

人生，水もの —私の研究経歴—

Life is as Water Flow —My Research History—

平石 哲也

Tetsuya HIRAISHI

Synopsis

The author was born in a port town, Kobe and studied the coastal engineering in Kyoto University. After graduation, he was hired by the Ministry of Transport and became a member of the Port and Harbour Research Institute (PHRI). In the institute, he mainly managed the wave transformation in shallow water, the prevention of the long period waves in harbors and the development of the multi-directional random wave generator. He moved to the DPRI, Kyoto University as a professor after the 26years work in PHRI. The large size experimental works in the Tsunami Reproduction Basin in the Ujikawa Open Laboratory was his main research theme This manuscript demonstrates the purposes and results of such large size experiments carried out by himself.

キーワード: 津波再現装置, 多方向不規則波, 津波調査, 関西空港護岸, 神戸

Keywords: tsunami reproduction basin, directional random wave, tsunami survey
Kansai-airport seawall, Kobe

1. はじめに

筆者は、2010年4月に防災研究所流域災害研究センター沿岸域土砂環境研究領域教授を拝命し、2023年3月に同所を定年退官した。退官に当たり、拙文を本年報に投稿する機会に恵まれた。そこで、これまでの主な研究内容を振り返るとともに、今後の抱負をまとめた。特に京都大学防災研究所付属宇治川オープンラボラトリーの“津波再現装置”での大型実験の成果を中心に話を進めたい。

2. 大学での高潮研究

筆者は、1957年12月に神戸市に生まれ、高校は、二級河川湊川の暗渠の入り口で、会下山の麓にある県立兵庫高等学校に進学した。このあたりは、南北朝時代の湊川の合戦の古戦場で、近くの湊川公園には後醍醐天皇方の楠木正成の銅像が建っている。[photo 1]に

示すように、馬上勇壮な姿で、神戸では楠公（なんこう）さんと呼ばれて親しまれている。公園の山側に平清盛が築いた福原の都跡があり、高校の恩師が近くの下宿していたため、よく散策していた。この頃、神戸港には、まだメリケン波止場があり、“はしけ”と呼



Photo 1 Stature of General Kusunoki in Minatogawa Park

ばれる小型の水上運搬船が多数係船されていた。ポートタワーは遠足と家族旅行でよく登り、港の風景には、慣れ親しんでいた。ただ1995年1月17日の阪神淡路大震災で、高校周辺の下町の風景はすっかり変わり、現在は中層アパートが整地後に建てられている。

高校卒業後、京都大学工学部交通土木工学科へ進んだ。大学の学部・大学院在学中を通じて下宿は下鴨だったので、鴨川は生活圏の一部で川辺にはよく親しんだ。教養教程の後、友人に誘われてなんとなく配属になったのが防災研究所の海岸災害研究室（現在は沿岸災害研究分野（森信人教授））で、当時は故土屋義人先生が教授、現在関西大学社会安全学部特別任命教授を務められる河田恵昭先生が助教授をされていた。私自身は助手の山下隆男先生（のち広島大学教授）について、吹送流の実験や海浜変形実験を手伝いながら、主に、高潮の数値計算を勉強した。当時ではめずらしく多層モデルを用いて、学部の時に断面2次元計算を行い、モデルの有効性を確認していた。修士に進んだときに平面3次元計算に着手し、大阪湾の高潮推算を実施した。このとき、再現目標としたのは第2室戸台風であったと記憶している。外界の潮位および高潮偏差を時系列として計算領域境界から入力し、内海での高潮を多層で計算するという計算法であった（土屋ら、1982）。

境界として明石海峡と友ヶ島水道で潮位変動を条件として与え、大阪湾内の流動を求めた。こんなに大きい高潮が頻繁に起こるのか疑問に思いつつ計算をしていたが、2004年には、台風が10個も本土上陸し、大阪湾には台風23号により高潮・高波が発生して、沿岸各地が被害を受けた。たとえば、関西空港は、東側の護岸が越波により破壊され浸水被害を受けた（平山ら、2005）。その後、護岸嵩上げが行われている。

引き続き、2018年の台風21号は第2室戸台風を越える規模で大阪湾に襲来し、再び関西空港に大きな被害をもたらした。このときは、強い風で流されたタンカーが連絡橋に衝突した。さらに、越波により護岸破壊と浸水が生じた。浸水した水は電気設備の停電をもたらし、応急復旧まで、3日間にわたり、空港機能は完全に閉鎖された。[Photo 2] に被害状況の一例を示す。浸水した海水の総量は290m³と推測された。筆者自身もインドネシアに出張中で、帰国できず、結局成田経由で帰国できたことを覚えている。帰国後ただちに、新関西空港株式会社に連絡を取り、被災調査に参画させていただいた。その縁で、被災後短期間で被災メカニズムと復旧工法を検討する委員会（台風21号越波等検証委員会（関西エアポート株式会社主催2018-2020））。ならびに、関西国際空港防災機能強化対策事業効果検証委員会、関西エアポート、2023）に委員長として参加し、被災メカニズムの検討と対策工法の検証および効果の確認を担務した。



Photo 2 Damaged Kansai International Airport

3. 港湾空港技術研究所における活動

防災研究所での大学院生生活中に受験した当時の国家公務員（甲種）土木職に合格したので、あまり深い考慮をせず、土屋教授に勧められるままに当時の運輸省（現 国土交通省）へ入省した。配属は、港湾技術研究所であった。場所も名前も聞いたことがなく、研究職の希望も提出したことがなく、最初はかなり奇異に感じた職場であったが、流れに任せているうちに、その後20数年を過ごすことになった。研究所は、神奈川県横須賀市の南部に位置し、品川から京浜急行の快速で1時間の道のりである。長瀬という浜に面し、浜伝いの隣の大浜には日本に開国を迫ったペリー提督が上陸した（1853年）記念碑 [Photo3] が立っている。またペリー記念館や浦賀奉行所跡地も近くにあり、日本の夜明けに関係する玄関口であったことが分かる。

港湾技術研究所（2001年4月から機構改革で、独立行政法人港湾空港技術研究所）での配属は、海洋水理部（のち海洋・水工部）波浪研究室研究官である。室長は、当時高山知司博士（のち、京都大学教授）で、その他には、主任研究官1名、各地の港湾建設局からの出向研究員3名、企業からの研修生1名の構成であった。理論構成やプログラミングは室長と主任研究官から、実験手法と管理法については研究員より指導を受け、



Photo 3 Memorial stature of Admiral Perry landing

意外と夜遅くまで、勉強に励んでいた。研究官になって最初のプロジェクトは印象深く、石油タンカー係留用のブイの運動と係留張力の推定法の確立であり、一点係留ブイや多点係留ブイシステムにおける船体運動についても検討を行った（平石ら，1985）。当時、国家石油備蓄基地において、このような係留システムを運営しており、実験データの取得のため、現場に出張させていただいたことが現在でもGPS波浪観測ブイの安全性照査調査に役立っている。

このころの特筆すべき事象は、1983年日本海中部地震津波である。1983年5月26日、秋田沖を震源とするM=7.7の大地震が発生し、日本海沿岸の各地へ津波が来襲した。津波は、島根県浜田から青森県竜飛崎まで広く伝わり、広範囲にわたる痕跡高分布を調べるために、研究所から数度にわたる現地調査団が派遣された。筆者は、第1次と2次の団員として参画し、当時の運輸省第一港湾建設局ならびに第二港湾建設局職員とともに、痕跡の発見と測量・整理を担当した（谷本ら，1983）。このときの痕跡調査と測量並びに痕跡高の整理の経験はその後の、津波現地調査の際に貴重な教訓となり、現場に役立てることができた。

