



東京大学農学部公開セミナー
第 50 回

「学」と「業」

講演要旨集

~~~~~ プログラム ~~~~~

【 開会の挨拶 】

13:35~14:25

『育種学と育種』

データ科学を応用し、品種改良を加速する

生産・環境生物学専攻

准教授 岩田 洋佳

【 休憩（10分） 】

14:35~15:25

環境に優しいセルロースナノファイバーの科学

生物材料科学専攻

准教授 齋藤 継之

【 休憩（10分） 】

15:35~16:25

水産資源の持続的有効利用と水産学

水圏生物科学専攻

准教授 山川 卓

【 閉会の挨拶 】

司会 教授 溝口 勝

|   |   |                          |
|---|---|--------------------------|
| 日 | 時 | 2016年6月18日（土）13:30~16:30 |
| 場 | 所 | 東京大学弥生講堂・一条ホール           |
| 主 | 催 | 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部     |
| 共 | 催 | （公財）農学会                  |

# 育種学と育種

## データ科学を応用し、品種改良を加速する

生産・環境生物学専攻 准教授 岩田 洋佳

### 1. 90億人の食を支えるために

2050年には世界人口が90億人を超えると推計されている。今後増加していく人口を支えるためには、2050年までに現在の1.7倍の穀物生産が必要となり、毎年4400万トンの増産が必要とされている。これまでの40年間の穀物生産の増加速度はほぼ一定で毎年3200万トンであったことを考えると、今後数十年はこれまでに比べて1.4倍の速度で増産していく必要がある。水や肥料などの資源が限られているなかで、こうした増産を実現するためには、作物のもつ遺伝的能力を向上させる必要がある。なお、カロリーが足りていてもビタミンやミネラルが欠乏する「隠れた飢餓」も大きな問題となっている。健康的で豊かな食生活を保障するためには、作物のもつ様々な能力を育種（品種改良）によって高度に改良していく必要がある。

### 2. ゲノム解析技術とデータ科学手法を用いた高速育種

作物の育種には通常長い時間がかかる。これは、能力の高い個体や系統を選び出す（選抜）のに、栽培試験を行う必要があるためである。毎年収穫できるイネやコムギでは通常年1回、収穫までに年数が必要な果樹では何年もかけて栽培試験が行われる。なお、イネやコムギでも、年次によって豊作・不作などのばらつきがあるため、やはり何年もかけて栽培試験が行われる。このように栽培試験の必要性が育種の高速化の障壁となってきた。

こうした障壁を取り除く画期的な方法である「ゲノミックセレクション」が現在注目されている。ゲノミックセレクションとは、DNA配列にみられる個体間の違い（DNA多型）に基づき、個体の遺伝的能力を予測して選抜する方法である。ゲノミックセレクションは、DNA多型を高速に決定するゲノム解析技術と、膨大な数のDNA多型を収量や品質に関連付けるデータ科学手法が融合した新しい育種法である。ゲノミックセレクションを用いれば、栽培試験を行わずに能力の高い個体を選抜できるため、育種を高速化できる。

### 3. ゲノミックセレクションの可能性

ゲノミックセレクションは育種の高速化だけでなく、様々な可能性をもつ。例えば、ゲノミックセレクションを用いれば世界の様々な地域に適した品種を日本で作り出すことも可能である（図1）。食料問題解決のためには、不良環境における生産性の底上げが重要だといわれている。ゲノミックセレク

ションにより不良環境における収量向上が実現できる可能性は高い。

また、ゲノミックセレクションは、新品種の親となる品種の組合せ（交配組合せ）の選択にも利用できる。交配組合せは、育種家の勘や経験を頼りに選ばれることが多かったが、コンピュータ上でシミュレーションを行って合理的に選ぶことができる。これにより、育種を効率化できると期待される。

