振動弾性板流れ発生機の高質量比における最適作動状態*

山口 信 行^{*1}

Optimum Performances of Vibrating Elastic Plate Flow Generators with High Mass Ratio and High Relative Stiffness

Nobuyuki YAMAGUCHI^{*2}^{*2} Department of Mechanical Engineering, Meisei University,
2-1-1 Hodokubo, Hino-shi, Tokyo, 191-8506 Japan

A Vibrating Elastic Plate Flow Generators (VEPFG) induces a strong fluid jet by a thin plate excited at the leading edge. The fluid-dynamic performances and working conditions of a VEPFG with mass ratios sufficiently high were analyzed by use of a method based on small perturbation and potential flow concept, including forces of elasticity, inertia, and fluid-dynamics. The optimum performances were found to be obtained close to resonant conditions; the thrust coefficients are of the order of 1×10^6 , quite high compared with those for low mass ratios, which are unity at most. The efficiency levels, however, are of the order of 50 percent, relatively low compared with those for the low mass ratio region, which are above 95 percent. The feature might make the high-mass-ratio VEPFG a very compact and powerful flow generator, particularly in air.

Key Words: Fluid Dynamics, Fluid Elasticity, Forced Vibration, Vibrating Plate, Flow Generator, Thrust, Induced Flow, Efficiency, Fish Propulsion

1. 前書

振動弾性板流れ発生器 (Vibrating Elastic Plate Flow Generator, 略称 VEPFG) は図 1 に示すように、弾性薄板を前縁で加振することにより流れを発生させる装置で、古くは団扇や扇子、最近では圧電ファン、攪拌用スターラ、実験的にはボートの推進器、等に利用され始めている。魚類や水棲動物の尾びれ推進のメカニズムにも関連している。著者は流体機械としての活用を目指して研究を続けている^(1, 2, 3)。

本研究の第 1 および 2 報^(1, 2)では VEPFG の流力弾性振動的な挙動とそれによる流れ発生の様子を微小擾乱とポテンシャル流れの仮定に基づいて解析する方法を記述し、それにより広範囲のサーベイを行った。その結果から高性能を与える最適化条件を見出した。微小擾乱・ポテンシャル流れという仮定のもとではあるが、ある程度一般性のある現象傾向が見出され、計画に有効な指針が得られた、と考えている。

さらに流体機械の性能、特に加圧やポンピング、等の観点から考える際には、誘起流量や流れに与えられるエネルギー等の情報が不可欠である。第 3 報⁽³⁾では流

体機械としての VEPFG の性能の考え方と表示法をまとめ、無次元性能表示法を導き、推進器性能パラメタとの関連づけを行った。また流れの状況を微小擾乱・ポテンシャル流れの想定で解析し、流れ場を調査した。

第 1, 2 報^(1, 2)から、低質量比・剛性比 (低 μ 低 β 領域) と高質量比・剛性比 (高 μ 高 β 領域) では効率レベルが全く異なり、振動モードも異なることが分かった。低質量比・剛性比での最適化は第 1 及び 2 報^(1, 2)で行われた。しかし高質量比・剛性比での挙動についての情報が不十分である。この状況は扇子や団扇など空気中で流れ発生を考える場合のように流体密度が低い状況で起こり易い。そこで本研究では高質量比での挙動と最適作動状態について解析的にさらに調査し、低質量比・剛性比での状態と本質的に異なる作動状態であることを明らかにした。

2. 記号

C_{EFG}	FG エネルギー係数
C_T	推力係数 (面推力)
C_{Te}	振幅規準化推力係数
C_{TFG}	FG 推力係数 (前縁振動速度基準)
E	流体付加エネルギー流束 (Pa·m/s)
f	振動数 (Hz)
f_0	振動板固有振動数 (Hz)

