

感潮狭口の流積に及ぼす沿岸漂砂の影響

孟 昭 武*・近藤 俣 郎**・藤 間 聡***

1. ま え が き

外海と内水を連結している砂浜海岸の感潮狭口の安定化は航路維持や内水域の水質保全のために重要である。堆積による狭口の閉塞や、侵食による導流堤や防砂堤などの被災を防ぐため、狭口周辺の流れや波浪が漂砂に及ぼす影響については現在まで数多くの研究が行われてきた。その中で、O'Brien は非侵食、非堆積の感潮狭口を対象として潮汐プリズム-最小断面流積の関係を明らかにした。さらに、Kondo (1990) は種々の要素がどのように感潮狭口の安定性に影響するかを解明するため、断面流積を潮流ピーク流量、外海の平均潮位差、年間沿岸漂砂量の関数として安定流積理論を提案した。しかし、この理論を適用して流積と沿岸漂砂の関係を考察した実例は少ない。また、弱漂砂量領域における狭口に関しては、安定流積の研究は今だ行われていない。本研究はニュージーランド北島における 17 地点、米国の Brown Cedar Cut、日本の能取湖、中国海南島の Sanya 港の感潮狭口に関するデータを分析することにより、流積に及ぼす沿岸漂砂の影響をより明確にすることを目的とする。

2. 安定流積理論

安定流積理論は潮流ピーク流量と年間沿岸漂砂量が断面流積に及ぼす変化量で感潮狭口の安定性を評価するのである。

単調和潮汐を対象とすると、潮汐プリズム P は以下のよう求められる。

$$P=Q_m T/\pi=A_p VT/\pi \dots\dots\dots (1)$$

ここに Q_m はピーク流量、 A_p は断面流積、 T は潮流の周期、 V は断面平均流速である。式 (1) を変形して、断面平均流速を求めると以下ようになる。

$$V=\pi/T\cdot(P/A_p) \dots\dots\dots (2)$$

Escoffier (1940) は図-1 に示すように、横軸に安定流積 A_e を、縦軸に最大断面平均流速に V_{max} を取って狭口の安定性を調べた。ここで、 V_{cr} は限界流速であり、水路

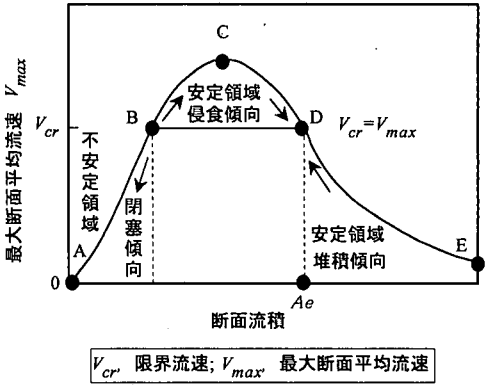


図-1 感潮狭口の流速と安定性の関係

底が洗掘、堆積の境界となる流速である。図中の矢印で分かるように、AB 区間では $V_{cr} > V_{max}$ であるから砂の輸送力は小さくて砂は堆積し、流積は減少して水路は閉塞方向をたどる。BC、CD 区間では掃流力が大きいため、流積が増大し水路は侵食傾向になる。しかし、さらに流積が大きくなって DE 区間になると潮流が伝達しやすいため内水と外海の水位差が小さくなり、流速は減少し、砂の輸送力も減少し再び堆積傾向にもどる。このことから V_{max} と V_{cr} の 2 つの線の交点のうち流積の大きい D 点の安定流積 A_e 付近にあると、流積が一時的に変化しても再び D 点に戻ることが期待される。このことから、B 点より右の範囲は安定領域と呼ばれる。

Kondo (1990) は、潮汐プリズム P と断面流積 A_e の比の最大値を以下のように求めた。

$$(P/A_p)_{max}=k_s\sqrt{a_sg}\cdot T \dots\dots\dots (3)$$

ここに a_s は外海潮の平均振幅、 g は重力加速度である。式 (2) と (3) から k_s は以下のように与えられる。

$$k_s=V/(\pi\sqrt{a_sg})=P/(A_p\sqrt{a_sg}\cdot T) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 k_s は無次元流速と呼ばれる。

