

ルーマニア黒海南部海岸の侵食実態とその対策について

Beach Erosion and Coastal Protection Plan Along The Southern Romanian Black Sea Shore

宇野喜之¹・伊東啓勝¹・黒木敬司²・越智 裕³・合田良實⁴

Yoshiyuki UNO, Yoshimasa ITO, Keiji KUROKI, Yutaka OCHI and Yoshimi GODA

The state of beach erosion of the southern unit of the Romanian Black Sea shore is described with explanation of its mechanism. Beaches in the northern part of the study area are composed of terrigenous sand from the Danube, while the sediment in the southern beaches is made of shell fragments. Shoreline changes over years have been well reproduced with the one-line model and the net sediment transport rate is evaluated at several coastal units.

1. はじめに

黒海に面し海岸総延長 245 km に及ぶルーマニア海岸は、北部海岸はドナウ川の河口デルタによって形成されウクライナと接しており、世界遺産として保護されている。南部海岸は、図-1 に示すように Navodari からブルガリア国境に面した Vama Veche までの約 80 km の区間を指し、東ヨーロッパ有数のリゾートとして利用されているものの、ドナウ川からの供給土砂量の減少に加えて、海岸保全施設が 1990 年以前に整備されたままに放置されているため、海岸侵食が進行している。そこで、長期的に安定した海浜を計画する目的で侵食実態の把握を行ったうえで適切な対策を計画し、汀線変化予測モデルを用いて対策の有効性を検証した。

2. 海岸侵食の状況と要因

ルーマニア国立海洋開発研究所(NIMRD)が 1970 年代から実施している断面測量結果を整理し、南部海岸(Navodari から Vama Veche)の 34 箇所での汀線位置変化速度を求めた。図-2 に示すように、Mamaia 海岸では 1970 年代後半から汀線の後退が進んだため、1989 年に養浜を実施し、離岸堤 6 基を建設した。その後の変化はほぼ直線的なトレンドで表現することが可能であり、約 2 m/年の速度で汀線が後退していることが確認された。その他の場所でも、変化速度に差はあるものの、殆どの地点で直線的なトレンドで海岸線位置の変動を評価できた。

Mamaia 海岸の砂浜幅は 1960 年代には 100 m 程度であったが 1970 年代の後半から顕著な侵食が始まった。この時期には Mamaia の北側約 11 km に位置する Midia 港の防波堤が水深 10 m 程度まで延伸された時期と一致し、ルーマニア国内に数多く建設されたドナウ川

支流のダム開発に伴う供給土砂量の減少に加えて Midia 港の拡張が、Mamaia 海岸侵食の主要因と考えることが出来る。

Mamaia 南部海岸ではこのような侵食に対して、6 基の離岸堤と養浜による対策を 1988 年から 1990 年の間に実施したものの、2005 年には養浜実施直後に比べて 40 m 近い汀線後退が見られ、一部の商業施設に直接波浪が作用している。

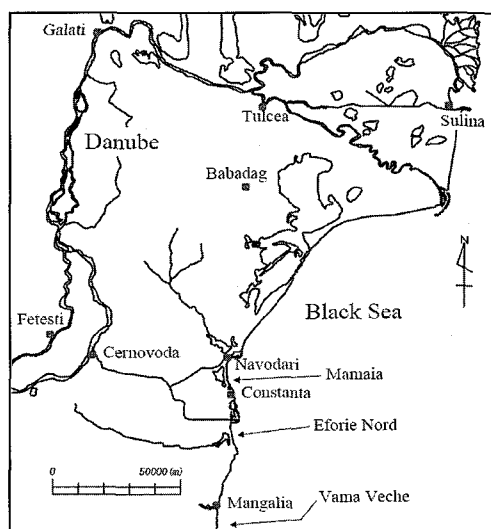


図-1 ルーマニア黒海南部海岸調査対象位置図

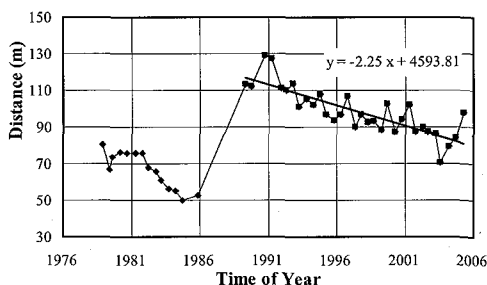


図-2 Mamaia 地区の汀線位置経時変化例 (MM-14)

