

協働モニタリングによる 沖縄本島億首川ダム直下マングローブ林の 河床変動特性の把握

CHARACTERISTICS OF BED-LEVEL FLUCTUATION BASED ON
COLLABORATIVE MONITORING AT MANGROVE FOREST
DOWN THE DAM IN OKUKUBI RIVER, OKINAWA

今井 洋太¹・竹村 紫苑²・高里 尚正³・乾 隆帝⁴
赤松 良久⁵・鎌田 磨人⁶

Yota IMAI, Shion TAKEMURA, Naomasa TAKAZATO, Ryutei INUI
Yoshihisa AKAMATSU, Mahito KAMADA

¹学生会員 学(工) 徳島大学大学院先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻
(〒770-8056 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 博(工) 総合地球環境学研究所 プロジェクト研究員
(〒603-8047 京都市北区上賀茂本山457番地4)

³非会員 株式会社ふくらしゃや
(〒904-1201 沖縄県国頭郡金武町金武5805番地)

⁴正会員 博(農) 山口大学大学院 助教(特命) 理工学研究科社会建設工学専攻
(〒755-0003 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁵正会員 博(工) 山口大学大学院 准教授 理工学研究科社会建設工学専攻
(〒755-0003 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁶正会員 学術博 徳島大学大学院 教授 ソシオテクノサイエンス研究部
(〒770-8056 徳島市南常三島町2-1)

Influence of hydraulic conditions on the bed-level fluctuation of mangrove forest during flood was clarified at the Okukubi River in Okinawa Island, Japan. Bed-level changes were monitored every one month from June 2012 to July 2015 at 18 stations. While non-dimensional shear stress during a flood was estimated by two-dimensional bed deformation analysis. Then relationship between observed bed-level change and non-dimensional shear stress was evaluated from correlation analysis. Bed-level change negatively correlates with non-dimensional shear stress during large flood. While during small flood, bed-level change doesn't correlates with non-dimensional shear stress. These results represent that bed-level fluctuation is occurred at sites where large non-dimensional shear stress is keeping during large floods. This condition can apply to selecting priority site in order to restoration of degraded mangrove forest.

Key Words : mangrove, collaborative-monitoring, two-dimensional bed deformation analysis,
Okinawa Islands

1. はじめに

マングローブ林は陸域と海域の境界域である汽水域に形成され、マングローブ林周辺に暮らす人々はマングローブ生態系から供給される様々な生態系サービスを受してきた¹⁾。しかしながら、マングローブ林は無秩序な土地転用によって、世界中で急速に減少している^{2, 3, 4)}。

また、道路工事や河川改修などのインフラ整備もマングローブ生育地を消失させる直接的な原因となったり、劣化を引き起こす原因となることが報告されている^{5, 6)}。そのようなことから、マングローブ林の保全・再生の試みが世界各地で取り組まれてきている⁷⁾。

インフラ整備による影響が及んでいるマングローブ林を保全し、地域の資源として利用し続けるためには、マングローブ生育地の現状を長期的にモニタリングして、

インフラ整備がマングローブ生育地に及ぼす影響を明らかにしたうえで、適切な管理施策を講じなくてはならない。沖縄本島億首川のマングローブ林は、地域経済を支える観光資源となっていて、その持続性を担保することは地域にとって非常に重要である。また、マングローブの生活史において胎生種子の定着が森林を維持するうえで最も重要なプロセスであり、マングローブ林の更新・維持に重要な胎生種子・実生の定着は、出水による河床変動、すなわち、河床高が動的に維持されることによって支えられていることが報告されている⁸⁾。一方で、橋の設置による川幅の縮小・流深部の固定化や、拡張工事によって貯水容量が818千 m^3 から8,560千 m^3 へと10倍となった金武ダムの運用開始（2013年4月）に伴う出水時の河床変動領域の縮小を通じて河床の地盤高と底質が変化し、結果としてマングローブの更新立地が減少すると考えられている⁹⁾。実際、億首川のマングローブ林の一部の林分では、生育地が更新に適さない立地環境へと変化したことによって森林の劣化が急速に進行しており、人工的な森林管理が必要な状況となっている。

