

波群津波の津波力に関する研究

仲 座 栄 三*・ 津嘉山正光**・ 日 野 幹 雄***・ 大 城 勉****

1. はじめに

Munk は、1948年に海岸における平均海面の上がり下がり初めて測定し、それに「Surf-beat」(磯波のうなり)と名付けた¹⁾。その発生メカニズムには、2, 3 の説があるが、海岸に來襲する波群が関係していることは明かである。一般に、Surf-beat はその名の意味するように、周期が2～5分程度の比較的ゆったりとした(個々波との比較において)平均海面の長周期変動として捉えられている。しかしながら筆者らは、ステップ型海岸(あるいはパー型海岸)のような(個々波の)砕波点と汀線との距離が比較的長くかつ水深が浅い海岸において、波群によって引き起こされた Surf-beat は、汀線に向けて進行するにつれ前傾化し、その先端付近に激しい流速変動を伴い Bore 状となって來襲することを明らかにしている²⁾。また、台風災害調査及び現地観測によって、Bore 状 Surf-beat によると考えられる海岸構造物の災害が数多く発生していることを確認しており³⁾、更に、こうした Bore 状 Surf-beat は地震津波(例えば、日本海中部地震津波)との類似性から波群津波として認識する必要があることを提案した⁴⁾。

本研究においては、上記波群津波(Bore 状 Surf-beat)の津波力を現地観測及び室内実験によって検討する。また今回は、津波力を定式化するのをさけ、防波堤に作用する津波力及び大規模渦の発生メカニズム等を中心として説明し、更に現行の設計法の問題点の指摘も行う。

2. 波群津波とは何か

ここでは、先ず題目における「波群津波」の定義について述べる。

和達⁵⁾は、津波について、「地震、噴火、地滑り、崖崩れなどの地変によって引き起こされる海水や湖水などの異常な大波を津波という。また、台風によって引き起こされる波や湖水の大波を(暴)風津波(または高潮)

ということもある」と定義している。

本研究における、波群津波とは次のような現象を言う。「海岸に波群が來襲し、波群中の個々波が砕波することによって、汀線と砕波点との間には平均海面の上昇(Wave Set-up)が形成される。この平均海面の上昇は、波群中の個々波の波高が時間的に変動することから海岸一帯の海面が一度に上昇するのではなく、個々波の進行と共に、津波(あるいは流れ)となって汀線へ來襲する。その際、砕波点と汀線間の距離が長く、かつ水深が浅い場合は、Bore 状になり汀線へ進行する。汀線で反射された津波は、さらにその前傾度を増し沖側へ進行して行く」。

文献3)で説明したように、沖縄本島北部の楚州海岸近くに住む住民は、台風8613号の際発生した波群津波によって大災害を被った。被災時住民らは、これまで見たこともない(10～15分間隔に襲う)大波に驚き、着のみ着のまま避難した。このように、直接災害を受けるのは、大半が海岸工学とは縁のない住民である。すなわち、「Surf-beat(あるいは、長周期波)が来るぞ、避難しろ!」の警報に住民が直感的に反応するかと言う問題である。住民に対する防災指導と言う面からすれば、波群津波として認識する必要がある。

上述の波群津波は、遠方からの「うねり」が來襲する場合、現地海岸においても頻繁に見られる。以下においては、現地海岸における波群津波の実態及びその津波力について述べる。

3. 現地海岸における波群津波の実態

(1) 現地観測位置及び気象条件

現地観測位置及び観測対象とした台風8712号の経路図を図-1に示した。現地観測は、図-1の小枠内に示す沖縄本島南部の港川漁港の新設防波堤を中心として、1987年8月29日午前9時～11時に行われた。観測当日は、約1000 km離れた台風12号からの「うねり」が來襲しており、図-2(図-1に示す位置に設置された沖縄気象台の波高計による)に示すように、観測時間帯には約6.0 mの有義波高であったことが分かる。なお、現

* 正会員 工修 琉球大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工修 琉球大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

