

江戸川河口デルタの人為改変と波・流れ環境の変化の数値的復元

清野 聡子*・宮武 晃司**・芹沢 真澄***・古池 鋼****

東京湾の江戸川河口デルタは戦後に埋立が進み原地形を留めていない。江戸川河口デルタの人為改変の解析と、現況と過去の波・流れ環境の変化の数値的復元を試みた。1948 年と 2000 年の比較では、海陸のエコトーンや干潟の消失、海岸線の前進と直線的な地形の出現がみられた。1948 年当時は、デルタ地形の斜面に応じて連続的な碎波状況で、流れも全域に及び、デルタ先端部の河口の土砂は縁辺部に沿って移動していたと考えられる。2000 年には海岸線の凹凸の発生や幾何学形状化により、波と流れの不連続性が強まり、デルタ縁辺部の海浜流が分断化され、土砂輸送にも影響したと考えられる。

1. ま え が き

内湾奥に発達した河口デルタは、日本国内では、歴史的にもその周辺に都市が発達し、肥沃な後背地では農業が盛んに営まれてきた。河川からの土砂供給によりデルタが干陸化すれば農地、塩田や住宅地として土地利用がなされたが、海岸線の前進は基本的には自然の営力に依存していたといえる。日本では中世より埋立・干拓が行われてきたが、戦後の土地利用や土砂資源の需要の急増に対し、土木技術が進展して大規模な人為改変が可能となったため、大規模な埋立や干拓により陸化が急激に進んだ。さらに干潟面を航路などとして、さらに土砂資源として河口周辺の海底掘削が頻繁に大規模に行われた。その結果日本の河口周辺の地形は大きく改変され、原地形を留める河口は日本では稀となった。

東京湾奥に発達した江戸川河口デルタは国内有数の規模だったが、大都市東京に隣接するため戦後に埋立が進み、現在では原地形がほとんど残っていない（貝塚, 1993）。河口デルタ左岸側の緩斜面の干潟・浅瀬の一角であった三番瀬は、埋立を免れ海面として残っている。現在は、再生計画作成が進み、改変前の場への認識が重要となっている。再生という枠組では、対象地の現在の理解のために、環境変遷の十分な認識が必要である。本研究では、江戸川河口デルタの人為改変の解析と現況と過去の波・流れ環境の変化の数値的復元を試み、過去と現在の比較を行った。

2. 江戸川河口デルタの地形と人為改変

江戸川は、東京湾奥に底辺約 12 km、突出距離約 15 km の国内では大規模な河口デルタを形成していた。東京湾奥には荒川などの河川とともに、関東平野を流下する大規模な河川の河口があったが、江戸時代初頭に利根川の本川を江戸の都市部を避けて銚子方面に東遷する河川改

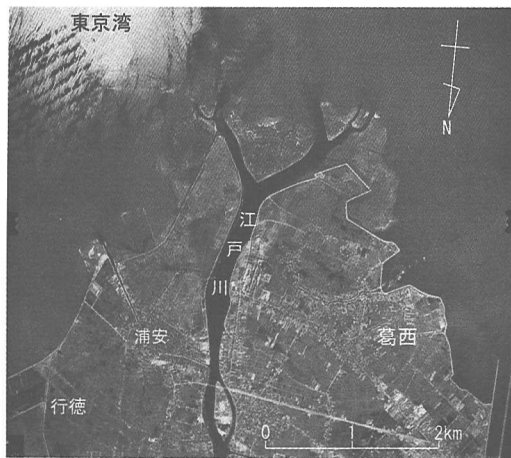


写真-1 江戸川河口部の空中写真

修が江戸幕府によって行われ、旧河道が江戸川となった。江戸川河口デルタの形成は江戸の都市形成以前の縄文海進後に進展したものである。

その後、洪水被害の軽減のため、大正時代に江戸川放水路が開削された。その後も江戸川の本川は、デルタの中央部を貫き、河口付近に通称“大三角”“小三角”の砂州を形成する二叉の樹状の河道であった。

