

環境DNA技術と生物多様性観測ネットワーク： ネイチャーポジティブ経済移行におけるその役割

近藤 倫生

東北大学大学院生命科学研究科

WPI-AIMEC Ecological Complexity Research Unit

第6の大量絶滅が進行中

1,000倍

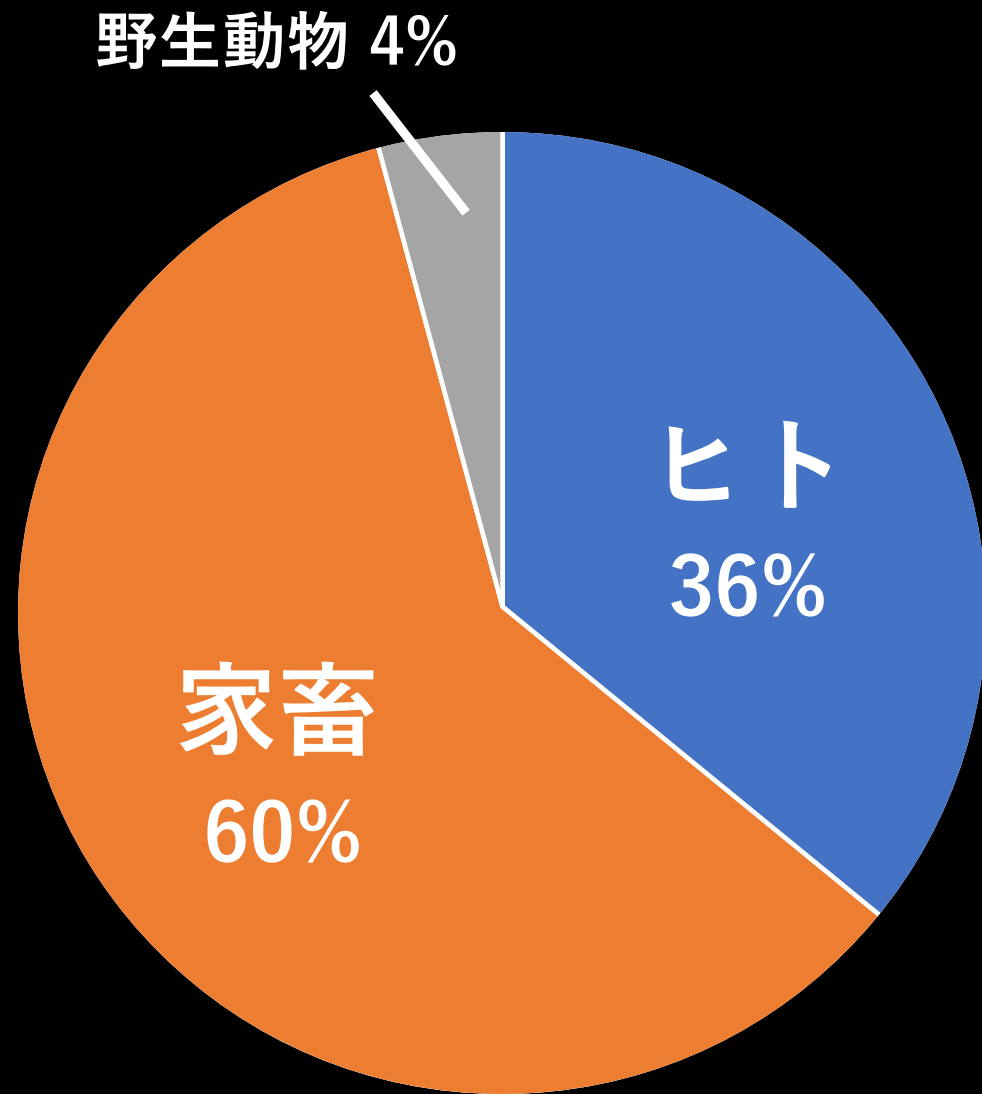
絶滅速度は
通常の1,000倍

25%

地球上の全生物の
25%が絶滅の危機

恐竜
絶滅

6,500万年前
白亜紀の大量絶滅に匹敵



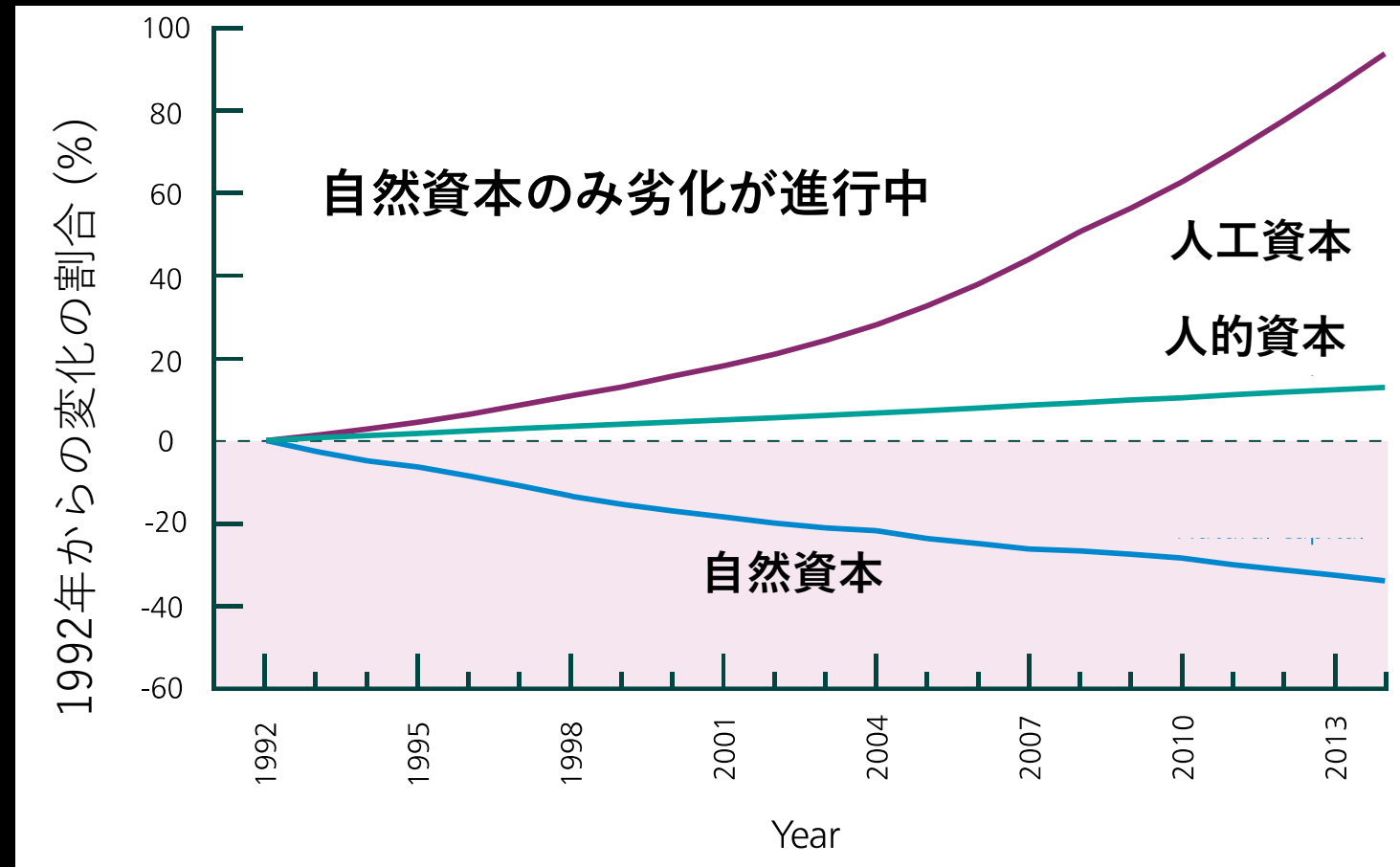
人新世： 人間が地球システムに 影響し始めた時代

地球上のほ乳類の96%はヒトと家畜

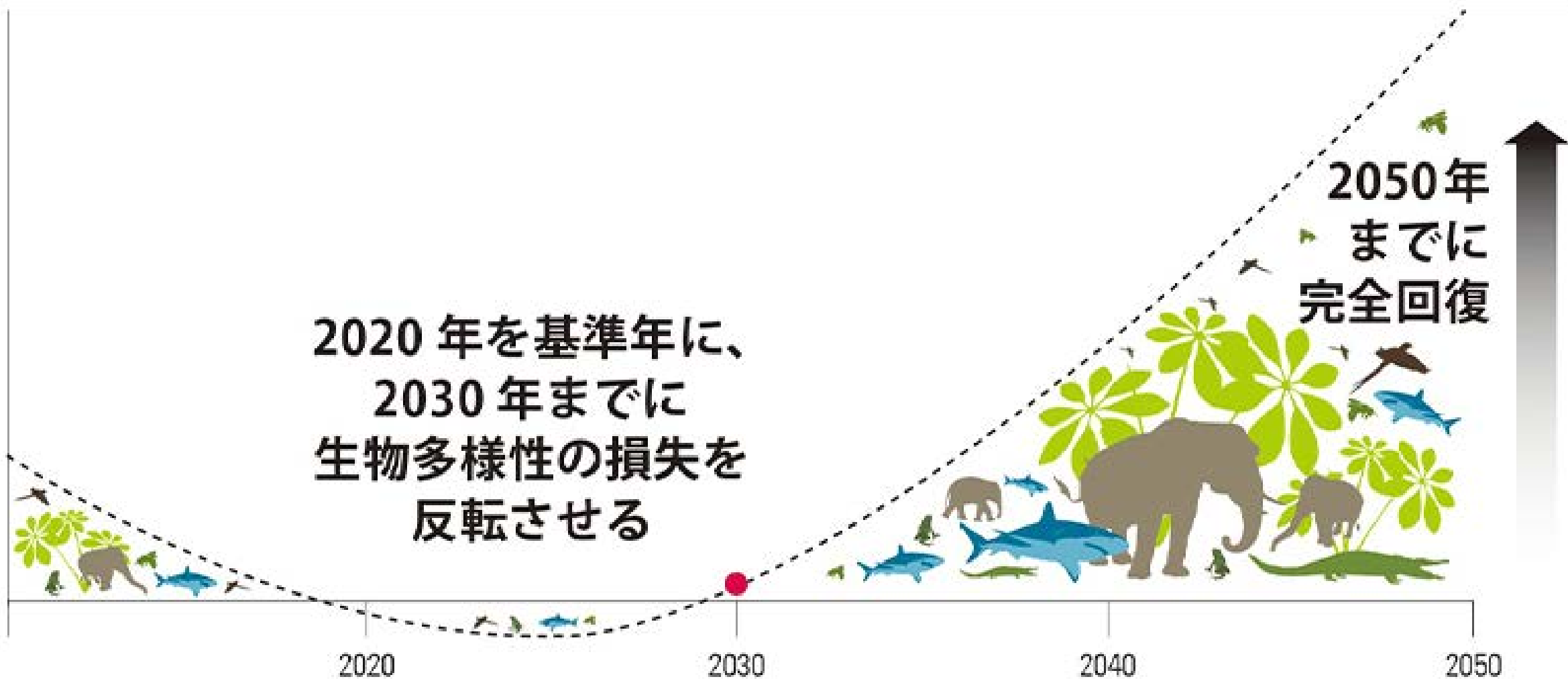
地球上のすべてのほ乳類の重さ (Gt C)

自然資本が劣化している

- 20年で人口資本は倍化、人的資本は13%増に対して、自然資本は40%減
- 自然資本の劣化は社会の持続不可能性を意味する



Managi & Kumar (2018)



国際的な自然の目標：ネイチャーポジティブ

- 2030年までに自然の劣化傾向を回復基調に逆転（COP15, 2022）
- 2050年までに自然が適切な保全のもと持続可能に利用されている自然共生社会実現



ネイチャーポジティブ実現は大きな挑戦

理論と現実のギャップ





Taskforce on Nature-related
Financial Disclosures

tnfd.global

Recommendations
of the Taskforce on
Nature-related
Financial Disclosures

September 2023

TNFDフレームワークの狙い

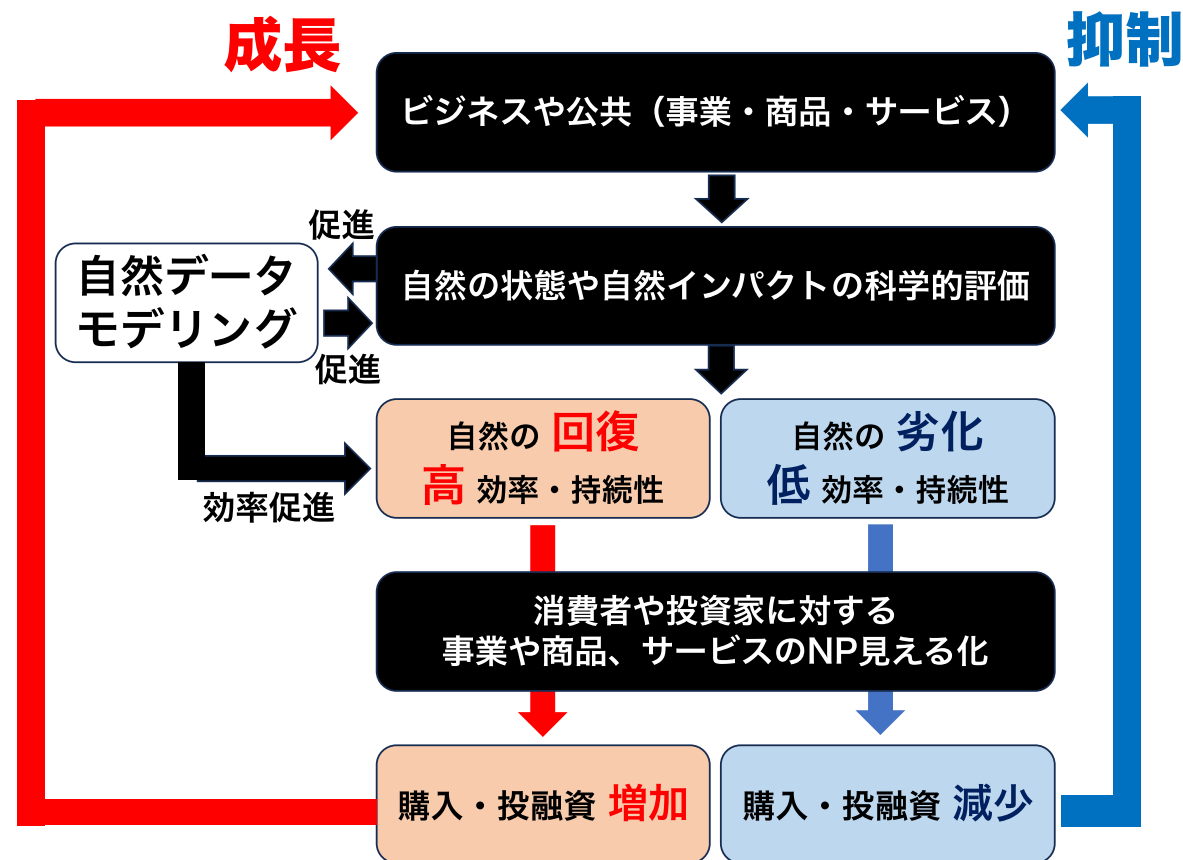
企業による生物多様性情報開示

- 企業が自然へのインパクトを把握し公開することを支援する
- 企業による生物多様性喪失や生態系機能の劣化といった自然関連のビジネスリスクの発見・管理を助ける
- ビジネス・金融セクターによる自然の健康を改善する事業を実施したり支援するための機会発見を支援
- 企業の透明性を高め、説明責任を果たさせることで、ステークホルダーによる環境インパクトを考慮した正しい判断を可能にする

