



Title	パイプ周方向溝における超音波エネルギートラップ
Author(s)	林, 高弘
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. 信学技報. 2020, 119(430), p. 25-27
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/92345">https://hdl.handle.net/11094/92345</a>
rights	Copyright©2020IEICE
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# パイプ周方向溝における超音波エネルギートラップ

林 高弘<sup>†</sup>

† 大阪大学 大学院工学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

E-mail: <sup>†</sup>hayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし パイプの周方向に管厚が薄くなるような溝部がある場合に、その溝部に沿って伝搬するガイド波が溝部のみにエネルギートラップされる現象について検討した。パイプの周方向を伝搬するガイド波の分散曲線より、そのエネルギートラップが予測され、半解析的有限要素法を用いた数値計算によって共振周波数および振動モードを算出することができた。さらに、レーザ超音波による非接触計測によって、それらのモードが数値計算により得られた共振周波数に非常に近い周波数において発生することが確認された。このパイプ周方向のガイド波のエネルギートラップは、管厚の薄い部分で起こるので、今後、高感度のセンサとしての利用が期待できる。

キーワード エネルギートラップ, パイプ, レーザ超音波, ガイド波

## 1.はじめに

弾性波のエネルギー閉じ込め現象は古くから知られており、厚み振動のエネルギートラップは QCM (Quartz Crystal Microbalance) などで利用されている[1-6]。QCM では、圧電平板上の電極部分で板厚が厚くなり、その形状変化により振動エネルギーが閉じ込められる。そのため、電極部から離れた場所の形状や支持の影響を全く受けることなく、安定した共振状態を再現することができる。QCM は、この特長を利用して微小量の吸着物質の検知を行うセンサとして使われている。同様の閉じ込め現象は、平板に限らず丸棒や球体でも報告されている。Johnson ら[7]は、丸棒の周方向に伝搬する表面波が段付き部において閉じ込められることを示しており、荻ら[8]は電磁超音波センサにより丸棒の段付き部に発生させたこの周方向に伝搬する閉じ込めモードを用いて無線かつ無電極によるバイオセンサを開発している。また、山中ら[9]は球体を表面にレイリー波のような波動場を周回させ、それにより即応性のある高感度センサを開発している。

これまで著者は、効率のよい配管検査を目的として、パイプ中を伝搬するガイド波の挙動に関する理論的および実験的研究を行ってきた[10-13]。本報では、そこで用いてきた数値計算手法および実験システムを用いて、パイプの円周方向に共振する周方向伝搬モードが管厚の変化により引き起こすエネルギートラップ現象について議論する[14]。

## 2. 分散曲線によるエネルギートラップの解析

図 1 は、後の実験で用いる直径と管厚を持つアルミニウム合金パイプ（縦波音速 6300m/s, 横波音速 3100m/s）の分散曲線である。周方向次数  $n=5$  のモードのみを表示した。ラム波の分散曲線よりエネルギートラップを論じた過去の論文[1-5]に倣い、縦軸を周波数、

横軸の右側を波数  $k$  の実部  $\text{Re}(k)$ 、左側を波数  $k$  の虚部  $\text{Im}(k)$  で表した。青線が外径 40mm、管厚 2mm のパイプ、黒線が外径 39mm、管厚 1.5mm のパイプのものであり、実線が波数  $k$  の実部  $\text{Re}(k)$ 、破線が波数  $k$  の虚部  $\text{Im}(k)$  である。 $k = 0$  に対する周波数はカットオフ周波数と呼ばれ、この周波数において、このモードは長手方向に伝搬せず、周方向に  $\cos 5\theta$  の分布で共鳴する。外径 39mm のパイプにおけるカットオフ周波数は  $f_c = 24.5\text{kHz}$  であり、その時 40mm のパイプでは波数が  $k = 40 + 127i$  のように複素数となっている。このことは、QCM のような平板に段がある場合のエネルギートラップとの類似性より、パイプのへこみ部でエネルギートラップが起こることを示している。つまり、外径 40mm、管厚 2mm のパイプに深さ 0.5mm の溝を周方向に掘って外径 39mm、管厚 1.5mm の帯状の領域を作成し、その薄い部位をカットオフ周波数  $f_c$  で励振した場合、溝部には周方向に  $\cos 5\theta$  で分布する周方向共振が起こり長手方向への伝搬を伴わない波動場 ( $k = 0$ ) が形成される。同時に溝部の外では、 $k = 40 + 127i$  となるので、長手方向の変位は  $\exp(-127z)$  の分布で指数関数的に減少する。これは振動エネルギーがパイプの溝部で周方向に共振しながらトラップされることを意味している。

