

海底地盤の隆起と沈降にともなう水面応答とその特性について

松 山 昌 史*・田 中 寛 好**

1. はじめに

津波の主な原因は地震による海底地盤の変動である。現在、地震に関する情報から海底地盤の変動を予測し、その海底地盤の変動と全く同じ水面変動が起こるものと想定して初期水位条件を設定し、津波を計算するのが一般的である。しかし、この方法で初期条件を設定して計算した津波の遡上高が調査された実際の遡上高と合わないことがある。これは、断層パラメータや地盤変動量の評価に問題があることも考えられるが、海底地盤変動と同一の初期水位変動を与えることも沿岸部での津波の予測値と実測値とが大きく異なる一因があるのではないかと考えられる。

海底地盤の変動に対する海水面応答に関する実験的研究には、発生及び伝播について平面水槽を用いて実験を行った高橋ら(1962)のもの、断面二次元水路の底部の一部を瞬間的に上昇・沈下させた実験を行った Ham-mack (1973) のものがある。いずれの実験も海底地盤の隆起または沈降どちらか一方のみを再現したものである。

本研究は、海底地盤の変動によって引き起こされる海水面変動のメカニズムを解明して津波の初期水位の評価精度の向上を狙ったものである。前報(松山ら, 1995)では地盤変動速度のみをパラメータとした実験について報告したが、本報告では水理実験装置を改良し、海底地盤の変位・速度、地盤変動水深などを变化させた場合の海水面の応答特性を詳細に測定した。また、発生した初期水位分布の伝播特性について Boussinesq 方程式を用いた数値計算を行い、その指向性について検討した。

2. 水理実験

2.1 実験装置

地震を発生させる断層の形状は一般的に長方形としてモデル化され、それによる地盤の変位分布もその形状を反映した分布となる。本実験は、長方形断層を短軸方向に2等分する断面を念頭に置いたものである。水路は、

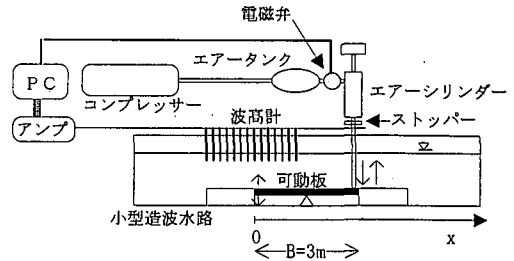


図-1 実験装置の概要

長さ 20 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.55 m であり、実験の縮尺は 1/10000 を想定した。図-1 に示すように、水路の中央部分に長さ 3 m, 幅 0.3 m の鋼製の板(以下、可動板とする)を沈め、その中心を水底から約 7 cm の高さにあるヒンジに接続した。さらに、その右端を鋼製の棒でエアシリンダーに接続し、そこにコンプレッサーによって圧力を急激にかけることにより、板を変位させて水面変動を発生させた。

可動板の変位速度 V はエアシリンダーに送り込む空気圧を調節することによって変えることができる。可動板端部の変位量(以下、ストローク)は、エアシリンダーに接続してあるストッパーの位置を移動させて変化させた。

2.2 実験条件

実験(縮尺 1/10000)での海底地盤を模擬した可動板の幅(B)が 3 m, 可動板上の水深は 12 cm~22 cm であり、実規模では断層幅 30 km, 水深は 1200 m~2200 m に相当する。地盤変位量は、最大となる可動板の端部で水深の 1/15~1/2 であり、実際の地震時の地盤変動水深の(1/100 オーダー以下)に比べるとかなり誇張した大きさを想定している。これは水面の応答特性を明確に把握するためである。表-1 に各実験条件での可動板端部の変位速度を示す。表中にはそれぞれの実規模における値を括弧に示した。地盤の変動速度は 9 m/s~24 m/s となるため、数 m 程度の地盤変位が 1~2 秒で生ずる通常の地震の 5 倍程度と割合に近いが、変位量を 50~100 倍程度と誇張しているために、変動時間も 15 秒から 100 秒程度と実際の 10 倍以上も長い時間となっている。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

表一 実験での可動板変位速度 (括弧内は実規模での速度)

