

超大型浮体構造物の津波高さ低減効果

柿沼 太郎*・勘場 隆嗣**・中平 達也***・村上 佳広****

1. 序 論

近年、海上空港や、風力・太陽光発電の基地、そして、災害時の避難場所として、超大型浮体構造物の利用が考えられるようになった。超大型浮体構造物は、曳航等により移動可能であるという特徴を有し、また、日本のような島国では、空間の創造という意味でも有効であろう。こうした構造物は、流体上に存在し、超大型であるがゆえに変形し、振動する。従って、超大型浮体構造物の設計のためには、変形する構造物の振動と流体の運動の相互干渉を把握する必要がある。例えば、遠藤 (2000)、Hermans (2000) 及び Kashiwagi (2004) は、海上空港を想定し、平面方向に広がりのある薄板状浮体構造物上を荷重が移動する場合を対象として、浮体構造物の線形な応答の数値シミュレーションを行なった。

また、堺ら (1998) 及び劉・堺 (2000) は、津波を想定した孤立波が、弾性体である薄板状浮体構造物に入射する場合の浮体の応答を水理実験により調べている。そして、入射波の非線形性が比較的強い場合に、孤立波に先行する分裂波が生じることを見出した。ところで、こうした波の分裂時に、主波のエネルギーの一部が分裂波に移行する。ここで、波高が最大の波を主波と呼ぶ。すなわち、主波の波高が、分裂波の生成に伴い低減される。従って、この現象は、薄板状浮体構造物が津波高さの低減効果を有することを示唆していると考えられる (中平ら, 2014)。すなわち、この性質を利用することができれば、浮体構

造物によって、巨大津波の津波高さをその伝播中に低減させることが可能となる。

そこで、本研究では、薄板状浮体構造物と流体の相互干渉問題を対象とした数値モデルを適用し、超大型浮体構造物が有する巨大津波の津波高さの低減効果に関して、数値解析に基づき検討する。

2. 基礎方程式系及び数値解析手法

基礎方程式系は、水の波の変分原理に基づく非線形方程式系と、線形古典理論から得られる薄板の運動方程式とする (柿沼ら, 2014)。Nakayama・Kakinuma (2010) は、内部波の 1 次元伝播を対象とした陰的な差分法を提案しているが、これを薄板状構造物と多層流体の連成問題が扱えるように拡張して、基礎方程式系を解く。

数値解析では、薄板が存在する位置の水面に曲げ剛性率を与え、一部の水域を覆う薄板を表現する。この手法により、薄板の端部における波の反射や透過も考慮することが可能である。ここでは、断面 2 次元内の現象を対象とし、また、簡単のために、浮体構造物下面、壁面及び底面における摩擦を無視する。

Kakinuma ら (2012) は、本数値モデルによる解析結果と、上述した劉・堺 (2000) による水理実験結果を比較し、本数値モデルによる薄板状浮体構造物の応答の再現性が高い精度を有することを確認している。

なお、本研究では、流体の速度ポテンシャルを表わす、鉛直方向 z に関するべき級数の展開項数を $N=3$ とし、波の分散性を考慮する。

図-1 に示すように、静水深 h が 50 m で一様な水域に、超大型浮体構造物を設置する。この水域における基礎方程式系の定常進行孤立波解を山下・柿沼 (2013) の手法により数

* 鹿児島大学学術研究院理工学域

** 大鉄工業株式会社線路部

*** 鹿児島大学大学院理工学研究科

**** 関西大学システム理工学部

的に求め、初期状態において水面形のピークが $x = 2.0 \text{ km}$ に位置するように、 x 軸の正の方向に伝播する孤立波の水面形及び速度ポテンシャル場の初期条件を与える。

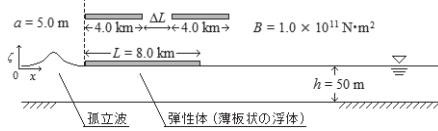


図-1 薄板状浮体構造物が設置された計算対象領域

3. 1 基の超大型浮体構造物が有する津波高さ低減効果

全長が 8.0 km である浮体構造物を図-1 に示す水域の $4.0 \text{ km} \leq x \leq 12.0 \text{ km}$ の位置に 1 基設置する。浮体構造物の曲げ剛性率 B は、 $1.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$ で一様であるとする。入射波の波高 a が 5.0 m の場合の浮体構造物及び水面の変動を図-2 に示す。

