

農業におけるCO₂の利用(CCU)の推進

茨城大学 地球変動適応科学研究機関
堅田 元喜

発表の流れ

- 地球環境問題と学際研究
- 温室におけるCO₂の利用 (CCU)
- 農場におけるCCU
- 将来のCCUと適応策

物理学と生物学の「橋渡し」

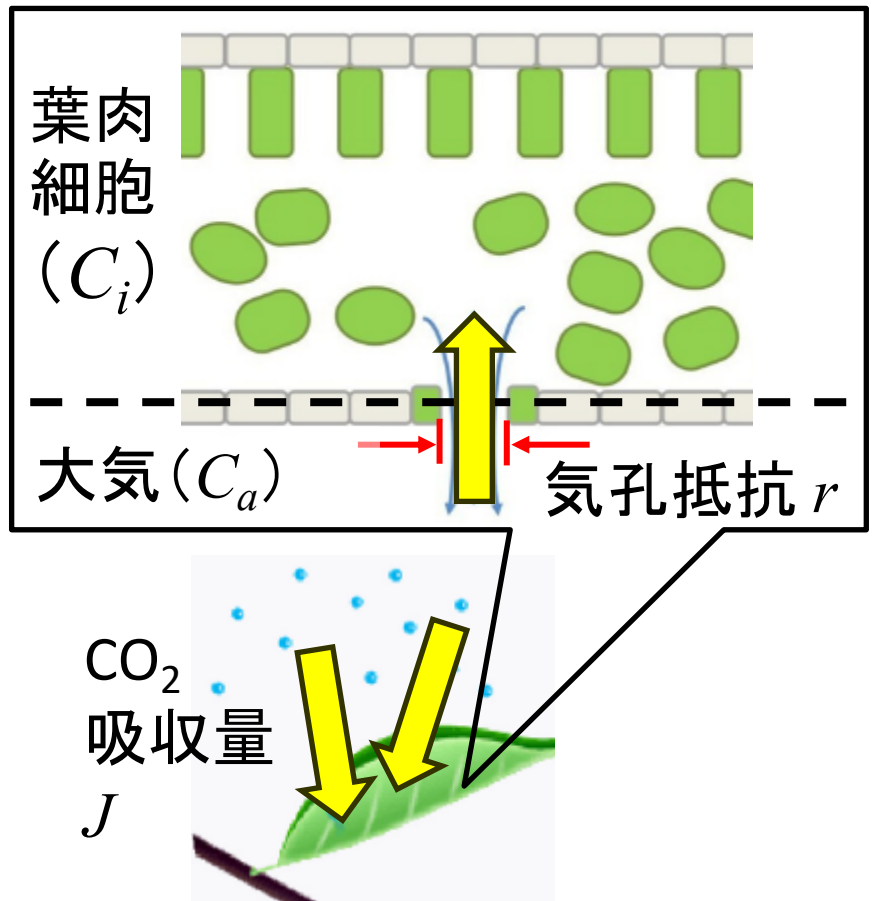
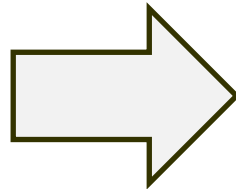
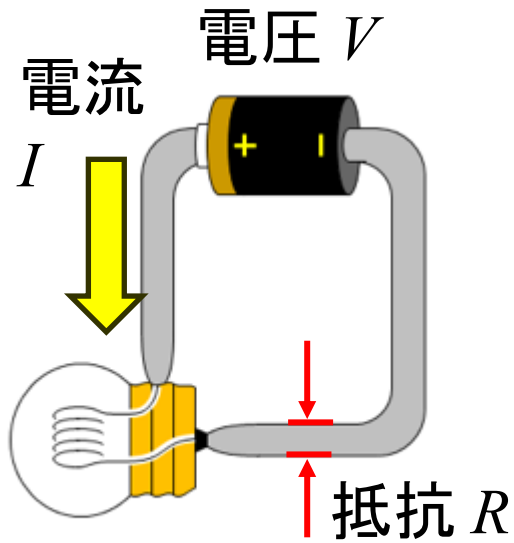
オームの法則:

$$I = V/R$$



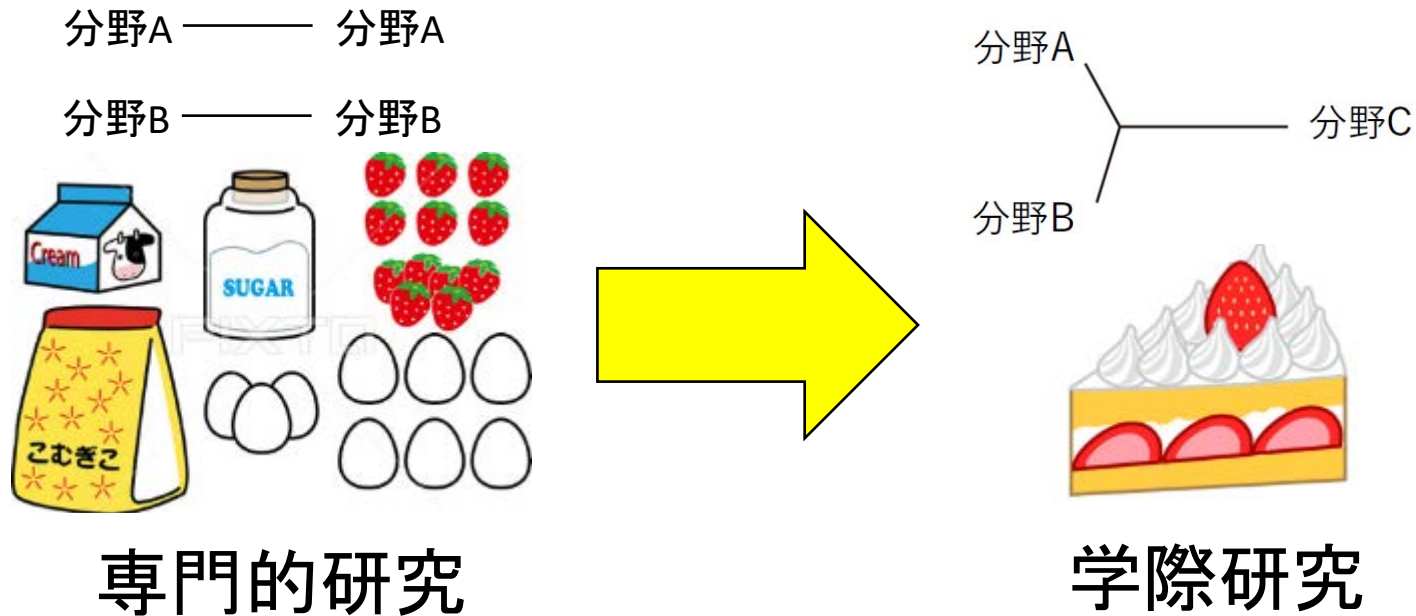
フィックの第一法則:

$$J = (C_i - C_a)/r$$



地球環境研究のあるべき姿

- 地球環境研究は、本来は**学際的**であるべき
- 現実には「たこつぼ化」。研究者はデータは共有するが、お互いの専門的内容には踏み込まない



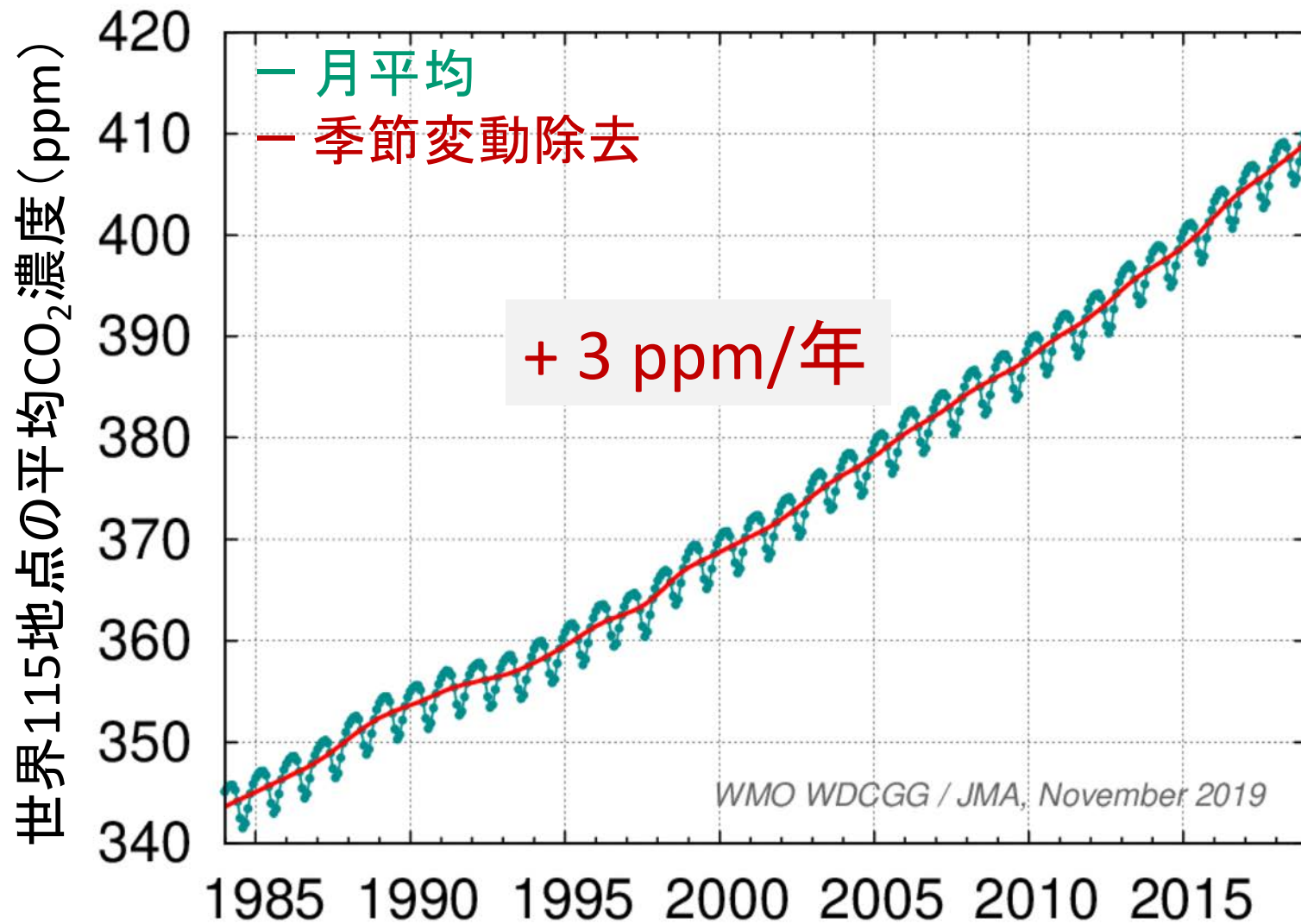
Nissani (1995) *J. Educational Thought*

目指すゴール: あらゆる学問分野を俯瞰し、研究の方向性と政策への提言を行う

発表の流れ

- 地球環境問題と学際研究
- 温室におけるCO₂の利用(CCU)
- 農場におけるCCU
- 将来のCCUと適応策

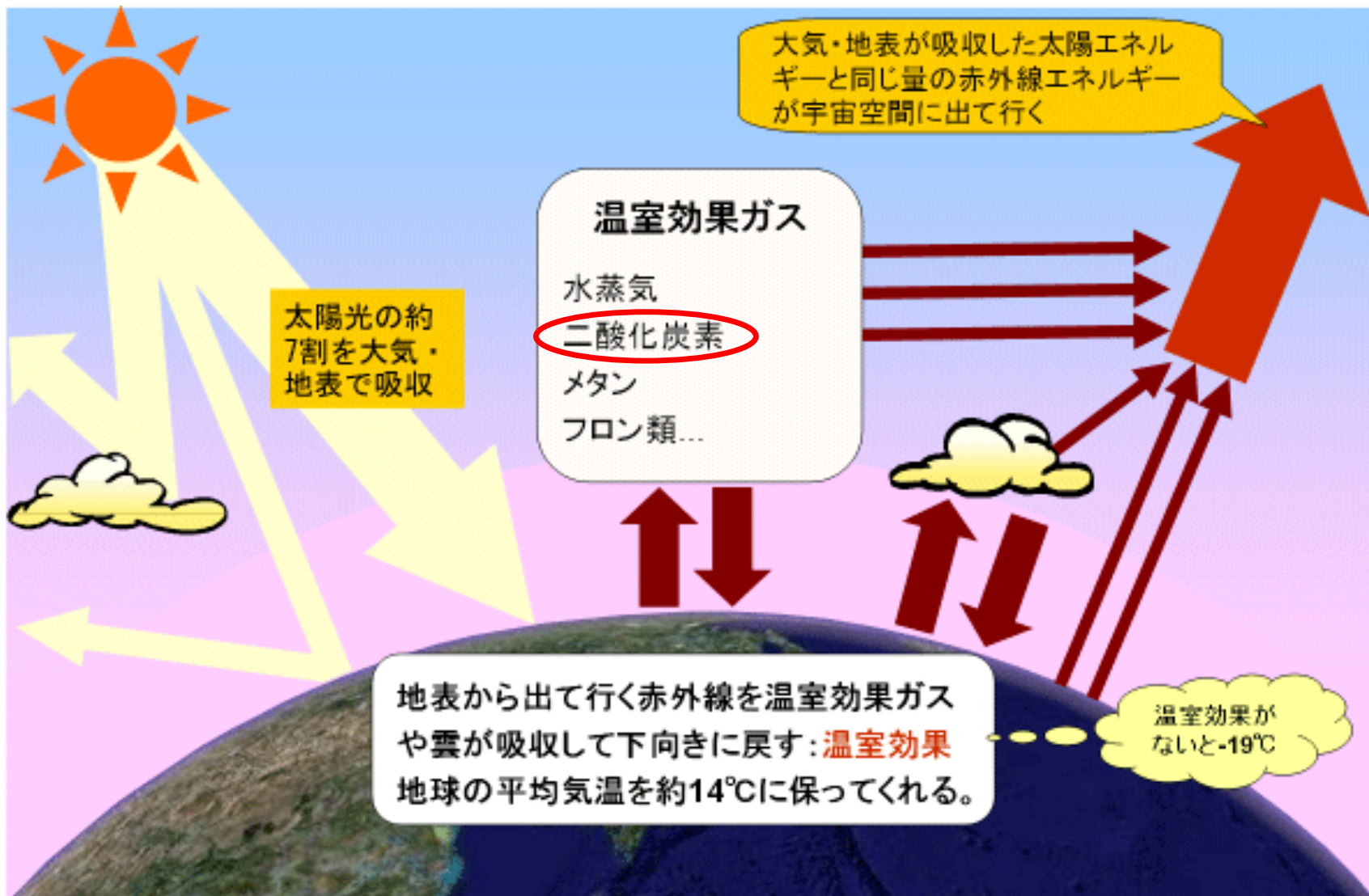
地球全体でCO₂濃度は上昇



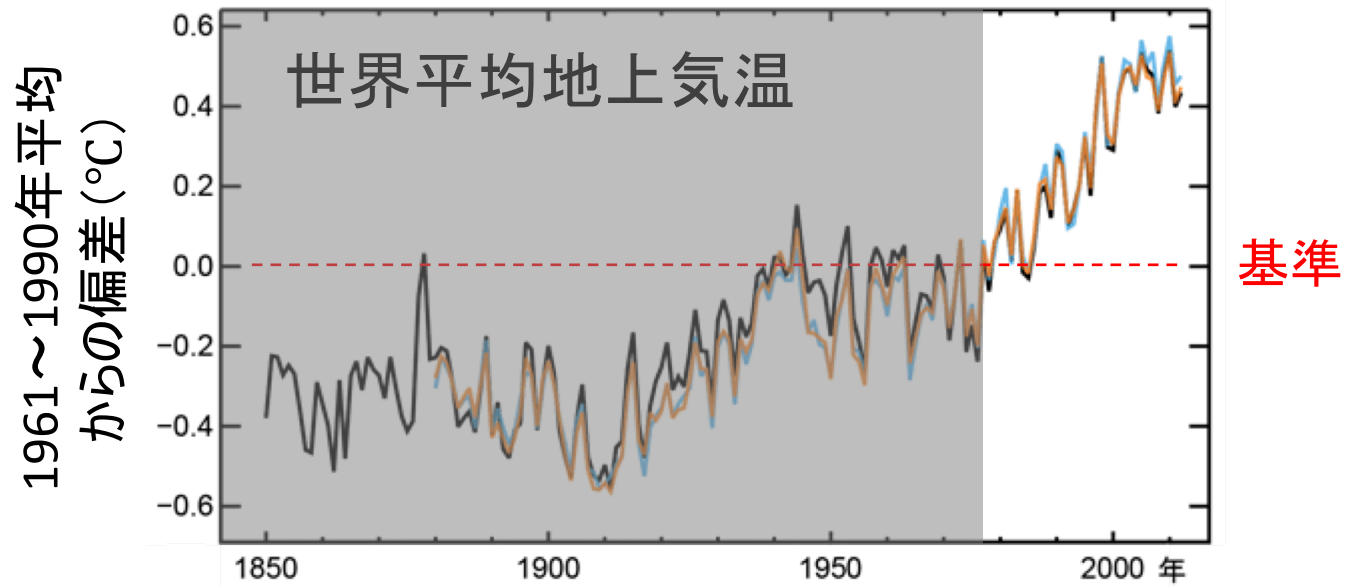
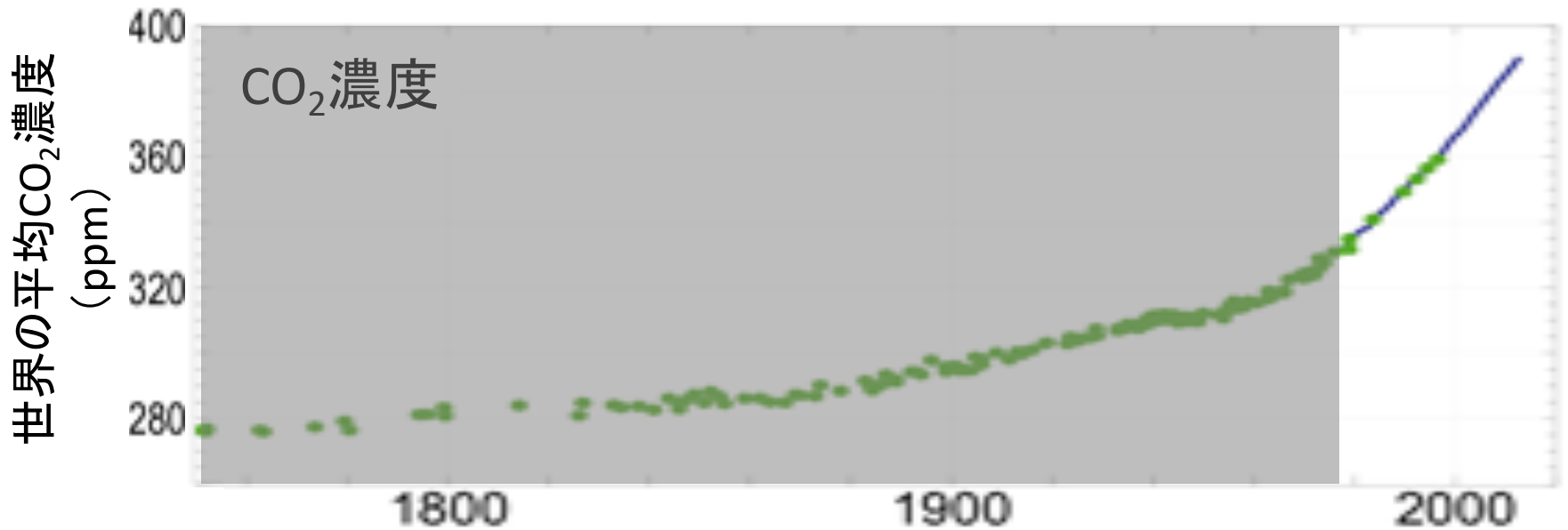
年 温室効果ガス世界資料センター(気象庁HP)

