

## ■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。  
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

\* :著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC:著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

②:パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし:上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 UTokyo OCW 朝日講座「知の冒険」  
Copyright 2014, 奈良一秀

The University of Tokyo / UTokyo OCW The Asahi Lectures “Adventures of the Mind”  
Copyright 2014, Kazuhide Nara

# 自然界にあふれる生物間共生

新領域創成科学研究科  
自然環境学専攻  
奈良 一秀

# 今日の内容

- 人にとっての森林
- 森林と野生生物
- 生物間の共生、菌根
- 森林と生物多様性
- 菌根菌と森林の保護、再生
- グループワーク討論



# 森林の多面的(公益的)機能

生物多様性保全

地球環境保全

土砂災害防止機能

土壤保全機能

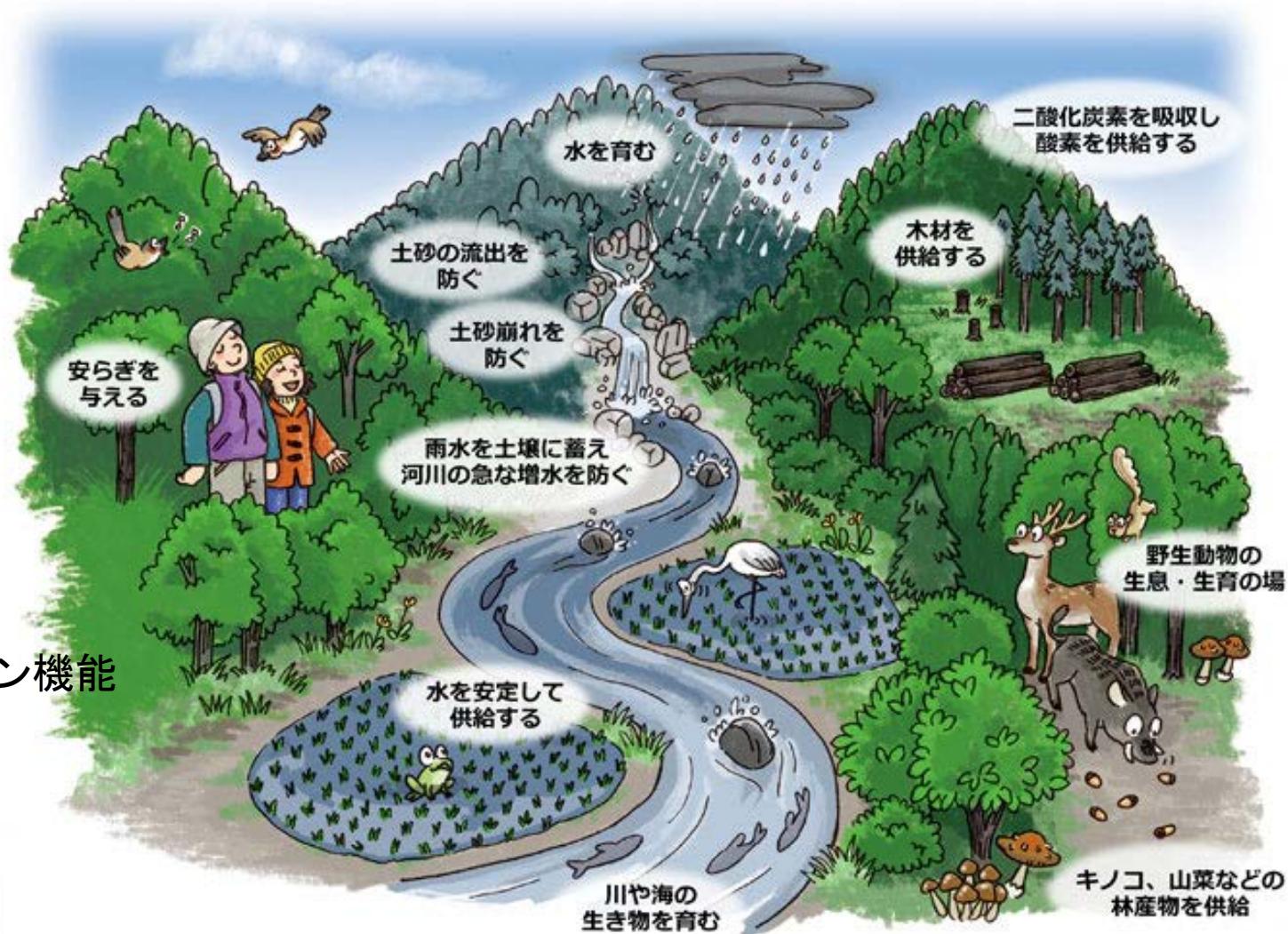
水源涵養機能

快適環境形成機能

保健・レクリエーション機能

文化機能

物質生産機能



\* イラスト「森林の多面的機能」

<http://www.gov-online.go.jp/useful/article/201211/3.html>  
「政府広報オンライン」より(2015/03/16確認)

# 人間にとての森林・生態系の経済価値

日本学術会議による森林の経済価値

表面浸食防止	282,565億円
水質浄化	146,361億円
水資源貯留	87,407億円
表層崩壊防止	84,421億円
洪水緩和	64,686億円
保健・レク	22,546億円
二酸化炭素吸收	12,391億円
化石燃料代替	2.261億円

日本の森林の経済価値は  
70兆円

国連環境会議(UNEP)

TEEB(2010) The Economics of Ecosystem and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB

世界の自然の経済価値は400兆円

森林による二酸化炭素の固定: 370兆円

# 生態系の経済価値

Constanza (1997) Nature 387

## 生態系機能の種類

生態系機能の種類	評価額 (10億ドル/年)
大気の調整(酸素、オゾンなど)	1,341
気候の調節(温室効果ガスなど)	684
自然災害の調節(洪水、干ばつなど)	1,779
水の調整・供給	2,807
土壤の形成と浸食の制御	629
栄養塩の循環	17,075
有害物の浄化	2,277
受粉	117
野生生物	541
食料生産	1,386
天然素材	721
遺伝子資源	79
レクリエーション	815
文化	3,015
合計	33,266

3500兆円

# 森林と文明(イースター島の悲劇)

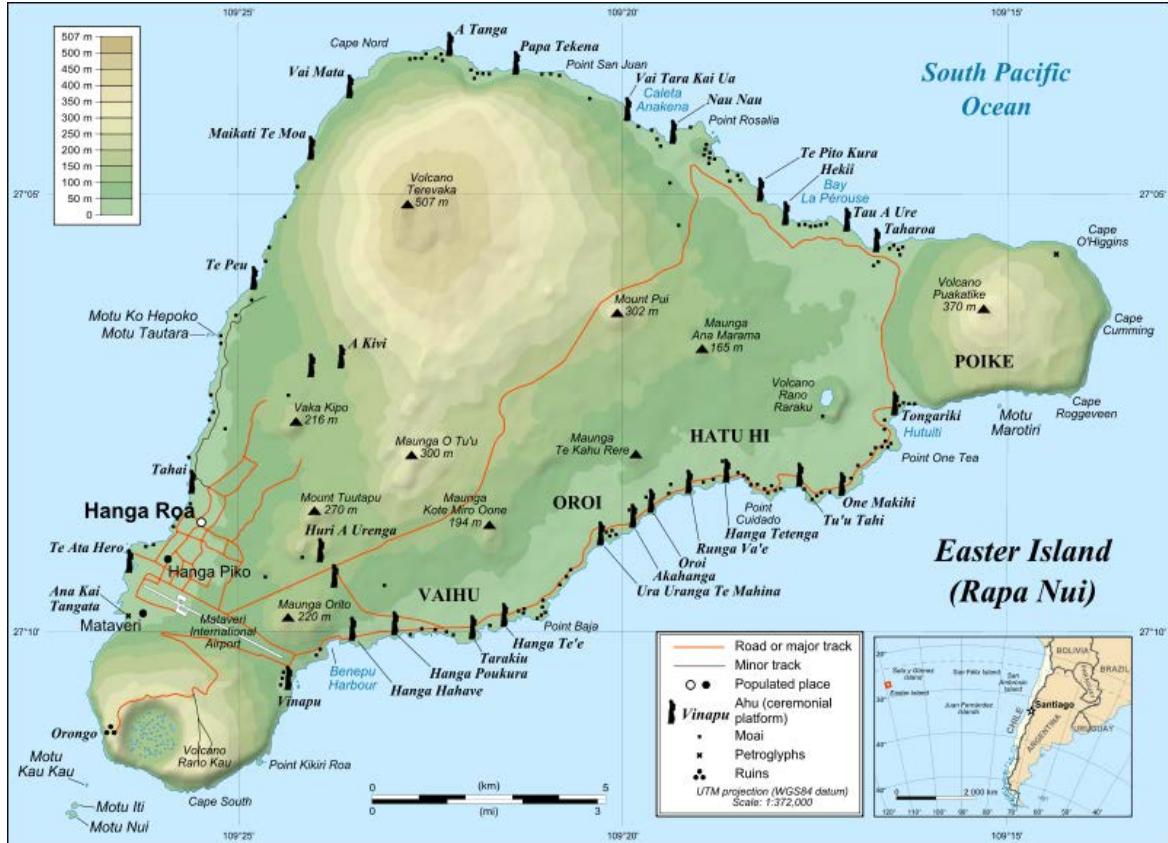


Image by Eric Gaba (Sting), translated by Bamse, from Wikimedia Commons

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Easter\\_Island\\_map-en.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Easter_Island_map-en.svg)

