

円形噴流の金網への衝突時における自励振動に関する研究

第1報 自励音と速度変動の関係

倉澤英夫*・羽田喜昭**・笠木伸英***・小幡輝夫****

(平成8年9月30日 受理)

A Study on the Self-Excited Oscillation in a Round Jet Impinging upon a Screen. 1st Report. The relation between self-excited tone and velocity fluctuation.

Hideo KURASAWA, Yoshiaki HANEDA, Nobuhide KASAGI and Teruo OBATA.

A fine screen is placed vertically to an axisymmetric jet. The diameter of the nozzle exit is 28mm and the exit velocity is 10.4m/s. In the experiment the screen is moved in the direction of the jet axis. The shear layer starts to oscillate periodically, and simultaneously a pure tone is generated due to the impingement of the jet upon the screen. This self-excited oscillation is produced because sound pressure is fed back so as to exert force on the unstable shear layer near the nozzle exit. It has been recognized that the configuration of the peaks in the sound pressure spectrum reflects that of the peaks in the velocity spectrum.

1. 緒 論

流体的自励振動に関しては、最近高速増殖炉「もんじゅ」における温度センサの破損事故でにわかに注目を浴びた現象の一つである。これは温度計のような円柱状物体の周りを流体が流れるときカルマン渦が発生する。この渦形成が円柱に対し流体力となって作用し、円柱が振動してくる。それが再びカルマン渦の発生に影響を与える一種の連成した自励振動を作り出し、大きな破損事故につながったという推論がある。一方流れが空気のような気体の場合には、円柱から作り出されるカルマン渦は電線の「ひゅーひゅー」といったうなり音の発生になってくる。この場合電線そのものは振動しても、しなくても音は生じてくる。このような音は一般に空力音響または空力音と呼ばれ、新幹線など交通機関の高速化により発生する風切り音、高層ビルなどの空調設備関係で生じる気流音、さらにはOA機器における冷却ファンからの音などの例^{1),2)}を上げることができる。

ここでは以上の流体的振動と空力音響の二つに関連した現象として、流体的自励音につい

* 長野工業高等専門学校 機械工学科 教授

** 長野工業高等専門学校 機械工学科 助教授

*** 東京大学工学部 教授

**** 帝京大学理工学部 助教授

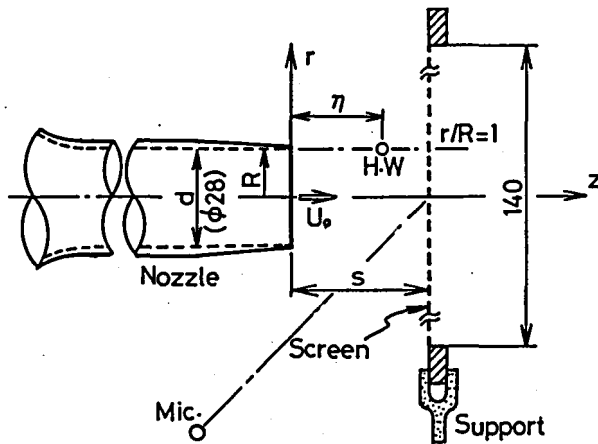


図1 実験装置と代表的記号

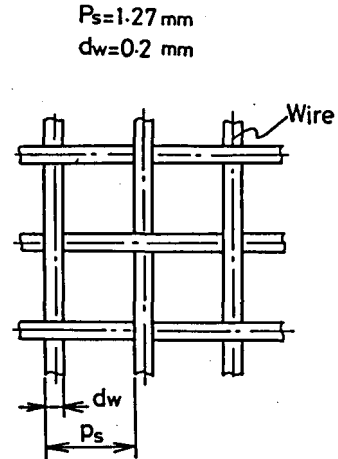


図2 供試金網

て検討した。すなわち円形噴流中に金網を噴流軸に直角に噴流の出口近くに置くと、せん断層の自励振動の発生と同時に噴流の金網への衝突に伴って空力音が生じてくる。このような空力音の特性について、せん断層の振動と対比させながら検討した。

