

ディーゼル・エンジンの燃費改善（第3報，TiO₂）

木下勝晴*¹⁾・山本哲夫*²⁾・佐藤幹夫*¹⁾・中川 実*¹⁾
林 文明*¹⁾・藤田英樹*¹⁾・山本 純*¹⁾・横井隆治*¹⁾

1. ま え が き

1. 1 ディーゼル・エンジン

ディーゼル・エンジンは1892年にドイツのルドルフ・ディーゼル（Rudolf Diesel）によって考案され1896年～1897年に熱効率25.2%の2号機完成・開発され¹⁾，以後このディーゼル・エンジンは内燃機関中で最も高い熱効率が注目され広く各種の動力源として利用され（熱効率・ガソリン・エンジン：20～30%，高速ディーゼル・エンジン：30～40%，低速ディーゼル・エンジン：40～50%）現在でも自動車，鉄道，船舶，作業現場用エンジン等として各方面に使用され今日に至り活躍している^{2) 3)}。

熱効率が高いことは，地球温暖化の原因である温室効果ガスの主因とされている二酸化炭素（CO₂）の排出が少なく環境（地球）に優しいエンジンと世界的に認知されている。

日本，アメリカでは排出ガス中のPM・SPM，NO_xの関係で問題視されてその使用が減少傾向にある。一方欧州では温室効果ガスの排出量が少なく省エネルギーに有利であるため日米とは逆にその用途は増加傾向を示している。

地球の環境を考えると，世界の最重要課題である地球温暖化の抑制を目指した，京都議定書を世界が批准し履行する以外に，ロシアが批准し漸く議定書が今春発効する見込みとなり一歩前進した。しかし，CO₂の最大排出国アメリカが経済・産業の停滞を招くとして，批准することなくこの問題から離脱したままである。

1. 2 酸化チタンボール

セラミック・ボール，チタン・ボールの表面にチタンを高速度で吹き付け，そのエネルギー（衝突エネルギー）にて表面に溶着させる，更にそのときの熱と大気中の酸素により酸化反応を起こし酸化チタンとして活性化（電離化）したもので，⁴⁾ 今回の実験には外径4 mmと2 mmのものを使用した。その外観は図1に示す。

* 1) 中日本自動車短期大学工学教室・NAC 環境科学研究会 * 2) (独) 産業技術総合研究所中部センター

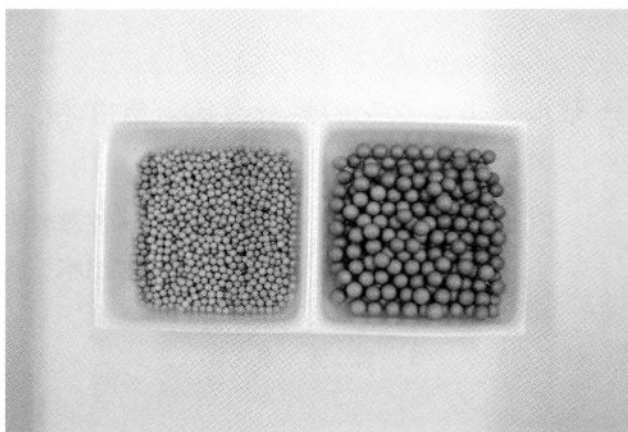


Fig - 1 TiO₂ボール

2. 実験装置

本実験に使用したエンジンは日産自動車（株）のワンボックス：NISSAN CARAVAN に使用されているディーゼル・エンジンで型式 LD20T II を用いた。その主要諸元を表 1 に示す⁵⁾。

Table - 1 エンジン諸元

エンジン型式	LD20T・II
排気量（内径×行程）	85×86
最高出力 [kW / min ⁻¹]	52/4400
最大トルク [N・m]	167
燃焼室形式	渦流室
圧縮比	21.3
過給機	ターボチャージャー

エンジン制御には東京メータ（株）の動力計を用いてエンジン回転数，エンジン負荷をコントロールした。動力計の主要規格を表 2 に示す。

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]
吸収回転数 (max)	9000 [min ⁻¹]
力量計	自動振子天秤

酸化チタン・ボール径 ϕ 4 mm (セラミック・ボールにチタン溶着), 酸化チタン・ボール径 ϕ 2 mm (セラミック・ボールにチタン溶着, チタン・ボールにチタン溶着) の各酸化チタンボール 0.5kgf をテトロン・ブレード・ホース容器に充填し, この容器を 5 個直列に設置し燃料流路をバルブにて軽油, 酸化チタン容器 1 個 (0.5kgf) を通過, 2, 3, 4, 5 個 (5 \times 0.5) を通過した燃料 (酸化チタン浸漬) と切替える装置とした。図 2

