

JAXA 主脚騒音模型の遠方場特性

横川 謙、今村 太郎、山本 一臣

宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ

浦 弘樹、小林 宙

宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

内田 洋

I H I エアロスペースエンジニアリング

Far-field Characteristics of JAXA Main Landing Gear Noise Research Model

by

Yuzuru Yokokawa, Taro Imamura, Kazuomi Yamamoto, Hiroki Ura, Hiroshi Kobayashi, Hiroshi Uchida

ABSTRACT

A far-field characteristic of a landing gear noise is assessed through low-speed wind tunnel test in large scale anechoic facility of Railway Technical Research Institute. To understand landing gear noise generation of regional jet airliner during the approach phase, 40% of two-wheel type main landing gear scale model which is called LEG (Landing gear noise Evaluation Geometry) model is installed in open-jet test section. The model is designed in detail in order to reproduce flow field similar to that of around an actual landing gear, which is equipped with small instruments as well as large components such as a tire, a strut, a door and a brace. As a result, spectrum of sound pressure level for fully dressed model configuration was obtained. The spectrum roughly corresponds to the empirical data given by EUDS database. Reynolds number effect and directivity in noise generation appeared at certain flow condition. In addition, the contribution and behavior of each component of the landing gear model to the total noise level was also assessed. The tire, the door and the brace were comparatively large noise source. It was shown that the spectrum of fully dressed configuration was reproduced by summation of the spectrum of each component, but some narrow band peaks were appeared depending on the model configuration.

1. はじめに

近年の民間航空機開発において主要な課題となっている空力騒音の予測・低減技術構築の背景には、航空機の騒音規制とそれに伴う空港着陸料増加および運用時間帯の制約による運航経済性の悪化という問題が存在している[1-2]。これまで亜音速旅客機の騒音問題は推進系の騒音低減に主眼を置いた議論や技術向上が行われ、エンジンについては大幅な静粛化が図られた。しかしながら結果として、高揚力装置や脚装置から発生する機体騒音がエンジン騒音よりも相対的に顕著となる状況が見受けられるようになった。さらに、現在開発中の国産旅客機 MRJ (Mitsubishi-Regional-Jet) [3]やカナダボンバルディア社の小型旅客機 C シリーズ[4]では大幅な低騒音化が期待できる GTF エンジン (Geared-Turbo-Fan エンジン) [5]の搭載が決定しており機体騒音静粛化に対する要求は今後より一層大きくなることが予想される。これに応えるためには、特にエンジン出力が小さくなる着陸時において、機体騒音レベルを大幅に低減する取り組みが必要である。

高揚力装置と並ぶ主要な騒音源である脚装置 (図 1 に概略を示す) については、これまで様々なスケールや形状の模型を用いた風洞試験および飛行試験が実施されてきており、低騒音化のための設計指針や騒音低減デバイスの提案も行われている[6-12]。しかしながら、それぞれの構成部品の音源としての振舞い、またそれらが組み合わされた際の空力干渉や騒音特性の変化について十分な理解がなされているとは言い難く、実機において騒音低減効果を期待できる技術も存在していないのが現状である。

JAXA では、想定実機 40%スケールの二輪式主脚装置詳細模型を用い、騒音発生メカニズム理解、実機騒音予測技術ならびに低騒音設計指針の構築に向けた研究を風洞試験および CFD の両面から推進している[13-15]。

本報告では、低騒音風洞にて取得した遠方場騒音データについて、基本特性ならびに脚装置構成部品の寄与や相互干渉について考察することを目的とする。

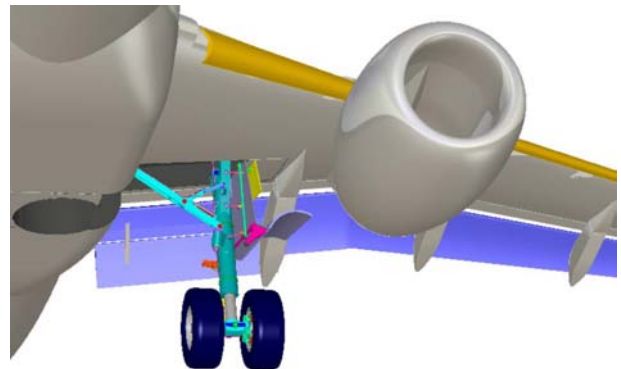


図 1 降着装置

2. 模型

使用した模型は、100 人乗りクラスのリージョナルジェット機を想定し研究用に概念設計した LEG (Landing gear noise Evaluation Geometry) の 40%スケール模型であり、本研究ではこのクラスの機体で一般的な二輪式の主脚を取り扱っている。図 2 には主脚の主たる構成部品名称を加えた CAD モデルを、表 1 にはそれらの代表寸法を示す。なお、後述する試験における模型設置の都合上、CAD モデルは実機とは上下が逆になった形態となっている。

