

サンゴ洲島の形成・消失機構に関する研究

宇多高明*・小菅 晋**・伊藤弘之***・山崎 順一****

1. ま え が き

近年、地球温暖化に伴う様々な現象が問題となっているが、海岸保全上最も重要な問題は海面上昇であろう。海面上昇は各地の海岸に影響を及ぼすが、中でもリーフ海岸への影響は大きいであろう。なぜなら、そこではリーフ上の浅瀬の存在によって高い消波効果が保たれており、海面の上昇はただちに消波効果の低下をひき起こすからである。こうしたことから、本研究ではリーフ海岸をとり上げ、その中で特にサンゴ洲島を対象として海面上昇による影響評価を試みる。サンゴ洲島とは、サンゴ礁上に形成された標高数m、面積数十m²～数百m²四方の小さな島であり、リーフ礁原上の満潮面よりわずかに高い位置に形成される。そして洲島の構成材料は、サンゴ礁海域に生息する有孔虫の遺骸、サンゴや貝殻のかからである（サンゴ礁地域研究グループ、1990）。ところで、サンゴ洲島の形成については、宇多（1988）がMaldivesの北マレ環礁内における新島の形成について報告した。一方、Stoddart（1963）は、1961年のハリケーンHattieによるBelizeの洲島の消失事例について、Guilcher（1968）はサイクロンによるNew CaledoniaのAin洲島の消失事例について報告した。そこで、本研究ではこうした現地海岸の事例を考慮しつつ、2次元移動床水理模型実験により、まずサンゴ洲島の形成過程について検討し、次いで海面上昇時におけるサンゴ洲島の侵食機構について検討する。

2. サンゴ洲島の形成機構に関する検討

2.1 既応の研究

洲島が形成されるためには、リーフ斜面上のサンゴ塊が波の作用により礁原上にうちあげられる必要がある。この場合の土砂移動の機構は、浅海平坦面上の海浜変形としてモデル化でき、野田（1967）、宇多ほか（1990）が移動床模型実験を行っている。野田の研究は、河口砂州

の形成を断面実験により扱ったものであり、入射波条件の違いにより、浅海平坦面上に堆積型、侵食型、遷移型の3種類の断面形が生じること、および堆積型地形で生じる砂堆の高さが、平坦面上の水深がある値をもつとき最大となることなどを明らかにした。宇多ほか（1990）は、現地のリーフ地形を忠実に再現するため、リーフギャップを有する移動床モデルを用いて、洲島の形成過程を再現した。また、宇多ほか（1989、1990）は、人工リーフの安定性に関する実験を行い、人工リーフが破壊される場合、のり肩の碎石が天端上にうちあげられることを示した。この現象もサンゴ洲島の形成とよく似た現象である。このとき、人工リーフの断面変化は人工リーフ表面上の岸向最大流速と良く対応することは注目される。

2.2 実験方法

サンゴ洲島の形成機構に関する実験は、平面水槽を用いて行った。幅20m、長さ31.7m、高さ1.2mの水槽を幅2mに仕切り、水槽の端部付近に中央粒径0.28mmの砂により図-1に示す移動床リーフ模型を製作した。リーフ模型の平坦面の岸沖方向の長さは4m、高さは40cmとした。リーフ模型の岸端には幅1mの水路を設け、それよりリーフ面上を透過した流れが導波板の外側へ流出できるようにした。リーフの平坦面上より鉛直方向に z 軸を、そしてリーフエッジより岸向きに x 軸を定めたとき、水位は $z=-3\text{cm}\sim 6\text{cm}$ の間で16通り変えた。

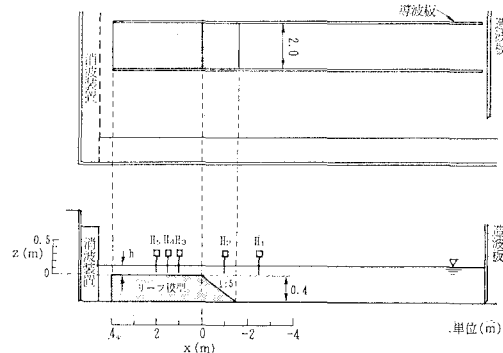


図-1 サンゴ洲島の形成実験時の模型

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
 ** 正会員 東海大学海洋学部土木工学科助教授
 *** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室
 **** 東海大学大学院海洋学部土木工学科

