

技術資料



複雑自由形状の固有振動測定技術開発

布施直紀*¹, 西崎浩規*²

Development of Characteristic Vibration Measurement Technology for Components with Complex Geometric Shapes

Naoki FUSE and Koki NISHIZAKI

Synopsis

In the measurement of natural frequencies, it is common to detect the sound and vibration generated when the object to be measured is hit with an impact hammer, or the like, and to calculate by analyzing the frequency. However, when measuring the characteristic vibration of a specific part of an object with a complex free shape, the point of impact and impact range of the impact hammer greatly affect the measured values. There may be areas that are difficult to hit.

Therefore, in this paper, instead of hitting with an impact hammer, we developed a characteristic vibration measurement technology that uses the impact of high-pressure air injection, and obtained the following results.

(1) It is possible to measure natural frequency in a local area of a complex free-form object.

(2) A simple and reproducible measurement was realized by a non-contact vibration excitation method using high-pressure air.

(3) Assuming that the material properties of the object to be measured are the same, the natural frequency can be used to identify dimensions such as thickness.

1. 緒言

固有振動の測定では、加振器により被測定物を振動させ、受振器により受けた振動信号を解析するが、最も一般的な方法は、インパクトハンマによる打撃試験であり、打撃時の衝撃振動音を高周波マイクなどで収録し、FFT (Fast Fourier Transformation) アナライザで周波数解析するものである。このような打撃試験では、

- ・加振力の大きさ、位置などの制御が煩雑となる(特に、人による加振は再現性が低い)
 - ・局所領域への加振が困難
 - ・打撃試験時に被測定物に損傷を与える可能性がある
- といった課題があった。

非接触で再現性良く物体を加振させる方法として、後述する、「空中超音波法¹⁾」, 「レーザ超音波法^{2), 3)}」などが考えられたが、前者では加振超音波出力が小さく、被測定物に十分な加振を印加できなかった。また後者では、被測定物体にアブレーションによる焼跡が残るため、商品としての外観に難ありであった。

一方、「高圧エア」を被測定物体に噴射したときの衝撃振動は十分な加振源となり、加振力の制御が容易で、加振位置の再現性も良好であった。

本稿では「高圧エア」加振方法の適用例として、ターボチャージャの重要部品である、タービンホイール(以下、T/W という)の固有振動測定について報告する。

2023年4月13日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 (株)大同キャスティングス 中津川事業所 (Nakatsugawa Business Unit, DAIDO CASTINGS CO., LTD.)

2. T/Wの固有振動数測定と課題

ターボチャージャはタービンハウジング (T/H) を筐体とし、エンジンからの排気ガスの噴出エネルギーにより T/W が回転し、これに連結したコンプレッサホイールも同時に高回転することで、エンジンシリンダ内に圧縮空気を送り込み、大きな出力が得られるというものである (Fig. 1)。T/W は十数万 rpm 以上で回転する場合もあるため、回転レスポンスを向上させるために、薄肉・軽量化が求められている。このとき、T/W の固有振動数が実運転環境での共振周波数と一致しないよう、設計値はもちろん実測値も十分余裕を持たせることが重要となっている^{6)~11)}。また、T/W は多いもので十数枚の翼を有しているため、各翼の固有振動数が一致していることが理想である。しかし、T/W は複雑自由形状であるため、インパクトハンマでの打撃試験では打撃可能位置が限定されてしまうことから、局所領域での固有振動を測定可能な方法が求められていた。

3. 実験方法

予備実験としていくつかの接触 / 非接触加振・受振方法により T/W の固有振動測定にトライした。主な結果を Table 1 に示す。

紙幅の都合上、良好な結果の得られた「高圧エア」による方法を主に詳細報告する。

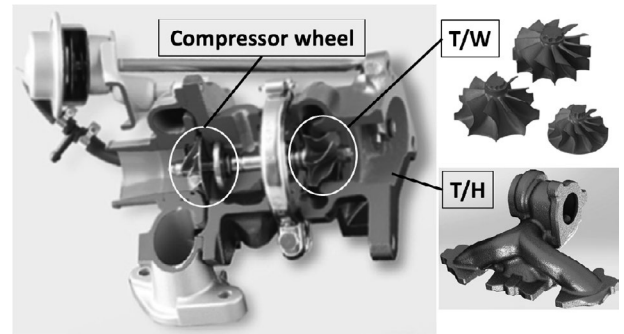


Fig. 1. Structure of turbocharger^{4),5)}.

