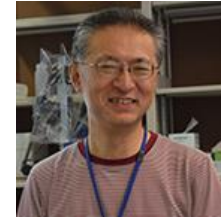


プラネタリー・バウンダリーの中で生きる生命

谷内 茂雄（やち しげお）
京都大学 生態学研究センター



人間による地球生態系の改変は、すでに地球の限界を超えたとされている。なぜこうなってしまったのか？ 持続可能な社会が満たすべき条件とは何だろうか？

そのヒントを求めて地球生態系の成り立ちを進化的・生態学的に検討していくと、個体レベルと個体より上の生物の階層の構成原理には大きな違いがあることがわかってきた。

自己紹介：2つのテーマ

テーマ1. 地球生態系の謎解き

地球生態系（地球型生命の世界）とは、どんな世界なのか？

・地球を構成する森林・草原・河川・湖沼・海洋といった個性ある生態系は、どんな歴史を経て形成され、どんなしくみで動いているのか？

テーマ2. 流域生態系の管理

地球という閉じた世界で長く豊かに生活するには、人間社会のしくみをどう変えればよいのか？

・流域は生態系の自然な空間単位
地域社会と流域生態系が共存できる流域管理のしくみとは？

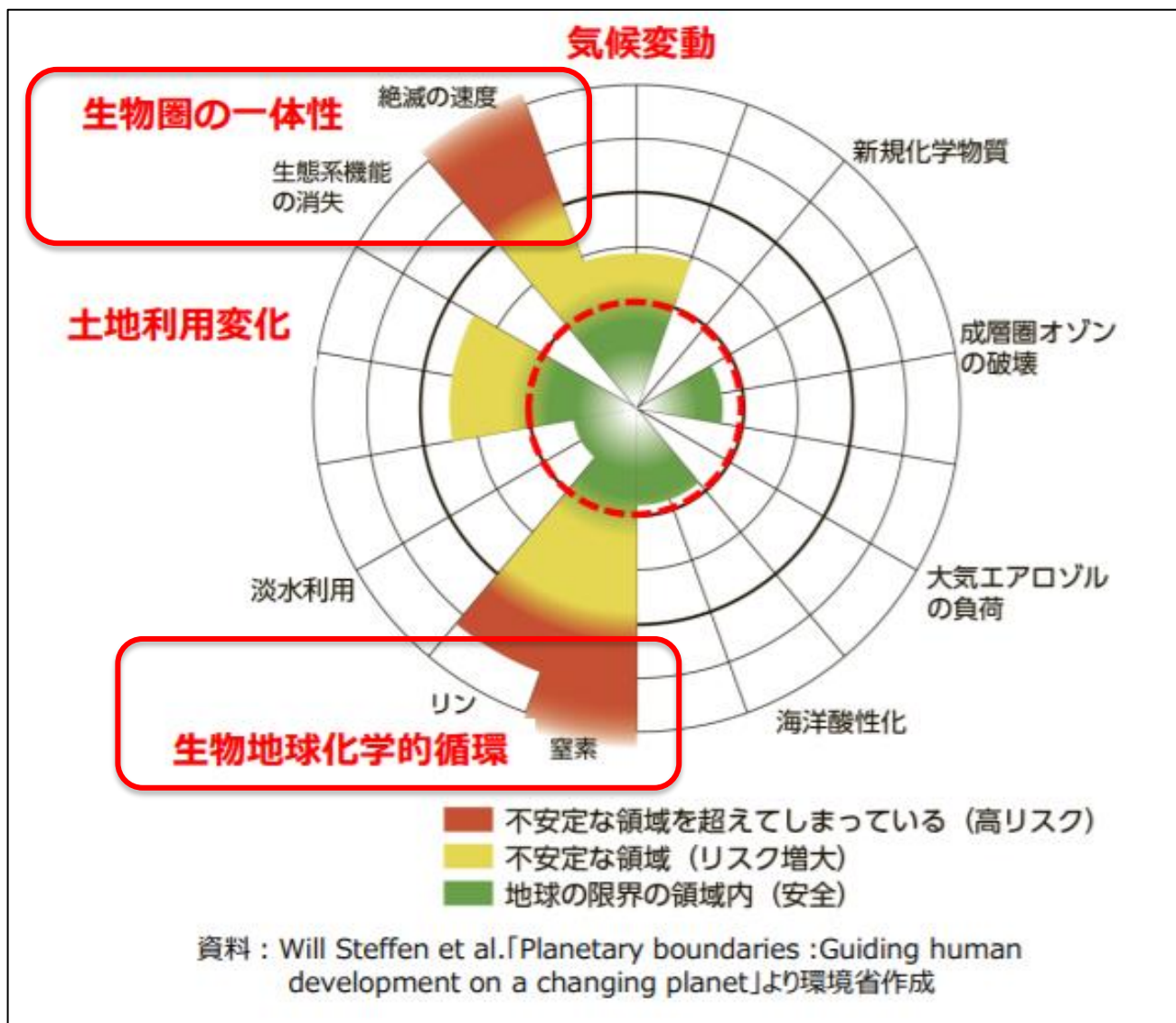
お話しする内容

- 1) プラネタリー・バウンダリーの現状
- 2) 地球生態系の成り立ちと構成原理
- 3) 生態系の限界を決める要因
- 4) なぜ限界を超えたのか？
どうすればよいのか？

プラネタリー・バウンダリー (Planetary boundaries) とは？

- ・ **人類が生存できる安全な活動領域とその限界点
(地球の限界)**
- ・ 安全域や程度を示す限界値を有する**9つのプロセス**から構成
- ・ 人間活動が限界値を超えた場合、地球環境に**不可逆的な変化が急激に起きる可能性**
- ・ 定量化できていないプロセスもある
- ・ 持続可能な開発目標 (**SDGs**) の内容にも採用

