

## ディーゼル・エンジンの燃費改善（第4報 SAC Ball）

木下勝晴\*・横井隆治\*・角毅一郎\*\*・辻 雅之\*\*\*

濱崎喬平\*\*\*・森 英世\*\*\*・森 正太\*\*\*

### 1. ま え が き

#### 1.1 ディーゼル・エンジン

内燃機関の実用化には、オットー（Nikolaus August Otto 1832～1891）が吸入、圧縮、燃焼、排気の行程をもつ4サイクル・エンジンの原形を1876年に完成させた。これに遅れること1892年にルドルフ・ディーゼル（Rudolf Diesel 1858～1913年）は「空気を極端に圧縮して、その際に上昇する温度を利用して、その中に噴射した燃料に自然発火させる」という圧縮着火機関の論文を発表しイギリスの特許を取得している。その後種々試作を繰返し、1897年に実用可能な高効率（当時）エンジンを完成させた。

ディーゼル・エンジンは、廉価な重油が使える熱効率の良いこと、気化器、点火装置が不要なこと等の特徴により、各種の原動機として広く使用され今日まで発展してきた。<sup>1)</sup>

このエンジンは、吸入した空気のみを圧縮して、高温高压状態（燃焼室）の空気中に霧状の燃料を噴射して、自己着火させる。空燃比が理論空燃比より大きい状態での燃焼（希薄燃焼・リーンバーン）であり、ガソリン・エンジンに比べて、不完全燃焼により発生する一酸化炭素（CO）や未燃焼ガスの炭化水素（HC）の発生が非常に少ない。ディーゼル・エンジンは高温燃焼で発生する窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）を特定の運転状態ではガソリン・エンジンより多く発生するが、その他の運転状態では、ガソリン・エンジンと同等か、それ以下であるが、エンジン（排気量）がガソリン・エンジンより大きく、排出量が多いため大気中に排出される絶対量の関係でNO<sub>x</sub>の排出に関してイメージを悪くしている。（特に日米でダーティ・エンジンのレッテルが貼られている）

また、このダーティ感は、排出ガス中の黒煙（PM・SPM）に一因がある。ディーゼル・エンジンの燃焼は、高温高压の空気中に燃料を噴射して成層燃焼状態（不均一混合燃焼）を形成する、この過濃混合気帯での燃焼（リッチバーン）で黒煙（煤）が生成される。この成層燃焼方式では



ルドルフ・ディーゼル

\*NAC 環境科学研究会 \*\*（有）SSJ 代表取締役 \*\*\* 専攻科・自動車工学専攻14期生

理論的に黒煙を生成する。

最近のディーゼル・エンジンは、これ等の低減を図るため超高压で燃料を噴射する方式を採用している。高压噴射すると燃料の粒径を微細化し空気との接触性が向上する。

この高压噴射方式は、燃料を完全燃焼に近い状態で燃焼を行うことでPMを殆ど排出しない。また燃料噴射システムを電子制御化することで、噴射タイミング、噴射量を運転状態に応じて適切な時期に適切な量を供給可能となり、コモン・レール式やユニット・インジェクション式が採用され排出ガスが清浄化されている。

ディーゼル・エンジン特有の騒音（ディーゼル・ノック）も燃料の微粒化と多段噴射（パイロット噴射+メイン噴射）により、燃焼初期が緩燃焼になり、燃焼温度、燃焼圧力の異常な上昇を防ぎ騒音、NOxが共に低減される。また、燃費も改善されている。

ディーゼル・エンジンの最大の長所である、熱効率はガソリン・エンジンより十数パーセント高く、近年熱効率が45%以上のエンジンも出現している。<sup>2)</sup>

人類最大の課題で世界の最重要問題である「地球の温暖化」に適したエンジンであるとして、ヨーロッパでは、コモン・レール式やユニット・インジェクション式エンジンに加えて排ガス後処理装置（触媒等）を装着したディーゼル・エンジン車が普及している。この地球に優しいエンジンは21世紀の主流になるものの一つと考えられる。

## 1.2 SAC Ball

SAC Ball は遊星運動（回転）する容器にボールの基材になるセラミックスやアルミニウム等を投入し、その中に粉末状のチタン等を添加して、球の表面に酸化チタン等を着層させて作製される。

SAC Ball は埼玉県上尾市の（有）SSJ社製で、外観等は前報（不二機販）の物と同形。基材がアルミニウムの物は光沢を有する。製造機、製造法は特許（出願中）の関係で詳細は報告できない。図-1にSAC Ballとエンボス加工のTitanium Sheetを示す。

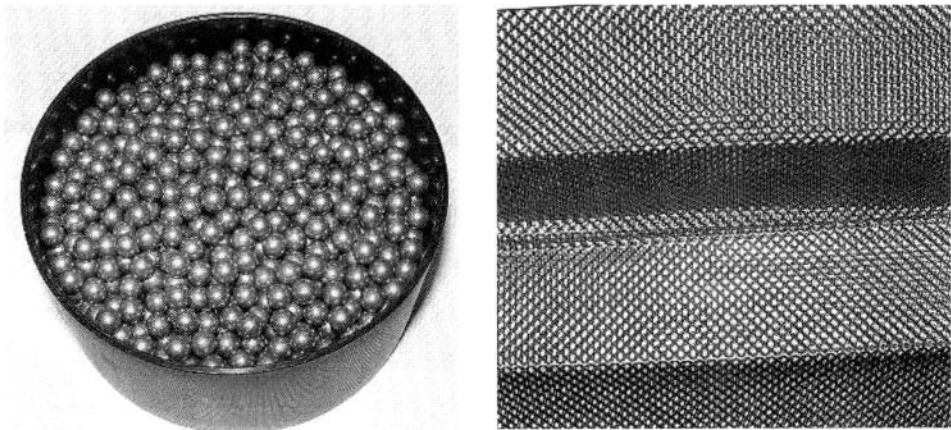


Fig - 1 SAC Ball & Titanium Sheet

## 2. 実験装置

実験に用いたエンジンは日産自動車（株）の NISSAN CARAVAN 用ディーゼル・エンジンを用いた。その主要諸元を表-1 に示す<sup>3)</sup>。

エンジン制御には東京メータ（株）製のエンジン動力計を用いて、エンジン負荷、回転数を、当該エンジンが搭載されている車両（キャラバン）の平坦路走行に相当するよう設定して実施した。動力計の主要諸元を表-2 に示す。

