

ディーゼル・エンジンの燃費改善（第5報 Aluminum Foil）

木下勝晴*・横井隆治・西側通雄

1. ま え が き

1. 1 環境

地球環境は産業革命以来、化石燃料の消費増大による大気汚染、地球温暖化等が近年の異常気象（その年、その地域によって酷暑、冷夏、暖冬等の異常気温、台風、ハリケーン、竜巻等の異常発生）の主因とされている。

石油ショック以後のエネルギー源として、石油依存から、原子力、水力、風力、波力、潮力、太陽光、地熱等の多様化へと研究、開発が進んでいる。

原子力は二酸化炭素（CO₂）の排出が無いため、地球温暖化に対して有効で地球に優しいエネルギー源として注目されているが、原子力はその原料、施設（原子炉とその周辺物）の使用後の問題、使用済核燃料及び核施設等の埋設方法、埋設場所等が未解決で監督官庁の行政はその場、その場で耐用年数を延長させ未だに解決されていない、この現状では危険（核汚染）が大きく、原子力発電所の増設には問題がある。

太陽光、風力、潮力、波力等は自然エネルギーを利用するため、地球環境に優れた特性を有しているが、気象の関係で年間を通しての安定的供給には問題が多すぎる、今後の研究開発に期待したい。

水力発電は、火力発電が普及した現代では火主水従の様相がつづくものと予想されるが、地球環境を考えると水主火従へ再変換する必要性が大きいと考えられる。その地域環境と共存できる水力発電に期待したい。

地熱発電は、地下に大量の温泉源を有している日本列島では有望なエネルギーの一つとして考えられ、北海道、九州等に地熱発電プラントが設置されている。ただ国立公園法が多少ネックとなっている。

石油を主体とする化石燃料は、現在でもエネルギー源としての主役にあり地球環境を考えると、省エネルギーに努めなければならない。

1. 2 クリーン自動車

クリーン自動車としては、天然ガス自動車、水素自動車等が有望視されてきたが、近年これに電気自動車、ハイブリッド自動車、燃料電池自動車等（発電装置付電気自動車）が加わりクリー

ン自動車の概念が広がってきた。更に、DME自動車、バイオマス自動車等も加わり、地球温暖化の問題と考え合わせて各燃料を利用する研究・開発されて、エネルギー源の多種多様化は進むものと考えられる。その各エネルギーの特性から走行距離、供給体制、価格等の問題も含めて解決されなければならない。

1.3 電気自動車

電気自動車は地球温暖化対策の救世主として、各方面から脚光されているが、電気自動車は、原動機として電動機（モータ）を使用しているため電気自動車自体からは、地球温暖化の主因とされている二酸化炭素（CO₂）は排出されない。

電気自動車のエネルギー源である電気自体を作るのに、どれだけのCO₂を排出しているのか検証の必要がある。

現在の産業構造のままで、自動車が電気自動車に移行変換した場合は、この地球の大気は現在よりCO₂の濃度は高くなり、この地球環境は救世主と呼ばれた電気自動車により悪化の方向へ進むことになる。

発電は現在、化石燃料による火力発電が主であり、その発電時に大量のCO₂を排出している。

火力発電での発電効率（超臨界蒸気タービンの熱効率）、発電機から電圧等を調整する数箇所の変圧効率、架線による数箇所の送電効率、商用電源からバッテリーへの充電効率、電動機効率等多くの効率を考慮すると、現在の内燃機関よりも熱効率は悪く、地球環境に優しい自動車とは考えられない。図-1に各種自動車、ガソリン・エンジンを100とした場合の熱効率を示す¹⁾。また、図-2にエネルギー別発電量の割合を示す。

現在の電気自動車は、他に何らかの理由があって普及、宣伝されているようにも思われるが、将来の石油枯渇問題等を考慮すると、電気自動車は発電システムの変換後には将来の自動車として有望なものの一つである。

