

地球温暖化で永久凍土・北極の氷が融けている！

～ 北極海の海氷融解は、一段と地球温暖化を加速する！ ～

## 檜山哲哉

(名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

(名古屋大学 フューチャー・アース研究センター)



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

専門分野

水文学  
(すいもんがく)

気候学  
(きこうがく)



# 本日の講演内容

はじめに（地球温暖化の概況）

1. 全球の二酸化炭素収支
2. 永久凍土
3. シベリアの気候変動
4. 地球温暖化が永久凍土生態系（北方林）と温室効果気体収支に及ぼす影響

まとめ

### Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

(a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)

(b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)

最終氷期  
(過去9万年程度)  
+  
現間氷期  
(過去1万年程度)  
||  
過去10万年間で最も温暖だった  
6500年前頃  
(数百年間)  
の気温幅

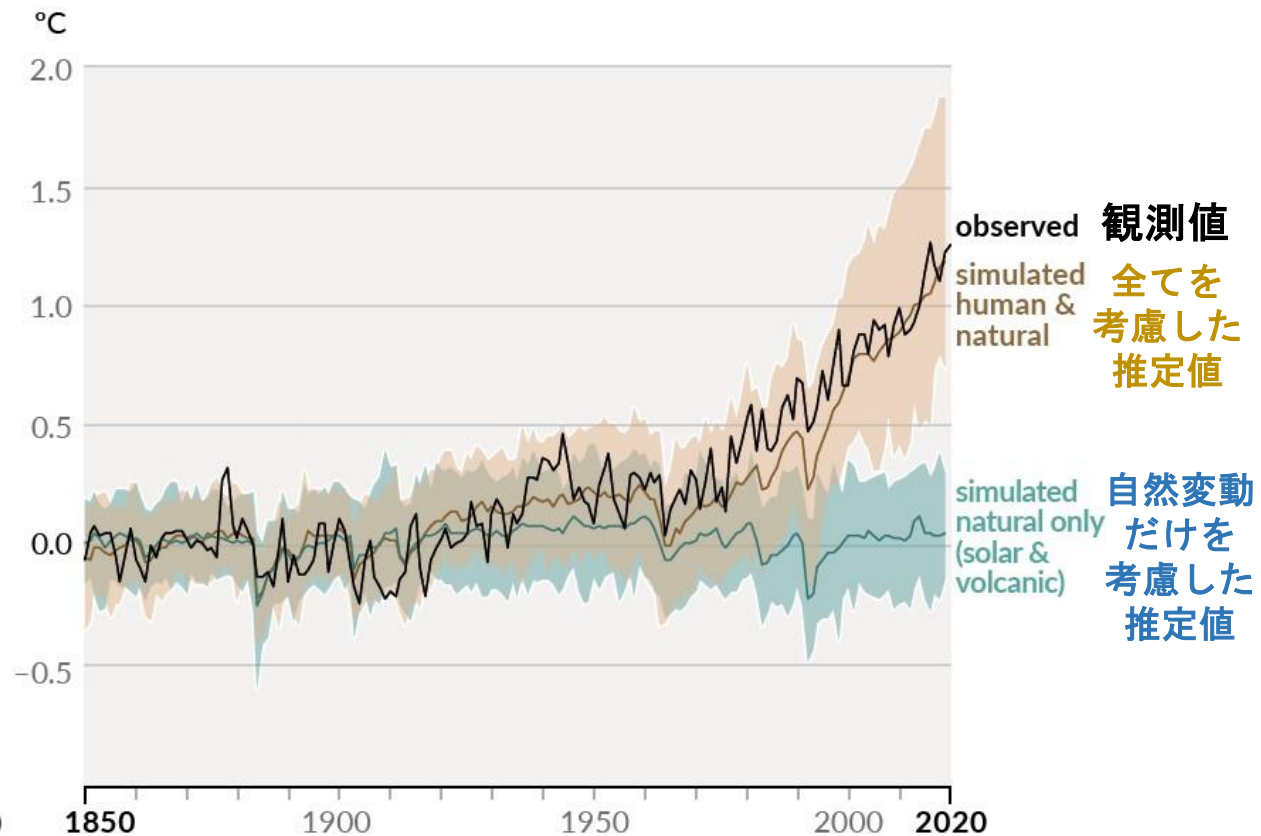
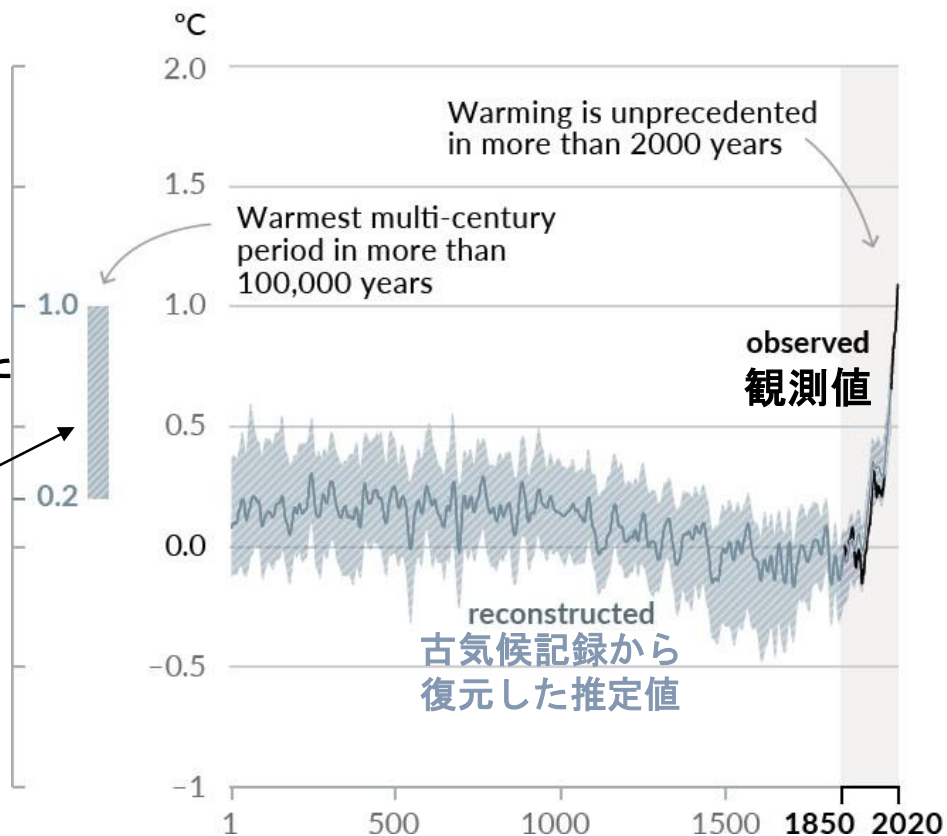


