

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560157

研究課題名(和文) ダクト中で上流支持された柔軟体の自励振動を利用した
渦発生器に関する研究研究課題名(英文) Study on a Vortex Generator that is a Fluttering Flexible Sheet
Cantilevered at the Leading Edge in a Duct

研究代表者

横田 和彦 (YOKOTA KAZUHIKO)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70260635

研究成果の概要(和文)：ダクト流中で上流支持されたゴムシートの自励振動特性と混合特性を低速風洞実験、超音速風洞実験、数値シミュレーションにより調査した。その結果、低速流れ、超音速流れそれぞれについて、自励振動限界流速、振動数、振幅の関係を無次元化して表すことが出来た。また自励振動しているゴムシートが混合を促進している事を確認した。これらから上流支持されたゴムシートは混合促進器として様々な流れで利用可能である事が示された。

研究成果の概要(英文)：The flutter and mixing characteristics of the flexible rubber sheet cantilevered at the leading edge in a ducted flow are investigated based on the experiments in the low speed and supersonic wind tunnels and the numerical simulations. The results are obtained which show the relations among the flutter limits, the flutter frequency and flutter amplitudes. Moreover, the mixing enhancement due to the fluttering rubber sheet is confirmed. All the results indicate that the flexible sheet cantilevered at the leading edge is available for the vortex generator in various flows.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：渦発生器, 柔軟体, 事例振動, 上流支持

1. 研究開始当初の背景

渦発生器(Vortex Generator)は、乱流遷移促進・物質伝達促進・熱伝達促進・消音等を目的に流れ中に設置される突起物で、液体・気体を問わず、また流速も低速から高速(超音速)まで非常に多種多様である。例えば、乱流遷移促進は抵抗低減による省エネルギー等を目的として航空機体・鉄道車両・自動車車体へ、物質伝達促進はエネルギー利用

効率向上や排気・排水浄化等を目的として混合・燃焼・反応促進・洗浄へ、熱伝達促進はエネルギー変換効率向上等を目的として熱交換器や噴流冷却へ、消音は音環境改善を目的として消音器・ジェットノズル等へ応用されている。これらの例から分かる様に、近年ではエネルギー問題・環境問題等の観点から渦発生器への注目度が更に増している。この様な背景から、これまでに、そして現在も膨

大な研究・開発が行なわれている。

一方、研究代表者は低速空気流中の上流支持柔軟シートの自励振動の実験的・理論的研究を行なって、渦とシートの自励振動の関係を明らかにした。また、振動する柔軟シートの流れへの影響に関する実験的研究、またアザラシ毛（柔軟体の一種）の流れへの影響に関する実験的研究を行なった。その結果、柔軟シートが自励振動すると、あるいはアザラシ毛が自励振動すると、流体抵抗が増加する可能性がある事を明らかにした。これらの結果は、自励振動により渦が生成され乱流混合が促進される事を示唆しており、上流支持柔軟体の自励振動を渦発生器に利用すると言う着想を得た。そして、様々な文献調査を行った所、自励振動する柔軟体の渦発生器への応用と言う観点の研究はほとんど皆無であった。

2. 研究の目的

ダクト流中で自励振動する上流支持された柔軟体を渦発生器として利用する為に、低速空気流れ、超音速空気流を対象として、自励振動の発生条件、自励振動の振動特性、および自励振動に伴う流れ構造、混合特性などを、実験および数値シミュレーションによって明らかにする事を目的とする。

3. 研究の方法

図1に低速風洞実験・超音速風洞実験における試験部の上面図を示す。支持棒は側壁で回転支持または固定支持した。これにより支持回転自由度の影響も調査した。

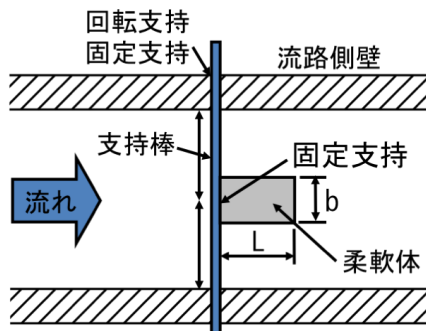


図1 試験部の上面図

柔軟体としては、予備実験において自励振動が発生した矩形ゴムシートを用いた。

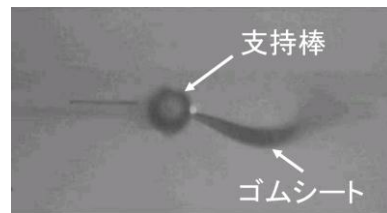
柔軟体の厚さ、幅、長さおよび流速をパラメータとして実験を行なった。また超音速実験のいくつかの実験条件に合わせて、数値シミュレーションを行なった。