3. 1 空中超音波による加振

空中超音波では、高電圧パルスを押電素子に印加したときに発生する超音波が空气中を伝播し、物体を非接触で加振させる。受振にはレーザドップラ振動計を使用した (Fig. 2, 3)。

結果としては、エアプローブ表面では 15 nm 程度の振幅振動が得られているもの (Fig. 4)、空气中で超音波が減衰し、T/W を非接触で加振させるには至らなかった (Fig. 5)。

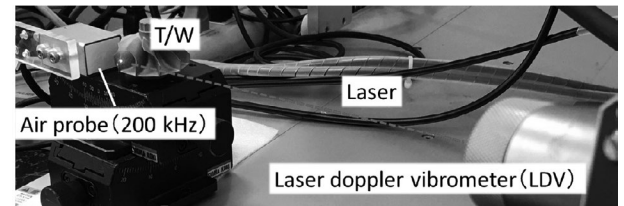


Fig. 2. Experiment using aerial ultrasound.

Table 1. Excitation/receiving methods and experimental results.

System	Types of elements or devices		Summary of results
Exciter	Contact	Impact hammer	• Difficulty in reproducibility of hitting position and striking force
		Ultrasonic transducer (Piezoelectric/Magnetostrictive element)	• Influenced by element mounting • Difficult to vibrate in confined areas
	Non-contact	Laser ultrasonic	• Concern over burn marks by ablation on appearance quality
		Aerial ultrasonic	• Ultrasonic propagation power too small to excite
		EMAT (Electromagnetic acoustic transducer)	• Short lift-off and limited T/W excitation
	High-pressure air	• Capable of measuring local areas • Easy excitation force control and position control	
Receiver	Contact	Ultrasonic transducer	• Influenced by element mounting
		Strain gauge	
	Non-contact	Condenser microphone (High-frequency microphone)	• Possibility of picking up sounds from other than the target site
		Speckle interferometer	• Good sensitivity but expensive
	Laser doppler vibrometer	• Good sensitivity, although easily affected by the surface texture of the object	

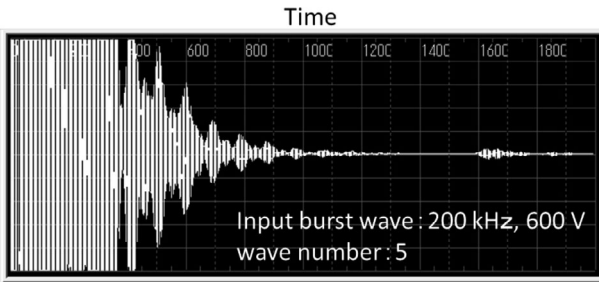


Fig. 3. Input burst wave signal to air probe.

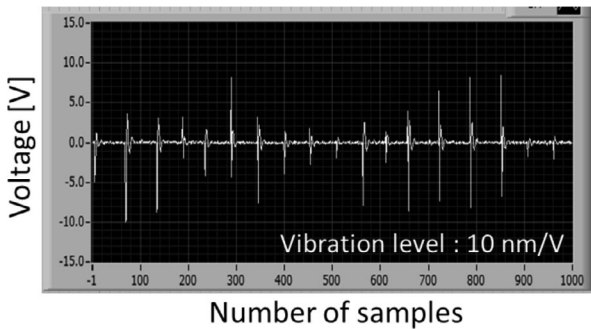


Fig. 4. Vibration observed on air probe surface.

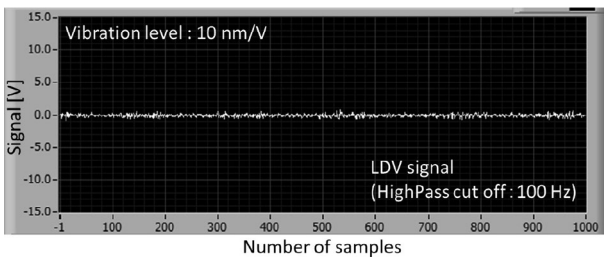


Fig. 5. Detected signal.

