

Bali 島の Kuta 海岸の侵食原因に関する考察

宇多 高明* ・大須賀 豊** ・遠藤 秀文**
芹沢 真澄*** ・三波 俊郎**** ・古池 鋼****

土屋ら(1993)は, Bali 島の Kuta 海岸の侵食に関し, 1968 年に空港滑走路がリーフ上に建設されたことによって sedimentation cell が分断されたことが原因であるとした。しかしその後の調査によると種々の矛盾点が見出され, 侵食原因をこれに求めることは物理的に困難であることが判明した。そこで新たにヒアリング調査・数値計算・理論検討などを行い, これらより侵食原因がリーフ上で広範に行われた coral mining によってリーフ水深が増加し, 波の屈折特性が変化するとともに, 波高が増大したことにあったことを突き止めた。

1. はじめに

Bali 島の Kuta 海岸はリーフに囲まれた海岸リゾートとして有名であるが, 近年急速に侵食が進みつつある。この侵食に関して, 土屋ら(1993)は, 1968 年に空港滑走路がリーフ上に建設されたことによって漂砂の流れが分断されたことが原因であるとした。リーフにおいてはリーフエッジ付近からサンゴ片や有孔虫の遺骸が波・流れの作用で岸向きに運ばれ, それが汀線に到達した後, 沿岸漂砂となって移動するが, 滑走路建設によってそれが分断されたことが主因としたのである。しかしその後の調査によると種々の矛盾点が見出された。本研究では, 現地調査・数値計算・理論検討などから侵食原因を突き止める。

2. Kuta 海岸の汀線と沿岸漂砂量の変化

図-1 は, 土屋ら(1993)による Kuta 海岸における sedimentation cell とその変化であり, これにより滑走路建設によって sedimentation cell が分断されたことが侵食原因であるとした。図には滑走路建設前後における漂砂移動が模式図として示されている。侵食が滑走路建設による sedimentation cell の分断にあったとするならば, 滑走路北側のみならず南側でも同種の現象が起こらなければならない。滑走路の南側隣接部では南向きの沿岸漂砂のバランスが崩れているので, 端部から侵食が発生し, それが南向きに波及しなければならない。しかし, 現地踏査によれば滑走路の南側隣接部では海浜は安定しているので, これと矛盾する。

一方, 滑走路北側における汀線変化について, 土屋ら(1993)は空中写真に基づく汀線変化分析を行い, 図-2 に示す結果を得た。1960 年から 1989 年の汀線変化である。滑走路は 1968 年に完成しているもので, 1968 年以前の汀線変化は小さかったと推定できる。このように考えたとき, 1968 年から 1972 年までに 0.8 km 付近を中心とし

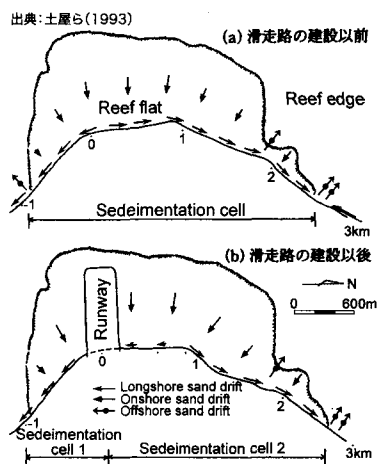


図-1 Kuta beach における sedimentation cell とその変化

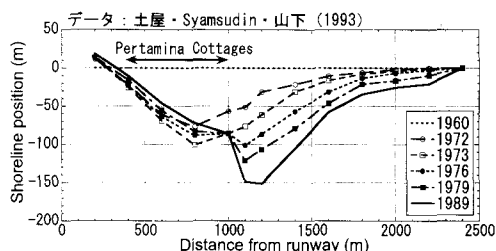


図-2 Kuta beach における汀線変化

てほぼ三角形に汀線の後退が生じ, その後最大汀線後退量が生じた場所が北側に移動しつつ, 後退量が増加している。また 2.4 km 地点では汀線位置は固定されており, そこでは全く汀線の後退が生じていないことが特徴である。この地点は図-1 によればリーフの切れ目に相当し, 沿岸漂砂と等しい量が流出するため動的平衡状態にある, という考え方に立てば一応は説明がつく。