1 正会員 修(工) (株)エコー
2 正会員 博(工) (株)エコー
3 工修 (株)エコー
4 名誉会員 工博 横浜国立大学名誉教授, (株)エコー

34箇所の汀線位置解析位置と平均的な変化速度を図-3に示す。MM_7はMamaia南部海岸に施工した6基の離岸堤の北側境界に位置しており、局所的な後退が生じている。Mamaia南部海岸に位置するMM_13-15では平均的に年間2m程度の速度で汀線後退が進行している。

Constanta港の南側では低い海食崖が連続しており、その前面に狭い砂浜が点在しており、Constantinescu (2005)は1924年の地形図と2002年のイコノス画像から、年間0.5~0.7mの速度で海食崖が後退していることを指摘している。

Eforie Nordに近いEF_1測点では、1986年以降に人工島形式で造られたマリーナ背後のトンボロ形成の影響による、汀線前進が見られる。EF_6では2.5m/yと大きな侵食が見られるが、隣接するEF_7付近の砂浜が消失しており、護岸からの反射波の影響を受けているものと推察される。

Mangalia港の北側に位置するSN_1とSN_2では1970年代に作られた突堤の影響による平面的な形状変化や海岸護岸の反射の影響により1.5m/y程度の速度で侵食が進んでいる。最南端に位置するVama Vecheの汀線後退は長期的に継続している海食崖の後退速度0.7m/yとほぼ一致している。

3. 鉱物組成分析による土砂供給源の推定

対象区域に加えて北部海岸やドナウ川の土砂を17サンプル採取し、粒度・比重・鉱物組成の分析を行った。Mamaia海岸の中央粒径は0.2mm程度、EforieからVama Vecheの間では0.4~0.7mmであった。鉱物分析は蛍光X線分析を行った。図-4に酸化ケイ素(Si)と酸化カルシウム(Ca)およびチタン(Ti)とマンガン(Mg)の検出率の沿岸方向分布を示す。図中のR2はドナウ川の河口から約130kmの位置での河床で採取した砂、Z2はMidia港より約20km北側の海岸で採取したサンプルである。

海岸域の代表的な構造物としては、Z2とA1の間にMidia港、B3とC1の間にConstanta港、F3とG1の間にMangalia港が位置している。

Constanta港を境にして南北のMamaia側とEforie側でSiとCaの含有率の傾向が異なり、北側ではSiが主要な鉱物であるのに対して、南側ではCaが支配的であった。このことから、Mamaia以北の海岸を構成する底質はドナウ川から排出される土砂が主要な供給源であり、Eforie以南はドナウ川の影響域からはずれ、毎年大量に発生するイガイの貝殻もしくは基盤岩である石灰岩の破砕片が主要な成分であることが確認された。なお、ルーマニアの山岳地帯で発生すると思われるTi等の鉱物に