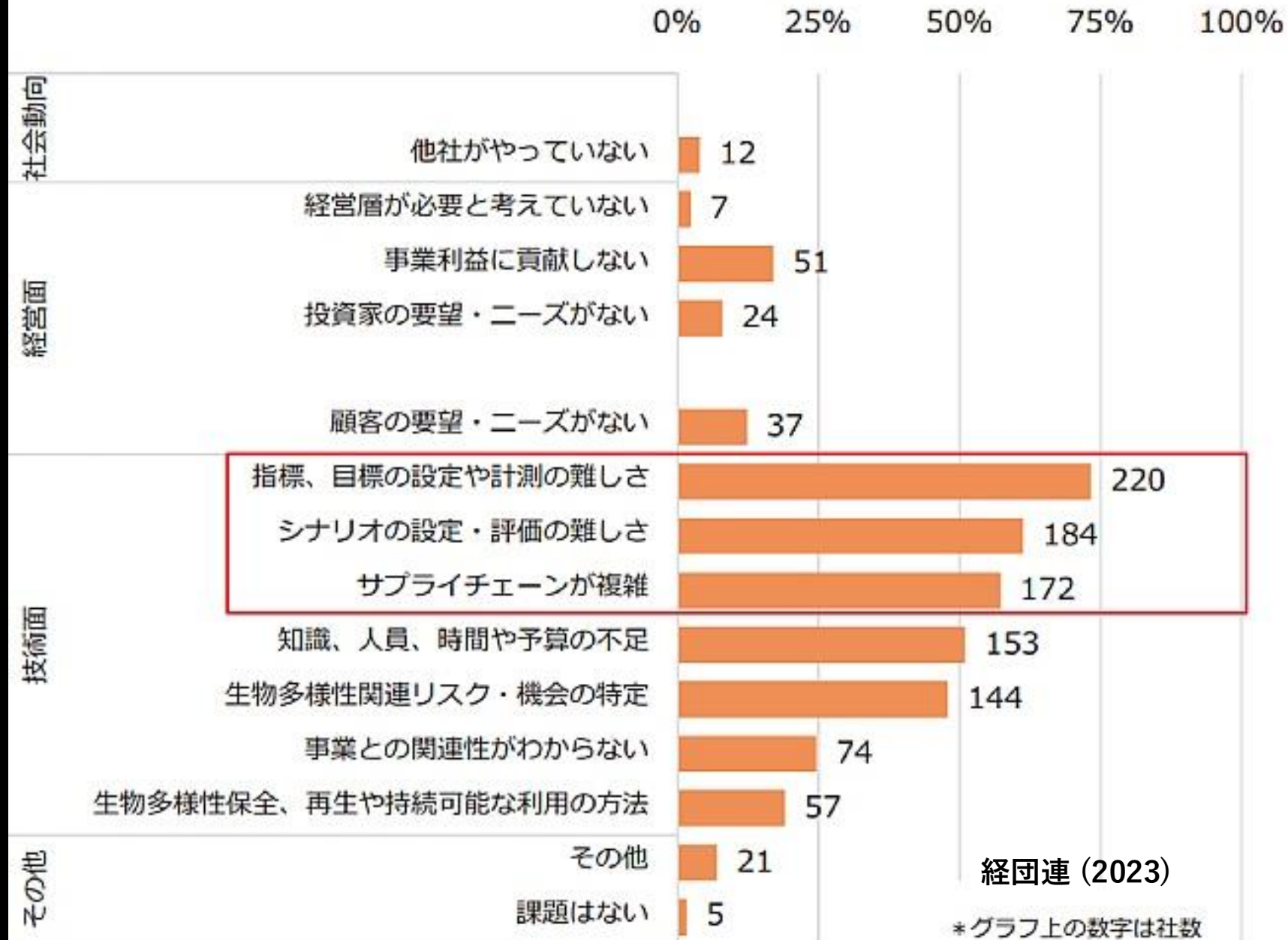
目指すべき社会システム

ネイチャーポジティブ社会の姿

- ネイチャーを再生する事業に資金やリソースが流れる社会システムへ (TNFD等)
- 事業活動の自然との関わりを科学的に評価・公開、消費や投融資の基準とされる仕組み
- 自然の指標・目標設定、計測といった技術面に挑戦



生物多様性への取り組みにおける課題

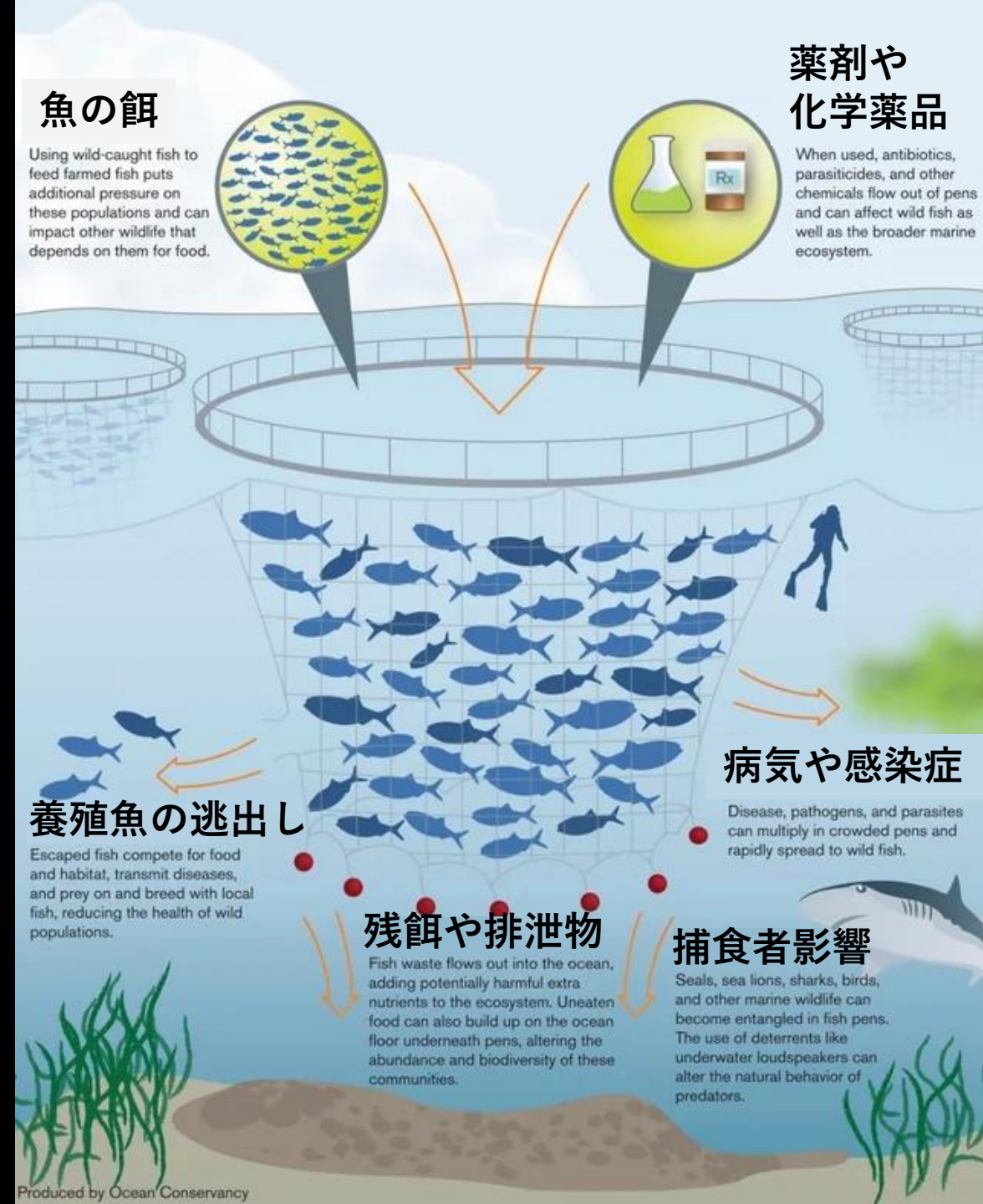




自然の複雑さに由来する困難

生物多様性インパクト評価の挑戦

- 事業はさまざまなやり方で生物多様性に影響しうる
- 全ての影響可能性を事前に知ることは困難
- 影響を受ける生物もあれば、ほとんど受けない生物もいるだろう
- 特定の生物だけではなく生物多様性全体を評価することの重要性



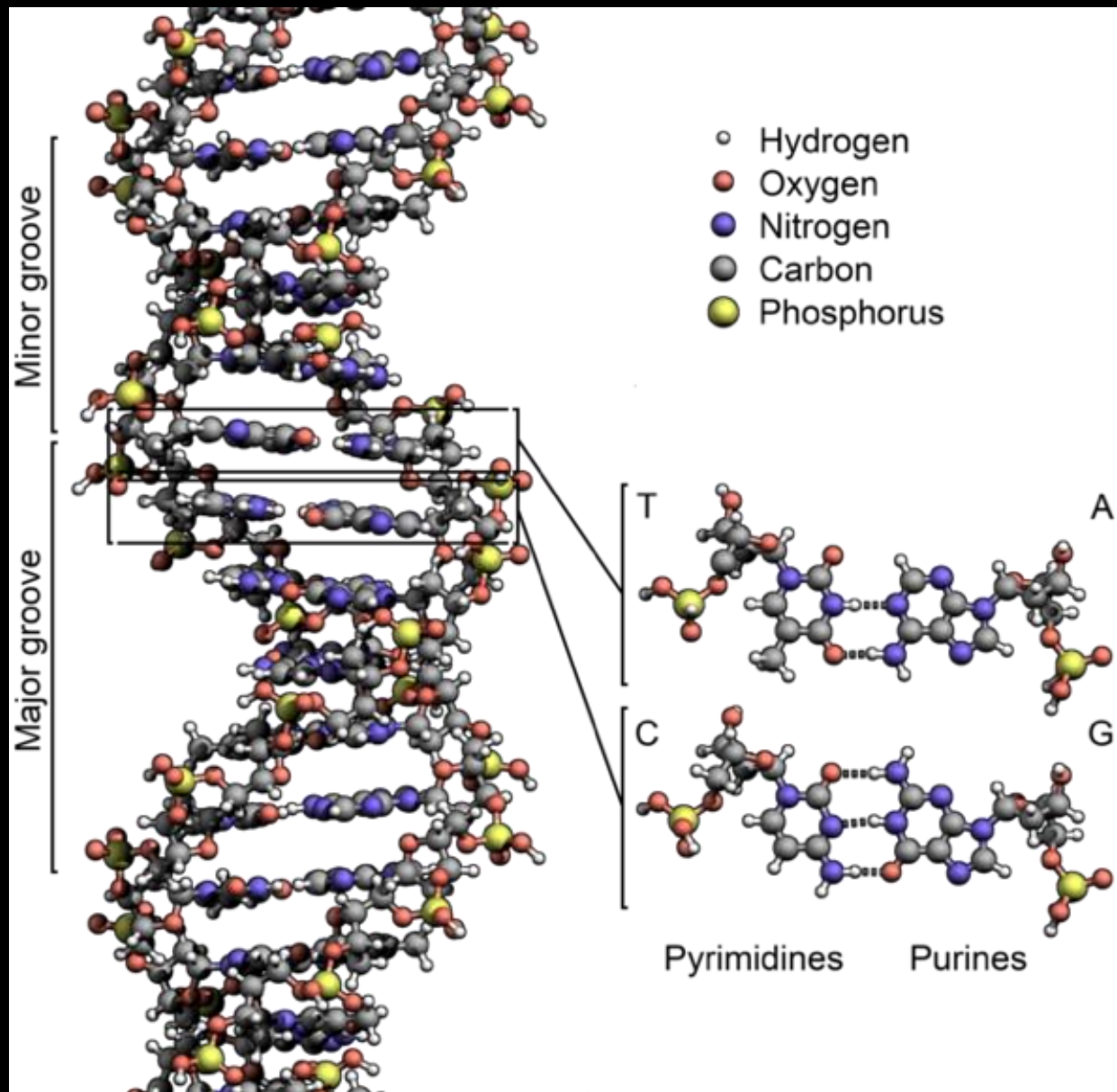


環境DNA技術

自然の血液検査







DNA(デオキシリボ核酸)