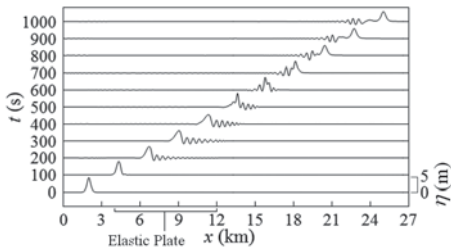


図-2 一部が浮体構造物で覆われた水域を孤立波が伝播する場合の表面形の時間変化 ($L = 8.0 \text{ km}$, $B = 1.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$, $a = 5.0 \text{ m}$)

浮体構造物に孤立波が入射すると、浮体波が分裂波として発生し、主波の波高が低減する。ところで、浮体波の分散関係式(坪郷・岡田, 1997)が示す通り、浮体波は、波長が短い波ほど波速が大きい。このため、分裂により発生した波長の短い波が浮体構造物を通過し、続いて、波長の長い、波高の低減した主波が浮体構造物を通過する。しかしながら、自由水面波は、波長が長い波ほど波速が大きい

ため、浮体構造物を通過後、後者の、波長の長い主波が、前者の、波長の短い分裂波に追い付き、重合する。従って、この重合の過程において、ある区間にわたって、主波の波高、すなわち、津波高さの増加が見られる。こうした現象は、図-2 では、時刻 $t = 500 \text{ s}$ で顕著である。

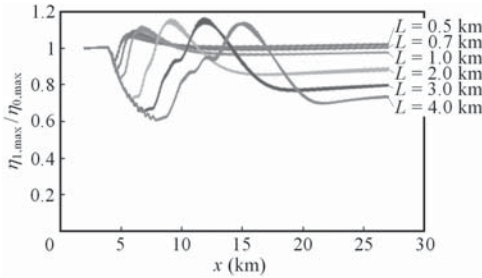
その後、波長の長い主波が、波長の短い分裂波を追い越すと、主波の波高は、再度、低減し、入射波の波高を下回る。すなわち、超大型浮体構造物が、津波高さの低減効果を有すると言える。この場合、波長の長い主波が、波長の短いすべての波を追い越し、主波の波高がほぼ一定となったときの最大水位は、約 3.5 m であり、主波の波高が入射波波高の約 30% 低減している。

図-1 に示す水域に、曲げ剛性率 B が $1.0 \times 10^{12} \text{ Nm}^2$ である浮体構造物を 1 基設置する。浮体構造物の沖側端の位置を $x = 4.0 \text{ km}$ とし、入射波の波高 a は、 5.0 m とする。浮体構造物の全長 L が異なる場合の、相対最大水位の数値解析結果を図-3 に示す。ここで、相対最大水位 $\eta_{1,\max} / \eta_{0,\max}$ は、各地点における、浮体構造物を設置した場合の最大水位 $\eta_{1,\max}$ と、浮体構造物を設置しない場合の最大水位 $\eta_{0,\max}$ の比である。

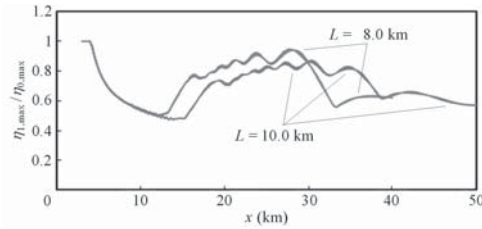
図-3 より、浮体構造物の全長が長いほど、最終的な津波高さの低減効果が大きくなることがわかる。なお、浮体構造物の全長 L が 8.0 km 及び 10.0 km の場合、最終的な津波高さは、4 割程度低減している。

また、図-1 に示す水域の $4.0 \text{ km} \leq x \leq 8.0 \text{ km}$ の位置に、全長が 4.0 km である浮体構造物を 1 基設置する場合を対象とする。入射波の波高 a は、 5.0 m とする。この浮体構造物の曲げ剛性率 B が異なる場合の、各地点の相対最大水位を図-4 に示す。

図-4 より、浮体構造物の曲げ剛性率 B が大きいほど、最終的な津波高さの低減効果が大きくなることがわかる。ただし、浮体構造物の曲げ剛性率が大きいほど、浮体構造物通過後の主波の波高が定常状態になるまでに要する、津波の伝播距離が長くなる。これは、



