

# 津波氾濫流れによる植生の揺動とその流体力特性

今井健太郎\*・松 富 英 夫\*\*・高 橋 智 幸\*\*\*

津波氾濫流による、植生に作用する流体力とその揺動の特性の理解を目的としている。作用流体力は植生に取り付けた分力計により直接測定を行った。本実験の条件下では、作用流体力は枝葉の有無でその特性を変化させ、枝葉の有る植生の場合、水平流体力は枝葉無しの場合の 3～4 倍程度となり、鉛直流体力は非・準定常区間において、正負を変化させることを確認した。植生の揺動は氾濫流からの外力による強制振動であり、浸水深や流速の卓越振動周波数に対応する傾向にあった。植生群となると相互の干渉のためか、その傾向はより顕著なものとなる。

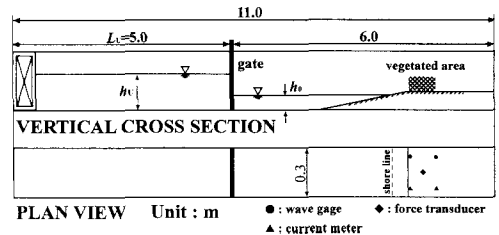
## 1. はじめに

日本は有数の津波被災国であり、常に津波災害から人命や財産保護等の対策を検討する必要がある。津波防波堤など、経済的に負担の大きいハードによる津波からの完全な防御は現実的ではない。地域環境への配慮や、被災時の避難行動への時間稼ぎ、そして遡上後の津波エネルギー減衰という点から見ると沿岸植生は複合的な防災対策として有効であり、また、その有効性は活発に言及されてきている (例えば、原田ら, 2003)。

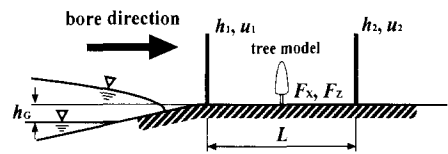
一方、沿岸樹木を含め、植生による津波からの減災効果を議論するためには、詳細な作用流体力や倒伏・損壊限界を知る必要がある。津波からの植生の抵抗力は、剛体に適用される Morison 式 (Morison ら, 1950) による流体力からの反作用だけでなく、植生の揺動による造波抵抗や混合抵抗を検討する必要があると考えられる。また、その抵抗を正確に評価することは施工効率や正確な減災率評価を行う際に必要と考えられる。しかし、植生の変形や流れによる植生揺動に起因した流体抵抗を扱った研究は少ない (例えば、石川ら, 1987; 中川ら, 1995)。既報の研究 (今井ら, 2003) では揺動による抵抗を簡易的に造波抵抗に結びつけて考察を行ったが、より定量的な議論が必要である。そこで、本研究の目的は氾濫流による流体力を分力計を用いて直接測定を行い、その流体力特性を把握し、植生の揺動特性を実験的手法により検討していく。

## 2. 実 験

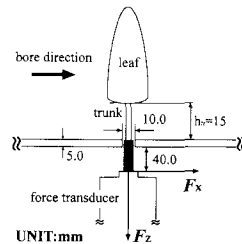
津波氾濫流はゲート急開流れで模擬した。実験装置の概略を図一に示す。水理実験には貯水部 (水深  $h_v$ ) が 5 m、一様水深部 (水深  $h_0$ )、一様勾配斜面部 (勾配  $S=1/26$ ) が 2 m、一様勾配斜面部に接続された単純な平坦陸上部が 2.0 m、全長が 11 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路を用いた。氾濫流は水路下端を自由に越流することが



図一 実験水路の概略



図二 計測機器の配置と諸記号の定義



図三 4分力計配置の詳細図

できる。図二は計測項目についての諸記号の定義を示す。 $h_0$ は地盤高、 $h_1$ 、 $h_2$ は各々海側・陸側の浸水深、 $u_1$ 、 $u_2$ は各々海側・陸側の流速である。浸水深の測定は容量式波高計 (KENEK 社製) を用い、線形性確保のために深さ 10 cm のプールを設け、その中に据えた。陸上氾濫流速の測定は直径 3 mm のプロベラ流速計 (中村製作所製) を用いた。検査領域の中央には 4 分力計 (SSK 社製: 定格容量 4.9 N (0.5 kgf), 定格容量の 1/2000 までの精度を保証) を据えて植生に作用する流体力を直接測定した。 $F_x$ は水平方向 (流れ方向を正) の流体力、 $F_z$ は鉛直方向 (鉛直下向きを正) の流体力である。 $F_y$  (流れに横断方向) と  $M_y$  (流れ方向の転倒モーメント) については、

