

# マイクロホンアレイによる音源探査

石井達哉、長井健一郎、生沼秀司(宇宙航空研究開発機構)  
武田克己(航空宇宙振興財団)

## Source Localization by the Microphone Array

Tatsuya Ishii, Kenichiro Nagai, Hideshi Oinuma (JAXA)  
Katsumi Takeda (JAST)

### 概要

一層の騒音低減には、個々の音源の情報を把握すること、即ち音源探査が必要である。航空機騒音に於いては、エンジン、高揚力装置、脚などの要素のみならず、全機模型についての音源探査が有効である。音源探査法としてマイクロホンアレイ法を採用し、風洞実験や飛行実験に適用して技術向上を図ってきた。本報では、これまでの音源探査例について紹介する。

#### 1. 研究の背景

制約条件の伴う騒音対策には、適切な手段の選択が鍵となる。その判断材料として、音源情報が必要である。音源の情報を取得する方法の中でも、マイクロホンアレイによる音源探査は、音源の位置、大きさ、周波数範囲といった情報を直接提供できるため、実機航空機や風洞実験の有用なツールとして普及しつつある<sup>[1-5]</sup>。こうした背景を受けて、当該技術を開発し、幾つかの実験に適用して改良を図っている。本報は、過去に実施した音源探査実験について幾つかを紹介する。

#### 2. 音源探査

##### 2-1. モデル

音源、マイクロホン、音伝播のモデルを図1に示す。解析面には単音源の集合を仮定する。音源から放射される音の距離減衰と伝播に要する時間おくれとを利用して音源位置を予測する。マイクロホン*i*に到達する信号は全ての音源から発せられる音の総和であるから、音源*j*から伝播に要する時間 $\tau_{i,j}$ を考慮して、

$$p_{m,i}(t) = \sum_j^{N_s} \frac{s_j(t - \tau_{i,j})}{r_{i,j}(t)}, \quad \tau_{i,j} = \frac{r_{i,j}(t)}{c} \quad (1)$$

となる。ここで、 $N_s$ は仮想音源の数、 $c$ は音速である。マイクロホン*i*の受信信号と音源*j*との間に強い相関があるならば、当該位置に音源があると見込まれる。そこで、マイクロホンの受信信号を音源*j*に集積すると

$$s_j(t) \approx \frac{\sum_i^{N_{mic}} w_i p_{m,i}(t + \tau_{i,j})}{\sum_i^{N_{mic}} \frac{w_i}{r_{i,j}}} \quad (2)$$

と表せる。 $w_i$ は重み関数、 $N_{mic}$ はマイクロホン個数である。注目する位置に音源が存在しなければ、音源とマイクロホンの間の相関は元々弱く、上記積算の過程で減衰して、有意な値とはならない。一方、音源が存在すれば、周囲よりも信号雑音比が上昇し、音源の存在を推定できる。

##### 2-2. マイクロホン配置

マイクロホンの配置は遺伝的アルゴリズムを利用して設計する<sup>[6]</sup>。遺伝子座にマイクロホンの座標情報を記載し、全マイクロホンの座標情報を一つ

の遺伝子とする。例えば、あるマイクロホンの座標が(55, 93)である場合には、遺伝子の一部を「...00110111 01011101...」と表現するなど様々な方法が考えられる。遺伝子に対する適応度は、仮想の音源を置いた時の音源探査結果を関数化したものであり、遺伝子情報と一対一の関係にある。例えば、遺伝子に対応するマイクロホン配置における主音源のレベルとサイドローブのレベル差を関連付けてもよい。マイクロホン配置に対応する遺伝子の集合を群とみなし、世代毎に選択、交配、突然変異を繰り返す。選択過程では、原則として適応度順に遺伝子をランキングして、下位の遺伝子を除去する操作を行う。交配過程は、異なる遺伝子ペアにつき、上記遺伝子座の一部を交換する操作である。突然変異は、選択した遺伝子の全部又は一部の遺伝子座をビット反転する操作などが相当する。なお、適応度上位の遺伝子を保持するためにエリート処理を行うことも有効である。こうした処理によって、最終的に、適応度の高い遺伝子（マイクロホン配置）を求めることが可能となる。図2には、飛行実験で用いたマイクロホン配置を示す。内側の32点のマイクロホン配置には上記設計が施されている。外側は低周波数用の40個のマイクロホンが配置される。