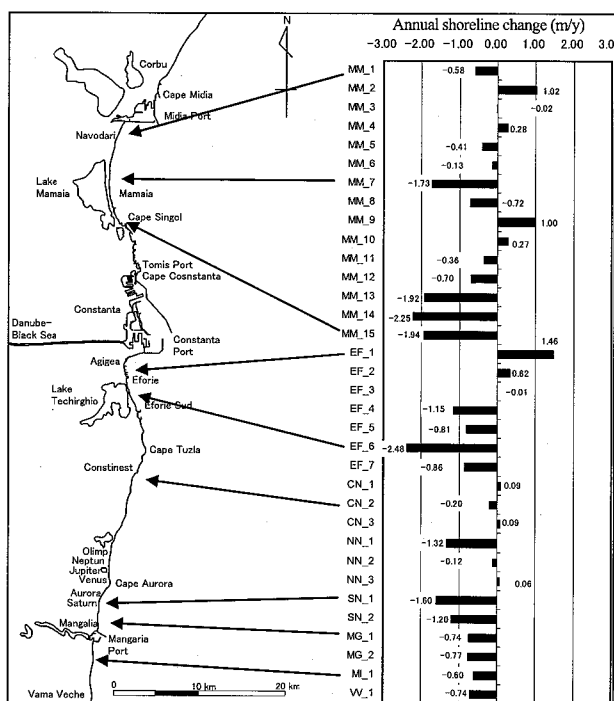


図-3 ルーマニア南部海岸の汀線位置変化速度

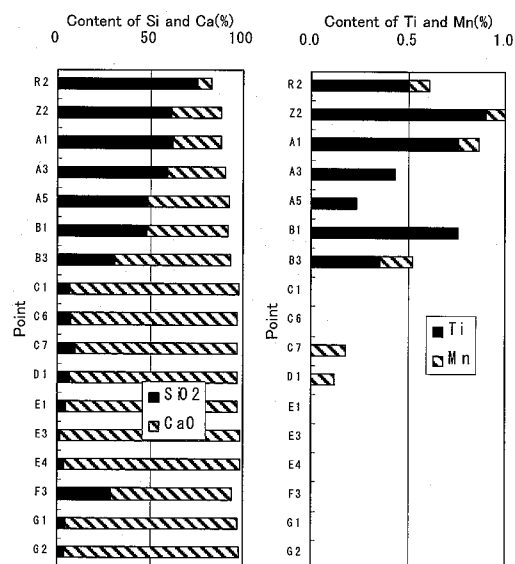


図-4 代表的な鉱物の沿岸分布

ついても、Eforie以南では検出されず、Constanta港が漂砂の境界となっていることを裏付ける資料となった。なお、Mangalia港に近いF3のSi含有率が周囲に比べると高い。これに付いてはヒアリングの結果から、以前に川砂を用いて養浜を行った箇所であることが判明した。

4. 波浪特性と代表波浪条件

ヨーロッパ中期気象予報センター (ECMWF) による波浪推算結果 (1991 - 2002) を用いて、波浪出現状況を整理した。表-1 に Constanta 沖での月別平均の有義波高 (周期) の出現状況と 10 % および 1 % 超過波を示す。季節別に見ると冬季に波高が高く夏季に低い傾向にあり、冬季の平均的な波高として 11 月から 3 月までの平均波高は 1.16 m、夏季については 4 月から 10 月の平均波高が 0.79 m となる。

表-2 に設計波浪諸元を示す。50 年確率の波高は 7.45 m、周期は 10.8 s であった。

表-1 Coanstanta 沖の月別有義波高 (周期)

Month	Mean	10 % exceedance	1 % exceedance
Jan.	1.11 m (5.1 s)	2.0 m (6.7 s)	4.4 m (9.1 s)
Feb.	1.06 m (5.1 s)	2.0 m (6.7 s)	3.6 m (8.4 s)
Mar.	1.05 m (5.2 s)	1.8 m (6.8 s)	3.7 m (8.2 s)
Apr.	0.88 m (5.1 s)	1.6 m (6.6 s)	2.9 m (8.0 s)
May	0.71 m (4.8 s)	1.4 m (6.4 s)	2.6 m (7.8 s)
Jun.	0.65 m (4.5 s)	1.3 m (5.8 s)	2.2 m (7.3 s)
Jul.	0.68 m (4.5 s)	1.4 m (6.1 s)	2.3 m (7.5 s)
Aug.	0.73 m (4.8 s)	1.4 m (6.2 s)	2.3 m (7.8 s)
Sep.	0.89 m (4.9 s)	1.7 m (6.6 s)	3.1 m (8.0 s)
Oct.	1.03 m (5.2 s)	2.0 m (6.9 s)	3.4 m (8.6 s)
Nov.	1.18 m (5.3 s)	2.4 m (7.2 s)	4.4 m (9.4 s)
Dec.	1.31 m (5.5 s)	2.7 m (7.4 s)	4.9 m (9.5 s)
Annual	0.95 m (5.1 s)	1.8 m (6.6 s)	3.6 m (8.4 s)

