

A study on the reduction of environmental  
impact by adding hydrogen to existing diesel  
engines

既存ディーゼルエンジンへの水素添加による環境  
負荷の低減に関する研究

Muxi Wang

王 木喜

## 要 旨

人間活動の結果として、二酸化炭素排出量の急峻な増加による急激な気候変動、化石燃料の持続的な利用による資源の枯渇、さらには都市部を中心とした大気質悪化の問題などが深刻化している。水素社会への移行が国際的なコンセンサスとして認識されているが、完全な転換は短期間での実現が難しい。近年、各国は純粋な電気自動車の研究開発と普及を進め、顕著な進歩を遂げているが、充電時間や航続距離などの面では化石燃料燃焼型自動車の性能には及んでいない。

同時に、研究開発と普及が進められている純水素車も、燃料価格のコスト高、水素供給インフラの特殊事情、安定的な水素のストレージの観点から技術的な課題を残している。したがって、すぐには到達できないこの移行期間中には、既存の技術を有効に活用し、環境負荷を最小限に抑える取り組みが必要となってくる。

この研究では、直接噴射式ディーゼルエンジンを搭載したトラックを使用しディーゼルエンジンの環境負荷を低減する方法として、水素の添加を検討する。水素はクリーンな燃料として知られており、ディーゼル燃焼の効率を向上させる可能性がある。水素添加の実験を通じて、燃焼効率の実証や環境負荷の低減効果を明らかにすることを目指す。

本研究では、直接噴射式ディーゼルエンジンを搭載したトラックを使用し、シャーシダイナモメーター上で走行させながら、水素混合空気をエンジンの

吸気に導入しました。燃料消費量や排気ガス成分に対する水素添加の影響を調査した。

試験走行実験は、4つの試験走行モードで実施した：JE05 ドライビングサイクル、定速 40km/h、定速 60km/h、定速 80km/h で、プログラムロボット（ADS-1100、HORIBA）によりトラックを走行させた。

本研究の結果は、ディーゼルの消費減少と HES の増加はほぼ線形の関係があり、ディーゼル消費のパーセンテージの減少は HES の約 0.6 倍であることを示している。また、CO<sub>2</sub>パーセンテージの減少はディーゼル消費の減少と一対一の関係があることが確認された。CO、PM、および炭化水素（エチレンを除く）の排出の減少もディーゼル消費の減少と同じまたはそれ以上の相関を示していた。

それに対して、NO<sub>x</sub>の排出は増加し、NO<sub>x</sub>のパーセンテージの増加は HES の 1.5~2.0 倍であることが観察された。また、水素を添加した場合の総エネルギー供給量はディーゼルだけよりも多かったことが確認された。

実際の運行モードでは、添加された水素のエネルギーのうち 50%しかトラックの動力に使用されていないことが観察されました。この実験ではエンジンに何の調整も施されていないため、これは燃焼条件を調整することで改善可能な欠点と考えられる。

この研究は、ディーゼルエンジンへの水素添加が燃料消費と CO<sub>2</sub>、CO、PM、および大部分の炭化水素の排出を大幅に減少させる可能性があることを示している。しかし、NO<sub>x</sub> 排出の増加および水素エネルギーの効率的な利用には改善の余地があることも明らかになった。これは、エンジンの燃焼条件

を調整することで最適なパフォーマンスと環境効果を達成するための要件を示している。

水素の添加がディーゼル消費を減少させる一方で、一部の状況では NOx 排出物が増加する可能性があることがこの調査から明らかになりました。これは、水素を代替燃料として使用する際に、その異なる排出物への影響を同時に考慮する必要があることを示している。

まとめとして、水素の添加がディーゼルエンジンの燃料消費と CO<sub>2</sub>、CO、PM、および大部分の炭化水素の排出を大幅に減少させる可能性がある一方で、NOx 排出物の増加と水素エネルギーの効率的な利用には改善の余地があることを示している。さらなる研究とエンジニアリングの改良が必要ですが、これにより水素の補助燃料としての利用が最適化される可能性がある。これには、NOx 排出を減らし、水素エネルギーの利用効率を向上させるための燃焼条件の改善が含まれる。

全体として、ディーゼルエンジンにおける水素の使用に関する新たな洞察を提供し、さらなる改良と最適化が必要な分野を明らかにした。未来の研究がこの有望な代替燃料の探求を続け、内燃機関技術をより環境に優しく、効率的な方向へと推進することを期待している。

本研究結果は、新エネルギー自動車完全に普及する前の過渡期に、可能な解決策を提供している。水素を燃料添加剤として使用することにより、燃料効率を向上させ、有害な排出を減らすことができ、それにより化石燃料エンジンが環境に及ぼす影響をある程度軽減することができると期待する。

目次 .....	4
第1章序論.....	7
1.1 背景.....	7
1.1.1 化石燃料の枯渇 .....	8
1.1.2 二酸化炭素 CO <sub>2</sub> 増加の問題 .....	10
1.1.2.1 二酸化炭素発生する原因、環境の影響及び対策.....	12
1.1.2.2 世界中：CO の削減政策 .....	14
1.1.2.2.1 アメリカの状況 .....	17
1.1.2.2.2 日本国の状況 .....	19
1.1.2.2.3 中国の状況 .....	27
1.1.2.2.4 ヨーロッパの状況.....	29
1.1.2.2.5 東南アジア諸国の状況 .....	31
1.1.3 大気汚染問題 .....	33
1.1.4 石油燃料自動車の現状及び大気環境への影響: .....	35
1.1.5 電気自動車（EV）の現状.....	38
1.2 水素利用現状 .....	40
1.2.1 水素エネルギーの利用状況.....	41
1.2.2 水素技術を用いた自動車の発展状況と問題点 .....	43
1.3 化石燃料自動車における水素ガス混焼技術 .....	45

1.4 本研究の目的.....	45
1.5 本論文の構成.....	46
第2章 文献レビュー .....	48
第3章 試験方法 .....	58
3.1 試験の総括.....	58
3.2. 水素添加試験の必要な機器と材料.....	60
3.2.1 実験対象と試験エンジンの仕様 .....	61
3.2.2 水素の発生と供給—HHO ガス発生装置 .....	62
3.3 試験のシステム .....	64
3.4 試験走行実験.....	66
第4章 試験の結果と考察 .....	72
4.1 燃料消費量の変化状況.....	73
4.2 CO <sub>2</sub> の変化状況.....	77
4.3 NOX の変化状況.....	81
4.4 CO と PM の変化状況 .....	86
4.5 THC の変化状況.....	92
4.6 VOC の変化状況.....	94
4.6.1 定速 80KM で VOC の変化状況.....	96
4.6.2 定速 60KM で VOC の変化状況.....	99

4.6.3 定速 JE05 で VOC の変化状況.....	101
4.6.4 定速 40KM で VOC の変化状況.....	104
4.7 水素添加のエネルギーの収支状況.....	108
4.8 水素添加実験自動車モデル計算結果.....	110
4.9 VOC、CO、CO <sub>2</sub> 、P M、THC の削減、NO <sub>x</sub> の増加について化学反応式 を用いての説明.....	114
第 5 章 結論.....	117
謝辞 .....	124
参考文献.....	126

# 第1章 序論

水素の利用が注目されている背景には、環境、経済、およびエネルギーの安定安全に関わる複数の理由があり。

燃料の枯渇と価格の上昇：世界的に見て、石油や天然ガスといった化石燃料の埋蔵量は限られており、将来的には枯渇すると予想されている。これらの燃料に依存する現代のエネルギーシステムは、資源が減少するにつれて供給が不安定になり、価格が上昇する可能性があります。水素は地球上で豊富に存在し、持続可能な方法で生産することが可能なため、化石燃料の代替として有望視されている。

大気汚染の問題：自動車や工場からの排出ガスに含まれる一酸化炭素、窒素酸化物、微粒子物質などは、大気汚染を引き起こし、人の健康に悪影響をおよぼしている。水素を燃料として使用する場合、排出されるのは水蒸気のみであり、大気汚染物質を排出しない。このため、大気質の改善に寄与する可能性がある。

CO<sub>2</sub> 排出問題：化石燃料の燃焼によって大量の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が排出され、これが温室効果ガスとして地球温暖化の主要な原因の一つとなっている。水素エネルギーは燃焼時に CO<sub>2</sub> を排出しないため、地球温暖化対策において重要な役割を担うことができる。

## 1.1 背景



世界のエネルギー需要に対して、化石燃料の使用によるエネルギー供給は大きな割合を占めている。一方で、化石燃料の使用の問題が多くみられるようになり、持続可能な新しいエネルギー源や技術への転換が求められている。第一章では、化石燃料使用問題点を示し、次世代のエネルギー供給と其中での水素技術の役割を述べる。そして、水素技術のひとつである本研究のテーマ：「既存ディーゼルエンジンへの水素添加」の位置づけを述べる。

### 1.1.1 化石燃料の枯渇

近年、世界のエネルギー需要は急速に増加しており、それに伴い、化石燃料の消費量も急増している。その結果、石油、石炭、天然ガスなどの主要な化石燃料の埋蔵量が減少し、将来的には枯渇の恐れが出てきている。

化石資源とは、石油、石炭、天然ガスなどの地下に埋蔵された、有機物由来の炭化水素資源を指します。これらの資源は数億年をかけて生物の残骸が圧縮され、高温・高圧下で変化して形成されたものであり、その形成速度は非常に遅いため、実質的には再生不可能な有限資源として扱われる。

#### (1). 現状

- 世界のエネルギー消費の大部分は化石燃料に依存している。特に石油は、輸送用燃料としての利用が多いため、現状では最も高い需要を示す。
- 一部の国々や地域では、化石燃料の採掘や生産が経済の主要な柱となっており、多くの雇用を生み出している。

#### (2). 枯渇の予測

- 多くの専門家は、21世紀中に石油、天然ガスの主要な埋蔵量が減少し始めると予測している。特に“ピークオイル”という概念は、採掘可能な石油の量が最大に達した後、減少していく時点を指し、これが近い将来に訪れるとの議論がある。

- 石炭に関しては、残存埋蔵量が相対的に多いとされているが、環境問題や健康への影響から、採掘や使用が制限される可能性がある。

### (3). 問題点

- 化石資源の枯渇は、エネルギー価格の上昇や供給の不安定化を引き起こす可能性がある。これは経済的な混乱や社会的な不安を引き起こす原因となり得る。

- 石油を中心とした化石燃料の価格高騰は、輸送コストや物価全般の上昇を引き起こすことが考えられる。

### (4). 対策

- 再生可能エネルギー源（太陽光、風力、地熱、水力など）の導入と普及を進めることで、化石燃料への依存を減少させる努力が行われているが、コストが高いことから広く普及するには至っていない。

- エネルギー効率の高い技術の開発や省エネルギー活動も、消費量を削減するための重要な取り組みとなっている。

結論として、化石資源の枯渇は21世紀の重要な課題の一つである。持続可能な社会を実現するためには、新しいエネルギー源や技術への転換が不可欠である。

### 1.1.2 二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 増加の問題

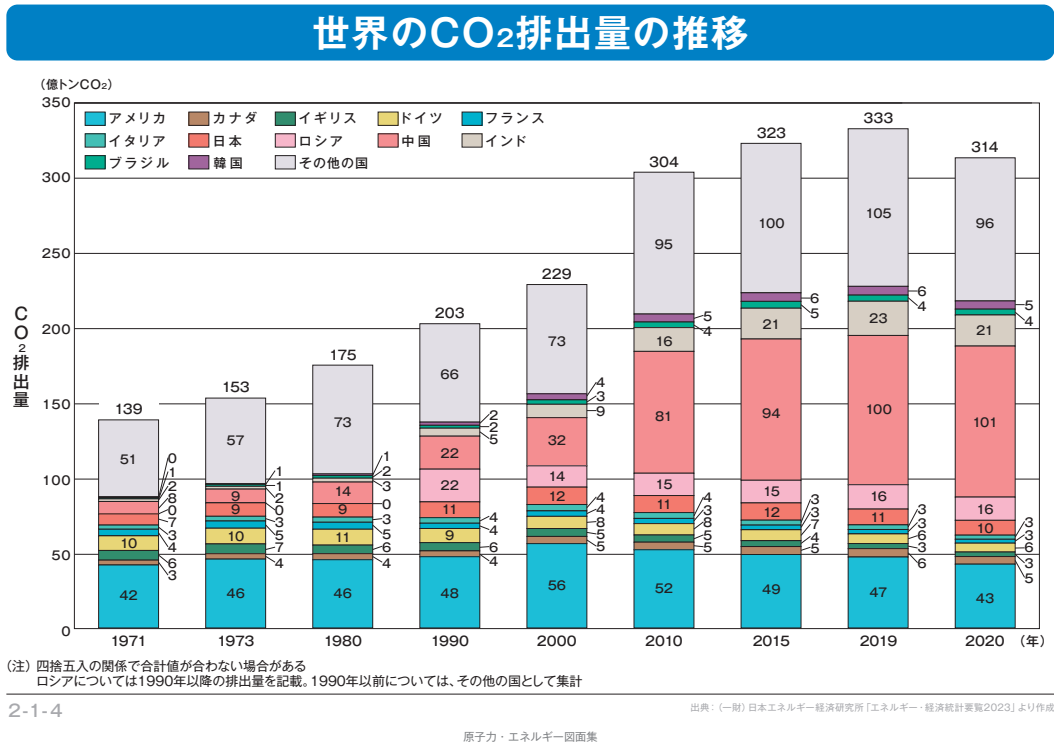


図 1.1.1 世界 CO<sub>2</sub> 排出量の推移(50)

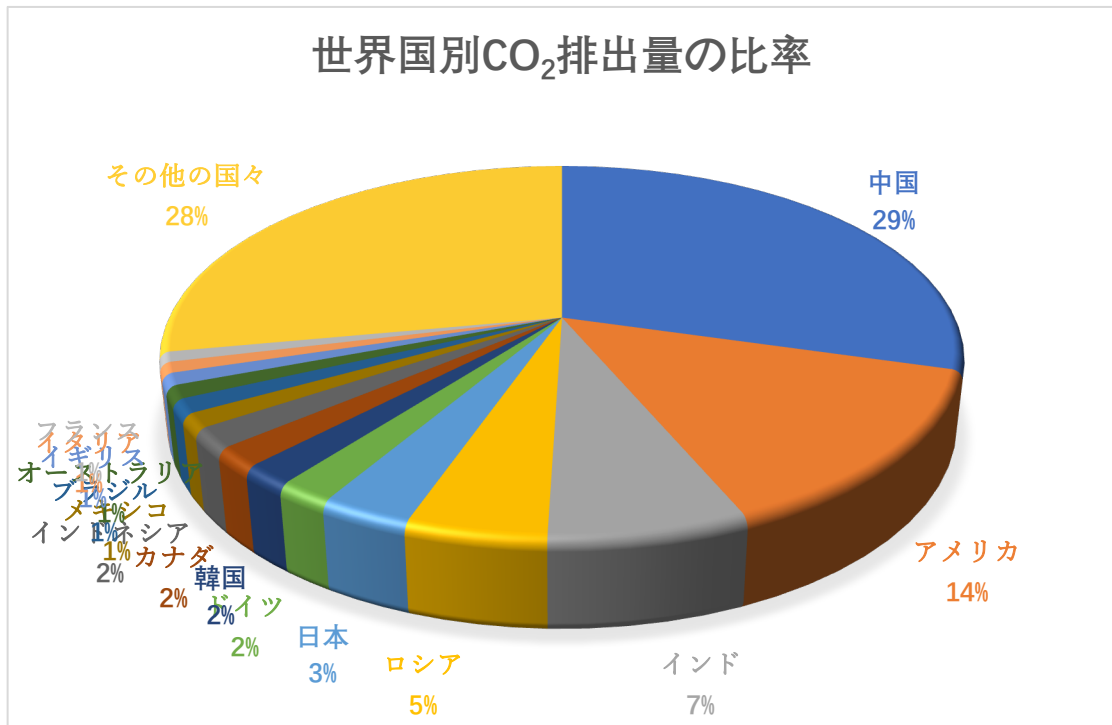


図 1.1.2 世界国別 CO<sub>2</sub> 排出量の比率((50))

世界の CO<sub>2</sub>排出量は、図 1.1.1 のようにおよそ 50 年前の 2 倍以上（2020 年 /1971 年比）に増加しており、これはアジア地域（特に中国、インド）における増加に寄因する。2020 年における日本の CO<sub>2</sub>排出量は京都議定書基準年（1990 年）に比べやや減少した。（50）

表 1.1.1 全世界二酸化炭素排出量（2019 年）（35）

	国別	排出量	比率
1	中国	9,882	29.5
2	アメリカ	4,744	14.1
3	インド	2,310	6.9
4	ロシア	1,632	4.9
5	日本	1,059	3.2
6	ドイツ	644	1.9
7	韓国	587	1.7
8	カナダ	571	1.7
9	インドネシア	584	1.7
10	メキシコ	419	1.2
11	ブラジル	411	1.2
12	オーストラリア	381	1.1
13	イギリス	342	1
14	イタリア	309	0.9
15	フランス	292	0.9
	その他の国々	9,378	28
	全体の排出量（グローバル排出量）	33,545	

出典) EDMC/エネルギー・経済統計要覧 2022 年版

\* 国別排出量比は世界全体の排出量に対する比で単位は[%]  
排出量の単位は[トン/人-エネルギー起源の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)]

このリストは、各国の名前、排出量、およびその割合を示している。排出量は CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの排出量を指摘する。[35]

図 1.1.2.では 2019 年の全世界の二酸化炭素排出量の国別リストによると、中国が最も多くの CO<sub>2</sub>を排出しており、全体の 29.5%（9,882 百万トン）を占

めている。アメリカが次に多く、14.1% (4,744 百万トン) で、インドが 6.9% (2,310 百万トン) で第 3 位であり。ロシアと日本がそれに続き、それぞれ 4.9% (1,632 百万トン) と 3.2% (1,059 百万トン) の排出量である。

ドイツ、韓国、カナダ、インドネシアが 1.7%から 1.9%の範囲で

排出し、メキシコ、ブラジル、オーストラリアがそれぞれ 1.2%、1.1%の 35)排出量であり、イギリス、イタリア、フランスはいずれも 1%未満の排出量で、その他の国々が全体の 28% (9,378 百万トン) を占めている。全体のグローバル排出量は 33,545 百万トンである。

#### 1.1.2.1 二酸化炭素発生する原因、環境の影響及び対策

化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素は、地球温暖化の主要な原因とされている。産業革命以降の急速な工業化と経済成長により、大量の二酸化炭素が大気中に放出され、気候変動のリスクが高まっている。

##### 1. 主な原因

- 化石燃料の燃焼:
  - 交通手段: 車、船、飛行機、鉄道など、多くの交通手段が石油製品をエネルギー源として使用しており、大量の CO<sub>2</sub> を排出している。
  - 発電: 石炭や天然ガスを主要なエネルギー源として使用する火力発電所は、世界中で最も CO<sub>2</sub> 排出量が多い固定発生源である。

- 工業: 鉄鋼、セメント、化学などの産業活動も、大量の CO<sub>2</sub> を排出している。
- 森林破壊:
  - トロピカルレインフォレスト: インドネシア、ブラジル、マレーシアなどの国々での過度な伐採が、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度増加の主な原因となっている。
  - 焼畑農業: 一部の地域では、土地を開墾するために森林を焼き払う焼畑農業が行われており、これにより大量の CO<sub>2</sub> が排出されている。

## 2. 影響

- 海洋酸性化: CO<sub>2</sub> の増加に伴い、海水中の CO<sub>2</sub> 濃度も増加しており、これが海洋酸性化の原因となっている。これにより、サンゴ礁の白化や甲殻類の成長阻害などの問題が生じている。
- 生態系の変動: 地球温暖化に伴い、生物の分布域が変動している。特に、極地や高山の生物は生息域が狭まる傾向にある。

## 3. 対策

- 炭素価格の導入: CO<sub>2</sub> 排出量に応じて税金や料金を課すことで、企業や個人に CO<sub>2</sub> 排出削減を促進する制度がいくつかの国で導入されている。
- CCS 技術: Carbon Capture and Storage (CCS) とは、大気中の CO<sub>2</sub> を捕捉して地下に保存する技術で、この技術の普及が期待されている。

- 持続可能な農業: 農地の持続可能な管理や再生可能エネルギーの利用拡大など、農業の環境への影響を最小限に抑える取り組みが進められている。

二酸化炭素の増加は、様々な要因に起因し、地球の気候や生態系に多岐にわたる影響を及ぼしている。国際的な協力や技術の進展が、この問題への対策を進める鍵となる。

### 1.1.2.2 世界中：CO<sub>2</sub>の削減政策

現在、120以上の国と地域が2050年までのカーボンニュートラル実現を表明しており、図1.1.3のような2060年までの中国、2070年までのインドも含めると、全世界の約3分の2がカーボンニュートラルの旗を掲げている。

(51)









	中期目標	長期目標
 EU	2030年までに少なくとも▲55% (1990年比)	2050年排出実質ゼロ
 英国	2030年までに少なくとも▲68% (1990年比) 2035年までに▲78% (1990年比)	2050年少なくとも▲100% (1990年比)
 アメリカ	2030年に▲50-52% (2005年比)	2050年排出実質ゼロ
 カナダ	2030年までに▲40-45% (2005年比)	2050年排出実質ゼロ
 中国	2030年までに排出量を削減に転じさせる、 GDPあたりCO <sub>2</sub> 排出量を2005年比65%超削減	2060年排出実質ゼロ
 ロシア	2050年までに▲60% (2019年比)	2060年排出実質ゼロ
 インド	30年には再生可能エネルギーの比率を50%	2070年排出実質ゼロ
 日本	2030年度において▲46% (2013年比)	2050年排出実質ゼロ

図 1.1.3 各国のカーボンニュートラル(51)

カーボンニュートラル実現に向けて、各国がガソリンエンジンの販売数を規制する政策を打ち出しているが、そのスタンスはさまざまである。EU やカナダでは、PHV も含めた強い販売禁止が打ち出されているものの、ガソリ

ン・ディーゼル等の内燃機関車（ICE）のみを販売禁止対象とする国や、ICEとHVを販売禁止対象とする国も多くある。日本は、新車販売について、乗用車は2035年までに電動車100%を実現し、商用車のうち小型車は2040年までに電動車もしくは脱炭素燃料車とし、大型車は2030年までに改めて2040年の普及目標を設定するとした。世界ではHVが販売禁止の対象になりつつある中、日本では現時点の2030年新車販売台数目標のうちHVを30～40%としており、HVを電動車の主力と位置付けている（図1.1.4）（51）。

	2019年(新車販売台数)	2030年
従来車	60.8%(261万台)	30～50%
次世代自動車	39.2%(169万台)	50～70%※
ハイブリッド自動車	34.2%(147万台)	30～40%
電気自動車 プラグイン・ハイブリッド自動車	0.49%(2.1万台) 0.41%(1.8万台)	20～30%
燃料電池自動車	0.02%(0.07万台)	～3%
クリーンディーゼル自動車	4.1%(17.5万台)	5～10%

図.1.1.4 次世代自動車の普及目標(51)

世界中 CO2 の削減政策として以下のようなものがある。

1. 国別の温室効果ガス削減目標：

- パリ協定に基づき、多くの国が2030年までに自国の温室効果ガス排出を削減する目標を設定している。例えば、アメリカは、2005年から2030年までに排出を50～52%削減することを目指している。

2. 再生可能エネルギー：



- 太陽光と風力エネルギーの利用が急速に増加しており、世界中で再生可能エネルギー発電のシェアが拡大している。再生可能エネルギーの比率は国によって異なりますが、例えば、デンマークは 2020 年に再生可能エネルギーの割合が 50%を超えた。

### 3. エネルギー効率：

- 国や地域により異なりますが、建物や交通などのセクターにおいて、エネルギー効率向上を図るための規制やイニシアティブが展開されている。例えば、欧州連合は 2030 年までにエネルギー消費を 32.5%削減することを目標としている。

### 4. カーボンプライシング：

- カーボンプライシングは、企業に対して CO<sub>2</sub>排出に対する費用を課すメカニズムであり。多くの国で導入されており、価格は国によって異なる。例えば、欧州連合のカーボン市場では、1 トンの CO<sub>2</sub>排出に対する価格は一時期 40 ユーロを超えた。

### 5. 再植林と森林保護：

- 森林保護と再植林プログラムは、CO<sub>2</sub>の吸収と貯蔵をサポートしている。ブラジルやインドネシアなどの国々は、熱帯雨林の保護と再植林に取り組んでおり、数百万ヘクタールの森林を復元した。

### 6. グリーンテクノロジー：

- 新興のグリーンテクノロジーは、エネルギー効率の向上や低排出ソリューションの開発に寄与している。例えば、自動車市場は急成長し、2020年には全体の自動車販売の約4%を占めた。

#### 7. 気象変動への適応策：

- 気象変動への適応策には、洪水対策、干ばつ耐性の農業プラクティス、都市計画の再構築などが含まれる。これには多額の資金が投じられており、世界中の国々がそれに取り組んでいる。

これらの政策は、温暖化の抑制と気象変動への対応に寄与している。各国はこれらの政策をさまざまな方法で実施し、国際協力を通じて共通の目標を達成しようとしている。その結果、温室効果ガス排出の抑制と気候変動への適応が進行してある。

##### 1.1.2.2.1 アメリカの状況

アメリカが取り組んでいる具体的なCO<sub>2</sub>の防止策について詳しく説明である。

1. クリーンエネルギーの導入 アメリカは、再生可能エネルギーの導入を進めており。バイデン政権は、2035年までにアメリカ全土で100%のクリーンエネルギーを使用することを目指しており、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの普及を進めてある。

2. 炭素中和の目標設定 アメリカは、2050年までに炭素中和を目指すことを表明している。バイデン政権は、2030年までにCO<sub>2</sub>排出量を2005年比で50%削減することを目指しており、具体的な政策に取り組んでいる。

3. 自動車排出規制の強化 アメリカは、自動車排出規制の強化にも取り組んでいる。バイデン政権は、2026年までに全米の自動車の排出量を1ガロンあたり50マイル（約20km/L）にすることを目指しており、規制の強化を進めている。

4. エコノミー効果の推進 アメリカは、エネルギー効率の向上によって、CO<sub>2</sub>排出削減と同時にエコノミー効果を生み出すことを目指している。エネルギー効率の高い建築物や家電製品などの普及を促し、CO<sub>2</sub>排出削減とエコノミー効果の両面から取り組んでいる。

5. 低炭素交通システムの構築 アメリカは、低炭素交通システムの構築にも注力している。公共交通機関の導入や、自転車や歩行者に優しいまちづくりなど、CO<sub>2</sub>排出を削減しながら交通事故の減少や健康促進にも繋がる取り組みを進めている。

6. 炭素税の導入 アメリカでは、炭素税の導入を検討している。炭素税は、CO<sub>2</sub>排出量に応じて税金を課すことで、企業や個人にCO<sub>2</sub>削減への取り組みを促すことができる。バイデン政権は、炭素税の導入によって、気候変動対策を進めるための財源を確保することを目指している。

7. CCS技術の開発 アメリカは、CCS（二酸化炭素の回収・貯留）技術の開発にも力を入れている。CCS 技術は、発電所や工場から排出される二酸化炭素を回収し、地中に貯留することで、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を削減することができる。アメリカは、CCS 技術の開発と実用化を進めることで、炭素中和の実現を目指している。

8. 持続可能な農業の推進 アメリカは、持続可能な農業の推進にも力を入れている。化学肥料や農薬の使用を減らし、有機農業や森林の再生を進めることで、CO<sub>2</sub>の吸収力を高める取り組みを進めている。

以上が、アメリカが取り組んでいる具体的な CO<sub>2</sub> の防止策である。バイデン政権は、気候変動問題を重視し、環境にやさしい政策を進めているため、今後もさらなる取り組みが期待される。

#### 1.1.2.2.2 日本国の状況

図.1.1.5 は 1990 年から 2021 年にかけての日本の一人あたり（トン/人）CO<sub>2</sub> の排出量および日本全体 CO<sub>2</sub> 排出量の推移が示されている。緑色の棒グラフは一人あたり（トン/人）CO<sub>2</sub> の排出量、折れ線グラフは CO<sub>2</sub> 排出量を表しており、両方のデータは時間の経過と共に変動していることが視覚的にわかる。

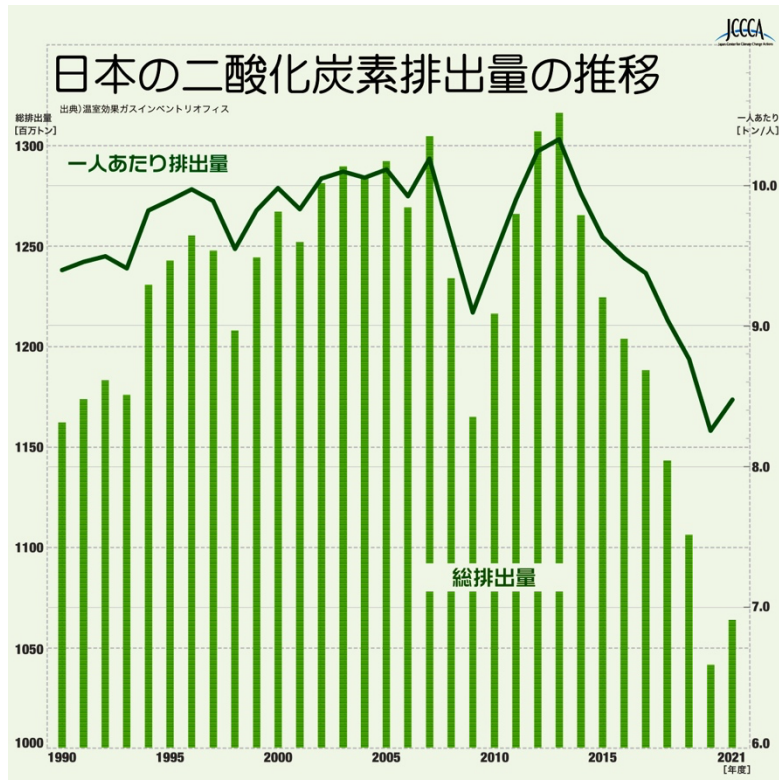


図 1.1.5 日本の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量の推移 (52)

