風洞の主流近傍に設置したマイクロホンアレイによる 音源位置同定精度の改善*

山崎展博^{*1}, 長倉 清^{*1}, 宇田東樹^{*1}

Improvement of the Source Localization Accuracy by Microphone Array Adjacent to Main Flow of Wind Tunnel

Nobuhiro YAMAZAKI^{*2}, Kiyoshi NAGAKURA and Toki UDA

^{*2} Environmental Engineering Division, Railway Technical Research Institute,
2-8-38 Hikaricho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

In this study, we proposed a method to improve an accuracy of source localization in a wind tunnel tests by using microphone array. Based on an acoustic path model in passing through the free shear layer, the microphone array is installed adjacent to the main flow to avoid the refraction and dissipation in the free shear layer. The flow-induced noise caused by the interference with the main flow is also effectively reduced by calculating a cross spectrum between the respective outputs of 2 pairs of 2-D microphone array. The effects of these techniques are varified by the acoustic performance test with standard source device under wind condition. As a result, firstly, it was found out that the calculation method is effective even at the uniform wind velocity of 300 km/h and enables the acoustic measurement adjacent to the main flow. Secondly, accurate noise source localization can be achieved by installing the microphone array along the line extended from the side wall of the wind tunnel nozzle adjacent to the main flow. The location error by this method is improved less than 10 mm compared with that measured outside of the free shear layer.

Key Words: Aerodynamic Noise, Vortex, Shear Flow, Microphone Array, Wind Tunnel Test

1. 緒 言

新幹線の高速化が進む中で、空力騒音は依然として大きな環境問題を引き起こしており、その低減対策が強く望まれている。現状の把握や対策を施すための指針を得るため、反射板式收音装置、マイクロホンアレイに代表される指向性收音装置を用いて高速車両まわりの騒音発生源を特定する試みが広く行われている^{(1)~(3)}。その一方で、低減手法を確立するまでの行程を短縮化することはコスト削減の点から重要であることから、製品開発の初期段階から風洞試験を活用し、主たる音源分布の存在箇所を把握するアプローチも有用である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

長倉⁽⁶⁾は風洞試験において円体形反射板式收音装置を用いて新幹線車両模型まわりの音圧レベル分布を測定し、高速の気流にさらされる集電系騒音や台車部が主たる騒音源であると指摘している。これらの知見をもとに車両から発生する騒音の寄与度が部位ごとに推定され、特に顕著な空力騒音が発生する集電系

騒音については、構成機器の形状を簡素化したり流線形化するなどの対策により低騒音化が図られている⁽⁷⁾。その一方で、複雑な形状を有するパンタグラフの舟体近傍⁽⁸⁾や新幹線車両部⁽⁹⁾等の狭小な領域から発生する騒音の寄与が相対的に増大する中で、收音装置に要求される指向性や音源位置同定精度はますます高まっている。

一般に收音装置のサイズが決まっている場合には、装置を測定対象物に近づけるほど鋭い指向特性が得られる。しかし従来の收音装置に見られるように、風洞の開放形測定部で用いられる場合には、主流がマイクロホン受圧部と干渉することによりS-Nが著しく悪化する問題⁽¹⁰⁾を避けるため、主流の外部に設置した状態で測定が行われる。このため、主流内部に設置された供試体から発生する音波が主流外部のマイクロホンに到達する過程において非定常に変動する自由せん断層の影響を受け、音波が散乱しコヒーレンス性が低下する問題が生じる⁽¹¹⁾。また自由せん断層の拡大領域が一樣流速および位置により異なるため、音波の移流量の予測は一般的に困難である⁽⁴⁾。

