

マングローブ林床堆積物不攪乱コア採取の意義と工夫

– Geoslicer NM1~5の試作 –

宮城豊彦^{1,2)}・宮城ふみ子¹⁾・馬場繁幸²⁾

The idea and significance of non-disturbed corer “Geoslicer NM series” for mangrove forest-floor investigation

Toyohiko MIYAGI^{1,2)}, Fumiko MIYAGI¹⁾, Shigeyuki BABA²⁾

Abstract: Mangrove forests are forest ecosystems that exist only in the upper half of the intertidal zone. In conventional studies, research had been conducted to grasp the physiological and ecological realities. However, in terms of understanding the underground part of the forest, it remained extremely unclear, despite the fact that it was only in the upper half of the intertidal zone. This report introduces the fact that the authors have developed a tool for collecting intertidal sediments without disturbance that they have been working on for many years. The geo-slicer shown in the title was devised to realize the original idea of "taking out geological formations and observing them easily." Here, this idea is developed into a tool that can easily collect and observe intertidal sediments by non-disturbance as a handy geoslicer.

Keywords: Mangrove sediment, Geoslicer NM5, Non-disturb corer, Forest structure

1. はじめに

ジオスライサーは「地層を面的に取り出して簡単に観察する」という独創的な発想を実現するために、中田・島崎(1997)によって考案された地層採取装置(道具)である。この装置は、活断層調査での露頭観察を契機に発想が始まったと思われる。断層露頭の観察は、1970年代から掘削調査が始まった。この掘削調査では露頭断面で観察できる変位の過程や時期を、礫の並び具合や腐植土の乱れの状態をできる限り正確に記載することで推定することをしていた。観察は精緻を極め、礫の一つ一つにマーカーを付して、何日もかけて記載していたのが印象的であった。その延長で、地表では「断層が此处にあると分かっているが露頭が無い」ような場合、「では露頭を作りましょう」という展開である。土木工事現場でよく目にする鋼製矢板を5tのバイブロハンマーで挿入するが、これで得られた地層断面を詳細に観察して断層の変動履歴(地震イベント)の復元に利用するものである。ジオスライサーは、任意のピンポイントに露頭を作ることを実現することに道を開い

た。筆者は、この展開の一つとしてマングローブ林の林床堆積物を、まるで露頭を見るように観察することの必要性を感じたのである。この経緯はここでは触れない。マングローブ林は潮間帯上半部に発達する森林生態系であるが、この潮間帯では、潮汐による水位変動・波・潮汐流・河川の諸作用などが発揮され、しかもその強度・頻度は潮汐の大小によっても異なるし、時折発生する津波や台風などによる突発的なインパクトもある。言うまでも無く海水は樹木にとっては毒である。このような環境で森林を発達・維持するマングローブ林はそれ自体が興味の対象だが、その観察には多大な苦勞と工夫が必要である。まして、潮間帯の林床堆積物を観察することは(林床でトレンチや試掘孔を設定しようとした方は十分に実感するように)困難を極める。冒頭に述べた発想はマングローブ林でこそ有意義ではないか。

マングローブ林床堆積物の分析事例は多くない。またその評価に関しても、Komiyama et al. (1987, 1988)により地上部・地下部のバイオマス現存量(Top and root biomass ratio)が世界的にも先駆的な試みである。2000

¹⁾ 地域情報カスタマイズユニット E-mail: c1934009@mail.tohoku-gakuin.ac.jp Geo Customize Mapping Unit, Saitama, 330-0801, Japan

²⁾ 国際マングローブ生態系協会 International Society for Mangrove Ecosystems, Nishihara, Okinawa 903-0129, Japan

