

ブラジル北東部の大規模砂丘-海浜系における 漂砂機構の解明

COASTAL SEDIMENT BALANCE UNDER CONDITION OF EXISTENCE OF
LARGE-SCALE SAND DUNES IN NORTHEASTERN BRAZIL

大中 晋¹・宇多高明²・三波俊郎³・小舟浩治⁴

Susumu ONAKA, Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI and Koji KOBUNE

¹正会員 工修 日本工営(株)コンサルタント海外カンパニー (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2)

²正会員 工博 (財)土木研究センター理事なぎさ総合研究室長 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

³海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

⁴正会員 工博 (株)国際開発システム (〒105-0003 東京都港区西新橋1-22-12 JCビル3F)

In northeastern Brazil, large-scale sand dunes are formed by wind-blown sand caused by unidirectional strong wind. This characteristic of wind induces a strong littoral drift with more than several hundred thousand cubic meters per year in the northeastern coastal region in Brazil. In this condition, wind-blown sand acts to the sediment balance as a source or sink in the coastal region. This study aims to investigate sediment balance in the coastal region under the condition of existing of large-scale sand dunes and littoral drift using the statistic weather and wave data, aerial and satellite photographs.

Key Words : *Sediment balance, dune, northeastern Brazil, image processing, aerial photo, shoreline change, multi-line model, numerical computation*

1. はじめに

海外での海岸調査においては、国内ほどの十分な空撮、測量、波浪データ等が得られないケースがほとんどである。一方で、国内には見られない特異な現象が生じている事例も多い。このような場合、対象海域のみの狭い視点に着目した評価では、現象の誤った理解を招く恐れがある。ブラジル北東部の海岸は、年間を通じてほぼ一定方向の強風と、それによる風波の作用により、大規模な砂丘の発達が見られるとともに、年間数十万 m^3 規模に及ぶ顕著な沿岸漂砂が存在する。わが国における一般的な漂砂海岸では、ある領域内での土砂収支は、通常岸沖漂砂および沿岸漂砂による出入りが支配的である。しかし当地点のように大規模砂丘が発達している海岸では、砂丘からの飛砂が、各海岸エリアに対する漂砂の供給源や流出源となりうる。本研究は、わが国では例を見ない大規模砂丘、および沿岸漂砂が存在する海岸における漂砂機構を、限られたデータから解明することを目的とする。

2. 調査地点および気象海象条件

(1) 調査位置

本研究の調査対象地点を図-1に示す。対象地点はブ

ラジル北東部のセアラ州に位置するペセンエリア（南緯 5° 西経 38° ）である。当エリアは、東西方向に延びる約576kmの海岸線を持つセアラ州のほぼ中央付近に位置する。セアラ州には、ペセンエリアに2001年に開港したペセン港、およびその東方約45km地点のフォルタレーザ市に位置する既存のムクリペ港の2つの港が存在する。

(1) 気象特性

ブラジル北東部の気候は雨季（1月～7月）と乾季（8月～12月）に分かれる。フォルタレーザにおける年間降雨量は1500mm程度であるが、そのほとんどは1月から4月の雨季に集中し、それ以外の月の降雨量はほとんど0となる。図-2は、当地点における年間の平均風速・風向の出現分布を示す。当地点では、赤道付近の貿易風による、年間を通してほぼ一定したE方向からの強風が吹く。年間の平均風速は約6m/s、雨季および乾季の平均風速は、それぞれ4.7m/s、および7.3m/sと、特に乾季において強風の出現率が高くなる。

(3) 波浪特性

当地点の波高は1.0～1.5mの出現率が全体の約7割、周期は5～7秒の出現率が約5割程度である。波向はNNE～ESEに分布し、最多頻度はESE方向である（波浪観測

