

希釈燃焼エンジンにおける
点火エネルギーの時間配分制御

2022年 3月

大畠 英一郎

希釈燃焼エンジンにおける
点火エネルギーの時間配分制御

大島 英一郎

理工情報生命学術院
システム情報工学研究群
筑波大学

2022年 3月

論文概要

本論文は、希釈燃焼ガソリンエンジンの着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火用電極チップの消耗低減と点火の省エネルギー化の両立を、研究目的とする。

CO₂削減要求の増大が見込まれる社会背景において、運輸部門は他産業と比べて高い排出割合を今後も占める見込みである。そのため、ガソリンエンジンの燃費低減が求められている。そのための一般的な対策技術として、圧縮比の増大による熱効率の向上が有効である。

しかし、圧縮比増大によりノッキング等の異常燃焼や、NO_x等の排気増大が生じる。そのため、燃費と排気間にトレードオフが生じる。このトレードオフを解消する対策技術の一つに、希釈燃焼がある。希釈燃焼により、燃費と排気を同時に低減できる。しかし、希釈率の増大により、燃料混合気の点火性能が低下して、失火が生じる。そのため、燃費と失火間に新たなトレードオフが生じる。このトレードオフを解消する対策技術の一つに、筒内ガス流動強化と高エネルギー点火がある。これらの対策技術を組み合わせた状態における実用性を確認するため、「高圧縮比」「高希釈率」「筒内ガス高流動」「高エネルギー点火」を適用した対策エンジンを実機評価した結果、新たな副作用を2つ確認した。

副作用の1つ目は、点火プラグ電極の消耗増大による耐久性低下である。耐久性低下により、自動車寿命の低下や交換部品の増大が生じる。これはライフサイクルアセスメント(LCA)の観点において、CO₂排出量の増大要因である。そのため、上記対策エンジンにおける点火プラグ電極の消耗要因を解明した上で、新たな対策技術を考案して効果を検証した。その結果、以下の結論を得た。(1)放電の低電流期間を短くすることで、再放電回数を低減できる。(2)再放電回数を低減することで、電極チップの消耗体積を低減できる。(3)放電エネルギーの時間配分制御により、再放電回数を従来比で半減し、同時に燃焼安定性を向上した。

副作用の2つ目は、点火コイルの消費エネルギー増大による電費増大である。電費増大により、エンジンの発電負荷が増大するため、正味燃費は低下する。この正味燃費の低下は、CO₂排出量の増大要因である。そのため、上記対策エンジンにおける点火コイルのエネルギー出力特性と点火性能の関係を数値計算により解明した上で、対策技術を考案して効果を検証した。その結果、以下の結論を得た。(1)火炎核成長を阻害しない、電力需給差削減コンセプトを提案した。(2)電力需給差削減のため、能動式コイルを追加した点火コイルを試作し、点火エネルギーの時間配分制御を可能とした。(3)点火エネルギーの時間配分制御により、点火の省エネルギー化と着火性を両立し、正味燃費改善の見通しを得た。

本研究の結果から、「高圧縮比」「高希釈率」「筒内ガス高流動」「高エネルギー点火」を適用したガソリンエンジンへ、点火エネルギーの時間配分制御を適用することにより、「燃費」「排気」「耐久性」間のトレードオフを解消できる可能性があることが示唆される。

目次

目次.....	1
図の目次.....	4
表の目次.....	9
略号.....	10
記号.....	12
第1章 背景.....	15
1.1. エンジンの社会課題.....	15
1.1.1. 気候変動の増大.....	15
1.1.2. CO ₂ 排出量の増大.....	16
1.1.3. CO ₂ 排出量の抑制手段.....	19
1.1.4. CO ₂ 排出量抑制の問題.....	22
1.1.5. 自動車の課題.....	25
1.1.6. エンジンの課題.....	27
1.2. ガソリンエンジン.....	30
1.2.1. ガソリンエンジンの構成.....	30
1.2.2. 火花点火.....	31
1.2.3. 放電中の電圧遷移.....	32
1.2.4. 放電中の電流遷移.....	33
1.2.5. アーク放電とグロー放電の特徴.....	34
1.2.6. 点火と燃焼.....	34
1.3. 希釈燃焼の作用.....	37
1.3.1. 理論熱効率の向上による燃費低減.....	38
1.3.2. ポンプ損失の低減による燃費低減.....	38
1.3.3. 冷却損失の低減による燃費低減.....	39
1.3.4. 燃焼温度低下による排気低減.....	39
1.4. 希釈燃焼の課題.....	40
1.4.1. 希釈燃焼の先行研究.....	40
1.4.2. 着火性改善策.....	41
1.4.3. SI の先行研究例.....	44
1.4.4. 乱流強化と点火強化.....	45
1.4.5. 点火の高電流化.....	46
1.4.6. 点火の現象解明.....	47

1.4.7. 点火強化の副作用.....	49
1.5. 希釈燃焼の副作用.....	50
1.5.1. 耐久性低下の抑制.....	50
1.5.2. 電費増大の抑制.....	51
1.6. 本論文の構成.....	53
1.7. 章のまとめ.....	53
第2章 耐久性低下の抑制技術.....	54
2.1. 調査.....	54
2.1.1. 消耗要因.....	54
2.1.2. 電極材料.....	54
2.1.3. 浸食メカニズムの仮説.....	55
2.1.4. 浸食現象の観察.....	55
2.1.5. 浸食現象の見積.....	56
2.1.6. 浸食現象の影響因子.....	57
2.1.7. 放電の耐久性評価.....	58
2.1.8. 電極消耗の抑制方法.....	59
2.1.9. エンジンにおける電極消耗.....	59
2.1.10. 容量放電.....	61
2.1.11. 容量放電回数.....	62
2.1.12. 再放電.....	63
2.1.13. 対策.....	65
2.2. 試験方法と試験装置.....	67
2.2.1. 試験方法.....	67
2.2.2. 試験エンジン.....	67
2.2.3. 筒内流速の向上策.....	68
2.2.4. 点火デバイス.....	71
2.2.5. 電極消耗抑制効果の検証方法.....	71
2.2.6. CT 撮像データ解析.....	72
2.2.7. 消耗体積の算出方法.....	74
2.2.8. 解析範囲の分割.....	74
2.2.9. 計測項目.....	76
2.2.10. 試験装置.....	77
2.2.11. 収録波形の確認.....	79
2.3. 試験結果および考察.....	84
2.3.1. 再放電回数抑制効果の検証結果.....	84

2.3.2. 放電仕様.....	85
2.3.3. 電極の外観変化.....	91
2.3.4. CT 撮像結果.....	98
2.3.5. 消耗体積評価.....	99
2.3.6. 電極消耗抑制効果の検証結果.....	105
2.3.7. 考察.....	108
2.4. 章のまとめ.....	111
第3章 電費増大の抑制技術.....	112
3.1. 調査.....	112
3.1.1. 供給電力増強コンセプト.....	112
3.1.2. 効果の見積り.....	113
3.2. 解決策.....	120
3.2.1. 試作した点火コイルの構成.....	120
3.2.2. 試作した点火コイルの動作原理.....	120
3.2.3. 試作点火コイルの動作確認結果.....	120
3.2.4. 試作点火コイルの変電効率.....	120
3.3. 試験方法と試験装置.....	123
3.3.1. 試験方法.....	123
3.3.2. 試験エンジン.....	123
3.3.3. 筒内流速の向上策.....	123
3.3.4. 点火デバイス.....	124
3.3.5. 効果検証方法.....	124
3.3.6. 実験装置.....	124
3.4. 試験結果および考察.....	125
3.4.1. 実験結果.....	125
3.4.2. 考察.....	130
3.5. 章のまとめ.....	132
第4章 結言.....	133
謝辞.....	134
参考文献.....	135
研究業績.....	154

図の目次

図 1-1 SDGs（持続可能な開発目標） [1].....	15
図 1-2 気候変動の例 [4].....	16
図 1-3 GHG 排出量の遷移 [5].....	17
図 1-4 温室効果影響の内訳 [6].....	17
図 1-5 地球公転軌道等と気温の関係 [7].....	18
図 1-6 モデルによる CO ₂ 濃度推定 [7].....	18
図 1-7 CO ₂ 排出量の抑制手段 [8].....	19
図 1-8 CO ₂ 排出量削減シナリオ（燃料種別） [9].....	20
図 1-9 CO ₂ 排出量削減シナリオ（消費用途別） [9].....	20
図 1-10 自動車の評価対象範囲 [10].....	21
図 1-11 CO ₂ 排出量の分類 [5].....	21
図 1-12 輸送機器別（過去実績） [5].....	21
図 1-13 輸送機器別（将来目標） [9].....	22
図 1-14 輸送機器と燃料種の関係 [11].....	22
図 1-15 乗用車の販売台数予測 [2].....	23
図 1-16 エネルギー構成シナリオ [9].....	23
図 1-17 従来政策による車種構成 [12].....	24
図 1-18 適度な政策による車種構成 [12].....	24
図 1-19 自動車の利用エネルギーごとの費用 [11].....	24
図 1-20 WTW CO ₂ 排出量と航続距離 [11].....	25
図 1-21 自動車販売台数予測（4°C未満目標と改善案） [11].....	26
図 1-22 WTW CO ₂ 排出量削減効果 [17].....	26
図 1-23 TTW CO ₂ 排出量削減効果 [17].....	26
図 1-24 WTW CO ₂ 排出量推計（政策積み上げ） [18].....	27
図 1-25 WTW CO ₂ 排出量推計（輸送機器別） [18].....	27
図 1-26 国別の CO ₂ 排出量 [19].....	28
図 1-27 国別の燃費規制 [2].....	28
図 1-28 CO ₂ 排出量規制値 [20].....	29
図 1-29 燃費規制値 [20].....	29
図 1-30 ガソリンエンジンの構成例.....	30
図 1-31 火花点火現象の概要.....	31
図 1-32 グロー放電中における火花の放電経路外観例 [24].....	32

図 1-33 放電中の電圧遷移 [25].....	33
図 1-34 放電中の電流遷移 [27].....	33
図 1-35 圧縮比と熱効率の関係	35
図 1-36 ガス温度と NO ₂ 生成量の関係 [33].....	35
図 1-37 日本国内における NO _x 排出規制値の遷移	36
図 1-38 正常燃焼時の圧力波形例	36
図 1-39 ノッキング時の圧力波形例	36
図 1-40 希釈率と燃焼温度の関係 [45].....	38
図 1-41 希釈率と NO _x の関係 [46]	38
図 1-42 希釈率と比熱比の関係	38
図 1-43 比熱比と熱効率の関係	38
図 1-44 熱収支の例 (負荷 50[%]) [49] [50] [51]	39
図 1-45 ポンプ損失の概要	39
図 1-46 伝熱量と温度の関係 [53].....	40
図 1-47 希釈率と NO _x 生成量の関係 [54]	40
図 1-48 希釈率と最少点火エネルギーの関係 [55].....	41
図 1-49 希釈率と燃焼速度の関係 [55].....	41
図 1-50 HCCI の燃焼コンセプト [61]	42
図 1-51 燃費低減技術の進化 [62].....	42
図 1-52 SPCCI の燃焼コンセプト [67].....	43
図 1-53 通常点火と副室点火の比較 [68].....	44
図 1-54 副室構造 (水冷式) [68].....	44
図 1-55 副室構造 (点火プラグ 2 個) [71].....	44
図 1-56 希釈燃焼への流動と点火エネルギーの影響 [72].....	45
図 1-57 点火エネルギーと着火性の関係 [101].....	46
図 1-58 リーン限界拡大に必要な点火技術・流動強化策 [109].....	47
図 1-59 点火強化システムの例 [109].....	47
図 1-60 高速 PIV システムの概略 [109]	48
図 1-61 点火モデルの概要 [121].....	48
図 1-62 点火コイルの回路モデル [122].....	49
図 1-63 火炎核成長モデル [122].....	49
図 1-64 耐久評価における点火電極の外観例	50
図 1-65 正味燃料消費率と点火に要する燃料消費率 [101].....	50
図 1-66 定常運転における図示平均有効圧力 IMEP の測定例.....	52
図 1-67 サイクル C の放電電力 W ₂ 波形例.....	52

図 1-68 サイクル D の放電電力 W_2 波形例.....	52
図 2-1 液滴排出モードの模式図 [28].....	56
図 2-2 単発放電によるクレータの SEM 写真 [27].....	56
図 2-3 電極消耗と環境温度の関係 [23].....	57
図 2-4 電極消耗と電極表面積の関係 [23].....	57
図 2-5 電極消耗と環境圧力の関係 [23].....	58
図 2-6 電極消耗と点火電圧の関係 [23].....	58
図 2-7 高温高圧の点火試験装置 [28].....	59
図 2-8 分子逆反射の模式図 [23].....	59
図 2-9 Ni 電極の高エネルギー放電試験例	60
図 2-10 点火エネルギー電極消耗の関係 [151].....	60
図 2-11 高エネルギー点火試験装置の構成.....	60
図 2-12 電極消耗体積[fl] (femto litre)	61
図 2-13 風洞実験による再放電の波形例	62
図 2-14 風洞試験装置の構成	63
図 2-15 放電中における電力不足期間を表す模式図	64
図 2-16 試作した点火コイルの構成仕様	65
図 2-17 点火コイルの動作を表すタイミングチャート	66
図 2-18 点火コイル試作品を動作させた結果の I_2 波形例.....	67
図 2-19 吸気ポートの流速向上デバイス (SCE)	68
図 2-20 点火電極間における流速の見積もり (SCE)	69
図 2-21 吸気ポートの流速向上デバイス (MCE)	69
図 2-22 点火電極間における流速の見積もり (MCE)	70
図 2-23 吸気行程の筒内流動 (ノズルアダプタ無し)	70
図 2-24 吸気行程の筒内流動 (ノズルアダプタ有り)	70
図 2-25 点火時期の筒内流動 (ノズルアダプタ無し)	71
図 2-26 点火時期の筒内流動 (ノズルアダプタ有り)	71
図 2-27 CT 撮像装置の概観	72
図 2-28 ヒストグラムと電極チップ面定義情報	73
図 2-29 ヒストグラムと接地電極母材面定義情報	73
図 2-30 点火プラグ電極部の CT 撮像例	74
図 2-31 電極消耗前の形状例	74
図 2-32 電極消耗後の形状例	74
図 2-33 電極消耗分	74
図 2-34 解析範囲の分割	75

図 2-35 解析範囲の寸法設定結果	76
図 2-36 構築した試験装置	78
図 2-37 FPGA 制御装置操作画面例	78
図 2-38 収録装置操作画面例	79
図 2-39 筒内圧力の波形例	81
図 2-40 I_1+I_3 の波形例	82
図 2-41 再放電回数の波形例	83
図 2-42 再放電回数 (SCE)	84
図 2-43 #F の再放電回数	90
図 2-44 #H の再放電回数	90
図 2-45 #N の再放電回数	90
図 2-46 #D の再放電回数	90
図 2-47 放電仕様ごとの再放電回数平均値	90
図 2-48 #F の CT 撮像結果	98
図 2-49 #H の CT 撮像結果	98
図 2-50 #N の CT 撮像結果	98
図 2-51 #D の CT 撮像結果	98
図 2-52 撮像範囲全体の容積遷移	104
図 2-53 接地電極母材の容積遷移	104
図 2-54 接地電極チップの容積遷移	104
図 2-55 中心電極チップの容積遷移	104
図 2-56 撮像範囲全体の容積変化	105
図 2-57 解析部位ごとの容積変化	105
図 2-58 チップ電極の体積変化	105
図 2-59 新品状態	106
図 2-60 150[hour]経過後	106
図 2-61 評価範囲	106
図 2-62 中心電極チップの容積遷移 (見直し後)	106
図 2-63 チップ電極の体積変化	107
図 2-64 チップ電極の体積変化 (合計)	107
図 2-65 燃焼安定性	108
図 2-66 点火コイルの消費エネルギー	108
図 2-67 再放電回数と電極消耗体積間の回帰分析	109
図 2-68 点火コイルの消費エネルギーと電極消耗体積の関係	110
図 2-69 電極消耗体積と燃焼安定性の関係	110

図 2-70 点火コイルの消費エネルギーと燃焼安定性の関係	111
図 3-1 放電経路モデル	114
図 3-2 2次電流の推定	116
図 3-3 2次電力の推定	116
図 3-4 放電経路長さの推定	117
図 3-5 放電エネルギーのガスへの伝達割合	119
図 3-6 火炎核体積の推定結果	119
図 3-7 点火コイル試作品を動作させた結果の W_2 波形例.....	122
図 3-8 点火コイルの変電効率	122
図 3-9 燃焼サイクルごとの θ_{IG-10}	125
図 3-10 θ_{IG-10} の平均値	126
図 3-11 燃焼サイクルごとの IMEP	126
図 3-12 1次エネルギーに対する燃焼安定性の評価	131
図 3-13 2次エネルギーに対する燃焼安定性の評価	131
図 3-14 点火コイル温度評価	132

表の目次

表 1-1 点火強化のためのコイル仕様 [101].....	46
表 2-1 Data on Physical Properties and Erosion [157]	55
表 2-2 電極消耗要因	61
表 2-3 試験用エンジンの仕様	68
表 2-4 試験用エンジンの運転条件	68
表 2-5 点火プラグの仕様	71
表 2-6 点火コイルの仕様	71
表 2-7 CT 撮像装置の仕様	72
表 2-8 CT 撮像装置の設定値	72
表 2-9 計測項目	77
表 2-10 MCE#1 気筒の放電仕様.....	86
表 2-11 MCE#2 気筒の放電仕様.....	87
表 2-12 MCE#3 気筒の放電仕様.....	88
表 2-13 MCE#4 気筒の放電仕様.....	89
表 2-14 中心電極チップ外観（正面）	92
表 2-15 中心電極チップ外観（吸気側）	93
表 2-16 中心電極チップ外観（排気側）	94
表 2-17 接地電極チップ外観（正面）	95
表 2-18 接地電極チップ外観（吸気側）	96
表 2-19 接地電極チップ外観（排気側）	97
表 2-20 CT 撮像の立体評価（#F）	100
表 2-21 CT 撮像の立体評価（#H）	101
表 2-22 CT 撮像の立体評価（#N）	102
表 2-23 CT 撮像の立体評価（#D）	103
表 3-1 電力需給関係の模式図	113
表 3-2 試験用エンジンの仕様	123
表 3-3 試験用エンジンの運転条件	123
表 3-4 Case1 実験結果（#N）	127
表 3-5 Case2 実験結果（#F）	128
表 3-6 Case3 実験結果（#H）	129

略号

略号	意味
#D	Double Ignition
#F	Full assist Ignition
#H	Half assist Ignition
#N	Not assist Ignition
AICE	The Research association of Automotive Internal Combustion Engines
BEV	Battery Electric Vehicle
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH ₄	Methane
CO	Carbon monoxide
CO ₂	Carbon dioxide
COV	Covariance
ECU	Electronic Control Unit
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EPA	Environmental Protection Agency
EV	Electric Vehicle
FEM	Finite Element Method
F-GASES	Fluorine Gas
FPGA	Field Programmable Gate Array
GFEI	Global Fuel Economy Initiative
GHG	Green House Gas
HC	Hydrocarbon
HCCI	Homogeneous Charged Compression Ignition
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HTA	Hyperbolic Tangent Approximation
ICCT	International Council on Clean Transportation
ICTT	International Certificate Testing Technology
IEA	International Energy Agency
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IMEP	Indicated Mean Effective Pressure