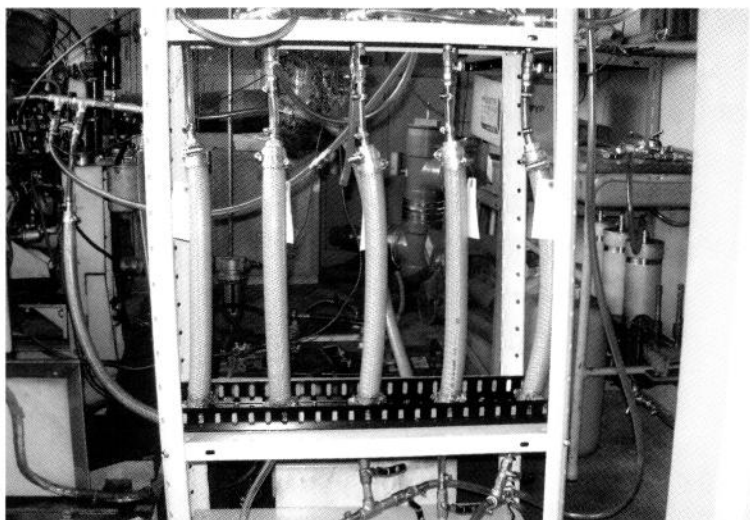


Fig - 2 燃料供給装置

3. 実験方法

本実験エンジンの燃料系に酸化チタン封入容器を設置し, 運転パターンは本エンジン搭載車両の平坦路走行で速度 40km/h, 50km/h, 60km/h に相当するエンジン回転数, エンジン負荷を車両シャシ性能曲線図より求め設定した。⁵⁾

実験燃料として標準燃料・市販軽油, 酸化チタン容器 1 個 (0.5kgf 浸漬), 2 個 (1.0kgf 浸漬), 3 個 (1.5kgf 浸漬), 4 個 (2.0kgf 浸漬), 5 個 (2.5kgf 浸漬) 各々の条件で燃料消費量, 消費時間, エンジン回転数, 負荷荷重等を測定した。

測定データを以下の計算式よりエンジン出力 (kW), 速度 (km/h), 燃費率 (g/kW \cdot h) 等を算出した。

負荷トルク: T [N \cdot m]

$$T = F \cdot g \cdot L$$

F : 荷重 [kgf] g : 重力加速度 L : 荷重計アーム長 [m]

エンジン出力: P [kW]

$$P = T \cdot \omega \quad \omega : \text{角速度} \quad \omega = 2 \pi N / 60$$

N : エンジン回転数 [min^{-1}]

燃料消費率 : η_f [$\text{g} / \text{kW} \cdot \text{h}$]

g : 燃料消費量, $g = V \times \gamma$, V : 消費量 [cc], γ : 燃料比重

$$\eta_f = V \cdot \gamma \times 3600 / (t \cdot F \cdot g \cdot L \cdot \omega \times 10^{-3})$$

t : 消費時間 [S]

車速 / エンジン回転数

V : 車速 [km / h]

$$V = R \cdot \omega = R \times 2 \pi N w K / 60$$

R : タイヤ有効径

K : 比例定数 ($60 \times 60 / 10^3$)

エンジン回転数 : $N_E = N_w \cdot R_T$

N_w : ホイール回転数

R_T : 総減速比

4. 実験結果

4.1 燃費率 : $\text{g} / (\text{kW} \cdot \text{h})$

燃料消費率は前記計算式により, 単位出力 (kW), 単位時間 (h) 当たりの燃料消費量 (g) であり, 各燃料種 (標準軽油, TiO_2 浸漬軽油) の各速度における燃費率を以下の表, 図に示す。

燃料消費率 ($\phi 2 : \text{Ti} + \text{TiO}_2$ 平均値) の関係 (結果) を表 3, 図 3 に示す。

Table - 3 燃費率

	N	0.5 kgf	1.0 kgf	1.5 kgf	2.0 kgf	2.5 kgf
40 km / h	36331	346.44	344.62	342.49	315.82	310.47
50 km / h	343.71	331.06	329.53	326.84	306.32	287.64
60 km / h	322.82	299.57	313.00	298.21	277.95	275.88