波浪条件は、換算沖波波高が3.2cm、周期が0.8sとし、地形が安定するまで波を作用させた。堀川ほか（1975）が提案した海浜断面変化の分類式に実験条件を代入すると、 $C \approx 5$ が得られることから、実験ではタイプII型の断面形成が予想された。この断面変化では、岸向きまたは沖向きのいずれか一方の漂砂が著しく卓越する条件とはならないため、断面変化にサンゴ礁地形の影響が明瞭に現われると考えられる。実験では、碎波点位置を測定するとともに、波の作用後、海浜地形変化と波高分布を測定した。波高分布は図-1に示す点で測定した。

2.3 実験結果

リーフエッジ付近の海浜断面変化を図-2に示す。 $h=1\text{cm}$ の場合、リーフエッジ付近が侵食され、その岸側に堆砂し、バームが形成された。この場合のバームの頂高は約3cmである。 $h=3\text{cm}$ の場合には越流が生じ、海面下のみ小高い部分が形成された。さらに潮位を上昇させると、地形変化量は大きく減少する。すなわち、リーフ水深が増加するにしたがい、リーフエッジの侵食量は減少し、リーフ上の土砂の堆積量も大きく減少する。次に、図-3に示すようにリーフ上の堆積域のリーフ面上の高さ Z_0 と堆積域の幅 l を定めた。そして Z_0 、 l とリーフの相対水深との関係を図-4に、同じく Z_0/l と相対水深の関係を図-5に示す。また、堆積域の標高が高くなり、水面上に表われてバームとなる場合は、洲島の形成を意味することから、 Z_0 のデータを黒塗で区別した。 Z_0/H_0' は、 $h/H_0' \approx 0.6$ で極大値を示す、この時 l/L_0 もほぼ極大値をとる。図-4では $h/H_0' > 2.0$ のデータがないが、 h/H_0' の増大とともに Z_0/H_0' および l/L_0 が単調に減少していること、また海底面に及ぼす波の作用は波高が一定の場合水深とともに減少するこ

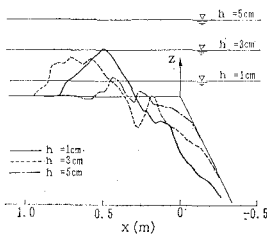


図-2 リーフエッジにおける断面変化

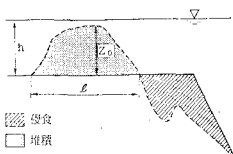


図-3 堆積地形の高さ Z_0 および長さ l の定義図

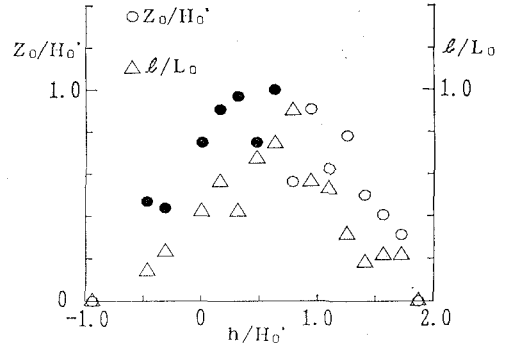


図-4 Z_0/H_0' 、 l/L_0 と相対水深 h/H_0' の関係

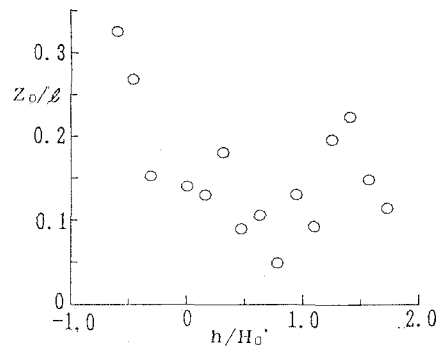


図-5 Z_0/l と相対水深 h/H_0' の関係

とから、リーフエッジより岸側で土砂の堆積が生じるかどうかの限界条件は、ほぼ $h/H_0' < 2$ で与えられると言える。一方、 Z_0/l は Z_0 や l が最大となる $h/H_0' \approx 0.6$ では極小値を示す。図-4, 5によると堆積域が形成される場合、その堆積域の高さおよび幅は h/H_0' に鋭敏に反応するものの、ピーク付近においては、高さに比べ幅のほうがより急激に増加すると言える。また、堆積量が増えると、 Z_0/l が減少することから、堆積域はより平坦になることが分かる。

