

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560270

研究課題名(和文)渦一音響相互作用モデルに基づく熱交換器管群部の気柱共鳴騒音予測手法の開発と実用化

研究課題名(英文)STUDY ON PREDICTION METHOD OF ACOUSTIC RESONANCE IN HEAT EXCHANGER TUBE BUNDLES

研究代表者

西田 英一 (Eiichi, Nishida)

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：70410032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：管群を内蔵する熱交換器において、管群部で生じる熱流体による渦(カルマン渦)がダクト室内の共鳴を誘起すると、大レベルの騒音が発生し、場合によっては運転継続が困難になることが知られている。この現象を設計段階で予測するための手法を開発した。

その概要であるが、現象を半実験的に表すモデルを考案し、それが有するパラメータを風洞実験により同定することで、共鳴の発生、発生時の最大音圧を予測するものである。汎用性のある共鳴予測手法として設計現場での使用が可能となると考える。

研究成果の概要(英文)：Acoustic resonance may occur in heat exchangers such as gas heaters or boilers which contain tube bundles. When the gas flow in the duct increases to some level, Karman vortex shedding frequency increases and when it reaches to the natural frequency of the acoustic space within the duct, the resonance have a potential to generate high level noise and in the worst case, this phenomenon may make it impossible to load up the plants or may cause the structural damage of the products. In order to avoid a trouble by a resonance attack, we developed a method by which to predict the resonance attack critical gas flow velocity and maximum resonance amplitude at the design stage.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・制御

キーワード：共鳴 熱交換器 伝熱管群 カルマン渦 渦一音響相互作用 同期化 自励振動

1. 研究開始当初の背景

管群をダクトに内蔵する熱交換器において、ダクトを流れる気体がある流速に達すると気柱振動が励起されて高レベルの騒音が発生する場合があります、最悪の場合にはプラントの負荷上昇が困難になるばかりでなく、構造の破損を引き起こす。

この共鳴現象を下図により説明する。ガス流速 U_g の上昇とともに管群内で放出されるカルマン渦の周波数 f_w が増大し、ダクトの気柱共鳴周波数 $f_i (i=1,2,\dots)$ と一致すると騒音が発生する。

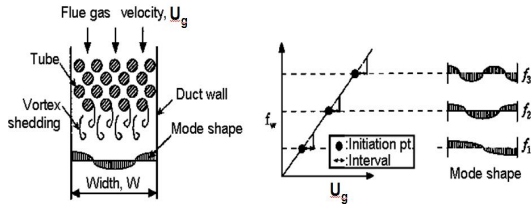


Fig. Overview of acoustic resonance

この現象については、カルマン渦に関係したメカニズムについて詳細に検討した1968年のY. N. Chenの論文が草分け的存在として知られている。

この現象に関しては、主としてトラブルシューティングとしての対策がとられることが多く、著者らも現場での共鳴計測データに基づく対策法を検討してきた。一方、設計段階での共鳴発生予測法については、実験データや実機データに基づく方法と、共鳴発生メカニズムの解明に基づく方法に大別される。前者に関しては、Grotz、Y.N.Chen、Fitzpatrick、Ziada、Blevins、Eisinger など多数にわたるがダクトの音響特性（形状や吸音等）や管群配列などの条件の考慮が困難であるという問題点がある。後者に関しても多くの研究がなされているが残された課題は多く、その中でも最大の問題は、この現象で重要な渦/共鳴音場相互作用現象の扱いが必ずしも十分とはいえないことである。そのため信頼性も必ずしも十分とは言えず、より信頼性の高い予測手法の開発が求められていた。

2. 研究の目的

設計段階で共鳴発生予測が可能な、より信頼性が高く、かつ、ダクト内音響特性、管群配列などの設計諸条件を反映できる実用的な予測手法を開発することを目的とする。具体的には、共鳴発生限界流速、共鳴時の最大音圧レベルを予測可能な手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

この共鳴現象を支配するメカニズムを組み込んだモデルに基づく予測法を開発する。そのメカニズムを以下に示す。上図は、渦-音場間の相互作用現象の特徴を示すもので、非共鳴時にはランダムであった渦放出のタイミングが、共鳴時には同期化し、かつ渦の

強度も増大することを示す。つまり、この現象は渦/音響系のフィードバックに基づく自励振動であり、下図はそのブロックダイアグラムである。本研究では、この考え方に基づくメカニズムを比較的簡易にモデル化し、それをベースとした共鳴発生予測法を提案する。