CC BY-SA 2.5

面積120km<sup>2</sup>, 南米から3700km  
5世紀に入植、森林に覆われる

1550年頃には7000人まで増加  
木材需要、開墾のため森林消滅  
資源を巡る戦乱状態、文明崩壊

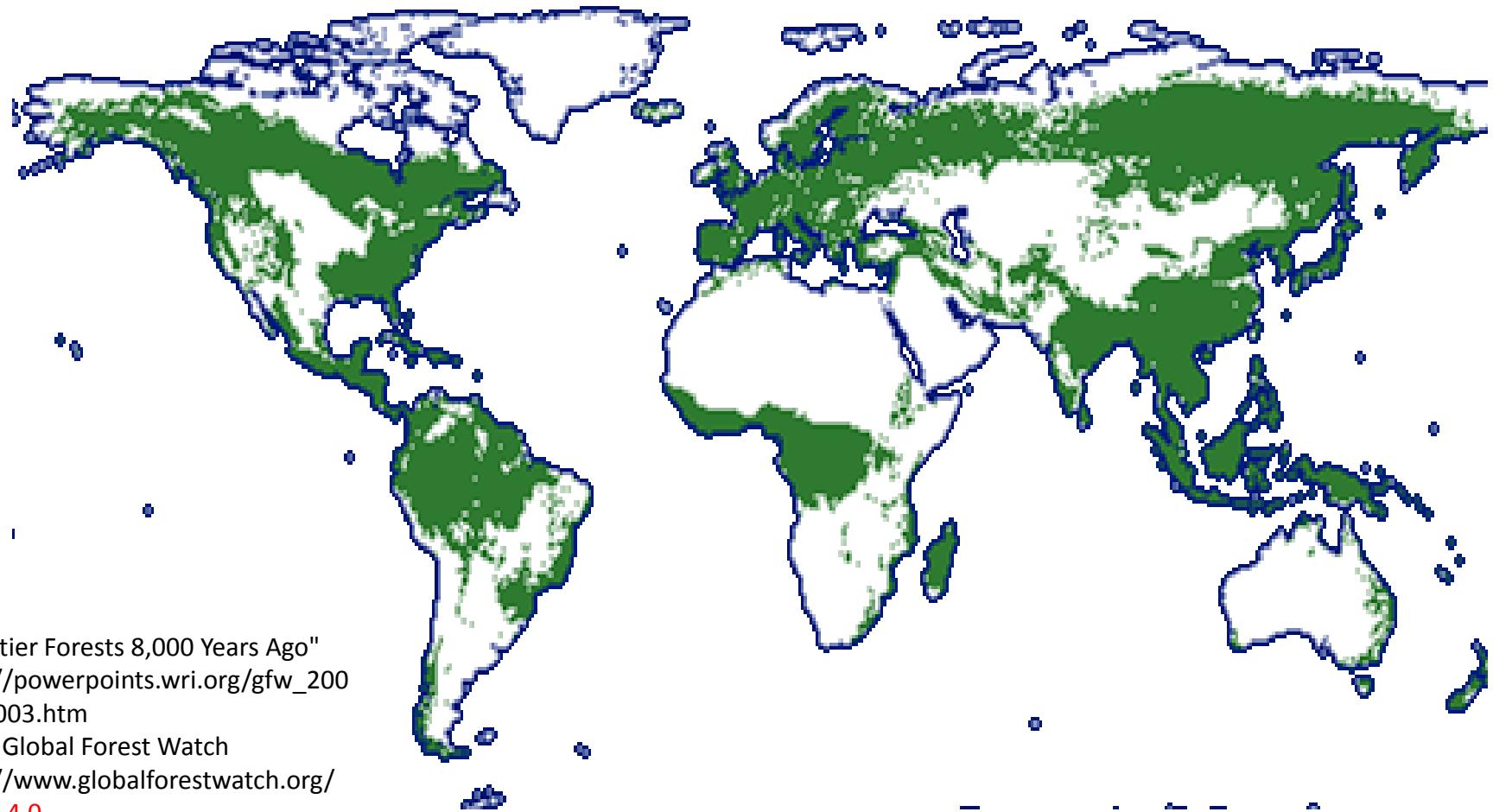
原始的生活、人口は1/10

森林の消滅が文明の消滅につな  
がった例は数多い  
(メソポタミア、ギリシャ、ローマ、  
黄河)

「環境と文明(湯浅赳男)より」

森林が人類にとって重要なことは歴史から明らか

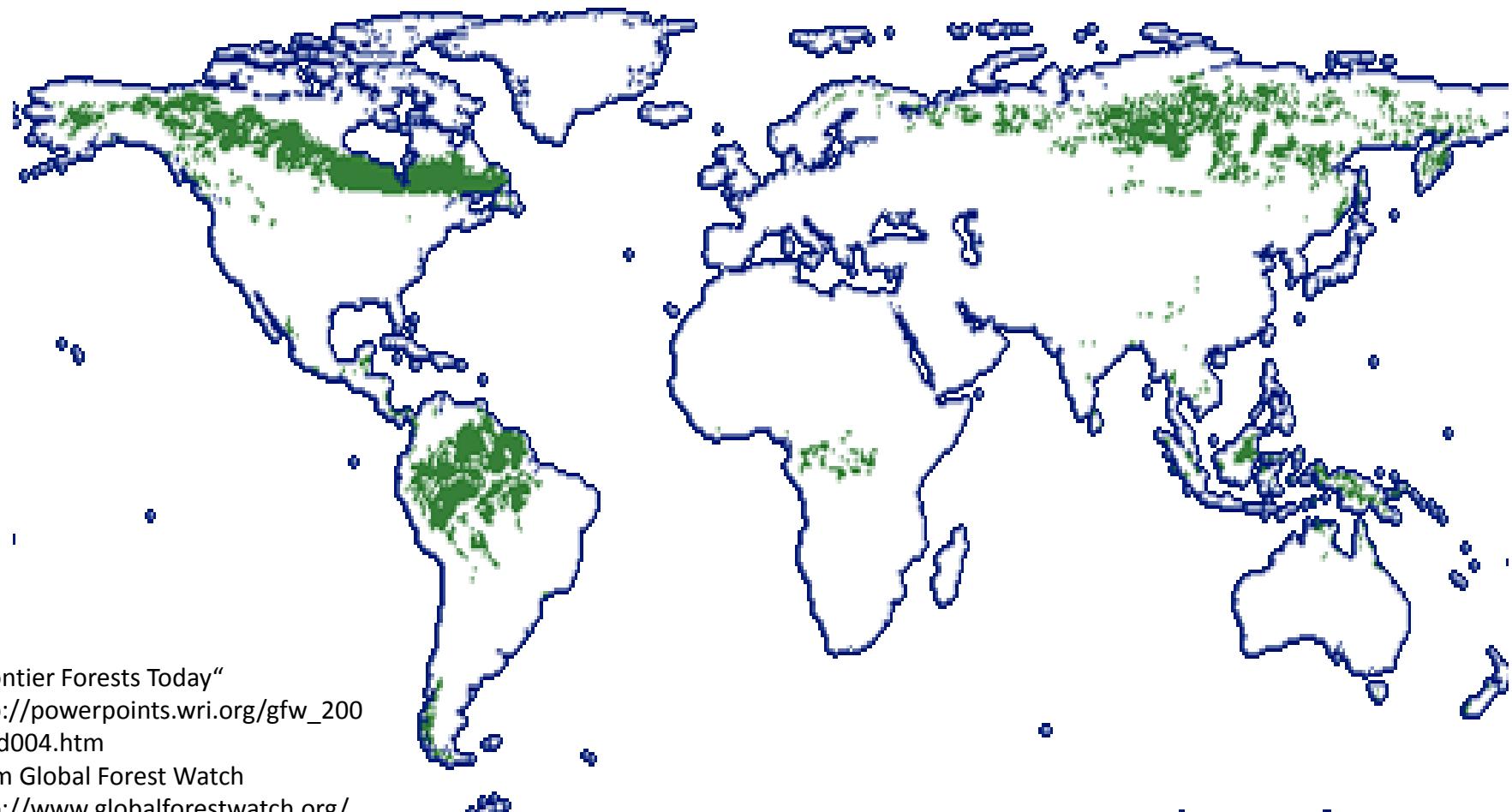
# 8000年前の原生林



"Frontier Forests 8,000 Years Ago"  
[http://powerpoints.wri.org/gfw\\_2000/sld003.htm](http://powerpoints.wri.org/gfw_2000/sld003.htm)  
From Global Forest Watch  
<http://www.globalforestwatch.org/>  
CC BY 4.0

