

久里浜の研究所による先輩の経験を語り継ぐ会

高山知司先輩「私の研究歴 ～体験と展望～」

講演者 京都大学名誉教授 高山知司

司会 国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部長 酒井浩二

日時・場所 令和5年9月29日（金） 国土技術政策総合研究所（横須賀庁舎）3階会議室

はじめに

【司会】

久里浜の研究所（国総研、港空研）において、研究所OBの方を講師に、港湾・空港整備等における技術課題をどのように克服したか等、研究者としての経験を語っていただき、若手職員等のこれからの研究活動における気づきの機会になればと思い、先輩の経験を語り継ぐ会を開催することとしました。第一回の講師として、京都大学名誉教授高山先生にお願いしたところ快くお引き受けいただきました。

高山先生は、防波堤の計画にも必要な港内静穏度の計算法（高山法）を提案されました。コンピューターが未発達時代において、自然現象を見極め、当時の計算機レベルで実用に堪えられるモデルとして提案したものです。技術課題を克服するために、自然現象をどのように捉え、実用に堪えられるモデルとするかという視点は、水工・環境だけでなく、構造・土質等の分野の研究においても参考となると思います。

なお、本日の講演会は、「先輩の話を聞く」ということです。高山先生のごことは、この会では「高山先輩」とお呼びしたいと思っておりますので、よろしくお願ひします。

【高山先輩】

本日は先輩の経験を語り継ぐ会にお呼びいただき、ありがとうございます。ここへ来るのはもう30年ぶりのことでしょうか。

今日は、これまで研究をどういうふうにしてやってきたのか、その時の社会情勢がどういったものだったのか等のお話をさせていただきます。

講演内容ですけれども、まず研究生活に

高山知司先輩の略歴

- 昭和19年島根県生まれ、昭和42年京都大学卒、昭和44年京都大学大学院修士修了。同年、運輸省入省（港湾技術研究所水工部波浪研究室研究員）。高潮津波研究室長、波浪研究室長、水工部長を歴任。
- 平成7年、京都大学防災研究所教授。
- 現在、一般財団法人沿岸技術研究センター 上席客員研究員。



おける社会環境、在籍した研究所を取り巻く状況はどのような状況だったのかというお話をします。私自身は、非常に恵まれた社会経済環境の中での、研究生活を送れたのではないかと考えています。現在の皆様が研究をしている環境と、私がいた当時とでは、もう 50 年ぐらい昔になるので、だいぶ違うかと思えます。

次に実施した主な研究について、お話をさせていただきます。

研究所に在籍していた当時、私の上司は合田先生です。合田先生は港研を退職されて横浜国大に行かれています。現在はもうお亡くなりになりましたけれども、先生の的確な指導があったということと、

また、研究の実施にあたって資金的にも豊富だったと感じています。

私は、運輸省港湾技術研究所（以下、港研と記す）に 1969 年から 26 年間、在籍しました。国の行政的な課題に対応するという要請があって研究を行うという、まさに具体的な問題を解決するということを実施してきました。

それから京都大学防災研究所に移籍しました。大学ですから、非常に自由に、何をやってもそんなに文句を言われることはありませんでした。研究を行う上で自由な課題の選択がありました。ある意味、大学の研究とは社会の要請に比べると抽象的です。港研にいる時のような「これをやってほしい」と言われるように問題が明確になっているわけではありませんので、自分の判断で研究を行いました。ただし、今の大学は国立大学法人化されましたので、かなり変わってきています。これについてはもう少し後でいろいろとお話しします。

その後、大学を停年退官しました。私の時は 63 歳が停年でした。停年後にすぐ一般財団法人沿岸技術研究センター（以下、沿岸センターと記す）に移籍しました。沿岸センターでは、行政が抱える問題を解明するというので、具体的な問題に対応しています。

講演内容

1. 研究生活における社会環境
非常に恵まれた社会経済環境の中での研究生活
2. 実施した主な研究
的確な指導・豊富な資金

運輸省 港湾技術研究所水工部時代

【高山先輩】

港研では、水工部波浪研究室に在籍していました。基本的には6名の体制で、室長と研究員2名、この3名が上級職を通して入ってきていました。それから研究補佐員が3名で、彼らは、全員地方建設局採用で、今の地方整備局からの出向者で構成されていました。

研究室では、まず4月にこの1年間どのような研究を実施するかということ、研究室の皆を集めて話をしていました。まず、研究としては、基礎実験、まず基本的なことに関する実験を行うということです。それは大体職員3名でやっていました。それから受託実験、頼まれた試験を行っていました。こうした実験では職員2名と、あとは民間のコンサルが入った形で行っていました。

予算的には研究費が300万円程度ありました。それに海調費、港調費、受託費で対応していました。

運輸省 港湾技術研究所 水工部

波浪研究室 基本的に6名体制
室長、研究員2名、研究補佐員3名
補佐員：全員地方建設局からの出向者

研究体制：年度初めに研究計画(担当の確認)
基礎実験：直営体制(3名)
受託実験：職員(2名)+民間コンサル

予算：研究費(300万円)+海調費+港調費+受託費
外部資金≤3,000万円 豊かな予算

京都大学 防災研究所部時代

【高山先輩】

京都大学では、防災研究所沿岸災害研究室に在籍していました。教授、助教授、助手、技官、各1名と、学生は学部が3名、修士が5、6名、博士課程が2名ぐらいという体制です。研究生としては外国人が1、2名いるという感じです。卒論は教授、助教授、助手の3名でテーマを考えて、そして卒論生3名に選択させました。

土木本部の一研究室当たりの学部定員は5名ですけれども、防災研究所の一研究室当たりの学部定員は3名でした。最近は2名になったということを知っていますが、我々の時は3名という感じでした。

学士の卒論生は土木学会関西支部で必ず発表させます。関西支部では春に研究発表会があります。そして修士以上の者は、海岸工学講演会や海洋開発講演会で発表させます。博士課程を出た者は、ICCE（国際海岸工学会）や Coastal Structure 等の国際会議の場で、必ず発表させます。外国に連れていくことをやっていました。

予算は講座費が350万円ぐらい、科研費、共同研究、それから受託費がありました。十分な予算があり、予算で困ることはありませんでした。ただし最近、国立大学が法人化され、講座費がどんどん減らされています。大学では、講座費を減らして、研究者には科研

京都大学 防災研究所

沿岸災害研究室
教官：教授、助(準)教授、助手(助教)、技官：各1名
学生：学部(3名)、修士(5~6名)、博士(2名)
研究生：1~2名

卒論：教官3名で研究テーマを討議設定・分担
修論：研究テーマは卒論の延長
博士：研究テーマは本人の希望
学士は関西支部発表、修士以上は学会(海講・海洋開発)発表、
博士は国際学会(ICCE, Coastal St., etc.)発表

予算：講座費(350万円)、科研費、共同研究、受託費
十分な予算 困ることはなかった

波浪変形

【高山先輩】

次に、私自身が実施した主な研究についてお話したいと思います。黒い字で書いた項目は、ここでこんなことをやっていますよというだけで、緑の字で書いた部分について、後程少し詳しくお話したいと思います。

最初が港内静穏度の解析です。1970年ぐらいから1982年にかけて行いました。これについては後で、また詳しくお話しします。

それからリーフ上の波の変形解析を行いました。これは1972年に沖縄返還がありました。沖縄は皆さまざま存じのように、非常に幅の広いリーフが沿岸部に存在します。リーフ上は水深が非常に浅いものですから、沖から来た波はリーフ前面斜面とリーフ上で砕波します。そして、砕波によるウェーブセットアップで水位も上昇します。リーフが非常に長いものですから、砕波減衰した波はまた非砕波の波に戻ってきます。このような波の変形を実験によって再現し、リーフ上の構造物の設計波を算定する式を提案しています。

それから、1988年から1995年に、エネルギー平衡方程式による波浪変形計算について取り組みました。これについては後程説明します。

また、多峯型方向スペクトル波に関する研究については、現在港空研にいる高橋地盤改良研究グループ長に修士論文として研究してもらいました。彼の修士論文は土木学会の論文集にも要約されています。多峯型方向スペクトルの中には波向きが2つ重なっている二山型になったものも出てきます。この論文はどのような条件の時に二山形スペクトルが発生するか、また、条件によって方向スペクトル形状が異なる原因について調べています。

2. 実施した主な研究

(1) 波浪変形

- ・ 港内静穏度解析(1970~1982)
- ・ リーフ上の波の変形解析(1975~1978)
沖縄返還(1972)に伴うリーフ上構造物の設計波の設定
- ・ エネルギー平衡方程式による波浪変形計算(1988~1995)
- ・ 多峯型方向スペクトル波に関する研究(2000~2003)
多峯型方向スペクトルの発生と影響

護岸越波量に関する研究

【高山先輩】

それから、各種消波護岸の越波量に関する研究を行っています。これまで、低天端護岸や親水性構造物が指向され、面的に防護するという方向性があり、様々な特殊な構造物を作って越波量を減らすということに取り組みました。

その中で、天端高低減係数という概念を出しています。これは直立護岸の天端高を1として消波護岸を作ると、どの程度に天端が下がるかという係数です。例えば0.6にできるとか、0.7ぐらいだとかという形で、端的にすっきりと分かるような数値で提示しています。

(2) 護岸越波量に関する研究

- ・ 各種消波護岸の越波量(1982~1992)
低天端護岸(親水性構造物)の要請(面的防護)
天端高低減係数の概念の導入

(3) 波浪中の浮体運動

- ・ 係留浮体の運動と波力(1970~1980)
大型タンカーシーバース、関西空港、国家備蓄
- ・ プイ係留船舶の運動と係留力(1979~1998)
多点プイ係留船舶の運動の現地観測

波浪中の浮体運動

【高山先輩】

波浪中の浮体運動に関する研究にも取り組みました。係留浮体の運動と波力についての研究です。ちょうど私が運輸省に入省した当時、タンカーがどんどん大きくなって、そしてタンカー専用のシーバースに係留して石油を揚げる形態になっていました。非常に大きなタンカーに係留すると、波によってタンカーが揺らされ、大きな力がシーバースに作用します。それがどのくらいになるかという話です。

