



糸状菌の多様性と産業利用への期待

2024年7月19日

独立行政法人製品評価技術基盤機構

バイオテクノロジーセンター 稲葉 重樹

(Biological Resource Center, NITE : NBRC)

今、注目の糸状菌活用法：マイコテクノロジー（Mycotechnology）

代替皮革



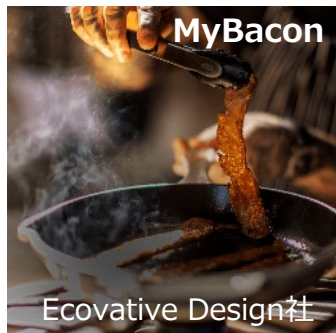
キノコの菌糸体から生まれた新しい素材 マッシュルームレザー

“育てる”梱包材



農業廃棄物に菌糸体を育てて作った環境負荷の少ない梱包材！

代替肉



菌糸体から作るタンパク質
“マイコプロテイン”由来の代替肉の市場が拡大中！

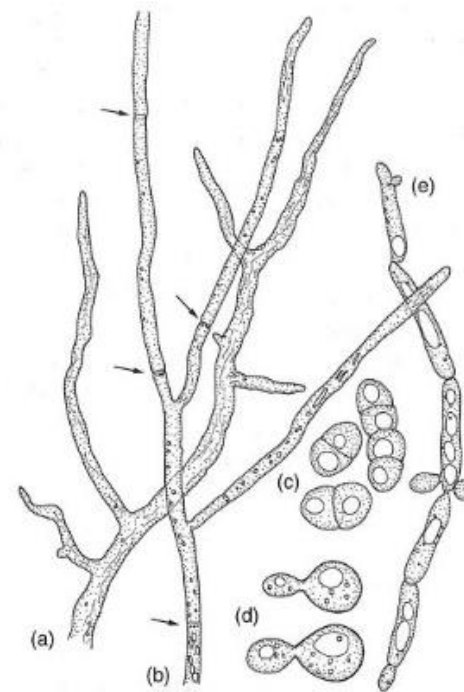
(<https://www.mycoworks.com/>,
<https://mycorena.com/>,
<https://www.ecovative.com/>)

糸状菌とは

- 糸状菌(filamentous fungi)とは、菌糸からなる菌糸体制を基本として、胞子によって増殖する菌類(真菌類)のこと。一般にかび(mold)と呼ばれる菌類を指すが、広い意味ではきのこ(mushroom)も含む
- 菌類を形態によっておおまかに分類するときに使い、系統進化を反映してはいない

(参考)

- 酵母(yeasts)とは、広義には生活環の一定期間において栄養体が単細胞性を示す菌類(真菌類)

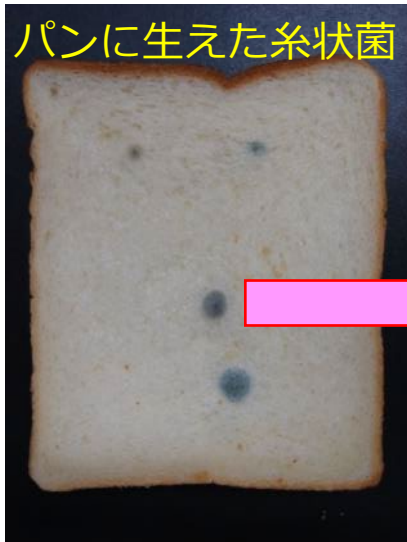


菌類の体制

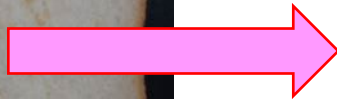
- a. 菌糸(無隔壁) = 多核体coenocyte
- b. 菌糸(有隔壁)
- c. 酵母(分裂)、d. 酵母(出芽)、e. 偽菌糸

糸状菌の特徴：菌糸体の形成

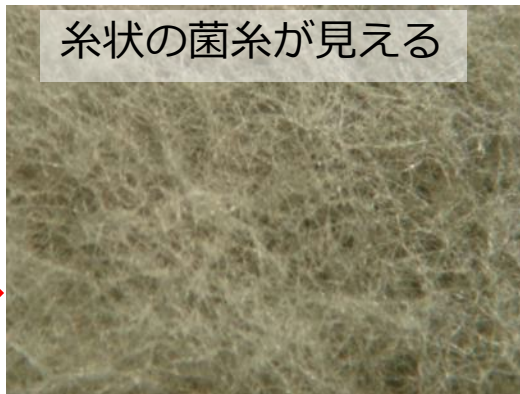
パンに生えた糸状菌



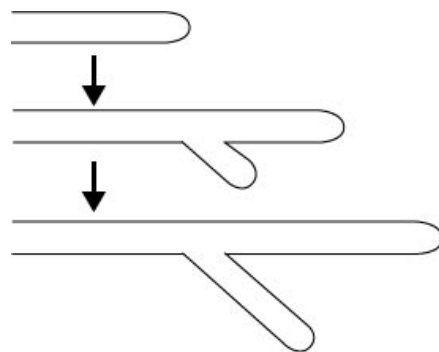
拡大



糸状の菌糸が見える



菌糸は枝分かれしながら
先へ先へと伸びていく

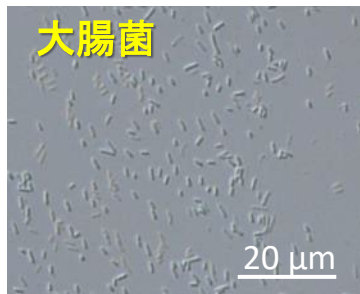


微生物の多様性

- (ウイルス)

- 古細菌 (アーキア)
- 細菌 (バクテリア)
 - 大腸菌
 - 乳酸菌
 - 放線菌
 - . . .

