

空力音インテンシティの近傍場での測定の問題点

坂尾 富士彦 (近畿大学工学部・東広島)

On determining acoustic intensity in the near-field of aerodynamic sound sources

Fujihiko SAKAO

School of Engineering, Kinki University, Takaya, Higashihiroshima 739-2116

ABSTRACT

Measurement of the acoustic intensity (AI) flux is made in the neighborhood of a circular cylinder set normal into a circular jet flow. Results for AI flux show acceptable features only when the sensors are well out of the acoustic near-field of the sound source, that is, the cylinder. Although it can be shown analytically that AI measurement with two microphones should work well even in the near-field, measured results there show totally unacceptable features. The inevitable conclusion is that microphones inside the near-field scatter the near-field into real sound wave, and then measure it.

Keywords : Acoustic intensity, Near field, Aerodynamic sound

1. はじめに

ヒトの気道内の異常を呼吸音の聴診で診断する方法の基礎研究 [1]に関連して、音の原因となる機構を確定する一方法として音響パワーの流れ (Acoustic Intensity) の測定を行なった際、不可解に思える結果に遭遇した [2] [3]。例えば音波の強い発生源が流路外の何も無い場所にある、しかもそこから或る特定方向にのみ強い音波が出ているかのような測定結果が得られた。誤差の原因は種々あり得るが、発生する音が極めて弱い事から、この測定が実は音源の近傍場内と推定される場所で行なわれている点が最も有力な原因と疑われる。今回はそれに関する検討及び実験の結果を示す。

2. 近傍場内の音響パワー流れ測定

2本のマイクロホンを用い、信号のクロススペクトルから音響パワー流れ密度を求める方法はよく知られている [4]。マイクロホン1、2の音圧 p_1 , p_2 から $\partial u / \partial t = -(1/\rho) \partial p / \partial x = -(1/\rho)(p_2 - p_1)/(x_2 - x_1)$ によって速度 u が求められる。但し x は1から2へ測った距離である。 p に $(p_1 + p_2)/2$ を代用すると $\langle pu \rangle$ は結局 $-(1/\rho) \langle p_2 \int p_1 dt \rangle - (1/\rho) \langle p_1 \int p_2 dt \rangle$ となる。

遠方場でも2本のマイクロホンの間隔が有限である為に誤差は生じるが、量的な誤差である。近傍場内では間隔は音源からの距離に比べて大きくなりさえし得る。しかし、音源が2重極の場合について調べてみると、生じる誤差はやはり量的なものに限られ、真のパワー流れ以外を測定はしない事が示される。即ち、2重極の作る場を記述する多くの項の中で、分母が距離 r について2次以上になる項は全部を合算すれば互いに消去し合って消滅し、結局音

響パワー流れを示す項としては $\left\langle \frac{q_i}{r_i} \int \frac{q_j}{r_j} dt \right\rangle$ ($i \neq j$)

のみが残る事が分る。近傍場内でそれを測定するに際して定量的な誤差は生じるであろうが、存在しないパワー流れを検出する可能性は否定される訳である。従って、先に述べた不可解な測定結果の原因は、それ以外でなければならない。最も有力なのは、音源の近傍場に異物が持ち込まれると音波が発生する、「近傍場の散乱」として知られる現象である。即ち測定の為に持ち込んだマイクロホンが異物として音波を発生させ、自ら発生させた音波を(正しく)測定すると考えられる。呼吸流の実験では発生する音が小さいので、マイクロホンを音源から十分離す事

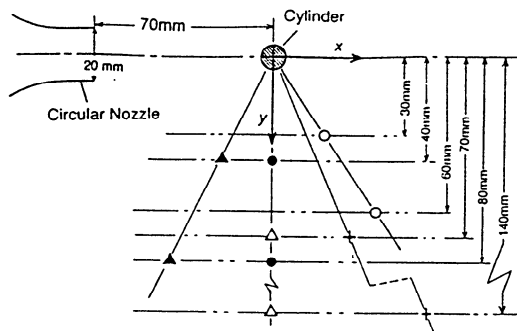


図1. 実験装置の概要

が困難なので、この事が重要になる可能性がある。

3. 実験方法

図1に実験装置の概要を示す。円形断面で出口での径 20mm、25 m/s の噴流に対し、出口から 70 mm の場所に径 10 mm の円柱を垂直に置く。気流は予め沈静化しており、円柱が無ければ音は殆ど聞こえないが、円柱を置くと大きい音が聞こえる。公称径 6 mm のコンデンサーマイクロホン2本を中心間隔 10 mm で組み合わせ、流れの外の種々の場所で音圧を測定する。信号は計算機で処理してクロスパワースペクトルの虚数部を求め、周波数で割って音響パワー流れのスペクトルを計算する。スペクトルの安定度を充分にする為に周波数分解能は最低限に押さえた。