IPCC	International Council on Clean Transportation
IT	Injection Timing
LCA	Life Cycle Assessment
LNT	Lean NOX Trap
LP-EGR	Low Pressure EGR
MBT	Minimum spark advance for Best Torque
MCE	Multi Cylinder Engine
N ₂ O	Nitrous Oxide
NEDC	New European Driving Cycle
Ni	Nickel Alloy
NMOG	Non-Methane Organic Gas
NO _x	Nitrogen Oxide
PC	Personal Computer
PCI	Pre-Chamber Ignition
PM	Particulate Matter
PN	Particulate Number
SCE	Single Cylinder Engine
S/B	Bore Stroke ratio
SDGs	Sustainable Development Goals
SEM	Scanning Electron Microscope
SI	Spark Ignition
SILS	Software In the Loop Simulation
SPCCI	Spark Controlled Compression Ignition
TCV	Tumble Control Valve
TTW	Tank to Wheel
UN	United Nations
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WLTC	Worldwide harmonized Light-duty Test Cycle
WTT	Well to Tank
WTW	Well-to-Wheel

記号

記号	意味	単位	備考
#1	気筒番号 1		多気筒エンジン
#2	気筒番号 2		多気筒エンジン
#3	気筒番号 3		多気筒エンジン
#4	気筒番号 4		多気筒エンジン
A	原子量		
A/F	空燃比	-	混合気中の空気と燃料ガスの質量比
C	静電容量	F	
C_c	コイル特性定数	A/sec	
C_D	流速に対する放電経路の変化の追従性を示すモデル定数	-	
C_g	放電経路定数	-	=1
D	シリンダ直径	m	
E_1	1 次エネルギー	J	点火コイルの消費エネルギー
E_2	2 次エネルギー	J	電極を消耗させる容量放電エネルギー
E_3	3 次エネルギー	J	
F/A	燃空比	-	混合気中の燃料ガスと空気の質量比
I_1	1 次電流	A	
I_2	2 次電流	A	
I_2'	出力可能電流		
I_{2s}	初期電流	A	
I_3	3 次電流	A	
Q_{gap}	電極間へ形成される放電経路の発熱率	J/s	
REQ	放電経路の維持に必要な要求値		
T	熱伝導率		

T_M	金属の沸点	K	
V	電圧	V	有効放電電位差
V_1	1次電圧	V	
V_2	2次電圧	V	絶縁破壊に必要な要求電圧
V_3	3次電圧	V	
V_{gap}	電極間の電圧	V	
V_{max}	内燃室最大容積	m ³	
V_{min}	内燃室最少容積	m ³	
V_{rs}	再放電が発生する電極間の電圧	V	
W_1	1次電力	W	
W_2	2次電力	W	要求電力
W_2'	出力可能電力	W	
W_3	3次電力	W	
d_{gap}	電極間距離	m	電極間（中心電極と接地電極の間）の距離
h	比エンタルピ°	J/kg	
k	熱伝導率	-	
l_{spk}	放電経路長さ	m	
p	圧力	Pa	筒内圧力
p_0	大気圧	pa	
r	火炎核半径	m	
s	比熱	J/(kg·K)	
S_{DC}	初期火炎核の膨張速度	m	
s_T	乱流燃焼速度	m	
t	時間	s	放電開始からの経過時間，または，再放電後からの経過時間
u	比内部エネルギー	J/kg	
u_g	流速	m/sec	
u_{gap}	混合気の流速	m/s	
v	1回の放電で電極の金属が侵食される量，または蒸発量	m ³	

α	局所容量 C と放電条件の係数（電極で放出される全エネルギーのうち利用可能な割合）	-	
β	ステファン定数とホットスポットの面積を含む定数	-	
γ	金属中のエネルギーの熱伝導率に関連する幾何学的因子	-	
ε	圧縮比	-	
η	熱効率	-	
η_{eff}	放電エネルギーの伝達係数	-	
θ	クランク角度	rad	
θ_{IG-10}	放電開始から燃焼質量割合 10[%]へ至るまでのクランク角度	deg.	点火性能を評価するための一般的な指標
θ_{hs}	ホットスポットから離れた地点の定常温度	K	
κ	比熱比	-	
λ	空気過剰率	-	燃料に対して、理論量の何倍の空気が供給されたかを表す係数、=空燃比/理論空燃比
ρ	密度	kg/m ³	気体や金属
φ	当量比	-	空気に対して、理論量の何倍の燃料が供給されたかを表す係数、=理論空燃比/空燃比
ω	角速度	rad/sec	

第1章 背景

本論文は、希釈燃焼ガソリンエンジンの着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火用電極チップの消耗低減と点火の省エネルギー化の両立を、研究目的とする。この研究目的の背景を説明するため、社会課題を挙げた上で、エンジン技術による社会貢献についての検討結果を述べる。

1.1.エンジンの社会課題

1.1.1.気候変動の増大

持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）とは、2015年の国連総会において全会一致で採択された、17の世界的目標である（図 1-1）。SDGsには、法的拘束力や罰則は無いものの、世界各国が目標達成へ向けて推進している。日本においては、SDGs推進のための具体的対策法（SDGsアクションプラン2020）が策定されている。



図 1-1 SDGs（持続可能な開発目標） [1]

SDGsは、国連 [1]総会での全会一致へ向けた合意形成を得るため、先進国（目標 1～6）と途上国（目標 7～12）の要望や主張を寄せ集めた内容になっている。そのため、それぞれの目標間には、「環境と経済」「福祉と経済」「短期（緊急）と長期」など、トレードオフの関係になり易いものが混在しているが、優先順位は定められていない。そこで、

エンジンに関しては、Global Fuel Economy Initiative (GFEI) [2]が選定した目標7と目標13への技術的貢献が求められている。

目標7の内容は、「すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する」となっている。エンジンは主に化石燃料を消費して動作する機械である。BP [3]によると、化石燃料は限りある地球資源の一つであるため、消費抑制策が必要である。

目標13の内容は、「気候変動及びその影響を軽減するための緊急対策を講じる」となっている。この気候変動とは、平年の平均的な気候からの偏差という意味で用いられる。図1-2はエコライフ [4]による世界平均気温と世界平均海面上昇の遷移を示している。近年、気温と海面の上昇が観測されていることから、気候変動の軽減策が求められている。



図 1-2 気候変動の例 [4]

1.1.2. CO₂排出量の増大

目標13への対応として、パリ協定では世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く保ち、1.5[°C]に抑える努力をするという長期目標が掲げられた。気温上昇の要因である、温室効果ガス (GHG : greenhouse gas) には、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O)、フッ素化ガス (F-GASES) などがある。

図1-3はこれらの排出量の遷移を示しており、International Council on Clean Transportation (IPCC) [5]によれば温室効果ガスの排出量は増加を続けている。そして図1-4へは温室効果影響の内訳を示しており、United States Environmental Protection Agency (EPA) [6]によると温室効果ガスの中で最も多いものは、CO₂である。

Total Annual Anthropogenic GHG Emissions by Groups of Gases 1970- 2010

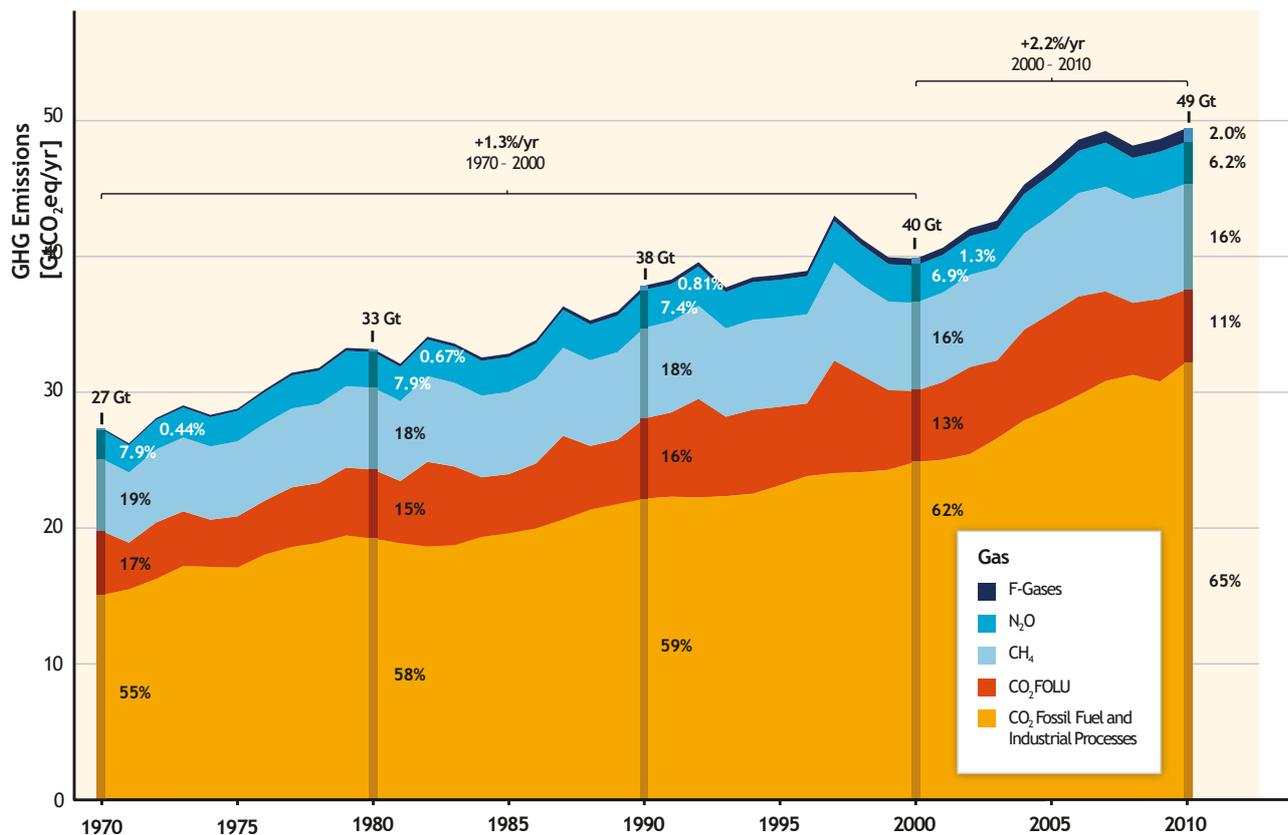


図 1-3 GHG 排出量の遷移 [5]

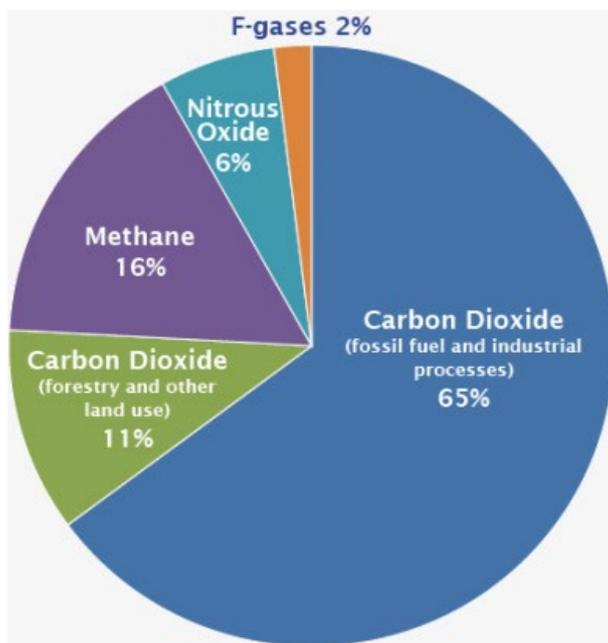


図 1-4 温室効果影響の内訳 [6]

しかし、気候変動と CO₂ の関係は十分に解明されているとは言えない。例えば、大嶋 [7] は図 1-5 へ示すように、気温の変動要因を地球公転軌道や太陽との距離などであると

する仮説を示している。その他にも、図 1-6 へ示すように、大気中の CO₂ 濃度が現在よりも過去の方が数倍から数十倍も高かったとする推計もある。

これらの仮説や推計を発表した大嶋 [7]によると、現在の地球温暖化対策は、二酸化炭素放出量削減だけが特効薬であると錯覚されているが、地球温暖化の環境影響評価の科学的な根拠はほとんど明らかにされていない。

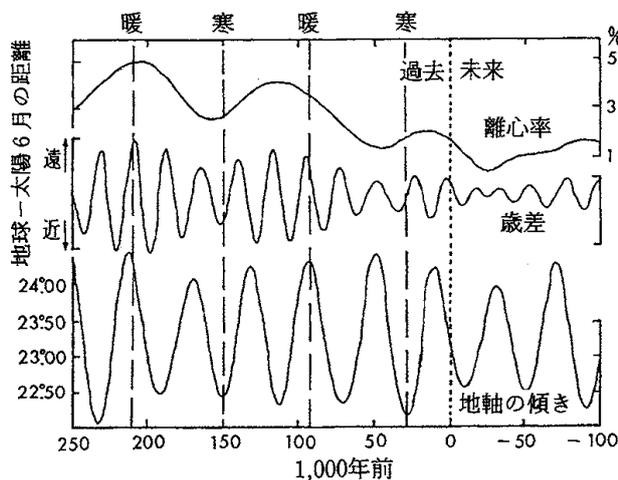


図 1-5 地球公転軌道等と気温の関係 [7]

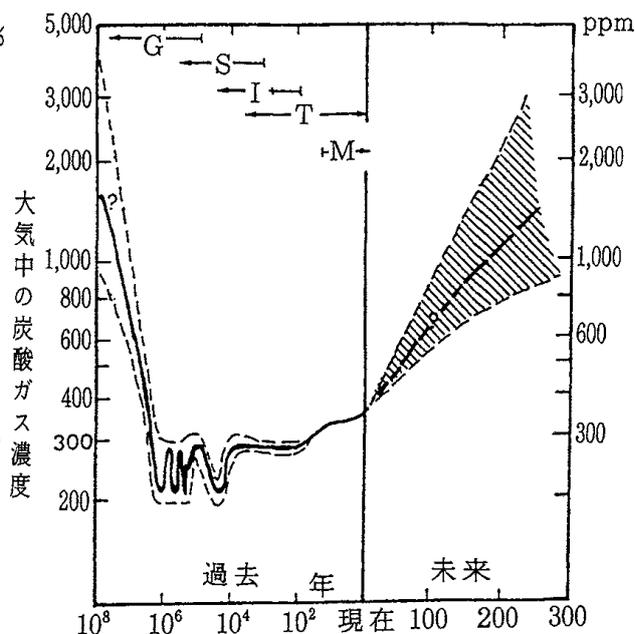


図 1-6 モデルによる CO₂ 濃度推定 [7]

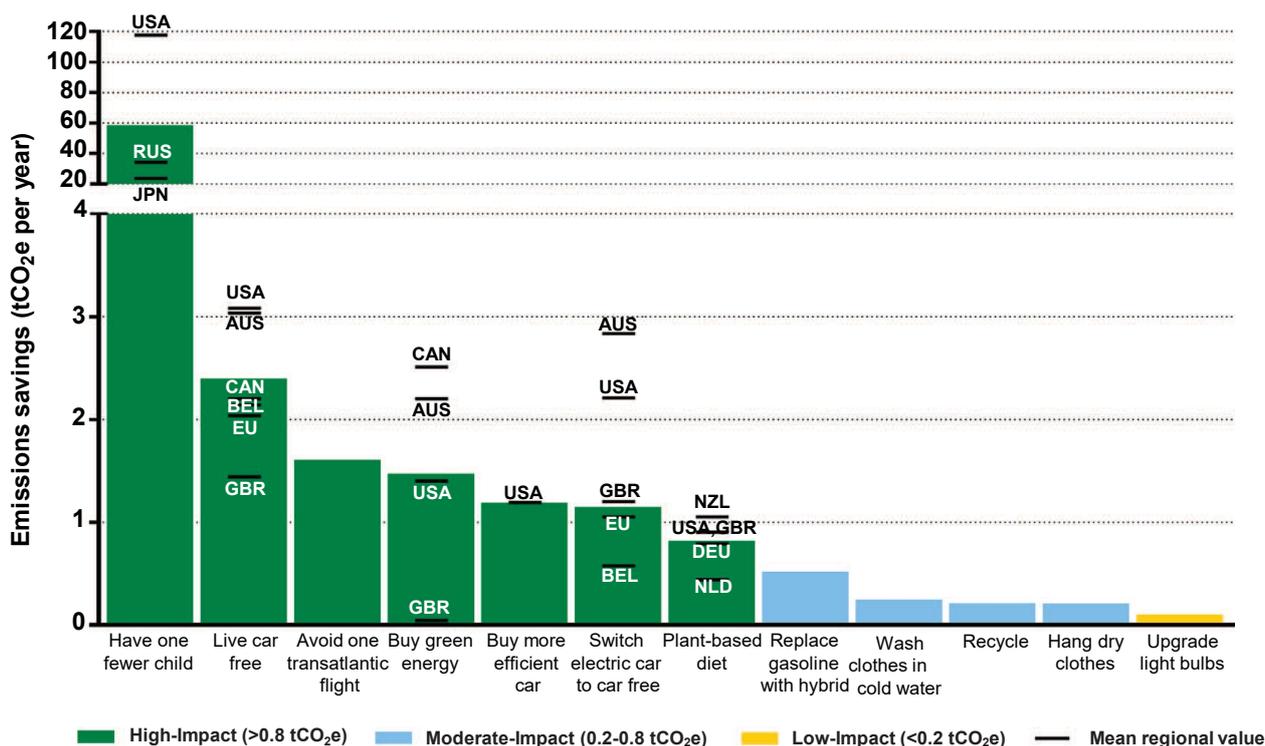
そしてさらに、地球温暖化には様々な利点が考えられる。例えば地球の極地付近においては、寒さによる死者数の減少、耕地拡大による食料問題の改善、北極海航路利用による物流効率化などの副作用が期待できる。

また、パリ協定の長期目標値は科学的な根拠に乏しく、非科学的な終末論やバーゲンバイアス、同調行動などを利用した悪用が懸念される。例えば、CO₂ 排出量削減のための投資を進めさせることで、将来の経済力を低下させるといったような、経済戦争への間接利用であるとも考えられる。