### 3. 音源探査の適用例

#### 3-1. 風洞実験<sup>[7-9]</sup>

最初の取り組みとして、風洞実験にマイクロホンアレイを適用した。半載翼模型のナセルに小型ジェットエンジンを設置し、主流中で運転した時の音源探査をJAXA大型低速風洞で試みた(図3)。半載翼模型の側面方向には、アルミ製騒音計測板が設置されている。この板の所定位置に64個の小型マイクロホンが分散して埋め込んである。薄板の模型側表面は、主流乱れの影響を抑制すべく10mmのウレタン層で覆われている。模型から発生する音は、反射成分も含めて薄板内の全マイクロホンで受信され、中継器を介して同時収録される。

各マイクロホンの受信信号について周波数分析した結果に主流による伝播経路の補正を加えて積算すると、翼と胴体の下面の音響パワー分布を得る。図4は、エンジン定格(110,000rpm)で主流速度40m/s時に緩やかに上昇する周波数帯域を積算した音響パワー分布を表す。分散配置したマイクロホンアレイによって、サイドローブの影響を大幅に削減することが出来ており、ナセル排気側に現れる音源を高い信号雑音比で分離することができた。なお、エンジンノズルがナセル内側にある構造のため、エンジン排気がナセル後縁と干渉する部分に音源が存在する結果となった。

#### 3-2. 携帯型音源探査装置<sup>[10-11]</sup>

研究用マイクロホンアレイは計測点数が数十以上で寸法も大型となり、設置に時間がかかる上、特殊な収録装置が必要となる。その一方で、精度を犠牲にしつつも簡易にかつ安価にできる音源探査への需要もある。そこで、汎用向け音源探査装置を試作した(図5)。装置には、

- 1) 準実時間処理
- 2) ビデオ画像上へのマップ表示
- 3) 操作性及び携帯性
- 4) 低価格

が要求される。

本装置では、汎用の収録ボードのチャンネル数程度にマイクロホン数を減らし、かつ周波数分析に係る演算を簡素化した。その結果、通常のパーソナルコンピュータ上でビデオ画像に重ね合わせて音源マップを準実時間表示することができるようになった。ヘリコプター地上運転時に収録した音について、8kHz付近の翼通過周波数音のみを取り出して分析した結果を図5に示す。音源マップは、エンジン空気取入口に圧縮機音源を明示している。

#### 3-3. 飛行実験<sup>[12-15]</sup>

移動音源の音源探査技術を開発するため、模型

飛行機を音源とする飛行実験を実施している。模型飛行機を使った実験の長所として、大型模型やジェットエンジン付模型を扱えること、着陸や巡航などの形態変更や改造にかかる自由度が大きいこと、比較的低予算で早期に実現が可能であることなどが挙げられる。

図 6 に模型飛行機を使った飛行実験の概要を示す。模型飛行機がマイクロホン上空を通過する度にレーザーセンサーの応答を電氣的に検出することで、機体の進入時刻、経路、速度を正確に知ることができる。レーザーセンサーの ON-OFF 信号とマイクロホンの受信信号合わせて 80CH 以上を同時収録する。収録した信号を解析して、模型飛行機の軌跡とそれに伴う音源分析を調べる。分析には風洞実験と異なり、時間領域法が採用される。なお、模型飛行機の高度は別途、超音波方式や画像処理方式で取得するか、解析面の高度を振って音源探査結果から確定する。図 7 に滑走路上に展開したマイクロホンアレイ、レーザーセンサー、収録装置を表す。実験に用いている模型飛行機はいずれも小型ジェットエンジンを搭載しており、全長 1.8m の単発機と同じく 4m の双発スケール機である。それぞれの機体がマイクロホンアレイ上空を通過する様子を図 8 と図 9 に示す。機体に搭載した GPS による軌跡と速度の表示を図 10 に示す。

