

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008 年度～2009 年度
 課題番号：20760103
 研究課題名（和文） 振幅変調計測による非線形共鳴音波の分散性の解明
 研究課題名（英文） measurement of amplitude modulation and dispersive effect of nonlinear resonant oscillations
 研究代表者
 栗原 央流 (KURIHARA ERU)
 北海道大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：90344481

研究成果の概要（和文）：

円筒型トランスデューサーを用いた円筒音波共鳴装置を用いて共鳴音波の分散性の定量評価を行った。共鳴振動状態における音圧測定をとおして分散性の定量評価，ならびに共鳴管内に微粒子を混入することによる共鳴音波の空間的な分布についての観察を行った。本実験により，円筒音波の分散性に起因する振幅の変調が実際に観測された。この振幅変調の周期が過去の 2 次元円筒音波の共鳴現象に関する理論解析の結果ならびに数値シミュレーションによる結果と定性的に一致したことから，音場の幾何学的な形状に起因する音波の分散性の存在が実験的にも示されたといえる。

研究成果の概要（英文）：

Measurement of dispersion effect of resonant cylindrical waves is performed by using the cylindrical transducer. The amplitude modulation due to the dispersive effect of the resonant gas oscillations was found through the experiment. Spatial distribution of the resonant wave was observed by the particle in the resonator. The experiment revealed that the dispersion effect associated with the amplitude modulations. Since the period of the modulation is consistent with the results of both theoretical and numerical analysis, the presence of the dispersion effect resulting from the geometry of the sound field was shown experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：音響

1. 研究開始当初の背景

気体や液体中における音波の伝播は Navier-Stokes 方程式によって記述される本質的に非線形な流体現象である。音波の非線形性ならびに非線形効果と散逸効果の相互作用に起因する特徴的な現象(例えば、波形歪みと衝撃波の形成、音響流、パラメトリックアレイ、音響放射圧など)に対する研究が古くからなされており、その成果として超音波による画像診断・非破壊検査技術、超音波による洗浄、音波による体内結石の破碎といった応用技術が実用化され商業的にも成功をおさめている。音波の共鳴現象は、小さな入力により大振幅の音場が形成されるという著しい特徴を持つため、古くから数多くの研究がなされている。とくに、閉じられた管内の気体中における平面音波の共鳴現象については、理論的および実験的な研究により、その詳細が明らかにされている。

その一方で円筒音波や球面音波の共鳴現象に関しては、これらが学術的にも応用的にも極めて基本的かつ重要な伝播形態であるにもかかわらず、その非線形現象を含んだ詳細なふるまいは、Chester や Ellermeier によるものを除きほとんど知られていなかった。申請者らは、同軸円筒および同心球殻内に励起される共鳴音波の非線形解析を行い、円筒音波や球面音波の非線形共鳴現象は周期的な振幅の変調をとまなうこと、音場の幾何学的な形状に起因する共鳴音波の分散性によって非線形効果による衝撃波の形成が抑制されることなどを定量的に示した。この結果は、散逸効果が無視出来る場合に平面音波の共鳴現象では必ず衝撃波が形成されるということと比較して極めて対照的であるといえる。

2. 研究の目的

本申請による研究の目標として、円筒音波の非線形共鳴現象に関して以下にあげる点を明らかにすることを旨とする。

- (1) 申請者らによってなされた過去の理論解析の結果を踏まえて、円筒共鳴管の動径方向に伝播する音波の共鳴現象を実験的に検証する。
- (2) 周期的な振幅の変調と衝撃波の抑制効果の定量的な評価を行い、円筒音波の共鳴現象における分散効果の存在を明らかにする。
- (3) 動径方向以外の周方向および円筒の軸方向に励起される振動モードの測定と解析を行い、理論および数値シミュレーションとの定量的な比較を行う。

