振動弾性板流れ発生機の流力弾性的特性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)山口 信 行^{*1}Analytical Study on the Fluid-Elastic Characteristics
of the Vibrating Elastic Plate Flow Generators
(3rd Report, Fluid-Dynamic Performances and Induced Flow Field)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 Generator (VEPFG) is an application of a vibrating plate to a flow generator. It became recently to be utilized for flow generation, in addition to propulsion purposes such as boat thrusters. The fluid-dynamic characteristics of the VEPFG as a fluid-machine, however, have not been fully elucidated. This paper aimed to make clear the pumping action, i.e. flow energy input, flow rate and induced flow field, in addition to the thrust. The performance parameters were made dimensionless by normalizing on the basis of the driving conditions at the leading-edge. The parameters thus defined were proposed in place of those of the thrusters. They could be useful for planning the VEPFG. The induced flow fields were analyzed on the assumptions of small-perturbation and potential flow. The results will serve as a referential base for comparing with actual VEPFG flows and experimental results.

Key Words: Fluid Dynamics, Fluid Elasticity, Forced Vibration, Flow Generator, Induced Flow, Thrust, Dynamic Energy, Efficiency

1. 前書

振動弾性板流れ発生器 (Vibrating Elastic Plate Fluid Generator、略称 VEPFG) は図1に示すように、弾性薄板前縁を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、等にご利用され始めている。また魚類や水棲動物のひれ推進のメカニズムでもある。著者はその流体機械としての活用・改良を目指して研究を続けている。

既に報告した本研究の第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、それに基づいて広範囲の条件に対してサーベイを行った。その結果から高性能を与える状況を調査し、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、ある程度の一般性のある現象傾向が見出され、流れ発生機および推進器とし

ての計画に役立つ指針が見出された。

その際に流れ発生機の状況を、推力や推進効率など推進器としての性能表示法を用いて記述した。しかし流体機械の性能を、特に加圧やポンピングなどの観点から考える際には、誘起される流量や流れに付与されるエネルギーなどの情報が不可欠である。本報告ではその観点からの考え方と表示法を導き、無次元性能表示法と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

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

* 原稿受付 2002年1月23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

想定で解析し、流れ場を調査した。

実際の状況では板面上の境界層とそれに起因する後流ウェーク、ジェット噴流など粘性や混合の影響が大きく現れることが予想される。本解析にはそれらの影響は含まれていないが、それらを考える際のベースとして利用できるものとする。

2. 記号

C_E	エネルギー係数
C_T	推力係数 (面推力)
C_{Te}	前縁振幅規準化推力係数
$C_{T PL}$	前縁振動速度規準化推力係数
E	流体付加エネルギー流束(Pa-m/s)
E_s	振動板ヤング率(Pa)
f	加振振動数(Hz)
f_0	振動板固有振動数(Hz)
f_R	無次元振動数
G_0, G_1, G_2	計算式略記号
I_s	振動板断面二次モーメント(m ⁴)
j	虚数単位
L_s	振動板長さ(m)
Q	誘起流量(m ³ /s)
Q^*	規準化誘起流量
Qe^*	前縁振幅規準化誘起流量
Qe_{jet}^*	前縁振幅規準化誘起全流量
q_{PL}	前縁振幅・振動速度規準化誘起流量
R_{LE}	前縁角度振幅比
R_{QT}	流量/推力比
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	誘起速度 (x 方向) (m/s)
u_t	変動誘起速度 (x 方向) (m/s)
ue^*	前縁振幅規準化誘起速度
$u_{p av}$	誘起速度時間平均値(m/s)
V_1, V_2	計算式略称
V_{LE}	前縁振動速度(m/s)
W	動力 (W)
x_P	速度計算点 x 座標(m)
x_P^*	速度計算点の規準化 x 座標
x_V	渦点 x 座標(m)
x_V^*	渦点規準化 x 座標
y_P	速度計算点 y 座標(m)
y_P^*	速度計算点の規準化 y 座標
$y_{P\infty}^*$	流線上規準化 y 座標