2本のマイクロホンは図1の縦(y)と横(x)の方向に並べて各方向の成分を測定した。測定の場所は図1に数例を示すように、軸に平行(y=一定)な数本の線上の各数カ所である。特に、音源である円柱から放射状に引いた直線上の遠近2箇所での測定を重視した。図中では一組は同じ記号で示してある。

下流では流れが外に広がるので、マイクロホンが流れ自体の中に入る場合があり、yの小さい場所での測定は意味が無くなる。

4. 実験結果

図2に、このようにして測定した音響パワー流れの分布図の一例を示す。測定は $y=30\text{mm}$ (図1参照)の線上で行った。横の位置は図1の横方向位置(x)を表し、1ピッチが 10mm であるが、縦位置は周波数である。A から L迄、ほぼ対数的な帯域幅で纏められているが、各帯域の詳細は表1を参照されたい。

音源の円柱の位置は、横は図の上部に示す場所、縦は各行の上方 ($y/10\text{mm}$) ピッチ、今の場合3ピッ

チの場所である。各点から引いた線の方向と長さが、音響パワーながれの方向と強さを示すが、強さは広い範囲に変化するから、スケールは周波数により適宜変えてある。

音波の大部分は見掛け上は円柱の場所で発生するから、本来なら、図中の全ての線は各行毎の音源位置から引いた直線に沿う方向に進む筈である。しかし、低い周波数でのデータは、それとは全く違う方向に向いている。むしろ外部から来て音源に向かって進むように見えるのも珍しくはない。そのような異常さは、高い周波数では減少する。

図中、周波数帯域の所に三角印が記してあるが、後述の近傍場の目安で、これに就いては図3をも見た後に詳しく説明する。

図3と4は、音源(円柱)から一直線上で、距離が1対2の2点(図1参照)で測定されたスペクトルの比較の例を示す。両図共に、(a)は $y=30\text{mm}$ と 60mm 、(b)は $y=40\text{mm}$ と 80mm 、(c)は $y=70\text{mm}$ と 140mm の2点での比である。いずれも図示したのはy-方向成分である。測定点は図3では円柱から真横(図1で、 $x=0$)の方向である。一方、図4で

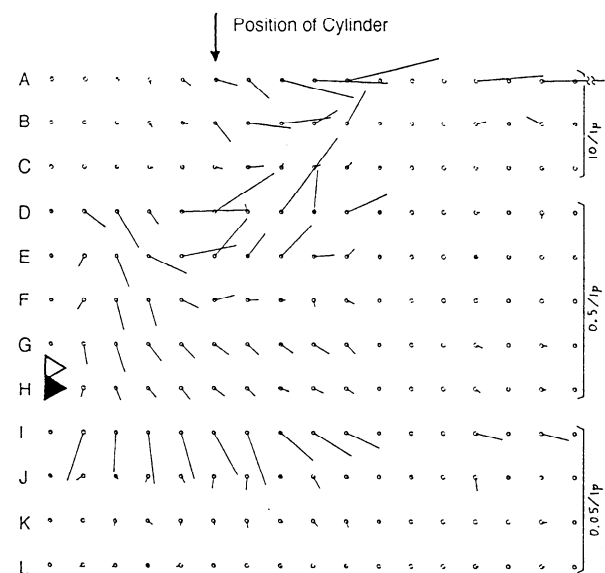


図2. 測定された音響パワー流れの分布例。矢印の方向と長さは、音響パワー流れの方向と大きさを示す。それらは音響パワー流れの縦(y)と横(x)両方向の成分から求めた。

測定位置は $y=30\text{mm}$ (図1参照)の線上。音源である円柱の横位置は図上部に示してある。縦位置は各行の上方に3ピッチだけ離れた場所になる。図右端に記すスケールは1ピッチ長さ当たりの強さ(但し任意単位)を示す。

は斜め下流方向で、(a) は $(x, y)=(20\text{mm}, 30\text{mm})$ 、と $(40\text{mm}, 60\text{mm})$ 、(b) は $(x, y)=(20\text{mm}, 40\text{mm})$ 、と $(40\text{mm}, 80\text{mm})$ 、(c) は $(x, y)=(40\text{mm}, 70\text{mm})$ 、と $(80\text{mm}, 140\text{mm})$ での測定結果の比較である。

音源からの距離が1対2であり、音波の伝播は3次元的に近いから、各スペクトル成分の比は少なく共近似的には4対1 (図中に水平な直線で示される) でなければならないのに、実際には、特に低い周波数では全く違い、甚だしく大きい。これは近傍場内に異物であるマイクロホンが入る事によって近傍場を散乱して真の音波を発生させ、それを測っていると考えるなければ説明できない。