年前後には、特に地下部での炭素貯留機能が注目され、Fujimoto et al. (1999), Miyagi (2000), 二宮 (2001) などの報告が行われた。これと並行して宮城・藤本(2001), 藤本ほか (2002), 宮城ほか (2003) などで沖縄県西表島では、堆積物の物質構成や炭素貯留の研究があった。その後は世界的に見れば地下部の炭素貯留が注目され、2014年には Coastal Blue Carbon の評価手法に関するマニュアルの出版 (Howard et al., 2014) があり、この方面への注目が一気に高まる。この文献には炭素貯留の調査からサンプリング、分析、評価の仕方が丁寧に記載されている。しかしながらそもそも、「この堆積物はどのような形成過程を経ているのか」という課題には十分な答えを得ていないのではないかと。マングローブ生態系では中等潮位付近から最高高潮位の間で優占する種が置き換わる(いわゆるゾーネーションが形成される)が、この変化過程は水位(地盤高)の変化に相応することを示唆するが、堆

積物にはそのような証拠を見出してはいない。森林・微地形・林床堆積物の一体的な観察が必要であろうが、このような取り組みは、ここで紹介した筆者らの報告(宮城・藤本, 2001; 藤本ほか, 2002; 宮城ほか, 2003など)程度しかない。このような状況からの変化を想定して藤本・宮城(2016)では、マングローブ林の帯状構造の形成要因についての図式が提案されている。

図1は、GeoslicerNM4で採取した不攪乱コアの断面である。ここでの林床堆積物は大量のマングローブ林起源と思われるデトリタスを基質として生根、死根、バーク、甲殻類が運んだと思われる砂(地下1m内外から広がる砂層から持ち上げられたと思われる)などの混合物である。不攪乱コアの観察でマングローブ林の土台がどのように形成されるかを考察できる。堆積物断面には様々な根が目立つ。この地上部を構成するヤエヤマヒルギが *Rhizophora stylosa* であろうと確定したのは最近のことのようだ (Inoue et al, 2023)。

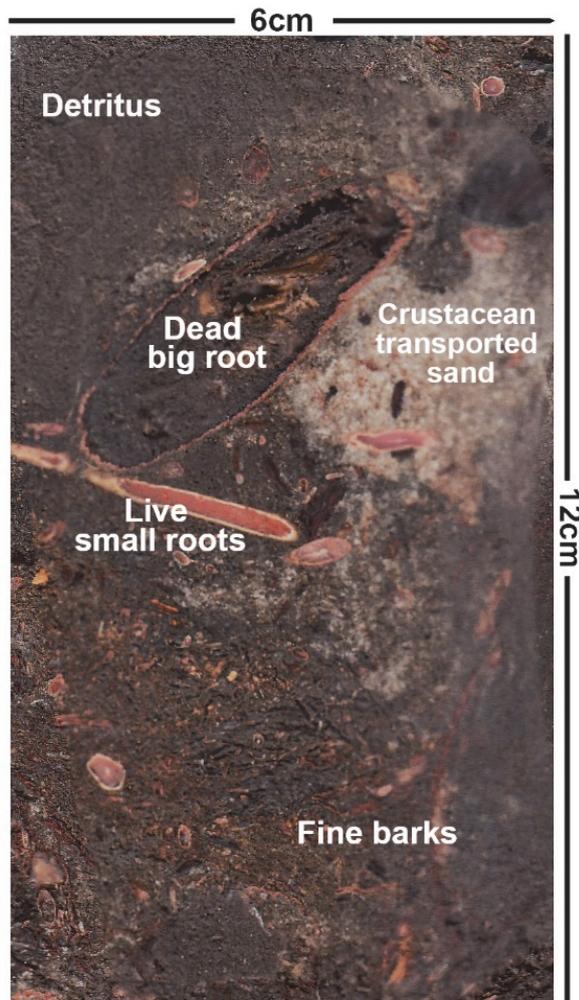


図1 マングローブ林の林床堆積物断面(深度約40-52cm) 沖縄県西表島仲間川河口部の *Rhizophora stylosa* 矮性低木林。
Fig.1 Facies of a mangrove forest floor sediment collected at *Rhizophora stylosa* habitat on Iriomote Is., Japan