(a) $L = 0.5 \text{ km}, 0.7 \text{ km}, 1.0 \text{ km}, 2.0 \text{ km}, 3.0 \text{ km}$ 及び 4.0 km



(b) $L = 8.0 \text{ km}$ 及び 10.0 km

図-3 各地点の相対最大水位 $\eta_{1,max}/\eta_{0,max}$ ($B = 1.0 \times 10^{12} \text{ Nm}^2$, $a = 5.0 \text{ m}$, $\eta_{1,max}$ 及び $\eta_{0,max}$ は、それぞれ、浮体構造物を設置した場合と設置しない場合の、各地点における最大水位である。)

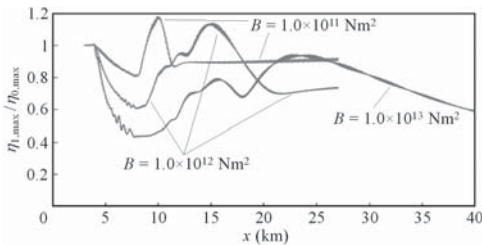


図-4 各地点の相対最大水位 $\eta_{1,max}/\eta_{0,max}$ ($L = 4.0 \text{ km}$, $a = 5.0 \text{ m}$)

曲げ剛性率が大きい場合に、周期の短い分裂波が数多く生成されるためである。波高が比較的大きく低減して波速が遅くなった周期の長い主波が、長い波列の分裂波を追い越すまでに、より多くの時間を要する。

更に、図-1に示す水域の $4.0 \text{ km} \leq x \leq 8.0 \text{ km}$ の位置に、全長が 4.0 km で曲げ剛性率が $B = 1.0 \times 10^{12} \text{ Nm}^2$ である浮体構造物を1基設置する場合を対象とする。入射波の波高 a が 5.0 m , 10.0 m 及び 15.0 m の場合の相対最大

水位を図-5に示す。

図-5より、入射波波高 a が大きく、入射波の波形勾配が大きい場合ほど、津波高さの低減率が高くなることわかる。

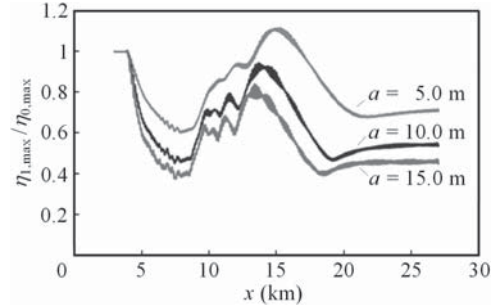


図-5 各地点の相対最大水位 $\eta_{1,max}/\eta_{0,max}$ ($L = 4.0 \text{ km}$, $B = 1.0 \times 10^{12} \text{ Nm}^2$)

4. 2基の超大型浮体構造物が有する津波高さ低減効果

図-1に示す水域に、浮体構造物を2基設置する場合を対象とする。1基目及び2基目の浮体構造物の曲げ剛性率をそれぞれ B_1 及び B_2 として、これらがともに $1.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$ であるとする。また、1基目及び2基目の浮体構造物の全長をそれぞれ L_1 及び L_2 として、これらがともに 4.0 km であるとする。1基目の浮体構造物の開始点は、 $x = 4.0 \text{ km}$ の地点とする。

入射波の波高 a を 5.0 m としたとき、2基の浮体構造物間の距離 ΔL が異なる場合の、各地点における相対最大水位を図-6に示す。

図-6より、相対最大水位は、浮体構造物長のみならず、2基の浮体構造物間の距離 ΔL にも依存することがわかる。波高がほぼ一定となった主波の最大水位の低減率は、 $\Delta L = 1.0 \text{ km}, 1.5 \text{ km}, 2.0 \text{ km}, 2.5 \text{ km}, 3.0 \text{ km}$ 及び 3.5 km の順に、約 26%, 28%, 29%, 26%, 17% 及び 7% であり、 $\Delta L = 2.0 \text{ km}$ の場合に最も大きい。主波が、1基目の浮体構造物を通過後、波の重合によって波高が大きくなった状態で、2基目の浮体構造物に入射すると、2基目の浮体構造物に対する入射波の、波形

