

トピックセミナー②『SDGsへの取り組みを活用した持続可能社会への移行加速』

持続可能な食料・農業（作物・水畜産物） 基盤技術

2019年8月29日

JST研究開発戦略センター

ライフサイエンス・臨床医学ユニット 桑原 明日香



国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

持続可能な食料生産：現状と課題を克服するための基盤技術

1. 農業

主要国の農業・食糧関連研究開発戦略の調査から
限界に近づく地球環境
海外の取り組み事例紹介
真に地球にやさしい農業を実現するには

2. 水産・畜産

水畜産業の動向と現在の課題
持続可能な水地区産業への技術開発例の紹介
今後の課題

俯瞰報告書から：主要国の農業・食糧関連研究開発戦略の調査

2018年6月発表、ナショナルアカデミーによるコンセンサスレポート
 EU Horizon2020の目標
 英国の研究開発戦略
 ワーゲニンゲン大学研究開発戦略 etc...

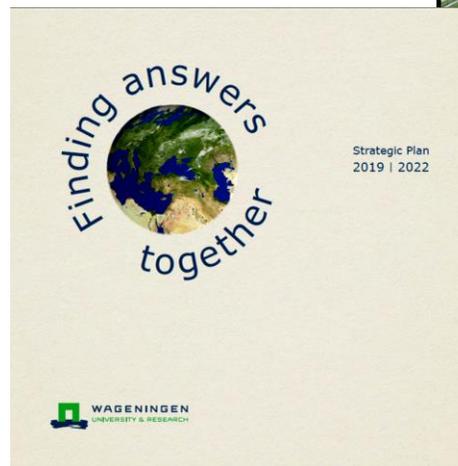


世界の潮流は

- 環境負荷低減
- 持続可能な農業
- 気候変動対策（適応&CO₂削減）
- 農村の多様性&環境・所得改善

研究開発トピック：

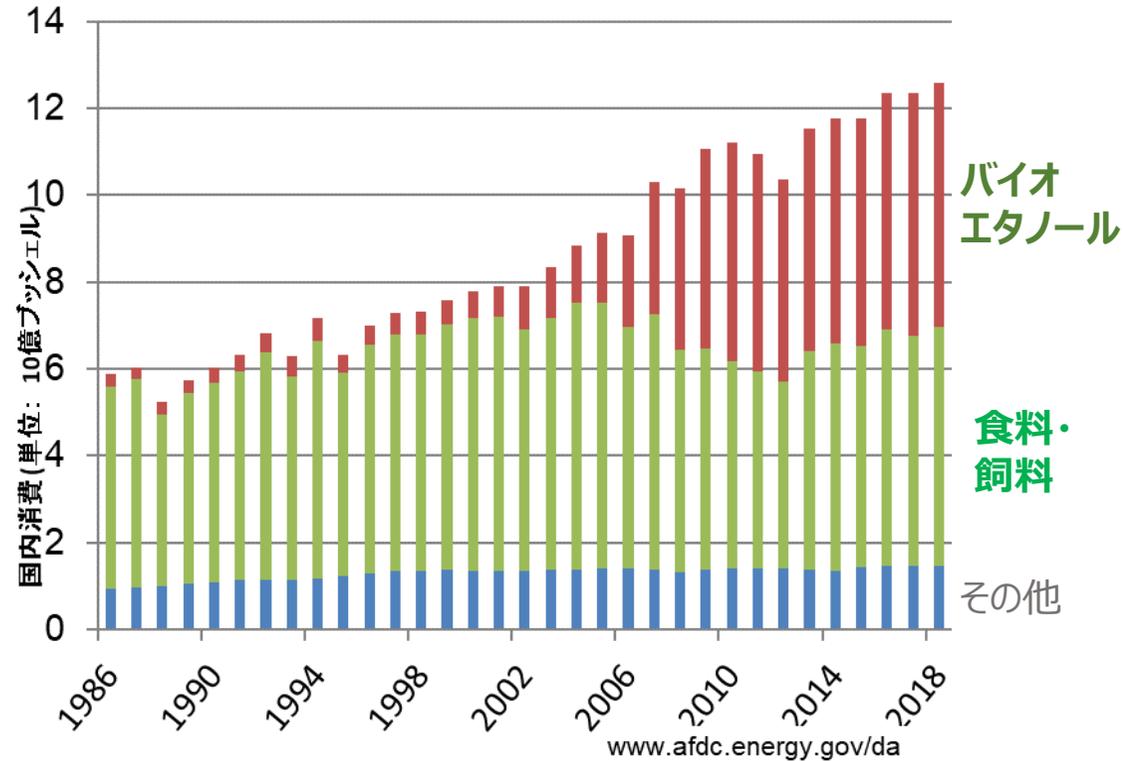
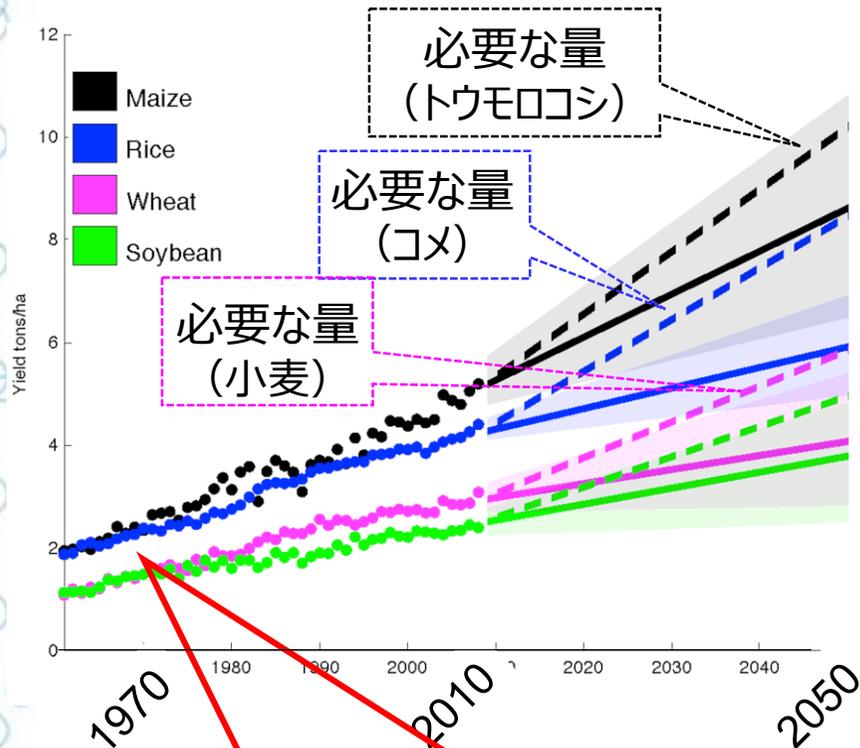
- ・有機農業
- ・土壌（農地）管理
- ・植物-土壌微生物相互作用
- ・農業気象土壌データ（スマート農業）
- ・植物の合成生物学



【社会経済的背景】農産物用途の多様化による需給の逼迫

- 増加し続ける人口を養う食糧は不足の見込み
 - バイオ燃料、飼料など農産物の用途の多様化
- ➡ 耕地面積には限界があるので
単位面積当たりの収量増加は必須

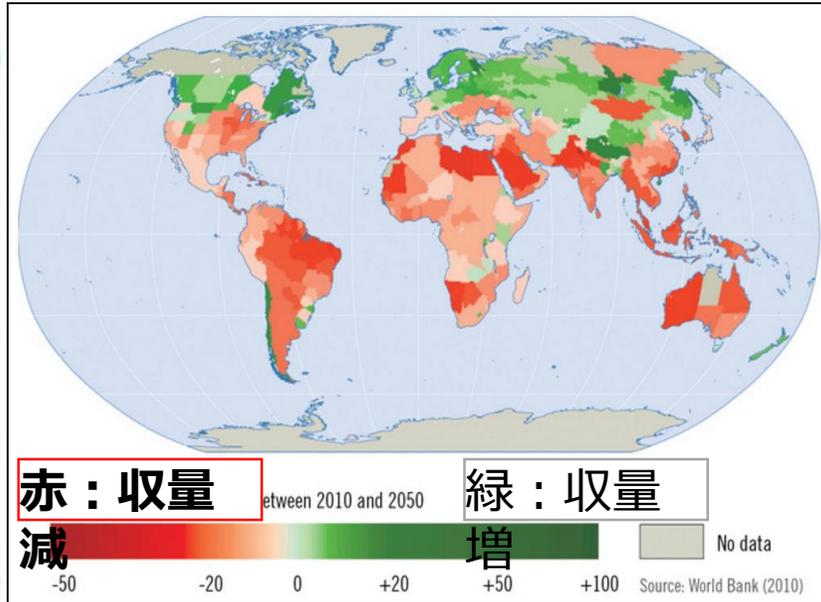
増加する世界人口を賄う食糧が足りない 米国トウモロコシの生産量1/3はエタノール用



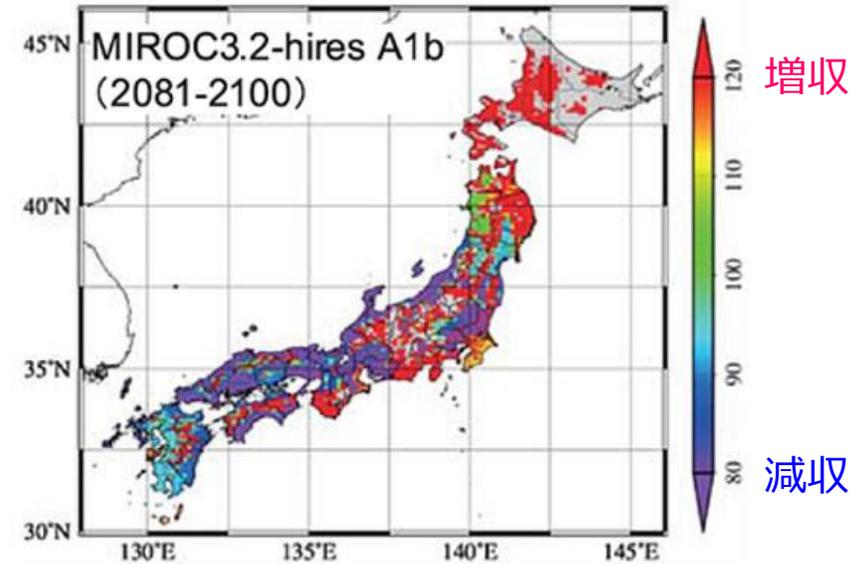
緑の革命：矮性化で受光態勢の改善、
大量の化学肥料の投入、化学肥料で良く育つ品種の開発

【社会経済的背景】気候変動による収量低下

気候変動による収穫量減少予想(2050)



気候変動による収穫量減少予想(2080~2100)



Ishigooka et al., J Agric Meteorol 73 (2017): 156.

