

# 学 位 論 文 要 旨

氏 名

沖元 洋介

題 目

ガス交換法および生長曲線解析法を用いた  
 マングローブ林の炭素固定能の評価に関する研究  
 (Study on the estimation of CO<sub>2</sub> fixation capacity in mangrove forest  
 by using methods of gas exchange analysis and growth curve analysis)

マングローブ林は陸生の森林を凌ぐ炭素固定能を有し、熱帯・亜熱帯沿岸地域における重要な CO<sub>2</sub> シンクの役割を果たすと考えられている。しかしながら、マングローブの炭素固定能を正しく評価できる手法はいまだ確立されていない。本研究は、マングローブの炭素固定能を評価する手法の開発を目的に、沖縄県石垣島の *Rhizophora stylosa* (ヤエヤマヒルギ) 自然林、ベトナム国タインホアおよびナムディンの *Kandelia candel* (メヒルギ) 植林地、タイ国トラートの *R. apiculata* (フタバナヒルギ) 植林地の炭素固定能をガス交換法と生長曲線解析法の2手法で評価した。

ガス交換法では、(1) 各器官の呼吸速度を実測して現存量当たりの呼吸量を評価し、光合成量との CO<sub>2</sub> 収支で CO<sub>2</sub> 純固定量を評価した。(2) 個葉の光-光合成反応を測定し、各月における光強度の日変化と群落構造の調査で得たキャノピー内各層の光減衰および葉量から光合成量を評価した。(3) 1日さらには1年を通して変化する気温の日変化モデルを開発し、個葉光合成および各器官の呼吸速度の温度反応を用いて光合成量および呼吸量を温度補正した。(4) 群落の温度プロファイルを測定して群落内の気温低下を明らかにし、光合成量および呼吸量の評価に対する群落内の温度低下の影響を検討した。(5) 嫌気条件下にある根の呼吸速度の O<sub>2</sub> 濃度反応を測定して、根の呼吸量を O<sub>2</sub> 濃度補正した。

気温の日変化を用いて光合成量および呼吸量を温度補正することで、石垣島の *R. stylosa* 自然林の地上部の乾物蓄積量は 4.19 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> から 8.86 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> と2倍に増加した。一方、タインホアの樹齢10年の *K. candel* 植林地では、地上部の乾物蓄積量は温度補正によって 79.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> から 50.2 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> へと約35%減少した。これらは炭素固定能の評価に対する温度補正の効果が地域の季節特性で異なることを示す結果であり、ガス交換法による炭素固定能の評価では温度補正を行なう必要性が明らかになった。

生長曲線解析法では、異なる樹齢の立木現存量を用いて生長曲線を作成し、生長曲線の微分値で各年における年間の乾物蓄積量を評価した。生長曲線の解析より、ナムディンの *K. candel* 植林地は樹齢8年前後で年間の炭素固定能が最大 (56.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) となることが分かった。また植林後15~18年で立木現存量が最大となることが生長曲線より推定された。つまり、効率的な炭素固定機能を利用したマングローブ林の更新サイクルは20年前後と考えられる。さらに、生長曲線で評価した各年の乾物蓄積量を参照値として、ガス交換法で評価した炭素固定能の妥当性を検討できることが明らかになった。

2種類の方法で評価した地上部の乾物蓄積量を比較すると、タインホアの樹齢10年の *K. candel* 植林地では、ガス交換法の評価値 (34.3 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) と生長曲線解析法の評価値 (26.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) が類似した。ナムディンの樹齢7年の *K. candel* 植林地における根の呼吸量を13% O<sub>2</sub> 濃度で補正した場合、ガス交換法の評価値は 39.1 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> から 59.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> と約1.5倍に増加し、生長曲線解析法の評価値 (50.8 ± 5.1 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) に近似した。以上の結果より、本研究のガス交換法がマングローブ林の炭素固定能を十分に評価できる手法であること、また生長曲線の変曲点となる樹齢7~10年において2種類の方法で評価した炭素固定能が近似することが明らかになった。

本研究の結果から、ガス交換法による炭素固定能の評価精度を向上させるために、特に地下部にある根の呼吸量およびガス交換の季節特性を含めた炭素固定能について評価精度を向上させることが重要であることが明らかになった。また、2種類の手法で炭素固定能の評価が類似したことで、ガス交換法の評価値を用いて生長曲線の生長係数を推定して生長曲線を作成し、マングローブ植林地の最大現存量や成熟期に達する期間を予測できる可能性が示された。