関西国際空港の第2期工事に際して、浮体式という計画も浮上し、これについても検討しました。浮体で作った時に、どういう問題が起きるかということです。問題の一つは航空機の下降時に滑走路がゆっくり運動しているということです。航空機の安全な着陸のために地上からビームを出しています。そのビームに沿って航空機が降りてきますが、ビーム発生器が浮体の上に乗っていると、ビームが上下に大きく揺れてしまいます。そうなりますと、飛行機はそれに追従して降りて行けないという問題が出てきます。それをどのように解決するかは大きな問題で、関空の浮体化構想は消えました。

それから国家備蓄の問題です。昭和48年にオイルショックが起きました。日本で、石油やガソリンがものすごく値上がりするという大きな問題が起きました。それを防ぐためには国が120日ぐらいの石油量を備蓄して、そのような問題が起きた時にはそれを払い出すことをするべきだということで、国家備蓄計画が立ち上がりました。係留浮体の運動や波力について、今まで港研では研究してこなかったけれども、この頃から浮体の問題をどんどん研究するようになって、海洋構造研究室が新たに設置されることになりました。

それから国家備蓄用の大型タンカーはシーバースにも着きますし、専用のブイにも係留し、荷役します。ブイは一点係留ブイと呼ばれており、ブイのタイプとしてはCALM型とSALM型というのがありました。SALM型というのは、緊張係留方式の一点係留ブイです。それからCALM型というのは、カテナリーチェーンによる弛緩係留方式のブイです。一点係留ブイに係留しているタンカーの波浪動揺と係留力について研究を行いました。

不規則波の水理模型実験

【高山先輩】

次に不規則波の水理模型実験についてお話しします。ちょうど私が港研に入った時に、今の大型の平面水槽が作り始められようとしていました。当時、不規則波の造波装置を入れるということで、信号をどのように作るかが課題でした。当時はまだ海の波のス

(4) 不規則波の水理模型実験

- ・平面水槽用不規則波造波装置の製作(1970~1972)
- ・多方向不規則波造波装置の開発(1980~1994)

(5) 港湾・海岸構造物の設計法

- ・防波堤の信頼性設計法(1988~2005)
- ・海岸・港湾構造物の被災解析(1997~2002)
- ・個別要素法による防波堤の挙動解析(2002~2007)
- ・海岸護岸の最適設計(2004~2009)
- ・実際問題への対応(1996~2002)

ペクトル形状についてよく分かっていませんので、不規則波の信号をどのように得るかが課題でした。

その頃の計算機は、今と違って非常に遅い。ちょっとした計算もなかなかできない。当時、ホワイトノイズジェネレーターというホワイトノイズの信号発生器がありました。そこで、その信号を、バンドパスフィルターを通してデータレコーダーに記録させます。記録した信号そのものの周波数は非常に高いので、データレコーダーを非常にゆっくり回して、出力信号の周波数を造波する波の周波数程度に落として出すようにしました。発生波は一方向の不規則波で、造波板幅 5m を持つ造波機で発生しました。そのような造波機を 15 台ぐらい作りました。こうして不規則波の造波装置を開発しました。その後、今度は多方向不規則波の造波装置の開発を行いました。これについてはまた後で詳しくお話しします。

港湾・海岸構造物の設計法

【高山先輩】

次に「港湾・海岸構造物の設計法」についてです。防波堤の信頼設計について研究を進めました。また、海岸や港湾の構造物がどのような被災を受けているのか、こうしたことの解析も行っています。

防波堤がどういうふうに被災をするのかシミュレーションを行おうということで、防波堤の挙動解析も行っています。後程、これについてはお話しします。

大学の時に委託された技術課題として、高松港防波堤の上部工形状設計があります。当時、高松港では防波堤を透過式にすることが考えられて、前面と背後にスリットを設置した透過式防波堤が建設されていました。背後のスリットの空隙率は、前面に比べてその割合は少し小さくなっています。通常の防波堤では港内の海水交換ができないということから、港外からの水を入れよう考えられていました。更に、防波堤を市民に開放できるような親水性防波堤にする計画があり、親水性防波堤にしたときの防波堤の安定性について実験的に検討し、必要なら上部工の形状についても検討するように高松港湾・空港整備事務所から頼まれて、実験的検討を行いました。その防波堤は現地に整備されて、25 年程度になります。

津波に関する研究

【高山先輩】

次に、津波に関する調査・研究についてです。これまで数多くの津波の現地調査を行っ

てきました。1983年の日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震。それから2011年の東日本大震災です。

こうした中で、津波に関する研究としては、「津波の変形と波力」について、大学の時ですけれども、ソリトン分裂に関する実験を行って、ソリトン分裂によって波力がどう変化するかを検討しました。また、実験だけでなく、ソリトン分裂の計算法についても検討しています。

また、リアルタイムの津波予測を行っています。これについては少し詳しく後で話します。

(6) 津波に関する研究

- ・ 津波被害の現地調査(1983, 1993, 2011)
- ・ 津波の変形と波力(1980~2005)
- ・ リアルタイム津波予測(2003~2007)

(7) 高潮に関する研究

- ・ 高潮災害の現地調査(2003~2005)
- ・ 確率台風モデルによる高潮解析(1996~2005)

(8) 波による海底地盤の液状化

- ・ 海底地盤の液状化に関する現地観測(2002~2005)

高潮に関する研究

【高山先輩】

それから高潮に関する研究で、高潮災害の現地調査を行っています。2004年に広島港で大きな災害が起きました。高潮についても現地調査だけでなく、高潮に関するシミュレーションについて研究を進め確率台風モデルを使った解析を行っています。

また、波による海底地盤の液状化について、波浪による海底地盤の液状化に関する現地観測を、高知港で行っていました。この研究については、当時、私の研究室にいた佐々さん、現在、港空研の動土質研究グループ長にも手伝ってもらいました。

港内静穏度解析

【高山先輩】

それでは港内静穏度解析について、少し詳しくお話します。1970年から1982年の頃に行った研究です。まず、当時の港内静穏度解析では港内の波高をどのように推定していたかお話します。防波堤の配置計画に対する基準というのは、明確になっていませんでした。風向きの頻度等から経験によって防波堤の配置が決められていたという状況です。

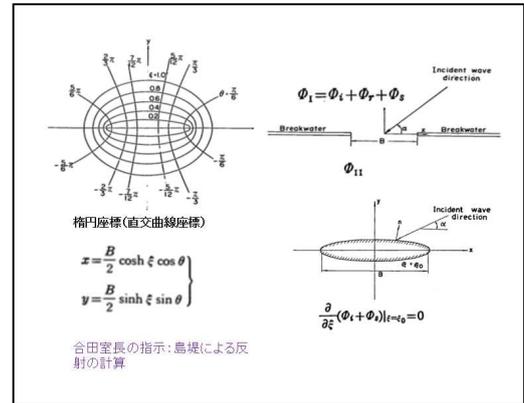
1) 港内静穏度解析(1970~1982)

1970年頃の状況

- ・ 防波堤配置計画に対する明確な基準なし: 風向の頻度や経験によって決定
- ・ 半無限防波堤や両翼防波堤のような単純な防波堤に対する回折図は存在
- ・ 港内波高の算定には、折り返し回折図法といった図式解法の適用
- ・ 複雑な港湾に対する港内波高分布の計算法の必要性: 港内波高は実験によって算定
- ・ 港内静穏度の評価基準の確立の必要性

当時、半無限防波堤や両翼防波堤のような単純な形状の規則波の回折図は示されていませんでした。しかし港内の波高を計算する方法は、何もありませんでした。ただし、折り返し回

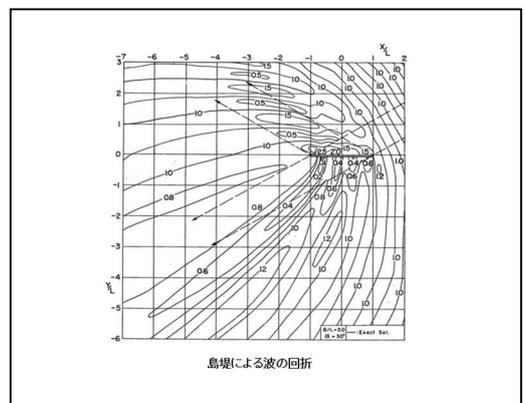
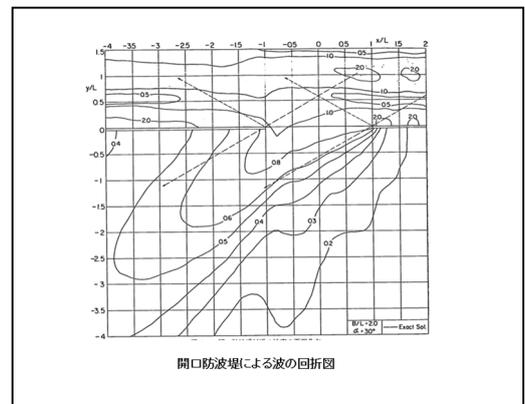
折図法と呼ばれる手法では、岸壁を鏡のように見立てて反射波を計算する図式解法のようなものがありました。これもいい加減なもので、精度的には非常に悪いものでした。そのため、複雑な港湾に対する港内波高分布の計算法を確立する必要がありました。その頃は、防波堤の配置はほとんどが実験で決められていました。水槽内に港を再現して、模型実験を行っていました。そういう面で、港内静穏度の評価基準の確立の必要性も強く感じていました。



その防波堤の開口部から入ってきた波が、港内でどのように反射するのか、それを計算しようということで、島堤による波の回折の問題と、それから開口部から入ってくる波の回折計算を厳密解で計算できるようにしました。それまでの開口防波堤の回折図は、半無限堤に対する Sommerfeld の解析解による近似解でした。

厳密解は、図に示す楕円座標を用いています。楕円座標を用いるのは開口防波堤における境界条件が簡単に表せるからです。円筒座標ですと、解としてベッセル関数がありますが、楕円座標ですと、マッシュー函数が解になります。