原核生物



真核生物

- 微細藻類
 - ミカヅキモ、ミドリムシ
- 原生動物
 - ゾウリムシ、アメーバ
- 菌類 (真菌類)
 - パン酵母
 - コウジカビ
 - シイタケ
 - . . .

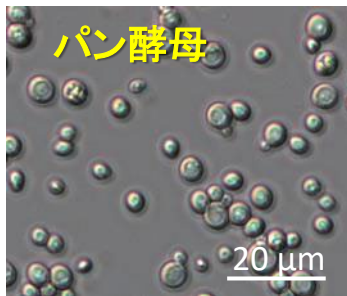
ミドリムシ



アメーバ



パン酵母



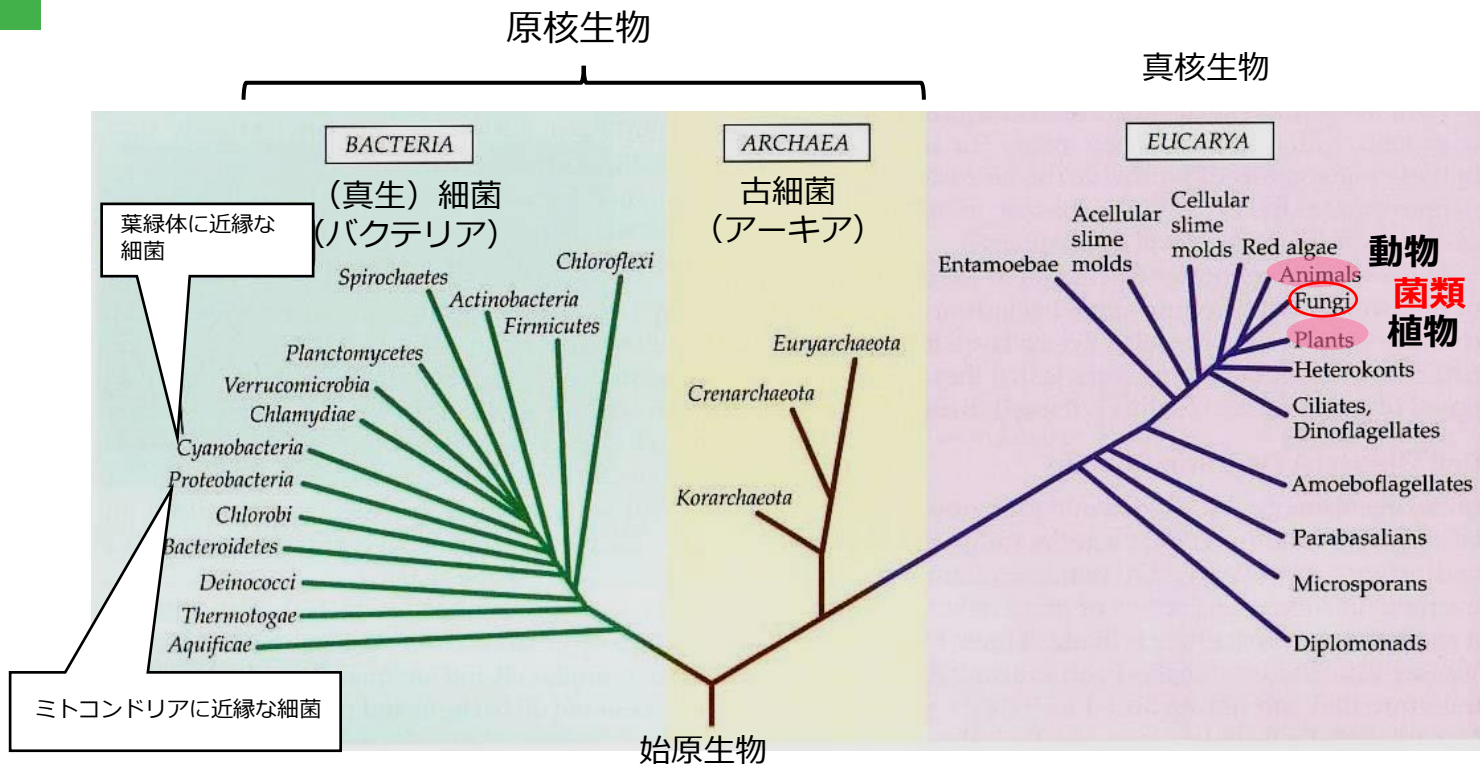
コウジカビ



菌類の特徴

- 真核生物
- 体制は単細胞（酵母様）または糸状の細胞（菌糸）よりなる菌糸体
- 細胞壁をもつ
- 吸収によって栄養を摂取する従属・栄養生物
- 各種の胞子を形成