また、狭口付近の年間沿岸漂砂量 M_t とピーク流量 Q_m の比を潮流による沿岸漂砂の無次元濃度で表し、次元解析により以下の式が得られる。

$$P/(A_p\sqrt{a_sg}\cdot T)=k_a[M_t/Q_m]^{k_b} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 k_a および k_b は漂砂の影響係数で実測データに基づいて決定する。

* 学生会員 工修 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻
** フェロー 工博 室蘭工業大学名誉教授
*** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科

表-1 ニュージーランド 17 地点の感潮狭口の特徴

狭口名称 () は番号	平均大潮 潮位差 m	平均大潮潮 砂プリズム 10 ³ m ³	平均断 面流積 10 ³ m ³	年間沿岸 漂砂量 10 ³ m ³	安定度
(1) Whitianga	1.6	12.6	1.3	1	安定
(2) Whangarei	2.1	155	14.6	20	
(3) Parengarenga	2.13	73.0	7	30	
(4) Hokianga	2.77	228	13	175	
(5) Tairua	1.6	5.02	0.43	5	
(6) Ngunguru	1.71	3.83	0.31	5	
(7) Whangateau	2.2	10.5	0.66	13	
(8) Ohiwa	1.6	28.1	1.88	70	
(9) Kaipara	2.68	1990	82	175	侵食 傾向
(10) Manukau	3.38	918	46	175	
(11) Rangauna	2.0	134	6.5 (8.8)*	20	
(12) Tauranga	1.8	6.55	0.5	60	
(13) Katikati	1.6	95.8	4.68	7	堆積 傾向
(14) Kawhia	2.9	121	11	175	
(15) Raglan	2.8	46.0	3.6	175	
(16) Whananaki	1.8	1.46	0.13	5	
(17) Manganwhai	1.6	131	6.26	70	

注：表の中でのデータは Hicks, D. Murray and Hume, T. M. (1996) による。
(*) は Hume, T. M. and Headenorf, C. E. (1993) による。

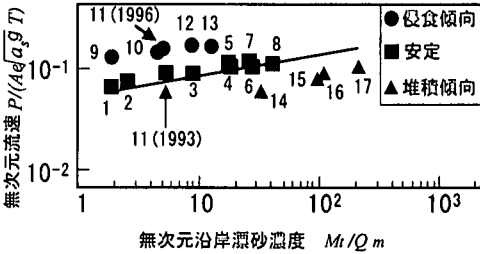


図-2 無次元流速と無次元沿岸漂砂濃度の関係
(データ番号は表-1 中の番号に対応)

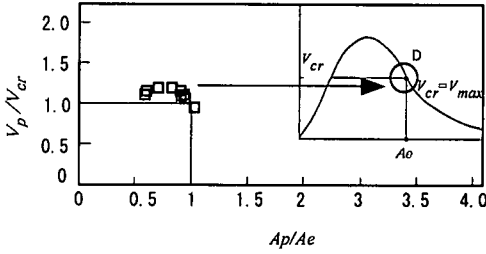


図-3 ニュージーランド北島における感潮狭口の安定状態
(安定状態の狭口)

式 (1) と (5) の関係を用いると、安定流積 A_e は以下のように得られる。

$$A_e = g^{0.5} / (k_a \cdot \pi) \cdot Q_m^{1+k_b} \cdot a_s^{-0.5} \cdot M_t^{-k_b} \dots \dots \dots (6)$$

以上の安定流積 A_e を式 (2) に代入して限界流速が求められる。

$$V_{cr} = \pi / T \cdot (P / A_e) \dots \dots \dots (7)$$

漂砂の影響係数 k_a および k_b は漂砂の強弱によって異なる。Bruun (1978) は感潮狭口の安定性について潮汐プリズムと年間沿岸漂砂量との比で、狭口付近における漂砂の強弱を分類し評価した。潮汐プリズムは内水面積、狭口の断面流積や内水の潮位差等に影響される。内水の潮位差によっても水面勾配が生じることから、潮汐プリズムの代わりに外海のアベラジ潮位差と内水面積との積を用いて、年間沿岸漂砂量との比で沿岸漂砂の強弱を評価することが狭口付近における漂砂の客観的指標になると考えられる。ここではその比が 100 より大きい場合を弱漂砂領域とし、100 より小さい場合を強沿岸漂砂領域とする。Kondo (1990) は強漂砂領域における狭口のデータに基づき、最小自乗法で最適同定し、式 (5) および (6) の漂砂の影響係数 $k_a=0.1$, $k_b=0.1$ を得た。以下においては、ニュージーランド北島の現地事例を用いて弱漂砂による影響について考察する。