\* 学生会員 修(工) 秋田大学大学院工学資源学研究所

\*\* 正会員 工 博 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科

\*\*\* 正会員 博(工) 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科

本研究では検討の対象外とした。図-3は4分力計配置の詳細図である。植生模型と分力計の接続にはニッケル製の長ナット(全長3cm)を用いた。ただし、樹幹部のみの場合、本実験では $F_z/F_x < 0.1$ となり、おおむね浮力に対応しているものと判断し検討の対象外とした。故に、 $F_z$ については枝葉有りの場合について検討した。各測定値の取り扱いについて、浸水深、流速には500 Hz、4分力計には20 Hzのローパスフィルターを使用した。

陸上部に配置された模擬植生について、植生樹幹部は樹幹直径 $d=4.0$  mmの硬質ウレタンゴムを用い、枝葉部については $h_{tr}=1.5$  cm、空隙率 $\lambda$ ( $1-\text{実質体積}/\text{包絡体積}$ ) $=0.96$ 程度の消波マットを用いて模している。樹幹部の材質については、各種流体力のうち、抗力が支配的となるとして導いた樹幹部相似則(松富ら, 2004)に基づいた材質の選択を行っている。樹幹部相似則は次式となる。

$$\left(\frac{Ed^3\delta}{\rho u^2 h^4}\right)_p = \left(\frac{Ed^3\delta}{\rho u^2 h^4}\right)_m$$

ここで、 $E$ は弾性係数、 $d$ は直径、 $\rho$ は水の密度、 $u$ は流速、 $h$ は浸水深、 $\delta$ は植生の撓み量、下添え字 $p$ と $m$ は各々原型と模型を示す。本実験で用いたウレタンゴムの弾性係数は $E=49$  MPa(500 kgf/cm<sup>2</sup>)程度である。枝葉部の相似に関しては幾何学的な相似(主として空隙率と樹冠幅)より材質の選択を行った。

表-1に実験条件を示す。ここで、 $N$ は植生本数を示している。植生配置は、測定区間の中央を中心とし、流れ方向の植生間隔 $L_i=10$  cmとなるように千鳥格子に設置した。枝葉の無い場合、本実験条件では流れ方向に対する植生間隔と植生直径の比は $L_i/d=25$ となり、植生からの後流による干渉は小さいものと考えられる。

### 3. 結果と考察

#### (1) 流況

図-4は樹幹部のみ、 $N=5$ 、 $\Delta H/h_0=0.50$ (Stoker, 1948)での各計測値の経時変化例である。波形から、氾濫初期の非定常部分とその後続く準定常部分で構成されることが判る。ここで、水面勾配の急な氾濫初期である非定常区間をSTATE-1、水面勾配が穏やかな準定常的な区間をSTATE-2と定義する。

図-5は、STATE-2における浸水深比 $h_1/h_2$ と入射波の強さ $\Delta H/h_0$ の関係を示す。図から、枝葉の無い場合では $\Delta H/h_0$ によらずその比はほぼ一定となるが、枝葉が有る場合では $\Delta H/h_0$ の増加に伴い大きくなる。後者は枝葉による投影面積の増加や、枝葉部と流体の接触面積の増加に伴った摩擦抵抗の増大による堰上げが生じた結果と考えられる。STATE-1においても堰上げは生じ、作用流体力に影響を及ぼす。また、植生本数の増加に伴い

表-1 実験条件

|            |                                               |
|------------|-----------------------------------------------|
| $h_U$ (cm) | 11, 12, 13, 14, 15, 16                        |
| $h_0$ (cm) | 6.67                                          |
| $h_c$ (cm) | 1.5                                           |
| $S$        | 1/26                                          |
| $L$ (cm)   | 50                                            |
| $N$        | 50                                            |
| Pattern    | Staggered                                     |
| $d$ (mm)   | 4.0                                           |
| Leaves     | trunk only or $h_{tr}=1.5$ cm, $\lambda=0.96$ |

