公開実験でいただいた質問と回答

No.	質問	回答
1	造波装置位置での多方向スペクトル波を再現するにあたっては、造波機前面の波浪スペクトルが造波板毎に異なる場合が想定されますが、造波板横軸方向の波浪分布特性まで再現するのは困難ではないかと懸念されます。地形による変形後の波浪特性の再現法について、どのような前提条件のもとで可能となったのか、お教えいただければ幸いです。	実験内容の説明や施設説明でも少しご紹介しましたが、今回の造波方法は数値シミュレーション結果をそのまま再現できる波の信号を作って、それを造波するという方法です。すなわち、沖の方向スペクトルをきちんと再現したうえで、それが造波板位置まで伝播するとどのような波になるかを数値シミュレーションで計算して、各造波板位置で異なるそれらの波をそのまま造波しています。造波検定では、数値計算で算定された各地点での波高を目標値として、水槽内に設置した波高計で実際に計測された波高の再現性を確認しています。このような造波方法は、造波板位置で異なる方向スペクトルの造波板横軸方向に沿った空間分布を算定し、これらを構成する成分波を網羅的に設定するとともに、各造波板に対してそれぞれ異なる振幅リストを与えることにより、成分波形の空間的な連続性を確保しつつ合成波の空間的なエネルギー分布を表現することで実現しています。
2	実験の概要説明で SW の波との話がありましたが、画面でどちらが北あるいは南なのでしょうか？波高分布図で、防波堤らしきもの左上側が赤く、位置関係が捉えづらかったため質問させていただきます。	（当日はカメラの映像でお答えしましたが、配布資料に沿って改めて回答させていただきます。）配布資料 20 p のデュアルフェースサーペント水槽内の模型配置には東西側線と南北側線を示しています。再現計算結果として示している波高分布図においては下側が NNW になります。
3	①バンクーバー島沖で巨大な波(18m)が観測された（CNN）との報道がありましたがこうした現象の解明も可能でしょうか。	① Freak wave が観測されたものと考えられますが、その発生条件等は未だ十分に分かっていません。そのため、現象を解明するための水槽実験の実施も未だ困難と思われます。一方、現象の再現ということで言えば、オックスフォード大学とエジンバラ大学の研究チームが実験水槽で行った事例（McAllister et al., 2019）などがあります。文献については以下からご覧いただけますので、参考にしていただけますと幸いです。 https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/laboratory-recreation-of-the-draupner-wave-and-the-role-of-breaking-in-crossing-seas/65EA3294DAFD97A50C8046140B45F759

No.	質問	回答
	②将来は実験を行わず全て計算で確認できるようになるのでしょうか。あるいは実験による確認はやはり必要でしょうか。	なお、一方向波に限られますが、デュアルフェースサーペント水槽内でも狙った位置、時刻に突然現れる大波を作り出すことは可能です。 ②　ご承知の通り、数値シミュレーションは波の研究分野でもすでに広く活用されているところです。例えば、かつてはこの平面水槽に港の模型を設置して計測していた港内の波は、現在では数値シミュレーションで精度よく再現できるようになりました。これは、模型実験などを通じて港内での波の変形メカニズムが十分に解明された結果、それを表現できる方程式をベースとした数値シミュレーションモデルが開発されたためです。また、本日ご覧いただいた越波などのより複雑な現象を表現できる方程式も存在し、それをベースとした高精度モデルの開発も進められています。しかし、その分、計算負荷が非常に大きいため、少なくとも現時点では最新のスーパーコンピュータ（富岳など）をもってしても港全体を対象とした数値シミュレーションにいったい何日かかるのか想像もつきません。そこで、このような場合には通常、現象を近似する簡便な計算法が導入され、数値シミュレーションの適用範囲の拡張と計算負荷の削減の両立が図られています。しかし、この計算法によって現象をどの程度再現できているかについては、模型実験との比較を通じて確実に検証される必要があります。したがって、数値シミュレーションだけ実施すれば十分か、実験による計算結果の検証が必要か、それとも、模型実験でしか目的を達せられないかは、対象とする現象やその再現範囲、あるいは、日々進化する数値シミュレーションモデルや実験施設の開発・整備状況によって異なります。将来的にコンピュータがどの程度進歩していくかという面とも密接に関連しますが、あらゆる現象を計算だけで解明することはまだまだ難しいと思われます。
4	再現地点の模型の作成と水槽内の設置にどれくらい時間かかりましたでしょうか？	模型の製作は、年末年始を挟んで２ヶ月くらいかけて行いました。年末年始の期間を除くと、実質１ヶ月半くらいかかっています。
5	岸壁上は水深が浅いので、水の粘性の影響が実際より大きく出る、という	ご指摘の通り、相対的に底面摩擦の影響が大きくなる浅い水深では、縮尺効