4. 研究成果

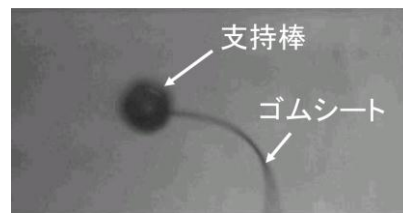
(1) 低速風洞実験結果

図2に低速風洞において得られた流速

20m/sの場合のゴムシート（厚さ0.5mm、幅10mm、長さ40mm）の自励振動の瞬間撮影画像を示す。ここで(a)は支持棒を固定支持した場合、(b)は支持棒を回転支持した場合の結果である。



(a) 支持棒固定支持



(b) 支持棒回転支持

図2 低速流中の瞬間撮影画像

図2においては、いずれも山を1つ持つ振動モードであった。また実験を行なった流速の範囲においては、モードのわずかな変化は見られたものの、モードの遷移あるいは領域を同定出来る様な顕著な変化ではなかった。また図から分かる様に、回転支持した支持棒の方が、固定支持した支持棒の場合より、ゴムシートの振動振幅が大きかった。ただし、ゴムシートが支持棒から剥がれたり、ゴムシート途中で破れたりするゴムシートの破壊が生じた。S-N曲線（疲労曲線）を勘案すれば、当然の結果と言えるが、実際の応用では、混合促進効果だけではなく、強度（破壊）を考慮に入れ、トレードオフをどの様に最適化するかという問題が生じる。

図3に、振動しなかった場合を振動数ゼロとして、流速と振動数の関係を示す。

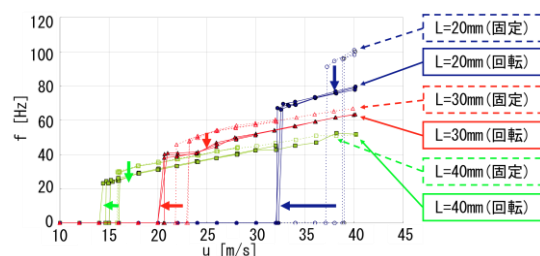


図3 振動数特性

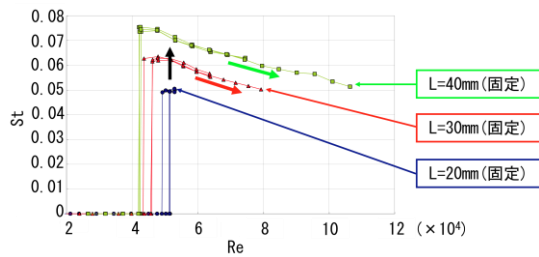
図3から、流速の増加に従って、ある流速で自励振動を生じ、その後は振動数も増加する事、そして流速と振動数の関係はほぼ直線

的である事が分かる。また、ゴムシート長さが長くなるに従って、自励振動の限界流速および振動数が減少している。また回転支持した方が、固定支持した場合よりも、自励振動限界流速および同一流速での振動数は減少する事が分かる。

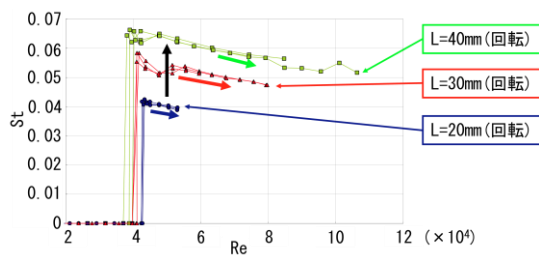
ここで、結果を無次元化する為に、代表長さをゴムシート長さ L 、代表流速を U 、振動数を f 、空気の動粘度を ν として、レイノズル数 Re とストロハル数 St を次式で定義する。

