

ブループラネット賞受賞記念講演
2013年10月31日 国連大学

日本における地球温暖化・気候変化予測 の研究を振り返る

松野 太郎

Blue Planet Prize Commemorative Lecture
October 31, 2013
At United Nations University

Looking Back at Research Projecting Global Warming and Climate Variance in Japan

Taro Matsuno

- ◆地球温暖化の科学と社会の認識(1970年代まで)
- ◆地球環境問題の社会的認知と気候変化予測研究の発展(1980年代以降)
- ◆日本の気候の特色である夏季の対流性降雨は
どうなるか？(最近の研究から)

- ◆Global Warming Science and Social Recognition
(Until 1970s)
- ◆Social Recognition of Global Environmental Issues
and the Expansion of Climate Change Prediction
Study (After 1980s)
- ◆Convective Rain in Summer and Its Futures as a
Characteristic of Japanese Climate (Recent studies)

◆地球温暖化の科学と社会の認識

1950~60年代
温暖化問題前史

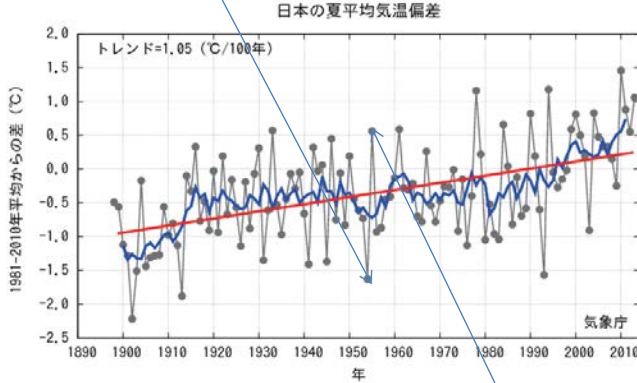
◆Global Warming Science and Social Recognition

1950s – 1960s
Prehistory of Global Warming Issues

1954,55年 日本で異常冷夏と暑い夏

1954年は異常冷夏

3月にビキニ環礁で行われた最初の水爆実験で成層圏に注入された塵のため日射が減少した可能性が指摘された。



翌55年の東大五月祭でそれを説明する
地球物理学科上級生

展示の図は火山噴火後の気圧偏差分布など



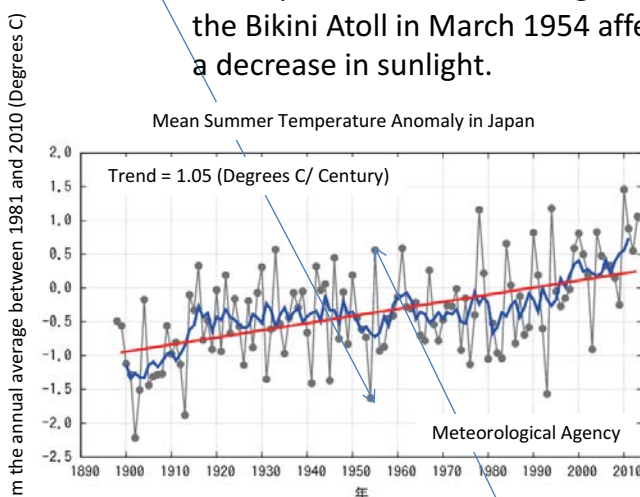
1955年からは梅雨で暑夏

「CO2の増加で梅雨はなくなった」
とのコメント(新聞か何か)

Abnormally Cool Summer and Hot Summer in 1954 and 1955 in Japan

Abnormally Cool Summer in 1954

It was pointed out that dust generated from the first thermonuclear test in the Bikini Atoll in March 1954 affected the stratosphere and possibly led to a decrease in sunlight.



Senior students at the University of Tokyo, Department of Geophysics explaining the possibility mentioned above at the school festival held in May 1955

Charts exhibited show the distribution of pressure deviation after volcanic eruptions, and other events.

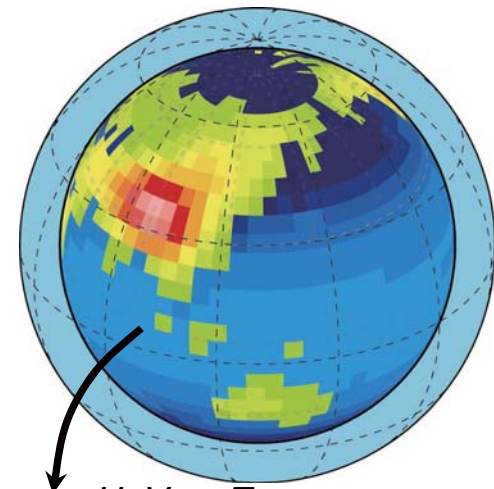


Less rain in the rainy season and hot summer in 1955

Someone published a report that the increase of CO2 extinguished the rainy season in Japan.

数値天気予報とは：明日の気象を物理の方程式で計算する

大気(・海洋・陸面)を3次元の格子に切る(離散化)



各格子で気圧・気温・風など物理量の値をきめる

この延長上に気候モデル、温暖化予測モデルがある

各格子点での物理量の時間的変化を方程式に従い計算する

$$\frac{dp}{dt} + \rho \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{du}{dt} - \frac{\tan \varphi}{a} uv - fv = F_\lambda - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\tan \varphi}{a} u^2 + fu = F_\varphi - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

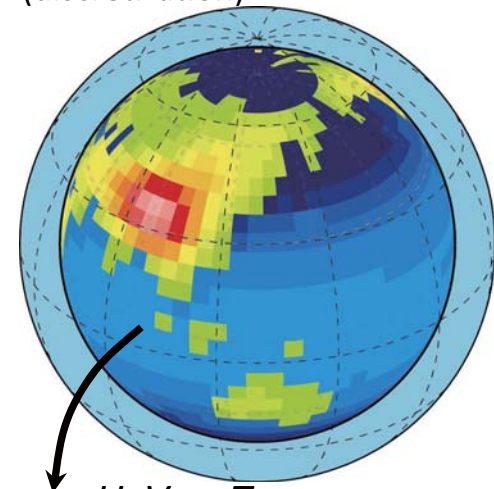
$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

$$\frac{dq}{dt} = -c - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_q}{\partial z}$$

$$p = \rho RT$$

Numerical Weather Prediction: Forecasting future weather phenomena utilizing physical equations.

Divide atmospheric air (ocean, and land) into three-dimensional grids (discretization)



Determine the values of physical factors such as pressure, temperature, and wind.

Calculate the temporal changes in physical quantity in each grid.

$$\frac{dp}{dt} + \rho \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{du}{dt} - \frac{\tan \varphi}{a} uv - fv = F_\lambda - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\tan \varphi}{a} u^2 + fu = F_\varphi - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

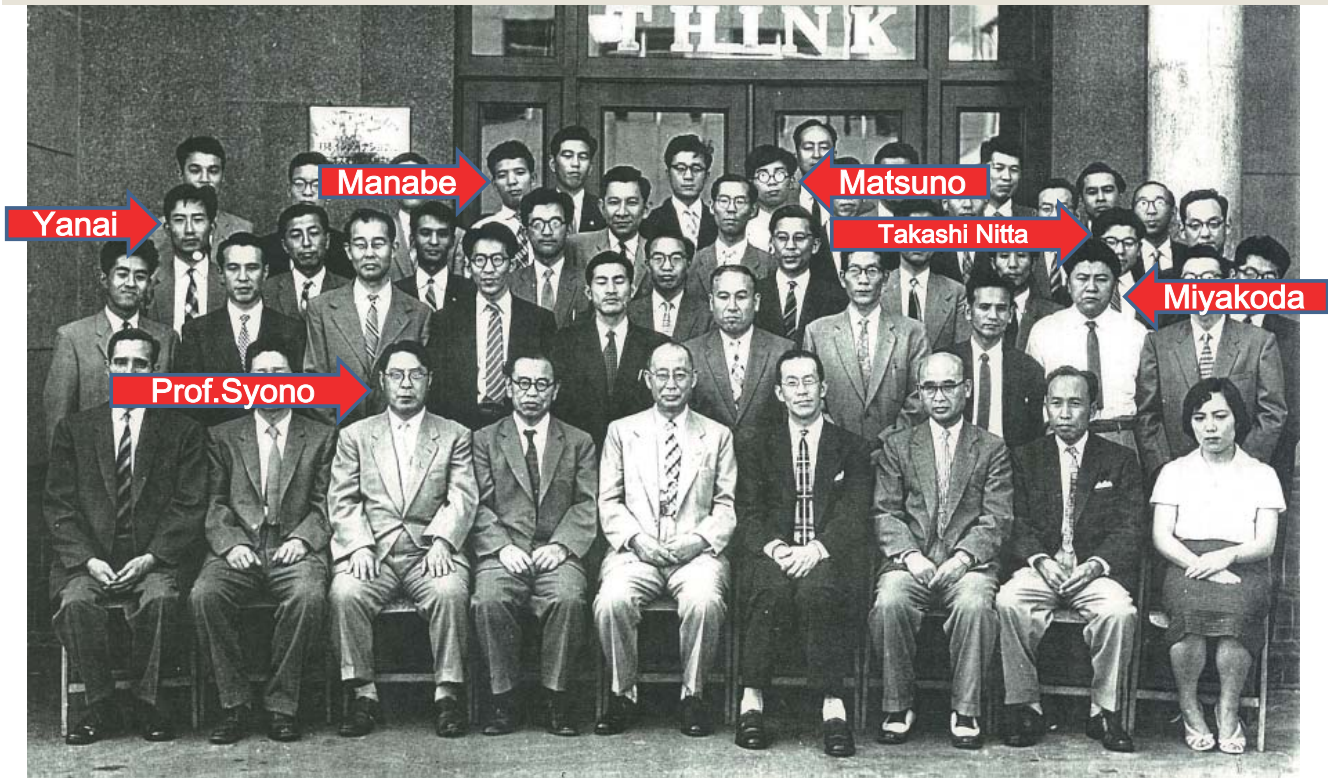
$$\frac{dq}{dt} = -c - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_q}{\partial z}$$

$$p = \rho RT$$

This will lead to a predictive model for climate and global warming.

そのころの気象学「数値天気予報(NWP)」研究全盛の後期 1957年大学院進学、59年 IBM704を導入し気象庁で業務開始

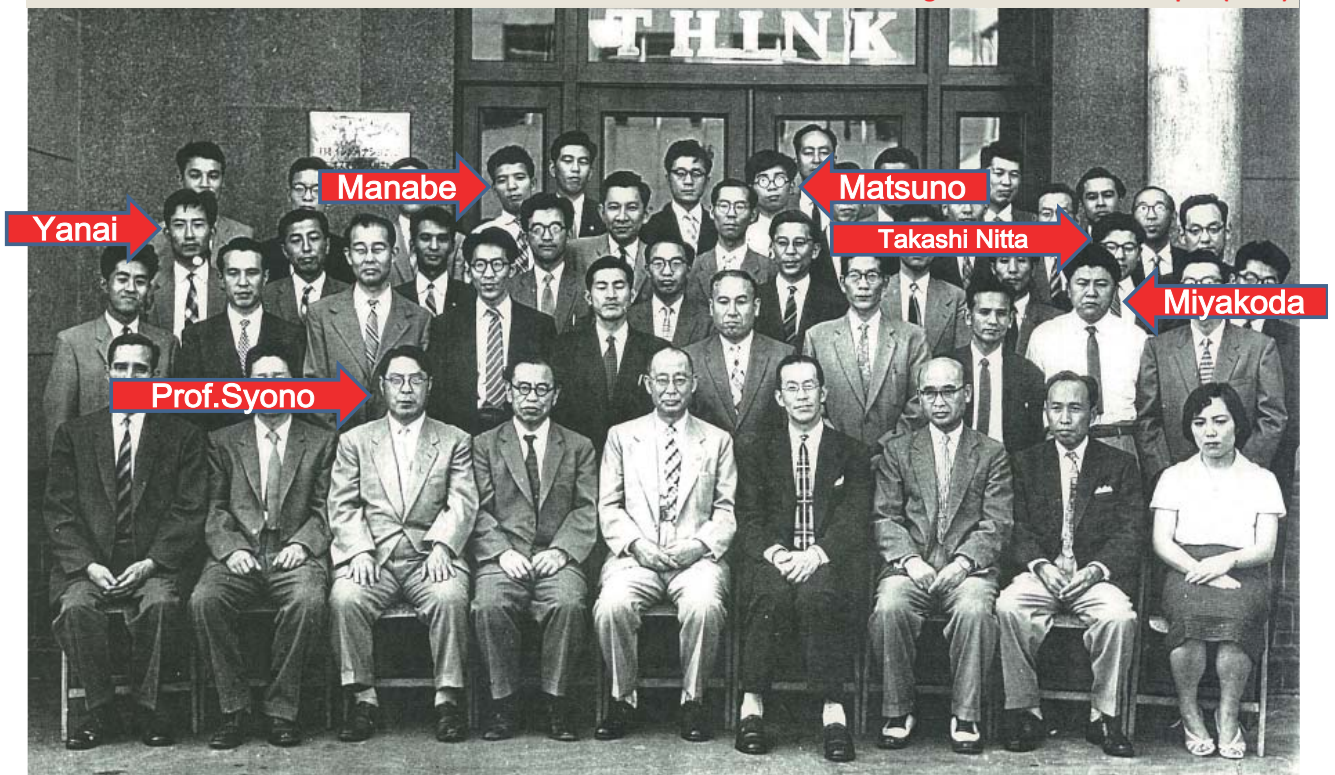
日本IBMでのプログラム講習会(58年)



In the Late Half of the Prime Time of the Numerical Weather Prediction (NWP) Research in Meteorology

Enrolled in graduate school in 1957/ Joined the Meteorological Agency in 1959
and worked with the IBM 704 data processing system.

Program seminar at IBM Japan (1958)



地球温暖化についての科学と社会 50~60年代

- ・1957,58年 国際地球観測年(IGY)

人工衛星打ち上げ(スプートニク、ソ連)、南極観測(日本)

成層圏ラジオゾンデ観測、赤外放射観測(気象庁、東北大)、

オゾン観測(東北大、田中正之さん)

アメリカ、スクリップス海洋研究所のR.Revelle, C.D.Keeling
ハワイ島マウナロアでCO₂の連続観測開始

- ・1956,57年 G. Plass CO₂温室効果再確認と氷河期の理論

R.Revell ほか氷河期理論への反論・否定(大気・海洋CO₂交換)

真鍋さん:「僕は依然ミランコビッチが正しいと思っている」

- ・1960年代 北半球(全球)の寒冷化が明らかになる

1962/63年 北半球各地で厳寒、日本では三八豪雪

Budyko, Michellら データ解析で1950年代以降の寒冷化示す

Global Warming Science and Society: 1950s to 1960s

- ・1957 & 1958: International Geophysical Year (IGY)

Artificial satellite launched (Sputnik in the Soviet Union), Antarctic exploration (Japan), stratospheric observation with radiosondes, infrared ray radiation observation (Meteorological Agency, Tohoku University), Ozone layer observation (Tohoku University, Prof. Masayuki Tanaka)

R. Revelle and C.D. Keeling of the Scripps Institution of Oceanography (U.S.) started continual monitoring of CO₂ at Mauna Loa on the island of Hawaii.

- ・1956 & 1957:

[G. Plass] Reconfirmation of the CO₂ Greenhouse Effect and Ice Age Theory

[R. Revell and others] Objection and disapproval of the Ice Age Theory

(CO₂ exchange between the atmosphere and ocean)

[Dr. Manabe] "I still agree with the Milankovitch theory."

- ・1960s: It was clarified that the northern hemisphere (or the entire earth) was cooling down.

1962 & 1963: Various regions in the northern hemisphere encountered intense cold.

Sanpachi heavy snowfall observed in 1963 in Japan.

[Budyko, Michell, et al.] Analyzed data and showed the cooling of the climate in and after the 1950s.

地球温暖化の科学 1960-70年代前半

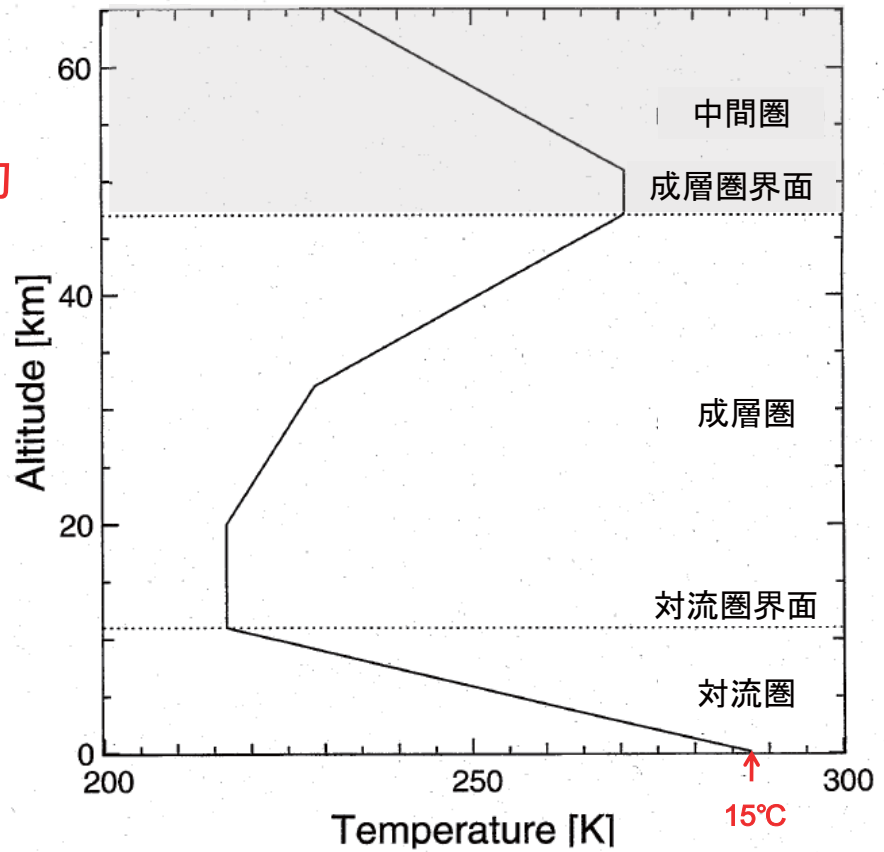
- 大気中CO₂の観測
 - 濃度変化のモニタリング——C. D. Keeling
 - 時間的・空間的变化の観測——Bert Bolin(1963,・・・)
- 温暖化理論の基礎＝真鍋博士の研究
 - ・大気の温度構造の理論=放射・対流平衡(Manabe, Strickler, 1964)
 - ・CO₂濃度の違いによる温度の変化(Manabe, Wetherald, 1967)
- 気候とその変化の数値モデリング＝GFDLのグループ
 - ・水循環を含む地球大気循環のモデル
(Manabe, Smagorinsky, 1965・・・)
 - ・大気・海洋結合モデルによる「気候」のシミュレーション
(Manabe and Bryan, 1969・・・)
- 理想化地形の地球でCO₂増加気候の数値実験
(Manabe, Wetherald, 1975)

Global Warming Science: 1960s – Early 1970s

- Observation of the atmospheric level of CO₂
 - Monitoring changes in concentration – C. D. Keeling
 - Observation of temporal and spatial changes – Bert Bolin (1963 etc.)
- The basics of global warming theory – Studies carried out by Dr. Manabe
 - Atmospheric air temperature structure theory = Radiative-convective equilibrium
(Manabe, Strickler, 1964)
 - Temperature change due to differences in CO₂ concentration
(Manabe, Wetherald, 1967)
- Numerical modeling of climate and its changes =
the group of Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)
 - Global atmospheric circulation model including water circulation
(Manabe, Smagorinsky, 1965, ...)
 - Simulation of climate utilizing the coupled ocean-atmosphere circulation model
(Manabe and Bryan, 1969...)
- Numerical experiment on the effect of increased CO₂ on climate on the earth
with idealized geographical features (Manabe, Wetherald, 1975)

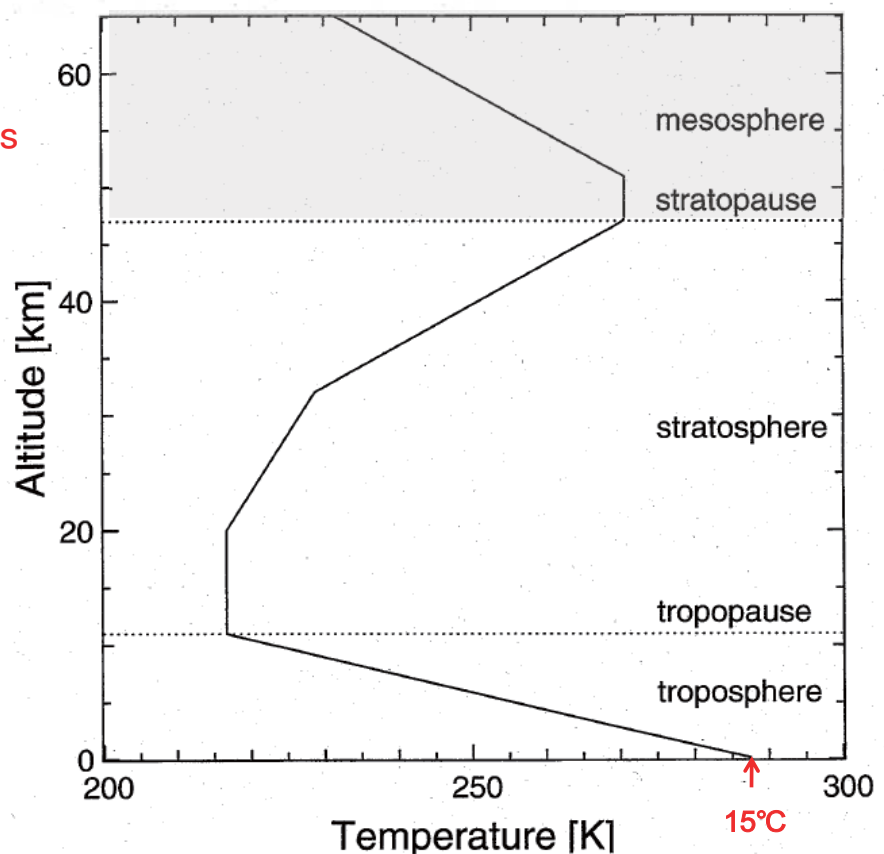
大気温度の鉛直構造

どうしてこうなっているのか？
気象学の古典的問題



Vertical Structure of Air Temperature

Classical Problems
in Meteorology



気象学の古典的問題に対する最初のそして決定的理論
(Manabe and Strickler, 1964)

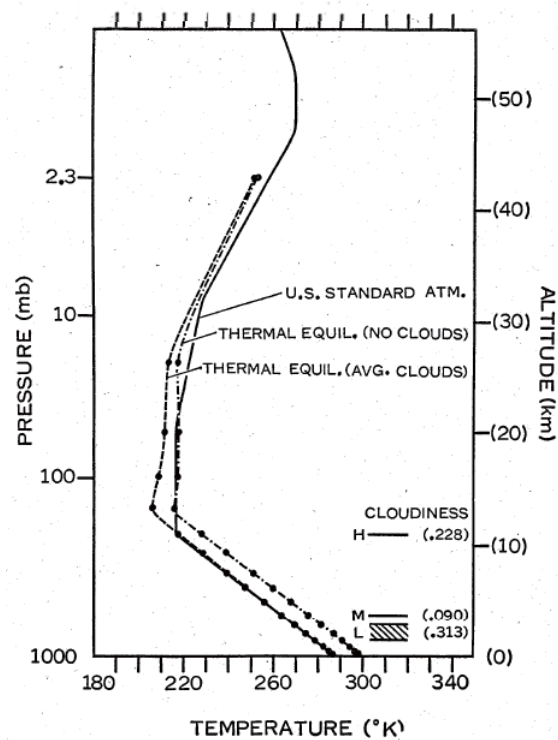


FIG. 8a. Dash-dotted and dashed lines show the thermal equilibrium of the atmosphere with and without cloudiness. The critical lapse rate for convection is 6.5 deg km⁻¹. The cloud amounts and cloud heights are shown on the right hand side. The solid line shows the U. S. Standard Atmosphere.

First and Conclusive Theory of Classical Problems in Meteorology
(Manabe and Strickler, 1964)

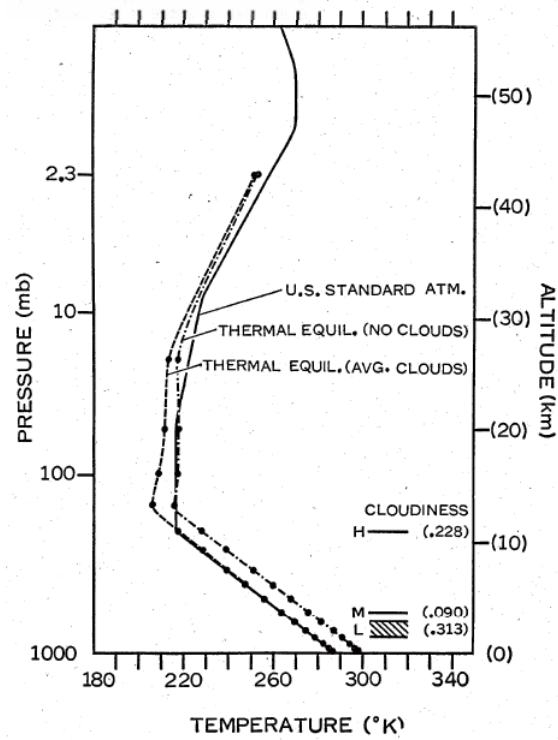


FIG. 8a. Dash-dotted and dashed lines show the thermal equilibrium of the atmosphere with and without cloudiness. The critical lapse rate for convection is 6.5 deg km⁻¹. The cloud amounts and cloud heights are shown on the right hand side. The solid line shows the U. S. Standard Atmosphere.