表-2 確率波高と周期

Return period	Wave height (m)	Wave period (s)
5 years	6.08	9.9
10 years	6.52	10.2
50 years	6.52	10.2
100 years	7.83	11.0

汀線変化予測シミュレーションを実施する目的で、エネルギー平均波高も求めた。海岸線に対して北側から作用する波と、南から作用する波の 2 種類に分けて求めた代表波浪条件を表-3 に示す。

表-3 エネルギー平均波 (汀線変化予測に用いる)

Waves	Northerly waves	Southerly waves
Wave direction	N64.0°E	N115.2°E
Wave height, $H_{1/3}$ (m)	1.65	1.11
Wave period, $T_{1/3}$ (s)	6.2	6.2
Directional spreading, S_{max}	25	25

5. 汀線変化予測モデルによる地形変化の検討

汀線変化予測モデルにより対象海岸の過去の地形変化の再現を行って、モデルの現地適合性を確認したうえで、各種対策の比較検討を行った。予測に用いた波浪条件は表-3 に示したエネルギー平均波を用いて N 系の代表波浪として N64°E, $H_{1/3}=1.65$ m, $T_{1/3}=6.2$ s, S 系の代表波浪として N115.2°E, $H_{1/3}=1.11$ m, $T_{1/3}=6.2$ s とした。

再現対象地形は Mamaia 地区では 1976, 1980, 1990, 1995, 1997 年の 5 回分の汀線測量データを入手してデジ

タル化したものを用いた。Eforie 地区については 1981, 1986, 1995, 1997 年の 4 回分のデータを再現対象とした。

(1) 予測方法の概要

汀線変化予測モデルは小笹ら (1979) によるモデルを用いた。漂砂量係数 K_1 と K_2 は Mamaia 地区では $K_1=0.154$ および $K_2=0.125$, Eforie 地区では $K_1=0.109$, $K_2=0.088$ とした。漂砂量係数 K_1 を地区ごとに变化させた理由として、Mamaia の平均的な中央粒径が 0.2 mm 程度、Eforie 地区では 0.4 mm 程度であったことに配慮したもので、波浪の遮蔽効果に影響を受ける K_2 については Mamaia 地区では 6 基の離岸堤背後の汀線形状、Eforie 地区では島状のマリーナ背後に形成されたトンボロの形状を対象として試行計算により決定した。

波浪変形計算は Karlsson (1969) によるエネルギー平衡方程式を用い、防波堤や離岸堤などによる回折の影響は方向分散法によった。碎波波高の判定は $H_b=0.8h$ を用いた。

漂砂の移動高さは Hallermeier (1978) による次式を用いると $h_c=9.3$ m となり、これに陸域を加えて 10.0 m とした。

$$h_c = 2.28 H_e - 68.5 \left(\frac{H_e^2}{g T_e^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

波高及び周期は Constanta 沖の波浪データから求めた有効波条件 $H_e=5.0$ m, $T_e=9.1$ s を用いた。Eforie 地区は粒径が大きいことから、佐藤・田中による移動限界水深を求めておき、Mamaia 地区との比率から水中部 7.1 m、陸域を加えて移動高さ 7.5 m とした。

(2) 現地データを用いた再現性の検討

Mamaia 地区海岸での 5 回分の地形図から汀線形状を読み取って再現対象地形とした。図-5 は 1976 年の汀線を初期地形として、1980, 1990, 1995, 1997 年の再現対象地形 (破線) と再現計算結果 (実線) を並べて比較したものである。上段は再現計算を実施した沿岸方向 20 km、岸沖方向 5 km の範囲の平面図であり、北側から順に Midia 港、Navodari 地区、Mamaia 地区、Tomis 地区、Constanta 港と並んでいる。Mamaia 地区の離岸堤等の保全構造物は 1997 年現在の配置を表示している。

