

沖合防波堤背後における大型弾性浮体の動揺特性

平石 哲也* ・平山 克也** ・丸山 晴広***
加藤 俊司**** ・斉藤 昌勝***** ・難波 康広*****

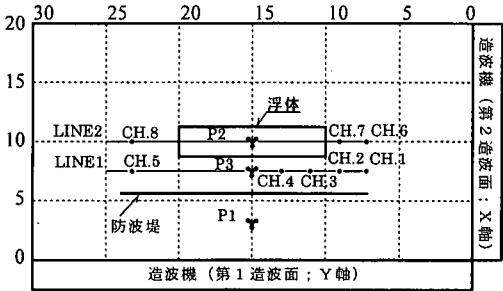
1. はじめに

大型浮体構造物は、コストが安い、工期が短期間、地震による耐震性が高い、移動・撤去が可能、さらに建設地区周辺に与える環境への影響が極めて少ないという利点から海上空港等への活用が期待されている。しかしながら、一方で、大型浮体構造物は水表面に係留され、変位や変型をある程度許容する構造形式であるため、従来の港湾構造物に比べて波浪による外力の影響を受けやすい。また、このような大規模構造物は、一般に大水深域に設置されるため、外力となる波浪条件は、多方向不規則波であるため波の方向分散性を考慮しなければならない。これまで、多方向波を対象とした大型浮体構造物の動揺実験に関する研究(池野ら, 1991)はいくつかあるが、高波浪域において安全に大型浮体構造物に係留する手法について詳細に検討された例はほとんどない。そこで、本研究では多方向不規則波中における大型浮体の動揺特性を把握するとともに、浮体の動揺を低減させるために、防波堤を設置することにより大型浮体に対する入射波高を低減させる方法を提案し、その効果を検証することを目的とした。

2. 実験条件

図一1に本実験で使用したデュアル・フェース・サーベント型造波装置(加藤ら, 1999)および計測機器の配置を示す。図中の配置位置の座標は、2面ある造波機の両造波面の交点を原点とし、第2造波面をX軸、第1造波面をY軸としている。また、以下に示す主波向 θ_p の定義については、第1造波面の法線方向を0°とし、半時計回りを正としている。表一1に本実験で用いた波諸元を示す。表一1に示すとおり、水深 D は50.0 cmで一定とし、有義波高 $H_{1/3}$ は2.0~10.0 cm、有義波周期 $T_{1/3}$ は1.05 s、主波向 θ_p は0, 30°, 方向集中度 S_{max} は10, 50, 999と

変化させた(ただし、 $S_{max}=999$ は単一方向波を表す)。なお、本実験では多方向波の波群は2種類とした。目標周波数スペクトル形は、JONSWAP型とした。また、本実験は全てSS(シングル・サンメーション)法により造波することとし、波の成分数を1024とした。大型浮体の規格は、10.0×2.0×0.07×0.02 m($L \times B \times D \times d$)、 $EI/B=765$ Nmの矩形型とした。ここで、 L , B , D , d , および EI はそれぞれ、矩形の長軸方向の長さ、幅、高さ、喫水および曲げ剛性である。また、防波堤の先端高 h_c は3.0 cmおよび4.0 cmの2種類とした。



図一1 模型および計測機器の配置図

表一1 実験ケース

No	Case	$D(\text{cm})$	θ_p	$S_{\max}$	$H_{1/3}(\text{cm})$	$T_{1/3}(\text{s})$	Wave group	
1	L012A	50	0	10	2.0	1.05	1013 1113	
2	L012B						1213 1313	
3	L015A				5.0		1013 1113	
4	L015B						1213 1313	
5	L017A				7.0		1013 1113	
6	L017B						1213 1313	
7	L01MA			50	10.0		1013 1113	
8	L01MB						1213 1313	
9	M015A			999	5.0		1013 1113	
10	M015B						1213 1313	
11	H015A			30	2.0		1013 1113	
12	H015B						1213 1313	
13	L312A			10	5.0		1013 1113	
14	L312B						1213 1313	
15	L315A				7.0		1013 1113	
16	L315B						1213 1313	
17	L317A			50	10.0		1013 1113	
18	L317B						1213 1313	
19	L31MA			999	5.0		1013 1113	
20	L31MB						1213 1313	
21	M315A			50	5.0		1013 1113	
22	M315B						1213 1313	
23	H315A			999	5.0		1013 1113	
24	H315B						1213 1313	