#### 4. 新しい育種システムを構築するために

ゲノミックセレクションは様々な側面から育種を合理化・効率化できる手法である。今後は、各々の作物の特性に合わせて、同手法を実際の育種に実装していくことが重要である。ここで非常に重要となるのは、作物の収量や品質に関わる性質・特徴（形質）のデータをできるだけ多く蓄積していくことである。データ科学に基づく同手法は、データが蓄積されればされるほどその能力を発揮する。この10年で大幅に効率が向上したゲノム解析技術に比べ、作物の形質を計測する技術の効率は高くない。ドローンによる計測なども活用し、形質データの蓄積の効率を高めていくことが重要だろう。

育種は、人間が有史以前から行ってきた重要な「業」の一つである。その長い歴史をもつ業が、今、近年急速に発展した生命科学や情報科学を原動力にして新しい進化を遂げようとしている。この進化を成し遂げることができれば、90億人の食を支える農業生産の実現にも大きく貢献できるだろう。

### 不良環境に強い品種を高速に作出する



図1. ゲノミックセレクションを用いれば、DNA多型に基づいて世界各地の不良環境における能力を予測でき、予測値をもとに各不良環境に適した個体を選抜できる。

# 環境に優しいセルロースナノファイバーの科学

生物材料科学専攻 准教授 齋藤 継之

## 1. セルロース利用の意義

本公開セミナーでは、鋼鉄の5分の1の重さで5倍強いとも言われる木材由来の新素材“セルロースナノファイバー”について紹介する。昨年改定された内閣の日本再興戦略の一つとしてセルロースナノファイバー関連の研究推進が宣言され、経済産業省主導の「ナノセルロースフォーラム」に国内170社の企業が参画するなど、近年セルロースナノファイバーへの注目が高まっている。

セルロースという物質自体は、高校の教科書でも取り上げられており、ご存知の方も多いのではないだろうか。セルロースは、グルコースが直鎖状に連なったシンプルな分子構造を有しており、樹木の主成分（乾燥重量の約50%）として地球上で最も多量に蓄積しているバイオマス（＝持続的に再生産される有機資源）である。我々人類は、材木・衣類・紙等として古くからセルロースを利用している。しかし、石油等の枯渇資源に依存した暮らしを脱却し、自然と持続的に共生する循環型社会を構築するために、セルロースをより高度に利用することが今まさに求められている。この社会的要請に応えることは、自然環境の保全と人類の欲求との間で発展的な共生を追求する“農学”の使命の一つとも言える。

## 2. 樹木中のセルロース構造

次ページの図1を見ていただきたい。樹木中のセルロースは、精緻な階層構造を形成している。まず、まっすぐな分子鎖が数十本束になり、ナノファイバー状の構造体を形成する。この構造体は、組織学上“セルロースマイクロフィブリル”として定義されてきた。さらに、100億本にも至る無数のセルロースマイクロフィブリルが整列し、強固に結束することで、チューブ状の繊維質（細胞壁）を形成している。このチューブ状の繊維質が、ギリギリ肉眼でも見える木材パルプ繊維（紙を構成する繊維質）である。想像していただきたい。ティッシュペーパーの毛羽立った繊維1本の中に、世界人口（約70億人）を超える数のマイクロフィブリルが、ぎっしりと堅く詰まっているわけである。木材パルプ繊維1本の引張強度は、鋼鉄の約2倍（最大で1.7GPa）にも達する。すなわち、パルプ繊維1本の中で、無数のマイクロフィブリルが文字通り強固に結束（水素結合）している。