乾燥地および極地を除いたほとんどの部分は原生林だった

# 現在(1997年)の原生林

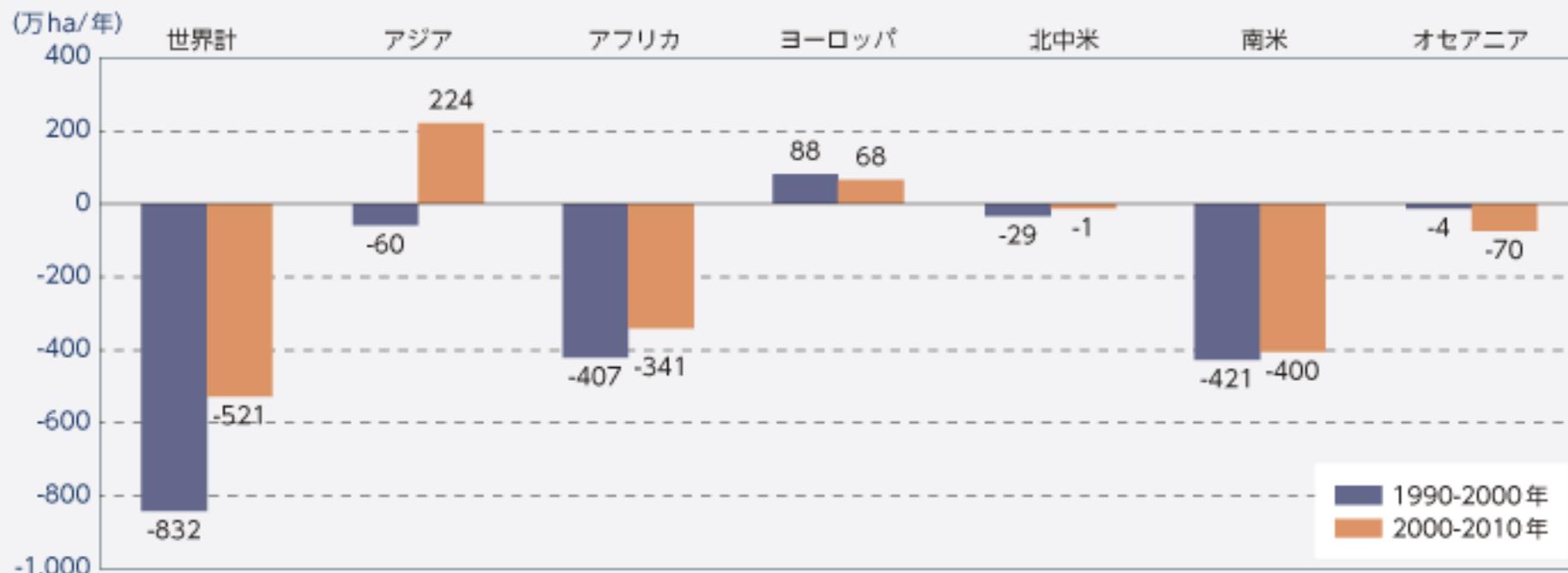


"Frontier Forests Today"  
[http://powerpoints.wri.org/gfw\\_2000/sld004.htm](http://powerpoints.wri.org/gfw_2000/sld004.htm)  
From Global Forest Watch  
<http://www.globalforestwatch.org/>  
CC BY 4.0

8割以上が消失。地域によっては95%以上。

# 現在も減り続けている森林

図2-2-8 世界の森林面積の変化



資料：FAO Global Forest Resources Assessment 2010

この数字以上に質の衰退はひどい

\* 環境省『環境白書/循環型社会白書/生物多様性白書(平成25年版)』  
<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h25/index.html>  
第1部・第2章・第2節「経済社会の変革への動き」  
図2-2-8 世界の森林面積の変化

# 森林が減る理由



違法伐採

\* © mongabay.com

\* © mongabay.com

世界的の需要の増大  
地元住民の貧困  
「切れば売れる、生き  
ていける」



© mongabay.com

# 森林が減る理由

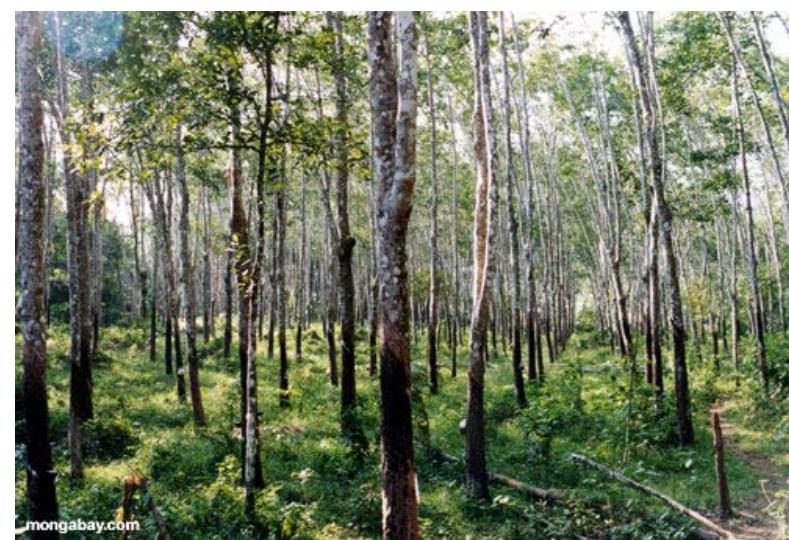
\* Taken 09/11/2013 © Ulet Ifansasti / Greenpeace



大規模な農地転用  
アブラヤシ(左下)  
ゴムの木(右下)



\* © mongabay.com



\* © mongabay.com

主に私たちが豊かに(贅沢に)暮らすために使われる

# 企業広告の一例

## MES(植物系洗剤原料)の開発

環境先進企業としての  
事業取組の集大成

著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました。

それが本当にエコなんですか？本質を見ることが重要

このまま人類が増え続け、  
「豊かさ」を追い続ければ…

森が消え  
イースター島の悲劇が地球規模でおきるかも



森林：野生生物の視点  
陸上生物の8割が生息する貴重な場所

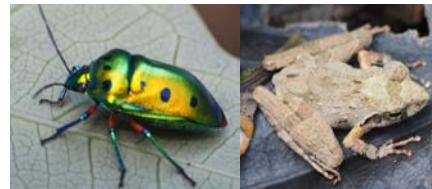
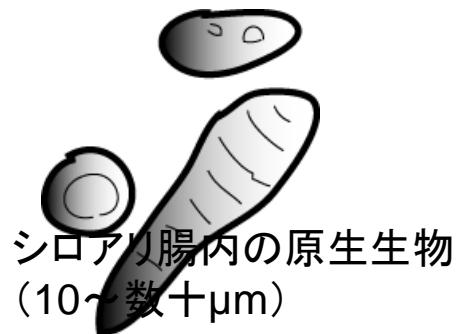
# 生態系の中の生物間相互作用

- 競争
- 草食
- 捕食
- 受粉
- 媒介
- 分解
- 寄生
- 共生



植物(22/30万種)

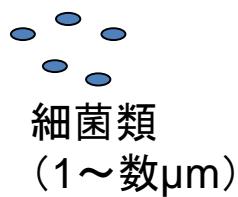
(記載種数/推定種数)  
Mora et al. 2011, Plos Biol.



動物(95/777万種)



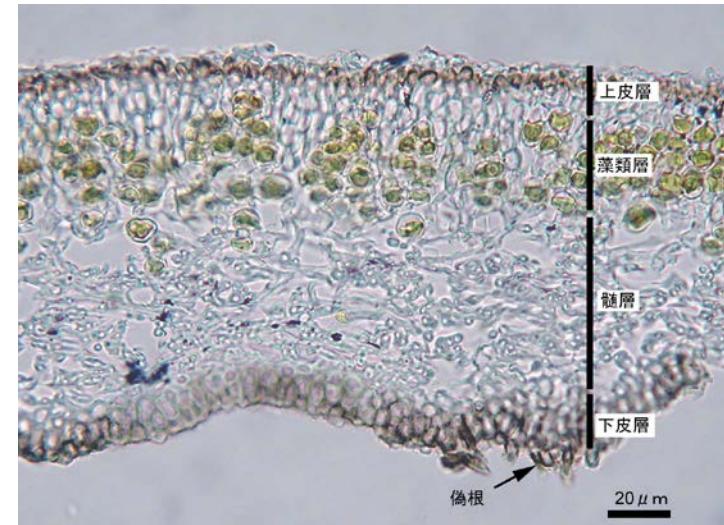
菌類(10/61万種)



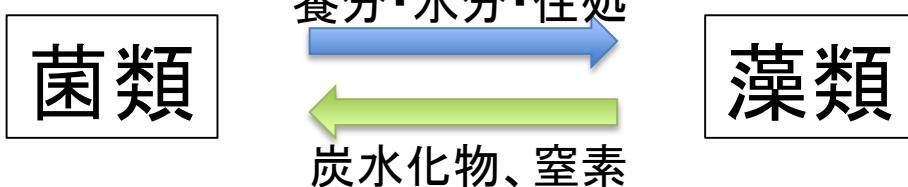
- 全ての生物は他の多くの生物と関係
- 1つの生物の変化が生態系全体に及ぶことも

# 共生(symbiosis)

- Frank (1877)が地衣類に初めて用いた(Living together)
- 現在はいろいろな分野でいろいろな使われ方
- 最も厳密には「異なる生物が互いに利益になるように密接に結びつき、あたかも1つの生物体のように振る舞うこと」