そのため SDGs については、目標 13 よりも目標 7 を優先すべきと考える。

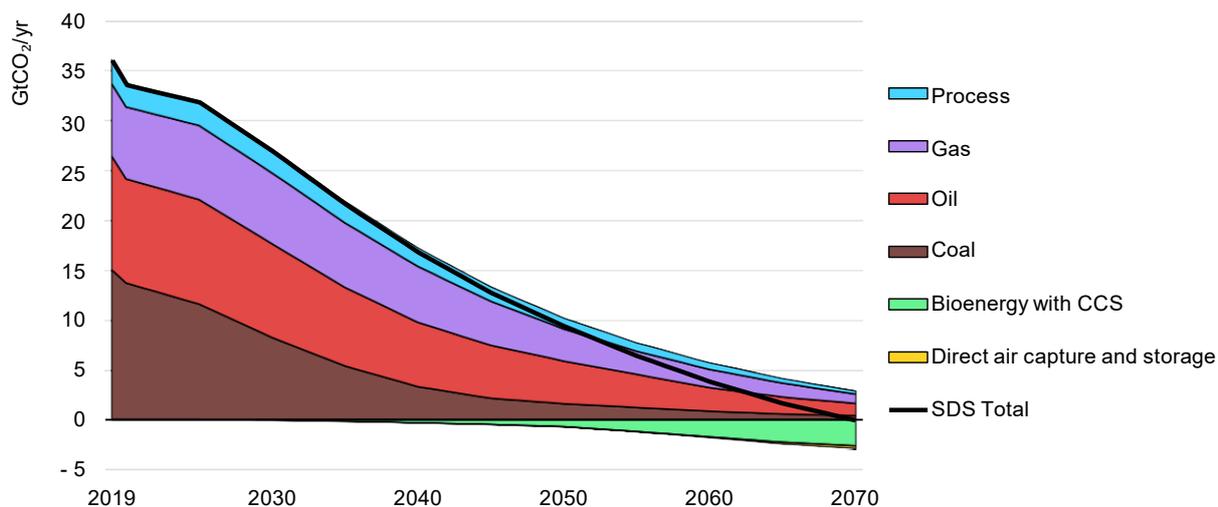
1.1.3. CO₂ 排出量の抑制手段

Seth ら [8]によると、CO₂ 排出量抑制手段の中で最も効果的な手段は、図 1-7 へ示すように、少子化である。しかしこれは SGD の目標 1~6 との間にトレードオフを生じる。そのため、次点以降の手段を実現化する必要がある。具体的には、自動車の燃費低減や再生可能エネルギーの利用などがある。よって、CO₂ 排出量削減への効果的な手段という観点から、自動車の燃費を低減する方策は必要である。

図 1-7 CO₂ 排出量の抑制手段 [8]

CO₂ 排出量の削減目標値として国連は、2070 年までにゼロにすべきであると報告している。この 2070 年についての明確な科学的根拠を探しても見つからなかったが、国連目標を達成するための CO₂ 排出量削減シナリオが、International Energy Agency (IEA) [9] によって燃料種別と消費用途別で策定されている。

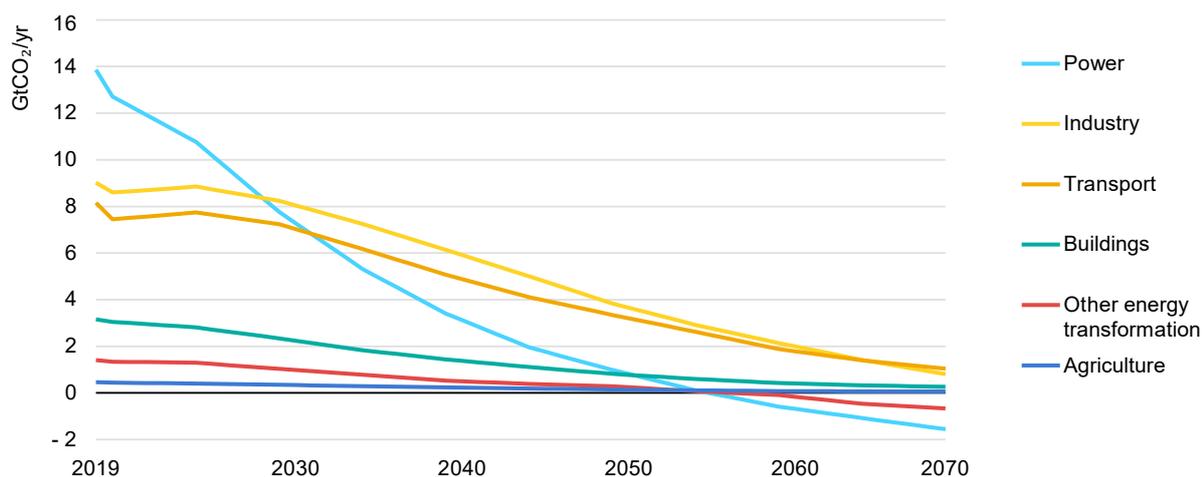
図 1-8 と図 1-9 は策定されたシナリオに基づく、CO₂ 排出量の遷移を示している。これによると、主にエンジンが関係する、石油 (OIL) と運輸部門 (TRANSPORT) については、2070 年時点において最も排出量が多くなると見込まれている。この石油と運輸部門の両方に関係する主なものに自動車がある。よって、2070 年における CO₂ 削減要求の観点からも、自動車の燃費低減は必要である。



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCS = carbon capture and storage. SDS= Sustainable Development Scenario.

図 1-8 CO₂ 排出量削減シナリオ（燃料種別） [9]



IEA 2020. All rights reserved.

図 1-9 CO₂ 排出量削減シナリオ（消費用途別） [9]

その他、小鹿 [10]らが図 1-10 へ示すように、LCA (Life Cycle Assessment) の観点において、CO₂ の排出には、直接的な排出の他に、製造や廃棄などによる間接的な排出もある。しかし IPCC [5]が図 1-11 へ示すように、運輸部門における間接排出量は全体の 0.3[%]程度であり、直接排出量の 14[%]と比べると十分に小さい。そのため、間接排出よりも直接排出の CO₂ 削減へ注力すべきである。よって、自動車製造時の CO₂ 排出量削減よりも、自動車走行時の燃費低減が必要である。

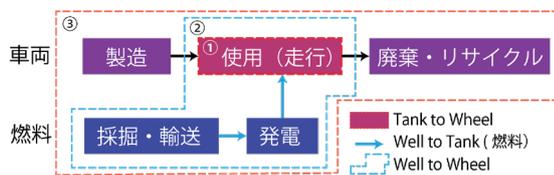


図 1-10 自動車の評価対象範囲 [10]

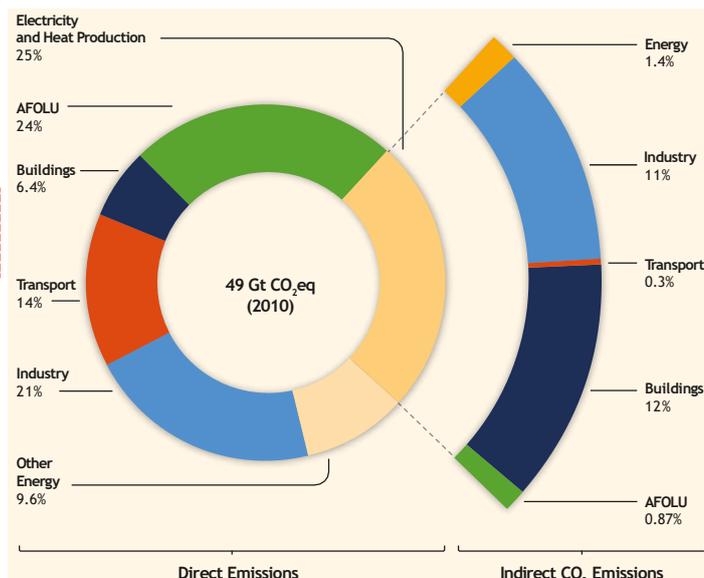


図 1-11 CO₂ 排出量の分類 [5]

次に図 1-12 と図 1-13 は、運輸部門の CO₂ 排出量の遷移について、IEA [9] [11]による輸送機器別の過去実績と将来目標を示している。従来と今後の双方において、陸上車両が最も多く、その中でも自動車の割合が大きい。よって、CO₂ 削減効果の観点からも、自動車の燃費低減が必要である。

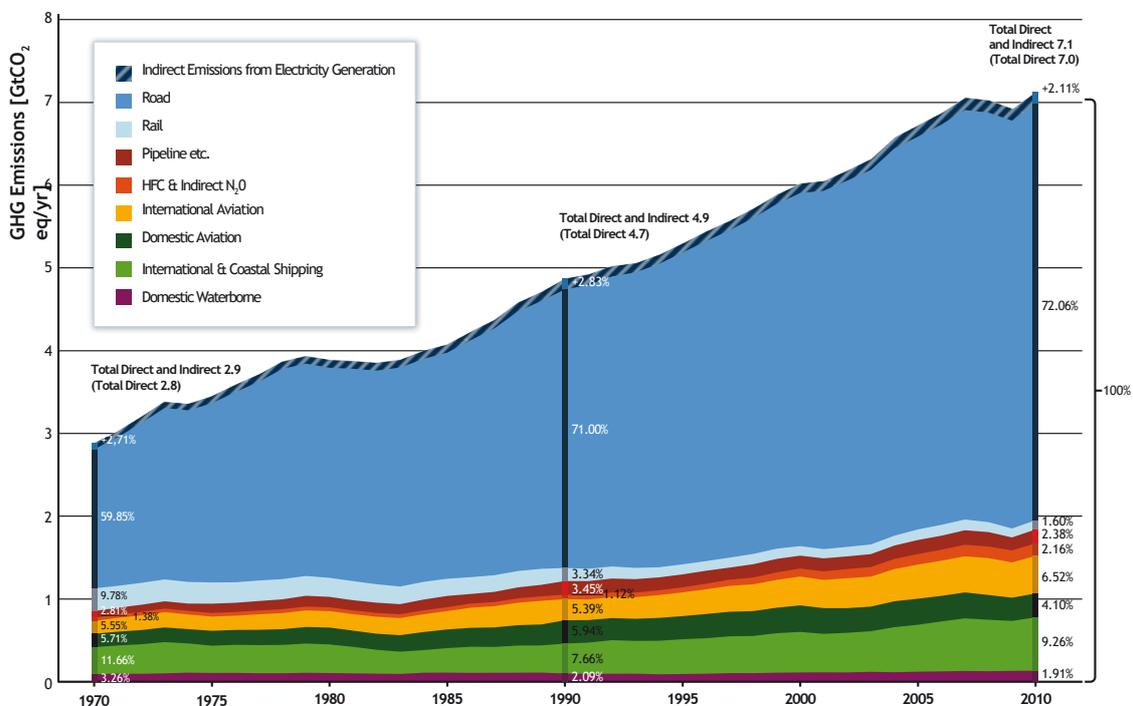


図 1-12 輸送機器別 (過去実績) [5]

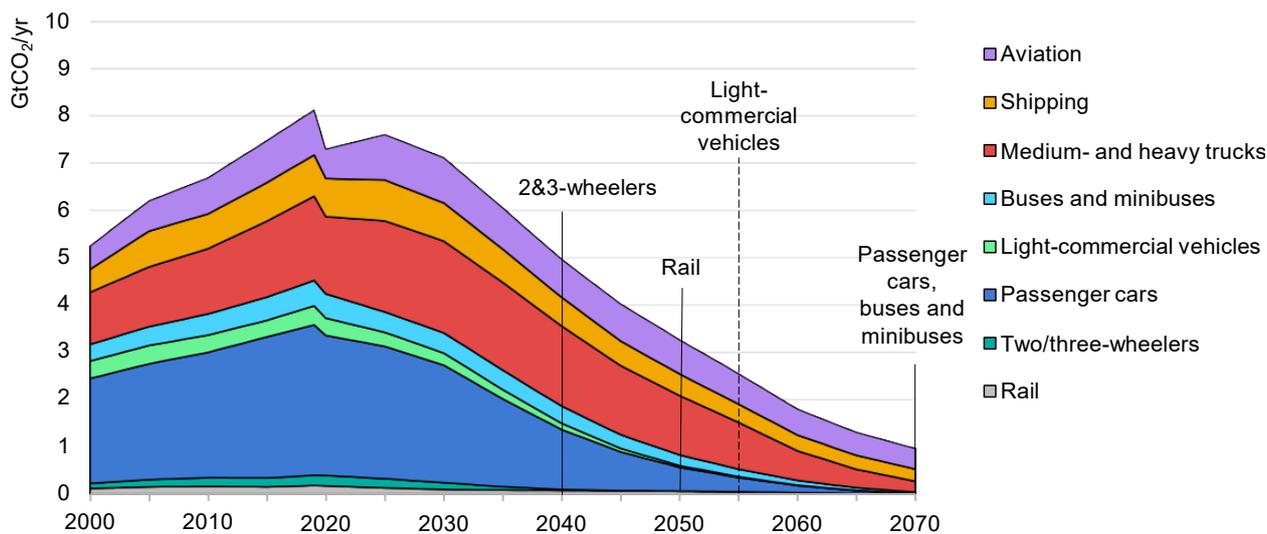


図 1-13 輸送機器別 (将来目標) [9]

さらに IEA [11]は、輸送機器と燃料種の関係を示している。図 1-14 によると、小型乗用車によるガソリン消費が最も多いことが分かる。よって、CO₂削減効果の観点より、ガソリンエンジンの燃費低減が必要である。

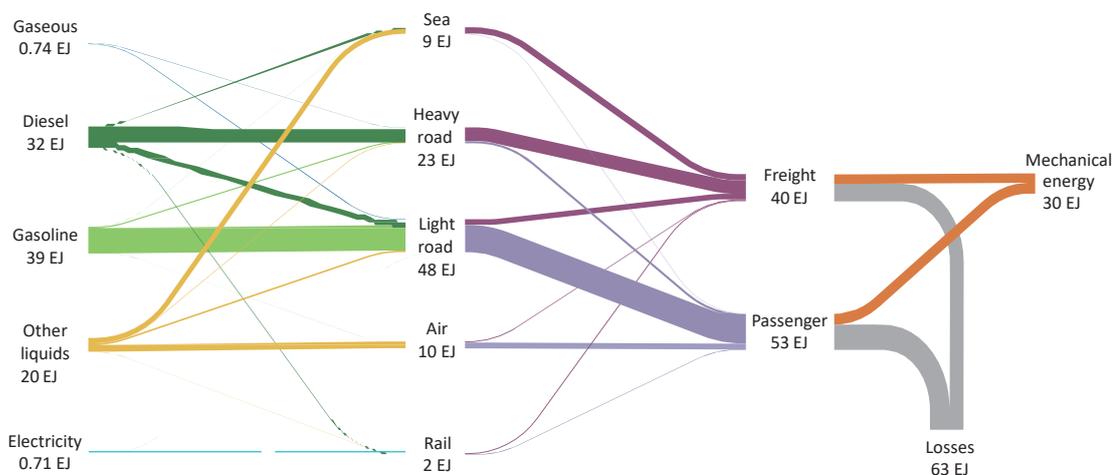


図 1-14 輸送機器と燃料種の関係 [11]

1.1.4. CO₂ 排出量抑制の問題

図 1-15 は、GFEI [2]による乗用車の販売台数予測の遷移を示している。乗用車は、今後の人口増加や、発展途上国の成長により、販売台数の増加が見込まれている。しかし一方で、これまでに述べたように、運輸部門全体の CO₂ 排出量を削減する必要がある。そのため、自動車 1 台あたりの CO₂ 削減率については、全体の CO₂ 削減率よりもさらに削減する必要がある。この具体的な方策として、図 1-16 のエネルギー構成シナリオへ示すように、化石燃料から水素や電気など、代替エネルギーなどへの転換が検討されている。

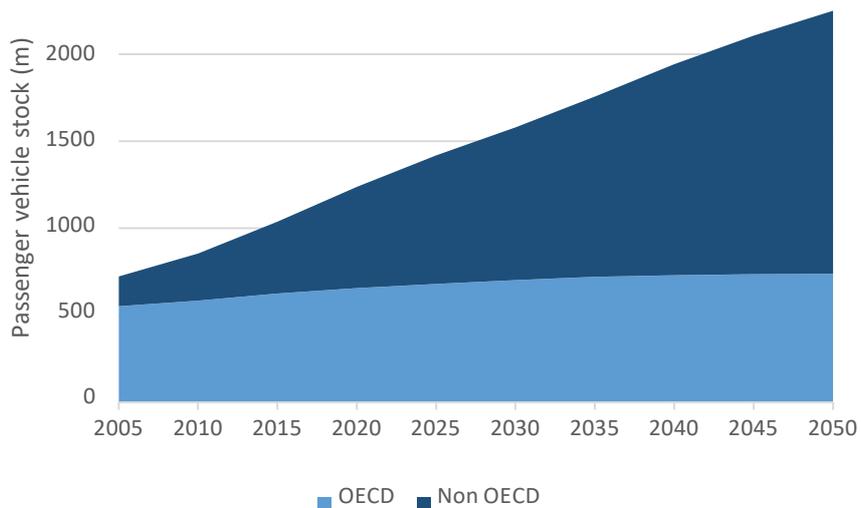


図 1-15 乗用車の販売台数予測 [2]

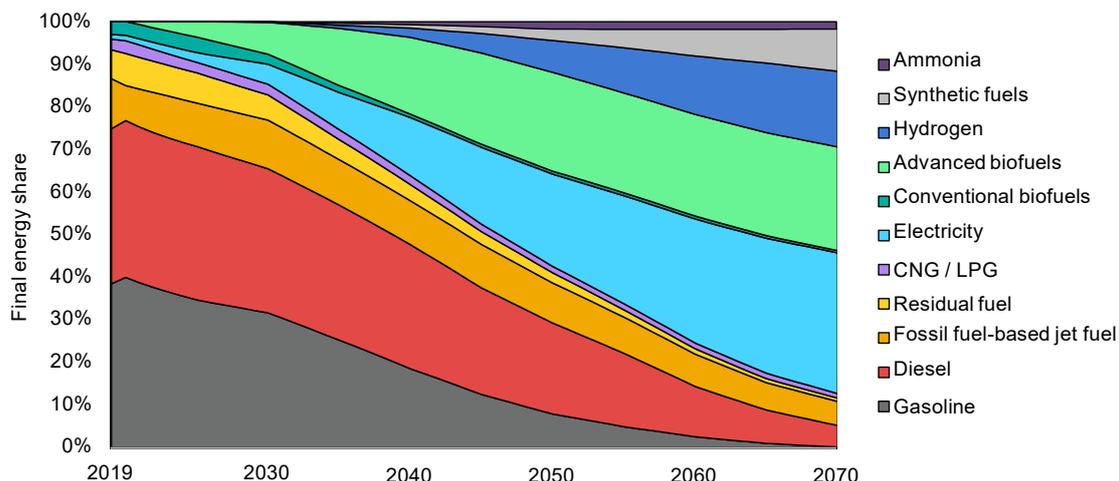


図 1-16 エネルギー構成シナリオ [9]

そしてさらに、International Council on Clean Transportation (ICCT) [12]による、このエネルギー構成の変化に対応するための自動車の車種構成についての推計値を図 1-17 と図 1-18 へ示す。この推計によると、例えば欧州における従来政策において、電気自動車 (BEV) の車種構成比率は 2035 年で約 25[%]であった。しかし目標達成のためには、従来の政策に対して 4 倍の 100[%]にする必要があるとの試算がある。

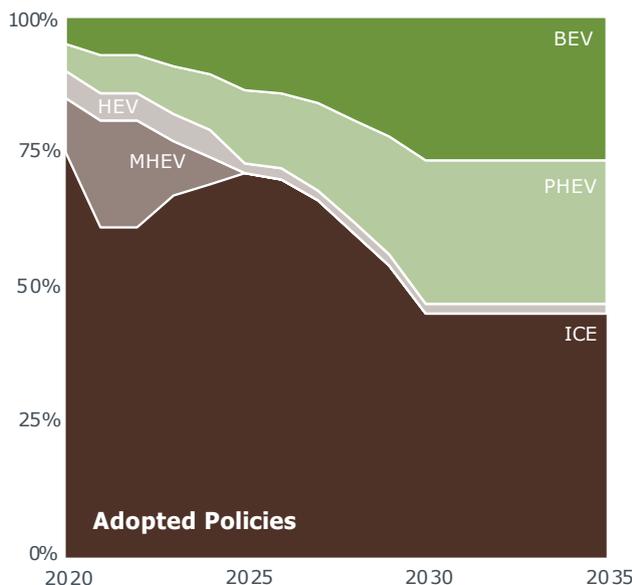


図 1-17 従来政策による車種構成 [12]

