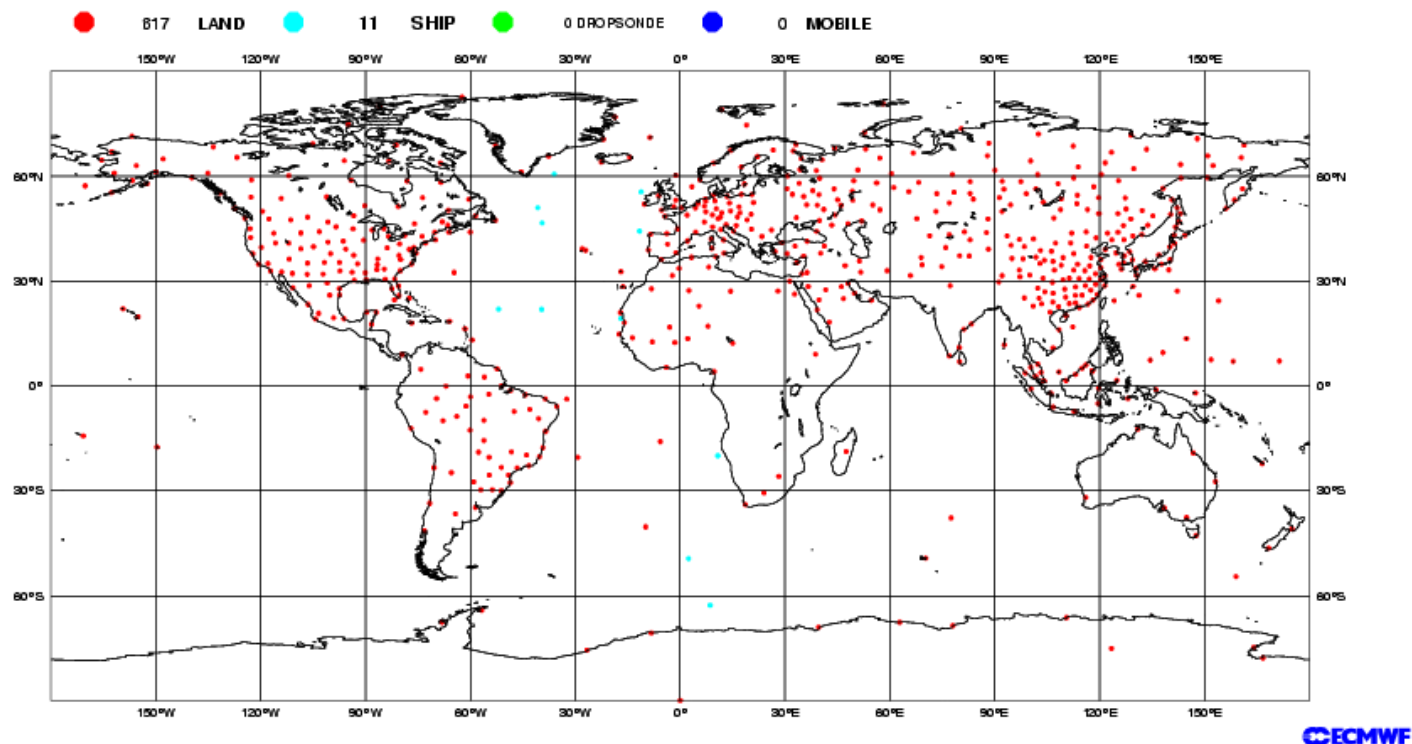
(Earth Observations from Space, 2008)

気球による高層観測

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - TEMP

06/DEC/2010; 12 UTC

Total number of obs = 628

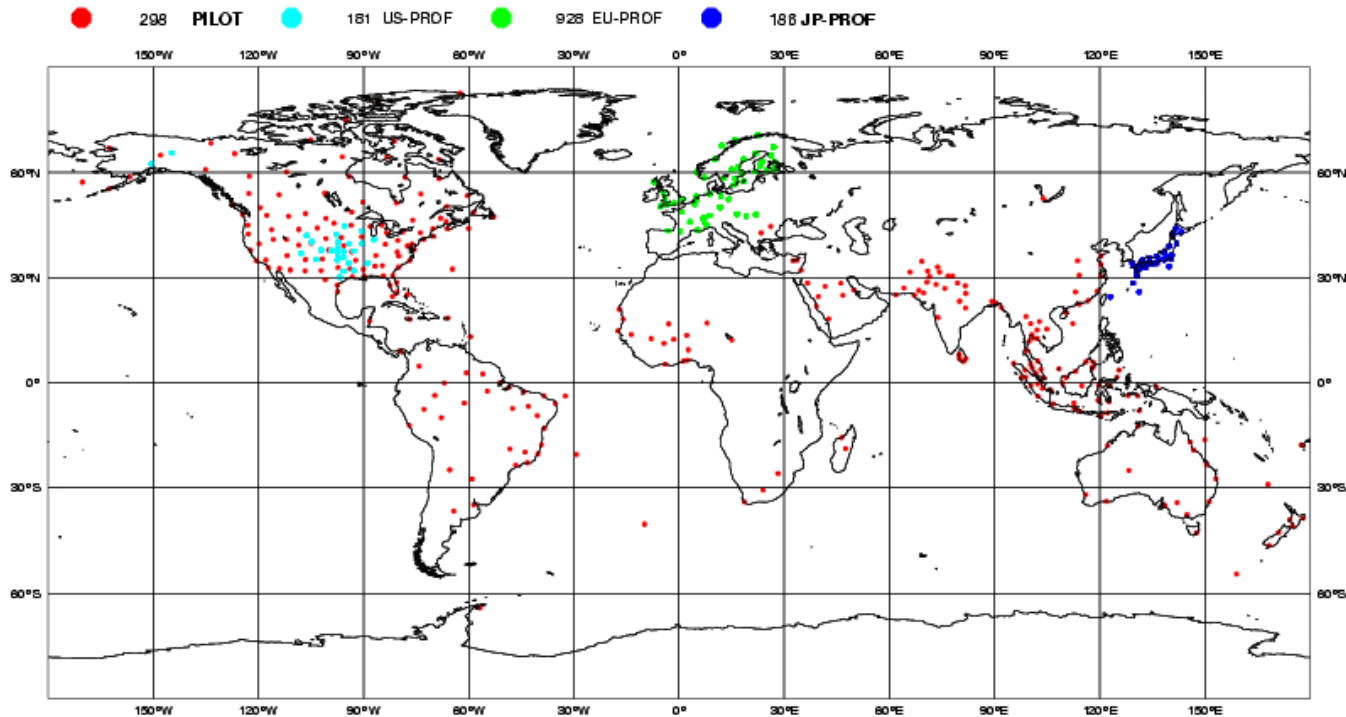


気球・wind profilerによる風の観測

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - PILOT/PROFILER

06/DEC/2010; 12 UTC

Total number of obs = 1593



ECMWF

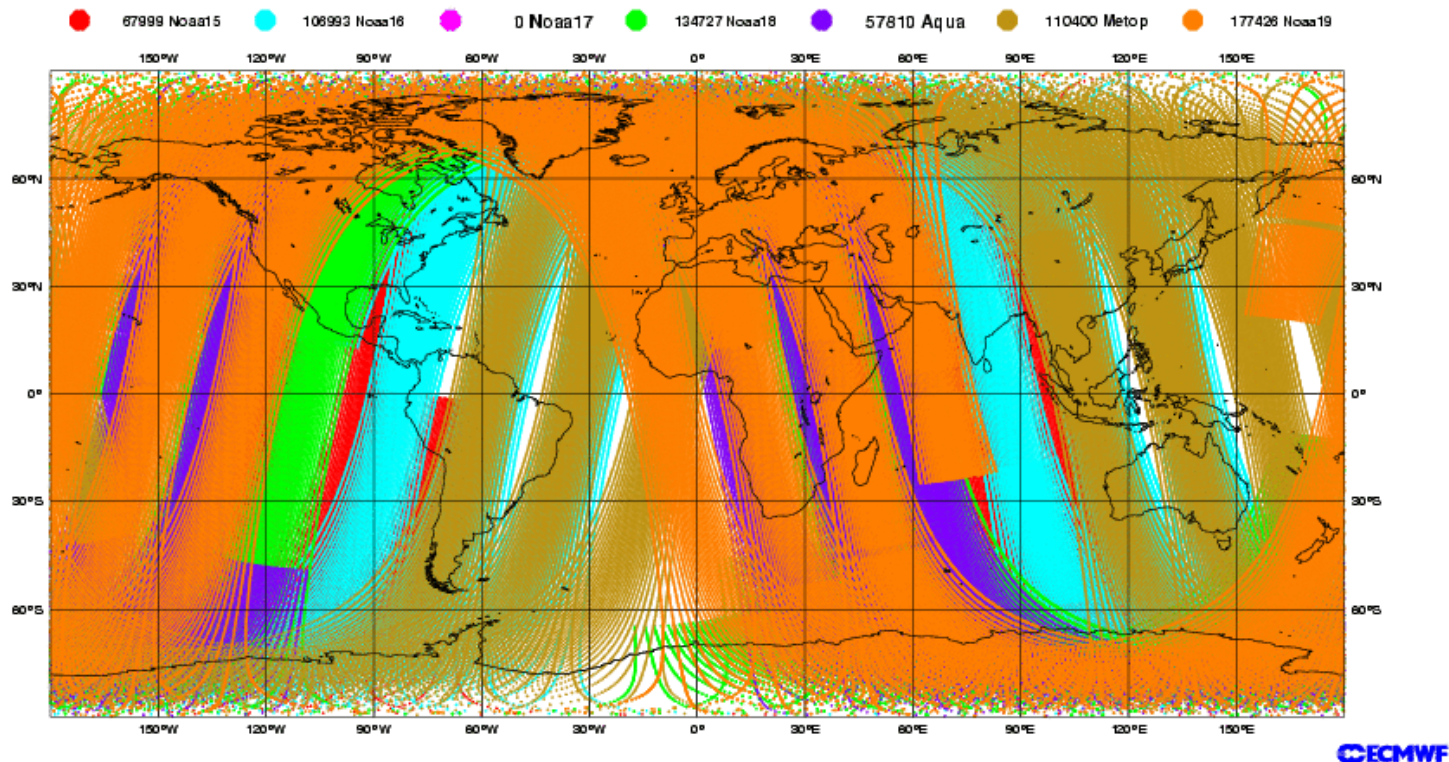
<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover/>

衛星からの温度観測

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - AMSU-A

06/DEC/2010; 12 UTC

Total number of obs = 655355



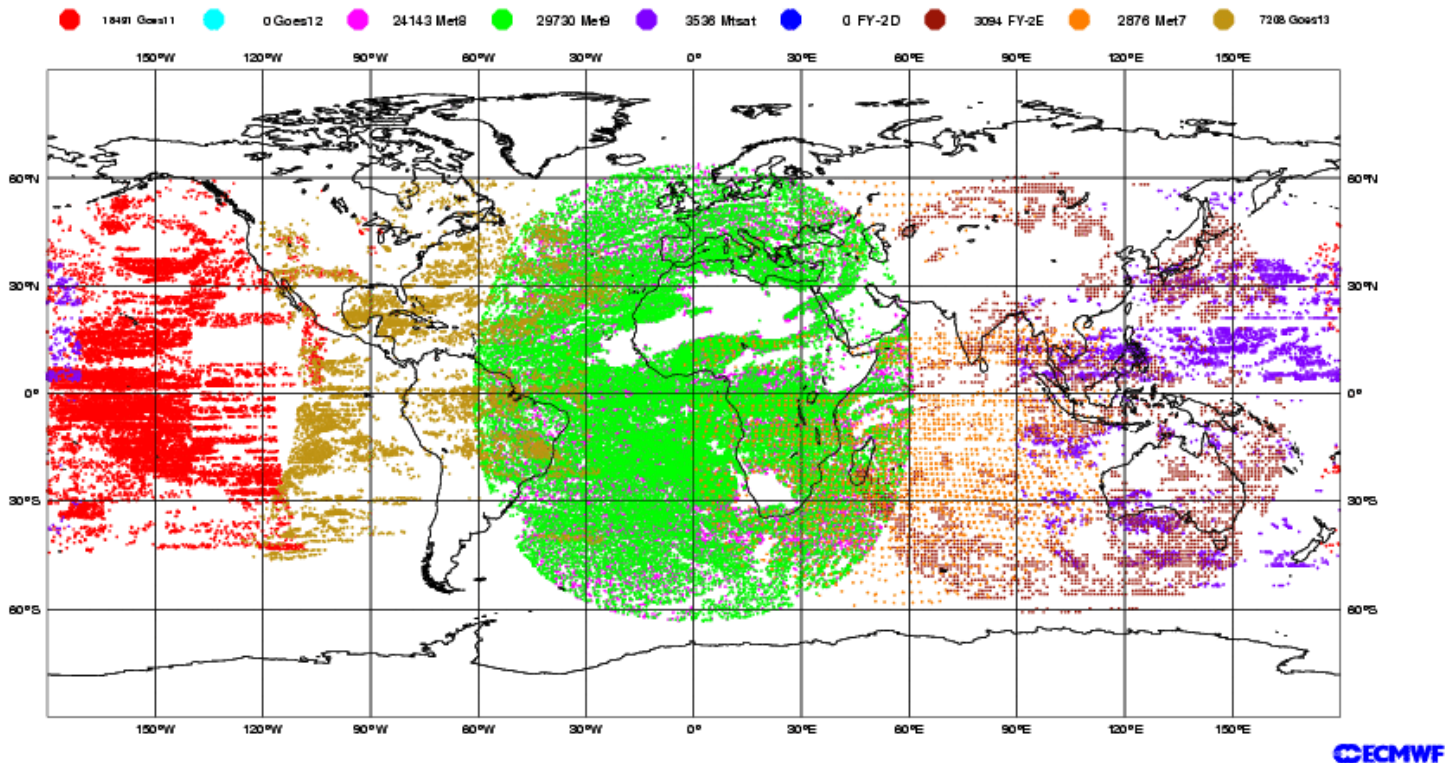
<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover/>