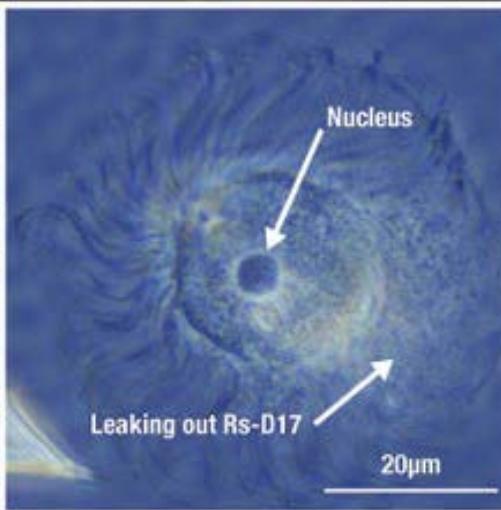
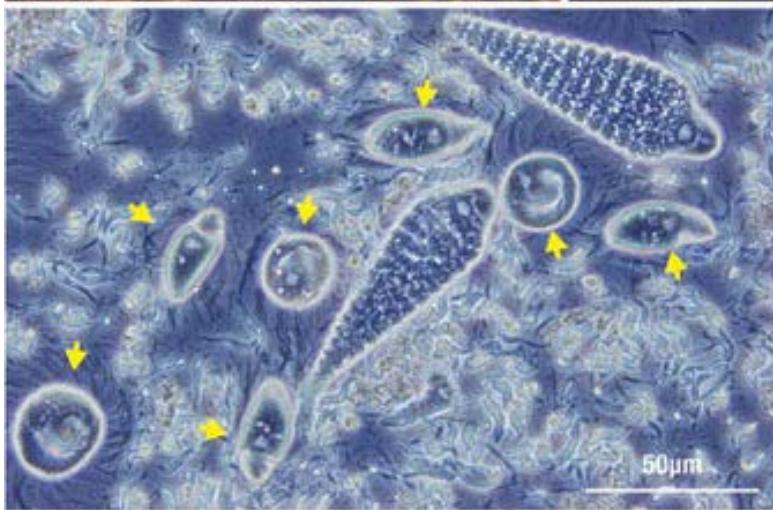
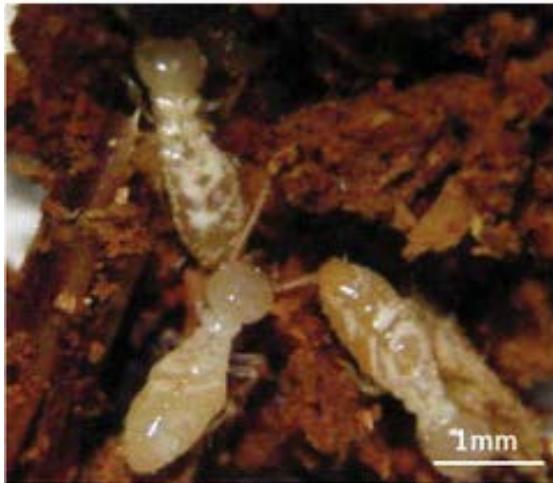
\* 写真提供: 大村嘉人(国立科学博物館)



共生によって単独では生きられない厳しい環境に適応・生育

# 消化管内共生(シロアリの事例)

Hongo et al. 2008, PNAS



- 餌は消化しにくい木材
- 腸内に何百種もの微生物、体重の1/3に達する
- シロアリの腸内でしか生きられない原生生物が多数
- 微生物によって木材を効率的に消化、利用 (74 - 99%)
- Nの少ない木材(<0.1%), 腸内の微生物によって窒素固定しタンパク質合成

Riken 2008

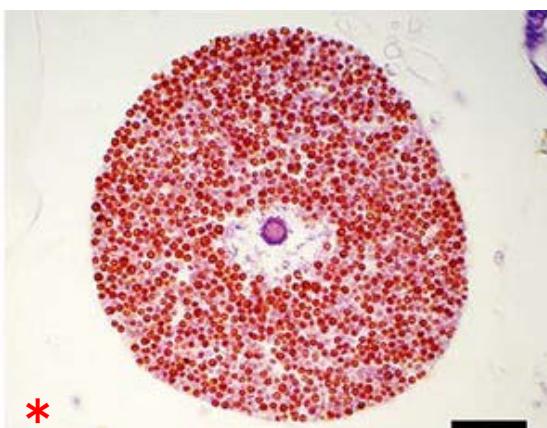
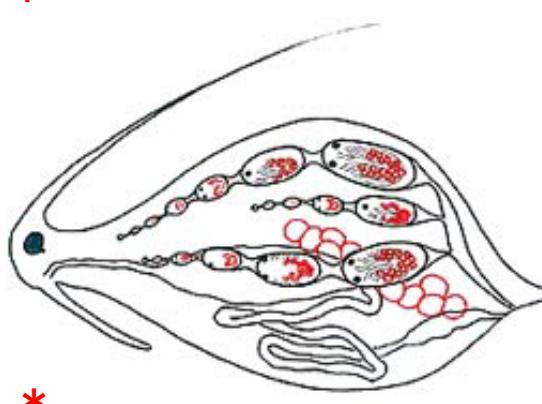
共生によって他の生物が利用できない資源を利用するように進化

\* 画像提供:理化学研究所

プレスリリース2008年4月1日「シロアリ腸内共生微生物のゲノム解読に世界で初めて成功-培養することができない微生物の機能解明への突破口-」([http://www.riken.jp/~media/riken/pr/press/2008/20080401\\_1/20080401\\_1.pdf](http://www.riken.jp/~media/riken/pr/press/2008/20080401_1/20080401_1.pdf))

# 消化管内共生 (エンドウヒゲナガアブラムシの事例)

産総研TODAY 2004.6より



- エサは偏った栄養(GluとAsp以外のアミノ酸が無い)
- 菌細胞内に共生バクテリア *Buchnera aphidicola*
- 共生細菌の作るアミノ酸に依存
- 別のバクテリアの共生によりシロツメクサも利用

「共生細菌が昆虫の植物適応を変える」(産総研Today 2004.06 VOL.4-6)より

[http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource\\_images/aist\\_j/aistinfo/aist\\_today/vol04\\_06/vol04\\_06\\_p07\\_09.pdf](http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol04_06/vol04_06_p07_09.pdf)  
p.7 図1およびp.8 図2 国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)提供

# 消化管内共生(ほとんどの動物)

## 人間の場合

- 100兆個のバクテリア(1.5 kg)
- 人間の細胞より多い
- 消化、ビタミン合成、免疫など
- 肥満、糖尿、ガンなどにも関係

動物は微生物との共生によって生きている

著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を  
削除しました。

明治プロビオヨーグルトR-1の  
写真

*Lactobacillus bulgaricus* OLL1073R-1

著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を  
削除しました。

明治プロビオヨーグルトLG21  
の写真

*Lactobacillus gasseri* LG21  
Against *Helicobacter pylori*

著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を  
削除しました。

ダノンビオの写真

*Bifidobacterium* BE80  
For beauty

# 菌根

(陸上で最も普遍的かつ重要な共生)

植物の根に菌類が共生し、互いに助け合う関係  
およそ130年前に発見されて、名前がつけられた

Frank 1885

ギリシャ語

mycos + rhiza

英語

Mycorrhiza

pl. mycorrhizae

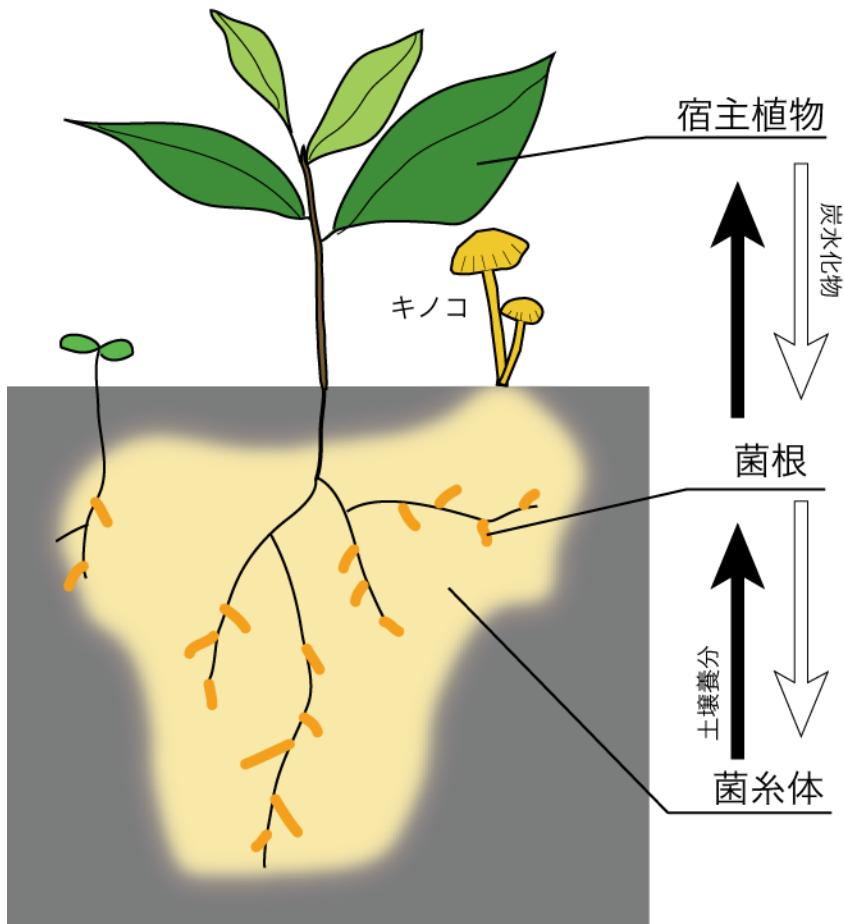
日本語

[菌] [根]

