

海の構造物

大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻

船舶海洋工学コース 船舶構造強度学領域 教授

飯島 一博

1. はじめに

筆者は大阪大学大学院地球総合工学専攻に属しており、2018年12月に准教授から教授に昇任した。大阪大学に助教として採用されたのが早いもので、もう15年前、様々な前職での経験もある中、今は大阪大学に育ててもらったと感じている。本稿では自分の今後の抱負を語りながら、私の研究を紹介させていただきたい。

2. 船体構造

(1) 船体荷重の不確実性

私の所属する研究室（領域）の名前は「船舶構造強度学領域」である。名前から想像されるように船舶の構造を専門とし、とくに船体作用荷重を主な研究分野としている。船体は常に流体に囲まれていて、複雑で不規則な荷重を受ける。積み荷による荷重も荷役の都度変わり、船長の判断次第で船速やコースも変わり、遭遇する海象も異なる結果、荷重も変わる。このような不確実性の下で、船体が生涯の中で受ける最大の荷重はどのようなものか、船体の設計ではこの問いに答える必要がある。従来はこれら不確実性を完全に明かすことができなかつたので、船体の構造設計荷重は多分に経験工学的であった。設計荷重をあるレベルにしたら壊れたので、次はもっと設計荷重のレベルを上げてみよう、それでも壊れた、では荷重レベルをさらに上げたものを正解にする、その類の経験ベースの考えだ。

ところが、いま不確実性を定量的に評価できるようになりつつある。ひとつにはシミュレーションの進展がある。現在のシミュレーションを駆使すれば、全球の海象条件の過去10年分を再現シミュレーションして、これと船長の行動モデルをもとに遭遇海象条件をシミュレーションし、さらに得られた海象条件の下で船体荷重シミュレーションを行い、統計を取って、最大荷重の分布を求める、といったことも可能となってきた。

もうひとつの大きな流れは観測である。船体構造にセンサーを取り付けて、長期に渡る観測を通して、実作用荷重が大量なデータとして得られ、これを解析することが行われつつある。光ファイバによる多点計測を用いると、驚くほど多数のデータが取得できる。つまり、これまで見えなかったものが見えるようになった。シミュレーションによる推定技術、観測技術と確率統計理論を組

み合わせれば、不確実性を徐々に除去できる。私のこれからの研究は不確実性を小さくすることに尽きると思う。

(2) 流体構造連成解析

できるだけ物理現象に即したモデルを用いることで、シミュレーション解析における不確実性を狭めることができる。コンピュータの発展を背景として、以前であればとんでもないと思われレベルの多自由度の解析が可能になってきている。従来は自由度をいかに減らすかということに知恵を絞ったシミュレーション技術が開発されたが、流体を支配している方程式を直接的に解く、という考えが生まれてきた。その結果、流体解析分野ではCFD (Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学) を船体の荷重問題に適用できるようになりつつある。CFDを使えば、水面衝撃などによる荷重も波浪による荷重も首尾一貫して、Navier-Stokesの支配方程式に従って解くことができる。

船体構造は波浪の荷重を受けて変形しながら運動し、一方で変形と運動は流体挙動に影響を与える。このような相互の影響を考慮することが、船体の変形解析では必須である。流体解析のためのCFDと構造解析のためのFEM (Finite Element Method; 有限要素法) を組み合わせた連成解析によれば究極的な船体変形シミュレーションが可能になる。筆者はこのような連成解析を試みている。

図1はCFDとFEMの連成解析により得られたシミュレーション結果を示す。周期10s程度の波浪中の船体作用荷重(縦曲げモーメント)の時刻暦を表している。波浪の周期とおおむね同じ周期の荷重成分に、水面衝撃によって高周波数の構造弾性振動が誘起されている(時刻590s以降)。このような過程が水面衝撃を含めて、構造部分も流

