

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2011～2015

課題番号：23405026

研究課題名(和文) 紅海沿岸のマングローブ林の動態とその生理生態的特性に関する研究

研究課題名(英文) Study on the physiological and ecological dynamics of the mangrove on the coast of the Red Sea

研究代表者

中島 敦司 (NAKASHIMA, ATSUSHI)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：90283960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、紅海沿岸に自生するヒルギダマシを対象にした生理生態学的な現地調査と、遺伝子解析を行った。その結果、紅海沿岸に自生するヒルギダマシは、家畜による被食を受けることで葉量を調整し、乾燥年にも林分を維持していることが明らかになった。また、側方に伸長する枝を着床させて不定根を伸長させ、その根からの水を先端部に分配し、高い塩分濃度下でも樹形を維持できる可能性を認めた。また、紅海内での遺伝的多様性は高くはなく、それは種子の散布様態の影響で、さらに場所によっては人為的な遺伝子移動のインパクトを受けている可能性が認められ、古来からの交易はヒルギダマシの遺伝的多様性に影響を与えたものと考えられた。

研究成果の概要(英文)：In this study, physiological and ecological field survey and genetically analysis were conducted on *Avicennia Marina*, native to the Red Sea coast. As a result, it was recognized that *A. Marina* adjusted the amount of leaves by browsed by livestock, for example by camels, maintaining the forest area without great death in the dry year. We also found that the adventitious roots were elongated by implanting laterally extending branches and the possibility of maintaining the tree morphology even under high salinity conditions was confirmed by distributing the water from the roots to the tip of shoot. In addition, the genetic diversity in the Red Sea was not high, which was thought to be due to the influence of the seed spreading pattern. The possibility of being affected by artificial gene transfer was recognized depending on the location, and trading from ancient times was thought to have influenced the genetic diversity of *A. Marina*.

研究分野：森林生態学

キーワード：マングローブ ヒルギダマシ 紅海 塩分濃度 樹形 家畜圧 同位体分析 遺伝的多様性

### 1. 研究開始当初の背景

(1) アラビア半島とアフリカ大陸に挟まれた紅海沿岸にはマングローブ構成種の中で最も耐塩性の高いヒルギダマシが純林を形成している。ラグーンやワジ河口付近に点在するヒルギダマシ林は、従来は魚付き林として沿岸生態系の保全機能が重視され、適切に維持されてきた。近年は人口増加と沿岸漁業を含めた産業構造や様態の変化によって、各地で林分の破壊、衰退が進んでいる。特に、エビ養殖池や沿岸工業地帯、観光ホテル建設のための大規模な開発行為はヒルギダマシ林の存続を危うくしている。

(2) 一方では、地球温暖化など気候変動がもたらす海面上昇による林分の衰退も危惧されている。開発による破壊などから免れたヒルギダマシ林は、まとまった緑に乏しい紅海沿岸における希少な自然として厳正に保護されなければならない。緑に乏しい乾燥地であるため、マングローブ林が失われると沿岸部だけでなく内陸部の生態系にまでダメージが連鎖することも危惧される。沿岸のヒルギダマシ林の生態的、社会的な重要性を早急に明らかにし、それを社会にアピールする必要がある。しかし、残された林分のほとんどは、家畜、特にラクダやヤギによる強い摂食圧によって林分の発達が阻害されるとともに、不法な伐採によって生残木の樹勢は著しく衰えており、早急なる再生、保全、管理の実施が求められる。

### 2. 研究の目的

(1) 研究では、ヒルギダマシ林の林分構造と生育環境を解析し、現在の林分動態の解明を行い、劣化したヒルギダマシ林を再生、保全するための技術的課題の解明を行う。それらの基礎情報を獲得するため、海水にのみ依存して純林を形成している特異なヒルギダマシ林の適応戦略を生理生態的特性から解明し、同位体分析によって光合成、蒸散特性を把握することで高塩分ストレス下での水収支を解明する。

(2) さらに遺伝子解析によって林分間の近縁性を定量的に解析し、種子散布の距離やその頻度などを予測し、更新戦略を解明する。その結果をもとに、林分サイズと遺伝的多様性との関係から保全することが必須となる林分サイズを特定するとともに、遺伝子の攪乱を引き起こさない植樹、人為繁殖の手法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) サウジアラビア、エジプト、スーダンにおいて調査プロットを設定し、毎木調査により個体サイズの構成を測定し、現存量の推定を行った。並行し、樹形調査を実施し、林分内の微地形と家畜による被食圧が葉や樹幹の形態に与える影響を測定するとともに、展