縦軸は左側が日本全体 CO<sub>2</sub> 排出量、右側が日本の一人あたり (トン/人) CO<sub>2</sub> の排出量である。

棒グラフによると、日本の一人あたり (トン/人) CO<sub>2</sub> の排出量は 1990 年代を通じて増加し、2000 年代初頭にピークを迎えた後、若干の減少傾向にあることが読み取れる。

CO<sub>2</sub> 排出量は 2000 年代半ばまで増加傾向にあったが、その後減少していることが折れ線グラフからわかる。

2021 年のデータでは、日本の一人あたり (トン/人) CO<sub>2</sub> の排出量および日本全体 CO<sub>2</sub> 排出量の両方が 1990 年代初頭以来の低い水準にあることが示されている。

このグラフは、エネルギー消費と環境への影響を監視し、政策や技術の進歩が CO<sub>2</sub> 排出量にどのような影響を与えているかを理解するのに役立つ。特に、経済活動の変化、エネルギー効率の改善、再生可能エネルギーへの移行などが、CO<sub>2</sub> 排出量の減少に寄与している可能性がある。(52)

日本の二酸化炭素排出量の推移は（表.1.1.2） 1990 年から 2021 年までの日本の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の推移を示している。表には、年ごとの総排出量と一人あたりの排出量が記載されており、以下のように要約できる：

この表は、温室効果ガスインベントリオフィスからのデータを元にしており、日本が気候変動対策に取り組んでいる状況を反映している。また、2020 年のデータは COVID-19 パンデミックによる経済活動の減少が影響した可能性がある。全体的に、日本は温室効果ガス排出量を減少させる方向に進んでいることがある。

- 一人あたりの排出量: 1990 年の 9.41 トンから、2000 年代半ばの 10 トン以上へと増加した後、2019 年には 8.77 トン、2021 年には 8.48 トンへと減少している。
- ギー効率の向上、再生可能エネルギーの導入、産業構造の変化、または経済活動の変動などによる可能性がある。

傾向: 日本の CO<sub>2</sub> 排出量は、2010 年代に入ってから一貫して減少しており、特に 2020 年には顕著な減少を見せている。これは、エネルギー

総排出量: 1990 年の 1163 百万トンから始まり、2000 年代半ばには 1300 百万トンを超えるピークを迎えた後、2019 年には 1107 百万トン、2020 年には 1042 百万トンと減少傾向にある。

表 1.1.2. 日本の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量の推移

	二酸化炭素(CO2)総排出量*	一人あたり
1990	1163	9.41
1991	1174	9.46
1992	1184	9.5
1993	1176	9.42
1994	1231	9.83
1995	1244	9.9
1996	1256	9.98
1997	1249	9.9
1998	1209	9.56
1999	1245	9.83
2000	1268	9.99
2001	1253	9.84
2002	1282	10.06
2003	1291	10.11
2004	1286	10.06
2005	1293	10.12
2006	1270	9.93
2007	1306	10.2
2008	1235	9.64
2009	1166	9.1
2010	1217	9.5
2011	1267	9.91
2012	1308	10.25
2013	1317	10.34
2014	1266	9.95
2015	1225	9.64
2016	1205	9.49
2017	1189	9.38
2018	1144	9.05
2019	1107	8.77
2020	1042	8.26
2021	1064	8.48
出典)温室効果ガスインベントリオフィス		

「日本の 1990-2021 年度の温室効果ガス排出量データ」(2023.4.22 発表)

\*総排出量の単位は[百万トン-二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)換算]、

一人当たり排出量の単位は[トン-二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 換算/人](52)

日本運輸部門における二酸化炭素排出量(34)

### 1. 運輸部門における二酸化炭素排出量(34)

2020 年度における日本の二酸化炭素排出量（10 億 4,400 万トン）のうち、運輸部門からの排出量（1 億 8,500 万トン）は 17.7%を占めている。自動車全体では運輸部門の 87.6%（日本全体の 15.5%）、うち、旅客自動車が運輸部門の 48.4%（日本全体の 8.6%）、貨物自動車が運輸部門の 39.2%（日本全体の 6.9%）を排出してある。

1990 年度から 1996 年度までの間に、運輸部門における二酸化炭素の排出量は 22.7%増加したが、その後、1997 年度から 2001 年度にかけてほぼ横ばいとなり、2001 年度以降は減少傾向に転じている。

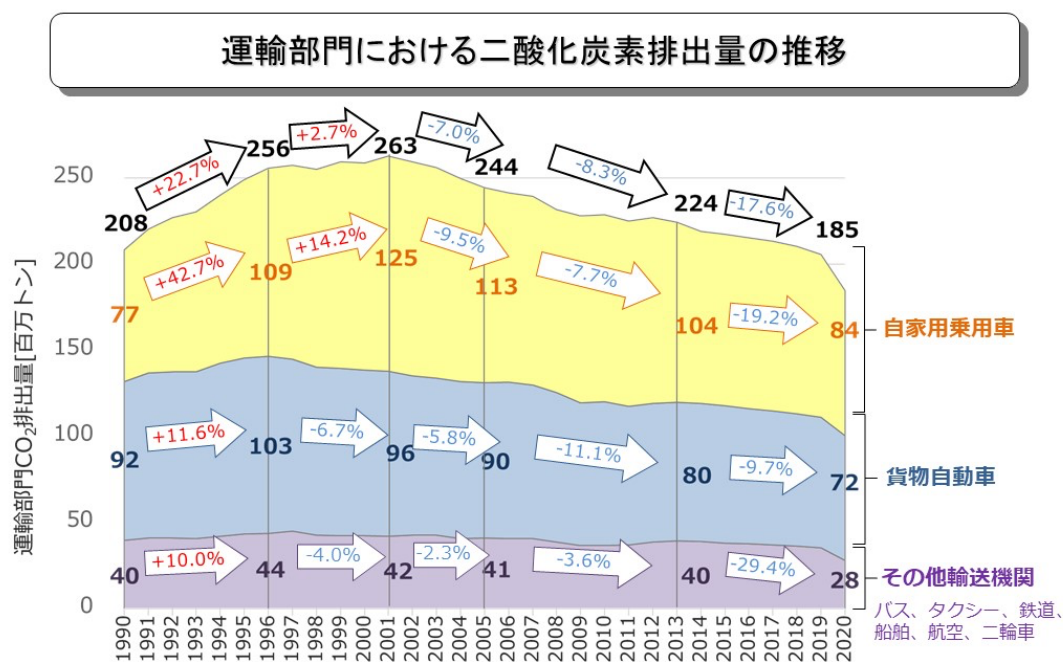


図 1.1.6 日本運輸部門における CO<sub>2</sub>排出量の推移(34)



2020年度の排出量は、自動車の燃費改善等や新型コロナウイルス感染症の感染拡大の影響による輸送量の減少により、2013年度比で減少している。また、前年度比でも減少し、8年連続の排出量減少となった。(34)

## 2.輸送量あたりの二酸化炭素の排出量(34)

一般に、輸送量が増加すれば二酸化炭素の排出量も増加する。輸送量は景気の動向等に左右されるため、運輸部門における二酸化炭素の排出量の削減を、輸送量の増減に関わらず確実なものとするには、効率のよい輸送を促進することが重要となる。

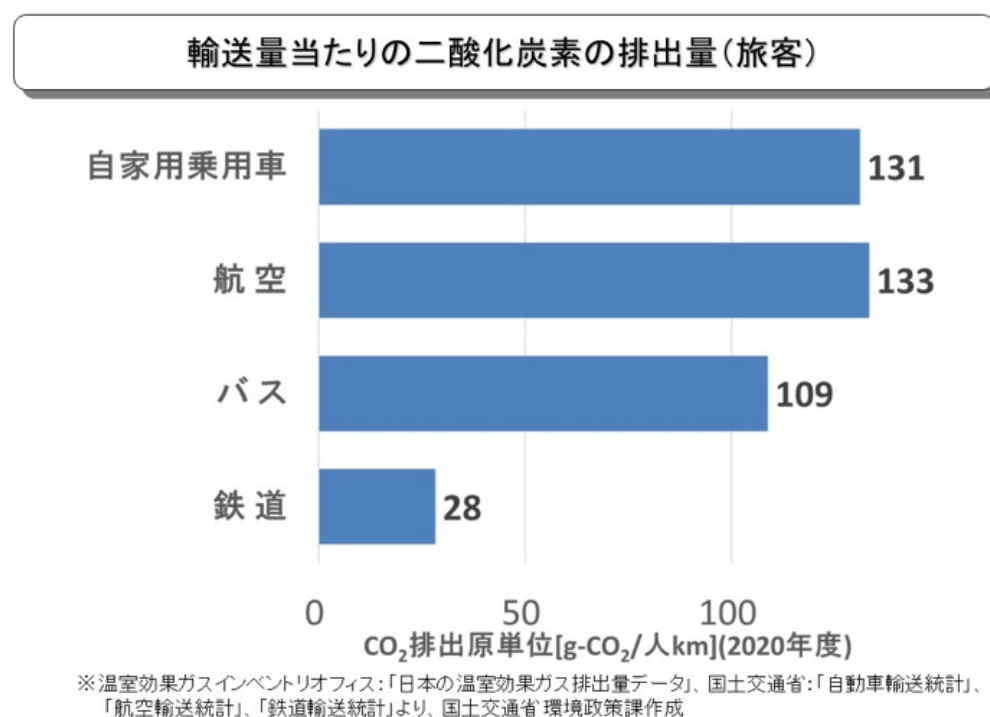


図 1.1.7 輸送量あたりの CO<sub>2</sub>の排出量 (旅客)

ここでは、日本国内の旅客輸送と貨物輸送において、効率の目安となる単位輸送量あたりの二酸化炭素の排出量を比較した。

なお、これらの数値は、サイズや車種、船種、機種等を区別せず、輸送機関の分類のみを考慮しておく。

旅客輸送において、各輸送機関から排出される二酸化炭素の排出量を輸送量（人キロ：輸送した人数に輸送した距離を乗じたもの）で割り、単位輸送量当たりの二酸化炭素の平均的な排出量を試算すると図 1.1.7 のようになる。

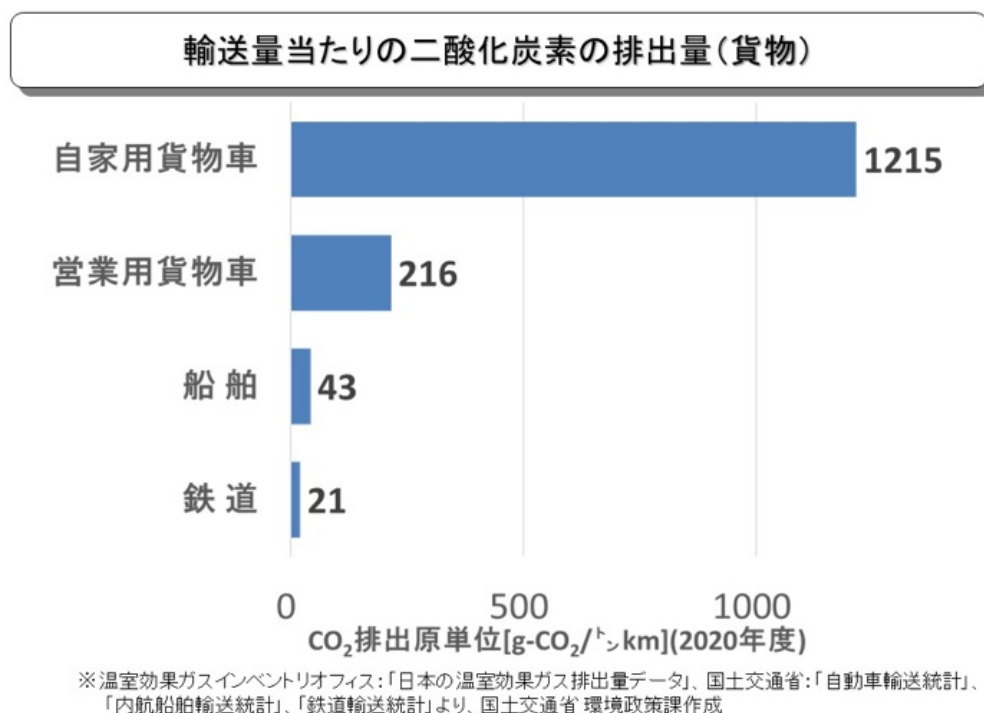


図 1.1.8 輸送量あたりの CO<sub>2</sub> の排出量 (貨物) (34)

※新型コロナウイルス感染症まん延に伴う各輸送機関の利用者数の減少により、例年に比べて輸送量当たりの二酸化炭素排出量が極端に高く算出されておる。本データを利用する際にはご注意ください。

貨物輸送において、各輸送機関から排出される二酸化炭素の排出量を輸送量（トンキロ：輸送した貨物の重量に輸送した距離を乗じたもの）で割り、単位輸送量当たりの二酸化炭素の排出量を試算すると図 1.1.8 のようになる。

[34]

以下日本国の CO<sub>2</sub> の防止策について、詳しく説明する。

1. 再生可能エネルギーの導入 日本国は、気候変動対策の一環として、再生可能エネルギーの導入を進めている。2019年には、再生可能エネルギーの発電量が国内の総発電量の18%を占め、目標の22~24%に近づいている、再生可能エネルギーの導入には、固定価格の買取制度（FIT）が活用されており、太陽光発電や風力発電などの導入に促進効果をもたらしている。また、2021年には、再生可能エネルギーの普及促進を目的とした新エネルギー法が制定され、再生可能エネルギーの導入拡大が進むことが期待されている。

2. エネルギー効率の改善 日本国は、省エネルギー技術の開発や普及に取り組んでおり、建物や自動車、家電製品などのエネルギー効率の向上を図っている。2016年には、省エネ法が改正され、製造業における省エネルギーの取り組みが義務付けられ、2020年には、家庭用電化製品の省エネルギー基準が強化された。また、自動車についても、燃費基準の引き上げが進められている。

3. 原子力発電の再稼働 2011年の東日本大震災以降、原子力発電所の一部が停止していたが、2015年から再稼働が始まり、2021年現在、再稼働が決まっている原発は9基あります。再稼働によって、火力発電に比べてCO<sub>2</sub>排出量を削減することができるとされている。

4. キャップ・アンド・トレード制度の導入 2015年には、日本でもキャップ・アンド・トレード制度が導入され、企業によるCO<sub>2</sub>の排出量を規制することが始まった。現在は、エネルギー、化学、鉄鋼、セメントなどの業界が対象となっている。2022年炭素中和の取り組み日

本国は、炭素中和を目指して取り組みを進めている。2050年までに、CO<sub>2</sub>排出量を実質ゼロにすることを目指し、2030年までには、温室効果ガスの排出量を2013年度水準から46%削減する目標を掲げている。このため、再生可能エネルギーの導入やエネルギー効率の改善を進めるとともに、炭素中和に必要な技術の開発や普及を進めてある。

5. 水素社会の実現 日本国は、水素社会の実現を目指して取り組みを進めている。水素は、再生可能エネルギーと組み合わせることで、CO<sub>2</sub>を排出せずにエネルギーを生産することができる。日本国は、2020年に「水素社会創成基本法」を制定し、2025年までに水素を活用した社会の実現を目指してある。

6. 地球温暖化防止税の導入 2019年には、地球温暖化防止税が導入された。この税金は、石炭や石油などの化石燃料を使う事業者に課され、CO<sub>2</sub>の排出量に応じて課税されます。税収は、再生可能エネルギーの開発や普及、エネルギー効率の改善、環境に配慮した社会インフラの整備などに利用される。

以上が、日本国のCO<sub>2</sub>の防止策の一部です。これらの取り組みを進めることにより、CO<sub>2</sub>の排出量の削減や炭素中和の実現に向けた取り組みが進められてある。

#### 1.1.2.2.3 中国の状況

中国は経済成長を遂げると同時に、CO<sub>2</sub>排出量も急激に増加している。このため、中国政府はCO<sub>2</sub>削減を重要な政策課題としている。

まず、エネルギー源の多様化が求められています。石炭を主要なエネルギー源とすることから、再生可能エネルギーやガスなどにシフトすることが重要である。また、エネルギー効率の向上も推進されている。これには、省エネ建築や工場の設備改良などが含まれる。

次に、産業構造の変革が求められている。中国は高度な製造業を持つ国ですが、これを持続的なものにするためには環境に配慮した産業構造への変革が必要である。これには、高効率な製造技術の開発や環境に配慮した産業の創出などが含まれる。

さらに、政策や法律の強化も求められている。例えば、CO<sub>2</sub> 排出量に応じた税制や、CO<sub>2</sub> 削減を図るための補助金などがある。また、市場メカニズムの導入も有効な手法となっている。例えば、二酸化炭素取引システムなどがある。

以上が、中国において CO<sub>2</sub> 削減への取り組みの一部です。これらの多角的な取り組みが進められているが、まだまだ課題も多い状況である。今後も国際的な協力も含め、CO<sub>2</sub> 削減への取り組みがさらに進んでいくことが期待される。

また、中国の経済事情により、CO<sub>2</sub> 削減への取り組みが大きく影響される。例えば、経済成長率の減速や、資源・エネルギーコストの上昇などがある。これらが影響すると、CO<sub>2</sub> 削減への取り組みにも影響を及ぼす可能性がある。

しかしながら、CO<sub>2</sub> 問題は大事な問題であり、環境保護を重視することが国際社会からも期待されている。このため、中国政府は CO<sub>2</sub> 削減への取り組みを継続することが大切であると考えられている。

一方で、CO<sub>2</sub>削減による経済的な影響も忘れてはならない。例えば、石炭産業の停滞や、再生可能エネルギーの普及に伴い、新たな産業の創出などがある。これらは、中国の経済成長を持続する上でも重要な要素となる。

以上が、中国における CO<sub>2</sub>削減とその関連する経済事情についての簡単な説明である。

#### 1.1.2.2.4 ヨーロッパの状況

ヨーロッパは、気候変動に対する取り組みにおいて、世界のリーダー的存在である。

以下に、具体的な取り組みについて詳しく説明する。

1. カーボンプライシング ヨーロッパの多くの国々は、排出されるCO<sub>2</sub>の量に応じて企業に課税するカーボンプライシングを導入している。この制度は、企業がCO<sub>2</sub>の排出を削減することを奨励し、排出量を削減する効果がある。また、企業がCO<sub>2</sub>の排出量を削減することにより、課税額を減らすことができるため、自発的なCO<sub>2</sub>削減が進むことも期待されている。

2. 再生可能エネルギーの利用 ヨーロッパは、再生可能エネルギーの利用を促進する政策を導入している。たとえば、ドイツでは、再生可能エネルギーの普及を目的として、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入を奨励する政策が進んでいる。また、デンマークでは、風力発電の普及により、国内の電力需要の39%を再生可能エ

エネルギーが占めている。これらの政策により、再生可能エネルギーの利用が広がり、CO<sub>2</sub>の排出量を削減することができる。

3. エネルギー効率の改善 ヨーロッパでは、建物や機器のエネルギー効率を改善する政策が進んでいる。たとえば、スウェーデンでは、建物の断熱性能を向上させる政策が進められている。また、EU では、家電製品のエネルギー消費量に関する規制が厳格化され、エネルギー効率の高い家電製品が普及するようになっている。これらの政策により、エネルギー効率が向上し、CO<sub>2</sub>の排出量を削減することができる。

4. 持続可能な交通政策 ヨーロッパでは、公共交通機関や自転車、歩行者に優しい街づくりを進めることで、持続可能な交通政策を実現している。たとえば、オランダのアムステルダムでは、自転車や歩行者を優先する交通政策が進められ、自転車が主流の交通手段となっている。また、フランスでは、パリ市内でディーゼルエンジンの乗り入れを制限する政策が導入され、車の利用を減らすことで CO<sub>2</sub> の排出を削減することが狙いとされている。

5. 持続可能な農業 ヨーロッパでは、農業においても CO<sub>2</sub> の排出を削減する取り組みが進んでいる。たとえば、オランダでは、温室栽培において CO<sub>2</sub> を循環利用する技術が開発され、CO<sub>2</sub> の排出を抑えつつ、効率的な農業が行われている。また、フランスやイタリアでは、伝統的な農業の復興に取り組むことで、持続可能な農業を実現している。

以上が、ヨーロッパの CO<sub>2</sub> の防止策の一部です。これらの取り組みにより、ヨーロッパは世界的なリーダーとして、気候変動に対する取り組みを進めている。

#### 1.1.2.2.5 東南アジア諸国の状況

東南アジアの国々は、経済発展に伴い CO<sub>2</sub> 排出量が増加しており、気候変動問題に対する取り組みが課題となっている。以下に、東南アジアの主要な国々が取り組んでいる CO<sub>2</sub> の防止策をいくつか紹介する。

1. 再生可能エネルギーの導入 東南アジアでは、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が進んでいる。特に、タイやフィリピン、ベトナムなどは、再生可能エネルギーの導入目標を設定しており、太陽光発電や風力発電の導入を積極的に進めている。

2. エネルギー効率の向上 東南アジアの多くの国では、エネルギー効率の向上に取り組んでいる。特に、エアコンや照明などの家電製品に対する省エネ基準の設定や、建物の断熱化などが進んでいる。

3. 低炭素交通手段の普及 自動車やバイクなどの交通手段による CO<sub>2</sub> 排出が問題となっている東南アジアでは、公共交通機関の整備や自転車の普及など、低炭素交通手段の普及が進んでいる。シンガポールでは、高速鉄道の整備が進められており、インドネシアでは首都ジャカルタでの BRT（バス急行車道）の整備が進んでいる。

4. 森林保護と再生 東南アジアは、熱帯雨林地域が広がっており、森林保護が重要な課題となっている。インドネシアやマレーシアでは、



森林伐採に対する取り組みが進んでおり、再生可能なパーム油の生産や森林再生プロジェクトなどが行われている。

5. 廃棄物のリサイクル 東南アジアでは、廃棄物処理が課題となっている。そのため、廃棄物のリサイクルや再利用に取り組むことで、CO<sub>2</sub>の排出削減を目指している。

6. CCS技術の導入 一部の東南アジアの国々では、石炭火力発電所のCO<sub>2</sub>排出量を削減するため、CCS（二酸化炭素の回収・貯留）技術の導入に取り組んでいる。インドネシアやベトナムでは、CCS技術の導入に向けた研究が進められており、実証プロジェクトも行われている。

7. 国際的な取り組みへの参加 東南アジアの国々は、気候変動問題に取り組むため、国際的な枠組みに積極的に参加している。たとえば、パリ協定に署名し、温室効果ガスの削減目標を設定している国もある。また、ASEAN（東南アジア諸国連合）も、気候変動に対する共同の取り組みを進めている。

8. 再生可能エネルギーの導入 東南アジアでは、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入に向けた取り組みも進んでいる。特に、フィリピンやタイ、インドネシアなどでは、太陽光発電や風力発電の導入が進んでいる。これにより、化石燃料による発電からの転換が進み、CO<sub>2</sub>排出量の削減が期待されている。

9. エネルギー効率の改善 東南アジアの一部の国では、エネルギー効率の改善に向けた取り組みも進んでいる。たとえば、タイでは、エネルギー使用量の削減を目的に、省エネルギー施策の推進やエネルギー

効率の向上に取り組んでいる。また、フィリピンやインドネシアでは、エネルギー効率の向上を目的に、LED 照明の導入などの取り組みが進んでいる。

10. 森林保護 東南アジアは、世界でも有数の森林域を有しており、森林保護も重要な CO<sub>2</sub> 排出削減策の一つとなっている。一部の国では、森林保護に積極的に取り組んでおり、インドネシアでは、森林破壊を防ぐために、森林の持続可能な管理や再植林に取り組んでいる。また、タイやマレーシアなどでも、森林保護に向けた取り組みが進められている。

以上が、東南アジアで取り組まれている CO<sub>2</sub> の防止策の一部である。ただし、依然として CO<sub>2</sub> 排出量が増加傾向にあるため、より積極的な取り組みが求められている。

### 1.1.3 大気汚染問題

大気汚染とは、大気中に有害物質が放出されることによって、人々の健康や環境に悪影響を及ぼす現象を指す。都市部や工業地帯では特に顕著な問題となっている。以下は大気汚染の主な原因、影響、そして対策について詳細に述べる。

#### 1. 原因

- 車両排気ガス: 交通量の多い都市部では、車両からの排気ガスが大気汚染の主要な原因となっている。これには窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)、炭化水素、粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub> や PM<sub>10</sub>) などが含まれる。

- 工業活動: 工場からの排出ガスは、硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物、有機溶剤、重金属などの汚染物質を大気に放出する。
- 発電所: 石炭や重油を燃料とする発電所は、CO<sub>2</sub> の他に SO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub> などの汚染物質も排出する。
- 家庭からの排出: 家庭の暖房や調理に関連する排出も、大気汚染の一因となっている。
- 農業活動: 農薬や肥料の使用、家畜の排泄物からのアンモニアの放出などが、大気汚染の原因となることもある。

## 2. 影響

- 人々の健康: PM2.5 やオゾンは呼吸器疾患の原因となることが知られている。また、重金属や有機化学物質は長期的な健康リスクを持つことがある。
- 環境: 酸性雨の原因となる SO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub> は、森林や湖沼、土壌、建物に損害を与えることが知られている。
- 気候変動: 汚染物質の中には、温室効果ガスとして機能するものもあり、地球温暖化の進行に寄与している。

## 3. 対策

- 排出基準の強化: 工場や車両の排出ガスに対する法的基準を強化し、監視を行うことで、汚染物質の排出を削減する。
- 公共交通の促進: 電車やバスなどの公共交通機関の利用を促進し、車両による排出を減少させる取り組みが進められている。

- 再生可能エネルギーの普及: 太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入を促進し、化石燃料の使用を減少させることで、大気汚染を軽減する。

- 緑地の増設: 都市部においては、樹木や緑地を増やすことで、大気中の汚染物質を吸収し、環境を改善する努力が行われている。

大気汚染は、地域や時期によって異なる要因や影響を持つ複雑な問題である。持続可能な社会を目指すためには、この問題への取り組みが不可欠である。

#### 1.1.4 石油燃料自動車の現状及び大気環境への影響

石油燃料を使用する自動車、つまりガソリンやディーゼル燃料を用いる内燃機関車は、20世紀から21世紀初頭にかけて主要な交通手段として用いられてきた。以下に、石油燃料自動車の発展現状および大気環境への影響について述べる。

石油燃料自動車の発展現状（2021年時点）：

1. 市場シェア: 2021年時点で、全世界の新車販売台数の約80%以上が石油燃料を使用する伝統的な内燃機関車である。電気車のシェアは急成長しているものの、絶対数での燃料自動車の台数は圧倒的である。

2. 普及率と地域性: 世界中で石油を燃料とする自動車は数十億台が走行している。先進国においては電気車の普及が進む中、発展途上国では依然として燃料自動車主流である。価格、インフラの整備状況、経済的背景などがその理由として挙げられる。

3. 経済的価値: 石油産業は世界の GDP の約 2-3%を占めており、多くの国の経済基盤となっている。これに関連して、自動車産業も多くの雇用を生み出している。

4. 技術革新: 近年の技術革新は、エンジンの効率を飛躍的に向上させている。

燃費向上技術: 最近の技術進歩により、エンジンの熱効率が向上。ダウンサイジングターボや直噴技術の採用が一般的となってきた。

後処理技術: セラミックを使用した三元触媒や、ディーゼルエンジンの排ガス後処理としての DPF (Diesel Particulate Filter) や SCR (Selective Catalytic Reduction) の導入が進められている。

電子制御技術: ECU (Electronic Control Unit) の進化により、エンジンやトランスミッションの動作が最適化され、燃費改善や排出ガス削減が図られている。

代替燃料: バイオ燃料や合成燃料の研究が進められ、部分的にまたは完全に石油由来の燃料を置き換える取り組みが進行中である。

環境対応: 排ガスの浄化技術も進化しており、特にディーゼル車の NOx や PM の排出を低減するための技術が進展している。

5. 政策と規制: 多くの国で環境対策として排出ガス規制が強化されており、特に欧州ではディーゼル車に対する厳しい制限が設けられている。

大気環境への影響:

1. 温室効果ガス: 最も一般的な温室効果ガスは二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) です。石油燃料の燃焼は大量の CO<sub>2</sub> を排出し、これが気候変動の主要な要因となっている。世界全体の CO<sub>2</sub> 排出の約 15%は、道路輸送 (特に自動車) からのものである。燃料自動車の燃焼は、2019 年で約 24 ギガトンの CO<sub>2</sub> を排出した。

2. 石油消費: 2020 年の世界の日々の原油消費は約 93 百万バレルであり、その大部分が輸送に使用されている。BP 統計レビューによれば、2019 年の終わり時点での証明された石油予約は約 50 年分とされている。ただし、消費パターンや新しい技術、価格動向によってこの数字は変動する。石油は有限な資源であり、長期的には枯渇のリスクが懸念される。このため、代替エネルギー源の開発や採用が急務となっている。

3. 大気汚染: 窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や未燃完全な炭化水素 (HC)、一酸化炭素 (CO) などは都市部のスモッグの原因となる。

