

システムセンシング情報学講座

「地球環境問題と衛星による地球観測」

- 地球環境問題 –システムとしての地球
 - 地球システム, 気候システム
 - エネルギー・水循環, サブシステム間の相互作用
 - 現場観測と大循環モデル
- 衛星による地球観測
 - リモートセンシングとは?
 - 衛星が捉えた地球環境現象
 - 地球環境問題への貢献

田殿 武雄 (Takeo Tadono)

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター (JAXA EORC)

北海道大学 情報科学研究科 システム情報科学専攻
工学部L棟1階L-115 サイバーフィールドリサーチラボ(CFRL)内

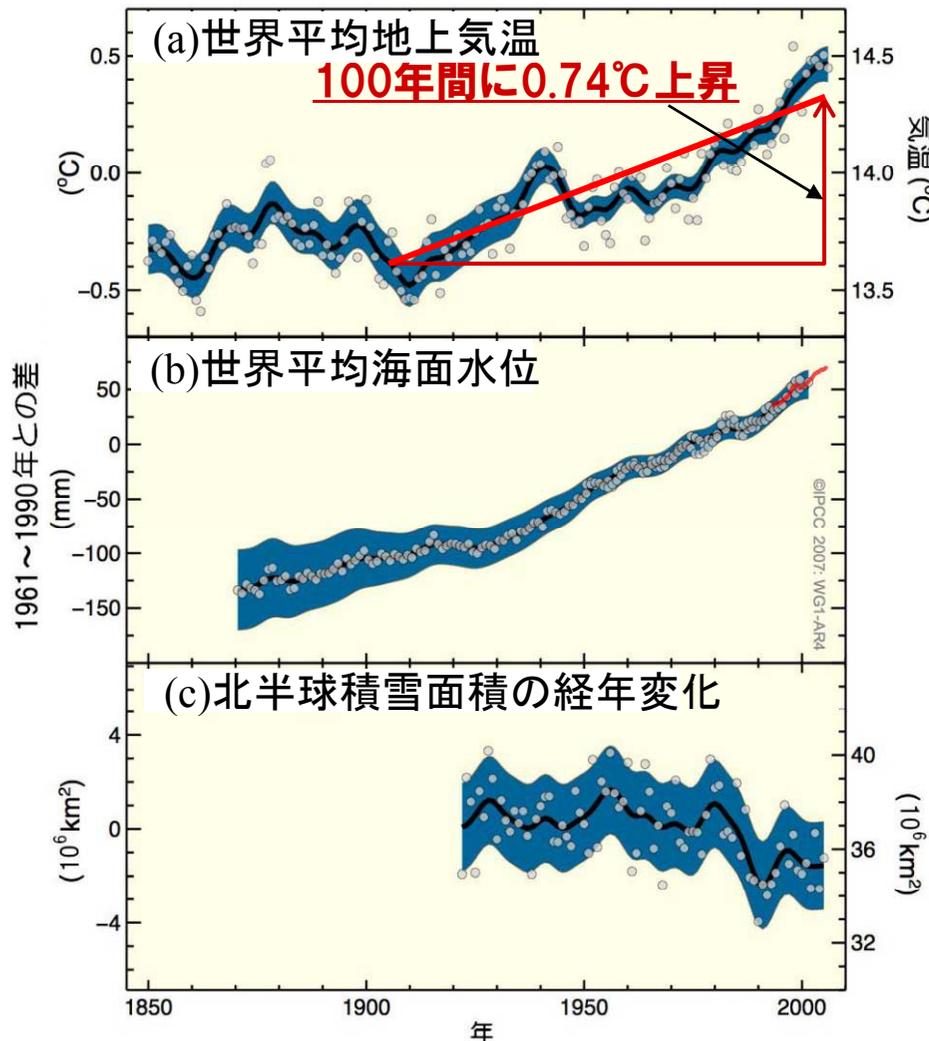
E-mail: tadono.takeo@jaxa.jp / tadono@ssi.ist.hokudai.ac.jp

講座Web <http://www.eorc.jaxa.jp/ISS/index.html>



地球温暖化は疑う余地がない？

IPCC第4次評価報告書 (2007)



IPCC第4次評価報告書 (気象庁訳)

「気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、
大気や海洋の世界平均温度の上昇、
雪氷の広範囲にわたる融解、
世界平均海面水位の上昇
が観測されていることから
今や明白である」

出典: IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約 (気象庁訳)

地球環境問題とは?

■ 地球環境問題とは?

- ✓ 現象から見れば, 人間の社会経済活動の増大に伴って人間圏から放出される物質が, **地球システムの物質循環・エネルギー循環**に影響を与える結果として生じるような地球規模(**グローバル**)の諸現象
 - 地球温暖化
 - オゾン層の破壊
 - 砂漠化, 土壌の流出
 - 酸性雨などに見られる広域汚染
 - 熱帯雨林の減少などに伴う生物多様性の消失

- ✓ 人間活動が自然に負荷をかけた直接の結果として生じている訳ではない
- ✓ 「**地球表層環境**」に表れている現象 = 自然環境と社会経済環境との関わり
 - 1992年6月リオデジャネイロ「環境と開発に関する国連会議(地球サミット)」
 - アジェンダ21, 生物多様性条約, 気候変動枠組み条約, 京都議定書
→ 政策決定に結び付く

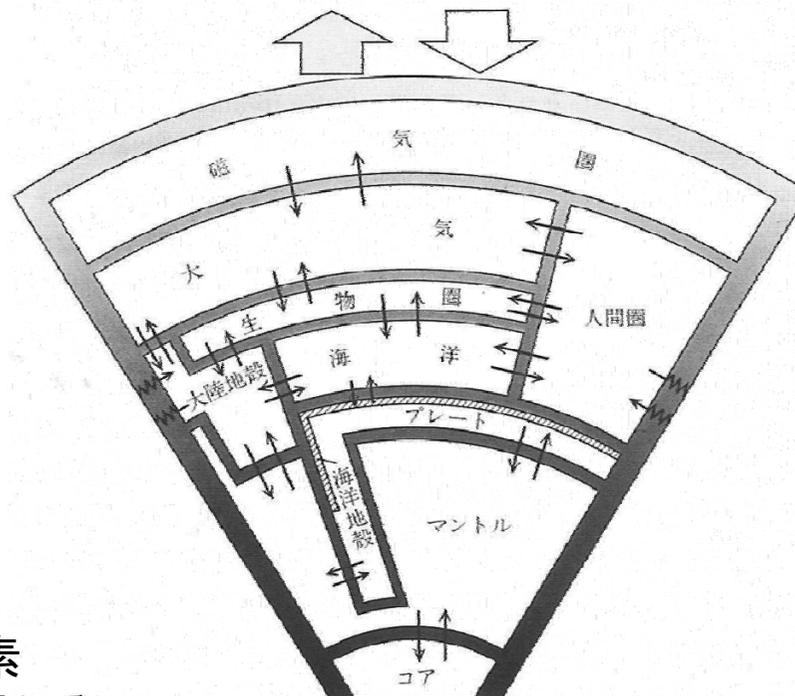
- ✓ 「**地球システム**」のメカニズムを理解する必要がある
 - 科学技術の発展
 - 人間社会と自然との関係

■ 「地球」

- ✓ 46億年前, 微惑星の衝突によって誕生
- ✓ マントルから地殻が分化し海洋と大気を分化
 - 「水惑星」=「海」の存在
- ✓ 38億年前, 生命の誕生 → 光合成開始
- ✓ 21億年前, 現在とほぼ同様の大気組成
- ✓ 400万年前, 猿人誕生
- ✓ 4万年前, 現世人類誕生

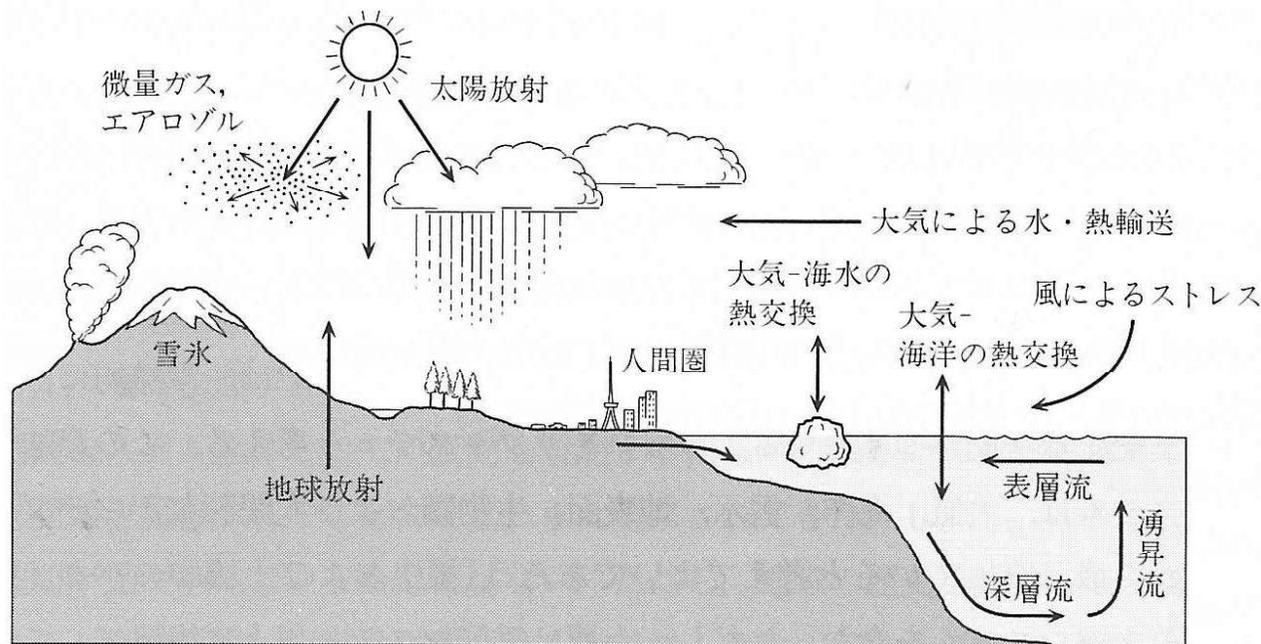
■ システムとしての「地球」

- ✓ 地球の構成要素の時間的階層構造, 構成要素 (サブシステム)間の相互作用と分化の様子を捉える
- ✓ 「地球システム」の構成 = サブシステム
 - 磁気圏: 宇宙空間との境界領域
 - 固体圏: 地殻, マントル, コア
 - 流体圏: 大気, 海洋
 - 生物圏: 生物の生息
 - 人間圏: 人類の活動によって規定
- ✓ **地球環境問題** = 人間圏で作り出す様々な物質が, 地球システムを駆動・維持している物質循環に負荷をかけ, 従前の変動内で処理できなくなった現象



地球システムとサブシステム間相互作用
(岩波講座 地球惑星科学2より引用)

気候システム (Climate System)

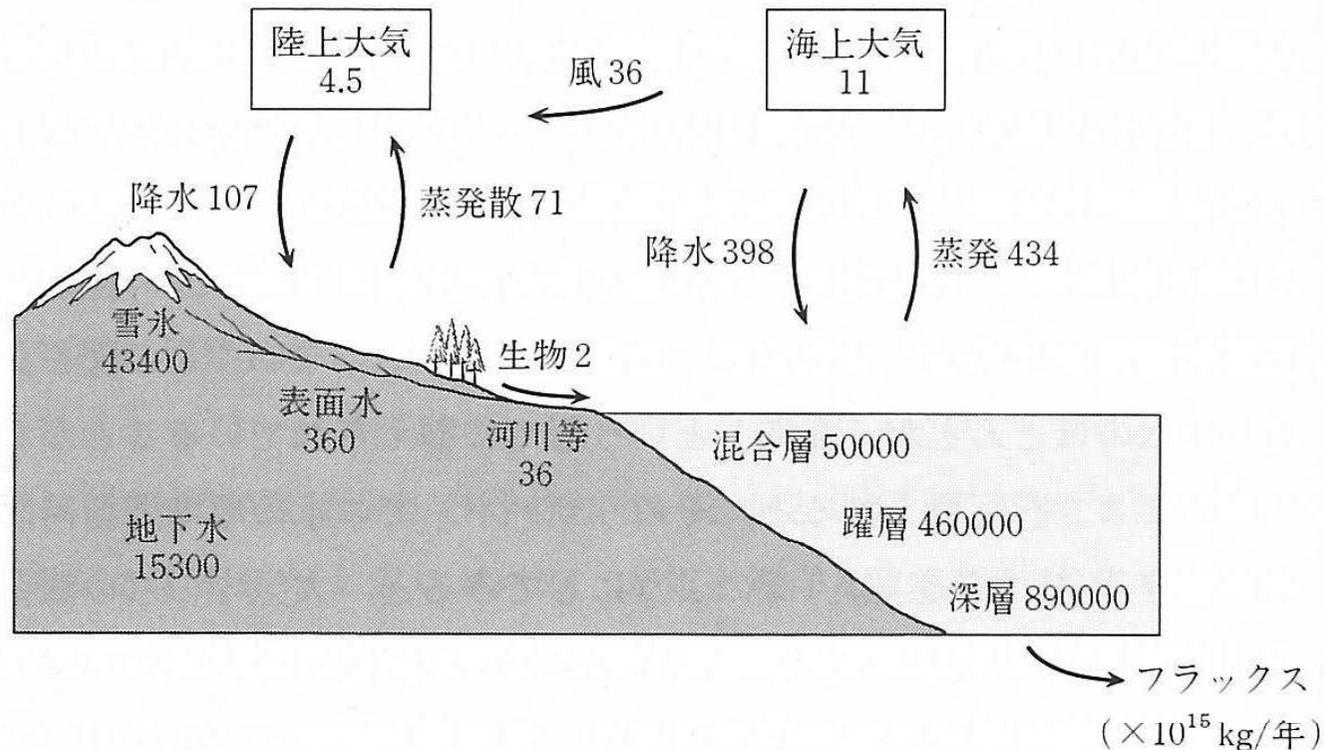


気候システムの模式図 (岩波講座 地球惑星科学2より引用)