そこで本研究では、主流の影響により顕著に増大する雑音成分を効率的に除去するため、2組のらせん配列形マイクロホンアレイの出力についてクロススペク

* 原稿受付 2007年12月7日。

^{*1} 正員, (財)鉄道総合技術研究所(〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)。

E-mail: nobuhiro@rttri.or.jp

トルを算出する手法(クロススペクトル法)を提案したうえで、風洞の開放形測定部における主流近傍にマイクロホンアレイを設置することで音源位置同定精度の改善を試みた。これらの点について、自由せん断層内の流速分布測定および基準音源を用いた音響試験を行い、クロススペクトル法の有効性ならびに主流近傍に設置した場合の装置の音響特性について検証した。

2. おもな記号・単位

- M : 一様流速のマッハ数
 α, β : 音源位置からの音波放射角 rad
 γ : 音波の屈折角 rad
 Δx : 音波の移流距離 mm
 U_0 : 一様流速 km/h
 Y_a : ノズル中心とアレイ装置間距離 mm
 P_1, P_2 : アレイ 1, アレイ 2 の指向性出力パワースペクトル
 Cr : アレイ 1 とアレイ 2 間の指向性クロススペクトル
 u, v : X 軸方向, Y 軸方向の平均流速 km/h
 T_u, T_v : X 軸方向, Y 軸方向の乱れ度 %
 N_{ave} : 平均化回数
 c : 音速 m/s

3. 主流近傍設置形マイクロホンアレイの設計

3.1 開放形測定部における音波の伝ば経路モデル

主流内部に存在する音源から放射された音波が自由せん断層を通過して主流外部に到達するまでの経路モデルについて考察する。Amiet⁽¹²⁾は主流まわりの自由せん断層が無限に薄く、かつ主流方向に平行であると仮定した音波の伝ば経路モデルを提案した(図 1)。ここで、音源位置 A から放射された音波は主流により下流側に流されながら自由せん断層境界上の地点 C において屈折した後に、主流外部に設置されているマイクロホン位置 D に到達する。このとき、図 1 に示す幾何学的関係から、角度パラメータ α, β, γ は次式により関係付けられる。

$$(\cos \alpha + M) / \sin \alpha = 1 / \tan \beta \quad \cdots \cdots (1)$$

$$1 / \cos \alpha + M = 1 / \cos \gamma \quad \cdots \cdots (2)$$

このうち式(2)は自由せん断層を挟んで音速が変化する現象を表している。マイクロホンアレイによる信号処理においては、複数のマイクロホンで検出される音圧波形の位相を補正することで指向性が得られるため、マイクロホンアレイの測定精度が音波の行路長の予測精度に大きく依存する。主流外部に設置されたマイクロホンアレイによる信号処理では、自由せん断層

Fig. 1 Geometry of sound path model at the open test section of wind tunnel

の影響を式(1), (2)で示した伝ば経路モデルに基づいて補正している。しかしこのモデルでは自由せん断層の領域が拡大する現象が考慮されていない。このため、モデルでは自由せん断層中を通過する時間が実際よりも短くなることから、下流方向への移流効果が過小評価される問題が生じる。

これに対しマイクロホンアレイを主流近傍に設置することで、自由せん断層領域の拡大に起因する音源位置同定精度の誤差を改善することができると考えられる。この場合、図 1 で示される γ の影響を考慮せずに済むために式が簡素化される。

3.2 クロススペクトル法による雑音成分低減法

Phased Array に基づくマイクロホンアレイの信号処理において、解析平面上の位置 x に照準点を設定した場合のマイクロホンアレイによる指向性出力 $Z(\omega)$ は、周波数領域において次式で表される⁽¹³⁾。

$$Z(x, \omega) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Y_m(\omega) \exp(j\omega r_m / c) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 j は虚数単位、 $Y_m(\omega)$ は m 番めのマイクロホンアレイで検出される音圧波形のフーリエ変換を表す。また r_m は m 番めのマイクロホンから照準点までの距離、 c は音速を表す。設定した照準点が実際の音源位置と一致する場合には、式(3)内の各音圧波形の位相がそろうため、高い出力が得られる。この場合、平均化処理を施したマイクロホンアレイによる指向性出力音圧レベルは次式で表される。