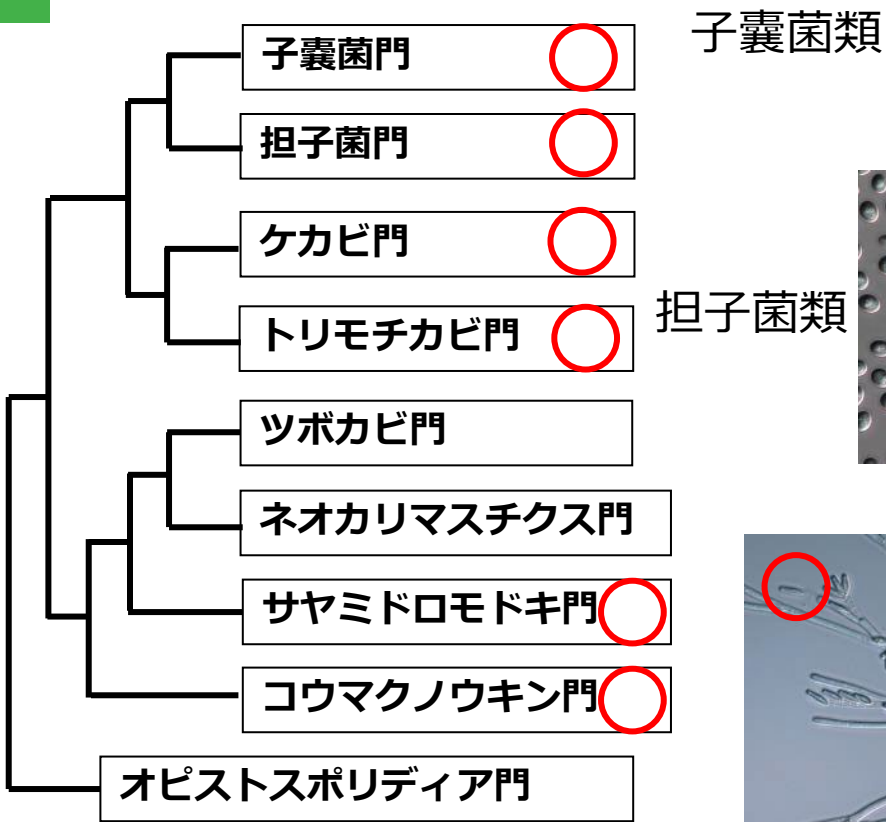
生物の分類：3超界（ドメイン）説と菌類の系統的位置



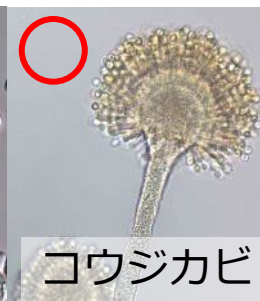
菌類は真核生物であり、動物に近縁

直線の長さはリボソーム小サブユニットのrDNA塩基配列の相違度を表す

菌類の系統分類と糸状菌 (○) を含む門



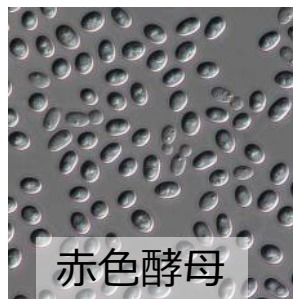
パン酵母



コウジカビ



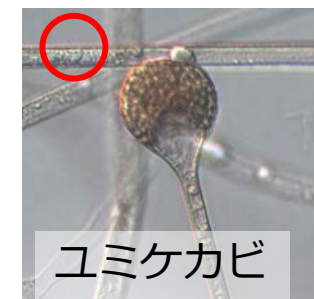
アミガサタケ



赤色酵母



シイタケ

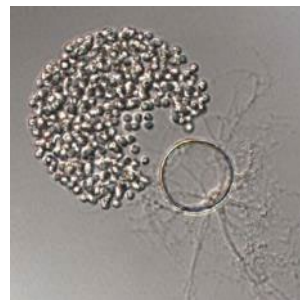


ユミケカビ

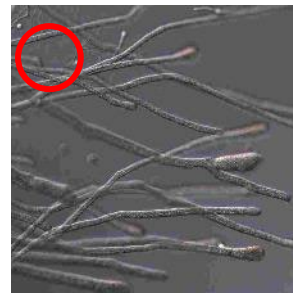
ケカビ類



トリモチカビ類



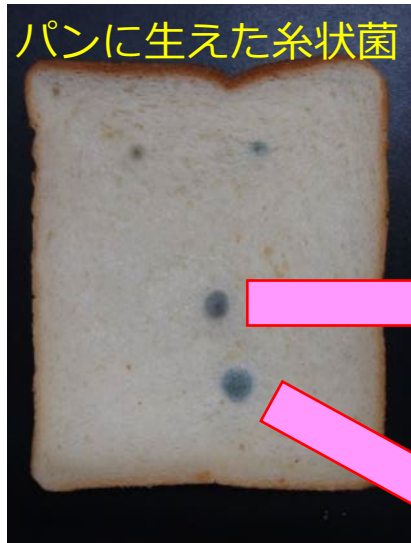
ツボカビ類



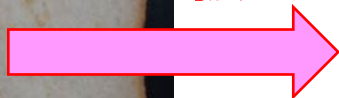