Table - 1 エンジン諸元

エンジン型式	LD20TII
排気量（内径×行程）	85×86
最高出力（kW/min <sup>-1</sup> ）	52/4400
最大トルク（Nm）	167
燃焼室形式	渦流室
圧縮比	21.3
過給機	ターボチャージャ

Table - 2 動力計

動力計型式	EW - 150EP
動力吸収形式	渦電流式
吸収出力（max）	110 [kW]
力量計	自動振子天秤

SAC Ball をエンジン燃料系の途中に容器を設けて、SAC Ball をその容器に封入し、燃料路をバルブにて切替える構造とした。図中のパイプ内に SAC Ball 封入。

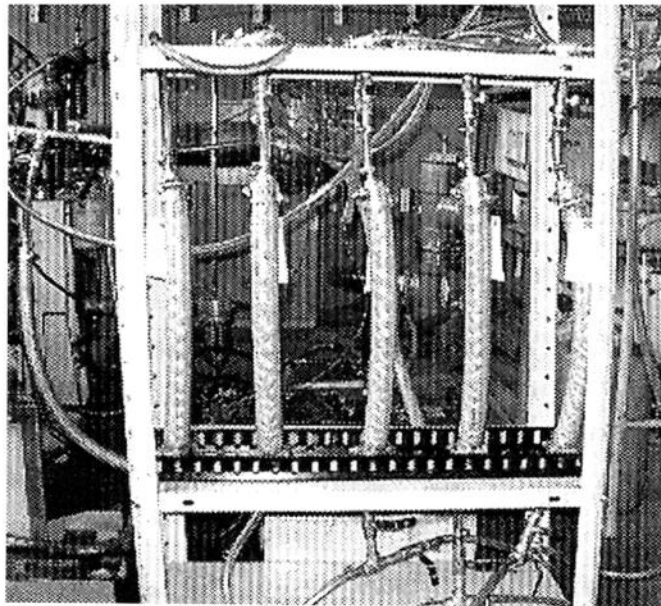


Fig - 2 浸漬燃料

### 3. 実験方法

各走行パターン (40km/h, 50km/h, 60km/h 走行時<sup>3)</sup>) の速度に相当する, エンジン回転数, 各走行抵抗に相当する, エンジン負荷 (トルク) ごとに実験を行った。実験装置のパイプに SAC Ball を0.5kgf, 1.0kgf, 1.5kgf, 2.0kgf, 2.5kgf 封入した浸漬燃料と標準燃料との燃料消費量, 燃料消費時間を各々計測する。

エンジン回転数[ $\text{min}^{-1}$ ], エンジン負荷[kgf], 燃料消費量[ $\text{cm}^3$ ], 燃料消費時間[S] 等の計測データを以下の計算式により, エンジン出力[kW], 車速[km/h], 燃料消費率[g/kW·h] 等を求めた。

負荷トルク : T

$$T = F \times g \times L \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

F : 動力計荷重(kgf)

g : 重力加速度

L : 動力計アーム長(m)

エンジン出力 : P [kW]

$$P = T \times \omega$$

$\omega$  : 角速度( $2\pi \text{ N} / 60$ )

燃料消費率 :  $\eta_i$

$$\eta_i : G / (P \times h)$$

G : 燃料消費量(g) =  $v \times \gamma$

v : 消費量( $\text{cm}^3$ )

$\gamma$  : 比重

P : 出力(kW)

h : 時間(h)

$$\eta_i : v \times \gamma \times 3600 / (F \times g \times L \times 2\pi \times N / (60 \times 10^3))$$

速度 : V

$$V = r \times \omega \text{ [km/h]}$$

V : (km/h)

r : 駆動輪径(半径)(m)

$\omega$  : 角速度

N : 駆動輪回転速度

$$N = N_e \text{ (エンジン回転速度)} / (R)$$

R : 総減速比

$$V = r \times 2\pi N_e / (60 \times R)$$

#### 4. 実験結果

車速40km/h, 50km/h, 60km/h 各車速における標準燃料（N）と SAC Ball 浸漬燃料の燃料消費率（平均値）を表－3, 4, 5, 6 及び図－3, 4, 5, 6 に示す。

##### 4.1 SAC Ball 型番01B5

基材：Ceramics + (TiO<sub>2</sub> + Ag)

Table - 3 平均燃費率 [g/kWh]

	N	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km/h	351.03	334.04	330.45	325.24	322.13	320.09
50km/h	339.18	331.33	331.59	327.33	323.77	320.66
60km/h	326.54	317.97	315.75	316.09	313.33	311.12