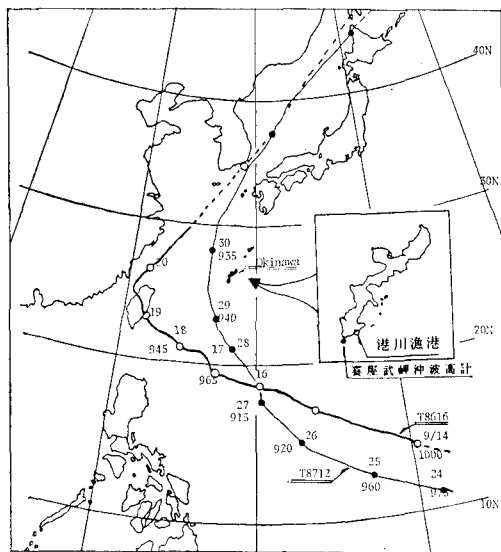
**** 琉球大学学生 工学部土木工学科

観測は、T8616が発生した際1986年9月17日及び18日の17時～20時においても、同地点で行われた。上述の観測日と区別するため、写真等においては、T8712あるいはT8616と記した。

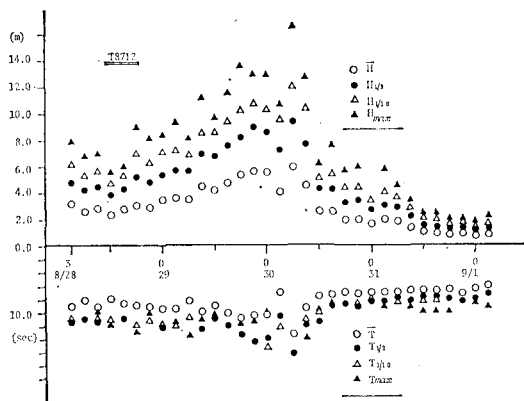
(2) 現地海岸における波群津波

写真—1—(b)～(d)は、8月29日9時22分に発生した波群津波を捉えたものである(T8712)。写真—(a)は、沖波波高がほぼゼロである時におけるH.W.L.(C.D.L.+2.10m、以下高さは、C.D.L.+0.0mにとる)時の状況を示す。矢印で示す位置が汀線付近であり、汀線背後の岸壁の高さは+6.0～7.0mはある。なお、岸壁の近くに立ててあるボールの高さは2.0mである。写真—(b)～(d)は、波群津波が汀線に向けて来襲し汀線背後の岸壁に激しく衝突するまでの約30秒間を捉えたものである。岸壁の高さを参考にすれば、津波の波高は4～5m程度であったと判断される。