コウマクノウキン類

糸状菌の特徴：胞子の形成

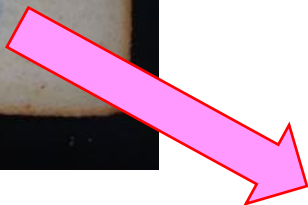
パンに生えた糸状菌



拡大

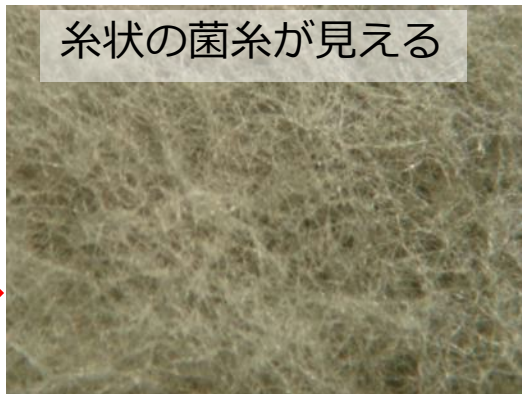


拡大

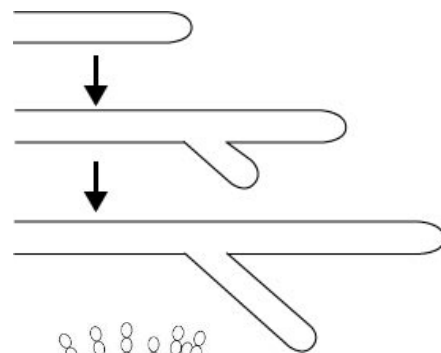


菌糸からのびた柄の先に
胞子を形成

糸状の菌糸が見える



菌糸は枝分かれしながら
先へ先へと伸びていく



胞子

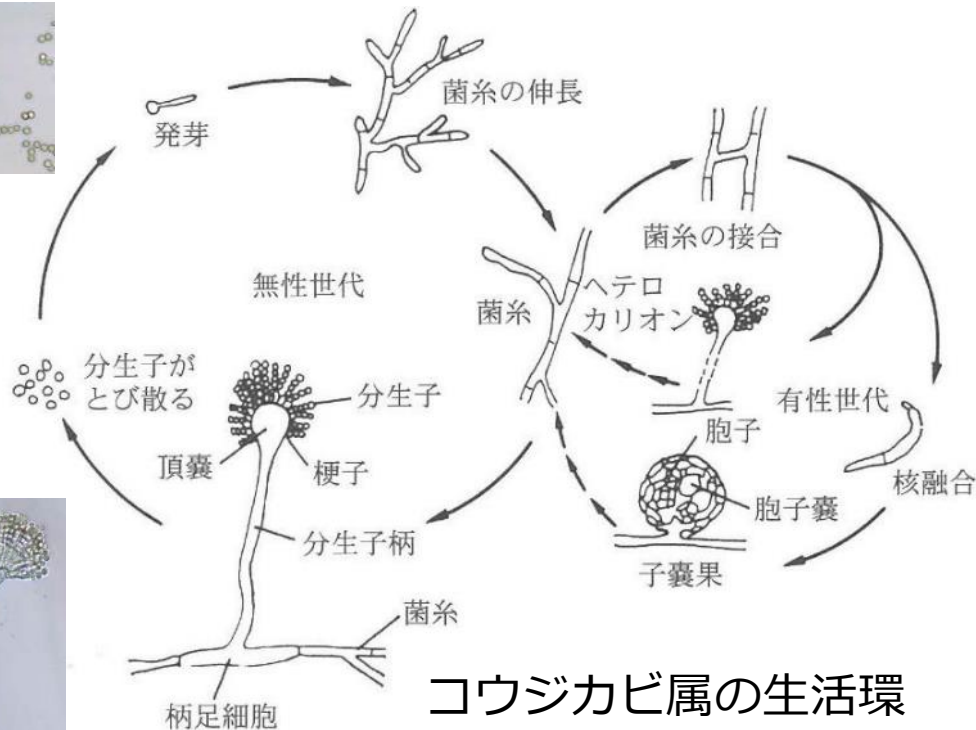
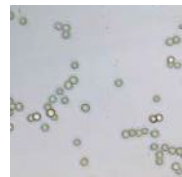
柄

菌糸

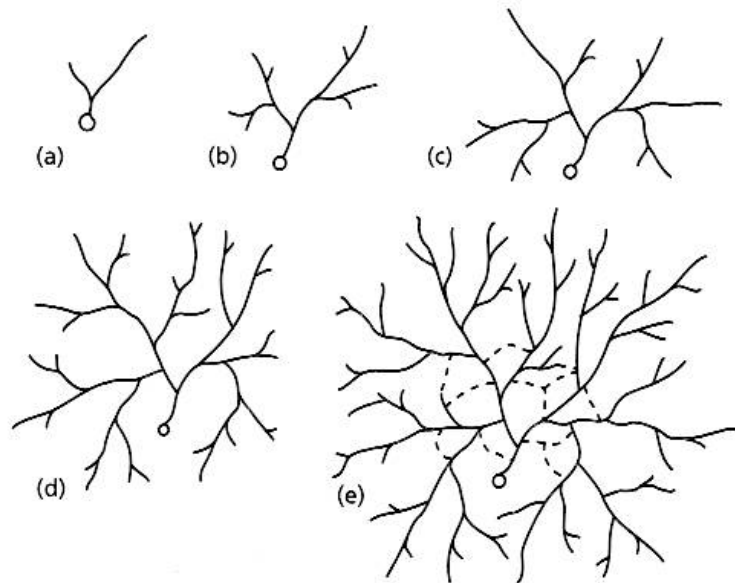
アオカビ
属の特徴

糸状菌の生活環と孢子形成

・コウジカビ属の場合



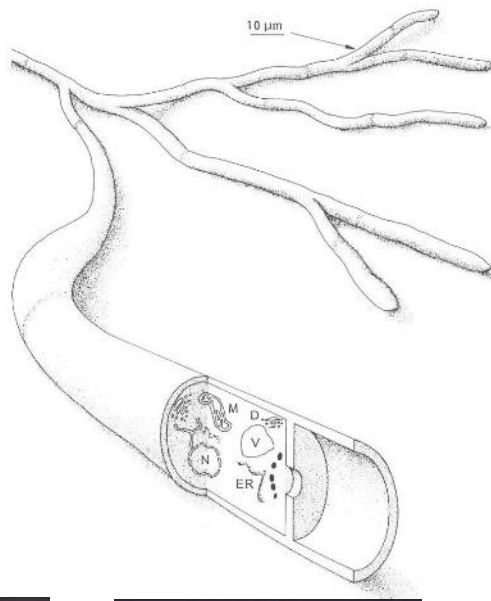
コウジカビ属の生活環



コウジカビ属の孢子発芽・
菌糸生長過程

菌糸(hypha, pl. hyphae)