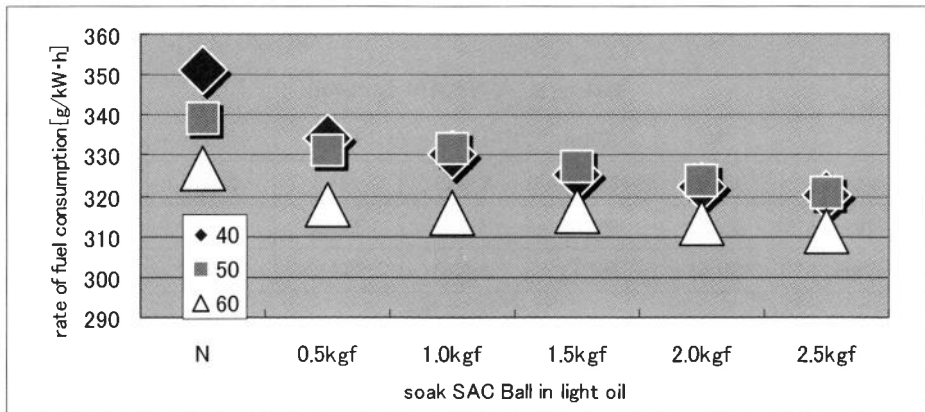


Fig - 3 燃費率 (01B5)

##### 4.2 SAC Ball 型番01AA5

基材：Aluminum + (TiO<sub>2</sub> + Ag)

Table - 4 平均燃費率 [g/kWh]

	N	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km/h	352.30	333.62	327.55	323.89	318.30	313.95
50km/h	349.54	334.41	330.87	323.95	319.75	316.64
60km/h	326.41	314.04	309.44	309.68	302.12	298.16

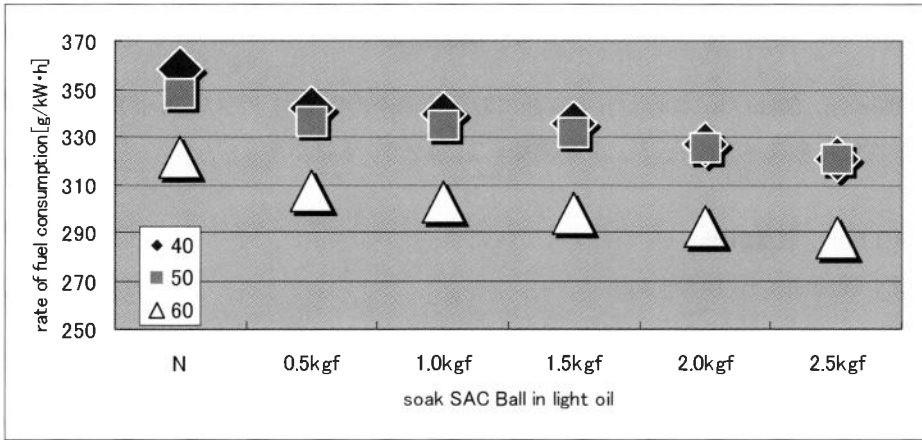


Fig - 4 燃費率 (01AA5)

### 4.3 SAC Ball 型番02AA5

基材：Aluminum + (TiO<sub>2</sub> + Ag + α)

Table - 5 平均燃費率 [g/kWh]

	N	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	358.05	341.96	339.49	335.3	326.74	320.96
50km / h	348.33	336.05	334.54	331.32	325.11	320.48
60km / h	321.51	307.43	302.20	298.12	292.02	287.59

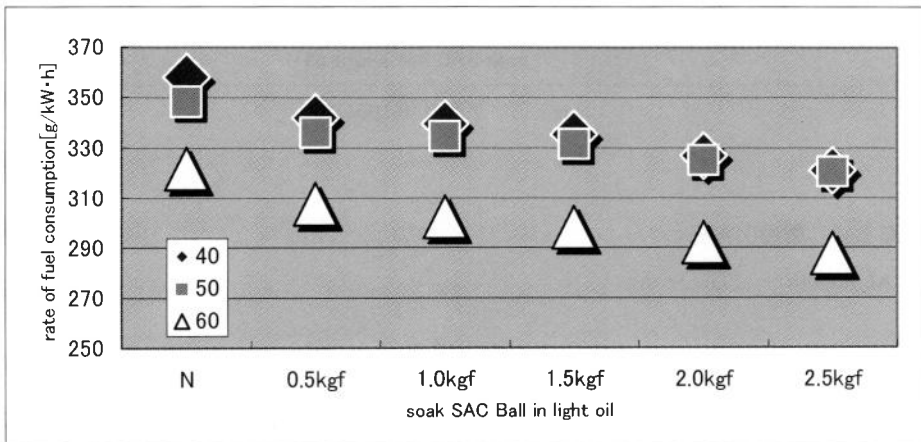


Fig - 5 燃費率 (02AA5)

#### 4.4 Titanium Sheet

エンボス加工チタン板

Table - 6 平均燃費率 [g/kWh]

	N	①	②	③	④	⑤
40km/h	369.92	355.74	352.18	346.27	339.64	335.31
50km/h	340.47	331.16	324.93	320.31	314.40	308.57
60km/h	318.25	304.94	299.91	294.83	288.95	287.50

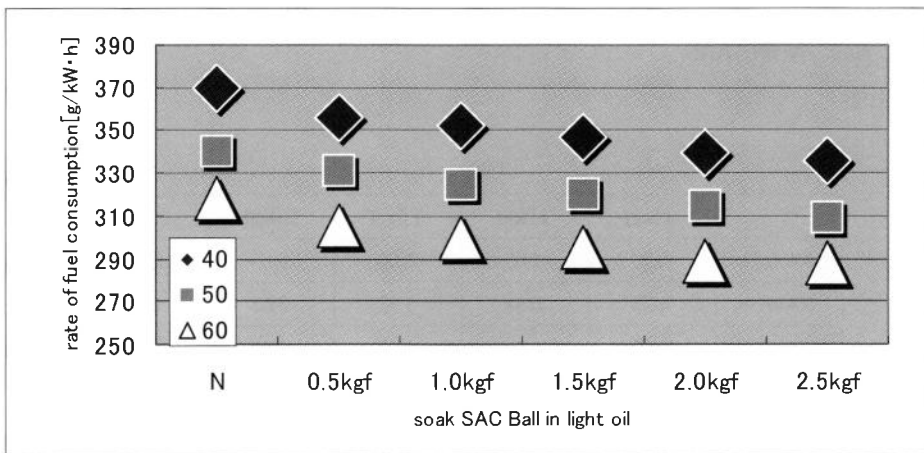


Fig - 6 燃費率 (Titanium Sheet)