Pres. stroke	隆起				沈降			
	約 6 cm		約 2 cm		約 6 cm		約 2 cm	
2 kgf/cm ²	17 cm/s(17 m/s)		9 cm/s(9 m/s)		17 cm/s(17 m/s)		8.1 cm/s(8.1 m/s)	
8 kgf/cm ²	24 cm/s(24 m/s)		13 cm/s(13 m/s)		23 cm/s(23 m/s)		13 cm/s(13 m/s)	
水深(cm)	22 cm	12 cm	22 cm	12 cm	22 cm	12 cm	22 cm	12 cm

この影響区間は可動板の変位量や変位速度によらず、一定であった。

第二段階は、水面上昇後に、可動板端部直上の水面変動が停止状態になる $t=0.25\sim0.6$ 秒の期間である。勿論、この期間中では可動板の動きはほとんどない。この段階は、自由表面の変化はほとんど無いものの、

可動板の変動により強制的に起こされた水位変動が自由波動として伝播する状態になるまでの流体内部の運動量調整期間であると推測される。つまり、この段階では、第一段階での可動板の変動によって生じた流体内部の流速分布が自由波として伝播する波動の流速分布に変化する遷移過程であると推測することができる。

第三段階は、初期水位変動が波動として伝播する過程である。可動板左端 ($x=0$ cm) 付近では水面全体が再び下降しはじめ、そこから波動が伝播した。

(b) 初期水位の伝播特性

図-4 に可動板端部から外側へ 100 cm 離れた地点 ($x=-100$ cm)、可動板端部 ($x=0$ cm)、可動板中央部 ($x=150$ cm) での水位変動を示す。板の左端で発生した押波が中央部 ($x/B=0.5$) を $t=0.6$ 秒 $\sim$ 2.0 秒にかけて通過していく。また、可動端から外側 ($x=-100$ cm) の水位変動は中央部 ($x=150$ cm) ほど大きくならない。このように発生した初期水面変動は、主に x の正の方向へ伝播し、 x の負の方向へはあまり伝播していく様子はみられなかった。伝播が非対称となる原因は明らかではないが、可動板が移動開始後から第二段階終了時まで、 x

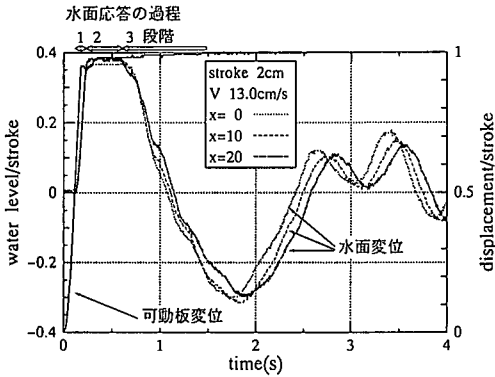


図-2 可動板端部での水面応答 (隆起)

2.3 実験結果

2.3.1 水面応答とその直後の水位変化の伝播

(1) 海底地盤隆起領域の現象

(a) 水面応答の3過程

空間分布の測定間隔は 10 cm であり、 x 軸は図-1 に示すように可動板の左端を 0 として、右方向を正とする。図-2 に水深 22 cm、ストローク 2 cm、可動板変位速度 13 cm/s での板の左端付近 ($x=0, 10, 20$ cm) の可動板端部の変位と水面変位応答 (水面変位/ストローク) を、図-3 に水面変位の空間分布の時間変化 ($t=0.13\sim0.92$ 秒) を示す。時間は可動板の移動開始時間を 0 とする。水面の応答過程は以下の3段階に分けることができる。

第一段階は、可動板の変位開始とともに水面が上昇し始めてから変位が終了するまでの、 $t=0.13\sim0.25$ 秒までの期間である。可動板の変位速度よりは遅いが水面は追従して変化している。 $t=0.25$ 秒での水位空間分布を初期水位分布と考えると、可動板の動きが初期水位分布に及ぼす影響は $x/B=-0.33\sim0.3$ の区間であった。