衛星からの風(雲ベクトル)観測

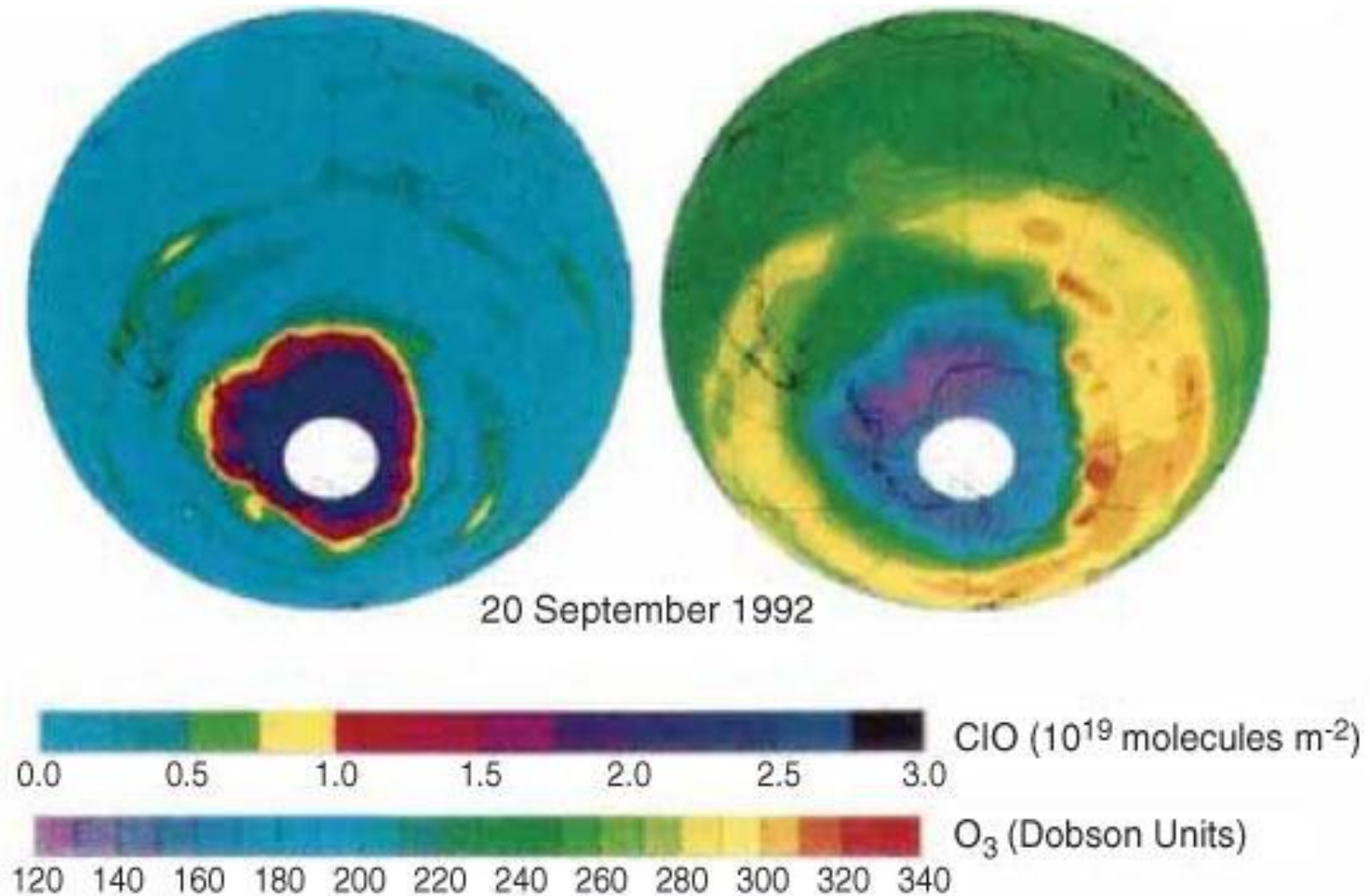
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - AMV IR

06/DEC/2010; 12 UTC

Total number of obs = 89078



大気微量成分のグローバル観測



(Earth Observations from Space, 2008)

海洋の流れ(Gulf Stream)

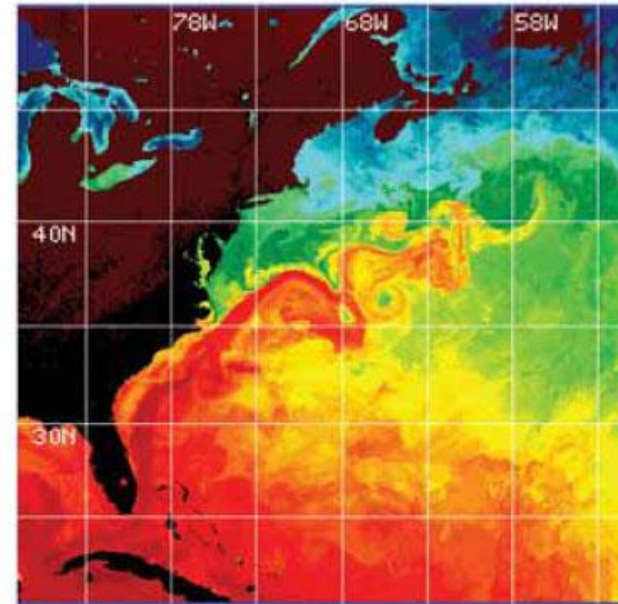
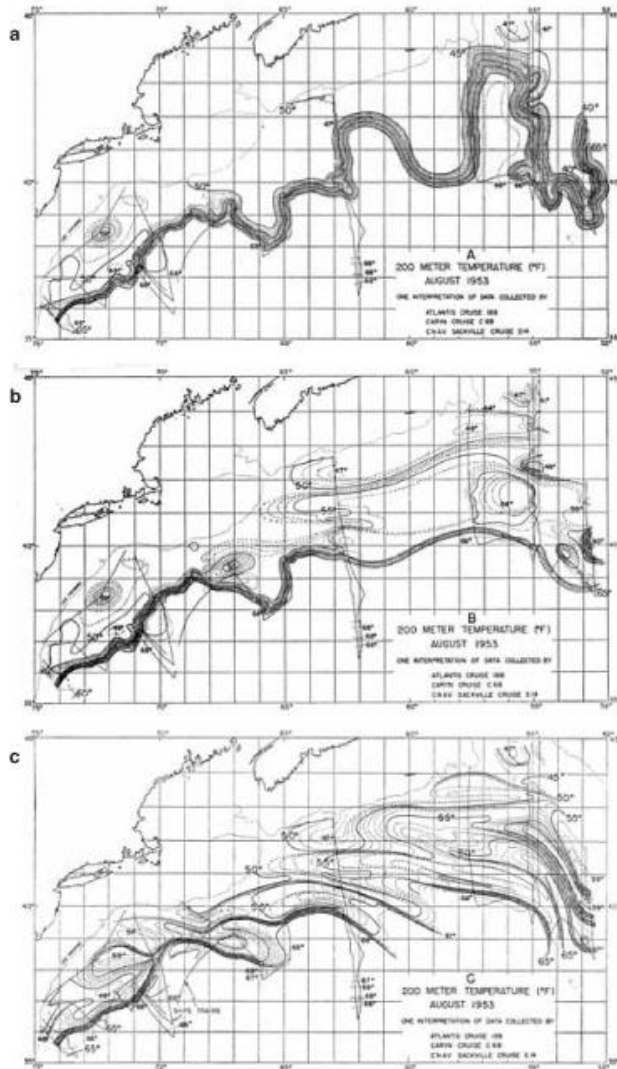


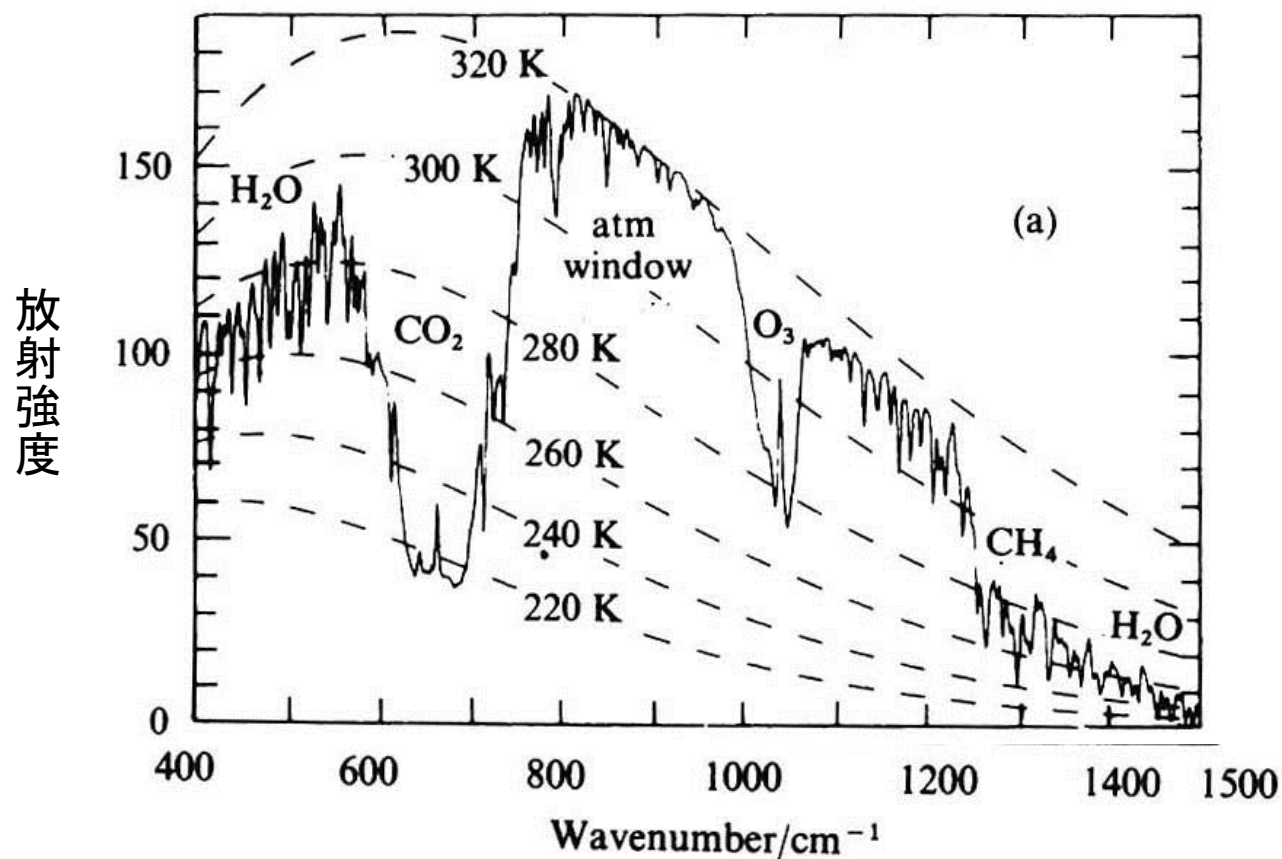
FIGURE 8.2 SST image showing the Gulf Stream in the Atlantic Ocean. SOURCE: Provided by Otis Brown and Bob Evans.

FIGURE 8.1 Fuglister's multiple current hypothesis. SOURCE: Stommel (1965). Reprinted with permission from the University of California Press, copyright 1965.

衛星からの観測手法

- どの大気成分を測定するのか?
⇒ 特徴的な波長帯の選択
- どのような方向から観測するのか?
nadir sounding $\Leftrightarrow$ limb sounding
- どのような範囲を観測するのか?
⇒ 静止軌道, 極軌道, 傾斜軌道

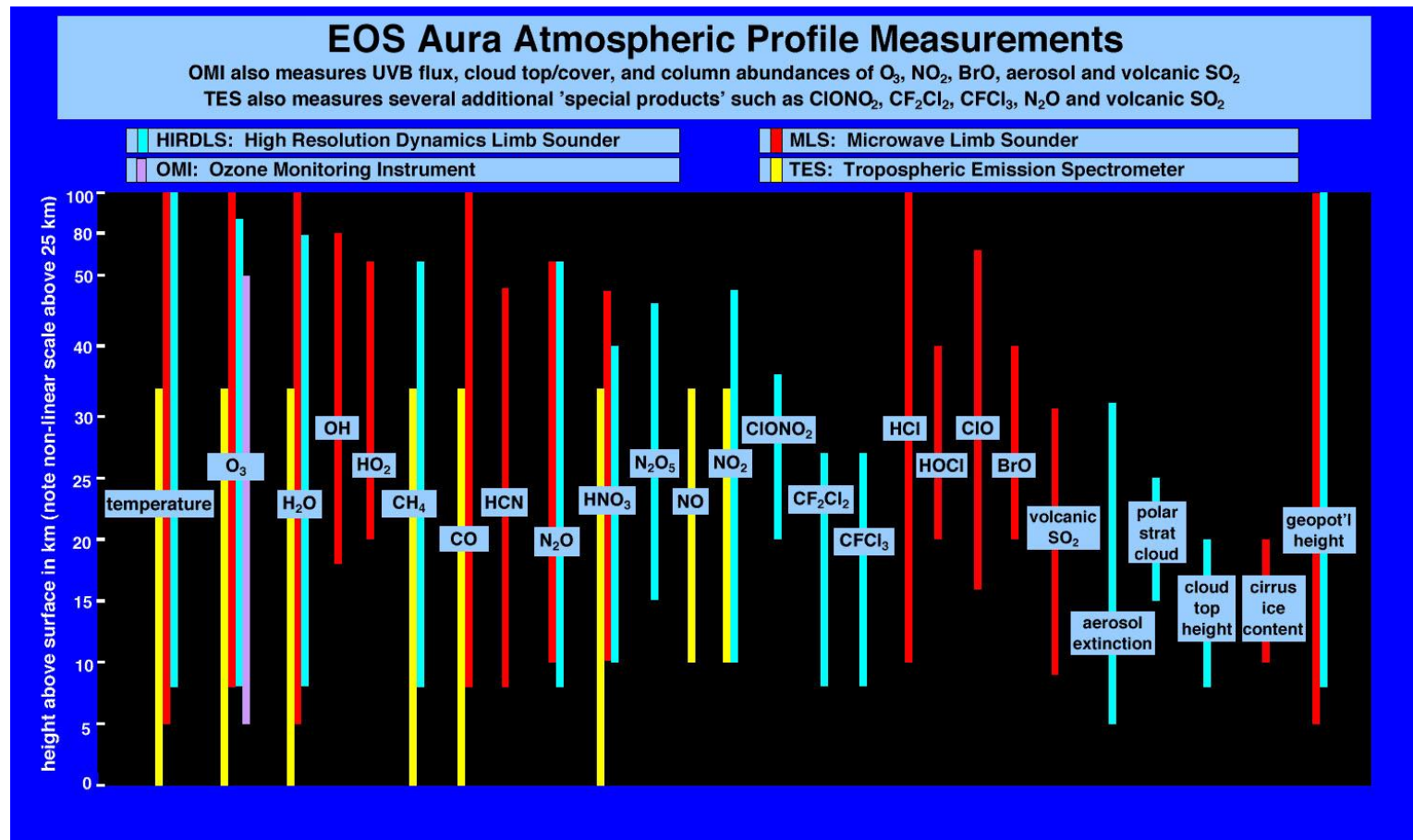
衛星からの放射観測



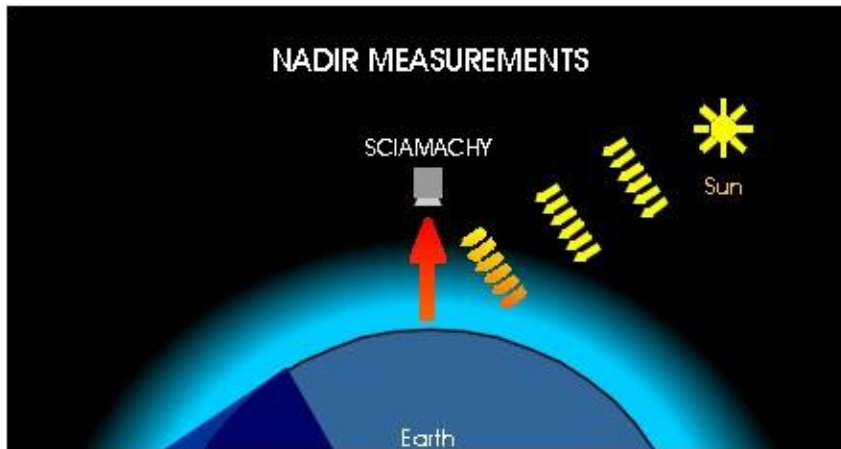
(Hanel et al., Appl. Opt., 1971)