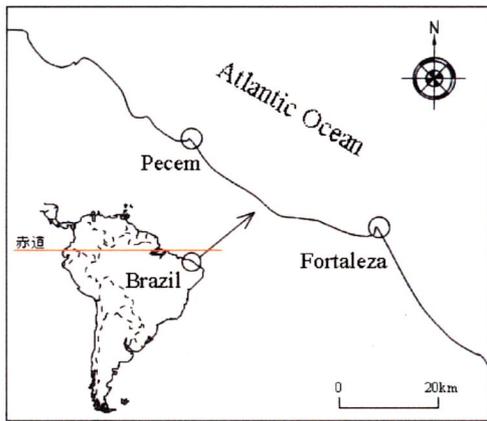


図-1 調査位置図

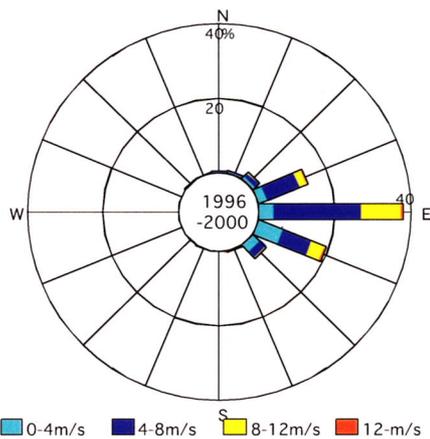


図-2 風向風速の出現頻度 (ペセン)

地点は図-8参照)．図-3は、月毎の波高、周期、波向変化と強風(10m/s以上)の出現頻度を示す．当地点の波浪特性は、雨季と乾季での風況に大きく依存する．強風の出現頻度の高い乾季には、風波成分が顕著となり、波高の増大と周期の低下が生じる．一方、強風の出現頻度の低い雨季にはうねり成分が顕著となる．波向は、乾季では北寄りの波向であったものが雨季では南寄りに変化する．図-4は、乾季および雨季における代表的な周波数スペクトルおよび方向関数を示す．乾季、雨季とも風波成分(0.15Hz付近)およびうねり成分(0.075Hz)にピークを持つ2ピーク型のスペクトルであるが、強風の出現頻度の高い乾季では風波成分のパワーが大きくなる．これより、当地点の波浪特性として、NE～ENE方向から入射するうねり成分とESE～SE方向から入射する風波成分の2成分波が存在し、強風の出現頻度の高い乾季に風波成分がうねり成分に比べて顕著となる．

3. 空中写真によるマクロ的海岸特性の把握

(1) 大規模砂丘の形成

ブラジル北東部の海岸域における特徴的な点と

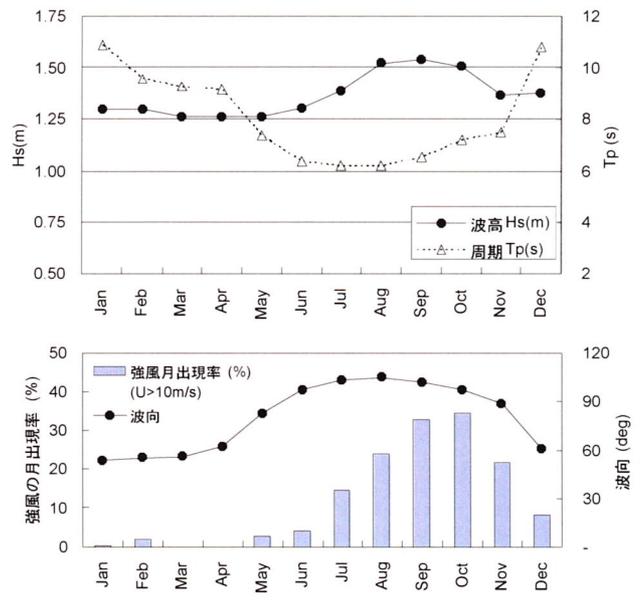
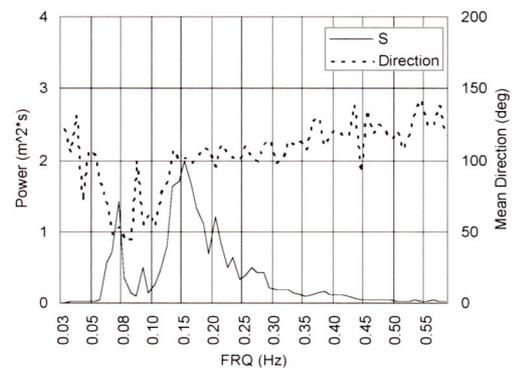
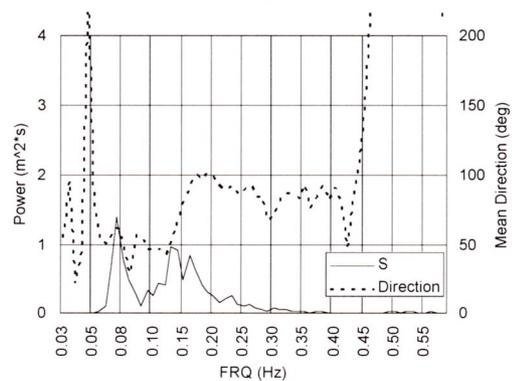