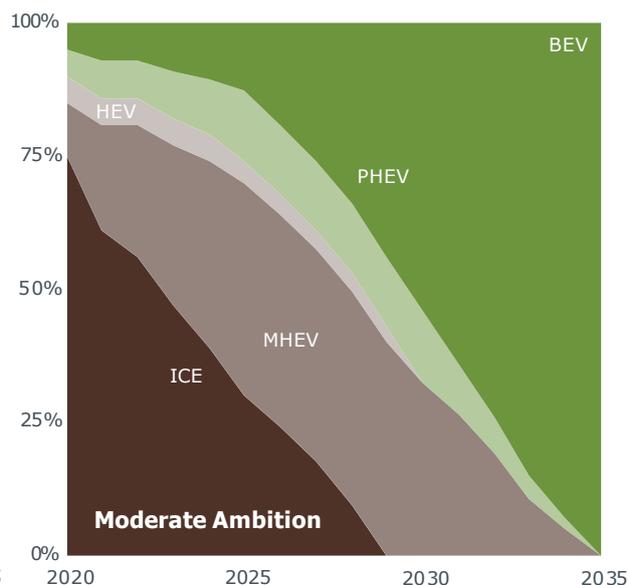


図 1-18 適度な政策による車種構成 [12]

しかし Standard Chartered [13]によれば、事業者はカーボンニュートラル化に必要な資金調達や組織変更には、中長期的な時間を要すると考えており、積極的な投資は遅れている。

図 1-19 は IEA [11]による自動車の利用エネルギーごとの費用を示している。現時点においては、ガソリンの燃費は電気や水素と比べても十分に低い。さらに、IEA [11]が 図 1-20 へ示すように航続距離などの利便性や WTW CO₂ 排出量の面でもエンジンの方が高性能である。そのため、消費者にとって、水素自動車や電気自動車の購入は難しい状況である。

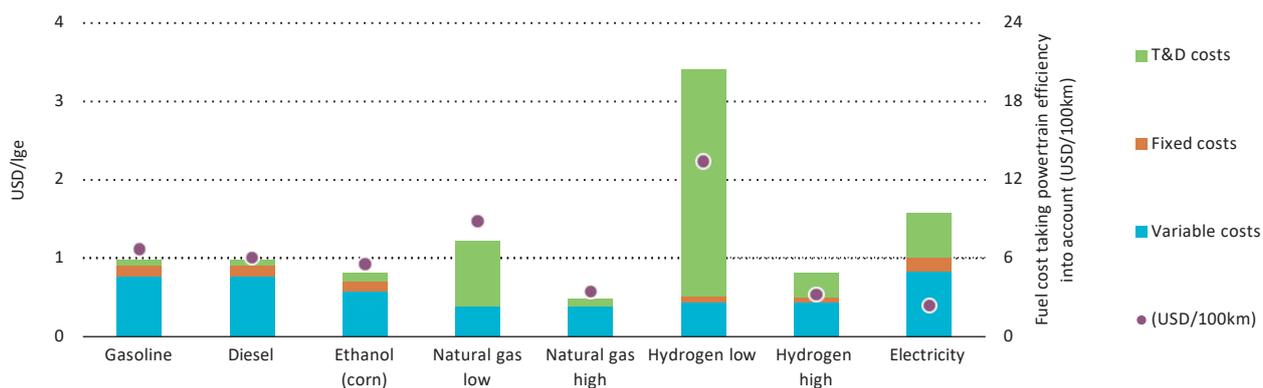
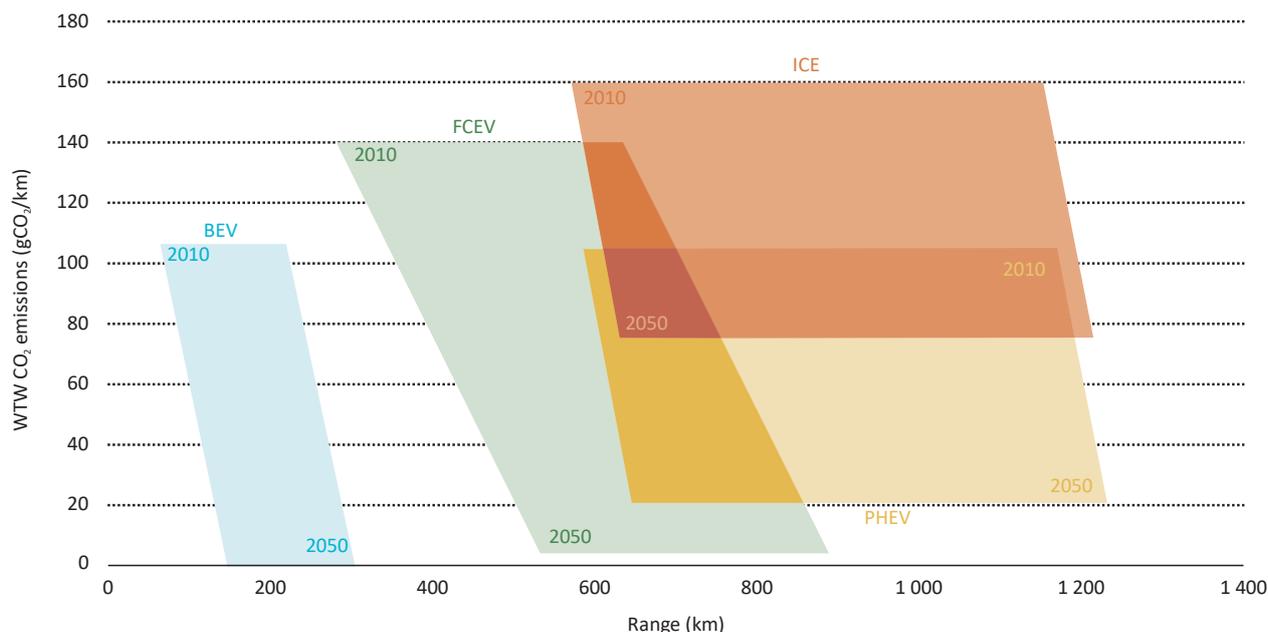


図 1-19 自動車の利用エネルギーごとの費用 [11]

図 1-20 WTW CO₂ 排出量と航続距離 [11]

電気自動車の将来普及に関して、一般社団法人日本自動車工業会（JAMA）の豊田会長 [14]によると、仮に、日本内全ての新車販売を全て電気自動車にする場合、充電設備のインフラ投資に 14～37 兆円が必要となる。そしてさらに、原子力発電所 10 基に相当する電力が必要となる。日本内における原子力発電所の追加稼働は困難な状況であり、仮にこれを火力発電所で代用すると、約 20 基分の電力に相当する。

また、電気自動車における CO₂ 排出量について、Tank to Wheel（TTW：タンクから車輪まで）の指標では、CO₂ 排出量ゼロである。しかし火力発電所でも化石燃料は使われて CO₂ を排出するため、Well-to-Wheel（WTW：油井から車輪まで）の指標では CO₂ 排出量の削減効果は限定的である。

その他、電気自動車へ大量に搭載されるバッテリーに必要なコバルトやリチウムなどの原料不足なども懸念される。特にコバルトは埋蔵量不足により、可採年数は石油よりも短いとされる。これらが、電気自動車普及を難しくしている。

以上のことより、エンジンの廃止のみで CO₂ 排出量削減目標を達成することは困難であるため、エンジンの CO₂ 排出量削減は必要である。

1.1.5. 自動車の課題

近年、国連の長期目標を前倒しするため、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC） [15]において日本を含む多くの国々が 2050 年までのカーボンニュートラル（炭素中立）を宣言している。電気自動車の普及が難しい状況下において、自動車用

内燃機関技術研究組合（AICE） [16]では内燃機関搭載車両におけるカーボンニュートラルに向けた技術シナリオの検討をしている。この検討においては、今後の内燃機関搭載車両として、ガソリン車の電動化技術を搭載したハイブリッド車（HEV や PHEV）を前提に WTW CO₂ 排出量の低減策を検討している。

このハイブリッド車の販売数見積りについて、IEA [11]が試算した結果を図 1-21 へ示す。図 1-21 によると、従来の 4[C]未満目標と比べて、改善案ではガソリン車とディーゼル車は減少しているが、これに代わってハイブリッド車が増加している。その結果、2050 年において少なくとも年間 1 億台の自動車へエンジンが搭載される見通しである。これは、今後もエンジンの生産台数が増加することを示している。

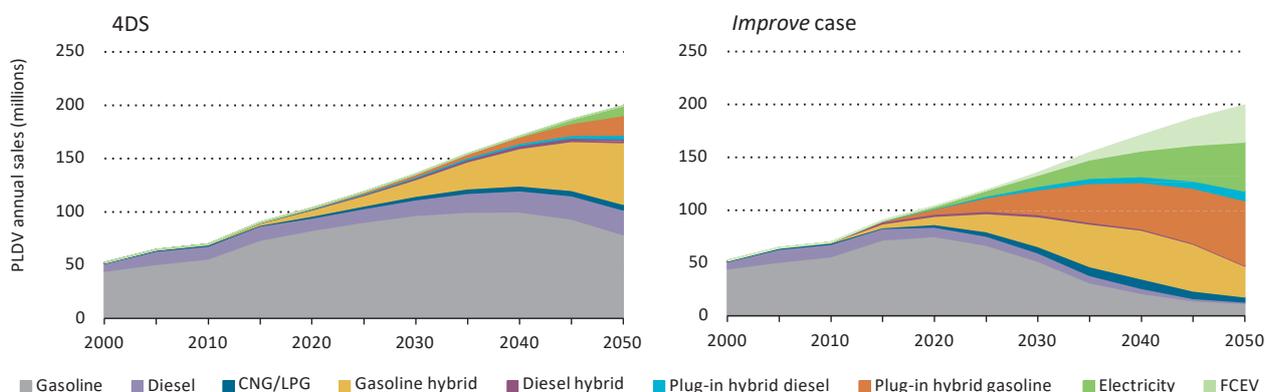


図 1-21 自動車販売台数予測（4°C未満目標と改善案） [11]

しかし、WTW CO₂ 排出量の低減について、現状政策に加えてエンジンの改良や電動化技術の投入を行ったとしても、目標達成の見通しは得られない。図 1-22 と図 1-23 は、GFEI [17]により試算された、新型車導入に伴う WTW と TTW 双方についての CO₂ 排出量の削減見通しが示されている。

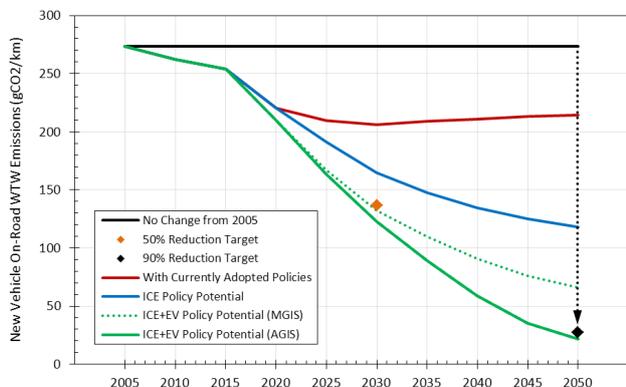


図 1-22 WTW CO₂ 排出量削減効果 [17]

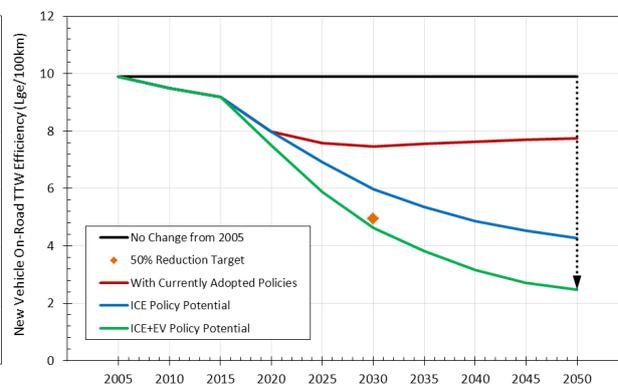


図 1-23 TTW CO₂ 排出量削減効果 [17]

次に図 1-22 と図 1-23 を基に GFEI [17]が見積もった、全体の WTW CO₂ 排出量を図 1-24 と図 1-25 へ示す. 現在の見通しでは, WTW で 2000[Mtones]以上の目標未達である. これは現状政策維持の場合を基準にすると, さらに約 10[%]分の CO₂ 排出量低減策が必要である.

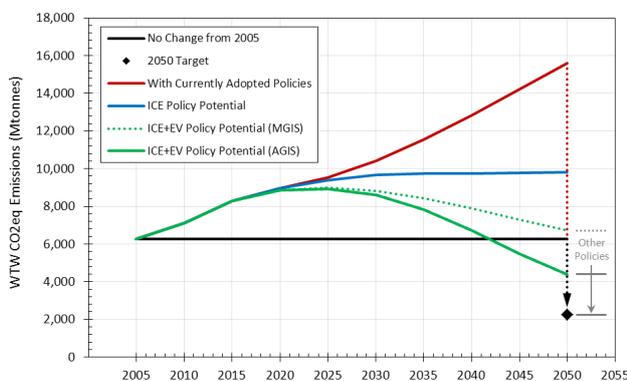


図 1-24 WTW CO₂ 排出量推計
(政策積み上げ) [18]

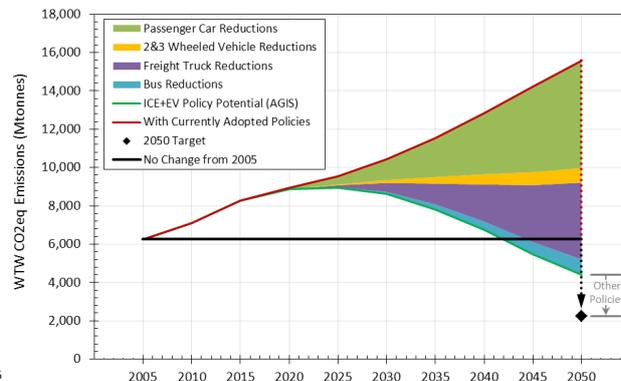


図 1-25 WTW CO₂ 排出量推計
(輸送機器別) [18]

1.1.6.エンジンの課題

CO₂ 総排出量をさらに低減するにあたり, 現実的な対応策として, 主要排出国の規制強化がある. ICTT [19] (International Certificate Testing Technology) による図 1-26 の CO₂ 国別排出量へ示すように, CO₂ 排出量が多い国には偏りがある. 例えば, 日本が CO₂ 排出量の規制を強化することで, 多額の投資を費やして CO₂ 排出量をゼロにしても, 全世界の 10[%]分を削減することはできない. そのため, GFEI [2]が図 1-27 へ示すように, 主要排出国における自動車の CO₂ 排出量の規制強化が進められている.

ここで一般的に, 単位燃料から得られる発熱量と, これを完全燃焼した場合の CO₂ 排出量は比例関係にある. そのため本論文では, CO₂ 排出量と燃費を等価として扱うこととする.

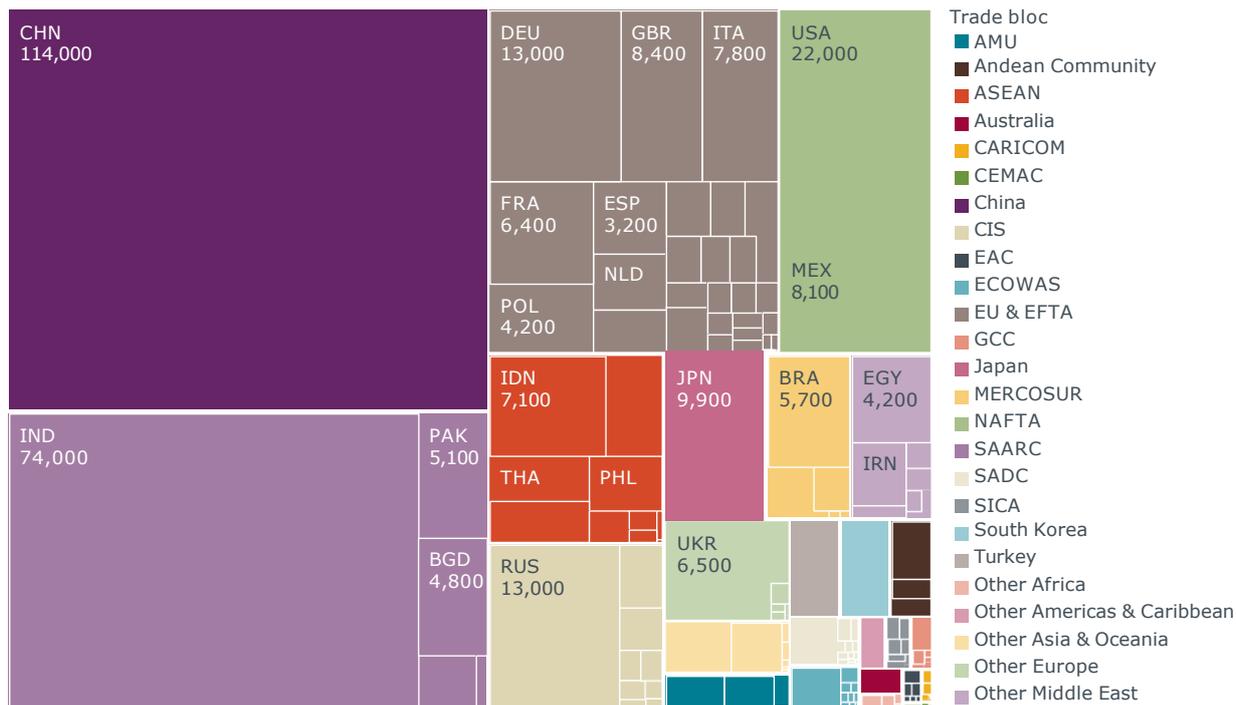


図 1-26 国別の CO₂ 排出量 [19]

