長方形噴流の発振と圧力フィードバック*

佐野 学^{*1}, 大石 勉^{*2}, 高野 登^{*2}Relation between Oscillation of Rectangular Jet and
Feedback of Pressure FluctuationManabu SANO and Tsutomu OOISHI
and Noboru TAKANO

The self-excited oscillation of a rectangular jet impinging on an edge is investigated experimentally. Cross-correlation functions between the pressure fluctuation of the edge and those of measured points in the nozzle-edge span are calculated. Contour lines of cross-correlations and phase differences are depicted. Peaks from the edge to the nozzle exit are found in those contour lines; a connecting line with these peaks is assumed as a main path of feedback. The phase lags a bit and is positive. This suggests that the oscillation occurs by the positive feedback of the pressure fluctuation at the proximity of the edge to the nozzle exit. Furthermore, the existence of the feedback path is made visible by three-dimensional graphics of cross-correlation functions. It seems that there is a relation between the cross-correlation and the maximum magnitude of the pressure fluctuation.

Key Words: Fluid Mechanics, Rectangular Jet, Fluid Vibration, Edgetone, Flow-induced Oscillation.

1. はじめに

長方形噴流がその軸上におかれたエッジなどの障害物に衝突する時、噴流は軸に垂直な方向に発振する。この発振現象については音響学あるいは流体力学の立場から多数の報告がなされている^{(1)~(5)}。

前報⁽⁶⁾で著者らはフィードバック説の立場から発振現象の主因がエッジ近傍での圧力変動がノズル出口近傍へ伝播することにより起こるというフィードバック機構であることを実験的に明らかにした。この確認のためフィードバック経路を遮断板により遮断して発振が停止することより、ノズル出口近傍への圧力波の伝播の変化を調べ、遮断板をつけた状態でノズル近傍を強制加振し発振現象が再現されることを確認した。

遮断板を設置すると主発振モードにはほとんど変化はないが、高次モードの消滅が確認され発振現象自体

が変化していることが考えられる。このようなことから本報では発振現象の主因をより明確に把握するため、遮断板などを設置せずに場の圧力変動を現象に影響のないブローブにより測定しエッジ先端での圧力変動との相互相関をとることより、発振主因が圧力フィードバックによることを確認し、その主たる経路を明らかにすることを目的とする。具体的には、噴流中心線上にエッジを置き発振させ、吐出口とエッジ間の適当な位置での圧力変動とエッジ先端での圧力変動の相互相関関数を求め、等相関線図と等位相差図を描きその結果から検討している。

2. 記号および座標系

使用した記号を以下に示す。また、主な記号と座標系を図1に示す。

B	: ノズル出口幅
Lw	: エッジ壁面長さ
$p_e(t)$	: エッジ近傍での圧力変動
$p_n(t)$	: ノズル出口近傍での圧力変動
R	: 測定点における相互相関関数

* 平成元年3月10日 東海支部第38期総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月8日。

^{*1} 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)。

^{*2} 学生員、金沢大学大学院。

R_{max}	: 全測定点中のRの最大値
U_s	: ノズル出口流速
W	: ノズル出口幅
X_e	: ノズルエッジ間距離
Z_m	: 最大測定範囲
α	: エッジ角
τ	: 位相差

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

実験装置については前報で詳しく説明したので省略する。装置はノズル部とエッジおよびプローブから構成されている。前報と異なっているのはプローブのみである。

プローブ先端は外径2mm、内径1mmのステンレス製パイプで作り、これにより導かれる圧力をビニールチューブを介して半導体小型圧力変換器（豊田工機KK製PMS5-0.5H）に接続してある。このプローブは外径5mmの真鍮製支持棒に取り付けられている。このプローブによる測定のための移動装置はZ方向にはスピードコントロールモータで、X方向の位置は手動で設定する。

3.2 実験方法と結果の整理

図2に示すようにプローブをX方向とZ方向の適当な測定点へ移動させ、その位置とエッジ先端での変動

図1 座標系および記号の定義

図2 測定装置

圧力を半導体小型圧力変換器を用いて電圧に変換した後、A/D変換しパソコン（NEC、PC-98XL）によりデータ処理を行った。これをノズルエッジ間距離を変化させ各測定点で繰り返した。各測定点のデータはサンプリング点数 4096 点、サンプリング周波数 20kHz、2チャンネルでA/D変換をおこない波形をグラフィック表示で確かめた後、フロッピーディスクに記録した。

