

等深線変化モデルを応用したバー・トラフ形成に関する縦断モデル

Model for Predicting Development of Multi-bar System by Applying Contour-line-change Model

清水達也¹・小林昭男²・宇多高明³・芹沢真澄⁴・野志保仁⁵・熊田貴之⁶

Tatsuya SHIMIZU, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA,
Masumi SERIZAWA, Yasuhito NOSHI and Takayuki KUMADA

On the basis of cross-shore sand transport under the action of long period waves and standing waves reflecting from the seabed slope given by Bowen (1980) and Katoh (1984), a model for predicting the development of multi-bar system was proposed by applying the contour-line-change model. The increase in the intervals between the bars and the decay of the relative height of bars in the cross-shore direction were predicted well. The possibility of the recovery of the multi-bar system by beach nourishment using fine sand is also shown.

1. まえがき

砕波帯に形成されるバー・トラフは海岸(砂浜)保全上重要な意味を持つだけでなく, 浅海域に生息する生物, とくにチョウセンハマグリなどの二枚貝類の生息とも密接な関係を有している. このことから, バー・トラフの発生と規模を予測可能とすることは, 海岸保全上の重要なテーマであると同時に, 二枚貝類の生息環境の評価にも役立つ重要なテーマである. 浅海域に形成されるバー・トラフのうち, 図-1に実例を示すような, 細砂からなる緩勾配海岸に形成される多段バーの形成機構に関し, Bowen (1980), 加藤 (1984) は, 長周期波と海底斜面からの反射重複波(反射定常波)の作用を岸沖漂砂に加えることによりその発生機構を説明した. 同時に多段バーの発生位置も予測できることを示した. しかし実務に使用可能な地形変化予測モデルの構築までには至っていない. 本研究の目的は, 彼らの考え方を基礎として等深線変化モデル(芹沢ら, 2002)を応用して多段バーの発生予測モデルを構築することにある. なお, 本研究では海浜縦断面内でのバー・トラフの形成機構について議論するものであり, 沿岸砂州の平面変化は対象外とする.

2. 多段バーの形成モデル

Bowen(1980)は, Bagnoldの漂砂式(Inman and Bagnold, 1963; Bagnold, 1966)をもとに, 波の作用に伴う岸向き

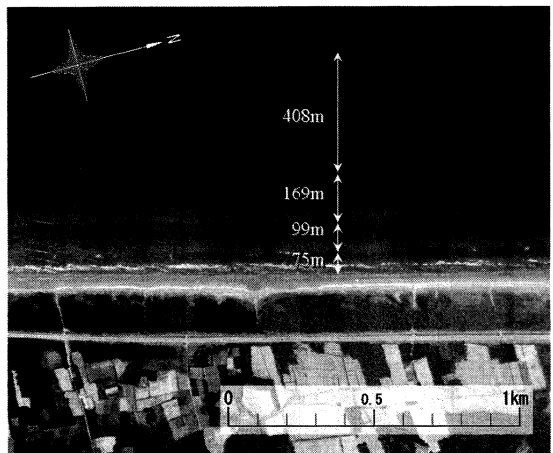


図-1 石川県羽咋海岸における多段バーの例

漂砂と, 海底面上の砂の重力効果による沖向き漂砂がバランスして平衡海底断面が形成されることを示し, その上に長周期波(反射定常波)の作用が重なると平衡海底断面への振動解として多段バーが形成されるとした. 同様な考え方をもとに加藤(1984)も実海岸に形成される多段バーを対象として, それらの資料解析結果から, 長周期波(反射定常波)による多段バーの成因を示した. 本研究もBowen(1980), 加藤(1984)の考え方に従い, まず岸沖漂砂 q_z を, 波による岸沖漂砂成分 q_{zw} と, 長周期波(反射定常波)による岸沖漂砂成分 q_{zl} の線形和で与える(式(1)).

$$q_z = q_{zw} + q_{zl} \quad (1)$$

$$q_{zw} = A_w \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) (-h_c \leq z \leq h_R) \quad (2)$$

$$A_w = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \cdot \sin \beta_c \quad (3)$$