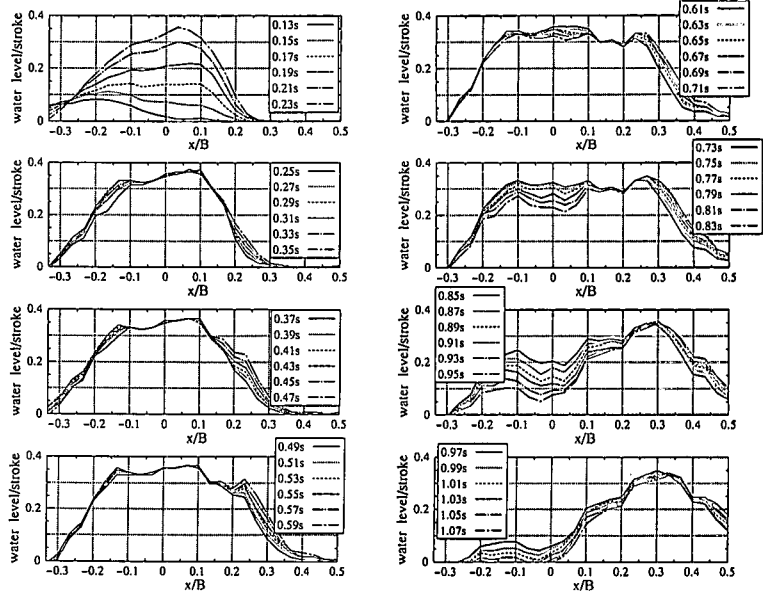


図-3 隆起での空間波形の時間変化 (ストローク 2 cm, 速度 23 cm/s)

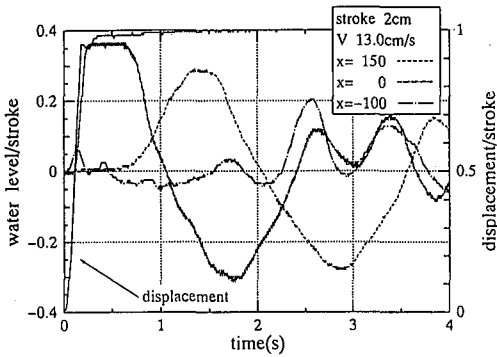


図-4 可動端中央部, 端部, 外部の水面応答 (隆起)

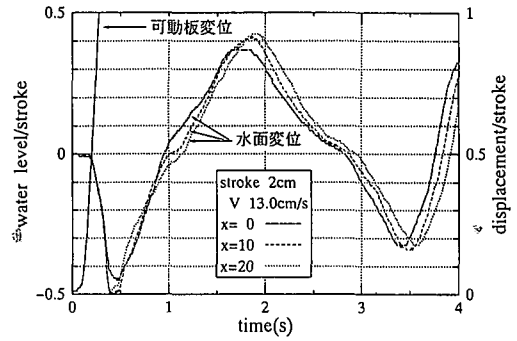


図-6 可動端端部付近の水面応答 (沈降)

の正方向への内部流速が形成されるために, 水面変動の伝播方向がその方向へ規定される可能性も考えられる。

可動板移動後の波動の伝播を再現し, 発生した波動の指向性に関わる要因を探るために, 初期水位分布と流速分布をパラメータとして断面波動伝播計算を行った。基礎方程式は次元の Boussinesq 方程式を用い, Nwogu (1993) に方法に基づいて数値計算を行った。

初期水位として図-3の $t=0.6$ 秒での水位を与え, 初期流速分布はすべての計算領域で0としたケースと線形近似に基づく関係式 ($M = \sqrt{gh} \cdot \eta$) による流速を与えたケースについて計算した。ここに, η : 水面変動, M : x 方向の線流量, h : 水深, g : 重力加速度である。結果を図-5に示す。流速を0としたケースでは初期水位が2つに分離して2方向へ伝播した。それに対して流速を与

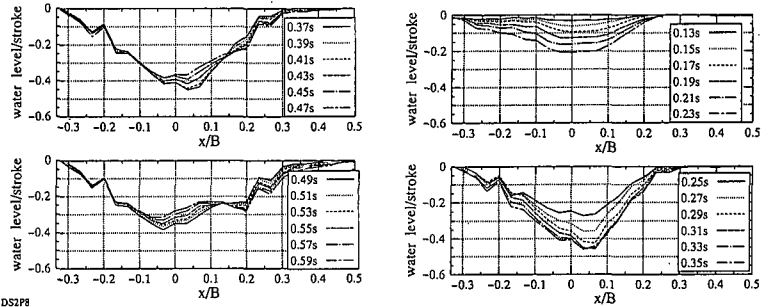


図-7 沈降での空間波形の時間変化 (ストローク 2 cm, 速度 13 cm/s)