生物の「マーカー」DNA

- DNAは全ての生物が持っている「生命の設計図」の物質
- DNAの暗号 (塩基配列) は生物ごとに違う
- DNA図鑑をあらかじめ作っておけば、DNAだけから生物がわかる



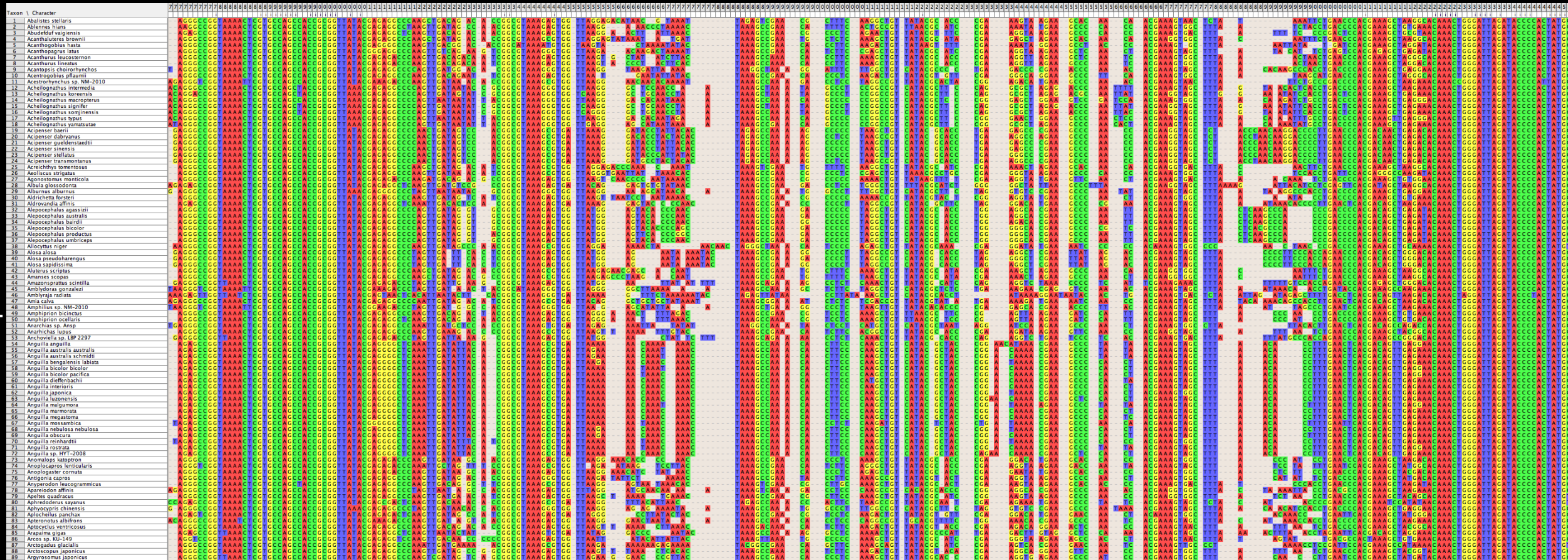
環境DNA：新しい生物調査法

- 環境DNA - 水や土の中に生物がのこした微量のDNA (フンや粘液)
- 「バケツ一杯の水」からDNAを抽出、分析して生物調査
- 現場では水汲みと濾過だけ、後は実験室の作業のみで生物情報が得られる



Diagram illustrating the base pairing in DNA. The top strand is labeled '5' and the bottom strand is labeled '3'. The bases are A (red), T (blue), G (yellow), and C (green).

880 species

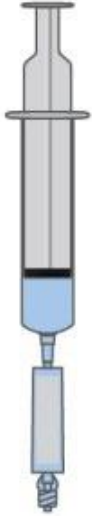


さまざまな魚のミトコンドリアDNA 12S rRNA

Miya et al (2015)

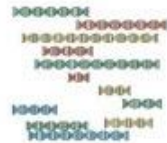
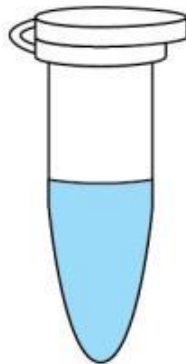
1

試料水採取
(数L)



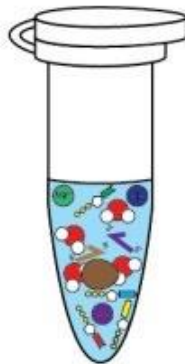
2

試料水からの
DNA抽出



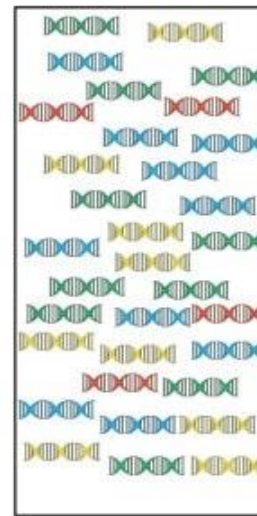
3

抽出DNAの
増幅 (PCR)



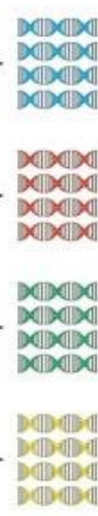
4

NGSによる
DNA分析



5

DNA配列データ
の解析



6

手同定や
DNA定量





2020年9月29日 10:40

志津川湾での調査

南三陸町・サステナビリティセンター

Stichaeidae

Pennahia argentata

Lumpeninae Scomber

Takifugu alboplumbeus

Scombropterus Takifugu Trachurus

14魚種を検出

Engraulis japonicus

Chaenogobius annularis

Acanthopagrus

Gymnogobius heptacanthus

Tribolodon hakonensis

Pseudolabrus sieboldi

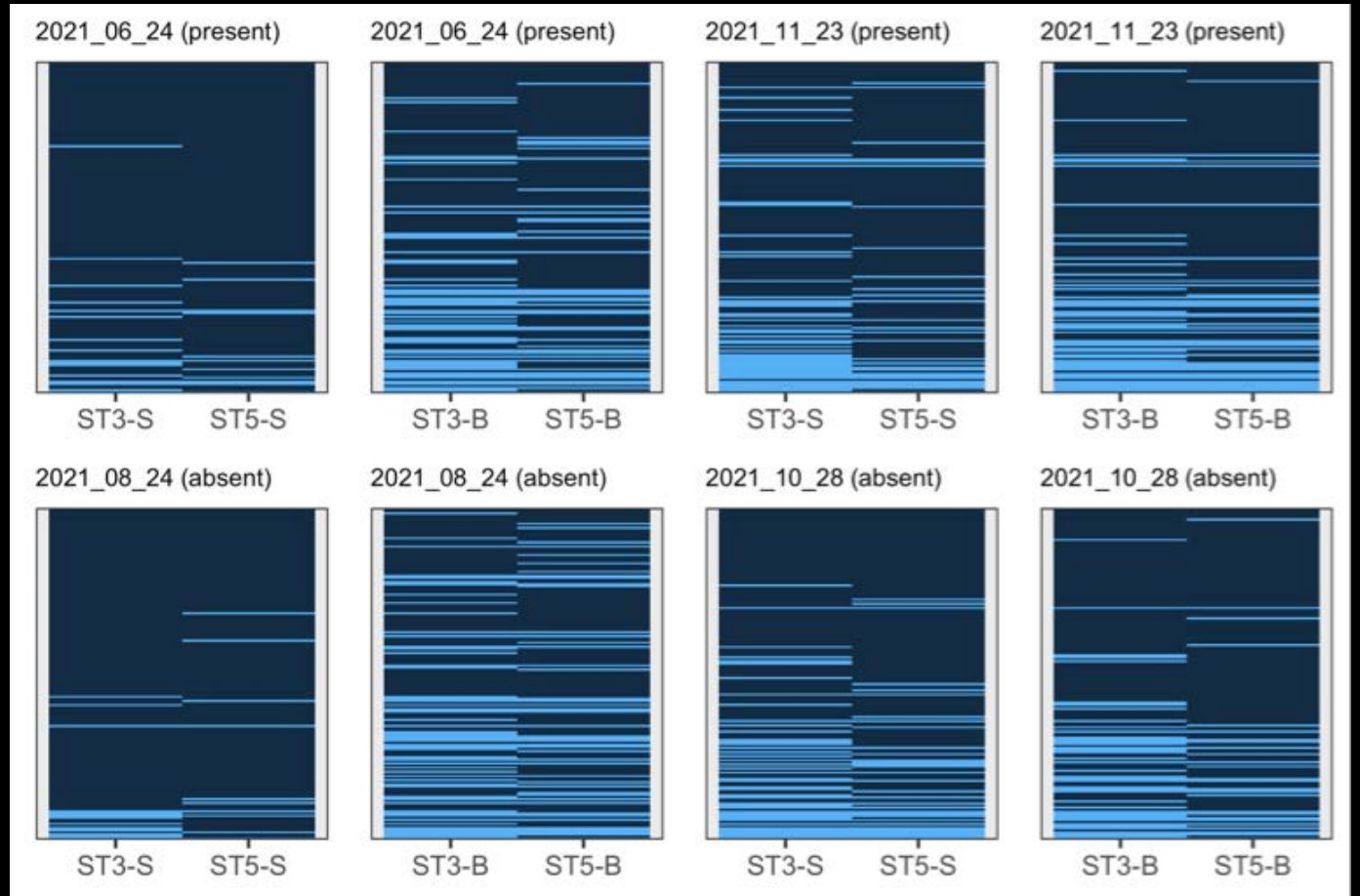


環境DNAを使ったインパクト評価

網羅的生物多様性調査の力を借りる

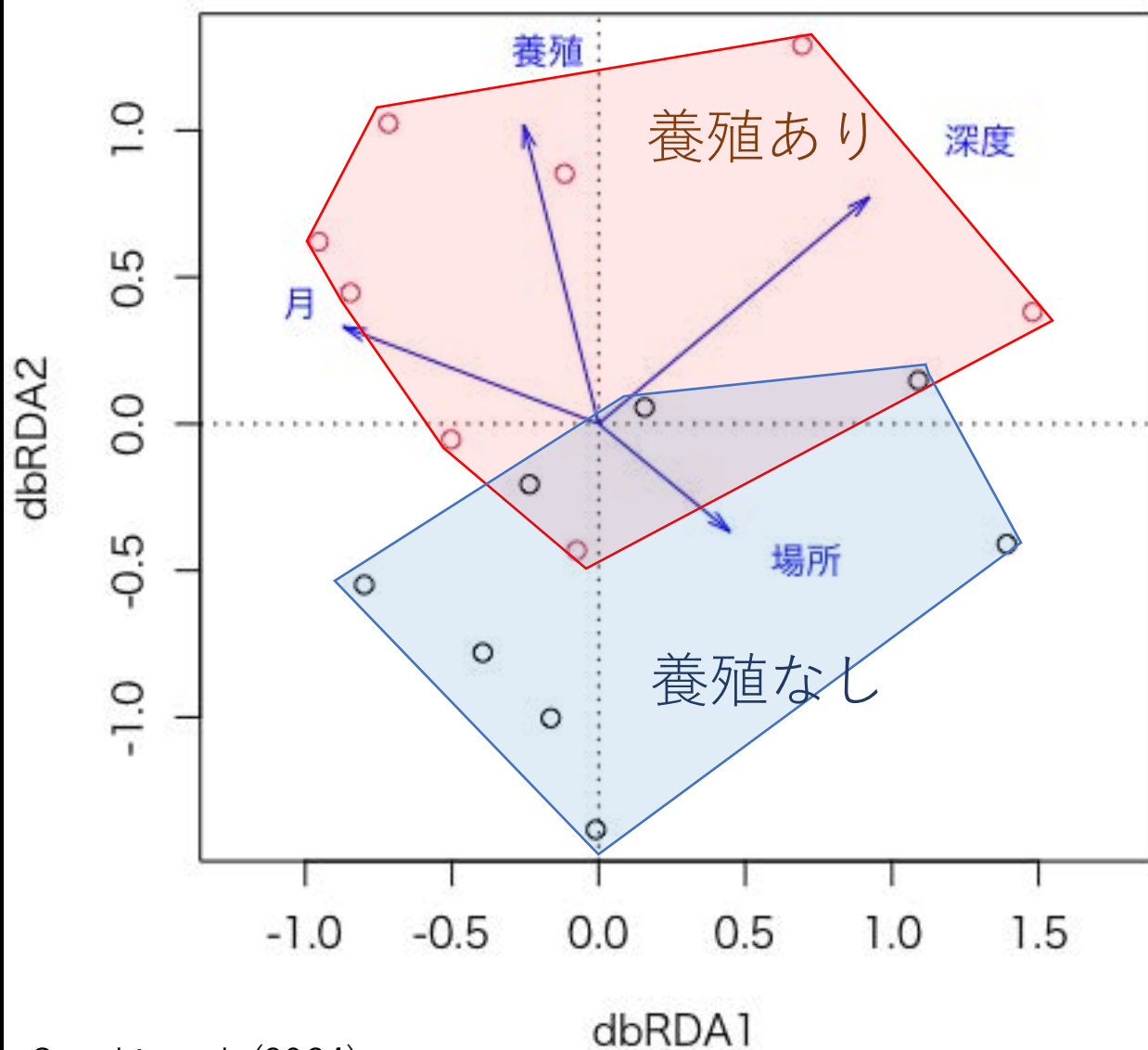






海面養殖の魚類へのインパクトを環境DNAで可視化

- 海面養殖と自然の関わりを環境DNAで評価
- 年に4回、湾内の複数地点で環境DNAによる魚類調査
- 養殖のある/なしで魚類相のどこに違いが生じるかをデータ解析