4. 酸性雨: 硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) や NO<sub>x</sub> が大気中の水分と反応して酸性化し、地上に降下すると土壌や水質の酸性化を引き起こる。これが森林の健康を害することや、淡水の生態系に影響を与えることがある。

5. 健康への影響: PM2.5 などの微小粒子状物質や NO<sub>x</sub> は呼吸器疾患の原因となることが知られている。特にディーゼル車からの排出は、これらの有害物質の主要な源となっています。WHO によれば、毎年約 430 万人が大気汚染に起因する早死にが発生しており、その多くは輸送関連の排出が原因である。

これらの環境問題を解決するため、多くの国や都市が石油燃料車の使用を制限する動きを見せており、電気車や燃料電池車への移行が急ピッチで進められている。燃料自動車と環境の関連性や、その他の相関要因を示している。持続可能な未来を築くためには、石油への依存度を減少させる必要があると広く認識されている。

#### 1.1.5 電気自動車（EV）の現状

電気自動車（EV）は、環境に優しいクリーンエネルギー車として注目されている。CO<sub>2</sub>排出量がゼロで、大気汚染の原因物質を排出しないため、都市部の空気質改善に効果的である。しかし、バッテリー技術や充電インフラ、価格などの課題も存在する。

##### 電気自動車の発展状況およびある問題

電気自動車の発展状況は、近年急速に進展している。以下に、電気自動車の発展状況についていくつかのポイントを挙げてみる。

1. EVの販売台数が増加している：世界的にEVの販売台数が増加しており、2021年には全世界でのEV販売台数は前年比で2倍以上に達し、市場規模は拡大している。
2. 充電インフラの整備が進んでいる：充電インフラの整備も進んでおり、急速充電器の普及により、充電時間が短縮されている。また、スマートフォンやカーナビなどのアプリケーションにより、充電場所を簡単に検索することができる。

3. 自動車メーカーの注力度が高まっている：自動車メーカーも EV に注力しており、電気自動車を中心にラインアップを充実させている。また、バッテリー技術の進歩により、EV の航続距離も延びつつある。

4. 政府の補助金や規制が導入されている：多くの国では、EV を普及させるために政府が補助金や減税措置を導入している。また、排出規制も厳格化されており、自動車メーカーは EV を増産していく必要があるとされている。

5. 新しい技術やコンセプトが次々と登場している：EV に関する新しい技術やコンセプトが次々と登場しており、注目を集めている。例えば、自動運転やシェアリングサービスを組み合わせた新しいモビリティコンセプトなどがある。

以上のように、電気自動車は今後ますます普及していくと考えられている。以下に、電気自動車の発展状況と共に注意すべき問題点を挙げてみる。

1. 充電インフラの未整備：充電インフラがまだ整備されていない地域もあり、長距離移動をする場合などに充電が困難となることがある。

2. バッテリーのリサイクル問題：EV に搭載されるバッテリーのリサイクル問題がある。バッテリーは、貴重なレアメタルなどの素材を多量に含んでおり、リサイクルが不十分であれば環境負荷を引き起こすことがある。

3. 電力供給の問題：電気自動車が増えるにつれ、電力供給の問題も顕在化してきている。電力需要が急激に増加することで、電力インフラが追いつかず、電力不足に陥る可能性がある。



4. コストの高さ：EV は、現在のところガソリン車に比べて高価であり、コストがネックとなることがある。特に、バッテリーのコストが高いため、バッテリー技術の進化や生産効率の向上が求められている。

5. エネルギー源の問題：EV の CO<sub>2</sub> 排出量が低いとはいえ、エネルギー源が化石燃料であれば、排出量を削減する意味がない。そのため、エネルギー源の再生可能性や CO<sub>2</sub> 排出量を考慮したエネルギーミックスの導入が求められている。

以上のように、電気自動車の発展状況は急速に進んでいる一方、解決すべき問題も多く存在している。今後、これらの問題を克服することで、EV の普及が進むことが期待される。

## 1.2 水素利用の現状

水素（化学記号: H、原子番号: 1）は、元素周期表で最も軽い元素であり、最も一般的な元素の一つです。水素は非金属元素であり、常温・常圧下では無色、無臭、無味の気体です。水素は宇宙の中でもっとも豊富な元素の一つであり、水や有機化合物にも含まれている。

水素は、原子核が一つの陽子から成る原子によって構成されており、単一の電子が原子核の周りを回っている。この特性により、水素は非常に反応性が高く、他の元素と結合して化合物を形成することができる。水素原子同士が結合して水素分子（H<sub>2</sub>）を形成し、これは水素ガス表.1.2.1 よく使われる燃料の高発熱量としても知られている。

表 1.2.1 よく使われる燃料の発熱量

燃料	kJ/g	kcal/g	BTU/lb
水素	141.9	33.9	61,000
ガソリン	47	11.3	20,000
軽油	45	10.7	19,300
エタノール	29.7	7.1	12,000
プロパン	49.9	11.9	21,000
ブタン	49.2	11.8	21,200
木	15	3.6	6,000
石炭 (亜炭)	15	4.4	8,000
石炭 (無煙炭)	27	7.8	14,000
天然ガス	54	13	23,000

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

水素は、エネルギーの重要な源として注目されている。特に、燃料電池などの技術を利用して水素を酸素と反応させることで電力を生成する方法が研究されている。また、水素は化学工業や石油精製などのプロセスで重要な中間体や還元剤としても利用されている。

さらに、燃料としての水素は、燃焼時に水しか生成しないクリーンな特性を持っており、環境への負荷が少ないとされている。そのため、水素は再生可能エネルギーの貯蔵手段や輸送燃料としての潜在的な利用価値が高く、持続可能なエネルギー体系の構築に向けて重要な役割を果たす可能性がある。

### 1.2.1 水素エネルギーの利用状況

先進国では、水素エネルギーへの転換に向けた政策には次のようなものがある。

水素インフラの整備: 先進国では、水素を生産・貯蔵・輸送するためのインフラを整備することが重要である。このために、水素生産施設や水素貯蔵施

設、水素給油ステーションなどが建設されることが期待されている。

水素車の開発・普及: 先進国では、水素車の開発・普及に向けた投資が進められている。このことにより、水素車が一般消費者によって利用されることが期待されている。

法的枠組みの整備: 先進国では、水素エネルギーに関連する法的枠組みも整備されている。このことにより、水素エネルギーの使用・開発に関連する規制が明確化され、投資家にとっても安定的な環境が整備される。

新興国では、次のような取り組みが進められている。

経済発展のための水素エネルギー推進: 新興国では、水素エネルギーの利用によって、経済発展を図るための取り組みが進められている。このことにより、新興国の経済成長が期待されている。

自国のエネルギー需要を満たすための水素エネルギー利用: 新興国では、自国のエネルギー需要を満たすための水素エネルギーの利用が進められている。このことにより、輸入に依存することなくエネルギーを確保することができる。

環境保護のための水素エネルギー利用: 新興国では、環境保護のためにも水素エネルギーを利用することが期待されている。このことにより、温室効果ガスの排出削減などが期待される。

後進国では、次のような取り組みが進められている。

基本的なエネルギー需要を満たすための水素エネルギー利用: 後進国では、基本的なエネルギー需要を満たすための水素エネルギーの利用が期待されて

いる。このことにより、発展途上国においてもエネルギー確保ができるようになる。

地域経済の発展のための水素エネルギー推進: 後進国では、水素エネルギーを活用することで、地域経済の発展を図る取り組みが進められている。このことにより、地域の経済格差が是正されることが期待される。

このように、先進国・新興国・後進国において、水素エネルギーへの転換に向けた取り組みが異なりますが、全ての経済圏では水素エネルギーを活用することで様々なメリットを期待するとともに、エネルギー・環境・経済など多角的な観点からの取り組みが進められている。

### 1.2.2 水素技術を用いた自動車の発展状況と問題点

EV 技術とともに、燃料媒体として水素を用いる自動車（水素自動車と呼ぶ）の開発も進められている。水素技術を用いた自動車として水素を用いて発電する燃料電池車・水素を燃焼させる水素エンジン車がある。ここではその発展状況と問題点を述べる

#### (1).水素製造のコストとエネルギー効率の問題

水素を製造するには、化石燃料を使用するケースが多く、CO<sub>2</sub> 排出量が高くなるのが問題となっている。また、水素を電気に変換する際にもエネルギーが消費され、エネルギー効率が悪くなるのが問題である。これらの問題を解決するために、再生可能エネルギーを使った水素製造技術や、効率的な水素の生成方法の開発が進められている。

#### (2).水素の安全性の問題

水素は、気体であり、爆発や火災のリスクがある。そのため、水素を安全に取り扱うためには、充填ステーションや水素タンクの設計、運転者や整備士の安全教育などが必要とされる。現在、水素車は高圧タンクに水素を格納する方式が主流ですが、安全性を高めるためには、さらなる技術的な改良が求められる。

### (3).充填インフラの未整備

水素自動車は、電気自動車と比較しても充電に時間がかかる。また、充填ステーションの整備が不十分で、利用に制限があるため、移動が制限されることがある。これらの問題を解決するために、充填ステーションの整備や、充填スピードの向上などが必要とされる。

### (4).コストの高さ

水素自動車の開発や製造には高額なコストがかかる。特に、燃料電池の製造には高価なプラチナなどの希少金属が必要であり、コストが高くなることが問題となっている。今後、技術の進歩や、原材料の代替品の開発などにより、コストの低減が期待される。

### (5).経済的なインセンティブの不足

水素自動車の普及を促進するためには、政府や自治体からの経済的なインセンティブが必要とされる。しかし、現状ではこのような問題があるため、水素自動車の普及はまだ進んでいない。しかし、将来的には電気自動車とともに、環境にやさしい自動車として注目されることが期待されている。

現在、日本をはじめとする各国では、水素社会の実現を目指して、水素エネルギーの利用に向けた研究開発やインフラ整備が進められている。また、

自動車メーカーも水素自動車の開発に力を入れており、2020年代には、より多くの水素自動車が市場に登場することが期待されている。

水素自動車の問題点を解決するためには、技術革新やインフラ整備に加えて、政府や企業の支援が必要である。将来的には、水素自動車が環境にやさしい交通手段として、より広く普及することが望まれる。

### 1.3 化石燃料自動車における水素ガス混焼技術

しかしながら、このような理想的な社会への完全な転換は短期間での実現が難しい。近年、各国は純粋な水素自動車の研究開発と普及を進め、顕著な進歩を遂げていますが、充電時間や航続距離などの面ではまだ欠点があり。同時に、研究開発と普及が進められている純水素車も、燃料価格が高い、水素供給点が少ない、保管が困難といった問題に直面している。したがって、すぐには到達できないこの移行期間中には、既存の技術を有効に活用し、環境負荷を最小限に抑える取り組みが必要となってくる。このような背景から、基盤技術の継続的な開発と改良が非常に重要となる。

自動車における基盤技術を有効に活用する水素技術のひとつとして水素ガスの混焼技術が報告されている。この技術は既存のエンジンに化石燃料と水素ガスを同時に導入し、水素の燃焼エネルギーで化石燃料消費を減少させる技術である。この技術は、大きなエンジンパワーが必要とされるディーゼル車において、特に有効と考えられている。

### 1.4 本研究の目的

ディーゼルエンジンに水素を添加した際の環境負荷低減は、第2章で述べるようにこれまでエンジン単体で、一定のエンジン負荷の下で調べられてきた。一方で、実際の加速を伴いエンジン負荷が変化する走行中のディーゼルエンジン車における環境負荷低減は調べられてこなかった。

本研究では、走行中の既存のディーゼルエンジン車に水素を添加することで、どれほどの環境負荷低減が可能か、実験を通じて検証する。特に、燃焼効率の向上や排ガス成分の変化を中心に、水素添加の効果を定量的に評価することを目的としました。

具体的な研究内容としては、以下の点を詳細に調査・実験する。

1. ディーゼル燃料に水素を添加した際の燃焼特性の変化
2. 排ガス成分の分析と有害物質の低減効果の評価
3. 燃料の効率改善や燃料消費量の変動に関する分析

結果として、水素添加技術が現在の輸送インフラを活用しつつ、環境への負荷を低減する有効な手段として提案できるか、その可能性を探ることがこの研究の主要な目的である。

## 1.5 本論文の構成

本論文は5章で構成される。

第1章：序論、この章では論文の背景である地球温暖化やエネルギー資源の枯渇などの課題への対応としての低炭素社会や水素社会への移行の必要性について述べた。同時に、短期間での完全な移行は難しく、電気自動車や純

水素車にも課題が残っており、この過渡期に、現存技術を最適化して環境への影響を減少させる取り組みが求められている現状を説明した。

第2章 文献レビュー、この章では水素のエンジンへの添加は燃料消費を改善し、排気ガスを減少させる可能性を示した過去の文献を取りまとめている。これまで多くの文献でエンジンへの水素の効果が調査されているが、実際の運転を模擬した走行中の車両に水素を添加した具体的な研究例が無いことを示した。

第3章 試験方法、この章ではディーゼルエンジン車の排気ガスによる環境負荷低減を目的とした、水素添加の実験の試験方法について述べた。直接噴射式ディーゼルエンジンを持つトラックを使用し、水素混合空気をエンジン吸気口から導入して影響を調査した。複数の走行モードでの試験を行い、その結果を検証した。

第4章 試験の結果、この章では水素を添加することで、ディーゼル燃料の消費が減少し、多くの排気ガスが減少することが確認された。しかし、NOxの排出は増加するとともに、エネルギー効率に課題が残ることが示された。この点は、エンジンの調整によって改善可能であるとされることの試験結果に対する考察を述べた。

第5章 結論、この章は水素をディーゼルエンジン車に添加することで、CO<sub>2</sub>やPMなどの排出物の大幅な減少が期待できるが、NOxの排出の増加やエネルギー効率に改善の余地があることをあらためてまとめた。この技術は過渡期の即効性のある環境負荷軽減策として有効であり、さらなる改良の可能性も残されていることを結論として述べた。



## 第2章 文献レビュー

各国の研究者たちは水素に関する多くの研究を行っており、ディーゼルエンジンに限らず、ガソリンエンジンもある。実験方法としては、主にエンジンの定速運転、空荷重或いはフルロードであり、エンジン内に水素を添加ことによりエンジンの燃料消費と排気ガス排出を調査している。試験結果も比較的理想的である。詳細は文献を参照。参考文献ごとで得る各指標と変化比率は異なるが、結果は類似している。エンジンの燃焼添加剤として水素ガスが非常に効果的であることを説明したが。これまではエンジン単体を用いての報告が主であったが、車両に積まれたエンジンに走行中に水素を添加しその影響を評価した例は無い(表 2.1)。

以下は参照文献の内容概要である。

### 1. Investigating the Effect of Oxy- Hydrogen (HHO) gas and Gasoline Blend Addition on the Performance of Constant Speed Internal Combustion [36]

(一定速度の内燃機関での Oxy-Hydrogen (HHO)ガスとガソリンブレンドの追加の影響の調査)

#12Dept. of Mechanical Engineering, SRCOEM, Nagpur, Maharashtra, India.

#3Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering, SRCOEM, Nagpur, Maharashtra, India.

HHO ガスがガソリンエンジンと燃焼室に 3 つの異なるアンペア (1 アンペア、2 アンペア、3 アンペア) で取り込まれます。3 アンペアでエンジンの性能が最も良好であった。エンジンの熱効率が 3.735% 向上し、総燃料消費量が 18.87% 削減され、燃料消費効率が 19.48% 削減された。CO と HC の排出もそれぞれ 16.4% と 28.33% 削減された。同時に、すべての負荷下で、ガソリンの排気温度はガソリンと HHO ガス混合物よりも高い。

## 2. Performance Analysis of Gasoline Engine by Addition of HHO

### Gas as a Secondary Fuel [37]

(HHO ガスを二次燃料として追加することによるガソリンエンジンの性能分析)

この論文では、単純な HHO 生成システムの構造とガソリンエンジンとの統合について調査しています。ガソリンエンジンの性能は HHO を補助燃料として評価されます。熱効率が 10% 向上し、燃料消費が 34% 削減され、CO が 18%、HC が 14%、NO<sub>x</sub> が 15% 減少することが結果として示されています。

## 3. Comparative Analysis of Performance Characteristics of CI

### Engine with and without HHO Gas (Brown Gas) [49]

(CI エンジンの HHO ガス (ブラウンガス) の有無による性能特性の比較分析)

著者: Ghulam Abbas Gohar, Hassan Raza

所属: Department of Mechanical Engineering, COMSATS Institute of Information Technology, Sahiwal, Pakistan

実験は、HHO 発生器の有無で同じテスト条件下で実施された。結果は、エンジンのブレーキ効率、熱効率、機械効率がそれぞれ 22%、47%、24%増加し、HHO ガスがないエンジンと比較して、特定の燃料消費量とエンジンの特定の燃料消費量がそれぞれ最大で 35%と 27%減少したことを示している。

#### 4. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines [48]

(圧縮着火エンジンにおけるハイドロキシ (HHO) ガス添加の性能および排気排出への影響)

著者: Ali Can Yilmaz, Eric , Oldsmar, Kadir Aydin

所属: Ali Can Yilmaz, Eric , Oldsmar, Kadir Aydin\* Department of Mechanical Engineering, C , ukurova University, 01330 Adana, Turkey

水素酸素電子制御ユニットが設計・製造された。HHO の流れは、電圧と電流を自動的に減少させることで減少し、HHO システムがエンジンに追加されることで、エンジンのトルク出力を平均で 19.1%増加させ、CO 排出を平均で 13.5%減少させ、HC 排出を平均で 5%減少させ、SFC を平均で 14%減少させる。

#### 5. Utilization of HHO gas with Diesel fuel in stationary compression Ignition Engine [38]

(HHO ガスとディーゼル燃料を用いた定置式圧縮着火エンジンの利用)

著者: Anil Kumar Dhaliwal, Ashish Nayyar, Dinesh Kumar Sharma

所属: Department of Mechanical Engineering, Swami Kishanganj  
Institute of Technology, Management & Gramatan, Jaipur, India

HHO 生成キットにより生成された水素と酸素のガスは、圧縮着火エンジンの補助燃料としてエンジンの吸気管に注入される。実験結果から、特定の燃料消費量(BSFC)が9%減少し、熱効率(BTE)が7%向上することが示されている。ディーゼルだけと比較して、水素、酸素、ディーゼルの混合物の CO、HC、スモークの排出量はそれぞれ 56%、16%、5%減少するが、NO<sub>x</sub> はわずかに 6%増加する。

6. Performance and emission characteristics of a diesel engine with on-board produced hydrogen-oxygen injection [39]

(ディーゼルエンジンに搭載された水素酸素注入の性能と排出特性)

著者: S. Bari, T.J. Dewar, C. Zhang

所属: STEM, University of South Australia, Mawson Lakes, South  
Australia 5095, Australia

ディーゼルエンジンの発電機に接続された HYDI デバイスは、水素酸素混合物を生成するために使用される。この混合物が吸気に混ぜられると、排気ガス中の吸入可能な粒子の濃度が大幅に減少する。CO の排出量もそれに応じて減少する。HHO 混合物の最大流量は 0.067% HES に過ぎないため、燃料の質量流量、熱効率、および BSFC はほとんど変わらない。HHO 混合物を生成するための必要な電力はバッテリーと発電機から供給される。使用される電力は 360 ワットだけであり、夜に発電機をシャットダウンした後の起

動に問題はない。水の貯蔵や消費に問題はない。24 時間で 0.974 リットルの水しか消費しない。

7. An experimental investigation of the impact of added HHO gas on automotive emissions under idle conditions [46]

(アイドル状態下での HHO ガス添加が自動車排出ガスに与える影響の実験的調査)

著者: Piotr Jablonski, Jacek Czarnowski

所属: Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Aviation Propulsion, Mechanical Faculty, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36, 20-618, Lublin, Poland

この実験は、外部電源で生成された定量の HHO ガスを SI エンジンと CI エンジンに追加し、アイドル速度で動作させるものである。結論として、HHO ガスを追加することで、排気ガス中の CO と HC の濃度や SI (ガソリン) エンジンの NO<sub>x</sub> 濃度は減少するが、CI (ディーゼル) エンジンの NO<sub>x</sub> 濃度は増加する。

8. Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxy- hydrogen (HHO) gas. [42]

(酸素-水素 (HHO) ガスを導入したバイオディーゼル-ディーゼル燃料ブレンドのピロット噴射で動作するデュアル燃料ディーゼルエンジン)

著者: Jami Apparath, S. Murunga

所属: Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, India

一つの CI エンジンはデュアル燃料モード下で酸素-水素 (HHO) で駆動されている。デュアル燃料モードの高負荷下で、HHO のエネルギー比率が高いことが観察される。デュアル燃料モードでは、HHO によって最大熱放出率が検出され、Opt. JME20 と HHO の操作によって CO の排出量が約 33%減少する。JME20 との HHO の導入により、スモーク排出量が約 18.7%削減できることが示されている。

9. An investigation of the efficiency of using O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> (hydroxide gas -HHO) gas additives in a ci engine operating on diesel fuel and biodiesel [47]

(ディーゼル燃料とバイオディーゼルを使用する CI エンジンにおける O<sub>2</sub> および H<sub>2</sub> (水酸化ガス-HHO) ガス添加剤の効率に関する調査)

著者: Alfred as Rimkus, Jonas Mafiosi's, Marijuana's Biodevices, Akas Breezy, Adam To€ro€k

車載の発電機を電源として HHO ガスを生成し、CO<sub>2</sub> および NO<sub>2</sub> の濃度を増加させる。排気ガス中の CO、HC、煙の濃度を減少させる。バイオディーゼルを使用すると、エンジンの効率はほとんど変わらないが、CO、HC、煙の濃度は大幅に減少する。

10. Characterization of the hydroxy fueled compression ignition engine under dual fuel mode: Experimental and numerical simulation [41]

(デュアル燃料モード下のハイドロキシ燃料圧縮点火エンジンの特性：実験および数値シミュレーション)

著者: Rupendra Kumar Sharma, Dili Sharma, Shyam Lal Sony, Amit

Jhalani, Digambar Singh, Summit Sharma

所属: Department of Mechanical Engineering, Malviya National Institute of Technology Jaipur, Jaipur, 302017, India

エンジンの性能パラメータ (BTE および BSEC) は、水素と酸素のエネルギー比率が増加するとともに増加する。HHO を追加すると、HC、CO、および煙の排出が大幅に削減されることが観察される。Dp0.75HHO 混合物の ROPR、MGT、およびシリンダ内の NHRR が改善される。エンジンの動作パラメータは、ハイブリッドパワーを使用して最適化される。

#### 11. Production and use of HHO gas in IC engines [44]

(IC エンジンでの HHO ガスの生産と使用)

著者: Balaji Subramanian, Saleel Ismail

所属: School of Mechanical and Building Sciences, Vellore Institute of Technology (VIT) Chennai, Chennai, 600127, India

HHO ガスの生産率を増加させるための設計と運転パラメータについて議論している。HHO ガスの導入は、エンジンのトルク、パワー、熱効率を向上させ、NO<sub>x</sub>、CO、HC、CO<sub>2</sub>の形成を減少させる。HHO ガスを使用するエンジンの主な課題は、システムの複雑さ、安全性、コスト、電解効率として特定されている。

12. Experimental investigations on performance, emission, and combustion characteristics of Diesel- Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine [40]

(デュアル燃料 CI エンジンにおけるディーゼル-水素およびディーゼル-  
HHO ガスの性能、排出、および燃焼特性に関する実験的調査)

著者: Balaji Subramanian, Venugopal Than gavel

所属: School of Mechanical Engineering, Vellore Institute of  
Technology, Chennai, 600127, India

デュアル燃料 CI エンジンの性能、排出、燃焼特性。吸気マニホールドでの  
模倣 HHO ガスの使用。ディーゼル水素とディーゼル HHO ガスとの比較。  
HHO ガスは CO、HC、および煙の形成を減少させ、NO<sub>x</sub> を増加させる。

13. Evaluating combustion, performance and emission characteristics of  
diesel engine using Karanja oil methyl ester biodiesel blends  
enriched with HHO gas.[45]

(HHO ガスを濃縮したカランジャ油メチルエステルバイオディーゼル混  
合物を使用したディーゼルエンジンの燃焼、性能、排出特性の評価)

著者: Suga Thangata, Nagarajan Govindan

所属: a Than Thai Paraiyar Government Institute of Technology, Vellore,  
India、 b Mechanical Engineering, Anna University, Chennai, India

HHO ガスを含むバイオディーゼルが燃料としてディーゼルと混合される。  
純ディーゼル燃料の運転と比較して、無負荷状態のブレーキ特定燃料消費は  
2.41%減少し、フルロード状態では 17.53%減少する。無負荷でのブレーキ  
熱効率は 2.61 増加する。フルロードでの増加は 21.67%であり、無負荷より  
もフルロードの効果が高い。NO<sub>x</sub> を除くと、HC、CO、CO<sub>2</sub>、粒子状物質  
の排出が大幅に減少している。EGR の追加も NO<sub>x</sub> の増加を制御する。HHO



ガス、バイオディーゼル、EGR が追加され、エンジンの全体的な特性が向上する。

#### 14. Investigating the pros and cons of brown gas and varying EGR on combustion, performance, and emission characteristics of diesel engine [43]

(ブラウンガスおよび変動 EGR のディーゼルエンジンの燃焼、性能、および排出特性の利点と欠点の調査)

著者: Sujay Thangaraj1 & Nagarajan Govindan2

実験結果から、HHO ガスと EGR を使用することで、燃料効率および性能が向上し、排気排出が削減されることが示されている。一定の HHO 流れが 0.73L/分の場合、ブレーキ特定燃料消費が減少し、ブレーキ熱効率が向上する。CO と HC の排出が減少し、NO<sub>x</sub> がわずかに増加するが、EGR を増加させることで緩和される。

本論文の研究 (2023 年 11 月 13 日) では、CI (圧縮着火) エンジンにおいて 4 つの異なる走行モードと 4 つの HHO ガス流量で試験を行い、以下の結果が得られています：

燃料消費量：減少

PM (粒子状物質)：増減あり減少

CO (一酸化炭素)：増減あり

CO<sub>2</sub> (二酸化炭素)：減少

THC (総炭化水素)：増減あり

NO<sub>x</sub> (窒素酸化物)：増減あり

VOC（揮発性有機化合物）：増減あり

この本論文の研究は、以前の試験と比較して、排出ガスの主要成分において網羅的な増減少を報告している。以前の研究では、一部の成分を報告しているのに対し、本論文の研究ではほとんどの排出ガス成分での変動を報告した。

また、この研究の新しい点は、4つの異なる走行モードとHHOガス流量を用いたことで、過去の文献との整合性を確認するとともに、実際に模した走行モードと定速モードの結果をつなげるための関係性を報告した。

表.2.1 参考文献の試験結果と結論

発表時期	参考文献	試験方法	熱効率	燃料消費量	PM	CO	CO <sub>2</sub>	THC	NOx	VOC	煙
2012. 8. 23	自社	中国青島市沙子口港漁船（4000CC）で海に実際走行		減少							減少
2012. 10. 18	自社	中国青島市トラック（3500）で青銀高速道路に実際走行		減少							減少
2012. 11. 11	自社	中国山東省運輸船（4000cc）で京杭運河内河に実際走行		減少							減少
2016. 4. 14	自社	日本兵庫県波浜坂港漁船（10500CC）で海に実際走行		減少							減少
2017年 ～ 2022年	1 (36)	1 SIエンジン、一定速度、1, 2, 3アンペア電流制御HHOフロー（3アンペア）	増加	減少		減少		減少			
	2 (37)	SIエンジン、定速、単一HHOガス流量	増加	減少		減少		減少	減少		
	3 (38)	CIエンジン、定速、単一HHOガス流量	増加	減少		減少		減少	増加		
	4 (39)	CIエンジン、定速、HHOガス流量0.42L/min			減少	減少		減少			
	5 (46)	SIエンジン 3台、定速、単一HHOガス流量 CIエンジン2台、定速、単一HHOガス流量				減少		減少	減少	増加	
	6 (42)	CIエンジン、定速、単一HHOガス流量+バイオディーゼル	増加			減少		減少	増加		減少
	7 (47)	CIエンジン、定速、単一HHOガス流量+バイオディーゼル+ディーゼル				減少	増加	減少	増加		減少
	8 (41)	CIエンジン、定速、3つHHOガス流量	増加			減少		減少	増加		減少
	9 (44)	CIエンジン、定速、単一HHOガス流量	増加			減少	減少	減少	減少		減少
	10 (40)	CIエンジン、定速、7つHHOガス流量	減少				減少	減少	増加		減少
11 (45)	CIエンジン、定速、単一HHOガス流量+バイオディーゼル	増加	減少		減少	減少	減少	増加			
12 (43)	CIエンジン、定速、3負荷パターン、単一HHO流量	増加	減少		減少		減少	増加			
2023. 11. 13	本論文	CIエンジン、4つの走行モード、4つのHHOガス流量		減少	増減少	増減少	減少	増減少	増減少	増減少	

## 第3章 試験方法

本実験は2017年5月21日から5月24日まで日本国立環境研究所低公害車両実験室で実施した。実験の目的はエンジンの実際の走行モードを検証するため、異なる流量のHHOガスを添加することによってエンジンの燃料消費と排気ガス排出、特にVOCの変化状況に対して精密な分析と比較を行った。

### 3.1 試験の総括

#### 1. 実験対象と試験エンジンの仕様

実験に使用したディーゼルトラックは、平成元年排出ガス規制に適合した排気量3600ccの直噴CIエンジンを搭載し、走行距離23万kmが積まれていた。このエンジンは試験において、水素添加の効果を評価するための基盤として使用された。具体的なエンジンの技術仕様については、表3.2.1.1に詳細が示されている。

