

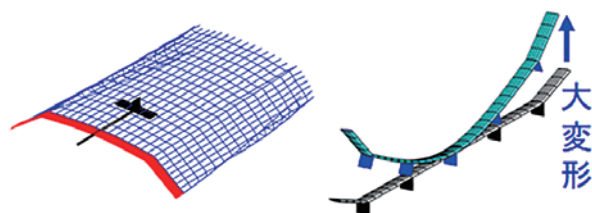
## 第26回青葉工学研究奨励賞



### 次世代航空機の高効率な一連解析を実現する非線形移動型モデリング

東北大学大学院工学研究科  
航空宇宙工学専攻  
助教 大塚 啓介

コロナ禍・災害の影響を受け、通信需要はますます増加しており、低高度を1年継続飛行することで空の基地局となる衛星航空機の実用化が期待されている（下図）。従来航空機と異なり、極軽量柔軟な衛星航空機は静的大変形状によって周波数特性・動特性が激変する。2003年に実施されたNASAの試験衛星航空機の飛行実験では、事前の解析で予測出来なかった大変形に起因する振動が発生し、墜落事故が起きている。この事故以来、柔軟航空機の解析研究が活発化してきた。衛星航空機の実現には大変形を考慮したモデル（非線形運動方程式）による静解析・周波数解析・動解析という一連の解析が必要になる。



次世代航空機解析モデル

$$\mathbf{M}(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(\mathbf{x})\mathbf{x} = \mathbf{F}$$

慣性項   粘性項   剛性項

衛星航空機のモデリング研究はUniversity of MichiganとImperial College Londonが牽引してきたが、その理論は複雑であり、静解析・周波数解析・動解析いずれかに対して、必ず計算効率が悪化する問題があった。これは大変形解析モデルにおいてあらゆる項に同時出現する非線形性（M、C、Kが非一定）が原因である。このため静解析では非線形剛性行列の逆行列計算コスト増、周波数解析では線形化困難、動解析では非線形質量行列の逆行列計算コスト増が発生する。

そこで本研究では非線形性を任意に移動させ、静解析・周波数解析・動解析いずれに対しても容易に適用でき、高い解析性能を発揮する「非線形移動型モデリング法」を提案し、その解析精度を風洞実験で実証することを目的とした。提案手法は3つの独自アイデアから成る。

第1の独自アイデアは高効率な静解析を実現する「ベクトル歪変換式」である [1]。対象の細長形状と幾何学曲線理論の類似性を活用して歪変数表現にモデルを変換する。この結果、静解析で高計算負荷となる剛性項の非線形

性を慣性項に移動できる。このアイデアを用いて、片持ち梁のロールアップを静解析した。ロールアップは片持ち梁の自由端に特定の曲げモーメントを作用させた際に真円になることが数学的に明らかにされている大変形ベンチマーク問題である。少ない要素分割数で真円を得られるほど、モデルの静解析の性能が高いと言える。提案手法は僅か2要素分割で真円が得られた。これは筆者の知る限り、世界最高の解析性能である。

第2の独自アイデアは高効率な周波数解析を実現する「平均人工歪」である [2]。周波数解析には大変形状周りでモデルを線形化する必要がある。上述の静解析モデルは剛性項を線形にできるが、非線形慣性項と非線形粘性項が依然として存在するので線形化が難しい。しかし、対象構造物にとって非支配的な変形を平均人工歪として簡易的に表現すれば、慣性項の非線形性を剛性項に移動でき、粘性項も0にできることを見出した。これによって剛性項のみの線形化で容易に周波数解析が可能となる。提案手法は衛星航空機の振動で特に問題となる低次の曲げ振動をUniversity of MichiganとImperial College Londonの解析手法よりも少ない分割数で解析できた。

第3の独自アイデアは高効率な動解析を実現する「内部変形拘束式」である [3]。上述の周波数解析モデルは慣性項を線形、粘性項を0にできるが、平均人工歪のチューニングによっては動解析の時間更新中に計算が発散し得る。そこで平均人工歪の代わりに付与した内部変形拘束式に非線形性を移動することで高速・安定・チューニング不要な動解析を実現した。提案手法による動解析は東北大学・流体科学研究所の大型風洞装置で行った実験結果と良好に一致した。

提案する非線形移動型モデリング法の外力Fは空気力、波力、接触力などにも容易に適用できるよう定式化してある。このため本研究成果は衛星航空機のみならず、大型軽量化に伴って柔軟化が進んでいる洋上風車、炉心探査用ロングアームなど多様な次世代構造物への応用が期待できる。

[1] Otsuka, K., Wang, Y., and Makihara, K., *ASME J. Comput. Nonlinear Dyn.*, 16(1), 2021, 011007.  
 [2] Otsuka, K., Wang, Y., and Makihara, K., *ASME J. Vib. Acoust.*, 143(6), 2021, 061006.  
 [3] Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K., *AIAA J.*, 57(10), 2019, 4300-4311.