自然に基づく解決策としての沿岸生態系の再生
－藻場・サンゴ礁の再生技術と実装事例－

Restoration of Coastal Ecosystems as Nature-based Solutions
－ Technologies and Implementations for the Restoration of Seaweed Beds and Coral Reef －

山木 克則　林　文慶　中富 伸幸　中村 華子　高砂 裕之　田中 真弓　田中 昌宏
Katsunori Yamaki, Li m Boon Keng, Nobuyuki Nakatomi, Hanako Nakamura,
Hiroyuki Takasuna, Mayumi Tanaka and Masahiro Tanaka

Ⅰ．はじめに

人類の社会活動により大気に放出された二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの増加が起因となり，地球温暖化が進行している。海洋環境においても水温上昇や潮流の蛇行などによる漁業への影響が深刻化している。特に，藻場の「磯焼け現象」やサンゴ礁の「白化現象」は，海の異常事態として顕在化し（Photo 1，2），我々の食糧問題や地域経済への影響も無視できなくなっている。

地球温暖化によって引き起こされる自然災害に対する対策のうち，緩和策・適応策の両者として期待されるのが「自然を基盤とした解決策」（Nature Based Solutions：NbS）[1]である。NbS は，人間社会の経済や豊かさは，健全な自然生態系の下で成立するものであり，自然と調和した気候変動を含む社会課題の解決を図っていこうという考え方に基づく。これは，自然のプロセスを活用して，環境の保全と再生，持続可能な管理を行いながら，社会，経済で得る便益の最大化を目指すものである。その代表事例として，沿岸浅海域の藻場とサンゴ礁の再生が挙げられる。当社は，地域固有の大型海藻類の配偶体の保存，大量培養による陸上種苗生産技術を保有しており，地域の藻場再生を通じたブルーカーボン創出に貢献している。また，サンゴ再生では陸域起源の細粒分によるストレスの低減，台風によりダメージを受けたサンゴ群集をスピード再生できる「コーラルネット®」技術を保有し，海外プロジェクトへの展開を図っている。

これらの技術は，生態系における炭素貯留機能や生物多様性の増進，また，持続可能な漁業や観光産業などの地域経済の底上げを実現する。その先には，海面上昇や自然災害などに対する防災対策や沿岸部の浸食対策で重要な役割を果たし，島嶼国の国土維持にも貢献する。

海洋生態系での炭素貯留の仕組みは，2009 年に国連環境計画（UNEP）の報告書で命名された「ブルーカーボン」が知られている[2]。ブルーカーボンは，マングローブ，塩性湿地，海草・海藻場で吸収され，海洋生態系に長期間貯留される炭素のことである（Fig.1）。これまで，自然生態系における CO_2 の吸収は，陸上植物により吸収されるグリーンカーボンがよく知られるが，ブルーカーボンの登場により海洋が新たな CO_2 貯蔵庫の場として世界中で注目されている。地

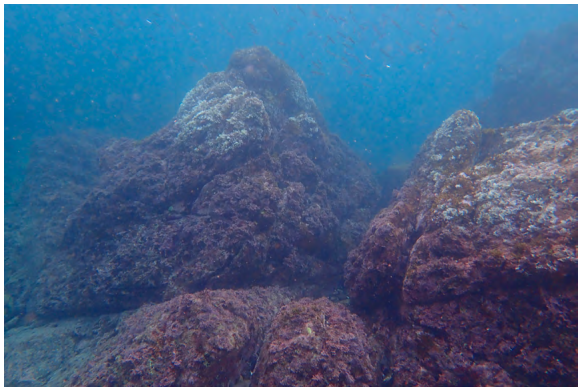


Photo 1　磯焼け現象
(Sea Desertification)

Photo 2　サンゴの白化現象
(Coral Bleaching)