図-3 月毎の波高、周期波向変化と強風との関係



(1) 乾季



(2) 雨季

図-4 乾季、雨季の波浪スペクトルおよび方向関数

して、海浜から陸域に続く大規模砂丘が発達していることである．写真-1は、ペセン周辺での広域空中写真であり、写真中の白色部が砂丘部である．砂丘幅は平均2 km程度で、広い所では5 km以上に達する．砂丘高は10m程度から最大60m程度にも達し、平均30m程度である．なお当該砂丘の平均粒径は0.25mmである．この粒

径に対する飛砂の発生限界風速は、移動限界摩擦速度より約6 m/sと推定される。乾季における強風（平均風速7.3m）の存在と、その時期には降雨量がほとんど0となること、当海岸域での大規模砂丘の形成の要因となっている。空中写真より、砂丘は当エリアの風下方向であるW方向に発達していることや、砂丘幅は海岸線の方向により変化していることが見てとれる。すなわち、海岸線方向と風向（E方向）のなす角度が大きいほど、砂丘は内陸部まで発達する。一方、海岸線と風向方向のなす角がほぼ平行となる海岸域では、砂丘の顕著な発達は見られない。砂丘は、常に砂が移動する部分（Mobile Dune）と安定部（fixed dune）に分けられる。砂丘の陸域先端部の大部分は移動部に属し、少しずつ風下側に移動している。その移動量は、過去30年間の空中写真の比較結果より、年平均6～7 m程度である。一方安定部の多くは窪地となり、植生域となっている。砂丘部での何の障害もない地点における飛砂量は、過去に実施された現地観測結果より、79m³/m/yrと推定されている¹⁾。これは、例えば国内の事例（例えば、新潟海岸の飛砂量30m³/m/yr³⁾、阿字ヶ浦砂丘における25m³/m/yr⁴⁾）と比べて非常に大きな量である。

(2) 砂丘の発達と海岸線の関係

当海岸の主要な入射波向はE～ESEであり、海岸線に対して顕著な斜め入射となり、これによる顕著な西向き沿岸漂砂が存在する。写真-1で、十数キロから数十キロ毎に存在する岬を境に、常に西側の海岸線がフック状に湾曲していることから、西向き沿岸漂砂の存在が明らかである。当海岸域での土砂収支を考える上で、波による沿岸（および岸沖）漂砂とともに、飛砂の影響が無視できない。海岸部の土砂収支に対し、飛砂は海岸線方向によって流入源にも流出源にもなる。写真-1より、ペセン岬東側（右側）では海岸線の方向がSE—NW方向であり、風向方向（E方向）と40°程度の角度をなす。これより、当エリアでは海岸部の土砂収支に対して飛砂は流出源となり、これにより砂丘が発達する。一方ペセン岬西側（左側）では、海岸線は風向と同じE方向であるため、飛砂は沿岸漂砂と同じく海岸線に沿って移動するため砂丘は発達しない。海岸部の飛砂量は湿潤状態にあることなどから、砂丘部における飛砂量に比べて小さくなると考えられるが、当