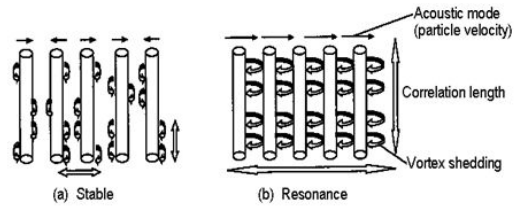


Fig. View showing vortex/sound interaction

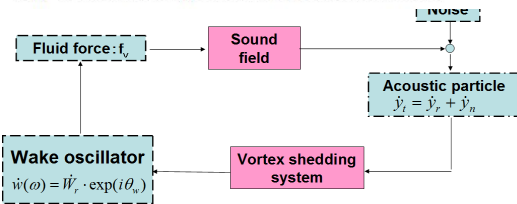


Fig. Block Diagram of Vortex-Sound Interaction

具体的には、この相互作用現象に関する、過去の実験で明らかになった知見を反映可能なモデル化方法を導く。その際に参考になるのが Blevins、Facchinetti 等による管の振動問題に関する研究である。この研究では管振動 渦間の相互作用を後流振動子 (wake oscillator) モデル(下図参照)により簡潔に表しており、かつ、実験データの反映も容易である。

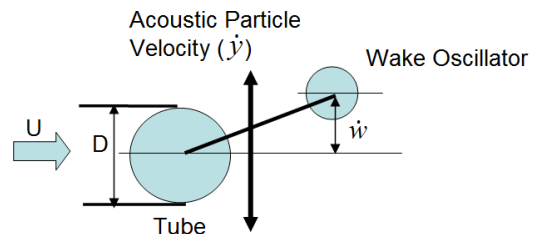


Fig. Wake oscillator model

ここで、「管振動が渦放出に及ぼす影響は気柱による影響と同じであろう」との推定に基づき、本研究ではこの方法を渦-音場間の相互作用向けに変換することにより渦-音場間の相互作用のモデルを導き出す。

その際に、渦放出現象が空間的にも時間的にもランダムな要素を含むことから、この特徴を反映すべく、統計的なモデル化手法を導入する。このモデルの概念図を以下に示す。

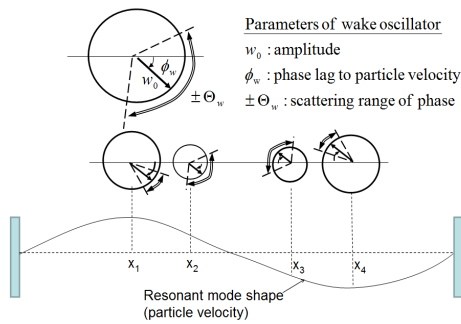


Fig. Modeling of synchronization feedback

渦放出挙動は後流振動子に置き換えられる。その運動特性は音響共鳴モードに強く依存している。まず、後流振動子の振幅は共鳴モード振幅が大きいところでは大きい。次に、後流振動子の位相特性で表される渦放出のタイミングは共鳴モードに基本的には同期しているが、ランダムな特性も内蔵している。このランダム性は後流振動子の位相のランダム成分 w のばらつき範囲 ($\pm w$) の広さで表され、この広さが共鳴モードの大きさに依存するとしてモデル化される。

この考え方を下図により詳述する。

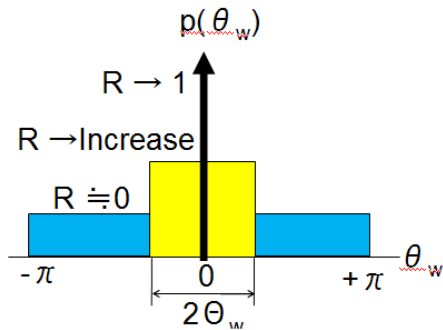


Fig. Probability density function of θ_w

この図は位相のランダム成分 w の確率密度関数であり、共鳴モードが大きくなるにつれてランダム成分のばらつき範囲 ($\pm w$) の広さが狭くなることを示している。なお、この図で'R'はノイズを含む音圧に占める共鳴モード成分の寄与を表すパラメータで、下図にその定義を示す。

Components of sound response : $y_t = y_r + y_n$

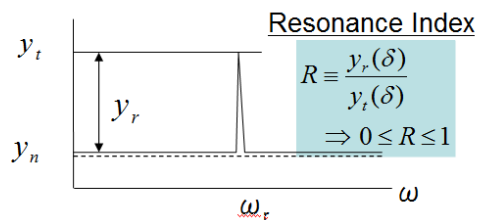


Fig. Power spectrum of sound response

このような渦音響相互作用モデルに基づく共鳴発生予測法の計算手順を下図に示す。

モデルに含まれるいくつかのパラメータ (渦放出タイミングの音場に対する感度を表すパラメータ、共鳴モード形状や音響減衰等の共鳴モード特性等) は風洞実験により同定する。

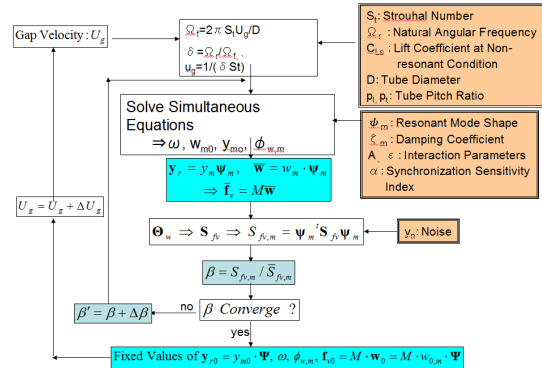


Fig. Flow of Numerical Simulation

4. 研究成果

渦音響相互作用 (共鳴進行とともに渦放出の空間的な同期化が顕著になるとともに、渦の強度が増大する現象) を組み込んだ数値モデルに関する定式化と実験検証を行い、その信頼性、実用性を検証した。その一例として、渦放出の同期化に関するシミュレーション/実験の量結果を比較して下図に示す。横軸は流速 U_g 、縦軸はある2つの管における渦放出の相関度 (Coherence) である。シミュレーション結果は、流速 U_g の増大とともに相関度の増大する傾向をよく表すとともに、計測結果ともよく一致している。

