

# 環境植物学

第13回 高濃度CO<sub>2</sub>と植物

渡辺 誠

# 2018年度 環境植物学（伊豆田 猛・渡辺 誠）



1. 光化学オキシダントと植物(1): 農作物に対するオゾンの影響 (4月11日, 伊豆田担当)
2. 光化学オキシダントと植物(2): イネに対するオゾンの影響 (4月18日, 伊豆田担当)
3. 光化学オキシダントと植物(3): 樹木に対するオゾンの影響 (4月25日, 渡辺担当)
4. 酸性降下物と植物(1): 樹木に対する酸性雨の影響 (5月2日, 伊豆田担当)
5. 酸性降下物と植物(2): 樹木に対する酸性降下物による土壤酸性化の影響 (1) (5月9日, 伊豆田担当)
6. 酸性降下物と植物(3): 樹木に対する酸性降下物による土壤酸性化の影響 (2) (5月16日, 伊豆田担当)
7. 森林生態系における窒素飽和(1): 森林生態系における窒素飽和現象とその樹木影響 (5月23日, 伊豆田担当)
8. 森林生態系における窒素飽和(2): 樹木に対する土壤への窒素負荷の影響 (5月30日, 伊豆田担当)
9. 森林生態系における窒素飽和(3): 樹木に対する土壤への窒素負荷とオゾンの複合影響 (6月6日, 伊豆田担当)
10. エアロゾルと植物(1): 樹木に対するブラックカーボン粒子の影響 (6月13日, 伊豆田担当)
11. エアロゾルと植物(2): 樹木に対する硫酸アンモニウム粒子の影響 (6月20日, 伊豆田担当)
12. エアロゾルと植物(3):「植物と微小粒子状物質( $PM_{2.5}$ )」に関する最新の知見 (6月27日, 伊豆田担当)
13. 気候変動と植物: (7月4日, 渡辺担当)
14. 高濃度 $CO_2$ と植物: (7月11日, 渡辺担当)
15. 環境植物学に関する最新の研究動向 (7月18日, 渡辺担当)
16. 試験 (7月25日)

Key words: 植物, 光化学オキシダント( $O_3$ ), 酸性降下物, 窒素飽和, 地球温暖化, エアロゾル

関連講義: 環境生物相関論(3・4年次後期), 樹木生態生理学(3年次前期, 集中講義)

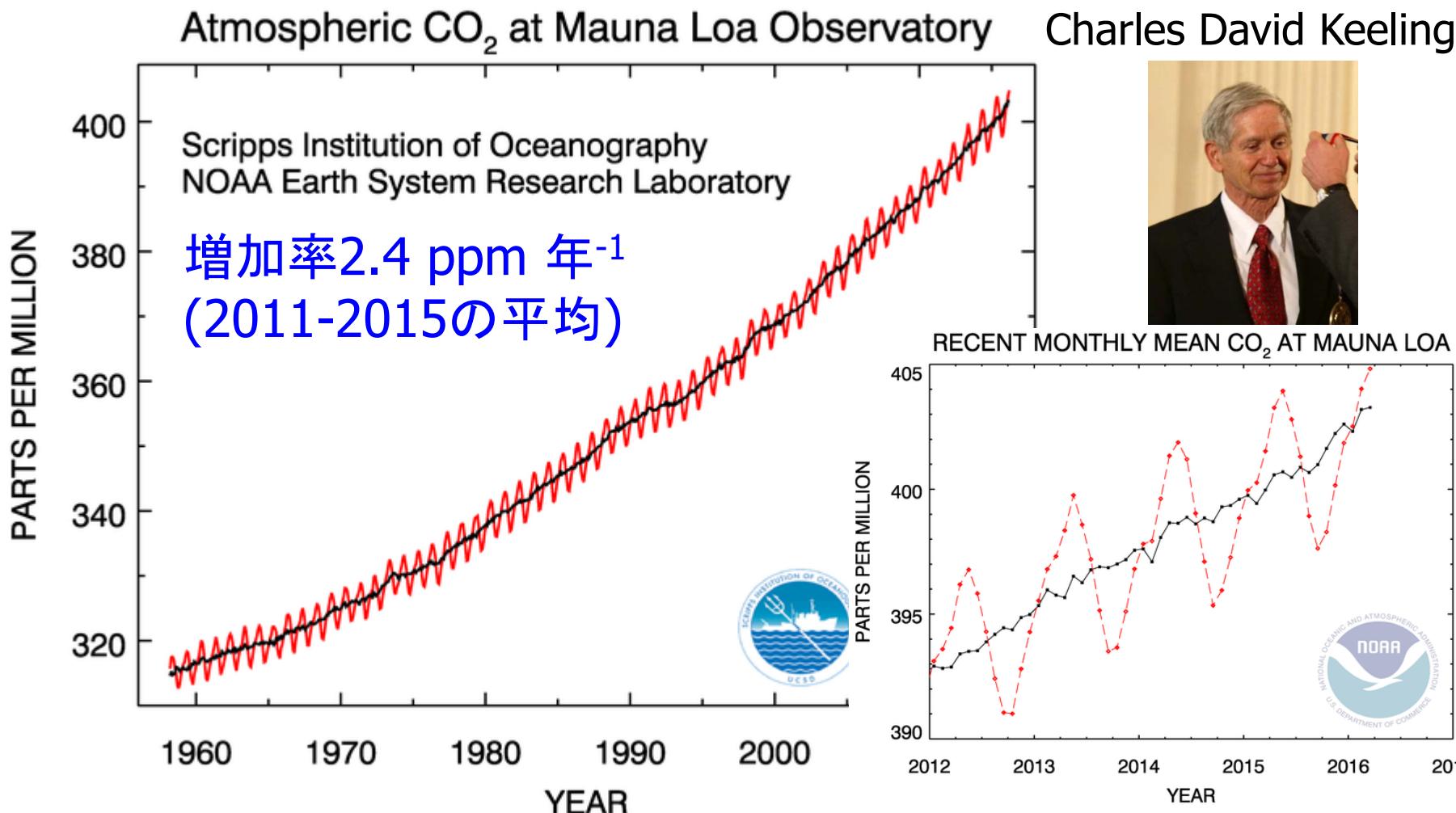
# 環境植物学 第13回

## 高濃度CO<sub>2</sub>に対する樹木の応答

---

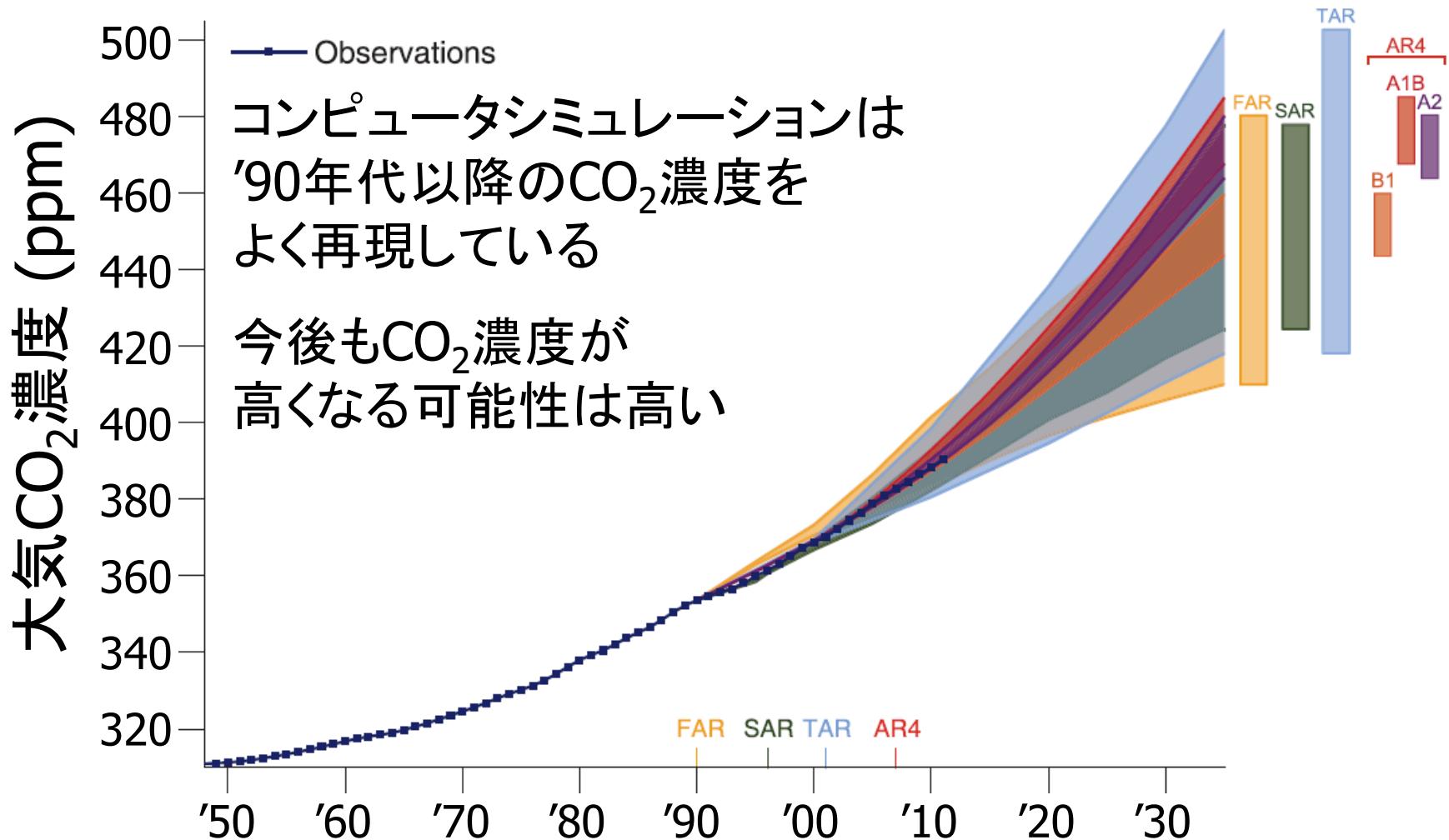
1. 背景: 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加
2. 光合成の解析  
(A-Ciカーブと光合成の律速段階)
3. 光合成の順化応答  
(ダウンレギュレーションとその要因)
4. FACE研究
  - a. 海外のFACE研究
  - b. 日本のFACE研究

# キーリング曲線(大気CO<sub>2</sub>濃度の増加)



植物のCO<sub>2</sub>吸収によって  
6 ppmの増減

# 大気CO<sub>2</sub>濃度の将来予測



# 環境植物学 第13回

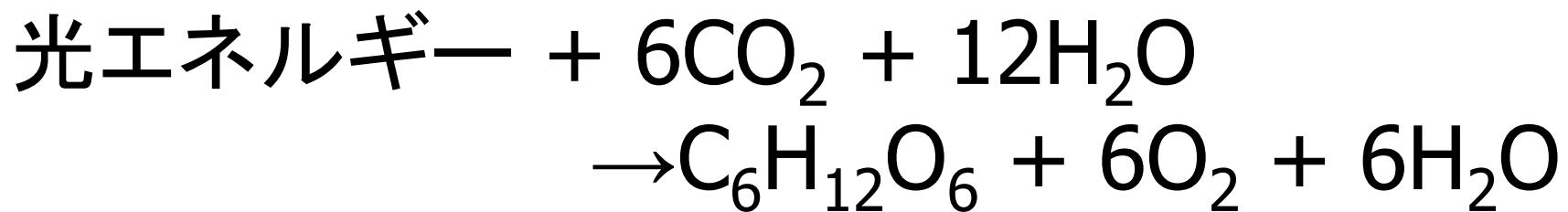
## 高濃度CO<sub>2</sub>に対する樹木の応答

---

1. 背景: 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加
2. 光合成の解析  
(A-Ciカーブと光合成の律速段階)
3. 高濃度CO<sub>2</sub>に対する光合成の順化応答  
(ダウンレギュレーションとその要因)
4. FACE研究
  - a. 海外のFACE研究
  - b. 日本のFACE研究