## 3. 半解析的有限要素法による周方向トラップモードの算出

上述では  $z$  方向に無限に長いパイプを用いて解析しており、 $z$  方向に有限の長さの溝部が存在するような場合のエネルギートラップ周波数を厳密に求めることはできない。そこで、著者がこれまで開発してきた半解析的有限要素法[13]を用いてエネルギートラップ周波数を求めた。Fig.2 は、半解析的有限要素法において固有値として得られる共振モードのうち、溝部にエネルギーが集中しているモードを示したものである。(a)-(c) は

管厚方向の振動が支配的なモードであり、表面カラーは管厚方向変位を表している。(d)-(f)は管の長手方向の振動が支配的なモードであり、その方向の変位を表面カラーで表している。それぞれ、周方向モード次数が  $n=4,5,6$  のモードを表している。得られた共振周波数は、それぞれ図中に示した通りである。Fig. 2 (b)のモードが Fig. 1 に分散曲線により予測されたエネルギートラップモードであり、算出された共振周波数 26.25kHz は Fig. 1 の肉厚 1.5mm のパイプのカットオフ周波数と 2.0 mm のパイプのカットオフ周波数の間にある。また、(a)-(c)から分かるように、様々な  $n$  においてもエネルギートラップモードが存在しており、また(d)-(f)から分かるように SH 振動であってもエネルギートラップモードが存在している。このように様々な周波数や振動モードでもエネルギートラップが実現できるという結果は、センサやフィルタといったデバイスに応用する際に、広い適用範囲が期待できる。

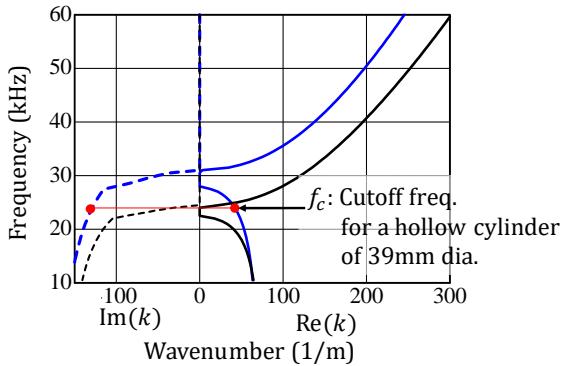


Fig. 1 Dispersion curves for circumferential guided waves in a pipe with a different thickness. Blue: outer dia. = 40 mm, thickness = 2.0 mm. Black: outer dia. = 39 mm, thickness = 1.5 mm. Modes with  $n = 5$  are shown as a representative [14].

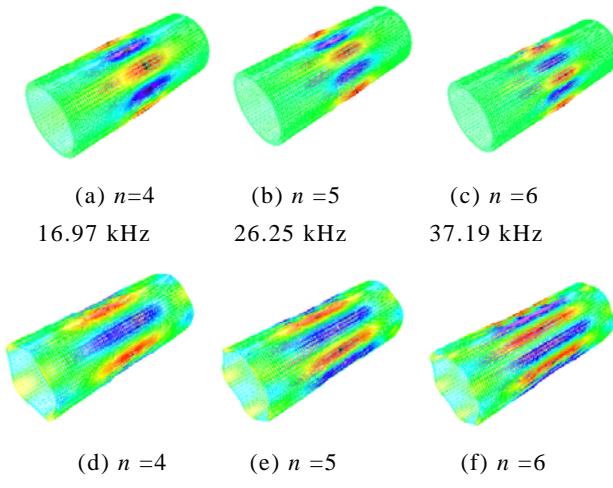


Fig. 2 Wave structures of energy trapping modes. (a)-(c) are flexural vibration modes [14].