$$P(x, \omega) = 10 \log[E[(Z^*(x)Z(x))]] \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $*$ は複素共役、 $E[\cdot]$ はアンサンブル平均を表す。以降 ω の表記を省略する。この場合の指向性出力 Z について、信号成分 S および雑音成分 N による寄与に分けて考えると、式(4)中の各項は次式に示すパワースペクトル項から構成される。

$$P(x, \omega) = 10 \log[E[(S^*(x) + N^*(x))(S(x) + N(x))]] = 10 \log[E[|S(x)|^2] + E[|N(x)|^2]] \quad \cdots \cdots (5)$$

ただし、

(a) Whole view

(b) Plane view

Fig. 2 Experimental setup

$$Z(x) = S(x) + N(x) \cdots \cdots (6)$$

であり、信号成分 S と雑音成分 N のクロススペクトル項は零とした。

全マイクロホンについて一様に位相補正を施す処理法(加算法: Summation Method)では、式(5)で示す項 $E[|N(x)|^2]$ が雑音自身のパワースペクトルを意味し、雑音成分が信号成分に対して大きい場合には $S-N$ の劣化につながる。

そこで本研究では、指向性出力を表す式として、2組のマイクロホンアレイ出力間でクロススペクトルを算出する方法を提案する(クロススペクトル法: Cross-spectrum Method)。ここで、 N 個のマイクロホンをそれぞれ $N/2$ 個からなる2組のマイクロホンアレイに分割し、それぞれのマイクロホンアレイによる指向性出力を $Z_1(x)$, $Z_2(x)$ で表す。この場合、式(4)に基づく指向性出力音圧レベルは式(7)で表される。

$$\begin{aligned} P(x) &= 10 \log[E\{(Z^*(x)Z(x))\}] \\ &= 10 \log[E\{(Z_1^*(x) + Z_2^*(x))(Z_1(x) + Z_2(x))\}] \\ &= 10 \log[E\{|Z_1(x)|^2\} + E\{|Z_2(x)|^2\} \\ &\quad + E[Z_1^*(x)Z_2(x)] + E[Z_2^*(x)Z_1(x)]] \cdots (7) \end{aligned}$$

マイクロホンを主流近傍に設置した場合には、音圧に比べて非常に大きい流れの変動圧力の影響を受ける。そこで Y_m を測定対象音源からの信号成分とこれ以外の雑音成分に分けて考える。この場合の指向性出力 $Z(x)$ について、式(6)で示すように信号成分 S および雑音成分 N による寄与に分けて考えると、式(4)中の各項は次式に示すパワースペクトル項とクロススペクトル項から構成される。

$$\begin{aligned} P_i &= E[|Z_i(x)|^2] \\ &= E[|S_i(x)|^2] + E[|N(x)_i|^2] \quad i=1, 2 \cdots (8) \\ Cr &= E[Z_1^*(x)Z_2(x)] = E[S_1^*(x)S_2(x)] \\ &\quad + E[N_1^*(x)N_2(x)] \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

ただし、

$$Z_i(x) = S_i(x) + N_i(x) \quad i=1, 2 \cdots \cdots (10)$$

前述した主流に起因する雑音成分は各マイクロホンの受圧部近傍で生じているものと考えられることから、2組のマイクロホンアレイにおける $N_1(x)$ および $N_2(x)$ は互いに無相関であるとみなせる。この場合、平均化処理を行うことにより、式(9)中の右辺第2項は第1項に比べて相対的に減少するため、雑音成分が効果的に除去できるものと期待される。なお、式(7)において雑音信号成分が基準信号に比べて十分小さい場合には、パワースペクトル項 P_1 , P_2 およびクロススペクトル項 Cr は同値となり、 Cr の値は本来のパワ-の $1/4$ となる。

ただし、個々のマイクロホンアレイに着目した場合、一定数のマイクロホンを2組に分割したことにより、構成マイクロホン数が減少しマイクロホン間隔が広がることになる。これにより、本来の指向特性に関しては、クロススペクトル法による増幅倍率が加算法に比べて劣化することに注意する必要がある。

