

流体－構造物連成解析による 長大斜張橋の耐風設計の高度化

2023年10月25日

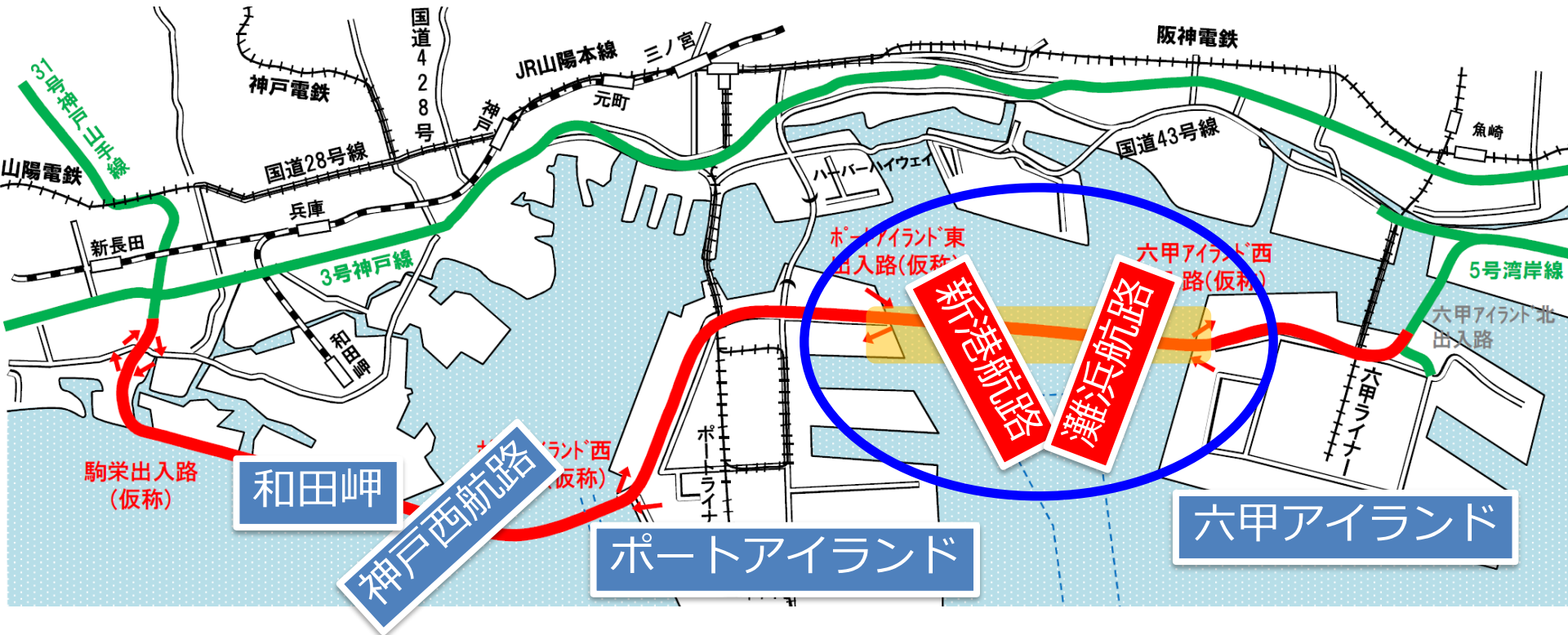
前阪神高速道路株式会社

一般財団法人阪神高速先進技術研究所 杉山裕樹

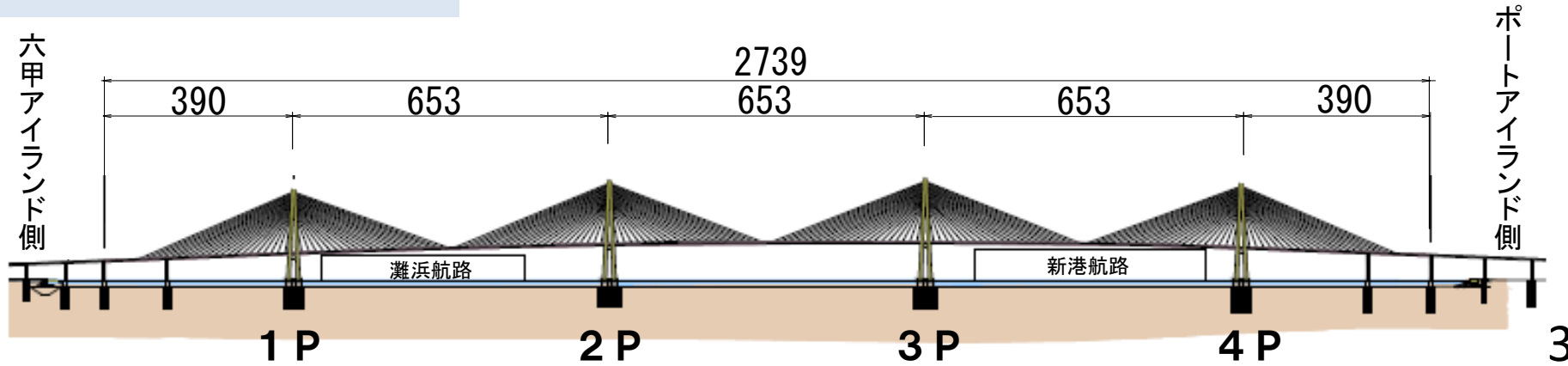
大阪湾岸道路西伸部 概要



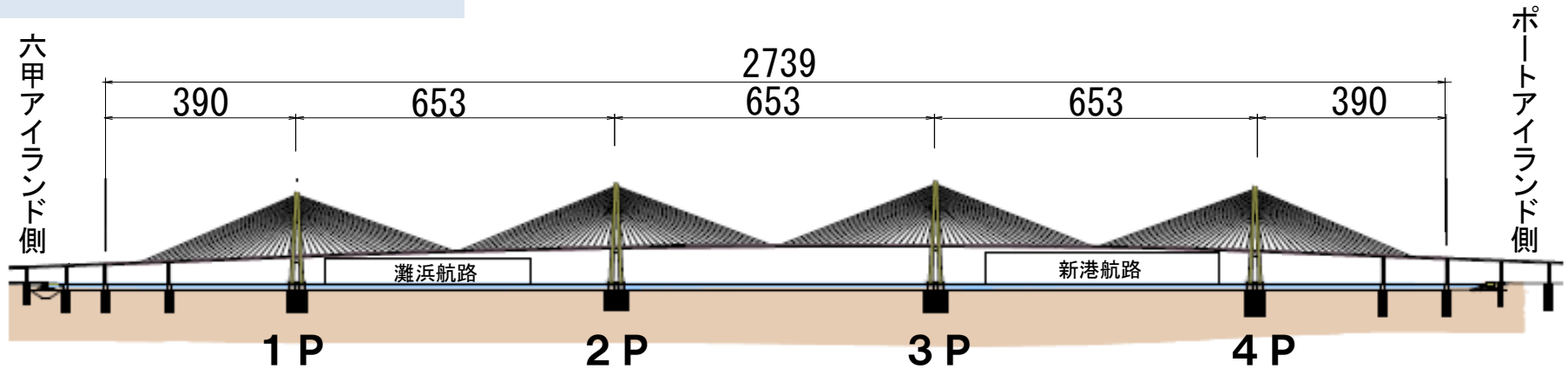
検討対象の長大斜張橋



多径間連続斜張橋



多径間連続斜張橋



- ✓ 支間長653mを有する4主塔鋼連続斜張橋（国内外の実績最大規模）
- ✓ 主桁および主塔とも1次モードの固有振動数が低い



多様で複雑な
振動モード



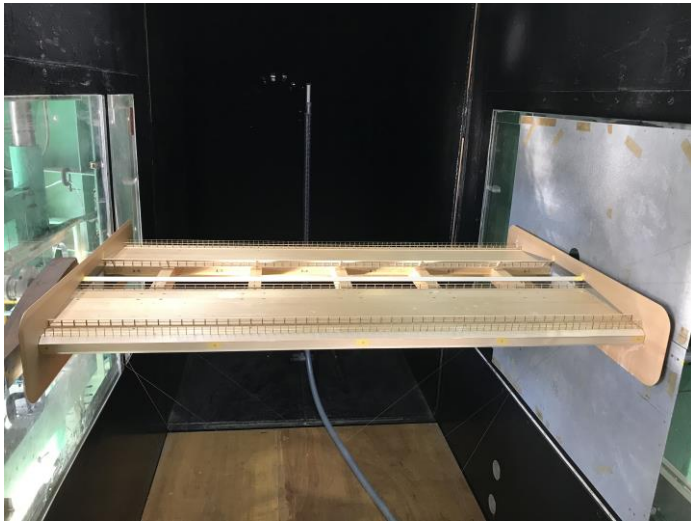
国内初の分離2箱桁
断面，橋軸A型主塔

激甚化する台風災害

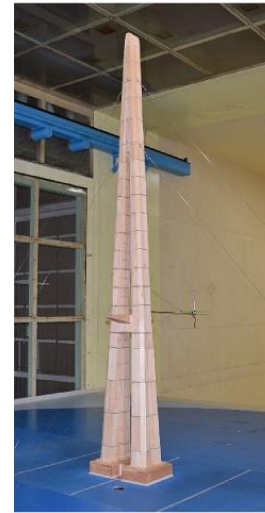
より慎重に耐風性を検討する必要がある

風洞試験にて検討

- 主桁や主塔のそれぞれに対して，部分模型による風洞試験にて耐風性を確認



主桁：バネ支持試験の例

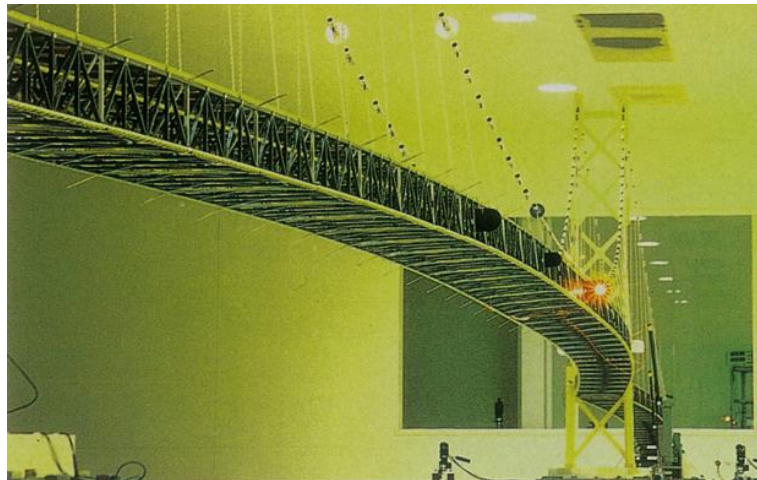


主塔：弾性模型試験の例

- ✓ 流れ場の可視化や風圧等の計測に手間を要し振動原因の特定が困難
- ✓ 対策方法はトライ＆エラーによる試験を重ねるため，模型数および実験数が膨大となる
- ✓ 長大橋梁の場合，大型風洞が必要となり，試験箇所が限定

風洞試験にて検討

- 部分模型に加え全橋風洞試験にて耐風性を確認する場合もある



本四高速HPより

全橋風洞試験の例

- ✓ 長大橋梁の場合，大型風洞が必要となり，試験箇所が限定（今回の規模では国内での実施は困難）
- ✓ 再現可能なモード形状が限られる
- ✓ 縮尺によっては模型精度の問題や模型製作，試験の設定など大掛かりな作業となり費用と手間が膨大となる

本研究の目的

数値流体解析によって主桁・主塔，あるいは全橋の耐風性の評価の実現

