

南部風鈴の振動解析に関する検討

A Study on Vibration analysis of Nanbu hurin

森田一真, 松橋彩花, 永田仁史, 藤岡豊太, 安倍正人, 田中隆充, 平塚貞人, 堀江皓, 鈴木幸一

Kazuma Morita, Ayaka Matsuhashi, Yoshihumi Nagata, Toyota Hujioaka, Masato Abe,
Takamitsu Tanaka, Sadahito Hiratsuka, Hiroshi Horie, Kouiti Suzuki

岩手大学

Iwate University

キーワード： 南部風鈴 (Southern wind chime), 有限要素解析 (Finite element analysis), レーザードップ
ラ振動計 (Laser Doppler Vibrometer)

連絡先： 〒 020-0066 岩手県盛岡市 4-3-5 岩手大学 工学部 電気電子情報システム工学科 安倍・永田研究室
森田一真, Tel.:(019)621-6972, E-mail: h21j114@cis.iwate-u.ac.jp

1. まえがき

南部風鈴は岩手県の南部鉄器の鑄造技術を用いた伝統工芸品である。南部風鈴の造形は、職人の経験と知識に基づいており、音色と形の間の工学的な検討についての報告例はほとんどない。そこで、本研究では、風鈴の音色の工学設計を目指し、基礎的な検討として、有限要素法とレーザードップラー振動計による南部風鈴の振動解析を行うこととした。

これまで、南部風鈴に似た形状をもつ梵鐘の振動解析については多くの報告がなされている¹⁾²⁾³⁾が、南部風鈴に関する研究例は多くなく、音色に及ぼすうなりの重要性に関する報告が大谷⁴⁾によりなされているのみである。一方、梵鐘の振動解析結果¹⁾²⁾³⁾によると、梵鐘の基音の振動は、鐘の底面を含む円周部のたわみによるものとされている。この振動には Fig.1 に示すように、 45° ずれた 2 つの振動モードが存在し、この 2 つの振動の腹の位置に対応する材料の重み

が異なるとき、重さの違いに応じてわずかに異なった振動周波数となり、うなりの原因になっていることが示されている。

南部風鈴のうなりについては、以前に本研究室の木村ら⁵⁾がプローブマイクロホンを用いて測定を行い、南部風鈴にも梵鐘と同様に二つの振動モードが存在する可能性が高いことを明らかにした。しかしながら、木村らの測定において使用されたプローブマイクロホンは、観測対象部位以外からの発生音もわずかながら拾ってしまい、対象位置の材料の振動だけを正確に測定することは困難であると考えられる。そこで、本研究で

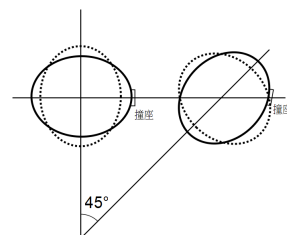


Fig. 1 2 つの振動モード

は、レーザードップラー振動計を用いて南部風鈴の振動を直接測定した。また、有限要素法による固有値解析を行い、南部風鈴の振動解析における有限要素法の有効性についても検討した。

以降、本報告では、まず、有限要素法による検討結果を述べた後、レーザードップラー振動計による測定結果について述べる。

2. 有限要素法による固有振動モード解析

有限要素解析プログラムである ABAQUS(6.9 student edition) を用いて、固有振動数および固有モードを求めた。

2.1 有限要素モデル化

木村らの研究⁵⁾において使用された南部風鈴には、大、中、小の3種類があり、そのうちの中を対象として寸法を計った。計測した寸法は、全高が約 40mm、下端部の外径が約 50mm、上端部の外形が約 30mm であった。板厚は均一ではなく偏りがあったが、今回は全体にわたって均一に 2mm とした。これらの形状データに基づき、四面体二次要素 (C3D10) でモデル化した。解析にあたっては、線形等方弾性体を仮定した。材料定数として、縦弾性係数はドイツのニハード鋳鉄から 180GPa、ポアソン比は一般的な鉄鋼材料のデータより 0.28、密度も同様に 7.85g/cm³ とした。要素数は 454、節点数は、1415 である。要素分割図を Fig.2 に示す。

2.2 固有モードと固有振動数

作成した有限要素モデルについて求めた固有振動数を Table.1 に示す。Table.1 には風鈴から距離を離して設置したマイクロホンを使用して測定した音の周波数分析結果も示してある。また、第一次から第六次までの固有モードを Fig.3 に示す。各々のモード形状については、上から見