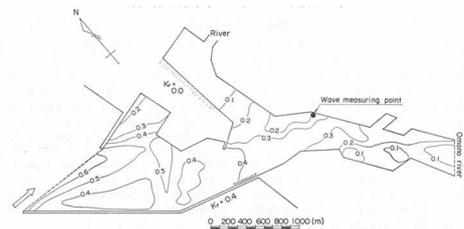
この図が開口防波堤による回折図を厳密解で計算したものです。波高 1 の規則波が入射波として来襲したときの防波堤周りの波高分布を示しています。防波堤前面では入射波と反射波が重なっていますし、防波堤背後では回折波になって、波高は低減しています。従来の開口防波堤の回折図は、既に述べたように近似解ですから計算精度を調べるためには、この厳密解による回折図と比較する必要があります。従来の回折図と厳密解による回折図を比較した結果では、開口幅と入射波長の比が 1.0 より小さく、波が 60 度以上傾いてくる入射場合には両者に差が出るが、それ以外では回折図はほぼ同じになるため、一般的には、計算の速い近似解で計算してもよいことが分かりました。



次に、これは島堤に対する厳密解の回折図です。島堤に関しても半無限堤に関する Sommerfeld の解を用いて近似解を得ることができます。厳密解と比較しても近似解はかなり精度が高いので実用に供することができることが分かりました。

防波堤の配置としては、半無限堤が開口部を持って、一直線上に並んでいるものは少なく、一般的にはハの字の形をした配置になっている。このような防波堤の配置に対しても半無限堤の解析解を重ね合わせることによってうまく近似解を得ることができます。そして、回折して港内に入って来た波が岸壁に当たると、岸壁を島堤として反射波を計算するようにして、港内で何回か反射させることもできるように計算方法を改良しました。この図はこのようにして計算した秋田港の港内波高分布です。当然、入射波は多方向不規則波として計算しています。

秋田港内の波高分布の計算例



それから当時、港内静穏度の判定基準をどうするかということが問題になっていました。1970年代の頃は、係船岸壁における波高が 50cm 以下になる年間の日数の割合を静穏度として年間 95%以上にしようとしていました。

この話をもう少し具体的に説明します。その頃、満載で船が入ってくると、3日間ぐらい岸壁に係留します。つまり空載になるまで3日間を要します。そのために3日間の間に 50cm 以上の波高に遭わないようにしなければなりません。50cm 以上の波に遭遇すると荷役障害が発生すると想定されます。3日間連続して 50cm 以上の波に会わない確率は $0.95^3=0.857$ となり、50cm 以上の波に会う遭遇確率は 0.143 なり、ランダムに 7 隻の船が入ってくると、7 隻の遭遇確率は $0.143 \times 7 > 1$ となって、7 隻の内の 1 隻は荷役障害を起こすこととなります。

こうした計算を行うと、静穏度を 97.5%以上にすると、15 隻に 1 隻が荷役障害を受けることとなります。つまり 2 倍ぐらい安全になるということです。最初は静穏度 95%でいこうとしていたのですが、いろいろ港湾局と話をした時に、やはり 7 隻に 1 隻が荷役障害を起こすのは大き過ぎるということで、97.5%に変えることになりました。

これは通常の風波に対しての検討ですが、その後、船舶そのものがどんどん大きくなってくると、今度は、波高が小さくても周期の長い波によって船体はかなり大きな動揺を起こすような現象が起きてきました。こうした長周期波による荷役障害、すなわち周期 30 秒以上の長周期波に対しても検討しなければいけないということになっています。それから 2000 年代になりますと、通常波でも長周期波でも、基準値以下の波高になる条件として静穏度が 97.5%以上という形になりました。

港内静穏度の判定基準

- 1970年代:50cm以下の港内波高の発生頻度を95%以上:7隻に1隻が荷役障害
- 1980年代:50cm以下の港内波高の発生頻度を97.5%以上に変更:15隻に1隻が荷役障害
- 1990年代:係留船舶の運動を考慮して、船の大きさに対応した波高基準の設定,周期30s以上の長周期波に対する検討
- 2000年代:通常波でも長周期波でも基準以下の港内波高の発生頻度を97.5%以上

ただし現在でも港内静穏度の問題は残っています。風波については長期間の観測値から波高や周期、波向きの発生頻度は明確になっていますが、長周期波についてはあまり分かっていません。つまり、周期の長い波についてはその発生頻度がよく分かっていません。長周期波の発生頻度をこれから明確にしていかないと、長周期波に対する対応がうまくいかなくなります。

波浪変形計算

【高山先輩】

次に、波浪変形計算について説明します。1980年代当時、多方向波の浅水や屈折変形計算にエネルギー平衡方程式を使うことは既に行われていました。そこでのエネルギー平衡方程式は、エネルギーが逸散しないという条件で計算されていました。しかし、砕波が考慮されていなかったものですから、沖合に浅瀬がある海域でこの方程式を使って、港口部に来襲する波高を計算すると、浅瀬で波が砕波しないので、大きな波が港口部にやってくるようになってしまい、これはおかしい、何とかしてほしいということが地方港湾建設局から問題提起されました。

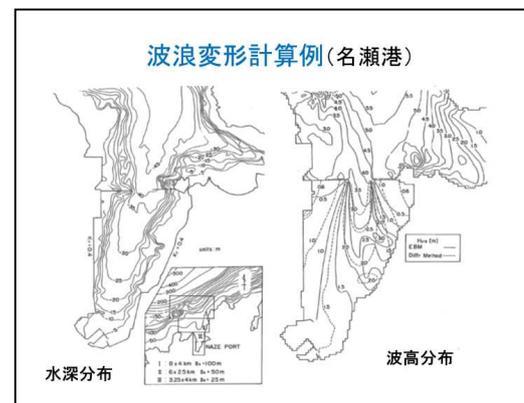
そこで、砕波によるエネルギー逸散を含むエネルギー平衡方程式を作ることになりました。これによってエネルギー逸散を考慮したモデルができ、沖合に浅瀬があって、砕波が起きれば、砕波によるエネルギー逸散の計算ができるようになりました。また、防波堤や護岸による沖側への反射波の計算もできるようにしています。このようにより精度良く計算できるようにしています。

この図は例として、名瀬港の港内波高について計算を行ったものです。右の図が計算した波高分布で、点線で示している波高分布は、水深が一樣という条件で防波堤による回折計算をしたものです。実線がエネルギー平衡方程式による計算です。港内では水深の変化があるので、屈折の影響がかなり出てきて波高が変わってきています。

2) 波浪変形計算(1988~1995)

背景: 多方向波の浅水や屈折変形の計算としてエネルギー平衡方程式が採用されていたが、砕波が考慮されていなかったために、沖合に浅瀬がある場合に波高の推定に問題があった。

- ・砕波によるエネルギー逸散を含むエネルギー平衡方程式(EBE)を応用
- ・砕波によるエネルギー逸散としては合田の砕波波高の計算式を用いて、計算格子内での砕波エネルギー逸散量を計算
- ・沖側への反射波の計算の導入



実際の計算では沖から波浪が入射してきますので、沖では大領域を取って、浅くなるに従って領域をどんどん狭め、格子サイズも小さくしていくような形にしています。

私の研究室にいた間瀬助教授が、エネルギー平衡方程式に少し修正をかけています。エネルギー平衡方程式に回折の効果が入っていないということで、緩勾配方程式による位相関係式を導入することによって、回折効果を完全ではありませんが、見かけ上モデル化してみたという感じです。

それから斜めの反射波のところを、うまく出せるようにしました。更に、数値拡散を抑えるようにした。こうした改良を彼がやってくれました。

間瀬助教授によるEBE法の改良

- EBE法は基本的には位相平均しているので、成分波間の位相差が重要な回折現象は計算できない。緩勾配方程式における位相関係式の導入によって、回折効果を見かけ上導入
- 斜め反射境界での反射波を格子線上で沖側に反射させるのではなく、正確に反射方向に反射させる方法に改良。
- 数値拡散を抑えるように、計算精度の向上を図る。

浮体

【高山先輩】

次に浮体構造物について説明します。先ほども話しましたがけれども、昭和48年にオイルショックが起きました。ガソリンの値段が非常に上がるということがあり、石油の国家備蓄をやらなければいけないということで、いろんな会社がタンクの製造を提案しています。その中で浮体式タンクとして、長さ

が300m、幅が50m、深さが30mのタンクを造ろうという動きがありました。その場所は白島と上五島です。白島は日立造船、上五島は三菱重工が提案していました。

この備蓄基地の建設は石油公団が実施したのですが、石油公団に港湾局からの出向者がおり、その人が「彼らに勝手にさせるのはどうもいけない。」と、「きちんとした技術の確認を取らなければいけない。」ということで委員会を作り、我々もその委員会に引っ張り出されました。白島と上五島に浮遊式備蓄タンク基地を造っています。

それから更に、このような巨大な浮遊タンクだけではなく、陸上タンク群も造りました。陸上タンクのためのタンカーの係留装置として、一点係留ブイを造るということになり、それについても委員会が設けられています。

これが洋上石油備蓄基地で白島に造られました。福岡の沖合にある白島という所に造られたものです。これは浮体構造物で、この構造物の周囲は防波堤で囲まれています。一部の防波堤は上に取り除く

3)浮体

石油の国家備蓄計画(1978~1985)

- 備蓄タンクの挙動と係留力(白島と上五島)
石油備蓄タンク:300m×50m×30m
- 一点係留船舶の振れ回り運動(むつ小川原や福井)
SALM型一点係留ブイに係留した20万トンクラスのタンカーの風による振れ回り運動

洋上石油備蓄基地

白島石油備蓄基地



ことができ、それでタンクも修復の時は、取り出すことができるようになっています。

これが上五島で、長崎の五島列島に造られている基地です。ここは島と島の間を防波堤で仕切って、島を回った回折波が入ってくるような形で、浮遊式タンク群を並べて造っています。



それから先ほど話しました一点係留ブイというのは、20万トンクラスのタンカーをSALM型ブイに係留して石油を陸上げます。このような係留の仕方をしますと、タンカーは風によって典型的な振れ回り運動を起こします。タンカーの係留実験はオランダにある船舶技術研究所（MARIN）で行われました。

