

4/26

大型構造物の振動耐久性評価・設計 改善技術の開発（第1報）

金属・物性科
機械・加工科
ロボット・制御科

○工藤弘行
坂内駿平
近野裕太

西村将史 佐藤浩樹

背景

当所における廃炉産業集積の取り組み（技術的な側面の支援）
令和4年度から コンピュータ・シミュレーション(CAE)を活用し、
県内企業の設計力、提案力を高めようという取り組みを開始
令和5年度から 研究を開始

原子力・廃炉分野の特徴

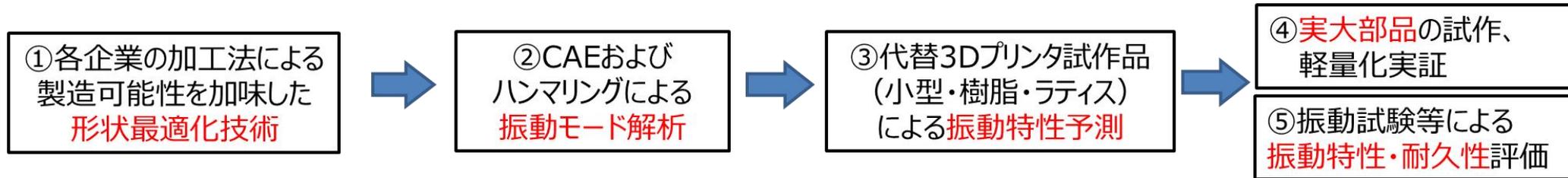
- ・数mサイズの大型構造物を扱うことが多い。⇒ 「振動」「剛性」の測定が困難
- ・「一品もの」であるなど、一般的な工業製品に比べて製造個数が極端に少ない

CAE適用が難しい工学問題

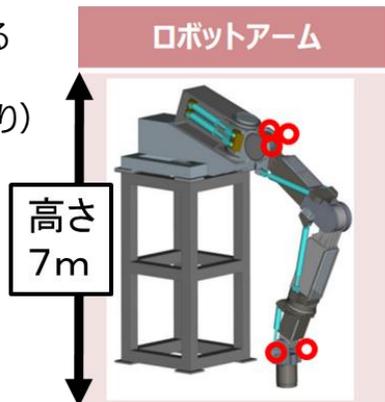
振動・衝撃などの「動解析」、複数部品の接触を扱う「接触解析」
実製品から CAEへのフィードバックが必要とだが、
廃炉分野で使用される大型構造物はフィードバックに難点がある。

目的・研究概要

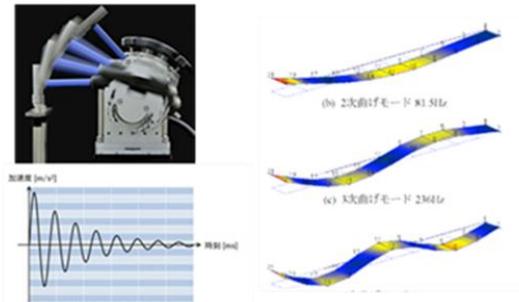
大型機械構造部品を対象に、CAE（コンピュータ・シミュレーション）による設計と、実製品・試作品の実験評価を組み合わせることにより、設計初期の段階で実大製品の**振動特性・耐久性**を正確に予測し、設計改善を行う技術を開発する。



廃炉で想定される
巨大構造物例
(廃炉戦略プランより)



