

野生動物学入門

佐藤担当分

自己紹介

佐藤 悠 (sato.yu.3z@kyoto-u.ac.jp)

野生動物研究センター 助教

研究テーマ: 日本の野生動物(哺乳類・鳥類)の**保全遺伝学**

遺伝的多様性、近親交配、絶滅リスク、保全

絶滅危惧の哺乳類や鳥類の保全を、遺伝解析を活用して考える



ニホンイヌワシ



ヤンバルクイナ



オジロワシ↑ & オオワシ→
(北海道東部)



タンチョウをはじめとするツル類



コウノトリ



アオサギ



ダイサギ



カワセミ

野生動物を遺伝子解析によって理解する(5回)

直接観察が難しい野生動物でも、DNAを調べることで生態や進化に関する情報が得られる。遺伝解析による種判別、性判別、ゲノム解析による遺伝的多様性や近親交配の解析、個体数推定について、方法や応用など、例をあげて説明する。またこういった遺伝解析から展開される野生動物の保全や生態研究の様々な可能性について解説する。

講義内容(予定)

第1回	5/8	シラバス紹介 & 保全について
第2回	6/26	DNA・遺伝子・ゲノム概論
第3回	7/3	野生動物の遺伝解析Ⅰ
第4回	7/10	野生動物の遺伝解析Ⅱ & 絶滅について(哲学)
第5回	7/17	野生動物研の院生による研究紹介
試験	7/24	

保全とは何か

保全とはなにか？

絶滅が心配される生物（＝絶滅危惧種）は過去7年間で1.8万種も増えた

More than 30,000 species
are threatened with extinction

That is 27% of all assessed species.



Take action

Help us make The IUCN Red List a more complete barometer of life.

IUCNのレッドリストより

2019年12月

More than 48,600 species
are threatened with extinction

That is 28% of all assessed species.



Take action

Help us make The IUCN Red List a more complete barometer of life.

2026年4月

第6の大量絶滅の時代

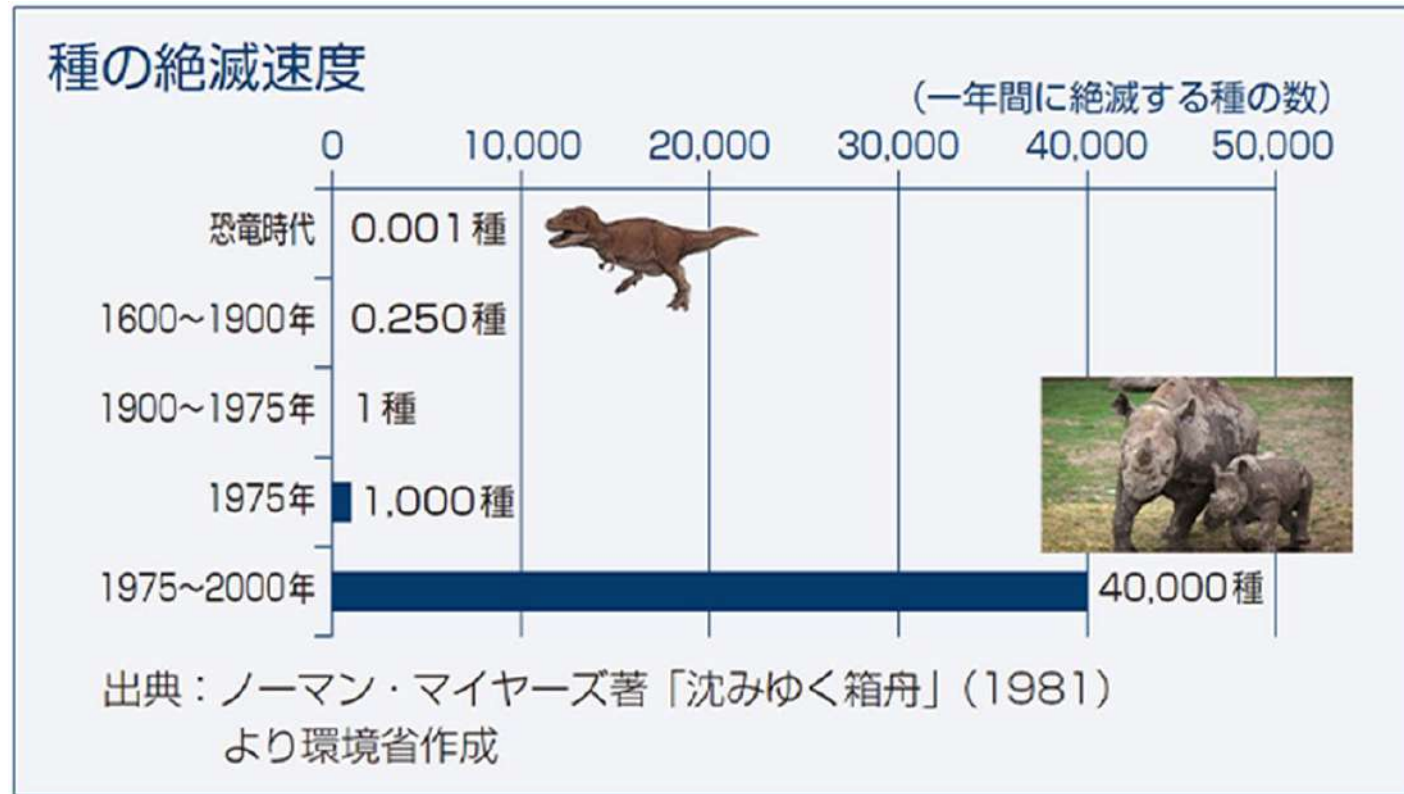
人新世とも呼ばれる現代は、

第6の大量絶滅の時代と考えられている

- ✓ 都市開発
- ✓ 自然破壊
- ✓ 乱獲・密猟
- ✓ 外来種問題
- ✓ 感染症
- ✓ 地球温暖化
- などなど



保全とはなにか？



現代の種の絶滅の速度は
過去1千万年の平均の10~100倍ともいわれている

第6の大量絶滅の時代

人新世とも呼ばれる現代は、
第6の大量絶滅の時代と考えられている

これまでの絶滅とは異なり
人の活動により極短期間で大量絶滅が進行している

変わりゆく環境の変化に
生物の進化が追いつかない可能性が高い

保全とはなにか？

野生動物を保全する必要は本当にあるのだろうか？

必要ある/ないのはなぜか？

保全とはなにか？

「野生動物の保全」とは何か？何をするのか？」
(佐藤的には2つある)

1. 絶滅危惧動物(鳥獣)を保護し、個体数や生息地の回復させ、絶滅させないこと
2. 増えすぎた動物の個体数を管理し、バランスを保つこと

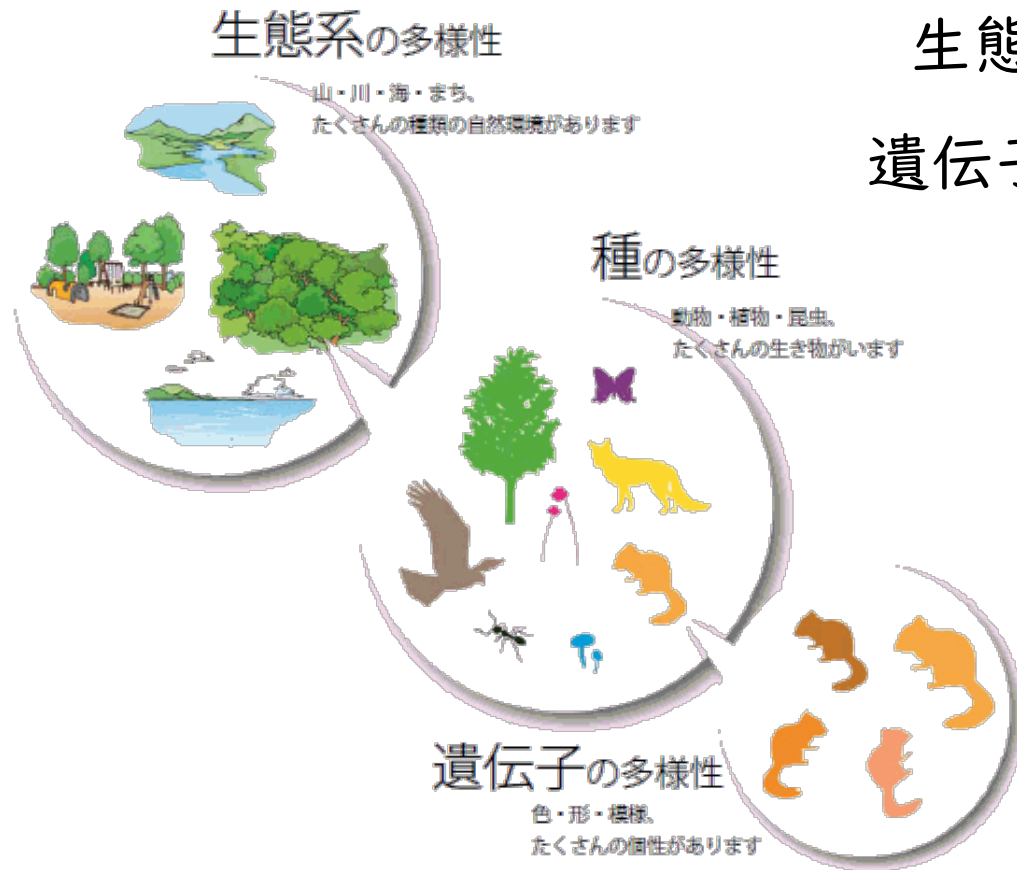
保全とはなにか？

「保全」

辞書的な意味：保護して安全であるようにすること（コトバンクなど）

生態学的な意味：生物多様性を保存すること

遺伝子の多様性・種の多様性・生態系の多様性



保全とはなにか？

人間の経済活動の発展に伴い、
自然の変容、生態系の劣化と環境問題が引き起こされた
→ 野生動物とも軋轢（例えば生息地破壊など）



- 人間の活動によって生じた野生動物との軋轢
- 野生動物が引き起こす人間の活動との軋轢

保全とはなにか？

人間の活動によって生じた野生動物との軋轢



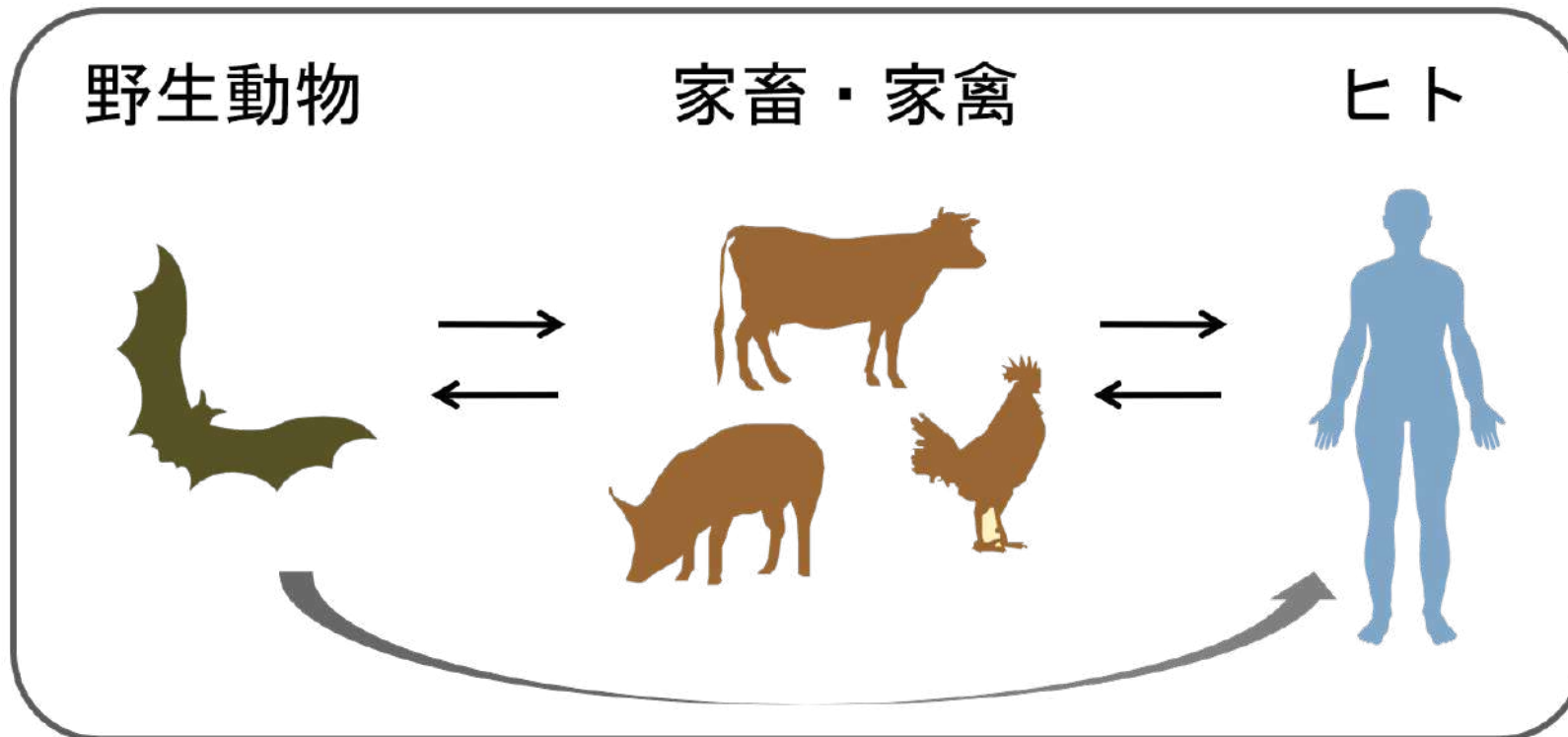
保全とはなにか？

野生動物が引き起こす人間の活動との軋轢



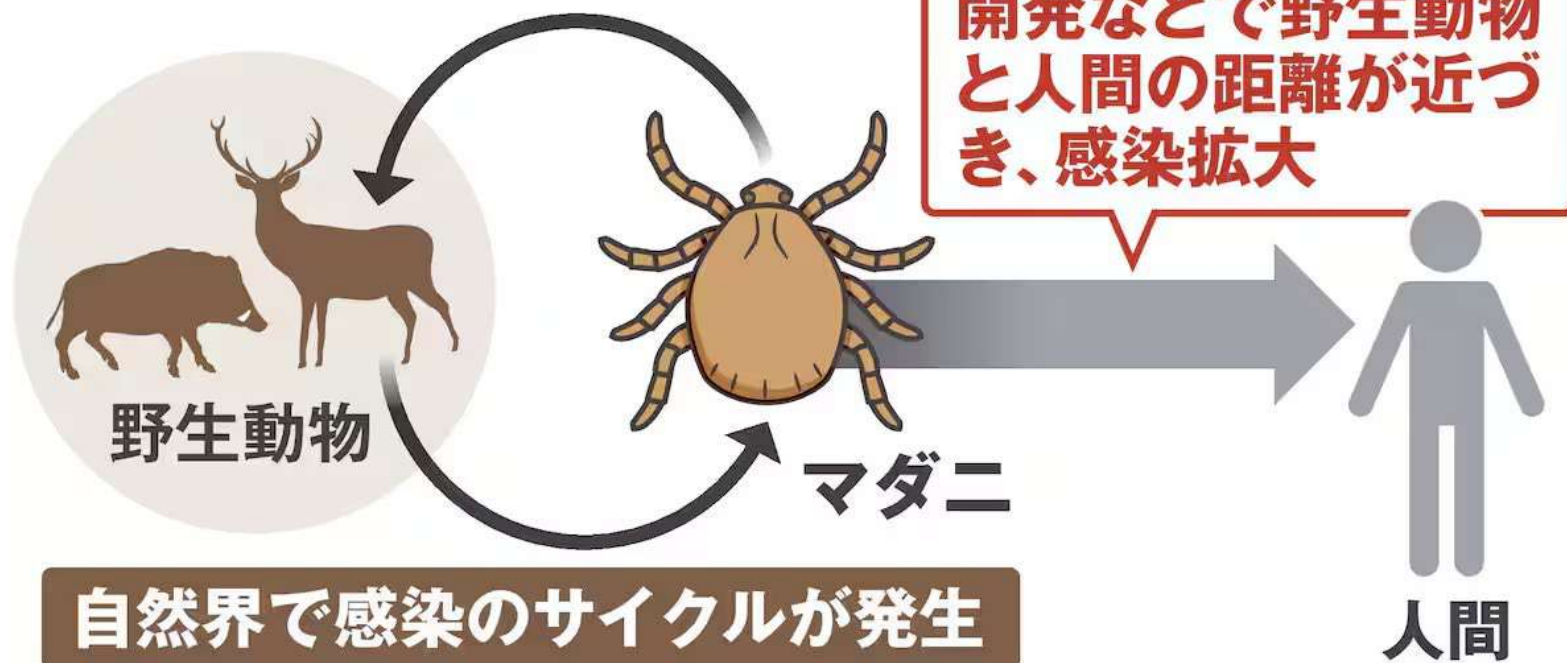
人獣共通感染症

- 動物から人、また人から動物へと感染する病気のこと
- 野生動物や家畜、その糞などとの直接接触は非常に危険



人獣共通感染症

「重症熱性血小板減少症候群」(SFTS)の 感染拡大の兆しが見える



致死率20%以上

保全とはなにか？

人間の経済活動の発展に伴い、
自然の変容、生態系の劣化と環境問題が引き起こされた

→ 野生動物とも軋轢（例えば生息地破壊など）



- 人間の活動によって生じた野生動物との軋轢
- 野生動物が引き起こす人間の活動との軋轢

を解消し、

野生動物（と人間活動）を保護するのが野生動物の「保全」

保全とはなにか？

野生動物の「保全」とはなに？
なにをすること？

1. 絶滅危惧動物を保護し、個体数や生息地の回復させ、絶滅させないこと
➤ 人間→動物の軋轢の解消
2. 増えすぎた動物の個体数を管理し、バランスを保つこと
➤ 動物→人間の軋轢の解消

野生動物の「保全」とは総じて
人間と野生動物の軋轢を解消し、
動物とのよりよい関係性の構築・維持を行うこと

Q.絶滅危惧動物を「保全」する必要はありますか？

ーこれまでに誕生した生物も絶滅してきたでしょ
今の生物を特別に守る必要ある？

ーだって絶滅する運命にあるから絶滅するんでしょ？
運命なら仕方ないよね

ー絶滅も自然現象の一部である
人間が介入すべきことではない

Q.絶滅危惧動物を「保全」する必要はありますか？

(佐藤がノッパツと思いつく)

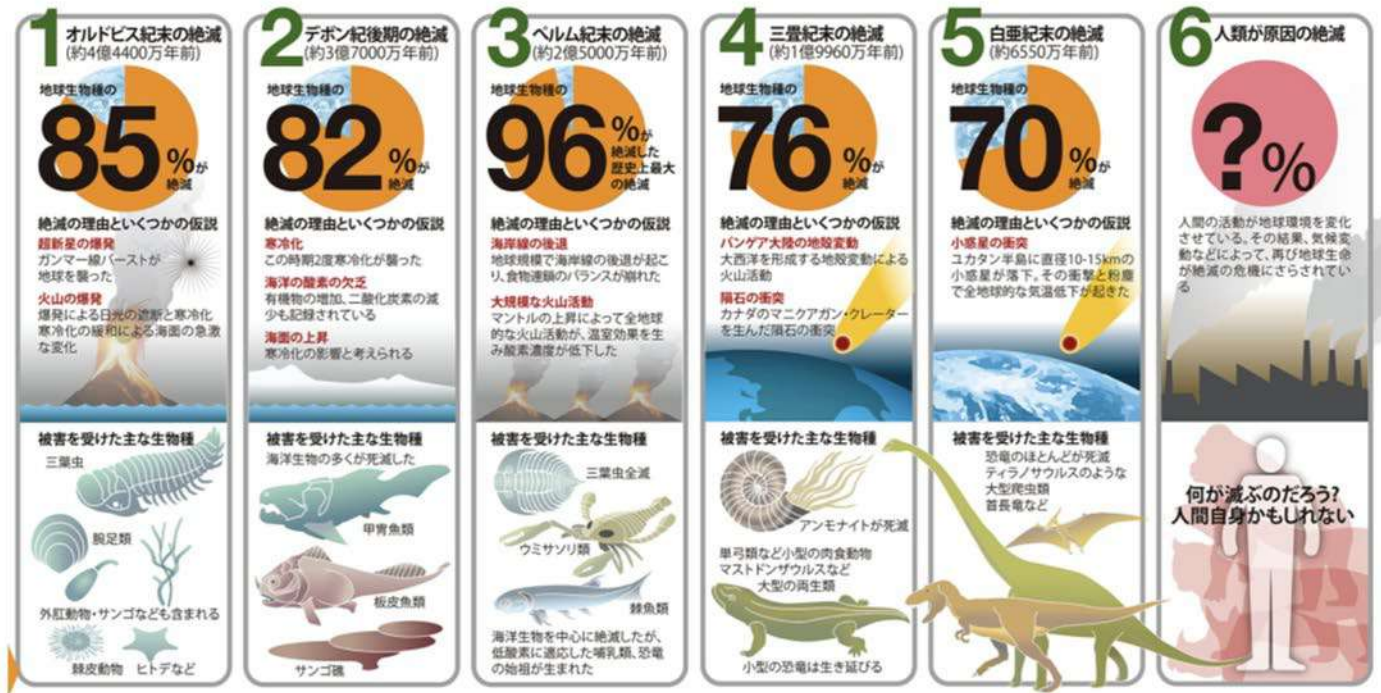
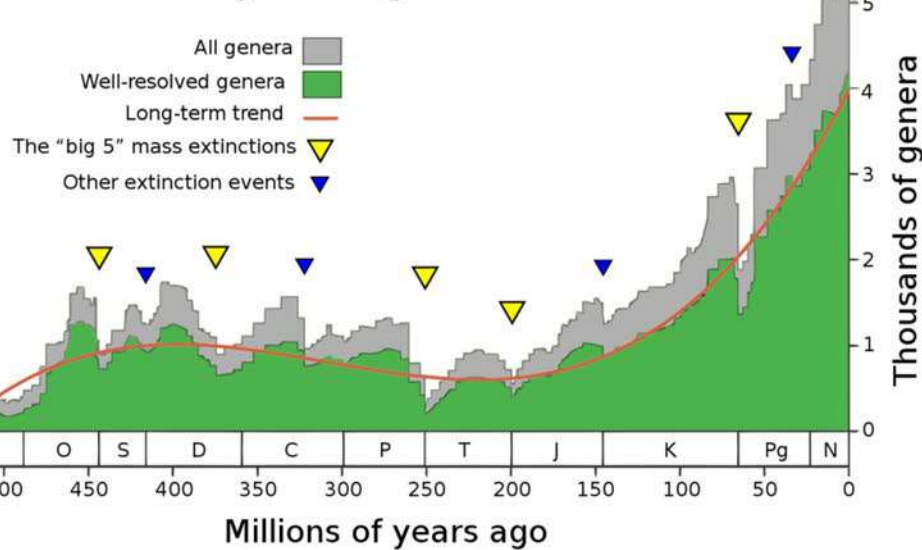
4つの理由

1. 「第6の大量絶滅」
2. 「進化学的意義」
3. 「普遍的な倫理(正義感)」
4. 「感情論」

保全の理由

1. 第6の大量絶滅

Biodiversity during the Phanerozoic



• 現代の絶滅は人間の経済活動が原因

• 絶滅の規模は過去よりもはるかに大きい(ペルム紀の6倍)

➤ 人間には保全を行う責務がある! 科学技術で立ち向かうべきだ!