3. 2 レーザ超音波による加振

レーザ超音波では、高出力パルスレーザを物体に照射させたときの、アブレーションによるプラズマ衝撃波、あるいは熱弾性効果により発生する超音波が加振源となる。前者は後者よりも発生する超音波振動が大きい、アブレーションによる焼跡が物体表面に残り外観品質上望ましくないため、T/Wではサンドブラストで焼跡を除去する必要がある (Fig. 6)。したがって、本方式は不採用とした。

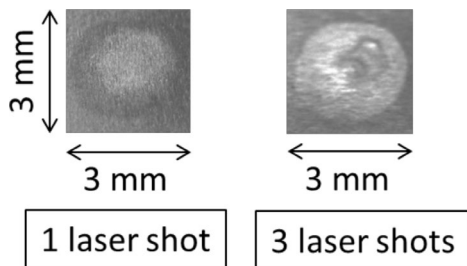


Fig. 6. Burn mark due to ablation after laser irradiation.

3. 3 高圧エアによる加振

本方式では圧力約 0.4 MPa の工場エアを開口径 1 ~ 2 mm のノズルより T/W に噴射させている。エアは連続噴射あるいはパルス噴射で行い、T/W への噴射位置、噴射距離は可変かつ再現性があるものとしている。

一方、受振にはともに非接触方式であるレーザドップラ振動計 (以下、LDV という) とスペckル干渉計を検討したが、ワーキングディスタンスについて、スペckル干渉計は 200 mm、LDV が 400 mm であることから、設置位置の利便性を考慮し、LDV を採用した。LDV は物体の表面性状の影響を受けやすいが、T/W は鑄肌あるいはサンドブラスト肌のため、ワーク全領域にわたって均一な反射光が得られる。

実験で用いた高圧エア噴射機構と受振装置を Fig. 7 に示す。また、装置仕様を Table 2、測定フローを Fig. 8 にそれぞれ示す。高圧エアは T/W の翼面から数 mm 離れた位置で翼面に垂直となる方向から噴射し、その位置は一定とした。測定フローにて、LDV で検出した時間領域での振動データを FFT により周波数領域に変換、ピークホールドで 10 回平均したパワースペクトルデータより、固有振動数を求めている。このとき、ピーク値により正規化している。

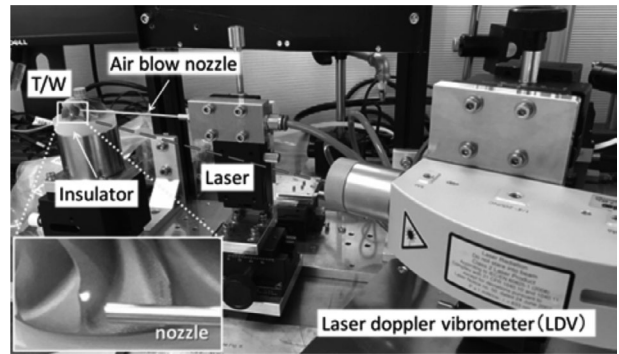


Fig. 7. Experiment in natural frequency measurement using high-pressure air injection.

Table 2. Specifications of main experimental equipment.

System	Specification	
Solenoid valve in air-blow system	Response speed	≤10 msec
	Pulse repetition frequency	0~100 Hz
	Pulse duty ratio	0~100 %
Laser doppler vibrometer	Response speed	3.2 MHz
A/D converter	Sampling frequency	500 kHz

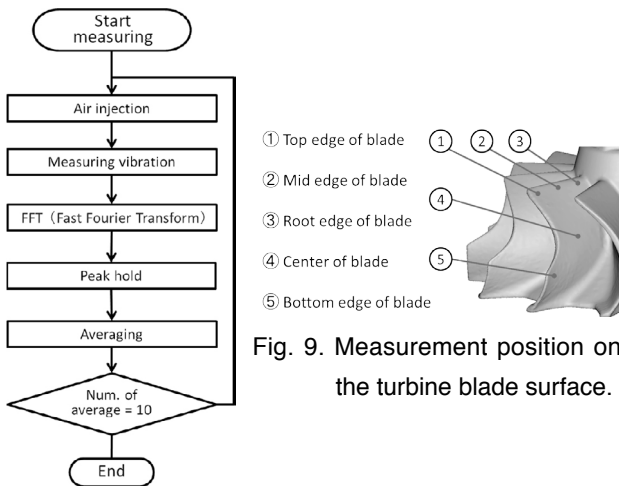


Fig. 9. Measurement position on the turbine blade surface.

Fig. 8. Natural frequency measurement flow chart.