地点での実測データを得ることはできなかった。そこで、当海岸域に存在する2つの港で得られた沿岸漂砂量の違いから推定することを試みる。後述するが、当海岸域の風上側かつ沿岸漂砂の上手側に位置するムクリペ港における沿岸漂砂量は60万～88万m³/yr、一方その下手側45kmに位置するペセン港における沿岸漂砂量は35万m³/yrと推定された。この間の海岸線が現在ほぼ平衡状態を維持しているものとする、両者の差の大部分が、海岸からの飛砂による砂丘の形成に寄与していると考えられる。衛星画像より、45km間の海岸線の中で、砂丘が発達しているエリア、すなわち、海岸線と風向が異なる角度をもつ海岸線延長を抽出すると、約30km程度となる。これより、海岸線より砂丘の形成に供給される飛砂量は、10～20m³/m/yrと推定される。実際にはこの間の土砂収支に、岸沖漂砂の影響や海食崖等による領域内で供給される量も無視できないと考えられるが、実測データが得られていない中での大まかな推定としてはほぼ妥当と考えられる。

(3) ペセン岬周辺の海浜応答

写真-2は、1968年および1987年の20年間のペセン岬近傍の空中写真を、また図-5は空中写真解析より得られた汀線変化量（1968年基準）を示す。この間では、港建設等の人為的作用はないにもかかわらず、岬の下手側（西側）の約3kmの範囲で汀線後退が生じている。岬のすぐ下手側での急激な後退は砂嘴の消滅によるものである。これを除く下手側での平均的な汀線後退量としては30m（平均1.5m/yr）程度である。当地点の漂砂の移動限界水深が6～7 m程度であることから、漂砂の移動高は6～9 m程度と推定される。これより、ペセン岬西側での年間の土砂消失量は3～4万m³/yrとなる。ペセン岬東側から西側海岸域への飛砂による供給は、写真-2に示すような、西側の海岸ラインから沖側に位置する400m区間から生ずると仮定する。当地点は風を遮るものが何もないことより、年間の飛砂量として前節で示す砂丘部で観測された79m³/m/yrを用いるとすると、西側海岸への飛砂による供給量としては約24,000m³/yrとなる。写真-2の1968年および1987年の砂丘の状況を比較すると、1987年では海岸背後域の植生域が1968年時に比べて大幅に拡大していることがわかる。これは海岸域からの飛砂による供給量が減少して

