

2021 年度 博士論文（要約）

ひずみ計測に基づく構造物の形状センシングとその応用
Shape sensing based on strain measurements and its applications

東京大学大学院新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻

小林 真輝人
Makito Kobayashi

概要

SHM (Structural Health Monitoring) は生物における神経のように構造にセンサを設置し、構造の状態を把握するというコンセプトであり、自動制御、疲労推定、安全率の見直しなど構造物の運用・保守・設計のそれぞれのステージへの貢献が期待されている。SHM にとって外力・変形・応力は重要な物理量である。形状センシングは構造物に設置したセンサから、構造物の形状(変形)を推定する技術であり、構造物の全体変形が推定できれば、未計測部の応力を解析する、変形の原因となった外力を推定するといったことが可能になると期待できる。比較的容易に計測可能なひずみを計測し、形状を同定する形状センシングの手法として iFEM (inverse Finite Element Method) と MCF (MultiCore Fiber) 形状センシングがある。本研究は、構造物に設置したセンサの計測量から構造物の状態量を同定し、それをモニタリング・蓄積することによって、データに基づく合理的・効率的な運用・保守・設計を実現し、構造物の安全性・信頼性を高めることに貢献することを目的に、Stiff structure に対する形状センシングとして iFEM, Flexible structure に対する形状センシングとして MCF 形状センシング、形状センシングを起点とした応力解析 (Re-FEM) と荷重推定 (ext-iFEM) の提案および検証を行った。

iFEM を CFRP サンドイッチパネルに適用し、実験的に精度よく形状を推定することに成功した。さらに、有限要素モデル上の距離に基づいたひずみの補間手法を提案し、iFEM と組み合わせることで、海流発電ブレードモデルを対象に変形の複雑さに対して十分な計測点のひずみから精度よく変形を推定することに成功した。

MCF 形状センシングは、システムを構成する計測器・MCF・アルゴリズムのパラメータが複雑に形状センシングの精度に影響する。本研究では Failure Mode and Effects Analysis によって、体系的に失敗モードを分析し、代表的な失敗モードについてシミュレーションと実験で検証した。特に、位置を用いた形状の補正により、形状センシングの精度を向上させることが可能なことを実験的に示した。

形状センシングによって求めた変位を構造物の有限要素モデルに強制変位として与えることで、非計測部の応力集中を解析する Re-FEM の提案と検証を行った。シミュレーション上で、平板モデルで解析した変位を穴あき平板の詳細モデルに与えることによって、円孔部周辺の応力集中を推定することに成功した。さらに、パイプ構造を対象に MCF 形状センシングで推定した

形状から応力分布を再現した.

荷重の方向とグラフフーリエ変換を用いて定義した荷重分布の滑らかさに関する制約を与えることによって, 形状センシングによって求めた変位から荷重を推定する ext-iFEM を提案した. 単純支持平板に複雑さの異なる 4 つの分布荷重を与えた問題について, シミュレーション上で提案手法を適用し, 荷重分布を精度よく推定することに成功した.

本研究全体を通じて, SHM にとって重要な物理量である変位・応力・外力を導出する形状センシングを起点とした SHM システムのコンセプトを示すとともに, それを実現するための基盤技術を提案しその適用性を明らかにした. このシステムは, 運用中の構造物の変位・応力・外力といった物理量をモニタリングすることを可能にし, そこで収集されたデータは, 構造物の運用・保守・設計を効率化・合理化することに貢献する.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	構造物の破壊リスク	1
1.1.2	従来の対策	2
1.1.3	Structural Health Monitoring	3
1.1.4	データ同化と SHM	6
1.1.5	SHM の物理量	6
1.1.6	形状センシング	7
1.2	本研究の目的とスコープ	7
1.3	本論文の構成	8
第 2 章	形状センシング	9
2.1	形状センシング研究の潮流	9
2.1.1	形状センシングの計測量とセンサ	9
2.1.2	形状センシングの対象構造物と変形	10
2.1.3	形状センシングの手法	11
2.1.4	形状センシングのアプリケーション	16
2.2	本研究の位置づけ	18
第 3 章	iFEM を用いた形状センシング	21
3.1	iFEM	21
3.1.1	iFEM の先行研究	22
3.1.2	iFEM の自由度	24
3.1.3	iFEM の誤差	25
3.2	iFEM の定式化	27
3.2.1	有限要素モデルによる離散化	27
3.2.2	最適化問題	29

3.2.3	入力ひずみの補間	30
3.3	シミュレーションによる検証	34
3.3.1	理論解	34
3.3.2	FEM / iFEM	35
3.4	サンドイッチパネルの形状同定実験	38
3.5	海流発電ブレードの形状同定実験	38
3.5.1	実験の背景と目的	38
3.5.2	実験概要	39
3.5.3	数値検証	40
3.5.4	実験的検証	41
3.5.5	海流発電ブレードの形状同定実験のまとめ	48
3.6	社会適用に向けた取り組み	50
3.6.1	社会適用に向けた取り組みの背景と課題	50
3.6.2	Integrated Structural Analysis System	51
3.7	iFEM 形状センシングのまとめ	53
第 4 章	MCF を用いた形状センシング	55
第 5 章	応力解析	57
第 6 章	荷重推定	59
第 7 章	結論と展望	61
7.1	結論	61
7.2	課題と展望	62
謝辞		65
参考文献		67
付録 A	iFEM	73
A.1	iFEM の定式化	73
A.1.1	全体座標系における iQS4 要素の定式化の導出	73
付録 B	MCF	75

目次

1.1	タコマ橋のねじり振動 [1]	2
1.2	MOL COMFORT の破断事故 [2]	2
1.3	応力-強度モデルの不確実性と経年劣化 [3]	2
1.4	人の神経系と SHM を適用した構造物のアナロジー [4]	4
1.5	デジタルツインを航空機構造の寿命予測や構造的健全性の保証に利用する概 念モデル [5]	5
1.6	海洋資源開発のための海上プラットフォーム [6]	6
2.1	Stiff Structure の例 (左) 風力発電ブレード [7] (右) サンドイッチ設計の帆船 [8]	11
2.2	Flexible Structure の例 (左) フレキシブルライザー [9] (右) ROV ケーブル [10]	11
2.3	バルクキャリアモデル [11]. 緑色の要素の X 軸成分を既知とした)	13
2.4	バルクキャリアモデルの変位推定結果 [11]	13
2.5	Lally らの螺旋マルチコアファイバ (A) 断面図 (B) 螺旋配置 (C) 一定曲率下の ひずみ応答 [12]	15
2.6	Lally らの形状センシング (左) 実験室のレンダリング (右) 同定形状 [12] . . .	15
2.7	NASA AFRC の開発するシステムのダイアグラム [13]	16
2.8	Continuous robots[14]	17
3.1	smoothed iFEM の検証の問題設定 [15]	23
3.2	smoothed iFEM の検証検証結果 [15]	23
3.3	iFEM 有限要素のジオメトリ [16]	28
3.4	有限要素モデル (左) とグラフ構造 (右) 緑線がエッジ, 青点がノード	32
3.5	RBF 補間のイメージ	33
3.6	片持ち梁のシミュレーションの問題設定	35
3.7	片持ち梁の有限要素モデル	36
3.8	片持ち梁のたわみの計算結果	37
3.9	片持ち梁のたわみの誤差	37

3.10	(左) 水中浮遊式海流タービンシステムの概念図, (右) かいりゅう [17]	39
3.11	海流発電ブレードのジオメトリ	39
3.12	海流発電ブレードの有限要素モデル (左)FEM, (右)iFEM	40
3.13	海流発電ブレードモデルの数値検証のセンサ配置	41
3.14	数値検証のひずみ補間結果	42
3.15	数値検証の変位推定結果 (センサ配置 1)	42
3.16	数値検証の変位推定結果 (センサ配置 2)	43
3.17	数値検証の変位推定結果 (センサ配置 3)	43
3.18	数値検証の変位推定結果 (センサ配置 4)	44
3.19	ロゼットゲージとマーカーを設置した海流発電ブレード	44
3.20	海流発電ブレードのマーカー配置	45
3.21	海流発電ブレードの荷重条件 (左) 曲げ (1 点荷重), (中央) 曲げ (2 点荷重), (右) 曲げねじり	45
3.22	実験的検証のひずみ補間結果	46
3.23	実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 1)	46
3.24	実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 3)	47
3.25	実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 4)	47
3.26	実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 4)	48
3.27	実験的検証の曲げ (2 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 1)	48
3.28	実験的検証の曲げねじりの変位推定結果 (センサ配置 1)	49
3.29	i-SAS のロゴ	51
3.30	i-SAS のプログラム構成	52
3.31	i-SAS のシステムアーキテクチャ	52
3.32	i-SAS のプロジェクトのシステム構成の例	53

表目次

1.1	ライザーの安全率 [18]	3
1.2	ハルガーダのホイッピング影響に関する部分安全係数 [19]	3
1.3	本研究のスコープ	8
2.1	形状センシングの計測量とセンサ	10
3.1	iFEM の入力ひずみの成分数	25
3.2	片持ち梁のたわみの定量評価	38

第 1 章

序論

本章では, まず本研究の背景について述べ, 次に本研究の目的とスコープを述べる. 最後に本論文の構成について述べる.

1.1 研究背景

1.1.1 構造物の破壊リスク

橋梁やトンネルなどの社会インフラ, 船舶や航空機などの輸送機器, 風力発電機やライザー, パイプラインなどのエネルギー関連設備などの構造物は破壊のリスクを抱えている. 全長数 m から数 km 程度のこれらの構造物は社会基盤として重要な役割を果たしているが, 破壊により重大な被害が発生した事例が世界中に存在している.

1940 年にアメリカで当時の最新理論に基づいて設計されたタコマ橋は, 全長 1600 m の大規模構造物であったが, 完成のわずか 4 か月後, 風による上下振動の調査が行われる最中に落橋事故が発生した [1]. 上下振動がねじれ振動に変化し, 中央スパンから破壊される落橋の様子を様子を撮影した映像が残されている (Fig.1.1). 近年でも落橋事故は発生しており, 2018 年にはイタリアのモランディ橋が落橋し大きな被害をもたらした [20].

1988 年に発生したアロハ航空 243 便事故では, ボーイング 737-200 に高度 24000 フィートで急激な減圧と構造破壊が発生し緊急着陸した. 事故の推定原因は, 重大な剥離と疲労損傷を点検時に発見できなかったことであった [21].

大型コンテナ運搬船「MOL COMFORT」は 2013 年にインド洋沖で, 船体中央部が折損し船体前半分と後半分に分断・漂流ののちに沈没した (Fig.1.2). 船体中央部の船底外板の座屈変形が原因であり, 安全性評価で考慮されていなかった船体の横方向に作用する横荷重によって船体の縦曲げ強度が低下し, 当時の状況において作用荷重が船体強度を上回った可能性があることがわかった [2].



Fig.1.1 タコマ橋のねじり振動 [1]



Fig.1.2 MOL COMFORT の破断事故 [2]

1.1.2 従来の対策

このような構造物の破壊が発生するリスクを低減するために、構造力学や Computer Aided Engineering (CAE) の研究が進められてきた。構造物に生じた応力が構造物の強度を上回ると破壊が生じるとする応力-強度モデルは、構造物の設計に広く活用されている。実際の構造物では、以下が課題となる (Fig.1.3)。

- 構造物に生じる応力や構造物の強度には不確実性が存在する
- 経年劣化によって構造物の強度が低下する

これらの課題それぞれに関して、安全率を設ける・保守を実施するといった対策が行われている。

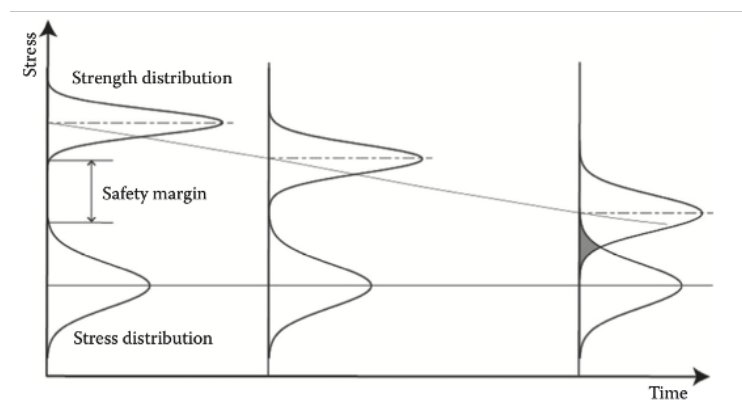


Fig.1.3 応力-強度モデルの不確実性と経年劣化 [3]

安全率は強度と想定最大応力の比で表される。多くの構造では安全率を経験的に定めており、

構造物に過剰な強度を持たせることで安全を保障している。安全率が大きいほど構造の安全性は高まるが、経済性や性能は低下する。そのため、ライザー (Table1.1) やハルガーダ (Table1.2) などの一部の構造では、モニタリングによって、応力や強度の不確実性を低減させることで、要求安全率を下げる基準が設定されている。

Table1.1 ライザーの安全率 [18]

安全率	条件
10	モニタリング不可能 / 安全性や汚染リスクが大きい
3	モニタリング可能 / 安全性や汚染リスクが小さい

Table1.2 ハルガーダのホイッピング影響に関する部分安全係数 [19]

部分安全係数	条件
1.3	HMON(G) に適合していない
1.21	ハルモニタリングにより HMON(G) に適合している

構造物に生じる繰り返し応力が蓄積しやがて破壊に至る疲労破壊が知られている。運用環境が一定でなく、不確実性の高い荷重下にある構造物の寿命を正確に把握することは困難であり、定期的な保守点検により構造物の健全性が評価されている。しかし、メンテナンスコストが課題になっている。特にその運用形態から安全率を大きくすることが難しい航空機では重点的なメンテナンスが実施されており、米国の大手航空会社 10 社の整備業務は、オペレーションコストの 9 % を占めていると報告されている [22]。

1.1.3 Structural Health Monitoring

Structural Health Monitoring (SHM) は生物における神経のように構造物にセンサを設置し、構造物の状態を把握するというコンセプト (Fig.1.4) である。

SHM は橋梁や風力発電などの分野で積極的に活用されてきた。例えば、橋梁のひずみを測定し、蓄積疲労を推定する研究 [23] や、風力発電ブレードの氷結を温度センサで検知し、氷結を検知すると積極的な除氷制御を行う研究 [24] が行われている。

SHM は構造物の運用・保守・設計のそれぞれのステージへの貢献が期待されている。構造物に設置したセンサの計測値や、計測値から構造モデルに基づいて計算した状態量から、以下の運用への貢献が期待できる。

- 異常の即時検知
- より合理的・効率的な運用・意思決定のための情報提供

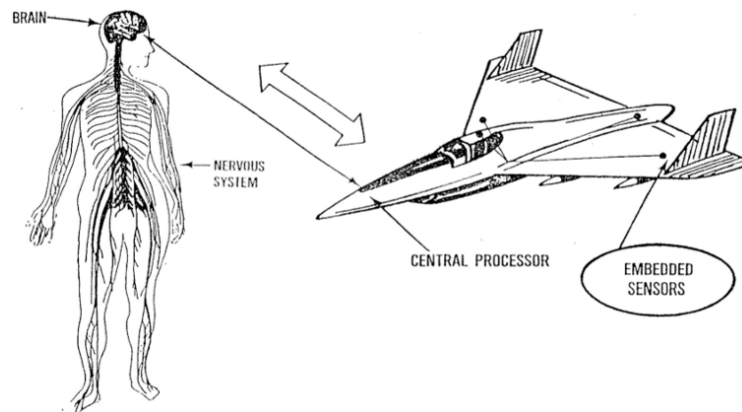


Fig.1.4 人の神経系と SHM を適用した構造物のアナロジー [4]

- 構造物に加わる負荷の小さい制御の実行
- 自動制御

また, 計測値や状態量の短・中期的なデータ蓄積により, 以下の保守への貢献が期待できる.

- 応力履歴を用いた蓄積疲労の推定
- 構造物の状態に応じた合理的なメンテナンスの計画・実施

さらに, 計測値や状態量の長期的なデータ蓄積により, 以下の設計への貢献が期待できる.

- 生産計画の最適化
- 外力の不確実性低減
- 安全率の合理的見直し
- 画一的な基準に従った設計からの脱却

デジタルツイン

SHM と深く関連する概念として, デジタル空間上に構造物の「双子」を作り出すデジタルツインの開発が世界的に進められている. デジタルツインは, 物理世界に存在する製品や構造物のモデルをシミュレーションで作成し, 計測した情報に基づいてモデルを更新することによって, シミュレーション空間上に物理世界と同期したモデルを作成する.

デジタルツインは航空機業界で開発が進められ, Tuegel ら [5] は, デジタルツインを航空機構造の寿命予測や構造的健全性の保証に利用する概念モデルを示した (Fig.1.5). 航空機のデジタルツインモデルは, シミュレーション上で仮想的なフライトを経験し, 寿命や信頼性の評価に活用される. 一方で, 実際のフライトで計測された構造に関する様々な情報に基づいてモデルが更新され, 更新されたモデルが以降の評価に活用される. デジタルツインを実現するためには,

各々の解析手法の高精度化とともに、多種多様な解析手法の統合が必要不可欠であり、それらの開発を効率的に進めるためにプラットフォームの構築が重要である。

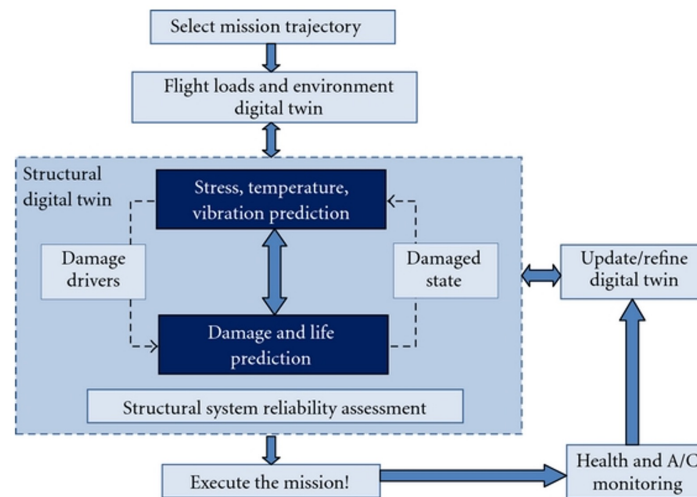


Fig.1.5 デジタルツインを航空機構造の寿命予測や構造的健全性の保証に利用する概念モデル [5]

船舶業界では 2018 年から 2020 年の 2 年間で海事産業関係者のコンソーシアムによって、Open Simulation Platform(OSP) が共同開発された [25]. OSP は複雑な統合システムの設計, 試運転, 運用, 保証のためのソリューションを仮想的に探索することができる, 協調的なデジタルツインシミュレーションのためのエコシステムというコンセプトである. Function Mockup Unit (FMU) に基づいて開発されたモデルを接続した, 大規模なシミュレーションが可能であり, 現在も OSP を活用したエコシステム構築のための取り組みが実施されている. しかし, 有限要素解析のような大量のデータを扱うことを想定して設計されていない.

海洋構造物の SHM

線状構造物は, 電力・信号, 流体, 荷重などを効率的に伝達可能な構造要素であり, 海洋構造物においてライザーや係留索, 漁業における網やロープとして広く利用されている (Fig.1.6). 線状構造物の破壊による, パイプラインの漏洩事故 [26] や ROV の紛失事故 [10] が発生しており, 海洋構造物で使用される線状構造物を対象に SHM の適用が研究されている. 例えば, パイプラインに周方向に光ファイバセンサを設置し, 腐食・漏洩を検出する研究 [27] や, フレキシブルライザーに長手方向に光ファイバセンサを設置しガスキックをモニタリングする研究 [28] が実施されている.

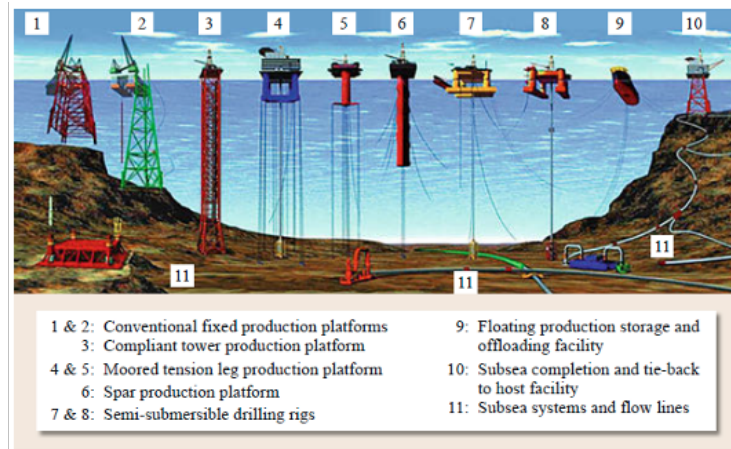


Fig.1.6 海洋資源開発のための海上プラットフォーム [6]

1.1.4 データ同化と SHM

予測を行う科学的アプローチには、計測データに基づく推定のような帰納的アプローチと、シミュレーションのような演繹的アプローチが存在し、それぞれ強み・弱みが存在する。これらのアプローチを融合しそれぞれのアプローチを補い合うことによって、より精度の高い予測を行う技術をデータ同化という。構造物にセンサを設置し構造物の状態を把握する SHM は帰納的なアプローチであるが、データ同化によって演繹的な手法と組み合わせることによって、構造物の状態をより精度高く把握することが可能になると期待できる。本研究で扱う形状センシングと有限要素法による逐次データ同化によって、水中線状構造体の挙動を推定した研究 [29] が存在する。

1.1.5 SHM の物理量

SHM にとって、外力・変形・応力は非常に重要な物理量である。外力のモニタリングは、構造物を取り巻く環境から与えられる外力の不確実性を低減することによる合理的な設計や、推進力や揚力を直接モニタリングすることによるフィードバック制御を可能にする。変形のモニタリングによって、固定点と変形から構造物の固定点に対する相対的な位置を連続的に推定できる。応力は構造物の破壊の直接的な原因となる物理量であり、強度に対する応力のモニタリングによる構造物を合理的に運用することや、応力の履歴から蓄積疲労を推定し、保守・運用計画に役立てることが可能になる。しかし、外力・変形・応力を構造全体で直接計測することは困難である。

ところで、構造物の状態料である外力・変形・ひずみ・応力には、構造を取り巻く環境から外力を受けて変形し、相対的な変形量であるひずみが発生、外力に抵抗するため内力 (応力) が

発生するという力学的な因果関係が存在する。ひずみは、ひずみゲージや光ファイバセンサによって、比較的容易に計測可能であり、ひずみを構造全体で計測することにより、力学的因果化関係を順または逆にたどることにより、以下の手順によって構造全体に渡って、外力・変形・応力といった物理量を推定することができると期待できる。

1. ひずみゲージや光ファイバセンサによって構造の部分的なひずみを計測する
2. 形状センシング技術によって構造全体の変形を推定する
3. 推定した構造全体の変形に基づいて未計測部の応力や構造に加わる外力を推定する

1.1.6 形状センシング

ひずみ計測に基づく形状センシング技術として、異なる特性をもつ2つの手法、inverse Finite Element Method (iFEM) と Multi-core fiber (MCF) 形状センシングが存在する。

iFEM[30] は、有限要素モデルを用いて構造を離散化し、最小二乗法によって構造物に設置したセンサの計測ひずみから変位を導出する手法である。事前実験が必要なく、線形構造に対してロバストに適用可能であり、構造物のひずみを直接計測し活用できる。

MCF 形状センシング [12] は、MCF の各コアのひずみを計測し MCF 構造の線形性を利用して積分することで MCF 自体の形状を導出し、MCF を形状センサとする技術である。形状センサとした MCF を構造物に沿わせることにより、非線形性を持つフレキシブルな構造に適用可能である。

1.2 本研究の目的とスコープ

本研究の目的は、構造物に設置したセンサの計測量から構造物の状態量を同定し、それをモニタリング・蓄積することによって、データに基づく合理的・効率的な運用・保守・設計を実現し、構造物の安全性・信頼性を高めることに貢献することである。

本研究では、以下の手法の提案および検証を行い、広範な構造物を対象に変形・外力・応力の同定を可能にすることを目標とする。

1. iFEM を用いて、構造物に設置したセンサの計測ひずみから構造物の全体変形を推定する
2. MCF 形状センシングを用いて、MCF の各コアの計測ひずみから MCF の形状を推定し、大変形する線状構造体の変形を推定する
3. 推定した変形を有限要素モデルに強制変位として与えることで、詳細な応力の解析を行う (Re-FEM)
4. 推定した変形を用いて適切な制約の下で剛性方程式を解くことで、荷重を推定する

(ext-iFEM)

本研究では, 本研究で提案する形状センシングを起点とした SHM・デジタルツインを幅広い構造を対象に適用するため, iFEM と MCF 形状センシングの 2 つの形状センシングのアプローチを研究する. また, 形状センシングのアプリケーションとして, SHM にとって直接的に最も重要な物理量の 1 つである応力の解析と, 構造を取り巻く環境の情報を含み構造の制御に資する外力の推定を扱う. ただし, 材料非線形を持つ構造の応力解析と荷重推定, 大変形する構造の荷重推定については今後の課題とする (Table1.3).