たモード形状を上半分に、横から見たモード形状を下半分に示してある。第一次が青木らの報告¹⁾において (4-0) モード、第二次が (6-0) モード、第三次が (8-0) モードと呼ばれているモードに相当する。また、西口らの報告²⁾において第四次が (4-1) モード、第五次が (6-1) モード、第六次が (10-0) モードと呼ばれている。

ここで、(m-n) は、m が縦方向に走る子午線方向の節線の数、n が円形節線の数を表す。Fig.4(g),4(f) にはそれぞれ (10-0) モードと (8-1) モードの形状を示してあるが、測定音の周波数分析結果においては、これらのモードに相当する正弦波成分は検出できなかった。

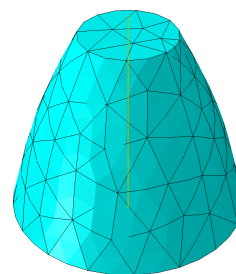
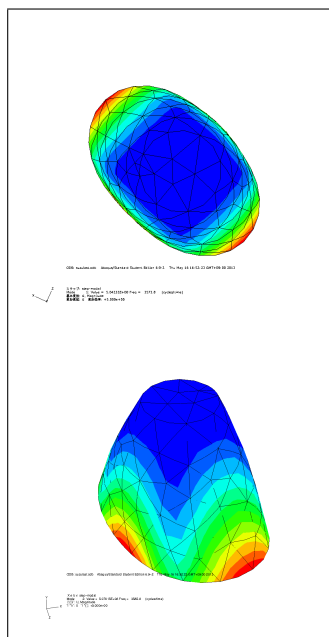


Fig. 2 風鈴の FEM モデル

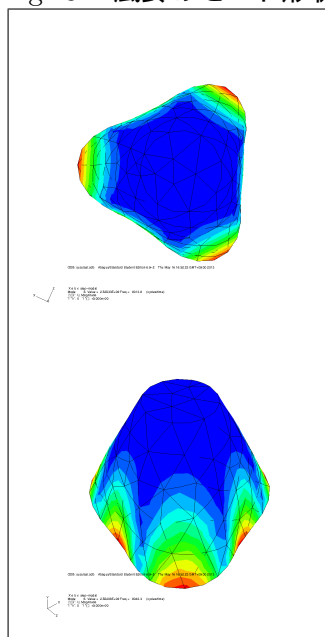
Calculated (Hz)	Measured (Hz)	Mode
3573.8	3533	(4-0)
3585.8	3557	
8013.7	9487	(6-0)
8043.3	9550	
14918.7	17550	(8-0)
14992.2	17647	
19721.6	20401	(4-1)
19746.3	20441	
21545.3	21860	(6-1)
21671.4	21921	
23636.0		(10-0)
24024.0		
29306.0		(8-1)
29517.8		

Table 1 固有振動数と実際の周波数分析結果

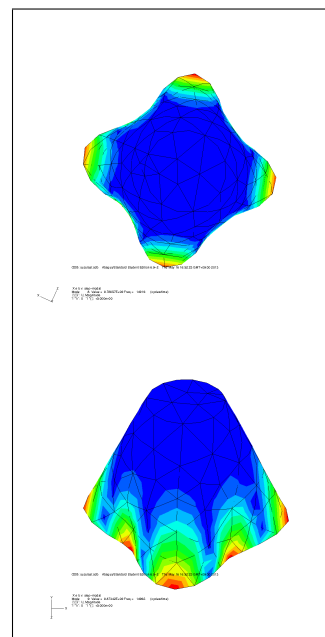
Fig. 3 風鈴のモード形状



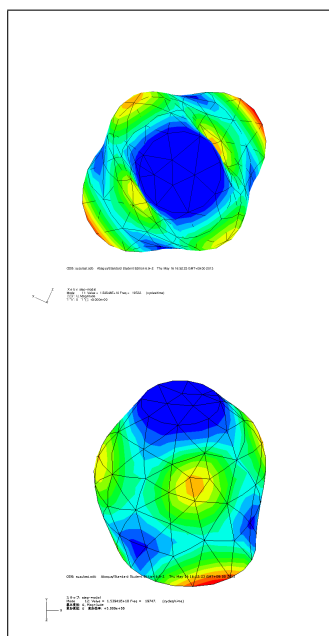
(a) (4-0)