Suzuki et al. (2024)

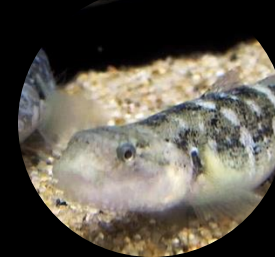
環境DNAの強みを活かす

養殖は生物多様性のどの側面に影響するか発見する

- 123魚種の環境DNAを検出（10~56種/地点；平均34.2種）
- シロウオは増えるがアゴハゼが減る
- 種数増えた・減ったという単純な話ではない



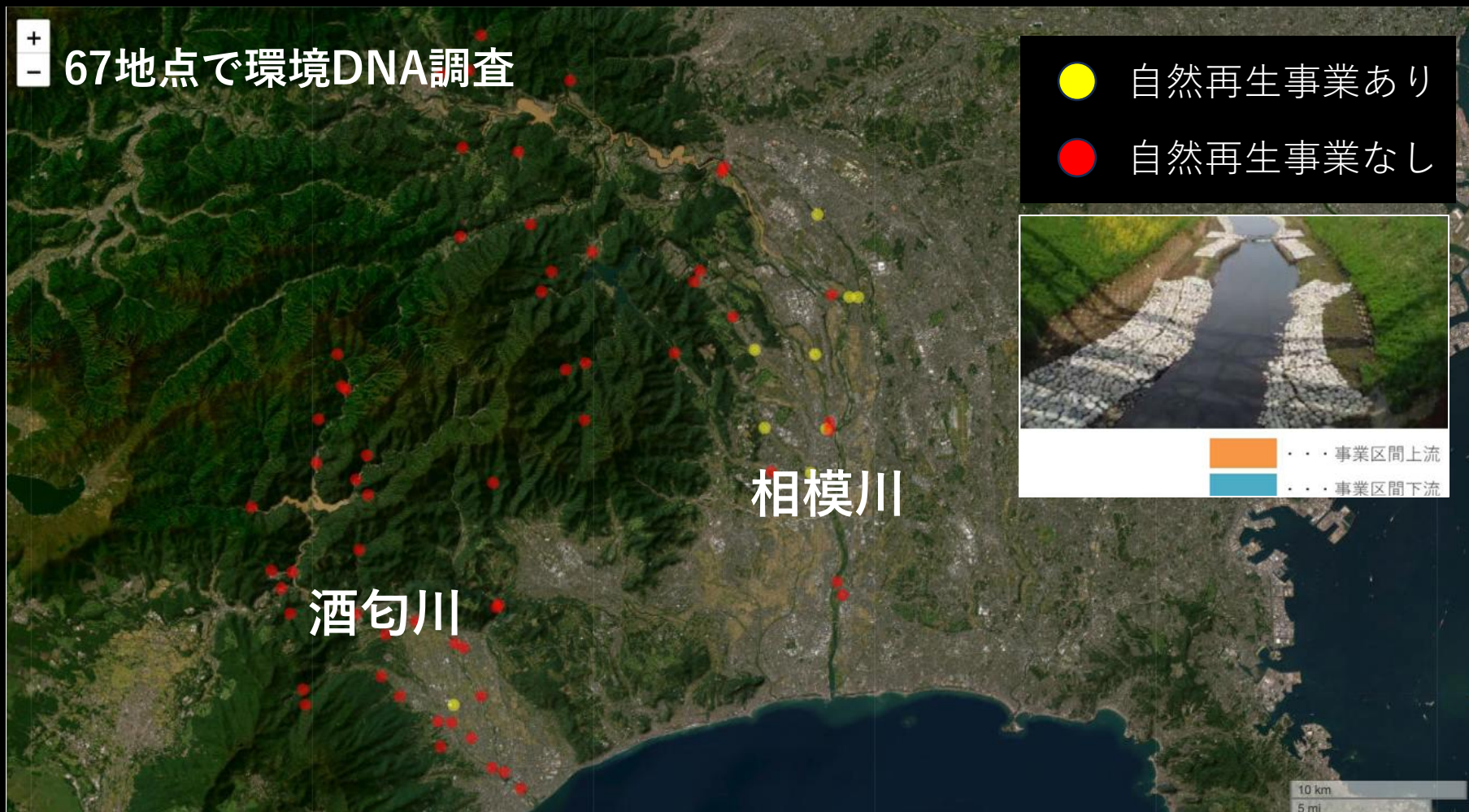
シロウオ



アゴハゼ

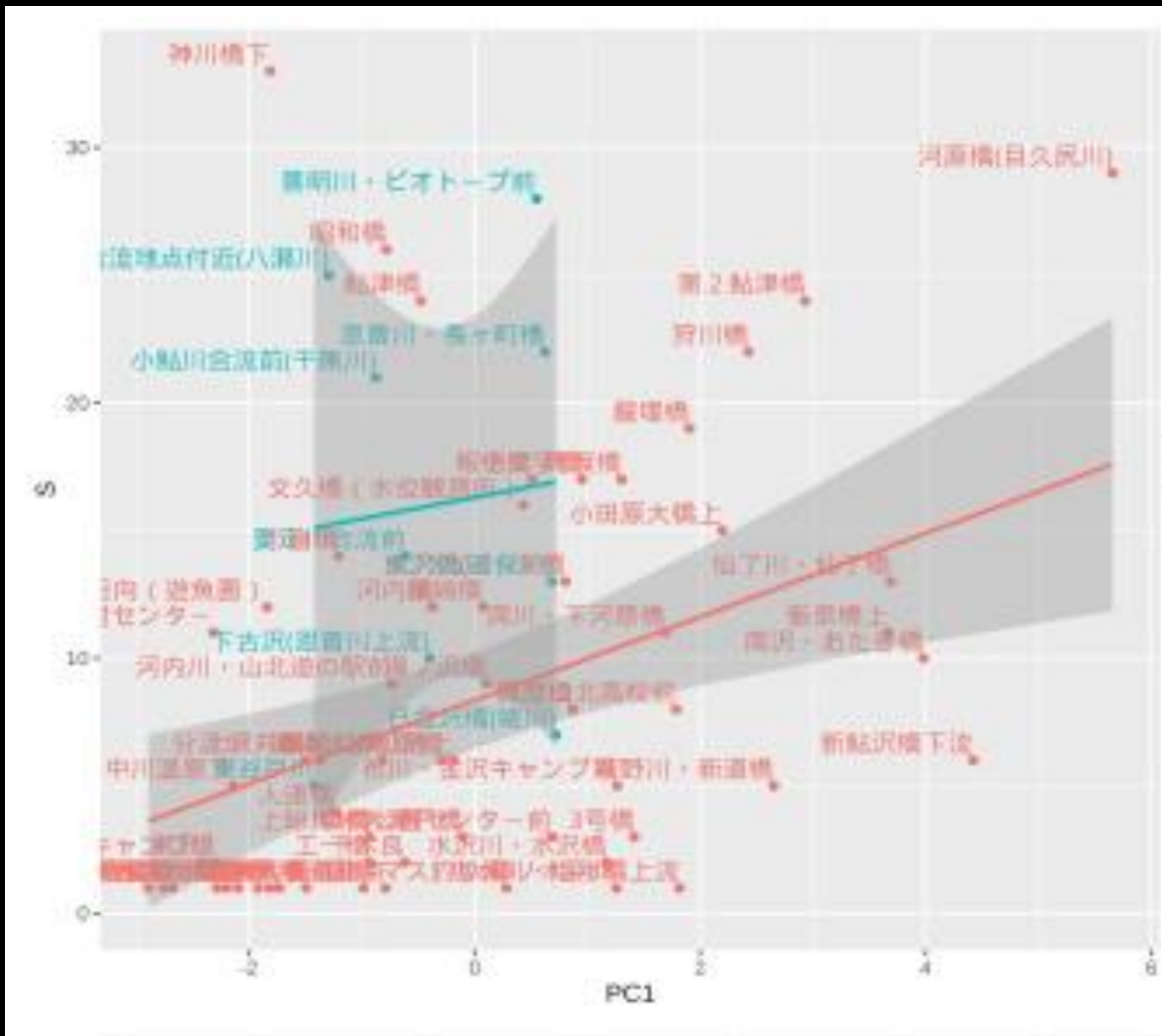


自然再生事業のインパクトを評価



環境DNAで自然再生事業の効果を可視化する

- 67地点で魚類の環境DNA調査を実施
- 自然再生事業の効果を生物多様性データを比較することで可視化する



自然を回復させる事業の効果を科学的に評価する

- 環境 (PC1) に対して各地点の種数をプロット
- 事業サイトでは生物多様性が高まっている
- 事業効果はサイトによって大きなばらつき

Conservation site name	Species	Shannon	Simpson	abundance
善名川・ビオトープ前	22.8	1.36	2.31	75.2
恩曾川・長々町橋	12.3	0.849	0.675	2.30
東沢橋(道保川)	2.79	0.235	-0.306	23.2
白金沢橋(姥川)	-3.26	-0.284	-1.16	41.2
相模川合流地点付近(八瀬川)	18.1	1.48	3.58	27.1
小鮎川合流前(干無川)	12.7	1.14	2.17	5.63
東谷戸川	-0.982	0.296	0.0285	16.9
下古沢(恩曾川上流)	0.396	0.0271	-1.03	19.2
要定川合流前	5.94	1.02	2.21	73.5



ANEMONE

日本全域をカバーする環境DNA調査のネットワーク





自然は途方もなく大きく 私たち一人ひとりは あまりにも小さい

- 生態系は巨大（渡鳥は何万kmも移動、マグロは太平洋を回遊）
- 一箇所の短時間調査からわかることはその一部、限界がある
- どうやって生態系の全体像を捉えるか

ANEMONE : 環境DNA観測のネットワーク

- 2019年、東北大学 (代表)・筑波大学・かずさDNA研究所の呼びかけ、全国大学や国立研究所が参加
- 全国77地点 (55沿岸, 18河川, 4湖沼) で環境DNAの定期観測実施