### 3. 木質素材からセルロースナノファイバーへ

セルロースナノファイバーとは、木材を水中で繊維質にほぐしたもの（製紙原料となるパルプ繊維）を、さらに細かくマイクロフィブリルレベルにまでほぐした新素材である。木材を繊維質にほぐすプロセス（蒸解）は古くから確立しており、現在製紙産業で流通しているパルプ繊維はキロ 100 円程度の安価な素材である。しかし、“無数のマイクロフィブリルがぎっしりと堅く詰まった”パルプ繊維をさらに細かく（例えば平均繊維径が 100 ナノメートル以下となるまで）ほぐすためには、従来 30,000 kWh/ton もの大量のエネルギーを消費する粉碎処理が必要であった。結果として、従来のセルロースナノファイバーは非常に高価で、繊維径もバラつきが大きく、工業利用は極めて限定的なものであった。

当研究室では、TEMPO 触媒酸化と呼ばれるグリーンケミストリー（環境にやさしい化学反応）とコロイドサイエンス（微粒子分散系の科学）の知見を組み合わせることで、従来よりも効率的にセルロースナノファイバーを生産する手法を近年見出している。この新手法により、木材パルプ繊維の粉碎工程に要するエネルギー量が従来の 100 分の 1 以下となり、得られるセルロースナノファイバーは 3 ナノメートルの均一な繊維径となる。

本公開セミナーでは、セルロースナノファイバーの生産法や基本特性、応用事例等について概説する。

## 樹木中のセルロース構造

直鎖状のセルロース分子が数十本束になって **ナノファイバー** を形成

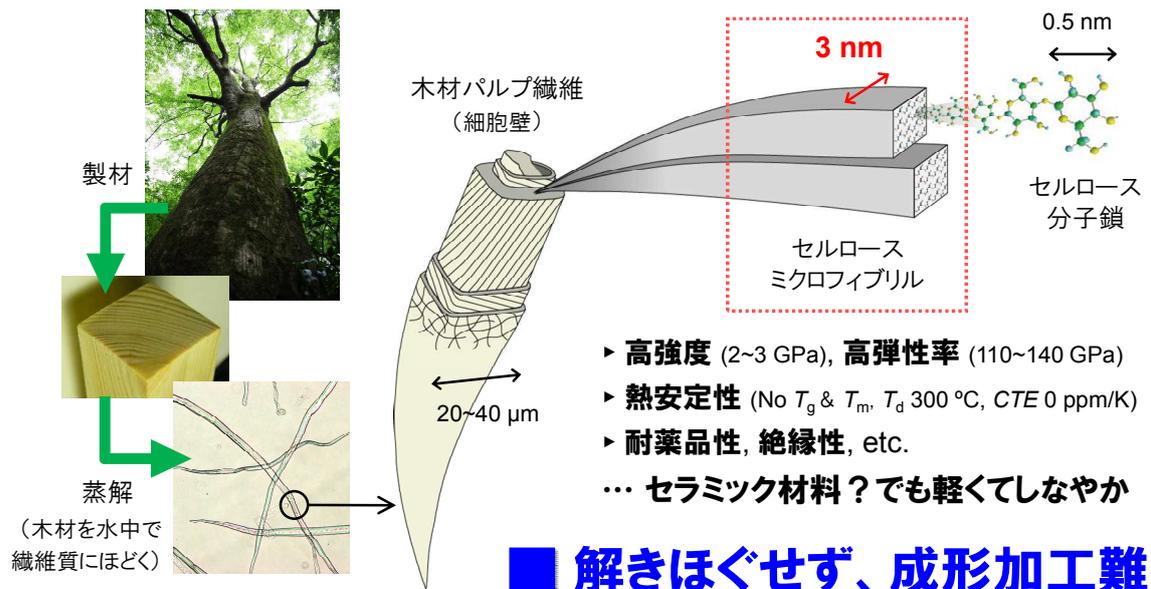


図 1 樹木セルロースの階層構造と工業利用

# 水産資源の持続的有効利用と水産学

水圏生物科学専攻 准教授 山川 卓

## 1. ヒトと自然の関わり方

水産業は、地球上に数ある産業のなかでも、天然の野生生物を資源として利用する最大規模の産業であり、この有限な「宇宙船地球号」の中で我々人類が今後どのように持続可能な社会を構築していくことができるかを考える際の雛型として、最も示唆に富む産業であるといえよう。その生産性は自ずと自然の再生速度に規定されるため、ヒトと自然の関わり方について正面から向き合い、如何にすれば自然生態系の恩恵を持続的に享受し続けていけるかを真摯に考えていく必要がある。ここでは、水産資源の持続的有効利用に向けて科学（水産学）が果たしてきた役割と方向性を紹介する。

## 2. 水産資源の基本的特徴

水産資源は、①自律更新性 ②無主物性 ③不確実性という特徴をもつ。石油などの非再生資源と異なり、①雌親が卵や子を産むことで自律的に更新（再生産）される。このため、漁獲圧を調節し、再生速度と減耗速度のバランスを適切に保つことができれば、将来にわたる持続的利用が原理的に可能である。しかし、農作物などと根本的に異なる②の特徴により、そのバランスは損なわれやすい。天然の魚は、水中を泳いでいる状態では誰のものでもない無主物とみなされ、漁獲行為によって最初に手中に収めた者がその所有権を主張できる（無主物先占）。このため、漁業を完全な自由競争に委ねると、早いもの勝ちの漁獲競争によって乱獲に陥る。これは、Hardinの「共有地の悲劇」や社会的ジレンマと同型の問題であり、自由な経済行為に伴って生じる共有資源の劣化という外部不経済をいかにシステム内に取り込んで（内部化して）制御すべきかという命題に繋がる。また、③環境の影響を受けて資源は年々変動し、魚は移動・回遊する。それは漁業者にとって大きな不確実性であり、目の前に魚群が来遊している今のこのチャンスにできるだけ多く獲っておこうと、漁獲競争に拍車が掛かる。将来の状態が不確実なため、現在価値に比べて将来価値が大きく割り引いて評価されるのである。

## 3. 水産資源の科学的管理

水産資源管理では、ヒトの健康管理と同様に、現状診断を行ったうえで治療（管理）が行われる。まず、年齢、成長、自然死亡、再生産などの生物的特性や、資源量、漁獲率などの資源特性値が、科学的に推定（資源評価）される。次に、資源評価結果と管理目標を比較して、資源の現状をどうみるか、望ましくない状態にあるとすれば何が問題なのか、という資源診断が行われる。そして、資源の合理的利用や目標とする状態への回復を目指して、漁獲