本モデルには、タイヤ、支柱 (シリンダーとピストン)、脚扉、サイドブレースといった主構造物だけでなく、ブレーキキャリパ、トルクリンク、脚扉駆動ロッド、アンロックアクチュエータ、アップロック用ピン、更には油圧配管や電気系統の配線などの詳細な模擬部品も設置されている。また、実機における脚収納室についても間口面積と容積を概算し模擬している。なお、タイヤ部の収納スペースは省

略している。模型の高さは、キャビティから外に出ている部分、すなわち一様流に曝される部分が 1.078m である。実機では起こり得ない層流剥離等による狭帯域音の発生を防ぐため、タイヤ上の上流淀み点（幾何学的 0°）を中心として±55°の位置、および支柱上の上流淀み点（幾何学的 0°）を中心として±60°の位置にジグザグテープならびにディスクラフネスをそれぞれ設置し[11]、さらに脚扉後縁についても直径 4mm のトリップワイヤを設置した。なお、本稿中においては、全ての構成部品が組み付けられた模型の形態を「基本形態」と称する。

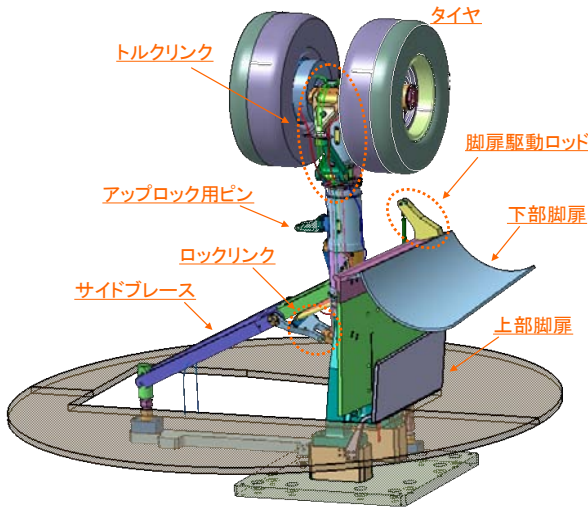


図2 LEG 模型の CAD モデル

Level) の狭帯域スペクトルは 185 回の平均結果を評価している。

主流風速は実機着陸時の流速を想定し $U=68\text{m/s}$ を基準としたが、レイノルズ数効果検証や狭帯域音の比較用に 27.2、54.4、80m/s も実施している。また横滑り角は 0 度とした。

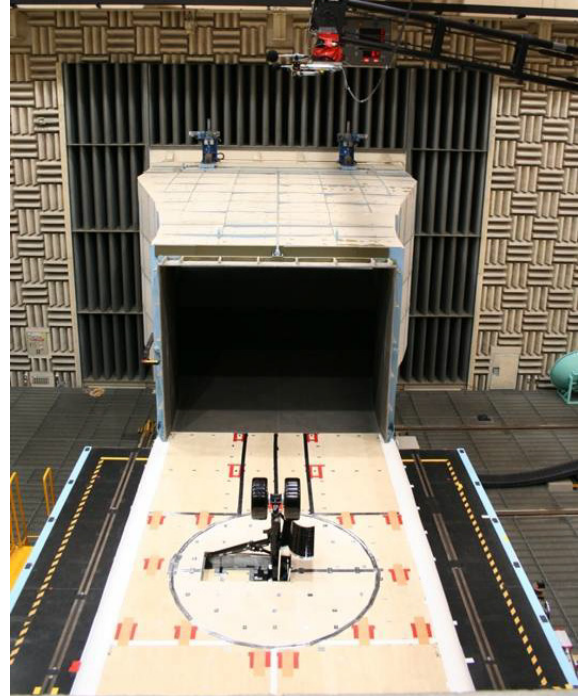


図3 低騒音風洞測定部に設置された LEG 模型

表1 主要な構成部品の代表寸法

構成部品	寸法
タイヤ	0.417m(直径)／0.163m(幅)
支柱	0.1m(最大)／0.061m(最小)
サイドブレース	0.036m(厚さ)
トルクリンク	0.083m(最大)／0.016m(最小)
脚扉	0.001m(厚さ)
配管	0.004m(直径)