気候変動



高温・高CO₂
劇的な気象の変化



作物（植物）の高CO₂応答は調べられてきたが、
高温+高CO₂応答は、**ほぼ未知の領域**
より複雑で劇的な異常気象は完全に未知

【社会経済的背景】農業の持続性

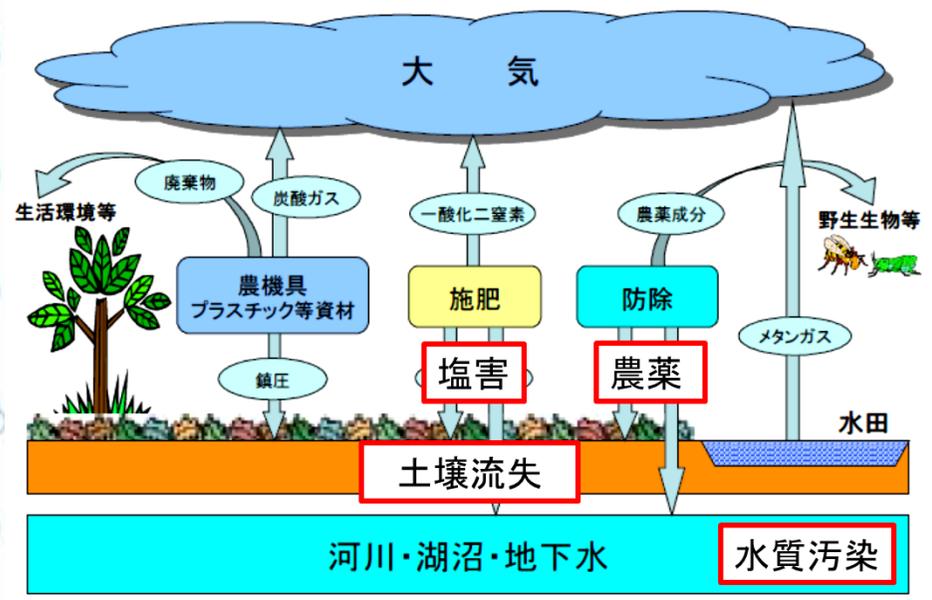
- 環境汚染、地球温暖化の要因となりうる
- 大量の非再生資源、エネルギーを要する

持続性懸念

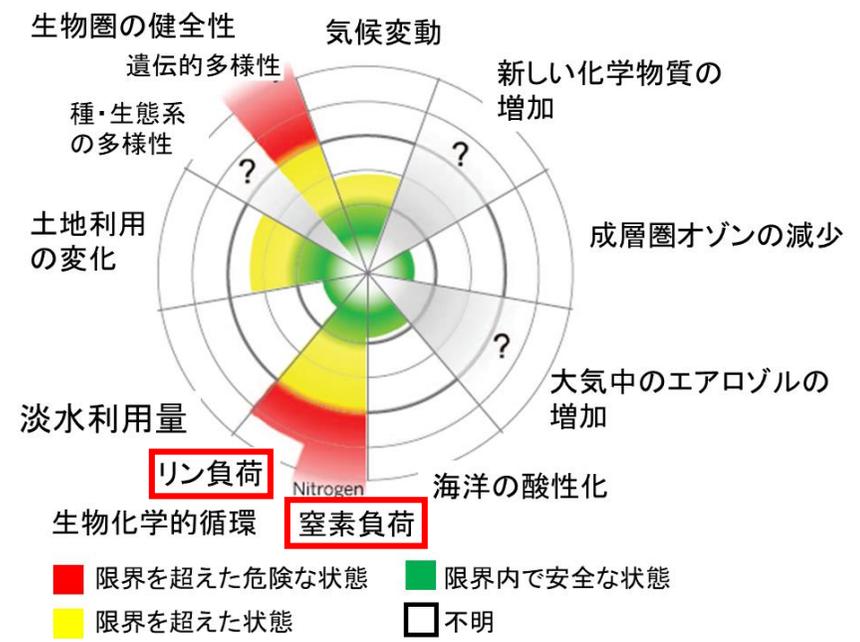
13 気候変動に
具体的な対策を

15 陸の豊かさも
守ろう

地球環境への負荷の限界



農林水産省資料に加筆



Steffen et al., Science 347(2015): 736より改

- 肥料分 (N・P・K) のうち、リン (P) は全面的に輸入に依存
- しかも良質で安価なリン鉱石は50~100年で枯渇するとの予想
- 窒素 (N)は石油に依存した化学合成
- 水田から植物に由来する強力な温室効果ガス、メタンガスが発生する

CO₂の25倍の
温室効果

持続的な食料供給、環境負荷低減農業のための取り組み

実用化研究

今すぐ手を打つべきもの

多収品種の開発

スマート農業

必要最小限の施肥

土壌・気候区にあった栽培管理

センシング

ロボティクス

基礎～応用研究

50年後を見越した準備

バイオテクノロジーを活用した単位面積

あたりの収量増加

気候変動下でも環境負荷低減を実現する

- 作物の開発
- 調和のとれた圃場の物質循環の実現

2019年1月、光合成研究における歴史的なブレイクスルー

RESEARCH ARTICLE

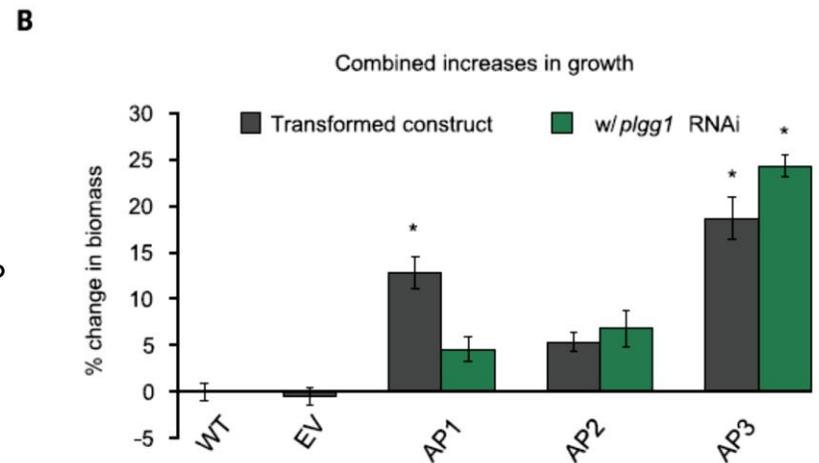
Science

PLANT SCIENCE

Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field

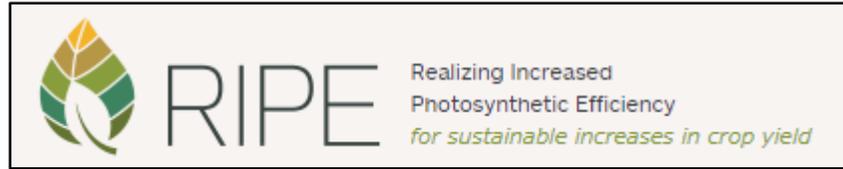
Paul F. South^{1,2}, Amanda P. Cavanagh², Helen W. Liu^{3*}, Donald R. Ort^{1,2,3,4,†}

- 植物は光呼吸により、吸収したCO₂の30%をロスする。
- 合成生物学的な手法を用いて、光呼吸を抑え、25%近いバイオマス増大を実現。
- ただし、できた植物は外来遺伝子を含むGMO。
- 光合成効率の増大は植物学者の悲願だったが、ここまで大規模なバイオマス増大につながる研究結果は過去に例がない。



**光合成効率を増強することで単収増加に貢献
(カルタヘナ法非批准国での実装に期待)**

この研究を支援したのはRIPEという国際研究プログラム



イリノイ大学



エセックス大学



ランカスター大学



オーストラリア
国立大学



オーストラリア
科学と産業研究協会



中国科学院-マックス
プランク研究所・
共同研究体



カルフォルニア大学
バークレー校



ルイジアナ
州立大学



米国農務省
農業調査局

5か国+2国際組織、
9研究所での研究を
複数の財源で支援

- 1期: 2012~2016、25 million USD (約27億円)、メリンダ & ビル・ゲイツ財団が単独で支援
- 2期: 2017-2022、45 million USD (約49億円)、メリンダ & ビル・ゲイツ財団、英国国際開発基金、食糧と農業研究基金(米)

農作物用途の多様化により、さらなる増産が必要

しかし

農業が直面する課題：

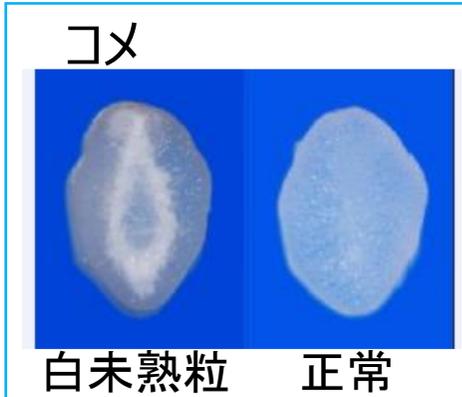
- 気候変動
- 増大する環境負荷

現行品種は高施肥で良く育つように設計されているが、..

**気候変動下（高温・高CO₂）でも環境負荷低減、
増収を目指す新しい農業**

✓ 高温条件は単独で、減収をもたらす

高温による白未熟粒増加
(米の等級が下がり、農家に打撃)



