

領域略称名：統合生物圏科学  
領域番号：21A403

令和6年度  
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」  
に係る中間評価報告書

「デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための  
統合生物圏科学」

領域設定期間

令和3年度～令和7年度

令和6年6月

領域代表者 東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授・伊藤 昭彦

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	8

## **研究領域全体に係る事項**

4	研究領域の目的及び概要	13
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	15
6	研究の進展状況及び主な成果	17
7	研究発表の状況	31
8	研究組織の連携体制	36
9	若手研究者の育成に係る取組状況	37
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	38
11	研究費の使用状況・計画	39
12	今後の研究領域の推進方策	40
13	総括班評価者による評価	42

**研究組織**

(令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

**1 総括班及び総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	21H05312 統合生物圏科学の構築にかかる支援活動	伊藤 昭彦	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	12
A01 計	21H05313 炭素貯留を最大にする最適な森林の予測	彦坂 幸毅	東北大学・大学院生命科学研究科・教授	5
A02 計	21H05314 森林機能の最大化のためのゲノム・形質・生態の革新的な統合アプローチ	小野田 雄介	京都大学・農学研究科・教授	3
A03 計	21H05315 土壌微生物機能発揮の鍵となる群集・メタゲノム構造の特定	近藤 倫生	東北大学・大学院生命科学研究科・教授	4
B01 計	21H05316 東ユーラシア低～高緯度域を縦断した大気－森林生態系の物質交換機能解明	熊谷 朝臣	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	14
B02 計	21H05317 リモートセンシング技術による生態系構造、機能及び多様性の高精度観測	小林 秀樹	海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・グループリーダー代理	3
C01 計	21H05318 高分解能な生物圏モデル開発と緩和シナリオの検討	伊藤 昭彦	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	3
C02 計	21H05319 地球システムモデルによる生態系環境適応が気候へ与えるフィードバックの解明	加藤 知道	北海道大学・農学研究院・教授	4
<b>総括班及び総括班以外の計画研究 計 8 件 (廃止を含む)</b>				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：統合生物圏科学の構築にかかる支援活動

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	伊藤 昭彦	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	総括と全体調整、アウトリーチ活動、コンプライアンス関係
分担	彦坂 幸毅	東北大学・大学院生命科学研究所・教授	A分野とりまとめ、機能形質データベース、若手人材育成
分担	小林 秀樹	海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・グループリーダー代理	Slackなど情報基盤、観測キャンペーン、衛星データ管理
分担	村岡 裕由	岐阜大学・高等研究院・教授	国際連携、長期観測ネットワーク、観測キャンペーン
分担	近藤 倫生	東北大学・大学院生命科学研究所・教授	データ駆動モデル支援、ゲノム情報支援など
分担	安立 美奈子	東邦大学・理学部・准教授	広報活動支援、全体会合の開催支援など
分担	熊谷 朝臣	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	B分野とりまとめ、観測ネットワーク、人材育成
分担	平舘 俊太郎	九州大学・大学院農学研究科・教授	土壌調査技術支援、同位体分析
分担	加藤 知道	北海道大学・農学研究科・教授	広報活動、地球システムモデル、国際モデル相互比較
分担	植山 雅仁	大阪公立大学・大学院農学研究科・准教授	フィールド観測技術支援
分担	日浦 勉	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	長期観測ネットワーク、アウトリーチ活動、人材育成
分担	小野田 雄介	京都大学・農学研究科・教授	セミナー、アウトリーチ活動、形質データベース
合計 12 名			

研究項目：A01

研究課題名：炭素貯留を最大にする最適な森林の予測

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	彦坂 幸毅	東北大学・大学院生命科学研究所・教授	研究統括・植物形質

分担	小嵐 淳	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主席	放射性同位体分析
分担	小黒 芳生	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員	モデリング
分担	平舘 俊太郎	九州大学・大学院農学研究大学院・教授	土壌分析
分担	木庭 啓介	京都大学・生態学研究センター・教授	安定同位体分析
合計 5 名			

**研究項目：A02**

**研究課題名：森林機能の最大化のためのゲノム・形質・生態の革新的な統合アプローチ**

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	小野田 雄介	京都大学・農学研究科・教授	研究総括・樹木の形質評価・UAV-LiDAR を用いた森林構造評価・生態系機能評価の推進
分担	井鷲 裕司	京都大学・農学研究科・教授	樹木のゲノム・形質評価研究の推進
分担	北島 薫	京都大学・農学研究科・教授	樹木形質評価研究の推進
合計 3 名			

**研究項目：A03**

**研究課題名：土壌微生物機能発揮の鍵となる群集・メタゲノム構造の特定**

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	近藤 倫生	東北大学・大学院生命科学研究所・教授	研究統括、モデリング
分担	川津 一隆	東北大学・大学院生命科学研究所・助教	微生物実験データの解析
分担	永田 裕二	東北大学・大学院生命科学研究所・教授	微生物実験
分担	大坪 嘉行	東北大学・大学院生命科学研究所・准教授	DNA 分析
合計 4 名			

研究項目：B01

研究課題名：東ユーラシア低～高緯度域を縦断した大気－森林生態系の物質交換機能解明

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	熊谷 朝臣	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	フラックス－生態系機能関係解析
分担	村岡 裕由	岐阜大学・高等研究院(環境社会共生体研究センター)・教授	植物生理パラメータの環境応答解析
分担	福田 健二	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	植物生理パラメータの環境応答解析
分担	久米 朋宣	九州大学・農学研究院・教授	フラックス観測
分担	清水 貴範	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・室長	フラックス観測
分担	中路 達郎	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授	生態系操作実験
分担	斎藤 琢	岐阜大学・高等研究院(環境社会共生体研究センター)・准教授	フラックス観測
分担	植山 雅仁	大阪公立大学・大学院農学研究科・准教授	フラックス－生態系機能関係解析
分担	小林 真	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授	生態系操作実験
分担	日浦 勉	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	長期観測データの解析と生態系操作実験
分担	飯田 真一	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究員	フラックス観測
分担	市榮 智明	高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・教授	植物生理パラメータの環境応答解析
分担	宮沢 良行	九州大学・キャンパス計画室・学術推進専門員	植物生理パラメータの環境応答解析
分担	中村 誠宏	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授	生態系操作実験
合計 14 名			

**研究項目 : B02**

**研究課題名 : リモートセンシング技術による生態系構造、機能及び多様性の高精度観測**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	小林 秀樹	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・グループリーダー代理	研究統括、リモートセンシングデータにおける森林機能解析(ドローン運用含)
分担	甘田 岳	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・学振特別研究員	森林サイトにおける現場データの収集と分析
分担	Eko Siswanto	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・主任研究員	リモートセンシングによる沿岸生態系のRS/現場観測
合計 3 名			

**研究項目 : C01**

**研究課題名 : 高分解能な生物圏モデル開発と緩和シナリオの検討**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	伊藤 昭彦	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	統括、陸域モデル開発
分担	中岡 慎一郎	国立環境研究所・地球システム領域・主任研究員	海洋観測、海洋モデル開発
分担	安立 美奈子	東邦大学・理学部・准教授	観測-モデル連携、モデル検証、陸域観測
合計 3 名			

**研究項目 : C02**

**研究課題名 : 地球システムモデルによる生態系環境適応が気候へ与えるフィードバックの解明**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	加藤 知道	北海道大学・農学研究院・教授	統括、陸域モデル開発
分担	相田 真希	国立研究開発法人海洋研究開発機構・グループリーダー代理 (海洋モデル)	海洋モデル開発
分担	羽島 知洋	国立研究開発法人海洋研究開発機構・グループリーダー	マルチモデル開発、陸域モデル開発

		一代理（陸域モデル）	
分担	立入 郁	国立研究開発法人海洋研究 開発機構・グループリーダ ー（統合モデル）	統合モデル開発
合計 4 名			



### 3 公募研究

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A04 公	22H05703 環境 DNA と適応形質の時空間変異 によって明らかにする社会－生態 －進化連関	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	内海 俊介	北海道大学・北方生物圏フ ィールド科学センター・准 教授	1
A04 公	22H05709 森林と草原に何種の微生物、何円 の価値が含まれるか？－植物共生 微生物に着目して－	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	田中 健太	筑波大学・生命環境系・准教 授	1
A04 公	22H05714 ウイルスを捉えて生物圏機能を根 底から理解する－革新的メタゲノ ム解析技術の開発－	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	西村 陽介	東京大学・大気海洋研究所・ 特任研究員	1
A04 公	22H05717 容易に抽出可能な水溶性有機物の 同位体情報を活用する土壌有機物 分解動態の解明	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	永野 博彦	新潟大学・自然科学系・助教	1
A04 公	22H05718 温帯性樹木の幹内部二酸化炭素フ ラックスの種多様性	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	飯尾 淳弘	静岡大学・農学部・准教授	1
A04 公	22H05720 土壌マイクロバイオームが固定す る CO <sub>2</sub> の動態解明	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	村瀬 潤	名古屋大学・生命農学研究 科・教授	1
A04 公	22H05722 樹木における匂い受容を介した環 境ストレスと病虫害への応答トリ プトークの解明	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	西岡 正恵 (石原 正恵)	京都大学・フィールド科学 教育研究センター・准教授	1
A04 公	22H05726 湖沼における淡水ブルーカーボン 増強に向けた CO <sub>2</sub> 調整機能の解明	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	中山 恵介	神戸大学・工学研究科・教授	1
A04 公	22H05729 土壌動物群集の同位体と DNA メタ バーコーディングから炭素循環を 理解する	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	兵藤 不二夫	岡山大学・環境生命科学学 域・准教授	1
A04 公	22H05731 ゲノム配列に基づいた被子植物種 ごとの炭素固定能力推定モデルの 開発	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	白井 一正	九州工業大学・大学院情報 工学研究院・研究職員	1
A04 公	22H05736	令和 4 年度 ～	安藤 麻里子	国立研究開発法人日本原子 力研究開発機構・原子力科	1

	温暖化は土壌の炭素貯留能を低下させるか？放射性炭素を利用したアプローチ	令和5年度		学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹	
B03 公	22H05704 森林生態系における地上と衛星SIF観測の統合による着葉期CO <sub>2</sub> 吸収量の評価	令和4年度 ～ 令和5年度	両角 友喜	北海道大学・農学研究院・博士研究員、国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・特別研究員	1
B03 公	22H05706 森林生態系のフラックス観測によって根呼吸の時間変動に関する特性と要因を解明する	令和4年度 ～ 令和5年度	平野 高司	北海道大学・農学研究院・教授	1
B03 公	22H05711 観測ビッグデータ駆動型の広域陸域水・物質循環推定による陸域生態系変動の診断	令和4年度 ～ 令和5年度	市井 和仁	千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授	1
B03 公	22H05715 BVOC放出を介した動的な植物-葉圏微生物相互作用の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	甲山 哲生	東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・助教	1
B03 公	22H05716 海色リモートセンシングによる沿岸域のための固有光学特性推定法の開発	令和4年度 ～ 令和5年度	比嘉 紘士	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・助教	1
B03 公	22H05724 AIとUAVを活用したリモートセンシングの強化	令和4年度 ～ 令和5年度	伊勢 武史	京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授	1
B03 公	22H05725 Tree ring isotope composition to inform models assessing the sensitivity of the forest carbon budget to increased atmospheric CO <sub>2</sub> and climate change	令和4年度 ～ 令和5年度	Epron Daniel	京都大学・農学研究科・特定教授	1
B03 公	22H05730 異なる気象条件下における森林生態系の細根生産量:NPP配分比率の変動解明に向けて	令和4年度 ～ 令和5年度	片山 歩美	九州大学・農学研究院・助教	1
B03 公	22H05734 東ユーラシア域を網羅する土壌炭素放出の温暖化影響とフィードバック効果に関する研究	令和4年度 ～ 令和5年度	梁 乃申	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・室長	1

B03 公	22H05738 革新的手法を用いたブルーカーボン生態系による CO <sub>2</sub> 吸収観測	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	桑江 朝比呂	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長	1
B03 公	22H05739 長期地上観測で捉える「陸域生態系の環境応答は人工衛星でどう見えるか」	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	秋津 朋子	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・第一宇宙技術部門・主任研究開発員	1
C03 公	22H05735 Developing an agricultural production and land-use change model and examining the land-use scenarios under mitigation policies	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	Wu Wenchao	国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・社会科学領域・任期付研究員	1
A04 公	24H01513 マングローブ植林クロノシーケンス：土壌炭素の蓄積機構と溶存有機炭素プールの変遷	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	木田 森丸	神戸大学・農学研究科・助教	1
A04 公	24H01519 ゲノム解析に基づく被子植物の炭素固定能力を制御する遺伝子の解明	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	白井 一正	九州工業大学・大学院情報工学研究院・研究職員	1
A04 公	24H01514 高解像度な生物地球化学プロセス予測のための微生物群集機能解明	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	瀬戸 繭美	奈良女子大学・自然科学系・助教	1
A04 公	24H01516 陸上食物網を支える炭素循環の時間スケールとその決定要因の解明	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	兵藤 不二夫	岡山大学・環境生命自然科学学域・教授	1
A04 公	24H01527 森林における Thermophilization とその生態系機能への影響を解明する	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	辰巳 晋一	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等	1
A04 公	24H01501 環境 DNA と適応形質の時空間変異によって明らかにする社会－生態－進化連関 2	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	内海 俊介	北海道大学・地球環境科学研究院・教授	1
A04 公	24H01510 マングローブのガス交換における潮汐周期の影響	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	檀浦 正子	京都大学・農学研究科・准教授	1
A04 公	24H01521 地球温暖化および海洋酸性化の複合ストレスに対するサンゴの応答評価	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	山本 将史	東京都立大学・都市環境科学研究科・特任教授	1

A04 公	24H01523 森林生態系における分解者の多様性形成と炭素隔離機能への影響の解明	令和6年度 ～ 令和7年度	上村 真由子	日本大学・生物資源科学部・准教授	1
B03 公	24H01504 観測ビッグデータ駆動の広域陸域水・物質循環の高空間分解能診断と予測	令和6年度 ～ 令和7年度	市井 和仁	千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授	1
B03 公	24H01531 ブルーカーボン生態系における革新的手法を用いた CO <sub>2</sub> 吸収の観測と検証	令和6年度 ～ 令和7年度	桑江 朝比呂	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・領域長	1
B03 公	24H01517 森林の炭素循環に大型哺乳類ヒグマが果たす役割：非栄養効果に注目して	令和6年度 ～ 令和7年度	富田 幹次	高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・助教	1
B03 公	24H01518 異なる気象条件下における森林生態系の細根生産量：NPP/GPP 値の変動解明に向けて	令和6年度 ～ 令和7年度	片山 歩美	九州大学・農学研究院・助教	1
B03 公	24H01525 森林の階層構造にもとづく林床クロロフィル蛍光による群落鉛直光合成評価	令和6年度 ～ 令和7年度	両角 友喜	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・特別研究員	1
B03 公	24H01508 衛星画像と深層学習を用いた、斜面崩壊に伴う炭素移動の広域における定量的評価	令和6年度 ～ 令和7年度	江草 智弘	静岡大学・農学部・助教	1
B03 公	24H01522 スキャナ法の自動化による広域的な細根フェノロジーの解明	令和6年度 ～ 令和7年度	大橋 瑞江	兵庫県立大学・環境人間学部・教授	1
B03 公	24H01520 恒常的な台風攪乱が森林生態系のバランスにもたらす影響の解明	令和6年度 ～ 令和7年度	松本 一穂	琉球大学・農学部・准教授	1
B03 公	24H01515 モンゴル草原生態系の植生状況を考慮した水分変動に対する CO <sub>2</sub> フラックスの応答	令和6年度 ～ 令和7年度	寺本 宗正	鳥取大学・乾燥地研究センター・テニユアトラック助教	1
C03 公	24H01530 Developing fire-vegetation model to estimate net fire impact on forest carbon uptake	令和6年度 ～ 令和7年度	朴 彩娟	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員	1
C03 公	24H01528 在不在理論の一般化による生物多様性の定量評価	令和6年度 ～ 令和7年度	入谷 亮介	国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・上級研究員	1

C03 公	24H01502 生物圏予測に資する空間高解像度 な十年気候・海洋予測	令和6年度 ～ 令和7年度	見延 庄士郎	北海道大学・理学研究院・教授	1
C03 公	24H01526 High-resolution global land use downscaling model development and land-based mitigation potential assessment	令和6年度 ～ 令和7年度	Wu Wenchao	国立研究開発法人国際農林 水産業研究センター・社会 科学領域・任期付研究員	1
公募研究 計 45 件（廃止を含む）					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

## 研究領域全体に係る事項

### 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

#### 【研究領域の目的】

急激に悪化しつつある地球環境を保全し持続可能性を維持するには、生物圏・生態系を用いた対策が不可欠であるが、複雑多様な生物圏に関する理解は不十分である。そこで、生物圏の機能に関する新しい科学「統合生物圏科学」を創出し、地球環境激変を克服する対策を提示する。生物圏に関する理解を深化するため分子～地球スケールでの基礎研究を推進し、その知見を統合した新しい生物圏モデル「デジタルバイオスフェア」を開発する。生物圏による二酸化炭素（CO<sub>2</sub>：地球温暖化の主要原因物質）吸収量、再生可能資源であるバイオマスの供給量、そしてそれらに必要な土地利用という具体的な問いに答える。

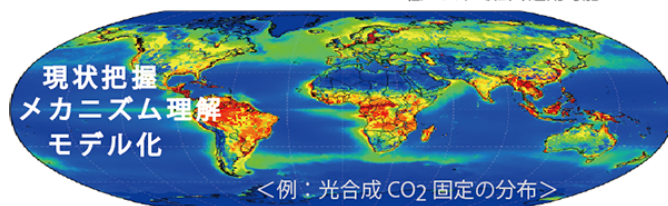
#### 生物圏機能の向上

- ・形質の最適化→CO<sub>2</sub>固定
- ・構造の最適化→バイオマス
- ・分布の最適化→土地利用



#### 地球環境激変の緩和

- ・確かな環境対応力と持続性
- ・生態系の予測性に基づく低リスク
- ・低コストで広く適用可能



#### 【研究領域の学術的・社会的背景】

生物圏は陸域・海洋にわたって地表を覆うだけでなく、大気圏や水圏さらには雪氷圏や岩石圏と相互作用を行っており、地球の環境形成と安定化に特異な役割を果たしてきたと考えられる。人間活動によって放出されたCO<sub>2</sub>の約3割は陸域生物圏に、同じく約3割は海洋生物圏によって吸収されていると考えており、そのCO<sub>2</sub>は再生可能資源であるバイオマスに転換されて人間社会に様々な形態で利用されている。生物圏の機能を維持しより高度に活用することは、人類の持続可能性にとって極めて重大な意味を持っており、そのために生物圏の構造・機能・環境応答に関する理解を深化させる必要がある。