衛星から観測する大気微量成分

2004年7月に打ち上げられたEOS-Auraの例

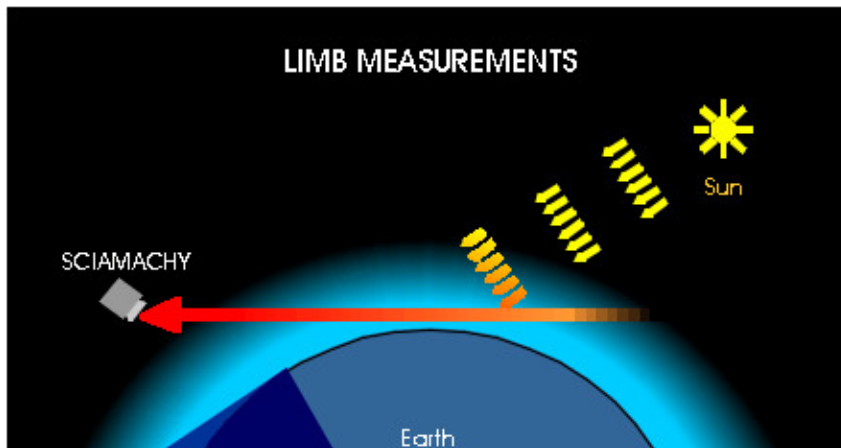


衛星からの地球大気の眺め方



大気を上から観測する

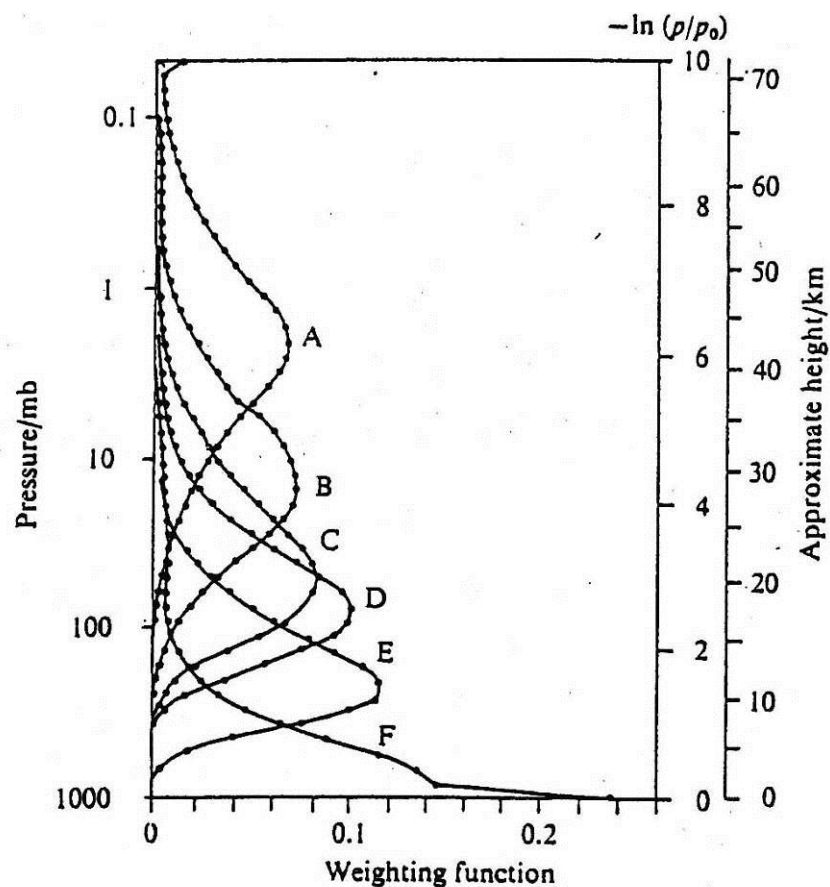
- ▶ 水平分解能はよいが、鉛直方向の構造はよくわからない



大気を横から透かして観測する

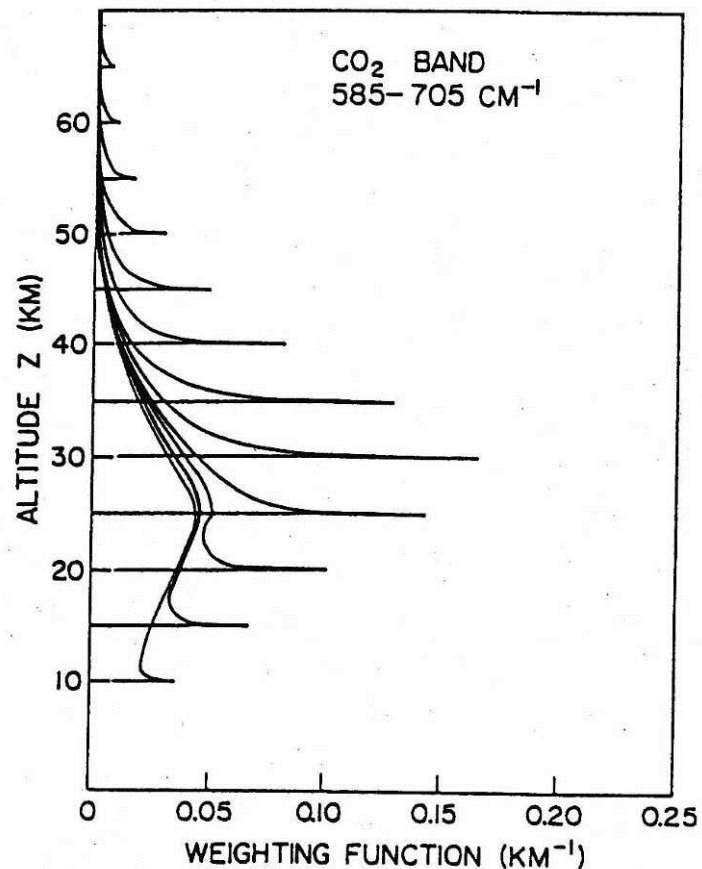
- ▶ 鉛直構造を把握できるが、水平分解はよくない

重み関数 (weighting function)



(nadir sounding の例)

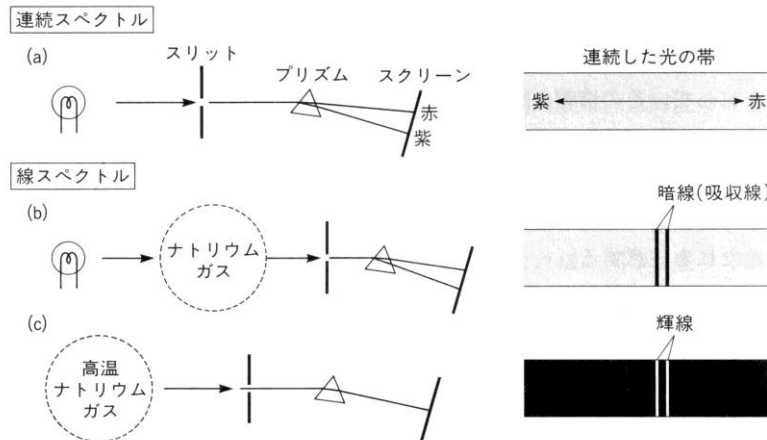
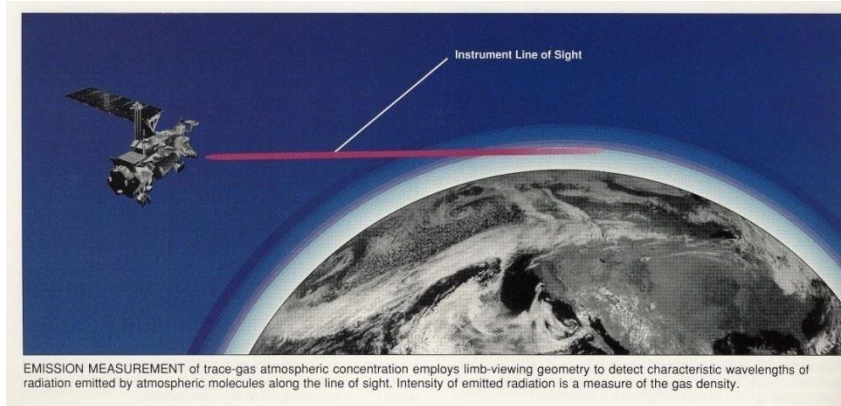
(Abel et al., Proc. R. Soc. Lond, 1970)



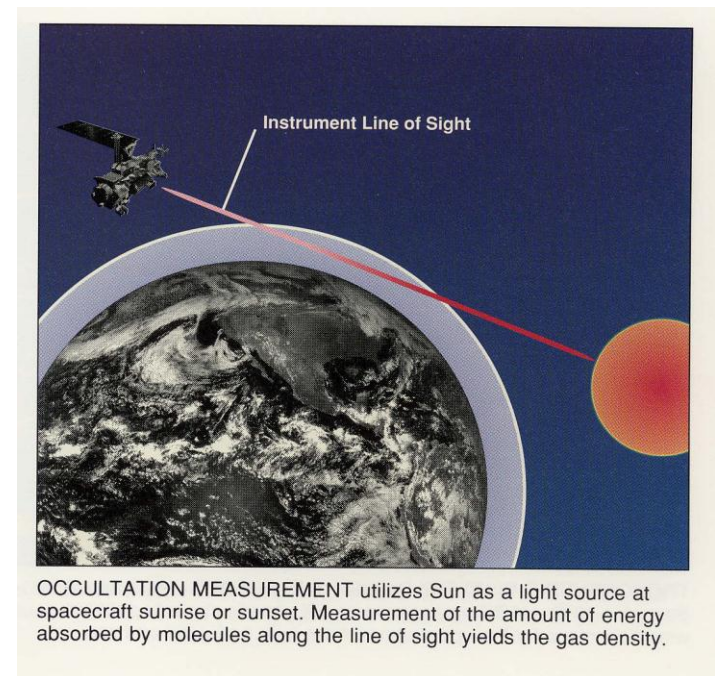
(limb sounding の例)

(Gille and Bailey, 1978)

2種類のリム観測



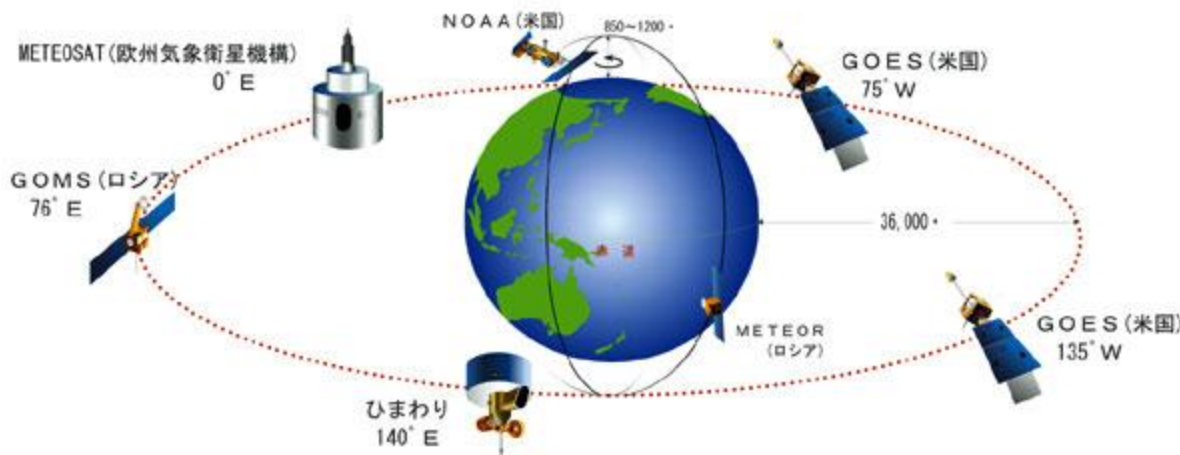
(出典不明: 確かとある地学の教科書)



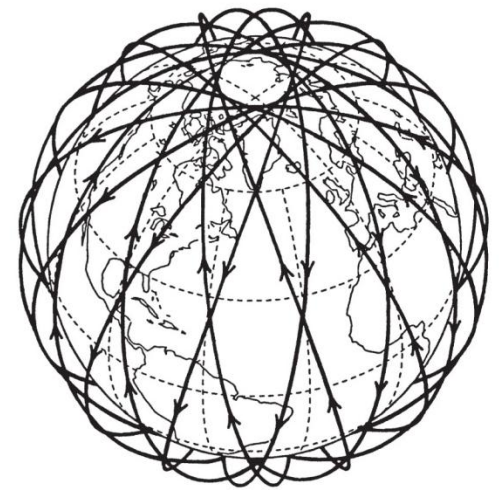
(NASA, UARS pamphlet , 1989)

衛星の軌道

- 静止軌道衛星: 円軌道, 赤道軌道, 地球同期(高度36000km)
- 極軌道衛星: 楕円軌道(円に近い), 極軌道, 太陽同期
- 傾斜軌道衛星: ほぼ円軌道, 傾斜軌道
(低軌道: 高度 約300~1,500km)