マングローブの生育地や更新立地の物理環境を効率的に維持・修復していくためには、金武ダム直下のマングローブ生育地における河床変動パターンを継続的なモニタリング調査によって把握した上で、出水時の河床変動によって河床高が動的に維持される条件を明らかにしなければならない。また、長期的なモニタリングを実現するためには、億首川を利用している地域住民によって簡便に河床変動パターンが計測可能なモニタリング手法の構築も必要であろう。

本研究では、出水時にマングローブ生育地における河床変動を生じさせる環境要因を、土砂水理的側面から検討することを目的とし、沖縄本島の億首川において以下のように検討を進めた。マングローブ生育地における地盤高変化を簡便に把握する計測手法を開発し、億首川を利用している地域住民との協働によるモニタリング調査によって2012年6月から現在までの長期的な河床変動パターンを把握した。あわせて、二次元河床変動モデルによる数値シミュレーションを用いて流れの定量化を行った。そして、モニタリング調査で得られた河床変動パターンと数値シミュレーションで得られた無次元掃流力との関係性を明らかにすることによって、出水時に河床高が動的に維持される条件について論じた。

2. 方法

(1) 研究対象地

本研究の対象地は沖縄本島の中央部に位置する億首川の河口域に成立するマングローブ林（図-1A）であり、4種のマングローブ（オヒルギ、メヒルギ、ヤエヤマヒル

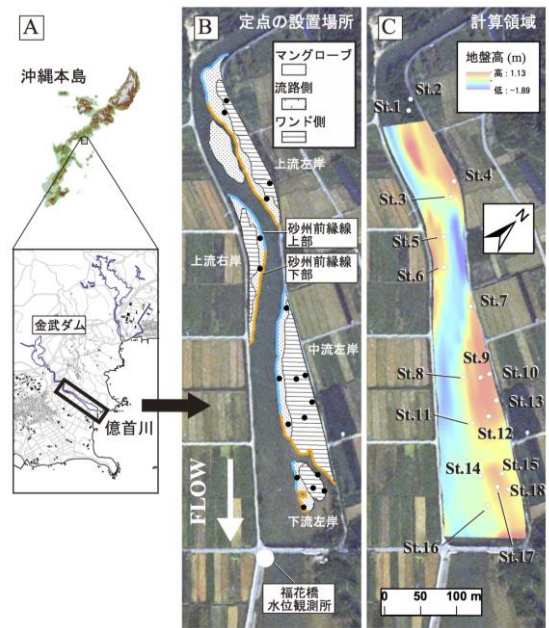


図-1 研究対象地 (A) , モニタリング調査の定点 (B) , そして、数値シミュレーションの計算領域 (C) を示す。

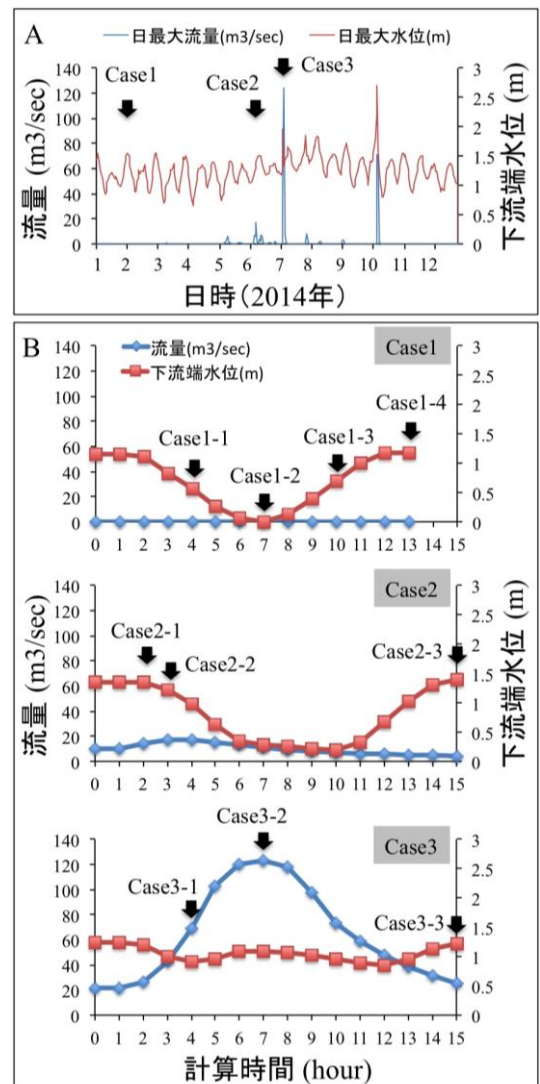


図-2 2014年の流量および下流端水位 (A) と数値シミュレーションに用いた計算条件 (B) .

ギ、ヒルギモドキ)が生育する河川である¹⁰⁾。しかしながら、億首川の河口は1970年代に橋脚の建設に伴い川幅が狭められ⁷⁾、マングローブ林から約2km上流の金武ダムからの河川維持用流量は0.15m³/secに限られるなど、人為的な改変による影響が及んでいる河川でもある。

(2) 河床高変化パターンの把握

本研究では、マングローブ生育地における河床高変化を長期的に把握するために、億首川のマングローブ林内に18箇所の定点を設置した。2012年6月にGNSSおよびトータルステーションによって定点中央部の標高を測定した後、長さ1mの塩ビ管を0.3m地表に出るように打ち込み、調査毎に塩ビ管の地表に露出している部分の長さを塩ビ管直下から1mm単位で測定することにより算出した。河床高変化モニタリング調査は、億首川においてエコツアーを実施している金武町内の観光業者「ふくらしや自然体験塾」のスタッフによって1か月に1回程度の頻度で行われてきており、現在も継続中である。なお、これまでのモニタリング調査から、塩ビ管自体が沈降するなどの問題は確認されていない。

