

# いま永久凍土上の北方生態系に 何が起きているのか

佐藤 永 (海洋研究開発機構 / 東大院農学生命科学)

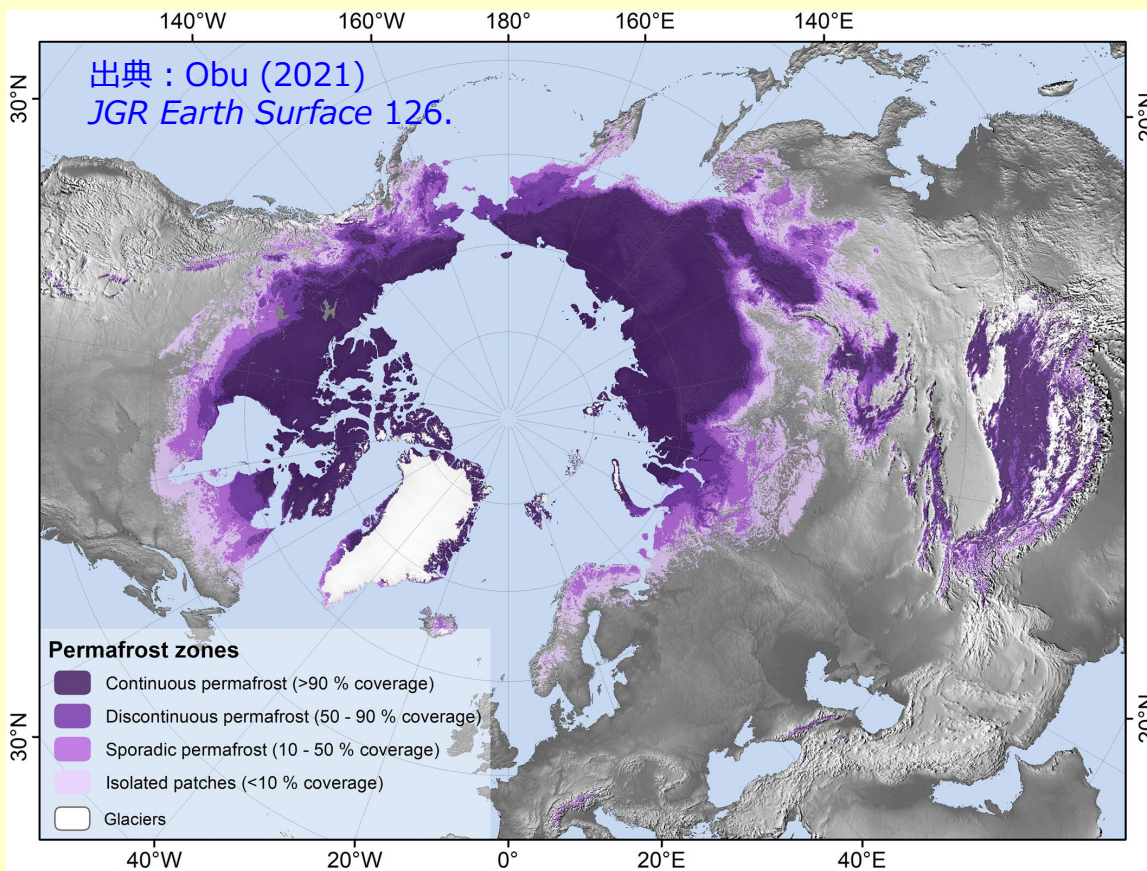


# コンテンツ

1. 永久凍土と北方植生の基礎
2. 近年の温暖化傾向に伴った北方植生の変化
3. 近年の温暖化傾向に伴った東シベリア植生の変化

# 1. 永久凍土と 北方植生の基礎

# 永久凍土



永久凍土地帯は、氷床を除く  
全球陸面の約22%に相当

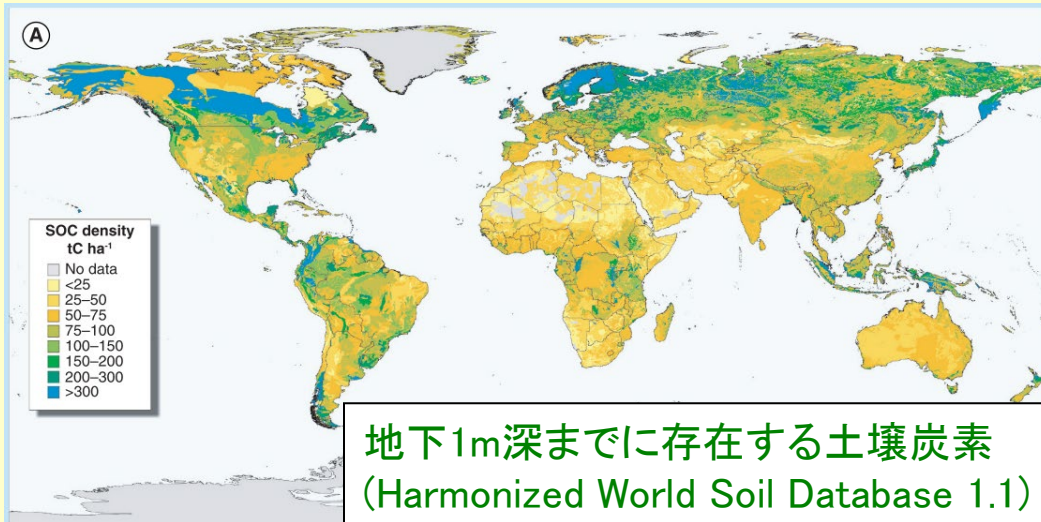
Obuら(2019)Earth-Science Reviews 193

永久凍土帯は、高緯度帯に均  
一に広がっているわけでは無  
い。最終氷期に氷床に覆われ  
ていた西シベリア～ヨーロッパ  
域には分布していない。

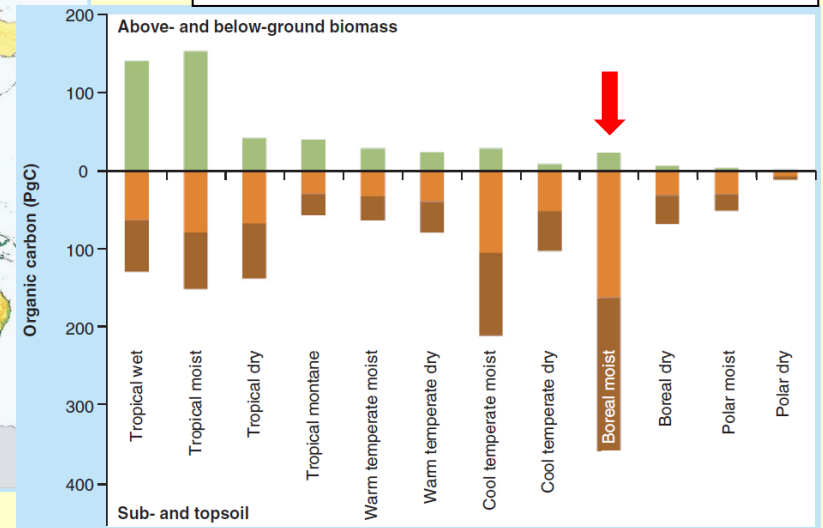
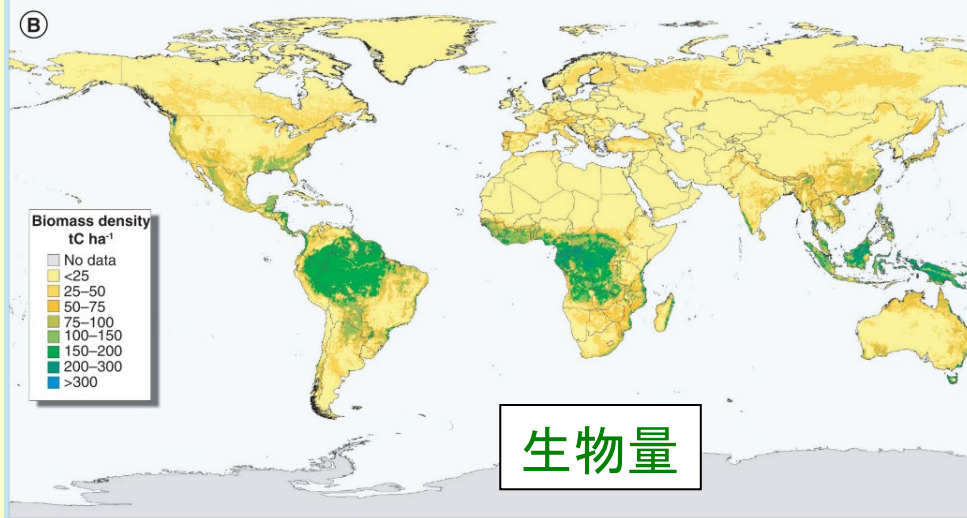
また、北方の永久凍土中には、全球の土壤炭素とバイオマスの合計の約36%に相当する1070~1360 PgCもの有機物が含有されていると推定される

(IPCC 2021, Box5.1)