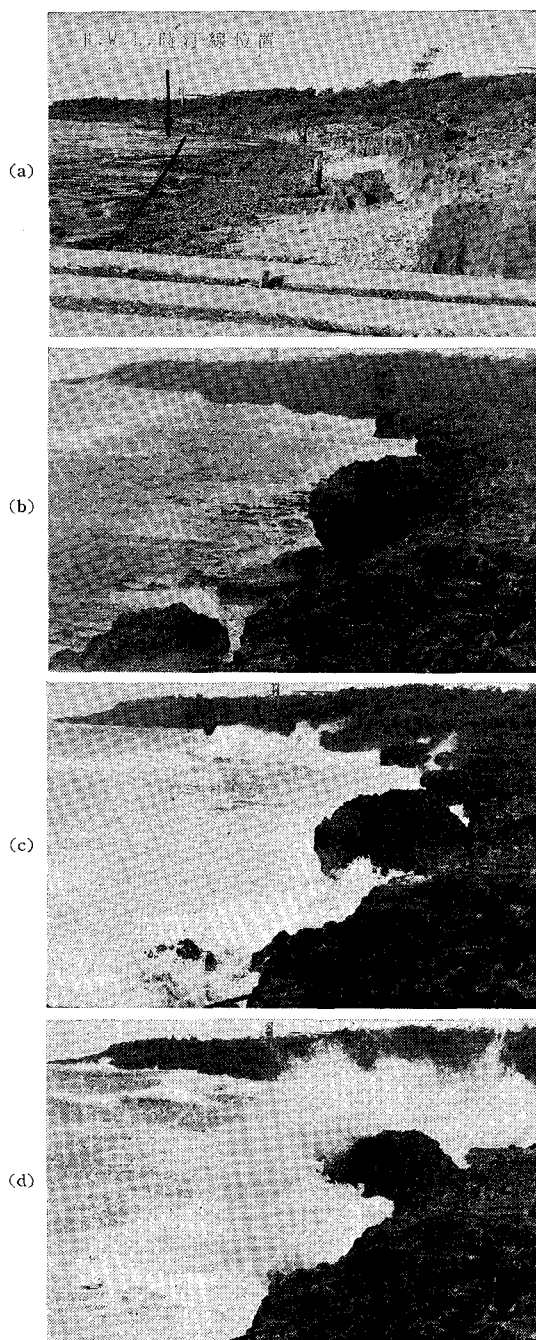
次に、波群津波が防波堤を乗り越える状況を捉えたの



図—1 台風経路図及び現地観測位置図



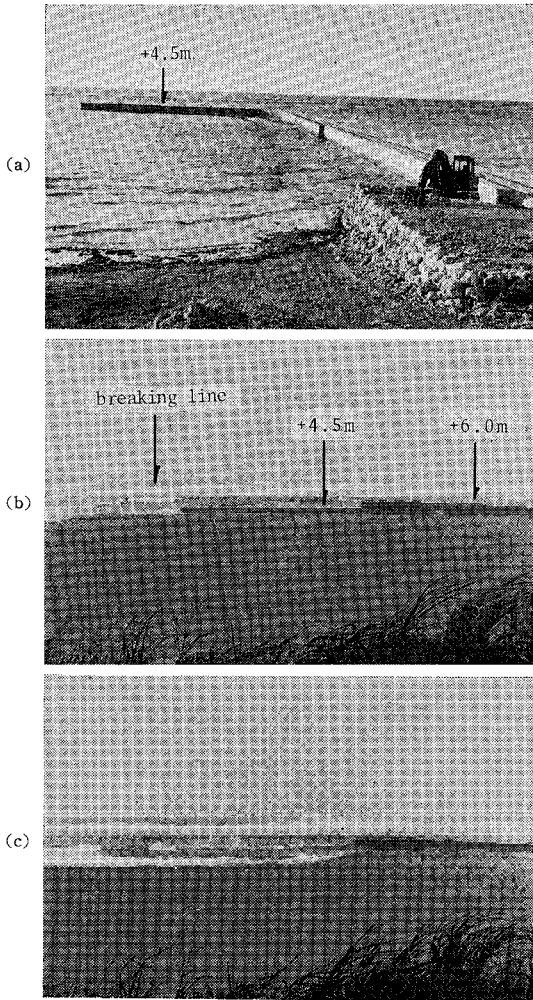
図—2 代表波高及び代表周期の経時変化



写真—1 現地海岸における波群津波 (T8712)

が写真—2である(T8712)。写真—(a)は、H.W.L.の状況であり、防波堤先端高は+4.5mである(1986.9)。写真—(b)の状態は波群津波が防波堤先端付近を通過する直前であり、写真—(c)は防波堤を乗り越えた直後である。

以上述べた現地観測から指摘されるのは、Surf-beat(波群津波)の(津)波力は極めて大きく、個々波の波力



写真—2 防波堤を乗り越える波群津波 (T8712)

を上回る可能性があること、また、防波堤先端部付近には大規模な渦が発生している可能性があることである。

以下においては、“おそらく初めて捉えられるであろう Surf-beat (波群津波) の (津) 波力”を実験的に検討する。

4. 波群津波の津波力

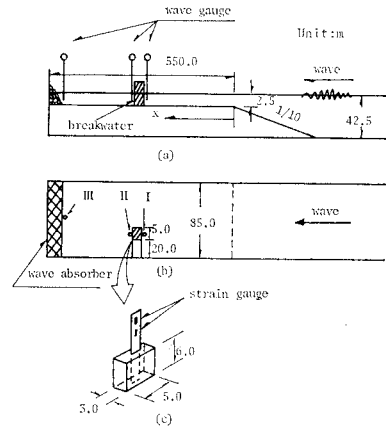
(1) 実験装置及び実験方法

実験には、図—3 に示すような長さ 22.0 m、幅 0.8 m の二次元造波水槽を用いた。水槽の一端には、3. で述べた港川漁港の防波堤を中心とする海岸を 1/100 縮尺でモデル化し設置した。なお、現地海岸は、+0.0 m のリーフがほぼ水平に汀線から沖側へ約 600 m 張り出し、その後、約 1/10 勾配で深くなるようなステップ型海岸である (詳細は、文献 3) を参照)。