生物圏は1000万種以上にも及ぶ多様な生物種で構成されており、温暖湿潤な熱帯から砂漠・高山・深海まで著しく異なる環境下に分布している。その生物間・生物-環境間の営みは複雑であり、その全体像を解明することは容易ではない。しかし現在、次世代シーケンサーや人工衛星など、生物圏を観測する手法はマイクロからマクロのスケールで長足の進歩を遂げており、深層学習などのデータ解析手法も著しく進化している。これら近年の科学技術を活用することで、従来は困難であった生物圏に関するメカニズムの解明を進め、生物圏を利用した地球環境保全策を見出すことが可能になると期待される。

生物圏に関連する学問分野は多岐にわたっている。生物科学だけでも分子生物学から地球生態学にまたがり、地球システムを扱う気象学、海洋学、土壌学など、さらに応用分野では農学、森林科学、水産学などに広がっている。地球環境への危機意識を受けて各分野で個別に研究が始められてきたが、それらを学際的に横断する「統合生物圏科学」が求められていた。

#### 【研究領域の全体構想】

本研究領域では、3つの分野を設定し、それぞれの分野が複数の計画研究で構成されている。A分野は生物圏に関するメカニスティックな理解を深め、生物圏機能に関する決定要因と環境応答を予測できるような素過程モデルを提案する（計画研究A01、A02、A03）。B分野は広域観測を行い、生物圏機能の空間的分布や時間変動、そして地球環境変動影響に関するデータを提供する（計画研究B01、B02）。C分野は生物圏によるCO<sub>2</sub>交換やバイオマス生産などの諸機能をグローバルに再現するモデルを開発し、地球環境保全策を提案するためのシミュレーションを実施する（計画研究C01、C02）。



公募研究には、計画研究で手薄な生物過程や地域を扱うことで領域がカバーする範囲を補完し、別の視点からの観測や解析を行うなど分野の厚みを加える役割を期待している（分野毎にA04、B03、C03）。総括班は、領域全体をとりまとめて分野間連携を促進し、研究成果のアウトリーチ、若手人材の育成などを推進する。本研究領域において全体の有機的連携を推進し、領域を特色付ける活動として以下の2点が

あげられる。①観測キャンペーン：観測サイトにすべての観測・モデル研究者が集合し、同時観測やモデル連携に関するディスカッションを行う。分野間の交流を促し、若手人材の実地教育の場となる。②デジタルバイオスフェアの開発：実験・観測分野から得られる多様なデータ・知見を統合化するため、生物圏モデルにおけるパラメータ改良、新しい定式化、検証などを通じて集約させる。

### 【これまでの学術の体系や方向を大きく変換・転換させる点】

生物圏は、領域が大きく海洋と陸域に分割され、また空間スケールの階層によって分子生物学、生理学、生態学などに、さらに基礎分野と応用分野（農学など）に分割されてきており、各学問領域を深めることはできても統一的な理解が困難となっていた。本研究領域では「統合生物圏科学」という間口の広い分野を設定することで、多様な研究分野を縦横にまたぐ視座を与える独自の科学を創出しようとしている。「地球環境を守る」ことを標榜し、研究領域の開始時点から具体的な問題を設定するなど、基礎科学だけでなく成果の社会還元を意識した応用科学的な性格を持つ点も従来とは一線を画す点である。それらの試みを「寄せ集め」で終わらせないよう、デジタルバイオスフェアという共通枠組みを採用したことは学術として未曾有の試みである。概念モデルではなく、定量的な結果を与える数値モデルを柱としたことで、個別の研究成果を具体性的問題として統合化することが可能になる。つまり統合化するための作業自体が研究要素となっており、試行錯誤から新しいアイデアが生まれる可能性がある。最新のリモートセンシング、DNA シーケンシング、AI に代表されるデータ科学、などのテクノロジーは各分野での新機軸をもたらしているが、本研究領域の統合生物圏科学ではそれらを取り込んだ上で既成概念にとられない分野横断的な観点から再構築し、より高いレベルでの理解に導くことを意図している。

### 【領域設定期間終了後に期待される成果】

本研究領域の成果は「統合生物圏科学」という新しい研究分野と、それを具体化したモデル「デジタルバイオスフェア」である。統合生物圏科学は、マイクロからマクロにまたがる新しい視点で生物圏を理解しようとする学際的学問として、特に本研究領域で育成を受けた若手研究者とコミュニティによって、期間終了後も様々なレベル・形態で発展を続けると期待される。デジタルバイオスフェアは、高分解能シミュレーションを行うことによって生物圏へのCO<sub>2</sub>吸収やバイオマス供給に関する定量的な推定結果を与えることで、地球環境変動に対する生物圏に基づく対策（一種のNature-based Solution）の検討に貢献し社会に成果還元することが期待される。デジタルバイオスフェアは、生物圏に関する新しい知見を加えることでモデル自体も進化していくことが望ましく、期間終了後もこの統合的枠組みを生かした研究が継続されて新しい成果を生み出していくことが期待される。本研究領域の実施によって整備された研究基盤、例えば観測サイトやデータセットの整備は、この分野の日本の基礎研究を下支えするインフラとして長期的で幅広い波及効果が期待される。

## 5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### ●【所見コメント1】

本研究領域は、分子生物学から地球科学など広範な分野の研究者が連携して、ミクロからグローバルまでの生物学的プロセスモデルをベースとした「デジタルバイオフィア」の開発を行い、地球環境問題の解決に迫ろうとする提案である。これまでの各空間スケールにおける生物・生態系の研究成果をモデルに取り入れるとともに、取組の遅れていた土壌プロセスや微生物活性を組み込み、生物学圏が地球環境に果たす役割を統合的に明らかにしようとしている点や、高解像度でデータベースの一元化を目指す点で新規性が高い。

#### 【領域の対応状況1】

高分解能な生物圏モデルの開発を通じて、各種の実験・観測によるデータベースの構築と知見の集約を図り、統合生物圏科学の構築を目指した研究を多面的に推進している。領域会合を開催して総括班評価者・学術調査官に意見を仰ぎ、また学会シンポジウム・集会（生態学会・2022年3月、2023年3月、2024年3月；森林学会・2024年3月）を開催して異分野の有識者から意見をいただくなど、総括班を中心とした取り組みを進めている。合計45件の多分野からなる公募研究に加わっていただき、土壌プロセスや微生物活性については当初計画した以上に分野横断的な研究が進行中である。また、観測とモデルの高解像度化や、オンラインツールを用いたデータ共有についても取り組みを進めている。

### ●【所見コメント2】

領域代表者や各計画研究の代表者は、これまで各分野で水準の高い研究を行っており、国際的にも高い研究成果が期待できる。マルチスケールの統合や社会経済的な要因の組み込みなど、チャレンジングな面を克服し、地球環境問題の解決に貢献できるプラットフォームが構築されることを期待する。

#### 【領域の対応状況2】

ミクロからマクロの生物学的スケールをシームレスに繋ぐことや、生物圏機能に影響を与える社会経済的な要因をモデルに組み込むことは本研究領域の大きなチャレンジと捉えている。全体会合や隔週セミナー、観測キャンペーンなどを実施して分野間の有機的連携を促進しており、またゲノムレベルの知見を生物圏モデルに取り入れる方策など共通課題に関する議論を行ってきた。領域発足後、多様な公募研究に参加していただいた結果、土壌プロセス、メタゲノム、衛星リモセンなどを軸とした新たな共同研究グループが立ち上がっている。それらの試み自体が新しく刺激的なものであり、科学的な知見だけでなく地球環境問題の解決に資するプラットフォーム構築に向けた成果が期待される。

### ●【所見コメント3】

一方で、モデルの精度・検証方法、定量的評価の信頼性などに関する目標設定、生物多様性や進化などを含む生物特有のプロセスへの更なるアプローチ、社会的課題を解決する実装面などで、公募研究を含めた充実が望まれる。

#### 【領域の対応状況3】

公募研究については、メタゲノム、進化、炭素循環プロセス、生物間相互作用、ブルーカーボン、リモートセンシングなど、幅広い分野から2022-2023年度は23件、2024-2025年度は22件の課題を採択させていただき、実験・観測・モデルの面で領域の実施内容を拡充補強することができた。計画研究による実測データの取得と公募研究の参加による実測データの拡充がモデルの精度・検証・定量的評価の信



頼性に関する研究を加速すると期待している。特に検証については衛星リモセンによって観測された新しい変数（クロロフィル蛍光、地上部バイオマスなど）や、機械学習アルゴリズムを用いて作成された広域データを比較に用いるベンチマーキングは、近年、モデル研究分野で注目されており本領域でも力を入れて取り組んでいる。また、多様な計画研究と公募研究の協同により、生物多様性・進化などの生物特有のプロセスへの挑戦的研究が可能となると考えている。実装面は、モデル開発が進む後期期間に特に重要な課題となるので、早い段階から情報を収集し、後半期の公募研究の募集のあり方を含めて（特に前期で応募が少なかった広域モデル・社会経済分野への呼びかけなど）、その方向性を固めていく。

## ●【留意事項】

社会経済的な側面を更に取り込んで、要因としての人間活動を評価できるプラットフォームとして構築することが望まれる。また、東アジアにおける研究を全球レベルでの問題の中でどう位置付けるかについては更なる検討が必要である。人材育成の面ではジェンダーバランスへの配慮も望まれる。

### 【領域の対応状況】

計画研究に加え、公募研究に社会経済モデルを用いた土地利用分析の課題に参加いただいて人間活動に関するシナリオベースの評価を実施中であり、後期期間ではその方向性を強化する方向である。立地的に東アジアでの研究が多くなるが、その状況を活用して生物圏モデルを高度化するデータを取得し、また人間活動の影響を評価する手法を開発することで、全球レベルの研究につなげていく。ジェンダーバランスについては、採択後に総括班員に女性メンバーに加わっていただき、公募研究でも女性代表者の課題を複数採択することができた。2024-2025 公募研究では、22 件中 6 件（約 27%）が女性研究者代表であり、その割合は科研費全体の 22.1%（2022 年度配分状況より）より高くなっている。引き続き人材育成面でのバランスを検討していく。

## ●【参考意見】

生物多様性の減少や生態系サービスの変化などのアウトプットについても、より積極的な考慮が必要である。また、問題解決のためには、科学技術の倫理的・法的制度・社会的課題の観点から検証できるような配慮が必要ではないか。

### 【領域の対応状況】

生物多様性や生態系サービスは重要な課題であり、本課題のデータや生物圏モデルを活用する方策を検討していく。領域代表者は IPBES Nexus 評価報告書の責任執筆者に選ばれ、そのような場で本領域の成果をより活用できるよう誘導していくのも 1 つの方策と考えている。特に社会実装を考える場合には、倫理的・法的制度・社会的課題の観点は不可欠となるので、領域内で検討するだけでなく、外部から識者を招いて客観的な視点で検証をしていただくなどの取り組みを検討している。

## 6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

### 計画研究 A01・彦坂班

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

計画研究 A01 班では、植物の光合成によって有機物となった炭素が土壤中に隔離されるまでのプロセスの速度を様々な森林で測定・解析し、その決定要因を探ることを目的とし、二つのアプローチによって研究を進めている。一つめのアプローチでは、様々な森林において、森林樹木の地上部炭素貯留量と、土壤中の炭素貯留量を測定し、そのばらつきを構成樹種の形質、気象、土壌要因によって説明する統計モデルを開発する。二つめのアプローチでは、土壤中の物理化学プロセスの多くが未解明であることに着目し、同位体でラベルした植物リターの分解プロセスを徹底的に追跡する。それぞれについて現状と今後の計画を記す。

#### a) 森林炭素循環のモデル化

野外調査: 研究開始以来、日本国内において新たに12ヶ所で土壌のサンプリングと周囲の植生調査を行った(図 A01-1、A01-2)。最大で深さ1.2 mまで土壌試料を採取し、炭素放射性同位体を用いた年代測定、土壌有機炭素含量測定、土壌 pH など酸的特性測定、母材の風化指標成分測定、微生物ゲノムなどの解析を行った。すでに土壌有機炭素含量と放射性炭素同位体の測定を終えており、今後は土壌炭素の貯留能や代謝回転速度の違いを規定している要因を解析していく。

形質評価: 国内の森林構成樹種の葉と材の形質情報は存在するが、根の情報がない。圃場実験を行い、2年に分けて、計60種を2年間育成し、形質データの取得と成長解析を行った。R6年度に全ての実験を終え、データ解析を行う予定である。

統計モデル: 森林の地上部(幹)と地下部(土壌炭素)が蓄積する速度に関するパラメータを各森林で得て、それぞれの速度を気象、土壌の母材、植物形質などの関数として表し、森林の炭素蓄積速度の環境依存性を表すモデルを作成する。

#### b) 土壌中有機化合物の追跡

この研究は $^{13}\text{C}$ と $^{15}\text{N}$ でラベルした植物のリターを作製することから始まる。落葉広葉樹コナラと常緑広葉樹アラカシの葉と根のリターを作製した。さらに、土壌有機化合物の中でも炭素隔離に重要と考えられる微生物菌体遺骸(ネクロマス)の解析法を確立した。これまで粕谷試験地の一断面について測定を進め、4種のアミノ糖の定量に成功した。今後はこれまでに採取した土壌試料全てについて測定するとともに、ラベルリターの分解実験を行い、土壌分解プロセスのモデル化を行う。

連携する公募研究 A03 では、温暖化条件で土壌からの $^{14}\text{CO}_2$ 放出量を測定することで、温暖化による炭素年代の変化を解析する研究(安藤麻里子)、風乾土壌から水抽出した水溶性有機物(WEOM)の分析を進め、WEOM分析の有用性を示すことを試みた研究(永野博彦)、ゲノム情報から光合成速度などの葉特性を推定する研究(白井一正)を行った。

図 A01-1  
調査地点の地図



(2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

(計画研究 A01) 森林の地上部バイオマスの決定要因

国内の 51 サイトの森林樹木の地上部炭素貯留量、構成樹種の形質データと気象モデルによる気象推定情報を用いて、森林の地上部炭素貯留量を説明する統計モデルを作成した。天然林に絞って解析を行った結果、最適モデルにおいて選択された要因は、年平均気温、構成樹種の葉面積あたり葉重の群集平均値、主要構成種がスギか否かの 3 つであった (投稿論文準備中)。

(計画研究 A01) 葉形質と根形質のスペクトルは共生菌根菌種によって異なる

全ての維管束植物の葉形質は 1 本の軸上に収斂することが知られ、葉経済スペクトルと呼ばれる。根形質にも同様の収斂があることが示唆されるが、葉形質と根形質の間に相関があるかは先行研究の間で意見が分かれていた。本研究は、葉形質と根形質の間には強い相関が存在するが、切片が共生菌根菌種によって大きく異なるため、共生菌根種を無視すると相関が弱くなることを見出した (改訂稿審査中)。

(計画研究 A01) 土壌中微生物菌体遺骸 (ネクロマス) の分布解析

粕谷試験地の 1 断面について測定を進め、ネクロマス炭素の濃度が深層ほど低いこと、土壌炭素中に締める割合は 11~69 % とかなり多いことを明らかにした。

(公募研究 A03) 異なる年代の炭素化合物の分解への温暖化影響 (安藤麻里子)

国内 5 カ所の森林 (宮崎、広島、つくば、白神、天塩) について土壌呼吸の放射性同位体比を調べた結果 (図 A01-3)、天塩以外の 4 サイトでは表層リターに近い比較的新しい炭素が微生物呼吸の主な起源だが、天塩では古い炭素の放出が認められ、温暖化によって古い炭素化合物の分解が促進されることが明らかとなった。

(公募研究 A03) 風乾土壌から水抽出した水溶性有機物 (WEOM) (永野博彦)

風乾土 WEOM とバルク土壌の安定同位体存在比の差に着目することで、土壌有機物分解において重要な微生物が実際に使用している有機物の生成年代や代謝レベル、また、微生物による基質有機物の同化と異化のバランスなどを推定できる可能性を示し、国際誌に公表した (Nagano et al. 2023)

(公募研究 A03) ゲノム情報から葉形質を推定する (白井一正)

文献からゲノム情報と光合成速度などの葉形質情報を収集し、機械学習によってゲノム情報から葉形質情報を高精度で推定するモデルを構築した (論文準備中)。

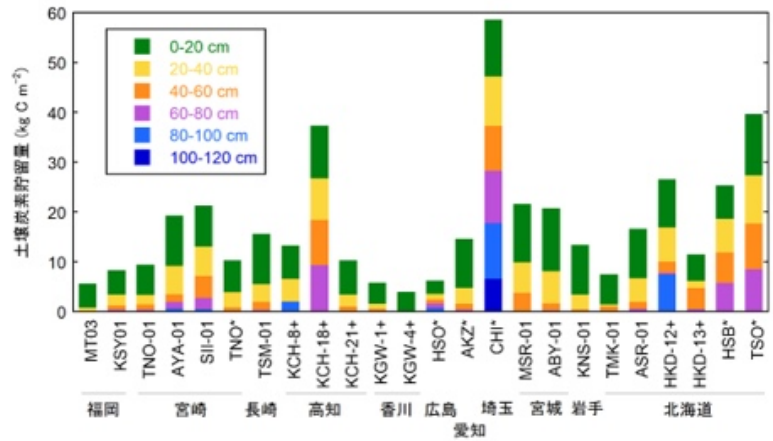


図 A01-2 各調査地における深さ別の土壌中有機炭素貯留量。本プロジェクト以外で得られた結果も示す。

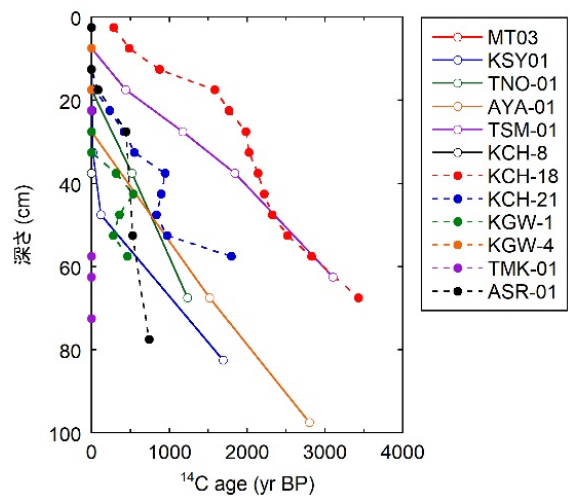


図 A01-3 各調査地における深さ別の土壌中有機炭素 <sup>14</sup>C 年代。本プロジェクト以外で得られた結果も示す。

**計画研究 A02・小野田班**

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

計画研究 A02 では、気候変動下における森林の機能の維持・向上に資する、樹木のゲノム・形質・生態を有機的に連結した新しいアプローチを提案・実行することを目的としている。本計画班には、2つの研究グループ、形質チームとゲノムチームがあり、形質チームは、UAV-LiDAR (Unmanned aerial vehicles-Light detection and ranging) を導入し、樹冠面積や樹高などの樹冠形質を測定する方法を開発・実施することにより、森林生態系機能の評価により直接的につながるデータを収集することを目指してきた。またゲノムチームは、温暖化に伴う樹種の生育適地が移動とその適応の程度を、ゲノムレベルから明らかにしようとしてきた。