4. 結果および考察

4. 1 高圧エアの連続噴射とパルス噴射

固有振動測定位置を Fig. 9 に示すように 5 か所とした。まず、高圧エアの噴射状態を連続とした場合の翼の固有振動測定結果を Fig. 10 ~ 14 の左側に示す。次に、噴射状態をパルス状とし、パルス周期を 1 Hz、パルスデューティ比を 10% と固定したときの固有振動測定結果を Fig. 10 ~ 14 の右側に示す。前者（左側）、後者（右側）ともに同一ワークを測定している。

本結果にて、連続噴射、パルス噴射ともに複数の振動モードによる固有振動が観測されてはいるものの、連続噴射の場合、測定位置以外の振動が減衰されずに検出されるため、翼全体で主となる 1 次モード固有振動をとらえていると考える。一方、パルス噴射では測定位置での 1 次モード振動が減衰され、測定位置近傍範囲に限定された 2 次以降の固有振動を主体に検出しているものと考えられる。そこで以降では、測定点における固有振動が他の振動モードに影響されにくい、1 Hz、デューティ比 10% のパルス噴射を用いた。翼面内分布については次節にて考察する。

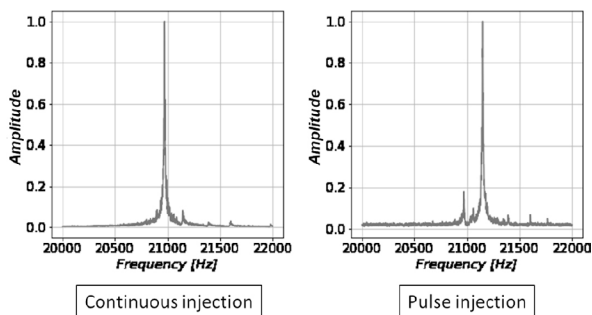


Fig. 10. Natural frequency at top edge.

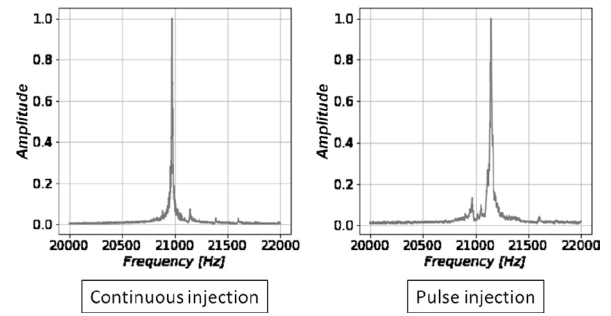


Fig. 11. Natural frequency at mid edge.

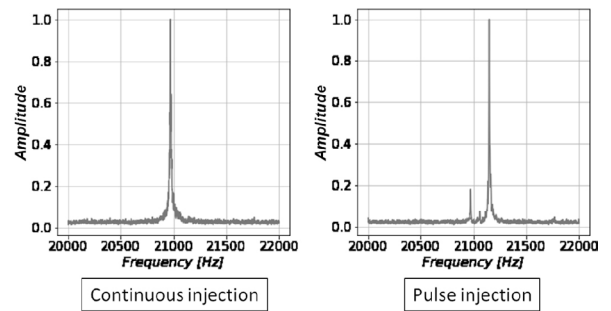


Fig. 12. Natural frequency at root edge.

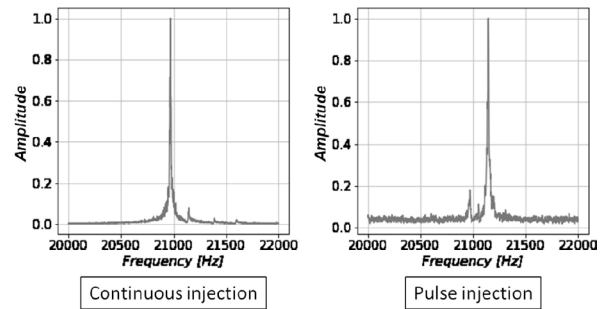


Fig. 13. Natural frequency at center.

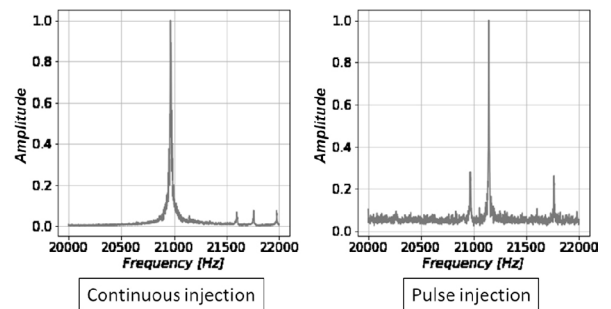


Fig. 14. Natural frequency at bottom edge.