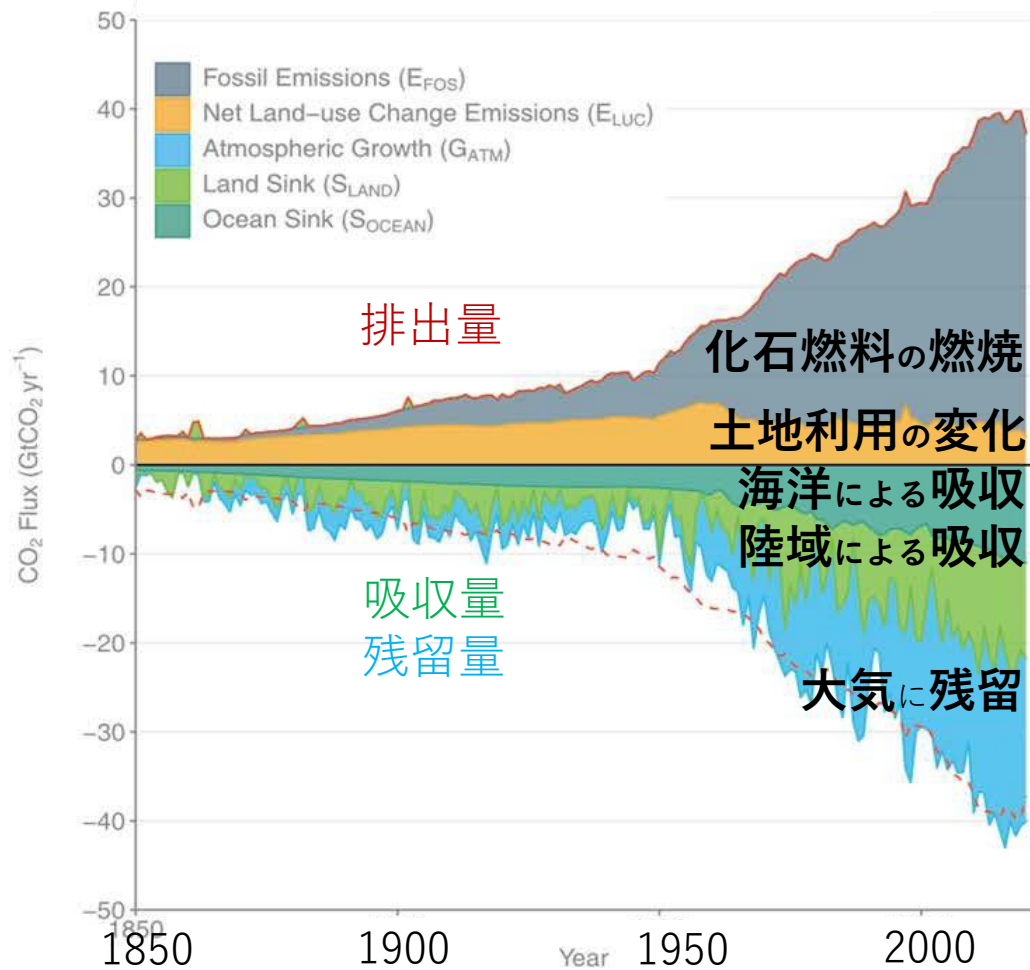
Figure SPM.1 | History of global temperature change and causes of recent warming

# 1. 全球の二酸化炭素収支について

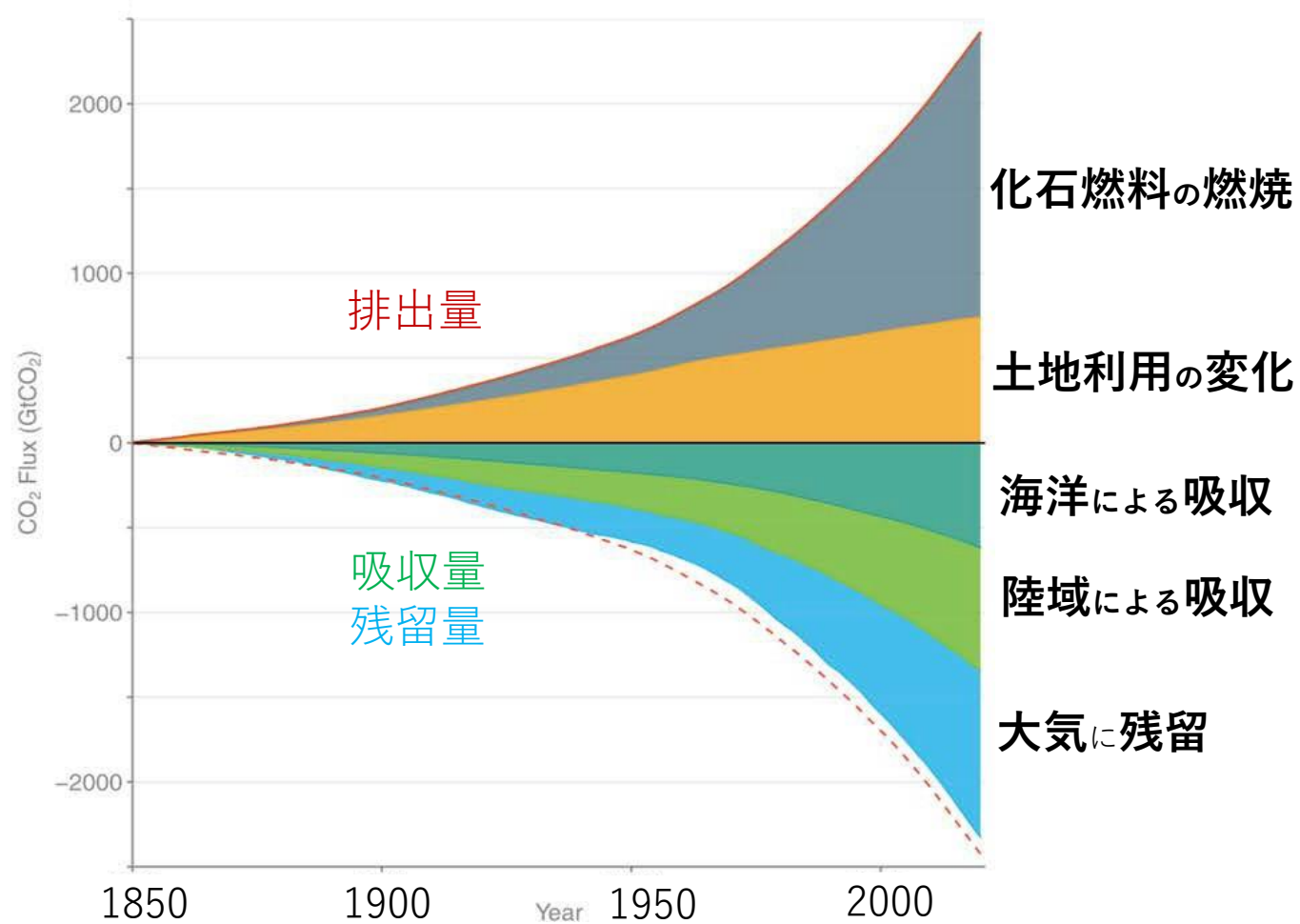
# Global Carbon Budget 2021

1Gt (1ギガトン) =  $1 \times 10^9$ トン = 1,000,000,000トン  
 1トン(1,000kg)の10億倍 (10億トン)