#### 5. 考察

燃費改善（向上）率

向上率： $\eta_i$

$$\eta_i = (\eta_n - \eta_i) / \eta_n$$

$\eta_n$ : 標準燃料燃費率  
 $\eta_i$ : 浸漬燃料燃費率

標準燃料と各浸漬燃料の燃費向上率を表-7, 8, 9, 10及び図-7, 8, 9, 10に示す。

5.1 SAC Ball 型番01B5

燃費向上率

Table - 7

	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	4.84	5.86	7.35	8.23	8.81
50km / h	2.31	2.53	3.49	4.54	5.46
60km / h	2.62	3.30	3.20	4.04	4.72

5.2 SAC Ball 型番01AA5

燃費向上率

Table - 8

	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	5.30	7.02	8.06	9.65	10.88
50km / h	4.33	5.34	7.32	8.52	9.41
60km / h	3.79	5.20	5.13	7.44	8.65

5.3 SAC Ball 型番02AA5

燃費向上率

Table - 9

	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	4.79	5.18	6.35	8.74	10.36
50km / h	3.53	3.96	4.88	6.66	7.99
60km / h	4.38	6.01	7.27	9.17	10.55



## 5.4 Titanium Sheet

燃費向上率

Table -10

	①	②	③	④	⑤
40km/h	3.83	4.79	6.39	8.18	9.36
50km/h	2.73	4.56	5.92	7.65	9.37
60km/h	4.18	5.76	7.36	9.21	9.66

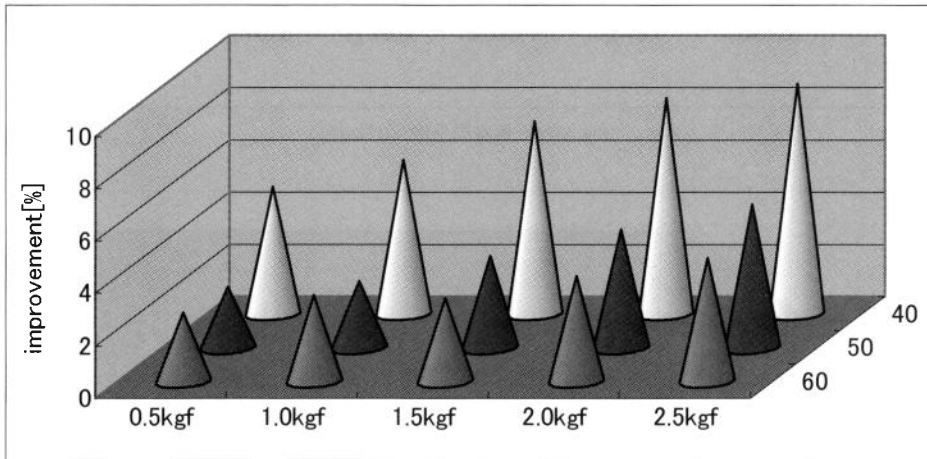


Fig - 7 燃費向上率 (01B5)

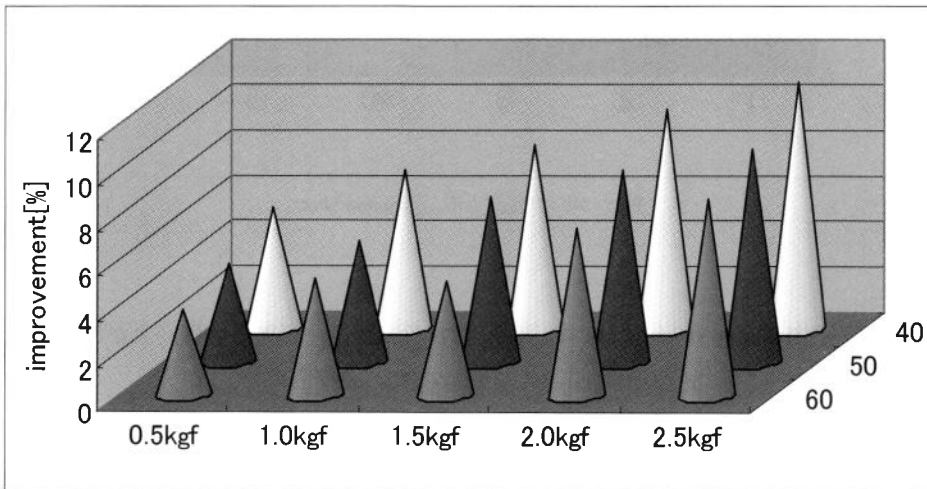


Fig - 8 燃費向上率 (01AA5)

