

基本資料不足の海浜における汀線変化予測モデルの開発

三浦正寛*・小林昭男**・宇多高明***
芹沢真澄****・熊田貴之*****

波浪データの不足する海岸における汀線変化予測に関し、渡辺ら (2001) は多数の空中写真から読み取った汀線の時間変化を Pelnard-Considere (1956) による汀線変化の解析解へ当てはめ、それより漂砂量係数を定めた。これに対して、本研究では最低 2 時期の空中写真から読み取った汀線変化の空間分布を解析解へ当てはめ漂砂量係数を決定した。さらに、決定した漂砂量係数を従来の汀線変化予測モデルに組み込むことにより、護岸、離岸堤などが存在するという、解析解では予測できない複雑な境界条件下でも汀線変化を予測可能なモデルを開発した。モデルは赤羽根漁港周辺の海浜変形に適用され、その有効性が確認された。

1. はじめに

沿岸漂砂阻止に起因する海岸侵食では、時間経過とともに侵食が激化し、侵食域が下手側に広がって深刻な問題をひき起こす。対策を立てるには将来予測が不可欠であるが、多くの場合、予測範囲は数 km から数十 km に及び、また時間的には数十年以上の長期予測が必要となる。その予測は、汀線 (等深線) 変化モデルを使えば可能である。しかし、これには波浪変形計算のための広範囲の深浅図、波浪データが欠かせないし、数値計算を専門とする技術者も必要とする。しかし、その種のデータがない場合も多い。データの不足のために、まず深浅測量から始めると多額の経費だけではなく、データ取得に長時間を要し、その間にも侵食は進んでしまう。そこで、本研究では海岸実務において、海岸工学の技術者が予測精度は多少犠牲にしても、将来予測を簡便に行うことのできる手法を開発する。この種の問題は、わが国各地で数多く観察されるだけでなく、発展途上国においても開発の進行に伴って発生しつつある。このことから本研究の成果は、わが国にとどまらず今後開発が進む発展途上国にも有効利用が可能と考えられる。

2. モデルの理論

(1) モデルの理論

港湾、漁港などの構造物により沿岸漂砂阻止に起因する海浜変形が生じた場合を考える。その状況が空中 (衛星) 写真によって捉えられているとする。空中写真が経時的に撮られておれば、渡辺ら (2001) のように汀線変化の解析解の実測データへの当てはめを行えば汀線変化予測が可能となる。この方法は、沿岸漂砂の卓越する直線状海岸に沿岸漂砂を阻止する構造物を設置した場合の

汀線変化を与える、Pelnard-Considere (1956) による汀線変化の解析解 (式 (1)) を基本とする。

$$y(x, t) = -\frac{\tan \alpha_0}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{4A_0 t} \exp \left\{ -\left(\frac{x}{\sqrt{4A_0 t}} \right)^2 \right\} - x \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4A_0 t}} \right) \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2) dz \dots\dots\dots (2)$$

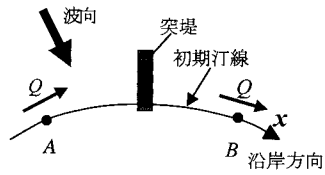
ここに、 $A_0 = k(EG)_0/h$ 、 x は突堤からの沿岸距離、 t は時間、 α_0 は碎波波向、 erfc は式 (2) で定義される余誤差関数、 k は漂砂量係数、 $(EG)_0$ は波浪エネルギーフラックス、 h は漂砂の移動高である。

上記の解析解の初期汀線は直線であるため、この方法が適用可能な条件は、海岸線曲率 (碎波帯幅 B / 海岸線曲率半径 r の比) が十分小さいことである。しかしながら、実際の汀線は直線とは限らない。これについては図-1 に示すように展開座標 (宇多ら, 1998) を用いればよい。この方法が適用可能な条件は、海岸線曲率が十分小さいことである。

