

【領域番号】 4004

【領域略称名】 サンゴ礁学

【領域代表者（所属）】 茅根 創（東京大学大学院・理学系研究科・教授）

本研究領域では、前述のとおり学際分野の連携を推進するために、複合ストレス評価、生態系の応答評価、社会システム評価という3つの連携課題を設けて研究を進めたので、達成度もこの3つの連携課題ごとにまとめる。各連携課題の目標は、前項「2. 研究組織と各研究項目の連携状況」の最後に記した。

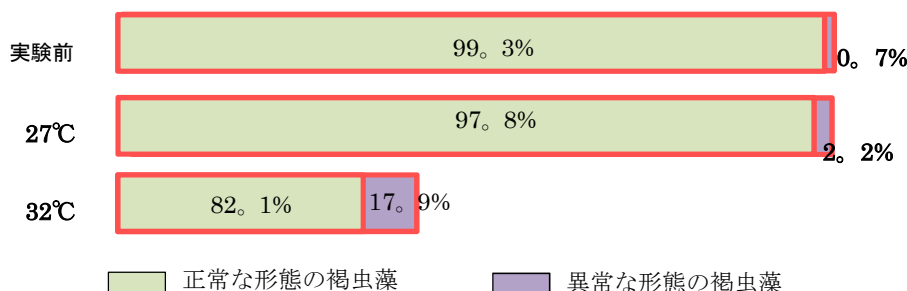
(1) 連携課題「複合ストレス評価」

① 複合ストレスに対するサンゴ-褐虫藻-細菌による複合共生系の応答 (A01・A02)

サンゴのストレス応答を、とくに初期生活史に焦点を当てて調べた。褐虫藻の存在がプラヌラ幼生のストレス感受性を高めること、褐虫藻のタイプによりサンゴ幼群体のストレス応答が異なること、ストレス特異的に反応して発現が変化する遺伝子があることを発見した。すなわちウスエダミドリイシの一次ポリプを、高温ストレス、有機スズ (TBT)、光合成阻害剤 (DCMU) に暴露し、発現変化する遺伝子を調べた結果、各ストレスに特異的に反応して発現が上昇する遺伝子が見つかった。さらに群体型や遺伝子型などの違いによるサンゴのストレス応答の違いも明らかにできた。ミドリイシ属サンゴの幼生に人工的に褐虫藻を感染させると、高温や強光ストレス感受性が高まる。ストレス条件下では褐虫藻が活性酸素発生源となるためである。ウスエダミドリイシとハナヤサイサンゴ 2 種の幼生と成群体とで呼吸の温度依存性を調べた結果、幼生は成群体に比べて Q_{10} (温度依存性を示す値) と呼吸速度のどちらも低く、幼生はエネルギー消費を抑えて高温ストレス耐性を高めている可能性が示唆された。高水温ストレス下で褐虫藻は光合成能を低下させ、それによりサンゴは褐虫藻からの有機物の供給が減少する。しかし、サンゴ自身も高水温下でストレスを受け、呼吸活動が増加し、消費する有機物をより必要とする。そのため褐虫藻の消化がより行われることにより、褐虫藻の色素が失われる割合が増加する。とくにサンゴ体内の活虫藻は高水温下で半分以下に激減するだけでなく、異常な形態 (縮小) の割合も増加する (図)。

② 複合ストレスに対する複合共生系の化学的応答・指標 (A01・A02)

海水温の上昇と紫外線量の増加によるストレス指標として、炭酸脱水素酵素や緑色蛍光タンパク質の遺伝子発現、DNA 損傷および脂質組成の変化がサンゴの高



水温下におけるストレス指標として有効であることを見出した。また高水温ストレス下ではサンゴがタンパク質やアンモニアを高濃度で放出すること、それに伴いタンパク質分解酵素であるプロテアーゼが放出され、褐虫藻、サンゴの組織の一部が損傷を受けることを見出した。また高温および紫外線増加のストレス下ではサンゴ内に共生する褐虫藻の色素であるペリジニンとクロロフィル *a* 濃度が減少すること、アミノ酸組成も変化し、プロリン等のアミノ酸が増加することを見出した。ココビミドリイシのゲノム情報が利用可能となり (Shinzato et al. 2011)、細胞内酸化ストレス状態の指標となる酸化型チオレドキシン、活性酸素除去系のカタラーゼ、サンゴの石灰化および褐虫藻の光合成に重要な役割を果たす炭酸脱水素酵素などのストレスパラメータとしての有用性を明確にする道筋が拓かれた。

③ ミクロからマクロスケールまでのストレス評価 (様々な時間空間スケール) (B01・A01・A02・C01・C02)