環境変遷の研究時に経年的な空中写真の比較は有効な方法である（清野ら, 2003）。写真-1 は、1961 年の空中写真であるが、陸域の埋立や後背湿地の農地・宅地化が進んだとはいえ、江戸川河口デルタの原形をまだ示している。特に、河口砂州の“大三角”“小三角”は埋立前には、湿地で網状水路や塩性湿地、それに連続する干潟、沿岸砂州が自然状態に近く残っていた状況が判読できる。干潟面で際立って白く見えるパターンは、砂州や干出面である。

江戸川河口域、干潟、浅海域は、沿岸漁業の良好な漁場として高度に利用され、特に貝類、甲殻類漁業が盛んに行われていた。写真-1 左上には、沖にノリ養殖施設が判読される。このエリアは、「江戸の台所」として江戸時代から都市に新鮮な魚介類を提供する漁村や農村が広

* 正会員 工博 東京大学助手 大学院総合文化研究科広域システム科学科

** 国土交通省河川局河川環境課 課長補佐

*** 正会員 海岸研究室(有)

**** 海岸研究室(有)

がっていた。

現在、東京湾の再生の議論において、再生すべき目標像の環境要素として、干潟、塩性湿地、淡水湿地、沿岸砂州、クリーク、砂浜などが、地域住民から挙げられている。これらの平面的な分布や地形は、このような空中写真から判読可能である。

現在では、このエリアは埋立が進み、河口砂州は消失した。デルタ右岸側には、“三枚州”があり、環境上、漁業上の観点から埋立が回避され、現在では葛西臨海公園など当時の自然環境が多少なりとも残されたエリアとなった。

一方、デルタの左岸側には、沖合 3-4 km の広大な干潟が沿岸数十 km にわたって存在していた。豊かな干潟～沿岸の生態系が形成され、利用としては漁場や市民の潮干狩の場となっていた。ここはまた、埋立時には工事の容易性からも良好な条件であったため、結果的には埋立てられた。

2000 年の地形は、埋立地が河口デルタ先端部から東側の斜面（浦安前面）とデルタ基部（船橋前面）に、干潟面をほとんど覆う法線で建設され、江戸川放水路前面のエリア（三番瀬周辺）が鍋底状に湾入する海岸線となった。また、干潟面には市川・船橋航路が掘削された。埋立の材料用の土砂採取が近傍から行われたため、前置斜面付近には砂利掘削穴が出来た。

3. 海底地形の数値的復元

海底地形情報は、さまざまな特性をもつ地図、データセットが存在しているため、研究目的に応じた資料の発見と、系列の異なるデータの統合化が必要である。本研究では、当該エリアの各種情報の収集と統合を行った。埋立や港湾施設建設の事業時には、深浅測量図が作成されることが多い。構造物の設計などの基礎情報になるため、0.1 m オーダーで詳細に取られることが多く、沿岸地形の有力な情報である。しかし事業対象近傍の範囲に限られているため、沿岸の全体像の把握には不十分ではあるが、一方、海図は船舶航行時の利用を想定しているために、河口・海岸の水深の浅いエリアの情報はほとんどない。地形図は、陸域を中心としているため、海岸の情報はあいまいであることも多い。

1948 年当時の海底地形の復元のためには、海図（1948 年）と旧版地形図の応急修正版（国土地理院の旧版地形図のうち 1948～1953 年にかけて米軍が撮影した空中写真を利用して応急修正が行われたもの）で海岸線を確認した。干潟面は海図岸線の「くさむら海岸（Grassy coast）」に分類される岸線位置を D.L.+2 m (H.W.L.) とみなして、その包絡線を海岸線全線に延長した。その岸線と D.L.±0 m と間は直線補間した。

その結果の復元された 1948 年当時の深浅図を図-1 に示した。緩勾配の沿岸地形がみられ、デルタ先端部の江戸川河口から東側の船橋方面へとなだらかに続いたコンターを見せている。干潟面には潟がみられるが、これは自然地形をもとに小規模であるが、漁船の航路掘削の作業を行って近世以降維持してきた二次的な地形でもある。現在の三番瀬付近が台状になって膨出しているのが判別される。水深 2-6 m の前置斜面は連続的である。