保全の理由

理由2「進化学的意義」

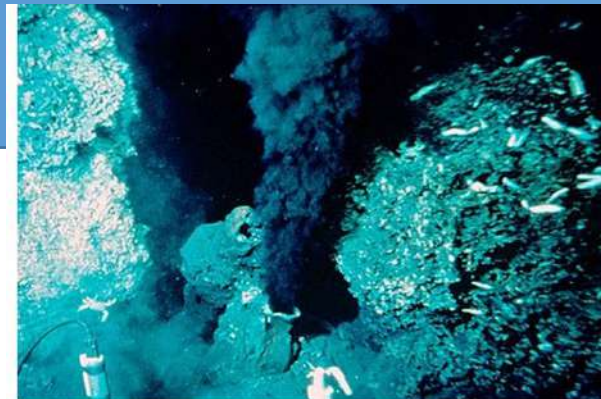
生物は様々な生息環境で進化してきた

- 生物多様性 $\equiv$ 多様な環境で生き残る(=適応)能力
 - 種の絶滅 $\equiv$ 生物の適応能力の喪失

種の保全

将来の気候変動や感染症などへの適応能力

生物の更なる進化の可能性



深海熱水噴出孔



砂漠に生息するオオスナネズミ



熱帯雨林のジャガー

理由3「普遍的な倫理感（正義感）」

あらゆる生命は等しく尊く、すべての命を尊重するべきである

自己矛盾？

「人は生きるために他の生物の命を奪っている（＝食料）じゃないか」



命を奪う「理由」が大事なのかもしれない

「自分が生き延びるための必要最小限の殺生は許されるべき」

理由3「普遍的な倫理感（正義感）」

あらゆる生命は等しく尊く、すべての命を尊重すべきである

では

- 人の生活を脅かす害獣の駆除は許されるのか？
- 他の生命の脅威となっている動物の駆除は？
- インフルエンザウィルスは？天然痘ウィルスは？HIVは？

理由4「感情論」

だって絶滅したら**悲しい**じゃん！

科学者（研究者）としては不適當な解答かもしれない
しかし、最も根源的で普遍的な解答なのでは

理由4「感情論」

だって絶滅したら**悲しい**じゃん！

科学者（研究者）としては不適當な解答かもしれない
しかし、最も根源的で普遍的な解答なのでは

ただし、反論もできてしまう

➤ **誰も悲しくならない動物**なら絶滅してしまってもいいの？

現実問題として、すべての動物を保全することはできない

- 資金の問題
 - 人材の問題
 - 労力の問題
 - スペースの問題
- (生息地・飼育・保存など)

保全の対象はどのように選べばよいだろうか？

どの動物を保全しますか？
どうやって保全する動物を選びますか？
優先順位をどうやってつけますか？

保全の優先順位

カリスマ性



知能(知性)の高さ



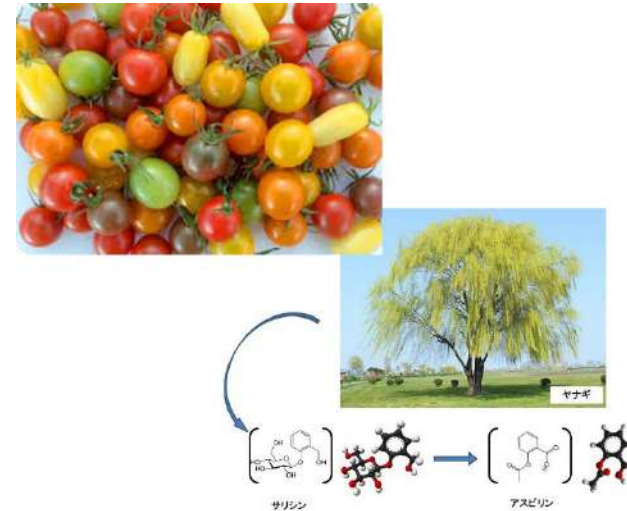
絶滅リスク(個体数)



生態系への影響力



役に立つ



保全の優先順位

カリスマ性のある（アイコンニックな）動物を優先しましょう！



- 誰もが知っている
- 社会の合意が得やすい
- 資金が集めやすい？
- 「保全」の啓蒙になるかも

一方で、、、

- 絶滅の危険性がもっと高い種がいる

優先度は本当に高いのだろうか？

知能（知性）の高い動物を優先しましょう！



- 感情的な保全の動機
- 資金は集めやすいかもしれない

しかし、、、

- どうやって「知能」を評価するのか
- 非常に**差別的**
(能力の差で不平等に扱っても良いのか?)

知性が動物の価値の尺度となる科学的な根拠は存在しない

保全の優先順位

絶滅の可能性が高い（個体数が少ない）動物を優先しましょう！

キタシロサイ
現存：2頭



カカポ
現存：200羽

- 緊急性が非常に高い

一方で、、、

- 非常に高コスト
- 絶滅が回避できない状況かもしれない

絶滅を受け入れ、他の種にコストをかけたほうが結果的に多くの種を保全できる可能性。。。。

絶滅の可能性が高い（個体数が少ない）動物を優先しましょう！

希少種

個体数が少なく、稀にしか見ることができない種のこと
また、絶滅する可能性が高い絶滅危惧種も含む

普通種

個体数が多く、よく見ることが出来る種のこと

希少種の保全は大事なことだが、
普通種の保全はしなくて良いのだろうか？

More than 30,000 species are threatened with extinction

That is 27% of all assessed species.



More than 48,600 species are threatened with extinction

That is 28% of all assessed species.



「普通種が絶滅危惧種になってしまった」
ということでもある

政治・経済 ▶ 環境

スズメの減少率が絶滅危惧種レベルという危うさ

全国1000カ所で20年間、研究者と市民が調査

河野 博子：ジャーナリスト

2024/10/01 14:00

+ 著者フォロー

ブックマーク

印刷

A+ 拡大



スズメ（写真：古屋正善氏）

スズメなど身近に見られる生きものがどんどん減っている——。環境省生物多様性センターと環境NGO、研究者、市民らが全国約1000カ所で2003年から続ける生態系のモニタリング調査のまとめが1日公表された。

8つの分野で植生、鳥類、哺乳類、淡水魚、底生生物、藻類、サンゴ礁など広範な生きものを調べた。20年間続けて初めて明らかになった異変もある。私たちが慣れ親しんできた鳥やチョウは見られなくなってしまうのか。

保全の優先順位

生態系への影響力が高い動物を優先しましょう！



出典：<https://man-kan.jp/food-chain/>

生息環境の改善
→ 他の生物の保全にも

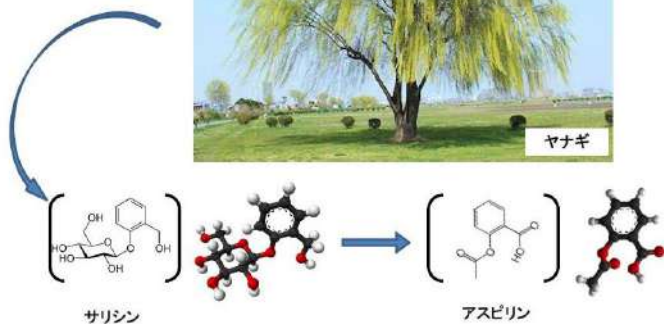
しかし、、、
環境改善には時間がかかる

- 時間的な猶予がどれだけあるのか
- ピラミッド下位の生物の保全は間接的になる
 - 本当に保全に繋がる？
- 影響力の低い生物の保全はしなくてもよいのか？

役に立つ生物を優先しましょう！



- 家畜・農作物
- 薬効のある生物（植物・微生物など）
- 生態系サービス
食品、環境調整、レクリエーション、生命基盤



資本主義的すぎませんか？

人間中心主義すぎませんか？

役に立たない生物は保全しなくて良いのですか？

保全の優先度に確たる答えは見つかっていない

結局のところ、
研究者や保全グループ・機関が自らの主義主張によって種を決め、
保全を実践している

重要なのは

- その動物を**保全する理由**を説明できること
- 保全の手法が**科学的な論拠**に成り立つこと
 - **関係者間で連携**が取れていること

遺伝子とは

遺伝子

生物のある特徴(=形質)の**設計図**

親から子へと伝わっていくもの



ある個体のある形質は遺伝子によって

- ・生み出される
- ・子に受け継がれる

遺伝子・DNA・ゲノムの違いを説明できますか？

遺伝子:ある形質の設計図

DNA:設計図に書かれている文字

ゲノム:設計図の総体

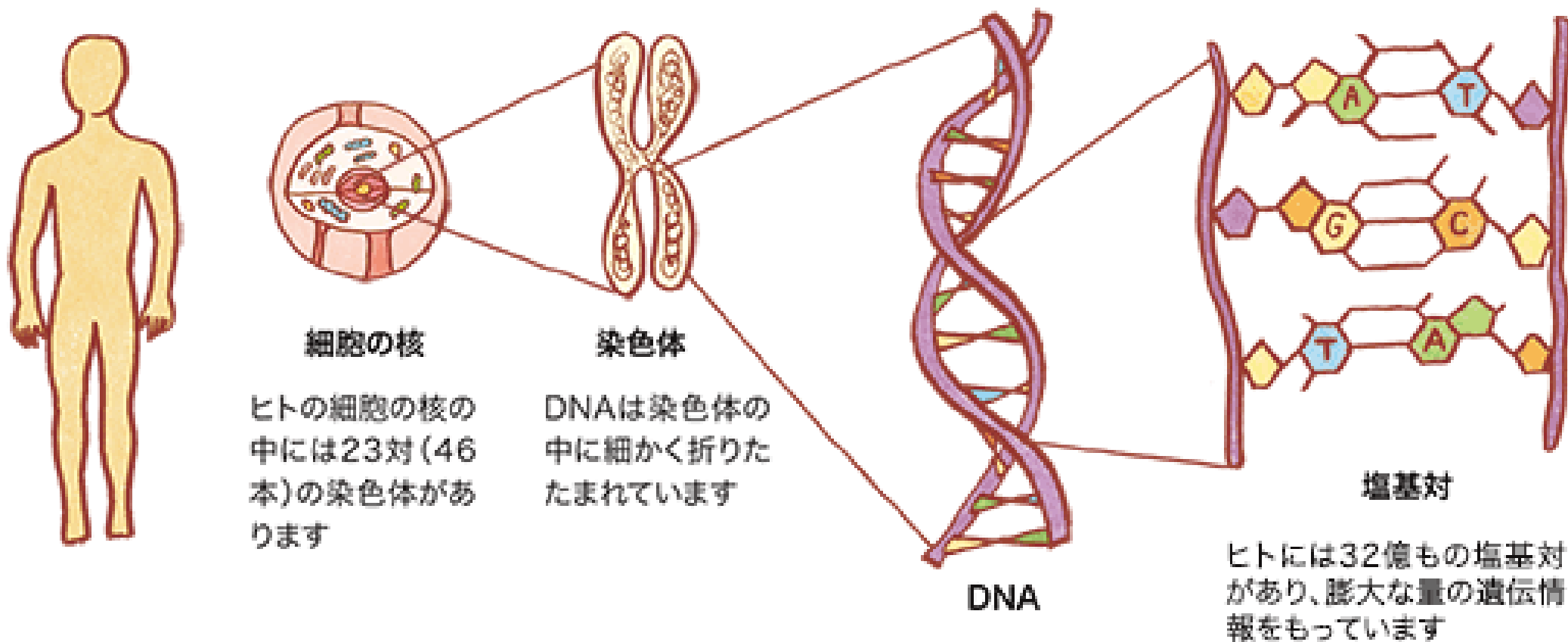
例えば「椅子の組み立て方の説明書」を想像すると

「背もたれの組み立て方」などの各項目が**遺伝子**

そこに書かれている文字が**DNA**

「説明書」それ自体が**ゲノム**

DNA



遺伝子とは

DNAはアデニン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C)
の4つの化学物質(塩基)から成る

ATGCGTCATACGGTCCAAAATGCTACGCATTACATGGGCTATATATGGG……

またDNAは必ず2本鎖となっており、AにはT、GにはCが必ず対応する

ATGCGTCATACGGTCCAAAATGCTACGCATTACATGGGCTATATATGGG……

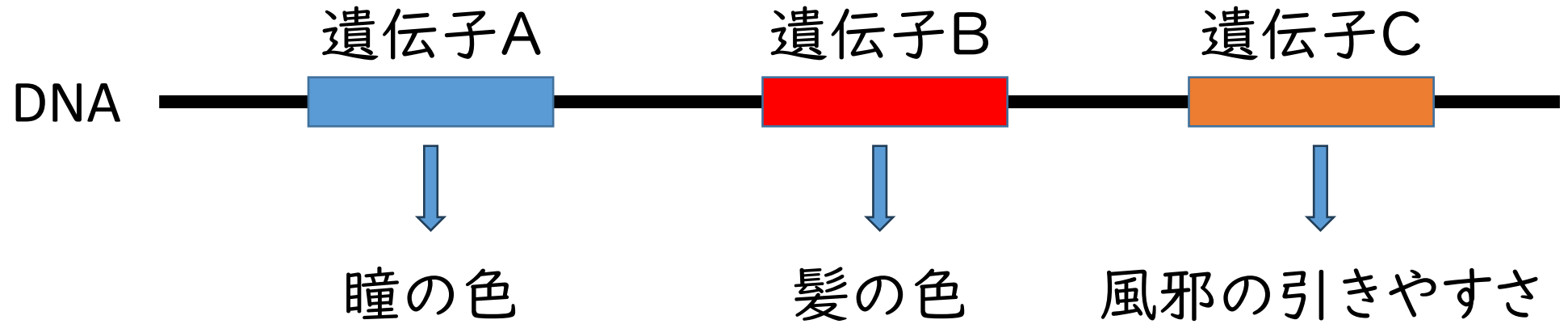
TACGCAGTATGCCAGGTTTTACGATGCGTAATGTACCCGATATATACCC……

DNAとは化学物質であり、親から子へ受け継がれる「物質」

遺伝子とは

DNAのうち、体の設計図になる部分を遺伝子という

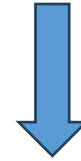
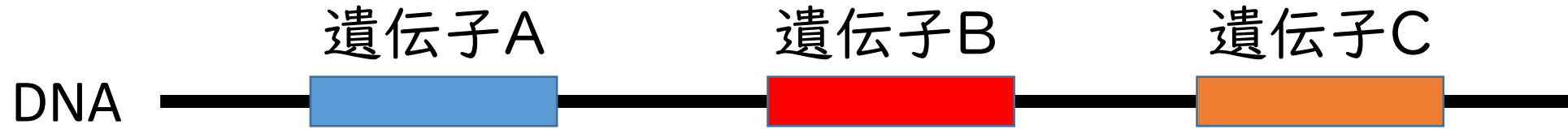
イメージ



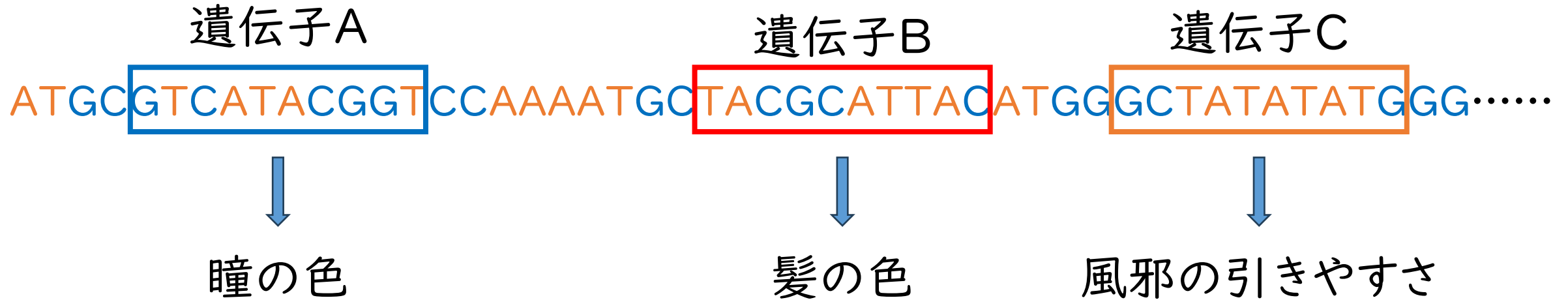
遺伝子とは

DNAのうち、体の設計図になる部分を遺伝子という

イメージ



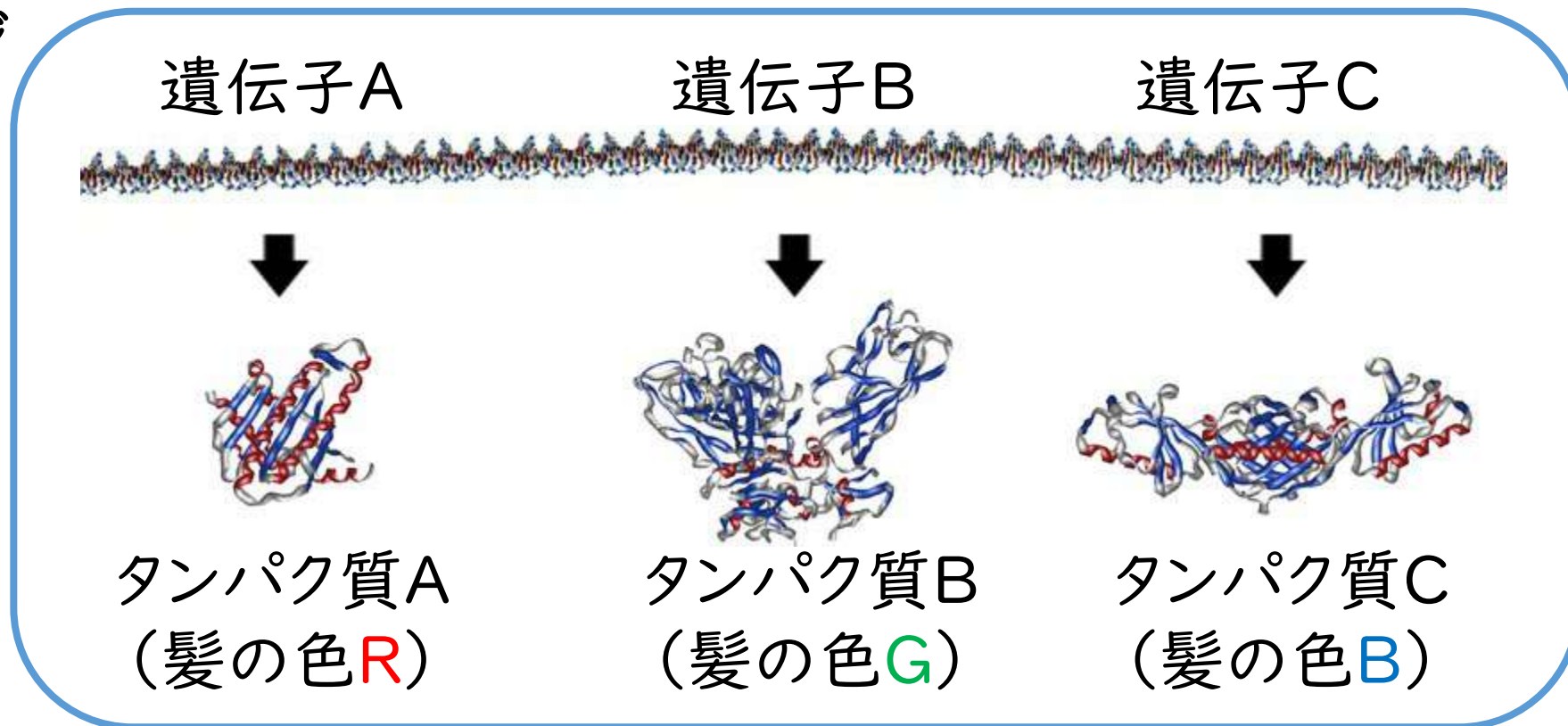
実際は...