葉や伸長、肥大成長の変化を測定し、加えて、塩分濃度などの環境条件との対応関係についての解析を行った。

(2) 光合成・蒸散測定装置やクロロフィル蛍光測定装置、プレッシャーチェンバーなどを利用し、ヒルギダマシの光合成、蒸散特性の日変化、季節変化を測定し、生理的なストレス耐性についての解析を行った。並行して、葉のサンプルを日本に持ち帰り、炭素と酸素の安定同位体の分析を行い、水利用特性についての解析を行った。

(3) サウジアラビア、エジプト、スーダンにおいて遺伝解析用の試料を採取し、日本に持ち帰って遺伝子の分析を行い、マイクロサテライト法において紅海沿岸の遺伝的多様性についての解析を行った。

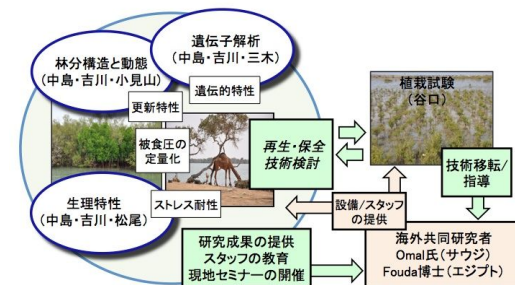


図-1 個別の研究テーマと組織の概略図

### 4. 研究成果

(1) 紅海沿岸での林分調査の結果、降水や河川水による淡水がほとんどない紅海沿岸のヒルギダマシ林では、汀線から内陸にかけ徐々に樹体サイズが小さくなることを把握した。これは、内陸に行くほど比高が高くなり、それによって潮（海水）の到達頻度が減少し、強い太陽照射による蒸発の結果、土壌水の塩分濃度がより高くなることに起因している現象であることが明らかになった。一方、汀線に近づくほど、潮の到達頻度が増え、蒸発で濃縮された土壌水の塩分濃度が海水レベルにまで戻ることがヒルギダマシの樹体サイズを維持する要因になることも明らかになった。このような微地形レベルでのダイナミクスのため、例えば、高温年には海水の蒸発量が増えることによって塩分濃度が上昇し、土壌水の塩分濃度は著しく上昇し、その結果、特に比高の高い位置に生育する個体ではダイバックが誘発される。ダイバックが数年サイクルで引き起こされるために、ヒルギダマシ林は林分サイズを大きくできないことも明らかになった。海面の日および年変動が、世界でも最小レベルにある紅海沿岸ですら、このようなダイナミクスの影響を受けるのだから、他地域では、さらに大きな林分動態の変動が頻りに繰り返されるものとみられ、温暖化による海面上昇の影響は広域で危惧されると考えられた。