全国一斉調査2017



調査開始日：2017年6月5日

調査終了日：2017年8月30日

調査地点数：528地点

最北：宗谷岬（北緯45.52度）

最南：南硫黄島（北緯24.22度）

最東：納沙布岬（東経145.82度）

最西：与那国島（東経122.68度）

参加延人数：114名



近藤倫生



荒木仁志



笠井亮秀



清野聡子



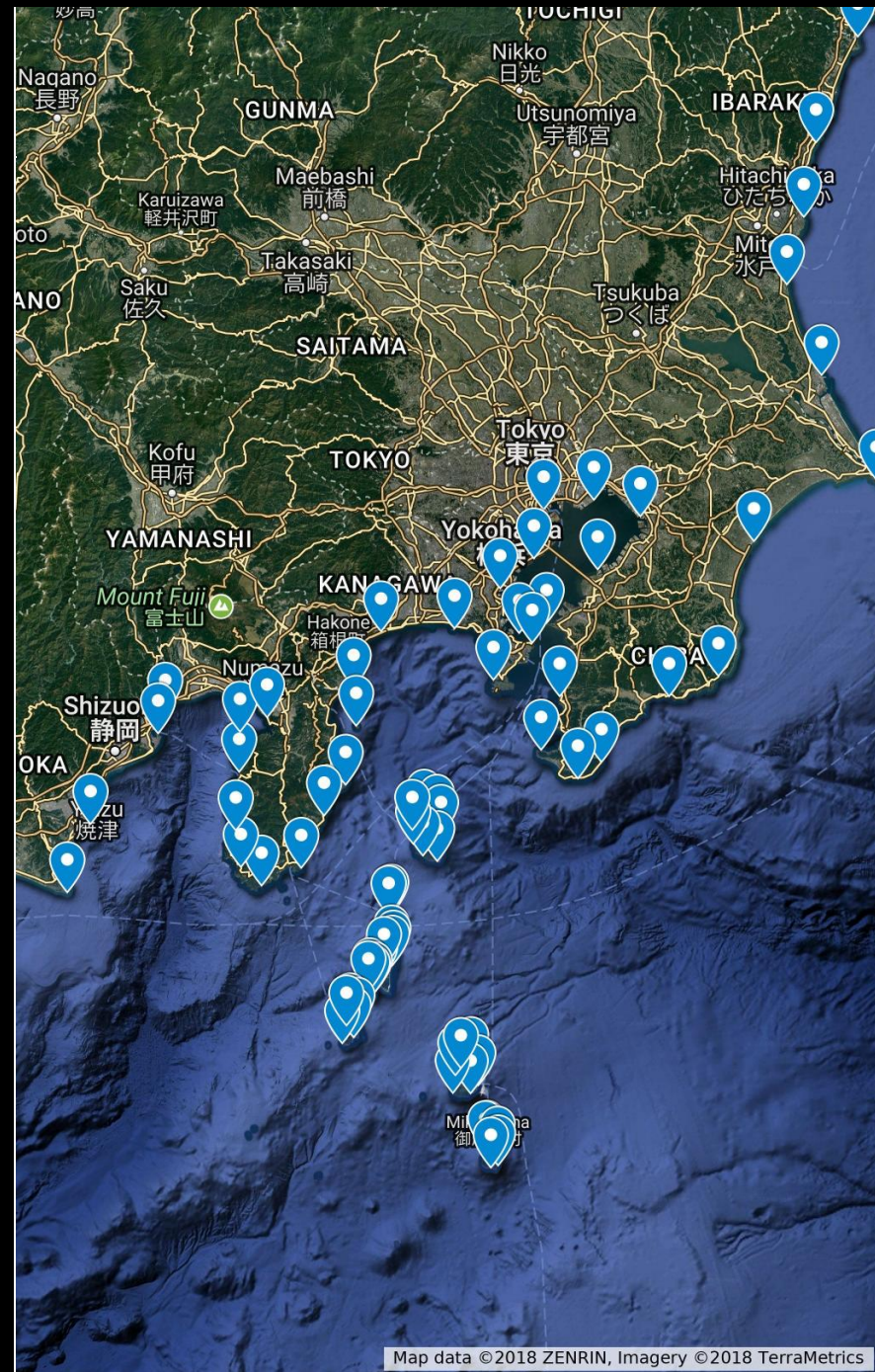
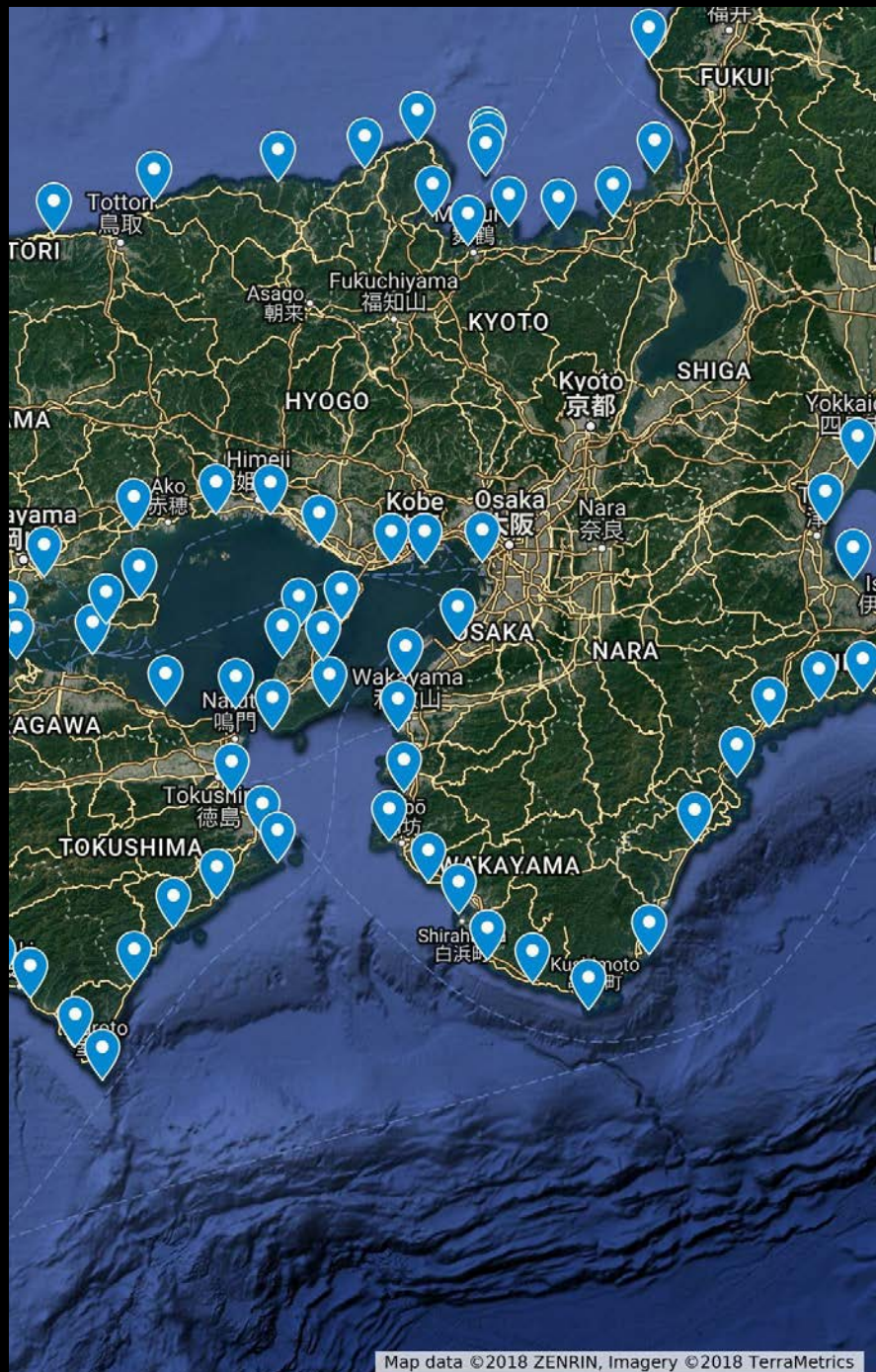
益田玲爾



源利文



宮正樹



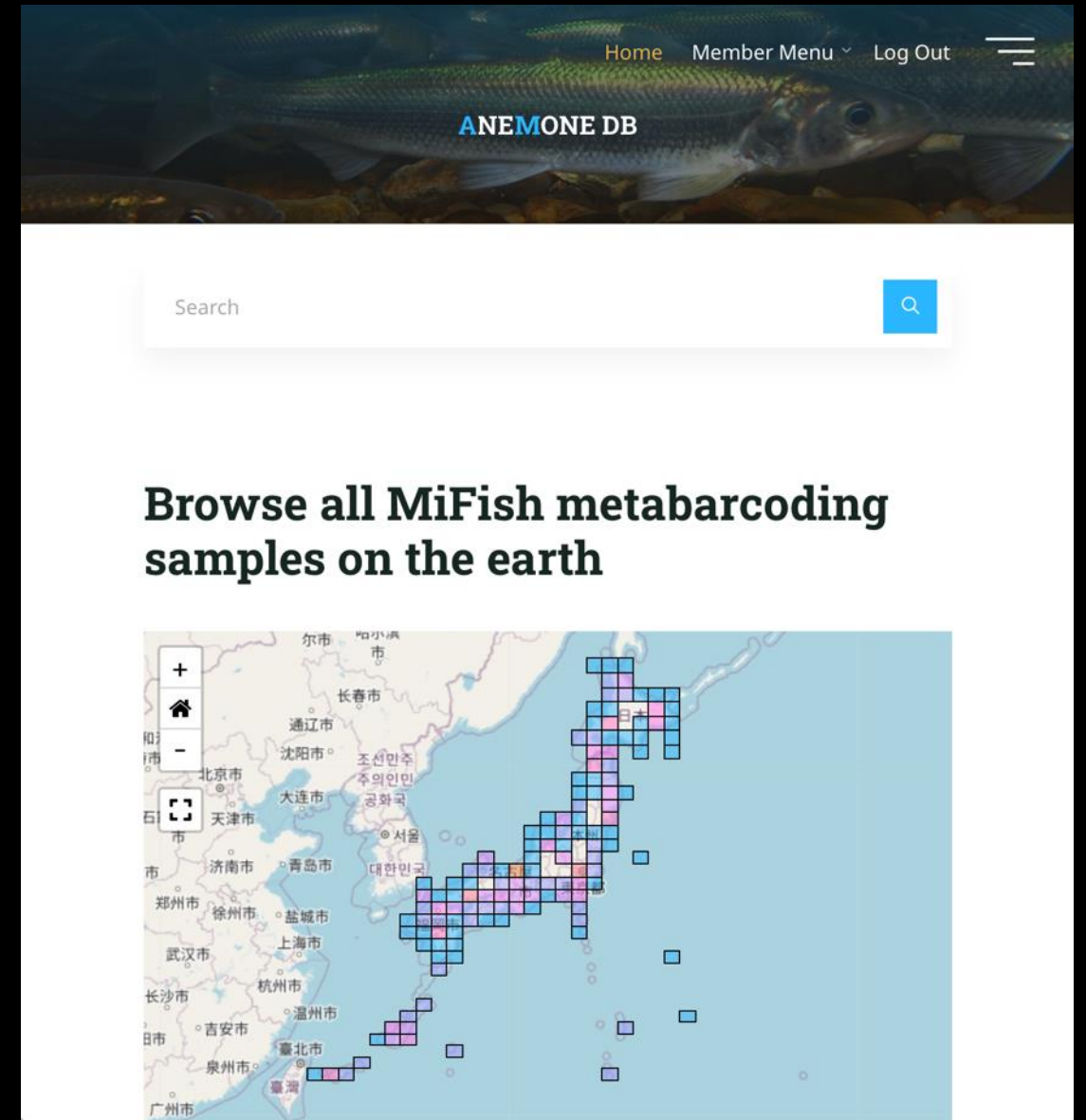


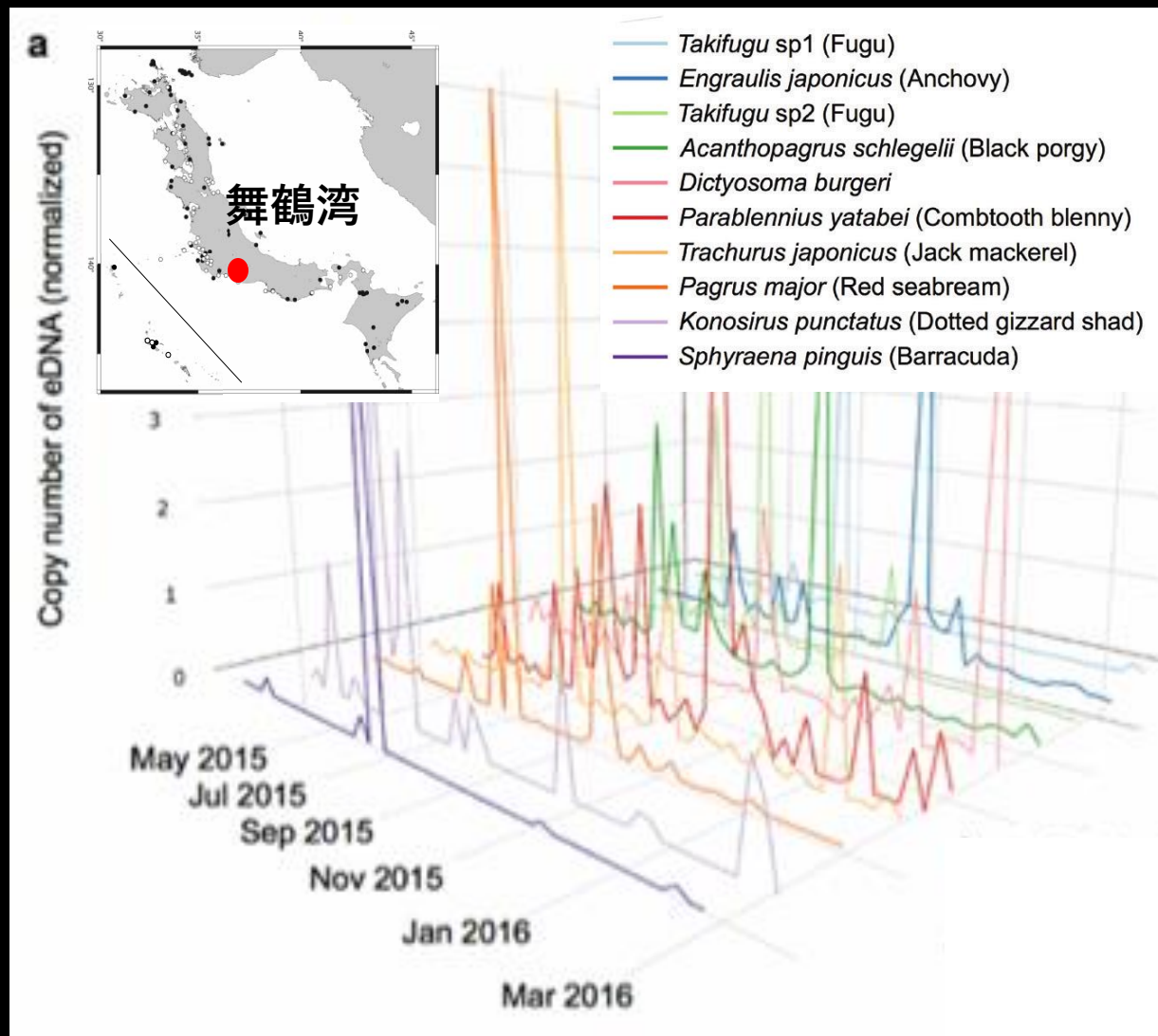
田辺晶史

環境DNA調査データを集約し 誰にでも使えるようにする

- 2022年6月2日、環境DNA調査に特化した ANEMONE DB 公開
- 利用制限のないオープンデータポリシー、学術・産業界のみならず幅広い利用を促進
- 地域の生物多様性情報を集約することで「生物多様性の全貌」が得られる