■ 「地球表層環境」≒「気候システム」

- ✓ 人間の視点から重要な自然環境は地球表層 = 大気圏, 海洋圏と生物・人間圏
→ 気候システム ≒ 水・熱エネルギー循環
- ✓ 独自の力学と独自の時間・空間スケールを持つサブシステムで構成される
 - 低気圧: 「日」, 「数100km~1000km」オーダー
 - 積乱雲: 「時間」, 「数km~数10km」オーダー
 - 氷河: 「何万年」オーダー(これまでは)
- ✓ 相互作用: サブシステムの変動の重ね合わせでなく, システム全体として独自の変動

水循環 (Water Cycle)

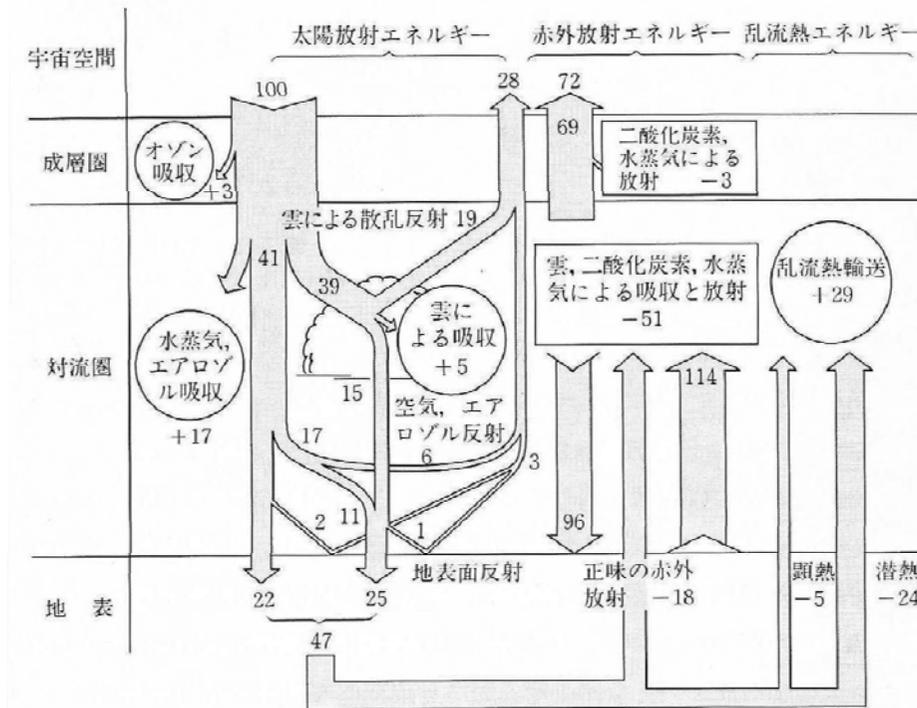


大気－海洋－陸域における水収支 (岩波講座 地球惑星科学2より引用)

■ ”水惑星”地球

- ✓ 水の特殊性: 熱的特性 → 相変化(気体, 液体, 固体) = 熱エネルギー循環
密度, 放射収支
- ✓ 大気中の水分量: 0.0009% → 蒸発散, 雲形成, 降水過程は短期
- ✓ 地球の面積の7割が海, 3割が陸地: 陸域の水分量は約3.5%, この半分は雪氷
- ✓ 相互作用: 大気－海洋－陸域の不均一性

エネルギー循環 (Energy Cycle)

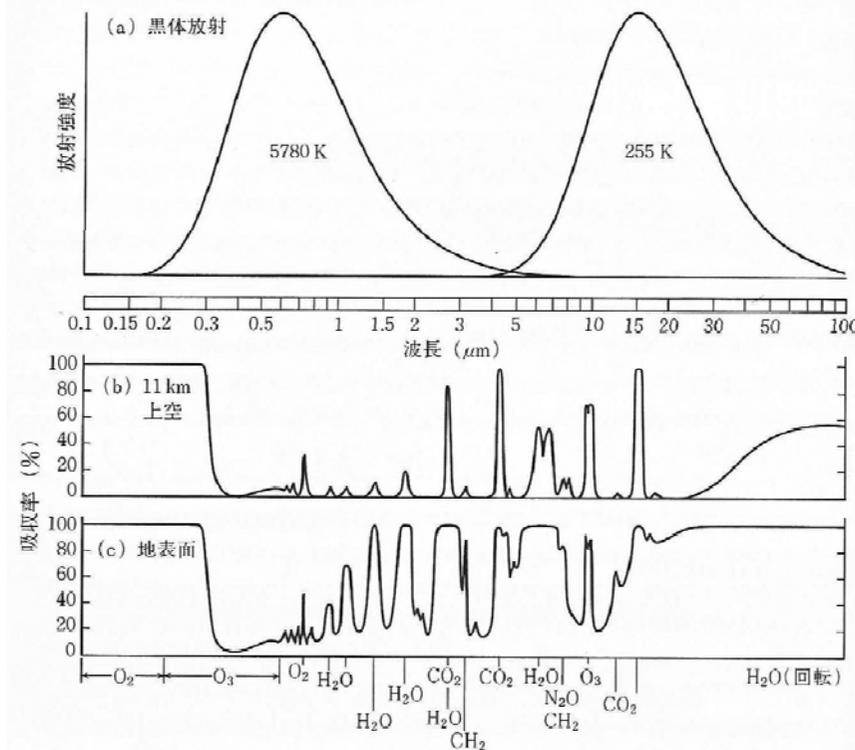


地球一大気系の年平均エネルギー収支. 系へ入射する太陽放射を100として表示 (岩波講座 地球惑星科学3より引用)

■ 熱エネルギー循環

- ✓ 太陽放射エネルギー: 気候システムのエネルギー源
- ✓ 大気上端(top-of-atmosphere, TOA)で入射エネルギーと放射エネルギーはバランス
- ✓ 地表面でのエネルギー収支: 正味の赤外放射と顕熱, 潜熱に分配
 - 顕熱(sensible heat): 物質の状態を変えずに, 温度を変化させる熱
 - 潜熱(latent heat): 温度の変化をとみなわないで吸収, 放射される熱

太陽放射と地球放射

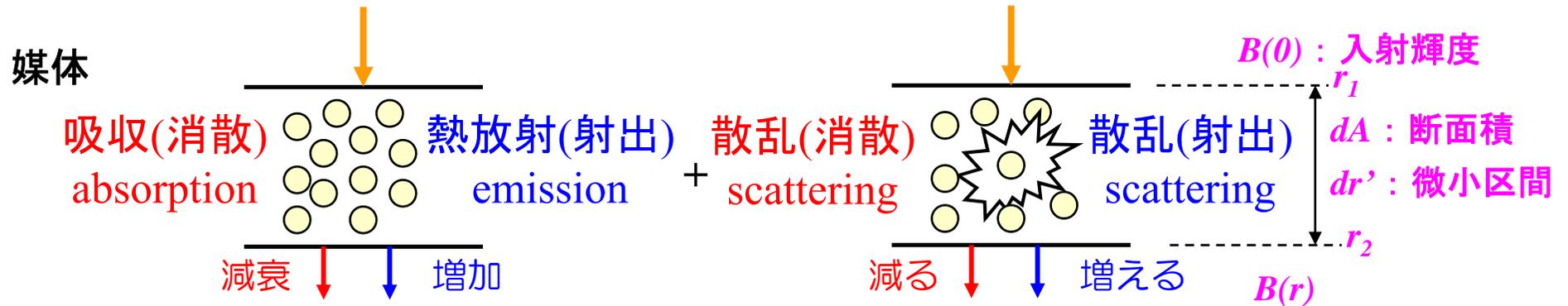


太陽放射, 地球放射スペクトルと大気吸収特性 (岩波講座 地球惑星科学3より引用)

■ 鉛直方向のエネルギーの流れ → 放射伝達理論

- ✓ 太陽放射: 6000Kの黒体放射(black body radiation), 中心波長 $0.5\mu\text{m}$ (短波放射)
- ✓ 地球放射: 地表温度約290Kの黒体とすると中心波長 $10\mu\text{m}$ (長波放射)
- ✓ 紫外領域: オゾン, 赤外領域: 二酸化炭素によって吸収
 - 紫外領域: オゾンによって吸収 = オゾン層が破壊されると地表に届く紫外線が増加
 - 赤外領域: 二酸化炭素によって吸収 = 二酸化炭素が増えると大気温度上昇 → 温暖化

放射伝達理論 (Radiative Transfer Theory)



- 吸収 (absorption) : エネルギーの受け渡しがある = 媒体の温度が上がる
- 散乱 (scattering) : " がない = 温度は上がらない → 電磁波の向きを変える

✓ 消散係数 (extinction coefficient) : $K_e = K_a + K_s$ (nepers \cdot m⁻¹)

ここで, 吸収係数 (absorption coefficient) K_a , 散乱係数 (scattering coefficient) K_s

✓ 単一散乱アルベド (single-scattering albedo) : $\omega \equiv K_s / K_e$

✓ 光学的厚さ (optical thickness) : $\tau(r_1, r_2) \equiv \int_{r_1}^{r_2} K_e dr$

■ 放射伝達の式 (equation of radiative transfer) : $dB + K_e B dr = K_e J dr$

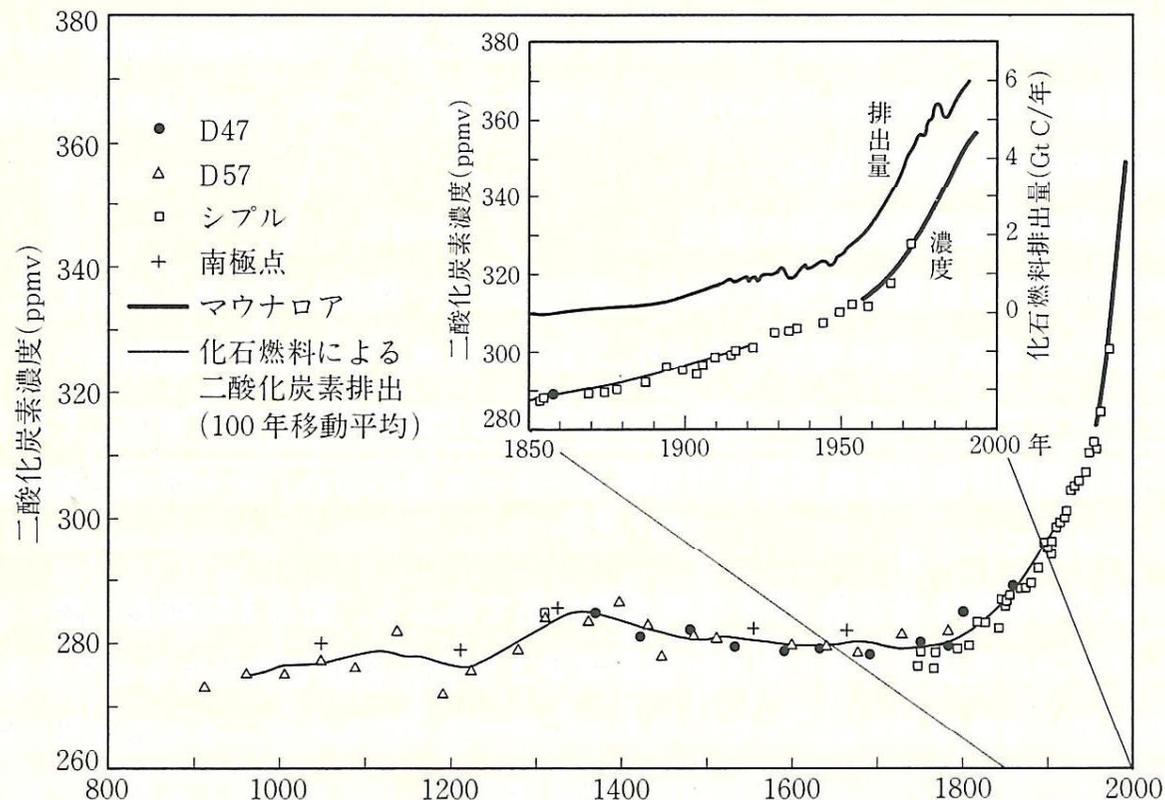
■ 形式解 : $B(r) = B(0) \exp[-\tau(0, r)] + \int_0^r K_e(r') J(r') \exp[-\tau(r', r)] dr'$

$r=0$ で放射された電磁波が $0 \sim r$ 中の微小区間 dr' で射出した電磁波が
 $0 \rightarrow r_1$ に消散して r_1 に届く輝度 $r' \rightarrow r$ を伝搬中に消散して r に届く輝度

■ 1 nepers/m : 1mで1neper下がる = $1/e$ になる



温室効果気体 (Greenhouse Gas)