# 光合成反応

---

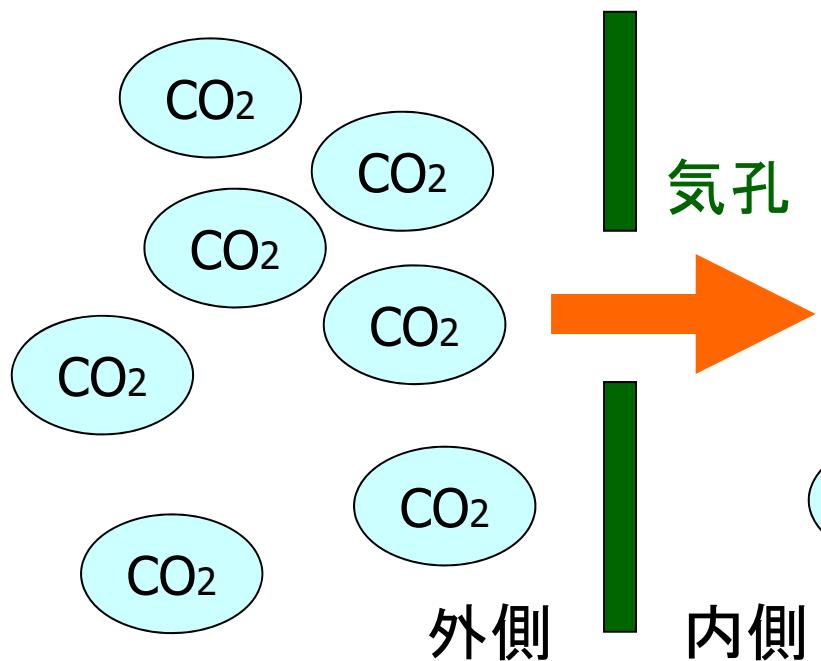


実際には非常に複雑な反応系

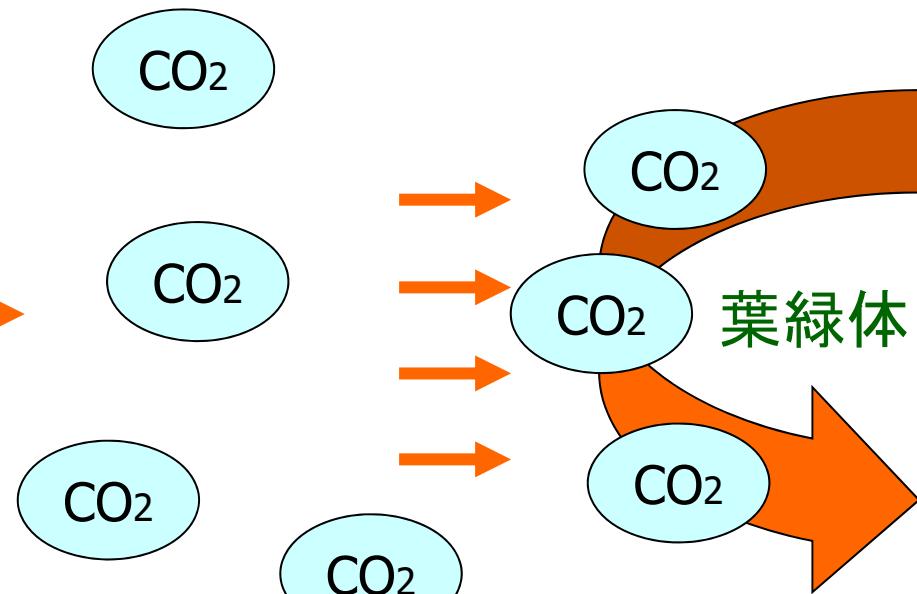
---

# 光合成系へのCO<sub>2</sub>の流れ

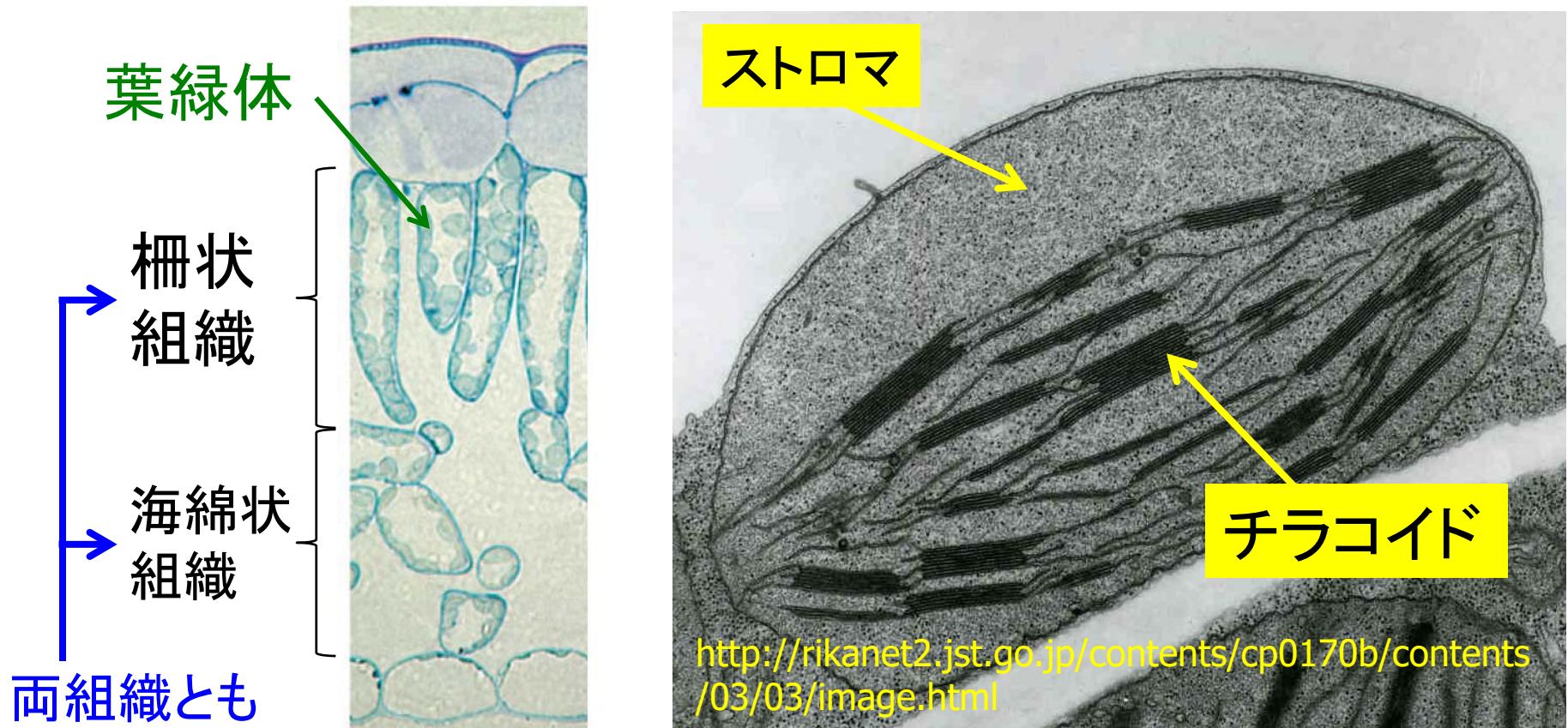
[Supply function(供給)]



[Demand function(要求)]



# 葉緑体～光合成反応の場



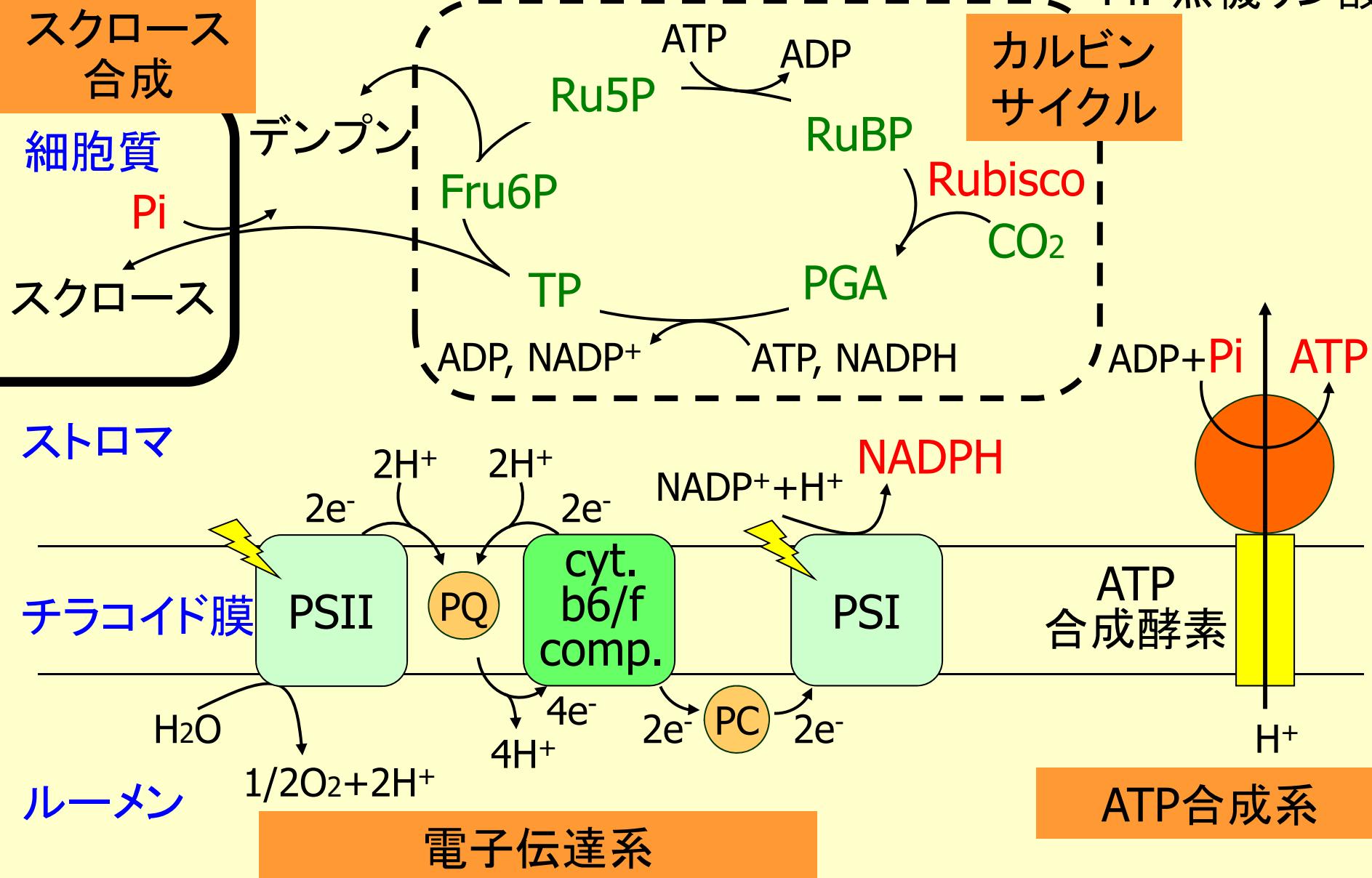
チラコイドにおける反応：電子伝達(NADPH合成)  
ATP合成

ストロマにおける反応：CO<sub>2</sub>固定反応

# 葉緑体における生化学的光合成プロセス

C3植物

Pi: 無機リン酸



# C3植物の光合成（簡易版）

チラコイド

電子伝達系

- ・NADPH生成

ATP合成系

ストロマ

カルビンサイクル

- ・RubiscoによるCO<sub>2</sub>固定
- ・RuBPの再生

細胞質  
(葉緑体外)

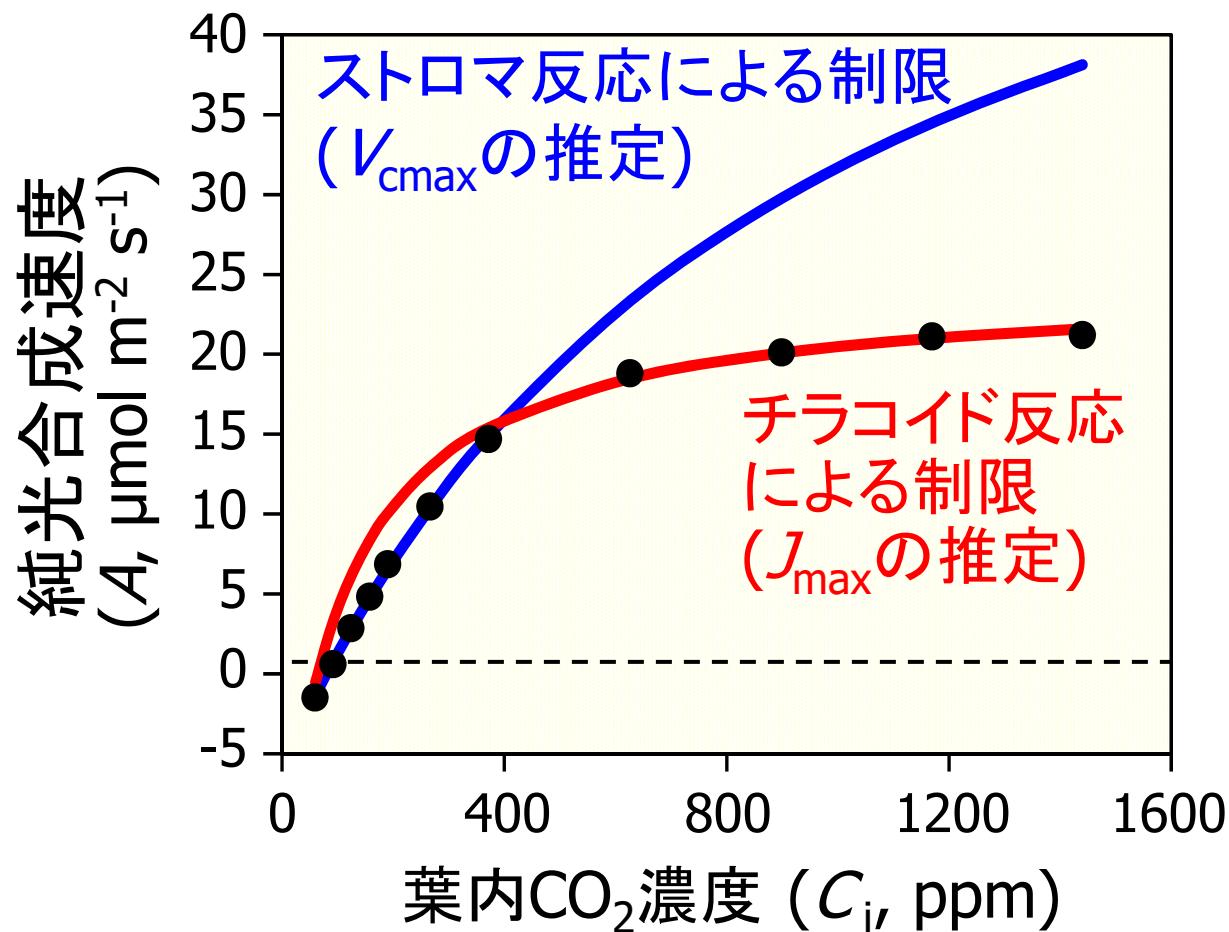
トリオースリン酸

スクロース合成系

各器官へ

無機リン

# $A-C_i$ カーブによる光合成の解析



$A-C_i$  カーブの解析によって、最大カルボキシレーション速度( $V_{cmax}$ )や最大電子伝達速度( $J_{max}$ )を求めることができる

# 環境植物学 第13回

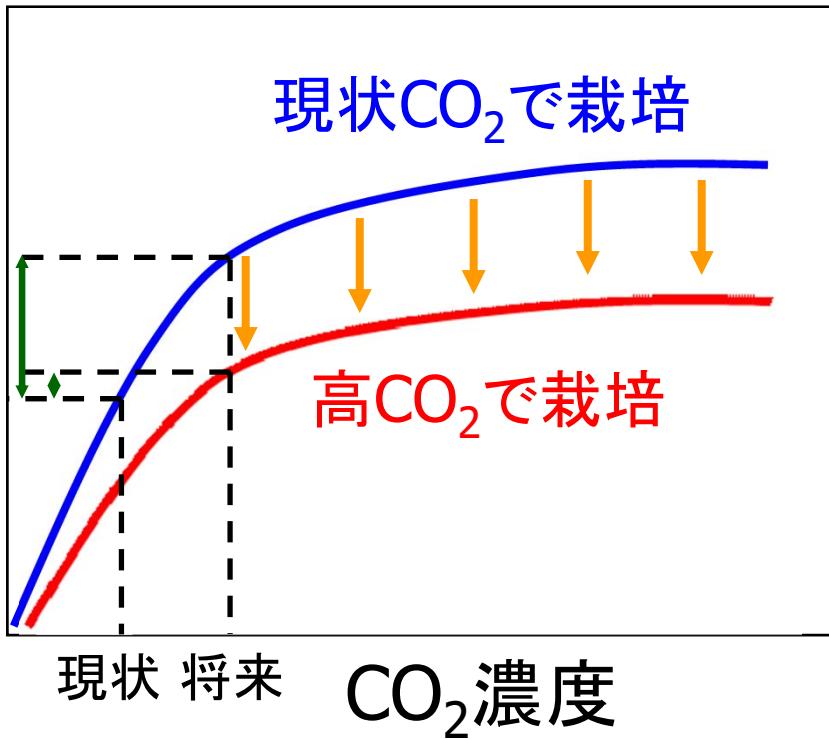
## 高濃度CO<sub>2</sub>に対する樹木の応答

---

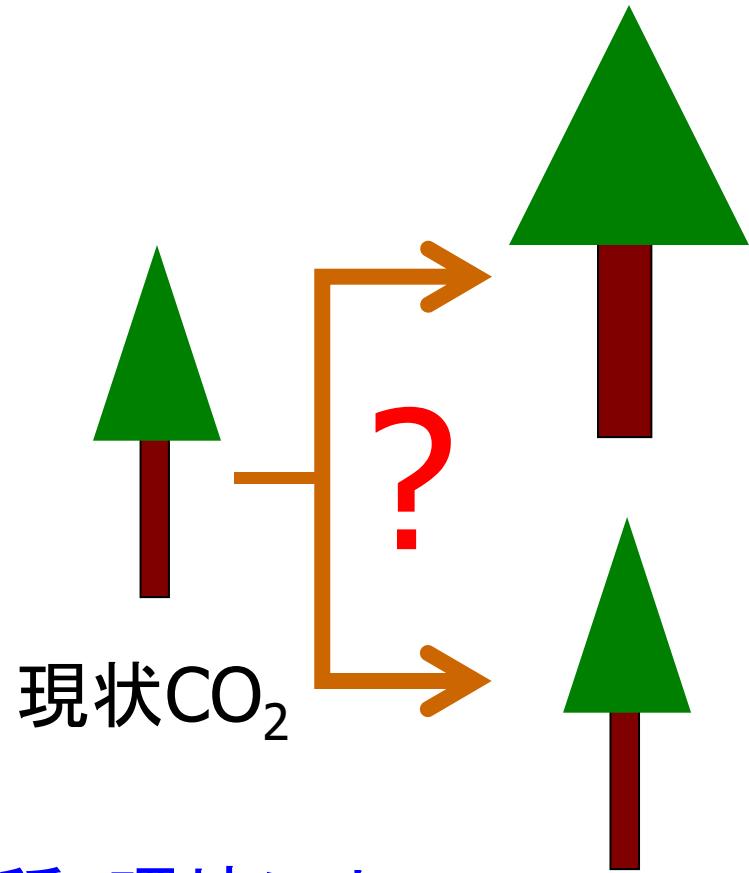
1. 背景: 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加
2. 光合成の解析  
(A-Ciカーブと光合成の律速段階)
3. 光合成の順化応答  
(ダウンレギュレーションとその要因)
4. FACE研究
  - a. 海外のFACE研究
  - b. 日本のFACE研究