Table1.3 本研究のスコープ

構造の分類	形状センシング	応力解析	荷重推定
線形構造	iFEM	Re-FEM	ext-iFEM
非線形構造 (大変形)	MCF 形状センシング	Re-FEM	Future work
非線形構造 (材料非線形)	MCF 形状センシング	Future work	Future work

1.3 本論文の構成

本論文は本章を含め, 7 つの章と 2 つの付録からなる.

第 1 章では, 構造物の破壊のリスクから始まる本研究の背景について述べ, 本研究の目的とスコープ及び本論文の構成を説明した.

第 2 章では, 本研究の中心的なトピックである形状センシングの研究についてまとめ, 本研究の位置づけを整理する.

第 3 章では, 形状センシング技術の 1 つである iFEM の手法と検証について記す.

第 4 章では, 形状センシング技術の 1 つである MCF 形状センシングの手法と検証について記す.

第 5 章では, 構造物の推定した形状に基づいた応力解析について記す.

第 6 章では, 構造物の推定した形状に基づいた荷重推定について記す.

第 7 章では, 本研究の結論と今後の展望に関して述べる.

付録 A と付録 B では, それぞれ iFEM と MCF 形状センシングについて, 補足的な情報を記す.

第 2 章

形状センシング

本章では, 本研究の中心的なトピックである形状センシングの研究の潮流について述べる. 次に, それを踏まえた本研究の位置づけを述べる.

2.1 形状センシング研究の潮流

形状センシングには, 以下のような軸が存在する.

1. 計測量・センサ
2. 対象構造物・変形
3. 手法
4. アプリケーション

本節では, それぞれの軸に基づいて, 形状センシングの特徴を先行研究を交えながら整理する.

2.1.1 形状センシングの計測量とセンサ

形状センシングで計測される物理量とセンサを Table2.1 にまとめる.

形状センシングを行うために計測する物理量として, 変位 (座標)・加速度・ひずみを活用した研究が存在する. 主に橋梁のたわみ計測で, さまざまなセンサーを活用した形状センシングの研究が実施されてきた.

構造物の点や線, 面の変位 (座標) を直接計測することができれば, 構造物の変形を比較的簡単に推定することができる. 変位 (座標) を計測するセンサとしては, レーザードップラー流速計 (LDV), 作動変圧器 [31], トータルステーション, GPS[32], カメラ (Image Sensing) [33] などを使用した研究が存在するが, いずれも固定点が必要であったり, 使用可能な場所が制限される

Table2.1 形状センシングの計測量とセンサ

センサ	計測量	備考
LDV	変位 (座標)	基準点が必要
差動変圧器	変位 (座標)	基準点が必要
トータルステーション	変位 (座標)	基準点が必要
GPS	変位 (座標)	使用可能な場所が制限される
カメラ (Image Sensing)	変位 (座標)	基準点が必要
加速度センサ	加速度	時間方向の積分で誤差が蓄積する
ひずみゲージ	ひずみ	
光ファイバセンサ	ひずみ	分布計測可能

といった制約が存在する。

変位の時間による微分量である加速度を用いて形状センシングを行った研究 [34] が存在する。加速度センサは直接変位を計測するセンサと比較して、設置や使用場所に関する制約はないものの、時間方向の積分によって誤差が蓄積するという課題が存在し、加速度センサ単独での形状センシングは精度面で課題が残る。

変位の空間による微分量であるひずみは、ひずみゲージや光ファイバセンサによって比較的簡単に計測可能である。また、これらのセンサは加速度センサと同様に設置や使用場所に関する制約がなく、構造物の存在する空間は限定的であるため空間方向の積分による誤差の蓄積は時間方向の積分と比較して、大きくなりにくい。このような背景から、適用範囲が広いひずみゲージや光ファイバセンサによって計測したひずみを入力とした形状センシングが広く研究されており、以降ではひずみを入力とした形状センシングについて述べる。

2.1.2 形状センシングの対象構造物と変形

形状センシングの対象となる構造物の種類によって、ひずみを入力とした形状センシングの研究を分類できる。一つが橋梁や翼・船舶のような Stiff structure (Fig.2.1) を対象にした形状センシングであり、もう一つがケーブルやフレキシブルライザーのような Flexible structure (Fig.2.2) を対象にした形状センシングである。

Stiff structure を対象とした形状センシングでは、構造物の力学的特性を利用してひずみと変形の間を構築することが多く、ひずみと変位の間の線形性が成り立つ微小ひずみ・微小変形または微小ひずみ・大変形が対象となる。

一方で、Flexible structure を対象にした形状センシングは、構造には大きなひずみが発生するため、ひずみと変位の間の関係が非線形となり扱いにくく、ひずみの計測自体も困難になる。そ

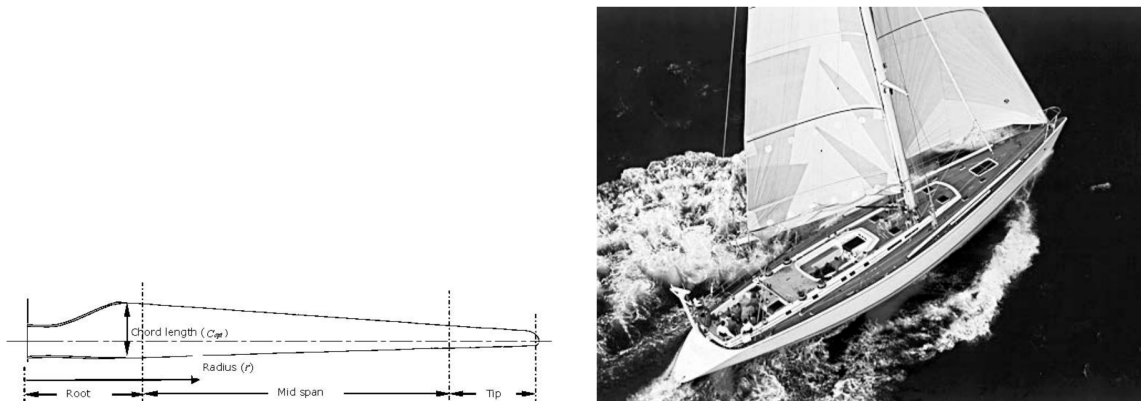


Fig.2.1 Stiff Structure の例 (左) 風力発電ブレード [7] (右) サンドイッチ設計の帆船 [8]

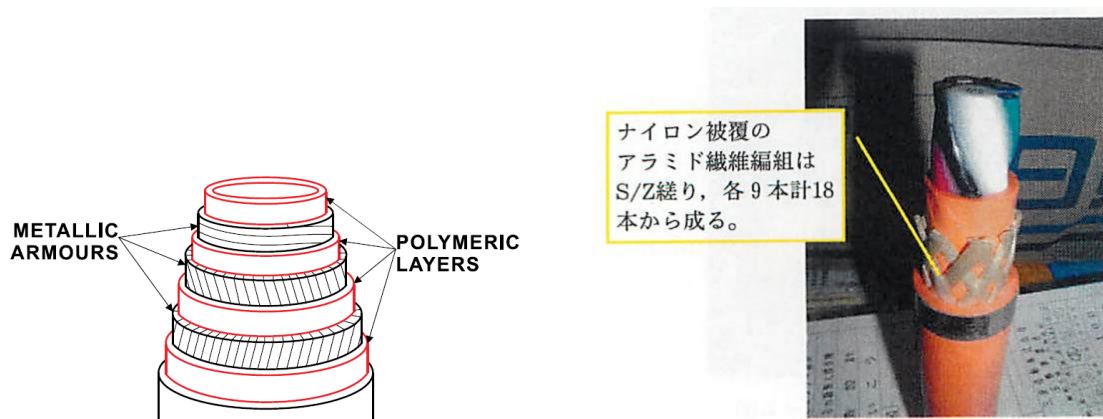


Fig.2.2 Flexible Structure の例 (左) フレキシブルライザー [9] (右) ROV ケーブル [10]

ここで、センシングしたい構造とは独立した、線形性の成り立ちかつ Flexible structure の変形に追従可能な構造である細径の MCF を形状センサとして、Flexible structure に沿わせることにより、Flexible structure の形状を間接的にセンシングするアプローチが有効である。

2.1.3 形状センシングの手法

前述したように、形状センシングのアプローチは Stiff structure を対象にした場合と、Flexible structure を対象にする場合で大きく異なる。そこで、それぞれの構造ごとに形状センシングの手法を先行研究を交えて整理する。

Stiff structure を対象にした形状センシング手法

Stiff structure を対象にした形状センシング手法は、梁や板に関する初等曲げ理論に基づく手法 [35, 36, 37, 38, 39]、モーダル解析を用いた手法、iFEM を用いた手法が研究されている。

初等曲げ理論に基づく形状センシングの研究では、梁に設置したひずみゲージなどで計測し

た部分的なひずみを使い、ひずみや曲率の分布を同定し、初等曲げ理論に基づいて積分し変位を計算する。Kirby ら [35] と Jones ら [40] はひずみ分布の関数を多項式近似し、Kim ら [36] は回帰分析によって計測ひずみと曲率の間の関数を推定した。また、Ko ら [37] は、弱い非線形片持梁のために定式化された Ko 変位理論を用いて、多項式を区分的に決定することにより、翼の曲げ変形とねじり変形を同定し、高い精度でのたわみ同定に成功した。光ファイバセンサはひずみゲージと比較し多点での計測（準分布計測、分布計測）が可能であり、光ファイバセンサを使用することにより、より多くのひずみを入力とした定式化が可能になる。Derkevorkian ら [38] は、光ファイバセンサによって準分布的に計測した翼形状のひずみから変形を同定し、梁理論に基づく手法と後述するモーダル解析を用いる手法を比較した。Pena[39] らは、翼を対象に光ファイバセンサで分布的にひずみを計測し、梁理論に基づいてたわみを計算した。さらに、適応制御によって飛行中のたわみを小さくするような制御を行う手法を実験的に検証した。初等曲げ理論に基づいたこれらの手法は、単純なジオメトリや境界条件に対しては、少ないセンサ点から精度よく形状をセンシングでき、リアルタイム性に優れているものの、複雑なジオメトリや境界条件に対しては、適用が難しく精度が低下するという課題が存在する。

モーダル解析を用いた手法では、ひずみモードと変形モードの関係を事前の実験やシミュレーションによってあらかじめ求めることによって、未知の変形時に計測されたひずみから形状を同定する。Kang[41] らは梁を対象に、Rapp らは [42] 平板を対象に、事前実験に基づいたモーダル解析を用いて部分的な計測ひずみから構造全体の変形を同定した。一方で、Boggert ら [43] は、有限要素法と組み合わせシミュレーション上でモーダルマトリックスを求める手法を提案し、実験的な検証でシミュレーションとよく一致する結果を得た。モーダル解析を用いたこれらの手法は、構造ごとの事前の実験やシミュレーションによって、モーダル解析に必要なマトリックスを事前に計算する必要があるという適用上の課題を抱えている。また、複雑な変形を同定するためには多くのセンサ点が必要であり、計算コストが大きくなる。

iFEM は、Tessler と Spangler[30] によって SHM に適用された手法である。構造を有限要素モデルによって離散化し、ひずみと変位の関係式を定義し、重み付き最小二乗法によって計測ひずみと、変位から計算されるひずみの差を最小化することにより、構造物の部分的な計測ひずみからロバストに構造物全体の変位を計算できる。初等曲げ理論に基づいた手法と比較して複雑なジオメトリや境界条件に対して適用可能であり、モーダル解析と比較して事前実験が不要なく構造のジオメトリと変位の境界条件が分かっている点で有利である。また、構造特有のマトリックスを事前に計算しておくことにより、リアルタイムなアプリケーションへの適用に十分な速度で計算可能である。iFEM を梁や平板の問題に適用した研究では、Gherlone[44] らは、Timoshenko 梁理論を用いたビーム要素を用いた iFEM の信頼性を実験で検証した。また、Kefal ら [45] は、逆解析の安定性を向上させた iFEM のための四角形要素を提案し、平板を対象にその適用性を検証した。さらに、複雑なジオメトリをもつモデルに対して適用した研究も存在し、ケミカルタンカー [46] やバルクキャリア [11] のモデル (Fig.2.3) に

対して、シミュレーション上で部分的なひずみから構造全体の変形を精度よく同定することに成功している (Fig.2.4).

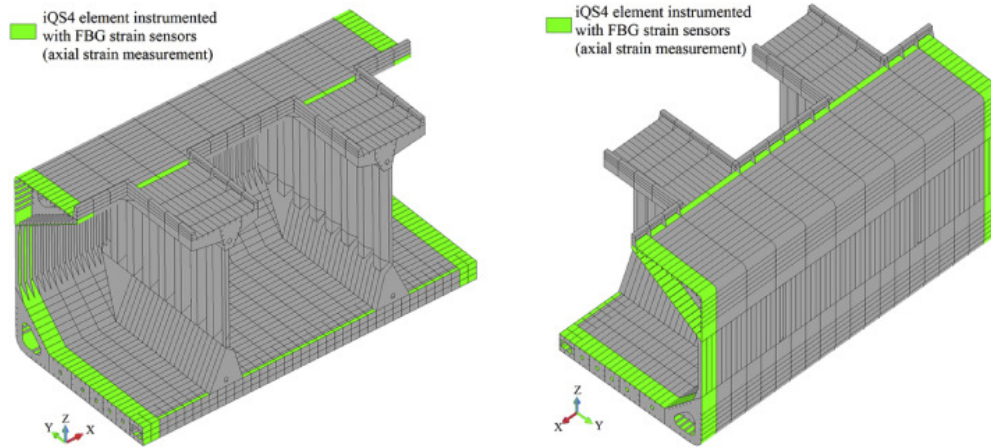


Fig.2.3 バルクキャリアモデル [11]. 緑色の要素の X 軸成分を既知とした)

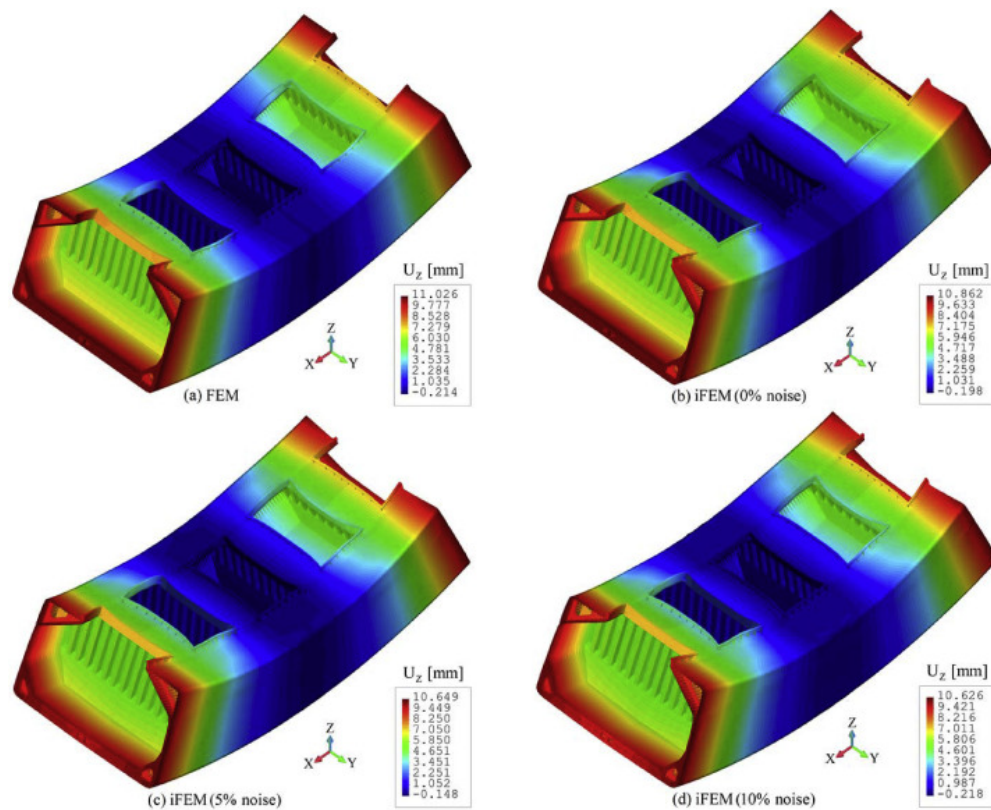


Fig.2.4 バルクキャリアモデルの変位推定結果 [11]

本節では、iFEM の対象とする構造物は Stiff structure であり、微小ひずみを前提とすると述べたが、iFEM を大ひずみへ適用可能なように拡張する研究も存在する。Paczkowski と Riggs[47]

は, Green-Lagrange ひずみを用いて, total Lagrangian に基づいた定式化を行い iFEM と同様に最小二乗法を適用し, Newton-Raphson 法を用いて最小化することで, iFEM を大ひずみ大変形の問題に拡張した. シミュレーション上で, 梁と平板の問題について, 変位場の復元に成功したが, 実用に向けて要素の開発や実験ひずみの活用といった課題が残っている. また, モニタリングシステムとしての活用は, 計算速度が課題になると考えられ, 本研究では, Flexible structure に対する形状センシング手法として, 後述する MCF 形状センシングを検討する.

Flexible structure を対象にした形状センシング手法

Flexible structure を対象にした形状センシング手法は, 本研究で扱う MCF 形状センシングを用いた手法が中心的である.

MCF 形状センシングの先行研究では, 様々な構成の MCF や計測技術, 手法による形状センシングが研究されてきた. Ducan ら [48] は, 3 コアの MCF に Fiber Bragg Grating (FBG) を形成し, Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) で分布計測することによって, 2 次元と 3 次元の形状センシングを行った. さらに, レーリー散乱光を利用した OFDR による計測結果と比較し, センサ密度を大きくすることによって, 形状センシングの精度が向上すること示した [49]. Barrera ら [50] は, 4 コアの MCF に FBG を形成し, 初等梁理論と幾何学的な考察に基づいて 2 次元の曲率を求める独自の定式化を行った.

MCF は細径であるため線形材料でありながら柔軟な変形が可能であるが, ねじれやすいという特徴が存在する. MCF のねじれは, 形状センシングにとって大きな課題となる. 形状センシングでは, MCF のコアの位置関係に基づいて, MCF の曲げ方向を決定するため, MCF がねじれると推定される曲げ方向と実際の曲げ方向が乖離し, 推定形状に大きな誤差が生じるためである. この MCF のねじれの課題に対して, MCF のねじれを計測するというアプローチをとったのが, Lally ら [12] である. 彼らは MCF の外周上のゴアにピッチを加え螺旋状に配置する (Fig.2.5) ことによって, 外周上のコアにねじりに対する感度を持たせ, MCF のねじりを分布的に計測することによって, ねじれを補正して MCF の形状をセンシングした. さらに OFDR でレーリー散乱光の位相を計測し, ひずみではなく伸びを計測することで, 高い精度でリアルタイム 3 次元形状センシングを行うことに成功した (Fig.2.6)

しかし, 螺旋状にコアを配置する手法は以下のような課題を抱えており, MCF 形状センシングが実用に至った例はまだ報告されていない.