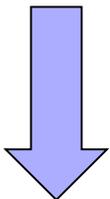
実っているので稲穂が垂れる

イネの高温障害



高温で花粉が飛ばず、実らない

窒素施肥を増やせば白未熟粒は減るが、肥料利用効率が悪くなる



環境負荷増大

対処療法はあるが、メカニズムが分からないので根本的な解決には遠い

農研機構 中川博視先生のスライドより

実際の減収のメカニズムはもっと複雑

収量を決める全ての要素を統合的に考えなければならない

高温による低収量のしくみ

日長も関係する

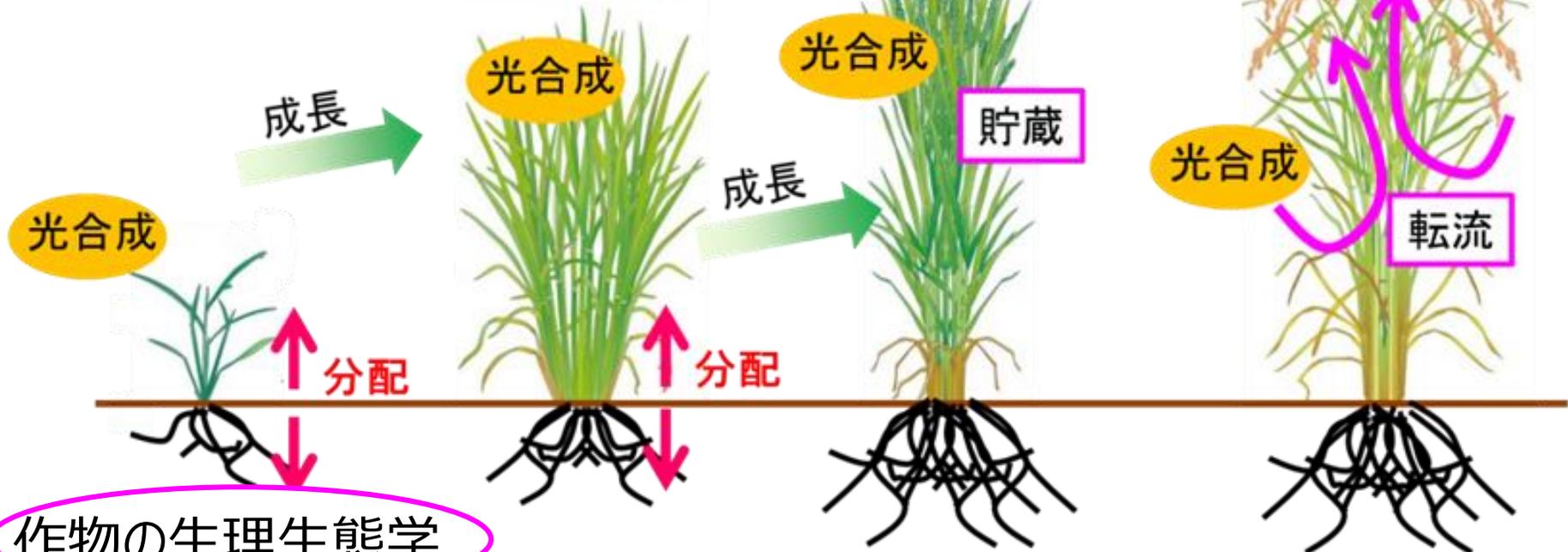
高温になると早く花成する

生長期間が短いと光合成産物の貯留が小さい

田植え期をずらすことで減収を抑制
どれくらいずらせばよい？

花成
成長STOP

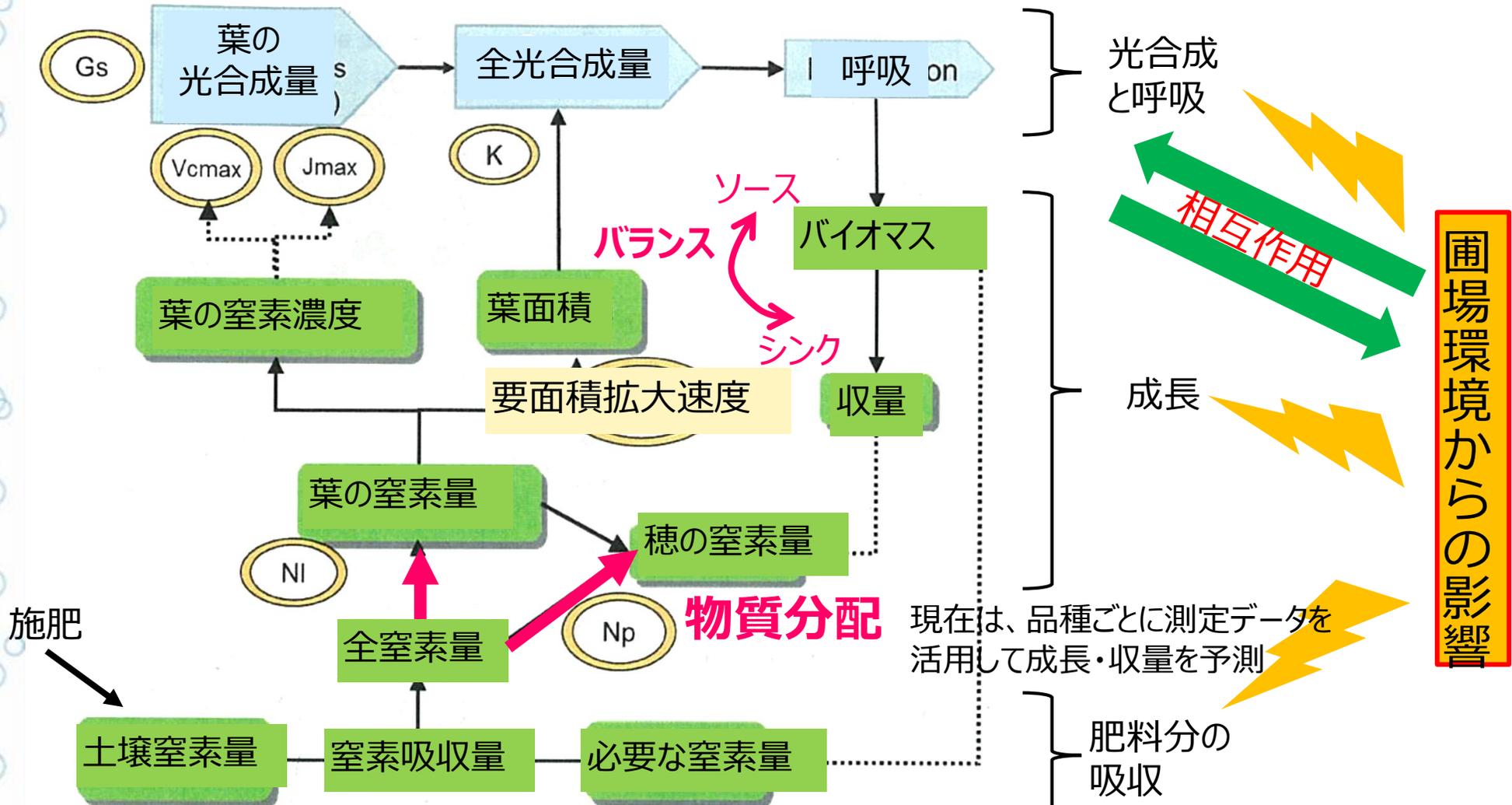
穂に充填



作物の生理生態学

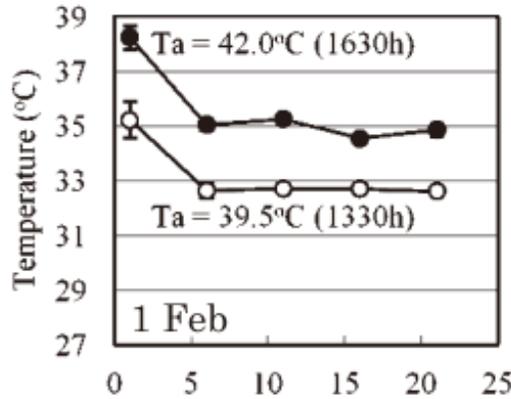
作物モデル

日照、温度条件など、環境要因の入力により、開花や収量を正確に予測できる成長予測モデル



農研機構・長谷川先生の収量モデル(H/H model) から改変

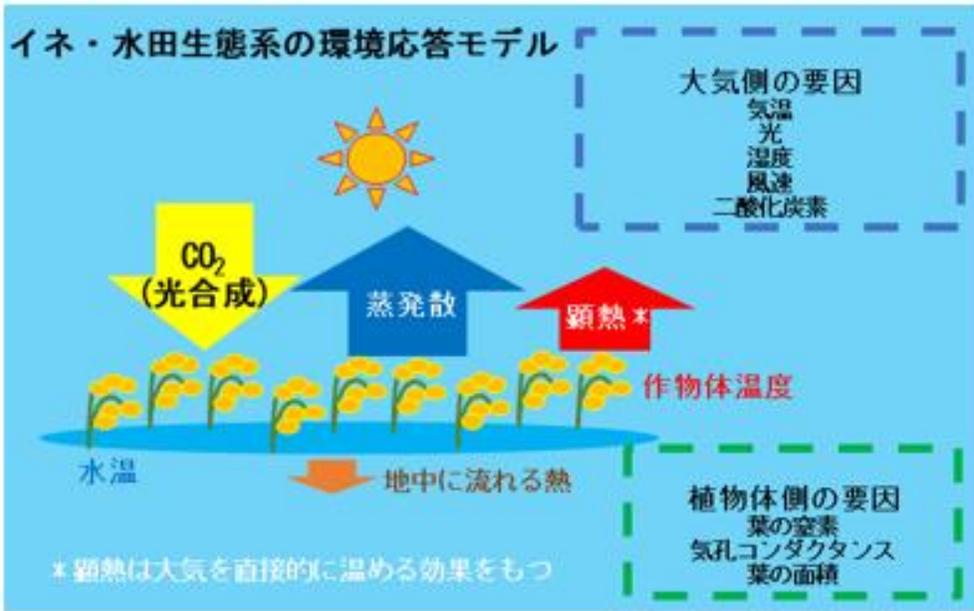
(実は) 気温と作物体の温度はかなり違う



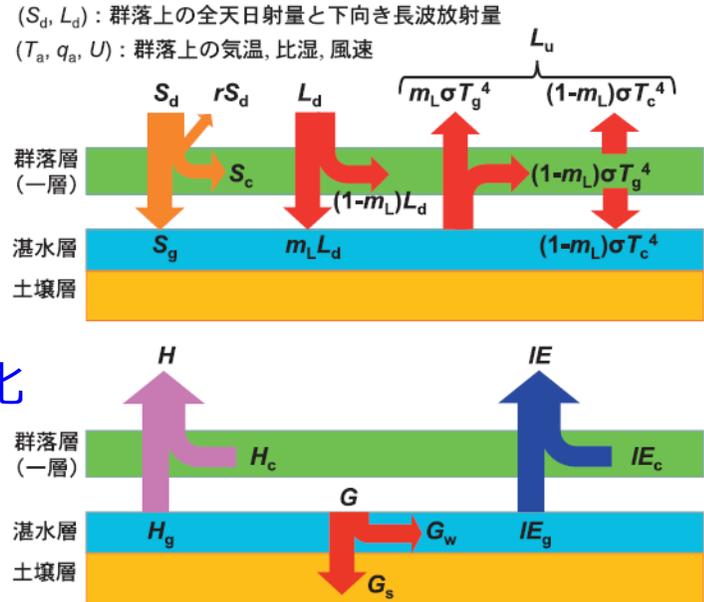
気温42°Cでも稲穂の温度は35~39°C
群落内部の方が穂の温度は低い

作物体温度は蒸散によって下がったり、作物体の熱が地中や水中に逃げたり、作物体に熱がたまることで自身の周囲が温まったりするので、気温とは同じにならない

Matsui et al., 2014 Plant Prod Sci 17:245.



水田群落微気象モデル

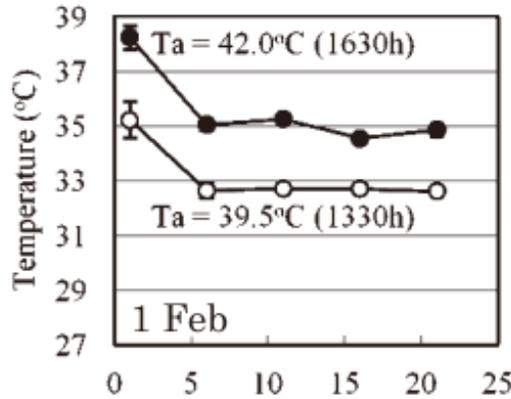


桑形ら (2019) 低温科学 77: 125.

図 1: イネ・水田生態系の環境応答モデル

【科学技術が解決すべき課題】 高温・高CO₂でも単収増 + 環境負荷低減

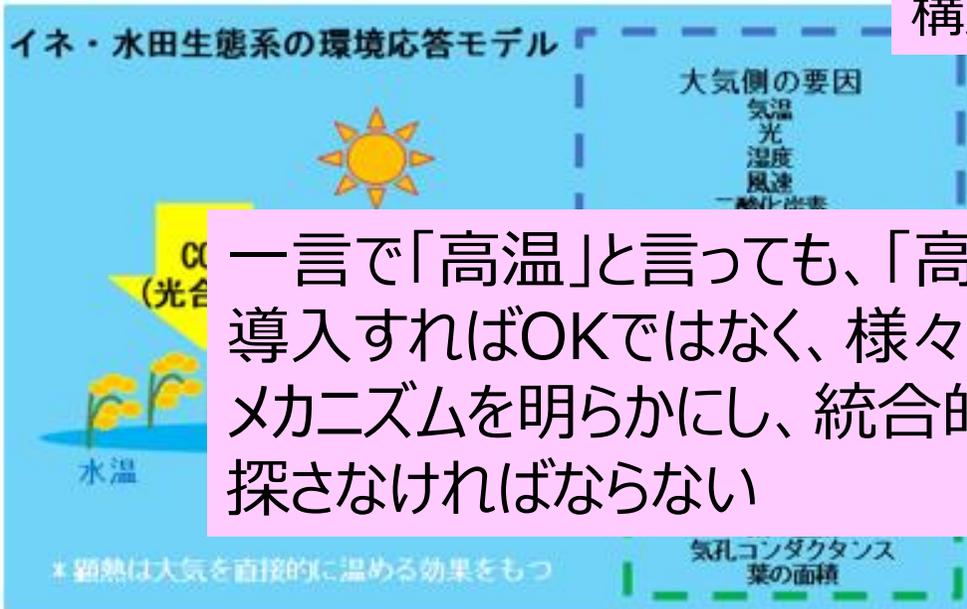
(実は) 気温と作物体の温度はかなり違う



Matsui et al., 2014 Plant Prod Sci 17:24

作物群落と、群落の気象条件
(圃場の微気象) は相互作用する

作物体温度は蒸散によって下がったり、作物体の熱が地中や水中に逃げたり、作物体に熱がたまることで自身の周囲が温まったりするので、気温とは同じにならない
高温に耐える品種、だけでなく、高温を自ら和らげるような品種や栽培管理、農業生態系の構築が必要