図 11 は単発ジェット機模型がクリーン形態で通過した時の音源探査例を示す。結果は、1/1 オクターブバンド中心周波数 2000Hz の時間平均値である。進入速度はレーザーセンサーの結果から 270km/h (約 75m/s) であった。コンターは最大音圧に対する信号雑音比を 6dB として整理した。排気パイプ後方の音源が顕著である。低速時の結果と比較すると、パワーの上昇と音源位置が後方に移動する傾向が捉えられている。

双発ジェット機模型では、ナセル内のエンジン排気が専用のノズルを介して噴出するので、ナセル直後で主翼下に音源が現れる。クリーン形態で、時速 195km で進入した時の 1/1 オクターブバンド

中心周波数 8000Hz の分析結果を図 12 に示す。支配的な左右両エンジン排気側のうち片側を拡大したものである。飛行速度を上げるとノズル周囲流れとジェット排気とのせん断が変化し、音源が主翼下まで移動する傾向が見られる。

着陸フラップと着陸用脚を下ろした形態でエンジン出力をアイドルまで絞った時には、フラップや脚からの空力音が相対的に大きくなると予測される。そこで、外側のマイクロホンアレイのみを用いて、低周波数帯域の音源分布を調べた結果が図 13 である。エンジン音源の場合に比べて、主翼下で後方の脚とフラップの中間領域に音源が現れる。支配因子を確定するには、更にデータを収集する必要がある。

#### 4. まとめ

音源探査は騒音低減にとって不可欠なツールであると認識し、風洞実験から飛行実験まで多様な需要に応えられるように、技術開発を進めてきた。その結果、一定の成果を上げるに至ったが、分析精度、汎用性、周辺技術など未踏の課題は残されている。今後も、実験と改良を繰り返して更なる向上を図る予定である。

#### 文献

- (1) H.Holthusen and H.Smit, "A new data acquisition system for microphone array measurements in wind tunnels", AIAA-2001-2169, (2001).
- (2) U.Michel, et.al., "Flyover noise measurement on landing aircraft with a microphone array", AIAA-98-2336, (1998).
- (3) J.F.Piet, G.Elias, and P.Lebigot, "Localization of acoustic source from a landing aircraft with a microphone array", AIAA-99-1811, (1999).
- (4) W.Dobrzynski, et. al., "European study on landing gear airframe noise sources",

AIAA-2000-1971, (2000).

- (5) K. G. Degen, et. al., "Spiral array measurement of high-speed train noise", Inter-Noise2001, (2001).
- (6) 特許 3692402, "音源探査方法及び装置", (2005).
- (7) 清水他, "エンジン付き翼模型の騒音源探査", 日本機械学会 2002 年次大会, (2002).
- (8) 石井, 長井, 生沼, 武田, "騒音計測技術の研究", 航空宇宙技術研究所 ASET 研究報告会, (2002).
- (9) 石井, 生沼, 長井, 武田, "マイクロホンアレイによるジェットエンジン付翼模型の騒音計測", 騒音制御 27-5, (2003).
- (10) 長井, 石井, 生沼, 武田, "携帯型音源可視化装置の開発", 環境総合シンポジウム, (2004)
- (11) [http://www.ista.jaxa.jp/res/a03/b04\\_03.html](http://www.ista.jaxa.jp/res/a03/b04_03.html)
- (12) なる NAL 2002 年 10 月号, (2002).
- (13) 石井, 長井, 生沼, 武田, "航空機騒音の計測と低減", JAXA 第 1 回公開研究発表会, (2004).
- (14) <http://www.ista.jaxa.jp/res/a03/a01.htm>
- (15) [http://www.ista.jaxa.jp/res/a03/b04\\_04.html](http://www.ista.jaxa.jp/res/a03/b04_04.html)