ここに, 波による漂砂成分 q_{zw} には等深線変化モデル(芹沢ら, 2002)の基礎式を用いる. β は海底勾配角, β

- | | |
|---------|---|
| 1 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 |
| 2 正 会 員 | 工博 日本大学教授理工学部海洋建築工学科 |
| 3 正 会 員 | 工博 (財)土木研究センター理事なごぎ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 |
| 4 正 会 員 | 海岸研究室(有) |
| 5 学生会員 | 修(工)日本大学大学院理工学研究科海洋建築工
学専攻 |
| 6 正 会 員 | 博(工)(株)水圏科学コンサルタント |

Cは平衡勾配角であり、 K_L は漂砂量係数、 $(EC_g)_b$ は碎波点での波のエネルギーフラックスである。また h_C は波による地形変化の限界水深、 h_R はバーム高であり、波による漂砂は限界水深 h_C からバーム高 h_R の間で生ずるとする。式(3)で与えられる係数 A_w は波による漂砂強度を表し、波の作用強度に比例する係数である。さらに、式(3)の $\varepsilon(x)$ は岸沖漂砂強度の水深方向分布関数であり、本研究では宇多・河野(1996)の与えた沿岸漂砂量の水深方向分布を用いる。

長周期波による漂砂の成分 q_{zL} は式(4)で与える。

$$q_{zL} = A_w \cdot K_L \cdot R \cdot \sin S \quad (-h_{CL} \leq z \leq h_{OL}) \quad (4)$$

$$S = 2\pi \cdot \left(\frac{X}{L}\right)^n \quad (n = 0.56) \quad (5)$$

$$R = \exp\left(-\alpha \cdot \left(\frac{z}{z_1} - 1\right)\right) \quad (6)$$

ここに、 K_L は長周期波(反射定常波)による漂砂強度を表す係数、 R はバーの比高減衰強度、 L は汀線から第1バーまでの岸沖距離とする。Bowen(1980)によれば、長周期波と海底斜面からの反射による重複波(反射定常波)が存在すると、ドリフト流速の大きい場所から小さい場所へと浮遊砂が輸送され、輸送された砂がドリフト流速の小さい場所に集積する結果、多段バーが形成される。Bowen(1980)、加藤(1984)は、この機構に関してBagnoldの浮遊砂量式(Inman and Bagnold, 1963; Bagnold, 1966)をもとに、一様勾配斜面上の反射定常波の理論解を用いて漂砂式を誘導し、浮遊砂が反射定常波の水面波形の腹の位置に集まることを理論的に示した。また、加藤(1984)は反射重複波のドリフト流速のみによって底質移動が生じるのではなく、入射波の作用によって浮遊状態となった底質が反射定常波のドリフト流速によっても運ばれることを理論的に示した。式(4)においては、入射波と反射定常波両者の作用によってバーが形成されるという性質を反映するように、 q_{zL} は波作用の強さを表す A_w に比例すると考え、かつ反射定常波の寄与を表すための漂砂強度係数 K_L を導入して加藤(1984)が誘導した漂砂式と同様、漂砂量が両者の積 $A_w K_L$ に比例するものとした。また、図-2にあるように q_{zL} は冲向き距離 X に対して漂砂の向きと強さが周期的に変動するよう、冲向き距離 X に対する正弦関数 $\sin S$ を仮定した(式(4))。位相 S は、バーの両側からバーに砂が集まるように、岸側から N 番目のバー位置で $SS = 2\pi N$ とする(図-2)。位相 S を冲向き距離 X に正比例した直線分布で与えた場合、多段バーの間隔は冲向きに变化しないが、図-1に示したように実海岸の多段バーは冲向きにバー間隔が広がって

