

研究成果報告書

研究 題 目		発電用タービンブレードにおける振動の局在化現象の解明とその防止	実 施 年 度
			28-29 年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学大学院 工学研究院 機械システム・応用力学部門	
	氏 名	原 田 祐 志 印	

1. 研究の目的・背景

タービンブレードの振動に関する従来の研究は、ほとんどが線形振動に限られていた。理論解析では、ブレードは回転体の円周上に放射状に多数配置された片持はりでモデル化されるが、振動変位が比較的大きくなると、はりの復元力に内在する非線形性が顕在化し、非線形性を考慮したモデル化が必要となる。このような片持はりが隣り合うはりが弱いばねで連結されている系において、非線形局在モード (ILM, Intrinsic Localized Mode の略) と呼ばれる局在化現象の発生が予測される。これまで、このような系の局在化現象について、二、三の論文で調べられているが、数値シミュレーション波形が示されているだけであり、タービンブレードの局在化現象が完全に解明されたとは言い難い。

非線形局在モードは元来、規則的に配列された原子構造を対象として、固体物理学分野で調べられてきた。しかし、固体物理学分野で研究対象とされてきた原子の運動を支配する運動方程式は、その大きさに関係なく、機械構造物を対象とした運動方程式と本質的に同じ形式をもつ。本研究課題では、物理分野と工学分野の間に垣根を設けることなく、原子構造の振動学的性質の知見を、タービンブレードのみならず一般の機械構造物を含む広い分野に適用することが可能であり、局在化現象の普遍的な発生メカニズムを解明することができる。

本研究課題では、片持はりでモデル化された系全体に周期的な強制トルクが作用する場合、調和振動解を理論的に求め、共振曲線を計算する。加えて、得られた共振曲線を元に連結ばねのばね定数や系の非線形性が非線形局在モードの発生に与える影響について調べる。そして、実験装置を設計・作製し、実験を行い、実際の系で非線形局在モードが発生することを確認する。これらの結果より、系に生じる非線形局在モードの振動特性を調べる。さらに、共振曲線により、大きく振動するタービンブレードを特定し、疲労破壊によるブレードの損傷を防ぐ対策を講じる。

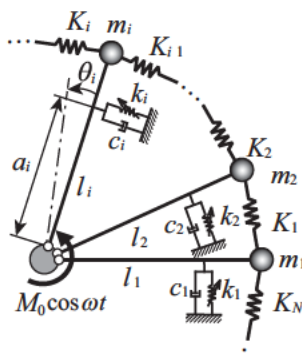


図 1 解析モデル

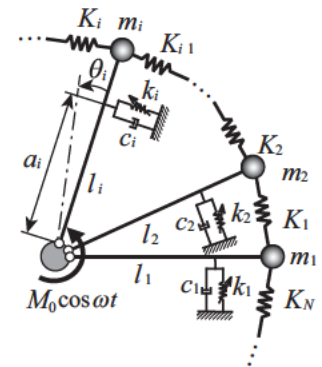


図 1 解析モデル

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

局在化現象の発生メカニズムと振動学的特徴の解明とその防止法

図1（1頁）に示すように、タービンプレードのモデル化として、ボスの円周上に放射状に多数の片持はりが固定され、各はりが弱いばねで連結された系を対象とし、各はりに強制トルクが作用した場合の共振曲線（図2）を求めた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 連結ばねのばね定数が比較的小さい場合、励振振動数と初期値に依存して ILM（図3）が発生する。
- (2) 連結ばねのばね定数の値が大きくなるにつれ、ILM の発生パターンは減少し、ある特定の値を超えると、ILM は発生しなくなる（図4の背景色の部分で ILM が発生する）。
- (3) 連結ばねのばね定数の値により、一部の安定な分枝上でホップ分岐が生じる。その不安定となった分枝上で静止型 ILM および移動型 ILM（図3）を含む振幅変調運動が生じる。
- (4) 系の非線形性が大きいほど ILM の発生する励振振動数区間は大きくなる。また、非線形性が小さくなると ILM は発生しなくなる。

以上より、ILM の発生範囲などが共振曲線を求めることにより明らかになったため、局在化現象の発生メカニズムと振動学的特徴の解明については目標をおおむね達成できた。一方、局在化の防止法については、ILM の発生する連結ばねのばね定数や非線形性の係数の範囲外の値となるようにタービンの設計を行うことにより、ILM の発生を防ぐことができることを明らかにしたが、動吸振器などの制振装置の利用については、まだ調べられていない。