形質チームは、R3 年度に導入した UAV-LiDAR から得られる膨大な点群データから、地形モデルや樹冠高モデルを効率的に作成するワークフローを完成させた(図 A02-1ab)。それをベンチャー企業とも連携し、汎用ソフト (DF-LAT) として一般化した (2023 年 9 月にリリース)。またこの技術を最初に適用した和歌山での調査結果について、論文化を進めた (投稿中)。R3 年度に開発した森林調査方法を、R4-R5 年の 2 年間に於いて、全国の森林固定試験地に適用し、詳細な樹高情報や樹冠情報、そして毎木データとの紐付けをおこなった。調査地点数は、当初の予定の 2 倍を超える全国の 23ヶ所でおこなった(図 A02-1c)。これらの調査データにより、4000 本を超える林冠木について、樹種、樹高、樹冠面積、胸高直径データが整備され、100 種以上の樹木について、樹冠情報から現存量を推定する式を構築した(図 A02-1d)。また各サイトのデータについては、サイト代表者に無償で提供し、様々な研究や評価に役立てていただいている。

ゲノムチームは、気候変動に対する森林の進化的応答を解明するため、重要な森林構成種であるミズナラとコナラを対象に、遺伝子浸透と適応進化動態の検証を行った。宮城県釜ノ沢、滋賀県比良山、岡山県蒜山、宮崎県霧島山にある 4つの交雑帯を調査地に選定し、多検体の全ゲノム分析を実施した。これまで、3 交雑帯での分析を完了させており、これらの交雑帯において 6 世代以上種間交雑が維持されていることが明らかになった(図 A02-2A)。雑種株のゲノムにおけるミズナラ由来領域、コナラ由来領域の割合を調べた結果、釜ノ沢、比良山では標高に応じて、ゲノムがコナラからミズナラへシフトしていることが示された(図 A02-2B)。また、乾燥気候と関係する葉形質(個葉面積・葉形の複雑さ)とゲノムのミズナラ由来領域の割合との関係も示唆された。これらの結果より、気温や降水量などの気候要因によって標高間でのミズナラ・コナラの適応度の違いを生み、遺伝子浸透の勾配を決定している可能性が示された。

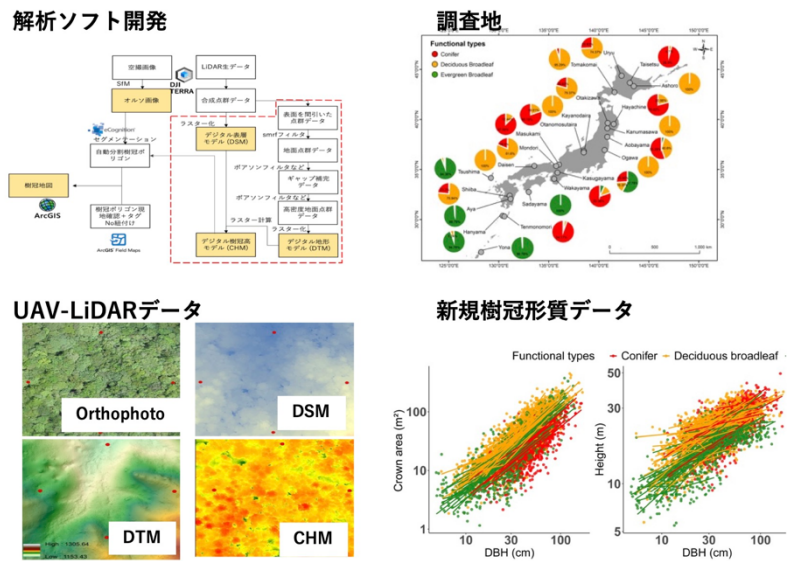


図 A02-1 UAV-LiDAR による研究展開。(a)解析フローの確立とソフト開発、(b)UAV-LiDAR から得られるデータの一例、(c)全国調査地、(d)樹冠形質データの例。

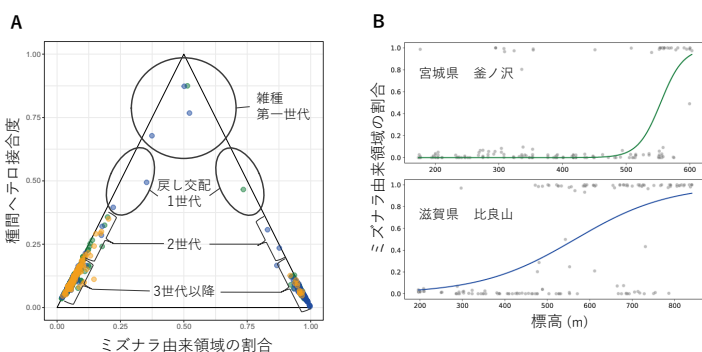


図 A02-2 ミズナラ・コナラ交雑帯の遺伝的構造。(A) 種間マーカーを用いたヘテロ接合度とミズナラ由来領域の割合のプロット。色の違いはサイトの違いを示す。(B)ミズナラ由来領域の割合と標高の関係。

また広域分布植物の環境適応メカニズムをゲノム情報から解明するために、広い地理範囲に分布するキク科アキノキリンソウを対象に、世界中からサンプルを収集し、全ゲノム解析を実施した。北極圏のゲノムデータを欧州の南方集団と比較した結果、開花期や細胞壁形成、シュート分枝に関与する可能性のある遺伝子群が緯度に沿って分化していることが明らかになった。また遺伝子発現パターンを比較する目的で、バイオトロンで北極圏と非北極圏集団の2系統を栽培し、葉組織のRNA-seq解析を実施し、北極圏の白夜条件への適応に関与していると考えられる遺伝子群が多く検出された。

## (2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

**(計画研究 A02 形質チーム)** UAV-LiDAR の大量の点群データから地形モデルや樹冠高モデルを効率的に作成するワークフローを完成させ、汎用ソフト (DF-LAT) としてリリースした。開発した森林調査方法を、23 の全国の森林固定試験地に適用し、4000 本を超える林冠木について、樹種、樹高、樹冠面積、胸高直径データを整備し、100 種以上の樹木について、樹冠情報から現存量を推定する式を構築した。また各サイトのデータについては、公募班やサイト代表者に無償で提供し、様々な研究や評価に役立てている。また UAV に関するシンポジウムを B01 班、B02 班、公募班 (桑江班) と共に開催した。

**(計画研究 A02 ゲノムチーム)** 日本の主要な森林構成種であるミズナラとコナラを対象に、遺伝子浸透と適応進化動態の検証を行った。宮城県から宮崎県に至る4つの交雑帯を調査地に選定し、多検体の全ゲノム解析を実施した結果、気温や降水量などの気候要因によって標高間でのミズナラ・コナラの適応度の違いを生み、遺伝子浸透の勾配を決定している可能性が示された。またユーラシア大陸に広く分布するアキノキリンソウのゲノム解析を進め、北上する植物の適応進化メカニズムを明らかにした。

## **(公募研究・PI 内海俊介) 環境 DNA と適応形質の時空間変異によって明らかにする社会-生態-進化連関**

植物形質関連遺伝子のジェノタイプングを都市-郊外景観において実施し、環境傾度に対する適応進化に関する精細な空間マッピングを実現した。また、環境 DNA を用いることにより、群集に関するメタバーコーディングと種内の SNV データについての包括的な時系列データの取得に成功し、因果推論により野外生態系における群集動態と進化動態のフィードバックの実態が明らかとなった。

## **(公募研究・飯尾 淳弘) 温帯性樹木の幹内部二酸化炭素フラックスの種多様性**

幹の呼吸能力を高い精度で評価するために、樹液流による CO<sub>2</sub> の幹内輸送量を温帯の様々な樹種について調べた。呼吸で発生した CO<sub>2</sub> のうち、最大で 40% が樹液によって上方へ輸送された。輸送量の種による違いは明確でなく、呼吸が活発になるほど輸送量が大きくなる可能性が示唆された。

## **(公募研究・西岡 (石原) 正恵) 樹木における匂い受容を介した環境ストレスと病虫害への応答トリプルの解明**

乾燥化と葉の食害を模した匂い受容実験を、ブナを対象におこなった。20 種類の匂い物質を同定し、その組成は乾燥化によって変化した。葉を切除した個体からの匂いを受容した他個体は、サリチル酸を蓄積し植食者への防衛力を高めた。乾燥下にある個体でも同様の防衛反応を示した。地球温暖化に伴う実際の樹木の応答予測の高精度化に寄与した。

## **(公募研究・中山 恵介) 湖沼における淡水ブルーカーボン増強に向けた CO<sub>2</sub> 調整機能の解明:**

淡水域における二酸化炭素の吸収ポテンシャル (Freshwater Carbon) について検討を行った。水草が存在することにより特殊な成層場が発生することで、表水層における水中二酸化炭素分圧が大きく低下することがわかった。湖沼・貯水池・ため池における二酸化炭素の吸収量が、沿岸域のブルーカーボンに匹敵する可能性が示された。

**計画研究 A03・近藤班**

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時まで  
にどこまで研究が進展しているのか

計画研究 A03 では、培養実験系と非線形時系列解析、フィールド実験を組み合わせたアプローチで、土壤微生物の群集構造が有機物分解や土壤呼吸に影響するメカニズム・原理を明らかにすることを目的とする。本目標達成のため以下の4つの研究課題を設定した：

課題1【実験培養系での解析】異なる環境条件（温度・添加炭素源）下での土壤微生物群集の培養実験を実施し、添加炭素源分解資化能と固定能に関わる菌叢・機能遺伝子組成および全有機体炭素量の経時変化のデータを取得し、課題2の解析に供する。

課題2【種間・機能遺伝子間相互作用の同定】あらかじめ支配方程式を仮定しない、データ駆動型のモデリングを利用することで、微生物群集・機能遺伝子群の相互作用ネットワークの時間変動を定量的に評価、そこから相互作用ネットワークの主要な相互作用モードを推定し、そこから分解能を大きく向上させる機能を持つモードを特定する。

課題3【実験系での検証（培養系・マイクロコズム）】課題2で同定された炭素源分解資化能の鍵となる群集・メタゲノム構造・環境要因について、培養系および自然環境を模したマイクロコズムを用いて、その正当性を実験的に検証すると共に、当該機能を操作する方策を提示する。

課題4【土壤微生物群集機能予測モデルの構築】課題3で明らかになるブースト菌叢に着目し、微生物群集機能の定量・局所的な予測を実現するモデル、および微生物群集機能の定性・大域的な予測を実現する炭素源代謝数理モデルを開発する。

中間評価実施時までの目標としていた課題1と課題2終了を達成することができた。研究課題1については、分解し易さの異なる炭素源を添加した培養実験によって、添加炭素源分解資化能と固定能に関わる菌叢と機能遺伝子の経時変化データを獲得できた。また、課題2では観察時系列データから種間相互作用を超高精度・ノイズ頑健に推定する手法LMDr(Local-Manifold-Distance based locally weighted regression)の開発に成功したほか、動的モード分解(DMD)の手法検討も進み、課題1で得られた時系列データを元に三つの重要なモードを検出できた。



**(2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果**

**(計画研究 B02) 土壤微生物機能発揮の鍵となる群集・メタゲノム構造の特定**

課題1- 森林土壌から得られた抽出物を液体培地により培養した。炭素源として、グルコース、コハク酸、ナフタレン、フェナントレン、 $\gamma$ -HCH を与えた。2週間、12時間ごとにサンプリングし、メタゲノム手法によりサンプルに含まれる OTU を特定した。その結果、微生物群衆の主組成変動を示す時系列データを獲得した。また炭素源についても、炭素量の変化を追跡した。多変量解析により、OTU・属の変化は炭素源ごとにクラスター化でき(図 A03-1)、群集組成変化は炭素源の変化に対応することが示唆される。時系列データに基づく因果推論手法を利用することで、異なる炭素源で培養した微生物群集の相互作用ネットワークがどのように異なるかを推定した(図 A03-2)。強い相互作用に着目すると、正の相互作用は負の相互作用と同数か少し多い程度であった。5つの異なる炭素源を用いた場合を比較すると、 $\gamma$ -HCH を与えた実験系において強い相互作用が増加し続ける特徴的な変動が観察された。

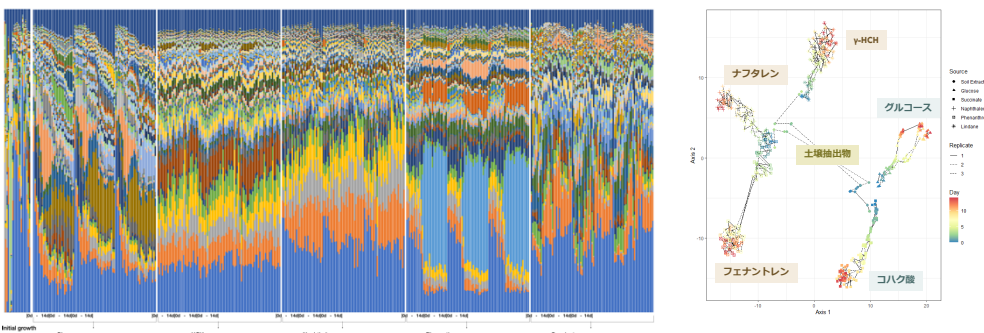


図 A03-1. 培養実験における OTU の時間変動(左)と t-SNE による変動の可視化

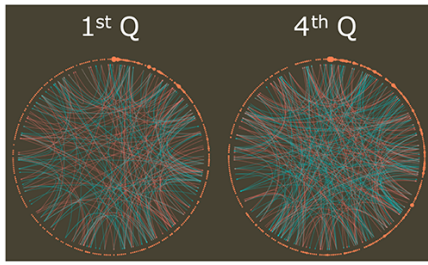


図 A03-2. グルコースを炭素源にした場合の、第一・四半期におけるネットワーク。

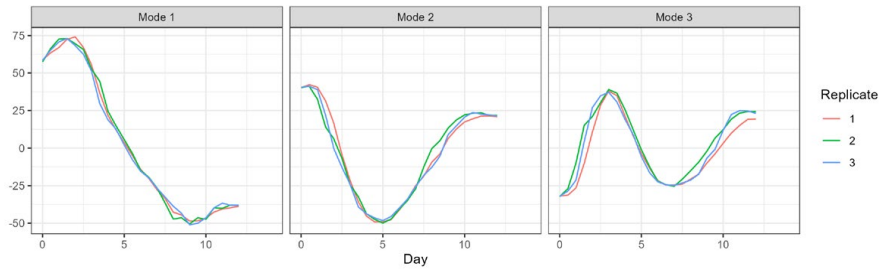


図 A03-3. コハク酸を炭素源とした実験系における時系列データから推定された3つの動的モード。

バイオマス変動と相互作用変動の両方に対して動的モード分解を行ったところ、群集を大きく変動させている3つの動的モードを検出することができた。また、それぞれの動的モードに対して、特に貢献度が大きいOTUを抽出することができた。これらのOTUは対応する炭素源の分解に関わる「ブースト菌相」の候補として考えることができる。

**(公募研究 PI 村瀬 潤) 土壌マイクロバイオームが固定するCO<sub>2</sub>の動態解明**

微生物光合成が土壌の炭素循環に及ぼす影響を検証した。農地(水田、畑地、草地)土壌は光照射下で高いCO<sub>2</sub>吸収能力を示し、植生下に相当する弱光でもCO<sub>2</sub>吸収が確認された。藍藻、緑藻、珪藻が光条件でCO<sub>2</sub>を固定していること、固定された炭素は土壌の炭素貯留に寄与する可能性が示された。フィールド調査においても光照射は土壌呼吸による農地からのCO<sub>2</sub>放出を部分的に相殺する効果があることが明らかとなり、土壌の炭素循環に光合成微生物が有意に関与することが示された。光のほかには施肥や水分が土壌微生物の光合成に影響しており、将来的にはそのポテンシャルを環境要因から推定できる可能性が示された。

**(公募研究 PI 田中 健太) 森林と草原に何種の微生物、何円の価値が含まれるか?—植物共生微生物に着目して—**

長野県・菅平高原のスキー場草原及び隣接する森林の計37地点で、維管束植物約200種を採集し、真菌と細菌のDNAメタバーコーディングを行った。これらの植物から約50の真菌株を分離培養して真菌2種・細菌4種の検定菌に対する抗菌活性を調べた。草原・森林の各7地点で100m<sup>2</sup>、草原1地点で1haの植生調査を行って植物種数—面積関係を調べ、真菌種数—植物種数関係をもとに真菌種数—面積関係を求めた。抗菌活性の保持割合、創薬成功率、成功時利益、開発費用から真菌1種あたりの遺伝資源価値を推定し、遺伝資源価値—面積関係を真菌について求めた。また、真菌と放線菌の検出種数の比や、抗菌活性保持率の比を用い、放線菌を含めた遺伝資源価値も試算した。草原は小さな面積での植物種数・微生物種数・遺伝資源価値が森林よりもはるかに高かった。生息地に依存している遺伝資源価値や、遺伝資源価値の減少速度は草原で大きく、遺伝資源の側面から見たときに草原を保全する重要性が高いことが示された。

**(公募研究 PI 西村 陽介) ウイルスを捉えて生物圏機能を根底から理解する—革新的メタゲノム解析技術の開発—**

公共データベースのビッグデータを解析して、環境中に存在するウイルスの知られざる多様性を明らかにした。(1) DNAウイルスについては、様々な環境に由来する大規模メタゲノムデータ(約100兆塩基対)からウイルスゲノムを探索し、1600万の配列のウイルスゲノム(うち、7万が完全長ゲノム)を同定した。ウイルスの由来する環境と機能遺伝子について情報整備を行い、ウイルスが持つ機能遺伝子は環境によって異なり、生息環境がウイルスの生存戦略に影響を与えることを明らかにした。(2) RNAウイルスは必須遺伝子RdRpをマーカーとして検出されるが、RdRpをコードするペプチド鎖が2つに分かれている「分割型」のRdRpが複数発見されている。「分割型」RdRpを探索する解析パイプラインを新規開発し、公共ビッグデータを用いて網羅的に同定した結果、分割型RdRpの未知の系統多様性を明らかにした。