2. 実験装置および供試金網

2-1 実験装置および測定方法

実験装置における測定部分および使用した主な記号を図1に示す。送風機により送り出された空気は、直径28mmの円形ノズルより静止空間に噴出させた。噴流中には噴流軸に直角に金網を置いた。そ

れは一辺140mm、厚さ5mmの四角形の木枠に固定し、さらに支持棒を介して移動装置に取りつけ、ノズル出口—金網間距離 s を変化させた。実験はノズル出口での速度 $U_0=10.4\text{m/s}$ の一定下で行った。

速度の測定は加熱部直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ 1mm のI型熱線プローブ (H.W.) を用い、その出力を流速計につないだ。このときプローブの挿入位置は、波形分析を目的にした場合には変動が明りょうにとらえられる、ノズル出口よりやや下流域の $\eta=12\text{mm}$ 、 $r/R=1$ に置いた。音の測定は1/2インチのコンデンサ型マイクロホン (Mic) を金網の中心より上流側 84mm 、噴流軸に対し 45° の位置に一定になるように置き、その出力を精密騒音計につないだ。また変動信号に対するスペクトル分析はデジタルのFFT分析器を用いた。なお音の測定を行う関係上、送風機から発生した音をできるだけ除去するために、送風機本体は実験室の隣に設置しかつ流路の途中に消音器を設けるなど、測定部分での暗騒音レベルをできる限り下げる

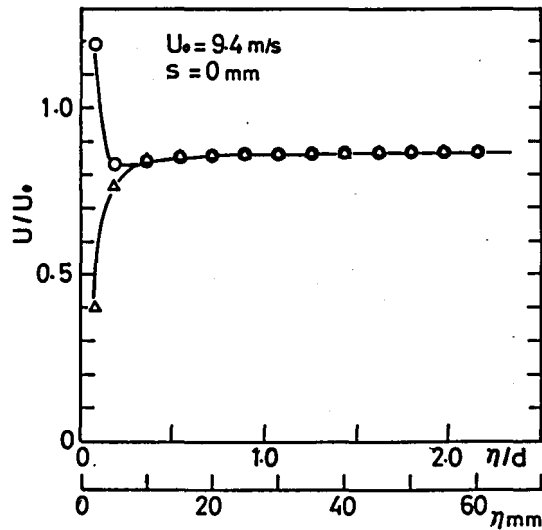


図3 軸流速度への金網の影響

工夫をした。しかし実験室そのものは遮音、吸音設備が取られるなど特別な工夫がないため、データ収録は外乱の影響を少なくする目的で暗騒音の小さい夕方から夜にかけて行った。このとき暗騒音は47dB程度であった。

2-2 供試金網の特性

使用した金網は市販のステンレス鋼製の平織り金網でその詳細寸法は図2に示す。金網のメッシュ数は20である。金網の特性を示す開口比 β 、空孔率 ϵ はそれぞれ $\beta=0.71$ 、 $\epsilon=0.88$ である。ここで開口比、空孔率は次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \left(\frac{P_s - dw}{P_s} \right)^2 \\ \epsilon &= 1 - \frac{\pi dw \sqrt{P_s^2 + dw^2}}{4 P_s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

以上の特性を持つ金網をノズル出口端に置いたとき、金網を通過することにより中心速度がどの程度減少するかを図3に示す。測定値はホットワイヤセンサにより得られたもので、2回の結果を示している。金網通過直後で両者の値は全く異なっているが、この原因は次のことが考えられる。○印では U/U_0 が1より大きな値となっている。これはセンサが金網の線と線の間になされた場合に対応し、その間を通過する縮流の影響で速度が増大したと考えられる。逆に△印では U/U_0 が1より小さな値になるが、これは線の後ろの後流部分に位置し、速度が低下したと考えられる。線の影響は下流に進むにつれなくなり、約10mm下流では値が一致し最終的に $U/U_0=0.86$ と一定値になる。金網の抵抗が速度エネルギーの損失となって現れ、本実験では金網がない場合に対し $0.86U_0$ の速度の損失を招いている。