# 大気CO<sub>2</sub>の増加=生産力増加？

光合成速度



光合成の  
ダウンレギュレーション



樹種・環境によって  
応答が異なる

# 高CO<sub>2</sub>に対する光合成応答 (人工気象室でのダウンレギュレーションの メカニズム研究)

---



# 材料と方法

---

## 供試材料

グイマツ雑種F<sub>1</sub>(グリーム)

3年生苗

## 処理設備

自然光型環境調節室  
(森林総研北海道)

## CO<sub>2</sub>濃度

360 ppm と 720 ppm

## 実験期間

2008年5～10月



# グイマツ雑種F<sub>1</sub>

- ・グイマツを母樹、カラマツを花粉親とした雑種の一代目
- ・ネズミ害や病害を受けにくく、かつ成長が早い
- ・木材としての質も良い
- ・洞爺湖サミットの記念植樹に用いられた



2008.5  
(0.6 m)

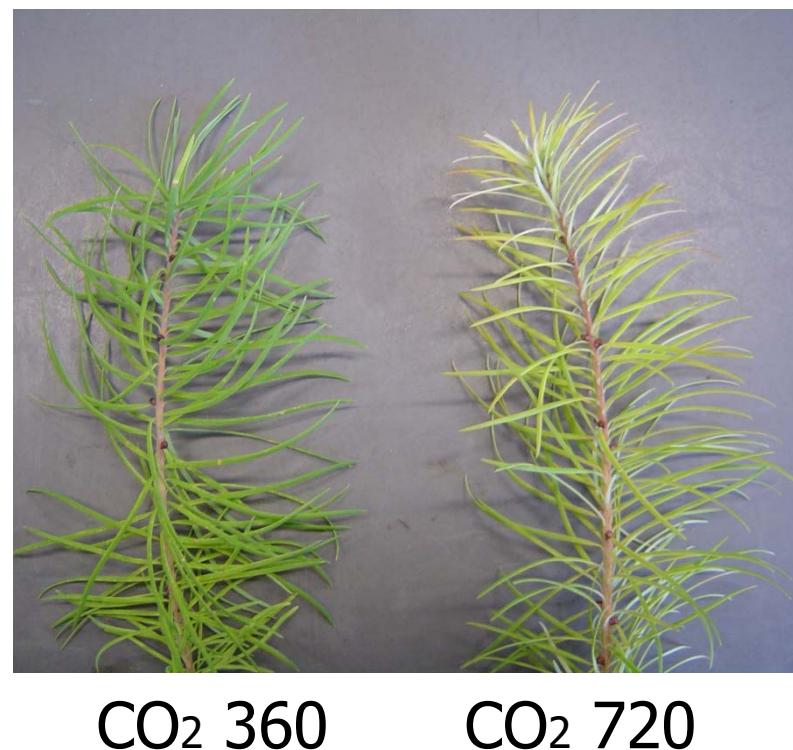
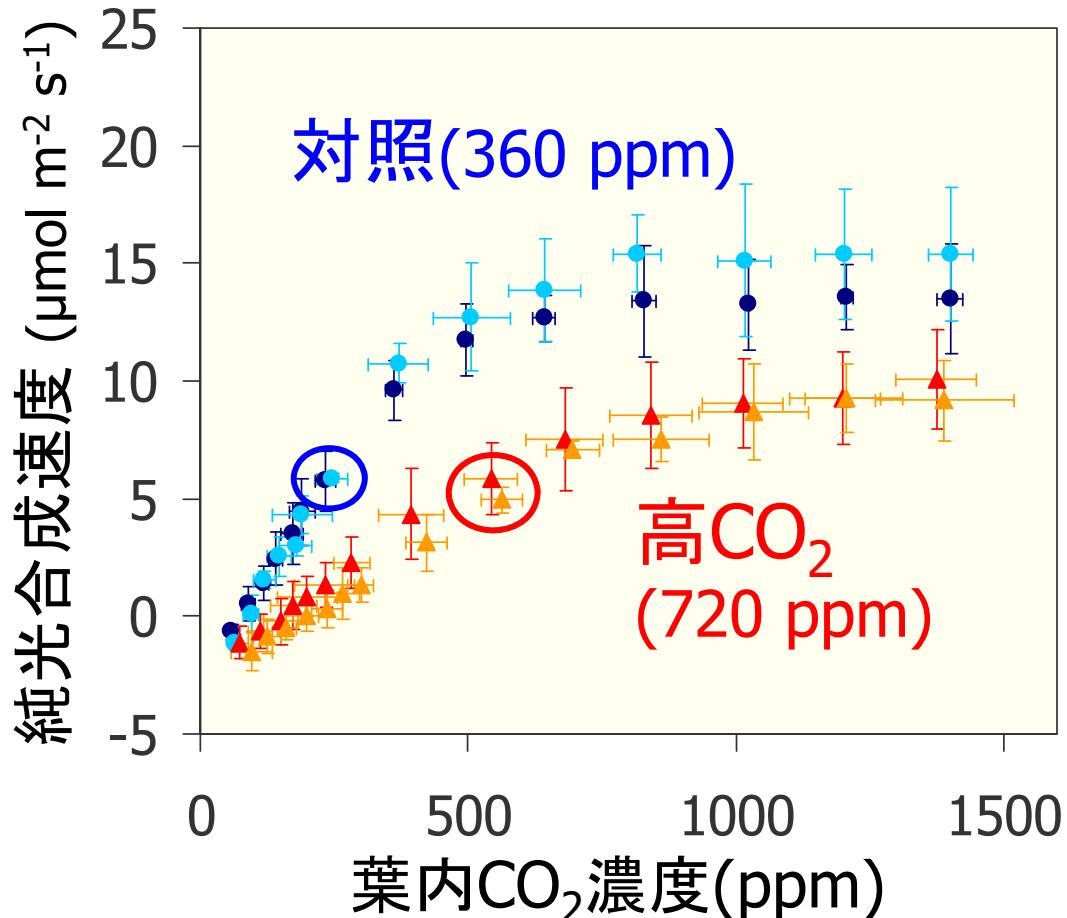
2009.9  
(2.5 m)

2010.8  
(3.7 m)



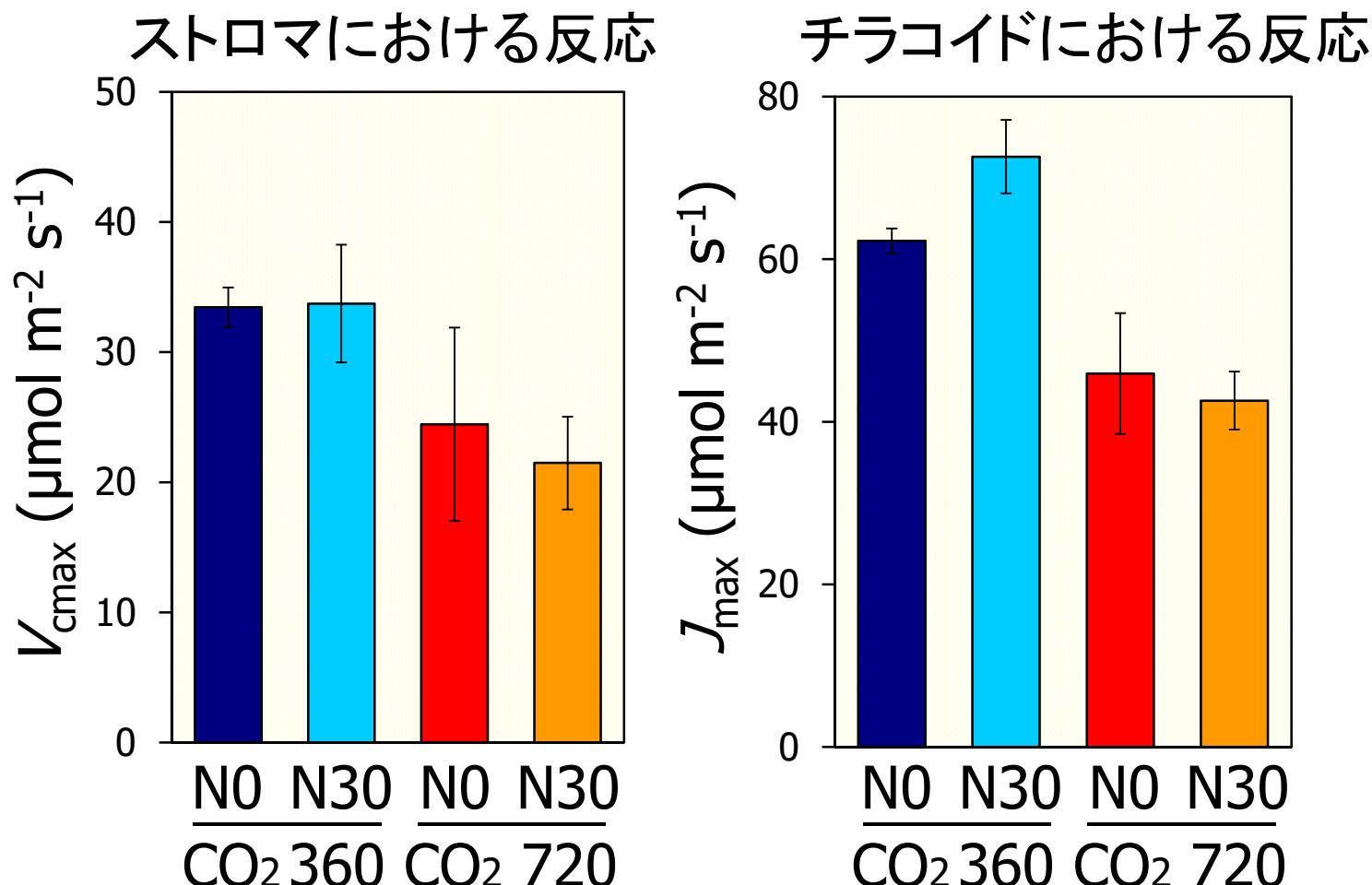
2016.5  
(9 m)

# 高CO<sub>2</sub>環境で光合成能力の低下



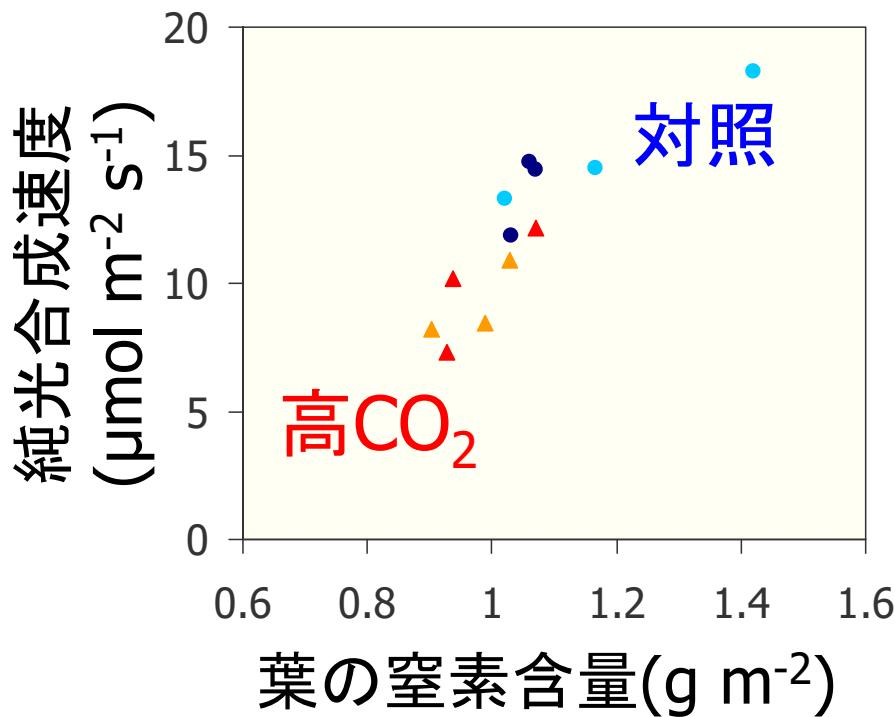
高CO<sub>2</sub>なのに光合成速度が増加していない  
-> 光合成のダウンレギュレーションが起こった