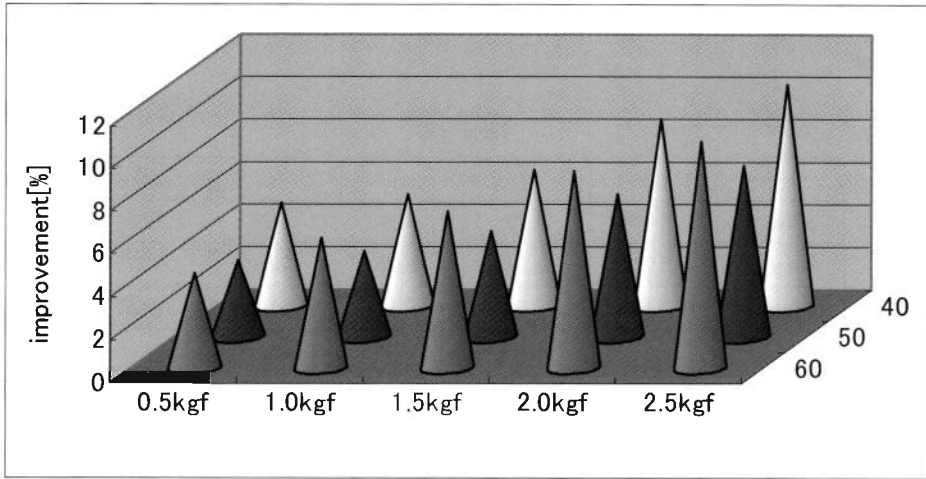


Fig - 9 燃費向上率 (02AA5)

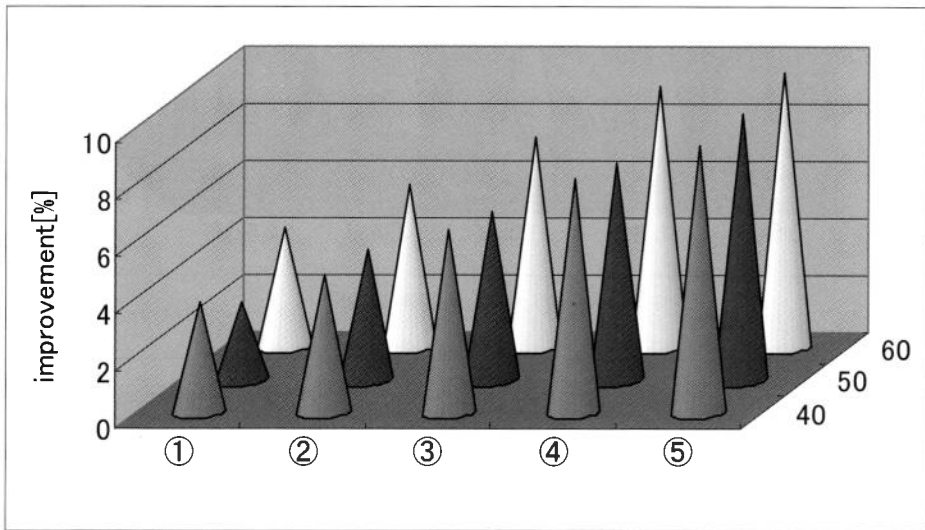


Fig - 10 燃費向上率 (Titanium Sheet)

SAC Ball 及び Titanium Sheet において、各車速、負荷で約 3 ~ 10% の燃費向上が確認できた。車速 50km/h、60km/h では型番 01B5 と 01AA5、02AA5 との差が表れた。

基材の表面に着層させた物質の違いによるものが影響していることが考察される。

各車速における比較を図-11, 12, 13 に示す。

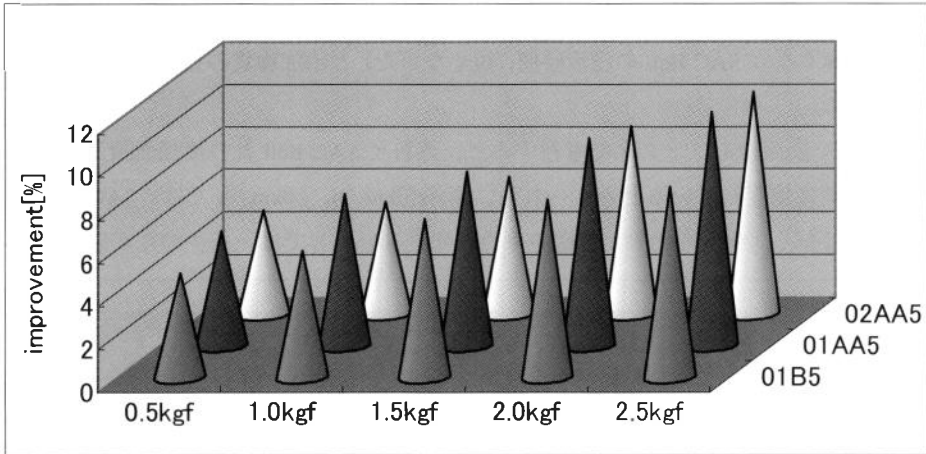


Fig -11 燃費向上率 (40km/h)

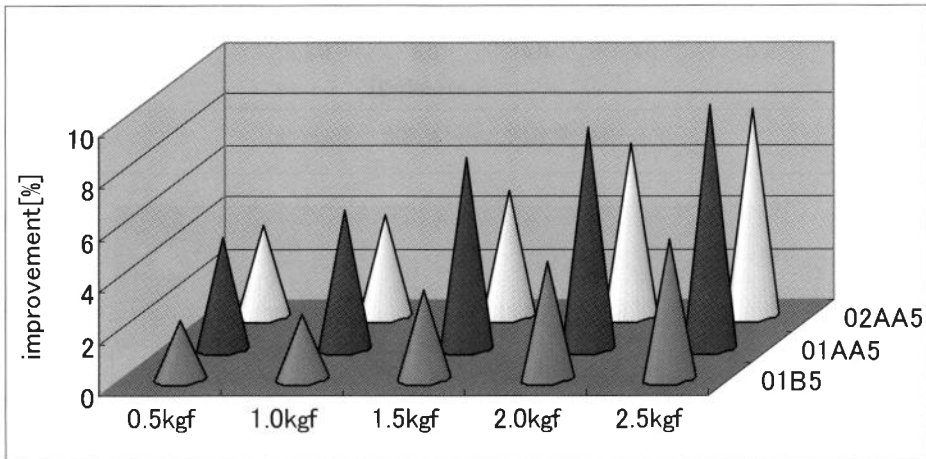


Fig -12 燃費向上率 (50km/h)