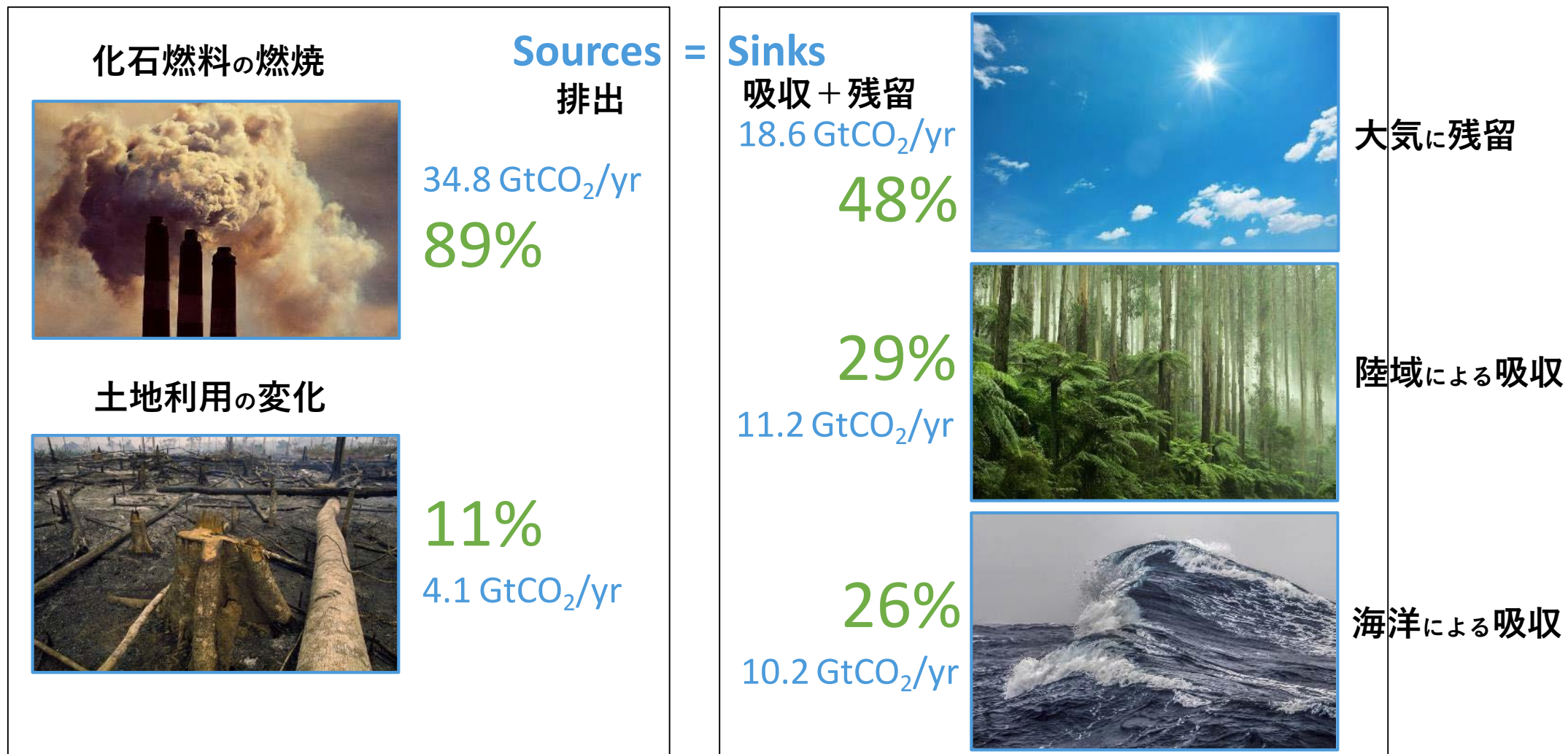
### 年間のCO<sub>2</sub>吸排出量 (GtCO<sub>2</sub>/年)



### CO<sub>2</sub>吸排出量の積算値 (GtCO<sub>2</sub>)



## Fate of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions (2011–2020)



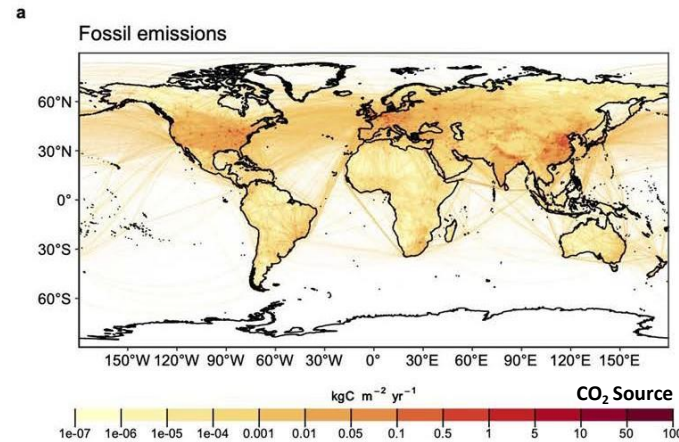
**Budget Imbalance:**  
 (the difference between estimated sources & sinks)

**3%**  
 -1.0 GtCO<sub>2</sub>/yr

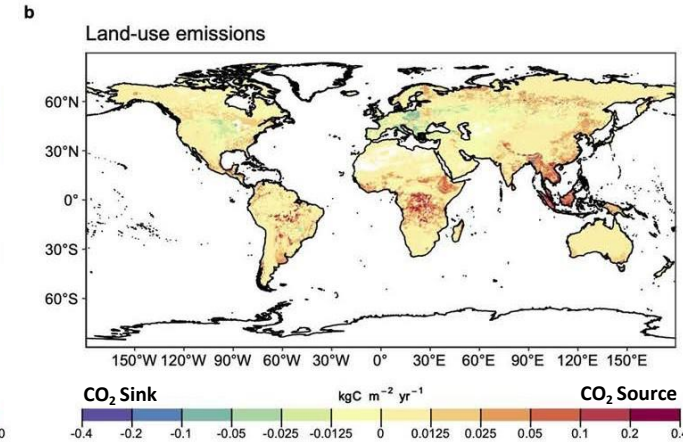
Source: [Friedlingstein et al 2021](#); [Global Carbon Project 2021](#)

Fossil emissions dominate in the Northern Hemisphere, while land-use emissions are important in the tropics.  
 The North Atlantic and Southern Ocean are carbon sinks while the tropical ocean is a source of CO<sub>2</sub>.  
 Tropical, temperate and boreal forest are the main terrestrial carbon sinks