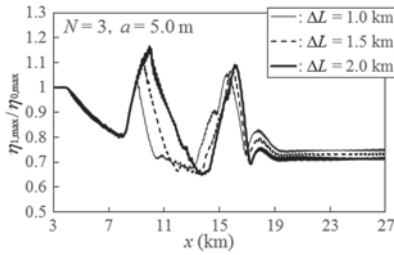
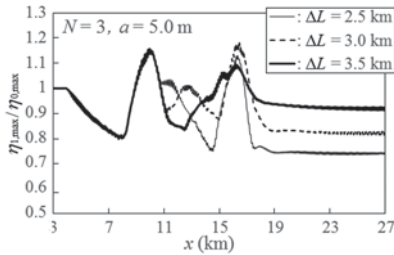
(a) $\Delta L = 1.0$ km, 1.5 km 及び 2.0 km(b) $\Delta L = 2.5$ km, 3.0 km 及び 3.5 km

図-6 各地点の相対最大水位 $\eta_{1,max}/\eta_{0,max}$
 $(L_1 = L_2 = 4.0$ km, $B_1 = B_2 = 1.0 \times 10^{11}$
 Nm^2 , $a = 5.0$ m)

勾配が大きいため、最大水位の低減効果が大きくなる。このように、浮体構造物を数基に分割して設置することにより、津波高さの低減効果をより大きくすることが可能である。

5. 巨大津波に対する超大型浮体構造物の津波高さ低減効果

2011年東北地方太平洋沖地震津波のような巨大津波に対する、超大型浮体構造物の低減効果を検討する。そのために、まず、岩手県南部沖の静水深約 204 m の地点に設置された GPS 波浪計が捉えた津波波形（河合ら, 2011）をモデル化する。すなわち、岩手南部沖 GPS 波浪計による潮位偏差の観測値を 2 倍し、津波が GPS 波浪計の設置位置を線形浅水波の波速で通過したと仮定して、図-7 に示すような空間波形を得る。ここで、 ζ は、水面変動である。

この波形を初期時刻 $t = 0$ s における水面形とし、初期の速度ポテンシャルを至る所で 0.0 m²/s とする。そして、この初期状態より生成

した津波が、図-8 に示すようなモデル地形上を伝播する場合の数値解析を行なう。

ここで、二つの一様静水深部が一様勾配斜面で接続されており、一様勾配斜面は、 600 km $\leq x \leq 650$ km にある。また、斜面より沖側の静水深を 204 m、斜面より岸側の静水深を 60 m とする。なお、この斜面勾配は、約 2.88×10^{-3} であり、岩手南部沖 GPS 波浪計の設置地点から釜石湾湾口に至る実地形の斜面勾配の平均値と同オーダーである。

図-9 に、時刻 $t = 8,000$ s における水面形の数値解析結果を示す。この時刻において、津波は、静水深が 60 m である水域を伝播している。

図-9 より、最大水位に至るまでに、2 段階で水位が上昇する津波の伝播が確認される。すなわち、波高数 m の成分と、その後続く、変位のより大きな比較的短周期の成分が存在する。このうち、変位の大きな比較的短周期の津波の波形勾配は、約 0.01 となっている。なお、前述した GPS 波浪計は、多方向波を捉えた可能性もあるが、ここで行なっている