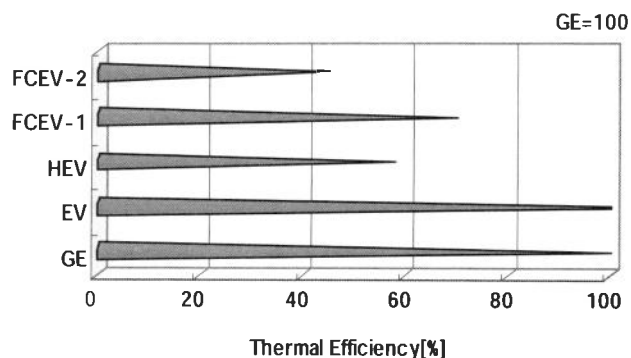


Fig-1 各車種の熱効率（ガソリン・エンジン（GE）を100とした場合）

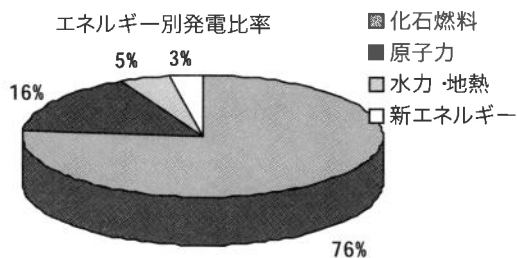


Fig-2 各エネルギー別発電比率

1. 4 ディーゼル・エンジン

ディーゼル・エンジンはルドルフ・ディーゼル (Rudolf Diesel) によって1892年に考案され、その後、研究実験を重ね1897年に実用可能なエンジンを完成させた。

ディーゼル・エンジンは、軽油、重油等の粗燃料が使用でき、また、点火装置、気化器等の複雑な装置が不要という特徴、さらに、このエンジンの特性である熱効率の高さによる経済性等により、今日まで広く各種の原動機として採用されている。

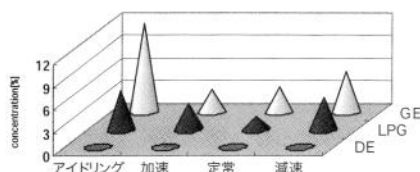
ディーゼル・エンジンは吸入空気のみを圧縮して高温・高圧の燃焼室に霧状燃料を噴射し自己着火させ、この燃焼膨張圧力を動力として利用している。

この方式は、理論空燃比より大きい希薄燃焼（リーン・バーン）を利用するため、不完全燃焼による一酸化炭素 (CO)、未燃焼による炭化水素 (HC) の排出はガソリン・エンジン等に比べ非常に少なく、高温燃焼 (1500℃ ~) で生成する窒素酸化物 (NO_x) は特定の運転域以外ではガソリン・エンジン等より少ない²⁾。図-3にガソリン・エンジン、LPG、ディーゼル・エンジンの排出ガス濃度 (CO, HC, NO_x) の比較を示す。

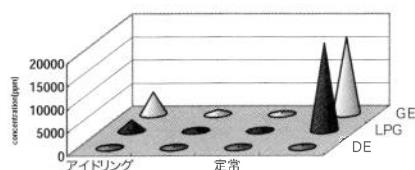
ディーゼル・エンジンをダーティ・エンジンと言わしめるのは、排出ガス中の粒子状物質 (PM) が他のエンジンより多く排出されるためと思われるが、燃焼形態が液状燃焼、筒内噴射式であり、この方式の場合、噴射から燃焼までの時間が短く、充分蒸発気体化されない機構となっている。ガソリン・エンジンの筒内噴射 (GDI, D4等) は他方式よりPMの排出量は多い。



CO



HC



NO_x

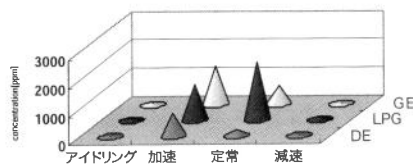


Fig-3 各エンジン排ガス濃度

この問題も燃料噴射方式を機械式から電子制御式に変更し、かつ噴射圧力を超高压噴射方式で適切な噴射時期、適切な噴射量に制御することで、PMの排出が大幅に低減された。

電子制御方式により、噴射タイミングは一段噴射からプレ噴射（パイロット噴射）、メイン噴射、アフタ噴射、ポスト噴射と多段化することで噴射タイミングの自由度が増し、各エンジンの状態に適したエンジン設計が可能となり、リーン・バーンのディーゼル・エンジンにNOx還元触媒が設置可能となった。また、欧州（ドイツ）と日本のディーゼル・エンジンに対するイメージの比較を図-4に示す。