y_V	渦点 y 座標(m)
y_V^*	渦点規準化 y 座標
y_{LE}	前縁 y 座標(m)
β	動圧/剛性比
γ	渦強度密度(m/s)
γ^*	規準化渦強度密度
ΔQ	流管流量(m ³ /s)
ΔQ^*	規準化流管流量
Δy^*	規準化流線座標ずれ
Δye^*	前縁振幅規準化流線座標ずれ
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

a	流体に関する量
e	前縁振幅規準化された量
FG	流れ発生機
LE	振動板前縁
P	解析における注目点座標
s	振動板に関連する量
T	推力
V	渦点座標

3. 流れ発生機と推進器の性能の関係

前報^(1, 2)では流れ発生機の性能を、推進器性能を規準化した次の量で表示した。

$$\text{推力係数} \quad C_T = T / (\rho_a U_a^2 L_s / 2) \quad (1)$$

$$\text{推進効率} \quad \eta_P = TU_a / W \quad (2)$$

ここで T は発生推力(N)で、前縁推力を含まない板面のみの推力 (面推力) を考えている⁽¹⁾。 U_a は主流速度(m/s)、 L_s は振動板長さ(m)、 W は動力(w)、 ρ_a は流体密度(kg/m³)である。これらは当然、流速や振動板の剛性だけでなく、加振条件にも影響される。そこで次に前縁相対振幅 ε による規準化を行って係数化した。

$$\text{前縁相対振幅} \quad \varepsilon = |y_{LE}| / L_s \quad (3)$$

$$\text{前縁振幅規準化推力係数} \quad C_{Te} = C_T / \varepsilon^2 \quad (4)$$

ここで y_{LE} は振動板前縁 y 座標(m)で、 $|y_{LE}|$ はその片振幅を表す。これらを次の作動条件を示す無次元パラメタの組み合わせで記述した。

$$\mu = \rho_s t_s / \rho_a L_s \quad (5)$$

$$\beta = Es I_s / ((\rho_a U_a^2 / 2) L_s^3) \quad (6)$$

$$R_{LE} = |\theta_{LE}| L_s / |y_{LE}| \quad (7)$$

$$f_R = f_{L_s} / U_a \quad (8)$$

$$f/fo \quad (9)$$

ここで t_s は振動板厚さ(m)、 ρ_s は振動板密度(kg/m³)、 Es は振動板ヤング率(Pa)、 I_s は振動板断面 2 次モーメント(m⁴)、 f は振動板加振振動数(Hz)、 θ_{LE} は前縁回転振動の角度片振幅(rad)、 ϕ_{LE} はその位相(rad)、 fo は振動板の真空中での 1 次固有振動数(Hz)である。これらにより推進器としての性能と挙動が記述され、最適化された^(1, 2)。

一方、流れ発生器としては、誘起流量 Q_{jet} (m³/s)、付加エネルギー E (W)、流れ発生器としてのエネルギー効率 $\eta_{FG} = E/W$ を知りたい。以下にこれらの性能について検討し、適切なパラメタ表示を試みる。

4. 流れ場の計算方法

束縛渦とその流出渦の分布で振動板が表された場合⁽¹⁾についてその時間平均的な流れ場を、微小擾乱、ポテンシャル流れの仮定の下で解析する。

4.1 誘起速度 図2に示される P 点(x_P, y_P)における流れ方向 (x 方向) の誘起速度 $u(x_P, y_P)$ を評価する。 x_V 点にある VEP 渦あるいはその流出渦をあらわす渦の強さ $\gamma(x_V, t)$ とその y 座標 $y_V(x_V, t)$ とから、幅 dx_V 上に存在する渦 $\gamma(x_V, t) dx_V$ により誘起される速度増分 $du(x_P, y_P; t)$ は次式で与えられる。

$$du(x_P, y_P; t) = -(1/2\pi) (\gamma(x_V, t) dx_V / r) \sin \alpha \quad (10)$$

ここで P 点と V 点の間の距離 r と角度 α は次式で与えられる (図2)。

$$r = \sqrt{((x_P - x_V)^2 + (y_P - y_V)^2)} \quad (11)$$

$$\sin \alpha = (y_P - y_V) / r \quad (12)$$

これらを(10)式に用いて誘起速度は次の積分値で与えられる。

Fig.2 Velocity at point P induced by a vortex at point V

$$u(x_P, y_P; t) = -\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^1 \gamma(x_V, t) \times \frac{(y_P - y_V) / ((x_P - x_V)^2 + (y_P - y_V)^2)}{dx_V} \quad (13)$$