No.	質問	回答
	ことはないのでしょうか。	果による水の粘性による作用に十分注意しなければならないところです。しかし、波の相似則に対してどの程度の影響を考慮しなければならないかについては未だ不明な部分も多いので、今回の模型実験ではその影響をなるべく小さくするためにできるだけ大きな実験模型を作成して対応することとしました。
6	数値計算で岸壁前面波を算出して大縮尺の水理模型実験を行うことは実験精度が向上し、目標とする現象を捉える上で非常に良い手法と思います。計算値を造波信号として入力するのではなく、水槽上で波高のキャリブレーションを行うのでしょうか？多方向不規則波のような有効実験範囲等の造波上の課題はないのでしょうか？よろしくお願いいたします。	数値計算で得た各造波板位置での時系列データを直接入力するのではなく、それぞれ方向スペクトルを算定して長辺側 70 台のうち少なくともいずれかで造波することになる成分波の周期、波向及び初期位相を網羅的に設定した後、各造波板位置の方向スペクトルに応じて調整した各成分波の振幅リストをそれぞれ与えることにより、成分波形の空間的な連続性を確保しつつ造波板毎に異なる多方向不規則波を造波しています。造波機で起こしている波は多方向波ではありますが、防波堤によって既に変形した波になるため、地点毎に波の状況（多方向性）が違っています。その波向分布まで忠実に再現するために造波板側でどのように微調整すればよいかまでは現状わからないため、実験ではそこまでの検証は行っていません。一方で、計算結果として得られている任意地点での波高を再現目標として、造波する波エネルギーに関する造波信号の検定を必要に応じて行っています。地点毎に目標波高に対する計測波高の再現性が多少違ってくるため、そこにつきましては全体としてそれらの目標値との誤差が最小になるように、最小二乗法を用いて誤差を最小化する形で、各造波機に入力する造波信号（のうち各成分波の振幅）を決めています。
7	御説明にはなかったと思いますが、短辺側も動かしているということでしょうか。	短辺側から波は起こしていません。しかし、今回起こしている波はかなり複雑になっており、そのまま止まったままだと短辺側での反射がかなり発生します。造波機の制御機能のうちその反射を抑えるという動きにより多方向の波を打ち消すということで、「多方向消波壁」として動いています。
8	実際に防波堤模型を置いた場合と今回の場合では、結果の違いなどはあるのでしょうか。	目標としては違いがないようにしたいと思っています。今回少し複雑な造波方法を採用した一番の理由は、できるだけ大きな縮尺で実験模型を作成す