3. 風洞試験

試験は、鉄道総合技術研究所大型低騒音風洞において実施した。模型は図3に示すとおり、無響室内のオープンジェット（幅 3m、高さ 2.5m）測定部の模型支持台車上に設置された地面盤上に上向きに取り付けた。ノズル出口面から模型（支柱中心）までの距離は 3m であり、この位置での地面盤上面境界層の 99% 厚さは約 130mm となっている。地面盤表面は反射壁であり、端面は発泡性材料により滑らかに整形されている。

音響計測は図4に示すよう、上方（実機下方相当）、両側方に設置した無指向性マイクロフォン（B&K4939）により行った。前者は地面板上から 5m 直上に、後者は模型支柱中心から 4.5m の真横位置に設置した。このうち上方については指向性把握のため、上流側 5.356m、下流側 3.750m の範囲での計測も特定のケースについて実施しており、その詳細については後述する。サンプリング周波数は 200kHz とし、FFT により得られた SPL（Sound Pressure

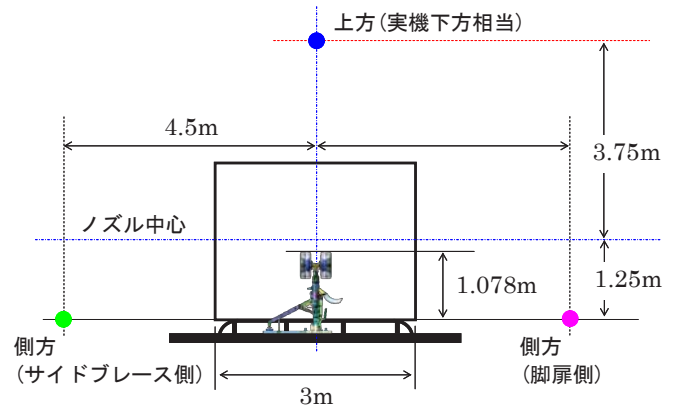


図4 無指向性マイクロフォン設置位置概略

4. 結果および考察

本章では、特に断りのない限り主流風速 68m/s における計測結果を示すものとする。また狭帯域スペクトルの周波数分解能は 12.2Hz としている。

4-1. 基本特性

図5に基本形態に対し測定した SPL の狭帯域スペクトルを示す。なお、両側方での計測データについては上方計測値との比較のため、同じ距離である 5m 位置での値に換算して示している。図より3方向に対してレベルが比較的近い騒音が放射されていることがわかる。スペクトルの定性的な特徴としては、①0.1~0.3kHz でのゆるやかなピーク、

②0.7kHz 付近の狭帯域ピーク、③1kHz 以上の広帯域領域に大別できる。①については直上で特に顕著に観察されており、これは脚収納キャビティからの発生音であることをキャビティ有り無し形態に対する結果比較により確認している。②は、車軸付近に設置されたピン（直径 20mm の円柱）から発生するエオルス音であることをピン有り無し形態に対する結果比較により確認している。このピンは制動時にブレーキディスクの回転を制止するために実機においても取り付けられているものであり、注目すべき音源である。③については様々な音源が寄与しているものと考えられるが、広帯域スペクトル上に重なった鋸状の複数ピークについては、特に側方において顕著であることから、支柱や脚扉などの後縁からの 2 次元的な剥離が原因である可能性も考えられる。

