

기후예측자료의 이해

유진호

2024.9.26

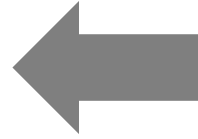
기후정보생산 및 활용 사용자 워크숍



목차

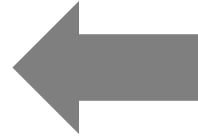
- 자기소개
- 기후
- 예측
- 분석

이 아이는 야채를 먹을까?



판단의 근거는?

이 아이는 채식주의자가 될까?



판단의 근거는?

기후(Climate)

- “기후가 어떠한가요?”
- 이 질문에 대답하기 위해 더 필요한 것은?

기후

유럽의 여름



동아시아의 여름



기후

- 어떤 장소, 시점(기간)에서
 - ✓ 가장 나타날 확률이 높은 날씨 상태
 - ✓ 나타날 가능성이 있는 날씨 상태의 집합
 - ✓ 7월 31일과 8월 1일의 기후는 다를까?
 - ✓ 과거의 경험/기록을 통해 얻어짐 (e.g. 30년) : 모두가 어느정도 알고 있음
- 기후 = 날씨에 대한 믿음, 상식

기후

- Q: 당신이 살고 있는 (혹은 가본) 지역의 가을철 기후는 어떠합니까?
- 기후요소 : 기후를 표현하기 위해 사용되는 날씨 특성, 변수, 물리량
 - 기온, 강수량, 풍속, 일조시간, 습도...

기후 = 기대 (믿음)

- 사회는 기후조건에 적응하고 있음 :
 - 주요 행사 시점의 선정 (영화제, 불꽃 축제..)
 - 방재 시설 (제설장비 : 서울 1216, 부산149)
 - 건물의 냉난방 효율, 주거 형태
 - 공공자원(전력, 수자원 등) 수급 계획 수립

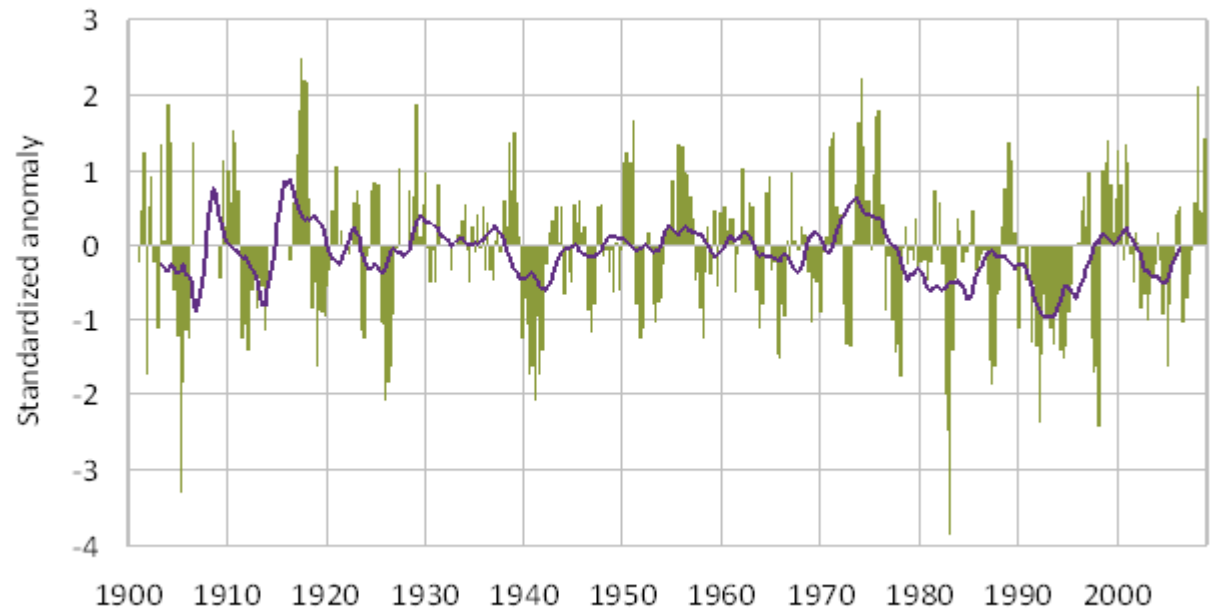
기후는 무엇이 결정하나?

- “climate” : 고대 그리스어 κλίμα (inclination) 에서 유래
 - 위도(latitude) : 왜?
 - 대륙과 해양의 위치 : 왜?
 - 고도, 지형 : 왜?
 - Etc.. : 왜?

- 결국, 태양으로부터 온 에너지가 어떻게 재분배되는 지에 따라 결정
 - 재분배되는 방식 : “순환” : 날씨 현상, 해류, fluxes, 복사
 - 운동과 에너지에 관한 물리 법칙을 따라 진행

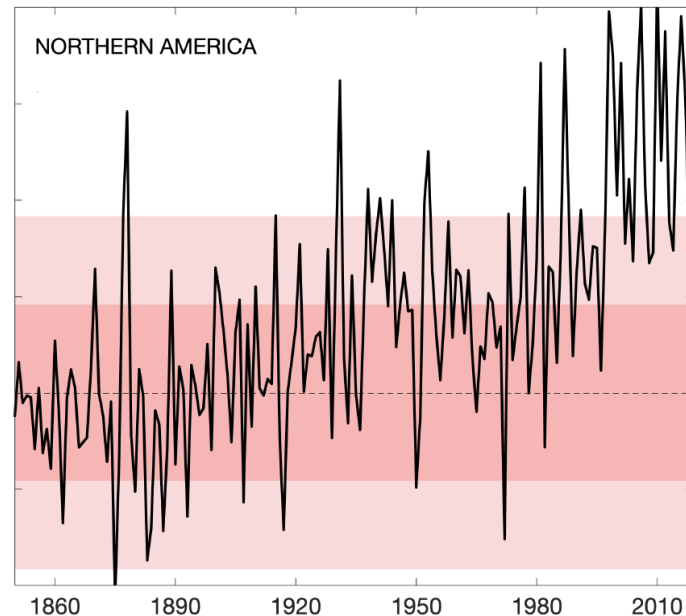
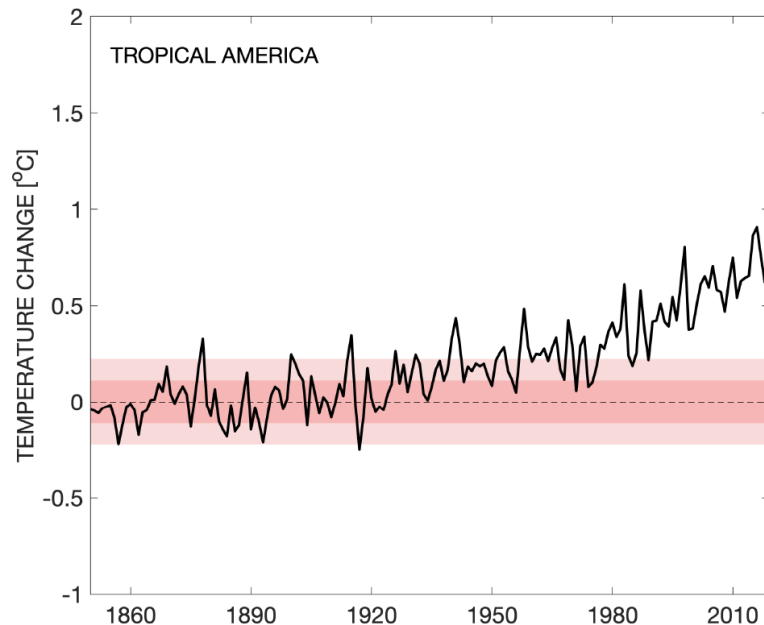
기후변동(Climatic Variability)

- 여름은 더움 (상식)
 - 더 많이 더운 여름 / 선선한 여름
- 평균적인 상태를 중심으로 높거나 낮은 기후상태가 반복적으로 일어나는 것 : “상식 선에서 움직임”
- ** 진동 : 엘니뇨/라니냐, 북극진동



기후변화(Climature Change)