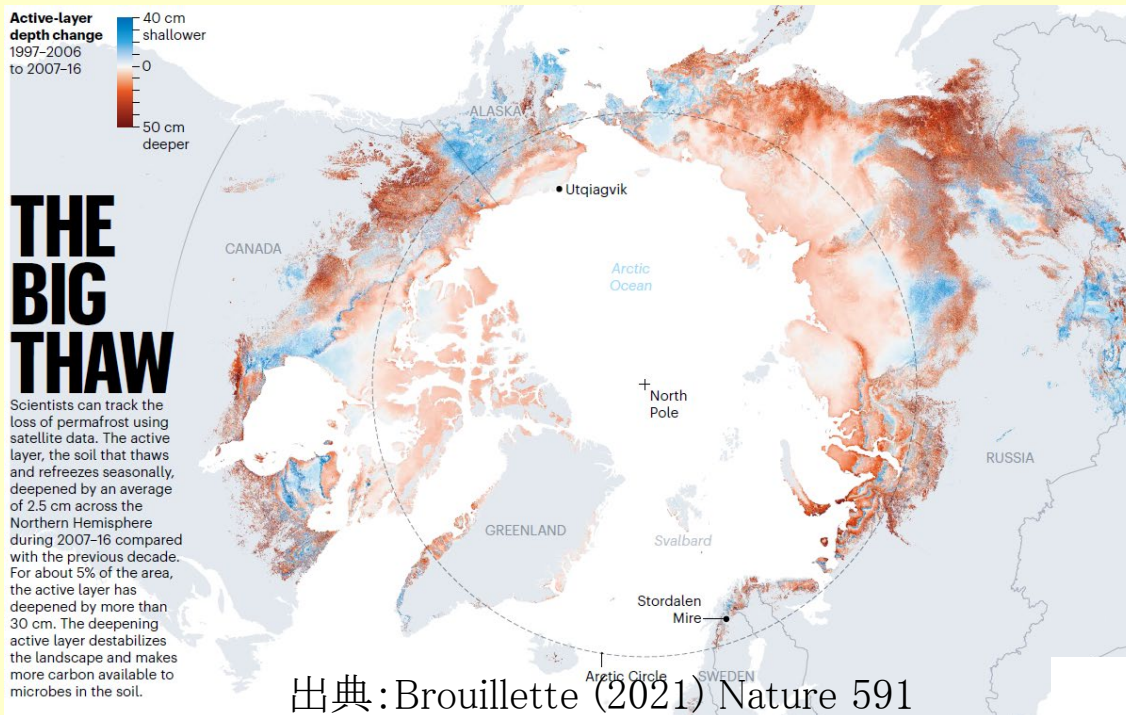
# 高緯度帯では、生物量よりも土壤中に多く炭素が存在する



バイオーム別の有機炭素プール  
上: バイオマス  
下: 土壌





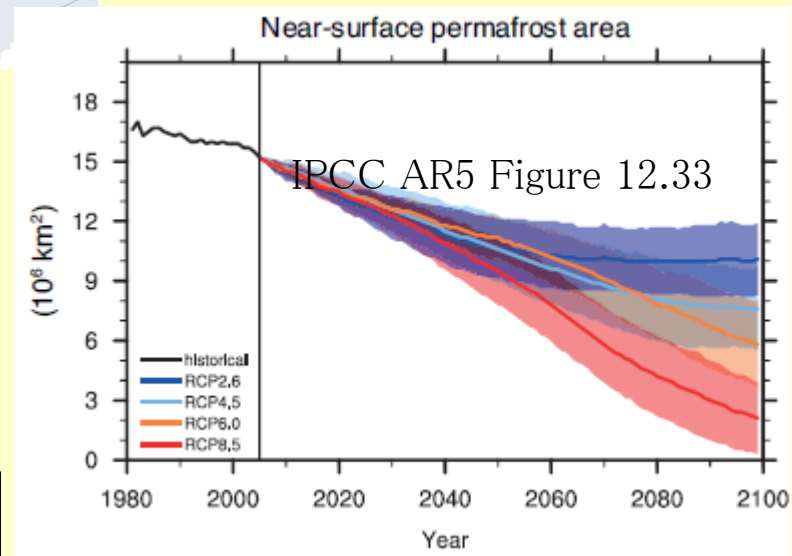


1997-2006年  
→2007-2016年に生じた活動層厚変化

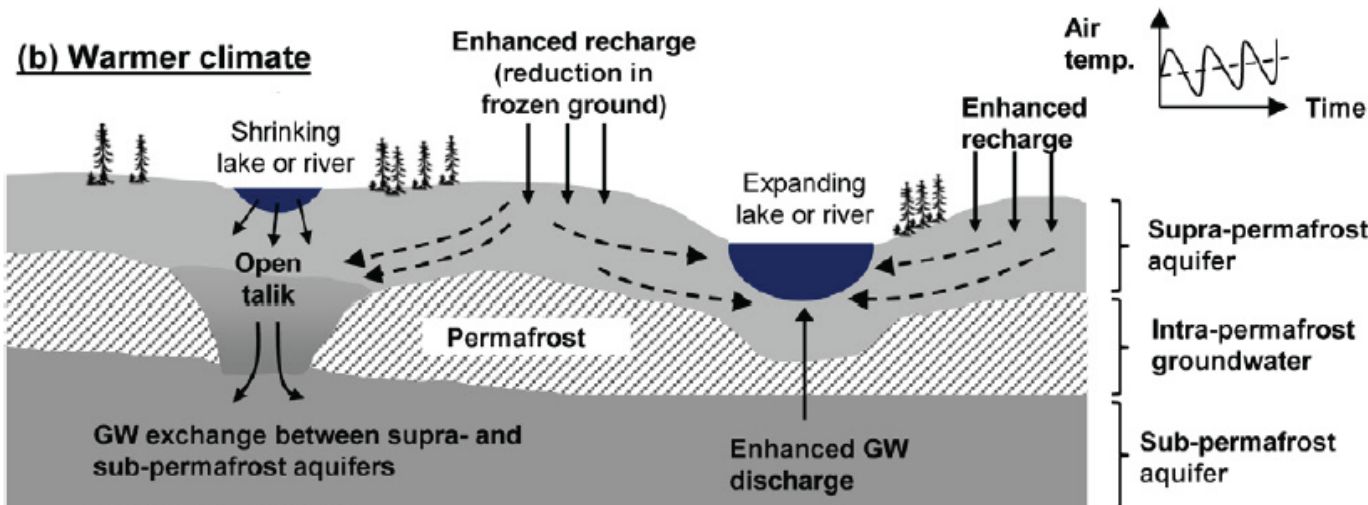
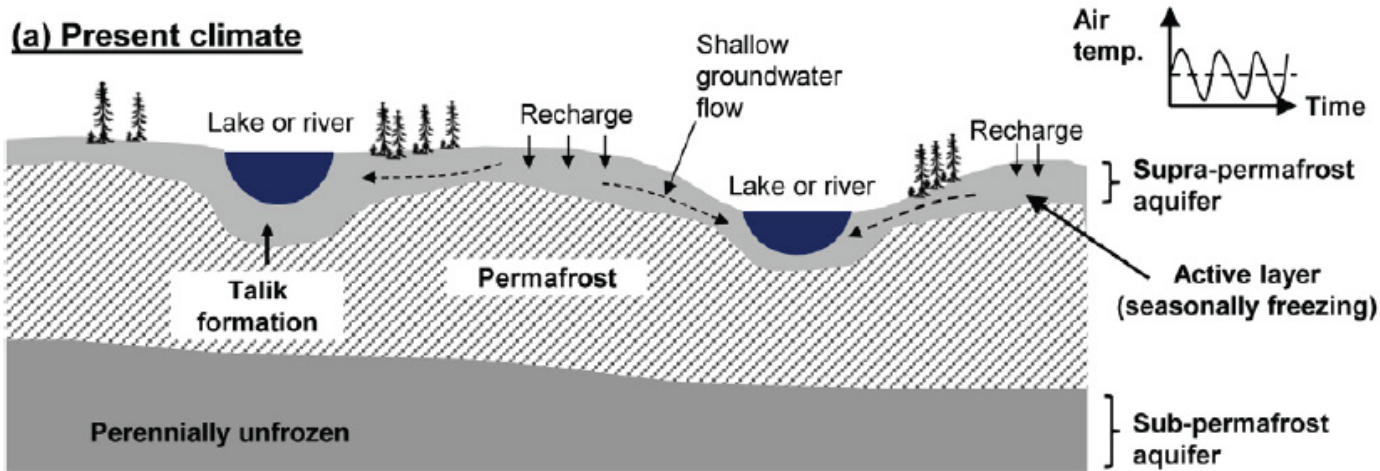
急速に融解中

## 今世紀末までの地表面付近の永久凍土面積予測

今世紀末までに、地表付近の永久凍土はほぼ消失する見込み。



# 永久凍土の融解に伴う土壌水の移動



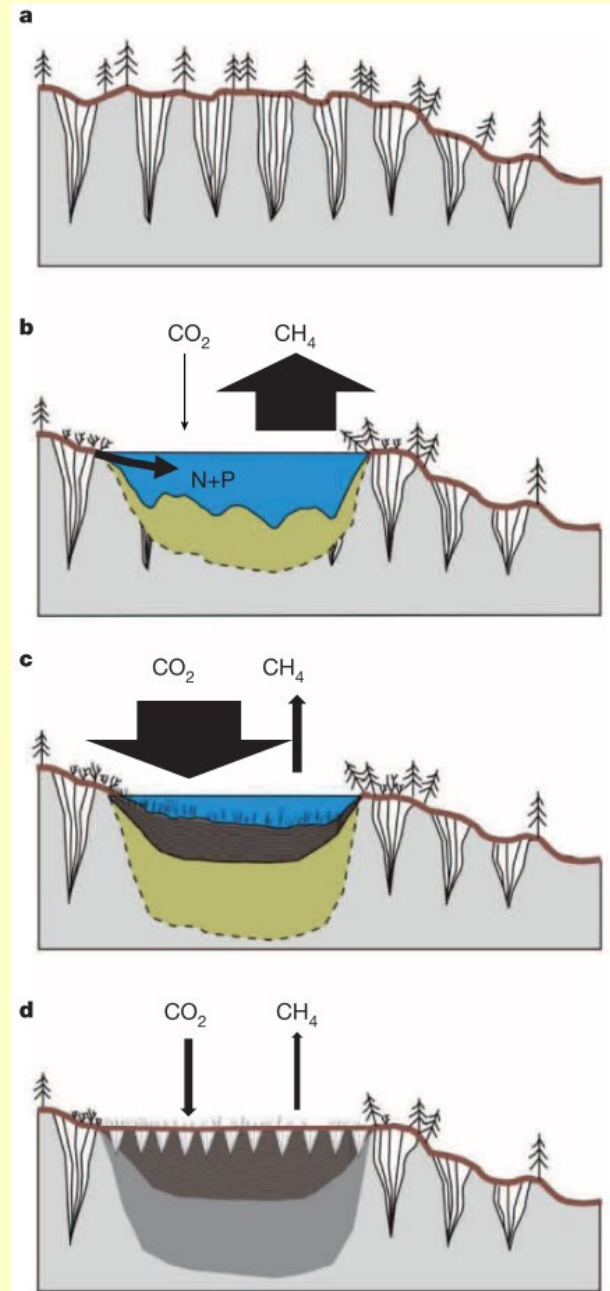
地形に応じて融解水の移動が生じるため、面的な不均一な反応を示す

# 14700年前の最終退氷期に生じたサーモカルスト湖の形成消滅サイクルに伴う炭素循環の変化

サーモカルスト湖が形成され、過去に堆積した土壤炭素が主に $\text{CH}_4$ として大気中に放出される。それに伴い開放されたNとPにより、湖の生物生産性は増加。

サーモカルスト湖の排水が進み、その湖底には周辺植物の遺骸が蓄積。これは1000年スケールの時間をかけて進行する。

ちなみに北方の永久凍土地帯のうち、約20%がサーモカルスト地形であるが、そこには北方の永久凍土地帯が抱える土壤炭素量の最大で半分が画分されている (Olefeldtら, 2016, *Nature Communications*)。





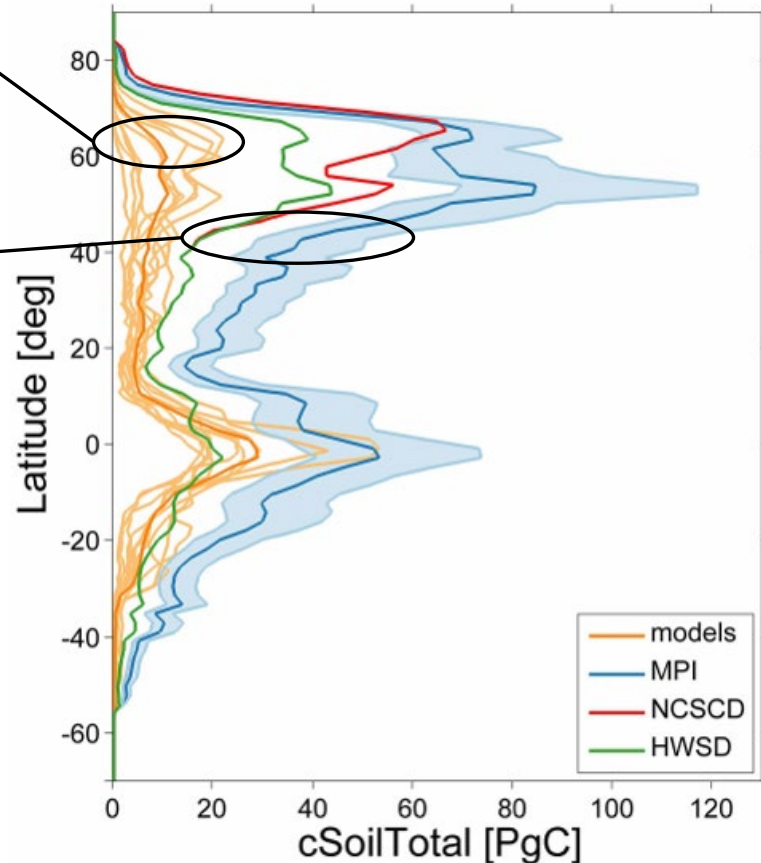
# ESMでは土壌炭素を過小に評価している

CMIP5参加モデル出力

実測ベースのデータ  
(MPI以外は、深さ1mまで)