一言で「高温」と言っても、「高温耐性遺伝子」を導入すればOKではなく、様々な側面からメカニズムを明らかにし、統合的にバランスの良い解決を探さなければならない

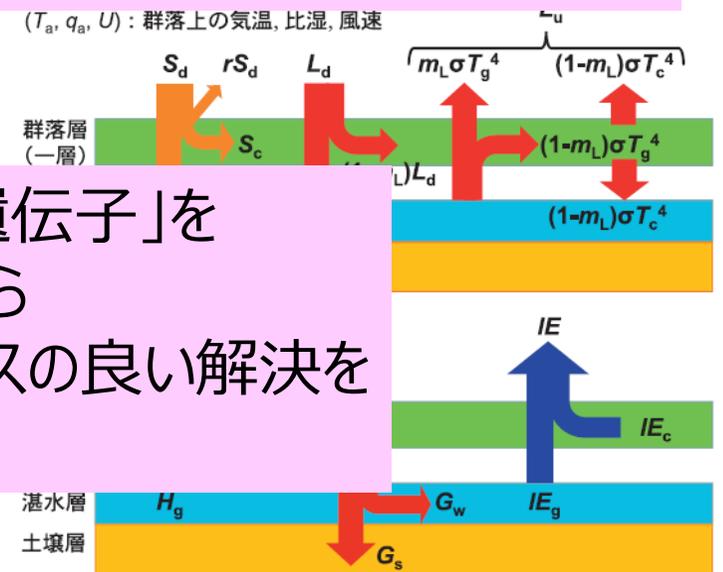


図 1: イネ・水田生態系の環境応答モデル

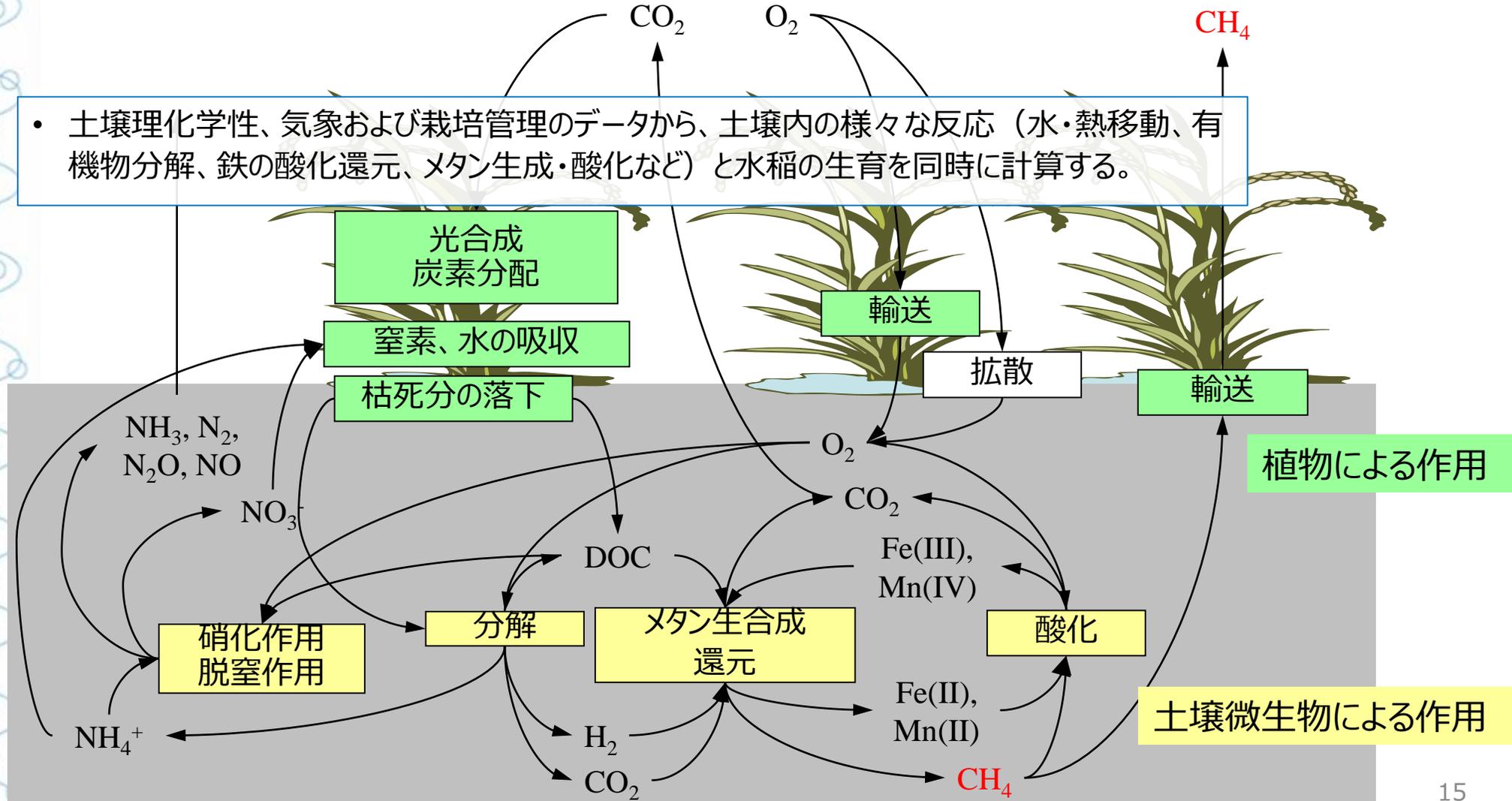
桑形ら (2019) 低温科学 77: 125.

✓ 高温・高CO₂複合条件は、循環の全体に影響を及ぼす

バランスを考える一例：

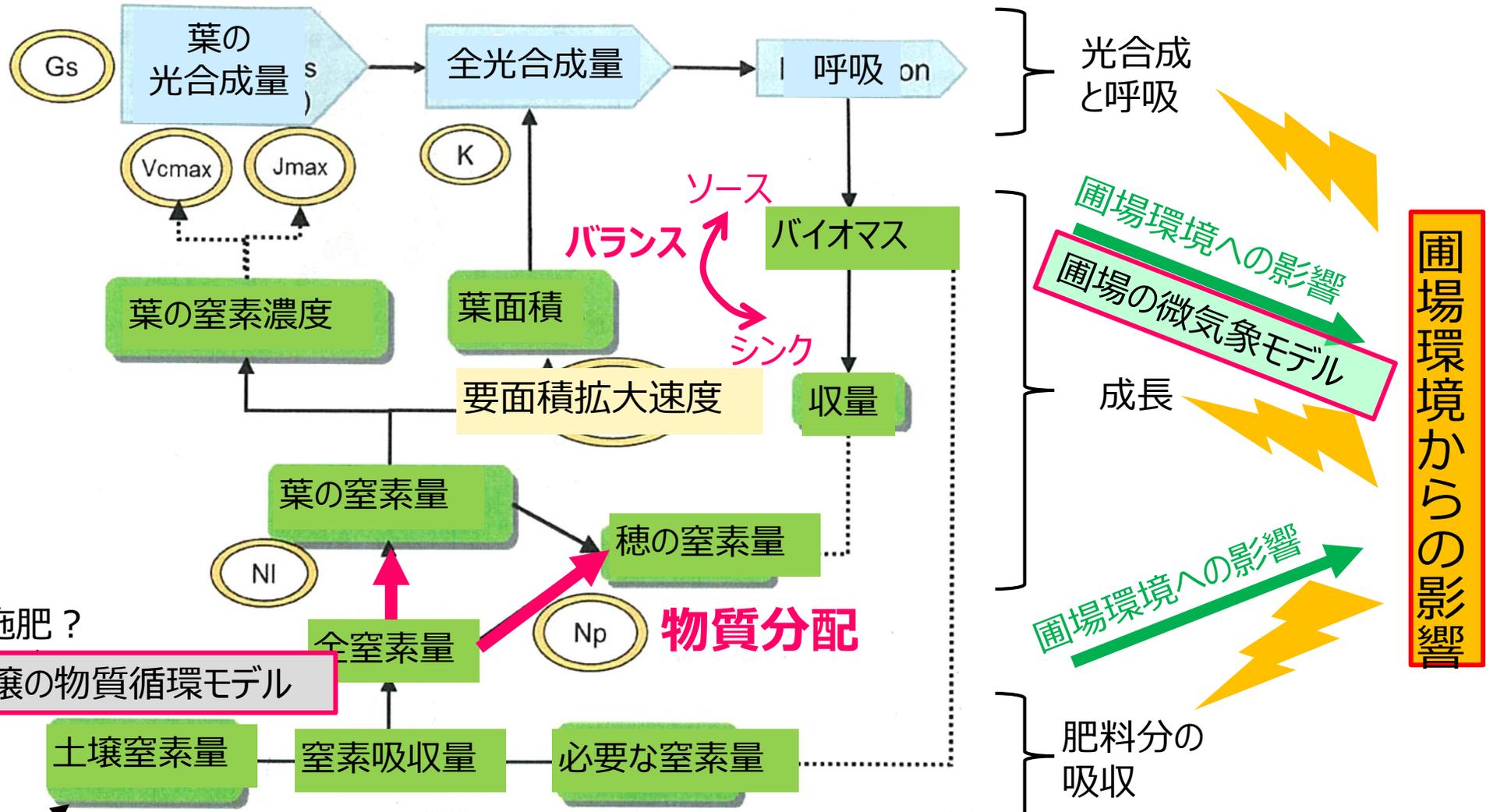
土壌のC/N循環と水稻の成長を計算するDNDC-Riceモデル

- 土壌理化学性、気象および栽培管理のデータから、土壌内の様々な反応（水・熱移動、有機物分解、鉄の酸化還元、メタン生成・酸化など）と水稻の生育を同時に計算する。



【科学技術が解決すべき課題】 高温・高CO₂でも単収増+環境負荷低減

作物モデル



農研機構・長谷川先生の収量モデル(H/H model) から改変

モデルを結合できれば現状をよく知ることができる。ここから環境負荷が低く、高温・高CO₂でも高収量を得られる品種をデザインするには？

水田のN固定？

土壌の物質循環モデル

施肥？

圃場環境からの影響

圃場環境への影響
圃場の微気象モデル

圃場環境への影響

肥料分の吸収

光合成と呼吸

成長

ソース
シンク

バランス

物質分配

高温・高CO₂、低施肥でよく育つ品種の育成の試み
 (有利な形質に関わるゲノム領域をかけあわせで集積)

戦前のイネ



低施肥でも育つ
 背が高いため倒れやすい
 (光合成効率悪い)

現代のイネ
 (緑の革命による)



高施肥で高収量
 背が低いので倒れにくい
 (光合成効率良い)

近未来のイネ
 (モンスターライス2号)



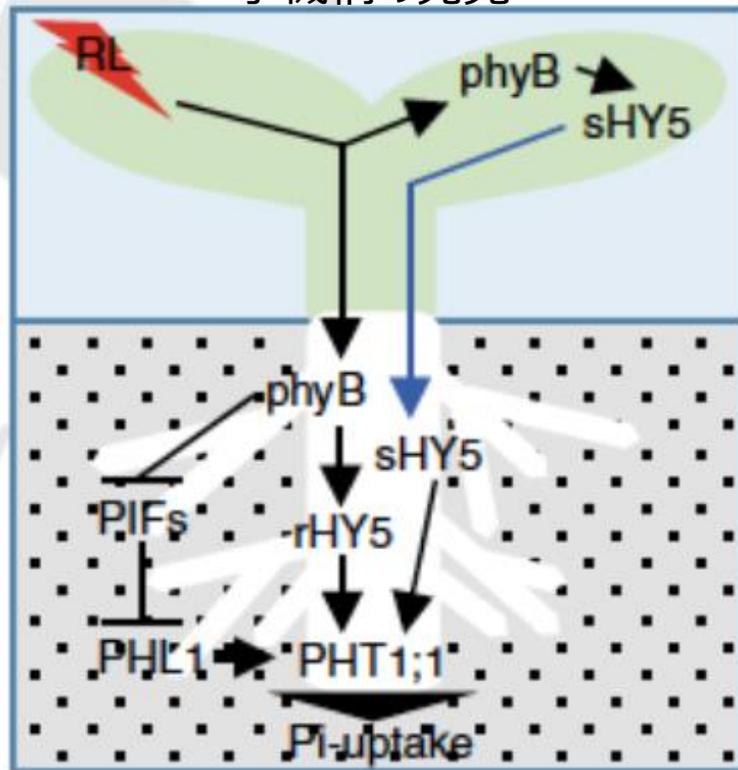
高温・高CO₂耐性
 茎が丈夫なので倒れにくい
 低施肥でも良く育つ

農工大・大川先生のWS資料より

バイオマスはとても大きいですが、まだ収量が少ない！

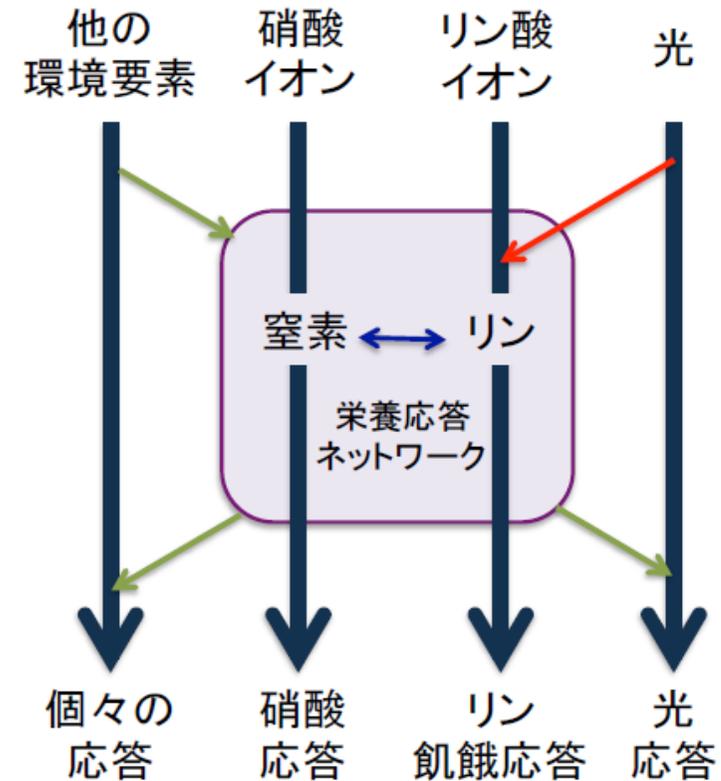
窒素、リン酸などの栄養応答の分子ネットワークが続々と明らかに

光条件に応答してリン吸収を制御する分子機構の発見



Sakuraba et al., (2018) Nature Plants 4:1089.