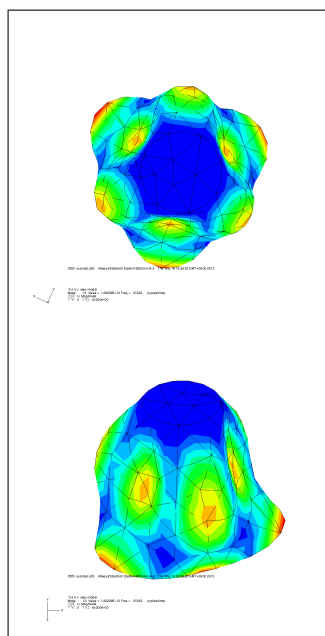
(b) (6-0)



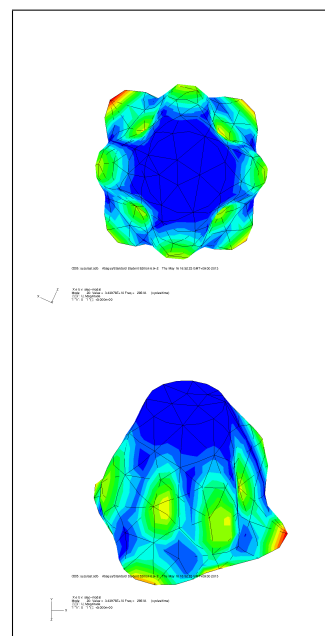
(c) (8-0)



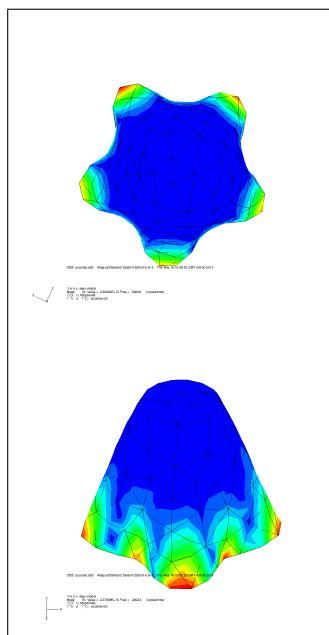
(d) (4-1)



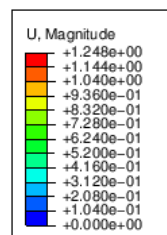
(e) (6-1)



(f) (8-1)



(g) (10-0)



(h) Magnitude

図に示したすべてのモードは、お互いに剛体回転で重なる2個の同一形状の固有モードの対となっており、それぞれ中心軸に対し、(4-0)、(4-1)モードは45度、(6-0)、(8-0)モードは30度回転した位置関係になっている。中西らの報告³⁾によると、梵鐘において、撞座などの質量的非対称要素が付与されない場合は、これらの対になるモードのモード周波数の違いは起こらないとされている。しかし、今回の解析では、質量的非対称要素が存在しないにも関わらず対になるモード周波数が異なっている。また、それぞれのモード形状を西口らの報告²⁾において示されている梵鐘のモード形状と比較すると、(6-0)、(8-0)モードの振幅が、梵鐘の子午線方向の中腹で最大になっているのに対し、南部風鈴では、全てのモードの振幅が下端部で最大になっている事が分かる。また、測定値と解析結果の周波数の比較において、(6-0)、(8-0)以外のモードでシミュレーション結果と測定値が概ね一致しており、モデル形状、材料係数により正確な値を使用すれば誤差をさらに小さくできると考えられる。

3. レーザードップラー振動計を用いた測定

Fig.4に示すような測定装置を作成し、南部風鈴の振動を測定した。今回の実験では、風鈴の一定の位置を打撃しながら、風鈴の外周にそってレーザードップラー振動計のレーザーを当て、南部風鈴の振動を探る必要があった。そこで、測定装置は回転台の上に打撃装置および風鈴を固定できるように設計した。打撃装置は、一定の圧力と間隔で風鈴を打撃し続け、さらにPC上で作成した打撃信号を南部風鈴に伝える必要があったため、8cmφのフルレンジスピーカを改造し、スピーカの中心キャップ上に金属のボルトを接続したプラスチック素材の棒を接着した。スピーカの磁石により金属のボルトが磁化し、南部風鈴の振動に影響することがないように、金属の