4. 実験方法

4.1 実験装置 基準音源を用いた音響試験により、自由せん断層付近におけるマイクロホンアレイ装置の設置位置が指向特性に及ぼす影響を調べた。本研究で提案する手法の適用周波数範囲として、大型低騒音風洞で縮尺模型を用いた測定例が多いことを考慮し、4 kHz 帯以上の高周波数領域における妥当性を検討する。実験は鉄道総合技術研究所が保有する大型低騒音風洞の開放形測定部において行った。風洞ノズルの口径は、高さ 2 500 mm、幅 3 000 mm である。

実験装置の配置図を図2に、本研究で設計されたマ

Table 1 Measurement position

	X [mm]	Measurement region	
		Y [mm]	Z [mm]
Microphone Array (Center position)	2000	$Y_a = 1500, 1800, 2100, 2400$	650
Velocity	2000	With microphone array : 900mm ~ $Y_a - 50$ mm Without microphone array : 900mm ~ 2100 mm	500

Fig. 3 Arrangement of 64 microphones

マイクロホンアレイ装置(以下アレイ装置)のマイクロホン配列を図3にそれぞれ示す。アレイ装置は総数64本のマイクロホンから構成されており、高さ1300 mm×幅1300 mmの板にフラッシュマウントされている。また、その表面には厚さ10 mmのウレタンフォームをちょう付している。3・2節で示したクロススペクトル法を適用するため、64本のマイクロホンのうちそれぞれ32本を用いて、2組のらせん配列を構成した。

基準音源として、高周波数(4 kHz以上)の音響成分を生成可能なジェットノイズ発生装置を $X=1750$ mm, $Y=0$ mm, $Z=1255$ mmに設置した。本装置は、回転円筒形の内壁を有するチャンパ内において、一方の焦点位置で発生させた音波を内壁で反射させることで他方の焦点へ収音させ、増幅した音波を孔口から Y 軸の正方向へ放射するものである。このため基準音源として、音波の発生源が詳細に特定できる利点をもつ。アレイ装置の設置条件は表1に示したとおりである。

自由せん断層内の Y 軸方向流速分布については、速度の X 軸方向成分 u および Y 軸方向成分 v を対象として X 形熱線流速計を用いて測定した。一樣流速度は $U_0=200$ km/hとし、アレイ装置を設置した条件および取り除いた条件での流速分布を比較した。具体的な流速測定範囲については、表1に示したとおりである。さらに平均流速 u の Y 軸方向分布をもと

に、主流およびせん断層による音波の移流量を推定し、音響実験で得られた結果と比較した。

4・2 解析手法 マイクロホンにより検出された信号は、400 Hzのハイパスフィルタを介した後、サンプリング周波数50 kHzでA-D変換器によりデジタルデータに変換される。各マイクロホンでの検出波形について、加算法およびクロススペクトル法を用いて解析領域上での音圧レベル分布を算出した。音波の伝ば経路長については、式(1)、(2)で示すAmietのモデルに基づいて算出した。提案するクロススペクトル法の効果は、その性質から平均化回数 N_{ave} に依存すると考えられるため、 $N_{ave}=1\sim500$ 回の範囲で演算を行った。解析領域平面として、音源装置を含む $X-Z$ 平面の中で 200×200 mmの正方形領域を設定した。計算格子間隔については、コンタ図作成の際には25 mm、音源位置移流量算出時には1 mmとした。クロススペクトル法と従来の加算法の比較を行うため、解析領域平面内の基準音源位置 PS_1 、ならびにそこから100 mmだけ X 軸の正方向に離れた位置 PS_2 を照準点とした条件で式(8)、(9)で示すパワースペクトル項およびクロススペクトル項の寄与を算出した。