<https://db.anemone.bio>

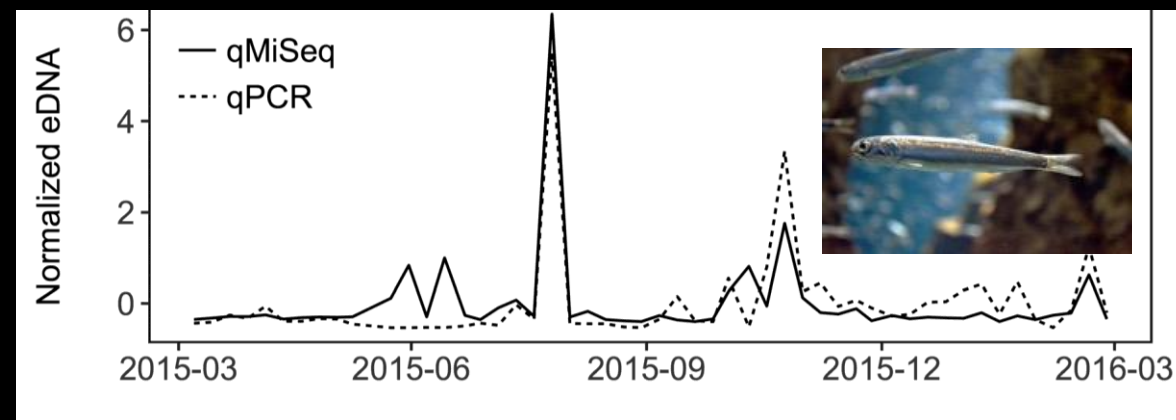




魚類組成の変化を 高時間解像度で捉える

- 京都府舞鶴湾では2015年より毎週の魚類観測
- 魚種の超高頻度での変動を捉えることに成功

秋のカタクチイワシのパルス的登場を検出



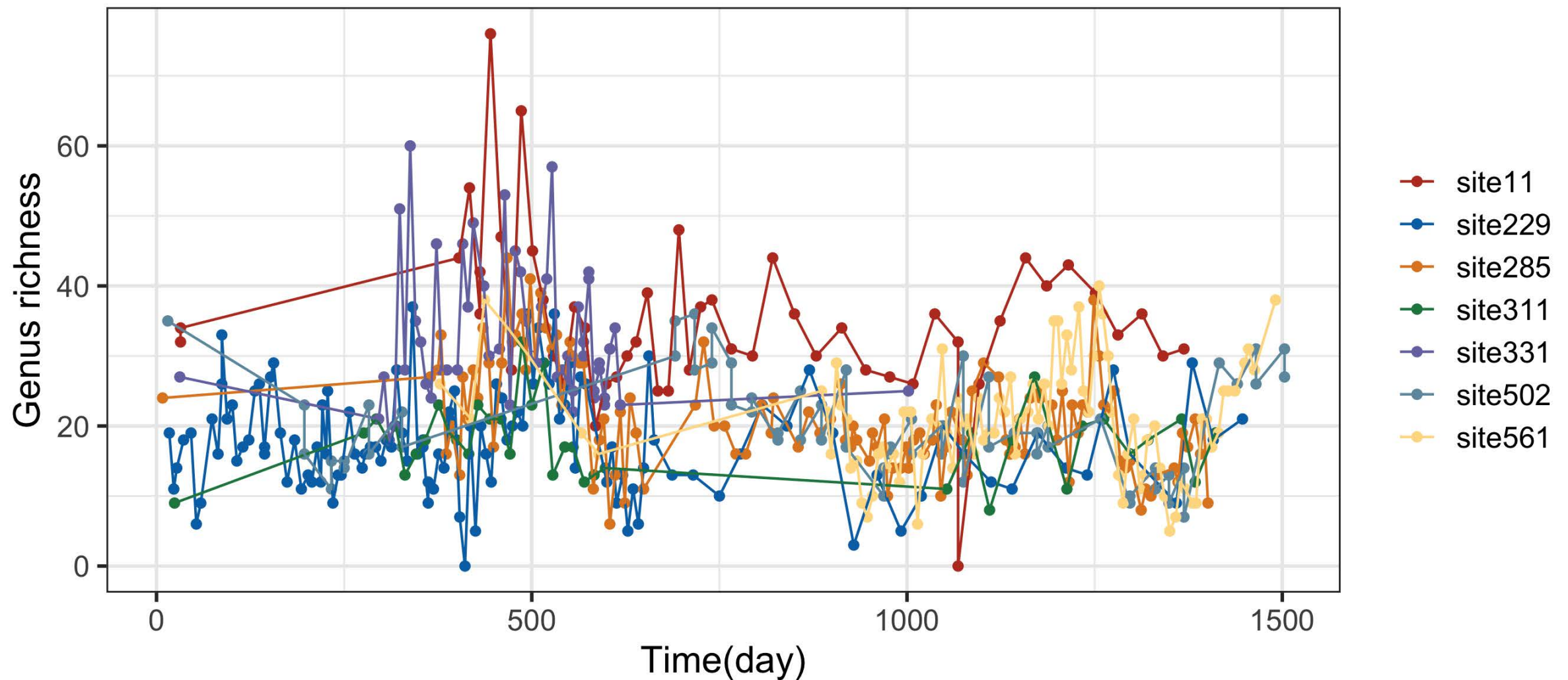
Masuda (unpublished data)

Browse all metabarcoding samples including *Engraulis japonicus* on the earth



あらゆる生物の分布を 見える化する

- 地域の調査データをまとめることで全国レベルでの分布を知ることができる
- 全国の「魚の天気図」を得られる



生物多様性の時間変化を地域間比較する

- 毎週観測を実施しているANEMONE観測点での生物多様性変動
- 高頻度データ獲得で異常検知や因果推論など時系列解析の適用が視野に



自然を観測で
把握する



自然がどう反応するか
予測する



自然に働きかけて
上手に使う

ネイチャーポジティブに欠かせない3つの科学技術要素



自然を観測で
把握する



自然がどう反応するか
予測する



自然に働きかけて
上手に使う

ネイチャーポジティブに欠かせない3つの科学技術要素



地域コミュニティへの視点

生物多様性の利用に関する意思決定はいかにしてなされるべきか







イソシジミ



アオアシシギ



コメソギガニ



チュウシャクシギ



アサリ



ヤマトカワゴカイ



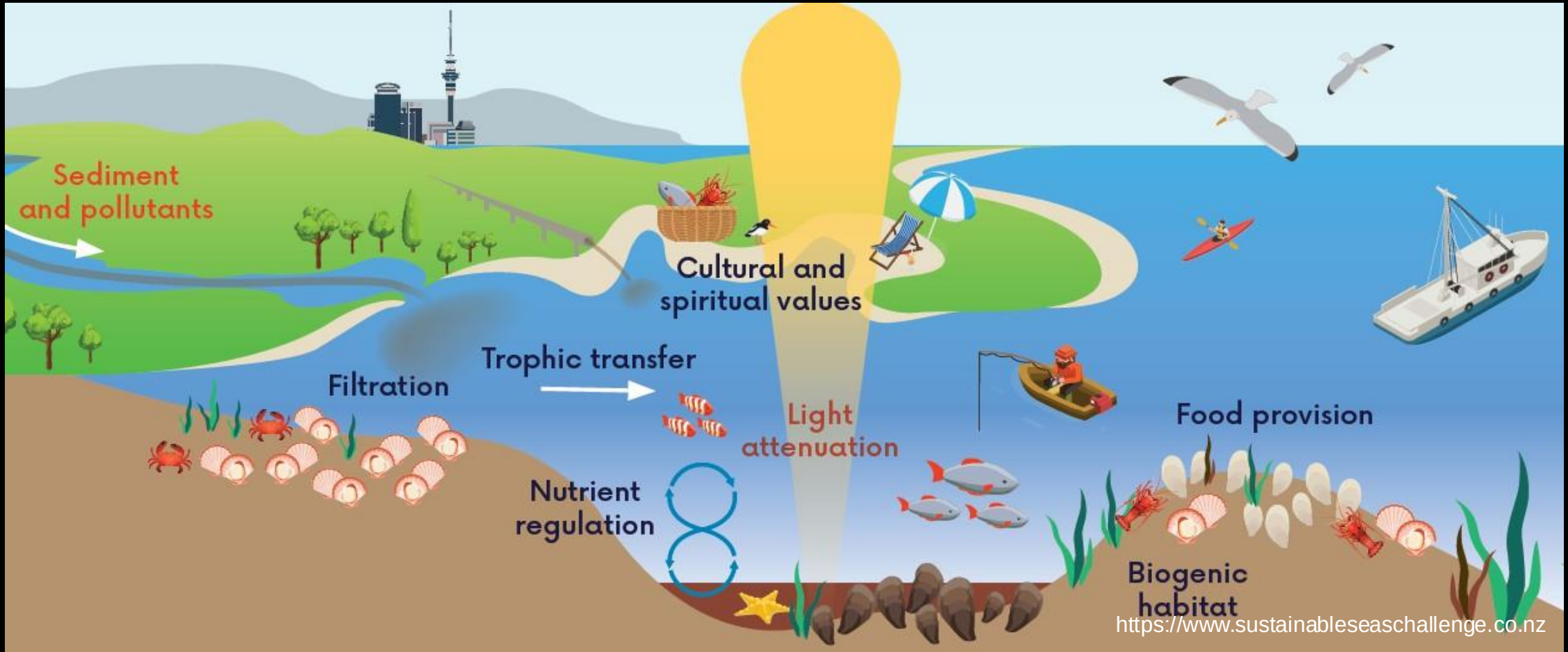
ヤマトオサガニ

生態系サービスの分類		生態系サービスの内容例	全国の干潟の 経済価値 (／年)	評価原単位 (／ha／年)	評価の詳細 ※評価内容に は次項 (4) を参照
供給	食料	水産資源の供給	907 億円	184.5 万円	B-1
		〔アサリの漁業生産額〕	95 億円	19.4 万円	
		〔ハマグリの漁業生産額〕	10 億円	2.2 万円	
		〔ノリの漁業生産額〕	801 億円	162.9 万円	
		〔その他の魚種の 漁業生産額〕			
	淡水資源	海水の淡水化利用			B-2
	原材料	貝製品、美容品などの生産			B-3
調整	遺伝子資源				B-4
	薬用資源				B-5
	鑑賞資源	鑑賞用動植物（クビレズタ、アカテガニ、ベンケイガニなど）の供給			B-6
	大気質調整	硫黄酸化物、窒素酸化物濃度の調整			B-7
		潜熱効果による気温調整			
	気候調整	二酸化炭素の濃度調整			B-8
	局所災害の緩和	波浪の減衰			B-9
	水量調整				B-10

日本における湿原・干潟の提供する生態系サービスの経済評価（環境省 2014）

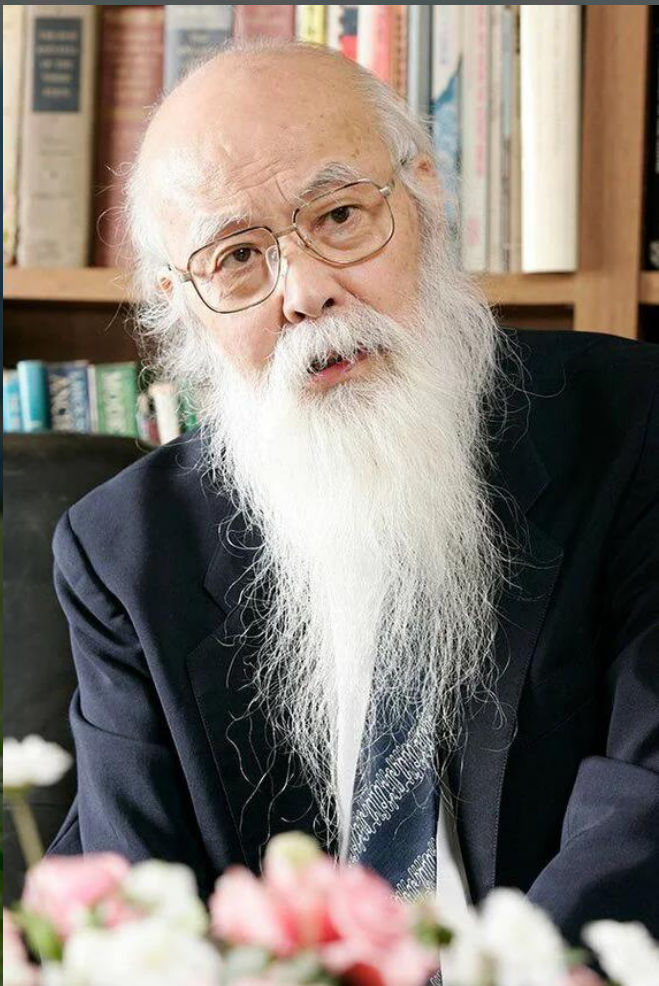
湿原は9,000億円/年、干潟は6,000億円/年程度と推定された

生態系サービスの分類		生態系サービスの内容例	全国の干潟の 経済価値 (／年)	評価原単位 (／ha／年)	評価の詳細 ※評価内容に は次項 (4) を参照
	水質浄化	窒素、リンの除去	2,963 億円	602.7 万円	B-11
		〔窒素の除去〕	2,963 億円	602.7 万円	
		〔リンの除去〕	1,932 億円	393.0 万円	
		有害物質の無害化			
	土壌浸食の抑制				B-12
	地力の維持				B-13
	花粉媒介				B-14
	生物学的防除	食物連鎖による赤潮抑制			B-15
生育・生息地	生息・生育環境の提供	干潟の生物多様性の保全	1,954 億円	397.4 万円	B-16
		魚介類の産卵場、採餌場、避難場の提供	234 億円	47.6 万円	
		カレイ類の漁業生産額	212 億円	43.1 万円	
		クルマエビの漁業生産額	22 億円	4.5 万円	
	遺伝的多様性の保全				B-17
文化	自然景観の保全	多様な景観の創出			B-18
		希少野生生物等が生息する景観			
	レクリエーションや観光の場と機会	潮干狩り	45 億円	9.1 万円	B-19
		自然観察や散策など、観光利用の場			
	文化、芸術、デザインへのインスピレーション	地域行事や祭事の開催			B-20
		絵画や文芸などの創作			
	神秘的体験				B-21
	科学や教育に関する知識	環境教育の場としての利用			B-22
		科学研究の場、材料としての利用			



多機能性とマルチステークホルダー

- 自然には色々な「恵み」や「人々への貢献」がある
- だから、たくさんの利用者・利害関係者がいる（社会共通の基盤）
- 誰が「自然資本」の管理・運用を行うべきか？



宇沢 弘文 (1928-2014)

日本の経済学者。東京大学名誉教授。
1983年文化功労者、1989年日本学士院
会員、1995年米国科学アカデミー客員会
員、1997年文化勲章、2009年ブルー
プラネット賞。