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所波浪研究室長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所波浪研究室
*** 運輸省港湾技術研究所波浪研究室
**** 工博 運輸省船舶技術研究所
***** 工修 運輸省船舶技術研究所
***** 工博 科学技術振興事業団

3. 実験内容

本実験の方法について、浮体動揺に関する検討実験に先立って、防波堤背後の波浪特性を把握するために越波特性実験を実施した。次に、沖波と浮体動揺の関係を把握するために、防波堤を設置せずに浮体動揺実験を行った。最後に、防波堤を設置して、防波堤の波の遮蔽効果による浮体動揺の低減効果について検討した。波の計測は、容量式波高計によりサンプリング周波数 20 Hz で 9000 データ分の水位変動を取得した。計測されたデータのうち造波開始約 40 s 後からの 8192 データを用いて、周波数スペクトルおよび方向スペクトルの解析を行った。なお本研究では、周波数に関して積分した方向スペクトルを“二次元方向スペクトル”と記す。浮体動揺の計測は、図-2 に示す位置にユニバーサル・ジョイント式の係留変位計 4 台を設置して行った。なお、浮体動揺における相対座標系は図-2 に示すとおりであり、浮体の

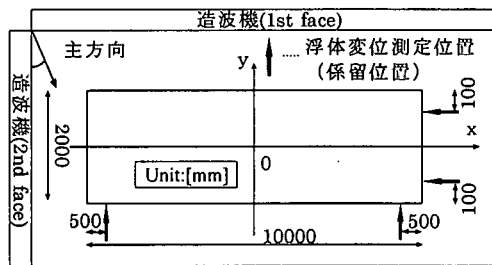
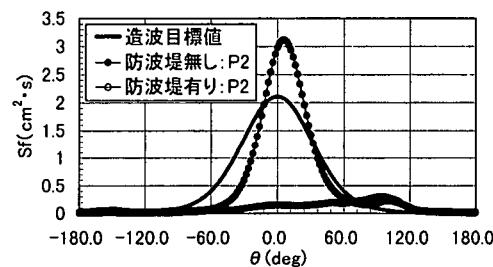
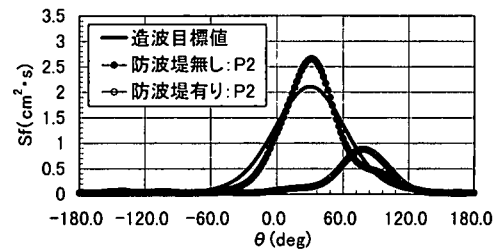


図-2 浮体模型拡大図



(1) $\theta_p = 0^\circ$



(2) $\theta_p = 30^\circ$

図-3 防波堤による入射波の遮蔽効果

動揺は、Surge(前後揺れ; x 軸方向), Sway(左右揺れ; y 軸方向), Yaw(船首揺れ; z 軸周り)の3成分についてのみ計測した。

4. 波に関する模型実験の結果

ここでは、防波堤を設置して図-1 に示す波高計アレイ P.2 で方向スペクトルを計測することにより、多方向波に対する防波堤の遮蔽効果を検討した。相対天端高 $h_c/H_i = 0.43$ としたとき、方向集中度 $S_{\max} = 10$ 、主波向 $\theta_p = 0, 30^\circ$ の場合における P.2 での 2 次元方向スペクトルを図-3(1) および (2) に示す。図-3 より、防波堤背後ではかなりの波エネルギーが減衰されることがわかる。しかしながら、図-3(1) では、 0° 付近と 90° 付近に小さなピークがみられた。前者は越波による伝達波、後者は防波堤端部から進入する回折波によるものと考えられる。また、図-3(2) では 80° 付近に比較的大きなピークがみられた。これは、防波堤端部からの回折波のほかに、防波堤側面の造波面から直接伝搬する沖波のエネルギーが含まれているものと考えられる。また、越波による伝達波のエネルギーは、 $\theta_p = 0^\circ$ のときに比べて小さかった。

以上のように、多方向波中の防波堤背後で観測される波高は、越波による伝達波高のほかに、防波堤端部から進入する回折波や防波堤側面から直接伝播する沖波などが含まれる。したがって、多方向波を用いた場合における防波堤の相対天端高と波高伝達率の関係を明らかにするためには越波による伝達波とその他の波を分離することが必要である。ここでは、(1) 式を用いて実験値から越波による波高伝達率を算定した。ここで、(1) 式中の $K_{t(2cm)}$ は、入射波高 $H_{in} = 2.0$ cm であるときの伝達率を示し、このとき越波が生じないことが目視より確認されている。

$$\left. \begin{aligned} K_t^* &= \sqrt{K_t^2 - K_{t(2cm)}^2} \\ K_t &= H_{exp}/H_{in} \\ K_{t(2cm)} &= H_{exp(2cm)}/H_{in(2cm)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_{exp} は計測波高、 H_{in} は入射波高、 K_t^* は越波による伝達率である。

一方、高山 (1981) による回折波計算法を用いて入射波高 $H_{in} = 2.0$ cm の場合の防波堤背後の波高分布を求め、実験結果と比較したものを図-4 に示す。白抜きの記号で示す実験値が高山法による回折計算結果と一致していることから、この場合の防波堤背後の波は、回折波と沖波から直接伝播する成分波によるものと推定されることが確認された。図-5(1) および (2) に、多方向波 ($S_{\max} = 10$) を $\theta_p = 0, 30^\circ$ として作用させたときに、(1) 式によって算出された防波堤背後の P.2 における越波に

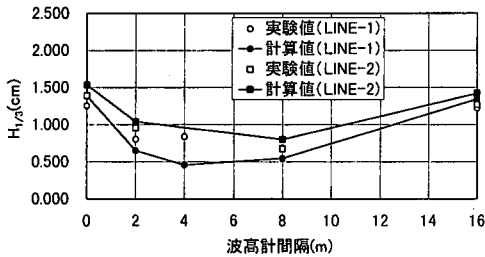
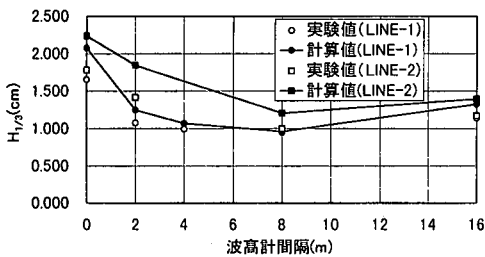

 (1) $\theta_p = 0^\circ$

 (2) $\theta_p = 30^\circ$

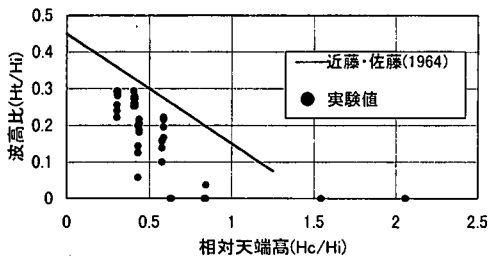
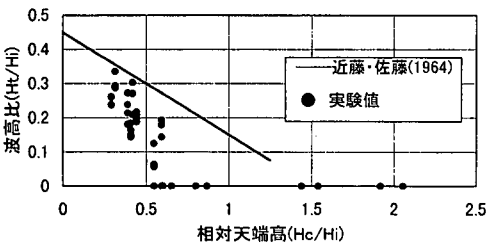
 図-4 回折計算結果 ($S_{\max} = 10$, $H_m = 2.0$ cm)

 (1) $\theta_p = 0^\circ$

 (2) $\theta_p = 30^\circ$

 図-5 越波による波高伝達率
($S_{\max} = 10$, $T_{1/3} = 1.05$ s; 計測点=P.2)

表-2 自由動揺試験結果

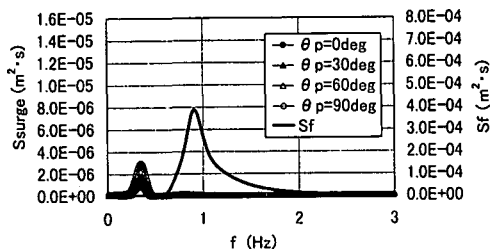
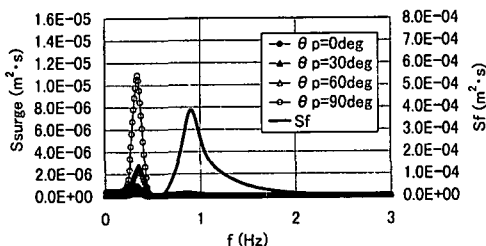
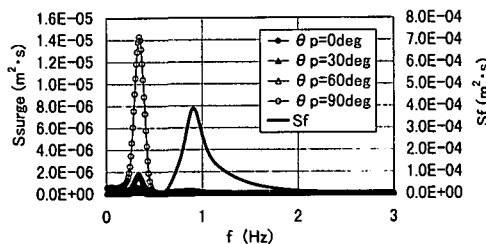
浮体動揺成分	固有振動周波数(f)
Surge	0.35
Sway	0.34
Yaw	0.52