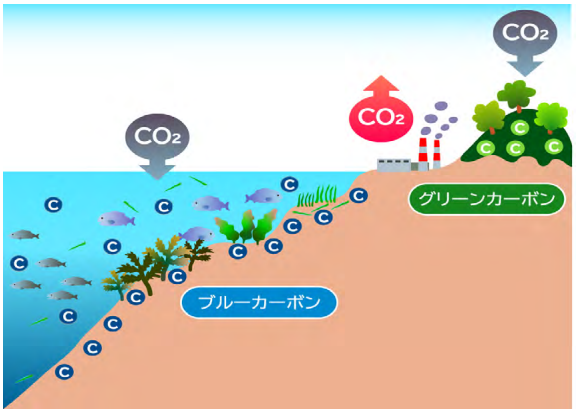


Fig.1　ブルーカーボン生態系
(Blue Carbon Ecosystems)

球上では年間に大気に排出される炭素が約 94 億トン余りとされるが，海底には年間 1.9～2.4 億トンの炭素が貯留されると推定され，藻場や干潟が占める浅海域ではそのうちの約 73～79%（1.4～1.9 億トン）[3] を占める。一方で，サンゴ礁においては，サンゴの石灰化反応の過程では二酸化炭素の放出側となるが，サンゴに共生する藻類やサンゴ礁生態系全体では吸収場となるとの報告 [4] もあり，統一的な見解が示されていない。サンゴ礁生態系では，炭素貯留以外にも食料自給，水質浄化作用，観光，教育，医薬など自然資源の様々な生態系サービスが多面的な高付加価値として見込まれていることからも再生，保全策が重要視されている。

Ⅱ．藻場再生技術によるブルーカーボンの創出

1．海藻の衰退要因

沿岸域の海藻群落である藻場は，有用水産生物となる魚介類の餌場や隠れ家，産卵場，稚魚の育成場となる（Photo 3）。近年問題となっている磯焼けは，ウニ類やアイゴなどの藻食性魚類が増えたことが主原因とされてきた。しかし，これまで長い間，全国各地でウニや食害魚の駆除，藻体移植などが行われてきたが，藻場が回復し，維持されている所はほとんどない。これは，磯焼けの根本的な原因が食害によるものではなく，藻場の生育環境の悪化，すなわち沿岸生態系の回復力の低下などと考えられる。カジメやアラメの生活環では，晩夏～秋季に遊走子と呼ばれる胞子を大量放出する。胞子はすぐに海底に着床し，細胞分裂をしながら配偶体となる。この配偶体は秋から冬の水温が下がる時期に成熟して卵を形成し，翌春には胞子体（海藻の若芽）が形成される（Fig.2）。ところが，近年の温暖化の影響で冬の水温が十分に低下しない場合，配偶体の成熟や発芽後の生育が十分進まない [5]。すなわち，本来海藻が持っている自己回復力が発揮できず，藻場が急速に減少・消失していると考えられる。また，近年は春先から遊走子を出す早熟性のカジメが増えており，配偶体が夏場の高水温に耐えられず再生産ができない事象もみられる。

神奈川県三浦郡葉山町の沿岸域では，2017 年頃より浅場に群生するアラメが衰退し始め，2020 年には深場のカジメも含めて磯焼けが目立つようになった。磯焼けへ転換する 2016 年から 2020 年までの冬季の水温は，平年よりも最大で 3～4℃高く推移したことから，水温上昇が配偶体の成熟，若