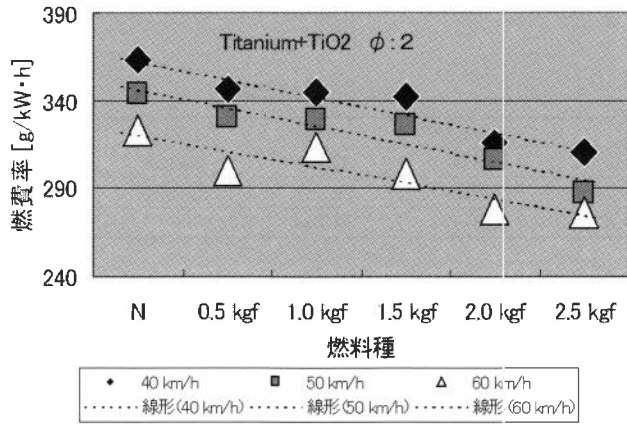


Fig - 3 燃費率 (φ : 2 mm Titanium)

燃料消費率 (φ 2 : Ceramic + TiO₂ : 平均値) の関係を表 4, 図 4 に示す。

Table - 4 燃費率

	N	0.5 kgf	1.0 kgf	1.5 kgf	2.0 kgf	2.5 kgf
40 km / h	366.65	350.97	324.80	326.91	316.78	304.29
50 km / h	345.09	330.93	330.89	318.64	291.45	286.48
60 km / h	327.77	316.18	310.60	305.57	274.76	261.38

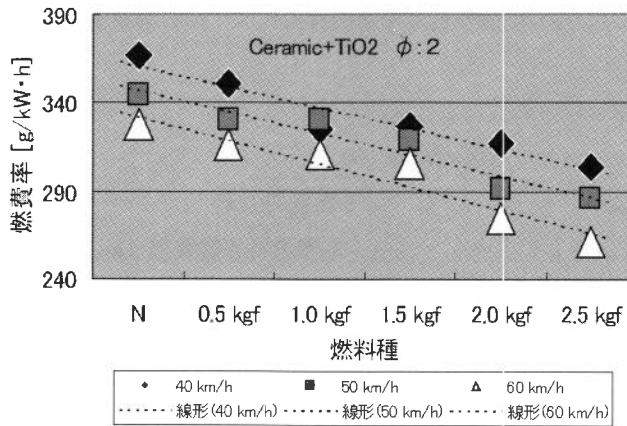


Fig - 4 燃費率 (φ : 2 mm Ceramic)

燃料消費率（φ 4 : Ceramic + TiO₂ : 平均値）の関係を表 5, 図 5 に示す。

Table - 5 燃費率

	N	0.5 kgf	1.0 kgf	1.5 kgf	2.0 kgf	2.5 kgf
40 km / h	352.63	328.59	320.74	315.27	310.76	316.35
50 km / h	342.29	327.25	324.62	321.31	317.63	313.96
60 km / h	327.36	313.66	310.68	306.59	300.77	296.30

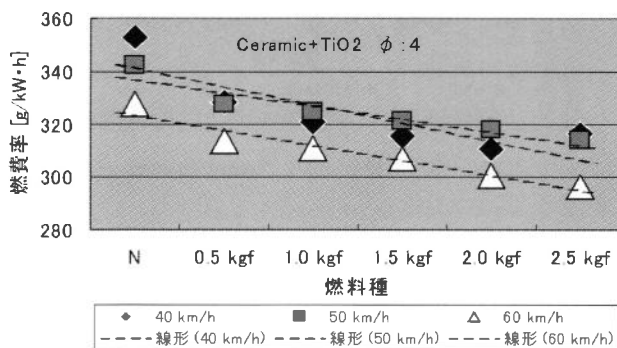


Fig - 5 燃費率（φ : 4 mm Ceramic）

5. 考 察

各運転パターンともに TiO₂ 浸漬燃料は標準燃料に比べて燃料消費率の向上（改善）が確認できた。

燃料消費率の向上率は以下の式により求めた。

$$\eta = (A - B) / A \times 100 \quad [\%]$$

η : 燃費向上率

A : 標準燃料の燃費率 [g / kW · h]

B : TiO₂ 浸漬燃料の燃費率 [g / kW · h]

各運転パターンの燃費向上率を表及び図に示す。Ceramic + TiO₂ · φ 4 mm の燃費向上率を表 6, 図 6 に示す。

Table - 6 φ : 4 mm

	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	6.82	9.04	10.59	11.87	10.29
50km / h	4.39	5.16	6.13	7.20	8.28
60km / h	4.18	5.09	6.34	8.12	9.49