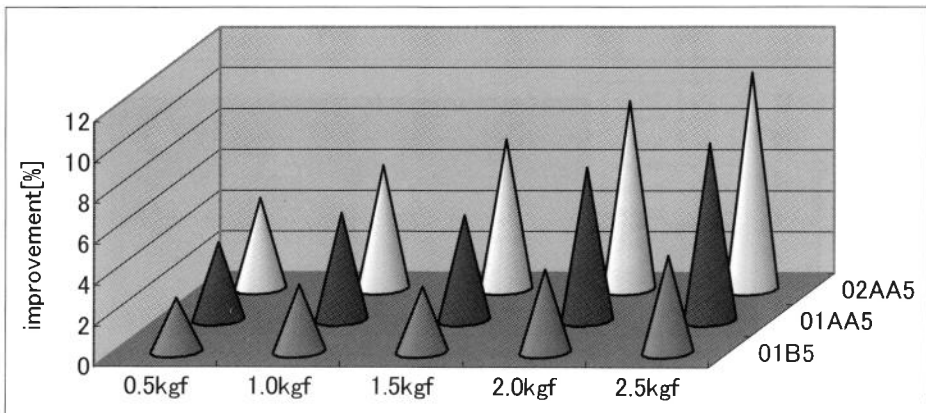


Fig -13 燃費向上率 (60km/h)

各 SAC Ball を質量区分で比較した場合、車速が高い (50km/h, 60km/h) 領域おいての差は、燃料の流速が速くなり SAC Ball の浸漬時間 (短くなった) と添加物質の差が影響を与えているものと考えられる。

各 SAC Ball を表面積をファクタで考察すると、燃料と SAC Ball との接触面積に相関があり燃費向上は表面積に依存していると考えられる。車速40km/h, 50km/h では、SAC Ball による燃費向上率に差はなく同程度の効果が確認された。車速60km/h では、多少の差が確認できる。

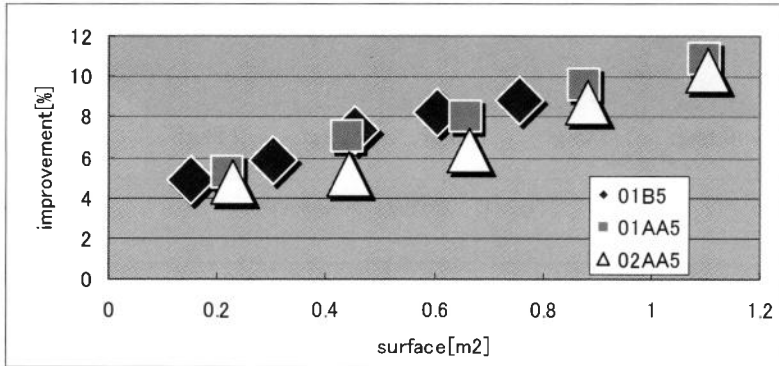


Fig - 14 燃費向上率/表面積 (40km/h)

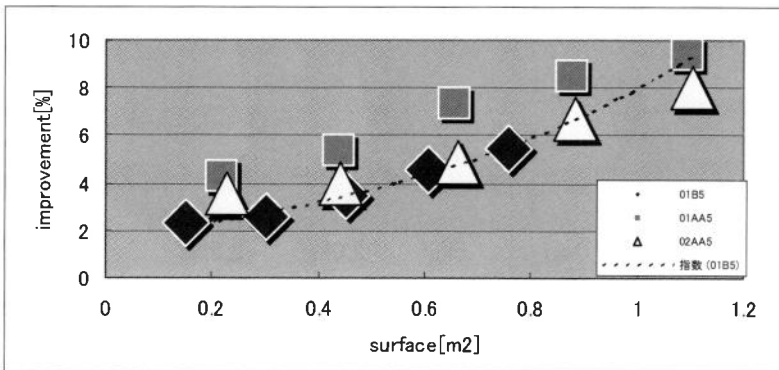


Fig - 15 燃費向上率/表面積 (50km/h)

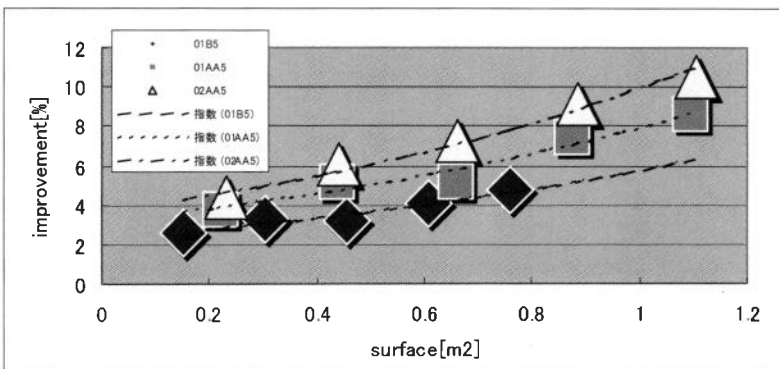


Fig - 16 燃費向上率/表面積 (60km/h)

### 5.5 窒素酸化物（NOx）

排出ガス中の窒素酸化物（NOx）濃度は、エンジン運転状態によって変化し本実験では実験中エンジン回転・負荷に多少の変動があり、それに伴い NOx 濃度も変化するため NOx 濃度をそのときの出力で除し単位出力当り NOx 濃度を燃料種により比較する。NOx 濃度測定に（株）島津製作所のポータブル NOx アナライザ（NOA-305A NO + NO<sub>2</sub>）を使用した。