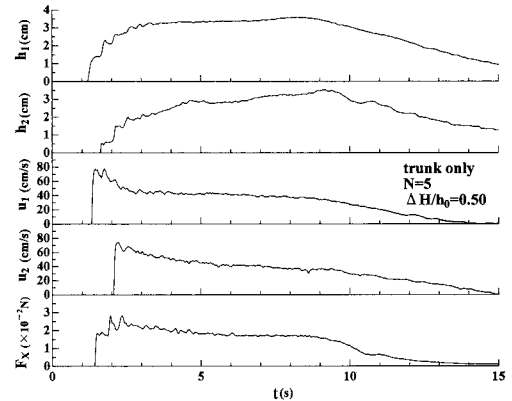


図-4 各測定値の経時変化例

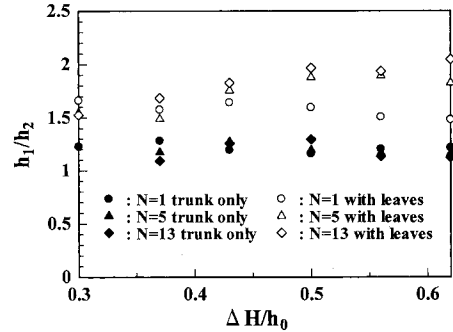


図-5  $h_1/h_2$ と $\Delta H/h_0$ の関係

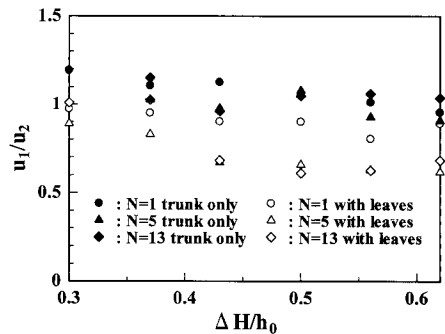
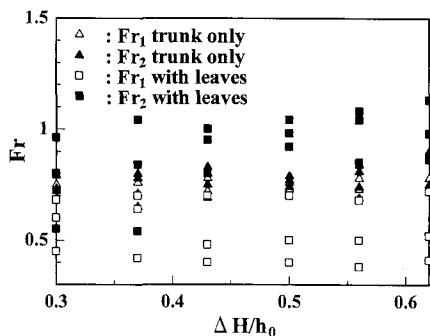


図-6  $u_1/u_2$ と $\Delta H/h_0$ の関係

図-7 フルード数と  $\Delta H/h_0$  の関係

その比は増加傾向にある。これらの  $h_1/h_2$  の傾向は、地形モデルは異なるが、既報の結果(松富ら, 2001)と一致するものである。

図-6 は STATE-2 における流速比  $u_1/u_2$  と  $\Delta H/h_0$  の関係である。流速比について、その大きさは異なるが、枝葉の有無に関わらず  $\Delta H/h_0$  と  $N$  の増加に伴って減少していく傾向がある。その度合いは枝葉有りの方が顕著である。これは、 $\Delta H/h_0$  の増加に伴った浸水深の増加による氾濫流と植生の接触面積の増加や、枝葉部からの後流による流速欠損のためと考えられる。 $h_1/h_2$  と  $u_1/u_2$  の結果は一見矛盾するものである。しかし、 $N$  の増加に伴い反射の影響で流入流量が減少していくゆえ、このような結果となる。

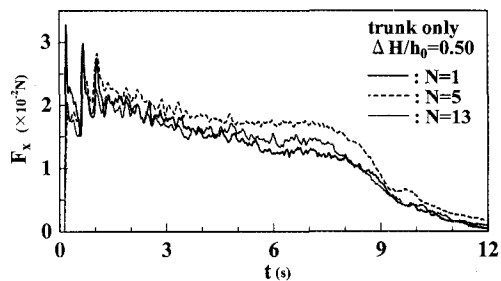
本実験で用いた枝葉を換算直径(今井ら, 2003)で取り扱った場合、おおむね樹幹直径の 1.5~3 倍程度となるが、それにしては氾濫流に及ぼす影響は大きい。換算直径を用いる場合、植生の体積は保存されるが、流体との接触表面積は保存されない。本研究では、枝葉の投影面積の評価方法までは至っていないが、従来の方法を踏まえ、枝葉部の表面積、枝葉と流体粘性の関係、そして枝葉による乱流渦の発生を考慮に入れた投影面積評価モデルを検討する必要がある。