- ねじれに対する感度が低いと S/N 比が悪化するため, スピンレートをある程度大きくした上で, 高精度・高空間分解のひずみ計測が要求される
- 正確なピッチでコアを螺旋状に配置することは製造上困難であり, ピッチのキャリブレーションが容易ではない
- 長距離計測が可能な計測器は空間分解能が大きくひずみの計測精度が低いため, 螺旋配

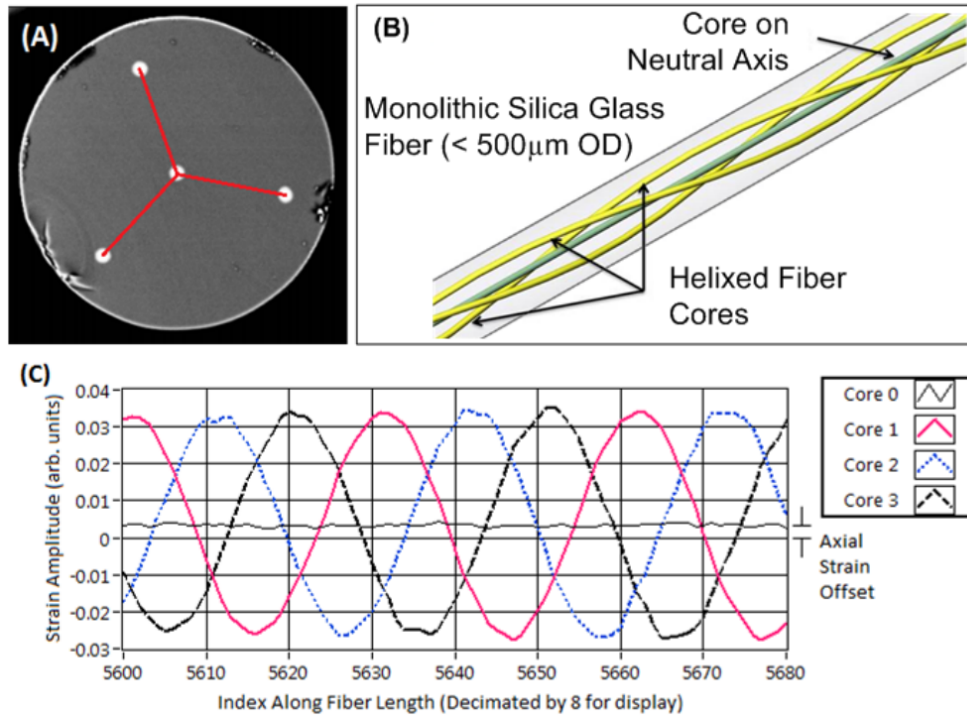


Fig.2.5 Lally らの螺旋マルチコアファイバ (A) 断面図 (B) 螺旋配置 (C) 一定曲率下のひずみ応答 [12]

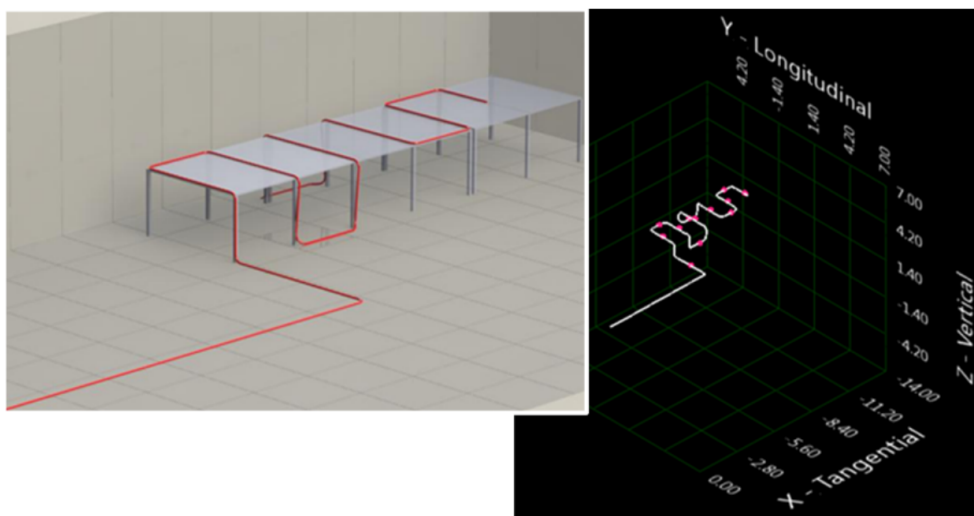


Fig.2.6 Lally らの形状センシング (左) 実験室のレンダリング (右) 同定形状 [12]

置したコアの計測に不適である

2.1.4 形状センシングのアプリケーション

形状センシングは、広範な構造物を対象に、構造物の形状を推定する技術であり、その活用法は多岐にわたる。Stiff structure, Flexible structure それぞれについて、形状センシングのアプリケーションに関する研究を整理する。

Stiff structure を対象にした形状センシングのアプリケーション

形状センシングの代表的な活用例として、構造物の健全性の監視が挙げられる。風力発電ブレードは発電効率の向上のため、大型化が進んでおり、ブレードに大きなたわみが発生すると、タワーと衝突して損傷する事故が発生する可能性がある。Lee ら [51] は、ブレードに設置した光ファイバセンサで計測したひずみからブレードのたわみを監視するシステムを開発した。

形状センシングの構造物の制御への活用も研究されている。構造物の変形が小さくなるような制御をすることにより、構造物に加わる負担を軽減することが可能になる。Pak[13] は、翼に設置した光ファイバセンサで計測したひずみを光ファイバセンサにそって積分し、光ファイバセンサの経路上のたわみを求め、有限要素法と結合させることにより、構造物全体のたわみを求める手法を提案した。この研究は NASA Armstrong Flight Research Center (AFRC) らの開発するシステムのダイアグラム (Fig.2.7) 中のモジュールの開発を目的としており、求めた形状は最終的にフライトコントロールに活用されることを想定している。

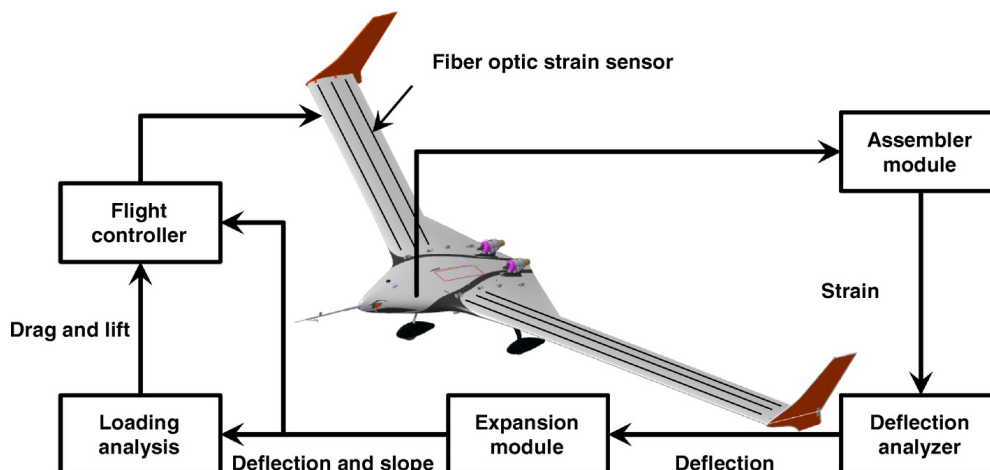


Fig.2.7 NASA AFRC の開発するシステムのダイアグラム [13]

Flexible structure を対象にした形状センシングのアプリケーション

Flexible structure を対象にした形状センシングは医療分野でのアプリケーションが注目されている。生検針やカテーテル・内視鏡を人体に挿入する医療行為では、挿入中の器具の形状を目視で確認することができず、計画された軌道からの逸脱は、位置決めエラーや処置上の合併症の原因となる。挿入中のこれらの医療器具の形状をリアルタイムでセンシングすることによって、計画された軌道と合致した挿入処置をサポートすることが期待できる。Park ら [52] は、2 か所に FBG が形成された複数の光ファイバを MCF のように束ねた生検針を開発し、生検針の全体形状が二次関数で表されることを仮定して、生検針が組織に挿入されときの曲げたわみを同定した。最近の研究では、Philips が MCF 形状センシングを活用した体内のデバイスの全容をリアルタイムに 3D で可視化する技術 Fiber Optic RealShape (FORS) の開発が進められている [53]。

光ファイバセンサを始めとするひずみセンサは、構造に発生した機械的なひずみだけでなく、温度変化によって発生するひずみも計測の対象となる。また、計測の際の変換係数は、温度によって変化する可能性がある。そのため、温度変化のある環境下で形状センシングを行う場合は、機械的なひずみと温度変化によるひずみを分離するための温度補償が必要になる。Lee ら [54] はコアレス光ファイバセンサに、フェムト秒レーザーを照射し 9 個の FBG を形成することで、温度補償形状センサを開発し、温度と形状の同時計測を行った。

また、Continuous robots (Fig.2.8) の制御においては、自己形状の推定が非常に重要な課題であり、将来的な MCF 形状センシングのアプリケーションとして期待されている [55]。

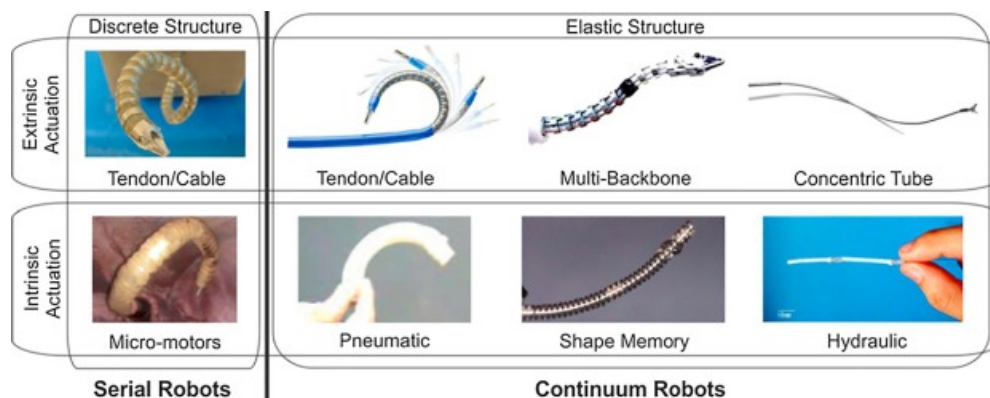


Fig.2.8 Continuous robots[14]

2.2 本研究の位置づけ

前節で紹介した形状センシングに関する先行研究と比較して、本研究で取り組む形状センシングは以下の特徴を有する。

- 比較的容易に計測可能で適用範囲の広いひずみを入力とする
- Stiff structure を対象に、事前実験が必要なく幅広いジオメトリ・境界条件に適用可能な iFEM を検証する
- Flexible structure を対象に、MCF をセンシング対象の構造に沿わせて形状を計測する MCF 形状センシングを検証する
- 形状センシングのアプリケーションとして、構造物の健全性評価に最も重要な応力解析と、構造物を取り巻く環境の情報をセンシングすることができ構造の制御に資する外力推定を検証する

Stiff structure を対象にした iFEM に関する研究では、補間と iFEM を組み合わせた形状同定手法を提案し、実験とシミュレーションでサンドイッチパネルと海流発電ブレードモデルを対象に提案手法の適用性を検証する。本研究で提案する有限要素モデル上の距離に基づいた補間手法は、センサ点の少ない複雑な構造に対しても適用可能であり、iFEM と組み合わせることにより、より限定された構造物の部分的なひずみから、精度よく構造全体の変位を推定することを可能にする。さらに、iFEM を社会実装するためのプラットフォーム構築について、コンセプトと設計を示す。

Flexible structure を対象にした MCF 形状センシングに関する研究では、MCF 形状センシングを独自に汎用的に定式化した。多くの誤差要因が存在する MCF 形状センシングについて、効率的な検証を実施するためシミュレーターを開発し、MCF 形状センシングの精度向上のため、Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) で体系的に誤差要因を評価し、代表的な誤差要因について、シミュレーションと実験で検証した。特に、MCF 形状センシングにとって不可避である誤差の蓄積の課題に対し、位置を用いた補正手法を提案し、その有効性を実験的に示すことに成功した。

さらに、形状センシングによって求めた形状を利用して、構造物の応力を解析する手法 (Re-FEM) と、構造物に加わった外力を推定する手法 (ext-iFEM) を提案し、シミュレーション上でその適用性を検証することによって、形状センシングを起点とする SHM のための基盤技術を提案・検証した。

以上のように、本研究は広範な構造物を対象にした形状センシングおよびその応用について手法の開発・適用性の検証を実施することにより、本研究の目指す、「データに基づく合理的・効率的な運用・保守・設計の実現と、構造物の安全性・信頼性の向上」を実現するための SHM

のコンセプトを示すとともに, 核となる技術基盤を構築した.

第 3 章

iFEM を用いた形状センシング

本章では Stiff structure を対象にした, iFEM を用いた形状センシング手法について述べる.

まず, 最新の iFEM の研究について紹介し本研究の特徴を述べる. さらに, iFEM の次元や iFEM で発生する誤差について論じる.

次に, iFEM の定式化を詳細に述べる. 合わせて, 計測ひずみから iFEM の入力ひずみを計算するために使用する平板構造とより一般的な構造に対するひずみの補間手法について提案する. 後者のより一般的な構造に対するひずみの補間手法は, 有限要素モデル上の距離に基づく補間手法であり, 本研究独自に開発した手法である.

本研究で使用する iFEM によって確からしく変位が計算可能であることを, 理論解の求まる片持ち梁のたわみを同定する問題で検証し, iFEM によって生じる誤差について検証した. さらに, CFRP サンドイッチパネルと翼構造を対象にひずみの補間と iFEM を組み合わせた形状センシング手法を検証した.

最後に, 本研究で提案した iFEM を用いた形状センシング手法を社会実装するための取り組みとして, integrated Structural Analysis System (i-SAS) のコンセプトを述べる.

3.1 iFEM

iFEM は有限要素法の逆問題を解く手法であり, 構造物を有限要素モデルで離散化し, 要素ひずみと節点変位の関係式に基づいて, 計測ひずみと節点変位から求まる要素ひずみの差を最小化する最適化問題を立式し, 変位の境界条件に注意して最小二乗法で解くことにより, 計測ひずみから節点変位を導出する手法である. 本節では, iFEM に関する先行研究について述べ, iFEM の自由度と iFEM の誤差について整理する.

3.1.1 iFEM の先行研究

iFEM は Tessler と Spangler[30] によって SHM に適用された手法であり, Stiff Structure に対する他のひずみ計測に基づいた形状センシング手法と比較して, 以下の様な利点がある.

- 複雑なジオメトリを持つ構造に適用可能
- 複雑な境界条件に適用可能
- 事前実験が不要
- 構造の材料情報を必要としない
- 入力ノイズに対する頑健性が高い
- リアルタイム計算が可能

iFEM は Finite Element Method (FEM) のポストプロセスの逆問題を解く手法である. FEM では, 連続体である構造を節点と要素からなる有限要素モデルによって離散化し, 変位拘束と材料情報を所与として, 剛性方程式を解くことで, 節点荷重から節点変位を求める. 次に, ポストプロセスで, 節点変位から要素ひずみ, 要素応力を計算する. 一方 iFEM では, 有限要素モデルを用いて, 変位拘束を所与として要素ひずみから節点変位を求める. Tessler と Spangler は三角形要素を用いて, 梁の問題で手法の有効性を示した.

Kefal ら [45] は, iFEM のための四辺形要素 iQS4 要素を開発し, 平板の問題への適用性を検証した. 彼らは, 重みづけ最小二乗法によって非計測部の重みを極端に小さくすることによって, 部分的な計測ひずみから, 平板全体の変位を同定できることをシミュレーションで示した. さらに, 同様の手法をケミカルタンカー [46] やバルクキャリア [11] のモデルに適用した. 十文字 [56]・三上 [57] は, 船舶モデルを対象に iFEM をシミュレーションで検証し, それぞれひずみの重みづけ・補間によって模型船モデルの全体変形を推定した.

最近の研究では, 重みづけではなく, ひずみを事前に補間することによって, より少ないセンサ点から効率的に iFEM を適用する手法が研究されている. Roy ら [58] は, 平板に設置された光ファイバーセンサーの経路の延長線上にあるひずみ成分を, 一次元の Smoothing Element Analysis (SEA) を用いて補間し, iFEM の入力とすることで, 変位の再構成の精度を向上させることに成功した. Oboe ら [59] は SEA と多項式フィッティングを用いて外挿した平板全体の垂直ひずみを入力とした iFEM を適用する手法を, 平板の座屈変形に対して実験的に検証した. 2つの補間手法を比較した結果, 彼らの問題設定に対しては適切なパラメータ設定の下で両方の手法によって良好な結果が得られたと結論付けた. Kefal ら [15] は, SEA と iFEM を組み合わせる手法を smoothed iFEM と名付け, シミュレーションと実験で従来の iFEM と比較して smoothed iFEM の変位の推定精度が向上することを示した. シミュレーションの要素分割を Fig.3.1 に示す. 左のモデルが示すように, SEA では iFEM の解析に比べて粗く要素を分

解し, 要素内でひずみを平滑化する. SEA を事前に適用してひずみを補間し細かいメッシュの iFEM を適用することによって, 全ての要素のひずみが計測できるように粗いメッシュで計算した iFEM と比較して, FEM に近い変位場を再構成することに成功した (Fig.3.2).

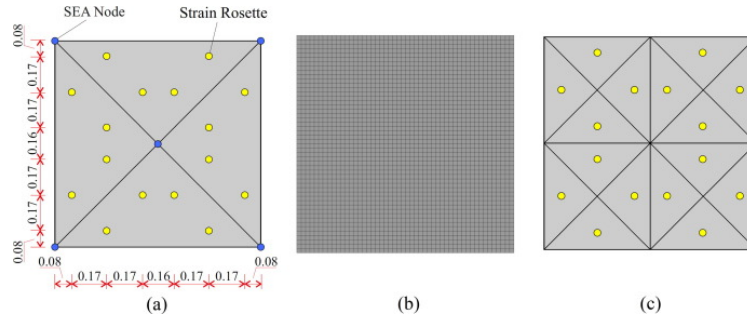


Fig.3.1 smoothed iFEM の検証の問題設定 [15]

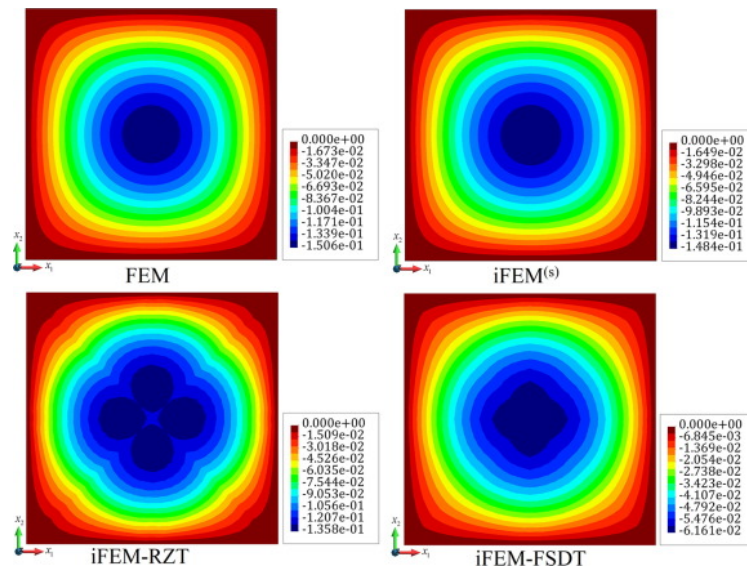


Fig.3.2 smoothed iFEM の検証検証結果 [15]

SEA を用いたひずみの補間手法は, 従来の重みづけ iFEM より少ないセンサ点数での変位推定が可能であるものの, SEA のために離散化した要素内に 1 点以上の計測点が必要であるため, 以下のような課題が存在する.

1. センサ点が極端に少ない問題では, SEA 要素を大きくする必要があり, ひずみ場の復元の精度が悪化する
2. 大きな要素で分割することが難しい, 複雑なジオメトリへの適用が困難である.

サンドイッチパネルを始めとした複合材料を対象とした iFEM の研究がおこなわれている. Cerracchio ら [60] は, zigzag theory に基づいた要素定式化を行い, サンドイッチ構造の変位と

応力をモニタリングした. Kefal ら [61] は, zigzag theory に基づいた 3 節点要素 (3-RZT) を開発し, 単純支持された矩形の積層複合板と穴あきウェッジ構造の 2 つの例題に関して, シミュレーションで検証した. 同様に, 3-RZT 要素は, 翼構造の解析にシミュレーション [62] と実験 [63] で適用された. しかし, これまで現実的なセンサー構成での iFEM の適用性を実験的に検証した研究は少ない. 本研究では, より少ないセンサ点で精度よく変形を推定するため, 事前にひずみを補間し, 補間によって得られたひずみ場を入力として iFEM を適用する手法を採用する. また, 最近の研究で提案されている SEA を用いた補間手法の課題を解決する有限要素モデル上の距離に基づいた補間手法を提案する. さらに, 補間と iFEM を用いた形状センシングの適用性をサンドイッチパネルと翼構造に対して実験的に検証した. 筆者の知る限り, 全ての面内ひずみ成分を構造全体で補間して iFEM の入力とする手法の適用性を, このようなスケールのサンドイッチパネルや翼構造に対して実験的に検証した研究は本研究が初めてである. 尚, 本研究におけるサンドイッチパネルの解析では, サンドイッチパネルが十分に薄い構造であるため, zigzag theory に基づいた要素は使用しなかった.

iFEM を非線形問題に適用する研究も存在する. 小林 [64] は iFEM を微小ひずみ大変形する中空丸棒の曲げ問題にシミュレーション上で適用し, 非線形 FEM による解析解とよく一致する変位を得ることに成功した. また, Paczkowski と Riggs[47] は, Green-Lagrange ひずみと Newton-Raphson 法を用いて iFEM を大ひずみに拡張した.

3.1.2 iFEM の自由度

ひずみの補間および iFEM で解いている問題の自由度について整理する. ただし, 解析の対象とする有限要素モデルの節点数を n_{node} , 要素数を n_{elem} , ひずみの成分の数を n_{strain} , そのうちの面内ひずみ成分の数を $n_{\text{in-strain}}$, 変位の成分の数を n_{disp} , 1 面内のセンサの計測点数を n_{sensor} , 変位の拘束点数を n_{support} とする. 例えば iQS4 要素においては, $n_{\text{strain}} = 5$, $n_{\text{displacement}} = 6$ である. ひずみ成分は z 軸方向の垂直成分を 0 とし, 変位成分は 3 つの軸の並進と回転が存在するためである.

iFEM で求める変位の成分数は, $n_{\text{node}}n_{\text{disp}} - n_{\text{support}}$ である. 一方で入力となるひずみの成分数は条件によって異なり, Table3.1 に示す. ひずみ成分は, 中立軸が要素の厚み内に存在し, 各要素の曲げ変形が全体変形に大きく影響を与える平板などの曲げ変形を解析するためには, 2 面で計測する必要がある. 一方で, 中空丸棒のような中立軸が要素の厚み内に存在しない構造においては, 要素の 1 面のみの計測で全体変形を推定できる. 実際には, センサを厚み方向に設置し要素の面外せん断ひずみを計測することは困難であるため, 実構造への適用時には面外せん断ひずみは 0 として面内ひずみ成分のみを用いて解析することが一般的である. さらに, 構造全体の面内ひずみ成分を計測することは, 構造上やコスト上の制約のため困難であるので, センサ点で計測した面内ひずみ成分のみを入力とすることになる.

Table3.1 iFEM の入力ひずみの成分数

条件	入力ひずみの次元
全要素の全ひずみ成分が既知	$n_{\text{elem}} n_{\text{strain}}$
全要素の全ひずみ成分が 2 面で既知	$2n_{\text{elem}} n_{\text{strain}}$
全要素の面内ひずみ成分が既知	$n_{\text{elem}} n_{\text{in-strain}}$
全要素の面内ひずみ成分が 2 面で既知	$2n_{\text{elem}} n_{\text{in-strain}}$
センサ点の面内ひずみ成分が既知	$n_{\text{sensor}} n_{\text{in-strain}}$
センサ点の面内ひずみ成分が 2 面で既知	$2n_{\text{sensor}} n_{\text{in-strain}}$

簡単のため, iQS4 要素 1 要素からなる有限要素モデルに注目すると, iFEM の出力となる変位の成分数は $24 - n_{\text{support}}$ であり, 入力ひずみの成分数は全ひずみ成分が 2 面で既知である場合においても高々 10 である. 過剰な拘束がなされていなければ, ひずみと変位の関係式は変数の数が関係式の数が上回る劣決定系の問題になる. つまり, ひずみ変位関係マトリックス \mathbf{B} は列数が行数より大きく, $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ は非正則行列となる.

iFEM では要素内ひずみが平均的に計測ひずみと一致することを仮定することによって, 最小二乗法で解くことができる優決定系の問題に帰着させている. 数式上では, 要素内の位置に対して定義される $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ 行列を要素内の複数点で足し合わせる積分によって正則化し, 逆行列を計算可能にしている.

センサ点で計測したひずみを事前に補間する手法においては, ひずみ場の伝達に関して空間的に近い点は近いひずみであるという仮定に基づいて, ひずみ場の分布関数を仮定し, 全要素上のひずみ場を計算する.

3.1.3 iFEM の誤差

ひずみの補間と iFEM によって計算した変位の誤差の要因について整理する.

iFEM で計算した変位の誤差の要因は以下のように分類できる.