$$Re = UL / \nu, \quad St = fL / U$$

図 4 に、 Re と St の関係を示す。(a) は固定支持した支持棒についての結果であり、(b) は回転支持した支持棒のそれである。



(a) 固定支持棒



(b) 回転支持棒

図 4 Re - St 線図

図 4 から、固定支持棒、回転支持棒いずれの場合も、 Re が増加すると、ある Re で自励振動を生じ、その後は Re の増加に伴って St はほぼ直線的に減少する事が分かる。またゴムシート長さが長くなるに従って、自励振動限界 Re はわずかに減少している。ただし、図 3 の有次元量のグラフに比べると、ほぼ一定と見なしても良い。これは、自励振動限界流速に関しては、代表長さとしてシート長さを採用した事が適切である事を示している。一方 St は、ゴムシート長さが長くなるに従って、増加している。また、その増加量は有次元の場合と比較して小さくなっているものの依然として無視出来ない。このことは、振動数の代表長さはシート長さの他にも、比較的大きな影響を与える長さが存在する事を示しており、これを解明する事は今後の課題である。

図 5 にゴムシート長さを代表長さとする無

次元振幅と Re の関係を示す。図に示したものの以外の場合には、振幅が大きくなり過ぎ、レーザ変位センサによる計測が不可能であった。この点は今後の計測における技術課題と言える。

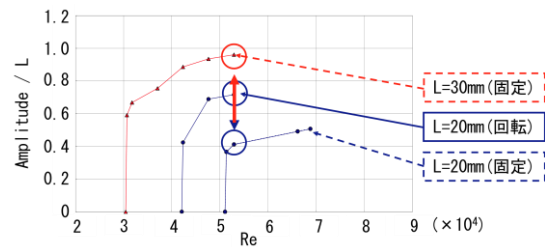


図 5 Re と無次元振幅

図 5 から、回転支持すると、固定支持の場合より、振幅が大きくなる事が定量的に定量的に読み取れる。また、ゴムシート長さが長くなると、無次元振幅が大きくなっている。この事は、シートを長くする事は、シート長さに応じた振幅の増大を生じるだけではなく、シートを長くする以上の振幅増大効果を持っている事を示している。

(2) 超音速風洞実験結果

図 6 に低速風洞において得られたマッハ数 2.1 の場合のゴムシート(厚さ 0.5mm, 幅 10mm, 長さ 13mm) の自励振動している時の瞬間撮影画像を示す。

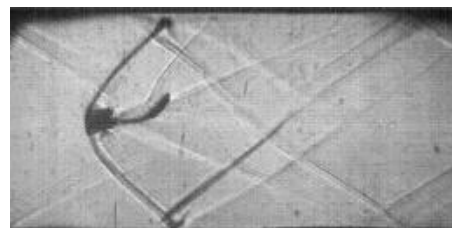


図 6 超音速流中の瞬間撮影画像

図 6 には、支持棒上流から生じる船先衝撃波、上に曲がったゴムシートの上面の後縁より少し上流から発生している斜め衝撃波、下面から発生している膨張波など、各種の圧力波が撮影されている。また振動形態は、山を持たない振動モードであり、低速風洞実験とは、異なる結果であった。

図 7 に、ゴムシート長さと振動数の関係を示す。超音速風洞実験では、流速を細かく変化させて実験する事が困難である為、有次元変数で結果を示す場合には、低速風洞実験とは異なる整理法を採用している。但し、図 8 に示す様に、変数を無次元化すれば、結局、低速風洞試験の時と同様、 Re - St の関係となる。この様に、無次元化した結果は、低速風洞実験結果との比較検討が可能になる様に

工夫している。

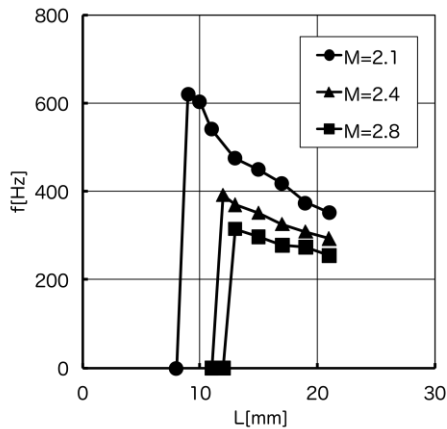


図7 超音速流中の振動の様子

図7から、ゴムシート長さの増加に従って、ある長さで自励振動を生じ、その後は振動数はほぼ直線的に減少する事が分かる。また、マッハ数の増加に従って、自励振動の限界長さは増加し、また振動数は減少している事が分かる。