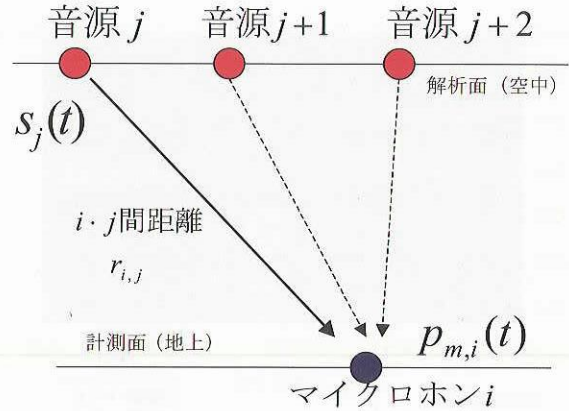


図 1. 音源とマイクロホンの関係

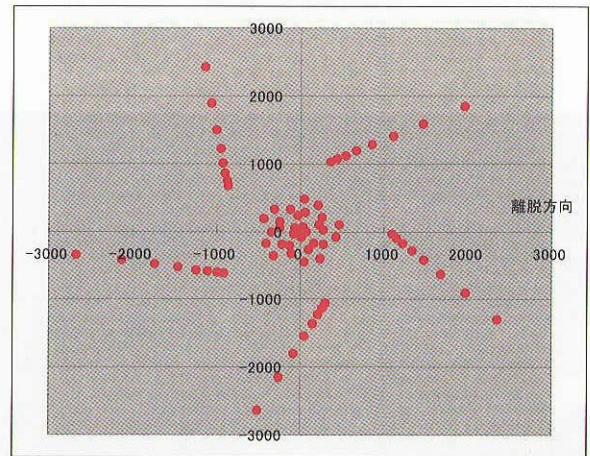


図 2. 飛行実験用マイクロホン配置

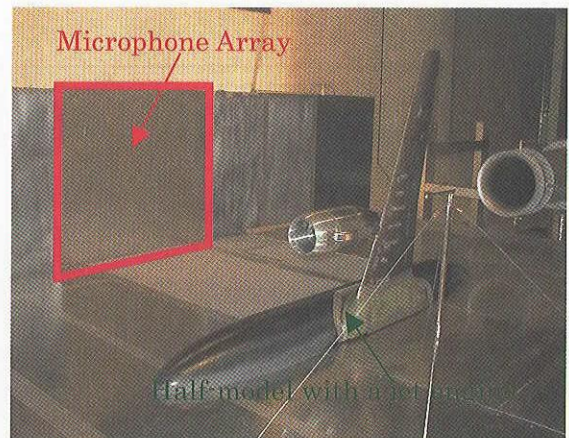


図 3. 半載翼風試模型とマイクロホンアレイ

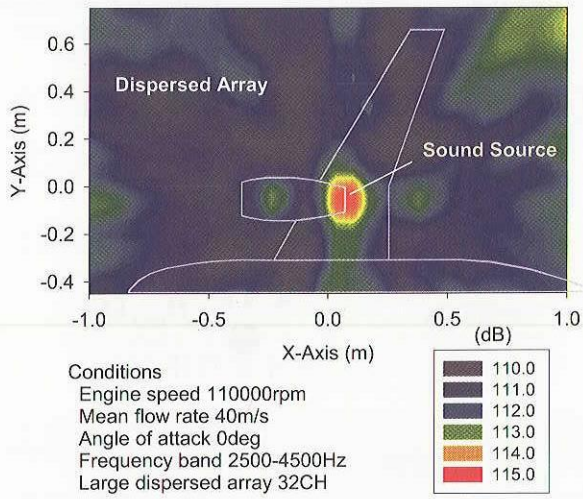


図 4. 風洞実験例

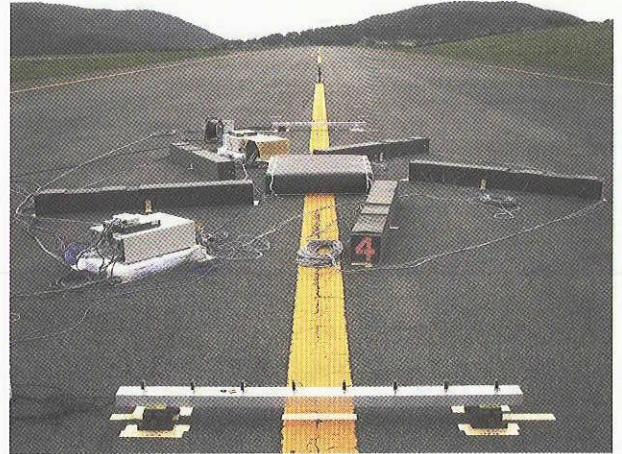