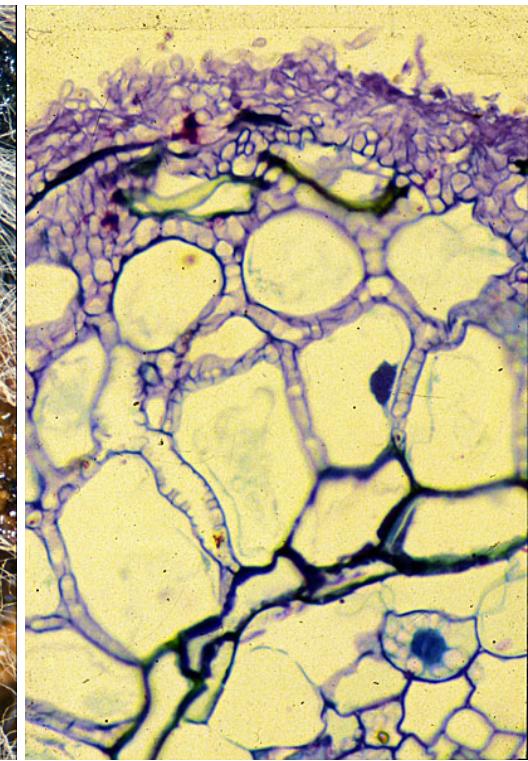
陸上は植物と菌の世界  
ほとんどの植物は菌根共生



# 外生菌根共生(樹木とキノコの共生)



外生菌根と土壌中に伸びた菌糸体



外生菌根の断面

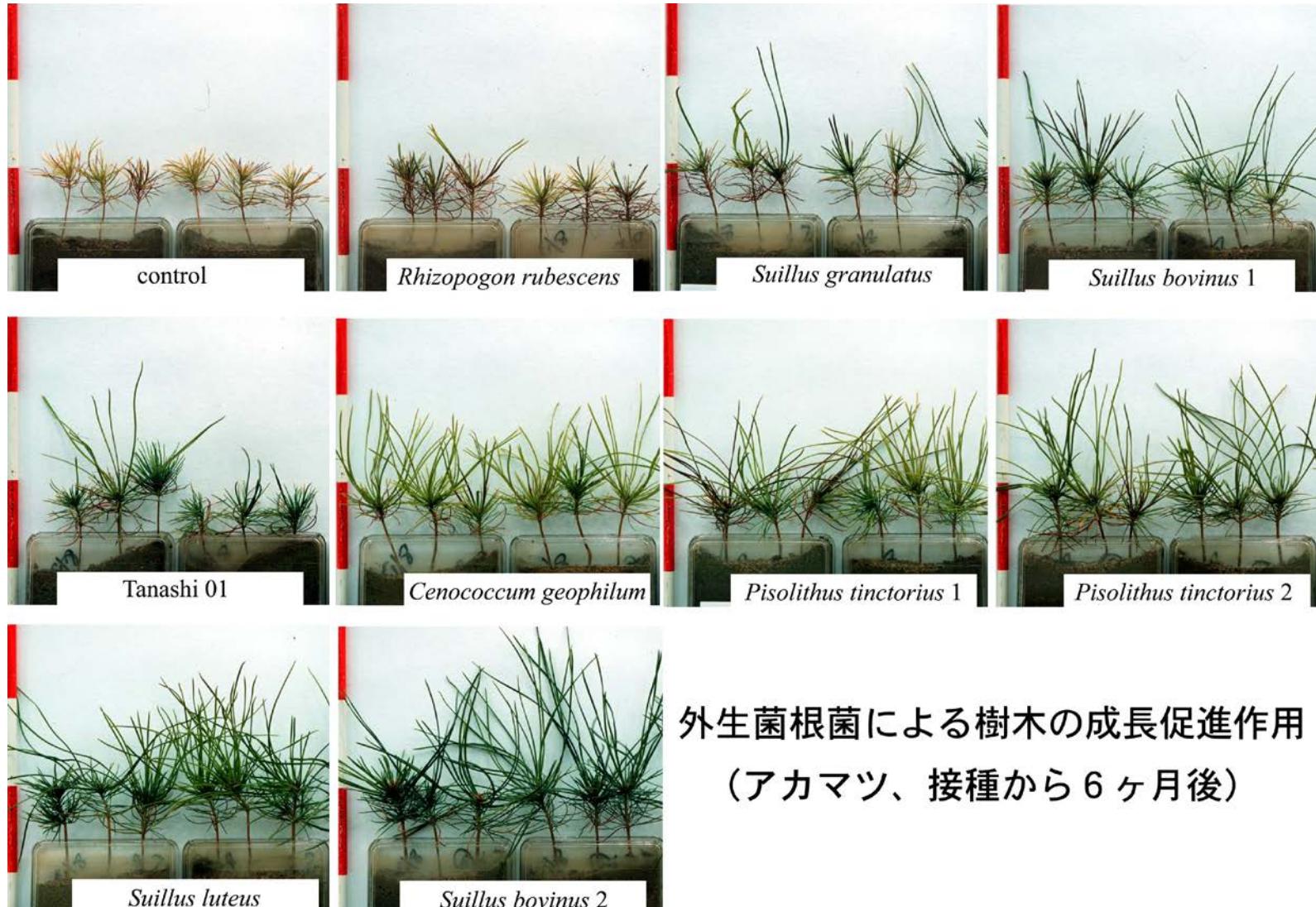
森林で優占する樹木の菌根  
互いに不足するものを交換によって獲得する相利共生



外生菌根菌は世界で10,000種以上  
地面から生えるキノコの多くは菌根菌



# 菌根菌による植物の成長促進



外生菌根菌による樹木の成長促進作用  
(アカマツ、接種から 6 ヶ月後)

菌根菌なしでは植物は育ちません

# 菌根菌による植物の成長促進 (ミヤマヤナギの例)



Control



*Pisolithus* sp.4 No.1



*Hebeloma leucosarx*



*Cenococcum geophilum*



*Scleroderma bovista* (Pinus)



*Tylopilus neofelleus*



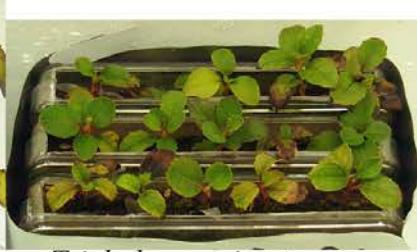
*Laccaria amethystina*



*Hebeloma mesophaeum*



*Scleroderma bovista* (61)



*Tricholoma sejunctum*



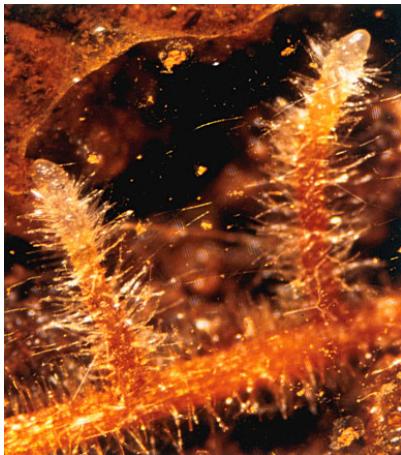
*Russula sororia*



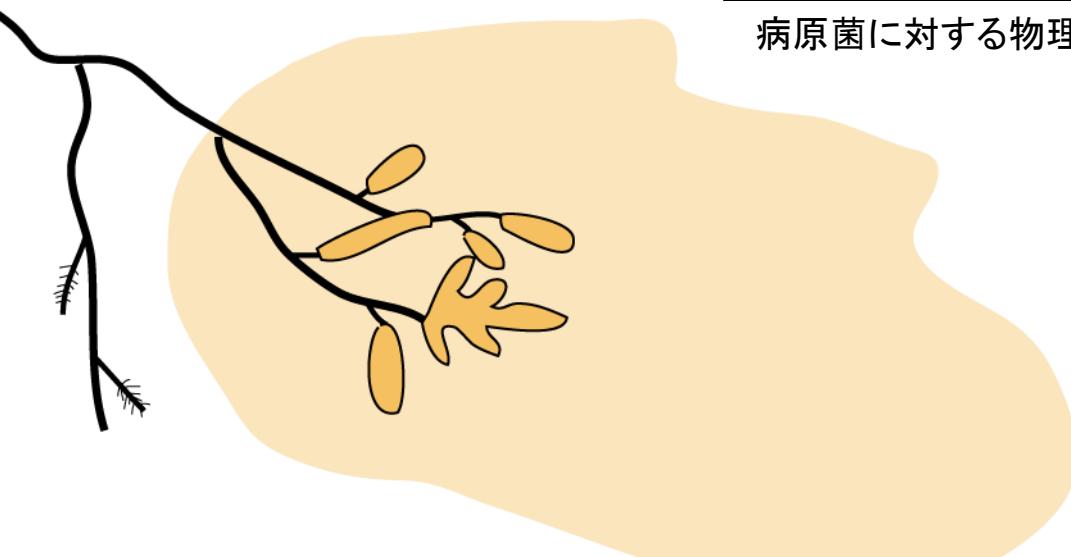
*Amanita pantherina*

菌根菌なしでは植物は育ちません

# なぜ菌根菌が有益なのか



マツの根毛  
(野外で見ることは無い)



