

# 自動二輪車用NO<sub>x</sub>低減排出装置の開発

宮川 和幸・萩原 茂・阿部 治・寺澤 章裕・池田 伸一\*<sup>1</sup>  
長井 一郎\*<sup>1</sup>・梅山 規男\*<sup>1</sup>・木羽 信敏\*<sup>2</sup>・中村 紘\*<sup>3</sup>・安藤 孝\*<sup>3</sup>  
秋山 信\*<sup>3</sup>・清水 哲也\*<sup>3</sup>・田中 康仁\*<sup>4</sup>・宗田 義孝\*<sup>4</sup>・北野 晋吾\*<sup>4</sup>

## Development of Device that decreases oxide of nitrogen for motorcycle

Wako MIYAGAWA, Shigeru HAGIHARA, Osamu ABE, Akihiro TERASAWA Shin'ichi IKEDA\*<sup>1</sup>,  
Ichiro NAGAI\*<sup>1</sup>, Norio UMEYAMA\*<sup>1</sup>, Nobutoshi KIBA\*<sup>2</sup>, Hiroshi NAKAMURA\*<sup>3</sup>, Takashi ANDO\*<sup>3</sup>,  
Shin AKIYAMA\*<sup>3</sup>, Tetsuya SHIMIZU\*<sup>3</sup>, Yasuhito TANAKA\*<sup>4</sup>, Yoshitaka SODA\*<sup>4</sup> and Shingo KITANO\*<sup>4</sup>

### 要 約

NO<sub>x</sub>低減排出装置の設計・試作を行う際に必要となる情報を得ることを目的として、有限要素法による熱流体解析を実施した。解析に必要なパラメータの一部は、二輪車モードとして告示されているISO6460に規定された方法で測定した。この結果を基に、当初検討した形状について低減排出装置内部の温度分布に関する解析を実施した結果、ヒータ表面が過度の温度上昇を示すほか、内箱と外箱の間を通る不均一な空気の流れ等の問題点が明らかとなった。そこで、ヒータの形状・配置の変更や排気ガス流入口の位置変更を行った結果、良好な解析結果を得た。この結果を踏まえて、装置の試作を行い性能評価を行ったところ、66%以上のNO<sub>x</sub>を除去することが可能であった。

### 1. 緒 言

従来NO<sub>x</sub>の除去には、三元触媒を用いて排気ガス中の未燃焼の炭化水素や酸化炭素を還元剤として、エンジン内の高温燃焼によりNO<sub>x</sub>を窒素まで還元する方法が広く利用されてきた。しかしながら、この手法では排気ガス中に一定量以上の酸素が存在すると性能が低下するという欠点があった。また、近年燃費改善のため採用が増えつつある希薄燃焼式ガソリンエンジンに対しては、還元に必要な炭化水素が完全燃焼されてしまうため、十分なNO<sub>x</sub>の分解が行われない。

これに対して、(独)産総研が特許申請中であるSr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>(SRO)は酸素雰囲気中で最高の融点を持つ導電性酸化物であり、現在還元剤を使用せず、窒素希釈したNO(400~500ppm)を約700℃で100%除去することができる。この特性を利用すれば、希薄燃焼ガソリンエンジンにおいても余分な燃料を消費することなくNO<sub>x</sub>の除去することが可能になる。これを利用して、昨年度からNO<sub>x</sub>の直接分解を可能とする全く新しい自動二輪車用NO<sub>x</sub>低減排出装置の開発に取り組んできた。昨年度は、

排気ガス温度と内部温度分布の関係を把握することを目的として、有限要素法を用いて解析を行い、その結果NO<sub>x</sub>分解可能温度を維持するために必要な熱量を得ることができ、その量はアイドリング時で約50Wであることを明らかにした。併せて、自動二輪車の走行状態と排気ガス温度を関連づけて測定可能なシステムを構築した。本年度は開発を行う自動二輪車用排気ガス中NO<sub>x</sub>低減装置に関して大きさや形状の制約を確認し、限られた条件において最も有効にNO<sub>x</sub>の除去が可能となるガスの流路形状について有限要素法を用いた数値計算を行い、複数の形状モデルを提案する。そのモデルに従いNO<sub>x</sub>低減装置の設計・試作を行うことを目標として研究を実施した。