4. 2 固有振動の翼面内分布

Fig. 9 の測定位置における T/W 翼面内の固有振動測定結果を Fig. 15 ~ 19 に示す。10 枚翼を有する T/W の各翼に対し測定した。固有振動が検出された周波数前後の広帯域（左側）と固有振動数近傍の狭帯域（右側）を示

している。本結果より、同一測定位置での各翼のバラツキはあるもののおよそ5%程度であった (Fig. 20)。このバラツキは T/W 素材の物性値が同じだと仮定すると、翼の厚さのバラツキに相関があるものと想定される。したがって、この場合、Bottom edge 部の固有振動バラツキは他の位置でのそれよりも小さいため、翼の厚さが他の部位よりも均一になっているものと推測する。また測定位置による固有振動数の微妙な差は、振動モードによるものとバラツキが含まれているものと想定される。Bottom edge 部の固有振動については別途、次節においても検証する。

次に、これまでとは固有振動設計値の異なる製品を用い、同一形状で製造ロットの異なる T/W (1 ロット 2 個 × 5 ロット : 計 10 個) に対し、Fig. 9 における Top edge 部、Bottom edge 部での固有振動を比較測定した。それらの結果を Fig. 21, 22 にそれぞれ示す。各測定位置にてロットによるバラツキは 10% 以内であった。したがって、材料特性が同じと仮定すると翼の厚さのバラツキも 10% 以内と推定できる。

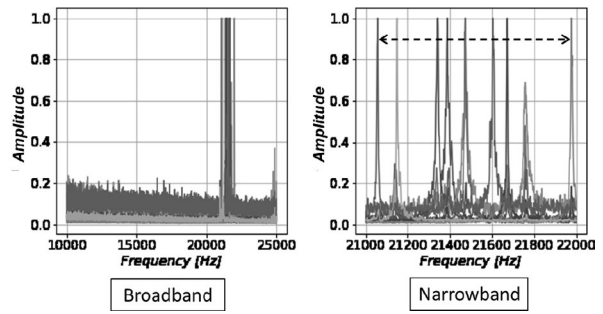


Fig. 17. Natural frequency for each blade at root edge.

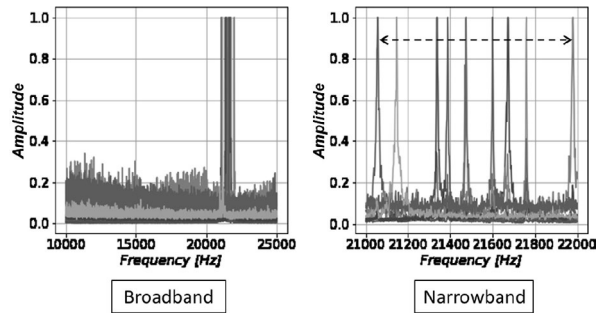


Fig. 18. Natural frequency for each blade at center.

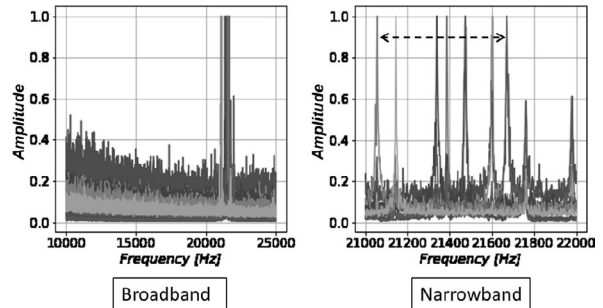


Fig. 19. Natural frequency for each blade at bottom edge.

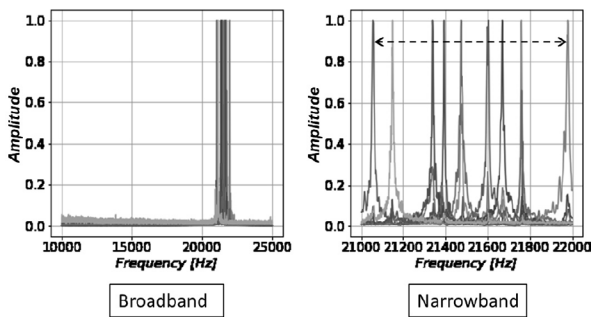


Fig. 15. Natural frequency for each blade at top edge.