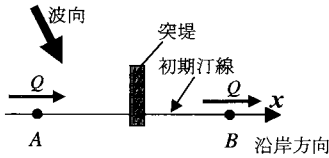
渡辺らは、同じ区域において経時的に撮影された多数の空中写真をもとに、沿岸漂砂阻止構造物の基部 ($x=0$) における汀線変化量と碎波波向 (α_0) より、式 (1) において $x=0$ を代入して得られる関係式から係数 A_0 を求めた。この方法は多くの空中写真がある場合に有効である。しかしこのような条件を満足する空中写真の取得が困難なことも多い。そこで少ない空中写真を利用する方法を考えた。

渡辺らの方法では、時間 t 、空間 x の関数として表される汀線変化に関し、沿岸距離 x を固定したある場所において、汀線の時間的变化から式 (1) の係数 A_0 、 α_0 を求めるが、汀線変化は式 (1) から明らかなように変数 $x/\sqrt{t}$ によって表されることから、 t を固定して汀線の空間分布 (x の変化) から A_0 、 α_0 を求めることも可能である。汀線変化については、変数 $x/\sqrt{t}$ が一定である限り、時間-空間の入れ換えを行っても同じ結果を得る。本研究で

* 学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正会員 工博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科
*** 正会員 工博 (財) 土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長
**** 正会員 海岸研究室(有)
***** 学生会員 博(工) (株) 水圏科学コンサルタント技術部



(a) 実際の初期汀線



(b) 解析上の扱い (展開座標)

図-1 展開座標の模式的説明

はこの考え方にに基づき、少なくとも2時期の空中写真より汀線変化の空間分布を利用して A_0 , α_0 を求め、それから汀線の将来形状を定めるものである。

まず式 (1) を次式のように書き換える。

$$y(x, t) = BF(\xi)\sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、 B , ξ , $F(\xi)$ は以下のように表せる。

$$B = \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} \tan \alpha_0 \quad (4)$$

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{4A_0 t}} \quad (5)$$

$$F(\xi) = \frac{y(x, t)}{y(0, t)} = \exp(-\xi^2) - \xi\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\xi) \quad (6)$$

実測汀線変化量を $y_{\text{mea}}(x_i, t_0)$ ($i=1 \sim N$)、解析解から得られる式 (3) を $y_{\text{cal}}(x_i, t_0)$ ($i=1 \sim N$) と定義して、次のように最小二乗法から A_0 , B を算出する。まず、解析解と実測汀線変化量の誤差 G を次式で定義する。

$$G(A_0, B) = \sum_{i=1}^N \{y_{\text{mea}}(x_i, t_0) - y_{\text{cal}}(x_i, t_0)\}^2 \\ = \sum_{i=1}^N \{BF(\xi_i)\sqrt{t_0} - y_{\text{mea}}(x_i, t_0)\}^2 \quad (7)$$

G は、 A_0 と B の二変数関数であるから、 A_0 を固定すれば G は B のみを変数となりその関数形は下に凸な二次曲線である。したがって $\partial G / \partial B = 0$ を満たす B が G の最小値となり、 B は次式で与えられる。

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N F(\xi_i)\sqrt{t_0} y_{\text{mea}}(x_i, t_0)}{\sum_{i=1}^N F(\xi_i)^2 t_0} \quad (8)$$

式 (8) を式 (7) に代入すれば、式 (7) は A_0 のみの変数となり、以下ようになる。

$$G(A_0) = \sum_{i=1}^N \left[y_{\text{mea}}(x_i, t_0) - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^N F(\xi_i)\sqrt{t_0} y_{\text{mea}}(x_i, t_0) \right\}}{\sum_{i=1}^N F(\xi_i)^2 t_0} F(\xi_i)\sqrt{t_0} \right]^2 \quad (9)$$

式 (7) では A_0 , B が変数であったが、式 (9) では A_0 のみの関数となることから G が最小となる A_0 を最小二乗法によって定める。次に式 (8) から B が算出され、 A_0 , B の値を、式 (4) から得た次式に代入することにより α_0 が定まる。

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left(B \sqrt{\frac{\pi}{4A_0}} \right) \quad (10)$$