3. ニュージーランド北島の弱漂砂条件の現地事例

(1) 安定な感潮狭口

表-1 はニュージーランドにおける 17 地点の感潮狭口の特徴を示している。これらの狭口においては、内水面積と外海のアベラジ潮位差との積、および年間沿岸漂砂量との比は 200~12000 の範囲にあるので、弱漂砂海岸に属する。その安定状況によって、安定、遷移状態 (侵食傾向)、遷移状態 (堆積傾向) の 3 種類に分類した。

図-2 は、表-1 のデータを用い、横軸に潮流に対する沿岸漂砂の無次元濃度を、縦軸に掃流力に正比例する無次元流速を表し、潮流と年間沿岸漂砂の相対的な強さで感潮狭口の安定性を評価するものである。図中の直線は安定な 8 データに着目し、式 (6) の漂砂の影響係数を最小自乗法で近似したものである。この場合、 $k_a=0.06$, $k_b=0.1$ になる。その直線は潮流と年間沿岸漂砂の影響が平衡状態となる前出の図-1 中 D 点の A_e を表し、流積が動的平衡状態にあるので、これを平衡線と定義する。平衡線より上の領域は大きい無次元流速に相応して潮流の掃流力が強く、流積が大きく安定流積 A_e になるまで、平衡線に向かい侵食されていく。流積が安定流積 A_e になると、流速はその狭口の最大流速になる。流積が A_e を超えると、データは平衡線の下方になる。安定流積理論に従って流速が徐々に減少していく。流速に比例する掃

流も減少するため、安定流積 A_e になるまで堆積過程が継続する。沿岸漂砂量が減少すると、データのプロットングポジションは左側に移動するので、潮流の掃流力が相対的に大きくなり、平衡線の上にある場合、狭口は侵食されていき、平衡線の下方にある場合、狭口は安定流積に向う。一方、沿岸漂砂量が増加すると、データのプロットングポジションは右側に移動するので、平衡線の上にある場合、狭口は安定流積に向い、平衡

線の下方にある場合、狭口は閉塞に向う。

図-3は横軸に実測の断面流積 A_p と安定断面流積 A_e の比を、縦軸に実測の流速 V_p と安定流積時の限界流速 V_{cr} との比を取って以上の8データを示している。これらのデータは狭口の流積が前出の図-1の領域BCDに相当し、限界流速に近く、安定範囲に入っていることが分かる。

(2) 遷移状態における感潮狭口

前出の表-1に示したニュージーランドの感潮狭口のうち、遷移状態にある9地点のデータを用いて、図-3と同様な手法で図-4を得た。これらのデータは図-1の安定領域BCDE区間に相当する。データ9, 10, 11(1996), 12および13は大きい流速で安定流積へ遷移状態(侵食傾向)であり、データ14, 15, 16および17は小さい流速で安定流積へ向っている遷移状態(堆積傾向)であることが認められる。

前出の図-2にプロットした潮流と年間沿岸漂砂の関係によると、データ9, 10, 11(1996), 12および13は平衡線の上に位置する。それはそれらの感潮狭口では相対的に大きい掃流力が存在し流積が大きくなっていくことが推測できる。安定時の限界流速に関しては、Bruun(1978)は米国やヨーロッパの狭口について調査したところ大潮時の断面平均流速は0.8~1.2 m/sである。Hicks(1996)の現地流速データによると、9, 10, 12および13の狭口の断面平均流速は限界流速の1.2 m/sより大きい。この現象は堆積後、感潮狭口は最大流速と断面流積の関係に従ってより大きい流速でもとの平衡状態に戻っていくと解釈でき、実現象の変化をよく表現していると言える。一方、データ14, 15, 16, および17は平衡線の下方にある。それらの感潮狭口では相対的に小さい掃流力が存在し、沿岸漂砂の影響が潮流に比べ強いことが推測できる。Hicks(1996)の現地流速データによると、これらの狭口の断面平均流速は0.66 m/sより小さい。

4. 沿岸漂砂による流積の時間変化の事例解析

ここでは米国のBrown Cedar Cut, 日本の能取湖漁港, 中国のSanya港の感潮狭口に関する時系列のデータを用い、狭口水路の閉塞傾向, 侵食傾向および堆積傾向を示す。