# 葉緑体における光合成活性

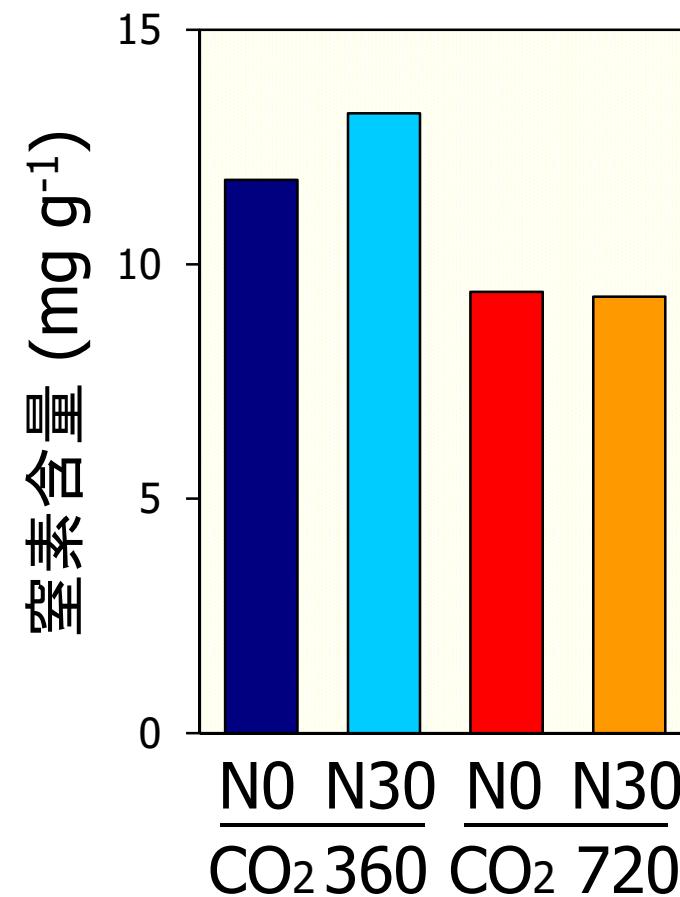


高CO<sub>2</sub>環境で  $V_{cmax}$  も  $J_{max}$  も低下

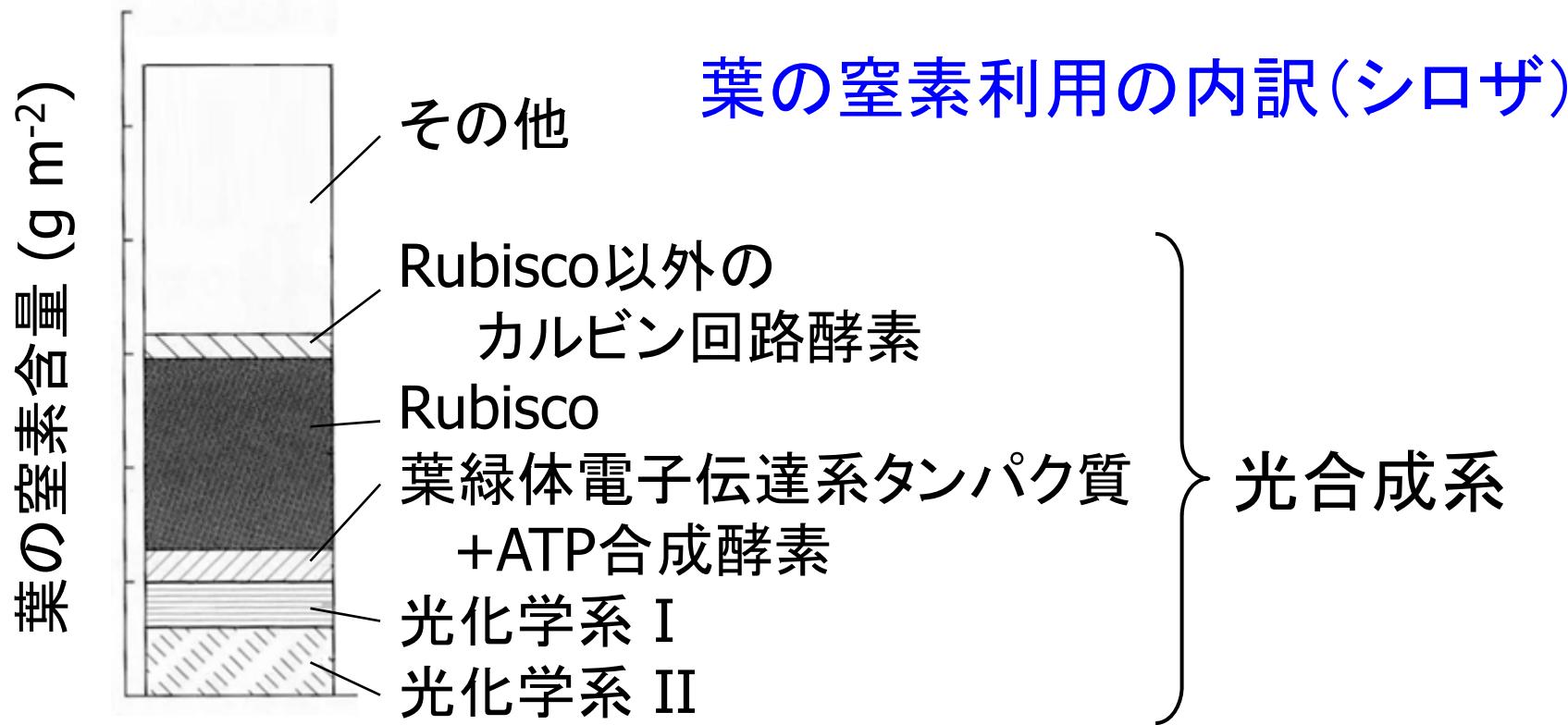
# 光合成のダウンレギュレーションが起こる原因①



高CO<sub>2</sub>環境では  
葉の窒素含量が低下



# 何故、葉の窒素が減ると光合成速度が低下する？

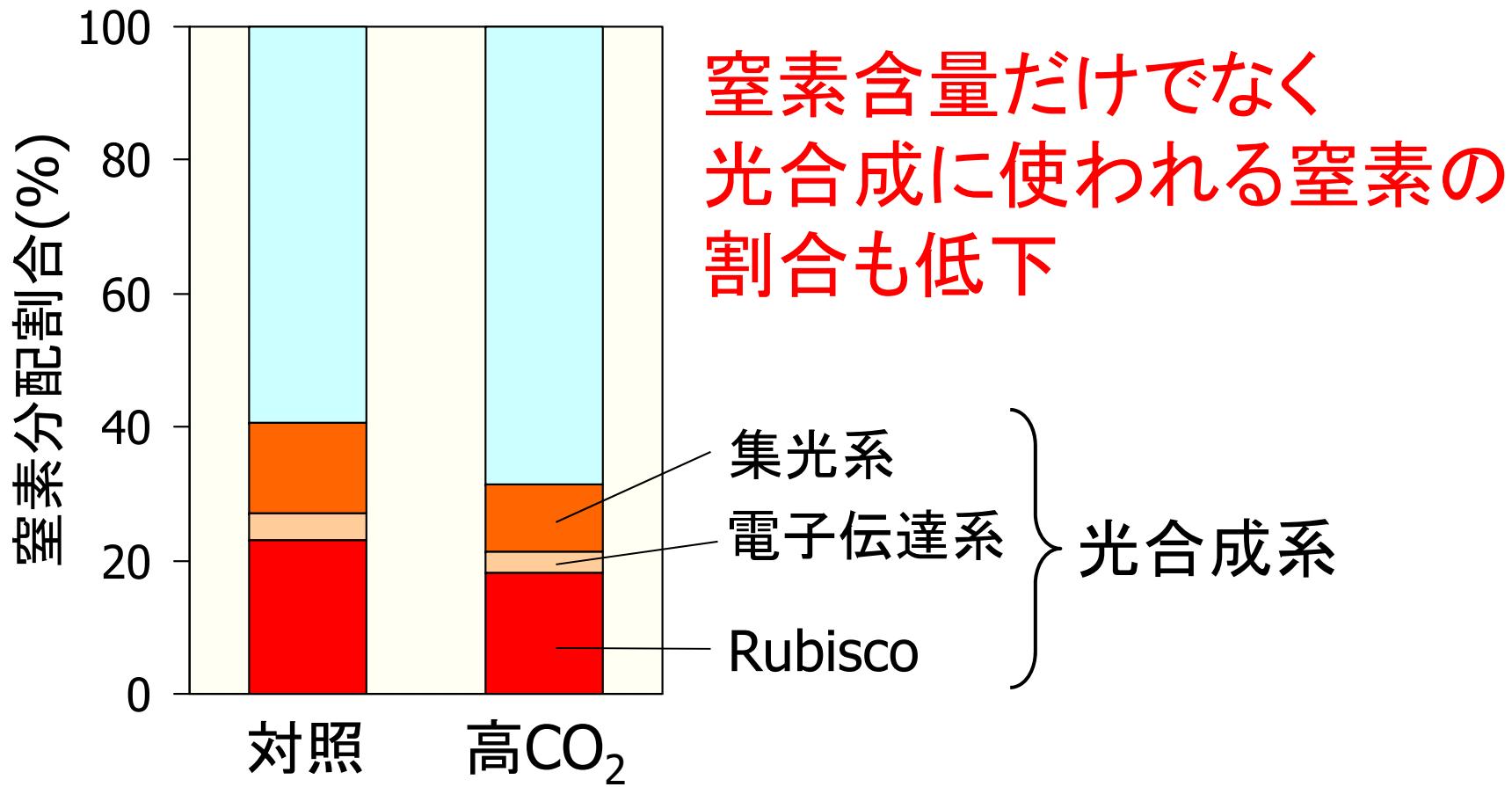


葉の窒素の大部分は光合成系に投資される

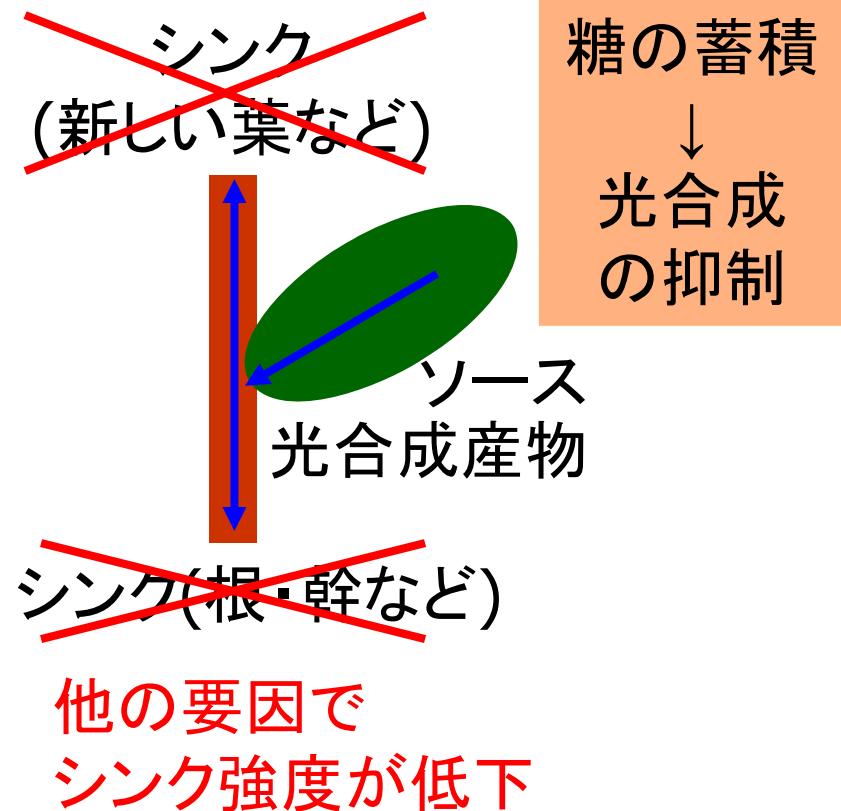
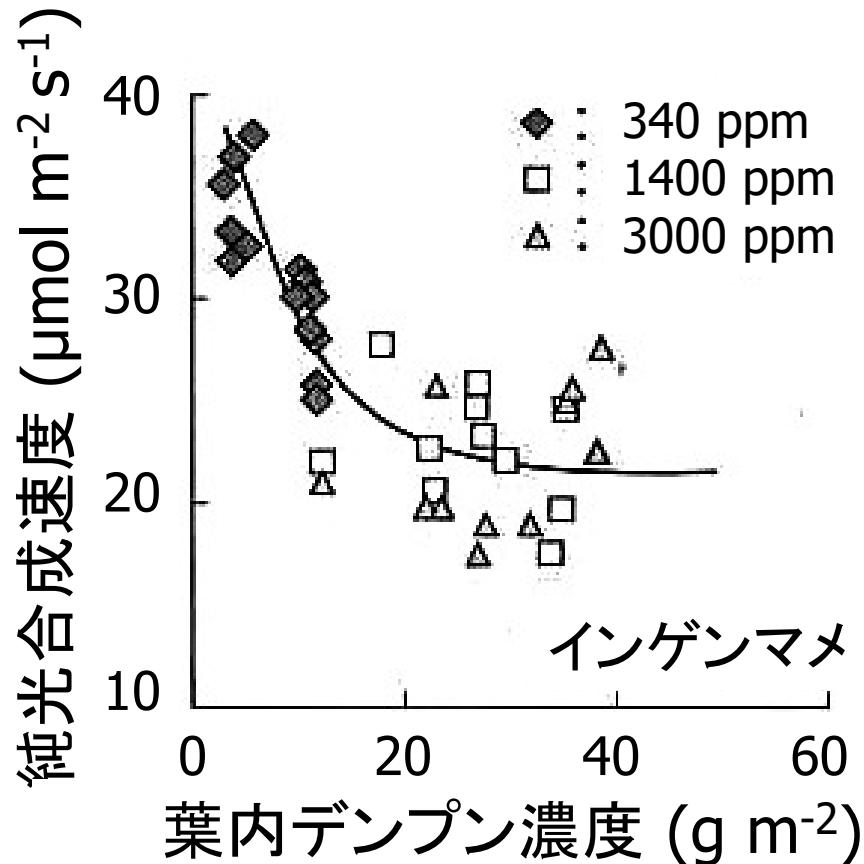
葉の窒素含量低下 → 光合成系への窒素投資量低下

# 光合成のダウンレギュレーションが起こる原因②

グイマツ雑種F<sub>1</sub>の場合



# 光合成のダウンレギュレーションが起こる原因③



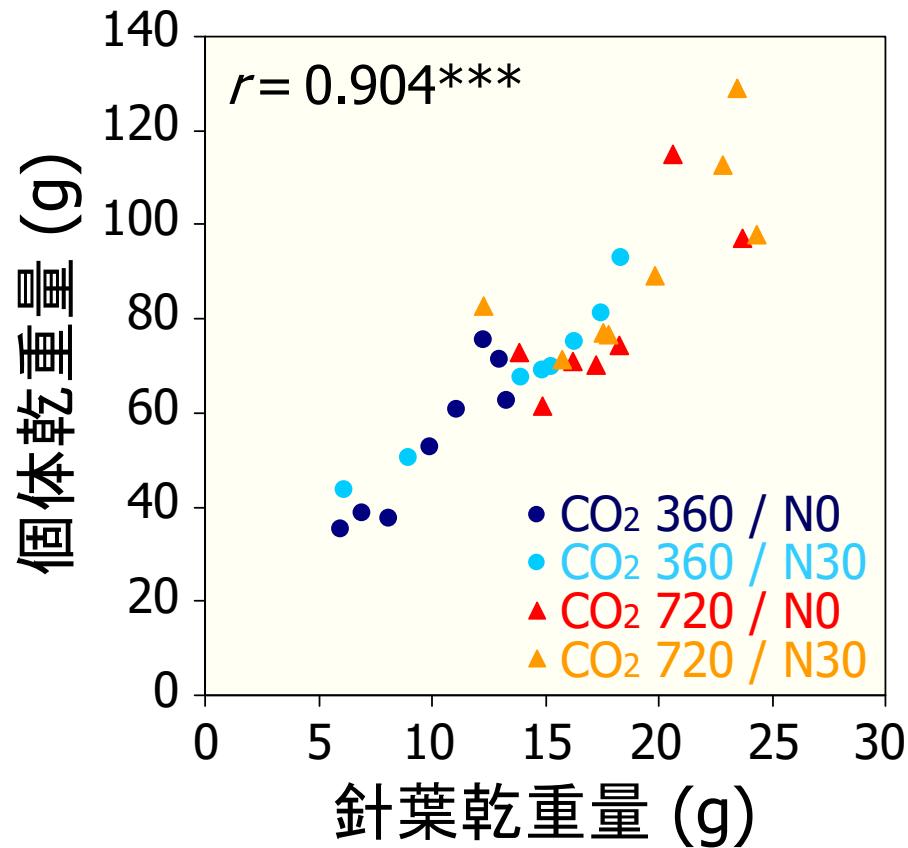
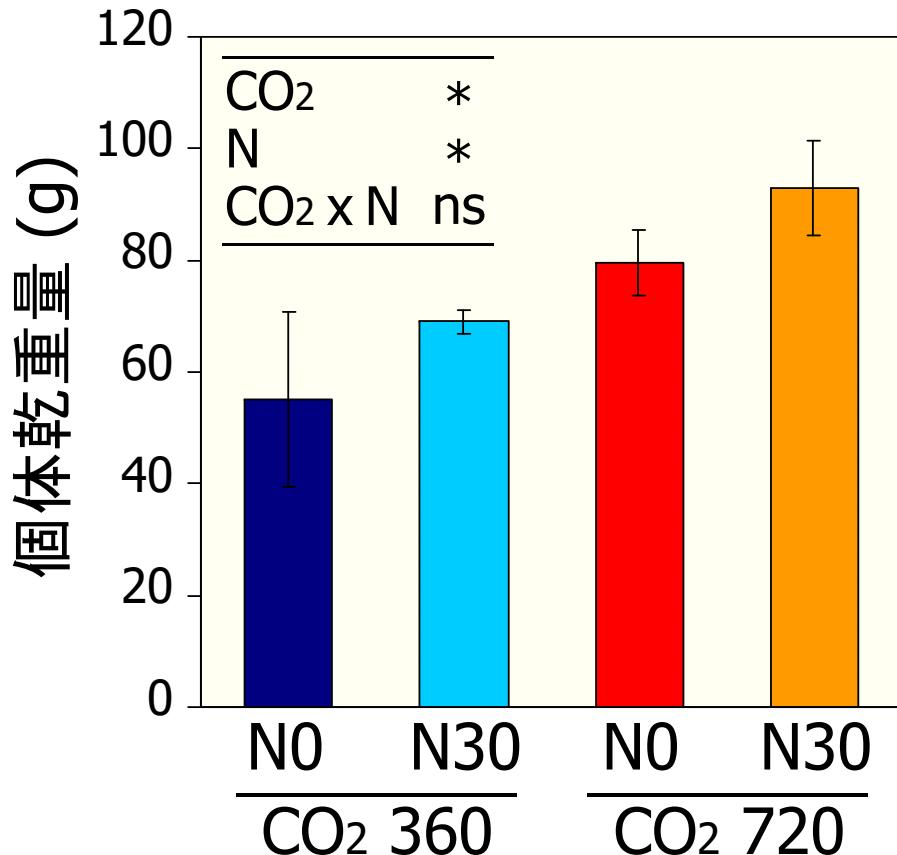
糖の蓄積によるダウンレギュレーション