Photo 3　藻　場（葉山のカジメ場）
（Seaweed Bed（*Ecklonia cava* in hayama））

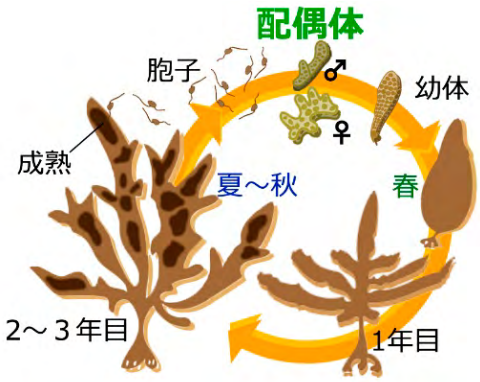


Fig.2　カジメ属の生活史
（Life Cycle of *Ecklonia*）

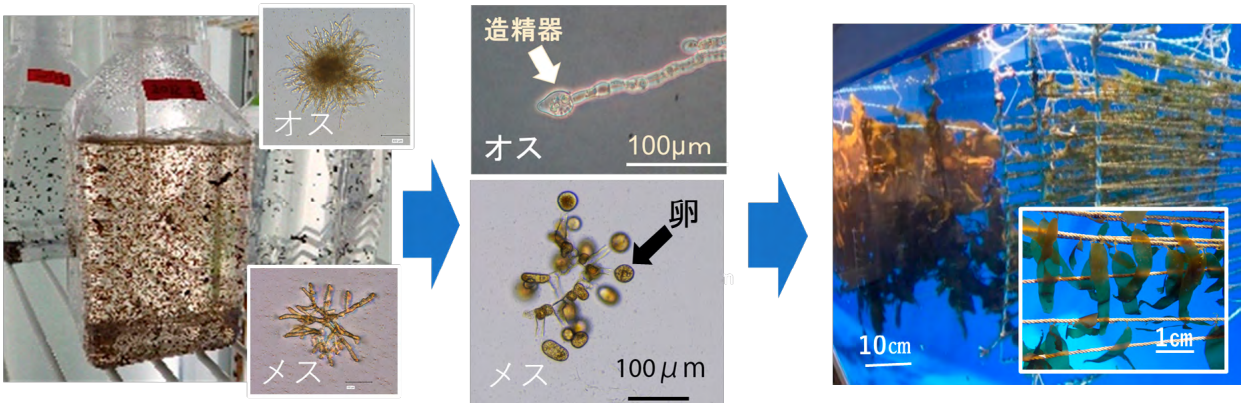


Fig.3　大型藻類の種苗生産技術
（Macroalgae Seedling Production Technology）

Fig.4　臨海プロジェクトにおける藻場再生
(Creation of Seaweed Beds in Coastal Projects)

しくは胞子体の生育など海藻の生活環に影響を及ぼした結果，磯焼けにつながった可能性が高い。さらに，冬場の高水温化は，食害生物の活動を持続させることも懸念される。その他の原因としては，近年大型化する台風や低気圧の暴浪によって藻体が大量に剥ぎ取られる現象も見受けられる。

２．種苗生産技術の確立による藻場再生

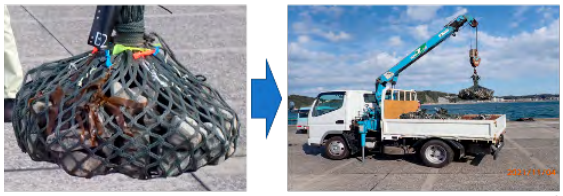
地域固有の大型褐藻類から構成される藻場を確実に持続させることを目的に，海藻類の生活環の中で一番重要な生殖に関わる「配偶体」に着目した。海藻類は生息する地域や水深帯により種類が異なり，また同種であっても地域により形態の違いもある。このことから，藻場の再生では，地域ごとの遺伝的多様性の保全への配慮が必要であり，できる限り地域種の海藻を生育させ，保全することが望ましい。そこで，各地域の配偶体を長期保存し，いつでも大量に殖やし，配偶体を成熟（メスに卵を形成させてオスの精子と受精）させ，海藻の苗を確実につくる技術を確立した（Fig.3）[6) 7) 8)]。

本技術の適用先には，各地の藻場造成への展開や地域振興としての漁場形成などが考えられる。近年では，洋上風力発電等の臨海プロジェクト（Fig.4）や港湾環境において藻場を創るプロジェクトなども検討されている。

３．現地藻場再生試験

(1)ユニット型漁礁における藻場再生

本技術の実海域における検証のため，葉山海域で消滅したアラメの再生試験を開始した[7)]。2021 年秋に，葉山水域環境実験場で作出したアラメ種苗と自然石を詰めたユニット型漁礁（直径約 1m，高さ 0.4m）を活用した。ユニット型漁礁の外周部にアラメ種苗を陸上で取付け，ユニック車により葉山港の海中（水深 2～3m）に設置した（Fig.5）。設置場所では，かつて港湾構造物の岸壁にアラメが群生していたが，2020 年に消滅した。設置から毎月一回のモニタリングを実施した結果，アラメ藻体の順調な生育を確認した（Fig.6, Photo 4）。約半年後には生育した藻体にメバルの幼魚やイカ類の産卵を確認するなど藻場の生物親和性が認められた。8