ハンマリング振動モード解析



トポロジー最適化形状の例

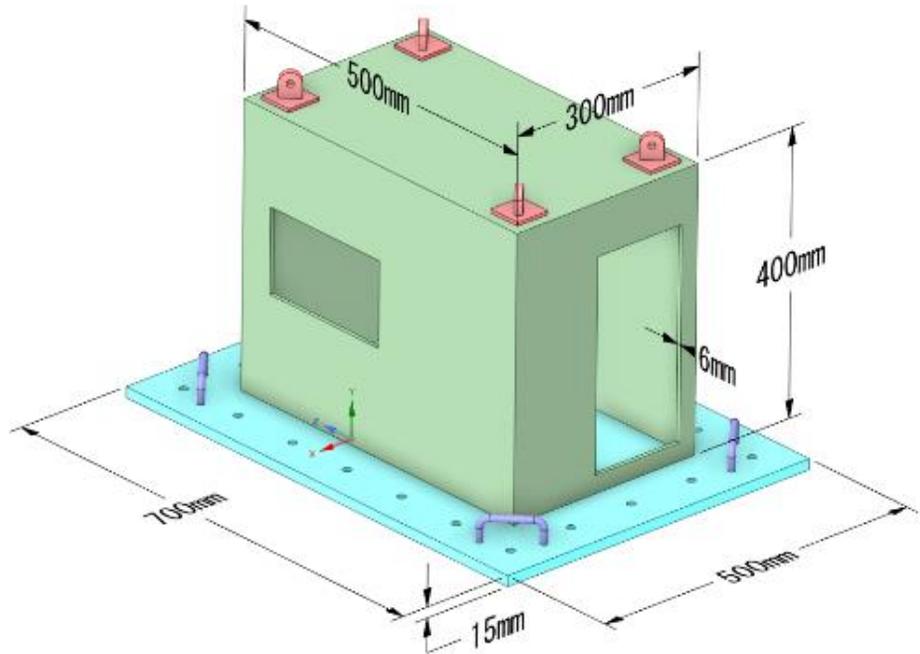
= 穴あき形状も含む形状の自由度



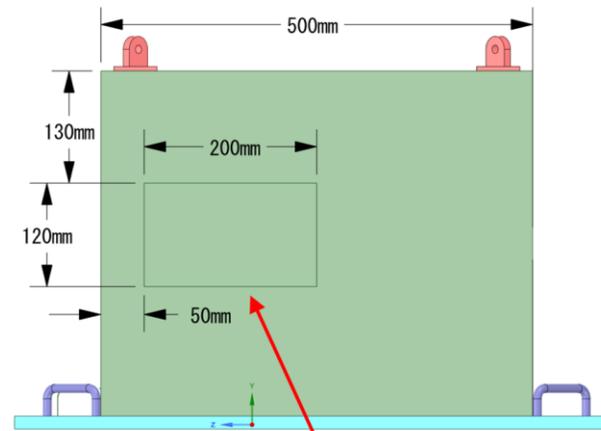
実施内容① 箱型溶接構造体の製作

板厚6mmの板を溶接して、箱型構造とする。

斜視図

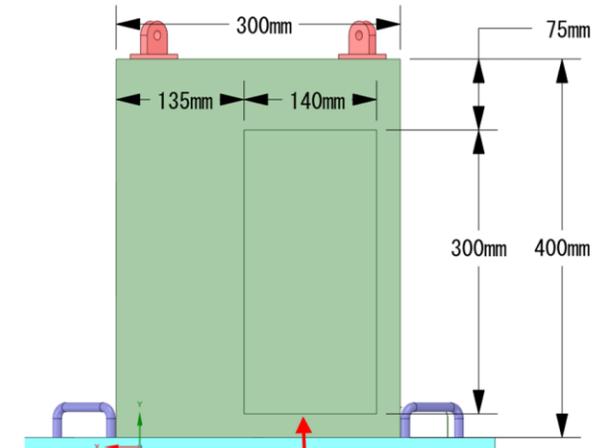


側面図



四角穴