- 細長い糸状の細胞構造
- 細胞壁に覆われる
- 先端生長する
- 隔壁をもつ場合もある
- 固体上（中）を伸長する



*Aspergillus oryzae*の増殖の様子 (25°C)



接種後1時間



24時間



48時間



1週間後

(参考) 酵母(yeast)

- 単細胞
- 細胞壁に覆われる
- 出芽または分裂で増殖
- 偽菌糸を形成することもある
- 液体中、固体表面で増殖

*Saccharomyces cerevisiae*の増殖の様子 (25℃)



接種後1時間



24時間

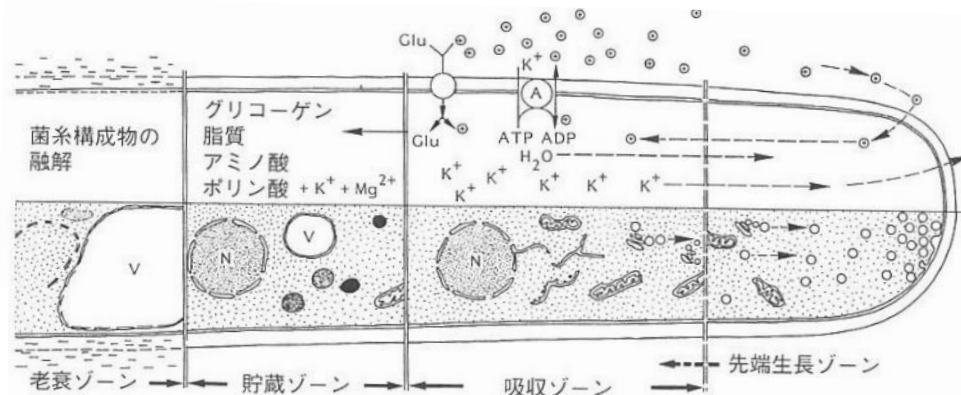
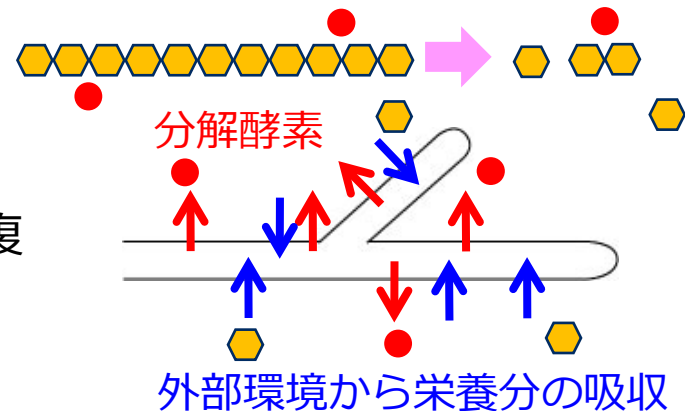


48時間

菌糸の4つのゾーン

- 先端生長ゾーン(apical growth zone)
伸長中の菌糸の先端と、それに隣接する部分
- 吸収ゾーン(absorption zone)
養分の吸収を担う。先端生長ゾーンと部分的に重複
- 貯蔵ゾーン(storage zone)
吸収された養分の一部を貯蔵物質として貯蔵する
- 老衰ゾーン(senescence zone)
古い部分
液胞形成

高分子は菌体外に放出した酵素で分解し、
低分子として吸収



大園享司(2018)
「基礎から学べる菌類生態学」,
共立出版

糸状菌の生態・機能

- 腐生：

低分子（糖、アミノ酸 etc.）、および高分子（でんぷん、セルロース、リグニン、タンパク質、脂質、 etc.）を酵素等によって分解した後の低分子を、養分として吸収する