* 原稿受付 2002 年 10 月 10 日。

^{*1} 正員, 明星大学理工学部 (☎ 191-8506 日野市程久保 2-1-1)。

E-mail: yamaguchn@me.meisei-u.ac.jp

f_R	無次元振動数
N	板セグメント数
L_s	振動板長さ (m)
Q_{jet}	誘起流量(m^3/s)
Q_{ejet^*}	前縁振幅規準化誘起流量
q_{FG}	FG 流量係数 (前縁振幅・振動速度規準化誘起流量)
r_{LE}	前縁角度振幅比
T	推力 (面推力) (N)
T_0	振動周期(s)
t	時刻(s)
t_s	振動板厚み (m)
U_a	主流速度(m/s)
u	誘起速度(m/s)
V_{LE}	前縁振動速度(m/s)
W	動力 (W)
x	主流方向座標(m)
y	主流に垂直方向の座標(m)
y_{LE}	前縁 y 座標(m)
y_s	板面 y 座標(m)
β	剛性比
Δp	板表裏圧力差(Pa)
ε	前縁相対振幅
μ	質量比
η_{FG}	流れ発生器エネルギー効率
η_p	推進器推進効率
ρ_a	流れ密度(kg/m^3)
ρ_s	振動板密度(kg/m^3)
ϕ_{LE}	前縁角度振動の位相差(rad)
θ_{LE}	前縁角度振幅(rad)
ω	円周波数(rad/s)
添え字	
e	前縁振幅基準
FG	流れ発生機
LE	振動板前縁
T	推力

3. 解析法概要

VEPFG を, 図 1 に示すように一様流中に置かれた前縁加振, 後縁自由の薄い 2 次元弾性梁としてモデル化する. この振動弾性板は前縁を保持されて振動数 f で加振されるものとする. ここで前縁の垂直変位 y_{LE} の振幅を $|y_{LE}|$, 回転振動 θ_{LE} の振幅を $|\theta_{LE}|$ と表記する. いずれも複素量の絶対値である. その前縁加振に対する応答振動による特性を考える.

この振動弾性板の挙動についての解析の考え方は柔軟薄板 (シートやウェブ) のフラッタ計算に用いられている方法 (山口, 他⁽⁴⁾ および Yamaguchi, N. et al.⁽⁵⁾) を利用する. 概要は次のようになる.

薄くて柔軟で多少の曲げ剛性を持つ材質の二次元的薄板の流れ弾性振動に関してここで利用する解析的手法は次の前提に基づいている. (1)運動を微小として, その 2 次以上の項は無視する. (2)板の長さは L_s , 厚み t_s で一様, 幅方向に二次元的状況とする. (3)主流は一様で, 速度は x 方向に U_a とする. これに垂直な方向を y 方向とする. 流れの状況も二次元的とする. (4)板は x 方向を向き, y 方向に微小振幅で振動し, その変位を y_s とする. (5)板密度を ρ_s , 空気密度を ρ_a とする.

この状況を次のように取り扱う. (a)板の変位, 質量, 剛性等や流体力は連続な分布系であるが, これらを N 個のセグメントに区間分割して, 各節点での量により折れ線近似する. (b)流れはポテンシャル的とし, その流れ場は微小振動する板の上に存在する非定常渦と後縁からの非定常流出渦の分布によって表現する. (c)板の運動は微小振動する柔軟な梁の運動として取り扱う. 板は剛性を持つが, 流れの上でその厚みは無視する. (d)渦も板も x 軸上に存在するものとする. (e)板に作用する力は, 板の弾性力, 渦により誘起される板上下面の圧力差, そして板要素の運動による慣性力とする. (f)流れと板運動の整合性は, 各要素の midpoint において板傾斜と相対流れ方向が x 軸上で一致することで満足させる. (g)各変数は座標 x と時刻 t の関数であるが, x のみおよび t のみの関数の積として変数分離して表現できるものとする.

このようにして各節点における渦度, 圧力差, 薄板座標, 板面傾斜, 曲げモーメント, 剪断力, の 6 種類の変数を未知数として, 次の 6 種類の式が各セグメント要素に対して導かれる. さらにこれらの変数は時間

Fig. 1 Mechanism of a Vibrating Elastic Plate Flow-Generator (VEPFG)

の関数 $\exp(j\nu t)$ と変数分離される. j は虚数単位, ν は無次元円振動数を表す. (1) 板面上誘起速度を介して分布渦と薄板の運動状況を関係づける関係式, (2) 板面上の圧力差と渦の関係式, (3) 板の運動と板の剪断力の関係式, (4) 板の運動と梁の曲げモーメントの関係式, (5) 板の運動と面傾斜の関係式, そして (6) 板の運動と面変位の関係式.