2. 現場で露頭を作ることの経緯

筆者の一人は、ボーリングコアを用いて盆地底堆積物を分析することを進めていた経緯(中山・宮城, 1984; 宮城ほか, 1995など)もあり、林床堆積物を円筒のコア取得器を用いて取得することを目指したが、コアの回収率が芳しくなかった。その理由の一つに円筒の場合、コアチューブを引き上げる際に地下に空間が生じざるを得ず、コアチューブの下端に陰圧がかかることがあった。この問題を解決するためにコアチューブを四角にすることを思いついた。これがジオスライサーとの親和性の良い展開の契機となった。四角のコアチューブを用いる際にはサンプリングが2つの段階を踏む。最初にコアチューブを差し込み、次にシャッターを挿入する。堆積物の状態と作業者の力によっては極めて順調に挿入できる。これは引き上げる際にも同じだ。筆者が考案したGeoslicerの初期のものは宮城・藤本(2001)でその成果を示し、地質調査所の雑誌「地質ニュース」でGeoslicerの展開形であるHandy Geoslicer(高田ほか, 2002)として紹介した。この段階で、羊羹のように林床堆積物が採取できることで、地層を面的に取り出すことに成功し、その堆積構造を手取るように観察できた。堆積物中の水も含めて採取できるから任意の深さの塩分濃度などが現場で計測できることとなった。堆積物は定体積で切り取れるので定量化でき、その内容を定量的に評価することも容易になった。

3. メキシコ国ユカタン半島におけるマングローブ生態系環境修復事業

ユカタン半島の北岸約300kmではマングローブ林が広範に劣化・枯死林化しており、JICAとメキシコ国環境省

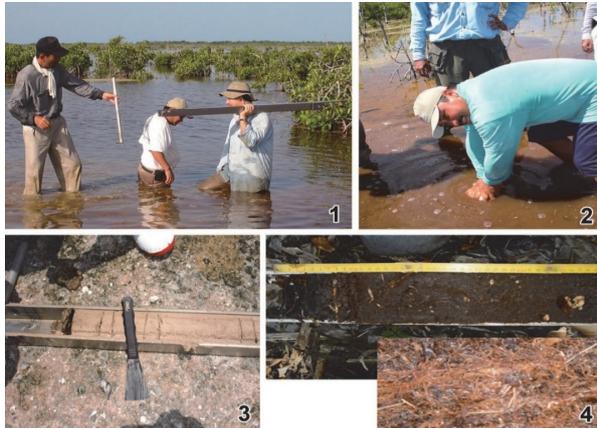


図2 Geoslicer NM3：メキシコ国ユカタン半島環境修復プロジェクトでの活用状況

1. 写真右に GeoslicerNM3 を担ぐ人，写真左の人が手にするのは挿入時に使うシャフト。2. 挿入は一気に素早く行うことが必要で，力と体重を兼ね備えた若者が役立つ。3. コアの状態（サンゴ砂主体の未固結堆積物）。調査参加者が一緒に，汚れ・コンタミネーション・攪乱の無い堆積物を観察しサンプリングができる。4. 林床では様々な有機質堆積物を確認できる。上は *Avicennia germinanse* 林の泥炭（地表下 20cm までは同種の生根が，その下位は *Rhizophora* の根が目立つ）。下は，*Rhizophora* 矮性林の例，細根が集積する。

Fig.2 GeoslicerNM3：Using condition for mangrove environmental rehabilitation project by JICA and CONAP at Yucatan Peninsula, Mexico.