5. 実験結果および考察

5・1 自由せん断層内の流れ場 図4には自由せん断層内の平均流速と乱れ度の Y 軸方向分布を示す。平均流速の測定結果から、 $Y_a=1500$ mmはほぼ自由せん断層内部、 $Y_a=1800, 2100, 2400$ mmの条件は自由せん断層の外部に相当することがわかる。音波の移流量推定誤差は自由せん断層の拡大によるものであることから、アレイ装置が主流に近いほど式(1)で示した伝ば経路長予測式の誤差が小さくなるものと考えられる。

次に指向特性を劣化させる要因として考えられる自由せん断層内の乱れ度に着目する。アレイ装置が設置されていない条件では、乱れ度がいずれの方向成分についても $Y=1500\sim1600$ mm付近で10~15%程度に達しているのに対し、アレイ装置を $Y_a=1500$ mmに設置した条件では、壁面の存在により v 方向の乱れ

Table 1 Measurement position

	X [mm]	Measurement region	
		Y [mm]	Z [mm]
Microphone Array (Center position)	2000	$Y_a = 1500, 1800, 2100, 2400$	650
Velocity	2000	With microphone array : 900mm ~ $Y_a - 50$ mm Without microphone array : 900mm ~ 2100 mm	960

(a) Non-dimensional mean velocity distribution of X component (b) Turbulence level distribution of X component (c) Non-dimensional mean velocity distribution of Y component (d) Turbulence level distribution of Y component

Fig. 4 Distribution of velocity profile around the free shear layer

の発達している領域が他の条件に比べて減少していることがわかる。また、音波が通過する自由せん断層の領域も他の条件に比べて短い。このことから、音波がマイクロホンに到達する過程で、自由せん断層による散乱、屈折の影響をさほど受けていないものと推察できる。

5.2 クロススペクトル法による雑音除去 クロススペクトル法の効果を検証するに当たり、主流に起因する雑音成分の影響を調べる。送風条件下において音源装置から放射される音波について、座標 $X=2118$ mm, $Y=1500$ mm, $Z=668$ mm に設置されたマイクロホンで検出された音波のパワースペクトルを

図5に示す。アレイ装置設置位置が主流に最も近い $Y_a=1500$ mm の条件下では、送風時の暗騒音レベルが増大し $S-N$ の劣化が著しいため、個々のマイクロホンにおいては信号成分を検出することが困難であることがわかる。

図6に加算法、図7にクロススペクトル法により算出された基準音源まわりの音圧レベル分布図 ($Y_a=1500$ mm, $U_0=300$ km/h, $N_{ave}=512$ 回) を示す。これより、十分な平均化処理を施したクロススペクトル法では加算法に比べ明らかな音源分布が得られていることがわかる。

これらの相違について、式(8)、(9)で示すパワー

Fig. 5 Power spectra of sound pressure level

Fig. 6 Contourmap of sound pressure level around the source device obtained by summation method

スペクトル項 P_1 , P_2 およびクロススペクトル項 Cr の平均化回数による変化を図 8, 9 に示す。なお, 図 8, 9 中 PS_1 と PS_2 間の差が大きいくほど音源が明りょうに分離されることを示す。実験結果から, 無風時においては各項の値はほぼ等しく, 基準音源からの信号が十分な $S-N$ のもとで測定されている。また各項について, PS_1 と PS_2 における差も大きく, 十分な空間的分解能が得られているといえる。これに対し $U_0=300$ km/h でのパワースペクトル項に着目すると, P_1 , P_2 項が増加することにより PS_1 と PS_2 の差が近接しており, 空間的分解能が劣化していることが示されている。一方 Cr については, 平均化回数の増加とともに PS_2 での値は減少し, 平均回数 100 回以上の条件においては無風時と同程度となっている。以上の結果から, 図 6 で示された加算法による空間分解能の劣化は送風時に起因する雑音成分によるものであり, 図 7 で示したクロススペクトル法では平均化処理により効率的にこれらの雑音成分が除去されていることがわかる。