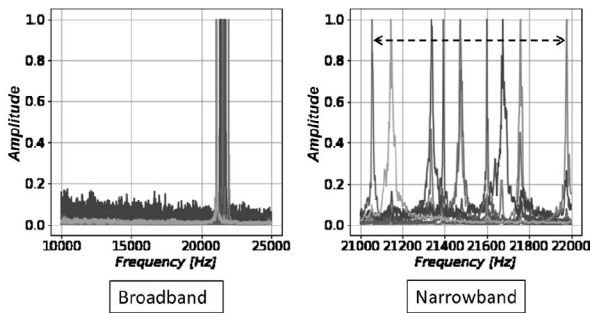


Fig. 16. Natural frequency for each blade at mid edge.

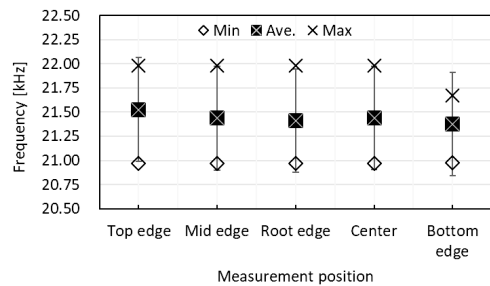


Fig. 20. Variation in natural frequency of each blade.

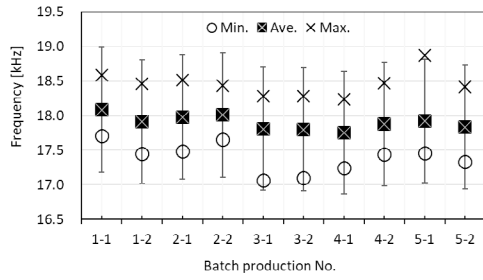


Fig. 21. Variation due to lot differences at top edge.

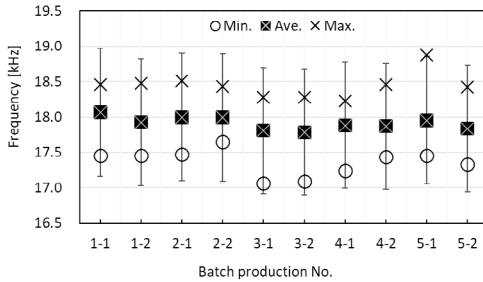


Fig. 22. Variation due to lot differences at bottom edge.

4. 3 考察

これまでのT/W各翼の低次固有振動数近傍のみに注目していたが、より広帯域での振動についても調査した。10枚翼を有する形状の異なる2種類のT/W(AとB)のおおのについて、Fig. 9に示す5か所の位置での高次固有振動測定結果をFig. 23～27にそれぞれ示す。グラフの左側にWheel Aの結果、右側にWheel Bの結果を示している。本結果より、Top edge部、Mid edge部、Root edge部、Center部では1次固有振動が主体で、それ以上の帯域で発生する高次モード振動はわずかに観測される程度であった。一方、Bottom edge部では、1次固有振動の大きさに対し高次固有振動も十分大きく、Wheel Bでは1次が従で高次が主であった。高圧パルスエア噴射による加振がない場合、振動が検出されないことから、エア噴射以外の外乱の影響ではないことは確認できており、Bottom edge部特有のものであると推測される。Bottom edge部近傍は他の測定部位よりも物理的に拘束されている領域が広く、また、その近傍の厚さ、重量も大きく異なるため、この測定点での高次振動モードは、他の部位とは異なるものと推測される。

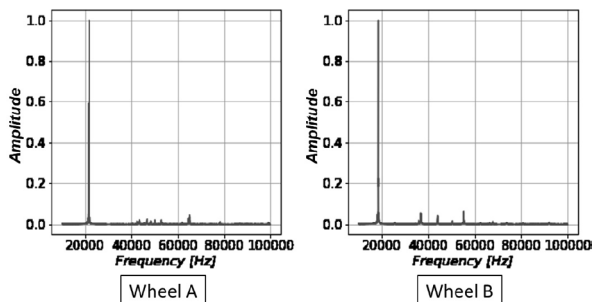


Fig. 23. Higher-order natural frequency at top edge.