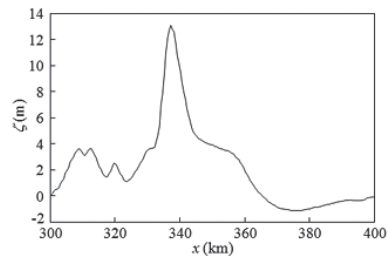


図-7 静水深が 204 m である水域における津波初期波形

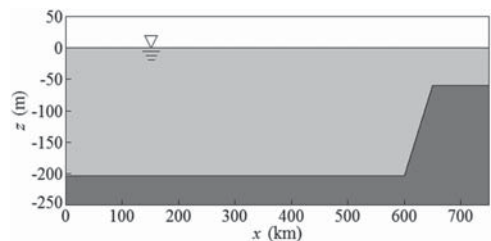


図-8 巨大津波の伝播解析のためのモデル地形

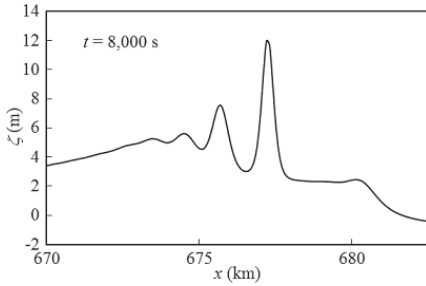


図-9 静水深が 60 m である水域を伝播する津波の水面形

津波の伝播解析は、図-7 に示した津波初期波形から、 x 軸方向という 1 方向に沿って津波が伝播したという仮定に基づいている。

次に、図-9 に示した水面形において、第 2 段階の部分、すなわち、比較的短周期である巨大な津波高さを有する成分に対する浮体構造物の低減効果に着目するため、この部分の後続の波の波形を単純化する。そして、得られた水面変動を 2 倍して、図-10 に示す水面形を作成する。

この波形を改めて初期時刻 $t = 0$ s における水面形とし、初期の速度ポテンシャルを至る所で $0.0 \text{ m}^2/\text{s}$ とする。そして、この初期状態より生成した津波が、一様静水深が $h = 60 \text{ m}$ である水域に設置した浮体構造物に入射する場合の数値解析を行なう。ここで、曲げ剛性率が $1.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$ である浮体構造物を $30.0 \text{ km} \leq x \leq 40.0 \text{ km}$ の位置に、1 基設置する。

図-11 に示すように、図-10 に示した津波初期波形は、反対方向に進む二つの波に分離し、このうち、 x 軸の正の方向に伝播する、津波高さ 15 m 程度の津波が、浮体構造物に入射する。

津波が浮体構造物に入射すると、相対的に、短い波長の浮体波が、分裂波として発生する。先に述べた通り、浮体波は、短波長である波ほど波速が大きく、短波長である浮体波の波速は、浅水波の波速より著しく大きいいため、短波長の浮体波が主波に先行し、その結果、主波の津波高さが低減する。そして、浮体構造物を通過した後、分裂波として生じた短波長波は、波速の大きな主波に追いつかれる。

図-12 に、各地点における最大水位を示す。先行する短波長波と主波の重合により、浮体構造物を通過後、 $40 \text{ km} \leq x \leq 49 \text{ km}$ において津波高さが増加している。その後、津波高さが低減し、最終的に、津波高さが 11 m 程度の津波となる。従って、津波の伝播方向の 1 次元性を仮定した場合には、岸から 10 km 以上沖の地点に浮体構造物を設置すれば、浮体構造物の津波高さ低減効果が発揮される。

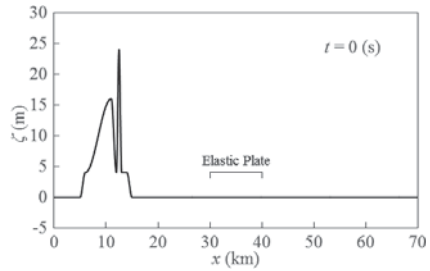


図-10 静水深が 60 m である水域における津波初期波形

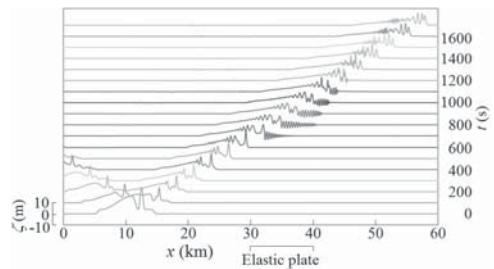


図-11 津波初期波形及び各時刻における津波の表面形（全長が 10.0 km、曲げ剛性率が $1.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$ である浮体構造物が $30 \text{ km} \leq x \leq 40 \text{ km}$ の位置に設置されている。水域の静水深は、60 m で一様である。）

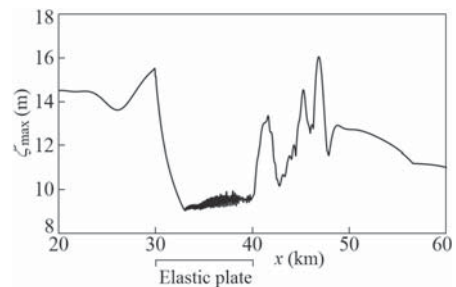


図-12 各地点における最大水位

図-13に、この浮体構造物に作用する曲げモーメント $M/(\rho gh\lambda^2\omega)$ を示す。

ここで、水の密度を $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 、重力加速度を $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ としている。また、無次元化のための水平方向の長さ λ を $\lambda = h = 60 \text{ m}$ とし、浮体構造物の幅を $\omega = 1.0 \text{ m}$ としている。図-13 が示す曲げモーメントに対する強度が、浮体構造物に要求されることになる。なお、図-11 との比較により、浮体構造物に作用する相対的に大きな曲げモーメントは、津波が浮体構造物を通過する際の分裂によって生じた短波長波に起因していることがわかる。