図8に、 Re と St の関係を示す。 Re, St の定義は低速風洞実験結果と同様である。

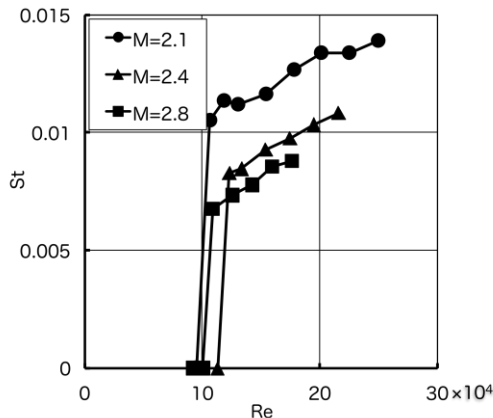


図8. Re - St 線図

図8から全てのマッハ数において、ほぼ同一の Re を境として自励振動が生じている事、および Re の増加に伴って St はほぼ直線的に増加している事が分かる。従って、超音速流れにおいても、自励振動限界を表す代表長さはシート長さであると言える。一方、 St について見ると、マッハ数が増加するに従って St は減少している。この事は自励振動の代表振動数が U/L では無い事を示している。そこで、片端固定・片端自由の梁の1時の固有振動数 $f_1 = (1.875 \times L)^2 \sqrt{EI / \rho_r A}$ を用いて無次元化を試みた。この f/f_1 を振動数比と呼ぶことにする。ここで、 ρ_r はゴムシートの密度、 $I = t^3 W / 12$ はゴムシートの断面

2次モーメント、 $A = tW$ はゴムシート断面積、 t はゴムシート厚み、 W はゴムシート幅である。また、真空中の2次、3次の固有振動数 (f_2, f_3) は、それぞれ $f_2/f_1 = 2.7, f_3/f_1 = 17.5$ で与えられる。

図9に、 Re - f/f_1 の関係を示す。図中の紫線、緑線、オレンジ線は、それぞれ f_1, f_2, f_3 を意味する。

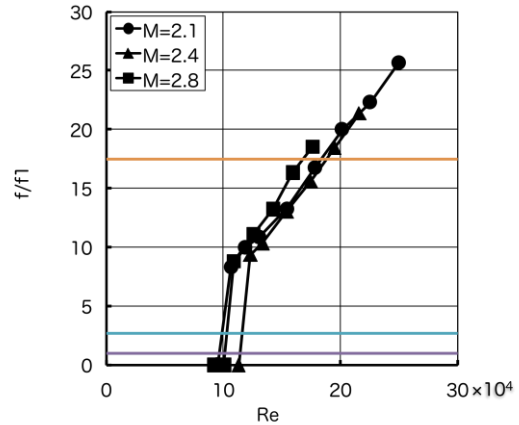


図9 Re -振動数比線図

図9を見ると、全てのマッハ数の結果がほぼ1本の線で表されていると言える。この事は、代表振動数が系の固有振動数である事を示している。但し、図9の様に縦軸の無次元化に f_1 を用いた場合には、横軸の代表時間である L/U と、縦軸の代表時間である $1/f_1$ の2つの代表時間が存在する事を意味する。これは一種の物理的矛盾と考えなければならない。この矛盾をはじめとした代表時間やその他の代表量に関する事項については、今後の課題としなければならない。

図10に、上流から水を噴射した時の流れ場の可視化画像を示す。

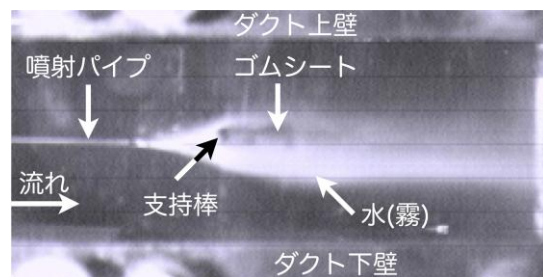
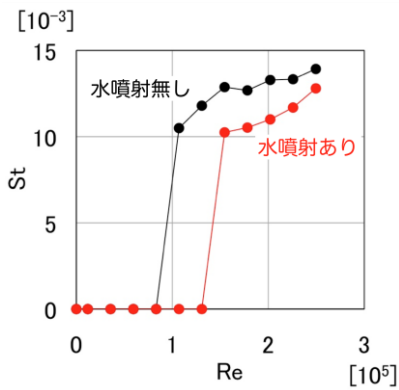