渦の強さ $\gamma(x_V, t)$ とその y 座標 $y_V(\equiv y(x_V, t))$ は微小項であるから高次を無視すると式(13)は次のようになる。

$$u(x_P, y_P; t) = -\int_{-\infty}^{\infty} \gamma(x_V, t) \left[\frac{y_P}{((x_P - x_V)^2 + (y_P)^2)} + \frac{((y_P)^2 - (x_P - x_V)^2) / ((x_P - x_V)^2 + (y_P)^2)^2}{y_V} \right] dx_V \quad (14)$$

変数分離し、かつ規準化して次のように表示する。

$$x_V^* = x_V / L_s \quad (15)$$

$$x_P^* = x_P / L_s \quad (16)$$

振動板上では

$$\gamma(x_V, t) = U_a \gamma^*(x_V^*) \exp(j\omega t) \quad 0 \leq x_V^* \leq 1 \quad (17)$$

$$y_V = L_s y_V^*(x_V^*) \exp(j\omega t) \quad 0 \leq x_V^* \leq 1 \quad (18)$$

振動板下流では、後縁($x_V^* = 1$)から流出する渦とその y_V 座標がそのまま主流に乗って流されるとして、次式で表される。

$$\gamma(x_V, t) = U_a \gamma^*(x_V^* = 1) \exp(-j2\pi f_R(x_V^* - 1)) \exp(j\omega t) \quad 1 < x_V^* \quad (19)$$

$$y_V = L_s y_V^*(x_V^* = 1) \exp(-j2\pi f_R(x_V^* - 1)) \exp(j\omega t) \quad 1 < x_V^* \quad (20)$$

ここで j は虚数単位、 ω は円振動数(rad/s)、 f_R は無次元振動数である。これらの表示法は第1および2報^(1 および 2)で用いられており、それらの結果を利用できる。

それぞれの実数部を式(14)に代入し、1周期の平均を行い、P点誘起速度の時間平均値として次を得る。

$$u_P av(x_P, y_P) = \oint u(x_P, y_P; t) dt / T_o \quad (21)$$

ここで T_o は振動周期(s)を示す。さらに規準化する。

$$u_P av^*(x_P^*, y_P^*) = u_P av(x_P, y_P) / U_a \quad (22)$$

結局次のようになる。

$$u_P av^*(x_P^*, y_P^*) = -\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^1 \left\{ \frac{((y_P^*)^2 - (x_P^* - x_V^*)^2)}{((x_P^* - x_V^*)^2 + (y_P^*)^2)^2} \right\} G_0 dx_V^* + \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{((y_P^*)^2 - (x_P^* - x_V^*)^2)}{((x_P^* - x_V^*)^2 + (y_P^*)^2)^2} \right\} (V_1 G_1 + V_2 G_2) dx_V^* \quad (23)$$

ここで

$$G_0 = \{ \text{Re}(y_V^*(x_V^*)) \text{Re}(\gamma^*(x_V^*)) + \text{Im}(y_V^*(x_V^*)) \text{Im}(\gamma^*(x_V^*)) \} \quad (24)$$

$$G_1 = \text{Re}(\gamma^*(x_V^* = 1)) \cos(2\pi f_R(x_V^* - 1)) + \text{Im}(\gamma^*(x_V^* = 1)) \sin(2\pi f_R(x_V^* - 1)) \quad (25)$$

$$\rho \rho G_2 = \text{Im}(\gamma^*(x_V^*=1)) \cos(2\pi f_R(x_V^*-1)) - \text{Re}(\gamma^*(x_V^*=1)) \sin(2\pi f_R(x_V^*-1)) \quad (26)$$

$$V_1 = \text{Re}(y_V^*(x_V^*=1)) \cos(2\pi f_R(x_V^*-1)) + \text{Im}(y_V^*(x_V^*=1)) \sin(2\pi f_R(x_V^*-1)) \quad (27)$$

$$V_2 = \text{Im}(y_V^*(x_V^*=1)) \cos(2\pi f_R(x_V^*-1)) - \text{Re}(y_V^*(x_V^*=1)) \sin(2\pi f_R(x_V^*-1)) \quad (28)$$