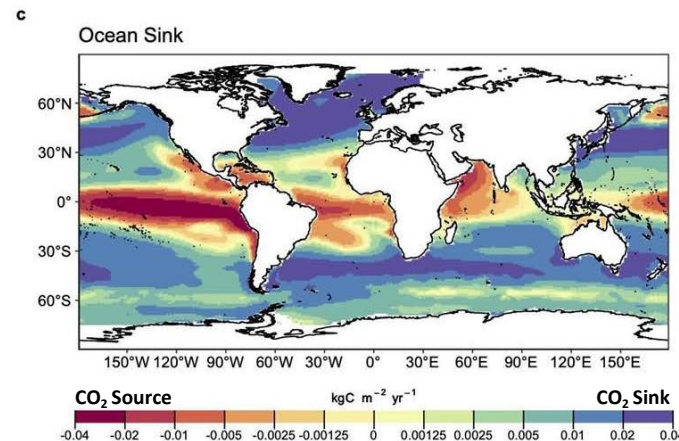
化石燃料の燃焼



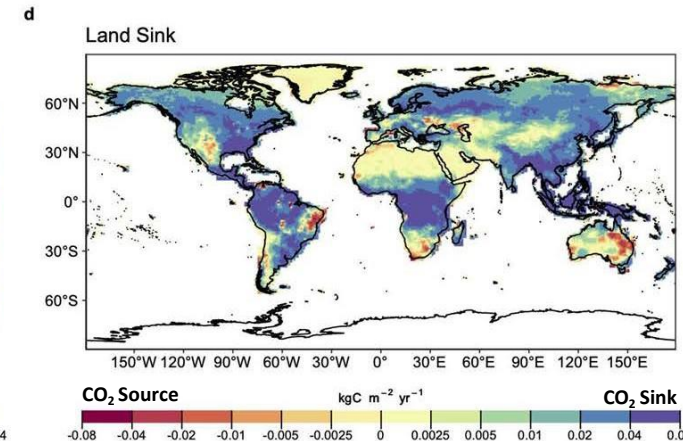
土地利用の変化



海洋による吸収

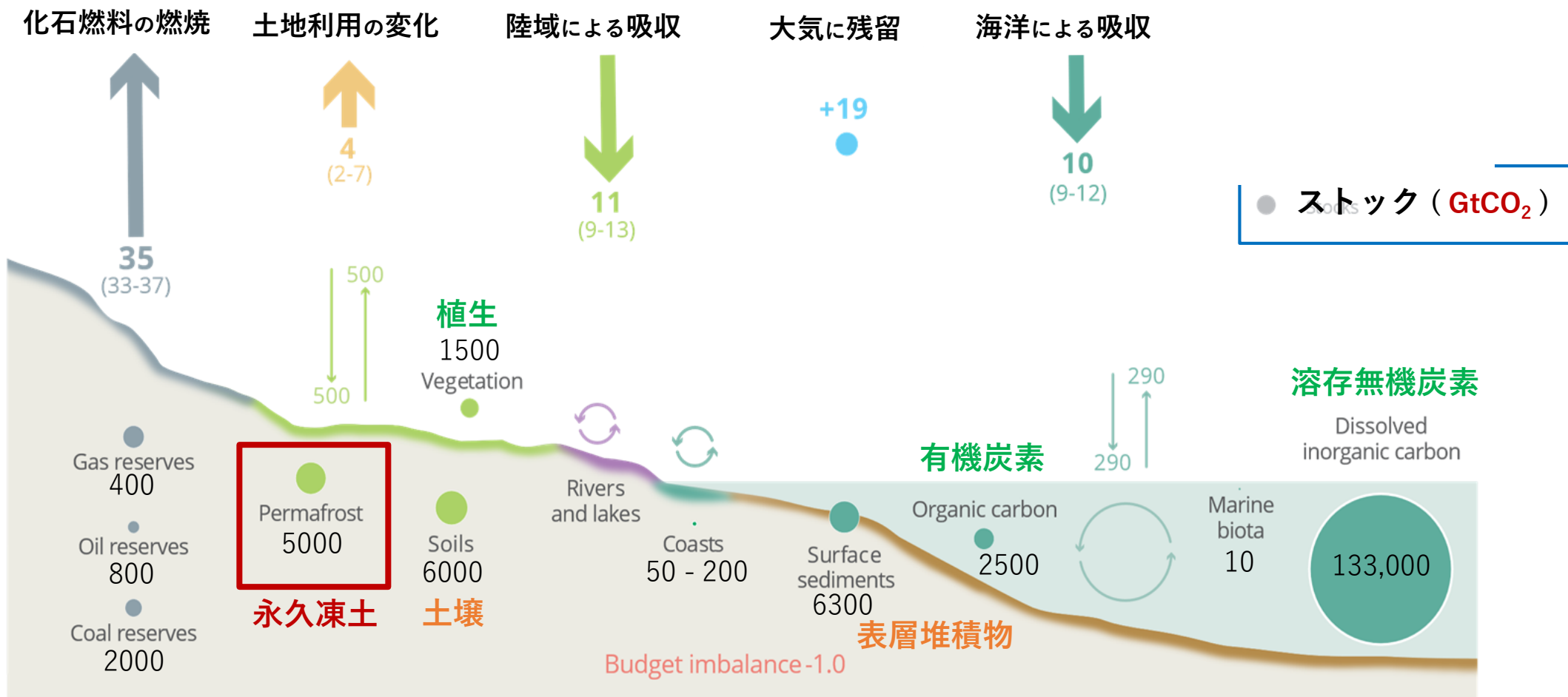


陸域による吸収





Perturbation of the global carbon cycle caused by anthropogenic activities,  
global annual average for the decade 2011–2020 ( $\text{GtCO}_2/\text{yr}$ )