# 高CO<sub>2</sub>による光合成のダウンレギュレーション

---

- ①葉の窒素含量の低下  
(光合成系への窒素投資量の低下)
- ②光合成に使われる窒素の割合の低下
- ③糖の蓄積に伴うフィードバック阻害

# ダウンレギュレーションは起こったけど



高CO<sub>2</sub>による葉量の増加が  
個体乾重量の増加をもたらした

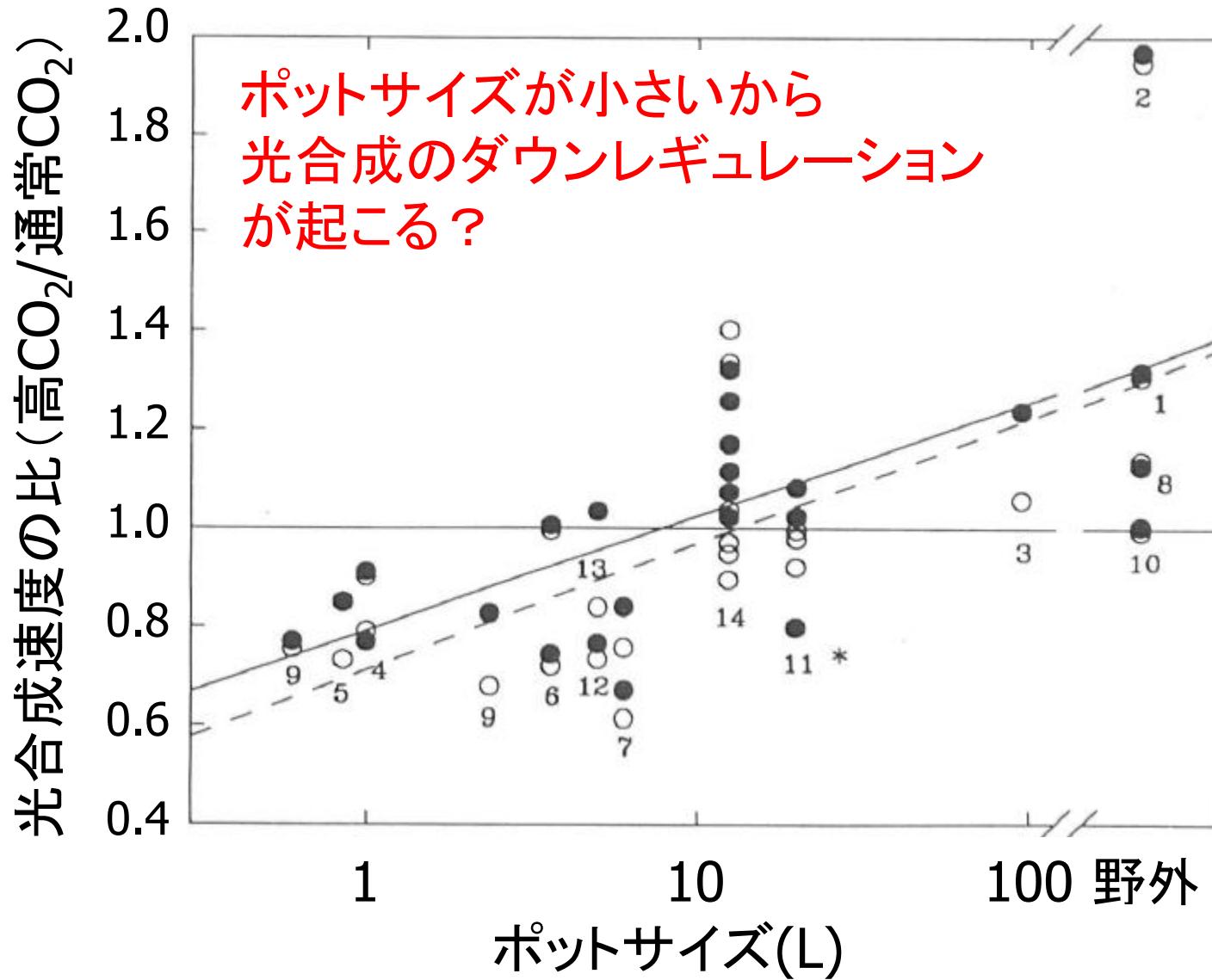
# 環境植物学 第13回

## 高濃度CO<sub>2</sub>に対する樹木の応答

---

1. 背景: 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加
2. 光合成の解析  
(A-Ciカーブと光合成の律速段階)
3. 光合成の順化応答  
(ダウンレギュレーションとその要因)
4. FACE研究
  - a. 海外のFACE研究
  - b. 日本のFACE研究

# Arp (1991) によるポットサイズの指摘



# 樹木の高CO<sub>2</sub>応答に関する実験設備

人工気象室(人工光)



人工気象室(自然光)



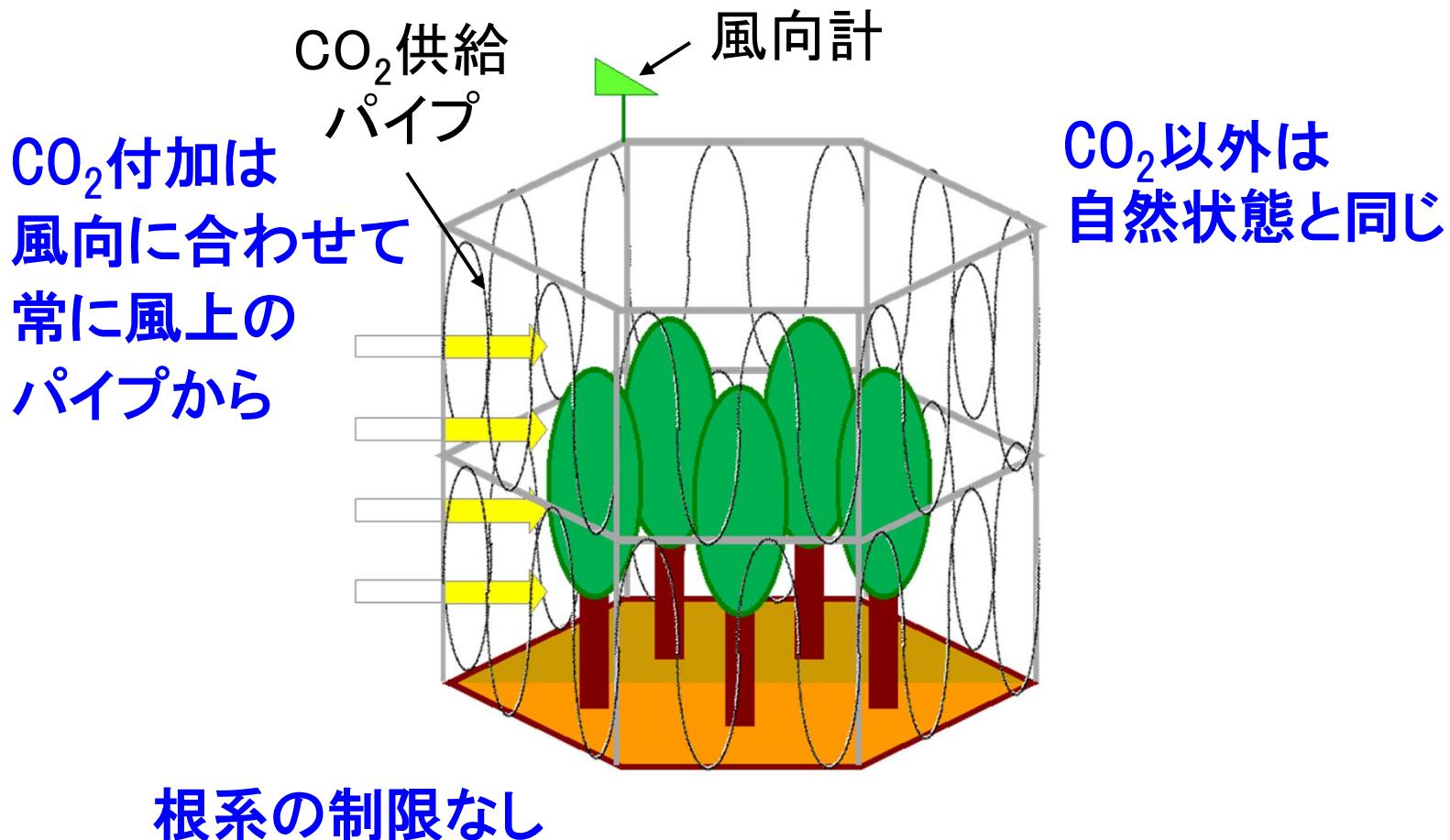
オープントップチャンバー



FACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment)



# FACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment)



# 高CO<sub>2</sub>実験装置の比較

設備	人工気象室 (人工光型)	人工気象室 (自然光型)	オープントップ チャンバー	FACE
環境	人工的 (一定条件)			自然 (大きく変動)
制御	精密			荒い
ランニング コスト	安い			高い
用途	メカニズム 研究			生態(系)調査 応用科学

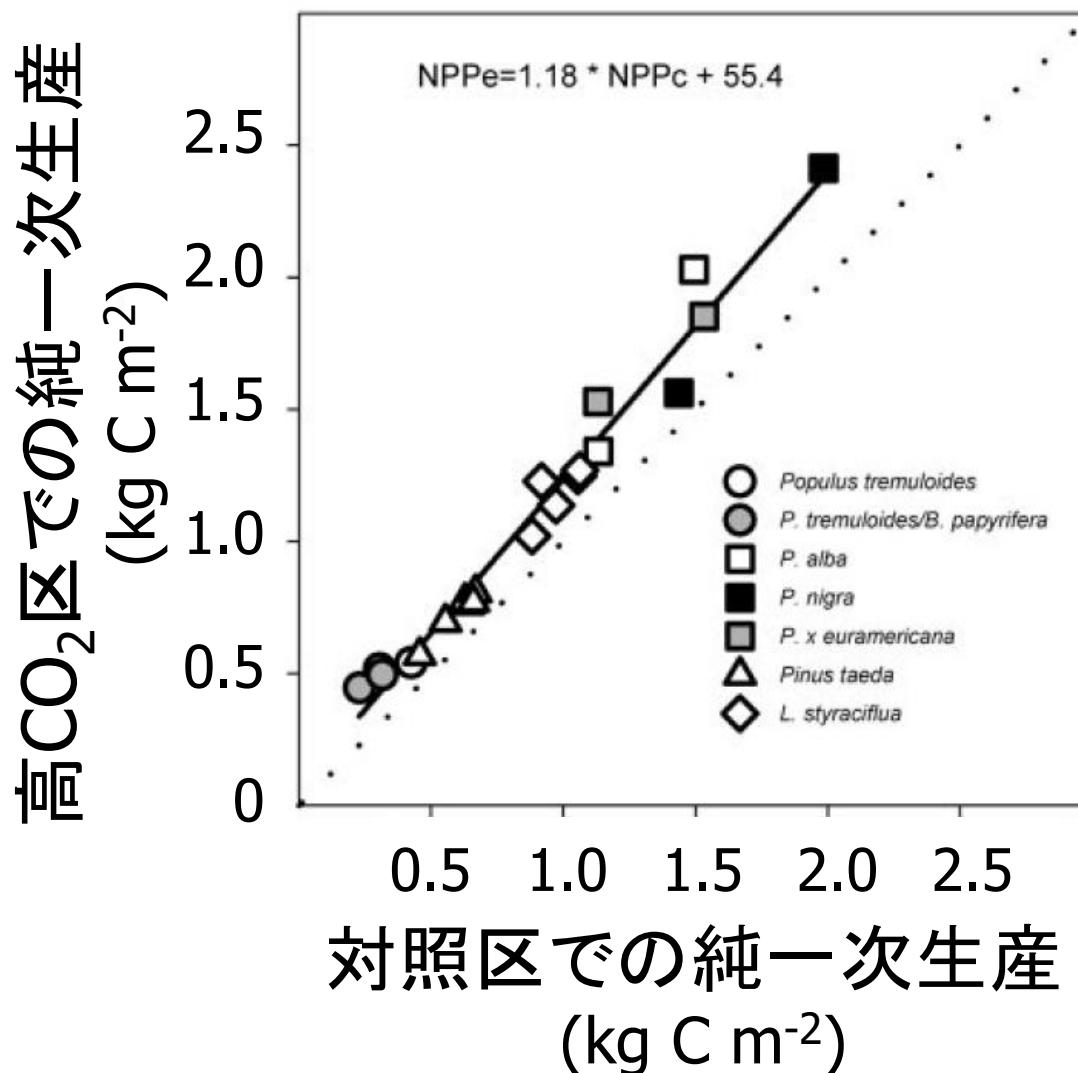
※CO<sub>2</sub>スプリングは無料で自然状態(ただし対照が取りにくい)