ここで Re は複素数の実数部、 Im は虚数部を表す。以上で P 点における x 方向誘起速度が計算できる。

流れが発生するのは、渦の強さとその位置の各々瞬時的関係が貢献しあい、打ち消されない量が残るためである。渦の強さとその位置は前縁相対振幅 ε にそれぞれ比例するから、誘起速度は ε の2乗に比例する。そこでさらに ε の2乗で規準化する。

$$u_{ep} av^*(x_P^*, y_P^*) = u_P av^*(x_P^*, y_P^*) / \varepsilon^2 \quad (29)$$

4. 2 時間平均誘起流量 x_P 断面を通過する規準化誘起流量は、対称性から次式で与えられる (図3)。

$$Qe^*(x_P^*) = 2 \int_0^\infty u_{ep} av^*(x_P^*, y_P^*) dy_P^* \quad (30)$$

後縁付近から下流では誘起流量は一定であり、全誘起流量は次式で与えられる。

$$Qe_{jet}^* = Qe^*(x_P^*=1) \quad (31)$$

ここで実流量は次式で与えられる。

$$Q_{jet} = \varepsilon^2 L_s U_a Qe_{jet}^* \quad (32)$$

Fig.3 Induced flow field and a stream-tube around the VEP

4. 3 時間平均流線 振動板に垂直な断面 (x_P = 一定) 上で板面 ($y_P = 0$) から y_P 点までの時間平均通過流量 ΔQ を考える。

$$\Delta Q(x_P, y_P) = \int_0^{y_P} (U_a + u_P(x_P^*, y_P)) dy_P \quad (33)$$

次のように規準化する。

$$\Delta Q^*(x_P^*, y_P^*) = \Delta Q(x_P, y_P) / L_s U_a \quad (34)$$

すると次のようになる。

$$\Delta Q^*(x_P^*, y_P^*) = y_P^* + \varepsilon^2 \int_0^{y_P^*} u_{ep} av^*(x_P^*, y_P^*) dy_P^* \quad (35)$$

同一の流線を考えると同一の ΔQ になるから、無限上流での y_P 座標を $y_{P\infty}$ とし、 x_P 面での y_P 座標を $y_P(x_P)$ とすると次式を得る。

$$y_{P\infty}^* = y_P^*(x_P^*) + \varepsilon^2 \int_0^{y_P^*} u_{ep} av^*(x_P^*, y_P^*) dy_P^* \quad (36)$$

従って無限上流での y 座標からの流線のずれを規準化した Δy_e^* を次式のように定義すると

$$\Delta y_e^*(x_P^*) = (y_P^*(x_P^*) - y_{P\infty}^*) / \varepsilon^2 \quad (37)$$

次式を得る。

$$\Delta y_e^*(x_P^*) = - \int_0^{y_P^*} u_{ep} av^*(x_P^*, y_P^*) dy_P^* \quad (38)$$

微小擾乱の仮定から、流線は x 軸にほぼ平行であるが、上式で与えられるほんのわずかな距離だけずれる。

5. 流れ発生機の性能

前報^(1, 2)では性能を推進器の性能パラメタを流用して表示した。流体機械として考えると、このままでは不便である。そこで以下のようにさらに検討を加え、流体機械性能表示パラメタを作成する。

5. 1 推力と流量の関係 流出する噴流を含む流れ発生機の流れ場に運動量の法則を適用すると、推力はその十分下流の時間平均流速分布 ($U_a + u$) と次のように関係付けられる⁽³⁾。

$$T = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_a (U_a + u) u dy \quad (39)$$

なお下流検査面において周期的変動が残っている場合、注目する点での時間平均運動量は次のようになる。ここで u_t を変動誘起速度とする。

$$\oint \rho_a (U_a + u_t)^2 dt / T_o = \oint \rho_a \{U_a + u + (u_t - u)\}^2 dt / T_o = \rho_a (U_a + u)^2 + \oint \rho_a (u_t - u)^2 dt / T_o \quad (40)$$