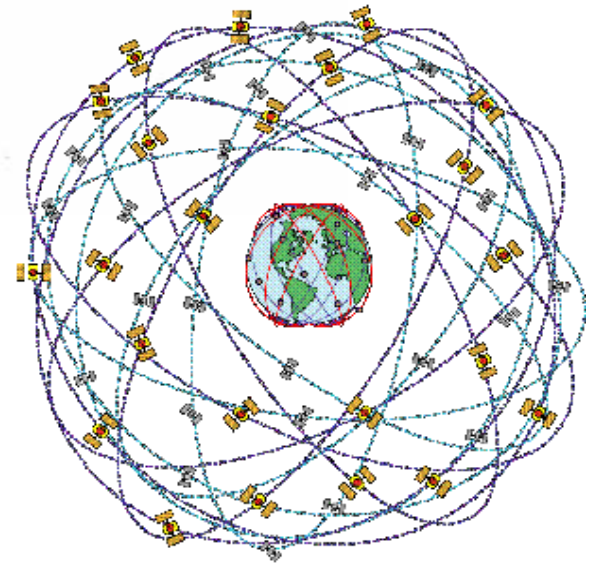
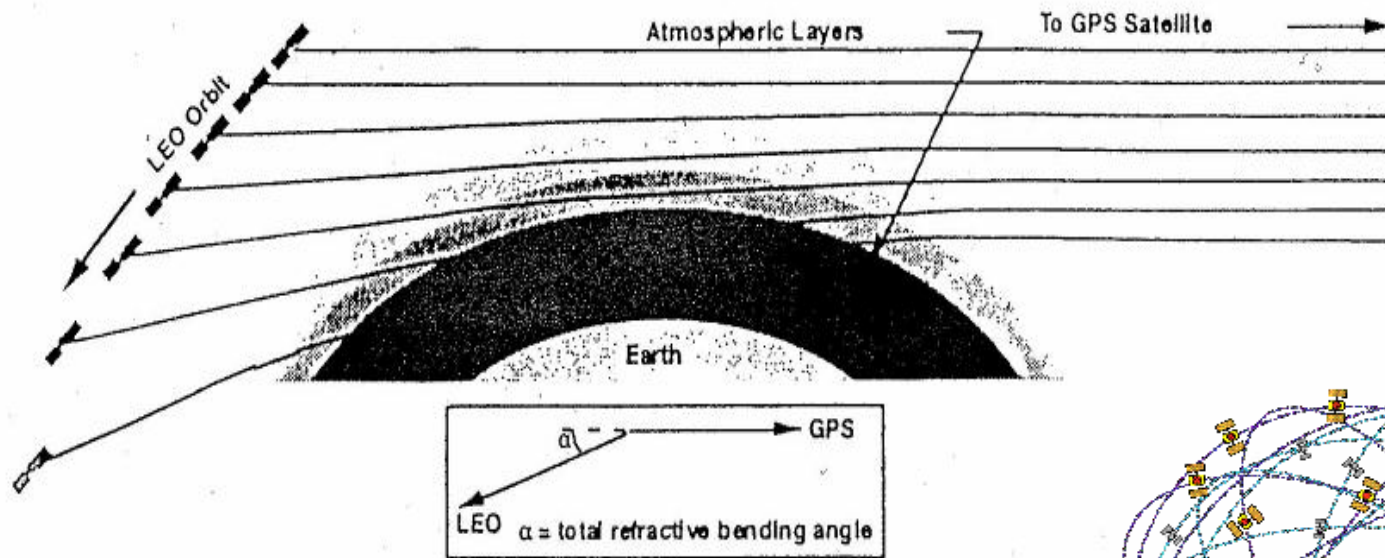
(気象庁?)



(Kidder & Vonder Haar, 1995)

GPS掩蔽法による大気観測

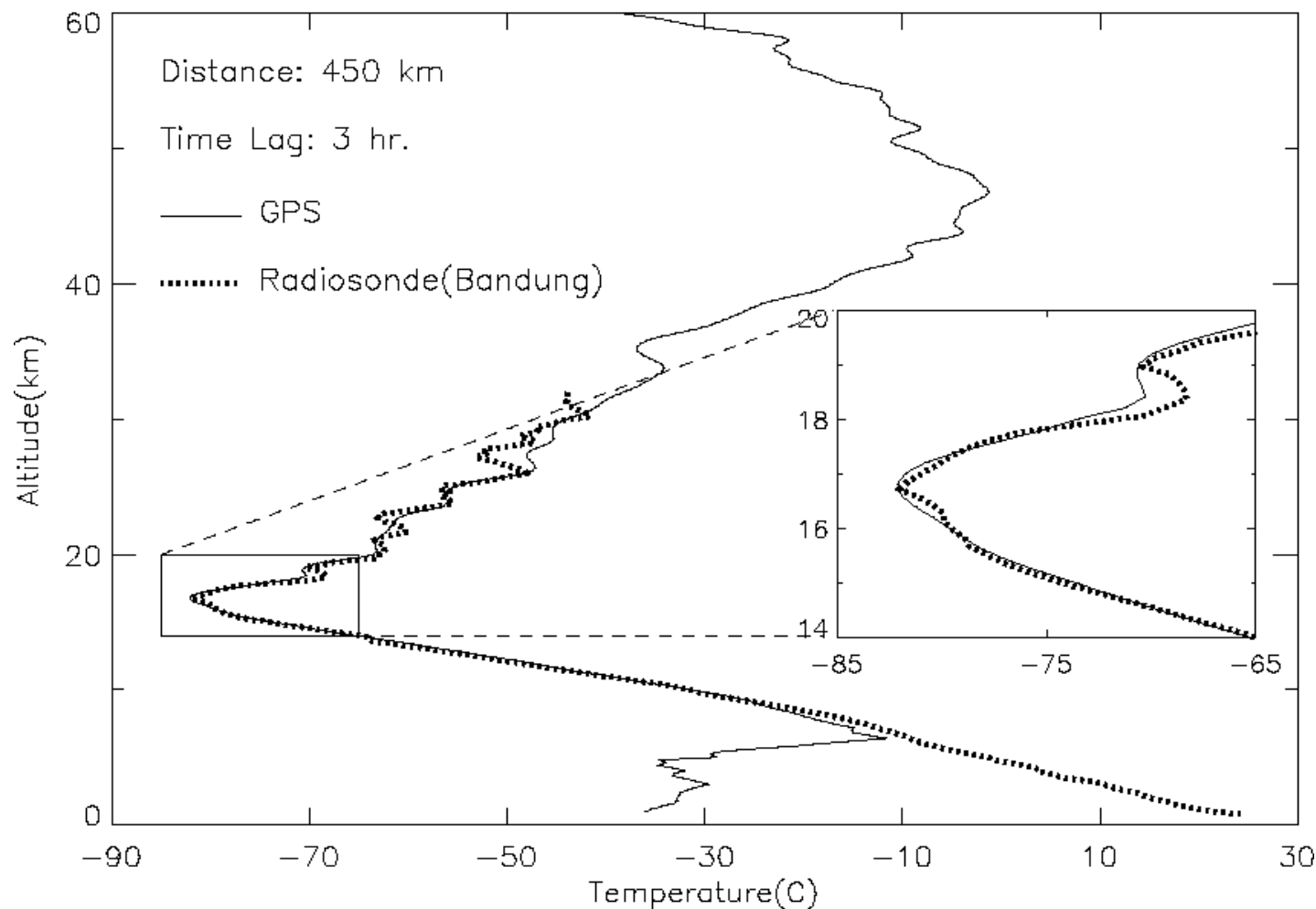
大気の屈折率から温度情報を導出



→ 高度約20000kmの軌道を29
個のGPS衛星が周回している

温度観測の例

GPS/MET 04:13:31 UT on JUL 1, 1995
at 7.53S 104.03E



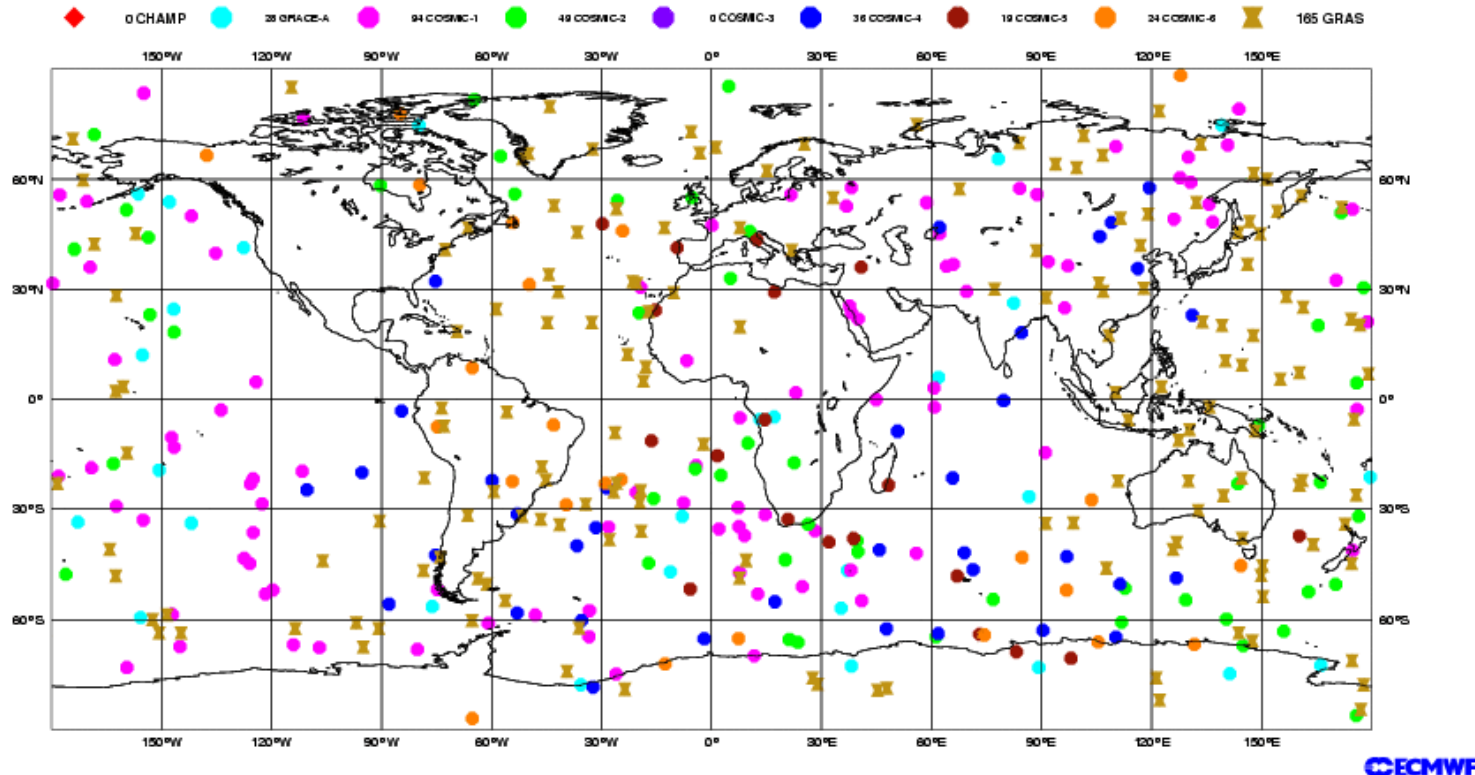
(Nishida et al., JMSJ, 2000)

GPS掩蔽観測点の分布

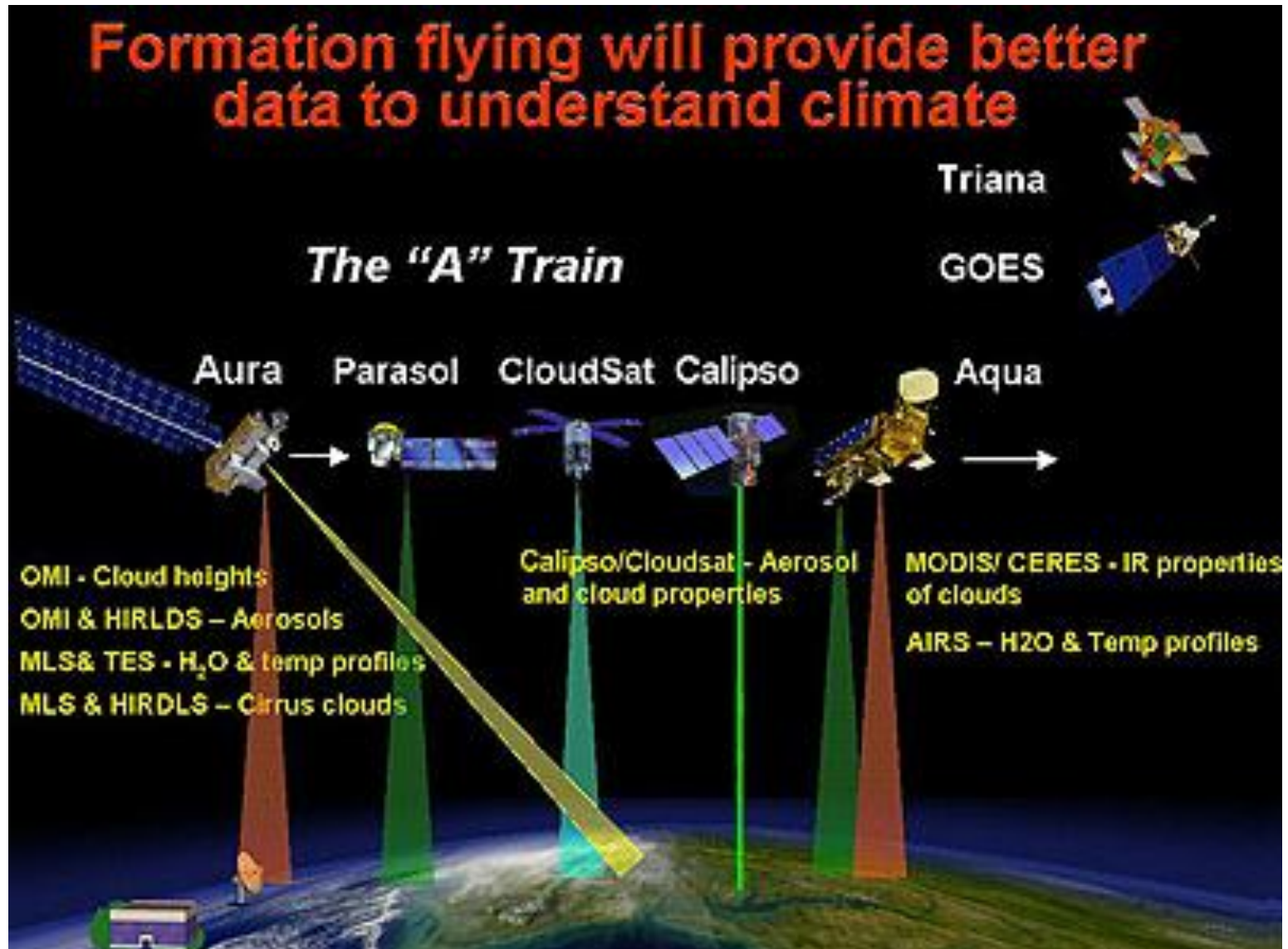
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - GPSRO