港湾空港技術研究所では、波浪研究室長さらに海洋・水工部長として勤務させていただいた。この間、エネルギー平衡方程式法という波浪変形モデルの現地適用をはかったり、ブシネスクモデルという時系列を計算していく波浪変形計算モデル（平山，2002）の普及を、勉強会を企画して行ったりと忙しく動いていた。個人の研究としては、もっぱら、波を起こす造波機の改良や開発に注力し、平面水槽の中で多方向不規則波の有効造波領域を大きく取って造波できる2面造波装置（デュアルフェース・サーペント）（平石ら，1995）や、3面を造波板とし、しかも流れを多方向から発生できる環境インテリジェント水槽の開発に取り組んだ。この頃、筆者の要求に応え、造波装置を製作していただいた三井造船株式会社の関係者の皆様に感謝する次第である。2つの造波水槽は、その後、制御装置が改良され、今日でも最先端の造波システムとして活躍している[Photo 4, 5（両写真とも港湾空港技術研究所ホームページによる）]。



Photo 4 Dual-Face Serpentine-type Wave Maker



Photo 5 Intelligent Directional Wave and Current Generator



Photo 6 Improved seawall in Port and Airport Research Institute

もうひとつ、筆者が取り組んだものに、港湾空港技術研究所の実物護岸がある。2002年9月、台風21号が近接したときに、越流量の現場測定機の実証実験を護岸で行っていたら、護岸ごと壊れてしまった。直前までデータは取れていたのに、実験は成功したが肝心の護岸は破壊されてしまった（永井ら，2003）。そこで、被災後、実測値を用いた潮位推測と波高計算から、越波量を推算し、必要点端高を推算し、被災の復旧護岸を提案した。高さを決めると、当時の横浜調査設計事務所と協議し、復旧断面を決めている。その後も、度々台風が来襲しているようであるが護岸そのものの破壊は生じていないようである[Photo 6]。

波浪研究室長として12年間研究に従事した後に、海洋・水工部長職を約2年務めたが、その間、コスタリカ国太平洋岸のカルデラ港の開発計画のお手伝いをして、現地へ2回飛んだことが印象に残っている。

4. 宇治川オープンラボラトリーでの津波防災研究

つぎに、2010年4月から、京都大学防災研究所流域災害研究センター沿岸域土砂環境研究領域教授として働くことになった。勤務場所は、京都大学防災研究所付属宇治川オープンラボラトリー（UOL）である。筆者が学士・修士時代は、冬は氷が張る屋外プールのある寂しいところであったが、屋内実験棟が4つある巨大な

実験場となっていた。筆者が在籍中に、研究本館も建設され、職場環境もよくなっている。勤務場所が建っている土地は、第2高瀬川が宇治川に合流する地点のそばで、堤防により防護されているが、堤防の背後地に当たり、宇治川の氾濫危険域に位置している。ここまで書くと、本稿のタイトル「水もの」のひとつの意味が明らかになってくる。生まれたところ、勉学のところ、勉学の対象、勤務地がすべて「みず」のほitoriになっている。

(1) 津波再現装置の開発

筆者が採用された当時、実験に用いることができる水路は、UOL第3実験棟の45m多目的造波水路しかなく、それも、制御装置が壊れたままであった [Photo 7]。当初は、使える実験装置を目指して、新規の制御システムの導入を目指した。また、反射波吸収式造波法（平口ら，1988）が可能となるように、造波機面に取り付ける大型の波高計の購入を目指した。

防災研究所に入って、最初に大がかりな現地調査に参画したのは、2011年3月11日に生じた東日本大震災の津波による被災調査である。京大からの1次調査団として、宮城県の中央部沿岸を担当し、津波の被災状況と被災メカニズムおよび痕跡高を調べた（平石ら，2011）。その後、当時の東良慶助教（現 大阪工業大学准教授）と2人であるが、岩手県釜石港の調査を行っている。その結果、研究室内資料にとどまるが、低地における津波浸水地の広がりや越波による洗掘メカニズム、海岸井戸には塩分が含まれることはなかった事などを明らかにしている。また、津波防波堤は被災しても、ある程度の津波は低減効果があったと考えられ、釜石市内における津波痕跡高は、周辺の大槌町などの地区に比べると小さくなっていたことも、現地調査で判明した。

このような津波の特性を実験で再現し、適切な対策を検討するために、2014年度に「津波再現装置」を製作した（平石ら，2015）。この装置は、長さ45m、幅4m、深さ1.5m（有効水深1.0m）で、不規則波と流れを再現することができる。また小型水タンク内の水を、ゲートを開閉して一挙に水路に流す、ゲート型津波発生器も装備されている。不規則波の発生周期帯は、0から5sで長い周期を選ぶと、長周期波を再現できる。長大ストロークを有しているので造波板を後方へさげて、最速スピードで前進させることによって、ソリトン波として津波を再現できる。従って、津波再現装置では、①流れ発生装置、②ピストン型造波機、③落下式水槽の3種類の造波方法で津波を再現できる。[Fig. 1]に津波再現装置の外観を示す。[Fig. 2]は本装置で造波できる津波の水位時系列波形で流れ発生装置を用いて起こされる長い周期の水位変動を組み合わせると段波の



Photo 7 45m Multi-purpose directional random wave generation channel (UOL) (by UOL homepage)

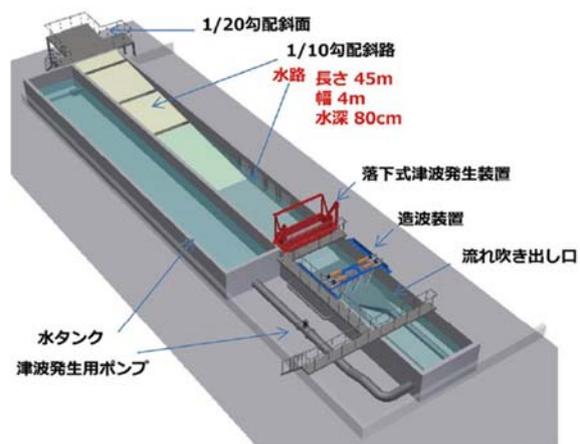


Fig. 1 Tsunami reproduction basin

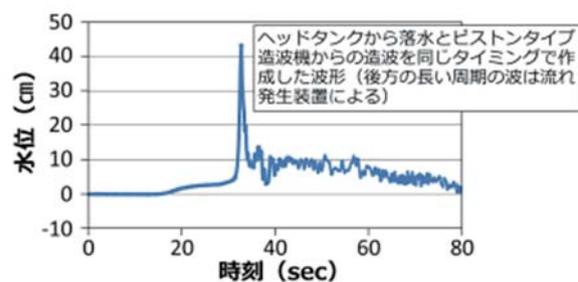


Fig.2 Tsunami profiles generated by Tsunami Reproduction Basin

あとに高水位が続く実際の津波に近い水位変動を再現することも可能である。

ここからは、津波防災に関する研究を中心に津波再現装置で実施された実験的研究を紹介する。

(2) 防波堤ケーソンの滑動

防波堤の破壊モードの一つに滑動がある。これは、津波や高潮の水平波力成分による水平運動で、最も大

きいものである。釜石の湾口防波堤の被災写真を見ても、ケーソンの中には滑動でマウンドからころげ落ちているものもあった。このことから、ケーソンの重量を大幅に増すか、底面に付属構造物を置いて、摩擦抵抗を増やすことが対策として考えられる。[Fig. 3]にケーソンの設置断面イメージを示す。前方から津波が作用すると、越波も生じるので、前面に渦が生じる。そのため、ケーソンののり先には、洗掘が生じる可能性があり、それを防止するために、可撓性を有する洗掘防止工を設置する。