図-2 をもとに滑走路から 2.4 km までの区間における 1960 年基準での侵食面積を算出した。滑走路の建設は 1968 年であるが, その年の汀線は明らかではないので 1960 年から 1968 年までは汀線が安定していたとし, 1968 年から汀線後退が始まったと考えて, 1968 年を基準

* 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 日本工営(株) コンサルタント海外カンパニー
*** 正会員 海岸研究室(有)
**** 海岸研究室(有)

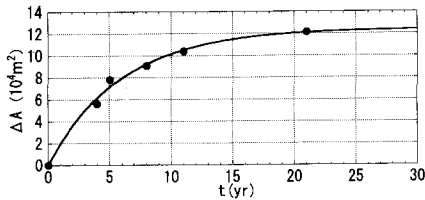


図-3 Kuta beachにおける侵食面積の経時変化

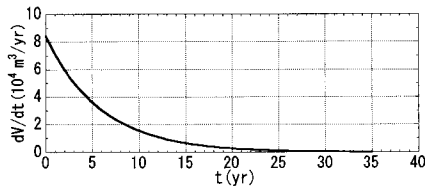


図-4 侵食土砂量の経時変化 (海岸端部の沿岸漂砂に相当)

として侵食面積 (ΔA) の経時変化を示すのが図-3である。 ΔA は漸近曲線にのり、式 (1) で表される。

$$\Delta A(\text{m}^2) = 1.24 \times 10^5 (1 - \exp(-0.17t)) \quad \cdots (1)$$

このような汀線変化が現れるには2つの可能性しかない。第1は、リーフ区間と連続した沿岸漂砂移動の見られる全区域において護岸が設置され、汀線がそれ以上後退しない状態となっている場合、第2は、波浪場の変化に起因して汀線が変形したが、最終的に各点で汀線が波の入射方向と直角となって安定した場合である。

Kuta 海岸の縦断測量によれば、汀線が後退する場合漂砂の移動高は約4 mと得られている (谷本ら, 1989) ので、前出の侵食面積に漂砂の移動高を乗じて変化土砂量 (ΔV) を算出し、 ΔV を微分して土砂量の時間変化割合を算出したのが図-4である。この変化は式 (4) で表される。

$$dV/dt = 8.4 \times 10^4 \exp(-0.17t) \quad \cdots (2)$$

土砂の保存式と沿岸漂砂の境界条件を考えれば、この土砂は北端の2.4 km 地点を通じて運び去られた沿岸漂砂量に等しい。通過沿岸漂砂量は初期には $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ であったが、時間経過とともに急速に0に近づいたことが分かる。

3. 現象の解釈

滑走路の建設によって沿岸漂砂の分断が起きたとすると、その影響はまず滑走路の隣で現れ、それが北側に波及する。その場合、滑走路から離れた2.4 km 地点を通過する沿岸漂砂は、当初ある一定量を有するが、それが減少して最終的に0に漸近するという漸近曲線となる。すなわち滑走路建設直後には変化が見られず、上手側での汀線の後退とともに次第に減少するという変化とならなければならない。しかし式 (2) は滑走路の建設直後に

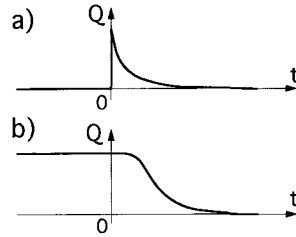


図-5 沿岸漂砂量の経時変化の模式図

大きく、時間経過とともに減衰しているから明らかにこれと異なる。

模式図に整理したのが図-5である。図-5 (a) は本研究の場合であり、当初ほぼ0であった沿岸漂砂量為何らかの要因 (後述の coral mining による波向の急変) で急激に増加したが、時間経過とともに0に減衰したというものである。一方、図-5 (b) は土屋ら (1993) の考え方を要約したものであり、当初存在した約 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂が構造物の阻止により0に収束するというものである。沿岸漂砂が収束した段階ではいずれも沿岸漂砂量は0なので、その段階で比較を行っても両者の差異は明確にならない。両者の根本的差異は、人工改変が行われる前の沿岸漂砂量の相違である。自然状態では汀線はほぼバランスしていたと考えるのが本研究であり、大量の沿岸漂砂が流れていたと考えるのが土屋らの考え方である。