## 学 位 論 文 要 旨

氏 名	Yosuke Okimoto
題 目	Study on the estimation of CO <sub>2</sub> fixation capacity in mangrove forest by using methods of gas exchange analysis and growth curve analysis (ガス交換法および生長曲線解析法を用いた マングローブ林の炭素固定能の評価に関する研究)
<p>Mangrove possesses a higher CO<sub>2</sub> fixation capacity compared to terrestrial trees. It becomes a very significant option for CDM (Clean Development Mechanism) program to mitigate global warming. However, a reliable method to estimate CO<sub>2</sub> fixation capacity of mangrove forest has not been established. We investigated mangrove forest of <i>Rhizophora stylosa</i> in Ishigaki Island, Japan, <i>R. apiculata</i> in Trat, Thailand, and <i>Kandelia candel</i> in both Thanh Hoa and Nam Dinh, Vietnam to estimate their productivity using gas exchange analysis and growth curve analysis.</p> <p>In the gas exchange analysis, we calculated CO<sub>2</sub> fixation capacity by (1) measuring respiration rate of each part of stand and calculating respiratory CO<sub>2</sub> emission from above- and below-ground parts of the stand. (2) Measuring single-leaf photosynthetic rate in response to light intensity and calculating the photosynthetic CO<sub>2</sub> absorption. In order to improve accuracy of the gas exchange estimations, (3) we developed a model for diurnal variation in temperature. By using this model, monthly averages of CO<sub>2</sub> absorption and emission, which is based on one day estimation, were corrected in response to temperature. (4) Temperature decrease inside the forest was obtained by measuring temperature profile of the forest, and which was added into the temperature modification. Furthermore, (5) respiratory CO<sub>2</sub> emission from the root in below-ground of the stand was corrected in response to low oxygen levels.</p> <p>Due to the temperature modification, above-ground biomass accumulation in <i>R. stylosa</i> forest in Ishigaki Island was doubled from 4.19 to 8.86 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Meanwhile, the above-ground biomass of 10 year-old <i>K. candel</i> forest in Thanh Hoa decreased about 35% from 79.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> to 50.2 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. These results suggest that the temperature modification affects differently to the estimation of CO<sub>2</sub> fixation capacity because of climatic characteristics in growing area, showing that it is necessary to incorporate the temperature modification into the gas exchange estimations of the CO<sub>2</sub> fixation capacity of the mangrove forest.</p> <p>We drew a growth curve on a single stand biomass using the above- and below-ground biomass of different growth stages obtained in the plantation site. A derivative value of the growth curve was calculated to be used for the estimation of an annual biomass increment. The annual biomass increment in <i>K. candel</i> forest in Nam Dinh was the largest to be 56.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> at around 8 year-old. The forest biomass will reach to the maximum value at 18 year-old. Hence, it is possible to propose that artificial clearance of the planted trees can be done at around 20 year-old to perform the most efficient carbon fixation capacity of the mangrove forest. Furthermore, it was appeared that validity of the gas exchange estimations can be examined by comparing with the growth curve estimation of the annual biomass increment, which was constructed for the same forest.</p> <p>Comparing annual biomass accumulations of the two methods estimated in 10 year-old <i>K. candel</i> forest in Thanh Hoa, the above-ground biomass accumulation of the gas exchange estimations (34.3 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) was closely compared to those of the growth curve estimations (26.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). In addition, due to the O<sub>2</sub> level modification of root respiration, the gas exchange estimations of the total biomass accumulations in 7 year-old <i>K. candel</i> forest in Nam Dinh increased 1.5 times from 39.1 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> to 59.6 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, which was approximated to the growth curve estimations (50.8 ± 5.1 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). These results suggest that the gas exchange analysis was capable of estimating mangrove productivity. Moreover, it was appeared that the estimated values of the carbon fixation capacity of the both methods was closely compared at 7 to 10 year-old, which is accordance with the inflection point of the growth curve.</p> <p>From the results of this study, it is possible to suggest that estimation accuracy of the gas exchange analysis can be enhanced by both the O<sub>2</sub> level modification of root respiration and an incorporation of seasonal variation of gas exchange properties in each part of the stand. In addition, the gas exchange analysis was effective in estimating the growth coefficient of the growth curve, and which enables to establish the growth curve to predict the biomass accumulation in a new plantation area and the growth period attaining to the maximum biomass of the area.</p>	