漁礁への種苗設置　　ユニック車による吊下げ

Fig.5　ユニット型漁礁の設置状況
(Installation Status of Unit-type Fishing Reefs)

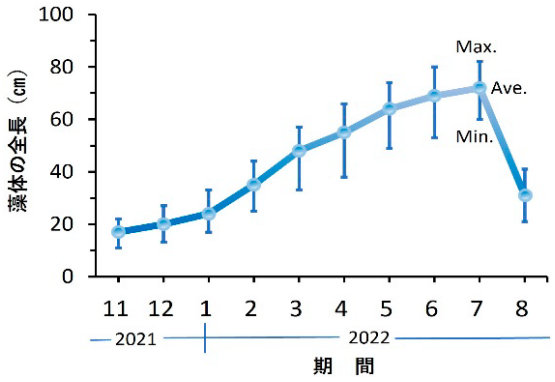


Fig.6　ユニット型漁礁におけるアラメの生長
(Growth of *Eisenia bicolor* on a Modular Reef)

Photo 4　半年後のアラメの生育状況
(Growth of *Eisenia bicolor* after 6 Months of Transplantation)

Photo 5　カジメ，アラメの海面養殖（3 カ月経過）
(Marine Culture of *Ecklonia* and *Eisenia* (3 months after)

月には側葉に子嚢斑（遊走子を放出する細胞）を確認し，その後高水温の影響による衰退傾向がみられた。

（2）海面におけるアラメ，カジメの養殖試験

カジメやアラメなどの大型海藻を海面下で大規模養殖する試験を実施した[8]。これらの大型藻類がワカメやノリのように海面で大規模に養殖することが可能になれば，バイオ燃料やバイオプラスチックなどの高機能材料として活用するための大量生産が可能となる。

そこで，配偶体から作出したカジメ，アラメ種苗を養殖用のロープ（全長約 200m）に取り付け，養殖期間の 1 月から 4 月上旬まで約 3 カ月間，海面下で生育させた（Photo 5）。アラメ，カジメは順調に生育し，3 カ月間で最大 40cm に生長した（Fig.7）。現在，養殖されたカジメ，アラメは遊走子の供給源として磯焼けの海底面や人工構造物に設置することで地域の藻場再生に用いられている。

５．地域活動によるブルーカーボンの創出

神奈川県三浦郡葉山町では，2006 年に地域の漁業者，学校，ダイバー，企業の協働により藻場の保全活動を行う地域協議会「葉山アマモ協議会」を設立した。協議会では，藻場再生技術などを導入した藻場再生，ウニの駆除活動，学校や地域住民を対象とした教育・普及活動を実施している。

葉山沿岸の藻場は 2016 年以降，水深 3m ほどのアラメが生育する浅場から磯焼けが始まり，5m 以深のカジメの生育場も衰退した。地域の藻場再生活動により，2020 年の磯焼けから復活した水深 5m～20m のカジメ藻場は現在約 20ha まで回復した（Photo 6）。そして，2022 年度に 46.6t-CO_2/年，2023 年度に 49.7t-CO_2/年のブルーカーボンがジャパンブルーエコノミー技術研究組合（JBE）により認証された。ブルーカーボンクレジットはボランタリークレジットであるが，企業の CO_2 排出のオフセットに活用されるほか，地域では，クレジットで得られた収益を藻場の再生活動や地域の教育，啓発活動に活用している。

Ⅲ．サンゴ礁再生技術

１．コーラルネットの開発

サンゴの衰退原因は，海水温の上昇に加えて陸域から流入，堆積する細粒分や栄養塩負荷などの複合ストレスが考えられる。特に，有機物を含む細粒分は，サンゴ幼生の着生や変態に影響がある[9]。このため，海底面から容易に離隔して設置ができる網状構造の人工基盤「コーラルネット」を開発した（Fig.8）。コーラルネットの素材は，バイオプラスチックからなる自然分解タイプ，ステンレス製の耐久型タイプがある（Photo 7）。前者はサンゴ礁リーフ内などの比較的静穏な海域での活用，後者は港湾環境の消波ブロックやアウトリーフ近傍など波の強い場所に適している。コーラルネットにおけるサンゴの自然着生の仕組みは，基盤裏側に付着する石灰