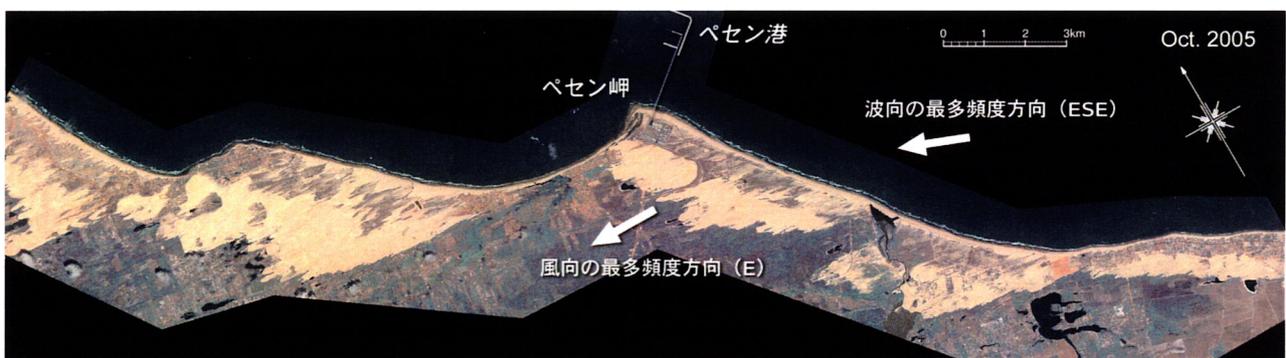


写真-1 ペセン周辺の海岸線と砂丘の発達状況

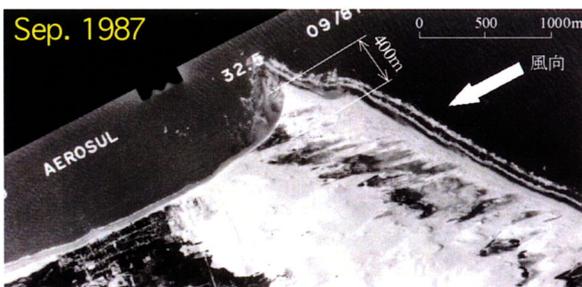


写真-2 ペセン岬周辺の空中写真（1968年，1987年）

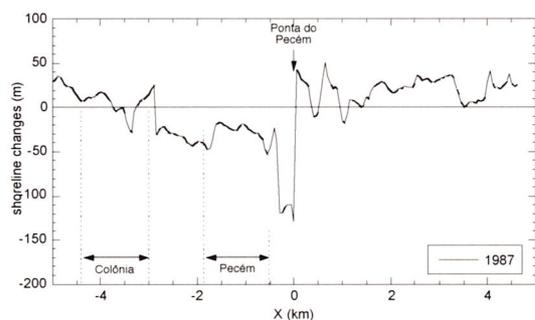


図-5 判読された20年間の汀線変化（1968年基準）

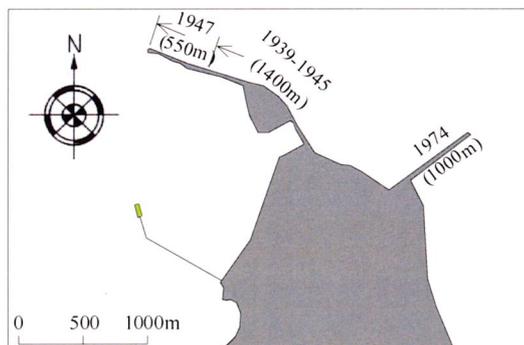


図-6 ムクリペ港の防波堤形状

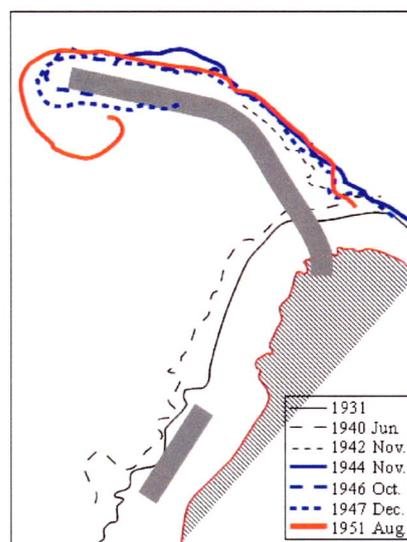


図-7 防波堤周辺の等深線変化

いることを示唆する。またペセン岬西側での市街地化の拡大に伴い、人為的に除去される飛砂分も増大していると考えられる。これらの状況から、ペセン岬西側で生じている侵食原因として、近年の飛砂量の減少が起因している可能性が考えられる。

4. 構造物に対する海浜応答

(1) ムクリペ港での海浜応答

ペセン岬の東方約45kmに位置するフォルタレーザ市にムクリペ港が存在する（図-6）。本港は、1939年から1947年にかけて、図中の西側に位置する長さ1950mの主防波堤が建設された。図-7は、建設前からの5mの等深線変化状況を示す。防波堤の延伸とともに上手側での顕著な堆積が生じ、建設終了時には防波堤先端からの漂砂が港内に回り込んだ（写真-3）。このため、1974年に、主防波堤の上手側約700m付近に、新たな防砂突堤が建設された。これにより、防波堤先端部からの漂砂の流入は低減されたが、防波堤背後遮蔽域での循環流によるものと思われる堆砂は引き続き生じている（写真-4）。これらの防波堤建設に伴う地形変化

から、当地点の沿岸漂砂量として60万～88万 m^3/yr と推定されている²⁾。ムクリペ港では、港内での定期的な維持浚渫を実施しており、最近の10年間の浚渫量は約550万 m^3 に及ぶ。一方ムクリペ港の西側では、防波堤の建設と同時に広域にわたる海岸侵食が生じた。特に市街地エリアに属するムクリペ港西側の10km程度の海岸線では、突堤や護岸の建設や、一部区間での養浜等の海岸保全対策が実施されている。ムクリペ港での沿岸漂砂遮断による下手側への影響範囲については、ムクリペ港からペセンに至る、過去の測量や連続的な空中写真等のデータが得られなかったため不明である。しかし45km離れたペセン岬の上手側では、1958年以降現在まで、目立った汀線変化が生じていないことが空中写真解析結果から得られているため、少なくともペセンまでは影響が及んでいないのではないかと想定される。

