

中間報告書

1. 研究背景と研究概要

日本の風車産業において、ブレードは穏やかな風で使用されることが前提の海外輸入品に強く依存してきたが、風向風速が安定しない日本で高出力な浮体式洋上風車を実現するには高い回転効率、首振制御性能を有する革新的な超軽量ブレード（図1）が必要となる。軽量化に伴って発生する大きな空力弾性変形（流体と構造の連成）に対して、数学モデルを用いた効率的な制御が求められる。大変形解析と大変形制御を一貫して可能とするモデリング理論の構築が目的である。申請者を含め、従来は大変形解析のみを目的としたベクトル変数モデルが開発されてきた。一方で、制御用モデルは大変形時も計測可能な変数で記述される必要がある。そこで本研究では、無線・光ファイバセンサの発達によって、大変形時も計測が容易になってきている歪を変数とした風車モデルの構築を目指し、以下6項目を実施した。本中間報告では、成果発表の完了した①～④について報告を行う。

- ① 【ジョイントパラメータ】による歪モデリング法の風車への適用 [業績 1]
- ② 国際共同研究先の大変形モデルとの比較検証 [業績 3, 4]
- ③ 東北大学・流体科学研究所における風洞実験系の構築 [業績 2]
- ④ 風洞実験による提案モデルの実証 [業績 1, 5]
- ⑤ 歪モデルに対する減衰力の導入
- ⑥ 提案手法を援用した構造最適化法の提案

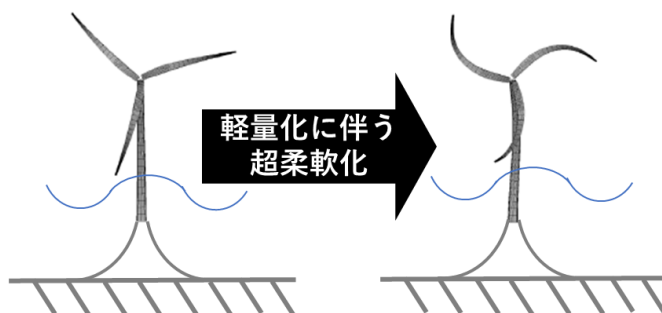


図1 浮体式洋上風車に必要な超軽量ブレード

2. 【ジョイントパラメータ】による歪モデリング法の風車への適用 [業績1]

図2に提案するモデリング法の概念図を示す。申請者が構築してきた柔軟航空機の空力弾性モデルを風車モデルへ拡張した。このモデリング法は対象の細長形状を利用し、「ベクトル」から「歪」に変換された変数を用いて根本から先端までの大変形を漸化計算する申請者オリジナルの手法である。ここに新規アイデア【ジョイントパラメータ】を導入することで航空機と風車の最大の相違点であるジョイントを取り扱うことを可能とした。

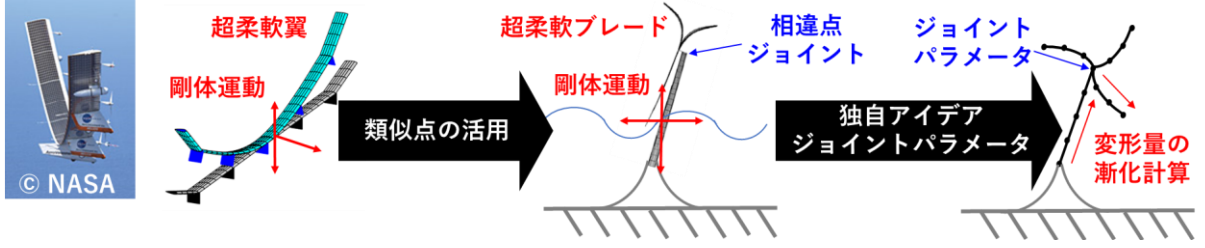


図2 本研究で提案するモデリング法の概念図

大変形解析に広く用いられるベクトルを変数としたモデルは以下の運動方程式で記述される.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{F}_{\text{elastic}} = \mathbf{F} \quad (1)$$

ただし, モデルの一般化座標は次式のようになる.