次に、各定点における河床高変化パターンを把握するため、累加河床変動量および累加河床変動絶対量を算出した。累加河床変動量は河床高変化モニタリング調査の期間内において生じた河床高の変化量をあらわし、その期間内において立地の堆積作用が卓越したのか、浸食作用が卓越したのかを示す。一方、累加河床変動絶対量は期間内において生じた河床高変化の絶対値の累積量をあらわし、立地の不安定性を示す^{11, 12)}。そして、定点が位置する砂州および砂州上における立地の違い(流路側またはワンド側)と河床高変化パターンとの関係性を検討するため、18定点において累加河床変動量および累加河床変動絶対量を算出し、砂州(上流左岸, 上流右岸, 中流左岸, 下流左岸), 砂州上の位置(流路側, ワンド側: 図-1B)において比較した。また、流路側の8定点については、砂州前縁線の変曲点より上部と下部(図-1B)においても累加河床変動量および累加河床変動絶対量を比較した。なお、流路側は砂州の尾根線より流路側に立地する範囲、ワンド側は尾根線より護岸側に立地する範囲と定義した。これらを判断するための尾根線は後述の測量データから算出した。

(3) 二次元河床変動モデルを用いた流れの計算

本研究では、マングローブ生育地において地盤高変化に関わる水理条件として、二次元河床変動モデル¹³⁾を用いて無次元掃流力を算出した。初期地盤高は2015年6月にGNSSおよびトータルステーションを用いて測量した。そして、測量結果を元に、縦断方向に137分割、横断方向に31分割した計算格子(5×5m)を構成した(図-1C)。2014年における流量および下流端水位を図-2Aに示す。流量および下流端水位は、Case 1: 河川維持流量

のみの平常時(2014年2月14日~15日), Case 2: 台風の影響がない小規模の出水時(2014年6月14日~15日), Case 3: 年最大流量規模の出水時(2014年7月9日~10日)の3つの計算条件(図-2B)により数値シミュレーションを行なった。なお、流量は金武ダム(図-1A)での観測値を、下流端水位には、計算区間の下流端に位置する福花橋水位観測所(図-1B)の計測値を用いた。粒径は均一粒径とし、2014年3月に18定点で採取した表層土壌サンプルの中央粒径の平均値(D50 = 0.3mm)を用いた。また、マンニングの粗度係数は0.03とし、マングローブ林の植生密度を0.2、植生高さを5mとして、マングローブ林による阻害率を考慮した。数値シミュレーションによって得られた無次元掃流力の値をArcGIS ver. 10.3を用いて地図化し、各定点と地図化した無次元掃流力とのオーバーレイ解析によって、各定点から半径5m以内における無次元掃流力の平均値を算出した。