この方法では突堤基部など特異な変化を含むデータがあればそれらを計算から除外すればよい。また、解析解は沿岸漂砂上手側のみならず下手側でも成立するので、実測データの当てはめは上手側・下手側のどちらを対象としてもよい。ただし、実際には下手側は突堤や防波堤による波の遮蔽の影響を受けている場合が多いので、上手側を対象とすることになる。

(2) 解析解を利用した汀線変の数値モデル

前節で述べた解析解は、任意の時間・地点の汀線変化量を与えるものであるから、時間 t に将来の時間を与えることで下手側の海岸侵食による汀線変化の将来予測を行うことができる。しかし、防波堤による波の遮蔽域内や、沿岸漂砂下手側の侵食域に護岸が設置された場合には、そこで汀線の後退が阻止されるので解析解は予測に使えない。このような問題を解決するために、ここでは前節で求められた係数値を既知として、従来の汀線変化モデルと同等の式を数値的に解く手法を提案する。基礎式は式 (11), (12) である。

$$q = A_0 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (12)$$

ここに q は単位深さ当たりの沿岸漂砂量である。 α_0 は碎波角であり、汀線直角方向と α_0 のなす角度である。

式 (11), (12) は単位深さ当たりに換算した沿岸漂砂量式、連続式であり、式 (11) は係数が A_0 である点、式 (12) は移動高 h を含まない点が従来の式と異なる。このことから、移動高を与える必要はなく、式 (11) に解析解の当てはめで求められた A_0 , α_0 の値を与えて、図-1の展開座標により直線化した初期汀線を用いて式 (12) を解けば解析解と同じ数値解が得られる。ただし、防波堤による波の遮蔽域のように、波の回折作用を考えなくてはならない場所では補正を要する。ここでは、不規則波の方向分散法 (酒井ら, 2003) により回折係数 K_D と回折波向 θ_D を求め、それらを用いて補正する方法を考えた。

A_0 は $A_0 = k(EG)_b/h$ で与えられるが、 $k(EG)_b$ は碎波波高 (H_b) の 5/2 乗に、また漂砂の移動高 h は H_b に比例すると考えられることから、 $A_0 \propto H_b^{5/2}$ が成立する。そこで遮蔽域内の碎波波高を $H_b' = K_D H_b$ で低減するものと考え、 A_0 は式 (13) のように $K_D^{5/2}$ を乗じて低減させた。

また α_0 には回折波向 θ_D を与えた。

$$A_0' = K_B^{3/2} A_0 \quad (13)$$

$$\alpha_0 = \theta_D \quad (14)$$

護岸については、芹沢ら (2002) と同様の手法を用いた。この手法では、汀線が後退し護岸に接近したとき、漂砂量 q に低減率 μ を乗じて低減させる。低減率 μ は、バーム頂部が護岸に接すると漂砂量の低減が始まると考え、護岸前面の浜幅 ($y - y_D$) が前浜幅 (h_R/γ) より狭まると低減が始まり、海浜幅が 0 になると漂砂量が 0 となるように、式 (15)～(17) で与えた。

$$\mu = 1 \quad y - y_D > h_R/\gamma \quad (15)$$

$$\mu = \frac{y - y_D}{(h_R/\gamma)} \quad h_R/\gamma > y - y_D > 0 \quad (16)$$

$$\mu = 0 \quad y - y_D > 0 \quad (17)$$

ここに、 y は汀線位置、 y_D は護岸位置、 γ は前浜勾配、 h_R はバーム高である。

一方、侵食対策としてのサンドバイパスが行われる場合については、式 (12) の連続式に外部からの土砂流入・流出の項を付加した次式を用いる。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{Q_{BP}}{h} \quad (18)$$

ここに Q_{BP} は海岸線単位幅当たりのサンドバイパス量である。サンドバイパスの計算では式 (18) に使う漂砂の移動高 (h) の値を知る必要がある。これは通常、対象海岸の複数回の深浅測量結果から求められるが、深浅データが全くない場合もある。この場合には、宇多 (1997) に示されている日本全国各地のデータから得られたバーム高 (h_R) と h の経験式より h は h_R の約 3 倍とみなせるので、現地踏査によって h_R を計測し、 $h = 3h_R$ で与えることができる。