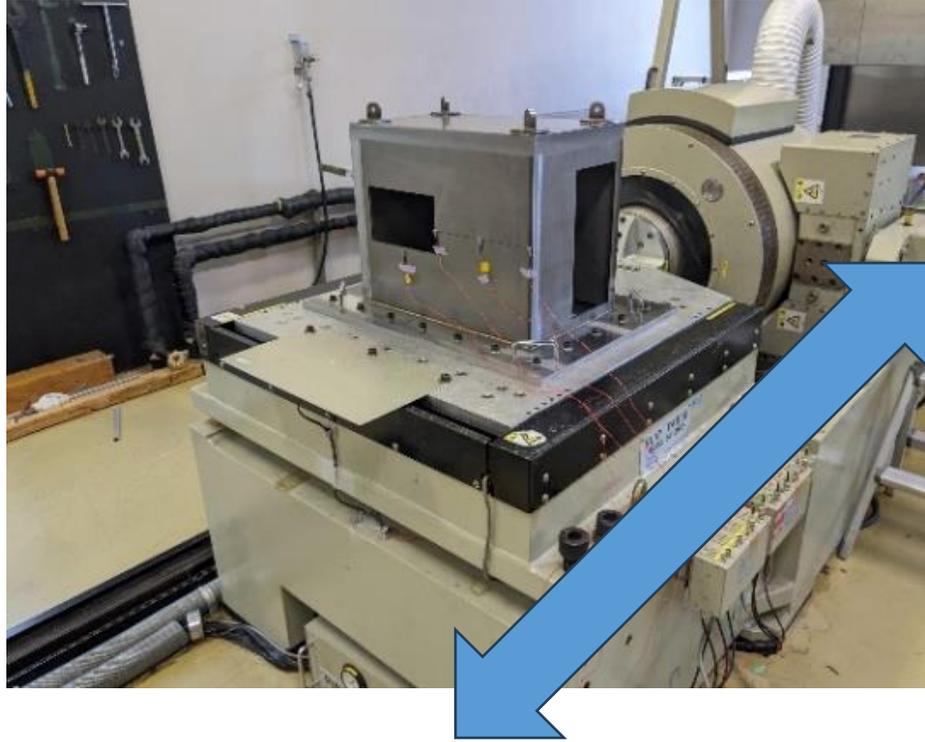
正面図



四角穴

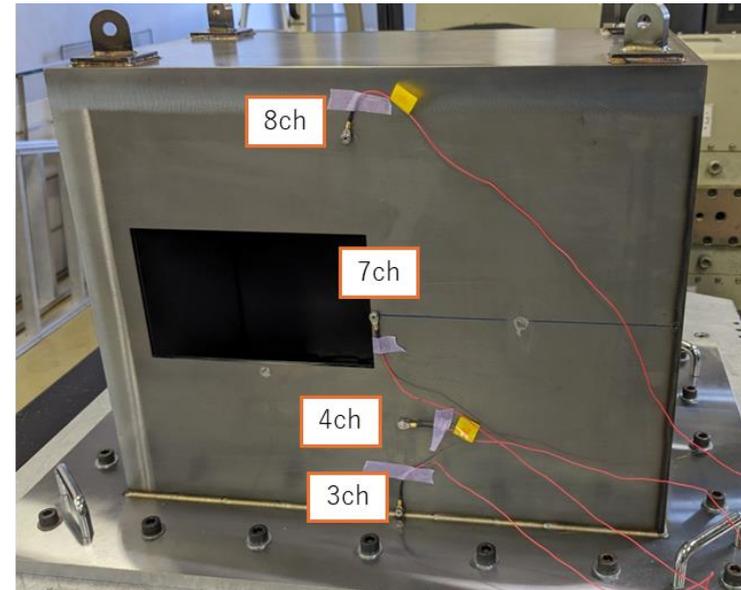
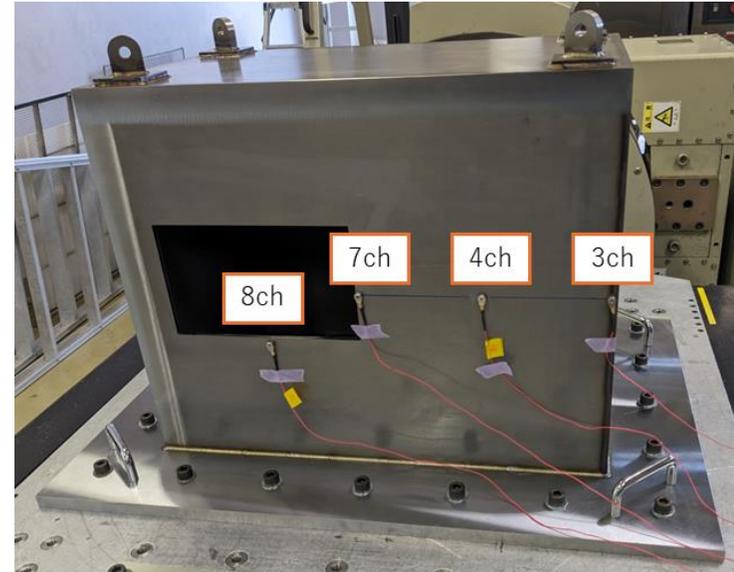
穴がある面を表。

実施内容① 振動試験

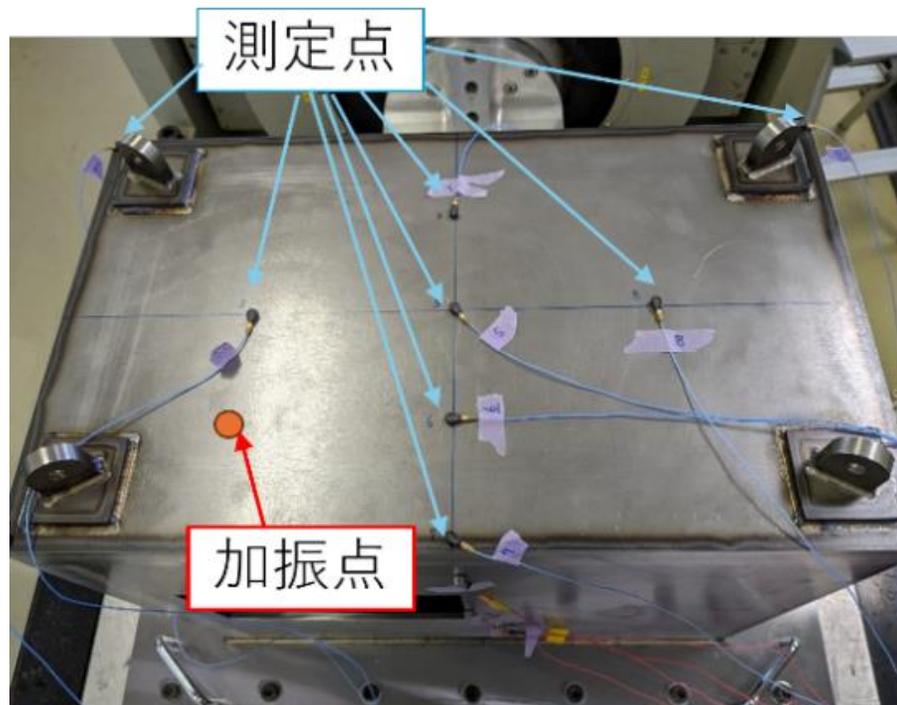
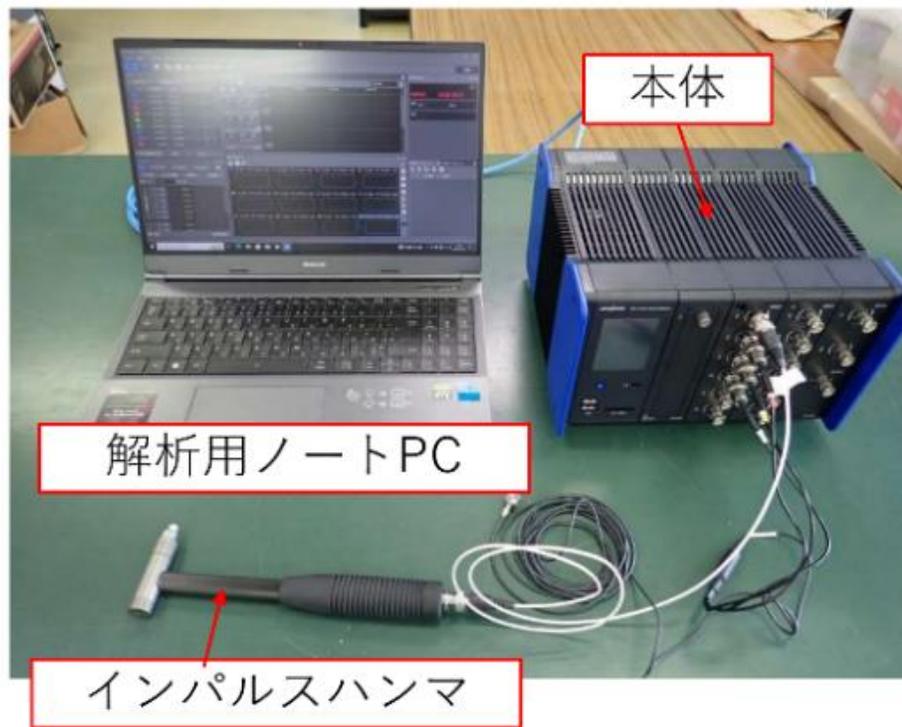