むつ小川原にこのSALM型ブイを造るということで、青森県が委員会を開催し、その中に私が委員として入っていました。オランダで実験を行っていますが、委員会の誰も見ないと問題があるだろうと、そこで「高山君、行ってこい。」と合田さん言われて、私は半月ぐらいオランダに出張しました。ブイ係留船舶の動揺実験を確認して帰ってきました。ブイ係留船舶の動揺実験はそれまで行ったことがありませんでしたので、よい経験をしました。

多方向不規則波造波装置の開発

【高山先輩】

次に、多方向の不規則波の造波装置の開発について説明します。実際の海の波は、皆さんご存じのように、いろんな成分の波がいろんな方向からやってきます。周波数もいろいろ違うけれども、やってくる方向もいろいろ違います。

実験水槽では、実際の海の波に近い波を起こさなければいけないということで、当時の合田水工部長から多方向不規則波造波装置を製作するように命じられました。

与えられた課題としては、成分波となる斜め波が起こせるような造波機を製作しなければなりません。そして、いろいろな方向の波を重ね合わせて、造波することになりますが、文献を調べましたが、実際に斜め波を造る理論はどこにも記述してありませんでした。そこで、まず斜め波の造波理論をまず自分自身で開発し、多方向不規則波を製作しました。

今は港研の中には沢山の多方向造波装置があります。この写真が私の製作した多方向造波装置ですけれども、まずこの写真のように並んだ1枚の造波板を動かした時に、起きる

4) 多方向不規則波造波装置の開発 (1980~1994)

実際の海の波と同じ特性の波を実験室内に再現

- ・多方向不規則波の造波理論の提案
- ・わが国最初の多方向不規則波造波装置

合田部長の指示: 多方向不規則波造波装置の製作

波の理論を最初に導きました。そして、位相をずらして横の造波板を動かすことによって斜め波を起すことができることが分かりました。位相のずれが波向きを示します。1枚の造波板の幅を狭めることによって一様な斜め波を起すことができることが分かりました。

この時に、25台ぐらいだと思うのですが、造波機を造りました。こうしてやっと、斜め規則波を起すようにすることができるようになりました。周波数及び波向きの異なる斜め規則波をいくつも重ね合わせて同時に造波すると、多方向の不規則波を起すこととなります。造波機の製作に当たって、合田部長に「1つの造波板の幅は狭ければ狭いほど良いのですから、50cmぐらいで作しましょう。」と言ったら「予算がない。」と言われて、造れませんでした。実際に私が作ったのは、1つの造波板の幅が80cmの物を造りました。

私が京都大学に移って大分年数が経ってから聞いた話なのですが、天皇陛下が港研に視察に来られた時に、多方向不規則波の装置を動かそうとしたら、動かなかったということがあり、天皇陛下に非常に申し訳ないことをしたとのことでした。その後すぐに本省が予算を付けてくれて、新しい造波機に取り替えるということがあったようです。私が造ってから、もうその時で20年近く経っていたかも知れません。もうかなり老朽化していたという感じです。今は造波板も幅50cmと、狭いものを作ってやっていると聞いています。

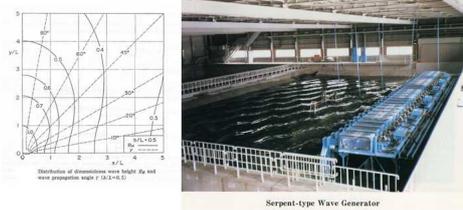
多方向造波装置を作る時に、信号をどうするかという問題がありました。あの頃のパソコンの演算速度はそれほど速くありませんでした。そこで、2,000万円位のミニコンを購入して造波信号を造りました。

多方向の不規則波を作る表示方法としては、ここに示すように、シングルサンメーション法とダブルサンメーション法があります。シングルサンメーション法は、1つの周波数で1つの波向きです。それが1つの成分波という形で、成分波が異なれば波向きも周波数も違います。ダブルサンメーション法は、周波数が同じで、波向きが違うものが重なっているという形になります。こうした2種類の表示方法の得失について理論的に検討を行いました。

ダブルサンメーション方式では、成分波間にフェ

斜め規則波の造波理論

1枚の板による造波 多数の造波板による斜め波



多方向不規則波の造波方法

多方向不規則波の表現方法

・シングルサンメーション法

$$\eta(x, y) = \sum_{i=1}^N a_i \sin(k_i x \cos \theta_i + k_i y \sin \theta_i - 2\pi f_i t + \varepsilon_i)$$

$$a_i = \sqrt{2S(f_i) \delta f_i} \quad S(f_i) = \int_{-\pi}^{\pi} S(f_i, \theta) d\theta$$

・ダブルサンメーション法

$$\eta(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \sin(k_i x \cos \theta_j + k_i y \sin \theta_j - 2\pi f_i t + \varepsilon_{ij})$$

$$a_{ij} = \sqrt{2S(f_i, \theta_j) \delta f_i \delta \theta_j}$$

2種類の造波方式に関して理論的に検討した結果

- ・ダブルサンメーション式では成分波間にフェーズロッキングが生じ、位相が平滑化されて方向集中度が低下する。そのため、成分波の数を増やさなくてはならない。
- ・同程度の精度で多方向波を発生させるためには、成分波数の少ないシングルサンメーションがよい。

現在では、多くの水理研究所に多方向不規則波造波装置が設置されており、造波はシングルサンメーション法で行われている。

ーズロッキングが生じ、位相が平滑化されて、方向集中度が低下するため、成分波の数をかなり増やさなくてはいけなくなり、それだけ沢山の成分波を作ることになって、今度はコンピューターに負担が掛かるということになります。そのため、シングルサンメーション法で行うのが良いということになり、シングルサンメーション法を採用しました。現代では多くの水理研究所で、多方向不規則波造波装置が入っていますけれども、全てがシングルサンメーション法で行われるという形になっています。

防波堤の信頼性設計

【高山先輩】

次に、防波堤の信頼性設計についてです。設計法の合理化と建設費の低減を目的に、防波堤の期待滑動量や破壊確率、それから海面上昇による防波堤の不安定化について検討しました。

この図は合田の波圧公式の精度を調べて示したものです。 P_c というのは合田波圧公式で計算した波力です。 P_E というのは実験値から求めた波力です。合田波圧公式は実験値よりも平均的に見ると、少し大きめに計算しており、この図に示すようなばらつきがあり、実験値の中には合田公式よりも大きいものもあります。

それからこの図は摩擦係数の分布図です。マウンド上のケーソンの摩擦係数としては、0.6 という一定値を取っていますけれども、実際に測ってみると、このようなばらつきを持っています。実際の摩擦係数の平均値としては 0.6 よりも 1 割程度大きい値になります。

波力やケーソンの摩擦係数がこのようなばらつきを持っているときに、防波堤の供用年数 50 年間に波浪によってケーソンが滑動する平均的な量が期待滑動量です。この期待滑動量を求めてケーソンの安定性を評価しようとするのが期待滑動量による信頼性設計です。期待滑動量の計算に、先ほど示した波力や摩擦係数の分布型をどのように使えばよいのか調べてみました。これらの分布形を正規分布で表すと、正規分布は広い範囲をカバーします

5) 防波堤の信頼性設計(1988~2005)

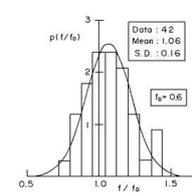
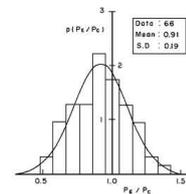
設計法の合理化と建設費の低減

- ・防波堤の期待滑動量や破壊確率
- ・海面上昇による防波堤の不安定化

波圧公式と摩擦係数の推定誤差

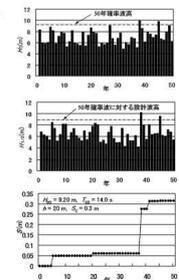
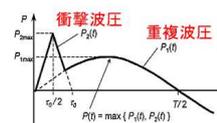
合田の波圧公式

摩擦係数のばらつき



防波堤の信頼性設計

期待滑動量の概念の導入
下迫・高橋(1997)

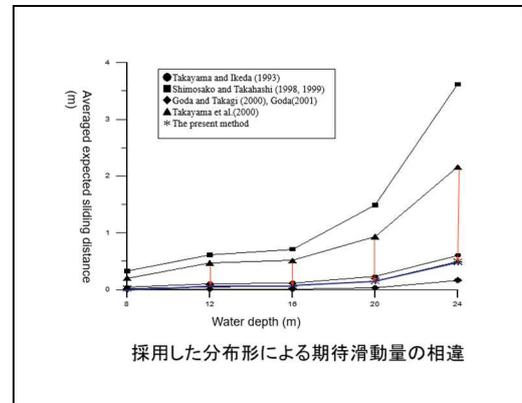
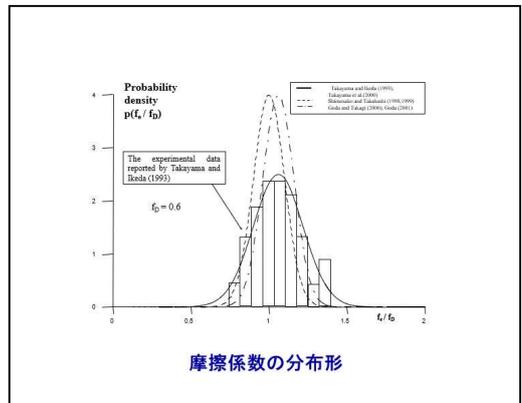
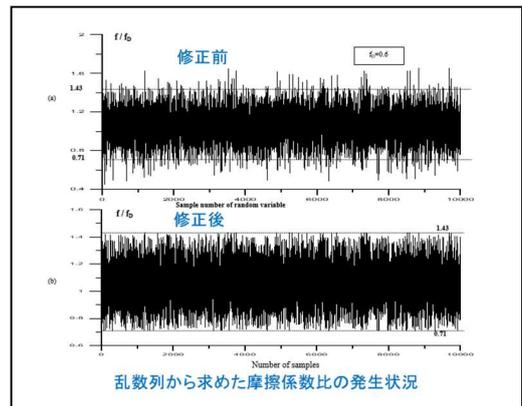
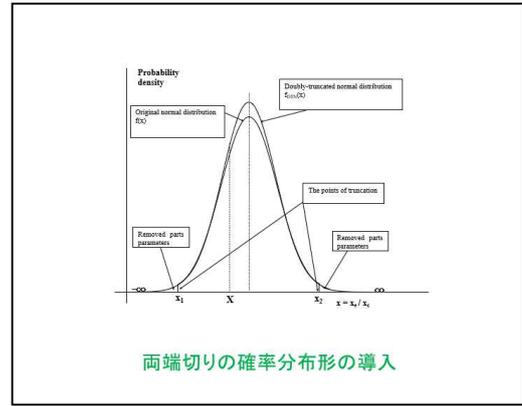