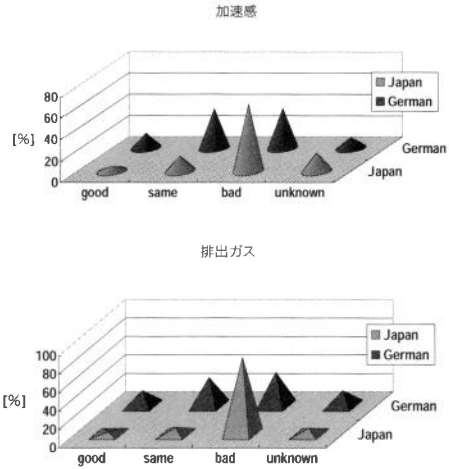


Fig-4 ディーゼル・エンジンのイメージ

1. 5 アルミニウム

アルミニウムは、主としてボーキサイトから製錬される銀白色の金属で99.99%ぐらいの高純度のものもあるが、一般材料は98.0~99.8%ぐらいである。元素記号はAl, 原子番号13, 原子量26.98154, 安定性同位体としては質量27のものが100%, 周期表の3B族に属す軟らかい金属で展性, 延性に富み加工性に優れている³⁾⁴⁾。

電気伝導度は銅に比べると劣るが、比重が小さく単位重量当りの電気伝導度は高くなる。大気中では金属表面に酸化被膜ができることで内部を保護し耐食性を有している。大気中で熱を加えるとアルミナ (Al₂O₃) を生成する、塩酸やアルカリの水溶液には水素を発生しながら溶け、希硫酸には溶けるが、希硝酸には溶けない、これは硝酸の酸化力によって表面に酸化被膜が生成されるからである。

アルミニウムは還元力が強く、高温では酸素と化合しやすく、クロム、タングステン、マンガン等の酸化物をアルミニウム粉末と混ぜて加熱すると、クロム、タングステン、マンガン等の金属が遊離される。また、銅、マグネシウム、クロム、鉄、ニッケル、ケイ素等でジュラルミン、Y合金をつくる。

アルミニウムの用途には、送電線、蓄電池の電極や箔として利用され、構造材としては、飛行機、電車、自動車等に採用され、さらに、家庭用品としても広く利用されている⁴⁾。

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・エンジンを用了。また、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。主要諸元を表-1に示す⁵⁾。

Table - 1 エンジン&動力計諸元

エンジン主要諸元		エンジン動力計諸元	
製作会社	日産自動車（株）	製作会社	東京メータ
型 式	LD20T II	型 式	EW-150EP
排気量（cc）	1951	動力吸収形式	渦電流式
内径 × 行程（mm）	85 × 86	冷却方式	水冷式
最高出力（kW/min）	52 / 4400	吸収出力（max kW）	100
最大トルク（N・m/min）	167 / 2400	吸収回転数（max min ⁻¹ ）	9000
燃焼室形式	渦流室	トルク・アーム長（m）	0.358
圧縮比	21.3		
過給機	ターボ・チャージャ		
搭載車両	キャラバン, ホーミ		

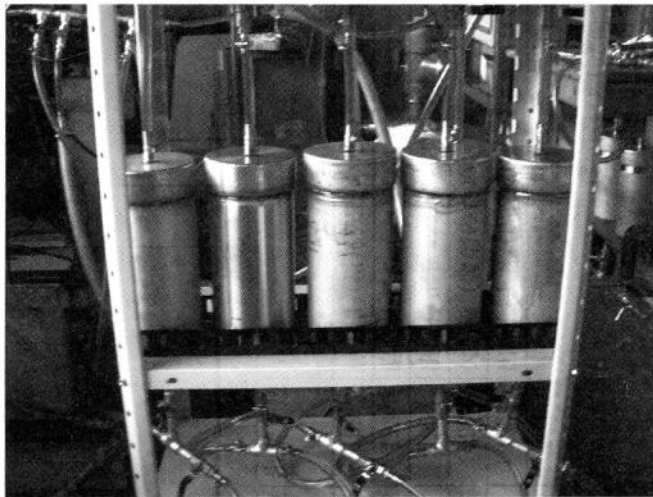


Fig-5 浸漬燃料（実際の容器はテフロン系）

3. 実験方法

各走行パターン（40km / h, 50km / h, 60km / h 走行時）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^{5, 6)}。

実験装置の燃料パイプに Aluminum Foil を封入した容器 ① (22.66g), ② (45.33g), ③ (68.00g), ④ (90.66g), ⑤ (113.33g) の 5 個を直列に配置した。図 - 5 参照

標準燃料（ノーマル）と浸漬燃料との燃料消費量、燃料消費時間等を各走行速度で計測した。

エンジン回転数 (min⁻¹), エンジン負荷 (kgf), 燃料消費量 (cm³), 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 $T = F \times g \times L$ [N・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] $P = T \times \omega$
 ω ：角速度 ($2\pi N/60$)