ストレス要因を挙げ、それらをグローバルな環境要因 (制御不能)、ローカルな負荷要因 (制御可能) と、それらにより影響されるサンゴ礁の系内の攪乱要因 (生物的要因) に区分した。ミクロスケールではサンゴの胃腔中の細菌の細胞数は $10^7/L$ のオーダー、サンゴの外側の海水中の細菌数 $10^5/L$ に比較してかなり高いことを明らかにした。サンゴ内部のストレス指標として、ビタミン B_{12} の濃度も指標になる。サンゴ内では $100-700pM$ に対して、海水中では $2-5pM$ 、サンゴ内で高いということ、高い水温下では濃度は低くなることを明らかにした。世界で初めてのサンゴ内部の測定からサンゴの周りの海水に対してサンゴは半閉鎖系な振る舞いをしていることを明らかにした。環境ストレス下におけるサンゴの生命維持とビタミン・アミノ酸との関係の重要性を明らかにした。サンゴ内部の栄養塩循環が明確になった。複合共生系のストレス応答に関する生物・化学過程の理解のための有用な指標のいくつかが確定できた。

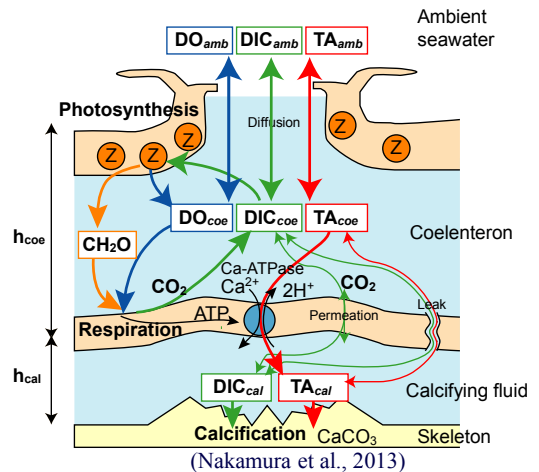
マクロスケールでは、陸域から負荷の指標としての硝酸濃度の分布および変動を整理し、ストレス指標として機能すること、硝酸負荷とサンゴ礁の劣化が歴史的にも密接に関係していることを明らかにした。またグローバルなストレス要因の閾値として、水温 (+2度) と酸性化 (pH7.8) をフィールドと飼育実験で統合的に定めることに成功した。

(2) 連携課題「生態系応答評価」

サンゴ礁生態系応答モデルの開発は C02 班が中心となって担当し、そのコアとなるサンゴ内部モデル (ポリプ) モデルの開発とサンゴ礁物質循環・低次生態系モデル (微生物ループも含む) の開発にあたっては適宜 A02 班と連携して取り組んだ。以下にモデル開発の内容について述べる。

① サンゴ内部モデル (ポリプ) モデルの開発

複合ストレス下でのサンゴ礁生態系の動的応答過程を理解するための方法論の一つとして、高水温負荷や酸性化負荷、栄養塩負荷といった個別の負荷条件の下でのサンゴ片の室内暴露実験を行う研究が数多く行われてきているが、それによって現地のサンゴ礁生態系でのサンゴ群体の実際の挙動を十分に説明することは出来ない。というのも、実際の現地のサンゴ礁生態系では、これらの各ストレス要因がさまざまな時間スケールで常に変動をされていて室内暴露実験のような一定負荷条件ということとはあり得ず、しかもこれらの負荷要因が同時に作用していることから、「現実の複合環境ストレス下でのサンゴ礁生態系の動的な応答の解明」という課題に対して、このような方法論で取り組むには原理的には限界があるからである。C02 班では、この原理的な限界を克服することが出来る新たな方法論として、複合ストレス下でのサンゴ群体内部の動的応答過程を表す、従来にない「サンゴ内部モデル (ポリプモデル)」 (Nakamura et al.,



2013) の開発に成功した。このモデルは、サンゴの石灰化の概念モデルとして幅広く受け入れられている trans-calcification モデルを基に定式化を行ったもので (図)、サンゴの石灰化に特徴的にみられる“光に促進された石灰化 (light-enhanced calcification)” と呼ばれる現象や、石灰化や光合成の海洋酸性化応答や流速依存性などの基本応答が、このポリプモデルによっては良く再現することが示された。さらに、栄養塩や水温、赤土の影響などのストレス応答の素過程の解明を A02 班と共同で行い、それらの素過程をこのモデルに組み込むことに成功した。得られたモデルにより、フィールドで観察されているサンゴ群体のストレス応答に近い応答特性が再現された。