- 寄生：

他の生きた生物に侵入して養分を奪ったり（活物栄養性）、殺してから分解・吸収する（殺生栄養性）

- 共生：

他の生きた生物を菌糸体内に取り込んだり（地衣）、他の生物の体内に侵入したりしながら（菌根菌、植物内生菌）、栄養分のやり取りをする

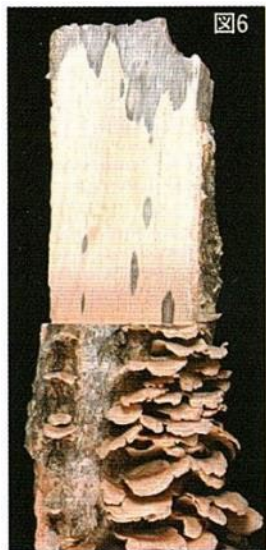


腐生菌の菌糸の機能

- 植物遺骸（落葉・落枝、倒木）や動物遺骸への侵入と分解



落葉を分解しながら成長する糸状菌の菌糸体



木材の分解
(白色腐朽菌) *



皮膚の角質や爪（ケラチン）を分解する白癬菌（水虫）*



牛革製のパスケースに生える糸状菌

共生菌の菌糸の機能

- 地衣：菌糸体が共生藻類を保護



密着した菌糸からなる
上下の皮層の間の
髓層の上部に藻類を
含む藻類層がある

- 菌根：植物の根と菌糸とで構成



樹木の根に形成された
外生菌根



根の細胞中のアーバス
キュラー菌根菌

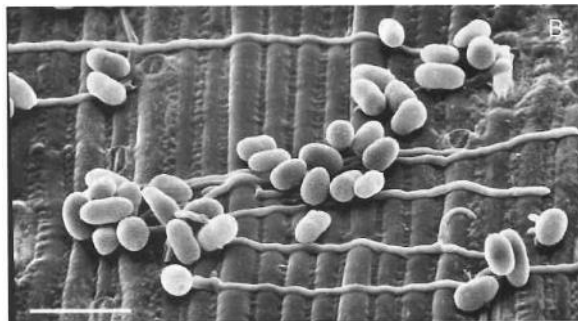


マツの実生の根から土壤
中に広がるアマタケ（外
生菌根菌）の菌糸

Boddy&Coleman (eds.). (2010)
"From Another Kingdom", Royal
Botanic Garden

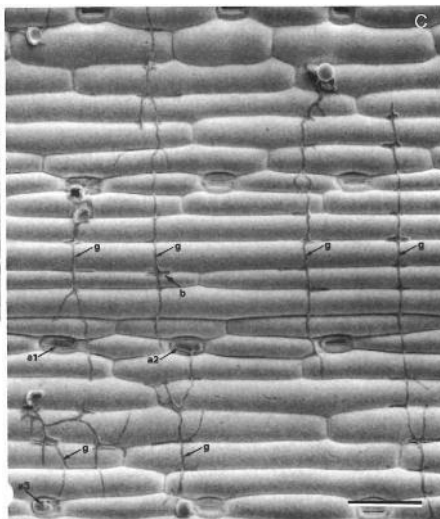
寄生菌の菌糸の機能

- 植物病原菌：植物組織への侵入・成長



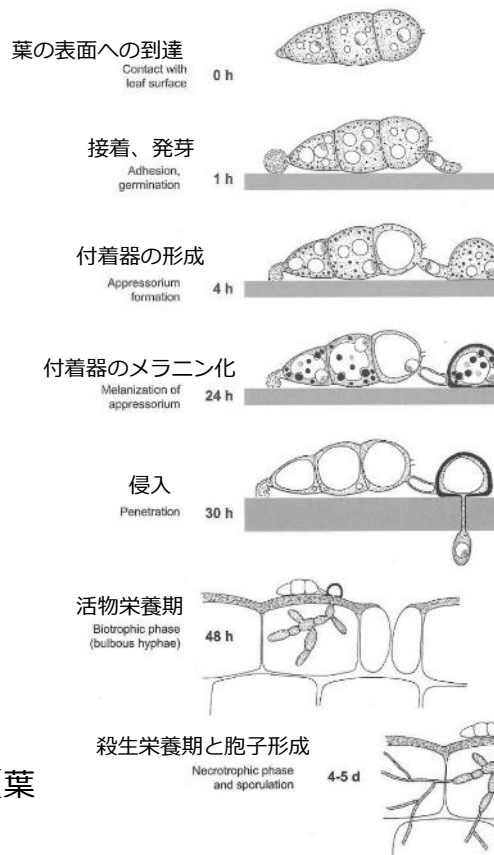
コムギ黒さび病菌の胞子の発芽と菌糸伸長

コムギの葉表面の畝と溝に垂直に菌糸が伸長していく



オオムギ小さび病菌の菌糸伸長（葉の模型上）

伸びた菌糸が気孔に到達すると、そこからオオムギの葉の内部に侵入して感染する



イネいもち病菌の胞子発芽と植物細胞への侵入過程

糸状菌の生態・機能と産業利用

- 腐生：
 - バイオレメディエーション
 - 酵素の利用
(アミラーゼ、セルラーゼ、リパーゼ etc.)
 - 発酵食品 (麴、テンペ etc.)
 - きのこ栽培
- 寄生：
 - 菌寄生菌類や昆虫寄生菌類の
生物農薬としての利用
- 共生：
 - 菌根菌類の土壌改良資材としての利用
 - 植物内生菌類による農作物の成長促進・
病害抵抗性誘導

洗濯洗剤



バイオ燃料・SAF



生物農薬 (殺虫剤)



<https://www.sdsbio.co.jp/products/bioj/19071.html>

菌根菌入り農業資材
(生物肥料)



<https://matsumoto-biken-shop.com/item-detail/175161>

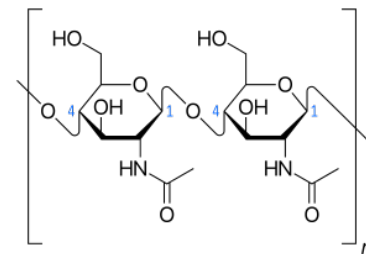
糸状菌の生産物の産業利用

- 細胞壁：キチン・キトサン
- タンパク質：生産プラットフォーム
- 貯蔵脂質：高度不飽和脂肪酸（アラキドン酸 etc.）
- 貯蔵糖質：トレハロース
- 二次代謝産物：
 - 有機酸
 - 色素
 - 香料
 - 抗生物質
 - 免疫抑制剤
 - 高脂血症薬
 - etc.