なお、本研究は平成18年度地域新生コンソーシアム研究開発事業に採択されたものであり、本報告はその一部である。

### 2. NO<sub>x</sub>低減排出装置の検討及び試作

#### 2-1 熱流体解析を用いた装置の形状設計

##### 2-1-1 FEM解析用パラメータの測定

NO<sub>x</sub>低減排出装置のFEM解析を行う際に使用する、各種のパラメータを求める目的で以下の測定を実施した。今回はまず、FEM用パラメータとして排気ガスの流量、エンジンから排出される排気ガス温度を測定する

\*1 独立行政法人産業技術総合研究所

\*2 国立大学法人山梨大学

\*3 株式会社ミラプロ

\*4 株式会社エスエフシー

こととした。現在の二輪車の排出ガス試験方法としては、平成9年3月に国際的に多く採用されているISO6460に規定するモードが二輪車モードとして告示されている。従って、これらの値を測定する場合もISO6460に沿って測定することが必要となる。本試験方法は、測定対象二輪車に対して実際の走行状態を模した種々の負荷を課すことが必要であり、当該試験を行うためには二輪車の原動機に負荷を与えるためのシャシーダイナモおよび負荷に応じた送風機構を有する試験設備が必要となる。今回は、この設備を有する財団法人日本車両検査協会東京検査所において測定を実施した。図1に試験装置および測定の様子を示す。



図1 試験装置および測定の様子

今回の測定に使用した二輪車の概要を表1に示す。

表1 使用した二輪車の概要

名称・形式	スズキ チョイノリ・BA-CZ41A
エンジン形式	空冷4サイクル単気筒49cm <sup>3</sup>
最高出力	1.5kW (2.0PS) /5,500rpm
最大トルク	2.9N・m (0.30kg・m) /3,500rpm

二輪車は後輪がシャシーダイナモのローラーに接するよう位置を調整し前輪を固定する。前方のモニタに表示される走行パターンに従い、スロットルを調整しエンジン回転数を変化させる。その際、二輪車前方のシロッコファンからローラー回転数に応じて風が送られるようになっている。また、この走行シミュレーションによる排気ガスを収集することにより、NO<sub>x</sub>、HC、COの測定が可能である。今回は車両検査協会の通常測定とは異なり、排気温度および排気ガス流量を測定することとした。

排気温度の測定にはφ3.2のシース型熱電対 (K type) を使用した。排出直後からマフラー内を移動する際の温度変化を把握することを目的として、エンジン近傍からマフラーに5か所穴をあけ、その中にシース型熱電対を

挿入し温度を測定した。これら5か所の温度データおよび流量計からのデータはデータロガー (NR-1000 株式会社キーエンス製) を用いて記録した。排気ガス温度の測定箇所を図2に示す。



図2 排気ガス温度測定箇所 (5か所)

今回サンプリング間隔は1secに設定した。測定結果を図3に示す。

排気ガス温度は測定位置によって大きく異なり、エンジン直近とサイレンサー以降とは200℃以上異なった。また、エンジン負荷の変化は、エンジンに近いほど排気ガス温度に影響を与えることが確認され、エンジン直近では最高で900℃以上となった。負荷が小さいアイドリング状態での排気ガス温度は350~400℃程度であった。

排気ガスの流量はエンジンの負荷によって異なるが、1~4 m/s程度であった。

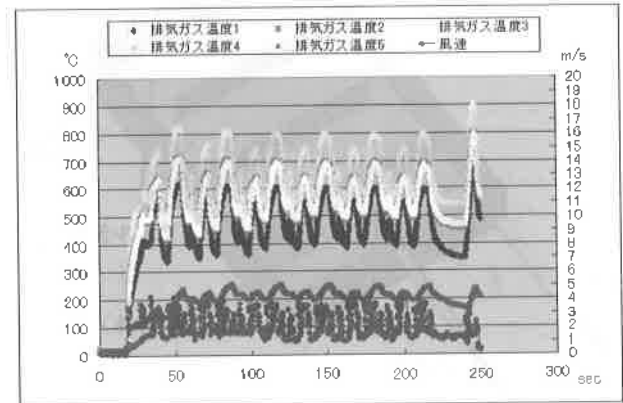


図3 測定結果

この結果から、エンジン負荷と排気ガス温度に関して代表的な条件として、始動直後スロットル全開時 (条件①)、暖気後アイドリング時 (条件②)、暖気後スロットル全開時 (条件③) を設定した。今回の実験において、排気ガス流量の単位はm/sであったが、FEM解析におい