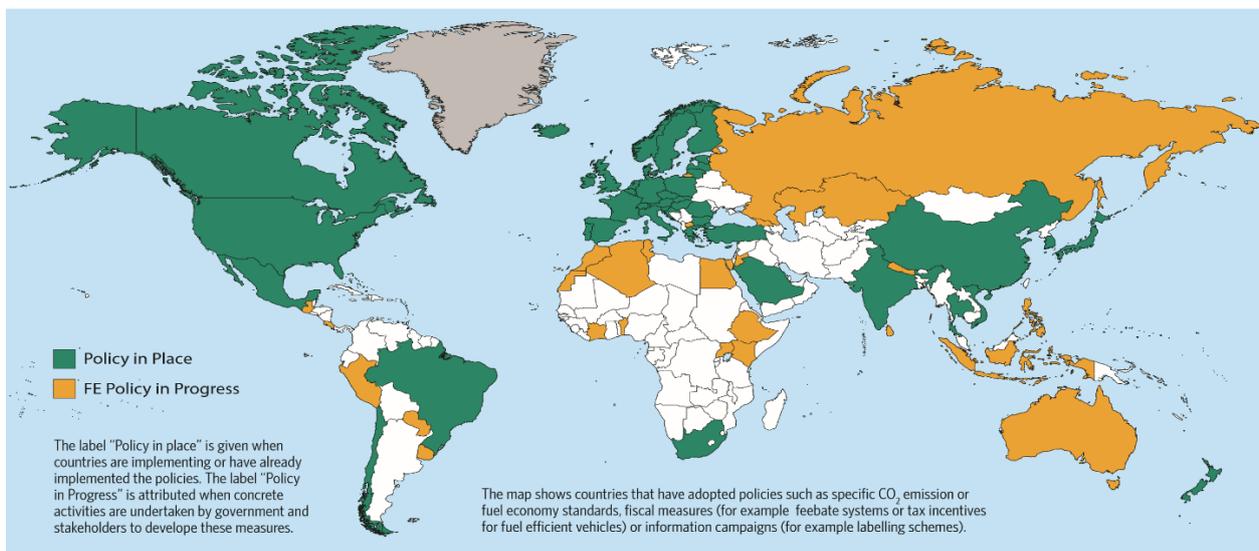


図 1-27 国別の燃費規制 [2]

自動車の CO₂ 排出量規制値と燃費規制値について、ICTT [20]による今後の見通しはそれぞれ図 1-28 と図 1-29 へ示すとおりである。そして FOURIN [21] [22]のレポートによると、自動車の CO₂ 排出量規制は今後も強化される見通しである。これに伴い、自動車は今後 10 年以内に現在比で約 50[%]の燃費低減が必要となる見込みである。

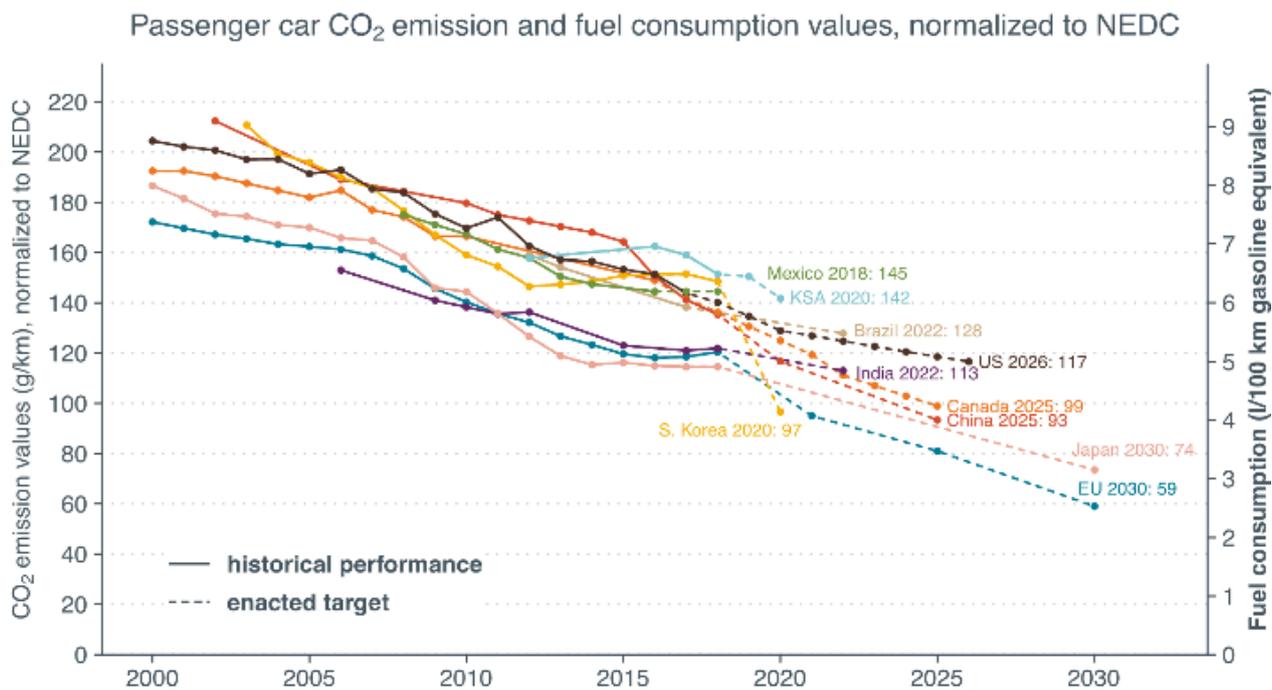


図 1-28 CO₂ 排出量規制値 [20]

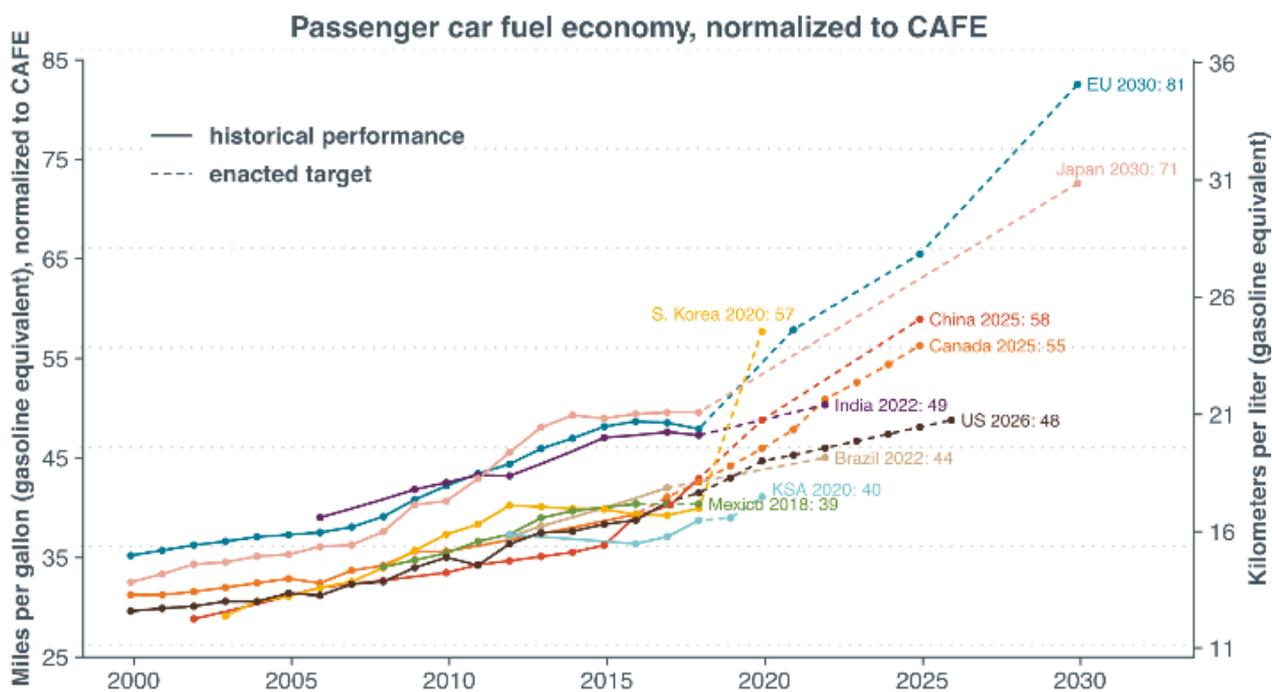


図 1-29 燃費規制値 [20]

以上のことより、エンジンの社会的な最優先課題の一つは、ガソリンエンジンの燃費低減である。

1.2.ガソリンエンジン

1.2.1.ガソリンエンジンの構成

一般的なガソリンエンジンの構成を図 1-30 へ示す. このガソリンエンジンの主要な構成部品は, 吸入ガス量を調節するスロットル, 燃焼室へのガス出入りを制御するための弁, 燃焼室へ導入されたガスを点火するための点火プラグ, 燃焼に伴う高圧ガスをクランク軸へ伝達するためのピストンなどである.

そしてガソリンエンジンは, 熱力学サイクルの分類上ではオットーサイクルとなり, 火花点火内燃機関の一種である. そしてこの火花点火内燃機関とは, 筒内の点火プラグの発する火花により燃料に点火する容積型内燃機関の一種である.

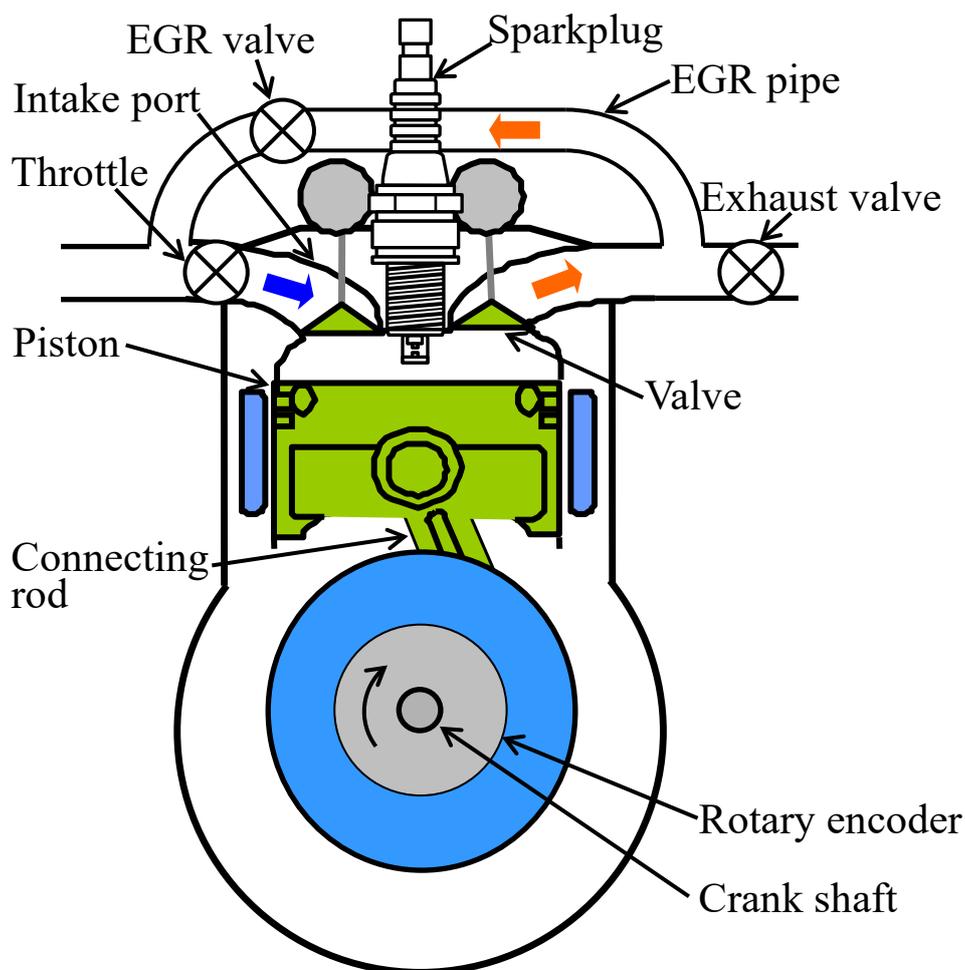


図 1-30 ガソリンエンジンの構成例

この点火プラグの性能は、電極材料、電極設計、および使用条件（温度、雰囲気、火花エネルギー、電流など）に大きく依存する。そして Rager ら [23]によると、点火プラグの電極の耐久性は、主に電極の消耗によって生じる電極ギャップの拡大によって決定される。

この電極には陽極と陰極がある。一般的な点火回路の場合、中心電極は陰極（カソード）、接地電極は陽極（アノード）へ接続されている。本研究においては、接地電極と比べて電極消耗量が多くなる、中心電極を対象に研究する。

1.2.2.火花点火

ここで火花点火とは、電気エネルギーを用いて火花放電し、放電経路から燃料ガスへの伝熱により、燃料を発火点まで加熱して酸化の連鎖反応を生じさせることである。この電気エネルギーを用いて火花放電するための点火装置の一つに、点火コイルがある。図 1-31 は、自動車用エンジンに用いられる一般的な点火コイルの、回路図と出力特性を示している。

点火コイルの回路図より、点火コイルは主に 1 次側と 2 次側のコイルおよび通電制御素子（IGBT など）によって構成されている。1 次側コイルの通電を遮断すると、磁束変化に伴う電磁誘導により、2 次側コイルへ電位差が生じて昇圧した電力が出力される。

そして、混合気中の電極間に必要な電圧が加えられる。放電初期では回路の容量分に蓄えられた静電エネルギーが放出され（容量火花）、続いて回路の誘導分による火花（誘導火花）が出力される。図 1-32 は筆者ら [24]によるグロー放電中における火花の放電経路外観を撮影した例である。撮影方法の詳細については後に述べる。この火花放電の詳細な現象を、以下へ述べる。

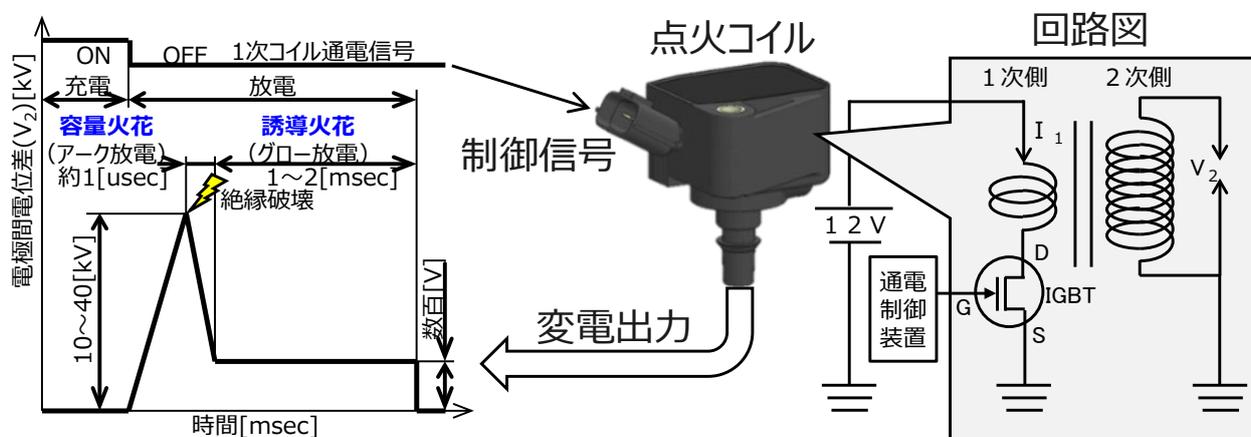


図 1-31 火花点火現象の概要



図 1-32 グロー放電中における火花の放電経路外観例 [24]

1.2.3.放電中の電圧遷移

ここで火花点火とは、電気エネルギーを用いて火花放電し、放電経路からの伝熱により、燃料を発火点まで加熱して酸化の連鎖反応を生じさせることである。混合気中の電極間に電圧を加えると、点火プラグの電極より放電する。Rager [25]によると、この放電過程における電極間電圧遷移の模式図 1-33 より、放電は主に次の3つの段階に分類される。

- (1) 第1段階：導電性プラズマチャネルが形成されるブレイクダウン
非常に短い間に電極間の電子が増殖し、電極間の空間に導電性のプラズマが発生する。この間、電極間に印加された電圧は数[kV]から100[V]以下へ低下する。この段階において、点火プラグの容量成分と誘導成分が部分的に放電される。
- (2) 第2段階：過渡的アーク放電
約1[μ s]の期間において、点火プラグに蓄えられていた残留エネルギーと、高電圧ケーブルやイグニッションコイルの容量成分が放電される。
- (3) 第3段階：グロー
点火コイルへ蓄えられたエネルギーにより、数[ms]間の誘導放電が継続する。このグロー放電における電流はおよそ100[mA]未満である。点火コイルに蓄えられていた残留エネルギーの低下に伴い、電極への印加電圧が低下してグロー放電が停止する。放電経路消失の結果、電極間の抵抗値増大により電圧が上昇して電圧波形は振動する。

1.2.4.放電中の電流遷移

Jeanvoine ら [26]は、高圧環境 (5~10[bar]) において発生する、点火放電の一般的な電流遷移を図 1-34 のように示している。最初の非常に短いブレークダウン段階は、点火回路に蓄積された容量エネルギーが数[ns]以内に放出される絶縁破壊に相当する。このブレークダウンとは、プラズマ放電の一種であるストリーマの機構によって電極間に導電路が形成されることである。ブレークダウンにおけるピーク電流は、主に点火電圧と放電プラズマおよび点火プラグのインピーダンスによって決定され、数 100[A]の値まで上昇する可能性がある。ブレークダウン後、点火システムのコンデンサに蓄えられていたエネルギーが放電され、数[A]の電流が流れる過渡的なアークが発生する。

Rager ら [27]によると、このフェーズに続いて、約 1[μ s]の短いアークフェーズが発生する。この間に、高電圧ケーブルの容量とコイルの容量がエネルギーを放出する。この第2段階の一般的な電流値は 10[A]のオーダーである。そしてここまでの絶縁破壊とアークの段階は、主に容量放電である。次に点火コイルが電流を決定すると、アーク相は定常状態へ移行する。

誘導放電開始時の電流はコイルによって決まり、通常は約 100[mA]台である。この段階では、陰極表面全体にイオンが衝突して電子が放出される。この間、コイルは約 1[ms]以内の期間でエネルギーを放出する。Jeanvoine ら [26]によると、ここでは電流値が低いため、誘導放電はほとんどがグロー放電の形態をとる。

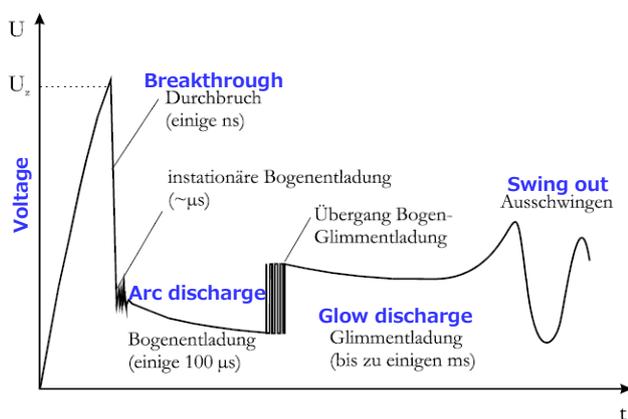


図 1-33 放電中の電圧遷移 [25]

(筆者にて英訳加筆)

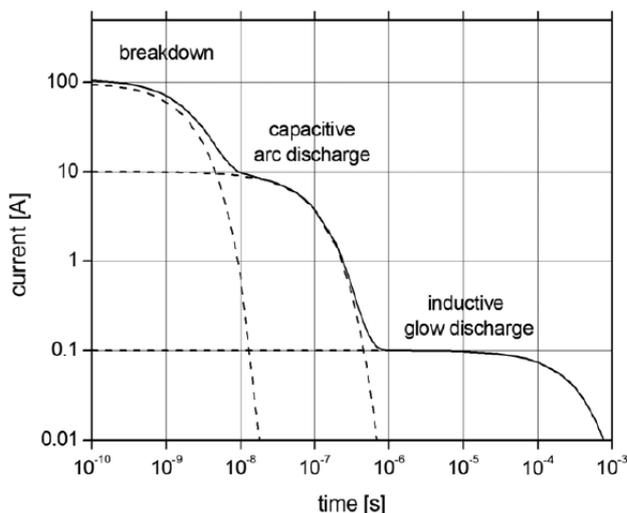


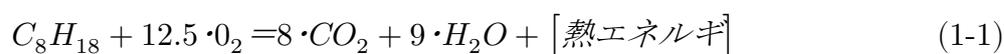
図 1-34 放電中の電流遷移 [27]