土屋ら (1993) によれば、リーフエッジ付近からの土砂供給はあり得るが、滑走路建設以前には動的平衡状態にあったと考えられるので、対象区域から流失していた沿岸漂砂量と同じ量の土砂がリーフエッジ付近から供給されなければならない。このことは自然状態での沿岸漂砂量 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ がリーフエッジ付近から供給されていたことになる。しかしこの量はかなり規模の大きな河川の流出土砂量に匹敵し、漂砂量のオーダーから見て極めて不自然である。このことから滑走路が建設されたことは事実であるが、それが直ちに沿岸漂砂の分断を招いて侵食を発生させたと考えられることには疑問がある。

4. 新たな侵食原因の推定

図-6 (a) に周辺の家図を示す。沖合から入射した波は、矢印で示すようにリーフの影響によって大きく変形していると考えられる。図-6 (a) には、リーフの影響がない場合の汀線形を破線で示す。現況との海面面積の差は 270 m^2 である。リーフが存在することで、移動高を4 mとすると約 1900 m^3 の土砂をリーフ背後に貯留していると考えられる。このようにリーフはその岸側の海浜形成に非常に大きな影響を与えていると推定される。

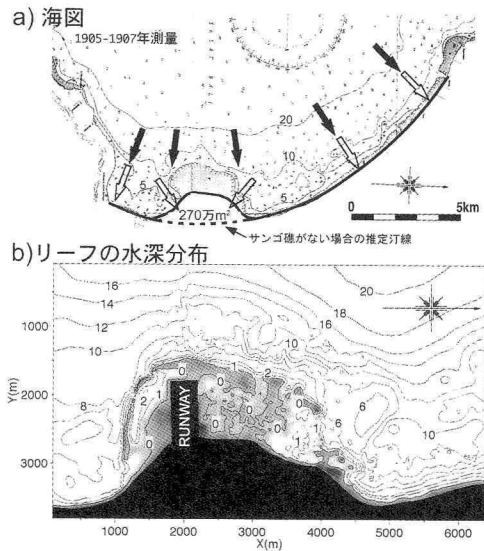


図-6 Kuta beach の海底地形

図-6 (b) には 1997 年のリーフの水深分布を示す。一般にリーフ地形ではリーフ外縁に小高い高まりがあり、その陸側が礁池となっている。このような視点から図-6 (b) のリーフの深浅図を見ると、特異な海底形状が観察される。一つは空港滑走路の南側にある延長約 1 km に及ぶ細長い楕円形状の深みである。この深みは周辺のリーフ面と比較して平均で約 2 m 深くなっている。また滑走路北側の海岸においては、周辺のリーフ面と比較して 1 m 程度の深い場所が見られる。しかし南側と比較して凹みの境界が明瞭ではなく、掘削穴か自然地形かは、深浅図のみからは判断できない。このため現地調査および聞き取り調査を行った。

5. Coral mining の聞き取り調査

2003 年 8 月 13 日, Kuta 海岸の漁民 7 名 (60 歳台の老人 2 名, 30~40 歳 4 名) に対し, 当時行われた coral mining について意見聴取を行った。まず, coral mining を行っていた時期は 1940 年代から 1974 年までであった。それに従事していた人は約 100 名で, そのほとんどが Kuta 地域の漁民であった。Kuta 地域の漁民は高潮時に漁業に従事し, 低潮時には coral mining を行っていた。当時, 漁法や漁船が未発達であり, 漁獲対象魚が近海の雑魚を中心とするものであったため魚は低価格であった。このため coral mining により生計を立てていたようである。Kuta 全域のサンゴの掘削量は, 多い日で 6t トラック 5 台分 (平均でこの量の半分程度) とのことであった。

リーフエッジからは, 主に *Coelosseris Mayeni* (ヒラフキサンゴ科) や *Alveopora* (ハマサンゴ科) の 0.5~1.5 m の大型のサンゴを採掘し, 壁材や道路の路盤材などに