3. 実験結果および考察

3-1 噴流の金網への衝突におけるフィードバックループの形成

金網を噴流中に置いた場合の速度変動の波形（センサ位置は $\eta=12\text{mm}$ 、 $r/R=1$ に固定）を図4に示す。振幅を示す縦軸は同一の

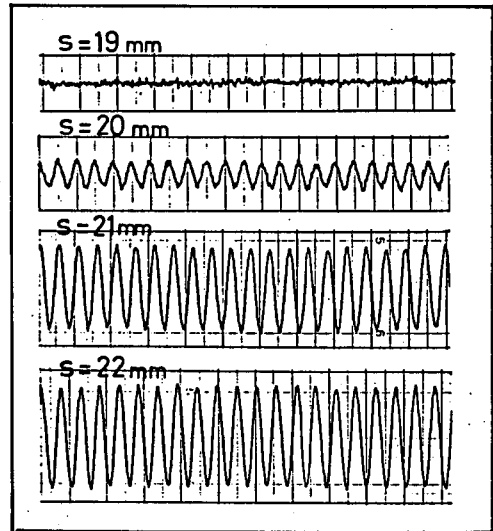


図4 セン断層での速度変動の波形

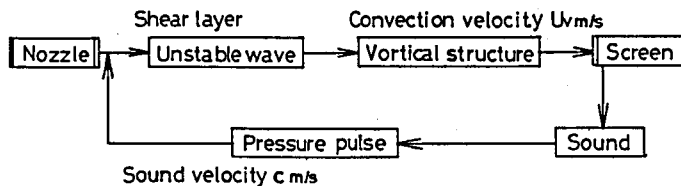


図5 噴流の金網への衝突によるフィードバックループの形成

増幅率である。この結果金網位置が $s = 19\text{mm}$ と 20mm では波形が全く異なることがわかる。 $s = 19\text{mm}$ では振幅は極めて小さく周期性は全く観測されないのに対し、 $s = 20\text{mm}$ では周期性の出現と同時に振幅が急増している。 $s = 21, 22\text{mm}$ ではさらに振幅が増大し、また s の増大に伴いこれら波形の頂点の間隔が広がっており、周波数が変化していることがわかる。

$s = 20\text{mm}$ に示した周期的な波形の出現は、せん断層の自励振動の出現を意味しており、著者等がすでに報告した噴流—リング系^{3,4)}での現象と定性的に一致している。すなわち、この自励振動は図5に示される一つのフィードバックループの形成により出現、維持されている。ノズルから噴出した薄いせん断層はもともと極めて不安定なかく乱を有しており、それは下流方向に向かって成長し大きな渦構造を持ってくる。このかく乱は初期条件、境界条件により発生しやすい波数領域 (preferred mode) を有するものの、拘束のない自由噴流ではスペクトル分布上卓越したエネルギーを有する特定波数成分を持たない。ところが噴流中に金網が存在する場合には以下のようにして特定波数成分が卓越してくる。流れの中の不安定波の成長は大きな渦構造となって金網に衝突する。このとき図示したように衝突に伴い金網から圧力パルス (音) が発生する。これは上流へ音速 (c m/s) で伝播しノズル出口端近辺に圧力変動として作用し、不安定波の初期段階に影響を与える。影響を受けた不安定波は再び渦を形成し金網に衝突する。このようなフィードバックループの形成により、特定の周波数成分を持つかく乱のみが成長し自励振動が生じてくる。この自励振動が維持されるためのエネルギーは、外部的な供給はなく平均流から定常的に供給されたものといえる。