燃料消費率： η_i $\eta_i : G / (P \times h)$
 G：燃料消費量 (g) = $v \times \gamma$
 v：消費量 (cm³)
 γ ：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
 $v = r \times \omega$ [m/s]
 r：駆動輪径 (半径) (m)
 N：駆動輪回転速度
 Ne = エンジン回転速度
 R：総減速比
 $v = r \times 2\pi Ne / (60 \times R)$
 $V = 3.6 \times v$

4. 実験結果

4.1 燃料消費率 (エンジン性能燃費)

本実験における各車速40km/h, 50km/h, 60km/hにおける標準燃料 (N) と Aluminum Foil 浸漬燃料の燃料消費率 (平均値) を表-2 及び図-6 に示す。

4.2 燃費向上率 (エンジン性能燃費)

Table - 2 平均燃費率 [g / kW・h]

	N	①	②	③	④	⑤
40km/h	386.82	343.95	317.04	290.97	268.24	250.4
50km/h	346.38	316.45	295	268.86	255.76	240.6
60km/h	322.68	291.52	272.17	251.34	233.37	208.01

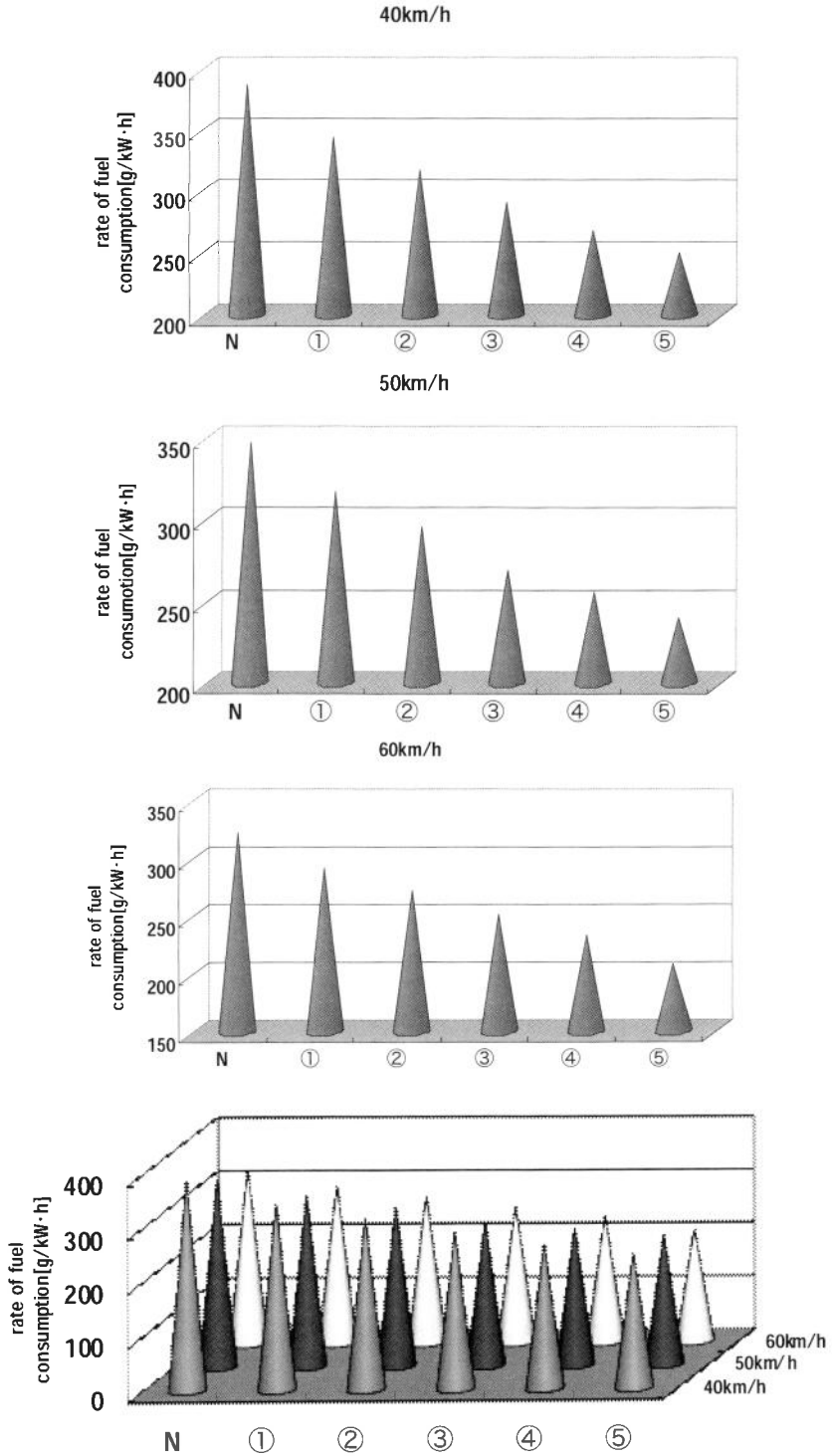


Fig-6 燃費率（40・50・60km/hの比較）

本実験における、Aluminum Foil 浸漬燃料の燃費向上（改善）率を表-3及び図-7に示す。
燃費向上（改善）率は次式より求めた。

Table - 3 燃費向上率 [%]

	N	①	②	③	④	⑤
40km/h	0 (基準)	11.08	18.04	24.78	30.65	35.27
50km/h	0 (基準)	8.64	14.83	22.38	26.16	30.54
60km/h	0 (基準)	9.66	15.65	22.11	27.68	35.54