境界条件は次のようになる. (7) 後縁での Kutta-Joukowski の定理成立, および (8) 前縁での渦強さと圧力の関係. 前後縁支持条件として (9) 板前縁で加振 (y 方向変位振動, かつ面傾斜を位相差 ϕ_{LE} を持たせて変化), そして (10) 後縁で自由 (剪断力および曲げモーメントゼロ).

結局, 方程式は $6 \times N$ 式, 境界条件 6 個, 未知数 $6 \times (N+1)$ 個の同次線形連立方程式になり, 解くことができる. この系の係数には次の形をもつ無次元円周波数 ν が加振周波数として含まれている.

$$\nu = 2\pi f_R \quad (1)$$

ここで

$$f_R = f L_s / U_a \quad (2)$$

解はこの加振周波数に対する応答として決定される.

振動板面推力 T および動力 W を, Δp を板表裏圧力差として, 次式により 1 周期 T_0 の平均で算出する.

$$\text{面推力} \quad T = \frac{1}{T_0} \oint_0^{L_s} \int_0^{T_0} \Delta p \frac{\partial y_s}{\partial x} dx dt \quad (3)$$

$$\text{振動板仕事} \quad W = \frac{1}{T_0} \oint_0^{L_s} \int_0^{T_0} -\Delta p \frac{\partial y_s}{\partial t} dx dt \quad (4)$$

$$\text{推進効率} \quad \eta_P = \frac{T U_a}{W} \quad (5)$$

一方, 流れ発生機の性能については, 発生機後縁断面での x 方向の時間平均誘起速度分布を u として, 微小量の仮定に基づく本研究報告第 3 報⁽³⁾の検討結果から次の量に注目する.

$$\text{誘起流量} \quad Q_{jet} = \int_{-\infty}^{\infty} u dy = T / \rho_a U_a \quad (6)$$

$$\text{付加エネルギー} \quad E = \rho_a U_a^2 Q_{jet} \quad (7)$$

$$\text{流れ発生機エネルギー効率} \quad \eta_{FG} = E / W \quad (8)$$

推力にはさらに前縁吸込みによる付加推力があり, これも加えた全推力を考える必要がある場合もある. しかし薄板では前縁推力は期待しがたいことから, ここでは面推力のみに注目した.

4. 性能表示パラメタ

以上の性能諸量を無次元表示するために前縁相対振幅 ε による基準化を行う.

$$\text{前縁相対振幅} \quad \varepsilon = |y_{LE}| / L_s \quad (9)$$

さらに流体機械の性能表示の基準量として次の 2 量を考える⁽³⁾.

$$\text{前縁振動片振幅} \quad |y_{LE}| = \varepsilon L_s \quad (10)$$

$$\text{前縁振動速度} \quad V_{LE} = \omega |y_{LE}| = \varepsilon \omega L_s \quad (11)$$

これらに基づく性能表示パラメタとして次を得る.

(1) 推力係数

$$\text{一般推力係数} \quad C_T = T / (\rho_a U_a^2 L_s / 2) \quad (12)$$

$$\text{前縁振幅規準化推力係数} \quad C_{Te} = C_T / \varepsilon^2 \quad (13)$$

FG 推力係数として前縁振動速度 V_{LE} で推力 T を規準化する.

$$C_{TFG} = \frac{T}{\rho_a V_{LE}^2 L_s / 2} = \frac{C_{Te}}{(2\pi f_R)^2} \quad (14)$$

(2) 流量係数

$$Q_{ejet}^* = \frac{Q_{jet}}{\varepsilon^2 L_s U_a} \quad (15)$$

微小擾乱の仮定内では次の式が成り立つ.

$$Q_{ejet}^* = C_{Te} / 2 \quad (16)$$

FG 流量係数として前縁振動速度と振幅で規準化する.