風洞試験の補助的な位置づけによりメリットを発揮

- ✓ 数値流体解析により断面の基本的な性状の把握
- ✓ 対策形状をあらかじめ検討し，風洞試験ケースを縮減
- ✓ 流れを可視化することにより振動メカニズムの解明に寄与
- ✓ 効果的な対策形状の提案が可能
- ✓ 模型精度やレイノルズ数効果を排除した評価が可能となり精度向上に寄与

将来的には風洞試験に代わる評価方法となることを期待

- ✓ 大規模風洞施設がなくとも耐風性の評価が可能
- ✓ デジタルツインとして様々な外乱に対する応答を把握し対策を検討



阪神高速
先進の道路サービスへ

京都大学




KINDAI
UNIVERSITY



国立大学法人
名古屋工業大学

WEI



株式会社 地震工学研究開発センター
Earthquake Engineering Research Center Inc.

esi / OpenCFD
get it right

2019 流体－構造物連成計算コードの開発

- ✓ OpenFOAM（流体計算コード）とSeanFEM（構造振動計算コード）の連成による流体－構造物連成解析コードの開発

2019～ 主桁モデル風洞試験の再現解析 京, Oakforest-PACS, 富岳

- ✓ 風洞試験結果と再現解析との比較による振動現象の再現性の確認
- ✓ 計算時間, 計算コストの把握
- ✓ 計算効率向上の検討
- ✓ 振動メカニズムの把握

2020～ 主塔モデル風洞試験の再現解析 Oakforest-PACS, 富岳

- ✓ 主桁モデルと同様

2022～ 橋梁全体モデルの流体－構造物連成解析 富岳

- ✓ 橋梁全体の簡易モデルを作成し, 静的風力の計算
- ✓ 簡易モデルによる流体－構造物解析を実施し, 実現性および課題の抽出

✓ **OpenFOAM**（流体解析）計算コード

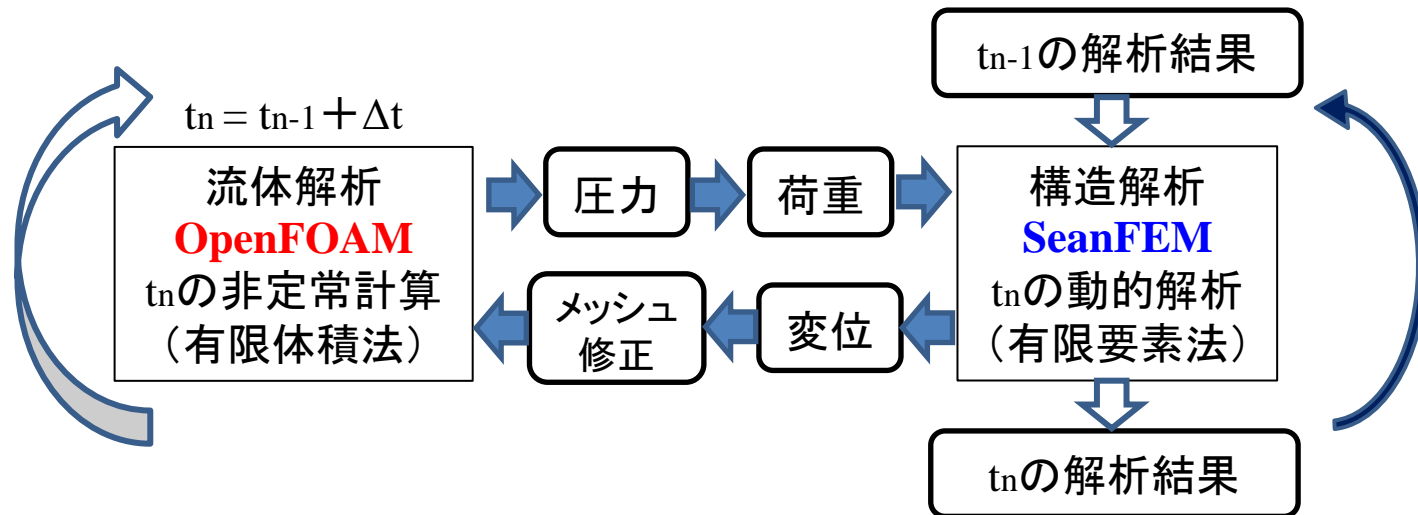
最新バージョンでFSI（Fluid - Structure Interaction）のインタフェース強化