* ppm: ある物質が大気中に存在している体積割合の100万分の1

CO₂の温室効果

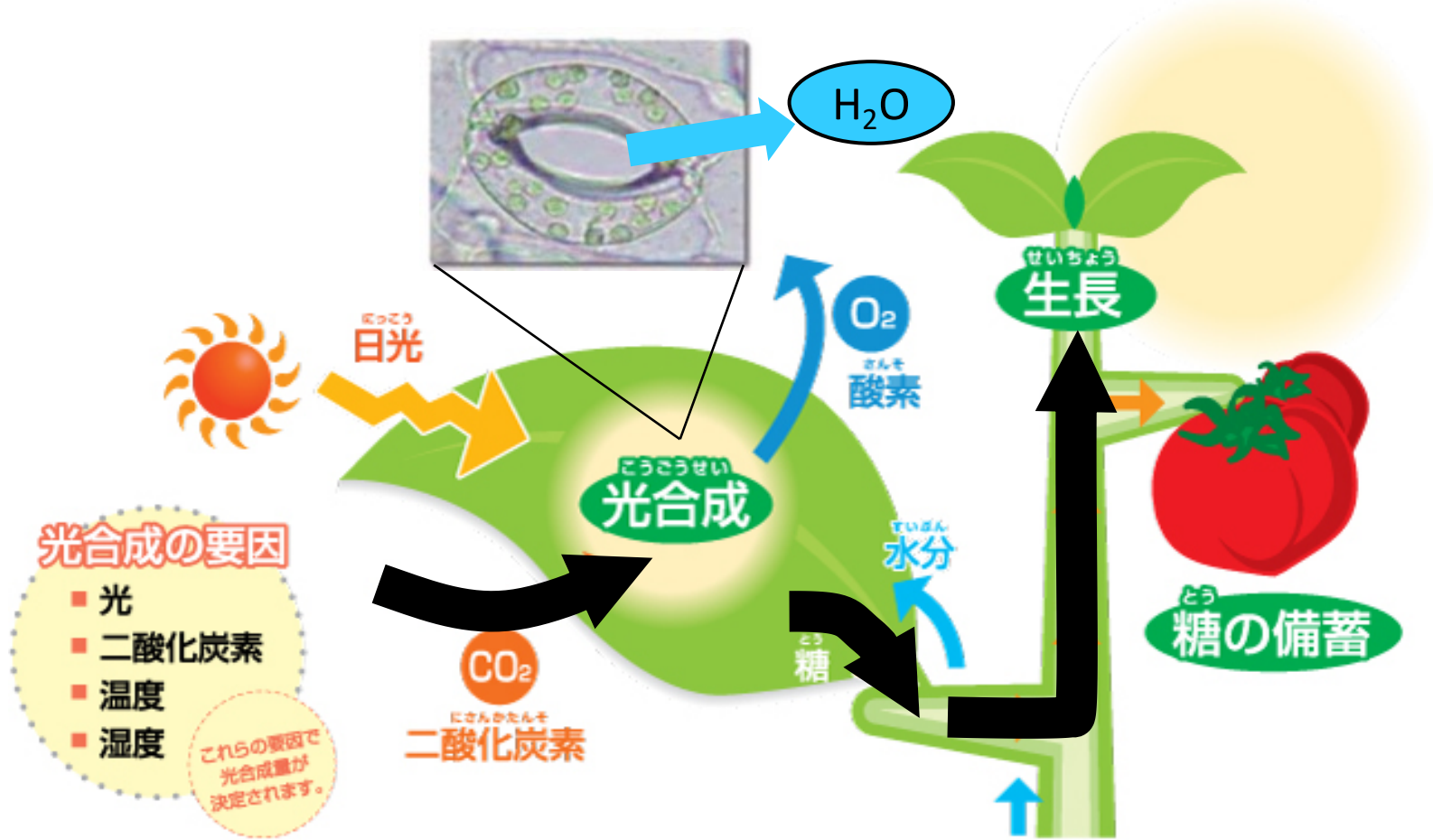


地球全体で気温は上昇傾向



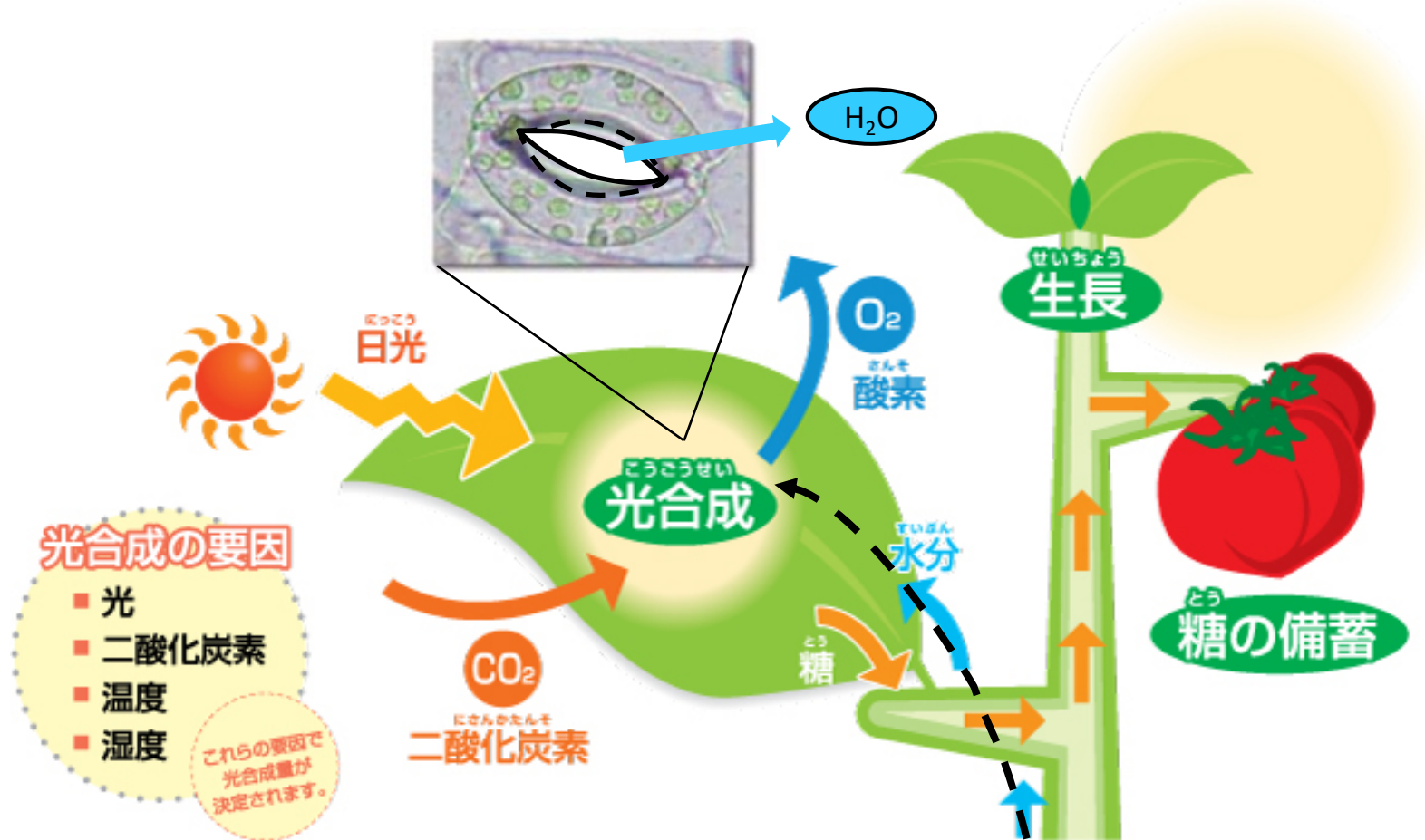
CO₂濃度の上昇には、
「良い影響」もある！

「CO₂施肥効果」



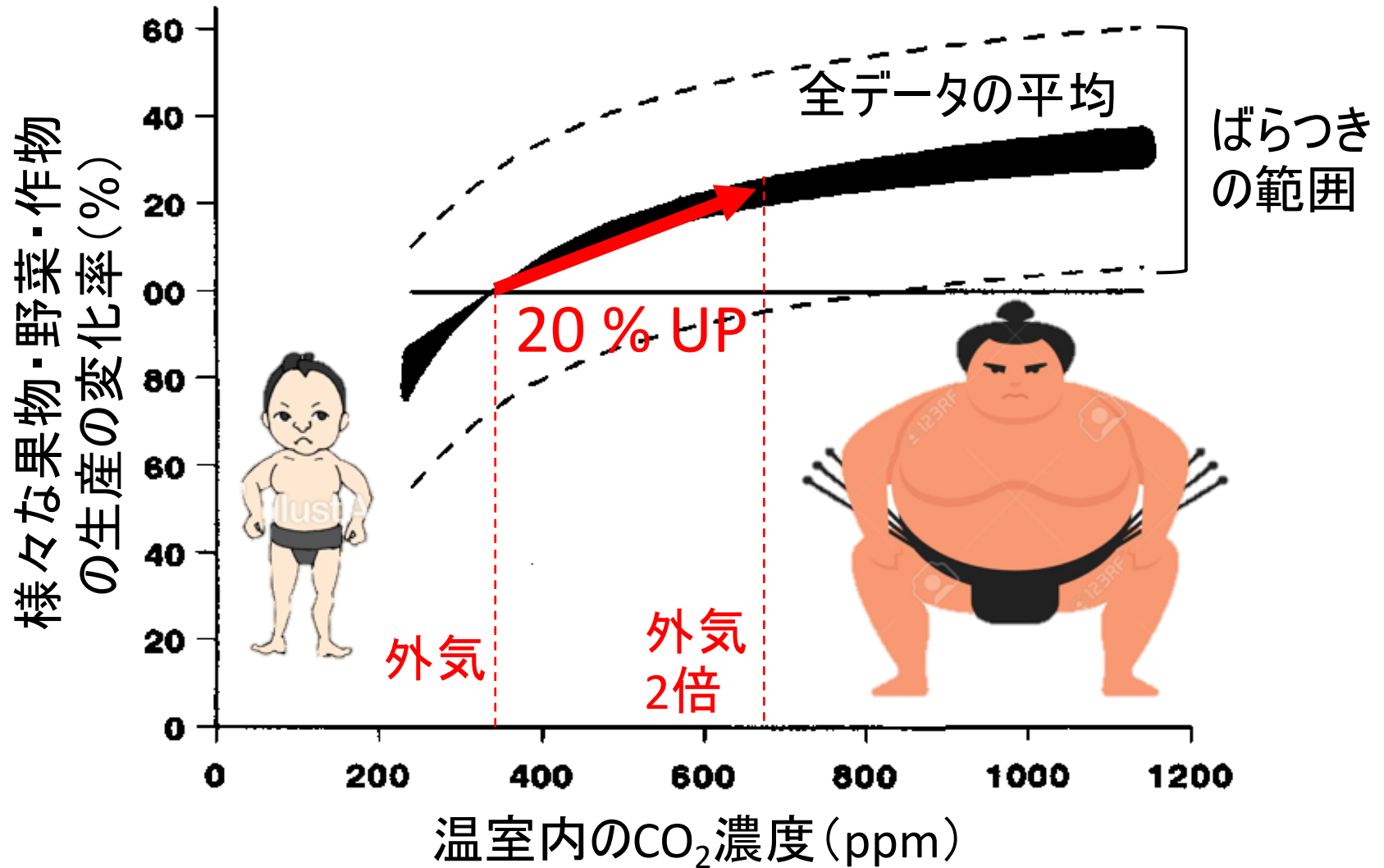
- CO₂は、植物の**光合成**にとって必須の原料
- CO₂濃度が2倍上昇すると、生長が促進

水の損失が減り、光合成の効率もアップ



- CO₂濃度が2倍上昇すると、気孔が閉じ気味になり、水の損失(蒸発)が抑えられる

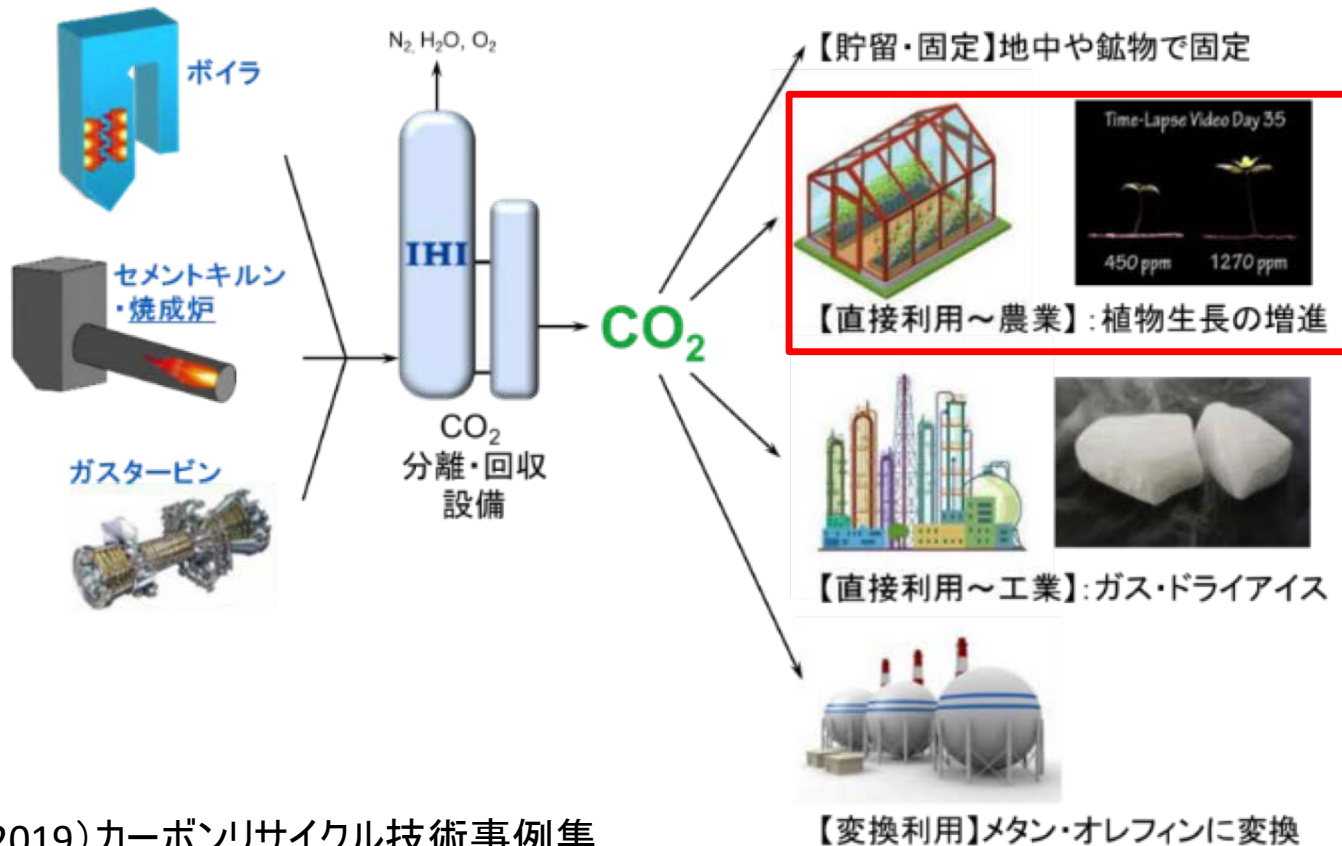
温室によるCO₂施肥効果の実験結果



温室におけるCCU:
CO₂を回収→園芸作物に施肥

カーボンリサイクルとCCU（経産省）

- CO₂を資源として捉えて分離・回収し、CO₂を利用することで（Carbon Capture and Utilization: CCU）、大気中へのCO₂排出を抑制



経産省(2019)カーボンリサイクル技術事例集

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/pdf/tech_casebook.pdf

大規模なCO₂回収の実証試験(事例)



利用



大崎クールジェン
(CO₂回収実証プラント)

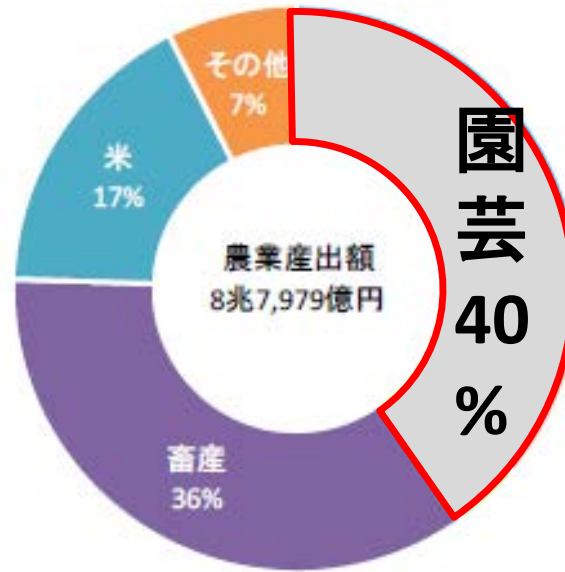
トマト菜園

経産省(2019)カーボンリサイクル技術事例集

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/pdf/tech_casebook.pdf

- 国内初の石炭火力発電所からのCO₂分離・回収・利用の実証試験を開始(2019年6月～、広島県)

日本の園芸作物による農業生産額



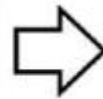
農水省(2015)我が国の
農業生産額



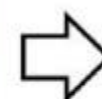
雨よけ施設



ビニールトンネル



温室



環境制御型温室
(植物工場)

- 園芸作物の生産量の増加とその維持には、 CO_2 施肥効果を最大化するCCUは有効

温室におけるCCUの必要性(バラの例)



全農とちぎ実績(2009~2011年の平均値)

<https://www.agrinet.pref.tochigi.lg.jp/member/tag/炭酸ガス施用>

- 冬季にCO₂濃度を1500ppmに増加させ、**30%増収**。設備投資費用も、初年度に回収

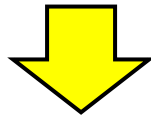
CO₂発生装置の方式



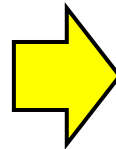
装置の方式	灯油燃烧	LPガス燃烧	液化炭酸ガス
特徴	排ガス利用	排ガス利用	ボンベ供給
メリット	燃料費安価	壊れにくい	熱が少ない
デメリット	燃烧不純物	燃料費高価	燃料費 とても高価
普及実態	シェアの 大部分	灯油燃烧に次 いで多い	大規模施設に 事例あり