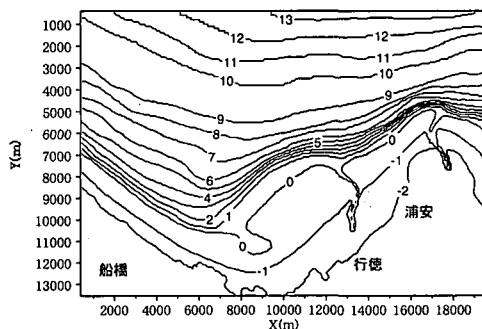


図-1 江戸川河口デルタ付近の深浅図（1948 年）

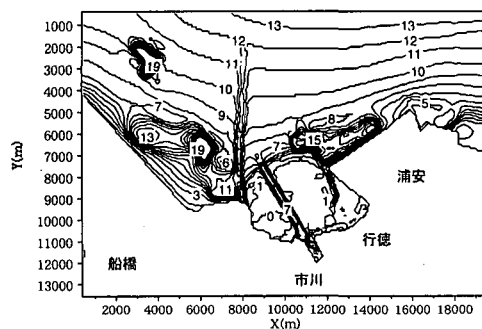


図-2 江戸川河口デルタ付近の深浅図（2000 年）

表-1 波浪場・海浜流シミュレーションの計算条件

目 的	三番瀬周辺の波浪場と海浜流場の把握
数値計算手法	波浪変形計算モデル：放物型波動方程式モデル、磯部（1986） 海浜流計算モデル：平面 2 次元の運動方程式と連続式、堀川（1985）
計算対象範囲	波浪変形計算：沿岸方向 20 km × 岸沖方向 14 km 海浜流計算：沿岸方向 19 km × 岸沖方向 13 km
入射波条件	入射波高 $H_0=1.3$ m, 周期 $T=4.5$ s, 波向 SSW
潮 位 条 件	■ 朔望平均干潮位 L.W.L. (A.P.+0.04 m) ■ 最近 5 年間平均位 M.S.L. (A.P.+1.19 m) 1990～1995 年の平均値 ■ 朔望平均満潮位 H.W.L. (A.P.+2.06 m)
波浪変形計算条件	・ 数値計算法：差分法（クラック・ニコルソン法） ・ 計算メッシュ：0.1 波長 ・ 不規則波の成分波への分割数：周波数 5 分割 × 波向 9 分割 = 計 45 成分波 ・ 境界条件：開境界
海浜流計算条件	・ 数値計算法：差分法（リーブフック法） ・ 計算メッシュ： $\Delta x=25$ m (100 m) ・ タイムステップ： $\Delta t=0.2$ s (4 s) ・ トーフステップ：20,000 (1,000) ・ 摩擦係数： $C_D=0.01$ ・ 水平拡散係数： $N=0.01$ ・ 境界条件：海域は開境界、陸域との境界は固定境界

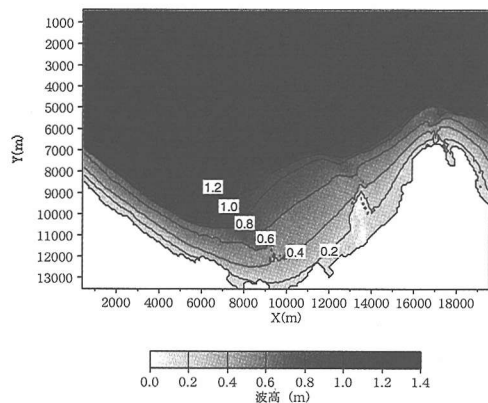


図-3 波高分布 (1948 年 H.W.L.)

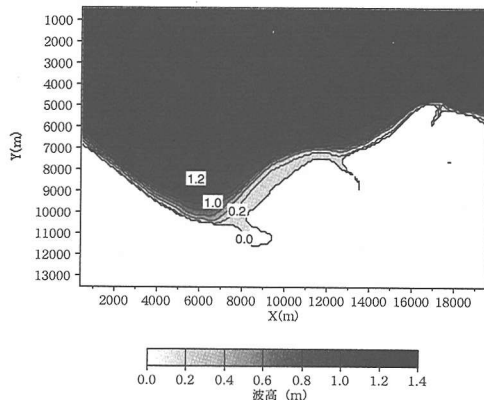


図-5 波高分布 (1948 年 L.W.L.)