表2 FEM解析に使用するパラメータ

	排気温度 (°C)	流量 (l/min)
条件①	523	32
条件②	400	14
条件③	798	50

て求められる単位はl/minであることから、装置の排気ガス取り込み口の面積を考慮して単位を変換した。その結果、表2において示した値が得られ、これらを用いてFEM解析を行うこととした。

### 2-1-2 装置の大きさと内部温度

NOx低減装置を50ccバイクに取り付けるために設計を行った。取り付け場所としては、フロア型ステップ部の下面が最適と思われた。装置の進行方向の長さは、前輪と接触しないように300mm以下、装置の厚さは、地面と接触しないために100mm以下となる必要があった。NOxを除去するためには、排気ガスの温度を700℃以上に加熱してフィルタ部を通過させる必要があるため、排気ガスを効率よく加熱する構造が必要である。装置内部の保温性能を向上させるため、図4に示すような、内箱と外箱からなる二重構造の筐体を開発した。内箱の中にはフィルタを詰めておき、排気ガスが、フィルタを透過する流路をジグザグとなるようにした。流入口から入った排気ガスは棒状のヒータにより加熱され、フィルタ部をジグザグに通る、保温性能を高めるため内箱と外箱の間を通り抜けて、排気口から排気される構造である。

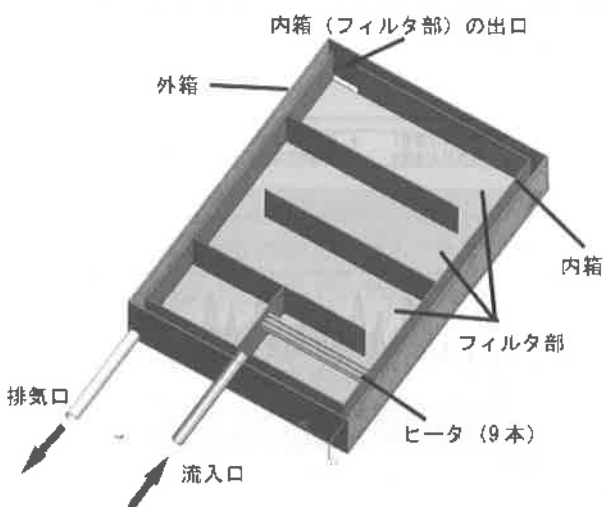


図4 装置の構造

### 2-1-3 装置内部の熱流体解析

NOx除去のためにはフィルタ部を通る排気ガス温度を700℃以上に加熱する必要がある。そこで、コンピュータシミュレーションにより排気ガスの温度が700℃以上になるかどうか、熱流体解析を行った。使用したソフトウェアと各物性値は以下のとおりである。

ソフトウェア：

モデル作成 NX3.0  
(株)電通国際情報サービス  
メッシュ作成 ANSYS10.0

(サイバネットシステム(株))

熱流体解析 CFX10.0

(サイバネットシステム(株))

流体の物性値 (NO<sub>2</sub>)：

モル質量 46.01 [kg/kmol]  
比熱 789 [J/kg·K]  
動粘度  $1.32 \times 10^{-5}$  [kg/m·s]  
熱伝導率 0.01457 [W/m·K]

筐体の物性値 (鉄)：

密度 7854 [kg/m<sup>3</sup>]  
比熱 434 [J/kg·K]  
熱伝導率 60.5 [W/m·K]

シミュレーションでは、流入管、排気管、ヒータ部での発熱、筐体の最外壁での大気による冷却を境界条件として設定した。ヒータ部は、φ 3 mm×90mmのヒータ9本が5 mm間隔で配置してあり、9本合計で200Wの熱量が発生する条件とした。排気口は大気への自然開放とし、流入口については、実測データの圧力値を使用した。各境界条件は以下のとおりである。