(4) 無次元掃流力と河床高変化量との関係性

無次元掃流力と河床高変化量との関係性を明らかにするために、各計算期間(Case 1, Case 2, Case 3)前後のモニタリング調査データから各定点における河床高変化量を算出した。そして、モニタリング調査データから算出した各定点における河床高変化量と数値シミュレーションにより得られた無次元掃流力とのスピアマンの順位相関係数を各計算期間において算出した。

3. 結果および考察

(1) マングローブ林における河床高変化パターン

図-3A, Bに2012年6月以降の億首川マングローブ林における累加河床変動量および累加河床変動絶対量の結果を示す。累加河床変動量の結果から、St. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14では浸食作用が卓越していた。一方、St. 6, 10, 15, 16, 17, 18では堆積作用が卓越していた(図-3A)。累加河床変動絶対量は、St. 1, 3, 4, 5, 11, 12では小さかった。一方、St. 2, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18では大きかった(図-3B)。次に、定点の立地場所による累加河床変動量および累加河床変動絶対量の違いを図-4に示す。砂州別では、累加河床変動量および累加河床変動絶対量に有意な差はみられなかった(図-4A, D)。一方、砂州の流路側に位置する定点は、ワンド側に位置する定点よりも累加河床変動量および累加河床変動絶対量が有意に小さかった(図-4B, E)。また、砂州の流路側に位置する定点の中でも、砂州前縁線の変曲点より上部に位置する定点は、下部に位置する定点よりも累加河床変動量が小さかった(図-4C)。一方、累加河床変動絶対量は、砂州前縁線の変曲点より上部に位置する定点は下部の定点よりも有意に大きかった(図-4F)。