1.2.5.アーク放電とグロー放電の特徴

Jeanvoine ら [26]によると、アーク放電とグロー放電は、陰極表面での電子放出メカニズムが異なる。グロー放電では、陰極表面の比較的広い範囲からイオンや高速中性粒子の影響を受けて、二次放出により電子が放出される。一方、Rager ら [28]によると、グロー放電は電流密度が低いことが特徴であるため、その投入電力密度は低く、材料表面へ対して目に見えるダメージを与えることはない。グロー放電と比べて、局所性の高いアーク放電では、入力電力密度が非常に高くなる。Llewellyn [29]によると、電流密度は、 $10^6[\text{A}/\text{cm}^2]$ のオーダーの非常に高い値となる。

1.2.6.点火と燃焼

火花の通路の混合気にエネルギーが与えられ、混合気が活性化することによって反応が起こり、火炎核ができる。供給される電気エネルギーが十分大きければ、周辺の混合気に火炎が伝播し、燃焼反応が進行する。三好 [30][31]と酒井 [32]による、ガソリンエンジンにおける燃焼反応の化学反応式を式(1-1)へ示す。



ガソリンエンジンの燃費を低減するためには、式(1-1)において、より多くの熱エネルギーを効率的に取り出す必要がある。従来からある一般的な熱効率向上技術として、圧縮比の増大がある。この圧縮比 ε とは、内燃室における、最大容積 V_{max} と、最小容積 V_{min} の比率であり、関係式(1-2)となる。

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (1-2)$$

ε : 圧縮比[-], V_{max} : 内燃室最大容積[m³], V_{min} : 内燃室最小容積[m³]

次に、圧縮比 ε と熱効率 η との関係式(1-3)を示す。

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} \quad (1-3)$$

η : 熱効率[-], κ : 比熱比[-]

筆者による式(1-3)の計算結果を図 1-35 へ示す。図 1-35 へ示すとおり、圧縮比の増大に伴い、熱効率も増大する。

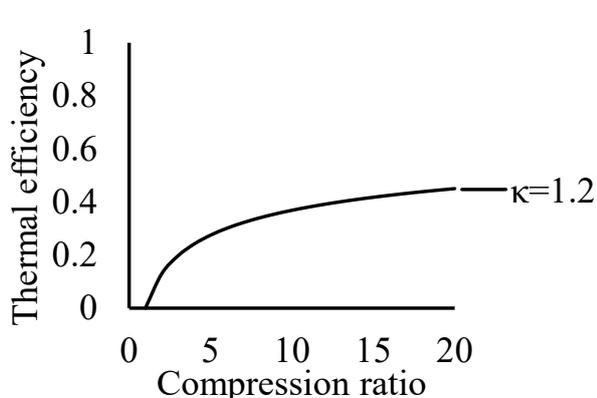


図 1-35 圧縮比と熱効率の関係

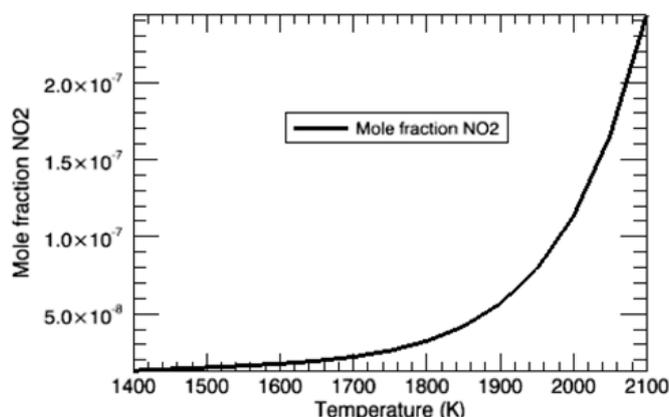


図 1-36 ガス温度と NO₂ 生成量の関係 [33]

しかし、松岡ら [34]が示すように、圧縮比を増大することで、筒内ガスの圧縮圧力が上昇する。ここで、エンジンの圧縮行程を断熱圧縮と仮定すると、圧縮圧力の上昇により、筒内ガスの温度が上昇する。ここで Monika ら [33]によるガス温度と NO₂ 生成量の関係図 1-36 においては、ガス温度の上昇に伴う NO₂ 生成量の増加を確認できる。その結果、NO₂ などの窒素酸化物 (NO_x) の生成が促進されて、NO_x 排出量の増大を引き起こす。

この NO_x による大気汚染と生体影響については、中島ら [35]によって調査されている。この調査結果によると、大気中の NO_x 濃度と有症率との関係が示されており、特に呼吸器への悪影響が問題となっている。そのため、中島らは NO_x 排出規制強化の必要性を述べている。このような背景により、自動車の NO_x 排出規制は強化されている。

図 1-37 は日本国内における NO_x 排出規制値の遷移を示すもので、1973 年を基準としている。これによると、現在の NO_x 排出規制値は 1973 年と比べて約 1/50 まで低減していることが分かる。この規制強化を達成するための主な排出防除技術として、NO_x 吸蔵還元触媒などの排気後処理がある。この後処理機能を強化することで、更なる排気規制強化への対応も技術的には可能である。しかし後処理機能の強化により、自動車のコストや重量が増大するため、自動車の利便性や燃費性能は低下する。よって、エンジン燃焼室からの NO_x 排出量抑制技術は今後も必要である。

その他、圧縮比上昇に伴う筒内ガス温度の上昇により、燃料ガスの着火点を超過すると、点火時期以前の自己着火が生じる。自己着火は過大な圧力を引き起こし、ノッキング現象が生じる。筆者ら [36] [37]が過去に実験を行った際の、正常燃焼とノッキング現象発生時の筒内圧波形の例を図 1-38 と図 1-39 へ示す。図 1-38 と比べて図 1-39 は、燃焼室内の各種ラジカルが活性化しており、圧力波形には異常振動を観察できる。圧力の

異常振動（ノッキング）による異音や振動が大きくなると、エンジンの破損リスクが増大する [38] [39]. よってエンジンの耐久性確保の観点からも、過大な圧縮比設定は避けるべきである.

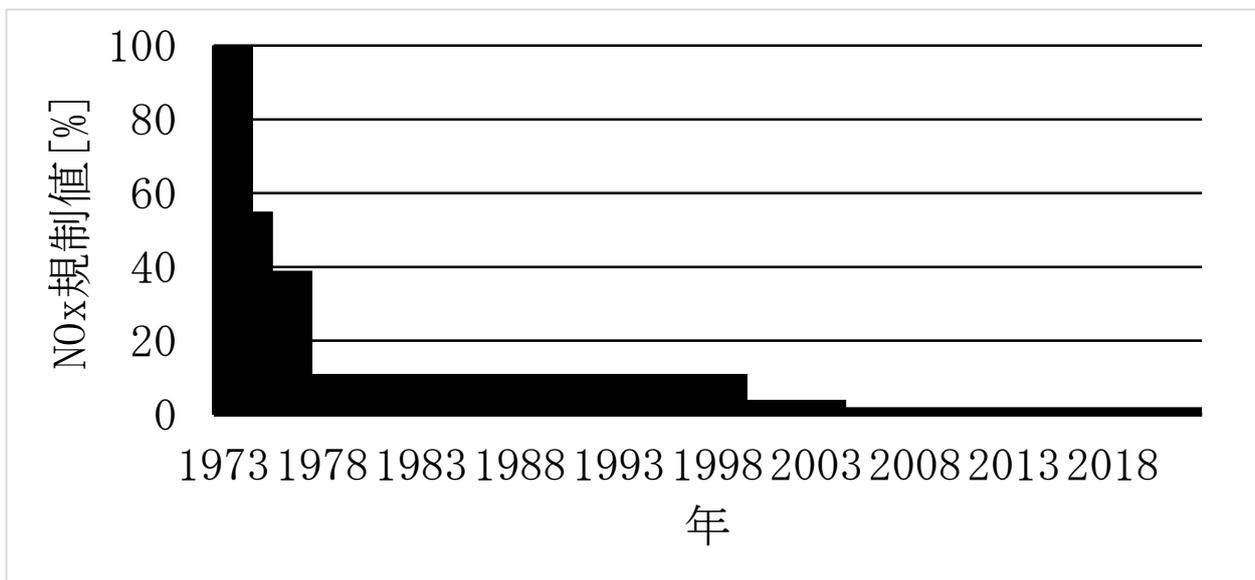


図 1-37 日本国内における NO_x 排出規制値の遷移

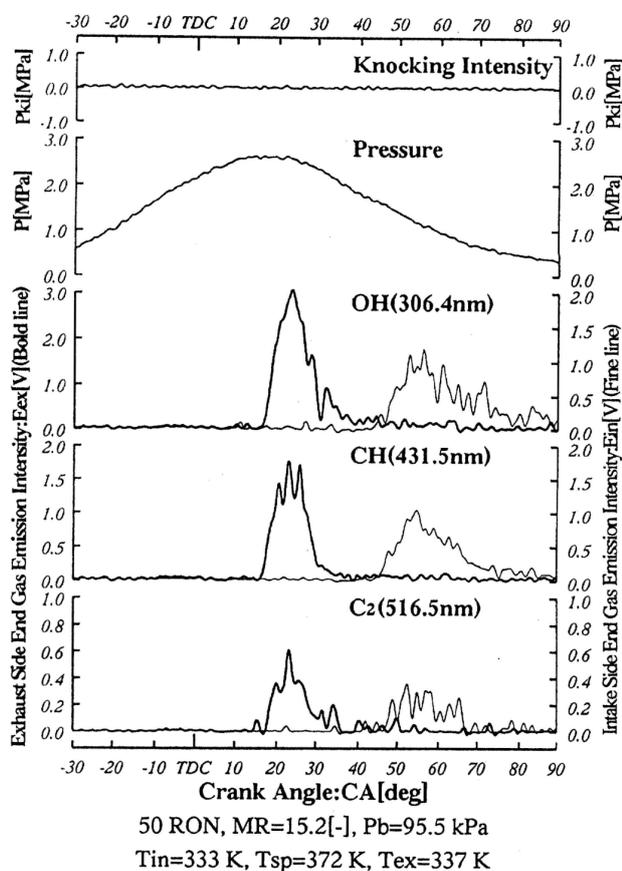


図 1-38 正常燃焼時の圧力波形例

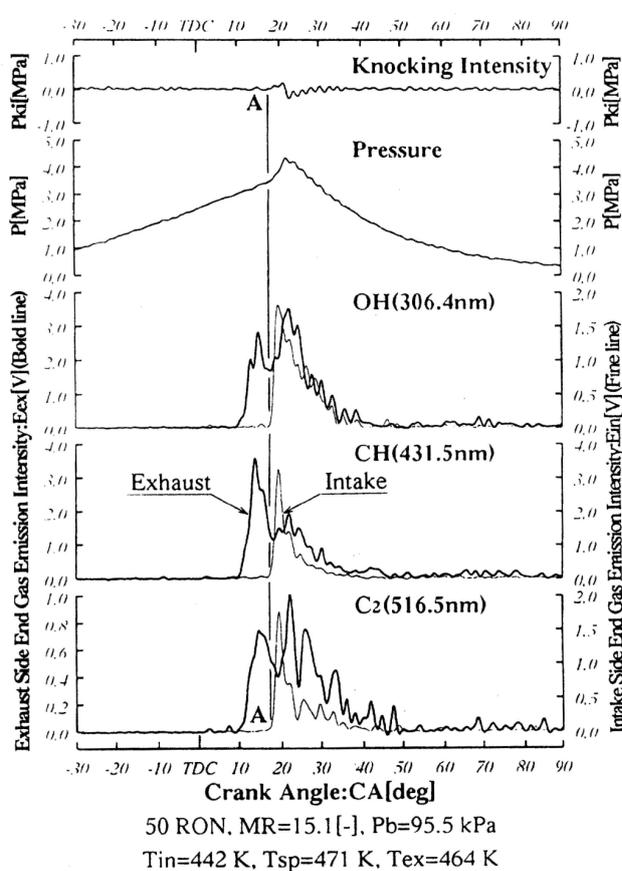


図 1-39 ノッキング時の圧力波形例

つまり、圧縮比上昇による燃費低減においては、燃費（CO₂）と排気（NO_x）のトレードオフが生じる。トレードオフ低減のため、燃費（CO₂）と排気（NO_x）を同時に低減することが、ガソリンエンジンの課題である。

1.3.希釈燃焼の作用

国土交通省 [40] [41]の報告書によると、複数の燃費改善技術が検討されている。これらの中において、燃費と排気を同時に低減する対策技術の一つに、希釈燃焼があり、窪山ら [42]、菅田ら [43]、森吉ら [44]などによって、検討が進められている。ここで希釈燃焼とは一般的に、混合気を排気や空気などの不活性ガスで希釈して燃焼するものである。ここで、希釈レベルの指標は複数あるため、主要な指標を示す。

- (1) A/F : 空燃比[-] (混合気中の空気と燃料ガスの質量比)
- (2) F/A : 燃空比[-] (混合気中の燃料ガスと空気の質量比)
- (3) λ : 空気過剰率[-] (=空燃比/理論空燃比, 燃料に対して, 理論量の何倍の空気が供給されたかを表す係数)
- (4) ϕ : 当量比[-] (=理論空燃比/空燃比, 空気に対して, 理論量の何倍の燃料が供給されたかを表す係数)

菅田ら [45]によると希釈燃焼は、図 1-40 へ示すように、吸入ガスの希釈により筒内の不活性ガスが増加するため、燃焼温度は低くなる。東野ら [46]によるとこの希釈燃焼による直接的な効果は、図 1-41 へ示すように NO_x の低減である。この直接効果を含む、希釈燃焼による複数の作用効果について、以下へ説明する。

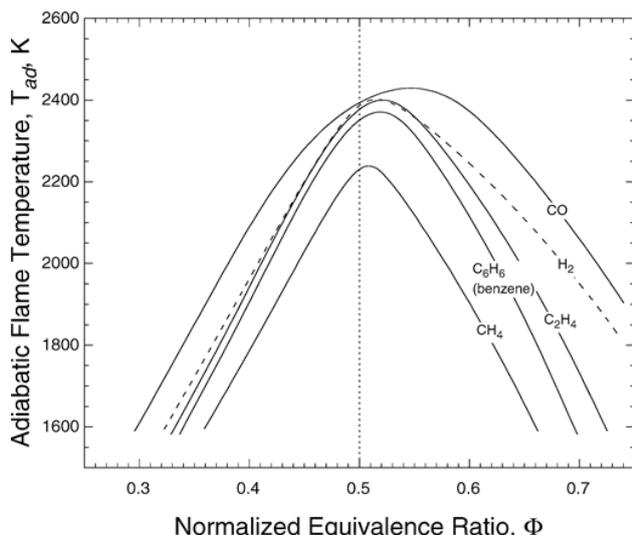


図 1-40 希釈率と燃焼温度の関係 [45]

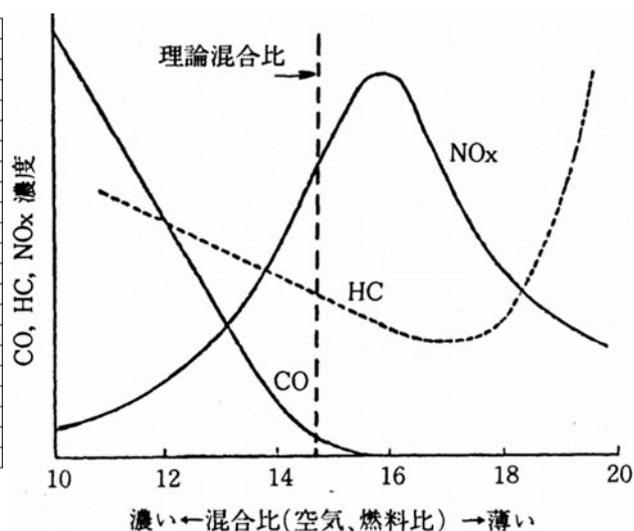


図 1-41 希釈率とNOxの関係 [46]

1.3.1.理論熱効率の向上による燃費低減

比熱は原子数に比例して低くなる．一般的に，燃料は空気よりも比熱比が低いため，空気希釈に伴い，図 1-42 へ示すように燃料ガスの比熱比は増大する．そして，空気希釈による燃焼温度低下により，さらに燃料ガスの比熱比が増大するため，図 1-43 へ示すように理論熱効率を向上できる．

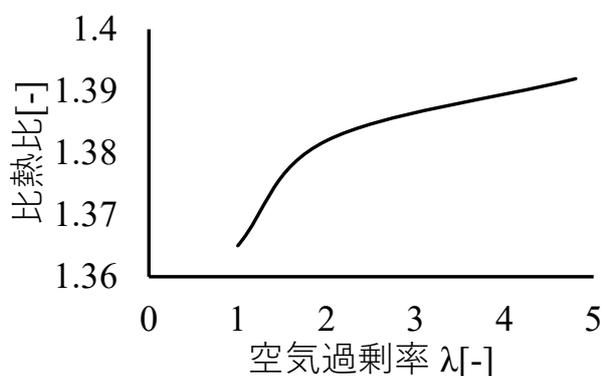


図 1-42 希釈率と比熱比の関係

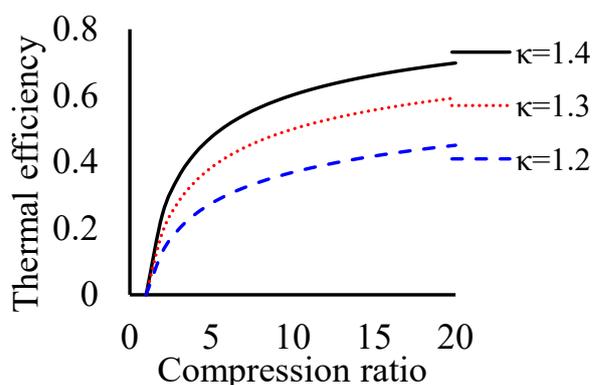


図 1-43 比熱比と熱効率の関係

1.3.2.ポンプ損失の低減による燃費低減

エンジンの発熱量と有効仕事には偏差があり，その原因は諸損失である．例えば，小川ら [47]は諸損失の中の発電分について調査している．またトヨタ自動車 [48]は，環境

温度の低下に伴う熱損失の増大について述べている。図 1-44 へ示すように、燃費低減のためには、諸損失を低減することが有効である。

そして主要な諸損失の一つにポンプ損失がある。これは燃料ガスを希釈することにより、吸入ガス量を増大することができる。そのため森吉ら [49]、角倉ら [50]、中部産業連盟 [51]によれば図 1-45 へ示すように、同一出力を得るためのスロットル開度が大きくなり、スロットル弁による吸気通路の絞り抵抗である、ポンプ損失を低減できる。

1.3.3.冷却損失の低減による燃費低減

松野 [52]によると、図 1-44 における主要な諸損失の一つに、冷却損失がある。希釈燃焼により、燃焼速度と燃焼温度が低下すると八光電機 [53]が 図 1-46 へ示すように、燃焼室やシリンダ壁面から冷却水への伝熱量が低下して、冷却損失を低減できる。