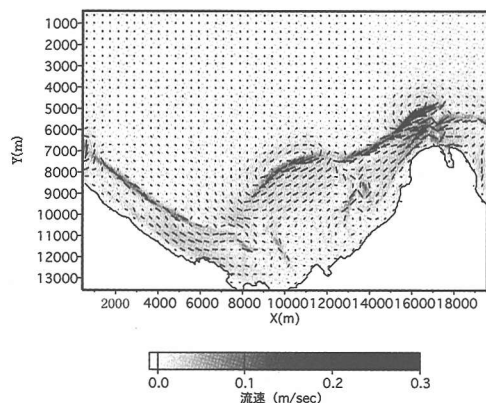


図-4 海浜流の分布 (1948 年 H.W.L.)

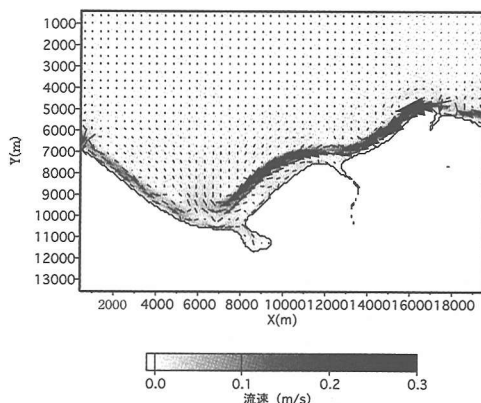


図-6 海浜流の分布 (1948 年 L.W.L.)

図-1の左には船橋前面の緩やかな弧状の海岸線がみられるが、これは地形図や資料によれば、白砂青松の海岸であった。

2000年の海底地形については、東京湾岸の再生の議論が盛んなため、また、各種事業の結果の蓄積もあって埋立後の情報は豊富であり、千葉県埋立計画に関する基礎資料で報告書などで公開されている情報を活用させていただいた。海図(W 1061/2000年, W 1088/2000年)、三番瀬の浅海域は千葉県測量(2000.8)、船橋航路周辺の水深は京葉港2期地区深浅測量(1991.9)によるものである。

統合化された2000年の深浅図を、図-2に示した。地盤沈下などの影響により、河口周辺の陸地の標高が下がった事象は知られているが、残された海底面の水深が深くなっている。河口デルタの先端部から左岸側の緩斜面の沿岸とデルタの基部に続く船橋前面には埋立地が形成された結果、現在残っている三番瀬の海面の両端に陸が延伸したため、海岸線に凹部が形成された。干潟面には航路が、前置斜面周辺には掘削穴が判別される。1948

年と2000年の深浅図を比較した結果わかった変化は以下のとおりに整理される。

- ① 海岸の埋立が進行し、自然海岸の消失が急激に進み、遮蔽域が形成された。
- ② 海底に人工的な不連続面が出現した。
- ③ 前置斜面に掘削穴や航路などの改変が進み、河口デルタ先端部の江戸川河口から船橋にかけての連続的な地形が失われた。

4. 波と流れ環境の数値的復元と新旧比較

上述のように作成した海底地形データをもとに、波高、波向、海浜流の数値計算を行った。計算条件を表-1に示す。波浪変形計算モデルは磯部(1986)の放物型波動方程式モデル、海浜流計算モデルは堀川(1985)の平面2次元の運動方程式と連続式に拠って行った。両年ともに入射波条件は、当該地の代表波として用いられている入射波高1.3 m, 周期4秒, 波向SSWとし、潮位はA.P.+0.04 m (L.W.L.), A.P.+1.19 m (M.S.L.), A.P.+2.06 m (H.W.L.)の3ケース設定した。

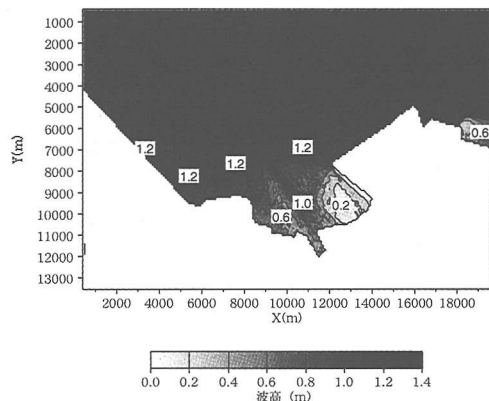


図-7 波高分布 (2000年 H.W.L.)