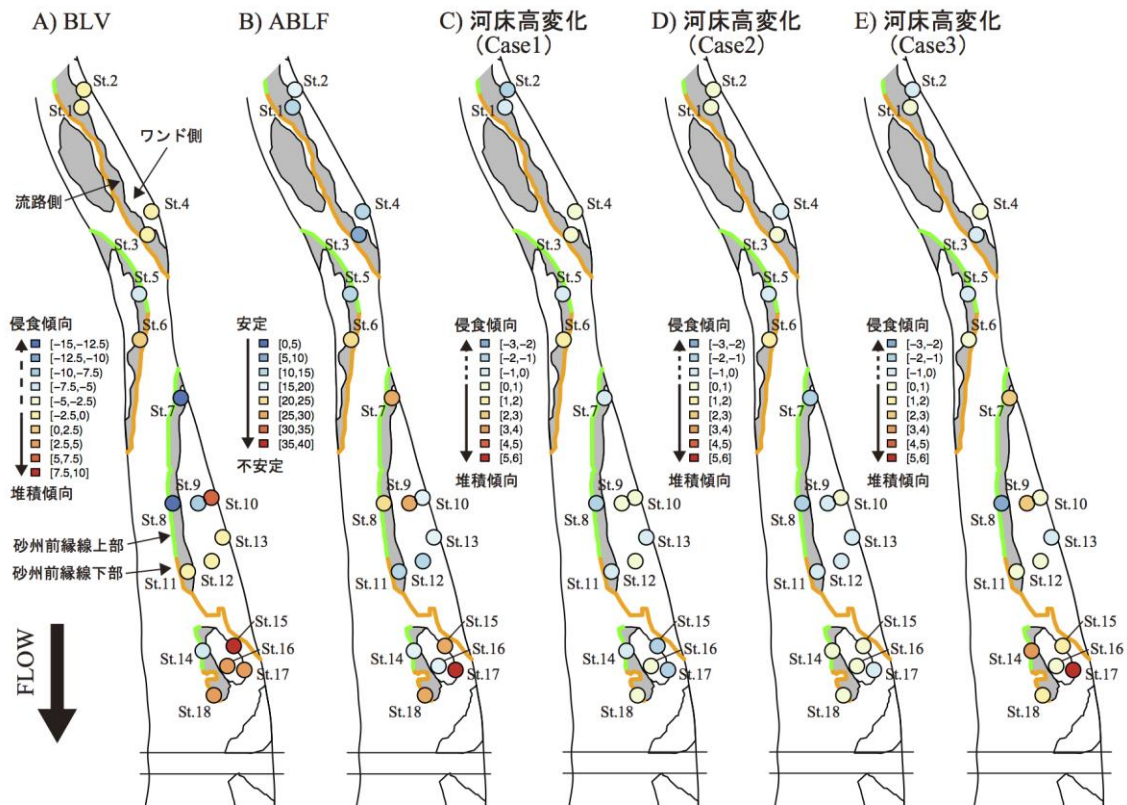


図-3 各砂州に設置した定点における河床高変化 (cm)。モニタリング調査期間におけるA: 累加河床変動量 (Bed-level validation: BLV) , B: 累加河床変動絶対量 (Absolute bed-level fluctuation: ABLF) , C: 河川維持流量のみの平常時における河床高変化, D: 小規模出水前後における河床高変化, E: 年最大規模出水前後における河床高変化を示す。

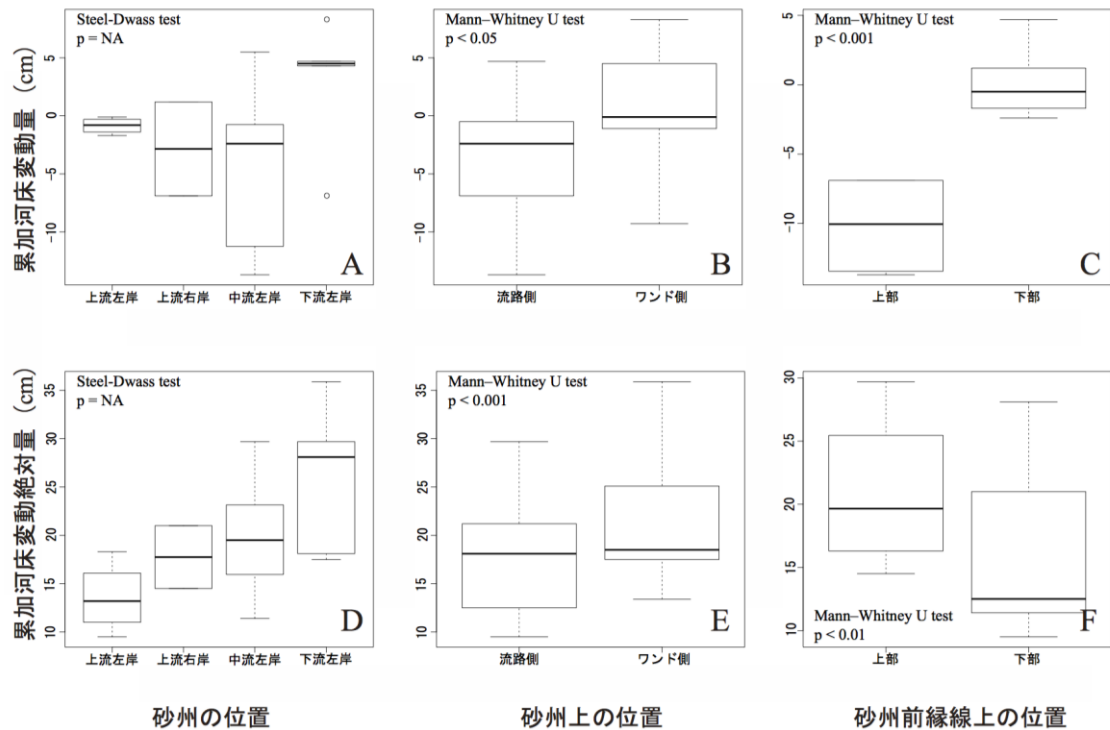


図-4 砂州の位置 (A, D) , 砂州上の位置 (B, E) , 砂州前縁線上の位置 (C, F) による累加河床変動量および累加河床変動絶対量の箱ひげ図を示す。なお、箱ひげ図の太線は中央値、箱の上端は第3四分位点、そして、箱の下端は第1四分位点をあらわす。砂州の位置による比較はスティール・ドワッス法による多重比較検定、そして、砂州上の位置および砂州前縁戦場の位置による比較はマン・ホイットニーのU検定を用いて行なった。