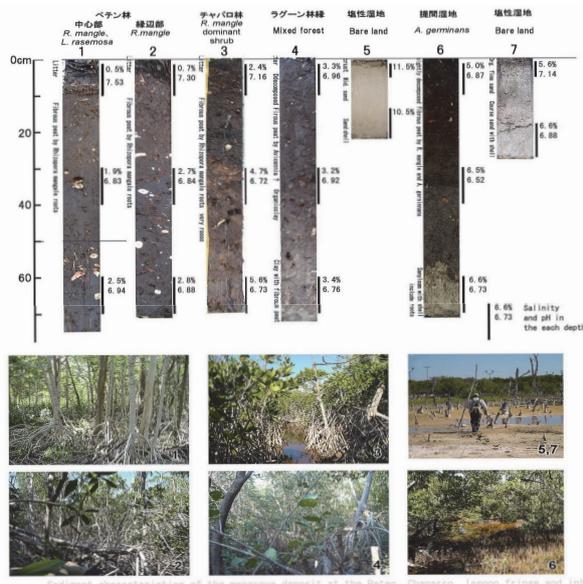


図3 メキシコ国ユカタン半島のマングローブ林・枯死林域の森林景観（下半部）と Geoslicer NM3 で採取したコア（上半部）。潮間帯域における多彩な森林景観と対応する林床堆積物の関係が良く分かる。巨木林（ペテン）からヤブ状の密生林（チャパロ）、堤間湿地マングローブ林、枯死林と地下部の有機物蓄積量に変化し、泥炭とこれを構成する樹種の推定に通じる中根・大根が観察できる。塩分濃度・PH も計測でき，地表から地下部における土壌中塩分濃度分布などが容易に把握できる。

Fig.3 The comparison between the forest landscapes and the forest floor sediment at Yucatan peninsula, Mexico.

とで環境修復事業が企画された。筆者はこの内，2005 年から 2010 年にかけてマングローブ林の調査と再生事業に関わった (CONAMP and JICA, 2010; Miyagi, 2013)。現地調査に際して，Geoslicer NM3 を用いて堆積相の把握・分析を行った (図 2, 3)。ユカタン半島には河川が存在しない。強い乾季があり，年間を通して雨量は少なく，更に地域の地形は平坦で，地質は石灰岩である。こうしたことが河川の発達を貧弱なものにする。降水は一旦地下に浸透するものの沿岸部では湧出する。ユカタン半島特有の水循環が沿岸域に地域特有の微地形を形成し，これに対応する植生が発達する。マングローブ林でもその様子は顕著であり，湧出孔付近ではペテンと呼ばれる巨木林が発達する。水が滞留する場所ではチャパロと呼ばれる *Rhizophora mangle* が優占する矮性低木密生林が発達する。沿岸の潮汐・水環境に対応した微地形が発達するのは言うまでも無い。

4. モーリシャスで発生したマングローブ林油汚染と林床堆積物

2020 年 7 月に発生したモーリシャス国沿岸での油汚染事案ではマングローブ林に対する影響が懸念された。沿岸流と風波・潮汐などでマングローブ林に到達した油が林床に沈殿し，樹幹・根系に付着し，物理的・生理的に影響をもたらすと考えられ，樹木からの油除去が喫緊の課題とされた。一方で，Norman (2016) の指摘には，油汚染から数十年を経て影響が顕在化することもあるとされた。

油汚染はマングローブ生態系にとって大きな Negative Impact であることは論を待たない。しかし，それがどのようなメカニズムで推移するのかの実態は Norman (2016) の図式を見ても明確ではない。その記載にもある通り，「かなりの長年月にわたって影響が残るだろう」という見通しと数例の事実があるのみである。ここで注目されるのが，地上部だけでなく，地下部における汚染物質の貯留状況の解明が為されていないことである。「数十年を経て」影響が残ることには様々な可能性が想定できるが，そのメカニズムを検証するには至っていないようだ。GeoslicerNM4 を用いて，油汚染を被ったマングローブ林の林床堆積物を確認した。*Rhizophora* が優占する場所の林床堆積物は，表層 1 - 3cm 及び 20 - 50cm の深度で根が集中する傾向にある。上部 20cm 程度まではカニなどの巣穴も頻りに認められる (図 4)。ここで表層数センチの細根やリターの集積は，マングローブ植物の落葉落枝と実生・幼木の根系であると判断できる。一方で地下部の細根～大根の集積層は成木の根系と判断できる。Miyagi ed. (2000), 宮城・藤本 (2001) などによれば，マングローブ林の林床堆積物には大量の有機物が含まれ，その大きな割合が根(生根・枯死根)であることが指摘されている。