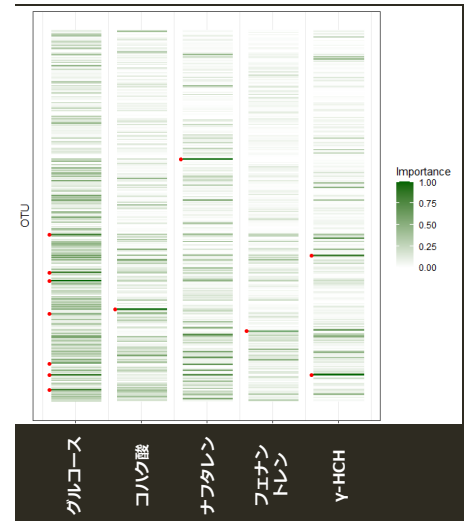


図 A03-4. 検出されたブースト菌相の候補。

## 計画研究 B01・熊谷班

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進んでいるのか

計画研究「東ユーラシア低～高緯度域を縦断した大気－森林生態系の物質交換機能解明」の最終目的は、デジタルバイオスフェアの完成に向けて、生態系機能に関する長期広域観測・大規模野外操作実験のコンビネーションにより(1)モデルパラメータの確保と(2)モデルの再現性担保を行うことである。本研究領域全体の目的がデジタルバイオスフェアの完成とその運用にある以上、本計画研究の目的は、現段階で、到達点に対し7割ほどの進展が理想的であると考えられる。以下に本計画研究と連携公募研究の成果として、まずは、広域統合解析の結果、ついで、後に広域統合解析を目論んだ各サイトの結果について記述する。なお、本計画研究は B03 の 11 件を含む多くの公募研究と連携し実施した。

(2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

東アジアグリーンベルトにおける生態系スケールの植物生理特性を評価するために、JapanFlux に参画研究者がこれまで実施してきたタワーフラックスのデータを収集し、JapanFlux database の構築を進めた。1990－2023 年までのデータ、70 地点の観測サイトから、合計 539 site years のデータが収集された。現在、欠測補完、フラックス分離をして、FLUXNET フォーマットで出力するコードの整備がほぼ完了している。今後、このデータを使って生態系スケールでの植物生理特性の評価を進め、デジタルバイオスフェアに適用可能なモデルパラメータの時間変化を含む全球マップを作成していく。局地スケール、例えば、マレーシア・ボルネオ熱帯雨林において、エルニーニョ南方振動に合わせて変化する生理特性が、当該地域の炭素・水循環の決定要因であった、等の研究成果が副次的に得られた(図 B01-1)。

また、日本の森林生態系の長期変化とそのメカニズムについて、「大規模データと長期サンプルの解析」と「シミュレーションモデルの構築」のアプローチによって明らかにしようとしている。前者では、1200ヶ所のプロットデータの解析により100年前の全国の森林の姿を再現しつつあるほか、7ヶ所の森林の20年間のリターフォールサンプルの化学分析によって全国で窒素利用可能性が低下してきていることを明らかにしつつある。後者においては、動的植生動態モデル(SEIB-DGVM)に新たに構築したササモジュールを組み込むことで、より現実的な針広混交林のダイナミクスを再現可能にしつつある。また、生物起源揮発性有機化合物(BVOCs)の時空間動態とその要因を解明するため、日本各地のスギが栽培されている共通圃場を利用して、BVOCsの測定と葉圏微生物群集の調査を行った(公募・B03班との協同)。その結果、スギのBVOCs放出と葉圏微生物群集組成には産地間差が認められたが、個体差と圃場間差も大きく、これらの変動には遺伝的要因と環境要因の双方が影響していた。

北海道、関東、九州の各2サイトから採取した天然林・人工林の土壌を用いて、降水量変化と温暖化の処理を施したメソコズム実験を実施した。土壌微生物群集の分解多機能性に対する降水量変化の影響は天然林も人工林もサイトによって異なった一方、温暖化は天然林でのみ一部のサイトで負の影響が見られた。降水量変化と温暖化の影響と環境条件(気候・土壌要因)の関係を単回帰で解析した結果、天然林では降水量変化の影響は土壌粒度と有意な関係が見られたが、人工林では有意な関係は見られなかった。

陸域の土壌に蓄積した膨大な有機炭素の動態に及ぼす気候変動の影響とそのメカニズムを解明するために、「自動開閉チャンバー観測ネットワーク」を活用し、日本を中心に東ユーラシア地域を網羅する代表的な森林生態系における温暖化操作実験を継続しながら観測データに基づき、各サイトにおける土壌CO<sub>2</sub>フラックスの時空間変動や温暖化に対する応答メカニズムと機械学習モデルによる広域特性を評価した(公募・B03班)。

モデルパラメータの確保、と言う観点で、様々な環境条件下にある各サイトで長期フラックス観測に基づく生態系機能特性が得られている。今後、以下の知見を統合した解析を進めることに留意されたい。

a) カンボジア王国の乾燥常緑林でのフラックス観測結果から、当該森林の年間蒸発散量は約1400mm/年、純生態系炭素交換速度(NEE)は約100gC/m<sup>2</sup>/年という値を得た。エルニーニョによる異常乾燥時に蒸散量が減少し、その要因は地下水面の低下であることも明らかになった。さらに、NEEや日中の生

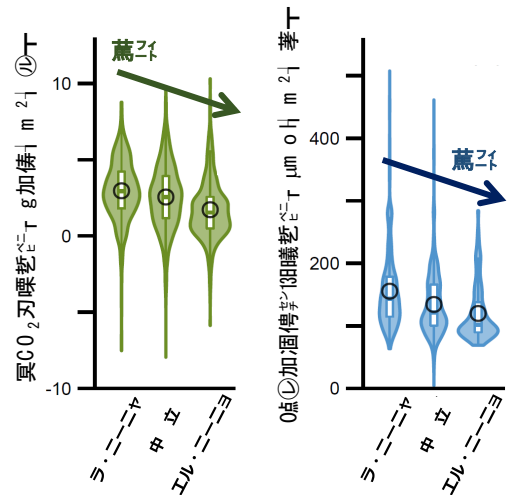


図 B01-1 ボルネオ熱帯雨林のラ・ニーニャ、中立、エル・ニーニョ条件下での森林生産力(純CO<sub>2</sub>吸収速度)とRubiscoの最大能力(最大炭酸固定反応速度)



態系の水利用効率値（「総1次生産（GPP）」/水蒸気フラックス値）の季節変動は乾季のリター量の急増とその後の展葉に影響を受けていることを見出した。

**b)** 東南アジア熱帯雨林で優占するフタバガキ科の稚樹6種について、人工的な強度乾燥条件下での生理生態的な応答を調べ、土壌含水率の低下に伴う応答には明確な樹種間差があり大きく3つのグループに分かれることを明らかにした。また、マレーシア・サラワク州のアブラヤシ農園において、アブラヤシの光合成や関連する葉の形質を調べ、最大光合成速度（ $A_{max}$ ）と最大電子伝達速度（ $J_{max}$ ）は葉のリン濃度と正の相関があり、光合成能力がリンによって制限されていること、アブラヤシ農園では施肥によって十分なリンが供給されており、アブラヤシの高い光合成能力の維持に寄与していることを明らかにした。さらに、マレーシアの熱帯二次林の林齢を、樹木の木部の髄に含まれる放射性炭素同位体比から高精度に特定する手法を開発した。

**c)** 岐阜大学高山試験地の落葉広葉樹林において、冷温帯落葉広葉樹林の炭素固定機能の時空間的変動の検出と気象学的・生理生態学的メカニズムの解明を目的として、林冠木個葉の光合成特性・葉形質の季節変化パターンの解明とモデル化、大気—森林間の $CO_2$ フラックスの観測、個葉及び林冠の分光反射特性の光合成機能指標としての検証、森林モニタリングシステム（Phenological Eyes Network）の維持管理や新型カメラ開発支援を進めた。 $CO_2$ フラックス観測の結果、当該森林ではNEPやGPPの年変動が大きく、これらはエルニーニョなどの極端気象の影響を受けていること、さらに最近10年ほどでは日射量の増加や飽差の上昇に伴い夏期のGPPが低下していることが判明した。今後、林冠木の生理生態学的特性を用いたモデル解析により要因分析を行う。さらに、同試験地、スギ林サイトにおいて、豪雪による自然攪乱が植生動態と炭素循環に及ぼす影響について調べた結果、攪乱前（2006—2014年）の純生態系生産（NEP）は約 $500\text{ g C/m}^2/\text{年}$ である一方、攪乱後5～8年後（2019—2022年）の平均NEPは $900\text{ g C/m}^2/\text{年}$ を超えた。その変動要因は、GPPの緩やかな変化に対して、生態系呼吸（RE）の明瞭な低下であった。GPPの緩やかな変化の主要因は、2014年の攪乱後の落葉低木の侵入であることが示唆された。他方、REの明瞭な低下は、倒木によるスギ個体の地上部呼吸量の減少、雪害によって生じた粗大有機物からの分解呼吸量の増加の抑制等が要因として挙げられる。

**d)** 秋田県のスギ林サイトにおいて、4割間伐すると、蒸散量は7割まで減少するが、数年後には元のレベルに戻ることが明らかとなった。その要因は、間伐による樹冠下部の光環境の改善による辺材深部の樹液流動の活性化であると推定された。また、筑波山の人工林サイトにおいて、一般に高オゾン濃度への耐性が高いとされているスギ・ヒノキ林でオゾン濃度とフラックス観測を同期して実施した結果、2月～春分の時期にオゾン濃度が55ppbを超えると、NEEが低下する傾向が見られることが判明した。

**e)** 北海道大学苫小牧研究林において、針葉樹林と広葉樹林の降水レジームの変化に対する応答を明らかにするため、降雨遮断実験を立ち上げた。現在まで、降雨遮断実験区の適地選定や設計、事前観測を実施してきた。強調すべきこととして、降雨減少が火山地帯の土壤に埋没する有機態炭素へ及ぼす影響についてミミズの機能に注目して検証する実験について、実験のセットアップを行うとともに、重要となる予備実験を行った。予備実験の主な成果として、土壤深層に埋没している有機物が土壤表層の有機物と比べて放射性炭素年代に大きな違いがみられた一方で、有機態炭素や窒素、そして含水率の値に2層間に統計的に有意な違いが見られなかった。このことは、ミミズの餌として土壤深層に埋没している有機物と土壤表層の有機物の間で質的な差異は小さいこと、ミミズに消費されて放出される二酸化炭素の放射性炭素年代は大きく異なることを示唆している。また、一連の予備実験の中で、土壤中の水分、有機物や微生物呼吸活性を迅速に計測する分光観測法の開発・検討を行い、その有効性を証明した。

モデルパラメータについて、より精緻・詳細かつ一般化可能なメカニズムを理解することを目論み、新たな計測テクノロジーの開発が進められている。以下にいくつかの例を示す。

**a)** 気候変動下での樹木の乾燥ストレス耐性や低温耐性を評価する上で、樹木の幹の通水機能と木部構造を知ることは重要である。幹の横断面での樹液流速分布を可視化できる手法としてMRIがある。従来、樹液流速可視化には、QSI（q-space imaging）法が用いられてきたが、計算処理が複雑で撮像に時間がかかること、高性能のMRIを必要とすることなどの制限があった。そこで、旧来からある簡便な手法であるPSI（phase shift imaging）により可視化した流速とプロトン密度から樹液流速密度を求める手法を提案した。

**b)** 葉の生理特性は種ごと、また環境条件に応じて複雑に変化し、季節から年スケールの長期の $CO_2$ 吸収に強く影響を及ぼす。その知見を収集することを目的とし、植物のガス交換（蒸散・光合成）に関する現象を連続的に、かつ電源や群落の状態などの制約に縛られない、簡便・安価な観測技術、特に樹液流センサーとクロロフィル蛍光センサーの開発を進めている。

**c)** タワーレス渦相関システム搭載ドローンによって大気—生態系間 $CO_2$ フラックスを実測し、タワーフラックスデータとの比較により、ドローンのプロペラによって発生する鉛直方向の風の影響をさらに軽減するための改良の必要性など、今後の課題を抽出した（公募・B03班）。

## 計画研究 B02・小林班

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

計画研究 B02 では森林生態系と沿岸海洋生態系に着目し、低・中高度プラットフォーム (UAV、航空機) 及び衛星搭載センサによるハイパースペクトル観測データとライダー観測により、生態系の構造・光合成機能及び生物群集の多様性 (植物プランクトン種組成など) の広域推定を試みる。この計画の達成のため、本学術変革で実施する大規模フィールドキャンペーンサイトの観測エリア (北海道大学苫小牧研究林、アラスカ州内陸の疎林、東京湾、タイランド湾) でリモートセンシング観測や現場検証実験を実施し、フィールドで得られた生物機能情報やプランクトン種情報の広域スケール (地域、アジア、グローバル) へのアップスケール手法の開発を目指す。

計画研究 B02 では中間評価までに、東京湾及び北海道の森林における観測キャンペーンに参加し、(1) 森林の個葉データの収集や沿岸生態系の水質、植物プランクトン (赤潮などの有害藻類グループ)、分光観測の取得とデータ解析、(2) UAV や航空機によるハイパースペクトルデータやライダーデータの取得と分析、さらに(3)アジア地域やグローバルにおける赤潮分布や陸上及び沿岸の光合成機能データ推定の試行などを行うところまで研究が進展した。

連携する公募研究 B03 では、北海道の森林の観測キャンペーンでの共同調査や各公募研究の個別の調査を通じて、様々な樹種の個葉のスペクトルデータの収集とその特徴分析 (PI 秋津朋子)、国内森林サイトでの森林生態系の太陽光励起クロロフィル蛍光の観測と解析 (PI 両角友喜)、UAV による高解像度空中写真と AI 技術による樹種判別 (PI 伊勢武史) などの研究を進めた。また、沿岸生態系では、沿岸域のための固有光学特性推定法の開発 (PI 比嘉紘士) を実施した。全球スケールへの展開研究では、観測データの複合利用による陸域生態系広域炭素収支推定手法の検討 (PI 市井和仁) や浅海生態系 (マングローブ、サンゴ礁、海草藻場、海藻藻場、塩性湿地) の全球分布と面積変化を予測するところまで進展した。

(2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

(計画研究 B02) 広域植物機能推定のための北方林矮性低木の植物形質データの取得及び分析

アラスカ内陸の不連続な永久凍土地域に同所的に生息する 2 つの密接に関連した主要な低木である 2 種の Labrador Tea (ツツジ科シャクナゲ亜科レダム) に焦点を当て、北方林の下層を支配する低木種が永久凍土の状態にどのように反応するかについて解析した。*R. groenlandicum* は活動層が厚く、暗く乾燥した条件下で多く生息するのに対し、*R. tomentosum* は活動層が浅く明るく湿った条件下でよく見られるなど、不均一な永久凍土分布により、2 種間の生息地の分離が発生していることが明らかとなった。

(計画研究 B02) 広域植物機能推定のための温帯林の植物形質データの取得及び分析 (B01、公募研究 PI・秋津朋子との共同研究)

北海道の森林における葉レベルの植物の機能形質と分光反射率と透過率の樹冠と樹冠にわたる変動の調査を行い両者の関係を考察した。各樹木について航空機で観測できる 2 つの異なる樹冠位置 (樹冠の最上部と樹冠周囲) の陽葉を取得し、葉形質 (炭素 (C) 濃度、 $\delta^{13}\text{C}$ 、比葉面積 (LMA)、クロロフィル、カロテノイドなど) と、個葉のスペクトルの違いを分析した。この結果、スペクトル情報や植物の機能的特性は樹冠位置によって有意に異なっていることなどが明らかとなった。

(計画研究 B02) 北海道厚岸町における赤潮の検出と分析 (公募研究 PI・比嘉紘士との共同研究)

渦鞭毛藻 (*K. selliformis*) によって引き起こされる深刻な赤潮現象が、2021 年の秋に北海道南東部沖の海域で発生した。将来の赤潮の発生に対応するため、海色に基づいた早期警報手法の需要が高まっている。そこで、GCOM-C/SGLI センサの反射率から総吸収係数 ( $a$ ) を計算し、赤潮の原因プランクトン (*K. selliformis*) の検出可能性を評価した。この結果 SGLI で取得したクロロフィル  $a$  濃度の同じ範囲内で、波長 530nm での吸収係数が、珪藻のブルーム時よりも *K. selliformis* のブルーム時の方が低くなる傾向があることを明らかにした。

(計画研究 B02) アジア沿岸海域モニタリングシステム (A-COP) の試作 (公募研究 PI・比嘉紘士との共同研究)

準リアルタイムで赤潮を監視する赤潮検出アルゴリズムを開発した。A-COP Web サイトのプロトタイプ

イプを準備した(図 B02-1。今後 HP で情報発信予定)。  
(公募研究・PI 秋津朋子) 個葉のスペクトル分析による衛星植生指数(NDVI, PRI, CI)変動の考察  
(B02 との共同研究)

GCOM-C/SGLI センサから得られる植生指数の特性を葉の光学特性の観点から明らかにし、クロロフィル量に敏感な新しい植生指数を提案した。

(公募研究・PI 両角友喜) 地上と衛星クロロフィル蛍光(SIF)観測による着葉期 CO<sub>2</sub> 吸収量の評価(B01 との共同研究)

国内の3サイトでの観測結果から、夏季の葉面積の大きい時期には NDVI は飽和していたが SIF は GPP の変化に対応する変化を示していた。また下層および中層 SIF は樹冠内部の光合成の情報を反映していることなどが明らかとなった。

(公募研究・PI 伊勢武史) AI と UAV を活用したリモートセンシングの強化

インスタンスセグメンテーションの応用によって、ドローンで撮影された可視光画像から森林内の樹木の直径および樹高を推定する手法を開発した。複数の樹木個体を個別に識別することで、対象区域内の樹木の本数・密度・各樹木個体の直径および樹高の推定が可能となった。

(公募研究・PI 比嘉紘士) 沿岸海色リモートセンシングのための固有光学特性推定法(IOP)の開発

外洋より複雑な沿岸において適用可能なIOP推定モデルを開発するため、既存モデルの比較を行った。その結果、IOPの高精度推定のためには、複数あるアルゴリズムの適切な複合利用が必要であることが明らかとなった。

(公募研究・PI 桑江朝比呂) ブルーカーボン生態系による CO<sub>2</sub> 吸収観測

浅海域の CO<sub>2</sub> 吸収量推定のためにグリーンレーザースキャナによる海中植生3次元マッピングが可能なドローンを開発し、海藻(ホンダワラ)高の高精度推定を実現した。また2100年までの浅海生態系(マングローブ、サンゴ礁、海草藻場、海藻藻場、塩性湿地)の全球分布と面積変化を予測した。

(公募研究・PI 市井和仁) 衛星等の観測ビッグデータによる陸域生態系変動の診断

グローバルな陸域植生総光合成量の長期トレンド解析における、衛星データの解析バージョン(C5とC6)の影響を調査した結果、最新のC6では、これまでのデータよりもインド、中国、東シベリアなどで、GPP増加のトレンドがより顕著に現れることが明らかとなった。