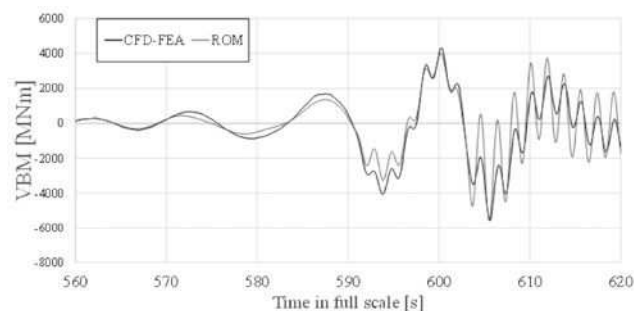


図1: シミュレーション例

体部分も直接的な支配方程式に従って“正しく”解析されている。このことについて、模型を用いた縮尺実験で確かめた(図2参照)。



図2：船体作用荷重の実験の様子

(3) 不規則波の中の最大値

ところで、“正しい”解析結果が得られるためには、入力条件が正しい必要がある。CFD-FEM解析で例えば変形の最大図1：シミュレーション例値を求めようとしたら、入力として最大値を与え得る波を与える必要がある。波浪はランダムな性質があり、生涯に遭遇する不規則波をそのままシミュレーションに与え、得た結果を統計解析するようなことは、CFD-FEM解析によるシミュレーションの負荷の大きさを考えると、不可能である。そこで、不規則波の中で最大値が生じ得る部分を予め切り出しておいて、切り取られた比較的短い時間の不規則波浪を入力条件として与えることが効率化のために必要である。

このような、CFD-FEM解析で得られる応答を最大化するような不規則波だけを切り取る手法を開発している。詳細については割愛するが、CFD-FEMで得られる結果をそっくりマネできる代理(surrogate)モデルと、いわゆる構造信頼性理論を併用している。信頼性理論と結びついていることから、切り出された波が発生確率に対応づけられている。このお蔭で、2時間の中で1回生じる確率レベルの最大の波浪荷重を生じさせることができる。図1は実はこのようにして切り取られた不規則波中でのシミュレーション結果であった。

この研究成果は博士課程学生として在籍していた、高見朋希君(現、海上・港湾・航空技術研究所)の研究成果でもある。同研究は引き続き、現博士課程の学生によって受け継がれ、発展されている。大学の研究は若い学生の手で成り立っている、とつくづく感じる。

3. 海洋構造物

所属する領域こそ“船舶”構造強度学であるが、海の構造物はすべて研究対象である。大型洋上風車、養殖漁業施設、超大型浮体などなど、今後いろいろな対象構造物に取り組んできたい。

(1) 大型洋上風車

大型の8MW級の風車ではローターの直径が160mにも

達する。状況的には40-50階建てのビルがタワーの先端、上空100mで回転していることに等しい。近年、このような大型風車を浮体の上に搭載することが検討されている。浮体であれば水深をあまり気にせずに洋上に展開ができ、日本のように山勝ちで陸域に適当な用地が少なく、周囲を深い海に囲まれている日本に適した形式である。そして、規模の経済から一気に大型の風車を用いようとする機運が強い。

洋上浮体式風車は決してハイテクではない。が、眺めてみるとなかなか複雑な系であることがわかる。ブレード、ギアボックスや発電機などの機構、浮体、係留装置からなっている。ブレードは空力外力を受け、浮体は波浪外力を受け、それぞれ弾性体として変形する。風荷重は、ブレードの風に対する当り角(ピッチ角)の制御の影響も受ける。浮体式風車の挙動を解析するためには、これらの要素を適宜モデル化してひとつのシステムとして組み上げる必要がある。筆者はこのような洋上浮体式風車の解析手法開発に携わってきた。実はこれら様々の要素を取り込んだ解析システムは世界的にも珍しい。本分野の日本を代表するツールともいえると思う。図3(左)はこのツールを検証するための実験の様子である。

幸せなことに、この研究にはまた別の博士課程学生が携わってくれている。現在、この解析システムを用いて、様々の浮体式風車について解析を行い、風による荷重と波による荷重が重畳した場合の構造部材中の応力の性質を調べている。風と波の条件の組み合わせを考え、疲労強度を検討しようとしたとき、膨大なケースの計算を行う必要がある。これではとても実用に耐えないので、統計的な性質を使っていくつかの計算から簡単にすべての組み合わせに対する疲労強度評価が可能となる、と期待している。