5・3 アレイ装置設置位置が指向特性に及ぼす影響

図 10 には基準音源まわりの音圧レベル分布と Y_a との関係を示す。図 10 中+は, 式(1), (2)で予測される音源位置を表す。ここで $N_{ave}=512$ 回とした。

$Y_a=1800, 2100, 2400$ mm の条件では $S-N$ の劣

Fig. 7 Contourmap of sound pressure level around the source device obtained by cross-spectrum method

(a) Cr (b) P_1 (c) P_2 Fig. 8 Change of P_1 , P_2 and Cr with average time at $f=5$ kHz band

化が著しく、また音圧レベルのピーク位置が本来の音源位置よりも下流側にずれている。これに対し主流に最も近い $Y_a=1500$ mm では正確に音源位置がとらえられている。この結果をもとに、送風条件下における音源位置での音圧レベルの変化を図 11 に示す。なお縦軸については、無風時での値で正規化している。これより無風時と比較した場合の音圧レベルの変化は $U_0=300$ km/h で最大 1.5 dB 以下 ($f=4\sim 16$ kHz 帯) であり、送風条件下においても定量的な評価が可能であるといえる。5・1 節で示したとおり、 $Y_a=1500$ mm では他の条件に比べて乱れ度の増大する領域が

(a) Cr (b) P_1 (c) P_2 Fig. 9 Change of P_1 , P_2 and Cr with average time at $f=10$ kHz band

小さくなっている。すなわち自由せん断層内で音波が散乱、屈折する影響が他の条件に比べて小さいことから、式 (1) により精度よく行路長が推定されているものと考えられる。ただし、4 kHz 帯においては、いずれの Y_a の条件でも送風条件下における音圧レベルが増大する傾向を示していることから、風洞の暗騒音レベルが顕著に増大する低周波数領域においては、本手法による雑音低減効果が悪化するものと考えられる。

5・4 移流量誤差の評価 図 12 には、アレイ装置設置位置 Y_a による推定音源位置誤差の比較を示す。ここで、 $Y_a=5000$ mm での測定には、 $X=2000$ mm

Fig. 10 Comparison of sound pressure level distributions around the standard source device ($f=10$ kHz band)

(a) $U_0=200$ km/h

(b) $U_0=300$ km/h

Fig. 11 Difference in sound pressure level against Y_a

に設置した X 形マイクロホンアレイ⁽⁵⁾を使用した。これより、アレイ設置位置が主流近傍に近いほど音源位置同定精度が改善され、主流に最も近い $Y_a=1500$ mm の条件では音源位置同定精度が約 10 mm へと改善されていることがわかる。

音波の移流量について、熱線流速計で測定した X 軸方向の局所速度 $u(y)$ を考慮することによりその妥当性を検討する。基準音源からの音波が $\alpha=90^\circ$ の方向へ放射される場合、移流量 Δx は式(11)で表される。

$$\Delta x = \frac{1}{c} \int u(y) dy \quad \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 12 Comparison of location error of the microphone arrays (*measured with X-array⁽⁹⁾)

式(11)をもとに、図4で示された自由せん断層中の流速分布測定結果から、速度分布 $v(y)$ を三つの領域に分割し、それぞれの領域 PS_i で音波が X 軸方向に移流される距離を推算した。ここで、領域 A, B, C はそれぞれ主流内部、自由せん断層内部および自由せん断層外部として定義する。表2に各領域での速度分布 $u(y)$ 、Y 座標範囲を示す。ここで、領域 C の適用範囲として、 $Y=2400$ mm までと仮定した。また、同表に、評価式(11)で得られた移流量の推定誤差を示す。これより、 $Y_a=1800\sim 2100$ mm での移流量は評価式における値と実験値とでおおむね同程度であり、移流量誤差が領域 B, C における自由せん断層の拡大によるものであることがわかる。