掃引試験の条件
周波数範囲50~500[Hz]
加速度5[m/s²]
掃引速度 0.5[オクターブ/分]

加速度センサ取り付け位置



実施内容② ハンマリング試験



生波形の例



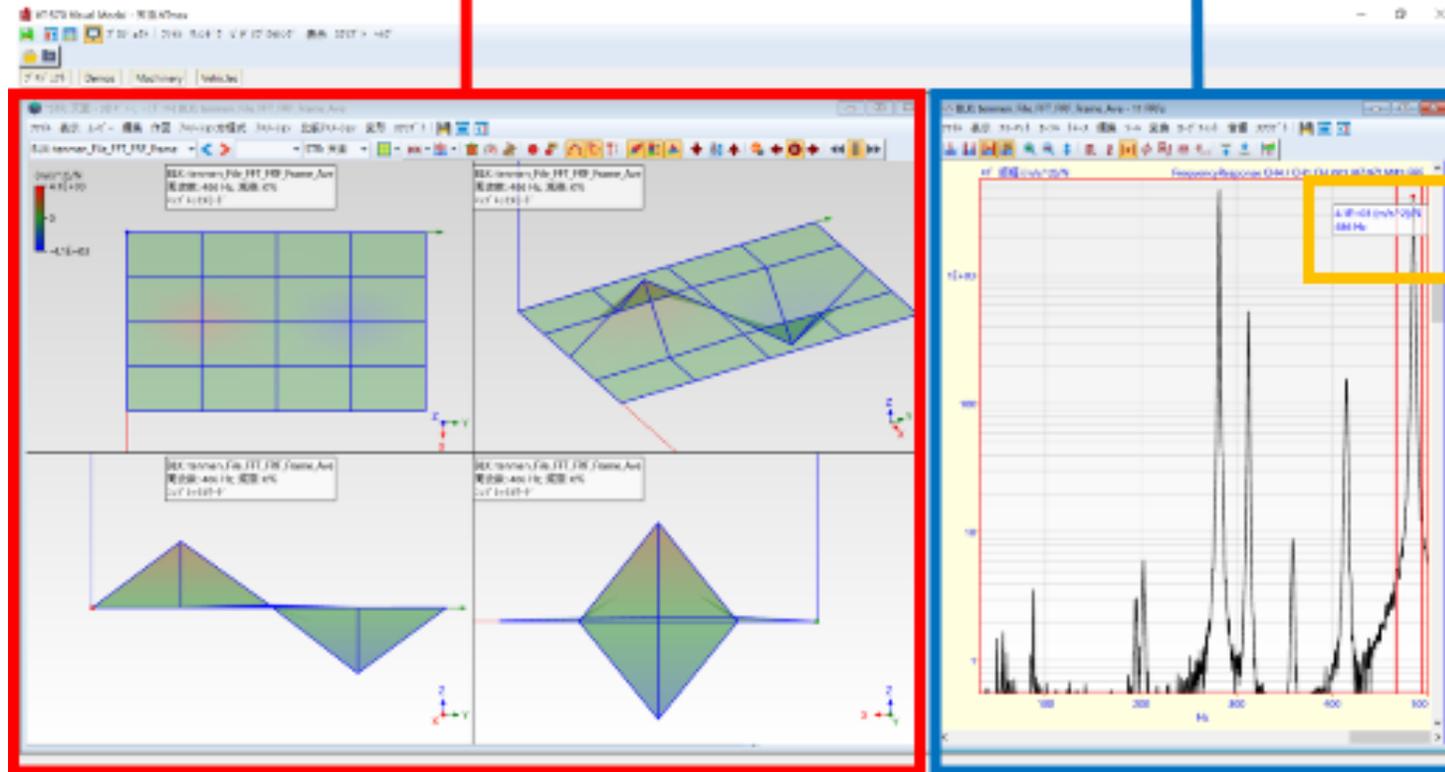
実施内容② 変形モードの可視化

モード可視化ソフト画面例 ME SCOPE

アニメーション画面

伝達関数画面

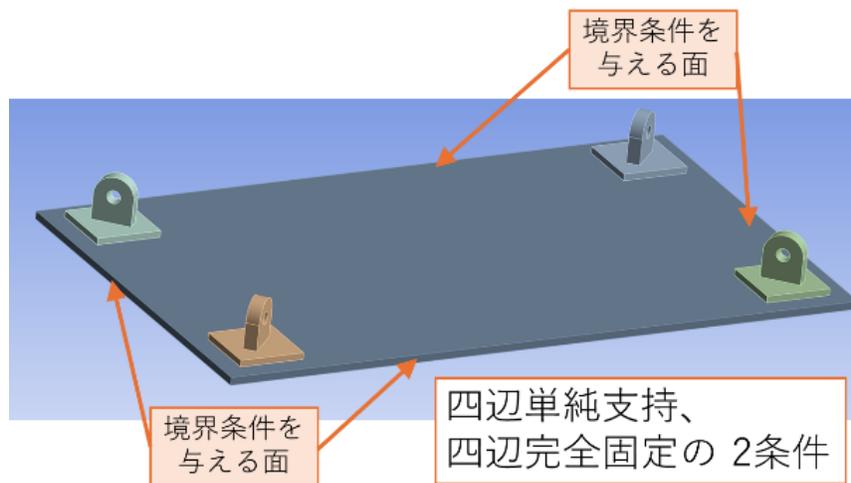
カーソル
部拡大



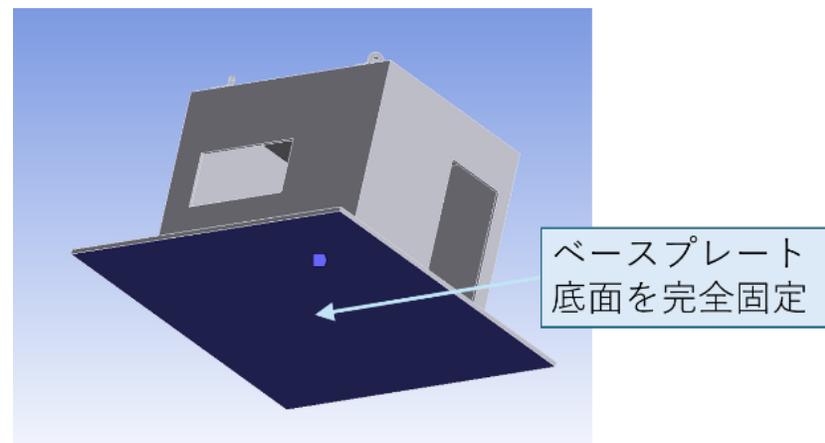
動的剛性と
ピーク周波数
の読み取り

実施内容③ CAE解析（長方形板、箱型）

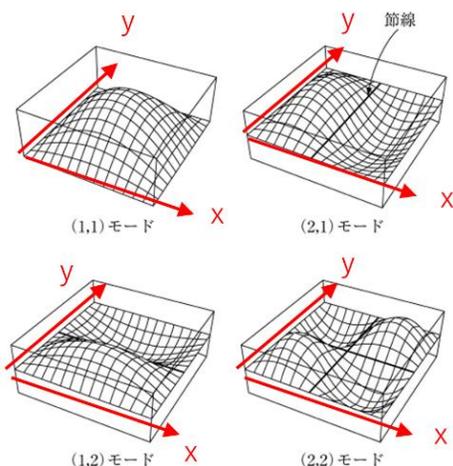
単独板モデル



箱型構造モデル



機械力学
の知見から

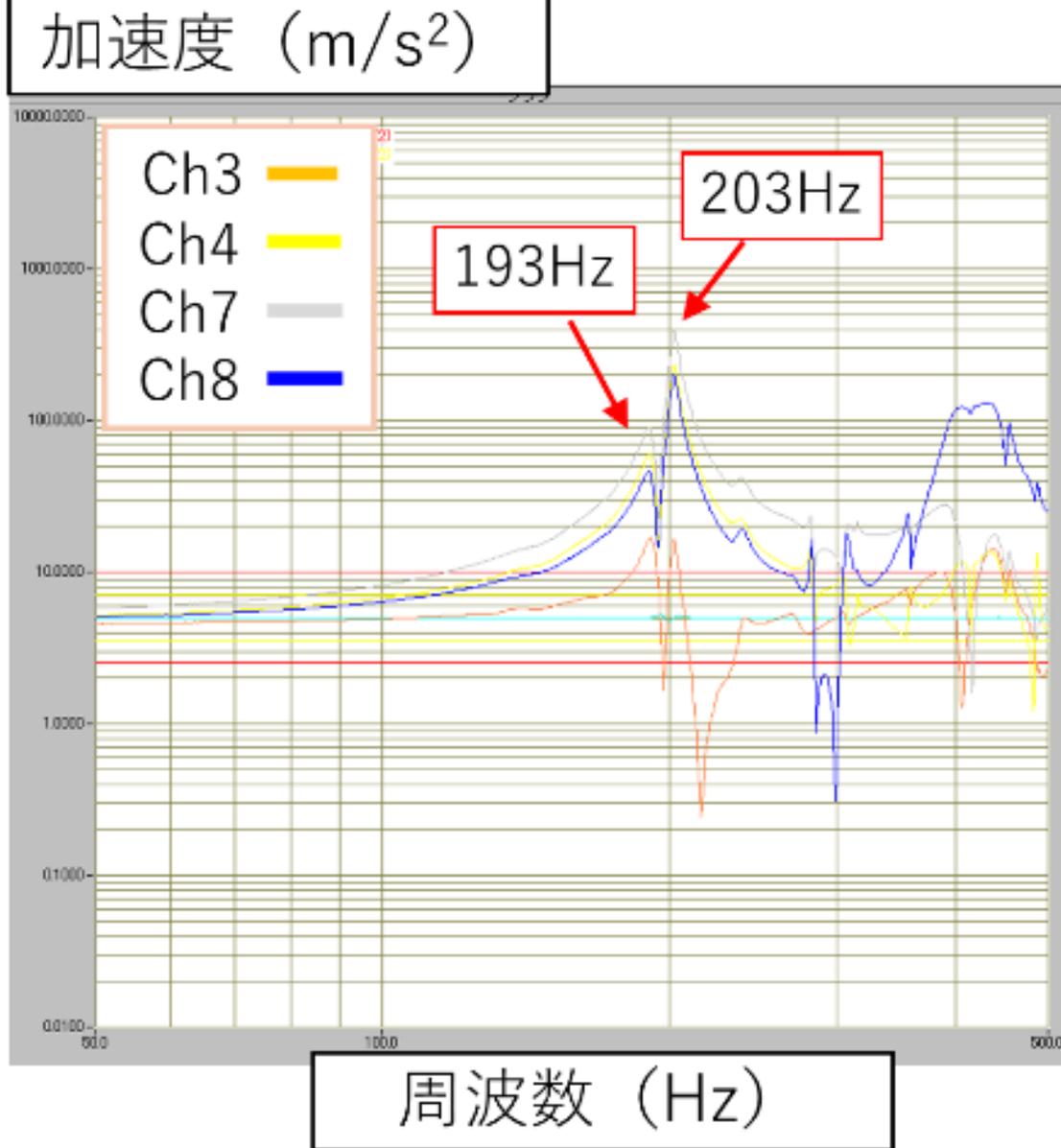


$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)}$$

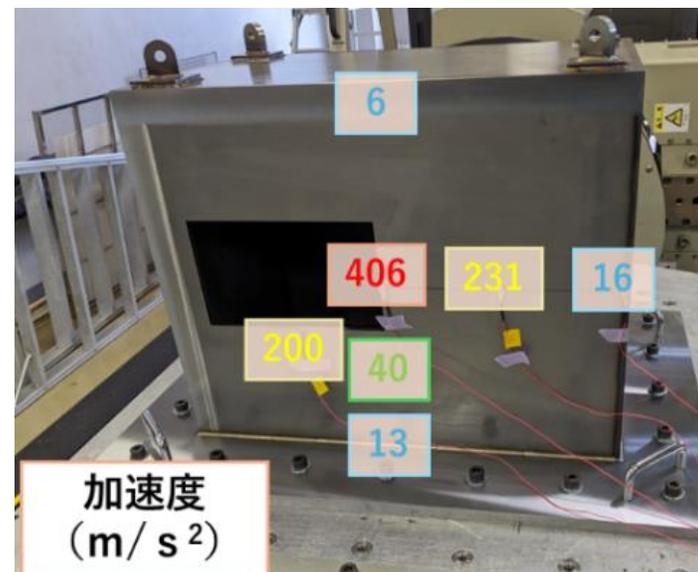
ここでDは曲げ剛性、 ρ は単位面積当たりの重量
a、bは長方形の長さで $a > b$ とする。