2.4 考察

実験条件下におけるリーフ上の岸向き最大流速を算定し、 Z_0 、 l が h/H_0' に強く依存した理由について考察する。岸向き最大流速は、岸向漂砂量と密接な関係を有しており、この流速が大きいほど岸向きの土砂移動量が増大するので、地形変化を評価する際のよい指標になると考えられる。まず、平坦面上の波高分布は、津嘉山ら（1989）の式（1）を用いて表わす。

$$\frac{H(x)}{H_0} = B \exp\left(-A \frac{x}{L}\right) + \frac{H_\infty}{H_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

x : リーフエッジからの岸向き距離, $H(x)$: リーフ上の波高, H_0 : 沖波波高, H_∞ : $x = \infty$ における波高, L : リーフ上の波長, A , B , H_∞/H_0 は定数であり, h/H_0

により、式 (2), (3) のように表わされる。

$$A=1.64(h/H_0)^{-0.71} \dots\dots\dots (2)$$

$$H_{\infty}/H_0 = \begin{cases} 0.12 & h/H_0 \leq 0.3 \\ 0.39(h/H_0) & 0.3 < h/H_0 \leq 2.4 \end{cases} \dots\dots (3)$$

リーフ上における波浪の2次元変形については、高山ほか(1977)の提案した実験式がよく用いられているが波浪の伝播距離が波長により無次元化され、水平方向の相似性が保たれていることから、本研究では津嘉山らの式を用いた。また、リーフ斜面上における波高分布に関しては、合田(1975)の碎波変形の近似式を用いた。ただし、本実験のリーフ斜面は1/5勾配であり、合田の碎波変形式の適用範囲より急勾配であるため、算定値と実験値とを比較し、波高分布の算定法の妥当性を示す。モデル①の実験より、 H_3 , H_5 地点の実測波高と計算波高を図-6に、また碎波波高を図-7に、碎波位置の x 座標を図-8に示す。 H_3 , H_5 地点の波高に関しては、波の再生などにより波高がややばらついているが、リーフ相対水深の増加に伴う波高の増大が高精度で再現されている。碎波波高に関しては、水深が大きくなると算定値がいくぶん過小評価されるものの全体的によく合っている。また、水深が大きくなるとリーフ上で碎波が生じるため、碎波位置の再現はできないが、水深が小さくリーフの外縁斜面上で碎波する場合は、比較的良く合っている。リーフ上では、碎波点から急激に波高が減少し、リーフ平坦面上で一定値に漸近する。このため碎波点、碎波波高およびリーフ平坦面上の波高が合えば、波高分布の再現性はかなり高いと言える。

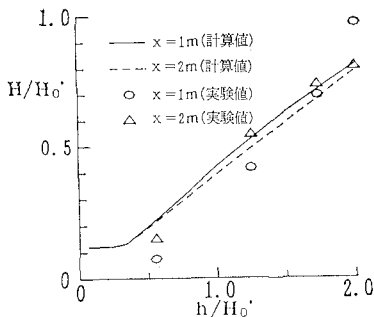


図-6 リーフ上の波高に関する計算値と実験値の比較

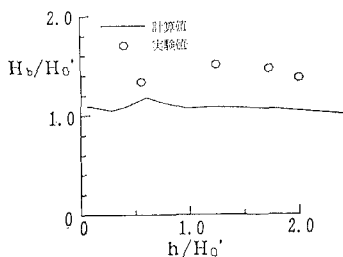


図-7 碎波波高に関する計算値と実験値の比較

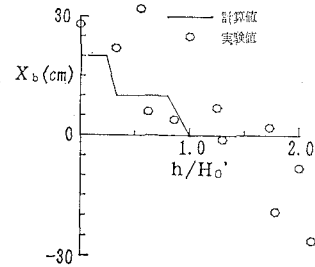


図-8 碎波位置に関する計算値と実験値の比較

リーフ上では波と流れが重合するため、岸向最大流速 $u_{\max}$ を、定常流速と波の底面流速振幅の和とする。定常流速に関しては、式 (4) より求める。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + F - M + R + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \dots\dots (4)$$