この種の現象の代表的なものとしてエッジ音⁵⁻⁷⁾、リング音が上げられるが、流れの形態から考察すると図6(a), (b), (c)に示した概念の相違がある。図6(a)は二次元のスリット状の噴流がくさび状物体に衝突する系で、エッジ音と呼ばれる。不安定な揺らぎを持った噴流はくさび状の物体に衝突し、くさびの上下に交番に渦を形成する。このため図の2つのパターンで示す上下方向の振動がくさびの前縁を境にして起こる。図6(b)は円形の噴流がリング状の物体に衝突する系で、リング音と呼ばれる。円形の薄いせん断層は下流方向に向かって成長し渦輪を形成する。渦と渦の中間領域が衝突するときはそこで圧力が高く、外側に向かった流れが起こる。逆に渦の中心近辺がリング前縁に衝突するときは、そこで圧力が低いいためリング内に向かった流れが生じる。このようにリング前縁を境にして内、外方向の流れが交番に生じる。図6(c)は金網の場合である。流れの形態に対

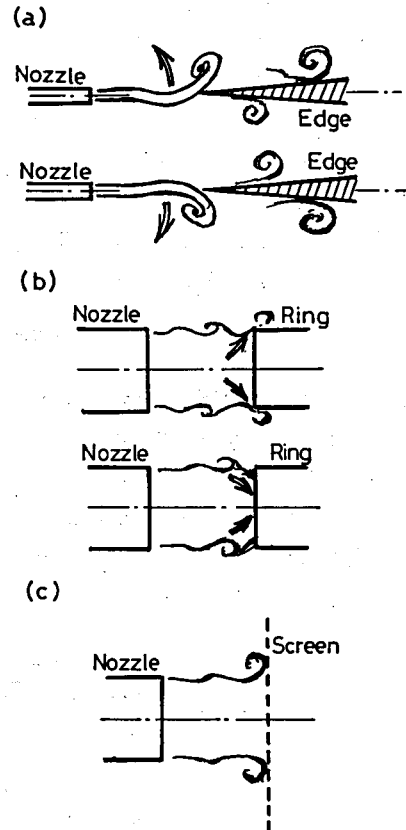


図6 フィードバックにおける流動パターン

し幾何学的な形状として明確に上下方向, あるいは内, 外とに流れを振り分ける物体(幾何学的形状)は存在せず, この点で前二者と異なっており, 今後フィードバックの数学的モデルを考える上で考慮が必要と思える。

なおここで, 噴流中に内在する小さな「かく乱」そのものが「不安定波」であり, それ成長すると「渦」構造となることから, 特に三者を区別せず以後同意語として扱う。

3-2 自励音と速度変動の振動モード

自励振動の発生時にはせん断層での速度変動は周期的に変動する。このとき金網へのせん断層の衝突により音(圧力パルス)が発生し, この時の波形例を図7に示す。音圧波形は対象以外の音(例えば, 計測器の電源の音など)が重畳してくるため全体に大きく揺らいているが, 基本的には周期的に変動していることがわかる。以後このような自励振動による周期的な波形を有する音を自励音と呼ぶ。

次に速度, 音圧変動の最大のエネルギーを有する振動成分を最大卓越周波数と呼び, 金網位置に対する変化を図8に示す。横軸には s の直径による無次元量と s の値を併記した。図中○, ◇印は音圧変動に対し, かつ○は下流方向, ◇は上流方向へ金網を移動した場合を示している。▲, ▼印は速度変動で, 同様に▲は下流方向, ▼は上流方向へ移動した場合を示している。なお上流方向に関しては下流方向と値が異なる場合のみ示してある。