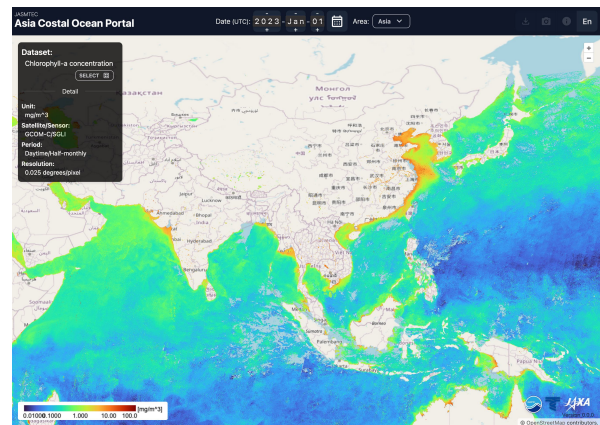


図 B02-1 沿岸赤潮モニタリングシステムのプロトタイプ画面。(アジア地域)

## 計画研究 C01・伊藤班

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

本計画研究の目的は、各計画・公募研究の成果を統合し高分解能で生物圏プロセスをシミュレートするモデル「デジタルバイオスフェア」を開発することである。領域設定期間内に陸域と海洋を結合した生物圏モデルを開発し、中間評価実施までに陸域と海洋のそれぞれの生態系モデルに関する技術的検討を進め、スタンドアロンでの試験計算を行うことを計画していた。

中間評価時までに予定していた進捗は以下の通りである。a) 各計画研究・公募研究から提供される生物圏プロセスに関する情報を収集し、モデルへの統合化戦略を検討する。b) 観測・実験が実施されるサイトにおいて生物圏モデルのプロトタイプ版による計算を行い、実測データを用いた段階的高度化を試みる。c) 高分解能な生物圏モデルを開発するための技術的検討を進めプロトタイプ版の作成、試験計算などを行う。d) 大型計算機での計算実施に向けた技術的検討を行う。e) 領域設定期間の終了時までには実施する「CO<sub>2</sub>吸収」「バイオマス生産」「土地利用」に関する実験設定・シナリオを検討する。

(2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

### a) 生物圏に関する知見の統合化（計画研究 C01）

本領域の実験・観測データに基づく生物圏プロセスのメカニスティックな知見を統合するための試みを進めた。統合すべき情報をパラメータ（最適化のためのデータを含む）、定式化（データ科学的モデルを含む）、推定精度を検証する情報、に整理し、各計画研究・公募研究からモデル統合に提供可能な情報を検討した。例えば、これまで陸域モデルに取り入れられて来なかった従属栄養生物（シロアリ）に関するプロセスを導入するなど新しい試みを行い（Ito, 2023, **Scientific Reports**）、その結果、陸域からのメタン放出に関する再現性が改善された。同時に、領域外との国際共同研究も進め、森林による CO<sub>2</sub> 吸収量評価に関する統合解析（Pan et al., in press, **Nature**）に参加して日本に関する分析結果を提供した。

モデル統合化の一環として観測を実施する研究班との共同研究を進め、ここでは A01 班とともに実施した土壌炭素、特に細根生産量に関する研究例を示す。2023 年 7 月に北海道大学苫小牧研究林のミズナラ林において、50cm×10cm の面積で深さ 10cm 毎の根の分布調査をおこなった。また、千葉県富里市にある放棄森林を皆伐して 3 年目の土壌についても、北海道と同様に根の分布調査を行った。その結果、右図 C01-1 にあるようにミズナラ天然林 (a) に比べて森林皆伐後 3 年目の森林では根の量はかなり少なくなっていることが示唆された。また、図 1(a) において、根の量が深さ 40~50cm 付近で一端減少し、50~60cm の深さで再び増加していることが明らかとなった。北海道苫小牧では、近隣の樽前山の噴火による影響で土壌断面に特徴を持っており、その影響が根量の分布にも大きく影響していることが示された。

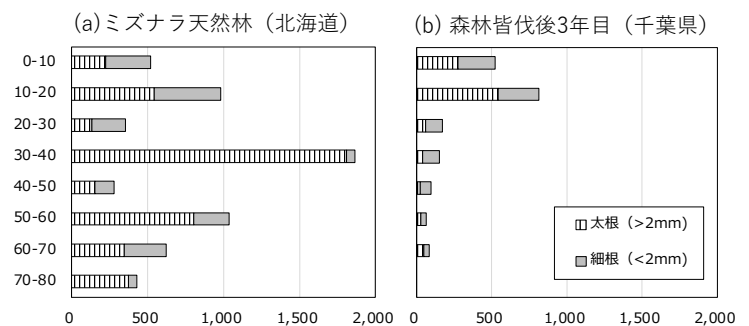


図 C01-1 北海道苫小牧研究林(a)と千葉県富里市(b)における、深さ 10cm ごとの太根（直径 2mm 以上）と細根（2mm 以下）の分布（g m<sup>-2</sup>）。

### b) 研究サイトでのプロトタイプ版計算（計画研究 C01）

陸域生態系モデル VISIT を用いて炭素循環の推定をおこなう際の課題点を明らかにするため研究サイトでの研究を実施した。マングローブ林は他の熱帯林と比較して土壌炭素蓄積量が極めて高い生態系とされているが、沿岸生態系の土壌炭素蓄積量の推定は不確実性が大きいと、マングローブ林の炭素循環を調べることは全球規模の推定精度向上に繋がることを期待される亜熱帯地域に位置する日本の南西諸島のオヒルギを中心としたマングローブ林にモデルを適用したところ、葉のフェノロジーや、地下部バイオマスの再現、リターや腐植における土壌分解プロセスの再現には課題が残るもの

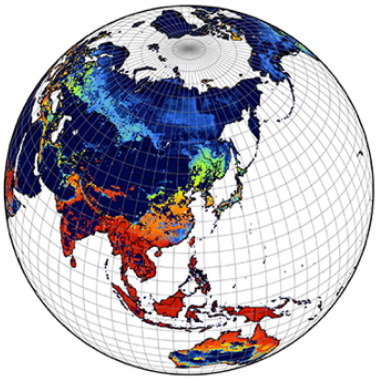
表 C01-1 リター生産量の推定結果と実測値の比較

	VISIT	実測値	引用
葉リター (tC/ha)	7.98	7.56	Ohtsuka et al. (2019)
枝リター (tC/ha)	2.89	2.60	Kamruzzaman et al. (2017)
根リター (tC/ha)	13.23	13.98	Imura et al. (2019)

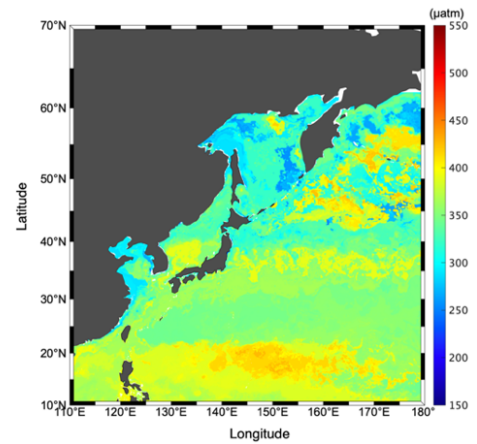
の、実測値の地上部バイオマス・リター量・土壌炭素蓄積量を再現した。この課題を解決するにあたって、葉生産量の推定の改善や、細根と粗根の推定計算の分離、リターや土壌における有機物動態の反映が必要と考えられた。例として、リター生産量の推定結果と実測値の比較を表 C01-1 に示した。リター生産量は、モデル上において葉・根の分解速度を低下させ、枝の分解速度を上昇させることによって実測値に近い数値が得られた。一方で、葉リターの生産量においては葉の生産量のフェノロジーの再現性が課題点として考えられた。また、環境条件によるリター生産量への影響を推定するには、リター中に含まれる有機物含有量を入力パラメータに加える必要があると考えられた。

**c) 高分解能モデルの開発 (計画研究 C01)**

陸域生物圏のモデルについては2種類のプロトタイプモデルを開発した。1つはグローバルスケールの中分解能 (0.25 度=約 30km メッシュ) モデルであり、もう1つは領域スケールの高分解能 (1km メッシュ) モデルである。両モデルは物質循環に関するコア部分は共通しているため、改良部分の移植は容易である (また地点モデルは a)と b)で使用されており、観測サイトでの研究で得られた知見の移植も同様である)。中分解能モデルでは入力気象データとして欧州中期予報センターで開発された ERA5 を使用しており、時間ステップ 1 時間で大気-陸域間の CO<sub>2</sub> フラックス計算が可能となっている (左図)。高分解能モデルは 1° × 1° 領域内を 120 分割して 1km メッシュ計算を行っており、日本周辺や南アジア、シベリアなどをテスト領域として試行計算を実施している。



海洋生物圏のモデルについては、北西太平洋域における高解像度 (約 8km) モデルによる海洋炭酸系 (pCO<sub>2</sub>、全炭酸濃度、pH) 分布等の把握に取り組んだ。そのため、海洋研究開発機構の JCOPE2M 水温塩分再解析データ (空間解像度: 南北約 8km, 時間解像度: ひと月) とヨーロッパ海色データサービスのクロロフィル a 濃度衛星観測データ (空間解像度: 南北約 4km, 時間解像度: ひと月) を用いて、ニューラルネットワーク手法 (Nakaoka et al., 2013) により海洋表層 CO<sub>2</sub> アトラス (SOCAT) の pCO<sub>2</sub> 観測データと上記物理生物パラメータを関連づけて 2010 年 1 月から 2019 年 12 月までひと月ごとの分布を推定した。推定結果の一例として、2010 年 6 月の pCO<sub>2</sub> 分布を右図に示す。この図から、ベーリング海やオホーツク海の沿岸域で植物プランクトンの活発な光合成活動により 300μatm を下回る pCO<sub>2</sub> が捉えられている一方、高緯度域の一部で冬季に亜表層から供給された高 CO<sub>2</sub> の水塊が残存している様子が示唆された。また北緯 30° から 40° の緯度帯でも黒潮起源の高い pCO<sub>2</sub> が捉えられている。今後は得られた炭酸系データを領域海洋物質循環モデル (ROMS-PISCES) へ初期値として入力することを検討し、海洋生物活動による生産量評価や大気海洋間 CO<sub>2</sub> 交換量評価の精緻な将来予測について貢献することを目指していく。



**d) 大規模計算に関する技術的検討 (計画研究 C01)**

将来的に超並列コンピュータ上で動作させることを想定した技術検討を行った。高分解能気象モデル NICAM を実行している富嶽と同じプロセッサを使用した東大 Wisteria-BDEC01/Odyssey 1node (48cores) を使用し、高分解能 VISIT モデルの並列化に対する性能評価を実施した。OpenMP を用いたノード内並列化を行った場合、1 コアから 48 コアまで並列数を変えると、8 ノードまでは計算時間の短縮効果が明らかであったが、それ以上は低下していた。計算コードを最適化し、適切なベクトル長の配列になるよう改良を加えることでオフライン計算でも 5~10 倍の計算速度向上が可能と推定された。

**e) 生物圏機能による地球環境激変防止に関する実験・シナリオの検討**

(公募研究 C03・PI Wu) Developing an agricultural production and land-use change model and examining the land-use scenarios under mitigation policies

IPCC 第 6 次評価報告書で用いられている社会経済シナリオ (SSP) に基づいて、統合評価モデル AIM により農業生産や緩和などを考慮した将来の土地利用シナリオを作成し、C01 班や C02 班の生物圏モデルシミュレーションに利用可能な空間的ダウンスケールされたデータの開発を進めた。

## 計画研究 C02・加藤班

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

グローバルスケールの陸域・海洋生態系の生物を介した物質循環が地球環境変動へどのように順化や適応をしているのかについて、よりリアルな仕組みを解明するために、IPCC 第6次評価報告書にも利用された日本のフラッグシップの地球システムモデル MIROC-ES2L (JAMSTEC/NIES/東大) に次の機能を追加した。a) 陸域生態系の光合成の CO<sub>2</sub> と温度順化、b) 陸域生態系のリン酸循環および、c) 海洋生態系の一次生産者 (植物プランクトン) のダイナミックな CN 比変化。また IPCC 対応の気候モデル実験 CMIP6 における世界各国の地球システムモデルの計算結果を統合的に調べる d) マルチ地球システムモデル解析を行った。

(2) 計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

### a) 陸域生態系の光合成の CO<sub>2</sub> と温度順化の導入

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は、植物の光合成を促進させる施肥効果を持つが、高 CO<sub>2</sub> 濃度生育下で数週間後には光合成能力が低下するダウンレギュレーション (CO<sub>2</sub> 順化) や生育温度が上昇すると光合成の最適温度を変化させる (温度順化) を行う。しかしほとんどの地球システムモデルではそれらを考慮していない。本研究では地球システムモデル MIROC-ES2L の陸域生態系モデル VISIT に温度順化

(Kumarathunge et al., 2019) ・ CO<sub>2</sub> 順化 (Pooter et al., 2021) のアルゴリズムを導入し、陸域生態系の環境適応が気候へ与えたフィードバックを定量化することを目指す。順化の導入にあたり、Monsi & Saeki (1953) の光合成モデルを de Pury & Farquhar (1997) に置き換えた。現在スピニアップが進行中であり、炭素蓄積量の平衡後、歴史実験 (1850-2014 年) と SSP1-2.6、SSP3-7.0、SSP5-8.5 シナリオを使用した将来予測 (2015-2100 年) を行う。順化の on/off でグローバルな GPP や気温、降水量、大気 CO<sub>2</sub>、および炭素と水のバランスの違いを解析し、長期の植物適応が地球炭素循環と水循環に与える影響を明らかに予定である。

### b) 陸域生態系のリン酸循環の導入

窒素やリンなどの必須栄養の欠乏は植物の成長を制限することが知られており、多くの地域が窒素・リン制限下にあると報告されている (Eizai et al., 2020)。MIROC-ES2L では陸域生態系の植物成長の計算に VISIT モデルを用いているが、リン酸循環は組み込まれていない。そこで本研究では既存のモデル (Wang et al., 2010; Yang et al., 2014) を参考にして MIROC-ES2L の陸域過程にリン酸循環を新たに組み込み、大気-海洋-陸域のフィードバックを解明することを目的とする。MIROC-ES2L へのリン酸循環の導入の準備として、単体 VISIT モデルにリン酸循環を組み込み、地上観測データとの比較やモデルベンチマーキングを行った。リン酸循環を組み込んだモデル (VISIT-CNP) はハワイ Thurston、Kokee の植物各器官の炭素・窒素量および、土壌のリン量を精度良く再現できた (各 R<sup>2</sup> は 0.68、0.70、0.95)。また、土壌内の溶存態、吸着態、吸蔵態プールもリン制限、窒素制限下でのリンの動態と整合していることが確認できた。全球におけるシミュレーション結果を CASA モデルの結果と比較したベンチマーキングテストでは、IGBP 土壌分類ごとの葉 NP 比を CASA モデルと非常に近い値で再現することができた (図 C02-1)。現在は MIROC-ES2L 内の VISIT ヘコード移植を行っており、終わり次第、大気-海洋-陸域間のフィードバックの実験を行う。

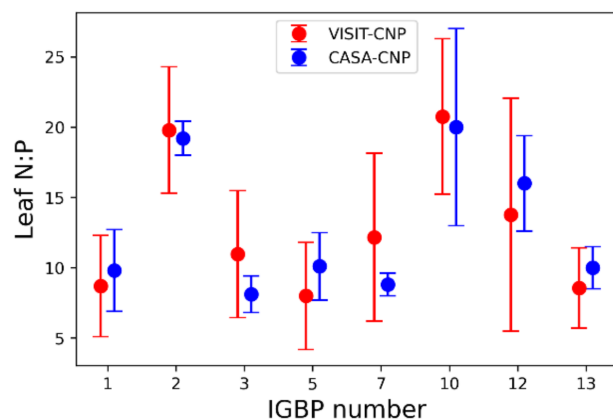


図 C02-1. VISIT-CNP で推定された葉 N:P 比 (CASA-CNP モデルとのベンチマーク比較)。IGBP 分類番号は、VISIT で利用されているもののみ表示: 1) evergreen needle leaf forest, 2) evergreen broadleaf forest, 3) deciduous needle leaf forest, 5) mixed forest, 7) shrub land, 10) grassland, 12) crop land, 13) urban areas

### c) 海洋生態系の一次生産者（植物プランクトン）のダイナミックな CN 比変化の導入

従来の地球システムモデル（ESM）では十分に考慮されていなかった、順化・適応といった環境変動に対する生態系応答過程の高度化を行った。海洋生態系モデルでは、一次生産者（植物プランクトン）の光合成速度に関する経験式について、これまでのレッドフィールド比による炭素:窒素の比率固定（CN 比）から、水温・日射・栄養塩といった生息環境に応じて細胞内の炭素と窒素のリソース配分（トレードオフ）を表現可能な FlexPFT（Smith et al., 2016）を実装した。その結果、観測値に近い CN 比の空間分布をモデルで再現でき、全球平均の植物プランクトンの CN 比はレッドフィールド比よりも高くなることが示された。植物プランクトン種が変わらなかった場合、栄養塩濃度の低下とともに、植物プランクトンの CN 比（全球平均）は上昇するが、大型（珪藻）から小型（シネココッカス等）に移り変わった場合、CN 比は低下することがモデルから示唆された（図 C02-2, Masuda et al., 2023）。

### d) マルチ地球システムモデル結果解析

既存 CMIP6 の気候-炭素循環シミュレーションを解析し、陸域生態系の総一次生産（Gross Primary Productivity, GPP）の温暖化（気候変動）に対する応答を評価した。全モデルの全球平均気温は程度こそ違うものの全て増加するが、これに対する GPP の応答はモデルによってそもそもその変化符号が異なることが明らかになった。1°Cあたりの GPP 変化率で見ると、-8.2 ~ +3.4 [%/°C]に相当する。その地理分布を見ると、熱帯で減少し北半球の中高緯度で増加するという、モデル間でおおよそ共通した傾向が確認された。このような全球 GPP 変化は、(1) 気温と群落光合成の最適温度との関係、(2) 植物の土壌水分応答、(3) 植物種の地理分布変化、(4) 温暖化による土壌有機物無機化の促進と植物による栄養塩吸収、などが影響していると考えられる。特に(1)に関し、多くのモデルは固定された最適温度に従ってモデル化されていると考えられ、このような過程のさらなる評価と詳細モデル化が必要であることが示唆された。