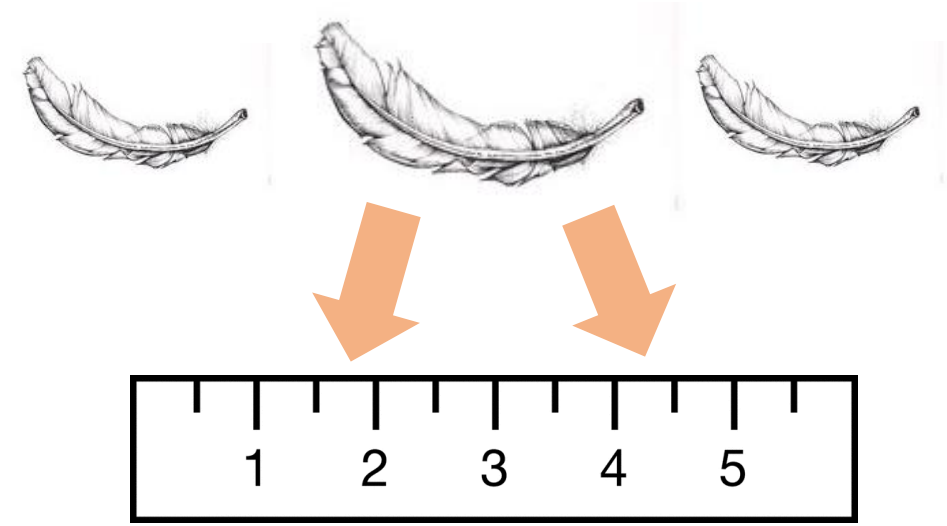
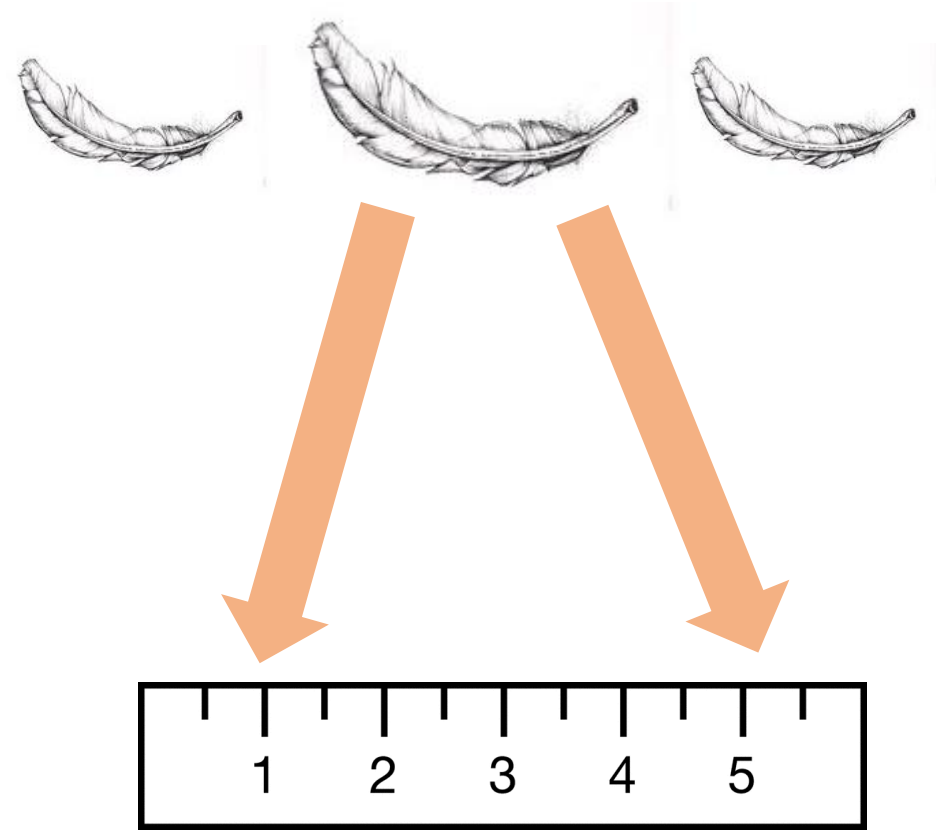
- 여름은 더움
 - “더 많이 더운” 여름 만 지속된다면?
- 평균적인 상태를 벗어나 계속 변화하는 상황 : 상식의 파괴, **배신**



예측

- 미래에 벌어질 일을 짐작하는 일
 - 예보(forecast) vs 예측(prediction)
 - 우리나라에서는 큰 구분 없이 사용. 예측이 보다 불확실하고 주관적인 느낌
- ‘바람’과 어떻게 다른가?
 - 객관적, 과학적 근거에 기반한 **방법**을 사용
- “**기준**”이 있어야 함
 - 예측의 시작점(초기조건)이자 미래와의 비교대상 (reference, e.g. 현재, 평년)

Chaos matters



기후예측 (Climate Prediction)

- 특정 기간 동안 **기대**(~평균)되는 날씨 상태에 대한 **예측**
 - 특정 기간 : 2016년 여름, 2020~30년 겨울 등
 - 과거에서 기대할 수 있는 날씨양상(기후)에 **비해** 원하는 미래의 날씨양상(기후)이 어떠할 것인지에 대한 과학적인 설명 (예측)
- 기후변화전망 (climate change projection)

일기예보도 불확실한데 기후예측이 가능한가?

단기 예보 (1일~3일)

- 각 시점의 날씨 상태

중기 예보 (~ 10일)

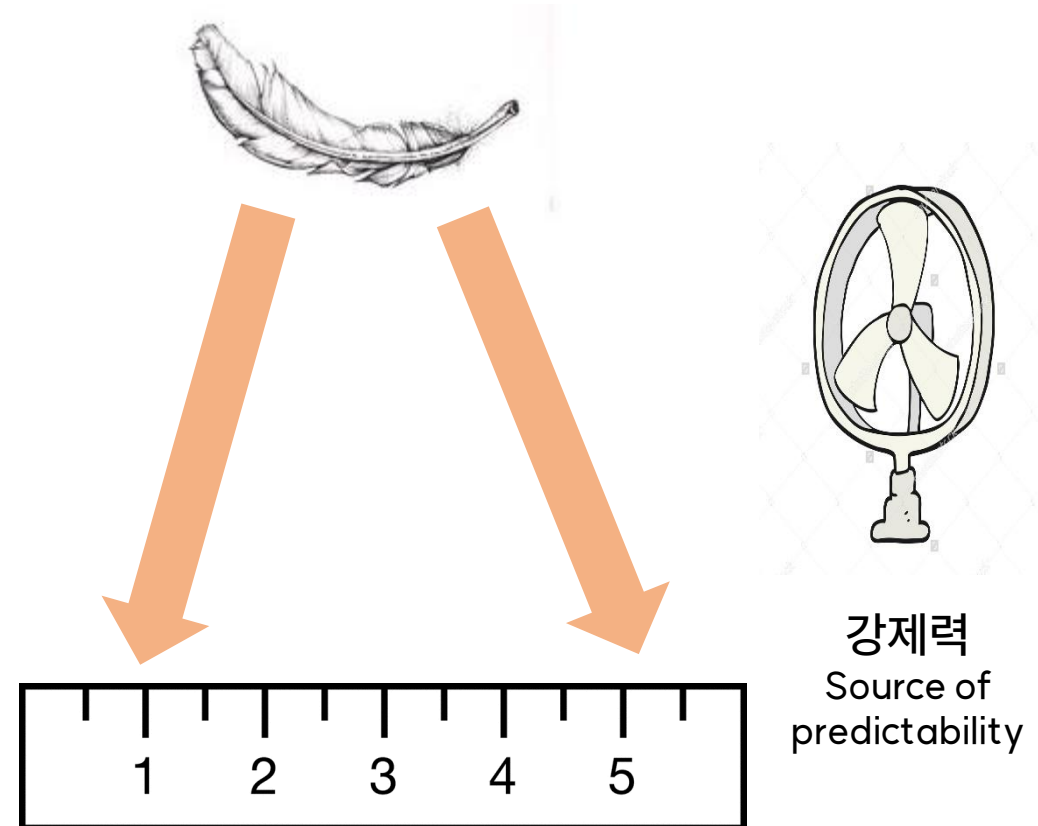
- 하루 동안 (12시간) 대표적인 날씨상태

장기 예보 (1~3개월)