境界条件

ヒータ部： 発熱量 34231196 [W/m<sup>3</sup>] (\*1)

排気口： 大気圧開放

筐体最外壁：熱伝達係数 6 [W/m<sup>2</sup>·K] (\*2),  
外気温 25 [°C]

流入口： 条件①始動直後スロットル全開時  
(温度523 [°C], 速度3 [l/min])  
条件②暖気後アイドリング時  
(温度400 [°C], 速度14 [l/min])  
条件③暖気後スロットル全開時  
(温度798 [°C], 速度50 [l/min])

(\*1) 200 [W]をヒータ9本の体積 $1.5\text{mm}^2 \times \pi \times 90\text{mm} = 5.72555 \times 10^{-6} \text{m}^3$ で割った値)

(\*2) 外壁が空気の自然対流によって冷やされる場合の値)

上記の条件を設定し、乱流モデルはSST (Shear Stress Transport) を使用して、定常解析を行った。条件①、②および③の装置内部の温度分布をそれぞれ図5、6、7に示した。なお、図中の温度単位はケルビン [K] で示した。

フィルタ部でもっとも温度が低くなる内箱の出口付近の温度は、条件①、条件②および条件③でそれぞれ、858℃、810℃および1006℃であり、いずれの場合においても、流入した排気ガスは、ヒータによって加熱された後、700℃以上の温度でフィルタ部を通過することがわかった。また、外箱の温度は105～368℃程度であり、

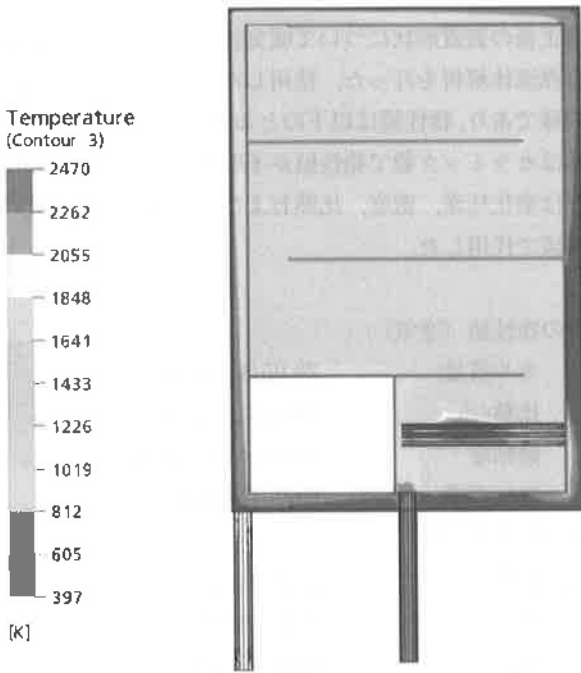


図5 条件①始動直後スロットル全開時の温度分布  
(温度523[°C], 速度32[l/min])

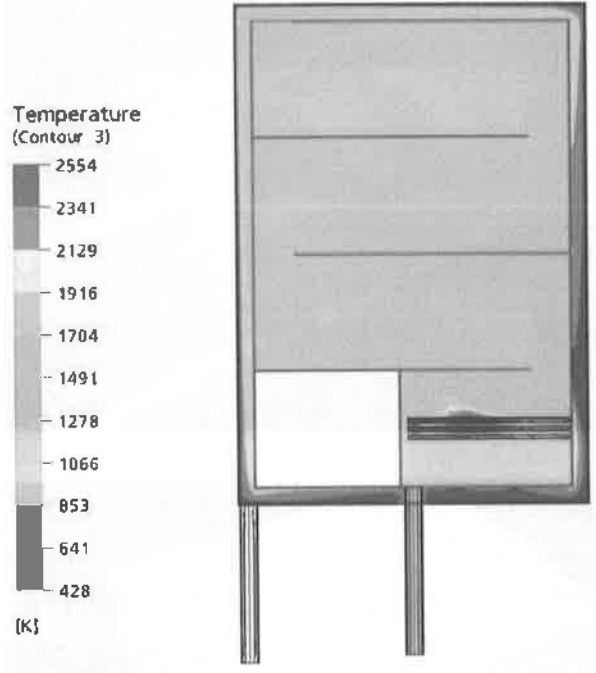


図7 条件③暖気後スロットル全開時の温度分布  
(温度798[°C], 速度50[l/min])