ここで、 U : 流速、 F : 摩擦項、 M : 水平拡散項、 R : radiation stress 項、 η : 平均水位である。摩擦項、水平拡散項、および radiation stress 項の与え方に関しては、西村(1982)にしたがった。式 (4) を連続式とともに陽形式差分法を用いて解き、定常状態における流速を求める。また波の底面流速振幅は、微小振幅波理論より求める。得られた岸向最大流速 $u_{\max}$ と、リーフの相対水深の関係を図-9に示す。比較のため、図-9には Z_0 とリーフの相対水深 (h/H_0') の関係を示す。岸向最大流速は $h/H_0' \approx 0.3$ で最大となることが分かる。 Z_0 の極大値は $h/H_0' \approx 0.6$ で生じており、岸向最大流速のピーク位置とはややずれがあるが、土砂の堆積とともにリーフの相対水深が減少することを考えると、両者のピークはかなりよい対応を示すと言える。以上のように、サンゴ洲島の形成には潮位が大きく影響しており、海面上昇は洲島の分布に大きな影響を及ぼすことになる。

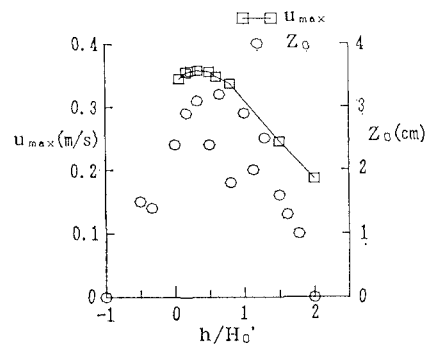


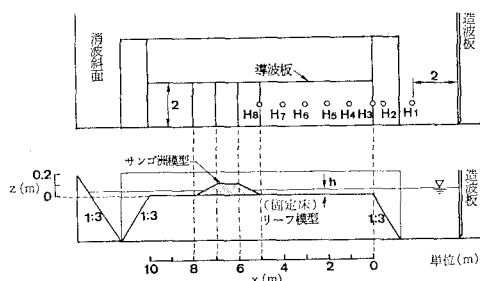
図-9 $u_{\max}$, Z_0 と相対水深 h/H_0' の関係

3. サンゴ洲島の消失機構に関する検討

3.1 実験方法

図-10に示す高さ 0.4 m、幅 10 m、海底勾配 1/3 のコ

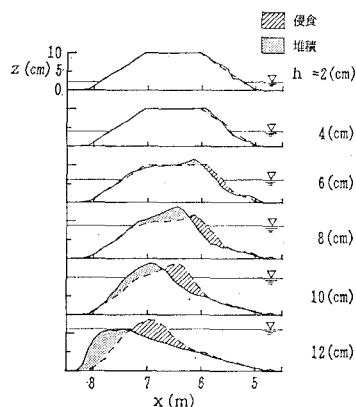
ソクリート製のリーフ模型を製作した。そしてリーフ模型を導波板により2分割し、その片側に中央粒径 0.27 mm の砂より高さ 10 cm, 幅 1 m, 海浜勾配 1/10 の台形断面を有する洲島模型を製作した。そして水位を $z=2\sim 12$ cm の間で 2 cm ごとに上昇させつつ、2時間ずつ波を作用させ、海浜断面形と波高分布を測定した。波高は図示する $H_1\sim H_9$ で測定した。この実験では潮位を変えるたびに初期断面を整形し直すことなく、波を連続的に作用させた。波条件は換算沖波波高 H_0' が 10 cm, 周期 T が 1 s の場合 (実験①) と, H_0' が 8 cm, T が 1.4 s の場合 (実験②) の2通りとした。海浜断面形は沿岸方向に 0.5 m 間隔で並んだ3測線において 10 cm 間隔で測定した。



図—10 サンゴ洲島の消失実験時の模型

3.2 実験結果

実験①, ②とも3測線の断面形はほぼ相似形であった。そこで、測定誤差を除くために平均断面を求めた。また、実験①, ②でよく似た結果が得られたことから、ここでは実験②の結果について示すこととする。実験②の断面形の変化を図—11に示す。まず潮位が低く、遡上波が洲島の斜面を越えない場合は ($h=2, 4$ cm), 洲島斜面上に堆積型海浜が形成される。これは波形勾配の小