結果① 振動試験

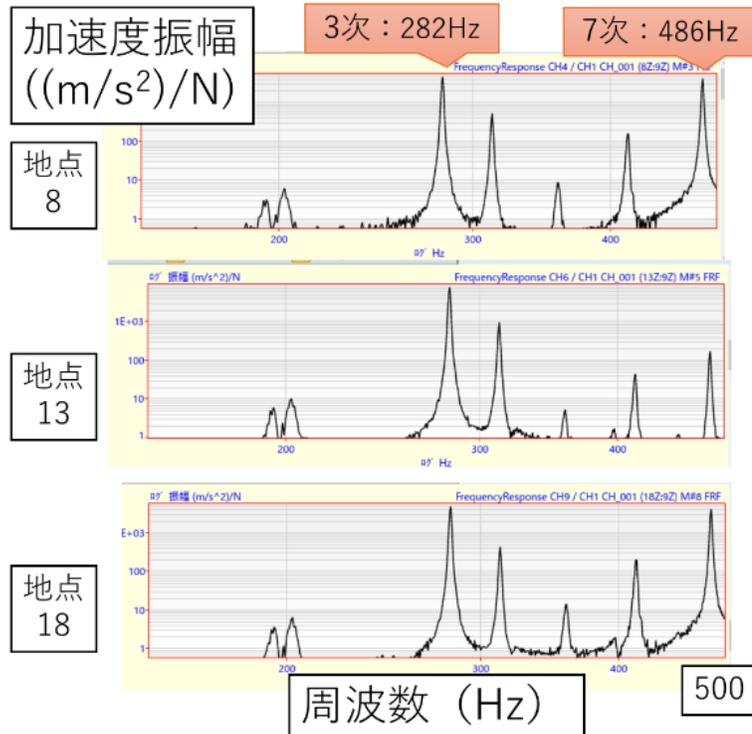
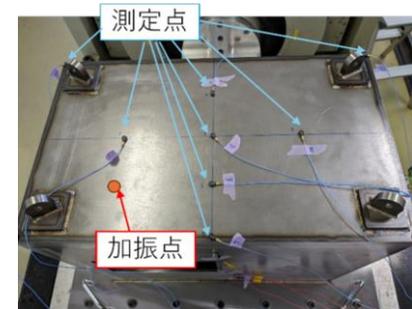
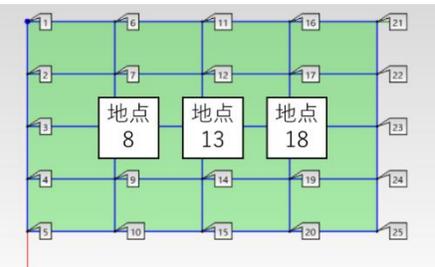
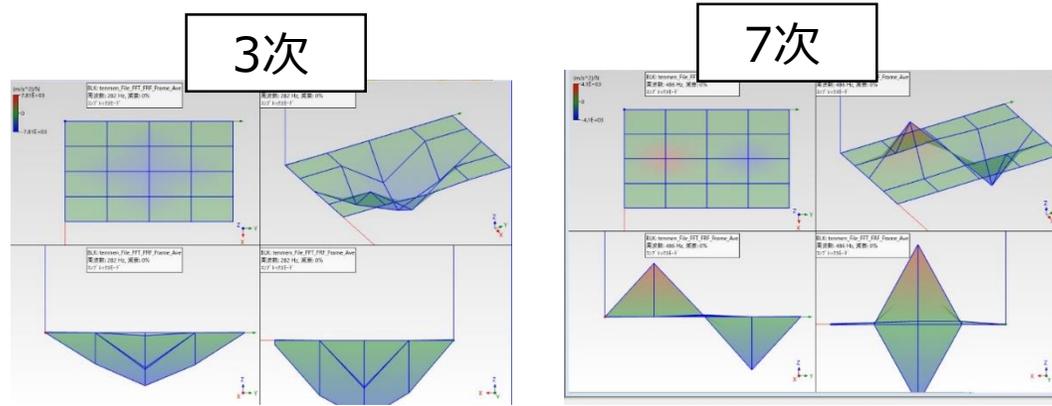
特徴点まとめ



周波数 (Hz)	現象	共振倍率 (倍)	測定点
191	ピーク	18	Ch7
203	ピーク	81	Ch7
216	変化点	—	Ch3
283	変化点	—	Ch7、8
303	変化点	—	Ch7、8
358	変化点	—	Ch8
416	変化点	—	Ch7
430	ピーク	26	Ch8
452	変化点	—	Ch8



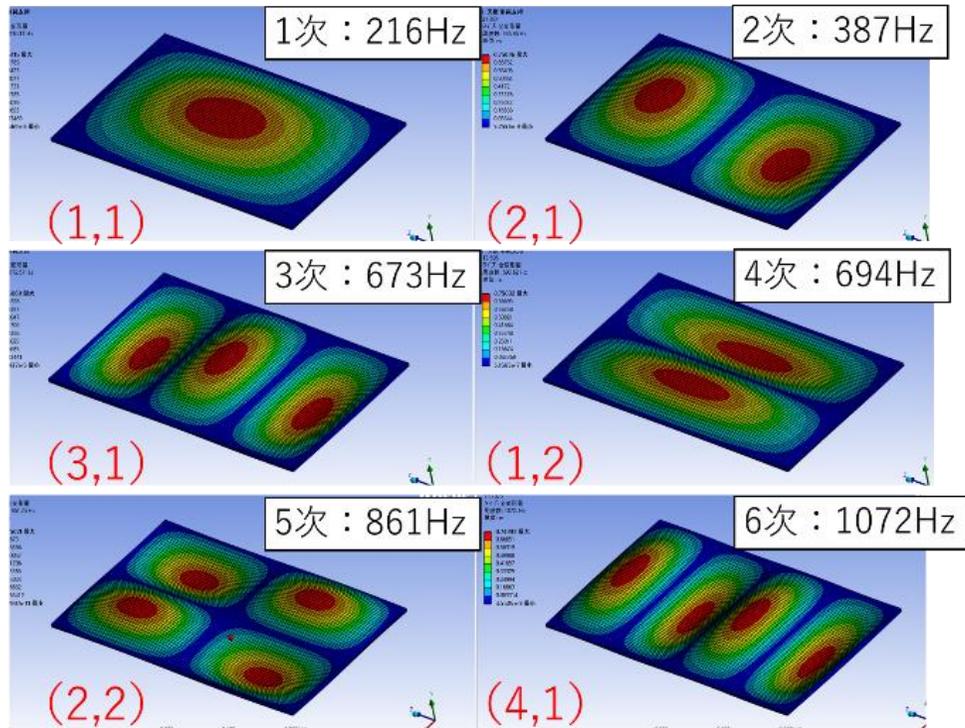
結果② ハンマリング試験（伝達関数、変形モード）



次数	周波数 Hz	単位荷重当たりの加速度振幅 (m/s ²)/N			変形 モード
		地点8	地点13	地点18	
1	195	3.10	5.95	3.59	(1,1)
2	203	6.13	10.2	6.51	(1,1)
3	282	4610	7810	4710	(1,1)
4	313	526	955	431	(1,1)
5	359	8.93	5.26	14.4	(2,1)
6	415	157	43.3	203	(2,1)
7	486	4100	171	4050	(2,1)