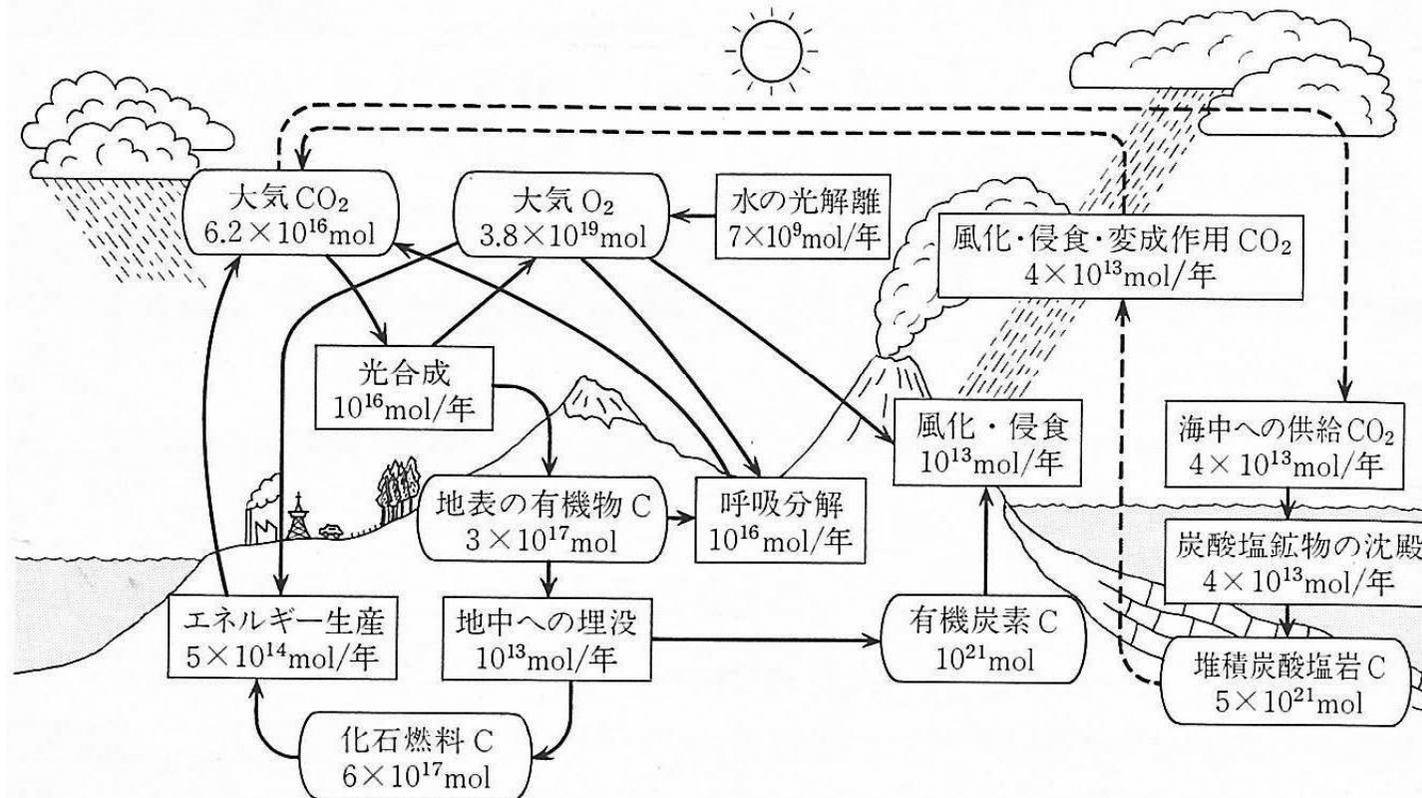


過去1000年に渡るCO₂濃度の記録 (岩波講座 地球惑星科学3より引用)

■ 最近1000年間の二酸化炭素量の変化

- ✓ 南極, グリーンランドの氷床コア中の気泡の濃度測定
- ✓ 化石燃料使用量の増加: 産業革命後
- ✓ 気温変化と二酸化炭素, メタンなど温室効果気体の濃度に相関
 - 正のフィードバック: 気温が上昇 → 温室効果気体の増加 → さらに気温が上昇

酸素と炭素(二酸化炭素)の循環

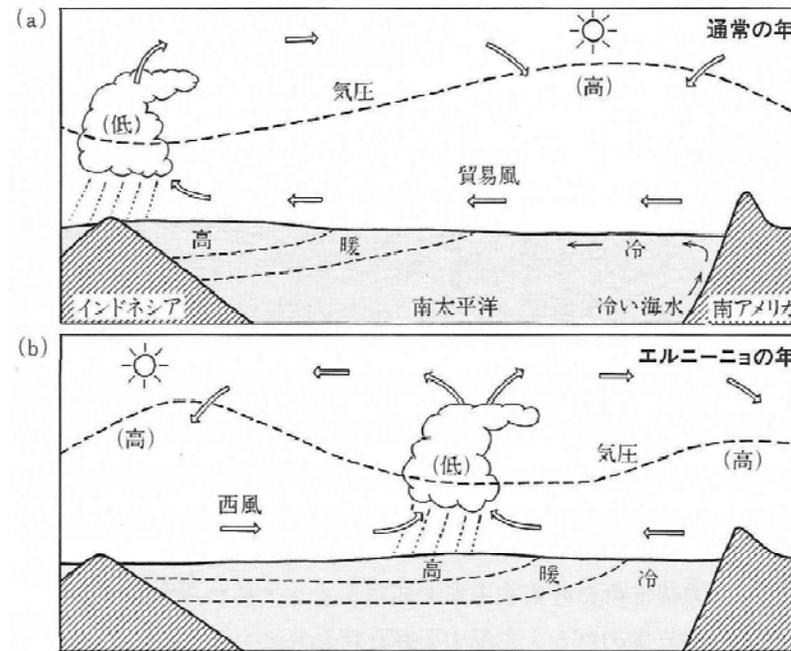


現在の地球における酸素と炭素の生物地球化学的循環(実線)と地球化学的循環(破線)
(岩波講座 地球惑星科学3より引用)

■ 二酸化炭素の循環: 地表付近の現象

- ✓ 地球化学的循環: 地表温度に依存. 降雨によって除去, 火山活動により供給
- ✓ 生物地球科学的循環: 生物活動をともなう循環. 全体の2割程度

大気－海洋間の相互作用

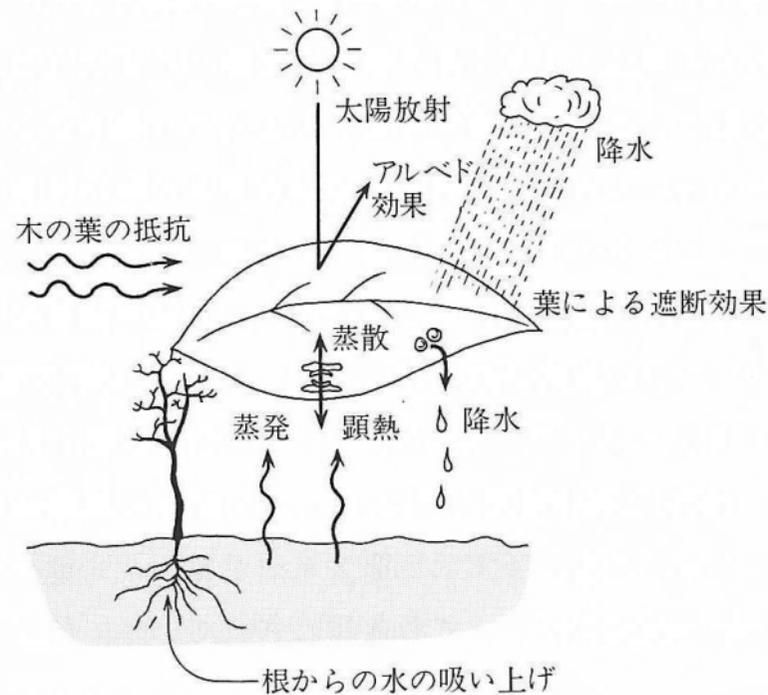


海洋のエルニーニョと大気の南方振動を合わせたENSO模式図 (岩波講座 地球惑星科学2より引用)

■ 気候システムにおけるサブシステム間の相互作用

- ✓ 大気－海洋間相互作用: 地球表面の7割
 - 運動量, 熱エネルギー, 水蒸気, 物質(二酸化炭素など)
 - 移流(advection): 流れによって運ばれる運動
 - 拡散(diffusion): 濃度が高いところから低いところへ物質が動いていく運動
- ✓ 結合系のふるまい: **エルニーニョ**
 - 通常: 太平洋西側に暖かい海水, 東側に冷たい海水(赤道湧昇) ← 貿易風
← 上昇流が必要 ← 西太平洋からインド洋の**アジアモンスーン域**の降水活動
 - エルニーニョ: 暖かい海水が東へ移動 → 積乱雲群も太平洋中央部に移動

大気－陸域間の相互作用



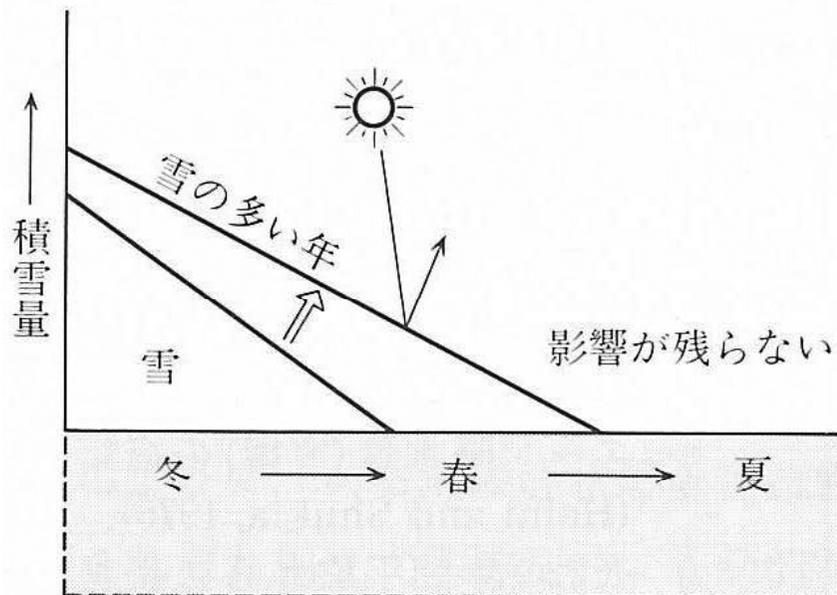
植生モデル(Big leaf model) (岩波講座 地球惑星科学2より引用)

■ 気候システムにおけるサブシステム間の相互作用

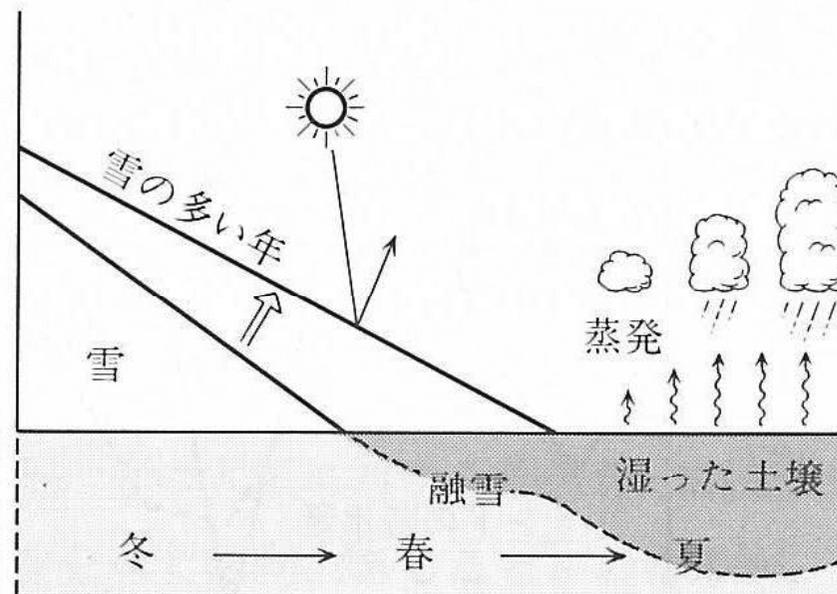
- ✓ 大気－陸域間相互作用: 地表面状態の非一様性
 - 運動量, 熱エネルギー, 水蒸気, 物質(二酸化炭素など) → 複雑化
 - 移流(advection): 流れによって運ばれる運動
 - 拡散(diffusion): 濃度が高いところから低いところへ物質が動いていく運動
- ✓ 水蒸気輸送: 蒸発散量, 土地被覆状態, 土壌水分, 地表面温度, 空気力学的粗度
- ✓ 接地境界層(Planetary Boundary Layer, PBL): 地表面近くの大気－陸域相互作用

フィードバック

アルベドのフィードバック



水文学的フィードバック



アイスアルベド・フィードバックの概念 (岩波講座 地球惑星科学11より引用)

■ フィードバック: サブシステム間の相互作用

- ✓ 外力の変化が加わった時, そのシステムの出力が変化し, その効果がさらに外力の変化を促す
- ✓ アイスアルベド・フィードバック
 - 何らかの要因で温度が下がり, 降雪量や氷床の面積が増える → 地球の反射率が大きくなる → 地球に入射するエネルギーが減少する → さらに温度が下がる
- ✓ 地球全体をシステムとして統一的に考える必要がある

現場観測 (In-situ Observation)



気象レーダ (Meteorological RADAR)



境界層タワー (PBL Tower)



自動気象観測装置
(Automatic Weather Station)

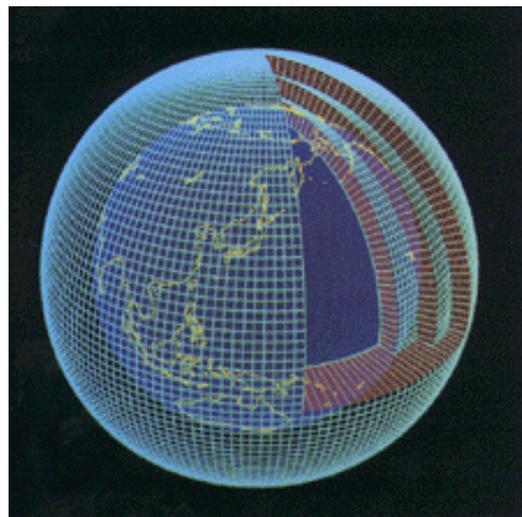
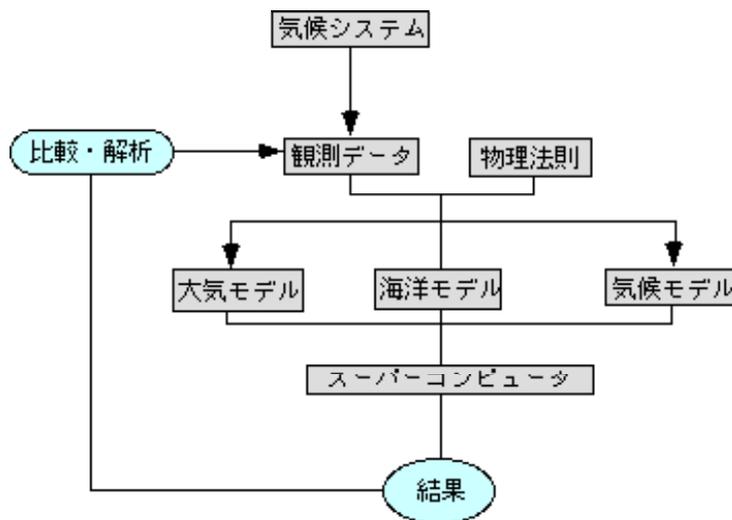
■ 気候(Climatology)と気象(Meteorology)

- ✓ 気候: 平均場を表す. 一年周期
- ✓ 気象: 大気状態や現象全てを表す. 一年より時間周期の短い現象

■ 気象・水文観測

- ✓ 気象要素: 気温, 湿度, 日射, 放射収支, 潜熱, 顕熱, 風速, 風向, 地中熱量, 空気力学的粗度, 降水量(降雨, 降雪)
- ✓ 水文要素: 土壌水分量, 積雪, 河川流出量
- ✓ その他: 植生要素 etc.