NOx 濃度を出力で除し、標準燃料と SAC Ball 浸漬燃料との関係の一例として車速50km/h の場合を図-17, 18, 19, 20に示す。

(1) 01B5

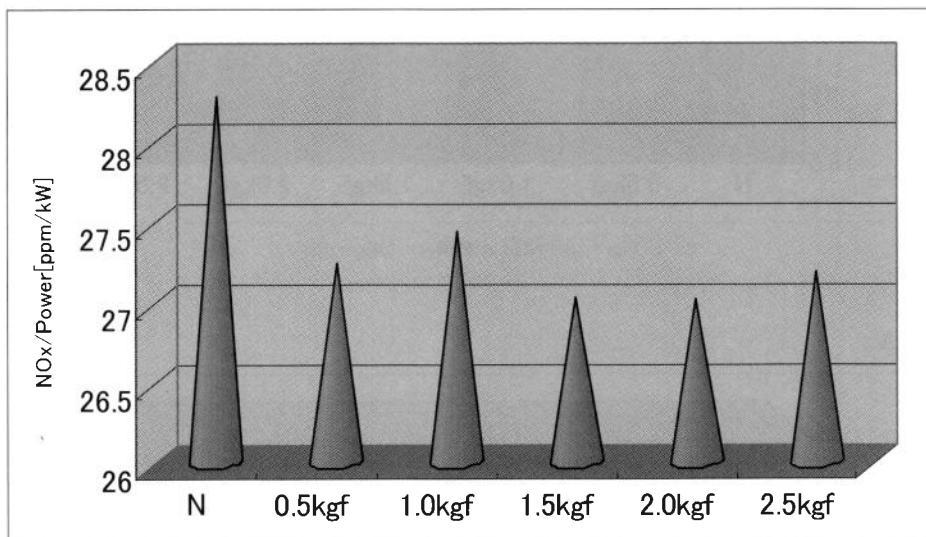


Fig -17 NOx / Power (50km/h)

(2) 01AA5

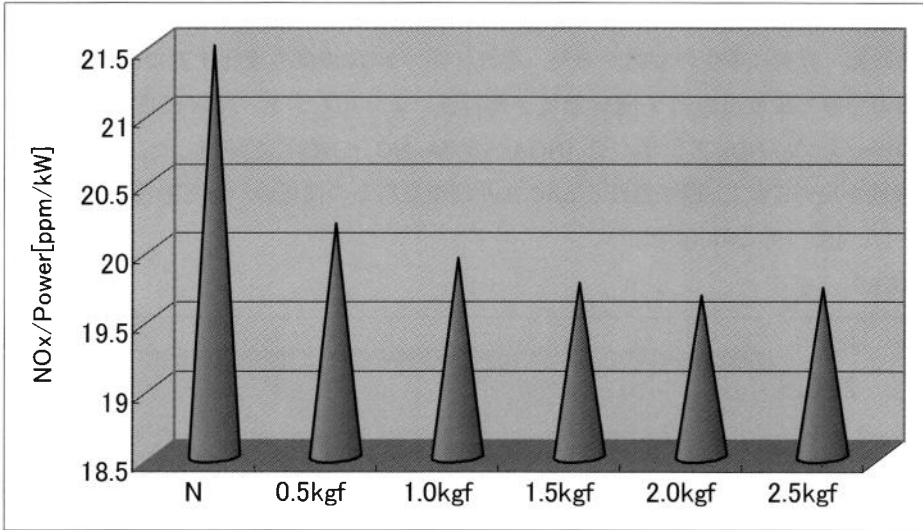


Fig -18 NOx / Power (50km / h)

(3) 02AA5

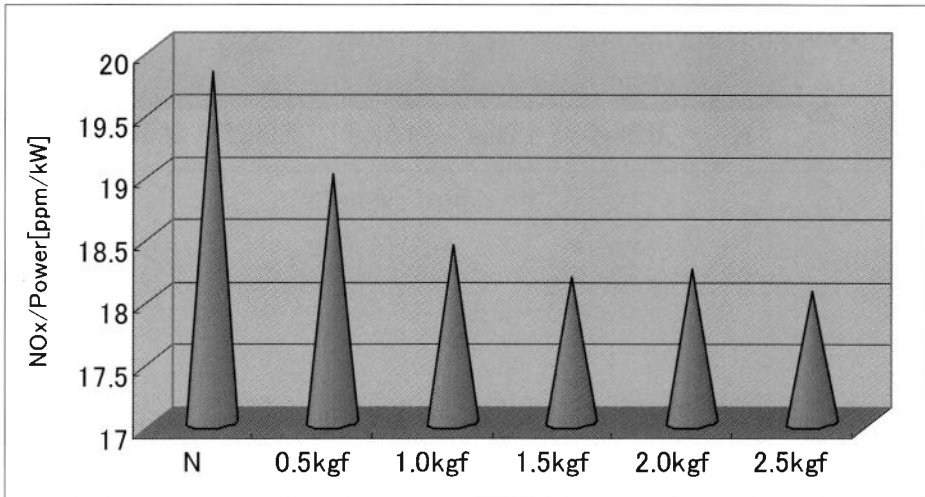


Fig -19 NOx / Power (50km / h)