② サンゴ礁炭酸系動態モデル動態モデルの開発

上記のサンゴ内部モデルの開発と併行して、サンゴ礁スケールでの複合ストレスの時空間変動評価ならびに生態系応答評価の両面に関わるモジュールの一つとして、サンゴ礁炭酸系動態モデル動態モデルの構築を行い、沖縄・石垣島東海岸サンゴ礁域での現地調査データを良好に再現することに成功した (Watanabe et al., 2013)。同モデルによる解析の結果、サンゴ礁内での炭酸系動態が、サンゴ礁内海底被覆分布や海水流動変動に基づく大きな時空間変動性を示し、特に CO_2 吸収・放出特性がサンゴ礁内で大きなコントラスト分布を示すことを明らかにした。この成果は、サンゴ礁内のただか1、2点での定点観測データの解析に基づく従来の炭酸系動態研究の限界を打破するものである。

③ サンゴ礁物質循環・低次生態系モデルの開発

サンゴ礁内での複合ストレスの時空間変動評価ならびに生態系応答評価の両面に関わるもう一つのモジュールとして、サンゴ礁における栄養塩や有機物の物質循環ならびに低次生態系の時空間応答過程を解析対象としたモデル開発を A02 班と連携して行った。このモデルは、詳細な流動場モデルをベースとして、水柱の生食連鎖と微生物循環および底生生物群集の代謝を組み込むことで構成されている。このモデルによる解析の結果、リーフ内の有機態動態がサンゴ粘液の生成と流動による移流効果に大きく支配されていること等が明らかになった。

④ サンゴ礁生態系短期応答モデル開発

上記のサンゴ内部モデル (ポリプモデル) をコアモデルとして、それをサンゴ礁炭酸系モデルおよび物質循環・低次生態系モデルに結合させることにより、複合ストレス下でのサンゴ礁生態系の短期応答を定量的に評価出来るモデル体系を開発した。これにより、海洋酸性化に対する応答や海水準の上昇に対する応答、さらにはそれらが複合的に起こった場合の応答など、将来予測に向けたいくつかシナリオ実験解析の結果を得ることに成功した。実験解析の結果は B01 班が得た過去の変遷や、C01 班が得た温暖化・酸性化・海水準上昇応答の結果によって検証、解析を進めている。

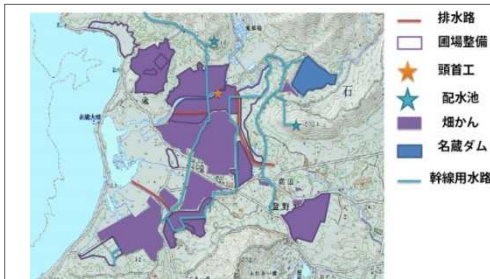
今後さらに、サンゴ幼生加入効果の導入等による長期応答モデルの開発や、トップダウン効果の取り込みなどを図っていく必要があるが、本課題の取り組みによって、サンゴ礁生態系についての、従来にないモ

デル体系の基礎を構築することが出来た。

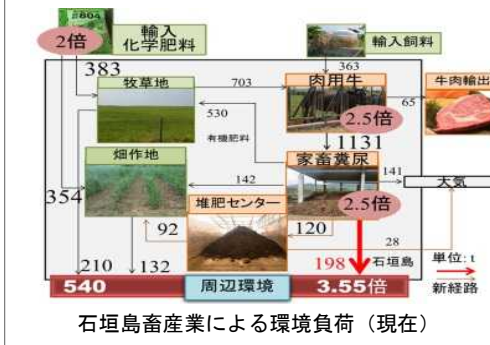
(3) 連携課題「社会システム評価：サンゴ礁－人間共存系に資する社会システム構築の可能性」

① 島嶼社会を構成する人々の多様な出自と立場 (B02)

海洋に囲われた島嶼世界は一見すると孤立した閉じた空間のように思える。しかし八重山諸島では、近世の地割制度や通耕、寄百姓といった慣行・制度のなかで、諸島民の頻繁な移動があった。近代以降は日清戦争後の南進政策や台湾開発と連動して、沖縄本島の糸満系漁民、宮崎県から入った鯉節製造業者、鹿児島出身の寄留商人、サトウキビ栽培と製糖業を目論んだ四国の起業家と移民、昭和初期にパイン栽培のために来島した台湾の人々が入植した。戦後はさらに、沖縄本島や本土から4千人近い自由移民や計画移民が渡ってきた。近年は、流通や交通手段の発達によって観光産業や畜産業が拡大している。石垣島の社会システムは閉鎖系ではなく、長い歴史のなかで外の世界と常につながりながら複雑化し続けている。島