## 物理的な菌糸の利点

根毛	菌糸
太さ	10μm
長さ	<2mm >数十cm

利点  
土壌中のより小さい隙間に侵入可能  
より遠い土壌にもアクセス可能

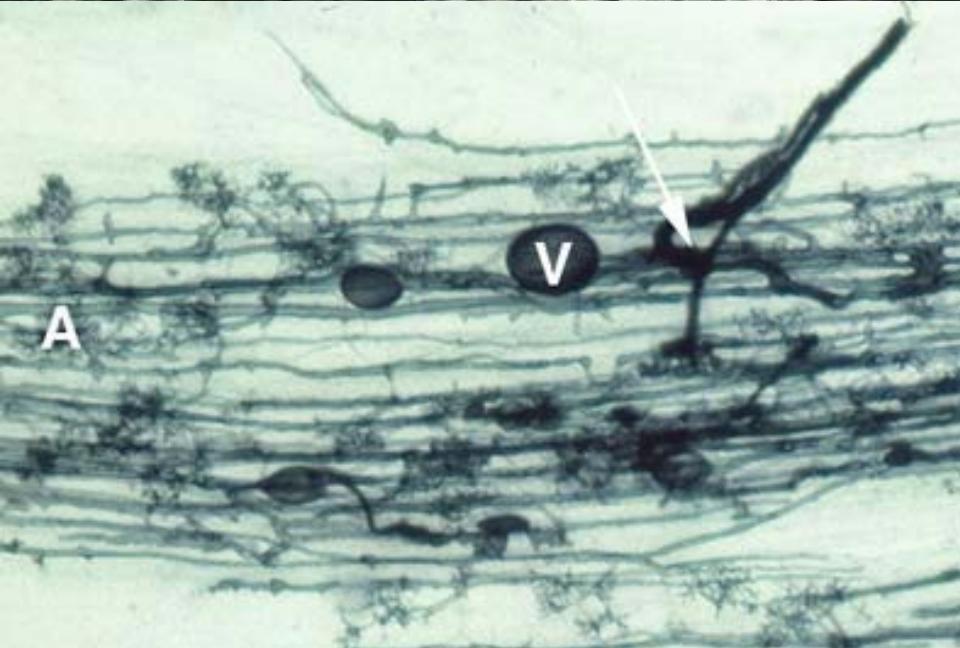
## 化学的な菌糸の利点

様々な酵素の分泌 → 土壌中に存在する多くの有機化合物中のリンや窒素を利用可能  
有機酸の分泌 → 難容性無機化合物から栄養塩類を溶かして利用する

## 生物学的な菌糸の利点

病原菌に対する物理的障壁、抗生物質の産出による耐病性向上

根に比べて菌糸の方が養分吸収器官として遥かに優れる



# アーバスキュラー 菌根

\*



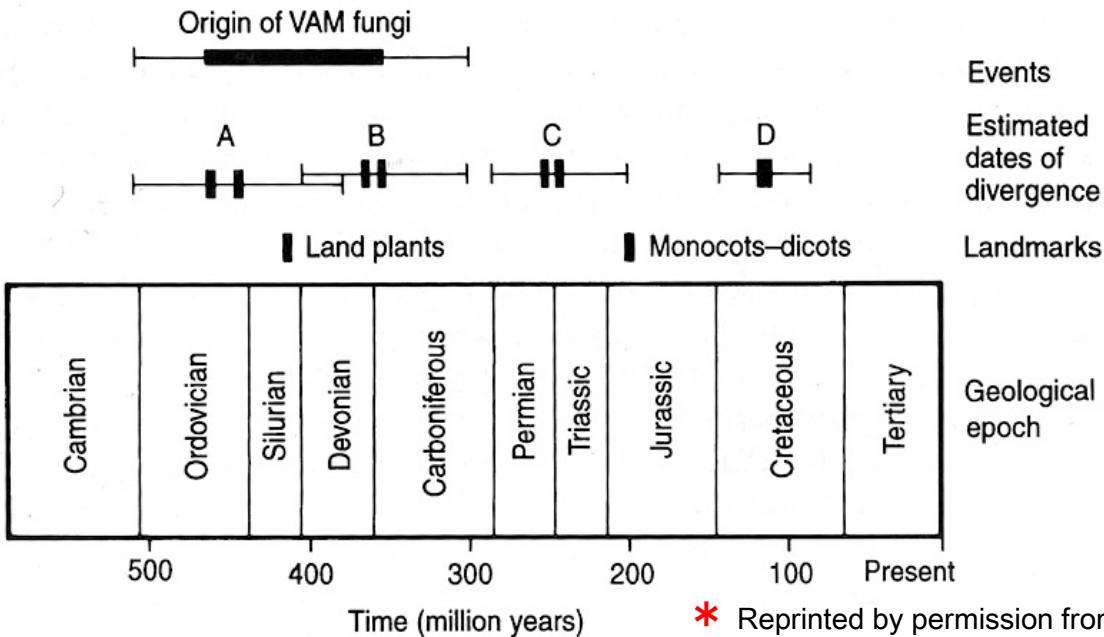
\*

MYCORRHIZAL ASSOCIATIONS: The Web Resource  
© Mark Brundrett, <http://mycorrhizas.info/index.html>

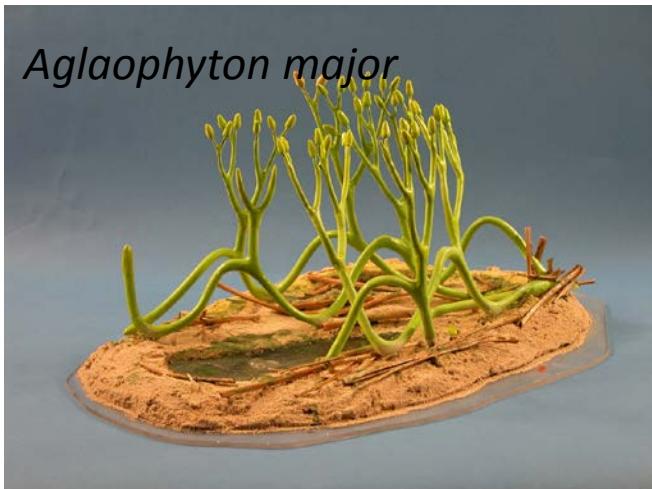
陸上植物の8割以上。草原、多くの農作物。

\*

# 植物と菌類の共生の起源



\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, 363(6424):67-69, p.68 Fig.2, copyright 1993.



著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を  
削除しました。

Sally E. Smith & David Read,  
*Mycorrhizal Symbiosis* (Third Edition),  
Elsevier, 2008.

p.34 Figure 1.9(a)-(d)  
"Fossil arbuscular mycorrhizas"

デボン紀(約4億年前)の植  
物化石に見られるAM菌根

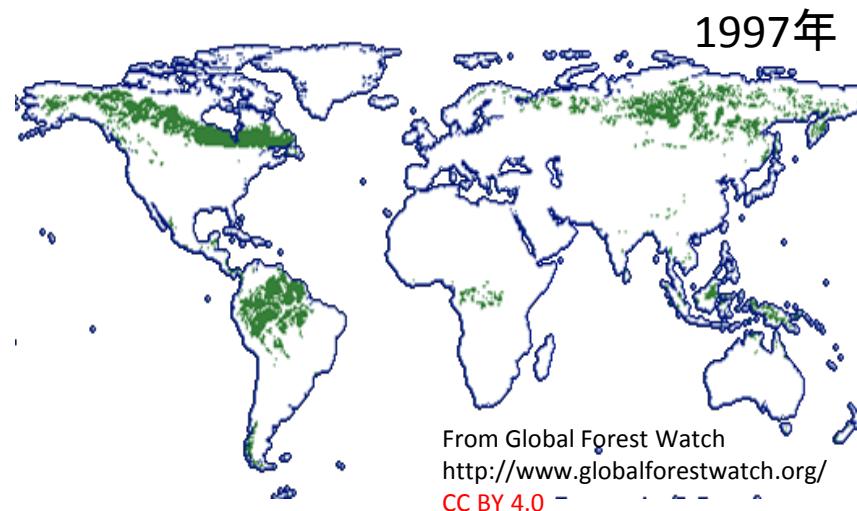
根ができるより前に菌と共生  
菌根菌の助けによって植物は陸上に進出  
菌根共生は4億年以上つづく関係

# 森林と生物多様性

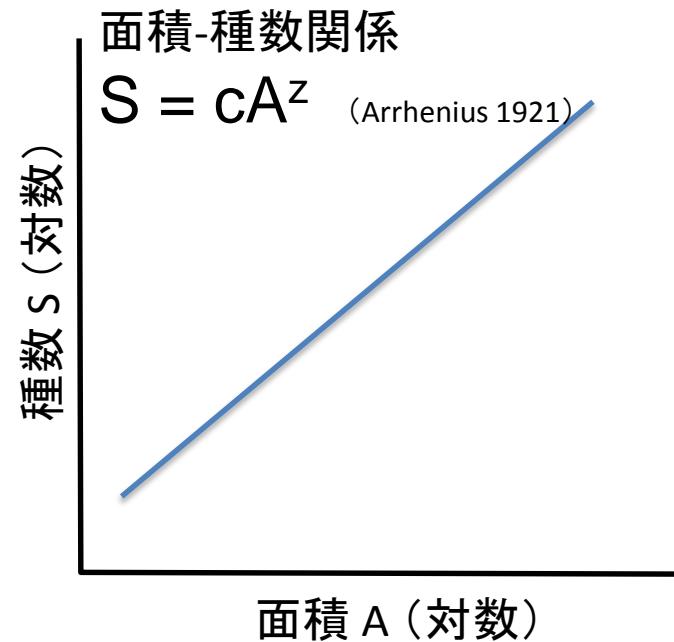
生物多様性：(1)種内の遺伝的多様性、(2)種の多様性、(3)生態系の多様性

生物多様性条約(1992)、生物多様性基本法(2008)