No.	質問	回答
		るためです。模型を小さくしてしまうと、実験に使っている水は実際の水と同じですから、水の粘性の効果、縮尺効果と言いますが、そういったものが影響してきます。平面的な波の変形実験の場合、1/50～1/100 くらいの模型を使うのが一般的ですが、それぐらいの範囲に収めるために今回防波堤を置くスペースがないという判断を行い、今回の実験の方法としました。特に今回は越波の実験もします。越波は縮尺効果を受けやすい実験でもありますから今回はなんとか頑張って 1/50 のスケールで模型を再現するために防波堤を置かずに実験をしました。実際に防波堤模型を置いた実験と同じような結果になることを期待しています（これまでの研究成果により、防波堤背後の波の回折変形に対する計算結果は実験結果をよく再現することが確認されています。したがって、防波堤背後の波の計算結果を再現した実験結果は、実際に防波堤模型を置いた実験結果とも一致するものと考えています)。
9	津波の再現は可能でしょうか	この造波装置はさまざまな造波機能を備えており、津波を造波する機能も有しています。ただし、造波板を複雑に動かして色々な向きに津波を作ることは難しいです。実際の津波の作り方としては、全部で 100 台ある造波板のうち長辺側もしくは短辺側の板の動きを揃えて一斉に後ろから前に水を押し出すという形で津波を造波することができるようになっています。
10	波高計は造波していない場合, 容量線が完全に空気中に出ている状態でしょうか？故障の問題はないでしょうか？	岸壁法線上に並べた波高計は岸壁の海側で壁面に沿わせて設置しているため、常に水に浸かっている状態です。陸上では波高計が常時水に浸かるように陸上に空けた穴に水を充填し、そこに容量線とその支柱を挿入して波高計先端部が地盤よりも低い位置なるように設置しています。また、実験時は容量線と支柱以外の部分の穴に蓋をして周辺地形との段差をなくしています。
11	実験方法や計測方法などに対して、いわゆる新技術の活用といったものはあるのでしょうか？例として 3D スキャナで測定すれば面的に把握できるかと思いますので、効率的に把握できるのではと思いました。	非接触式の 3D スキャナのうち対象物の映像をカメラで見て凹凸を計測する方法では、光が透過する透明な水の表面を捉えることが困難です。また、上下する水面ではなおさらです。一方、色を付けた水の濃淡などを数値化して面的な水深の時間変化を計測する方法がすでに提案されていますが、これ

No.	質問	回答
		だけ大規模な施設で適用するためには排水処理などの課題をクリアする必要があります。また、音波で測定する方法も考えられますが、構想だけで実現には至っていません。細かい時間間隔で面的にデータを取得しようとすると、データ量が非常に大きくなってしまうということも懸念されます。とはいえ、このような浸水模型実験において水面の動きを面的に捉える技術は私どももぜひ実現したいと考えていますので、現在も並行して検討を重ねているところです。
12	計測機器のうち流速計の設置位置についての質問です。流速は地面からの高さによって異なると思いますが、流速計は地盤面からどれほどの高さに設置するのでしょうか？また、それによって流量が正確に計測できるのでしょうか？	基本的には、流れを計測したい高さに設置することになると思われます。ただし、干渉を避けるため地面から数 cm 程度は離す必要があります。また、当然ながら検出部が水面から干出すると流速を測れないので、通常は少なくとも波谷時の水面よりも低い高さに設置します。そこで、流量の計測を目的とする場合には断面平均流速が出現する水深に設置することがまず考えられます。しかし、今回の実験では通常と異なり、流速計の設置高さは静水時に流速計の検出部上端が浸かる高さとしております。このような高さに設置している理由は、検出部が長時間干出して焼けて壊れてしまうことを防ぎつつ、岸壁地盤高よりも高い位置で海と岸壁上を行き来する水の流れを計測したかったためです。結果的に岸壁天端とほぼ同じ高さとなっております。なお、水位変動により検出部が干出した時刻のデータは欠測となりますが、流速が欠測している時間帯は越波・排水が生じていないと仮定することもできると考えられます。
13	通常の造波方法で防波堤を入れた場合と、今回の造波方法での波浪場の一致具合はどの程度でしょうか。	結論から申しますと、そのような比較検証は残念ながら未だ実施できておりません。しかし、これまでの研究成果により、防波堤背後の波の回折変形に対する計算結果は実験結果をよく再現することが確認されています。したがって、防波堤背後の波の計算結果を再現した実験結果は、実際に防波堤模型を置いた実験結果とも一致するものと考えています。
14	シミュレーション結果から造波することが可能とのことですが、具体的には、造波板の位置に相当するシミュレーションの水位時系列データを各造波	長辺側 70 台の各造波板位置での造波データを用意し造波システムに入力します。現在の仕様では短辺側 30 台は含まれません。このとき、数値計算