生物多様性・生態系：危機的な状況



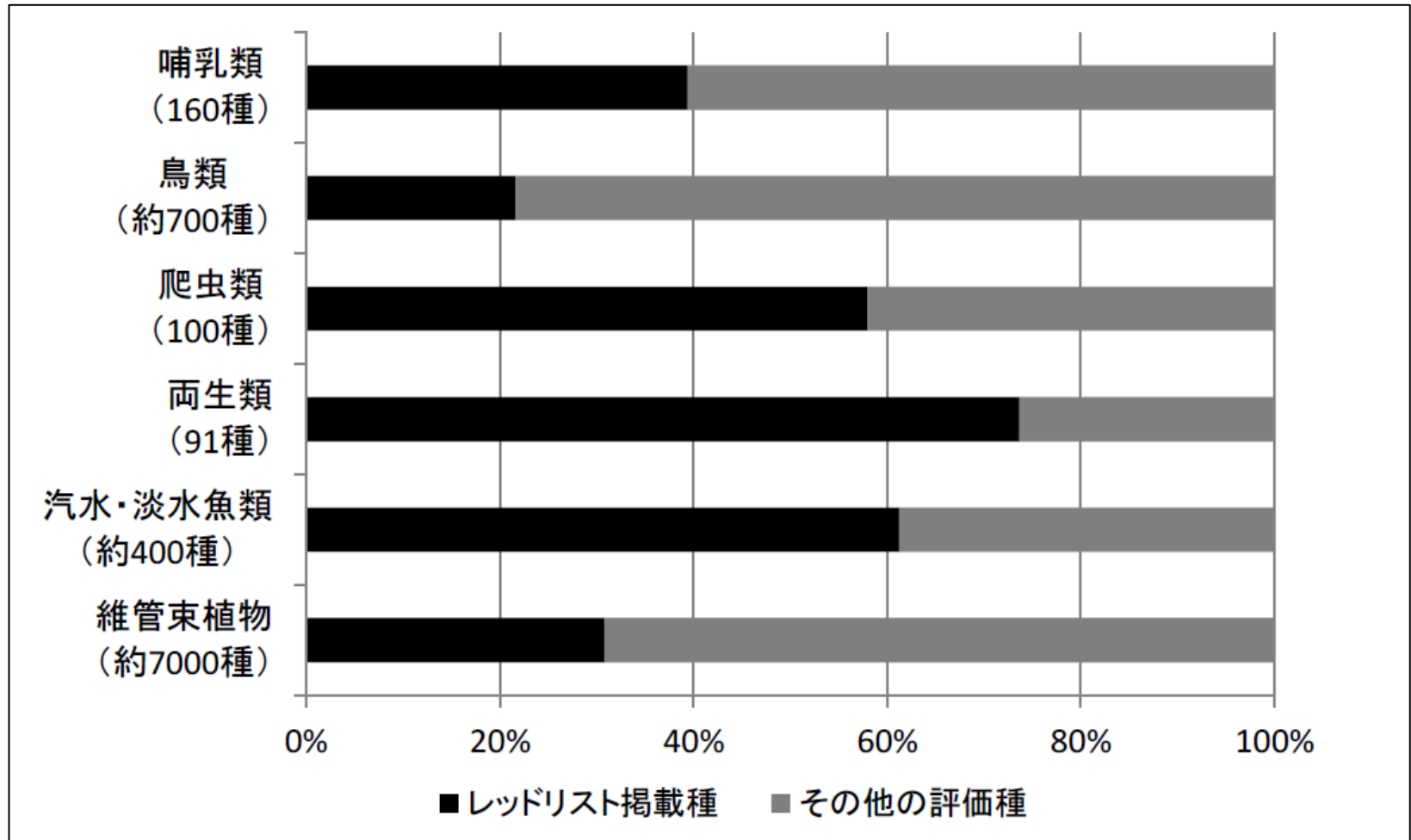
(人+家畜)のバイオマス

➤ 野生動物(哺乳類+鳥類)のバイオマス

| 分類群 | バイオマス(Gt) |
|-------|-----------|
| 植物 | 450 |
| バクテリア | 70 |
| 菌類 | 12 |
| アーキア | 7 |
| 原生生物 | 4 |
| 動物 | 2 |
| ウイルス | 0.2 |
| 合計 | 545.2 |

| 分類群 | バイオマス(Gt) |
|--------|-----------|
| 節足動物 | 1 |
| 魚類 | 0.7 |
| 軟体動物 | 0.2 |
| 環形動物 | 0.2 |
| 刺胞動物 | 0.1 |
| 家畜 | 0.1 |
| 人間 | 0.06 |
| 線形動物 | 0.02 |
| 野生の哺乳類 | 0.007 |
| 野生の鳥類 | 0.002 |
| 合計 | 2 |

生物種数の減少傾向（日本）



注：（）内は各分類群についての評価対象種数である。

出典）環境省, 2020：報道発表資料「環境省レッドリスト2020の公表について」・レッドリスト2020掲載種数表。

図3 環境省レッドリスト評価対象種における分類群ごとの掲載種及びその他の評価種の割合

生物多様性及び生態系サービスの総合評価2021(JBO3: Japan Biodiversity Outlook 3)