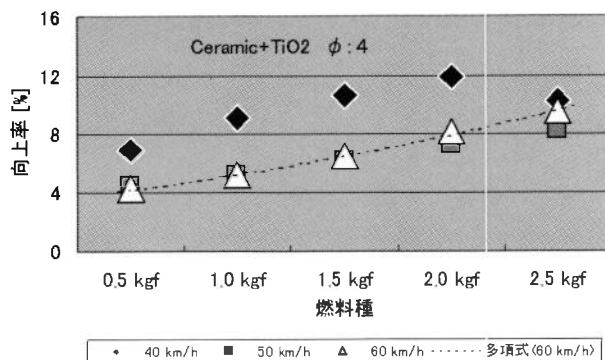


Fig - 6 燃費向上率

Ceramic + TiO₂ · φ : 2 mm の燃費向上率を表 7, 図 7 に示す。

Table - 7 φ : 2 mm

	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	4.28	11.41	10.84	13.6	17.01
50km / h	4.10	4.11	7.66	15.54	16.98
60km / h	3.54	5.24	6.77	16.17	20.25

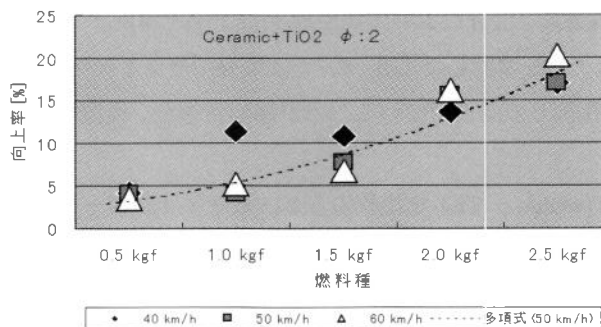


Fig - 7 燃費向上率

Titanium + TiO₂ · φ : 2 mm の燃費向上率を表 8, 図 8 に示す。

Table - 8 φ : 2 mm

	0.5kgf	1.0kgf	1.5kgf	2.0kgf	2.5kgf
40km / h	4.64	5.14	5.73	13.07	14.54
50km / h	3.68	4.12	4.91	10.88	16.31
60km / h	7.20	3.04	5.68	13.90	14.54

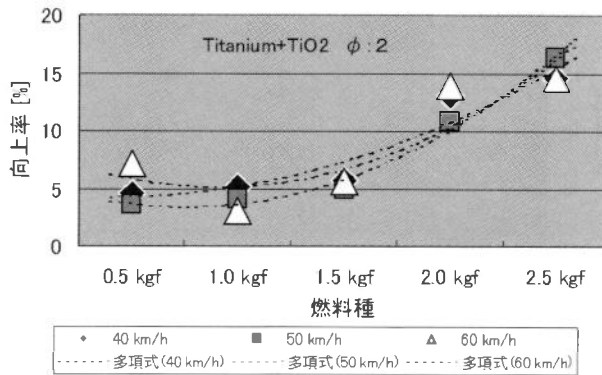


Fig - 8 燃費向上率

粒径4 mmのセラミック・ボールにチタンを噴射した酸化チタン・ボールの場合、速度40km / hでは浸漬量にほぼ比例して向上率が上昇しているが、浸漬量が2 kgfでピークが確認された。

速度50km / hと60km / hにおいてはともにTiO₂浸漬量に比例（2次関数的）して同程度の向上（改善）が確認できた。

粒径2 mmのセラミックス・ボールにチタンを噴射した酸化チタン・ボールの場合、速度40km / h, 50km / h, 60km / hの各速度ともにTiO₂浸漬量に比例（2次関数的）して燃費率の向上（改善）が確認された。浸漬量2.5kgfにおいて約20%の向上率を得た。

チタン・ボールにチタンを噴射したTiO₂ボールの場合、セラミックにチタンを噴射したものと同様にTiO₂浸漬量に比例して向上していることが確認された。浸漬量2.5kgfでは約15%向上が確認された。

Ceramic + TiO₂とTitanium + TiO₂を比較すると、セラミックボールにチタンを噴射したTiO₂とチタンボールにチタンを噴射したTiO₂の燃費率を比較すると、基材がチタンボールよりもセラ