(1) Brown Cedar Cut

Brown Cedar Cutは図-5に示すようにメキシコ湾の西海岸に位置し、面積140 km²の東Matagorda湾とメキシコ湾を連結する感潮狭口で、1929年の暴風で形成されたものである。ここでは、Curtis Mason et al. (1974)

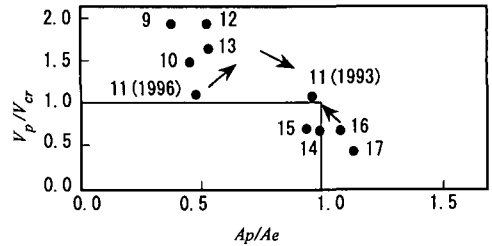


図-4 ニュージーランド北島における感潮狭口の安定状態(侵食傾向および堆積傾向の狭口)

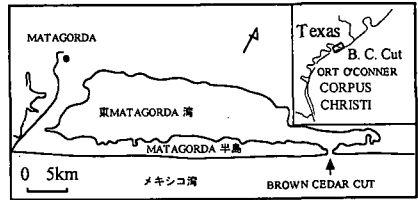


図-5 Brown Cedar Cut の位置

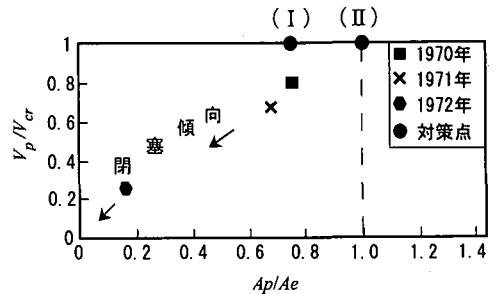


図-6 Brown Cedar Cut 感潮狭口の安定状態

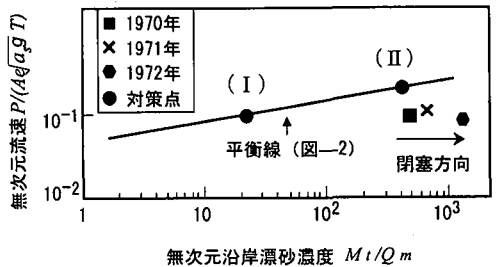


図-7 無次元流速と無次元沿岸漂砂濃度の関係 (Brown Cedar Cut 感潮狭口)

による1970年から1972年までの観測結果を用いて、同狭口における流積の時間変化を考察する。外海の平均潮位差26 cmである。年間沿岸漂砂量は350,000 m³である。内水面積と外海の平均潮位差との積、および年間沿岸漂砂量との比は100より大きいので、弱漂砂海岸に属する。主に南西への沿岸漂砂に影響される。

図-6および図-7は、1970年から1972年までのデータを用いて狭口の安定状態を示している。図-6から分

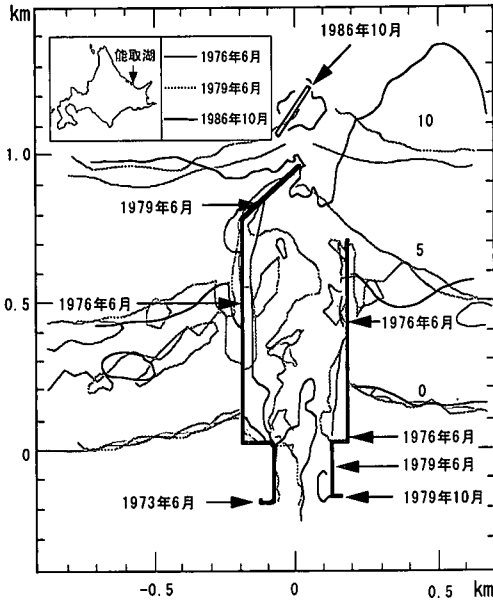


図-8 能取湖漁港の建設経緯及び地形変化

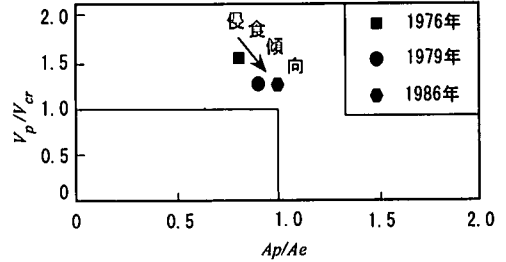
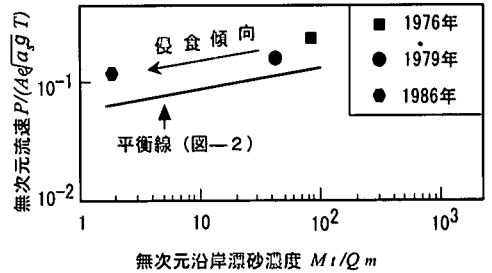