結果③ CAE（長方形板）

特徴点まとめ



固有周波数まとめ

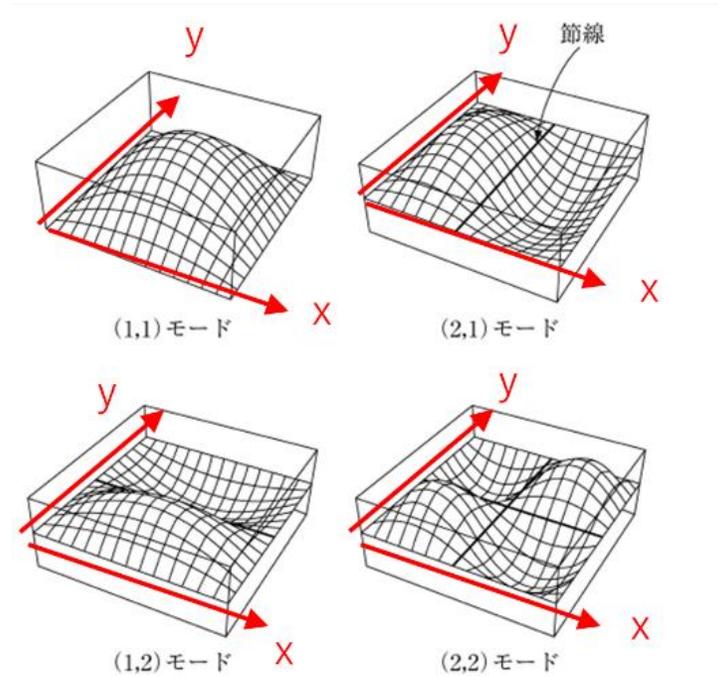
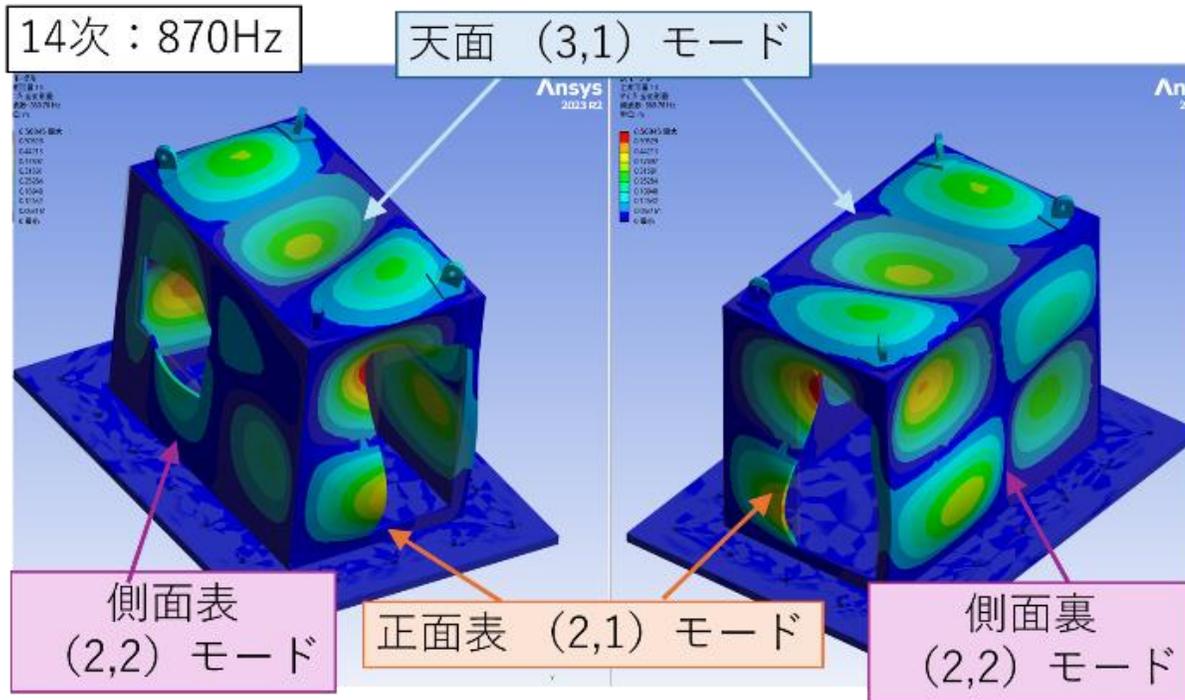
		単位：Hz							
次数	変形モード	長方形板のみ			長方形板 + 吊り治具				
		単純支持	完全固定	比	単純支持	完全固定	比	比	比
		A	B	B/A	C	D	D/C	C/A	D/B
1	(1,1)	216.1	418.9	1.9	236.4	427	1.8	1.09	1.02
2	(2,1)	386.9	602.3	1.6	423.9	627.6	1.5	1.10	1.04
3	(3,1)	672.6	918.8	1.4	705.3	954.1	1.4	1.05	1.04
4	(1,2)	693.6	1051	1.5	707.8	1062	1.5	1.02	1.01
5	(2,2)	861.7	1223	1.4	893.3	1257	1.4	1.04	1.03
6	(4,1)	1072	1359	1.3	1094.9	1390	1.3	1.02	1.02

境界条件の影響大

吊り治具は
剛性・ばねの両面で効く

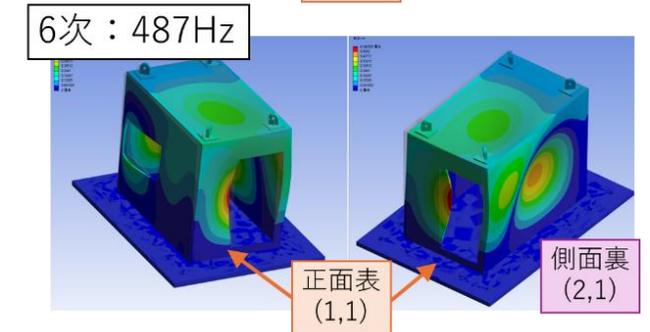
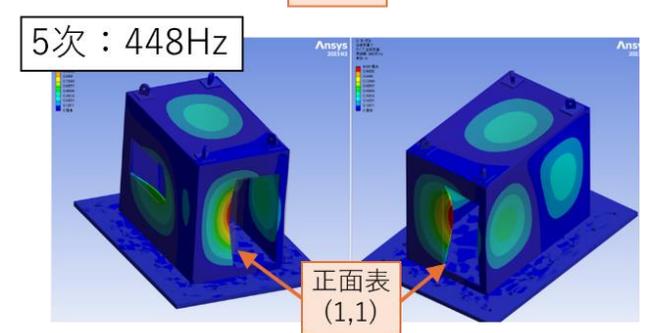
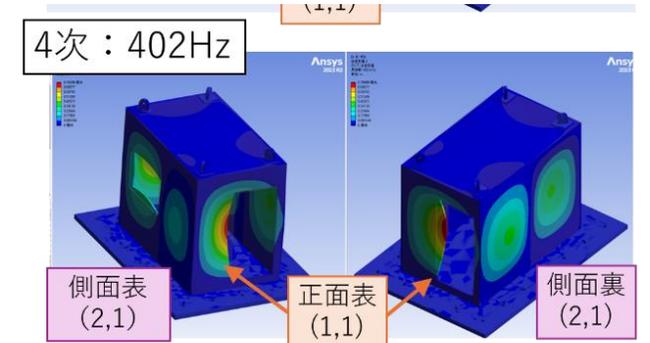
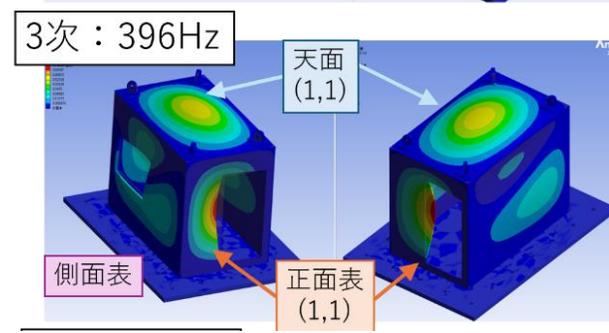
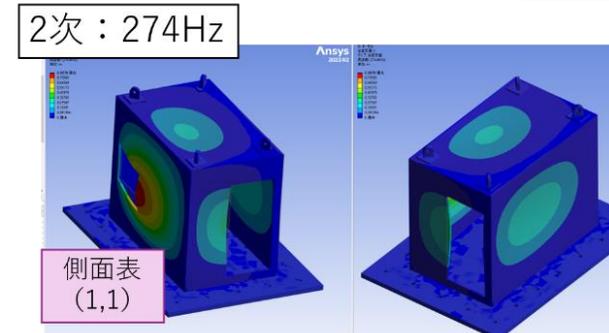
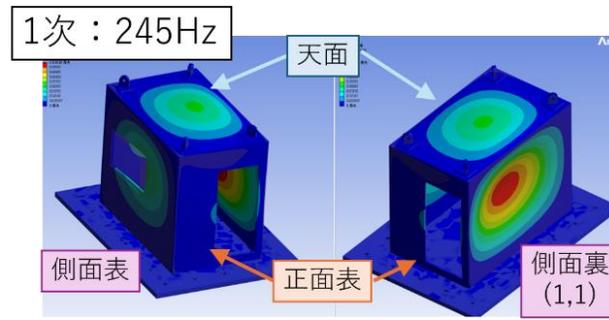
結果③ CAE（箱型・モーダル解析）