灯油燃烧方式の例

灯油燃烧、CO₂発生



放熱によりCO₂を低温に



CO₂モニタリングと制御



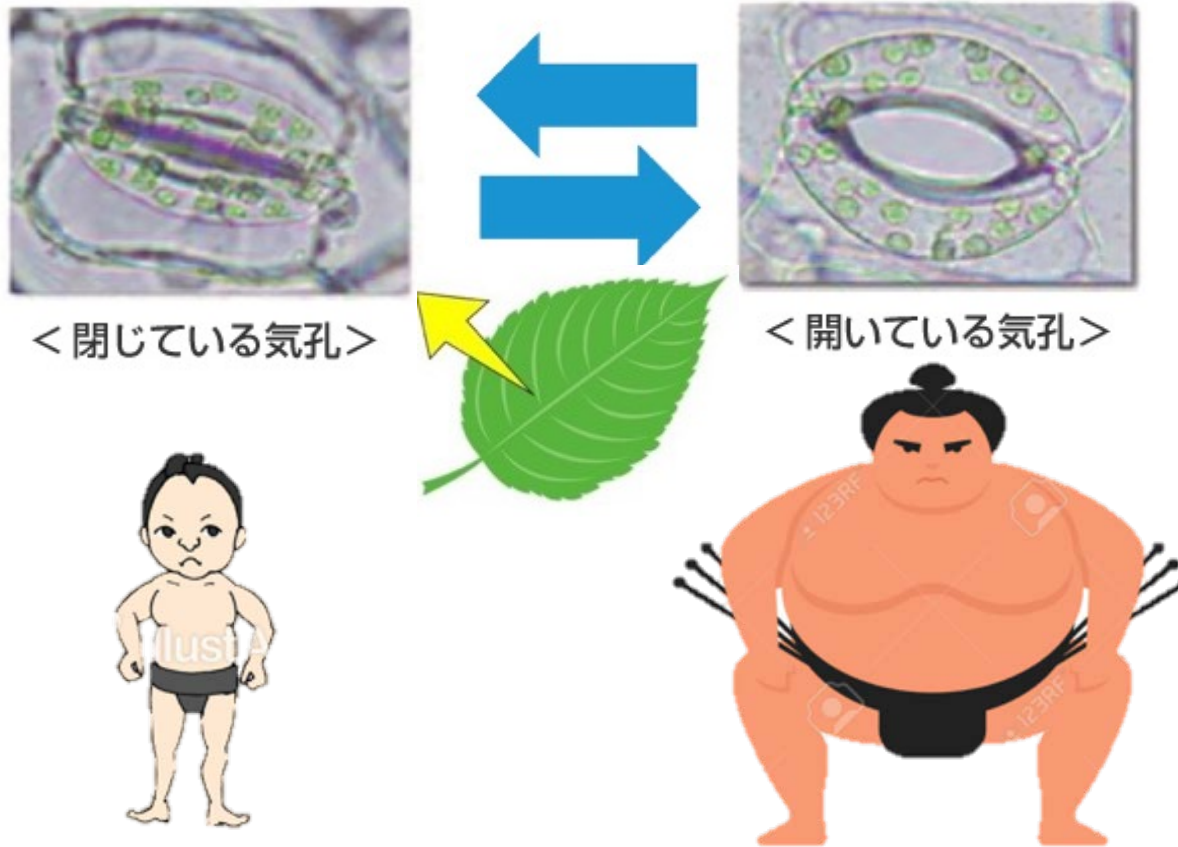
低温CO₂を局所施肥



低温CO₂局所施用システム「真呼吸」

<https://agrijournal.jp/renewableenergy/46238/>

環境制御＝「気孔」の制御



- 気孔が開いた状態を維持するには、**光・気温・湿度・養分**などの適切な制御が必要

環境制御型温室におけるCCUの例

オランダ型
高度栽培制御システム



ガスエンジン
トリジェネレーション



多様品種の通年栽培

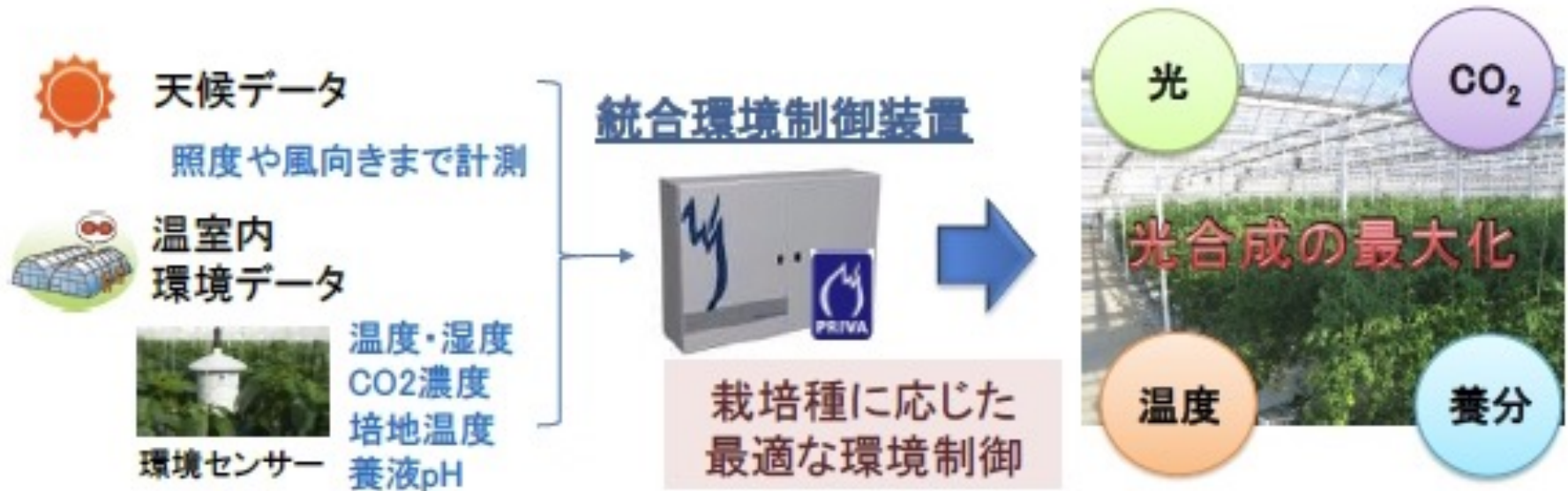
JFEエンジニアリング、カゴメ響灘菜園

<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1403/25/news126.html>

経産省(2019)カーボンリサイクル技術事例集

- CCUを利用した高糖度ミニトマトとベビーリーフ(葉物野菜)の通年栽培(2014年～、北海道)

オランダ型の高度栽培制御システム

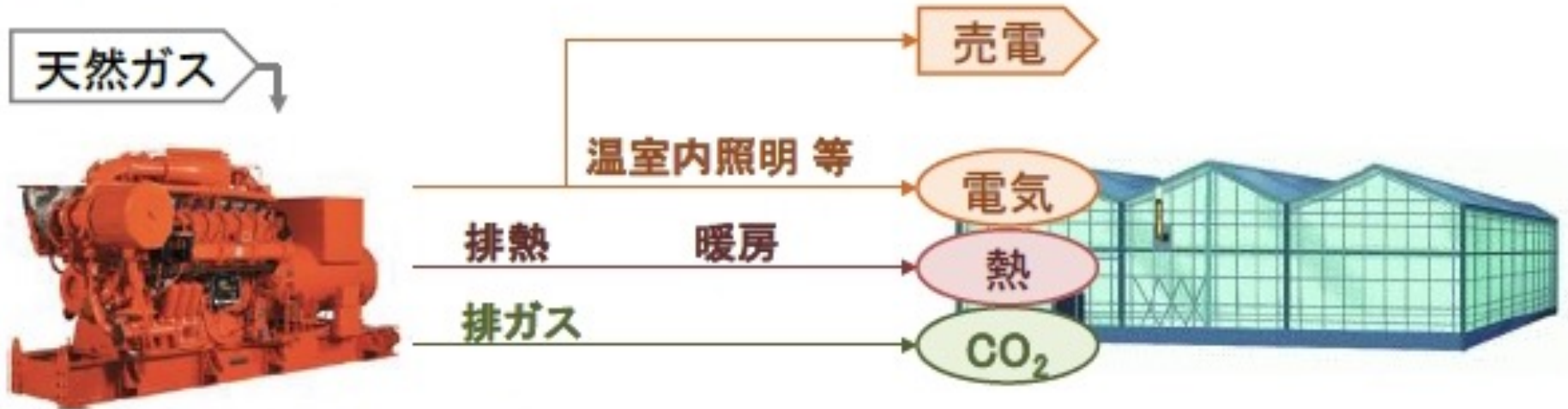


JFEエンジニアリング

<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1403/25/news126.html>

- 太陽光を生かした温室を利用して、ITで環境を制御し、一年を通じた収穫を可能とする

ガストリジェネレーション



JFE-Waukeshaガスエンジン

JFEエンジニアリング

<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1403/25/news126.html>

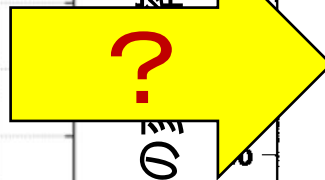
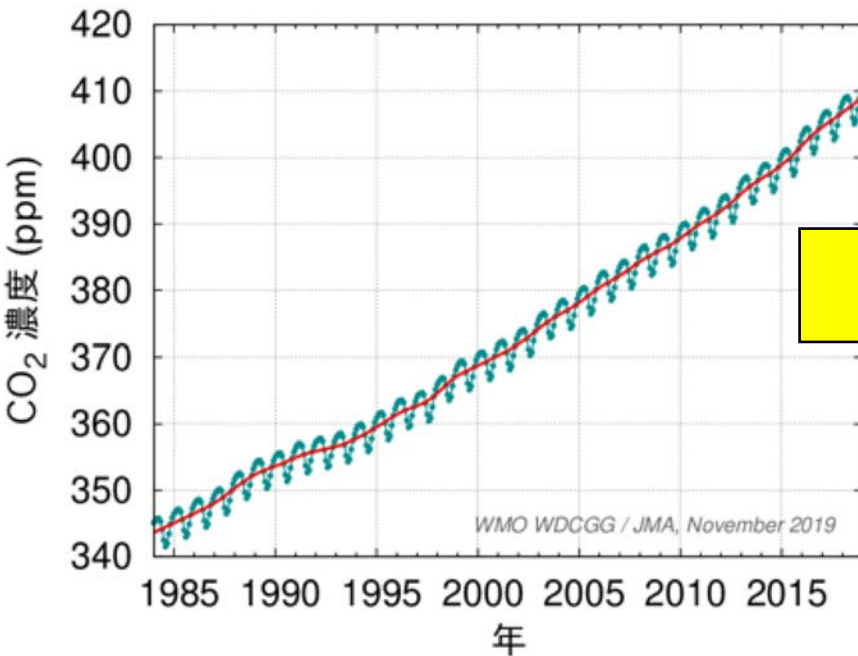
経産省(2019)カーボンリサイクル技術事例集

- 電力・熱(コジェネレーション)に加えて、高いCO₂濃度を維持する国内初の「トリジェネレーション」

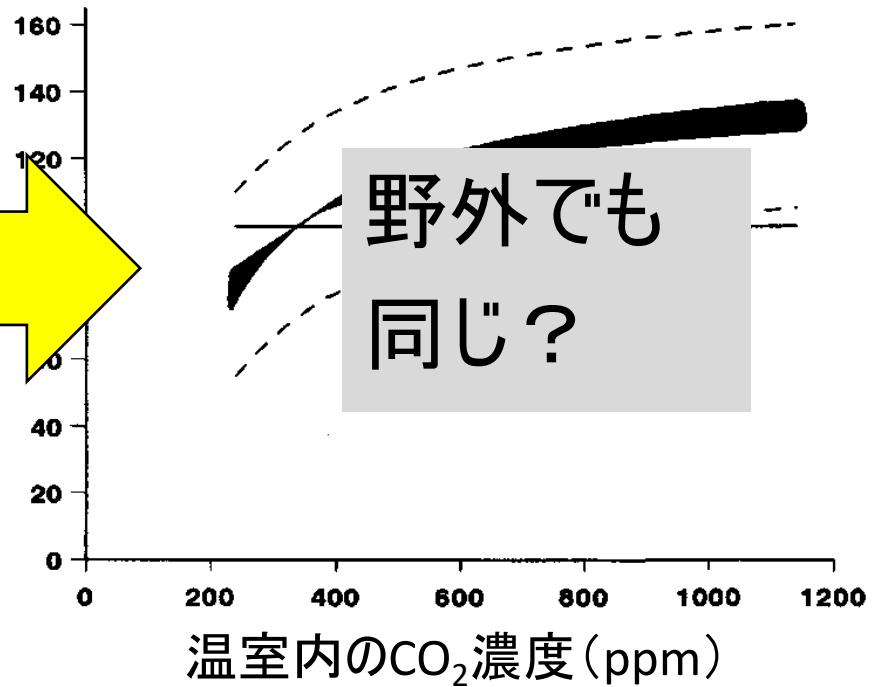
発表の流れ

- 地球環境問題と学際研究
- 温室におけるCO₂の利用(CCU)
- 農場におけるCCU
- 将来のCCUと適応策

自然環境でのCO₂施肥効果？



生産の増進率 (%)