放射・対流平衡における各成分の役割

- ◆CO₂が無かったら地表温度は10℃低い
- ◆成層圏の高温はオゾンによる紫外線吸収のため

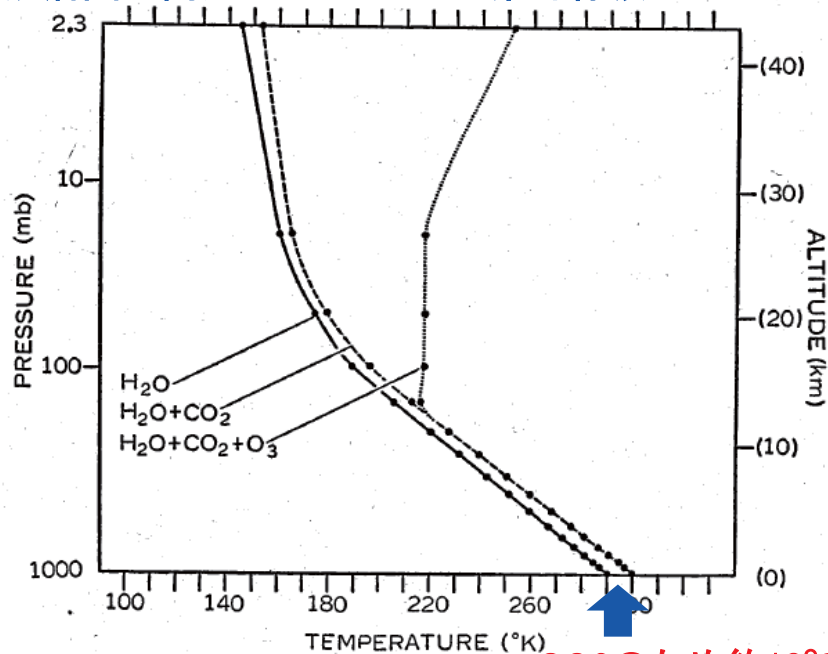


FIG. 6c. Thermal equilibrium of various atmospheres which have a critical lapse rate of 6.5 deg km^{-1} . Vertical distributions of gaseous absorbers at 35N, April, were used. $S_e = 2 \text{ ly min}^{-1}$, $\cos \bar{\zeta} = 0.5$, $r = 0.5$, no clouds. **CO₂のため約10℃高温**

Role of Individual Component in Radiative-Convective Equilibrium

- ◆ Earth surface temperature would be 10 degrees C lower without CO₂
- ◆ Stratosphere has a high temperature because of ultraviolet absorption by the ozone layer

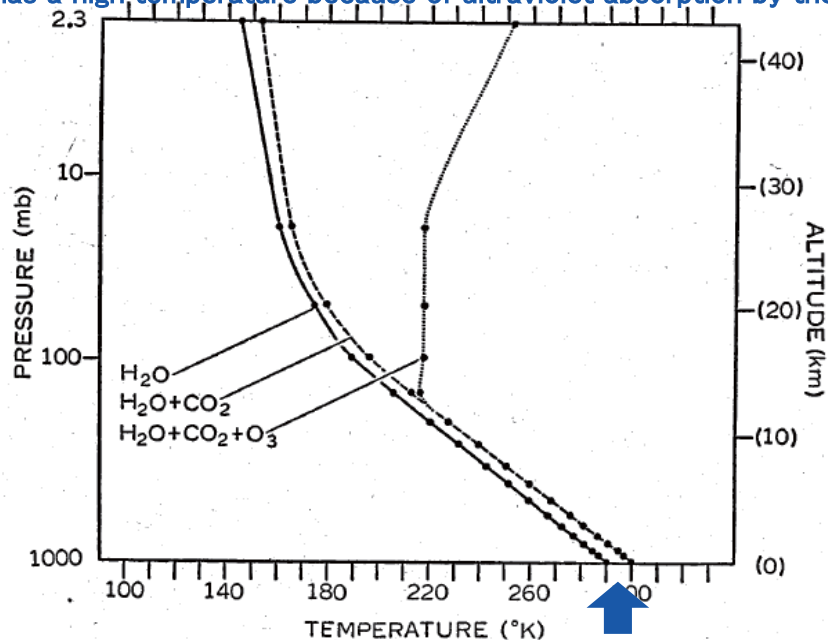


FIG. 6c. Thermal equilibrium of various atmospheres which have a critical lapse rate of 6.5 deg km^{-1} . Vertical distributions of gaseous absorbers at 35N, April, were used. $S_e = 2 \text{ ly min}^{-1}$, $\cos \bar{\zeta} = 0.5$, $r = 0.5$, no clouds. **Approx. 10 degrees C higher due to CO₂**

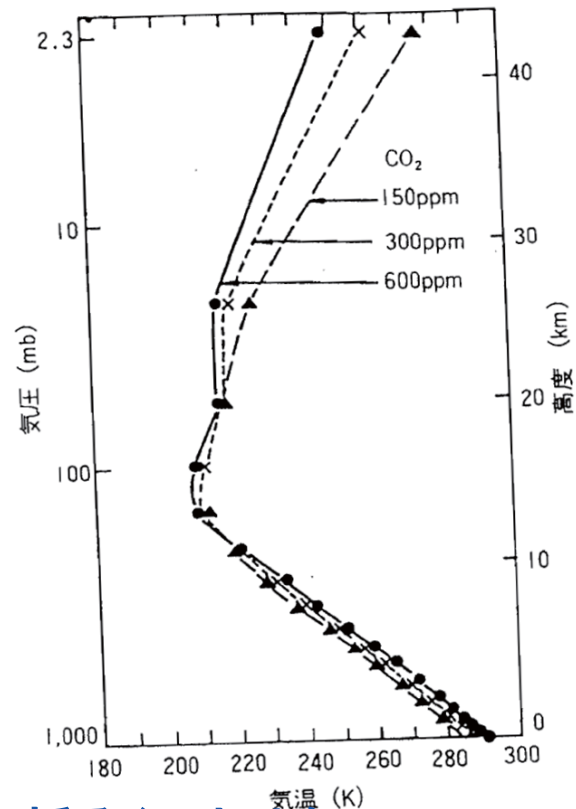
放射・対流平衡理論 Manabe & Wetherald (1967)

CO₂濃度を変えた時の平衡温度
(地表面)の変化

CO ₂ 濃度 (ppm)	水蒸気量 固定	相対湿度 固定
150	289.80	286.11
300	291.05	288.39
600	292.38	290.75

CO₂ 2倍により2.4°C高温に
(相対湿度不変と仮定)

現在の温暖化理論の基礎で揺るぐことはない

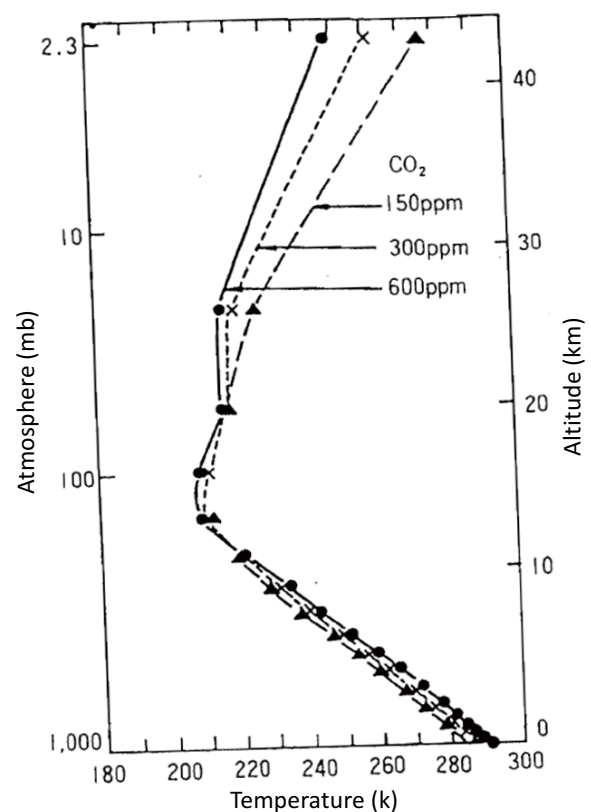


Radiative-Convective Equilibrium Theory by Manabe & Wetherald (1967)

Change in equilibrium temperature
(ground surface) along with the
change in CO₂ concentration

CO ₂ concentration (ppm)	Water vapor volume (fixed)	Relative temperature (fixed)
150	289.80	286.11
300	291.05	288.39
600	292.38	290.75

A doubling of the CO₂ level raises
surface temperatures by 2.4 degrees C.
(Based on an assumed absence of
change in relative humidity)



The validity of current global warming theory remains unchallenged.

**1960 –70年代 寒冷化と自然の気候変動、
一方、地球環境問題の芽が出現**

**1960 – 1970s Climate cooling and change
while global environmental issues began emerging**

1960-70年代前半 北半球を中心に寒冷化

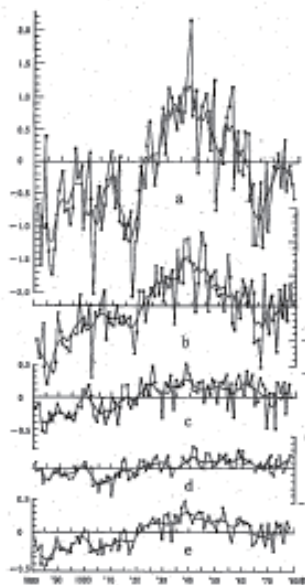


図 2.24 北半球緯度帯別年平均気温と 5 年移動平均。1881-1975 年平均からの偏差 (ビンニコフら, 1980)

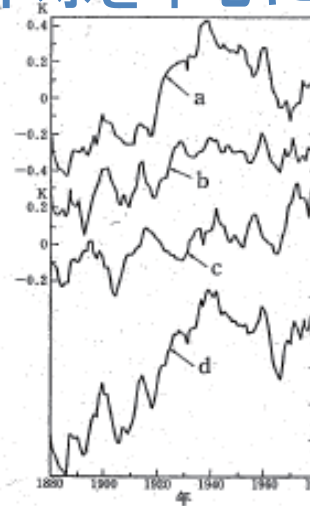
ビンニコフ

北半球高緯度

北半球中緯度

北半球低緯度

北半球



ハンセンら

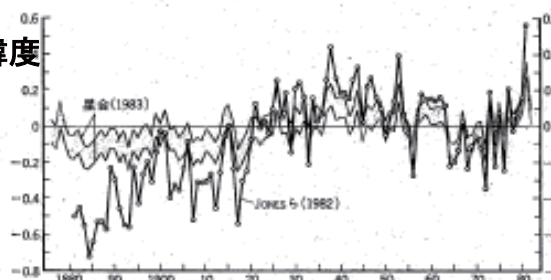
北半球中・高緯度

北半球低緯度

南半球中・高緯度

全球

図 2.25 三つの緯度帯と全球平均の気温変化。5 年移動平均 (a) 北半球中・高緯度, (b) 低緯度, (c) 南半球中・高緯度, (d) 全球。縦軸の日盛の異なることに注意。(ハンセンら, 1981)



山元龍三郎

北半球陸上

図 2.28 最近 100 年間の北半球年平均地上気温の変動の比較。太線はジョーンズ他 (1982)。縦線は山元・星合 (1980, 1984) に 1976-1982 年の部分を補足し 68% の信頼限界を示す。いずれも 1951-1980 年の平均値からの偏差で表わす。(山元, 1984)

1960 - First half of 1970s Climate cooling in the northern hemisphere

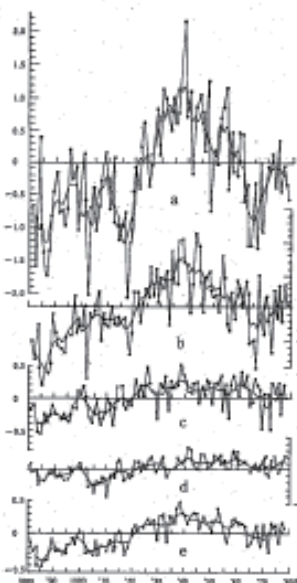


図 2.24 北半球緯度帯別年平均気温と 5 年移動平均。1881-1975 年平均からの偏差 (ビンニコフら, 1980)

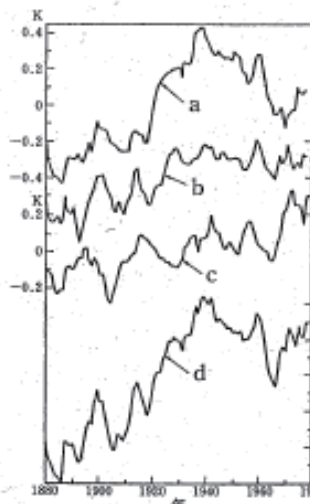
Vinnikov

High-latitude areas of the northern hemisphere

Mid-latitude areas of the northern hemisphere

Low-latitude areas of the northern hemisphere

Northern hemisphere



Hansen et al.

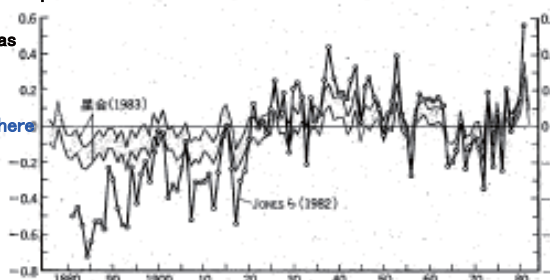
Mid- and high-latitude areas of the northern hemisphere

Low-latitude areas of the northern hemisphere

Mid- and high-latitude areas of the southern hemisphere

Entire earth

図 2.25 三つの緯度帯と全球平均の気温変化。5 年移動平均 (a) 北半球中・高緯度, (b) 低緯度, (c) 南半球中・高緯度, (d) 全球。縦軸の日盛の異なることに注意。(ハンセンら, 1981)



Ryuzaburo Yamamoto

Land in the northern hemisphere

図 2.28 最近 100 年間の北半球年平均地上気温の変動の比較。太線はジョーンズ他 (1982)。縦線は山元・星合 (1980, 1984) に 1976-1982 年の部分を補足し 68% の信頼限界を示す。いずれも 1951-1980 年の平均値からの偏差で表わす。(山元, 1984)

1960 – 70年代 寒冷化、気候変動が話題に

- 1960–70年代前半 北半球を中心に気候寒冷化の懸念
1900年くらい(以前)までさかのぼって全球規模のデータによる解析可能に⇒1940–50年をピークに下降傾向わかる
Budyko, Mitchellらデータ解析で1950年代以降の寒冷化示す
 - 異常低温、大西洋の海水南下、氷河後退の停止、etc
 - 1962/63年 北半球各地で厳寒、日本では三八豪雪
 - 原因不明、太陽活動の低下(1960年ピーク)とするものが多い
J. Eddyマウンダー極小期の提唱⇒NCARで太陽のモデル開発
近年の温暖化懐疑論(スベンスマルク)のもと: Dickinson(1975)
 - 世界各地大気汚染による日射量減少の可能性
- 各地の異常気象への関心が高まる
気象庁 1974年「異常気象レポート」No 1 発行

1960 – 1970s Climate cooling and change were in the news

- 1960 – First half of the 1970' s: Anxiety about climate cooling in the northern hemisphere.
It became possible to analyze data for the entire planet traced back to around 1990.
→ It revealed a downward trend in temperature from a peak in the 1940' s to 1950s.
Budyko and Mitchell et al. demonstrated climate cooling in and after the 1950s through data analysis.
 - Unusually low temperature, southward movement of ocean ice in the Atlantic Ocean, cessation of deglaciation, etc.
 - Severe coldness in the northern hemisphere (San-pachi Heavy snowfall in Japan too) in 1962 and 1963
 - Cause of climate cooling unknown, or thought to be lowering of solar activity (peak in 1960)
J. Eddy introduced the Maunder Minimum theory.
→ Development of the NCAR climate system model
Recent skepticism about global warming (Henrik Svensmark): Dickinson (1975)
 - Possibility of reducing the amount of solar radiation due to air pollution throughout the world
- Increasing interest in unusual weather in every corner of the world

The Meteorological Agency published its Unusual Weather Report Vol.1 in 1974.

➤ 社会の異常気象への関心から短期気候変動の研究盛んに
異常気象が増えたわけではなく、産業や生活圏の拡大で
社会が気象の揺らぎに対して敏感になった

エルニーニョとその影響(1972年イベント、76年/77年の寒冬)
テレコネクション、
ブロッキング、
天候レジーム、大気循環の多重平衡・・・

現在も異常気象の解説に現れるキーワードの関係する現象の
研究が盛んにおこなわれるようになった。(70年代半ば以降)

エルニーニョとその影響に関しては、「大気・海洋結合システム
の振る舞い」として相当理解は進みモデリングも進歩した

しかし、多くの自然の気候変動のメカニズムについて：
理解とモデルによる予測は依然未完成

➤ Increasing social interest in unusual weather accelerated research on
short-term climate change

It is not because unusual weather increased, but because society became
more sensitive to climate change due to the expansion of industry and living
sphere.

El Nino and its influence (El Nino in 1972/ Severe coldness in 1976 and 1977)
Teleconnection,
Atmospheric blocking,
Global climate regime, multiple equilibrium of the atmospheric circulation, etc.

The frequency of research on the phenomena related to the keywords listed in the
explanation on unusual weather being carried out has increased.
(in and after the 1970s)

The influence of El Nino was considered behavior explained by the coupled ocean-
atmosphere circulation model, and the modeling proceeded.

However, the majority of climate change mechanisms have yet to be completely
understood and prediction models have yet to be completed.

気象学・気候学の新しい流れ「世界気候研究計画」

◆ 全球大気研究計画 (Global Atmospheric Research Program, GARP)

1960年代 電子計算機による数値天気予報と人工衛星観測が実現
⇒ 人工衛星で常時地球全体の気象を監視しつつ計算機の中の
モデル大気でそれをシミュレートし、将来を予測するシステムを構築
1967-79年に実施(「ひまわり」打ち上げ ⇒ **現在の天気予報が実現**)

気象の長期の変化、冷夏・暖冬など年ごとの変化を数値天気予報と同じように物理法則に基づき方程式をコンピュータで解いて予測

「気候変動予測」が次の目標

◆ 世界気候研究計画 (World Climate Research Program, WCRP)

1979年「世界気候会議」で決定 1979年一現在 実施中

- 長期の気象は大気のみでは決まらない 海洋の影響(例エルニーニョ)
⇒ 海洋も物理の方程式に従って計算、さらに陸地の状態も計算
⇒ 大気・海洋・陸面・植生からなる「気候システム」の変動メカニズム
温暖化・環境問題を念頭に置くが主題は自然の気候変動機構の解明
• 「気候システムのモデルが出来れば温暖化予測は応用問題」

World Climate Research Program (WCRP) – A new trend in meteorology and climatology

◆ Global Atmospheric Research Program (GARP)

In the 1960s, numerical weather forecasting had become possible with the advent of electronic computers while weather observation by satellite had become a reality.

⇒ Establishment of a forecasting system that monitored weather with satellites and simulated weather with computer model atmospheres. Between 1967 and 1979, the system was actually used.
(Weather satellite Himawari was launched.) ⇒ **Realizing current weather forecasting**

Data on long-term changes in weather and changes by year (cool summers, warm winters, etc.) are analyzed by computers using physical principles, the same as numerical weather forecasting, for accurate forecasting.

Next goal is to forecast climate change

◆ World Climate Research Program (WCRP)

Initiated in 1979 by the World Climate Conference Since 1979, it has been implemented.

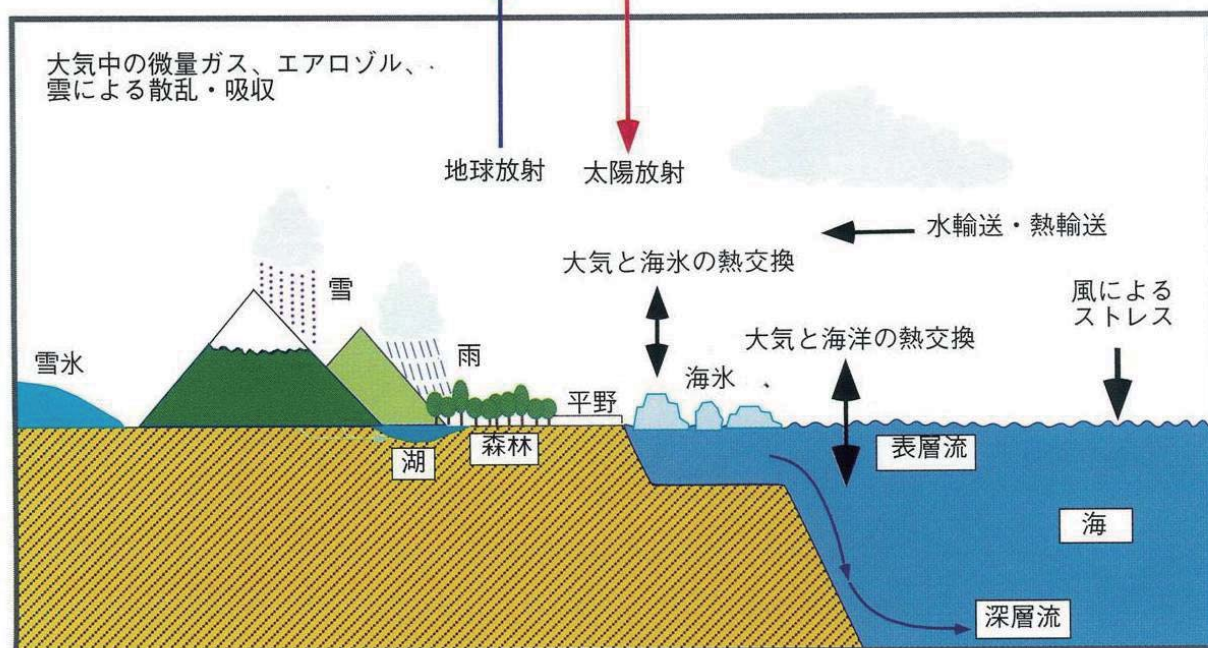
- Long-term weather is determined not only by the atmosphere, but also by oceanic influences (e.g. El Nino)
⇒ Oceanic influences and conditions on the earth's continents are also calculated utilizing physical equations.
⇒ Mechanism of changes in the climate system includes the atmosphere, oceans, continents, and flora.

Keeping global warming and other environmental issues in mind; however, focus on the clarification of climate change mechanisms.

- If we can establish a climate system model, we can apply the basics to global warming forecasting.

気候システム

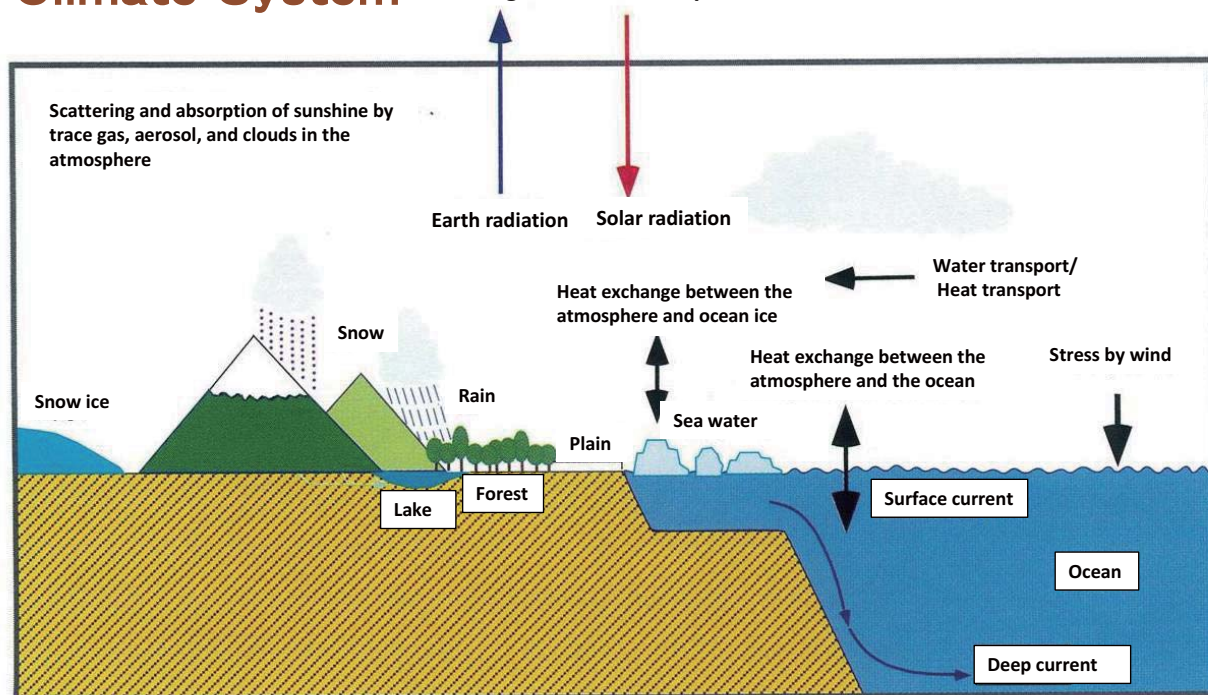
「気象」の平均である「気候」には、大気に加え海洋、陸域の変動が影響する



気候変動の予測には天気予報のためのモデルを拡張し、大気に加え海洋・陸面・雪氷の変化を支配する法則に基づき将来の状態を計算する

Climate System

Climate, the average of weather phenomena, is influenced by changes in the atmosphere, oceans, and conditions on the continents.



In order to forecast climate change, it is necessary to expand the weather forecasting model and calculate future conditions based on the principles that control the changes in atmosphere, oceans, land, and snow and ice.

70年代 地球環境問題の芽が出現、科学からの警告

1971年 Man's impact on climate (MIT Press)発行

1972年 国連 環境人間会議 温暖化問題にも触れる

1972年 米国運輸省(DOT) 超音速機排気(NOX)のオゾン層
影響評価プログラム開始(P. Crutzenほか指摘)

松野、最初の会合で成層圏力学の講演 小川、オゾン化学モデル開発
超音速機計画は別の理由で中止(経済的理由?)

1974年 CFCからの塩素によるオゾン減少の可能性(Rowland, Molina)
米国NASAを中心に研究続き、成層圏大気の化学飛躍的進歩

1979年 米国科学アカデミー、温暖化に関する“Charney Report”

CO_2 2倍で $\Delta T = 3^\circ\text{C} \pm 1.5^\circ\text{C}$

Manabe(GFDL)とHansen(GISS)の結果をもとに判断

温暖化の科学、日本では:

1950年代より 東北大・山本義一教授ほか CO_2 赤外放射の基礎研究

70年代 山本義一、田中正之:エアロゾルによる散乱⇒寒冷化?

79年 田中ほか:仙台において CO_2 モニタリング、野外観測開始

In 1970s, global environmental issues appear as a warning from science

1971: Man's impact on climate (MIT Press) is published.

1972: The United Nations Conference on the Human Environment discusses global warming issues.

1972: The United States Department of Transportation (U.S. DOT) starts an evaluation program to study the impact of nitrogen oxide (NOX) emitted by supersonic jet aircraft on the ozone layer (pointed out by P. Crutzen et al.)

Matsuno gives the keynote speech on stratospheric dynamics at the first meeting.

Ogawa develops an ozone chemical model.

Plans for supersonic jet aircraft are discontinued due to other reasons (Financial issues?)

1974: Possibility of decreased ozone layer due to chlorine contained in CFC (Rowland, Molina)
Drastic progress in research on the chemistry of stratospheric atmosphere conducted by NASA and other institutions

1979: Charney Report on global warming published by the National Academy of Sciences (NAS)

With doubled CO_2 $\Delta T = 3^\circ\text{C} \pm 1.5^\circ\text{C}$

Determined by the results revealed by Manabe (GFDL) and Hansen (GISS)

Global warming science in Japan :

In and after the 1950s: Prof. Yoshikazu Yamamoto at Tohoku University

Fundamental studies on CO_2 infrared radiation

In the 1970s: Prof. Yoshikazu Yamamoto, Prof. Masayuki Tanaka

Scattering of sunshine by aerosol → Climate cooling?

In 1979: Prof. Tanaka and others: CO_2 monitoring and outdoor observation starts in Sendai.

60-70年代気象学の飛躍と変貌の時期、日本では？

⇒モデリング研究センター設立活動の原点

What was happening in Japan during the era of breakthroughs and changes in meteorology of the 1960s and 70s?

⇒ The starting point of activity aimed at developing a modeling research center

- 1960年代 電子計算機と人工衛星の出現によって気象学・天気予報に革命的变化が起こった
- アメリカでは、これを支える基礎研究も飛躍的に充実した。
 - NSFからの資金で大学連合が運営するNational Center for Atmospheric Research (NCAR)が設立された。(1960年)
 - 研究者・技術者 計500名ほど、
 - 大型研究インフラ 電子計算機、航空機3機、実験観測用地etc
 - 数値予報を生み出したプリンストングループの一人Smagorinskyが将来を見通し専門研究機関を設立(原型1953年)Manabeらを集める
- ヨーロッパでは米国に比べ遅れていたが、70年代半ば、異常気象や温暖化が問題にされ始めると各国でモデリング専門機関設立
- 日本では
 - 1963年アメリカの動きを見て、若手による将来計画検討(澤田委員会)
 - NCARの設立にならい、大学共同利用機関「大気物理研究所」案
 - 1965年学術会議から政府に勧告(分子科学、情報科学、固体地球も)
 - 1973年京都大学附置の概算要求、しかし成功せず。1979年断念。
 - (個別専門分野では高水準の研究がおこなわれていた)

- 1960s: The advent of electronic computers and satellites was a revolutionary change for meteorology and weather forecasting.
- In the United States, the basic research that supported such change improved significantly.
 - The National Center for Atmospheric Research (NCAR) operated by the college association was established with funding from NSF. (1960)
 - About 500 researchers and engineers
 - Large-scale research infrastructure, electronic computers, 3 aircraft, land for experimental observations, etc.
 - Smagorinsky, one of the members of Princeton University research group that produced a numerical weather prediction system established a research institute in 1953 for future research where Manabe and other researchers got together.
- Compared with the United States, European research on weather was slightly behind. However, once unusual weather and global warming issues were brought up in the middle of 1970s, some European countries established research institutes.
- In Japan
 - In response to the movement in the United States in 1963, young researchers discussed future research plans (Sawada Committee).
 - A draft for the establishment of NCAR to be jointly used among universities was proposed.
 - The academic conference submitted a proposal to the government in 1965 (molecule science, information science and solid earth).
 - In 1973, Kyoto University requested a budget to establish the institute at Kyoto University; however, the request was denied. In 1979, Kyoto University suspended its plans.
 - (In individual areas of research, high-level research continued.)

Classified

大学における
気象学長期研究計画草案

澤田委員会、大気物理研設立運動に
松野も参加

気象・気候の数値モデルによる研究を目指す
「気象力学」の理論研究には限界
計算機による数値解なしでは進まない

昭和38年9月

沢田委員会

Classified

大学における
気象学長期研究計画草案
**Long-term Meteorological Research Plan
for Universities (Draft)**

Matsuno participated in the movement to establish the NCAR proposed by the Sawada Committee.

Aiming to conduct research on numerical weather and climate modeling Meteorological dynamics theoretical study encountered limitations. Research would not proceed without using numerical solutions by computer.