#### 2 水素の発生と供給

水素は、オキシ水素 (HHO) 発生装置 (Enameller EH-4000, Noto ice Ltd.) を使用して発生させた。この装置は水を電気分解することで水素と酸素のガスを生成し、2:1の割合で混合されました。生成された水素ガスは、吸気中に一定の流量 (0、3、30、60、67L/min) で供給され、エンジンの燃焼室に導入された。ガス専用の流量計、流量調整弁、加圧装置、逆流防止弁などの安全・計量装置が設置されていた。

#### 3. 試験装置の構築

試験走行実験は、国立環境研究所のシャシダイナモメーターを使用して行われた。この装置は、トラックを固定して定速または特定の走行サイクルに従って走行させるためのものであり、実際の道路走行をシミュレートすることができる。図.3.3.1に示されるように、トラックはシャシダイナモメーターに設置され、試験走行が行われた。

#### 4. 試験走行実験

試験走行実験は、4つの試験走行モードで行われました。これには、JE05ドライビングサイクル、定速 40km/h、定速 60km/h、定速 80km/h が含まれます。これらの走行モードは、プログラムロボット (ADS-1100、HORIBA) を使用してトラックを走行させた。各モードでのエンジンの性能と排出ガス成分の変化を評価するために、試験走行を実施した。

#### 5. 排気ガスサンプリングと分析

車両の排気ガスは導入管と希釈トンネルを介して定容量サンプラー (CVS ; CVS-7200, HORIBA) に接続され、希釈空気清浄機 (DAR-2200, HORIBA) で希釈された状態でサンプリングされた。これにより、排気ガスの成分が正確に収集された。排気ガス中の CO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、全炭化水素 (THC) の総排出量は MEXA-7200 (HORIBA) を使用して分析された。また、PM (微粒子) は一定流量でフィルターに捕集され、重量分析によって測定された。

#### 6. VOC のサンプリングと分析

排気ガスから捕集した VOC は、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 製ペローズポンプを使用してテドラーバッグに連続的に採取された。その後、

捕捉した VOC は吸着剤を充填したカートリッジに導入され、ガスクロマトグラフ（GC-FID）を使用して分析された。これにより、排気ガス中の VOC の種類と濃度が定量的に評価された。

### 7. 燃焼温度の評価

水素添加による燃焼温度の変化を評価するために、KUCRS ソフトウェアで生成した KUCRS 燃焼モデルを使用し、簡易反応シミュレーションを行った。これにより、水素添加の影響を燃焼温度に対して定量的に評価した。

以上が、実験方法の詳細な説明です。これにより、実験の各段階での手順と使用された装置がどのように組み合わされているかが明確された。

## 3.2. 水素添加試験の必要な機器と材料

水素添加試験においては、以下の機器と材料が一般的に必要なものである。

シャシダイナモメータ: 車両を固定し、実際の走行条件をシミュレートするために使用されるテスト装置である。車両全体を固定して、負荷をかけながら動作させることができる。

トラック: 実際に試験を行う車両は、水素燃料の効果をテストするため、燃料系に変更を加えて水素が混入されるようにする必要がある。

水素発生装置: 水素を現地で生成するための装置であり、水素をガス状態でエンジンに供給するためには、適切な圧力と純度で安定して供給する必要がある。

発電機: 水素発生装置などの電力を供給するために使用される場合がある。

安全装置: 水素は可燃性が高く、取り扱いには注意が必要である。漏れ検知器、通気システム、消火設備など、水素の取り扱いに適した安全装置が不可欠である。

これら以外にも、水素の取り扱いに関するトレーニングを受けた専門スタッフや、適切な規制に従ったテスト環境が必要である。また、試験データの収集と分析のためのセンサーやデータロガー、分析ソフトウェアなども重要な機器となる。

### 3.2.1 実験対象と試験エンジンの仕様

実験に使用したディーゼルトラックは、図 3.2.1 のように、平成元年排出ガ



図 3.2.1 試験用トラック

ス規制に適合した排気量 3600cc の直噴 CI エンジンを搭載し、走行距離 23 万 km が積まれてあった。このエンジンは試験において、水素添加の効果を評価するための基盤として使用された。具体的なエンジンの技術仕様については、表 3.2.1 に詳細が示されている。

表 3.2.1 テストエンジンの技術仕様

車両情報		車台番号	FE315B560618	オドメーター	230093
車名	CANTER	全幅	1690mm	オドメーター	230108
				(終了時)	
製造元	MITSUBISHI	ホイールベース	2500mm	定員	3
型式	U-FE315B	車両重量	2440kg	最大積載量	2000kg
駆動方式	FR	車両総重量	4605kg	製造年	1991. 12
全長	4690mm	等価慣性重量	3495kg	排出量	3, 600cc
全高	1990mm	Actual HP			

### 3.2.2 水素の発生と供給—HHO ガス発生装置

水素は、オキシ水素（HHO）発生装置（Enveloper EH-4000, Noto ice Ltd.）を使用して発生させました。この装置は水を電気分解することで水素

#### 水素導入の流れ

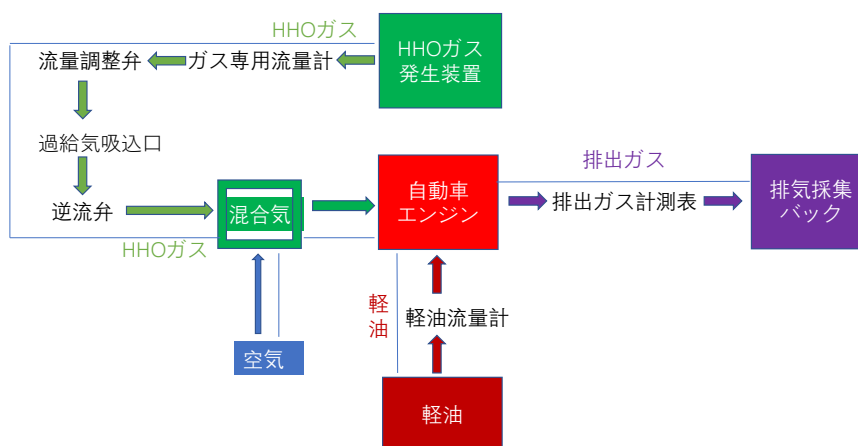


図 3.2.2.水素導入の流れ

と酸素のガスを生成し、2:1 の割合で混合された。生成された水素ガスは、

吸気中に一定の流量（0、3、30、60、67L/min）で供給され、エンジンの燃焼室に導入された。ガス専用の流量計、流量調整弁、加圧装置、逆流防止弁などの安全・計量装置が設置されていた(図 3.2.2)。

実験に使用した HHO 発生装置の仕様は図 3.2.3 のように電源部と水素発生部を一体化したフレームに組み込まれた構造である。



図 3.2.3 試験用 HHO ガス発生装置

製造業：有限会社ノート

型式：エネヘルパーEH-4000

最大ガス生成量 L/H：4000L /H

最大水消費量（蒸留水・RO 水）：<2.2

最大消費電力 Kw/H:13



特徴：HHO ガスとは、水を電気分解して発生する水素 66.6%・酸素 33.3%の混合ガスで 1L の水から 1860L の HHO ガスが発生する。水素は、燃焼すると 1/1860L の体積に収縮し、爆発でなく爆縮するので安全にエンジンに導入できる。

図 3.2.4 HHO ガス導入方法には HHO ガスベープがトラックエンジンの吸気管に挿す込みして、エアークリーナーからの空気と混ざって混合気としてエンジンに導入する。



図 3.2.4 HHO ガス導入方法

### 3.3 試験のシステム

この試験走行実験は、国立環境研究所のシャシダイナモメーターを使用してトラックを固定して定速または特定の走行サイクルに従って走行させるためのものであり、実際の道路走行をシミュレートすることができる。図 3.3.1 に示されるように、トラックはシャシダイナモメーターに設置され、実験走行が行われました。水素は、荷台に設置したオキシ水素（HHO）発生装置

(Enameller EH-4000, Noto ice Ltd., 最大総ガス発生量：67 L/min) で水を電気分解することにより発生させた。生成されたガスには、水素と酸素が2：1の割合で含まれ、わずかに水蒸気も含まれていました。生成された水素ガスは吸気と混合され、一定の流量（0、3、30、60、67L/min）でエンジンの燃焼室に入れられました。ガスの逆流を防ぐため、HHO ジェネレーターと吸気マニホールドの間には、ガス専用流量計、流量制御弁、加圧装置、逆

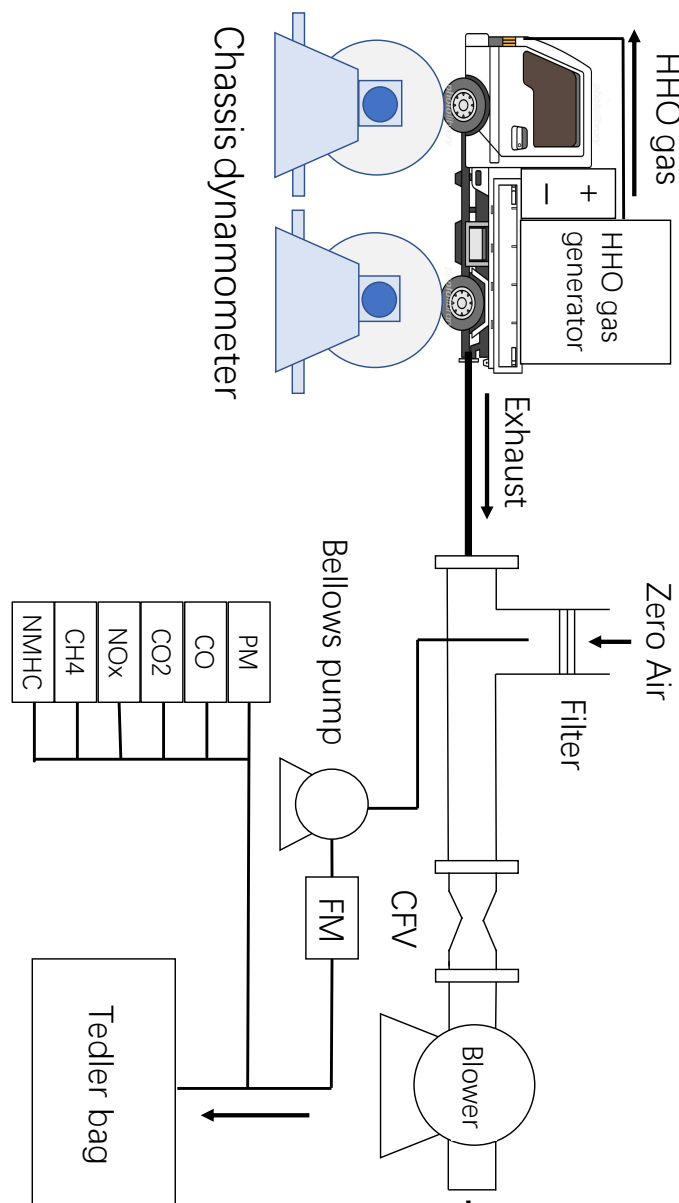


図 3.3.1 コンスタントボリュームサンプラー (CVS)と  
希釈排ガスのサンプリングの模式図

流防止弁などの安全・計量装置を設置した。水素は水を電気分解して製造され、気体を分離しないため、水素、酸素、水蒸気だけでなく、燃焼反応を変化させる可能性のある特殊な状態の物質も含まれている[26]。水素と HHO を第二燃料として使用する場合、汚染物質生成の絶対量に多少の違いはあるも



図 3.3.2 排出ガスの収集方法

の、相対的な添加効果では同様の傾向を示している[24]。そこで、本研究では、HHO ガスを水素と酸素の 2 : 1 の割合で混合したものとして扱った。

### 3.4. 試験走行実験

試験走行実験は、方法、表 3.4.1 に示すように、4 つの試験走行モードで実施した：

JE 05 ドライビングサイクル[27]定速 40km/H、定速 60km/H、定速 80km/H で、プログラムロボット（ADS-1100、HORIBA）によってトラックを走行させた。図 3.4.1 JE05 走行モードは、ディーゼルトラックを含む大型車の市街地走行と高速道路走行を模擬した排ガス試験モードで、市街地走行を模擬した多数の加減速からなり、最高速度が88km/h、平均速度が27km/h、時間が約 30 分となる。各モードでのエンジンの性能と排出ガス成分の変化を評価するために、試験走行を実施した。

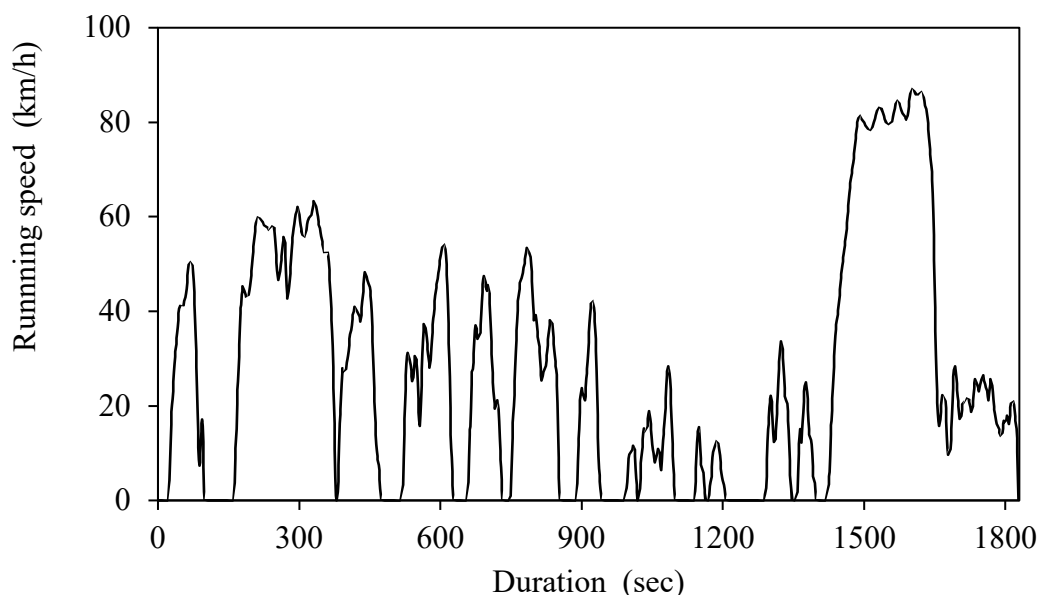


図 3.4.1. JE05 のドライビングサイクルにおける走行速度

表 3.4.1. 走行モードの特徴には、実験の持続時間、サンプルの希釈比、平均速度、および水素流量（リットル/分）が含まれている。各走行モードは、JE05 ドライビングサイクルと一定の速度（40 km/h、60 km/h、80 km/h）でのテストが行われました。水素の流量は、実験によって 0、2、20、40 または 45 リットル/分に変化し、それぞれの条件での実験の有無が記されている。

- JE05 ドライビングサイクル: 1829 秒継続し、サンプル希釈は 16.3、平均速度は 27 km/h で、水素流量は 0、2、40 リットル/分 (40 km/h 時) で実施された。

- 定速 40 km/h: 900 秒継続し、サンプル希釈は 19.8、水素流量は 0、2 リットル/分で実施された。

- 定速 60 km/h: 900 秒継続し、サンプル希釈は 14.3、水素流量は 0、2、20、45 リットル/分 (45 km/h 時) で実施された。

定速 80 km/h: 900 秒継続し、サンプル希釈は 12.0、水素流量は 0、2、40 リットル/分 (40 km/h 時) で実施された。

表 3.4.1. 走行モードの特徴\*

HHO は水素と酸素のみを 2 : 1 で含むと仮定し、HHO の流量から推定した

Run modes	Duratio n	Sample dilutio n	Average speed (km/h)	H <sub>2</sub> flow (L/min)*			
	(sec)			0	2	20	40 or 45
<b>JE 05 driving cycle</b>	1829	16.3	27	○	○		○ (40)
<b>Constant 40 km h<sup>-1</sup></b>	900	19.8	40	○	○		
<b>Constant 60 km h<sup>-1</sup></b>	900	14.3	60	○	○	○	○ (45)
<b>Constant 80 km h<sup>-1</sup></b>	900	12	80	○	○		○ (40)

これらの実験は、おそらく水素を燃料として使用する際のエンジン性能や排出物質の測定を目的としており、異なる速度および水素流量での影響を評価するために行われた。

車両のテールパイプは、導入管および希釈トンネルを介して定容量サンプラー（CVS；CVS-7200，HORIBA）に接続され、排気ガスは希釈空気清浄機（DAR-2200，HORIBA）[25]で生成したゼロエアで希釈されていた。CVSの総流量は3.5～20 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>で、図3.4.1に示すように臨界流ベンチュリー（CFV）によって変化させた。排気ガス希釈係数は、走行サイクルごとに変化させ、テールパイプとCVSのCO<sub>2</sub>濃度の比率で決定した。試験走行中のCO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、THCの総排出量はMEXA-7200（HORIBA）で、PMは一定流量でフィルターに捕集した後、重量分析により測定した。

また、希釈した排気ガスを、走行サイクルに応じて一定の流量で、試験走行中にポリテトラフルオロエチレン（PTFE）製ベローズポンプを通して、容量150Lのテドラーバッグに連続的に採取した。その後、回収した空気の一部が吸着剤を充填したカートリッジに50sccmの定流量で3分間導入しました。カートリッジに捕捉された炭化水素（HC）は、熱脱着装置（Unity2，Markes International Ltd.英国）を用いて623Kで脱着し、デュアルカラム（Agilent J&W HP-1 and Agilent J&W GS-Gasport，Agilent Technology，U.S.A.）[28]を備えた炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ（HP 6890，Agilent Technology，U.S.A.）に導入した。分析では、GCカラムを最初に313Kで5分間設定し、その後5K min<sup>-1</sup>の速度で20分に413Kまで昇温し、5分間維持した。各種VOCを含む標準ガス（PAMS-J58，住都精化工業，日本）[28]に対して校正を行い、各生物種のGC-FIDピーク面積とVOC濃度との保持時間および換算係数を求めた。

さらに、水素添加による燃焼温度の変化を、KUCRS ソフトウェア[29]で生成された KUCRS 燃焼モデルに若干の修正を加えたものを用いて評価した[30]。計算では、Cantera プログラム[31]を用いて、初期温度 1000K、初期圧力 30atm、体積一定条件で、燃料として n-セタン単体を用いて簡易反応シミュレーションを実施した。燃焼温度は着火後の断熱火炎温度として計算した。本モデルでは NOx 生成機構を含まないため、NOx 生成量は定量的に評価せず、NOx 生成量の指標として、水素添加時の予測燃焼温度の相対変化を算出した。当量比 10 の燃料リッチ条件での結果を示し、酸素欠乏条件下でも水素添加が燃焼温度に影響を与えることを強調した。水素添加量と燃焼温度の相関は、異なる当量比でも同じ傾向を示すことがわかった。計算は、水素添加量分率が 0、0.001、0.01、0.02 の場合に行った。簡単のため、初期空気中の CO2 濃度および水素添加による燃料消費量の減少は考慮しなかった。

水素エネルギーシェア (HES) は、水素化の指標として使用し、以下のよう

に計算した：

$$HES = \frac{M_{hydrogen} LHV_{hydrogen}}{M_{hydrogen} LHV_{hydrogen} + M_{diesel} LHV_{diesel}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、M はラン実験 1 回あたりの燃料消費量 (kg/run)、LHV は低位発熱量 (MJ/kg) [3]である。本研究では、ディーゼルおよび水素について、それぞれ および 121 MJ/kg の LHV を使用した。

表 3.4.2 の表は、3 つの異なる物質—ディーゼル、ディーゼルセル、水素—の物理的性質を比較している。それぞれの物質について、比重、発熱量、火炎速度、自己着火温度、爆発性限界といった属性が記されている。

ディーゼルは比重が 840 kg/m<sup>3</sup>で、発熱量は 10.7 Kcal/g、火炎速度は 0.3 M/S、自己着火温度は 280°C、爆発性限界は 0.1 と記されている。

- ディーゼルセルに関する情報は提供されていない。
- 水素は比重が 0.082 kg/m<sup>3</sup>と非常に軽く、発熱量は 33.9 Kcal/g と高い値を示しています。火炎速度は 2.7 M/S であり、自己着火温度は 585°C です。爆発性限界は 0、つまり爆発しないとされている。
- この情報は、燃料としてのこれらの物質の使用に関連したエネルギー効率や安全性を比較検討する際に有用である。特に、水素は発熱量が高く、火炎速度も速いことから、エネルギー源としてのポテンシャルが高いことが示されている。

• 表 3.4.2 ディゼルと水素の性能比較

プロパティ	ディーゼル	水素
密度 (kg / m <sup>3</sup> )	840	0.082
発熱量 (Kcal/ g)	10.7	33,9
火炎速度( M / S )	0.3	2.7
自動点火温度。(°c)	280	585
炭素残渣	0.1	0



## 第4章 試験の結果と考察

各試験における各コンポーネントの燃料消費量と総排出量を表 3 に示す。すべての試験において、水素の添加により、燃料消費量の減少および各成分の排出量の変動が確認された。図 3 は、水素の総添加量に対応する燃料消費量の減少を示したものである。

表 4.1. 各コンポーネントの燃料消費量と総排出量のまとめ

Run mode	H2 flow*	HES (%)	Fuel consumption (L/run)	CO <sub>2</sub>	NOX	CO	THC	CH <sub>4</sub>	PM
	(L/min)			(g/run)					
JE 05 driving cycle	0	0	1.38	3663	34.7	16.4	9.8	0.04	2.35
	2	1.2	1.35	3578	34.2	15.6	10.1	0.041	2.31
	40	21.6	1.2	3196	44.4	12.3	6.7	0.03	1.88
Constant speed at 40 km/h	0	0	0.61	1628	19.5	8.2	5.3	0.032	0.92
	2	1.3	0.6	1599	19.2	8.2	5.7	0.028	0.88
Constant speed at 60 km/h	0	0	1.06	2805	22	11.9	6.8	0.057	2.07
	2	0.8	1.05	2779	22.1	11.8	7.6	0.059	2.14
	20	7.3	1.02	2725	24.5	10.6	6.9	0.03	1.68
	45	16.1	0.95	2517	28.4	8.8	6.6	0.025	1.44
Constant speed at 80 km/h	0	0	1.74	4626	30.3	23.8	9.9	0.037	2.27
	2	0.5	1.73	4591	30.1	24	10.3	0.052	2.21
	40	9.2	1.6	4248	36	18.3	9.3	0.044	1.54

この表は、水素を燃料として使用する際の燃料消費量と排出ガス成分に関するデータをまとめたものである。JE05 走行サイクルと 40km/h、60km/h、80km/h での一定速度走行の条件で、水素の流量 (L/min) と水素エネルギーシステムの混合比率 (HES %) を変化させた時の、燃料消費量 (L/run) と排出物質 (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, THC, CH<sub>4</sub>, PM) の量を示している。

- 水素の流量が増加するにつれて、多くのケースで燃料消費量が減少していることがわかる。
- 一方で、NOx の排出量は水素の流量が増えると増加傾向にあり、特に 80km/h の一定速度走行でその傾向が顕著である。
- CO<sub>2</sub>の排出量は一定速度 40km/h と 60km/h で水素流量を増やすことで減少していますが、80km/h では逆に増加している。
- CO、THC（全炭化水素）、CH<sub>4</sub>（メタン）、PM（粒子状物質）は、水素流量の増加によって大体のケースで減少していることが観察できる。

このデータは、水素の使用量を調整することで、ディーゼル車の燃料効率と排出ガスの質を最適化するための重要な情報を提供している。

#### 4.1 燃料消費量の変化状況

実験条件と結果:

研究では、ディーゼルエンジンにおける燃料消費量と HHO ガスの導入の影響を評価するために、異なる試験条件での実験が行われた。まず、JE05 試験サイクルでの実験では、図 4.1.1 のように HHO ガスなしの状態でのディーゼル燃料の消費量が 1.38L でした。これに対して、HHO ガスを 3L/min で供給した場合は 1.35L、HHO ガスを 60L/min で供給した場合は 1.20L となった。これにより、HHO ガスの導入による燃料消費量の低減が示された。

同様に、定速 60km および定速 80km での実験も実施された。定速 60km での実験では、HHO ガスなしの状態でのディーゼル燃料消費量は 1.06L でした。

たが、HHO ガスを 3L/min 導入した場合は 1.05L、HHO ガスを 60L/min 導入した場合は 0.95L に減少しました。定速 80km でも同様に、HHO ガスの導入によってディーゼル燃料の消費量が低減したことが確認された。

燃料節減効果:

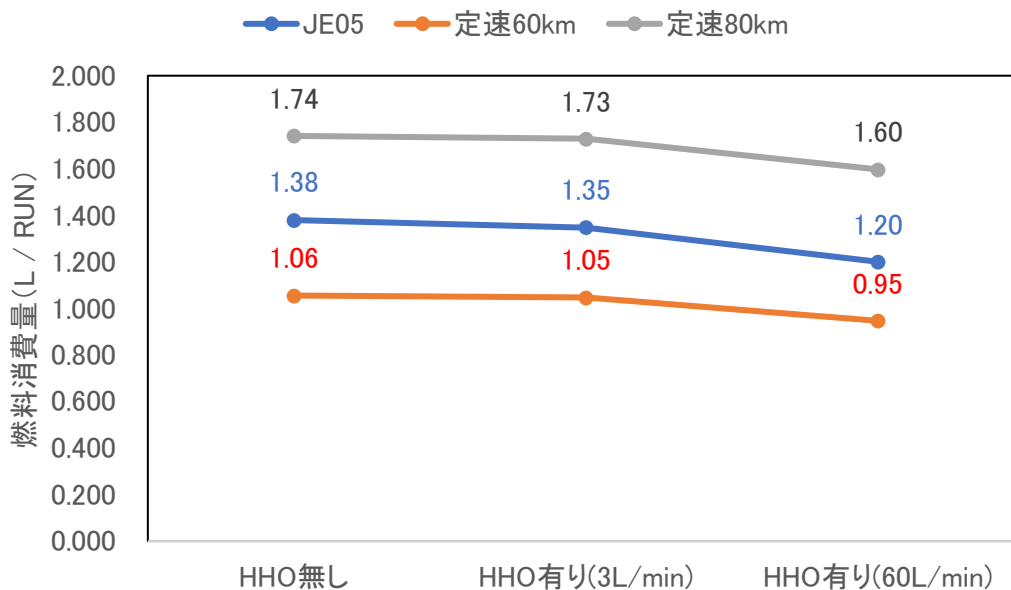


図 4.1.1 燃料消費量の変化

これらの実験結果を総合すると、HHO ガスの導入によってディーゼル燃料の消費量が削減されることが示された。具体的な数値として、図 4.1.2 のように HHO ガスを導入することで最大で約 13.04%の燃料節減が実現された。詳細な計算により、JE05 試験条件、定速 60km、定速 80km の各条件での燃料節減率がそれぞれ 13.07%、10.33%、8.27%と計算された。

速度条件と効果の変化:

興味深い点として、定速 60km から定速 80km にかけての速度条件で、HHO ガスの導入による燃料節約効果の増加率が低下していることが示された。これは、高速走行時には燃費向上効果が限定的である可能性を示唆している。

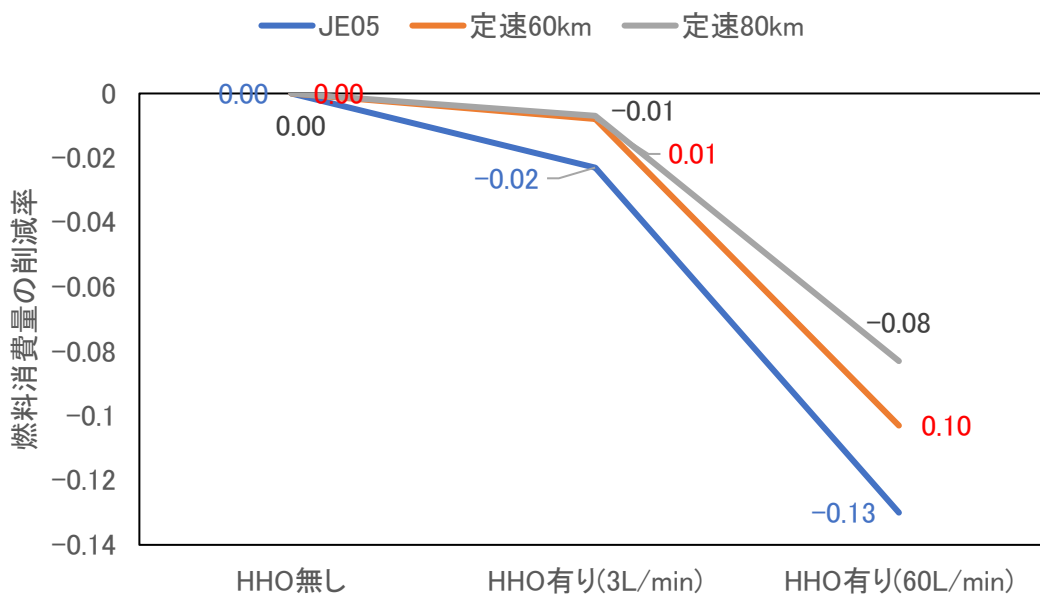


図 4.1.2 燃料消費量の変化比率

結論:

総合的に言えば、HHO ガスのディーゼルエンジンへの導入によって、燃料消費量が削減され、最大で約 13.04%の燃料節減効果が得られた。しかし、速度条件によって効果が異なることが明らかになり、高速走行時には燃料節約効果が限られることが示唆された。