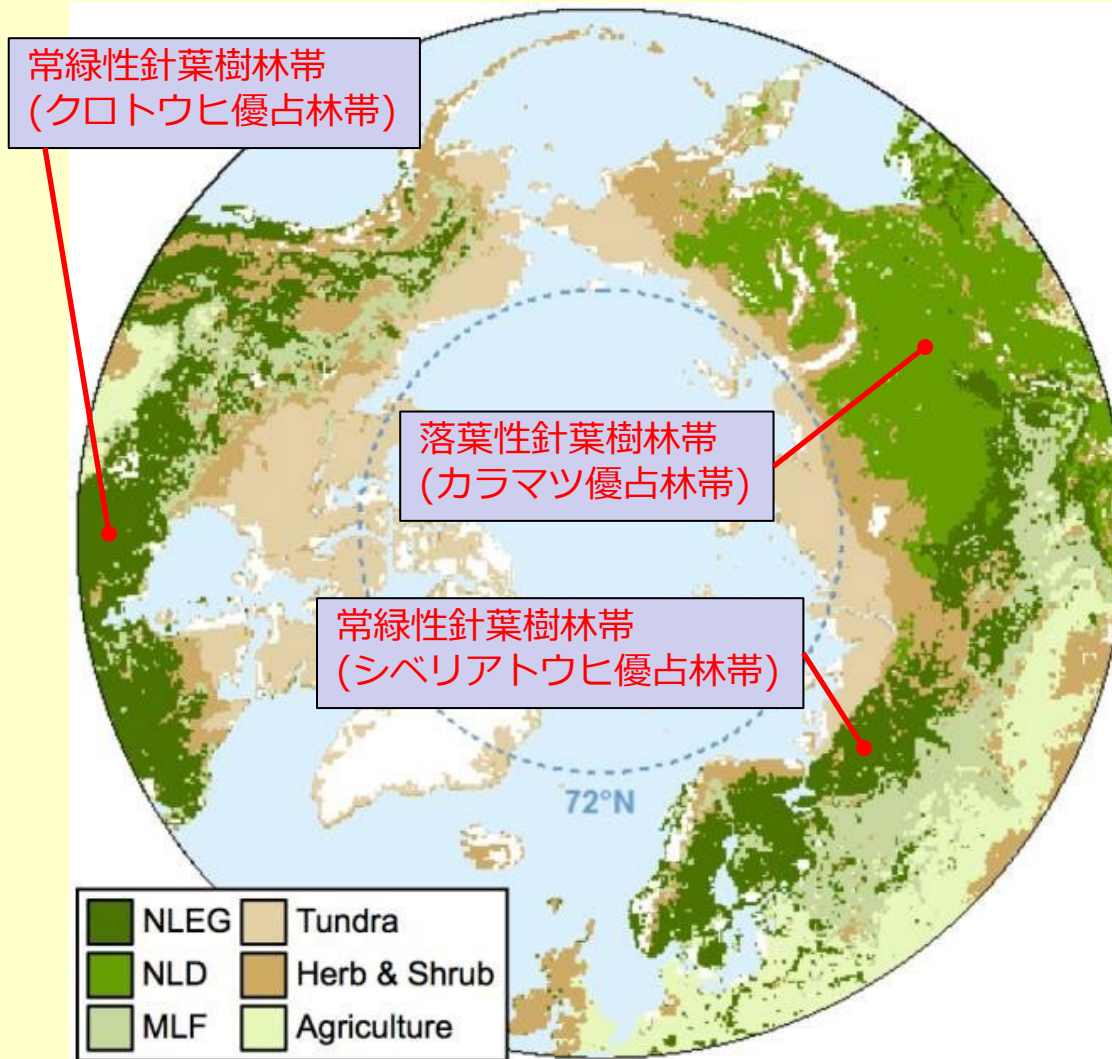
現在のESMは、特に高緯度帯の土壌炭素を過小推定しており、今後は、凍土や泥炭に埋蔵されている炭素なども考慮する必要がある。

土壌炭素の緯度方向分布  
モデル vs 実測ベースのデータ



出典：Nunoら (2014) *Nature* 514.

# 植生被覆



北極海に接する地域はツンドラ、南下すると灌木帯、さらに南下すると森林帯が優占

森林帯は針葉樹が優占するが、山火事直後などの植生回復過程などでは落葉性広葉樹が一時的に優占する事が多い(特に北米大陸において)

東シベリアのみに、落葉性針葉樹であるカラムツが優占。その優占域は、永久凍土分布域と良く一致する

## 針広混交林の世界的な分布

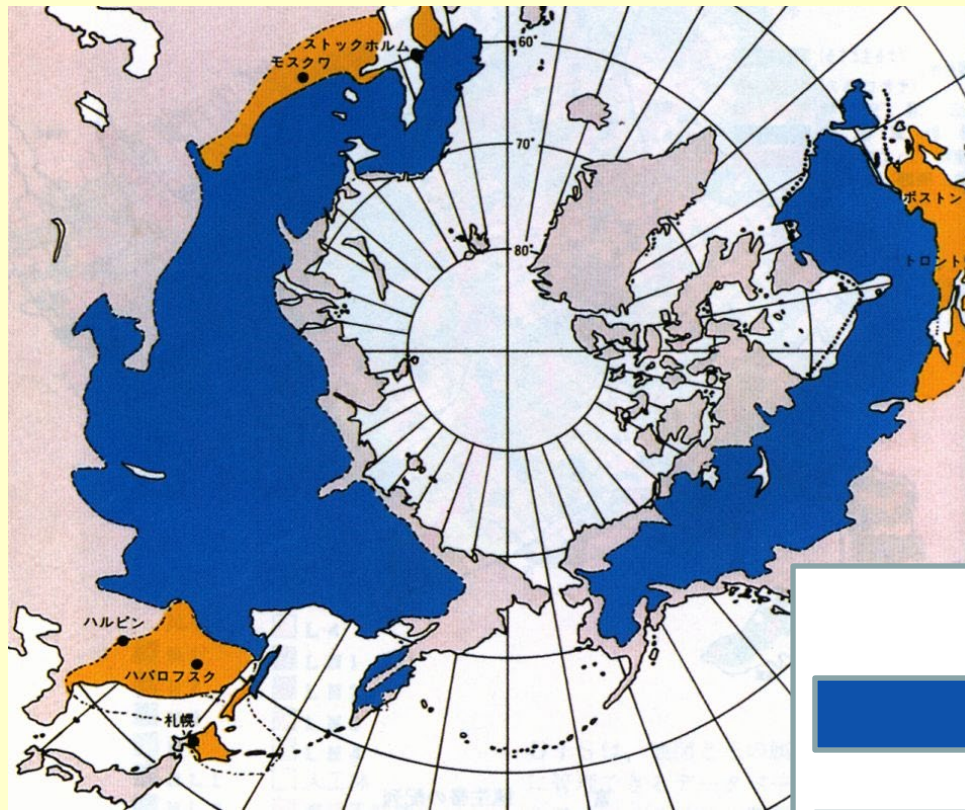




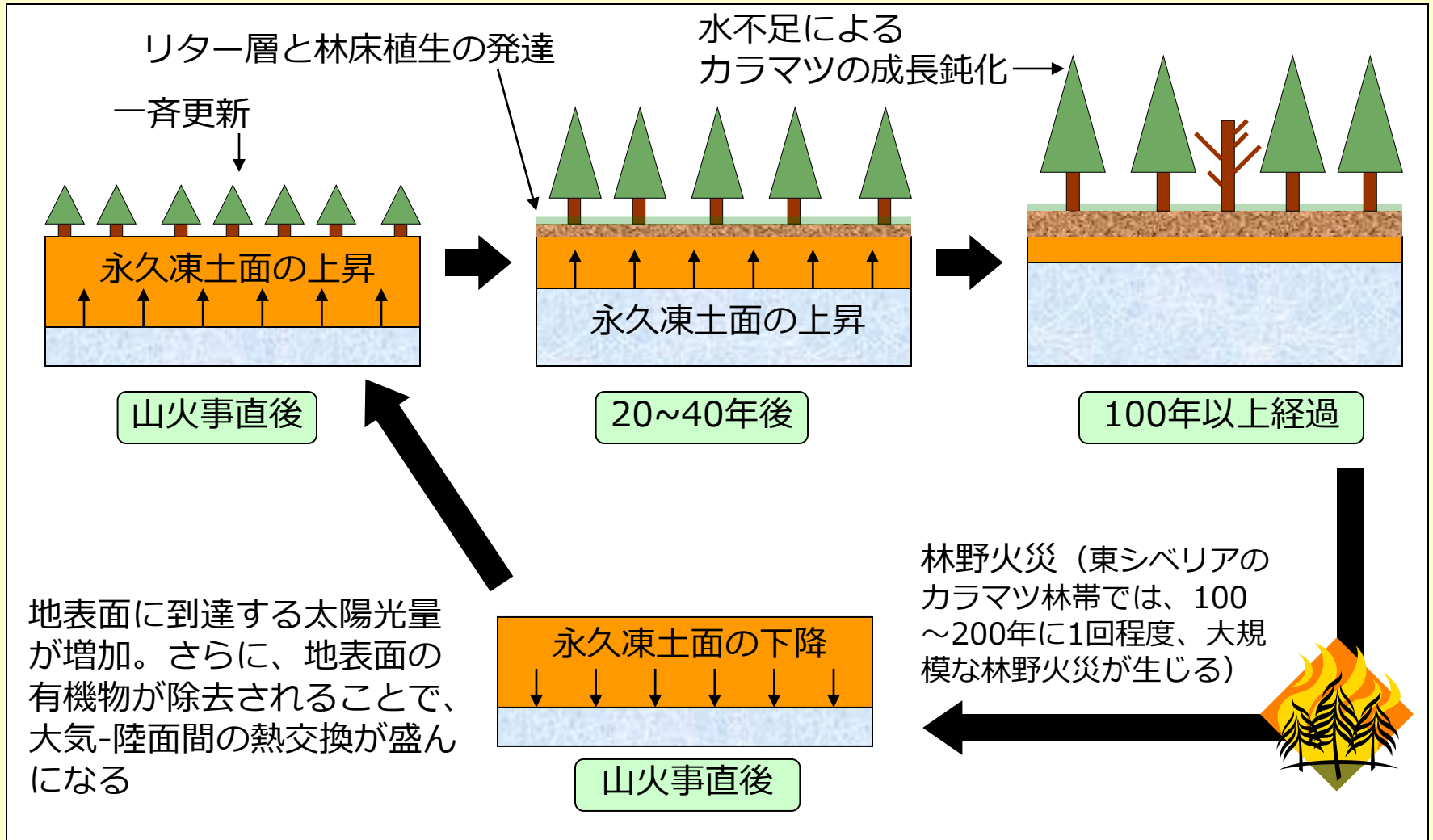
Figure source:「北海道 森を知る」鮫島 惇一郎 (監修), 森林総合研究所北海道支所 (編集), 1998

### 優占する森林タイプ

-  Coniferous forest (Taiga)
-  Mixed conifer and broad-leaved forests (針広混交林)

針広混交林は、亜寒帯性常緑針葉林帯の低緯度側(低標高側)、冷温帯性落葉広葉林帯の高緯度側(高標高側)に分布し、気候変動に対して、高い感受性を持つと考えられている。

# 林野火災が制御する東シベリアの凍土-植生動態サイクル





## まとめ (1/3)

高緯度陸域には広大な永久凍土地帯が広がる。永久凍土地帯には膨大な土壌炭素がプールされている。ここは現在、急速な融解が進行しており、それに伴い大規模な炭素の放出が生じる可能性が高い。しかし、その定量的予測には、地形や土壌炭素プールの大きな空間的不均質性が妨げとなっている。