06/DEC/2010; 12 UTC

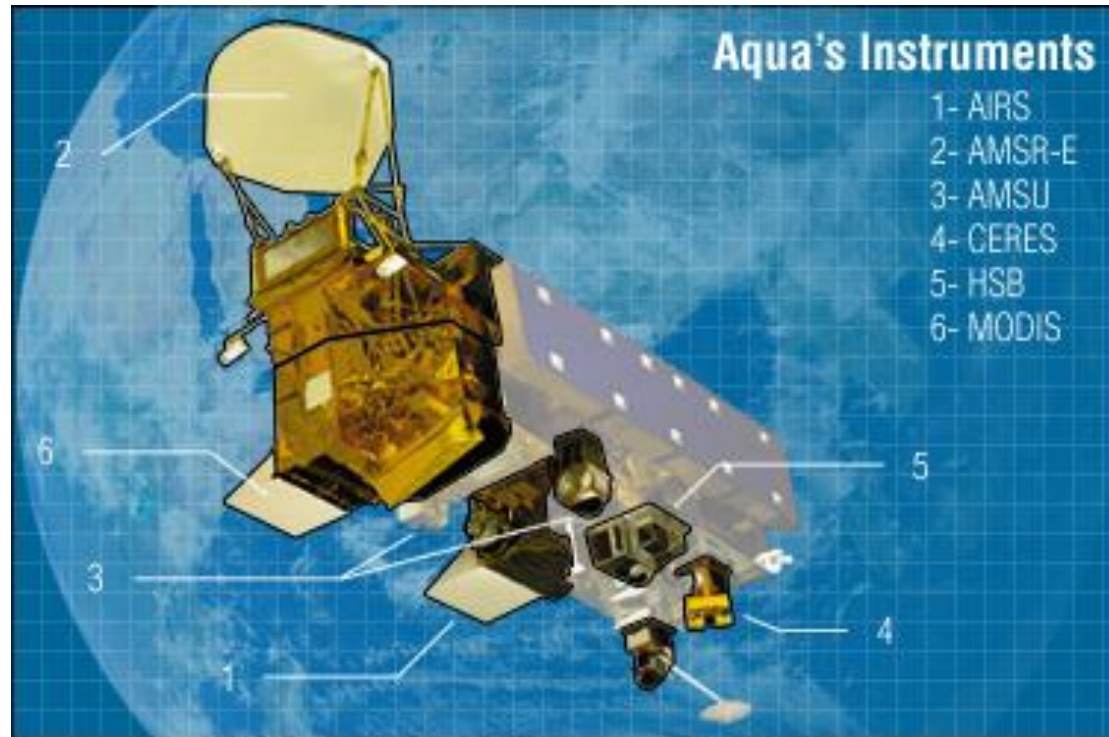
Total number of obs = 415



最近の衛星観測 – 編隊飛行



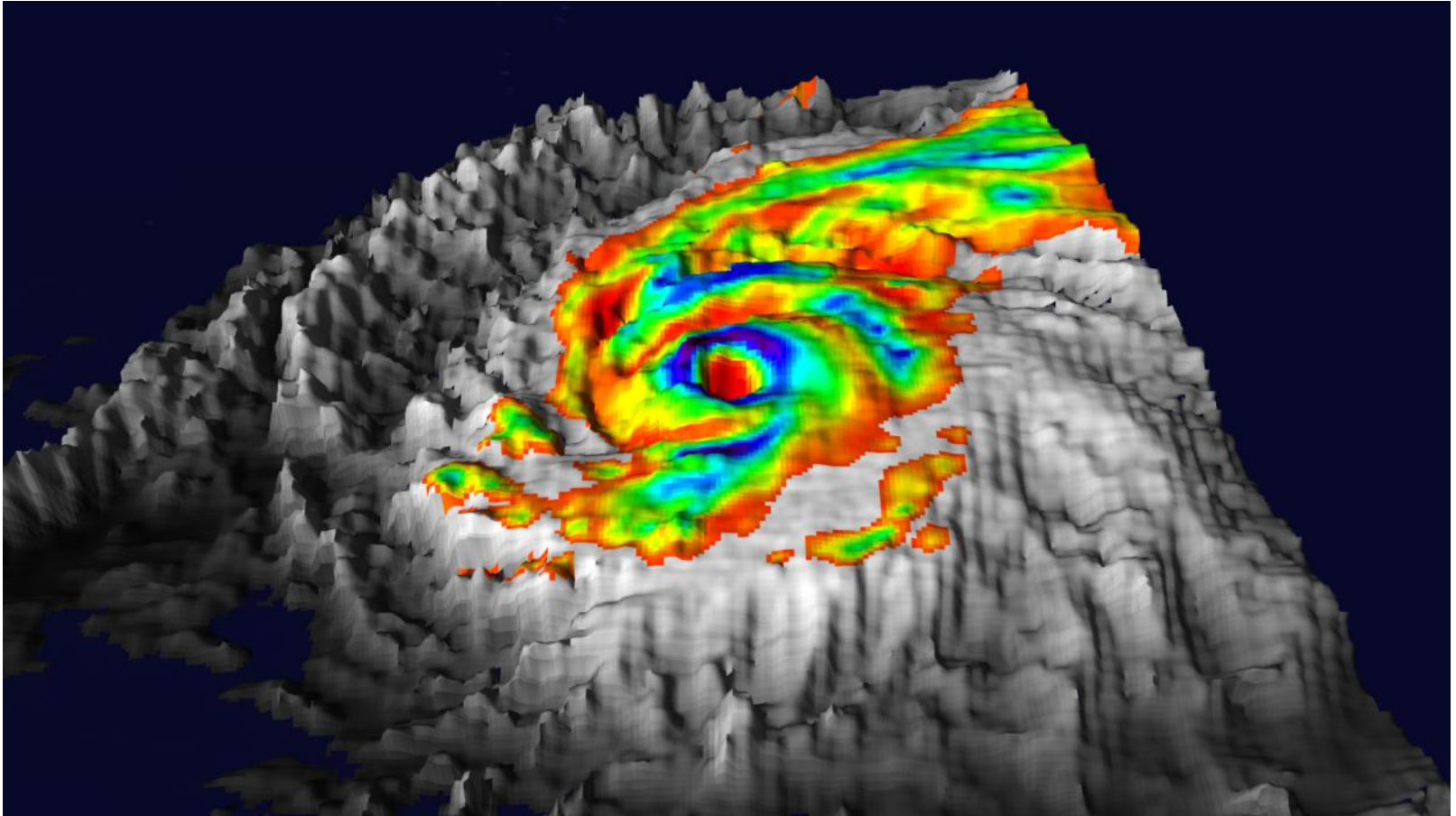
Aqua – 水循環ミッション



Aqua には6つの観測機が搭載されている: the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-A), the Humidity Sounder for Brazil (HSB), the Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E), the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)

<http://aqua.nasa.gov/>

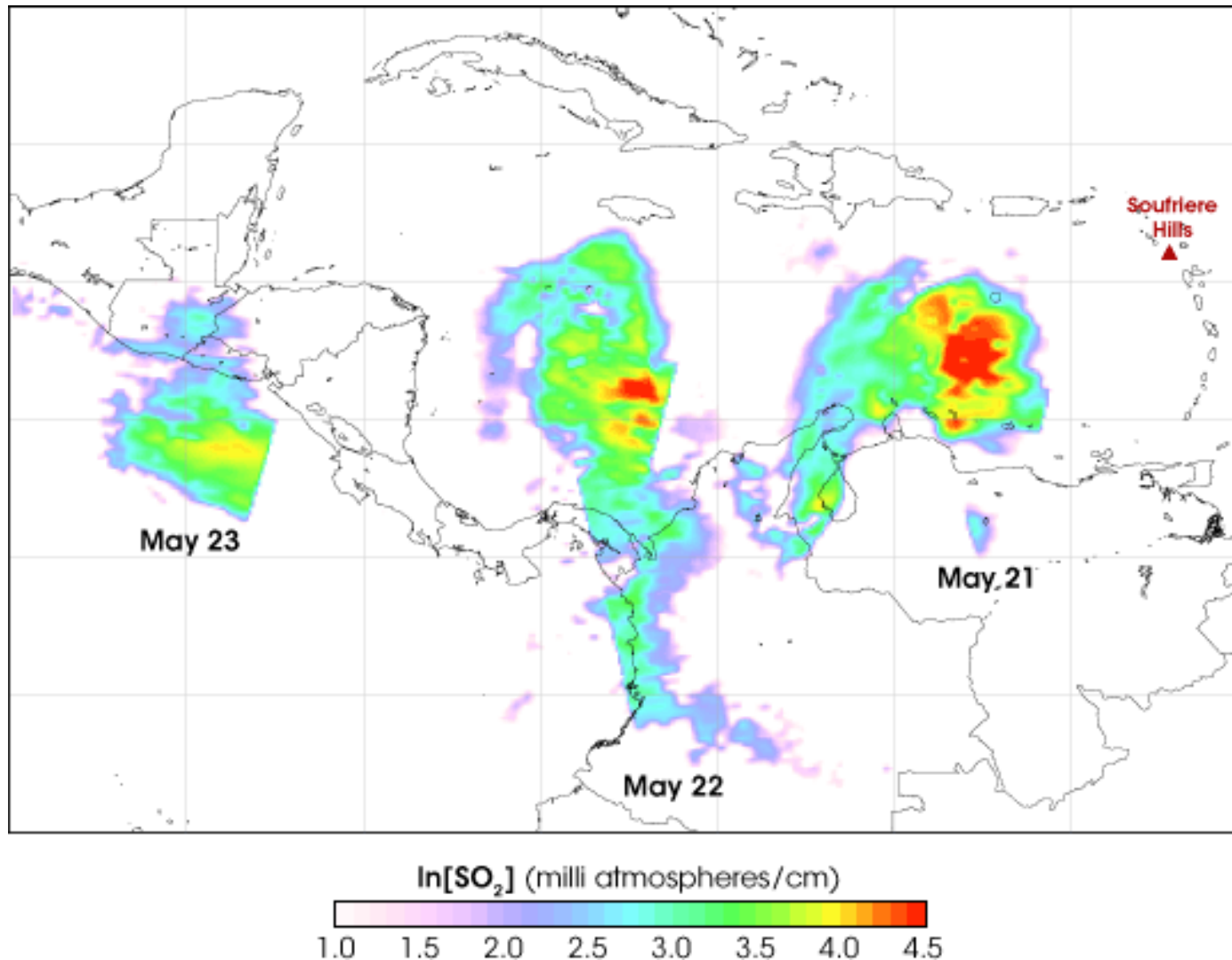
台風 Pongsona



雲の分布に輝度温度を重ね書きしてある. 青いところが活発な対流と雨の領域を表す. (AIRS)