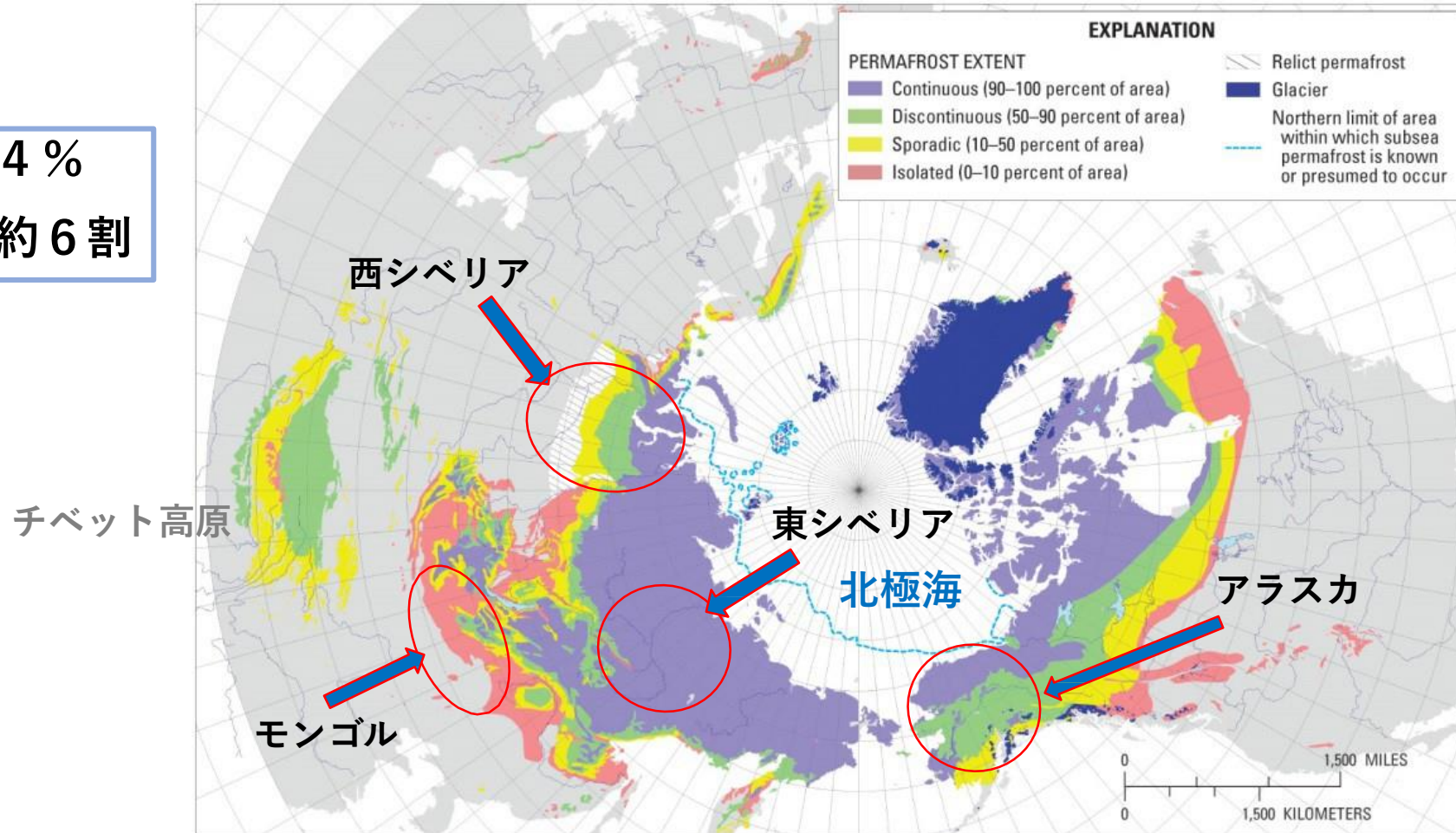


The budget imbalance is the difference between the estimated emissions and sinks.

Source: [NOAA-ESRL](#); [Friedlingstein et al 2021](#); [Canadell et al 2021 \(IPCC AR6 WG1 Chapter 5\)](#); [Global Carbon Project 2021](#)

## 2. 永久凍土について

全陸地面積の14%  
ロシアの国土の約6割



(永久凍土が占める面積比率による区分)

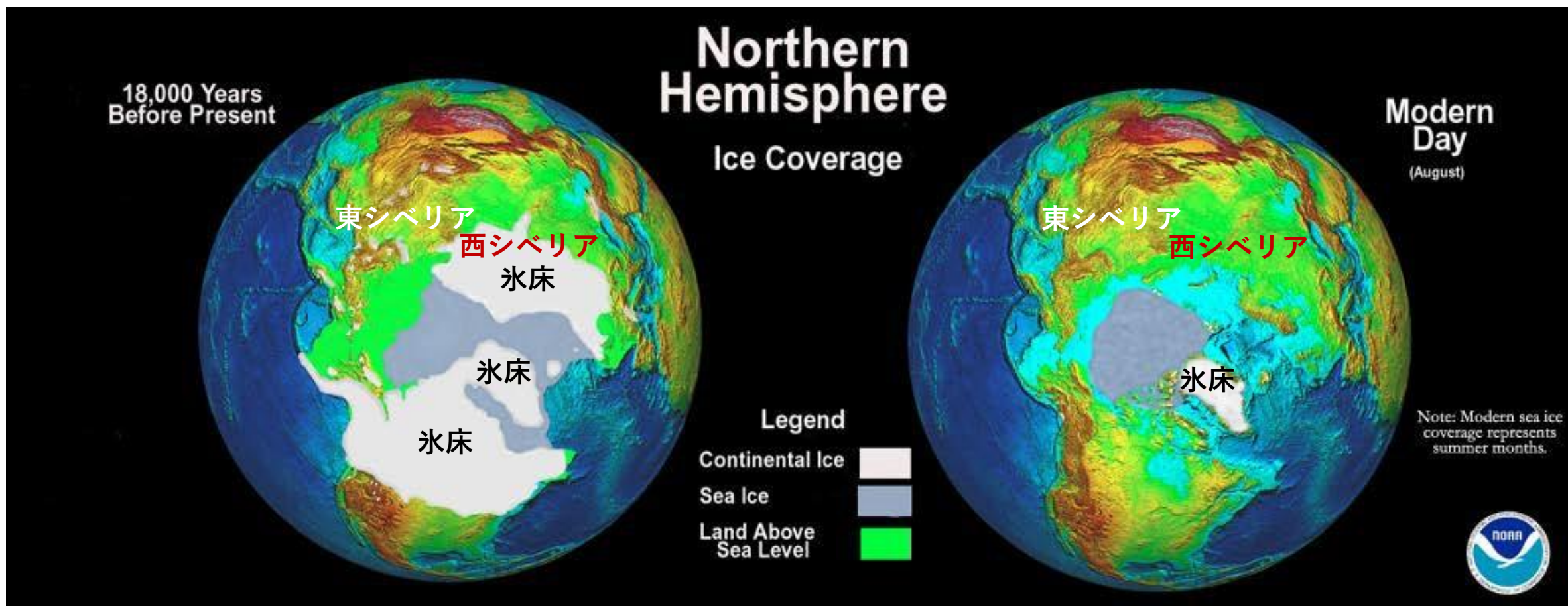
- 紫色： 連続的永久凍土 90-100%
- 緑色： 不連続的永久凍土 50-90%
- 黄色： 点在的永久凍土 10-50%
- 朱鷲色： 孤立的永久凍土 0-10%

- 斜線： 化石永久凍土
- 紺色： 氷河・氷床・氷帽
- 青点線： 北極海の海底永久凍土の北限

USGS Professional Paper 1386-A  
 Richard S. Williams, Jr., and Jane G. Ferrigno, 2012  
<http://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery5-fig03.html>

最終氷期  
(約1万8千年前)

現在  
(ただし8月)



画像 : アメリカ海洋大気庁 (NOAA)