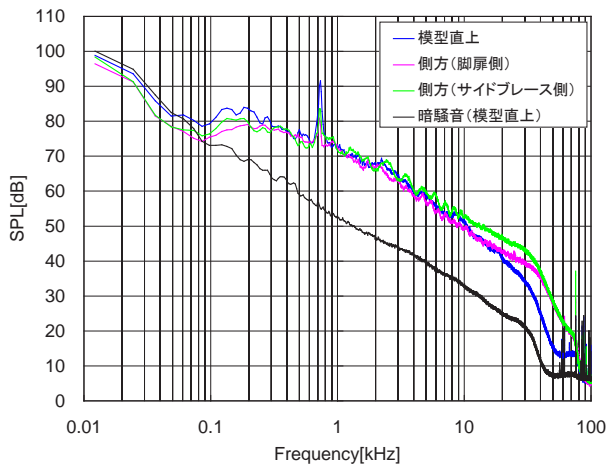


図 5 3 計測点における騒音特性の比較

図 6 に直上における 1/3 オクターブバンド SPL スペクトルとデータベース値 (ESDU[16]による) の比較を示す。なお、データベース値を実験値と同等のスケール、風速、測定距離に換算して示している。図より、スペクトルのエンベロープは概ね一致しており 40%スケール詳細模型について本試験で得られた騒音特性が大域的には実機の状態を再現していることが確認できた。SPL のレベル自体には 10dB 程度の差が存在するが、模型形状とデータベースで対象としている脚形状とは同一ではないためこの定量的なずれを評価の対象とすべきではない。

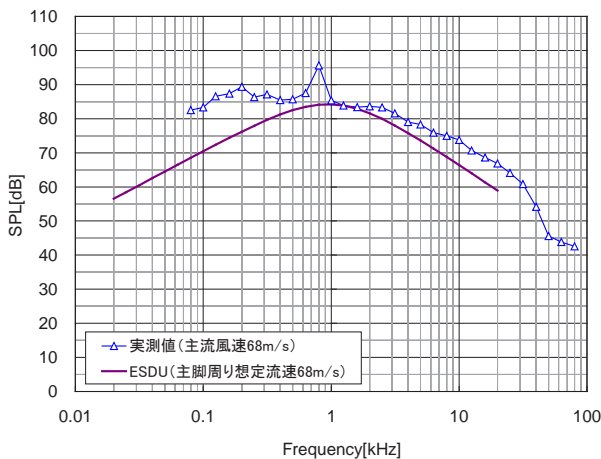


図 6 遠方場スペクトルとデータベース値の比較

図 7 にはタイヤ上と支柱上にラフネスを設置した場合としていない場合の、直上における SPL スペクトルの比較を示す。なお、ラフネスを設置した際には確実に境界層が遷移することを可視化により確認している。図より、0.7kHz 近傍の狭帯域ピークの周波数とレベルが多少変化するものの全体としてラフネス設置効果による有意な差は観察されない。すなわち層流剥離に起因した音源は存在してないことがわかる。狭帯域ピークの特長変化については、ラフネス設置効果によりタイヤ間の流速が僅かに変化し、音源である前述のピン周辺でも流速変化が生じたことによるものと考えられる。

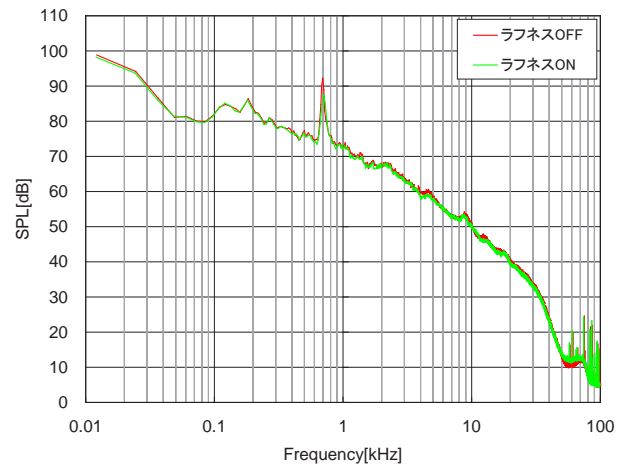


図 7 ラフネス効果

図 8 に直上における SPL スペクトルの速度依存性を示す。縦軸は、本模型の音源が全て 2 重極であるという仮定の下に速度の 6 乗則[3]を用いて 68m/s へ換算した値としている。また横軸については主流速度と単位長さで無次元化した値で示している。全体的な傾向として、54.4m/s 以上ではスペクトルのレベルが近く、類似した物理現象により騒音が発生しているものと考えられる。しかしながら完全にはレベルが一致しておらず、また広帯域スペクトル上に重なった鋸状のピークについても必ずしも定性的な一致が見られない。すなわち、構成部品ごとのローカルな現象に起因する音源成分については完全な 6 乗則では補正できず、2 重極であること以外の効果についての補正が必要であることがわかる。一方、27.2m/s については前述②の狭帯域ピークを除きスペクトルの全体的レベルも大きくずれており、これはレイノルズ数効果によるものと考えられる。

次に上方への放射音の流れ方向の指向性を評価する。図 9 に示すよう、計測はマイクをトラバースさせて地板から高さ 5m の各位置 (青点で示す) にて行い、これを模型支柱根元と平板上面の交点を原点とした半径 5m の円弧上での値 (青丸で示す) に換算した。さらに主流速度分の移流補正を加味した点 (ピンク点で示す) のオーバーオール値 (OASPL) を求めた。OASPL は実機での評価範囲 50Hz ~10kHz を想定し、40%スケール換算で 125Hz ~25kHz の範囲を積分し求めている。図 10 に結果を示す。図より、上方で観測される騒音は指向性を有し、模型直上付近ではレベルが低く、下流側でよりレベルが高くなる様子が観察される。この点については参考文献[3]においても言及されており、ストローハル数が大きい場合に特に顕著になることが示されている。なお、最上流の点は騒音レベルが大きく低減しているが、これは風洞ノズルとの干渉によるものと考えられる。

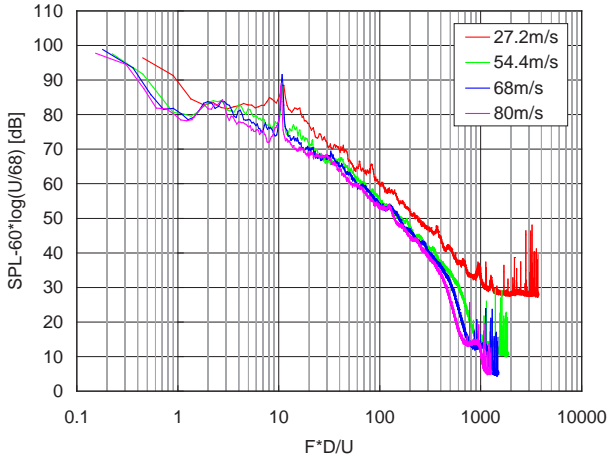


図8 模型直上計測点での風速依存性比較

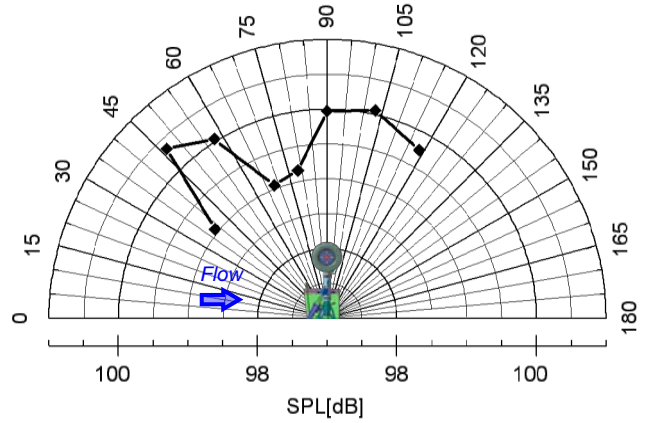


図10 放射音の流れ方向指向性

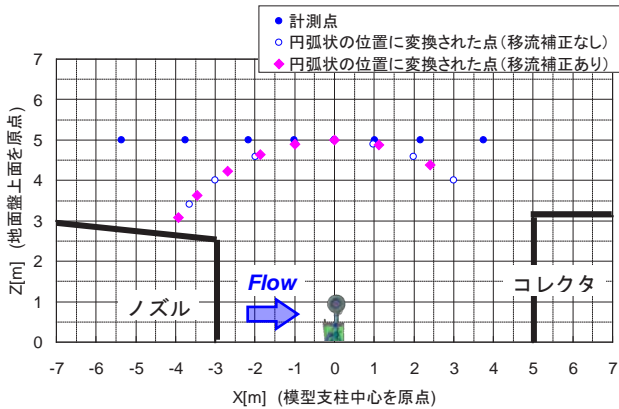


図9 流れ方向の指向性計測位置

4-2. 構成部品単体の騒音レベル

次に、脚収納用キャビティと支柱を設置した状態を基準とし、図11に示すよう脚を構成する各部品を単独で取り付けた場合（以下、パーツ ON 効果試験）の放射音特性の評価を行った。図12に模型直上における OASPL を示す。まず、支柱のみの形態“2”に対して、配管“3”や車軸“4”を設置しても騒音レベルの上昇は見られない。車軸については、前項で述べたとおりピンが併せて設置された形態“5”では狭帯域ピークが突出することによる約 3dB の OASPL の増加がある。その際、更にトルクリンクを設置した効果“6”は微小である。比較的スケールの大きな構成部品について見ていくと、サイドブレース“8”およびタイヤ“9”は約 5dB、脚扉“7”は 2dB 程度と大きな騒音源となっていることがわかる。