これらの結果は、砂州による河床高変化パターンに違いはみられず、砂州における定点の位置によって、流路側では侵食作用が卓越し、ワンド側では堆積作用が卓越していることを示している。さらに、同じ流路側でも砂州前縁線の変曲点より上部において特に河床の侵食が著しいことから、マングローブの生育地全体で堆積傾向にある場所と、侵食傾向にある場所において河床高の二極化が進行してきていることを示唆している。

図-3C, D, Eに各計算期間 (Case1, Case2, Case3) 前後における河床高変化量の結果を示す。河川維持流量のみの平常時 (Case1) および小規模の出水 (Case2) 前後では、-2cm~1cmの河床高変化が生じていた。一方、年最大規模の出水 (Case3) 前後では、-2cm~6cmの河床高変化が生じていた。また、河川維持流量のみの平常時や小規模出水前後において侵食傾向にあった地点 (St.4, St.7, St.11, St.12, St.17) は、Case3において河床の堆積が確認された。

これらの結果は、河川維持流量のみの平常時および小規模出水前後と年最大規模出水前後では、河床変動パターンが大きく異なることを示している。

(2) 無次元掃流力と河床高変化量との関係

図-5に、各定点における無次元掃流力と、計算期間前後における河床高変化量の実測値との関係を示した。河川維持流量のみの平常時 (Case 1) および小規模出水時 (Case2) では、無次元掃流力と河床高変化量との間に相関関係はみられなかった (図-5A, B, C, D, E, F, G)。定点の立地の違いに着目すると、流路側では無次

元掃流力に関係なく砂州前縁線上部において侵食し、砂州前縁線下部において堆積する傾向がみられた。しかしながら、ワンド側ではそのような傾向はみられなかった。一方、年最大流量規模の出水 (Case 3) では、無次元掃流力と河床高変化量との間に負の相関関係 (スピアマンの順位相関係数: $\rho > 0.5$) がみられたが (図-5H, I, J), 定点の立地の違いによる河床高変化に違いはみられなかった。

これらの結果は、河川維持流量のみの平常時および小規模出水では河床変動は起こりえず、干潮時の戻り流が強い砂州前縁線上部において河床の侵食、満潮時の上げ潮が強い砂州前縁線下部において河床の堆積が生じることを示唆している。また、屈曲部に位置し、年最大規模出水時に水あたりの激しいSt. 3, 5, 6では河床高が動的に維持されているが、それ以外の場所では年最大規模の出水によって河床が堆積していることを示している。

(3) 再生すべき林分の抽出

億首川のマングローブ林では、干潮時の戻り流が強い流路側の砂州前縁線上部において河床が侵食し、満潮時の上げ潮が強く、年最大規模出水時に水あたりが弱い流路側の砂州前縁線下部とワンド側において河床が堆積してきている。すなわち、マングローブの生育地全体で堆積傾向にある場所と、侵食傾向にある場所において河床高の二極化が進行してきている。その中で、屈曲部に位置し、年最大規模出水時に水あたりの激しい場所において、河床高が動的に維持されていることが示された。