大気大循環モデル (AGCM)



“地球シミュレータ2” 2009年3月
(海洋研究開発機構より引用)

気候システムを理解するためのフロー (東大気候システムセンターより引用)

■ 数値モデルの意義

- ✓ 0次元モデル: 空間分布を持たない変数を持つ, 低自由度モデル
- ✓ 1 or 2次元モデル: 温度だけを変数とし, 1次元または2次元の空間分布を持ち, エネルギー保存だけを基本法則としたエネルギー収支モデル
- ✓ 3次元モデル: 温度, 圧力, 速度などの3次元に分布する変数の時間発展を運動方程式, 質量保存, エネルギー保存などの物理法則にもとづいて計算するモデル
 - 大気や海洋 → **大循環モデル**(General Circulation Model, **GCM**)
 - より高解像度化 → コンピュータ能力の発展

■ “地球シミュレータ”: 海洋研究開発機構(JAMSTEC)で管理

リモートセンシングとは?

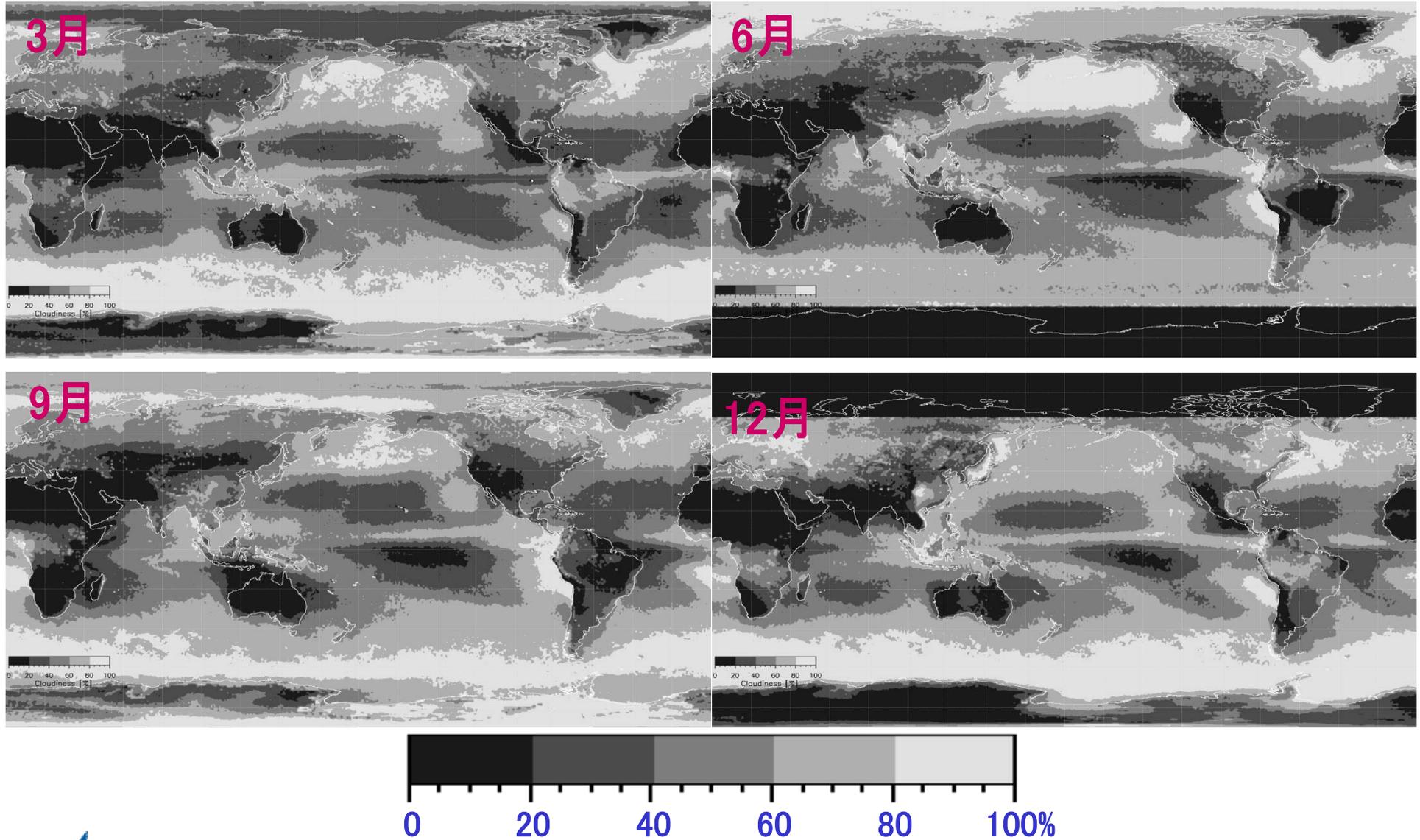


宇宙を飛ぶ“計測器”

↑
地球全体(グローバル)を計測可能
同じ時間間隔で計測可能
同じ精度で計測可能

- ✓ 遠く離れたところから, 対象物に手を触れずにそれが {何か? どういう状態か?} を {電磁波, 音波, 振動} を使って計測する技術.
- ✓ 地球観測: {人工衛星, スペースシャトル, 航空機等} プラットフォーム(platform) に搭載された センサ (sensor) で計測. → 分光(スペクトル)特性を利用.

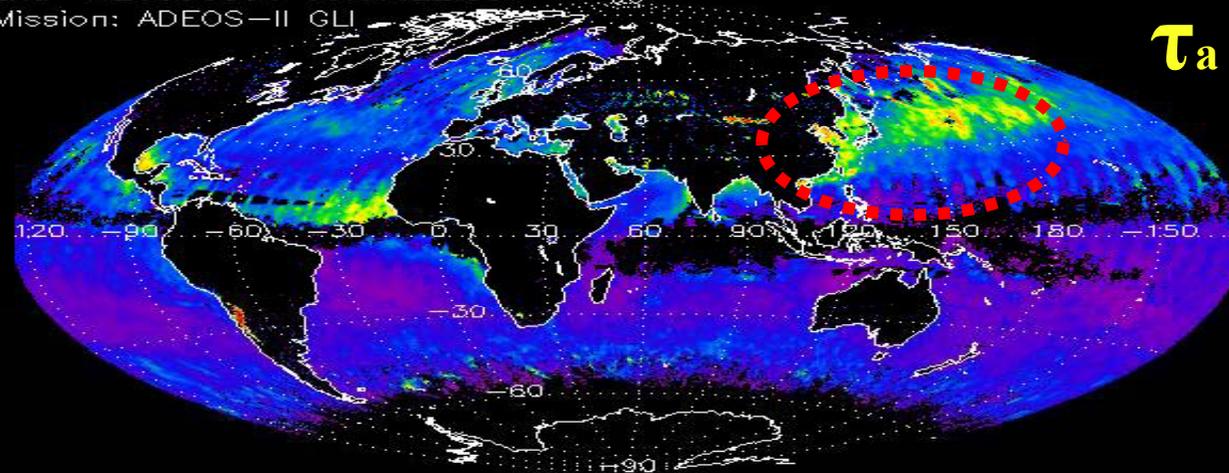
雲量の季節変化(2000-2008平均)



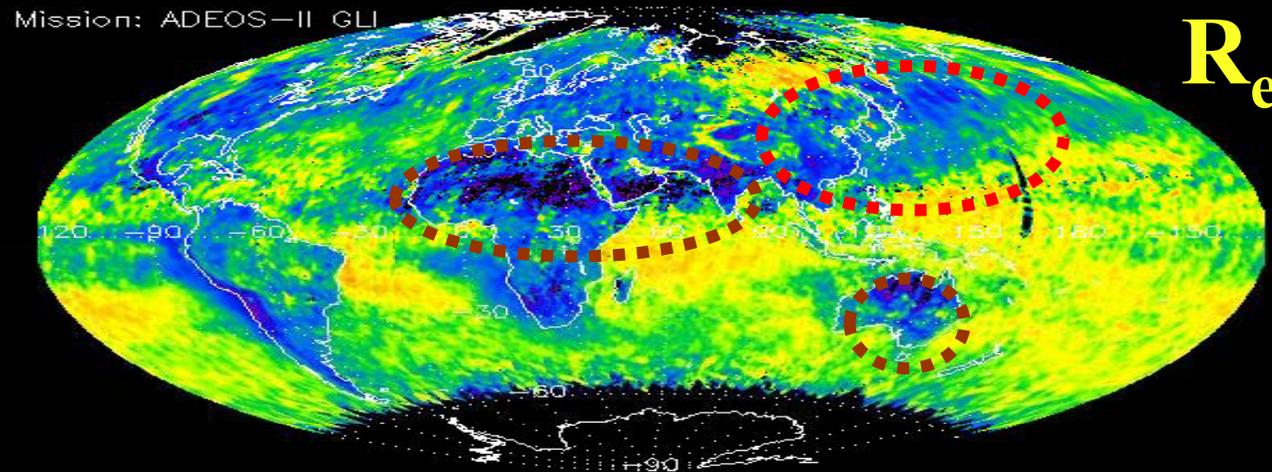
エアロゾルと雲の相互作用

April, 2003

Start: 20030403 00:06:03.241
End : 20030501 00:07:22.007
Mission: ADEOS-II GLI
JAXA EORC, Tokyo, Japan



Aerosol Optical Thickness at 500 nm
0.0 0.2 0.5 0.8 1.0

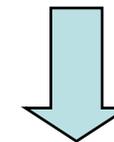


Cloud Effective Particle Radius (Water Cloud by Reflection Method)
4 8 12 16 20 24

τ_a

R_e

エアロゾルの
光学的厚さ



エアロゾルの放射
強制力の見積り精
度の向上に貢献



水雲の有効半径
(同光学的厚さ)

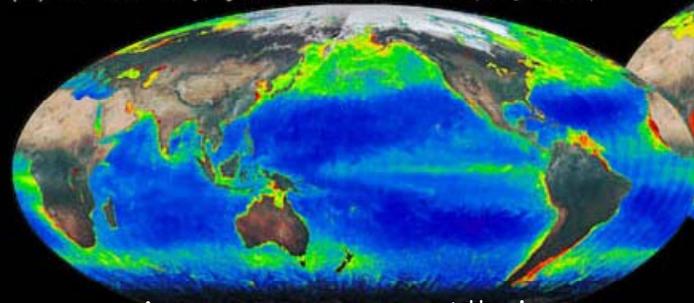
海洋基礎生産力=炭素固定量の見積

2003年4月平均

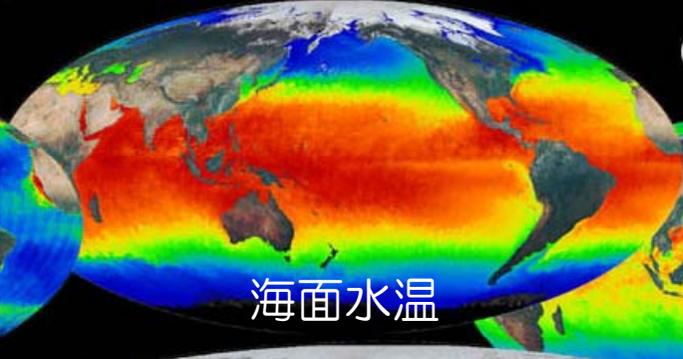
(C) GLI sea-surface temperature (May, 2003)

(B) GLI chlorophyll-a concentration (May, 2003)

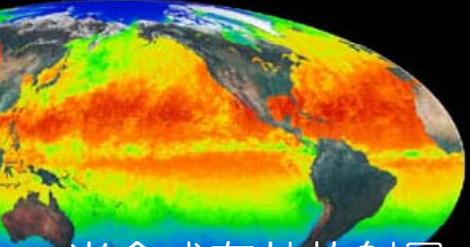
(D) GLI photosynthetically available radiation (May, 2003)