遺伝子とは

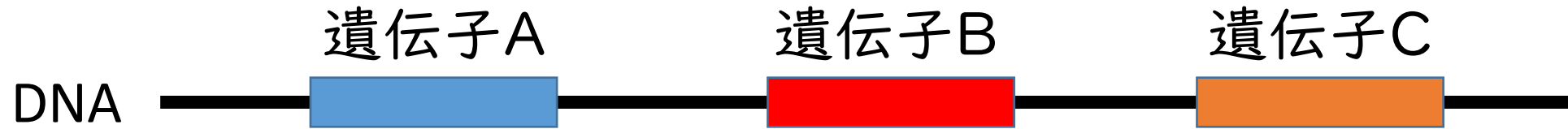
DNAのうち、体の設計図になる部分を**遺伝子**という
実際には、遺伝子から作られるのはタンパク質である
タンパク質の複雑な相互作用が生物の特徴を作り出す

イメージ



遺伝子とは

DNAのうち、体の設計図になる部分を**遺伝子**という



ゲノム？

この遺伝子全ての集合を**ゲノム**と呼ぶ

ヒトの場合、遺伝子は約2万個存在する

この2万個の遺伝子をすべてまとめてヒトゲノムと呼ぶ

全ての遺伝子はDNA上に存在していることから、
DNAの全長を指して「**全ゲノム**」と呼ぶこともある

種によっては

ある遺伝子が無かったり

DNAの配列が大きく異なったりする

→ 種によって「遺伝子のセット(ゲノム)」が異なる

その違いで進化が駆動し、多様な生物種が誕生した

ヒトゲノム ⇔ チンパンジーゲノム

イヌゲノム ⇔ オオカミゲノム

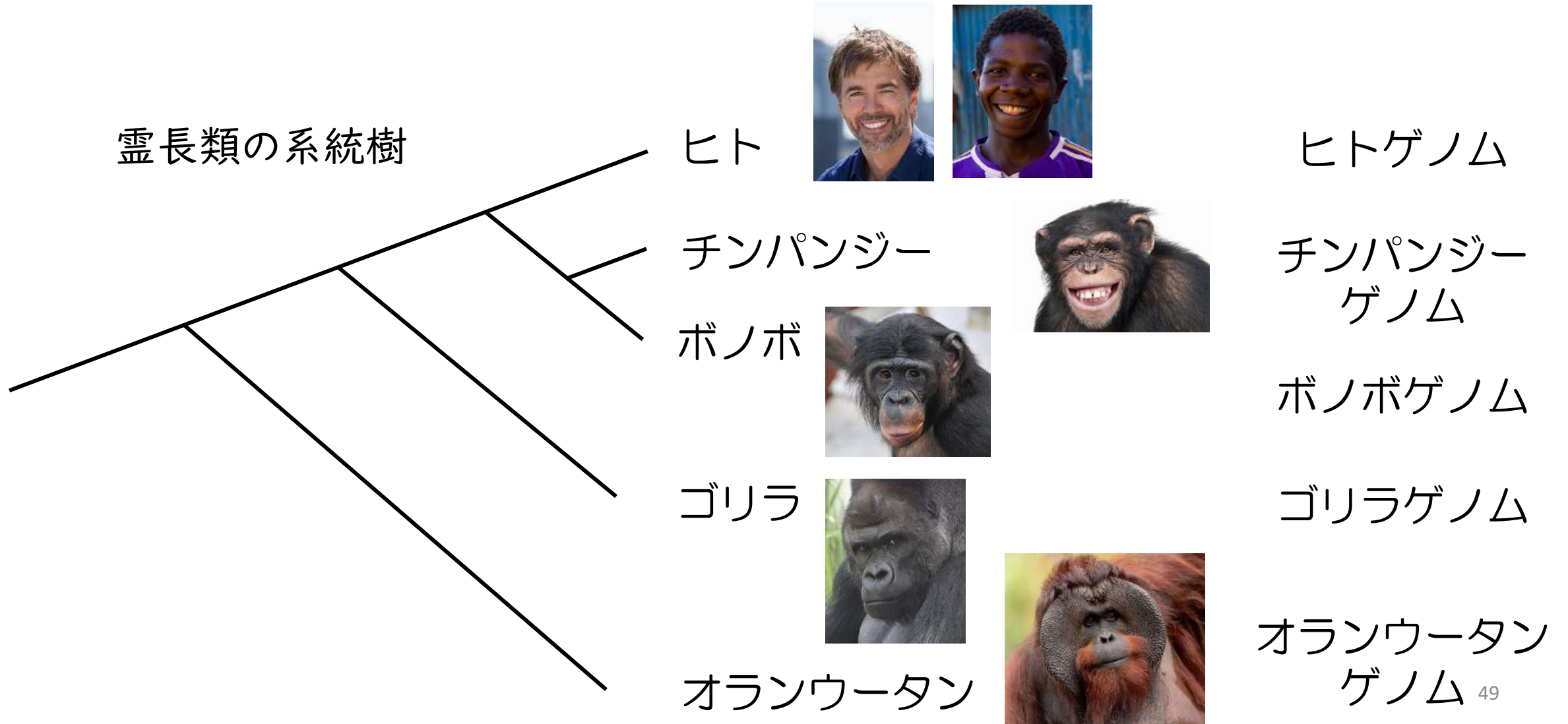
リンゴゲノム ⇔ ナシゲノム

マグロゲノム ⇔ カツオゲノム

などなど

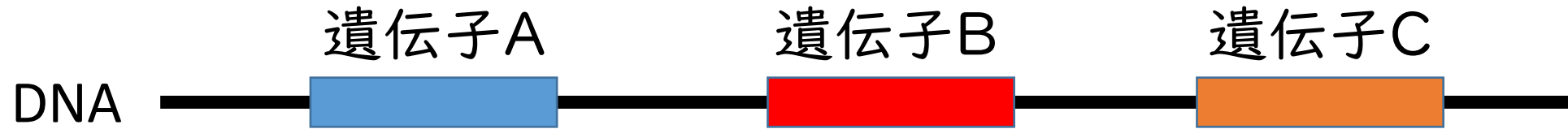
遺伝子とは

それぞれの種がその種のゲノムをもっている



遺伝子とは

DNAのうち、体の設計図になる部分を**遺伝子**という



DNAの全長（ゲノムサイズ）は
哺乳類：約30～20億塩基（文字）
鳥類：約10億塩基
大腸菌：約450万塩基
スギ（杉）：約110億塩基（!）

ちなみに.....

広辞苑は一冊約1500万字

哺乳類のゲノムは200冊分

鳥類のゲノムは70冊分

遺伝的多様性



生物多様性＝

・生態系の多様性・種の多様性・**遺伝子の多様性**

生態系の多様性：

さまざまなタイプの自然環境（森林、河川、海洋など）
が存在すること

種の多様性：

さまざまな種が存在すること

遺伝子の多様性：

同じ種内において、ある遺伝子に様々なタイプが存在
すること

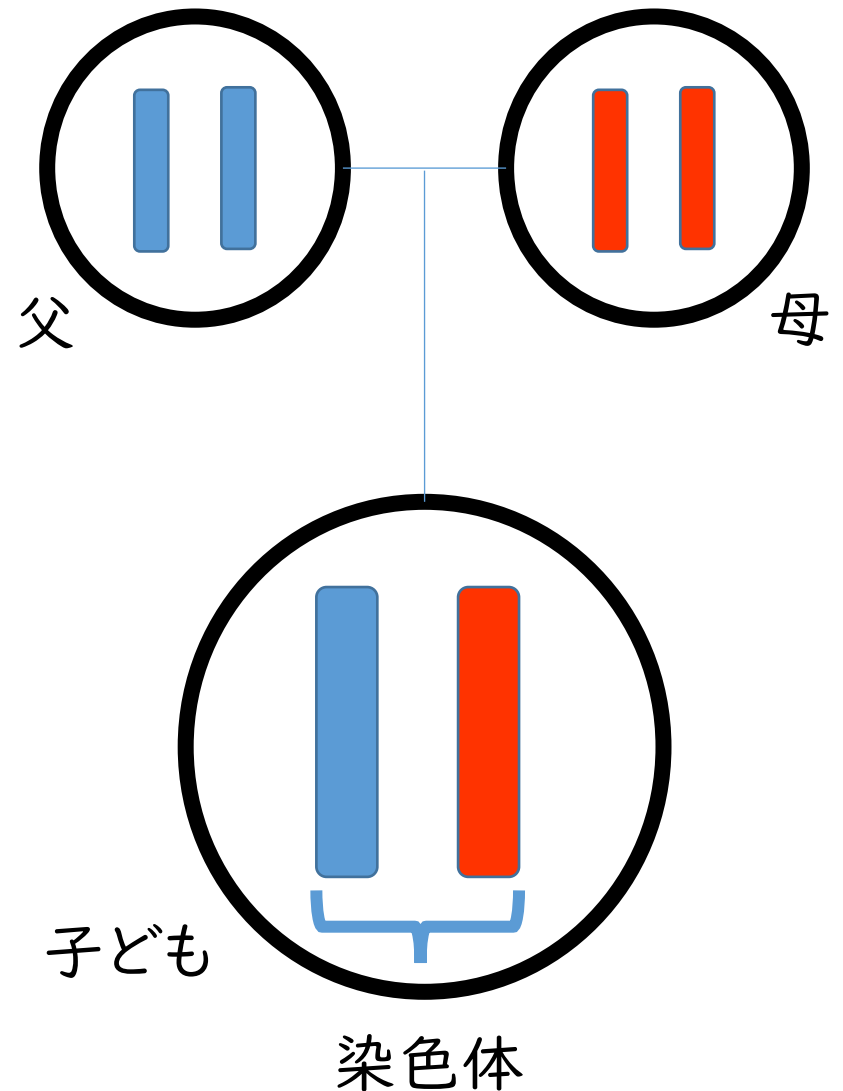
遺伝的多様性

DNAは**染色体**というコンテナに折りたたまれている

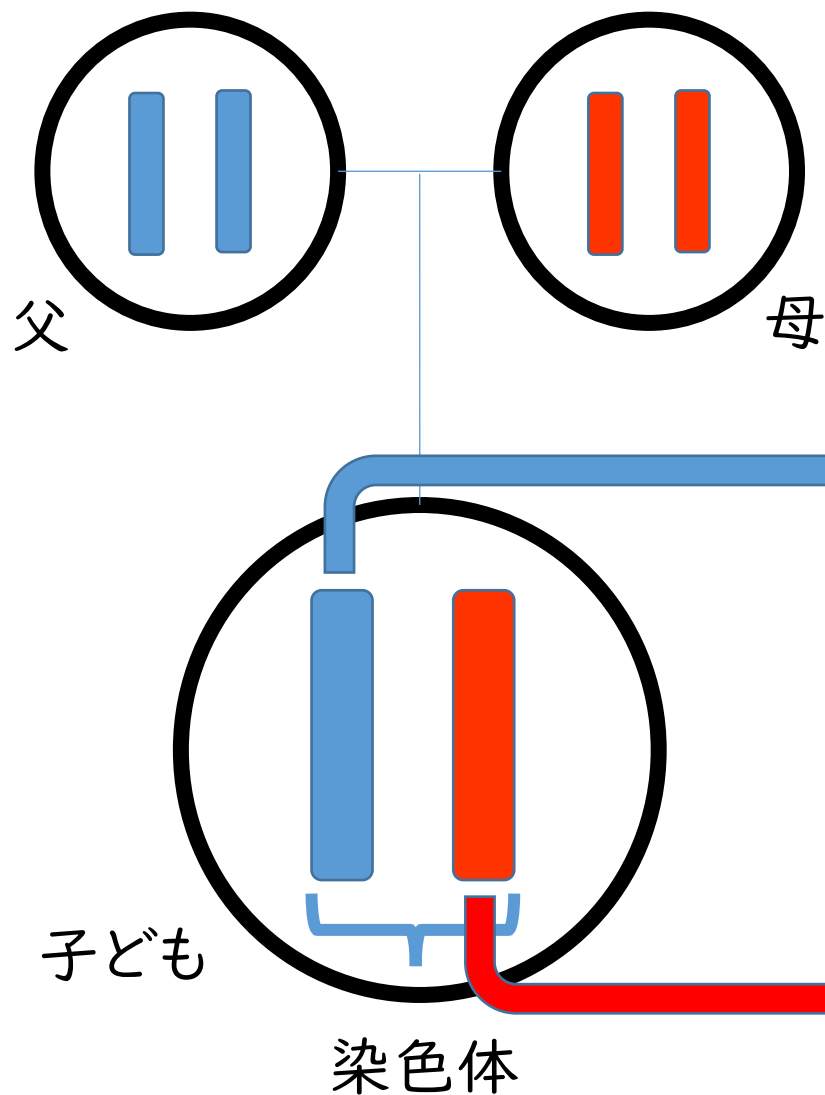
染色体は

- 父親から受け継がれるもの
 - 母親から受け継がれるもの
- の2つが存在する

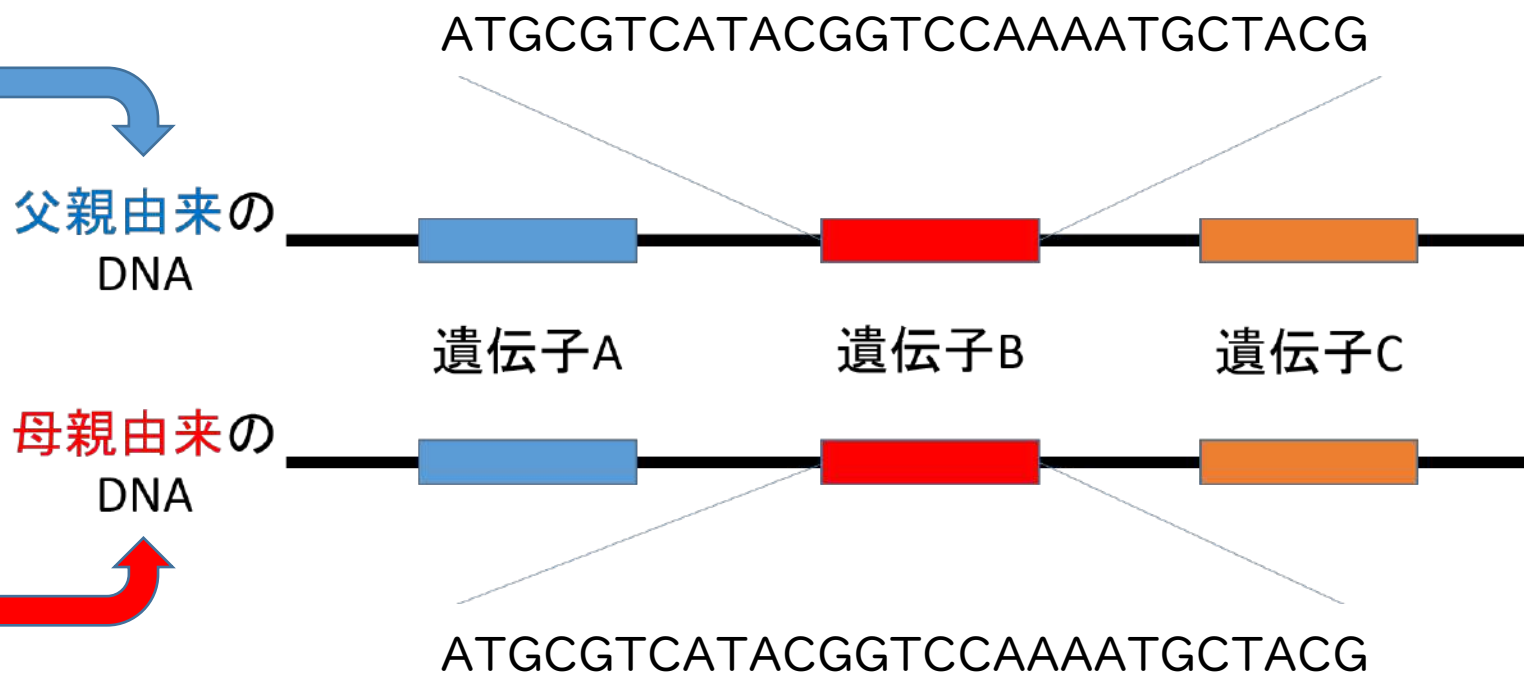
つまり、私たちは
ほとんど同じ配列のDNAからなる遺伝子（ゲノム）
を**2セット**持っていることになる



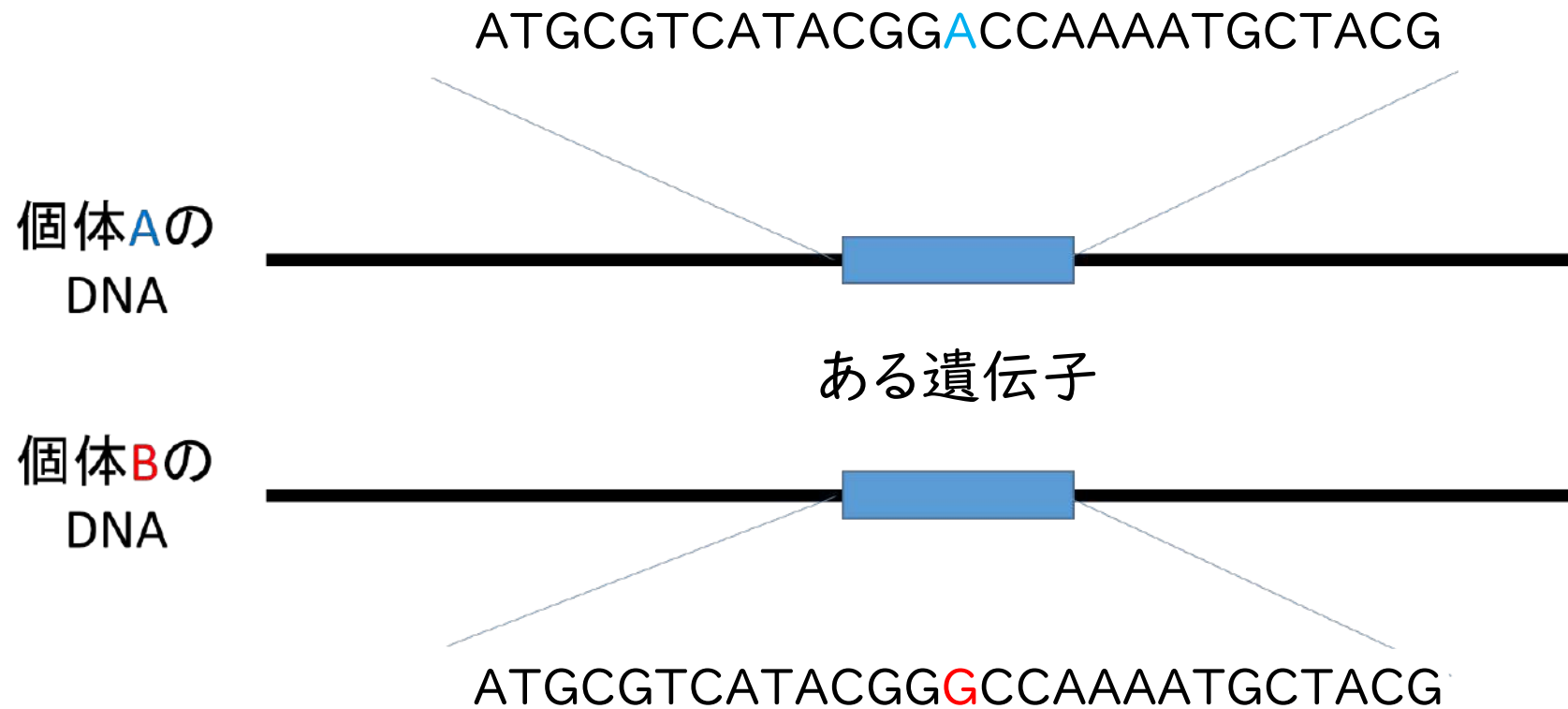
遺伝的多様性



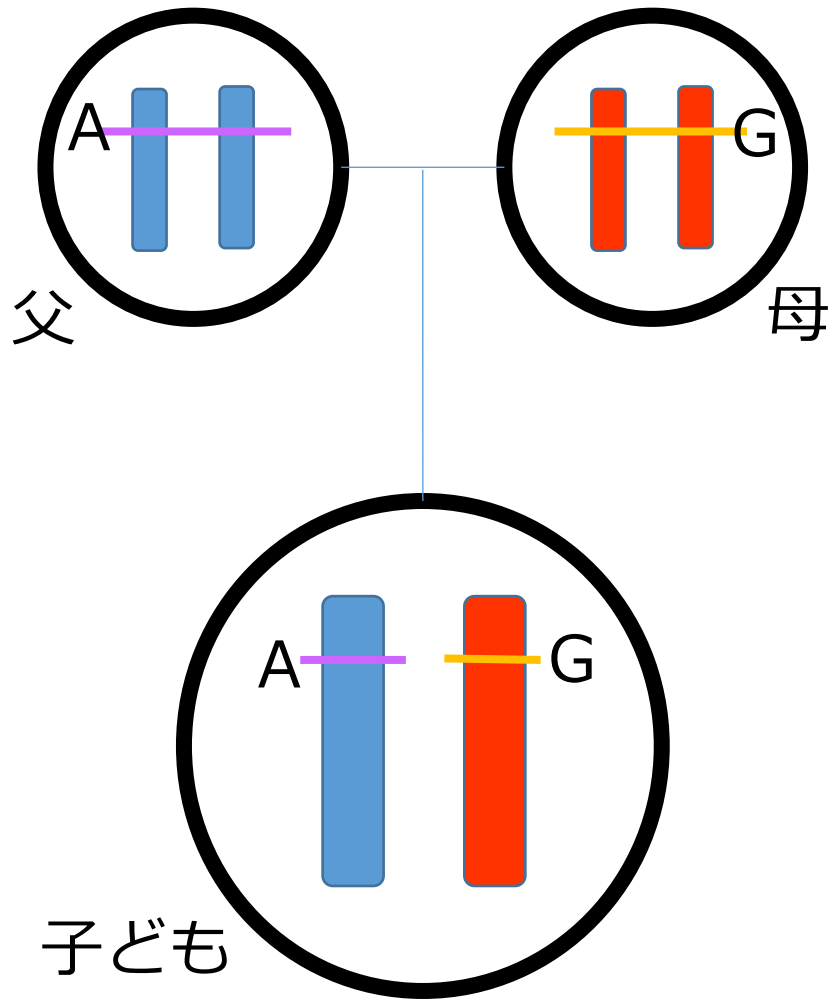
ほとんど同じ配列のDNAからなる遺伝子（ゲノム）
を2セット持っていることになる