高緯度帯の優占植生は比較的単純で、ツンドラ・灌木帯・常緑性針葉樹林・落葉性針葉樹林に大雑把に分けられる。

亜寒帯性常緑針葉樹林帯(タイガ林)の南側には、針広混交林が広がる場合がある。内陸部など、十分な降水量の無い地域には、草原や灌木帯が広がる。

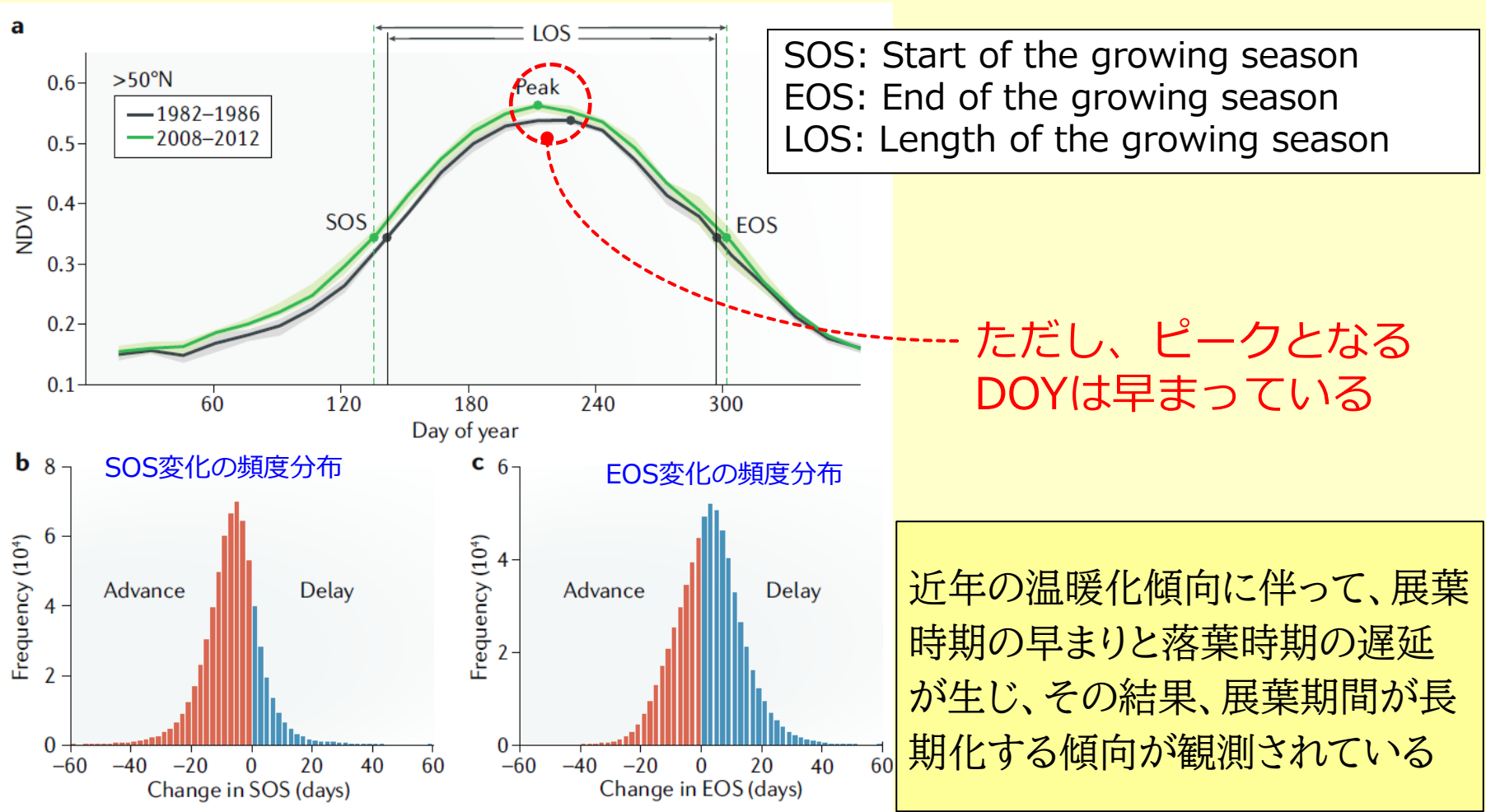


# コンテンツ

1. 永久凍土と北方植生の基礎
2. 近年の温暖化傾向に伴った北方植生の変化
3. 近年の温暖化傾向に伴った東シベリア植生の変化

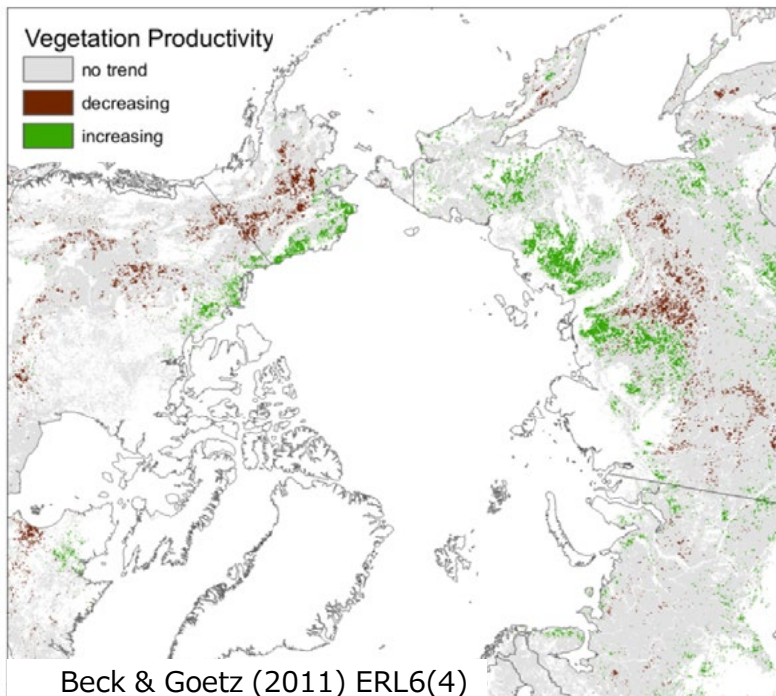
# 高緯度帯の展葉期間は長期化しつつある

## 北緯50度以北のNDVI(正規化植生指数)季節変化トレンド



# 温暖化への応答はツンドラと森林で異なる

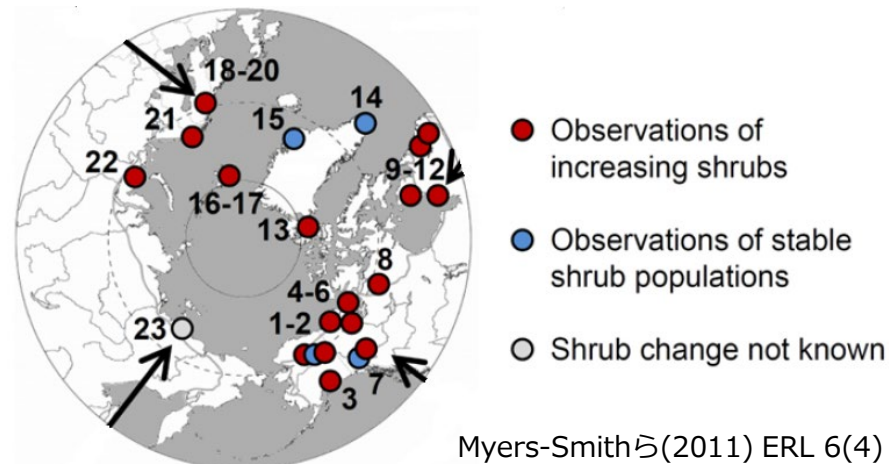
## NDVI変化トレンド (1982~2008年)



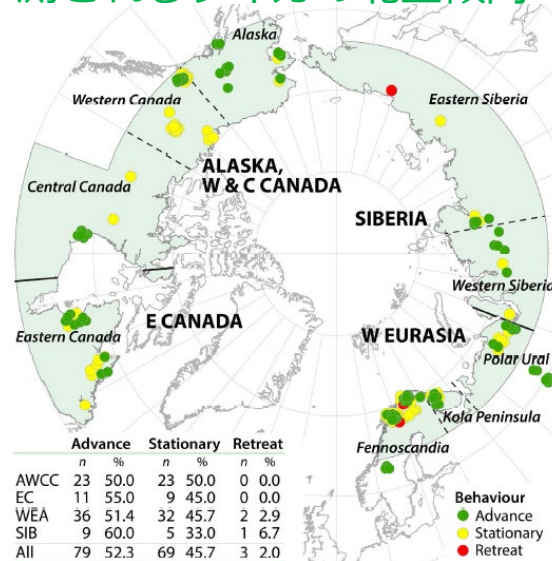
全体的な傾向 **ツンドラ域:UP**  
**亜寒帯林域:Down**

北上速度は、サイトごとにマチマチであるが、いずれにせよ気候変化から期待される速度の1~2オーダー低かった。その速度は、**気温よりも降水量と強く相関していた。**

## ツンドラ域で観測される低木の侵入拡大



## ツンドラ-タイガ境界域で観測されるタイガの北上傾向

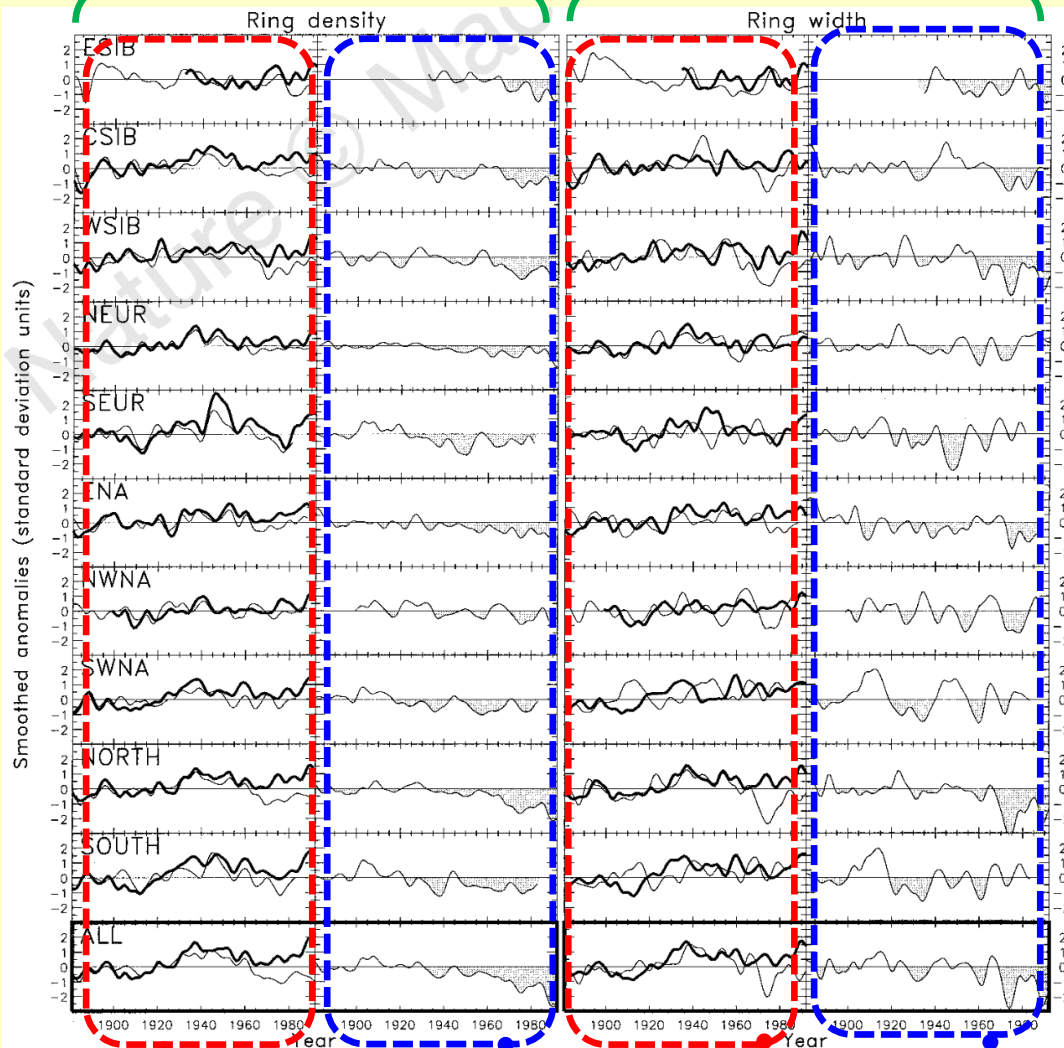




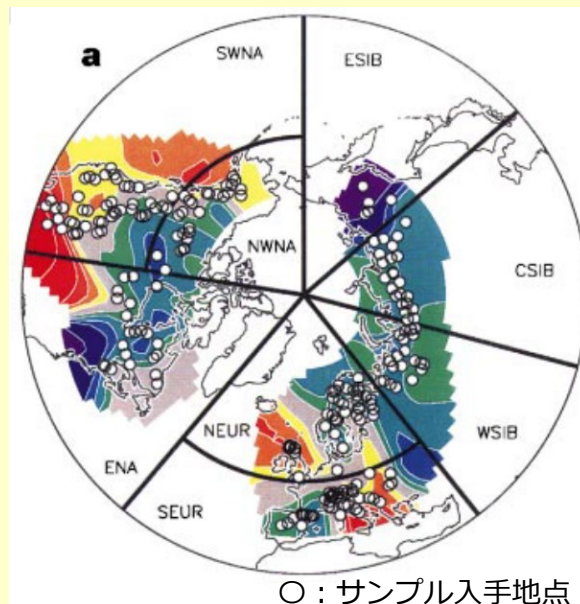
規格化した値のアノマリー (smoothed)