# CO<sub>2</sub>スプリング(天然の高CO<sub>2</sub>環境)



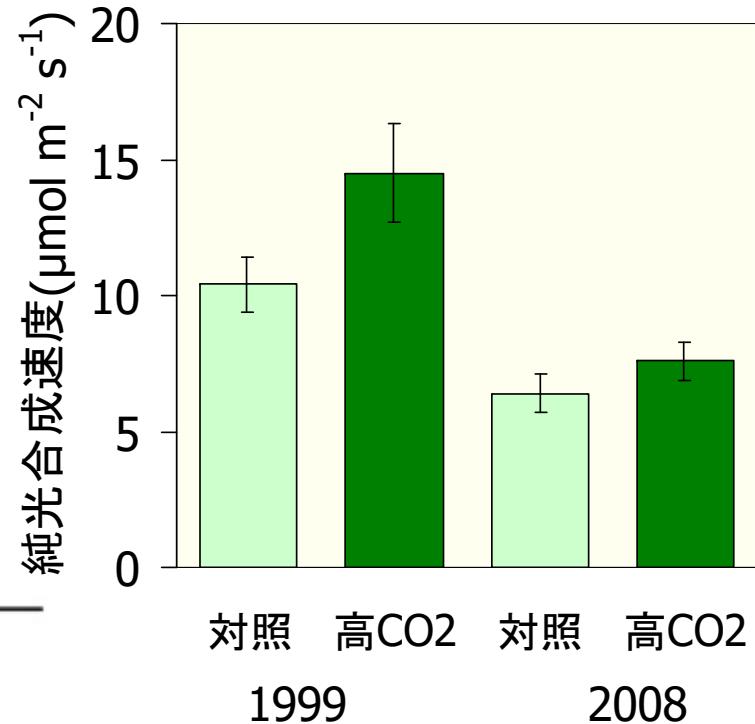
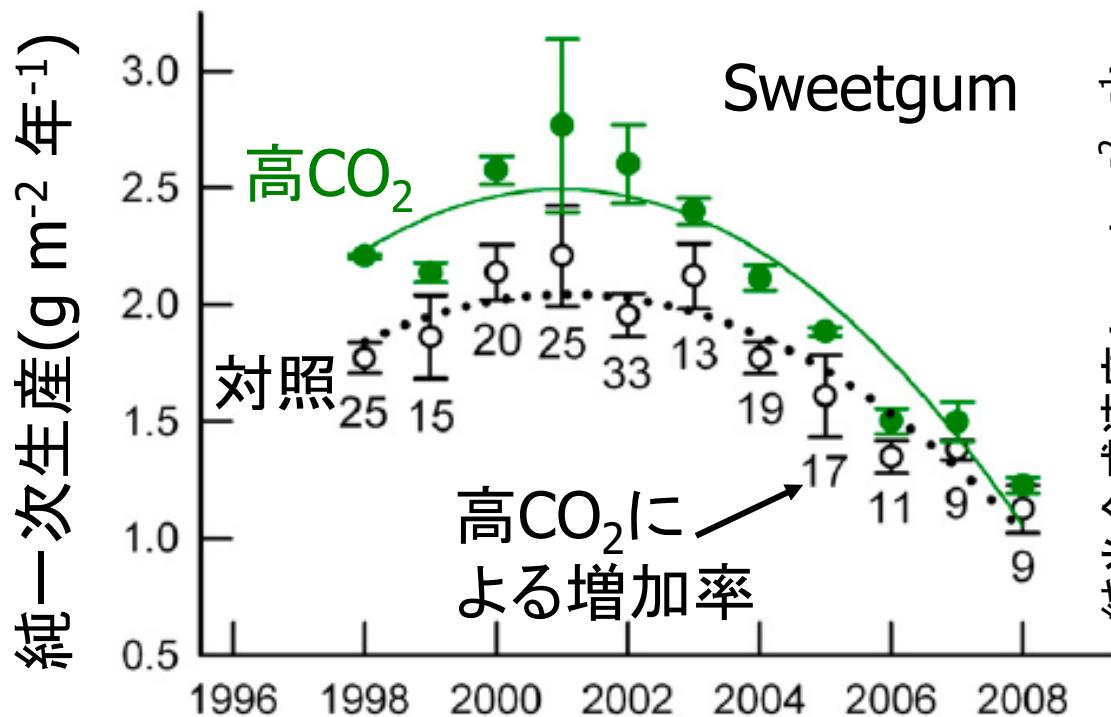
[http://hostgk3.biology.tohoku.ac.jp/hikosaka  
/CO2spring/CO2spring.html](http://hostgk3.biology.tohoku.ac.jp/hikosaka/CO2spring/CO2spring.html)

# やはりFACEではCO<sub>2</sub>で成長促進か？



森林を対象とした  
FACE実験の  
取りまとめ  
全体で23%増加

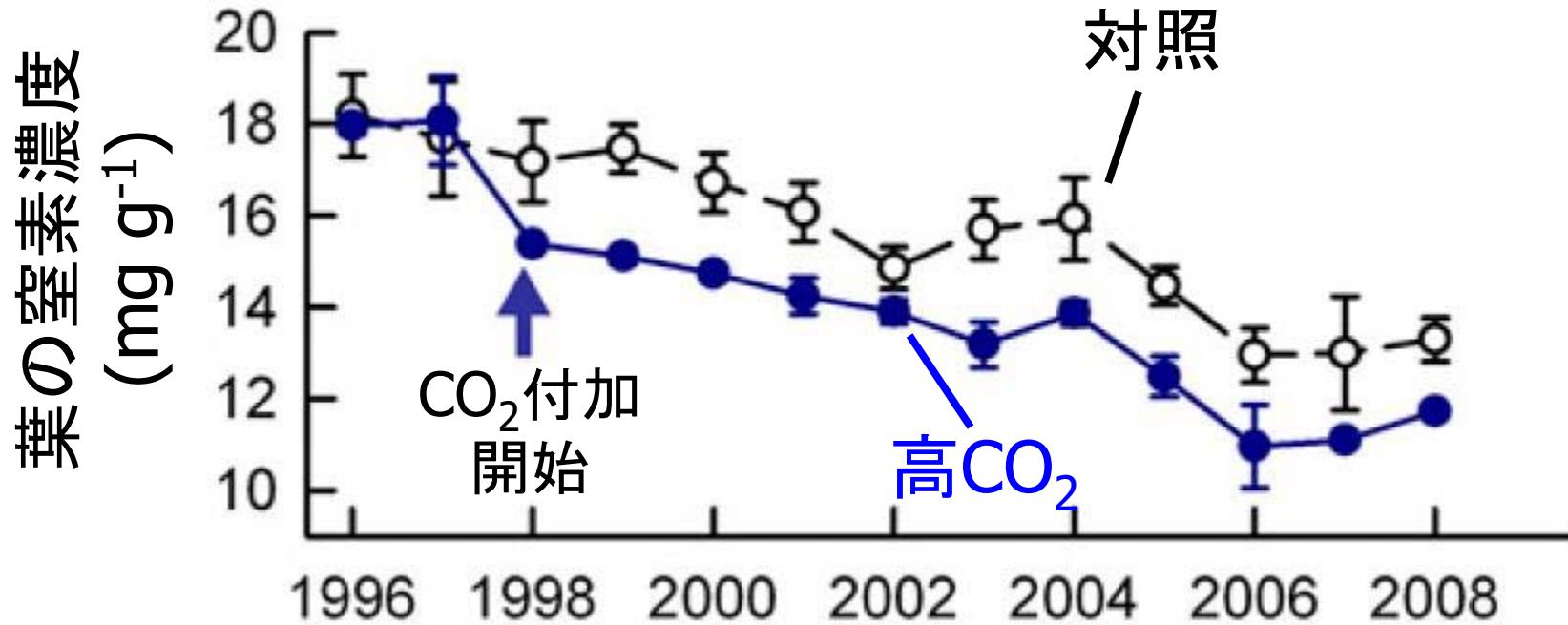
# FACEでもCO<sub>2</sub>によって生産性が高まるとは限らない Oak Ridge FACE (オークリッジ国立研究所)



高CO<sub>2</sub>による成長促進が  
途中から見られなくなった

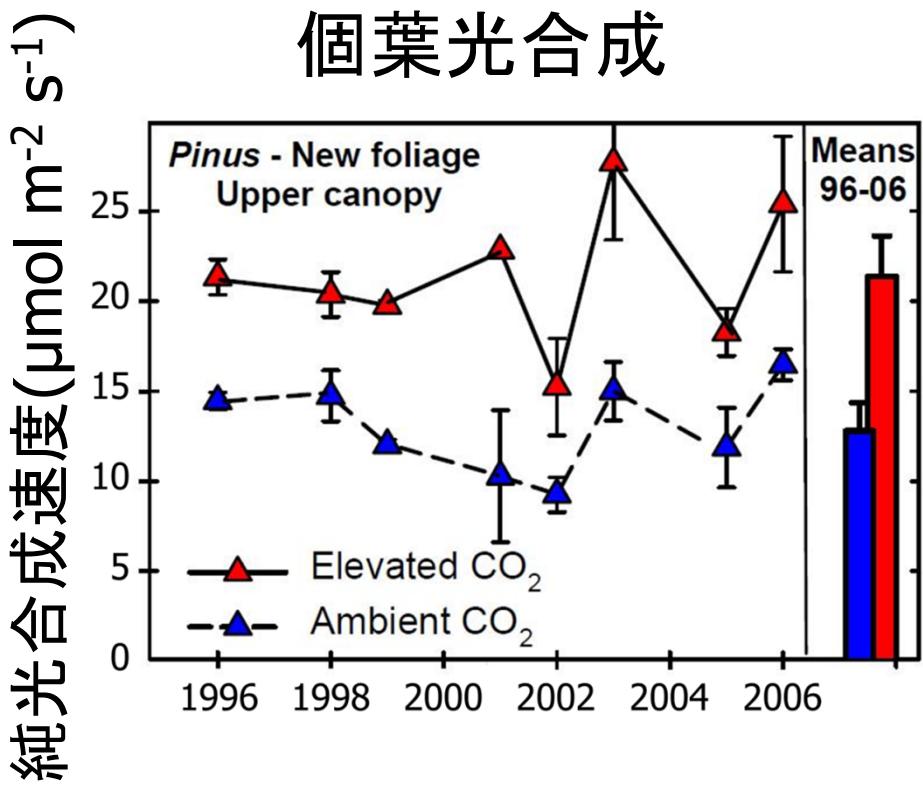
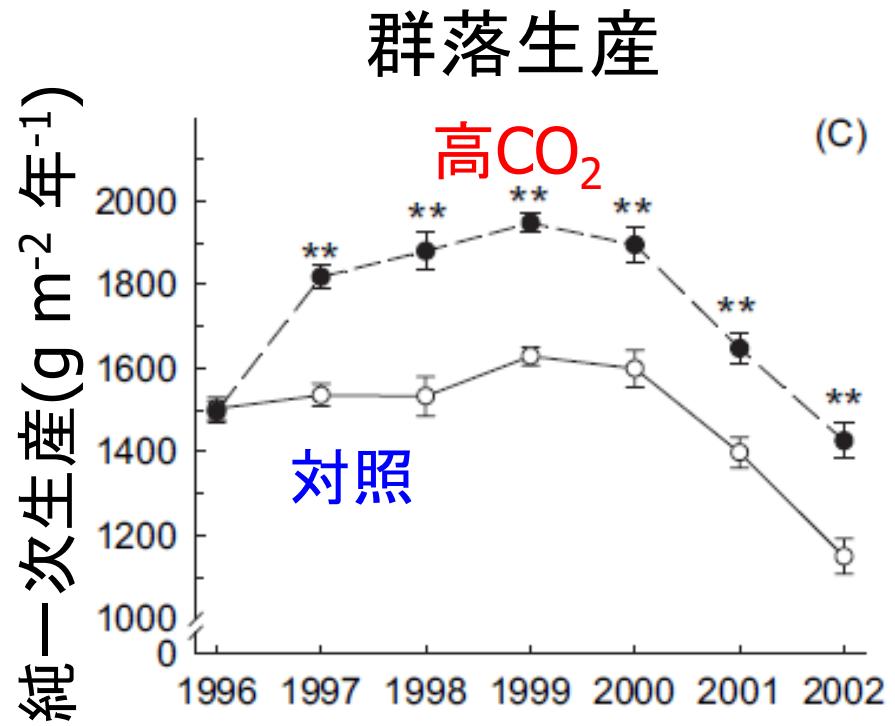
# 葉の窒素濃度の推移

Oak Ridge FACE (オークリッジ国立研究所)



葉の窒素含量の低下によってCO<sub>2</sub>による光合成速度の増加があまり見られなくなった

# Duke FACE (loblolly pine、デューク大学)の結果



高CO<sub>2</sub>によって森林の生産は継続的に増加した  
個葉の光合成も低下しなかった

# 海外のFACE研究のまとめ

---

FACEだからといって、CO<sub>2</sub>による成長促進が  
保障されているわけではない



養分利用性などの立地環境や気候条件  
によってはCO<sub>2</sub>による成長促進効果が  
期待するほど得られない可能性がある

# 環境植物学 第13回

## 高濃度CO<sub>2</sub>に対する樹木の応答

---

1. 背景: 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加
2. 光合成の解析  
(A-Ciカーブと光合成の律速段階)
3. 光合成の順化応答  
(ダウンレギュレーションとその要因)
4. FACE研究
  - a. 海外のFACE研究
  - b. 日本のFACE研究

---

日本の森林樹木の生産は高CO<sub>2</sub>環境でどうなる？

カバノキ属3種の光合成・成長に与える  
高濃度CO<sub>2</sub>の影響

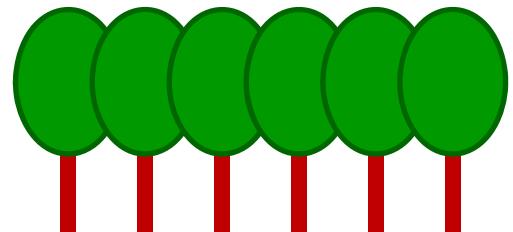
---

# 高CO<sub>2</sub>が森林のCO<sub>2</sub>吸収に与える影響

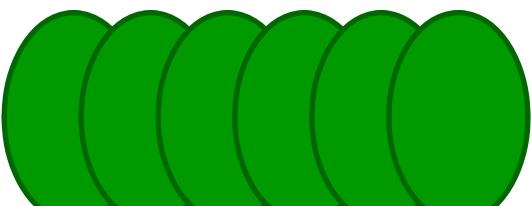
## 葉量への影響

LAI =Leaf Area Index

単位土地面積あたりの葉面積( $m^2 m^{-2}$ )



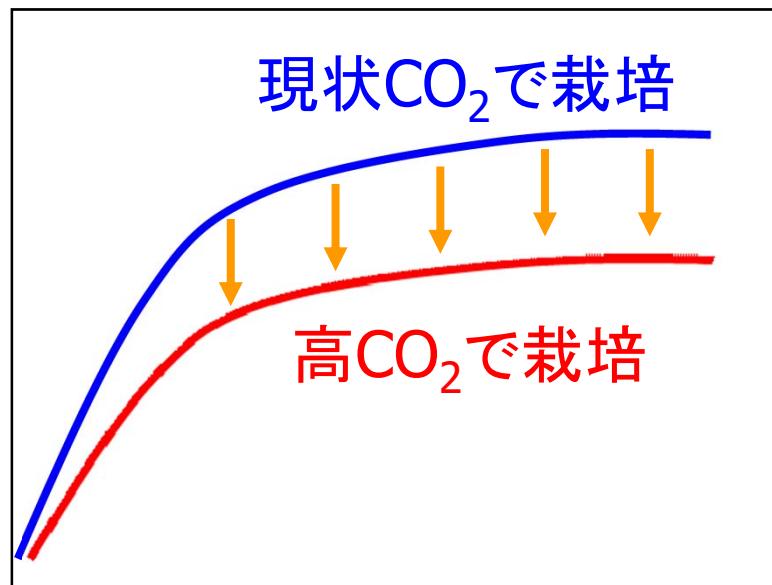
現状CO<sub>2</sub>



高CO<sub>2</sub>

## 個葉への影響

光合成速度



CO<sub>2</sub>濃度

光合成の負の制御  
Down regulation of photosynthesis

両者を統合した評価が必要

# 材料と方法

## 供試樹種（植栽時2年生苗）

- ・シラカンバ (*Betula platyphylla* var. *japonica*)
- ・ダケカンバ (*Betula ermanii*)
- ・ウダイカンバ (*Betula maximowicziana*)