図-2 に本研究による汀線変化予測手法のフローを示す。まず最低限 2 時期の空中写真から汀線変化量の空間

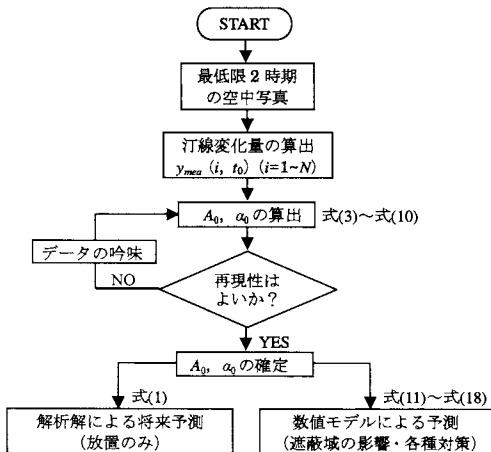


図-2 本モデルのフロー

分布を求め、解析解の当てはめを行い、解析解に含まれる未知係数 A_0 と α_0 を決定する。次にこれに基づき解析解、または A_0 、 α_0 のみを用いて単純化した汀線変化モデル (数値モデル) により汀線変化の将来予測を行うものである。この方法では波浪データ・深浅図は必要としない。

3. モデルの検証

(1) 赤羽根漁港周辺の海浜変形

モデルの妥当性を検証するため、現地海浜の汀線変化をもとに検証を行った。対象海浜は、図-3 の位置図に示すように、愛知県渥美半島の太平洋に面する赤羽根漁港周辺の海浜とした。赤羽根漁港周辺では、防波堤の建設によって西向きの沿岸漂砂が阻止され、防波堤の東側で堆積が、西側で侵食が起きている (宇多, 1997)。本研究では、この海岸におけるデータへの当てはめを行った。まず、1946, 1973, 1986, 1995 年に撮影された空中写真を判読し、漁港周辺の海浜変形について調べた。

1946 年の空中写真を写真-1 (a) に示す。高松崎には岩礁があるためそこで海岸線に段差が付いていたが、1946 年には全区域において海岸線に沿って約 100 m 幅の砂浜が連続的に延びていた。1973 年には写真-1 (b) のように赤羽根漁港の東・西防波堤が既に建設されていた。長い東防波堤がこの地区で卓越した西向きの沿岸漂砂を阻止したために、防波堤の東側隣接区域では堆積が起り始め、西側では沿岸漂砂の連続性が絶たれたことに起因して海浜幅が狭まった。

1986 年では、写真-1 (c) のように東防波堤がさらに延長され、西向きの沿岸漂砂の移動がさらに困難となったために、東防波堤を境にその東側に細長い三角形の砂浜が広がった。対照的に西側では汀線が後退し前浜が消失した。この写真は高波浪時に撮影されたために白濁した碎波帯が防波堤の先端を越えて東側から西側へと連続的に延びている。このことは碎波帯内で移動が激しい沿岸漂砂の一部は当時防波堤の先端を越えて西側へと流出していたことを意味する。

写真-1 (d) に示す 1995 年では、防波堤がさらに延長

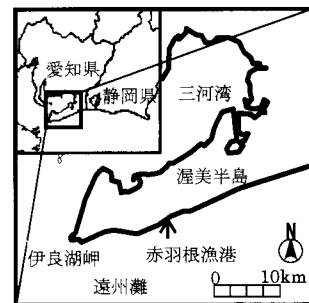


図-3 赤羽根漁港の位置

されるとともに東防波堤の先端付近に既存防波堤と斜めに、汀線と平行方向に防砂突堤が延ばされた。さらに漁港西側地区では6基の離岸堤が設置された。離岸堤群の背後の東部では舌状砂州の発達が見られるが、西部では舌状砂州の発達は明瞭ではなくなる。東防波堤と高松崎の間では西向きの沿岸漂砂が阻止されたことによって砂浜が大きく広がったことが見て取れる。