図-7 には STATE-2 における海側・陸側のフルード数  $Fr$  と  $\Delta H/h_0$  の関係を示してある。枝葉の有無に関わらず、海側よりも陸側の方が射流に近い状態となる。枝葉の無い場合、海側・陸側での  $Fr$  の変化は枝葉の有る場合に比べて小さく、 $\Delta H/h_0$  への依存性は低い。一方、枝葉の有る場合では  $\Delta H/h_0$  への依存性が確認でき、 $\Delta H/h_0$  が大きくなれば  $Fr$  は海側・陸側ともに大きくなる。これは、同じ  $N$  の場合では  $\Delta H/h_0$  の増加に伴い氾濫流量は増加することと枝葉部による堰上げの効果によるものと考えられる。

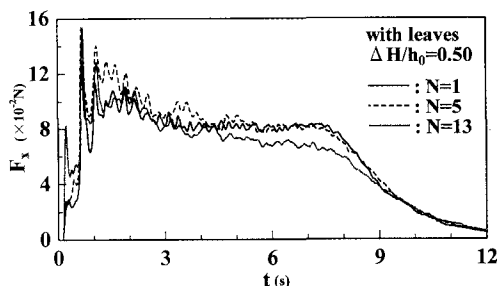
## (2) 作用流体力

### a) 水平流体力 $F_x$

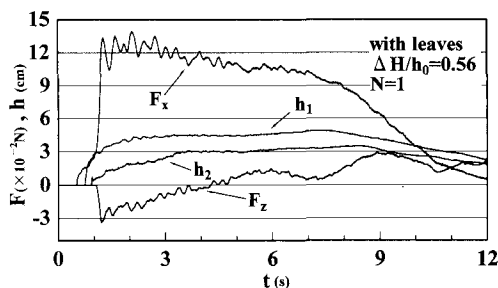
図-8(a), (b) に  $F_x$  の経時変化例を示す。(a) は枝葉



(a) 枝葉無し



(b) 枝葉有り

図-8  $F_x$  の経時変化例図-9  $F_z$  の経時変化例

無しの場合、(b) は枝葉有りの場合で、両図共に  $\Delta H/h_0 = 0.50$  の場合である。枝葉無しの場合、 $N$  の違いによる  $F_x$  の顕著な違いは見られないが、準定常部分にはな力の振動が生じている。この振動、すなわち植生の揺動が造波抵抗や流体混合作用に関係すると考えられる。この揺動振幅の絶対値は最大水平流体力の 1 割程度となり、既報の解析(今井ら, 2003)に比べると小さいものとなった。

枝葉が有る場合、本実験条件では  $F_x$  は投影面積の増加や摩擦の影響で、枝葉の無い場合の 3~4 倍程度となる。枝葉無しに比べ、枝葉有りでは  $N$  により STATE-1 での違いが大きく生じている。これは氾濫流が中央部の植生に到達するときには前列の植生の影響を強く受け堰上げが生じた結果、浸水深が大きくなっているためと考えられる。また、STATE-1 では  $N=1$  に比べ  $N=13$  の

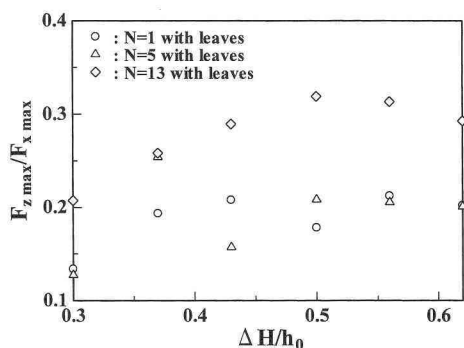
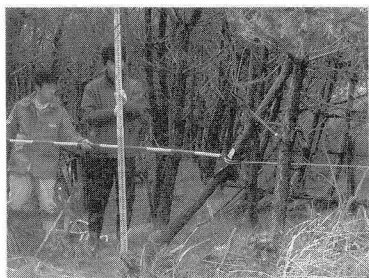
図-10 最大流体力比の  $\Delta H/h_0$  への依存