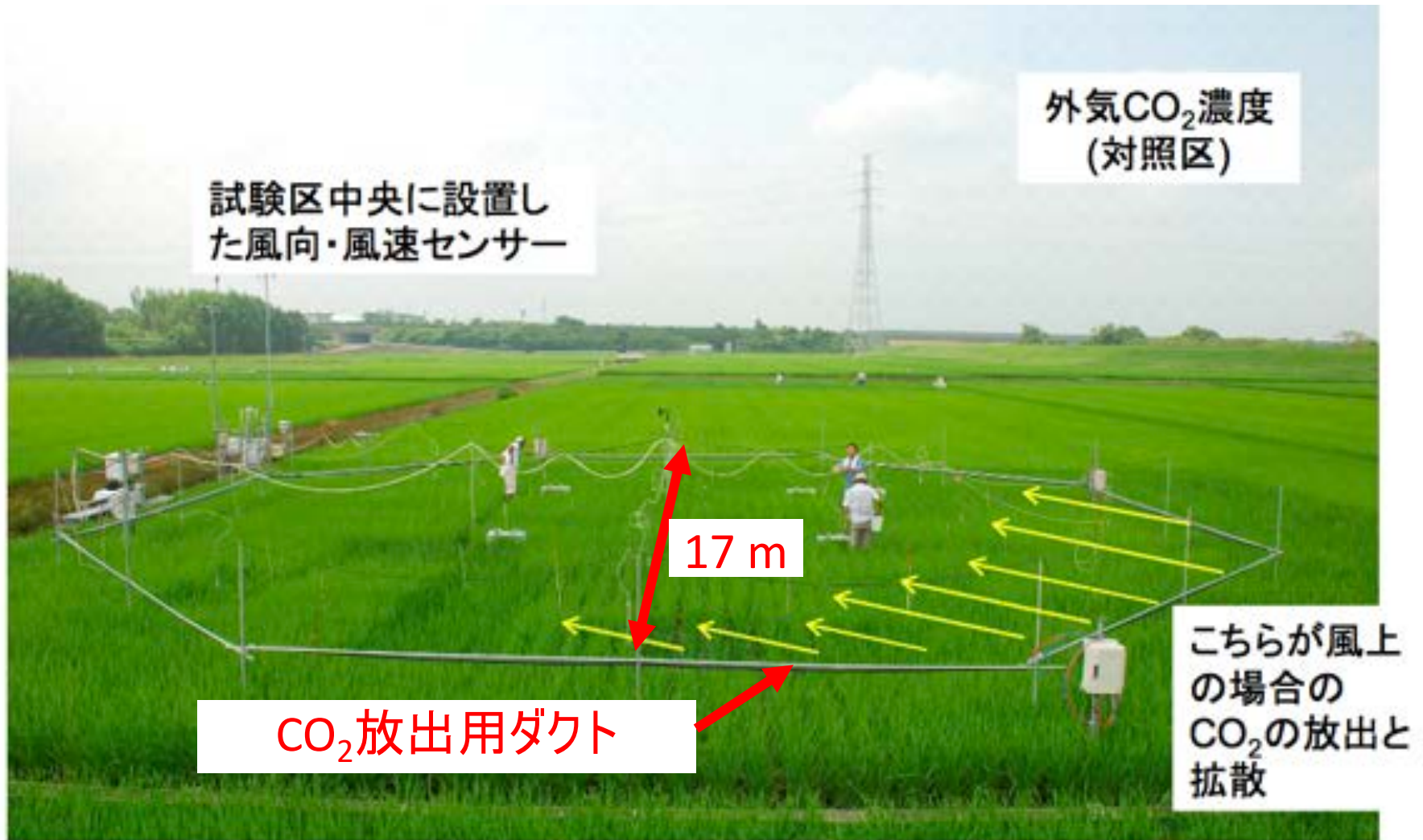
温室効果ガス世界資料センター(気象庁HP)

Nederhoff (1994)

FACE

外気でのCO₂増加実験

FACE : Free-Air CO₂ Enrichment



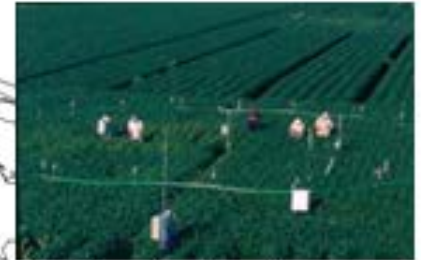
<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/outline/face/outline/s2.html>

世界のFACE (2012年時点)

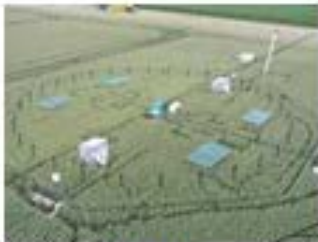
中国 イネ・ムギFACE



アメリカダイズ・トウモロコシFACE



ドイツ畑輪作FACE



つくばみらい
イネ FACE



イタリア デュラムコムギFACE

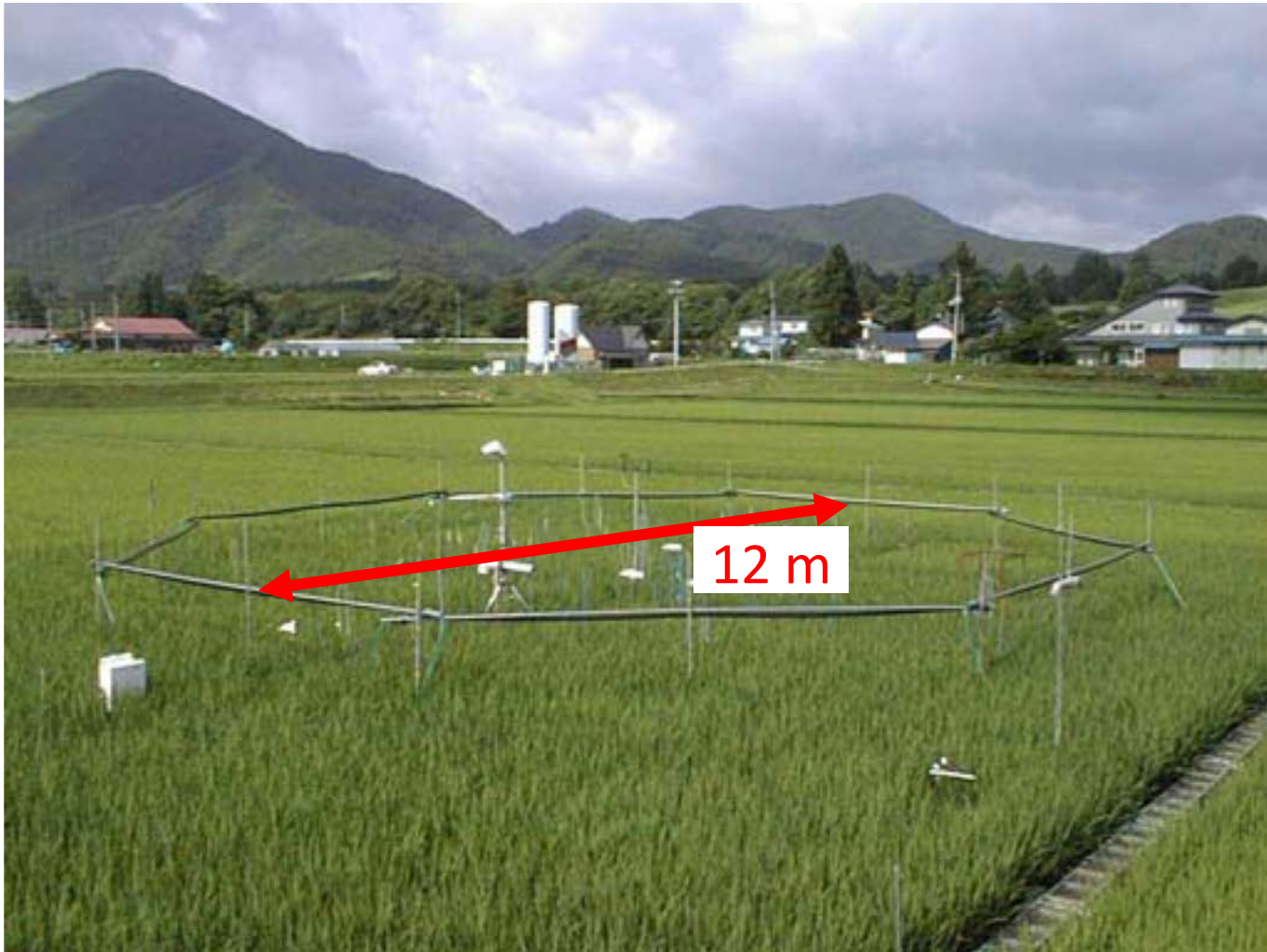


オーストラリアコムギFACE



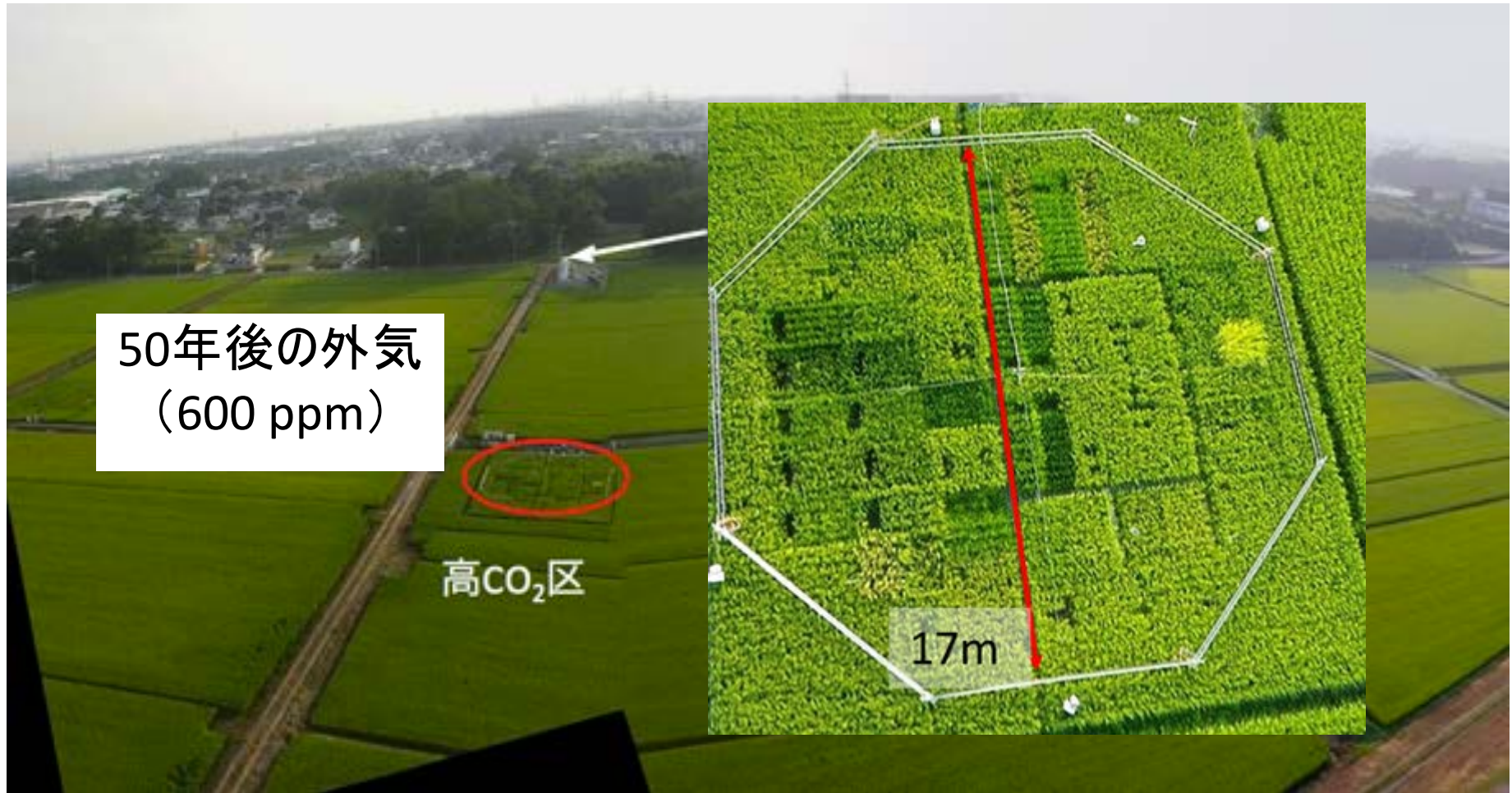
ニュージーランド 牧草・羊放牧FACE

雫石FACE (1998-2008年)



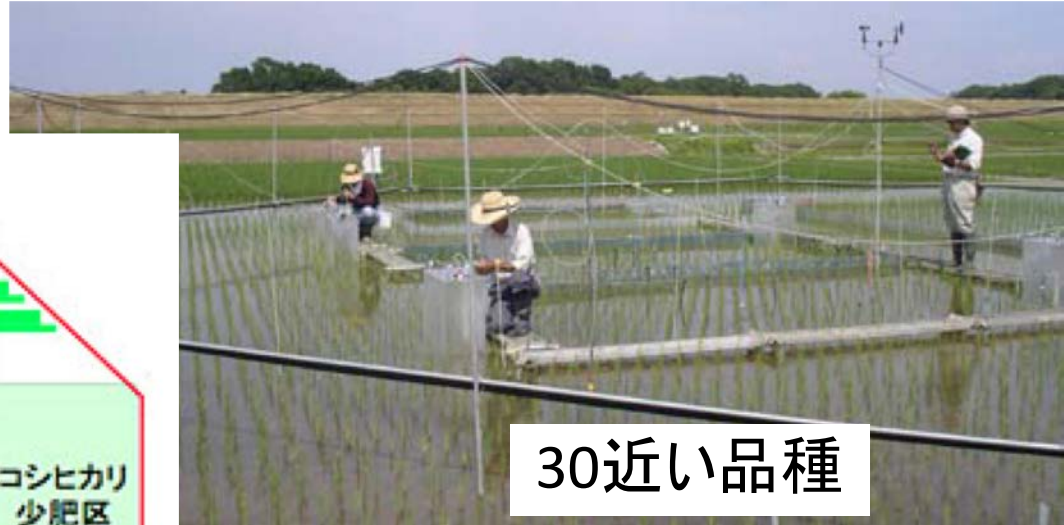
<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/outline/face/outline/s2.html>

つくばみらいFACE (2010-2019年)



<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/outline/face/outline/s2.html>

多様なイネを田植え



コメの収量へのCO₂施肥効果

CO₂濃度を400から600ppmにしたときの
玄米の増収率
(つくばみらいFACE, 2010年)