再現計算では Midia 港と Constanta 港を通過する漂砂はないものとした。Mamaia 海岸から Constanta 港に至る Tomis 地区では漁港施設や突堤が配置されており、各突堤の長さに応じて通過漂砂量を考慮した。

1976 年から 1980 年には Mamaia 地区の南側約 3 km の範囲で汀線が後退しており、再現計算でもこの範囲の侵食が表現されている。

1988 年には侵食対策として 6 基の離岸堤と養浜が実施された。養浜は Mamaia 海岸の背後に位置する湖の土砂をパイプにより排砂する方法で実施された。

1990 年は離岸堤と養浜が実施された直後であり、Mamaia 地区の南端部の汀線が大きく前進し、離岸堤の背

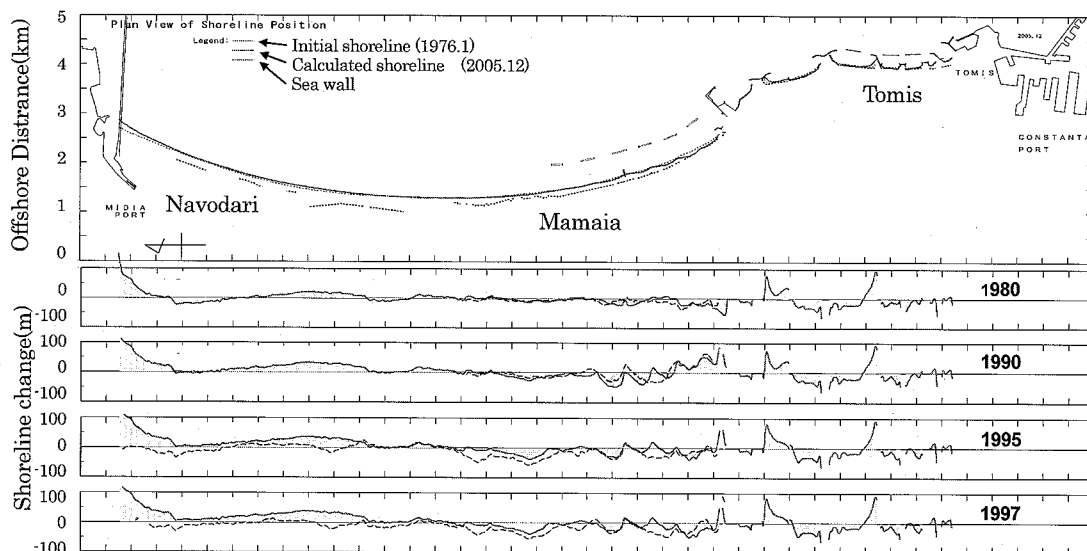


図-5 Navodari から Tomis 地区の汀線変化再現計算結果

後にトンボ口状の汀線前進が見られる。同時期に6基の離岸堤の北端部背後からは汀線の後退が始まり、1997年までに後退範囲、後退量とも大きくなる傾向が見られる。

1990年に一時的に前進した南端部の汀線も1995年には後退が始まり1997年には最大で50m程度後退している。この後退量は前述した基準点での年間当りの汀線後退量(2.2m/y)と一致している。

1988年の養浜は背後の湖の土砂が利用されたものの、離岸堤の背後に堆積した土砂は汀線付近の砂に比べて非常に小さく(中央粒径が0.1mm程度)、沿岸方向北側に移動したのではなく、沖側に堆積して残っていると推定される。

この点に関しては別途実施した深浅測量結果から求めた離岸堤背後の水中部の勾配が、粒径0.1mmを想定した場合のDeanの安定勾配と一致していることから裏付けられる。

加えて、離岸堤背後の汀線が養浜実施後に急激に後退した原因の一つに、離岸堤の沈下を挙げることができる。

Navodari地区の汀線は1997年に至るまで殆ど変動しておらず、安定した形状を保っている。しかし、再現計算ではMamaia地区から北上した土砂が大規模に堆積し汀線が前進する結果となっており、沖方向に輸送される土砂の評価が不十分であると考えられる。