政策決定者向け要約報告書（環境省 生物多様性及び生態系サービスの総合評価に関する検討会）11p より引用

生態系サービスの低下傾向（日本）

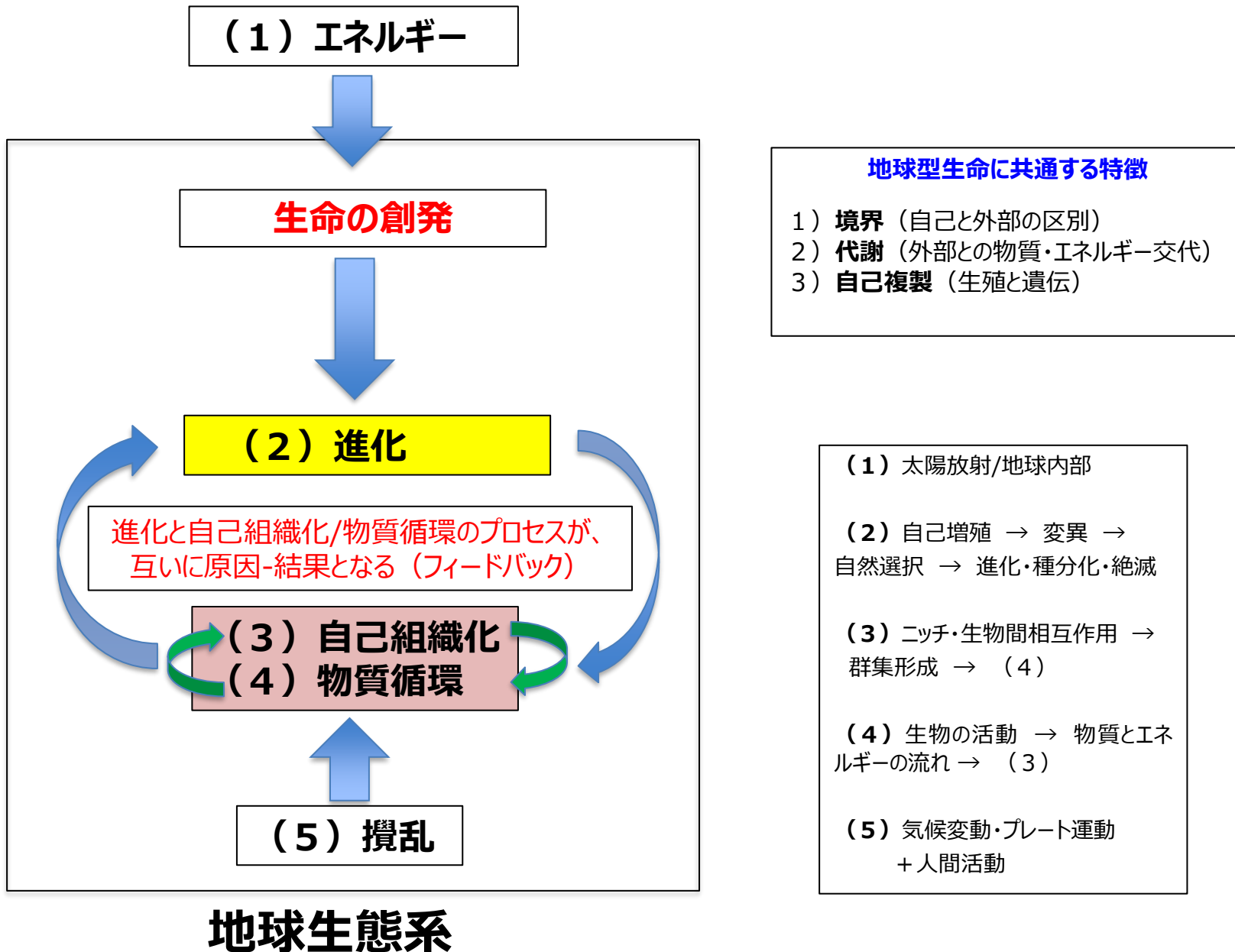
表 3 生態系サービスの状態の指標と評価

| 評価項目 | | 評価結果 | | |
|--------|------------|--------------------|------------------|----------------------|
| | | 過去 50 年～ 20 年の間 | 過去 20 年～ 現在の間 | オーバーユース アンダーユース※ |
| 供給サービス | 農産物 | ↓ | ↘ | アンダーユース (データより) |
| | 特用林産物 | ↗ | ↘ | アンダーユース (アンケートより) |
| | 水産物 | ↗ | ↘ | オーバーユース (データより) |
| | 淡水 | — | → | オーバーユース (アンケートより) |
| | 木材 | ↘ | ↗ | アンダーユース (データより) |
| | 原材料 | ↘ | ↘ | アンダーユース (データより) |
| 調整サービス | 気候の調節 | — | ↘ | — |
| | 大気の調節 | — | → | — |
| | 水の調節 | — | ↘ | — |
| | 土壌の調節 | → | — | — |
| | 災害の緩和 | ↗ | → | — |
| | 生物学的コントロール | — | ↘ | — |

お話しする内容

- 1) プラネタリー・バウンダリーの現状
- 2) 地球生態系の成り立ちと構成原理**
- 3) 生態系の限界を決める要因
- 4) なぜ限界を超えたのか？
どうすればよいのか？