図10 水噴射の流れ場可視化画像

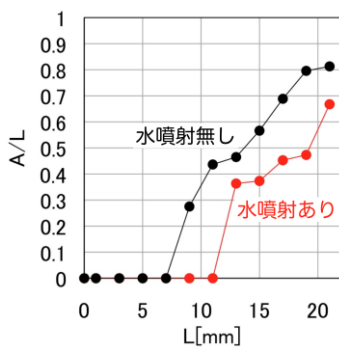
図10から、流れに平行に配置した噴射パイプから流れに平行に噴射された水が支持棒、ゴムシートによって縦方向へ広がり、下流へ流れると拡散(混合)して、白濁している領域の幅が狭くなっている様子が分かる。

図11に、水を噴射した場合の振動特性を

示す(a)は Re-St 線図であり, (b)は Re-振幅線図である.



(a) Re-St 線図



(b) Re-振幅線図

図 11 水噴射有りの振動特性

図 11 から, 水噴射によって, 自励振動限界 Re が大きくなる事, 自励振動周波数が小さくなる事, および振幅が小さくなる事が分かる. 自励振動限界 Re が大きくなる原因および振幅が小さくなる原因は水(液滴)による流体減衰の増加, 自励振動周波数が大きくなる原因は水(液滴)による付加質量の増加であると考えられる.

次に, 混合特性を定量的に調査する為に, 水の混合の度合いを定量的に表す指標を導入した. 指標の候補をいくつか考案し, 最も顕著に差が出たものを混合の指標として採用した. 本研究で最終的に採用したのは, (水の) 広がり面積である. これは, 例えば図 10 では, 水(霧)を表す白の領域の面積の事である. この面積は水の広がり度合いを定量的に表し, 広がり面積が大きい程, 混合が促進されていると考える事が出来る. 但し広がり面積は, 噴射直後からゴムシート(後縁)より少し下流まででしか混合の指標とならない事に注意する必要がある. 何故ならば, ゴムシートからかなり下流へ行くと, 水の液滴は更に細分化され, 本研究で使用したカメラでは撮影出来なくなって仕舞う. 換言すれば, 混合が促進した結果, 水が目に見えなくなり,

広がり面積はかえって小さくなってしまいう訳である.

図 12 に, ゴムシート長さとおび面積の関係を示す. 広がり面積は時間的に振動する為, 図ではエラーバーでその振動の振幅を表現してある. ゴムシート長さがゼロとは, 支持棒のみの結果である.

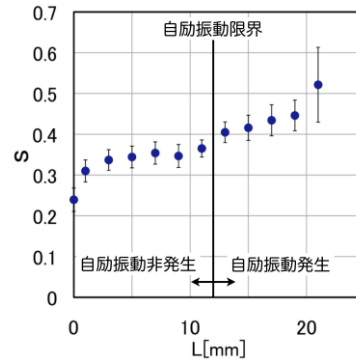


図 12 ゴムシート長さとおび面積

図 12 から, 支持棒のみに比べると, シートがある場合は, たとえ自励振動していなくても混合が促進されている事, また自励振動が発生すると更に混合が促進される事が分かる.

(3) 数値シミュレーション結果

流体と構造体を連成させた数値シミュレーションを行なった. 計算場は 2 次元と仮定した. 計算格子は H 型を使用し, ゴムシートの変形に合わせて変形させた. 格子点数の決定する為に, 異なる格子点数でシミュレーションを行ない, 実験に合う結果を得られる最小限の格子点数として, 流体方程式に 11000 点, 構造方程式に 400 点を採用した.

図 13 に実験とシミュレーションの比較を示す. 厚さ 0.5mm, 長さ 20mm の結果である. 実験はシュリーレン結果であるので, 数値シミュレーションは密度勾配の結果とした.