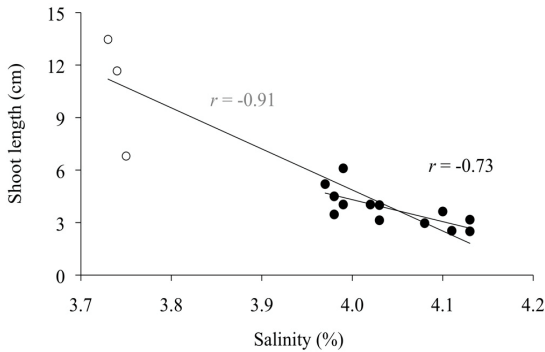


図-2 塩分濃度と伸長成長量との関係

(2) エジプト、スーダンでの林分調査の結果、ラクダをはじめとした家畜による過度なヒルギダマシの被食圧は個体の成長に深刻な影響を与える可能性のあることを認めた。一方では、葉のバイオマス量として20~30%レベルの被食圧によってむしろヒルギダマシ個体の成長量は大きくなることも明らかとなった。これは、被食によって葉が失われると、残存した葉への水の分配量が大きくなるための間引き効果であり、この効果によって適度な被食圧を受けた個体ではダイバックも起こりにくいことが認められ、資源生産を最大にするためには、むしろ家畜による被食を受けさせた方が良いという結果になった。これは、日本における里山でのバイオマス生産と類似した現象であると考えられた。一方、ヒルギダマシ林による土砂を捕捉するトラップ効果は、林分の発達とともに林分内の比高を高くするため、自然状態のヒルギダマシ林は、上記(1)のメカニズムとの関係から、発達すると次には衰退し、衰退すると波浪による洗削によって比高が下がり、再び発達が始まることが明らかとなった。したがって、仮に家畜による強度の被食を受けても、長期レベルでは洗削による比高リセット効果によって林分面積は大きくは変化しない可能性のあることも認められた。以上の結果は、ヒルギダマシ林の保全目的で放牧産業の排除を求める、特にヨーロッパ系、北米系の研究者、環境保護団体からの圧力に抵抗できる新知見であり、現地から歓迎された。

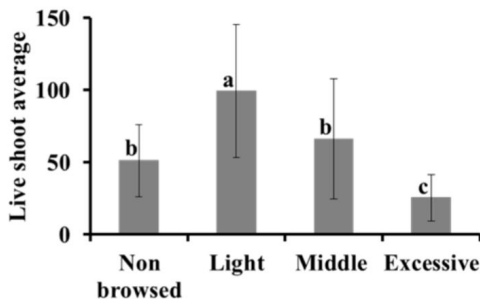


図-3 家畜の採食とヒルギダマシの関係

(3) 上記(2)の結果を裏付ける目的で、エリア内でも最大樹高レベルにある個体を対象とした樹形調査を実施した。その結果、乾燥地

に生育するヒルギダマシは、高い塩分濃度によって、頻繁に頂芽や枝の先端を失い、失う度に側芽は展開する偽二分枝する特徴を持つことが明らかとなった。このため、通常には成長せず、また樹高も大きくならない。代わりに、側方に大きく拡張する樹形となる。さらに、樹体での水の移動は、重力の関係から、同じ距離であっても側方よりも上方に対しての移動の方が遅く、このため、上方の茎葉ほど成長量が小さくなり、結果的に上方への樹高伸長が小さくなることが明らかとなった。これは、上方の茎葉ほど太陽エネルギーを強く受けることによる強光ストレスによる成長抑制現象では説明できないことであった。他方、乾燥地のヒルギダマシでは、側方に伸長したシュートが着床し、不定根を伸長させ、より側方伸長型の樹形となりやすいことを認めたが、多くの着床発根タイプの側方伸長型の樹種でみられる、シュートが自重に耐えられずに垂れることを見た目として下方に伸長しているものとは異なり、重力極性を覆して下方に伸長する可能性を認めた。その一因として、下方ほど海面からの蒸発による湿度が高く、その刺激に対する環境応答と考えられた。これは植物生理学的に重要な新知見である可能性のあるもので、継続研究が必要であると判断された。

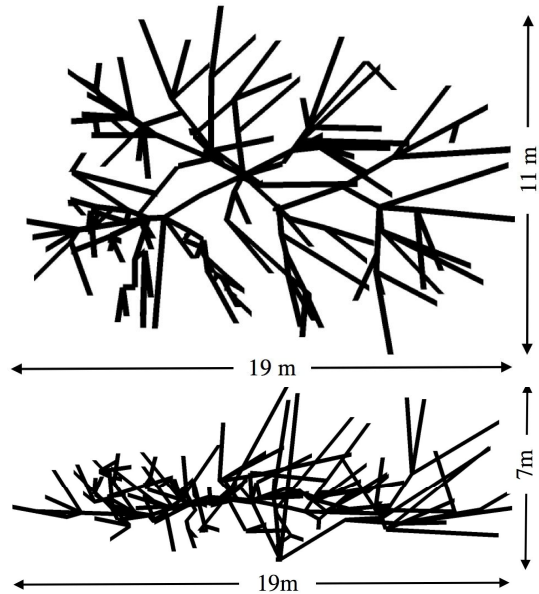


図-4 大型のヒルギダマシ個体の樹形図 (上図：上方から、下図：側方から)