- 1개월/3개월 동안 평균적인 날씨상태

기후변화 전망

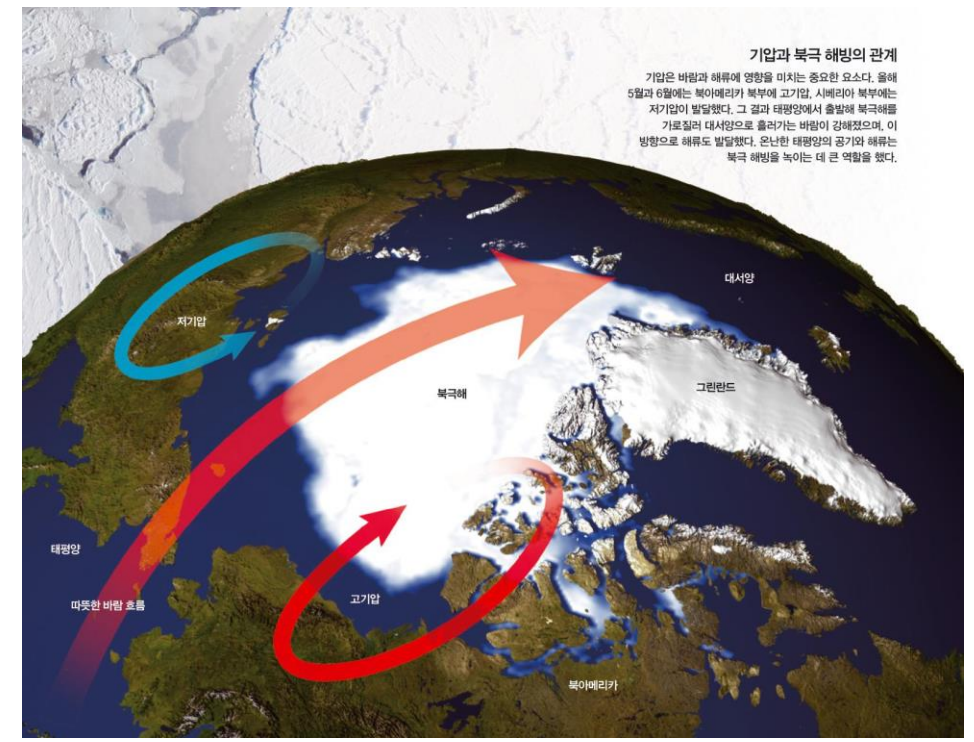
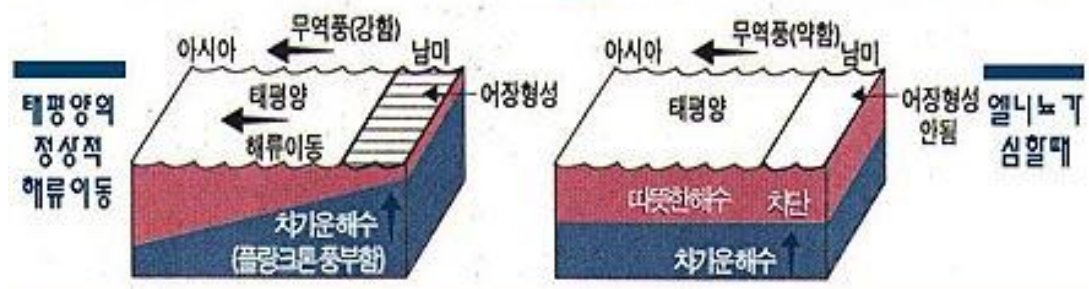
- 수십년의 평균 날씨상태



기후강제력 (climate forcing)

- 엘니뇨/라니냐 (열대 수온)

- 북극 해빙



강제력도 변함 (Signal and Noise)

- 예측 시간 범위에 따라 내부 변동과 외부 강제력으로 나눌 수 있음

Internal

External

Weather:

1. Internal Dynamics of Atmosphere

• SST, Soil wetness, Snow, Sea ice, etc.

Climate:

(seasonal-decadal)

2. Internal Dynamics of Coupled Ocean-Land-Atmosphere

• Solar, Volcanoes

Climate Change:

3. Internal Dynamics of Sun-Earth System

• Human effects:
(Greenhouse gases, land use changes)

기후예측의 성능은,

- Chaotic한 내부 변동성을 얼마나 잘 예측하는가? (초기조건 + 예측방법)
- 외부 강제력의 영향을 얼마나 잘 반영하는가? (경계조건 + 예측방법)

에 좌우됨.

즉, 초기조건, 경계조건, 그리고 예측 방법이 좌우

기후예측 방법

경험적 (통계적) 방법

- 과거 자료를 이용해 대상지역 기후변동과 관련있는 인자를 추출. 이를 이용한 예측 (예: 엘니뇨 → 여름 강수)
- 모든 경우에 적용이 가능하지 않음, 가용 자료의 한계 (과거에 의존)

역학적 방법 (기후모델)

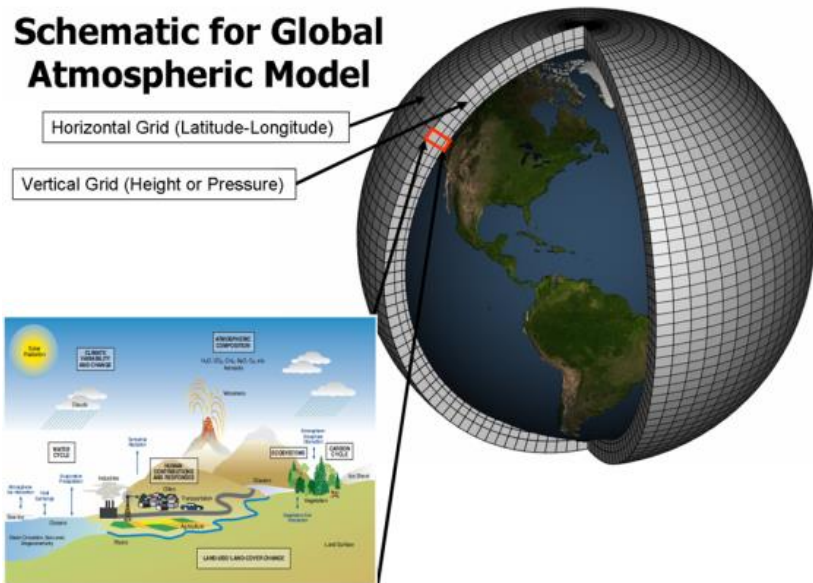
- 대기/해양의 움직임을 나타내는 물리방정식을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 미래를 예측
- 컴퓨터 시뮬레이션이 완벽하지 않음 (아직 모르는 것이 많고, 프로그램도 불완전함)

기후예측모델

- 수치화 된 가상의 지구
- 대기, 해양, 지표(식생, 얼음)에서 일어나는 상호작용을 표현 (동물은 없음)

Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (Latitude-Longitude)
Vertical Grid (Height or Pressure)



기후예측모델

• 편미분 방정식 (물리보전법칙)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \Phi - 2\Omega \times \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathcal{F}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\nabla} \theta = l$$

-
-
-

```
//Belehradek functions:
//
//   DTstage(T+9.11)^-2.85
//
MinTime=pow(T[j]+9.11, -2.85);//Minimum time to advance to stage (in days)
for(k=0;k<numLifeStage;k++)
{
  MaxRate[k]=MinTime*DTstage[k];
  MaxRate[k]=MaxRate[k]*ToSecs;//Convert to seconds
  MaxRate[k]=1.0/MaxRate[k];//Convert to rate
}

//Parameters for Ivlev functions controlling food dependence
//
//   R=a[1-exp|-b*(food-c)|]^--development rate (days^-1)
//
// But, idea is that temp sets max growth rate, and food tells us how close
// we get to the max. In this sense, a=1 (Campbell) figured an absolute
// rate, we're essentially normalizing his rates by rate at 40C.
//
//b=[ones(1,6)*params.bnaup,ones(1,6)*params.bcop];

for(k=0;k<6;k++)
  Rfood[k]=[1.-exp|-([F[j]-c]*params.bnaup)|];
for(k=6;k<12;k++)
  Rfood[k]=[1.-exp|-([F[j]-c]*params.bcop)|];

//Multiply Rfood by MaxRate to get the actual rate.
for(k=0;k<12;k++)
  R[k]=MaxRate[k]*Rfood[k];

R[12]=0.;//adults don't molt

//M[k]=mortality rate for stage k at node j
//
gammaT=gamma0*(1.-gamma0)*pow(T[j]/Tc,z);
//gammaT=0.1; //Override temp dependent mortality
```