昭和38年9月

沢田委員会

アメリカ気象学会誌に出た記事

第2次大戦後米国に渡った日本出身研究者の活躍を分析

Meteorologists from the
University of Tokyo: Their
Exodus to the United States
Following World War II

John M. Lewis
National Severe
Storms Laboratory,
NOAA/ERL,
Norman, Oklahoma

©1993 American Meteorological Society

Bulletin of the American Meteorological Society

1351

数値予報研究やIBMの
プログラム講習で一緒
だった先輩たちは次々
とアメリカに渡った。

日米で研究環境(職と
計算機)の差大。

アメリカに移った先輩達は
気象・気候モデル研究で
中心的役割を果たす。

An article published in the journal of the American Meteorological Society (AMS)

Analysis of Japanese researchers who moved to the United States for their research after World War II

Meteorologists from the
University of Tokyo: Their
Exodus to the United States
Following World War II

John M. Lewis
National Severe
Storms Laboratory,
NOAA/ERL,
Norman, Oklahoma

©1993 American Meteorological Society

Bulletin of the American Meteorological Society

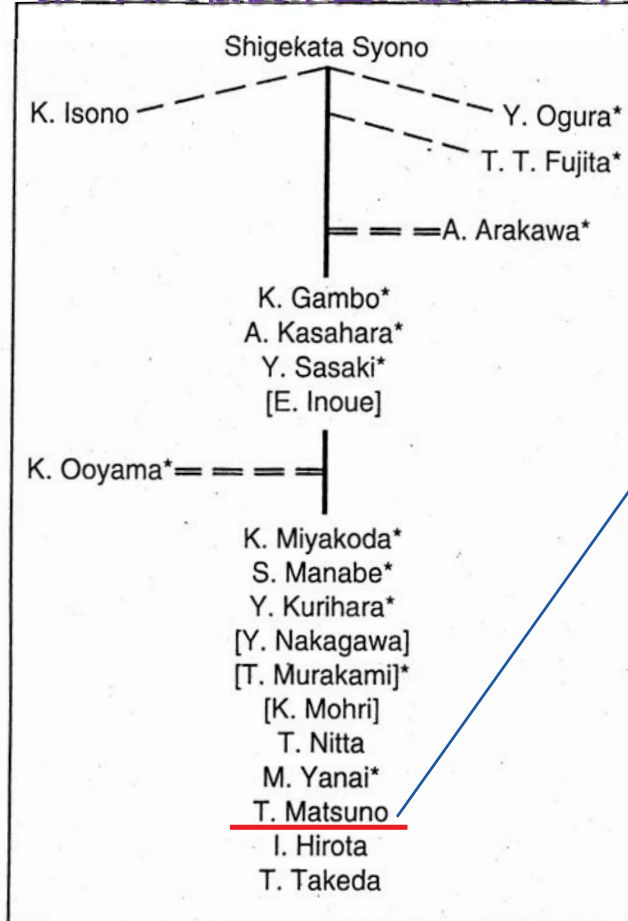
1351

Senior researchers that I worked
with in the numerical weather
prediction study and IBM program
seminars moved to the United
States one after another.

Significant difference in research
environment between the United
States and Japan in regard to the
job and computers.

Senior researchers who moved to
the United States played a central
role in research on numerical
weather and climate modeling.

第2次大戦後米国に渡った日本出身研究者の活躍を分析(続き)



*アメリカに移住した気象学者

FIG. 1. Scientific genealogy of Syono according to Takashi Nitta. The * identifies those members of the genealogical chain who emigrated to the United States. The names in brackets have been added by the author in response to information contained in the oral histories and letters of reminiscence. The list is roughly in order of seniority [age of scientist] (— — : junior faculty; == : indirect apprentice).

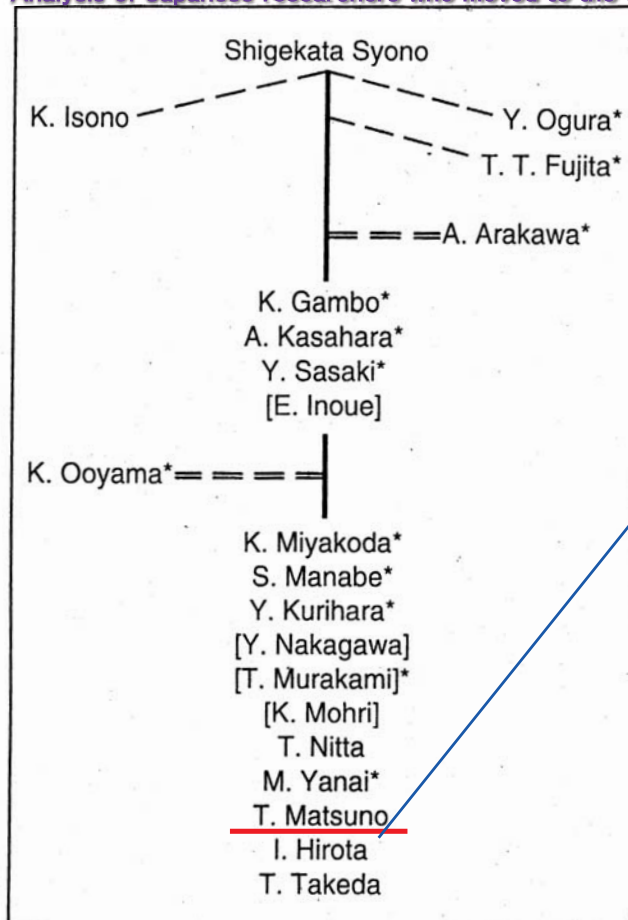
日本の大学に残った最年長者

日本でも気象・気候モデルによる研究を！

後年対外的役割多数を担うことになった

WCRP、IGBP、IAMAS、IPCC、

Analysis of Japanese researchers who moved to the United States for their research after the World War II (continuation)



*Meteorologists who immigrated to the United States

FIG. 1. Scientific genealogy of Syono according to Takashi Nitta. The * identifies those members of the genealogical chain who emigrated to the United States. The names in brackets have been added by the author in response to information contained in the oral histories and letters of reminiscence. The list is roughly in order of seniority [age of scientist] (— — : junior faculty; == : indirect apprentice).

The oldest Japanese meteorologist who remained at a Japanese university

Conducting research on modeling weather and climate in Japan!

WCRP, IGBP, IAMAS, and IPCC would have come to bear a number of external roles.

◆地球環境問題の社会的認知と 気候変化予測研究の発展(1980年代以降)

- 新しい研究組織の設立
- 地球シミュレーターと気候変化予測プロジェクト

◆ Social Recognition of Global Environmental Issues and the Expansion of Climate Change Prediction Study (In and after 1980s)

- Establishment of a new research organization
- The “Earth Simulator” system and Climate Change Prediction Project

1980年代 地球環境問題が国際政治の課題に

1984年 WMO+UNEP オゾン層問題の科学レポート

85年 オゾン層保護のWien条約

85年 南極オゾンホール発見

87年 モントリオール議定書(特定フロン50%削減,オゾンホール以前)

88年初め 米国NASAの研究者ら来日 環境庁、通産省主催会合

85年 SCOPE主催 Villach 温暖化の科学まとめ(松野欠席)

1988年 北米の猛暑 Hansen博士 議会でCO2原因を証言
IPCC設立、トロント会合⇒CO2排出削減トロント目標

89年 アルシュ・サミット 温暖化を大きく取り上げる

89年 WMOオゾンホールの科学のまとめ(松野参加)

90年 ロンドン改定 特定フロン, CCl₄, CH₃CCl₃ 全廃

オゾン層問題は解決へ向かう

1990年 第2回世界気候会議でIPCC第1次報告を承認(松野出席)
温暖化の科学を確認

1992年 リオデジャネイロ地球サミット
気候変動に関する枠組み条約(UNFCCC)締結

In 1980s: Global environmental issues become international political issues.

1984: WMO + UNEP release a scientific report on ozone layer issues.

1985: Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer

1985: A hole in the ozone layer is discovered over the South Pole.

1987: Montreal Protocol restricting the use of CFCs is established.

(Reducing designated CFC production by 50%, the level before the hole in the ozone was discovered)

Beginning of 1988: Researchers from NASA (U.S.) visit Japan for meetings hosted by the Ministry of Environment and the Ministry of International Trade and Industry.

1985: Scientific summary of global warming in Villach, Austria organized by SCOPE (Matsuno is absent.)

1988: Fierce heat in North America, Dr. Hansen states that the heat is caused by CO₂ emissions.

Establishment of IPCC, Toronto Summit ⇒ Setting the goal of reducing CO₂ emissions

1989: Arche Summit raises global warming issues.

1989: Scientific summary of WMO ozone hall (Matsuno is present.)

1990: The London Amendment, Abolition of controlled CFCs (CCl₄, CH₃CCl₃)

Ozone depletion issues moving toward resolution.

1990: The 2nd World Climate Conference ratifies the 1st report of the IPCC. (Matsuno is present.)

Scientific facts of global warming confirmed

1992: The Earth Summit in Rio de Janeiro

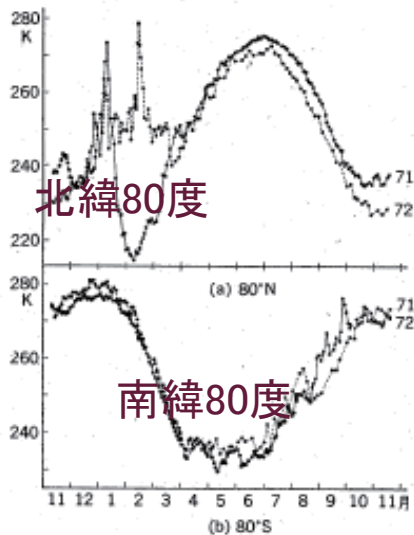
The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) is concluded.

成層圏突然昇温

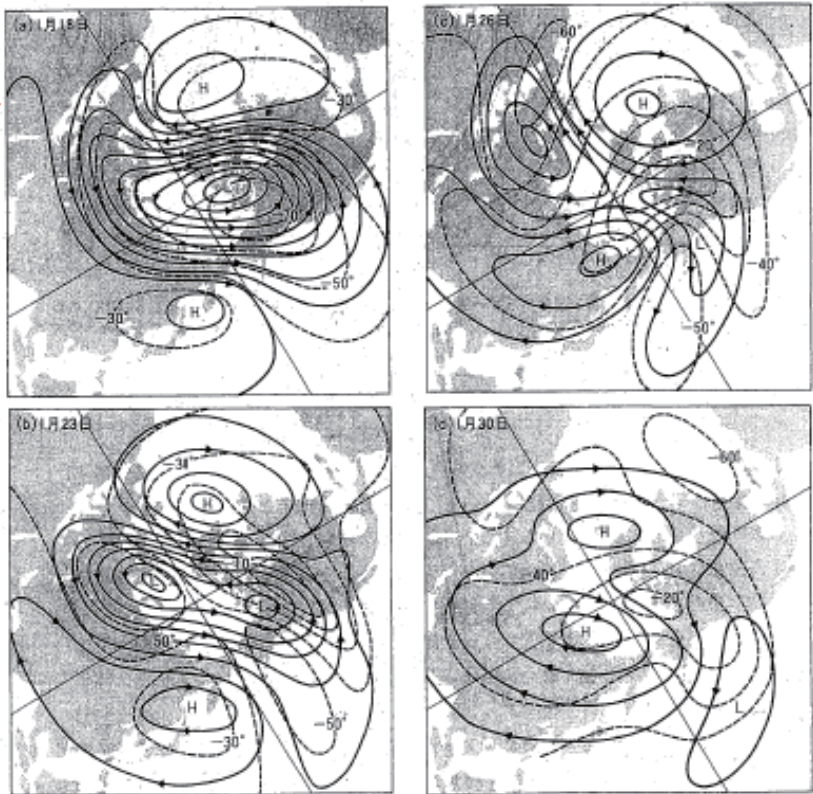
(松野の研究とのかかわり)

北半球に限られ、南半球では起こらない ⇒
オゾンホールは南極のみ

成層圏上部の気温・年変化



北半球極域成層圏で真冬に気温が1週間に
30-40°Cも高くなり真夏よりも高温となる
同時に北極を回る西風渦壊れ東風にもなる



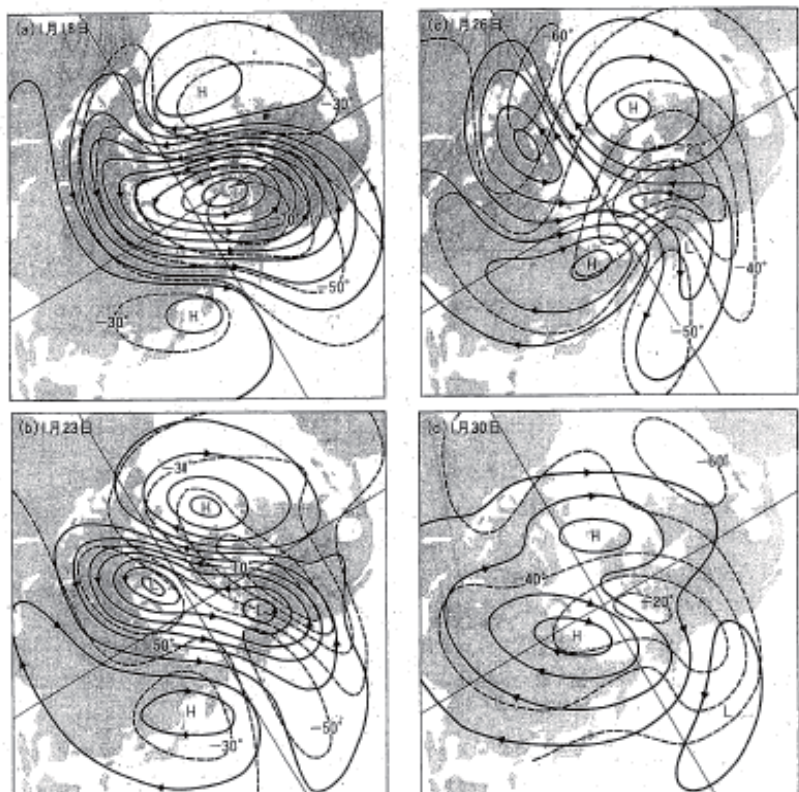
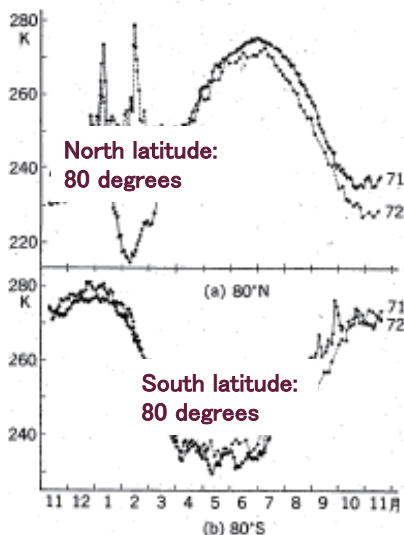
Sudden Stratospheric Warming

(Relation with the study carried out by Matsuno)

Only seen in the northern hemisphere,
not the southern hemisphere

⇒ Ozone hole is seen only at the
South Pole.

Inter-annual changes of temperature
in the upper stratosphere



なぜ100年後の気候についての科学的予言が この時期に突然国際政治の課題になったか？

米ソ対立の冷戦構造が解消し、世界全体の問題として
協議すべき適当な課題としてクローズアップされた・・・米本昌平氏
⇒脅威一定の法則（核戦争の脅威減少、温暖化の脅威が埋める）

“Suddenly green Margaret Thatcher and
Suddenly green Soviet Prime Minister”・・・Gordon McBean
(WCRP,JSC Chair)

Why did scientific weather prediction some 100 years later suddenly Become an international political agenda?

After the cold war structure ends, global environmental issues were
intentionally placed on the world leaders' agenda to prompt discussion.
(According to Shohei Yonemoto)

⇒ In response to the elimination of the threat of nuclear war, global warming
threat came to the forefront.

“Suddenly green Margaret Thatcher and Suddenly green Soviet Prime Minister”
・・・Gordon McBean (WCRP,JSC Chair)

気候変動、地球環境問題に対応する研究組織・プロジェクトの新展開

	旧文部省	旧科学技術庁
研究組織	1991 東京大学気候システム研究センター 1993/94 北海道大学 大学院地球環境科学研究科 2010年(改組) 東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系	1997「地球変動予測の実現に向けて」 (当初2期20年の計画) 地球フロンティア研究システム 宇宙開発事業団 海洋科学技術センター 共同プロジェクト 2004(改組) 海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター 2009(機構全体再編により消滅)
プロジェクト	1990 - 94 新プログラム アジア・太平洋域を中心とする 地球環境変動の研究 リーダー 田村三郎先生 (気候、大気化学、生態系)	1987 JENEX エルニーニョ緊急観測 1988 JAPACS エルニーニョほか --1992 海洋観測 (TOGA CORE参加) 地球観測衛星(宇宙開発事業団) ADEOS 1 (1997), ADEOS2(TRMM(1997 -2013--)熱帯降雨観測

New Movements of Research Organizations & Projects in response to Climate Change and Global Environmental Issues

	Former Ministry of Education	Former Science and Technology Agency
Research Organizations	1991: Center for Climate System Research, the University of Tokyo 1993/1994 Graduate School of Environmental Science, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University 2010 (Reformed) Division of Climate System Research, Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo	1997: Preparation for global change forecasting (Originally planned for 2 terms with 10 years/ term) Frontier Research System for Global Change Space Development Agency of Japan (NASDA) Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC) Joint project 2004 (Reformed) Frontier Research Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 2009: Dissolved due to the reformation of the entire agency
Projects	1990 -1994 New program Study on global environmental change centering on Asian-Pacific region Leader: Prof. Saburo Tamura (Climate, atmospheric chemistry, ecosystem)	1987 Emergency observation of El Nino by JENEX 1988 JAPACS El Nino, etc. --1992 Oceanographic observation (TOGA CORE participated) Earth observation satellite (NASDA) ADEOS 1 (1997), ADEOS 2 () TRMM (1997-2013 -) Tropical rainfall observation

◆ 東京大学気候システム研究センター

◆ 北海道大学 大学院地球環境科学研究科

◆ 地球フロンティア研究システム

◆ Center for Climate System Research, the University of Tokyo

◆ Graduate School of Environmental Science,
Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

◆ Frontier Research System for Global Change

1990-1993年に行われた文部省の新プログラム：
「アジア太平洋域を中心とする地球環境変動の研究」の
「研究の場の整備」として東大・気候システム研究センターを新設



田中さん

住さん

京大・電離層研究施設
加藤進先生

住さんと2人3脚で活動、東北大・田中さんのサポート

New Program Implemented by the Ministry of Education between 1990 and 1993 :
Center for Climate System Research at the University of Tokyo was established for
research on global environmental changes centering on the Asia-Pacific Region.



Prof. Tanaka

Prof. Sumi

Prof. Susumu Kato,
Ionosphere Research laboratory,
Kyoto University

I was engaged in research with Prof. Sumi, and provided support for Prof. Tanaka at Tohoku University.

1991年4月12日 東京大学気候システム研究センター発足
理学部7号館地下の一室で、親元である理学部長の話を聞く



浜野さん
地球物理主任

住さん

杉ノ原さん
海洋モデル開発

大気モデルは、住さんが気象庁で天気予報用に作られたモデルを移植して改良し、海洋モデルは、杉ノ原さんが10年以上前から大学院生と開発してきたものがあつた。こうして、理学部にいる間に準備が進んでいた。

April 12, 1991: Center for Climate System Research at the University of Tokyo started operation.
Listened to the Dean of the Faculty of Science at University of Tokyo in a room in the basement of the No.7 building.



Prof. Hamano
(Head of the
Geophysics Department)

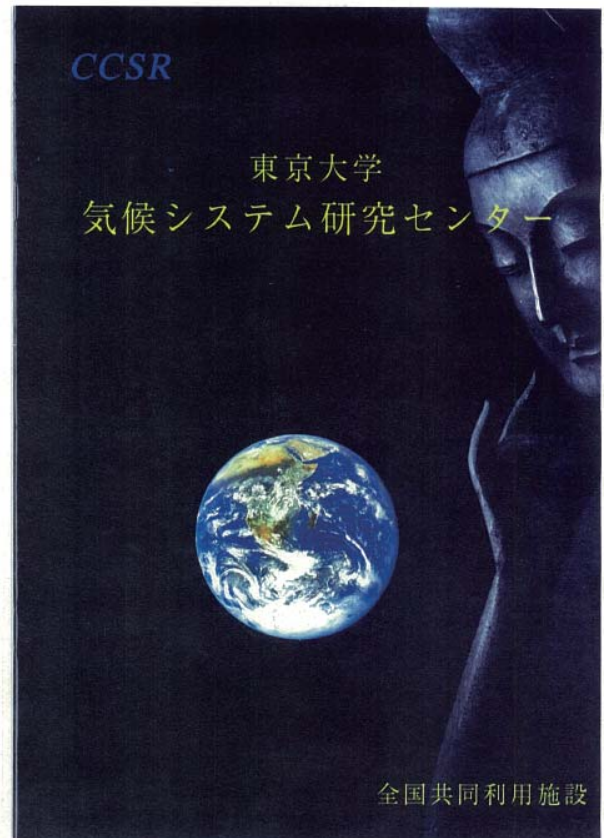
Prof. Sumi

Prof. Sugino-
hara
(Develop an
oceanic model)

The atmospheric model was made by transplanting the model developed for use in weather forecasting at the Meteorological Agency by Prof. Sumi. The oceanic model was developed over a period of more than 10 years by Prof. Sugino-hara and graduate students. The preparation was proceeding while I was working at this faculty.

教授4、助教授4、助手2、事務官3
の小组織ながら学部から独立

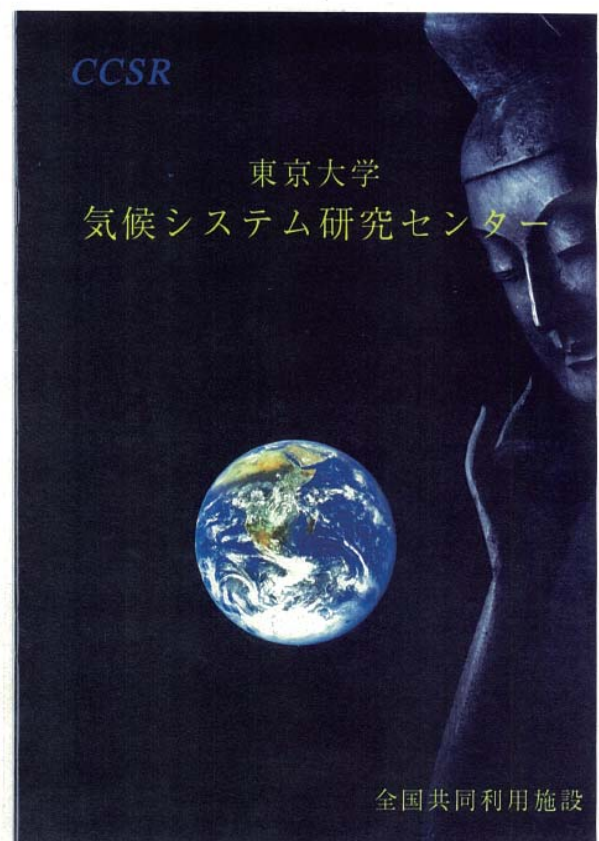
1992年2月駒場第2キャンパス
元宇宙科学研15号館に移転



パンフレットの表紙より気候モデルMIROC

Although it was a small organization with four professors, four assistant professors, 2 assistants, 3 administrative staff, the Atmosphere and Ocean Research Institute became independent from the university faculty.

In February 1992, the Center was relocated to former Space and Science Research Building No.15 at Komazawa Campus II.



The front page of the pamphlet: Climate model MIROC

発足直後1992年3月に下田で国際ワークショップを開催
世界の主要モデリングセンターの代表者と国内関連研究者と一緒に
将来の方向を検討



In March 1992, right after the establishment of the institute, an international workshop was held in Shimoda.

Discussed the future direction among the representatives of major modeling centers from around the world and domestic researchers.



モデル開発とモデリング研究の発展

- ・木本さんが気象庁から移籍して大気海洋結合モデルの開発を進め、温暖化・気候変化予測実験を行う基盤が出来た。
- ・若手による海洋モデルの改善、海氷モデルの開発。
- ・成層圏を含む高解像度大気モデルで、理想的条件のもと長期積分。赤道成層圏の準2年振動を世界で初めて再現に成功(高橋さん)。

海洋観測プロジェクト・衛星からの地球観測の発展

1987 JENEX エルニーニョ緊急観測

1988 JAPACS エルニーニョほか海洋観測

--1992 (WCRPのサブプログラムTOGA CORE) 住さんが中心、日本で初めての本格的フィールドプログラム。

地球観測衛星(宇宙開発事業団) 中島さんが新しい衛星データ解析エアロゾルの分布やミクロな特性を明らかにした。

ADEOS 1 (1997), ADEOS2(

TRMM(1997 -2013--)熱帯降雨観測衛星・・・新田勅さん日本側PI

Development of Models and Expansion of Modeling Research

- Prof. Kimoto was transferred from the Meteorological Agency to advance coupled ocean-atmosphere circulation model development and made the base for experiments on global warming and climate change prediction.
- Young researchers improved the oceanic model, and developed a sea ice model.
- Long-term integration of the high-definition atmospheric model including the stratosphere under ideal conditions. Prof. Takahashi succeeds with the world's first replication of the quasi-biennial oscillation (QBO) in the stratosphere around the equator.

Expansion of the Ocean Observation Project & Earth Observation from Satellites

1987: JENEX Emergency observation on El Nino

1988: JAPACS Oceanographic observation including El Nino

--1992: (WCRP subprogram – TOGA CORE) Japan's first full-scale field program organized by Prof. Sumi.

Earth observation satellite (NASDA): Prof. Nakajima analyzed new satellite data. Clarified aerosol distribution and micro properties.

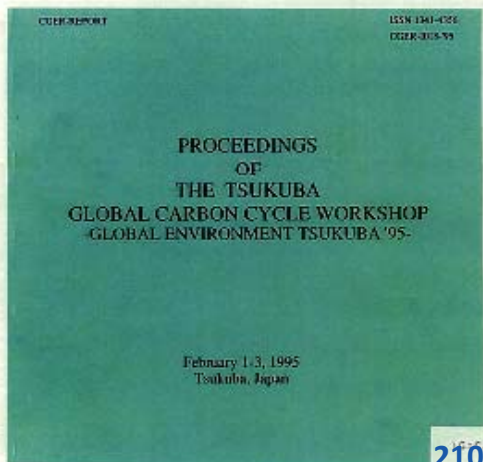
ADEOS 1 (1997), ADEOS 2 ()

TRMM (1997-2013 -) Tropical rainfall observation satellite –

Prof. Tsuyoshi Nitta as a principal investigator from the Japan side

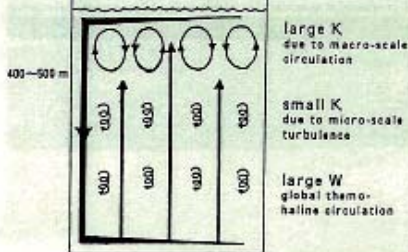
簡略海洋モデルによる炭素収支とCO2濃度安定化

松野自身の問題意識による田辺清人さんの修士論文研究(1993)



IPCC FARの簡略海洋モデルの内部矛盾
⇒2層湧昇拡散モデル⇒安定化に応用

2層湧昇拡散モデル



SOME CONSIDERATIONS REGARDING CARBON BUDGETS BASED ON SIMPLE OCEAN MODELS

By

Taroh Matsuno

Graduate School of Environmental Earth Science
Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan

and

Kiyoto Tanabe

Sanwa Research Institute Corp., Tokyo, Japan

2100年以后排出一定=3GtC 620ppmでほぼ一定

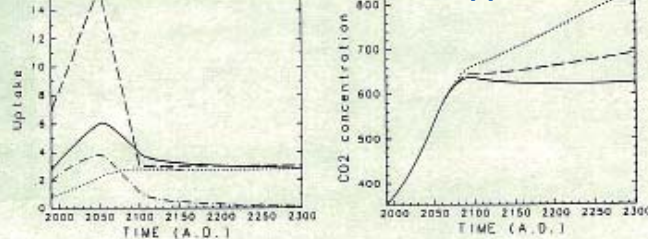
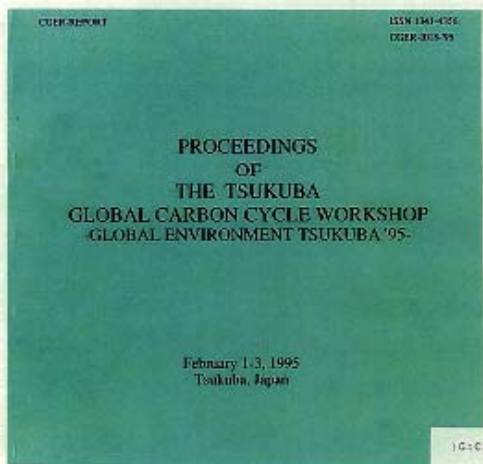


Figure 3. (a) CO₂ emission scenario with a constant flux of 3 GtC/year after 2100 (dashed line). Other lines show total annual uptake by the ocean (solid), uptake by the near surface layer (dash-dot) and transport to the deep layer (dotted). (b) CO₂ concentrations corresponding to the emission scenario shown (a) (solid line) and scenarios with final constant fluxes of 3 GtC/year (dashed) and 6 GtC/year (dotted). After Tanabe (1993).