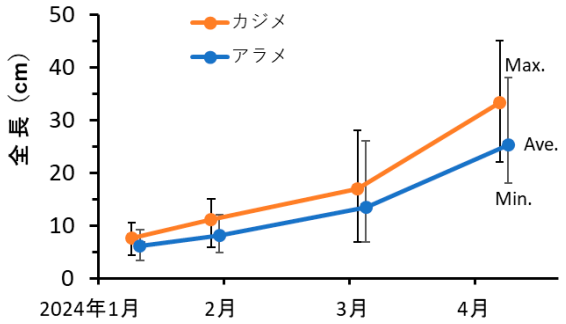


Fig.7 養殖によるカジメ，アラメの生長

(Growth of *Ecklonia cava* and *Eisenia bicolor* in Culture)

Photo 6　再生中のカジメ場（2 年目）

(Restoring the *Ecklonia* Bed (2nd year))

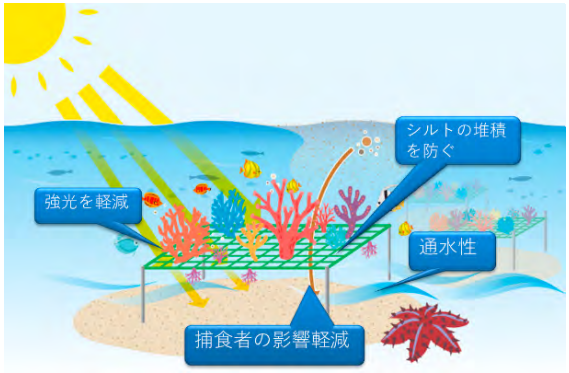
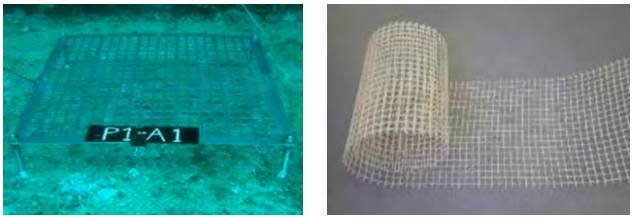


Fig.8　コーラルネットの原理

(Principle of CORALNET)



（1）耐久型タイプ (Durable type)　（2）自然分解タイプ (Biodegradable type)

Photo 7 コーラルネットのタイプ

(Types of CORALNET)

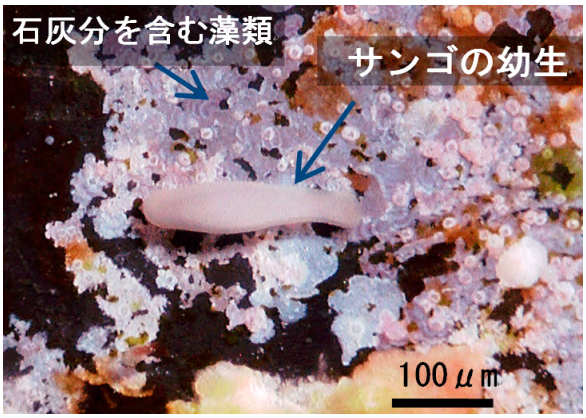


Photo 8　無節サンゴモによるサンゴ幼生の誘引
(Attraction of Coral Larvae by Non-geniculate Coralline Algae)

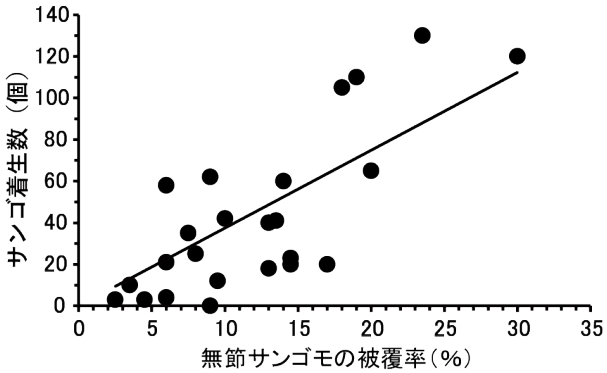


Fig.9　無節サンゴモとサンゴの着生の関係
(Relationship between Non-geniculate Coralline Algae and Coral Settlement)