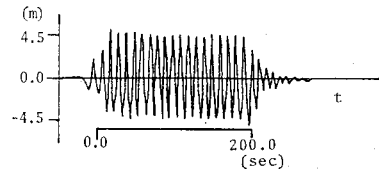
防波堤に作用する波力の実験では、H.W.L. 時程度の水深を考え、 $h=2.5$ m (以下においては、現地スケール

で示す) とし、防波堤の位置をリーフの先端から 300.0 m に設置した。波力 (水平力) の検出には、図—(c) に示すような、1 自由度のバネ系を用いた。また、波力検出用のセグメントは、図—(b) に示すように防波堤先端部付近に設置した。防波堤先端部から掃き出される渦の可視化には、1~2 mm のポリスチレン粒子を用い、水槽側面からスリット光線を照射することによって行った。

角柱単体に作用する波力の実験では、角柱として上記の波力検出用セグメントをそのまま用い、水槽の幅方向中央に設置した。入射波群としては、波群津波の特徴が強調されるように振幅が図—4 に示すようなステップ型に変動する波形 (波群周期 $Tg=6.7$ 分) を用いた。なお、波群中の個々波は、平均波高が $\bar{H}_0=9.0$ m、周期が $T=10.0$ 秒である。



図—3 実験装置概略図



図—4 入射波群波形

(2) 防波堤に作用する波群津波力

上記実験によって得られた津波力と波群津波波形との関係を図—5 に示した (静水面への波群入射後 1 波目及び 2 波目を示した、なお、波力は静止水深時における静水圧: $p_s (= \rho gh^2/2)$ で無次元化してある)。図中、白抜き矢印が港内へ来襲する波群津波の先端付近であり、黒塗の矢印が港奥の岸壁から反射された反射波群のフロント付近である。また、周期 10.0 秒程度で振動しているのが個々波の振動に対応する。波力波形は、波群津波の先端付近で衝撃力を受け大きく振動している。さらに、注目すべきは、反射波群津波のフロント付近に見られる衝撃力であり、これは、港奥で反射された波群津波がさ

らにその前傾度を増し Undular bore となって港外(沖側)へ進行することによるものである。また、個々波の波力が比較的大きくなる場合があるが、これは個々波が防波堤を越波する際に発生する衝撃波力である。写真-3-(b)~(c)は、図-5における①、②に示す位相の波群津波を捉えたものである。なお、写真-(a)は、静水面の位置を示す。港に來襲する波群津波は、防波堤に衝突した後、その一部は防波堤から沖側へ反射される(写真-(b))。また、港口から港内へ入射した波群津波は港

奥で反射された後、防波堤を背後から襲う(写真-(c))。

これらの写真に示すように、波群津波が港内へ入射し、港奥の岸壁から反射され防波堤に到達するまでの間、防波堤は正(岸方向)の波力を受けることになり、また、引き波の間は、港外が比較早く引き始めるので負(沖方向)の波力を受けることになる。図-5において波群津波の先端付近の衝撃波力を除いても、津波力は個々波の波力と同程度かそれ以上である。

従来、防波堤に作用する波力は、堤前面の設計波を用い、1/25程度の模型実験(防波堤断面のみを取り出した模型実験)から算定していた。すなわち、本研究で指摘するような Surf-beat が決して生じない条件で行っていたのである。図-6は、図-5の実験で用いた最大波高を定常的に入射させた場合における波力(すなわち、単一波であると言う問題はあるが、従来の実験と本質的に同じである実験から得られた波力)である。当然の結果として、図-5と図-6には明かに違いが見られる。

図-5に示す波群津波力を谷本らの津波力に関する研究⁶⁾と比較した場合、多くの類似点を有する(例えば、文献6)の写真-6.8等、但し、港奥からの反射津波力については触れていない)。

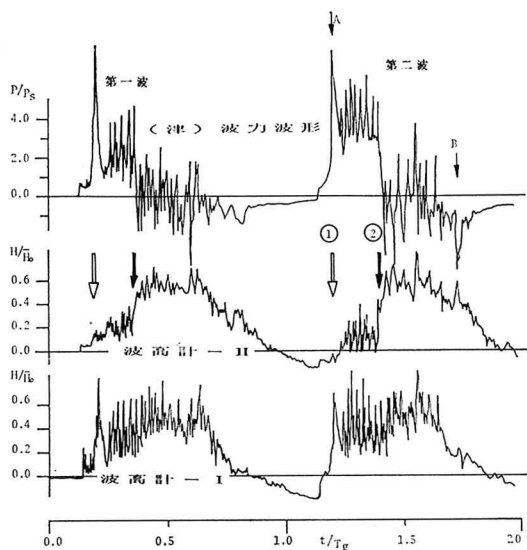


図-5 波群津波波形と(津)波力波形

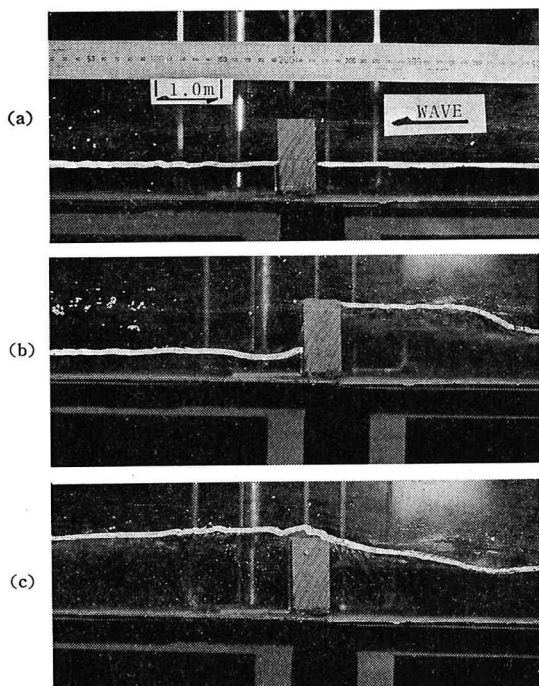


写真-3 波群津波の來襲による港内外の水面変化

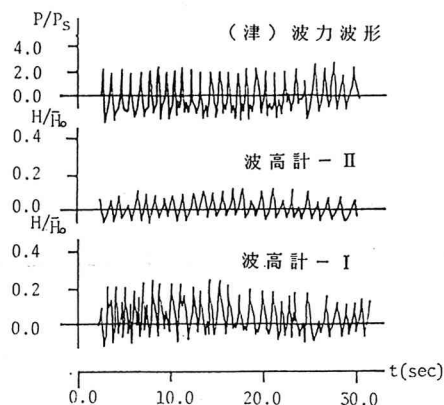
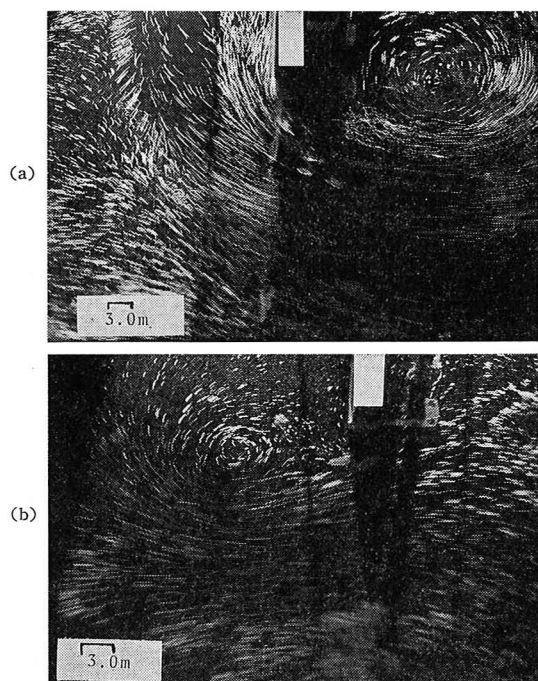


図-6 Surf-beatが発生しない条件における水面波形と波力波形

(3) 防波堤先端から掃き出される大規模渦

日本海中部地震津波が発生した際、防波堤の先端部から大規模の渦が発生し、小型漁船が巻き込まれている状況がテレビのニュースで報道されたのは記憶に新しい。

波群津波によって防波堤先端部に発生した大規模渦を捉えたのが写真-4である。なお、写真と波群津波の位相関係は、図-5にA, Bで示してある。写真に示す防波堤幅が3.0mであることから大規模渦の最大直径は約40mにも達することが分かる。また、カメラの露光時間が1/15秒であることから、渦によって引き起される最大流速は約10.0m/sにも達する。防波堤に作用する流体力と渦との関連性までは解析が進んでいないが、