変動速度が大きい場合には式(40)の右辺第2項の偏差項の影響が残ってくる可能性があるが、ここでは微小擾乱の仮定から右辺第1項に比し非常に小さいと考え、平均流速分布のみに対して式(39)を用いた。さらに式(39)において微小擾乱の1次までを考えると

$$T = \rho_a U_a \int_{-\infty}^{\infty} u dy \quad (41)$$

$$= \rho_a U_a Q_{jet} \quad (42)$$

これを規準化すると

$$C_{Te} = \rho_a U_a Q_{jet} / (\rho_a U_a^2 L_s / 2) / \varepsilon^2 \quad (43)$$

$$= 2Q_{e\ jet}^* \quad (44)$$

そこで流量／推力比として

$$R_{QT} = \rho_a U_a Q_{jet} / T = 2Q_{e\ jet}^* / C_{Te} = 1 \quad (45)$$

となる。すなわち、流量と推力は直接関係付けられること、それらの係数の間の関係も単純に与えられることが分かる。

誘起速度から流量を計算するのに比し、推力は板面の傾斜と圧力差から直接的に計算されており⁽¹⁾、より正確と考えられるので、全体性能における誘起流量としては次式により評価するのが妥当であろう。

$$Q_{jet} = T / \rho_a U_a \quad (46)$$

5. 2 振動板によるエネルギー付加 振動板は周囲圧力一定の環境の中で働いているので、その作用は流体の運動エネルギー流束の増加 E と考えることにする。

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \rho_a (U_a + u)^3 / 2 \, dy - \rho_a U_a^3 / 2 \, dy_{\infty} \} \quad (47)$$

ここで図3に示すように、 dy_{∞} と dy は注目する流管のそれぞれ無限上流と下流での幅を表す。連続条件から

$$(U_a + u) \, dy = U_a \, dy_{\infty} \quad (48)$$

従って式(46)は次のようになる。

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \rho_a (U_a + u)^3 / 2 - \rho_a U_a^2 (U_a + u) / 2 \} \, dy \quad (49)$$

微小項の1次項まで残すと

$$E = \rho_a U_a^2 \int_{-\infty}^{\infty} u \, dy \quad (50)$$

$$= \rho_a U_a^2 Q_{jet} \quad (51)$$

上式を式(41)と比較して次式を得る。

$$E = T U_a \quad (52)$$

流れエネルギー効率としては

$$\eta_{FG} = E / W \quad (53)$$

と定義することにすれば

$$\eta_{FG} = T U_a / W = \eta_P \quad (54)$$

すなわち、微小項の範囲内でエネルギー効率 η_{FG} は推進効率 η_P と一致する。

5. 3 前縁振動速度・振幅規準の性能パラメータ 流体機械性能表示の基準量として次の2量を考える。

$$\text{前縁振動速度} \quad V_{LE} = \omega |y_{LE}| = \varepsilon \omega L_s \quad (55)$$

$$\text{前縁振動片振幅} \quad |y_{LE}| = \varepsilon L_s \quad (56)$$

するとこれらに基づく性能パラメータとして次を得る。

(1) 流量係数

$$q_{FG} = Q_{jet} / (V_{LE} |y_{LE}|) = Q_{jet} / (\varepsilon^2 \omega L_s^2) \quad (57)$$

と定義すると

$$q_{FG} = Q_{e\ jet}^* / (2 \pi f_R) \quad (58)$$

(2) エネルギー係数

前縁振動速度でエネルギー増加 E を規準化する。

$$C_{E\ FG} = E / (\rho_a V_{LE}^2 L_s U_a / 2) \quad (59)$$

$$= E / (\varepsilon^2 \rho_a \omega^2 L_s^3 U_a / 2) \quad (60)$$

と定義すると次式を得る。

$$C_{E\ FG} = C_{Te} / (2 \pi f_R)^2 \quad (61)$$

(3) 推力係数

前縁振動速度で推力 T を規準化する。

$$C_{T\ FG} = T / (\rho_a V_{LE}^2 L_s / 2) \quad (62)$$

$$= T / (\varepsilon^2 \rho_a \omega^2 L_s^3 / 2) \quad (63)$$

次式を得る。

$$C_{T\ FG} = C_{Te} / (2 \pi f_R)^2 \quad (64)$$

従って前節の結果と対比から次のようになる。

$$C_{T\ FG} = C_{E\ FG} \quad (65)$$

以上の式から振動板の加振条件と流量やエネルギーなどの性能を量的に関連付けることができ、流体機械としての設計に結びつく無次元パラメータを得た。それらは推進器の性能パラメータ類と関連させて評価できる。前報^(1, 2)において導かれた結果はこれらの式により直ちに換算して利用することができる。