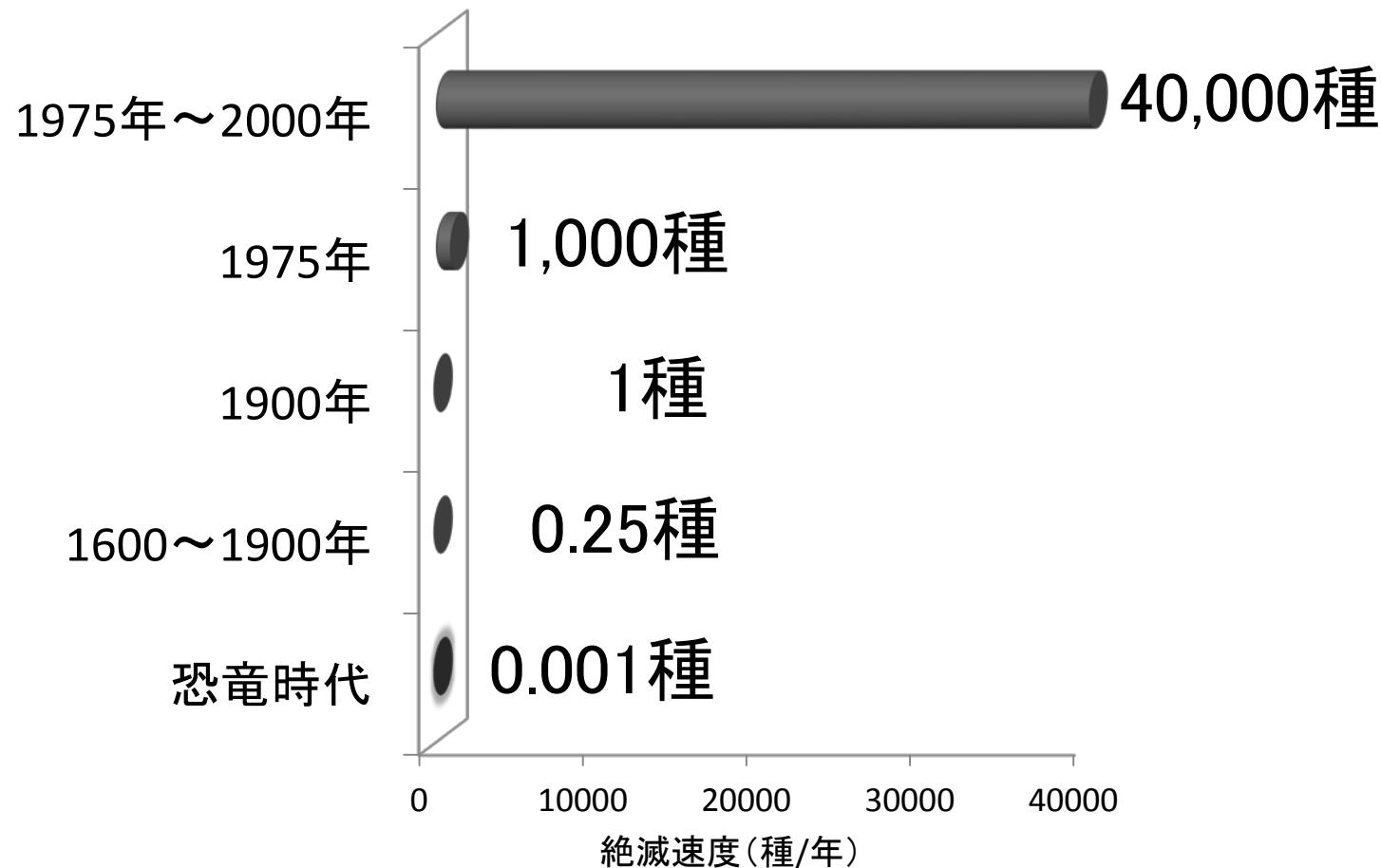
# 原生林の減少と野生生物への影響



- 森林には陸上の生物種の約8割が生息
- それぞれの生物は何億年、何千万年という長い進化の過程を経て、森林の環境に適応
- 森林が失われると他の環境では生きられないため絶滅



# 急激に進む生物種の絶滅



人類社会の発展(?)が影響



ボルネオ熱帯林(1ha)  
樹木 300種  
菌根菌 100種  
昆虫 数千種?