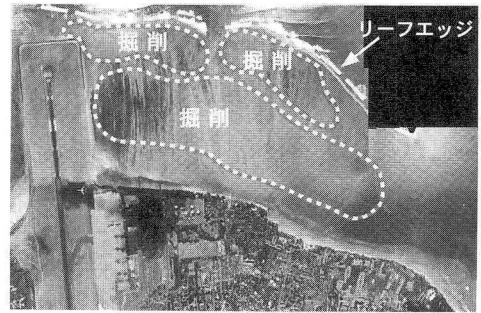


写真-1 コーラルマイニングの位置

用いた。これら大型のサンゴは 1 固体が数百 kg と重量が大きいため, ハンマー, 鋸, シャベル等で分割し採掘された。また, サンゴのみの採掘ではなく, サンゴの基盤まで採掘したとのことである。その場合の基盤の掘削深は 0.5 m~1.0 m であった。

リーフフラットからは, 主に *Acroporide* (ミドリイシ科) の枝サンゴや *Pocillopride* (ハナヤサイサンゴ科) の 0.3~0.5 m の小型サンゴを採掘し, チョーク (黒板用) や壁材などに用いられた。リーフフラット上はほとんどが小型のサンゴであったようであるが, 数は少ないが 1.0 m 以上のサンゴも存在したようである。このエリアもリーフエッジ付近同様に 0.5 m~1.0 m の掘削深で基盤ごとと採掘された。

漁民に平面図を見せ, coral mining 区域を示していた。写真-1 に結果を示す。coral mining はリーフエッジ付近およびリーフフラットで広範囲に行われたことがわかる。リーフエッジでは波当たりの強いリーフエッジの外縁のみを残して, 内側が掘削された。

6. 数値計算

coral mining の影響を数値計算により検証した。まず, Kuta 海岸への卓越入射波として, WSW 方向から $H_0 = 0.89$ m, $T = 12$ s の波を入射させて波浪場の計算を行った。現況のリーフ地形と復元された (浅くなった) リーフ形状を与えた場合の波高分布の差を図-7 (a) に, 波向分布の差を図-7 (b) に示す。リーフの掘削の有無は汀線近傍での波浪場に大きな影響をもたらす。ここで Kuta 海岸の汀線の長期的安定性について考えると, リーフ形状に応じて汀線はある安定形状に近い状態にあったと推定される。リーフ上の水深が浅くリーフ幅が広い場所では汀線が突出し, リーフ上の水深が深くリーフ幅が狭い場所では汀線の突出量も小さくならなければならない。このような原理から考えると, Kuta 海岸の汀線が近年になってその安定性を失うには, 波浪変化を起こすような要因が生じ, それに応じて汀線が変化したと考えることが合理的である。

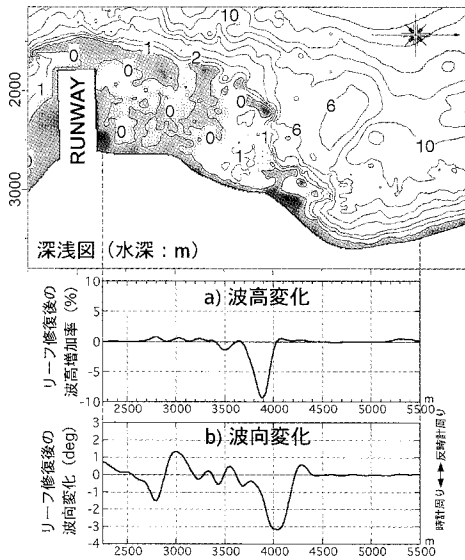


図-7 リーフを修復した場合の波高及び波向変化の沿岸方向分布

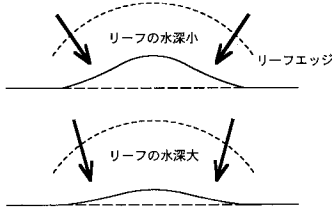


図-8 コーラルマイニングの影響による波浪変化の模式図

このような考え方を模式化したのが図-8である。すなわち, coral mining によりリーフ上の水深が深くなり, このため屈折が弱くなり波高が増大したものと考えられる。実際に等深線変化モデルによりリーフの修復の有無による汀線の維持効果をシミュレーションした結果を図-9に示す。リーフを修復することで, 養浜砂の流出が抑えられ, 養浜のみ行ったケースに比べて大きな砂浜が保持されていることがわかる。これは, 現況およびリーフ修復後の波高・波向の差分値の分布に示すように, リーフの修復により汀線沖で波の屈折状況が変化することで, 汀線に作用する波浪外力の分布が汀線を安定的に保持する状態へと変化した結果である。