いる。これはBowen(1980)および加藤(1984)が理論的に示したように、斜面上の反射定常波の水面波形の腹の間隔が冲向きに長くなり、これに対応してバー間隔も冲向きに広がるためと考えられる。そこでこの性質を反映できるように、位相 S は式(5)で与えた。式(5)で $n=1$ とすればバーの間隔が一定となり、 n を1より小さくすることで沖へ向かうほどバーの間隔が広がる。なお、式(4)、(5)に関しては、加藤(1984)が用いた一様勾配斜面上の反射定常波の理論解を用いて式(4)の正弦関数をベッセル関数に置き換える方法も考えられるが、実務での現地海岸への適用を考えると、海岸ごとに異なる海浜縦断形に対して理論解を得るのは困難であり、それには加藤(1984)が行ったように波動方程式の数値計算が必要になる。しかしこれでは実用に不便なことから、本研究では式(5)の正弦関数によってバーの間隔を調整できるようにし、現地海岸毎に多段バーの形成位置に合うよう n の値を経験的に定めた。加藤(1984)の用いた一様勾配斜面における反射定常波の解の場合、水面波形の1番目の腹までの冲向き距離 X_N は、 $X_1=1.0$ 、 $X_2=3.3$ 、 $X_3=7.0$ 、 $X_4=12.0$ となるが、これにできるだけ合致するように n を定めると $n=0.56$ となる。しかしながらこの値を実海岸へそのまま適用して予測計算を行うと、バー発生間隔にズレが生じる。そのため本モデルでは $n=0.56$ はあくまでも標準値とし、現地海岸の条件に合わせて n を決定できるようにした。

また、加藤(1984)が示したように、実海岸の多段バーでは、バーの比高も冲向きに減少する。バーの比高が冲向きに減少するのは、水深が大きくなるほど砂を輸送するエネルギーが減衰していることが原因と考えられ、これはバー形成に関与する岸沖漂砂強度が水深方向分布を持つことを意味する。そこでバー比高が沖ほど小さくなるよう式(6)の比高減衰強度 R を導入した。式(6)のバーの比高減衰強度 R には指数関数(図-2参照)を採用し、岸沖

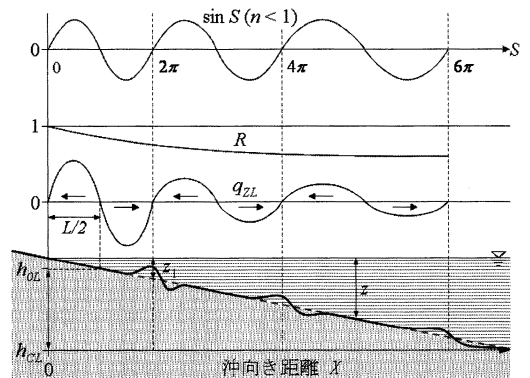


図-2 式(4)、(5)、(6)に含まれる関数の岸沖分布

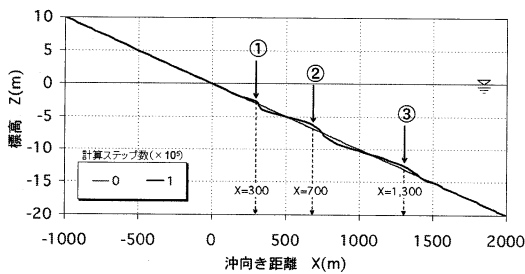


図-3 1/100勾配斜面における多段バーの形成(ケース1)

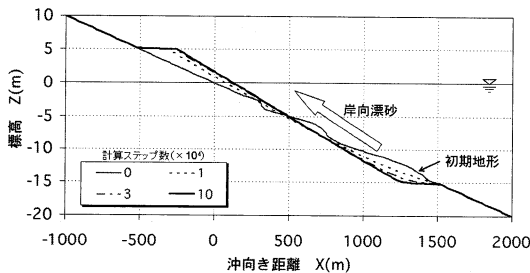


図-4 多段バーに静穏波を作用させた場合(ケース2)の縦断形変化

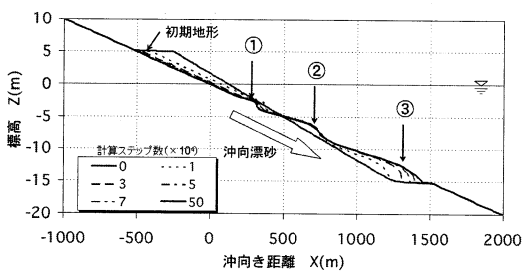


図-5 バームに暴浪波が作用した場合(ケース3)の縦断形変化

漂砂強度が水深の増加とともに減衰するようにした。ここに z は任意地点の水深、 z_1 は水面から測った第1バーの水深であって、 z_1 により規格化している。式(6)の係数 α についても現地海岸毎にバーの比高の変化に合うよう経験的に定める。さらに、 q_{ZL} は h_{cl} および h_{ol} に挟まれた範囲にのみ作用させるとし、 h_{cl} は h_c と同じ値をとる。 h_{ol} は $h_{ol}=0$ とすると汀線付近にバーが形成されてしまうが、実海岸では汀線付近にバーは形成されていない。これを考慮し、計算では半波長分沖側の $L/2$ に対する水深から長周期波(反射定常波)による漂砂が作用するように与えた。