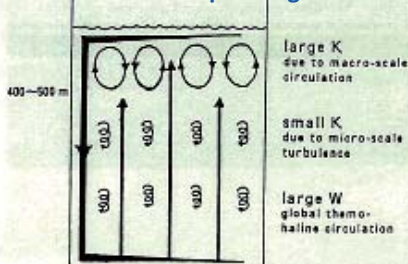
Carbon Budgets and Stabilization of Carbon Dioxide Levels by a Simplified Oceanic Circulation Model
Master's thesis of my student, Mr. Kiyohito Tanabe (1993)



Internal conflict in the simplified oceanic model developed by IPCC FAR

⇒Two-dimensional upwelling diffusion model
⇒ Applied to stabilization

Two-dimensional upwelling diffusion model



SOME CONSIDERATIONS REGARDING CARBON BUDGETS BASED ON SIMPLE OCEAN MODELS

By

Taroh Matsuno

Graduate School of Environmental Earth Science
Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan

and

Kiyoto Tanabe

Sanwa Research Institute Corp., Tokyo, Japan

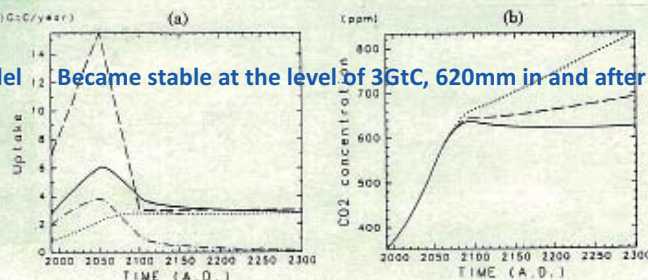


Figure 3. (a) CO₂ emission scenario with a constant flux of 3 GtC/year after 2100 (dashed line). Other lines show total annual uptake by the ocean (solid), uptake by the near surface layer (dash-dot) and transport to the deep layer (dotted). (b) CO₂ concentrations corresponding to the emission scenario shown (a) (solid line) and scenarios with final constant fluxes of 3 GtC/year (dashed) and 6 GtC/year (dotted). After Tanabe (1993).

Became stable at the level of 3GtC, 620mm in and after 2001

理学部地下室で教授3名事務官3名から出発した気候センター
 1994年秋には教職員20名＋大学院生約10名に成長
 伊藤忠商事からの寄附研究部門の役割大



1994年9月、松野の北大転任お別れ会での教職員

Center for Climate System Research started its operation at the basement of the School of Science, the University of Tokyo with only 3 professors and 3 administrative staff.
 In autumn 1994, the Center grew larger with 20 teaching staff and approximately 10 students in the master's program.
 Donation from Itochu Corporation contributed to the growth of the research division.



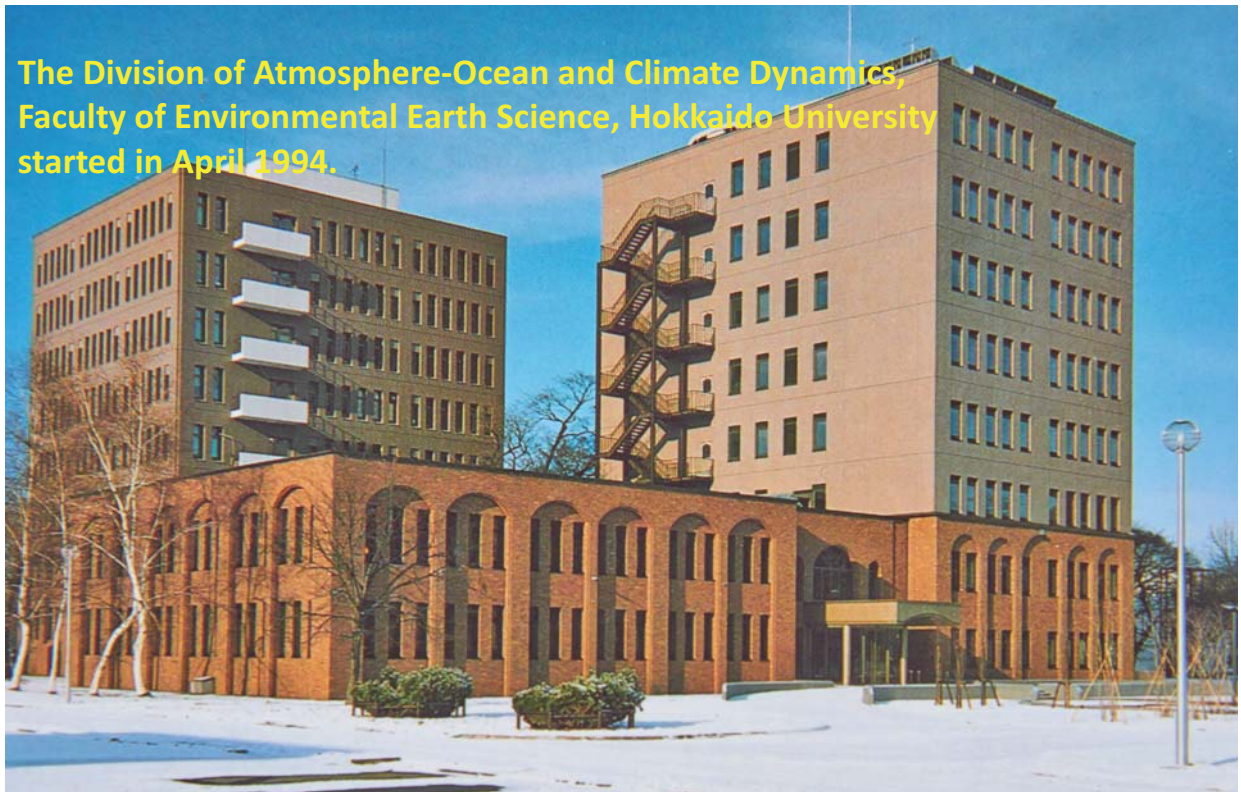
Teaching staff at the farewell party for Matsuno (moving to Hokkaido University) in September 1994

北海道大学 大学院地球環境科学研究科
大気海洋圏環境科学専攻 1994年4月発足



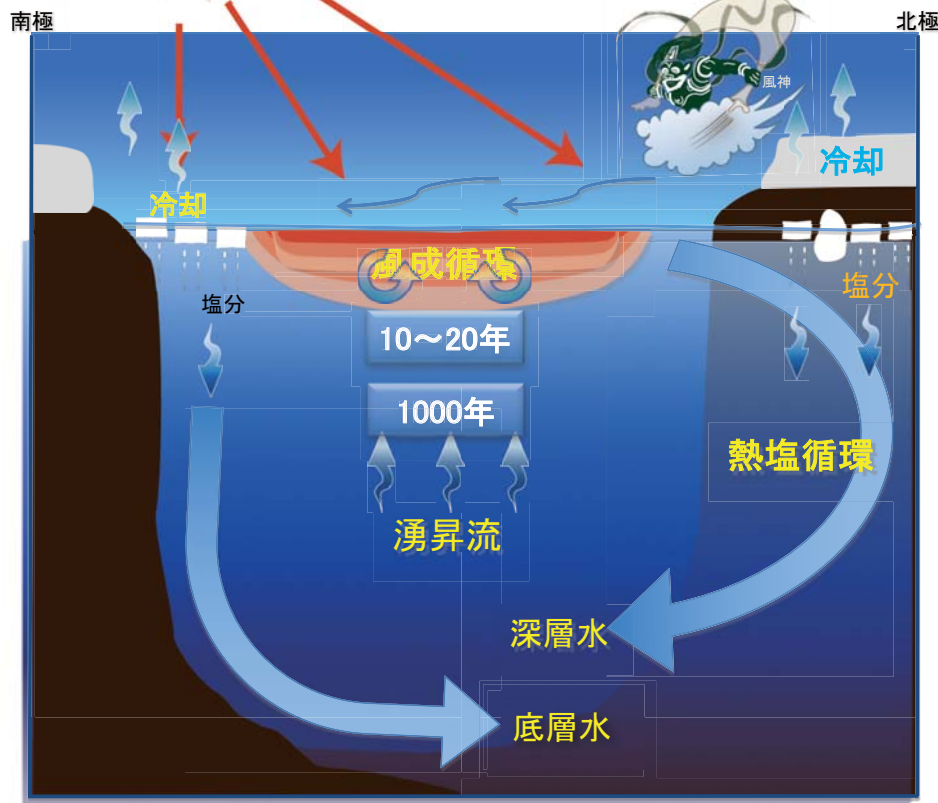
大気海洋圏専攻は、低温研究所、水産学部の教官数名が核となり、10名以上の若手新人が日本各地の大学や滞在中の外国から集まり新進の気にあふれていた。学生も、日本中の大学から集まった

The Division of Atmosphere-Ocean and Climate Dynamics,
Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University
started in April 1994.



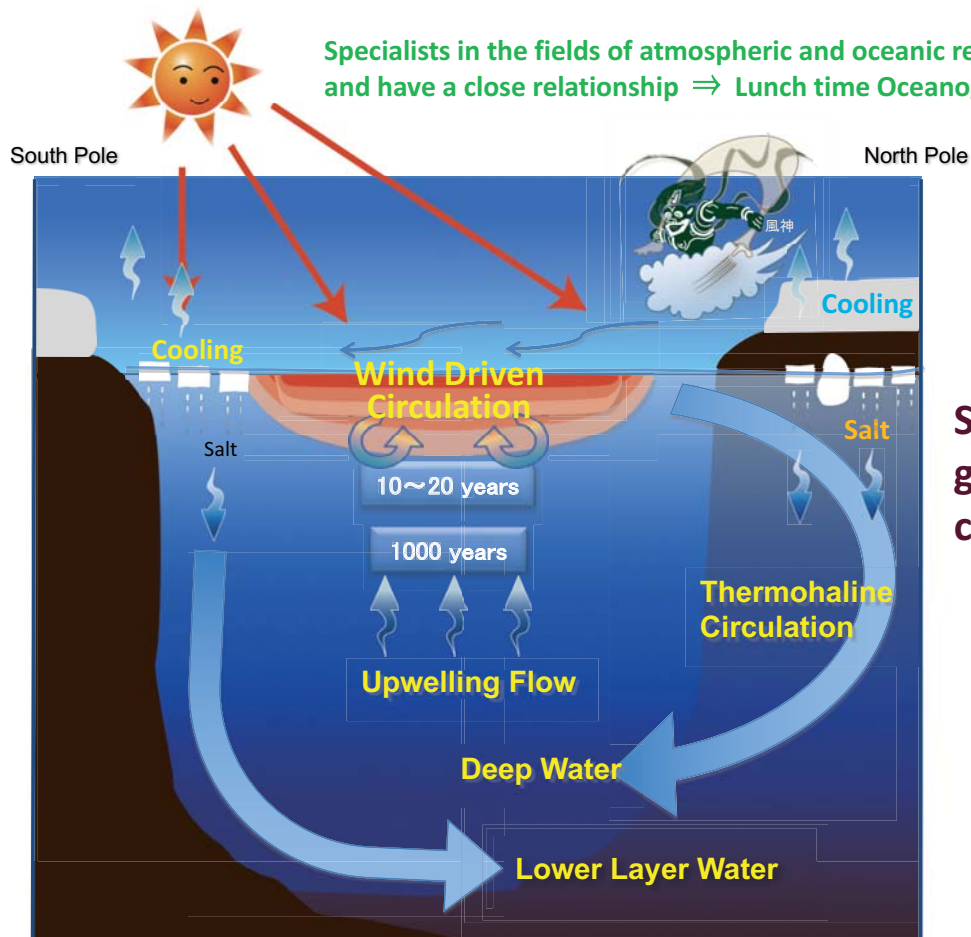
The Division of Atmosphere-Ocean and Climate Dynamics was filled with the energy of more than 10 frontline researchers from Japanese universities and overseas who came here as lecturers to augment the core teaching staff from the Institute of Low Temperature Science, and Faculty of Fisheries. It gathered many students from throughout Japan.

大気と海洋の専門家が一緒に親しく会話
⇒Lunch time Oceanographer



世界海洋循環
の模式図

Specialists in the fields of atmospheric and oceanic research got together
and have a close relationship ⇒ Lunch time Oceanographer



Simplified
global ocean
cycle diagram

前田芳恵さん修士論文：「地球温暖化予測に用いられる簡略化海洋モデルの検討」 北海道大学大学院地球環境科学研究科 (1998年)

HILDA モデル(Bernモデルの原形)

このとき、海洋内部 (Interior) では、トレーサー ϕ の海洋内部の値を $\phi_I(z)$ とすると、保存則から、

$$k \frac{d^2 \phi_I(z)}{dz^2} - w \frac{d\phi_I(z)}{dz} - q(\phi_I(z) - \phi_{HD}) + S_I(z) = 0$$

が成り立つ。ここで、 ϕ_{HD} は高緯度の内部のトレーサーの値、 $S_I(z)$ は海洋内部での、発生源と吸収源である。同様に、極域の下層では、

極域とそのほかの海洋本体に分け
海洋本体では平均的な湧昇を考える

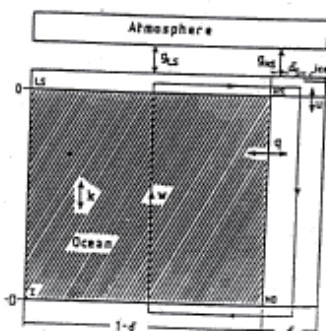
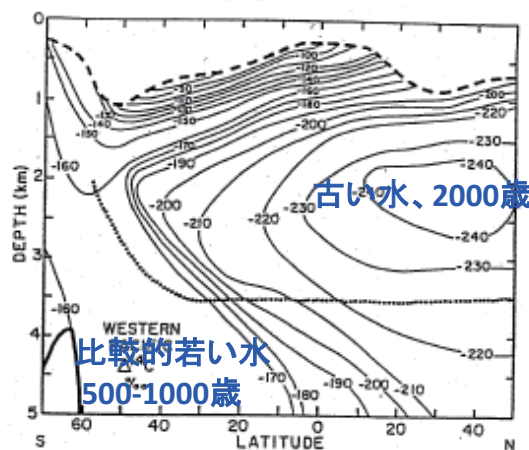


図 3: HILDA モデルの概略



平均湧昇速度 $w=0.6\text{m/年}$ (HILDA): GEOSECS による太平洋の $\Delta^{14}C$ (Broecker and Peng, 1982)

一般的に受け入れられている値:

太平洋内部の ^{14}C 濃度分布

$w=4\text{m/年}$ なぜこんな違いが?

Ms. Yoshie Maeda's master's thesis: Simplified ocean cycle model used for global warming prediction (1998)
(Graduate School of Environmental Science, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University)

HILDA model (Original form of Bern model)

このとき、海洋内部 (Interior) では、トレーサー ϕ の海洋内部の値を $\phi_I(z)$ とすると、保存則から、

$$k \frac{d^2 \phi_I(z)}{dz^2} - w \frac{d\phi_I(z)}{dz} - q(\phi_I(z) - \phi_{HD}) + S_I(z) = 0$$

が成り立つ。ここで、 ϕ_{HD} は高緯度の内部のトレーサーの値、 $S_I(z)$ は海洋内部での、発生源と吸収源である。同様に、極域の下層では、

Split the polar zones from the ocean cycle to assume an average upwelling speed by the ocean cycle.

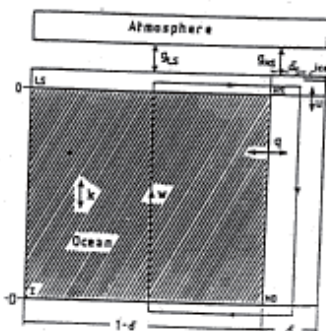
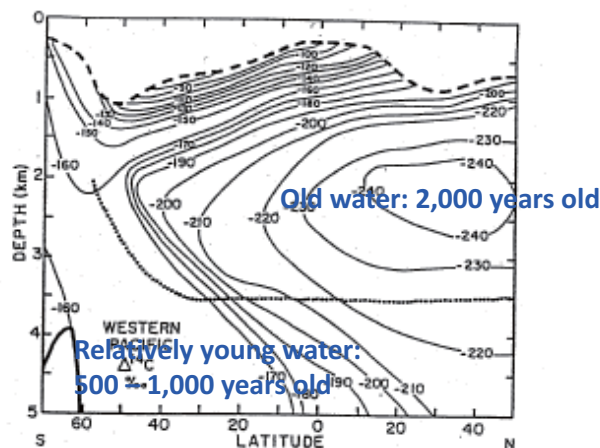


図 3: HILDA モデルの概略



Average upwelling speed: $w=0.6\text{ m/year}$ (HILDA): GEOSECS による太平洋の $\Delta^{14}C$ (Broecker and Peng, 1982)

Generally used speed: $w=4\text{ m/year}$

Why are they so different?

^{14}C concentration distribution
in the Pacific Ocean

$$(C_0 - C) \left(q + \frac{w}{\Delta z} \right) + \frac{k}{\Delta z} \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=\Delta z} = \lambda C \quad (10)$$

と書き直す。HILDA の場合は w が鉛直で一定なため、 $\Delta z \rightarrow 0$ を考えると、 $(C_0 - C)$ の項では、 q は無視できることが分かる。よって、これを式 9 に戻し、 $\Delta z \rightarrow 0$ とすると、

$$(C_0 - C)w + k \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=\Delta z} \rightarrow 0, \Delta z \rightarrow 0 \quad (11)$$

となる。特別な状況でない限り、無限小の厚さでの発生消滅はないとしてよいので、式 11 は式 5 は同じ意味を持つ。HILDA での底の $\Delta^{14}\text{C}$ の値は、拡散項と湧昇項のみで決められており、 ^{14}C の崩壊には因らないことが分かる。この式から、実際に太平洋で見られるような、高緯度域から流入した新しい水が中低緯度の最下端で古くなって (C_0 より小さい C になって) いる理由は、古い水のある上層からの鉛直渦拡散によるものということになる。また、下端に近い上層の水が古いのは、小さい湧昇速度で長時間かかって上昇したためと考えられる。

しかし、実際には高緯度で沈んだ水は底層を中低緯度に向けて流っており、その間も、 ^{14}C は、崩壊率 $1/8250\text{yr}$ の速さで崩壊している。(図 6 は、海底で南北方向に水が移動していることを示唆している。) この効果が欠けているために、HILDA の最下端の水は古くなり、古い湧昇と拡散のみの不自然なバランスになってしまった。そのため、上方に動く間に充分古くなれるような小さな w が、最も良い値とされたと考えられる。

湧昇速度 w = 一定 (深さによらない)
としてしまったために生ずる
海底面でのあり得ない ^{14}C バランス

次に、これと比較するために w が鉛直非一定の場合を考える。 w は連続的に変化するから、底から Δz だけ上がった場所での w は、

$$w(\Delta z) = w_0 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \Delta z + O(\Delta z^2) \quad (12)$$

と展開できる。ここで w_0 は 0 なので、これを式 9 に代入すると、

$$(C_0 - C) \left(q + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \Delta z \right) + k \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=\Delta z} = \lambda C \Delta z \quad (13)$$

となり、 Δz の項のバランスから、左辺第二項は $\Delta z \rightarrow 0$ で 0 になる必要があることがわかる。式 12 と同様にこの項を展開すると、 Δz の項のバランスは、

$$(C_0 - C) \left(q + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \Delta z \right) + k \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0} = \lambda C \quad (14)$$

で表される。よって、 w が鉛直非一定であれば、海底での $\Delta^{14}\text{C}$ を決める関係の中に、 ^{14}C の崩壊の項が含まれるため、新しい水が中低緯度に向け底層を流っていくうちに古くなっていく効果を、取り入れられることになる。

湧昇速度 w を鉛直方向に変わるとすると
海底を這う水平流によって時間がたち実際
に見られる古い水 (^{14}C 小) となり得る。

となる。これを

$$(C_0 - C) \left(q + \frac{w}{\Delta z} \right) + \frac{k}{\Delta z} \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=\Delta z} = \lambda C \quad (10)$$

と書き直す。HILDA の場合は w が鉛直で一定なため、 $\Delta z \rightarrow 0$ を考えると、 $(C_0 - C)$ の項では、 q は無視できることが分かる。よって、これを式 9 に戻し、 $\Delta z \rightarrow 0$ とすると、

$$(C_0 - C)w + k \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=\Delta z} \rightarrow 0, \Delta z \rightarrow 0 \quad (11)$$

となる。特別な状況でない限り、無限小の厚さでの発生消滅はないとしてよいので、式 11 は式 5 は同じ意味を持つ。HILDA での底の $\Delta^{14}\text{C}$ の値は、拡散項と湧昇項のみで決められており、 ^{14}C の崩壊には因らないことが分かる。この式から、実際に太平洋で見られるような、高緯度域から流入した新しい水が中低緯度の最下端で古くなって (C_0 より小さい C になって) いる理由は、古い水のある上層からの鉛直渦拡散によるものということになる。また、下端に近い上層の水が古いのは、小さい湧昇速度で長時間かかって上昇したためと考えられる。

しかし、実際には高緯度で沈んだ水は底層を中低緯度に向けて流っており、その間も、 ^{14}C は、崩壊率 $1/8250\text{yr}$ の速さで崩壊している。(図 6 は、海底で南北方向に水が移動していることを示唆している。) この効果が欠けているために、HILDA の最下端の水は古くなり、古い湧昇と拡散のみの不自然なバランスになってしまった。そのため、上方に動く間に充分古くなれるような小さな w が、最も良い値とされたと考えられる。

Unrealistic ^{14}C Level on the Seabed
Caused by Setting the Upwelling
Speed (w) at a Constant Speed
(regardless of the depth)

Considering that the upwelling speed (w)
changes in vertical directions, horizontal
flow at the seabed requires time, which
matches the actually observed old water ^{14}C

次に、これと比較するために w が鉛直非一定の場合を考える。 w は連続的に変化するから、底から Δz だけ上がった場所での w は、

$$w(\Delta z) = w_0 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \Delta z + O(\Delta z^2) \quad (12)$$

と展開できる。ここで w_0 は 0 なので、これを式 9 に代入すると、

$$(C_0 - C) \left(q + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \Delta z \right) + k \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=\Delta z} = \lambda C \Delta z \quad (13)$$

となり、 Δz の項のバランスから、左辺第二項は $\Delta z \rightarrow 0$ で 0 になる必要があることがわかる。式 12 と同様にこの項を展開すると、 Δz の項のバランスは、

$$(C_0 - C) \left(q + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \Delta z \right) + k \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0} = \lambda C \quad (14)$$

で表される。よって、 w が鉛直非一定であれば、海底での $\Delta^{14}\text{C}$ を決める関係の中に、 ^{14}C の崩壊の項が含まれるため、新しい水が中低緯度に向け底層を流っていくうちに古くなっていく効果を、取り入れられることになる。

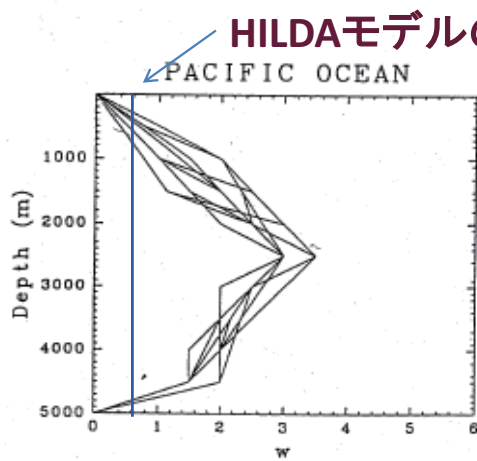


図 15: 太平洋の湧昇速度 (m/yr)

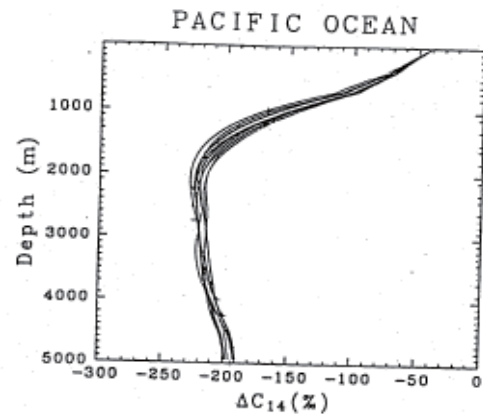


図 14: 太平洋の $\Delta^{14}\text{C}$ の分布

太平洋の平均 ^{14}C の分布(右)
を説明できる湧昇速度分布(左)

インド洋、大西洋についても湧昇速度分布を得た。
しかし、簡略海洋循環モデルを作るには至らなかった

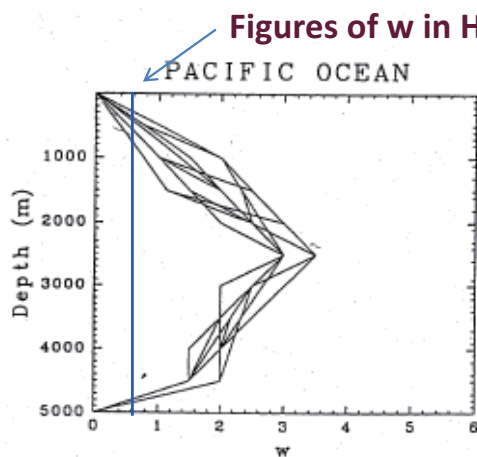


図 15: 太平洋の湧昇速度 (m/yr)

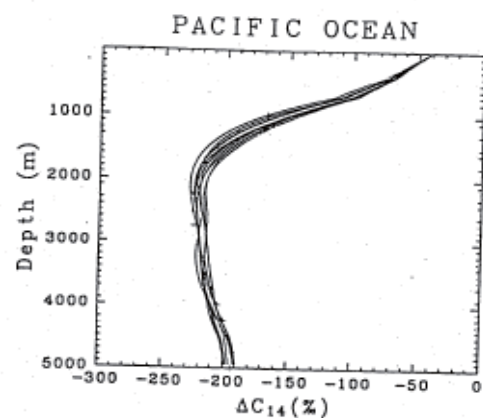


図 14: 太平洋の $\Delta^{14}\text{C}$ の分布

Distribution of upwelling speed (left) that explains the
Distribution of average ^{14}C in the Pacific Ocean (Right)

We obtained the data of the upwelling speed distribution in
the Indian Ocean and Atlantic Ocean. However, these data
were insufficient to develop a simplified ocean cycle model.

地球フロンティア研究システム

旧科学技術庁：

傘下の宇宙開発事業団 (NASDA)では衛星による地球観測
海洋科学技術センター (JAMSTEC)では海洋観測が進んでいた。
観測の成果を生かして気候変動や地球環境問題に寄与⇒

1996-97年 航空電子等技術審議会
地球科学技術部会で審議
報告書「地球変動予測の実現に向けて」

6目標を掲げる

1.気候変動の予測

2.水循環変動の予測

3.地球温暖化の予測

4.大気組成変動の予測

5.生態系変動の予測

6.地球内部変動の予測 2000年に別のフロンティア研究として独立

個別プロセスを解明して(プロセス研究)
それに基づくモデルをつくり予測実現

地球フロンティア研究システム・・・NASDA,JAMSTECの共同事業

Frontier Research System for Global Change

Former Science and Technology Agency:

NASDA carried out earth observations under the umbrella of the Science and Technology Agency.
JAMSTEC began expanding oceanic observations.
The results of those observations contributed to solutions for climate change and global environmental issues. ⇒

1996-97:

Discussed by the Council for Aeronautics, Electronics and Other Advanced Technologies, Global Science and Technology Division Compiled a report "Toward Realizing the Prediction of Global Change"

6 Targets

1. Prediction of climate change

2. Prediction of water circulation change

3. Prediction of global warming

4. Prediction of atmospheric composition change

5. Prediction of ecosystem change

6. Prediction of changes in inside the earth

Clarify the individual processes (process research)
and develop a model for prediction

In 2000, became independent as another frontier study.