年輪密度

年輪幅



# 年輪記録の解析



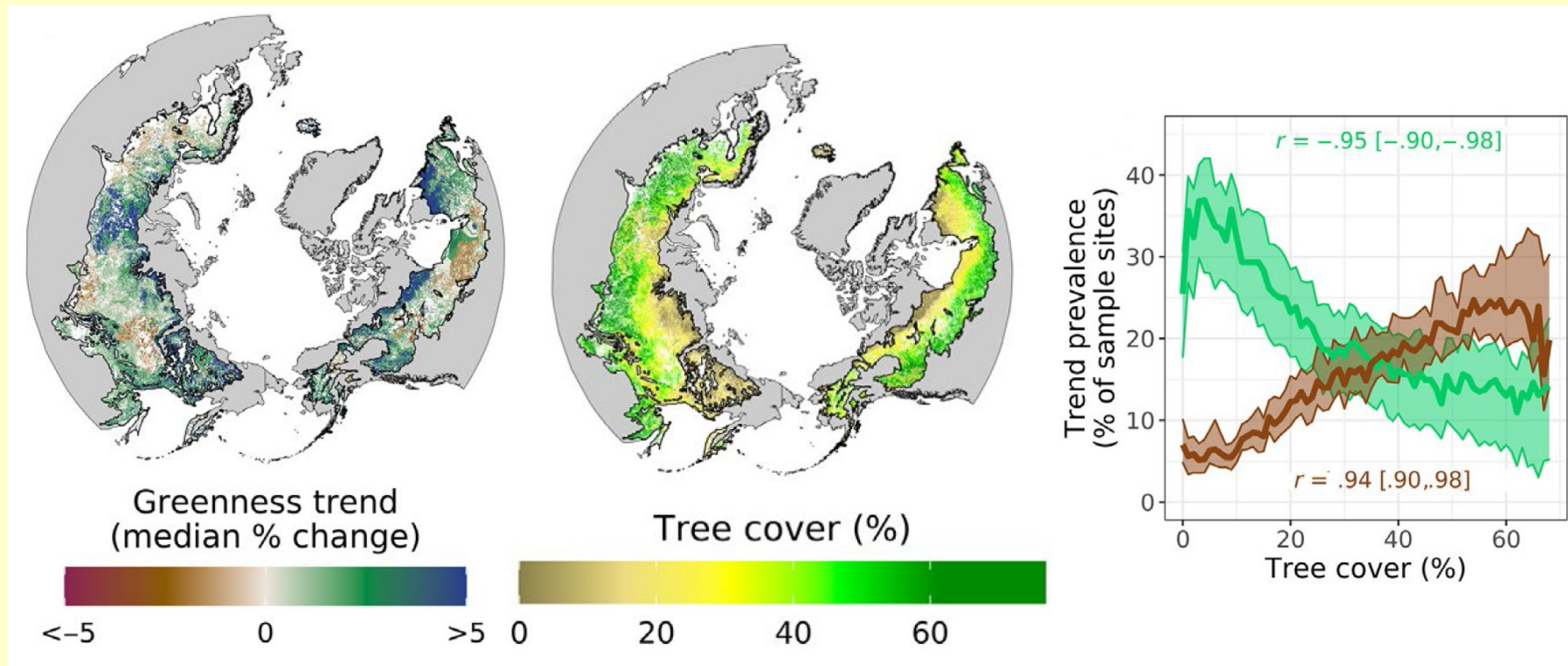
20世紀前半では、夏が暑い年ほど木本成長が良かったが、20世紀後半では、この傾向が逆になった

夏期気温 - 年輪値

太線: 夏期気温, 細線: 年輪値



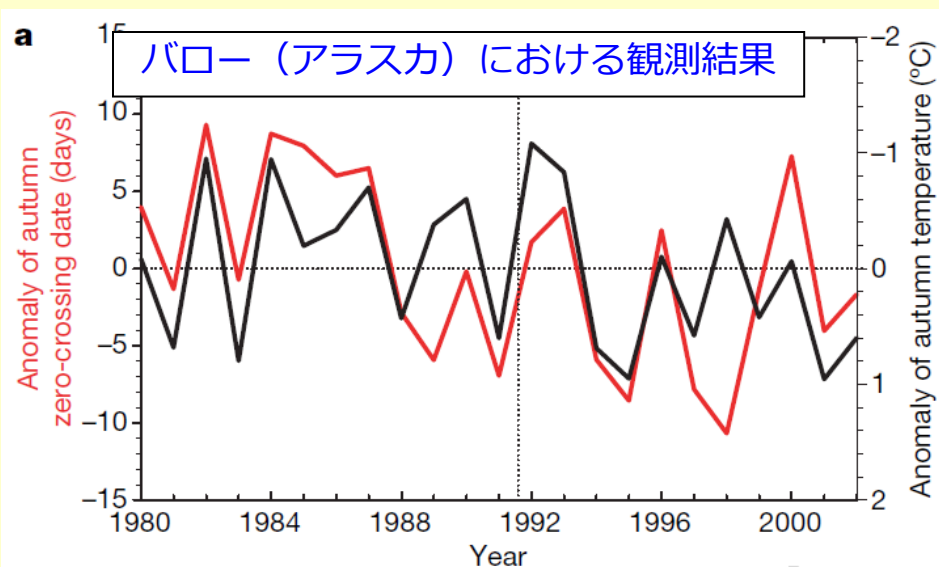
# 周北極域の森林成長速度変化、その傾向



さらに2000～2019年に取得された衛星リモートセンシングデータの解析からは、植物生産性に関わる指標が温暖年に弱まる傾向が示されている。そしてその傾向は、森林被覆度の高い地域ほど強く生じていた

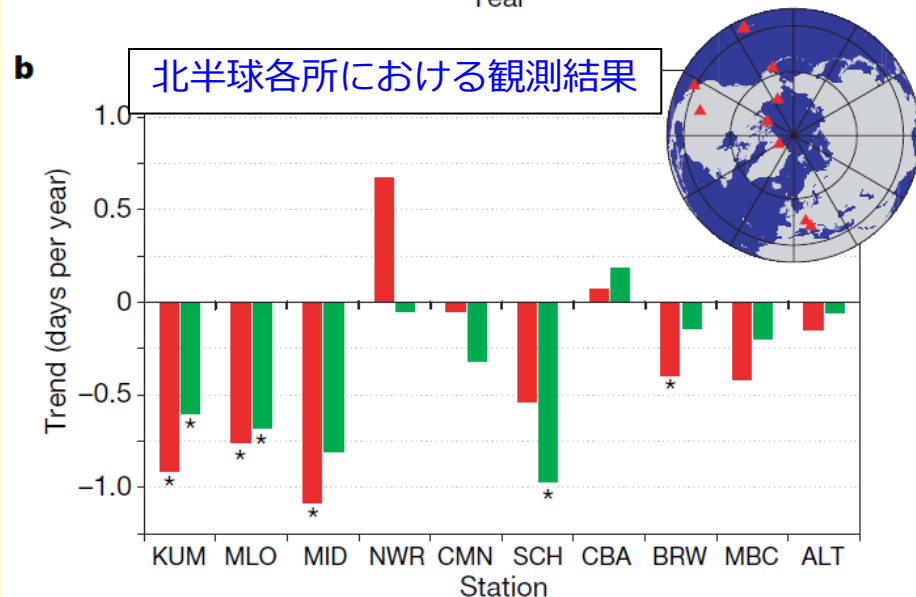


# 北半球におけるNet炭素吸収期間の短化



- ← 赤線: 炭素収支が負になるDOYのアノマリ
- ← 黒線: 秋気温のアノマリ

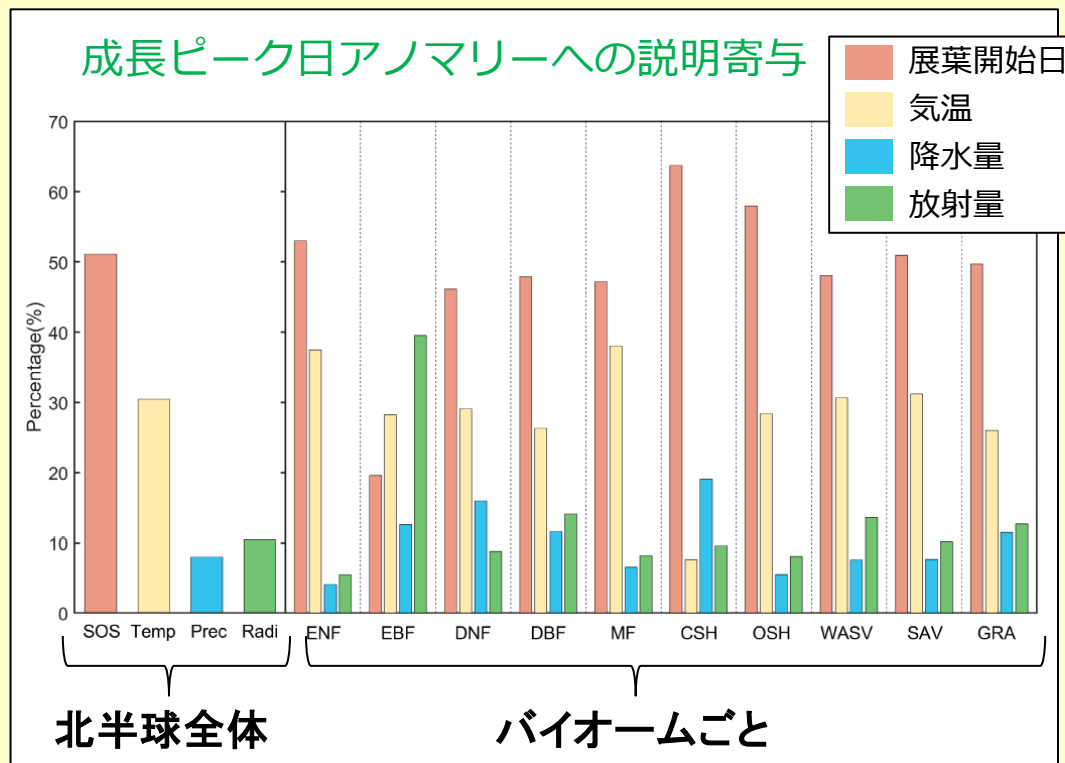
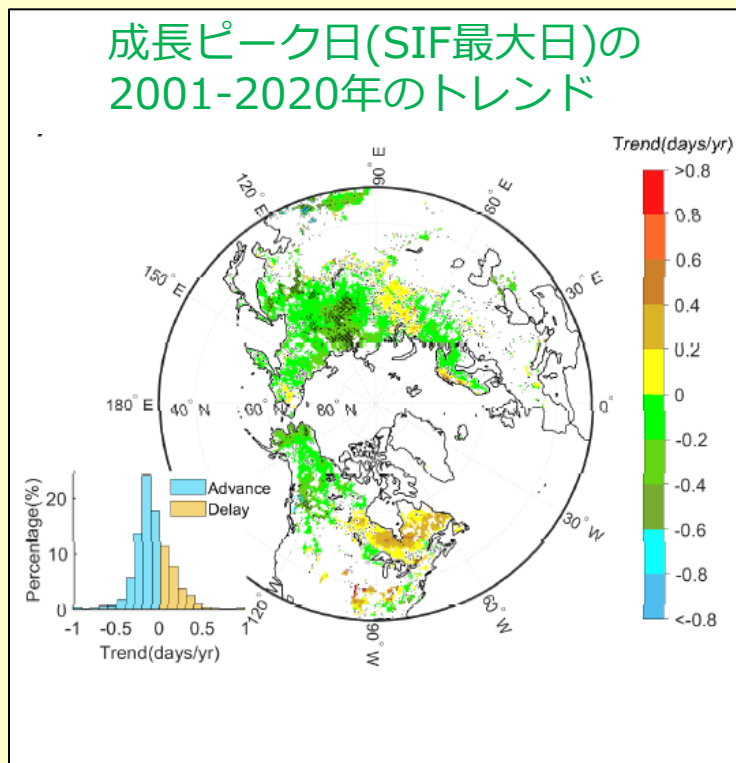
北半球の陸域生態系では、秋にCO<sub>2</sub>のnet吸収源から放出源に切り替わるが、切り替わり日のアノマリは秋気温と強く相関(他方で降水量とは有意に相関しない)