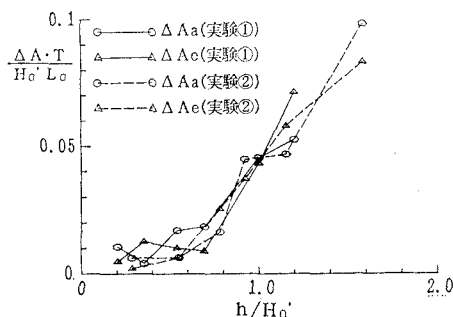


図—11 海面上昇に伴う洲島断面の変化

さい波により生じる海浜断面である。次第に潮位が上昇し、遡上波が洲島の平坦面に達すると ($h=6, 8$ cm), 洲島平坦面上にバームが形成され、波作用前より海浜高が高くなる。さらに潮位が上昇し、洲島上に越流が生じる場合 ($h=10, 12$ cm) は、洲島前面の土砂が洲島を越えて洲島背後の海中に堆積する。洲島前面は削られて緩勾配となり、それに対し洲島背後は、押し流された土砂が堆積して急勾配となる。実験①, ②の沖波波形勾配は、それぞれ 0.06, 0.02 とかなり異なっていたが、沖波波形勾配が断面変化に及ぼす影響は小さかった。リーフ上の波高はリーフ上の水深により規定されるため、波形勾配は $\sqrt{(h/g)}/T$ で近似できる。したがって、リーフ上の波形勾配は実験①, ②で 1.5 倍程度しか変わらないため、波形勾配の影響が小さかったと考えられる。通常、海浜での変形は、沖波波形勾配に強く依存するが、リーフ上の海浜変化には、波のうちあげ高や、越流の影響が大きいことが分かる。

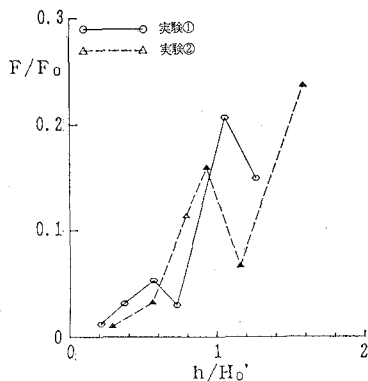
3.3 考察

断面変化量の評価を試みるために、単位時間当たりの堆積・侵食断面積 ΔA_a , ΔA_e と、リーフの相対水深 h/H_0' の関係を図—12に示す。ここに、断面積については H_0' と T を用いて無次元化した。リーフの相対水深の増加に伴って断面積変化量が増加すること、また、 $h/H_0' \approx 0.7$ を境として断面積変化量の増加率が急変することが分かる。



図—12 単位時間あたりの断面変化量と相対水深の関係

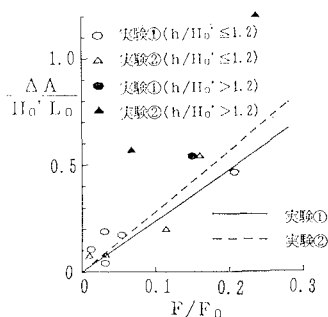
洲島の断面変化は、波の作用によるものであるから、洲島への波のエネルギーフラックスによりその変化が説明されると予想される。そこで、沖波エネルギーフラックス F_0 で無次元化した洲島前面の $x=5$ m における波のエネルギーフラックス F と、リーフ相対水深 h/H_0' の関係を図—13に示す。 $h/H_0' \leq 0.7$ では F/F_0 の変化は小さく、 h/H_0' が 0.7 を越えると急激に増大する。こうした特徴は、図—12の関係とよい対応を示す。 $h/H_0' \approx 0.7$ を境に、エネルギーフラックスが急増するのは、リ



図一13 エネルギーフラックスと相対水深の関係

ーフ上への侵入波高が急激に増加するためと考えられる。また、エネルギーフラックスが $h/H_0' \approx 1.2$ で減少するのは、この条件で越流が生じ、波エネルギーの一部が流れのエネルギーに変換されたためと考えられる。