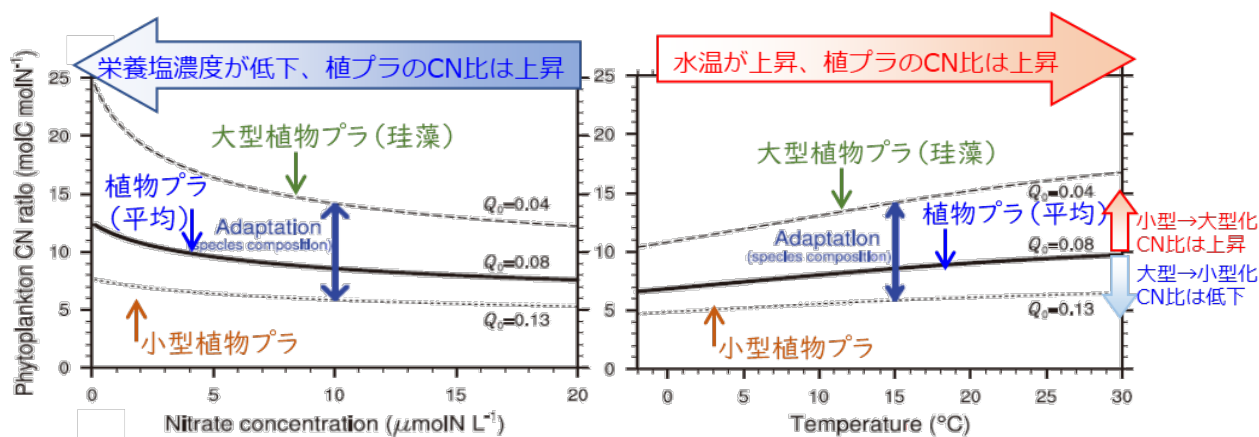


図 C02-2 栄養塩（左図）と水温（右図）の変化に応じた植物プランクトンの CN 比の変化。昇温と栄養塩濃度の低下によって、植物プランクトンの CN 比は上昇するが、プランクトンの体サイズが小型化すれば CN 比は低下することが推察された。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### 研究領域全体

発表論文 150 報（うち和文 8 報）、口頭・ポスター発表 200 件以上

### 計画研究 A01

- Nakamura Y\*, Tsujimoto K, Ogawa T, Noda HM, Hikosaka K\* (2024) Correction of photochemical reflectance index (PRI) by optical indices to predict non-photochemical quenching (NPQ) across various species. **Remote Sensing of Environment**, 305: 114062.
- Mishio M\*, Sudo E, Ozaki H, Oguchi R, Fujimoto R, Fujii N, Hikosaka K (2024) Heterotic growth is enhanced more under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> conditions. **American Journal of Botany**, 111: e16317.
- Griffin-Nolan RJ\*, Hikosaka K, 他 5 名 (2024) Away-range shifts in leaf function of a global invader: a case of resource reallocation? **Biological Invasions**, 26: 1489–1503.
- Yamakawa M\*, Onoda Y, Kurokawa H, Oguro M, Nakashizuka T, Hikosaka K (2023) Competitive asymmetry in a forest composed of a shade-tolerant species depends on gap formation. **Forest Ecology and Management**, 549: 121442.
- Imasu R\*, Hikosaka K, 他 17 名 (2023) Greenhouse gases observing satellite 2 (GOSAT-2): Mission overview. **Progress in Earth and Planetary Science**, 10: 33.
- Kiyono T\*, Noda HM, Kumagai T, Oshio H, Yoshida Y, Matsunaga T, Hikosaka K (2023) Regional-scale wilting point estimation using satellite SIF, radiative-transfer inversion, and soil-vegetation-atmosphere transfer simulation: A grassland study. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128: e2022JG007074.
- Yoshida N\*, Hikosaka K, 他 4 名 (2023) Does selection occur at the intermediate zone of two insufficiently isolated populations? A whole-genome analysis along an altitudinal gradient. **Journal of Plant Research**, 136: 183-199.
- Satoh Y, Ishizuka S, Hiradate S, Atarashi-Andoh M, 他 2 名 (2023) Sequential loss-on-ignition as a simple method for evaluating the stability of soil organic matter under actual environmental conditions. **Environmental Research** 239: 117224.
- Makishima D, Hikosaka K, Sasaki T\*, 他 9 名 (2022) Predicting diversity changes in subalpine moorland ecosystems based on geometry of species distributions and realistic area loss. **Journal of Vegetation Science**, 33: e13150.
- Sasaki T\*, Hikosaka K, 他 12 名 (2022) Plant and microbial community composition jointly determine moorland multifunctionality. **Journal of Ecology**, 110: 2507–2521.
- Oguchi R, Hikosaka K\*, 他 4 名 (2022) Enhanced growth rate under elevated CO<sub>2</sub> conditions was observed for transgenic lines of genes identified by intraspecific variation analyses in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Molecular Biology**, 110: 333–345.  
(合計 11 報)
- 口頭・ポスター発表 51 件（うち国際会議の基調講演 3 件、国内会議の招待講演 1 件）

### 計画研究 A02

- Kurata S, Sakaguchi S, Hirota S., Kurashima, O Suyama Y, Ito, M. (2024) Phylogeographic incongruence between two related Geranium species with divergent habitat preferences in East Asia, **Ecological Research** (in press)
- Matsuo T\*, Martínez-Ramos M, Onoda Y, Bongers F, Lohbeck M, Poorter L (2024) Light competition drives species replacement during secondary tropical forest succession. **Oecologia**, 205 (in press)
- 小野田雄介\*, 大西信徳, 穂垣佑輔, 竹重龍一, 小口理一 (2024). UAV-LiDAR による大阪公立大学附属植物園の 11 の樹林型のデジタル化. **日本生態学会誌**, 74: 25-33
- Gomasasca U\* et al. include Onoda Y (2023) Leaf-level coordination principles propagate to the ecosystem scale. **Nature Communications**, 14: 3948.
- Xu WB\* et al. incld Onoda Y 他 47 名 (2023) Global beta-diversity of angiosperm trees is shaped by Quaternary climate change. **Science Advances**, 9: eadd8553.
- Nadal M\*, Clemente - Moreno MJ, Perera - Castro AV, Roig - Oliver M, Onoda Y, Guliás J, Flexas J (2023) Incorporating pressure-volume traits into the leaf economics spectrum. **Ecology Letters**, 26: 549-562.
- Nagai S\*, Saitoh TM, Takeuchi Y, Miura T, Aiba M, Kurokawa H, Onoda Y, Ichii K, Nasahara KN, Suzuki R, Nakashizuka T, Muraoka H (2022) Review: Monitoring of land cover changes and plant phenology by remote - sensing in East Asia.



**Ecological Research**, 38: 111–133.

- Masuda, K, Setoguchi H, Nagasawa, K, Ishihara M, Sawa K, Horie K, Tsuboi H, Fukumoto S, Tango A, Sakaguchi S (2023) Rear-edge daylily populations show legacies of habitat fragmentation due to the Holocene climate warming, **Journal of Biogeography**, 50: 551–563.
- Maenpuen P, Katabuchi M\*, Onoda Y, Zhou C, Zhang JL and Chen YJ (2022) Sources and consequences of mismatch between leaf disc and whole - leaf mass per area (LMA) **American Journal of Botany**, 109: 1242-1250.
- Dong N\*, Prentice IC, Wright IJ, Wang H, Atkin OK, Bloomfield KJ, Domingues TF, Gleason SM, Maire V, Onoda Y, Poorter H, Smith NG (2022) Leaf nitrogen from the perspective of optimal plant function. **Journal of Ecology**, 110: 2585–2602.
- Guo WY\*, Onoda Y, 他 55 名 (2022) High exposure of global tree diversity to human pressure. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, 119: e2026733119.
- Izuno A, Onoda Y, Amada G, Kobayashi K, Mukai M, Isagi Y, Shimizu KK\* (2022) Demography and selection analysis of the incipient adaptive radiation of a Hawaiian woody species. **PLoS Genetics**, 18: e1009987.
- Narita A, Nakahama N, Izuno A, Hayama K, Komaki Y, Tanaka T, Murata J, Isagi Y\* (2021) Conservation genetics of critically endangered *Crepidiastrum grandicollum* (Asteraceae) and two closely related woody species of the Bonin Islands, Japan. **Conservation Genetics**, 22: 717–727.
- Ng KK\* et al. incld Isagi Y. (2021) The genome of *Shorea leprosula* (Dipterocarpaceae) highlights the ecological relevance of drought in aseasonal tropical rainforests. **Communications Biology**, 4: 1166.
- ほか 22 報 (合計 35 報)  
口頭・ポスター発表 82 件以上

### 計画研究 A03

- Yusuf Habibullah KO, Ito R, Stari L, Kishida K, Ohtsubo Y, Masai E, Fukuda M, Miyauchi K, Nagata Y\* (2024) Degradation of DDT by  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane dehydrochlorinase LinA. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, 88: 123–130.
- Ohtsubo Y\*, Kawahara S, Nagata Y\* (2024) Clamping-mediated incorporation of single-stranded DNA with concomitant DNA synthesis by Taq polymerase involves nick-translation. **Scientific Reports**, 14: 2030.
- Kawase T, Kyogoku D, Kawatsu K, Katayama N, Miki T\*, Kondoh M (2024) Time series analysis showing how different environmental conditions affect the interspecific interactions of *Callosobruchus maculatus* and *Callosobruchus chinensis*. **Population Ecology**, 66: 6–21.
- Kato H\*, Ohtsubo Y, Hirano S, Masuda S, Shibata A, Shirasu K, Nagata Y\* (2023) Draft genome sequence of *Cupriavidus* sp. strain TKC, isolated from a  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane-degrading community. **Microbiology Resource Announcements**, 12: 00567-23.
- Seto M\*, Kondoh M (2023) Microbial redox cycling enhances ecosystem thermodynamic efficiency and productivity. **Ecology Letters**, 26: 1714–1725.
- Hosoda K\*, Seno S, Murakami N, Matsuda H, Osada Y, Kamiura R, Kondoh M\* (2023) Synthetic model ecosystem of 12 cryopreservable microbial species allowing for a noninvasive approach. **Bio Systems**, 235 105087–105087.
- Noriyuki, S\*, Kawatsu, K, Kaneko S. (2022) Nonlinear time series analysis of the predator-prey interaction between the citrus whitefly and the whitefly-specialist ladybird. **Journal of Applied Entomology**, 146: 903–910.
- Kato H, Ohtsubo Y, Nagata Y\*, 他 5 名 (2022) Genome evolution related to  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane metabolic function in the soil microbial population. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, 86: 800–809.
- Ohtsubo Y\*, Hirose Y, Nagata Y (2022) Algorithms used for in silico finishing of bacterial genomes based on short-read assemblage implemented in GenoFinisher, AceFileViewer, and ShortReadManager. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, 86: 693–703.
- Yang D, Kato H, Kawatsu K, Osada Y, Azuma T, Nagata Y, Kondoh M\* (2022) Reconstruction of a Soil Microbial Network Induced by Stress Temperature. **Microbiology Spectrum**, 10: e02748-22.
- Mukaimine W\*, Kawatsu K, Toquenaga, Y (2021) Digging out intersexual and meteorological effects on cicada emergence using 10-year citizen monitoring. **Ecological Entomology**, 47: 253–261.
- ほか 6 報 (合計 17 報)

### 計画研究 B01

- Egusa T\*, Nakahata R, Neumann M, Kumagai T (2024) Carbon stock projection for four major forest plantation species in Japan. **Science of the Total Environment**, 927: 172241.
- Igarashi S\*, Ichie T, 他 7 名 (2024) No evidence of carbon storage usage for seed production in 18 dipterocarp masting species in a tropical rain forest. **Oecologia**, 204: 717–726.
- Iida S\*, 他 9 名 (2024) Effects of forest thinning on sap flow dynamics and transpiration in a Japanese cedar forest. **Science of**

the **Total Environment**, 912, 169060.

- Murayama S, Kondo H, Ishidoya S, Maeda T, Saigusa N, Yamamoto S, Kamezaki K, Muraoka H (2024) Interannual variation and trend of carbon budget observed for more than two decades at Takayama in a cool-temperate deciduous forest in central Japan. **Journal of Geophysical Research Biogeosciences**, 129: e2023JG007769.
- Tomita K\* and Hiura T (2024) Brown bear digging decreases radial growth of canopy trees: implications for ecological role of large carnivores in anthropogenic landscape. **Ecology**, 105: e4266.
- Gonzalez A\*, Muraoka H, 他 89 名 (2023) A global biodiversity observing system to unite monitoring and guide action. **Nature Ecology and Evolution**, 7: 1947–1952.
- Hino T\*, Agetsuma N, Hiura T (2023) Anthropogenic disturbances alter responses of understory plants to deer density: A 9-year deer density control experiment. **Forest Ecology and Management**, 537: 12092.
- Hiura T\* (2023) Functional biogeography in Japanese cedar. **Ecological Research**, 38: 42–48.
- Inokoshi S\*, Gomi T, Chiu C-W, Onda Y, Hashimoto A, Zhang Y, Saitoh TM (2023) A watershed-scale evapotranspiration model considering forest type, stand parameters, and climate factors. **Forest Ecology and Management**, 547, 121387.
- Kiyono T\*, Noda HM, Kumagai T, Oshio H, Yoshida Y, Matsunaga T, Hikosaka K (2023) Regional-scale wilting point estimation using satellite SIF, radiative-transfer inversion, and soil-vegetation-atmosphere transfer simulation: A grassland study. **Journal of Geophysical Research -Biogeosciences**, 128: e2022JG007074.
- Mori AS\*, Muraoka H, Koba K, Kondoh M, Kitajima K, Nakamura M 他 9 名 (2023) Sustainability challenges, opportunities, and solutions for long-term ecosystem observations. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 378: 20220192.
- Morozumi T\*, Kato T, Kobayashi H, Muraoka H, 他 7 名 (2023) Contributions of the understory and midstory to total canopy solar-induced chlorophyll fluorescence in a ground-based study in conjunction with seasonal gross primary productivity in a cool-temperate deciduous broadleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, 284: 113340.
- Muraoka H\*, Saitoh TM, Murayama S (2023) Review: Long-term and multidisciplinary research networks on biodiversity and terrestrial ecosystems – findings and insights from Takayama super-site, central Japan. **Journal of Ecology and Environment**, 47: 22.
- Takamura N, Hata Y, Matsumoto K, Kume T, Ueyama M, Kumagai T\* (2023) El Niño-Southern Oscillation forcing on carbon and water cycling in a Bornean tropical rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, 120: e2301596120.
- Iida S\*, Takeuchi S, Shinozaki K, Araki M (2022) Calibration of sap flow techniques using the root-ball weighing method in Japanese cedar trees. **Trees**, 36: 1747–1759.
- Nakamura M\*, Hiura T, Muraoka H, Kurokawa H, 他 52 名 (2022). Evaluating the soil microbe community-level physiological profile using EcoPlate and soil properties at 33 forest sites across Japan. **Ecological Research**, 37: 432–445.
- Shen Y\*, Takata K, Kudo K, Muraoka H, Saitoh TM, Hirano Y, Yasue K (2022) Effects of climate on the tree ring density and weight of *Betula ermanii* in a cool temperate forest in central Japan. **Trees**, 36: 1597–1605.
- Yokobe T\*, Tokuchi N, Hyodo F, Tateno R, Hiura T (2022) Response of microorganisms to a 5-yr large-scale nitrogen loading in immature volcanic ash soil in an oak-dominated forest. **Applied Soil Ecology**, 177: 104537.
- Fujime N\*, Kumagai T, Egusa T, Momiyama H, Uchiyama Y (2021) Importance of calibration in determining forest stand transpiration using the thermal dissipation method. **Agricultural and Forest Meteorology**, 301–302: 108356.
- Momiyama H\*, Kumagai T, Egusa T (2021) Model analysis of forest thinning impacts on the water resources during hydrological drought periods. **Forest Ecology and Management**, 499: 119593.

ほか 24 報 (合計 44 報)

口頭・ポスター発表 50 件以上 (うち招待・基調講演 AsiaFlux Conference 2023 など)

## 計画研究 B02

- Siswanto E\*, Luang-on J, Ogata K, Higa H, Toratani M (2024) Observations of water optical properties during red tide outbreaks off southeast Hokkaido by GCOM-C/SGLI: implications for the development of red tide algorithms. **Remote Sensing Letters**, 15: 121–132.
- Morozumi T\*, Kato T, Kobayashi H, Akitsu TK, Muraoka H 他 6 名 (2024) Contributions of the understory and midstory to total canopy solar-induced chlorophyll fluorescence in a ground-based study in conjunction with seasonal gross primary productivity in a cool-temperate deciduous broadleaf forest, **Remote Sensing of Environment**, 284: 2023.
- Kobayashi H\*, 他 10 名 (2023) Ecosystem aboveground structures of an open-canopy black spruce forest in interior Alaska for ecosystem modeling, **Polar Data Journal**, 72–88.
- Luang-on J\*, Siswanto E, Kobayashi H, 他 8 名 (2023) MODIS-derived green Noctiluca blooms in the upper Gulf of Thailand: Algorithm development and seasonal variation mapping. **Frontiers in Marine Science**, 10: 1031901.

(合計 4 報)

口頭・ポスター発表 14 件

### 計画研究 C01

Pan Y\*, Ito A, 他 15 名 (in press) The enduring world forest carbon sink. **Nature**. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>

Ito A\* (2023) Global termite methane emissions have been affected by climate and land-use changes. **Scientific Reports**, 13: 17195.

Tokoro T\*, Nakaoka S, 他 7 名 (2023) Statistical Analysis of Spatiotemporal Variations of Air-Sea CO<sub>2</sub> Fluxes in the Kuroshio Region. **Journal of Geophysical Research - Oceans**, 128 (11): e2023JC019762.

Adachi M\*, Hobara Y, Saitoh MT, Hirota M (2022) Temporal variation and hysteresis of soil respiration and sap flow of *Pinus densiflora* in a cool temperate forest, Japan. **Forests**, 13(11): 1833.

羽島知洋\*, 伊藤昭彦, 野口真希 (2022) 地球システムモデリングにおける炭素循環過程の検証と発展. **地球環境**, 26(1&2): 101-110.

(合計 5 報)

口頭・ポスター発表 12 件

### 計画研究 C02

Végh L, Kato T\* (2024) Modified SEIB-DGVM enables simulation of masting in a temperate forest. **Ecological Modelling**, 488: 110577

Masuda Y\*, Aita Noguchi M, 他 6 名 (2023) Acclimation by diverse phytoplankton species determines oceanic carbon to nitrogen ratios. **Limnology and Oceanography Letters**, 8: 519-528.

Morozumi T\*, Kato T, Kobayashi H, Sakai Y, Tsujimoto K, Nakashima N, Buareal K, Wu L, Ninomiya H (2023) Row orientation influences the diurnal cycle of solar-induced chlorophyll fluorescence emission from wheat canopy, as demonstrated by radiative transfer modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, 339: 109576.