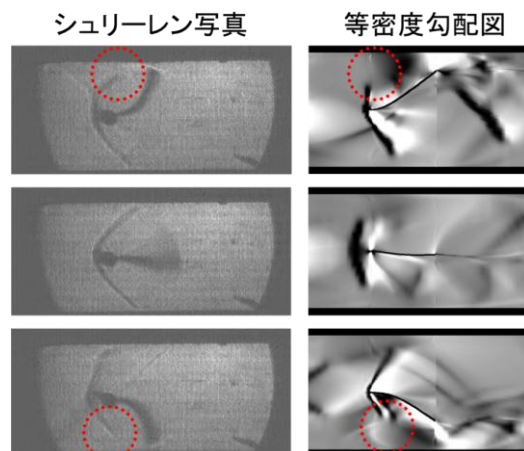


図 13 実験とシミュレーションの比較

図 13 の赤の点線の丸で囲んだのは、実験において舳先衝撃波が消えている事を示しており、実験結果と計算結果が良く対応している事を示している。またモードや振動数も、実験結果とほぼ一致しており、振動数やモード、密度場に関しては、シミュレーション結果の妥当性が確認された。

図 14 に、ゴムシート後縁が最大変位に近い時の瞬時の渦度分布を示す。

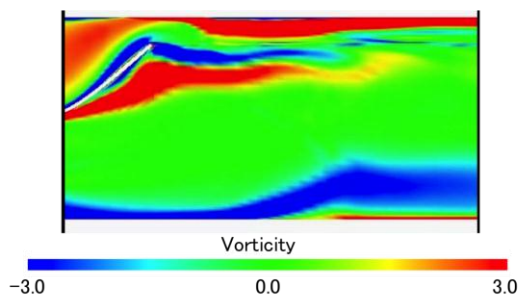


図 14 渦度分布(シミュレーション)

図 14 から、後縁負圧面に大きな渦度が現れており、剥離渦が形成されている。また後縁変位と逆の壁面下流にも大きな逆回りの渦が形成されている。定性的には納得出来る結果ではあるが、実験的に観察するには、現在の計測機器では不可能であり、このような流れ場の詳細、特に、速度場や渦度場の妥当性は未確認である。

本研究の流体-構造体連成の数値シミュレーションは、計算時間が膨大で1ケースのシミュレーションに3ヶ月程を要した。そして、必要な格子数の探索にも時間を要した為、研究期間内では1ケースでしか、実験に合わせたシミュレーションを行なうことが出来なかった。シミュレーション時間の短縮や、コードの3次元化は今後の課題である。

(4)まとめ

低速風洞実験、超音速風洞実験、数値シミュレーションによって、ダクト流中で上流支持されて自励振動する柔軟体の振動特性、混合特性の調査を行ない、それらの特性を明らかにする事が出来た。

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)

[学会発表] (計8件)

①伊島章久, 横田和彦, 佐藤光太郎, 振動弾性板ポンプの性能に関する実験的研究, 日本機械学会九州支部第 64 期講演会 (福岡), 2011. 3. 17.

②伊島章久, 横田和彦, 佐藤光太郎, 振動弾性板を利用したポンプの性能特性に関する

研究, 日本混相流学会年会講演会 2010 (浜松) 講演論文集, 2010. 7. 17-19.

③伊藤憲一, 山下昌平, 横田和彦, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之, 剛板と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究, 日本機械学会東海支部 58 期総会講演会講演論文集 (岐阜), 2009. 3. 17.

④大野順子, 松村洋, 横田和彦, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之, 噴流中に弾性板を設置した場合の発振現象に関する研究, 日本機械学会東海支部 58 期総会講演会講演論文集 (岐阜), 2009. 3. 17.

⑤熊田良宣, 石田弘樹, 横田和彦, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之, 超音速流中に配置した弾性体の振動が圧力場に及ぼす影響, 日本機械学会東海支部 58 期総会講演会講演論文集 (岐阜), 2009. 3. 17.

⑥ Kazuhiko YOKOTA, Kyohei YAMAMOTO, Kotaro SATO, Shinji TAMANO and Motoyuki ITOH, Behaviors and Effects of Movable Objects in Supersonic Flows, AIAA Paper 2008-6930, 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii, 18-21 August 2008.

⑦石田弘樹, 横田和彦, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之, 超音速流中の物体が液体噴射に与える影響, 日本混相流学会年会講演会 2008 講演論文集 (会津若松), 2008. 8. 8-10.

⑧山下昌平, 横田和彦, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之, 単純支持弾性体のフラッタ特性に関する研究, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 Vol.2 (横浜), 2008. 8. 3-7.

6. 研究組織

(1)研究代表者

横田 和彦 (YOKOTA KAZUHIKO)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号：70260635

(2)研究分担者

佐藤 光太郎 (SATO KOTARO)
工学院大学・グローバルエンジニアリング
学部・教授
研究者番号：80252625