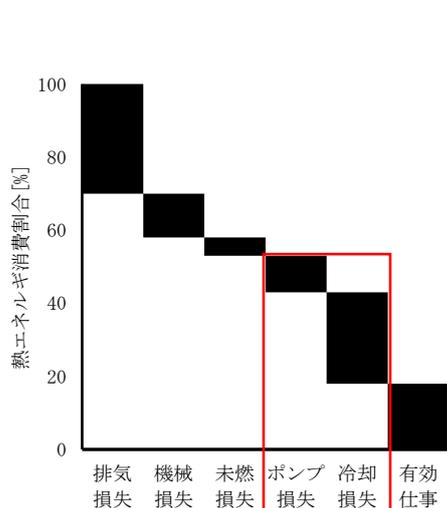


図 1-44 熱収支の例 (負荷 50[%])
[49] [50] [51]

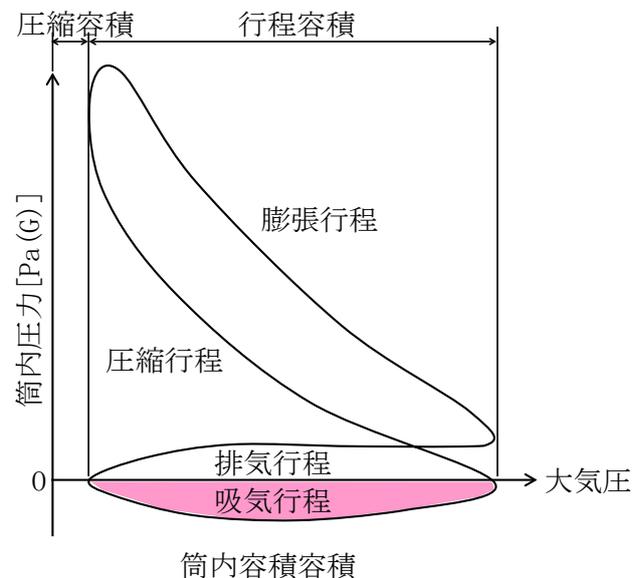


図 1-45 ポンプ損失の概要

1.3.4.燃焼温度低下による排気低減

NO_xは、一般的に 2000[K]以上の燃焼時に窒素が酸素と酸化反応して生成する。希釈率の増大によって燃焼温度が下がり、図 1-36 へ示すように NO_x 排出量が減少する。特に A/F > 30[-]になると英ら [54]が図 1-47 へ示すように、燃焼温度が 1800[K]以下で NO_x がほとんど発生しないので、三元触媒が使えない空気希釈燃焼でも高価な NO_x の後処理装置を不要にできる。例えば Monika ら [33]は、燃焼過程における NO_x 生成メカニズムの解明を数値計算により試み、NO₂ の生成に及ぼす温度の影響を明らかにしている。

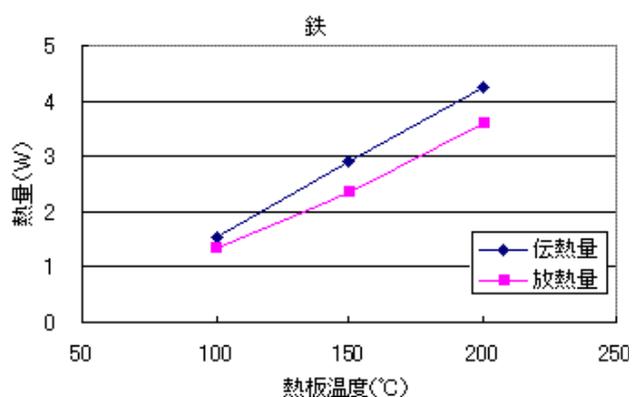


図 1-46 伝熱量と温度の関係 [53]

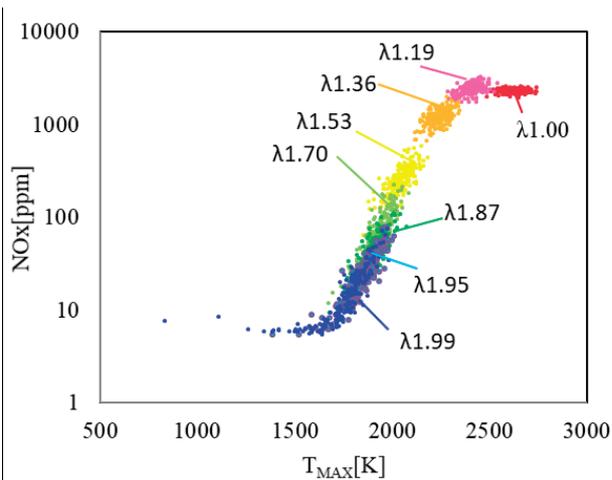


図 1-47 希釈率と NOx 生成量の関係 [54]

1.4.希釈燃焼の課題

一方で希釈燃焼には副作用もあるが、現時点では対策技術が十分とは言えない。そこで、副作用へのさらなる対策技術を検討する。次に希釈燃焼における、副作用の抑制に関する先行研究と残課題を以下へ示す。

1.4.1.希釈燃焼の先行研究

一般的に希釈率の増大に伴い、着火性は低下する。図 1-48 は、Desmond [55]が希釈率と最少点火エネルギーの関係を示したものである。そしてさらに図 1-49 は、が希釈率と燃焼速度の関係を示したものである。これらによると、希釈率の過小や過大に伴い、最少点火エネルギーの増大や燃焼速度の低下が生じていることから、着火性が低下していることが分かる。

この着火性の低下に伴い、失火や半失火が生じると、出力のサイクル変動によるエンジンの振動増大などが生じる [56]。これに対して筆者らは最近の電動化技術を活用し、失火による出力低下分をモータなどで補助する方法なども検討している [57] [58]。しかし、この方法は電費が増大する上、仮に振動を抑制できても、熱効率低下や排気増大を避けられない。そのため、さらなる着火性向上策は必要である。

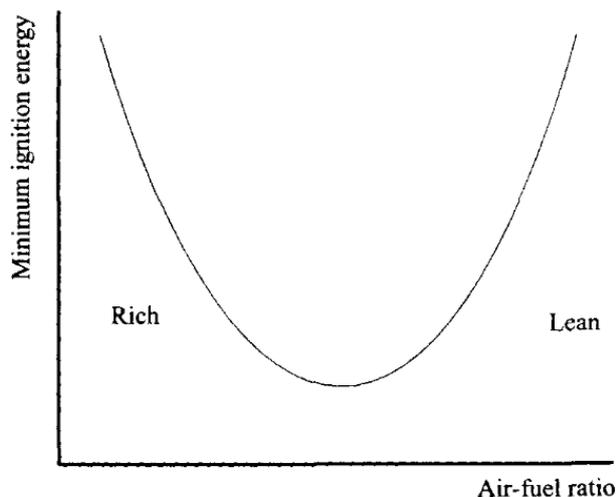


図 1-48 希釈率と最少点火エネルギーの関係 [55]

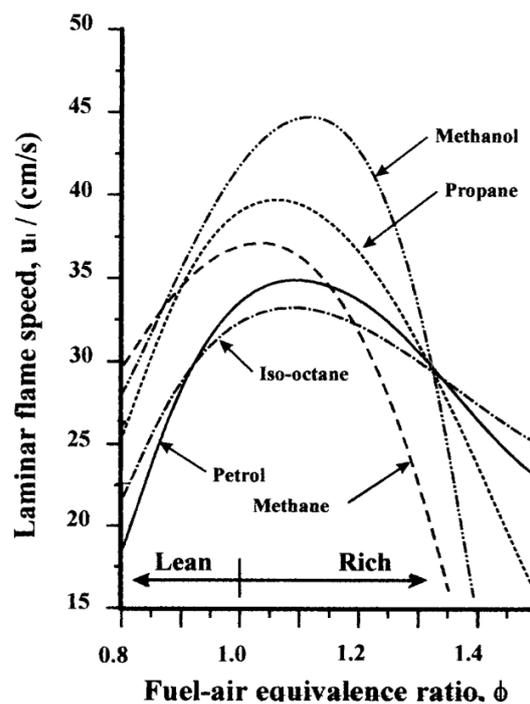


図 1-49 希釈率と燃焼速度の関係 [55]

1.4.2.着火性改善策

Kume ら [59], 松田ら [60]によると, 着火性を改善する方法として, 過去には成層燃焼などが採用される事例もあるが, 排気低減が難しいことから, 採用例が少なくなっている. そして Marty [61]によると, これらに代わる着火性改善方法として, 主に以下のものがある.

- 均一予混合圧縮着火エンジン (HCCI : Homogeneous Charged Compression Ignition)
- 火花点火制御圧縮着火 (SPCCI : Spark Controlled Compression Ignition)
- 副室点火 (PCI : Pre-Chamber Ignition)

HCCI は図 1-50 へ示すように, 予混合ガスを圧縮着火する技術であり, 点火プラグを用いずに着火する技術である. 主な先行研究として Marty ら [61]の論文がある.

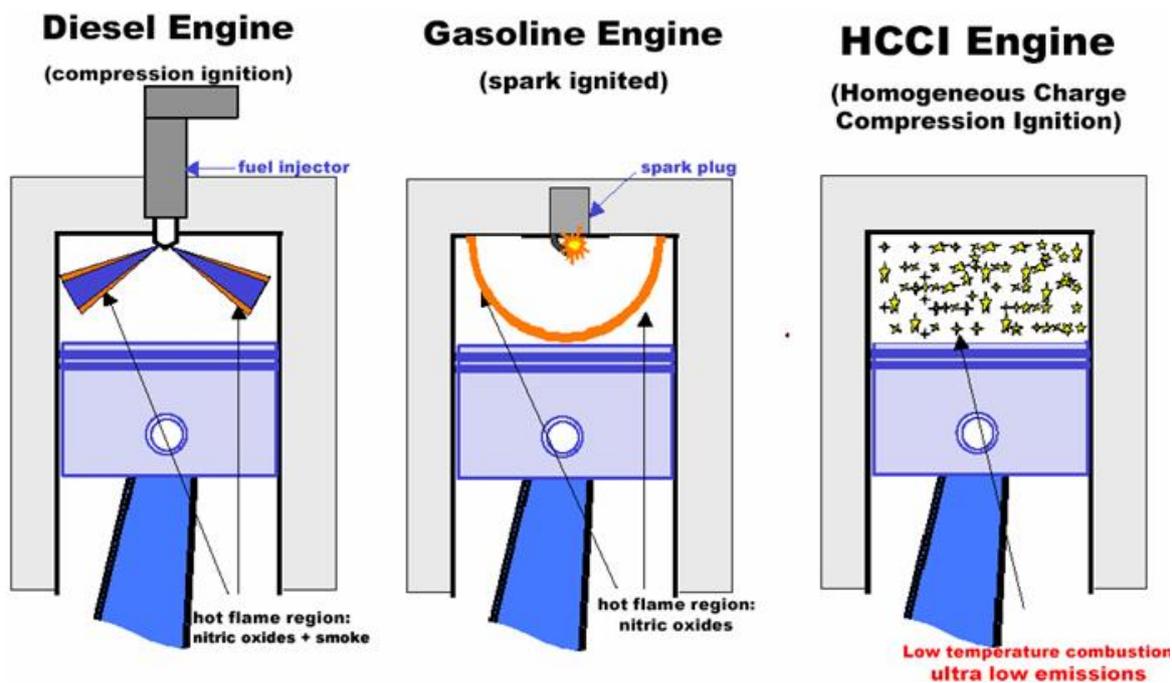


図 1-50 HCCI の燃焼コンセプト [61]

白石ら [62], 川那辺 [63], 緒方 [64]によると図 1-51 へ示すように, この HCCI は今後の排気ガス規制を満足しつつ, ディーゼルエンジンと同等の燃費を実現する可能性が期待される.

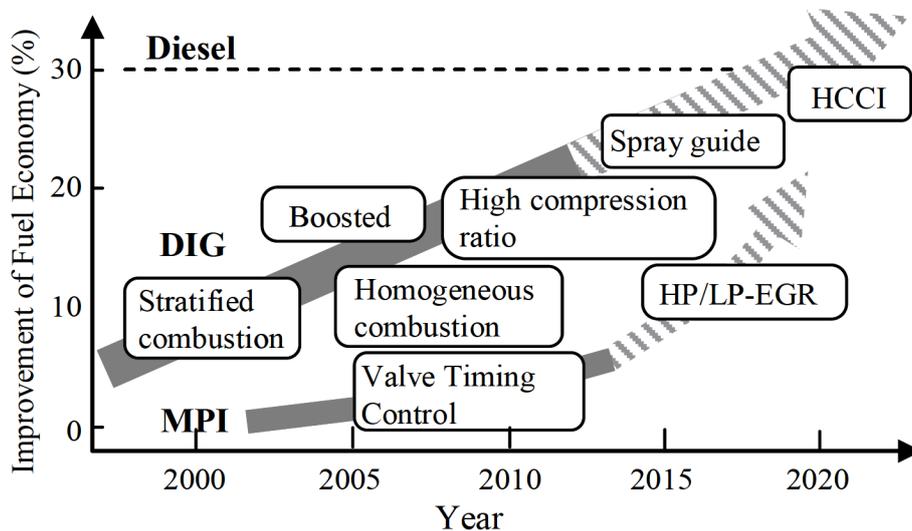


図 1-51 燃費低減技術の進化 [62]

HCCI の主な効果は燃焼温度の低下による熱損失の低減にあるが, 燃焼の適用が低~中不可に限られ改善しないという問題も Furerhapter ら [65]や Kuboyama ら [66]によって指摘されており, HCCI を採用したエンジンは実用化されていない. これら HCCI の諸問題

を改善するため、火花点火制御圧縮着火（SPCCI）が漆原ら [67]によって実用化されているが、これは図 1-52 へ示すように、従来の火花点火（SI）との併用に近い形態である。

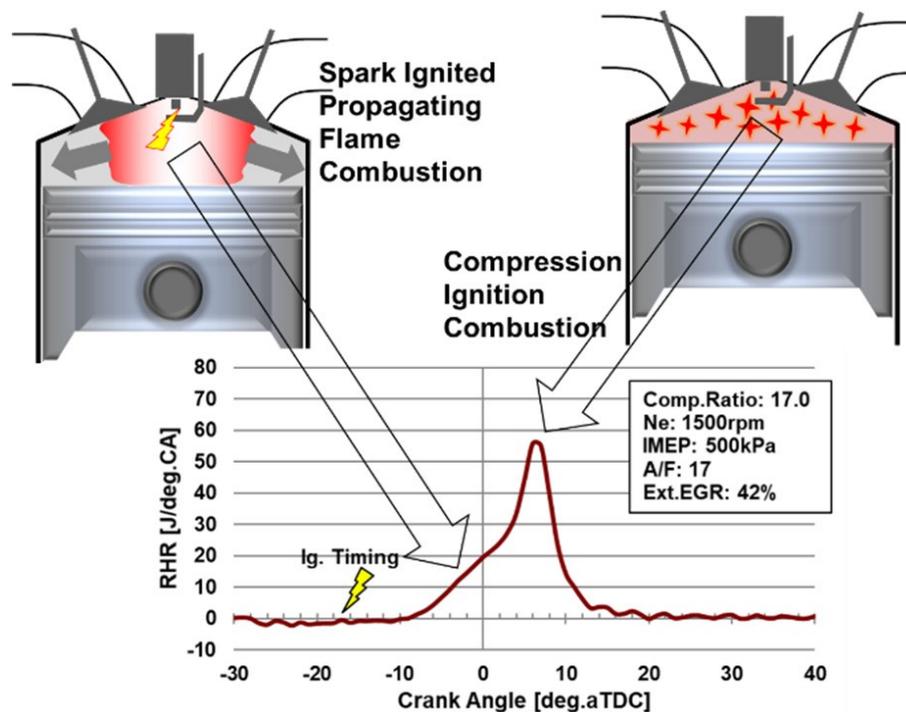


図 1-52 SPCCI の燃焼コンセプト [67]

次に副室点火（PCI）は米谷ら [68]が図 1-53 へ示すように、副室内で点火した燃焼ガスを、ジェット噴流として主燃焼室へ噴き出すことで体積的に着火するものである。体積的な着火により、SI と比較して、燃焼速度の向上や着火性の改善効果を得られる。

この PCI には、副室内に点火プラグ、または点火プラグと燃料噴射弁を設置したものが Carlos ら [69]や Adrian ら [70]によって検討が進められている。しかし、米谷ら [68]による副室の構造例においては、図 1-54 へ示すように、副室内に既燃ガスが残留することによる着火性の低下や、副室の過熱による自己着火などの問題がある。ジェット点火のみを採用した市販自動車用エンジンの実用化は未だ困難な状況である。

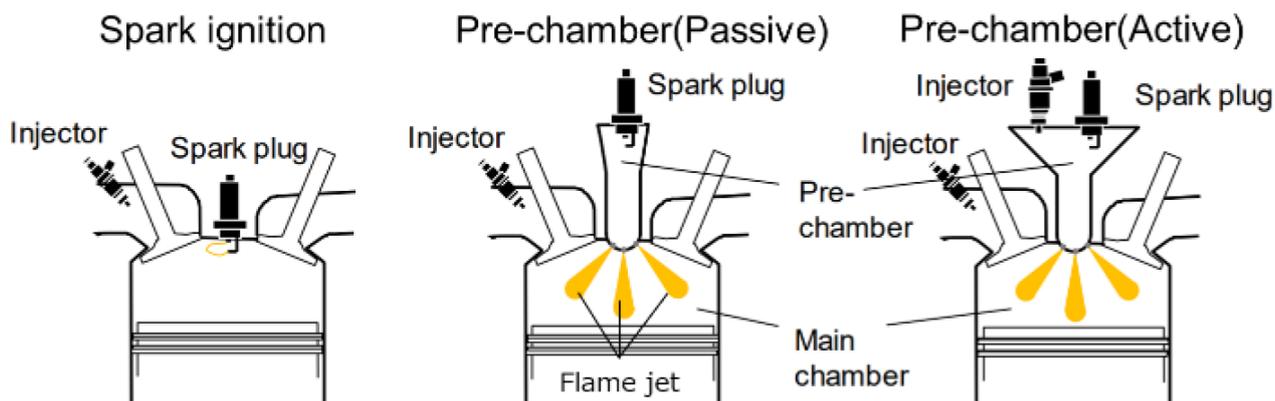


図 1-53 通常点火と副室点火の比較 [68]

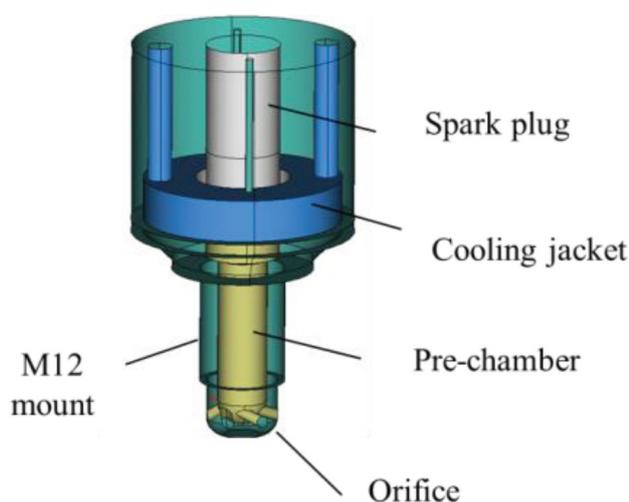


図 1-54 副室構造（水冷式） [68]

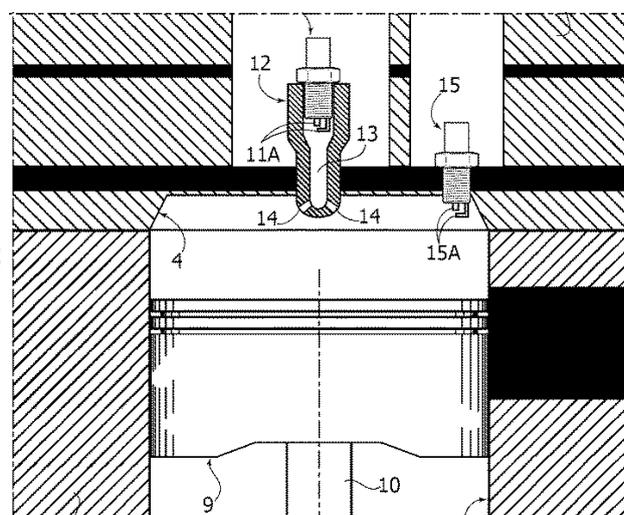


図 1-55 副室構造（点火プラグ2個） [71]

なお、上記問題を改善するため Magistrali ら [71]が図 1-55 へ示すように、従来の点火プラグを追加した方法がマセラティ社により出願された特許が登録されている。これは従来の火花点火（SI）との併用に近い形態である。

つまり、HCCI や PCI は、抱える問題の大きさから、SI との併用が欠かせない状況にある。そのため、SI 自体の改良による、希釈率増大の検討が進められており、次に SI における先行研究例を説明する。

1.4.3.SI の先行研究例

SI へ希釈燃焼を適用する場合の要求として、草壁ら [72]が図 1-56 へ示すように、筒内ガスの乱れ強さ（乱流強化）があり、希薄燃焼の火炎は乱流の影響をより強く受けると菅田ら [43]や井上ら [73]より報告されている。そのため、筒内における乱流成分を見積もるための数学モデルが考案され、乱流強化方法の検討が Peters [74], David [75], Liu

ら [76], Tang-Wei ら [77]によって行われている. 具体的な乱流強化方法については, クランク軸のロングストローク化や, 吸気口の隔壁形状見直しが Tianyou ら [78], Ikeya ら [79], Nakata ら [80], 柿沼ら [81], 南波ら [82]によって検討されている.