[Photo 8] は土留工としても使われる繊維網の中に、角ばった自然石から成る採石を詰めたユニットを用いた洗掘防止工で、このような透過性を持つ構造物を適用して足下を防護する。ケーソン後方には、滑動抵抗

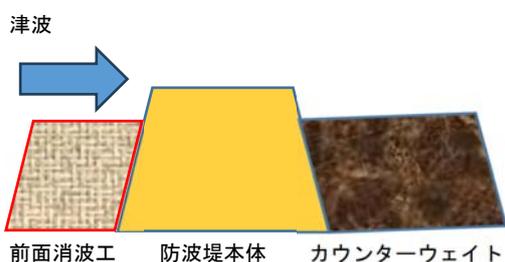


Fig. 3 Image of cross section of caisson breakwater



Photo 8 Wave dissipating later to prevent scouring

を増すことができるカウンター構造物を設置する。これは、変形しても抵抗力をある程度保持できる。したがって、設計荷重を越える津波力が作用しても、ケーソンが傾くだけで、津波エネルギーの大部分は抑えられ、ある程度の低減が期待できる。このような機能を“レジリエンシイ”と呼ぶ。以下の2つの節では、カウンターウェイトとしての対策工法を紹介する。

(3) カウンターウェイトブロック

[Fig. 4] にカウンターウェイトブロックの設置イメージ図を示す。この構造物は、空洞を有する四角形の

固形ブロック内に大きめの自然採石をつめて、ケーソンの背後に設置するものである。[Photo 9] にカウンターブロック模型と通常の平型ブロック（潜堤等で使われる採石層の天端をカバーする）を比較して示す。中央と右側のブロック模型がカウンターウェイトブロック模型にあたる。

[Photo 10] は採石を充填したカウンターウェイトブロックの引っ張り試験の状態を示し、採石床面上での水平摩擦抵抗を測定している様子である。測定した水平摩擦抵抗値は0.75であった。この値は、現地で使用しているアスファルトマット（ケーソンの下面に摩擦増大を目的に使用される）の摩擦抵抗値0.65~0.70より高い値となっている（間瀬ら、2011）。

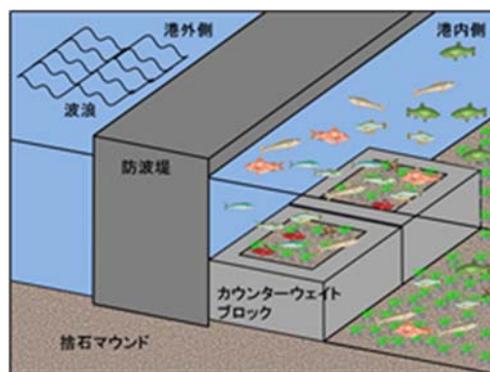


Fig. 4 Image of Counter-weight block in harbor



Photo 9 Comparison of Plane and Counter-weight blocks



Photo 10 Towing test of Counter weight block

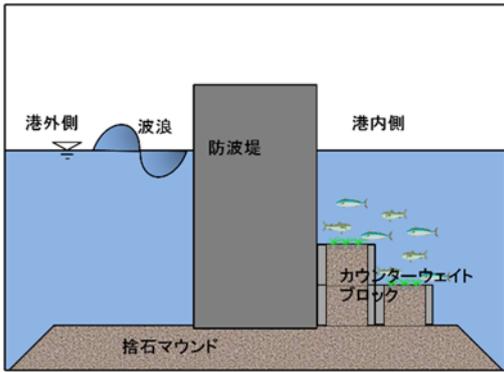


Fig. 5 Cross section of breakwater with Counter-weight Blockers

[Fig. 5] にカウンターウェイトブロックの設置断面を示す。ブロックは段積みも可能で、数を増す場合には2段および3段積みが可能である。また港内では海藻が附着するので魚の住処にもなり環境に優しい構造物となっている。このブロックは民間ブロックメーカーとの共同特許になっていて、京大には現在（2023年7月）でも特許収入が入っており、全国で使用されている。大規模な使用例としては、東日本震災直後の八戸港があり、700mにわたって本ブロックが採用されている。

(4) カウンターウェイトマウンド

これは、既存防波堤の港内側に砕石等でマウンドを作り、腹付けして防波堤の後方への滑動を防ごうとするものである。港内側に砕石層を積むというアイデアは本来、港内に侵入する長周期波の対策として提案され、港内での長周期波の反射を防ぎ、港内での擾乱をなくそうとしたもので、北海道苫小牧港や秋田港で実用化が図られ、十分な成果が確認されてきた（たとえば、松野ら、2011）。この消波目的の砕石層を拡大し、腹付けすることにより、常時は港内の静穏度を保ち、津波来襲時は滑動量を軽減し、レジリエンシーを高めることができると考える。既存防波堤は、その多くがレベル2津波来襲時に滑動し、転倒してしまうので、港内側に大規模な腹付けを行い、津波に対する滑動抵抗を増大させて、滑動が生じたとしてもその場で傾く程度に被災を最小にすることができる。

[Fig. 6] に高知県西部の須崎津波防波堤の平面配置図を示す。湾口防波堤の断面図が [Fig. 7] であり、図の着色した部分の港外側（左側）が積み増した消波ブロック層、港内側（右側）がカウンターマウンド層を示す。[Photo 11] はケーソン上から港外側の消波工のトップを臨んだもので、[Photon12] が、港内側のカウンターブロック層を干潮時に見たものである。砕石層

の表層は写真で示すように、平型ブロックで覆われ、保護されている。これは、台風時のうねり性波浪による越波が港内側へ伝播し、腹付け工の砕石を動かしてしまうことを防止するためのものである。2023年7月現在、高知県高知港、須崎港をはじめ、全国の主要な津波来襲予想港で施工が進められている。