生命の創発と地球生態系の展開



2つの構成原理

(1) 自然選択 (進化) : 個体の形質・ニッチ・行動

→ 生息環境への**適応性と利己性 (合目的性)**

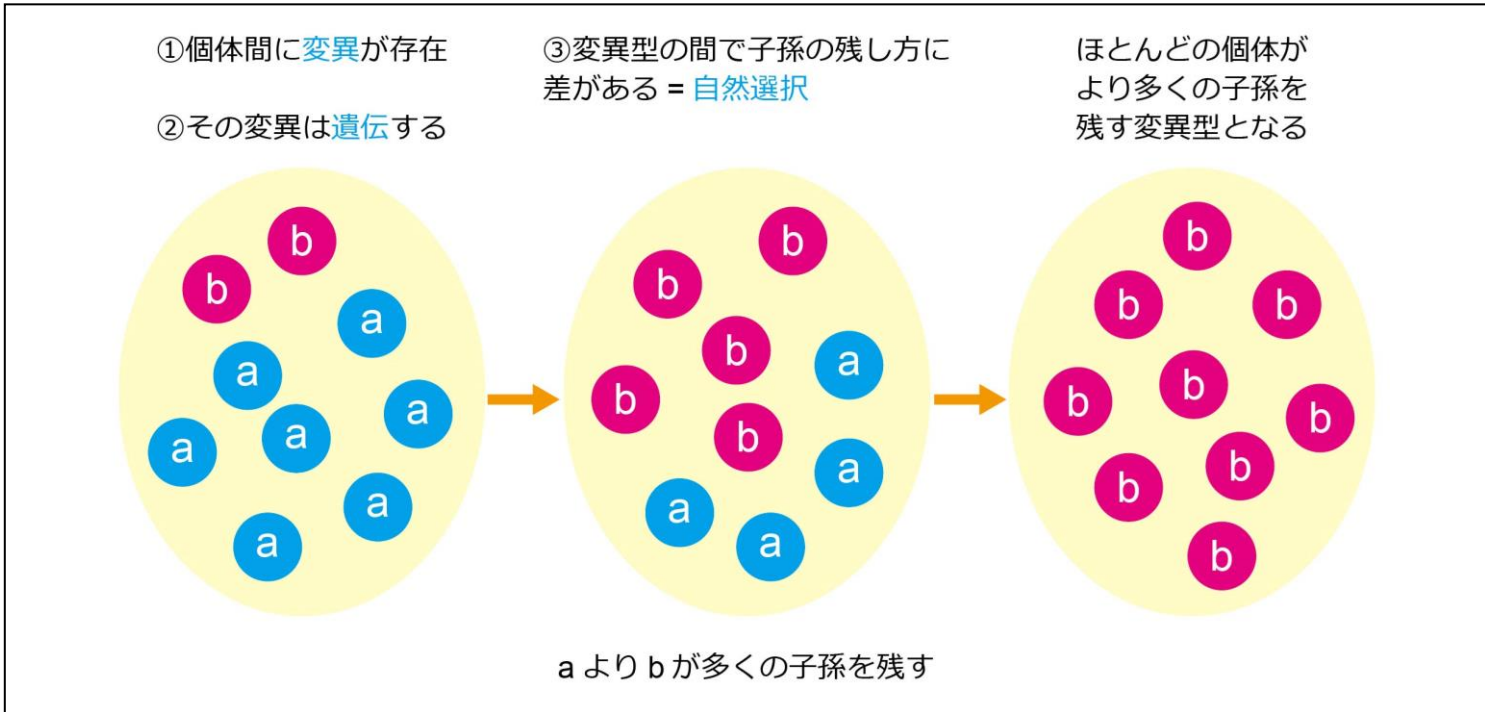
→ 攪乱に対して**個体が生息適地に戻る復元力**

(2) 自己組織化 : 群集 (生態系) の時間空間分布パターン

→ 地域・歴史・偶然に依存した**力学的な安定性**

→ 攪乱に対して**群集自体が復元する合目的性はない**

自然選択による進化



・多様性の進化

生息環境に応じた**形質・ニッチ・行動**が進化 → **適応性**と**利己性**、**種分化**

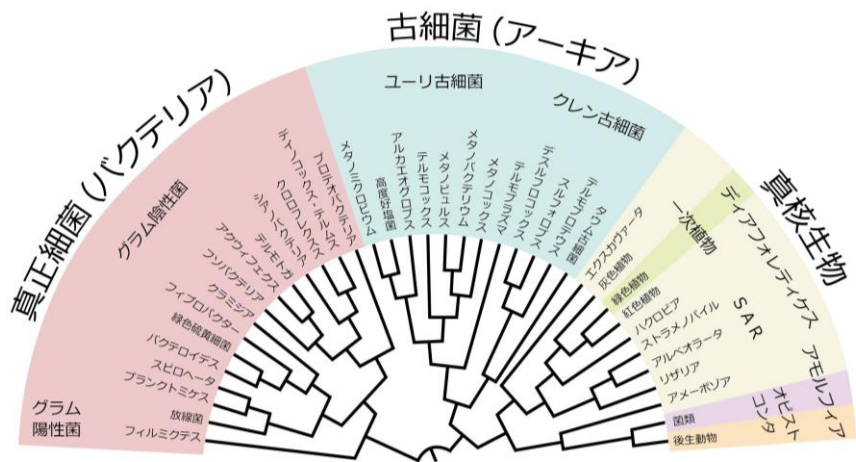
・階層性の進化

下位ユニットを**包含・統合**する形で上位ユニットが進化 → **階層性**

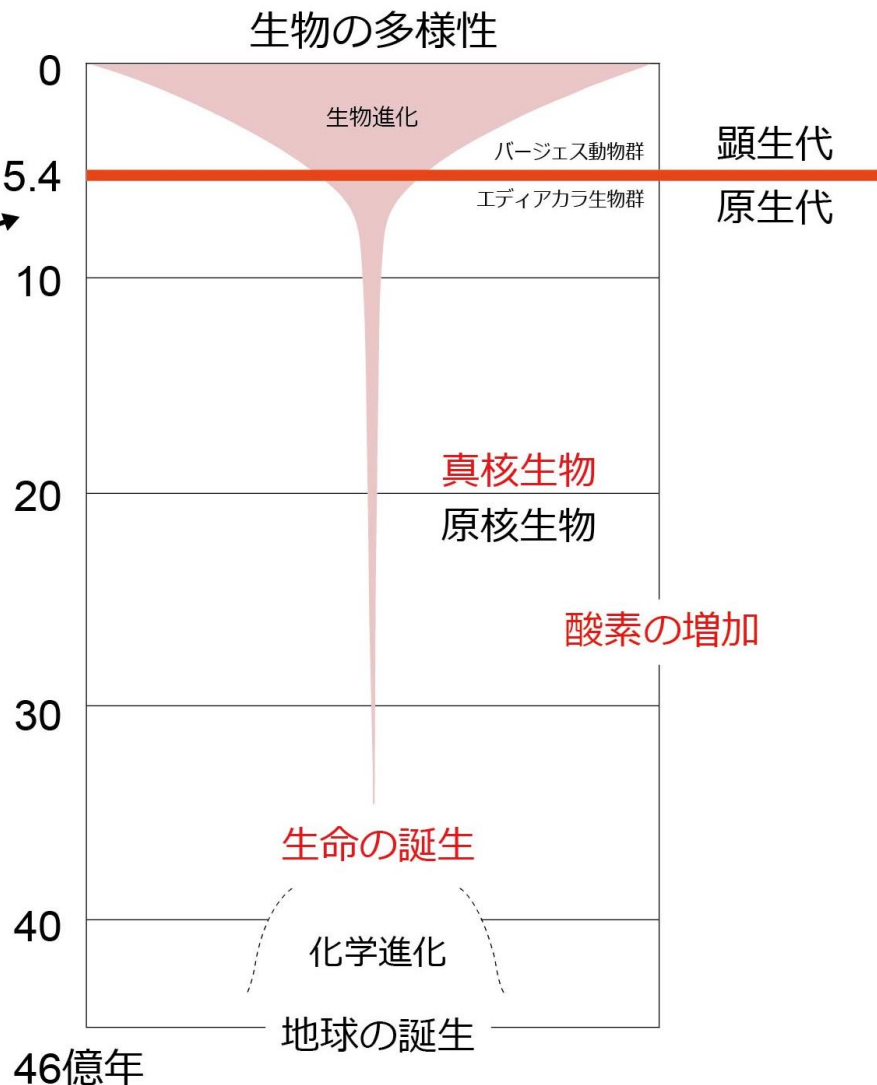
・原核生物 → 真核生物 → 多細胞生物 (植物・動物・菌類)