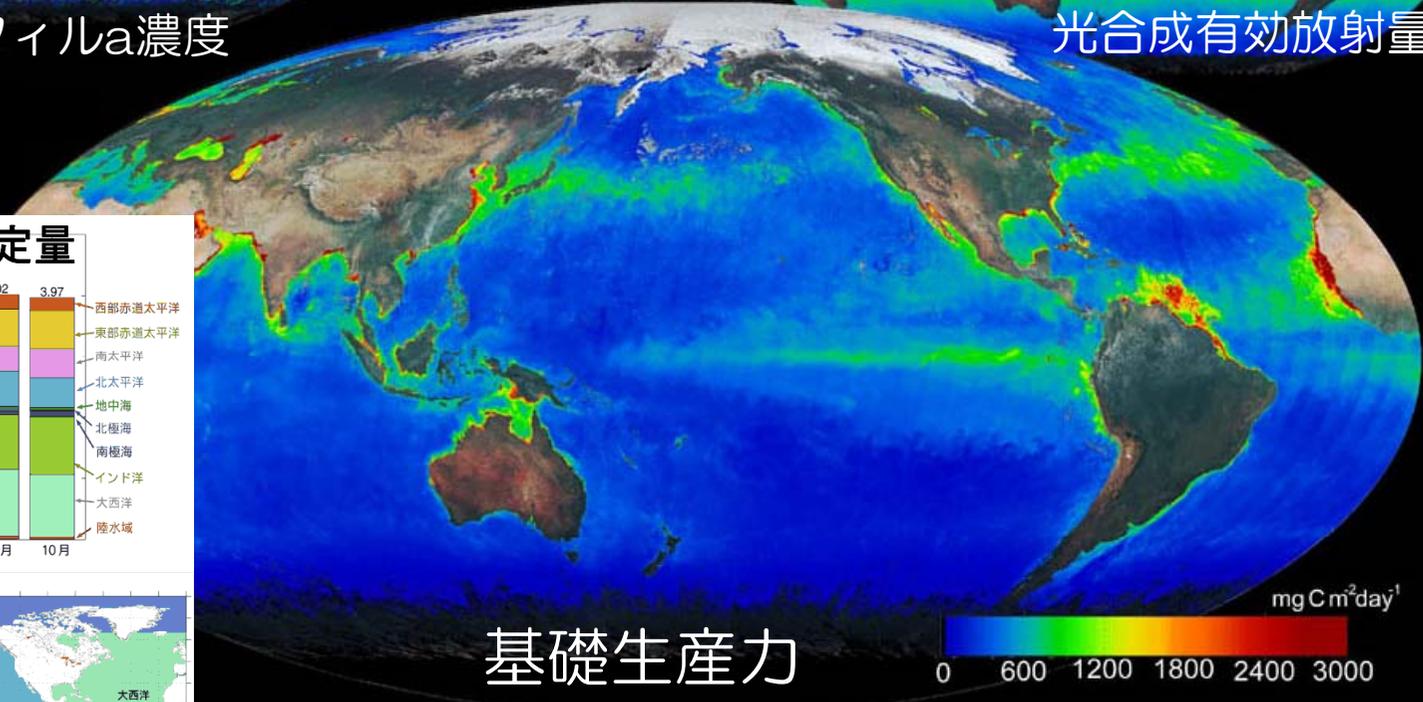
クロロフィルa濃度



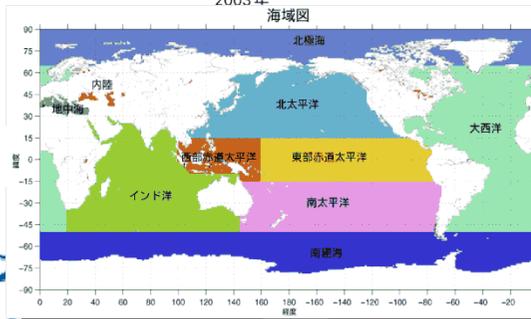
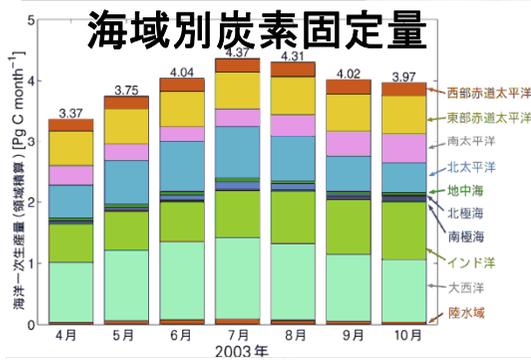
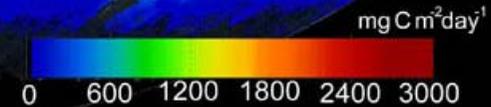
海面水温



光合成有効放射量

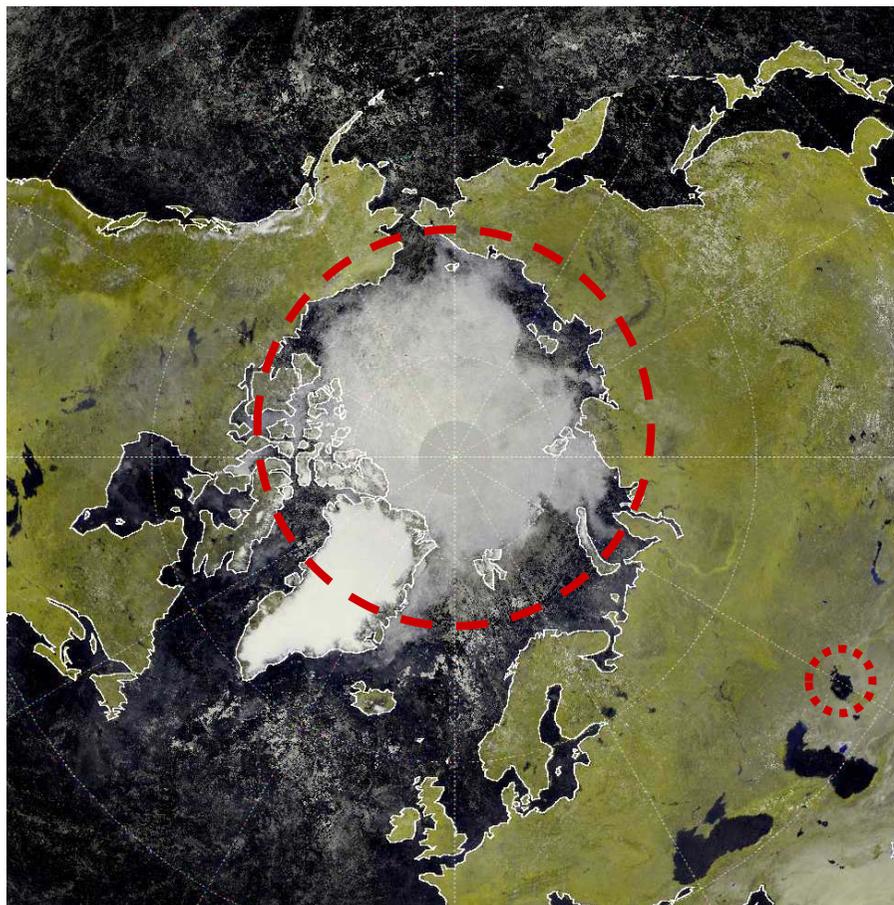


基礎生産力

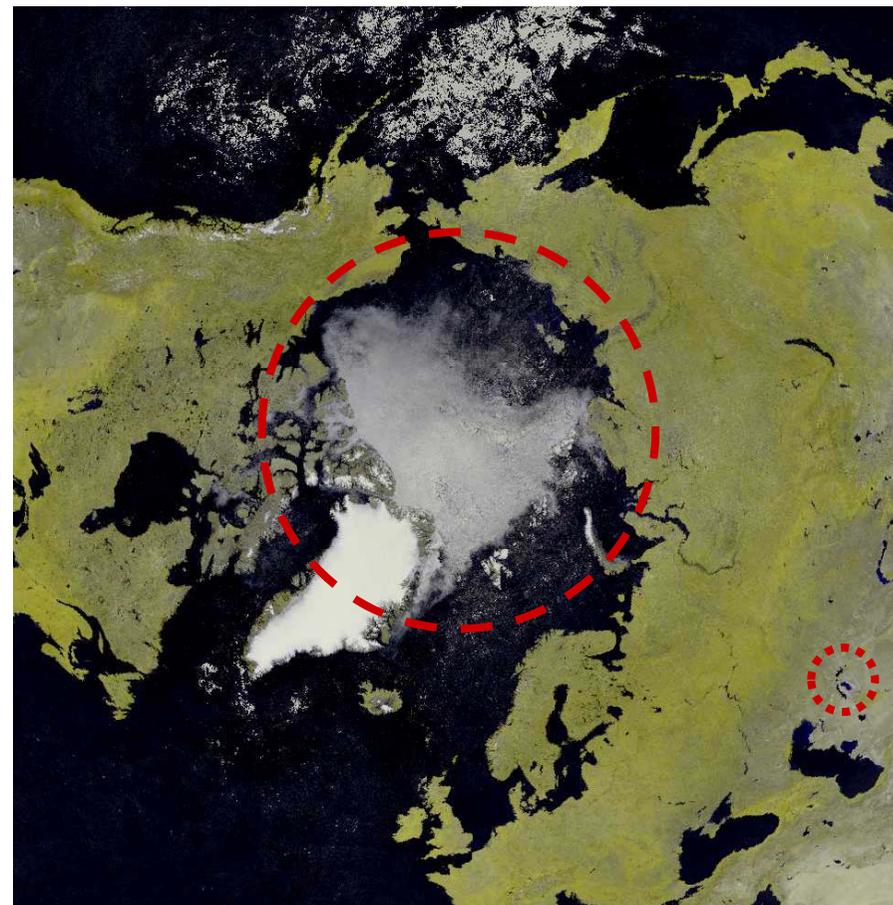


Above figures show GLI monthly ocean products in May 2003. OPP (A) is estimated from GLI ocean products (B-D) with the ocean bio-optical model (algorithm investigator: I. Asanuma), and (G) is calculated by area and month integration considering sea-ice concentration (E) for the ten ocean areas (see H). Chlorophyll-a concentration (B) is estimated using water-leaving radiance at GLI channels 4 (443nm), 5 (460nm), 7 (520nm), and 8 (545nm) (algorithm investigator: B. G. Mitchell), which are derived by atmospheric correction algorithm using two near-infrared channels (investigator: H. Fukushima). We also use the data from channels 4, 5, 7, 8, and 13 (678nm) for photosynthetically available radiation (D) (investigator: R. Frouin), and channel 34 (8.6um), channel 35 (10.8um), and channel 36 (12.0um) for sea-surface temperature (C) (investigator: H. Kawamura).

夏季北極海の海水の減少



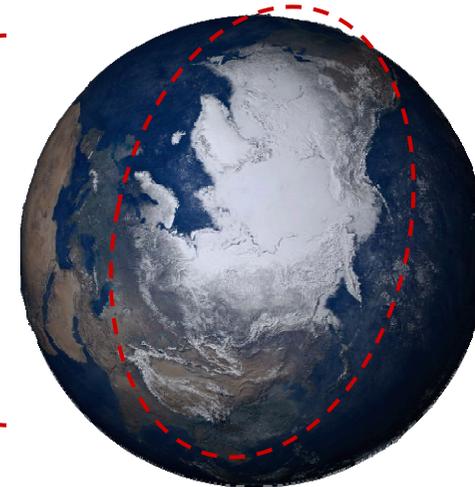
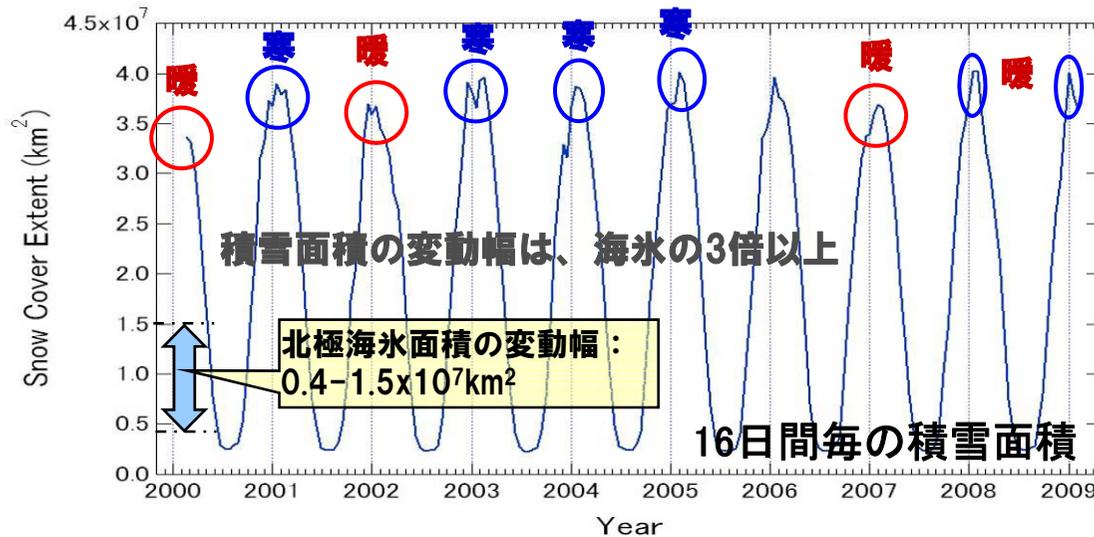
1981年8月の北極域 (NOAA/AVHRR)



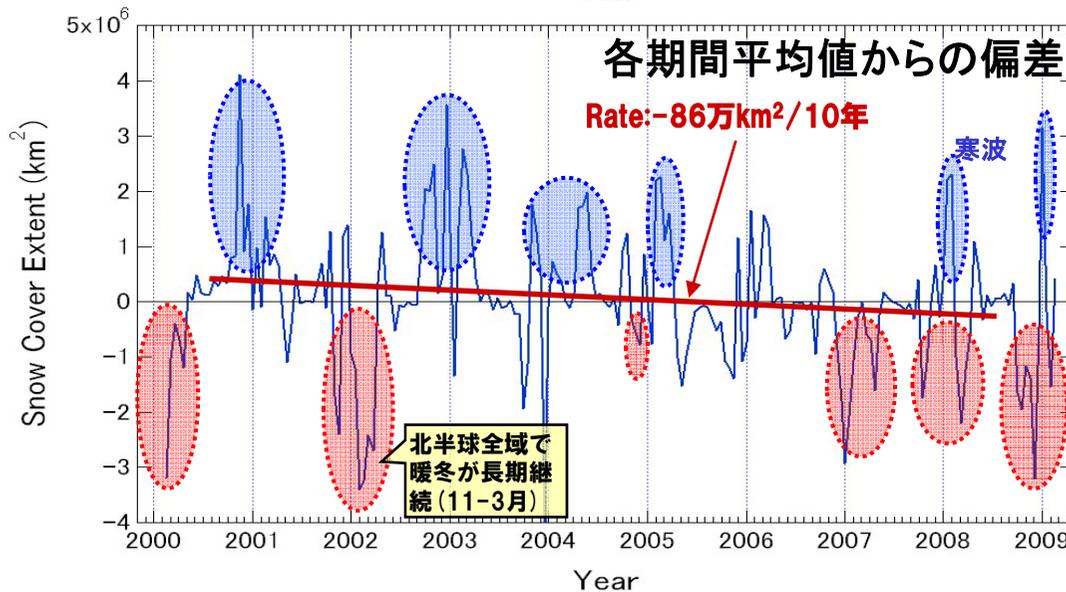
2007年8月の北極域 (TERRA/MODIS)

