

論文の内容の要旨

論文題目 Effect of Physical Environmental Factors on Community Structure of Tropical Seagrass Meadows

(熱帯性海草群集に対する物理的環境要因の影響)

氏名 田中 義幸

海草藻場は一次生産量が大きく、多様な動植物に生活の場を提供することから、沿岸生態系の主要な構成要素であるといえる。しかし、浅海域に分布するため人間活動の影響を受けやすく、全世界でその分布面積は減少傾向にある。海草藻場を保全・復元するためには、環境要因に対する海草の応答を明らかにする必要がある。これにより、地形改変・赤土の流入・富栄養化・地球温暖化などの環境変動に対する藻場の分布および種構成の変化を予測できる。

複数種が狭い範囲に混生する事が熱帯性海草藻場の特徴のひとつである。これまでに、水深や底質の粒度組成(シルトの量など)に対応した分布種の変化が指摘されている。しかし、分布に影響を与える要因はひとつひとつ個別に扱われることが多く、各種の分布に差をもたらす機構を実験によって検証した例は少ない。これまでの研究では環境に対して各種が固定された応答を示すかのように捉えられてきた。しかし、実際には海草各種は環境勾配に応じて形態や生理特性に種内変異を示す。ある環境要因に対して有効な種内変異の幅が大きい種は、小さい種よりもそのストレスに適応しやすいと考えられる。

本研究は、主要な物理的要因である干出・弱光・堆積物の特性(粒度組成とその安定性)が、熱帯性海草の分布に与える影響を、各種の形態と生理特性の種内変異に着目して実験的に明らかにし、その分布範囲と複数のストレスとの関係をモデル化することを目的とする。調査地はインド洋・太平洋の熱帯性海草群集から、堆積物環境が大きく異なる沖縄県石垣島とタイ南西部を選択した。まず、石垣島で詳細に海草の分布を観測し、多変量解析により卓越種に注目して海草群集を類型化した。干出耐性については、石垣島白保で移植操作実験と室内乾燥実験を行った。弱光耐性については、白保とタイ南西部の Mai Hang (MH) にて、光合成量・呼吸量を測定し、株全体の収支を種間と種内で比較した。次に、白保とタイ南西部の比較により、堆積物環境の変異と種内形態変異の関連性を検討した。これらを元に、複数の環境要因が同時に作用する条件下での各種の分布範囲を示すモデルを作成し、他地域、他種への適用性を検討した。

多変量解析による群集組成の類型化

本研究の目的は、多種が混生する熱帯性海草の群集組成を類型化し、環境要因との関係を解明することである。石垣島の周囲 6 測線上の 26 地点にて、海草の種数と各種の現存量（葉面積）を用いてクラスター解析を行い、環境要因と対比した。

石垣島の海草群集は 4 タイプに分類された。タイプ I では *T. hemprichii* と *C. rotundata* が、タイプ II では *C. serrulata* が、タイプ III では *E. acoroides* が、タイプ IV では *H. pinifolia* と *H. ovalis* がそれぞれ卓越した。各群集タイプと、水深・堆積物の厚さ・堆積物中のシルト率との対応を解析した。タイプ III に分類されたのは 1 点だけだった。他の 3 つのタイプは出現水深が異なり、最も浅所（平均海面下 60 cm 前後）ではタイプ IV が、大潮最低低潮線（平均海面下 123 cm）以浅ではタイプ I が、それ以深ではタイプ II が卓越した。堆積物の厚さと群集タイプとの間には明確な関係はなかった。シルト率については、タイプ IV は低い地点に集中したが、他のタイプでは明確な傾向はなかった。

本研究では、海草群集を類型化して複数の物理的環境要因と同時に比較したため、これまでの個別の要因に着目した研究より熱帯性海草の分布と環境要因の関係を的確に表現することができた。

干出に対する 3 種の応答

海草の分布上限は、種毎に異なる。本研究の目的は、移植実験と乾燥実験により干出が海草の分布上限を決める機構を解明することである。

白保の潮下帯には *T. hemprichii*, *C. rotundata*, *C. serrulata* の 3 種が分布する。一方、潮間帯には *C. serrulata* を除いた 2 種しか分布しない。潮間帯にも分布する 2 種は、潮間帯で葉長が有意に短く（潮下帯の約 50%）、生長量が有意に小さかった（同 25%）。潮下帯から潮間帯への移植の結果、干出ストレスの大きい冬季に *C. serrulata* の株数が大幅に減少した（移植後 3 週間で対象区の 3%、残りの 2 種は約 55%）。また、潮間帯の 2 種では、潮下帯から潮間帯に移植した株の葉長が有意に短くなり、潮間帯の株の長さに近づいた。また、同種でも短い葉を持つ株の方が、干出時間が短かった。葉部の乾燥実験では、*T. hemprichii* の水分保持能が高かった（気温 24.5°C、湿度 70% で、葉の水分の 80% を失うのに要する時間は 120 分）。*Cymodocea* 属の 2 種は同じ傾向を示し、水分を失いやすかった（同 60 分）。