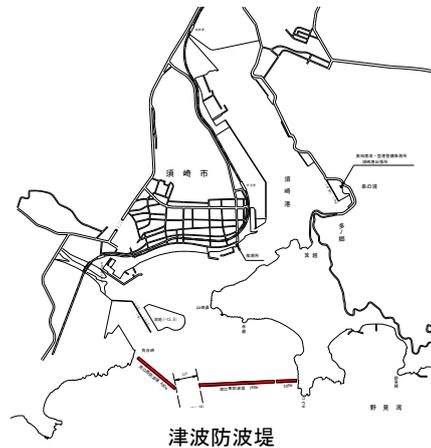


Fig. 6 Location of Tsunami breakwater in Suzaki harbor

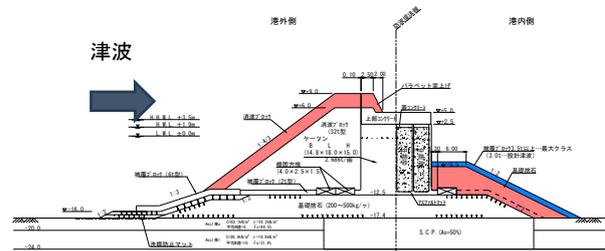


Fig. 7 Cross section of Tsunami breakwater in Suzaki

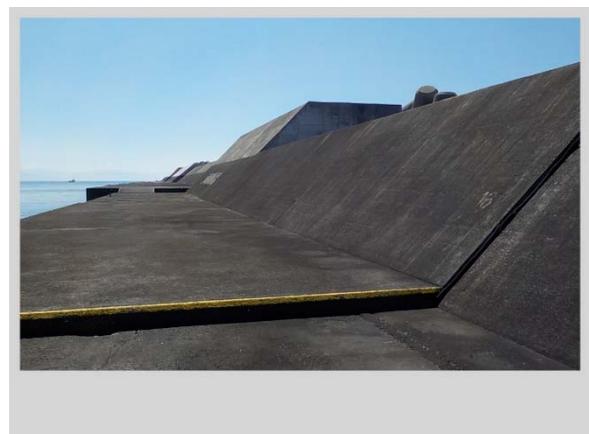


Photo 11 Wave absorbing block layer



Photo 12 Counter-weight mound in Suzaki breakwater

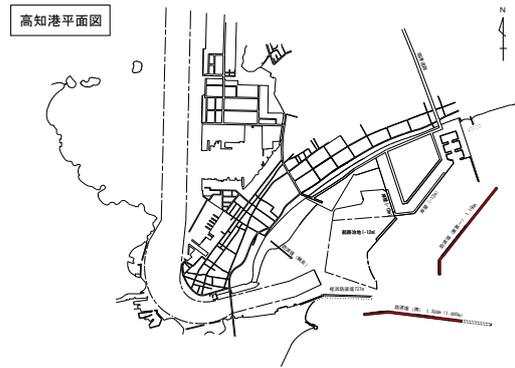


Fig.8 Plane of Kochi port

(5) 流起式可動型防波堤

[Fig. 8] に高知港の平面図を示す. 湾口部には風波・うねり対策として防波堤群が建設されていて, これらの防波堤はカウンターウェイトを設置することにより津波にも減災効果を発揮できると思われる. ただし, 港口部からの津波侵入は抑止できない. 本来防波堤の開口部には航路が設けられ, その幅は, 港に來航する船舶の最大船長で決められる. [Fig.9] に示されるように, 安全性を考慮すると, 防波堤の開口幅 B は入港する最も大きい船の最大船長 L よりも大きくなければならない, 近年では船舶の大型化も進んでいるので, B を小さくすることはできず, 航行の安全性を考慮すると, B は今後ますます大きくなり, 津波來襲時には, 不利な方向へ向かう. また, 航路も深く真っすぐに設定されるようになっているので, 津波だけでなく, 台風時のうねり等にも遮蔽効果が少ない港形となりつつある. そこで, 異常時に, 港口部 (開口部) に浮上してバリアとなる流起式可動型津波防波堤を紹介する.

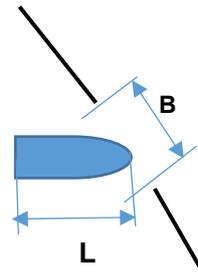


Fig.9 Comparison of Port entrance width and vessel length

異常時に開口部で浮き上がって津波を抑止できる防波堤としては3つのカテゴリーが紹介されているが (平石, 2022), ここでは, 開発にあたって津波再現装置を主に使用した流起式可動型津波防波堤を取り上げる. [Fig. 10] に防波堤のイメージ図を示す. この防波堤は主にレンズ状の浮体部分と係留積層ゴムからなっていて, 津波の流れをうけて, レンズ状の浮体部 (翼) が自動で回転して浮き上がる. この翼は, 反対向きの流れ (引き波時) によっても立ち上がることに大きな特徴があり, 全工程にわたって, まったく外部の動力を必要としない.

1/50縮尺模型を用いて津波を造波し, 基礎実験を行い, 機能を確認したところ想定通り, 本機は立ち上がり津波抑止に活用できることが分かった. [Fig. 11] に実験で得られた透過率を示す. 津波高は限定的であるが, 固定式防波堤と同様に, 透過率 $R_T=0.5$ で, ほぼ同程度の効果を有することが分かった (東ら, 2014) .

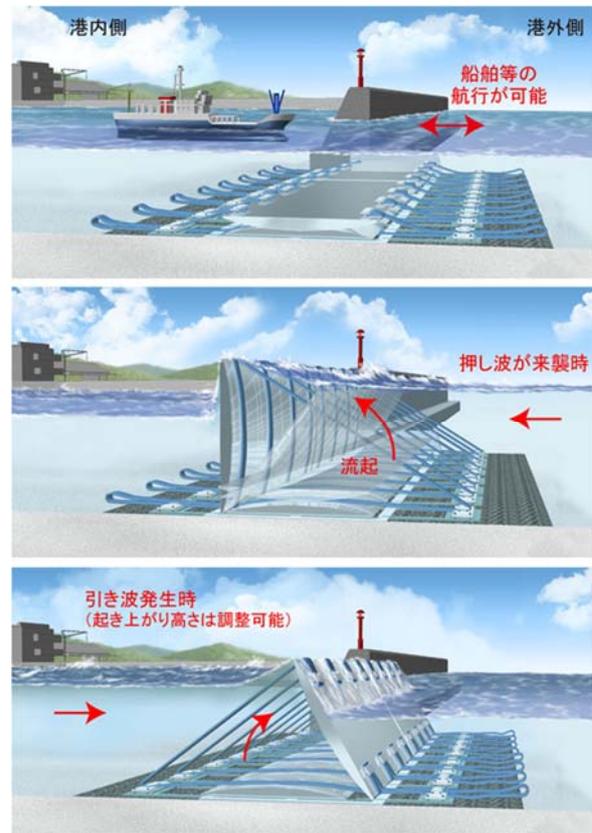


Fig. 10 Image of Fin-type Movable Tsunami breakwater

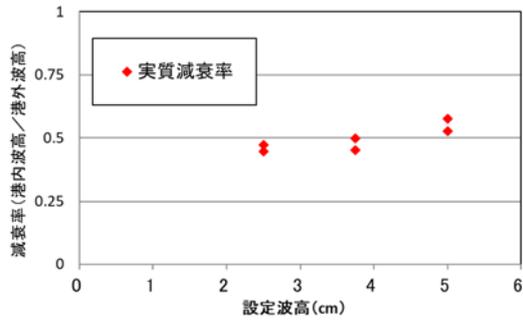


Fig. 11(a) Tsunami reduction rate of fixed tidal gate

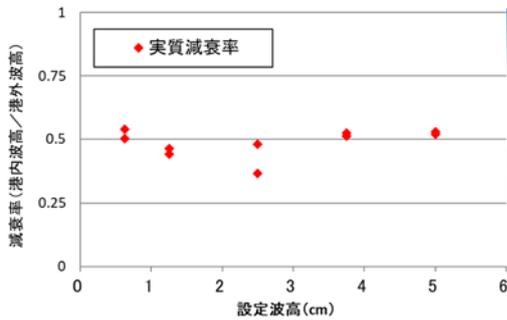


Fig. 11(b) Tsunami reduction rate of Fin-type movable tsunami breakwater

次に流起式可動型防波堤の実海域への適用例を示す。大阪市の内水河川の河口部に位置する防潮水門は高潮水門として重要であるが、閉鎖時の津波力を考慮していない。本水門は、1970年に建設されたアーチ形水門で、バイザーゲートと呼ばれる[photo 13]。この水門は、大阪市内の尻無川、安倍川、木津川の3河川の河口部に1基ずつ置かれ市内を高潮から防護する役割を担っている[Fig.12]。実際に前述の2018年台風21号来襲時には、建設後訓練以外では初めて閉鎖され、大阪市内を高潮から防護した[Photo 14 (大阪市港湾局提供)]。



Fig.12 Arrangement of Visor gate for storm surge prevention



Photo 13 Visor gate at Kizu River mouth



Photo 14 Protection of storm surge generated by typhoon No.1821.