箱構造の各面に、単独板の固有値モードが表示される。



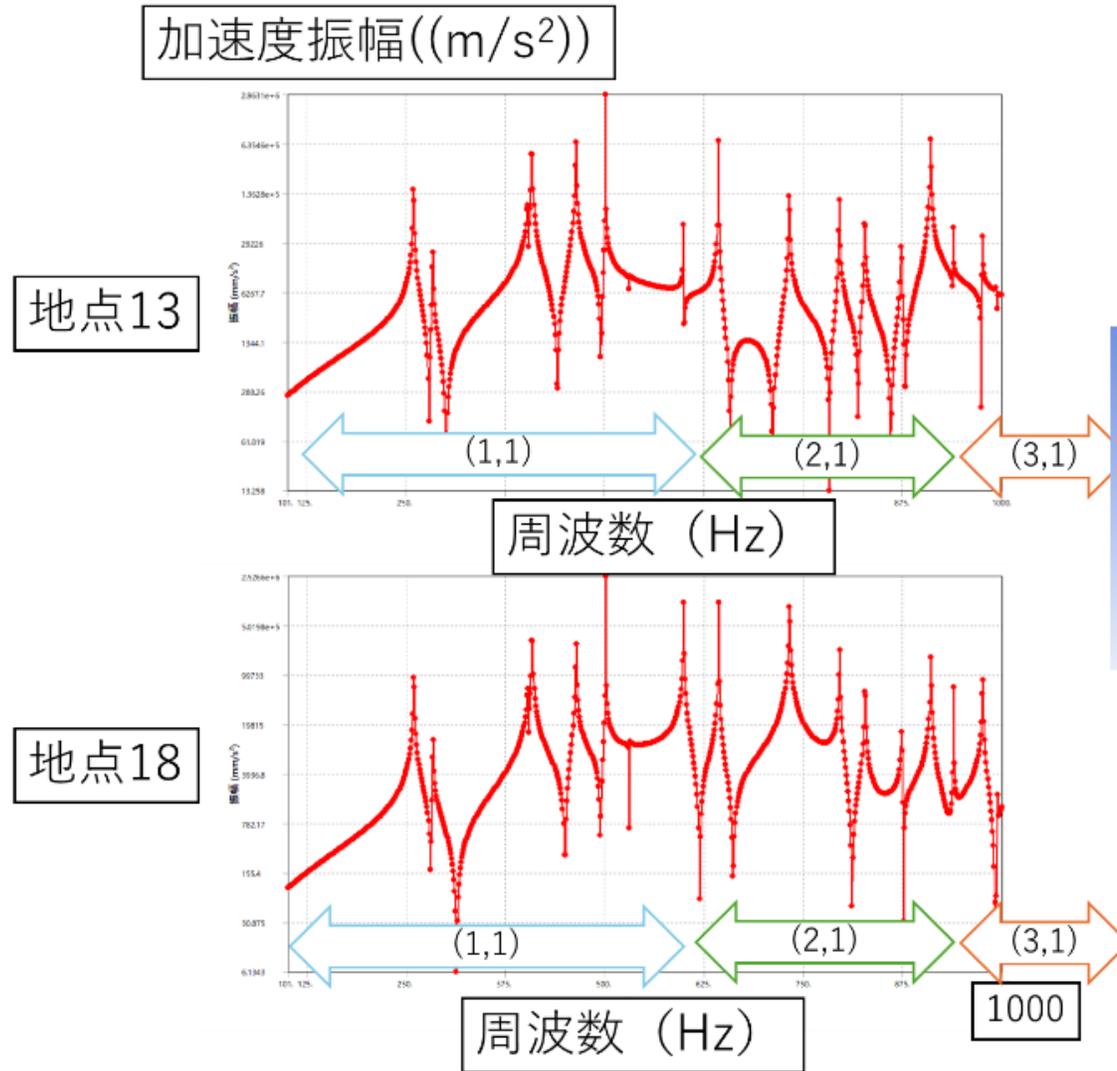
結果③ CAE（箱型・モーダル解析）

次数	周波数	特徴点 1 (P1)		特徴点2(P2)		
	Hz	場所	モード	場所	モード	比率 P2/P1
1	245	側面・裏	(1,1)	側面・表	(1,1)	0.4
2	274	側面・表	(1,1)	側面・裏	(1,1)	0.4
3	396	正面・表	(1,1)	天面	(1,1)	0.7
4	402	正面・表	(1,1)	正面・裏	(1,1)	0.6
5	448	正面・表	(1,1)	側面・表	(1,1)	0.5
6	487	正面・表	(1,1)	正面・裏	(1,1)	0.8
7	512	側面・表	(1,1)	側面・裏	(2,1)	0.8
8	588	側面・表	(2,1)	天面	(2,1)	0.6
9	625	側面・表	四角穴	天面	変則(2,1)	0.4
10	693	側面・表	(2,1)	天面	(2,1)	0.9
11	738	側面・裏	(1,2)	天面	(1,2)	0.5
12	811	正面・表	(2,1)	側面・表	(2,2)	0.6
13	827	側面・裏	変則(3,1)	正面・表	(2,1)	0.5
14	870	正面・表	(2,1)	側面・裏	(2,2)	0.7
15	902	側面・表	(2,2)	正面・表	(2,1)	0.8
16	942	側面・裏	(2,2)	正面・表	(2,1)	0.9
17	963	側面・表	(3,1)	正面・表	変則(2,1)	0.6

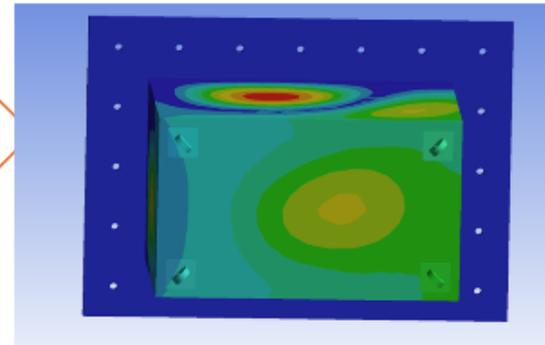


整理すると、実験との照合に役立つ

結果③ CAE（箱型・周波数応答）

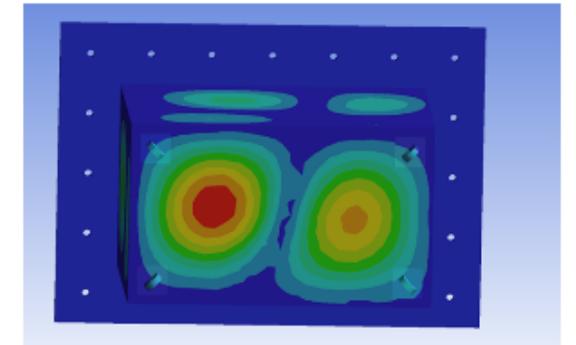


501Hz (1,1)



天面 最大変位 0.4mm

732Hz (2,1)