近傍場の及ぶ範囲の目安は、音源からの距離で云うと波長の 2π 分の1である。図の横軸に付した白抜き三角は、波長の 2π 分の1が円柱と観測点の中心間距離に等しくなる周波数、黒塗り三角は円柱表面と近い側のマイクロホンの距離に等しくなる周波数を示す。スペクトルの比が4と甚だしく離れた異様な値になるのはマイクロホンが近傍場の中にある場合と云う事が見て取れる。ここに示さない多くの実験結果でも同様である。

なお、噴流中心軸からの距離が最も小さい (a) では、図3よりも図4の方が一層予期と異なる結果を示しているようであるが、これは噴流中心線に近い為、下流ではマイクロホンが流れの場に近付き過ぎる結果ではないかと推察される。

図5は同じく音源からの一直線上にある2点での、音響パワー流れの方向測定結果を比較したものである。音波の進行方向は、音響パワー流れの縦(y)と横(x)両方向の成分から求めた。重点は方向に置いたので、図中で線の長さは強さの対数に比例させた。

図5 (a) は $y=30\text{mm}$ と 60mm 、(b) は $y=40\text{mm}$ と 80mm 、(c) は $y=70\text{mm}$ と 140mm (図1参照)、いずれも円柱から一直線上の2点での結果であり、音源である円柱から出た音波はその直線に沿って伝播するべきである。図で実線は近い方の測定点での結果である。図で横方向は測定位

A	100 -117.5	G	612.5-887.5
B	117.5-162.5	H	887.5-1262.5
C	162.5-222.5	I	1262.5-1762.5
D	222.5-312.5	J	1762.5-2512.5
E	312.5-437.5	K	2512.5-3512.5
F	437.5-612.5	L	3512.5-5012.5

表1 各帯域の周波数範囲 (Hz)

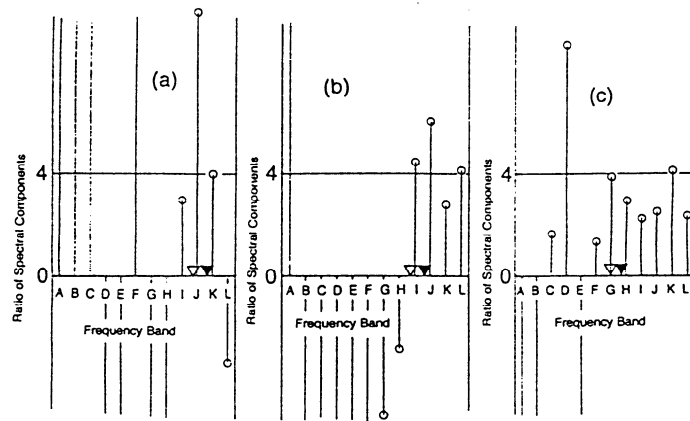


図3. 音源から一直線上の2点でのスペクトルの比較。距離は1対2。音源から真横の方向 (図1参照: $x=0$)。

(a) $y=30\text{mm}$ と 60mm , (b) $y=40\text{mm}$ と 80mm , (c) $y=70\text{mm}$ と 140mm 。図中の白抜き三角は、近傍場の範囲の目安である波長の 2π 分の1が円柱と観測点の中心間距離に等しくなる周波数、黒塗り三角は円柱表面と近いマイクロホンの距離がそれに等しい周波数。図中、縦線のみで円が無いのは、スケールオーバーして図の範囲外にある事を示す。

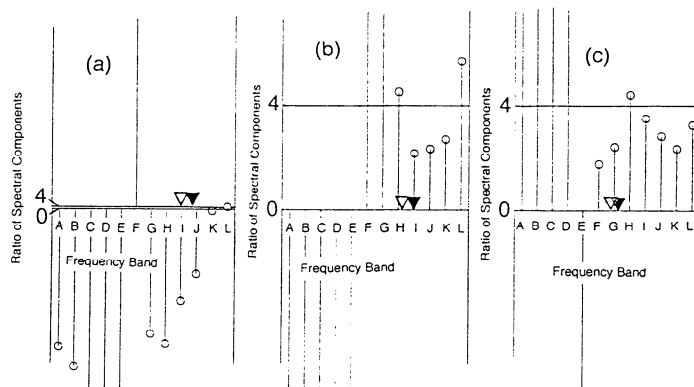


図4. 音源から一直線上の2点でのスペクトルの比較。距離は1対2。音源からの方向は斜め下流 (図1参照)。

(a) $y=30\text{mm}, x=20\text{mm}$ と $60\text{mm}, 40\text{mm}$ (b) $y=40\text{mm}, x=20\text{mm}$ と $80\text{mm}, 40\text{mm}$ (c) $y=70\text{mm}, x=40\text{mm}$ と $140\text{mm}, 80\text{mm}$ 。図中の三角印の意味は図3と同じであるが、距離としては円柱から近い側の測定位置を斜めに測っている。