自然は「社会的共通資本」 ＝ 社会全体を支える共通の財産

すべての人々が、ゆたかな経済生活を営み、すぐれた文化を展開し、人間的に魅力ある社会を持続的、安定的に維持することを可能にするような社会的装置

宇沢「社会的共通資本」(2000)

社会的共通資本は…決して国家の統治機構の一部として
官僚的に管理されたり、また利潤追求の対象として
市場的な条件によって左右されてはならない

(コミュニティから信託された) 職業的専門家によって、
専門的知見に基づき、職業的規範に従って
管理・維持されなくてはならない

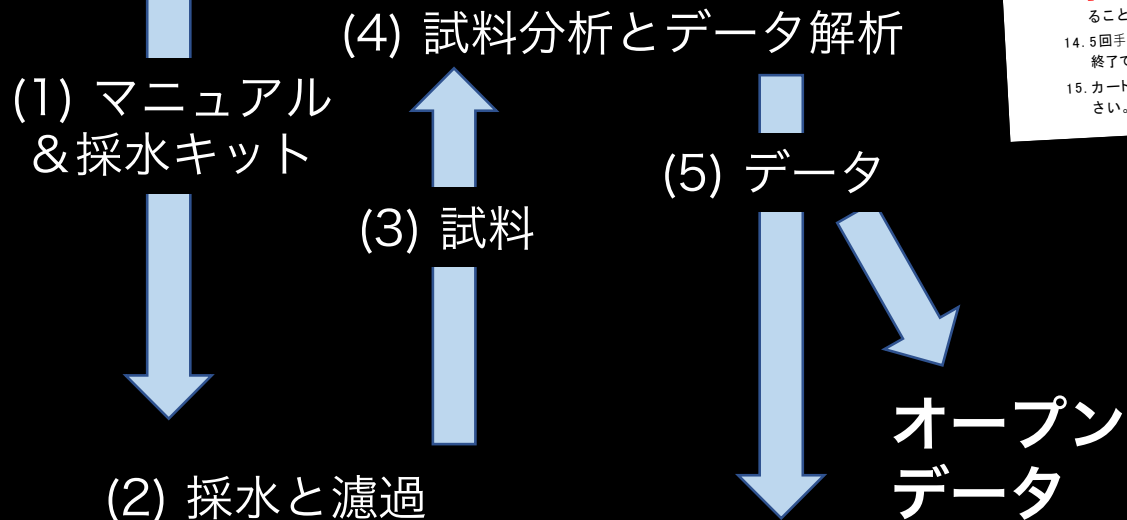
宇沢「社会的共通資本」(2000)

地域の自然の持続的利用に
最大の関心を持つ地域の人々こそ
自然管理・運用の主役になるべき



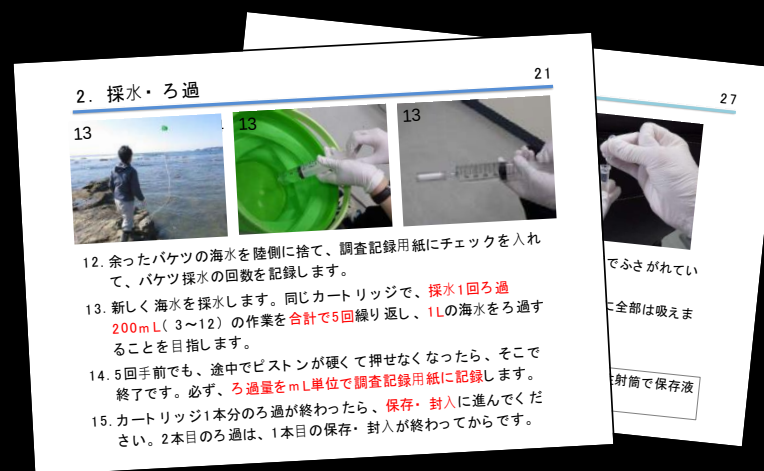


ANEMONE ハブ



ANEMONE ノード

固定観測点と一時観測点



誰でも環境DNA調査に参加できる

- 誰でも観測に参加できるように作業を手分け
- 専門用語を使わないマニュアルと採水キットを提供、科学者ではなくとも調査可能に

bucket casting rope

filter cartridges

cartridge caps

RNA Later
(DNA stabilizer)

a sign "under survey"

gloves

syringes

ice packs

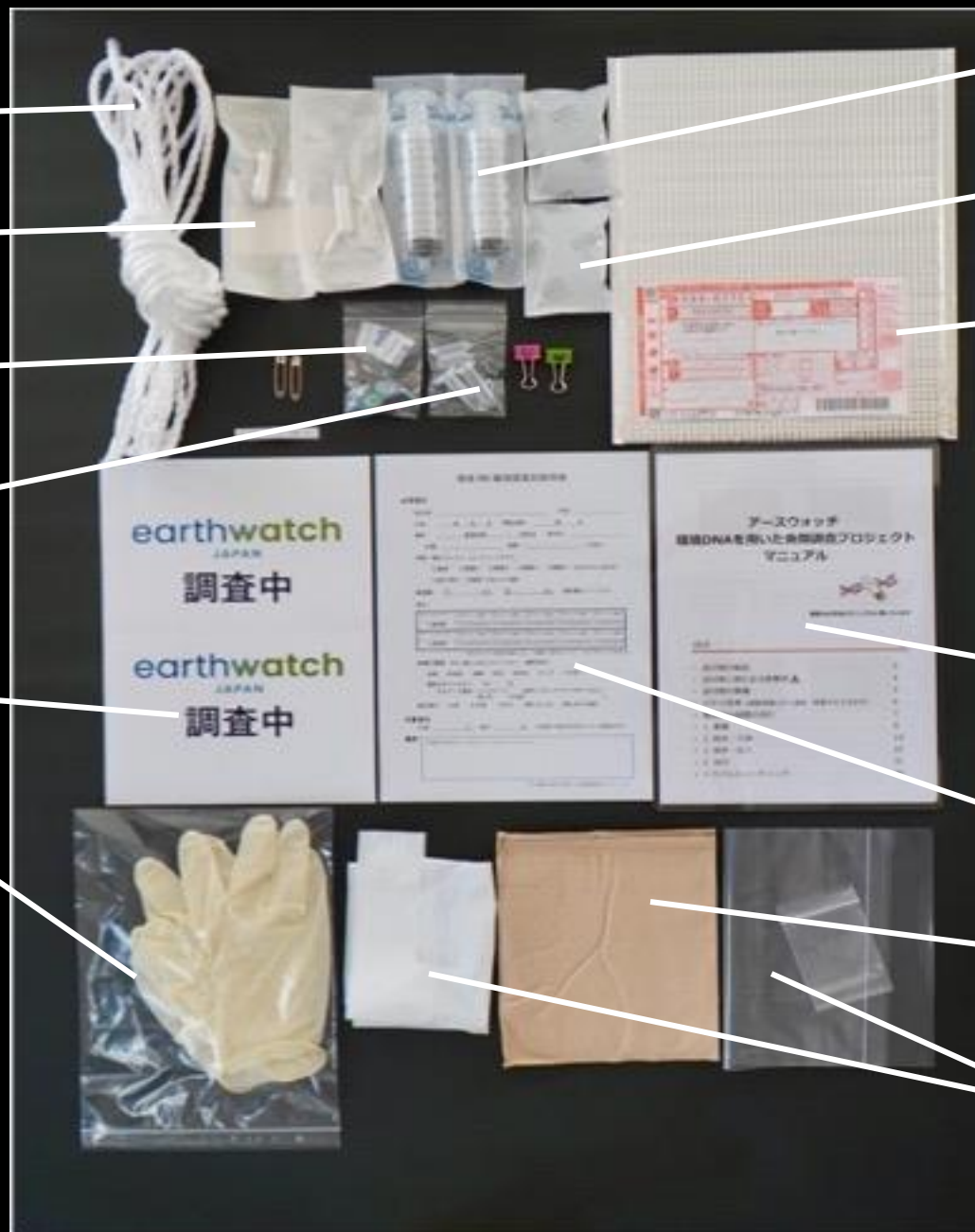
a prepaid envelope

instruction manual

survey forms

paper towels

plastic bags



Coastal Fish eDNA Monitoring Project

環境DNAを用いた魚類調査プロジェクト

環境DNA

earthwatch
JAPAN

kakaku.com



クロダイ



ニホンウナギ



アカメ

地域住民による地域の自然の調査

- 2020年より、カカクコムとアースウォッチ・ジャパンの協力のもと全国の市民が身近な海で環境DNA調査
- 139地点の市民ボランティア調査によりニホンウナギやアカメなど希少な生物を含む632魚種の検出に成功（～2023）



近藤倫生



笠井亮秀



清野聡子



益田玲爾

kakaku.com
earthwatch
JAPAN

4
年

830
人

496
地点

>800
魚種

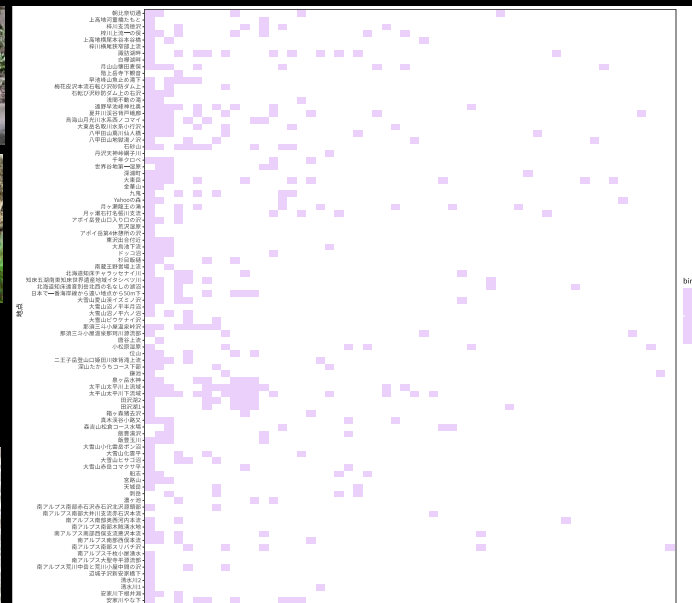
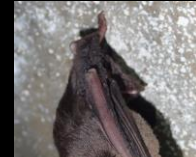


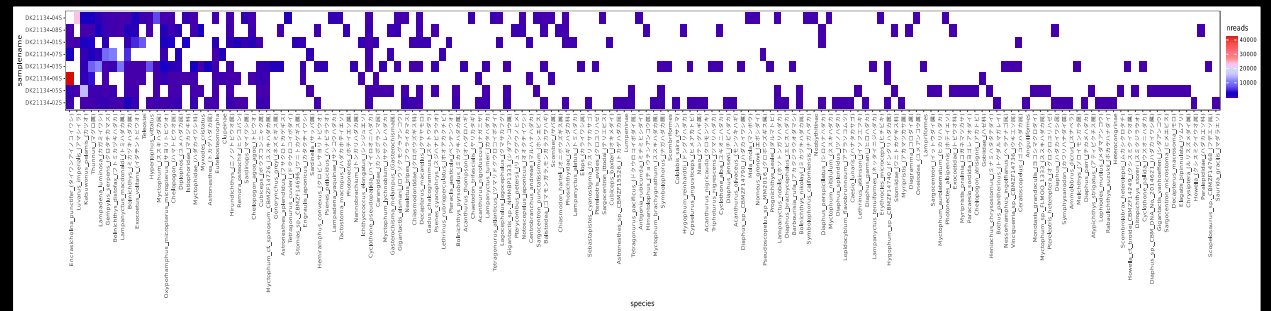
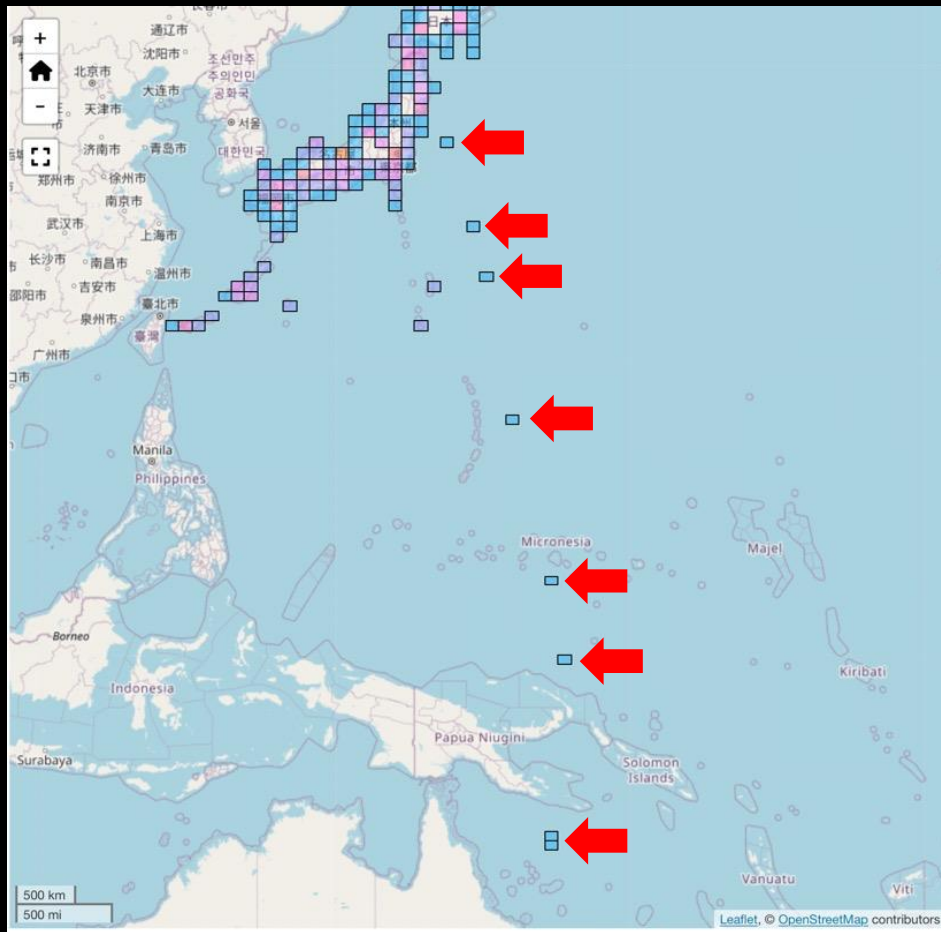
FIRST ASCENT JAPAN.
むらかみみちこ さん