✓ **SeanFEM**（構造解析）計算コード

上記FSIインタフェースに対応するプログラムの開発

SeanFEM：鋼橋を対象にした動的弾塑性有限変位解析プログラム

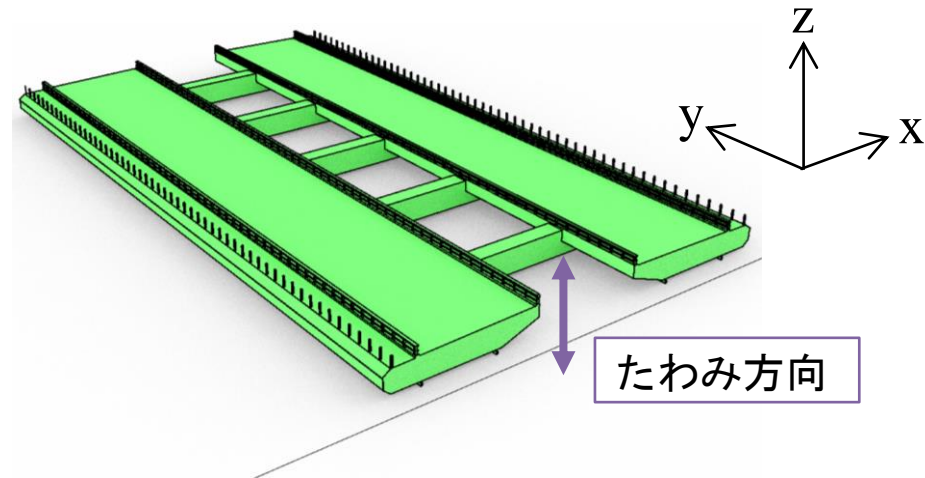
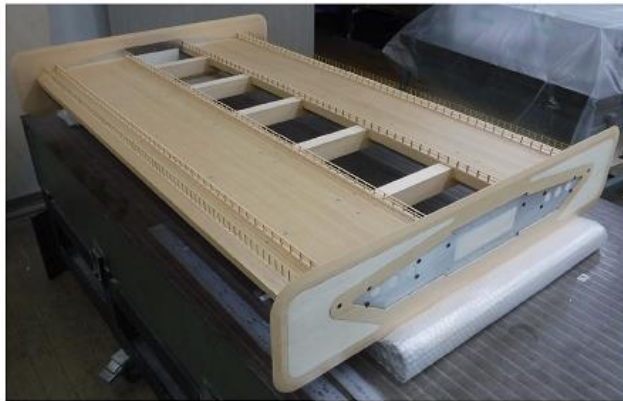
✓ 2つの計算コードによるFSIの処理方式



※OpenFOAM, SeanFEMの実績：「京」にて並列化および解析実施（7年間：2013年～2019年）

解析モデル

- ✓ 縮尺1/60のバネ支持風洞試験模型を再現
- ✓ 車両用防護柵や管理路高欄，検査車用レール等の付属物も再現
- ✓ たわみ1自由度試験を対象に実施



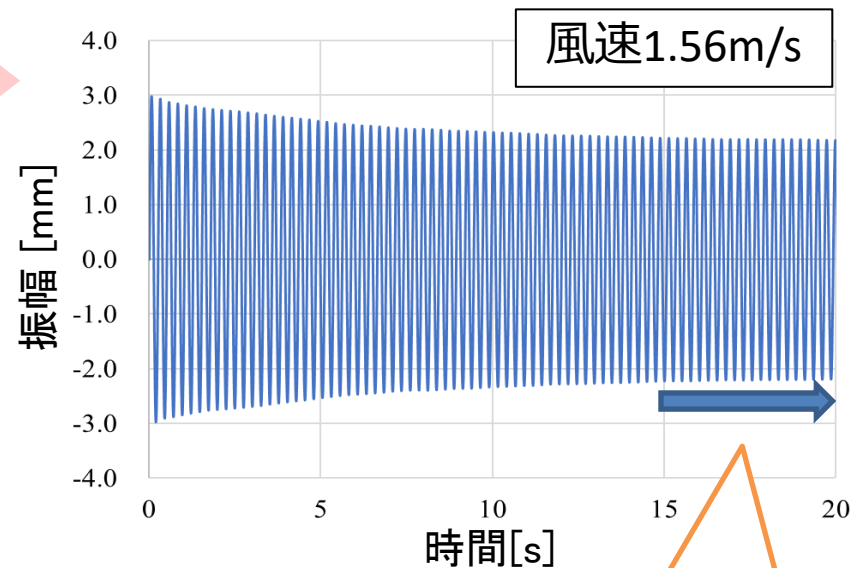
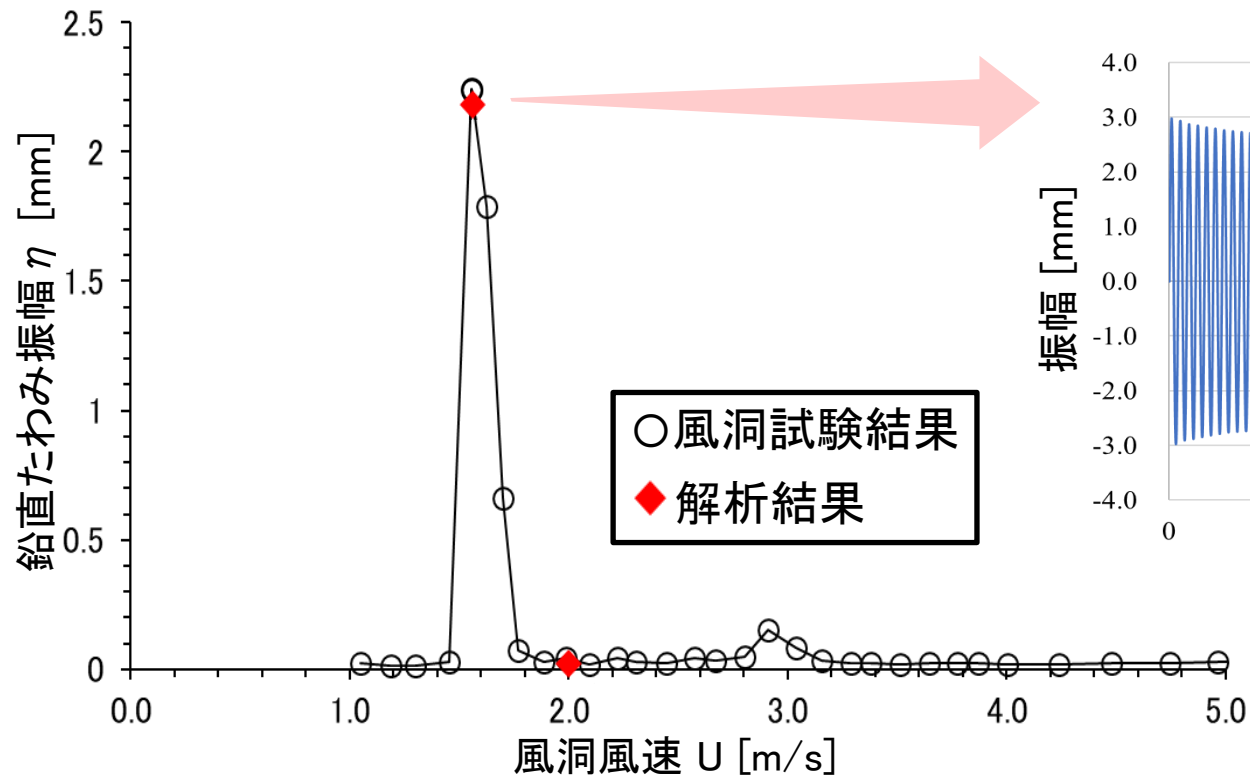
解析条件