Frontier Research System for Global Change ... A joint project by NASDA and JAMSTEC

地球フロンティア研究システムの発足 1997年10月



Establishment of the Frontier Research System for Global Change October 1997



地球フロンティア研究システム発足シンポジウム 当初4領域＋IPRC, IARC連携プログラム

1998年大気組成 秋元領域長、 99年生態系 安岡、後 和田領域長



Frontier Research System for Global Change Symposium Initially 4 research fields + IPRC and IARC collaborative programs

1998: Atmospheric composition: Prof. Akimoto, Chief
1999: Ecosystem: Prof. Yasuoka, Chief ⇒ Dr. Wada



地球フロンティアにおけるモデリング研究 ーIPCCに向けた気候変化予測と新モデル開発の方針

- 温暖化予測実験: 大気・海洋・陸面結合物理的気候システムモデルは既に経験のある東大気候センター、国立環境研と協力
- 大気組成、生態系など生物地球化学の専門家を含む地球フロンティアの強みを生かし地球システムモデル(Earth System Model)開発
気候変化が炭素循環に与える影響を含む温暖化実験
- 地球シミュレーターの能力をフルに活用する超高解像度の大気モデル
海洋モデルの開発、大気は熱帯のクラウドクラスターを直接表現

各領域でのそれぞれの専門的研究に加え
地球フロンティアとしての特色を出す

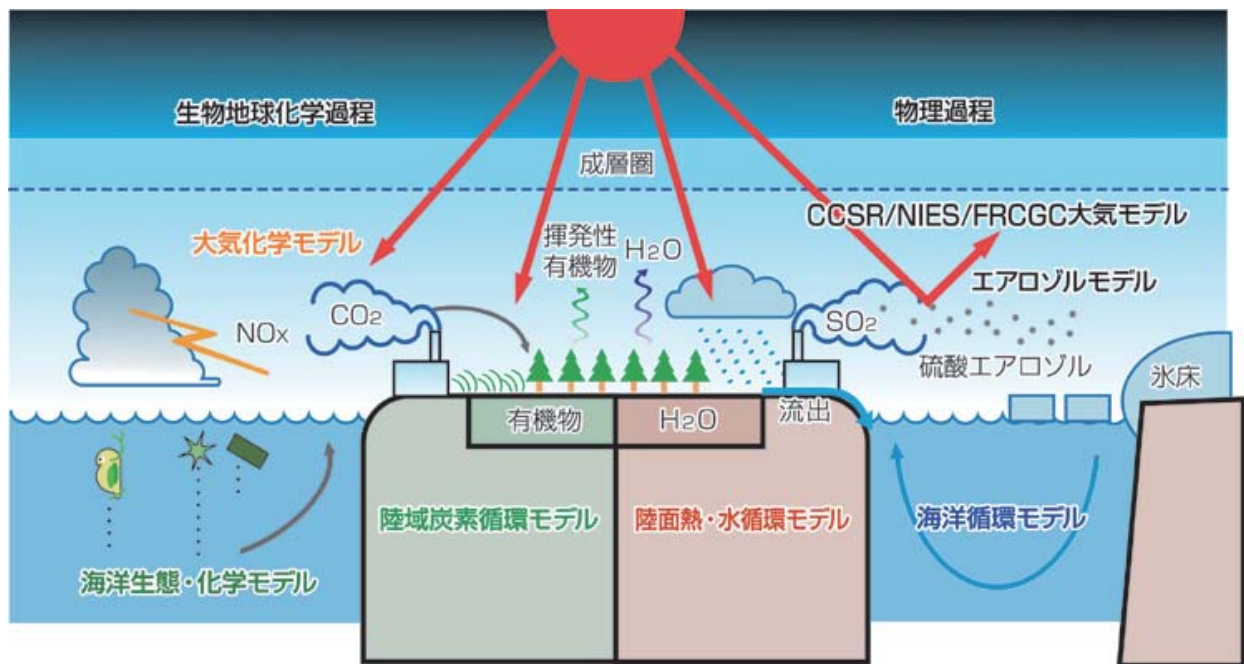
Modeling Research at the Frontier Research System for Global Change - Climate change prediction for IPCC and the policy for new model development –

- Experiments for global warming prediction: Develop a coupled atmosphere-ocean-land general circulation model in cooperation with the University of Tokyo Meteorological Research Institute and National Institute for Environmental Studies (NIES).
- Develop an earth system model utilizing the strength of the Frontier Research System for Global Change that holds a wide variety of biogeochemistry specialists in atmospheric composition and ecosystem.
- Development of high-resolution atmospheric and oceanic models fully utilizing the capability of the earth simulator.
Atmospheric model was to be developed to show tropical cloud clusters on a direct grid.

In addition to the specialized research in each field, it is essential to create distinctive characteristics as the Frontier Research System for Global Change.

地球環境システムの概念図

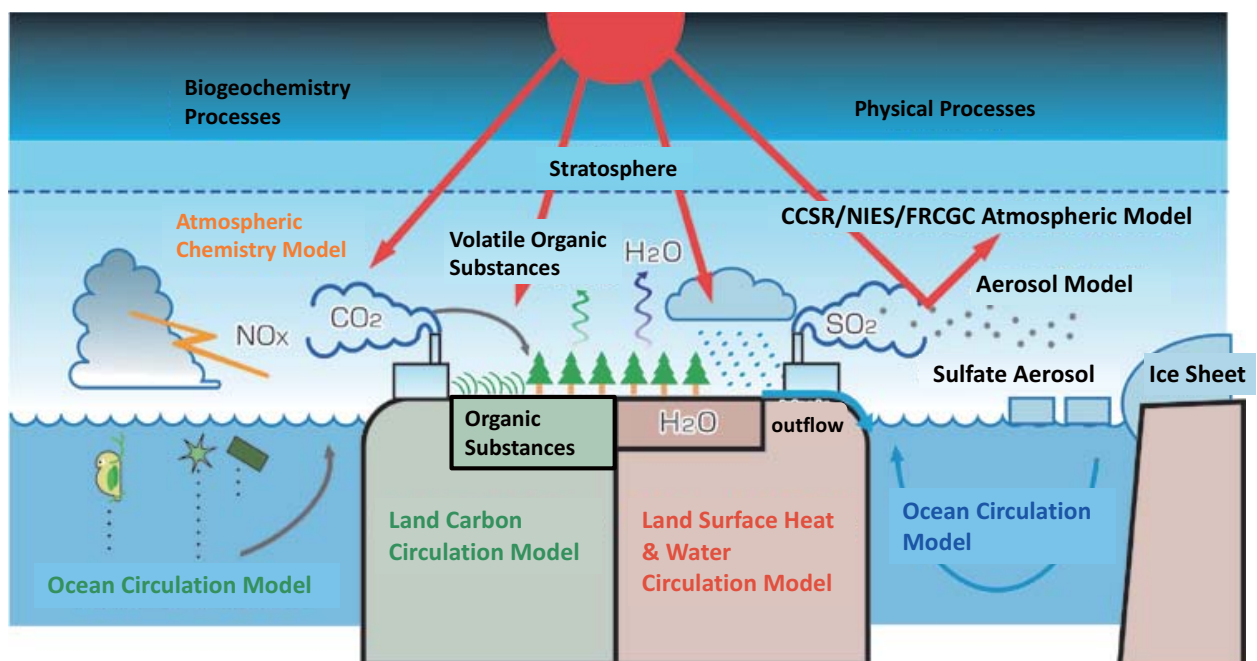
生物地球化学を含むモデル無し 物理的気候システム: 既にモデル化



Earth Environment System Diagram

Biogeochemistry system:
No model was developed yet.

Physical climate system:
A model was already developed.



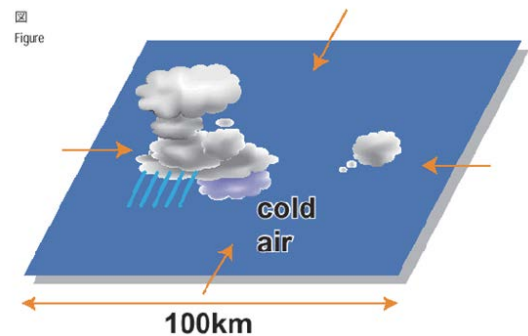
地球シミュレーターのパワーを生かす 世界未踏の全球雲システム解像モデルを開発

これまでの天気予報・気候モデル 格子間隔～100km

- 温帯低気圧や前線の雲・雨は直接計算
- 格子より小さな対流雲(入道雲)
安定度 = $T(\text{上層}) - T(\text{下層})$
から対流雲の発生・雨量決定
→パラメタリゼーション

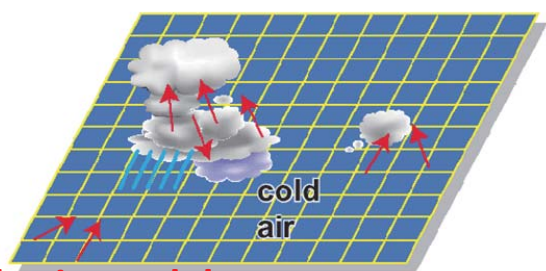
[天気予報]

上空に寒気が入って大気が不安定となり
所により強い雨が降るでしょう



全球雲解像モデル

熱帯の対流雲システム
クラウドクラスターを直接計算
細かいメッシュでメソスケールの
メカニズムを取り入れる



Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

NICAM: 2005年に完成 8年間世界唯一

Development of the World's First Global Cloud-System-Resolving Model utilizing the Earth Simulator's Capability

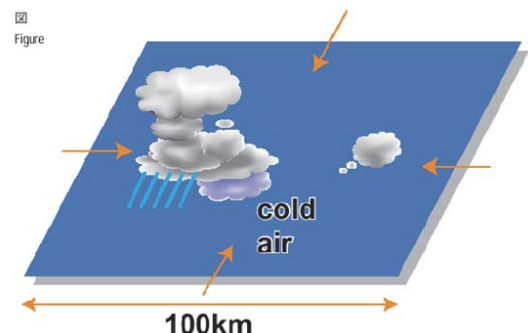
Conventional weather forecasting & climate model: Grid spacing – 100 km

- Directly calculate extratropical storms, frontal clouds and rain.
- Convection clouds (towering thunderclouds) that are smaller than the grid

Stability = $T(\text{top layer}) - T(\text{lower layer})$ will determine the generation of towering thunderclouds and precipitation ⇒ Parameterization

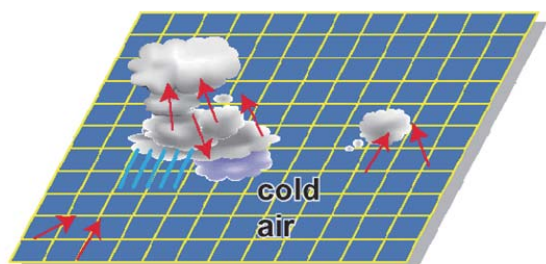
[Weather Forecast]

Due to the cold air entering into the air, the atmosphere will become unstable, and bring strong rainfall.



Global Cloud-System-Resolving Model

Tropical convection cloud system
Directly calculate clouds clusters
Application of meso-scale mechanism with fine mesh



Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

NICAM: Completed in 2005/ The only one in the world for 8 years

JAMSTECで主に温暖化予測、新モデル開発に携わっている研究者と



With the researchers working on global warming prediction and new model development at JAMSTEC



世界最大のスーパーコンピューター
「地球シミュレーター」と
それを用いた地球温暖化・気候変化予測実験

The World's Largest Supercomputer
“Earth Simulator” and the Experiments of Global Warming
and Climate Change Prediction Utilizing it

スーパーコンピューターと気象・気候の研究、予測

- ◆ 気象・気候の数値モデルによる研究: 科学諸分野中計算量最大
 - ・ GFDL: 世界トップレベルの計算機を少数の研究者が利用
 - ・ 日本の電子計算機: 1970年代まで世界水準にはるかに及ばない。
 - ・ 気象庁: 日本の最大級計算機設置。業務用で研究はごくわずか
 - ・ 大学: 最大級の計算機は計算センターで1000人の共同利用!
- ◆ 1984年 気象研究所 つくば移転を機に専用計算機設置
1990年 IPCC第1次報告に独自予測結果を何とか出す(時岡さんほか)
- ◆ 1990年 温暖化問題重大化+スーパーコン貿易摩擦
⇒ 国立環境研(NIES)、防災科技研に研究専用大型機導入
 - ・ 1995年 IPCC 第2次報告: 気象研NIESの計算機を利用、並みの結果
 - ・ 2001年 IPCC 第3次報告: 気象研、東大気候センターそれぞれのモデルによる結果 世界の真ん中よりちょっと後ろに
 - ・ 気象研から防災科技研に出向の研究者: 独占的利用で高い成果

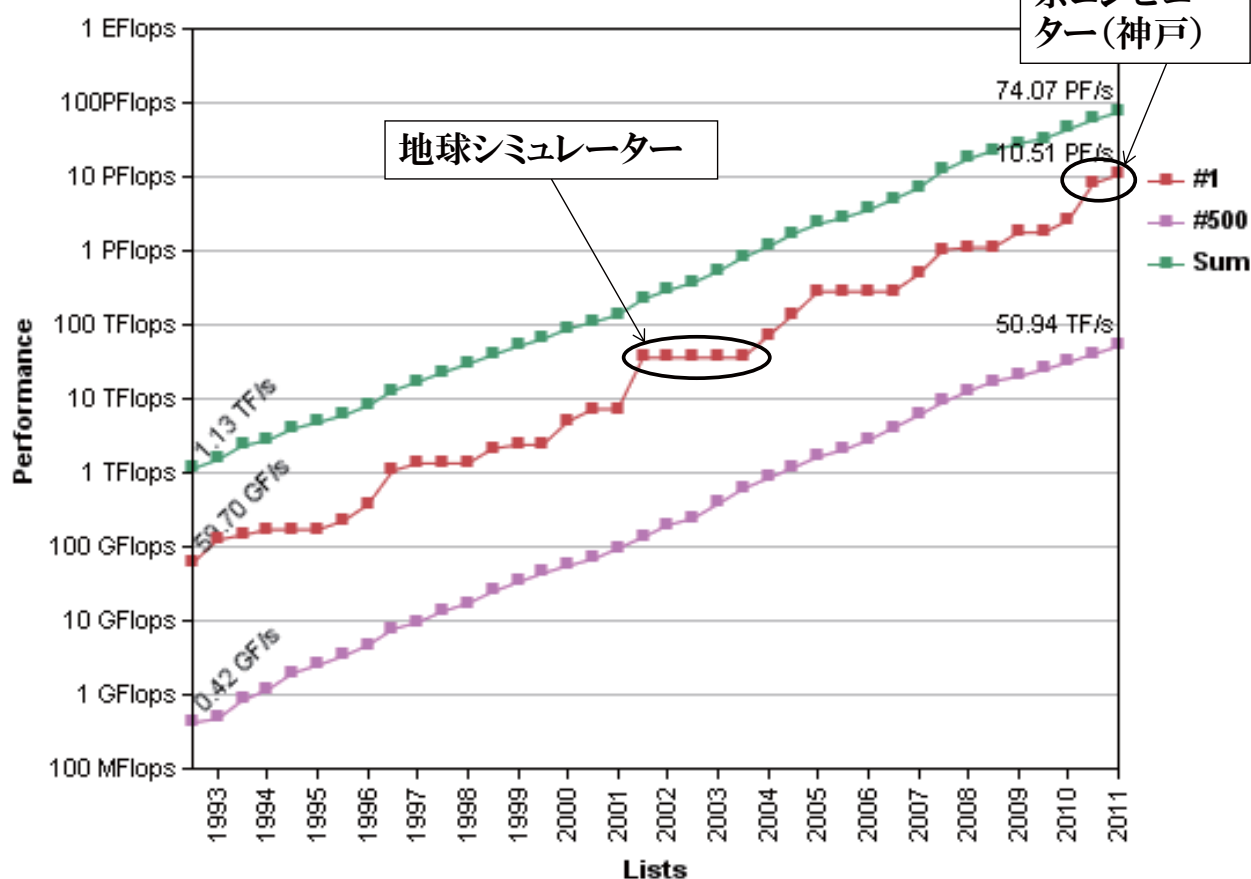
こんなところに世界最大のスーパーコンが来ることになった!

Supercomputer & Meteorological and Climate Research and Prediction

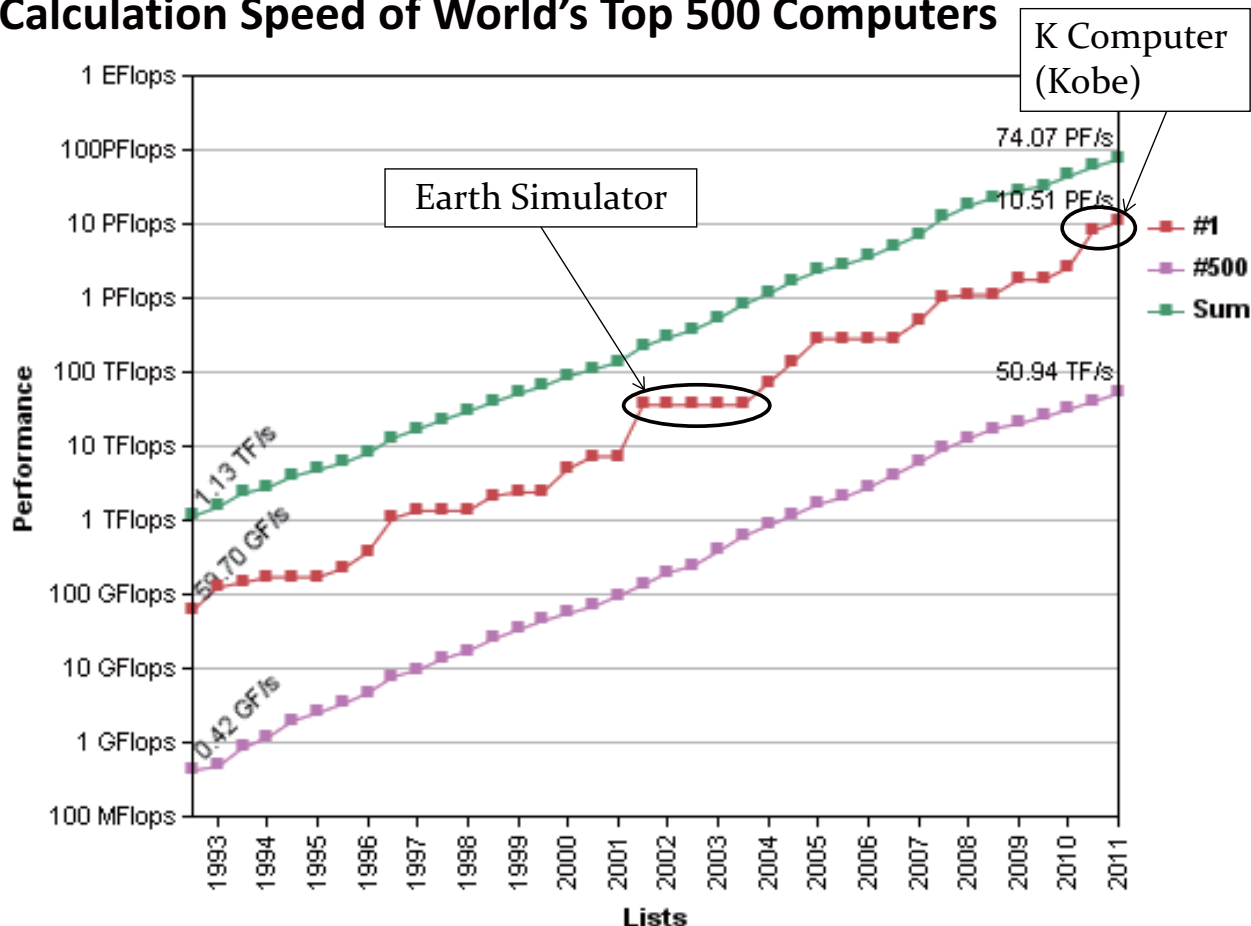
- ◆ Research on numerical weather and climate modeling: The maximum amount of calculation among all scientific fields
 - ・ GFDL: A small number of researchers use the world's top class computer
 - ・ Electronic computers made in Japan: Far behind the global standards until the 1970s
 - ・ Meteorological Agency: Acquired Japan's largest class computer, which was mainly for industrial use rather than research
 - ・ Universities: University computer centers had top-level computers in Japan shared by thousands of people.
- ◆ 1984: Meteorological Research Institute was moved to Tsukuba and specialized research computers were installed.
- ◆ 1990: Independent predictions from the Institute somehow made it into the first IPCC report. (Dr. Tokioka and others)
- ◆ 1990: Expansion of global warming issues + Increased trade friction related to supercomputers ⇒ NIES and the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED) procured large supercomputers.
 - ・ 1995: IPCC 2nd report: By the Meteorological Research Institute using the computer installed at NIES, resulting in the same type of calculations performed by other groups.
 - ・ 2001: IPCC 3rd report: Meteorological Research Institute and the University of Tokyo CCSR made predictions using their respective models, which were a little behind the global mainstream.
 - ・ Researchers dispatched from the Meteorological Research Institute to NIED: Use of the computers exclusively resulted in excellent achievements.

Plans to install the world's largest supercomputers in Japan!

世界でTOP500のコンピューターの計算速度



Calculation Speed of World's Top 500 Computers



世界最大のスーパーコンピュータ地球シミュレーター

1997年開発決定、2002年完成 予算400億円

640ノードから成る並列ベクトル計算システム

各ノードは8ギガフロップスの演算器8台(計64ギガフロップス)と16ギガバイトのメモリを持つ

総計5120の演算器で最大演算速度40テラフロップス
メモリ10テラバイト

すべての演算器が一斉に働くように仕事を割り振れない。普通は数%が働くのみ⇒最大実効速度目標値 5テラフロップス

最大速度の12%

実際達成記録 36テラフロップス⇒～90%(2年半世界一)

一般利用の場合でも～30% 当初目標の3倍!

1ギガフロップス(G Flops): 1秒間に10億回の演算

テラ = ギガの1,000倍 テラフロップス: 1秒間に1兆回の演算

The World's Largest Supercomputer – Earth Simulator –

Development was determined in 1997/ Completed in 2002/ Budget: 40 billion yen

A parallel/ vector supercomputer system consisted of 640 processor nodes (PNs)

Each PN is a system with a shared memory, consisting of 8 vector-type arithmetic processors (Aps) (totally 64 G flops), and 16-GB main memory system (MS).

The Earth Simulator as a whole thus consists of 5120 Aps with 10 TB of main memory and the theoretical performance of 40 T flops.

The Earth Simulator as a whole thus consists of 5120 Aps with 10 TB of main memory and the theoretical performance of 40 T flops. Not all the APs work at the same time. Only a few % of Aps work together. ⇒ Target maximum effective speed: 5 T flops (12% of the maximum speed)

Actual record of achievement: 36 T flops ⇒ 90% (World's record for 2 and a half years)

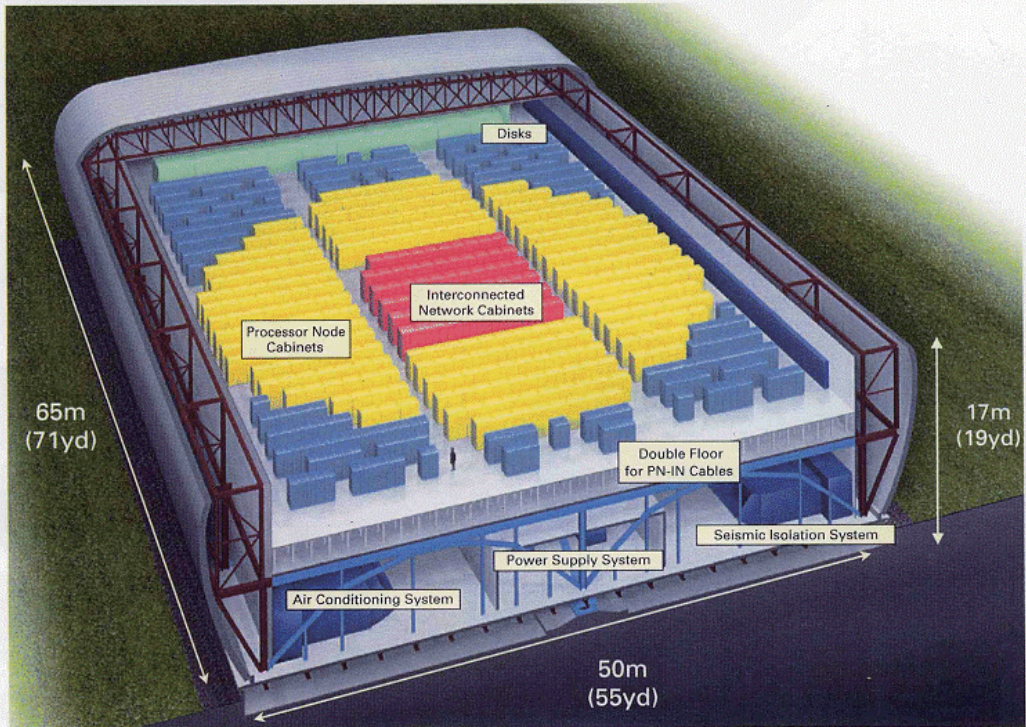
Even in general use ⇒ 30% (3 times faster than the initial goal)

1 G flops: 1 billion times of arithmetic processing/ second

T = 1000 times of G

T flops: 1 trillion times of arithmetic processing/ second

Artist's Representation of the Earth Simulator



Earth Simulator System



人・自然・地球共生プロジェクト

2002-2006年度 ⇒ IPCC 第4次報告(2007年)

21世紀気候変動予測革新プログラム

2007-2011年度 ⇒ IPCC第5次報告(2013年)

Project for Sustainable Coexistence of Humanity, Nature and the Earth

2002 -2006 ⇒ IPCC 4th Report (2007)

Innovative Program of Climate Change Projection for the 21st Century

2007 -2011 ⇒ IPCC 5th Report (2013)

地球シミュレーター(ES)にどう取り組むか

- 計算能力一挙に1,000倍(東大・計算機センター32GFlops)

- 大気や海洋モデルの解像度10倍=格子間隔1/10

IPCC報告にある世界の大気モデル最多 280km

前回東大モデル大気: 約500km⇒目標50km(実際100km)

(結合モデル) 海洋: 約280km ⇒ 約20km(目標・実際)

- 気象研大気だけモデル: 100*km⇒目標10km**(実際20km)

* 防災科技研での研究用モデル

**ES開発計画に際し「地球シミュレーター部会」で決めた目標

今まで経験しない並列機

計算量のギャップから実機でないとテストできない

世界の「中の下」からいきなり「飛びぬけトップ」へ！

How to Use the Earth Simulator

- 1,000 times more powerful than existing computers

(The University of Tokyo Computer Center: 32 G flops)

- 10 times higher resolution in atmospheric and oceanic models = Grid spacing becomes 1/10

- The highest resolution in atmospheric model of the world in the IPCC report: 280 km

Previous University of Tokyo atmospheric model: Approx. 500 km

⇒ Target: 50 km (Actually 100 km)

(Coupled model) Ocean: Approx. 280 km ⇒ Approximately 20 km (Both target and actual)

- Meteorological Research Institute atmospheric model: 100 km*

⇒ Target: 10 km** (Actually 20 km)

* Research model used by NIED

** Target determined by the Earth Simulator Council under the ES development plan project

The first parallel computer ever

Testing is only possible by the actual device due to the gaps in the calculation amount.

Japanese computers jumped to the world's top from a place which was a little behind the global mainstream!

人・自然・地球共生プロジェクト(2002-2006年度)

地球シミュレーター有効利用へ向け「オール日本体制」

課題 番号	主目的	モデル種別	解像度		担当機関
			大気	海洋	
1-1	世界最高解像度モデル による21世紀気候変 化予測	大気・海洋・ 陸面結合気候 モデル	110km	20km	東大気候センター、国 立環境研、海洋機構・ 地球環境フロンティア
1-2	京都議定書後の安定化 シナリオ選定のための 450年予測	同上 NCAR開発モ デル	160km	110km	電力中央研、米国大気 研究センタ（NCAR）、 九大応力研
2	炭素循環・大気組成変 化へのフィードバック を含む気候変化予測	炭素循環・大 気組成・気候 結合モデル	280km	140km	海洋機構・地球フロン ティア、国立環境研、 東大気候センター
4	21世紀末における地 域気候変化、日々の気 象の変化の予測	海面温度指定 大気・陸面モ デル	20km	—	気象庁・気象研、地球 科学技術推進機構、宇 宙航空研究開発機構
		同上 日本周 辺	5km		
IPCC第三次評価報告書			560～ 280km	440～ 140km	

Project for Sustainable Coexistence of Humanity, Nature and the Earth (2002 – 2006)

For the effective use of the Earth Simulator – Established a “All-Japan team” structure.

No.	Major Purpose	Model	Resolution		Responsible Organization
			Atmosphere	Ocean	
1-1	21st climate change prediction utilizing the world’ s highest-resolution model	Coupled atmosphere-ocean-land general circulation model	110km	20km	University of Tokyo Center for Climate System Research(CCSR)/ National Institute for Environmental Studies (NIES)/ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) Frontier Research System for Global Change
1-2	450-year prediction to determine a stabilization scenario after the Kyoto Protocol	Same as above NCAR development model	160km	110km	Central Research Institute of Electric Power Industry/ US National Center for Atmospheric Research (NCAR)/ Kyushu University Research Institute for Applied Mechanics (RIAM)
2	Climate change prediction including the feedback to the changes in carbon circulation and atmospheric composition	Carbon circulation-atmospheric composition-climate coupled general circulation model	280km	140km	JAMSTEC Frontier Research System for Global Change/ NIES/ University of Tokyo Center for Climate System Research
4	Prediction of regional climate and daily meteorological phenomena at the end of the 21st century	Atmosphere-land general circulation model under the determined sea surface temperature	20km	—	Meteorological Agency Meteorological Research Institute/ Advanced Earth Science and Technology Organization (AESTO)/ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
		Same as above Around Japan	5km		
IPCC 3rd Report			560～280km	440～140km	

「共生プロジェクト」のおかげで東大気候センター、 国立環境研、地球フロンティアが一体化して協力

リーダー：住さん、木本さん

若手実行部隊だけで20人規模

大気モデル高解像度化に伴うモデル修正

⇒パラメタ調整100回以上（国環研・フロンティア 江守）

海洋モデル、極の扱い変更⇒極軸回転

20kmメッシュでは渦の効果直接計算無理、海氷の問題

計算量のギャップのため実機でないとテストも出来ない，そのうえ

2002年4月ES公式稼動 少しして利用可能に

2004年8月末 IPCC AR4向け計算終了期限という厳しいスケジュール

多くの課題、初めての経験

にもかかわらず驚くべき短時間で奇跡的に間に合った！！

住さん・・・天佑神助 ESが実効として3倍速かった

Researchers from the University of Tokyo CCSR, NIES and the Frontier Research System for Global Change came together as a team to be engaged in very close collaboration through the Project for Sustainable Coexistence of Humanity, Nature and the Earth.

Leaders: Prof. Sumi and Prof. Kimoto

About 20 young researchers participated in the project

Revision of models along with the enhancement of the high-resolution level of the atmospheric model

⇒ More than 100 times adjustment of parameters (NIES & Frontier: Dr. Emori)

Changes in handling of the pole in the oceanic model

⇒Rotation of polar axis

Impossible to directly calculate the vortex effects with 20 km grid/ Sea ice issues

Due to the gaps in the calculation amount, it was necessary to use the actual equipment.