(4) エジプト紅海沿岸に自生する個体の枝の先端についている葉の有機物の炭素安定同位体比( $\delta^{13}C$ )および酸素安定同位体比( $\delta^{18}O$ )、枝の中の水の $\delta^{18}O$ を測定し、長期平均的な水利用効率と蒸散量を推定した。それらと枝のつけ根から葉までの枝の長さ、不定根がある場合は不定根から葉までの枝の長さ、地表面から枝の先端までの高さとの関係を検討した。その結果、枝の先端の葉の $\delta^{13}C$ は枝の長さとの正の相関があった。さらに不定根が存在する枝の場合、枝の先端の葉の $\delta^{13}C$ は枝のつ

け根からの葉までの長さよりも不定根から葉までの枝の長さの方がより高い相関を示した。これらのことは、葉の水利用効率 $\delta^{18}O$ は高い位置の葉ほど低くなる傾向がみられた。これは樹冠内の湿度、温度の鉛直勾配の影響である可能性があると考えられた。さらに、側枝が伸長し、地面に着床することで不定根を伸長させるが、この不定根は、さらにその先の葉に対して水を供給し、このことが、側方に大きく拡張するヒルギダマシの樹形の形成に大きな影響を及ぼす要因となることを明らかにした。

表-1 着床した根から吸収した水の同位体

Parameters	Branches with adventitious roots		Branches without adventitious roots	
	Mean $\pm$ SD	N	Mean $\pm$ SD	N
D (cm)	12.0 $\pm$ 3.0 <sup>a</sup>	9	13.8 $\pm$ 5.6 <sup>a</sup>	17
H (cm)	243 $\pm$ 50 <sup>a</sup>	9	232 $\pm$ 76 <sup>a</sup>	17
L (cm)	716 $\pm$ 165 <sup>a</sup>	9	556 $\pm$ 170 <sup>b</sup>	17
L <sub>r</sub> (cm)	492 $\pm$ 138 <sup>a</sup>	9	556 $\pm$ 170 <sup>a</sup>	17
$\delta^{13}C_{om}$ (‰)	-27.24 $\pm$ 0.89 <sup>a</sup>	9	-27.44 $\pm$ 0.96 <sup>a</sup>	17

(5) マイクロサテライト法により、紅海内に分布するヒルギダマシの遺伝的多様性を調べた結果、大枠で、北部と南部で遺伝的に異なることを認めた。研究の初期段階では、ヒルギダマシの遺伝子解析を行うためのマーカーの開発を行い、4種類のマーカーの開発に成功した。これらを活用し、サンプル分析を行った結果、紅海内に大きく2つのハプロタイプがあることを認め、南北に距離が離れるほど近親性が失われることが明らかとなった。また、地域性が発現する理由としては、種子散布の様態に依存すると考えられ、特に、静波環境下であり、かつ、浮遊した種子を補足できる障害物のある場所で活発に稚樹が更新され、それらの条件を備えた場所が、結局はヒルギダマシ林内ということになり、このために種子は遠くには運ばれず、結果、紅海内での遺伝子の多様性は高くなりにくくなると考えられた。ヒルギダマシ林内では、密生する呼吸根が浮遊して満潮で到着した種子を捕獲することが多見された。その結果、同一林分内での遺伝子の多様性は高くなり、そのことが積み重なり域内での遺伝子多様性は限定的になっていると考えられた。このことは紅海沿岸における特徴であり、個体の人為移動は遺伝的攪乱に作用する危険性を認めた。一方では、スポット的に遺伝子が異なる場所があり、そういった場所は古くからの港湾都市であった。このことから、このような港湾都市での遺伝子の特異性は、人間が交易することによる種子の意図的、あるいは非意図的な運搬によるものと考えられたが、その詳細は明らかにならなかった。

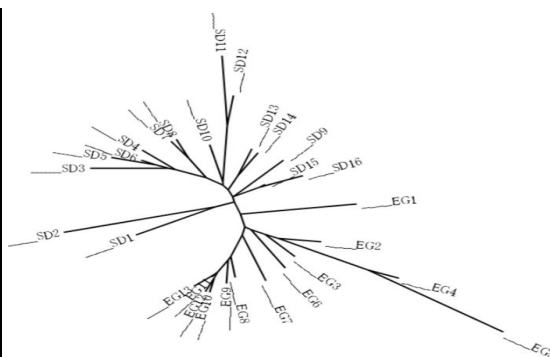


図-5 マイクロサテライト分析の結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 23 件)