図 4.1.3 (水素の量は HHO ガスの 2/3 で表示する) から、一般的に HES を増やすと燃料消費量が減少することがわかる。JE05 のドライビングサイクルでは、水素なしでの 1.38L から 2L/min の水素流量で 1.35L と 2.3%の燃料

消費量の減少を示した。40km/h 定速走行時の燃料消費量は、水素なし時の 0.61L から 2L/min 時の 0.60L へと 1.6%減少した。60km/h の一定速度では、燃料消費量は水素なしの 1.06L から水素流量 2L/分で 1.05L に 0.8%減少し、水素流量 45L/分では 0.95L に 10.3%減少した。80km/h の定速走行では、水素流量 2L/min で水素なしでの 1.74L から 1.73L に、40L/min で 1.60L に 0.7%減少した。

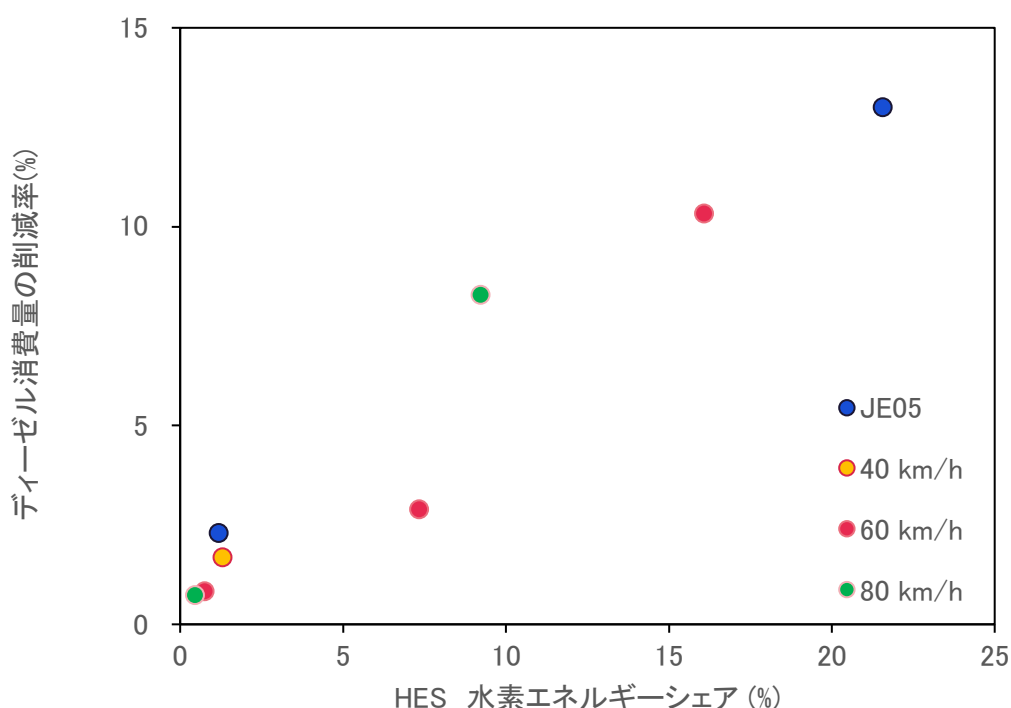


図 4.1.3. 燃料消費量の削減割合の、燃料の全熱エネルギーに占める水素添加量の割合への依存性。HES：水素エネルギーシェア

定速走行モードでの比較では、80km/h 以下よりも 80km/h で HES に対する燃費低減効果が大きくなる傾向が見受けられた。JE 05 ドライビングサイクルでは、平均速度が 27.4km/h と最も低いにもかかわらず、HES に対する燃

料消費量の減少が最も低いとは言えなかった。HES に対する燃料消費量の低減は、走行モードにわずかに依存することがわかったが、依存の程度を明らかにするためには、さらなる実験が必要である。HES の増加に伴うディーゼル消費量の減少率は若干異なるものの、ほぼ線形依存性を示し、ディーゼル消費量の減少率は約  $0.6 \times \text{HES}$  となった。この関係は、HES がディーゼル消費量の減少をおおよそ予測するのに有効であることを示唆している。

## 4.2 CO<sub>2</sub> の変化状況

CO<sub>2</sub> 排出量の変化と HHO ガス導入に関するさらに詳細な説明を以下に示す。

CO<sub>2</sub> 排出量の変化と HHO ガス導入:

図 4.2.1 は、HHO ガス導入量による CO<sub>2</sub> 排出量の変化を示している。この図からわかる通り、すべての走行試験において CO<sub>2</sub> 排出量が削減されていることが確認されている。ただし、JE005 の試験条件下では CO<sub>2</sub> の排出量が他の条件に比べて多いことが観察された。これは、燃料消費量や HHO ガスの流量などの要因が影響している可能性がある。

水素導入と CO<sub>2</sub> 削減:

実験結果によれば、水素導入による CO<sub>2</sub> の削減効果が確認された。水素は炭素が少ない燃料であり、水素をディーゼル燃料に添加することで、生成される混合物中の炭素濃度が低くなるため、二酸化炭素の排出量が削減される。実際のデータから次のような結果が得られた。JE05 試験条件下では、HHO ガスなしの状態での CO<sub>2</sub> 排出量が 262.76g/km から、HHO ガスを 3L/min 導

入した場合は 257.24g/km、HHO ガスを 60L/min 導入した場合は 220.16g/km に減少した。

定速 60km 試験条件下では、HHO ガスなしの状態での CO<sub>2</sub>排出量が 186.93g/km から、HHO ガスを 3L/min 導入した場合は

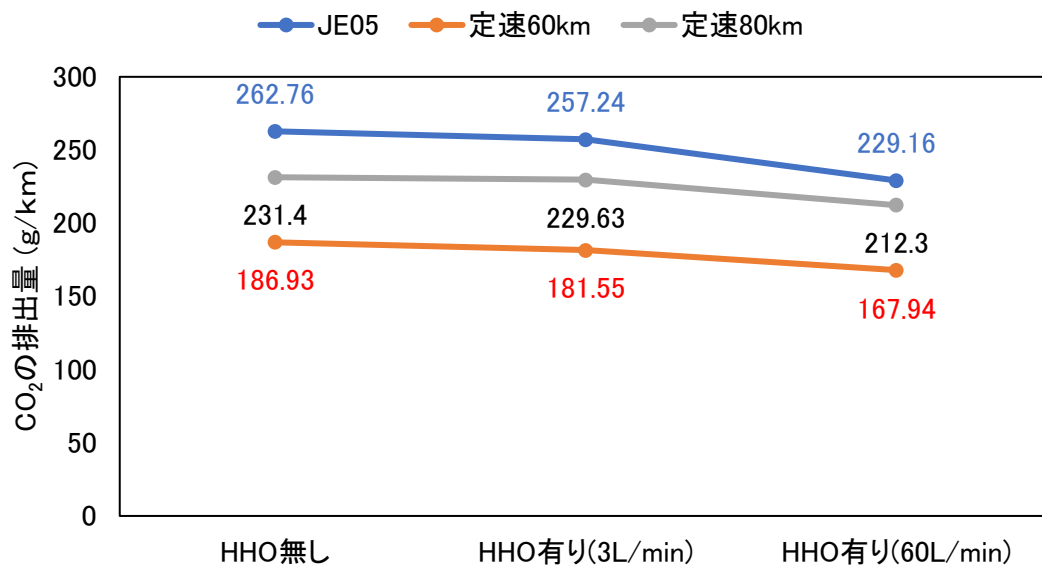


図 4.2.1 CO<sub>2</sub>の排出量

- 181.55g/km、HHO ガスを 60L/min 導入した場合は 167.94g/km に減少した。
- 定速 80km 試験条件下では、HHO ガスなしの状態での CO<sub>2</sub>排出量が 231.4g/km から、HHO ガスを 3L/min 導入した場合は 229.63g/km、HHO ガスを 60L/min 導入した場合は 212.3g/km に減少した。

ガス混入量と CO<sub>2</sub>削減率:

CO<sub>2</sub>の削減率は、図 4.2.2 のようにガス混入量（HHO ガスの導入量）と密接に関連している。具体的には、ガス混入量が 60L/min に達すると、CO<sub>2</sub>の削減率が最大となる。詳細なデータによれば、以下の削減率が得られた。

- JE005 の場合、CO<sub>2</sub>削減率は HHO ガスを導入しない状態から HHO ガス 3L/min を導入した場合において、2.1%の削減率が得られた。HHO ガス 60L/min を導入した場合に 12.79%の削減率が得られた。

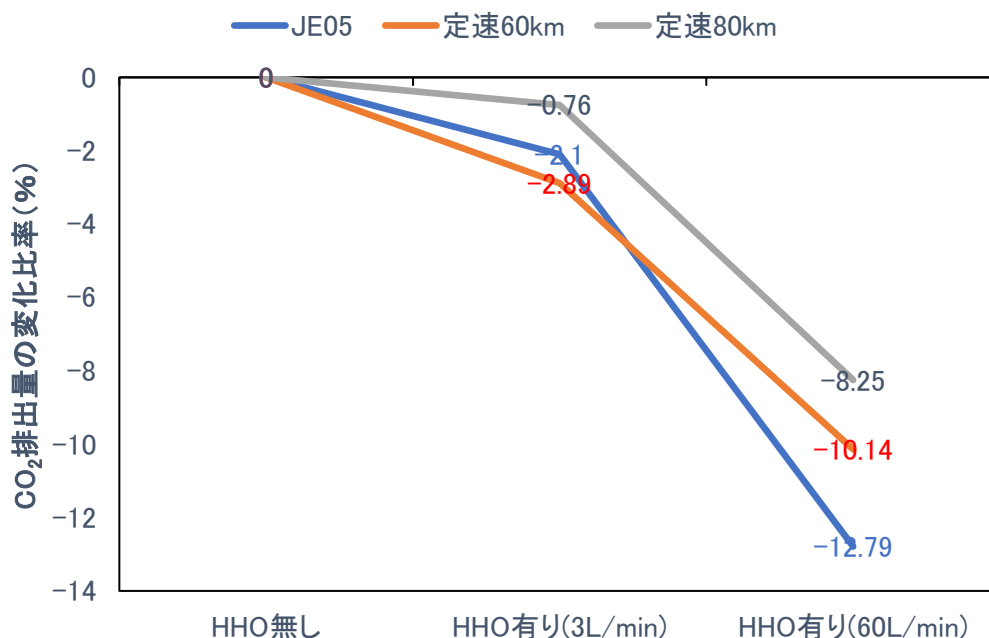


図 4.2.2 CO<sub>2</sub>の変化比率

- 定速 60km 試験条件下では、CO<sub>2</sub>削減率は HHO ガスを導入しない状態から HHO ガス 3L/min を導入した場合において、2.89%の削減率が得られた。HHO ガス 60L/min を導入した場合に 10.14%の削減率が得られた。



- 定速 80km 試験条件下では、CO<sub>2</sub>削減率は HHO ガスを導入しない状態から HHO ガス 3L/min を導入した場合において、0.76%の削減率が得られた。HHO ガス 60L/min を導入した場合に 8.25%の削減率が得られた。

これらの結果から、水素の導入による CO<sub>2</sub>の削減率は、ガス混入量が増加するにつれて増加することが示唆される。

CO<sub>2</sub>削減と燃料消費量の関係:

さらに、CO<sub>2</sub>排出量の削減率と燃料消費量の削減率との関係が示される図 4.2.3 によって、二者間の関連性が明らかにされました。この関係性から、CO<sub>2</sub>の削減率と燃料消費量の削減率が密接に関連しており、燃料の消費が CO<sub>2</sub>の排出量に大きな影響を及ぼしていることが理解される。特に、消費された燃料の大部分が CO<sub>2</sub>に変換されるため、燃料消費量の削減は CO<sub>2</sub>の排出量の削減に直結していることが示唆される。

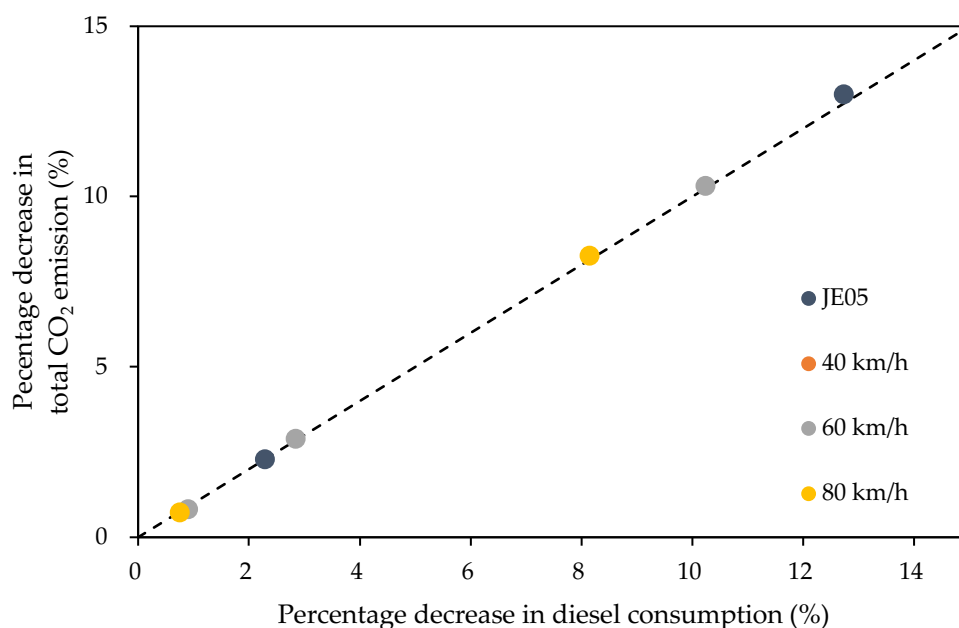


図 4.2.3 ディーゼル燃料消費量の削減率と CO<sub>2</sub>排出量の削減率の関係。

このように、水素導入による CO<sub>2</sub>排出量の削減は、混合燃料中の炭素濃度の変化や燃料消費量の影響などが絡み合う複雑なプロセスを通じて生じていることが明らかになる。

水素添加による CO<sub>2</sub>排出量の削減率は、燃料消費量の削減率と非常に良い一致を示しました。これは、消費された燃料の殆どが CO<sub>2</sub>に転換され、ディーゼル消費量の改善が CO<sub>2</sub>排出量の削減に直接結びついていることを示しており、図 3 の関係を用いて HES から CO<sub>2</sub>排出量の削減量を約 0.6 倍 HES と見積もることができる。

### 4.3 NO<sub>x</sub> の変化状況

NO<sub>x</sub> 排出量の変化:

図 4.3.1 と図 4.3.2 には、HHO ガスの導入量による NO<sub>x</sub> 排出量の変化を示しており、異なる走行モードでの条件下での結果が示されている。

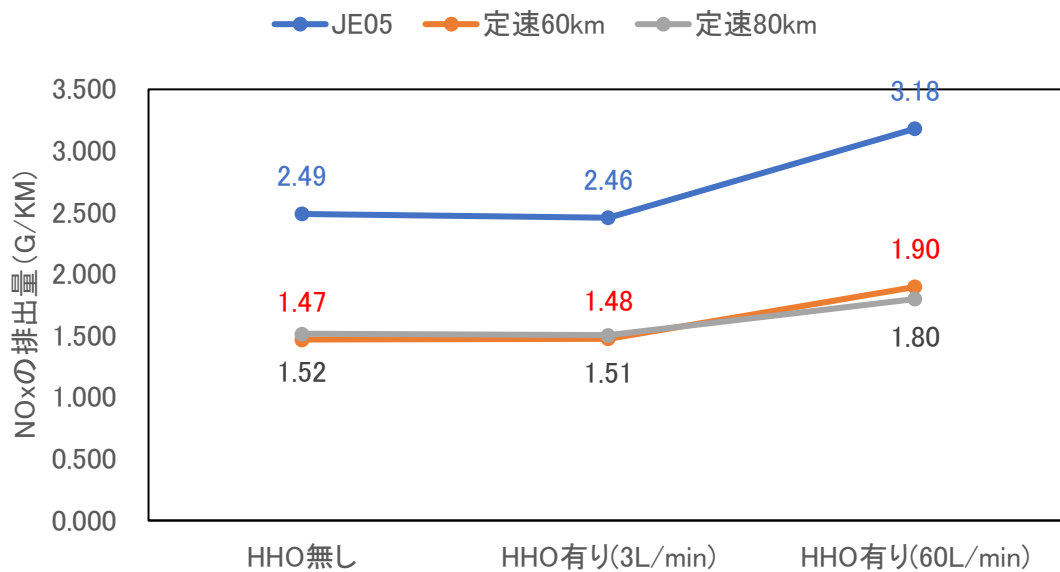


図 4.3.1 NO<sub>x</sub> の変化量

図からは、HHO ガスの導入が NOx 排出量に及ぼす影響が視覚的に確認できる。

HHO ガスの混入は、すべてのモードで NOx 排出量の増加をもたらした。

内燃機関の NOx 排出量が増加する可能性として、空燃費に関する制御が機能していないことによる影響が考えられる。燃料を完全に燃焼するために必要な最小量の空気を導入する必要がある。本試験で行った車両は年式が古くこれらの制御機能が働いていない可能性がある。また、一般的には内燃機関の燃焼温度が増加すると大気から作られる NOx（いわゆるサーマル NOx）は増加する傾向にある。

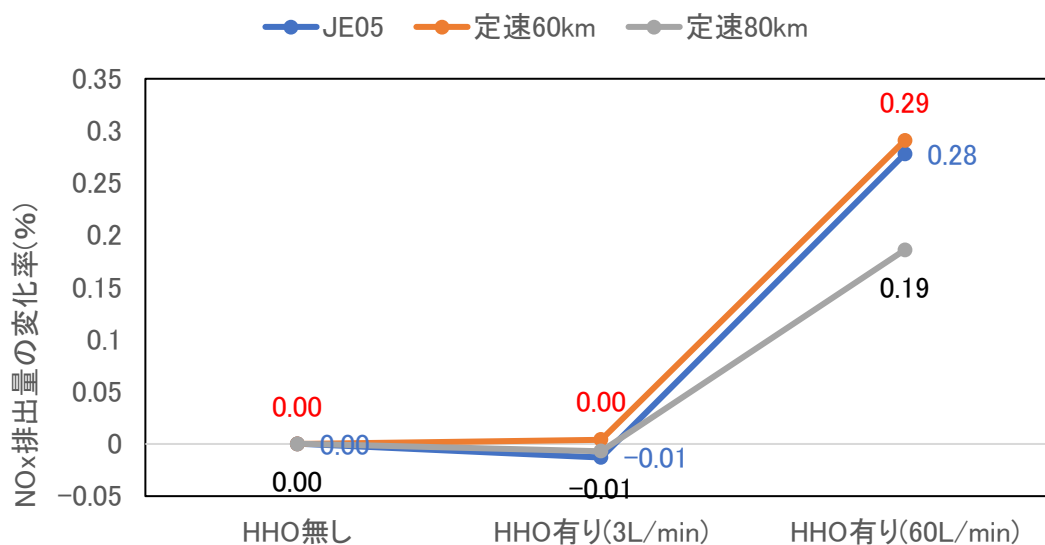


図 4.3.2 NOx の変化比率

以下に、異なるモードでの NOx 排出量の変化について具体的な情報を示す。

- 定速 60km モードにおいては、HHO ガスの導入により NOx 排出量が最大で約 29.1% 増加し、1.48g/km から 1.90g/km まで増加した。

- JE005、定速 60km、定速 80km のモードでも、HHO ガスの導入量の増加に伴い NOx 排出量は異なる結果を示した。

- JE005 モードでは、HHO ガス混入量 3/min すると NOx 排出量は 2.40g/km から 2.46g/km まで-1.3%減少した、HHO ガス混入量 60/min すると NOx 排出量は 3.18/1g/km まで 27.8%増加した

- 定速 60km モードでは、HHO ガス混入量 3/min すると NOx 排出量は 1.47g/km から 1.48g/km まで 0.4%増加し、HHO ガス混入量 60/min すると NOx 排出量は 1.90g/km まで 29.1%増加した

- 定速 80km モードでは、HHO ガス混入量 3/min すると NOx 排出量は 1.52g/km から 1.53g/km まで-0.7%減少した、HHO ガス混入量 60/min すると NOx 排出量は 1.90g/km まで約 29.1%増加した。

これらの結果から、HHO ガスの導入量によって異なる走行モードや条件下でNOx排出量が増加することが示されている。特に、燃焼条件の変化がNOx排出に与える影響が明らかになり、HHO ガス導入の影響が詳細に理解されている。

また、水素添加による NOx 排出量の変化を図 4.3.3 に示した。

2L/min の水素添加 (HES~1%) では、JE05 ドライビングサイクル、定速 40km/h、80km/h で NOx 排出量が 2%弱減少した。一方、水素流量が増加すると NOx 排出量は増加し始めた。HES による NOx 排出量の増加は、試験

走行中の平均速度が上がるにつれて増加する傾向にあるが、走行モードによる差は顕著ではなかった。水素の効果最も大きい 80km/h の定速走行では、10%HES で NO<sub>x</sub> の増加率が 20% となり、HES のほぼ 2 倍となった。JE05 では水素の効果最も小さく、NO<sub>x</sub> の増加率は HES の 1.5 倍であった。

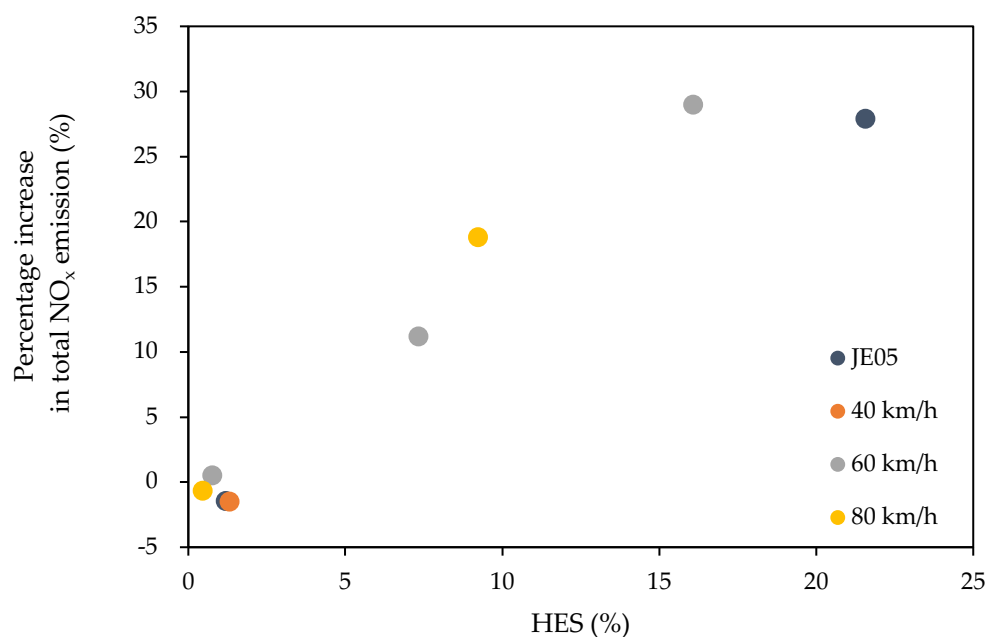


図 4.3.3. 水素添加による NO<sub>x</sub> 排出量の変化

NO<sub>x</sub> の生成は燃焼温度の上昇に伴って促進されるため、今回の実験では、水素の添加によって燃焼温度が上昇したと予測される。動力学シミュレーションにより燃焼温度の予測を行った。標準的なモデルディーゼル燃料として n-セタン ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3$ ) を用い燃料リッチ条件下で計算した。計算結果を図 4.3.4 に示す。水素添加による燃焼温度の変化を、KUCRS ソフトウェア [29] で生成された KUCRS 燃焼モデルに若干の修正を加えたものを用いて評価した [30]。計算では、Cantera プログラム [31] を用いて、初期温度 1000K、初期圧力 30atm、体積一定条件で、燃料として n-セタン単体を用いて簡易反応

シミュレーションを実施した。燃焼温度は着火後の断熱火炎温度として計算した。本モデルでは NOx 生成機構を含まないため、NOx 生成量は定量的に評価せず、NOx 生成量の指標として、水素添加時の予測燃焼温度の相対変化を算出した。当量比 10 の燃料リッチ条件での結果を示し、酸素欠乏条件下でも水素添加が燃焼温度に影響を与えることを強調した。水素添加量と燃焼温度の相関は、異なる当量比でも同じ傾向を示すことがわかった。計算は、水素添加量分率が 0、0.001、0.01、0.02 の場合に行った。簡単のため、初期空気中の CO<sub>2</sub> 濃度および水素添加による燃料消費量の減少は考慮しなかった。

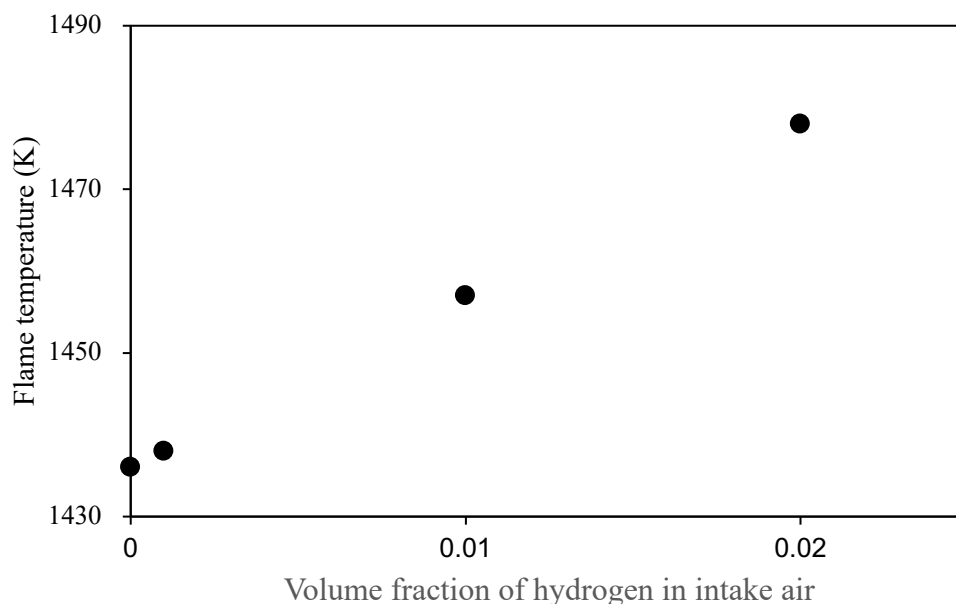


図 4.3.4. 燃焼モデルで予測された、水素添加による n-セタン燃焼火炎温度の変化

モデルの計算条件が実際と異なるため、この予測温度の絶対値を実験に適用することはできない。図 4.3.4 に示すように、水素添加量の増加に伴い、燃焼温度の上昇が相対的に予測された。これらの結果から、水素添加量が大き

いとき、温度上昇は $\Delta T=45\text{ K}$ であった。また、リーン条件でのシミュレーションでも同じ傾向が見られた。Talib らは、水素添加によって $\text{NO}_x$  排出量が増加するのは燃焼温度が閾値を超えたときだけで、閾値を下回ると減少すると報告している [13]。今回の実験では十分な水素供給があったのでサーマル $\text{NO}_x$  を生成する閾値を十分超えた状況であったと考えられる。

#### 4.4 CO と PM の変化状況

一酸化炭素 (CO) の変化:

図 4.4.1 と図 4.4.2 には、HHO ガスの導入量と一酸化炭素 (CO) の排出量の関係を示している。この図を通じて、異なる走行モードや条件下での HHO ガス導入による CO 排出の変化が可視化されている。

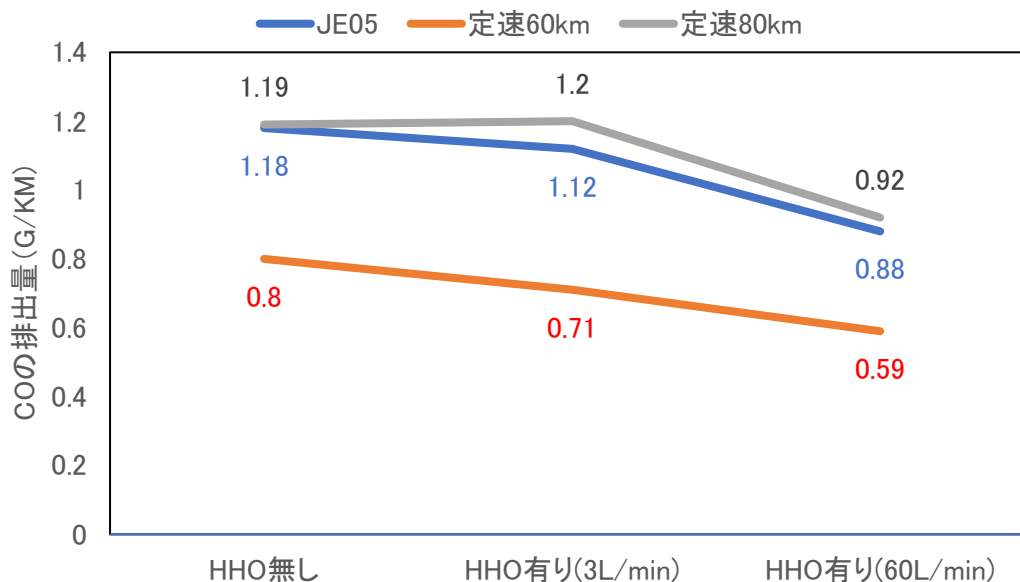


図 4.4.1 CO の変化量

CO の排出量は、HHO ガスの有無に関わらず、定速 60km の状況で最も低いことがわかる。これは、定速 60km モード CO 排出が比較的少ない走行条件を示していることを示している。