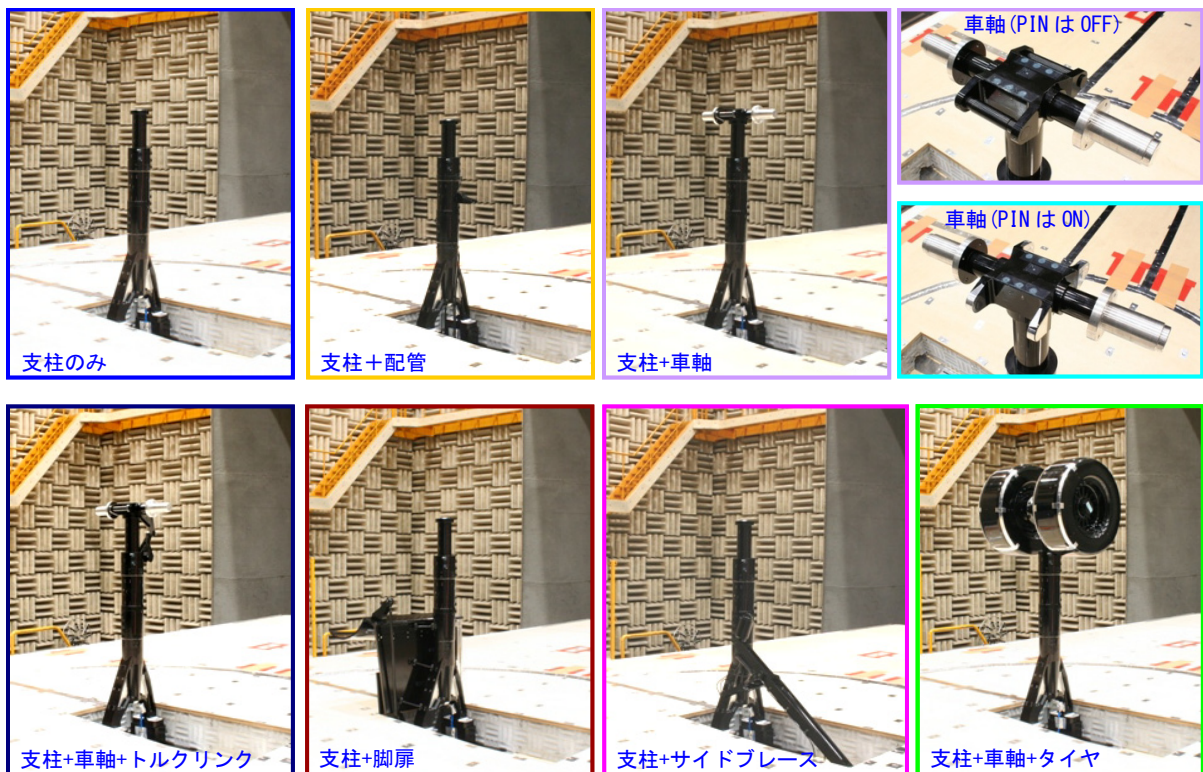


図11 構成部品 ON 効果試験における模型形態

ここで、支柱に車軸とタイヤが設置された“9”のレベルが、全パーツを設置した基本形態“10”のレベルよりも大きくなっている様子が見られるが、これには2つの理由が考えられる。一つは、基本形態として全部品が組み合わされたことによる流れ場の干渉により模型上の各音源の特性が変化し、トータルとしての騒音レベルが変化したことにより起るもの。また、もう一つには、前述した車軸付近のピン周りの流れ場が変化したことにより、相対的にレベルの高いこの音源での騒音レベルが上昇し、全体の騒音レベルを押し上げてしまったことに起因するものがある。