3. 研究の方法

本研究では、円筒音波の共鳴現象における分散効果検証するにあたって、実験およびそれを補う形で数値計算を行う。詳細な研究計画は以下に示すとおりである。

(1) 円筒型トランスデューサーによる円筒共鳴装置の作成および音場の計測

円筒型トランスデューサーを利用した音響共鳴管を作成し、円筒の動径方向に伝播する音波による共鳴音場における音圧分布の測定を行う。はじめに音源の振動数に対する共鳴音波音圧振幅の応答と共鳴管内の音圧分布計測を行い、本実験装置の大まかな信頼性と性能の評価を行う。つづいて円筒共鳴管内に励起される音波が振幅の変調をとまなっていることを確認し、ここで得られた変調振幅の周期と申請者らによる理論解析・数値解析による結果とを比較し、円筒音波の共鳴現象における分散性の存在を示す。また、マイクロフォンによって得られる音圧変動の時系列データの FFT 解析によって、円筒共鳴音波のもつ分散効果を定量的に評価する。

研究目的で述べたように、平面音波の共鳴においては散逸効果が無視できるならば音源の振幅がどれだけ小さかったとしても必ず衝撃波が形成されることが、理論・実験によって示されている。これは、音波の非線形効果によって生じる高調波の振動数が基本波の整数倍に等しいことによる。これに対して円筒音波や球面音波の共鳴では、高調波の振動数は基本波の振動数の整数倍に一致せず、音源の振動によって励起される低次の振動モードのエネルギーが高次の波に伝達されにくくなるために衝撃波の形成が抑制される。本研究では、このことを音場の幾何学形状に起因する分散効果と呼んでいる。ゆえに本研究において共鳴音波の周波数解析を行うことは、円筒共鳴音波の分散性を定量的に評価する上で非常に有効であるといえる。

共鳴音波の非線形性に関して、大振幅音場における衝撃波の形成とそのふるまいの詳細な解析を行う。ここでは衝撃波形成の臨界 Mach 数 Mc の存在を明らかにすること、および高速度データロガーを用いた圧力変動計測によって、衝撃波を含んだ波形の時間発展を解析する。

(2) 値計算による円筒内の 2 次元的な共鳴波のふるまいの解析

円筒音波の共鳴現象では、動径方向だけでなく円筒の軸方向や円周方向に伝播する音波が励起される。これらの波動成分が動径方向成分と同程度あるいはより大きな振幅

を持つような音場が形成された場合、動径方向に励起される共鳴音波の観測・測定に支障を来すおそれがある。動径方向以外の波動成分のうち、軸方向に伝播する成分については実験装置の軸方向長さを適切に選ぶことで軸方向の共鳴振動数と動径方向の共鳴振動数を明確に分離できるように実験を行う上で大きな問題は無いものと考えられる。一方、周方向成分については、その共鳴振動数が動径方向モードの振動と同程度であること、音波の非線形性と分散性によって比較的広い周波数帯域を持つ波が励起されると予想されることから、この影響がどの程度あるのかを知ることが必要となる。そこで本研究では、数値シミュレーションによって円筒内に励起される共鳴音波の2次元および3次元のふるまいを調べる。予備的な解析として、過去の申請者らによる円筒音波の1次元シミュレーション(Kurihara et al. 2005)の計算コードを拡張することにより2次元計算を行った。

4. 研究成果

円筒型トランスデューサーを用いた円筒音波共鳴装置を用いて共鳴音波の分散性の定量評価を行った。はじめに装置の特性を知るために、共鳴振動数の測定と線形理論による比較を行った。続いて、共鳴振動状態における音圧測定をとおして分散性の定量評価、ならびに共鳴管内に微粒子を混入することによる共鳴音波の空間的な分布についての観察を行った。最後に、共鳴円筒音波の直接数値シミュレーションにより実験によって得られた結果との比較・検証を行った。実験装置の音響特性の評価として音源の駆動振動数に対する音圧の測定を行った。その結果、1次から4次までの振動モードについて、線形解析によって予測される共鳴振動数に対して1%未満の誤差で音圧のピークが観測された。このことより円筒共鳴管内に共鳴円筒音波が励起されていることが確認できる。また、音響特性評価によって得られた最大音圧は170dBにも達し、効果的な音波の増幅が確認された。さらに、このとき衝撃波は観測されておらず、音波の分散性による衝撃波形成の抑制効果の存在が示唆される。