よる波高伝達率と相対天端高との関係を示す。また、図中の直線は近藤・佐藤(1964)による単一方向波を用いた2次元実験から得られた実験式である。図-5より多方向波の主波向が防波堤に対して直角である場合、全体的に多方向波の越波による波高伝達率は一方向波に比べて小さくなり、とくに、相対天端高が0.7以上になると越波はほとんど観測されないことがわかる。また、防波堤に対して多方向波が30°傾いて入射する場合、越波による伝達波高は直入射の場合に比べて減少することがわかった。一方、図-4(2)に示すように回折波高は $\theta_p = 0^\circ$ のときより若干大きくなる傾向がみられた。これは、多方向波の方向集中度が小さいほど波のエネルギーが広い角度に分散し、防波堤背後に到達する成分波のエネルギーが増加するためであると考えられる。したがって、主波向が直入射から傾いてくると、方向集中度の低い多方向波の越波による伝達波高と回折波からなる防波堤背後の波高分布は、防波堤に対する入射角によって大きく変化しないことが推測できる。

5. 浮体動揺に関する模型実験の結果

5.1 浮体動揺に関する検討

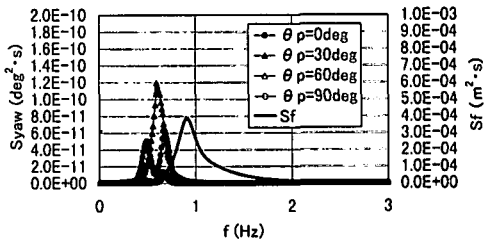
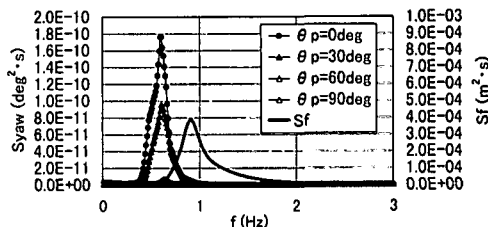
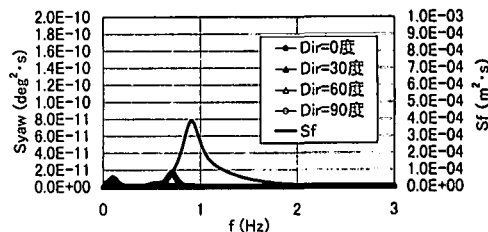
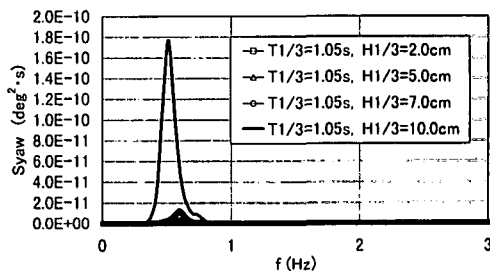
本節では、防波堤を配置しない条件において、沖波の方向集中度、主波向が変化したときの浮体動揺特性を考察した。図-6、図-7は、 $H_{1/3} = 5.0$ cm, $T_{1/3} = 1.05$ sで一定とし、 $\theta_p = 0 \sim 90^\circ$, $S_{\max} = 10 \sim 999$ まで変化させたときの浮体動揺特性をSurgeとYawについて示したものである。なお、図中には合わせて、入射波の周波数スペクトル図を S_f として示す。まず、Surgeは、図-6に示すとおり、いずれの $S_{\max}$ においても主波向が、 $\theta_p = 0 \sim 90^\circ$ と変化するにつれて、大きくなることが確認された。一方、主波向を一定として $S_{\max}$ を変化させた場合には、 $\theta_p = 90^\circ$ のときは多方向波($S_{\max} = 10, 50$)よりも一方向波($S_{\max} = 999$)によるSurge動揺量の方が大きくなるものの、 $\theta_p = 0 \sim 60^\circ$ のときは一方向波よりも多方向波によるSurge動揺量の方が大きくなることが確認された。なお、SwayについてはSurgeで得られた傾向と同様の結論が得られた。Yawは、図-7に示すとおり $\theta_p = 60, 90^\circ$ のときよりも $\theta_p = 0, 30^\circ$ のときに大きくなることからわかる。 $S_{\max}$ を変化させた場合には、主波向に関わらず一方向波よりも多方向波によるYaw動揺量の方が大きくなることからわかる。また、図-7(1)に示すように、 $S_{\max} = 10$, $\theta_p = 0^\circ$ の沖波が入射するとき、Yawの動揺ピーク周波数が2カ所確認された。これは、本実験で使用した浮体動揺計測装置がユニバーサル・ジョイント式の係留変位計であったため、浮体の鉛直方向における動揺の影響が水平方向の動揺として表れるためと考えられる。なお、全ての浮体動揺成分においてもピーク周波数は、入射波