相互相関関数 $R(\tau)$ (7) は、ファイル（フロッピーディスク）に記録されているデータについて次式により計算した。

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} p_e(t) p_n(t+\tau) dt$$

ここで $p_e(t)$ 、 $p_n(t)$ はそれぞれエッジ先端、ノズル出口近傍での圧力変動を表している。位相差はエッジ先端付近で位相差を零として、相互相関関数が最大値をとった位置での τ の値を角度に換算して表した。

4. 実験結果と考察

4.1 エッジ先端とノズル出口近傍の圧力変動に対する相互相関関数

エッジ先端とノズル出口近傍の圧力変動の相互相関関数 R の最大値を各エッジ角における相互相関関数の最大値 R_{max} で無次元化したものを図3に示す。相互相関関数は $\alpha = 30^\circ$ の場合、 $X_e/W = 3.0$ で、 $\alpha = 60^\circ$ の場合、 $X_e/W = 4.5$ で、それぞれ極大値を示している。極大値を示した後は X_e/W の増加に伴い徐々に減少している。この様相は前報のエッジ先端変動圧力のパワースペクトルとエッジ距離との関係とよく類似している。極大値を示すエッジ距離以下では、エッジがコア領域内に設置されていることから噴流の軸方向の運動量がZ方向のそれに比べて大きく、噴流の直進性が強く軸に垂直な方向への速度も小さいことが

図3 相互相関関数

らほとんど発振しない。コア領域の消滅後の発達領域では周囲からのまき込みの影響によりせん断層内に微小な渦塊が発生し、これらが下流へ移動しエッジに近付くことにより、エッジ先端付近の上下面における圧力の不平衡を生ずる一つの誘因となり発振が起き易くなる。混合領域内における混合作用が著しくなるに伴い、さらに発振が起き易くなり R/R_{max} が極大を示すことになると考えられる。極大値を示した後 R/R_{max} が減少するのは、ノズルまでの距離が長くなるに伴う圧力波の減衰によると考えられる。

また、エッジ角 30° 、 60° のいずれの場合も定性的には同じ傾向を示すが、極大値を示した後の減衰は 60° の方が 30° に比べて大きい。これは噴流がエッジ先端に衝突する際の衝突角度が 30° と 60° で異なり、エッジ先端における渦発生の様相が異なることによると考えられる。

4.2 等相関線図

各測定点とエッジ先端における圧力変動成分について相互相関関数を求め、その最大値を等相関線図の形で整理した結果の一例を図4、図5に示す。厳密にはエッジ先端近傍で発生した圧力変動は放射状に伝播するからエッジ壁に衝突して減衰する分以外はノズル方向へフィードバックしていると考えられる。これらのフィードバック成分は噴流に対しては空間的・時間的に変動しながら影響を及ぼしている。この中で

どのような経路を辿ってフィードバックした成分が噴流発振に強い影響を与えているかを特定しておくことが必要である。

エッジ先端で発生した圧力変動がノズル出口端近傍へフィードバックし、そのフィードバックした成分の影響により噴流がわずかに偏向し、これにより発振が起こると思われる。これらの成分は種々の経路をたどってノズル出口近傍へ到達する。このうちエッジ先端近傍の圧力変動と最も強い相関を有する成分のたどる経路を主フィードバック経路と定義する。また、これは4.6で示すように減衰が最小の経路にほぼ対応していることから発振の誘因を決定する一つの重要な因子と考えてよい。具体的には、周期的な発振が起きている場合、等相関線図には等相関線の突出した部分が存在し、この突出部を連ねるとノズル出口端へ向かう一つの線が形作られる。これが主フィードバック経路に対応していると考えられる。図5に示すように周期的な発振が起きていない場合にはこの主フィードバック経路は明確には現れなかった。また、 $\alpha = 60^\circ$ では、ノズル出口方向だけでなくわずかに上方へも等相関線の突出部がみられる。このことは、エッジ角に

図4 等相関線図

図5 等相関線図

図6 位相差

より圧力フィードバックの様相が異なることを意味している。エッジ角 30° 、 60° のいずれの場合でも発振が起きないような X_e/W の値では等相関線図には大きな差異は認められなくなる。

4.3 位相差

エッジ先端と測定点における変動波形の間の位相差については、全体としてエッジ角により若干の相違点があるものの $X_e/W < 9.5$ では、エッジからノズル出口方向に向かって位相は遅れている。図6に示す $\alpha = 30^\circ$ の場合について見てみるとエッジ近傍からノズルに向かって位相差勾配の大きい部分が存在し、急激に位相が遅れ、ほぼ一定値となり、再び位相差勾配の大きい