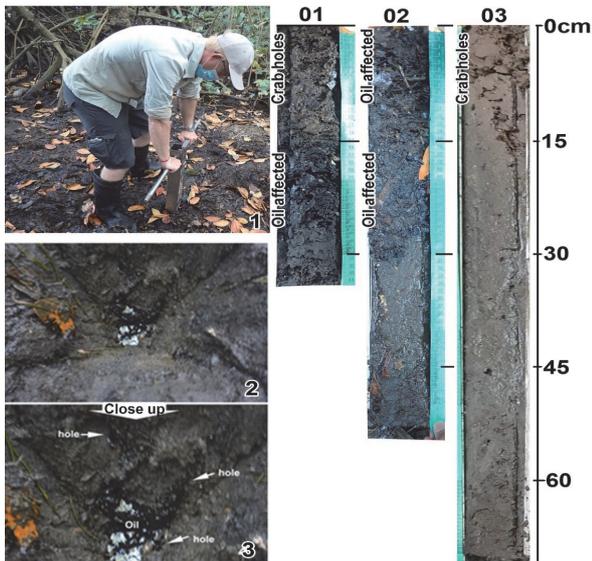


図4 GeoslicerNM4を用いたモーリシャス国マングローブ林床堆積物の油汚染状況調査

1. マングローブ林の林床堆積物採取状況。2,3. 堆積物をスコップで切り取るとカニなどの巣穴にオイルが入り込む。不攪乱コアでは油汚染箇所が容易に確認できる。01が海側。

Fig.4 Field check by Geoslicer NM4 for Oil affected mangrove sediment at Mauritius mangrove coast.

この節の冒頭で述べた油汚染のマングローブ林への影響を、林床堆積物との関連性を推定する観点から考察することへの可能性を感じるようになった。甲殻類の巣穴などを通した油の地下部での集積は今回の調査で初めて確認されたものである。油汚染除去を指揮する組織であるITOPFのThomas氏はこの汚染状況をオイルポケットの放置が続けば将来的に森林への影響が長く続くのではないかと類推し、これを対象とした汚染除去を進めることとなった。幸い、このような汚染箇所は極めて限られていたため、大規模な作業とはならず済んだ。

5. 問題点

但し、これが完成形ではない。数々の課題があった。潮間帯の林床堆積物には3つの特徴がある。第1に潮間帯であるため、低潮位時にしか作業が出来ない。第2に、堆積物は軟弱ではあるが、組成的には多彩でコアチューブの挿入、抜き取りには相応の腕力が要る。特に、挿入に当たってはハンマーなどで「ブツ叩く」ことがしばしば行われることとなった。結果として、道具の頭部は歪んでしまい、「使い物にならない」と評価された。抜き取りにも相当な腕力が必要で、小生の個人的な感想でしかないが「疲労困憊」する。第3には、コアチューブが大きすぎる。大きい場合はサンプルを確保するのが容易で大断面を観察できる利点はあるが、サンプルの自重が大きくなる。

従って抜き取りの際や運搬に思いのほか労力を費やすこととなった。

6. Geoslicerの仕様

Geoslicer 1-3は当初のもので、長さ1.5m、断面積が80cm²の仕様でジュラルミン製、シャッターはステンレス製であったが、NM4は長さ1.1m、コアチューブがチタン製、シャッターがステンレス製となった。これはチタンを加工したこともあり高価であった。

7. 課題解決を目指した GeoslicerNM5

2022年12月の日本マングローブ学会シンポジウムで報告したNM5は、上記の問題点を解決することと、誰でもがマングローブ林の堆積物を観察できる状況を実現することを目的として製作した言わば決定版である。機材の総重量が5kg以内、コア断面積は15cm²程度、コア