<http://aqua.nasa.gov/>

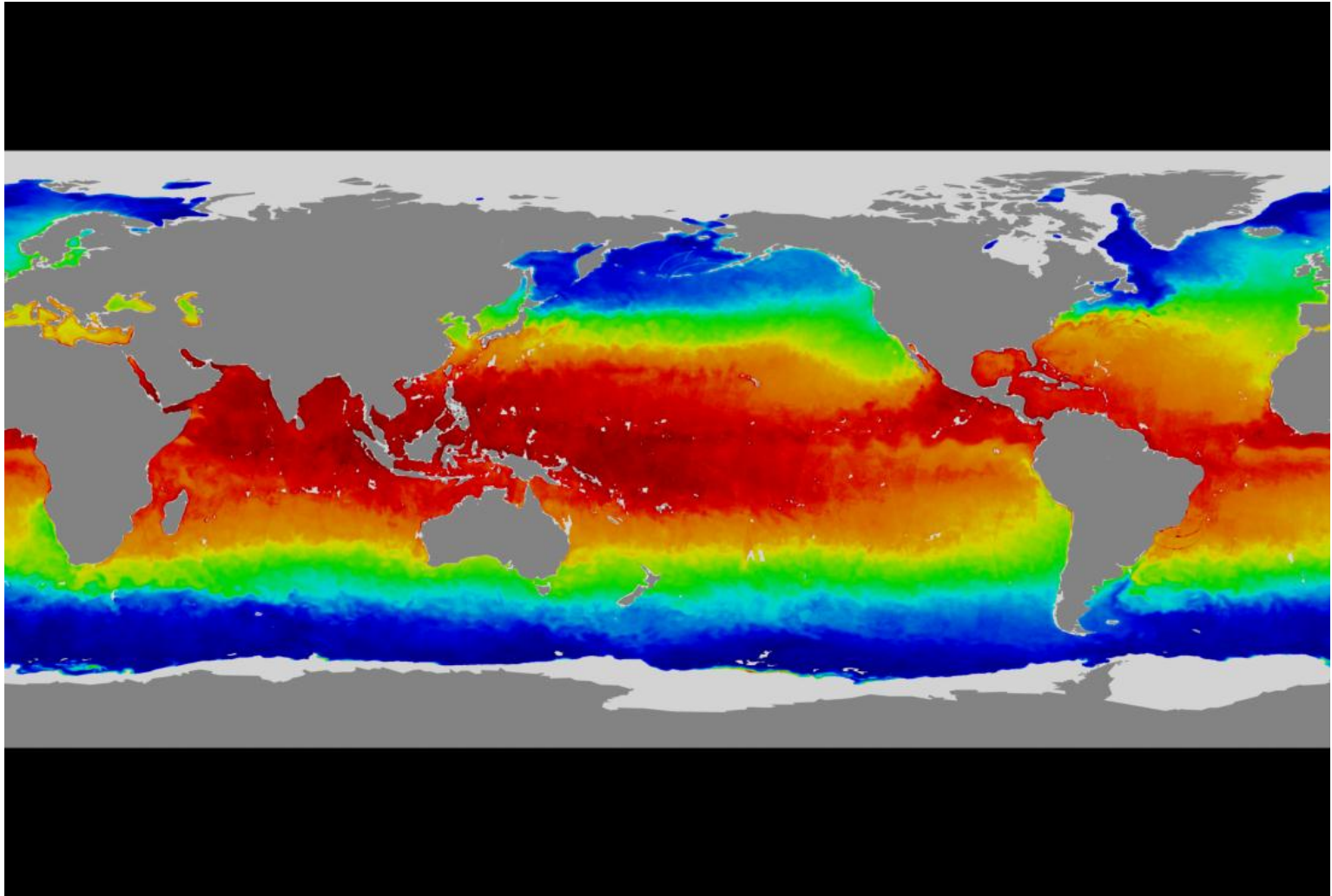
Soufriere Hills 火山の噴火



AIRSが観測した二酸化硫黄の分布

<http://aqua.nasa.gov/>

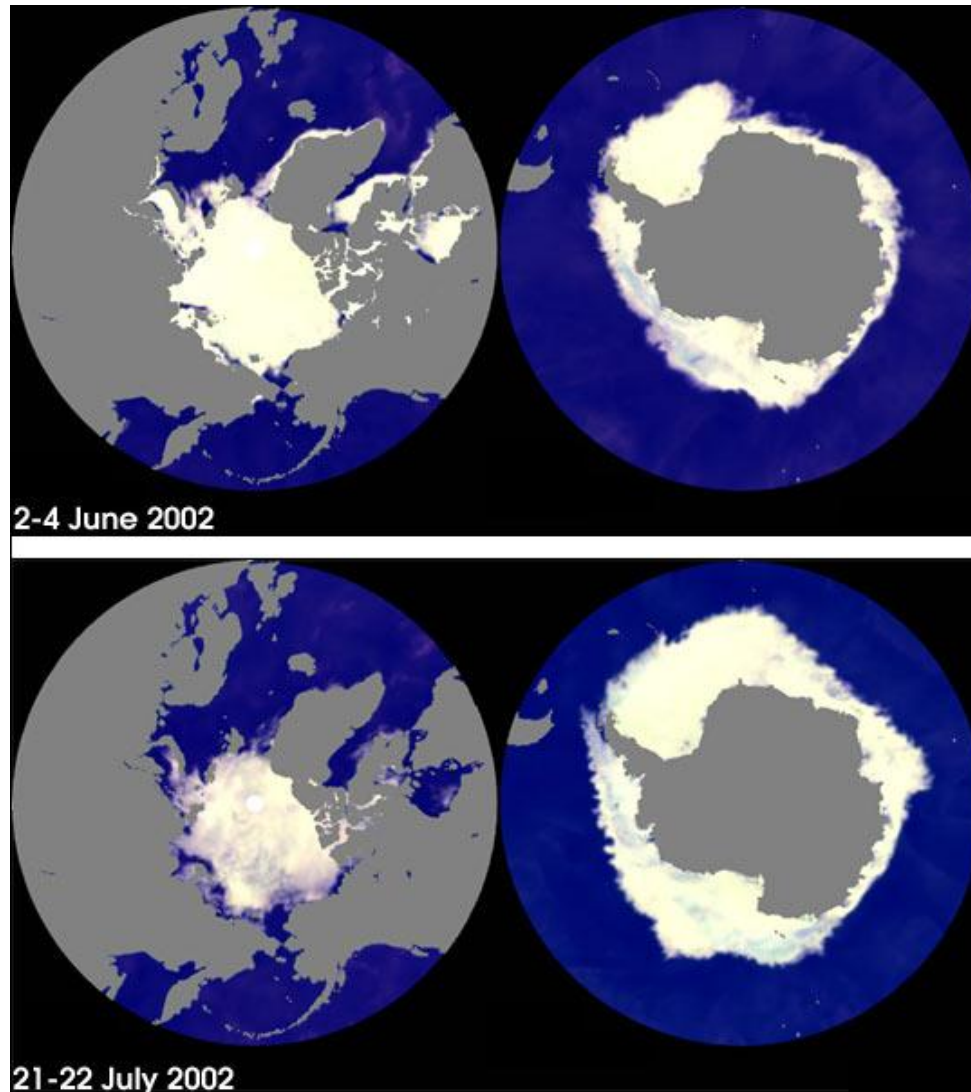
海面水温分布(Sea Surface Temperature)



AMSR-Eによる海面水温分布

<http://aqua.nasa.gov/>

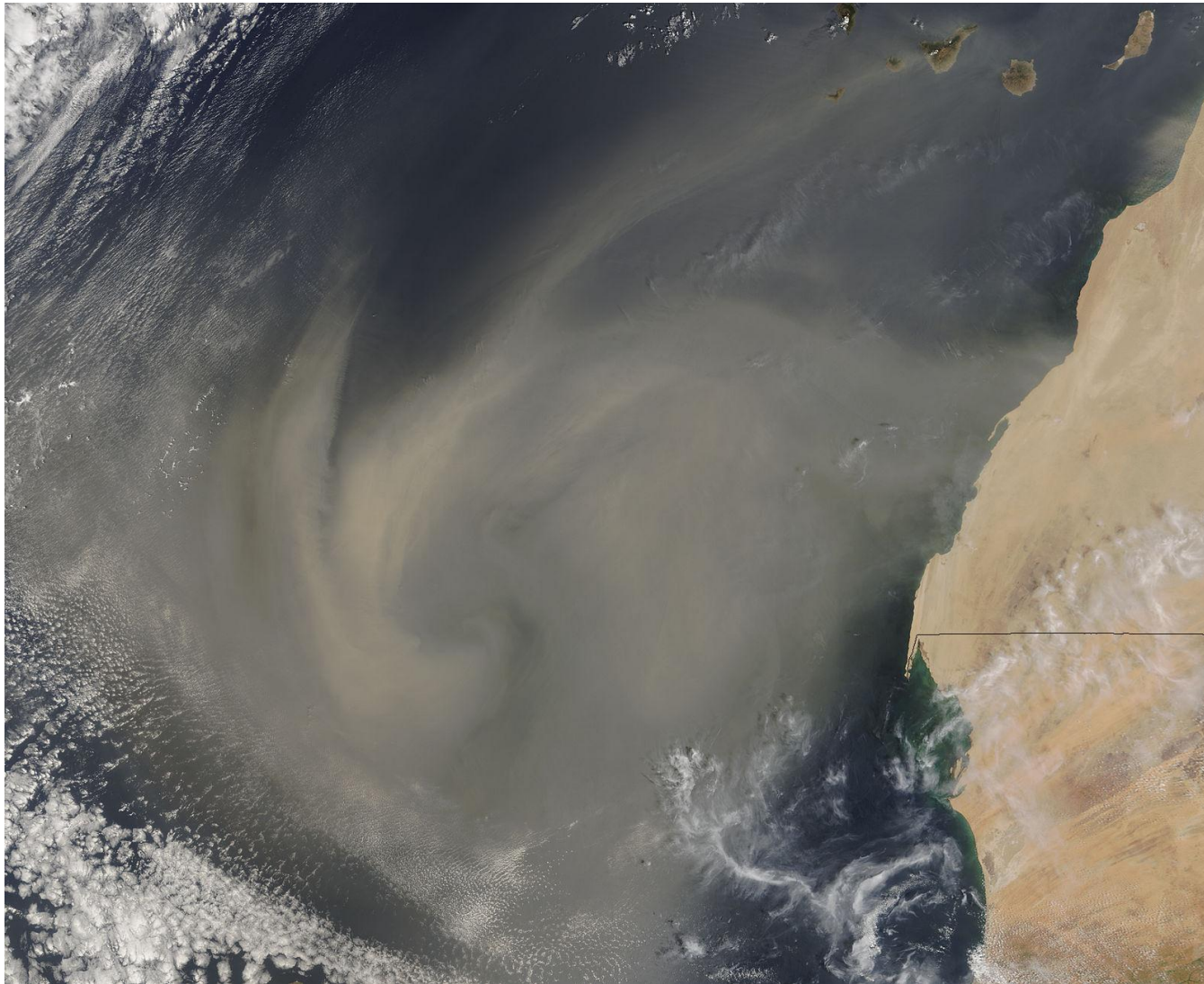
海氷分布(Sea ice extents)