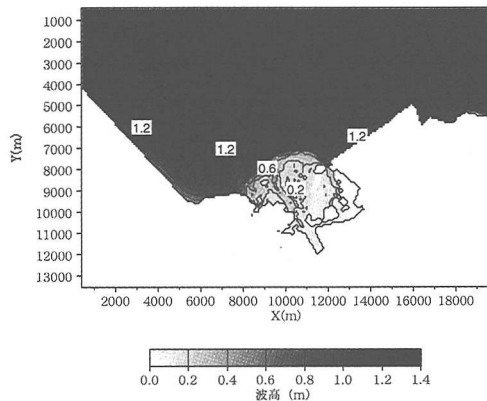


図-9 波高分布 (2000年 L.W.L.)

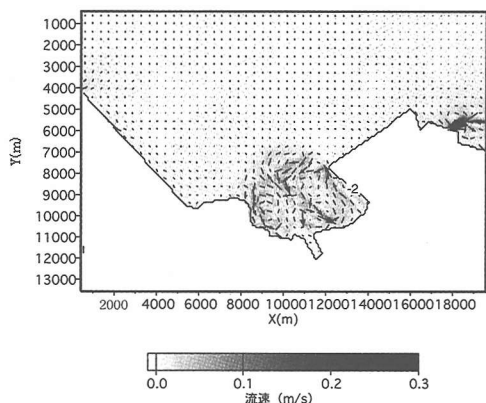


図-8 海浜流の分布 (2000年 H.W.L.)

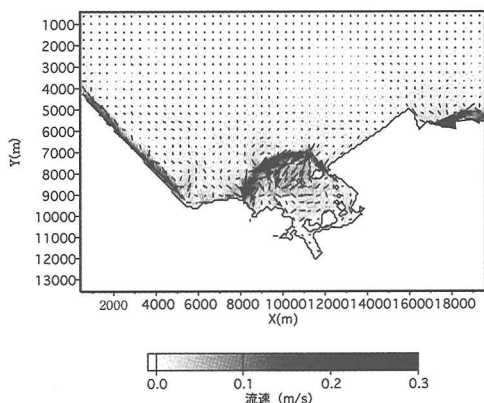


図-10 海浜流の分布 (2000年 L.W.L.)

1948年のH.W.L. (A.P.+0.2 m)での波高(図-3), 海浜流(図-4), L.W.L.での波高(図-5)【海浜流(図-6), 2000年のH.W.L.の波高(図-7), 海浜流(図-8), L.W.L.での波高(図-9), 海浜流(図-10)に示す。

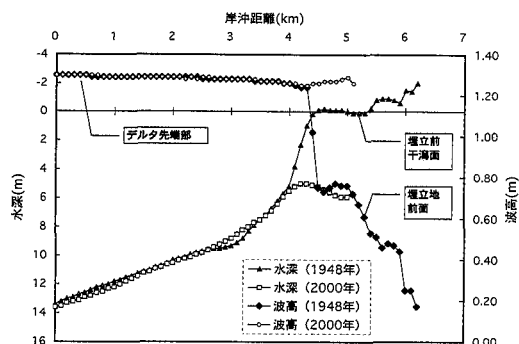
1948年は、波高分布は岸沖方向に連続的であり、なかなか河口テラスの斜面では岸に近づくほど波高が低くなり、干潟面での碎波がスムーズに起きていたといえる。H.W.L.時もL.W.L.時の双方ともにこの特徴がみられるので、干満に応じて、干潟面上の絶対地点では波高が連続的に変化していたことになる。これらは、干潟面上での物質の流動に関連する現象であり、河口デルタ周辺のもともとの物理条件と考えられる。

それに応じて、海浜流の特性をみたところ、河口デルタ先端部や前置斜面の勾配変化点に早い流れがみられた。河口からテラス前縁に沿って行徳沖から船橋に至るNW方向の連続した0.15 m/s以上の分布がみられた。それは、H.W.L.ではデルタの最先端部左岸側で最大となり、M.S.L.では三番瀬前面、L.W.L.では感出した干潟の前縁に沿って拡大していた。0.15 m/s以上の海浜流分布