金網位置がノズル出口に近い場合には不安定波の成長も小さく自励振動は発生しない。金網が点 a_1 とある程度下流に位置すると不安定波の成長と同時に自励振動が発生する。このときかく乱の周波数と自励音の周波数は同一の値を取り, s の増大につれ周波数は降下する。両者の値が同一になることは, 図5, 図6(c)に示す渦の形成とその金網への衝突の関係から次のように理解できる。一定周期を持った渦が金網に衝突すると, 金網には交番に周期的な圧力変動が加わるため, 位相は別にしてそれに同期した音波が発生する。すなわち渦の衝突周期に一致した周期の音が発生する。次に点 a_1 から点 b_1 までくると流れが不安定となり, より安定した状態である a_2 に跳躍する。以下周波数の降下と跳躍が繰り返され, 全体にこの歯状の振動モードが得られる。これらの

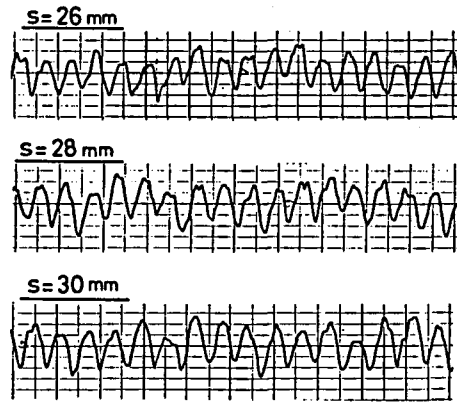


図7 音圧変動の波形例

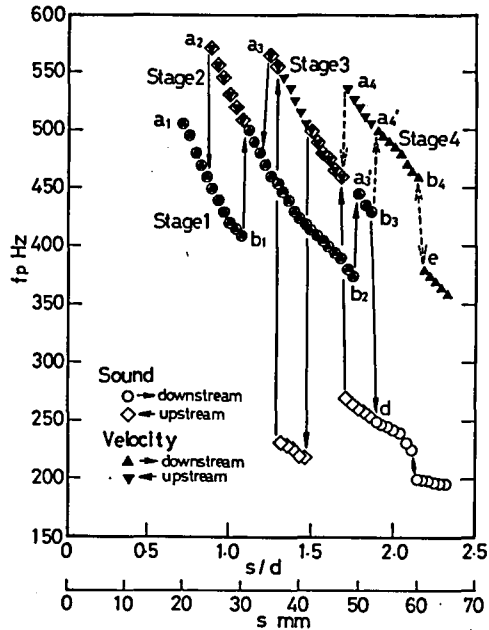


図8 最大卓越周波数の変化 (音圧, 速度変動)

振動モードを上流側よりそれぞれステージ1, 2, 3, 4と呼ぶことにする。

この中で特に下流方向での a_3 — b_3 のステージ3領域は極めて小さいが、これはステージ2が安定した領域で相対的に下流域まで存在したためと考えられる。またステージ3から4の跳躍では、速度は a_4 に跳躍するが、音圧は d に跳躍し、両者の跳躍先が異なるがこれに関しては後で詳述する。さらにステージ4の b_4 からの跳躍は点 e とステージ3の延長線上に位置してくるが、これに関しても後で述べる。また測定は s をさらに増大させると、スペクトルの時間的ゆらぎも増し、かつ最大卓越成分が他の卓越成分に比較し同レベルとなり、全体に広帯域成分になってくることから s をこの程度に留めた。

3-3 自励音と速度変動の波形、スペクトルの比較

ここでは代表的な音圧 (p)、速度 (u) の波形およびスペクトルの比較を示す。図9は $s = 24\text{mm}$ のステージ1の初期段階である。音圧波形の周期は一定しているが、SN比が悪いため外乱の影響を受け全体に揺らいでいる。スペクトル分布では f_p の他に $2f_p$ 成分が音圧、速度ともに現れている。また音圧スペクトル分布では電源周波数の2次に相当する120Hzが現れるとともに、SN比の関係から対象音以外の各種のスペクトル成分が含まれている。図10は $s = 40\text{mm}$ であり、ステージ2の真中を過ぎた位置である。速度波形は正弦波状であるが、音圧波形は正弦波状からはかなり歪んでいる。速度スペクトル分布では f_p に対して $0.5f_p$, $1.5f_p$ が出現するのが特徴的で、小さな $2f_p$ 成分を除くと高次成分は出現していない。これに対し音圧スペクトル分布では $0.5f_p$, $1.5f_p$ が出現しているが、相対的に現れにくく、 f_p の完全な調波成分である $2f_p$, $3f_p$, $4f_p$ が卓越した成分として出現する。この点では両者のスペクトルは完全に相似でない部分も存在する。