Evolution of Climate Models

Mid - 1970's

Solar radiation
Atmosphere
Precipitation



Solar radiation

Atmosphere



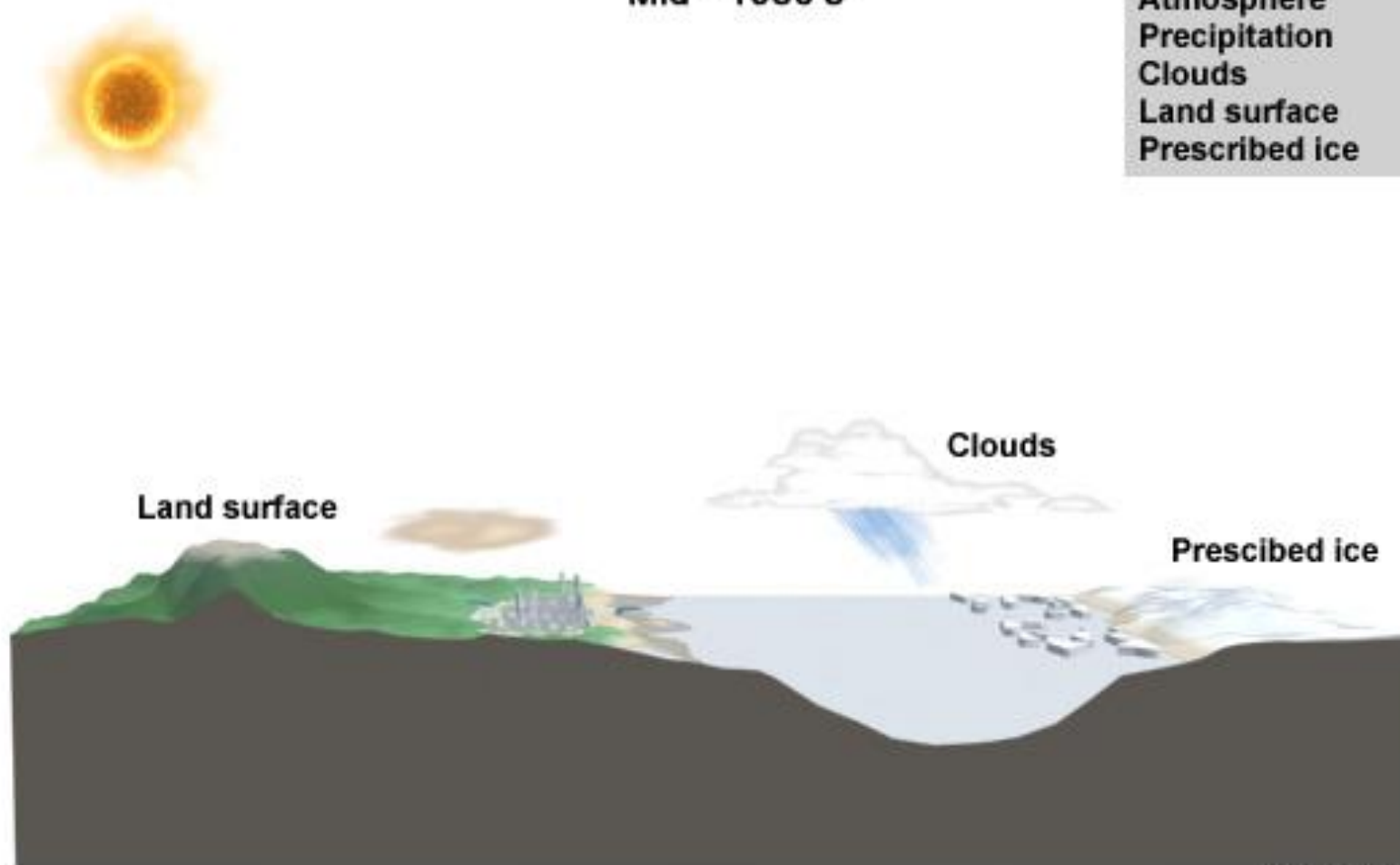
Precipitation



Evolution of Climate Models

Mid - 1980's

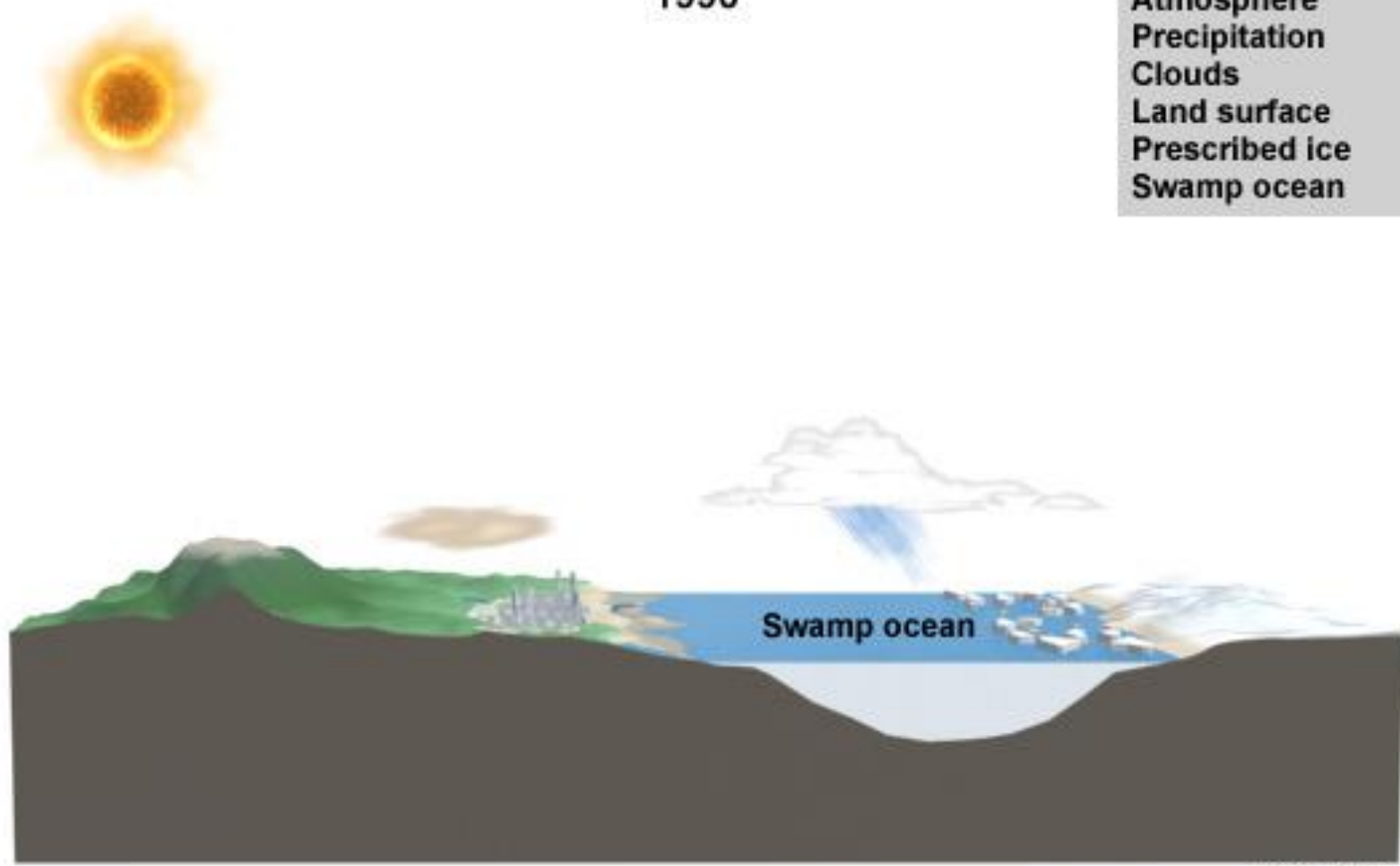
Solar radiation
Atmosphere
Precipitation
Clouds
Land surface
Prescribed ice



Evolution of Climate Models

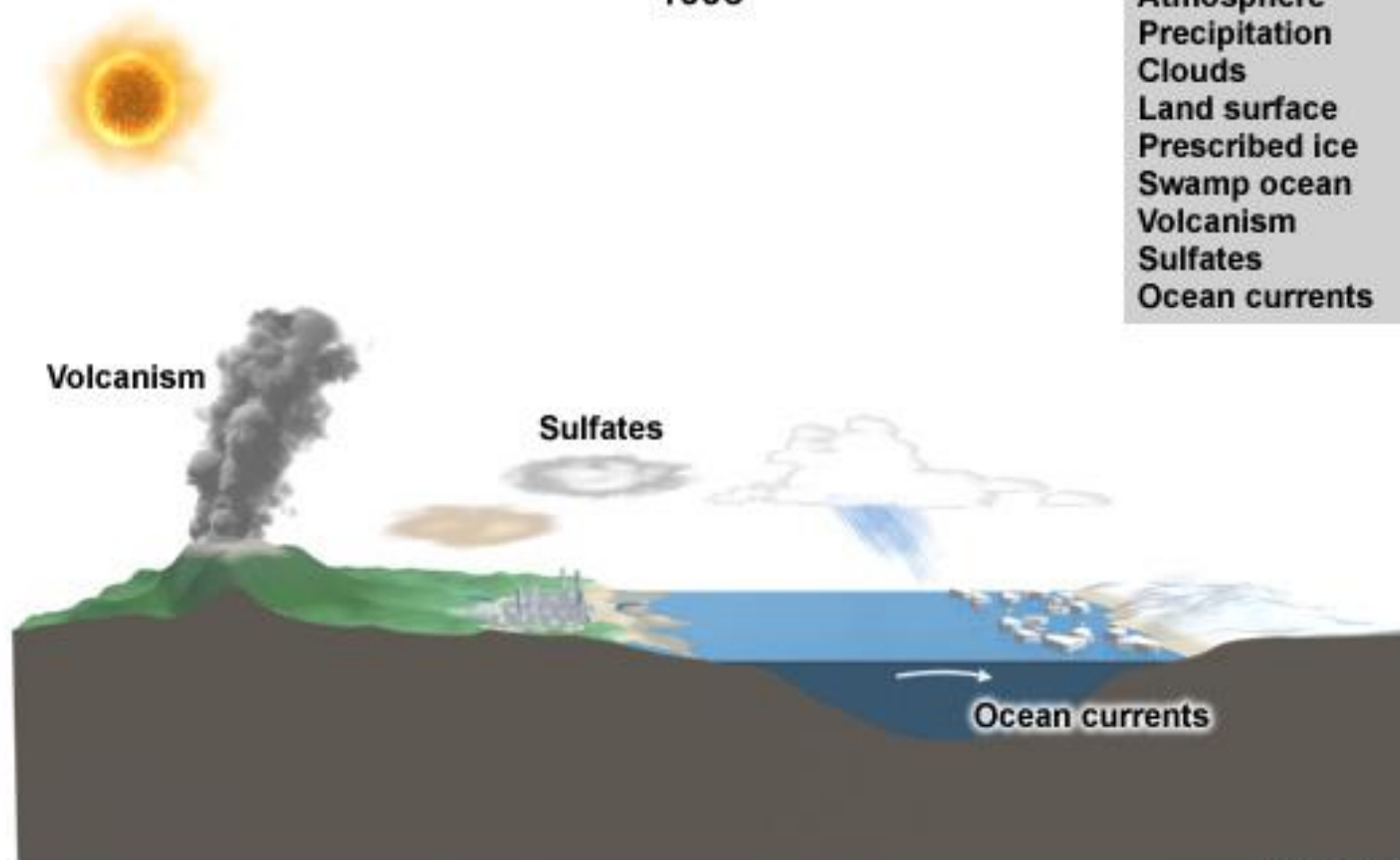
1990

Solar radiation
Atmosphere
Precipitation
Clouds
Land surface
Prescribed ice
Swamp ocean