リーフは沖向きに突出した浅瀬であるが, 入射波はリーフエッジで強く屈折し, リーフエッジにほぼ直角方向になるよう波向が揃えられる。この結果, 波向分布は, リーフ中央に収斂する分布となる。リーフ奥の汀線形状はこの波向と直角方向を向いて安定するため, 汀線形状はリーフエッジと相似形の凸型で安定する。ところがリーフ面を掘削してリーフ上の水深を深くと, 波の

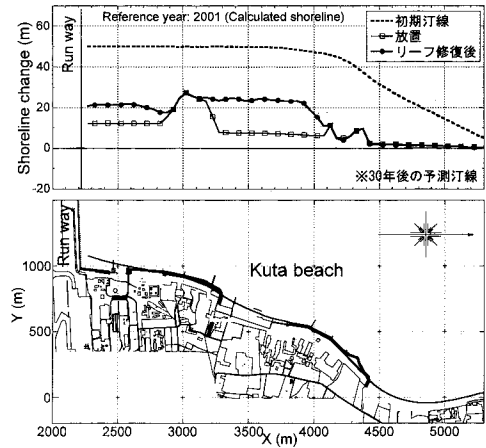


図-9 リーフの修復の有無による汀線の維持効果

屈折率は水深と逆比例するため, 屈折効果が弱まる。この結果, リーフ中央への波向の収斂度が低下して, 汀線形状は以前よりも緩やかな突出度で安定する。結局, 以前の突出度は維持できなくなり, 土砂は海岸線に沿って端部に向けて流出する。以上がサンゴの掘削による侵食機構である。

7. 汀線変化に関する理論的検討

実測の汀線変化では, 空港に近い区域から後退が始まり, 時間経過とともに侵食域が北向きに伝播していく傾向が見られた。この原因について考察する。

いま, 海岸の北端では汀線がほとんど変化していないことに着目して, 有限長 L の海岸線に波が斜め入射するとき, 左端で $Q=0$, 右端で $Y=0$ (固定) の境界条件に対して, 汀線変化の基礎方程式を解くと, 汀線変化量・沿岸漂砂量を与える式 (3), (4) を得る。また海岸右端から流出する沿岸漂砂量は式 (6) で与えられる。右端の境界条件は, 物理的にはそこに突堤や突出した護岸によって汀線がそれ以上後退しない状態となっている。

$$Y(x, t) = L \tan \alpha_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2}{\lambda_n^2} \cos \left(\frac{\lambda_n x}{L} \right) \cdot \exp \left(-\frac{\lambda_n^2 A_0}{L^2} t \right) \right\} + \frac{x}{L} - 1 \right] \quad (3)$$

$$Q(x, t) = A_0 h \left(\tan \alpha_0 - \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = Q_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2}{\lambda_n^2} \sin \left(\frac{\lambda_n x}{L} \right) \cdot \exp \left(-\frac{\lambda_n^2 A_0}{L^2} t \right) \right\} \quad (4)$$

$$\lambda_n = \left(\frac{1}{2} + n \right) \pi \quad (5)$$

$$Q_b = Q(L, t) = Q_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2}{\lambda_n^2} (-1)^n \cdot \exp \left(-\frac{\lambda_n^2 A_0}{L^2} t \right) \right\} \quad (6)$$

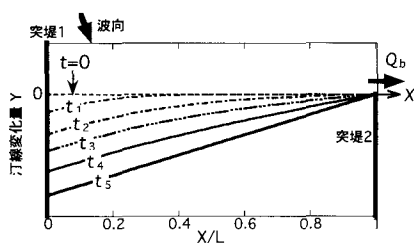


図-10 突堤間の汀線変化

図-10には式(3)の汀線変化を示す。計算結果は実態とかなりよく一致している。図-11は式(6)で与えられる、海岸端部での沿岸漂砂量を示す。突堤の延ばされる前には Q_0 の沿岸漂砂が連続的に流れていなければならない。しかし実際にはこのような条件を考えることは不合理である。