図11の $s = 48\text{mm}$ はステージ3の a_3 から b_3 の間に位置し、ステージ4に跳躍する前の極めて不安定な状態にある。速度の波形も正弦波状とはかなり異なり振幅が変動し、対応して音圧の振幅変化も大きい。ところで音圧、速度の両波形は、ホットワイヤとマイクロホンで同時計測した結果であり直接比較ができる。両者の波形の中で特に振幅の大きいところを取ると、音圧波形上の点A, B, C, Dは速度波形の点A, B, C, Dと完全に対応づけられ、両者の相似性がわかる。ただし記録計の関係で両者の位相差には若干の違いがある。次に速度スペクトルに関しては、 f_p , $2f_p$ が出現し、他に f_1 , f_2 , f_3 , f_4 の卓越した成分が存在するが、これら f_1 , f_2 などは f_p に対し、 $0.5f_p$, $1.5f_p$ といった関係にはない。音圧スペクトルでは f_p に対し $2f_p$, $3f_p$, ……の多くの高次成分が存在している。また同時に速度のスペクトルに見られる f_1 , f_2 , f_3 , f_4 成分は、対応して音圧のスペクトルにも出現している。すなわち音圧スペクトルは速度スペクトルと比べるとより高次の調和成分が出現すること、また両者のスペクトルの主な成分は完全に一致することの2つの特徴がある。

まず前者について考察する。速度はノズル出口よりやや下流の $\eta = 12\text{mm}$ ($z = 12\text{mm}$ でもある) にセンサを置いて観測しており、そこで存在するかく乱の特性を分析している。ところが音圧は $z = s$ に置かれた金網の中心から上流45°の位置にマイクを置いて分析している。マイクには噴流が金網に衝突し、その点から放射される音が主に観測される。従って $s = 48\text{mm}$ のこの例では、速度は $z = 12\text{mm}$ での情報であり、音圧は $z = 48\text{mm}$ で噴流が金網に衝突して放射された音の情報となる。このため不安定なかく乱は $z = 12\text{mm}$ と 48mm の間で波数間の非線形干渉が起り、下流では上流に対しより多くの卓越成分が出現し、それが放射音にも反映