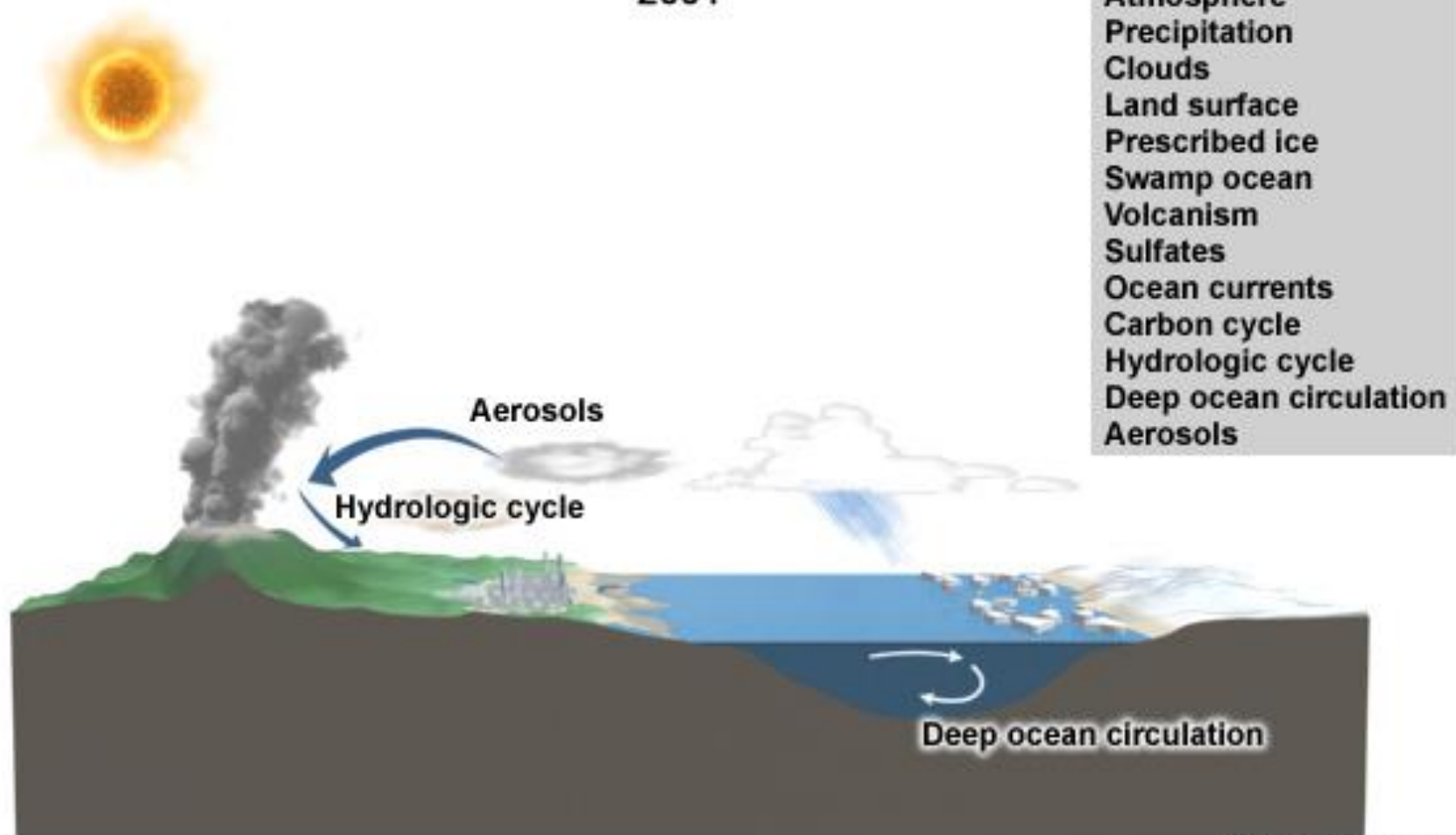
Evolution of Climate Models 1996

Solar radiation
Atmosphere
Precipitation
Clouds
Land surface
Prescribed ice
Swamp ocean
Volcanism
Sulfates
Ocean currents