25年間の地球の変貌を客観的に捉える

最近9年間の北半球積雪面積の推移(2000-2008)



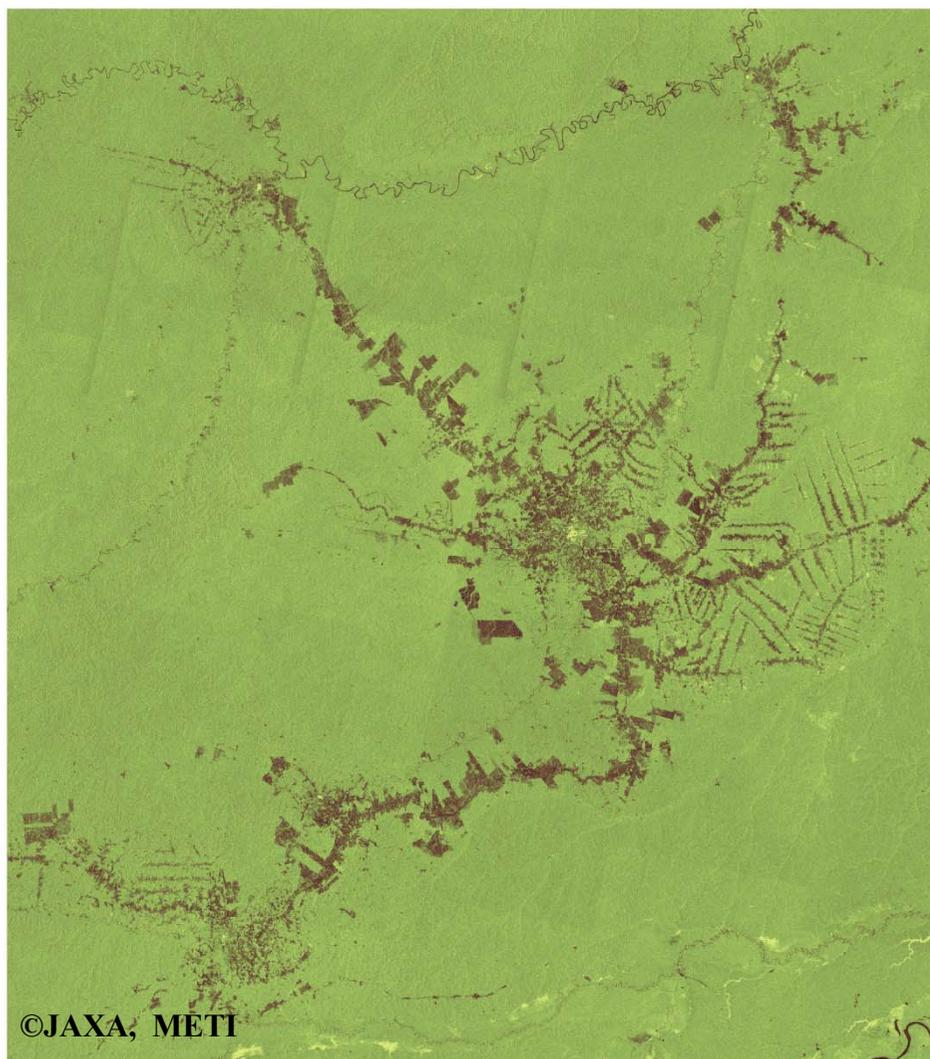
2008年4月の北半球
(MODIS True Color)



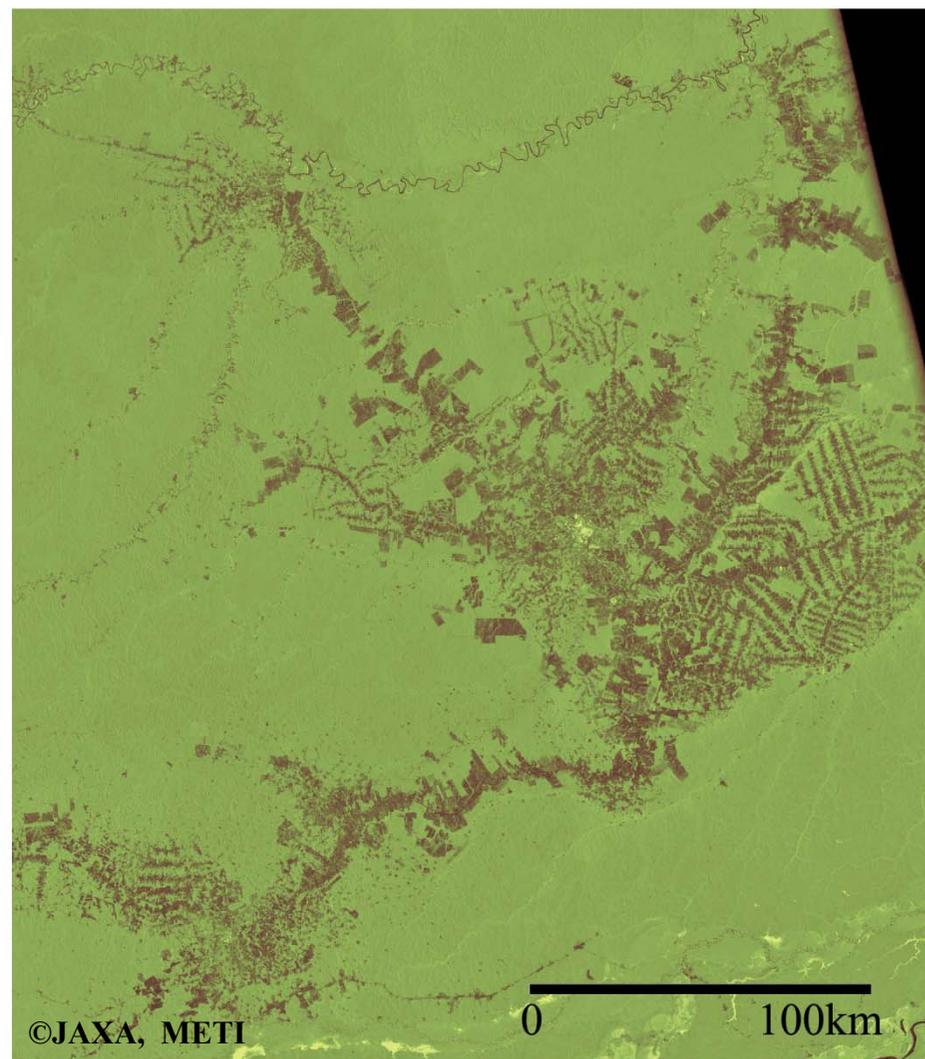
●積雪面積の経年変動

積雪面積の変動は、海水よりも振幅が大きい。2000, 02, 07年は暖冬となり、積雪面積が小さくなっている。一方、2001, 03, 04, 05年は寒く、積雪面積が大きくなっている。年毎の暖冬・寒冬のふらつきはあるものの、10年スケールで見ると積雪面積の減少傾向が明瞭。

熱帯地方の森林伐採の様子

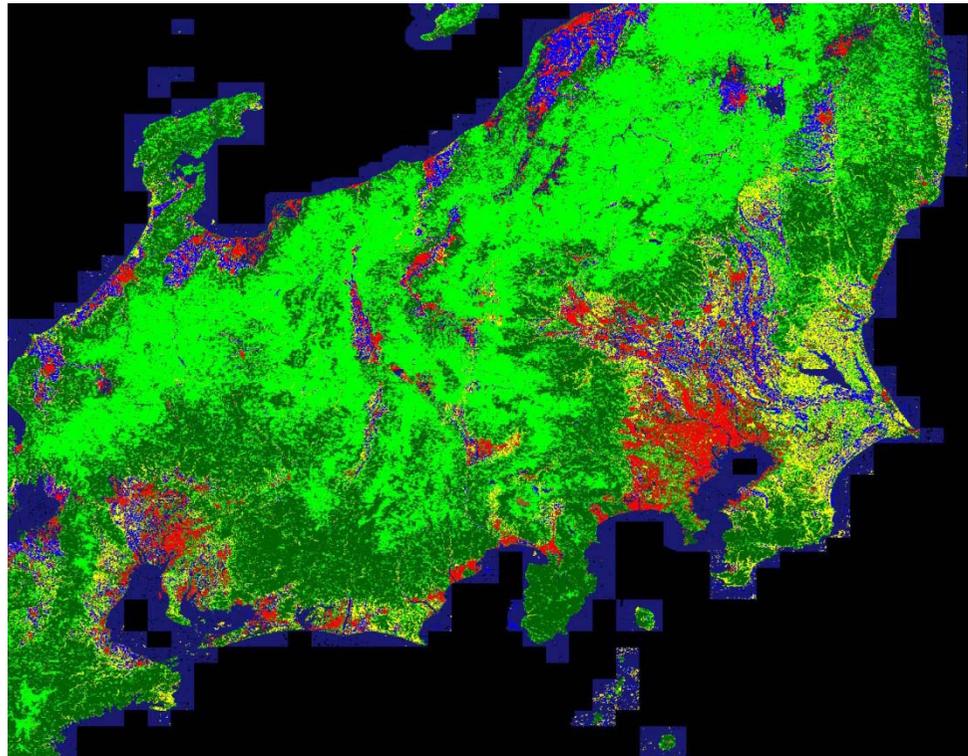


1995年「ふよう1号」SAR

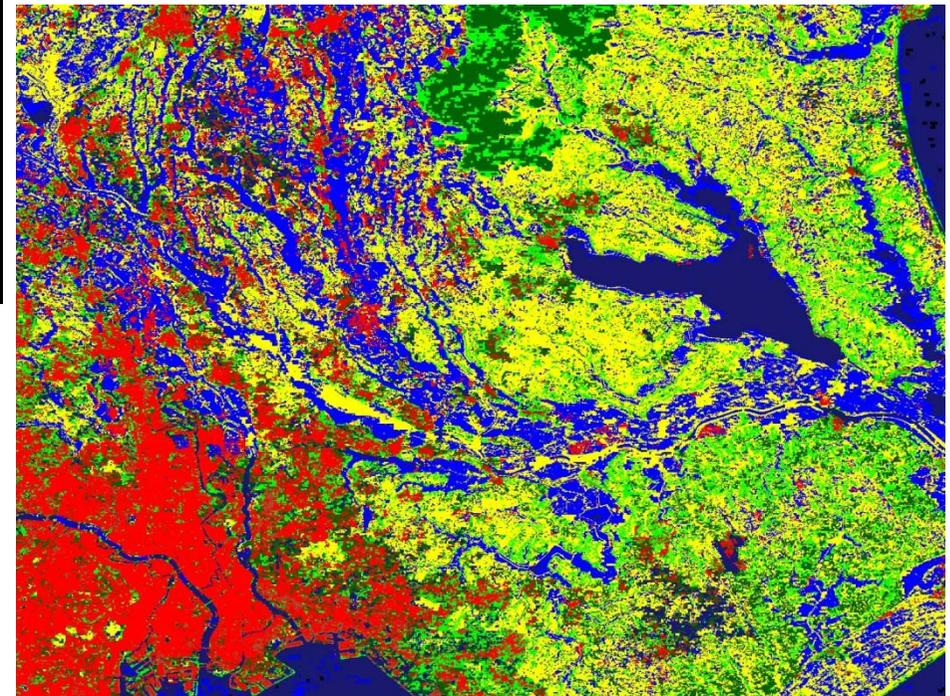


2006年「だいち」PALSAR

高精度土地被覆分類図



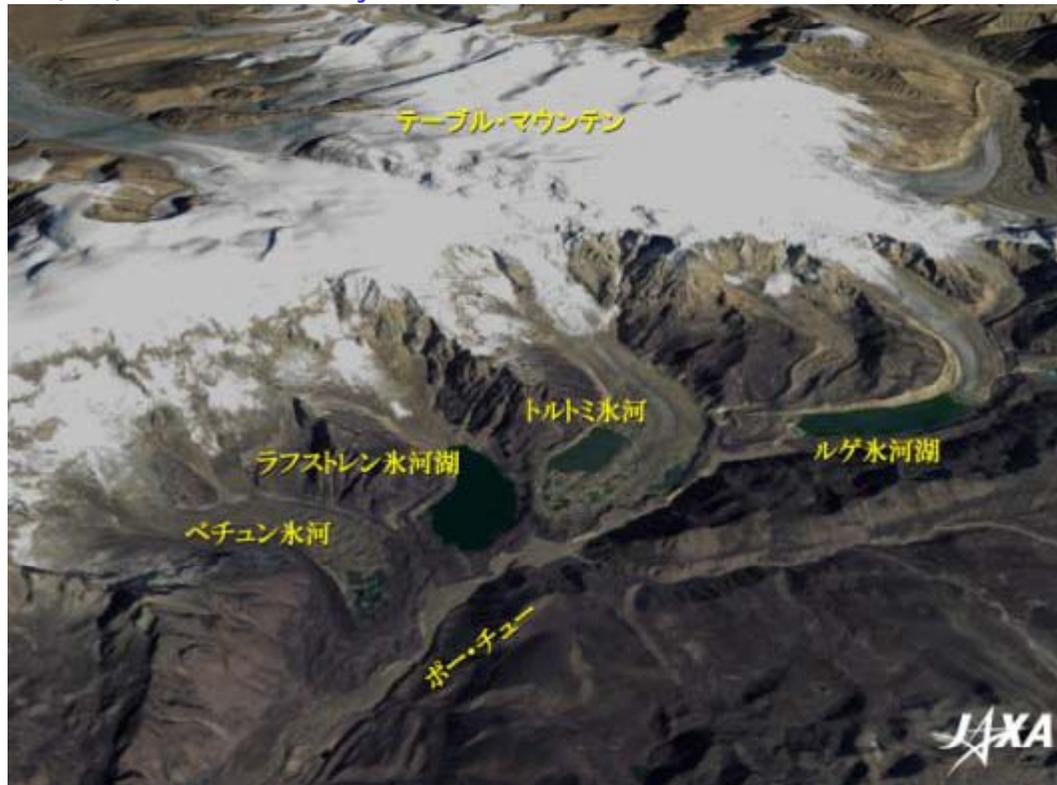
- カテゴリー
- 1 裸地, 砂地 Bare surface
 - 2 水体 Water
 - 3 都市 Urban
 - 4 水田 Paddy
 - 5 畑地 Crop
 - 6 落葉樹 Deciduous forest
 - 7 常緑樹 Evergreen forest
 - 8 雪水 Snow and ice
 - 9 その他 other