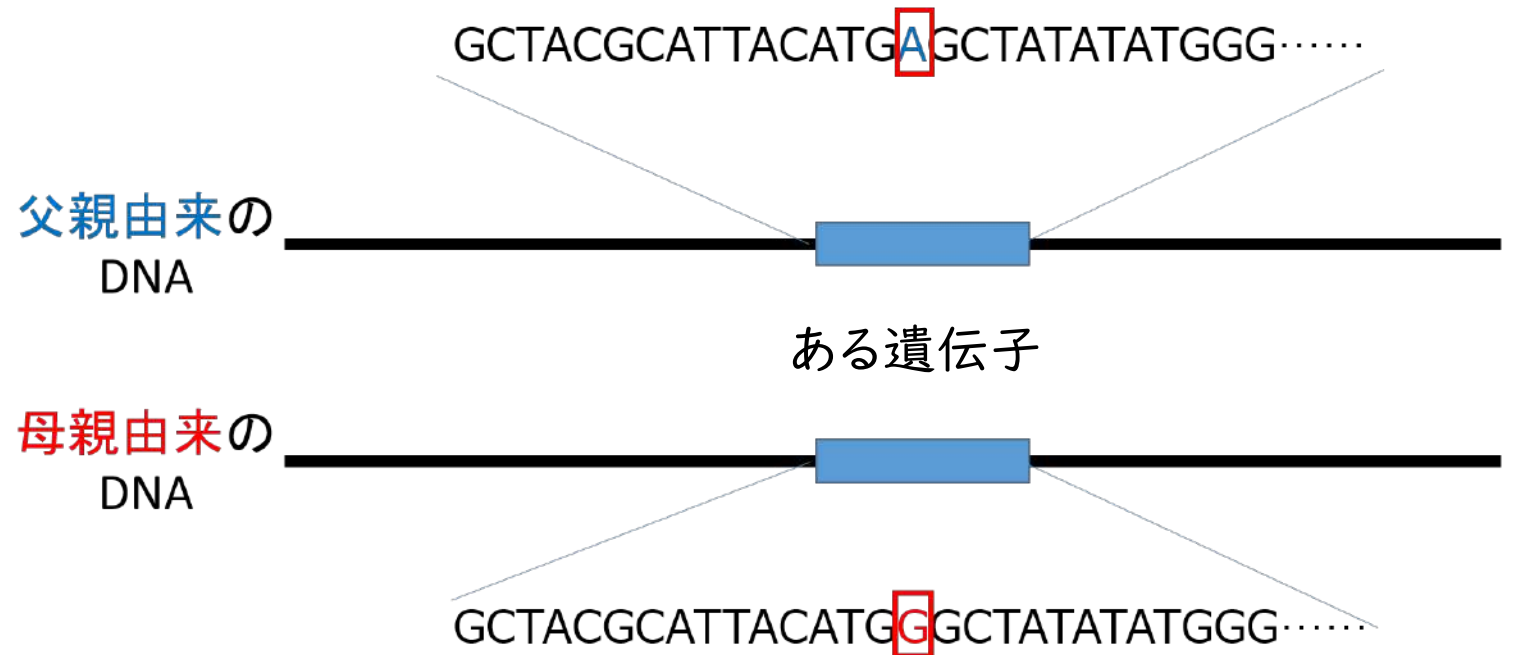
ところが
別の個体と「ある遺伝子」の塩基配列を比較したとき、
塩基配列が少しだけ異なることがある



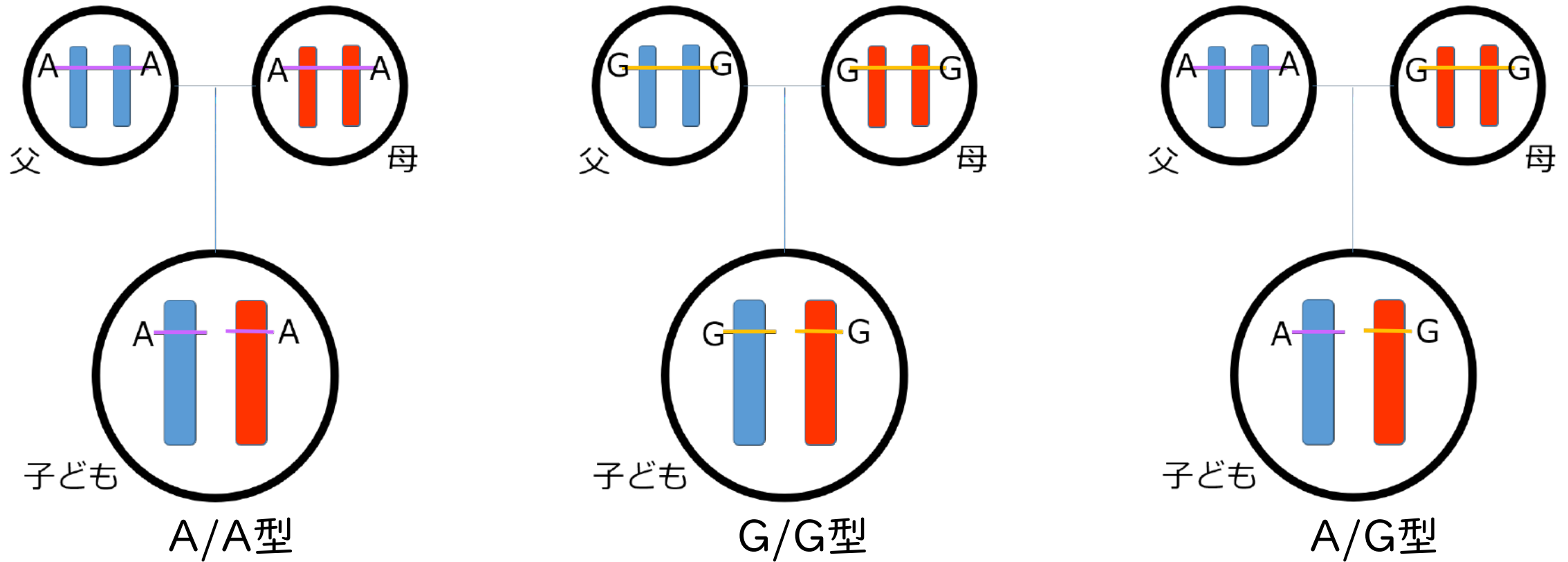
遺伝的多様性



ある遺伝子の塩基がA/Aの父親とG/Gの母親から生まれた子どもはA/Gの塩基配列を持つことになる

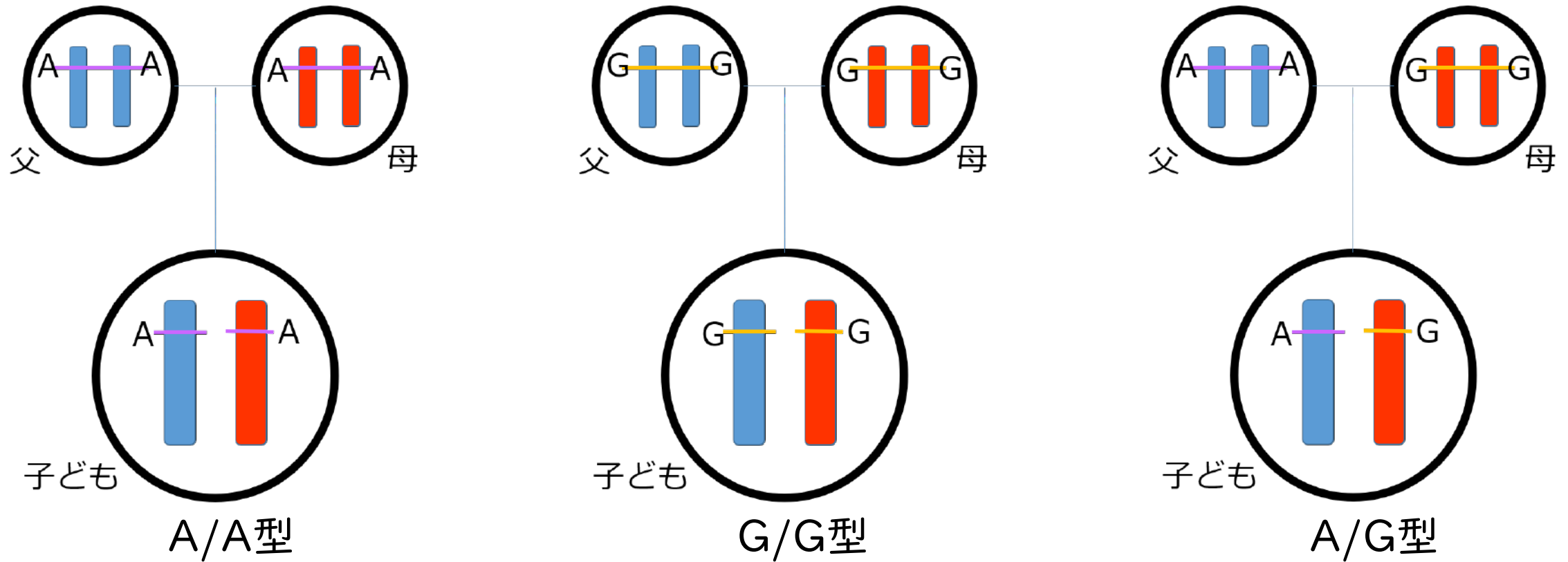


遺伝的多様性



このような遺伝子の型の違いが形質の違いとなり、
個体差となる

遺伝的多様性



またこのようにDNAの配列に個体差があることを多様性があると言い、
遺伝的多様性と呼ぶ

遺伝的多様性

種内および個体群内に存在する遺伝的な違いの総体

DNAの配列に個体差があること

この差により、個体間で形質の差が生じる

例えば.....

瞳の色（黒、青、茶色、緑など）

毛の色（黒、白、茶色、栗色など）

気温への耐性（暑いのが得意、寒いのが得意）

病気への抵抗性（強い、中間、弱い）

生態系の多様性

山・川・海・まち、
たくさんの種類の自然環境があります

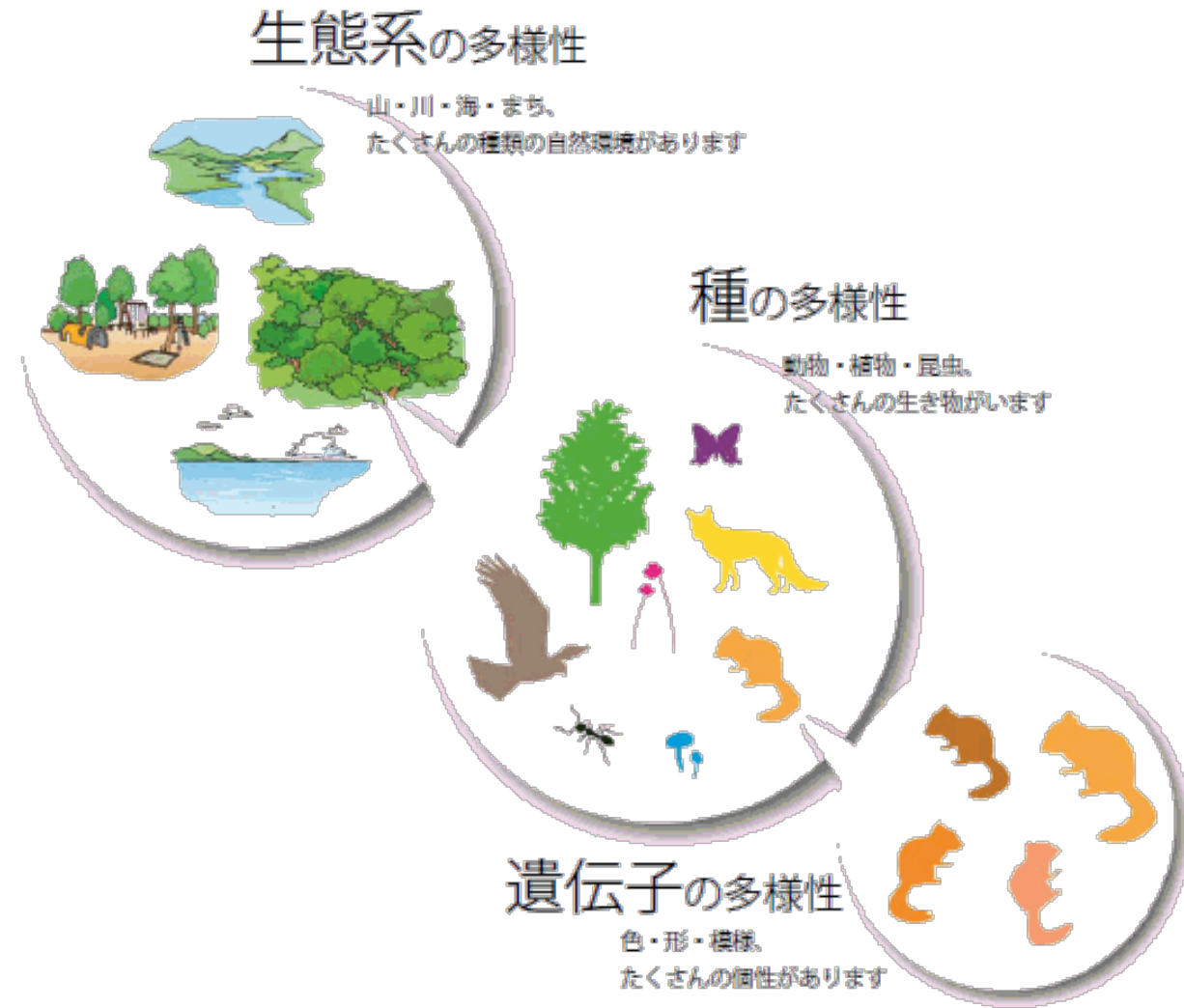
種の多様性

動物・植物・昆虫、
たくさんの生き物がいます

遺伝子の多様性

色・形・模様、
たくさんの個性があります

遺伝的多様性



生物多様性の保全とは

- ・生態系の多様性 (様々な生息環境)
- ・種の多様性 (様々な種)
- ・遺伝子の多様性 (個体差や個性、種差)

を守るということでもある

よくある間違い

遺伝的多様性の解析 = 様々な遺伝子の解析
ではない

遺伝的多様性は

DNAの塩基配列にどれだけ個体差があるか
の指標であり、**遺伝子の数には興味がない**

よくある間違い2

遺伝的多様性の解析 = 病気へのかかりやすさの解析

(感染症、癌、遺伝子疾患など)