$$q_{FG} = \frac{Q_{jet}}{V_{LE} |y_{LE}|} = \frac{C_{Te}}{2(2\pi f_R)} \quad (17)$$

(3) エネルギー係数

前縁振動速度 V_{LE} でエネルギー増加 E を規準化する.

$$C_{EFG} = \frac{E}{\rho_a V_{LE}^2 L_s U_a / 2} \quad (18)$$

微小擾乱の仮定内では次の式が成り立つ.

$$C_{EFG} = C_{TFG} \quad (19)$$

(4) 流れ発生機効率

微小擾乱の仮定内ではつぎのようになる.

$$\eta_{FG} = \eta_P \quad (20)$$

これらを次の無次元パラメタの組合せで記述する.

$$\text{質量比} \quad \mu = \frac{\rho_s t_s}{\rho_a L_s} \quad (21)$$

$$\text{剛性比} \quad \beta = \frac{E_s I_s}{(\rho_a U_a^2 / 2) L_s^3} \quad (22)$$

$$\text{無次元振動数} \quad f_R = f L_s / U_a \quad (2a)$$

$$\text{相対振動数} \quad f / f_0 \quad (23)$$

$$\text{前縁角度振幅比} \quad r_{LE} = \frac{|\theta_{LE}| L_s}{|y_{LE}|} \quad (24)$$

$$\text{前縁角度変化位相} \quad \phi_{LE} = \text{Arg}[\theta_{LE} / y_{LE}] \quad (25)$$

ここで f_0 は真空中での片持ち梁振動板の 1 次固有振動数である.

これらの規準化係数を用いることにより, 流量やエネルギーなどの全体性能を幾つかのパラメタで整理して表示できる.

5. 高質量比における挙動の特徴

高 μ では効率も低く、最適点での振動数は f/f_0 が1に近く、共振状態に関連していた^(1, 2)。そこで $\mu > 1$ の場合に関してさらに詳しく調査した。以後本報告の図中のプロット点はすべて解析結果である。

5.1 前縁加振条件の影響 $\mu = 12.53$ で $\beta = 2545$ の状態のVEPFGにおいて前縁角度振幅比 r_{LE} と前縁角度振動位相 ϕ_{LE} を変化させて加振振動数に対するピーク効率 η_{FG} を調べた結果を図2に示す。この結果から ϕ_{LE} の影響は比較的小さいが、ほぼ $(0 - 0.5)\pi$ においてピークを持つ。

ϕ_{LE} が 0.5π と0の場合の推力係数に対する前縁振幅比 r_{LE} の影響の様子を図3に示す。 r_{LE} 増大とともに推力係数は増大している。後縁振幅が増えるためと考えられる。

5.2 推力、効率に関するサーベイ 以上の結果から、代表的な例として以後 $r_{LE}=6$ 、 $\phi_{LE}=0$ 、すなわち位相差無しの場合で計算を進めることにした。後者によりほぼ最適状態かつ最も単純なやり方での前縁加振を行える利点がある。計算条件を表1に示す。この計算では板の密度 ρ_s を変化させ、 μ と β を独立に変化させた。その結果を以下に述べる。

TABLE 1 Conditions for the analysis

VEPFG	Young's modulus E_s	2.1×10^{11} (Pa)
	Density ρ_s	variable (kg/m^3)
	Length L_s	0.165 (m)
	Thickness t_s	0.0003 (m)
L. E.	Feathering ratio r_{LE}	6
	Feathering phase ϕ_{LE}	0
Flow	Density ρ_a	1.2 (kg/m^3)
	Velocity U_a	variable (m/s)
Segment	Number N	100

図4に推力係数 C_{Te} の β と μ による変化を示す。同一の条件に対して加振振動数を変化させて効率がピークとなる点を求め、プロットしたものである。同一 μ では剛性比 β の増加とともに、すなわち主流流速の低下とともに推力係数 C_{Te} は増大している。質量比 μ の増加とともにこのカーブは大 β 側に移っている。ここに示す C_{Te} の最大値以上では計算結果のばらつきや解析不安定の傾向が見られたので示していない。この現象の原因については後に述べる。