6. 結 言

本研究では、風洞の開放形測定部における音源探索手法について、自由せん断層内部の主流にごく近い位置にマイクロホンアレイを設置することで、従来の主流外部における測定に比べて指向特性が改善できることを示した。

主流近傍における測定に際して、マイクロホン受圧部付近での流れに起因して増大する雑音成分を効率的

Table 2 Convected distances due to the enlargement of free shear layer at $U_0=200$ km/h

Region	$u(Y)/U_0$	Y [mm]	Y_a [mm]			
			1500	1800	2100	2400
A	1	0 ~ 1420	232	232	232	232
B	$-2.809y + 4.992$	1420 ~ 1750	12	29	29	29
C	0.1	1750 ~ 2400	—	0	6	12
Total [mm]			244	262	268	273
Estimated distance[mm]			245	245	245	245
Location error [mm]			-1	17	23	28

に除去するため、2組のらせん配列形マイクロホンアレイの出力についてクロススペクトルを算出する手法を提案し、基準音源を用いた音響試験により主流流速 300 km/h の高雑音環境下においても本手法が有効であることを示した。

次に自由せん断層内にアレイ装置を設置した際の流速分布を熱線流速計により測定した結果、主流にごく近いノズル壁面の延長線上に設置した場合、主流と直交する速度成分の乱れ度がアレイ装置付近において減少することが示された。また、音響試験の結果から、この設置条件において、 $S-N$ の悪化に伴う音圧レベルの減少および自由せん断層の拡大に起因する音源位置同定精度の誤差が改善されることを示した。

文 献

- (1) Nagakura, K., Measurement of Noise Source Distribution by an Acoustic Mirror with a Microphone Array, *RTRI REPORT*, Vol. 12, No. 16 (2002), pp. 11-16.
- (2) Takano, Y., Sound Source Localization of High Speed Vehicles by Two Dimensional Microphone Array System, *Journal of INCE/J*, Vol. 22, No. 1 (1998), pp. 14-16.
- (3) Kurita, K., Wakabayashi, Y., Yamada, H. and Horiuchi, M., Noise Measurement of Shinkansen High-Speed Test Train, *2007 Symposium on Environmental Engineering*, No. 109 (2007), pp. 54-57.
- (4) Nagakura, K., The Method of Analyzing the Wind Tunnel Tests Data Measured with Directional Microphone Systems, *RTRI REPORT*, Vol. 12, No. 13 (1999), pp. 15-20.
- (5) Yamazaki, N., Nagakura, K. and Ikeda, M., Acoustic Source Localization of Pantograph Using a 2-D Microphone Array, *RTRI REPORT*, Vol. 11, No. 17 (2003), pp. 1-6.
- (6) Nagakura, K., Localization of Aerodynamic Noise Sources of Shinkansen Trains, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 293 (2006), pp. 547-556.
- (7) Hara, M., Kurita, K., Horiuchi, M., Sato, H. and Shikama, T., Development of Low Noise Pantograph (Reduction of Aerodynamic Noise), *The 14th Transportation and Logistics Conference 2005*, (2005), p. 3317.
- (8) Ikeda, M., Koyama, T. and Suzuki, M., Aerodynamic Noise Reduction of a Pantograph by Decrease in Aerodynamic Interference between a Panhead and a Panhead Support, *RTRI REPORT*, Vol. 11, No. 20 (2006), pp. 5-10.
- (9) Central Japan Railway Company, *Annual Report 2006*, (2006), p. 12.
- (10) Jaeger, S. M., Horne, W. C. and Allen, C. S., Effect of Surface Self-noise, *6th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, (2000).
- (11) Thomas, J. M., *Aeroacoustic Measurements*, (2002), p. 40, Springer.
- (12) Amiet, R. K., Correction of Open Jet Wind Tunnel Measurements for Shear Layer Refraction, *2nd AIAA Aeroacoustics Conference*, 75-532 (1975).
- (13) Don, H. J. and Dan, E. D., Array signal processing, (1993), p. 133, Prentice Hall.