- ← 赤棒: 炭素収支が負になるDOYのトレンド
- ← 緑棒: 陸面の正味炭素吸収が正である日数のトレンド

北半球陸域全域で、炭素収支が負になるDOYが早くなり、これが炭素吸収期間の低下をもたらしている要因の一つ

# 開葉日が早まると、植物生産性のピークアウトも早まる



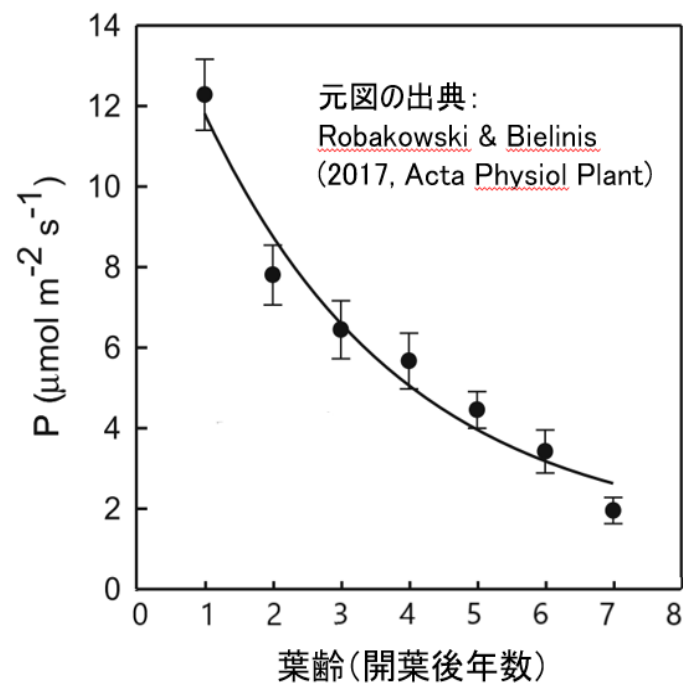
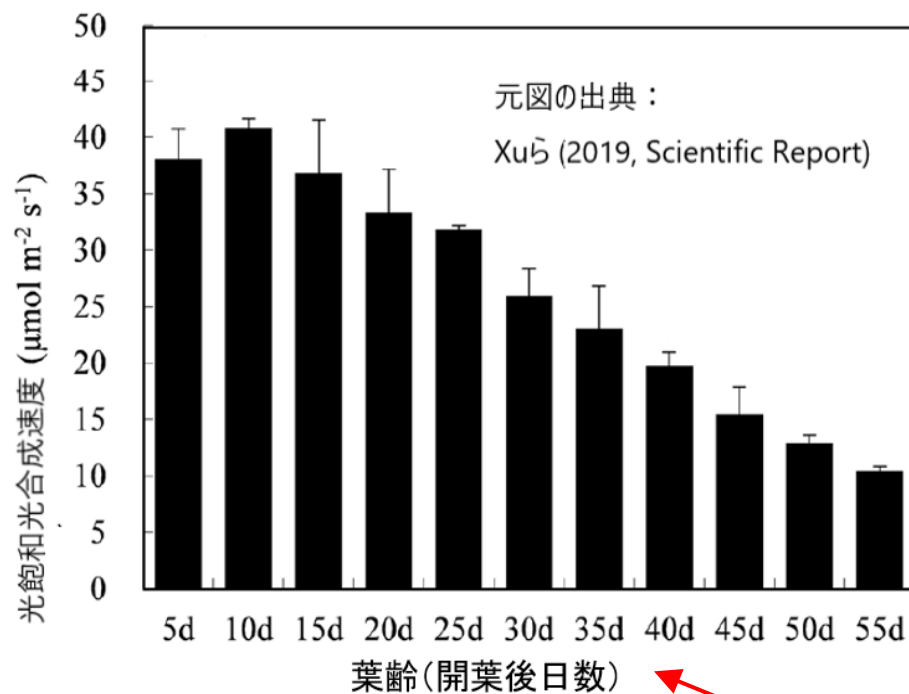
Huangら(2023) Glob Chang Biol 29(16)

春の高温などで展葉期が早まった場合、その後の気象環境とは無関係に、植物生産性のピークアウトも早まる。この傾向をもたらしている原因の1つとして、**葉の老化**が指摘されている

# 葉齢と光飽和光合成速度との関係

イネ

ヨーロッパアカマツ



スケールの違いに注意！

葉の光合成能力は、展葉直後に最大値に達し、その後は徐々に低下していく。従って、展葉期間と年間植物生産量との関係は、水や日光不足などの条件が同じであったとしても、正比例にはならない。

## まとめ (2/3)

現在の温暖化トレンドの元で、高緯度帯植生では、展葉期間が早く生じ遅くまで持続する傾向が観測されている。しかし植物生産性指標のトレンドは、一般にツンドラ域では上昇するが、森林地帯では下降している。後者は、乾燥の影響により生じていると考えられてきた。

他方で、秋にCO<sub>2</sub>のnet吸収源から放出源に切り替わる日のアノマリーは秋気温と強く相関するが、降水量とは有意に相関しないという報告もある。また、近年、開葉日が早まると、その後の気象環境とは無関係に、植物生産性のピークアウトも早まる傾向が観測される。

このような傾向をもたらしている原因の1つとして、近年、葉の老化が指摘されている。つまり、春先に早く開葉すると、秋には葉の老化が進行し、最大光合成速度が低下する。この場合、秋の高温は、それによる呼吸速度の上昇を賄えるほど、光合成速度は上昇しないことになる。

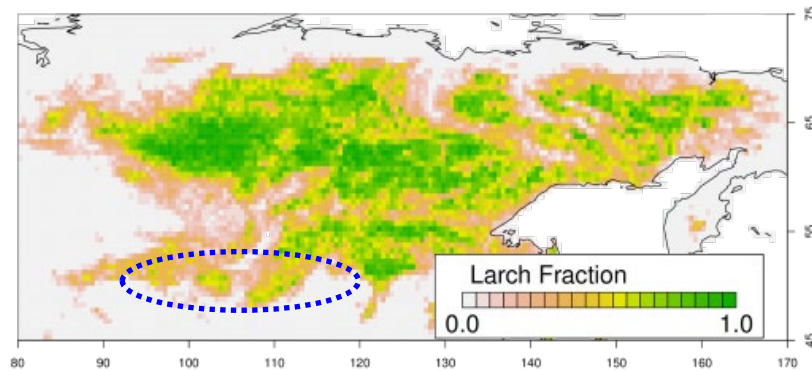
# コンテンツ

1. 永久凍土と北方植生の基礎
2. 近年の温暖化傾向に伴った北方植生の変化
3. 近年の温暖化傾向に伴った東シベリア植生の変化



# Topographic control on larch forest (Example 1)

## Transition zone of larch forest to steppe at Northern Mogol



Source: Forests of Northern Mongolia - FCA Today, [www.fca-today.com/page13.html](http://www.fca-today.com/page13.html)

**ARIDITY** controls southern boarder of Siberian larch forest, where larch trees mainly distribute on Valley Floors

## Topographic control on larch forest (Example 2)

### 1ha Plot @ a Transition zone of Larch forest and Tundra

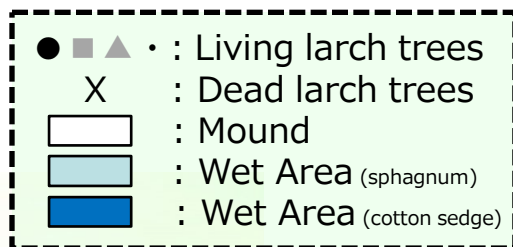
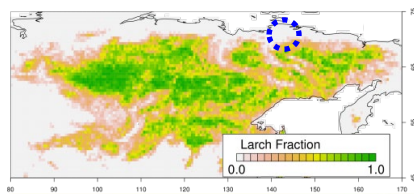
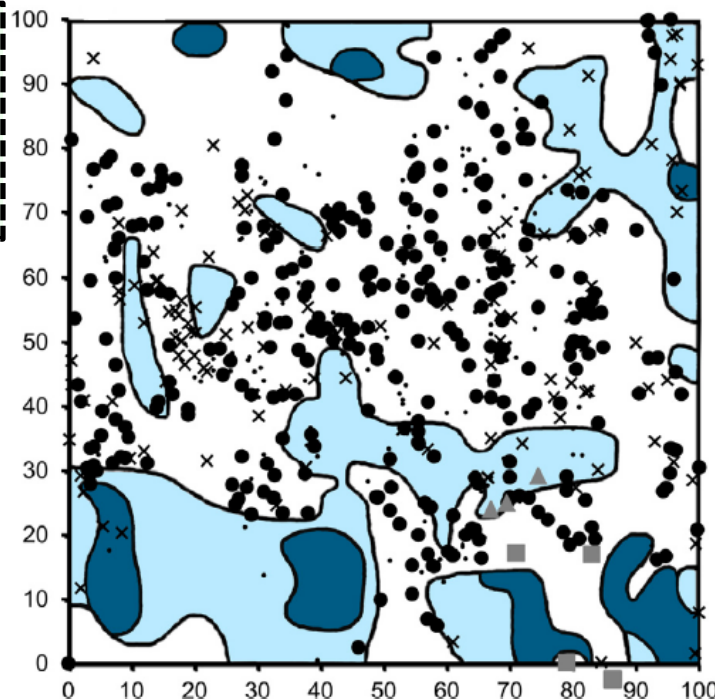


Photo: T. Morozumi

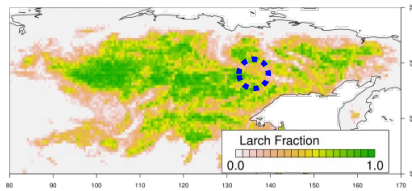


Source: Liang et al (2014)

Larch trees only distribute on mounds, because shallow active layer makes surrounding lower flat areas **OVER WET**

# Topographic control on larch forest (Example 3)

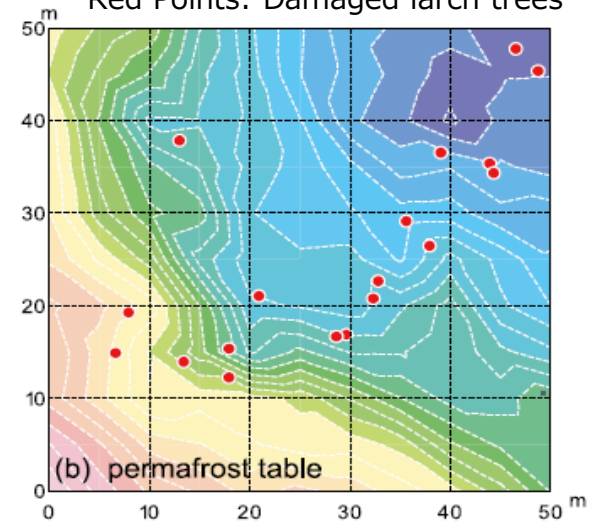
## Sppaskaya-pad forest@Yakutsk



Excessive precipitation during 2007~2008 caused forest decline

Iwasaki et al. (2010) *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 2

50m × 50m Plot  
Contour : Active Layer Depth  
Red Points: Damaged larch trees

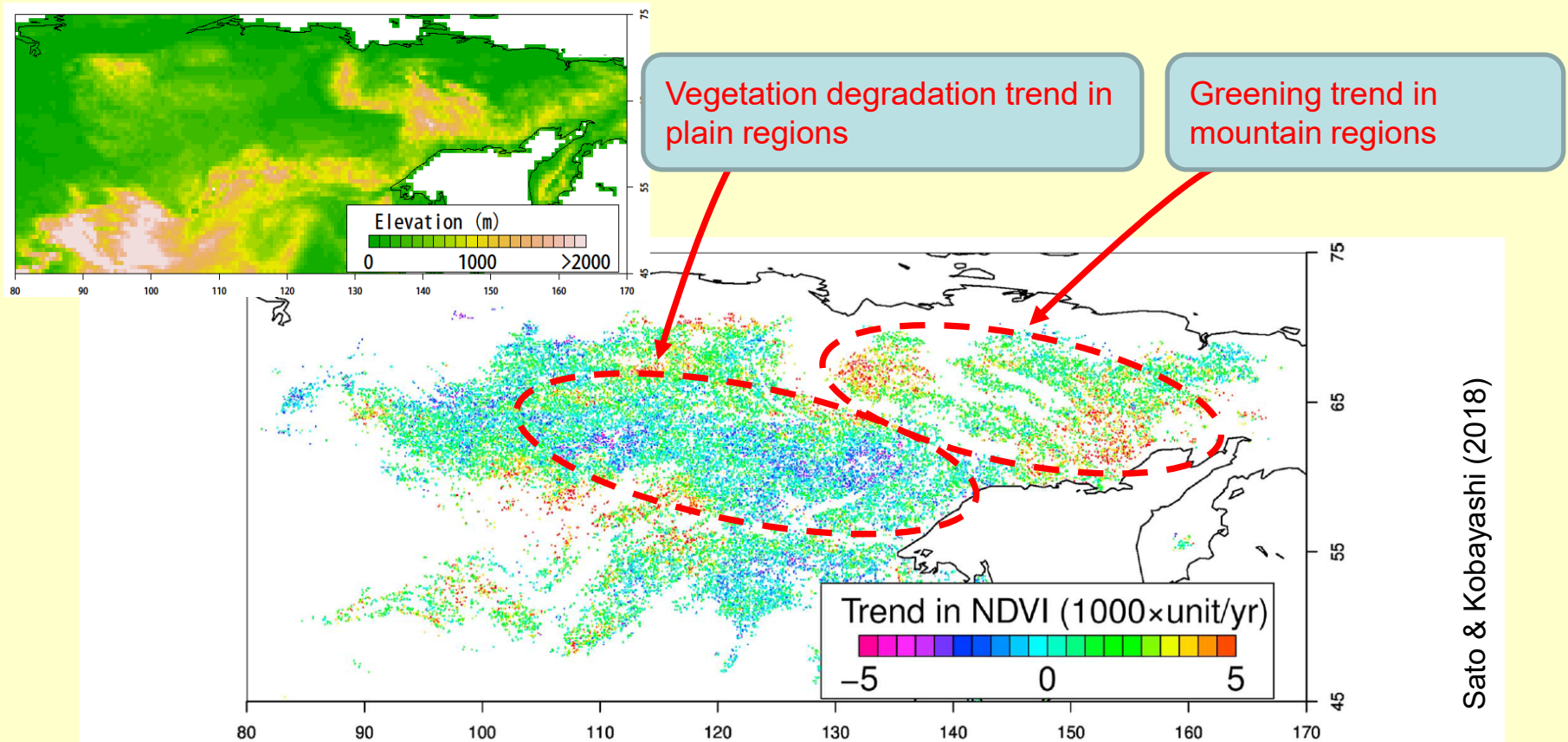


Damaged larch trees mainly distribute patches where soil water gathers

Iijima et al. (2016) *Ecohydrol.* 7(2)