写真-1 沿岸樹木損壊・倒伏試験風景（対象：黒松，場所：秋田県南秋田郡天王町）

方が若干小さくなる結果となった。これは、枝葉による投影面積の増加に伴い、植生背後に生ずる後流の影響が枝葉無しに比べ無視できなくなっていることを示している。逆に、 $N=5$  においては  $F_x$  は若干大きくなっているが、これは前列の植生間を氾濫流が通過する時、縮流時に生じるような流速の速まりによる結果と考えられる。

#### b) 鉛直流体力 $F_z$

図-9 に、 $F_z$  の経時変化例を示す。ただし、浸水深と  $F_x$  の対応を見るために図中に併記してある。STATE-1 では、サージ・フロントの水面勾配やそれによる上昇流のためか、 $F_z$  は鉛直上向きに作用し、これは STATE-2 における浸水深から算出した浮力の 3 倍程度である。しかし、STATE-2 では、実際には浮力方向には作用せず、鉛直下向きに作用する。これは、氾濫流によって植生が流れ方向に攪み、作用流体力の合力の向きが下向きになった結果と考えられる。このような点から考えると、対象とする津波の流勢や浸水深にもよるが、枝葉を多くつける樹種では、根抜けの危険性があるのは、氾濫初期段階であるといえる。

図-10 に最大流体力比  $F_{zmax}/F_{xmax}$  の  $\Delta H/h_0$  への依存を示す。図-8(b) に示すとおり、 $F_{xmax}$  は植生の本数にあまり依存性が認められないのに対し、 $F_{zmax}$  は依存が認めらる。これは前列植生による堰上げにより

STATE-1 での水面勾配が大きくなり、その結果、単独のものよりも複数本の場合で  $F_{zmax}$  が大きくなったものと考えられる。

参考程度に、胸高直径 8 cm、樹高 5.7 m の沿岸植生である黒松を対象とした損壊・倒伏試験（写真-1）によると、根折れを軽度の損壊とした場合、水平加重 3.1 kN (320 kgf) でそれに達し、その時の  $F_{zmax}/F_{xmax}$  は 0.4 程度であった。実測の詳細は後日改めて報告する予定である。

#### (3) スペクトル解析

本研究では、植生の揺動や植生群による相互干渉を検証するために、MEM によるスペクトル解析（日野, 1977）を行った。ただし、解析対象区間は  $F_x$  の立ち上がりを  $t=0$  として、波状段波先端部の分裂による振動が含まれた氾濫初期は除いた準定常状態となる  $t=2\sim 8$  s を対象とした。トレンドの除去には、移動平均を採用し低域フィルターを用いた。移動平均と低域フィルターの関係は次式で近似される。

$$f_c = 0.443 \cdot \frac{1}{\Delta t \cdot M}$$

ここで、 $f_c$  は遮蔽周波数、 $\Delta t$  は時間間隔、 $M$  は移動平均点数である。本解析では  $\Delta t = 0.01$  s、 $M = 100$  とし、遮蔽周波数は 0.44 Hz 程度である。解析データは上式で高周波成分を除去した波形を基の波形から差し引いたものを用いている。

図-11(a), (b) は枝葉有りの各測定値におけるスペクトル解析結果の一例である。両図より、 $F_x$  の卓越振動周波数は 3 Hz～4 Hz の間で生じていることが判る。これは、本実験に用いた硬質ウレタンゴムの第 1 次固有振動数である 27 Hz よりずいぶん小さいものである。このことは、氾濫流による強制振動であることを示している。多少のずれはあるが、浸水深と流速の卓越振動周波数は  $F_x$  のものに対応している。 $N$  が増加すると、植生相互の干渉によって振動を強め合うためか、水深や流速の卓越振動周波数は  $F_x$  のそれに強い対応を示すものとなった。このケースの場合、海側、陸側ともに  $F_r = 0.6$  程度であり、植生の揺動が流速や浸水深に影響を与え得る。このことから、本実験条件下では、植生の揺動により、造波抵抗や混合抵抗が少なくとも検査領域内に影響を及ぼし得ることを示唆している。

図-12 は単独植生と植生群における  $F_x$  のスペクトルである。ここでも、枝葉の有無に関わらず、卓越振動数はほぼ一致していることが判る。このことから、氾濫流からの強制振動により、植生の揺動が生じている事が判る。