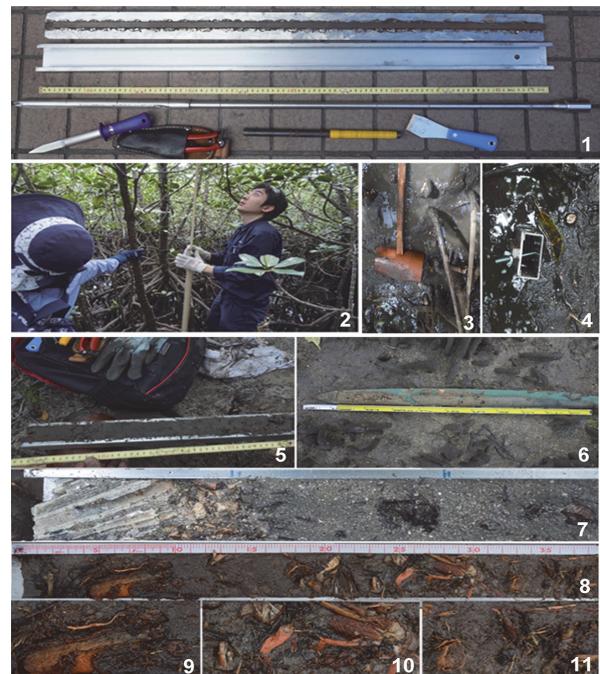


図5 GeoslicerNM5一式と作業状況概要

1. GeoslicerNM5の仕様。コアケースを挿入しシャッターを挿入する。両者を結束バンドで縛り、それを助手が支え、挿入時にはカケヤで軽く叩いて挿入する。挿入後に両者をボルトナットで固定し、ハンドルでゆっくり引き抜く。2. サンプルングを行ったマングローブ林。3. カケヤ。4. コアケースとシャッターを挿入し固定した状況。5. コアを回収しシャッターを外した状況。6. 通称ロシアンサンプラーによるコア回収状況。7. 石垣島宮良川のマングローブ林林床堆積物（サンゴ礫を割っている）。8. 西表島浦内橋付近の *Bruguiera gymnorrhiza* 林の林床堆積物採取状況。9 - 11. 8の一部を拡大したもの。複数の種の根が混在している。

Fig.5 Set of GeoslicerNM5, how to use and the core conditions.

チューブ長が100cmである。この程度であればマングローブ林内を手持ちで運搬できる。この道具で目的通りの不攪乱コアを採取するためには、少なくとも2名での操作が必要である。コアチューブ・シャッターの挿入時には「カケヤ(掛矢) またはモクハン(木製ハンマーの略) と呼ばれる」大きなハンマーで軽く打撃することで挿入できる。この際、検土杖などを用いて挿入の難易を予め探っておくと機材の破損を避けることにもなる。こうした道具は一般に消耗品で、従って対費用効果(B/C)が適切であることが求められることも留意されるべきものだろう。図5にGeoslicerNM5の概要を示した。

8. 観察の高精度化と定量分析に道を開く堆積物調査

本報告では、これまで隔靴搔痒の感があったマングローブ林の林床堆積物を、言わば手に取るように観察する手段について、若干の観察例と取り組み例を用いて紹介した。これは不攪乱・定体積であるという点から見て、堆積物の特性(物理・化学・地学・生態学的)を客観的に捉えることを可能としたことを意味する。現代はセンシングの技術が急速に進歩し、マングローブ林ですら精密な計測の対象としている(この先駆的な取り組み事例は、日本マングローブ学会2022年度シンポジウムで紹介している)。地下部においてもその実際を正確に理解することが必要なことは言うまでも無い。本報告ではGeoslicerNM5に至るサンプリングの工夫とその使用の必要性を提案した。これによって、従来行われてきた検土杖などによる堆積物の採取や地下構造の把握とは全く異なるアプローチで、地下構造把握の困難性を克服して、地上部の実態把握に相応する形で高精度化が進められることが現実になったのではないかと考える。