低施肥でも肥料の利用効率の高い作物デザインへ



東京大学・柳澤先生のWS資料より

しかし、こうした遺伝子(G)の、野外環境(E)での貢献度はまだ不明
G x E を数値評価するための実験圃場 & 評価モデルが必要

Cell

環境要因と遺伝子発現をリンク：
野外トランスクリプトーム解析ツール、FIT

Deciphering and Prediction of Transcriptome Dynamics under Fluctuating Field Conditions

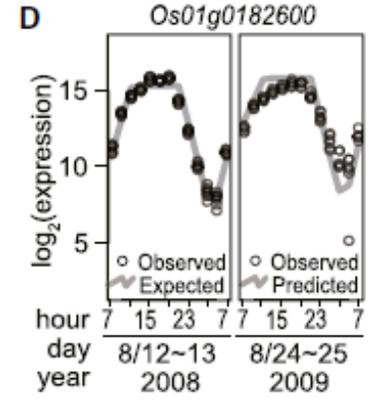
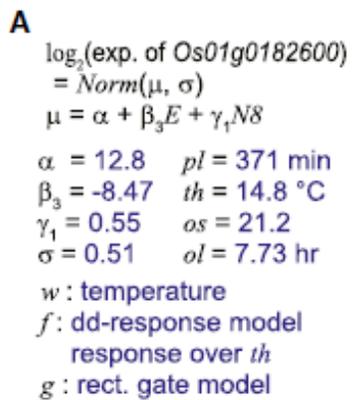
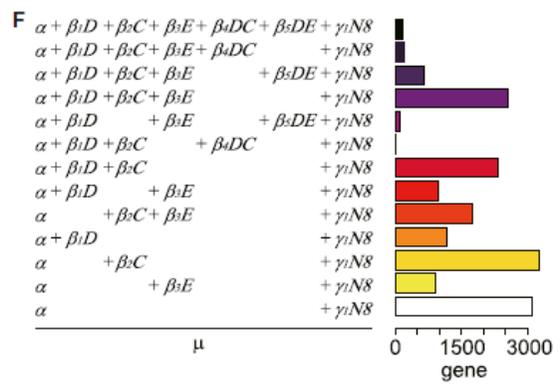
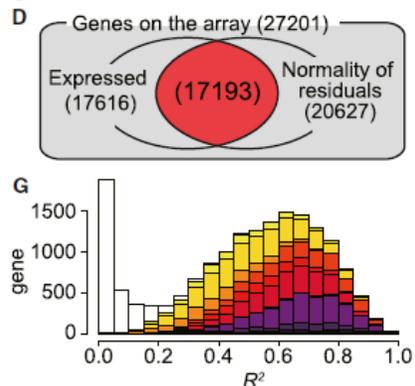
Atsushi J. Nagano,^{1,4,5} Yutaka Sato,^{2,4,7} Motohiro Mihara,^{3,6} Baltazar A. Antonio,^{2,7} Ritsuko Motoyama,^{2,7} Hironori Itoh,^{1,8} Yoshiaki Nagamura,^{2,7,*} and Takeshi Izawa^{1,3,8,*}

Nagano et al., Cell 151 (2012): 1358

全ての遺伝子発現が、どんな環境要因に影響を受けているかを分析

数式で表現

実測値の変化を数式で再現、予測も可能



Cell

環境要因と遺伝子発現をリンク：
野外トランスクリプトーム解析ツール、FIT

Deciphering and Prediction of Transcriptome Dynamics under Fluctuating Field Conditions

遺伝子発現と環境要因はリンクできるが、現段階では形質とリンクできない。
→形質を扱う作物モデルとの統合？

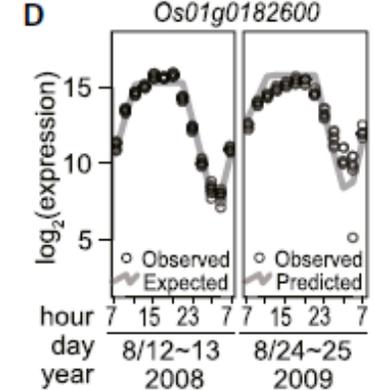
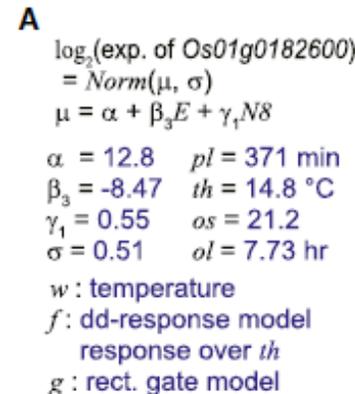
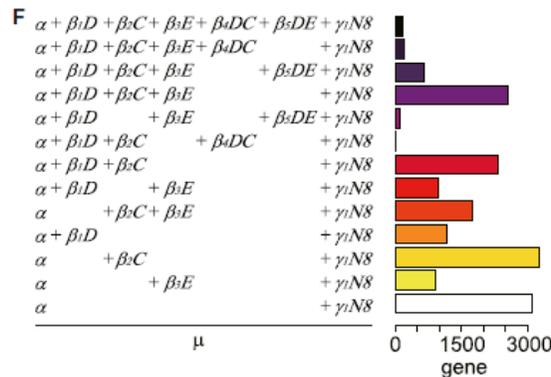
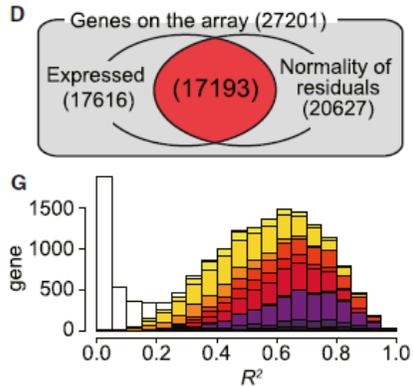
Atsushi J. Nagano,^{1,4,5} Yutaka Sato,^{2,4,7} Motohiro Mihara,^{3,6} Baltazar A. Antonio,^{2,7} Ritsuko Motoyama,^{2,7} Hironori Itoh,^{1,8} Yoshiaki Nagamura,^{2,7,*} and Takeshi Izawa^{1,3,8,*}