生物界の多様性と階層性の創出

多細胞動物の出現と多様化 → 5.4
 スノーボール・アース 全球凍結：7億年前

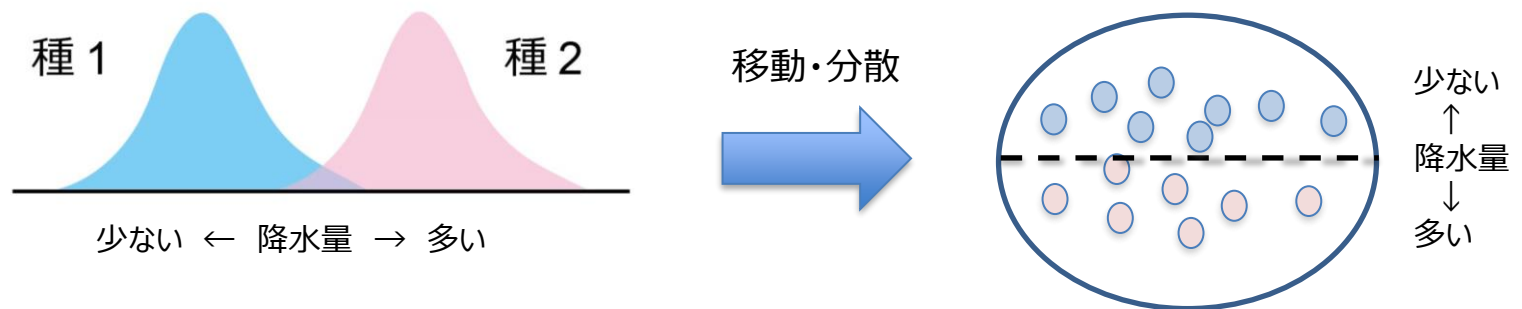


Wikipedia (*全生物の系統樹の1例*)



自己組織化による分布パターン形成

個体の局所的で自律的な行動と相互作用 → マクロな集団パターン形成



例：降水量への選好性（ニッチ）の異なる2種

降水量の勾配に応じた空間分布パターン

・個体群（同種集団）

個体が移動・分散してニッチに合った適地を探索

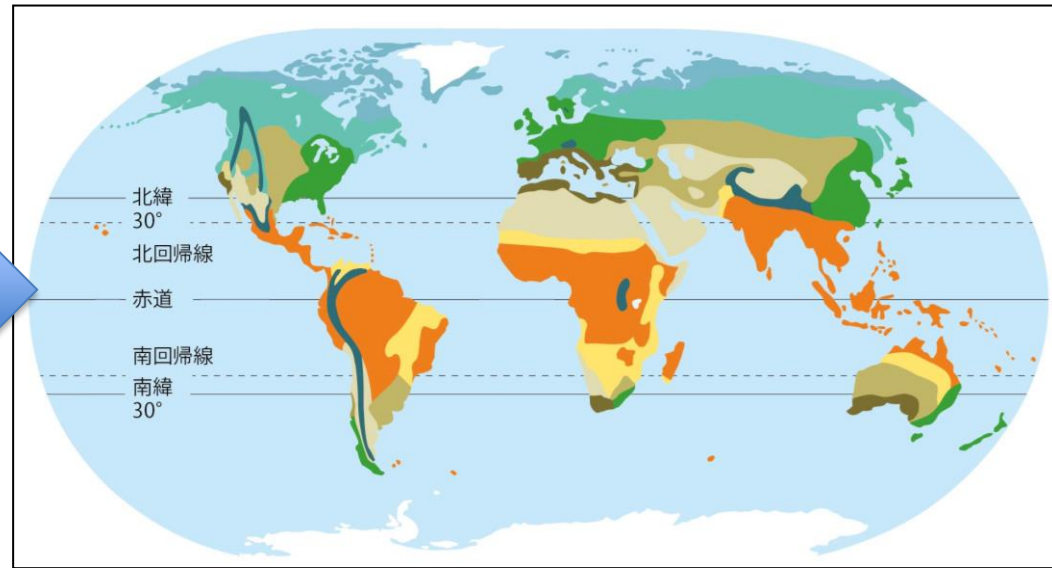
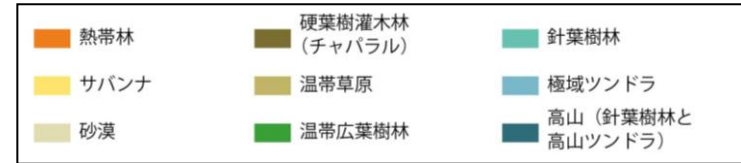
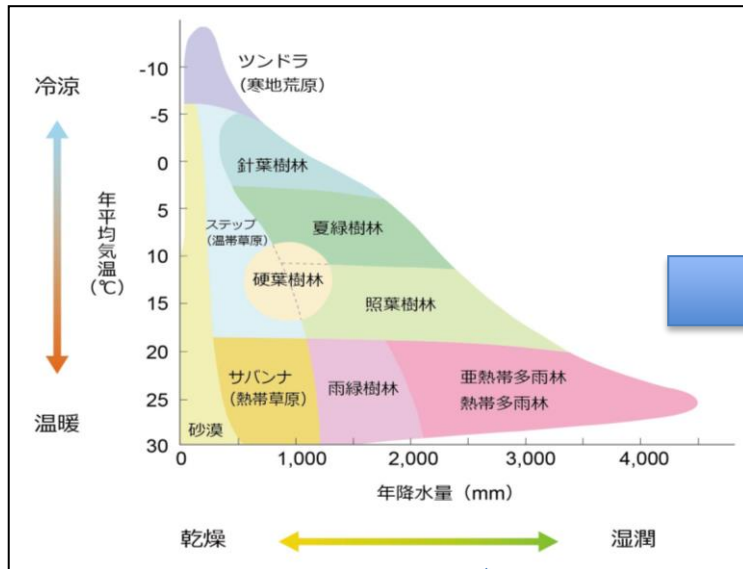
・群集（異種集団）