April 2002: The Earth Simulator started the operation officially, and soon after that it became available for use. At the end of August 2004: The deadline of the calculation for IPCC AR4 ← Very tight schedule

We encountered plenty of problems in our first experience conducting experiments using parallel computing, but achieved the goals in a short period of time!!

Prof. Sumi said, "We had the gods on our side."

The Earth Simulator was three times faster than the existing computers.

東大気候センター・モデルの海洋：20kmメッシュで蛇行する黒潮を表現
銚子沖で離岸するのがとらえられている **IPCC報告のモデルで初めて**

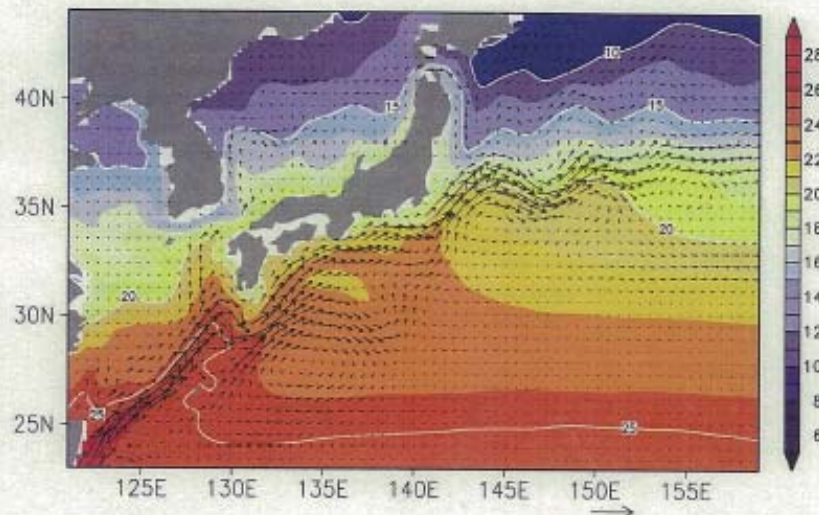


Figure 8.1. Long-term mean ocean current velocities at 100 m depth (vectors, unit: m s^{-1}) and sea surface temperature (colours, $^{\circ}\text{C}$) around the Kuroshio and the Kuroshio Extension obtained from a control experiment forced by pre-industrial conditions (CO_2 concentration 295.9 ppm) using MROC3.2 (fives).

Oceans Seen with the University of Tokyo CCSR Model: The meandering path of the Kuroshio was made visible for the first time with the high-resolution 20km grid.

(First time among the models used for IPCC reports)

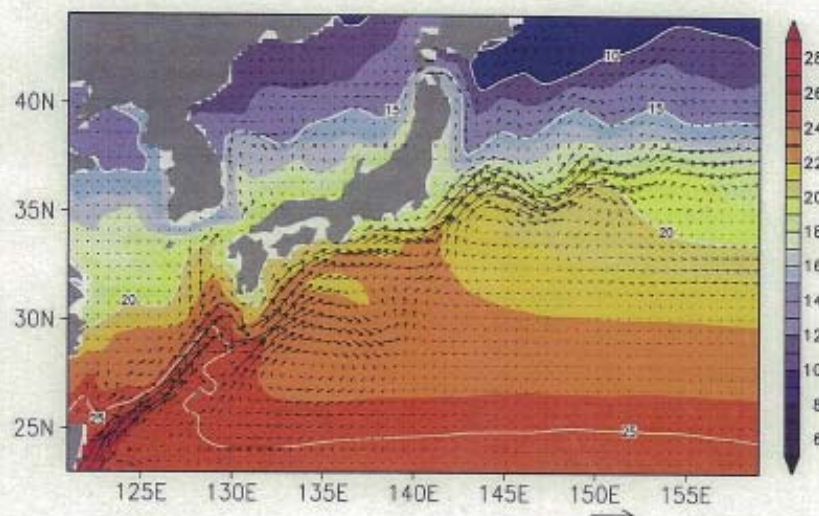
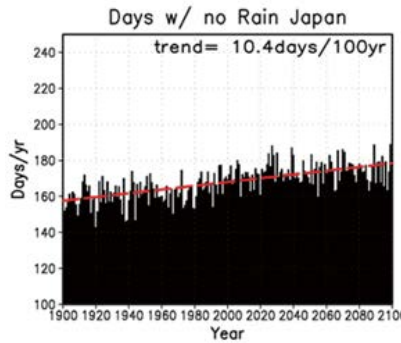


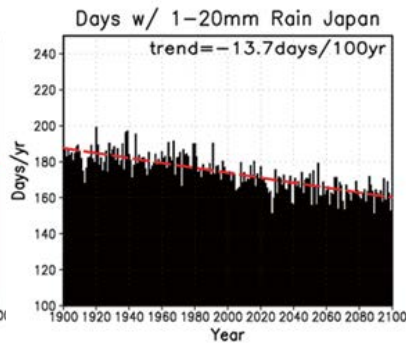
Figure 8.1. Long-term mean ocean current velocities at 100 m depth (vectors, unit: m s^{-1}) and sea surface temperature (colours, $^{\circ}\text{C}$) around the Kuroshio and the Kuroshio Extension obtained from a control experiment forced by pre-industrial conditions (CO_2 concentration 295.9 ppm) using MROC3.2 (fives).

100km格子気候モデルで計算された日本周辺の 無降水日、弱雨日、強雨日の日数の変化 (1900-2100年)

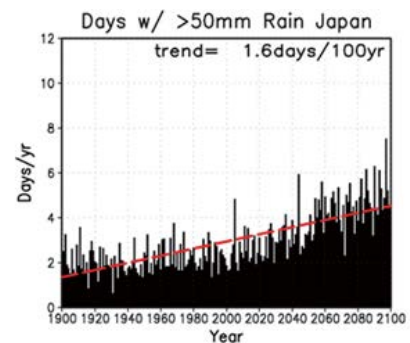
無降水日数
(1mm/日以下)



弱雨日数
(1-2mm/日)



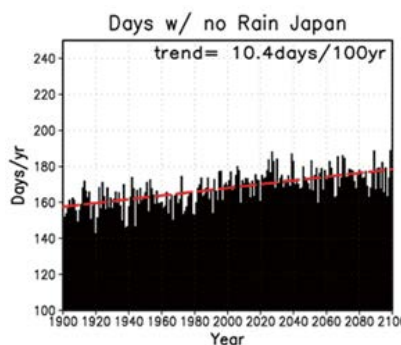
強雨日数
(50mm/日以上)



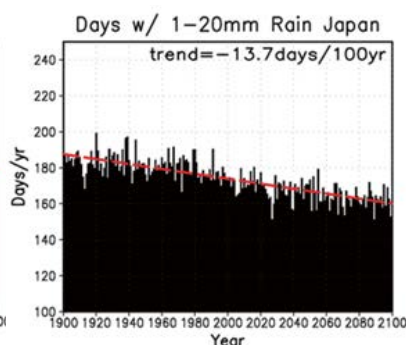
強雨日、無降水日がともに増え、中間が減る

Changes in the Number of Days with No Rainfall, Light Rain, and Heavy Rain around Japan Calculated by 100 km Grid Climate Model (1900 – 2100)

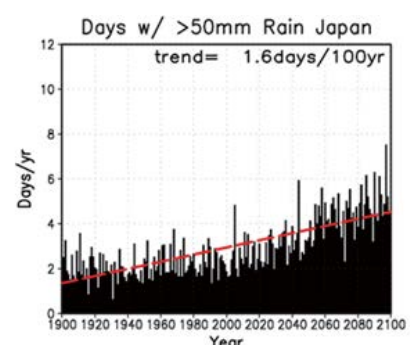
Number of days
with no rainfall
(1 mm/ day or less)



Number of days
with light rain
(1-2 mm/ day)



Number of days
with heavy rain
(50 mm/ day or more)



Both days with heavy rain and no rainfall increased
and the days with light rain decreased.

熱帯低気圧の経路

観測

83.7

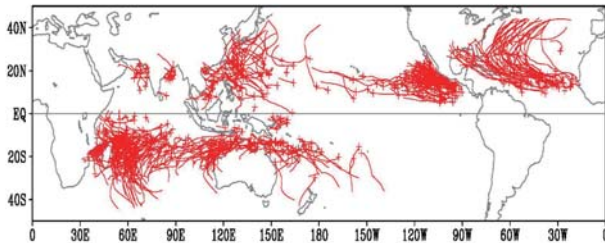
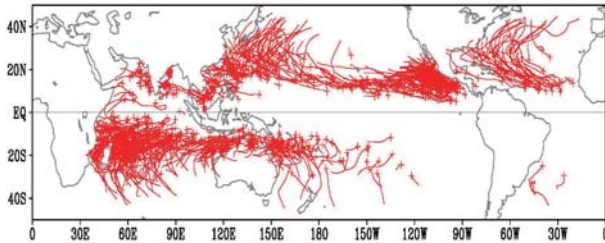
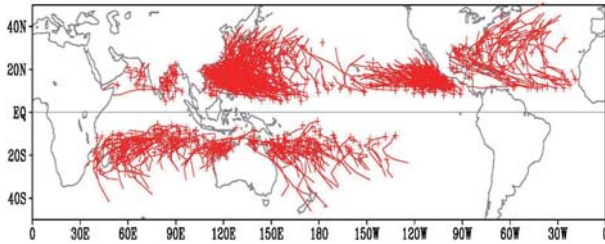
現在気候

78.3

28%減少

温暖化気候

54.8



Routes of the Tropical Depressions

Observation:

83.7

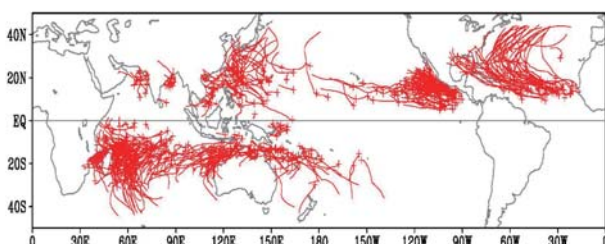
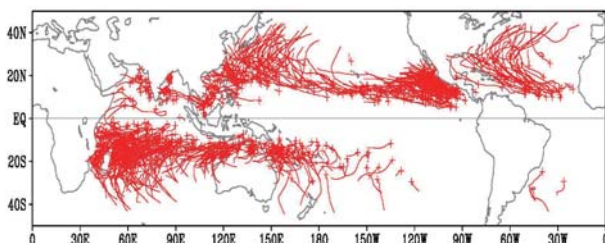
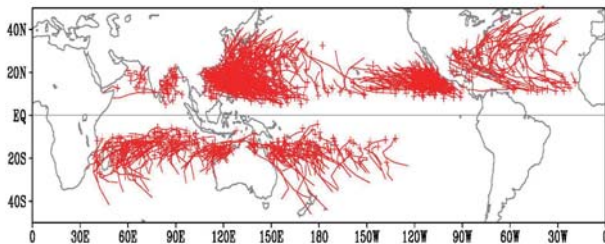
Current climate:

78.3

Decreased by
28%

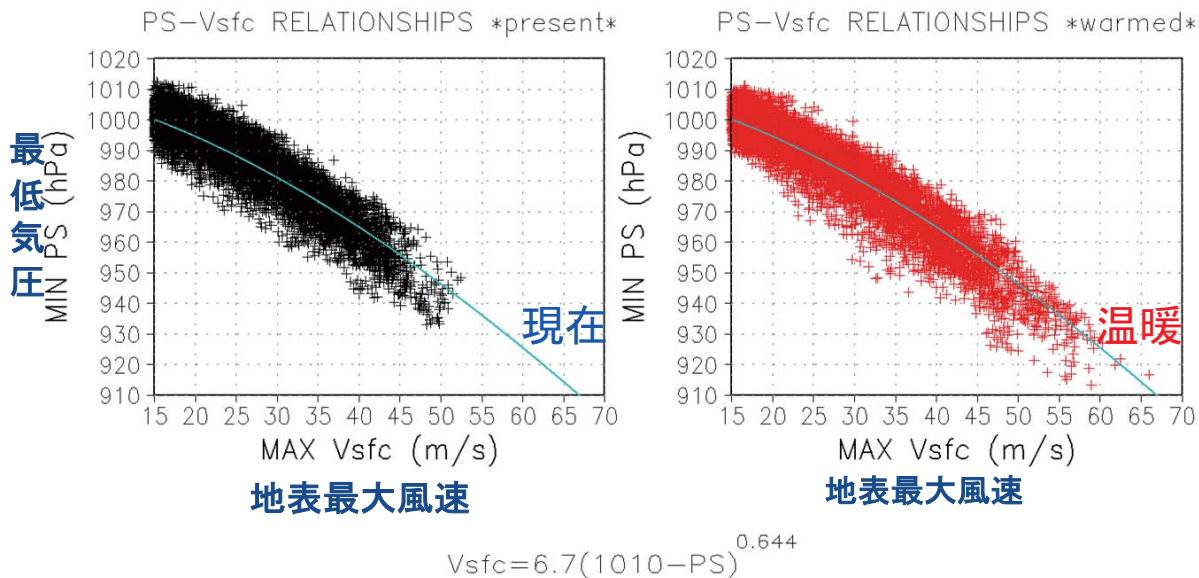
Warmer climate:

54.8



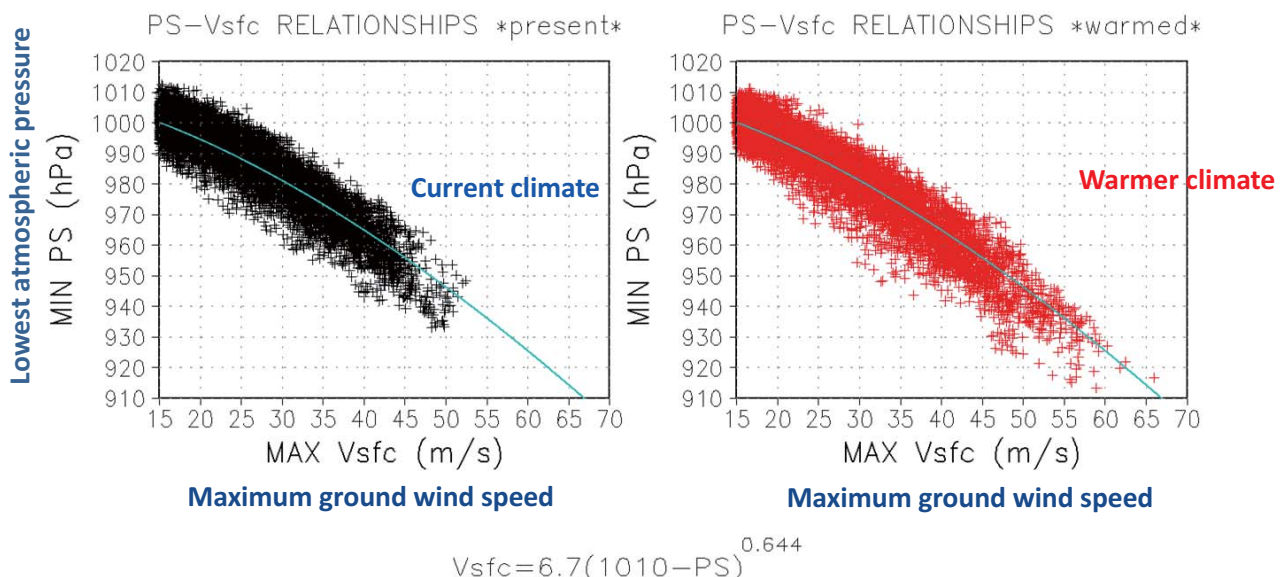
シミュレーションによる現在気候(左)と温暖化気候(右)のもとで発生した全熱帯低気圧の中心気圧－最大風速関係

温暖化気候では、これまでにない強い熱帯低気圧が発生する



Simulated Central Pressures and Maximum Wind Speed Relationships Seen in All Tropical Depressions under the Current Climate (left) and Warmer climate (right)

Under the warmer climate, tropical depressions tend to become stronger than ever.



21世紀気候変動予測革新プログラム(2007-11年度)

目的ごとの3種のモデル

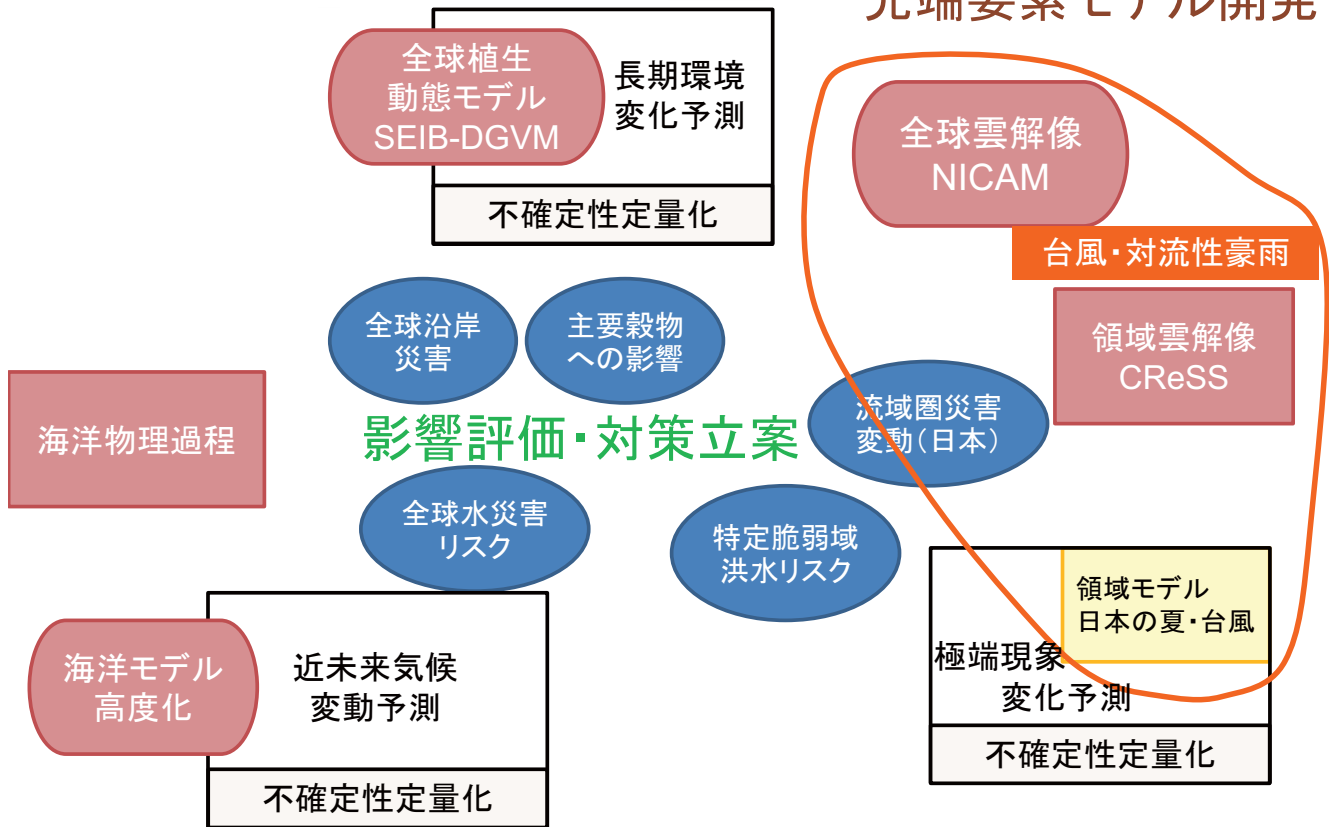
1. 長期(300年)にわたる地球環境の変化
温暖化に伴う植生の変化
気候変化(気温、海流、etcの変化)によるCO₂循環の変化
➡ 地球システム統合モデル
2. 近未来(30年)の気候変化予報
エルニーニョ等年々の気候変動
10年スケールでの変化(海面下数100mが影響)
➡ 大気・海洋結合気候モデル
3. 近未来(30年後)や21世紀末における
極端現象(台風・集中豪雨etc)の変化の予測
近未来、21世紀末における海面温度、CO₂濃度のもとで
数値予報を行う。
➡ 数値予報モデル

Innovative Program of Climate Change Projection for the 21st Century (Innovative Program) during FY 2007 – 2011

Three models by purpose

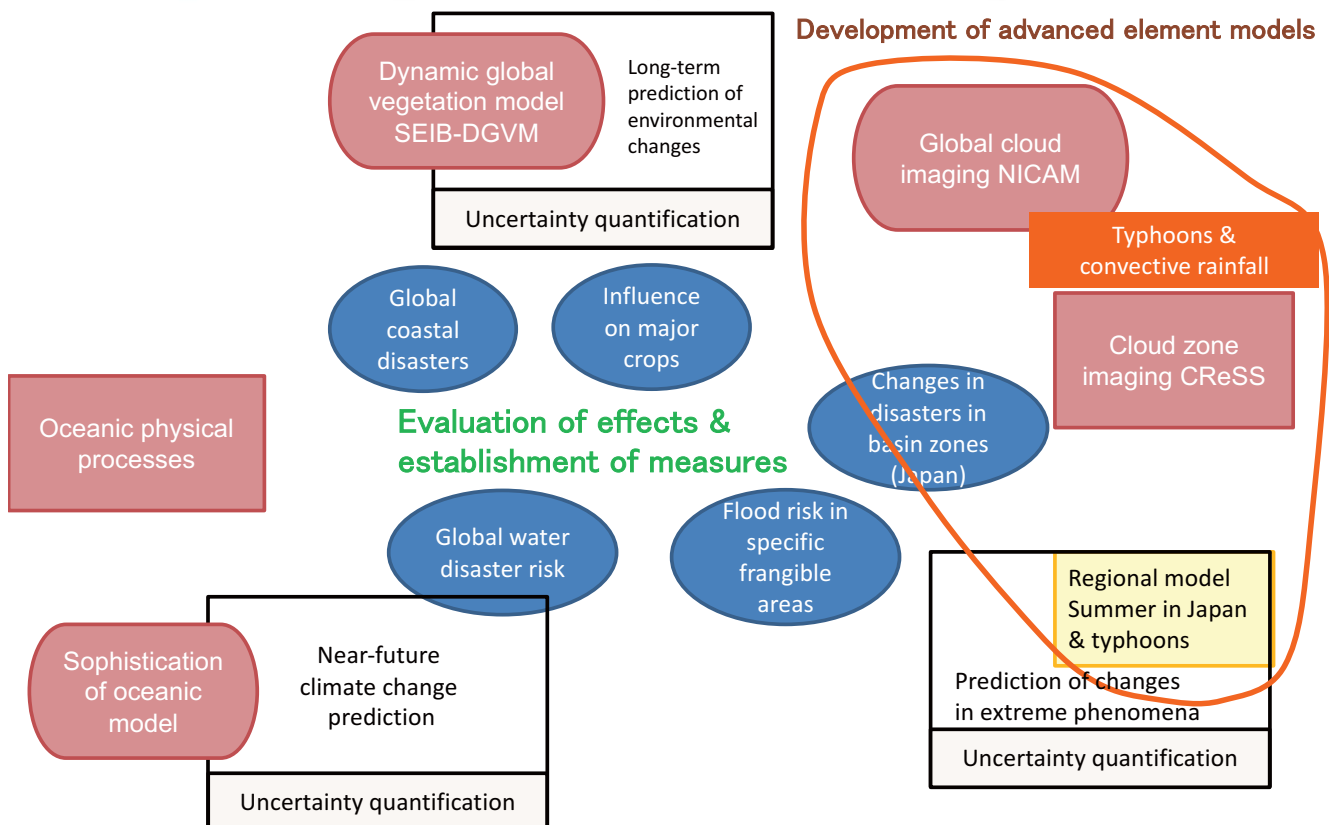
1. Changes in global environment over an extended period of time (300 years)
Changes in vegetation along with global warming Changes in CO₂
circulation along with climate change (changes in temperature, oceanic
currents, etc.)
➡ Integrated Earth System Model
2. Thirty-year climate forecast
Ongoing climate changes such as El Nino
10-year scale changes
(A few hundred meters below the ocean surface exerts an influence.)
➡ Coupled ocean-atmosphere general circulation mode.
3. Prediction of changes in extreme phenomena (typhoons, severe rain
storms, etc.) in 30 and 100 years
Numerical prediction under estimated ocean surface temperature and CO₂
concentration
➡ Numerical prediction model

革新プロの構成16課題 3主要モデル開発・予測実験 先端要素モデル開発



Innovative Program Structure – 16 issues

Development and prediction experiments of 3 major models



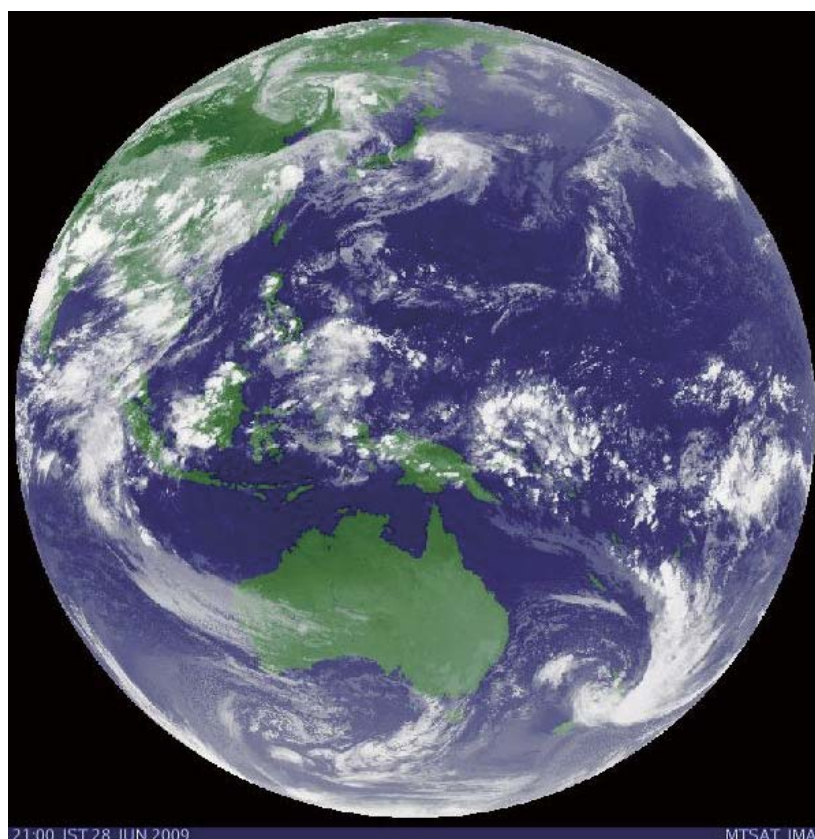


◆ 日本の気候の特色である夏季の
対流性降雨はどうなるか？

◆ How will the summer convective rain,
which is characteristic of Japanese climate, be?