No.	質問	回答
	板の信号として入力するということでしょうか。全造波板分の時系列データを用意されるのでしょうか。	で得た各造波板位置での時系列データを直接入力するのではなく、それぞれ方向スペクトルを算定して長辺側 70 台のうち少なくともいずれかで造波することになる成分波の周期、波向及び初期位相を網羅的に設定した後、各造波板位置の方向スペクトルに応じて調整した各成分波の振幅リストをそれぞれ与えることにより、成分波形の空間的な連続性を確保しつつ造波板毎に異なる多方向不規則波を造波しています。従いまして、各造波板位置での方向スペクトルを直接与える場合には、それらの位置での時系列データは必要ありません。なお、詳しい造波方法につきましては、次の文献を合わせてご参照いただけますと幸いです。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/72/2/72_I_1765/_pdf/-char/ja
15	埋立地模型からの反射波が造波板で再反射して造波特性が変わってしまうことは無いのでしょうか？	防波堤背後の回折波の造波を行わない短辺側の各造波板は、反射波が発生しないよう波を吸収する（多方向消波壁）ためだけに動いていますが、長辺側の各造波板は、埋立地模型からの反射波を吸収しながら回折波を造波する（多方向吸収造波）ように動いています。したがって、模型からの反射波が造波板での造波に悪影響を与えることはほぼないと考えています。
16	模型に作用させる波高、波力の妥当性の検証はどのようにされるのでしょうか？	ある地点の模型断面を対象とする水路実験とは異なり、平面模型を対象とする水槽実験では、一般に、実験対象とした模型の位置ではなく、平面的な海底地形を含めた模型の沖合で作用させるべき波浪諸元を設定し、それが十分な精度で再現されているかを確認することにより、模型に作用させる波の妥当性を検証しています。今回の実験では、数値計算で算定された各地点での目標波高に対する造波波高の誤差が最小となるよう、各造波板に与えたそれぞれの振幅リストに対し調整係数を一律に乗じています。また、十分大きな模型縮尺で設定した波浪諸元が適切に造波されていれば平面模型に作用する波力も妥当なものと判断されますが、模型縮尺が小さくなるにつれてその計測値の信頼性（妥当性）が劣るようになります。なお、今回用いた実験模型の縮尺 1/50 は、岸壁や陸上の建物に作用する波力を計測するには値が少し小さいこともあり、造波した波により作用する波力の再現性に関しては

No.	質問	回答
		特に検討していません。
17	他国や他研究団体で似たような実験装置・実験内容をしている事例はございますか？もしありましたら、本日見せていただいたものとの共通点や違いを教えていただきたいです。	デュアルフェースサーペント水槽は多方向不規則波を造波可能な平面水槽の１つとして分類されますが、海底地形や構造物などの模型設置を想定しない船舶用の実験施設を除いてもこのような水槽は国内外に複数存在します。ただし、水槽の２辺に造波装置を設置しているものは比較的まだ少ないと思われます。また、海外にはご覧いただいたものよりも大きな水槽もあります。断面水路を含めたこれらの詳しい状況につきましては、次の文献を合わせてご参照いただけますと幸いです。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/75/2/75_I_349/_pdf/-char/ja 護岸で生じる越波を対象とした断面水路での模型実験の事例に比べれば数は少ないですが、平面水槽を用いた模型実験の事例も例年いくつかみられます。通常、護岸の天端高は潮位や背後の地盤高に比べて高く、越波して背後に貯まった水塊が護岸天端高を乗り越えて排水される状況を考える必要がないため、これらの越波実験では護岸背後の陸上地形は考慮されず、代わりに、護岸を乗り越えた水量を計測するための集水箱などが設置されます。しかし、今回の実験のように、天端高が潮位や背後の地盤高とさほど変わらない岸壁を対象とした場合には、海と陸の間で水の流入及び排出が繰り返されるため、岸壁背後の陸上地形を考慮する必要があり、それらの水量や陸上の浸水量を計測する方法にもさまざまな工夫が必要となります。このような実験例は国内外を問わずまだほとんどみられないので、今後もさまざまな実験・計測技術の開発が必要になるものと考えています。
18	水理模型実験と CADMAS-SURF の使い分けはどのように考えられますか？	CADMAS-SURF は断面２次元場を対象とした CADMAS-SURF/2D と３次元場を対象とした CADMAS-SURF/3D がそれぞれ公開されていますが、CADMAS-SURF/3D は計算負荷が大きく、実務での適用例はまだまだ少ないのが実状と思われます。そのため、空間的に広がりのある現地の波浪現象を対象とする場合には、数値シミュレーションの適用範囲の拡張と計算負荷の削減の両立を図るために、適切にモデル化された境界処理法とともに３次