- 計測誤差
- ジオメトリの誤差
- センサ配置の誤差
- 境界条件の誤差
- 補間の仮定に基づく誤差
- iFEM の仮定に基づく誤差
- 有限要素モデルの離散化の誤差
- 要素定式化の誤差

- 数値計算の誤差

計測誤差は、iFEM や補間の入力とするひずみの計測値に含まれる誤差である。ひずみセンサとして、ひずみゲージや光ファイバセンサが知られているが、それらのセンサの計測値は誤差を含んでいる。この誤差は、iFEM の変位に影響を与えるが、iFEM は要素ごとではなく構造全体で統合した方程式を解くことによって、この誤差に対してある程度ロバストに変位を求めることができる。

ジオメトリの誤差は、実構造を離散化した有限要素モデルのジオメトリと実構造との間に生じる誤差である。実構造のジオメトリと有限要素モデルのジオメトリが乖離することによって、変形に誤差が生じる。特に、平板の変形における板厚は、ひずみの計測位置に影響するため、影響が大きいことが想定される。実験では構造物の形状を計測し、設計値との誤差を考慮したモデルで解析することが望ましい。なお、iFEM では材料の物性値は使用しないことに注意する。

センサ配置の誤差は、センサの配置した位置と向きに関する誤差である。一般に、ひずみゲージはセンサ点の座標と向き、光ファイバセンサでは線状の経路を設計と一致させるように設置する。しかし、モデルと同一の設計に従って実構造にセンサを配置した場合においても、設計と実際に配置されたセンサに位置と向きには誤差が生じる。これにより、実際に計測したひずみと異なる位置や成分のひずみを計測ひずみとして計算に使用することによって、変形に誤差が生じる。実験対象の構造物にセンサを設置する際には、設計通りのセンサ配置になるように、慎重にセンサを配置する。

境界条件の誤差は、解析上の境界条件と実際の境界条件の間に生じる誤差である。実際の構造物の形状には凹凸や反りが存在し、点や辺の支持のような解析上の境界条件を完全に再現することは困難である。正確な解析結果の評価が求められる実験では、比較的再現が容易な境界条件の問題設定にした上で構造の支持方法を工夫し、この誤差を可能な限り小さくする。

補間の仮定に基づく誤差は、少ない計測点の入力ひずみから構造全体のひずみ場を再構成するために、各補間手法で導入する仮定に基づいて補間することによって生じる誤差である。例えば、一定の範囲内のひずみ分布を決められた関数の重ね合わせで表現する場合、実際のひずみ分布は、その関数の重ね合わせで表現できずに誤差が生じる。一般に、より複雑なひずみ場を補間によって小さい誤差で再構成するためには、より大量の計測点が必要になる。

iFEM の仮定に基づく誤差は、iFEM の要素内でひずみが平均的に要素を代表するひずみと等しいという仮定によって生じる誤差である。実際は、ひずみ場は連続的に分布しているため、要素の一点で与えた代表ひずみがその要素のひずみの平均値であるとは限らない。しかし iFEM では、この仮定の下で定式化されるため、最終的な変位の誤差の要因となる。

有限要素モデルの離散化の誤差は、解析的に解けない微分方程式を解くために、有限要素モデルで連続体を離散化し、要素内の物理量を比較的単純な関数で近似していることによる誤差である。この誤差は要素分割を細かくすることや高次の要素を使用することによって小さくする

ことができるが、計算量とトレードオフが存在する。

有限要素モデルの要素では、変位とひずみの関係を力学理論に基づいて定義しているが、いくつかの仮定や単純化を含んでいる。例えば、シェル要素では厚み方向の軸ひずみを 0 として扱っている。構造によっては、その要素の前提とする仮定や単純化を満たさない場合があり、適切な要素や解析方法を選択する必要がある。

数値計算の誤差は、コンピュータによる数値計算において、計算可能な数値の桁数が有限であることに由来する誤差である。iFEM では、特に線形方程式を解くプロセスにおいて、この誤差が大きくなる可能性がある。

3.2 iFEM の定式化

本節では、iFEM の定式化について、詳細に述べる。

3.2.1 有限要素モデルによる離散化

iFEM では、FEM と同様に構造を有限要素モデルによって離散化し、形状関数によって要素の連続量を内挿する。有限要素モデルは、本来連続体である構造の 3 次元座標上に離散的に配置した節点と、複数の節点によって囲われた領域で構成される要素によって定義される。要素内の連続量は、その要素を構成する節点上の量を用いて、要素で定義された形状関数で内挿することによって計算する。

例えば、要素内の任意の点の X, Y, Z 軸方向の変位 u, v, w は、以下で表される。

$$\begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = N \mathbf{a}, \quad (3.1)$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T & \mathbf{a}_2^T & \cdots & \mathbf{a}_n^T \end{bmatrix}^T. \quad (3.2)$$

ただし、 N は、要素の形状関数を用いて定義される形状マトリクスであり、 n は要素の節点数、 \mathbf{a}_i は節点 i の変位をである。形状マトリクスと節点変位は要素によって、それぞれ定義が異なる。

FEM での活用を目的に様々な有限要素の定式化がなされている [65]。FEM で一般的に用いられる有限要素よりも iFEM に適した有限要素の定式化が複数提案されている。一般的な Shell 要素では計算に考慮しない面外方向の z 軸周りの回転成分を節点変位に加えることで、iFEM の解の安定性が向上することが報告されており、三角形要素である iMIN3[30]、四角形要素である iQS4[45]、セレンディピティ族四角形二次要素である iCS8[66] が提案されている (Fig.3.3)。Abdollahzadeh らは、これらの要素を 4 つの異なるベンチマーク問題に適用し、各要素の精度と性能を方法論的に比較している [16]。

本研究では、主に計算量が少なく汎用性が高い四角形要素である iQS4 要素を活用する。iQS4

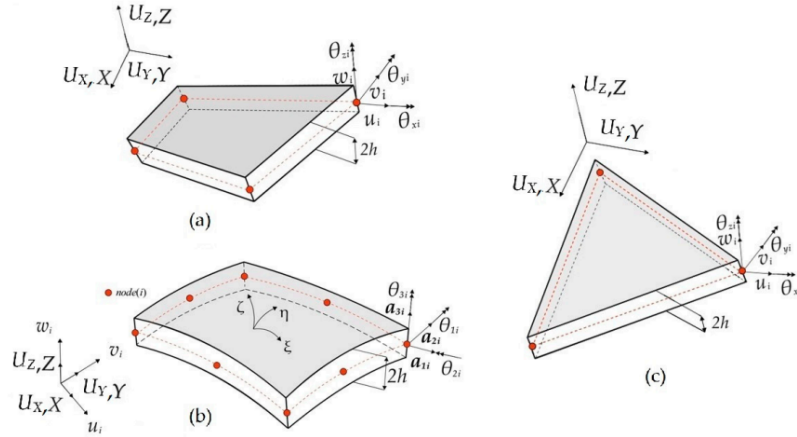


Fig.3.3 iFEM 有限要素のジオメトリ [16]

要素の節点数 n は 4 であり, 節点変位 \mathbf{a}_i は

$$\mathbf{a}_i = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{X,i} \quad \theta_{Y,i} \quad \theta_{Z,i}]^T \quad (3.3)$$

である. ここで, u_i, v_i, w_i はそれぞれ要素 i の X, Y, Z 軸方向の変位であり, $\theta_{X,i}, \theta_{Y,i}, \theta_{Z,i}$ はそれぞれ要素 i の X, Y, Z 軸周りの回転である. 本研究では一般的な有限要素モデルに対して要素間で節点変位を共有するために, 回転角を要素座標系ではなく全体座標系で定義した. 本研究で実施した iQS4 要素の形状マトリクスの修正の詳細は付録 A.1.1 に示す. iQS4 要素の形状関数は元論文 [45] に詳細に記述されている.

要素内のひずみと節点変位の関係はひずみ-変位マトリクス \mathbf{B} によって表すことができる. 要素内のひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}$ は,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}]^T = \mathbf{B}\mathbf{a} \quad (3.4)$$

ひずみ-変位マトリクス \mathbf{B} は, 形状マトリクスをひずみの定義に基づいて微分することによって導出できる. ここで, 変位はグローバル座標系で定義されるのに対し, ひずみはローカル座標系で定義されることに注意する. また, シェル要素では要素の厚み方向のひずみ成分 ε_z を常に 0 になるとする.

平板のような中立軸が要素内に存在する構造に iFEM を適用する場合には, 曲げによるひずみと引張によるひずみを分離するために, 要素の厚み方向の異なる 2 面 ($z = z^t, z^b$) のひずみを測定する必要がある. top 側の計測面の面内ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^t$ と bottom 側の計測面の面内ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ を

用いて、面内ひずみの引張成分 $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ と曲率成分 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ を計算する.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \frac{-z^b \boldsymbol{\varepsilon}^t + z^t \boldsymbol{\varepsilon}^b}{z^t - z^b}, \quad (3.5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \frac{t(\boldsymbol{\varepsilon}^t - \boldsymbol{\varepsilon}^b)}{z^t - z^b} = 2t\boldsymbol{\kappa}. \quad (3.6)$$

ただし, t は要素の厚みであり, $\boldsymbol{\kappa}$ は曲率である.

これを満たすように, ひずみ-変位マトリクス \mathbf{B} を分割し, 以下の関係式を得る.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \mathbf{B}_e \mathbf{a}, \quad (3.7)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{a}, \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_{yz} & \gamma_{xz} \end{bmatrix}^T = \mathbf{B}_g \mathbf{a}. \quad (3.9)$$

3.2.2 最適化問題

iFEM はひずみ-変位マトリクスを用いて節点変位から計算される要素ひずみと, 計測ひずみの差を最小化する最適化問題に帰着し, これを最小二乗法によって解く.

$$\text{minimize } \Phi = \Phi_e + \Phi_k + \Phi_g, \quad (3.10)$$

$$\Phi_e = \int_S (\mathbf{B}_e \mathbf{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_e)^T \mathbf{W} (\mathbf{B}_e \mathbf{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_e) dS, \quad (3.11)$$

$$\Phi_k = \int_S (\mathbf{B}_k \mathbf{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_k)^T \mathbf{W} (\mathbf{B}_k \mathbf{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_k) dS, \quad (3.12)$$

$$\Phi_g = \int_S (\mathbf{B}_g \mathbf{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_g)^T \mathbf{W}_g (\mathbf{B}_g \mathbf{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_g) dS. \quad (3.13)$$

ただし, \mathbf{W} と \mathbf{W}_g は重みマトリクスであり, S は要素内の面積を表す. 重みマトリクスは対角行列であり, 面内ひずみに対応する重みを 1, 計測できない面外ひずみに対応する重みを 10^{-5} とする. 極値において, 目的関数 Φ を接点変位ベクトル \mathbf{a} で微分した値が 0 になることから, 次式を得る.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{a}} = \frac{\partial \Phi_e}{\partial \mathbf{a}} + \frac{\partial \Phi_k}{\partial \mathbf{a}} + \frac{\partial \Phi_g}{\partial \mathbf{a}} = 0, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \Phi_e}{\partial \mathbf{a}} = \int_S (\mathbf{B}_e^T \mathbf{W} \mathbf{B}_e \mathbf{a} - \mathbf{B}_e^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_e) dS, \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \Phi_k}{\partial \mathbf{a}} = \int_S (\mathbf{B}_k^T \mathbf{W} \mathbf{B}_k \mathbf{a} - \mathbf{B}_k^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_k) dS, \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \Phi_g}{\partial \mathbf{a}} = \int_S (\mathbf{B}_g^T \mathbf{W}_g \mathbf{B}_g \mathbf{a} - \mathbf{B}_g^T \mathbf{W}_g \boldsymbol{\varepsilon}_g) dS. \quad (3.17)$$

節点変位ベクトル \mathbf{a} の係数を \mathbf{K}^{el} , 定数を \mathbf{f}^{el} に整理することにより, 要素の節点変位ベクトル \mathbf{a} に関する線形連立方程式を得る.

$$\mathbf{K}^{\text{el}} \mathbf{a} = \mathbf{f}^{\text{el}} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{K}^{\text{el}} = \int_s (\mathbf{B}_e^T \mathbf{W} \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_k^T \mathbf{W} \mathbf{B}_k + \mathbf{B}_g^T \mathbf{W} \mathbf{B}_g) dS \quad (3.19)$$

$$\mathbf{f}^{\text{el}} = \int_s (\mathbf{B}_e^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_e + \mathbf{B}_k^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_k + \mathbf{B}_g^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_g) dS \quad (3.20)$$

構造全体で統合した線形連立方程式を変位拘束に注意して解くことで, 節点変位ベクトルを求める

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (3.21)$$

ここで, $\mathbf{K}, \mathbf{u}, \mathbf{f}$ はそれぞれ $\mathbf{K}^{\text{el}}, \mathbf{a}, \mathbf{f}^{\text{el}}$ を構造全体で統合したものである. \mathbf{K} はモデルに特有の値であるため, 事前に計算しておくことが可能である.

3.2.3 入力ひずみの補間

iFEM は入力として全ての要素のひずみが与えられることが求められるが, 実構造ではセンサの設置できる位置・点数には構造上・コスト上の制約があるため, 全ての要素のひずみを計測することは困難である. この課題に対して, 3.1.1 小節で述べたように, ひずみを計測していない要素の重みを極端に小さくし, 重みづけ最小二乗法で解く手法と, ひずみを事前に補間する手法が提案されているが, より少ないセンサ点に対して精度高く変位が導出できるのは, 後者の手法である. 最近の研究 [58, 59, 15] で提案されている SEA を用いた補間手法は, SEA のために分割した要素に対して 1 点以上の計測点が必要であるため, 極端に計測点が少ない問題や複雑なジオメトリをもつ構造に対して適用することが困難である. そこで, 本研究では, より一般的な構造に対する補間として, 有限要素モデル上の距離に基づいた補間手法を提案する.

なお, 本節で論じるひずみの補間は, 少数の計測点から構造の詳細なひずみ分布を再現することではなく, iFEM の入力として構造の全体変形を精度良く求めることができるひずみ分布を再現することを目的とする.

平板構造に対する補間

まず, 平板構造を対象にしたときの, 一般的な補間手法を用いたひずみ場の補間について説明する.

平板構造では, 面内のひずみが支配的であるため, 3 方向の計測ひずみから面内ひずみを効率的に補間する. 平板が存在する面が XY 平面内に存在するように直交座標系 XYZ を定義する. 平板に設置したセンサで計測する 3 方向の垂直ひずみの X 軸となす角を $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ とする. 計測

した成分ごとに平板内でひずみを補間し、平板上の任意の点の 3 方向の垂直ひずみ $\varepsilon_{\theta_1}, \varepsilon_{\theta_2}, \varepsilon_{\theta_3}$ を得る. このとき, 平板上の任意の点の面内ひずみ $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \gamma_{XY}$ は次式により求まる.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_Y & \gamma_{XY} \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\theta_1} & \varepsilon_{\theta_2} & \varepsilon_{\theta_3} \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \cos^2 \theta_2 & \sin^2 \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ \cos^2 \theta_3 & \sin^2 \theta_3 & \sin \theta_1 \cos \theta_3 \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

より一般的な構造に対する補間

本研究で提案するより一般的な構造に対する補間手法について, 着想に至った経緯と提案手法の詳細を述べる.

平板構造より, より複雑なジオメトリを持つ構造に対するひずみの補間では, 空間上の 2 点間の距離が, ひずみの伝播のしやすさに対応しないという課題が存在する.

ひずみは物質的に連続的な構造上を伝播するため, 平板のように平面内に均質に構造が存在する場合, 平面内の 2 点間の距離はひずみの伝播のしやすさの尺度となり, 空間内の分布の連続性を仮定した一般的な補間手法が適用できる. しかし, 曲面などで構成されたより一般的な構造においては空間上に構造は均質に存在せず, 空間上の 2 点間の距離は実際にひずみが伝播する曲面上の 2 点間の経路長と一致しない. つまり, 空間内のひずみ分布は物質が存在する点としない点で非連続であり, 空間内の分布の連続性を仮定した一般的な補間手法が適用できない. 単純な曲面の構造であれば, 曲面を平面に射影することで一般的な補間手法を適用することも可能であるが, 曲面に穴が空いた構造や, 複数の曲面が交わった構造を考えたときに, 射影変換によってこの経路長を求めることは困難である. そこで, ひずみの伝播のしやすさの尺度として, 2 点間の空間上の距離ではなく, 物質が存在する空間で定義される構造上の 2 点間の最短経路長を採用し, この最短経路長を近似する手法を考える.

有限要素モデルは本来連続的な構造を計算を簡単にするため離散化したモデルであり, 物質が存在する空間上に配置された節点と, 複数の節点によって構成される要素によって構成されている. 構造上の 2 点間の最短経路長を, 有限要素モデルを用いて近似することを考える. 有限要素モデルの要素をグラフのノードとし, 2 つ以上の節点を共有する要素間に要素中心の距離を重みとするエッジを作成することで, 有限要素モデルからグラフ構造を作成することが可能である (Fig.3.4). このように有限要素モデルをグラフ構造に変換することにより, グラフ理論で研究・発展してきた知見や手法が適用可能になる.

このとき, 構造上の 2 点 (ノード i, j) 間の最短経路長 \hat{x}_{ij} は, グラフ構造の 2 点間の最短経路長 x_{ij} で近似することができる.

$$\hat{x}_{ij} \approx x_{ij} = \min_{p_{ij} \in P_{ij}} \sum_{p_{ij}} w_{\text{edge}} = \sum_{\hat{p}_{ij}} w_{\text{edge}}. \quad (3.24)$$

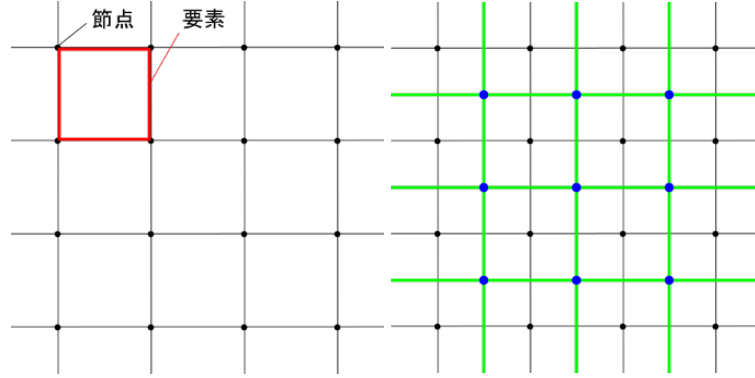


Fig.3.4 有限要素モデル (左) とグラフ構造 (右) 緑線がエッジ, 青点がノード

ここで, P_{ij} はノード i, j を結ぶ全ての経路の集合であり, \hat{p}_{ij} はそのうちの最短経路, w_{edge} は, エッジの重みである.

次に, ひずみの伝播のしやすさの尺度となる構造上の 2 点間の距離を用いて, ひずみを補間する手法について述べる. RBF 補間は Radial Basis Function (RBF) を利用して, 補間関数を作成する補間手法であり, 3 次元データの補間などに利用されている [67]. RBF は, 適当な点に関して球対称となる実数値関数であり, 2 点 i, j 間の距離 x_{ij} から定義される.

$$\text{RBF} = \phi(x_{ij}) \quad (3.25)$$

例えば, ガウシアンカーネルは

$$\phi(x_{ij}) = \exp(-\beta x_{ij}^2) \quad (3.26)$$

で定義される. ここで, β はパラメータである.

RBF 補間は, この RBF を基底関数とする (Fig.3.5). n 個のデータ点 (x_k, y_k) ($k = 1, 2, \dots, n$) が与えられたとき, 補間関数を RBF の線形和とし定義する.

$$y_i = \sum_{k=1}^n w_k \phi(x_{ik}) \quad (3.27)$$

ただし, w_k はデータ点 k の重みである. 補間関数が全てのデータ点を通ることを条件に重みが決定できる.

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{w} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n]^T \quad (3.29)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]^T \quad (3.31)$$

したがって,

$$\mathbf{w} = \Phi^{-1} \mathbf{y} \quad (3.32)$$

ただし,

$$\phi_{ij} = \phi(x_{ij}) \quad (3.33)$$

である.

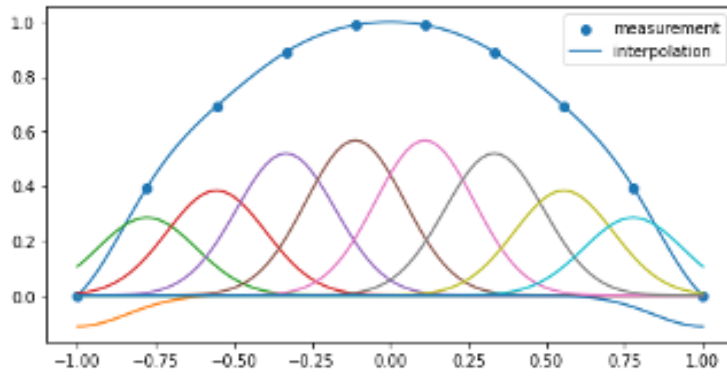


Fig.3.5 RBF 補間のイメージ

本研究では, 有限要素モデルを変換したグラフ構造において定義した 2 点間の最短経路長を 2 点間の距離として RBF 補間を適用することによって, 有限要素モデル上の距離に基づいた補間を行うことを提案する. RBF 補間によってひずみ成分を構造全体で補間し, 平板構造を対象とした補間手法と同様にロゼット解析を行うことで, 構造上の全ての要素ひずみが計算可能である.

ところで, RBF 補間は全てのデータ点を通るように補間関数を決定するため, ノイズが補間関数全体に影響してしまうという課題がある. これを解決するために, 正則化を行う手法が存在する.

$$\text{minimize } \|\Phi \mathbf{w} - \mathbf{y}\|^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|^2. \quad (3.34)$$

これを解いて, センサノイズに対して頑強な補間結果が得られる.

$$\mathbf{w} = (\Phi^T \Phi + \lambda I)^{-1} \Phi^T \mathbf{y} \quad (3.35)$$

本節で提案する有限要素モデル上の距離に基づいた補間手法には, 以下のような制限が存在する.

- RBF 関数が球状の関数であるため, センサ点の密度が不均一である場合に, ひずみ場の補間の誤差が大きくなる.

- スカラーでひずみ成分を補間したあとにロゼット解析をするため、3 方向以外のひずみの計測値を活用できない
- 構造によっては、補間に適切な座標系を定めることが困難である。
- RBF 関数のパラメータを実験的に決定する必要がある

特に、補間に適切な座標系の定義について説明する。本手法では、ひずみ成分を補間しロゼット解析によってひずみ場を復元するため、各要素のひずみ成分を定義する座標軸のとり方は補間によって得られるひずみ場に大きく影響する。しかしながら、一般的な構造で座標軸方向が連続した座標系を全ての要素で定義することは困難である。ブレードのスキンや船舶の船殻のような、長い筒やその両端を閉じたような構造においては、構造の長手方向ベクトルの要素平面への正射影ベクトルと、それと垂直なベクトルを軸とする要素ごとの座標系を定義することで、端部を除いた隣り合う要素で座標軸方向が連続した座標系を定義することができる。このようにこれらの制限は、センサの配置や対象とする構造によっては問題とならないが、より汎用的な有限要素モデル上のひずみの補間手法の開発は今後の研究課題とする。

3.3 シミュレーションによる検証

理論解の求まる片持ち梁の曲げ問題について、理論解と FEM, iFEM を比較し、本研究で示した iFEM の定式化の精度を検証する。

3.3.1 理論解

片持ち梁の固定端を原点とし、長手方向に x 軸それと垂直な方向に y 軸をとる。先端 $x = l$ に y 軸方向に集中荷重 P を作用させた長さ l の片持ち梁の変形を考える。

片持ち梁の曲げモーメントは、

$$M_x = -P(x - l). \quad (3.36)$$

弾性曲線方程式に代入して、

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = P(x - l), \quad (3.37)$$

ただし、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。

$$I = \int_A \eta^2 dA. \quad (3.38)$$

ただし, A を梁の断面積とした. これを, 境界条件 $x = 0$ で $y = 0, \frac{dy}{dx} = 0$ に注意して積分すると,

$$\theta = \frac{dy}{dx} = \frac{P}{2EI}(-x^2 + 2lx), \quad (3.39)$$

$$y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3lx^2), \quad (3.40)$$

ここで θ はたわみ角である. このとき, 梁に生じる曲げひずみ ε は

$$\varepsilon = -\frac{\eta P(x-l)}{EI} \quad (3.41)$$

で表される. ただし, η は中立軸からの距離である.

本検証では, 長さ 800mm, 幅 100mm, 厚さ 10mm のアルミニウム製 (ヤング率 70.3GPa, ポアソン比 0.345) の片持ち梁の先端に鉛直方向下向きに 100N の荷重を加えた (Fig.3.6). その結果, 先端 $X = 800\text{mm}$ の変位が -28.6mm , 根元の最大ひずみが $606\mu\varepsilon$ となった.

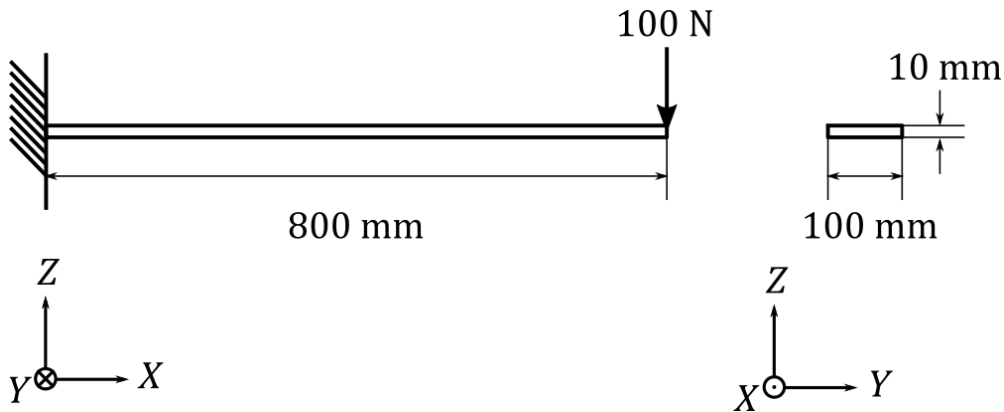


Fig.3.6 片持ち梁のシミュレーションの問題設定

3.3.2 FEM / iFEM

本検証で使用した片持ち梁の有限要素モデルを Fig.3.7 に示す. 要素は全て四角形要素 (iQS4) であり, 18 節点 8 要素である.

本検証では, 以下の 4 つの手法で求めたたわみを比較する.

- theoretical: 梁理論に基づいて計算したたわみ
- FEM: FEM によって計算したたわみ
- iFEM from theoretical strain: 梁理論に基づいて計算したひずみから iFEM で計算したたわみ
- iFEM from FEM strain: FEM によって計算したひずみから iFEM で計算したたわみ

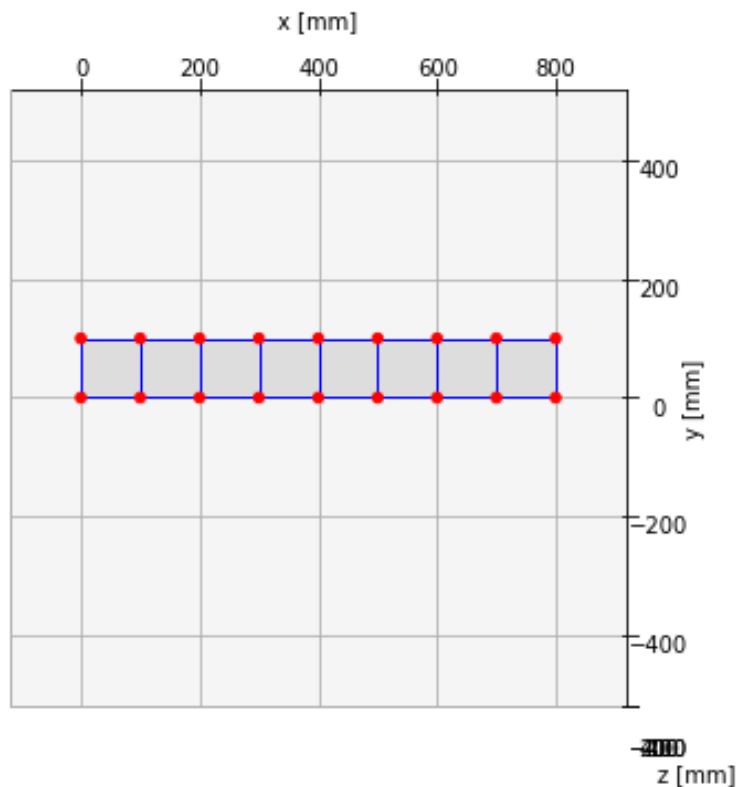


Fig.3.7 片持ち梁の有限要素モデル

片持ち梁のたわみの計算結果を Fig.3.8 に示す. FEM によって計算したたわみ, 梁理論に基づいて計算したひずみから iFEM で計算したたわみ, FEM によって計算したひずみから iFEM で計算したたわみは全て梁理論に基づいて計算したたわみとよく一致した.

Fig.3.9 は, 梁理論に基づいて計算したたわみとの誤差をプロットしたものである. 全てのたわみで, 境界条件を与えた $X = 0$ の点から先端に向かうにつれて, X に対して線形に誤差が増加した. FEM によって計算したたわみと FEM によって計算したひずみから iFEM で計算したたわみは梁理論に基づいて計算したたわみの誤差がよく一致した. 梁理論に基づいて計算したひずみから iFEM で計算したたわみの誤差は, 残りの 2 つのたわみに比べて小さくなった.

2 つのたわみ間の Root Mean Square Error (RMSE) を次式で定義する.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_{1,i} - w_{2,i})^2}. \quad (3.42)$$

ただし, n は節点数であり, $w_{d,i}$ はデータ d の節点 i のたわみである. 梁理論に基づいて計算し

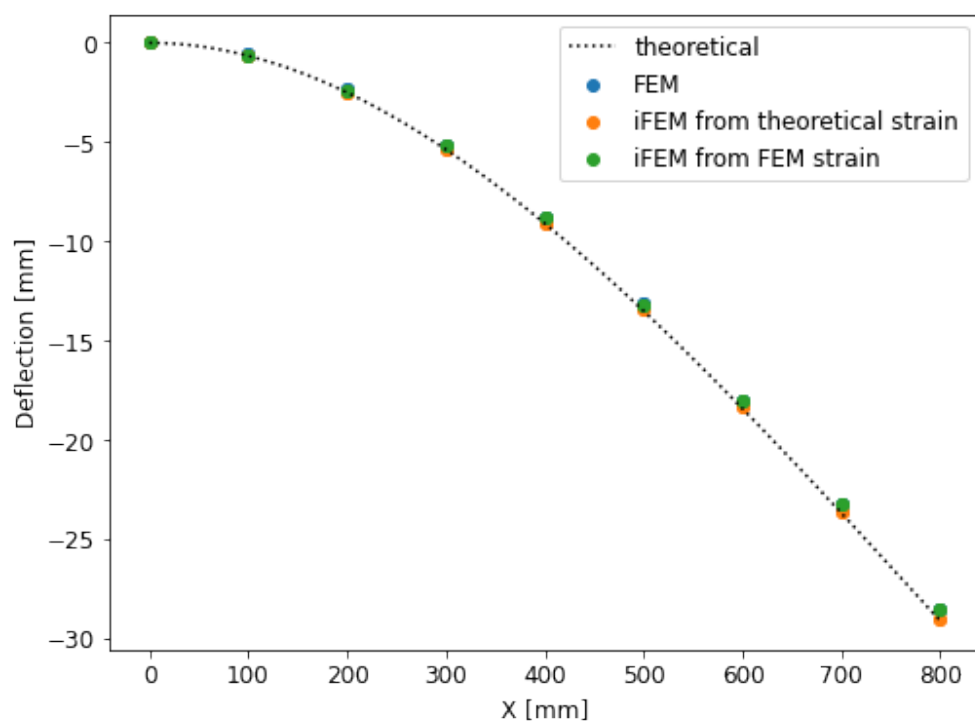


Fig.3.8 片持ち梁のたわみの計算結果

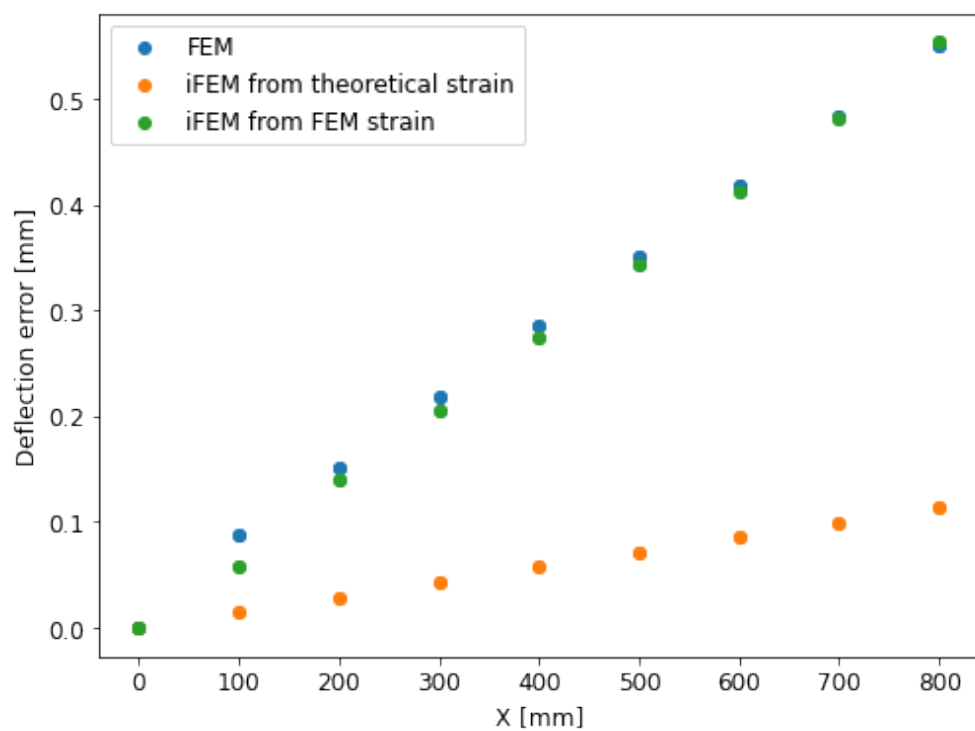


Fig.3.9 片持ち梁のたわみの誤差

たたわみは節点の存在する X におけるたわみを使用した。

Table3.2 は RMSE の計算結果である。梁理論に基づいて計算したたわみとの RMSE は梁理論に基づいて計算したひずみから iFEM で計算したたわみが最も小さくなった。これは、FEM の段階でたわみおよびひずみに発生する誤差が大きく、FEM から計算したひずみから計算した iFEM では、その誤差の影響を受けるためだと考えられる。一方で、FEM で計算したたわみと FEM から計算したひずみから計算した iFEM の RMSE は 0.0128mm と最も小さくなった。これらの結果から、全てのひずみを所与とした条件下で、本検証で使用した有限要素モデルに対して、iFEM の計算によって生じる変位の誤差は、FEM の計算で生じる誤差と比較して小さいといえる。FEM で計算したたわみと FEM から計算したひずみから計算した iFEM の間の誤差は、iFEM の過程に基づく誤差と計算誤差によるものだと考えられる。

Table3.2 片持ち梁のたわみの定量評価

data 1	data 2	RMSE [mm]
theoretical	FEM	0.332
theoretical	iFEM from theoretical strain	0.0677
theoretical	iFEM from FEM strain	0.327
FEM	iFEM from FEM strain	0.0128

3.4 サンドイッチパネルの形状同定実験

第3章第4節は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため、インターネット公表できません。

3.5 海流発電ブレードの形状同定実験

本節では、iFEM を用いた形状センシング技術を海流発電ブレードを対象に検証する。

3.5.1 実験の背景と目的

日本の沿岸部を流れる黒潮は、最も強い海流の一つであり、黒潮を利用した水中浮遊式海流タービンシステム「かいりゅう」(Fig.3.10)の開発が IHI によって行われている [17]。かいりゅうは 2017 年には、鹿児島県口之島沖で、100kW 規模の海流発電としては世界初となる実証試験が行われた。

海流発電におけるブレードは海流から受けた荷重をタービンに伝える重要な構造要素であり、海流から位置・時間によって刻々と変化する動的な分布荷重を受けて変形している。海流発

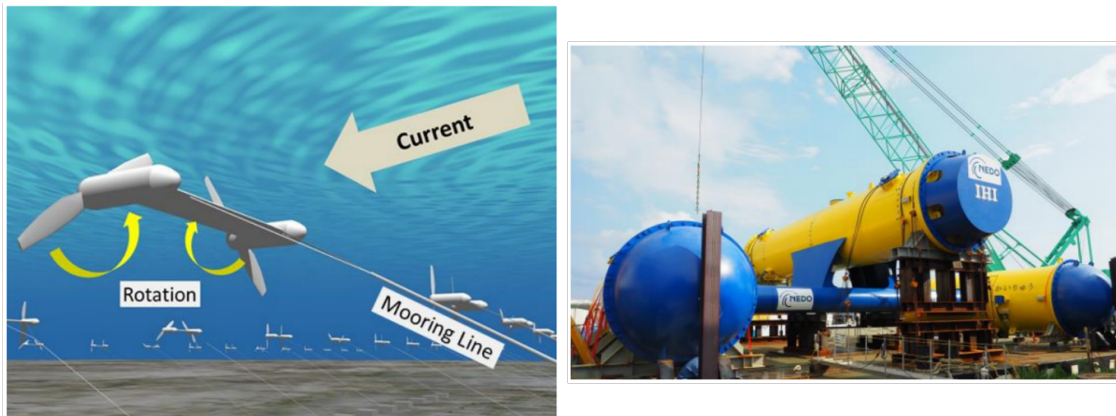


Fig.3.10 (左) 水中浮遊式海流タービンシステムの概念図, (右) かいりゅう [17]

電ブレードの変形をモニタリングすることで, 保守・運用の最適化が期待できる.

3.5.2 実験概要

3.4 節で解析した平板構造よりも複雑なジオメトリを持つ海流発電ブレードモデルを対象に, iFEM を用いた形状センシングの適用性を検証するため, 数値検証と実験的検証を実施する. 数値検証では, FEM で計算したひずみを入力として iFEM で変位を計算し, FEM で求めた変位と比較する双子実験を行い, センサ配置を検討する. 実験的検証では, 海流発電ブレードの陸上曲げ試験を行い, 海流発電ブレードの表面に設置したひずみゲージで計測したひずみを入力として iFEM で変位を計算し, モーションキャプチャで測定した変位と比較する.

本検証で対象とする海流発電ブレードモデルは全長 1400mm, 幅 300mm であり, 外側のスキン部とその中を貫通するスパー (桁) 部から構成される (Fig.3.11)

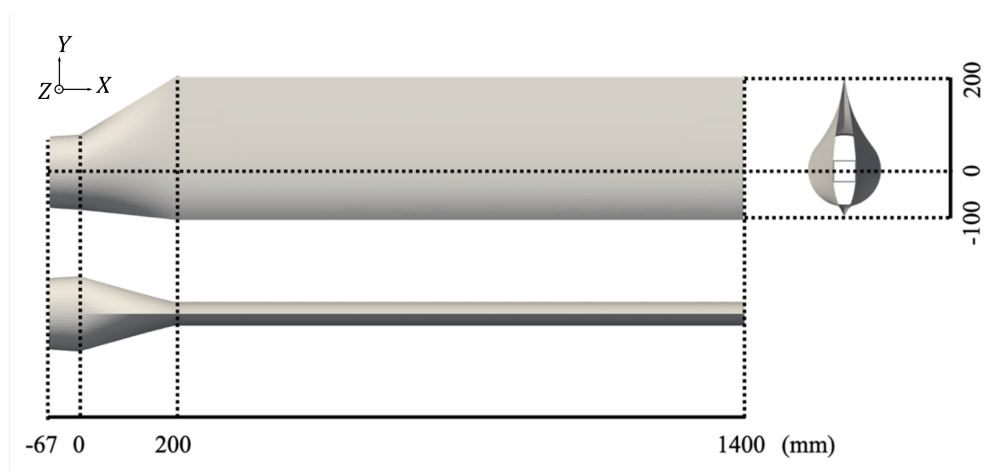


Fig.3.11 海流発電ブレードのジオメトリ

海流発電ブレードモデルの有限要素モデルを Fig.3.12 に示す. 数値検証で使用する有限要素モデルはスキンとスパーの両方をモデル化し, 18,170 の節点と 18,096 の要素を持つ. 一方で iFEM では, ブレードモデルの全体変位を推定するために最低限必要なスキンのみをモデル化した. ただし, ブレード根本部分には幾何学的形状から複雑なひずみ場が発生し, 本検証で検討する限られたセンサの計測ひずみから変形を推定することが困難であったため, $X \geq 400\text{mm}$ のスキンのみをモデル化した. その結果, 節点数が 12,672, 要素数が 12,584 となった. iFEM で計算した変位と FEM で計算した変位やモーションキャプチャで計測した変位を比較する際には, $X = 400\text{mm}$ における断面が一致するように平行移動と回転を行った.

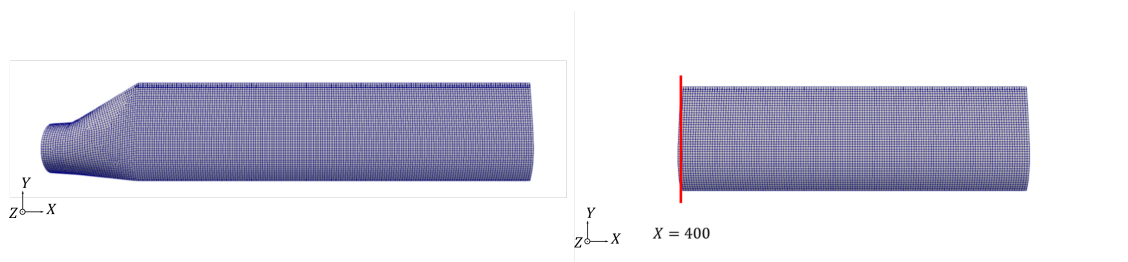


Fig.3.12 海流発電ブレードの有限要素モデル (左)FEM, (右)iFEM

入力ひずみの補間には, 3.2.3 小節で述べた, 有限要素モデル上の距離に基づいた補間を用いた.

3.5.3 数値検証

数値検証では, 海流発電ブレードモデルの先端の上辺に, 鉛直方向下向きに 1000N の曲げ荷重を加えた.

センサ数・配置の異なる 4 パターン (Fig.3.13) のセンサ配置でシミュレーションを実施し, ひずみの補間および変形の推定結果を比較する. センサはブレードのスキンの両面に, センサ配置 1 は 60 点, センサ配置 2 は 24 点, センサ配置 3 では 6 点, センサ配置 4 では 30 点のロゼットゲージを設置する. センサ配置 4 では, 曲げ荷重において大きなひずみが発生する海流発電ブレードモデルの根元部分にのみセンサを配置した.

FEM で計算したひずみから, センサを配置した点のひずみのみを用いて構造全体でひずみ場を補間した結果を Fig.3.14 に示す. 有限要素モデル上の距離に基づいた補間を用いて, 計測ひずみから構造全体にわたってひずみを補間することに成功した. センサ点の密度が大きいセンサ配置 1 では, 補間したひずみ分布は FEM で計算したひずみ分布とよく一致した. 一方で, センサ配置 2, 3 のように, センサ点の密度が小さくなると, センサが設置していない領域の補間したひずみ場の誤差が大きくなった. 特に, ブレードモデルの幅方向の中心にのみセンサを配置したセンサ配置 3 では, ブレードモデルに対して, y 軸方向に対象のひずみ分布が得られた.

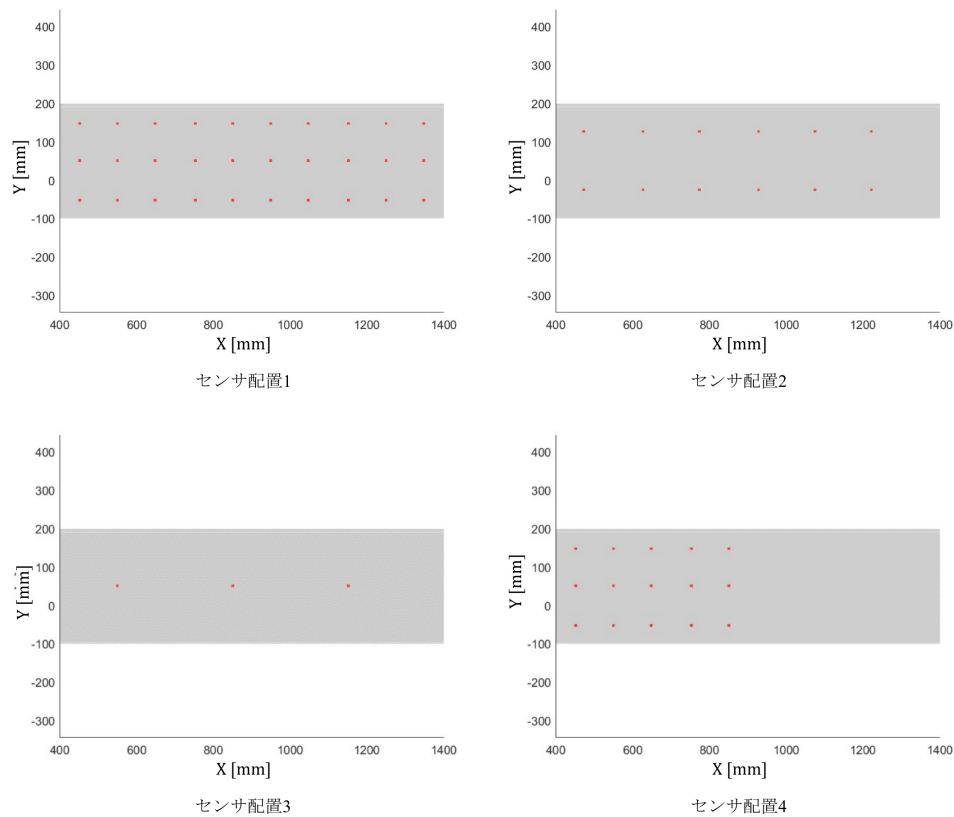


Fig.3.13 海流発電ブレードモデルの数値検証のセンサ配置

ブレードモデルの根元にのみセンサを配置したセンサ配置 4 では、根元のひずみ分布はよく一致したもののブレードモデルの先端ではほぼ一様なひずみ分布が補間された。

それぞれのセンサ配置でセンサを配置した点のひずみから補間したひずみから iFEM で推定した変形を Fig.3.15, Fig.3.16, Fig.3.17, Fig.3.18 に示す。ここで、iFEM corrected は $X = 400$ の断面が FEM の結果と一致するように iFEM の結果を平行移動・回転させたものである。センサ配置 1,2,4 で iFEM で推定した変形は FEM の結果とよく一致した。一方で、センサ配置 3 では、他のセンサ配置と比較して変位の推定精度が低下した。有限要素モデル上の距離に基づいた補間と iFEM による形状センシングは、ひずみ場を再現するのに十分なセンサ配置のもとでは、精度よく変形を推定することが可能であるが、センサ配置 3 のように、ひずみ場の複雑さに対してセンサ点が少ない場合には、変形の推定精度が悪化することがわかった。

3.5.4 実験的検証

海流発電ブレードモデルに対する有限要素モデル上の距離に基づいた補間と iFEM を用いた形状センシングの適用性を実験的に検証した。

シミュレーションで解析したブレードと同一のジオメトリを持つブレードに、センサ配置 1

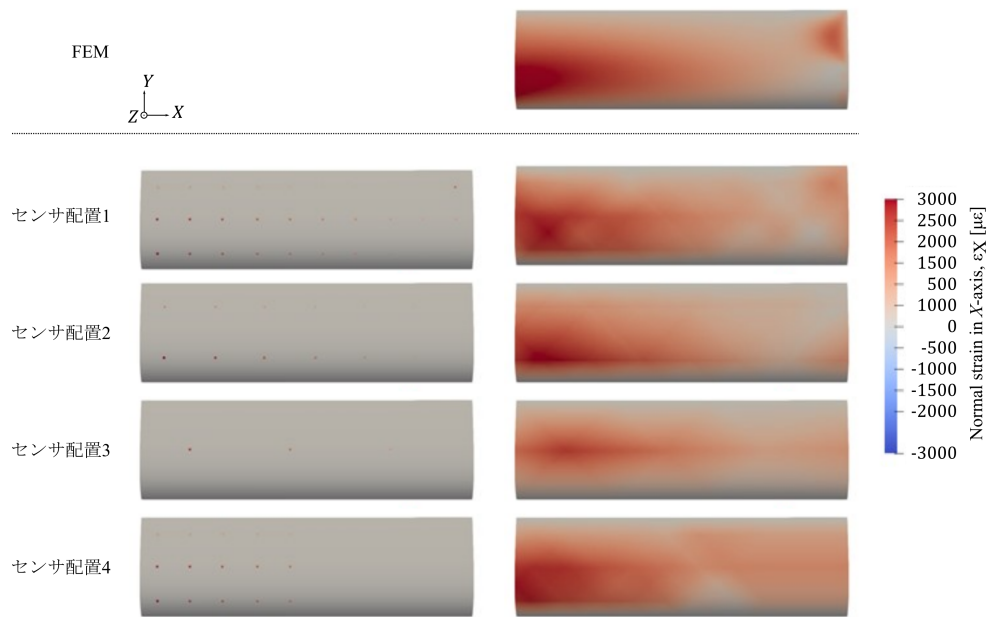


Fig.3.14 数値検証のひずみ補間結果

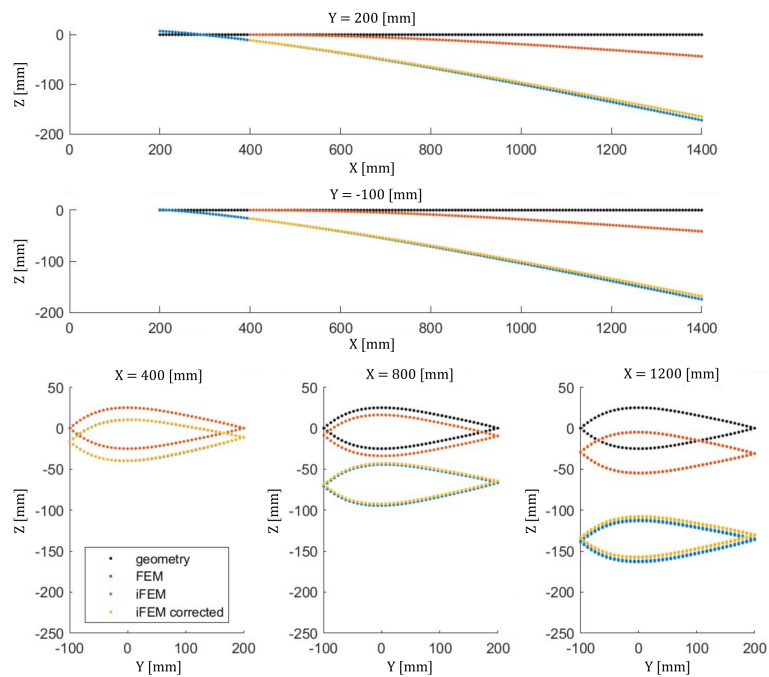


Fig.3.15 数値検証の変位推定結果 (センサ配置 1)

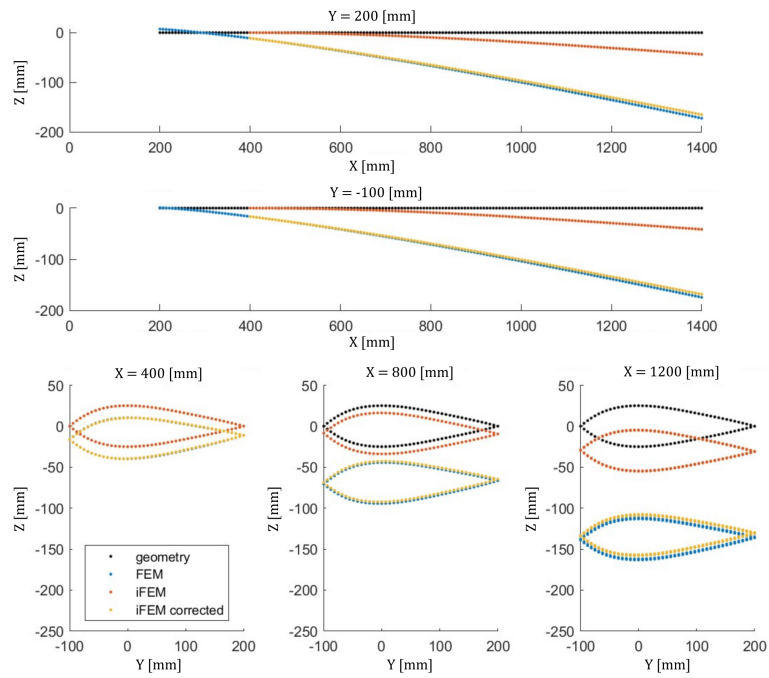


Fig.3.16 数値検証の変位推定結果 (センサ配置 2)

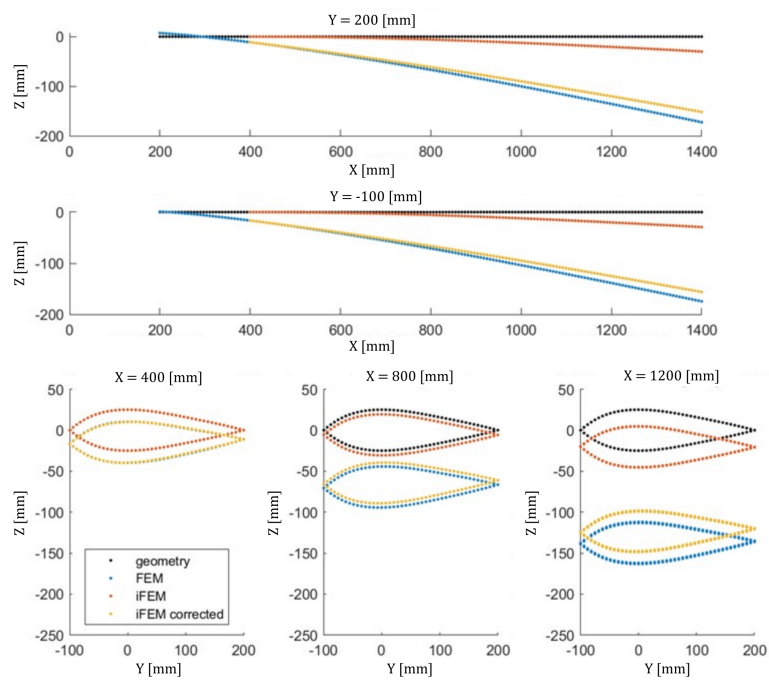


Fig.3.17 数値検証の変位推定結果 (センサ配置 3)

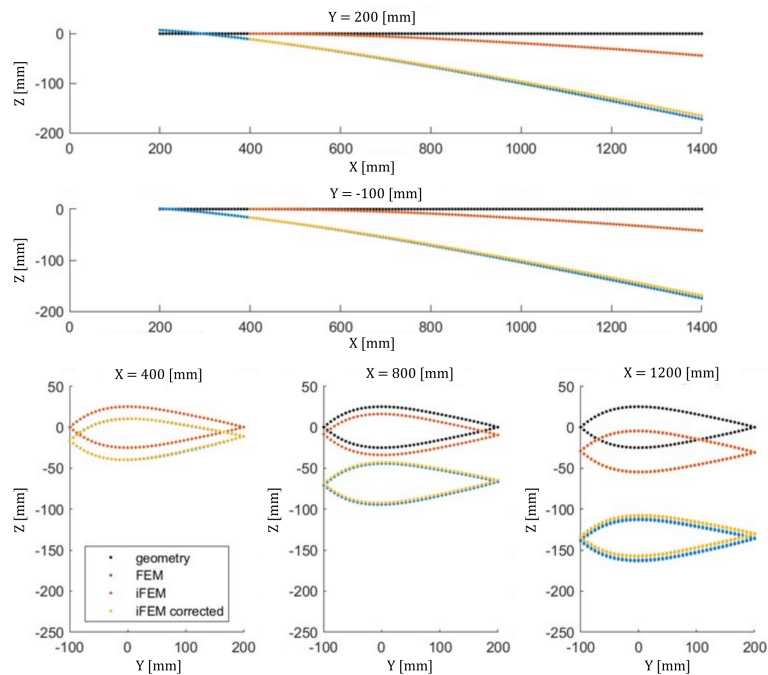


Fig.3.18 数値検証の変位推定結果 (センサ配置 4)

と同一の配置でロゼットゲージを設置してひずみを計測した Fig.3.19. 変位の推定結果を比較・評価するために、ブレードの上面にマーカーを 50 個設置し、モーションキャプチャで変位を直接計測した Fig.3.20.

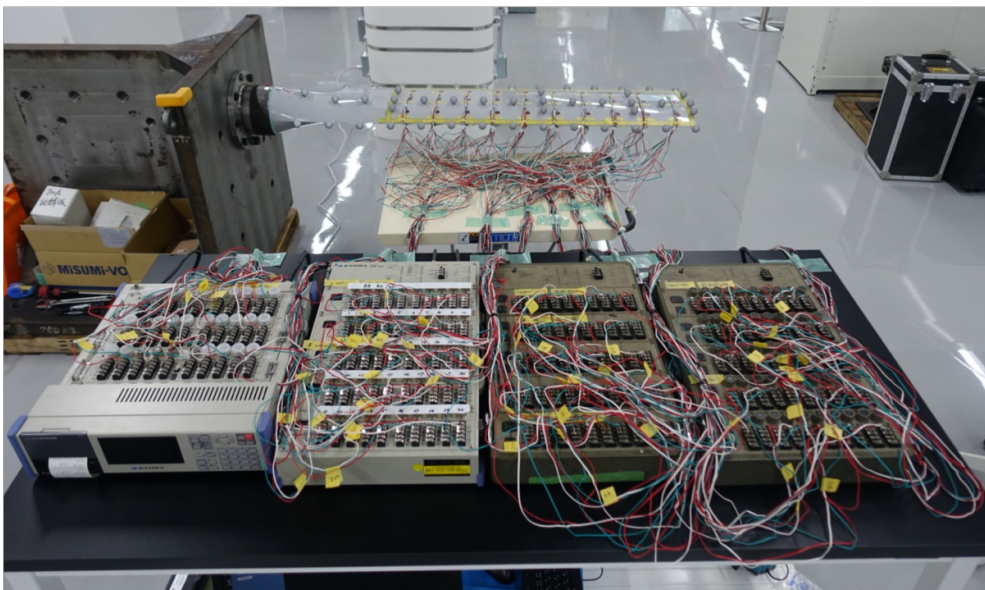


Fig.3.19 ロゼットゲージとマーカーを設置した海流発電ブレード

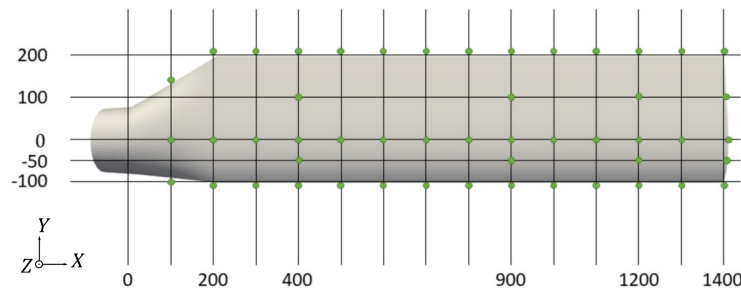


Fig.3.20 海流発電ブレードのマーカー配置

実験では、曲げ (1 点荷重)・曲げ (2 点荷重)・曲げねじりの 3 つの荷重条件について、それぞれ重りの重量 (3kg, 5kg, 10kg, 20kg) を変えながらひずみと変形を測定した (Fig.3.21)。曲げ (1 点荷重) ではブレード先端中央に鉛直方向下向きに加重し、曲げ (2 点荷重) ではブレード先端中央とブレード中部 ($X = 900[\text{mm}]$) の 2 点に鉛直方向下向きに加重、曲げねじりではブレード先端後縁に鉛直方向下向きに加重した。

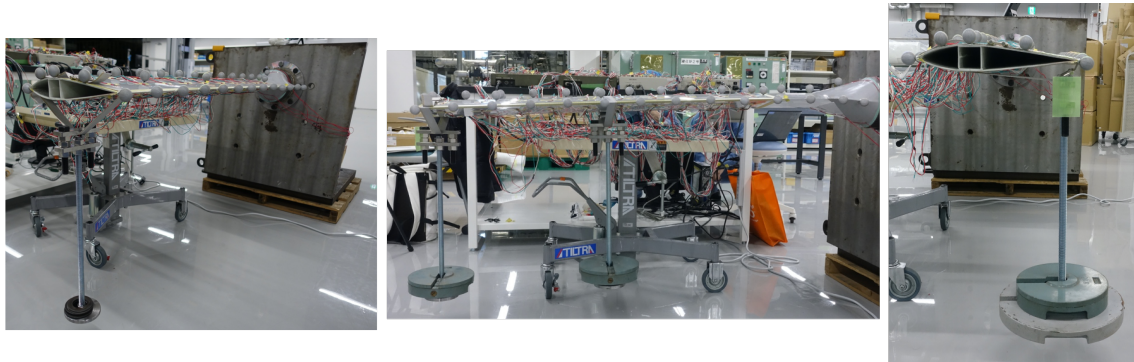


Fig.3.21 海流発電ブレードの荷重条件 (左) 曲げ (1 点荷重), (中央) 曲げ (2 点荷重), (右) 曲げねじり

20kgf の曲げ (1 点荷重) における計測ひずみと有限要素モデル上の距離に基づいた補間によるひずみの補間結果を Fig.3.22 に示す。有限要素モデル上の距離に基づいた補間を用いて、実験で計測ひずみから構造全体にわたってひずみ場を再構成することに成功した。

20kgf の曲げ (1 点荷重) において、センサ配置 1 および一部の計測点を利用したセンサ配置 3 とセンサ配置 4 の計測ひずみを補間して、iFEM によって推定した変形を、それぞれ Fig.3.23 と Fig.3.25 に示す。センサ配置 1 とセンサ配置 4 の両方で、曲げ (1 点荷重) における iFEM の推定変位は、モーションキャプチャによって計測した変位とよく一致した。重点的にセンサを配置した根元部分のひずみが変形に大きく寄与したためだと考えられる。一方で、センサ配置 3 の変位の推定結果は、他の 2 つのセンサ配置と比較して、精度が低下した。シミュレーションで示したように、発生するひずみ場の複雑さに対して、十分な計測点が存在しなかったことが原因であると推察できる。

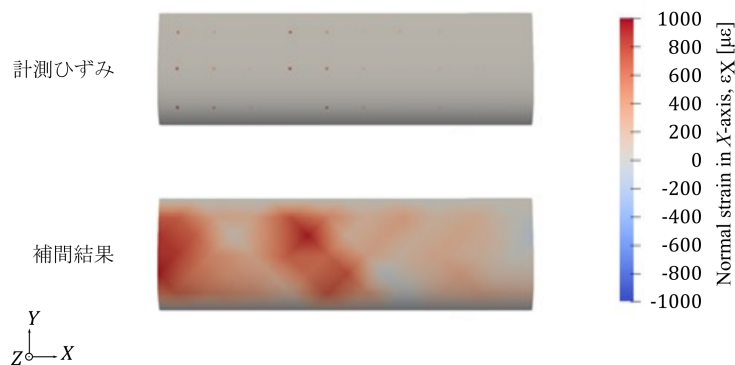


Fig.3.22 実験的検証のひずみ補間結果

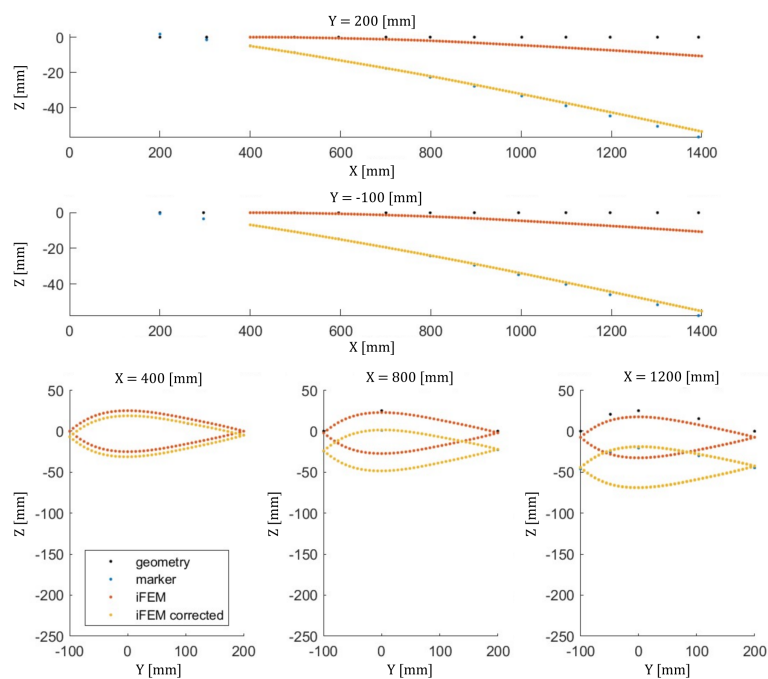


Fig.3.23 実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 1)

曲げ (1 点荷重) 変形における荷重の大きさとブレード先端の変位は, モーションキャプチャによって計測したマーカーの変位・iFEM によって推定した変位ともに, 荷重の大きさに対して線形に変化した (Fig.3.26). 3kg という小さな荷重においても変位を正確に推定できていることがわかる.

10kgf を 2 点に加えた曲げ (2 点荷重) と 20kgf の曲げねじり変形において, センサ配置 1 の計測ひずみを補間したひずみから, iFEM によって変形を推定した結果をそれぞれ, Fig.3.27, Fig.3.28 に示す. より複雑な変形となる 2 点曲げや曲げねじりの変形においても, 有限要素モデル上の距離に基づいた補間と iFEM を用いた形状センシングによって, 形状が推定できること

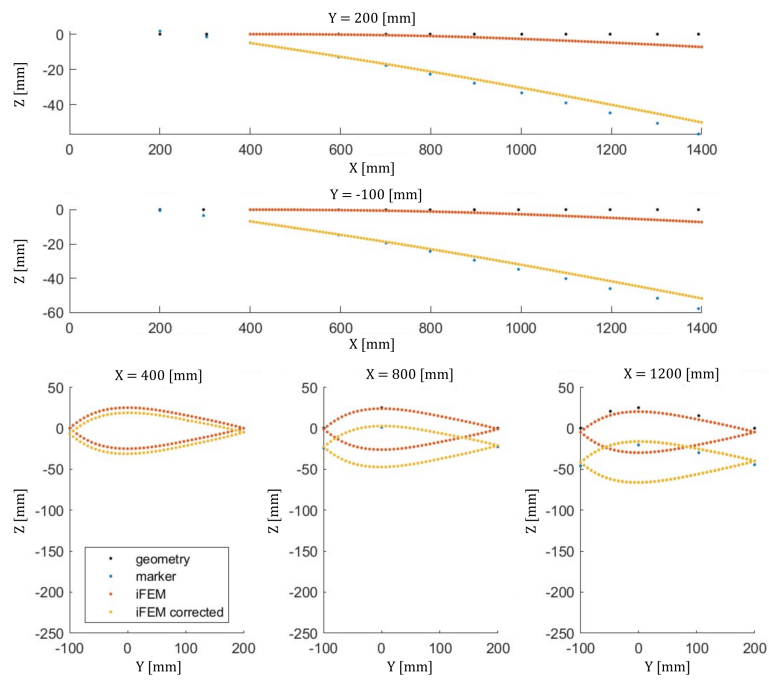


Fig.3.24 実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 3)

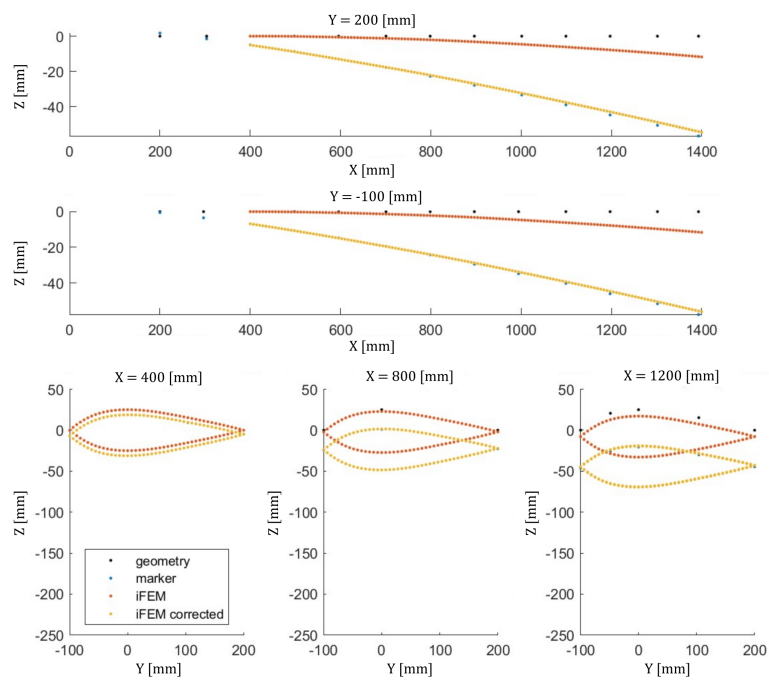


Fig.3.25 実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 4)

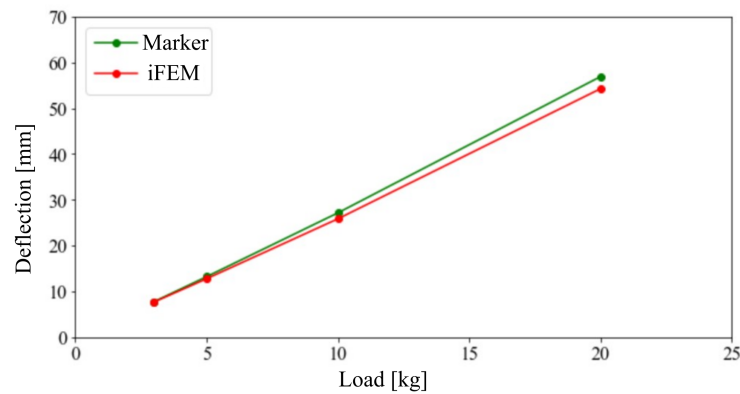


Fig.3.26 実験的検証の曲げ (1 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 4)

を実験的に確認した.

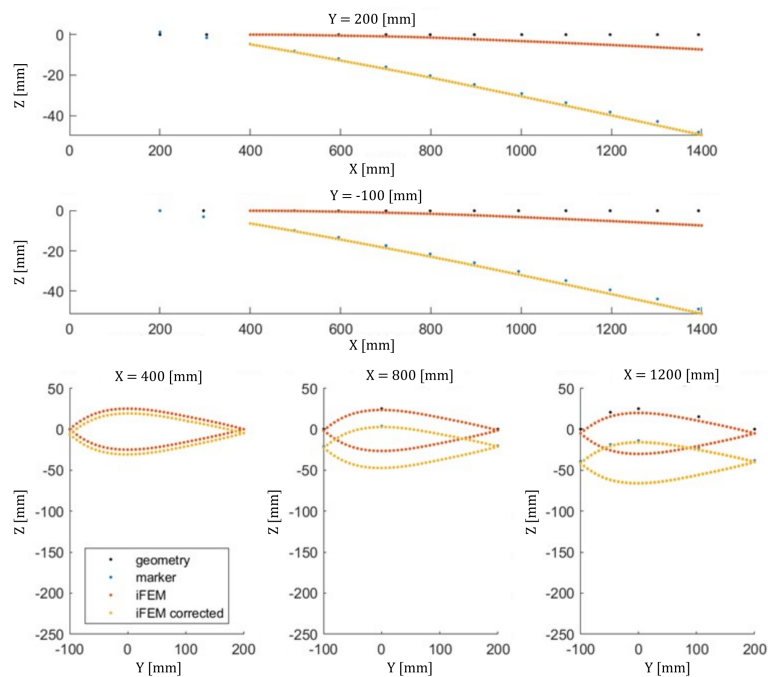


Fig.3.27 実験的検証の曲げ (2 点荷重) の変位推定結果 (センサ配置 1)

3.5.5 海流発電ブレードの形状同定実験のまとめ

有限要素モデル上の距離に基づいた補間によってひずみを補間し, iFEM と組み合わせて変形を推定する手法を提案し, 海流発電ブレードモデルに対する適用性をシミュレーションと実験で検証した.

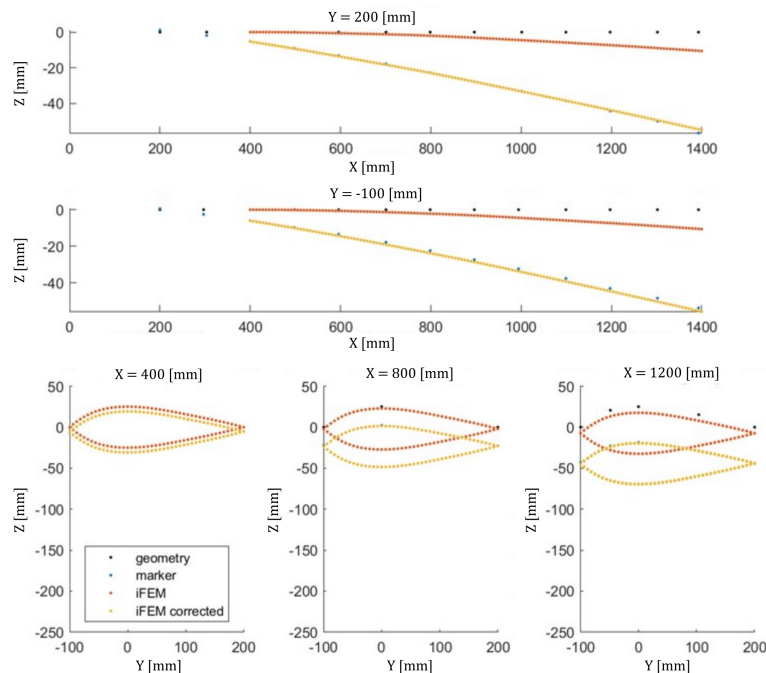


Fig.3.28 実験的検証の曲げねじりの変位推定結果 (センサ配置 1)

シミュレーションでは、4つのセンサ配置について解析し、センサ配置が形状同定に与える影響を検証した。有限要素モデル上の距離に基づいた補間によって、限られたセンサ点から構造全体のひずみ場を再構成することに成功した。変形に伴って発生するひずみ場の複雑さを表現するのに十分な計測点が存在する場合、有限要素モデル上の距離に基づいた補間によって補間したひずみ場はFEMの結果とよく一致した。また、そのひずみ場から推定した変位もFEMとよく一致した。一方で、変形に伴って発生するひずみ場の複雑さに対して十分でない計測点のセンサ配置において、補間したひずみ場の誤差および推定変位の誤差が大きくなった。

実験では、シミュレーションと同一のジオメトリを持つブレードに、ひずみゲージロゼットを設置しひずみを計測し、有限要素モデル上の距離に基づいた補間によってひずみを補間、iFEMによって変位を推定した。推定結果は、モーションキャプチャによって直接計測した変位と比較した。モーションキャプチャで直接計測した変位と、有限要素モデル上の距離に基づいた補間とiFEMによって求めた変位は、全ての荷重ケースにおいてよく一致した。また、シミュレーションと同様に計測点が少ない場合に、変位の推定精度は低下した。荷重の大きさに対して推定した変位は線形に変化し、3kgfという比較的小さい荷重においても、iFEMによって求めた変位はモーションキャプチャで直接計測した変位とよく一致した。発生するひずみ場の複雑さを表現するのに、十分な計測点が存在する場合において、有限要素モデル上の距離に基づいた補間とiFEMを用いた形状センシング手法を海流発電ブレードモデルに適用することで、変位をよく推定可能であることが実験的に示された。

ただし、本研究ではより少ないセンサ点で構造全体の変形を推定するために、複雑なローカルひずみが発生するブレードモデルの根元部分を除去したモデル化を行っている。実際の海流発電ブレードで形状センシングを行うためには、運用中の海流発電ブレードにどのようなひずみ場が発生するか調査し、ローカルなひずみが全体変形に与える影響をよく検討した上で形状センシング手法を再検討する必要がある。特に複雑なローカルひずみ場が変形に寄与する場合には、本手法を適用するためにそのひずみ場を再現するのに十分に多いセンサ点による計測が求められることに注意する。

3.6 社会適用に向けた取り組み

本節では、iFEM を用いた形状センシングシステムを社会適用するための取り組みについて述べる。

3.6.1 社会適用に向けた取り組みの背景と課題

これまでの数値的・実験的検証により、提案手法の妥当性が確かめられた。船舶のような、より複雑な構造に対する iFEM を用いた形状センシングの適用性検証も、十文字 [56] や三上 [57] によって進められ、良い結果を得ている。

社会適用に向けた次のステップとして、iFEM を用いた形状センシングは実構造物を対象にしたより実践的な検証の実施が必要である。デジタルツインやモニタリングシステムとしてのアルゴリズムの活用を実践的に検証するためには、実構造物を対象とした計測・解析・可視化のプロセスを実験や運用中にリアルタイムで実行するシステム化が必要である。船舶を対象にしたデジタルツインのための手法は、国内でもカルマンフィルタを用いた変形推定 [68] や遺伝的アルゴリズムを用いた波浪場逆推定 [69] などが提案されており、iFEM と同様に、システム化を要するより実践的な検証の実施が期待されている。このようなシステム開発には大きな労力を要し、アルゴリズムや各研究機関ごとに独自に開発を進めることは非効率的であるため、デジタルツインのためのプラットフォームの開発が求められている。船舶業界では協調的なデジタルツインシミュレーションのためのエコシステムとして、OSP[25] の開発が行われたが、OSP は iFEM を始めとする大量のデータを要する大規模な解析を行うことを想定して設計されていない。

本研究では、超高精度船体構造デジタルツインの研究開発プロジェクト [70] の下、実船のような実構造物への提案手法の適用とモニタリングシステムのより実践的な検証を効率的に実施するため、複数の研究組織と共同でデジタルツインのための統合開発プラットフォーム i-SAS の開発に取り組む。

以上の背景から、i-SAS は以下の機能要件を有する。

- 計測・解析・可視化をシームレスに接続する
- 実験室レベルから実船レベルまでスケラブルに適用可能
- 各研究者が自身の要素技術を簡単に試せる

i-SAS は以下の役割を果たすことが期待される。

- デジタルツインのひな形を与える
- プラットフォームを活用することで、アルゴリズムを適用するプロセスを効率化し、研究を加速させる
- 研究成果を共通の資産として蓄積・オープンにすることで、研究者間のコラボレーションを容易にする

3.6.2 Integrated Structural Analysis System

i-SAS(Fig.3.29) は Integrated Structural Analysis System の略称であり、構造物に設置されたセンサによる計測量に基づいて、現在および未来の構造物の状態量を推定し、設計・保守・運用に寄与する情報を提供することを目的とし、構造解析・データ分析・センシングシステム・可視化をシームレスに接続した統合構造解析システムである。海上技術安全研究所、東京大学、大阪大学、横浜国立大学、Class NK、JMU らと Alliance を形成し、東京大学村山研究室のマネジメントの下で設計・開発されている。Alliance メンバーに対してプログラムは公開されている(<https://github.com/i-SAS>)。



Fig.3.29 i-SAS のロゴ

i-SAS のプログラムは、各手法を実装した Sub package とそれらを操作する Interface package、これらのパッケージを使用して解析を実行する Project から構成される Fig.3.30。Sub package はモジュール性を持ち、Interface package により統一的に操作可能にすることで、ユーザーは Sub package のアルゴリズムを自由に組み合わせてユーザーの問題に適用する Project

を簡単に構成することが可能である。

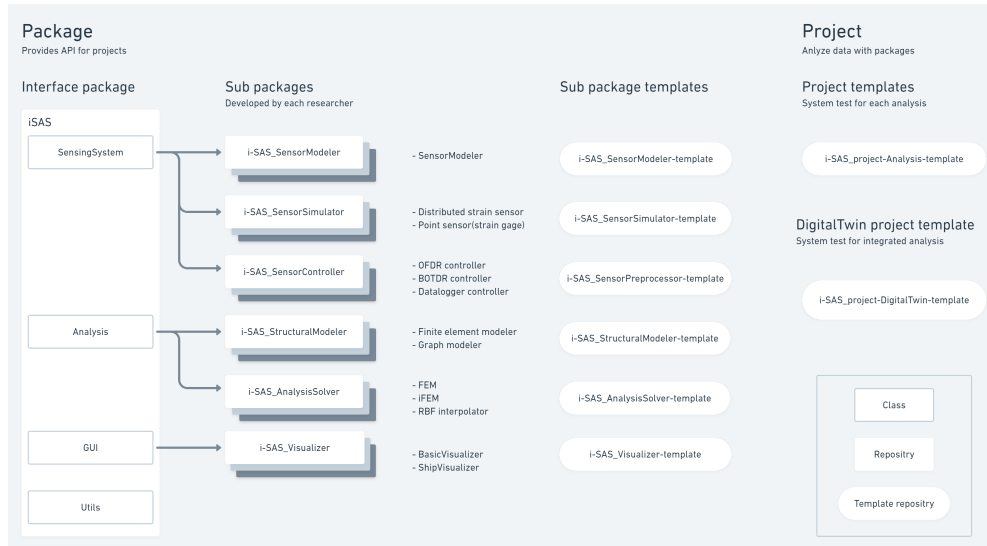


Fig.3.30 i-SAS のプログラム構成

船舶への適用において, i-SAS は船上の船員と陸上のオペレーターに利用されることを想定する (Fig.3.31). 現状ではインターネット環境が整っていない海洋上での運用を想定し, 寄港時にデータベースをクラウドに同期することで, 陸上のオペレーターが船舶の航行に合わせた構造情報を分析可能にする. 将来的には海洋上でのリアルタイム同期を視野に入れる. 一方で, 船上の船員に対しては, リアルタイムでモニタリングが可能なシステムを提供する.

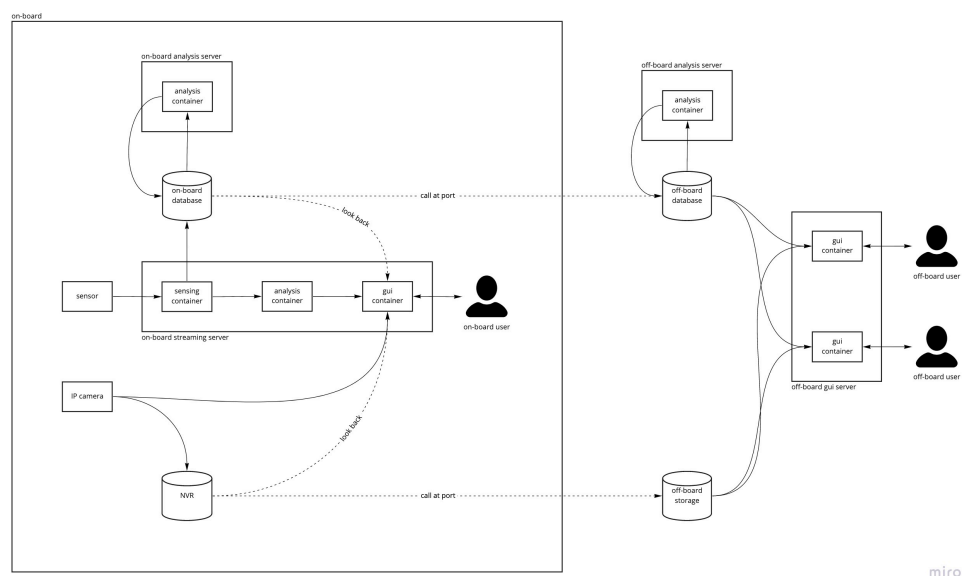


Fig.3.31 i-SAS のシステムアーキテクチャ

環境の違いによる動作の差異を防ぐと同時に検証段階と運用段階のシステムの移植を簡単にするため, i-SAS は仮想環境 (Docker) の使用を前提に開発されている. 各モジュールごとに複数の環境が並列で実行され, 環境ごとに解析を実行し, 解析結果が環境間で共有され次の解析の入力として使用される. 計測結果・解析結果は, 並列で実行される環境のうちの 1 つの GUI モジュールで統一的に可視化される (Fig.3.32). また, データは選択的にデータベースに蓄積することが可能である. データベースは, 計測結果・解析結果などの時系列データと構造モデル・センサや解析のメタデータなどの静的データを, それぞれのデータ特性に合ったデータベースで管理する.

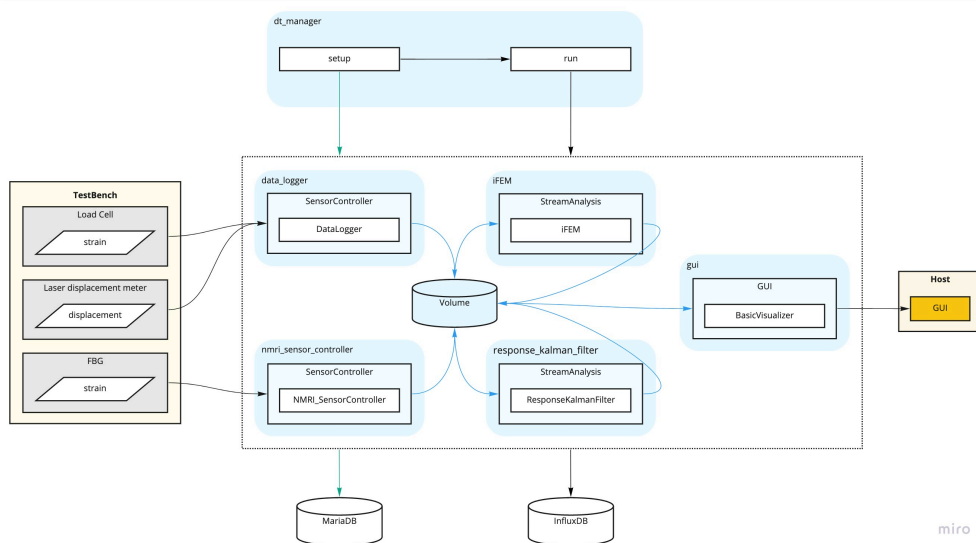


Fig.3.32 i-SAS のプロジェクトのシステム構成の例

i-SAS のシステムは 2021 年 11 月に実施される水槽模型試験での活用をマイルストーンに開発が進められ, 水槽模型試験においてリアルタイムに計測・解析・可視化を行うことに成功した. 試験後も運用中の実船への適用に向けて, 継続的な開発が行われることが予定されている.

3.7 iFEM 形状センシングのまとめ

本章では, Stiff structure を対象にした形状センシング手法として, iFEM を用いた形状センシング手法について, 定式化と数值的・実験的検証を実施した.

3.1 節では, iFEM の先行研究について詳細に述べ, それらと比較した本研究の特徴を述べた. さらに, iFEM の次元と誤差について整理した.

3.2 節では, iFEM の定式化を詳細に述べた. 本研究で提案する補間手法について, その着想と定式化, および手法の制限について述べた.

3.3 節では, iFEM を理論解の求まる梁の問題に適用し, 確からしく変形が求まることを確認

し、iFEM の計算によって生じる誤差について評価した。

3.4 節では、サンドイッチパネルを対象に数値的・実験的な検証を実施した。数値的検証では、複数のセンサ配置について、iFEM の精度に与える影響を検証し、センサの種類、配置、ノイズの大きさが iFEM の推定精度に与える影響を評価した。実験的検証では、実際に FBG センサを完全に埋め込んだサンドイッチパネルを設計・制作し、曲げ試験を実施した。iFEM によって計算した変位は、モーションキャプチャによって直接計測した変位とよく一致した。

3.5 節では、海流発電ブレードモデルを対象に数値的・実験的な検証を実施した。ひずみの補間手法として、本研究で提案する有限要素モデル上の距離に基づいた補間を適用し、数値検証と実験的検証の両者において、精度よく変形を同定することに成功した。

3.6 節では、iFEM を用いた形状センシングを社会実装するための取り組みである i-SAS の設計について述べた。デジタルツインを開発するためのプラットフォームである i-SAS により、iFEM を用いた形状センシング技術の社会への還元が実現することが期待できる。

本章全体を通じて、iFEM を用いた形状センシングによって、Stiff structure の変形を少ない計測点から、精度よく推定可能であることが示された。iFEM を用いた形状センシングは計測誤差に対してロバストで、リアルタイム性を有し、汎用的に適用可能な実用性の高い技術である。今後は、より大規模な構造を対象とした技術検証を経た上で、より合理的・効率的な構造物の運用・保守・設計の実現に向けて、社会実装が進められることが期待できる。

第 4 章

MCF を用いた形状センシング

第 4 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため、インターネット公表できません。

第 5 章

応力解析

第 5 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため、インターネット公表できません。

第 6 章

荷重推定

第 6 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため、インターネット公表できません。

第 7 章

結論と展望

本章では、本研究の結論と今後の展望について述べる。

7.1 結論

本研究では、構造に設置したセンサによる計測量から構造物の状態量を同定し、それをモニタリング・蓄積することによって、データに基づく合理的・効率的な運用・保守・設計を実現し、構造物の安全性・信頼性を高めることに貢献することを目的に、構造物に設置したセンサで計測したひずみ情報を用いた形状センシングを起点とする SHM の基盤技術を提案・検証した。

第 3 章では、Stiff structure を対象にした形状センシング技術である iFEM に関して、補間と iFEM を用いた形状センシングの手法の提案とサンドイッチパネルおよび海流発電ブレードを対象にした技術検証を行った。サンドイッチパネルを対象にした検証では、数値的にセンサの種類・配置・ノイズが形状センシングの精度に与える影響を分析し、実験的に手法の妥当性を検証した。実験では、モーションキャプチャで計測した変位と提案手法で計算した変位はよく一致した。海流発電ブレードを対象にした検証では、本研究で提案する有限要素モデル上の距離に基づいた補間を適用し、数値検証と実験的検証の両者において、精度よく変形を同定することに成功した。さらに iFEM を用いた形状センシング技術を社会実装するための取り組みとして、デジタルツインプラットフォームとして開発が進められている i-SAS を設計した。

第 4 章では、Flexible structure を対象にした形状センシング技術である MCF 形状センシングに関して、MCF 構成について汎用的な定式化と、形状推定精度向上のための体系的な失敗モードの分析、代表的な失敗モードに関する数値的・実験的検証を行った。特に、本研究で提案した、形状の一部の位置の情報を用いて形状全体を補正する手法によって、形状センシングの精度を大きく改善できることを実験的に示した。

第 5 章では、形状センシングの結果に基づいた Re-FEM による応力解析について、数値検証を行った。穴あき平板を対象にした検証では、形状センシングの結果を詳細モデルに強制変位

として与えることによって、非計測部の円孔部周辺の応力を同定することに成功した。パイプを対象にした検証では、MCF 形状センシングの結果をもちいて、線状構造体の応力を分析することに成功した。

第6章では、形状センシングの結果に基づいた ext-iFEM による荷重推定について、数値的検証を行った。平板を対象にした検証では、複雑さの異なる4つの異なる荷重条件に対して、荷重方向と荷重の滑らかさの制約を与えることによって、荷重の分布を推定することに成功した。

本論文全体を通じて、Stiff structure を対象にした iFEM を用いた形状センシングと Flexible structure を対象にした MCF 形状センシングによって、幅広い構造物を対象にひずみ計測に基づいた形状センシングを適用し、形状センシングの結果に基づいて Re-FEM や ext-iFEM を適用することにより、SHM にとって重要な物理量である変位・応力・外力を導出する SHM システムのコンセプトを示すとともに、それを実現するための基盤技術を提案しその適用性を明らかにした。このシステムは、運用中の構造物の変位・応力・外力といった物理量をモニタリングすることを可能にし、そこで収集されたデータは、短期的には運用、中期的には保守、長期的には設計を効率化・合理化することに貢献する。

7.2 課題と展望

本研究で示した各手法の課題と今後の展望についてまとめる。

iFEM を用いた形状センシングは入力の変位誤差に対してロバストにかつ高速に実用的なレベルの形状をセンシングを行うことが可能である。ただし、変形を精度よく同定するためには、変形の複雑さに対して十分な数の計測点が必要であり、これをより少なくするためのひずみの補間技術の研究が重要である。本研究で示した、有限要素モデル上の距離に基づいた補間手法は、少ないセンサ点から形状を精度よく推定することが可能であるものの、適用可能なセンサの配置や構造のジオメトリに制限があり、より一般的な有限要素モデル上のひずみの補間手法の開発が求められる。また、社会実装に向けて、実際の構造物にセンサを設置し収集した運用中のデータを用いた検証を実施し、iFEM の解析結果の活用法をより精緻化する必要である。

MCF 形状センシングは、システムを構成する計測器・MCF・アルゴリズムの要素が複雑に形状センシングの結果に影響を与える。本研究で示した体系的な失敗モードの分析によって、一つ一つ誤差要因に対処することによって、実用的な形状センシングの精度が達成できることが期待できる。今後は、具体的に形状センシングを適用したい構造物とその変形を定め、計測距離、サンプリングレート、精度といった要件に基づいて最適なシステムを設計・構成し、失敗モードの分析を通じた精度改善に取り組むことが重要である。

Re-FEM は本検証では数値検証のみを行っており、実験的な検証が求められる。また、実用上重要な亀裂進展の解析や蓄積疲労の解析のような問題に対する適用性の分析も十分に行われておらず、今後の課題とする。

ext-iFEM は本検証では数値検証のみを行っており, 推定変位の誤差に対するロバスト性を実験的に検証することが求められる. また, 実際の適用対象となる翼構造や船殻構造と想定荷重分布に対する適用性の検証も今後の課題とする.