6. VEPFG 周りの流れ状況と VEP 作動状況

表1に計算条件を示す代表的な2条件の VEPFG についての性能と流れの解析結果を以下に示す。いずれ

Table 1 Data for the Analysis

	A	B
PLATE		
Length L_s (m)	1	1
Thickness t_s (m)	0.0013	0.013
Young's modulus E_s (Pa)	0.21E+12	0.21E+12
Material density ρ_s (kg/m ³)	7800	7800
FLOW		
Fluid density ρ_a (kg/m ³)	1000	1000
Flow speed U_a (m/s)	1.629	3.003
LEADING-EDGE CONDITION		
Relative amplitude ε	0.01	0.01
Reduced frequency f_R	0.1450	1.635
Relative feather amp. R_{LE}	1.0	1.0
LE feather phase angle ϕ_{LE}	1.5 π	1.5 π
ANALYSIS		
Divisions N_{Div}	50	50

も本研究第1報⁽²⁾において性能良好とされた加振条件の組み合わせで、前縁角度振幅比 $R_{LE}=1$ 、角度振動位相差 $\phi_{LE}=1.5\pi$ である。振動板の分割数 N_{Div} は50である。

(1) 最高効率点(図4のA) 最高効率点としてで、質量比 $\mu=0.01014$ 、剛性比 $\beta=0.028977$ 、無次元振動数 $f_R=0.145$ を例にとった。

(2) 共振点付近(図4のB) 相対的に剛性が高く、共振に近い状態で、推力が大きく、かつその付近での局所的効率ピークを示す点として、 $\mu=0.1014$ 、 $\beta=8.5246$ 、 $f_R=1.635$ を例にとった。

それらの作動点の全体的な位置付けを第2報⁽²⁾から引用した図4の上に示す。全体的な性能パラメタに関する解析結果を表2に示す。効率と流量に関するデータは推力との関係式(46)と(54)から算出した。

しかし、表2の最下段の流量推力比 R_{QT} は4節に述べた誘起速度から流量を算出する方法による結果を示している。本来1.0であるべき量がそれぞれ0.85と0.37と計算された。他の計算結果でもこれが2から0.3

程度の間にはばらついている。オーダー的には1に近いので、このずれは計算過程における誤差によるものと考えている。全体流量としては既に述べたように式(46)によるほうが正確と考えられる。

図5-9に作動状況を示す。(a)、(b)はそれぞれ作動状況AとBに対応している。

図5に1周期間の振動板の運動モードを重ねて示す。

図6にいくつかのx断面上の速度分布をずらして並示している。横軸が規準化誘起速度 ue^* 、縦軸が y^* 座標である。

図7はそれらの平均誘起速度の振動板上での速度分布を示す。後縁速度を1として示している。後縁速度は表2に $TE \max ue^*$ として示されている。

図8は流線の挙動傾向を示し、無限上流での y_∞ からの流線のずれ Δy を y_∞ 一定の直線からのずれとして拡大して示す(板との距離は正しくない)。

図9にこれらに対応する振動板上の推力密度分布を、最大値を1として示している。流体仕事の分布はこの推力密度分布とほぼ同じである。推力密度は板面傾斜と圧力差とから評価したものである⁽¹⁾。

これらの結果から次のことが観察される。

- (1) 最高効率点(図4のA点)の流れの様子
この振動板の運動状態は図5(a)に見られるように

Table 2 Calculated Results for Conditions A and B

	A	B
	near optimum	near resonance
Mass ratio μ	0.01014	0.1014
Stiffness/flow force β	0.028977	8.5246
Reduced frequency f_R	0.1450	1.635
Relative frequency f/fo	0.2168	0.4506
Energy efficiency η_{FG}	0.9817	0.49344
Propulsion efficiency η_P		
Flow coefficient Qe_{jet}^*	0.4597	4419
Flow coefficient q_{FG}	0.5537	430.1
Energy coefficient C_{EFG}	1.1075	83.74
Thrust coefficient C_{TE}	0.9193	8837
Thrust coefficient C_{TFG}	1.1075	83.74
TE/LE amp. ratio	0.9544	4.278
TE max ue^*	65.73	174500
Flow/thrust ratio R_{QT} (only for reference)	0.8508	0.3726