さらに、エンジン機関の JE05、定速 60km、定速 80km のモードで、HHO ガスの混入量の増加に伴って CO の排出量が減少する傾向が観察された。具体的には以下のような結果が得られた。

- JE005 モードでは、HHO ガス混入量 3/min すると CO 排出量は 1.18g/km から 1.12g/km まで 5.1% 減少した、HHO ガス混入量 60/min すると NOx 排出量は 0.88/1g/km まで 78% 増加した

定速 60km モードでは、HHO ガス混入量 3/min すると CO 排出量は 0.80g/km から 0.71g/km まで 11.3% 増加し、HHO ガス混入量 60/min すると NOx 排出量は 0.59g/km まで 26.3% 増加した

- 定速 80km モードでは、HHO ガス混入量 3/min すると CO 排出量は 1.19g/km から 1.2g/km まで 0.8% 減少した、HHO ガス混入量 60/min すると NOx 排出量は 0.92g/km まで約 22.7% 増加した。

これらの結果から、HHO ガスの導入量が CO 排出量に与える影響が明らかになり、特に高い HHO ガス導入量の場合に CO 排出量が顕著に減少することが示されている。



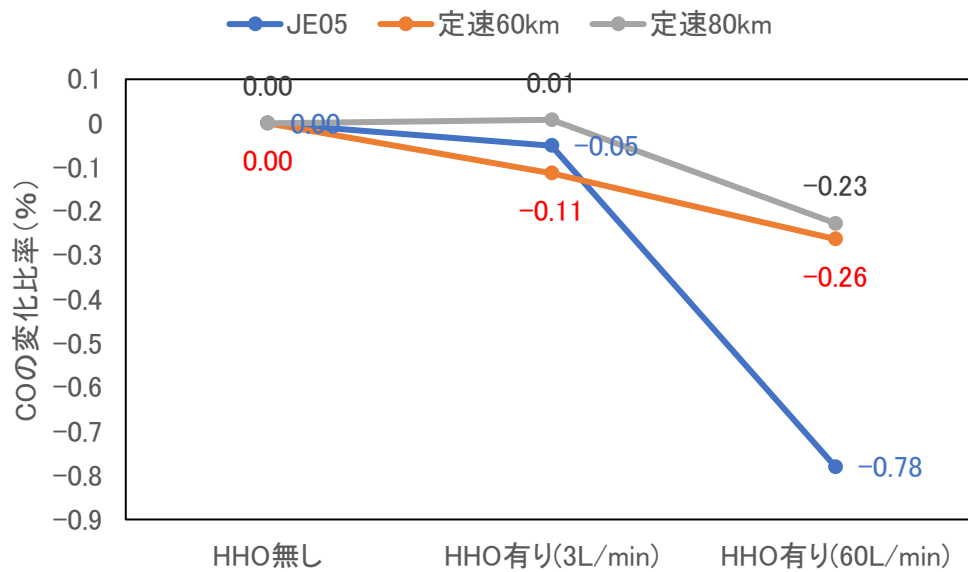


図 4.4.2 CO の変化率

PM 排出量の変化:

異なる走行モードにおける HHO ガスの導入量による PM 排出の変化に関する情報が提供されている。この情報に基づくと、異なる条件での HHO ガス導入による PM 排出の変動が示されている。

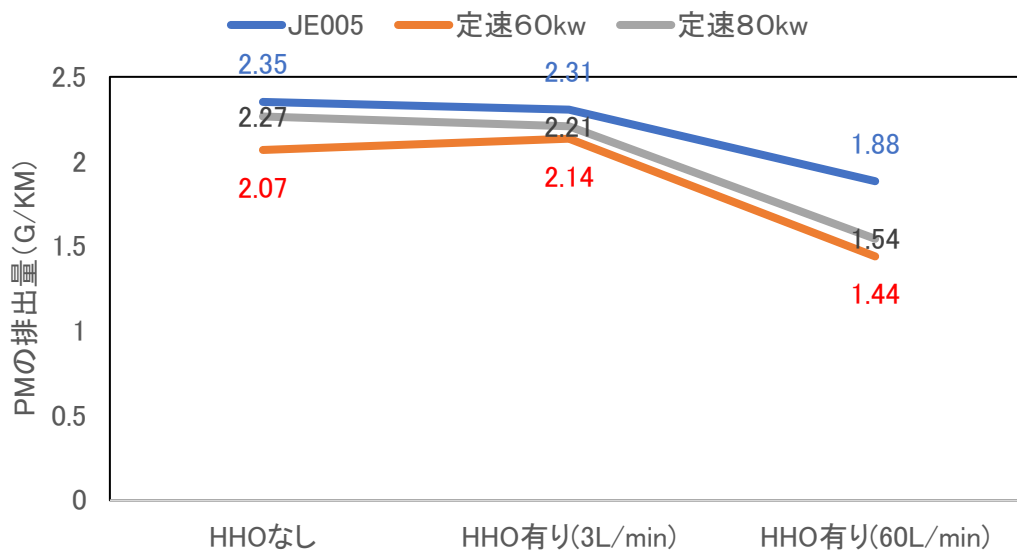


図 4.4.3 PM の変化量

図 4.4.3 と図 4.4.4 のように、JE005 モードでは、HHO ガス導入量を 3L/min にすると PM 排出量が 2.35g/test から 2.31g/km まで減少し、その割合は約-0.02%減少したことがわかる。同様に、HHO ガス導入量を 60L/min に増加させると、PM 排出量が 1.89g/test になり、約-0.20%減少したと報告されている。

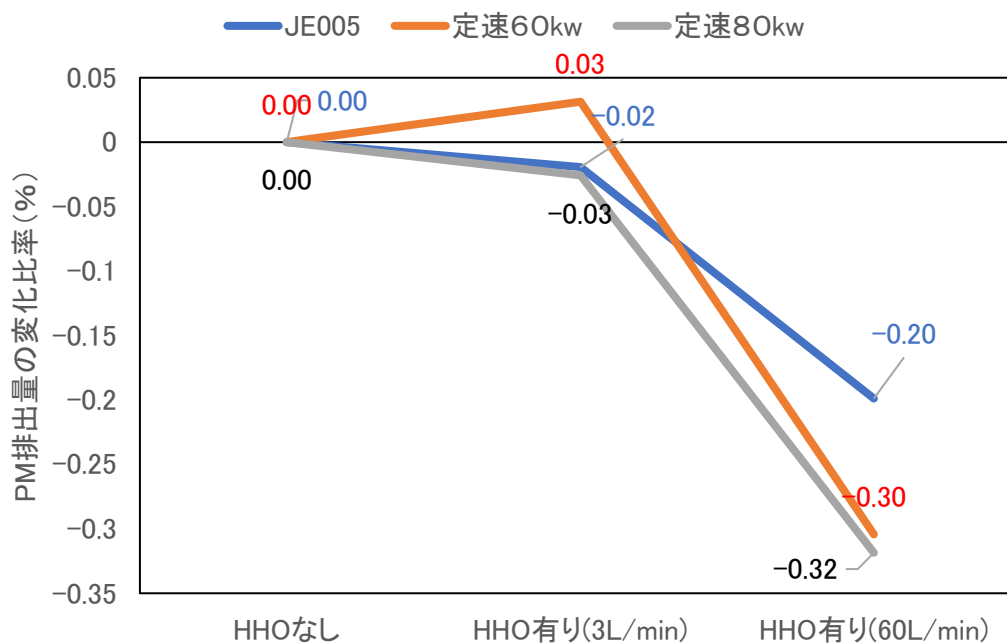


図 4.4.4 PM の変化比率

定速 60km モードでは、HHO ガス導入量 3L/min で PM 排出量が 2.07 g/test から 2.14g/km まで増加し、その割合は約 0.03%増加したとされている。また、HHO ガス導入量を 60L/min にすると、PM 排出量が 1.44g/test になり、約-0.30%減少したとの結果も示されている。

同様に、定速 80km モードでも HHO ガス導入量による PM 排出の変化が観察されている。HHO ガス導入量 3L/min では PM 排出量が 2.27g/test か

ら 2.21g/km まで減少し、その割合は約-0.03%減少。また、HHO ガス導入量 60L/min にすると、PM 排出量が 1.544g/test になり、約-0.32%減少した。

これらの結果から、異なる走行モードにおいて、HHO ガスの導入量が PM 排出に与える影響が示され、導入量によって排出量が減少する場合もあれば増加する場合もあることがわかる。

水素添加によるディーゼル消費量の減少率に対する CO と PM の減少率を図 4.4.5 に示す。点線は 1 : 1 で燃料消費量の減少に応じた CO や PM の減少量を予測した線である。ほぼすべての走行試験で、水素の添加により CO と PM の排出量が減少していることが確認された。CO と PM はディーゼルに由来するため、水素を添加することでディーゼルの燃焼消費量が減り、それに伴って排出量も減ったと考えられる。水素添加量を 2L/min (HES~1%) とした場合、CO と PM の排出量の削減率は、

ディーゼル消費量の削減率と一致した。さらに、水素添加量が増加するにつれて、CO と PM の排出量は、ディーゼル消費量の削減率よりも多く削減された。これは、水素の添加により燃焼温度が上昇し、完全燃焼の度合いが高まり、CO と PM の排出量が減少すると考えることができる。

ディーゼルエンジンから排出される粒子状物質 (Particulate Matter、PM) は、さまざまな有害成分を含んでおり、その毒性は特に以下の要因に関連している。

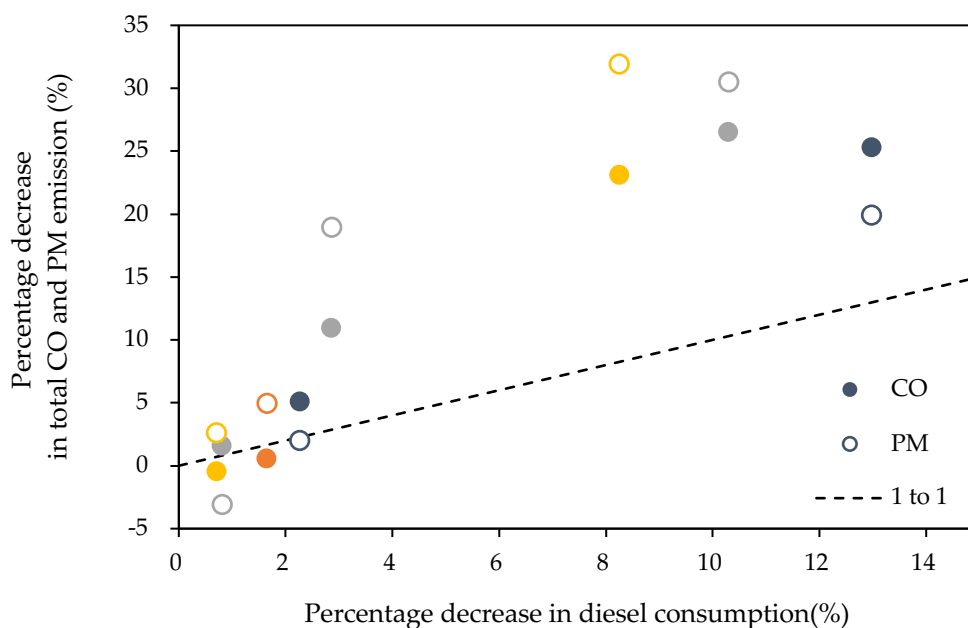


図 4.4.5 ディーゼル消費量の削減率に対する CO、PM の削減率。

注) 青色は JE05 ドライビングサイクル、オレンジ色は 40km/h 一定速、灰色は 60km/h 一定速、黄色は 80km/h 一定速

ポリサイクリック・アロマトニック・ヒドロカーボン (PAH) : PAH はディーゼル排気中に存在し、炭素と水素のリング状構造を持つ有機化合物です。これらの化合物は、PM 中に吸着または結合して存在し、特に発がん性物質として知られている。PAH の吸入はがんや呼吸器疾患との関連が指摘されている。

金属: ディーゼルエンジンの排気中には金属成分 (鉛、カドミウム、クロムなど) も含まれており、これらの金属が PM に吸着して大気中に放出される。これらの金属成分は、長期間の曝露によって神経毒性やがんの原因となることがある。

PMの毒性の主なメリットは、これら有害成分の減少に起因する。

健康への影響低減: PMからのPAHや金属成分の削減は、呼吸器系や循環器系への影響を軽減する。これにより、呼吸器疾患、心臓病、がんなどの発症リスクが低減する。

大気汚染の削減: PMによる大気汚染の減少は、都市部や工業地域での空気品質向上に寄与する。これにより、公衆衛生が向上し、医療費削減や生産性の向上が期待できる。

ディーゼルエンジン技術の進歩や環境規制の導入により、PMの有害成分の削減が進行している。水素添加によってディーゼルエンジンからPMの排出を削減すると、健康と環境へのメリットを提供している。

## 4.5 THCの変化状況

### THC排出量の変化

異なる走行モードにおけるHHOガスの導入量によるTHC排出の変化に関

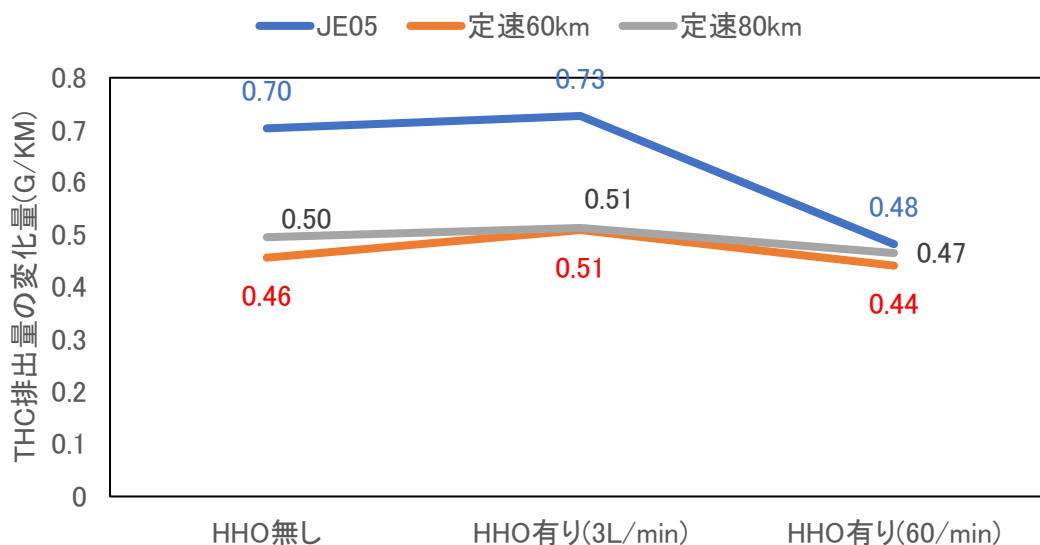


図 4.5.1 THC の変化量

する情報が提供されている。以下の図 4.5.1 と図 4.5.1 のようにそれに基づき、異なる条件での HHO ガス導入による THC 排出の変動が示されている。

HHO ガス導入量 3L/km の状況では、全てのモードにおいて THC 排出量が少なくともわずかに増加したことが示されている。具体的には、異なるモードにおける THC 排出量は、JE05 で 0.70g/km から 0.73g/km

まで、定速 60KM/H で 0.46g/km から 0.51g/km まで、および定速 80KM/H で 0.50g/km から 0.51g/km まで増加した

さらに、HHO ガスの導入量が 60L/min に増加すると、THC 排出量にも変

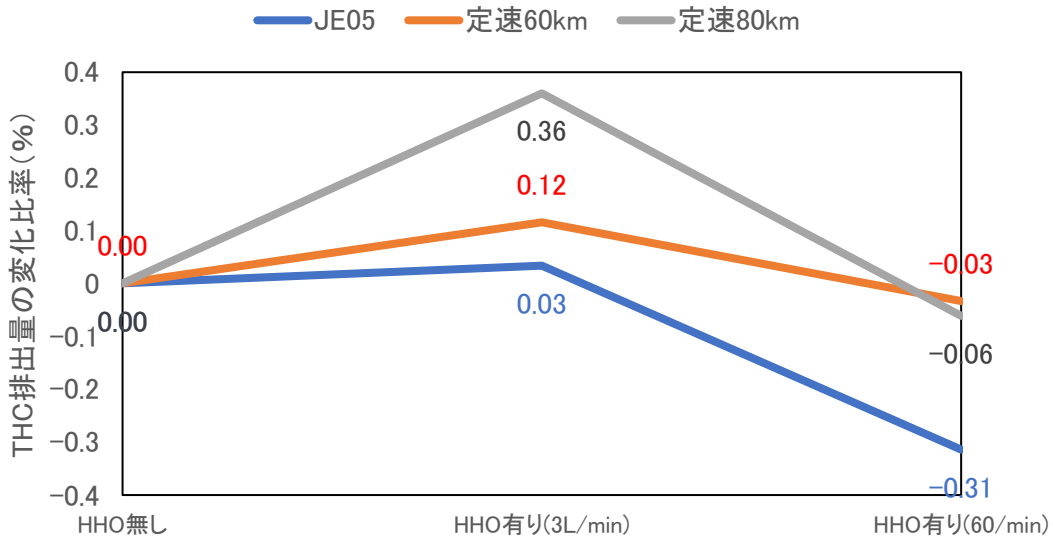


図 4.5.2 THC の変化比率

化が見られた。具体的には、HHO ガス導入量 60L/min の状況で、それぞれのモードにおいて THC 排出量は JE05 で 0.70g/km から 0.48g/km まで、定速 60KM/H で 0.46g/km から 0.44g/km まで、および定速 80KM/H 0.50g/km から 0.47g/km まで減少した。

特に、JE005 モードの場合、HHO ガス導入量の増加に伴う THC 排出量の減少率は約 31.44%で最大値になったことが記録されている。

これらの結果から、HHO ガス導入量によって異なる走行モードで THC 排出が変化することが示され、導入量によって排出量が増加したり減少したりすることがわかる。

炭化水素も CO や PM と同様にディーゼルの燃焼に由来するため、THC

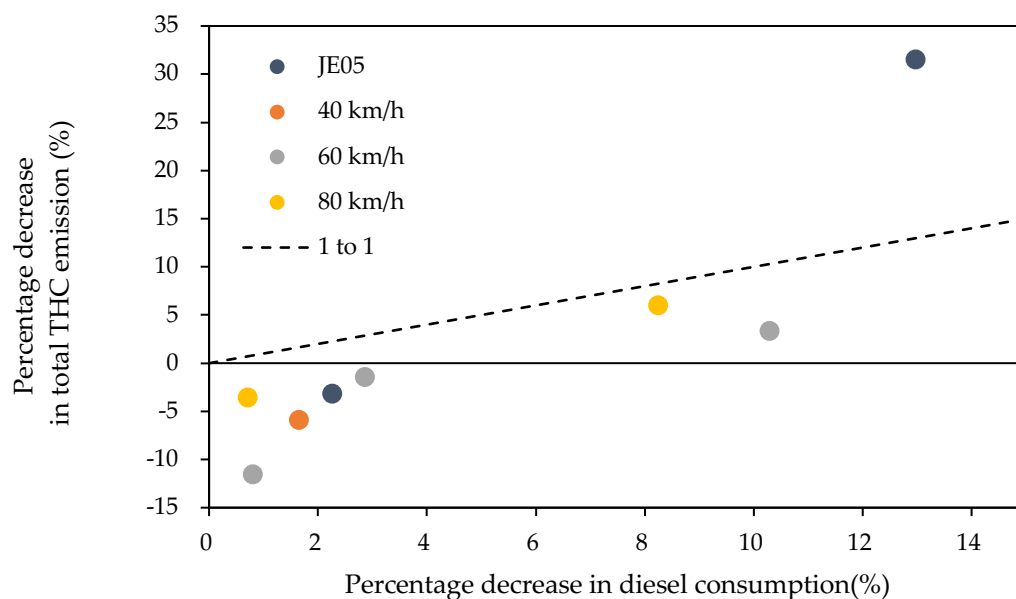


図 4.5.3. ディーゼル消費量の削減率に対する総炭化水素量（THC）の削減率

排出量も水素の添加によって変化する。各走行試験における THC 排出量と水素ガス添加によるディーゼル消費量の低減の関係を図 4.5.3 に示す。

大量の水素（ $\geq 40\text{L}/\text{min}$ 、 $\geq 10\% \text{HES}$ ）を添加することで、THC 排出量の低減が確認された。JE 05 の走行サイクルでは、THC 排出量の低減率は、ディーゼル消費量のみの場合よりも大きかった。JE 05 以外の平均速度が高い走行試験では、THC 排出量は減少したものの、その減少率はディーゼル消費量のみの場合より小さかった。逆に、水素添加量が少ない場合（ $60\text{L}/\text{min}$  未満、 $10\% \text{HES}$  未満）には、THC 排出量が増加した。

## 4.6 VOC の変化

揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds、VOC) には、環境や健康に対して有害な成分が含まれている。以下に、特に有害な VOC とその削減のメリットを考察する。

ベンゼン (Benzene) : ベンゼンは多くの石油製品、自動車排気ガス、産業プロセスから放出される。ベンゼンは発癌性があり、骨髄異形成症候群や白血病などの健康問題の原因となることが知られている。

削減メリット: ベンゼンの排出を削減することは、公衆衛生の向上と健康リスクの低減につながる。

トルエン (Toluene) : トルエンは石油製品の製造や使用、塗料、溶剤、印刷業界などで広く使用される。長期間の曝露は神経系への影響を引き起こす可能性がある。

削減メリット: トルエンの削減は神経系への潜在的な被害を減少させ、環境への影響も軽減する。

キシレン (Xylene) : キシレンは塗料、接着剤、印刷インク、石油製品など多くの工業プロセスで使用されます。高濃度のキシレン曝露は中枢神経系への影響を引き起こす可能性がある。

削減メリット: キシレンの削減は神経系への潜在的な危険を低減し、作業者の健康を保護する。

VOC の削減は、これらの有害物質を環境や作業者の健康に対するリスクを軽減するだけでなく、大気中の光化学スモッグや地球温暖化にも寄与する。

したがって、VOC の削減は環境保護と健康の観点から非常に重要である。



#### 4,6,1 定速 80km で VOC の変化状況

グラフは定速 80km で HHO ガスを添加することによる排出ガス中の揮発性有機化合物 (VOC) の濃度変化を示している。グラフ上の青色のバーは HHO ガスを添加していない状態を示し、オレンジ色のバーは HHO ガスを 60 リットル添加した後の状態を示している。グラフの縦軸はガスクロマトグラフィーによるピークエリアを、GC ピークエリア単位で示しており、これは各 VOC 成分の濃度に対応している。

グラフから、多くの VOC が HHO ガスを添加することで濃度が減少していることが見て取れる。特に、ベンゼン、トルエン、エチルベンゼンなどの有害な化合物の減少が顕著であり。これらの結果は、HHO ガスが燃焼効率を高め、有害排ガスの排出を減少させる可能性があることを示唆している。一方で、いくつかの化合物は HHO ガスの添加によって濃度が増加していることが分かる。

濃度が減少している主な化合物は以下の通りである：

- ベンゼン：人体に対する毒性が高く、長期間の曝露は白血病のリスクを高める可能性がある。
- トルエン：神経系に影響を与える可能性があり、特に高濃度での曝露は健康に害を及ぼすことが知られている。
- エチルベンゼン：長期間の曝露は肺や肝臓への影響が懸念される。
- キシレン：長期間にわたる曝露は呼吸器系の問題や肝臓への損傷を引き起こす可能性がある。

- スチレン: これもまた、神経系への影響や発がん性のリスクが懸念される化合物である。

具体的な数値は、上記図 4.6.1 のリストのように変化している。

以下が増加および減少したデータを完全にまとめたものである。

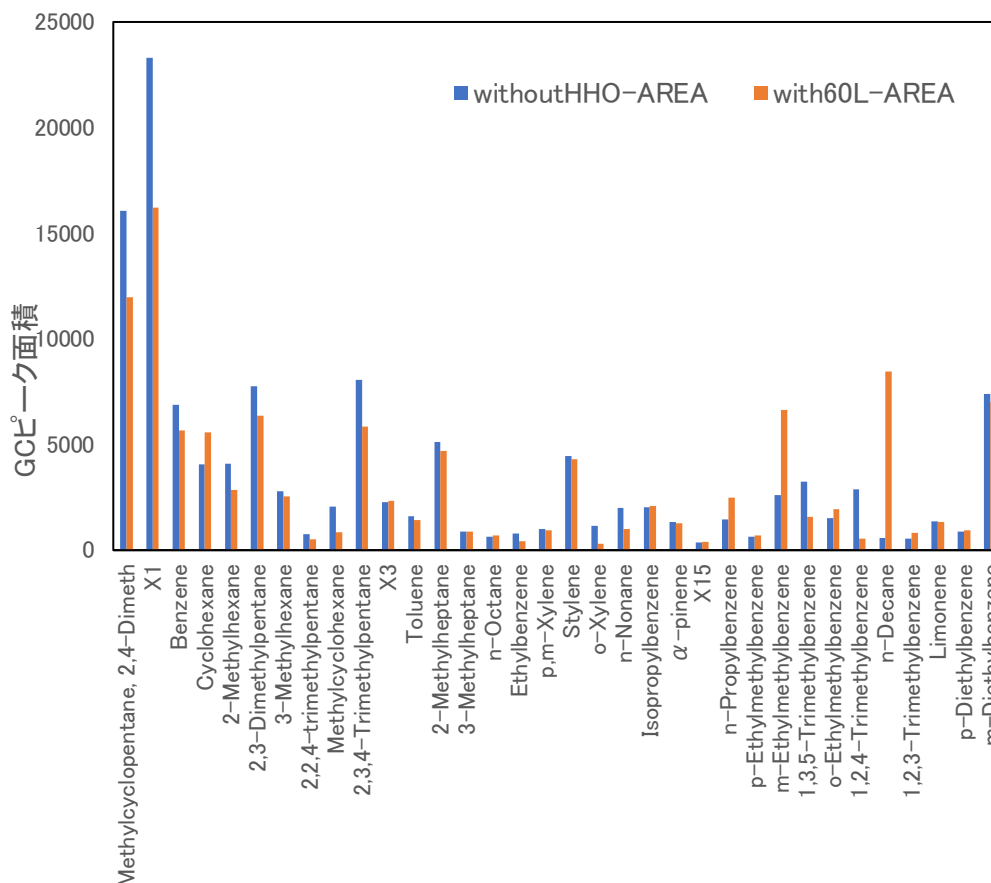


図 4.6.1.定速 80 kw で VOC の変化

増加したデータ:

1. Cyclohexane: 4,065.37 から 5,587.24 へ
2. X3: 2,265.63 から 2,342.54 へ
3. 3-Methylheptane: 889.34 から 889.94 へ (微増)
4. n-Octane: 632.07 から 693.28 へ

5. X15: 373.14 から 407.66 へ
6. n-Propyl benzene: 1,440.53 から 2,491.53 へ
7. p-Ethyl methylbenzene: 643.51 から 698.35 へ
8. m-Ethyl methylbenzene: 2,607.81 から 6,644.25 へ
9. o-Ethyl methylbenzene: 1,523.76 から 1,953.87 へ
10. 1,2,3-Trimethylbenzene: 555.77 から 808.41 へ
11. Limonene: 1,351.38 から 1,346.28 へ (ほぼ同じ)
12. p-Dimethylbenzene: 882.25 から 949.16 へ
13. n-Deane: 571.75 から 8,441.86 へ

減少したデータ:

1. Methyl cyclopentane, 2,4-Dimeth: 16,058.74 から 11,979.69 へ
2. X1: 23,299.43 から 16,220.79 へ
3. Benzene: 6,871.30 から 5,667.10 へ
4. 2-Methylhexane: 4,095.78 から 2,859.68 へ
5. 2,3-Dimethylpentane: 7,770.59 から 6,358.60 へ
6. 2,2,4-trimethylpentane: 750.44 から 527.73 へ
7. Methylcyclohexane: 2,066.00 から 862.77 へ
8. 2,3,4-Trimethylpentane: 8,057.80 から 5,848.41 へ
9. Toluene: 1,606.85 から 1,415.46 へ
10. 2-Methylheptane: 5,127.03 から 4,710.45 へ
11. Ethylbenzene: 775.56 から 440.02 へ
12. p.m.-Xylene: 997.75 から 954.79 へ

13. Styrene: 4,451.77 から 4,311.02 へ
14. o-Xylene: 1,147.81 から 297.66 へ
15. n-Nonane: 2,001.85 から 1,007.62 へ
16. 1,3,5-Trimethylbenzene: 3,240.64 から 1,565.52 へ
17. 1,2,4-Trimethylbenzene: 2,872.86 から 540.03 へ
18. m-Dimethylbenzene: 7,406.45 から 6,996.56 へ (微減)

上記のデータは、各化合物において「without HHO-AREA」から「with60L-AREA」への変化を示している。

#### 4,6,2 定速 60km で VOC の変化状況

このデータは、特定の化合物の領域 (AREA) を、水素ガス (HHO) を添加する前と 3L の HHO を添加した後で比較している。例として、n-Hexane は HHO 添加前が 3552.90 で、添加後が 5295.06 と増加している。一方で、Benzene は 4906.53 から 4323.78 に減少している。データを詳しく見ると、化合物によって HHO の添加が増加または減少の影響を持つことが確認できる。特定の化合物、例えば 2,3-Dimethylpentane は 7570.69 から 2724.48 に大幅に減少しているが、2,3,4-Trimethylpentane は 4089.63 から 5298.35 に増加している。これらの比較から、HHO の添加が各化合物の領域に与える影響を詳細に分析することができる。