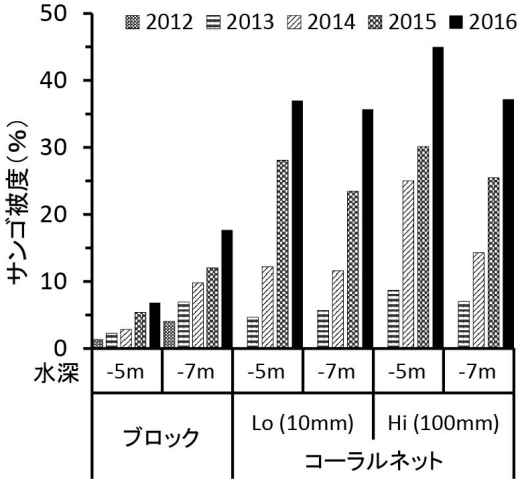


Fig.10 コーラルネットとブロックのサンゴ被度の推移
(Changes in Coral Coverage on CORALNET and Concrete Blocks)

藻類（無節サンゴモ）がサンゴ幼生を誘引し，変態を促す[10]（Photo 8，Fig.9）。サンゴは初め，コーラルネットの裏側に着生し，成長の過程で基盤の空隙から表側に成長をする。

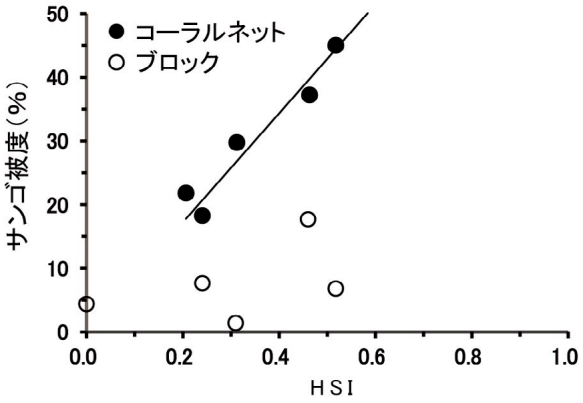


Fig.11　サンゴ HSI とサンゴ被度の関係
(Relationship between Coral HSI and Coral Cover)

Photo 9　港湾における耐久タイプのコーラルネットによるサンゴ再生（2021 年）
(Coral Restoration Using Durable CORALNET in Ports (2021))

２．コーラルネットの適用事例

(1)港湾環境におけるサンゴ礁の再生

沖縄県の港湾環境の特に港内側では河川からシルト分が流入し，防波堤の構造物上に堆積しているため，サンゴ幼生の着生や成育が厳しい状況にあった。そこで，2011 年に耐久型タイプのコーラルネットを港内のコンクリートブロック（ブロックからの離隔距離 10 ㎜，100 ㎜）に設置し，自然着生によるサンゴ再生試験を行った。その結果，コーラルネット設置によるサンゴ群集の拡大（Fig.10）と多様なサンゴ種を確認できた[11,12]。

さらに，港湾環境の流速，波高，光量子などの物理環境の分析を行うことでサンゴの生息地評価（HSI：Habitat Suitability Index）を実施した。その結果，本 HSI モデルはコーラルネットを適用した場合のサンゴ被度を適切に評価できているが，ブロック上のサンゴ被度は評価できなかった（Fig.11）。この理由として，ブロック上の芝草状藻類（turf algae）に堆積する細粒分がサンゴ幼生の着生を阻害している事が考えられた[13,14]。本結果から，基質上の藻類や濁り成分などの SI 因子の追加を含めた HSI モデルの開発