Ninomiya H, Kato T\*, Végh L, Wu L (2023) Modeling of non-structural carbohydrate dynamics by the spatially explicit individual-based dynamic global vegetation model SEIB-DGVM (SEIB-DGVM-NSC version 1.0). **Geoscientific Model Development**, 16 (14): 4155-4170

羽島知洋\*, 伊藤昭彦, 野口真希 (2022) 地球システムモデリングにおける炭素循環過程の検証と発展. **地球環境**, 26(1&2): 101-110.

(合計 5 報)

口頭・ポスター発表 11 件

### 公募研究 A04

Charon J, Nishimura Y, 他 45 名 (2024) Consensus statement from the first RdRp Summit: advancing RNA virus discovery at scale across communities. **Frontiers in Virology**, 4: 1371958.

Urayama S, Nishimura Y, 他 8 名 (2024) Double-stranded RNA sequencing reveals distinct riboviruses associated with thermoacidophilic bacteria from hot springs in Japan. **Nature Microbiology**, 9: 514-523.

Lin HC, Nakayama K, Tsai JW, Chiu CY (2023) Conceptual models of dissolved carbon fluxes in a two-layer stratified lake: interannual typhoon responses under extreme climates. **Biogeosciences**, 20: 4359-4376.

Nagatomo K, Nakayama K, 他 11 名 (2023) A spatially integrated dissolved inorganic carbon (SiDIC) model for aquatic ecosystems considering submerged vegetation. **Journal of Geophysical Research Biogeosciences**, 128(2): e2022JG007032.

Nagano H\*, Atarashi-Andoh M, T 他 4 名 (2023) Stable C and N isotope abundances in water-extractable organic matter from air-dried soils as potential indices of microbially utilized organic matter. **Frontiers in Forests and Global Change**, 6: 1228053.

Satoh Y, Ishizuka S, Hiradate S, Atarashi-Andoh M, Nagano H, Koarashi J (2023) Sequential loss-on-ignition as a simple method for evaluating the stability of soil organic matter under actual environmental conditions. **Environmental Research**, 239: 117224.

Shiozaki T\*, Nishimura Y\*, Yoshizawa S, Takami H, Hamasaki K, Fujiwara A, Nishino S, Harada N (2023) Distribution and survival strategies of endemic and cosmopolitan diazotrophs in the Arctic Ocean. **The ISME Journal** 17(8): 1340-1350.

Tsai JW, Nakayama K (2023) Editorial: Carbon dynamics in freshwater, coastal and oceanic ecosystems in response to the SDG goals. **Frontiers in Marine Science**, 10: 1212305.

ほか 9 報 (合計 17 報)

### 公募研究 B03

- Hirano T\*, Cui R, Sun L, Teramoto M, Liang N (2023) Partitioning of root respiration into growth, maintenance, and ion uptake components in a young larch-dominated forest. **Plant and Soil**, 482: 57–72.
- Hu R\*, Hirano T, Sakaguchi K, Yamashita S, Cui R, Sun L, Liang N (2023) Spatiotemporal variation in soil methane uptake in a cool-temperate immature deciduous forest. **Soil Biology and Biochemistry**, 184, 109094.
- Kohyama T\*, Hiura T, 他 9 名 (2023) Contribution of tree community structure to forest productivity across a thermal gradient in eastern Asia. **Nature Communications**, 14: 1113.
- Li T\*, Liang N, 他 15 名 (2023) Divergent accumulation of amino sugars and lignins mediated by soil functional carbon pools under tropical forest conversion. **Science of the Total Environment**, 881: 163204.
- Moki H\*, Yanagita K, Kondo K, and Kuwae T (2023) Projections of changes in the global distribution of shallow water ecosystems through 2100 due to climate change. **PLOS Climate**, 2, e0000298.
- Abe Y\*, Liang N, Teramoto M, Koarashi J, Atarashi-Andoh M, Hashimoto S, Tange T (2022) Spatial variation in soil respiration rate is controlled by the content of particulate organic materials in the volcanic ash soil under a *Cryptomeria japonica* plantation. **Geoderma Regional**, 29: e00529.
- Sasagawa T\*, Akitsu TK, Ide R, Takagi K, Takanashi S, Nakaji T, Nasahara KN (2022). Accuracy Assessment of Photochemical Reflectance Index (PRI) and Chlorophyll Carotenoid Index (CCI) Derived from GCOM-C/SGLI with In Situ Data. **Remote Sensing**, 14(21): 5352.
- Sato H\*, Ise T (2022) Predicting global terrestrial biomes with the LeNet convolutional neural network, **Geoscientific Model Development**, 15: 3121–3132.
- Teramoto M\*, Liang N, Hamamoto T, 他 5 名 (2022) Abiotic and biotic factors controlling the dynamics of soil respiration in a coastal dune ecosystem in western Japan. **Scientific Reports**, 12, 14320.
- Zhang J, Koarash J, Liang N\*, 他 14 名 (2022) Ten years of warming increased plant-derived carbon accumulation in an East Asian monsoon forest. **Plant and Soil**, 481: 349–365.
- ほか 4 報 (合計 14 報)

### 公募研究 C03

ポスター発表

- Wu W (2023) The development of a high-resolution global land use projection model. 16th IAMC Annual Meeting, Venice, Italy.

### 総括班 X00

口頭・ポスター発表

- 伊藤昭彦 (2024) デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための統合生物圏科学. 日本森林学会 第 6 回森林水文・地球科学研究会. 東京大学農学部 1 号館第 8 講義室.
- 伊藤昭彦 (2022) デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための統合生物圏科学. 日本科学振興協会第 1 回キックオフミーティング. 東京国際交流館プラザ平安.
- 伊藤昭彦 (2022) デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための統合生物圏科学. 日本生態学会第 69 回全国大会シンポジウム. オンライン.

### 産業財産権

- 伊勢武史 (国立大学法人京都大学) (2024) 特願 2024-004869 (R6.1.16) 物体学習検出システム、物体学習システム、物体検出システム、物体学習方法、およびコンピュータプログラム (審査請求中)。(概要) インスタンスセグメンテーションの応用によって、ドローンで撮影された可視光画像から森林内の樹木の直径および樹高を推定する発明。複数の樹木個体を個別に識別することで、対象区域内の樹木の本数・密度・各樹木個体の直径および樹高の推定が可能である。

### シンポジウム・研究集会開催

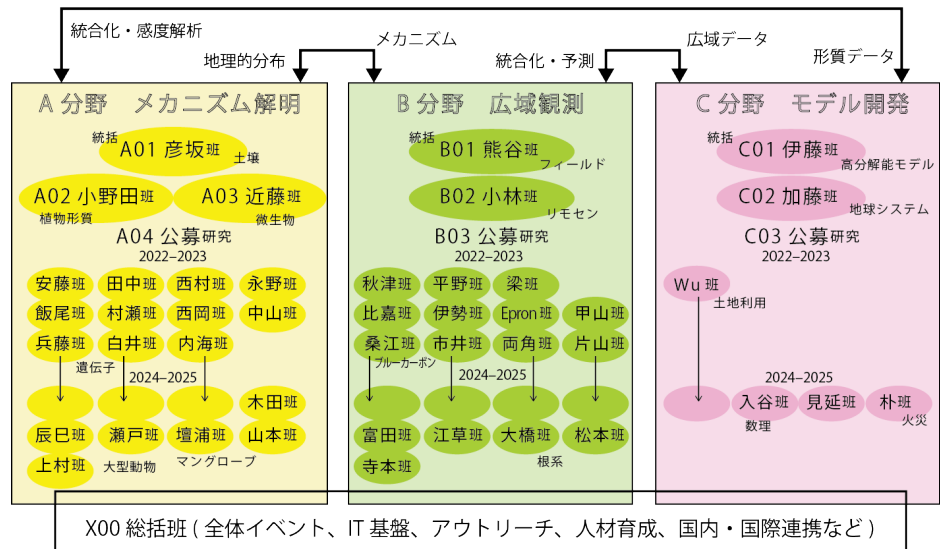
- 日本生態学会第 71 回全国大会シンポジウム. UAV によって広がる生態学 (企画者: 小野田雄介、小林秀樹ほか). 2024 年 3 月 21 日. 横浜国立大学
- 日本森林学会 第 6 回森林水文・地球科学研究会. 私なら、こうやる! 「デジタルバイオスフェア」 (企画者: 熊谷朝臣). 2024 年 3 月 11 日. 東京大学農学部.
- 日本生態学会第 70 回全国大会シンポジウム. 土壌圏の複雑性と適応性を明らかにする総合科学 (企画者: 近藤倫生ほか) オンライン. 2023 年 3 月 20 日.
- 日本生態学会第 69 回全国大会シンポジウム. デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための統合生物圏科学の創出にむけて (企画者: 小野田雄介、伊藤昭彦) オンライン. 2022 年 3 月 18 日.

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

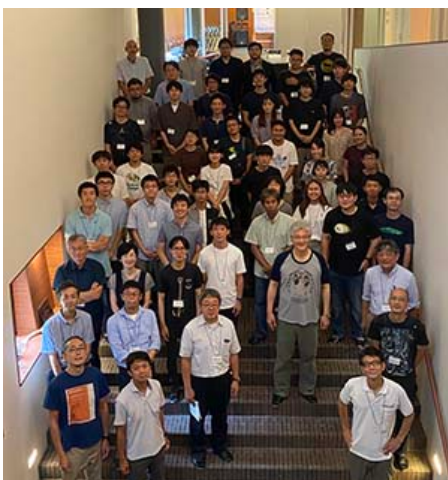
本研究領域の計画研究は、メカニズム解明を担当するA分野（項目A01、A02、A03）、広域観測を担当するB分野（項目B01、B02）、モデル開発を担当するC分野（項目C01、C02）で構成される（下図参照）。それぞれシニア研究者が代表を務めるA01、B01、C01が分野内の取りまとめを行い、あわせて分野間の連携を促進する。このような領域-分野-項目の体制とすることで、多数の研究項目間の有機的な連携が効率的に行われてきた。

各分野には公募研究として項目A04（前期11件、後期9件）、項目B03（前期11件、後期9件）、項目C03（前期1件、後期4件）が割り当てられ、計画研究と公募研究との間で様々な共同研究に発展した。公募研究のテーマは期待以上に多様性に富んでおり、若手研究者が多く、研究領域の活性化に大いに寄与した。公募研究が実施した共同研究はA/B/Cの分野を超えたもの



も多かったが、そこでは定期的なオンラインセミナー（2024年6月までに計35回開催し、のべ60人以上が発表）や観測キャンペーンによる交流の促進が効果的であった。

総括班 X00 は、研究領域内の連携を統括する上で十分な機能を発揮した。領域代表者らが参加していた新学術研究領域（植物高CO<sub>2</sub>応答）での経験が活かされたことも一因である。全体会合や観測キャンペーンを企画運営し、コロナ感染状況を見定めつつ対面での交流を促進したが、それは特に若手研究者に貴重な機会を提供することになった。2022年まで全体会合はオンライン形式で行われたが、2023年には東京大学山中寮で合宿形式の全体会合を行い（写真）、合わせてポスターセッションを実施して、すべての計画・公募班が参加して高密度な議論を行う機会を設けた。2023年10月23日には東北大学で、世界的に著名な植物生理生態学者である Ülo Niinemets 博士（エストニア生物科学大学・教授）に特別セミナーを実施していただくなど国際的な交流を促進する役割も担った。



観測キャンペーンは、2022年には東京湾、2023年には北海道大学苫小牧研究林でそれぞれ実施され、複数の計画研究・公募研究班が参加して共同作業を行い、またお互いの観測状況を見学することで貴重な研鑽の機会とすることができた。観測キャンペーンにはC01・C02のモデル研究者も参加し、観測データが取得されている現場を見つつディスカッションすることで、より率直な意見交換が可能となった。

情報基盤整備として、情報交換やディスカッションを継続的に行うためチームコミュニケーションツールである Slack を利用し、またデータ共有（例えば観測キャンペーンで取得された各種データ）のため Google Drive を活用した。日進月歩のツール群を用いた連携のあり方について総括班を中心とした議論を行い、柔軟に対応することができた。

## 9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

### 本研究領域における「若手研究者」の定義

研究予算で直接雇用したものを主とするポスドク研究員、公募班・計画研究分担者・協力者となっている（特任）助教、任期付研究員、そして参加した大学教員の指導する学生のうち、テーマとした分野の次世代を担うことが期待される人材を若手研究者として育成支援の対象とした。（各人のキャリアパスやライフイベントの多様性を考慮して厳密さよりも幅広い支援を目指した。）

### 本研究領域での取組状況

計画研究において、採択時に7班のうち5班は代表者が40代と、中堅・若手を軸とした構成となっている。特に採択時45才未満の計画研究代表者は、長期的にこの分野を主導する立場となっていくことを想定し、総括班のとりまとめやシンポジウムなどのアウトリーチで前面に立つ役割を担ってもらうようにした。

研究予算で雇用したポスドク研究員は、計画研究A01では3名（東北大・九大・京大）、A02では2名（京都大学）、B01では2名（東京大学）、B02では2名（海洋研究開発機構）、C01では1名（東京大学）、C02では1名（北海道大学）となっている。さらにB01ではJSPS特別研究員（国際競争力強化研究員）、C02班では特任助教がそれぞれ1名加わっている。これらのポスドク研究員は、領域で行う定期セミナーにおいて、運営やディスカッションで中心的な役割を果たしてもらうよう促した。ポスドク研究員のうちC01班では外国籍の若手女性研究者（2023年に学位取得）を雇用しており、育成する人材の多様性も広げることができた。A02班では、雇用したポスドクが大学の助教に就くなど、プロジェクトが就職のステップとしても機能している。なお、直接雇用でなくても参加する分担者に博士取得後5年以内の若手を加える（B02）などの取り組みを行った例もある。これらの若手研究者には、年1回発行しているニューズレターやホームページで自分の研究紹介を行ってもらった。また、総括班予算の一部を主に若手研究者を想定したオープンアクセス出版支援に充てた。

2022年のハイブリッド全体会合を経て、2023年には対面での全体会合が（適切なコロナ対策を講じた上で）可能となり、若手研究者には貴重な交流の場となった。ポスターセッションを実施し、3日間の会合期間中に毎日2-3時間のコアタイムを設けることで、十分なディスカッションを確保した。また、夕食後の懇親会やキャンプファイアの時間にはくつろいだ雰囲気の中で親睦を深めることができた。最終日にはベストポスター賞を発表するなど、切磋琢磨して研究レベルを引き上げる試みも実施した。

大学に所属する代表者・分担者により、本研究領域に関係するテーマでの学位取得も始まっている。B01班（分担者：日浦勉）では、日本列島の森林生態系において木本性つる植物のアバンダンスと分布パターンの変化のメカニズムを明らかにした博士課程学生（日下部玄）が2024年3月に学位を取得した。またC02班では、COP26サイドイベント International Universities Climate Alliance（気候変動研究に関する国際大学連盟）主催によるアジア地区ワークショップ“Climate and Cities Conference – the Asian Region in a Global Context”での学生研究発表コンテストにおいて修士学生（二宮秀輝）が一位になるなどの成果も上がっている。

本研究領域の特徴的な活動である観測キャンペーンは若手育成の場としても大いに効果を発揮した（右写真は2023年・苫小牧研究林での集合写真）。ミクロからマクロ、観測とモデルの研究者が会する場において、共同作業やディスカッションを行うことで研究の視野を広げスキルを向上させることができた。計画研究代表者も、その効果が発揮されるようにポスドク研究員にテーマを与えるなどの工夫を行っている。例えばC02班では観測データのモデルへの同化手法について研究を行い、博士学生が論文を執筆した。



## 10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

○総括班における広報担当（加藤）を決め、アウトリーチ活動を推進した。領域ホームページ（左図：<https://digital-biosphere.jp/>）を立ち上げ、同時にロゴも決定して、活動やメンバーの紹介を随時行った。年



1回のペースでニュースレターを発行し、最近の領域活動、各計画研究・公募研究の内容、若手人材をアピールする場として活用した。

○2022年6月に開催された日本科学振興協会（JAAS）キックオフ会合に参加し、本研究領域を紹介するポスター発表を行った。他の学術変革領域関係者を含む異分野の研究者と交流を持った。

○本研究領域参加者により、多くのテレビ番組において出演・取材協力が行われ、本研究領域に関連する内容紹介が行われた。下はその一部である。

- ・日テレ系全国ネット「沸騰!地球アツベンチャー～日本の未来を探す旅～」2024年6月（出演：熊谷）
- ・NHK「映像の世紀バタフライエフェクト」2023年11月（取材協力：伊藤）
- ・NHK-BS「全部見せます世界遺産—知床」2023年8月（出演：日浦）
- ・NHK BS プレミアム「ヒューマニエンス「CO<sub>2</sub>」見えざる生命の創造者」2023年5月（出演：熊谷）
- ・NHK BS スペシャル「デジタル・アイ 消える大森林」2023年4月（出演：熊谷）
- ・NHK BS プレミアム「コズミックフロント「アマゾンの”空飛ぶ川” 見えてきた地球規模の水循環」2022年3月（出演：熊谷）

○本研究領域の特徴的な活動である観測キャンペーンはアウトリーチとしても有効であった。北海道大学苫小牧研究林において2023年7月に実施され約80名が参加した観測キャンペーンは複数の報道機関に取り上げられた（右図：苫小牧民報7月29日朝刊）。（取材協力：伊藤）



○一般向け講演において本研究領域の活動を紹介した。下は一例。

- ・岐阜テクノ62勉強会「地球温暖化とカーボンニュートラル」2023年2月15日（招待講演：村岡）
- ・RICOH Solution Fair Gifu 2022「あらためて知っておきたい カーボンニュートラルと地球温暖化」2022年7月8日（招待講演：村岡）
- ・岐阜大学公開講座「カーボンニュートラルでひろがる地域活性化の可能性」2021年12月4日（招待講演：村岡）

○新聞など各種メディア掲載記事で本研究領域の活動を紹介した。

- ・大分合同新聞 朝刊一面「かぼす論壇 2024～故郷への提言」2024年3月13日（執筆：熊谷）
- ・朝日新聞 SDGs Action「プラネタリー・バウンダリーとは」2023年（取材協力：伊藤）
- ・esse-sense「北極圏の森林を見つめ、地球環境に思いを馳せて」2022年（取材協力：小林）
- ・リバネス 研究応援「永久凍土～今、我々はいかに向き合うべきか～」2022年（取材協力：小林）
- ・日本自然環境保全協会「しぜんかんきょう第5号 炭素を知り、地球温暖化を考える」（取材協力：小林）

○学校行事などを活用して一般向けに本研究領域の活動を紹介した。

- ・東京大学メタバース工学部ジュニア工学教育プログラム（小学生向け）「森が私たちを守る！」2023年10月15日（講師：熊谷）
- ・「東京大学本郷キャンパス内 三四郎池散策・樹木解説」2023年10月22日（講師：熊谷）
- ・出前授業 宮城県佐沼高校（2022）、秋田県大館鳳鳴高校（2023）（講師：彦坂）