クエン酸



紅麹色素



キチン

N-アセチルグルコサミン
の重合体



菌糸内の油球（Nile Red染色）

粉ミルクへの
アラキドン酸添加

様々な医薬品・機能性食品

糸状菌の菌糸体そのものの産業利用

- 代替皮革（ヴィーガンレザー）
- 建材・家具
- 発酵食品：米麹・テンペ
- 飼料
- 菌類由来タンパク質（マイコプロテイン）

「Quorn」(代替肉)

- Quorn Foods社の製品
- 土壌菌 *Fusarium venenatum* の菌糸細胞を加工した「人工肉」
- 食感は鶏肉様
- 欧米で広く普及



<http://mirenaass.blogspot.com/2018/03/quorn.html>

「Mylo」(きのこレザー)

- Bolt Threads社の製品
- きのこの菌糸体をおかず等で培養した「代替皮革」
- 牛革と同程度の強度や耐久性を実現
- Adidasや土屋鞆製造所などで採用



<http://boltthreads.com/technology/mylo/>

「Samorost Project」

- Buřinka社の製品
- マイココンポジットと呼ばれる菌糸体ベースの材料を整形
- 軽量、高強度、熱絶縁性、耐火性、撥水性の建材・家具を開発



<https://www.inovaceodburinky.cz/en/projects/samorost-from-burinka/>

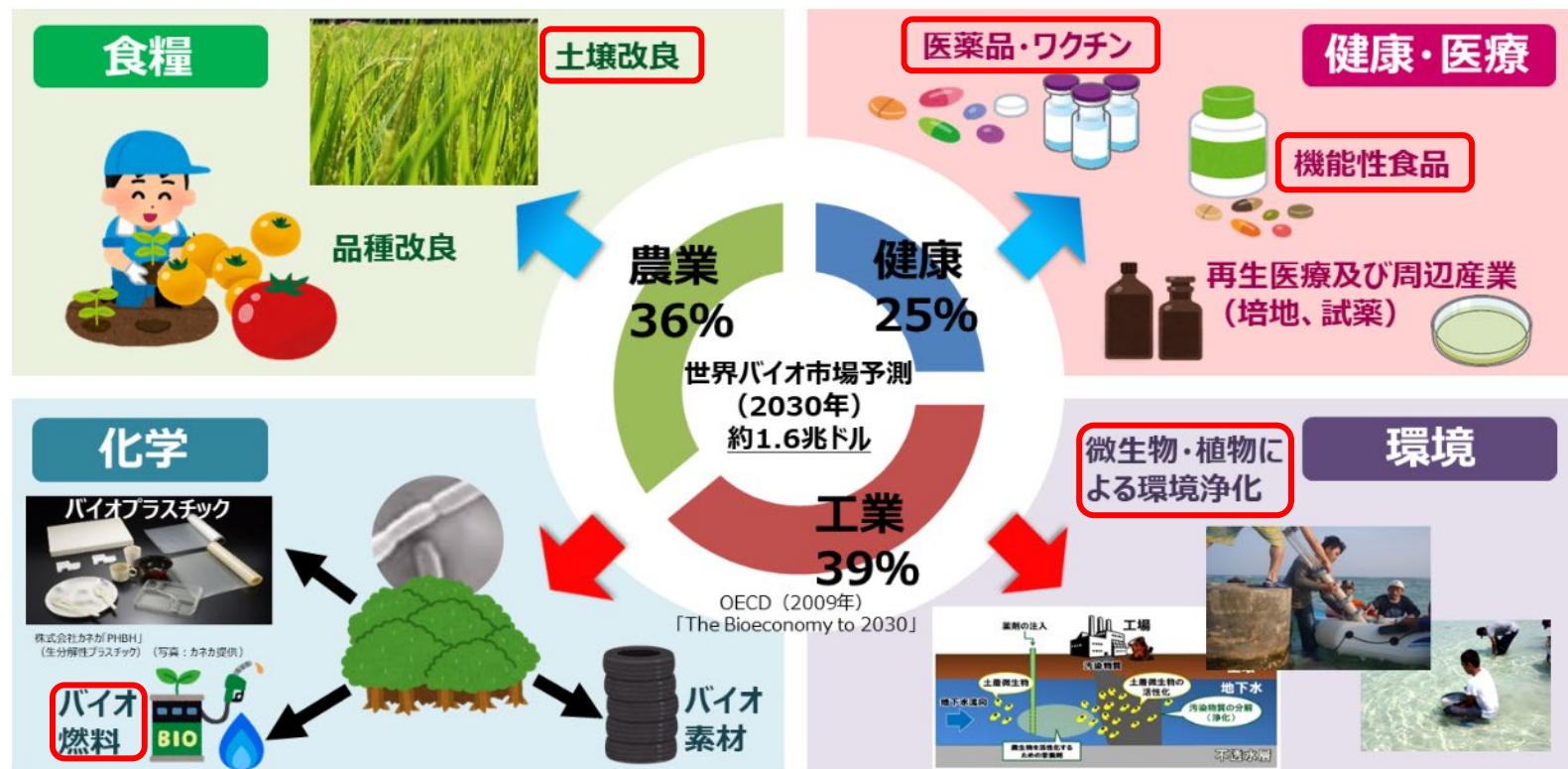
「THE FILET」(3Dプリント・フィッシュ)