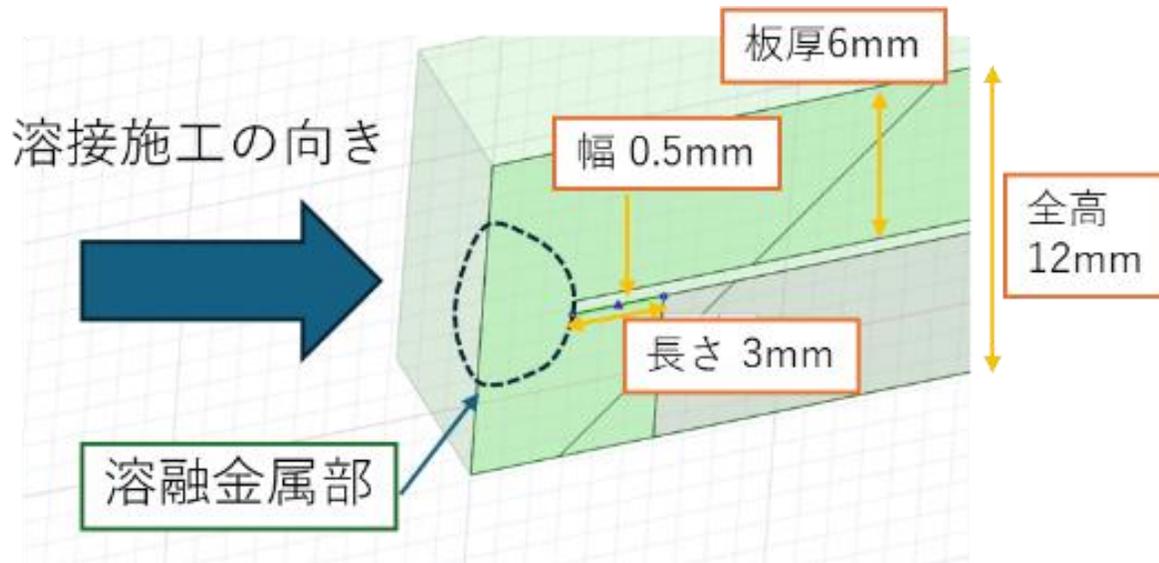
天面 最大変位 0.05mm

実験との照合に役立つ

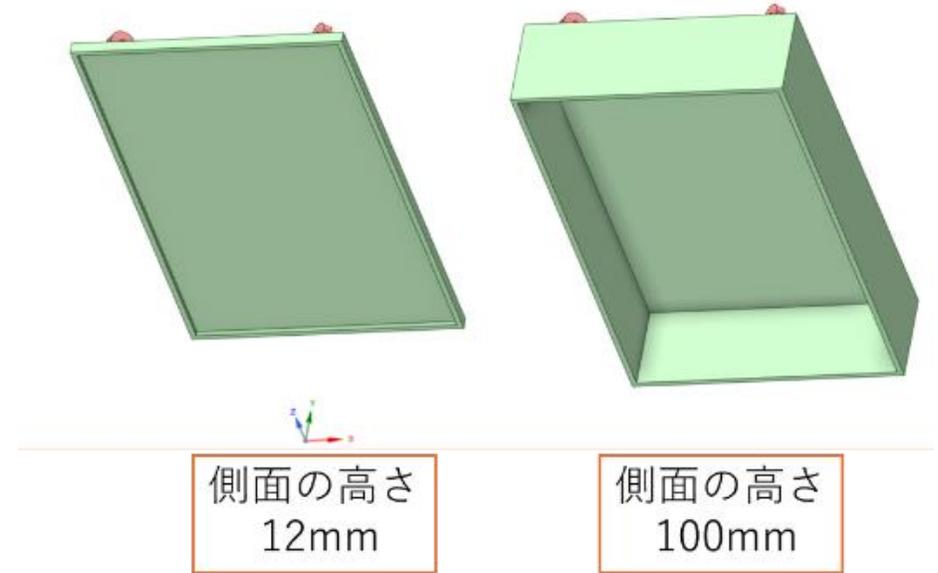
考察（CAEと実験の整合性）

CAEと実験の整合性がいまいち
天面のみに着目

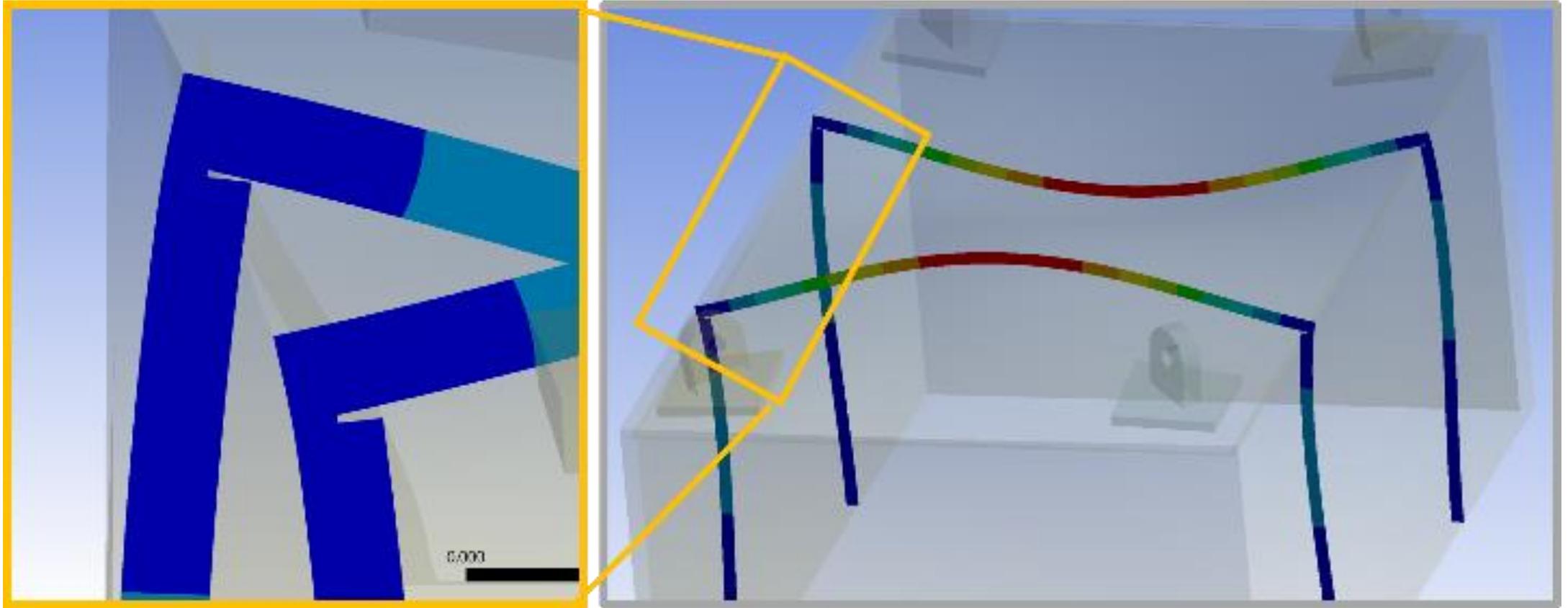
溶接未溶着部を再現



側面の影響を確認



考察（CAEと実験の整合性）



未溶着部の開口・閉口

天面と側面が協調して回転運動する

考察 (CAEと実験の整合性)

次数	CAE				実験			
	旧モデル	溶接部未溶着3mmモデル			振動試験		ハンマリング試験	
	固有周波数	固有周波数	特徴点 1 (P1)		固有周波数	側面・表	固有周波数	天面
	Hz	Hz	場所	モード	Hz	現象/ モード	Hz	モード
1	245	192	側面・裏	(1,1)	191	(1,1)	195	(1,1)
2	274	207	側面・表	(1,1)	203	(1,1)	203	(1,1)
3	396	305	天面	(1,1)	283	変化点	282	(1,1)
4	402	317	正面・表	(1,1)	—	—	—	—
5	—	339	正面・表	(1,1)	—	—	—	—
6	—	373	側面・表	(2,1)	358	変化点	—	—
7	—	392	側面・表	(1,2)	—	—	—	—
8	—	450	側面・表 天面	(2,1)	416	変化点	415	(2,1)
9	—	473	側面・表	(1,2)	—	—	—	—
10	588	516	天面	(2,1)	—	—	486	(2,1)
11	—	538	側面・裏	(1,2)	—	—	—	—
12	—	599	側面・表	(2,2)	—	—	—	—

溶接未溶着部
3mmモデルで

実験とCAEがよい一致

まとめ

- ★ 振動評価の3手法（振動試験、ハンマリング試験、CAE）について基礎的な評価を実施
 - ・ 振動試験により、側面の1次、2次固有周波数と変形モードを特定した。
 - ・ 箱型構造体の天面に対するハンマリング試験により、固有周波数と変形モードを特定した。
 - ・ CAEモーダル解析の結果は全ての部材の全ての方向の結果が混在する。実験との比較を容易にするため、箱型構造を構成する各面の固有値モードで整理する手法を提案する。

- ★ 箱型溶接構造体を対象に、CAEと実験の整合性を調査
 - 溶接部の未溶着部を再現すると、よい一致を示した。

- ★ 今後・・・ 梁構造を対象とする評価、振動耐久性推定、トポロジー最適化を本格化する予定