えたケースでは x の正方向へ伝播する大きな波動が見られ, 負の方向へ伝播する波動は小さいものであった。この結果から, 初期水位の伝播方向が規定される原因についての上記の推論が正しい可能性が示された。

(c) 伝播に伴う発生波の周期の変化

可動板左端 ($x=0$ cm) と可動板の中央部 ($x=150$ cm) での水位変動から各周波数ごとのパワースペクトルをFFTにより計算したところ, 発生地点 ($x=0$) でのピーク周期は2.5秒であり, 中央部 ($x=150$) でのピーク周期は3.3秒であった。このように発生した第一波の周期は水面変動の発生した地点から離れるに従って長くなることが認められた。これは, 左端では可動板の動きに水粒子が強制的に追従させられる状態で初期水位変動が生ずるが, 中央部では, 波動内部の運動量の調整がほぼ終わって, 自由長波としての性質を持つてくるためである。

(2) 海底地盤沈降領域の現象

(a) 水面応答の過程

図-6に水深 22 cm, ストローク 2 cm, 可動板変位速度 (V) 13 cm/s での板の左端付近 ($x=0, 10, 20$ cm) の可動板端部の変位と水面応答 (水面変位/ストローク) を, 図-7に水面変位空間分布の時間変化を示す。水面応答効率は隆起に比べると15%程度大きく50%に達する。

沈降では, 隆起の場合にみられた自由表面の変化がほ

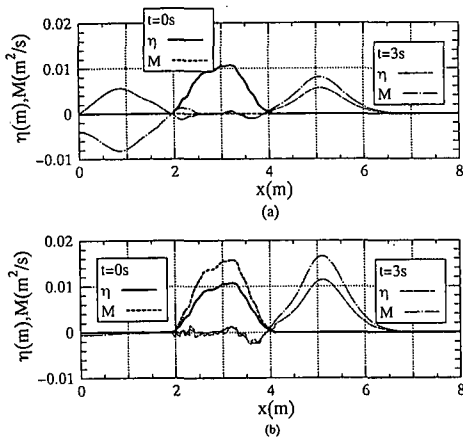


図-5 初期流速分布の違いによる波動の伝播の比較 ((a) すべて0, (b) 線形近似)

とんど無い第二段階が現われない。すなわち、第一段階として地盤板の変動に伴って $t=0.13\sim0.32$ 秒の間に水面は可動板に追従して急激に低下し、低下終了直後に水面は上昇を始め、波動を放射していく。

(b) 初期水位の伝播特性

図-7より、隆起のケースと同じように、水位変化の波動としての伝播には x 軸の正方向への指向性が見られた。この原因は隆起域と同じ現象と考えられる。

2.3.2 地盤の変位速度の異なるケースの比較

(1) 隆起に伴う水面応答

水深 22 cm の条件下で、速度 9 cm/s と 13 cm/s で可動板を端部で 2 cm 変位させた場合、板の左端付近 ($x=10$, cm) の水面変位の時間的変化を図-8に示す。時間は、各ケースでの板の変位した時間 (T_{rs}) で無次元化した。 $V=13.0$ cm/s での水面応答効率が 40% と $V=9.0$ cm/s の 37% に比べて大きい。このように地盤変位速度の速い方が水面応答効率は大きくなる。また、水面変動の始まりからピークに達する時間、すなわち初期水面形が形成される時間は地盤変動時間の約 8 割であり、地盤が変位する時間に応じたものになる。図-9に可動板左端付近 ($x/B=-0.33\sim0.33$) の水面応答効率の分布を示す。水面応答効率は可動板速度 13 cm/s のケースが

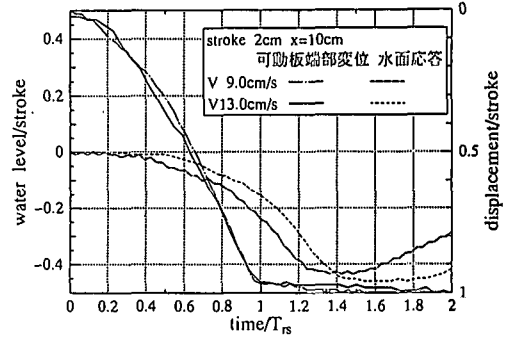


図-10 変位速度の違いによる可動板左端付近の水面応答 (沈降)