(2) ペセン港での海浜応答

ムクリペ港におけるこのような海浜変化を踏まえ、2001年に開港したペセン港は、沿岸漂砂を妨げないことを目的として、岸から約1.5km離れた沖合に港湾施設を配置し、透過式（杭構造）の取付道路で岸側と結ん



写真-3 港内堆砂状況 (防砂堤建設前)



写真-4 港内堆砂状況 (防砂堤建設後)

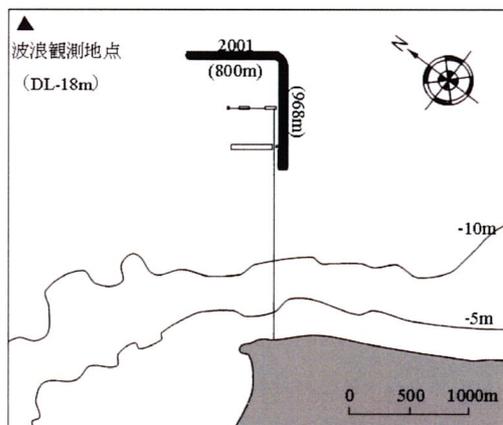


図-8 ペセン港の防波堤形状

ている(図-8)。ただし、工事期間中の1997年から約4年間にわたり、工事資材積出基地確保のための仮設突堤(延長250m)が、ペセン岬から東側約200m地点に設置された。写真-5は、仮設突堤設置直前の1996年から現在までの、ペセン岬周辺の汀線変化状況を示す。これより、1996年から2001年の間に、仮設突堤上手側(東側)での汀線前進、および下手側(西側)での後退が生じた。仮設突堤撤去後(2001年12月)には、上手側での堆積砂が急激に下手側に移動し、岬による海岸線の変化に対応しきれずに、砂嘴が形成された。現在(2005年11月)は、砂嘴を形成していた砂の一部はさらに下手側に移動し、ペセン岬から西側1.5kmに位置するペセン村前面での砂浜の回復に寄与している。図-9は、工事期間中に実施された汀線測量結果から得られ



写真-5 ペセン岬周辺における汀線変化状況

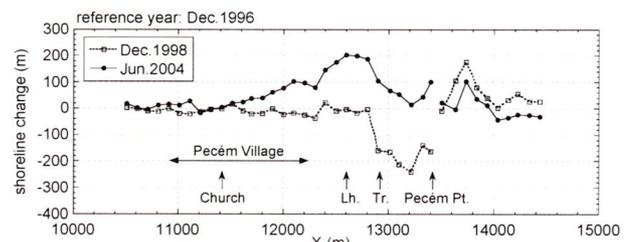


図-9 仮設突堤設置前後における汀線変化

た仮設突堤建設直前の1996年を基準としたときの汀線変化量を示す。これより、仮設突堤下手側では最大200m近い汀線後退が生じた。これらの測量結果および空中写真解析から得られた汀線変化から、当地点の沿岸漂砂量は約35万 m^3/yr と推定された。

表-1 計算条件

モデル	等深線変化モデル (芹沢ら, 2002)
計算範囲	ペセン岬を中心とする延長15km
計算メッシュ(Δx , Δz)	$\Delta x=200m$, $\Delta z=2m$
時間間隔 (Δt)	$\Delta t=876hr$ (10 steps/年)
入射波条件	H=1.5mとし、主要5方向にエネルギー比に応じて分配
潮位条件	M.S.L. (DL+1.45m)
漂砂移動高	7 m
平衡勾配	$\tan \beta_c=1/100$
沿岸漂砂量式	小笹・ブランプトンの式
漂砂量係数	($K_x=0.024$, $K_z=0.02K_x$, $K_2=1.62K_x$)
境界条件	右側境界: $q_r=3.5 \times 10^5 m^3/year$
	左側境界: 透過境界 (等深線固定)
	岸沖境界: $q_s=0$