- ✓ 迎角0度
- ✓ 初期振幅3mmを与え，振動振幅が収束するまで自由振動計算を実施

項目	解析条件
計算領域	$x \times y \times z = 4\text{m} \times 1.35\text{m} \times 2.5\text{m}$
最小格子幅	1mm (付属物周り)
総要素数	約5900万
時間刻み	0.0001 sec
解析時間	20~30 sec

解析結果

- ✓ 風速1.56m/sでは風洞試験と同程度の振動を再現
- ✓ 風速2.0m/sでは風洞試験と同様に振動が生じないことを確認
- ✓ 風洞試験で生じた渦励振が精度よく再現可能であることを確認



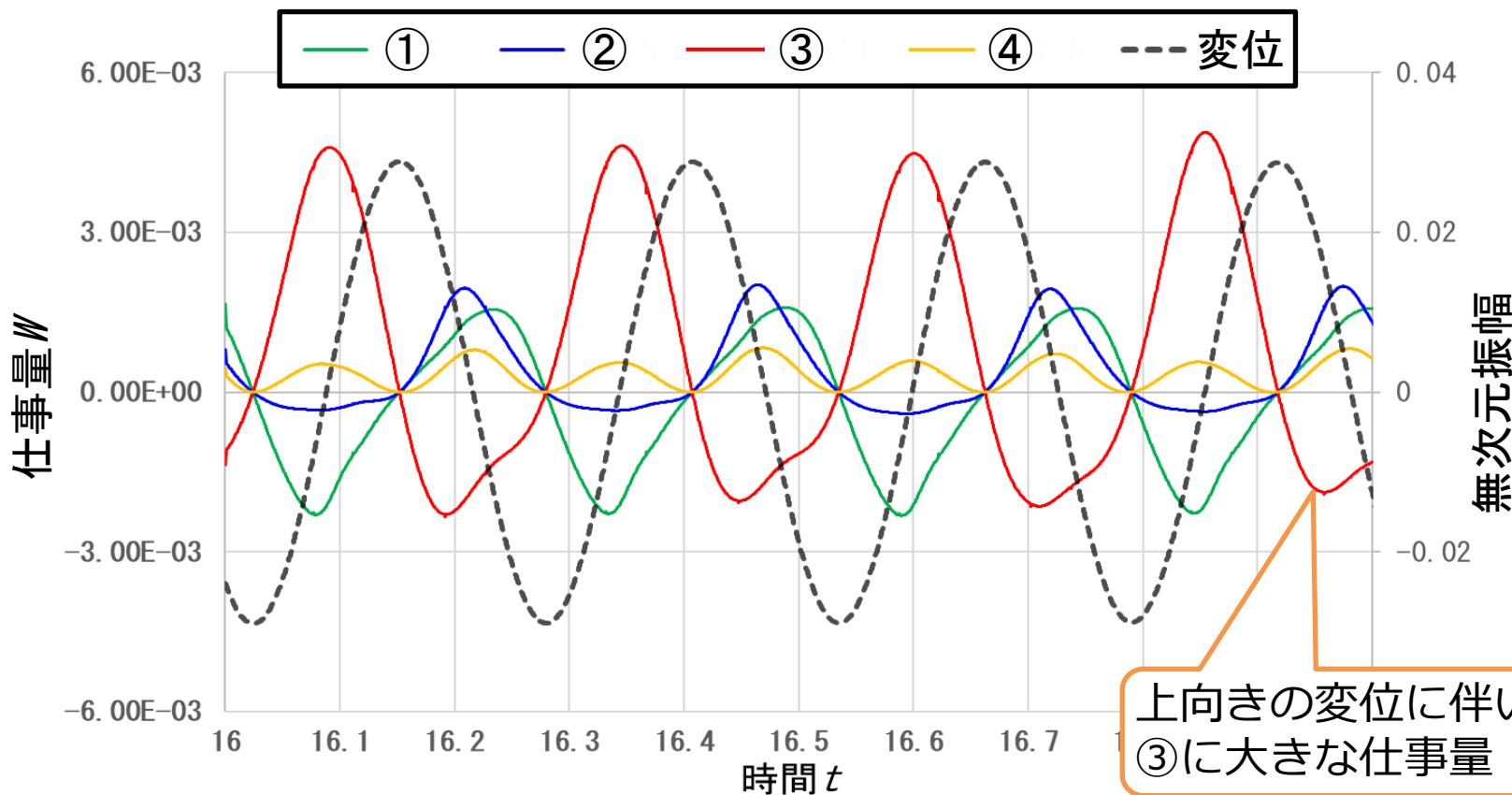
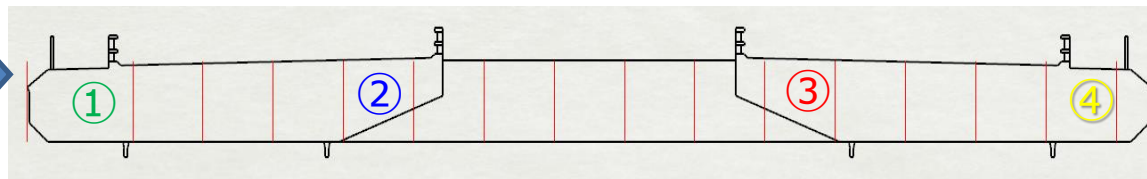
15s付近から定常的な
振幅に収束