○政策担当者向けに本研究領域の活動を紹介した。下は一例。

- ・GEO Symposium 2023, Geneva, June 2023（招待講演：村岡）
- ・GEO Open Data Open Knowledge Workshop 2023, Geneva, June 2023（招待講演：村岡）
- ・GEO BON Global Conference, Montreal, October 2023（招待講演：村岡）
- ・CBD Secretariat Knowledge Management for Biodiversity seminar, October 2023（招待講演：村岡）

## 11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

総括班が研究領域内での調整を行い、観測サイトや機器の共用を進めるなど効果的・効率的な使用に心がけた。コロナ禍の影響を受けた2021-2022年度は国外調査が制限されたが、その分、国内での調査やオンラインでの学会参加などを精力的に実施した。観測や全体会合は可能な限り大学施設を使用するなど経費圧縮に務めた。本領域予算で購入した主な高額機器は以下のようなものがある。

### A 分野（メカニズム解明）

- ・元素分析機：2021年度に導入し、植物の葉・茎・根の窒素・炭素濃度を定量。東北大に設置。
- ・TOC/TNアナライザー：2021年度に導入し、分画した土壌中有機物を定量。九大に設置。
- ・CO<sub>2</sub>濃度測定装置：ガスフロー・データ記録システムに組み込み、より詳細かつ定量的に土壌呼吸を連続して多点でモニタリングできるシステムを開発した。九大に設置。
- ・LI-6800F/KO54 携帯式光合成蒸散測定装置（クロロフィル蛍光ユニット付き）：京都大学小野田研究室に設置。随時稼働中。A02 班内だけでなく関連研究者が随時使用可能な状態。
- ・Matrice300RTK+L1 LiDAR 搭載 UAV、L2（L1の後継機でより詳細な測定が可能）、BLK2GO：京都大学小野田研究室に設置。森林内のレーザー測量システムを構築。随時稼働中。A02 班内だけでなく関連研究者が随時使用可能な状態。

### B 分野（広域観測）

- ・LI-7200RS クローズドパス CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 変動計（合計4台：右写真）
- ・CSAT3B 3次元超音波風速計（合計2台）：苫小牧サイトでの森林-大気間 CO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O 交換速度観測で稼働中（左写真）。高山サイトに新規設置予定。観測システムの高度化のための実験に随時使用。
- ・LI-6800 携帯式光合成蒸散測定装置（合計2台）：東京大学熊谷研究室に設置。B01 班内だけでなく関連研究者が随時使用可能。
- ・QIAcuity One ナノプレート方式デジタル PCR 装置：東京大学日浦研究室に設置。B01 班内だけでなく関連研究者が随時使用可能。
- ・分光光度計（ラムダ 850）：採水サンプルから植物プランクトンバイオマスの指標となるクロロフィル濃度の分析に利用計画研究 B02 と公募研究 B03（PI 比嘉紘士）で共同利用。
- ・大型 UAV システム（Boomerang 2）と分光イメージャー（PikalR-L）：UAV ハイパースペクトルシステム開発に使用。得られる画像データは領域内で共有される予定。



### C 分野（モデル開発）

- ・DELL Precision 7920 ワークステーション：東京大学伊藤研究室に設置。48 コアを搭載し生物圏モデルのプロトタイプ版計算実行やデータ分析に使用。
- ・C/N アナライザー（NC-TR22）：モデル開発に必要な土壌パラメータを取得。A01 班などと共有。

観測キャンペーンサイトの実験施設設置・整備は多数の研究者による共同研究に極めて有効であった。総括班は、学生・若手を含む多くの研究者に参加旅費を支出し、東京湾のフィールドキャンペーンの際には航空機観測やデータ共有のクラウドストレージ費用など領域独自の活動を支えた。

- ・40年間の野外モニタリングデータで明らかになった針広混交林における常緑針葉樹の衰退のメカニズムを明らかにするため、北大苫小牧研究林において降雨遮断実験地（10x10m プロット 16 反復）を設置し、複数班で2023年から観測を開始した（右写真）。

・岐阜大学・高山試験地における共同観測体制の整備を実施。森林の分光反射特性、生理生態学的特性等の観測に用いる林冠観測タワーの維持管理、共用・貸し出し可能な土壌呼吸測定装置や光合成蒸散測定装置の保守点検費、観測サイトにおける共同研究のための光熱費の支出等。

- ・2024年7月29日-8月2日には高山試験地において本プロジェクトの森林合同調査を60人規模で実施する計画であり、総括班を中心としながら全計画班が協力して準備を進めている。これらの合同調査において使用される調査機材・物資等についても総括班が支援する計画である。





## 12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

これまでの本研究領域で培われ今後も発展させるべき項目は4点あり、推進方策を以下に説明する。

### ① ミクロからマクロまでスケール横断的な統合生物圏科学の研究基盤の拡充

本研究領域には分子生物学から地球環境学まで幅広い空間スケールを扱う研究者が参加しており、観測キャンペーンなどを通じて交流・連携を始めることができた。このような分野横断的な試みは、分野にとらわれがちであったこれまでの学術の体系や方向を大きく変える分岐点となる可能性があり、今後も推進していくべきである。そのため、観測ステーションの整備、購入した機器の共有体制、データベースなど、本研究領域で構築した研究基盤を維持あるいは拡充していく。本領域が標榜する「統合生物圏科学」をより高いレベルで実現するため、学際的研究に向けた新しい取り組みを推進する。2024年度から開始した公募研究では、22件中の14件が新規参加であり、領域で扱われるテーマの多様性を広げる上で非常に有意義である。新しく加わった公募研究の中には、マングローブや大型動物といった、これまでの計画研究で手薄であったテーマが含まれており、本研究領域のカバレッジを補完する役割が期待される。2024年度以降も観測キャンペーンは実施される予定であるが、これら本研究領域で非常に有効であった試みは、より長期的な視点で継続していく努力を行う。その一環として、計画研究代表者のうち若手（応募時に45才未満）を中心として後継大型課題に申請する検討を始めており、本研究領域による資産の継承と分野横断的な生物圏科学という方向性の発展を目指す。

### ② 生物圏の諸プロセスを統合するモデル「デジタルバイオスフェア」の完成

本研究領域の知見を統合するデジタルバイオスフェアは、地表を数kmの高分解能でカバーし、従来よりも生物の諸プロセスを精緻に扱う複雑・大規模なモデルである。2021～2023年度において、テスト領域における陸域での1kmメッシュ計算や、中分解能でのグローバル計算、大規模計算機での並列化実効性など技術的研究開発を進めており、2024～2025年度はデジタルバイオスフェアに向けた作業を加速する。必要な作業として、海洋モデルと陸域モデルの結合と、A分野によるメカニスティックな知見の反映、B分野による広域観測データを用いた検証などがある。このような生物圏主体の高分解能・大規模モデルは未曾有のものであり、今までよりもきめ細かい気候変動対策（特に自然に基づく対策[Nature-based Solution]）の検討に寄与することが期待される。本研究領域では気候変動の緩和（「CO<sub>2</sub>吸収」「バイオマス生産」「土地利用」）に主眼を置いているが、将来的には気候変動適応や生物多様性などより幅広い問題をモデルで扱えるようになると期待される。2022～2023年度から土地利用を扱う社会経済モデル研究者が公募研究に参加しており、本研究領域の出口となるシナリオベースの実験検討に有意義な研究が行われた。2024年度からモデル分野で参加する公募研究の数は大きく増え、数理的な視点、海洋モデル、陸域の火災モデル、土地利用シナリオと、多様な研究が実施される見込みである。本研究領域で設定した問いに関するモデル解析を研究期間中に実施するため、公募研究と連携しつつ進めていく。一方、大規模なモデル開発には10年単位の時間を要するのが普通であり、特に本研究領域のように広大で複雑な対象を扱うモデルは、研究基盤として長期的な開発体制を構築することを模索する。それは①で掲げた統合生物圏科学の発展と足並みをそろえて進められることが望ましいと考えている。

### ③ 若手人材の継続的な育成

本研究領域に関わるポスドク研究員は10名以上を数え、多数の学部学生・大学院生、助教から任期付研究員クラスの若手研究者が参加した。本研究領域には多様なキャリアパスを経た研究者が参加しており、若手研究者が自身の進路を考えるうえで参考（ロールモデル）になったと思われる。研究期間中はセミナーによる定期的な交流、観測キャンペーンや全体会合における対面での密な情報交換やディスカッションなど、若手同士の交流や人材育成の機会を持つことができた。2023年10月に実施された特別セミナーでは、海外の著名研究者による講演と質疑応答を行うなど、若手研究者への刺激となる機会も提供

してきた。2024～2025 年度も同様な人材育成を継続し、若手研究者による成果のオープンアクセス出版を支援するなど、次世代を担う人材の育成を図る。また、研究期間終了後の人材育成を見据え、領域代表者（伊藤）より JST ASPIRE 事業に申請を行った（参加者：日浦、加藤）。この事業はトップレベル人材の頭脳交流に加えて、国際ネットワークの構築と人材育成を重視しており、予算規模も大きく、本研究領域に参加した若手人材のステップアップの場ともなることを想定している。具体的には、米国ミネソタ大学、フィンランド自然資源研究所、英国水文生態研究センター、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学の研究グループと共同提案を行い、それらの機関への派遣やワークショップの共同開催などを実施して国際的な場で活躍する若手人材の育成を進めていくことを目論んでいる。

#### ④ 国際的なネットワークの強化・構築

本研究領域参画者の多くは国際ネットワークにおいて活躍しており、本課題の成果を踏まえて強化を図る。参加している国際ネットワークとして、長期生態系研究（LTER: 村岡が日本ネットワーク JaLTER 共同代表）、生物多様性観測ネットワーク（BON: 村岡・近藤・黒川（A01）が日本ネットワーク JBON 運営委員）、大気-陸域間フラックス観測ネットワーク（FluxNet: 市井（公募班）が日本ネットワーク JapanFlux 代表、加藤・小林・植山（総括班）が同運営委員）などがある。また関連する国内ネットワークである PEN（生物季節観測）や ANEMONE（環境 DNA 分析）での活動も活発である。これらネットワークへの参加は、観測技術の標準化、データ共有とグローバルスケールでの解析の促進、若手人材の育成などに大いに有効性を発揮してきた。従来、これらのネットワークは学術分野別に特徴的な活動であったが、観測サイトやデータを共有することによる分野横断的な気候変動-生態系-生物多様性観測とモデリング研究の推進が重要であることも本課題などを通じて議論し、総説論文として纏められた（Muraoka et al., 2023）。また同様の動向は国際的にも進められており、GEO 生物多様性観測ネットワーク（GEO-BON: 村岡が運営委員及びアジア太平洋 BON 共同代表）により提案された全球生物多様性観測システム GBiOS 構想にも参加している（Gonzalez et al. 2023）。本研究領域で実施された観測データの活用や人材育成をさらに促進する上で、これら国際ネットワークとの連携強化は重要な課題である。そのための取り組みとして、例えば JapanFlux として生態系-大気間のフラックスデータベースの構築を推進している（植山）。この取り組みをアジア域に波及させるため、AsiaFlux SSC Meeting で紹介した。日中韓でも、同様の取り組みが開始されることになり、Asia 域を対象とした国際データベースの構築に取り組んでいる。

2050 年までのネットゼロ排出と 2030 年までの生物多様性のプラス方向への転換（ネイチャーポジティブ）に向けて、国際的な環境政策の動きが加速しており、本研究領域からも戦略的な貢献が期待される。それらを支援する科学的アセスメントである IPCC や IPBES などへの参加・貢献の促進が課題となるが、国際ネットワークを介することで効果的な貢献が可能になる。2024 年 12 月に公表予定の IPBES Nexus 報告書には伊藤が責任執筆者として参加しており、今後作業が進められる予定である第 2 次グローバル評価報告書などに本研究領域から積極的な参加貢献・インプットを進めていきたい。IPCC 第 7 次評価報告書についても、2024 年にスコーピングが行われた後、2028 年の出版に向けて作業が始まる見込みであり、本研究領域の成果を踏まえた貢献をしていく。伊藤は IPCC による土地利用専門家会合（2024 年 7 月、イタリア・イスプラ）に参加する予定であり、そこでも議論に参加するだけでなく本研究領域の成果をアピールし IPCC 評価報告書への貢献を最大化するよう務める。このように、本研究領域で培った国内外のネットワークを活用して、より効果的にインプットしてしていく。

### 13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

#### 寺島一郎（東京大学名誉教授、東京大学大学院農学生命科学研究科）

令和3年度に本領域が始動した時点で、参画研究者の約1/3とは面識があり研究履歴も把握していた。研究履歴は貴重であり、それがこの領域研究でも研究展開の基盤となっていると思う。しかし、本領域では、新たな課題に挑戦する研究者が多い。2022年9月に東京大学の農学部で行われた対面/Zoom併用の領域会議において、面識のなかった研究者も含めた参画者の研究計画を聴き、2023年9月に東大山中寮において対面で行われた領域会議で研究の進捗を目のあたりにして、領域代表者や首脳陣ばかりでなく、参画者が「統合生物圏科学」の創生のために本気になっていることに感銘を受けた。これまでの履歴とはかなり異なる分野に挑戦している者も多かった。なかでも特筆すべきは、これまで「森林の生理生態学」では研究の遅れていた土壌の機能に関して、メタゲノミクス技術の興隆や、統計学の深化、安定同位体・放射性同位体を用いた研究手法の発展を背景に、多くの意欲的なテーマが設けられていることである。背景とってしまうと語弊がある。この領域研究で開発されつつある新手法も多い。2023年9月のポスター発表において、発表者と議論したところ、大学院生や研究者の一人一人が、「統合生物圏科学」における自身の立ち位置をよく理解した上で研究を推進していることがわかった。これは、これまでに35回も開かれたオンライン領域セミナーにおける議論が、大学院生を含むメンバーによく浸透しているためだと思われる。また、東京湾と苫小牧で行われたフィールド観測キャンペーンも、領域の活動理解のために非常に有効であると思う。

本領域に参画した大学院生や研究者は、良く練られた、必須不可欠な課題に取り組んでいる。しかし、これらは目的達成型の課題ではない。研究者の興味を満たしつつ、突破しなければならない壁も備えた骨のある課題である。研究者は、ひるむことなくのびのびと研究を進めている。

本領域が採択されるまでには苦労もあったようだが、採択後には「審査で指摘を受けた事項への対応」も完璧に行っており、社会の期待に大きく応える「統合生物圏科学」が勢いをもって推進されている。本領域では、デジタルバイオスフェアという巨大モデルの構築が出口となっており、5年間の成果を問うことが客観的にも可能である。しかし、モデルは5年で完成するわけではない。今後の地球環境変化に高い予測力をもって並走しつつ、適応策を次々に打ち出すためにはさらに改良を迫られるはずである。5年間の成果としては、「統合生物圏科学」が順調に漕ぎ出され、モデルにその成果が反映される道が拓かれれば大成功だと思う。「統合生物圏科学」研究がさらに長期にわたって継続・発展すれば、地球環境の変化に並走しつつ迫力のある適応策を打ち出す基礎となることに疑いはない。代表や首脳のみならず参画者の意識が高く、社会的意義も大きい本領域研究のこれまでの活動を高く評価したい。本領域推進の意義をご理解いただき、是非、ご支援を継続していただきたい。

#### 三枝信子（国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・領域長）

将来の地球の気候を安定化させるため、2050年までにカーボンニュートラル実現が喫緊の課題である中、地球規模での生物圏の動態を包括的に把握する新しい生物圏モデル「デジタルバイオスフェア」を開発する本研究の目的はタイムリーであり、気候変動対策を加速する上でも必要性が高い。特に、化石燃料起源の人為起源CO<sub>2</sub>排出量の削減だけではパリ目標の達成が困難であることが明らかになる中、人為起源の温室効果ガス排出量とバランスするための人為起源吸収量（ネガティブエミッション）の拡大は必須であり、本研究は、植物バイオマス、土壌有機物、ブルーカーボンへのCO<sub>2</sub>固定を見据え、デジタルバイオスフェアを活用した吸収源の把握を視野に入れている点で、喫緊の社会のニーズに応えようとし

ている。さらに、生態系機能を最大限に生かした防災・減災への取組や食料生産の確保という視点でも、デジタルバイオスフェアの活用範囲は広い。これを可能にするために、本研究は生物科学、地球科学、農学、工学に高い専門性を持つ参画者から構成されており、マルチスケールでの現象解明と将来予測への貢献が期待できる。

現時点までの成果を見ると、国内複数地点の森林炭素循環のモデル化が進展し、炭素・窒素の同位体を活用した土壌有機物追跡に係る解析法が確立するなどの成果があった。また、UAV-LiDARを用いた樹冠高モデルの作成ワークフローを確立するなど、本研究にてそれらの手法を拡大し得る取組が進んだ。大陸スケールでの課題については、JapanFlux及びFLUXNETの多点観測データを再構築するなど、日本が強みを持つ東アジアや東南アジアの生態系における炭素・水循環の理解をより進めるためのデータ整備が進展した。モデル開発においては、土壌炭素動態の研究グループとの連携により、これまでデータが乏しかった樹木の細根生産量の情報を含む生態系モデルの高度化において大きな進展があった。また、陸域だけでなく海洋と大気のコ<sub>2</sub>交換についても、観測データベースに基づく広域評価が行われた。陸域生態系モデルVISITにおいては、高分解能VISITモデルを超並列コンピュータ上で運用するための性能評価が進み、新次元のVISITモデルとそれを最大限活用したデジタルバイオスフェアの誕生を予感させられた。地球システムモデルについては、陸域・海洋双方の生態系モデルに温度順化、CO<sub>2</sub>順化、栄養塩の循環が組み込まれ、気候将来予測に生物圏のフィードバックを本格的に考慮する準備が進んだ。

全般的に各研究グループからは多数の原著論文の発表があり、個別研究が多数進展したことが見て取れる。若手育成の機会としても、本研究がポストドク研究員の育成と活躍、若手研究者の交流と研鑽の機会として極めて有効に機能していることが認められる。研究成果は国内のみならず、地球観測に関する政府間会合やIPBES Nexus 報告書への科学的知見提供に繋がっている点は高く評価できる。今後は、各々の研究グループの成果（特に素過程の研究成果）を、デジタルバイオスフェアの完成にしっかりと繋げていく取組が必要であろう。素過程を深掘する研究や、個々の新規的手法開発の成果が、地球規模の高分解能VISITや地球システムモデルを駆使する研究に対してどのように新規性を付加していくのか、プロジェクト後半の成果が期待される。加えて、デジタルバイオスフェアに基づいて、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて世界の生物圏の機能をどこまで活用できるかといった課題にも、本プロジェクトからの貢献を期待したい。