## CO<sub>2</sub>濃度

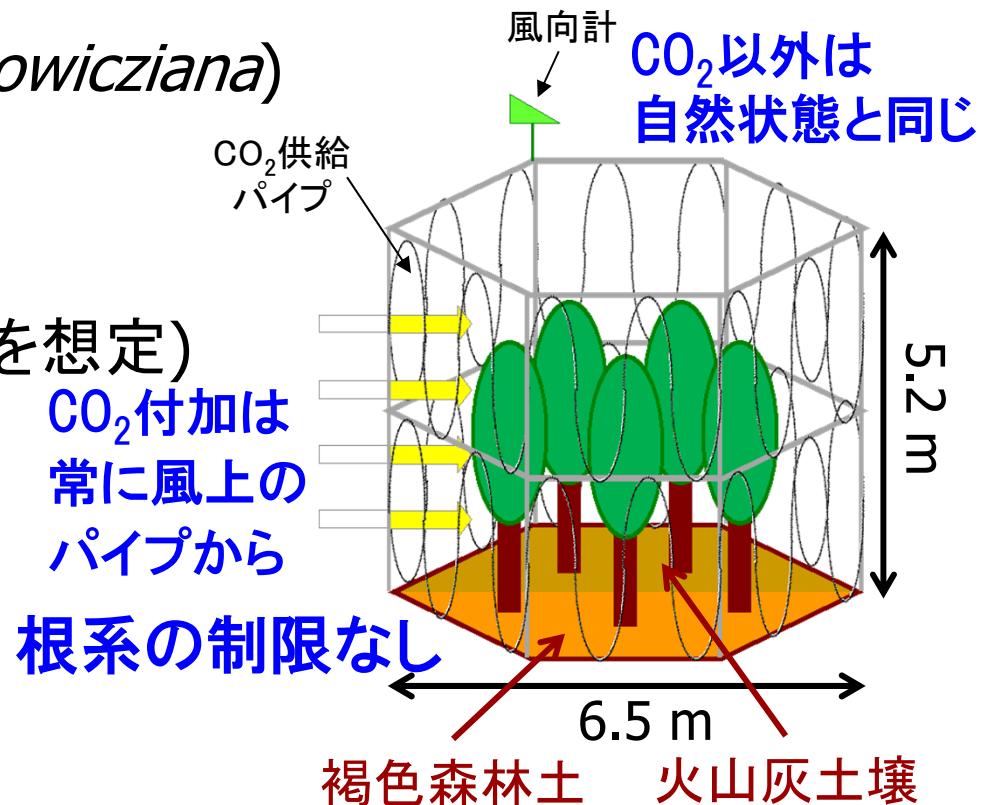
- ・380 ppm (対照)
- ・500 ppm (高CO<sub>2</sub>, 2040年頃を想定)

## 土壤

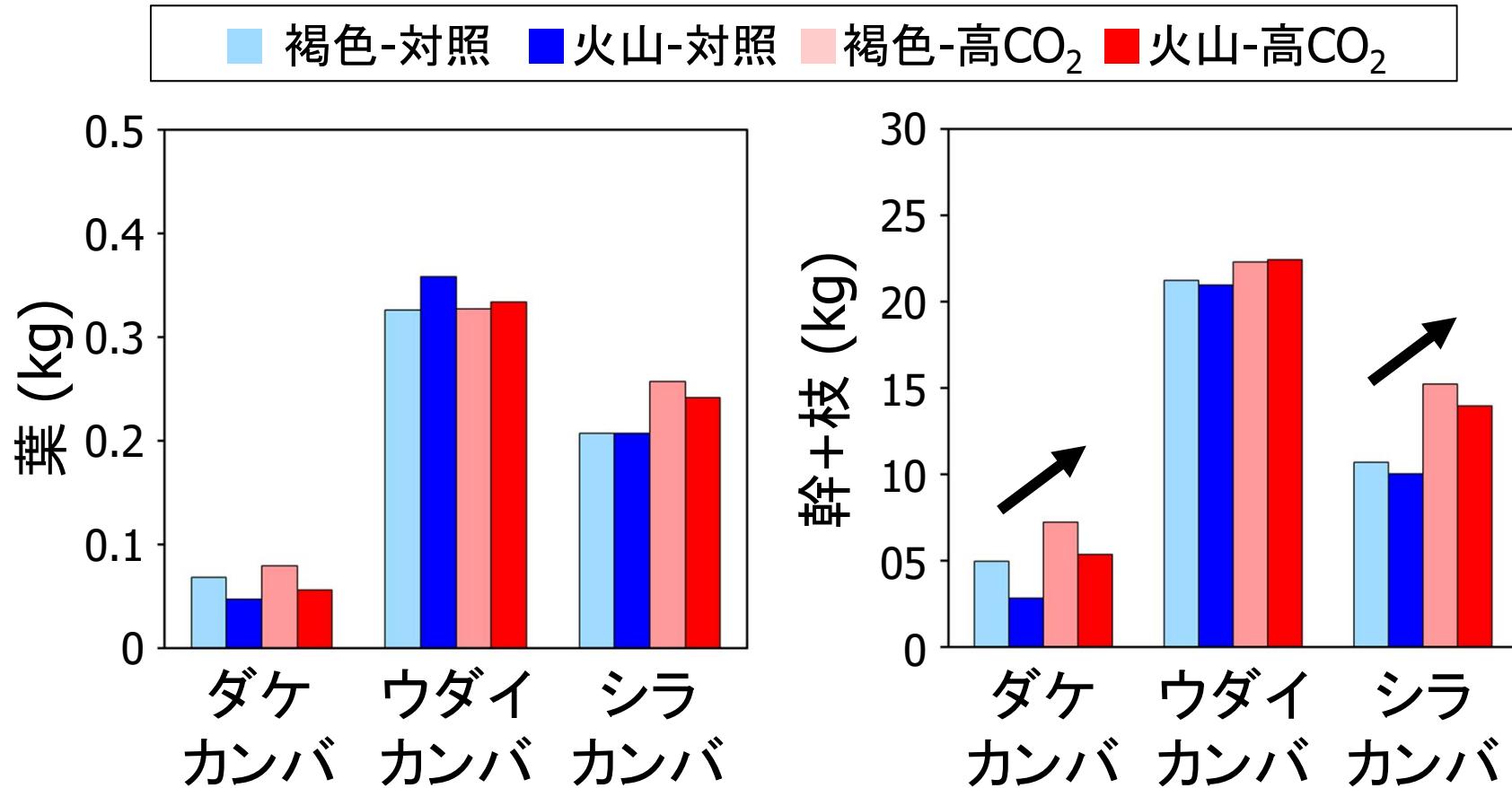
- ・褐色森林土 (富栄養)
- ・火山灰土 (貧栄養)

## 実験期間

2010～2013年(4成長期間)

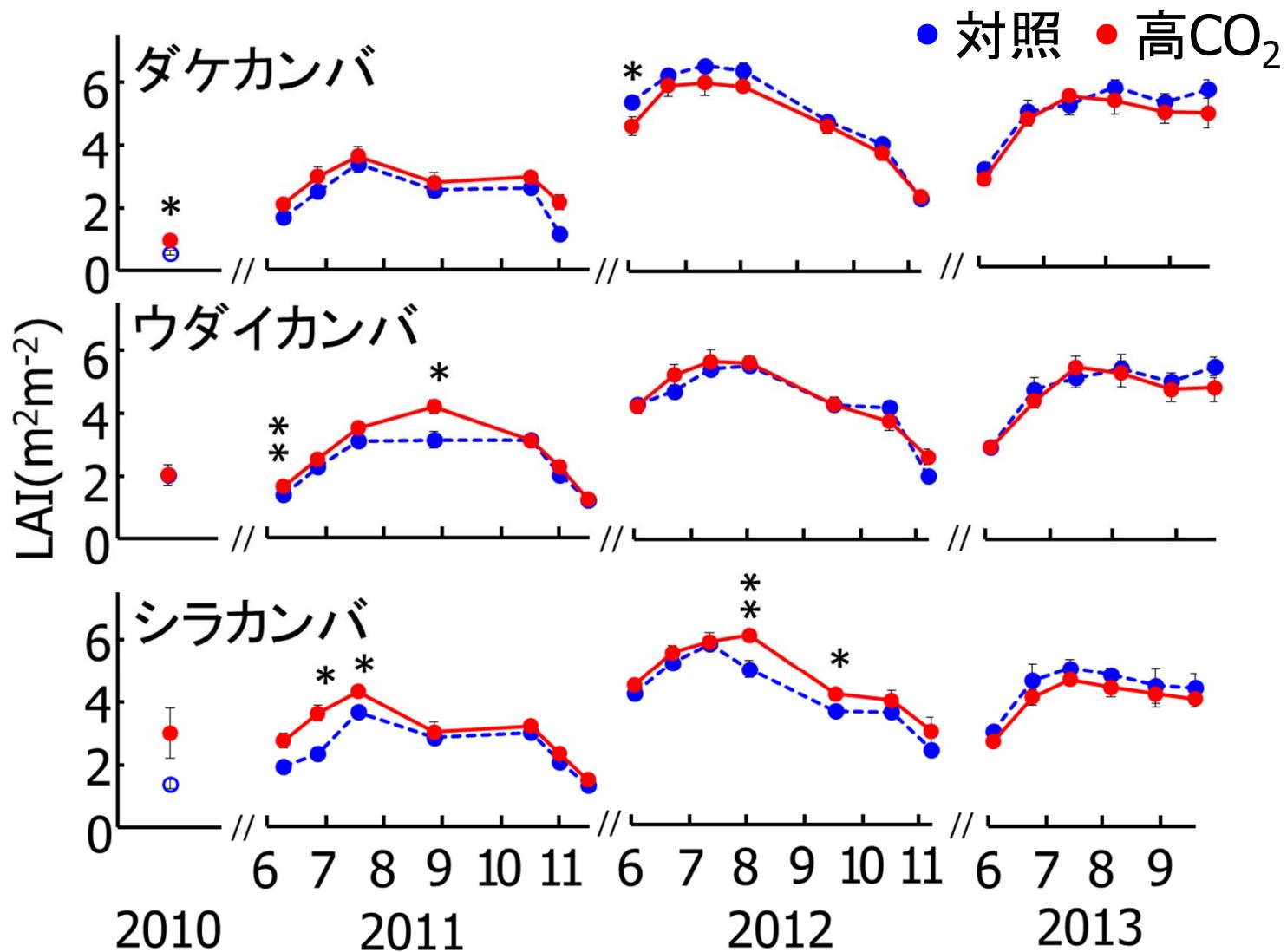


# 地上部バイオマスへの影響



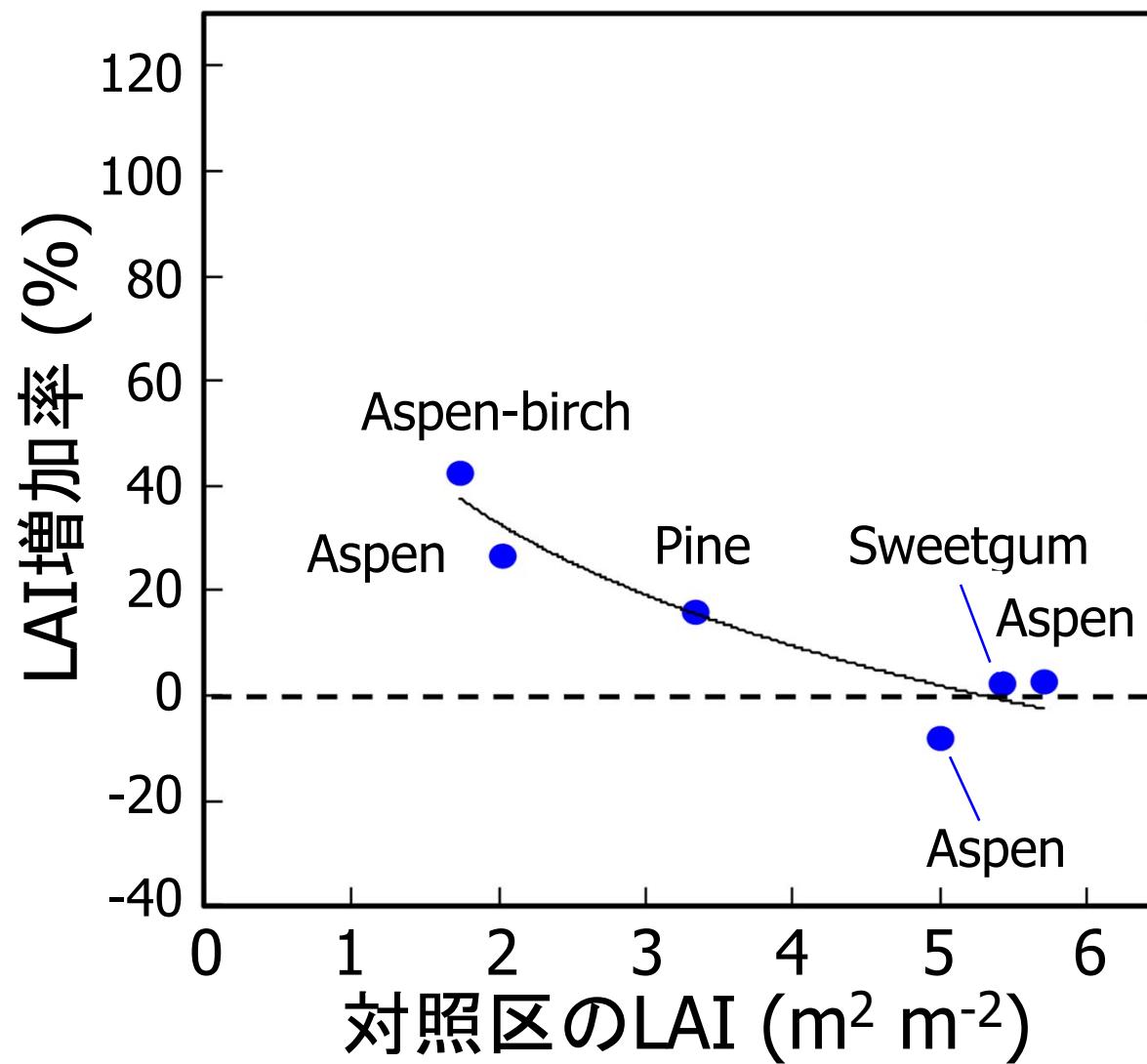
ダケカンバ・シラカンバ: 乾物成長の増加(主に幹の増加)  
ウダイカンバ: 高CO<sub>2</sub>の影響なし