渦励振の発生メカニズムに関する考察

✓ 振動の仕事量を主桁の部位ごとに分割して算出 ⇒ ③部位が励振力の寄与

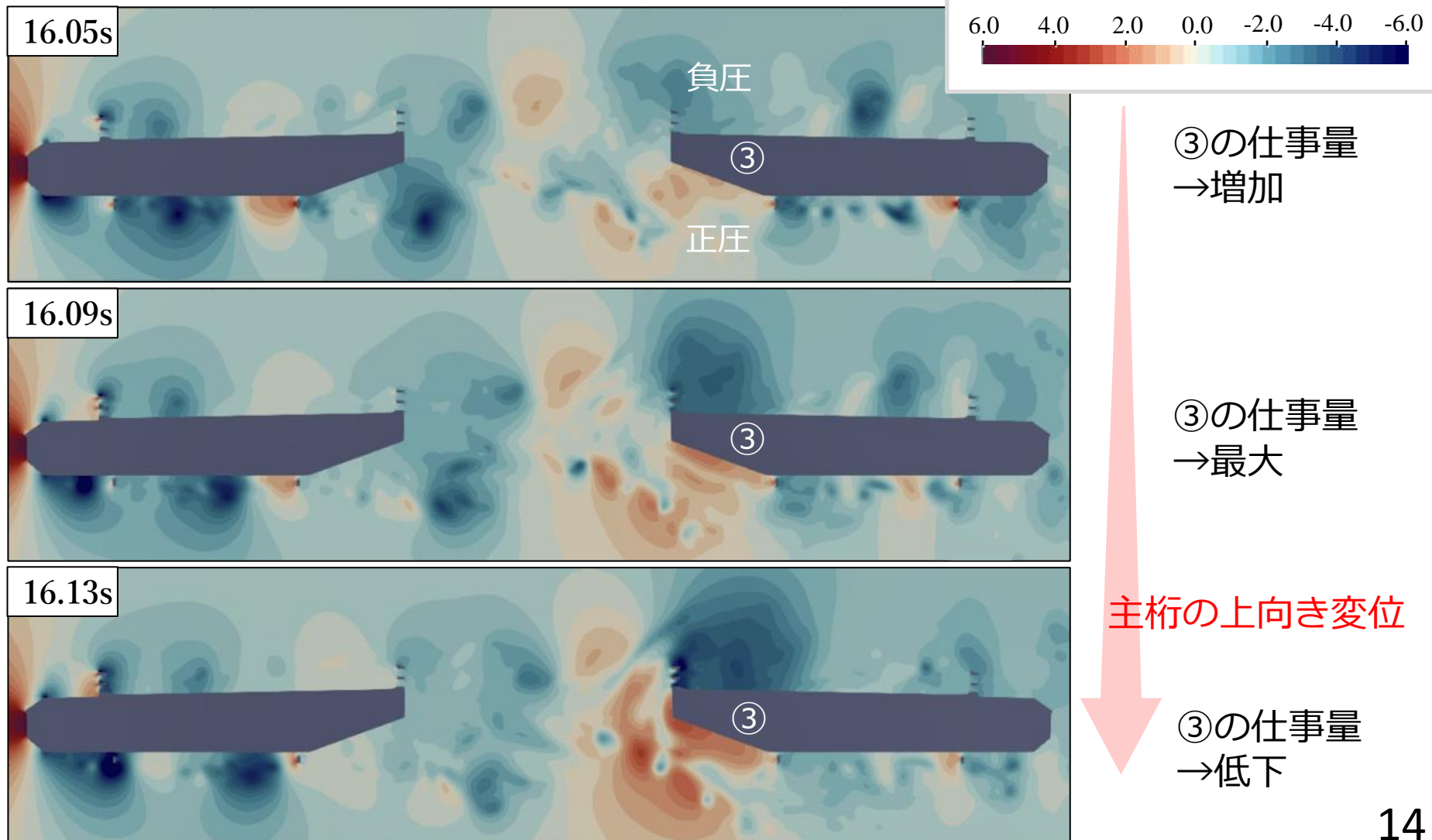
$$W(t) = C_y(t) \dot{y}(t) dt$$

鉛直方向風力 鉛直方向速度



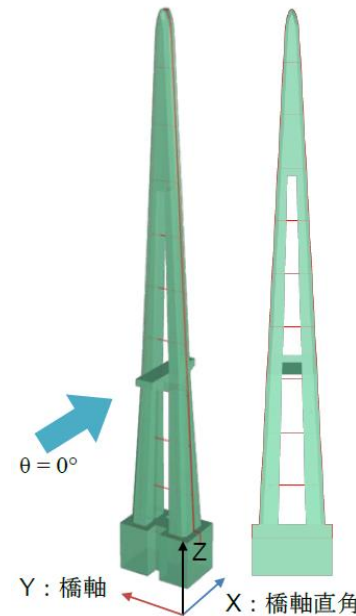
渦励振の発生メカニズムに関する考察

✓ 上流側桁から生じた渦が下流側桁に衝突し圧力差が生じるため振動が発生



解析モデル

- ✓ 縮尺1/100の主塔ロッキング模型試験を再現



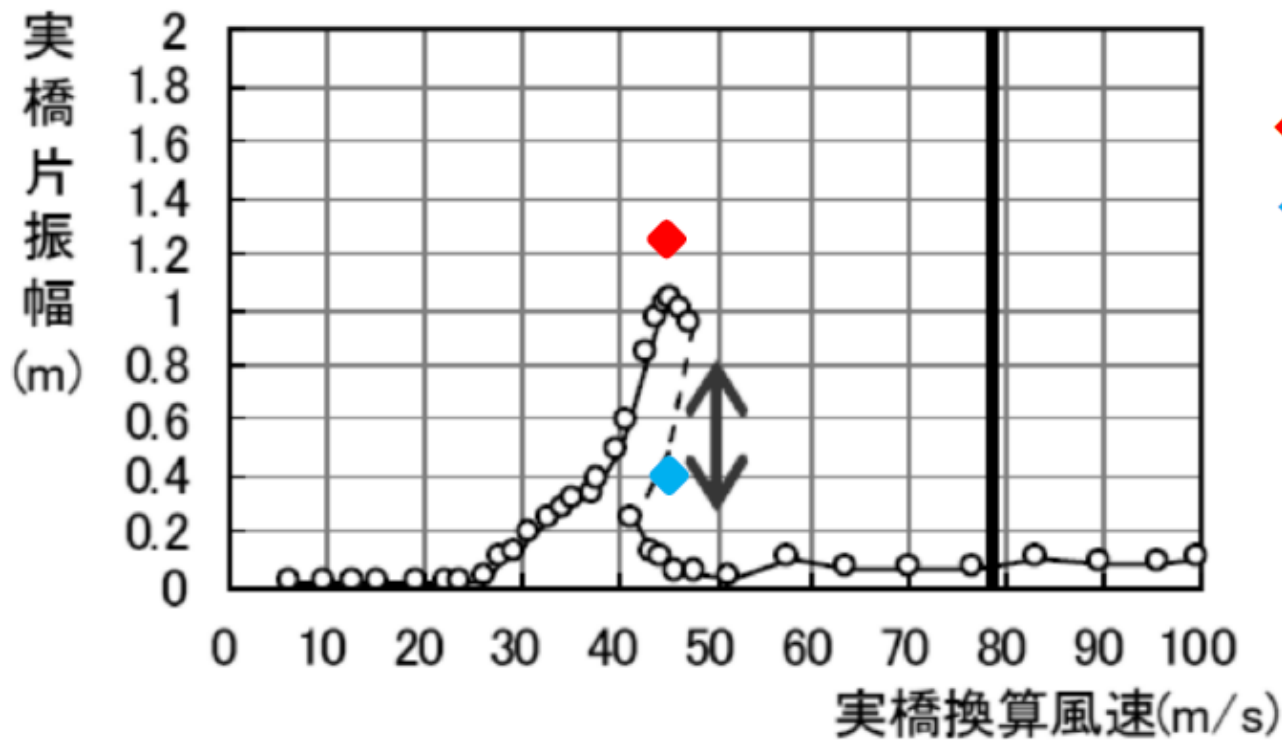
解析条件

- ✓ 風向は橋軸直角方向 ($\theta=0^\circ$)
- ✓ 初期振幅10mmを与え、振動振幅が収束するまで自由振動計算
- ✓ 初期振幅なしによる自由振動計算

項目	解析条件
計算領域	$x \times y \times z = 6\text{m} \times 4\text{m} \times 3.5\text{m}$
最小格子幅	1.5mm (主塔近傍)
総要素数	約5600万
時間刻み	0.0005 sec
解析時間	60 sec