参考文献

- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E. and M. Telezewski eds. (2014) : *COASTEL BLUE CARBON: Methods of assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. The BLUE CARBON initiatives. Conservation international.
- CONAMP and JICA (2010) : *Manual práctico para la rehabilitación del ecosistema de manglares en Yucatán, México: Proyecto de conservación de humedales en la Península de Yucatán (JICA-CONANP) 2003-2010*.
- Fujimoto, K., Imaya, A., Tabuchi, R., Kuramoto, S., Utsugi, H. and Murofushi, T. (1999) : Belowground carbon storage of *Micronesia mangrove* forests. *Ecological Research* 14: 409-413.
- 藤本 潔・宮城豊彦・河口定生・持田幸良・石原修一・田中伸治 (2002) : マングローブ林分の土壌堆積過程の地質学的ならびに地形学的解析 - 西表島マングローブ生態系の炭素蓄積機能と立地変動. 『内閣府委託調査, マングローブに関する調査研究報告書』 309-319, 亜熱帯総合研究所.
- 藤本 潔・宮城豊彦 (2016) : マングローブ林の植生配列と微地形の関係およびその応用可能性. 藤本 潔・宮城豊彦・西城 潔・竹内裕希子編著『微地形学-人と自然をつなぐ鍵』 80-104, 古今書院.
- Inoue, T., Kohzu, A., Akaji, Y., Miura, S., Baba, S., Oshiro, N., Kezuka, M., Tokuoka, H. and Naruse, T. (2023) : Mangroves of Japan. In Sudhir, C.D., Pullaish, T. and Elizabeth, C.A. eds. *Mangroves: Biodiversity, Livelihoods and Conservation*. Springer, pp. 463-487.
- Komiyama, A., Ogino, K., Aksornkoae, S. and Sabhasri, S. (1987) : Root biomass of a mangrove forest in southern Thailand. 1. Estimation by the trench method and the zonal structure of root biomass. *Journal of Tropical Ecology* 3: 97-108.
- Komiyama, A., Moriya, H., Prawiroatmodjo, S., Toma, T. and Ogino, K. (1988) : Primary Productivity of Mangrove Forest. In Ogino, K. and Chihara, M. (eds.) *Biological system of mangrove: A report of East Indonesian Mangrove Expedition 1986*. Ehimu University, pp. 97-117. 97-117.
- 宮城豊彦・小岩直人・竹中 純 (1995) : 東北地方南部低山帯における最終間氷期以降の環境変遷と斜面物質移動. 東北学院大学東北文化研究所紀要 27 : 1-29.
- Miyagi, T. ed. (2000) : *Organic Material and Sea-Level Change in Mangrove Habitat*. Grant-in-Aid for International Scientific Research 1998-1999 No. 10041125.
- 宮城豊彦・藤本 潔 (2001) : マングローブ林の土砂堆積過程の地質学的解析. 『内閣府委託調査, マングローブに関する調査研究報告書』 164-179, 亜熱帯総合研究所.
- 宮城豊彦 (2002) : マングローブ. 茅根 創・宮城豊彦『現代日本生物誌 12 サンゴとマングローブ-生物が環境をつくる』 79-162, 岩波書店.
- 宮城豊彦・藤本 潔・馬場繁幸・内山庄一郎・石原修一・林 一成・間宮理奈 (2003) マングローブ域における地生態系の発達に関する生物地形学的研究-船浦湾における分析例-. 『内閣府委託調査, マングローブに関する調査研究報告書』 265-280, 亜熱帯総合研究所.
- Miyagi, T. (2013) : Environmental Characteristics of Mangroves for Restoration in Yucatan Peninsula,

- Mexico. *Mangrove Ecosystems Occasional Papers* 4: 1-22.
- 中田 高・島崎邦彦 (1997) : 活断層調査のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer) . 地学雑誌 106: 59-69.
- 中山知子・宮城豊彦 (1984) : 閉鎖系堆積物からみた最終氷期中葉以降の環境変化と斜面発達過程 . 東北地理 36: 25-38.
- 二宮生夫 (2001) : 『マングローブ林根圏生態系の炭素貯留評価』 . 科研費補助金課題番号 11660151 報告書 .
- Norman, C. D. (2016) : Oil spill impacts on mangroves: Recommendations for operational planning and action based on a global review. *Marine pollution Bulletin* 109: 700-715.
- 高田圭太・中田 高・宮城豊彦・原口 強・西谷義数 (2002): 沖積層調査のための小型ジオスライサー (Handy Geoslicer) の開発 . 地質ニュース 579: 12-18.