(4) Titanium Sheet

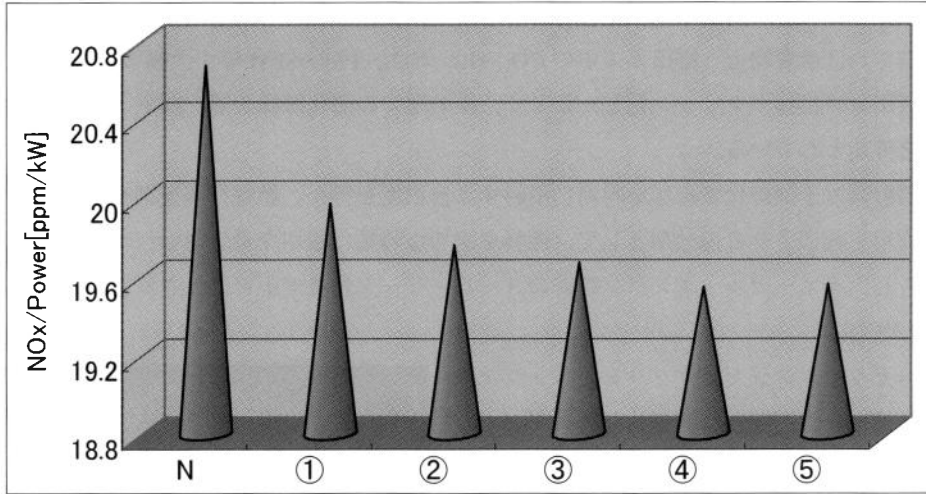


Fig -20 NOx / Power (50km/h)

燃料種による窒素酸化物（NOx）の排出濃度は SAC Ball, Titanium Sheet の量に比例して低減傾向が確認された。

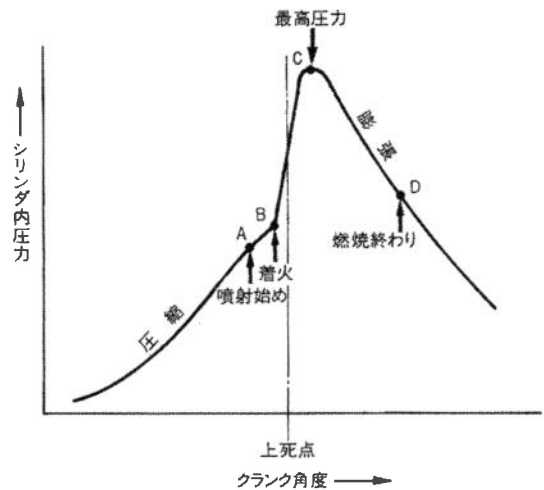
ディーゼル・エンジンの燃焼形態の例を図-21に示す。燃料噴射から着火までの着火遅れ期間中（図中の A ~ B 間）の燃料が着火すると急激に燃焼し温度・圧力の急上昇が NOx 生成に関与している。

SAC Ball 等が作用し燃焼遅れ期間の減少（図中の A ~ B を短縮）が起こり，燃焼全体が緩燃化される。

図中着火遅れ期間 A ~ B 間の途中より着火燃焼が起こり，図の B ~ C 間の燃焼が緩燃焼となり，最高圧力点（C点）が低下すると思われる，NOx の低減傾向を説明できる。<sup>4)</sup>

本実験に使用した SAC Ball はボール表層の酸化チタン（TiO<sub>2</sub>）等の触媒作用により燃料（軽油）にある程度の活性化が進行しているものと推察される。この事により燃焼（着火）がよくなり燃焼が改善され燃費向上と NOx の低減に関係したと思われる。

本実験は地球環境に対して有害ガス



ディーゼル・エンジンの燃焼状態

Fig -21 燃焼

(NOx) の低減と温室効果ガスの二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出抑制に寄与するものと考えられる。

近年のディーゼル・エンジンはコモン・レール式やユニット・インジェクション式 (大型車) 等が開発され、燃費向上と排出ガス中の CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM・SPM 等が大幅に低減されている。また、排出ガス自体がクリーン化したことで、後処理での酸化触媒装着, DPF (PM用フィルタ) の装着を可能としている。

燃料噴射は電子制御化で適切な時期に噴射する自由度を得た。燃焼行程後期や排気行程中に還元触媒作用を起こさせる還元剤として、燃料を適切な時期に適切な量を噴射 (ポスト噴射, アフタ噴射) し、ディーゼル・エンジン特有のスーパー・リーン燃焼で不可能とされた、還元触媒を装着可能とした。

ディーゼル・エンジンはガソリン・エンジンより熱効率がよく燃費性能が優れたエンジンであるが、さらに超高压噴射 (約130~210MPa) することで、燃費がさらに良くなり、地球環境 (温暖化) を考えると、内燃機関は21世紀も存在するか? という疑問にディーゼル・エンジンは内燃機関として答えられる。先年ヤマハが更に熱効率の良い「環境対応2サイクル・ディーゼル」を発表した。<sup>5)</sup>

図の美しい宇宙船「地球号」を未来の乗船者に引き渡すため、いまディーゼル・エンジン屋の間では、熱効率60%を目標に研究、実験が進められている。



本研究にあたり、実験試料 (各種 SAC Ball, チタン・シート等) の提供を受けました (有) SSI にはここに記して感謝申し上げます。本学第2工学教室・横井隆治准教授には本論文作成に協力して頂きました。

## 6. 参考文献

- |                           |          |                   |       |
|---------------------------|----------|-------------------|-------|
| 1) 自動車の歴史と社会              | 自動車工学全書1 | 山海堂               | 1995年 |
| 2) エンジン・テクノロジー (第6号)      | 乗籐和哲     | 山海堂               | 2000年 |
| 3) サービス周報                 |          | 日産自動車株式会社         |       |
| 4) ディーゼル・エンジンの燃費改善 (第3報)  | 木下勝晴 他   | 中日本短期大学論叢<br>第35号 | 2005年 |
| 5) エンジン・テクノロジー Vol.1 No.2 |          | 山海堂               | 2000年 |