品種	増収率(%)
アキヒカリ	2.7
あきたこまち	4.1
秋田63号	19.8
愛国	26.5
コシヒカリ	16.3
タカナリ	21.2
農林8号	36.0

Hasegawa et al. (2013)

- すべての品種の収量が増大。ただし、その割合は品種により3～36%の割合で変化

様々な作物の収量も増大

CO₂濃度を400から600ppmにしたときの世界のFACE実験の結果

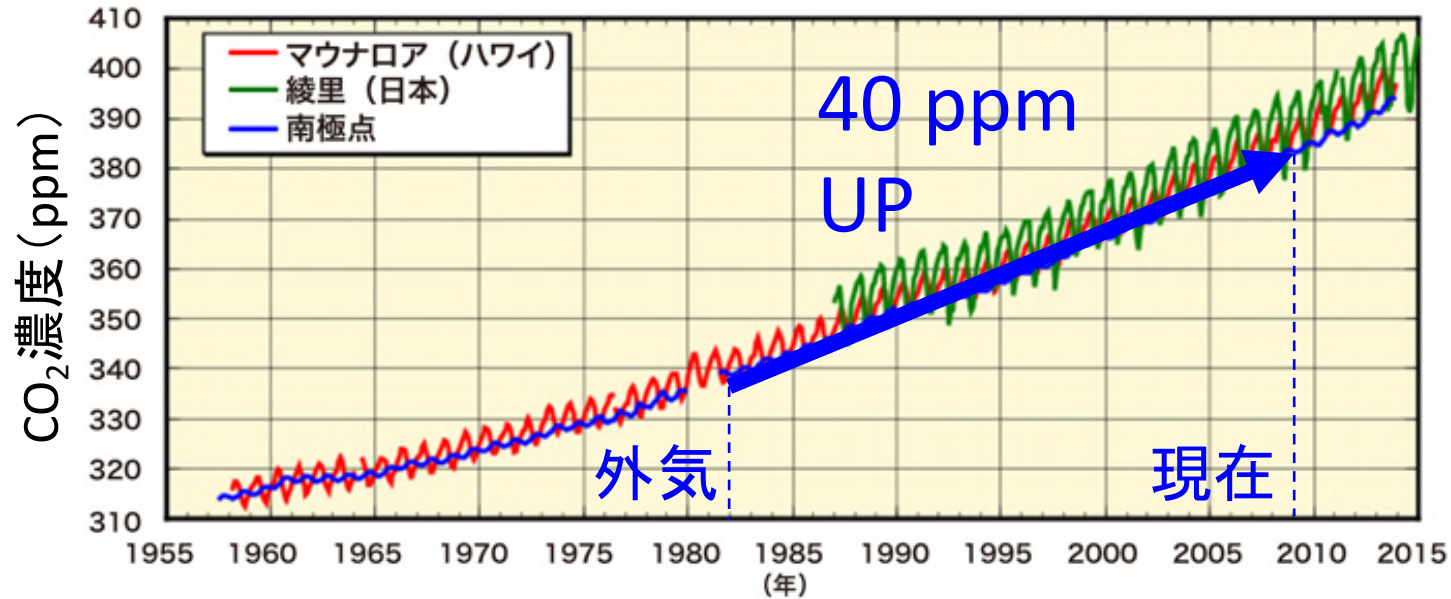
作物	増加率(%)	場所
わた	22-51	米国
小麦	15-17	米国
ソルガム	0.9	米国
大豆	15-16	米国
コシヒカリ	15	日本(雫石)
じゃがいも (重量, 個数)	35, 50	イタリア
大麦	8	ドイツ
牧草	12	ドイツ
テンサイ	8	ドイツ
冬小麦	14	ドイツ
牧草	7-32	スイス

Nösberger et al.
(2006)

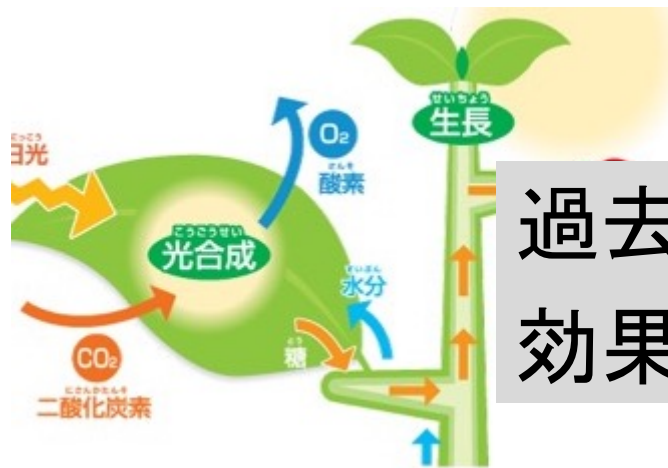
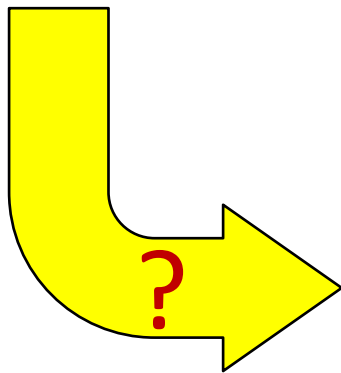
* 養分施肥(窒素)は十分に与えた場合の実験結果

CO₂施肥効果は
世界中で起こっている！

地球上の陸地へのCO₂施肥効果

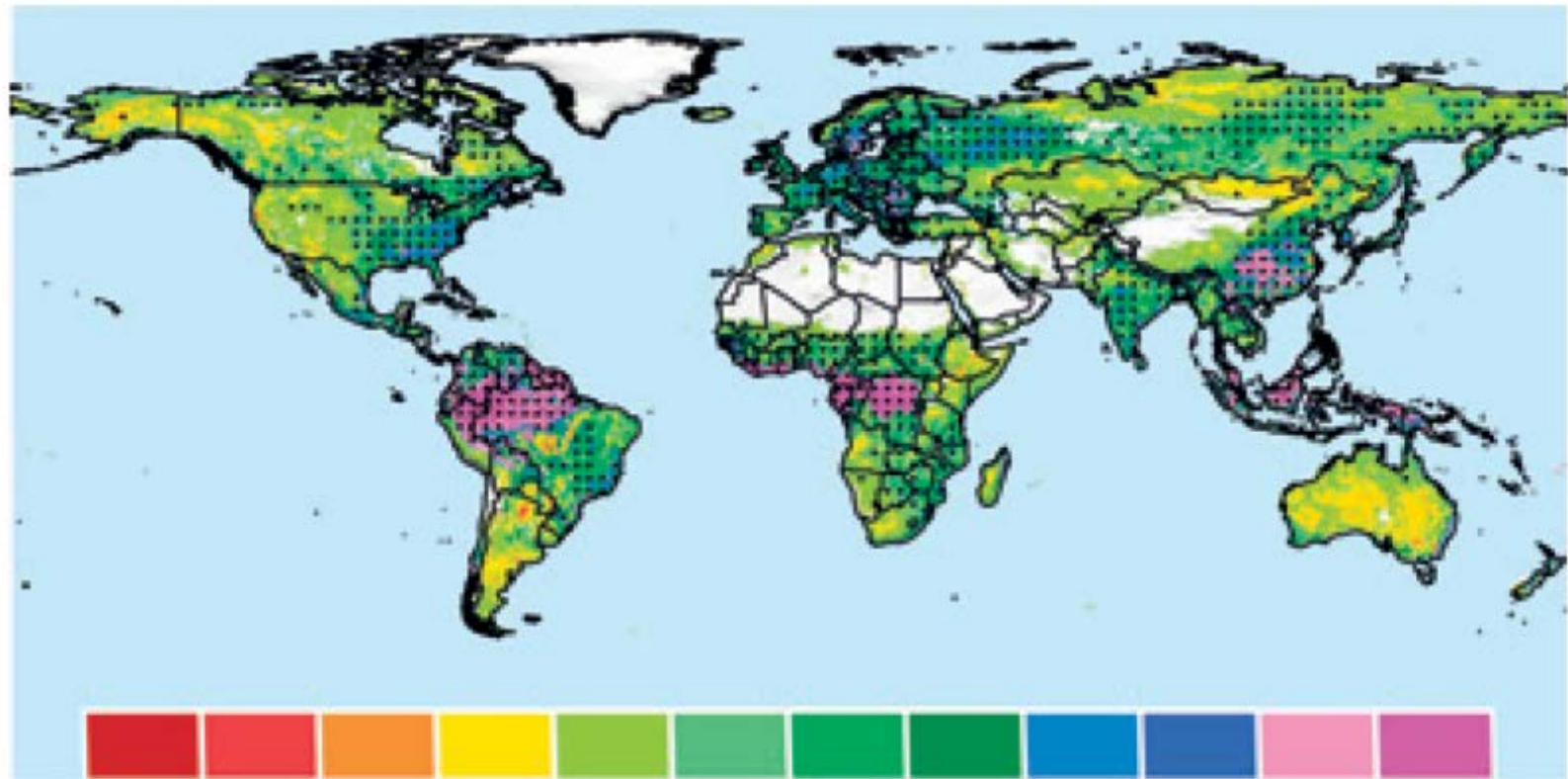


気候変動監視レポート2014(全国地球温暖化防止活動推進センターHP)



過去のCO₂施肥
効果は？

世界中の陸上植生に恩恵あり



<math><-15</math> -10 -5 0 3 6 9 12 15 18 >25

衛星観測による過去27年間の葉面積の増加率 ($10^{-2} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)

Zhu et al. (2016)

- 1982から2009年の間に各地で葉面積が増大
- その70%が CO_2 施肥効果(数値シミュレーション)

農作物の収量も上昇した可能性あり

1980～2008年の気温・降水量の変動とCO₂濃度の上昇が及ぼす
地球上の農作物の収量への影響(統計モデルによる推計)

Crop	production, 1998–2002 average (millions of metric tons)	Global yield impact of temperature trends (%)	Global yield impact of precipitation trends (%)	Subtotal	Global yield impact of CO ₂ trends (%)	Total
Maize	607	-3.1 (-4.9, -1.4)	-0.7 (-1.2, 0.2)	-3.8 (-5.8, -1.9)	0.0	-3.8
Rice	591	0.1 (-0.9, 1.2)	-0.2 (-1.0, 0.5)	-0.1 (-1.6, 1.4)	3.0	2.9
Wheat	586	-4.9 (-7.2, -2.8)	-0.6 (-1.3, 0.1)	-5.5 (-8.0, -3.3)	3.0	-2.5
Soybean	168	-0.8 (-3.8, 1.9)	-0.9 (-1.5, -0.2)	-1.7 (-4.9, 1.2)	3.0	1.3

Lobell et al. (2011)