$$\mathbf{e} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{r}^1 \\ \mathbf{r}_x^1 \\ \mathbf{r}_y^1 \\ \mathbf{r}_z^1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで従来ベクトルモデルの質量行列 \mathbf{M} は一定になるが, 弾性力 $\mathbf{F}_{\text{elastic}}$ は強い非線形性を有する. 伸び歪 ε , 捩率 κ_x , 曲率 κ_y , κ_z を考慮したベルヌーイオイラー梁要素を仮定する. 図3に示す梁要素の両節点 i と $i+1$ の位置ベクトル \mathbf{r} と中立軸と断面の方向を定義する3つのベクトル \mathbf{r}_x , \mathbf{r}_y , \mathbf{r}_z は以下のように曲線座標 s に関する1階の微分方程式として歪と関係づけられる.

$$\frac{\partial}{\partial s} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{r}_x \\ \mathbf{r}_y \\ \mathbf{r}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & (1+\varepsilon_x)\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \kappa_z\mathbf{I} & -\kappa_y\mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\kappa_z\mathbf{I} & \mathbf{0} & \kappa_x\mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \kappa_y\mathbf{I} & -\kappa_x\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{r}_x \\ \mathbf{r}_y \\ \mathbf{r}_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

1階の微分方程式なので, その解は exponential で表される. 節点 i の値を初期値とし, 要素内で歪を一定と仮定すると, その解は離散化した形で表現できる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}^{i+1} \\ \mathbf{r}_x^{i+1} \\ \mathbf{r}_y^{i+1} \\ \mathbf{r}_z^{i+1} \end{bmatrix} = e^{\mathbf{\kappa}_i \Delta s} \begin{bmatrix} \mathbf{r}^i \\ \mathbf{r}_x^i \\ \mathbf{r}_y^i \\ \mathbf{r}_z^i \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで Δs は梁要素の長さであり, $\mathbf{\kappa}_i$ は次式で定義される.

$$\mathbf{\kappa}_i \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{0} & (1+(\varepsilon_x)_i)\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & (\kappa_z)_i\mathbf{I} & -(\kappa_y)_i\mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -(\kappa_z)_i\mathbf{I} & \mathbf{0} & (\kappa_x)_i\mathbf{I} \\ \mathbf{0} & (\kappa_y)_i\mathbf{I} & -(\kappa_x)_i\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

漸化関係式 (4) で要素節点のベクトル速度を歪速度に変換する行列 \mathbf{B} が得られる.

この漸化計算の途中で図4に示すように、ジョイントパラメータ $\boldsymbol{\eta}$ (ジョイントの種類に応じて相対回転角, 方向余弦, オイラーパラメータから選択可能) を導入することで, 微分可能な風車部材の滑らかな大変形だけでなく, 微分不可能なジョイント部での折れ曲がりも表現できるようになる. この変換行列 \mathbf{B} を式(1)に適用することで, 以下の歪モデルの運動方程式が得られる.

$$\mathbf{B}^T \mathbf{M} \mathbf{B} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{B}} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{B}^T \mathbf{F} \quad (6)$$

ただし, モデルの一般化座標は次式のようになる.

$$\mathbf{q} \equiv \left[({}^1\mathbf{q})^T \quad \cdots \quad ({}^j\mathbf{q})^T \quad \cdots \quad ({}^m\mathbf{q})^T \right]^T,$$

$${}^j\mathbf{q} \equiv \left[({}^j\boldsymbol{\eta}^1)^T \quad ({}^j\boldsymbol{\varepsilon}_1)^T \quad \cdots \quad ({}^j\boldsymbol{\varepsilon}_i)^T \quad \cdots \quad ({}^j\boldsymbol{\varepsilon}_n)^T \right]^T, \quad (7)$$

$${}^j\boldsymbol{\varepsilon}_i \equiv \left[{}^j(\varepsilon_x)_i \quad {}^j(\kappa_x)_i \quad {}^j(\kappa_y)_i \quad {}^j(\kappa_z)_i \right]^T.$$

ここで剛性行列 \mathbf{K} が一定である.