Nagano et al., Cell 151 (2012): 1358

全ての遺伝子発現が、どんな環境要因に影響を受けているかを分析

数式で表現

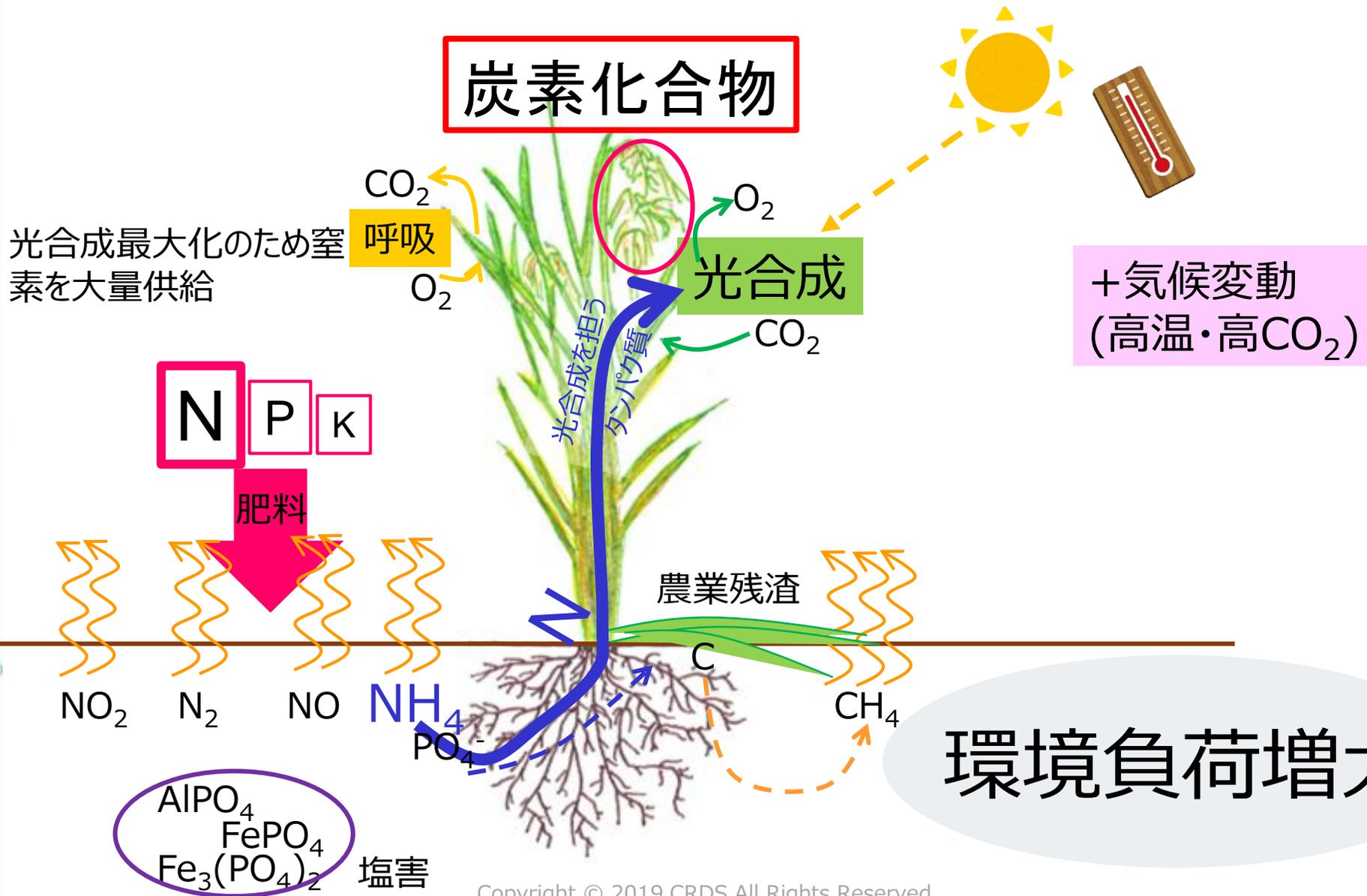
実測値の変化を数式で再現、予測も可能



【提案する研究開発の概要①】高温・高CO₂でも単収増 + 環境負荷低減

これまでの農業 = 炭素化合物の収穫最大化を目標

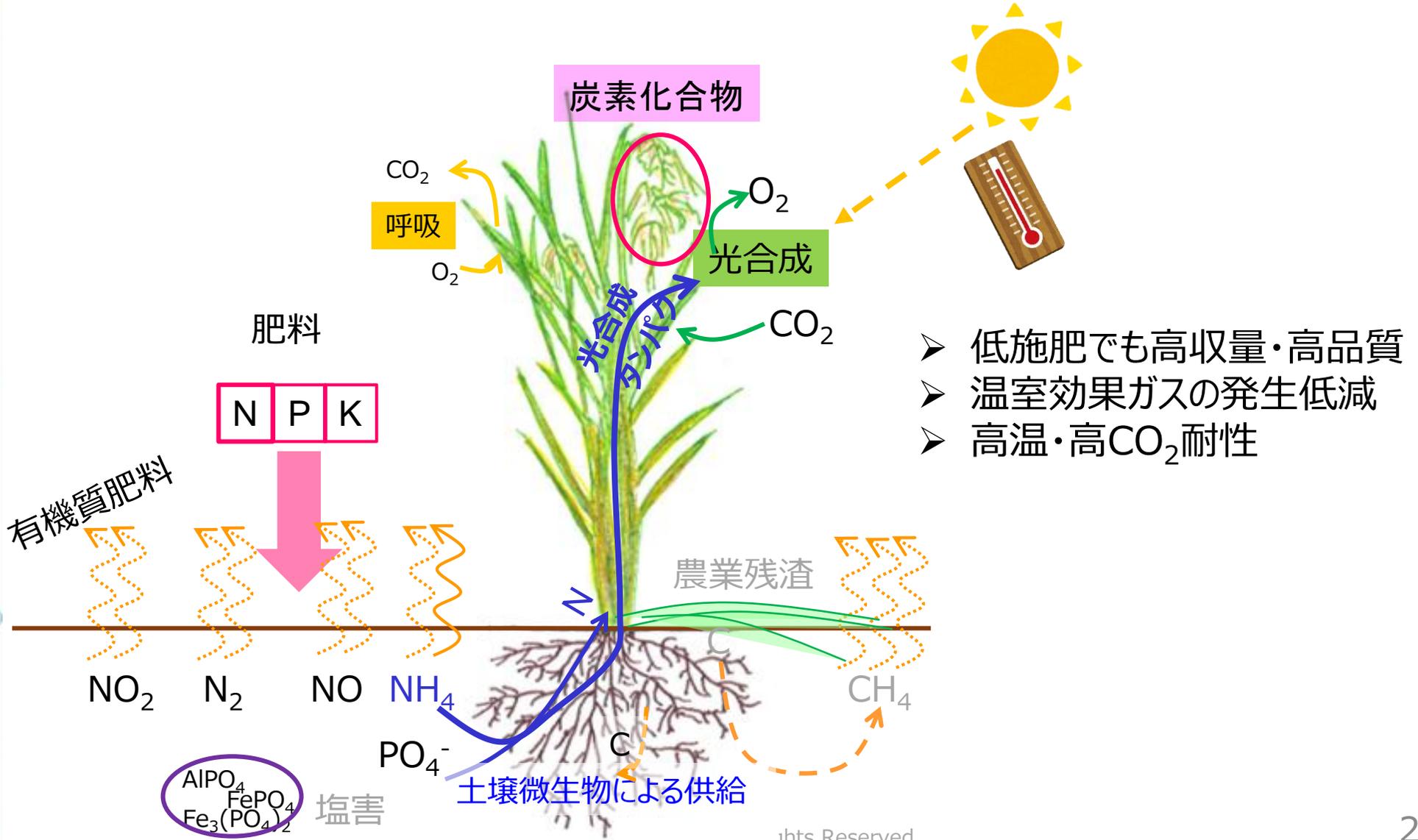
炭素化合物



【提案する研究開発の概要②】 高温・高CO₂でも単収増+環境負荷低減

これまでの農業 = 炭素化合物の収穫最大化を目標

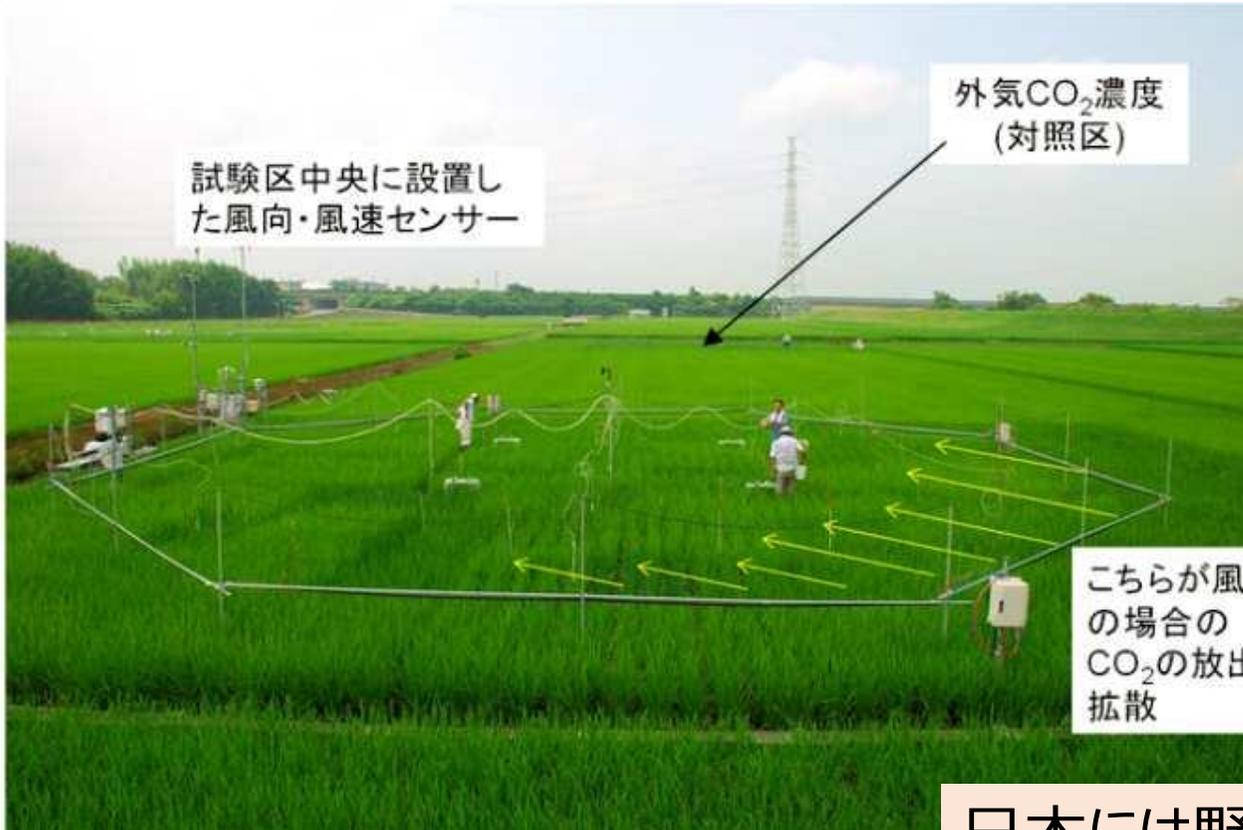
これからの農業 = 物質循環のバランスを最適化



環境摂動実験により、どの遺伝子(G)がどんな環境(E)どれだけ農業上重要な形質に貢献するか、を数値評価
 遺伝子発現、生育状態、環境データを同時取得することが必須



新しい品種の
デザインに活用



試験区中央に設置した
風向・風速センサー

外気CO₂濃度
(対照区)

こちらが風上
の場合の
CO₂の放出と
拡散

1998～2008 :
岩手県雫石町 (CRESTで開始)
2009～2017 :
つくばみらい

主として水田圃場生態系の
高CO₂応答の研究が展開され、
高温・高CO₂複合要因の研究が
進み始めたものの、
2018年3月で閉鎖された。

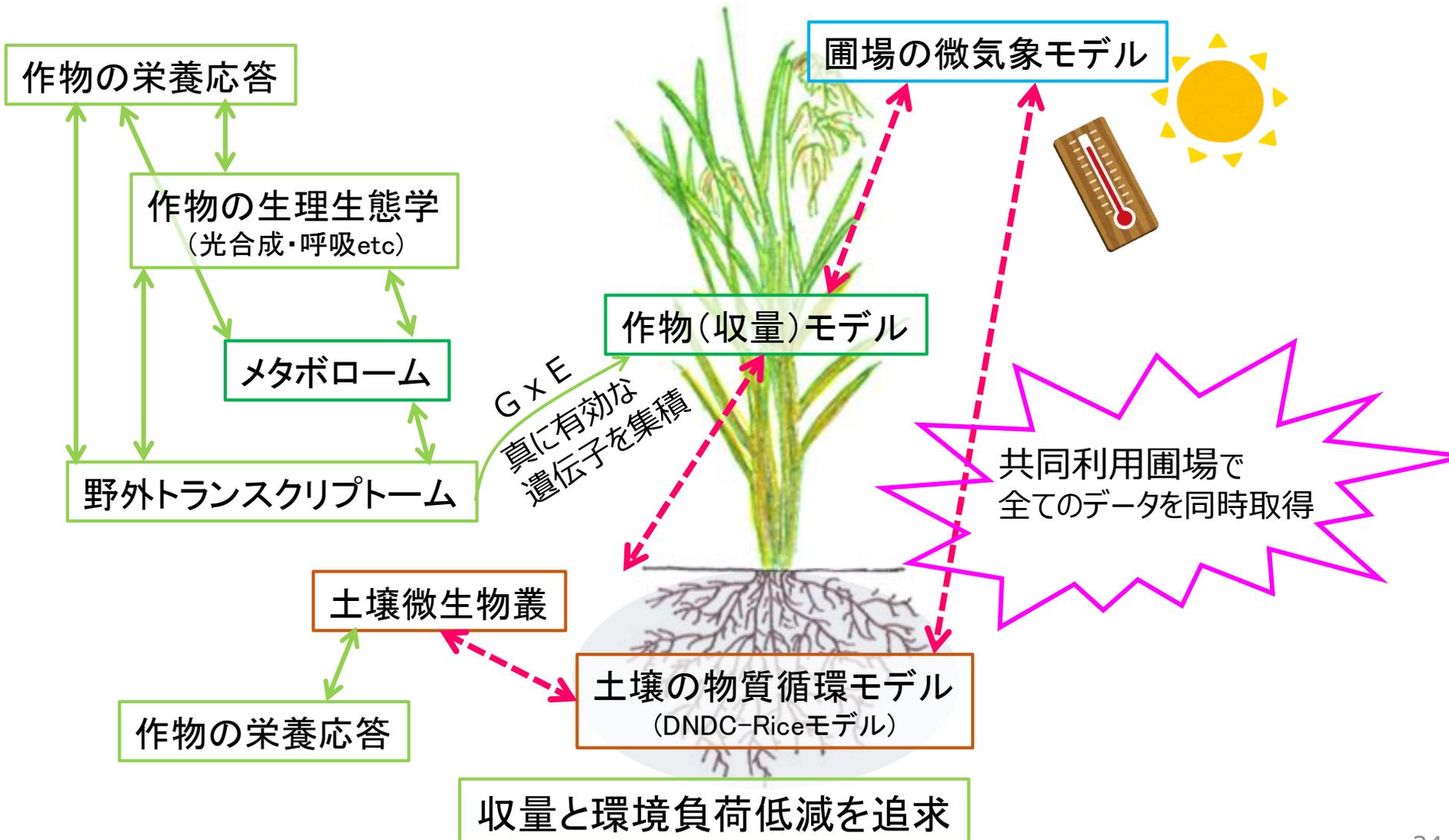
農研機構website より

日本には野外で高温・高CO₂実験をするためのテクノロジーが存在

作物の長期に渡る高CO₂応答研究の場合：
 解放系大気CO₂増加(Free Air Enrichment of CO₂: FACE)実験
 熱線などを追加することで高温・高CO₂複合要因の研究が可能。