解析結果

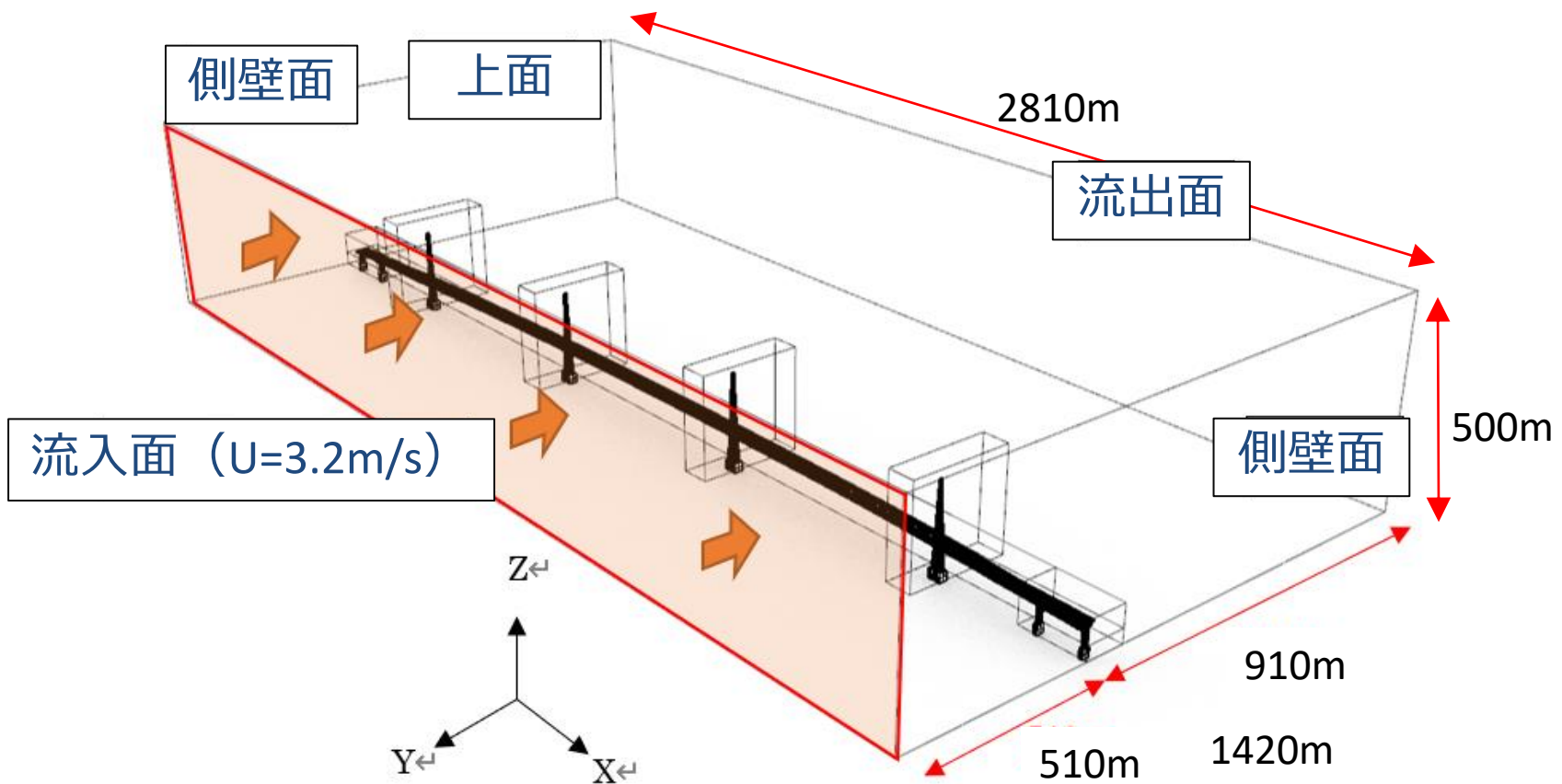
- ✓ 風速45.6m/sにて初期振幅有の場合、風洞試験よりやや大きい振幅
- ✓ 風速45.6m/sにて初期振幅無の場合、風洞試験よりやや大きい振幅
- ✓ 再現解析の方がやや振幅が大きいが、概ね振動を再現可能であることを確認