- CO₂施肥効果は、気温増加や降水量変動による
コメ・大豆へのマイナス効果を打ち消した？

発表の流れ

- 地球環境問題と学際研究
- 温室におけるCO₂の利用(CCU)
- 農場におけるCCU
- 将来のCCUと適応策

温室におけるCCU： 普及の課題

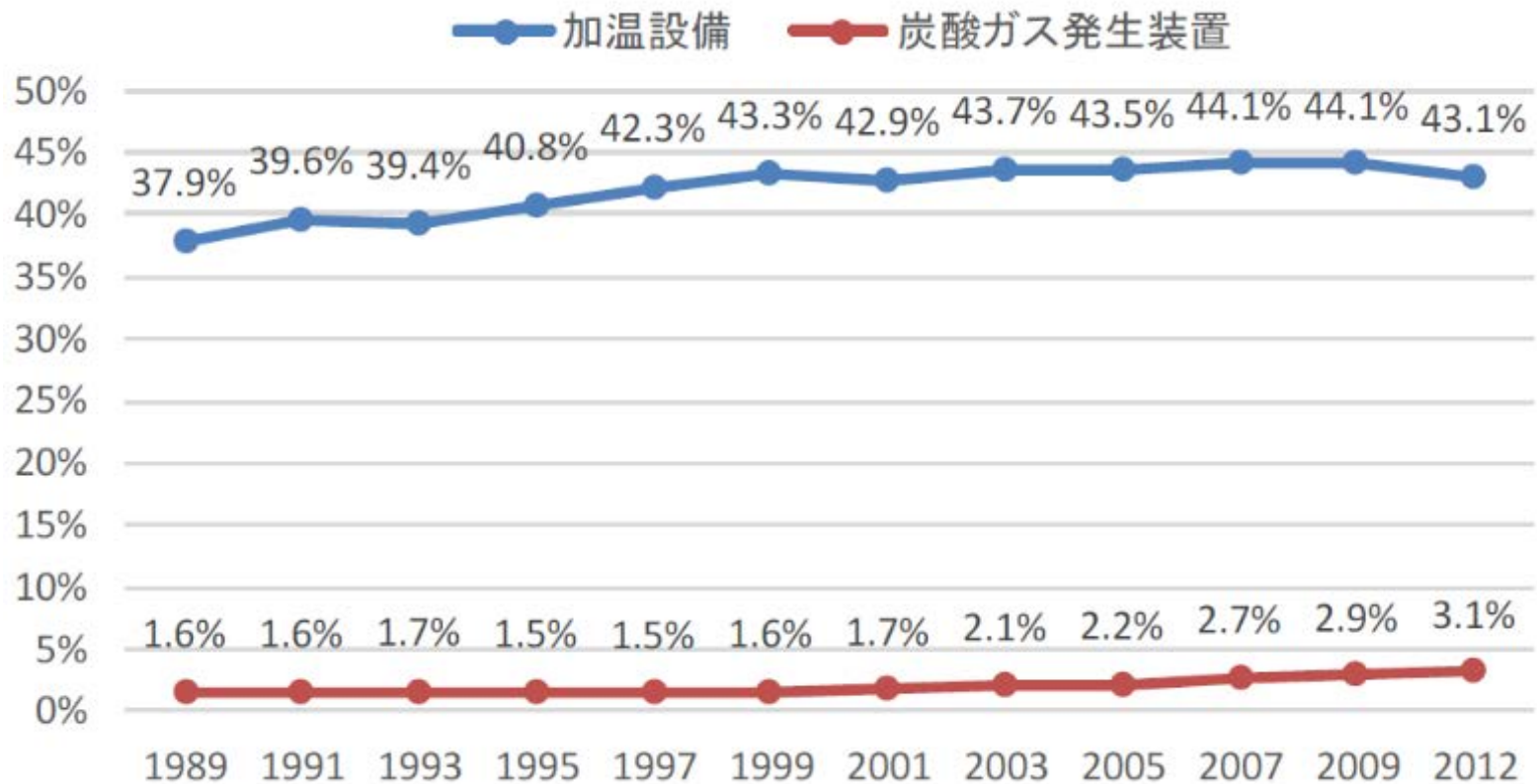
行政による農業CCUへの支援状況

要望・課題	支援策	予算
高度な環境制御技術や地域エネルギーを活用した大規模施設園芸に取り組みたい	農林水産省 「次世代施設園芸地域展開促進事業」	平成29年度予算 1,200百万円 (補助率: 定額、1/2以内)
温度、湿度、炭酸ガス濃度等を制御し、周年栽培ができる丈夫なハウスや環境制御装置を導入したい	農林水産省 「強い農業づくり交付金」	平成29年度予算 1,500百万円 (補助率: 1/2以内等)
	農林水産省 「産地パワーアップ事業」	平成28年度補正予算 57,000百万円 (補助率: 1/2以内等)
燃油価格が高騰し経営が苦しい	農林水産省 「燃油価格高騰緊急対策」	平成26年度期末残高 30,218百万円 (補助率: 1/2以内等)
施設園芸分野の低炭素化	環境省 「ヒートポンプを活用した低炭素型農業推進事業」	平成29年度予算 総補助金額: 200百万円 (補助率: 1/3)

日本LPガス協会(2017)施設園芸におけるLPガス需要の実態把握と拡大に向けた調査

普及率は、たったの3%

全国の温室面積に対する
設置面積の割合(%)

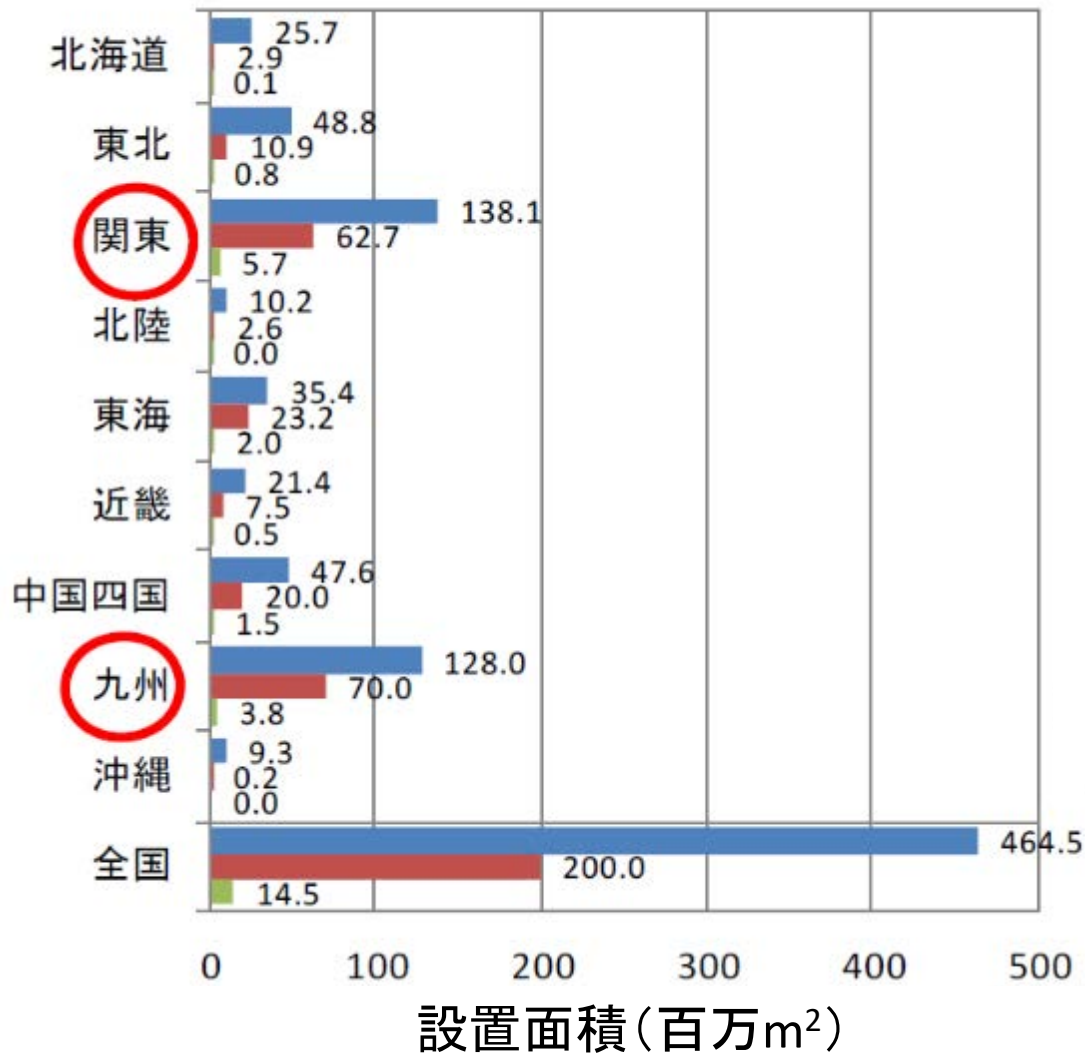


農林水産省(2017)園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する実態

- 加温装置に比べて、CO₂発生装置の普及は十分とはいえない

地域も限定的

■ 全体 ■ 加温設備のあるもの ■ 炭酸ガス発生装置のあるもの

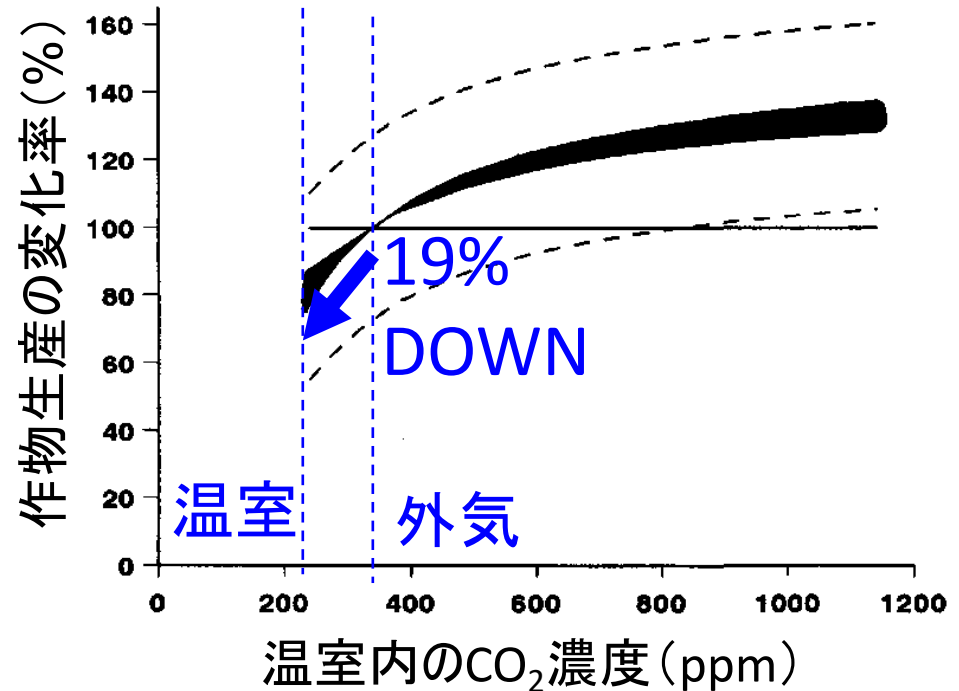


農林水産省(2017)園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する実態

温室内のCO₂が欠乏すると収量は減る



温室のCO₂
濃度は減少



Nederhoff (1994)

- CO₂濃度を十分に高めることが大切

温室CCUの推進に向けた提言

- 温室CCUによって、**収量増大だけでなく、健康・高品質・高付加価値化が見込める**
- 農業におけるCCUの普及率は、全国の施設園芸の3%。のびしろはまだあり
- 現在の全国4.6万haに対して年間500トン/haのCO₂を施肥できると仮定すれば、年間2,300万トンを有効に利用できる（大崎クールジェンの試算）
- 温室内でCO₂が欠乏しないように濃度を高めることが重要
- 費用対効果を含めた実施可能性を**産学連携で検討**

オランダの産学連携「グリーンポート」

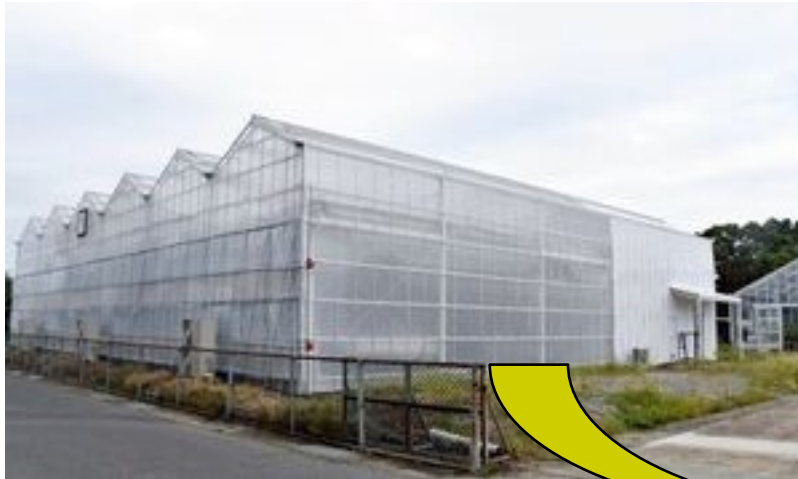
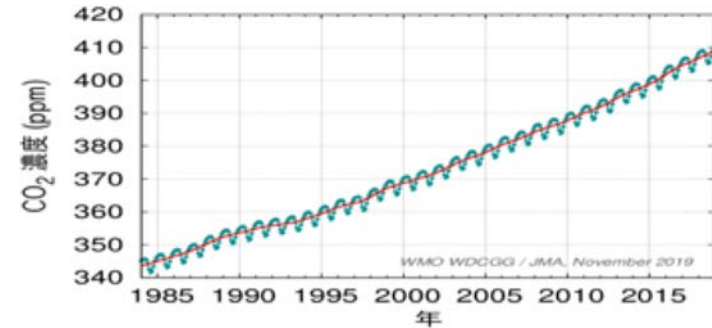


https://agri.mynavi.jp/2018_07_26_34019/

- 農業に関する産業を集めた地域を定めて連携

将来の適応策1: 農場でのCCU

CCUの概念の拡張：温室→農場



温室(施設園芸)