これらの式で入射波高 H 、 h_R 、 h_c 、長周期波による漂砂強度係数 K_L 、汀線から第1バーまでの岸沖距離 L 、バー発生間隔を定めるための乗数 n 、バー比高の減衰を定めるための係数 α を与えると等深線変化モデルにより多段バーの形成が予測できる。またバーが現存する海岸だけ

でなく、過去にバーが消失した海岸でのバーの復元についての検討にも使用することができる。例えば、ある海岸において人工構造物による沿岸漂砂の阻止や、波の遮蔽構造物建設に伴って遮蔽域へと向いた沿岸漂砂が起きて多段バーが消失した状況を想定すると、過去に存在していた多段バーの発生間隔、バー比高を式(5)、(6)の設定値として与えれば、養浜などによる多段バーの回復に要する細砂量の評価が可能となる。

3. 計算結果

(1) 1/100の一樣勾配海浜の例

平衡勾配が1/100の一樣海浜を想定し、この条件での多段バーの形成を調べた。長周期重複波に起因する水深方向の漂砂量 q_{ZL} を式(1)で与え、入射波高を2m、 h_R を5m、 h_c を15m、 $K_L=1.0$ 、 $L=200$ m、 $n=0.56$ 、 $\alpha=0.15$ として計算したケース1の結果を図-3に示す。多段バーの形成において、第1バーは $X=300$ mに、第2バーは $X=700$ mに、第3バーは $X=1,300$ mに形成され、バー間隔が沖向きに増大している。また、バーの比高も第1バーで0.8m、第2バーで1.2m、第3バーで0.7mとなっており、第1バーを除いてバーの比高は沖向きに減衰している。第1バーの比高が第2バーの比高よりも小さいのは、前述のように汀線へのバーの形成を防ぐために、長周期波起源の漂砂の作用範囲を $L/2$ よりも沖側にしていることなどが考えられる。

バーは荒天時に形成され、静穏時にはバーが消失してバームとステップの組み合わせに変化することが知られている。本研究でもこの現象の再現性を調べるために、ケース1の結果に対して、静穏波が作用した場合には平衡勾配が急になるという特性(福濱ら, 2008)を考慮し、平衡勾配を1/75と急にするとともに、 $q_{ZL}=0$ として静穏波を作用させたケース2の計算結果を図-4に示す。 $X=300$ m、 700 m、 $1,300$ mに形成されていた3段のバーが削られて岸側に運ばれた結果、汀線が前進してバームが形成された。さらに図-4に示す状態において再び高波浪が作用した場合を想定し、ケース1と同様な波浪条件として求めたケース3の結果が図-5であるが、高さ5mのバームの砂は短時間に沖へと流出し、再びケース1と同様な多段バーが形成された。これより海浜縦断形は完全に同じ状況に復元している。

バーが形成されるには、浮遊可能な細砂が大量にあることが条件であり、粒径の大きな砂はバーの形成に役立たないことから、粒径の大きな砂で覆われた海底面を固定床と見做し、その上に載る細砂の移動に伴う多段バーの形成について検討した。これは事実上、固定床上に細砂で養浜を行う条件に等しい。汀線付近に細砂が敷かれた場合(ケース4)の多段バー発達の計算結果を図-6に示

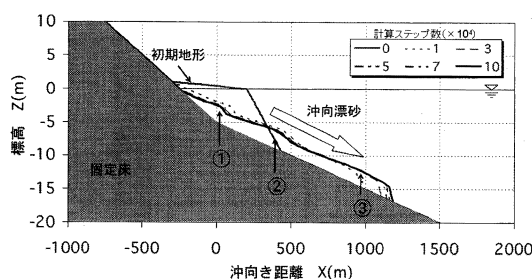


図-6 固定床上での細砂養浜後の多段バーの形成(ケース4)