(1) $S_{\max}=10$ (2) $S_{\max}=50$ (3) $S_{\max}=999$ (一方向波)図-6 θ_p および $S_{\max}$ の違いに関する浮体動揺変化 (防波堤無し: Surge)

のピーク周波数とは一致していなかった。表-2は浮体の自由動揺試験結果を示したものであるが、これによると、浮体の固有振動周波数は作用波のそれより小さく、図-6, 7で現れる振動のピーク周波数は浮体動揺の固有周波数と一致しており、実験で得られた振動は、固有振動の影響が大きいと考えられる。以上の結果より、沖合に浮体を設置する場合、Surge, Swayは、波向によっては一方向波よりも多方向波による動揺量の方が大きくなることがわかる。さらに、Yawは波向に関わらず、一方向波よりも多方向波による動揺量の方が大きくなる。したがって、沖合に浮体を設置するような場合、沖波の多方向性を十分考慮して設置しなければならないことがわかる。

5.2 防波堤設置による浮体動揺の低減効果の検討

本節では、防波堤の相対天端高や沖波の多方向性と防波堤による浮体動揺量の低減効果との関係を考察した。図-8は、 $h_c=4.0$ cmの防波堤を設置した場合におけるYawの浮体動揺スペクトルを示したものである。このときの沖波諸元は $\theta_p=30^\circ$, $S_{\max}=10$, $T_{1/3}=1.05$ sであり、

(1) $S_{\max}=10$ (2) $S_{\max}=50$ (3) $S_{\max}=999$ (一方向波)図-7 θ_p および $S_{\max}$ の違いに関する浮体動揺変化 (防波堤無し: Yaw)図-8 h_c/H_1 と Yaw の関係
($h_c=4.0$ cm, $\theta_p=30^\circ$, $S_{\max}=10$)

$H_{1/3}$ は 2.0 cm から 10.0 cm まで変化させている。なお、防波堤に対する相対天端高 (h_c/H_1) は 0.4~2.0 である。図-8より、波高 10.0 cm ($h_c/H_1=0.4$) では、比較的大きな Yaw が確認されたが、波高 2.0~7.0 cm 程度 ($h_c/H_1=0.6\sim2.0$) では、Yaw は比較的小さくなった。これは、沖波の波高が小さい場合には、越波により生じる防波堤背後の伝達波高も小さいためである。

つぎに、防波堤設置による浮体動揺の低減効果をさらに詳細に検討する。有義波高 $H_{1/3}=5.0$ cm ($h_c/H_1=0.8$), $T_{1/3}=1.05$ s, $S_{\max}=10$ の多方向波が、それぞれ $\theta_p=0$,