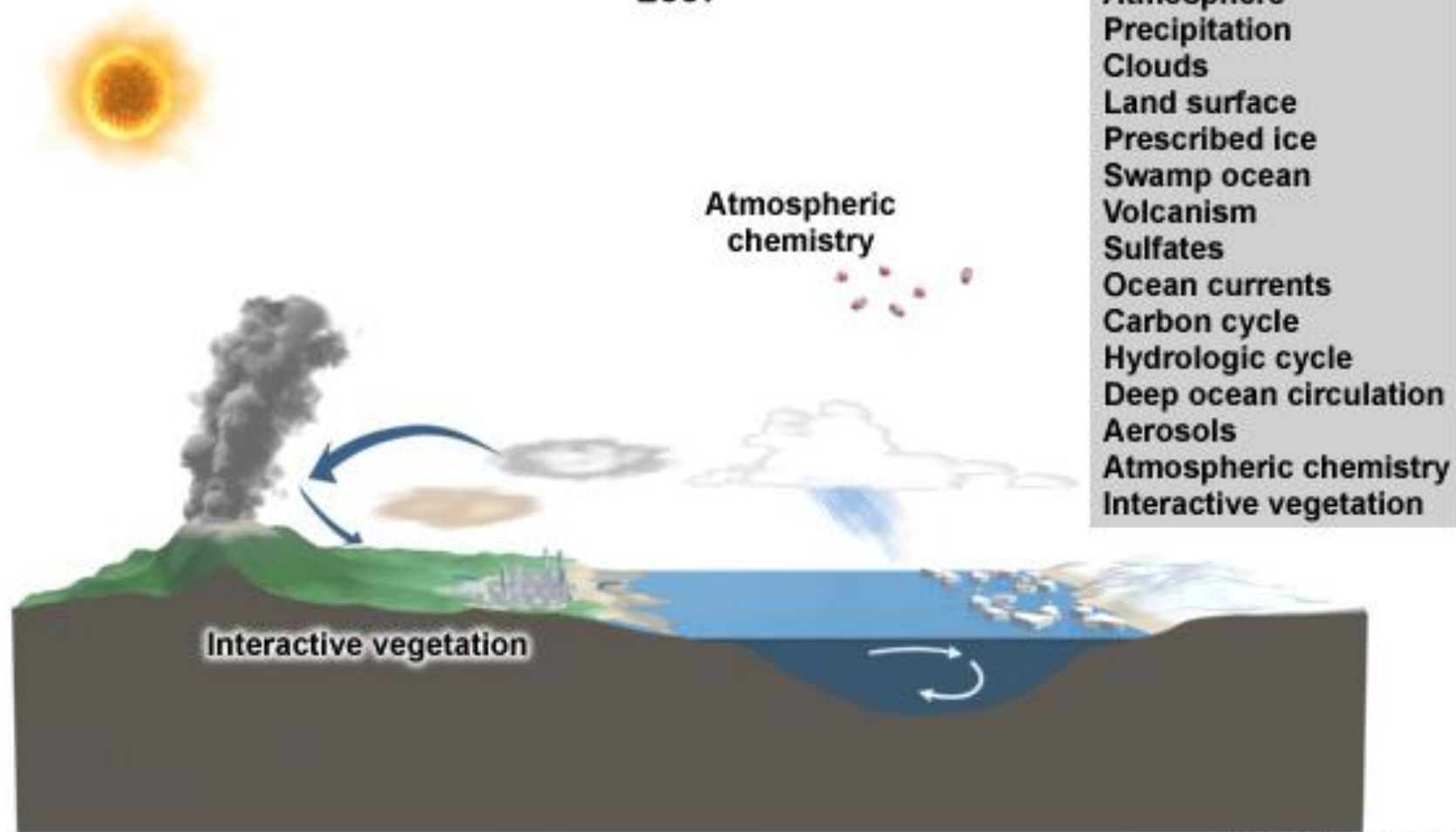
Evolution of Climate Models

2001

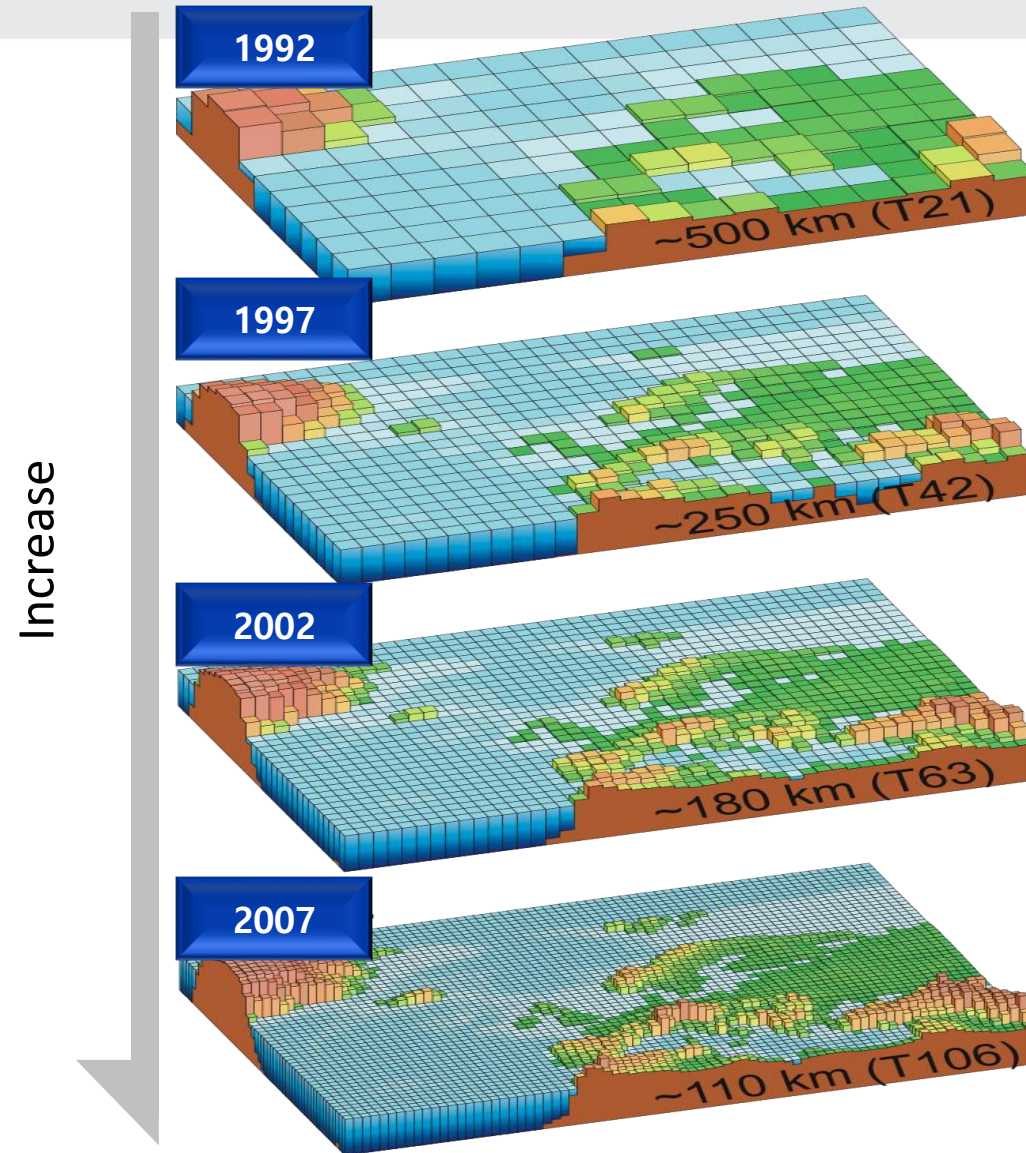


Evolution of Climate Models

2007



Horizontal Resolution Change



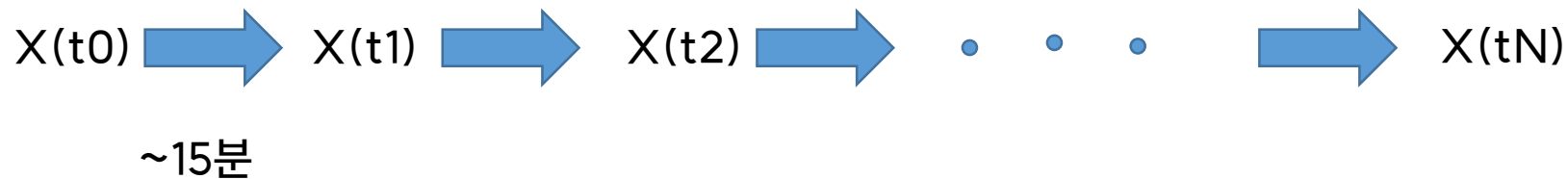
수치모델로 예측을 어떻게 하는가?

$$\vec{X}(t_0 + \tau) = \vec{X}(t_0) + \int_0^\tau F'(\vec{X}(t), a'(t)) dt$$

미래(t_0+t)
기후상태

현재(t_0)
기후상태
(초기조건)

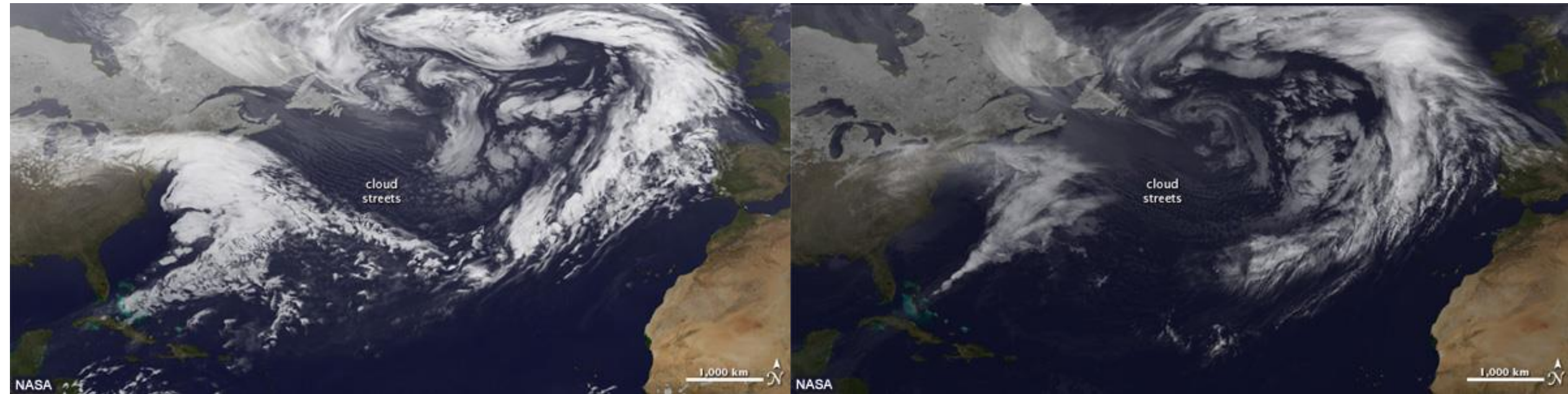
기후모델을 시간에 대해 적분



기후예측자료 = 모델(GCM) 결과물



기후예측모델 towards Digital Earth



90시간 예측 결과 (무엇이 예측?)
K-scale modeling

HW 문제가 나타나고 있음

Compute power?

9 km → 1 km → Factor $9^3 = 729$ compute power

무어의 법칙에 따르면, 2년에 2배씩 컴퓨터 계산성능이 좋아지고 있음

→ $2^9 = 512$ → Let's wait for 18 years?

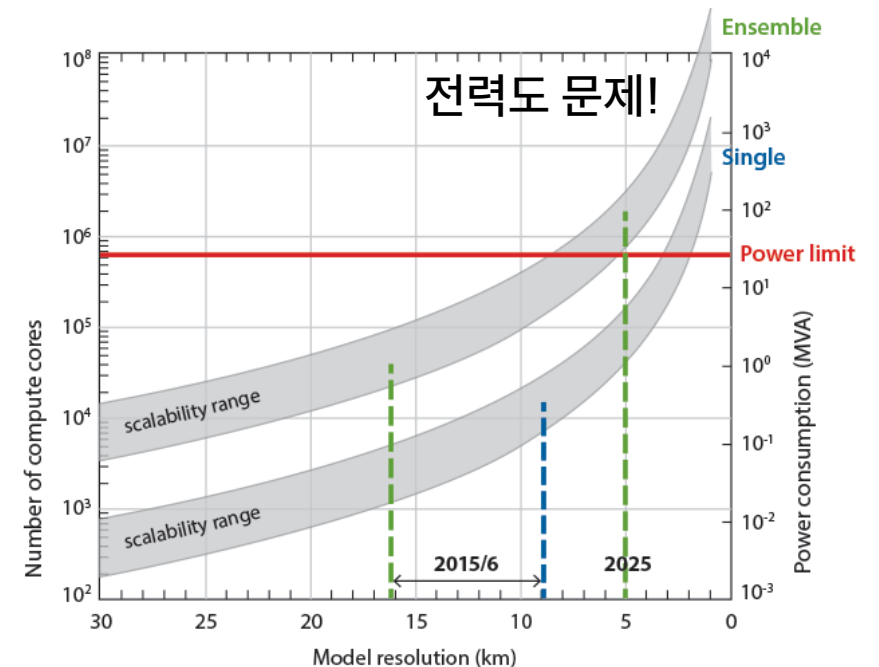
Data and storage?