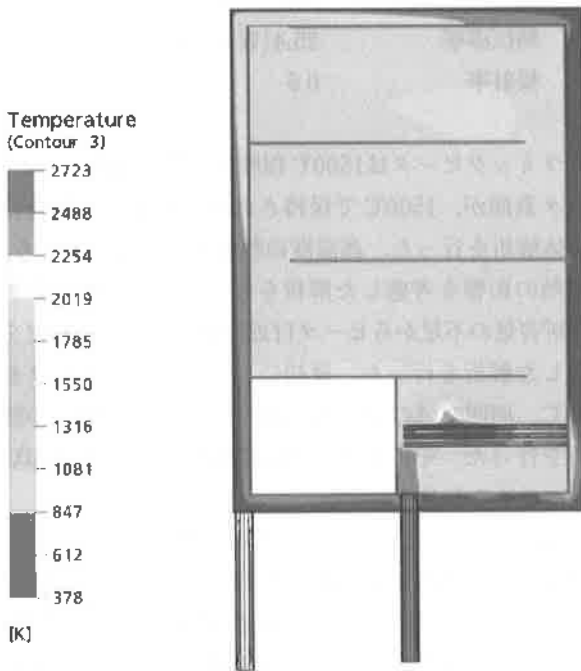


図6 条件②暖気後アイドリング時の温度分布  
(温度400[°C], 速度14[l/min])

保温の効果が確認できた。

また、条件①、②および③の装置内部の流速分布を解析した結果、流入した排気ガスは、ヒータを設置した第一室の中で細かな渦を形成することがわかった。ヒータの周囲で渦が形成され、効率よく熱が発散されることが予想される。加熱された排気ガスは、内箱内部をジグザグに流れ、内箱を出た排気ガスは、内箱を取り囲むよ

うに流れて、排気口から排出される。この形状では、内箱の出口と排気口が、同じ左側に位置するため、内箱と外箱の間では左側の流れの方が速くなっていることがわかった。

#### 2-1-4 光造形による形状確認

熱流体解析の結果から、ヒータによる加熱でフィルター内の排気ガスの温度を700°C以上に保持できることがわかった。そこで、光造形（ディーメック社製 JSC-2000）により、装置のモックアップモデルを作製し、詳細な形状確認を行うこととした。光造形は、コンピュータシミュレーションで使用した3次元CADデータを元に、レーザ光線で光硬化性樹脂を硬化させて積層することで、デザインされたモデル形状と同じ実物モデルを短時間に作製することが可能である。

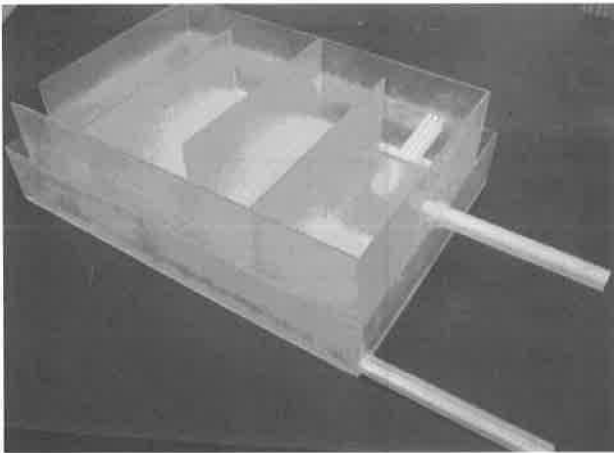
装置のモックアップモデルを用いて、空気の流れ方の検討、流入管の取付け法の検討、詰め込み可能なフィルター量、バイクに取り付けた場合の各部との干渉状態などを確認した。