多様な林床植物  
多様な動物、菌

プランテーションになると  
その全てが失われる



日本の冷温帯林(1ha)  
樹木 20~30種  
菌根菌 100~200種

多様な林床植物  
各樹種に特有な昆虫  
各樹種に特有な菌

スギ林になるとその  
全てが失われる



柏キャンパス

生産技術研究所の移転  
森林伐採  
県の絶滅危惧植物

\* 柏キャンパス航空写真(2012.6.26撮影)  
東京大学柏地区共通事務センター提供

\*

# 林床の稀少植物と菌根菌ネットワーク

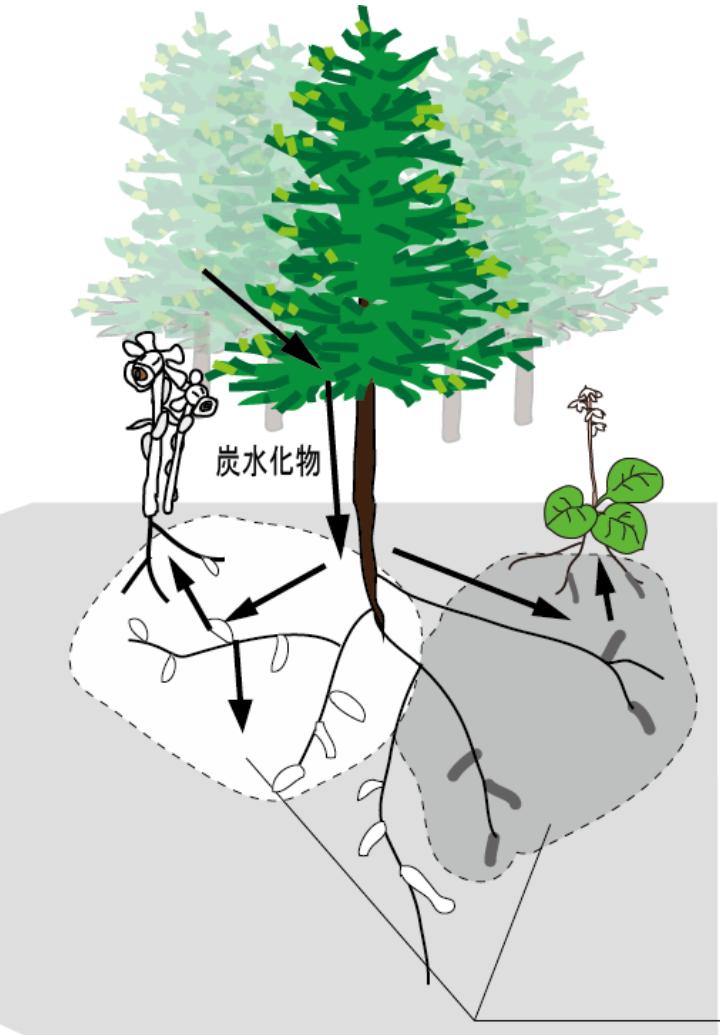


ヒメムヨウラン

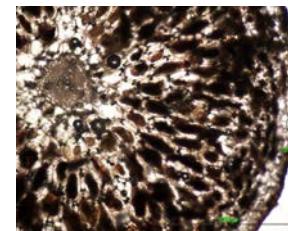


ツチアケビ

菌従属栄養植物



キンラン



ベニバナイチヤクソウ

混合栄養植物

樹木の光合成産物を菌根菌を通して受け取ることで生活

# 菌根共生と森林の保護、再生

# 森林再生と菌根共生

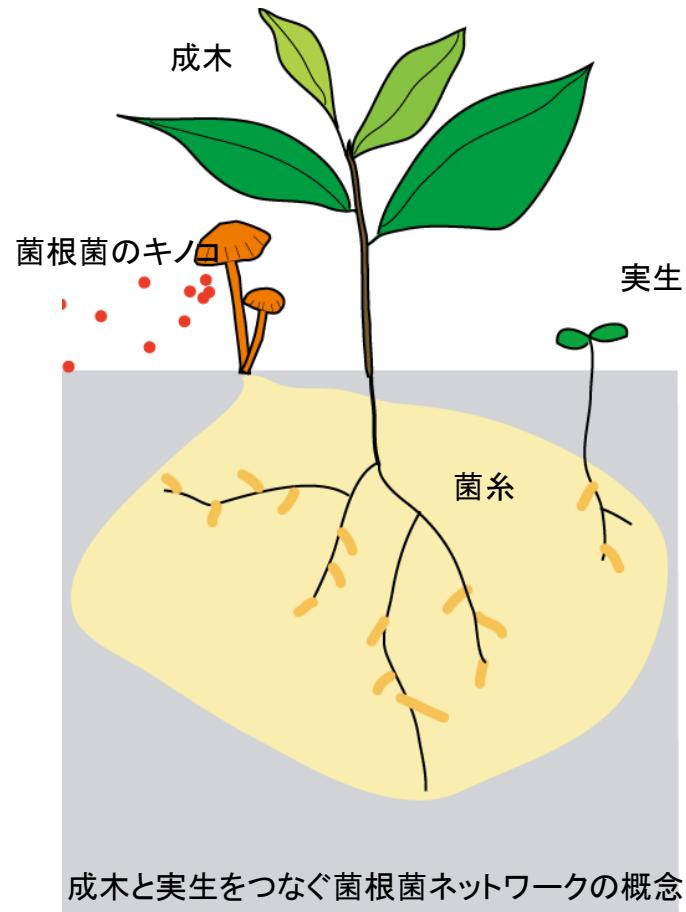


- 既に出来上がった森林ではどこにでも菌根菌
- 攪乱があると菌根菌の不在が大きな問題
- 菌根菌のある場所でしか樹木が定着できない

Nara 2006a, *New Phytol*



# 菌根菌のネットワーク



左端の苗から菌糸が伸び、早くネットワークに接続された実生ほど成長増

- 菌糸ネットワークは確実な感染経路
- 攢乱地などの土壤中に菌根菌が不足する場所では菌根菌の菌糸ネットワークが樹木の定着を決定する

# 森林形成と菌根菌のネットワーク

- 初期の森林を形成する高木樹種の定着も、既に定着したヤナギから伸びる菌根菌ネットワークのあるところのみ

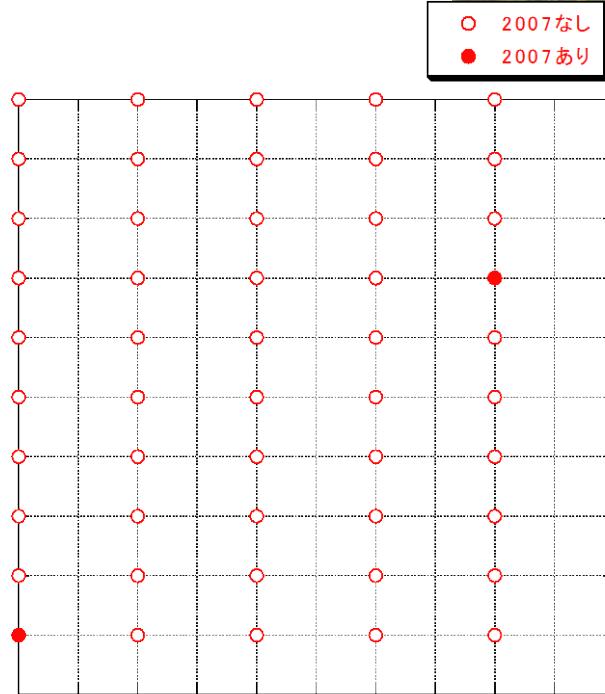
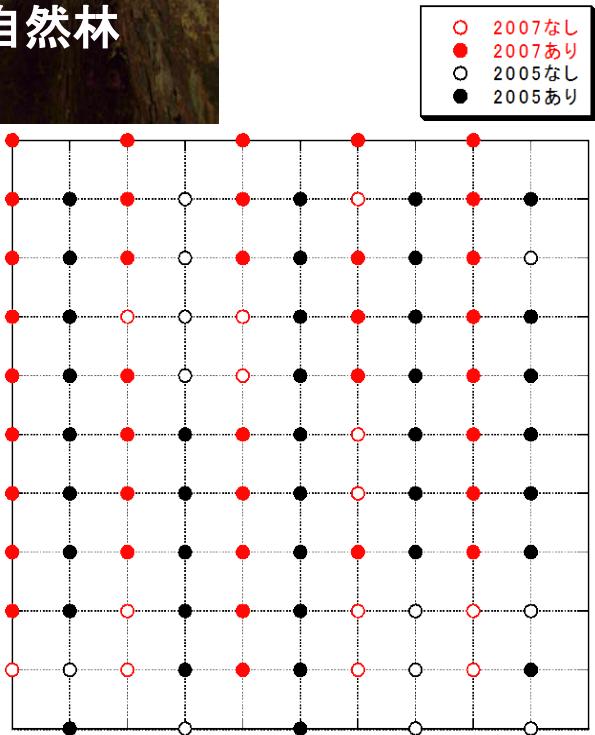
Nara 2006b, New Phytol



# 熱帯林火災が菌根に及ぼす影響



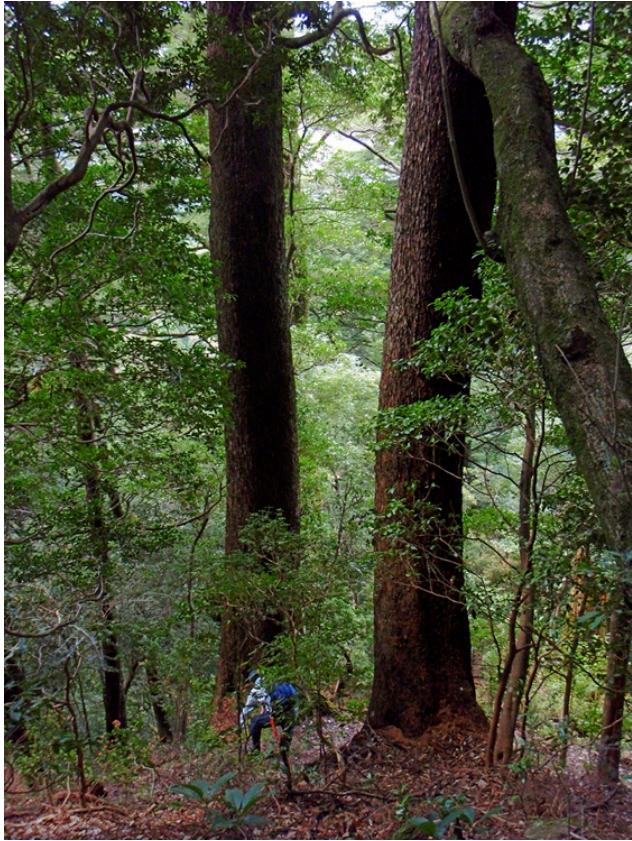
自然林



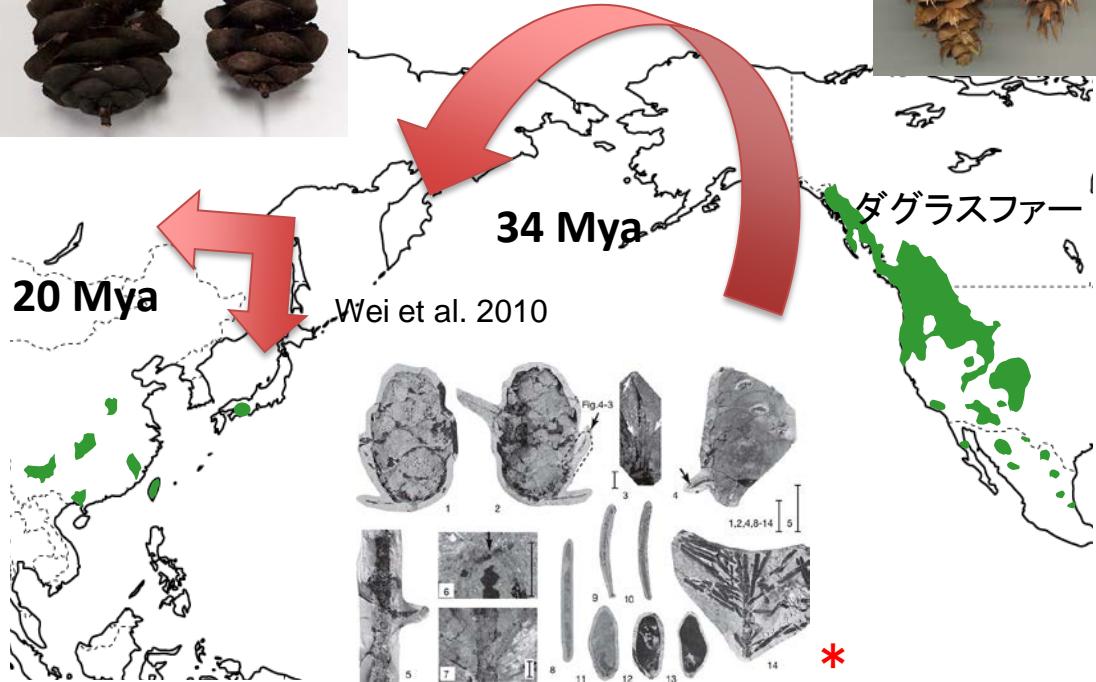
火災後は菌根がほぼ全滅  
回復も極めて遅い  
→フタバガキ科の更新は困難



# 絶滅危惧種トガサワラ保護と菌根菌



[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pseudotsuga\\_macrocarpa\\_cone.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pseudotsuga_macrocarpa_cone.jpg)  
CC BY-SA 3.0



日本で見つかった2300万年前の化石

Atsushi Yabe(2011) *Pseudotsuga tanaii* Huzioka from the earliest Miocene Shichiku Flora of northeast Japan: Systematics and ecological conditions, *Paleontological Research* 15(1):1-11, p.5 Figure4.  
日本古生物学会より許可を得て掲載。

3000万年以上にわたって独自進化した希少な生態系  
高知県と紀伊半島の一部に残存, 1000本  
トガサワラのみに共生するトガサワラショウロウが土壤中に埋土胞子として優占

ある意味、一般の注目を集めるトキ、ウナギ、ジュゴンなどよりも保護活動が必要？

見えないところで共生し、森を支え、  
野生生物や人間に恩恵をもたらすキノコ



# グループワーク討論

人間と人間に利益をもたらす生物以外は絶滅してもいいのか、生きる権利はないのか？

「多様な生物が維持される自然」と「人間」が共存していくとすれば、どのような考え方と手法が必要なのか？