すなわち、高潮や異常潮位に対応して閉鎖中に、津波が来襲して津波力が作用した場合は、安定性が保証されない。

そこで、津波力を軽減するために前面に可動型の津波防波堤を設置する案が提案された。それについて、実験で安定性を議論した。[Fig. 13] は、模型床における可動型防波堤とバイザーゲートの設置状況を示す。現地では、バイザーゲートの沖側に航行部として水路があるので、可動型防波堤は水路端に設置される。

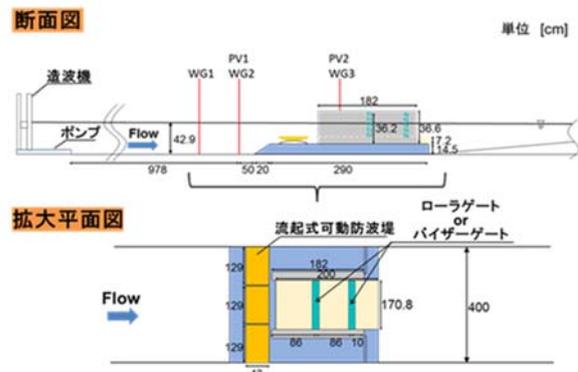


Fig. 13 Implementation of Fin-type movable breakwater and Visor gate model in Tsunami Reproduction Basin

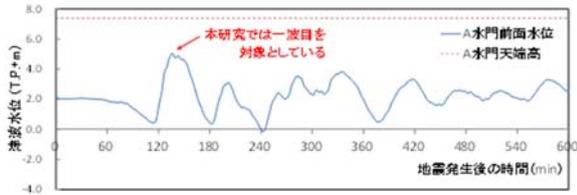


Fig. 14 Input tsunami profile (Level 2) for model test

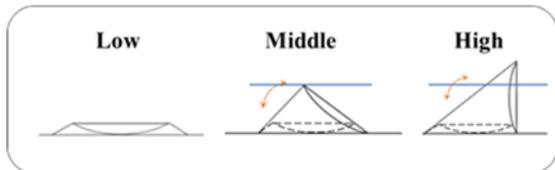


Fig. 15 Position of Flouter on tsunami prevention
(The height is controlled in the length of mooring rubbers)

作用させる津波はレベル2対応の津波として安政南海地震津波を想定して、その第1波をピストン型造波板で孤立波として造波した。[Fig. 14]に津波波形を示した。流起式可動型防波堤の立ち上がり高さは、積層ゴムの長さで調整できる。本実験では、[Fig. 15]で示した、水面までしか上げずに、津波軽減効果が早めに発揮できるようにしたケース (Middle) とフルに立ち上げたケース (High) を比較した。[Photo 15]は実験状況である。

[Fig. 16]に実験で得られたバイザーゲートの中央部に作用した全波力の変化を示す(小野ら, 2018)。図中の右側の点群がフルに立ち上げた波力比を示し、防波堤の立ち上がる高さは (High) である。点の違いは作用させる孤立波の高さを設計値から変化させたケースを意味している。図の左列は立ち上がり高さが水面までのケースで、平均減衰率は0.9から1.0になっている。[Fig. 17]は、浮き構造体の上端高さが、フルのものと同水面までのものとの比較である。浮き構造体の浮上位置を水面までに (Middle) 調整すると津波抑上効果が大きく発揮され、減衰率は0.75~1.05になり、ほとんどのケースで、減衰率は小さかった。このように、流起式可動型津波防波堤を活用することによって津波エネルギーを軽減することができる。

流起式可動型津波防波堤は、今後、高潮にも活用が期待できるとともに、補修・メンテナンスの簡易化や効率化が必要である。今後、マリーナ、小型漁港での活用を図りたい。



Photo 15 Experiment for effect of Fin-type movable breakwater to reduce tsunami force acting on visor gate

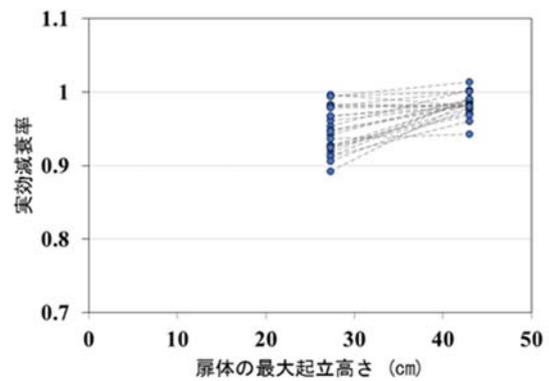


Fig. 16 Reduction effect of tsunami force for case of the height of "Middle"

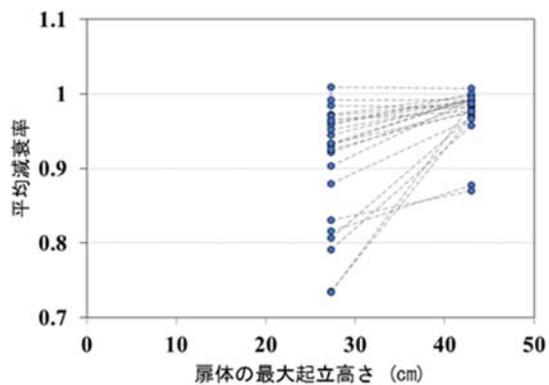


Fig. 17 Reduction effect of tsunami force for case of the height of "High"

(6) 海岸防潮用“防波扉”

海岸のプロムナードやビーチに面した護岸など、津波来襲時に浸水被害を受ける公共施設あるいは海に面した工場などの浸水対策用として、ベンチャー企業「防波システム研究所」と共同で提案したものが可動型防潮堤「防波扉」である。これは、3枚の板を横一列に並

べ、幅方向に連結し、水際に並べたものである。そして、3枚を折り曲げておき、津波来襲に備える。

[Fig.18] に示すような模型を製作し、同図の下図のように津波水槽内に設置し、室内で30cmの孤立波（津波）を作用させた。すると、3枚の板は伸びきり、1枚の仕切り板状になって防潮板となる。これを防波扉とよぶ。

[Fig.19] は、実験で設置した防波扉の初期断面イメージ図を示す。3枚の板をナイロン線でつないだのちに、図のように設置し、一番上部の板の端部は、必ずしも必要がないが、針金に通し、ガイドラインとしている。

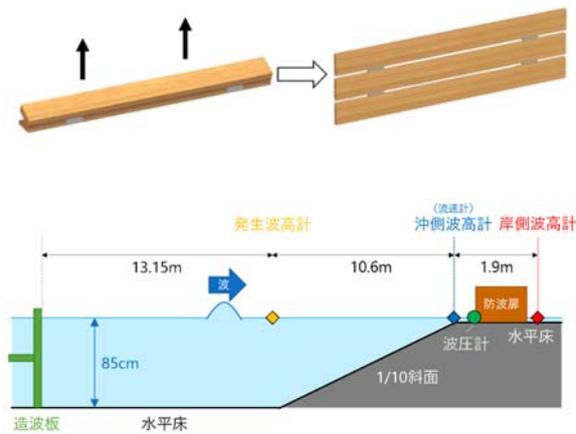


Fig. 18 Image of “Water defense door” and experimental set-up

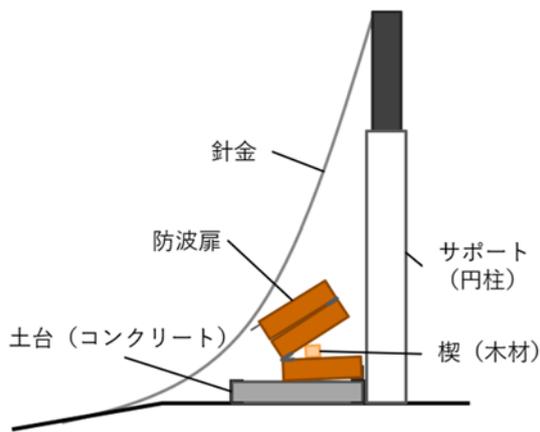


Fig.19 Cross section of “ Water defense door”