というのは間違い

遺伝的多様性は

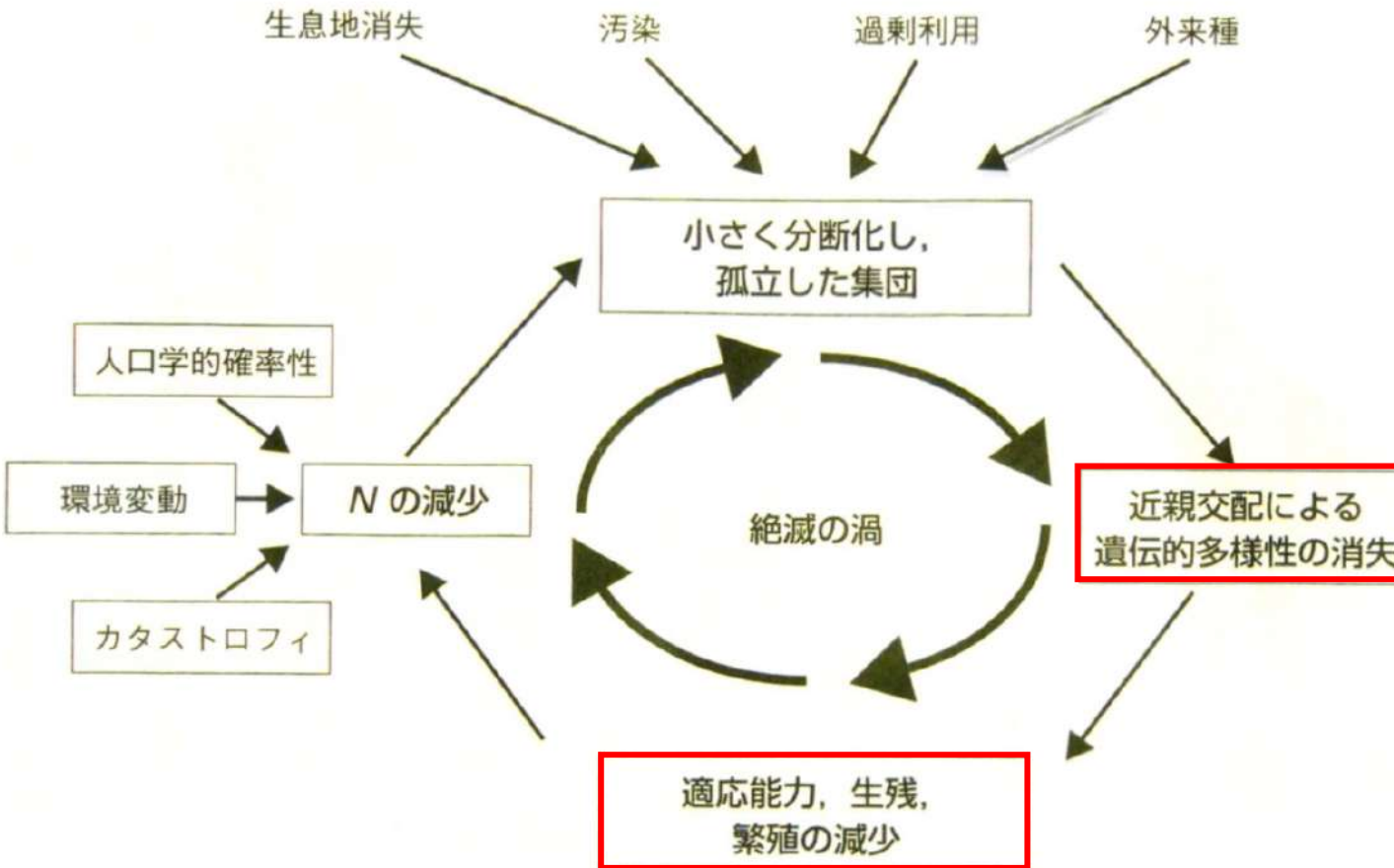
DNAの塩基配列にどれだけ個体差があるか

の指標であり、**遺伝子の機能には興味がない**

なぜ遺伝的多様性は重要なのか

遺伝的多様性の消失

遺伝的多様性の消失は「**絶滅の渦**」の大要因



個体数の減少は

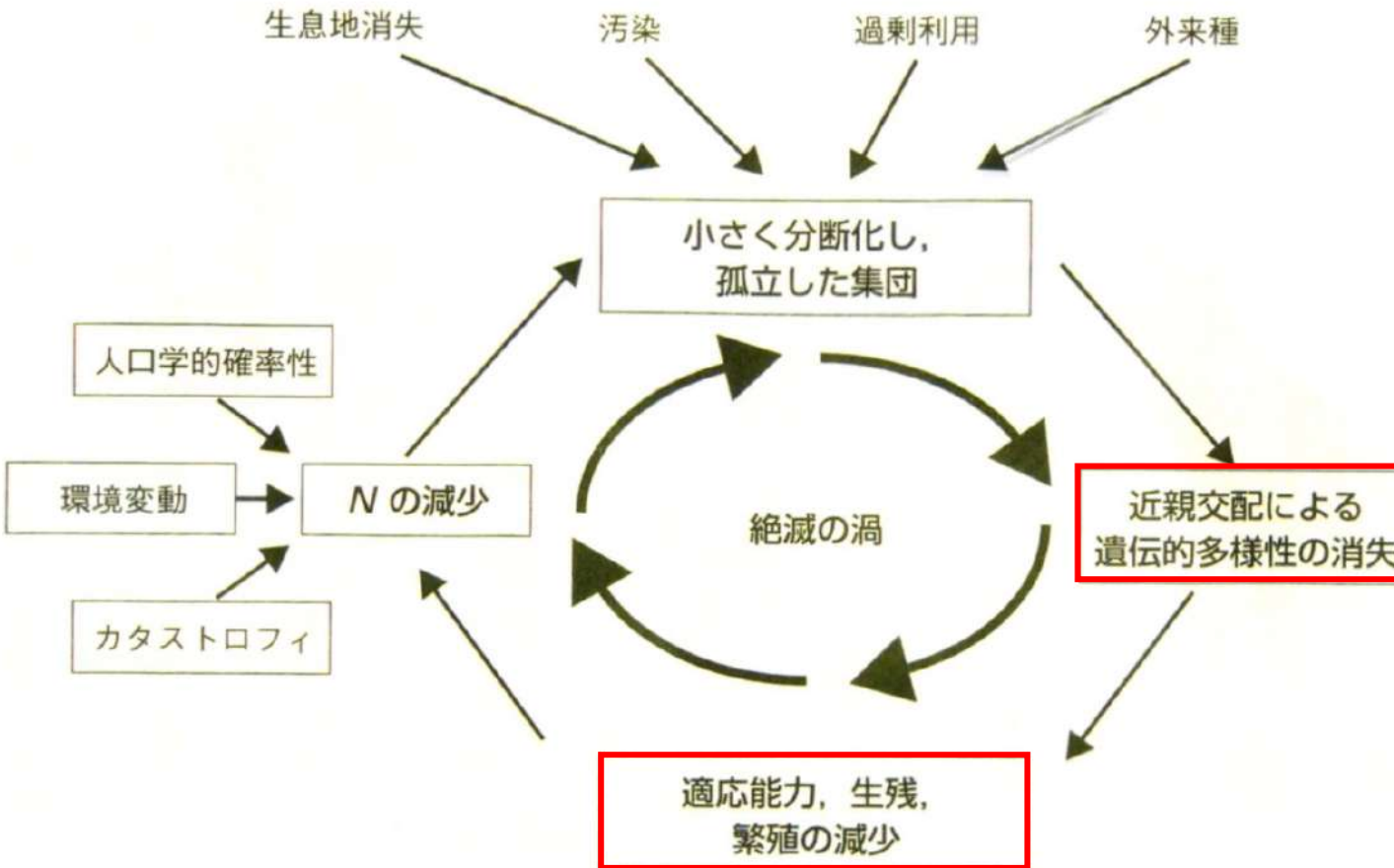
近親交配

遺伝的多様性の消失

を引き起こし、適応度が減少する

遺伝的多様性の消失

遺伝的多様性の消失は「**絶滅の渦**」の大要因



適応度が減少すると
→ 個体数がさらに減少
→ 近親交配の進行
→ 多様性の減少
→ 適応度のさらなる減少
という負のスパイラルに繋がる

「近親交配」はなぜ問題なのか？

遺伝的多様性の減少は
近親交配の進行に大きく影響する

近親交配は血縁関係にある個体の交配・繁殖である

種の存続のためには繁殖が必要不可欠であるが、
特に絶滅危惧種のような個体数が少ない小集団では
周囲には血縁個体しか残っておらず、
近親交配をせざるを得ない状況に陥ってしまう

遺伝的多様性の消失

近親交配の問題は、**有害遺伝子が高頻度に現れる**ことにある

有害遺伝子のなかには致死的な遺伝子が存在する

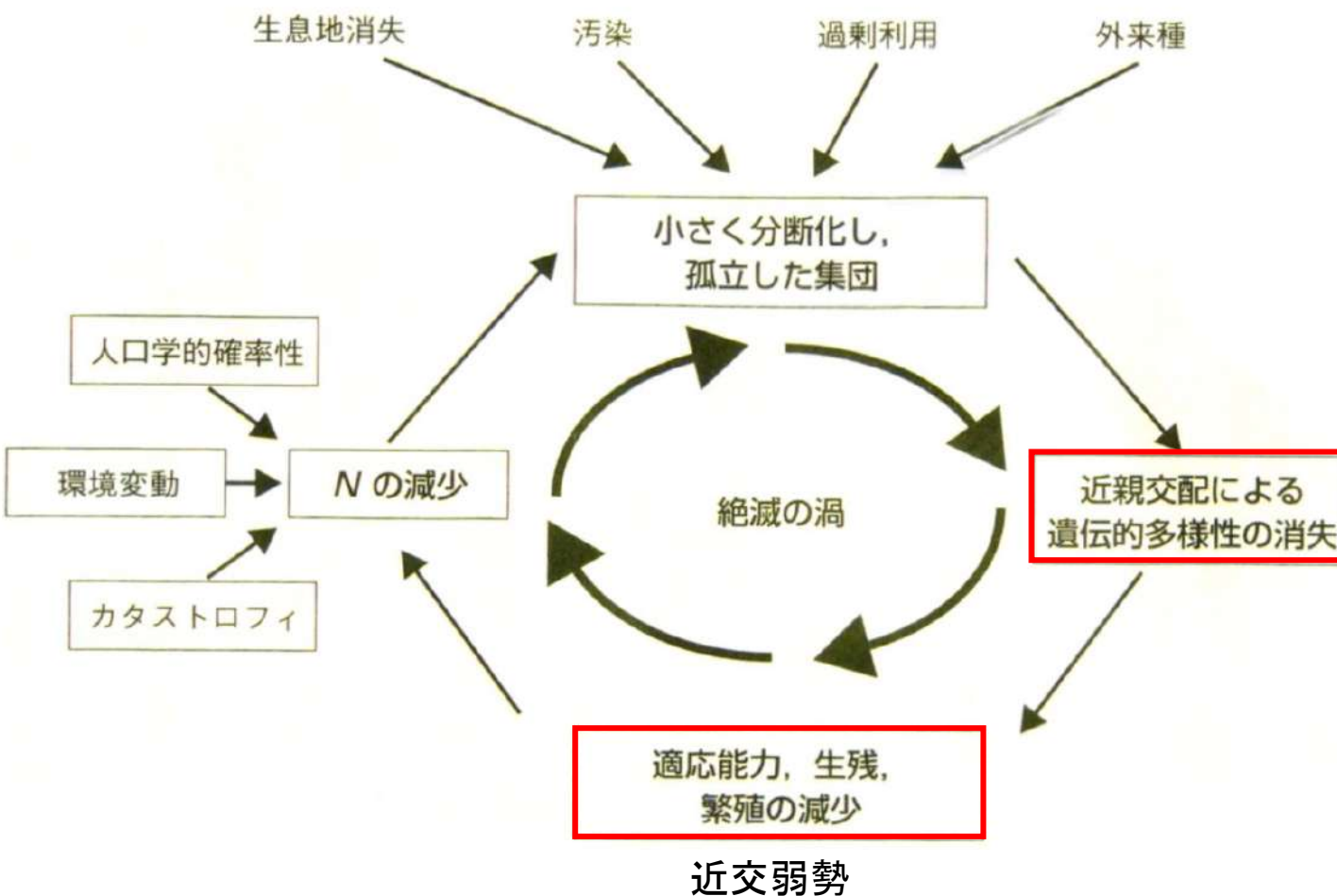
- ・軟骨ジストロフィ（カリフォルニアコンドル）
- ・ビタミンE吸収不良（モウコノウマ）
- ・停留睪丸病（フロリダパンサー） など

有害遺伝子は個体の適応度を著しく下げてしまう

近親交配によって生じる適応度の低下を**近交弱勢**という



遺伝的多様性の消失は「**絶滅の渦**」の大要因



遺伝的多様性がどれくらいか

近親交配がどれくらいか

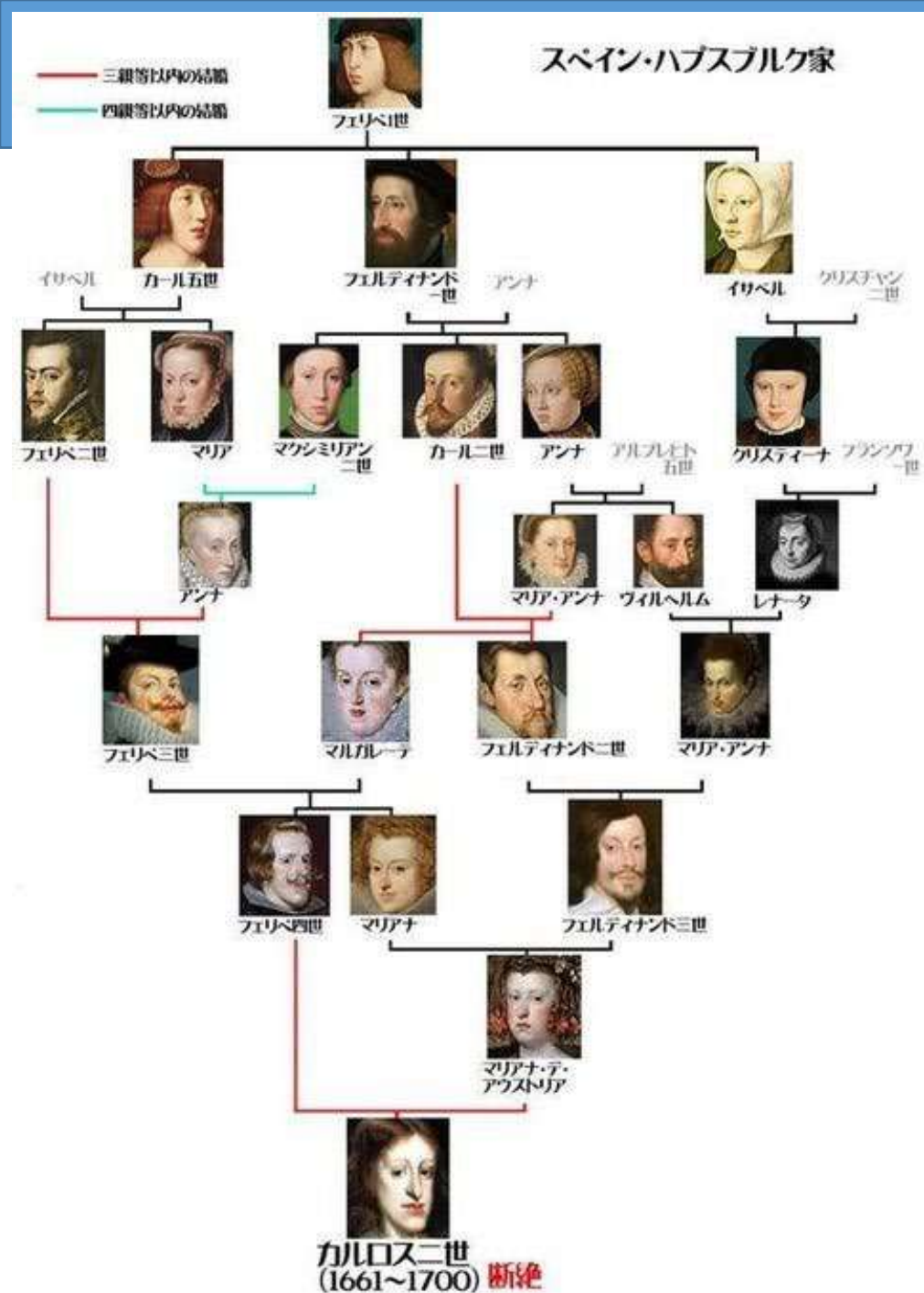
個体群の絶滅リスクはどれくらいか



保全遺伝学

遺伝解析

(≠遺伝子解析)



近親交配による有害遺伝子の高頻度な出現
は人間でも悪影響を及ぼした例がある

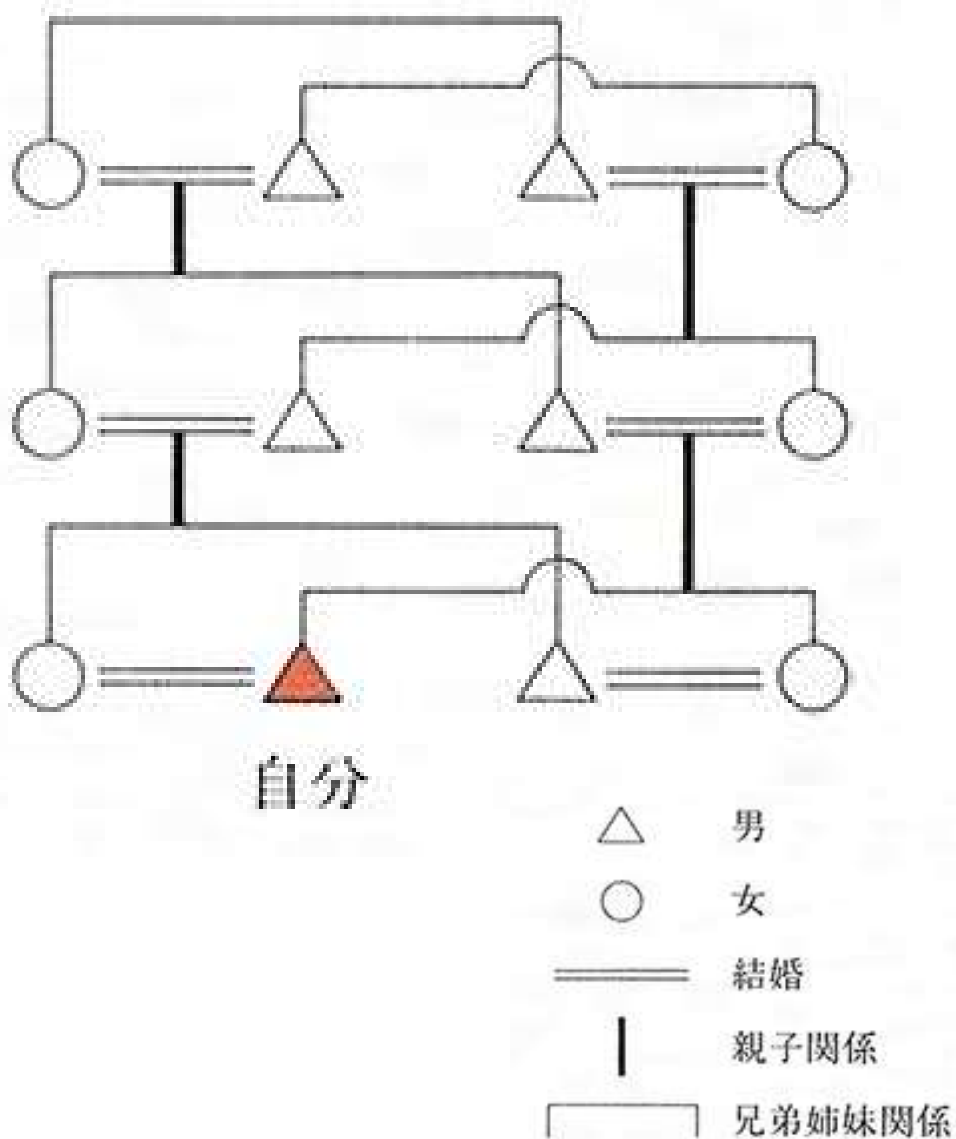
ヨーロッパを広く支配していたハプスブルク家
(の一部)は血族婚姻を繰り返した

最後のカルロス2世は

- ・虚弱
- ・不正咬合
- ・知的障害など



の近交弱勢と思われる特徴を持ち、断絶している



近親婚をどこまでとするかは難しいが、
現在の日本でも「イトコ婚」は認められている

ヒトの歴史のなかでも「イトコ婚」の風習は
多くの民族・部族・村落で見られる

→ 親族意識・協力関係の強化
(参考: 双方交叉イトコ婚)

近親交配の問題点は、
何世代にもわたり繰り返されることで
悪影響(近交弱勢)が顕在化することにある

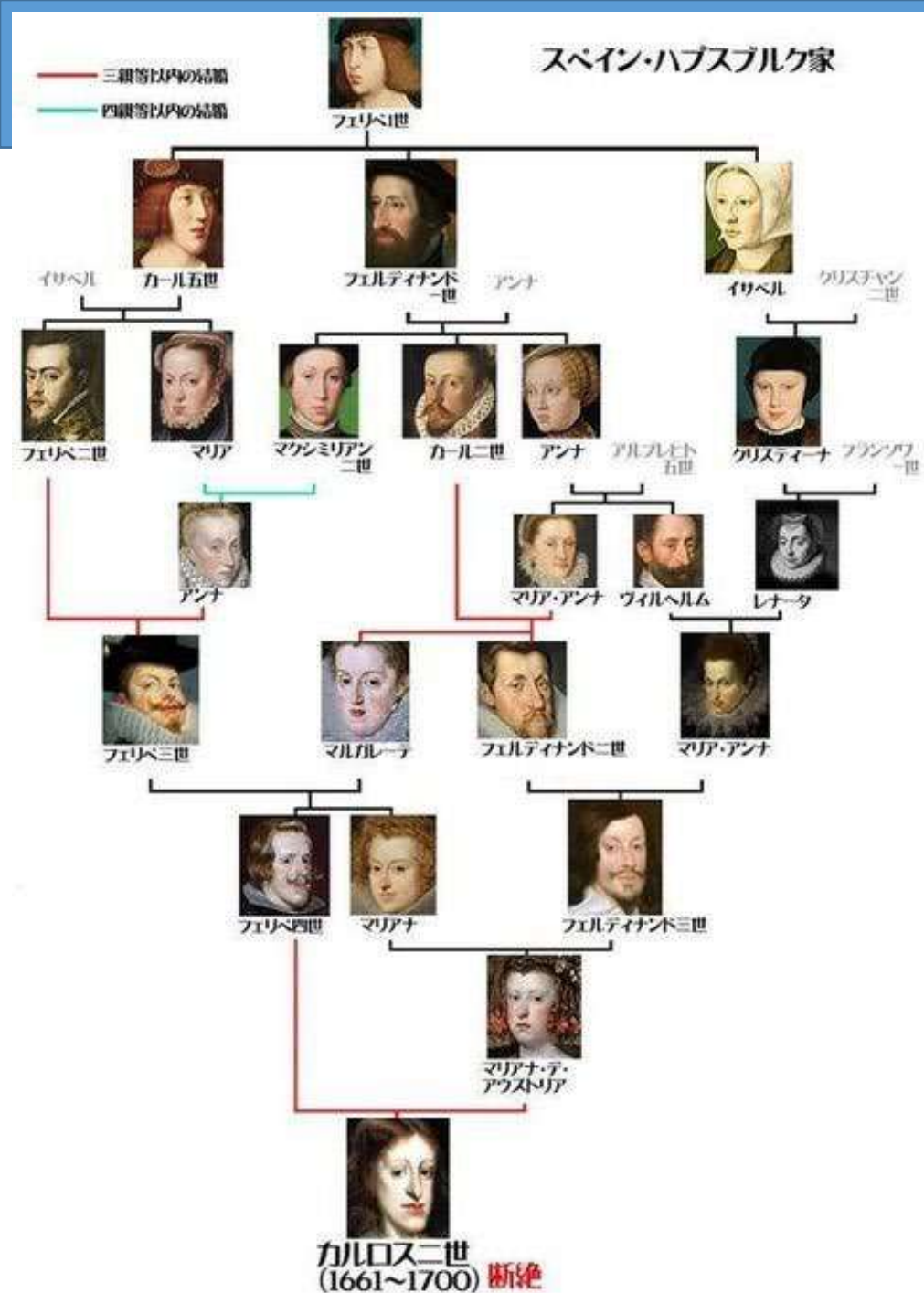
有害遺伝子のなかには致死的な遺伝子が存在する

- ・軟骨ジストロフィ(カリフォルニアコンドル)
- ・ビタミンE吸収不良(モウコノウマ)
- ・停留睪丸病(フロリダパンサー) など



有害遺伝子は個体の適応度を著しく下げてしまう
近親交配によって生じる適応度の低下を**近交弱勢**という

実は、このような致死的なほどに有害な遺伝子が問題となる事例はそこまで多くないことがわかってきた



ヨーロッパを広く支配していたハプスブルク家
(の一部)は血族婚姻を繰り返した

最後のカルロス2世は

・虚弱

・不正咬合

・知的障害など



の近交弱勢と思われる特徴を持ち、断絶している

↑の特徴のそれぞれは、どれも致命的なほど
に有害性が強いわけではない

致命的なほどの有害性:

流産、極度の奇形、重篤な遺伝子疾患

一方で、近親交配に起因するそれなりに重篤な遺伝子疾患を発症する生物も身近に存在している



ペット（イヌ、ネコ、魚など）や家畜（特にウマ）、農作物などの
品種として扱われる生物たち

品種改良は近親交配の歴史でもある

有害遺伝子の蓄積による

- ・遺伝子疾患

- ・病気への脆弱性

- ・極端なほどに不自然な形態

など、自然下であれば生きていけない形質が高頻度に出現する

スズメの減少率が絶滅危惧種レベルという危うさ

全国1000カ所で20年間、研究者と市民が調査

河野 博子：ジャーナリスト

2024/10/01 14:00

+ 著者フォロー

ブックマーク

印刷

A+ 拡大



スズメ（写真：古屋正善氏）

スズメなど身近に見られる生きものがどんどん減っている——。環境省生物多様性センターと環境NGO、研究者、市民らが全国約1000カ所で2003年から続ける生態系のモニタリング調査のまとめが1日公表された。