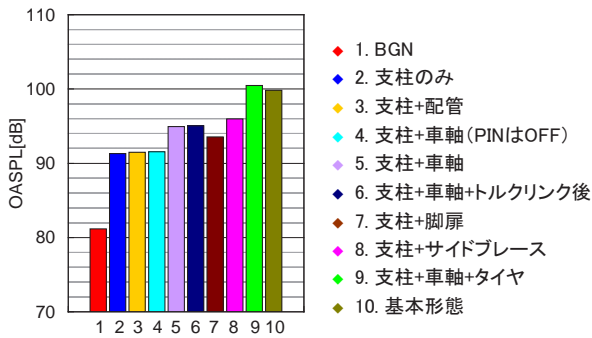


図 1 2 各部品設置形態に対する OASPL の比較

図 1 3 に上方への放射音に対する各構成部品の寄与率分布を示す。本図は、パーツ ON 効果試験で得られたそれぞれの模型形態に対する SPL を一旦線形値に戻し、差し引きにより各構成部品単体が発生する値を求め、それらの周波数ごとの比率を算出したものである。すなわち、図中のある周波数におけるそれぞれのパーツの寄与分はパワーの比率を表すものであり、SPL の絶対値を示すものではない。

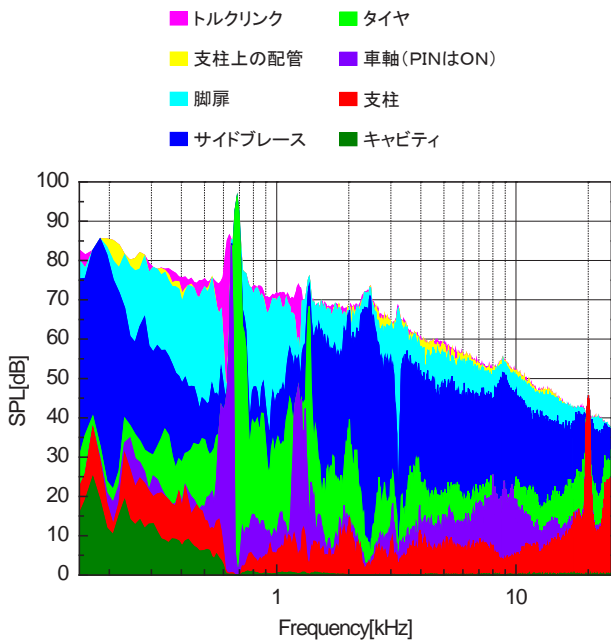


図 1 3 各構成部品の騒音寄与率の比較

図より、図 1 2 で示された大きな騒音源となっている部品に関し、サイドブレースと支柱は 2kHz 以上での広い周波域で寄与が大きい一方で、タイヤと脚扉については比較

的低い周波数域での寄与が大きいことがわかる。ここで、タイヤのデータ上 0.7kHz 付近に極めて寄与率の大きい領域が観察されるが、これは前述した車軸付近のピンに当たる流れの局所速度がタイヤを設置した場合としない場合とで異なりピーク周波数とレベルが変化したため、この周波数帯域ではタイヤ単体の寄与を純粋に分離することができなかったことに起因したものである。

4-3. 構成部品間の干渉

図 1 4 に、模型直上において基本形態に対し測定した狭帯域スペクトルと、パーツ ON 効果試験結果を用いて分離した構成部品単体 (図 1 4 上のイラストに示す各部品) が発生する騒音レベルを積算したスペクトルとの比較を示す。図より、積算スペクトルと基本形態に対する計測結果とは全体的なレベルを見る限り比較的よい一致をしていることがわかる。一方で、積算スペクトルの結果には 1kHz ~ 4kHz 付近に複数のピークが存在している。すなわち、脚を構成する各部品はそれらが組み合わされて設置された状態でも互いの干渉により特性を大きく変化させることはなく、基本的にはそれぞれが独立した音源として振舞うものの、前項で明らかとなったような構成部品設置形態に依存した流れ場の変化とそれに伴う騒音レベルの増減が局所的には起こりうるということが明らかとなった。