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iceage02.png>

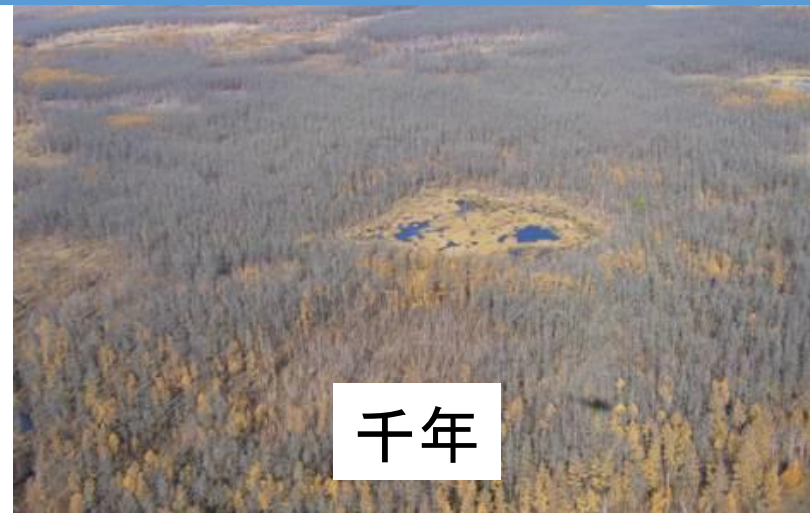
地下氷の融解に起因  
した陥没現象

## サーモカルスト



百～三百年

Stage 1



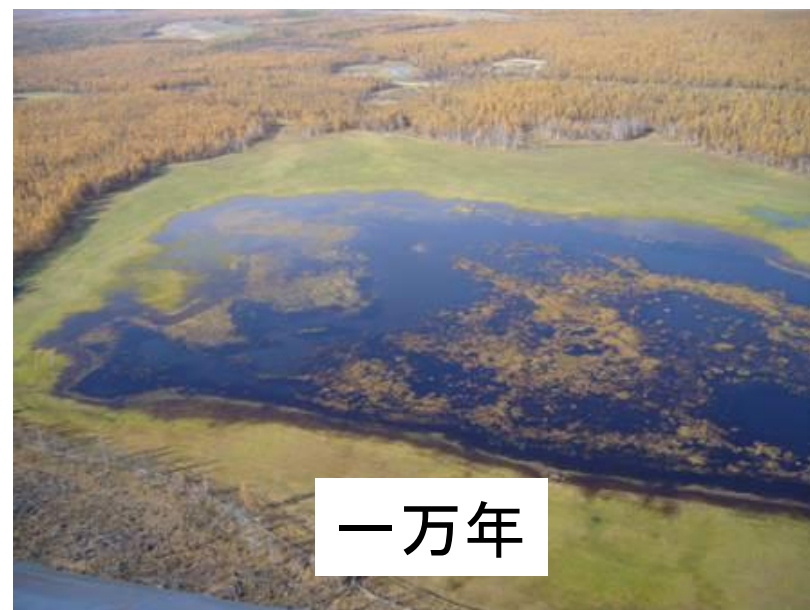
千年

Stage 2



千～三千年

Stage 3



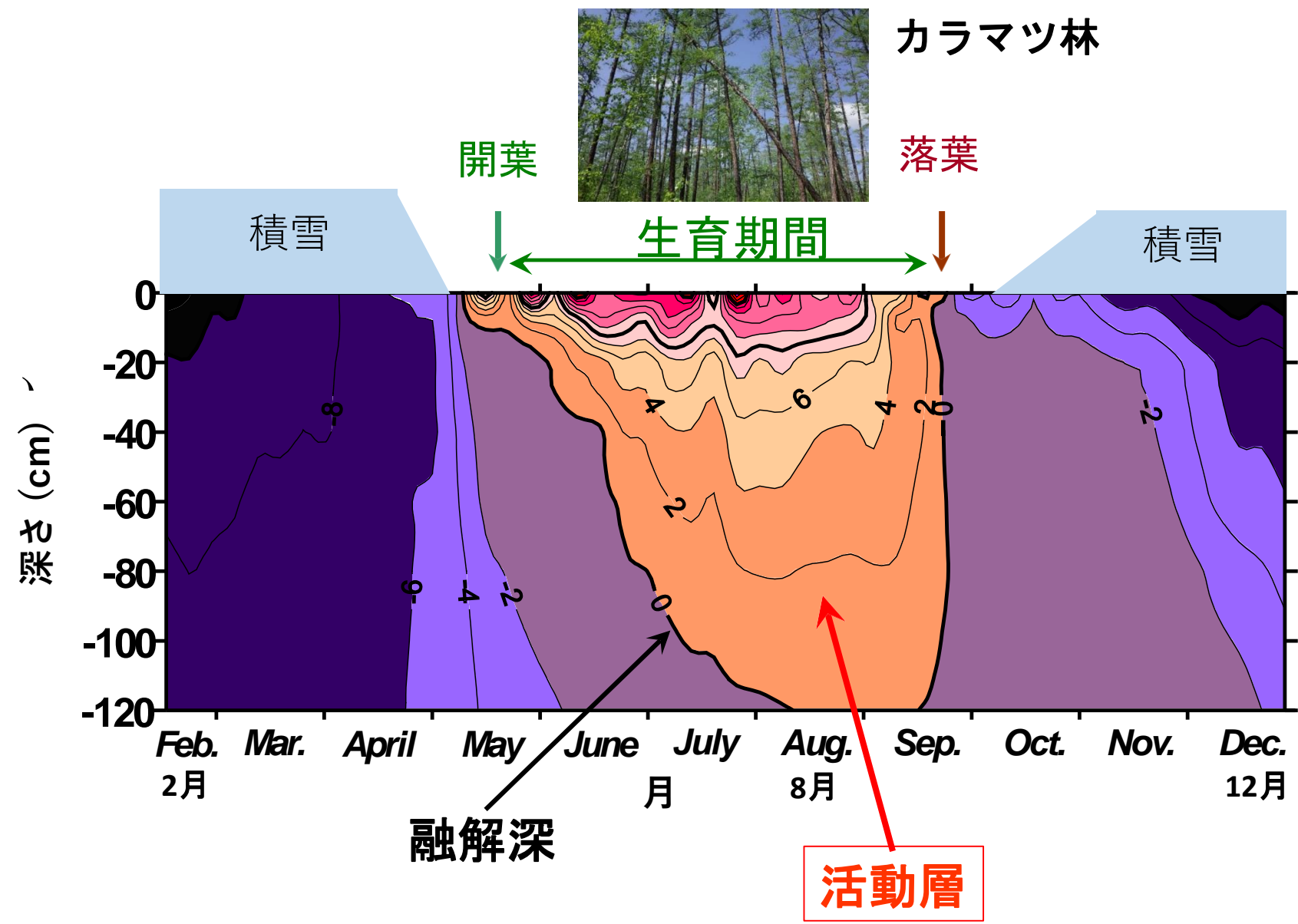
一万年

Stage 4

完新世  
(現間氷期)







(Ohta, Hiyama et al., 2001: *Hydrological Processes*)