8つの分野で植生、鳥類、哺乳類、淡水魚、底生生物、藻類、サンゴ礁など広範な生きものを調べた。20年間続けて初めて明らかになった異変もある。私たちが慣れ親しんできた鳥やチョウは見られなくなってしまうのか。

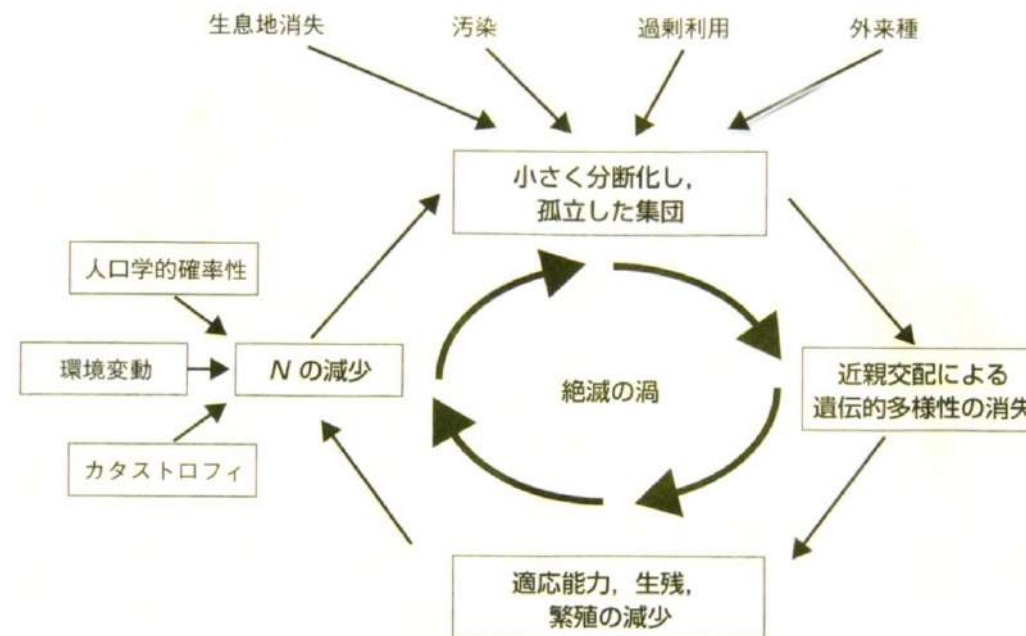
東洋経済オンライン 2024/10/01

(<https://toyokeizai.net/articles/-/830340>)

今は身近な生物も、将来的に見られなくなる可能性が近年急速に高まっている

→ 生態系サービスが受けられなくなる？

こういった生物でこそ遺伝的多様性の解析が重要なかもしれない



遺伝解析の紹介

希少な野生動物の行動観察はしばしば困難を伴う

そもそも姿が見られない

- 生息環境（森林・山岳など）
- 個体数が少ない（チャンスがない）

得られる情報が限られる

- 親子関係？性別？性比？
 - 生理機能？

なぜ遺伝解析？

遺伝解析は野生動物の目には見えない特徴を明らかにする

個体識別
親子判定

遺伝的多様性

進化

行動と遺伝子
の関連



なぜ遺伝解析？

希少な野生動物の行動観察はしばしば困難を伴う

遺伝解析を行うことで、行動観察のデータを補うことができる

個体識別・性判別

→ 個体数推定・密度推定

父子判定・親子判定

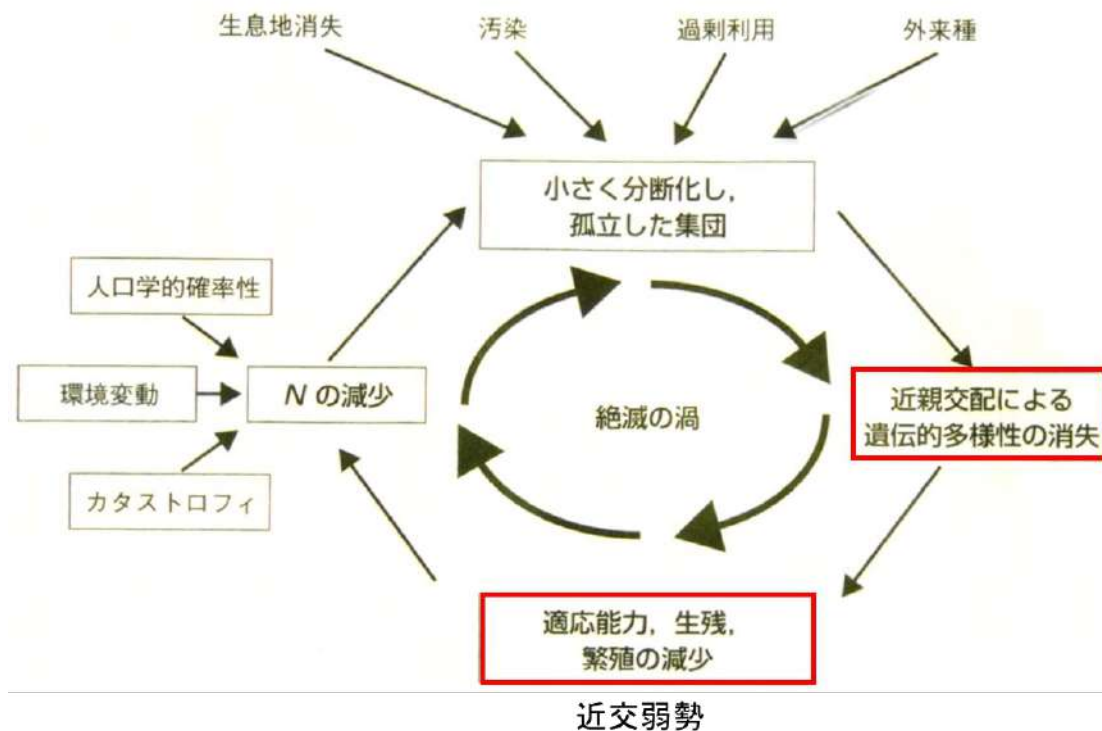
→ 家系図の再構築

遺伝的多様性

→ 保全の優先度

なぜ遺伝解析？

遺伝情報は保全を進めるうえで重要な手がかり



遺伝的多様性 → 絶滅リスクの推測

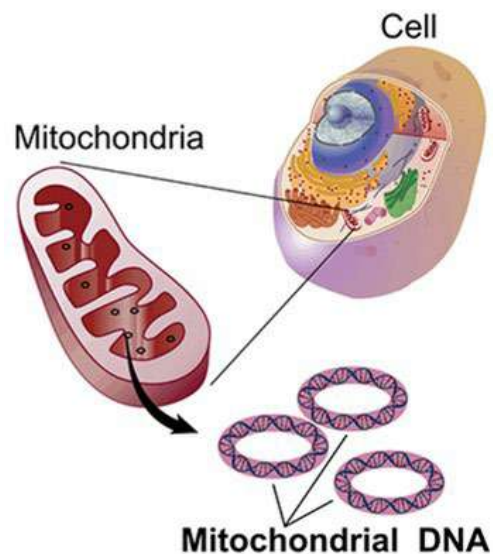
遺伝的な個体群 → 生息地の接続性・保全ユニット

なぜ遺伝解析？

(特によく使われる) 遺伝解析の種類

mtDNA

調節領域、ccytochrome *b*

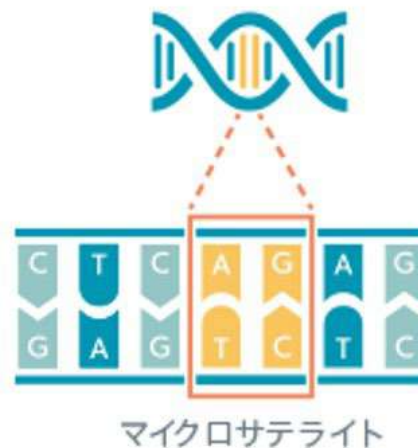


解析: 400塩基対くらい

- 母系解析
- 原産地の特定

核DNA

マイクロサテライト

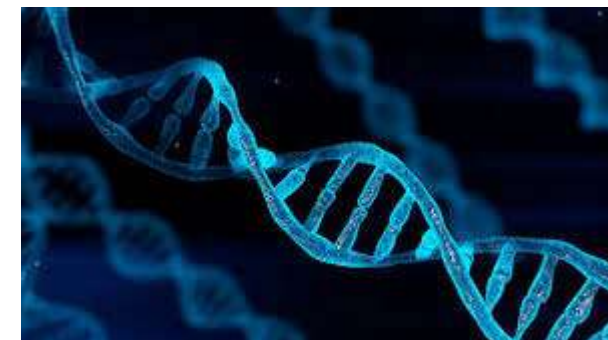


400塩基×10~15カ所

- 個体識別
- 遺伝的多様性

全ゲノム

哺乳類: 30億塩基対くらい
鳥類: 10億塩基対くらい



すべてのDNA塩基配列

- ゲノム規模の多様性

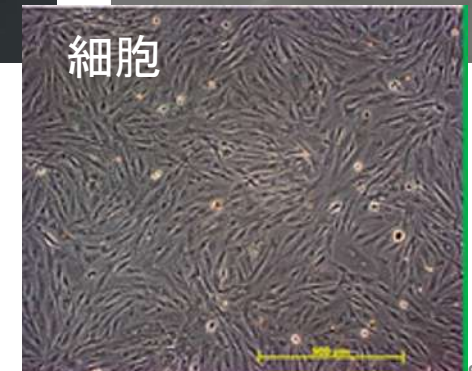
動物の遺伝解析

野生動物の試料？

1. 非侵襲的な試料



2. 侵襲的な試料



野生動物の試料？

1. 非侵襲的な試料



- ✓ 野生のフィールドに落ちているものを拾う
- ✓ 採取地点の情報なども研究に活用
- ✓ DNAの質は劣る

→ 解析可能な内容が限られる

- 個体識別・個体追跡・親子判定
- 性判別
- 遺伝的多様性
- 個体群(調査地)の情報など

いまそこで生きている動物の情報

野生動物の試料？

1. 非侵襲的な試料



遺伝解析

いまそこで生きている動物の情報

- ① 性判別
- ② 個体識別
- ③ 遺伝的多様性

個体AのDNA ———— AT AT AT AT ————

個体BのDNA ———— AT AT AT AT AT AT ————

検体数: 20個体～

野生動物の試料？

2. 侵襲的な試料



- ✓ 動物の捕獲や不動化（麻酔）を伴う
- ✓ 動物園飼育個体の有効な活用
- ✓ 完全品質のDNA
 - 全ゲノムによる高解像度な解析
 - 遺伝的多様性
 - 近親交配
 - 過去数百万年の個体数の変動
 - 遺伝子の機能推定など

進化や保全に関するディープな遺伝情報

野生動物の試料？

2. 侵襲的な試料



遺伝解析

進化や保全に関するディープな遺伝情報

① 高解像度な多様性



② 過去の個体数の変動

③ 遺伝子の機能、個体群の差

検体数：1 個体～

保全遺伝学の中心的な解析事項

性判別

個体識別・追跡

遺伝的多様性

近親交配

絶滅リスク

性判別

動物の行動の中には雌雄で異なるものがある

なわばりの大きさ

行動範囲・移動距離など

動物園飼育においては

個体の性別を知ることは繁殖計画にダイレクトに関係する

性判別

しかし見た目から雌雄がわからない動物も多い



性がDNAで決まっている動物 → 遺伝解析で性判別できる!

性判別

鳥類の性染色体はオスがZZ、メスがZW

DNAの対象領域を増幅すると

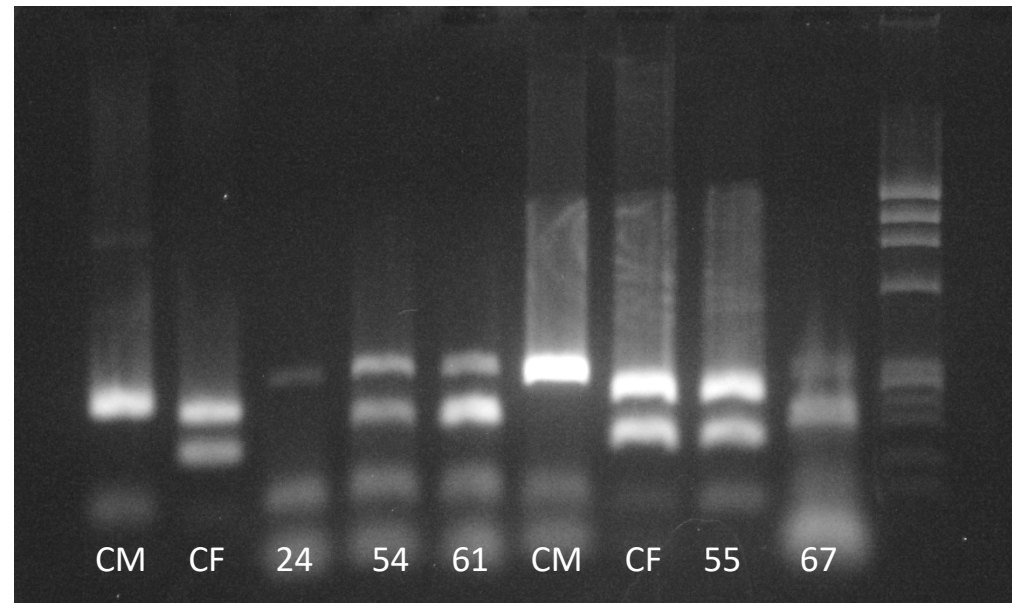
オスは1本の増幅しか得られない(Zのみ)

メスは2本の増幅得られる(ZとW)

哺乳類はオスがXY、メスがXX

オスは2本(XとY)

メスは1本(Xのみ)



鳥類の性判別(電気泳動)

オス→ZZ

メス→ZW

個体識別・追跡

多くの場合、顔つきや体の模様で個体を識別できる

一方で

調査エリアで採取した糞や体毛の持ち主の識別は難しい

糞や体毛、餌の残渣から個体を識別することで

- ・個体数や密度
- ・出現の季節性

など動物の生態や行動を理解することができる

個体識別・追跡

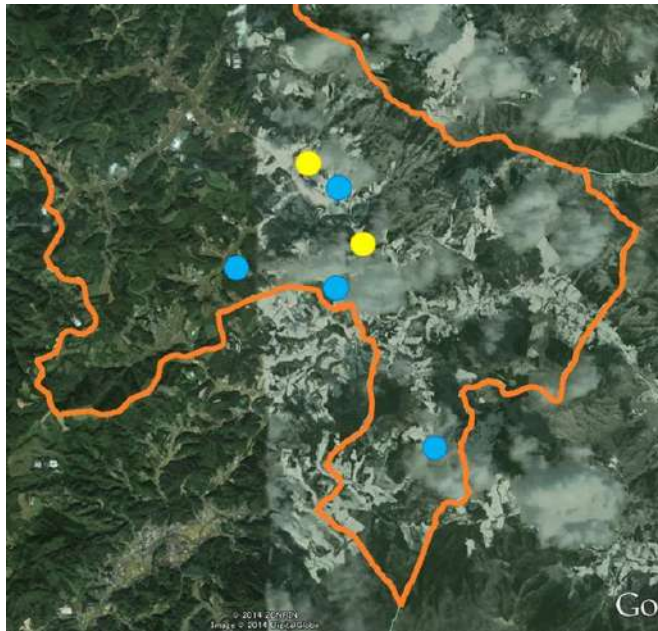
糞や毛からDNAを抽出し、マイクロサテライト解析を実施することで
個体が識別できる



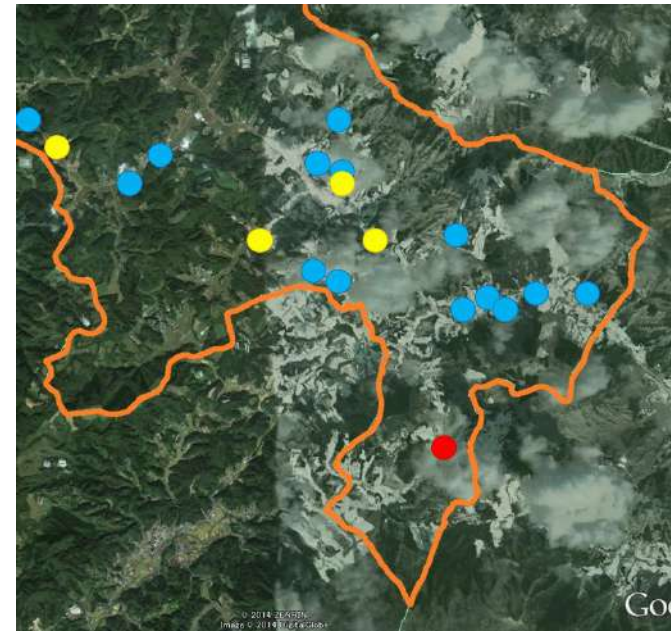
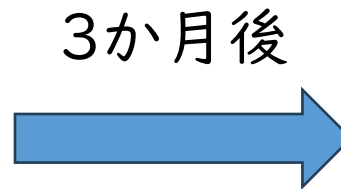
繰り返し回数のバリエーションを遺伝的多様性とみなせる

個体識別・追跡

糞や毛から個体が識別できれば、
個体数や季節変化がわかるかもしれない



ある動物の6月の農業被害地点
と加害個体



ある動物の9月の農業被害地点
と加害個体

遺伝的多様性－全ゲノム解析

- 全ゲノムデータから動物の遺伝的多様性を解析する

膨大なデータ量で解析

→ 高解像度・高精度な遺伝解析

1～数個体/個体群で十分

全ゲノム解析：ゲノム全体から100万-200万カ所くらい



各解析をざっくり紹介

遺伝的多様性－全ゲノム解析



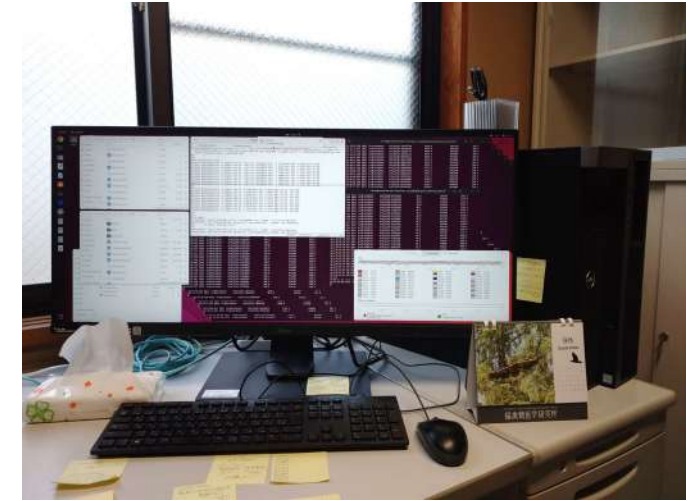
国立環境研究所(つくば市)

動物の試料(筋、血液、細胞)
を液体窒素で凍結保存
(生息域外保全)