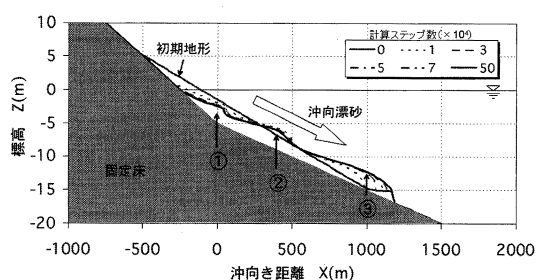


図-7 固定床上における多段バー形成後の静穏波の作用による縦断形変化(ケース5)

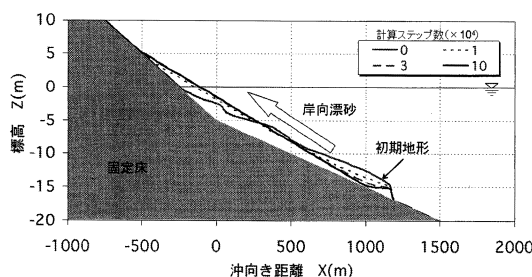


図-8 ケース5の平衡状態に暴浪波が作用した場合(ケース6)

す。汀線付近に敷かれた細砂は沖へと流出し、ケース1, 3と同様な多段バーが形成されており、細砂量が十分あれば多段バーが形成されることが分かる。

固定床上に細砂を養浜して形成された多段バーについてもケース2, 3と同様、バーが形成された海浜に静穏波が襲来した場合(ケース5)と、再び高波浪が襲来した場合(ケース6)の計算結果を図-7, 8に示す。ケース5の岸向き漂砂が卓越する条件では前浜に砂が堆積して汀線が前進し、一樣勾配海浜へと変形する(図-7)。しかしケース6の高波浪が襲来する条件では、沖向き漂砂が卓越することにより前浜を形成していた砂が沖へと流出しケース4と同様な多段バーが形成される(図-8)。なお各ケースの詳細な計算条件については表-1に示すとおりである。

(2) 石川県羽咋海岸の多段バーの再現計算

本モデルの実海岸への適用性を調べるために、図-1に示した石川県羽咋海岸に形成されている多段バーを再現計算の対象とした。羽咋海岸は日本海側に位置し、夏季の静穏時には波高が低く、碎波帯付近での濁りの発生が太平洋側の海岸と比べて少ないことから、空中写真に多段バーがうまく写されている。そこで空中写真に見られる多段バーを画像解析し、岸側から4番目までのバーの岸沖距離を算出した。図-1にはそれぞれの相対岸沖距離を示す。図-1をもとに式(5)の n を算出すると0.6となり、 L は第1バーまでの岸沖距離なので75mとし、その他の計算条件については加藤(1984)を参考として海底勾配 $\tan \beta$ を1/75、バーム高 h_R を3.0m、地形変化の限界水深 h_c を

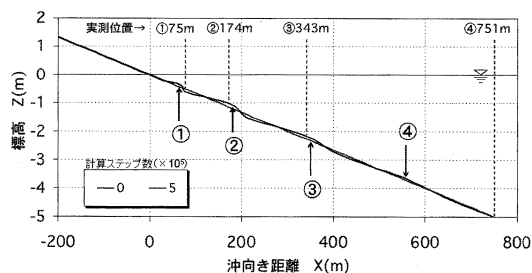


図-9 羽咋海岸の多段バーの再現計算結果の縦断形変化

8.0mとした。そのほかの計算条件は表-1に示す通りである。以上の条件で計算したケース7の結果を図-9に示す。第3バーまでの計算値と実測値とがうまく再現できている。