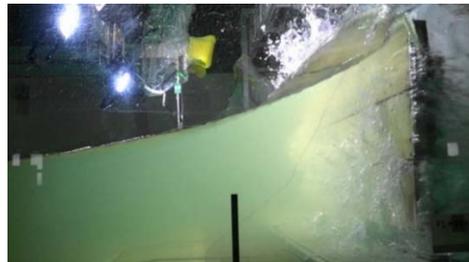


Photo 16 Stand-up of Water defense door on tsunami attack

サポートは、横断方向2箇所にて建てた円柱で、起立時の直立状態を保持できるように支持するためのものである。[Photo 16] は実験での防波扉の立ち上がり時の様子を示したもので、津波段波の先端が防波扉の位置に到達した瞬間、浮力が作用し、防波扉は上層面の部材から浮上し、実験値で、0.1秒程度で全部材が立ち上がり、一枚の防波板となって、防潮効果を示す。

防波扉が立ち上がった後の背後地の浸水被害については、実験で詳細な検討はできない。ここでは、数値流体解析法の一つである OpenFOAM 法を用いて、越流の様子を再現し、浸水の状況を検討した（飯干ら、2022）。[Fig. 20] は時間ごとの浸水状況を示した図である。[Fig. 21] は止水板と防波扉との津波減衰効果を

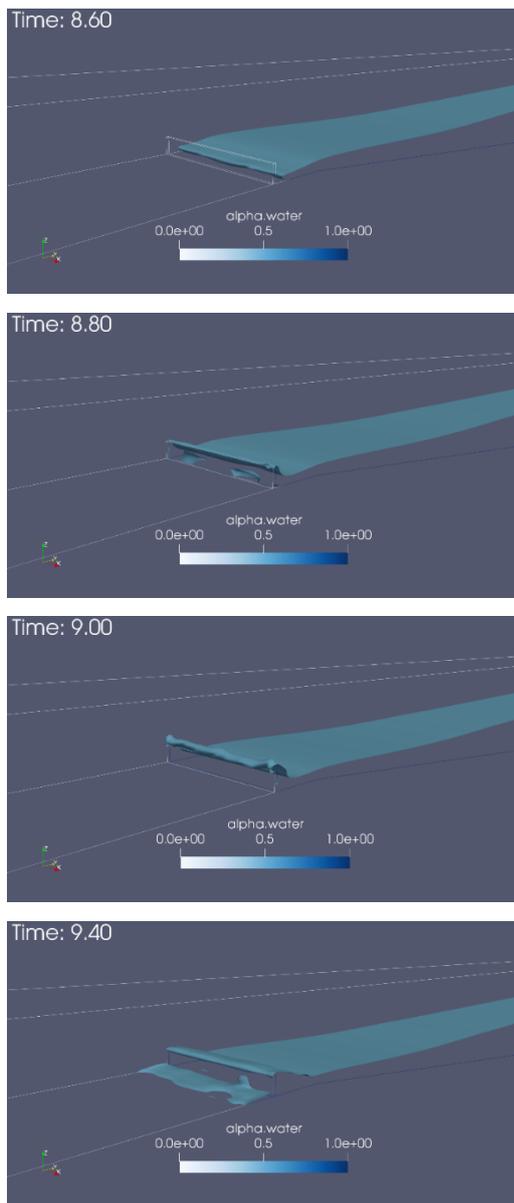


Fig.20 Snap-shot of overflow of tsunami in tsunami simulation

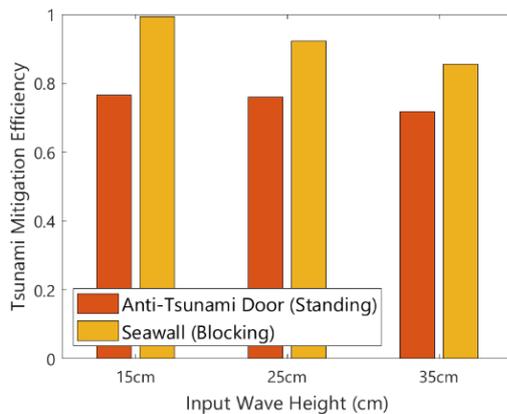


Fig. 21 Tsunami mitigation efficiency of Water defense door

比較したものである．横軸は，入射津波高を示している．防波扉は3枚の板の隙間から水が漏れてしまうことがあり，小さな津波では抑止効果が小さい．しかし津波高が35 cmになると効果が発揮でき，低減率は0.8程度になる．この扉は，津波の第1波を防ぐことができ，今後は実物大の実験等をしていく予定であり，東南アジアの海岸でも活躍を期待している．

5. 海岸砂丘の効果

我が国では，海岸に沿って重要な構造物が建設される場合が多い．海岸に沿って，砂丘がある地形が多く，この場合は構造物が海岸砂丘の背後に位置することになる．[Fig. 22] に海岸砂丘のイメージと構造物の位置関係を示す．津波が来襲すると，海岸砂丘を越えて構造物に作用することになり，その波力特性は，水平床に置いて作用する場合と異なり衝撃的な作用をするかもしれない．そこで，砂丘背後の津波力の特性の変化を実験で調べた．本実験の目的は，その他にも模型実験の必要性を検証することにある．[Fig. 23] に実験模型の配置を示す．縮尺は想定した現地の1/80とし，1/10 斜面から続く水平床に砂丘と直立防潮堤を設置した．防潮堤壁面には縦方向に複数の波圧計を貼り付け，波

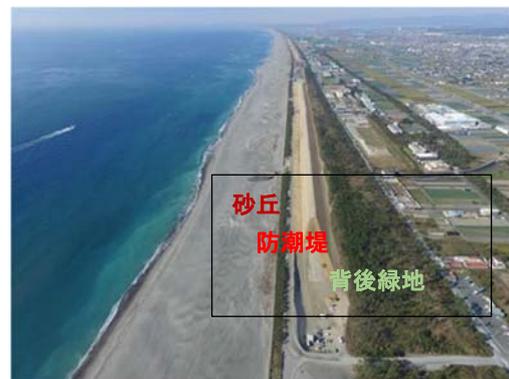


Fig. 22 Relation of coastal dune and tidal barrier

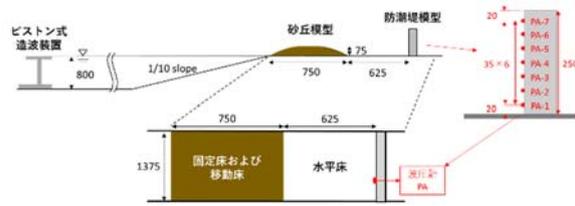


Fig. 23 Implementation of experimental model

Table 1 Experimental condition

実験ケース	表記	Case No.	実験条件	防潮堤位置	珪砂粒径	試行回数
平坦	NSII	1	孤立波	-137.5cm		3
平坦	NSI	2	孤立波	-80.0cm		3
固定床	FSII	3	孤立波	-137.5cm		5
固定床	FSI	4	孤立波	-80.0cm		5
移動床	MSII	5	孤立波	-137.5cm	dm=0.20mm	5
移動床	MSI	6	孤立波	-80.0cm	dm=0.20mm	5
移動床	MS'II	7	孤立波	-137.5cm	dm=0.11mm	5