- AVNIR-2による高精度土地被覆分類図の試作
- AVNIR-2/ORIを大気補正(レイリー補正)し入力
 - 植生フェノロジー(季節変化)を今後考慮
 - 補助的にPALSARモザイク, 地形データを使用
 - 今年度中に国内全域を20m分解能で作成
 - 来年度以降, 東アジアへ領域を拡大予定
- ⇒ EORC横軸”生態系”研究グループと共同

東京, 千葉, 茨城, 栃木に渡る地域の拡大図

氷河湖融解にともなう決壊洪水 (GLOF)



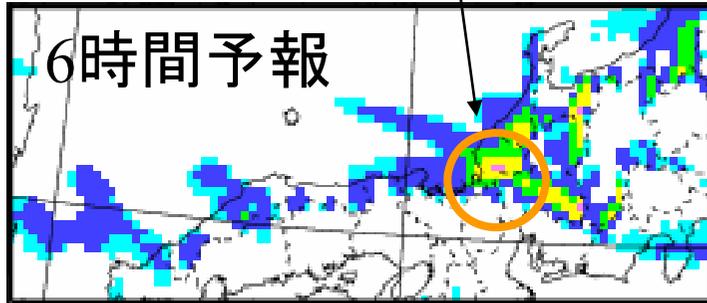
東西およそ2,400 kmに及ぶヒマラヤ山脈の東部に位置するブータン・ヒマラヤの氷河湖を南側の上空から見た様子を示しています。この画像は、2007年6月に地球観測衛星「だいち」が観測した標高データ（一部は他のデータで補完）を用いて、2007年12月に「だいち」が捉えた画像を鳥瞰図にしたものです。

ブータンの氷河湖の湖面面積の変化

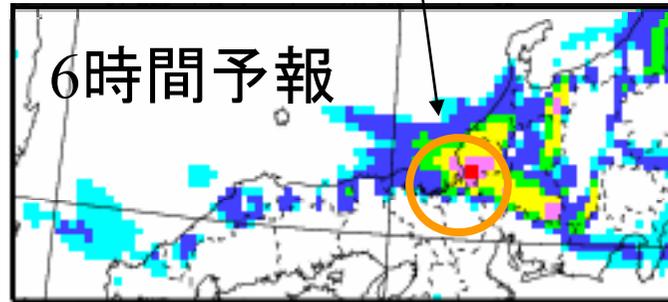
	ベチュン	ラフストレン	トルトミ	ルゲ
1993. 12. 27の面積 (ha)	1	127	0	118
1994. 11. 9の面積 (ha)	4	130	41	96
2007. 12. 26の面積 (ha)	18	126	88	127

天気予報での衛星データの利用

(衛星データ追加前)
豪雨予測低

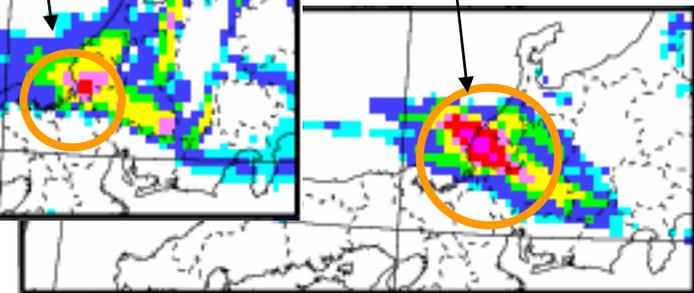


(衛星データ追加後)
豪雨予測あり



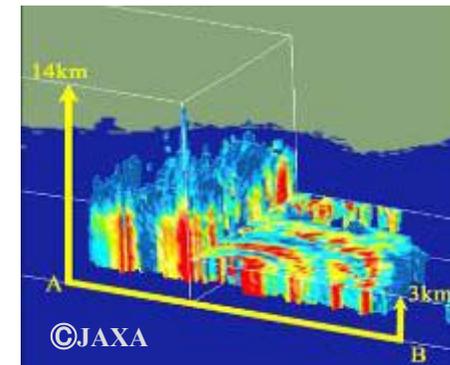
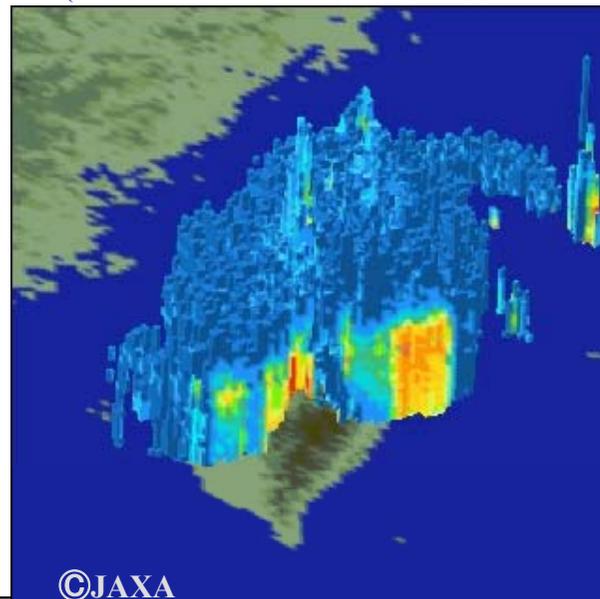
実際の
レーダーデータ

豪雨範囲大



2004年7月福井豪雨の事例

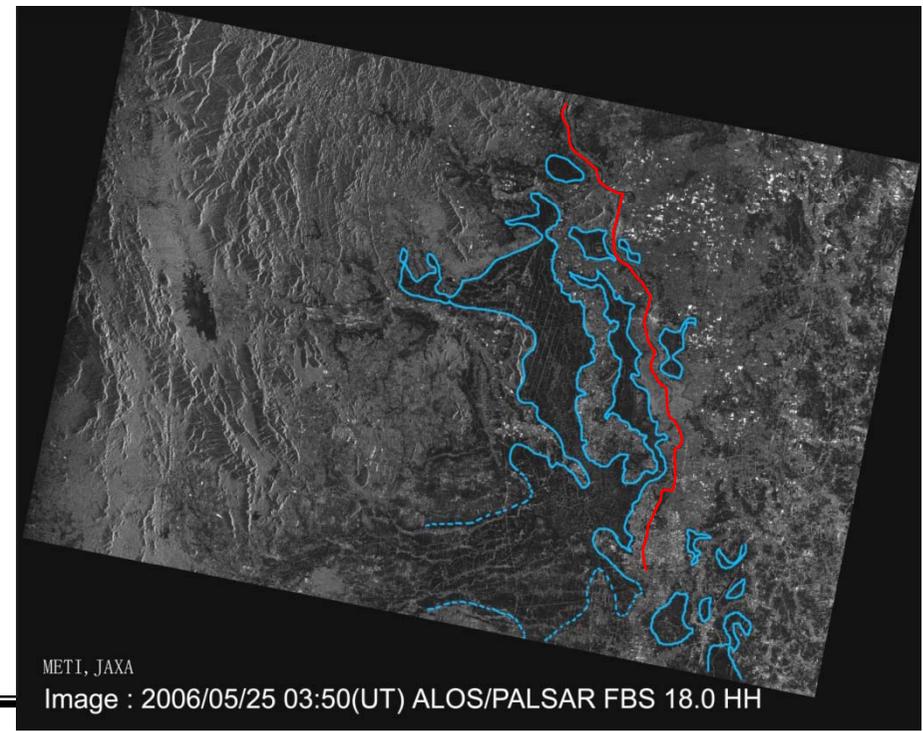
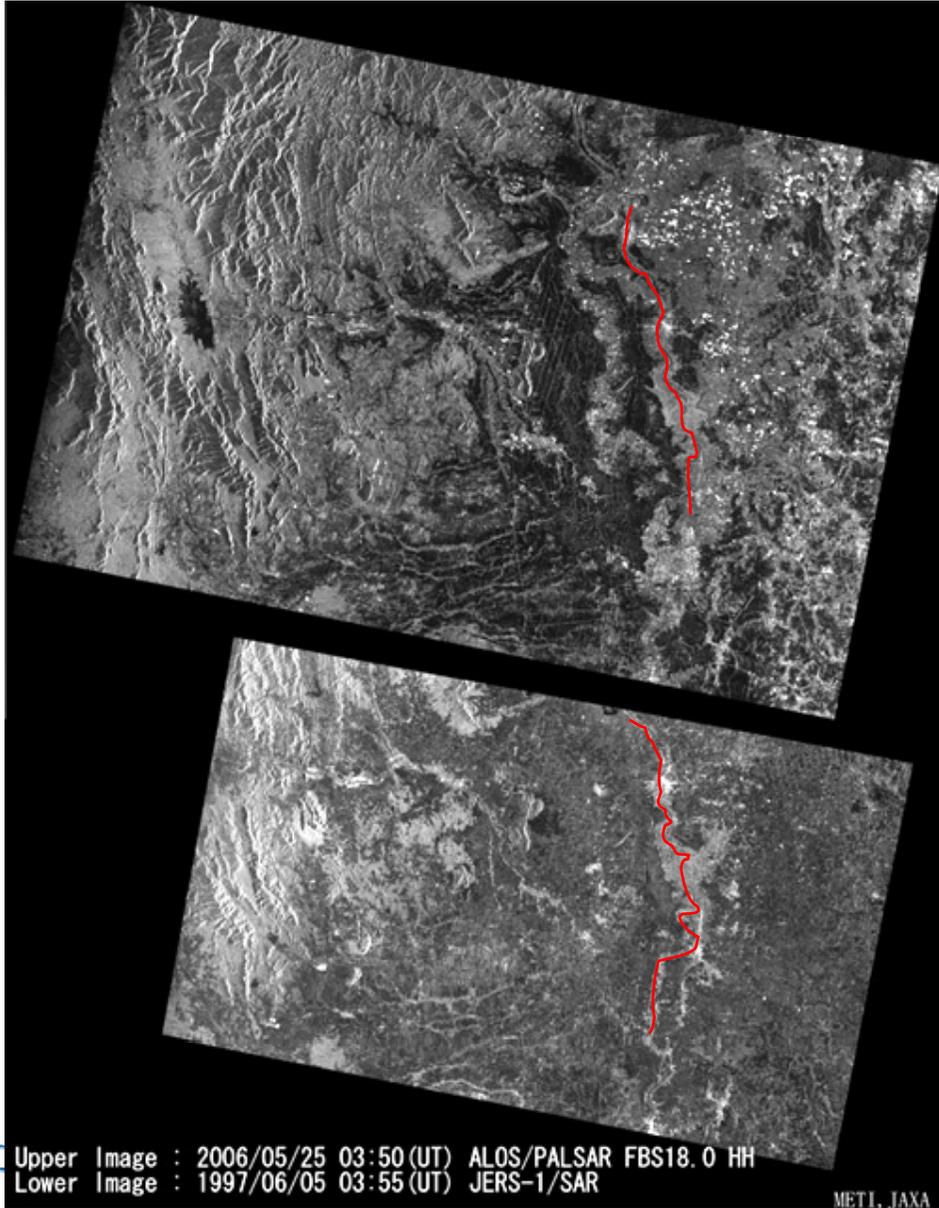
(本成果は、JAXAと気象庁の協力により得られた。解析は気象庁の実施による)



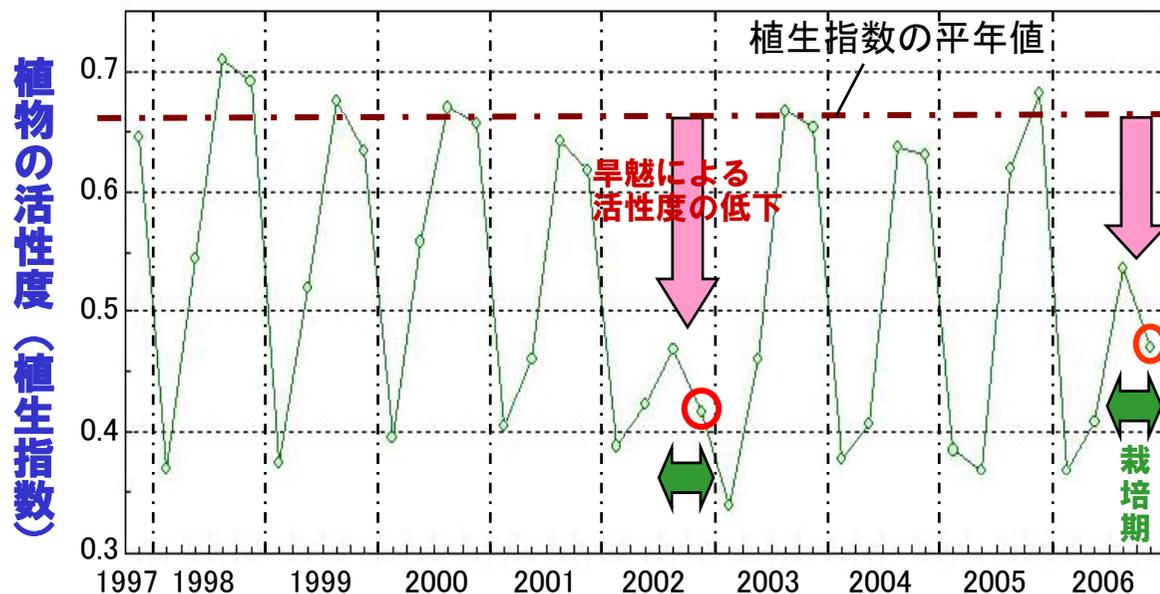
台湾に上陸した
台風8号の立体構造
2001年7月29日

洪水域の推定

2006年5月24日タイ北部洪水発生 → 5月25日緊急観測, 約20機関に提供



穀物の生育状況の観測

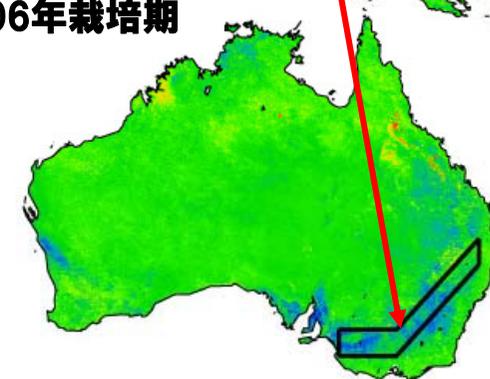


オーストラリア東部穀物地帯における植生指数の季節変動
(右図の黒線で囲んだ領域の植生指数をプロットしたもの)