クライマー・自然愛好家と連携し 洞窟や高山など到達困難域を調査

- 北は北海道 知床 チャラッセナイ川から、
南は徳之島 剥岳まで
- 山を愛する人々やアウトドア企業の協力
- 4/28から7/27に全国95地点で環境DNA -
魚や哺乳類、鳥の調査実施





海運会社による環境DNA調査への貢献

- 日本郵船は定期航路での環境DNA調査でANEMONEを沿岸から外洋に拡大
- オーストラリア航路での調査では158魚種の検出に成功
- 2022年は近海郵船の協力のもと三陸沖での調査を開始



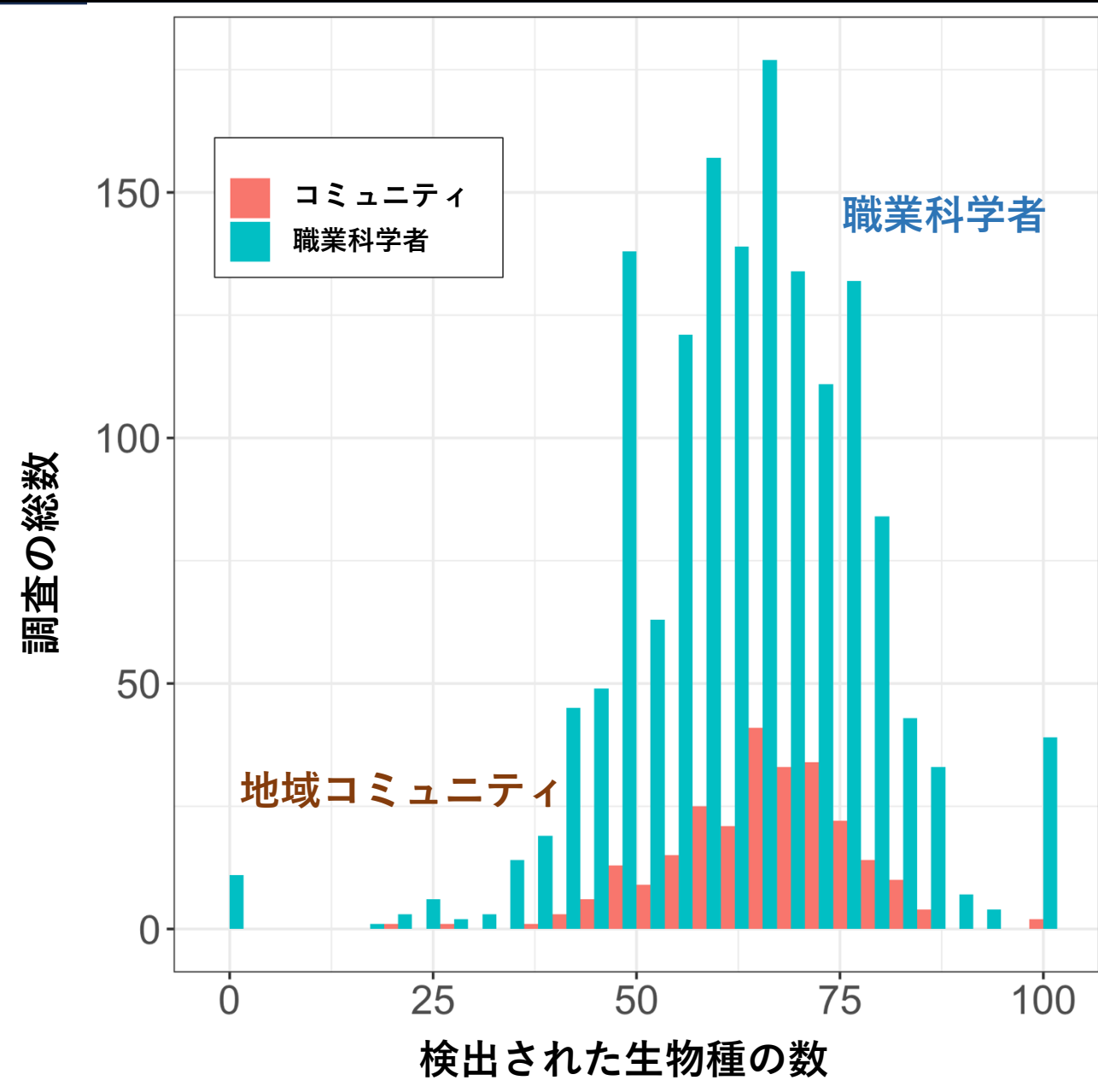
近藤 (東北大)



笠井 (北大)

地域コミュニティによる 調査データは質が十分に高い

- 調査によって検出された魚種数をコミュニティと職業科学者の間で比較
- 両者の間に違いはなく、コミュニティ科学によるデータの質の高さを示唆





東北大学 ネイチャーポジティブ発展社会実現拠点

産官学が連携する大学拠点



ネイチャーポジティブ発展社会実現拠点（NP拠点）

拠点ビジョン（未来のありたい社会像）

人と自然が育み合う ネイチャーポジティブ発展社会



ネイチャーポジティブ 発展社会実現拠点

- **JST COI-NEXTプログラム** - 国の重点的支援（3.2億円/年、2024-2033年）のもと、SDGsに基づく拠点ビジョン達成
- **NP拠点** - NP事業に資金・リソースが流れる仕組み構築、NP移行を支える人材づくりで、NP社会への移行を牽引
- **バックキャスト型研究** - ビジョン達成に必要な社会実装を特定、その実現に向けたイノベーション研究開発を推進
- **産学官共創システム構築** - 開発と実装の好循環でイノベーションを生み出す持続的エコシステム構築（経済的自立）



東北大
近藤 倫生 PL



東北大・日経BP
藤田 香 副PL

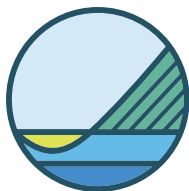
産官学の「機関×機関」連携でイノベーション創出

スタート時参画機関

南三陸町
(一社)サステナビリティセンター
(NPO)アースウォッチ・ジャパン
アマタホールディングス(株)
NECソリューションイノベータ(株)
MS&AD インシュアランスグループホールディングス(株)
神奈川県環境科学センター
(株)KDDI総合研究所
(一社)コンサベーション・アライアンス・ジャパン
(株)佐久
ジャパンプルーエコノミー技術研究組合 [JBE]
東北緑化環境保全(株)
(公社)日本山岳会
日本生命保険(相)
日本電気(株)
日本郵船(株)
パタゴニア・インターナショナル・インク日本支社

東北大学
海洋研究開発機構 [JAMSTEC]

かずさDNA研究所
国立環境研究所
京都大学
筑波大学
東京大学
東邦大学
北海道大学
琉球大学



ネイチャーポジティブ
発展社会実現拠点

自然資本の中心地＝東北に 生物多様性のシリコンバレーを作る

大学を中心にイノベーションでNP事業が次々に誕生、
資金や人材が循環・拡大するエコシステムを構築

- **参画機関** – 産官学より27参画機関で開始、具体的地域でのNP移行成功事例を増やしつつNP発展社会の実現を目指す
- **圧倒的な研究開発能力** – 生物多様性調査・データ解析・評価・予測等あらゆる生物多様性の専門家が全国機関より集結
- **幅広い企業参画** – 金融・保険、IT、アウトドア、通信、一次産業、コンサルなどの幅広い分野から15社が参画
- **自治体との連携** – 南三陸町、神奈川県その他、連携自治体でNP経済を実証しつつ積極拡大、全国にNP自治体創出

3つのターゲット：自然評価・経済の仕組・人材

- 産学連携による研究推進 – 3ターゲットに学術・企業両者よりリーダーが着任
- 研究開発のみならず、仕組み・ルールづくりや人材育成・事業創出が重要ミッション

ターゲット1 自然の状態把握の 科学技術開発



自然の価値を見える化し
持続的に高める



ジャパンプルーエコノミー
桑江 朝比呂



東北大
陶山 佳久

ターゲット2 見える化を支える 指標開発・標準化



ネイチャーポジティブに向けて
お金が流れる仕組みを作る



MS&AD 沖 宏治



東北大・日経BP
藤田 香

ターゲット3 企業や人々の変革を促す 人材・ビジネス創出



ネイチャーポジティブ実現を
支える人を育てる



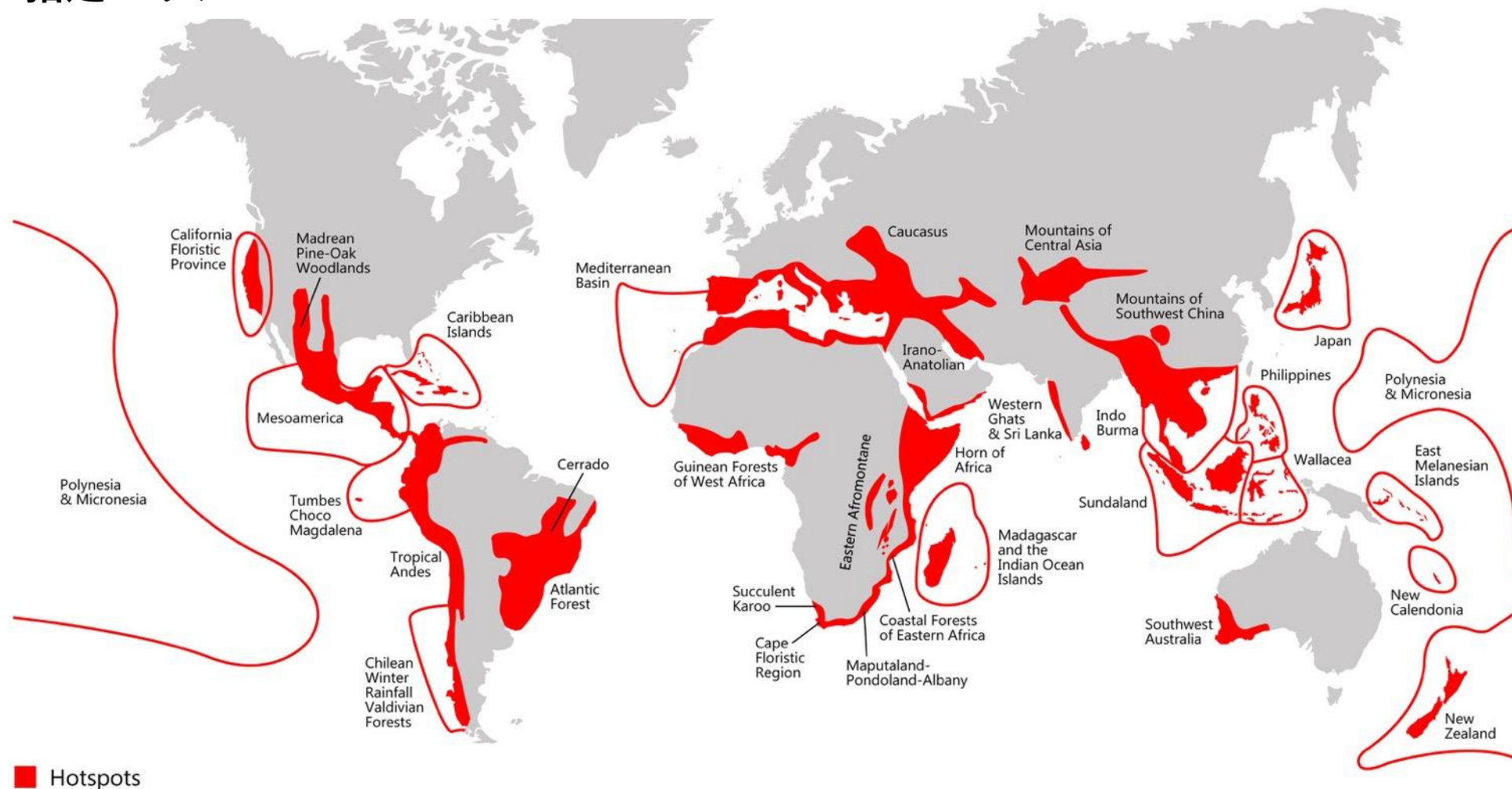
サステナビリティ
センター
太齋彰浩



東北大
高度教養教育・
学生支援機構
河田雅圭

世界の生物多様性ホットスポット

36の指定エリア



February 2005

生物多様性ホットスポット 日本

- 森林率 68.4% OECD中 第3位
- 我が国固有の生物種からなる豊かな生物相
哺乳類22%、両生類74%、爬虫類38%、維管束植物36%
- 世界三大漁場の一つを有する（三陸・金華山沖）

■ Hotspots

February 2005



まとめ

1. ネイチャーポジティブとは、自然という複雑な資本をどうやって上手に使うかという問題
2. 事業活動が複雑な自然に及ぼす影響を評価することができる環境DNAは、自然を上手に使うための大事なツールになる
3. ANEMONEは、オープンな環境DNA観測網、専門家でなくとも観測に参加でき、データを利用できるオープン性に意義
4. 地域コミュニティのANEMONEへの貢献が高まっているが生物多様性の自治管理でも重要な役割を果たしうる
5. ネイチャーポジティブ拠点は産官学連携によりネイチャーポジティブ経済への移行に必要なシステム構築を牽引する