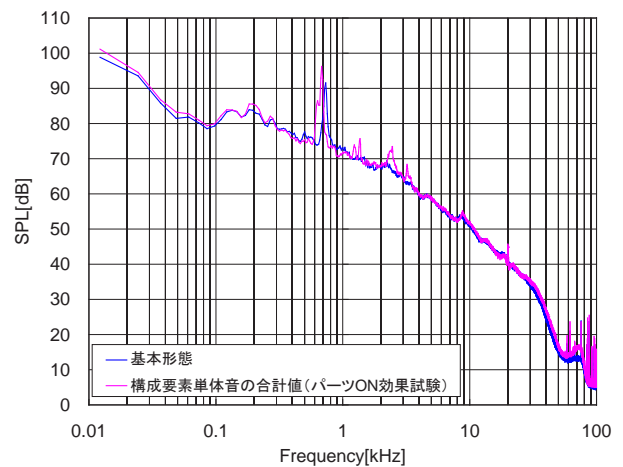


図 1 4 各構成部品からの騒音の積算スペクトル

最後に、今後の進め方としては様々な模型形態に対して、それぞれのパーツ周りの流れ場と音源としての特性を詳細に検証する必要があるものと考えられる。そのようにして

単体音源の振る舞いおよび他パーツとの干渉の度合いを把握できれば、脚を低騒音化する場合、少なくとも二輪のケースについては構成部品レベルでの対処の有効が確立できる。また、同じパーツであっても、特定の形態に対してはピーク音源として振る舞い、また別の形態に対しては広帯域の音源として振る舞う点について詳細が明らかになれば、スケール効果や今回6乗則での補正が不十分であった速度依存性の解明、さらにはその結果としての脚騒音予測精度の向上にもつながるものと考えられる。

5. 結論

想定実機 40%スケールの二輪式主脚模型を対象に遠方場計測を実施した。結果として、基本的な特性を把握した他、脚装置を構成する部品各々が騒音のオーバーオール値に与える寄与分や周波数特性についての知見が得られた。これらの部品は同時に組み付けられた場合にも互いの干渉は大きくはなく、独立した騒音源とみなしても脚装置全体騒音レベルの良い推算が可能であると考えられる。これにより、二輪式脚装置の低騒音化を行う場合、構成部品レベルでの対処も有効であるものと考えられるが、レイノルズ数効果や局所流速の変化等による特性の差も観察されたことから、こうした点には十分注意を払う必要がある。今後は、部品ごとにより詳細な騒音発生メカニズムの理解を行い、実機レイノルズ数での騒音レベルおよび特性の予測と低騒音化に向けた取り組みを推進する。

謝辞

風洞試験の実施にあたり、鉄道総合技術研究所諸氏ならびに宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ国産旅客機チーム諸氏から多大なる協力ならびに技術的アドバイスをいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

1) S. Schwanke, T. Baehr, W. Schmidt, "Support of cost-benefit analyses of noise control measures around a generic airport", AIAA Paper 2007-1034, 2007.

- 2) <http://www.boeing.com>
- 3) <http://www.mrj-japan.com>
- 4) <http://www.bombardier.com>
- 5) <http://www.pw.utc.com/Products/Commercial/PurePower+PW1000G>
- 6) Dobrzynski, W., Buchholz, H., "Full-Scale Noise Testing on Airbus landing Gears in the German Dutch Wind Tunnel ", AIAA paper 1997-1597, 1997.
- 7) Dobrzynski, W., Schöning, B., Chow, L.C., Wood, C., Smith, M., Seror, C., "Design and Testing of Low Noise Landing Gears", AIAA paper 2005-3008, 2005
- 8) Guo, Y., "Experimental Study on Aircraft Landing Gear Noise", Journal of Aircraft 2006 Vol.43, No.2 pp.306-317, 2006.
- 9) Molin, N., Piet, J. F., Chow, L.C., Smith, M., Dobrzynski, W., Seror, C., "Prediction of Low Noise Aircraft Landing Gears and Comparison with Test Result", AIAA paper 2006-2623, 2006.
- 10) Guo, Y., "A Study on Local Flow Variations for Landing Gear Noise Research", AIAA paper 2008-2915, 2008.
- 11) Manoha, E., Bulté, J., Caruelle, B., "Lagoon : An Experimental Database for the Validation of CFD/CAA Methods for Landing Gear Noise Prediction", AIAA paper 2008-2816, 2008.
- 12) 磯谷和秀, 越智章生, 葉山賢司, "航空機機体騒音(脚騒音)の風洞試験およびCFDによる評価", 第40回流体力学講演会/数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 講演集, 2008.
- 13) 今村太郎, 平井亨, 横川譲, 山本一臣 "主脚騒音計測用模型周り定常流れ場の数値解析", 日本航空宇宙学会第40期年会講演会 CD-ROM, 2009.
- 14) 浦弘樹, 横川譲, 今村太郎, 山本一臣 "航空機降着装置の騒音源計測", 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集(2), pp.269-270, 2009.
- 15) 阿部雄一郎, 鈴木雅人, 鈴木康方, 藤田肇, 小林宙 "航空機小型主脚模型から発生する空力騒音の特性", 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集(2), pp.271-272, 2009.
- 16) <http://www.ihsjapan.co.jp/esdu/index.html>