（1）台風通過前（2010 年）
（Before the typhoon）

（2）台風通過後（2011 年）
（After the typhoon）

Photo 10　慶良間諸島のサンゴ礁の衰退
（Decline of Coral Reefs in the Kerama Islands）

Photo 11 自然分解タイプのコーラルネットによる再生
（Coral Restoration Using Biodegradable CORALNET）

検討も必要と考えられる。

現在，コーラルネットを設置して 13 年が経過し，サンゴの被度（サンゴが海底面を覆っている割合）は最大 350%以上に達したものもある（Photo 9）。

（2）慶良間諸島におけるサンゴ再生

沖縄県では，高水温による白化現象に加え，台風の大型化等によるサンゴ群体の剥離，倒壊が度々確認されている。2011 年に慶良間諸島付近を台風が通過した際，内湾の浅場に生育する枝状のサンゴ群落が大規模に崩壊した（Photo 10）。そこで，サンゴが崩壊した地点の海底に自然分解タイプのコーラルネット約 1 ㎡を敷設し，そこへ底面に散乱したサンゴ断片を結束バンドで固定した。その後のモニタリングにより，コーラルネット上ではサンゴの成育が確認でき，10 年経過後にはコーラルネット敷設面積の 5 倍以上の大群落に拡大し，年々拡大が続いている（Photo 11）。一方，自然基盤の海底面では，サンゴ断片は安定せず，細粒分を含む砂中に埋もれるなど，再生の兆しはない。

3．海外サンゴ再生プロジェクトへの展開

アジア開発銀行（ADB）の国際公募事業「Technology Innovation Challenge for Healthy Oceans -Restore and Protect Coral Reefs-」においてコーラルネットを活用した再生プロジェクトを実施した [15]。事業期間は 2023 年 2 月～

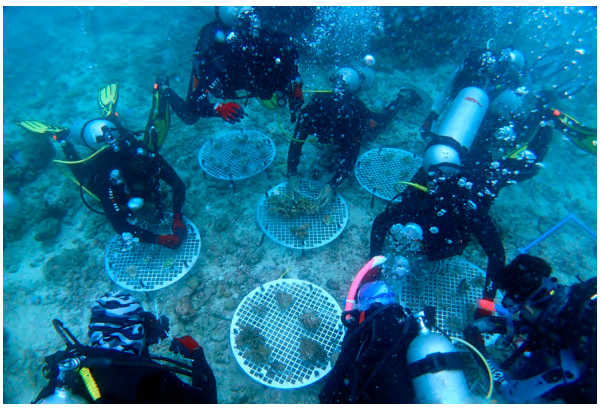


Photo 12　現地ダイバーによる作業状況
（Local Divers Working on the Site）

Photo 13　コーラルネットに設置したサンゴ断片の 10 カ月後の成長
（Growth of Coral Fragments Placed in CORALNET after 10 Months）

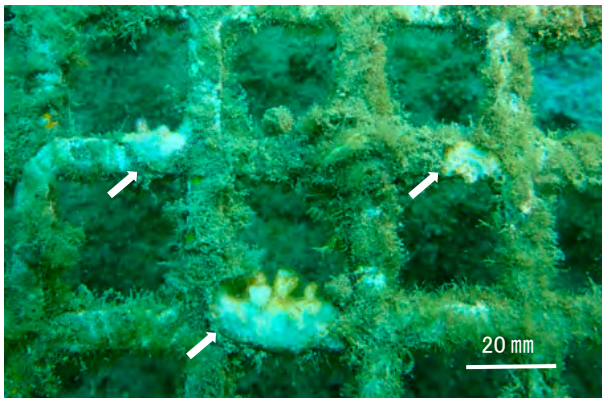


Photo 14 コーラルネットに自然着生したサンゴ（矢印）の成長
（Growth of Corals Naturally Settlement to CORALNET）

2024 年 7 月であり，フィリピンのパナイ島アクラン州タンガラン湾で実施した。本プロジェクトでは，東京科学大学，フィリピン大学，アクラン州立大学，地元行政，地域住民との連携により実施した。プロジェクトでは，リモートセンシン

グによるハビタットマップの作成と検証，温度・波高・流速・濁度・栄養塩等の計測，数値シミュレーションによるサンゴの生息環境の評価を行った。サンゴ群集の再生のために設置したコーラルネットは，ステンレス素材の耐久タイプとし，直径 60 ㎝の円型コーラルネット 86 基を 7 地点に設置した（Photo 12）。