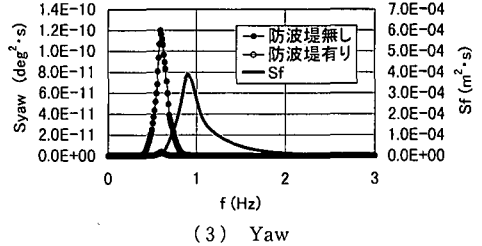
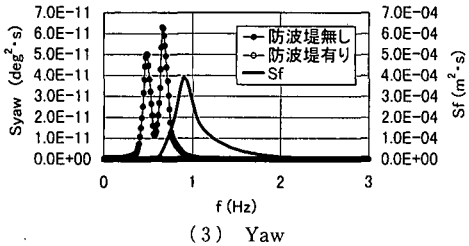
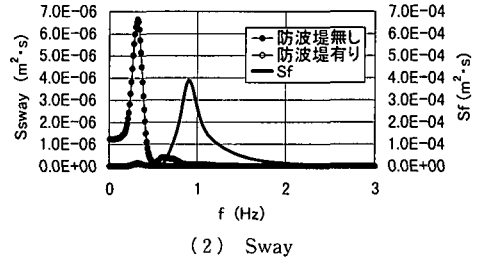
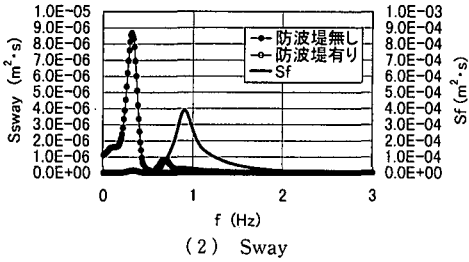
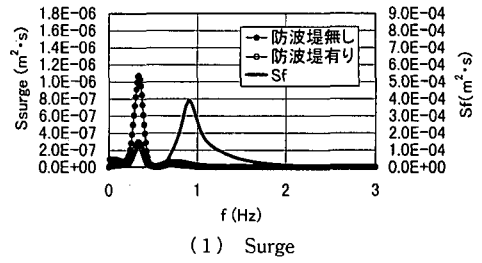
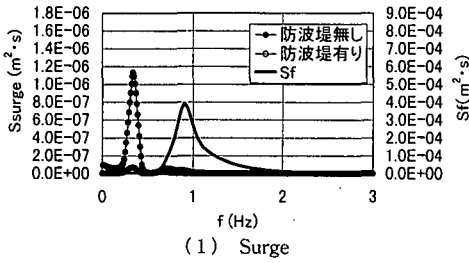


図-9 防波堤設置による浮体動揺の低減効果
($H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.05$ s, $\theta_p=0^\circ$, $S_{max}=10$)

図-10 防波堤設置による浮体動揺の低減効果
($H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.05$ s, $\theta_p=30^\circ$, $S_{max}=10$)

30°で防波堤に入射したときの浮体動揺スペクトルを図-9および図-10に示す。なお、図中には合わせて入射波の周波数スペクトル図を示す。図-9より、 $\theta_p=0^\circ$ のときは、いずれの動揺成分についても顕著な低減効果を確認することができた。一方、 $\theta_p=30^\circ$ のときは、図-10に示すとおり $\theta_p=0^\circ$ のときと比べると、防波堤端部から進入する回折波の影響が大きくなるため、浮体動揺の低減効果は若干小さくなるものの、防波堤による低減効果は十分に確認された。したがって、沖合の多方向波浪中に浮体を設置する場合、防波堤を配置することは浮体動揺量の低減効果を図るのに、有効な手法であることが確認された。

6. 結 論

防波堤設置による沖波の遮蔽効果について、多方向波の越波による波高伝達率は一方向波に比べて小さく、とくに相対天端高=0.7以上になると越波は、ほとんど観測されなかった。

浮体動揺については、多方向波が浮体に作用する場合、入射波の主波向の違いによって、Surge, Sway, Yawの動揺スペクトルが、顕著に変化することはなかった。これは、多方向波の方向分散性が大きく起因している。

防波堤背後の浮体動揺の低減効果については、防波堤の相対天端高が $h_c/H_i \approx 0.6$ 以上であれば多方向波中の浮体動揺は比較的小さいことが確認された。

参 考 文 献

- 池野正明・丸山康樹・平口博丸・鹿島遼一 (1991): 多方向不規則波浪場における浮揚式発電所の動揺と計算法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 781-785.
- 加藤雅也・平山克也・丸山晴広・平石哲也 (1999): デュアル・フェース・サーペント型造波装置による二方向波浪の造波特性, 港湾技研資料, No. 927, 24 p.
- 近藤徹郎・佐藤 功 (1964): 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第117号, 15 p.
- 高山知司 (1981): 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No. 367, 140 p.