9km: 6,599,680 points x 137 levels x 10 variables

→ 9 billion points → > 0.5 TB

1.5km: 256,800,000 points x 137 levels x 10 variables

→ 352 billion points → > 20 TB

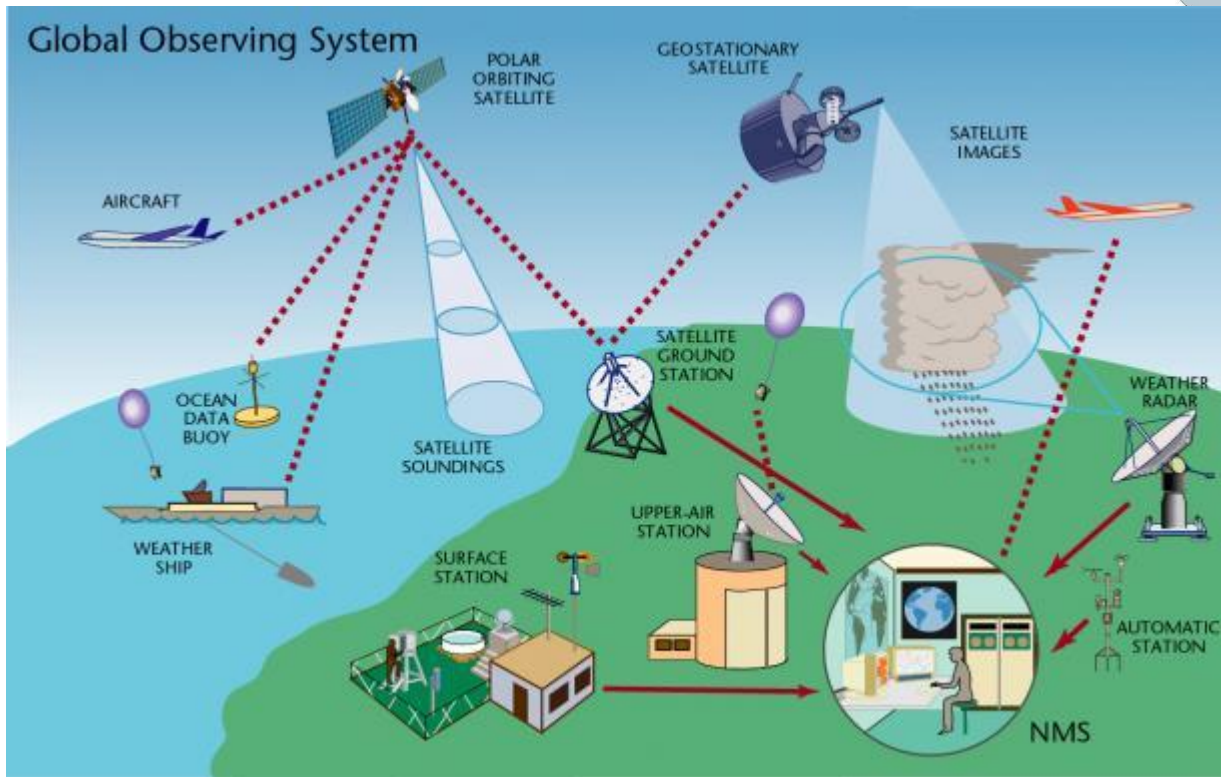


초기조건

- 기후예측모델 수행을 위해서는 **모든 격자점에 현재** 시점의 각 변수(기온, 기압 등)의 값이 주어져야 함
- 모든 지점의 기상변수 값을 관측할 수 있는가? Never!
- 우리의 초기조건은 절대로 완벽할 수 없음
 - 가능하다고 여겨지는 초기조건이 한 개가 아님 : chaos!!