圧分布が測定できるようにしている。[Table 1] に実験条件を示す。

[Fig. 24] は測定された水位と全波力の時間変化で、センサー設置位置の関係で時間差はあるが、水位最大時に最大波力が発生している。[Fig. 25] に最大波力発生時の鉛直波圧分布を示す。下端に行くほど波圧は大きくなるが、水平床土では少し小さくなるようである。

砂丘の効果を示したものが、[Fig. 26]である。図では、赤線で砂丘のない状態での作用波力を示し、○および△印で、砂丘がある場合の波力を示した。左軸は作用波力そのものを示し、右側の軸は赤線で示した砂丘のない状態での波力を1とした場合の各ケースの波力を比率で示したものである。凡例のなかで、Fは固定床、Mは移動床、M'は移動床で粒径が小さいものを示す。また、ave は実験での2回の試行の平均値を示す。平均値を使って結果を考察すると、砂丘があることにより、津波波力は軽減されることがわかる。軽減率は固定床が 0.25 程度、移動床が 0.20 程度で固定床が有利である。また、砂の粒径による差は小さい。

次に、本稿では 4. (6) で示した OpenFOAM による数値解析を試みた。[Table 2] に数値計算の条件を示す。[Fig. 27] は数値解析で用いた格子図並びに計算過程のスナップショットを示す。[Fig. 28] に最大波力出現時の波圧分布における実験値と数値計算値の比較を示す。衝撃波圧の水平床に近いところでの波圧の極端な増大の様子や、段波波圧の分布形状等、全体として実験で得られた波圧分布形は数値解析でよく再現されている。

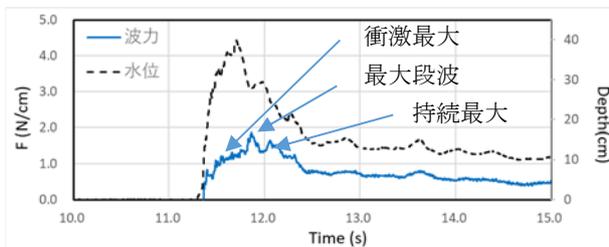


Fig. 24 Measured profile of tsunami height and force

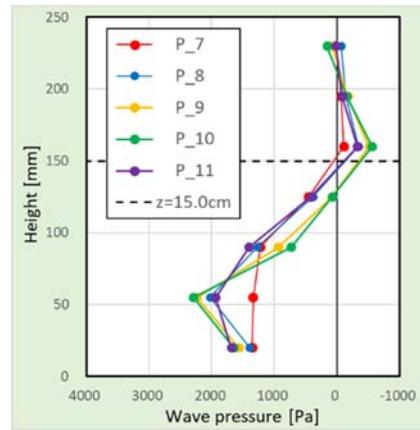


Fig. 25 Vertical distribution of tsunami pressure acting on tidal barrier

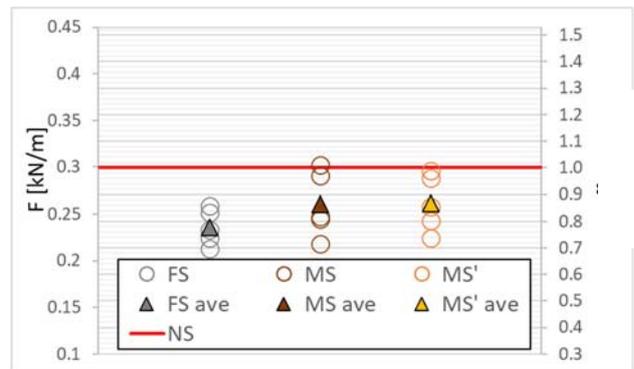


Fig. 26 Variation of tsunami force for coastal dune

したがって、本実験によって OpenFOAM モデルの適用性が検証できた。このように大型模型実験水槽は、実験自体が目的であるだけでなく複雑な数値解析モデルの検証データを得る上でも重要な役割を果たすことができる。

Table 2 Simulation condition

	Mesh A	Mesh B	Mesh C
計算格子間隔 (mm)	x: 5~150 y: 10~19	x: 5~50 y: 3~8	x: 5~50 y: 5~8
計算格子数	39825	205600	177120
実計算時間	5h	15h	10h
乱流モデル	RANS	RANS	RANS
層流モデル	LES	LES	LES
入力波高 (mm)	孤立波H=125	孤立波H=125	孤立波H=125
計算時間 (s)	15	15	15
計算時間間隔 (s)	0.01	0.01	0.01

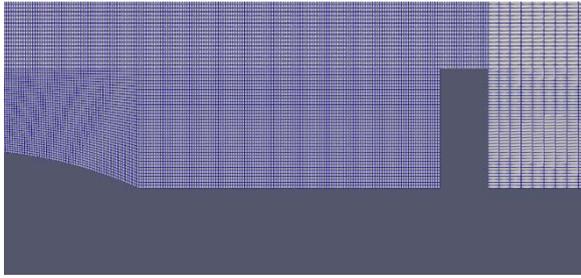


Fig. 27(a) Computation mesh of OpenFOAM model

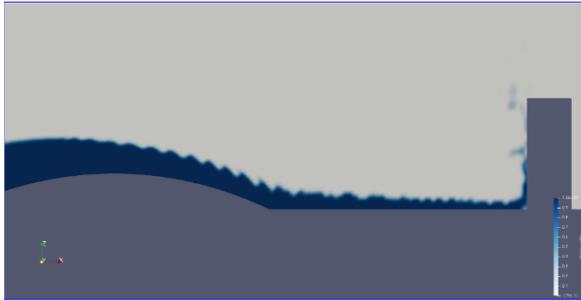


Fig. 27(b) Snapshot of impulsive clash of soliton wave

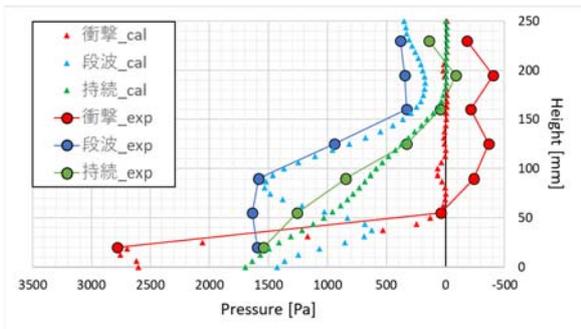


Fig.28 Comparison of measured and simulated tsunami pressure distribution on maximal tsunami pressure presence

次に検証された本数値解析モデルを用いて最適砂丘長を求めた。[Fig. 29] は砂丘長を変化させたときの最大波力の変化を示した図である。横軸が砂丘長、縦軸が作用する波力を示す。●が実験値を示し、赤丸印が計算値を示す。実験長さおよびその付近で作用波力は最小値を示し、それより長くなると作用波力はやや増大傾向を示し、長くなっても作用波力は低下しない。この原因は、砂丘から落下してくる流れの影響であるかもしれない。[Fig. 30] に防潮堤前面での流速ベクトルを示す。砂丘端が防潮堤に近すぎると、砂丘を駆け下った流れが防潮堤に当たり渦を作り、流速場を乱している。このことが波力増大につながっていると言える。以上のことより、砂丘長と位置には最適な値があり、砂丘がある海岸地形を活用して重要構造物を建設する場合には、その最適長と最適位置を考慮して、設置することが望ましいと言える。