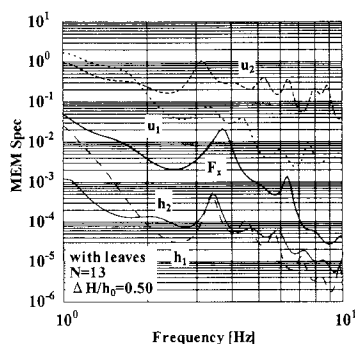
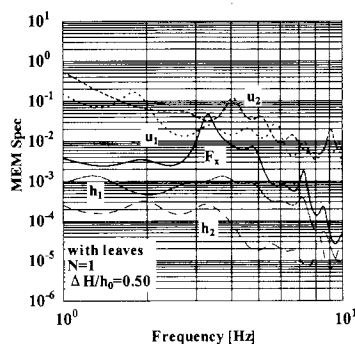
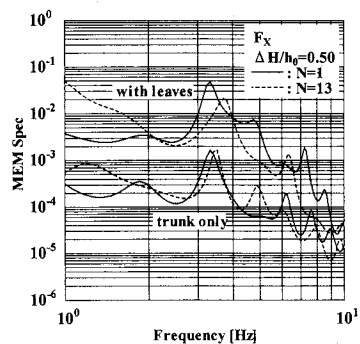
(a) 枝葉有り  $N=1$ (b) 枝葉有り  $N=13$ 

図-11 各測定値におけるスペクトル解析結果

図-12  $F_x$  のスペクトル解析結果例

#### 4. ま と め

- ①  $h_1/h_2$  は枝葉の無い場合では、 $\Delta H/h_0$  によらずその比はほぼ一定となるが、枝葉が有る場合では  $\Delta H/h_0$  の増加に伴い大きくなる。
- ②  $u_1/u_2$  について、その大きさは異なるが、枝葉の有無に関わらず  $\Delta H/h_0$  の増加に伴って減少していく傾向がある。
- ③ 氾濫流により、植生に作用する流体力には振動が生じる。枝葉が有る場合、本実験条件では植生に作用する流体力は投影面積の増加や摩擦の影響で、枝葉の無い場合に比べ、3～4倍程度となる。
- ④ 鉛直方向の作用流体力は、流勢にもよるが STATE-1 と STATE-2 では異なった作用方向となり、それぞれ上向き、下向きとなる。
- ⑤ 枝葉有無や単独・群に関わらず、植生の卓越振動周波数は氾濫流による強制振動である。植生群となると、揺動は植生相互で強め合うためか、 $F_x$  の卓越振動周波数と浸水深や流速のそれは強い対応を示す。

以上の結果を踏まえ、植生の流体力係数や、枝葉の投影面積の取り扱い、そして揺動による抵抗の定量的な評価について検討していく予定である。

**謝辞：**本実験の遂行に当たり、本学平成15年度卒研生諸君の助力を得た。また、平成15年度文科省振興調整費(代表：京大教授 河田恵照)の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 石川忠晴・田中昌宏 (1987): 開水路流中のかん木の抵抗特性に関する研究, 第31回水理講演会論文集, pp. 329-333.
- 今井健太郎・松富英夫・高橋智幸 (2003): 津波氾濫流の植生に作用する各種流体力, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 276-280.
- 中川博次・辻本哲郎・北村忠紀・藤井康嗣 (1995): 流れによって変形する植生粗度の抵抗則, 水工学論文集, 第39巻, pp. 465-470.
- 原田賢治・今村文彦 (2003): 防潮林による津波減衰効果の評価と減災の為の利用の可能性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 341-345.
- 日野幹雄著 (1977): スペクトル解析, 朝倉書店, pp. 210-223.
- 松富英夫・大沼康太郎・今井健太郎 (2004): 植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 301-305.
- 松富英夫・穂積拓哉・今井健太郎 (2001): 砂嘴植生域を越える津波の基礎水理, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 316-320.
- Morison, J.R., M. P. O'Brien, J. W. Johnson and S. A. Schaaf (1950): The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Transaction, AIME, Vol. 189, pp. 149-154.
- Stoker, J. J. (1948): The formation of breakers and bores, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 1, pp. 1-87.