

超長周期波の制御のための新型共振装置に関する実験的検証

Experimental Verifications of a Newly Developed Resonator for Sheltering Very Long Waves

中村孝幸¹・Nyein Zin LATT²・東 和希³

Takayuki NAKAMURA, Nyein Zin LATT and Kazuki AZUMA

In order to shelter harbors from very long waves (say wave period being greater than one minute), a new type of resonator was developed. Physical experiments were carried out to verify the effectiveness of the newly developed resonator. Extensive investigation was performed based on both numerical computations and experiments to examine effectiveness of the newly developed resonator as compared to the previous rectangular resonator and also the jetty type breakwater. Due to existence of higher harmonics in very long period waves, the harmonic analysis of incident and transmitted waves was carried out to know the performance of the new resonator accurately. It was verified both experimentally and numerically that the newly developed resonator was effective for sheltering very long waves.

1. まえがき

大規模港湾において、外洋船の接岸係留時における長周期船体動揺が問題となっている(平石ら, 2002)。この対策法の一つとして、アメリカのロングビーチ港で採用された、港口部に共振装置を設け港内への長周期波の侵入を少なくする方法が知られている(Poonら, 1998)。しかしながら、従来の矩形形状の共振水域を持つ共振装置は、制御対象とする周期帯内で長周期の条件になるほど遮蔽効果が低下しやすくその上限側では効果がほとんど期待できないことなどが知られている(中村ら, 1997)。これは、作用波の周期が長くなると共振装置の港内側の開口部に重複波の腹が形成されるようになり、港内側に比較的高い波が伝播するようになるためと考えられる。

既に著者らは(Nakamura et al, 2010)、従来の矩形共振装置の長周期側における制御効果を改善することを目的として、図-1に示すように装置の港内側の開口部付近に平行堤と呼ぶ新たな直立堤を設けることを提案した。平行堤の原理は、港内側の開口部に重複波の腹が形成されるのを防ぎ、理想的には節が形成されるようにして、港内への伝達波を低減するものである。

本研究は、主に平行堤を付加した新型共振装置の有効性を水理模型実験に基づき検証する。この際、新型共振装置の代表的な諸元の推定には、前研究のパラメータ解析による結果を参照する。また、比較のため、平行堤を取り除いた従来型の矩形共振装置や湾口防波堤の構造形式として利用されている突堤構造の防波堤についても実験を行う。そして、特に実験的な検討で見出された現象

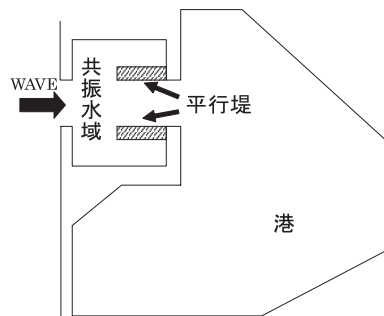


図-1 港口部に設けた共振装置

として、長周期波に含まれる高調波成分の共振装置による低減があり、基本周波数成分のみならず、これについても実態を明らかにして、遮蔽効果に及ぼす高調波成分の影響についても考察を行う。

2. 理論算定に基づく従来の成果の概要

既に著者ら(Nakamura et al. 2010)は、図-2に示すように、従来よりの矩形水域型共振装置の港内側開口部において、その開口長を維持するように水路に平行に直立壁を設けた新型共振装置を対象にして透過波の低減効果を理論的に検討した。この検討では、低減効果が簡単にかつ正確に行えるように、長水路内に1基の共振装置が設置されている状況(図-2)を想定して、背後に伝達する透過波の遮蔽効果が波浪ポテンシャル理論に基づく数値解析法(中村・岩崎, 1993)を用いて算定されている。このような水路内の共振装置は、両側壁の完全反射条件を仮定するとその鏡像効果により、装置が側壁方向に規則的に配列されている場合と等価になる。このため、配列中の一基の堤体を対象にして、配列堤体まわりの平面的な波高算定が可能になるなど、効率的に複雑な波動場

1 正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科
2 正会員 修(工) 愛媛大学大学院理工学研究科
3 愛媛大学大学院理工学研究科

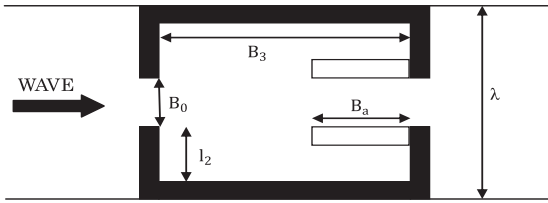


図-2 長水路内に設けた新型共振装置

表-1 新型共振装置の算定条件

縦横比 $l_2 : B_3$	B_3	平行堤率 B_a / B_3	平行堤長 B_3	開口率 B_0 / λ
1 : 2	400m	0~0.7	0~280m	0.214 ~ 0.353
1 : 2.5	500m	0~0.7	0~350m	0.214 ~ 0.353
1 : 3	600m	0~0.7	0~420m	0.214 ~ 0.353
1 : 3.5	700m	0~0.7	0~490m	0.214 ~ 0.353
1 : 4	800m	0~0.7	0~560m	0.214 ~ 0.353
1 : 4.5	900m	0~0.7	0~630m	0.214 ~ 0.353
1 : 5	1000m	0~0.7	0~700m	0.214 ~ 0.353
1 : 5.5	1100m	0~0.7	0~770m	0.214 ~ 0.353
1 : 6	1200m	0~0.7	0~840m	0.214 ~ 0.353
1 : 6.5	1300m	0~0.7	0~910m	0.214 ~ 0.353
1 : 7	1400m	0~0.7	0~980m	0.214 ~ 0.353

の算定が行える利点がある。

検討対象にした新型共振装置の諸元は、図-2を参照すると、表-1に示すように新規に導入した平行堤の長さ B_a を含め、共振水域の波向き方向の長さ B_3 、開口長 B_0 などである。この際、水路幅方向への突堤長 l_2 と水深 h は、それぞれ $l_2=200\text{m}$ 、 $h=20\text{m}$ に固定してある。そして、装置による消波対象の周期帯は、現地周期で $T_p=30\sim 300\text{s}$ を概略の目標として検討が行われている。図-3は、代表的な算定例を示すもので、図中に諸元を示すように、比較的大型の装置を対象にして、付加する平行堤の長さ B_a を各種に変化させたときの透過波の低減特性 K_{trms} の算定結果を示す。 K_{trms} は、装置背後の水路幅方向に波高変動が現れる場合を含めて、透過波高の低減特性が評価できるようにと採用したものであり、次式により定義される。

$$K_{trms} = \sqrt{\int_0^\lambda H_T^2(y) dy} / \lambda / H_I \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $H_T(y)$ ：装置の透過側で水路幅方向の位置 y における波高値、 H_I ：入射波高、 λ ：隣接する装置の中心間距離で水路幅に相当する。なお、透過波を評価するときの波向き方向の位置は、構造体との干渉による減衰定常波の影響が無視できると考えられる、構造体より岸側に2波長の位置とした。

この図より、 $T_p > 60\text{s}$ の長周期側では、平行堤を付加することで、従来の共振装置による透過波高に比較して半以下に低減できるなど効果的な方法であることが確認

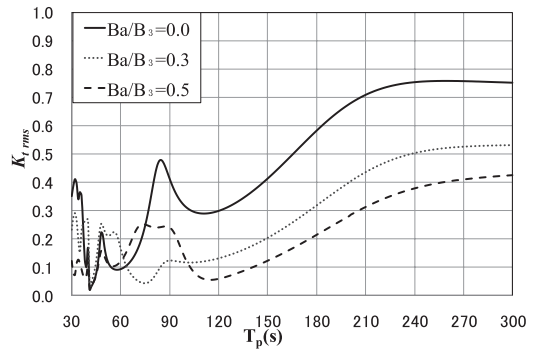


図-3 新型共振装置による透過波の低減特性 K_{trms}
(縦横比=1 : 3.5, $B_0=120\text{m}$, $B_3=700\text{m}$, $l_2=200\text{m}$)

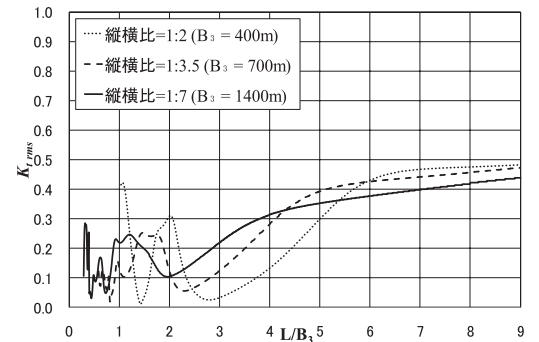


図-4 新型共振装置の波向き方向長 B_3 と制御対象の波長の関係
(平行堤率 $B_a/B_3=0.5$, $B_0=120\text{m}$, $l_2=200\text{m}$)

できる。一方、 $T_p < 60\text{s}$ の短周期側では、水路幅方向への横波共振の発生の影響などを受けるためか、波周期による変化が著しくなる傾向が見られるなど、その効果は明確でない。ただし、 K_{trms} は概略0.3以下とある程度の静穏化効果は認められる。

次に図-4は、平行堤率 B_a/B_3 を50%、開口長 $B_0=120\text{m}$ に固定して、共振水域の波向き方向長 B_3 を順次増加するときの新型共振装置による K_{trms} の算定結果を示す。この図から、 K_{trms} を概略0.3以下に制御できる対象波の波長は、共振水域の波向き方向長 B_3 の約4倍から5倍程度までの条件に限定されることが確認される。そして、 B_3 を長くして共振水域の縦横比を大きくすると、より長波長の波が制御できることも認められる。

従来の研究 (Nakamura et al. 2010) では、このような成果以外に、理論的な検討に限定されるが、共振水域をなくして、一対の突堤構造にすると、透過波の低減効果は大幅に低下することなども報告されている。

3. 実験概要

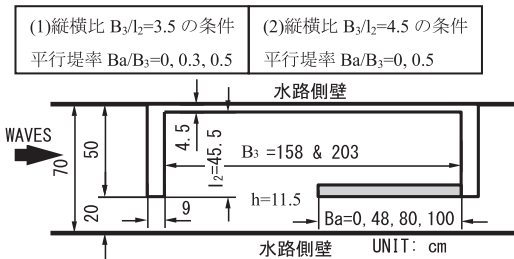
(1) 設定した新型共振装置のモデル

本研究では、上記の算定結果の妥当性を検証するため、共振水域の縦横比1 : 3.5と1 : 4.5の新型共振装置を模型

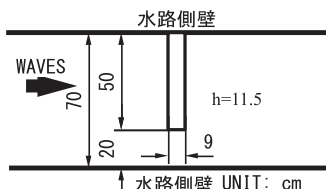
化する方向で水理実験を計画した。この際、後述するように、実験施設の水路幅が0.7mであることや造波可能な波周期が最大で14s程度までに限定されることから、模型縮尺は1/400程度に設定した。しかし、この縮尺条件では、理論算定で想定されている現地水深 $h=20\text{m}$ は模型量で5cmになることや、長周期波の現地波高の概略値である0.5mは1mm強の模型波高になるなど、水理実験に適さないことが判明した。

このため、実験では、水平方向の縮尺を優先することにして、鉛直方向の縮尺は測定精度などを勘案して決定した。最終的に水平方向の縮尺は1/400、鉛直方向のそれは1/20程度を想定した。ただし、理論算定では、模型量の条件を直接的に考慮して算定が行えるため、歪模型ということ意識せずに模型寸法をそのまま採用して算定を行った。

図-5は、このように設定した新型共振装置の模型および比較のために用いた突堤形式の模型を示す。これらの模型堤体は、後述するように1/100勾配の斜面上に固定されており、共振装置模型については共振水域の中央部において水深が11.5cmとなるようにした。実験では、図中に示すように、新たに付加する平行堤の長さとして、共振水域の波向き方向の長さ B_3 の3割、5割および平行堤無しの場合の3種類の条件を原則的に用いた。



(a) 新型共振装置の模型 (水深 $h=11.5\text{cm}$, 開口率 29%)



(b) 突堤形式の模型 (水深 $h=11.5\text{cm}$, 開口率 29%)

図-5 実験に用いた模型堤体とその諸元 (縮尺 $S=1/400$)

(2) 実験水槽および実験方法

実験に用いた水槽は、図-6に示す全長41m、幅0.70mの二次元造波水槽である。水槽内には、1/100勾配の斜面が設けてあり、この岸側端部には再反射を防ぐため、低反射材による消波工が設けてある。

実験には、9本の容量式波高計を使用し、図-6に示すように模型堤体の沖側に2台、模型堤体内部の波高測定用に3台、透過波の測定用に4台を用いた。透過波の測定には、水路の幅方向への波高変動が見られる場合もあり、図中に示すように水路幅方向に直線アレイで波高計を配置してある。

本研究では、事前検討として、共振装置の模型を設置していない条件下で、所要の周期、波高の波が造波できるように造波機の設定条件を把握すると同時に入射波の波形測定も実施した。このとき、波高測定は、模型設置時に沖側に設けた波高計 (No.1) を用いた。

実験には図-6に見られるように共振装置の1/2の模型を製作し、これを幅0.70mの長水路内に固定した。これは、前述したように水路側壁の流体力学的な鏡像効果を考慮したことによるものである。

実験における水深 h は、堤体内部の波向き方向の中心部で11.5cmとし、波周期は現地波換算で $T_p=60\sim 280\text{s}$ (実験時周期 $T_m=3\sim 14\text{s}$) の範囲の12種類とした。このとき、入射波の波高 H は3cm程度と一定にした。

4. 波浪制御効果に関する実験結果

(1) 入射波および透過波の周波数特性

今回の実験では、造波によって生じる入射波に基本周波数の成分のみならず、2倍、3倍周波数の高調波成分も有意な割合で含まれていることが判明した。このため、共振装置による波浪制御効果を正確に見積もることができるよう、入射波と透過波の両者について調和解析を行い、各周波数成分に着目して制御効果を検討してみた。なお、このときの入射波のデータは、堤体がないときに測定したものをを用いた。

図-7, 8は、共振水域の縦横比が1:3.5の条件で、平行堤率が5割および0のときの入射波と透過波の調和解析の結果を示す。また、図-9は、共振水域のない突堤構造の堤体による同様の結果を示す。いずれの結果も、本実験で採用した中では長周期側の条件 (模型周期 $T_m=12.4\text{s}$) での結果に対応する。なお、透過波について

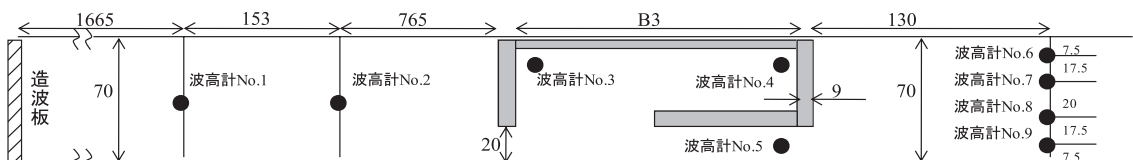


図-6 実験水槽および波高計の設置位置 (上面図, UNIT: cm)

は直線アレイ配置した4台の波高計による結果を平均化した量を用いた。

これらの図の比較から、入射波に含まれる2倍周波数以上の高調波成分は、平行堤を設けた新型共振装置の場合に最も低減することや、共振水域のない突堤構造の場合にその低減率が劣るようになることなどが分かる。これは、入射波に含まれる高調波成分が共振水域を持つ共振装置と干渉すると、自由波として振る舞うようになり、短周期である高調波成分に対する共振装置の遮蔽効果が強調されるようになるため、総合的な低減効果が高まることによると推測される。

(2) 透過波の制御効果

本研究では、透過波の低減度合いを示す特性量として、上記した周波数特性を勘案して、以下の2種類のものを定義して用いた。

$$K_{I rms} = a_{T1 rms} / a_{I1} \dots\dots\dots(2)$$

$$K_{IE} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 a_{Tj rms}^2 / \sum_{j=1}^3 a_{Ij}^2} \dots\dots\dots(3)$$

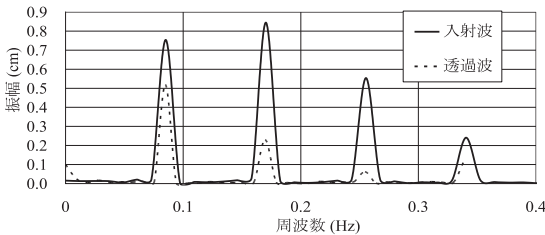


図-7 入射波・透過波の周波数特性 (新型共振装置, 縦横比=1:3.5, 平行堤率=0.5, 基本周期=12.4s)

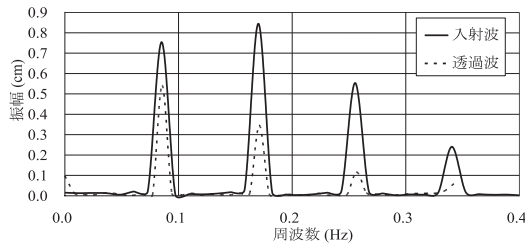


図-8 入射波・透過波の周波数特性 (共振装置, 縦横比=1:3.5, 平行堤率=0, 基本周期=12.4s)

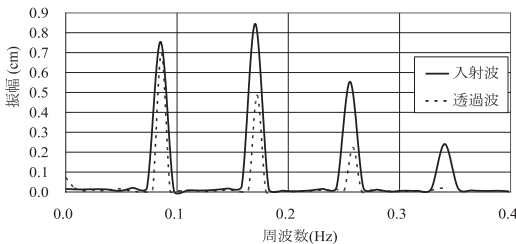


図-9 入射波・透過波の周波数特性 (突堤構造, 基本周期=12.4s)

ここで、 $a_{Tj rms}$ ($j=1\sim3$): 透過波の調解析結果において、J番目の調成分波の振幅を示し、しかも直線アレイ配置した4台の波高計による結果の空間的なrms値に相当する。また、 a_{Ij} ($j=1\sim3$): 入射波の調解析結果において、J番目の調成分波の振幅を示す。高調波成分として、3次高調波までに限定したのは、3次までが比較的有意な量であったことによる。式(2)による $K_{I rms}$ は、理論的には単一成成分を対象にした式(1)の $K_{I rms}$ の定義と一致するものであるが、実験的な求め方を明記するために再度にわたり表示した。

図-10, 11は、それぞれ共振水域の縦横比 B_3/L_2 が3.5および4.5のときの基本周波数成分に着目した $K_{I rms}$ に関する実験結果を示す。図中には、比較のため単調成分を想定した理論算定結果についても示す。横軸には、模型波の周期 T_m と現地換算周期 T_p の両者について表示してある。

これらの図より、平行堤を付加することで、透過波の低減効果は向上することや、この傾向は縦横比が4.5と共振水域長が長い場合に顕著になることが認められる。また、縦横比が4.5のときには、算定結果と実験結果の対応もある程度確認できる。

一方、縦横比が3.5のときには、現地換算周期で160s以上では、平行堤を付加する効果がほとんど認められない。この原因としては、縦横比が4.5の場合も含め、平行堤の突端部など隅角部から顕著な流れの剥離現象が見

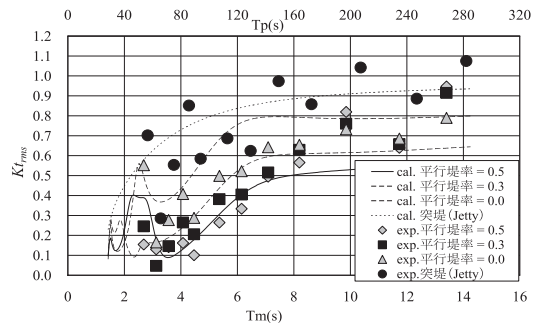


図-10 平行堤の付加による透過波の低減効果 ($K_{I rms}$ による評価, 縦横比=1:3.5)

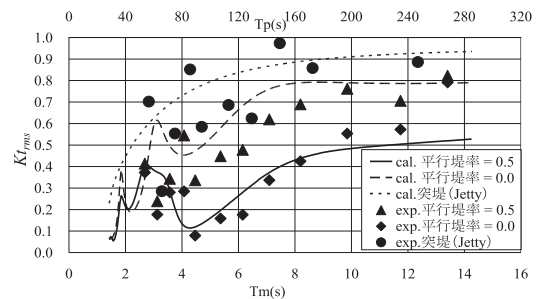


図-11 平行堤の付加による透過波の低減効果 ($K_{I rms}$ による評価, 縦横比=1:4.5)

られ、大規模渦が形成されることが一因ではないかと考えている。これについては、今後さらに検討を続けていきたい。

比較のために示した突堤構造の結果に着目すると、その制御効果は最も劣り、 $K_{t,rms}$ による評価では一部1を越える結果が見られる。これは、装置を設置していないときの入射波を用いたことが原因と考えられる。

図-12は、式(3)の定義による高調波成分を含むエネルギー的な評価による透過波の低減効果について示す。対応する条件の結果である図-11と比較すると、 K_{tE} を用いると全体的に2割程度の低下が見られ、やはり平行堤

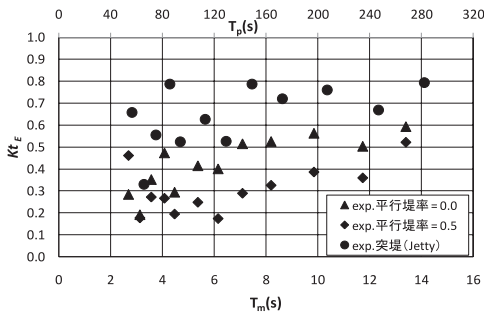


図-12 平行堤の付加による透過波の低減効果 (K_{tE} による評価, 縦横比=1:4.5)

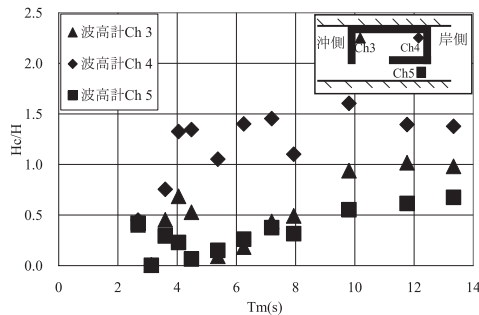


図-13 装置内の波高比 (縦横比=1:4.5, 平行堤率=0.5)

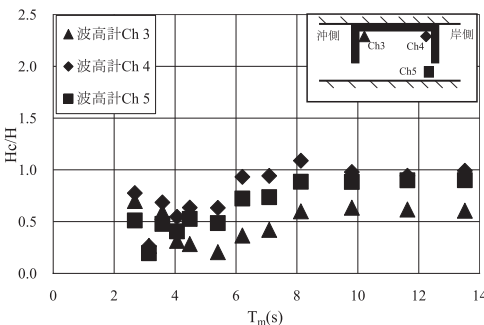


図-14 装置内の波高比 (縦横比=1:4.5, 平行堤率=0)

を設けることの有効性が確認できる。そして、 K_{tE} が低くなるのは、上記したように高調波成分が基本周波数成分よりも強く減勢されることによるものである。

(3) 装置内の波高比

図-13, 14は、縦横比が4.5のときの新型共振装置および矩形共振装置について、装置内の3カ所の波高比を模型周期による変化で示す。これらの図より、平行堤を設けることで、共振水域に波がトラップされやすくなり、平行堤の奥側での波高比 (Ch4) が高く、装置の港内側開口部 (Ch5) で波高比が低くなるのが分かる。平行堤がない場合、侵入した波がそのまま港内側に伝播しやすく、結果として港内側開口部 (Ch5) の波高比が比較的高いままとなるため、透過波も高くなるものと推測される。

5. 結語

- (1) 従来形式のように直線防波堤の一部に、開口部を設けた突堤形式の防波施設では長周期波に対する波浪低減効果はあまり期待できない。また、このような突堤形式の防波施設を2段構えにした矩形共振装置では、特に長周期側での波浪制御効果が不十分になりやすい。
- (2) 従来の矩形共振装置の矩形水域を一部囲むように新たに平行堤を付加することで、長周期波に対する波浪制御効果が向上する。そして、この平行堤の長さを長くすることで長周期側での波浪制御効果が改善できる。このとき、建設コスト等を考慮すると、実用的には矩形水域長さの30~50%程度とすることで有意な制御効果が得られる。ただし、共振装置内の波高は増幅されやすいため、注意する必要がある。

謝辞：本実験は、大阪大学の長波水槽を用いて実施されたものであり、使用等に当たり便宜を図っていただいた、出口一郎教授、荒木進歩准教授に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 中村孝幸・岩崎和弘 (1993) : 直線配列された消波堤による平面的な波変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 626-630.
- 中村孝幸・國富將嗣 (1997) : 長周期波制御のための外港型共振装置に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 716-720.
- 平石哲也・平山克也 (2002) : 港湾における長周期波対策の現状と課題, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 143-148.
- Nakamura, T. and Latt, N. Z. (2010) : Development of a new resonator with additional walls to attenuate very long waves, Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean, Vol.26, JSCE, pp. 855-860.
- Poon, Y. K., Raichlen, F. and Walker, J. (1998) : Application of physical model in long wave studies for the Port of Long Beach, Proc. 26th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1222-1235.