#### 2-1-5 装置形状の改善点

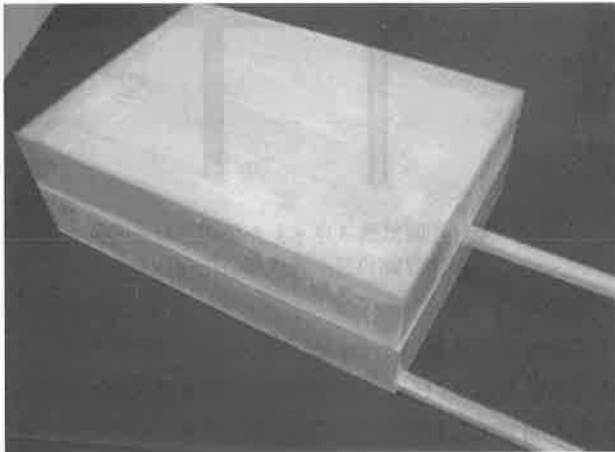
前節までのコンピュータシミュレーション及びモックアップモデルによる検討の結果、次の問題点が上げられた。

- ・ヒータ表面の温度が高い
- ・内箱と外箱の間を通る空気の流れが均一でない
- ・フィルターの交換時の作業法

そこで、以下の点を改善し、新たに設計を行った。修正後の形状を図9に示す。



内部



装置外観

図8 光造形で製作したモックアップモデル

- ・ヒータの表面積を増大し、排気ガスと接触する面積を増やすことで、ヒータ表面の温度を低下させる。
- ・ヒータの根元部分から排気ガスを流入させ、外壁へ伝わる熱伝導を抑えた。

内箱の排気ガス出口と、排気口を対角となるように配置し、内箱と外箱の間を流れる空気の流れを均等にした。

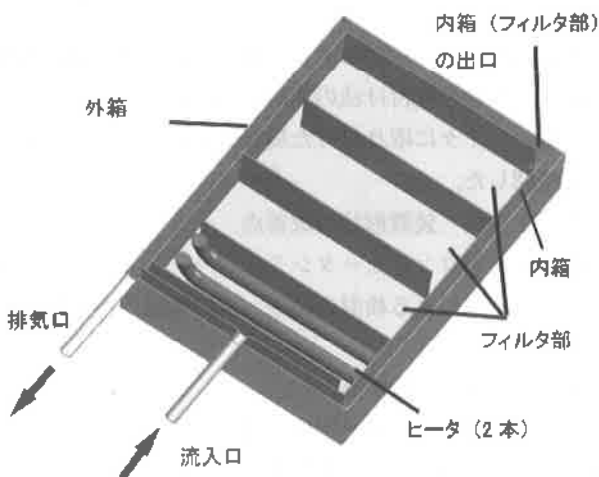


図9 改善した装置の形状

## 2-1-6 修正形状の熱流体解析

修正後の装置形状について暖気後アイドリング時における熱流体解析を行った。使用したソフトウェアは前回と同様であり、物性値は以下のとおりである。なお、ヒータ部はセラミック製で物性値が不明であったので、熱伝導率は窒化珪素、密度、比熱および輻射率は耐火煉瓦の物性値で代用した。

流体の物性値 (空気) :

モル質量	28.96 [kg/kmol]
比熱	1004.4 [J/kg·K]
動粘度	$1.831 \times 10^{-5}$ [kg/m·s]
熱伝導率	0.0261 [W/m·K]

筐体の物性値 (鉄) :

密度	7854 [kg/m <sup>3</sup> ]
比熱	434 [J/kg·K]
熱伝導率	60.5 [W/m·K]
輻射率	0.4

ヒータの物性値 (窒化珪素, 耐火煉瓦) :

密度	2645 [kg/m <sup>3</sup> ]
比熱	960 [J/kg·K]
熱伝導率	25.4 [W/m·K]
輻射率	0.6

セラミックヒータは1500℃程度まで昇温可能である。ヒータ表面が、1500℃で保持されると仮定した場合の熱流体解析を行った。高温の熱解析となることから、輻射熱の影響を考慮した解析を行うが、コンピュータの解析容量の不足からヒータ付近の形状に限って輻射を考慮した解析を行った。最初に、セラミックヒータを1500℃、周囲空気の温度を300℃とし、ヒータ周りの熱解析を行った。その結果、壁面は輻射熱により1100℃程度になることがわかった。