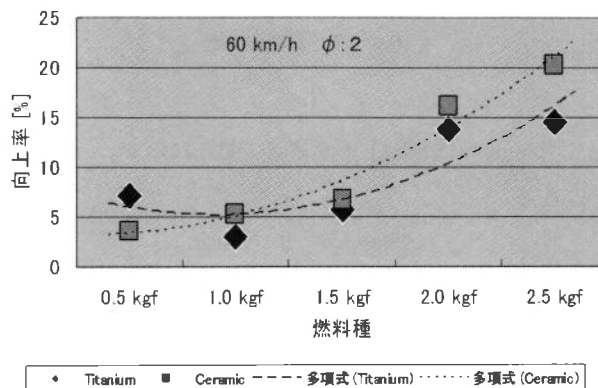


Fig - 9 燃費向上率 (Titanium / Ceramic)

ミックボールの方が高い向上率を示した。60km/h の燃費向上率比較を図9に示す。

セラミックはそれ自体が触媒の基材に多用されていることでもあり、セラミックは活性化能を持っていると考えればセラミックと TiO_2 の活性化能が相乗効果を表したものと推察されるが今後実験を進めこの信頼度を高めたい。ただ、資源的、コスト的、入手性で有利なセラミックの方が高効率を呈した事は将来性に適しているものと考えられる。

基材セラミックの粒径4 mm と2 mm の酸化チタンを比較すると、各速度ともに粒径が2 mm の方が4 mm のものよりも高い燃費向上率を確認できた。特に浸漬量が多い程顕著に現れた。図10に速度50km/h の場合を示す。

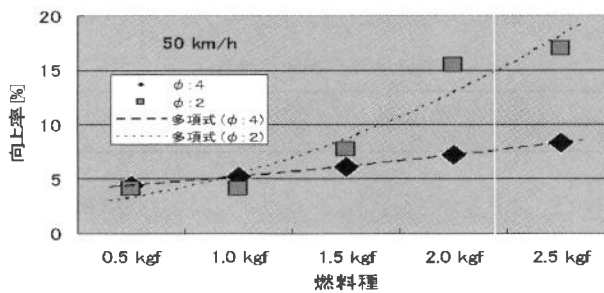


Fig - 10 燃費向上率 (φ: 2 mm / φ: 4 mm)

燃費向上率を酸化チタン・ボールの表面積をファクタにとって考察すると、粒径4 mm と粒径2 mm とともに表面積 $[\text{m}^2]$ の関数 (共通) 上にあると考えられる。図11に速度50km/h のものを示す。

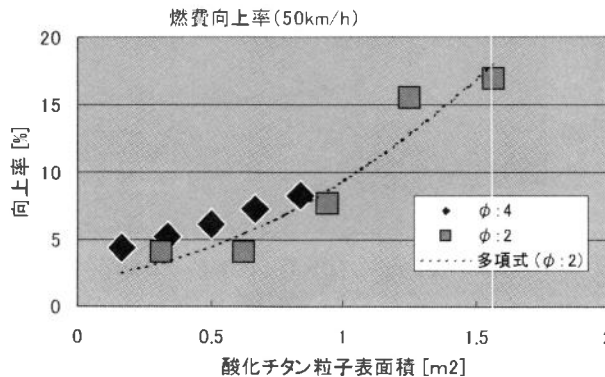


Fig - 11 燃費向上率 / TiO_2 表面積

燃費は酸化チタンの質量 (浸漬量) に比例 (2次関数的) して燃費率が向上することを既に発表した。これは同粒径の酸化チタン・ボールの為に質量に比例したもので、実際は質量よりも

燃料の接触面積の多寡が燃費に大きく関与、影響与えらる。この事は酸化チタンの量のよりも表面積の大小に関係すると資源的にも有利となる。

NOx 濃度

本実験でセラミックにTiを噴射したTiO₂浸漬燃料で速度60 km/hにおける排出ガス中のNOx (NO + NO₂) 濃度を島津製作所のポータブル NOx アナライザを用いて測定した。しかし、エンジンの状態 (回転, 出力等) によりその測定濃度は変動幅が大きく、そのままでは検討に不向きな為以下の修正を加え単位出力当り NOx 濃度とした。

修正 NOx 濃度 = 測定濃度 (ppm) / 出力 (kW) を表9に示す。

Table - 9 NOx / Power

	N	0.5 kgf	1.0 kgf	1.5 kgf	2.0 kgf	2.5 kgf
60 km / h	26.70	23.62	21.90	21.60	21.75	21.73