(a) 1946年



(b) 1973年



(c) 1986年



(d) 1995年

写真-1 赤羽根漁港付近の状況

図-4, 5は空中写真から読み取った汀線形状と1946年を基準とした汀線変化である。初期に直線的に延びていた海岸線が、赤羽根漁港地点で不連続となり、東防波堤の東側では徐々に堆積が進んでいる。一方、西側では汀線の後退が顕著であり、離岸堤が建設されても汀線の前進はわずかである。漁港西側では当初汀線の後退が著しいが、1986年以降、離岸堤背後での舌状砂州の発達を除けば汀線変動は小さい。これは海岸線に沿って建設された海岸護岸がそこで汀線を固定しているためである。

(2) 赤羽根漁港周辺の汀線変化予測への適用

計算では、高松崎から漁港東側の突堤までの3 km 区間において1946年と1973年の2時期の空中写真より、防波堤が波浪場に及ぼす影響がほとんどないと考えられる $x=0 \sim 3$ km 区間のデータから A_0 , ω_0 を決定した。式(9)に基づく G と A_0 の関係と、選択された A_0 の最適値 ($1.23 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{yr}$) を図-6に示す。また、この手法により $\omega_0 = 20.1^\circ$ を得ることができる。

赤羽根漁港周辺の汀線変化のうち、1946年を初期値として1973年までの汀線変化を求めたのが図-7である。これによれば防波堤直近の一部を除いて解析解は実測値とほぼ一致している。さらに1946年汀線を初期値として1986年の汀線変化の予測を行った。この場合は漁港の下手側区域を含んだ予測であり、下手側区域には護岸が設置されていると同時に、防波堤による波の遮蔽域も存在するのでそれらを考慮した数値解析も行った。結果を図-8に示す。漂砂上手側では解析解、数値解とも実測値と良い一致を示す。一方、漁港の下手側では解析解では予測し得なかった汀線変化が求められ、本モデルの有効

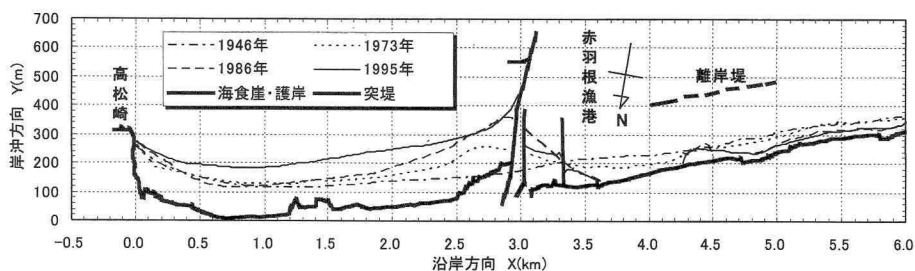


図-4 汀線形状

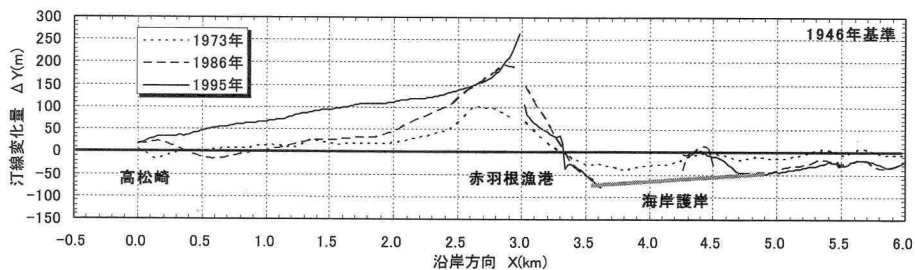


図-5 汀線変化量

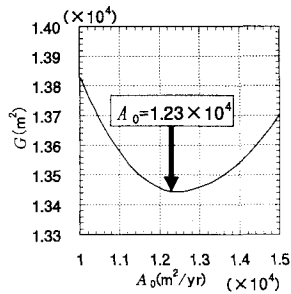
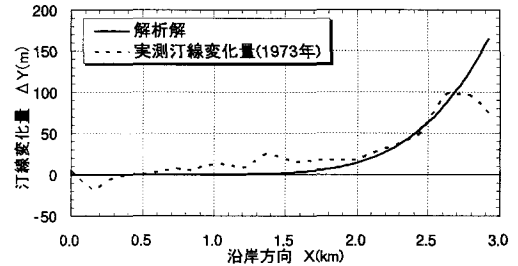
図-6 A_0 の算出