Summer **drought** basically controls annual productivity of larch trees, while **over wet** can kills larch trees in poorly-drained patches





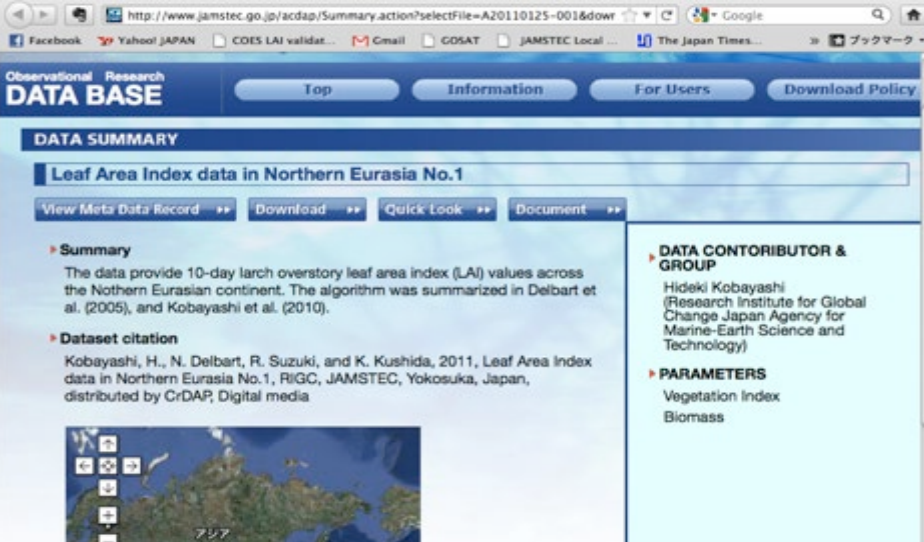
Sato & Kobayashi (2018)

**Figure 4.** Geographic distribution of summer normalized difference vegetation index (NDVI) trends during the last 30 years in larch dominated areas. For each year of GIMMS3g half-monthly NDIV data, only value of middle July was employed. Then, the average values from 2011 to 2015 were subtracted from the average values calculated for the period from 1981 to 1985. Only data grids where larch is dominant are visualized.

Topography mediated controls of hydrology would alter the vegetation response to climatic changes

# Canopy LAI was estimated for the Siberian larch zone (@1/122 degree resolution)

- LAI was estimated by adapting SPOT / VEGETATION data to Inverse analysis of a radiation transfer model
- Seasonal changes in NDWI was employed to separate canopy and floor LAIs



Observational Research  
**DATA BASE**

Top Information For Users Download Policy

**DATA SUMMARY**

Leaf Area Index data in Northern Eurasia No.1

View Meta Data Record Download Quick Look Document

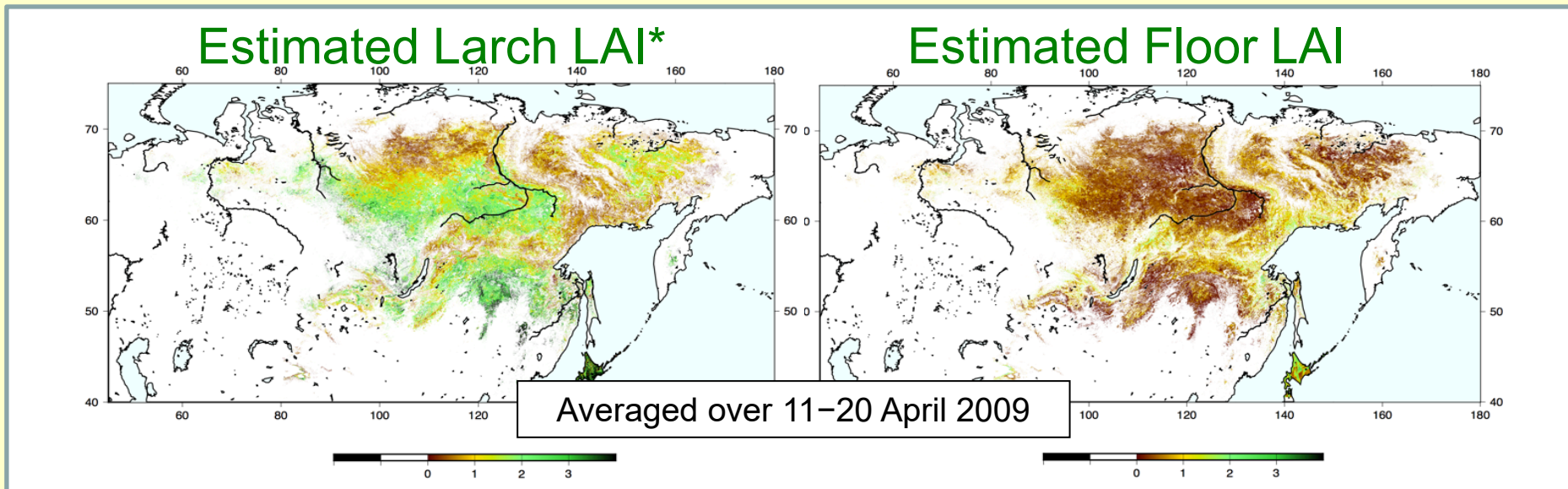
**Summary**  
The data provide 10-day larch overstory leaf area index (LAI) values across the Northern Eurasian continent. The algorithm was summarized in Delbart et al. (2005), and Kobayashi et al. (2010).

**Dataset citation**  
Kobayashi, H., N. Delbart, R. Suzuki, and K. Kushida, 2011, Leaf Area Index data in Northern Eurasia No.1, RiGC, JAMSTEC, Yokosuka, Japan, distributed by CrDAP, Digital media

**DATA CONTRIBUTOR & GROUP**  
Hideki Kobayashi (Research Institute for Global Change Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

**PARAMETERS**  
Vegetation Index  
Biomass

Data during years of 1998~2013 is available online <http://flies.sakura.ne.jp/RSdata/SiberiaLAI/README.html>



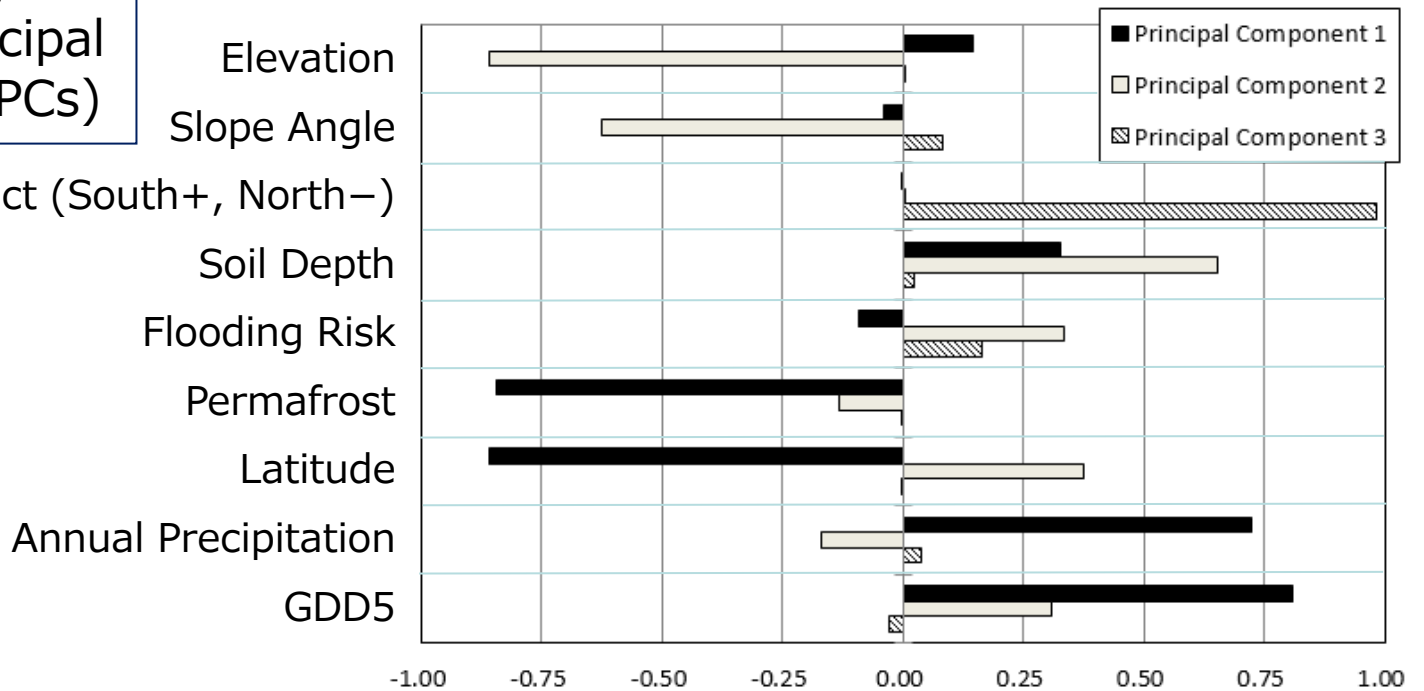
\*Canopy LAI for areas where GLC2000 classifies larch forest

Figures: Hideki KOBAYASHI



# Environmental variables were aggregated by Principle Component Analysis (PCA)

## Factor Loadings of the first 3 Principal Components (PCs)



**PC<sub>1</sub>** (representing 30.8% of total variance): Environmental gradient along **Latitude**

**PC<sub>2</sub>** (representing 21.7% of total variance): **Water-Holding-Capacity** of Soil

**PC<sub>3</sub>** (representing 11.1% of total variance): Environmental gradient of Slope Aspect

Total **63.6%**

# Multiple Regression of larch LAI as a function of the PC<sub>1~3</sub>

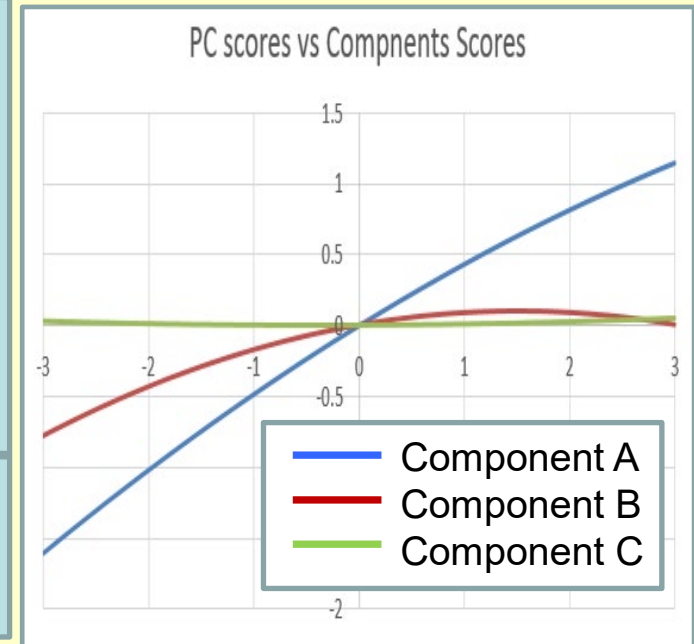
Larch LAI

$R^2=0.59$

$$\begin{aligned} &= 0.450 PC_1 - 0.027 PC_1^2 \quad \leftarrow \text{Component A} \\ &+ 0.130 PC_2 - 0.043 PC_2^2 \quad \leftarrow \text{Component B} \\ &+ 0.004 PC_3 - 0.005 PC_3^2 \quad \leftarrow \text{Component C} \\ &+ 1.575 \end{aligned}$$

## Notes

- (1) Quadratic terms were included, because there are noticeable geographic structures both in the intensity and sign of CCs between larch LAI and topographic properties
- (2) All terms contribute the larch LAI significantly ( $P < 0.001$ )
- (3) All terms included in the "best" model that is chosen by the Akaike Information Criterion.