そこで図-12のように考えた。もともと自然状態では、海岸線の各地点で波は汀線に対し直角入射し、 $Q=0$ の静的に安定した海岸であった。ところが coral mining によってリーフ面の水深が全体的に深くなったとすると、沿岸漂砂量も変化しなければならない。図-13に模式図を示す。リーフが一樣水深で、リーフエッジが直線であったと単純化して考えると、リーフ前面の入射地点の水深を h_1 、そこでの入射角を θ_1 (リーフエッジ直角方向に対する入射角)、リーフ面の水深を h_2 とすると、スネルの法則より屈折後の波向 θ_2 は次式で与えられる。

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{C_2}{C_1} \sin \theta_1 \right) \approx \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \sin \theta_1 \right) \approx \theta_1 \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで C_1, C_2 は波速であり、長波近似と θ_1 が微小の近似を用いた。

この式によれば、 $h_1 > h_2$ であるから、 θ_2 は θ_1 より必ず小さくなる。これは屈折により波向はリーフエッジに対して直角方向になるよう変化することを意味する。 h_1 が一定のとき、 h_2 が小さいほど強い屈折が起こり、リーフエッジに対して直角方向に近づく。屈折後の波向は h_2 の平方根に比例するから、リーフ上の水深 h_2 が増大すると屈折が弱まり、 θ_2 は大きくなる。Kuta 海岸の場合、リーフへの入射波向は南寄りが卓越するため、水深 h_2 が増大すると海岸線への入射波向は南寄りに変化することを意味する。すなわち、もともと安定していた海岸が北向きの沿岸漂砂が卓越する海岸に変貌し、海浜変形が引き起こされる。また水深の増大はリーフの持つ波浪減衰機能の低下につながり、海岸線への波当たりも強まる。リーフ上の波高はリーフ上水深に比例する一方、沿岸漂砂量を規定する波エネルギーフラックスは波高の $5/2$ 乗に比例して大きくなるから、結局、リーフ上水深の $5/2$ 乗に比例

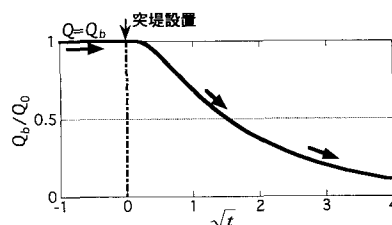


図-11 海岸端部での沿岸漂砂量の経時変化

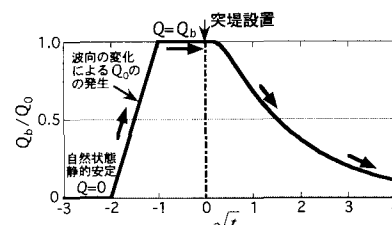


図-12 自然状態から coral mining 後の沿岸漂砂量の変化

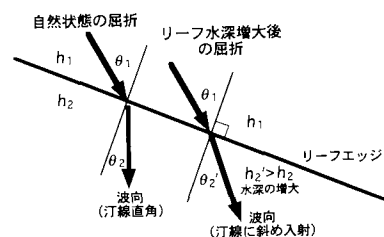


図-13 coral mining 後の波向変化の模式

して増大する。これはリーフ上水深の 30% の増加により、波エネルギーフラックスと沿岸漂砂量は 2 倍に増大することを意味する。このように coral mining によるリーフ上水深の増大は、漂砂の外力条件を大きく変化させたと考えられる。

参考文献

- 宇多高明 (1997): 沿岸漂砂の卓越する海岸における暗渠型放水路吐口の設計上の留意点, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 627-632.
- 谷本修志・宇多高明・桜本 弘 (1989): バリ島のリーフ周りの波, 流れ, 地形変化の観測, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 60-64.
- 土屋義人・A. R. Syamsudin・山下隆男 (1993): バリ島の珊瑚礁海岸の侵食制御について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 466-470.
- 野田英明・橋本 宏 (1981): 漂砂と海岸保全施設, 技報堂, p. 157.
- 山下隆男・西平守孝・土屋義人・スワンディー (1996): サンゴの移植によるバリ島サヌール海岸の保全について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1281-1285.
- Dean, R. G. (2002): Beach Nourishment-Theory and Practice, World Scientific Publishing, p. 397.