Fig.4 Points A and B on the overall performance map for peak-efficiency conditions

Fig.5 Vibrating modes of the LE driven plate for (a) condition A and (b) condition B

Fig.7 Distributions of the center velocity along the VEP for (a) condition A and (b) condition B

Fig.6 Velocity distributions on x -planes around the VEPFG for (a) condition A and (b) condition B

Fig.8 Exaggerated deviations of streamlines around the VEPFG for (a) condition A and (b) condition B

Fig.9 Distributions of density of thrust generation for (a) condition A and (b) condition B

弾性変形は顕著ではなく、前縁の上下振動と角度振動の組み合わせでほぼ決まり、これに小さな弾性変形が加わっている。後縁／前縁振幅比（表2の TE/LE amp. ratio）は1に近く、真空中固有振動数に対する加振振動数の比 f/f_0 はほぼ0.22である（表2）。推力分布から見ると、この状況では無衝突流入状態に近い（図9(a)）こと、推力密度分布は前半で滑らかに増加してから減少し、後半にはほぼゼロとなっている。誘起された流れは、板の前半では多少減速され、後半で加速されている（図6(a)と図7(a)）。この状況が流線に反映されており、板の前半で流線は外向きに拡大し、後半で絞られて板に近づいている（図8(a)）。ただし後縁付近では減速し、流線も拡大している。図6(a)からわかるように、後縁付近での噴流の厚さは振動板長さ L_s の2-3%程度と薄い。この厚みは ε には依存していないようである。

振動板の前半では、そこでの大きい推力発生密度にもかかわらず流速が減速気味である。これは板の運動による前縁付近での流れの汲みこみ（スクープ）作用で圧力が上がり、減速するとともに仕事が増えるものと考えられる。後半部はその汲みこまれた流れを押しやる仕事であり、比較的楽になっていると思われる。

(2) 共振点付近(図4のB点)の流れの様子

この状態は図5(b)に見られるように一次共振状態に近く、弾性変形による後縁振幅が非常に大きくなっている。表2に見られるように真空中固有振動数に対

する加振振動数の比 f/f_0 はほぼ0.45、後縁／前縁振幅比はほぼ4.3である。このときの推力密度分布は後ろに向かって大きくなり、後縁で急激に0まで低下している（図9(b)）。誘起速度分布は前縁から後ろに向かって増速、特に後縁付近で急激に加速している（図6(b)と図7(b)）。この様子が流線に反映されて、前縁から絞られて板に近づき、後縁でさらに急激に絞られている（図8(b)）。後縁付近での速度分布を見ると、高速噴流を挟むようにその外側に減速層が存在している。A点ではこれがそれ程目立たない。噴流の厚みはA点の状況とほぼ同様である。

表2の下段に示すように後縁噴流速度最大値（中心速度）TE max ue^* は 1.745×10^5 と非常に大きい。A条件ではこれは66程度である。本解析の仮定内ではVEPFGの噴流は厚みは変化せずに誘起速度が非常に変化することが分かった。

全体的性能の傾向は既に与えられている^(1, 2)が、それに伴う流れの状況が上記の例で明らかになった。条件AとBにおける流れ場と挙動の違いは興味深い。この違いが効率に影響しているものと思われる。今後流量とエネルギー上昇、そして効率の向上を図る上で注目すべき現象と考えられる。

7. 結語

弾性振動板流れ発生器の性能に関してこれまで推進器性能パラメタで表示してきたが、本研究では流体機械としての性能表示方法を示した。さらに振動板の周りの誘起流れを計算し、速度分布、流線、誘起流量について調査した。微小擾乱でポテンシャル流れという条件から、これらの解析結果の妥当性は限度があるが、今後実験データや現象を検討する際の比較データとして役立ち、参考になると考えられる。

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) Prandtl, L. and Tietjens, O.G., Applied Hydro- and Aeromechanics, Dover Publications, (1957), p.126-136