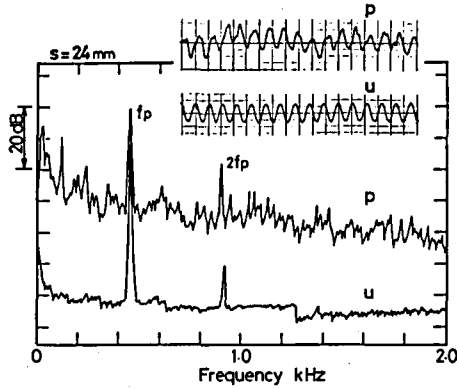


図9 $s = 24\text{mm}$ における波形およびスペクトル

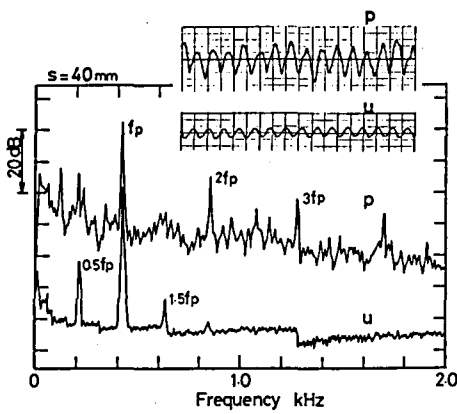


図10 $s = 40\text{mm}$ における波形およびスペクトル

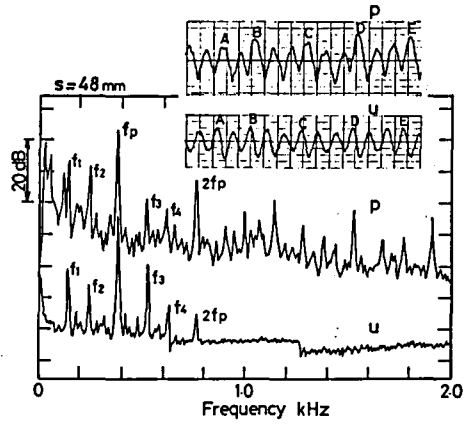


図11 $s = 48\text{mm}$ における波形およびスペクトル

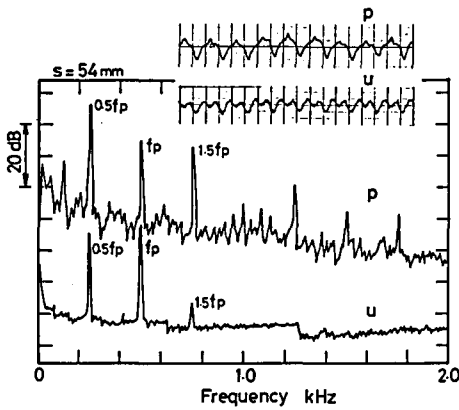


図12 $s = 54\text{mm}$ における波形およびスペクトル

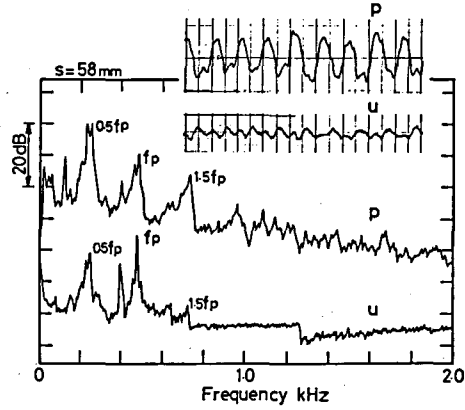


図13 $s = 58\text{mm}$ における波形およびスペクトル

してくるためと考えられる。後者は次のように考察できる。一般に速度 u は平均部分 \bar{u} と変動部分 u' の和として次式で示される。

$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

特に変動成分 u' に着目し、かつスペクトル分布の特徴から卓越する離散成分の波数を $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ とすると、 u' は $A_i \sin(\omega_i t)$ を振幅、時間として概略次式で表せる。

$$u' = \sum A_i \sin(\omega_i t) \quad (3)$$

これに対し一つの流線上でのエネルギー保存（ベルヌーイの式）を考慮すれば、対応した圧力変動 p は次の形式になる。ただし B_i は振幅を示す。

$$p = \sum B_i \sin(\omega_i t) \quad (4)$$

このような圧力変動が金網に作用するとき、当然 ω_i に対応した成分が音として放射され同一成分を持ったスペクトルが出現すると考えられる。ただしより厳密には音に変換される際に、波数間の相互作用、位相的变化が加わると推測できる。