- ◆ 解析結果
- ◆ 解析結果（初期無し）

解析モデル

- ✓ 全長2739mの橋梁全体を対象
- ✓ 車両用防護柵や高欄，検査車用レール等の付属物は省略（簡易モデル）
- ✓ 主桁のたわみ振動に着目



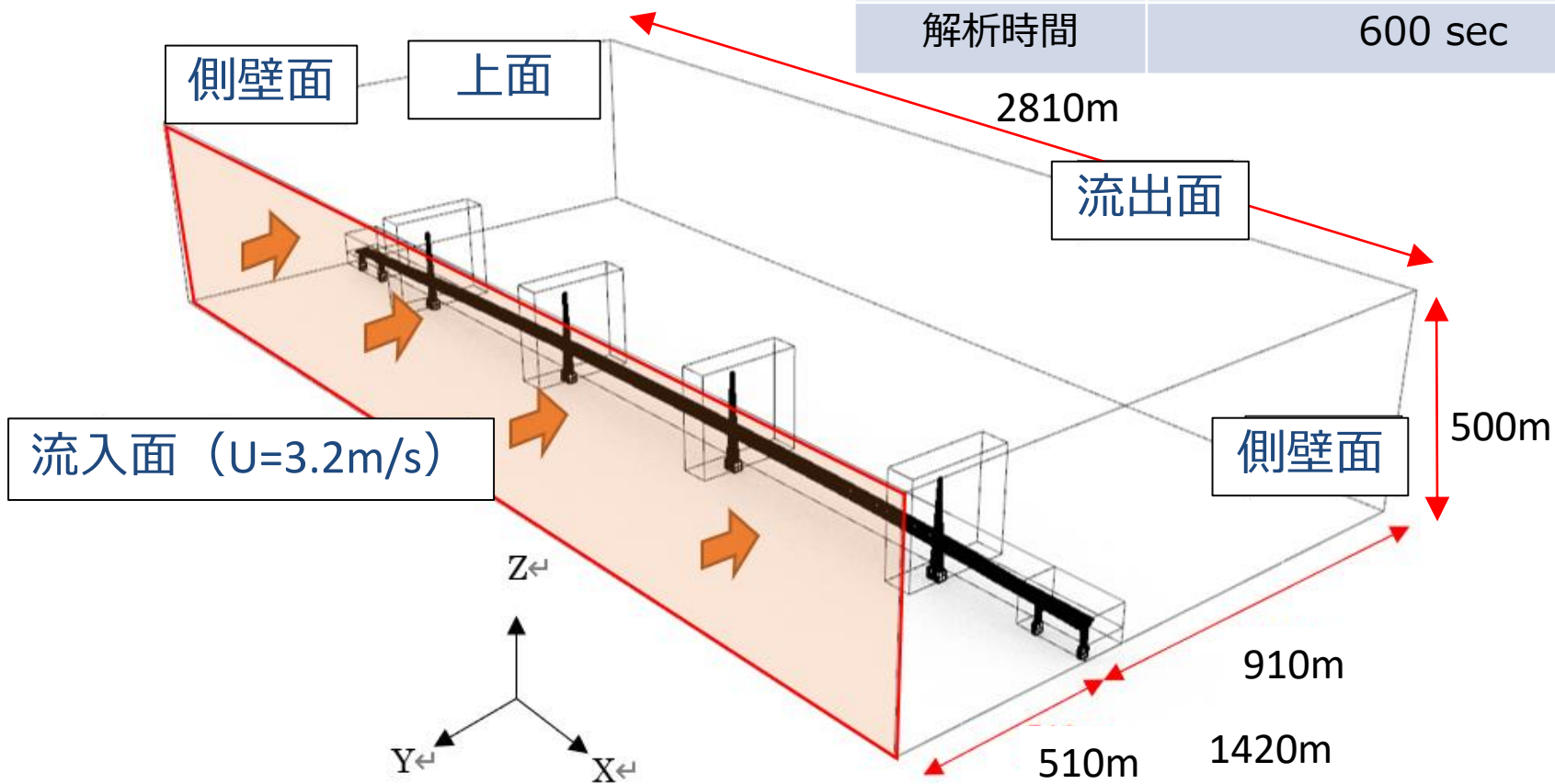
橋梁全体モデルの流体－構造物連成解析

神戸をつなく、世界とつながる。
大阪湾岸道路西伸部

解析条件

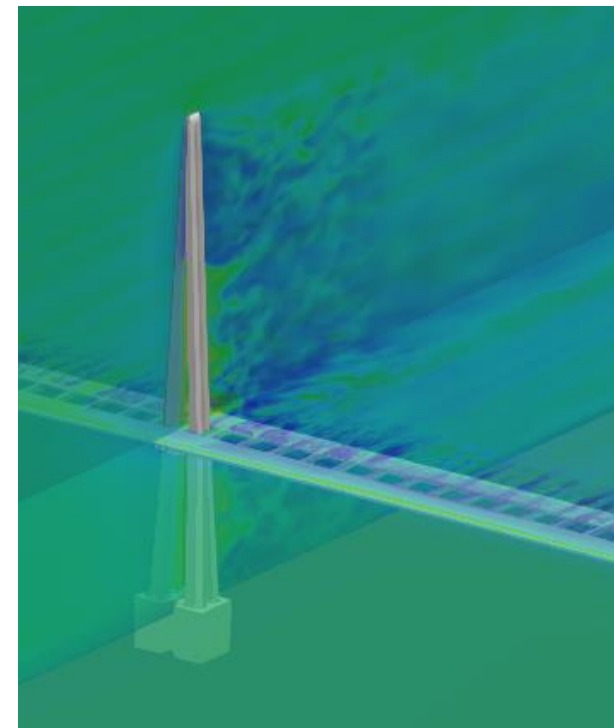
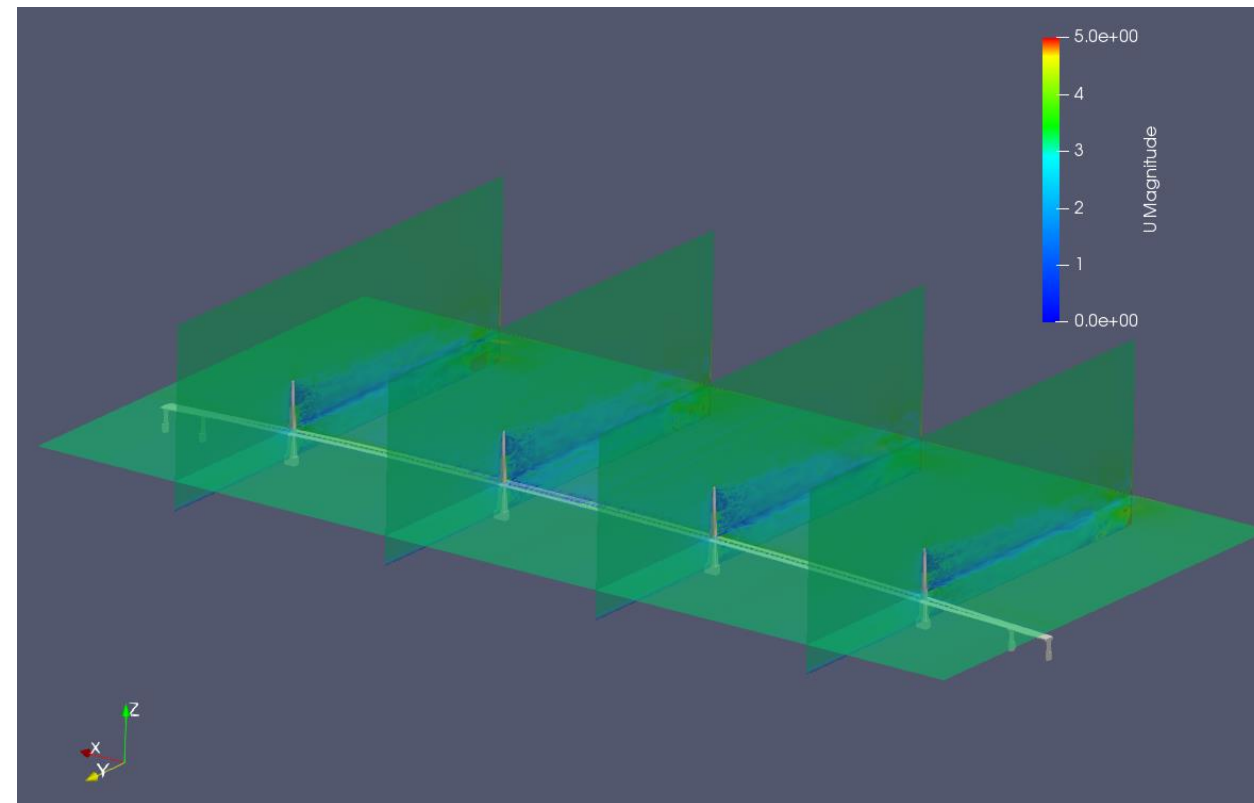
- ✓ 風速3.2m/s, 風向は橋軸直角方向, 迎角0°
- ✓ 最初のステップとして静止状態での流体解析を実施

項目	解析条件
計算領域	$x \times y \times z =$ 2810m × 1420m × 500m
最小格子幅	0.275m (主桁)
総要素数	約2億
時間刻み	0.01 sec
解析時間	600 sec