京都大学野生動物研究センター

試料から細胞を培養してDNAを抽出
→ 全ゲノム解読(外注)
10個体分で～40万円くらい
1個体だと5万円くらい



佐藤のオフィス

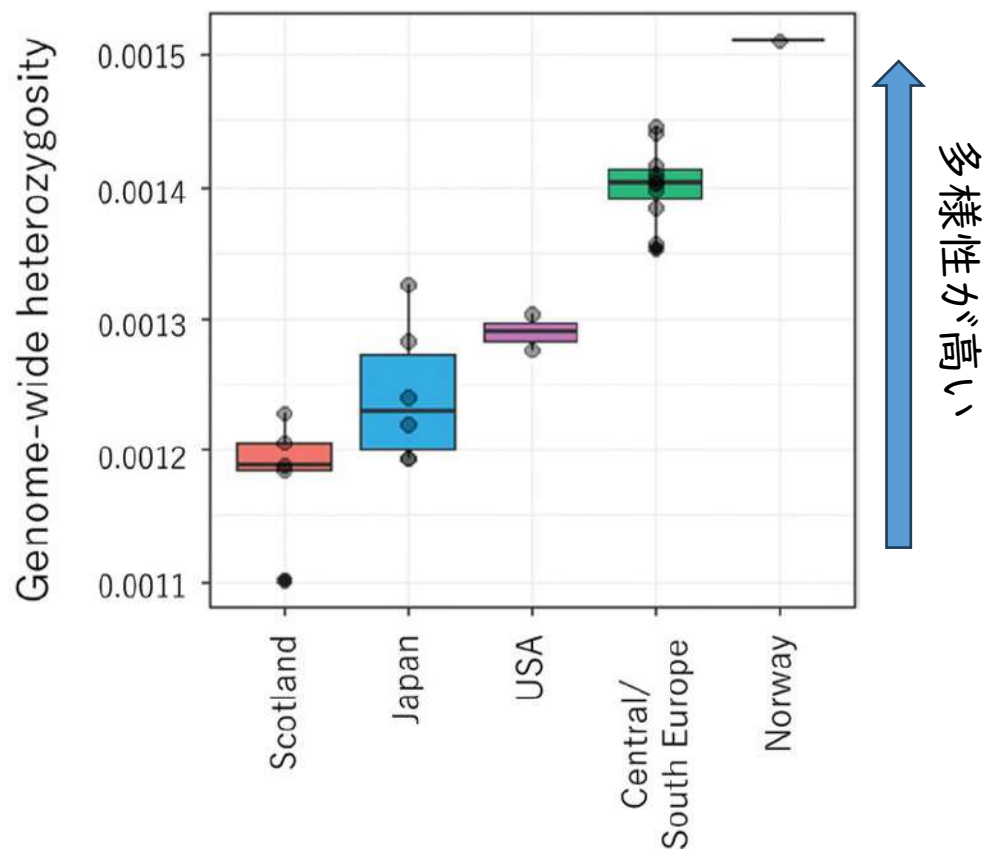
ゲノムデータの解析

個体数にもよるが

- 基礎的な解析に2～3か月ほど
- 発展的な解析は内容次第

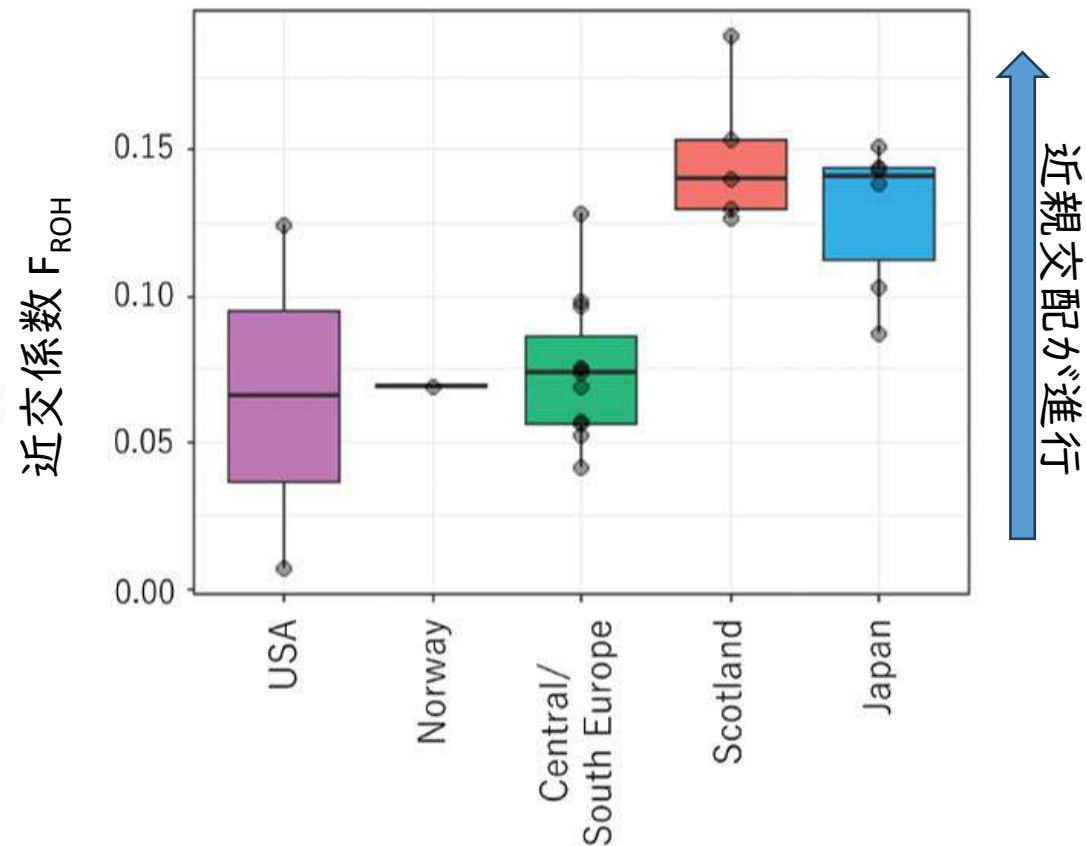
各解析をざっくり紹介

ある野生動物の遺伝的多様性



日本個体群の多様性はスコットランドに次いで2番目に低い

近親交配



日本個体群の近交係数はスコットランドと同程度に高く、近親交配が進んでいる

多様性は回復させられる？

多様性は回復させられる？

失われてしまった遺伝的多様性の回復は非常に困難

- DNAの突然変異（点突然変異）

ATGCGTGAGGATA



ATGCGT**A**AGGATA

哺乳類の突然変異率はおおよそ 1.0×10^{-9} site/generation

→ 3か所/1世代

（多様性の回復）1万か所に変異が出現するには約3,300世代がかかる

哺乳類のゲノムの場合、約200万～300万か所に多様性がある（諸説）

この半分が失われた場合、回復には莫大な世代が必要。。。

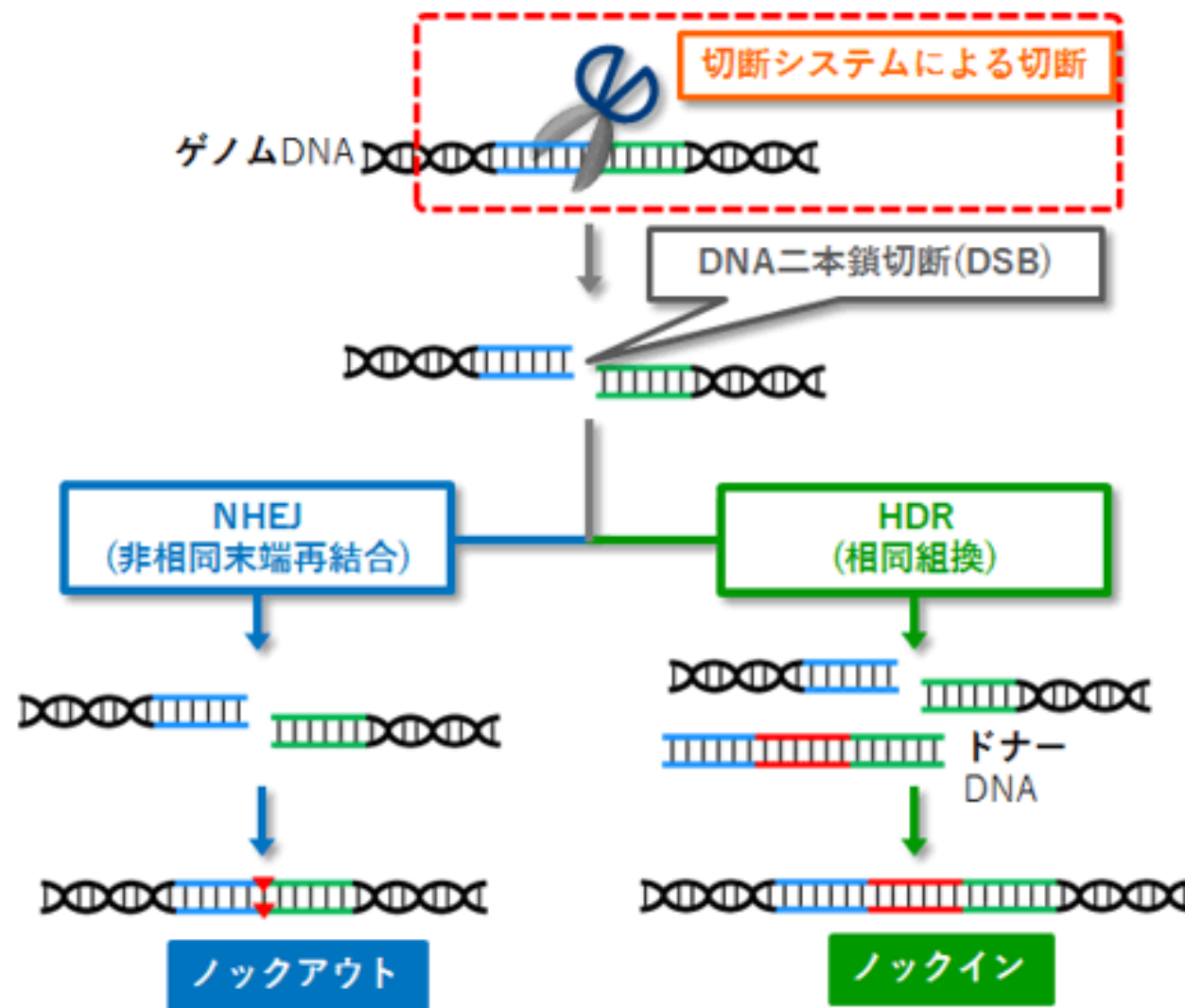
多様性は回復させられる？

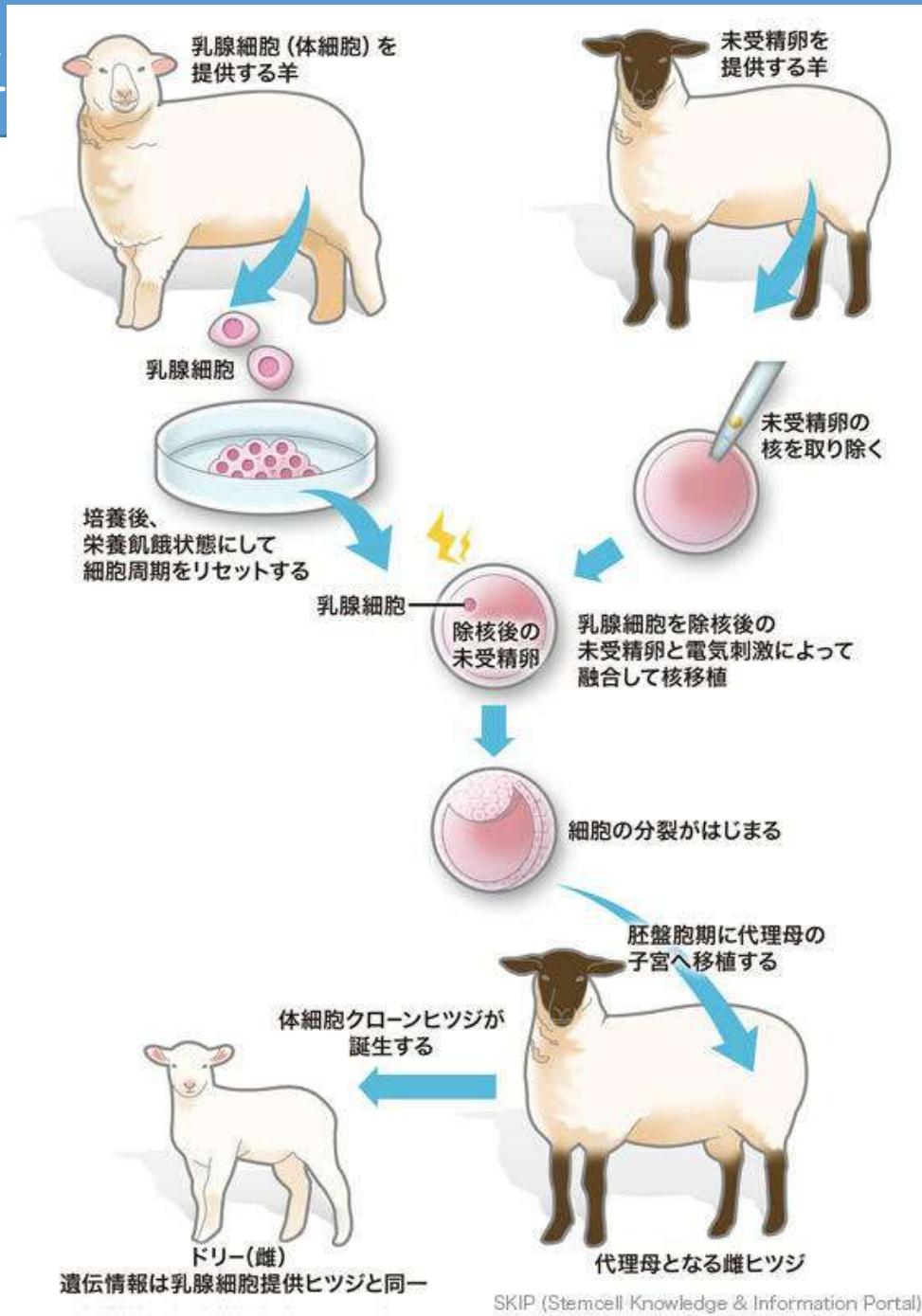
ゲノム編集

DNAの任意の箇所を切断

- ・任意の塩基配列の欠失（ノックアウト）
- ・任意の塩基配列の挿入（ノックイン）

→ ゲノムを編集して多様性を回復？





体細胞クローン

組織 (凍結細胞なども可) から核を取り出す



未受精卵を除核し、↑の核を移植する



細胞分裂と発生



代理母に移殖・出産



クローンの誕生

多様性は回復させられる？

全ゲノム解析とゲノムや編集体細胞クローン技術を組み合わせれば
絶滅危惧種を復活できる？

過去の標本や剥製の全ゲノムを解析
→ 失われた変異（多様性）を特定

ゲノム編集でDNAに変異をコピー

体細胞クローン技術&人工繁殖
(iPScも??)

多様性が回復した個体を作成！
(法律的・倫理的・哲学的に許されるのか??)

多様性は回復させられる？

絶滅した種も復活させられる！？
(ジュラシックパーク来る?)

化石や骨から(全)ゲノムを解析
→ 絶滅種のゲノムを決定

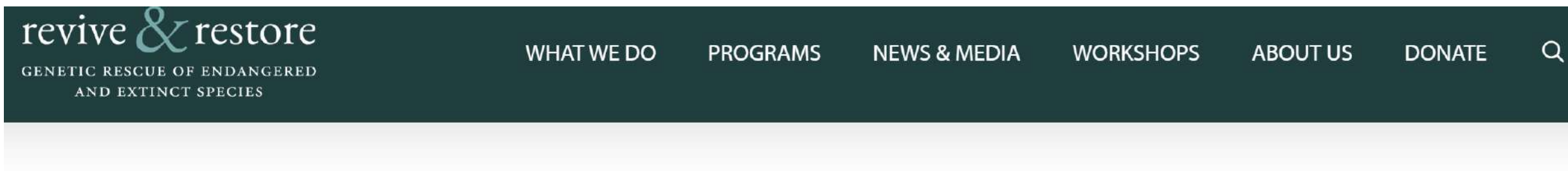
現生の近縁種のゲノムを
ゲノム編集で改変

体細胞クローン技術&人工繁殖
(iPScも??)

絶滅種が復活!!!
(法律的・倫理的・哲学的に許されるのか??)

絶滅した生物の復活は「脱絶滅 (De-extinction)」と呼ばれている

revive & restore (非営利団体、米) がプロジェクトを進めている



BRINGING BIOTECHNOLOGIES TO CONSERVATION

Our mission is to enhance biodiversity and restore ecosystems through the genetic rescue of endangered and extinct species. Revive & Restore is the leading wildlife conservation organization promoting the incorporation of biotechnologies into standard conservation practice.

<https://reviverestore.org/>

絶滅種の復活



かつて空を埋め尽くすほどだったリュコウバトは
狩猟によりたった30年で絶滅した(1914年)



2018年3月、世界に3頭しか残っていないキタシロサイのうち、
最後の1頭だったオスが死亡した

キタシロサイは事実上、繁殖の道が閉ざされた

すでに絶滅した生物の復活の研究が始まっている

リョコウバトの復活計画

キタシロサイの復活計画

オオウミガラスの復活計画

フクロオオカミの復活計画

マンモスの復活計画

ネアンデルタール人の復活計画 など

- ✓ 遺伝子を改変した動物を野生に放ってよいのか
 - ✓ 現在の地球環境に適応できるのか
- ✓ 地球の歴史から消えた動物を復活させたとして、同じ種とみなせるのか

「絶滅しても復活させられるなら、経済発展の犠牲になってもらおう」
という間違った認識

絶滅した動物の復活に多大なコストをかけるよりも、
現在の絶滅危惧種の保全にそのコストをかけたほうが、
より多くの動物を保全できるのではないか

遺伝解析の紹介2

保全遺伝学的な研究以外にも、遺伝解析が行われる

- 野生動物法医学 (Animal Forensic)
 - 違法な野生動物取引の捜査
- 年齢推定
 - 野生個体群の年齢構成の推定

野生動物法医学

人間の法医学の野生動物版

身元不明の動物や加工品を対象に、種や産地を特定

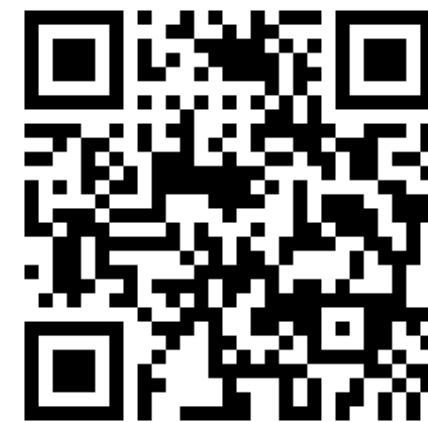
- ・密猟された動物（ペット）

- ・装飾品

- ・食品や医薬品など

野生動物法医学

密猟(poaching): 国際的な法令や協定を無視して野生動物を狩猟すること
→ 装飾品や漢方薬、食品に加工されて違法に売買されることが多い



WWFジャパンのHP

出典: MONGABAY 2014年3月3日
違法な野生動物取引に緊急対策を
動物園が各国政府に要請

各解析をざっくり紹介ー野生動物法医学



近年はマンタのヒレの密猟・違法取引が国際的に問題視されている
→ 中国などに輸出されて高級食材となる



野生動物法医学

この分野では押収された証拠品（牙・角・爪・羽根・ヒレなど）の

・種判別

・生産国の特定

が非常に重要になる

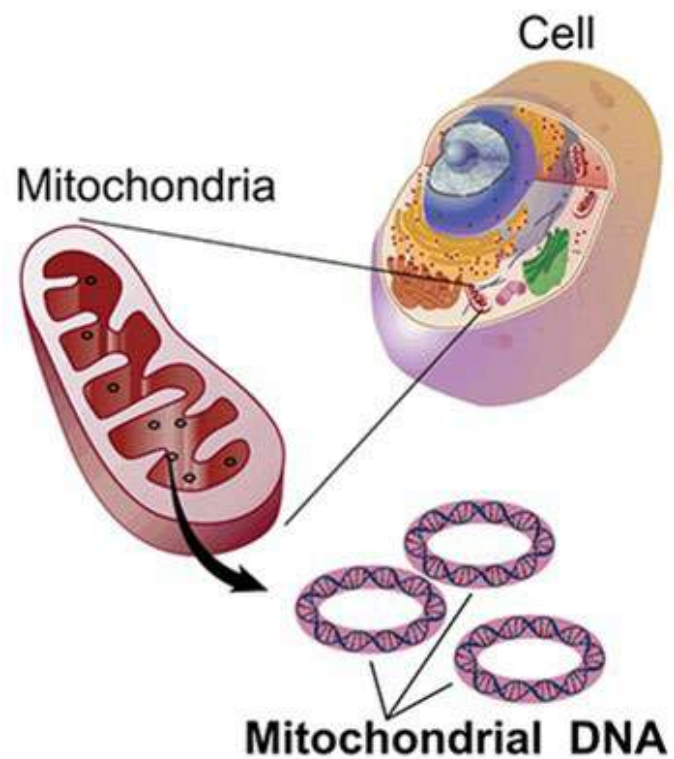
遺伝解析で解明したこれらの情報が裁判で判決の決め手になることが多い



これらの証拠品は押収までに加工されていることが多く、

ゲノムDNAを入手することが難しいことが多い

そこで、細胞の中に無数に存在するミトコンドリアに存在する
ミトコンドリアDNA (mtDNA)
が解析にはよく使われる



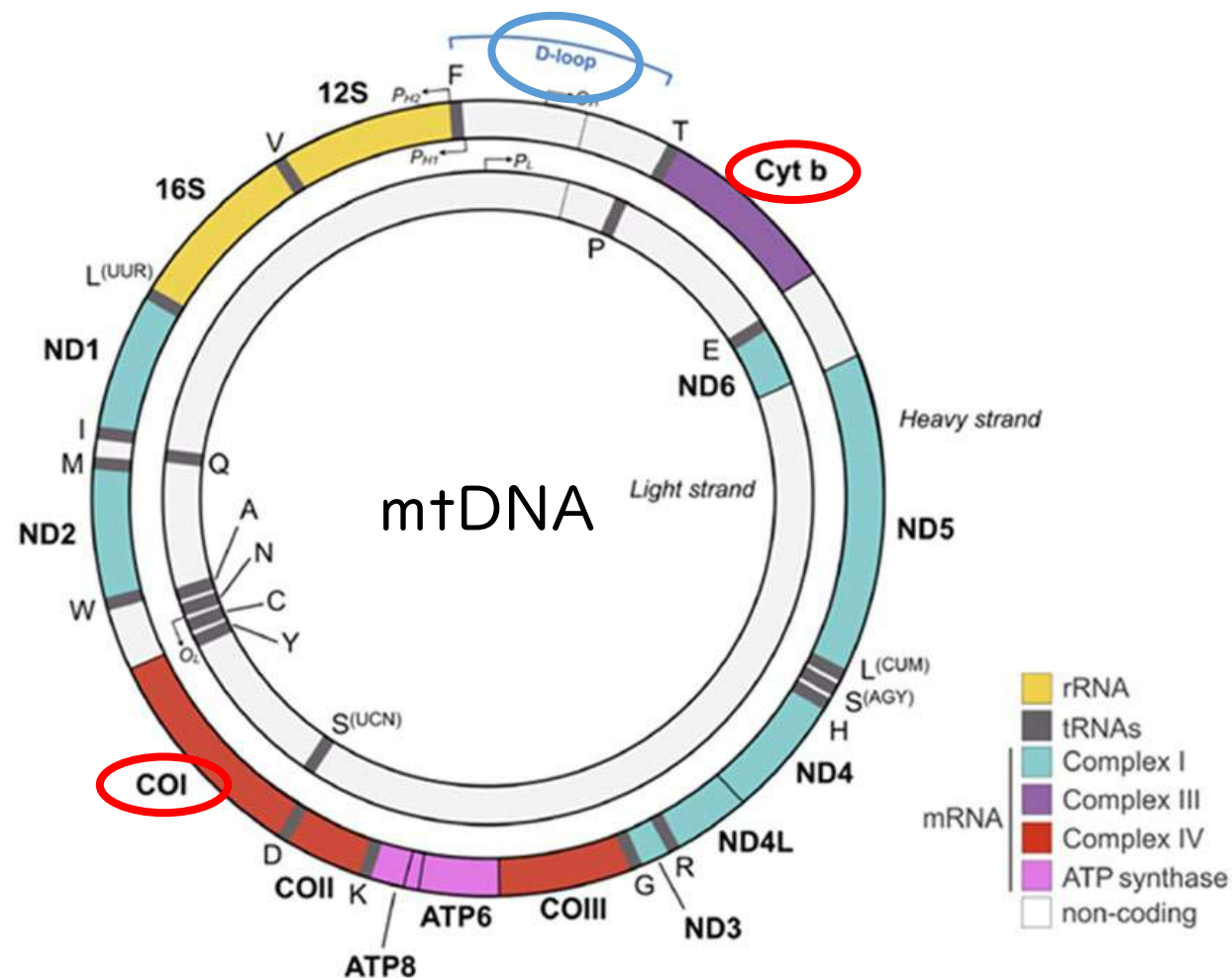
野生動物法医学

mtDNAは突然変異が生じやすい
(塩基配列の一部が変化すること)