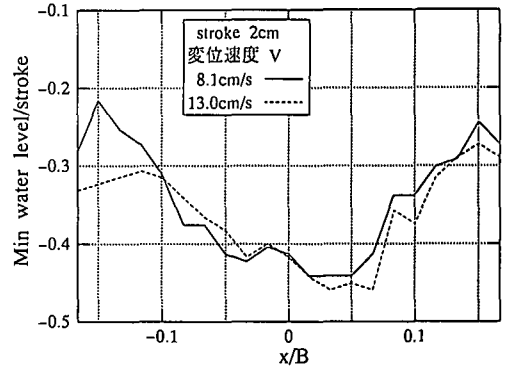


図-11 変位速度の違いによる可動板左端付近の水面応答効率 (沈降)

若干高く約 40%、9.0 cm/s のケースで約 37% である。

(2) 沈降に伴う水面応答

水深 22 cm の条件下で、速度 8.1 cm/s および 13 cm/s で可動板を 2 cm 変位させた場合、可動板の左端付近 ($x=0, 10, 20$ cm) の水面応答の時間的変化を図-10に示す。水面応答効率は可動板変位速度の大きい方が若干大きい、隆起のケースほどの違いはみられなかった。

図-11に水面応答効率の最大値の分布を可動板変位速度 13 cm/s と 8.1 cm/s について比較した。変位速度の大きい方が応答性は若干高いものの、顕著な違いはみられず、隆起のケースと比較して沈降では可動板変位速度の影響が小さいことが明らかになった。水面が重力方向に強制的に変位させられる方が逆方向に変位させられる場合より水面応答への影響が小さいと考えられる。

2.3.3 地盤変位量の異なるケースの比較

(1) 隆起に伴う水面応答

水深を 22 cm 一定として、速度 15 cm/s で可動板端部を 2 cm 変化させた場合と、速度 17 cm/s で 6 cm 変位させた場合、つまり変位速度がほぼ同じで変位量の異なる 2 ケースの板の左端付近の水面応答効率を比較した。水面応答効率は、2 cm のケースで $x/B=0.08$ 、6 cm のケー

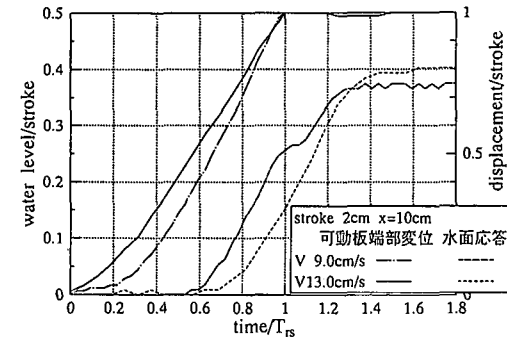


図-8 変位速度の違いによる可動端端部上の水位変動

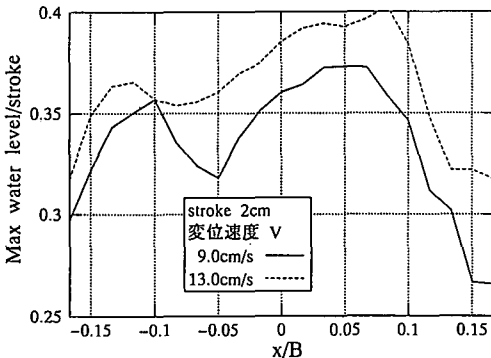


図-9 変位速度の違いによる可動板左端付近の水面応答効率 (隆起)

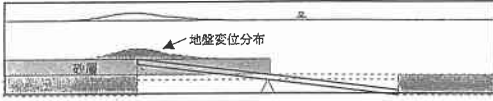


図-12 砂を敷いたケースでの可動板端部での海面応答

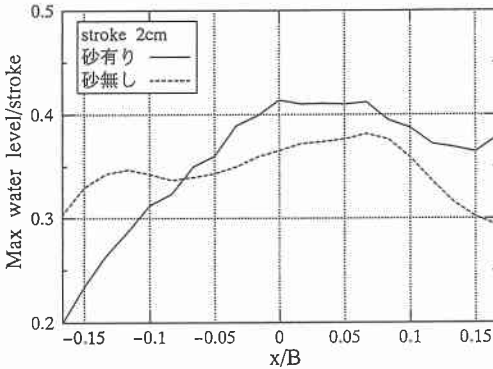


図-13 砂の有無による最大応答値の分布の比較

スで $x/B=0.1$ の点で生じ、その値はそれぞれ約 41%, 約 36% であり、前者の方が高い。これは可動板変位量の大きくなるほど、エネルギー逸散率が大きくなり、水面上昇に寄与するエネルギーの割合が小さくなることを示している。このように、波源付近において地盤変動エネルギーが初期水位分布を発生させる効率は、地盤変位量の小さいほうが高いといえる。