4. まとめ

Bowen(1980)、加藤(1984)による長周期波と海底斜面からの反射重複波(反射定常波)の作用を岸沖漂砂に取り入れることにより多段バーの発生機構を説明するという考え方を基礎として、芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを応用して多段バー発生予測モデルを構築した。これによりバーの発生間隔が沖向きに広がり、かつバーの比高が沖向きに減衰する現象の再現が可能になった。また、細砂養浜による多段バーの再生の可能性も示すことができた。さらに羽咋海岸を例として実海岸への適用性も確認した。本研究のモデルは、加藤(1984)のモデルのように長周期波(反射定常波)を外力条件として入力する方式ではなく、波動流速、長周期波の周期、土砂の沈降速度などのパラメータは用いずに、いくつかの係数を現地海岸の多段バーの形成実態に合うように経験的に定めるという手法を用いている。現地に形成されている多段バーは、その場所固有の外力条件や、粒径条件など全ての影響が反映された結果存在していることから、それをそのまま利用すればよいという考え方に基づいている。これは等深線変化モデルにおいて平衡勾配に現地海岸の平均的勾配を用いるのと同様な考え方である。また本モデル

表-1 計算条件

計算ケース		1	2	3	4	5	6	7
初期地形		1/100 一様勾配	ケース 1 最終地形	ケース 2 最終地形	養浜 (砕波帯)	ケース 4 最終地形	ケース 5 最終地形	1/150 一様勾配
平衡勾配 $\tan\beta_c$		1/100	1/75	1/100		1/75	1/100	1/150
安息勾配 $\tan\beta_0$	陸側	1/2						
	海側	1/10						
波による漂砂に関わるパラメータ	入射波高 H_b (m)		2.0					
	漂砂量係数 K_Z		0.01					
	地形変化の水深範囲	限界水深 h_C (m)	15.0					8.0
		バーム高 h_R (m)	5.0					3.0
長周期重複波による漂砂に関わるパラメータ	影響範囲	限界水深 h_{CL} (m)	15.0					8.0
		上限水深 h_{OL} (m)	0.0					0.0
	漂砂強度係数 K_L		1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.2
波による漂砂に関わるパラメータ	汀線から 1 つ目のバーまでの距離 L (m)		200					75
	振幅の減衰強度係数 α		0.15		0.3			0.1
	境界条件				緩傾斜護岸を設置 (1/50 : Z=-5.0m 以浅, 1/00 : Z=-5.0m 以深)			
計算範囲	岸沖距離 X (m)	-2000～2000						-750～1500
	標高 Z (m)	20.0～-20.0						5.0～-10.0
計算メッシュ ΔZ		0.2						0.1
計算時間間隔 Δt (hr)		0.5		1.0	0.5		0.1	
計算ステップ数 ($\times 10^5$)		1	5	1		5		
数値計算法		差分法による陽解法						

は、バーの発生間隔が力学的機構を介して自動的に決定されるモデルではない。現地海岸の多段バーの発達位置に合うように式(5)の n を調整してから計算を行っており、これはバーの発達位置を予め与えたことに等しい。しかし、本モデルは等深線変化モデルを応用したものであり、漂砂式が単純で扱いが簡単であり、従来の等深線変化モデルの岸沖漂砂式にバーの形成を促す項を付加するのみで多段バーの形成が計算できるという点が実用上の長所である。本モデルによれば、バーの発生間隔およびバー比高の再現はある程度可能となったが、縦断形の再現にとどまっていることも事実である。平面場での再現が可能のようにモデルを拡張することが今後の課題である。また、一般に静穏時にはバームが形成され、高波浪時にはバームが消失してバーの形成が進むという季節変化が起こるが、その計算の際には波高の大小を考慮する必要がある。本研究ではこの点についても十分考慮できてい

ない。これは今後の課題としたい。

参考文献

- 宇多高明・河野茂樹(1996)：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発，土木学会論文集，539号，pp.121-139.
- 加藤一正(1984)：長周期波と多段砂州の成因について，海岸工学論文集，第31巻，pp.441-445.
- 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.
- 福濱方哉・宇多高明・山田浩二・芹沢真澄・石川仁憲(2008)：前浜勾配と汀線の短期変動の予測モデル，海洋開発論文集，第24巻(印刷中)
- Bagnold, R. A.(1963)：Mechanics of Marine Sedimentation, in the Sea, Vol.3, pp.507-528.
- Bowen, A. J.(1980)：Simple models of nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars, The Geological Survey of Canada, pp.1-11.
- Inman, D. L. and Bagnold, R. A.(1963)：Littoral Processes, in the Sea, Vol.3, pp.529-533.