図-7 汀線変化の再現計算

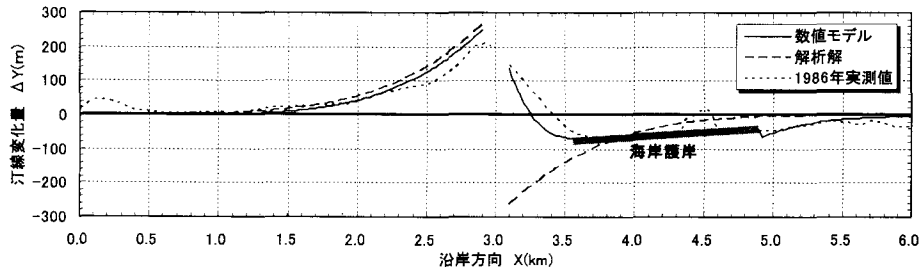


図-8 汀線変化の予測結果

性が明らかである。

4. ま と め

沿岸漂砂阻止に起因する侵食問題では、沿岸漂砂の変化の影響が及ぶ範囲全体に対する汀線変化予測が必要とされる。この場合、広範囲の深浅図が必要とされるが、この種の深浅図の取得はかなりの困難を伴う。また深浅図と波浪統計データがあったとして波浪変形計算を行い、それをもとに汀線変化予測を行う場合でも、代表波浪や漂砂量係数の選択を行うために、多数の試行計算を行う必要が出てくる。本研究の方法によれば、これらの問題の解決が可能となる。とくに全体系の土砂収支という観点から間違いの少ない方法である。

また実測データへのモデルの当てはめでは、解析解が、時間と空間を入れ換えても同一の結果となるというエルゴード性に着目し、①ある場所での汀線の経時変化が与えられる場合と、②ある時刻における汀線の空間分布が与えられている場合に対する当てはめの方法が明らかになった。

本研究の方法は、沿岸漂砂阻止による汀線変化が生じた場合の変化実態に基づくものであるから、数値計算から得られる地形変化には、海岸が実際に受けた波浪の特性、海浜の構成砂の動き易さ（漂砂量係数）が陰に全て含まれていることが特徴である。

解析解はよく知られている式であり、式中の各種係数が与えられれば汀線変化が計算できる。実務で重要なのは、これらにいかなる値を設定すべきかである。しかし

係数の決め方に関する実用的研究は少ない。本研究の解析解の当てはめは、変化実態に合うように係数の最適値を系統立てて定めるといものである。それも最低限2枚の空中写真のみあればできる方法を提示した。解析解は汀線変化モデルの基礎式と同一であるから、汀線変化モデルの基礎式には上記の2つの係数がそのまま使用でき、波浪変形計算を使わずに汀線変化モデルを使うことができる。さらにこのモデルでは解析解では扱えない境界条件の変化や波浪外力の変化を扱えることから、構造物やサンドバイパスなどの対策検討が可能になる。

参 考 文 献

- 宇多高明(1997):「日本の海岸侵食」, 山海堂, pp. 422-424, pp. 253-257.
- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖朗・厚坂祐次(1998): 展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 541-545.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003): 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 496-500.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002): 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.
- 渡辺宗介・宇多高明・芹沢真澄・清野聡子・三波俊郎・古池 鋼(2001): 汀線変化の解析解の九十九里海岸への適用とそれに基づく漂砂量の諸係数の評価, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 457-462.
- Pelnard-Considre, R. (1956): Essai de Theorie de l'Evolution des formes de Rivage en Plages de Sable et de Galets, 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1, pp. 289-297.