ボルトは磁化しない素材を使用した。測定に用いたレーザードップラー振動計は、小野測器のLV-1800である。上記の実験装置を使用して、風鈴の外周10度おきにレーザーを当て、下端部と中腹部のそれぞれ箇所の振動を測定した。

3.1 測定結果

(4-0)モードに相当する周波数について下端部の測定結果をFig.5に、中腹部の測定結果をFig.6に示す。Fig.5とFig.6はレーザーを当てた位置の角度を円の角度に対応させた円形のグラフであり、実線が3526Hz、点線が3549Hzのピークレベルである。Fig.5から、2つの近接モードの周波数の最大振幅および谷が90°おきに出現しており、さらに、隣接した周波数の振幅周期と45°のずれを持つことが分かる。また、Fig.5とFig.6を比べると、中腹部の最大振幅はに下端部の振幅よりも小さい事が分かる。これらの結果は、固有振動モード解析によって得られた結果と一致している。

(6-0)モードに相当する周波数について下端部の測定結果をFig.7に、中腹部の測定結果をFig.8に示す。実線が9461Hz、点線が9521Hzのピークレベルである。Fig.8から、それぞれの周波数の最大振幅および谷が60°おきに出現しており、さらに、隣接した周波数の振幅周期と30°

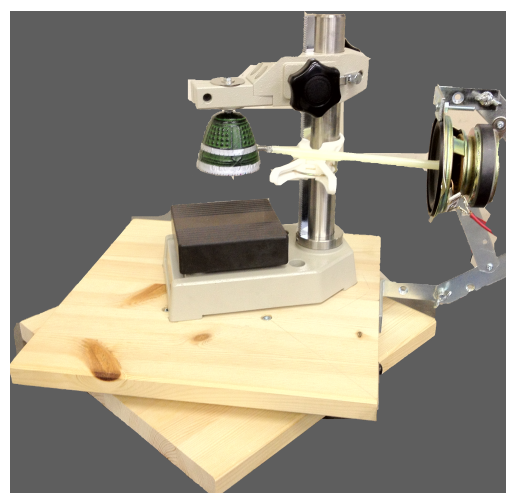


Fig. 4 実験装置

のずれを持つことが分かる。また, Fig.7 と Fig.8 を比べると, 中腹部の最大振幅が下端部の振幅よりも全体的に大きい事が分かる。これは, 今回の有限要素法によって得られた (6-0) モードのモード形状と異なっている。

(8-0) モード以上の周波数についても測定を行ったが, 測定装置の都合上, 十分に大きな力で風鈴を打撃できなかつたために高次のモードが起こらなかつたもしくは瞬間的に収束してしまつたため, (8-0) モード以上のモード周波数に相当する周波数については測定できなかつた。

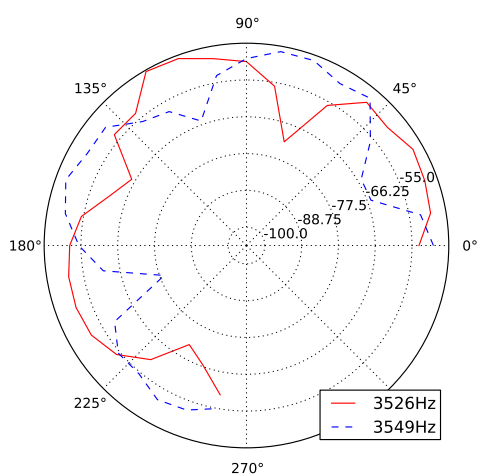


Fig. 5 (4-0) モードピークの下端部におけるレベル

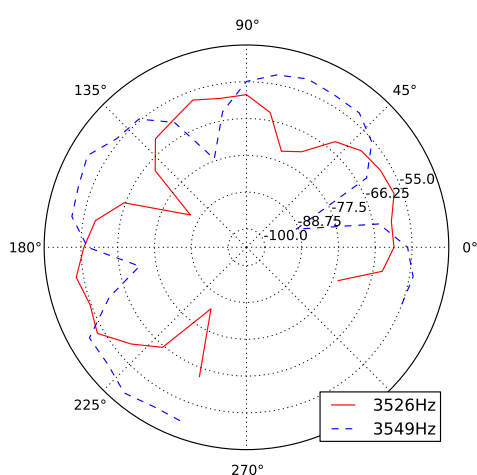


Fig. 6 (4-0) モードピークの中腹部におけるレベル

4. 結論

南部風鈴の振動について, 有限要素法による固有値解析とレーザードップラー振動計を使った振動測定との二つの面から検討を行った。有限要素法による南部風鈴の固有値解析では, (6-0), (8-0) モードにおいて西口らの報告²⁾で示されたモード形状と異なるモード形状が得られた。この事は興味深い, 原因は不明であり, また, レーザードップラー振動計を使用した振動測定によって得られた (6-0) モードの形状との間に差があつた。また, 固有値解析によって得られたモード周