## 学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	沖元 洋介
審査委員	主査 佐賀 大学 教授 野瀬 昭博
	副査 佐賀 大学 准教授 東江 栄
	副査 琉球 大学 教授 馬場 繁幸
	副査 鹿児島 大学 教授 富永 茂人
	副査 鹿児島 大学 教授 日高 哲志
審査協力者	電力中央研究所・上席研究員 立田 穰
題目	ガス交換法および生長曲線解析法を用いたマングローブ林の炭素固定能の評価に関する研究 (Study on the estimation of CO <sub>2</sub> fixation capacity in mangrove forest by using methods of gas exchange analysis and growth curve analysis)
<p>本研究は、沖縄県石垣島の<i>Rhizophora stylosa</i> (ヤエヤマヒルギ) 自然林、ベトナム国タインホアおよびナムディンの<i>Kandelia candel</i> (メヒルギ) 植林地、タイ国トラートの<i>R. apiculata</i> (フタバナヒルギ) 植林地の炭素固定能をガス交換法と生長曲線解析法の2手法で評価したフィールド調査にもとづきマングローブ林の炭素固定能の評価手法の開発を行ったものである。</p> <p>ガス交換法では、従来の生産構造図にもとづいたマングローブ林での群落炭素固定量の評価に初めて呼吸量の評価を組み込み実施した。特に本研究では、独自に開発した気温の日変化モデルを利用し光合成量および呼吸量について温度補正を行った。同時に群落の温度プロファイルを測定して群落内の気温低下を明らかにし、光合成量および呼吸量の評価に対する群落内の温度低下の影響についても検討した。更に、マングローブ地下部(根)の現存量を調査し、根部の炭酸ガス放出の規模を評価するとともに根の呼吸速度と酸素濃度の関係について解析し、炭素固定能の評価に及ぼす補正効果を検討した。</p>	

その結果、気温の日変化による光合成量と呼吸量の温度補正は、緯度の上昇とともに炭素固定量の評価を大きくする方向に改善し、高緯度地域でのガス交換法を用いた群落炭素固定量の評価に重要であることを明らかにしている。さらに、このような温度補正が、高緯度地域では冬季の呼吸量の過大評価を補正することで効果があること、北緯20度前後の地域では夏季の光合成量と呼吸量の補正に効果があり、マングローブ林における炭素固定量の季節変化の評価に有効であることを示している。同時に群落内の温度プロファイルを用いた温度補正も呼吸量の補正を介して群落炭素固定量の評価に重要であることを明らかにしている。また、呼吸量の評価を組みこんだ群落炭素固定量は樹齢の進行に伴い小さくなり、その原因が呼吸量の割合の増大、特に地下部の呼吸量の占める割合が大きくなることであることを明らかにしている。さらに、地下部の呼吸速度が低酸素条件下で顕著に低下することを明らかにし、地下部の呼吸量を酸素濃度で補正することによって群落炭素固定量の評価が改善される可能性を示した。

生長曲線解析法では、異なる樹齢の立木現存量を用いて生長曲線を作成し、生長曲線の微分値で各年における年間の乾物蓄積量、すなわち年間の群落炭素固定量を評価する方法を開発し、ガス交換法で評価する年間の群落炭素固定量の基準値の評価として利用できることを明らかにした。また、本研究で得られた生長曲線から推定されるベトナム北部の亜熱帯域及びタイ南部の熱帯域でのマングローブ林の最大炭素蓄積量は植付け後ほぼ20年で達成され、これらの地域のマングローブ林の効率的な更新サイクルは20年前後であると推測している。また、20年前後で成熟林に達するマングローブ林の年間炭素蓄積量の最大値は植付け後7～13年にかけて現れ、ベトナム・タインホアのメヒルギ林で得られた $25.5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ という乾物蓄積量が今までに得られた実測値と良く一致する結果を得ている。

特に、ガス交換法による炭素固定能の評価に地下部の呼吸量を酸素濃度と気温の日変化モデルによる温度補正を加えることで評価した年間の炭素固定能が、生長曲線の変曲点となる樹齢7～10年の時期で近似することが明らかになった。

以上の結果は、簡易性に優れたガス交換法がマングローブ林の炭素固定能の予測に有効であることを示すとともに、マングローブ林の炭素固定に関する新たな知見を提供している。以上の成果について、本審査委員会は、学位論文として十分な価値を持つものと判断した。