ので、実験では現れない波力や現地観測では出てこないような摩擦係数を使うことになる可能性があります。実際に現れないものは、取り除いたほうがよいのではないかと考えたわけです。つまり、両端切りの確率分布形を採用するのがよいと考えました。

この図は、摩擦係数の正規分布形からモンテカルロ法で計算に使う摩擦係数を取り出したものです。観測した摩擦係数と設計に用いられている摩擦係数 0.6 との比で示した観測摩擦係数の値は 0.71~1.43 の間にしかないけれども、摩擦係数が正規分布するとしてモンテカルロ法によって導出した値は 0.71~1.43 の範囲を大きくはみ出した値となっている。摩擦係数として小さな値を用いた場合に非常に大きな滑動量になると言った問題が生じる。そこで、観測値の範囲を超えるものを切り捨てる両端切りの分布形にしたときにモンテカルロ法によって得られた摩擦係数の分布図はこの図のようになる。

実際にいろいろな研究者が期待滑動量の計算を行っています。使っている摩擦係数の分布形もこの図のように研究者によって異なります。その結果、期待滑動量も採用した分布形によって大きく異なります。

分布形が異なるものを使うと、期待滑動量がどういふふうになるかというのを示したのがこの図です。モンテカルロ法で行いますと、非常に小さな摩擦係数も出てくるし、大きな摩擦係数も出てくるような形になるので、小さな摩擦係数になった時は、滑動量はものすごく大きくなります。やはり両端切りの分布形にして、期待滑動量を小さくするようになる必要があるだろうと感じています。



個別要素法による防波堤の挙動解析

【高山先輩】

次に、個別要素法による防波堤の挙動解析について説明します。

設計波を超える波浪による構造物の被災の状況を性能設計に対応をさせたいということで研究を行いました。「被災防波堤集覧」という資料があります。第1巻から第4巻まであって、これを調べてみました。例えば、ケーソン式混成堤において、どういう被災が起きているか調べました。滑動破壊が66%となつて、滑動による被災が一番多いのですが、複合破壊というのでも27%もあります。これは後で示しますが、滑動と支持力破壊が同時起きている破壊です。それから支持力破壊が5%、それから転倒破壊は2%と、あまりありません。

皆さんご存じだと思いますが、瀬戸内海では転倒破壊が多く起きています。それは、吹送距離が短いために設計波高は小さいですが、水深が深いので、非常に背の高いケーソンになってしまいます。風速が大きくなると、波高が大きくなって、その作用でひっくり返ってしまうことが起きます。ですが、普通の外洋に面したような所では、設計波高が大きいですからほとんど転倒という破壊は起きません。この図に示す破壊が複合破壊で、一部滑動が起き、支持力破壊も同時に発生しています。このような複合破壊が結構起きるといえることです。

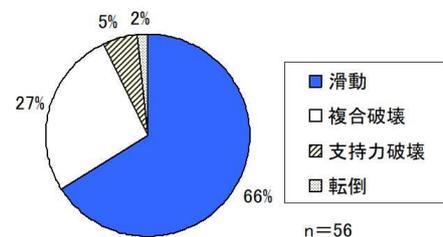
このようないろいろな被災形態が実際に計算で再現できないか、個別要素法 (DEM) を利用して試みることにしました。普通、個別要素法を用いる場合には、円要素を使いますが、その円要素を用いると、回転に対して非常に動き易くなるので、回転に対して抵抗力を入れるというようなことを一般に行いません。どの程度の回転抵抗力を入れればよいのか不明であるために、形状を円ではなく楕円にすることを考えました。楕円ですと安定して、楕円そのものは

6) 個別要素法による防波堤の挙動解析 (2002~2007)

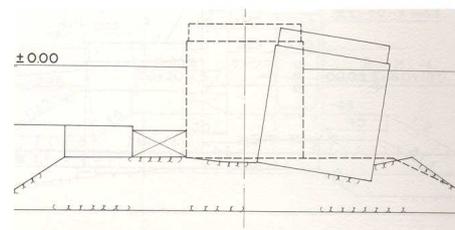
設計波を超える波浪による構造物の被災状況の再現:性能設計への対応
 ・防波堤の挙動解析
 個別要素法 (DEM)による捨石マウンドと防波堤の挙動解析

被災防波堤集覧: 旧運輸省港湾技術研究所 (現国土交通省総合政策研究所)

- 第1巻: 1949年~1964年間の被災例68例記載
直轄工事が中心で、比較的資料の整っているもの
- 第2巻: 1965年~1972年間の被災例63例記載
復旧予定額30,000千円以上のものと直轄手戻り工事のうち本体が移動や破壊したもののうち十分な資料があるもの
- 第3巻: 1973年~1982年間の被災例54例記載
復旧予定額30,000千円以上のもののうち十分な資料のものと直轄手戻りのもの全て
- 第4巻: 1983年~1991年間の被災例69例記載
2億円以上の復旧工事金額または直轄手戻り工事または混成堤で本体部の滑動



ケーソン式混成堤における変位形態割合



複合破壊 (滑動+支持力破壊)

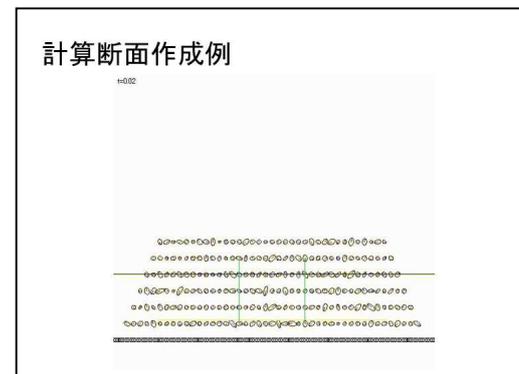
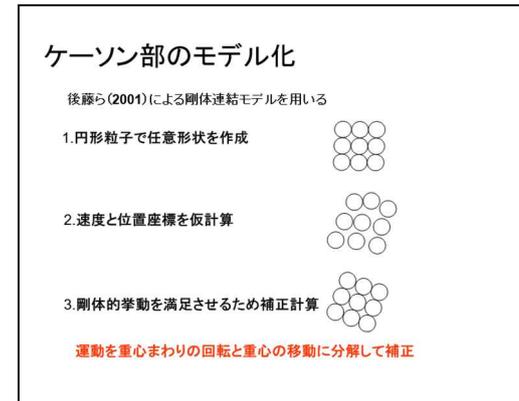
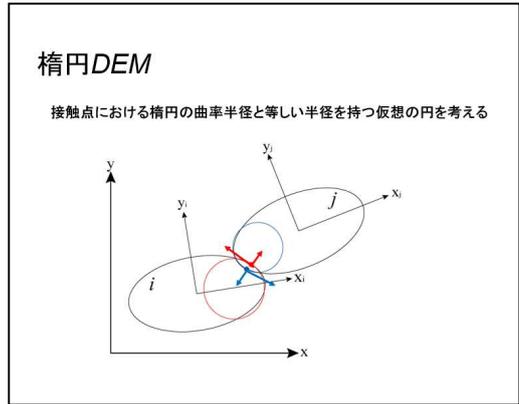
非常に転びにくいという形になりますので、長軸と短軸を分布させて行ってみました。

防波堤ケーソンを個別要素法でどのように表現するかが問題になり、当時、京大土木本部の海岸研究室に後藤助教授(現、教授)が個別要素法について研究していました。そこで、学生に「後藤助教授にどうすればよいか聞いてこい。」と言って聞きに行かせました。

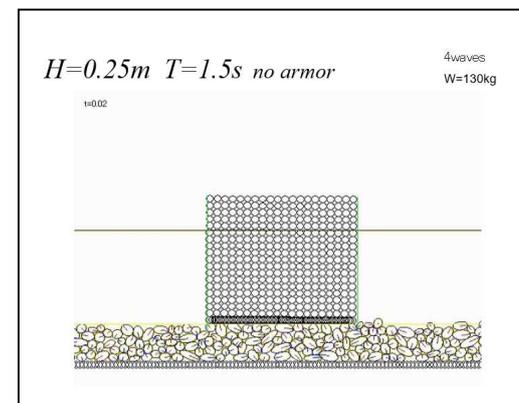
円形要素の剛体連結モデルとして矩形ケーソンを図のように構成します。波圧の作用で矩形ケーソンの円形要素がそれぞれ移動します。移動した円形要素中心の座標を用いて、ケーソンの重心の座標と重心周り回転角を求めます。重心位置と回転角から再度、剛体連結モデルで矩形ケーソンを構成します。これが第3番目の図です。そして、波浪を作用させて、次の時間ステップにおけるケーソンの動きを調べます。ケーソンの動きについてはまた後で述べます。

ケーソンを設置する捨石マウンドはいろいろな大きさの楕円形捨石を上から落下させることで製作致しました。この動画がその状況を示しています。この楕円形も径を分布させることで、長いのもあれば丸いのもあるようにいろいろな大きさものを作っています。捨石マウンドの上面が平らになるように捨石の追加も行っています。次に、円形要素の剛体連結モデルのケーソンを設置し、動きが安定したところで、捨石マウンド上に大きなマウンド被覆石を置いています。

この動画は、波浪を作用させて、剛体連結モデルのケーソンがどのように動くかを示したものです。被覆石がないと、ケーソンはこのようによく動きまわります。更に、この動画は、被覆石を付けた場合に、どのように動くかを示したものです。