多領域の共同研究で、真に地球にやさしい農業へ！

土壌・土壌微生物、作物の遺伝子型・生態生理、作物モデル、圃場の微気象モデルを統合するアプローチ



持続可能な食料生産：現状と課題を克服するための基盤技術

1. 農業

主要国の農業・食糧関連研究開発戦略の調査から
限界に近づく地球環境
海外の取り組み事例紹介
真に地球にやさしい農業を実現するには

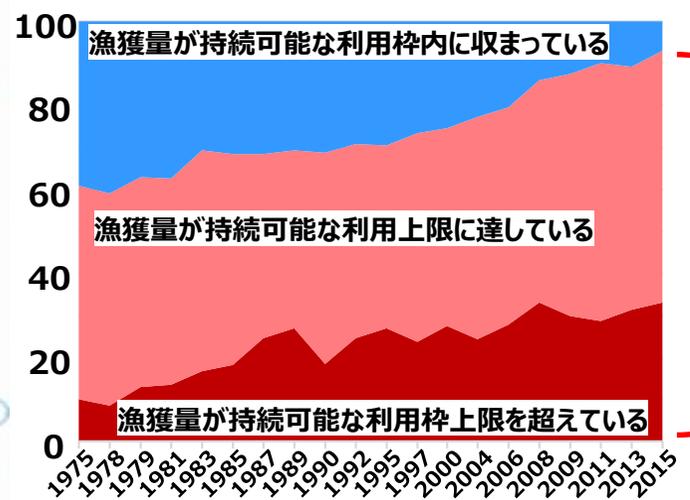
2. 水産・畜産

水畜産業の動向と現在の課題
持続可能な水地区産業への技術開発例の紹介
今後の課題

水産：持続性のある水産業へ、天然資源から養殖への移行

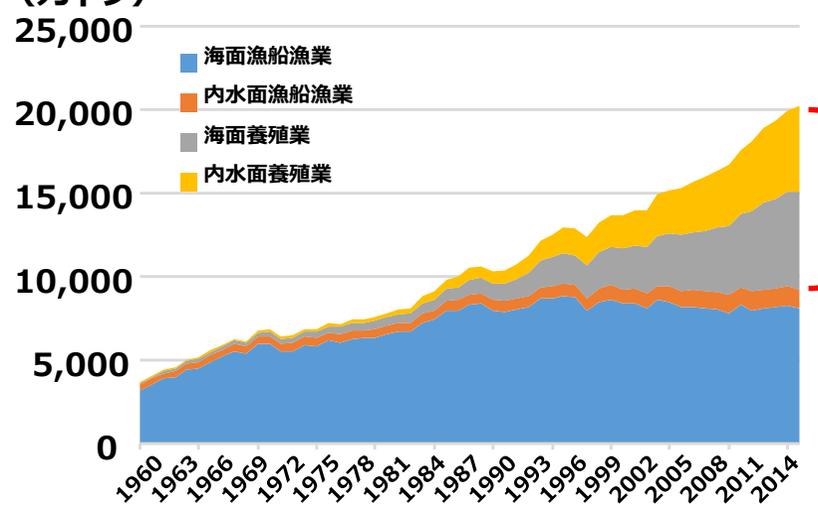
- **世界的に天然水産資源は枯渇、漁獲量は頭打ち傾向であり、養殖生産へのシフトが進む**
- わが国においても品種改良、生産手法改良による生産性向上が望まれる
- **しかし飼育期間の長さやコスト、飼育手法非効率性により、魚集団の調達維持も困難**

(%) 世界の主要魚種別水産資源



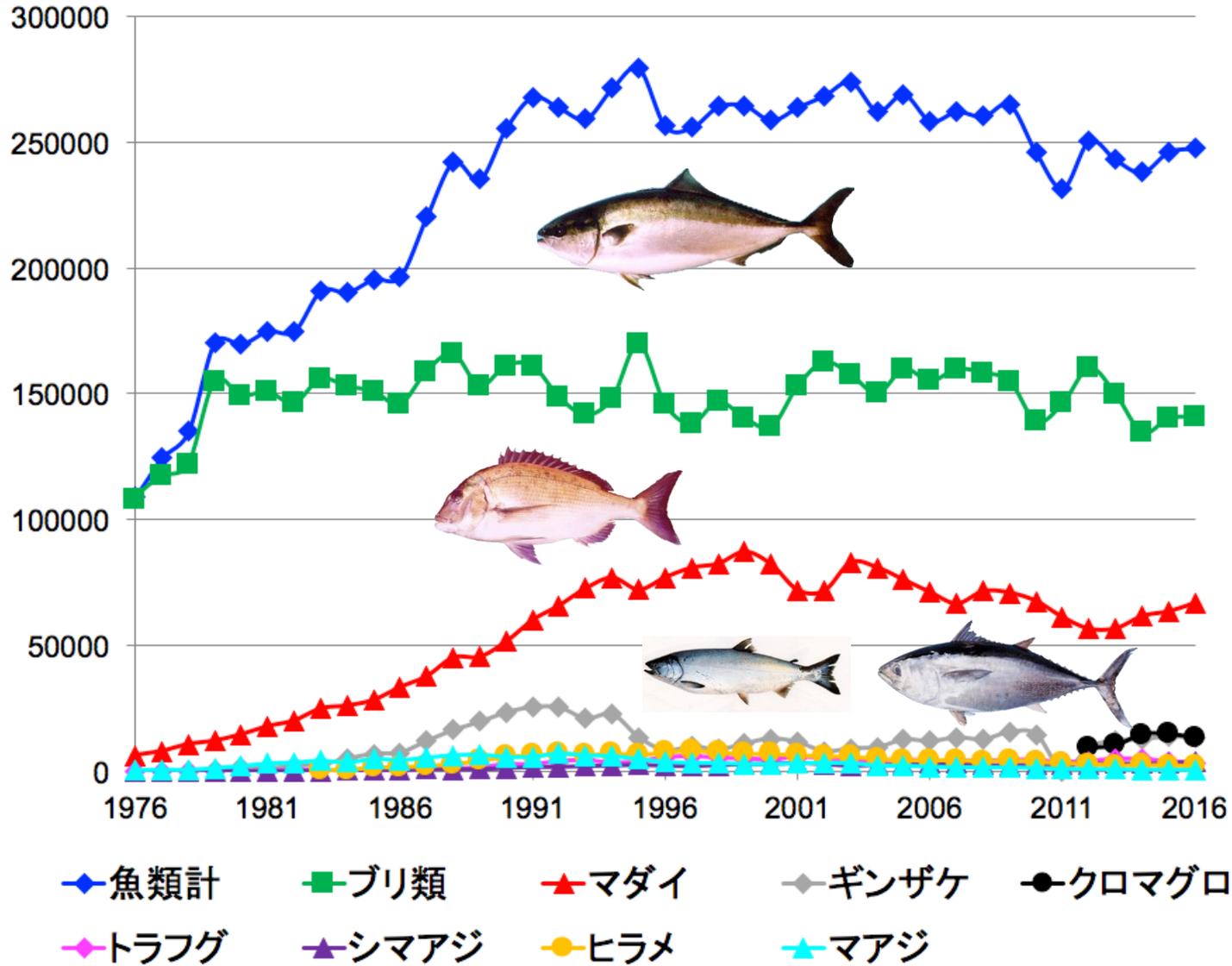
これ以上漁獲できない
漁獲対象魚種の66%は

(万トン) 世界の漁業・養殖業生産量の推移



過去の年の生産量増大は
ほぼ養殖によるもの

我が国の海水魚養殖業の現状



主要海水魚の養殖生産量の推移 (トン, 1976~2016)

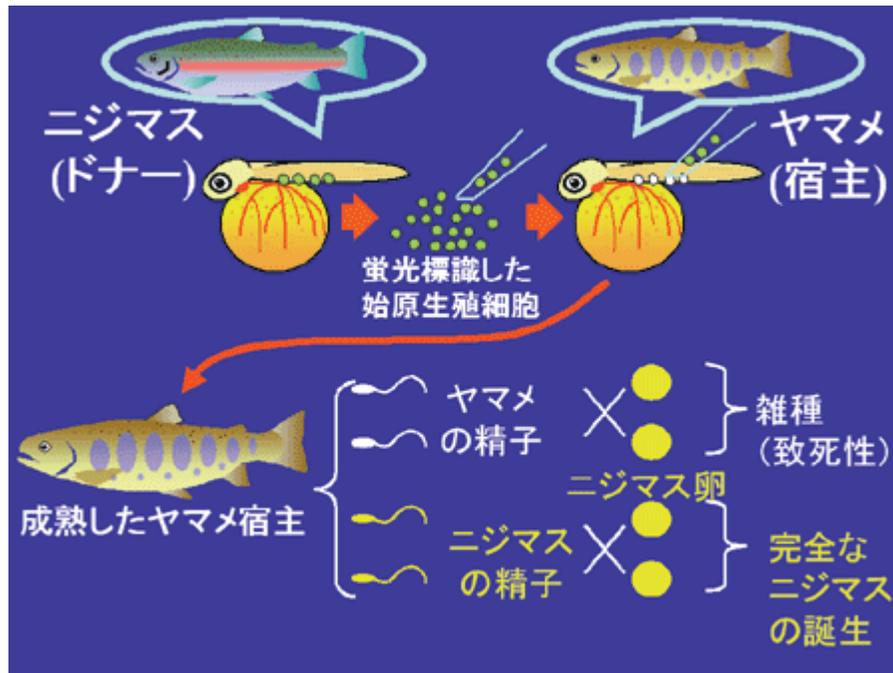
近畿大学家戸先生提供資料

農林水産省・漁業・養殖業生産統計

【生産】水産資源生産の省コスト、高速化

- 大型種は成熟までに長い期間(マグロ:3~5年)、広大な飼育スペースを要し生産効率が低い
 - 小型種を代替親とした生産
 - 早期成熟系統の創出

ヤマメを代替親としたニジマス生産



サバ⇒マグロ
クサフグ⇒トラフグ などの応用期待

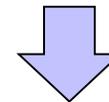
出典:東京海洋大学、JST

早期成熟系統の創出



出典:基礎生物学研究所

メダカ:fox13遺伝子破壊
⇒通常より早い段階で精子生産



成熟に長い期間がかかる
・トラフグ
・マダイ で研究が進められる

出典:近畿大学

養殖をより効率化する育種支援技術

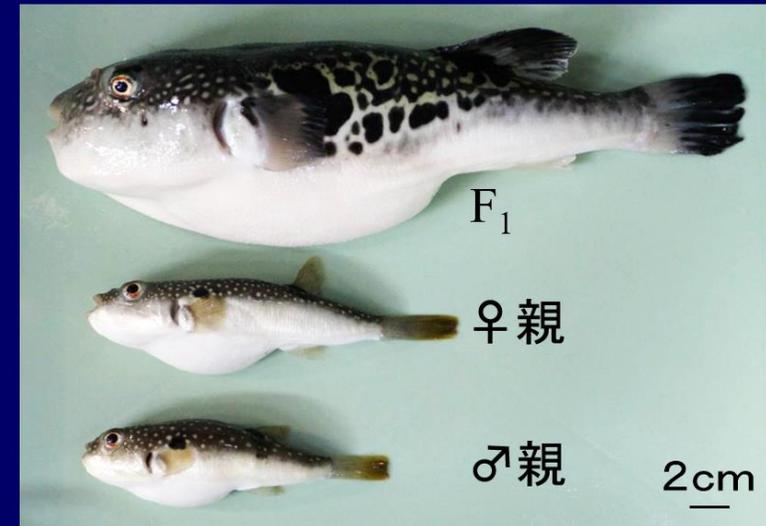
生殖工学推進による世代加速や生殖細胞の培養、保存方法開発⇒育種支援

- 大型の産業動物ほど、成熟に要する期間が長い
- また、水畜産対象種の多くで精子は保存可能だが、細胞サイズが大きい卵子は保存困難

代理親/借り腹による世代加速技術

トラフグの生殖幹細胞をクサフグに移植し、
クサフグでトラフグの精子、卵子を生産
これらを受精させてトラフグを得ることに成功
トラフグの成熟:オス2年、メス3年
クサフグの成熟:オス9ヶ月、メス1年