Fig. 2 Effects of feathering phase at the leading edge on the peak-point efficiencies for μ of 12.53 and β of 2545

Fig. 3 Effects of feathering amplitude at the leading edge on the thrust coefficient at peak-efficiency points at a fixed feathering phase ϕ_{LE} of 0 and 0.5π for μ of 12.53 and β of 2545

Fig. 4 Effects of mass ratios and relative stiffness on the peak-efficiency-point thrust coefficients with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

ここで計算された最大推力係数値は 1×10^6 弱程度だった。

主流流速がゼロに近い状態での作動は非常に高い β に相当するので、このような適用には、高 μ のVEPFGが適しているようである。

これに対する効率の挙動を図5に示す。効率は低 β

Fig. 5 Effects of mass ratios and relative stiffness on the peak efficiencies with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

で低く、 β が増加すると向上してフラットになり、最高値 50% 程度である。

6. 加振振動数の影響

6.1 相対振動数 これらのピーク作動点の振動数を真空中での片持ち梁の固有振動数 f_0 との比で表した相対振動数 f/f_0 としてみると、図 6 のようになる。 f/f_0 はほぼ 1.4 前後にあり、共振よりやや高い振動数が良いことが分かる。

6.2 計算精度への影響 一方、無次元振動数 f_R に注目すると図 7 のようになる。 f_R は β の増加とともに急増し、10 以上までに達している。

本解析の過程で、上のように f_R が大きくなる場合効率が計算上増加し、結果がばらつく現象が見られた。またこの場合仕事分布に凹凸が見られた。これは渦の分布に関係していると考えられる。すなわち無次元振動数は

$$f_R = f / (U_a / L_s) \quad (26)$$

と表されるから、主流が板を通過する時間内に発生する振動数を意味する。従って f_R が高いと、板に沿って分布する束縛渦の符号変化（正負）の間隔（波長）が短くなり、また放出されて主流に乗った渦も速やかには運ばれず、符号変化の激しい渦列が板の周囲に連なる。これが本解析コードによる計算上の効率の増加傾向とばらつきや不安定を招くと考えられる。

同一の作動条件に対してセグメント数を変えて計算した結果を図 8 に示す。ここで $\Delta \eta_P$ と ΔC_{Te} は推進効率と推力係数の $N=100$ の値からの相対的ずれである。これより、1 波長分を表現するセグメント数に相当する N/f_R が 10 程度以上であれば結果は 1% 以下の結果をもたらすことが予想された。そこで本報告で

は計算環境の許す最大の $N=100$ のセグメント数を用い、 $f_R < 10$ のデータを採用した。図 6 と 7 には表示されている大 β 値に対するデータがそれ以外の図に示されていないのはこの理由による。さらに大きいセグメント数を用いればさらに広い範囲を精度良く予想できるはずである。

Fig. 6 Working conditions of relative frequencies at the peak-efficiency points with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

Fig. 7 Working conditions of reduced frequencies at the peak-efficiency points with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

Fig. 8 Effect of relative segment number on the analytical accuracy for μ of 12.53, β of 2545 with f_R of 8.215

Fig. 9 Effects of feathering phase ϕ_{LE} at the leading edge on the oscillation modes for μ of 12.53 and β of 2545

7. 高 μ における振動モード

7.1 前縁位相差のモードに対する影響 このような場合の振動モードを示す。図9に $\mu=12.53$, $r_{LE}=6$, $\phi_{LE}=(0-2)\pi$ の場合の $\beta=2545$ のモードを示す。上からそれぞれ板振動形態、仕事密度分布、そして推力密度分布を示している。いずれも1周期間における最大値を基準にして分布を規準化してある。 ϕ_{LE} による振動モードへの影響は比較的小さいようである。

7.2 β による振動モード 一方、低 β の場合、すなわち主流流速が相対的に速い場合には、低い $\mu=12.53$ の場合に関する図10の左図に見られるように推力分布の前部に正負が交互に現れて打ち消しあい、推力係数が低く、効率が悪いことが示唆される。