AMSR-Eによる海氷分布

<http://aqua.nasa.gov/>

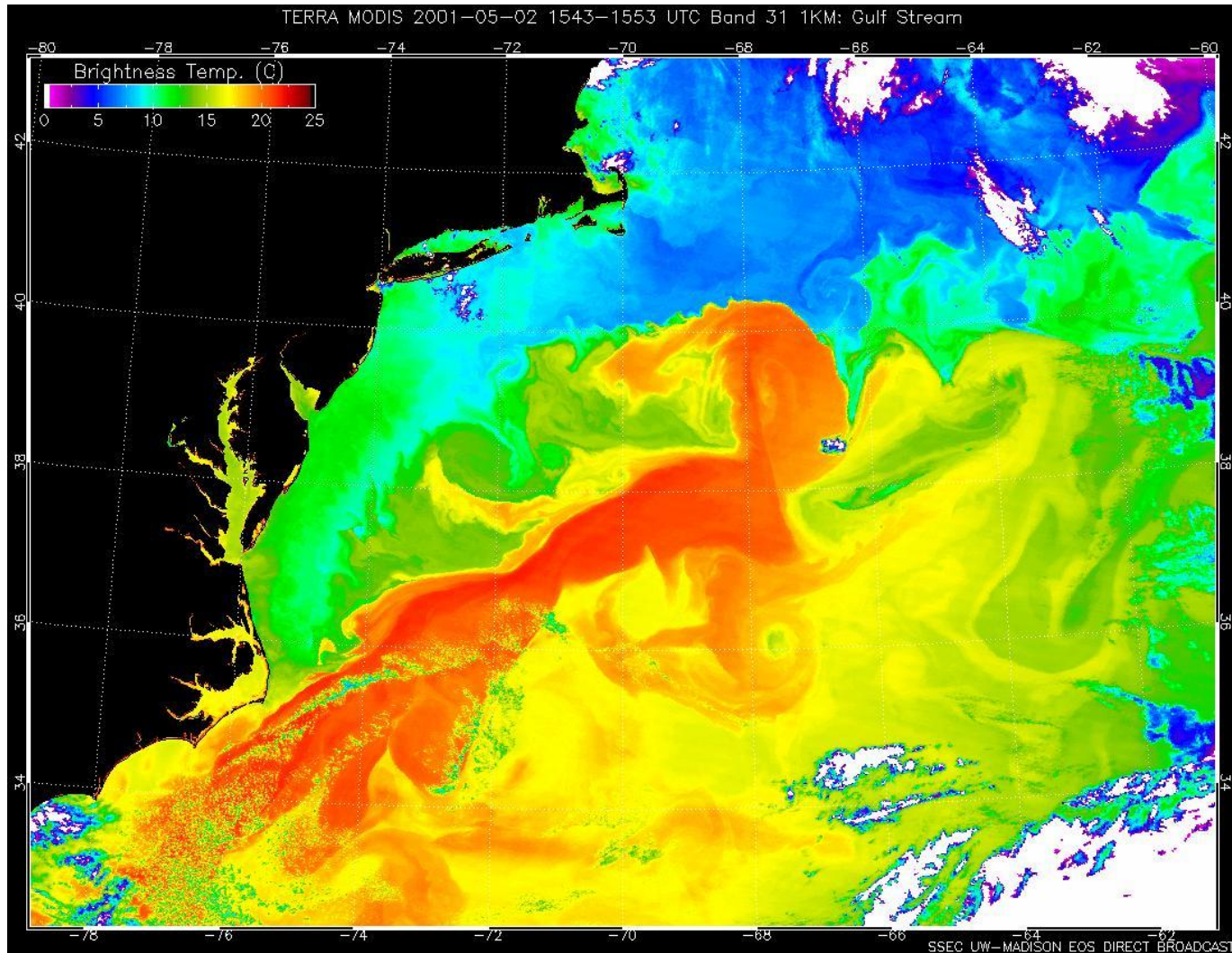
サハラダストストーム



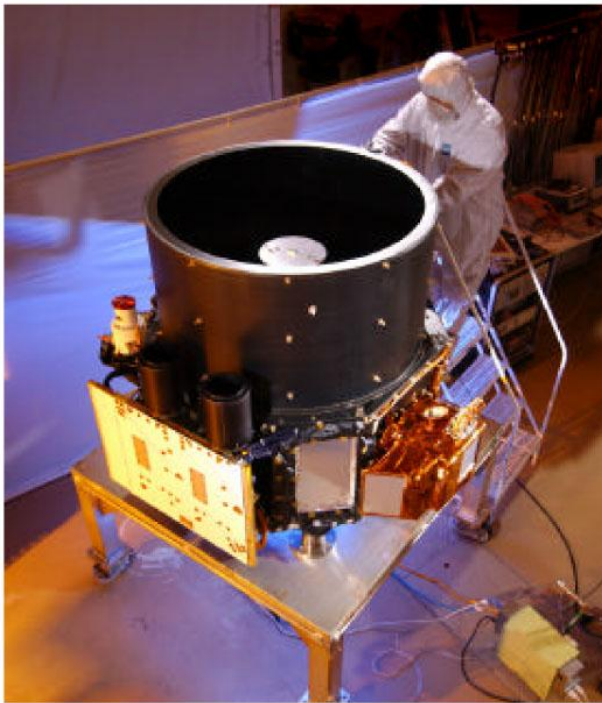
MODIS

<http://aqua.nasa.gov/>

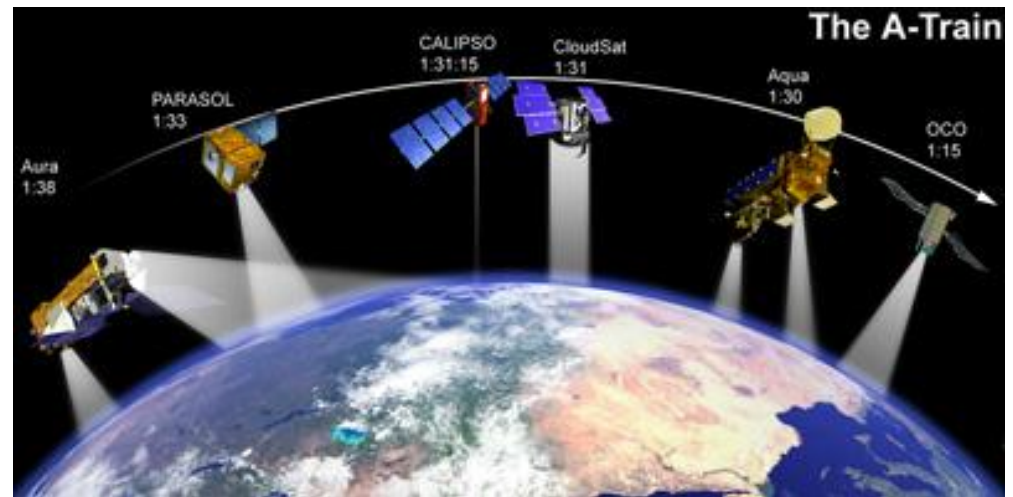
Gulf streamの海水温度分布



CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite observation



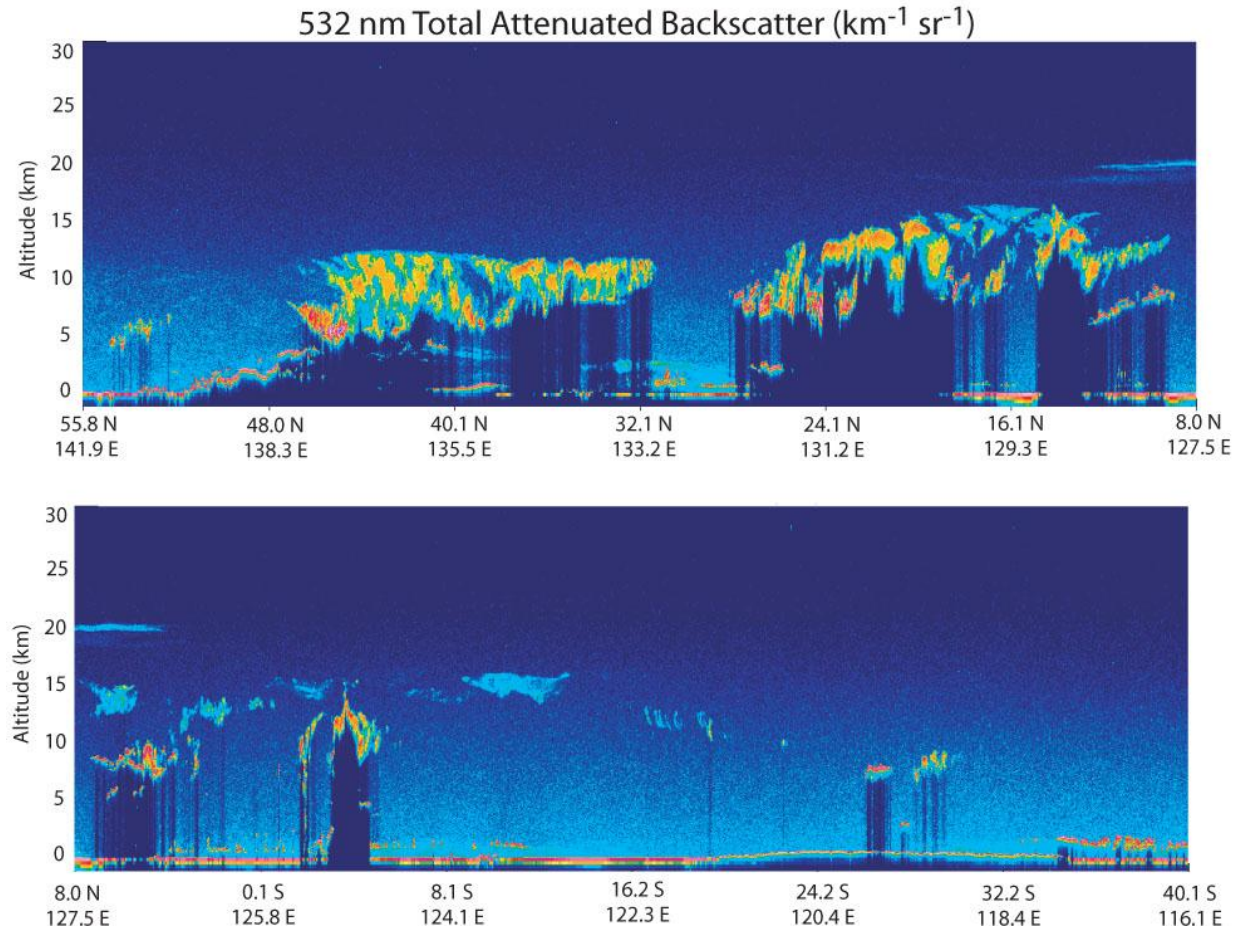
2006年4月28日打ち上げ



A-TRAIN 編隊飛行のうちのひとつ

<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>

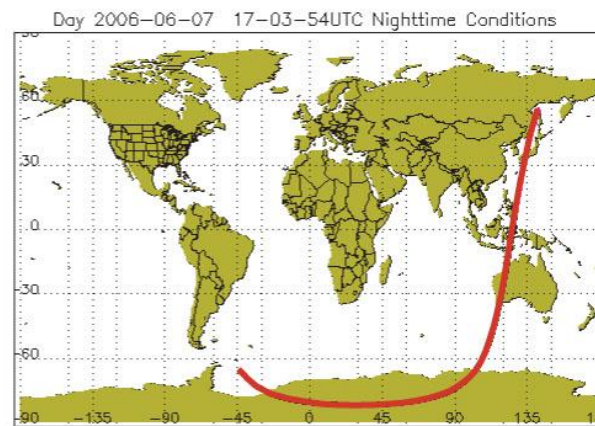
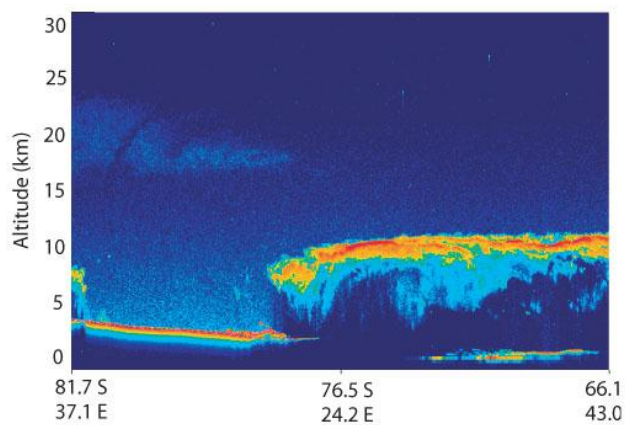
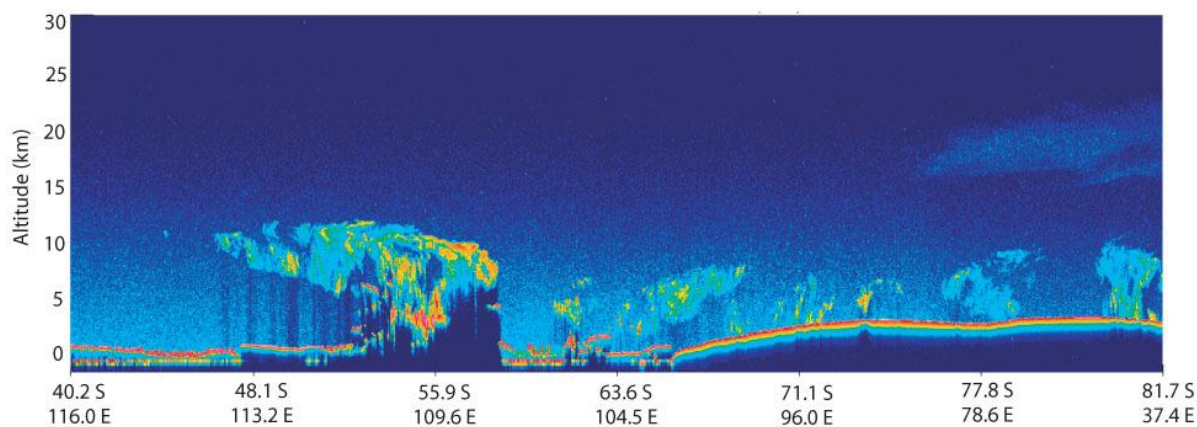
薄い雲の観測 - 1



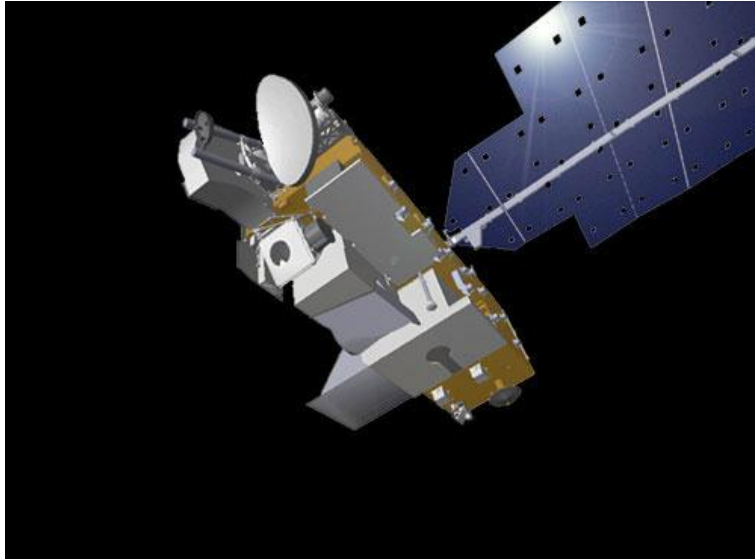
2006年6月7日

<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>

薄い雲の観測 - 2



EOS-Aura



2004年7月15日打ち上げ

Earth Observing System (EOS) Aura は NASA のミッションで、オゾン層や大気質、気候に資する観測をおこなう。研究対象としては、主として中層大気の大気組成や化学、力学である。

オゾン層は回復してきているのか？

大気質は悪くなっているのか？

地球の気候はどう変化しているのか？

搭載測器

- HIRDLS: High Resolution Dynamic Limb Sounder
- MLS: Microwave Limb Sounder
- OMI: ozone Monitoring Instrument
- TES: Tropospheric Emission Spectrometer

<http://aura.gsfc.nasa.gov/>

Aura の観測対象

EOS Aura Atmospheric Profile Measurements

OMI also measures UVB flux, cloud top/cover, and column abundances of O_3 , NO_2 , BrO, aerosol and volcanic SO_2

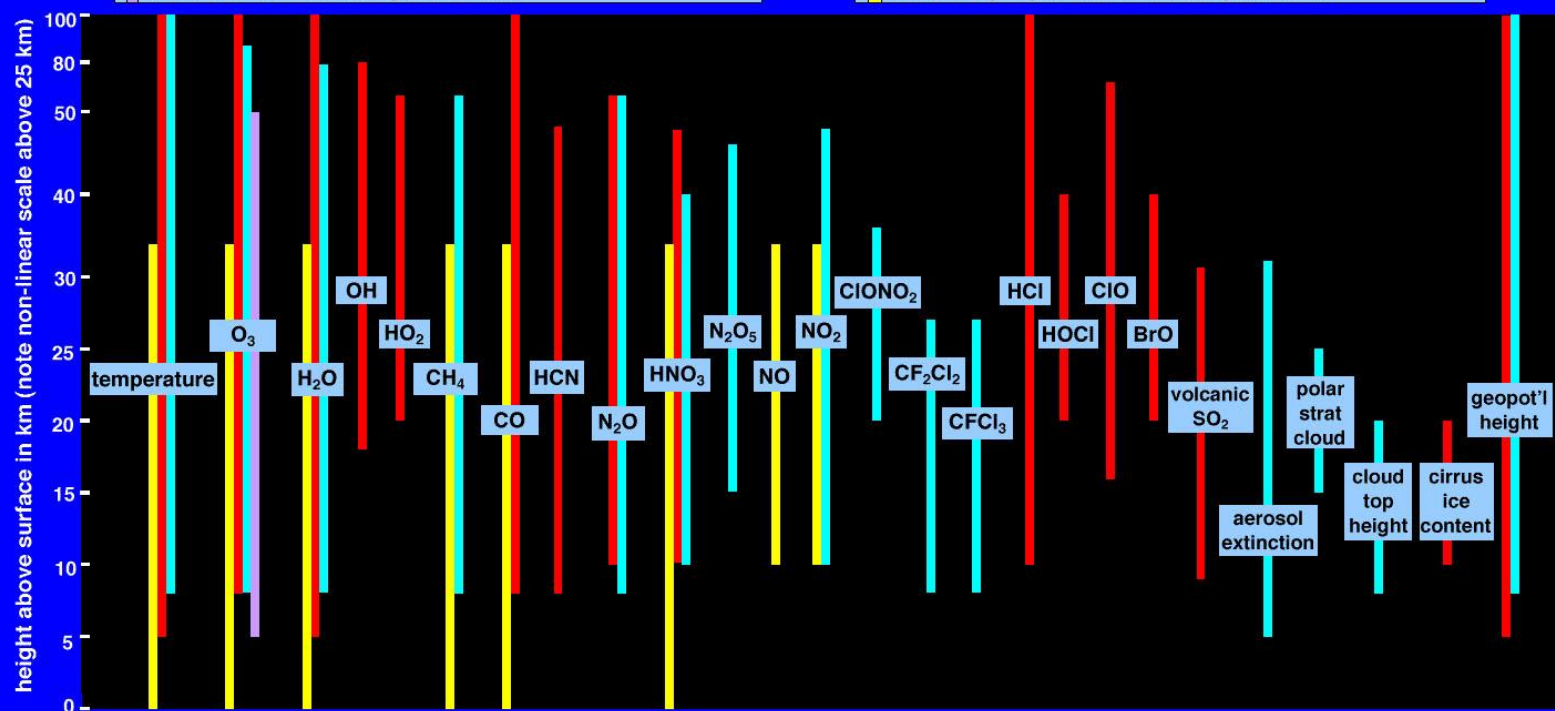
TES also measures several additional 'special products' such as $ClONO_2$, CF_2Cl_2 , $CFCl_3$, N_2O and volcanic SO_2