具体的な数値は、上記図 4.6.2 のリストのように変化している。

増加するデータ:

1. n-Hexane: 3552.90 -> 5295.06

2. Methyl cyclopentane, 2,4-Dimeth: 10835.42 -> 11061.07
3. 2-Methylhexane: 3074.00-> 4940.16
4. 2,3,4-Trimethylpentane: 4089.63-> 5298.35
5. Toluene: 1188.73-> 1303.57
6. 2-Methylheptane: 2729.19 -> 2908.95
7. o-Xylene: 676.05 -> 867.19
8. n-Nonane: 1208.38-> 1313.34
9.  $\alpha$ -pinene: 913.12 -> 1022.80
10. 1,3,5-Trimethylbenzene: 1654.63-> 1825.43
11. p-Dimethylbenzene: 642.36 -> 965.59
12. m-Dimethylbenzene: 4605.73-> 4815.51
13. n-Undecane: 1176.20-> 1207.37

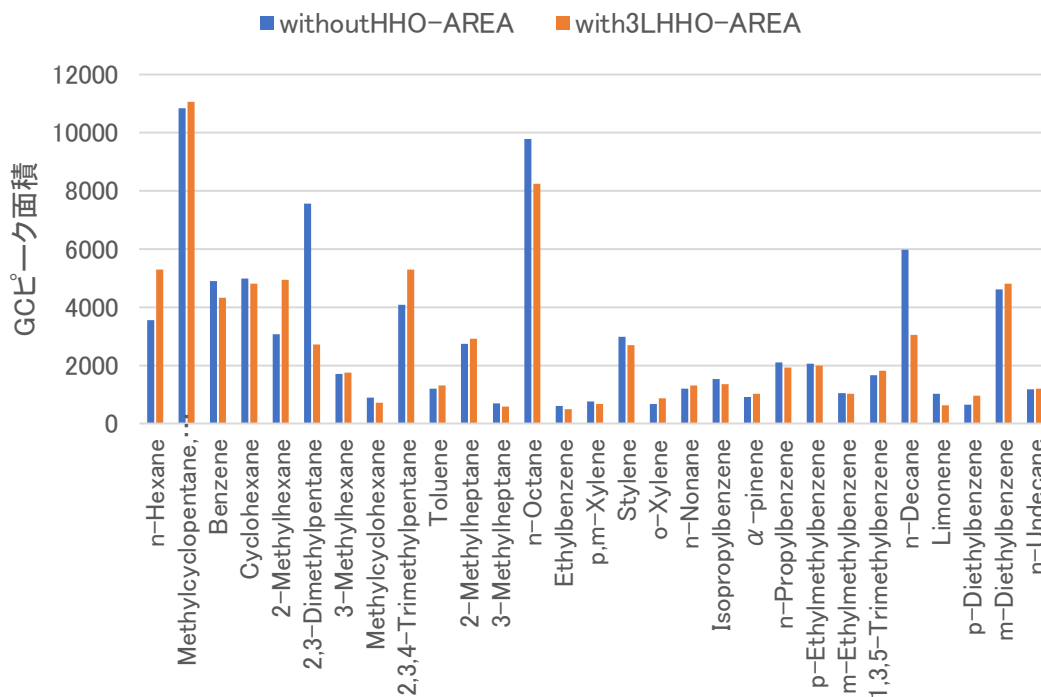


図 4.6.2.定速 60KM で VOC の変化

減少したデータ：

1. Benzene: 4906.53-> 4323.78
2. Cyclohexane: 4988.47 -> 4815.98
3. 2,3-Dimethylpentane: 7570.69-> 2724.48
4. Methylcyclohexane: 901.17 -> 720.89
5. 3-Methylheptane: 691.75 -> 590.45
6. n-Octane: 9773.59-> 8239.89
7. Ethylbenzene: 604.98-> 491.02
8. p.m.-Xylene: 754.30 -> 678.19
9. Styrene: 2988.19-> 2689.32
10. Isopropyl benzene: 1525.52-> 1345.11
11. n-Propyl benzene: 2100.61 -> 1917.73
12. p-Ethyl methylbenzene: 2047.00 -> 1987.76
13. m-Ethyl methylbenzene: 1042.12-> 1013.62
14. n-Deane: 5986.60-> 3048.23
15. Limonene: 1027.51-> 617.10

これにより、HHO の追加後に値が増減した化合物の明確な概観が提供される。

4,6,3 定速 JE05 で VOC の変化状況

定速 JE05 で HHO ガスを添加した場合と添加していない場合の揮発性有機化合物 (VOC) の濃度を比較している。青いバーは HHO ガスを添加していない状態 (without HHO)、オレンジ色のバーは HHO ガスを 3 リットル添加した状態 (with 3L HHO) を示している。横軸には各種 VOC の名前が記載されており、縦軸はガスクロマトグラフィーによるピークエリアを単位で表している。

このグラフから以下のことが読み取れる：

- 多くの VOC の濃度が HHO ガスを添加することにより減少している。
- 特定の VOC の濃度は HHO ガスを添加しても大きな変化が見られないか、わずかに増加しているものもある。
- HHO ガスの添加が排ガス中の VOC 濃度に一定の影響を与えていることが示されているが、その影響は化合物によって異なる。

このグラフは、HHO ガスの添加が自動車の排出ガス中の特定の有害化合物を効果的に減少させる可能性があることを示しているが、全ての化合物に対して同様の効果があるわけではないことも示唆している。

具体的な数値は、上記図 4.6.3 のリストのように変化している。

増加するデータ：

1. n-Hexane: なし -> 4072.31
2. 2-Methylhexane: 2038.97-> 8498.58
3. Methylcyclohexane: 5033.76-> 6953.35
4. 2,3,4-Trimethylpentane: 754.02-> 1154.94

5. Toluene: 2517.64-> 2853.56
6. n-Octane: 6240.17-> 7640.90
7. Ethylbenzene: 792.75-> 1228.93
8. p.m.-Xylene: 1114.63-> 2659.62
9. o-Xylene: 722.79-> 1435.10
10. n-Propyl benzene: 449.89 -> 1361.28
11. o-Ethyl methylbenzene: 375.32 -> 3429.43
12. p-Dimethylbenzene: 1190.99-> 4000.86

減少するデータ:

1. Methyl cyclopentane, 2,4-Dimeth: 8162.77 -> 5616.56
2. Benzene: 5599.40-> 2664.63
3. Cyclohexane: 1928.95-> 1772.75
4. 2,3-Dimethylpentane: 5890.58-> 2024.43
5. 3-Methylhexane: 1681.45 -> 1422.78
6. 2-Methylheptane: 801.95-> 684.26
7. 3-Methylheptane: 3155.47 -> 2286.19
8. Styrene: 2385.44-> 827.41
9. n-Nonane: 2632.79-> 886.75
10. Isopropyl benzene: 808.90-> 426.25
11. p-Ethyl methylbenzene: 2048.03-> 1623.15
12. m-Ethyl methylbenzene: 2244.71-> 516.71
13. 1,2,4-Trimethylbenzene: 1350.78-> 559.48



14. n-Deane: 1898.66 -> 1694.97
15. 1,2,3-Trimethylbenzene: 2220.81-> 1976.81
16. m-Dimethylbenzene: 2892.78 -> 701.63
17. n-Undecane: 2916.30-> 2299.88

上記のように、特定のコンポーネントでは水素の添加によって数値が増加しているのに対して、他のコンポーネントでは減少している。

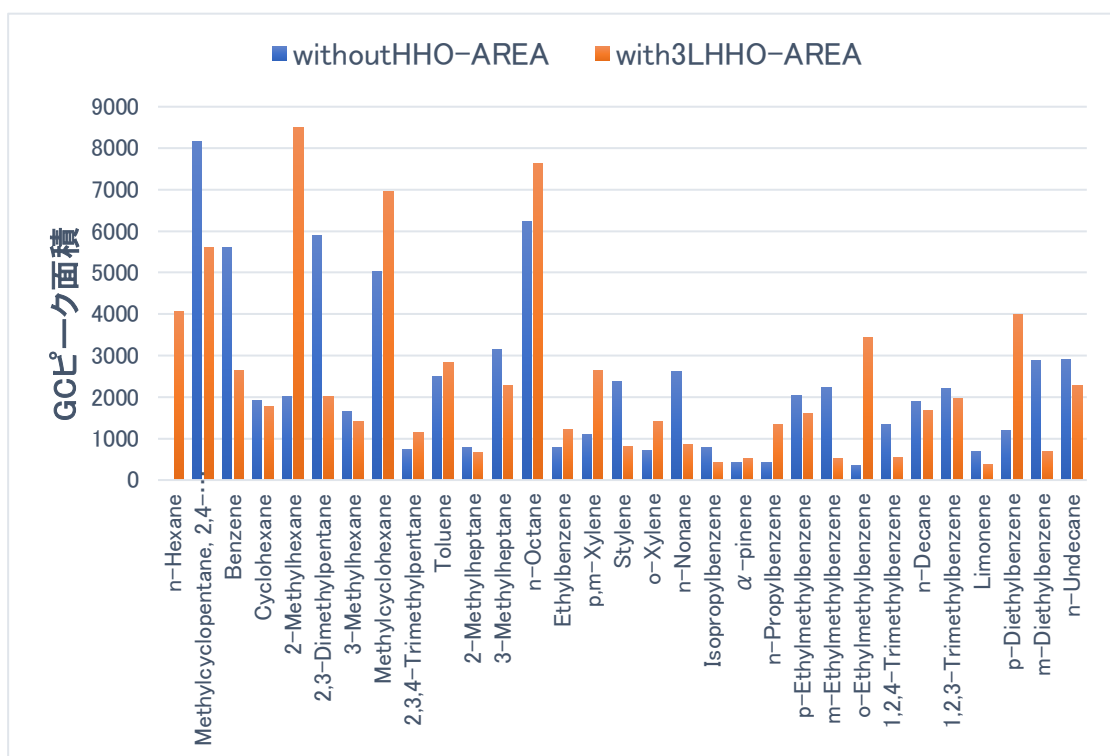


図 4.6.3 JE05 で VOC の変化

#### 4.6.4 定速 40km で VOC の変化状況

定速 40km で VOC の変化は、HHO ガス添加の有無による排出ガス中の各種揮発性有機化合物 (VOC) の濃度変化を示している。青色のバーは HHO ガスを添加していない状態 (without HHO - AREA)、オレンジ色のバーは HHO ガスを 3 リットル添加した状態 (with 3L HHO - AREA) を表している。

す。横軸は様々な VOC を表し、縦軸はガスクロマトグラフィーのピークエリアで、これは VOC の濃度を表している。

グラフから得られる主要な情報は次の通りである：

- 多くの VOC が HHO ガスの添加によって減少している。これは HHO ガスが燃焼を助け、より完全な燃焼を促進し、結果として VOC の排出を減らしている可能性がある。
- HHO ガスを添加しても濃度が減少しない、またはわずかに増加している VOC もある。これは、HHO ガスが全ての化合物に対して同じ効果を持たないことを示唆している。
- 特にノルマルヘキサン (n-Hexane) のようないくつかの化合物では、HHO ガスの添加前後で非常に大きな濃度の差が見られる。これは、HHO ガスが特定の条件下で特定の VOC の生成または排出を著しく抑制することを示している可能性がある。

具体的な数値は、上記図 4.6.4 のリストのように変化している。

増加するデータ：

1. n-Hexane: 3105.73-> 4883.11
2. Methyl cyclopentane, 2,4-Dimeth: 8003.65 -> 8785.34
3. 2-Methylhexane: 4431.37-> 6270.58
4. 2,3-Dimethylpentane: 2377.81-> 2442.61
5. 3-Methylhexane: 1322.14-> 1448.09
6. Methylcyclohexane: 453.66-> 494.60
7. o-Xylene: 914.08-> 937.65

8. p-Ethyl methylbenzene: 618.07-> 1658.89
9. 1,3,5-Trimethylbenzene: 3837.97-> 3971.98
10. o-Ethyl methylbenzene: 581.15-> 638.77
11. p-Dimethylbenzene: 1473.29 -> 3399.63
12. m-Dimethylbenzene: 1358.20-> 1611.14

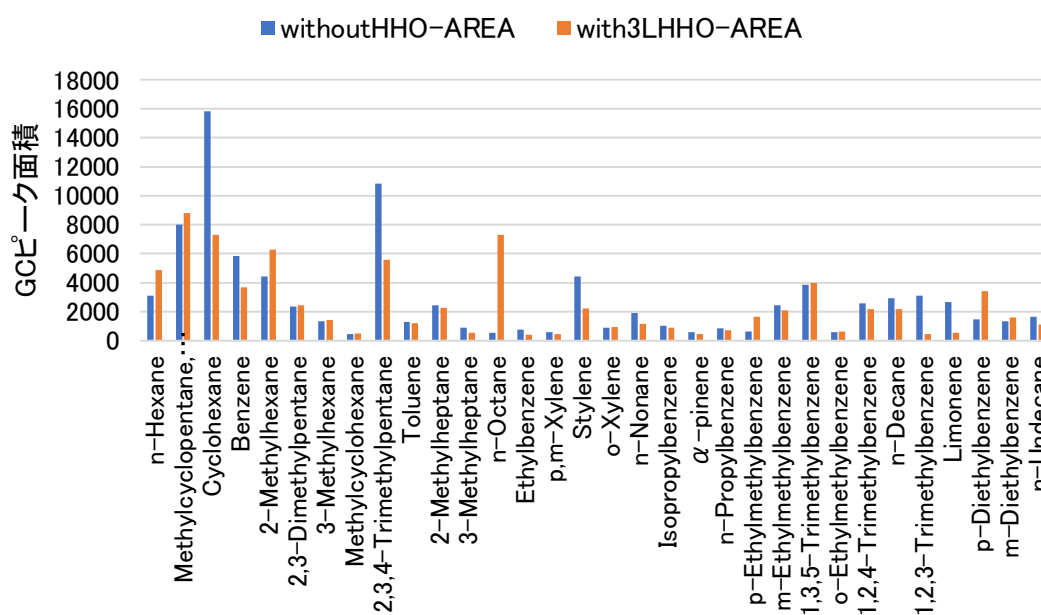


図 4.6.4 定速 40KM で VOC の変化

減少するデータ:

1. Cyclohexane: 15812.69 -> 7308.83
2. Benzene: 5850.19 -> 3688.04
3. 2,3,4-Trimethylpentane: 10826.80-> 5559.80
4. Toluene: 1307.05-> 1226.43
5. 2-Methylheptane: 2457.87-> 2271.04
6. 3-Methylheptane: 906.88 -> 564.19

7. Ethylbenzene: 761.55-> 416.76
8. p.m.-Xylene: 594.26-> 464.48
9. Styrene: 4418.91-> 2234.87
10. n-Nonane: 1930.04-> 1183.17
11. Isopropyl benzene: 1030.05 -> 915.45
12. n-Propyl benzene: 874.41-> 712.41
13. m-Ethyl methylbenzene: 2460.99-> 2069.31
14. 1,2,4-Trimethylbenzene: 2565.62-> 2170.51
15. n-Deane: 2913.25-> 2180.42
16. 1,2,3-Trimethylbenzene: 3105.32-> 456.98
17. n-Undecane: 1641.85 -> 1131.75

上記のように、特定のコンポーネントでは水素の添加によって数値が増加しているのに対して、他のコンポーネントでは減少している。

図 4.6.5 のような、エチレンを除き、水素添加後、測定された VOC の減少が確認された。これは主に、水素添加後のディーゼル消費量の減少に起因する。すべての VOC を分析したわけではないが、水素添加による燃焼温度の上昇により、炭素数の多い VOC の分解が促進され、その結果、エチレンの排出量が同時に増加したものと推測される。ディーゼル車の排ガス成分としてアセチレンが多く排出されるため、エチレン以外にアセチレンの排出量も増加した可能性があります。また、VOC の分解反応が促進されることで、完全燃焼の度合いが高まるほか、PM の発生が抑制されたと考えられる。

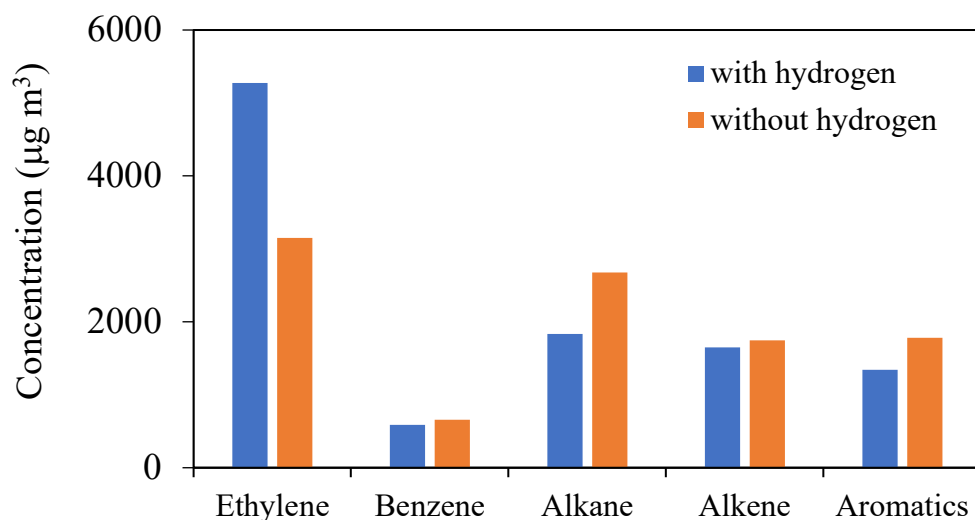


図 4.6.5 走行試験において、40km/h の定速で 2L/min の水素を添加した場合の HC 成分の変化。注) アルケンにはエチレンを含まず、芳香族にはベンゼンを含まない

#### 4.7 水素添加のエネルギーの収支状況

水素添加のエネルギー収支状況は図 4.7.1 の提示のように：

水素の添加量とエネルギー収支：

- モードに応じて水素の添加量が異なる条件で試験が実施された。水素の添加量は、モードやガスの流量によって変動しました。これらの条件下で、水素のエネルギー収支を評価した。

水素の低発熱量 (LHV) とディーゼルの LHV の比較：

- 研究では、追加された水素の LHV と、同量のディーゼル燃料の LHV を比較した。水素の LHV は、そのエネルギー含有

量を示す指標であり、ディーゼル燃料の LHV と比較することで、水素のエネルギー効果を理解した。

水素添加量の影響:

- 水素の添加量が少ない場合 (40L/min 未満、総ディーゼル燃料の 10%未満)、追加した水素の LHV は、ディーゼル燃料の LHV と近い値であることが示された。これは、エネルギー収支が比較的影響を受けない範囲であることを意味である。
- 一方、水素の添加量が多い場合 (40L/min 以上、総ディーゼル燃料の 10%以上)、追加された水素の LHV がディーゼル燃料の LHV よりも高くなることが示された。これは、高いエネルギー含有量を持つ水素の影響が顕著になることを意味である。

E05 モードのエネルギー収支:

- 特に JE05 モードでは、追加された水素のエネルギーの 50%しかトラックの動力源として使用されていないことが示された。この事実から、燃焼プロセスによって得られたエネルギーの一部は、燃焼温度の上昇などに使用され、その結果、総エネルギーが増加した可能性が示唆される。

結論: この研究からは、水素の添加量がエネルギー収支に影響を及ぼすことが明らかになった。特に高い水素添加量の場合、追加された水素のエネルギーが燃焼プロセスに与える影響が増大し、結果として総エネルギーが増加する可能性があることが示唆された。これは、エネルギー収支の観点から水素添加の効果をより深く理解する上で重要な知見と言える。

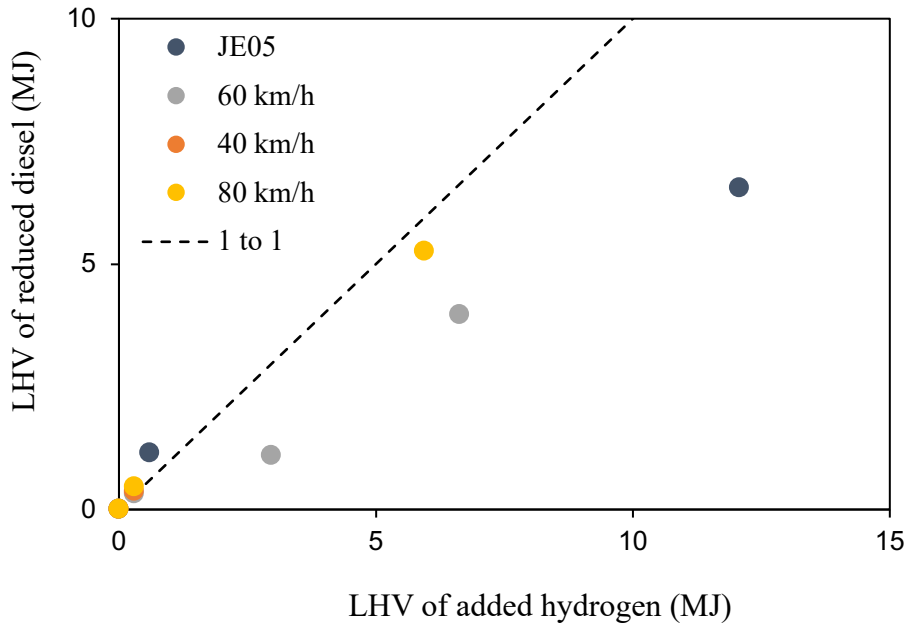


図 4.7.1. 水素添加により抑制されたディーゼルの LHV (Lower Heating Value) と添加した水素の LHV の比

#### 4-8、水素添加実験自動車モデル計算結果

水素添加試験自動車モデル計算結果は示すように水素の添加割合 0,0.001, 0.01, 0.02 と増やすに従い、主に  $C_3, C_4$  炭化水素が減少する結果となっている。 $C_2H_4$  もやや減少している ( $CO$  や  $CO_2$  まで酸化が進んでいる可能性がある)。しかし、計算は空間分布を考慮しないもの (実際の排ガスはいろいろな濃度で燃えたものが混ざり合う) で、これらの生

成量は相対的なものだと考えられる。相対的にみると  $C_3, C_4$  が  $C_2$  に比べて減っているとみることが出来る。初期温度や圧力を変えても、程度の差はありますが、似た結果になるようです。別の計算で火炎の温度をざっと計算したところ、1%の水素添加で火炎の温度が数十 K 上昇するようでしたので、温度が上がり  $C_3, C_4$  が分解しやすくなったのではないかと考えられる。

さらに、水素添加による燃焼温度の変化を、KUCRS ソフトウェア[29]で生成された KUCRS 燃焼モデルに若干の修正を加えたものを用いて評価した[30]。計算では、Cantera プログラム[31]を用いて、初期温度 1000K、初期圧力

表 4.8.1-水素添加試験自動車モデル計算結果

T/K	1000	10002	10003	10004
p/atm	30	30	30	30
fuel	nC <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	nC <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	nC <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	nC <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
phi	10	10	10	10
addh2	0	0.001	0.01	0.02
vol.frac				
CO	2.10E-01	2.10E-01	2.15E-01	2.19E-02
CO <sub>2</sub>	1.58E-04	1.35E-04	8.72E-05	9.35E-05
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2.07E-02	2.09E-02	2.21E-02	2.31E-02
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5.87E-02	5.87E-02	5.80E-02	5.69E-02
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.71E-03	2.70E-03	2.64E-03	2.57E-03
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> P	1.25E-02	1.22E-02	1.03E-02	8.63E-03
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> A	1.89E-03	1.85E-03	1.58E-03	1.35E-03
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	9.59E-03	9.52E-03	8.86E-03	8.14E-03
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.10E-04	1.09E-04	1.02E-04	9.47E-05
iC <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	4.53E-04	4.48E-04	4.01E-04	3.50E-04
1C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	3.77E-04	3.73E-04	3.33E-04	2.92E-04
2C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2.19E-04	2.16E-04	1.90E-04	1.64E-04
12C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	3.03E-04	3.01E-04	2.82E-04	2.59E-04
Tflame/Kジエチル	1436	1438	1457	1478

30atm、体積一定条件で、燃料として n-セタン単体を用いて簡易反応シミュレーションを実施した。燃焼温度は着火後の断熱火炎温度として計算した。本モデルでは NO<sub>x</sub> 生成機構を含まないため、NO<sub>x</sub> 生成量は定量的に評価せず、NO<sub>x</sub> 生成量の指標として、水素添加時の予測燃焼温度の相対変化を算出した。当量比 10 の燃料リッチ条件での結果を示し、酸素欠乏条件下でも水素添加が燃焼温度に影響を与えることを強調した。水素添加量と燃焼温度の相



関は、異なる当量比でも同じ傾向を示すことがわかった。計算は、水素添加量分率が 0、0.001、0.01、0.02 の場合に行った。簡単のため、初期空気中の CO<sub>2</sub> 濃度および水素添加による燃料消費量の減少は考慮しなかった。

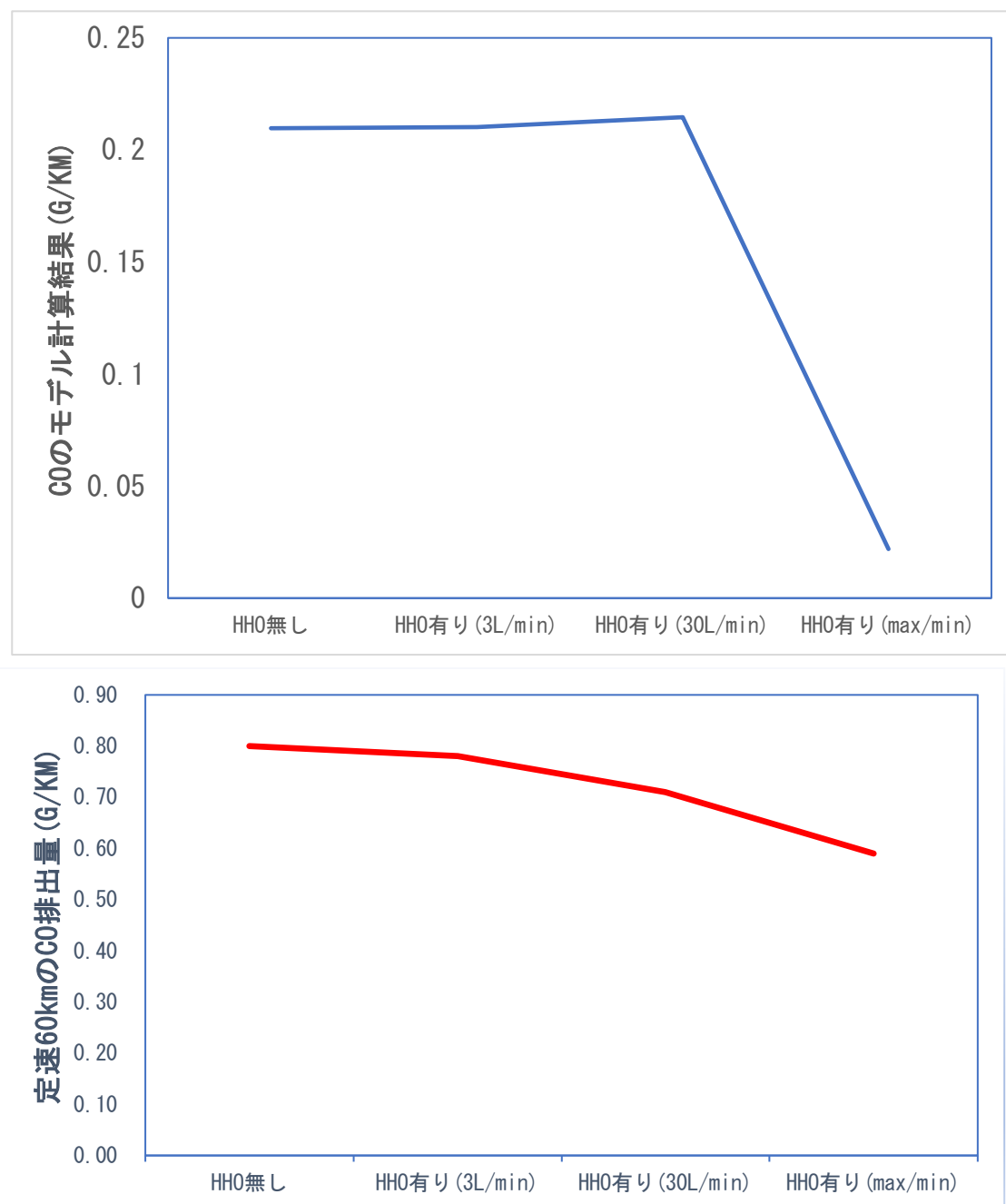


図 4.8.1 モデル計算結果と定速 60km の CO の変化比較

図 4.8.1 と図 4.8.2 には、特定の速度（定速 60km/h）で運転された際の車両からの CO（一酸化炭素）と CO<sub>2</sub>（二酸化炭素）の排出量に関する