次に図12は $s = 54\text{mm}$ で、ステージ4に位置する。速度波形は正弦波状とは異なるが極めて一定周期、振幅で変動している。対応して音圧も周期的になっている。速度のスペクトルでは、 f_p の他に大きな成分を持つ $0.5f_p$ および小さな $1.5f_p$ が存在する。これに対し音圧スペクトルでは、さらに $2f_p, 2.5f_p, 3f_p, 3.5f_p$ とより高い周波数まで出現している。中でも音圧スペクトルでは f_p よりも $0.5f_p$ 成分の方が大きくなっているのが特徴である。このため図8で示した点 b_3 からの跳躍先が速度では点 a_4 、音圧では点 d と異なってくる。この主たる原因は前述と同様に測定位置の違いが、スペクトルの大きさの違いになったと推考できる。特に s が大きいと両者の相違は大きくなると予測できるものの、スペクトルの分布の形は両者とも類似しており、本質的な点では差異はない。また、音圧スペクトルでは $0.5f_p$ を改めて主成分とみなすと、 $f_p, 1.5f_p$ は完全にその主成分の調和成分になってくる。

図13は $s = 58\text{mm}$ のステージ4の後期の場合である。速度の波形では周期性がやや観測しにくくなっているが、音圧波形では周期性がまだ強い。スペクトルでは今までの例とはかなり異なり、小さな卓越成分が急に増えておりまた卓越成分周りのバンド幅も広がっており、急に流れのランダム化が進行したことを示している。また、ここでも音圧スペクトルは、速度のスペクトルを極めてよく反映した形になっていることが確認できる。さらに $s = 54\text{mm}$ と同様に、速度では f_p が最大成分であるのに対し、音圧では $0.5f_p$ が最大成分となりこの変化は図8に対応する。この場合も両者の測定位置が異なることに主な原因があると考えられる。

4. ま と め

一定流速を持つ円形噴流中に金網を挿入し、それを流れ方向に移動したとき生じる自励振動について検討した。特にこのとき生じる自励音とせん断層の流体的振動とを比較し、次のことが明らかになった。

- (1) 金網の挿入によりせん断層には自励振動が発生し、これはノズル出口近くでの微小かく乱の存在、その下流方向への成長、金網への衝突による音の発生、その上流への伝播、微小かく乱への影響のフィードバックループの形成により発生する。そして流れの形態ではエッジ音、リング音と異なり、振動の運動を振り分けるような幾何学的形状は存在していない。

- (2) 発生する振動モードはこの歯状に変化し、基本的には速度、音圧ともその値は完全に一致している。ただし、最大卓越成分のみに着目すると下流域（ステージ4）では必ずしも一致せず、この主な原因はそれぞれの測定位置の違いに原因すると考えられる。
- (3) 速度スペクトルの形は音圧スペクトルによく反映され、両者は相似な関係にあり、主な卓越成分は両者とも出現しその値は一致している。このことはそれぞれの波形にも反映されている。この相似性は流れの変動を波数空間で考えるとき、音圧のスペクトル成分は速度場での圧力変動と対応づけられることから予測ができる。ただし、下流域でのスペクトルでは個々の成分の大小関係には不一致が見られるが、測定位置の違いなどが主な原因と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 藤森良夫：車両空力音とその制御，音響学会誌45巻1号（1989），pp62-68
- 2) 高橋稔，栗林卓，榎木隆氏，浜田春夫他：管路における空調ダクト騒音の音響特性，音響学会講演論文集（1985,9）pp335-336
- 3) 倉澤英夫，小幡輝夫，平田賢，笠木伸英：軸対称せん断層の衝突に伴う自励振動現象，機械学会論文集（B）53巻488号（1987）pp.1254-1261
- 4) 小幡輝夫，倉澤英夫，羽田喜昭：リングに衝突する軸対称噴流せん断層の自励振動，機械学会論文集（B）61巻583号（1995）pp.890-896
- 5) Powell ,A: On the edge tone, J.Acoust. Soc. Am. (1961) vol.33, no.4, pp395-405
- 6) Ziada,S and Rockwell,D: Oscillations of an unstable mixing layer impinging upon an edge, J. Fluid. Mech. (1982) vol.124, pp307-334
- 7) 社河内敏彦，伊藤忠哉，末松良一他：噴流・エッジ系における噴流の発振現象（第1報），機械学会論文集（B）51巻469号（1985）pp2987-2907