生産者（植物・植物プランクトン）を基点として、
食物連鎖・棲み込み連鎖・共生（寄生）関係を介して適地に集合

陸上のバイオーム（生物群系）の形成

降水量と気温（ニッチ）

→ バイオームの分布



食物連鎖・棲み込み連鎖・共生関係

→ 植物を起点とする動物・菌類・微生物の分布の同期

- 1) **生食連鎖**：葉・樹皮・樹液→植植生動物→肉食性動物
- 2) **腐食連鎖**：枯死材・枯葉→菌類・シロアリ・土壌動物
- 3) **送粉共生**：花粉・蜜→昆虫
- 4) **種子散布共生**：果実→鳥・哺乳類
- 5) **棲み込み共生**：樹木→多くの動物
- 6) **菌根共生**：光合成産物→菌根菌・バクテリアなど

お話しする内容

- 1) プラネタリー・バウンダリーの現状
- 2) 地球生態系の成り立ちと構成原理
- 3) 生態系の限界を決める要因**
- 4) なぜ限界を超えたのか？
どうすればよいのか？

攪乱に対して生態系を安定化するメカニズム

(1) 自己組織化

・ニッチ・食物連鎖・棲み込み連鎖・共生関係：

多様な種が相互依存的に生息適地に集合するメカニズム

→ 多少の攪乱があっても、攪乱が収まれば生物は元の生息地に戻ろうとする

(2) 生物多様性

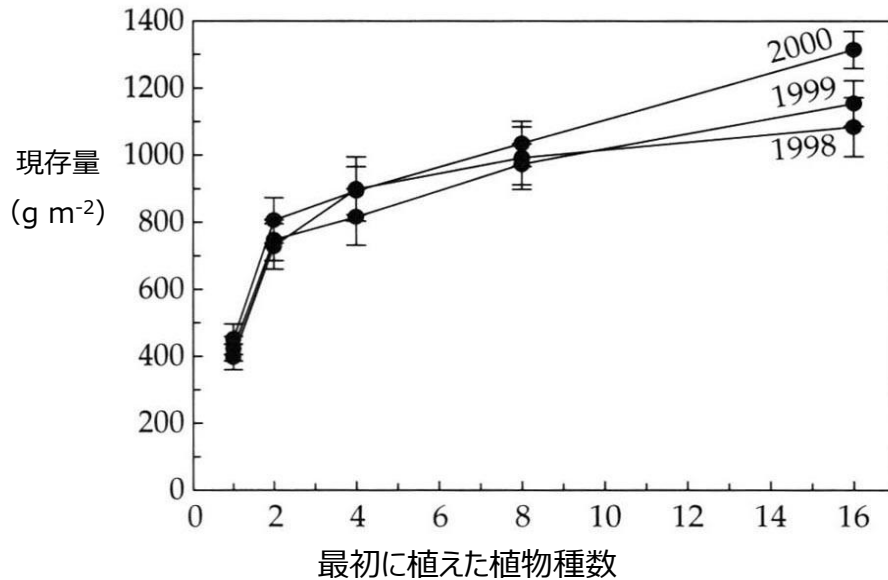
・多様な機能を持つ生物種を含む群集：

攪乱に対して生態系機能を安定化するメカニズム

→ 多少の攪乱があっても、生態系機能の変動が緩和される

生物多様性（種数）は生産力を高める

草原群集における
植物の種多様性と現存量の関係



草本群集を用いた大規模操作実験
(ミネソタ草原)



The Cedar Creek LTER site (Credit: David Tilman, UMN)
<https://www.cedarcreek.umn.edu/about/galleries/experiments>

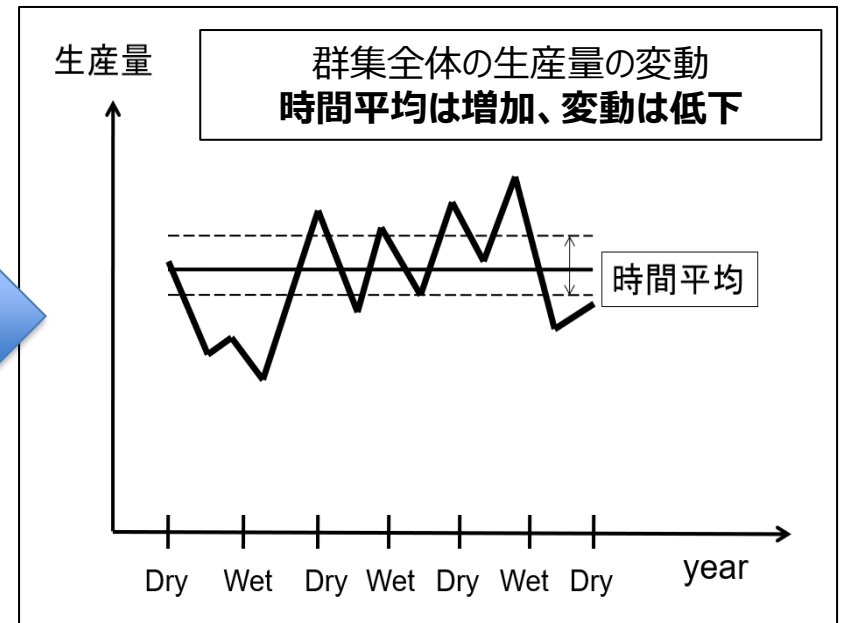
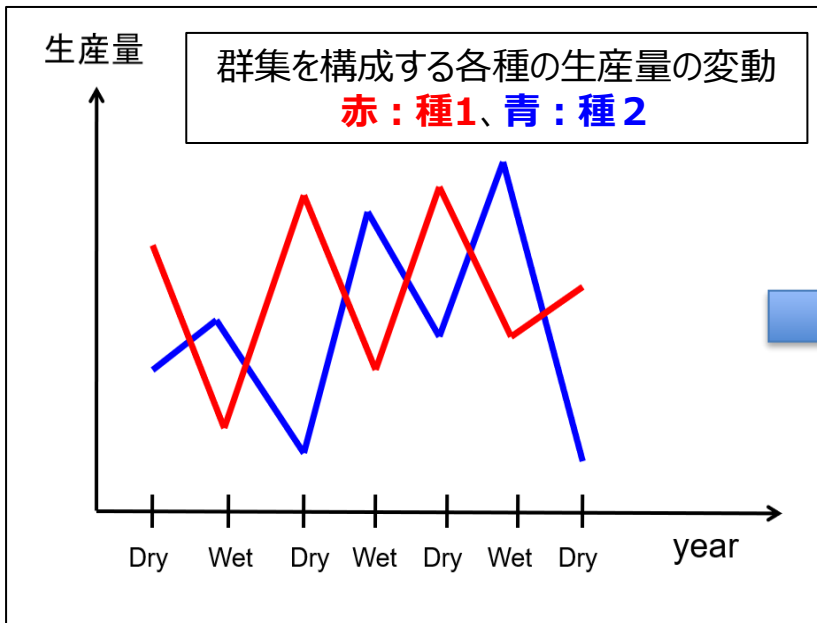
草地で植える植物の種数を変えて生育期間終了後に重量を測定
(図中の数字は実験年)