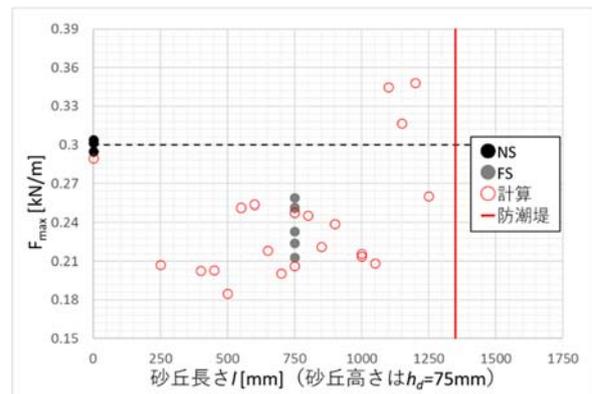
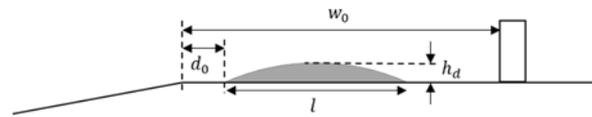
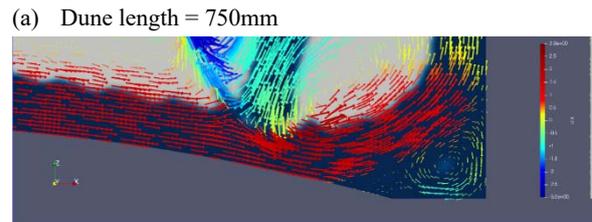
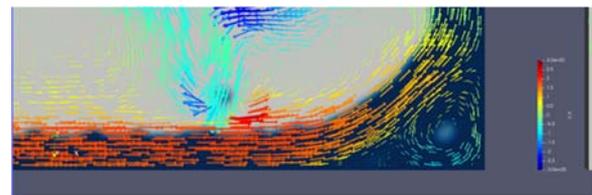


Fig. 29 Variation of tsunami force acting on tidal barrier for different coastal dune length



(b) Dune length = 1250mm

Fig. 30 Flow vector in front of tidal barrier

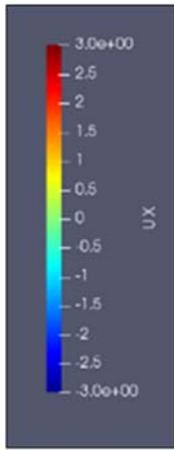


Fig. 30' Enlargement of color bar

6. まとめ

本章では、筆者の研究略歴を述べるとともに、主な研究テーマである大型実験室内における造波装置の開発・整備について述べるとともに、それらを用いた実験の内容と成果を示した。ここでは、結果をまとめるとともに、残された課題を示す。

① カウンターウェイトブロックを活用することにより、既存防波堤の水平抵抗を増すことができ、津波に対して安全性を増すことができる。ここでは、ブロックの中詰めとして角ばった碎石を使用してきたが、今後、石炭や鉄鋼スラグなどのリサイクル材を砕いた材料を用いて、より低コスト化と環境負荷を軽減することの可能性を検討する必要がある。

② カウンターマウンドは津波が設計荷重を越えた場合でも確実にケーソンをその場所に留まらせる手法であるが、航路に対しては、障害物になる可能性もある。したがって、減容化のアイデアが必須で、新構造形式のスリットケーソンへ置き換えるなどのアイデアが今後求められる。

③ 流起式可動型津波防波堤の最大の弱点は、漂砂であり、フィンの先端部に砂の堆積が厚く生じると、フィン先端への流れが阻害され、立ち上がりの揚圧力が働かない。現在は点検時に、水中ロボット等で砂を吹き飛ばすことを考えているが、手法として十分かどうか検討中である。今後も維持・点検については設置場所の地形特性を踏まえたより詳細な検討が重要になってくる。

④ 防波扉は室内実験で立ち上がりが確認されているものの、現地適用性になると、海浜地形の特性や部材を繋ぐヒンジ構造の提案等で、まだ開発すべき課題は残っている。もちろん、本来数m以上の大きな高さを有する津波防御を考えていないので、強度的には、木造でも抑止効果があること

は確認している。しかしながら、想定している津波を越えるような津波が来襲した場合に、防波扉を構成する部材そのものの安全性を確保できるように部材の材質に今後の工夫が必要と考える。

筆者は、2023年3月に京都大学を退官後、同年4月から国土交通省系の一般財団法人 沿岸技術研究センターに職を得る機会に恵まれた。本稿執筆時には、センターの研究者として国機関が実施する海岸・港湾の開発や防災に関する波浪と地盤調査のお手伝いをしている。これらの中には、高波や津波防災も含まれていて、当然これまでの知見を活かして、活用できる技術の適用を図るとともに残された課題の解決に取り組んでいきたい。

最後に、筆者の研究を支えてくれた独立行政法人港湾空港技術研究所（現 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所）の関係者の皆様、特に波浪研究チームの皆様、さらに京都大学防災研究所の諸先生並びに研究室学生諸氏に深く感謝する次第である。

参考文献

- 東良慶・伊藤忠男・半田英明・山敷亮・平石哲也・菅野高弘（2014）：流起式可動防波堤の小型モデルによる性能評価水理実験，土木学会論文集B2（海岸工学），第67巻，pp.1306-1310.
- 飯干歩・平石哲也・浜田英外・森田章一（2022）：可動式津波低減設備”防波扉“の適用性の検討，自然災害科学，40-4，pp.453-464.
- 小野秀平・平石哲也・東良慶・半田英明・伊藤忠男（2018）：河口水門の津波減勢工としての流起式可動防波堤の活用に関する模型実験，土木学会論文集B2（海岸工学） pp.217-222.
- 高山知司・平石哲也・古川正美・佐尾邦久・立野信一郎（1985）：タンカー係留時の一点係留ブイの運動と係留索張力に関する現地観測，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 677-681.
- 谷本勝利 他9名（1983）：1983年日本海中部地震津波の特性と二、三の考察，港湾技研資料，No.470，299p.
- 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・安田誠宏・高山俊裕（2003）：オンサイト越波計の開発と現地適用性，海岸工学論文集，第50巻，pp.626-630.
- 平石哲也・森信人・安田誠宏・東良慶・間瀬肇（2015）：京都大学防災研究所津波再現装置の特性，自然災害科学，34-1，pp.15-21.
- 平石哲也・金澤剛（1995）：多面式造波装置の適用性，海岸工学論文集，第42巻，pp. 131-135.

- 平石哲也・米山望・馬場康之・森信人・東良慶・安田誠宏・間瀬肇（2011）：宮城県沿岸における2011年東北太平洋沖地震による津波被災について，土木学会論文集B2（海岸工学），第67巻，pp.1306-1310.
- 平石哲也（2022）：可動型津波防波堤，自然災害科学・防災の百科事典，日本自然災害学会編，丸善出版，pp.280-281.
- 平口博丸・鹿島遼一・川口隆（1988）：水面波制御方式による無反射造波機の不規則波実験への適用性，第35回海岸工学講演会論文集，pp.30-34.
- 平山克也（2002）：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036, 162p.
- 平山克也・平石哲也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治（2005）：2004年台風による高潮災害の被災パターンについて，海岸工学論文集，第52巻，1316-1320.
- 間瀬肇・平石哲也・川田達也・行本卓生・徳永誠之・松下紘資（2011）：偶発波浪荷重対策としてのカウンターウェイトブロックの開発，土木学会論文集B2（海岸工学），第67巻，pp.696-700.
- 松野健・矢野隆博・葛西弘行・山本泰司・平石哲也・木村克俊（2011）：苫小牧港西地区における長周期波対策工に関する現地観測，土木学会論文集B2（海岸工学）第67巻，pp.681-685.

（論文受理日：2023年8月31日）