部分を通過して急激に回復している。図としては示さないが、 $X_e/W \geq 9.5$ では、等位相差線図には上で述べたような明確な傾向はみられず、部分的に位相が回復する部分が見られその様相は非常に複雑となっている。これは、エッジ距離が大きくなると発振状態が間欠的となったり、また、噴流のせん断層内に渦が形成され、その影響により変動圧力の伝播状態が複雑になることに対応していると考えられる。

位相差線図よりノズル出口近傍における位相差を抽出してみると図7に示すようになる。発振が起きている範囲では位相差は正の小さい値となっていて、エッジ角による差異がほとんど認められない。結果として、正フィードバックの様相を呈している。このことはエッジ先端近傍で発生した変動圧力がノズル近傍へフィードバックしていることの証明ともなっている。

4.4 主フィードバック経路

主フィードバック経路をエッジ角別に整理した結果を図8、図9に示す。主フィードバック経路は $\alpha = 30^\circ$ の時、噴流中心線にほぼ平行である。 $\alpha = 60^\circ$ の時、

図7 ノズル出口近傍における位相差

図8 主フィードバック経路 ($\alpha = 30^\circ$)

図9 主フィードバック経路 ($\alpha = 60^\circ$)

図10 相関

図11 相関

エッジ近傍では噴流中心線に平行であるが、途中で曲がり、再び噴流中心線にほぼ平行となっている。エッジ距離によらずこの傾向には大きな変化は見られない。また、エッジ距離が大きくなるほどいずれのエッジ角の場合も主フィードバック経路は噴流中心線から離れていく傾向がある。エッジ距離が大きくなるほどエッジ位置における噴流幅が広くなり、振動の中心位置が相対的に噴流から離れるためと考えられる。

エッジ角の差異により主フィードバック経路が異なるのは、エッジ先端近傍での渦形成の様相の違いによるものであると考えられる。今後、可視化などにより渦の大きさ、位置、強さ、運動方向などを明らかにすることが必要である。

4. 5 三次元表示による相関

前節まではフィードバック経路の方向や角度を求めるために等相関線図を二次元的に表したがフィードバック経路および相関の大きさが分かりにくい。そこで本節では相関をノズル出口方向から見た鳥瞰図により三次元的に表してみた。例として図10、図11に結果を示す。相関の高いところを連ねた線、いわゆる山の尾根にあたるところが主フィードバック経路に対応している。図10に示す $X_e/W = 4.5$ では主フィードバック経路の存在が認められる。しかし、図11に示す $X_e/W = 20.0$ では主フィードバック経路は不明確となっている。

相関の大きさはエッジ近傍でかなり大きく、ノズル出口端に近付くにつれて急激に減少し、ある程度小さくなると以降はわずかに減少するもののほとんど変化しない。これは、エッジ距離が大きくなるに伴ってフィードバックしている圧力変動が減衰していくことに対応している。

4. 6 変動圧力の最大振幅差

4. 2では相互相関関数を計算することにより、エッジ先端と測定点間で圧力波形の相似性について検討した。このような相関と変動圧力の減衰との関係を明らかにするため、各測定点における圧力変動の最大振幅を4. 5と同様に三次元表示してみた。結果の一例を図12に示す。 $X_e/W \leq 9.5$ では4. 2で述べたように主フィードバック経路に対応する振幅差の大きい“尾根”が存在し、等相関線図と定性的によく類似し

$$\alpha = 30^\circ \quad X_e/W = 4.5$$

図12 変動圧力の最大振幅差

ている。変動圧力の減衰が小さい経路と主フィードバック経路の間に相関関係が存在する。

5. おわりに

本研究の結果は以下のように要約できる。

- (1) エッジ・ノズル間の測定点とエッジ先端における圧力変動に対する相互相関関数の最大値と位相差を求めることにより、長方形噴流の発振現象が圧力フィードバックによることを実験的に明らかにした。
- (2) 同時に等相関線図から主フィードバック経路を求め、主フィードバック経路がエッジ角により異なることを明らかにした。

文 献

- (1) Powell, A., J. Acoust. Soc. Am., 33-4 (1961), 395.
- (2) Wooley, J. P. and Karamcheti, K., AIAA Paper, 73-628 (1973)
- (3) 社河内・ほか3名, 機構論, No. 830-4 (昭58), 97.
- (4) Curle, N., Proc. R. Soc. London, Ser. A, 216 (1953), 412.
- (5) Nyborg, W. L., J. Acoust. Soc. Am., 26-2 (1953), 174.
- (6) 佐野・水牧, 機論, 54-500, B, (昭63), 791.
- (7) 南, 科学計測のための波形データ処理 CQ出版社 (昭61), 116.