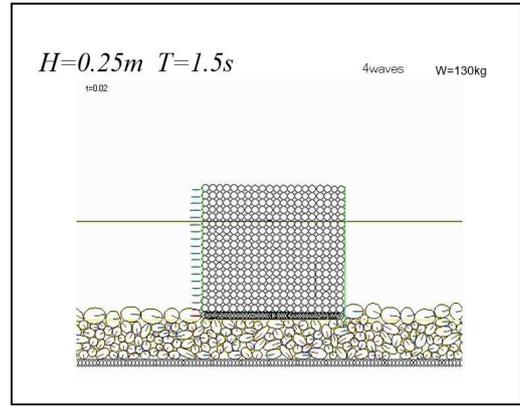


注：講演時は、動画の資料です



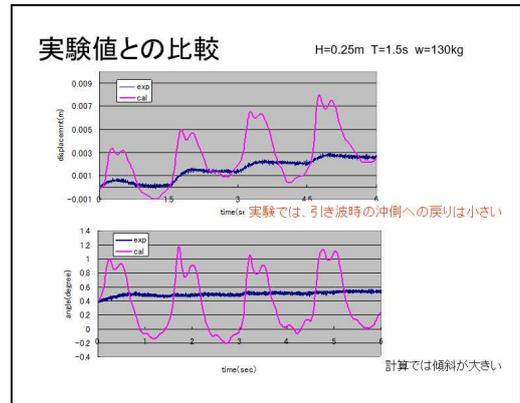
注：講演時は、動画の資料です

この図は、ケーソンの滑動と回転運動に関して計算値と実験値を比較したものです。実験で用いた波浪と同じ条件で計算を行っています。実験値では最初に少し動きますけれども、滑動量は計算で示したほど大きくはありません。実験における滑動はこの程度の小さな動きで、少しずつ滑動していきます。ケーソンの回転つきましては、実験ではほとんど起きていませんが、計算では押し波で後に大きく動き、引き波で元に帰る形です。

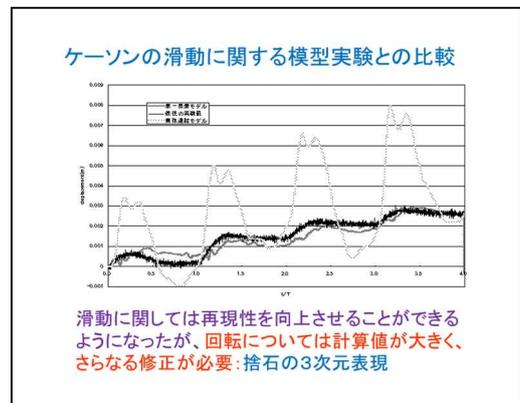


注：講演時は、動画の資料です

実験では引き波時の沖側への戻りはありませんし、計算では傾斜が大きいということで、これは何かおかしいということになりました。矩形ケーソンを円形要素の集合体モデルとしたのですが、それをもうやめて、一つの単体要素で造ることを考えて、この式で作りました。このようにすると、ケーソンの矩形の角の所は滑らかに丸くなるのですが、その部分を除けば矩形になります。この乗数を増やせば増やすほど四角にはなりますが、この程度にしてやってみました。



そして、再度計算してみますと、回転についてはまだ計算値が大きいのですが、水平の滑動については、実験値とほとんど同じになることが分かりました。今、個別要素法として個別楕円要素は入れているのですが、今は楕円筒状に入っていますので、これを本当の楕円体として入れるようにすると、今度は回転運動も小さくなって実験値と合うようになるのではないかと考えています。そうするには、更なる改良が必要と思っています。



矩形ケーソンを次式の単一要素で表すように変更

$$f(x,y) = \left(\frac{x}{a}\right)^{20} + \left(\frac{y}{b}\right)^{20} - 1 = 0$$

リアルタイム津波予測

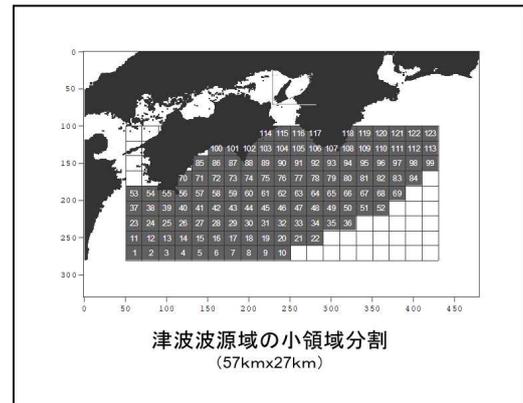
【高山先輩】

京都大学でリアルタイム津波予測についても研究を進めました。これは、津波波形の観測値を用いて、津波を起こした初期の海面変動を推測し、対象とする海岸へ来襲する津波の波形を予測しようとするものです。対象としては南海トラフの近くで起きる津波を対象にしています。南海トラフで起きる地震で地盤変動が起きるであろう海域を格子状に分割し、ある格子で単位の海面上昇(地盤変動と同じ)があるときに観測点でどのような波形の津波が到達するかを調べます。このようなことを海域の各格子で調べておきます。そして、地震によって津波が発生したときに、観測地点の津波波形は各格子における海面変動によって生じる津波の合成になると考えられるので、観測波形と比較して、最も自乗誤差が小さくなる合成津波ができるように各格子の海面変動を推定します。津波の観測点が複数あるときは、全ての観測点における津波波形のトータル自乗誤差を最小にするように各格子の海面変動を決めます。

具体的には、以下のように行います。 K 観測地点における津波の観測波形を $\eta_{obK}(t_n)$ 表します。ここに、 t_n は n 番目のタイムステップにおける時間を示しています。海域分割格子 i において a_i の海面上昇があったときに K 観測地点における津波の波形は $a_i\eta_{Ki}(t_n)$ になる。ここに、 $\eta_{Ki}(t_n)$ は格子 i で単位海面上昇が生じたときの K 観測地点における津波の波形を示しており、計算で求めます。全ての格子で海面上昇が起きる可能性があるので、 K 観測地点における津波の波形の自乗誤差は $\sum_n \{\eta_{obK}(t_n) - \sum_i a_i \eta_{Ki}(t_n)\}^2$ となる。観測点がいくつもあるときは観測点の数だけ自乗誤差を足し合わせて、画面に示す $E=$ の式になる。この自乗誤差が最小になるような各格子の海面変動量 a_i を求めることになります。この時使う方法が最小自乗誤差法です。その方法については、画面に示しています。

7)リアルタイム津波予測(2003~2007)

- 津波災害軽減のために正確な津波予測
- ・沖合い津波観測データの逆解析モデル
 - ・波源域と対象地点における予測精度



逆解析法として最小自乗誤差法の採用

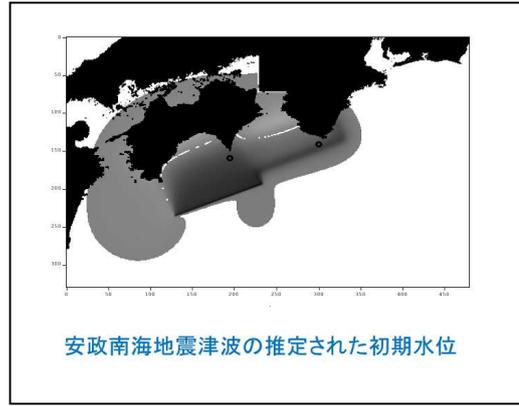
誤差の総和:

$$E = \sum_n \sum_K \left\{ \eta_{obsK}(t_n) - \sum_i a_i \eta_{Ki}(t_n) \right\}^2$$

次式の連立方程式を解くことによって a_i の値の算定

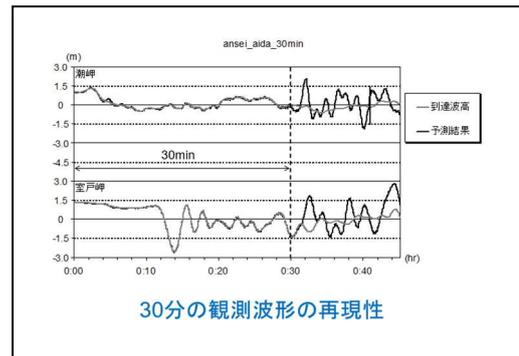
$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 2 \left\{ -\sum_n \sum_K \eta_{Kj}(t_n) \eta_{obsK}(t_n) + \sum_i a_i \sum_n \sum_K \eta_{Kj}(t_n) \eta_{Ki}(t_n) \right\} = 0$$

この図は 1854 年に発生した安政南海地震津波に関して推定された初期の水位変動です。これを初期水位分布とする津波が発生したとして、この初期水位分布から津波を計算によって求めます。図中の○印で示される 2 点、つまり室戸岬沖と潮岬沖でこの津波が観測されたとします。初期水位変動から計算して求めた観測点における津波の波形がこの図です。この図の最初の 30 分の津波波形を用いて最小自乗誤差法から推定した津波波形が薄い線で示してあります。30 分以降の使わなかったところの波形は少しずれていますが、最初の 30 分はきちんと合わせることができるようになっています。



安政南海地震津波の推定された初期水位

次に、室戸岬沖と潮岬沖に加えて浅川沖にも観測点を設けた 3 点における最初 30 分間の観測点での津波波形から各格子における初期水位の分布を求め、下津港や、関空、大阪、神戸に来襲する津波を推定したのがこの図です。図中の黒い実線は安政南海地震の初期水位分布から計算した津波波形で、薄い線は観測 3 点における初期 30 分の津波波形から推定した津波です。



30分の観測波形の再現性

最小自乗誤差法から推定した薄い線は黒い線の津波波形とそれほど大きくずれることなく変化しております。この程度の差なら観測津波波形から津波の初期水位分布を推定し、各海岸に来襲する津波を算定するこの手法は津波予測手法に活用できることが分かりました。

平滑化の導入 高川ら(港空研)による改良

- 推定パラメーターの多い逆解析では**不良設定**になりやすい
- 安定した解を得るために**時空間的な拘束条件**を導入(正則化)

空間的平滑化条件

$$\frac{x_{p+1,t} - 2x_{p,t} + x_{p-1,t}}{\Delta x^2} + \frac{x_{p,t+1} - 2x_{p,t} + x_{p,t-1}}{\Delta t^2} = 0$$