HIRDLS: High Resolution Dynamics Limb Sounder

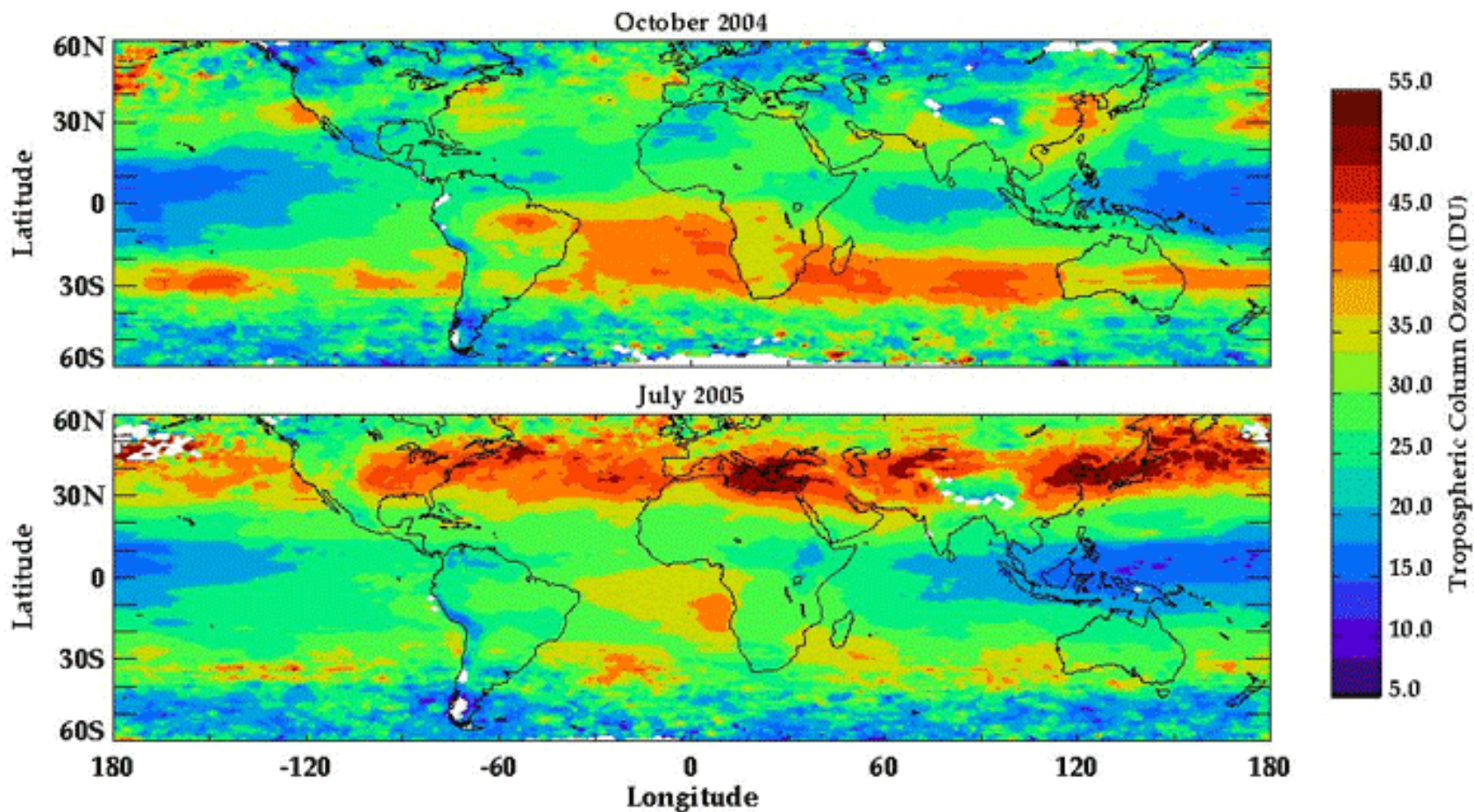
MLS: Microwave Limb Sounder

OMI: Ozone Monitoring Instrument

TES: Tropospheric Emission Spectrometer



対流圏オゾンの全球分布



OMI と MLS による対流圏オゾン分布のの分布

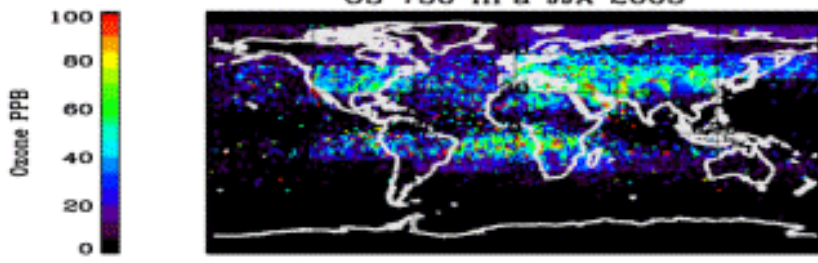
<http://aura.gsfc.nasa.gov/>

オゾンと一酸化炭素の全球分布

SUMMER 05

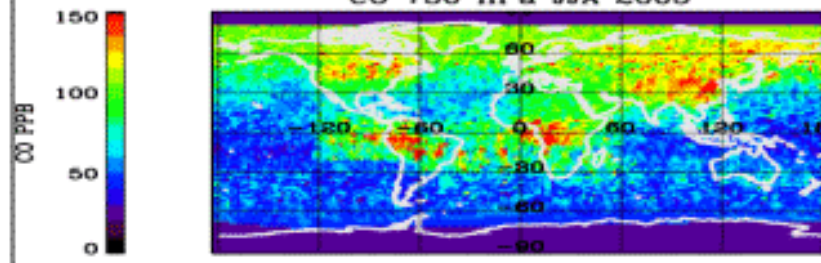
OZONE

O3 750 hPa JJA 2005



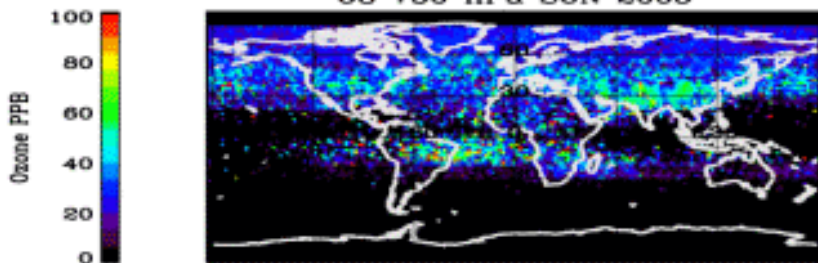
CARBON MONOXIDE

CO 750 hPa JJA 2005

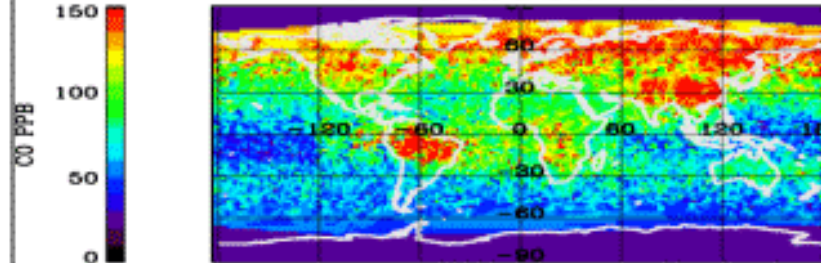


FALL 05

O3 750 hPa SON 2005

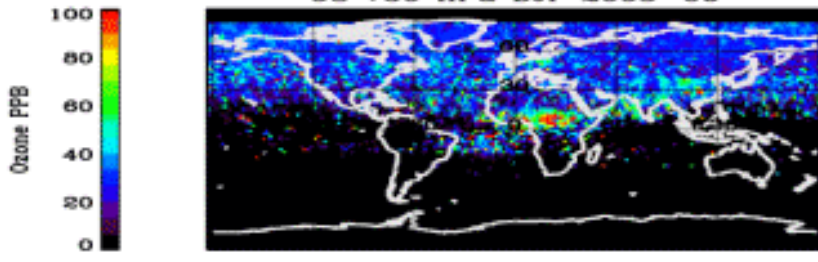


CO 750 hPa SON 2005

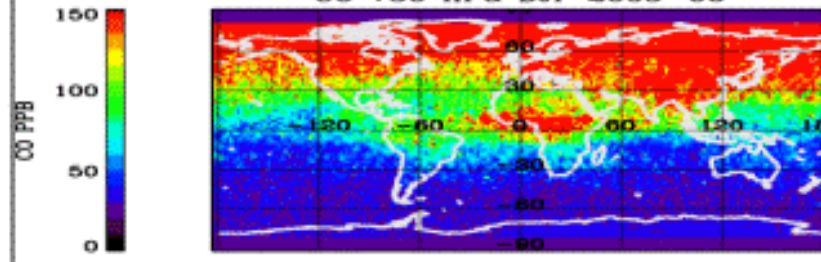


WINTER 05-06

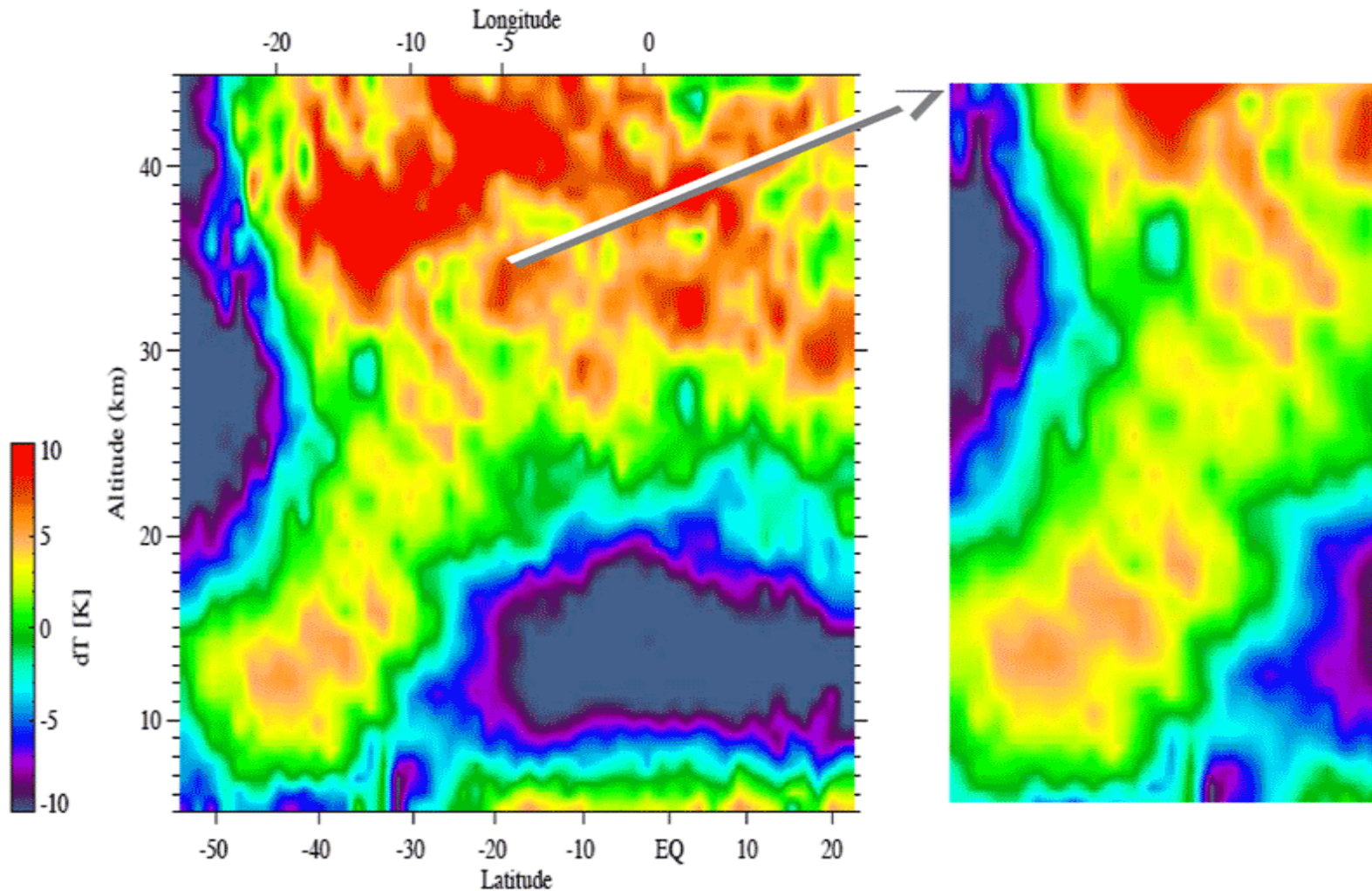
O3 750 hPa DJF 2005-06



CO 750 hPa DJF 2005-06



小スケールの重力波



HIRDLS は高鉛直分解能の温度プロファイルを観測できる

<http://aura.gsfc.nasa.gov/>

Conclusions - 1

- The daily synoptic global view of Earth, uniquely available from satellite observations, has revolutionized Earth studies and ushered in a new era of multidisciplinary Earth sciences, ... (衛星から得られるグローバルな描像は、多くの学問領域にわたる地球科学を新たな時代へと導いた。)
- To assess global change quantitatively, synoptic data sets with long time series are required. (グローバルな変化を定量的に評価するために、長期間のデータがますます必要になってきている。)
- The scientific advances resulting from Earth observations from space illustrate the successful synergy between science and technology. (宇宙からの地球観測による科学の進歩は、科学と技術がうまく組み合わさった成果である。)
- Satellite observations often reveal known phenomena and processes to be more complex than previously understood. (さまざまな衛星観測によって、これまで知られていた現象がより詳細にわたって理解できるようになった。)

Conclusions - 2

- The full benefits of satellite observations of Earth are realized only when the essential infrastructure, such as models, computing facilities, ground networks, and trained personnel, is in place. (衛星観測を真に生かすためには、地上観測システムや数値モデルさらには熟練した技術者などがあってはじめて可能となる。)
- Providing full and open access to global data to an international audience more fully capitalizes on the investment in satellite technology and creates a more interdisciplinary and integrated Earth science community. (グローバルなデータを全世界に向けて利用可能とすることで、より多くの学問領域にわたる統合的な地球科学コミュニティが作られる。)
- Over the past 50 years, space observations of the Earth have accelerated the cross-disciplinary integration of analysis, interpretation, and, ultimately, our understanding of the dynamic processes that govern the planet. (過去50年間の衛星からの地球観測によって、われわれの地球を支配するダイナミックな過程の理解が分野横断的に進んだ。)

参考文献

- Earth observations from space <http://dels.nas.edu/basc/earthobservations/report.shtml>
- Committee on Scientific Accomplishments of Earth Observations from Space, National Research Council, 2008, Earth Observations from Space, Natl Academy Pr
- NASA, 1985, Report No. 430-1003-001
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<http://www.ecmwf.int/>
- [Hanel, R. A.](#), [Schlachman, B.](#), [Rogers, D.](#), [Vanous, D.](#), 1971, Nimbus 4 Michelson interferometer, Applied Optics IP, 10, 6, 1376-1382
- Aura atmospheric chemistry
<http://aura.gsfc.nasa.gov/>
- SCIAMACHY
<http://www.sciamachy.org/>
- Abel, P. G. Ellis, P. J. Houghton, J. T. Peckham, G. Rodgers, C. D. Smith, S. D. Williamson, E. J. 1970, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 320, 1540, 35-55
- NASA, UARS pamphlet , 1989
- NASA
<http://www.nasa.gov/home/index.html>
- Aqua Project Science
<http://aqua.nasa.gov/>