規制等の資源管理措置が実行される。これまで、余剰生産モデルや成長生残モデルなどのさまざまな資源動態モデルが開発されるとともに、最大持続生産量（maximum sustainable yield: MSY）の概念が、国際的な資源管理の協議の場や、わが国の漁獲可能量（total allowable catch: TAC）管理における中心的概念として用いられてきた。総じて、歴史的な乱獲によって資源が大きく減少した魚種がある一方で、適切な管理の導入によって資源が回復あるいは適切な水準に維持されてきたものもあり、個別の丁寧な評価が肝要である。

#### 4. 不確実性への対処法

多くの水産資源において、十年～数十年の時間スケールで生じる地球規模での大気－海洋－海洋生態系の構造転換（レジームシフト）に伴って、資源水準が大きく変動することが明らかにされてきた（図1）。エルニーニョ/ラニーニャのサイクルや地球温暖化によっても、資源状態や生産性は大きく変わりうる。そのような中長期的な不確実性に対処するための管理方式として、フィードバック管理や順応的管理が提案されている。

これらは、対象とする系(資源、生態系など)の状態が、管理行動の投入や外的要因の変化によってどのように変わるかを継続的にモニタリングしながら、管理の内容と程度を適応的に調節していく方法である。将来予測に不確実性があることを前提に、系への入力に対する出力の変化（応答）をモニターして学習し、その変化に逐次的に対処する。例えば、現状の資源量が目標資源量よりも多ければ、事前に合意した漁獲制御ルール(harvest control rule:HCR)に従って漁獲量を増やし、少なければ漁獲量を減らす。そのような現実への対処の一方で、資源・生態系の動態を模した仮想現実モデルをコンピュータ上に作成し、それを用いて一連の資源管理実験を繰り返し行って適切な HCR を探る。シミュレーションでは仮想した真の資源状態がわかっているため、資源評価や管理の失敗/成功を判断し、管理システム全体の性能を評価できる。さまざまな不確実性を想定したシナリオを設定し、不確実性に対して頑健な管理方式を開発する。この一連のプロセスは、現実世界と仮想世界を並行させた PDCA(Plan-Do-Check-Act)サイクルとみなすことができる。

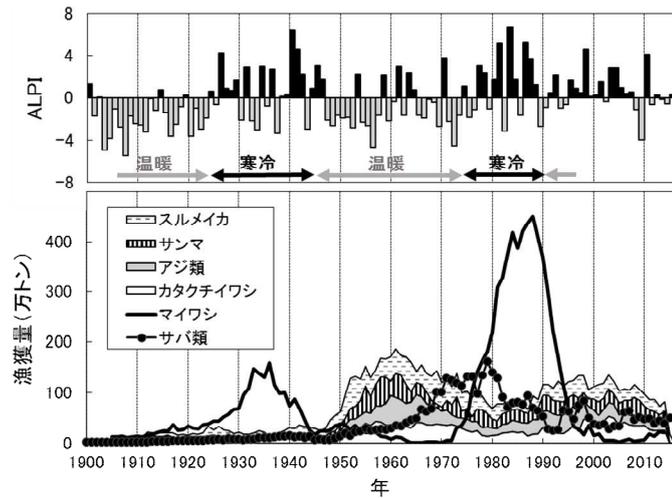


図1. レジームシフトに伴う主要浮魚類の漁獲量の長期変動。アリューシャン低気圧指数（ALPI）が正值のときには日本周辺の気候は平年よりも寒冷傾向に、逆に負値のときには温暖傾向になり、それによって各資源が変動する。

## プロフィール

いわた ひろよし  
**岩田 洋佳**

生産・環境生物学専攻 生物測定学研究室

### 主な研究活動

農学とデータ科学の融合と発展が我々の研究室の使命の一つです。現在私は、ゲノミックセレクションとよばれる手法をさらに発展させ、能力の高い品種を素早く作り出すための育種システムを開発するための研究に励んでいます。最近ではドローン計測などの新技術も続々登場し、毎日心をワクワクさせながら研究を進めています。

さいとう つぐゆき  
**齋藤 継之**

生物材料科学専攻 製紙科学研究室

### 主な研究活動

鋼鉄の5分の1の重さで、5倍強いとも言われる“セルロースナノファイバー”について研究しています。セルロースナノファイバーとは、製紙用の木材パルプ（紙を構成する繊維質）から製造されるバイオマス由来の新素材であり、少しずつですが、実用化され始めています。

やまかわ たかし  
**山川 卓**

水圏生物学専攻 水産資源学研究室

### 主な研究活動

水産資源の持続的利用をめざして、資源およびそれを取りまく生態系の動態や、資源評価・管理手法に関する研究を行っている。効果的な資源管理のためには、資源や生態系に関する自然科学的な研究に加えて、社会科学側面も含めた総合的アプローチが必要であり、それに向けて奮闘中。