- Revo Foods社の製品
- 各種糸状菌由来の代替タンパク質を3Dプリントして作る「代替サーモン」
- オーストリアで上市



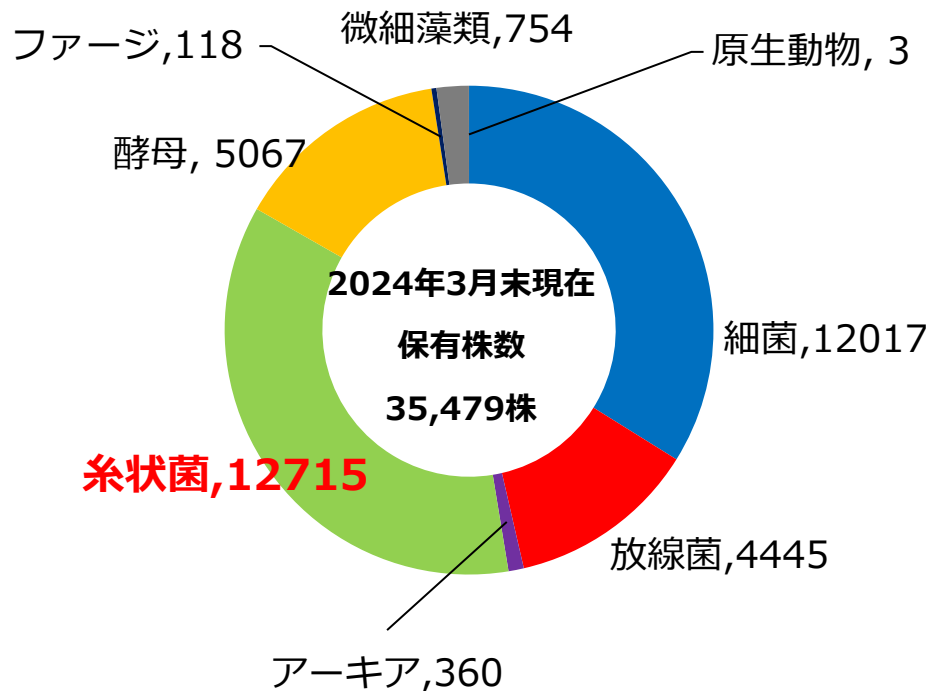
http://www.excite.co.jp/news/article/Karapaia_52325692/

糸状菌が利用可能なバイオエコノミー分野

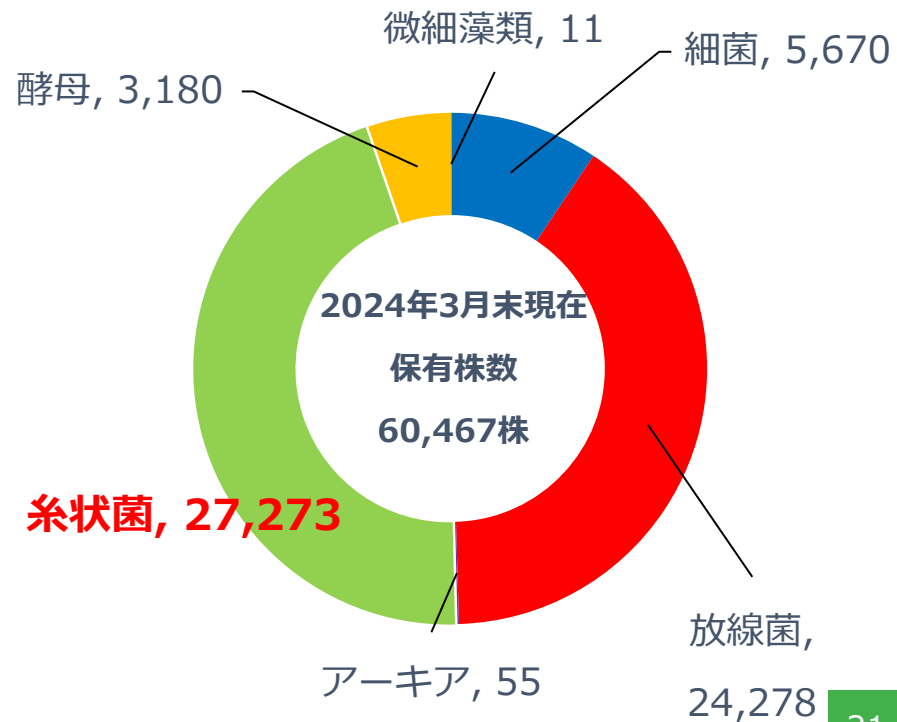


NBRCの糸状菌株保有状況

NBRC株

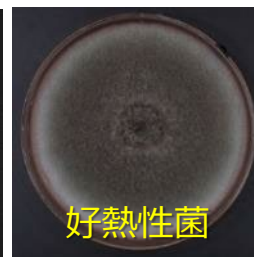
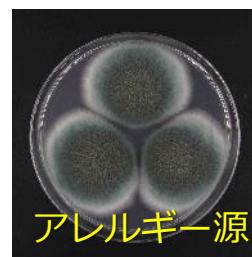
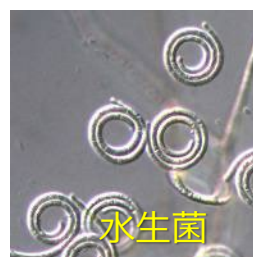
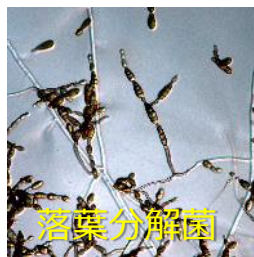


RD株



NBRCの多様な糸状菌ラインナップ

- 発酵食品生産菌
- 冬虫夏草類
- きのこと（担子菌）類
木材腐朽菌、落葉分解菌、菌根菌
- 植物内生菌類
- その他、カビ類



ぜひご活用ください！