Arctic Challenge  
for Sustainability II

← ソ連時代に利用されていた滑走路  
の変化（チュラプチャ村）

ロシア科学アカデミー・永久凍土研究所  
Fedorov 博士・撮影（ドローン）  
三重大学 飯島教授・提供

↓ チュラプチャ村の住居

ロシア科学アカデミー  
永久凍土研究所  
Fedorov 博士・撮影



（タイガの場合）

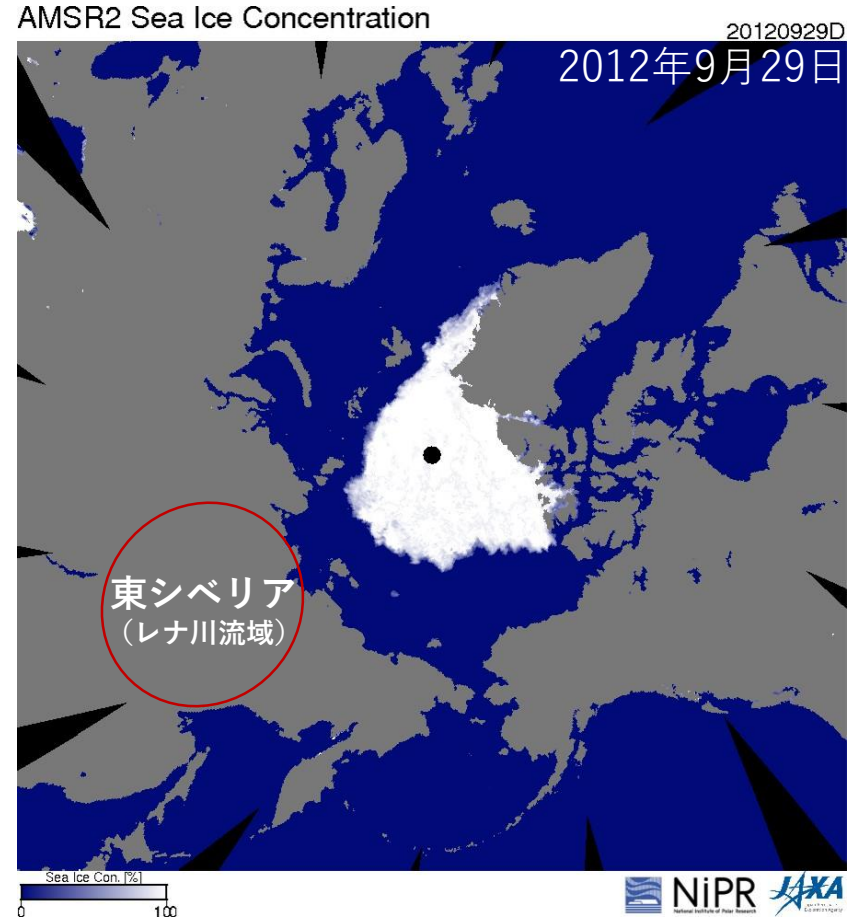
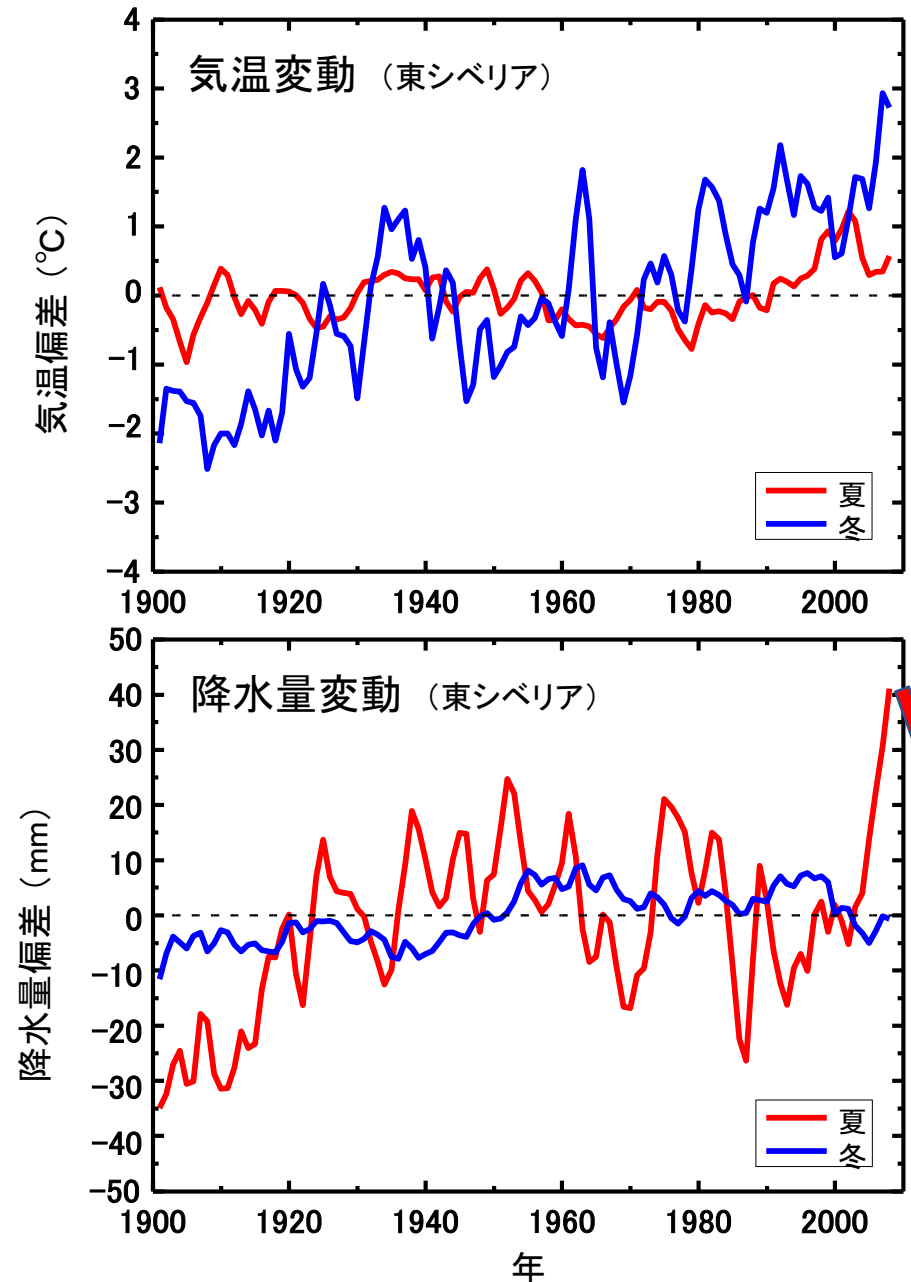
森林火災・森林伐採

→ 日射による加熱（地温上昇）  
降水量増加による融解深の深化

（サーモカルスト）

→ 永久凍土荒廃

### **3. シベリアの気候変動について**



北極海の海氷 (ユーラシア大陸側) ↓

数十年規模  
の大気循環  
変動の寄与  
?

- 蒸発量 ↑
- 降水量 ↑
- 河川流量 ↑

水文気候フ  
ィードバック

湖沼水増加分のうち  
約 70% : 降水 (雨・雪)  
約 30% : 地下氷 (融解水)  
↓  
**水循環の変化**



**永久凍土荒廃・湛水域の増加  
森林荒廃**  
↓  
**温室効果気体収支の変化**



(Fedorov, Hiyama et al., 2014: *Ecohydrology*)

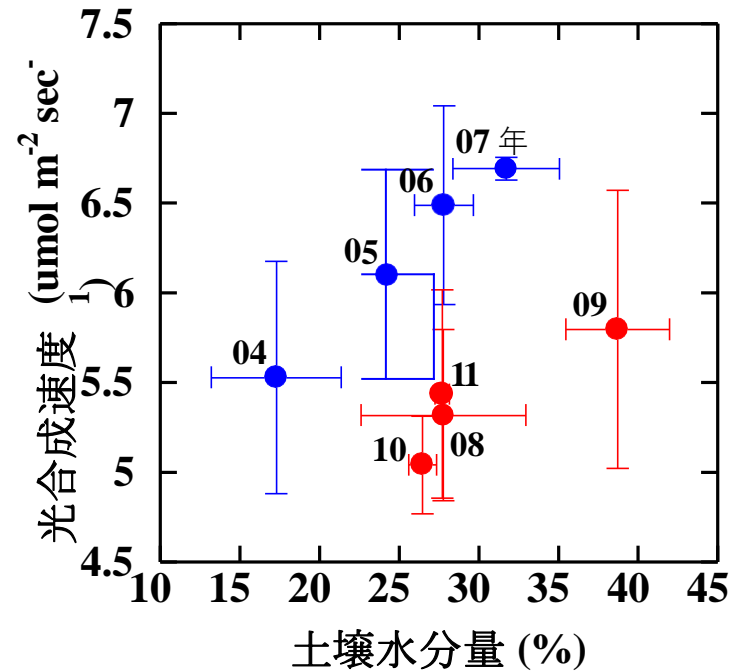
## 4. 地球温暖化が永久凍土生態系（北方林） と温室効果気体収支に及ぼす影響について



観測タワー (32 m)