(3) 沿岸漂砂量

汀線変化モデルによる数値計算結果から、沿岸漂砂量の分布を求めた。図-6はNavodariからTomis地区での2006年から2010年までの汀線変化予測結果から沿岸漂砂量を求めた結果であり、上段の平面図は図-5と同じものである。今回の計算では北から来襲して南向きに砂を移動させる代表波浪と、南から来襲して北向きに砂

を移動させる代表波浪を設定し、それぞれの出現頻度を月別に考慮して繰り返して作用させているため、北向き漂砂と南向き漂砂を個別に抽出することが可能である。

同図の中段は、プラスが南に向かう漂砂、マイナスが北に向かう漂砂を表し、両者の差分が実際の地形変化量に影響を及ぼす漂砂量(Net漂砂量)となることを示したものであり、下段はNet漂砂量を拡大したものである。

NavodariからMamaiaの範囲では、北向漂砂量が最大で約16万 m^3/y 、南向き漂砂量は約14万 m^3/y であり、両者の差は2万 m^3/y 程度で北向が大きくなっている。

Net漂砂は対象海岸全域で北向であり、沿岸方向距離9kmから10kmの位置で最大(約2.4万 m^3/y)となっている。この場所はMamaia地区の6基の離岸堤の北端部背後で、波浪の遮蔽域が形成され沿岸方向の波高の勾配が大きな場所であり、図-3に示した基準点MM_7やMM_8の局所的に大きな侵食が計測された場所と一致している。

Mamaia海岸と同様に、Eforie, Costinesti, Sturn, Vama Vecheなどの海岸について汀線変化の再現計算を行った。Eforie地区では南北両方向に向かう漂砂が10万 m^3/y 程度となるが、Net漂砂量は最大で南向きが7000 m^3/y となった。

CostinestiでもEforieと同様に10万 m^3/y の南北方向漂砂が発生するが、両者の差は非常に少なく地形も安定していることが確認された。Mamaia以外の海浜では背後に石灰岩層による基盤岩の上にレス層からなる崖が迫っている。

汀線変化予測では、海食崖からの供給土砂を考慮しておらず、崖の前面に堆積している土砂を考慮していない点などの問題はのこるが、ルーマニア南部海岸域の全体的な漂砂の動向を把握することが出来た。