7.3 振動形態 これらの振動形態を見ると、前縁が板全体の弾性変形をリードしている様子が見られる。ちょうどこれは扇や団扇を我々が使う時の状況である。すなわち、下向きのストロークで考えると、扇を持った手を少し押し下げつつ手首のスナップと板の弾性を利かせて大きく下向きに回転させる状況である。この観察からこれらのモードを「煽ぎモード

Fig. 10 Effects of relative stiffness β on the oscillation modes for μ of 12.53 with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

(fanning mode)」と命名したい。

8. VEPFG としての性能

8.1 作動点 質量比 μ と剛性比 β に対する等効率曲線を図5のデータから読み取って図11に示す。同一 μ に対する好適な作動範囲を例えば効率40%から50%の β の幅(比)と考えると、 μ によらずほぼ同一の幅(比)になっている。

同様にしてFG流量係数 q_{FG} とFG推力係数 C_{TFG} の等高線を図12と13に示す。この微小擾乱解析ではFGエネルギー係数 C_{EFG} はFG推力係数 C_{TFG} と同じ値になる。

これらの図から質量比 μ に対して作動上適切と考えられる β はほぼ次の関係にあることが分かる。

$$\beta \propto \mu \quad (27)$$

これから次の関係が導かれる。

$$U_a \propto \frac{t_s}{L_s} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad (28)$$

右辺は板の曲げ振動の伝播速度に比例する量である。この式には流体密度が現れておらず、質量比が十分大きくなると、適切な作動流速は板のパラメタだけに依存するようになることが分かる。

8.2 VEPFG 特性曲線 無次元振動数 f_R に対するFG流量係数 q_{FG} の様子を図14に示す。さらに q_{FG} に対するFG効率とFG流量係数の特性曲線を図15と図16に示す。これらによると、質量比 μ が1に近い場合には多少ずれるが、 μ が10以上の場合には f_R により q_{FG} がほぼ定まり、さらに振動板の特性は q_{FG} によりほぼ一意に決まっているようである。この両図が通常の流体機械の性能曲線に相当し、流量係数に対する推力

係数と効率が読み取られる。本解析の範囲内では推力係数はエネルギー係数と同じ値であるから、所要動力係数が計算されることになる。

Fig. 11 Behavior of iso-FG efficiency curves for mass ratios and relative stiffnesses with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

Fig. 12 Behavior of iso-FG flow coefficient for mass ratios and relative stiffnesses with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

Fig. 13 Behavior of iso-FG thrust coefficients and energy coefficients for mass ratios and relative stiffnesses with r_{LE} of 6 and ϕ_{LE} of 0

Fig. 14 Characteristics of FG flow coefficient for the peak-efficiency-point reduced frequencies

Fig. 15 Characteristics of FG efficiency for the peak-efficiency-point FG flow coefficient

Fig. 16 Characteristics of FG energy coefficient and thrust coefficient for the peak-efficiency-point FG flow coefficient

9. 性能最適点まとめ

作動点は以上の検討結果から高 μ における大略の性能最適点を低 μ の場合に対比してまとめてみると表 2 のようになる。

高 μ では r_{LE} はかなり大きく、かつ $\phi_{LE} = (0-0.5)\pi$ の状態が良い。現実的には $\phi_{LE} = 0$ すなわち前縁角

度変化位相差無しが便利であろう。相対振動数 f/fo が 1.4 程度が適切である。この状態で推力係数 C_{Te} は最大で 1×10^6 程度と高いが、最高効率レベルは 50% 程度と比較的低い。前後縁の振幅比 $R_{y_{TE/LE}}$ はかなり大きい。

このときの振動モードを「煽ぎモード (fanning mode)」と名づけることを提案した。

比較のため、前報^(1, 2)の結果を参照して低 μ における挙動の特徴をまとめておく。低 μ ($\mu < 0.1$) における最適点の特徴は次のようになり、低 μ と高 μ とで全く異なる傾向が見られる。