大学講義のためのプレゼン教材「生物多様性の未来に向けて」（総合地球環境学研究所）
：編集代表 畑田彩・市川昌広・中静透
「① 生物多様性とは何か？」作成者 中静透・相場慎一郎・井鷲裕司・畑田彩 より引用

生物多様性は生産量の変動を安定化する

保険効果（ポートフォリオ効果）

群集を構成する個々の種の生産量の年間変動が大きくても、変動が互いに同期しなければ、群集全体の生産量の変量（CV）は小さくできる



◆降水量が「Dry→Wet→Dry→Wet」と極端に変動するシナリオ
種1は乾燥に強いが湿潤に弱く、種2は種1と反対の応答。群集全体の生産量は生産量の大きい方で決まる

生態系の安定性にも限界がある！

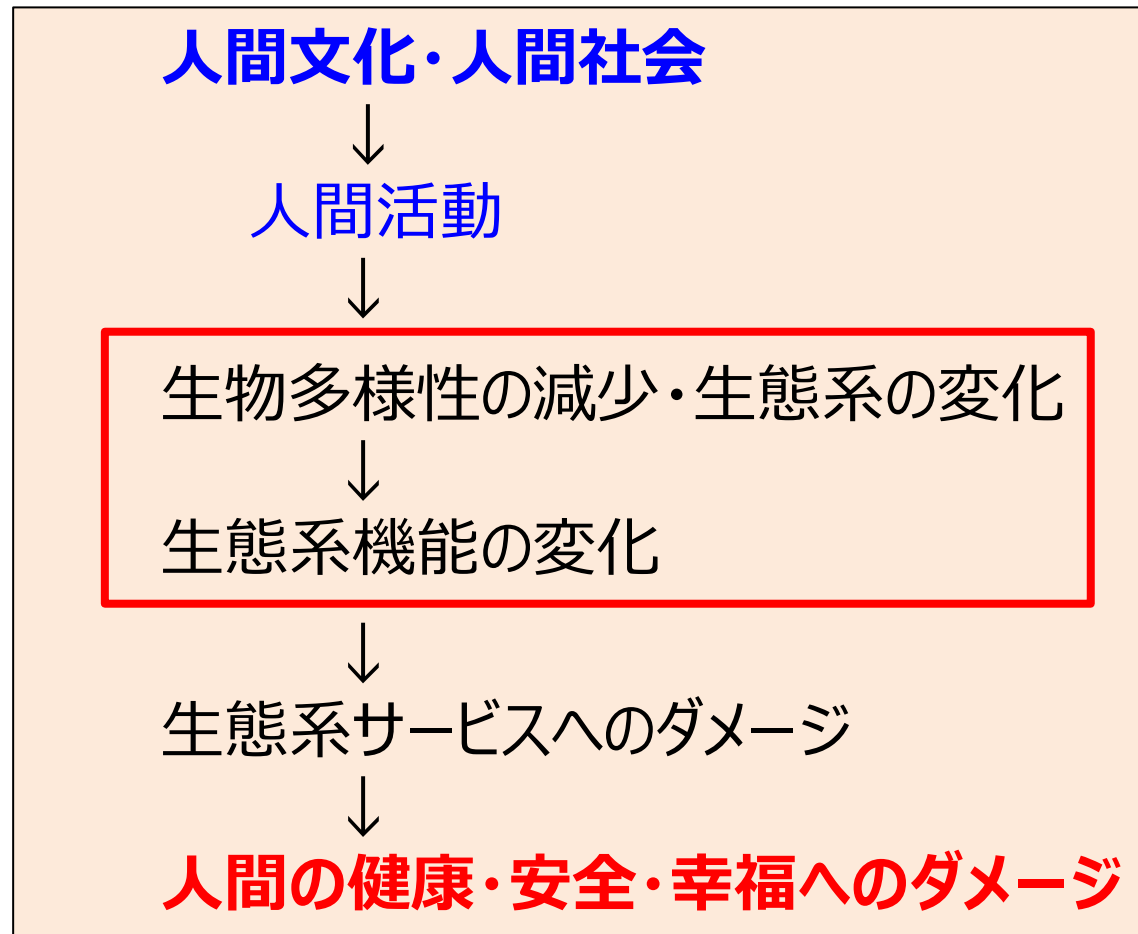
もし、環境の攪乱が生態系の安定性の限界を超えると…

→ 生物群集の構成が大きく変化し、
攪乱が収束しても元の生態系に戻らない！
(レジームシフト)