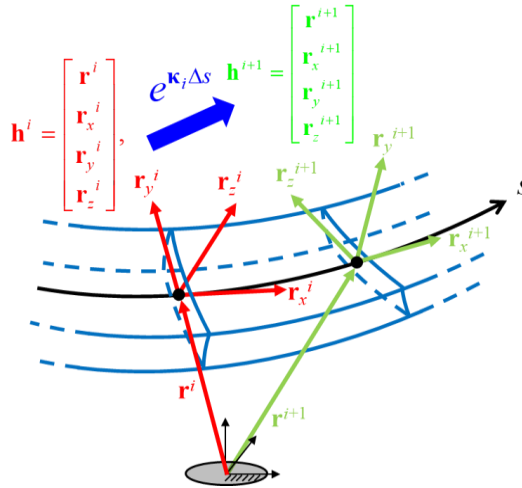


図3 歪変数による大変形状の漸化計算

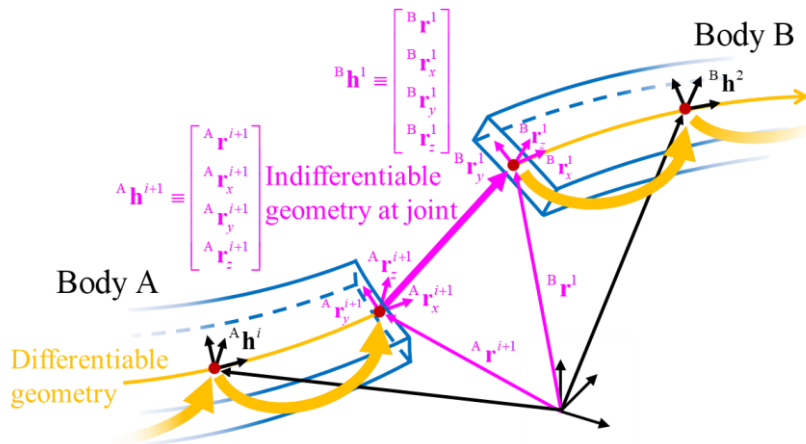


図4 漸化計算へのジョイントパラメータの導入

3. 国際共同研究の大変形モデルとの比較検証 [業績 3, 4]

提案するジョイントパラメータを導入した解析精度を検証するため、国際共同研究先 Imperial College London が開発した大変形モデル Displacement/rotation-based beam と University of Liverpool が開発した Fully intrinsic beam を提案する Proposed strain-based beam と比較した (図 5)。解析対象は 2 つの細長部材を回転ジョイントで連結した振子である。図 5 左は水平状態から重力によって自由落下させた場合の振子の挙動を示す。図 5 右は自由端の X 座標時間履歴である。3 つのモデルの良好な一致から提案手法の妥当性が検証できた。

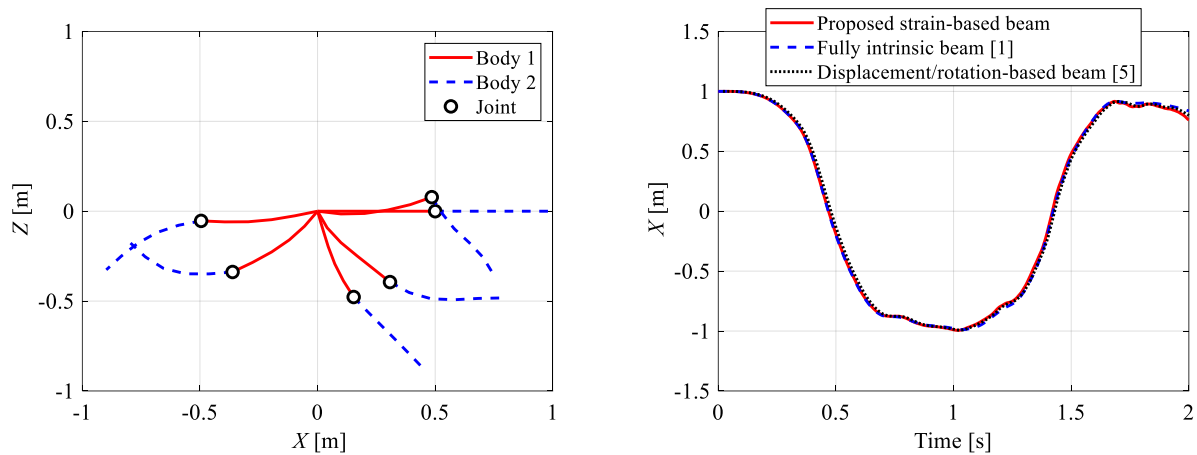


図 5 柔軟振子解析における各モデルの比較

4. 東北大学・流体科学研究所における風洞実験系の構築 [業績 2]