- (1) 加振前縁条件としては角度振幅比 r_{LE} がほぼ 1, その位相差 ϕ_{LE} がほぼ 1.5π に最適値がある。
- (2) 最適加振振動数としては無次元振動数 f_R がほぼ 0.15-0.2 前後である。板の共振点との関係を示す相対振動数 f/fo には関係していない。
- (3) 推力係数 C_{Te} は最大で 1 前後、最高効率は 95 パーセント以上に達し得る。
- (4) このときのモードは、後縁振幅が前縁振幅と同程度であり、板の弾性変形は顕著ではない。これは前縁が効果を発揮するモードであり、前後縁の振幅比 $R_{y_{TE/LE}}$ はほぼ 1 である。これを「掬い込みモード (scooping mode)」と名づけたい。

10. 結語

高 μ 領域での VEPFG 作動状態を微小擾乱かつポテンシャル流れによる解析で調査した。これによりこれまで明らかではなかった高質量比における VEPFG の作動状況の特徴とモードについて明らかにできた。

その結果、高 μ 領域での作動状態は前報の低 μ 状態での最適状態とかなり異なっていることが分かった。そのモードの特徴から前者を「煽ぎモード」、後者を「掬い込みモード」と名づけることを提案した。

「煽ぎモード」は共振に近い作動状態であり、計算上の効率レベルは最高 50% 程度であるが、推力係数 C_{Te} は 1×10^6 程度の大きさに達しうる。これに対し、「掬い込みモード」は主として板の変位を利用するもので、効率は 95% 以上に達し得るが、推力係数 C_{Te} は 1 程度までである。これより「煽ぎモード」が小型で強力な流れ発生機として可能性が高いことが分かった。

また流れ発生機としての適切な作動状態に関するデータと特性曲線をまとめた。

解析に用いた手法や仮定の上の制約からこれらの結果は傾向的なものと考えざるをえない部分も多いが、現段階では現象の理解と概略計画の資料としてそれなりに価値があると考えられる。さらに今後実験的

Table 2 An order-of-magnitude comparison of optimum conditions for a low- μ region and a high- μ region

Mass Ratio	Low μ	High μ
Mass ratio μ	< 0.1	$> \sim 10$
Relative stiffness β	~ 0.03	$> \sim 100$
LE Conditions		
Feathering amp. r_{LE}	1	(6)
Feathering phase ϕ_{LE}	1.5π	$(0-0.5)\pi$
Reduced frequency f_R	~ 0.15	
Rel. frequency f/fo		~ 1.4
Optimum Conditions		
Highest efficiency η_p	~ 0.98	~ 0.5
Thrust coefficient C_{Te}	~ 1	~ 1000000
FG Performance		
Efficiency η_{FG}	~ 0.98	~ 0.5
Flow coefficient q_{FG}	~ 0.5	~ 10000
Thrust coef. $C_{T_{FG}}$	~ 1	~ 400

な確認を行い、確実な資料として利用できるものにしてゆく必要がある。

11. 引用文献

- (1) 山口信行, 振動弾性板流れ発生機の流力弾性的挙動に関する解析的研究, (第 1 報, 流力弾性挙動と流れ特性の評価), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 67, No. 661, (2001. 9), pp. 2197-2204
- (2) 山口信行, 振動弾性板流れ発生機の流力弾性的挙動に関する解析的研究, (第 2 報, 流体特性の最適化), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 67, No. 661, (2001. 9), pp. 2205-2211
- (3) 山口信行, 振動弾性板流れ発生機の流力弾性的挙動に関する解析的研究, (第 3 報, 流体機械としての性能と誘起される流れ場), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 68, No. 672, (2002. 8), pp. 2201-2208
- (4) 山口信行, 横田和彦, 辻本良信, 柔軟で薄いシートの高速気流中における挙動に関する研究 (第 1 報) 微小擾乱的挙動の理論的評価法, 日本機械学会論文集 (B), Vol. 65, No. 632, (1999-4), pp. 1224-1231
- (5) Yamaguchi, N., Yokota, K., Tsujimoto, Y., Flutter Limits and Behaviors of a Flexible Thin Sheet in High Speed Flow - I: Analytical Method for Prediction of the Sheet Behavior, Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol. 122, pp. 65-73, (2000-3)