実験による局在化現象の観察と理論解析モデルの改善

タービンプレードを模擬した実験措置を設計・製作した。しかし、実験では加振方法に問題があり、解析モデルとの間に大きな差が生じ、予想していた結果と大きく異なる振動現象が現れ、局在化の発生を確認するまで至らなかったため、実験による局在化現象の観察については達成されなかった。改善策として、加振方法の変更に伴う実験装置自体の再設計、はりの先端質量の増加、はりを長くする、はりをヤング率が小さいものに変更するなどが必要である。

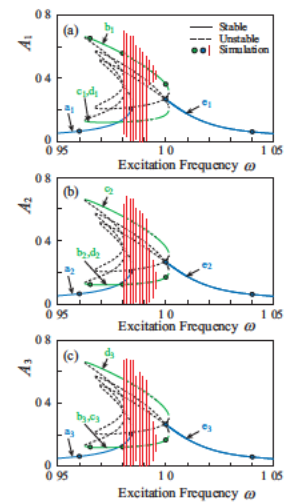
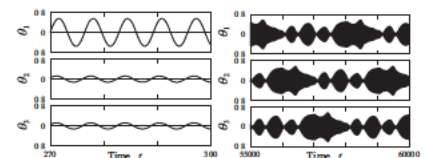


図2 漸軟形の共振曲線



(a) 静止型 ILM (b) 移動型 ILM

図3 図2における時刻歴波形

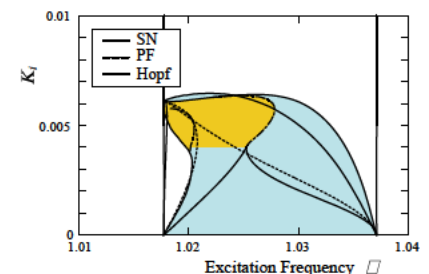


図4 ILM の発生範囲

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請時は、設備備品費 100 万円、印刷費 10 万円、旅費 15 万円、謝礼金 20 万円としていた。印刷費、謝礼金については、設備費と消耗品費に充当した。

内訳としては、申請時はレーザ変位計での計測を考えていたが、回転体の変位とはりの相対変位を計測できる、ハイスピードカメラに変更し、購入した。さらに、ハイスピードカメラによる計測データは、オフラインでのソフトウェアによる処理が必要となるため、リアルタイムに各はりの加速度を測定するためのモーションセンサを購入した。モータでの加振を予定し、モータ購入費を予定していたが、モータでの加振が難しかったため、別の費用で購入した加振器を利用した。

消耗品費としては、実験装置の製作のための、材料費と制作費を計上した。

旅費は、解析結果を D&D2017 において発表するため、計上した。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では、端部のない系において局在化した振動が各はりを移動する、移動型 ILM の発生を明らかにした。これは、大きく振動するはりが切り替わるため、すべてのはりが疲労する。このため、このようは移動型 ILM の発生をさせないことが重要となる。現在のところ移動型 ILM は系の非線形性が漸軟形の場合のみ発生することが分かっており、非線形性が漸硬形であるタービンブレードでの発生は確認していない。しかし、パラメータの値を変化させた場合、漸硬形の場合にも発生する恐れがあるため、移動型 ILM の発生条件を明らかにすることが必要である。

本研究では、ILM の発生条件、特に各はりの連結ばねのばね定数、系の非線形性について明らかにした。今後は、この結果を用いてタービンブレードの設計の際に、ILM の発生しない、連結の強さ、材料の選定、形状の指標に用いることができると考えている。

さらに、タービンブレードだけではなく、風車のブレードなどの複数のはりでモデル化できる機械構造物の振動の局在化現象などの解明やその振動抑制にも、本手法が生かせると考えている。一方、ILM を意図的に発生させる、特に移動型 ILM の発生を制御することによる新たな機構の開発が期待される。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

- (1) 福谷孝司，池田隆，原田祐志，環状に配置された振動子列の非線形局在化現象，日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会，# 1007，広島，2017.3.
- (2) 福谷孝司，原田祐志，池田隆，環状非線形振動子列における局在化現象，Dynamics & Design Conference 2017，#347，愛知，2017. 8.