マイクロフォンによる共鳴管内の音圧測定では、円筒音波の分散性に起因する振幅の変調が実際に観測された。この振幅変調の周期が過去の2次元円筒音波の共鳴現象に関する理論解析の結果ならびに数値シミュレーションによる結果と定性的に一致したことから、音場の幾何学的な形状に起因する音波の分散性の存在が実験的にも示されたといえる。円筒音波の直接数値シミュレーションでは、円

筒の偏心や楕円の離心率の変化を考慮した2次元解析を行い、円筒内に励起される大振幅音波のもつ非線形性と分散性が音波の波面の局所的な曲率の違いによって大きく異なることを示した。とくに、曲率が大きい場合に分散効果が支配的となり、衝撃波の形成が抑制されることが明らかとなった。また、音場の非一様性により円筒内の局所的な振幅の増大が観測された。

微粒子による共鳴管内の音場の直接観察では、音響放射圧によって粒子が環状に集積する様子が観察された。この粒子の集積位置は解析解による音圧の節の部分に対応しており、このことから共鳴管内部で軸対象な共鳴音場が形成されていること、音響放射圧を利用した微粒子の集積が実際に可能であることが理解される。

しかしながら、実験による結果はシミュレーションと比較して100倍ほどエネルギー散逸が大きい結果となったことから、実験・シミュレーションともにさらなる改善が必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計3件)

- ① 栗原央流、円筒音波の非線形共鳴現象における振幅変調計測、日本流体力学会年会2009、2009年9月3日、東洋大学(東京都文京区)
- ② T. Kanagawa, E. Kurihara, Nonlinear analysis of resonant sound wave excited in an elliptical cylinder, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Oct. 15, 2008, Sapporo.
- ③ E. Kurihara, Numerical simulation of nonlinear resonant oscillations in an elliptical cylinder, 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Jun. 19, 2008, Stockholm, Sweden.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 央流 (Kurihara Eru)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：90344481

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

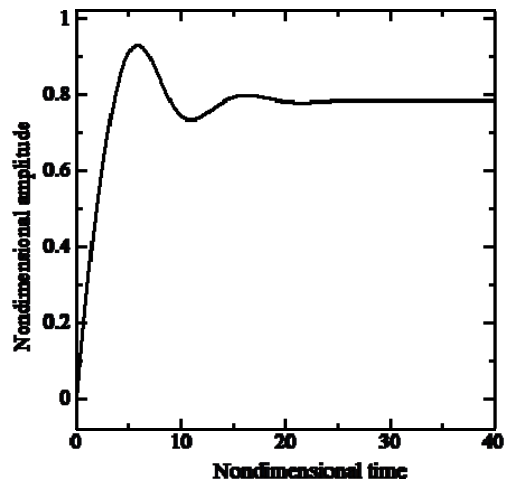
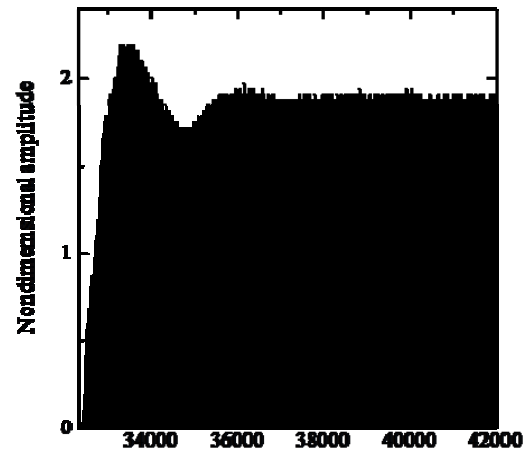


図 1： 円筒共鳴音波の振幅変調. 実験により得られた音圧変動（上）と理論解析による圧力振幅の包絡線.