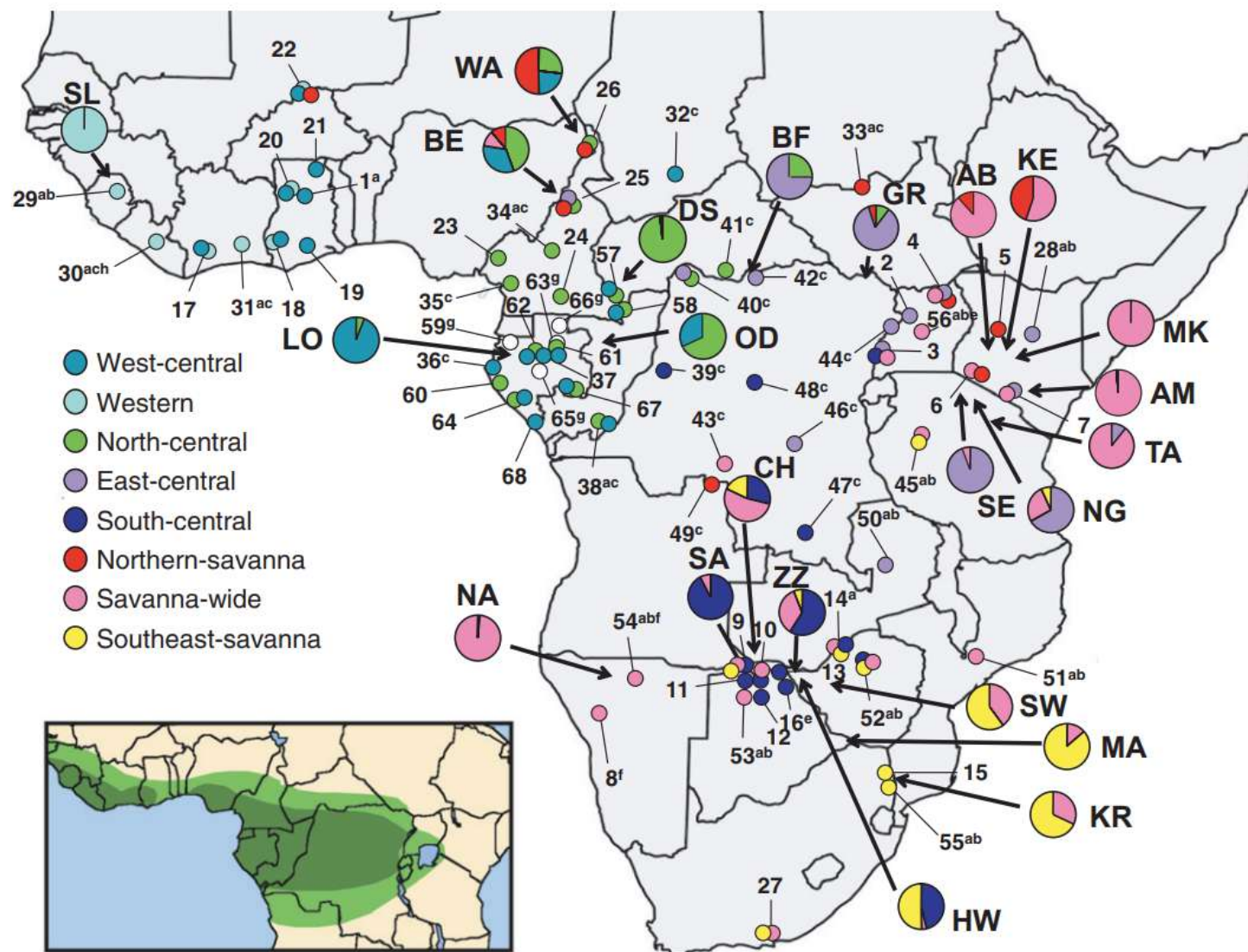
- ・種に特有な塩基配列
- ・生息地に特有な変異

Cyt bやCO I → 種判別

D-loop → 生息地判定
がよく使われる



アフリカゾウのmtDNAの地理的なタイプ



種判別

ウナギのかば焼きはニホンウナギか（佐藤 2019年の解析）

産地偽装？ 規制品種の使用？

- ✓ ウナギのかば焼きの産地ラベル（国産・中国産）は正しいのか
- ✓ 絶滅危惧種ヨーロッパウナギは使用されていないか



錦市場やスーパーでかば焼きを購入して種判別

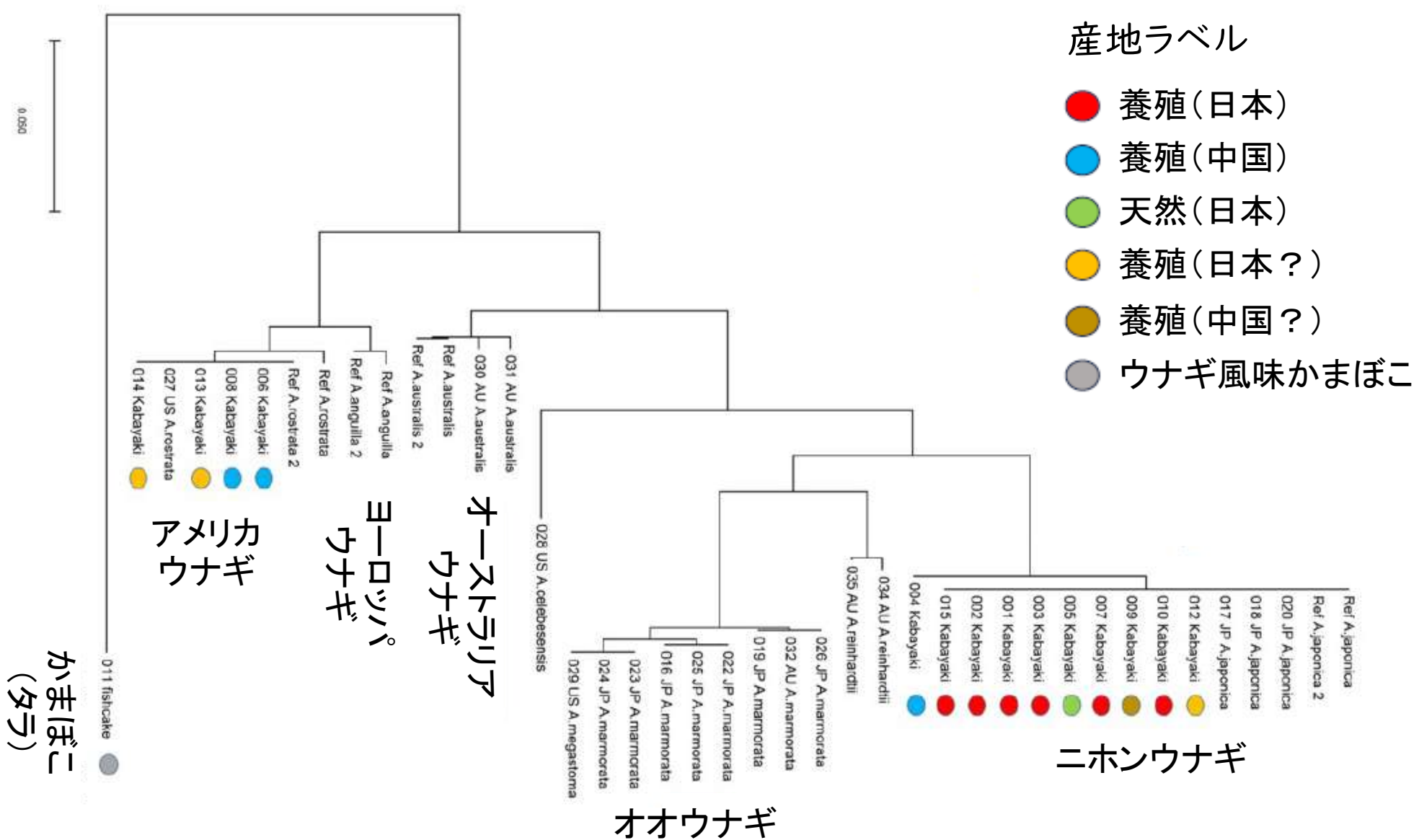
ただし、日本も中国もニホンウナギ (*Anguilla japonica*) を使っているはず

各解析をざっくり紹介ー野生動物法医学

ウナギの蒲焼をタレ付きのまま溶かしてDNA抽出



mtDNAを解析して種判別



ウナギのかば焼きはニホンウナギか（佐藤 2019年の解析）

産地偽装？ 規制品種の使用？

日本で購入できるかば焼きのウナギは

- ・ニホンウナギ（国産天然・養殖）
- ・アメリカウナギ（中国産養殖、安い弁当など）

産地偽装はなさそう

産地が書かれていないものは中国養殖のアメリカウナギかも



野生動物法医学に関連する研究は
警察や裁判での証拠の裏付けとなる可能性があり

- ・見たくない写真の確認

- ・犯人の逆恨み

などのリスクが存在する

加えて、他人の人生を左右する可能性があるために
解析の責任が非常に重い

学生の研究テーマとしては適切ではないかもしれない

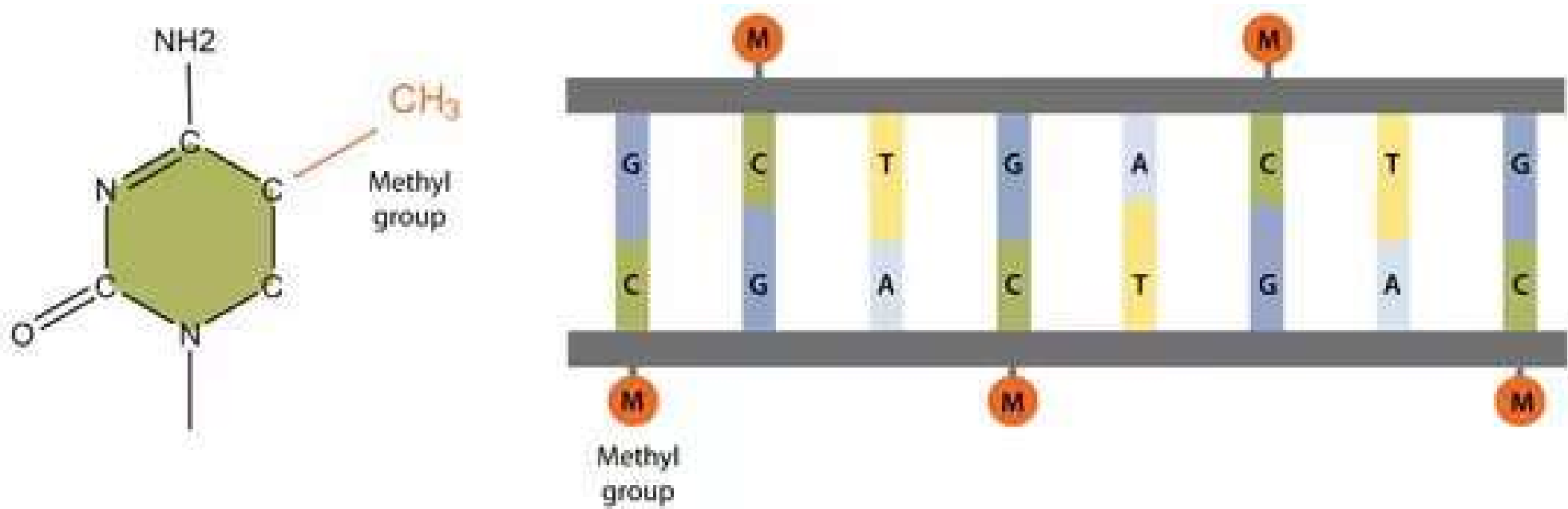
なぜ遺伝解析？

保全遺伝学的な研究以外にも、遺伝解析が行われる

- 野生動物法医学 (Animal Forensic)
 - 違法な野生動物取引の捜査
- 年齢推定
 - 野生個体群の年齢構成の推定

各解析をざっくり紹介一年齢推定

遺伝子の発現（作用する/しない）はメチル基がDNAに結合することで調節されている



メチル基が結合する/しないで適切な時期に適切な遺伝子が作用する

DNAのメチル化の一部は加齢と関係することがわかっている

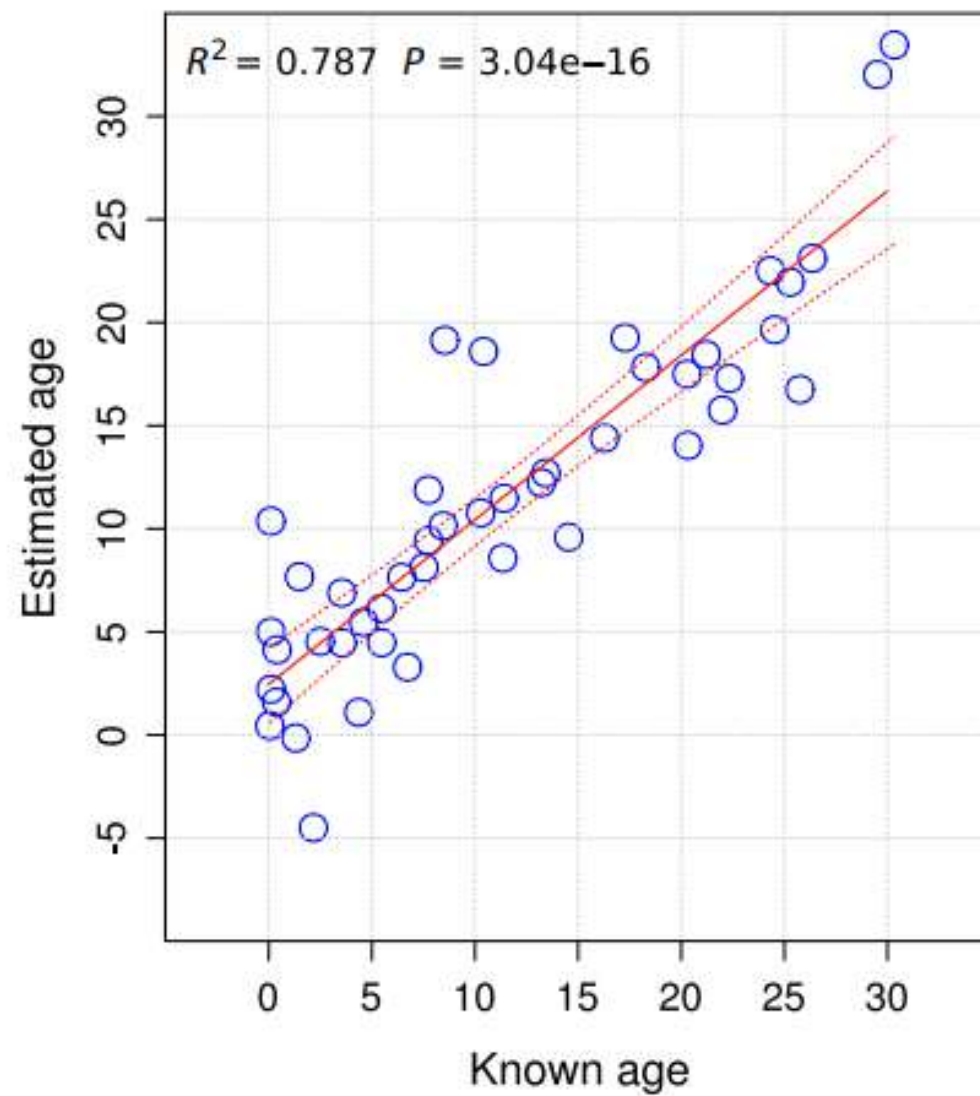
加齢とともにメチル基が

- ・増えていく遺伝子
- ・減っていく遺伝子

ある遺伝子のメチル化の度合いを調べることで年齢が推定できる

年齢がわからない動物も、**遺伝子のメチル化率**を調べることで年齢の推定が可能

各解析をざっくり紹介一年齢推定



野生動物の年齢が推定できれば、

- ・個体群の年齢構成の解明

老齢個体の多寡 → 絶滅リスク推定

- ・繁殖成否との関連解析

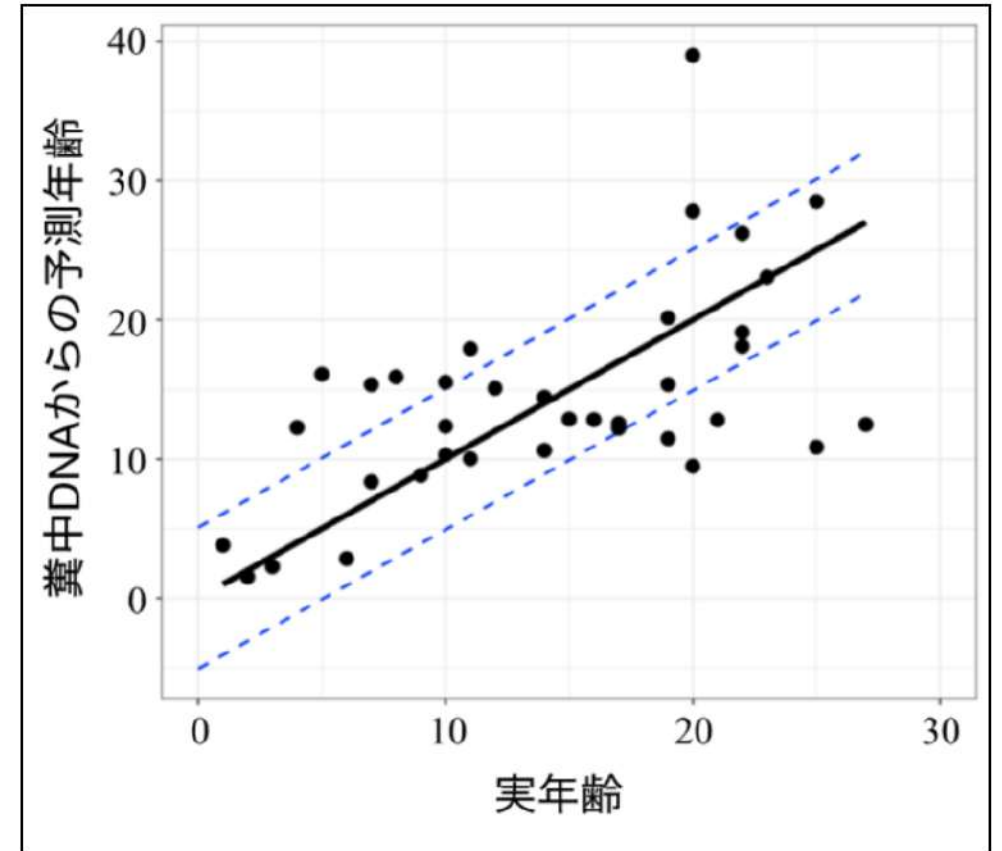
→ 絶滅リスク推定

糞由来のDNAから年齢が推定できれば、個体の直接観察も不要

各解析をざっくり紹介一年齢推定



糞をするミナミハンドウイルカ



イルカの糞から年齢推定

(野生動物研究センターと三重大学の共同研究)

なぜ遺伝解析？

遺伝解析は野生動物の目には見えない特徴を明らかにする

個体識別
親子判定

遺伝的多様性

進化

行動と遺伝子
の関連