コーラルネットのモニタリングの結果，タンガラン湾西側と沖合側のエリアでは，サンゴ被度の増加が確認され，生残率は 80～94%と高く，10 カ月間でサンゴ被度の増加が確認できた（Photo 13）。一方，東側の河川由来の濁りの影響が強いエリアでは被度の拡大は限定的で，生残率は 0～60%であった。サンゴの自然着生では，西側エリアで基盤上への成長を確認できた（Photo 14）。今後，地元と協働で現地モニタリングを継続する計画である。

Ⅳ．今後の展望

地球温暖化が加速する中，自然生態系を回復させ，持続させるためには自然再生技術の開発と社会実装が重要である。その中で, NbS の考え方では, 生態系における炭素吸収機能，生物多様性を増大させることで人間社会への便益の最大化をもたらす。今回紹介した藻場やサンゴの再生技術とパイロットプロジェクトはその一例である。この技術は，生体移動や遺伝子改変による手法ではなく，地域固有の遺伝子や種を守り，常に環境を評価しながら地域が主体となり進める手法である。また最近注目されているブルーカーボンクレジットや動き出している生物多様性クレジットを，今後より大きく広げていくためには，炭素固定量や生物多様性のより高精度な定量化技術と沿岸生態系の修復・再生を具体化する確実な技術が必要であり，本報で紹介した技術はその一助となることを期待している。

参考文献

1）Frank van der Meulen ; Nature-based solutions for coastal adaptation management, concepts and scope, an overview, Nordic Journal of Botany: Vol.2023, Issue 1，2023.

2）Nellemann, C., et al. ; Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environmental Programme, GRIDArendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland, 2009.

3）Kuwae, T. and Hori, M.（eds）; Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation. Springer Singapore, 2019，p.373.

4） Hajime Kayanne, Atsushi Suzuki, Hiroshi Saito ; Diurnal Changes in the Partial Pressure of Carbon Dioxide in Coral Reef Water, SCIENCE, Vol.269, 1995, pp.214-216.

5）馬場 将輔 ; 温暖化による大型褐藻類の生育反応および分布変動，海生研研報，No.26，2021，pp.1-28.

6）山木克則，リンブーンケン，中村華子；フリー配偶体によるカジメ・アラメの種苗生産と海域における初期生長，令和４年度日本水産学会春期大会講演要旨集，#1036，2022.

7）山木克則ほか；フリー配偶体由来のアラメ芽胞体を用いた藻場造成試験，令和 5 年度日本水産学会春期大会講演要旨集，2023，#1050.

8）山木克則ほか；アラメ，カジメのフリー配偶体を用いた藻場再生試験，令和４年度日本水産学会秋期大会講演要旨集，2022，#628.

9）山木克則，鈴木豪；サンゴ礁域の底質シルト分がサンゴ幼生の着生に及ぼす影響, 日本サンゴ礁学会第 14 回大会要旨集,2-M-07, 2011，p.88.

10) 山木克則 ; 網状人工基盤を用いたサンゴ群集再生技術, 鹿島技術研究所年報,Vol.85, 2010，pp.117-120.

11）山木克則，新保裕美，田中昌宏；那覇港内における網状人工基盤を用いたサンゴ群集の再生, 土木学会論文集 B2, Vol.70, No.2, 2014，pp.1171-1175.

12）山木克則，新保裕美，田中昌宏；コーラルネットを用いた那覇港内におけるサンゴ群集の再生， 土木学会論文集 B3, Vol.73, No.2, 2017，pp.875-880.

13）新保裕美，山木克則，田中昌宏 ; 港内のサンゴ生息地適性指標モデル（HSI モデル）の開発，土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2，2013，pp.1231-1235.

14）山木克則，新保裕美，田中昌宏；コーラルネットを用いたサンゴ群集の再生－沖縄・那覇港における長期モニタリング－，鹿島技術研究所年報, Vol.66, 2018, pp.129-136.

15）山木克則ほか；フィリピンにおけるサンゴ礁保全のための統合的アプローチ－流動シミュレーションとコーラルネット技術の導入－，日本サンゴ礁学会，2024,pp.80-81.