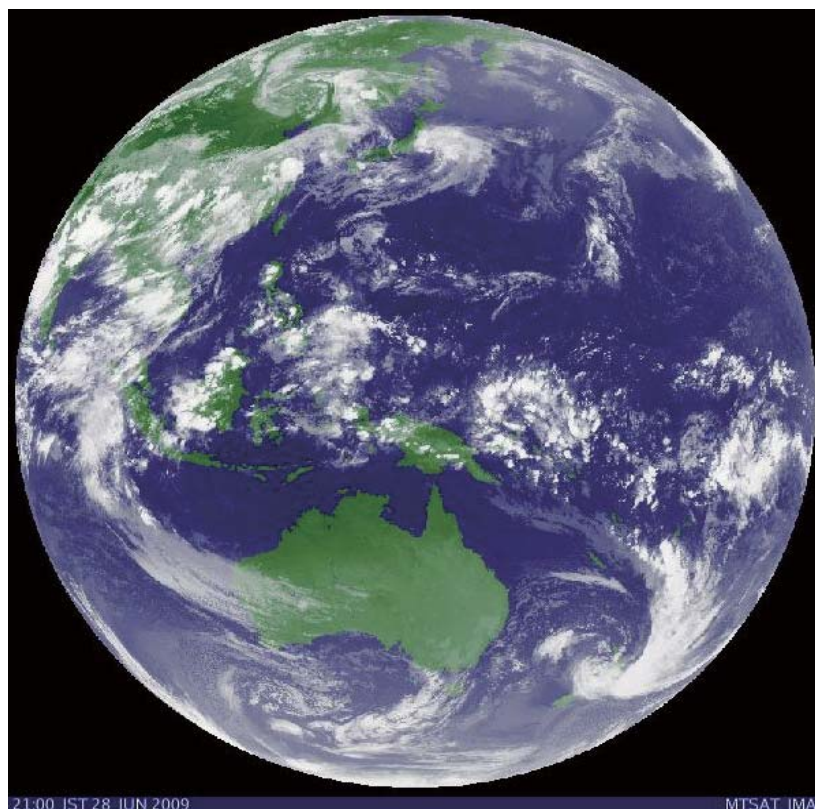
衛星(MTSAT)画像で見る熱帯の対流と(南半球)中緯度の温帯低気圧・前線(大規模システム)の対照

21:00 JST
28 JUNE 2009

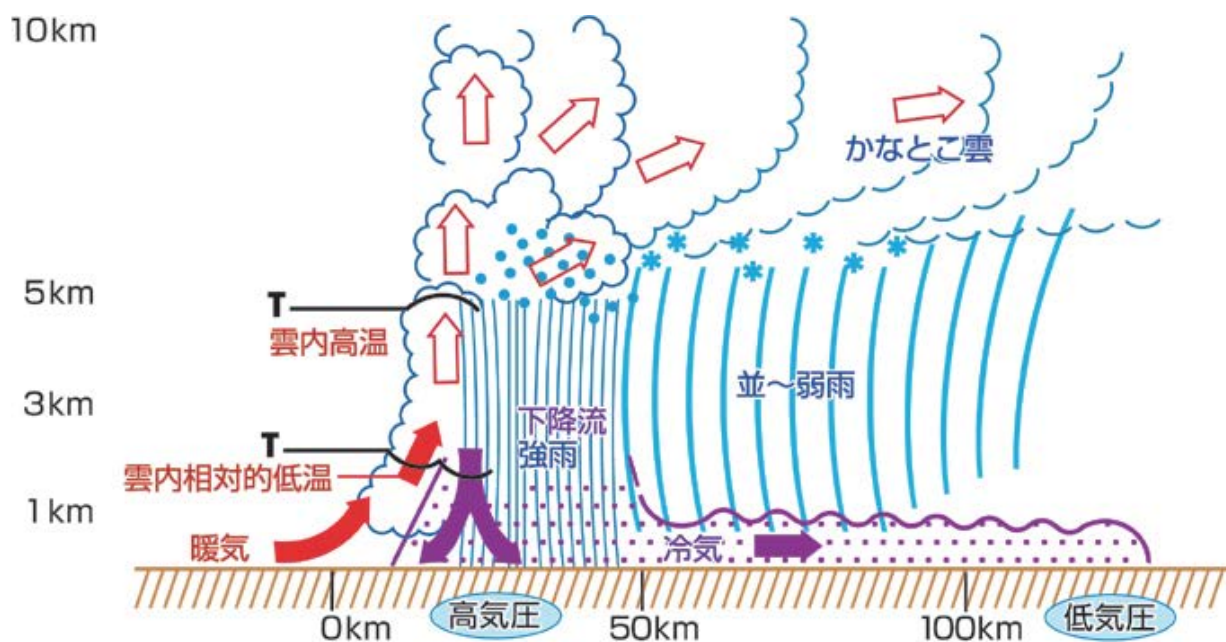


Tropical Convection (Southern Hemisphere), Extratropical Storms and Storm Fronts (Large-scale Systems) in Middle Latitudes Observed through Satellite (MTSAT) Images

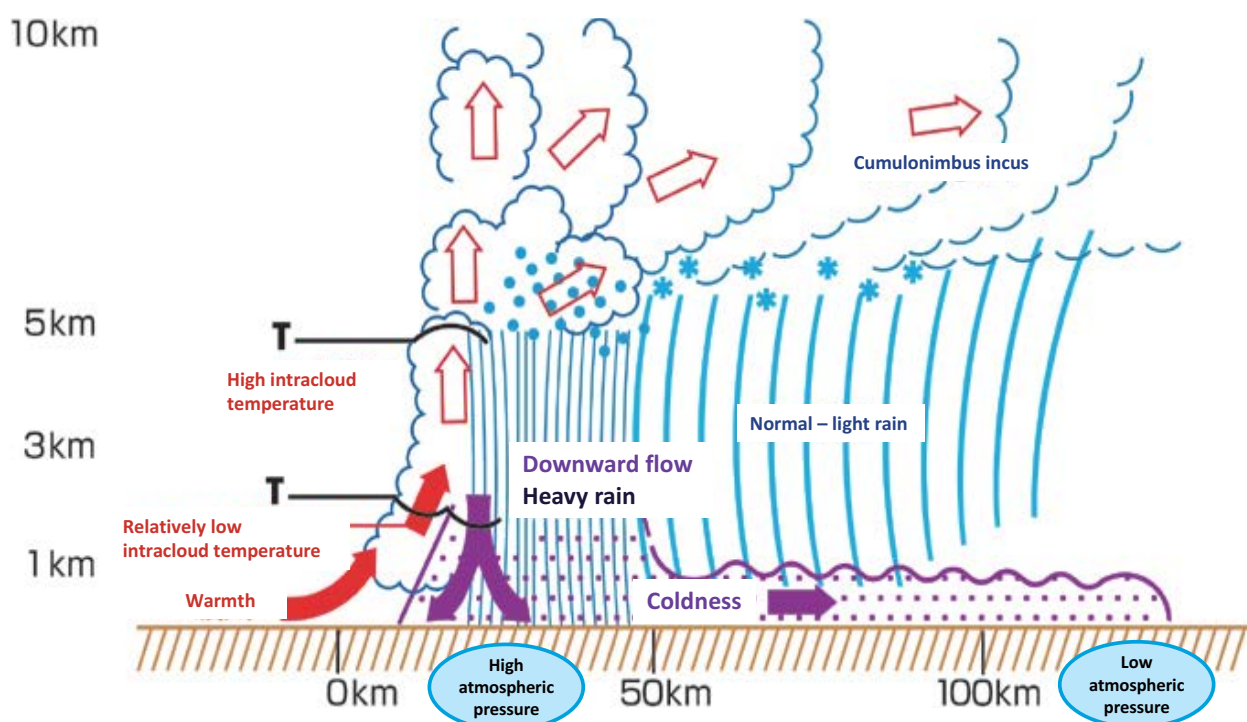
21:00 JST
28 JUNE 2009



熱帯域のクラウドクラスターの構造



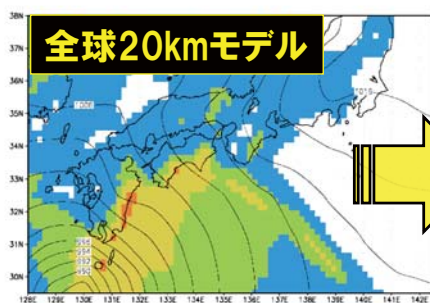
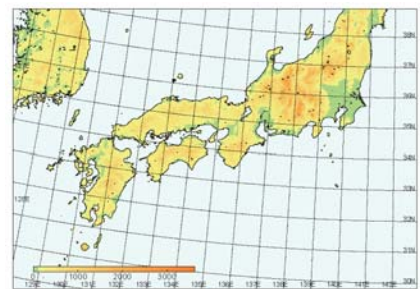
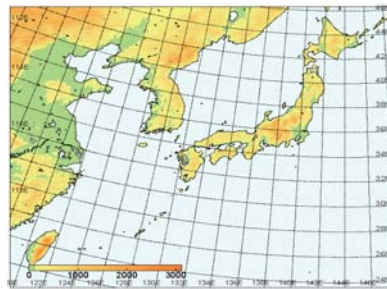
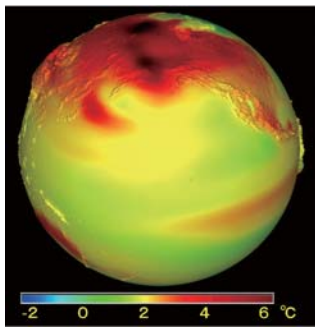
Cloud Cluster Structure in the Tropics



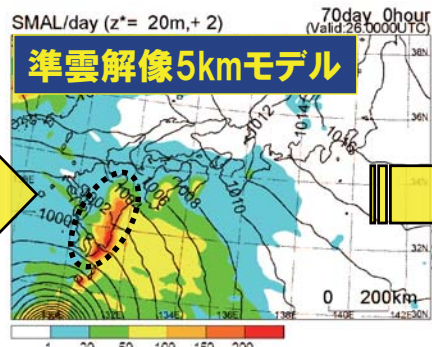
革新プログラム・極端現象変化予測

部分的に2段階に高解像度化

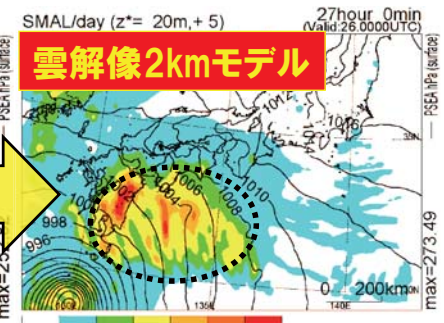
気象庁・気象研究所
代表 鬼頭昭雄



+3.0°Cの世界
+1.5°Cの世界



より強い降水の表現

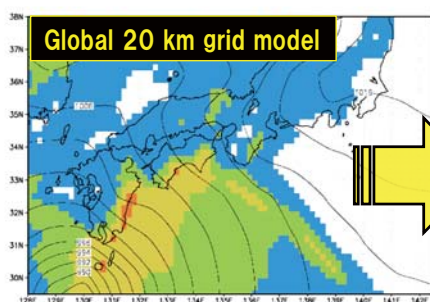
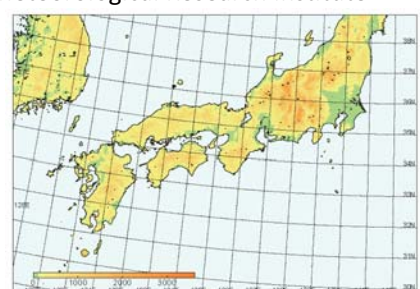
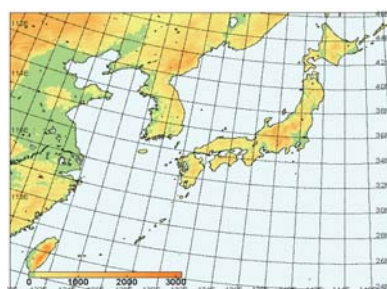
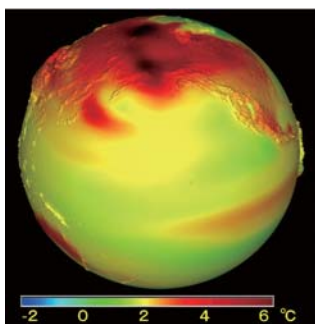


より精緻で現実に
即した現象の表現

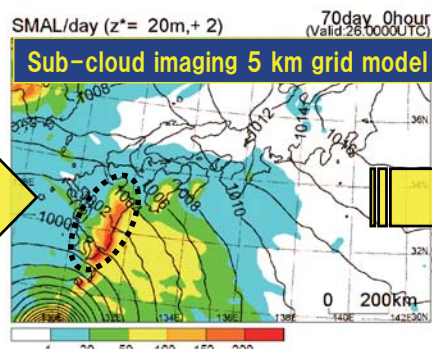
Innovative Program & Prediction of Changes in Extreme Phenomena

Two-step high-resolution imaging

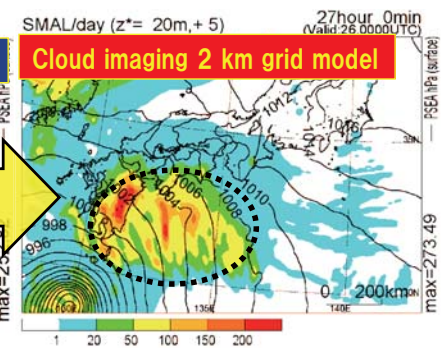
Dr. Akio Onitsuka
Representative, Meteorological Agency
Meteorological Research Institute



+ 3.0 degrees C
+1.5 degrees C



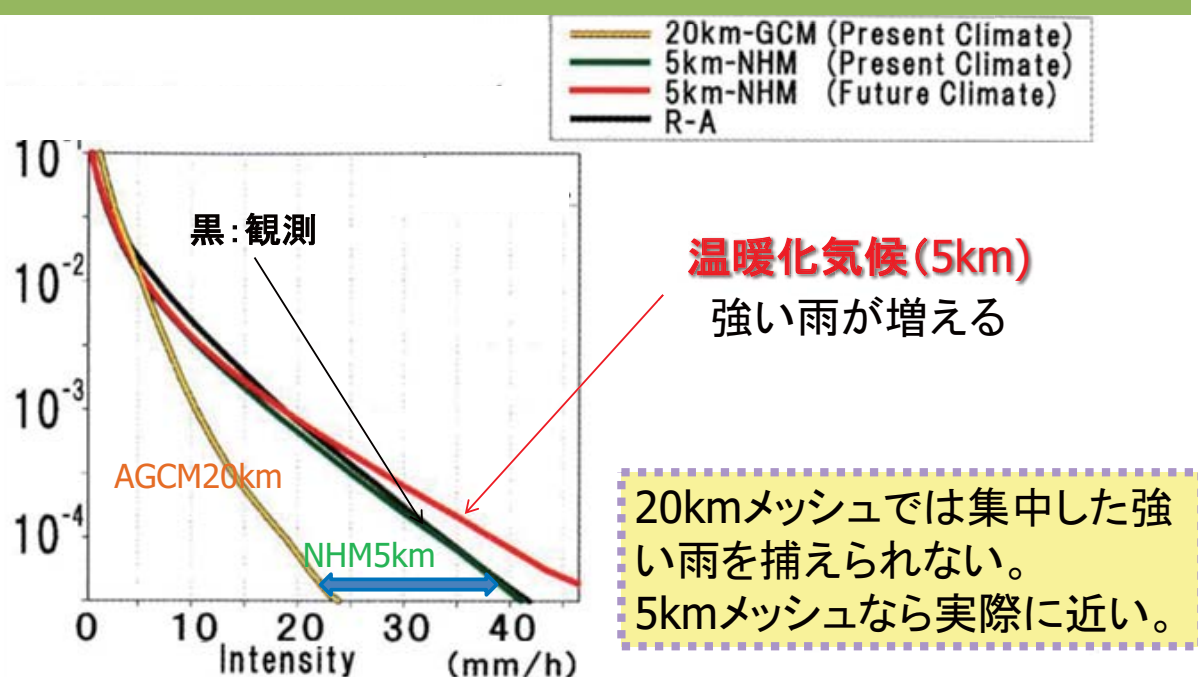
Show stronger rainfall



Show more accurate
and actual phenomena

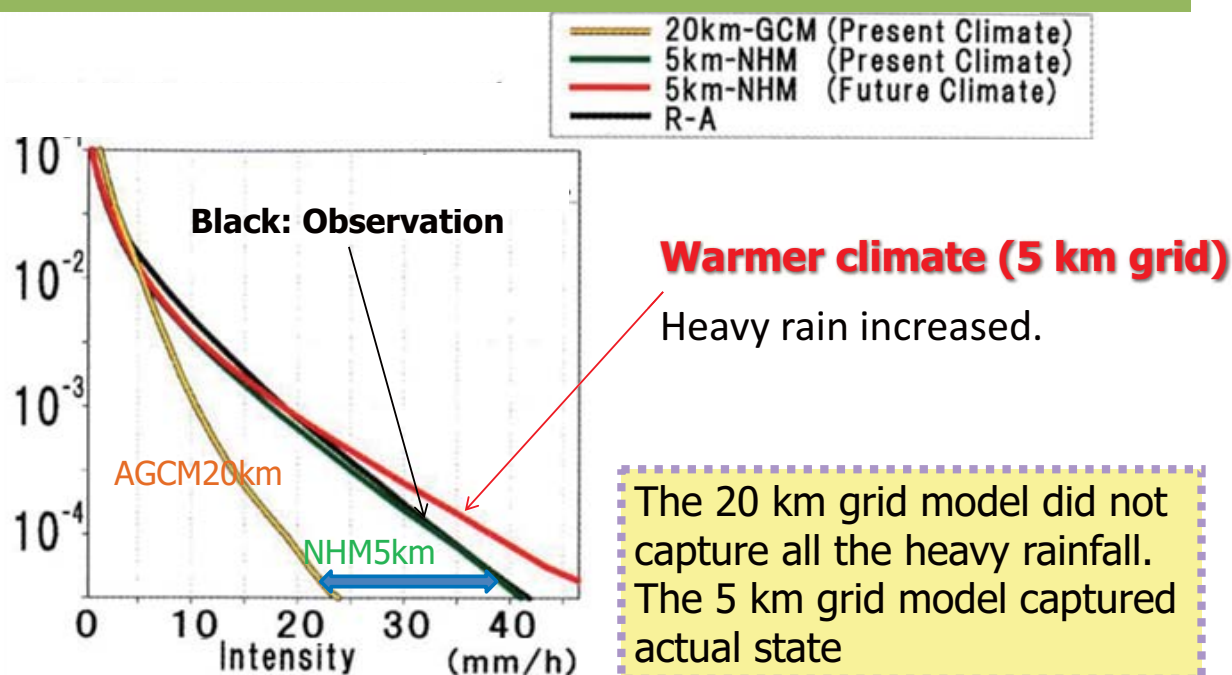
20kmメッシュと5kmメッシュ(対流雲直接計算)の比較

雨量強度別出現頻度 (Wakazuki et al. 2007)

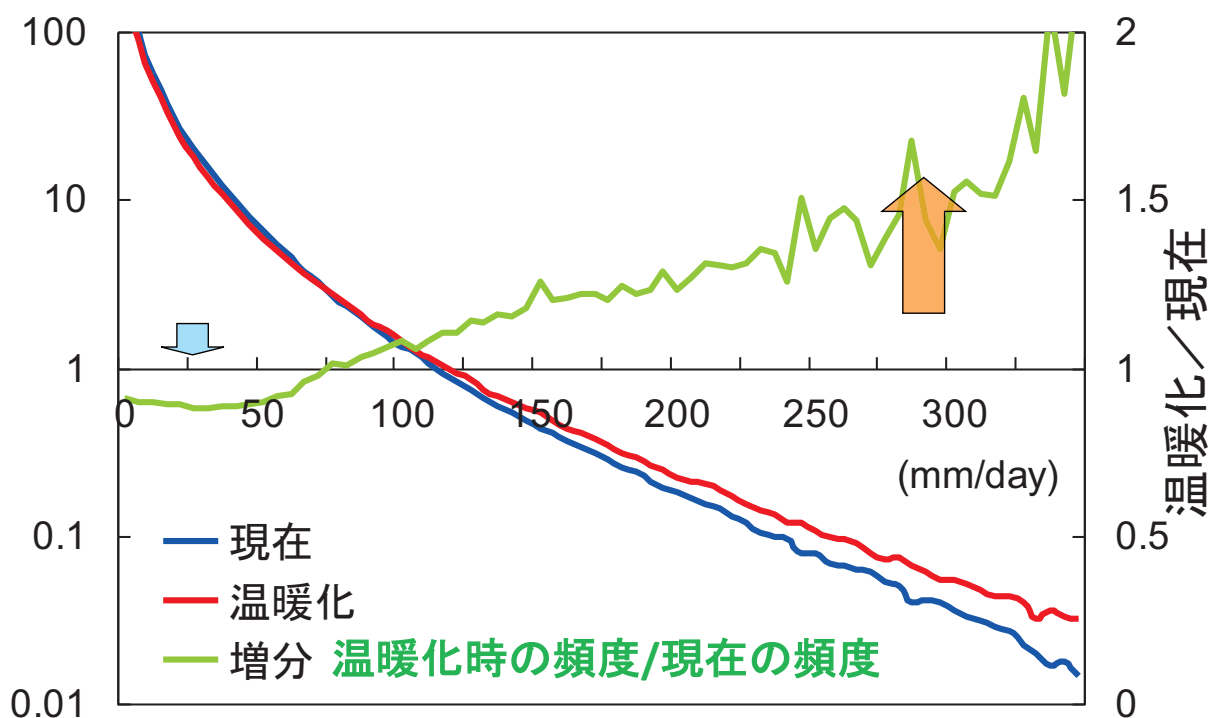


Comparison of 20 km and 5 km Grids (Direct Calculation of Convective Clouds)

Frequency by rainfall amount (Wakazuki et al., 200)



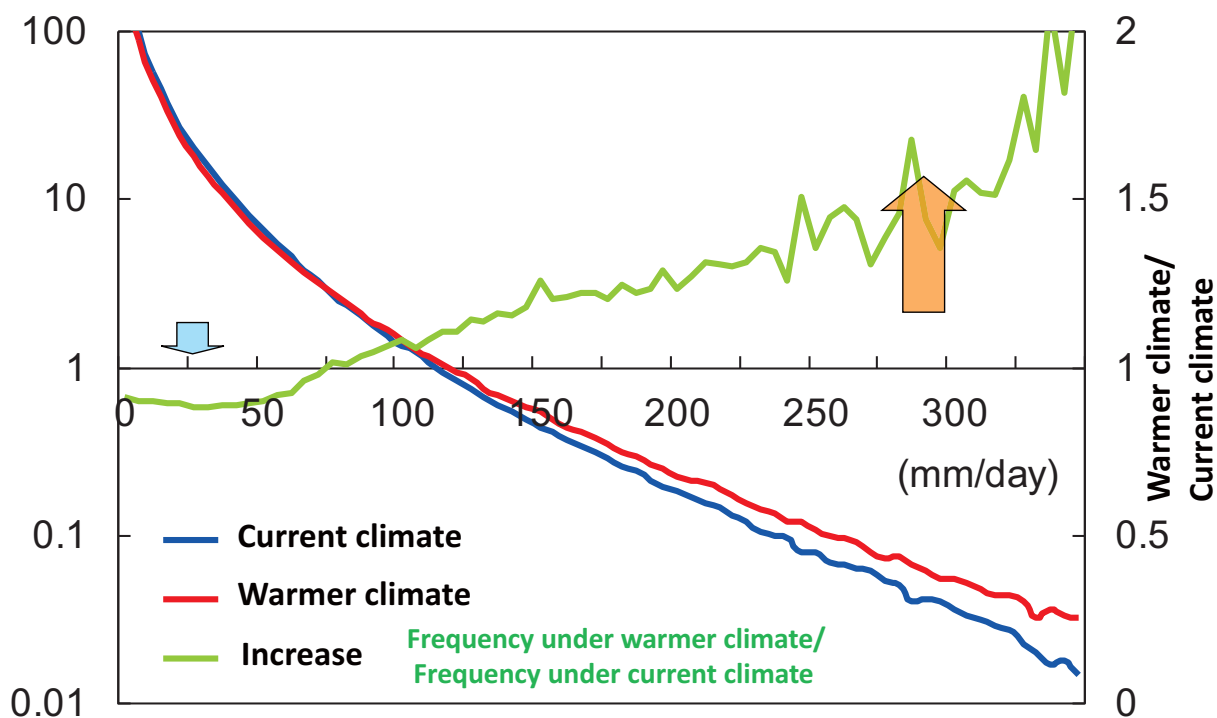
温暖化実験で得られた日本陸上の降水の変化 日降水量の頻度分布の変化



弱い雨の頻度は減少

強い雨の頻度は増加

Changes in Rainfall in Japan Observed in the Global Warming Experiments Changes in Distributions of Daily Precipitation



Frequency of light rain decreased.

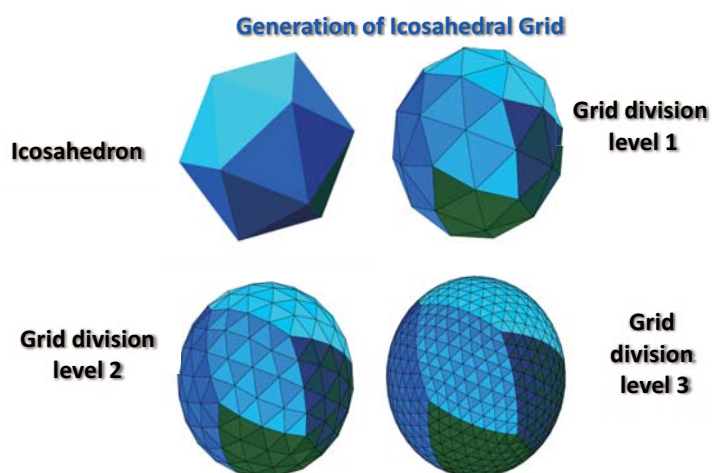
Frequency of heavy rain increased.

世界初の全球雲(システム)解像モデル

Non-hydrostatic ICosahedral Atmosphere Model (NICAM)

NICAM開発チーム

海洋研究開発機構
東京大学大気海洋研究所
リーダー 佐藤 正樹

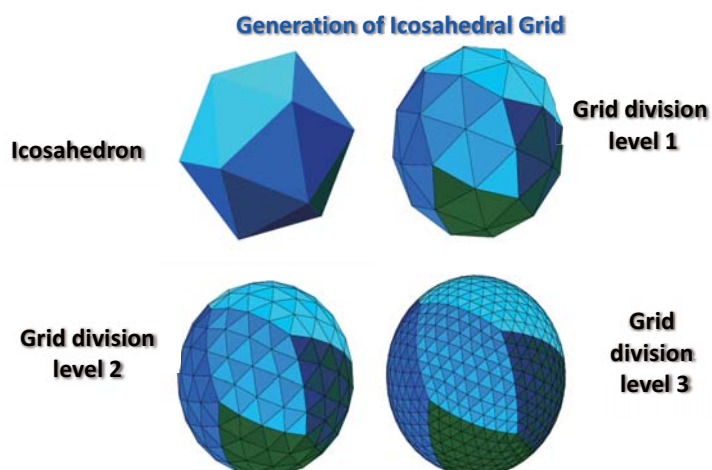


The world's First Global Cloud (System) Imaging Model

Non-hydrostatic ICosahedral Atmosphere Model (NICAM)

NICAM Development Team

Japan Agency for Marine-Earth
Science and Technology (JAMSTEC)
The University of Tokyo Center for
Climate System Research (CCSR)
Leader: Prof. Masaki Sato



Madden Julian Oscillation (MJO)

マッデン・ジュリアン振動(1971年発見)

熱帯域での気圧の
40～50日周期変動

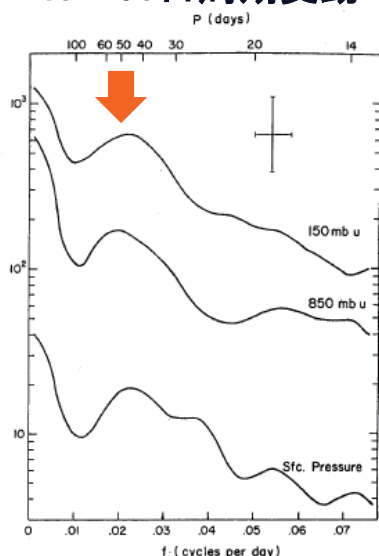
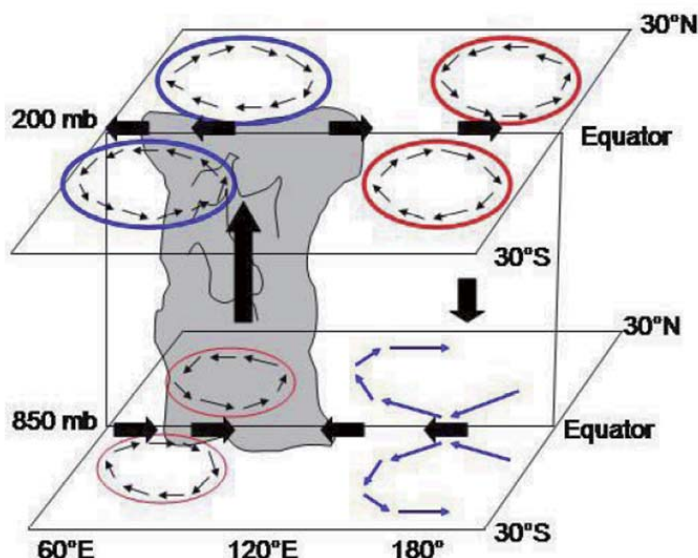


FIG. 2. Individual variance spectra for the 850- and 150-mb zonal wind component and station (sfc) pressure for the Canton Island record. The use of a logarithmic ordinate permits a constant scaling to be used for the chi-square degrees of freedom sampling analysis. This scaling $[x^2(0.1\%)/51]$ and the bandwidth of the analysis, $\Delta f = 0.0081 \text{ day}^{-1}$, are shown by the cross. Spectral densities are normalized to unit bandwidth ($\text{m}^2 \text{sec}^{-2} \text{day}^{-1}$).