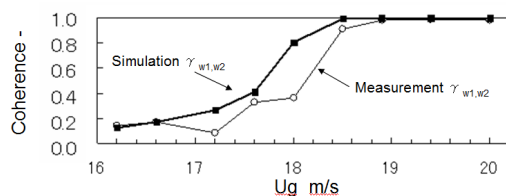


Fig. Comparison between calculated and measured coherence

また、下図は流速 U_g 増大時の共鳴発生時の状況をシミュレートしたものであるが、上段の渦放出周波数の特徴 (Lock-in)、あるいは2段目の音場の変動 (音響粒子変位 y_m) がある流速 (渦放出周波数が共鳴モード周波数と一致する流速) で最大となる状況を再現できている。

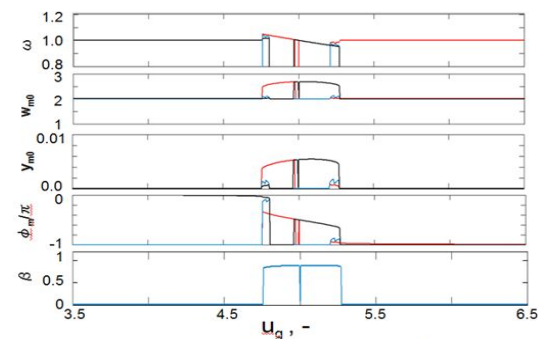


Fig. Results of Numerical Simulation

以上の結果より、提案法は熱交換器管群設計時に共鳴発生を予測する手法として使用可能であるといえる。今後の課題としては、種々の管群配列におけるモデルのパラメータを風洞実験により同定し、設計データとして整理することがあげられる。

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 2 件)

(1) Hirimitsu Hamakawa, Tatsuaki Nakamura, Kenta Asakura, Eiichi Nishida, Eru Kurihara, Effect of Arrangement of Tube Banks on Acoustic Resonance, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol. 2, No.4A, (2013/1), pp.311-317.

(2) 濱川洋充, 伊藤祐樹, 加茂龍之介, 西田英一, 栗原央流, 流れ中のフィン付き円柱から発生する渦放出音に及ぼす螺旋状側板の効果, 日本機械学会論文集 B 編, No.2013-JBR-0068, 2013, 10p.

〔学会発表〕(計 8 件)

(1) 濱川洋充, 西田英一, 中村達明, 朝倉健太, 栗原央流, 気柱共鳴現象による管群から放出される渦の同期化とそのモデリング, 日本機械学会 2012 年 Dynamics & Design Conference 2012 No.12-12, Paper No. 849, (2012-9 月)

(2) 濱川洋充, 朝倉健太, 中村達明, 西田英一, 栗原央流, ボイラにおける気柱共鳴現象の発生に及ぼす管群配列の影響, 日本機械学会第 90 期流体工学部門講演会講演論文集, (2012-11 月), pp.1-4

(3) 西田英一, 濱川洋充, 管群気柱共鳴における渦放出同期化現象のモデル化手法(第 2 報: 実験による精度検証), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011

(4) 濱川洋充, 中村達明, 内田圭亮, 太田光勇, 西田英一, 気柱共鳴現象による管群から放出される渦の同期化に関する研究, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2011, A22-241, (2011)

(5) 濱川洋充, 西田英一, 朝倉健太, 松岡博紀, 栗原央流, 気柱共鳴発生時の管群から放出される渦の同期化の評価指標に関する研究, Dynamics & Design Conference, 2013, Paper No.626, (2013)

(6) 西田英一, 濱川洋充, 管群気柱共鳴予測のための安定判別法の研究, Dynamics&Design Conference 2013, Paper No.628, (2013)

(7) E. Nishida, H. Hamakawa, Study on MODELING METHOD OF VORTEX SHEDDING SYNCHRONIZATION IN HEAT EXCHANGER TUBE BUNDLES :Experimental Verification, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2011, July 17-21,

2011, pp.1-9

(8) E. Nishida, H. Hamakawa, Study on Stability Ananysis Method of Acoustic Resonance in Heat Exchanger Tube Bundles 1st:Formulation of Resonanse Phenomena, Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2014, July 20-24, 2014, to be published.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 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 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

西田 英一 (NISHIDA EIICHI)
湘南工科大学・教授
研究者番号: 70410032

(2) 研究分担者

濱川 洋充 (HAMAKAWA HIROMITSU)
大分大学・教授
研究者番号: 30243893

(3) 連携研究者

()

研究者番号: