法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-06

小型低騒音風洞の設計試作に関する研究

加藤, 裕太 / Kato, Yuta

(出版者 / Publisher) 法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要.理工学・工 学研究科編

(巻 / Volume)
57
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
8
(発行年 / Year)
2016-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00012941

小型低騒音風洞の設計試作に関する研究

STUDY ON DESIGN AND PROTOTYPING OF SMALL LOW NOISE WIND TUNNEL

加藤 裕太 Yuta KATO 指導教員 御法川 学

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士前期課程

In the design of the low noise wind tunnel, it is important to minimize not only the flow noise generated from the nozzle or collector at the test section, but also the fan noise, which is transmitted through the duct system and from outside of the measurement room. In case of small low noise wind tunnel design, the noise treatment is not sufficient compared with the large wind tunnel because of cost and space constraints. This study is an attempt to establish a practical acoustic design process of small low noise wind tunnel. The relationship between BGN and the sound sources were discussed by investigating the characteristics of the sound sources.

Key Words : Low noise wind tunnel, Acoustic design, Back ground noise, Aerodynamic noise, Duct propagation

1. 緒論

近年ますます静粛になっていく住環境において、機械 から生じる音はより静かなことが求められる. 中でも車 両,空調機器,家電製品といった各種の機械システムは, その性能の向上に伴い空力騒音が増大するため、静音化 が強く求められている. そこで, 実際に空力騒音を解明 するための実験装置として代表的なものに、低騒音風洞 がある.低騒音風洞には実際の車両用の大型のものから, 実験室における要素実験のための小型のものまで各種あ るが,最近では,家電製品や情報機器の風切り音など, エンドユーザー製品の空力騒音についても静音化の要求 は大きく,低コストの小型低騒音風洞の実現が望まれて いる. 低騒音風洞においては、その性能評価指標の1つ である計測部の気流暗騒音が十分に静かでなければなら ないが、大型の風洞に比べ、小型の低騒音風洞では設置 面積やコストの制約があり、十分な性能を得にくい. ま た、気流暗騒音を構成する各騒音源の寄与度を明確に示 した資料は少なく、設計指針を得にくいのが現状である.

本研究では、測定室に防音室を用いた小型低騒音風洞 の設計,試作プロセスにおいて、風洞における気流暗騒 音と各騒音源の関係式を検討し,試作した低騒音風洞を 用いて,気流暗騒音を構成する各騒音源の寄与度を実験 的に調査することにより,小型低騒音風洞の設計手法の 確立を目指した.

2. 低騒音風洞の気流暗騒音

低騒音風洞は、気流源の発生騒音を消音して供試体の 空力学的特性とその発生音を測定するための風洞であり、 機械全体やその構成要素各部から発生する流体騒音を詳 細に調査することや、その低減対策技術を研究開発する ことに用いることが出来る.言い換えれば、測定部の気 流の乱れを極小化し、風洞気流源の送風機や圧縮機の発 生騒音が風洞計測部へ伝搬してこないように消音対策を 施した風洞である.

低騒音風洞の計測部における気流暗騒音BGNは,計測 部のノズルとコレクタにおいて生じる空力騒音 L_F ,送風 機騒音のダクト伝搬音 L_D ,外部に放射された送風機騒音 の測定室への透過音 L_T ,また外部暗騒音の4つにより構 成される.外部暗騒音が十分に小さい場合,気流暗騒音 は,次の式(1)で表される.

$$BGN = L_F + L_D + L_T \quad [dB] \tag{1}$$

低騒音風洞における気流暗騒音の概略図を図1に示す. ノズルとコレクタにおいて生じる空力騒音L_Fは、ノズ ル先端渦放射音、ノズル出口噴流発生音などのノズルに おいて生じる騒音、コレクタ入口における気流擦過音な どである.一般的に、亜音速領域において空力騒音は双 極子音源で構成され、音響パワーは流速の6乗に比例し 大きくなる.

送風機騒音のダクト伝搬音Loは、送風機を運転した際

に発生する騒音が上流及び下流ダクトを介し伝搬する騒音である.ダクトの音響特性は一定であるため,騒音は送風機の各流速による音響パワーによって決定される.

外部に放射された送風機騒音の測定室への透過音L_Tは, 送風機を運転した際に発生する騒音がダクト外部に放射 され,その騒音が測定室へと透過する騒音である.送風 機から測定室内の測定点までの距離は一定であるため, 透過音は送風機の各流速におけるダクト外部への音響パ ワー,測定室の吸音力,測定室の壁の透過損失によって 決定される.



Fig.1 Schematic view of background flow noise in low noise wind tunnel

3. 小型低騒音風洞の設計

(1)設計概要

本研究にて試作した小型低騒音風洞の上面図を図 2 に 示す.風洞の設計手順は計測部の気流断面積と使用最大 流速を決め,空力風洞としての形式を検討し,気流源で ある送風機の選定を行った.一般な低騒音風洞と同様に 計測部のみ開放することで,流れの乱れや圧力損失を抑 える回流式(ゲッチンゲン型)を採用した.計測部寸法 を小さく抑え気流源を小型多翼送風機とし,また無響室 より安価な防音室を流用して計測部を構成することなど により,低コストで製作可能な小型機器の空力騒音測定 用の小型低騒音風洞を目指した.風洞の諸元を表 1 に示 す.

(2) 空力設計

通風ダクトは 250mm×250mm または 300mm×300mm の矩形断面とし,縮流ノズル手前で 400mm×400mm に一 旦拡大及び整流金網(開口率約 50%を 2 枚)により静圧 を回復させた.縮流ノズルは乱れ強さを低減し一様性を 保つとされる正弦波形状を採用し縮流比を 9 とした.送 風機の大きさと設置空間の制限から気流流路長さを定め, 風洞全体の圧力損失から送風機を選定し,詳細設計を行 った.また,送風機吸込み口とダクトの接合部にベルマ ウス,気流戻り部であるコレクタを設置すると共に,コ レクタ以降の下流流路に対し繰り返し検討を行った.数 値流体解析及び管路の圧力損失式による計算の結果,風 洞全体の圧力損失は約1200 Pa(ノズル出口流速40m/s) となった.

(3)音響設計

測定室である防音室内の床面を除く壁面は,厚さ45mm の合板の外壁の内側に遮音シートを貼り,さらにその上 に密度 80kg/m³の厚さ40mm のロックウールを貼り付け た.また,消音器は本研究を進める上で,設計と試作を 繰り返した.





Fable.1	Specifications	and	performance
---------	----------------	-----	-------------

Item	Specifications and performance		
Wind tunnel type	Semi goettingen type		
Test section size	130mm×130mm		
Max. wind velocity	40m/s		
	Centrifugal turbo fan		
Air source	SRP30 No.2		
	(Made by Ebara Corp.)		
	Inverter		
Air volume control	FR-D720-5.5k (Made by		
	Mitsubishi Electric Corp.)		
Test Section length	640mm		

(4) 空力性能計測

ノズル内径 D を基準とし、ノズル出口部に対し下流側 の噴流方向(Z 軸方向)0.5D(=65mm)における水平方 向(X 軸方向),垂直方向(Y 軸方向)の流速の一様性 及び乱れ強度を計測した.測定には KANOMAX 社製 熱 線流速計 Model 1000Ser および標準直線プローブ 0251R-T5(線径 5µm のタングステン)を用いた.ノズ ル出口流速 40m/s 時では、ノズル出口面積 130mm× 130mm のうち 110mm×110mm の範囲において中心流速 の 97%以上の一様性を有し、乱れ強度は同上の範囲にお いて 0.8%以下と、十分に整流された吐出し流れとなった ことを確認した. また,図3にノズル噴流の垂直方向に対する噴流方向 の流速分布の計測結果を示す.流速の一様流に対する誤 差が2%以内の領域に対し実線を結び、ポテンシャルコア として示した.また、一点鎖線はノズルの内径の縁を示 している.ポテンシャルコアの範囲は、ノズル出口より Z=1D(=130mm)下流で90%、Z=2D(=260mm)下流で 80%と減少することが分かった.

また,実測した風洞全体の圧力損失は920Pa (ノズル出 口流速40m/s)であり,計算値と異なるが,これは本風洞 で生じる圧力損失の大部分は噴流がノズルから測定室に 放射される部分が占めることや,RANS モデルにより噴 流を過大評価していることが原因として考えられる.し かし,実測した圧力損失をノズル出口流速における圧力 損失係数で表すと,計算値と近い約1.0となり,送風機の 性能の範囲内となった.



(5) 音響性能計測

測定室内の全騒音測定は、ノズル出口中心から距離 2D (=260mm)、ノズル中心高さ噴流方向 45°において計測 した.図4に各流速における暗騒音(オーバーオール A 特性音圧レベル)を示す、ノズル出口流速 10m/s 以上で は双極子音源の特徴である流速の6乗に比例した、ノズ ル出口流速 5m/s のみ流速の6乗に比例していないが、こ れは無気流時の測定室暗騒音に近いことや、送風機騒音 のダクト伝搬音が影響していることが原因として考えら れる.また、各流速における気流暗騒音の1/3 オクターブ バンド分析結果を図5に示す.







Fig.5 1/3 octave band spectra of BGN at U=0 to 40 m/s

4. 低騒音風洞の簡易音響設計法の検討

(1)送風機騒音のダクト伝搬音

1

送風機騒音のダクト伝搬音 L_D は、送風機の音響パワーレベル L_{wFan} からダクトの音響特性 R_D を減算したものである.よって、下式(2)に示すように、騒音源である送風機をスピーカーで模擬することにより、ダクトの音響特性を算出した.

まず,無指向性スピーカーを送風機に対して下流側ダ クト内の設置可能な最も近い箇所に設置し,送風機騒音 と同値のオーバーオールレベルの模擬音を出力した. 模 擬音は送風機騒音と近い特性を有すピンクノイズで再現 した.スピーカーを設置したダクトの壁面において,計 測用マイクにより計測した結果をスピーカーの音響パワ ーレベルL_{wsp}とし,測定室におけるスピーカーを音源と するダクト伝搬音L_{DSp}を測定し減算することにより,ダ クトの音響特性を算出した.そして,上記と同様にダク トの壁面にて送風機運転時の送風機の音響パワーレベル を計測し,下式 (2)を用いて送風機騒音のダクト伝搬音 を算出した.

$$L_D = L_{WFan} - R_D$$

= $L_{WFan} - (L_{Wsp} - L_{Dsp}) [dB] (2)$

ダクトの音響特性を図 6 に示す.実測したダクトの音 響特性は、全周波数において設計時の最低目標値及び設 計計算減音量を上回る結果となり、十分な減音特性が得 られた.最低目標値の 10dB を上回り設定した減音量の目 標値と実測値を比較すると、100Hz で 3dB、3150 及び 4000Hz にて 1dB 到達しなかったが、ノズルとコレクタに おいて生じる空力騒音と送風機騒音のダクト伝搬音の SN 比が 7dB 以上得られると期待され、送風機騒音のダク ト伝搬音の影響は小さいと考えられる.

(2)外部に放射された送風機騒音の測定室への透過 音

外部に放射された送風機騒音の測定室への透過音 L_T は, 次の式(3)によって表される.送風機運転時は,送風機 の音響パワーレベルを測定室外にて測定することは可能 であるが、測定室内における送風機騒音の測定室への透 過音は他の騒音源の影響が原因で直接測定することは不 可能である.

そこで、測定室の壁の透過損失を得るために、無指向 性スピーカーを送風機上部に設置し、4. (1) と同様に 送風機と同等のピンクノイズを出力した.予め半無響室 にて測定したスピーカーの音響パワーレベル L_{wSp} と測定 室内におけるスピーカーの透過音 L_{Sp} を測定し、測定室の 壁の透過損失TLを得た.このスピーカーを用いて算出し た透過損失と送風機の音響パワーレベル L_{wFan} を下式に 代入することで、外部に放射された送風機騒音の測定室 への透過音を算出した.ここにおける送風機の音響パワ ーレベルは、風洞における送風機周りの複数箇所にて測 定し、距離減衰を用いて得た.送風機と測定室の距離 r_1 [m]は、複数箇所にて騒音を測定し平均化を行った. 測定室の吸音力A[m²]は、計測室の寸法及び吸音材の仕様 を元に計算した.S[m²]は、騒音が侵入する壁の面積であ る.

$$L_T = L_{WFan} - 10 \log_{10}(2\pi r_1^2) - TL + 10 \log_{10}\left(\frac{S}{A}\right) \quad [dB] (3)$$

図7に示すように、測定室の壁は平均約30dBの透過損 失を有する.また、送風機の音響パワーレベル及び外部 に放射された送風機騒音の測定室への透過音を図8に示 す.全周波数において30~45dBの減音が確認され、測定 室の吸音処理は十分であり、気流暗騒音に対する影響は 小さいと考えられる.

(3) ノズルとコレクタにおいて生じる空力騒音

測定室におけるノズルとコレクタにおいて生じる空力 騒音 L_F は、次の式(4)にて算出出来る.この空力騒音は、 気流暗騒音から他の騒音源を除去したものとみなした. この空力騒音は気流暗騒音に対し支配的となる必要があ り、この値を評価し低騒音風洞における設計指針とした.

$$L_F = BGN - (L_D + L_T) \quad [dB] \qquad (4)$$

上記の手法にて推定されたノズルとコレクタにおいて 生じる空力騒音を図9に示す.図5の全騒音源を含む気 流暗騒音を比較すると、全流速にて似た特性を有してお り、空力騒音が暗騒音に対して支配的となっていると考 えられる.

(4) 気流暗騒音を構成する各騒音源の寄与度

低騒音風洞における気流暗騒音を構成する各騒音源の 寄与を評価するために,各流速における各騒音源の寄与 度のスペクトルを図 10~図 13 に示す.ノズル出口流速 10m/sの低周波数を除き,気流暗騒音に対しノズルとコレ クタにおいて生じる空力騒音が支配的であることが分かる.また,全流速において,外部に放射された送風機騒 音の測定室への透過音の寄与は非常に小さく,防音室は 本低騒音風洞の測定環境として十分であると言える.

よって本小型低騒音風洞は、送風機騒音が気流暗騒音 に寄与していないことが分かり、ノズルとコレクタにお いて生じる空力騒音が支配的である気流暗騒音を有する と期待される.







Fig.7 1/3 octave band spectrum of transmission loss *TL* of test room



and noise level spectrum L_T at U=40 m/s



of nozzle and collector L_F



Fig.10 Contributions to BGN of noise sources at U=10 m/s



Fig.11 Contributions to BGN of noise sources at U=20 m/s



Fig.12 Contributions to BGN of noise sources at U=30 m/s



Fig.13 Contributions to BGN of noise sources at U=40 m/s

5. 気流暗騒音における空力騒音の特性

5.1ノズルとコレクタにおいて生じる空力騒音の 調査

(1) 実験方法

上記の手法により推定したノズルとコレクタにおいて 生じる空力騒音を検証するため、極めて静粛な気流を生 じさせることが可能な無響室設備にて、ノズルとコレク タにおいて生じる空力騒音のみを測定した.使用した設 備は、新菱冷熱工業株式会社中央研究所が所有する音響 棟で、無響室(本実験では床を設置し、半無響室として 利用)と残響室が隣り合い、その壁面に設置した供試材 料の透過損失が測定出来る構造となっている.また、両 室に圧力差を生じさせることにより、両室の通風用開口 部に気流を発生することが出来る.各計測室とは音響的 に完全に絶縁されており、また室内圧力を与える送風機 は、サイレンサにより十分に静音化されている.この装 置を用いることで、ダクトを通過する流体音のみを精密 に測定することが可能である.

ノズルとコレクタに対し、本風洞と同位置同流速を再 現し、気流暗騒音を測定する実験を行った.使用したダ クトは、本風洞に使用したノズル及びコレクタに加えて、 400mm×400mmの長さ1800mmの正方形ダクトを使用し た.ノズル中心から半無響室床面までの高さ2100mmに おいて計測した.なお、設備の仕様上、ノズル出口流速 は6~35m/sの範囲で計測した.

(2) 実験結果

本風洞と同条件を再現した気流暗騒音の測定結果を図 14に示す.ノズル出口流速 30 及び 35m/s を除き,流速が 上がるに連れ各スペクトルが上昇していることが分かる. 測定した騒音レベルは、ノズル出口流速 10m/s 以上で、 双極子音源の特徴であるノズル出口流速の 6 乗に比例し た値が得られ、ノズルとコレクタに関する空力騒音が計 測出来たと考えられる.

第4章で推定したノズルとコレクタにおいて生じる空 力騒音と、本実験で実測した結果を比較したものを図15 に示す.低周波数における誤差は、推定値の送風機騒音 のダクト伝搬音、無気流時の暗騒音、近距離場の疑似音 波(流れ近傍に出来る圧力変動)の影響が原因として考 えられる.しかし全流速にて,推定値と実測値は類似ま たは一致した結果が得られた.特に,ノズル出口流速 30m/s では実測値に対する推定値の平均誤差が1%と少な く,本研究の手法にて空力騒音を定量的に推定出来るこ とが確認された.



Fig.14 Measured flow noise of nozzle and collector L_F



Fig.15 Comparison of measured and estimated flow noise L_F

(3) 実測結果の無次元化及び予測

実測した噴流音は,発生音響パワーがノズル出口流速の6乗に比例する低亜音速噴流である.参考文献(5)による次式を用いて,実測した噴流音に対し比音響パワーレベルL_Kへ無次元化整理を行った.

$$L_W(f) = L_K(f) + 10 \log_{10} \left(\frac{\rho}{c^3} U^6 S\right) + 120 \quad [dB]$$
(5)

ここで, L_W は音響パワーレベル[dB], fは周波数[Hz], ρ は 流体密度[kg/m³], cは音速[m/s], Uは流速[m/s], Sは放射 面積[m²]である.

図16に実測結果の無次元化結果を示す.音のパワーが 流速の6乗に比例する15m/s以上では、高周波数におい て無次元スペクトルが一致していることが分かる.また、 ノズル出口流速が小さいほど高周波数において無次元ス ペクトルの傾向が一致していないことが分かる.これは、 双極子音源として発達しておらず、流体音がノズル出口 流速の 6 乗に比例していないことが原因として考えられる.また,低周波数でスペクトルが一致しない理由は, 近距離場の疑似音波の影響が原因として考えられる.

無次元スペクトルで整理すると、ノズル出口流速 15m/s 以上の高周波数において類似する傾向を得たので、ノズ ル出口流速 15~35m/s の無次元結果を平均化したスペク トル用いて、ノズル出口流速 40m/s における予測スペク トルを算出し、第 4 章で推定したノズルとコレクタにお いて生じる空力騒音と比較する.図17 にノズル出口流速 40m/s におけるノズルとコレクタにおいて生じる空力騒 音の推定値と上記の無次元化による予測値を示す.平均 誤差が 6%と、ほぼ同等なスペクトルが得られた.

ゆえに、本低騒音風洞は全流速においてノズルとコレ クタにおいて生じる空力騒音が支配的である気流暗騒音 を有することが分かった.



Fig.16 Dimensionless flow noise of nozzle and collector L_F





5. 2コレクタ部で生じる空力騒音の対策 (1)対策概要

上記より本風洞における気流暗騒音は送風機騒音の影響されていないことが判明した上で,ノズルとコレクタ において生じる空力騒音を低減させるため,コレクタ部 で生じる空力騒音の低減を試みた.

図 18 に本風洞計測部の側面図を示す.また,図 19 に 対策前後のコレクタの断面形状を示す.対策前の状態(図 19 a, b) では、コレクタ先の吸音材とダクト内径による段 差が生じており、これが原因の空力騒音が発生している と考えられ、この吸音材による段差に対策を施し、空力 騒音及び気流暗騒音の低減を目指した.従来のコレクタ 部に対して、ロックウールで吸音処理と既存の曲面形状 部に R80 の曲面形状部品を上乗せし、フィレット処理を 施した.



Fig.18 Detailed view of test room in small low noise wind tunnel



Fig.19 Detailed view of collector before and after acoustic treatment

(2)対策前後の性能計測

ノズル出口流速 40m/s の噴流でのコレクタ部の対策前 と吸音及びフィレット処理後におけるノズルの噴流方向 Z=4.5D(=585mm)での流速分布及び乱れ強度分布を図 20と図 21に示す. 左図は対策前,右図は吸音及びフィレ ット処理後である. 流速の一様性コンターの低流速表示 において,右図の処理後の下部に噴流が大きく表示され ている事がわかる. これより,右図の処理後の方が,噴 流がフィレット部に沿ってダクトへ吸い込まれているこ とが予測される. 乱れ強度は,各測定した面において処 理前は最大 40%,処理後は 28%の値を得た. 左図の対策 前の乱れ強度の方が広範囲において乱れが生じており, 且つ乱れ強度の値が大きく生じていることが分かる.また、ダクト内径の縁部を中心に乱れが生じていることが分かる.これより、対策前では噴流がコレクタ及びダクトに沿って送風機側へ吸い込まれていないこと、処理後では噴流が対策前と比較してコレクタ及びダクトに沿って送風機側へ吸い込まれていると予測される.このように、フィレット及び吸音処理を施すことにより、本風洞のコレクタ部の吸込み時の流れの乱れを低減することが出来た.

対策前,吸音処理後,吸音及びフィレット処理後のノ ズル出口流速 40m/s における気流暗騒音の測定結果を図 22 に示す.1/3 オクターブバンド分析結果は対策による違 いが大きく表れなかったので,FFT分析結果を掲載した. 14500Hz において小さなピークが生じているが,これは インバータのキャリア周波数である.対策前と両処理後 の結果を比較すると,コレクタ部で生じる空力騒音に対 し対策を施すことで暗騒音が低減されていることが分か る. 300Hz 以上において吸音及びフィレット処理後の気 流暗騒音が最も低いスペクトルを得た.

よって、コレクタ部の流れの乱れを低減することによ り気流暗騒音を低減出来た.また、コレクタ部及び測定 室での流れの乱れは気流暗騒音に影響していることが予 測される.



Fig.20 Contour figure of the flow velocity distribution before and after acoustic treatment (Maximum display value:10m/s)



(Maximum display value:25%)



Fig.22 Comparison of back ground flow noise before and after acoustic treatment of collector at U=40 m/s

6. 結論

低騒音風洞における設計指針を得る事を目的とし,小型低騒音風洞を設計・試作・改良し,低騒音風洞におけ る気流暗騒音に関する調査を行い,以下の知見を得た.

- 1)試作した小型低騒音風洞を用いて、低騒音風洞における 気流暗騒音を構成する各騒音源の寄与度の調査手法を 検討し、調査することで設計指針を得た.
- 2)上記の手法にて推定したノズルとコレクタにおいて生じる空力騒音は、騒音源である送風機を直接用いずに流体音実験を行うことが出来る環境にて測定した実測値とほぼ一致する結果が得られ、本手法は妥当であると考える.
- 3)本手法にて得られた設計指針を元に,測定室として防音 室を用いて試作した小型低騒音風洞を改良し,音響特 性及び流体特性を評価し,低騒音風洞として使用出来 る十分な性能が得られた.

4)騒音源である送風機を直接用いずに流体音実験を行う

ことが出来る環境にて、本研究で用いた縮流ノズルに 関する精密な噴流音を測定し無次元化することにより、 異なる流速における噴流音を予測した.

- 5)測定室における乱れの低減は気流暗騒音の低減に関連 があり、測定室の乱れは十分に取り除く必要がある.
- 6)測定室における流れの乱れと気流暗騒音の関係につい て明確化することが、今後の課題である.

謝辞

本研究の一部は新菱冷熱工業株式会社中央研究所の音 響設備を用いて実験致しました.ご協力頂いた新菱冷熱 工業株式会社様に感謝を申し上げます.

また,風洞部品加工にご協力頂いた昭和第一高等学校 の新屋敷誠先生に対し,この場をお借りして厚く御礼申 し上げます.

参考文献

- 1) 丸田芳幸,静粛工学-快適空間をめざして-,(1995),開 発社
- 2)望月修,丸田芳幸,流体音響工学入門-ゆたかな音環境 を求めて-,(1996),朝倉書店
- 3)鈴木昭次,西村正治,雉本信哉,御法川学,機械音響 工学,(2004),コロナ社
- 4) 望岡田和博,大上芳文,風洞用縮流ノズルの形状相違がもたらす影響について,(2002),日本機会学会講演論文集
- 5) 佐々木良太,西村正治,後藤知伸,重森正宏,噴流発 生音の相似則に関する基礎研究,(2011),日本機会学会 講演論文集
- 6)吉川茂,和田仁,音源の流体音響学,(2007),コロナ社
- 7) Yuta Kato, Gaku Minorikawa, Study on design and prototyping of small low noise tunnel, (2015), Proceedings of Internoise2015