対流活動中心と一緒に赤道沿いに
東進する低気圧 (地上)



40～50日で赤道を一周

Madden Julian Oscillation (MJO)

Madden Julian Oscillation (MJO) (Discovered in 1971)

Changes in Atmospheric Pressures in the
Tropics in 40- to 50-Day Cycles

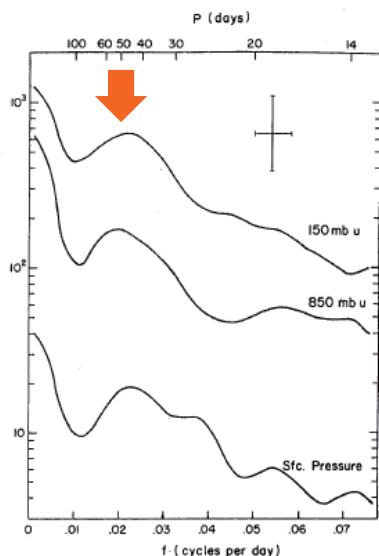
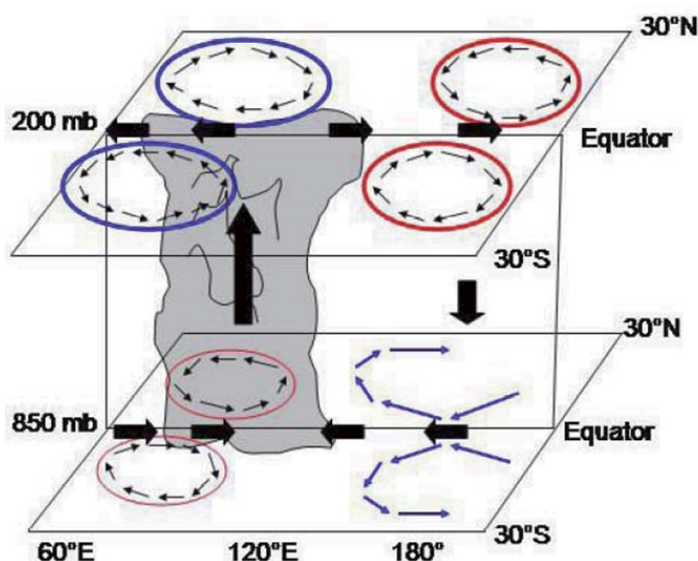


FIG. 2. Individual variance spectra for the 850- and 150-mb zonal wind component and station (sfc) pressure for the Canton Island record. The use of a logarithmic ordinate permits a constant scaling to be used for the chi-square degrees of freedom sampling analysis. This scaling $[x^2(0.1\%)/51]$ and the bandwidth of the analysis, $\Delta f = 0.0081 \text{ day}^{-1}$, are shown by the cross. Spectral densities are normalized to unit bandwidth ($\text{m}^2 \text{sec}^{-2} \text{day}^{-1}$).

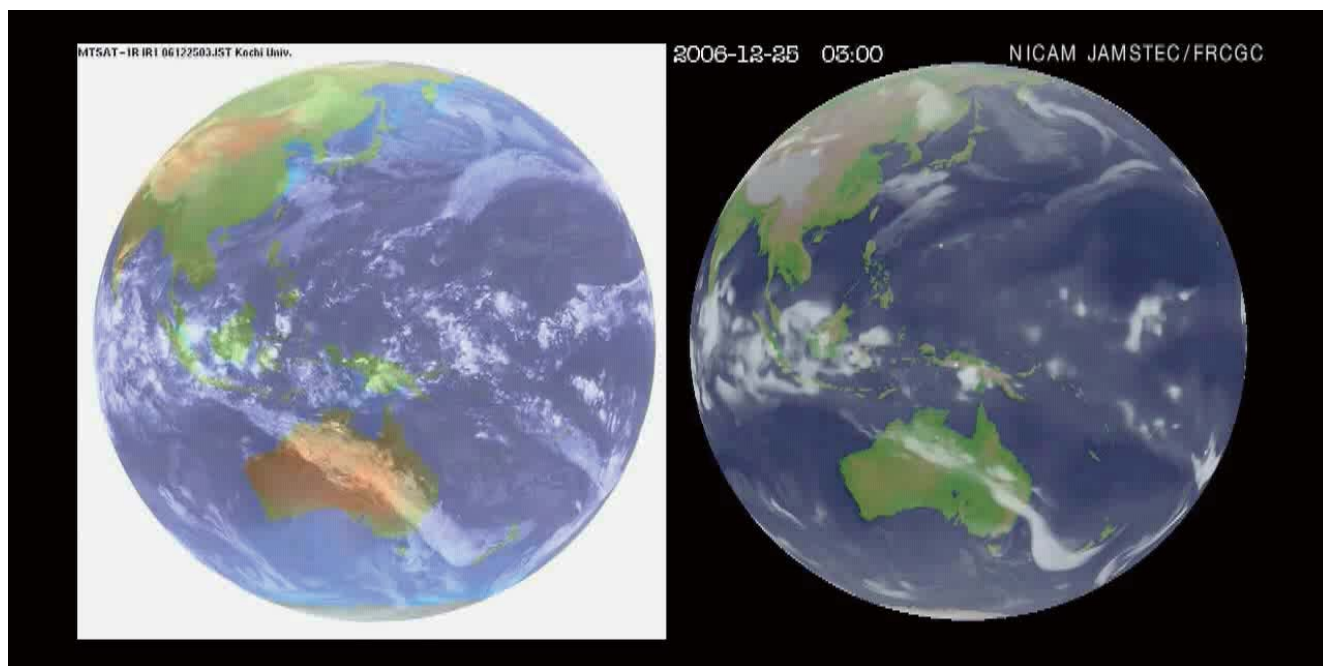
Low Atmospheric Pressure on the Ground Moving
toward the East with the Middle of the Convective
Activity along the Equator



They go around the equator over 40 to 50 days.

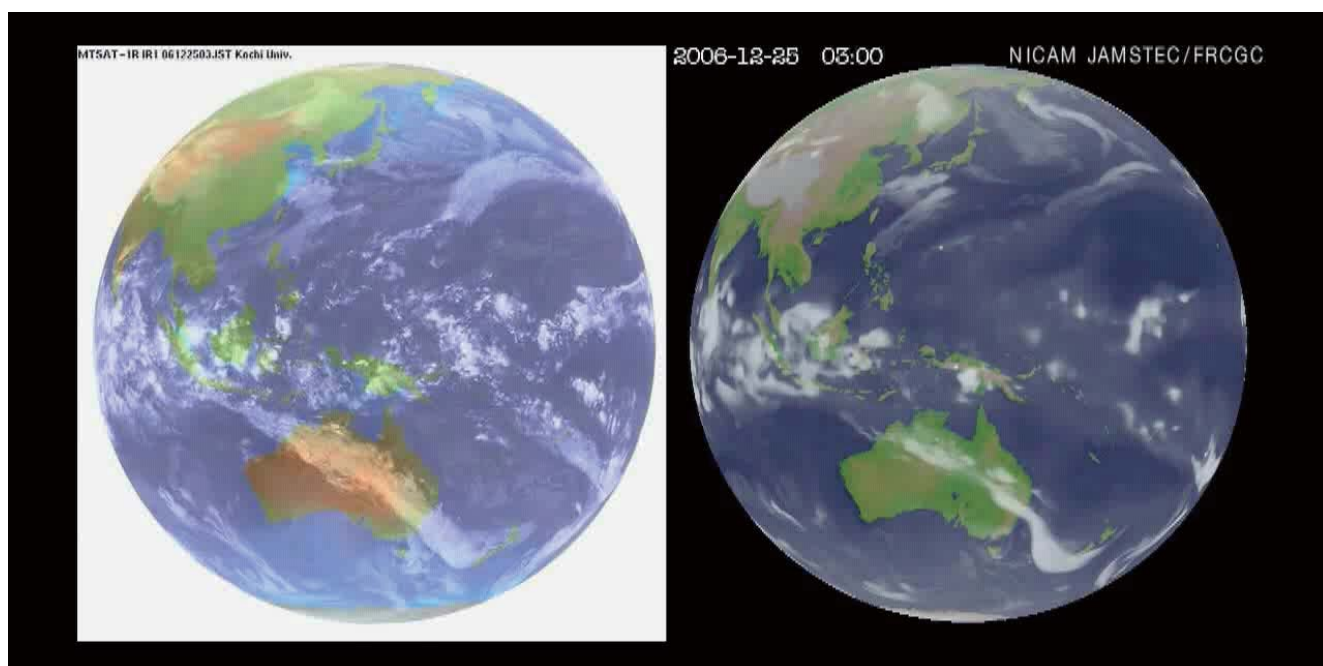
MTSATによる観測

NICAM (3.5km メッシュ) によるシミュレーション

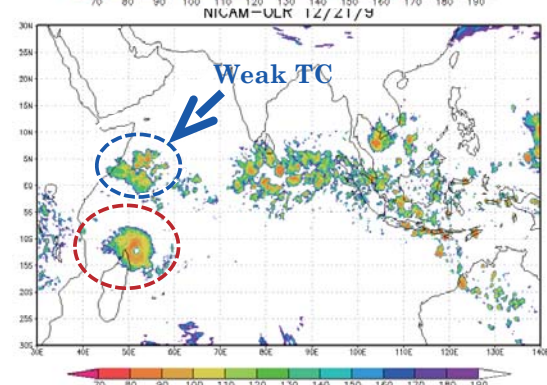
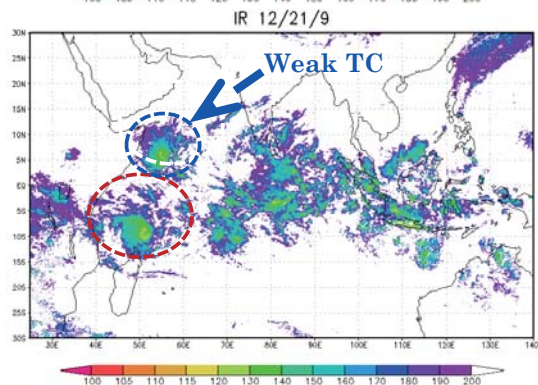
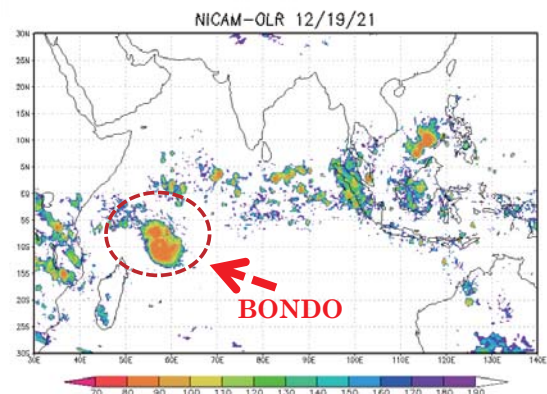
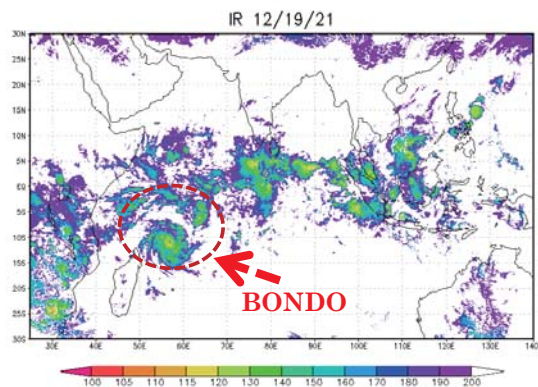


Observation with MTSAT

Simulation with NICAM (3.5 km grid)



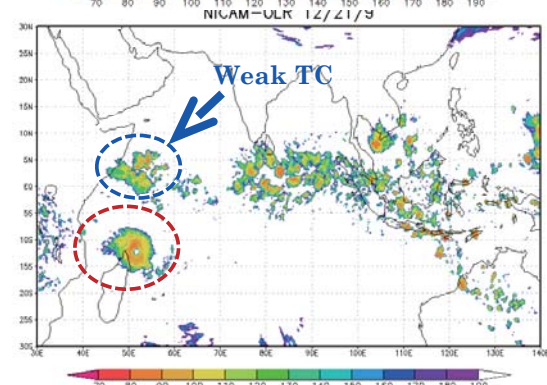
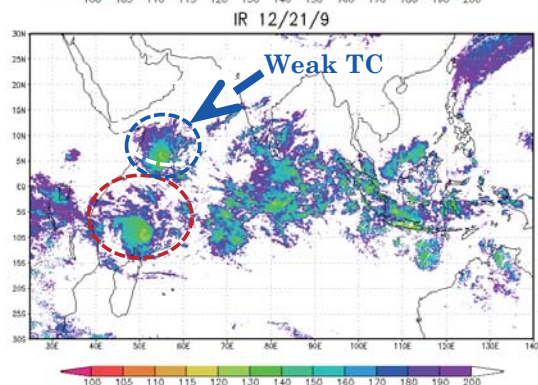
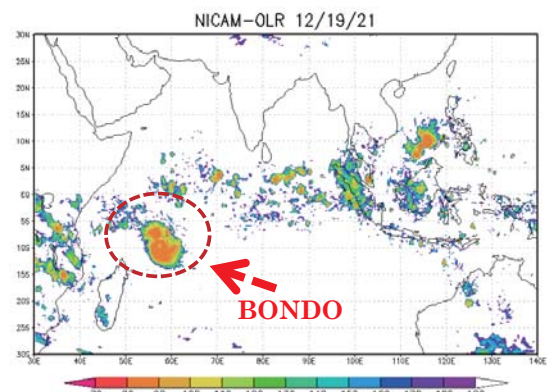
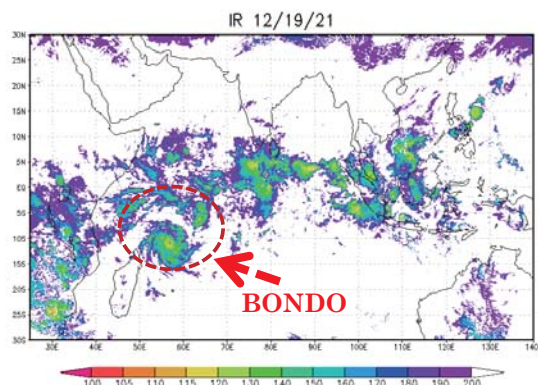
Bondo :西インド洋でうまれた双子渦の一方（南半球） 北半球の渦は弱く熱帯低気圧にならず



Satellite IR TBB (K)

NICAM OLR (W/m2)

**Bondo; One of the Twin Vortexes Generated in the West Indian Sea (Southern Hemisphere)
The vortexes in the Northern Hemisphere were weak and did not become tropical
depressions.**



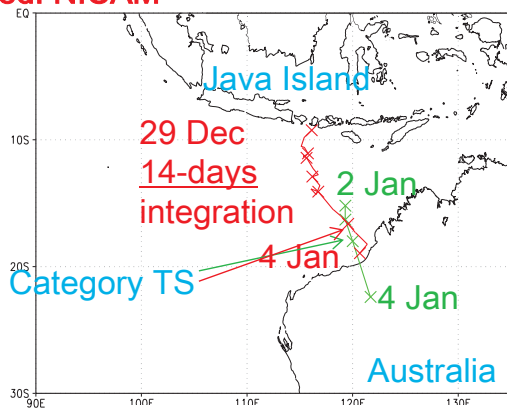
Satellite IR TBB (K)

NICAM OLR (W/m2)

Isobel : 観測とシミュレーション

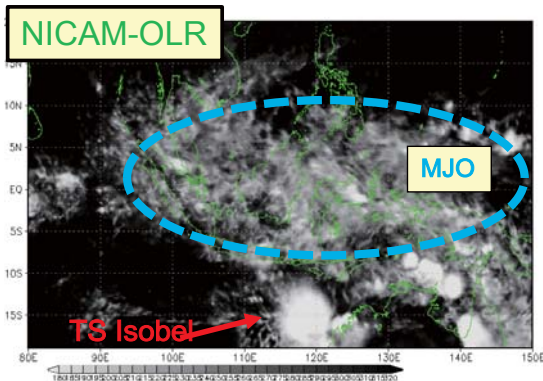
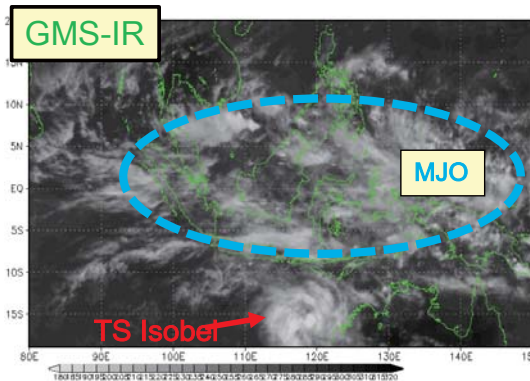
Green: OBS(JTWC)

Red: NICAM



NICAMはIsobelのライフサイクルを発生の前2週間前から予測した。

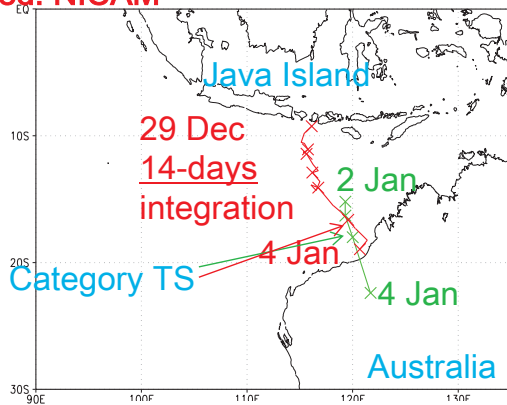
MJO とそれに伴う地表の西風が Isobel 発生のを準備した。



Isobel: Observation and Simulation

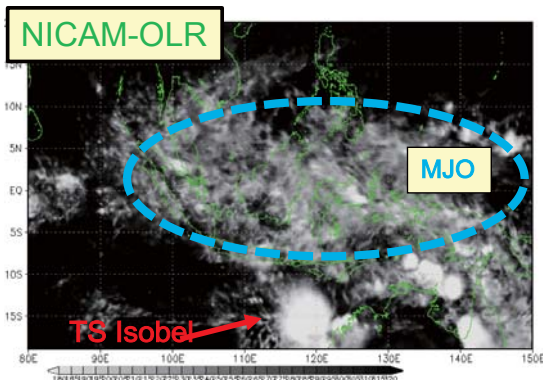
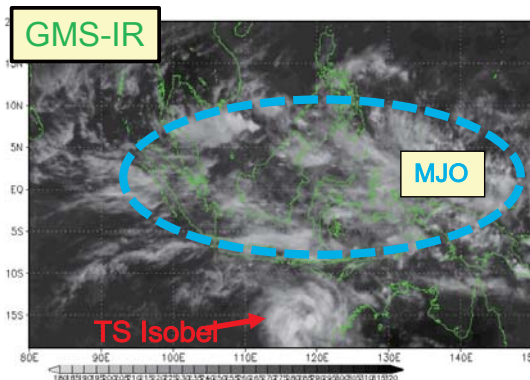
Green: OBS(JTWC)

Red: NICAM



NICAM predicted the life cycle of Isobel two weeks before its occurrence.

MJO and the associated western wind on the land promoted the occurrence of Isobel.



ATHENA project

- ✓ 2008年5月のWorld Modeling Summit for Climate Predictionを受け**Dr. Shukla**が米国NSFに提案
IGES/COLAで実行(主導者: Dr. Jim Kinter)
- ✓ 気候モデリングの革命的進歩を図るため専用のスーパーコンピューターを使い日、欧の最高解像度モデルを走らせて高解像度化の効果を検証する。

(ES-2に匹敵するコンピューターを各3ヶ月専有。)

NICAM 7km

ECMWF IFS 10km

2009年秋 — 10年春に実行

ATHENA project

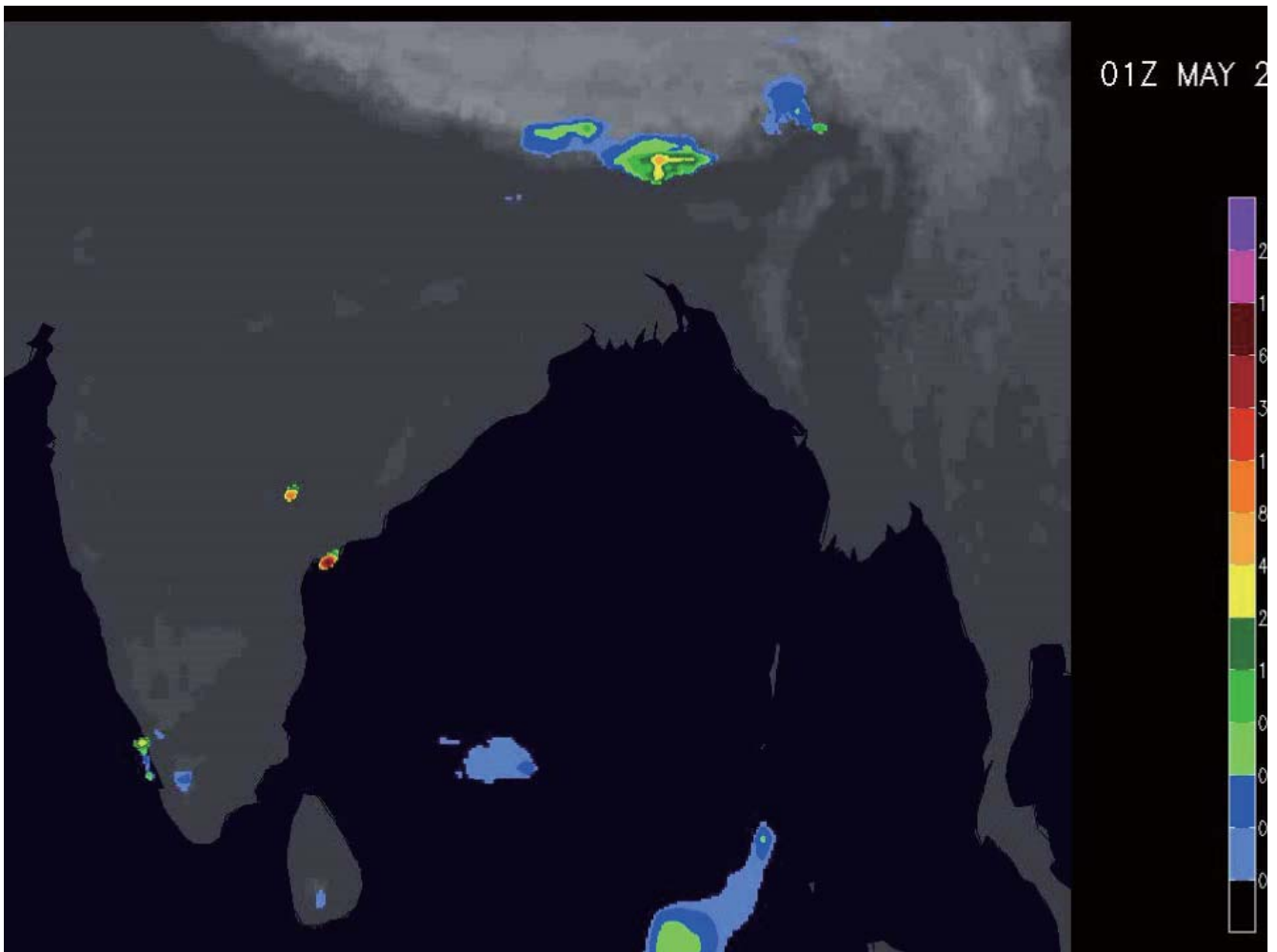
- ✓ In response to the World Modeling Summit for Climate Prediction held in May 2008, **Dr. Shukla** proposed this project to the NSF in the United States.
Undertaken by IGES/COLA (Leader: Dr. Jim Kinter)
- ✓ This project was undertaken to validate high-resolution imaging effects on model performance utilizing specialized super computers and the top-level imaging models produced by Japan and Europe with the goal of promoting the innovative advancement of the climate modeling.

(Using computers with the same quality as ES-2 for three months)

NICAM 7 km

ECMWF IFS 10 km

Performed between autumn 2009 and spring 2010



日本における気候変化予測研究の強み

欧米に比べ相対的に低緯度で熱帯に近い

ジブラルタル海峡 36° N → つくば

ロンドン、パリ、ベルリン 50° ±2.5° → サハリン

熱帯域、アジアモンスーン域の現象に注目し、それがどう変わるか予測

太平洋のエルニーニョ現象 → モンスーン、梅雨

対流性降雨、台風を高解像度モデルで直接計算

科学としてチャレンジングであり同時に実用的に重要

日本にとって重要であるばかりでなく、広くアジア・モンスーン域をはじめ「南」の国の将来気候の予測に貢献

Strength of Climate Change Prediction in Japan

Japan is at a lower latitude and closer to the tropics than the United States and Europe are.

Strait of Gibraltar 36 Degrees North ⇒ Tsukuba

London, Paris, Berlin 50 Degrees North ± 2.5 Degrees ⇒ Sakhalin

Focusing on the phenomena in the tropics and monsoon areas in Asia to predict changes.

El Nino in the Pacific Ocean ⇒ Monsoon, rainy season in Japan

Directly computing convective rain and Typhoon utilizing high-resolution modeling

It's highly challenging, but it is clearly vital to society.

In addition to Japan, therefore, this type of research contributes widely to forecasts of the future climate of countries of the "south," especially countries of monsoon areas in Asia.

大学院進学(1957年)以来、気象学の研究を進める上で
さらに地球温暖化と気候変動へと対象が広がるときに
導き、刺戟を与えて下さった諸先輩、



日本IBMでのプログラム講習会(57年、58年)

Scientists who influenced and guided me when I advanced my research
on meteorological phenomena, including expansion to the global
warming and climate change since I was in graduate school (1957)

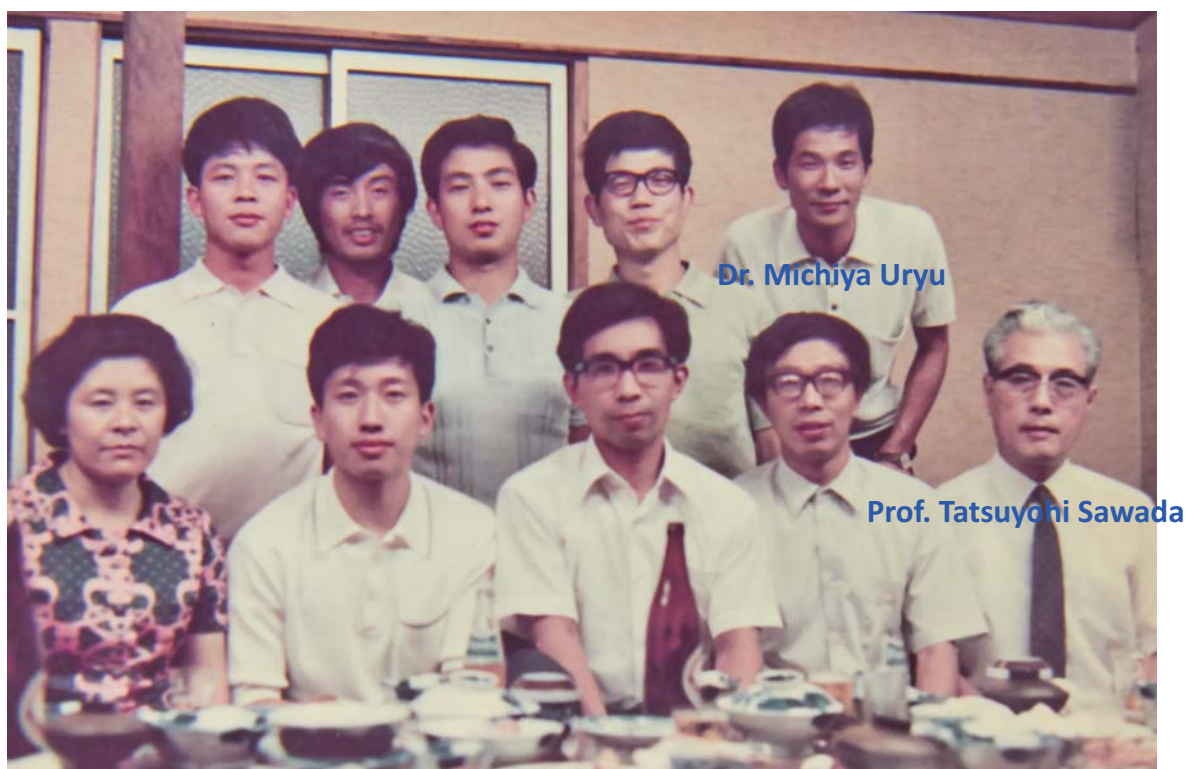


Program Seminar at IBM Japan (1957, 1958)

個人の研究者として短いながら最も充実した時を過ごした九州大学理学部・大気物理研究室の澤田龍吉先生と若手、とりわけ当時助手の瓜生道也さん、そして豊かな学問的雰囲気



It was a short period of time, but I enjoyed my time as a researcher.
Prof. Tatsuyoshi Sawada, Dr. Michiya Uryu (Assistant) and other young researchers
at Kyushu University Graduate School of Atmospheric Physics Study Group



長年の「悲願」東大気候センター
を作り上げた僚友住明正さんほか
日本の同僚、ささえてくれた世界の仲間達、



発足直後1992年3月に下田で国際ワークショップを開催
世界の主要モデリングセンターの代表者と国内関連研究者と一緒に
将来の方向を検討

Prof. Akimasa Sumi who worked together to establish
the University of Tokyo CCSR, and my other colleagues
in Japan and overseas



**In March 1992, immediately after the establishment of the CCSR,
we had an international workshop in Shimoda.**

Discussed future directions with representatives from major modeling
centers of the world and researchers in Japan

大きなプロジェクトを進めるのに昼夜を分かたず働いて世界に誇る成果を上げた若手研究者、世界トップの研究を可能にする環境を与えて下さった関係者、優秀な支援スタッフに感謝いたします。



I would like to express my deep appreciation to the young researchers who worked hard to achieve remarkable results in large projects, all the people who helped us improve our research environment for global competition, and the outstanding staff who helped our research.



長時間お付き合いくださって有難うございました。



Thank you for your kind attention.



The goal is this



Thank you