#### 4. レーザ超音波による実験的検証

最後に、このパイプ溝部におけるエネルギートラップを実験的に確認するため、Fig. 3 のようなアルミニウム合金試験体 (A1070) に対し、レーザによる非接触弹性波計測を行った。弾性波の励振は、連続波のファイバーレーザ出力に変調をかけることで実現し、本実験では持続時間 50ms のバースト波を励振した。受信はレーザドップラー振動計を用いている[12, 14]。

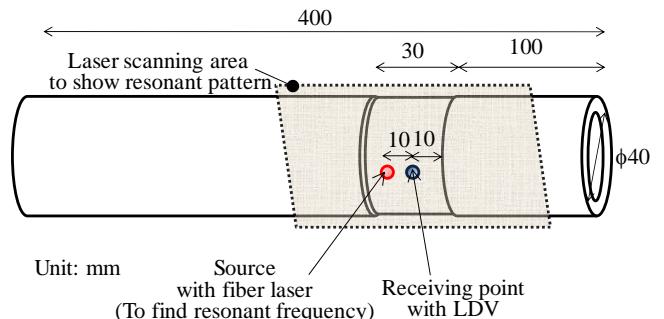


Fig. 3 A pipe used in the experiments and laser irradiation points for generating and detecting elastic waves [14].

はじめに Fig. 2 (a), (b), (c)に示されるような  $n=4, 5, 6$  の屈曲振動モードの共振周波数を実験的に特定した。弾性波の励振源と受信点を Fig. 3 に示すような溝部中に設定し、持続時間 50ms で、変調周波数を 10 kHz から 45 kHz の間で 0.02 kHz ステップで変化させて波形を収録した後に、周波数スペクトルピーク値を取得して Fig. 4 のようにプロットした。図中の赤矢印は、17.06 kHz, 26.32 kHz, 37.22 kHz となっており、これが  $n=4, 5, 6$  でエネルギートラップされた屈曲振動モードの計算結果 (16.97 kHz, 26.25 kHz, 37.19 kHz) と非常によく合っている。

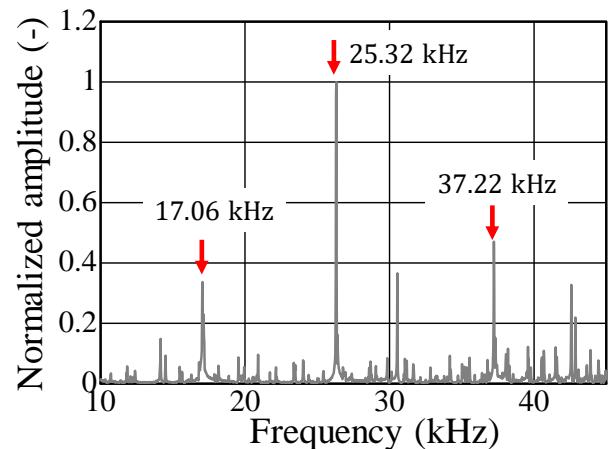


Fig. 4 Resonant spectrum measured by the non-contact manner with lasers [14].

次にその3つの共振周波数を励振しながら、弾性波の励振源を走査し、周波数スペクトルピークの最大値をマッピングしたものがFig. 5である。この図は、受信点を固定し励振源を走査して得られたものであるが、相反定理を考えた場合、励振源を固定して受信点を走査したものと等価であると考えられる。つまり、溝部で励振した振動の分布を表示していると考えることができる。表面状態の影響を受けやすいレーザによる振動の受信の点を走査する代わりに、励振源を走査することで安定した計測を実現している<sup>[11]</sup>。これらの図は、ちょうどFig. 2の計算結果と非常によく合っており、パイプの溝部におけるエネルギートラップモードを実験的に確認することができた。

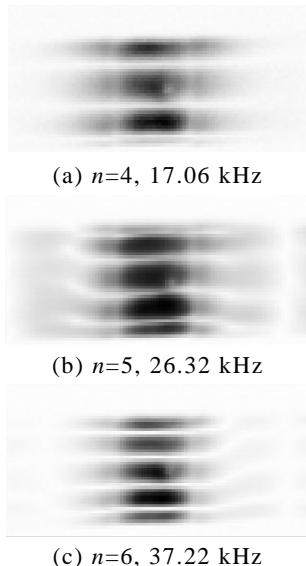


Fig. 5 Wave distributions obtained experimentally with scanning a laser source [14].