(2) 沈降に伴う水面応答

水深を 22 cm 一定とし、可動板を 13.0 cm/s で 2 cm 変位させた場合と、17.0 cm/s で 6 cm 変位させた場合の水面応答効率の分布を比較したところ、変位量 6 cm のケースにおいて、 $x=25$ cm の位置で 38%, 2 cm のケースにおいて $x=5$ cm の位置で 46% である。このように可動板変位量の小さいほうが水面応答効率も高くなり、隆起域と同じ傾向を示した。

2.3.4 水深の異なるケース

隆起及び沈降のケースで、可動板変位量 2 cm、変位速度 13 cm/s の条件で水深 12 cm と 22 cm の場合の水面応答効率の分布を比較したところ水深の浅いほど、水面応答効率は大きくなる。しかし、隆起・沈降とも水深の浅いケースほどピーク値を示す点を離れるに従って減衰が大きくなり、 $x/B=-0.2$ 付近では応答効率の差は小さくなった。よって、水深の異なる場所で同じ海底地盤変動が起こった場合に、波源付近での水面応答効率は浅い場所が発生した方が高くなる。

2.3.5 砂層を敷いた場合

一般的には地盤の表面に断層が現れる場合を除いて、海底の不連続な変位分布は生じない。そこで、 $x=$

150~150 の範囲に砂を 6 cm 厚で敷き、可動板を変位させる実験も行った。

砂を敷いた場合、端部の変位は図-12 に示すように、可動板の変位分布を反映しつつもなめらかに連続した地盤の変位分布を示した。最大変位量はほぼストロークの大きさとほぼ同じ値を示した。

砂を敷いたケースと敷かないケースでの水面応答効率の分布の比較を図-13 に示す。砂を敷いた場合と敷かない場合とでは、海底の隆起形状が異なり、それによって水面変位の分布も異なったものになる。

特に、可動板左端の外側領域で分布が大きく異なる。こうした水面変位分布形状の差は、沿岸部まで伝播する際の波高増幅率にも影響を及ぼすものと推測される。

3. ま と め

- 1) 隆起・沈降とも、地盤の変位速度が速く、変位量の小さいほど、また地盤変動の生じる水深の浅い程水面の応答効率は大きくなる傾向にあった。これは前報(松山ら, 1995)の数値シミュレーション結果と同じ傾向を示している。
- 2) 沈降域では、隆起域に比べて水面応答効率は大きく、地盤変位速度の水面応答効率に及ぼす影響は小さい。
- 3) 地盤変動に伴う水面変化において、隆起域と沈降域ではその挙動に違いがみられた。隆起域では、地盤変動と共に水面が急激に上昇して終了するまでの過程、水面がほぼ停止状態の過程、水位変化が波動として伝播する過程の 3 つの過程を経る。沈降域では、遷移状態と確認できるほどの水面の停止状態は認められなかった。
- 4) 隆起・沈降の両ケースとも発生した波動エネルギーの大部分が可動板の中心部に向かっていった。
- 5) 地盤変動により発生した第一波の周期は発生地点から離れるに従って長くなった。
- 6) 砂層を敷いた場合と敷かない場合で比較したところ、地盤変位分布に違いが見られ、前者の水位応答効率が高くなった。

参 考 文 献

- 高橋龍太郎, 羽鳥徳太郎(1962): 楢田浪源からの津波発生実験, 東京大学地震研究所彙報, 第 40 号, pp. 873-883.
- Joseph L. Hammack (1973): A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth, J. Fluid Mech., Vol. 60, part 4, pp. 769-799.
- 松山昌史, 池野正明, 田中寛好 (1995): 海底地盤変動による水面応答特性に関する実験と数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 226-230.
- Okey Nwogu (1993): Alternative Form of Boussinesq Equation for Nearshore Wave Propagation, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 119, No. 6, pp. 618-638.