本研究全体を通して示した, SHM システムを実構造物に適用し社会実装に向けて研究を加速するためには, i-SAS のようなプラットフォームの開発および活用が不可欠である. このようなプラットフォームの開発が重点的に進められることにより, 本質的な研究活動に注力し成果や知見が蓄積していく研究そのものの合理化・効率化が期待できる.

謝辞

本論文は、筆者が東京大学新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻の博士課程での研究成果をまとめたものであり、たくさんの方々の支えのおかげで完成に至りました。

修士課程及び博士課程の5年間を通して、熱心なご指導を賜りました指導教員の村山英晶教授に深く感謝申し上げます。村山先生には、研究の意義や方針について何度も議論を交わし、その多大なご知見から常に適切な助言をいただきました。

副査の新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻の高木健教授、和田良太准教授、工学系研究科システム創成学専攻の鈴木克幸教授、工学系研究科航空宇宙工学専攻の水口周准教授には、専門的な知見から本研究の方針について、熱心にご指導いただきました。心より感謝申し上げます。

3.4 節で述べました iFEM の CFRP サンドイッチパネルへの適用に関するジャーナル論文の共著者である荻野豪治氏、Magnus Burman 先生、和田大地氏、井川寛隆氏、村山英晶教授は、ジャーナルの研究内容を本論文の一部とすることを快く了承いただき、感謝申し上げます。荻野氏は、私の修士課程での同期であり、iFEM に関する議論を幾度とかわしました。また、本研究で使用した CFRP サンドイッチパネルに関して、Magnus Burman 先生とともに、その設計・制作を中心に組み込んでいただきました。和田氏、井川氏は実験における計測システム・データ解析手法の選定をしていただきました。また、金沢工業大学革新複合材料研究開発センター (ICC) の鶴沢潔所長、植村公彦氏には、サンドイッチパネル作成の際には設備のご提供と、作成のために指導をいただきました。ありがとうございました。

3.5 節では、株式会社 IHI の技術開発本部技術基盤センター非金属・複合材料グループの村田祥氏、嶋津恭弘氏、Juho Siivola 氏に、海流発電ブレードの FEM モデルのご提供や実験実施にご協力いただきました。お礼申し上げます。

3.6 節で述べました、i-SAS の開発に関しまして、i-SAS の Steering Committee として、開発方針の策定にご意見をいただきました、横浜国立大学大学院工学研究院の満行泰河准教授、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部門の辰巳晃助教、海上技術安全研究所構造安全評価系構造解析研究グループの岡正義氏、馬沖氏、小森山祐輔氏、同じく海上技術安全研究所知識・データシステム系知識システム研究グループの和中真之介氏、東京大学工学系研

究科 システム創成学専攻の宝谷英貴助教, 日本海事協会の木村文陽様, 見良津黎氏, ジャパンマリンユナイテッド株式会社の平川真一氏, 元村山研究室助教で現九州大学工学研究院海洋システム工学部門の藤公博助教にお礼申し上げます。また, 研究室の後輩である三上航平氏, 小高峯詩士氏, 宮下知也氏には, i-SAS の設計・開発に関しまして議論を重ねるとともに, 協力して開発に取り組みました。お礼申し上げます。

第4章では, たくさんの企業の方々にご協力いただきました。日本電信電話株式会社アクセスサービスシステム研究所アクセス設備プロジェクト先端媒体グループの中島和秀氏, 半澤信智氏, 松井隆氏には, 本研究で使用した MCF をご提供いただきました。お礼申し上げます。沖電気工業株式会社イノベーション推進センターセンシング技術研究開発部の村井仁氏, 小泉健吾氏には, 本研究で使用した計測器 SDH-BOTDR をご提供いただき, 使用法についてご指導いただきました。お礼申し上げます。宇部エクシモ株式会社研究開発本部の中村康一氏, 馬場昭典氏, 若原貴之氏, 橋本雅史氏, 足立龍彦氏は MCF 形状センシングのケーブルへの適用に関して, ご協力いただきました。お礼申し上げます。株式会社レーザックの町島祐一氏, 趙越氏, 長田氏には, 形状センシング手法について議論させていただきました。お礼申し上げます。株式会社富士テクニカルリサーチの水井賢文氏, 渡辺惇氏, 椿風太氏には, MCF 形状センシング実験における OFDR の使用及び解析についてご指導いただきました。お礼申し上げます。鹿島建設株式会社技術研究所土質・地盤グループおよび先端・メカトロニクスグループの川端淳一氏, 永谷英基氏, 今井道男氏, 藤原航太郎氏, 中島拓巳氏には, MCF 形状センシングの土木分野での活用に関してご知見をいただきました。お礼申し上げます。また, 村山研究室の後輩の前田恭輝氏は, MCF 形状センシングの実験に関して, 実験の計画および実験の実施, データの整理に中心的に取り組んでいただき, 感謝申し上げます。

研究室の秘書の石渡眞理子氏, 田中珠恵氏には, 研究に集中できる環境をご提供いただきました。ありがとうございました。研究室の中島拓也氏, 十文字拓也氏, 三上航平氏, 前田恭輝氏, 東駿吾氏, 小高峯詩士氏, 中内大智氏, 宮下知也氏には, 研究に関する議論や実験にご協力をいただきました。お礼申し上げます。

最後に, これまで私を暖かく応援し支えて下さった両親と周囲の方々に心よりお礼申し上げます。

2021 年 12 月 8 日

小林真輝人

参考文献

- [1] 松本勝, “タコマ橋落橋の謎と教訓,” *日本風工学会誌*, vol. 2003, no. 96, pp. 3–5, 2003.
- [2] コンテナ運搬船安全対策検討委員会, “コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書,” 国土交通省, Tech. Rep., 2015.
- [3] H. Murayama, “Structural health monitoring of composite materials using distributed fiber-optic sensors,” in *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. CRC Press, 2016, pp. 105–156.
- [4] D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes, *Structural health monitoring*. John Wiley & Sons, 2010, vol. 90.
- [5] E. J. Tuegel, A. R. Ingraffea, T. G. Eason, and S. M. Spottswood, “Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2011, 2011.
- [6] M. R. Dhanak and N. I. Xiros, *Springer handbook of ocean engineering*. Springer, 2016.
- [7] P. J. Schubel and R. J. Crossley, “Wind turbine blade design,” *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3425–3449, 2012.
- [8] D. Zenkert, *The handbook of sandwich construction*. Engineering Materials Advisory Services, 1997.
- [9] M. Yamamoto, “A study about the dynamic behavior of flexible tubes including internal flow,” *Yokohama National University*, 2011.
- [10] 渡邊正之, 田代省三, 橋本菊夫, and 門馬大和, “10,000 m 級無人探査機「かいこう」ビークル漂流事故の原因究明,” *海洋理工学会誌*, vol. 9, no. 2, pp. 163–168, 2003.
- [11] A. Kefal, J. B. Mayang, E. Oterkus, and M. Yildiz, “Three dimensional shape and stress monitoring of bulk carriers based on ifem methodology,” *Ocean Engineering*, vol. 147, pp. 256–267, 2018.
- [12] E. M. Lally, M. Reaves, E. Horrell, S. Klute, and M. E. Froggatt, “Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures,” in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012*, vol. 8345. International Society for Optics and

- Photonics, 2012, p. 83452Y.
- [13] C.-g. Pak, “Wing shape sensing from measured strain,” *AIAA Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 1068–1077, 2016.
- [14] J. Burgner-Kahrs, D. C. Rucker, and H. Choset, “Continuum robots for medical applications: A survey,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1261–1280, 2015.
- [15] A. Kefal, I. E. Tabrizi, M. Yildiz, and A. Tessler, “A smoothed ifem approach for efficient shape-sensing applications: Numerical and experimental validation on composite structures,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 152, p. 107486, 2021.
- [16] M. A. Abdollahzadeh, A. Kefal, and M. Yildiz, “A comparative and review study on shape and stress sensing of flat/curved shell geometries using c0-continuous family of ifem elements,” *Sensors*, vol. 20, no. 14, p. 3808, 2020.
- [17] T. Ueno, S. Nagaya, M. Shimizu, H. Saito, and N. Handa, “Development and demonstration test for floating type ocean current turbine system conducted in kuroshio current,” in *2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [18] “Api rp 2rd design of risers for floating production systems (fpss) and tension-leg platforms (tlps),” 1998.
- [19] “Dnv-gl rules for classification of ships part 5 ship types, chapter 2 container ships,” 2016.
- [20] G. M. Calvi, M. Moratti, G. J. O’Reilly, N. Scattarreggia, R. Monteiro, D. Malomo, P. M. Calvi, and R. Pinho, “Once upon a time in italy: The tale of the morandi bridge,” *Structural Engineering International*, vol. 29, no. 2, pp. 198–217, 2019.
- [21] A. Airlines, “Flight 243, boeing 737-200, n73711, near maui hawaii, april 28, 1988,” NTSB/AAR-89/03, National Transportation Safety Board, Washington, DC 20594, Tech. Rep., 1989.
- [22] C. Lagos, F. Delgado, and M. A. Klapp, “Dynamic optimization for airline maintenance operations,” *Transportation Science*, vol. 54, no. 4, pp. 998–1015, 2020.
- [23] X.-W. Ye, Y.-H. Su, and P.-S. Xi, “Statistical analysis of stress signals from bridge monitoring by fbg system,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 491, 2018.
- [24] S. Shajjee, L. Y. Pao, and R. R. McLeod, “Monitoring ice accumulation and active de-icing control of wind turbine blades,” in *Wind Turbine Control and Monitoring*. Springer, 2014, pp. 193–230.
- [25] “Open simulation platform,” 2021. [Online]. Available: <https://opensimulationplatform.com/>
- [26] S. Z. Halim, S. Janardanan, T. Flechas, and M. S. Mannan, “In search of causes behind offshore incidents: Fire in offshore oil and gas facilities,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 54, pp. 254–265, 2018.

-
- [27] L. Ren, T. Jiang, Z.-g. Jia, D.-s. Li, C.-l. Yuan, and H.-n. Li, "Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology," *Measurement*, vol. 122, pp. 57–65, 2018.
 - [28] G. Feo, J. Sharma, D. Kortukov, W. Williams, and T. Ogunsanwo, "Distributed fiber optic sensing for real-time monitoring of gas in riser during offshore drilling," *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 267, 2020.
 - [29] 小島駿, "水中線状構造物における分布型センサの逐次データ同化を用いた挙動推定," Bachelor's Thesis, 東京大学, 2020.
 - [30] A. Tessler and J. L. Spangler, "Inverse fem for full-field reconstruction of elastic deformations in shear deformable plates and shells," 2004.
 - [31] H. H. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, "Comparison of laser doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration," *Ndt & E International*, vol. 38, no. 3, pp. 213–218, 2005.
 - [32] E. Cosser, G. W. Roberts, X. Meng, and A. H. Dodson, "Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station," in *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece*, vol. 25, 2003.
 - [33] S. Yoneyama and H. Ueda, "Bridge deflection measurement using digital image correlation with camera movement correction," *Materials transactions*, vol. 53, no. 2, pp. 285–290, 2012.
 - [34] K.-T. Park, S.-H. Kim, H.-S. Park, and K.-W. Lee, "The determination of bridge displacement using measured acceleration," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 3, pp. 371–378, 2005.
 - [35] G. C. Kirby III, T. W. Lim, R. Weber, A. Bosse, C. Povich, and S. Fisher, "Strain-based shape estimation algorithms for a cantilever beam," in *Smart Structures and Materials 1997: Smart Structures and Integrated Systems*, vol. 3041. International Society for Optics and Photonics, 1997, pp. 788–798.
 - [36] N.-S. Kim and N.-S. Cho, "Estimating deflection of a simple beam model using fiber optic bragg-grating sensors," *Experimental mechanics*, vol. 44, no. 4, pp. 433–439, 2004.
 - [37] W. L. Ko, W. L. Richards, and V. T. Fleischer, "Applications of ko displacement theory to the deformed shape predictions of the doubly-tapered ikhana wing," 2009.
 - [38] A. Derkevorkian, S. F. Masri, J. Alvarenga, H. Boussalis, J. Bakalyar, and W. L. Richards, "Strain-based deformation shape-estimation algorithm for control and monitoring applications," *AIAA journal*, vol. 51, no. 9, pp. 2231–2240, 2013.
 - [39] F. Pena, B. Martins, and W. L. Richards, "Adaptive load control of flexible aircraft wings using fiber optic sensing," in *Optical Fiber Sensors*. Optical Society of America, 2018, p.

- WF101.
- [40] R. Jones, D. Bellemore, T. Berkoff, J. Sirkis, M. Davis, M. Putnam, E. Friebele, and A. Kersey, "Determination of cantilever plate shapes using wavelength division multiplexed fiber bragg grating sensors and a least-squares strain-fitting algorithm," *Smart materials and structures*, vol. 7, no. 2, p. 178, 1998.
 - [41] L.-H. Kang, D.-K. Kim, and J.-H. Han, "Estimation of dynamic structural displacements using fiber bragg grating strain sensors," *Journal of sound and vibration*, vol. 305, no. 3, pp. 534–542, 2007.
 - [42] S. Rapp, L.-H. Kang, U. C. Mueller, J.-H. Han, and H. Baier, "Dynamic shape estimation by modal approach using fiber bragg grating strain sensors," in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007*, vol. 6529. International Society for Optics and Photonics, 2007, p. 65293E.
 - [43] P. Bogert, E. Haugse, and R. Gehrki, "Structural shape identification from experimental strains using a modal transformation technique," in *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2003, p. 1626.
 - [44] M. Gherlone, P. Cerracchio, M. Mattone, M. Di Sciuva, and A. Tessler, "An inverse finite element method for beam shape sensing: theoretical framework and experimental validation," *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 4, p. 045027, 2014.
 - [45] A. Kefal, E. Oterkus, A. Tessler, and J. L. Spangler, "A quadrilateral inverse-shell element with drilling degrees of freedom for shape sensing and structural health monitoring," *Engineering science and technology, an international journal*, vol. 19, no. 3, pp. 1299–1313, 2016.
 - [46] A. Kefal and E. Oterkus, "Displacement and stress monitoring of a chemical tanker based on inverse finite element method," *Ocean Engineering*, vol. 112, pp. 33–46, 2016.
 - [47] K. Paczkowski and H. Riggs, "An inverse finite element strategy to recover full-field, large displacements from strain measurements," in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 42681, 2007, pp. 531–537.
 - [48] R. G. Duncan and M. T. Raum, "Characterization of a fiber-optic shape and position sensor," in *Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring Systems and Applications*, vol. 6167. International Society for Optics and Photonics, 2006, p. 616704.
 - [49] R. G. Duncan, M. E. Froggatt, S. T. Kreger, R. J. Seeley, D. K. Gifford, A. K. Sang, and M. S. Wolfe, "High-accuracy fiber-optic shape sensing," in *Sensor Systems and Networks: Phenomena, Technology, and Applications for NDE and Health Monitoring 2007*, vol. 6530. International Society for Optics and Photonics, 2007, p. 65301S.
 - [50] D. Barrera, I. Gasulla, and S. Sales, "Multipoint two-dimensional curvature optical fiber sen-

- sor based on a nontwisted homogeneous four-core fiber,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 12, pp. 2445–2450, 2015.
- [51] K. Lee, A. Aihara, G. Puntsagdash, T. Kawaguchi, H. Sakamoto, and M. Okuma, “Feasibility study on a strain based deflection monitoring system for wind turbine blades,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 82, pp. 117–129, 2017.
- [52] Y.-L. Park, S. Elayaperumal, B. Daniel, S. C. Ryu, M. Shin, J. Savall, R. J. Black, B. Moslehi, and M. R. Cutkosky, “Real-time estimation of 3-d needle shape and deflection for mri-guided interventions,” *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 15, no. 6, pp. 906–915, 2010.
- [53] M. Megens, M. D. Leistikow, A. van Dusschoten, M. B. van der Mark, J. J. Horikx, E. G. van Putten, and G. W. ’t Hooft, “Shape accuracy of fiber optic sensing for medical devices characterized in bench experiments,” *Medical Physics*, 2021.
- [54] K. K. Lee, A. Mariampillai, M. Haque, B. A. Standish, V. X. Yang, and P. R. Herman, “Temperature-compensated fiber-optic 3d shape sensor based on femtosecond laser direct-written bragg grating waveguides,” *Optics express*, vol. 21, no. 20, pp. 24 076–24 086, 2013.
- [55] M. Amanzadeh, S. M. Aminossadati, M. S. Kizil, and A. D. Rakić, “Recent developments in fibre optic shape sensing,” *Measurement*, vol. 128, pp. 119–137, 2018.
- [56] 十文字拓也, “逆有限要素法を用いた大型コンテナ船の変形推定の研究,” Master’s thesis, 東京大学, 2019.
- [57] 三上航平, “ひずみ場補間を用いた ifem の船体構造モニタリングへの適用検討,” Master’s thesis, 東京大学, 2020.
- [58] R. Roy, M. Gherlone, C. Surace, and A. Tessler, “Full-field strain reconstruction using uniaxial strain measurements: Application to damage detection,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1681, 2021.
- [59] D. Oboe, L. Colombo, C. Sbarufatti, and M. Giglio, “Comparison of strain pre-extrapolation techniques for shape and strain sensing by ifem of a composite plate subjected to compression buckling,” *Composite Structures*, vol. 262, p. 113587, 2021.
- [60] P. Cerracchio, M. Gherlone, M. Di Sciuva, and A. Tessler, “A novel approach for displacement and stress monitoring of sandwich structures based on the inverse finite element method,” *Composite Structures*, vol. 127, pp. 69–76, 2015.
- [61] A. Kefal, A. Tessler, and E. Oterkus, “An enhanced inverse finite element method for displacement and stress monitoring of multilayered composite and sandwich structures,” *Composite Structures*, vol. 179, pp. 514–540, 2017.
- [62] A. Kefal and M. Yildiz, “Modeling of sensor placement strategy for shape sensing and structural health monitoring of a wing-shaped sandwich panel using inverse finite element

- method,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 2775, 2017.
- [63] A. Kefal, I. Tabrizi, M. Tansan, E. Kisa, and M. Yildiz, “An experimental implementation of inverse finite element method for real-time shape and strain sensing of composite and sandwich structures,” *Composite Structures*, vol. 258, p. 113431, 2021.
- [64] 小林真輝人, “線状構造体を対象とした分布型光ファイバセンサを用いた荷重・変形および形状同定の研究,” Master’s thesis, 東京大学, 2018.
- [65] L. Segerlind and H. Saunders, “Applied finite element analysis,” 1987.
- [66] A. Kefal, “An efficient curved inverse-shell element for shape sensing and structural health monitoring of cylindrical marine structures,” *Ocean Engineering*, vol. 188, p. 106262, 2019.
- [67] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, and T. R. Evans, “Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions,” in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2001, pp. 67–76.
- [68] 飯島一博, 辰巳晃, and 藤久保昌彦, “ひずみセンサー情報と数値モデルによる船体変形の推定に関する研究,” in *日本船舶海洋工学会講演会論文集 Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, no. 30. 日本船舶海洋工学会, 2020, pp. 221–227.
- [69] X. Chen, T. Okada, Y. Kawamura, and T. Mitsuyuki, “Estimation of on-site directional wave spectra using measured hull stresses on 14,000 teu large container ships,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 690–706, 2020.
- [70] 一般財団法人日本船舶技術研究会, “超高精度船体構造デジタルツインの研究開発 (フェーズ 2) 2020 年度成果報告書,” 公益財団法人日本財団, Tech. Rep., 2020.

付録 A

iFEM

A.1 iFEM の定式化

A.1.1 全体座標系における iQS4 要素の定式化の導出

本研究では, iQS4 要素 [45] を複雑な曲面に適用するために, 節点変位の回転成分を全体座標系に修正した.

オリジナルの iQS4 要素では, 節点変位の回転成分はローカル座標系で定義されており, 形状マトリクスは以下で表される.

$$\mathbf{N} = [\mathbf{N}_1 \quad \mathbf{N}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{N}_4], \quad (\text{A.1})$$

$$\mathbf{N}_i = [\mathbf{N}_u \quad \mathbf{N}_\theta], \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} n_i & 0 & 0 \\ 0 & n_i & 0 \\ 0 & 0 & n_i \end{bmatrix}, \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{N}_\theta = \begin{bmatrix} 0 & \frac{t}{2}r_3n_i & l_i \\ -\frac{t}{2}r_3n_i & 0 & m_i \\ -l_i & -m_i & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

ここで, t は要素の厚み, r_3 は要素曲線座標系の厚み方向成分である. n_i, l_i, m_i は形状関数であり, 文献 [45] に詳細に記述されている.

この定式化では, 隣り合う要素の要素座標系が大きく異なる場合に, 節点変位の回転成分を一意に表すことができない. そこで, 節点変位の回転成分を全体座標系に変更し, それに適するように形状マトリクスにおける回転成分の係数部分 \mathbf{N}_θ を修正する.

要素座標系 (x, y, z) における, それぞれ軸方向の単位ベクトルを $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ とする. 全体座標系

の各軸の回転によって発生する, 要素座標系の各軸方向の変位 $\Delta \mathbf{n}_1, \Delta \mathbf{n}_2, \Delta \mathbf{n}_3$ は以下で表せる.

$$\Delta \mathbf{n}_i = \mathbf{R}_i \begin{bmatrix} \theta_X & \theta_Y & \theta_Z \end{bmatrix}^T, \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 0 & n_{i,3} & -n_{i,2} \\ -n_{i,3} & 0 & n_{i,1} \\ n_{i,2} & -n_{i,1} & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

ただし, 各軸の回転が十分に小さく, 回転によって生じる節点変位が, 各軸周りの回転による節点変位の和で表されるものとした.

これを用いて, 形状マトリクスにける回転成分の係数部分 N_θ は, 以下のように修正できる.

$$N_\theta = m_i \mathbf{R}_1 - l_i \mathbf{R}_2 + \frac{t}{2} r_3 n_i \mathbf{R}_3. \quad (\text{A.7})$$

付録 B

MCF

付録 B は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため、インターネット公表できません。