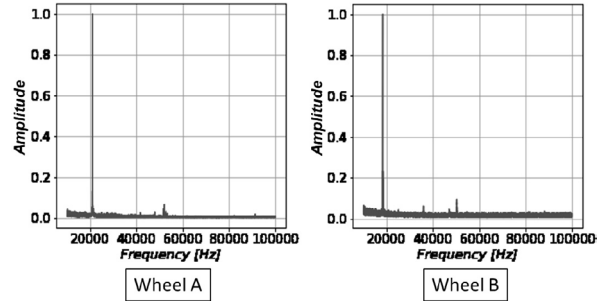


Fig. 24. Higher-order natural frequency at mid edge.

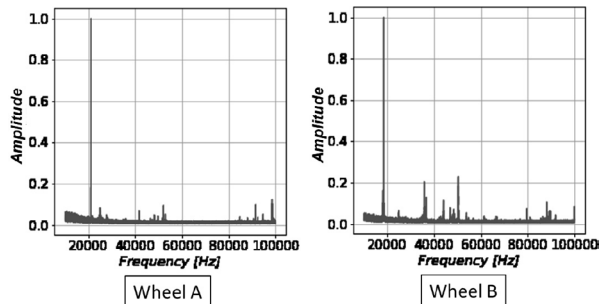


Fig. 25. Higher-order natural frequency at root edge.

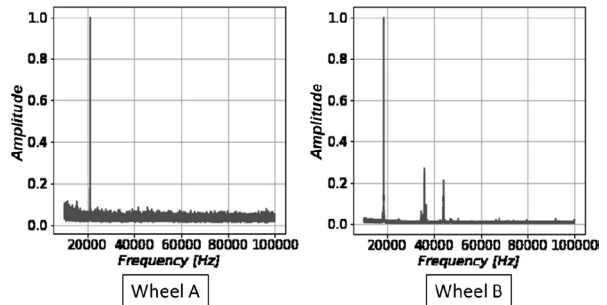


Fig. 26. Higher-order natural frequency at center.

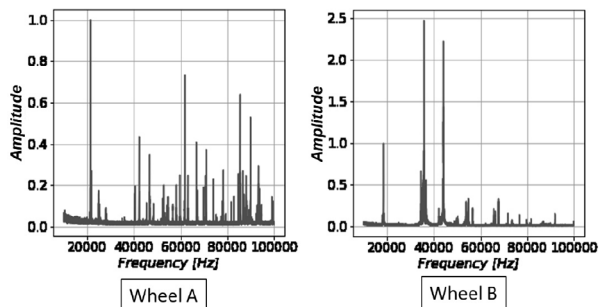


Fig. 27. Higher-order natural frequency at bottom edge.

5. 結 言

高圧パルスエアによる衝撃を加振源とした固有振動測定では、従来の打撃試験などの方法と比較して多くの利点を有することが実証された。

- (1) 複雑な自由形状物体の局所領域の固有振動を測定することが可能である。
- (2) 従来の方法と比較し、非接触かつ簡便で再現性の高い固有振動測定が実現できる。
- (3) 被測定物の材料特性が同じであると仮定した場合、形状寸法を固有振動数で同定できる可能性がある。

6. おわりに

本稿では固有振動の実測を主眼としているが、実際問題としては、固有振動の設計値に対して実測値がどうかを、多モード振動解析を含めて検証することが、生産プロセスでは重要となってくる。また、被測定対象物内部の亀裂、欠陥、低サイクル疲労などの、固有振動への影響も検証に値する課題である。今後はこのような検証も含めてトライしていきたい。

(文 献)

- 1) 伊藤洋一: IEICE Fundamentals Review, 9(2016), 3, 205.
- 2) 布施直紀: 電気製鋼, 83(2012), 87.
- 3) 島田義則: 検査技術, 11(2006), 9, 8.
- 4) 大同精密(株)ホームページ:
<http://www.daidoseimitu.co.jp/>
- 5) 大同特殊鋼(株)ホームページ:
<https://www.daido.co.jp/>
- 6) 名村清: ターボ機械, 15(1987), 6, 367.
- 7) 間瀬正隆, 金子康智, 角家義樹: 日本船用機関学会誌, 25(1990), 9, 652.
- 8) 内田博: 豊田中央研究所 R&Dレビュー, 35(2000), 3, 7.
- 9) 三上隆男: IIC REVIEW, 33(2005), 12.
- 10) 三上隆男: IIC REVIEW, 34(2005), 19.
- 11) 三上隆男: IIC REVIEW, 35(2006), 22.



布施直紀



西崎浩規