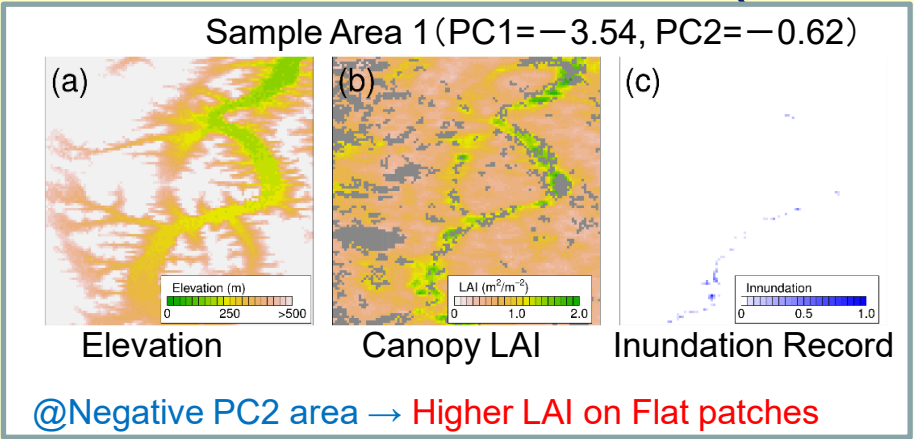
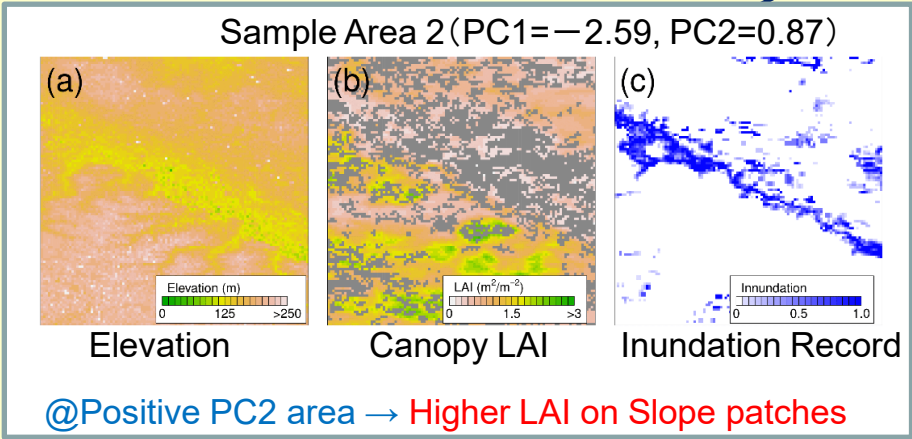
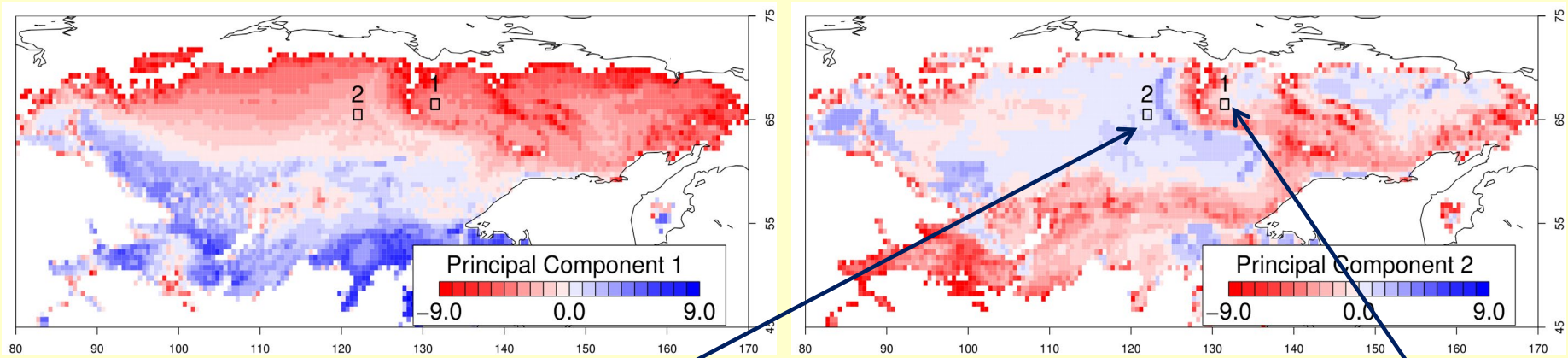


In the geographical extent of the analysis, PC<sub>1~3</sub> have basically positive correlation with larch LAI. But, top 10.9% of PC<sub>2</sub> have negative correlation.

It extracts trends that larch LAI becomes larger with

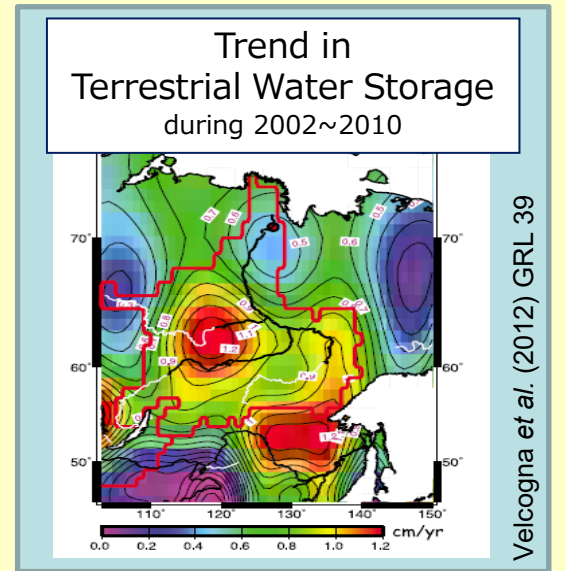
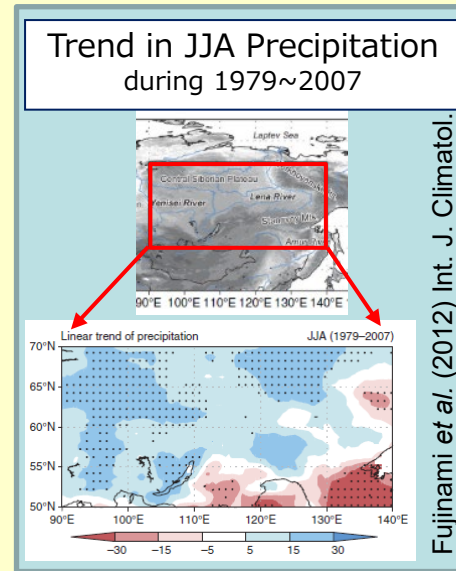
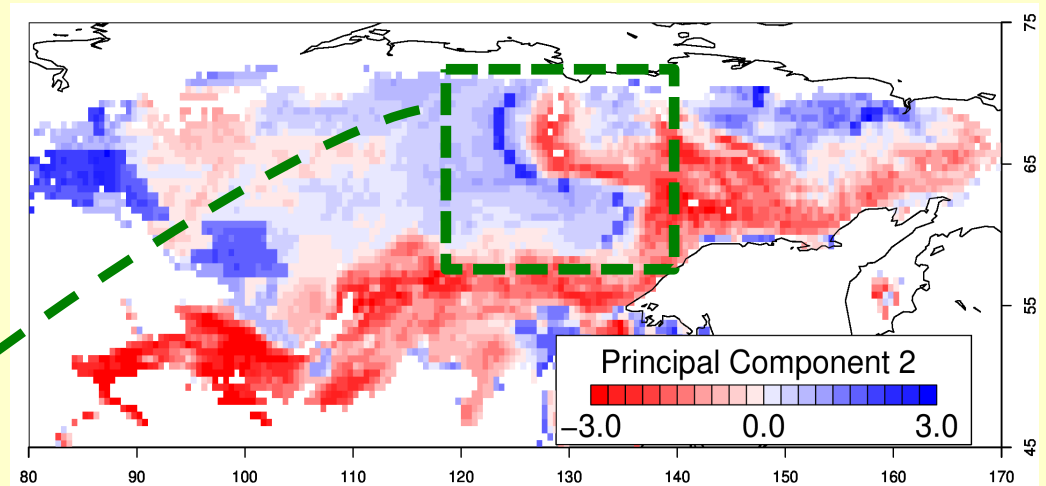
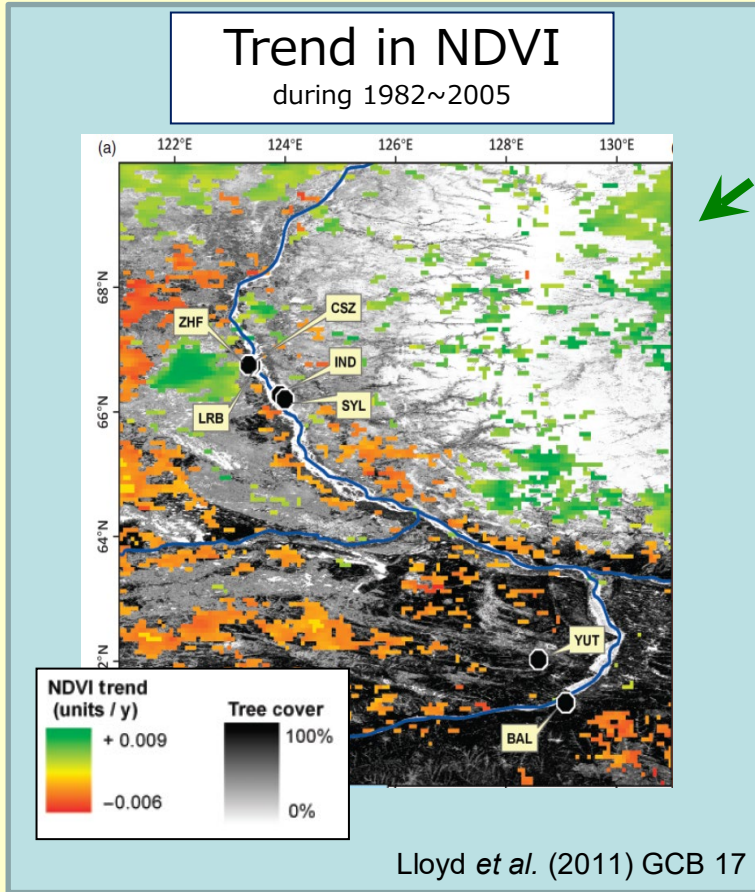
- (1) Environmental gradient toward South
- (2) Water-Holding-Capacity of Soil (Until some certain threshold)
- (3) South-faced Slope

# A comparison between two areas, those are separated for Positive and Negative PC2 scores



Larch forest existence is under control of { Aridity → Positive PC2 areas  
Over Wetting → Negative PC2 areas

# A consistent observation



Response on NDVI to the recent moist climate is also consistent with our expectation

## まとめ (3/3)

東シベリアのカラマツ林帯では、近年の降水量増加傾向に伴って、山岳域では植物生産性の上昇、平野部では植物生産性の低下が観測されている。この傾向について定量的な分析を行った。

この地域の気候・地形・土壌といった植物生産性に影響を与える環境因子に主成分分析を行ったところ、PC1に緯度に相関する成分、PC2に土壌保水力に相関する成分、PC3に斜面方位に相関する成分が、抽出された。

これらPC1~3を説明変数にして、Canopy LAIの回帰式を求めたところ、出現したPCnの範囲で、Canopy LAIは基本的に正に相関する式が得られた。しかし、PC2値の上位11%については負に相関していた。

近年の降水量増加に対するCanopy LAI応答の地理的バラツキは、この結果とconsistentである。