2002年栽培期



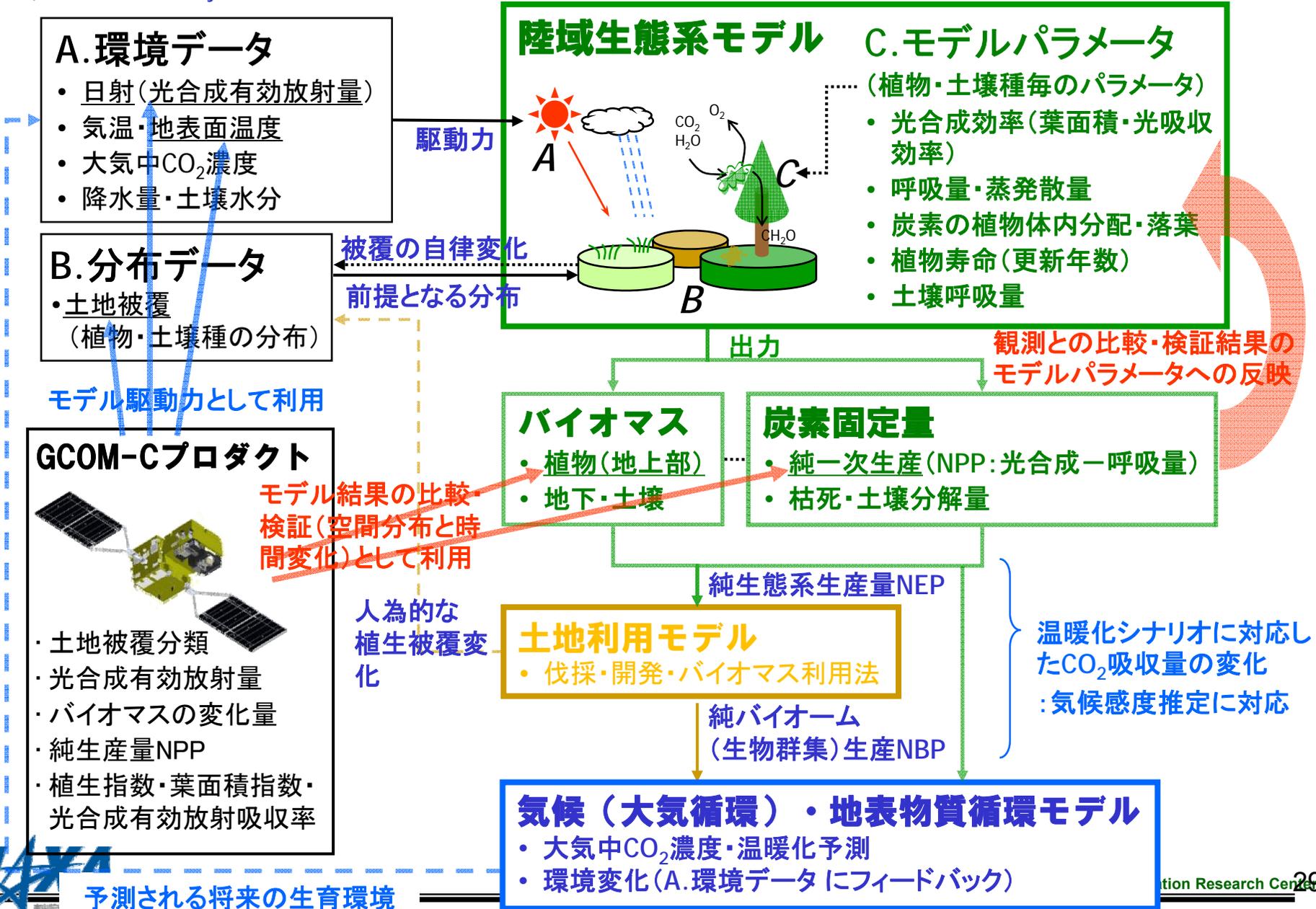
2006年栽培期



2002, 2006年の栽培期の植生指数偏差
SeaWiFS(1km分解能)を用いて作成

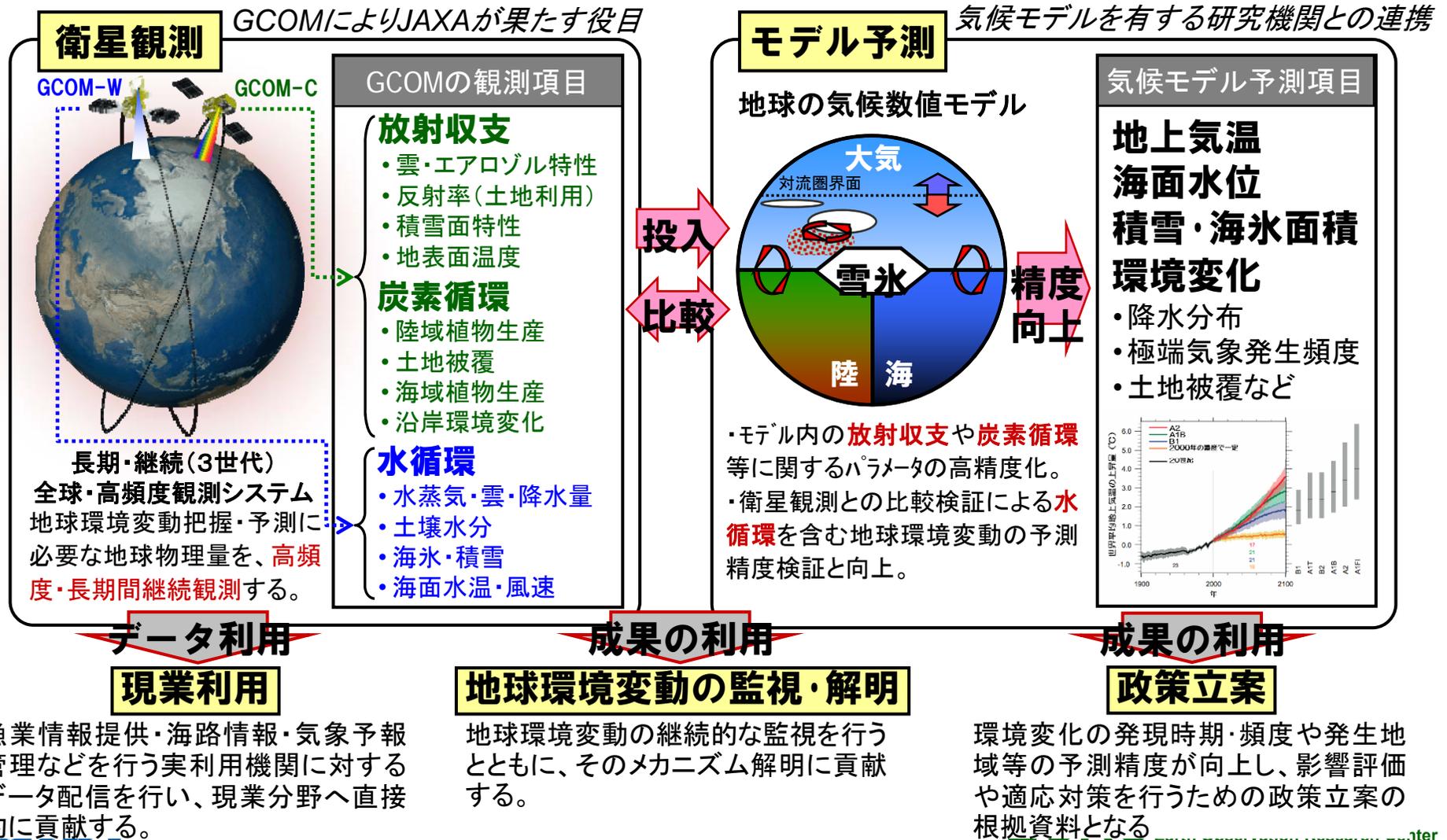
2006年のオーストラリア東部穀倉地帯では、深刻な早魃被害が発生し、小麦の収量減そして国際市場価格の高騰が報告された。過去10年間の同地域の植生指数の経年変動をみると、2002年にも小麦の収穫量が半減するような早魃があり、2006年と同様な植生指数の低下がみられた。どちらも太平洋赤道域にてエルニーニョの発生した年におきている。

陸域生態系数値モデルとの複合解析



環境変化予測の高精度化への貢献

- 将来の気温上昇量の正確な予測に必要な**放射収支**および**炭素循環**の変動メカニズム解明のため、気候変動観測 (GCOM-C) 衛星による**全地球規模での長期間継続的な観測・データ収集を行う**とともに、気候数値モデルを有する研究機関と連携し、**気候数値モデルによる気温上昇量の予測誤差低減と様々な環境変化予測の高精度化に貢献する**。

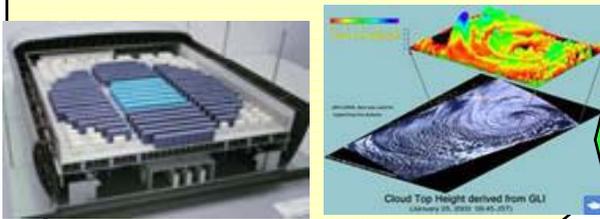


地球環境監視システムの構築 (GEOSS)

データ統合・解析システム

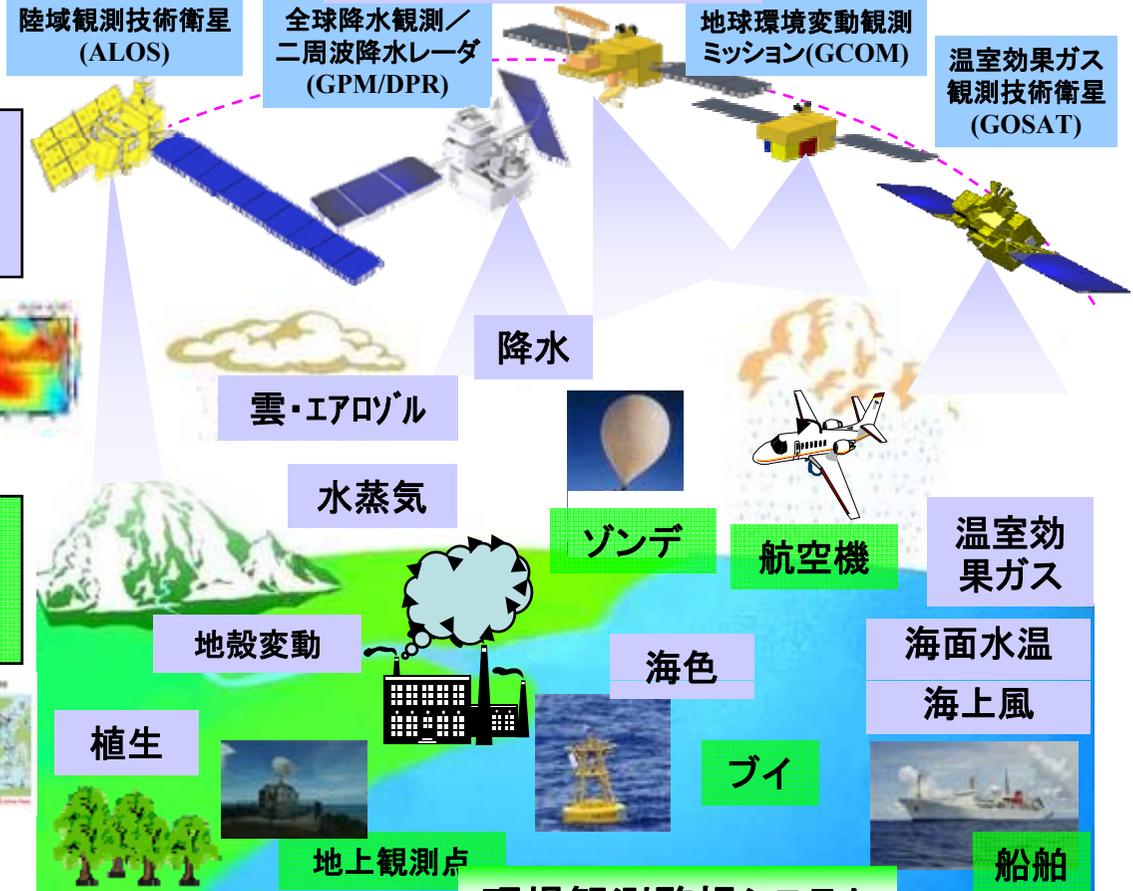
データから情報への変換

大型計算機等による
地球環境の解析・
シミュレーション



解析情報

衛星観測監視システム



社会利益分野



観測ニーズ

Research Center