図-9 能取湖漁港狭口の安定状態

図-10 無次元流速と無次元沿岸漂砂強度の関係
(能取湖漁港防波堤による影響)

かるように1970年から1972年まで狭口の断面流積と安定流積の比、および断面平均流速と限界流速の比は1より小さく閉塞方向を辿り、前出の図-1の不安定領域AB区間に相当する。図-7も同様な傾向を示している。断面流積の減少に伴い、東Matagorda湾に及ぼす潮流の影響も減少するが、沿岸漂砂の影響は減少している潮流のピーク流量に対して相対的に強くなり、狭口は堆積し、閉塞方向を辿る。その対策として、図-6と図-7の点(I)における限界流速まで防砂堤で沿岸漂砂を遮断する方法、点(II)における安定流積まで浚渫する方法と二つの考案が考えられる。

(2) 能取湖漁港

図-8に示すように能取湖は北海道の東海岸に位置し、オホーツク海に面する面積58.4 km²の湖である。外海の平均潮位差は37.6 cmである。年間沿岸漂砂量は100,000 m³である。内水の面積と外海の平均潮位差との積、および年間沿岸漂砂量の比は200よりもおおいので、弱漂砂海岸に属する。湖口の防波堤は1971年6月に着工し1986年10月に完成した。ここでは防波堤の建設による漂砂の変化が流積に及ぼす影響を評価する。

1977～1987年の波浪観測データから、通年では最多出現率は波高0.25～0.5 m、方向NNE, N、周期4～5 sである。1/2年確率波は波高0.7 m、方向NNE, N、周期5 sである。海底砂の中央粒径は0.3 mmである。

波高0.5 m、周期5 sの波の初期移動水深は-4～-5 m地点にあるので、図-8に示したように1976年6月当時の防波堤の先端水深は-5～-6 mにあり、上述の波に

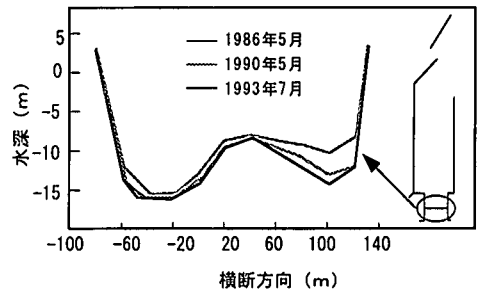


図-11 能取湖漁港狭口の断面変化

よる沿岸漂砂を防ぐことができる。波高0.7 m、周期5 sの1/2年確率波の初期移動限界水深が約-9 mである。1979年6月では防波堤の先端は水深-9～-10 mにあり、その波による漂砂を防ぐことができる。1986年に完成した防波堤は狭口の安定性を図るものではなく、漁港水路の静穏を保つため作られたものである。

図-9と図-10はこれまでと同様な手法を用い、1976年、1979年および1986年のデータを解析したものである。図-9から分かるように、データは前出の図-1の安定領域(侵食傾向)CD区間に相当する。防波堤の延伸とともに能取湖の断面流積が増大する傾向がある。それは防波堤が沿岸漂砂を遮断したため、潮流の力が相対的に強くなったことが理由と考えられる。図-11は防波堤の完成後の狭口の断面変化を示している。東側の防波堤の基部の洗掘が特に顕著となっている。このように流積が小さい狭口では、沿岸漂砂を完全に遮断すると、安定流