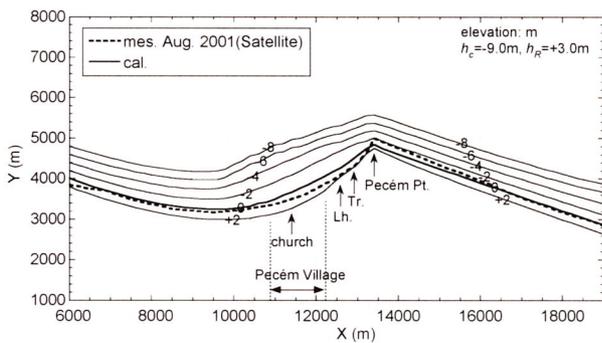


図-10 ペセン岬周辺の動的平衡地形の再現結果

5. 数値モデルによる動的海岸の再現検討

漂砂の動的平衡状態の中における海岸構造物による海浜応答について、等深線変化モデル⁵⁾を用いた再現性の検討を行った。計算は、初期地形として平行等深線を用い、境界の片側から一定の沿岸漂砂量を与えると同時に、当地点の岬の存在によるフック地形を再現するために、岬を突堤でモデル化し、その遮蔽効果を取り込んだ。計算は、安定汀線形状が得られるまで (各地点の漂砂量が釣り合うまで) 行った。計算条件等を表-1に示す。図-10は、得られた定常後の各等深線および空中写真判読結果より得られた実測汀線を示す。これより岬の存在も考慮した動的平衡状態の条件下で、実測結果と同様の汀線形状が得られている。次に仮設突堤設置時の汀線変化について、実測結果と比較したのが図-11である。両者は良好な一致を示す。

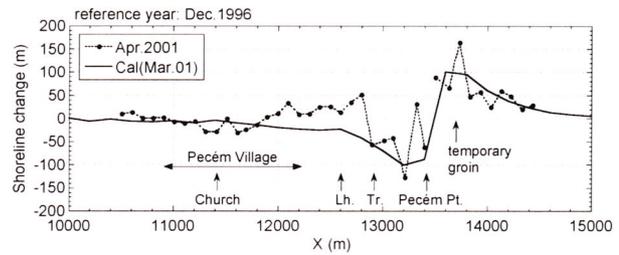


図-11 仮設突堤設置時の汀線変化の実測値と計算値の比較

6. おわりに

ブラジル北東部の海岸において、現地で得られた気象海象データ、測量結果、空撮・衛星画像データを用いた漂砂機構の解明、およびペセン港周辺における仮設突堤設置時の汀線変化について、等深線変化モデルを用いた再現性の検討を行った。その結果、当エリアのような海岸域での大規模な砂丘の存在や、顕著な沿岸漂砂が存在するような海岸域での漂砂機構の解明には、空中写真等を用いた広域の視点での検討により、多くの情報が得られることを示した。海外の調査においては、限られた時間、限られたデータの中で適切な判断と評価を行う必要に迫られる。その場合、対象地点のみの狭域の視点のみで判断するのは危険であり、広域での視点から対象領域に焦点を絞っていく段階的評価が重要と考えられる。

本研究は、独立行政法人 国際協力機構 (JICA) による「ブラジル国ペセン工業港湾開発計画調査」の調査結果の一部を取りまとめたものである。

参考文献

- 1) Jose, A Jimenes, Luis P. M., Jordi S. and Jader M. : Aeolian dune migration along the Ceara coast, north-eastern Brazil, *Sedimentology*, Vol. 46, pp. 689-701, 1999.
- 2) Oscar F., Sandra F., A.Braga C., Rui T., J. Alveirinho D., and Gustavo L. : Study of harbor infilling using sand tracer experiments, *Journal of Coastal Research*, SI36, pp. 283-289, 2002.
- 3) 佐藤慎司, 大谷靖郎, 橋本新, 堀口敬洋 : 新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp. 496-500, 1999.
- 4) 宇多高明: 日本の海岸侵食, 山海堂, pp. 70-74, 1997.
- 5) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池鋼, 熊田貴之: 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, *海岸工学論文集*, 第49巻, pp. 496-500, 2002.