図 7. 飛行実験用マイクロホンアレイ

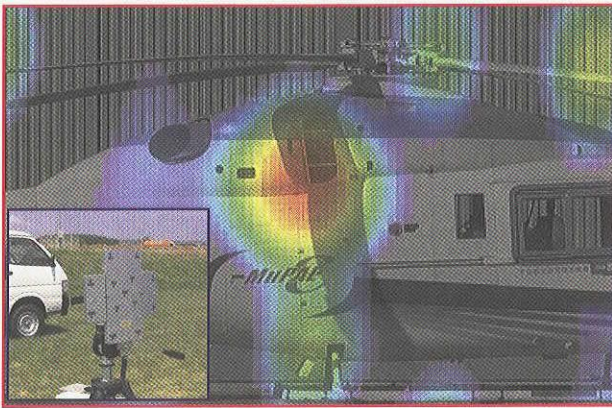


図 5. 携帯型音源探査装置と分析例



図 8. 飛行実験（単発ジェット機模型）

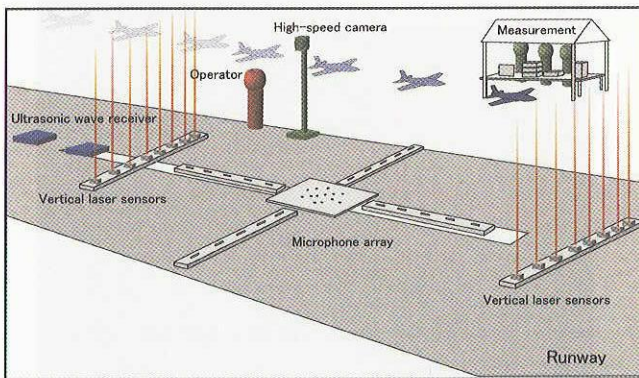


図 6. 模型飛行機による飛行実験概要

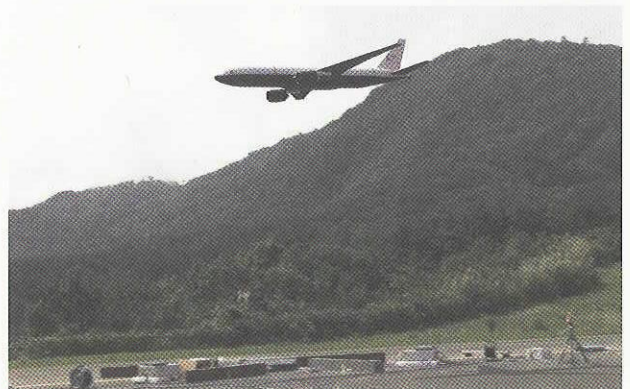


図 9. 飛行実験（双発ジェット機模型）

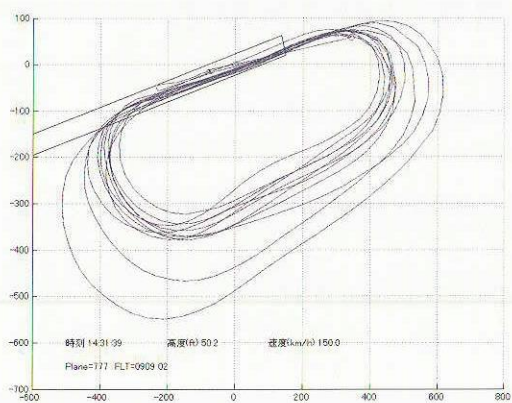


図 10. GPS 軌跡 (双発ジェット機模型)