# 葉量(LAI)の推移

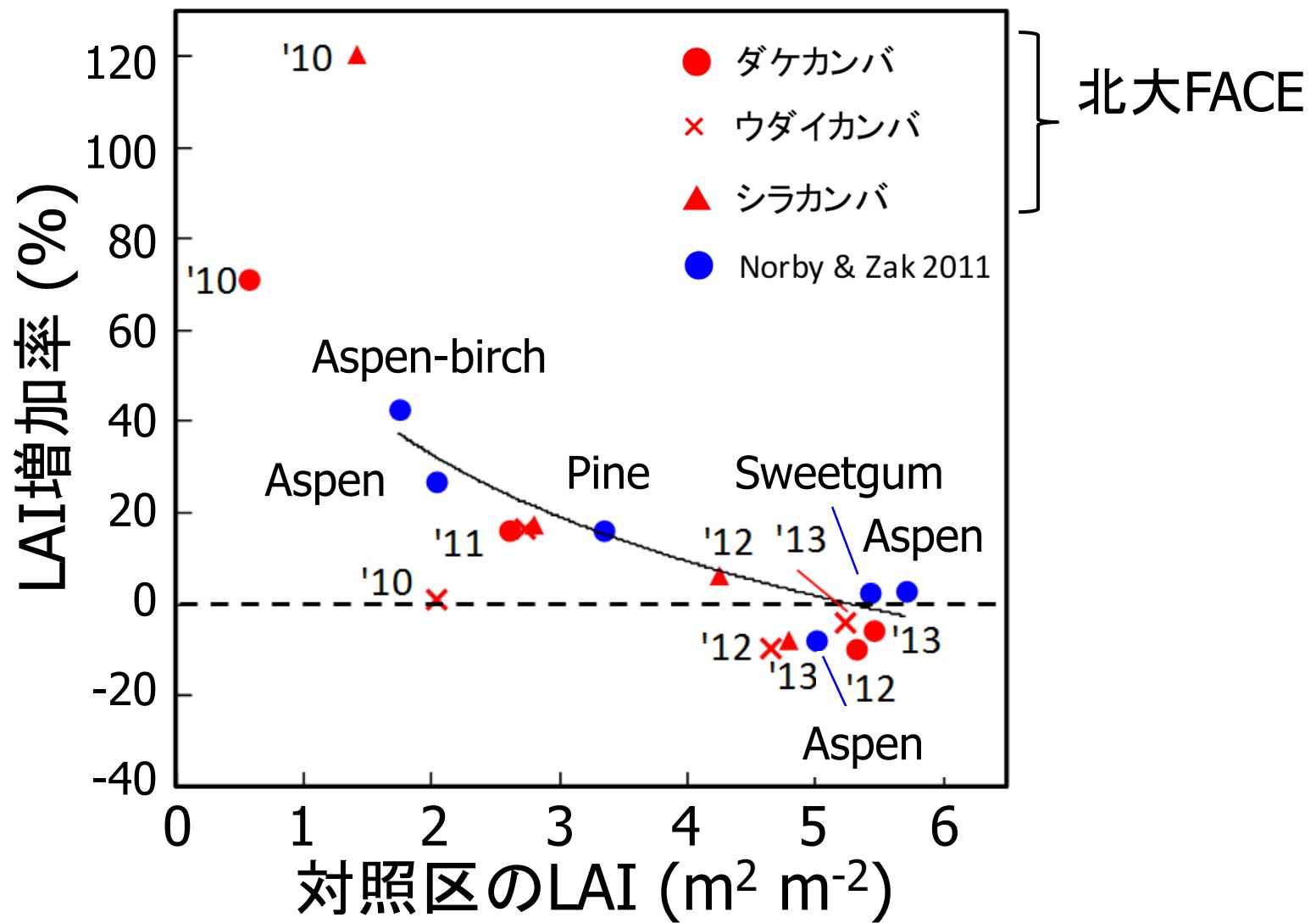


生育後半はLAIの増加があまり見られない

# 高CO<sub>2</sub>によるLAIの増加率

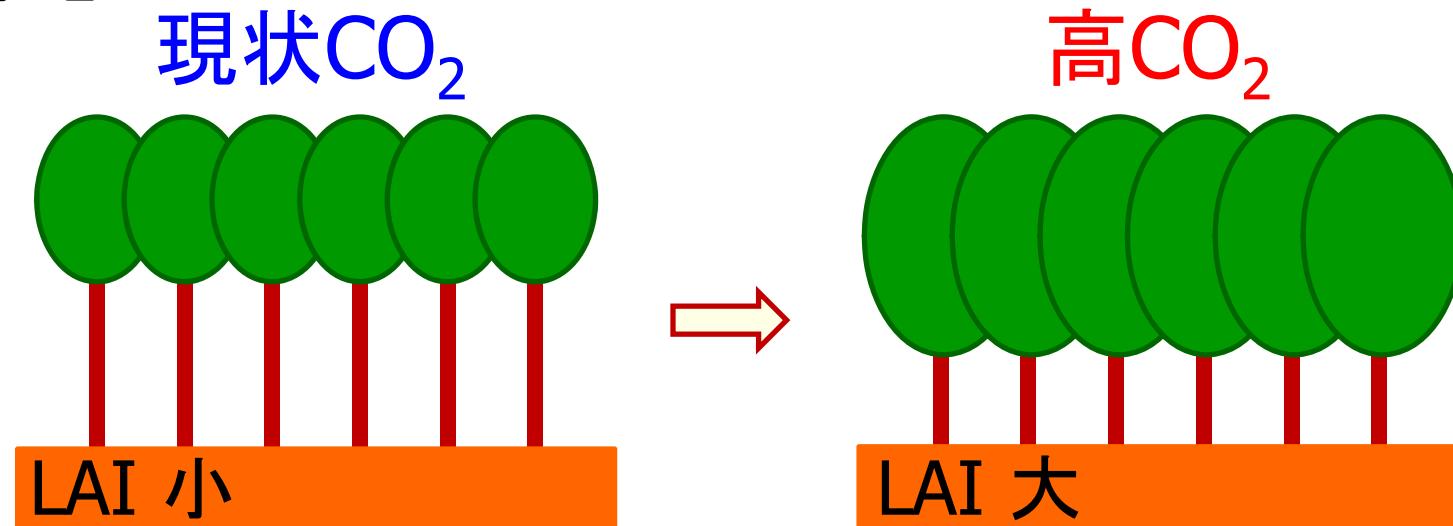


## 高CO<sub>2</sub>によるLAIの増加率



# 葉量(LAI)への影響

<予想>

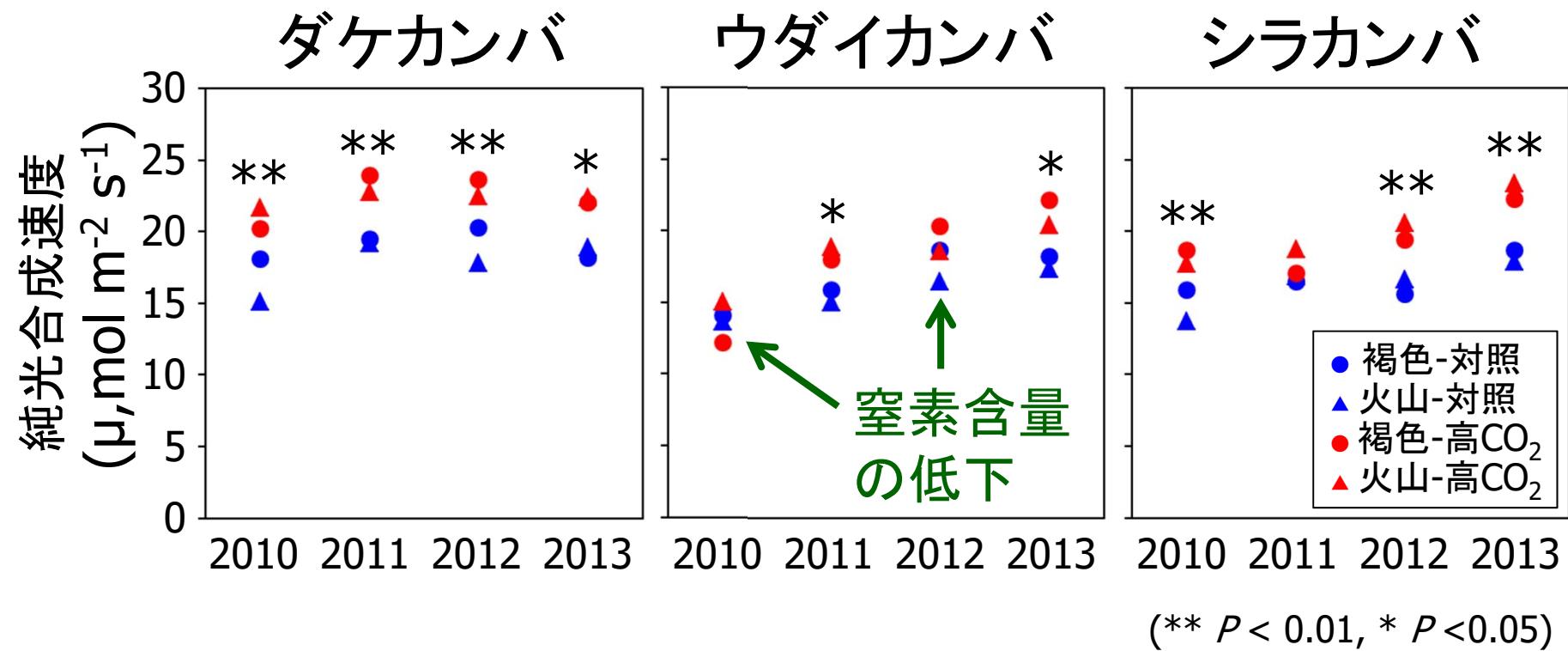


<結果>

- ・高CO<sub>2</sub>によるLAIの増加は生育初期のみ(樹種による)  
葉が混み合ってくると、高CO<sub>2</sub>でもLAIが増えない。
- ・その後の生産増加は個葉の光合成速度が高CO<sub>2</sub>で  
増加するかどうか(ダウンレギュレーションが起こるか  
どうか)にかかっている。

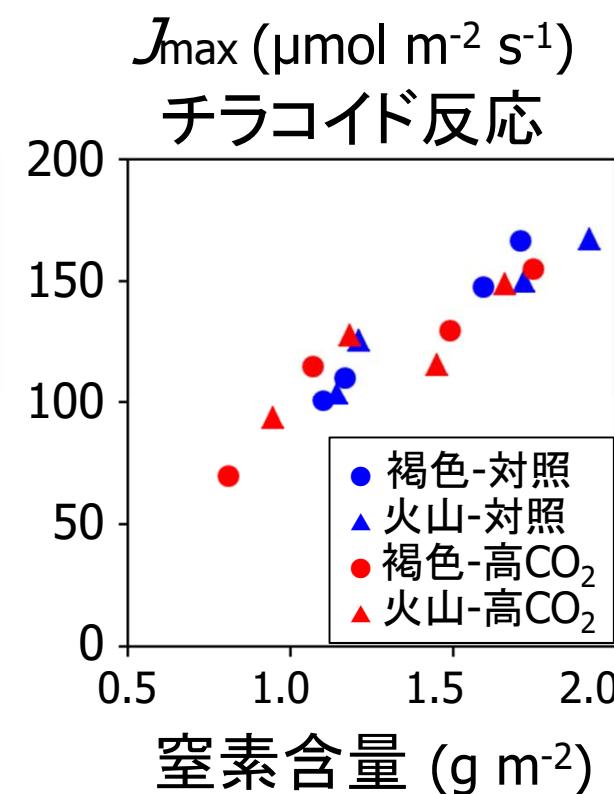
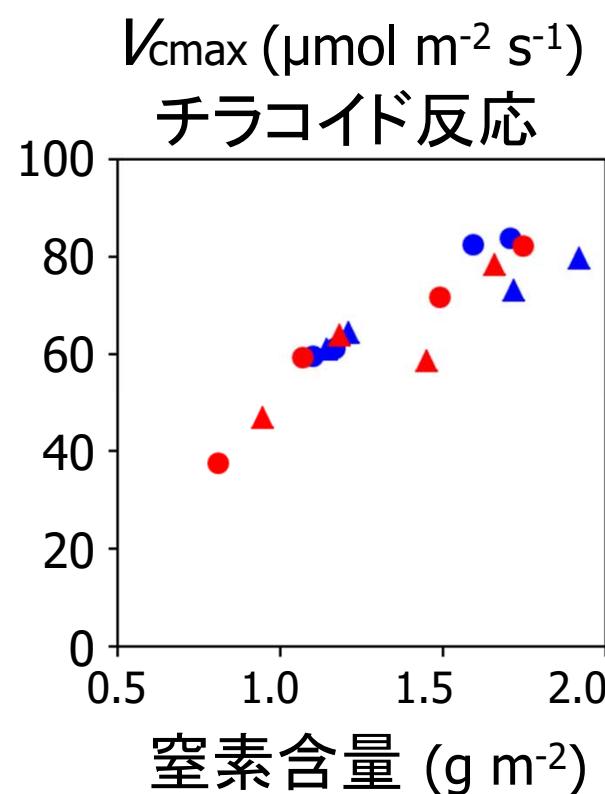
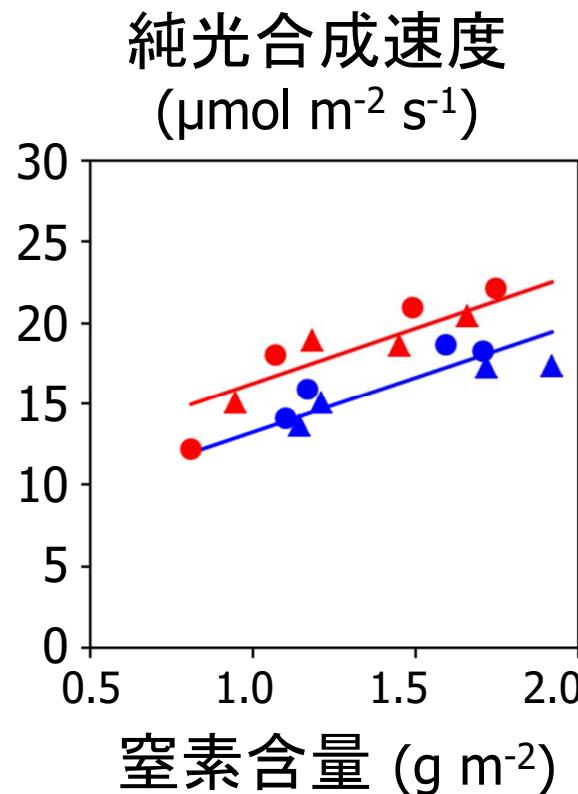
LAI =Leaf Area Index 単位土地面積あたりの葉面積( $m^2 m^{-2}$ )

# 純光合成速度の推移



成長増加が見られなかったウダイカンバでは  
高CO<sub>2</sub>環境でも純光合成速度があまり増加しない  
→ 光合成のダウンレギュレーション

# ウダイカンバの光合成と窒素含量



$V_{\text{cmax}}$ : 最大カルボキシレーション速度  $J_{\text{max}}$  : 最大電子伝達速度

光合成への窒素利用に高CO<sub>2</sub>の影響なし  
→葉の窒素含量の低下が高CO<sub>2</sub>で起こった

# まとめ

---

## 高CO<sub>2</sub>による成長促進に樹種間差異

ダケカンバ・シラカンバ: 成長増加

(主に幹+枝成長の増加)

ウダイカンバ: 高CO<sub>2</sub>の影響なし

## LAIの応答

ダケカンバ・シラカンバ: 実験初期のみ増加

ウダイカンバ: 高CO<sub>2</sub>の影響小

## 個葉の光合成応答

- ・ウダイカンバで光合成のダウンレギュレーション
  - ・窒素含量の低下に伴う葉内光合成活性の低下
-

# 環境植物学 第13回

## 高濃度CO<sub>2</sub>に対する樹木の応答

---

1. 背景: 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加
2. 光合成の解析  
(A-Ciカーブと光合成の律速段階)
3. 光合成の順化応答  
(ダウンレギュレーションとその要因)
4. FACE研究
  - a. 海外のFACE研究
  - b. 日本のFACE研究

# 参考文献

---

Watanabe, M., Watanabe, Y., Kitaoka, S., Utsugi, H., Kita, K. and Koike, T. (2011) Growth and photosynthetic traits of hybrid larch F<sub>1</sub> (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) under elevated CO<sub>2</sub> concentration with low nutrient availability. *Tree Physiology*, Vol. 31, No. 9, 965-975.

渡辺 誠, 来田和人, 渡邊陽子, 北岡 哲, 宇都木 玄, 小池孝良 (2013) 貧栄養条件下で栽培したグイマツ雑種F<sub>1</sub>の高CO<sub>2</sub>に対する応答. *森林遺伝育種*, Vol. 2, No. 1, 13-17. [http://fgtb.acaffrc.go.jp/publish/FGTB\\_ISSN\\_2187-350X/Vol.2/FGTB\\_Vol2\\_No.1/FGTB\\_V2N1\\_commentary1.pdf](http://fgtb.acaffrc.go.jp/publish/FGTB_ISSN_2187-350X/Vol.2/FGTB_Vol2_No.1/FGTB_V2N1_commentary1.pdf)

---

質問等がある方は

渡辺 誠 (5号館203室)

nab0602@cc.tuat.ac.jp

042-367-5820

まで連絡ください

---