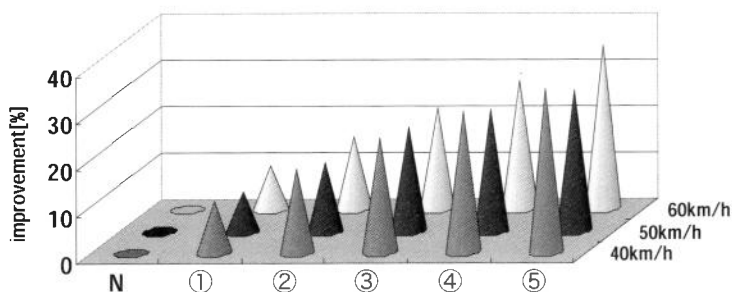


Fig-7 燃費向上率 (40・50・60km/h)

向上率： η_t

$$\eta_t = (\eta_n - \eta_i) / \eta_n \quad \eta_n: \text{標準燃料燃費率} \quad \eta_i: \text{浸漬燃料燃費率}$$

4. 3 燃料消費率（走行燃費）

エンジン回転数より各速度における走行燃費 (km/ℓ) を表-4及び図-8に示す。

走行燃費は以下の式で求めた。

Table - 4 走行燃費 [km/ℓ]

	N	①	②	③	④	⑤
40km/h	18.62	20.80	22.15	24.08	26.13	27.69
50km/h	17.62	19.44	20.98	22.95	24.14	25.14
60km/h	15.51	17.23	18.49	19.94	21.42	23.85

走行燃費： η [km/ℓ]

$$\eta = V \times t_s / (3.6 \times V_c)$$

V: 速度 [km/h], t_s : 燃料消費時間 [s], V_c : 燃料消費量 [cc]

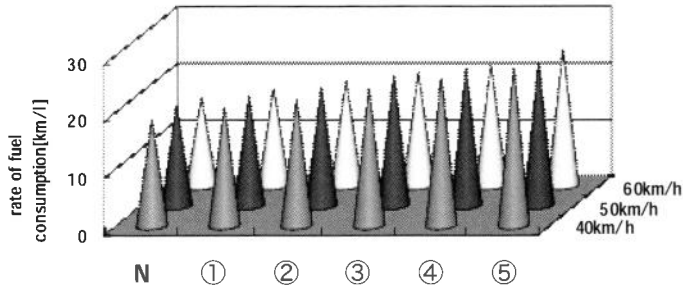


Fig-8 走行燃費 (40・50・60km / h)

4.4 熱効率

各走行速度及び各燃料種における熱効率を表-5, 図-9に示す。

Table-5 熱効率 [%]

	N	①	②	③	④	⑤
40km/h	21.9	24.63	26.72	29.11	31.58	33.83
50km/h	24.45	26.77	28.71	31.51	33.12	35.21
60km/h	26.25	29.06	31.12	33.70	36.30	40.72

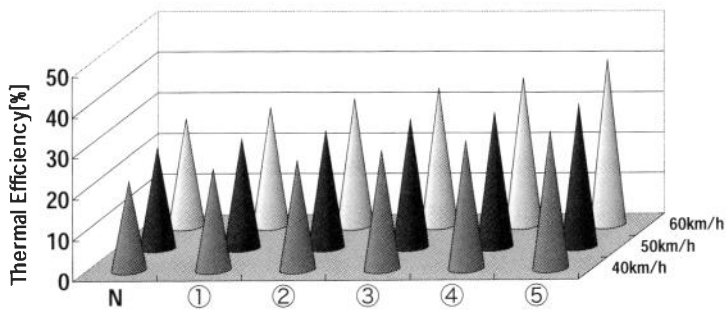


Fig-9 熱効率 [%] (40・50・60km / h)