提案モデルの実験実証を行うために東北大学・流体科学研究所の風洞に計測系を構築した。計測装置は高速度カメラ、レーザ変位計、電気抵抗式歪ゲージである。当初は歪を多点計測できる光ファイバセンサを使うことを検討していたが、治具との接触でコードが断線しやすかったため、1点計測の電気抵抗式歪ゲージに変更した。

5. 風洞実験による提案モデルの実証 [業績 1, 5]

図 6 のようにブレードと支柱を模した 2 つの部材からなる模型を風洞開口部に配置した。電動ストッパが降下すると両部材を連結する回転バネの力でブレードが回転を始める。図 7 に示すように実験と解析で得られた歪は良好に一致した。



図 6 漸化計算へのジョイントパラメータの導入

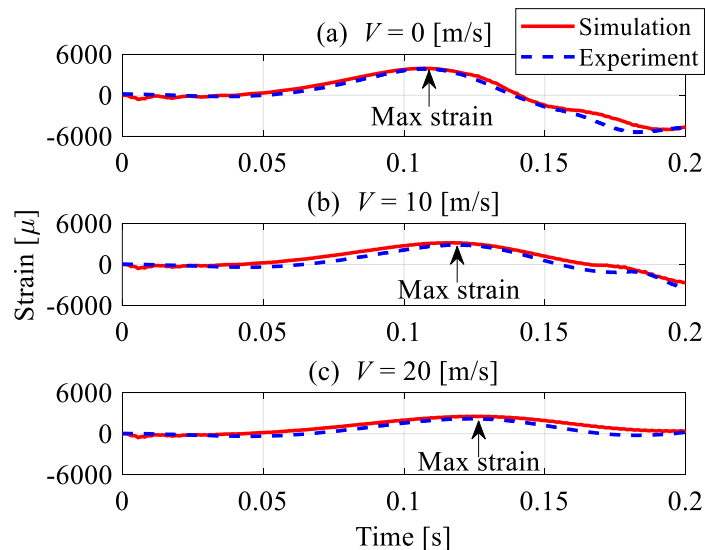


図7 解析と実験の歪の比較（流速 0, 10, 20 m/s でブレードを回転させた場合）

6. まとめと今後の方針

【ジョイントパラメータ】を導入することで歪モデリング法を風車解析に適用できるように拡張した。提案モデルによる解析を国際共同研究先が開発している大変形モデルと比較し、良好な一致を得ることができた。東北大学・流体科学研究所の風洞を用いて得られた実験とも良好な一致を得ることができた。

今後の方針として、まずシステムティックに歪モデルに減衰を導入する手法を考案したので、その成果発表を行う。次に提案した歪モデルの形状表現を用いた構造最適化法を考案したので、その成果発表を行う。

7. 研究成果

論文業績

- [1] **Otsuka, K.**, Dong, S., Fujita, K., Nagai, H., Makihara, K., “Joint Parameters for Strain-Based Geometrically Nonlinear Beam Formulation: Multibody Analysis and Experiment,” *Journal of Sound and Vibration*, 538, (2022), p. 117241. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117241>
- [2] Dong, S., **Otsuka, K.**, Makihara, K., “Hamiltonian Formulation with Reduced Variables for Flexible Multibody Systems Under Linear Constraints: Theory and Experiment,” *Journal of Sound and Vibration*, 547, (2023), p. 117535. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117535>

学会発表

- [3] **Otsuka, K.**, Wang, Y., Cheng, C. W., Dong, S., Fujita, K., Palacios, R., Nagai, H., Makihara, K., “Geometrically Nonlinear Beam Model for Slender Multibody Wings,” *Proceedings of the 19th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 2022.

受賞

- [4] **Keisuke Otsuka**, The 22nd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2022), Best Poster Presentation Award, Nov. 2022.
- [5] **大塚啓介**, 「超柔軟浮体式洋上風車の実現に向けた流体構造連成解析法の構築」, 一般財団法人エネエフ基金 研究開発奨励賞, 2022年12月.