クサフグ代理親魚から産まれたトラフグ



キングサーモン(成熟までに3-5年)をニジマス代理親
(同1-2年)を用いて生産

Hamasaki et al., Mar Biotechnol 2017

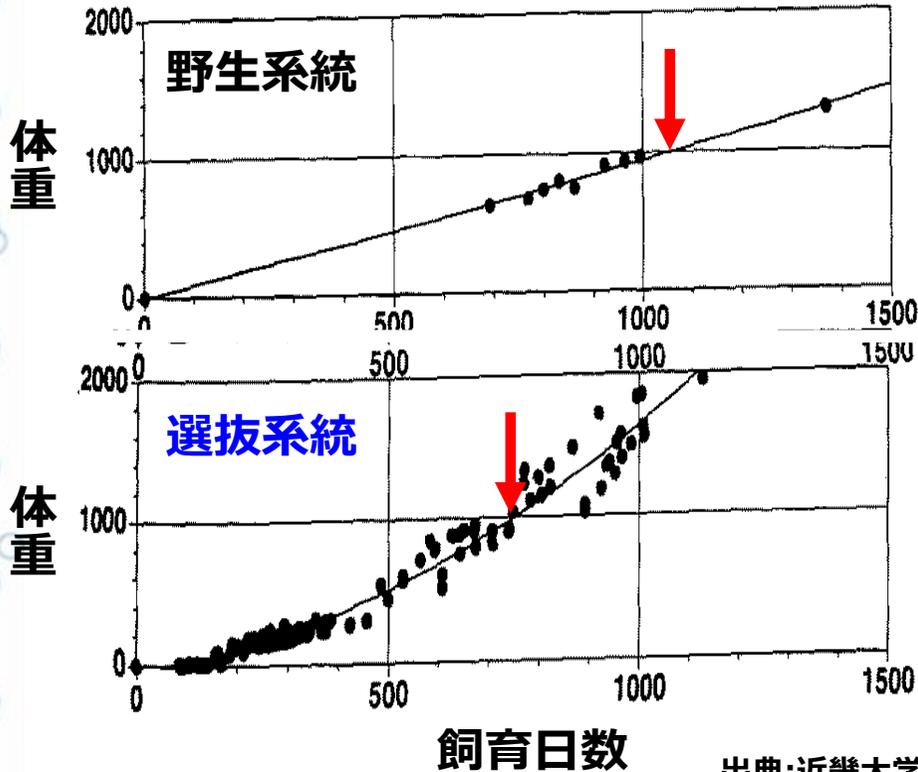
マグロなどの大型魚種での実証、橋渡し研究開発が必要

【育種】集団選抜からゲノミックセレクションへ

【従来】

早期成長系統の集団選抜（マダイ）

1960年代から30年近くかけて選抜
出荷サイズ（1kg）までの期間が
3年⇒2年と大幅に短縮
関西を中心に広く実用



出典:近畿大学

Murata O, et al., "Selective breeding for growth in red sea bream" *Fish. Sci.*, 62, 6, 845-849 (1996)

【今後】

ゲノム情報に基づく選抜、
ゲノミックセレクションでさらに
加速が期待

研究事例

- ・病虫害耐性
- ブリ
- ・雌雄比
- トラフグ
- ・高成長
- ギンザケ



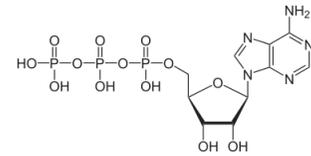
出典: Illumina

次世代シーケンサーの普及により、
優良品種だけでなく、従来淘汰されていた
奇形、疾病個体のゲノム解析も進む

行動メカニズム解析による飼育養殖手法開発改良

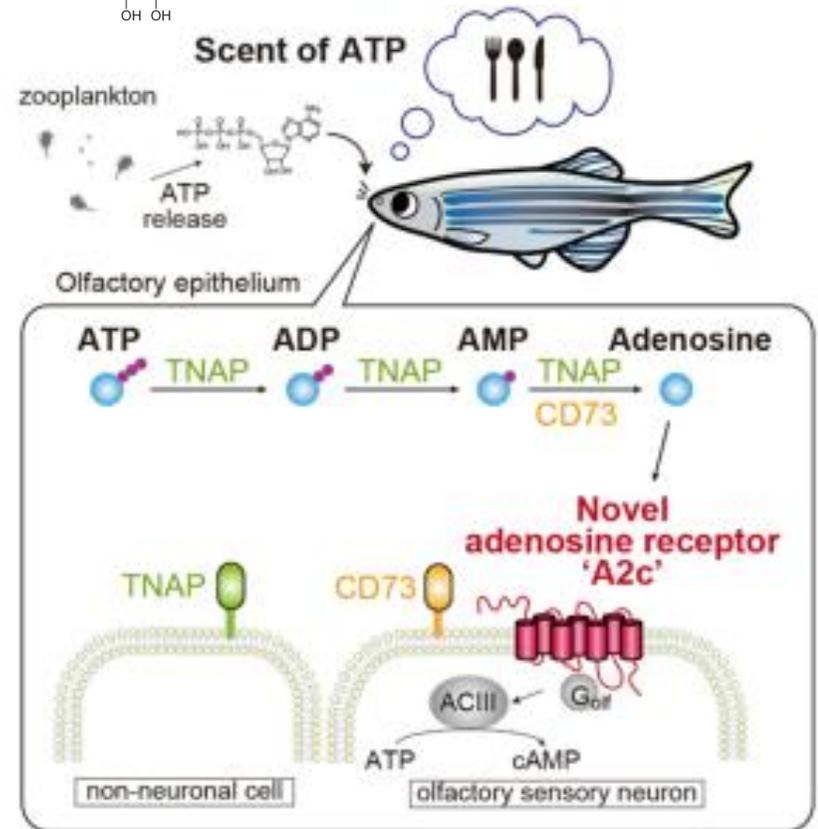
- 繁殖や摂食、忌避などの行動制御は産業動物の効率的な生産に必要不可欠
- 品質と持続性の向上、両立には、栄養条件が肉質など形質に与える機構の解析が重要

例) 摂食誘起行動のメカニズム解析



- 魚類が核酸の原料であるATPの匂いを受容、摂食行動をとる仕組みを解明
⇒飼料開発への応用が期待

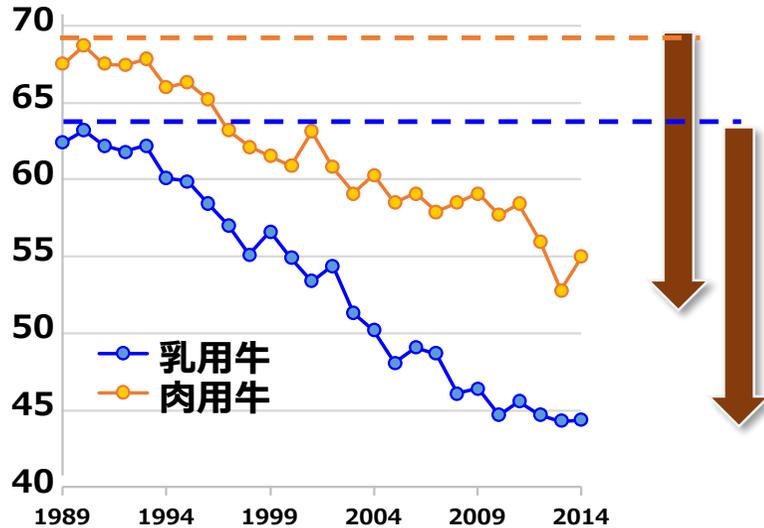
その他にも匂いによる繁殖、忌避行動のメカニズム研究が進む



畜産：ウシの人工授精受胎率の低下→子牛価格の上昇へ

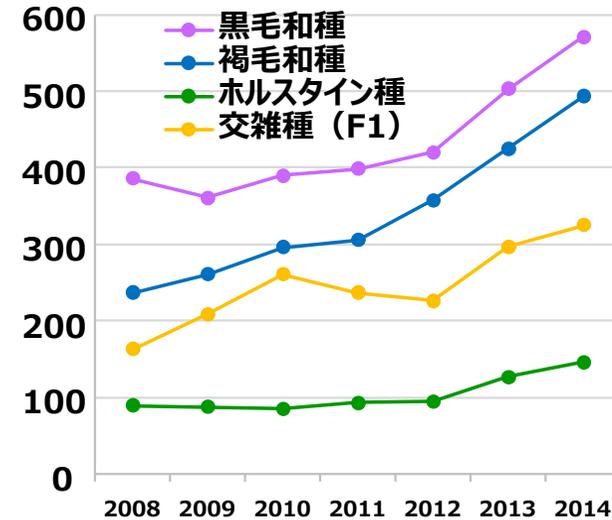
- ・世界的にウシの人工授精受胎率の低下が問題に
- ・さらに、わが国は飼料の大半を海外に依存、飼料価格の高騰などを受け仔牛価格も上昇
- ・飼育期間の長さやコスト、繁殖効率の低下が研究推進を困難に

わが国における人工授精受胎率推移



一般社団法人家畜改良事業団データを基にCRDS作成

わが国における肉用子牛価格推移



独立行政法人畜産業振興機構データを基にCRDS作成

受胎率が10%低下した場合の経済損失

$$\begin{aligned}
 & (\text{繁殖用ウシ頭数}) \times (\text{受胎率}) \\
 & \times (\text{一か月分の餌代} + \text{人工授精費用}) \\
 & = 150万 \times 0.1 \times 10万
 \end{aligned}$$

⇒ **150億円/年**

- ・繁殖に年単位の時間がかかる
 - ・配偶子の保存技術にも課題がある
- ⇒ 実験には年単位の準備が必要。コスト負担も大



生殖工学推進による世代加速や生殖細胞の培養、保存方法開発

⇒育種支援

- 大型の産業動物ほど、成熟に要する期間が長い
- また、畜産対象種の多くで精子は保存可能だが、細胞サイズが大きい卵子は保存困難

体外培養による配偶子の生産

マウスのiPS、ES細胞から体外培養で始原生殖様細胞を得ることに成功

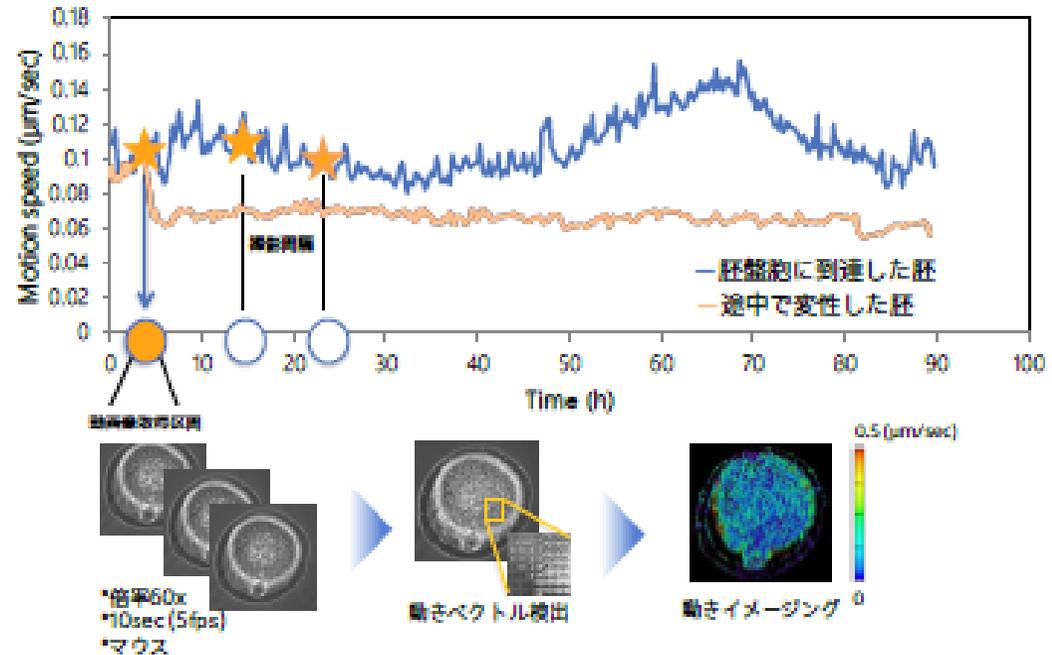


- 育種に個体の成熟を待つ必要がなくなる
- 凍結および繁殖による、稀少動物の保全
- 個体維持にかかるコストが軽減できる



SONY、全農による受精卵AI診断システム

ノンラベル動きイメージングによる受精卵胚盤胞形成過程の評価



ウシなどのさらに大型産業動物での実証、橋渡し研究開発が必要

まとめ

農業：

収量を維持しながら、気候変動下でも環境負荷低減農業を実現するためには、
気候変動下でも収量を維持/増加させるような品種の開発
有機農業（環境負荷低減）に適した品種の開発
圃場全体の物質循環のバランスを取る農業

土壌、土壌微生物、作物、分子生物学、気象学の共同研究による
基礎～応用研究が必要。

水産業：

養殖に適した品種を開発するため、世代交代を促進する技術基盤の醸成
養殖を可能にする基盤技術の開発

畜産業：

人工授精による着床率を上昇させる基盤技術
高栄養な配合飼料を脱却する、持続可能な畜産技術の開発

産業である以上、需給が見合わなければ社会実装は難しい。生産コストと需要の見極めが必要