侵食断面積と波のエネルギーフラックスの関係を図一14に示す。図には、 $h/H_0' \leq 1.2$ の場合の実験結果のみより求めた回帰直線も示してある。 $h/H_0' \leq 1.2$ では、エネルギーフラックスと侵食断面積の相関が高く、波のエネルギーの増加に伴って侵食断面積が増加する。回帰係数は実験①で 4.57×10^{-5} 、実験②で 5.57×10^{-5} であり、両者でかなり近い値となる。越流が生じない場合は、波の仕事量により侵食断面積がほぼ決まることが分かる。また $h/H_0' > 1.2$ の実験結果は、 $h/H_0' \leq 1.2$ の範囲で求めた回帰直線より、かなり上方に位置する。越流が生じると流れによる断面変化が卓越するためこのような結果となる。



図一14 エネルギーフラックスと断面積変化量の関係

越流が生じると、波浪エネルギーと断面変化量の関係が成立しなくなるのに対し、断面変化量とリーフの相対水深は、越流に関係なく高い相関を示す(図一12)。したがって、断面変化量と相対水深の関係から、侵食断面積の算定式を導くことができる。 $h/H_0' \leq 0.7$, $h/H_0' > 0.7$ の2つの領域に分けて、直線で近似すると式(5)となる。

$$\Delta A_e T / (H_0' L_0) = k_1 h / H_0' + k_2 \dots \dots \dots (5)$$

$$k_1 = 2.54 \times 10^{-5}, \quad k_2 = 6.54 \times 10^{-6} \quad (h/H_0' \leq 0.7)$$

$$k_1 = 2.16 \times 10^{-4}, \quad k_2 = -1.27 \times 10^{-4} \quad (h/H_0' > 0.7)$$

さらに、式(5)を断面変化量について解くと、式(6)となる。ただし、沖波波長 L_0 に $gT^2/2\pi$ を代入した。

$$\Delta A_e = gTH_0' \{k_1(h/H_0') + k_2\} / 2\pi \dots \dots \dots (6)$$

式(6)より、断面積変化量が沖波波高・周期に比例すること、また、水深波高比の増加に伴い増加することが分かる。また沖波波高・周期を一定すると、リーフ水深がある値($h=0.7H_0'$)を越えると、リーフ水深の増加に対する侵食断面積の増加率は約10倍となり、侵食が急激に進むことが分かる。

4. 結 論

本研究の成果は以下に要約される。

① 沖波条件を一定として、リーフ上の岸向最大流速を算定したところ、岸向最大流速はリーフ上の相対水深 h/H_0' に対して極大値を持つことが分かった。この水深は、バームが最も発達する水深とほぼ等しいことが示された。

② 水位上昇に伴う洲島の断面変形に関する水理模型実験によると、洲島の断面変形は波のうちあげや越流の発達状況により強く影響された。また、単位時間当りの侵食断面積は、換算沖波波高に対するリーフの相対水深により定まることが見出された。そして単位時間当りの侵食量を予測する式を導いた。これより、リーフ水深がある限界値を越えると、侵食量が急激に増大することを示すことができた。

参 考 文 献

- 宇多高明(1938): モルディブにおける高潮災害の現地調査, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 212-216.
- 宇多高明・谷本修志・坂野 章・高木利光(1990): リーフ上およびリーフギャップにおけるサンゴの移動機構, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 215-219.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友伸(1990): 人工リーフ被覆材の所要重量算定法, 土木研究所資料, 第2893号, p. 48.
- 合田良実(1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, Vol. 14, No. 3, pp. 59-106.
- サンゴ礁地域研究グループ(1990): 熱い自然サンゴ礁の環境誌, 古今書院, p. 372.
- 高山知司・神山 豊・菊地 治(1977): リーフ上の波の変形, 港研資料, No. 278, pp. 1-32.
- 津嘉山正光・仲座栄三・我喜屋邦浩(1989): リーフ上の波の変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 70-74.
- 西村仁嗣(1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 333-337.
- 野田英明(1967): 河口閉塞に関する二, 三の実験, 京大防災研究所年報, 第10号B, pp. 1-11.
- Guilcher, A. (1963): Les eaux dessalees du Golfe de Guinee. Nororis, 15, pp. 133-134.
- Stoddart, D. R. (1963): Effects of Hurricane Hattie on the British Honduras reefs and cays, October 30-31, 1961. ARB, 95, 142 p.
- Stoddart, D. R. (1964): Catastrophic storm effects on the British Honduras reefs and cays, Nature, 1964, pp. 512-515.