分布上限が異なる *Cymodocea* 属の 2 種の水分保持能がほぼ同じことから、葉の乾燥耐性だけでは実際の分布は説明できない。*C. rotundata* と *T. hemprichii* が浅所に分布できる理由は、倒れやすい形態をしていること、ならびに葉部が可塑的に小型化しやすいことから、潮位が低下しても空気中に干出しにくく、干出しても底質に密着して水分を保持しやすいことによる。

弱光に対する 3 種の応答

海草の分布下限は、種毎に異なる。光は水深の増加やシルトなど水柱中の懸濁物の増加により減衰する。本研究の目的は海草の分布下限を決める機構について、光合成特性の変化と葉・地下茎・根の各部位への生物量の分配の変化に着目して明らかにすることである。光条件のよい白保と、悪い MH にて、各部位の生物量を計測し、差働式検容計を用いて異なる光強度における葉の酸素発生量と葉・地下茎・根の酸素消費量を測定し、株全体の光合成・呼吸収支を計算した。

白保で採集した 3 種間には、葉の光合成や地下茎・根の呼吸に大差はなかった。一方、株全体の収支では *Cymodocea* 属 2 種の光補償点が $48\sim64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ であったのに対して、*T. hemprichii* の光補償点は $217 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ であった。白保と MH にて *Cymodocea* 属 2 種を比較したところ、地上部と地下部の比率や光合成特性の光条件に応じた

変化幅は、深所にも分布する *C. serrulata* の方が狭い値を示した。

光条件の悪い深所で *T. hemprichii* が卓越しない理由は、地下部の生物量が大きいために株全体の光合成収支が悪化する事に起因する。また、*Cymodocea* 属 2 種の分布下限は、弱光耐性以外の要因が決めている事が示唆された。

堆積物環境に応じた *Cymodocea* 属 2 種の種内形態変異

C. serrulata は、長い垂直地下茎で草丈を高く維持するため、堆積物により埋没が起こる環境や、シルトの再懸濁や水深の増加による弱光環境で他種より生残しやすいと指摘されている。一方、*C. rotundata* は、長い垂直地下茎を持たず、シルトが多い環境や深い環境には分布しない。本研究では、底質中のシルト率が高く、水深が大きい地点ほど *C. serrulata* の垂直地下茎が長いとの仮説を立て、その検証を目的とした。シルト率と水深が異なる 4 地点で *C. serrulata* の種内形態を比較し、2 地点だけに分布する *C. rotundata* とその変異幅を比較した。

地点により *C. serrulata* は垂直地下茎の長さが有意に変異した。しかし、シルト率が高い地点で *C. serrulata* の垂直地下茎が長いとは限らず、仮説は支持されなかった。*C. rotundata* では葉の長さが地点により変異した。シルト率が高い地点では、小さい地点より、*C. serrulata* の垂直地下茎から生える根が有意に多かった。

草丈を高くするために変異する部位は、種により異なることが明らかになった。底質の堆積だけでなく、侵食も起こっている地点では、根の比率をあげて底質を安定させることが、垂直地下茎を長くするよりも環境に適応した戦略だと考えられる。

総合考察

海草各種は、複数の環境に対して異なる形質を変化させることで対応し、またその変異幅は種により異なった。例えば、*C. serrulata* は垂直地下茎を長く伸ばす。これは埋没に対しては有利だが、干出に対しては不利である。このように、形質の変異はトレードオフの関係にあるため、各環境要因に対して各種が分布できる範囲が異なり、複数の環境要因が同時に働く条件下で多種が共存することが明らかになった。

上記の実験結果を統合し、水深とシルト率を軸に各種の分布範囲を模式的に表した。さらに、この模式図を利用して、陸域の開発にともなうシルト率の増加、地球温暖化にともなう海面上昇が海草群集に与える影響を予測した。水深が浅く・シルト率が小さい環境では *T. hemprichii* と *C. rotundata* が、水深が深く・シルト率が小さい環境では *C. rotundata* と *C. serrulata* が、水深が深く・シルト率が高い環境では *C. serrulata* がそれぞれ卓越する。石垣島全域の分布と比較すると、浅所で *T. hemprichii* と *C. rotundata* が卓越すること、深所で *C. serrulata* が卓越することは良く合致した。深所への分布が予測された *C. rotundata* は、実際には深所で卓越しなかった。タイやフィリピンにおける分布にも、同様の傾向が認められた。モデルで実際の分布を完全に説明しきれない理由としては、栄養塩などの資源をめぐる海草種間の競争や相互作用、海草を直接捕食する動物の影響などの可能性がある。今後これらの要因をモデルに取り入れることにより、熱帯性海草群集の共存機構に関するより深い理解を得られることが期待される。