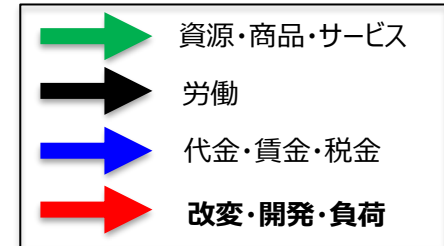
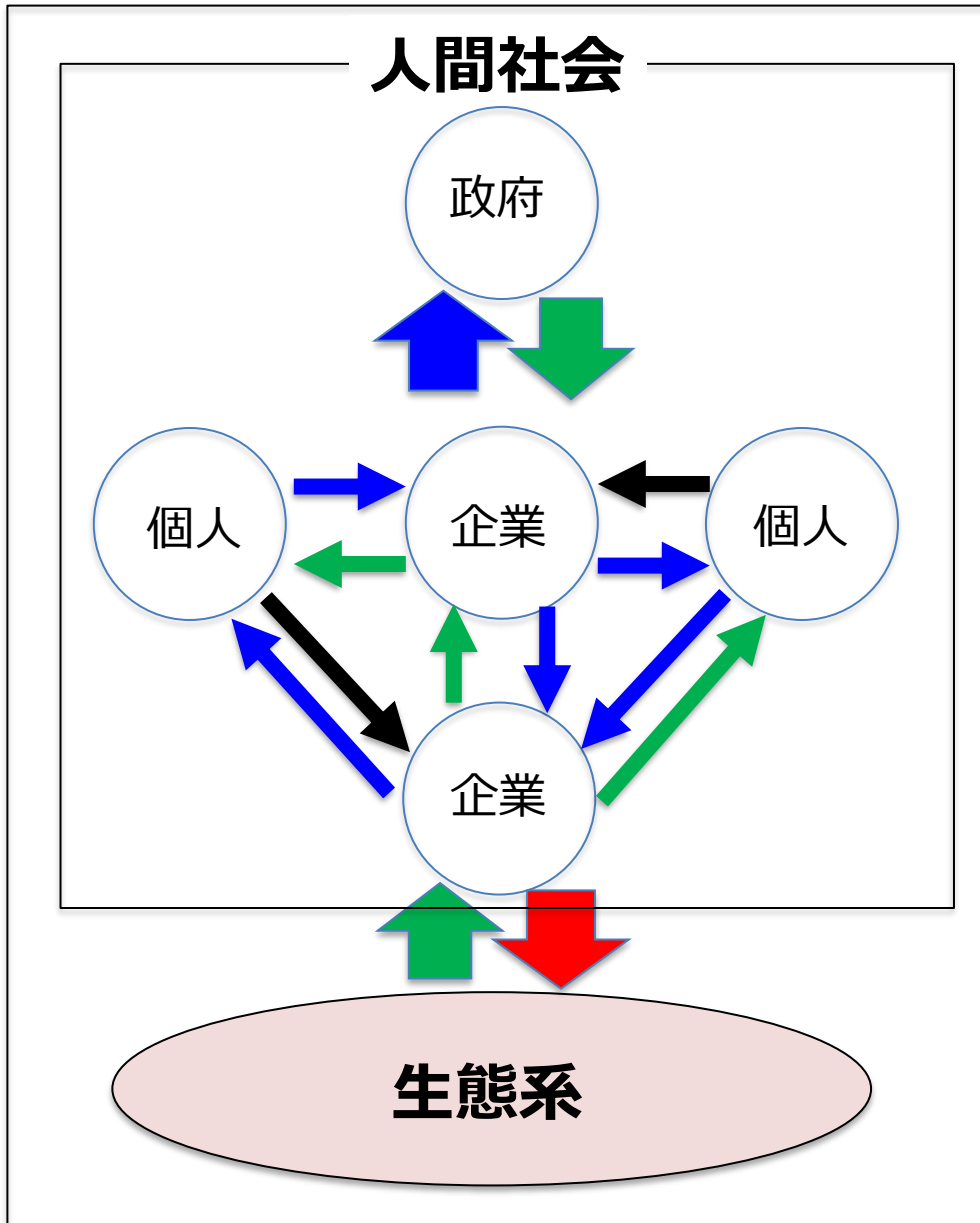
お話しする内容

- 1) プラネタリー・バウンダリーの現状
- 2) 地球生態系の成り立ちと構成原理
- 3) 生態系の限界を決める要因
- 4) **なぜ限界を超えたのか？**
どうすればよいのか？

人間文化・人間社会のしくみに原因がある



人間社会と生態系の関係：寄生者-宿主関係



・人間社会と生態系の関係

→ **寄生者-宿主関係**

・人間社会内の関係

→ **共生関係 + 競争関係**

・生態系への負荷の増加率

$$\frac{d(N \cdot \bar{E})}{dt} = \frac{dN}{dt} \cdot \bar{E} + N \cdot \frac{d\bar{E}}{dt}$$

N : 人口、 \bar{E} : 平均エネルギー消費量

なぜ地球生態系の限界を超えたのか？ どうすればよいのか？

(1) 原因：人間の高い適応力が生み出した人間社会の不具合

→ 根本原因は、人間文化・人間社会の側にある

・高い生産性 → 人口増加とエネルギー消費量の増加

・生活・経済・産業構造の変化 → 人間社会と生態系の関係の希薄化

(2) 知識の欠如：生態系の質的变化

→ 攪乱後の地球生態系は、元の地球生態系と大きく異なる

(3) 課題：寄生関係から共生関係へ

→ 生態系再生の取りくみが、生態系と人間社会相互に好循環を生み出す「社会－生態システム」への変革

参照および引用文献

◆書籍およびwebサイト

1. ロックストローム&クルム（翻訳）（2018）小さな地球の大きな世界-プラネタリー・バウンダリーと持続可能な開発 丸善出版
2. メイナード・スミス&サトマーリ（翻訳）（2001）生命進化8つの謎 朝日新聞社
3. サイモン・レヴィン（翻訳）（2003）持続不可能性 文一総合出版
4. ユヴァル・ノア・ハラリ（翻訳）（2016）サピエンス全史 河出書房新社
5. 和田英太郎・大河内直彦（1996）5 生態システム 154-184. 鳥海光弘他編「地球システム科学」所収 岩波書店
6. 脇田健一・谷内茂雄・奥田昇（編）（2020）流域ガバナンスー地域の「しあわせ」と流域の「健全性」 京都大学学術出版会
7. 日本生態学会編（2004）生態学入門（第2版） 東京化学同人
8. 環境省：自然環境・生物多様性 <https://www.env.go.jp/nature/index.html>
9. 生物多様性および生態系サービスに関する政府間プラットフォーム（IPBES） <http://www.ipbes.net/>
10. 生物多様性条約（CBD: Convention on Biological Diversity） <https://www.cbd.int/>

◆原著論文

1. Rockström et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.
2. Yinon M. Bar-On, Rob Phillips, & Ron Milo (2018) The biomass distribution on Earth, *PNAS* 115: 6506-6511.
3. Tilman, D. (1999) The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology*, 80(5), 1455-1474
4. Schindler, D., Hilborn, R., Chasco, B. et al. (2010) Population diversity and the portfolio effect in an exploited species. *Nature* 465, 609-612 (2010).
5. Cardinale, B.J. et al. (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59-67.
6. 杉山 智治・須崎 純一・田村 正行（2009）山形県におけるクマタカの生息適地推定モデルの構築 景観生態学 13 巻, 1_2 号, p. 71-85