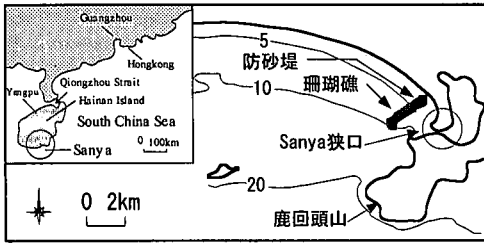


図-12 中国海南島 Sanya 港の深浅図

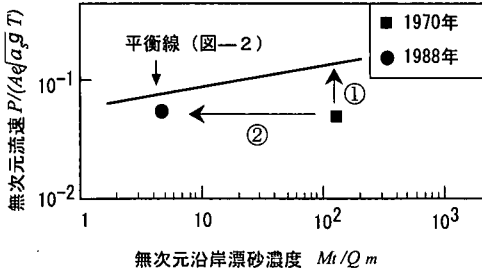


図-13 無次元流速と無次元沿岸漂砂濃度の関係 (Sanya 港防波堤による影響)

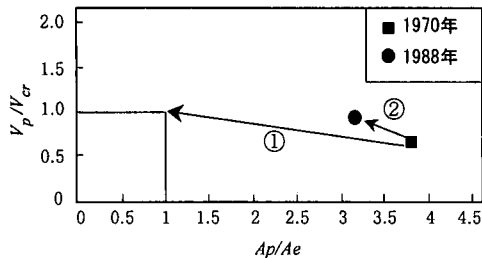


図-14 Sanya 狭口の安定状態 (防波堤による影響)

積になるまで水路が侵食されていくため、狭口付近の構造物の安定について予め検討する必要がある。

(3) Sanya 港

図-12 に示す Sanya は中国海南島の南端に位置する。狭口背後の感潮面積は 3.5 km^2 で、外海のア平均潮位差は 82 cm である。年間土砂量は $2,714 \text{ m}^3$ である。内水面積と外海のア平均潮位差との積、および年間土砂量との比は 1000 よりも大きく、弱漂砂海岸に属する。南側に位置する鹿回頭山は南からの風や波とともに、南からの沿岸漂砂も遮断する。北西からの波は有義波高 0.5 m 、周期 4 s である。北側における珊瑚礁は天然な防砂堤として効果があるが、水深 -5 m より浅いところから途切れている。この部分は丁度初期移動限界水深より浅くて砂移動の活

発な領域である。1970 年代以前は堆積砂は主に北西からの沿岸漂砂と内陸からの流砂である。航路水深を維持するため、1970 年代、陸側から珊瑚礁まで潜堤を建設し、北西からの沿岸漂砂を遮断した。それ以後、土砂は河川のみによって供給されている。

図-13 および図-14 は感潮狭口の安定状態を示している。図-13 にはデータは前出の図-1 の安定領域(堆積傾向)DE 区間に相当し、防波堤が沿岸漂砂を遮断して狭口が安定流積に向うことが分かる。自然状態では図-13 および図-14 の①のように安定流積に到るのに対して、防砂堤で沿岸漂砂量を減少させた場合には、感潮狭口は安定流速までたどる過程は②となる。即ち、自然の狭口より大きい断面流積で安定状態になる。

5. ま と め

本研究により以下の結論が得られる。

- (1) Kondo (1990) の安定流積理論を再検討し、ニュージーランド北島の安定な感潮狭口のデータを用い、弱沿岸漂砂に影響される感潮狭口の安定流積の式(6)および限界流速の式(7)を提案した。
- (2) ニュージーランド北島における感潮狭口の現状を分析し、漂砂による流積の変化傾向を示した。
- (3) 米国の Brown Cedar Cut, 日本の能取湖, 中国の Sanya における沿岸漂砂による流積の時間変化を分析し、航路埋没や構造物洗掘の傾向を明らかにした。

謝辞：本研究は室蘭工業大学木村克俊助教授からご指導を頂いた。(株)アルファ水工コンサルタンツの川森晃氏, Mr. Francois Salesse から能取湖に関する資料を頂いた。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- Bruun, P. (1978): Stability of Tidal Inlets-Theory and Engineering. Amsterdam: Elsevier, p. 510.
- Mason C. and R. M. Sorensen (1974): Character and stability of a natural inlet, Coastal Eng. ASCE, pp. 781-800.
- Hicks, D. and Murray et al. (1996): Morphology and size of ebb tidal deltas at natural inlets on open-sea and pocket-bay coasts, North Island, N. Z., J. Coastal Research, 12, pp. 47-63.
- Hume, T. M. et al. (1993): Factors controlling tidal inlet characteristics on low drift coasts, J. Coastal Research, 8, pp. 355-375.
- Kondo, H. (1990): Flow area prediction of tidal inlet after sea level rise, Proc. of 22nd ICCE, ASCE, pp. 3063-3073.