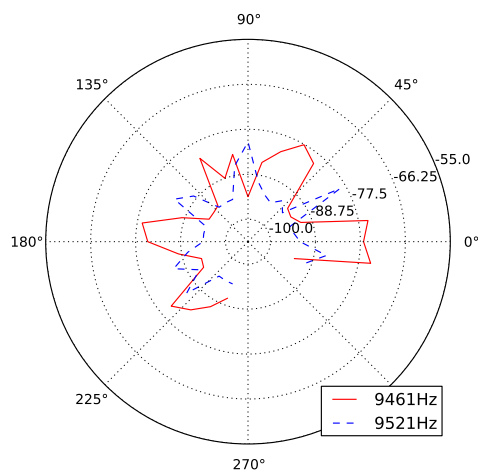


Fig. 7 (6-0) モードピークの下端部におけるレベル

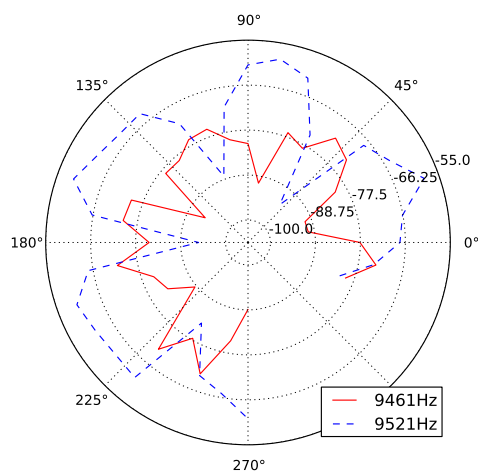


Fig. 8 (6-0) モードピークの中腹部におけるレベル

波数と実際に測定した周波数との比較においても,(6-0),(8-0)モードにおいて大きく周波数が異なっていた。これらの結果は固有値解析に使用した形状パラメータの値と実際の風鈴の値が異なっている可能性を示している。有限要素法を使用した梵鐘の振動解析³⁾では,(6-0),(8-0)モードが梵鐘の厚さに影響を受けやすいことが示されており,南部風鈴の設計に有限要素法を使用するには,特に風鈴の厚みに関する形状パラメータの検討が必要であることが分かった。

レーザードップラー振動計を使った振動測定では,(4-0)モードにおいて固有値解析で得られたモード形状と測定によって得られた形状が一致し,今回の手法により風鈴の大まかな振動形状を測定できることが分かった。しかし,今回の手法では,使用した測定装置の都合上マイクロホンを使用した際には測定できていた(8-0)モード以上の高次モードを測定できなかった。今後の課題として測定装置を改良し,十分な力で打撃できるようにする必要がある。

参考文献

- 1) 青木一郎「梵鐘」音響学会誌 27-1, 42/50 (1971)
- 2) 西口磯春, 高澤嘉光「和鐘の発音機構の解析」日本音響学会誌 53-11 (1997).
- 3) T.Nakanishi,T.Miura,T.Masaeda,A.Yarai
"Vibration analysis of a temple bell by Finite Element Method"Department of Electrical and Electric Engineering, Faculty of Engineering.
- 4) 大谷泰夫「夏に涼しさを呼ぶ風鈴」, シリーズ「身近な金属のミクロ組織を読む」
http://www.nsst.nssmc.com/tsushin/magazine/40_2.pdf
- 5) 木村隆史, 藤岡豊太, 永田仁史, 安倍正人, 平塚貞人, 堀江皓「南部風鈴の音色の分析に関

する検討」平成 23 年度第 4 回情報処理学会東北支部研究会 (岩手大) 資料番号 11-4-17.

- 6) Jacob Fish, Ted Belytschko
"A First Course in Finite Elements"