湿潤期(2005年~2008年)の立ち枯れ



## ■ 東シベリアの観測:

### □ 観測期間

1996年 ~ 2017年

### □ 植生

カラマツ・アカマツ  
カンバ

## ■ 永久凍土:

### □ 夏の融解深

(活動層の深さ) 増加

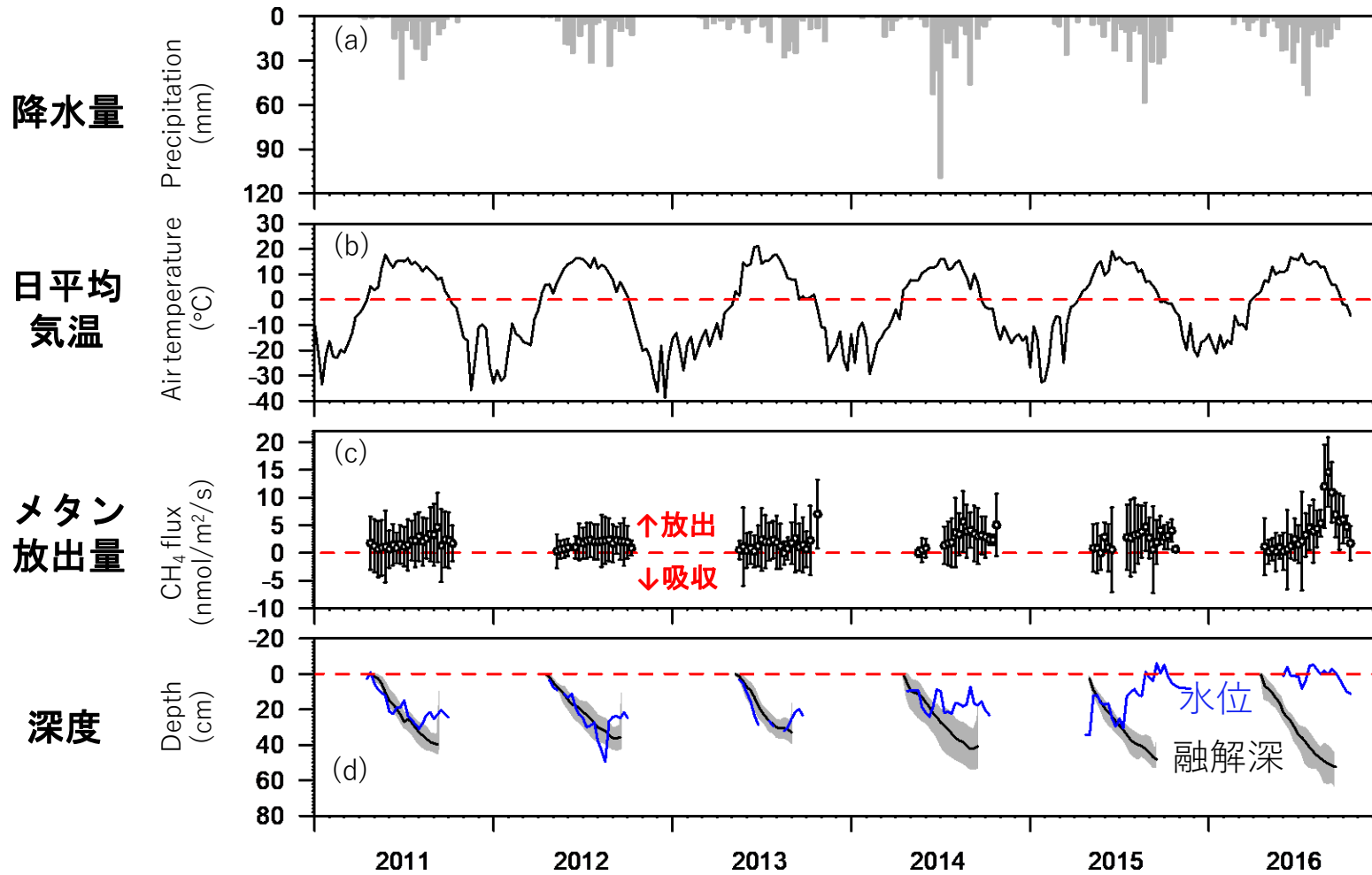
## ■ 長年の観測による成果:

← 2005年~2008年

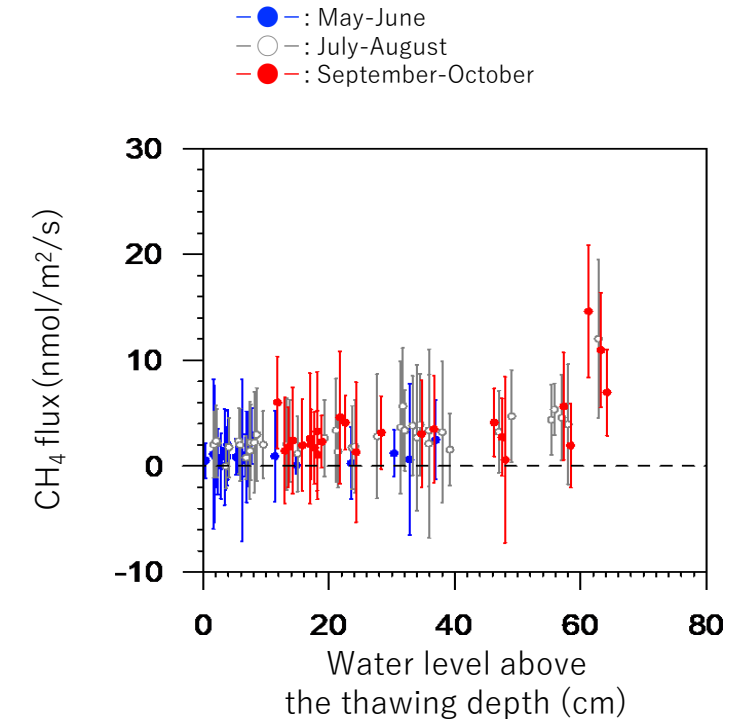
← 湿潤化の影響



## 内陸アラスカ・クロトウヒ林における観測例 (大阪府立大学・植山准教授 提供)



(a) 降水量、(b) 気温、(c) メタンフラックス、(d) 融解深と水位



### メタンフラックスと活動層内の 地下水位との関係



**活動層内の地下水位が、メタン放出量を決める。**

1. 永久凍土とは、少なくとも2年以上、地温が0°C未満の土壌を言う。
2. 永久凍土には、部分的に地下氷が含まれる。
3. 地下氷（の上部）が融解すると、周囲の地面よりも陥没する。
4. 地下氷の融解が生み出す景観の変化（現象）をサーモカルストという。
5. 陥没地形のため、サーモカルスト地形には水が溜まりやすい。
6. サーモカルストによって生じた湖沼の下は、地温が下がりにくい。
7. 東シベリアには、サーモカルスト地形が数多く見られる。
8. 森林を伐採すると、サーモカルストが進行してしまう。
9. 現在気候のもとでは、サーモカルストは元の景観に戻らない。
10. 温暖化は永久凍土（の上部）の融解を促す。
11. 降水量（雪・雨の量）が増えると、永久凍土（の上部）の融解が進む。
12. 北極海の家氷の状態（面積）は、西シベリアの積雪の量（面積）に影響する。
13. 西シベリアの積雪の量（面積）は、東シベリアの夏の気象に影響する。
14. 北極海の家氷の状態（面積）は、東シベリアの永久凍土荒廃に関わっている。