## 5.まとめと今後の展開

本報では、パイプ溝部に現れる周方向共振によるエネルギートラップについて、分散曲線を用いて理論的にその存在を予測した後、数値計算による共振周波数と振動モードの算出した。さらにレーザ超音波計測によるそれらのエネルギートラップモードを実験的に検証したところ、理論解析および数値計算に非常によく合う結果が得られた。

QCMと同様に、このようなトラップモードは、振動を用いた各種センサの高感度化、応答特性の向上などに寄与するものと考えられる。QCMのように電極のついた厚い部分にエネルギートラップする場合には、振動面の厚みを薄くするには限界があったが、このパイプ中のエネルギートラップでは壁面の厚みが非常に薄くすることができるため、センサとして用いた場合の感度の向上が期待できる。さらに、Fig. 2(d)-(f)のように面内の振動によるエネルギートラップも可能であるという

事実は、その用途を大きく広げることになる。例えば、溶液中の分子を検出する場合、Fig. 2(a)-(c)のような面外振動が支配的な屈曲振動モードを使うと液中への漏洩のためQ値が著しく低下するが、面内振動モード(d)-(f)の場合、漏洩が小さくQ値が低下しにくい。さらに、外部からの電磁気的な作用により非接触で励振することも可能であり、振動面に電極が不要となることもセンサとしての高感度化に寄与するものと考えられる。

本研究は、科学研究費補助金(18K18920)を用いて行われた。

## 文 献

- [1] 中村僖良，“弹性波のエネルギー閉じ込め現象とその圧電デバイスへの応用,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J78, no. 11, pp. 466-473, 1995.
- [2] T. Knowles, M. K. Kang, and R. Huang, “Trapped torsional vibrations in elastic plates,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, 201911, 2005.
- [3] W. H. King, “Piezoelectric Sorption Detector,” *Anal. Chem.*, vol. 36, no. 9, pp. 1735–1739, 1964.
- [4] J. D. N. Cheeke and Z. Wang, “Acoustic wave gas sensors,” *Sensors Actuators B*, vol. 59, pp. 146–153, 1999.
- [5] W. Wang, C. Zhang, Z. Zhang, T. Ma, and G. Feng, “Energy-trapping mode in lateral-field-excited acoustic wave devices,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, p. 192901, 2009.
- [6] H. Ogi, “Wireless-electrodeless quartz-crystal-microbalance biosensors for studying interactions among biomolecules: A review,” *Proc. Japan Acad. Ser. B*, vol. 89, no. 9, pp. 401–417, 2013.
- [7] W. Johnson, B. A. Auld, E. Segal, and F. Passarelli, “Trapped torsional modes in solid cylinders,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, no. 1996, pp. 285–293, 1996.
- [8] H. Ogi, K. Motohisa, T. Matsumoto, T. Mizugaki, and M. Hirao, “Wireless electrodeless piezomagnetic biosensor with an isolated nickel oscillator,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 21, no. 10, pp. 2001–2005, 2006.
- [9] K. Yamanaka *et al.*, “Ultramultiple roundtrips of surface acoustic wave on sphere realizing innovation of gas sensors,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 53, no. 4, pp. 793–801, 2006.
- [10] T. Hayashi and M. Murase, “Defect imaging with guided waves in a pipe,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 4, pp. 2134–2140, 2005.
- [11] T. Hayashi and M. Murase, “Mode extraction technique for guided waves in a pipe,” *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 20, no. 1, pp. 63–75, 2005.
- [12] T. Hayashi, “Detection of a Defect on the Back of a Pipe by Noncontact Remote Measurements,” *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 140, no. 6, p. 061401, 2018.
- [13] T. Hayashi, W.-J. Song, and J. L. Rose, “Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example,” *Ultrasonics*, vol. 41, no. 3, pp. 175–183, May 2003.
- [14] T. Hayashi, “Energy trapping of circumferential resonant modes at a thin-walled groove in a hollow cylinder,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 146, no. October, pp. EL376–EL380, 2019.