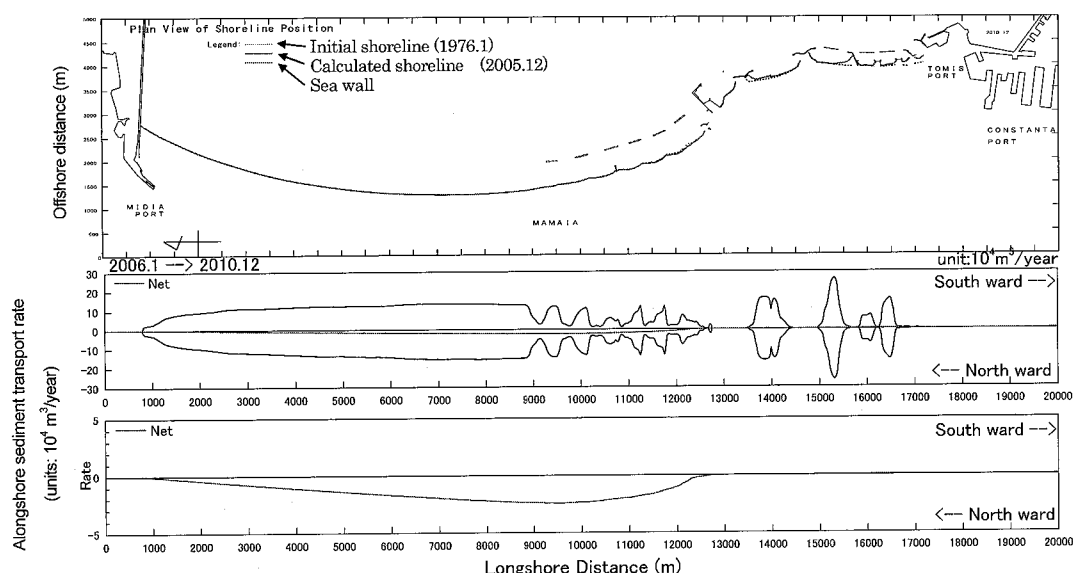


図-6 Navodari から Tomis 地区の沿岸漂砂量計算結果

6. 海岸保全基本計画と先行プロジェクト

各対象地域で過去に実施された侵食対策は、小規模な突堤群により海岸線を 100 m 程度の間隔で分断したため、海水交換が不十分で、初夏に海岸に打ち上げられるイガイや海藻が異臭を発するなどの環境問題があった。

今回は、景観や海水交換に配慮して、最低でも 500 m 程度の間隔で防護することを基本方針とした。

Mamaia 地区では既設離岸堤の補強、沿岸方向 1 km 区間への養浜と、養浜砂の流出防止のための大突堤に加えて、この突堤から概ね 1 km 間隔で小突堤を配置した。

Eforie 地区では、既設突堤の大部分を撤去し、2 基の大規模突堤と、突堤間への養浜に加えて、波浪制御のために潜堤を配置した。その他の地区でも養浜、延長 200 ~ 400 m のヘッドランド、幅広潜堤を組み合わせる対策を提案した。全ての領域で必要になる養浜土砂量は 300 万 m^3 を超え、全体整備の終了には 20 年以上の年月が必要と判断された。

各地区の海岸線の安定性については汀線変化予測モデルによる将来予測を行い長期的な安定性を確認した後に以下の検討を行った。対象海岸を 7 つの領域、さらに 20 の小領域に分けて、①海浜防護の必要性、②海浜利用の実態、③生態系などの問題点、④地元住民の要請、⑤整備後の利益創造などの観点からポイントを加点し、小領域ごとの優先度を検討した。

優先度の検討はルーマニア政府関係者に学識経験者、地元住民を加えて予め項目毎のポイント比率を設定しておき、ステークホルダーミーティング等により客観的に加点を行った。その結果、Mamaia 地区南部海岸と

Eforie Nord 地区を先行して着手することが望ましいとの結論を得た。

7. おわりに

本調査は NIMRD 等のルーマニアの各研究機関が長年に蓄積した海浜地形・波浪・潮位に関するデータや研究成果を基礎資料として実施し、Mamaia と Eforie 地区での先行プロジェクトを含む海岸域全体の整備基本計画を立案した。

汀線変化予測モデルにより、数 10 km におよぶ海岸域での地形変化動向を把握し、対策工の効果検討に用いることが可能であることを再認識することが出来た。

本研究はルーマニア政府の要請に基づいて独立行政法人 国際協力機構 (JICA) が 2005 ~ 2007 年に実施した調査業務の成果に基づくことを付記する。

参考文献

- Bondar, C. and Panin, N. (2000): "The Danube delta hydrologic database and modelling," GEO-ECO-MARINA, 5-6/2000-2001, pp. 5-52
- Constantinescu, St. (2005): "Analiza geomorfologică ţărmului cu faleză între Capul Midia şi Vama Veche pe baza modelelor numerice altitudinale," Unpublished PhD thesis, Faculty of Geography, University of Bucharest (in Romanian).
- Hallermeier, R.J. (1978): "Uses for a calculated limit depth to beach erosion," Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Hamburg, pp. 1493-1512.
- Karlsson, T. (1969): "Refraction of continuous ocean wave spectra," Proc. ASCE, 95 (WW4), pp. 437-448.
- Ozasa, H. and Brampton, A.H. (1979): "Numerical modeling for the shore-line changes in front of the seawall," Rep. Port and Harbour Res. Inst., 18 (4), pp. 77-103 (in Japanese).