1985-2000年土地改良事業（石垣島名蔵地区）



石垣島畜産業による環境負荷（現在）

を取り囲むサンゴ礁の劣化を考えると、多様な人びとの暮らしが並存するゆえに、そこにさまざまな利害が交差することを前提にしなければならない。

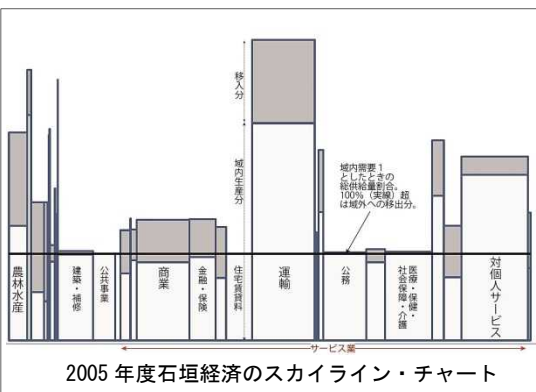
② 拡大した農地と畜産業による環境ストレス (B02, C01, B01, C02)

人々の移動に伴って生産技術や道具も常に変化してきた。キーパイ（木鋤）からカニパイ（金鋤）への移行や、昭和初期には二頭曳クラブなどの洋式農具や台湾の新式農具が導入された。戦後はさらに動力農機具が急速に普及した。耕運機の所有農家数は、1975年の345軒から2000年には1442軒に増加している。特に1980年代以降は、30馬力超の大型耕運機が主流となった。生産性の向上は土地利用の変化を引き起こし、浅海域への赤土流出量が増大した（B01成果参照）。1990年代以降には灌漑・排水事業が進み、取水地から尾根筋を超えて別の谷筋に農業用水が供給されるようになった。これによって耕地整備が進み、さらに多くの原野が畑地や牧地へと転換された。畜産業においても同時期に肉用牛が1万頭から3万頭に激増し、浅海域に流出する窒素量は3.5倍に跳ね上がっている。かつて循環型農業のなかで転用されていた家畜排泄物が島内で消費しきれ

なくなったことがもう1つの要因と考えられる。

③ 地域産業連関を踏まえた観光資源の波及的経済効果 (B02)

サンゴ礁が果たす生態系サービスへの善意の支払意思を問い、地域産業連関を通してサンゴ礁が島嶼経済にもたらす波及効果を提示することによって、多くの島嶼民の日常の実践の感覚にサンゴ礁の価値をアピールすることが可能となる。各種統計資料解析によるスカイライン・チャートによれば、自給率が高くかつ島嶼内生産額構成比が大きい産業部門は「運輸」「対個人サービス」、次いで「商業」である。これら



2005年度石垣経済のスカイライン・チャート

サービス産業部門は、他部門との連関度合いを示す影響力係数・感応度係数も高い。地方行政体の各種資料を精査し、観光産業の需要ベクトルを細分して解析したところ、付加価値誘発額の総額270億円のうち90%弱は八重山圏域内にとどまると推計され、他部門への大きな波及効果が期待できた。また、地域産業連関表でサンゴ種苗移植工事の一事例を検討したところ、域外に流出した付加価値額は12%にとどまった。サンゴ移植活動が島内生産総額に占める割合は現状では極めて小さいが、圏域内にとどまる付加価値誘発額の割合は高く、将来的な経済効果が期待できる。

④ サンゴ礁地形形成と人間居住の景観史 (B02, B01, C01)

石垣島とマジュロ環礁において、後氷期の海面上昇・温暖化に伴うサンゴ礁地形形成に伴う、人間居住・人間活動の歴史を復元し、地形の形成によって居住可能な環境が産まれると速やかに人間居住がはじまったこと、原初的な景観においても人間活動はサンゴ礁に無視できない負荷を与えていたことが明らかになり、人とサンゴ礁の関わりと再生のベースラインを提示することができた。

⑤ 景観史のアウトリーチ活動による社会的ネットワークの形成可能性 (B02, 総括班)

異なる産業部門の就業者を結びつけるだけでなく、就業年齢帯の外にいる高齢者や若年者を含め多様な世代間の社会的ネットワーク構築を検討するために、先史から現在にいたる景観史研究の成果 (B02班) を

素材としたアウトリーチ活動を石垣島で継続的に実施した。毎回 30-40 名におよぶ多様な職業、多様な世代の来場者をえた。第 3 回目には研究者の成果講演を切掛けにして、大判で打ち出した航空写真上に来場者の方々の「記憶」を位置づける社会実験を試みた。景観史と個人史を重ねることによって新たな出会いと対話の創出が可能であることを確認できた。