は3潮位ともに、デルタ左岸側では三番瀬前面、右岸側では三枚州前面に分布していた。H.W.L.時には干潟の全面にデルタ先端部から船橋方面にかけてみられた流れが、L.W.L.時には、同様の前置斜面を流れるが、流速が早い流れの幅が斜面に集中してみられる。いずれも、河口から出た土砂がデルタ基部の船橋方面へと輸送される営力が存在することがわかる。また、潮位に拠らず、前置斜面に沿って連続的な海浜流が見出せることは、土砂や生物の輸送や移動にとっても連続性が保たれていたことを意味する。

一方、2000年には、埋立地になったエリアでは当然1948年にみられた海岸の物理現象は見出すことができない。特徴的なのは、波高分布と海浜流ともに不連続なパターンがみられることである。1948年の同じ波浪条件の結果と比較し、深淺図の絶対位置と照応して不連続部分の位置を検討したところ、前面の掘削穴、埋立地の海岸線形状、航路の場所に不連続性がみられた。

実際に、デルタ先端部のH.W.L.での水深と波高の比較を行ったところ、デルタ先端部ではほとんど変化がな



図一11 デルタ先端部における波高・水深の岸沖分布

いが、埋立前の1948年には干潟面では急激ではあるが前置斜面から海岸にかけて連続的に波高が減衰しているが、2000年の条件では波高は沖と同じままである。これは水深に起因するものだが、物理的な環境勾配が失われたことを意味する(図一11)。

5. まとめ

江戸川河口デルタの物理環境の変化は、埋立による干潟面積の実質的な減少だけでなく、1948年には河口テラス前面の干潟の全体の流れ場が連続的であったものが、埋立による海岸線や水深の変化、航路建設や砂利掘削による海底面の不連続化により、流れ場もまた不連続になった。砂利掘削穴は明らかな海底面の不連続部分であり、海底での流動阻害から貧酸素水塊の発生源ともなっている。河口デルタの原地形が痕跡的に残っている三番瀬と三枚洲は、部分的には変化が少ないエリアもあるが、海浜流や波高分布の連続性は失われ、流れ場としては変容した。江戸川河口デルタは戦後に激しい改変を受け、物理環境の量的変化だけでなく質的変容も伴った。特に土砂輸送を通じて海岸の地形形成と保持に関与する海浜流の分断により、河口テラス周辺の堆積環境を変化させる。1948年当時とは河川からの土砂流入量も減少してい

る。

このように、1948年と2000年の物理条件を比較すると、現在の地形が河口デルタに特有の緩勾配の斜面を両脇に有した突出した地形である特性を保持しているとは言いがたい。しかし、痕跡的にはあるが、埋立地前面の前置斜面は部分的に残っている。

干潟・海岸・河口・沿岸の生態系の特徴として、「環境勾配」の重要性が言われる。本研究では、塩分や水質は取り上げていないが、基本的な波と流れの物理環境の条件について変化がわかった。そのため、物理条件の変化がおのずと生物的条件に影響することは必至であるため、地形改変によって生態系の基礎条件が根本的に変化したと推測される。

自然再生と環境復元の議論では、河口デルタの元の環境特性を踏まえた上での現況データの理解と比較の上での議論が不可欠と考えられる。

謝辞：本研究は、清野に対する文部科学省科学研究費および河川整備基金による、河口域環境保全のための物理・生物環境の解明および生態系・水産業に配慮した河口管理手法の開発の一環としてなされた。また、現在の三番瀬周辺の深浅測量データは、千葉県資料のご提供を賜った。国土交通省河川局および同省江戸川河川事務所、および東京湾河口干潟保全検討会メンバーの方々にはご議論を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の回折・屈折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 貝塚爽平編 (1997): 東京湾の地形・地質と水, 築地書館, 212 p.
- 清野聡子・足利由起子・安倍元子・宇多高明 (2003): 大分県中津干潟における海岸の変遷—写真資料に基づく解析—, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 261-266.
- 堀川清司編 (1985): 海岸環境工学—海岸過程の理論・観測・予測方法—, 東京大学出版会, 582 p.