$D_x x = 0$

時間的平滑化条件

$$\frac{x_{p,t+1} - 2x_{p,t} + x_{p,t-1}}{\Delta t^2} = 0$$

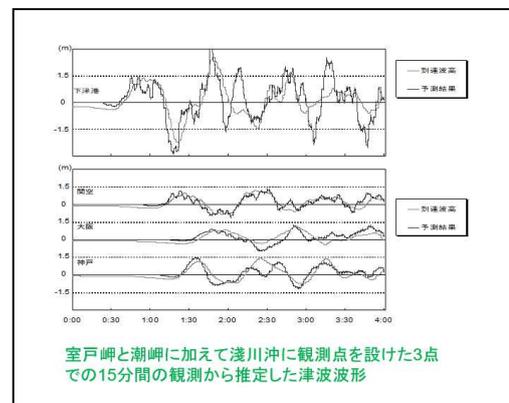
$D_t x = 0$

- 解くべき逆問題

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \lambda \\ \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G(t) & \dots & G(t-(k-1)\Delta t) & \dots & G(t-(K-1)\Delta t) \\ D_x(t) & \dots & D_x(t-(k-1)\Delta t) & \dots & D_x(t-(K-1)\Delta t) \\ D_t(t) & \dots & D_t(t-(k-1)\Delta t) & \dots & D_t(t-(K-1)\Delta t) \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} \eta(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

時間的・空間的平滑化に関するハイパーパラメーター

この手法について検討したのは、大学を停年で辞める頃でした。その頃、港空研では富田さんが室長として津波の研究をしていました。今は名古屋大学に帰っていると思います。私は富田さんに「私はこの研究をやってきたけれども、大学では津波観測データは容易に手に入らない。港空研だと観測津波データが容易に手に入るだろうし、GPS 波浪計もあるし、だから津波データ使ってこの研究を継続してやってくれないか。」と頼みました。「こ



室戸岬と潮岬に加えて浅川沖に観測点を設けた3点での15分間の観測から推定した津波波形

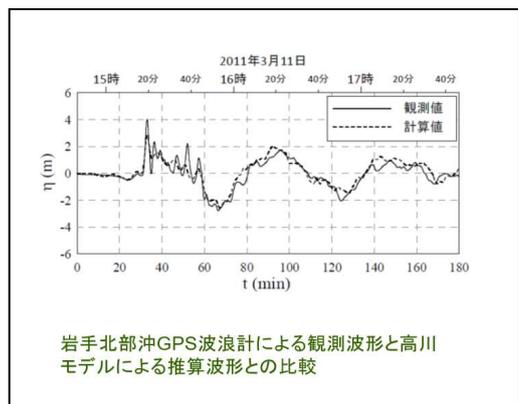
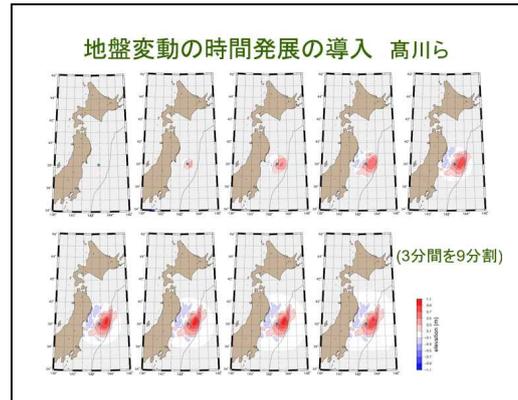
れから君達のところでやってくれ。」とデータを渡しました。

最初、辰巳さんがやっていましたが、辰巳さんが海外留学をされたので、今は、高川さんが取り組んでいます。この前、高川さんから聞きましたが、私がやっていた時と比較してかなり精度的に高くなっています。いろんなパラメーターを入れているようです。東日本大震災に適用して検討を進めていたようです。東日本大震災では3分間という長い時間、地震動があったことから海底地盤も徐々に変化するという事も入れて検討しています。

これは、GPSで観測した津波の波形データを使って、岩手北部沖GPSの観測地点に到達する津波波形を比較したものです。その結果、かなりの精度で合うようになっていました。これらの図は高川君からもらったものです。

私自身はこれだけ精度良く計算できるならば、これを使って八戸港や相馬港などで防波堤が被災していますが、その詳しい原因が探れないのかと思っています。その被災が何で起きたのか、ただ単に防波堤に来襲した津波の波高が大きいから被災が起きたというのではなくて、いろいろ原因があると思います。例えば女川港の防波堤は、津波の引き波により防波堤が港内側から押されて沖のほうに倒れています。つまり前後の水位差、防波堤の前後の水位差の影響が、ものすごく利いているという形になっています。

八戸港では、前面に押し波が来た時に、例えば、背面の水位がぐっと下がっていると、越流した津波で背後がかなり洗掘される可能性があります。つまり災害がどのような原因で起きたかということ綿密に調べようとする、正確な来襲津波の波形を使って、それぞれの港の中でどういう水位の変化があったかということを数値計算する必要があります。そうすると、防波堤が被災した原因が何かということは、ある程度分かるようになるのではないかと思います。ぜひこの手法を将来ともに活用していただければと思っています。



今後のリアルタイム津波予測

- 1) 本手法は観測津波波形を利用しているために、地震発生後30分以内での予測: 困難
1時間以内での予測: 可能
- 2) 本手法の実務への適用が実現することを望む。

高潮災害の現地調査

【高山先輩】

次に高潮の現地調査について説明します。2003年に韓国の馬山で高潮災害があり、その調査で馬山に行ってきました。それから2004年における広島での高潮災害も調べています。

この図は2004年に広島が高潮被害を受けた台風の進路です。この図でお分かりのように、瀬戸内海がここですけれども、台風はほぼ瀬戸内海に平行して走りました。このような台風のコースを通ると、瀬戸内海はどこかで大きな高潮が発生しますし、高潮と天文潮の満潮が一致する可能性があります。そうすると大きな災害が起きる可能性があるということをはっきりさせておく必要があると思います。

この図は呉港での潮位データです。これは台風16号による大潮の時の高潮です。高潮が最大になった時は、大潮の満潮よりもちょっとずれました。しかし、台風18号では小潮の満潮と高潮の最大水位は重なっています。もしもこの最大水位が大潮の満潮と重なったら、ものすごく大きな高潮災害になる可能性があったということが分かります。このような問題があるので、それをきちんと押さえておく必要があるだろうと考えます。ですから、高潮と天文潮の満潮が重なる可能性については、今後、検討しておく必要があります。特に大潮の時の満潮と重なると、非常に大きな災害になります。

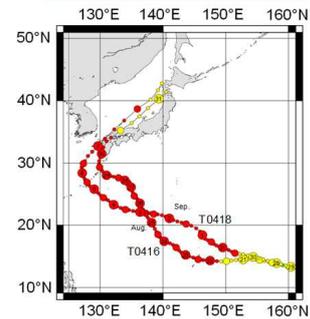
この図が広島港で起きた災害です。このように防護施設が壊れると、越波量は急激に増大します。災害の前の時だと越波流量が $0.1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ぐらいだったものが、 $1.0\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ になって10倍の越波量になってくるといことで、非常に大きな災害になることがあります。ですから、防護施設が壊れないようにするということが、非常に重要になってきます。

8) 高潮災害の現地調査(2003~2005)

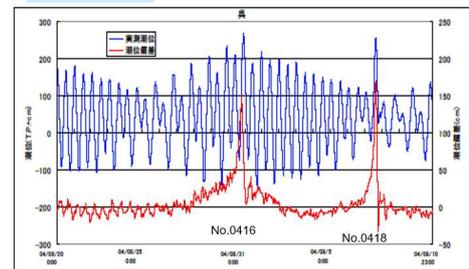
高潮災害の特徴の把握

- ・韓国馬山における高潮災害調査(2003年)
- ・台風0416および0418による高潮災害調査
- ・ハリケーン・カトリーナによるメキシコ湾岸とニューオリンズにおける高潮災害調査

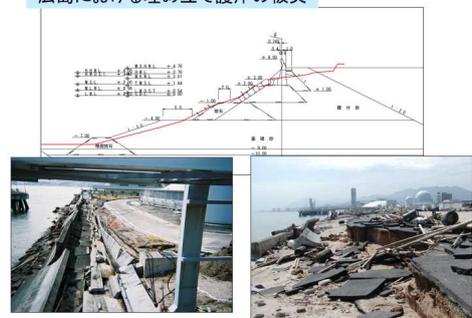
台風0416号と0418号の経路

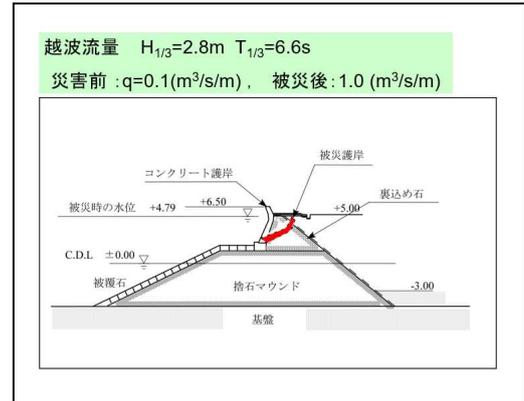


呉

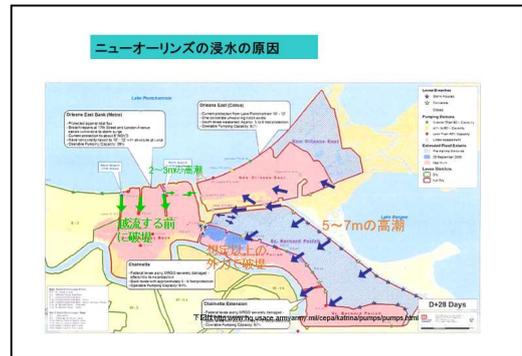


広島における埋め立て護岸の被災





これはハリーン・カトリーナの災害です。ニューオリンズは、0m 地帯がものすごくあります。ここに3つ水路が掘ってありますけれども、この辺の地盤は0m 地帯です。ですから雨が降って、水がたまると、その水を外に出す必要があるということで、水路が作られています。水路を通してポンチャートレイン湖という湖に水を捨てていました。この時は、ポンチャートレイン湖に高潮によって上昇した外海の海水が流れ込み、湖の水位が上昇したものですから、その水がどんどん水路に流れ込んできて、水路の護岸を壊して、堤内地に流出して、その結果、ニューオリンズで高潮の大災害が起きました。この写真が示すように矢板で造られていた護岸が倒れ落ちましたので、大量の海水が流れ込み、背後の人家が流されています。