置に対応するが、縦は周波数に対応する。横方向のピッチは(近い側では) 10 mm である。音源である円柱の横位置は図上部に示してある。縦位置は各行の上方 ($y/10\text{mm}$) ピッチだけ離れた場所になる。遠い側の測定点では x, y とも2倍であるから、図中には $1/2$ に縮小した場所に表示してある。例えば (a) で $y=60\text{mm}, x=20\text{mm}$ でのデータ(点線)は、 $y=30\text{mm}, x=10\text{mm}$ でのデータ(実線)と同じ場所に重ねて表示してある。

従って、図5で同じ横位置のデータは全て同じ方向を示すべきである。また、同じ位置に描かれた遠近のデータは同一直線上のそれであり同じ方向を示す筈で、実線と点線は重なるべきである。しかし低い周波数では実線と点線の一致はおろか、方向自体が外部から音源の方に向かう例もある等、全く受け入れ難い特徴を示している。一方、高い周波数では予想に近い振舞いをする傾向が見られる。図の縦方向は周波数に対応するので、図2~4と同じく、測定位置が近傍場の範囲の目安と同じになる周波数を三角で示す。やはり、近傍場の外で測る事になる周波数では、概ねもっともらしい結果を示すように見える。

5. 結論

音響パワー流れを正しく測定するには、測定用のマイクロホン等を、音源の近傍場の中に入れないよう注意する必要がある。若し中に入ると、その影響によって近傍場が散乱されて真の音波が発生し、その音波(測定を行わない場合には存在しなかった)のパワーを測定する結果になる。

6. 文献

- [1] F.Sakao: Modeling aerodynamic sound in the airways of a human body: A possible diagnostic tool. SADHANA (Proc. Eng. Sci., Indian Academy, Vol.18, pp.369-385 1993
- [2] 坂尾、佐藤: 管内障害物の音と流れ...音響パワーの流れ測定による音源探査。ながれ 17 巻別冊 (日本流体力学会年会'97=第30回乱流シンポジウム) pp.37-38 (1998)
- [3] 坂尾、佐藤: 管内障害物の音と流れ II 音響パワーの流れ測定による音源探査の試み。航空技術研究所特別資料 SP-40. pp.177-80 (1998) 他
- [4] F. J. Fahy: Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals J. Acoust. Soc. Am., Vol. 62, pp.1057-1059 1972

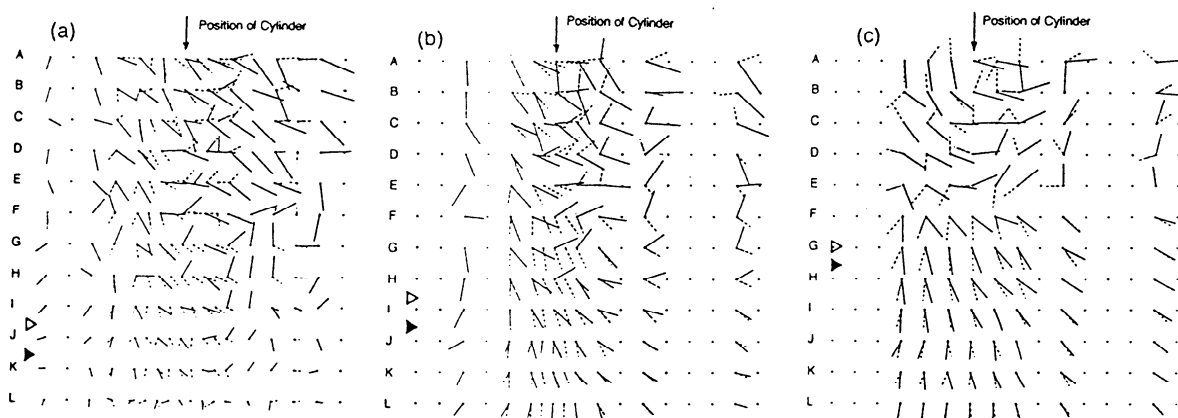


図5. 音響パワー流れ密度の方向分布。(a) $y=30\text{mm}$ と 60mm 、(b) $y=40\text{mm}$ と 80mm 、(c) $y=70\text{mm}$ と 140mm (図1参照) で円柱から一直線上の2点での結果を重ねる。実線は近い方の測定点、点線は遠い方での結果。音波が音源と見做される円柱の位置から出て直進するなら、実線と点線は重なる筈。