年最大規模出水時に水あたりの激しいSt. 3では、長期

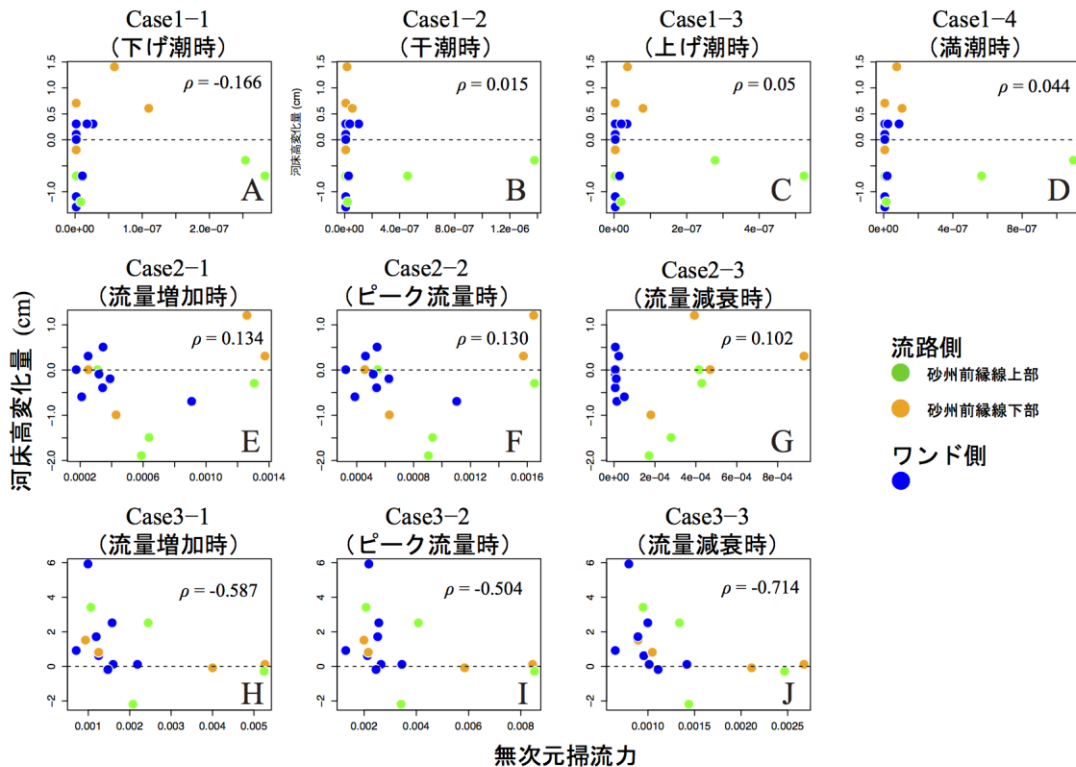


図-5 無次元掃流力と計算期間前後における河床高変化の実測値との関係。 ρ はスピアマンの順位相関係数を示す。

間にわたって河床高が一定の高さに維持されており (図-3A, 3B), 現在もマングローブの若木個体が多く生育している¹⁴⁾. このような場所では, 出水時の河床変動によってマングローブの若木個体の維持が期待できる.

一方, St. 3と同様に年最大規模出水時に水あたりが激しい場所であるにもかかわらず, St. 5では河床が浸食傾向, St. 6では河床が堆積傾向にある (図-3A). また, マングローブの若木個体はほとんど生育しておらず, 森林の劣化が急速に進行している¹⁴⁾. このような場所は, 平常時や小規模出水時において, 潮汐作用による河床の浸食や堆積が起こりにくい地形へと河床形状を修復することによって, 人工的な管理によるマングローブ林の再生を行うべき場所である.

4. おわりに

本モニタリング調査は, 億首川を利活用している地域住民によって継続されてきたものである. 本研究で得られた結果は, 干潟に打ち込んだ塩ビ管の地表に露出している部分の長さを測定するという簡便な調査によって, マングローブ生育地における詳細な河床高変化が記録可能であることを示している. そして, この長期モニタリング結果を二次元河床変動モデルによる流れの数値シミュレーションと組み合わせることにより, マングローブ林の中での再生すべき場所を見出すことができた.

億首川では, 億首川を利活用している様々なステークホルダーが協働でマングローブ林の「管理手法」や「仕組み」作りを推進する「億首川環境保全推進協議会」が2015年6月に発足した. 今後, 詳細な森林調査, 物理環境調査, 地盤測量をとおして, 再生候補地において河床高を動的に維持するために必要な条件を明らかにした上で, 億首川のマングローブ林の永続的な利用に向けて, どのような措置を講じていくべきかをステークホルダーと一緒に明らかにする必要がある.