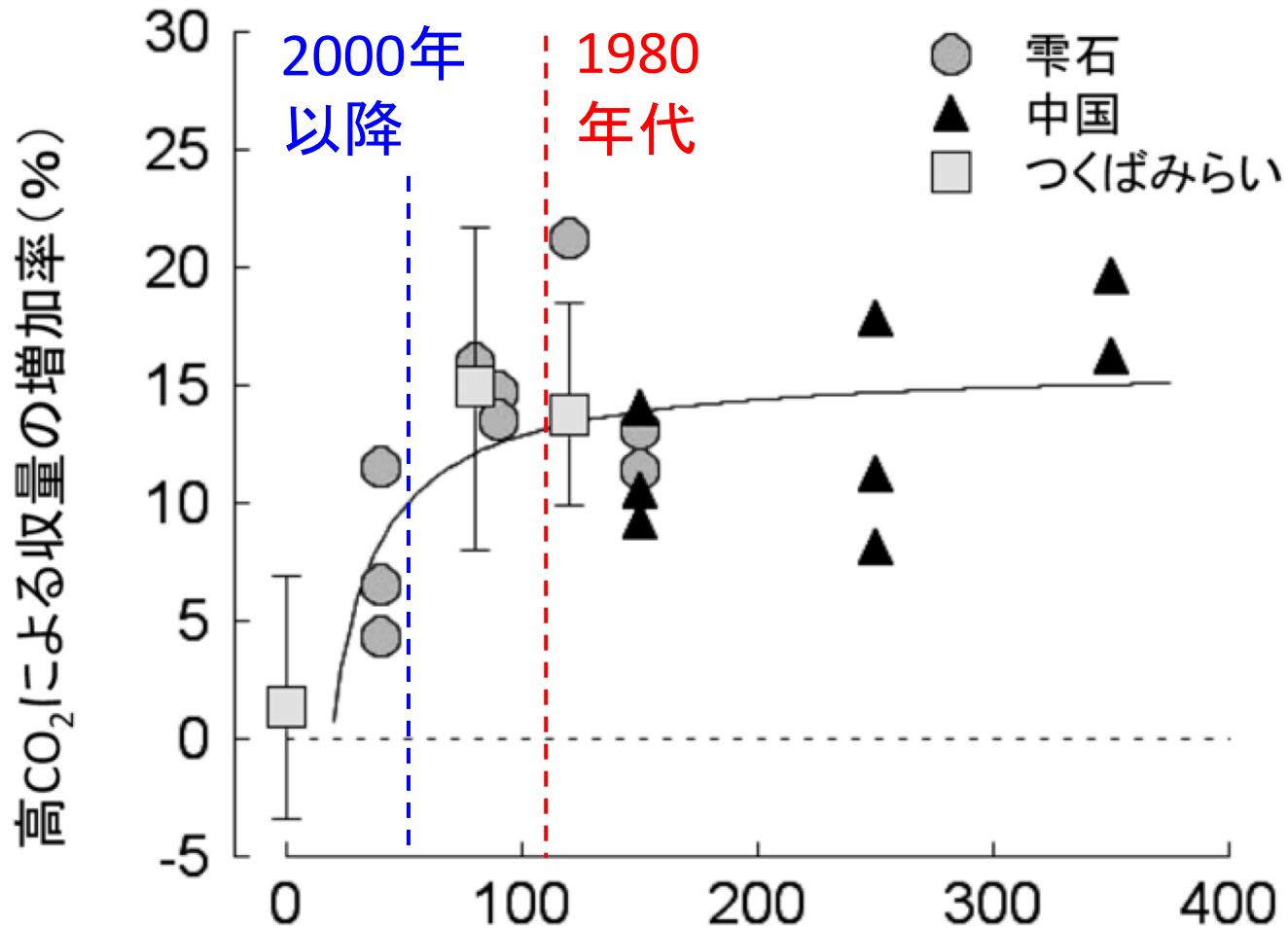


農場(自然環境)

- これまで「なりゆき」で行ってきた農場でのCO₂利用(CCU)を意識的に行っていく

CO₂の利用には、養分施肥(窒素)が必要

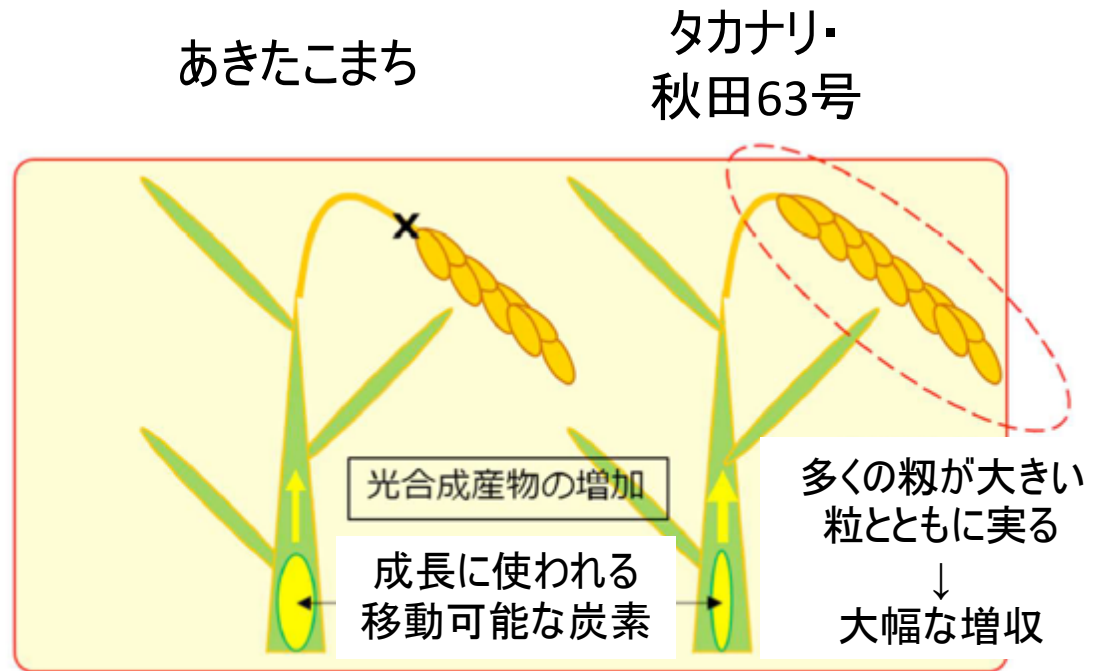
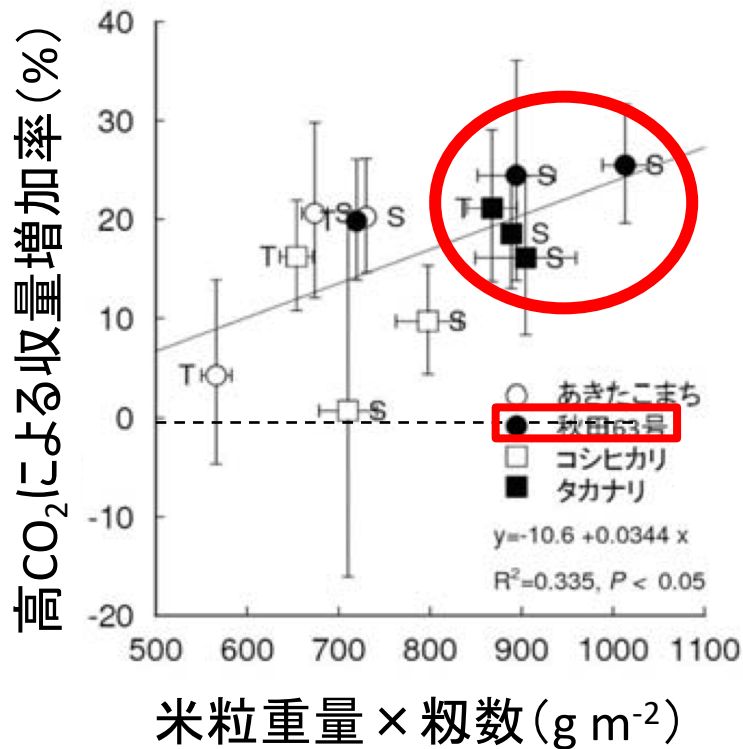
CO₂濃度を400から600ppmにしたときの玄米の増収率



長谷川ら(2019);
Hasegawa et al. (2017)

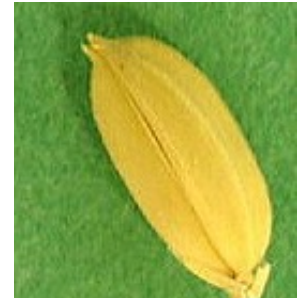
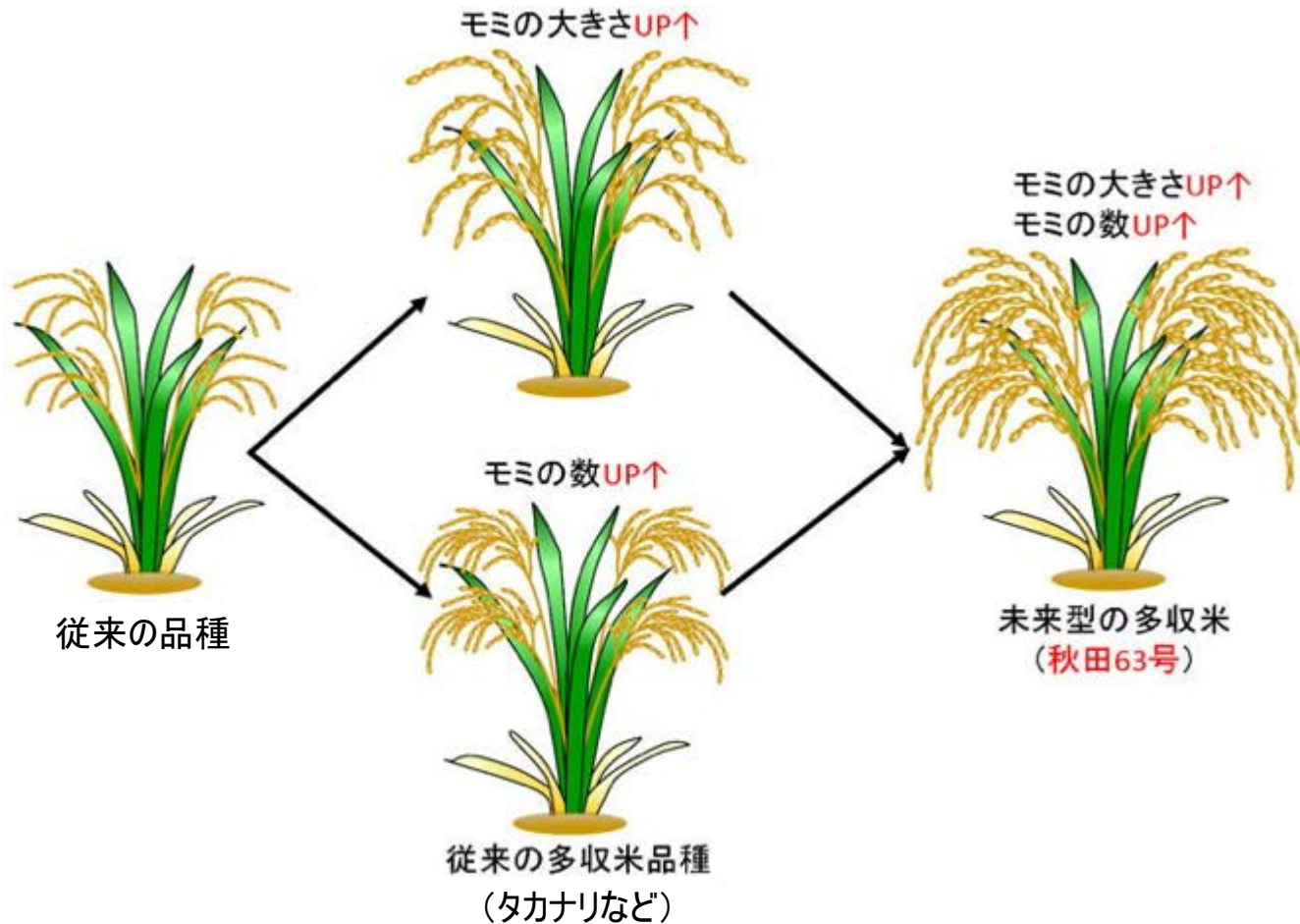
将来の適応策2: 品種改良

品種による収量増加率の違い



- 籾数が多く、米粒が大きい品種は、CO₂ 施肥効果も高い

品種改良による効果



秋田63号



タカナリ



あきたこまち

<https://www.agri.tohoku.ac.jp/syokuei/research3.html>

将来の適応策3: 遺伝子組み換え

遺伝子組み替え



農研機構(2018)

https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/karc/082092.html

- 遺伝子の人工交配により、CO₂施肥効果や品質の高いコシヒカリの開発に成功

CCUによる農場での適応策の提言

- **CCUは温室だけでなく農場に適用することも可能。**
収量増大だけでなく、健康・高品質・高付加価値化が見込める
- CO₂施肥効果を積極的に利用した適応策として、窒素施肥増大、品種改良、遺伝子工学が有望
- 様々な作物に対して、温室やFACEを用いたさらなる研究が必要

適応策に関するさらなる情報

日本土壤肥料学雑誌 —土壤・肥料・植物栄養—

第89巻 第6号 (2018年12月)

進歩総説：気候変動に伴い顕在化してきた作物栽培管理における問題と適応技術

作物における気候変動の影響の顕在化と適応技術	杉浦俊彦	461
作物栽培において予測される問題		
1. イネにおける光合成・個体生育の高CO ₂ 環境への応答およびその改良の試み	鈴木雄二・牧野 周	468
2. 干ばつ・洪水環境下での作物の生産性	小山博之・榎本拓央・山本義治	475
3. 地球温暖化が北海道の主要作物に及ぼす影響とその対応方向—2030年代の予測—	中辻敏朗	483
水稲作における気候変動への土壌肥料的適応技術		
1. 水稲のCO ₂ 増加に対する生育反応からみた窒素施肥の必要性	長谷川利拡・酒井英光・常田岳志・白井靖浩・林 健太郎	491
2. 近年の高温によるコメの外観品質の低下と栽培管理	近藤始彦・岩澤紀生	497
3. コメの外観品質低下対策としての窒素施肥	林 元樹	503
4. 近年のコメの外観品質の低下と土壌中の可溶性養分の関係	松本真悟・春日純子	508
5. 高温気象下での高品質米安定生産に果たすケイ酸と根圏環境の役割	金田吉弘	515
6. 気候変動下における水稲の安定生産と有機物施用	西田瑞彦	522
水稲以外の作物における気候変動への土壌肥料的適応技術		
1. 適応技術研究の現状：果樹	井上博道	529
2. 適応技術研究の現状：露地野菜	徳田進一	533
3. 適応技術研究の現状：畑作物	唐澤敏彦・新良力也	537

ご清聴ありがとうございました

解説・政策提言に関する記事



1. 「エアロゾル」による地球冷却効果—地球温暖化の知られざる不確実性—
2. 水田の減少は、日本の気温を上昇させている？
3. 花粉には強力な「公害対策」が必要だ