最終試験結果の要旨	
学位申請者 氏名	沖元 洋介
審査委員	主査 佐賀 大学 教授 野瀬 昭博
	副査 佐賀 大学 准教授 東江 栄
	副査 琉球 大学 教授 馬場 繁幸
	副査 鹿児島 大学 教授 富永 茂人
	副査 鹿児島 大学 教授 日高 哲志
審査協力者	電力中央研究所・上席研究員 立田 穰
実施年月日	平成20年 1 月 29 日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) <span style="float: right;">( <input checked="" type="radio"/> ) 口答・筆答</span>	
<p>主査および副査の6名は、平成20年1月29日(火)の公開審査会において、学位申請者に対して学位論文について説明を求め、その内容および関連事項について試問をおこなった。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>その結果、審査委員会は、申請者が大学院連合農学研究科博士課程修了者として十分な学力ならびに識見を有するものと認め、博士(農学)の学位を与えるに足る資格を有するものと判定した。</p>	

学位申請者 氏 名	沖元 洋介
<p>質問 1: マングローブの根の現存量評価は容易か?</p> <p>答 1: 植林地では比較的容易に行えるが, 自然林ではかなり難しい. 根のつながりを知るために色素や打診音を用いる方法などが試みられている.</p> <p>質問 2: 生長曲線の評価で 20 年前後に成熟林になるということだが, その後炭酸ガス収支はマイナスになるのか? また, 根の呼吸速度の酸素反応において, 温度の影響はどのように考えられるか? 同時にマングローブの地下部の酸素濃度環境についてのデータはあるのか? そのときに潮汐の関係は? マングローブ個葉の光合成の光反応については, 調査されているが, キャノピー全体としての光飽和点はどのくらいか?</p> <p>答 2: ここで用いた生長曲線ではゼロになる. 根の酸素濃度反応に対する温度の影響は, 本研究の中では検討していない. 重要と思われるので, 今後検討したい. 根域の酸素濃度については, 論文の中でも示したが Kitaya らの研究で根内の酸素濃度が潮汐によって影響を受け, 17 から 13% に低下することが示されている. この結果を参考にして根の低酸素濃度のレベルを設定した. キャノピー全体の光飽和点は, 本研究の積上げの過程で示すことが可能であるが, 本研究では実際の炭酸ガス吸収量の評価に重点をおいたので, 検討していない. 興味がある点なので今後検討したい.</p> <p>質問 3: マングローブ林では, 満潮時等に海面からの光の反射が光合成に影響を及ぼしているのではないか?</p> <p>答 3: そのように思うが, 今後海面からの反射の影響についても検討してみたい.</p> <p>質問 4: 群落内の炭酸ガス濃度の垂直分布はどうなっているのか?</p> <p>答 4: マングローブにおいては地価部の現存量が大きいことと, 汐の干満があることから, 林内の炭酸ガスの垂直分布の解析は重要であると思う. 今後検討したい.</p> <p>質問 5: Li-6400 を用いたマングローブ個葉の光合成の測定で, 上層において物理的刺激が敏感に現れるというような現象は観察されなかったのか?</p> <p>答 5: キャノピーの外側と内側で特に異なるというような経験はない. キャノピーの内部でも 11 時以降に Li-6400 を用いた光合成の測定は 5~6 分しか持続しなくなる.</p> <p>質問 6: 午前 11 時頃までしか光合成が測れなかった理由は?</p> <p>答 6: 水ストレス等が考えられ水ポテンシャルを測ったが, この点からは説明できなかった.</p> <p>質問 7: 呼吸の測定で切断による影響はないのか?</p> <p>答 7: あると思う. 本研究では切断後 24 時間冷蔵庫 (10℃) 内においた後に測定している.</p> <p>質問 8: 実際のマングローブ林では 20 年以降でも乾物量は増えているのではないか?</p> <p>答 8: 増えると思う. 本研究ではよく用いられる生長曲線の式を用いた.</p> <p>質問 9: 石垣のヤエヤマヒルギ林での生長曲線は書けないのか?</p> <p>答 9: この研究を深めて行けば可能であると思っている.</p> <p>質問 10: マングローブの種によっては若い根の表面にクロロフィルが存在するものがあるが, それらの呼吸については, どのように考えられるのか?</p> <p>答 10: 今後の検討課題と考えている.</p>	