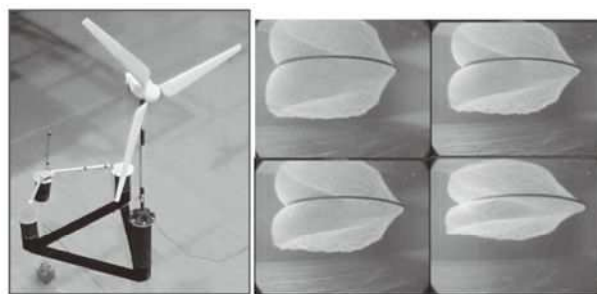


図3：洋上浮体式風車(左)と漁網(右)の実験例

(2) 養殖漁業施設

当初、養殖漁業施設を設計・製造する会社から一緒に研究してみませんか?と言われたときは、そんな研究対象もあるのかと思った。しかし、近年の養殖は環境汚染がより少ない場所を狙って、沖合に設置されることも多く、大型化が進んでいる。大きなものでは100mに達するスケールがあり、スチール製の構造が漁網を包み込むように支える。こうなると石油掘削などに用いられるセミ

サブ型の海洋構造物と変わりがない。網に作用する流体荷重の評価などの難しさもある。図3(右)は網の変形予測に取り組んだときの実験の様子である。

いま最も関心があるのは、養殖漁業に用いられる海洋構造物のリアルタイム変形・荷重推定である。この研究の背景には、同種の養殖施設が沖合に恒久的に設置されるために、検査とメンテナンスが困難なことがあり、もし状態が常時モニタリングできれば、その労を軽減できると考えたからである。モニタリングの一部をセンサーで行い、非計測部については数理モデルから推定ができるだろう。これがカルマンフィルタなどにより可能であると気づいてから、まったく素人ながら、今カルマンフィルタによる応答や入力である荷重推定にハマっている。

一部の計測結果から非計測部を含めた構造物の状態を推定し、計測とシミュレーションで不確実性を絞り込みながら、構造物を管理するのは大型構造物ではいずれ必須な流れであろう。船体構造や洋上浮体式風車にも共通して用い得る技術である。計測技術、シミュレーション技術、通信技術の発展によりこれが可能になってきている。

(3) 超大型浮体に関する研究

数km規模の大きな浮体構造を海に浮かべ、陸域で不足する土地を都市圏に作り出す。例えば空港や海上都市。私の人生初の研究課題は超大型浮体であった。卒業論文でこの研究課題を与えられ、それからおよそ30年経った。30年後は日本のあちこちに海洋空間利用のための超大型浮体が建造されている、これが当時の私の夢であった。

残念ながらこの夢は現実とはならなかったが、今改めて世界で超大型浮体が注目されつつある。オランダ、中国、シンガポールなどがこの潮流に乗る。一様な超大型浮体であればぺらぺらの海に浮かぶ弾性板としてモデル化できるが、同じモデルで海に浮かぶ氷床(ice sheet)と

して研究を続けている海外グループも古くからある。このような状況を目の当たりにして、筆者は最近、超大型浮体の研究を再始動した。将来の構造物を研究することで、今の構造物の研究へのフィードバックに繋がるかもしれない。

昨年、超大型浮体の模型実験を30年ぶりに実施した。超大型浮体(薄板でモデル化される)に水波が作用したとき、水波と浮体は一体となって変形し、浮体に入射した水波は浮体上を波動として伝わる。今回の着目点は浮体上の波動の非線形的な性質であった。非線形的な性質によって、本来正弦波である波動に、二倍、三倍の周波数成分が加わり、規則的ではあるものの非正弦的な波動になる。過去30年間、超大型浮体の非線形波動に着目した研究はなかった、と思う。どうしてこれを見落としていたのか?実験の結果は、ある条件下で非線形的な波動が極端に発達することを示していた。別途、導いた理論値は実験結果とびたりと一致した。近日中に計測法を改めた制度の高い再試験を実施することを予定している。

4. おわりに

執筆の過程で、卒業論文で超大型浮体の研究を行ったときのことを思い出した。シミュレーションによる予測と実験による予測が一致し、“すごい”と感動したものだ。この経験が研究者を志した最初の一歩であったのかも知れない。恩師がこの経験をさせてくれたことに感謝するよりない。立場変わって、今は私が学生に感動を与える番である。そこまでの気負いはなくとも、シミュレーションであれ実験であれ、海の構造物の研究を通して彼らも感動する瞬間があることを願う。

(東京大学 船舶海洋 平成5年卒

7年修士 10年博士)