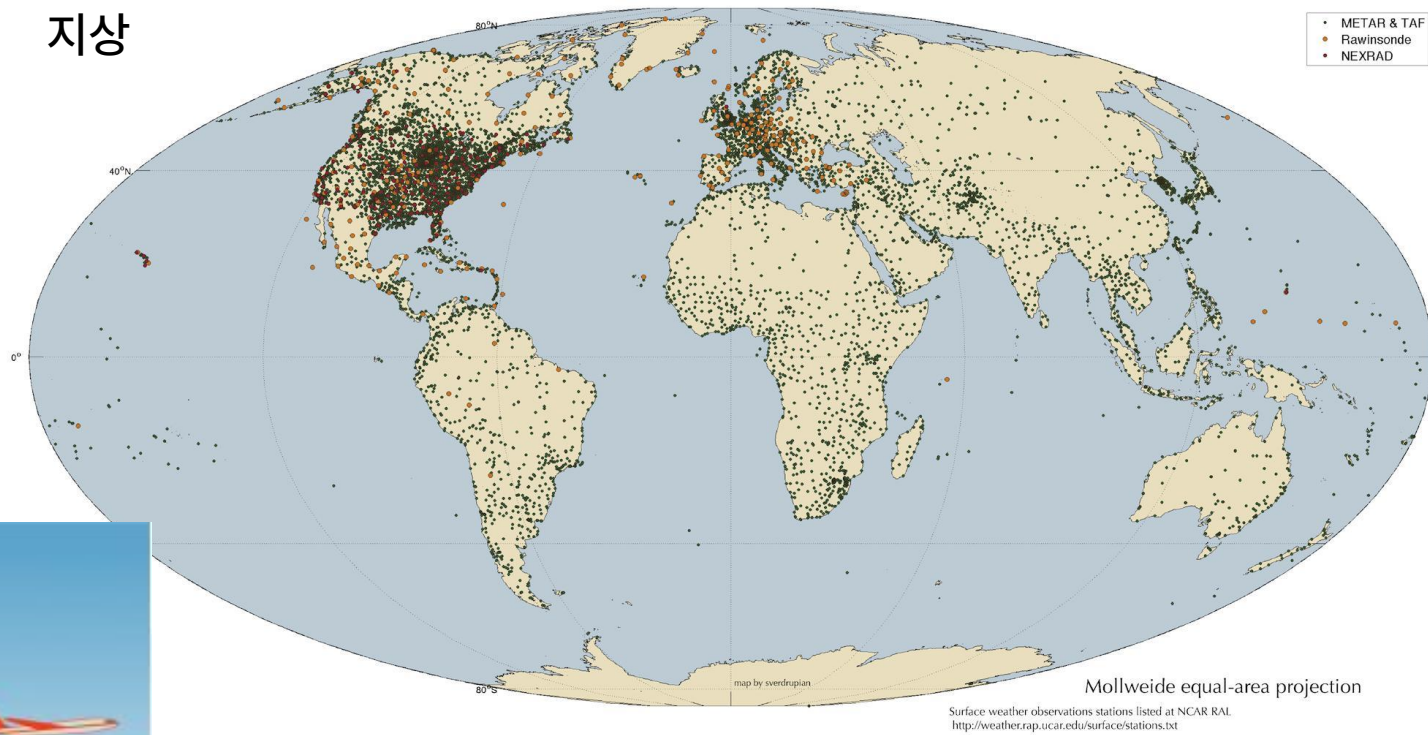
관측망

균질하지도, 충분하지도, 정확하지도(?) 않음

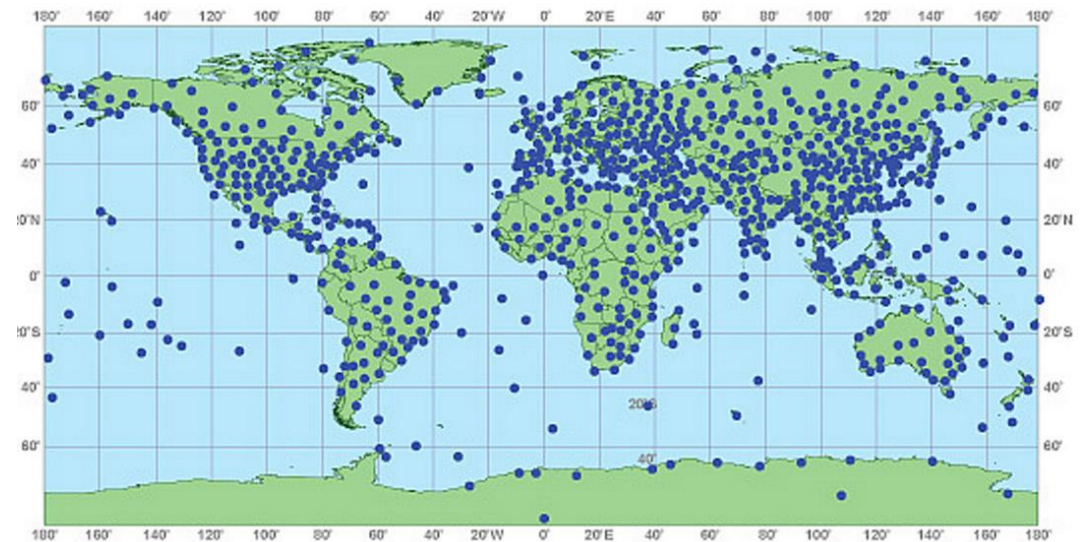


지상

Global Weather Observation Network: Surface Stations

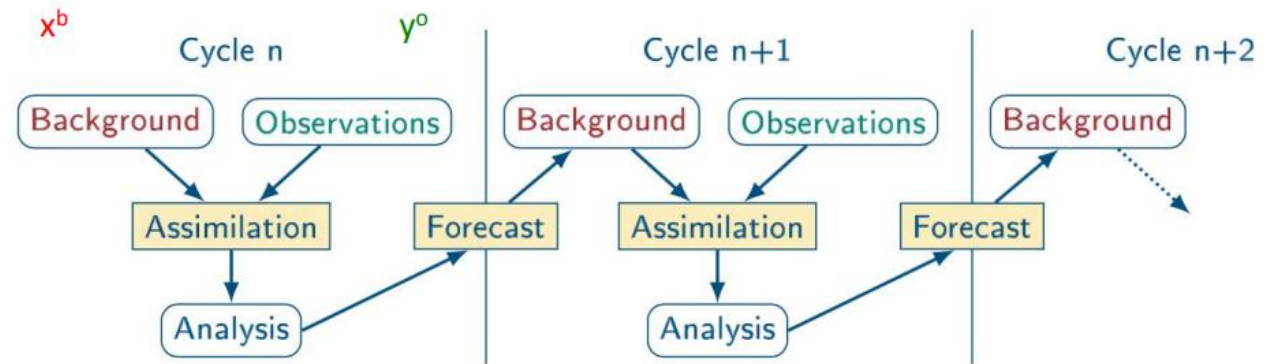
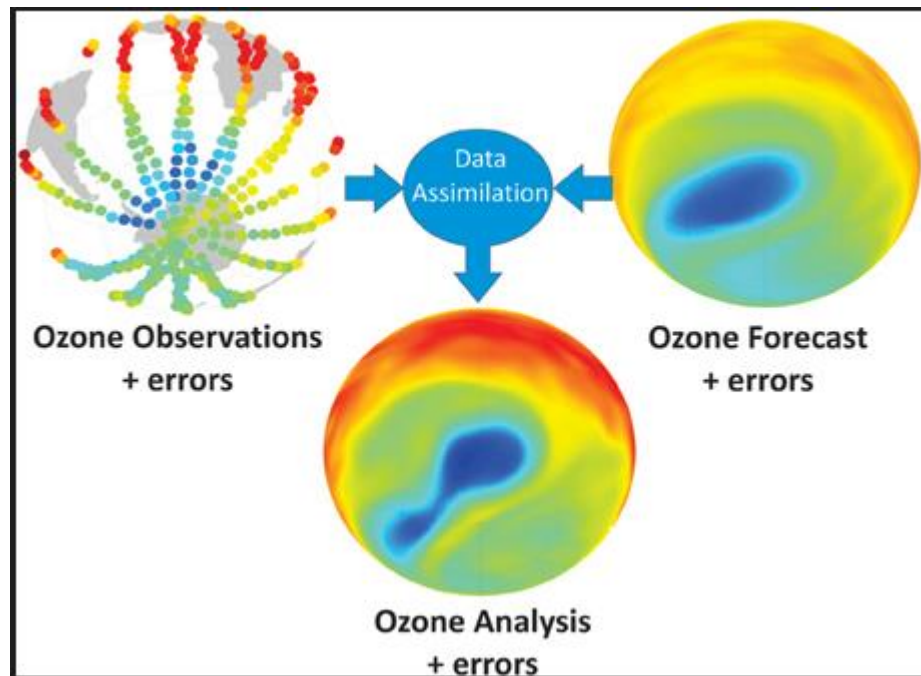


상층



초기조건 만들기 : 자료동화

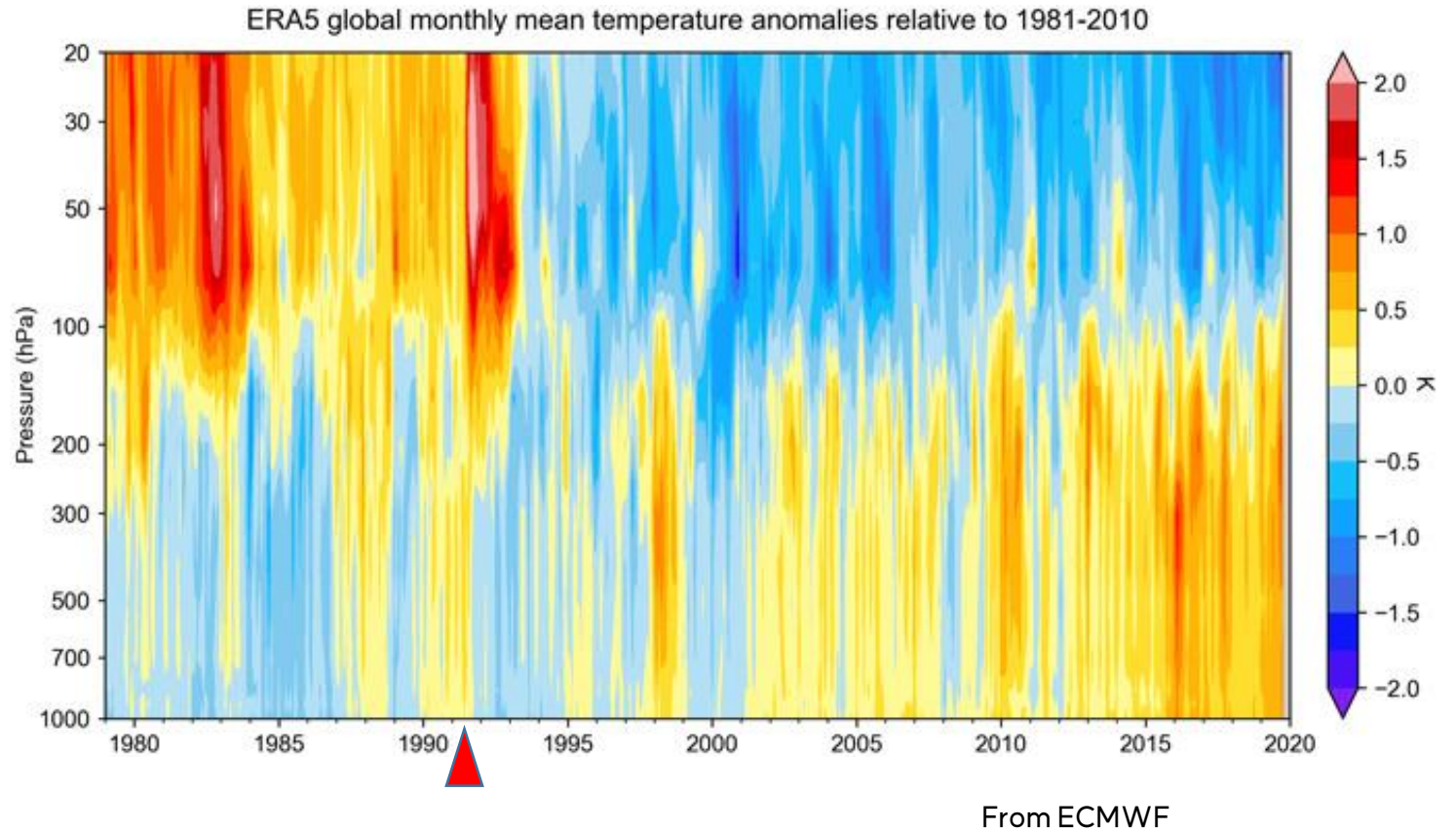
- 모델예측을 관측자료와 서로비교하여 최대한 오차가 작도록 보정 : 분석 (analysis)



Courtesy: Ménétrier

재분석(Reanalysis)

- Analysis는 일기예보를 위해 매일 수행 : 모델 변화에 따라 연속성 떨어짐. 간혹, 시간내에 도달하지 못한 관측 정보도 존재
- Reanalysis는 일정 기간에 대해 정해진 모델과 방법으로 일관되게 analysis 를 수행한 것 : 과거 기후현상의 분석을 위해 관측에 가장 가까운 추정치로 인식되고 활용됨



Data dimension

- 분석(관측)자료 (4차원)
 - 3차원 공간 (x, y, z)
 - 시간 (t)
- 예측자료 (4차원 + 2차원)
 - 예측선행시간 (lead time)
 - 앙상블 (ensemble) : 같은 예측을 여러 번 반복
- 모델/기관 (기존 차원 + 1)

Summary

- 기후란
- 예측이란
- 예측모델로 생산하는 자료
 - 계절예측, 기후변화 전망, 재분석자료
- 중요하나 다루지 않은 개념,
 - 기후값(climatology), 편차(anomaly)
 - 앙상블

Lunch? or Q&A