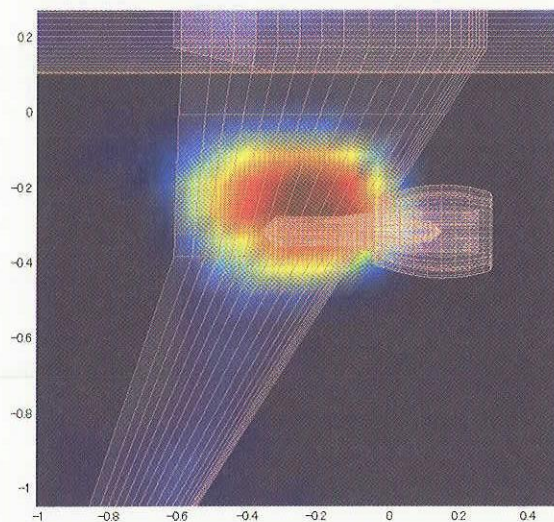


図 12. 音源探査例 SN04-0909-064  
速度 195km/h, 中心周波数 8000Hz

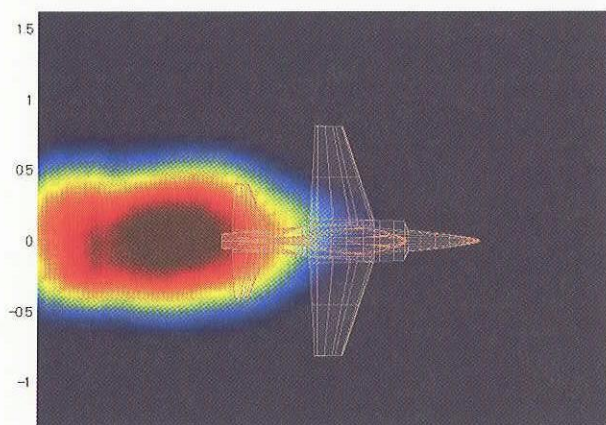


図 11. 音源探査例 SN04-0909-081  
速度 270km/h, 中心周波数 2000Hz

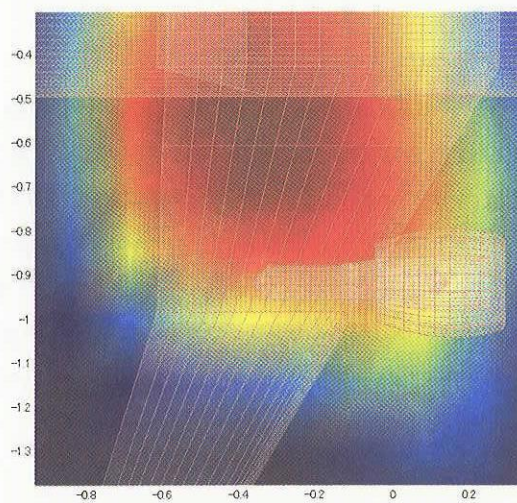


図 13. 音源探査例 SN04-0910-012  
速度 153km/h, 中心周波数 1000Hz