No.	質問	回答
		元的な現象を平面２次元場で近似したNOWT-PARIなどの波動モデルを適用することが多く行われています。ただし、このような計算法によって現象をどの程度再現できているかについては、模型実験との比較を通じて確実に検証される必要があります。すなわち、今回ご覧いただいた模型実験の目的の１つには、平面２次元場を対象とした数値シミュレーション結果と比較し、このような計算法の適用性を検証することが挙げられます。一方、計算負荷が比較的小さいCADMAS-SURF/2Dは護岸断面における越波計算などの実務にもすでに多く用いられているところですが、平面的な波の挙動は考慮されていないという点に留意する必要があります。また、境界処理や格子設定等の差分条件について適切に取り扱う必要があるため、十分なキャリブレーションを行ったうえで実務に適用するために、計算結果と比較し計算モデルの妥当性を検証できる模型実験結果の存在がやはり重要になるものと思われます。
19	岸壁の模型実験では、実際の高潮や高波の現象は風の影響があると思われますが、その影響はどのように考慮されているのでしょうか。	高潮や高波に対する風の影響は、観測値をほぼ再現することが確認された高潮推算及び波浪推算の結果に反映されているものと考えています。したがって、これらを入力値として港周辺の波浪変形計算をブシネスクモデルにより実施し、実験に用いる造波信号を得るために出力した岸壁沖での波浪諸元は、防波堤沖の波浪推算地点から岸壁沖までの風による波の発達は考慮できていないものの、ブシネスクモデルに与えている波浪条件及び潮位条件については風の影響を考慮したものといえます。一方で、今回の越波浸水・排水実験では風の再現は行っていないため、岸壁上の浸水過程における風の影響は考慮されていません。
20	短辺側では吸収造波とのことですが、長辺側でも吸収造波はされているのでしょうか。またその効果はいかがでしたでしょうか。	防波堤背後の回折波の造波を行わない短辺側の各造波板は、反射波が発生しないよう波を吸収する（多方向消波壁）ためだけに動いていますが、長辺側の各造波板は、埋立地模型からの反射波を吸収しながら回折波を造波する（多方向吸収造波）ように動いています。沖側の波高計アレイで計測した水面変動データを解析して取り出した入射波高を確認する限り、埋立地模型を

No.	質問	回答
		設置せずに実施した検定時と概ね同じ波を造波できていることが分かっています。
21	陸上部の浸水を評価する場合は、模型範囲外からの浸水の影響があるかと思いますが、模型範囲の決め方には工夫が必要かと思います。そのあたりは如何お考えでしょうか？	基本的には、岸壁全体を対象として事前に実施したブシネスクモデルによる越波浸水・排水計算の結果を参照して、越波浸水・排水過程がクローズしていると思われる範囲を切り取って実験模型を作成しています。しかし、ご指摘のような模型範囲外からの浸水の影響を完全に排除できているわけではありませんので、その部分の水の出入りについては模型実験を忠実に再現した数値計算の結果から把握しています。なお、実地形では海との直接的な水の出入りが生じ得ないにもかかわらず、一部を切り取った模型としたことで海と接するようになり、かつ波による影響が無視できる部分については、潮位による浸水が生じないよう仮想的に壁を立てることで対応しています。
22	模型岸壁表面の粗度調整をされているでしょうか？	結論から申しますと、今回の実験において岸壁模型の表面粗度の調整は行っておりません。これは、波の相似則に対して縮尺効果を有する底面摩擦の影響をどの程度考慮するべきかについて、未だ不明な部分も多いためです。今回の模型実験では岸壁模型の表面粗度の影響をなるべく小さくするために、できるだけ大きな実験模型を作成して対応することとしました。