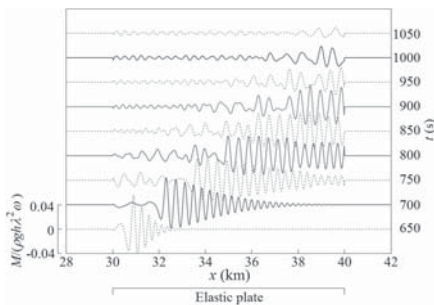


図-13 図-11 に示す津波が浮体構造物を通過する際に浮体構造物に作用する曲げモーメント M ($\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\lambda = h = 60 \text{ m}$, 浮体構造物の単位幅 $\omega = 1.0 \text{ m}$)

6. 結 論

薄板状浮体構造物と流体の相互干渉問題を対象とする数値モデルを適用し、超大型浮体構造物が有する巨大津波の津波高さ低減効果に関して、数値解析に基づき検討した。その結果、次のような結論を得た。

- ・孤立波が浮体構造物に入射すると、分裂して、周期の短い浮体波が発生し、主波の波高が低減する。
- ・浮体構造物を通過後、水面波となった周期の短い分裂波に、後続の周期の長い主波が重合して、ある区間にわたり、主波の波高

が大きくなる。

- ・主波が分裂波を追い越し切ると、主波の波高が低減し、超大型浮体構造物が有する津波高さ低減効果が発揮される。浮体構造物の全長、浮体構造物の曲げ剛性率及び入射する津波の津波高さが大きいほど、津波高さの最終的な低減率が大きくなる。
- ・浮体構造物を通過した後、分裂波との重合により増幅した主波が、次の浮体構造物に入射すると、後者の浮体構造物の津波高さ低減効果が増大する。すなわち、複数基から構成される超大型浮体構造物が有する津波高さ低減効果は、浮体構造物間距離にも依存する。

参考文献

- 1) 遠藤久芳：波浪および飛行機の離着陸荷重を受ける VLFS の挙動，第 15 回海洋工学シンポジウム，pp. 193-200，2000。
- 2) 柿沼太郎・吉川 諒・山下 啓：マントル及び地殻上の海水を伝播する津波の数値解析，津波工学研究報告，第 31 号，pp. 59-65，2014。
- 3) 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震津波の特性，港湾空港技術研究所報告，第 50 巻，第 4 号，pp. 3-63，2011。
- 4) 堺 茂樹・笹本 誠・劉 曉東・影佐拓也・平賀健司：津波来襲時の大型弾性浮体の変形について，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 896-900，1998。
- 5) 坪郷 尚・岡田博雄：超大型浮体構造の撓み波動伝搬挙動と強度に関する基礎的考察，造船学会論文集，第 181 巻，pp. 381-390，1997。
- 6) 中平達也・柿沼太郎・山元 公・山下 啓・村上佳広：超大型浮体構造物の津波低減効果，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 70，No. 2，pp. 911-915，2014。
- 7) 山下 啓・柿沼太郎：非線形波動方程式

- 系に基づく表面孤立波及び内部孤立波の数値解, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. 6-10, 2013.
- 8) 劉 曉東・堺 茂樹: 大型弾性浮体下での孤立波の分裂に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp. 31-35, 2000.
 - 9) Hermans, A. J.: A boundary element method for the interaction of free-surface waves with a very large floating flexible platform, J. Fluids and Structures, Vol. 14, pp. 943-956, 2000.
 - 10) Kakinuma, T., K. Yamashita and K. Nakayama: Surface and internal waves due to a moving load on a very large floating structure, J. Applied Mathematics, Vol. 2012, Article ID 830530, 14 pages, 2012.
 - 11) Kashiwagi, M.: Transient responses of a VLFS during landing and take-off of an airplane, J. Mar. Sci. Technol., Vol. 9, pp. 14-23, 2004.
 - 12) Nakayama, K. and T. Kakinuma: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 62, pp. 574-590, 2010.