この結果を基にして、ヒータ表面温度を1500℃、ヒータ周りの壁面温度を1100℃に保持した状態で熱流体解析を行った。排気口は大気への自然開放とし、流入口については、暖気後アイドリング時の実測データ値 (温度 400 [℃], 速度 14 [l/min]) を使用した。境界条件は以下のとおりである。

境界条件

筐体の最外壁 :

熱伝達係数 6 [W/m<sup>2</sup>·K] (\*1)

外気温 25 [℃]

(\*1 外壁が空気の自然対流によって冷やされる場合の値)

上記の条件を設定し、乱流モデルはSST (Shear Stress Transport) を使用して、定常解析を行った。装置内部の温度分布を図10に示す。なお、図中の温度単位はケルビン[K]である。

フィルタ部でもっとも温度が低くなる内箱の出口付近の温度は、749℃であり、流入した排気ガスは、ヒータによって加熱された後、700℃以上の温度でフィルタ部を通過することがわかった。また、外箱の温度は231～452℃程度で保持されることが確認できた。

次に、装置内部の流速分布を図11に示す。解析結果を見ると、流入した排気ガスは、ヒータを設置した第一

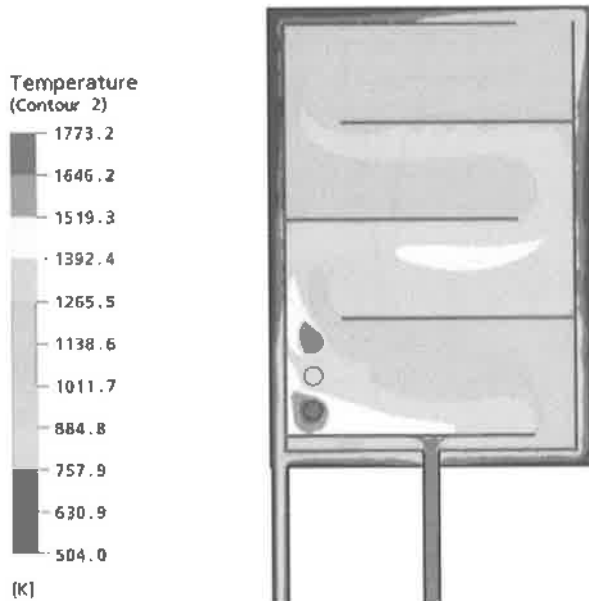


図10 暖気後アイドリング時 (温度400[℃]、速度14[l/min]) の温度分布

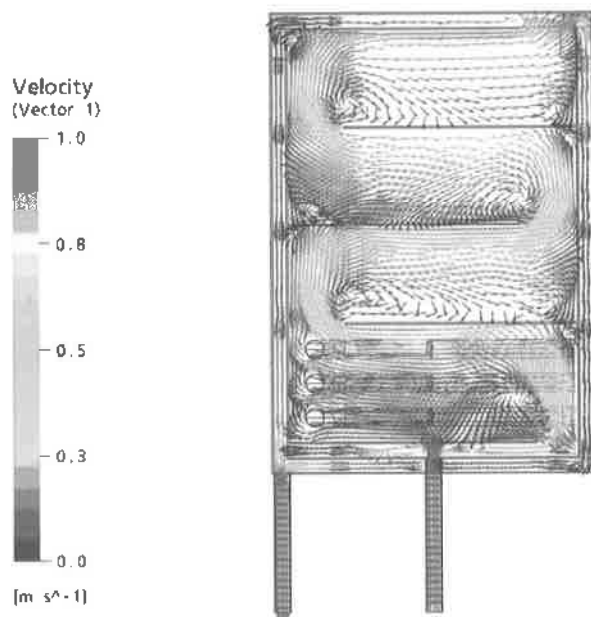


図11 暖気後アイドリング時 (温度400[℃]、速度14[l/min]) の流速分布

室で渦を巻くように流れており、排気ガスを効率よく加熱することが確認できた。また、内箱を出た排気ガスは、内箱を取り囲むように均一な流量で流れて、排気口から排出され、課題を克服することができた。

## 2-2 低減排出装置の製作

### 2-2-1 装置試作の概要

前項の解析を基に、低減排出装置の試作を行った。製作にあたっては解析結果およびラピッドプロトタイピングにより作成されたモデルを基本にすることとした。以下に製作にあたり留意した項目を述べる。