Matsuo N., Banjo R., Teraminami T., Abdelwahab A., Amgad EL-S., Nakashima A., Nawata H. and Yoshikawa K. (2016) Branch Morphology of a Mangrove (*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh) Growing in a Per-Arid Area on the Egyptian Red Sea Coast Regulates Water Use of Its Leaves. *J. Arid Land Study* 26, 91-94 査読有  
[http://doi.org/10.14976/jals.26.3\\_91](http://doi.org/10.14976/jals.26.3_91)

Yoshimori, I., Seo, A., Nawata, H., Fouda, M. and Yoshikawa, K. (2015) New microsatellite markers to analyze genetic structure of Gray Mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *J. Arid Land Study* 25, 11-16 査読有  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jals/25/1/25\\_11/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jals/25/1/25_11/_pdf)

Teraminami T., Nakashima A., Ominam M., Matsuo N., Nakamura R., Nawata H., A. A. Abdelwahab, A. A. El-Shaffai and Yoshikawa K. (2014) Effects of shoot position on shoot and leaf morphology of *Avicennia marina* in the hyperarid Red Sea coastal region of Egypt. *Landscape and Ecological Engineering*, 10(2), 285-293 査読有  
 DOI : 10.1007/s11355-013-0224-9

〔学会発表〕(計 15 件)

Nakashima A., Kondo Y., Matsumura K., Murakami T., Ominami M., Yoshimori I., Matsuo N., Hawata H., Yoshikawa K. and Abdelmoneim Karamalla Gaiballa (2014) Effects of camel browsing on the growth of *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. in coastal dry climate mangroves, I-cal2, Samarkand Univ., Samarkand, Uzbekistan.

笠間融, 松尾奈緒子, 中島敦司, 吉川賢, 縄田浩志 (2014) 極乾燥域に自生するマングローブ樹 (*Avicennia marina* (Forsk.))

Vierh.)の安定同位体比を用いた葉のガス交換特性の解明. 第 61 回日本生態学会大会, 広島国際会議場, 広島, 日本

吉森一道, 石原愛子, 吉川賢, 中島敦司, 松尾奈緒子, 瀬尾明弘, Abdelmoneim Karamalla Gaiballa (2013) 紅海沿岸に生育するヒルギダマシにおける遺伝的特性, 日本森林学会大会発表データベース 124(0), 825, 岩手大学, 岩手, 日本

笠間融, 松尾奈緒子, 中島敦司, 吉川賢, 縄田浩志 (2013) スーダン紅海沿岸域に生育するマングローブ植物(*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.)の樹形と葉の水利用特性の関係, 第 60 回日本生態学会大会, 静岡県コンベンションアーツセンター, 静岡, 日本

齋木拓郎, 松尾奈緒子, 野口よしの, 宮田慎吾, 谷口真吾, 山中典和 (2013) 長短期塩分ストレスに対するヒルギダマシ(*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.)の葉の炭素・酸素安定同位体比の応答, 第 60 回日本生態学会大会, 静岡県コンベンションアーツセンター, 静岡, 日本

〔図書〕(計 3 件)

小見山章 (2017) 「マングローブ林」変わりゆく海辺の森の生態系, 273pp, 京都大学学術出版会

中島敦司 他 (2014) 横に伸びていくヒルギダマシの樹形. 国立科学博物館叢書・砂漠誌 (篠田謙一, 縄田浩志編), 156-164, 東海大学出版会

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 敦司 (NAKASHIMA, Atsushi)  
和歌山大学・システム工学部・教授  
研究者番号: 90283960

### (2) 研究分担者

吉川 賢 (YOSHIKAWA, Ken)  
岡山大学・環境生命科学研究科・特任教授  
研究者番号: 50166922

小見山 章 (KOMIYAMA, Akira)  
岐阜大学・応用生物科学部・教授  
研究者番号: 60135184

谷口 真吾 (TANIGUCHI, Shingo)  
琉球大学・農学部・教授  
研究者番号: 80444909

### (3) 連携研究者

松尾 奈緒子 (MATSUO, Naoko)  
三重大学・生物資源研究科・講師  
研究者番号: 00423012

三木 直子 (MIKI, Naoko)  
岡山大学・環境生命科学研究科・准教授  
研究者番号: 30379721

### (4) 研究協力者

寺南 智弘 (TERAMINAMI, Tomohiro)  
吉森 一道 (YOSHIMORI, Ichido)