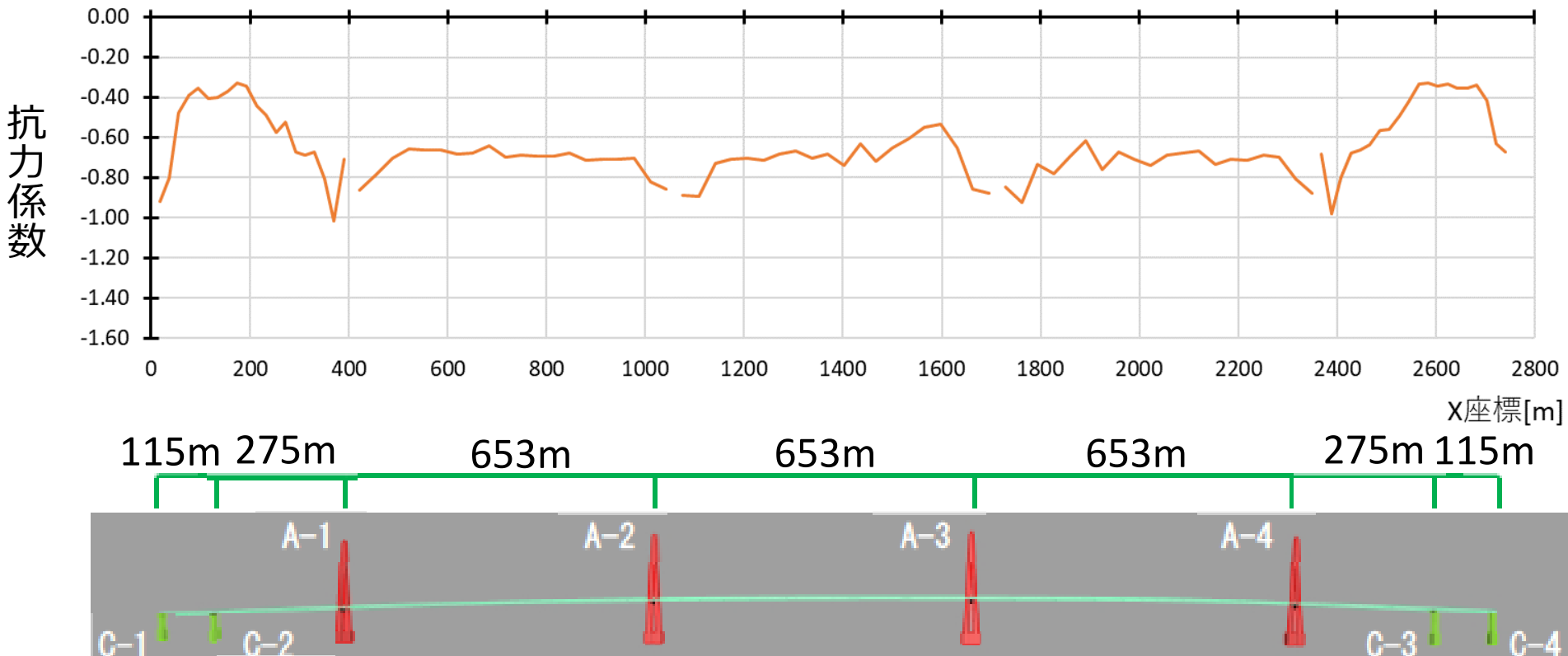
解析結果（風速コンター）

- ✓ 風速コンターから主塔付近では主塔と主桁との相互作用により複雑な流れ場となることを確認



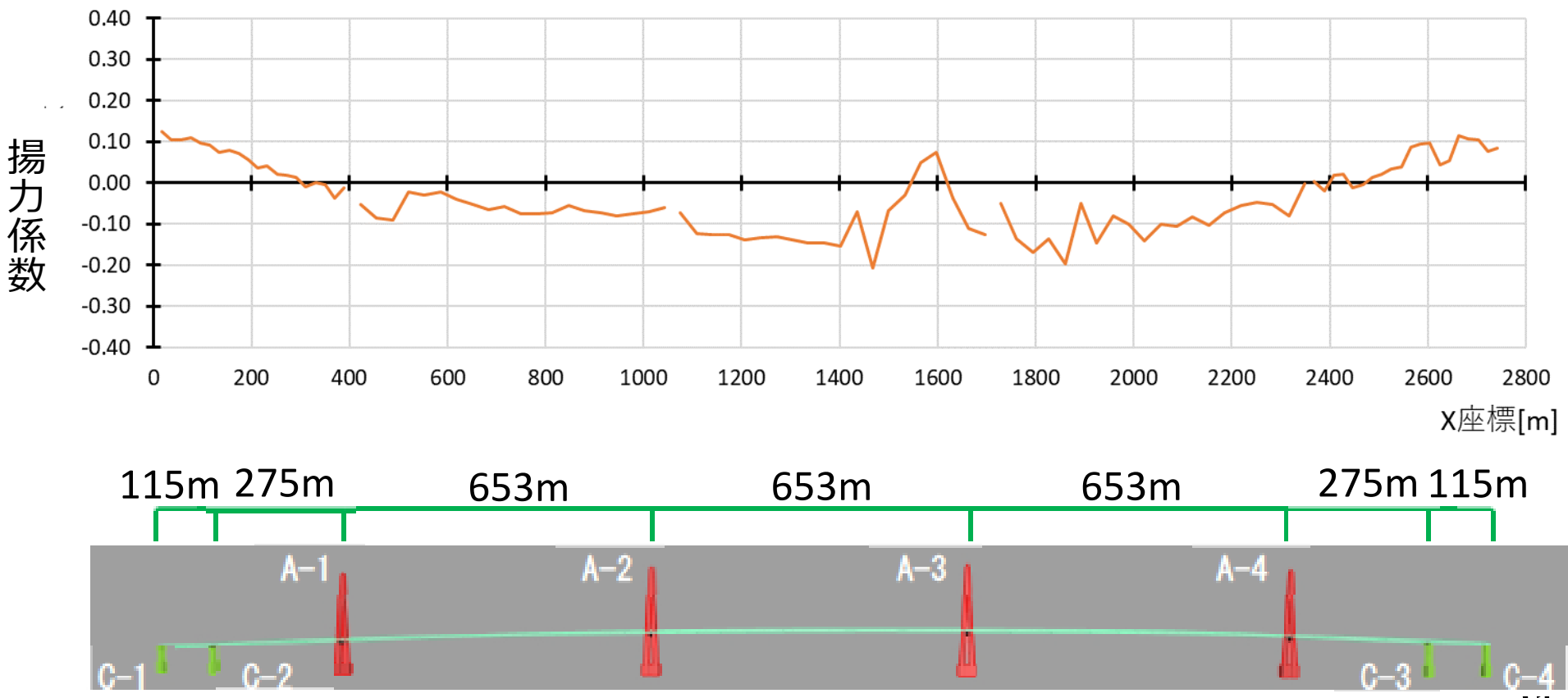
解析結果（主桁の抗力係数）

- ✓ 2箱桁断面の主径間中央付近では抗力係数が0.7程度と実験（1.25）と比べ、低い値
⇒ 付属物を再現しない簡易モデルのため
- ✓ 主径間部では概ね一定の抗力係数となっている
- ✓ 主塔付近では主塔による風の乱れの影響により増加傾向にあることを確認



解析結果（主桁の揚力係数）

- ✓ 橋梁中央部ほど揚力係数が減少する傾向があり、3次元性を有している
⇒ 橋梁中央部に向かって縦断勾配を有しているため、床面の影響を受けていることが考えられ、振動性状に影響を与える可能性がある



■ 流体－構造物連成計算コードの開発

- ✓ OpenFOAM（流体計算コード）とSeanFEM（構造振動計算コード）の連成による流体－構造物連成解析コードの開発

■ 主桁モデル風洞試験の再現解析

京, Oakforest-PACS, 富岳

- ✓ 渦励振に対して、風洞試験結果を精度よく再現できることを確認
- ✓ 振動メカニズムの解明に寄与
- ✓ 全橋モデルを視野に要素分割数の縮減が課題

■ 主塔モデル風洞試験の再現解析

Oakforest-PACS, 富岳

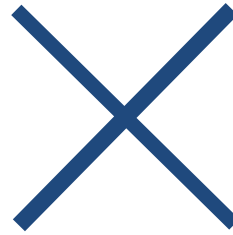
- ✓ 主桁モデルと同様（再現精度については課題）

■ 橋梁全体モデルの流体－構造物連成解析

富岳

- ✓ 橋梁全体の簡易モデルを作成し、静的風力を算出
- ✓ 簡易モデルによる流体－構造物解析を実施中
- ✓ 高精度モデルによる要素分割数の縮減が課題

世界最大規模の
連続斜張橋



世界最高水準の
スーパーコンピュータ

富 岳

激甚化する自然災害に対して、
世界水準の卓越した都市高速道路技術を発揮し、
最高水準の安全・安心を提供する橋梁を実現するための
挑戦は続きます。