写真—4 防波堤先端部から掃き出される大規模渦

石井・真野らの津波防波堤開口部の流れの特性に関する研究⁷⁾を参考にすると、渦力は、防波堤マウンド部の捨石等に影響を与えることが分かっており、この場合も渦力が防波堤に与える影響は大であると推定される。

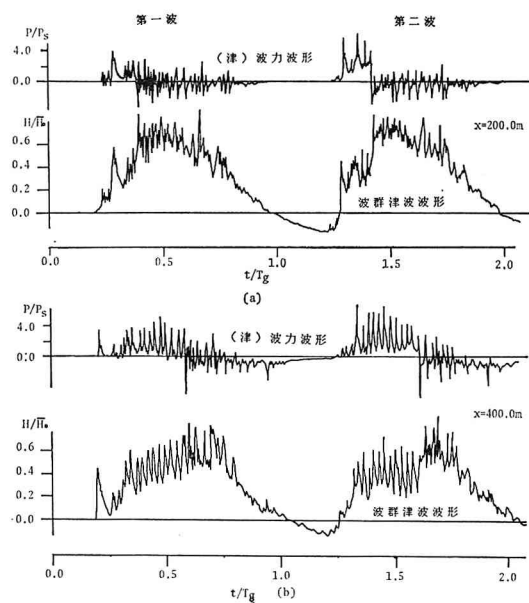
こうした大規模渦は流体力に加え、水産面でも次のような問題点を与える。「最近の砂浜域における漁場の開発に伴い、離岸堤を設置しその内側に魚介類等の養殖場を作る計画等がクローズアップされてきたが、Surf-beatがよく観測されるような海域では、規模は小さくとも上述の波群津波が発生することになり、それに伴う大規模渦が一度に大量の浮遊砂を生じさせ魚介類を弊死させてしまうことになる。」

(4) 角柱に作用する波群津波力

角柱単体に作用する津波力と波群津波との関係を、図—7に示した。図—(a)及び(b)は、それぞれ汀線から200.0m及び400.0mの位置で測定されたものである。角柱に作用する津波力は、波群津波に伴う流れによる抗力が主流となる。角柱は、波群津波の先端付近で衝撃力を受け、さらに汀線からの反射波群津波の衝撃力を受ける。(紙面の都合上詳細は割愛する。)

5. おわりに

本研究では、浅い海岸において波群によって引き起こされるSurf-beatを波群津波と再定義し、地震津波と比較しながら波群津波の津波力及び大規模渦の実態等を中心として説明した。その中で、防波堤及び角柱単体に作



図—7 角柱単体に作用する波群津波力

用する津波力は、個々波の波力を上回る程度の大きさであることを示し、Surf-beatの波力を考慮していない現行の設計法の危険性を指摘した。また、波群津波によって防波堤先端からは大規模渦が掃き出され、それが防波堤先端付近に特異な水理現象を引き起こすことを確認した。さらに、上記の波群津波が引き起こす様々な水理現象を現地観測の写真を通して説明した。

謝辞：本研究を行うにあたり、宮崎大学工学部の河野二夫教授及び琉球大学工学部の筒井茂明助教授には数多くの御助言を頂いた。さらに、琉球大学水工学研究室の宇座俊吉技官及び院生、4年生の皆さんには、実験の全てに協力して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Munk, W. H.: Surf beats, Trans. A. G. U., Vol. 30, No. 6, pp. 849~859, 1949.
- 2) 仲座栄三・日野幹雄：波群によって引き起こされる平均海面の共振応答，第32回水理講演会論文集，pp. 571~576, 1988.
- 3) 仲座栄三・日野幹雄：リーフ地形海岸におけるBore状サーフビートによる災害の実態調査，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 202~206, 1988.
- 4) 仲座栄三・日野幹雄・與那覇健次：波群によって引き起こされるBore状サーフビートに関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 197~201, 1988.
- 5) 和達清夫編：津波・高潮・海洋災害，共立出版，1970.
- 6) 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料，No. 470, 1983.
- 7) 石井義祐・真野 明：津波防波堤開口部の流れの特性，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 182~186, 1987.