今後の高潮対策では何をやるべきか。やはり、いろいろありますが、異なる発生確率の高潮に対して、その性能照査をきちんとしておく必要があると思います。例えば100年、200年、500年、1,000年ぐらいの高潮でどうなるのかということです。それから大潮時の満潮と重なると、どのような災害が起きるか頭に入れておかなければなりません。守るべき防潮堤の設計については、防潮堤の天端高を決める設計条件と防潮堤の強度を決める設計条件は同じでなくてもよいと考えます。つまり構造物の強度を決める設計条件は、もう少し条件を厳しくしてもいいのではないかと思います。そうすることによって、粘り強さを付加することが重要になってくるのではないかと思います。

今後の高潮対策

- 異なる発生確率の高潮に対する性能照査の実施：例えば100年、200年、500年、1,000年の高潮で検討
- 設計潮位：台風期の平均満潮位を基準
大潮時の満潮との重畳についても照査
- 護るべき防潮堤の破壊は大惨事の被害：防潮堤の天端高を決める設計条件<構造物の強度を決める設計条件：粘り強さの付加
- 木材、小型船舶、コンテナ等の流出防止
- リアルタイム高潮予測：構造物の破壊の可能性も予測
- 地球の温暖化による海面上昇も考慮

ています。それから木材、小型船舶、コンテナ等の流出防止もやらなければいけないし、地球温暖化による海面上昇も、今後考慮する必要があると思います。

終わりに当たって

【高山先輩】

2004年12月、インド洋大津波災害の1か月後に神戸で国連防災10年の国際会議がありました。

その時に私も、京都にいたものですから出席しましたが、外国の記者から「日本でもマグニチュード9.0以上の地震は起きませんか？」と言われました。私は「日本でこれまで起きたのは、マグニチュード8.6が最大クラスの地震なので、9.0以上の地震は起きないと思う。」と言ったのですが、その6年後には東日本大震災

が起きました。マグニチュード9.0ぐらいのものが起きました。ある意味、そういうことが起きるといことを誰も何も備えていなかった。そのためにもう大惨事になりました。

今はもう性能設計の時代です。要求性能というのはいくらでも書けるけれども、要求性能を照査する技術がしっかりしていないと何の意味もありません。

東日本大震災の後に現地に行って、いろいろな工事を見ました。震災対策、粘り強さを生かすということで、いろいろ対策をやっていました。しかし見かけ上、粘り強さを付加するという形だけの対応は駄目です。やはりそこには数値的に、どれだけ粘り強くなったのかということが明確に言える技術を持っていないといけません。

そうでないと、誰かに「じゃあ、どれぐらい粘り強くなったのですか？」って問われた時に「いや、分からない。それは少しなっていますよ。」としか言えないのでは、何の意味もありません。粘り強さというのが大きな課題になってはいますが、それを数値的にどれぐらい粘り強くなったのか表すようにしてほしいと思います。それが皆さんのこれからの、非常に大きな仕事ではないかと思っています。

ぜひ皆さんがこれから、どんどん新しい研究をやられ、どれぐらい強くなったのかとか、数値的にきちっと表せられるような研究をやっていただきたいと思います。

うまく話せたかどうかは分かりませんが、これで私の講演を終わりたいと思います。

終わりに当たって

2004年12月のインド洋大津波災害の1か月後に神戸で国連防災10年の国際会議があり、その時に外国の記者から「日本でもマグニチュード9.0以上の地震は起きませんか？」と尋ねられ、「日本では、マグニチュード8.6が最大で、9.0以上の地震は起きないと思う。」と答えた。その6年後に東日本大震災が起きた。

誰も何も備えていなかったのが大惨事になった。今は性能設計の時代である。要求性能は何でも書けるが、照査技術がない要求性能は絵に描いた餅だ。

皆様の今後の努力で、新たな要求性能を見据えた照査技術が速やかに開発されることを願う次第です。皆様の力を期待しています。

質疑応答

【司会】

高山先生、ありがとうございました。まだ若干時間がありますので質疑応答の時間を取りたいと思います。

申し訳ありませんが、司会の私からまずは質問させてください。今日の高山先輩の話では、実際に解決しなければいけない課題に直面し、こういう答えを導きましたという説明でした。お聞きしたいのは、いろいろな難しい技術的な課題に対して、これが答えだと、すぐ結び付いて研究を進められたのか？ということです。

今日ここにいる若い研究者たちは、技術課題に直面した時、どうやって解決策を見つけていくのか毎日悩み、いろいろ考えます。すぐその解決策の道行きが分かる人は、おそらくいないはずですよ。

例えば、今日の講演で、合田先生に関わる話は何回か出てきています。合田先生は、当時、高山研究官に対し、「こうすれば、答えが出るよ」と言われたのでしょうか？おそらくそうではなくて、技術課題だけを言われて「おまえ、どうしたらいいのかわか何か考えてみろ」ということだったのではないのでしょうか？その時、高山研究官や高山主任研は、どのように悩み、どのように解決策を見つけてきたのでしょうか？教えてください。よろしく願います。

【高山先輩】

私は合田さんの下にいたのですが、合田さんは、例えば先ほどもお話ししましたが、「多方向不規則波の造波機を作れ」、それしか言いません。あとは自分でやるしかありません。

「港内静穏度に関して、島堤のようなものによる反射波が計算できるようにしなさい」と、こういうようなことでした。あとは自分で考えてどうするかです。

自分で考えること、それは何かと言いますと、まず調べることです。つまり誰かがどんなことをやっているかというデータを、すべて自分のものにします。多方向不規則波に関して、斜め波を出すにはどうしたらいいのかわか、論文にはどのように書かれているかを調べました。しかしどこにもないということになりますと、その理論をまず作らなければいけません。それから始めたわけです。そのように導き出した理論について学会でも発表しました。



また、造波信号を作る時に、じゃあダブルサンメーションと、シングルサンメーションの2つがあるけれども、どちらを使うほうが少ない成分波の数で済むのか。つまり成分波の数が少ないほど、コンピューターで計算する量が少なくなるわけです。あの頃のコンピューターは、今のように容量も大きくなく、計算も大変でしたが、それを作るのにどうしたらいいかということです。そうすると、そこもまた調べなければいけません。どのようにして多方向不規則波のスペクトルを求めるのか、そこから始まっていった、シングルサンメーションでないと駄目なのだと、理解が深まりました。

つまり、まずは、自分がやることだけを考えるのではなくて、それに関係する理論なり、何なりをどんなものがあるか、全てを調べなければいけません。そこから始まります。

今は解析プログラムソフトもいろんなものどんどん出ていますが、その解析プログラムソフトを用いて単に利用するのではなく、そのプログラムが作られた根拠は何か、基本的な理論の何がそこに入っているのかということ、まず自分のものにしなければいけません。人が作ったプログラムを持ってきて、データだけを入れて計算するというのでは駄目です。これでは発展性がありません。何らかの拍子におかしくなった時に、どう直していか分かりません。そのプログラムの基本的な理論を自分のものにします。それをするによって、応用がどんどん広がっていきます。それが一番大事です。

私がやってきたのは大体そうです。例えば、波の回折の理論、島堤の理論をやる時に、楕円座標に変換して、マシユー函数というのを使うようにしました。マシユー函数については、論文ではなく本が出ています。それは1冊のこれぐらい厚い英文の本ですが、大体読みました。そうしますと、円筒座標のベッセル関数との関係とか、みんな分かります。つまりそういうことをすることによって、自分の幅がものすごく広がります。自分に身に付いたものは、いろいろなことに応用できるようになります。

ですから、自分が使っているプログラムが、「こういうプログラムを使っています。」ではなく、そのプログラムが作られた理論的な根拠をきちっと自分のものにしなければいけません。私はそれが若い人のやり方だと思います。

私の研究室を卒業する学生に「40までは死にももの狂いで勉強しろ。」とっていました。「40過ぎたら眼も悪くなるし、身体も弱くなってからできないけれども、40ぐらいまでだったら死にももの狂いでやれば何でもできる。」と言ったことがあります。そういうものだと思います。

やはり自分のものにしていくということが、一番大事です。そしてクエスチョンマークが付いたものを持たないということです。これはこういう理論からなって、こうなってなるのだ、なるほどこれでいいのだということです。そういうことをやっておくと、いろい

ろな技術課題に直面した時に、応用ができ、判断ができるようになります。

今日の講演では言わなかったかもしれませんが、ベッセル関数などいろんなものが出ていますが、それは何に使えるかと言いますと、構造物の境界条件が簡単に作れるということです。ですから、円筒座標はこういう円筒形のものに対して、波が来た時にどういうふうに反射されて、どういうふうになるかというのを、一つの関数で与えられるようになります。そして楕円構造物であればマシュー関数を使います。それからもう一つ半無限堤では放物線座標を使います。つまり境界条件が明確になるように適切な関数を使う必要があります。

今日は講演の機会をいただき本当にありがとうございました。皆さんは若いのですから、もう死にもの狂いで勉強してもどういうことはありません。それをやるとどんどん幅が広がってきます。期待しています。

【司会】

ありがとうございました。高山先輩が話された言葉には、この会に参加された研究者にとって、身につまされたり、なるほどそうだなと感じたり、気付かされたことが多かったのではないのでしょうか。これから研究を進めるにあたり、高山先輩の言葉を思い出して、さあ頑張ってみようじゃないかと思う人も多いでしょう。

最後のパワーポイントで「要求性能は何でも書けるから、照査技術がない要求性能では駄目だ」という話がありました。私たちは、今、国総研、港空研で技術基準の改訂や部分改訂に向けて、検討を進めています。確かにこうやったらいいよというのはいくらでも言えますが、それを確かに照査してどこまで数値的に大丈夫なのか、そこまで言えないと技術ではないという高山先輩の言葉に、私自身、改めて大切なことだと感じました。高山先輩の話について、すぐできることと、できないことと、もちろんあると思いますが、久里浜の研究所はこれからも頑張っていきたいと思います。

それでは最後に高山先輩に感謝の気持ちを込めて、拍手で終わりたいと思います。どうもありがとうございました。(拍手)