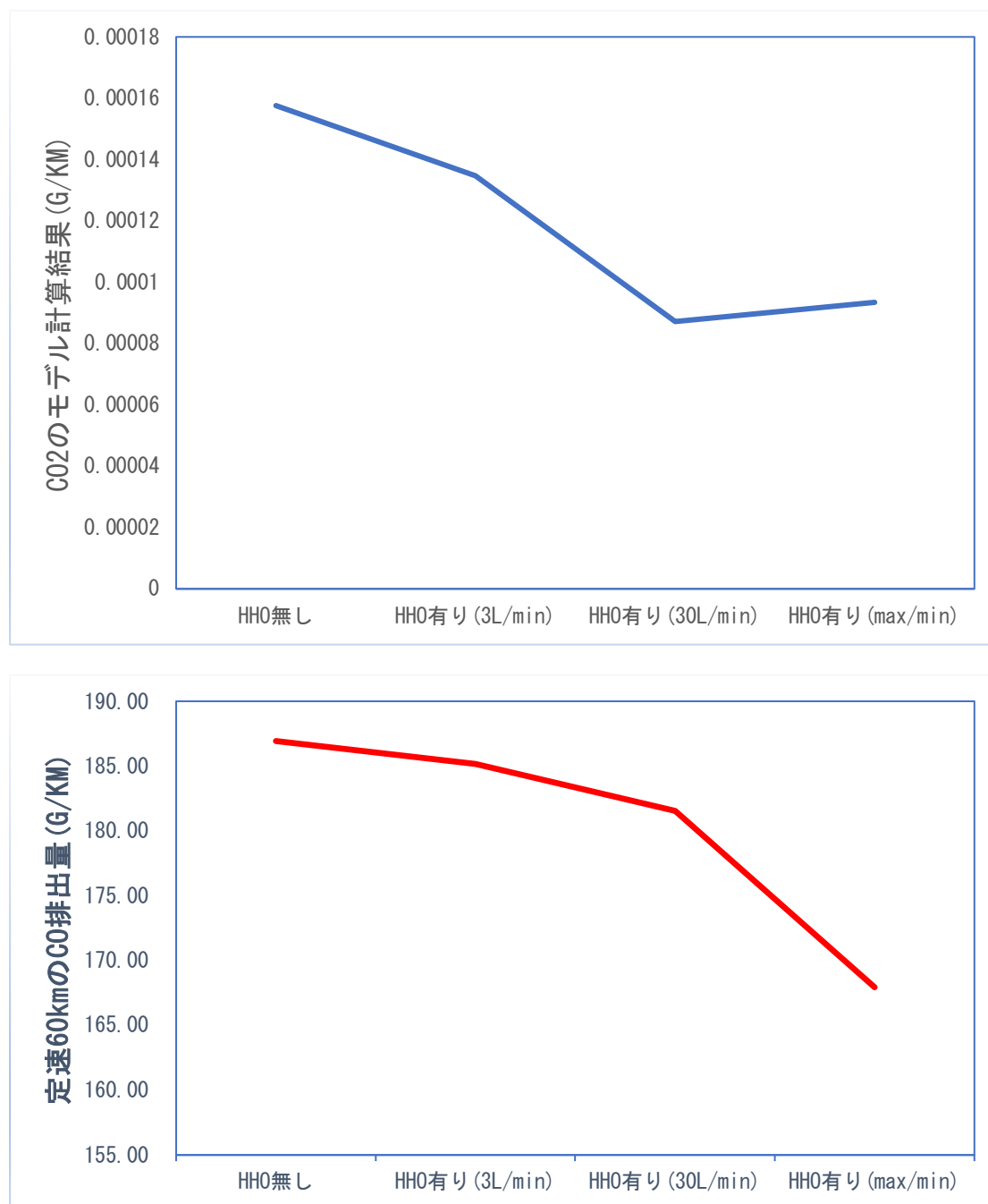


図.4.8.2 モデル計算結果と定速 60km の CO<sub>2</sub> の変化比較

モデル計算結果を示している。4つの異なる HHO ガスの添加量（H1、H2、H3、H4）に基づいて、排出量がどのように変化するかを示したグラフが含まれている。

CO の排出量: HHO ガスの添加量が増加するにつれて、CO の排出量が顕著に減少している。具体的な数値はグラフから読み取れませんが、明らかな下降傾向が見られる。

- CO<sub>2</sub>の排出量: CO<sub>2</sub>に関しても、HHO ガスの添加量が増加すると排出量が減少していることが示されている。ただし、CO の排出量の減少に比べると CO<sub>2</sub>の減少傾向は緩やかである。

各グラフは、水平軸に HHO ガスの添加量を、垂直軸に排出量 (CO や CO<sub>2</sub>) を示しており、HHO ガスの添加が車両の排出ガスに及ぼす影響

を視覚的に比較している。全体的に、HHO ガスの添加が排出ガスの削減に有効である可能性を示唆している。計算結果は、全体的に実際の実験結果と非常によく似た削減効果を示しています。特に、CO と CO<sub>2</sub>の変化の方向は基本的に同じで、HHO ガス混合量が増えるにつれて

排出量は減少し、HHO ガス流量が 60L/min のときに最も減少した。

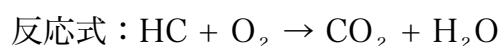
4.9 VOC、CO、CO<sub>2</sub>、PM、THC の削減、NO<sub>x</sub>の増加について化学反応式を用いての説明

揮発性有機化合物 (VOC)、CO (一酸化炭素)、CO<sub>2</sub> (二酸化炭素)、PM (粒子状物質)、THC (総炭化水素) の削減と NO<sub>x</sub> (窒素酸化物) の増加について、化学反応式を使って説明することは複雑ですが、一般的な概念を以下に示す。

以下は、VOC (揮発性有機化合物)、CO (一酸化炭素)、CO<sub>2</sub> (二酸化炭素)、PM (粒子状物質)、THC および NO<sub>x</sub> (窒素酸化物) の排出および削減

に関連する化学反応式の例である。これらの反応はディーゼルエンジンの燃焼プロセスに関連している。

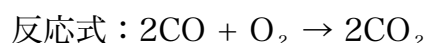
VOC、THC の削減：VOC と THC（特に非メタン炭化水素）は、光化学スモッグの形成に寄与する物質である。



この反応により、未燃焼の炭化水素が二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）と水蒸気（ $\text{H}_2\text{O}$ ）に変換され、VOC が減少する。

CO 削減：

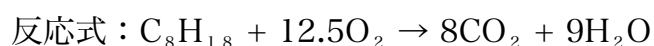
一酸化炭素（CO）の削減は酸素供給を増やすことによって行われる。



この反応により、一酸化炭素（CO）が二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）に変換され、CO の排出が削減される。

$\text{CO}_2$  排出：

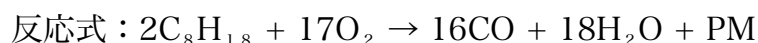
二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）は完全な燃焼の結果として発生する。



この反応により、炭化水素燃料が完全に酸化され、二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）と水蒸気（ $\text{H}_2\text{O}$ ）に変換される。

PM 削減：

粒子状物質（PM）の削減は完全燃焼によって



この反応では、未燃焼の炭化水素が酸化され、一部は PM として排出される。

NO<sub>x</sub> 増加：

窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の増加は高温燃焼条件下で発生し、NO が大気中の酸素と反応して NO<sub>2</sub> に変換される。

反応式（NO の生成）： $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$

反応式（NO<sub>2</sub> の生成）： $NO + O_2 \rightarrow NO_2$

NO<sub>x</sub> の増加を抑制するには、低温燃焼が必要である。

これらの化学反応は大変単純化されたもので、実際のエンジン内の化学反応ははるかに複雑で、温度、圧力、燃料の種類、エンジンの設計など多くの変数によって影響を受ける。また、NO<sub>x</sub> の増加はしばしばエンジンの調整、燃焼温度の上昇、または排ガス再循環（EGR）システムの不十分な機能によるものである。

## 第5章 結 論

この実験の結果から導き出された結論は、非常に興味深く、複雑なパターンが示されている。まず、3つの異なる走行モードにおいて、異なる流量のHHOガスを添加した場合の影響を詳細に分析した。この分析の結果、燃焼温度の上昇に伴う排気ガス中のNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）排出量の増加以外にも、燃料消費量およびその他の排気ガス成分に関しては明確な減少傾向が観察された。

特に、JE05の走行モードでは、他の2つのモードに比べて最も効果的な削減率が得られた。この現象は、HHOガスの流量が60L/minで変化の最大値が観察された時に顕著である。この条件下では、燃料消費量はJE05モードで13%、定速60kmモードで10.3%、定速80kmモードで8.3%減少した。同様に、CO<sub>2</sub>排出量もJE05モードで12.8%減少し、定速60kmモードで10.2%減少し、定速80kmモードで8.3%減少した。一方で、NO<sub>x</sub>（二酸化窒素）排出量はJE05モードで27.8%増加し、定速60kmモードで29.1%増加し、定速80kmモードで18.6%増加した。

- こうした効果の変動が実際の数値として示されると、興味深い見解が浮かび上がる。
- 具体的には、2020年のディーゼル燃料の消費量に対して13%の削減が適用される場合、変化最大値で計算すると全日本2020年ディーゼルの消費量は20,935,945キロリットルで13%当たる削減量は2721672.85キロリットルになる可能性がある。

同様に、輸送車両の CO<sub>2</sub>総合排出量に対する 12.8%の削減によって 2020 年輸送車両の CO<sub>2</sub>総合排出量 1 億 6106 万トンで 12.8%当たる削減量は 2061.568 万トンの CO<sub>2</sub>排出削減が期待されることも示された。

こうした結果は、参考文献に基づく指標や変化率が異なる場合があるにも関わらず、基本的な傾向が一致していることを示唆している。このことから、HHO ガスがエンジンの燃焼添加剤として高い効果を持つことが理論的に示された。しかしながら、この成果を実際の車両に応用するためには、HHO ガスの生成に必要な車載電力エネルギー消費問題やその経済性を解決する必要があることも明らかにされた。このような課題を克服するためには、続く研究や技術開発が重要であり、持続可能なエネルギー源を活用する未来への展望が示唆された。

更に水素添加による大気汚染物質の削減は、環境に対するポジティブなインパクトを持つ可能性がある。以下に、水素添加の主要な利点とそのインパクトを考察してある。

CO（一酸化炭素）削減：

水素添加は、ディーゼルエンジンの燃焼プロセスを最適化し、CO の排出を削減できる。

CO は有毒で、大気中での存在は健康へのリスクと関連している。水素添加による CO の削減は、大気汚染の健康への影響を軽減する。

NO<sub>x</sub>（窒素酸化物）削減：

NO<sub>x</sub> は大気中の光化学スモッグや酸性雨の原因となり、呼吸器疾患や大気中のオゾン生成に寄与する。

水素添加は NOx の生成を増加させることがあります。現代新型エンジンの燃料ガス処理 (DPD+尿素 SCR) で使って完全に削減される。

PM (粒子状物質) 削減:

PM は微小な粒子であり、大気中で浮遊し、呼吸器系に侵入して健康リスクを引き起こすことがある。

水素添加により、不完全燃焼物質の削減であり、PM の排出を減少させることがある。

VOC (揮発性有機化合物) 削減:

VOC は大気中で光化学反応に関与し、オゾンとの反応によってスモッグの形成に寄与する。

水素添加は完全燃焼を促進し、未燃焼の炭化水素 (HC) の排出を削減する。

CO<sub>2</sub> (二酸化炭素) 削減:

水素は燃料として使用された場合、CO の排出が低減する。

CO<sub>2</sub> は地球温暖化の主要な原因となるため、水素を使用することで温室効果ガスの削減が期待される。

水素添加によってこれらの大気汚染物質が削減されることで、都市部や工業地域などでの大気品質の向上が期待される。これは、環境への影響を減少させ、人々の健康と生活の質を向上させる効果を持つ可能性がある。しかし、水素添加にはエンジンの NOx 排出増加といった課題もあり、バランスを取る必要がある。そのため、水素添加技術の継続的な研究と開発が重要である。

纏めると、この研究は水素の添加がディーゼルエンジンの環境負荷を軽減する有望な手法であり、特に低炭素化戦略として注目されるべきものである。



ことを示した。エネルギー収支や排出物のバランスを考慮しながら、適切な水素添加量を見極めることが今後の研究の重要な課題である。

このような研究においては、いくつかの重要な洞察が得られた。まず、先行研究との一致性が確認された。この研究も、水素の添加がディーゼルエンジンの性能や排気ガスの組成に良好な影響をもたらすことを示した。特に、燃料消費量の低減や環境に悪影響を及ぼす成分の排出削減が観察されたことは、環境への配慮から見て非常に重要である。

また、この研究は水素添加の効果と走行モードの関係を詳細に分析した。JE05 モードで最も効果的な削減率が得られたことは、都市部でのディーゼル車の運行において水素添加が有望であることを示唆している。特に、水素の流量が 60L/min で最大の効果が得られたことは、水素添加の適正量を見極める上での重要なガイドラインとなるのである。

さらに、燃焼温度と NO<sub>x</sub> 排出の増加の関連性が明らかにされた。燃焼温度の上昇によって NO<sub>x</sub> 排出が増加することは、エンジンの最適な燃焼条件を探求する際の課題となる。ここでのトレードオフを考慮しながら、環境への悪影響を最小限に抑える方法を見つけることが重要である。

ただし、水素添加にはエネルギー収支の側面からの理解が必要である。水素の流量が増加すると、ディーゼル燃料とのエネルギー収支のバランスが変動することが示唆された。エネルギーの適切な配分が、効果的な水素添加の実現において重要な役割を果たすのである。

走行速度に応じて水素供給量を制御するアプローチは、エンジンの最適な燃焼条件を維持し、排出物を最小限に抑えるために有望な方法です。以下に、このアプローチの考察を示す。

#### 燃焼最適化：

走行速度に応じて水素供給量を調整することで、エンジンの燃焼条件を最適化できる。高速走行時にはより多くの水素供給を行い、高負荷状態でも適切な燃焼を維持する。

これにより、完全燃焼が促進され、未燃焼物質や CO、PM の排出を最小限に抑えることができる。

#### NO<sub>x</sub> 排出制御：

NO<sub>x</sub> の生成は燃焼温度に関連しているため、速度に合わせた水素供給調整は NO<sub>x</sub> 排出を制御するのに役立つことである。低速走行時に NO<sub>x</sub> の生成を最小限にし、高速走行時にはより効果的な NO<sub>x</sub> 対策を行うことが可能である。

#### 燃費最適化：

速度に合わせた水素供給制御は、燃料消費効率を向上させる助けとなる。エンジンの負荷に応じて最適な水素供給を行うことで、燃費が最大化される。

#### エンジンの対応性向上：

走行速度に合わせた水素供給制御は、エンジンの対応性を向上させる。急速なアクセル操作や坂道の登りなど、異なる運転条件に迅速に適應できるため、運転性能が向上する。

ただし、このアプローチにはいくつかの課題も存在する。例えば、水素供給の制御は高度なセンサー技術と制御システムを必要とし、実装が複雑にな

る可能性がある。また、エンジンの動作条件に応じた最適な制御アルゴリズムを開発する必要がある。

総括的に言えば、走行速度に合わせて水素供給を制御するアプローチは、エンジンの効率を向上させ、排出物を最小限に抑えるための有望な方法である。しかし、技術的な課題を克服する必要があり、研究と開発が進められるのである。

最終的に、この研究の成果は水素混合燃焼ディーゼル車が環境への負荷を軽減する重要な技術であることを示唆している。エネルギー効率の向上と排出物の削減を両立させるアプローチとして、水素混合燃焼ディーゼル車は今後の自動車産業において大きな影響を持つ可能性がある。しかし、技術的な課題や経済的側面も考慮する必要があり、これらの側面にも焦点を当てた研究や開発が不可欠である。

既存のディーゼルエンジンに水素添加燃料を使用するシステム導入では経済的に大きな投資が必要ではなく簡便に行えるメリットがある。さらにディーゼルエンジンはその寿命が長く水素添加仕様に改造したのちに使用できる期間が長いことあげられる。今後続く化石燃料の高騰と水素燃料の価格の低下のバランスでその普及効果は大きく異なる。経済的に未成熟な東南アジアの発展途上国などでは環境対策と経済対策をセットで議論できるポテンシャルを有している。

総じて、この研究は、水素混合燃焼ディーゼル車が環境とエネルギーの両面で有益であることを示す重要な一歩であり、持続可能な未来に向けた展望

を提供している。今後の研究により、実際の実用化に向けた障壁を乗り越えるための洞察が得られることである。

## 謝 辞

この論文の完成にあたり、多くの方々からのご支援とご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

まず、私の指導教員である梶井先生に深く感謝いたします。梶井先生の専門的な知識と的確な指導のもと、研究を進めることができました。そして、熱心なご指導により、研究の方法論から結果の分析までを深く理解する機会を与えていただきました。

特に感謝したいのは、実験の開始から論文の投稿まで一貫して献身的に助け、指導してくれた坂本先生です。彼の豊富な専門知識と鋭い判断力・分析能力のおかげで、この実験は順調に完了し、論文も無事に掲載されました。再度、感謝の意を表します。

また、本実験に HHO ガス発生装置を提供してくれた製造業者や、実験に関与してくれた友人たちにも感謝します。梶井研究室の皆様にも感謝の意を表します。共に議論を重ね、アイデアを交換する中で、研究の質が向上しました。特に皆様からの貴重な助言は、本研究の進行に非常に役立てました。

また、研究に関するデータ収集や実験に協力していただいた松木様、近藤様にも深く感謝申し上げます。彼らの協力がなければ、この研究は進めることが難しかったでしょう。

さらに、私の家族や友人たちにも感謝の意を表します。彼らの応援と励ましに支えられ、研究を続けることができました。

最後に、この研究を支えていただいたすべての方々への深い感謝を込めて、謝辞を締めくくらせていただきます。皆様のご協力なくして、この論文の完成はあり得ませんでした。

## 参考文献

1. Kovač, A.; Paramos, M.; Marciuš, D. Hydrogen in energy transition: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 10016–10035. [CrossRef]
2. Elam, C.C.; Padró, C.E.G.; Sandrock, G.; Luzzi, A.; Lindblad, P.; Hagen, E.F. Realizing the hydrogen future: The International Energy Agency's efforts to advance hydrogen energy technologies. *Int. J. Hydrogen Energy* 2003, 28, 601–607. [CrossRef]
3. Frantzis, C.; Zannis, T.; Savva, P.G.; Yfantis, E.A. A review on experimental studies investigating the effect of hydrogen supplementation in CI diesel engines—The case of HYMAR. *Energies* 2022, 15, 5709. [CrossRef]
4. Stępień, Z. A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges. *Energies* 2021, 14, 6504. [CrossRef]
5. Wróbel, K.; Wróbel, J.; Tokarz, W.; Lach, J.; Podsadni, K.; Czerwiński, A. Hydrogen internal combustion engine Vehicles: A review. *Energies* 2022, 15, 8937. [CrossRef]
6. Jhang, S.-R.; Chen, K.-S.; Lin, S.-L.; Lin, Y.-C.; Cheng, W.L. Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions. *Fuel* 2016, 172, 89–95. [CrossRef]

7. Pundir, B.P.; Kumar, R. Combustion and smoke emission studies on a hydrogen fuel supplemented DI diesel engine. SAE Trans. 2007, 116, 48–54.

8. Masood, M.; Mehdi, S.N.; Ram Reddy, P. Experimental investigations on a hydrogen-diesel dual fuel engine at different compression ratios. J. Eng. Gas Turbines Power 2007, 129, 572–578. [CrossRef]

9. Karagöz, Y.; Sandalcı, T.; Yüksek, L.; Dalkılıç, A.S. Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads. Int. J. Hydrogen Energy 2015, 40, 6702–6713. [CrossRef]

10. Dimitriou, P.; Kumar, M.; Tsujimura, T.; Suzuki, Y. Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine. Int. J. Hydrogen Energy 2018, 43, 13605–13617. [CrossRef]

11. Yilmaz, I.T.; Demir, A.; Gumus, M. Effects of hydrogen enrichment on combustion characteristics of a CI engine. Int. J. Hydrogen Energy 2017, 42, 10536–10546. [CrossRef]

12. Sharma, P.; Dhar, A. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions. Int. J. Hydrogen Energy 2018, 43, 7570–7580. [CrossRef]



13. Talibi, M.; Hellier, P.; Morgan, R.; Lenartowicz, C.; Ladommatos, N. Hydrogen-diesel fuel co-combustion strategies in light duty and heavy duty CI engines. *Int. J. Hydrogen Energy* 2018, 43, 9046–9058. [CrossRef]
14. Juknelevičius, R.; Rimkus, A.; Pukalskas, S.; Matijošius, J. Research of performance and emission indicators of the compression- ignition engine powered by hydrogen—Diesel mixtures. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44, 10129–10138. [CrossRef]
15. Shin, B.; Cho, Y.; Han, D.; Song, S.; Min Chun, K. Investigation of the effects of hydrogen on cylinder pressure in a split-injection diesel engine at heavy EGR. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011, 36, 13158–13170. [CrossRef]
16. Wu, H.-W.; Wu, Z.-Y. Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel/hydrogen mixtures by using energy- share method in a diesel engine. *Appl. Therm. Eng.* 2012, 42, 154–162. [CrossRef]
17. Kumar Bose, P.; Banerjee, R. An experimental investigation on the role of hydrogen in the emission reduction and performance trade-off studies in an existing diesel engine operating in dual fuel mode under exhaust gas recirculation. *J. Energy Resour. Technol.* 2012, 134, 012601. [CrossRef]

18. Sarjovaara, T.; Larmi, M. Dual fuel diesel combustion with an E85 ethanol/gasoline blend. *Fuel* 2015, 139, 704–714. [CrossRef]
19. Dimitriou, P.; Tsujimura, T.; Suzuki, Y. Low-load hydrogen-diesel dual-fuel engine operation—A combustion efficiency im-
20. Yilmaz, I.T.; Gumus, M. Effects of hydrogen addition to the intake air on performance and emissions of common rail diesel engine. *Energy* 2018, 142, 1104–1113. [CrossRef]
21. Karagöz, Y.; Sandalcı, T.; Yüksek, L.; Dalkılıç, A.S.; Wongwises, S. Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines. *Adv. Mech. Eng.* 2016, 8, 1–13. [CrossRef]
22. Talibi, M.; Hellier, P.; Balachandran, R.; Ladommatos, N. Effect of hydrogen-diesel fuel co-combustion on exhaust emissions with verification using an in-cylinder gas sampling technique. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014, 39, 15088–15102. [CrossRef]
23. Bakar, R.A.; Widudo, K.K.; Kadirgama, K.; Ramasamy, D.; Yusaf, T.; Kamarulzaman, M.K.; Sivaraos; Aslfattahi, N.; Samylingam, L.; Alwayzy, S.H. Experimental analysis on the performance, combustion/emission characteristics of a DI diesel engine using hydrogen in dual fuel mode. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2022; in press. [CrossRef]

24. Nakashima, Y.; Kamei, N.; Kobayashi, S.; Kajii, Y. Total OH reactivity and VOC analyses for gasoline vehicular exhaust with a chassis dynamometer. *Atmos. Environ.* 2010, 44, 468–475. [CrossRef]
25. Sherman, G.; Singh, A.P. Fuel efficiency and emissions reduction of hydroxy added gasoline fuel using HydroBoost technology. *Int. J. Hydrogen Energy* 2023, 48, 14511–14526. [CrossRef]
26. Subramanian, B.; Thangavel, V. Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel- hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020, 45, 25479–25492. [CrossRef]
27. Sekimoto, K.; Inomata, S.; Tanimoto, H.; Fushimi, A.; Fujitani, Y.; Sato, K.; Yamada, H. Characterization of nitromethane emission from automotive exhaust. *Atmos. Environ.* 2013, 81, 523–531. [CrossRef]
28. Sakamoto, Y.; Shoji, K.; Bui, M.T.; Phạm, T.H.; Vu, T.A.; Ly, B.T.; Kajii, Y. Air quality study in Hanoi, Vietnam in 2015–2016 based on a one-year observation of NO<sub>x</sub>, OCO and a one-week observation of VOCs. *Atmos. Pollut. Res.* 2018, 9, 544–551. [CrossRef]

29. Miyoshi, A. KUCRS Software Library, Revision 20110107m14. Available online: <http://akrmys.com/KUCRS/> (accessed on 11 June 2018).
30. Yasunaga, K.; Etoh, S.; Yamada, H.; Oshita, H.; Hidaka, Y. Modeling and experimental study on pyrolysis of isooctane and n-heptane behind reflected shock waves. *Chem. Lett.* 2018, 47, 747–750. [CrossRef]
31. NIST. Chemistry WebBook. In NIST Standard Reference Database Number 69. Gaithersburg MD, 20899; Linstrom, P.J., Mallard, W.G., Eds.; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2023.
32. Goodwin, D.G.; Moffat, H.K.; Speth, R.L. Cantera: An Object-Oriented Software Toolkit for Chemical Kinetics, Thermodynamics, and Transport Processes, Version 2.1.1; Caltech: Pasadena, CA, USA, 2014.
33. EDMC/エネルギー・経済統計要覧 2022 年版
34. 出典：国土交通省ウェブサイト  
([https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html))

35. 出典：全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト  
(<http://www.jccca.org/>)

2)全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト  
(<http://www.jccca.org/>) より引用「すぐ使える図表集」の 3-01 世界  
二氧化碳排放量(2020 年)

36. #<sup>1</sup>Shashikant Jadhav, #<sup>2</sup>Darshan Gabhane,#<sup>3</sup>Prof. S.S.Deshmukh ;Investigating the Effect of Oxy- Hydrogen (HHO) gas and Gasoline Blend Addition on the Performance of Constant Speed Internal Combustion Engines. International Engineering Research Journal (IERJ), Special Issue Page 26-31, ISSN 2395-1621

37. Pranav Pawar<sup>1</sup>, Pratik Baheti<sup>2</sup>, Swapnil Darade<sup>3</sup>, P. D. Menghani<sup>4</sup> ; Performance Analysis of Gasoline Engine by Addition of HHO Gas as a Secondary FuelInternational Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIIME 2017) ISSN: 2321-8169 Volume: 5 Issue: 6 862 – 869

38. Anil Kumar Dhariwal, Ashish Nayyar, Dinesh Kumar Sharma; Utilization of HHO gas with Diesel fuel in stationary compression Ignition Engine ;SKIT RESEARCH JOURNAL VOLUME 8; ISSUE 1: 2018

39. Ghulam Abbas Gohar\* and Hassan Raza; Comparative Analysis of Performance Characteristics of CI Engine with and

without HHO Gas (Brown Gas) ;Gohar and Raza, Adv Automob Eng  
2017, 6:4 DOI: 10.4172/2167-7670.1000172

40. Balaji Subramanian, Venugopal Thangavel<sup>\*</sup> ; Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel- Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine ;International Journal of Hydrogen Energy Volume 45, Issue 46, 21 September 2020, Pages 25479-25492

41. Pushpendra Kumar Sharma, Dilip Sharma, Shyam Lal Soni, Amit Jhalani<sup>\*</sup> , Digambar Singh, Sumit Sharma; Characterization of the hydroxy fueled compression ignition engine under dual fuel mode: Experimental and numerical simulation ; International Journal of Hydrogen Energy Volume 45, Issue 15, 18 March 2020, Pages 8067-8081

42. Jami Paparao<sup>\*</sup> , S. Murugan ;Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxygen (HHO) gas; International Journal of Hydrogen Energy Volume 47, Issue 40, 8 May 2022, Pages 17788-17807

43. Suja Thangaraj<sup>1</sup> & Nagarajan Govindan<sup>2</sup> ; Investigating the pros and cons of brown gas and varying EGR on combustion, performance, and emission characteristics of diesel engine Environ

Sci Pollut Res (2018) 25:422–435 <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0369-4>

44. Balaji Subramanian, Saleel Ismail; Production and use of HHO gas in IC engines; International Journal of Hydrogen Energy; Volume 43, Issue 14, 5 April 2018, Pages 7140-7154

45. Suja Thangaraj <sup>a,\*</sup>, Nagarajan Govindan <sup>b</sup>; Evaluating combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using karanja oil methyl ester biodiesel blends enriched with HHO gas; International Journal of Hydrogen Energy Volume 43, Issue 12, 22 March 2018, Pages 6443-6455

46. Piotr Jaklinski, Jacek Czarnigowski <sup>\*</sup>; An experimental investigation of the impact of added HHO gas on automotive emissions under idle conditions; International Journal of Hydrogen Energy Volume 45, Issue 23, 28 April 2020, Pages 13119-13128

47. Author [links](#) [open overlay panel](#) Alfredas Rimkus <sup>a b</sup>, Jonas Matijošius <sup>a</sup>, Marijonas Bogdevičius <sup>c</sup>, Ákos Bereczky <sup>d</sup>, Ádám Török <sup>e</sup>; An investigation of the efficiency of using O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> (hydroxyl gas -HHO) gas additives in a ci engine; Energy Volume 152, 1 June 2018, Pages 640-651 operating on diesel fuel and biodiesel

48. Ali Can Yilmaz, Erinc , Uludamar, Kadir Aydin\* ; Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions

in compression ignition engines; International Journal of Hydrogen Energy; Volume 35, Issue 20, October 2010, Pages 11366-11372

49. Ghulam Abbas Gohar\* and Hassan Raza; Comparative Analysis of Performance Characteristics of CI Engine with and without HHO Gas (Brown Gas) ; Advances in Automobile Engineering Gohar and Raza, Adv Automob Eng 2017, 6:4

50. JAERO 一般財団法人日本原子力文化財団 (エネ百科) 原子力・エネルギー図面集.第2章 地球規模の環境問題. [2-1-04] 全球二酸化炭素排出量趨勢

51.自動車産業を取り巻くカーボンニュートラル対応の動向 戦略コンサルティング部 Auto Sector コンサルティング室 室長 石倉 拓史 出所：三菱UFJリサーチ&コンサルティング

52.出典：全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト (<http://www.jccca.org/>) より引用「すぐ使える図表集」の4-03 日本の二酸化炭素排出量の推移 (1990-2021 年度)