謝辞: 本研究を行うにあたっては, 内閣府沖縄総合事務局北部ダム統合管理ダム事務所から, 金武ダム放水量および福花橋水位データをご提供いただいた. 地盤高変化調査モニタリングの実施に際しては, 株式会社ふくらしやの外間慎仁氏, 測量の実施に際しては, 京都学園大学バイオ環境学部の丹羽英之博士, 琉球大学工学部環境建設工学科の神谷大介博士および神谷研究室のみなさまに多大なご協力を頂いた. この研究は, 総合地球環境学研究所・未来設計プロジェクトE0-5「地域環境知形成による新たなコモンズの創生と持続可能な管理」の援助を受けて行った. また, (財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業 (27-1215-023, 研究代表者: 鎌田磨

人) による研究補助金を一部利用した. ここに記して感謝する.

参考文献

- 1) Walters, B. B., Rönnbäck, P., Kovacs, J. M., Crona, B., Hussain, S. A., Badola, R., Primavera, J. H., Barbier, E. and Dahdouh-Guebas, F.: Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review, *Aquatic Botany*, Vol.89, pp.220-236, 2008.
- 2) Valiela, I., Bowen, J. L. and York, J. K.: Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments, *BioScience*, Vol.51, pp.805-815, 2001.
- 3) Alongi, D. M. Present state and future of the world's mangrove forests: *Environmental Conservation*, Vol.29, pp.331-349, 2002.
- 4) Giri, C., Zhu, Z., Tieszen, L. L., Singh, A., Gillette, S. and Kelmelis, J. A. Mangrove forest distributions and dynamics (1975-2005:) of the tsunami-affected region of Asia, *Journal of Biogeography*, Vol.35, pp.519-528, 2008.
- 5) Xue, C. Coastal sedimentation, erosion and management of Kosrae.: Federated States of Micronesia, *SOPAC Technical Report 228*, South Pacific Geoscience Commission, Suva, Fiji, 1996.
- 6) Allen, J. A., Ewel, K. C. and Jack, J.: Patterns of natural and anthropogenic disturbance of the mangroves on the Pacific Island of Kosrae, *Wetlands Ecology and Management*, Vol.9, pp.291-301, 2001.
- 7) Field, C.: Restoration of mangrove ecosystems, *the International Tropical Timber Organization and the International Society for Mngrove Ecosystems*, 1996.
- 8) 竹村紫苑, 赤松良久, 鎌田磨人: 沖縄本島億首川における出水時の河床変動に着目したマングローブ林の生育地評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, pp.I_1615-I_1620, 2012.
- 9) Takemura, S., Akamatsu, Y. and Kamada, M.: Influence of dam construction and river-mouth alteration on mangrove habitat in the Okukubi River, Okinawa, Japan, *Proceeding of the 9th Annual Joint Seminar between Japan & Korea on River and River Basin Restoration by Ecosystem Approach*, pp.9-14, 2011.
- 10) 中須賀常雄, 小橋川義博: マングローブに関する研究 IV-(2) 沖縄本島・久米島におけるマングローブの分布状況 琉球大学農学部学術報告書, Vol.23, pp.313-337, 1976.
- 11) 岡部健士, 鎌田磨人, 小寺郁子: 交互砂州上の植物群落分布とこれに及ぼす河状履歴の影響, 水工学論文集, Vol.41, pp.373-378, 1997.
- 12) 鎌田磨人, 岡部健士, 小寺郁子: 吉野川河道内における樹木および土地利用型の分布の変化とそれに及ぼす流域の諸環境, 環境システム研究, Vol.25, pp.287-294, 1997.
- 13) iRICソフトウェアNays2DH: <http://i-ric.org/ja/software/18/>
- 14) 竹村紫苑: 空間的階層性概念に基づくマングローブ生育地の持続性評価, 徳島大学大学院先端技術科学教育部博士論文, 2013.

(2015. 9. 30受付)