- 試作装置の筐体は二重構造であり、かつ内部のNOx除去フィルタが交換可能であること
- ヒータによる加熱が可能であること
- 温度センサの取り付けが可能であること
- 実験に使用する二輪車に試作装置が搭載可能であること

以上により試作装置の部品図・組み立て図の作成を行い、試作を行った。内部にヒータを搭載し局部的に1000℃以上になることが予想されることから、素材にはSUS304を用いた。曲げ加工を行った後、TIG溶接ならびにボルトナットによる締結を行い、筐体を作成した。図12に試作品の概要を示す。

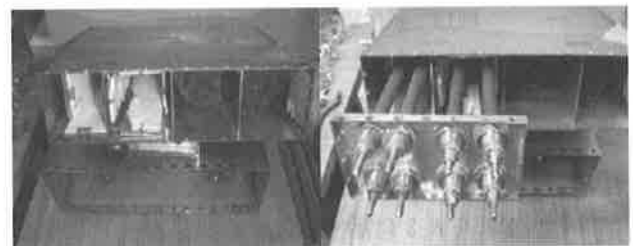


図12 試作品概要図

左側2室にヒータが収納され、右側2室にSROを搭載する構造である。なお、ヒータが収納される2室には、内壁にセラミック板を設置することにより保温効果を持たせることとした。また、下側の筐体内に上の筐体が収納される二重構造となっている。

使用した温度センサはφ3.2のシース型熱電対 (K type) である。熱電対を挿入・固定した後にX線テレビ検査装置 (PRO-TEST-150 (株)ソフテックス製) を用いて内部を非破壊で観察し、内部のSROが圧縮され偏っていないことを確認した。

完成した試作装置は、空間的制約によりステップの下に取り付けることとしたため、エンジン排気口から試作装置の入り口に排気ガスを導入するS字管および取付治具を作成した。

試作装置を取り付ける前に、予備的にヒータ加熱実験を行ったところ、SUS304の二重構造のみでは外部へ逃

げる熱量が大きく、装置内部が十分加熱されないことが確認された。そこで外部へ熱量を逃さないことを目的に、筐体外側をガラス繊維（シロカウールシート、中部工業製、厚さ約3mm）で包み、更にアルミニウム薄板で覆うこととした。以上の過程を経て、NO<sub>x</sub>低減排出装置を試作した。完成した試作装置を試験車両に搭載した様子を図13に示す。

### 2-2-2 NO<sub>x</sub>除去性能の検証

開発した装置を用いてNO<sub>x</sub>除去性能に関する検証を行った。測定はISO6460に規定された二輪車モードにおいて実施した。実際の走行状態を模した種々の負荷を



図13 試作装置および搭載状況

課した状態を6回繰り返し、6回目の排気ガスをNO<sub>x</sub>センサを用いて測定し、その平均値を求めた。今回の測定も、財団法人日本車両検査協会東京検査所において行った。その結果を表3に示す。通常のマフラーを使用した場合、平均NO<sub>x</sub>濃度が307ppmであったのに対し、試作装置を装着した場合の平均NO<sub>x</sub>濃度は289ppmであった。それに対して、試作装置のヒーターを加熱しSROがNO<sub>x</sub>を分解可能な状態では、98ppmという結果が得られた。従って、試作装置を装着し、SROによるNO<sub>x</sub>分解が可能な領域において

$$(289-98)/289*100=66.08 (\%)$$

となり、66%以上のNO<sub>x</sub>削減が可能であった。

## 3. 結 言

1) 自動二輪車用NO<sub>x</sub>低減排出装置の設計を行い、形状について有限要素法による熱流体解析を実施した。その結果、ヒータの形状・配置の変更や排気ガス流入口の位

置変更を行うことで良好な解析結果を得ることができた。

2) 解析結果を踏まえて、装置の試作を行った。試作装置の性能を検証したところ、66%以上のNO<sub>x</sub>を除去することが可能であった。

表3 NO<sub>x</sub>濃度測定結果

	平均NO <sub>x</sub> 濃度 (ppm)
純正マフラー装着時	307
試作装置 (加熱なし)	289
試作装置 (加熱あり)	98