燃料種・φ : 2 Ceramic + TiO₂

一般に燃焼工学では燃焼状態が改善されると、燃焼温度 (燃焼最高温度) が上昇し NOx の生成が進行し排出濃度が高くなるのが定説である。しかし、本実験ではその方向とは逆に TiO₂ 浸漬燃料では燃焼が改善し燃費が向上すると共に NOx 濃度の低減が確認された。

燃費率向上 (改善) は TiO₂ の触媒的作用が燃料に活性化 (励起化, イオン化, 電離化) を起こさせたと考えられ、燃焼がスムーズ (緩燃焼) に進行したと推察される。図 12

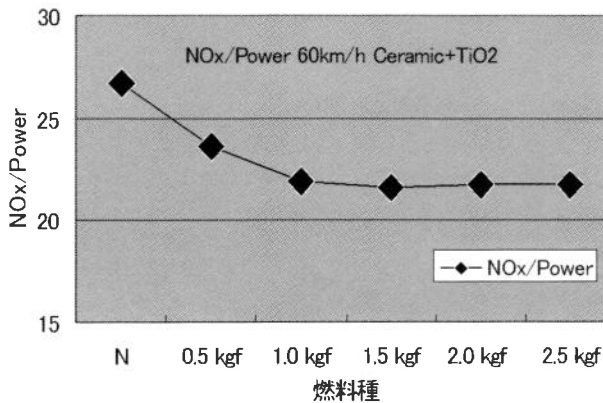


Fig - 12 NOx / Power

酸化チタン浸漬燃料による NOx 低減率を図 13 に示す。

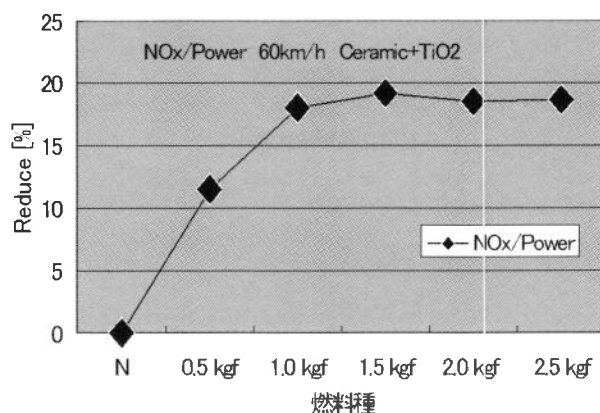


Fig - 13 NOx 低減率

ディーゼル・エンジン特有の着火遅れ期間が長い程、その後の燃焼が急激な燃焼となり最高温度・圧力が高くなる、その副産物として NOx の生成やディーゼル・ノックが発生する。(これ等が日米でのディーゼル車の普及を阻害する一因となっている)

TiO₂ 浸漬燃料の場合、燃料が改質(励起化・イオン化・電離化)活性化されて燃焼性がよくなり、着火遅れ期間が短縮し燃焼初期が緩燃焼化し NOx の生成が抑制(低減)されたものと考えられる。燃焼現象の前駆現象から推察してもこの可能性はあるものと考えられる。

6. ま と め

本実験において酸化チタン・ボールの浸漬燃料では表 10 の燃費向上が確認できた。

(浸漬量毎の各速度平均値)

Table - 10 平均向上率/各速度

浸漬量	0.5 kgf	1.0 kgf	1.5 kgf	2.0 kgf	2.5 kgf
φ 4 Ceramic	5.13	6.43	7.68	9.06	9.35
φ 2 Ceramic	3.97	6.92	8.42	15.10	18.08
φ 2 Titanium	5.17	4.10	5.44	12.62	15.13

酸化チタンの粒子径を小径化することで、燃料との接触性(接触率)がよくなり少量の酸化チタンでかなりの向上効果が確認できた。今後は実験・研究さらに進め確認・実証したい。

本研究にあたり実験試料の酸化チタン・ボールをご提供頂きました、株式会社 不二機販 代表取締役社長・宮坂四志男氏、日新商事株式会社・服部 勇氏にはここに記して感謝申し上げます。

参 考 文 献

- | | | | |
|--------------------------|-----------|-----|--------|
| 1) 自動車用ディーゼル・エンジン | 宮下直也 他 | 山海堂 | 1995 年 |
| 2) エンジンテクノロジー Vol 2 No 1 | | 山海堂 | 2000 年 |
| 3) マリン・エンジニアリング | 日本船用機関学会 | | 1999 年 |
| 4) WPC 処理 | (株) 不二機販 | | 2003 年 |
| 5) サービス周報 | 日産自動車株式会社 | | |