熱効率は以下の式より求めた。

熱効率： η_t

$$\eta_t = Q_i / Q_o$$

燃料消費率→熱効率

$$\eta_t = 10^3 \times 3600 / (Vg \times 10^{-2} \times 42.5 \times 10^6)$$

Vg：燃料消費量

Q：燃料（軽油）低発熱量 $Q = 42.5\text{Mj}$ （ボッシュ・自動車ハンドブック）

5. 考 察

原子構造は、あるエネルギー準位の軌道に電子が詰まって充填が完了すると、これらの電子はその原子に強く結合している。この完結した電子殻の外側の電子（その殻に半分以下しか詰まっていない場合）は比較的容易にイオン化する。この傾向は周期表を通じて繰返される。

一般に金属は、比較的イオン化されやすい元素である。銅やアルミニウムのような金属は各原子の全ての価電子が隣り合う原子ばかりでなく全ての原子に共有された形で結合されている。

即ち、この場合どの価電子も結晶中を自由に移動できる状態で存在している。このような結合を金属結合といい、金属結合によってできた物質は一般に電気の良い良導体となる⁷⁾。

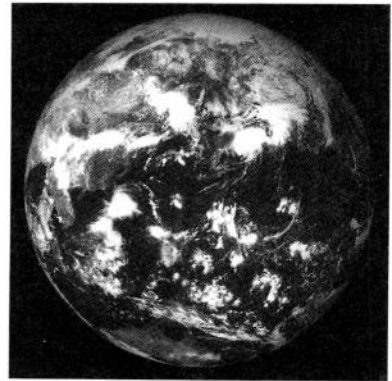
アルミニウム・ホイル (Alumi-foil) は、アルミニウム板を2枚重ねて、ローラで繰返し圧延形成される。このときアルミニウム板は塑性変形でアルミ箔に形成される。変形過程でアルミニウムの結晶構造にずれが生じて内部応力、電子配列の歪等によりアルミ・ホイルは局部的励起状態になっていると考えられる。

アルミニウムの特性（3価）として、還元力が強くイオン化列の順位から、アルミニウム ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p$) のM殻電子は自由電子として、電導性に関与している。

アルミニウムは加工（塑性変形）による不安定域の電子（3価）は離脱し易く、アルミニウム (Al) \rightarrow アルミニウムのイオン化 ($Al^{3+} + 3e^-$) と変化した状態で燃料と接触していると推察される。また、燃料がアルミニウムと接触流動することで、流動電位が生じその界面に電気二重層も形成されることも考えられる⁸⁾。これらが燃料に活性化を与え燃焼状態が変化し燃料消費率向上に繋がったものと考えられる。

本実験により内燃機関中で熱効率の高いディーゼル・エンジンは地球温暖化で世界（一部を除く）が問題視している二酸化炭素 (CO_2) の排出を抑制、低減する方向にマッチするエンジンで、このエンジンに燃費向上策を採用すれば、さらに二酸化炭素の排出が抑制され地球環境に寄与すると共に共有する資源の枯渇対策にも有効と考えられる。

今回、本実験において燃費向上率が約30% (max) の効果が確認できたが、実験に用いたアルミ・ホイルの表面に吸着（付着）現象が起これば、その効果は期待できない可能性が懸念され、これの持続性については疑問も残るが、この美しい宇宙船「地球号」を次世代の乗船客に残すことにつながると信じて。



6. 参 考 文 献

- 1) Engine Technology, 山海堂 (株)

木下勝晴・横井隆治・西側通雄：ディーゼル・エンジンの燃費改善（第5報 Aluminum Foil）

- 2) 自動車と大気汚染に関する調査報告, 日本自動車工業会
- 3) 化学小事典, (株)三省堂
- 4) 田中政夫 他: 機械材料, 共立出版 (株)
- 5) サービス週報, 日産自動車 (株)
- 6) 木下勝晴 他: ディーゼル・エンジンの燃費改善 (第4報), 中日本短期大学論叢
- 7) 柳井久義 他: 基礎電気材料, 実教出版 (株)
- 8) 近藤 保: 界面化学第2版, 三共出版 (株)