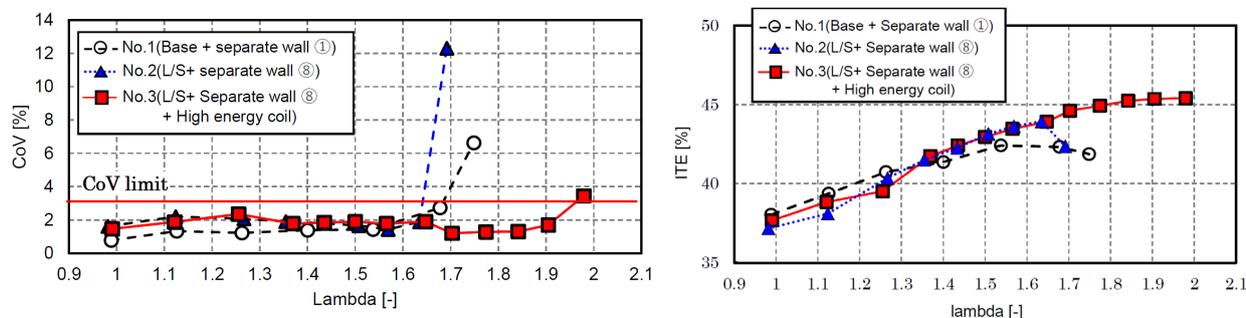


図 1-56 希釈燃焼への流動と点火エネルギーの影響 [72]

1.4.4.乱流強化と点火強化

乱流強化の評価方法についても Richard ら [83], Enaux ら [84], Benoit ら [85], Granet ら [86], Baum ら [87], Baumann ら [88], Shimura ら [89]によって検討が進んでおり, 計算値と計測値の比較検証が進んでいる. しかし, Müller ら [90], Brian ら [91][92], 沢田ら [93], 佐々木ら [94], 保木本ら [95]によると, 筒内の流動は, 残留ガスの乱れや環境温度などにより影響を受けるため, 安定した乱流強度を発生することが難しい. そして井上ら [56]や Wei ら [96]によれば, 乱流強度が燃焼サイクルごとに変わると, インジェクタによる燃料噴霧形状が変化するため, 着火性のサイクル変動が生じることになる.

この着火性のサイクル変動に対応するためには, 乱流強度に対応した点火強化が必要である. そして乱流強度の変化に対応した要求点火性能について実験的に検討された結果, 放電エネルギーに加え, 放電電流が着火性へ影響することが, Bengt [97], Walter ら [98], Shy ら [99], 緒方ら [100] によって述べられている. そこで緒方ら [101]は, 表 1-1 へ示すように, 様々な放電特性の点火コイルについて評価し, 図 1-57 へ示すように EGR 限界へ寄与する放電仕様を調査した. その結果緒方ら [101]や草壁ら [102]によると, 乱流強化のみでは着火性は改善せず, 点火強化における放電の高電流化が必要とされている.

表 1-1 点火強化のためのコイル仕様 [101]

No.	A	B	C	D	E1	E2	F1	F2
Specification	Single spark				Multi spark			
	Base	High energy (Long duration)	High energy (High current)	Dual (Synchro)	Single coil (Multiple)		Dual coil (Alternative)	
Sample								
Secondary energy* (Total)	70mJ	129mJ	123mJ	230mJ	145mJ 18times	151mJ 12times	280mJ	300mJ
Secondary current* (Peak)	60mA	50mA	130mA	220mA	140mA	140mA	130mA	130mA
Spark duration* (Total)	1.8msec	4.3ms	1.8msec	1.7msec	3.5msec	3.7msec	2.8msec	3.0msec

*Measurement condition
Primary voltage: 14V, Atmospheric temperature: 120deg.C, Wiring resistance: 0.2Ω, Secondary load: 5kΩ + 1.5kV zener diode

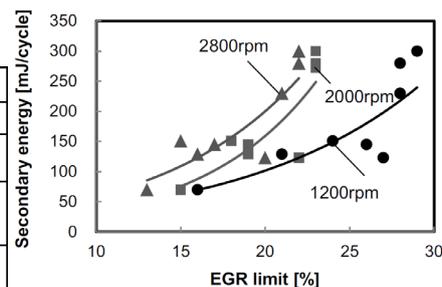


図 1-57 点火エネルギーと着火性の関係 [101]

なお、助川ら [103]、筆者 [104]、桑原 [105]によると、多気筒エンジンにおいて、希釈方法として排気ガス再循環 (EGR) を用いる場合は、吸入空気と EGR ガスとの気筒別混合率に偏りが生じる。そのため、混合器の形状を工夫することでの改善も試みられている。

1.4.5.点火の高電流化

点火強化における放電の高電流化について、高流動場においては放電経路が伸長するため、より高い電流が要求されることを、白石ら [106]や白石 [107]によって考えられている。そして横森が図 1-58 へ示すように、点火性能を推定するための指標を実験的に求める試みがされている。押領司ら [108]によると、一定期間の平均エネルギーと一定期間の平均電流は、点火性能との間で、高い相関が得られることを示している。

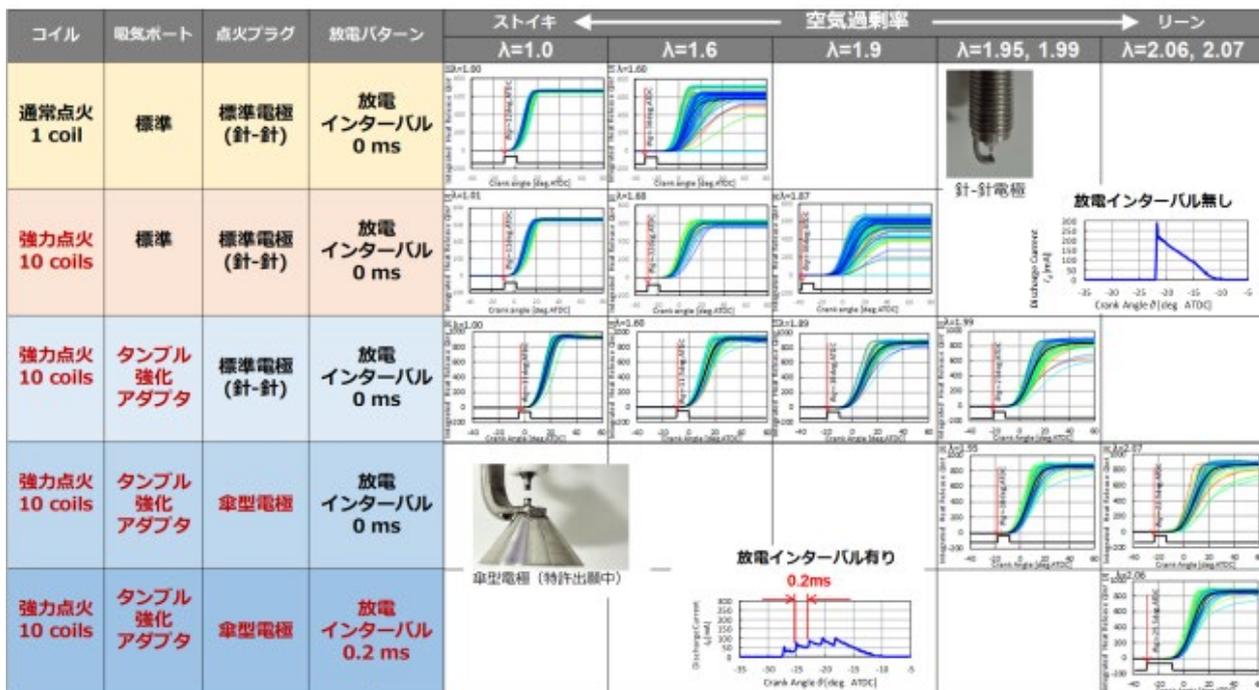


図 1-58 リーン限界拡大に必要な点火技術・流動強化策 [109]

そしてこの提案などを基に、より高い点火性能を得るための点火方法が Shiraishi ら [110]や Alger ら [111]によって検討されている。具体例としては横森 [109], Anqi ら [112], 坪井ら [113]が図 1-59 へ示すような多数の点火コイルを用いる方法や、白石 [107], 白石ら [62], Dongwon ら [114], 筆者 [115] は1個のコイルで複数回放電する多重点火を検討している。

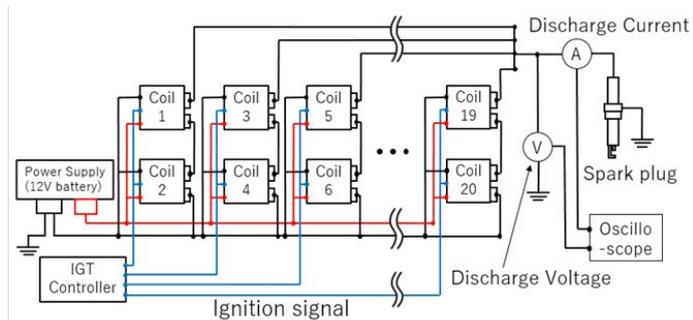
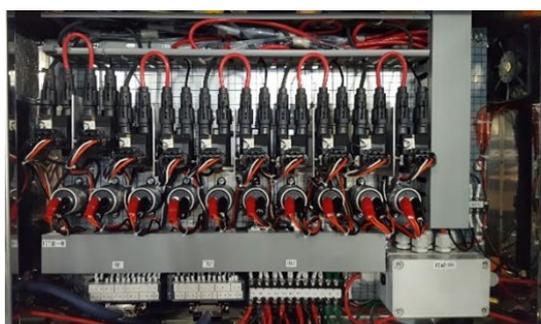


図 1-59 点火強化システムの例 [109]

1.4.6.点火の現象解明

実験的なパラメータサーベイによる着火性改善手法の検討に加えて、点火の現象解明へ向けた現象可視化など検討が Shiraishi ら [116], 今村ら [117], Qingchu ら [118], 筆者

[119] [120]によって進められている。例えば横森 [109]が検討している粒子画像流速測定法 (PIV) は、エンジン筒内におけるガス流動の瞬時速度を非接触で計測する手法である。

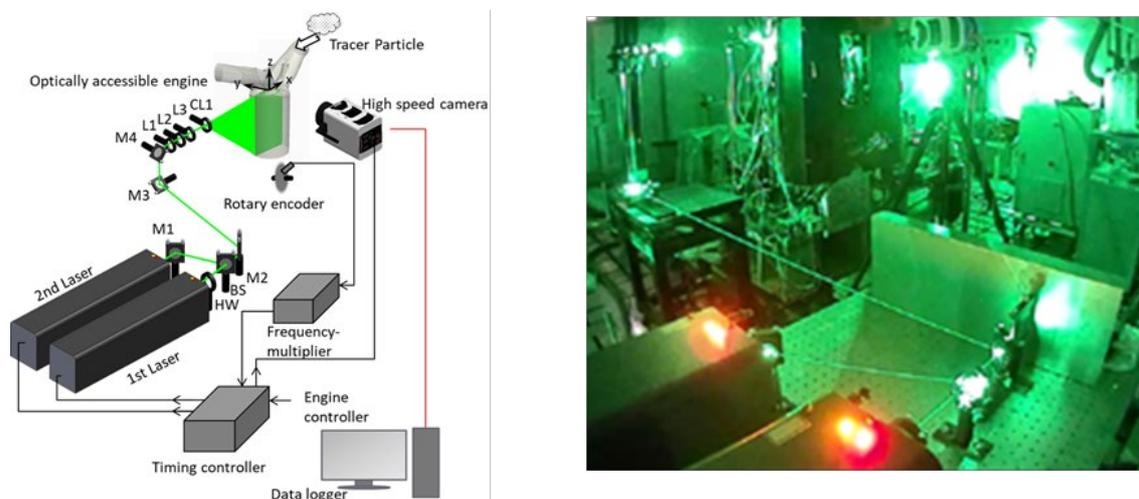


図 1-60 高速 PIV システムの概略 [109]

そして堀 [121]による図 1-61, 保坂ら [122]による図 1-62 へ示すように、点火の現象説明結果を活用することで Amsden ら [123], Jaehong ら [124], Fan ら [125], Duclos ら [126], Gardiner ら [127], Rainer [128]により検討されている放電経路モデル, Gerhard [129], Cornolti [130], 山村 [131], Sifoen [132]により検討されている点火回路モデル, 堀 [133], Sayama ら [134], 増田ら [135]によって検討されている点火モデルについて高精度化が進められている。

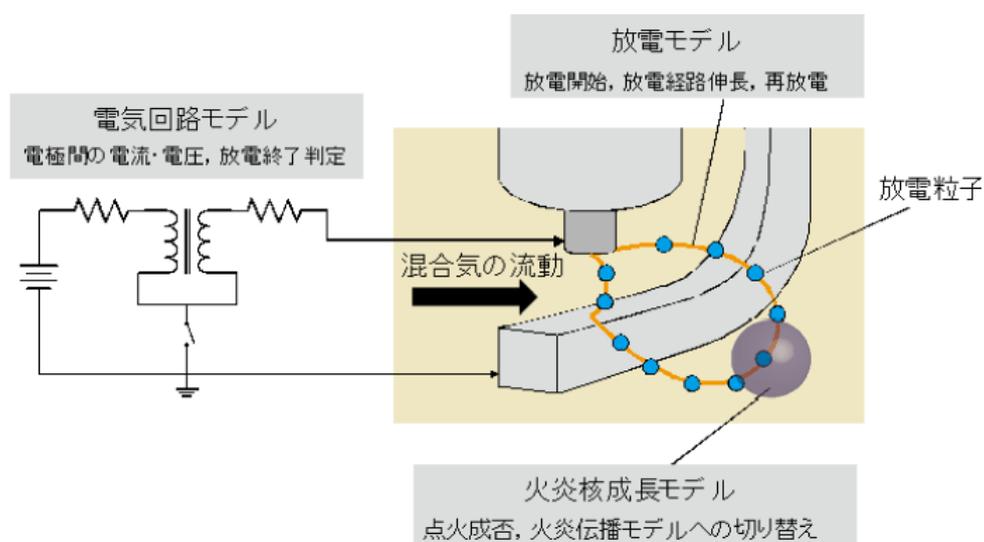


図 1-61 点火モデルの概要 [121]

これらの構築された点火モデルは Hosaka ら [122]が図 1-63 へ示すように、CFD とともに燃焼モデルへ組み込まれ津江ら [136], 山下ら [137][138], 中谷ら [139]の他、多くの研究者によって乱流強化と点火強化の両方を加味した検討ができるようになった [140][141][142][143][144][145][146][147][148][149][150]. これらの計算には時間を要するものの、吸気から排気へ至る過程を 3 次元で数値計算できるようになっており、より効率的に点火性能向上を検討できる環境が整ってきている。

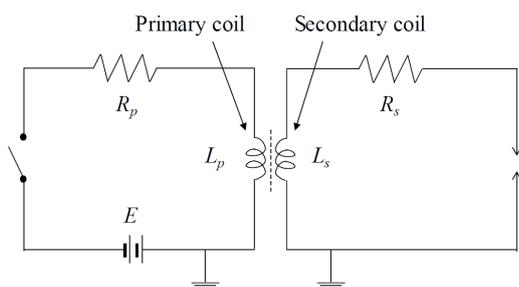


図 1-62 点火コイルの回路モデル [122]

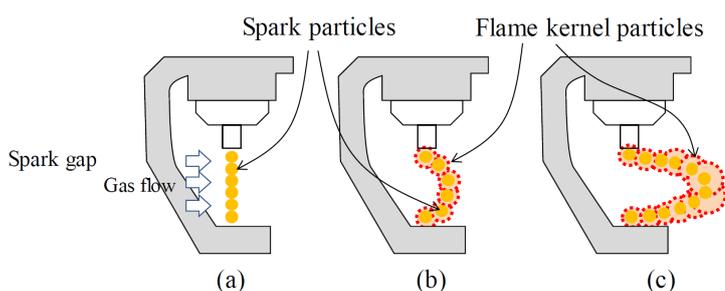


図 1-63 火炎核成長モデル [122]

1.4.7.点火強化の副作用

以上のように、数値計算による見積り精度は向上しているものの、計算負荷の大きさなどから、車載 ECU において点火時期におけるガスの点火性能を予測することは難しい状態にある。よって、点火性能の安全率を確保するためには、点火エネルギーや放電電流をより増大する必要が生じる。

しかしこれらの点火強化により、点火プラグの電極を通電する電流が増大するため、以下のような副作用を英ら [54], 緒方ら [100][101], 西尾 [151], Hayashi ら [152]によって懸念されている。

- ・電極の発熱による電極材の消耗体積増大（図 1-64）
- ・電費増大による正味燃費の悪化（図 1-65）

しかし、ガソリンエンジンの希釈燃焼における、電極材の消耗に伴う耐久性低下や、電費増大を抑制するための実用的な先行研究は見つからない。

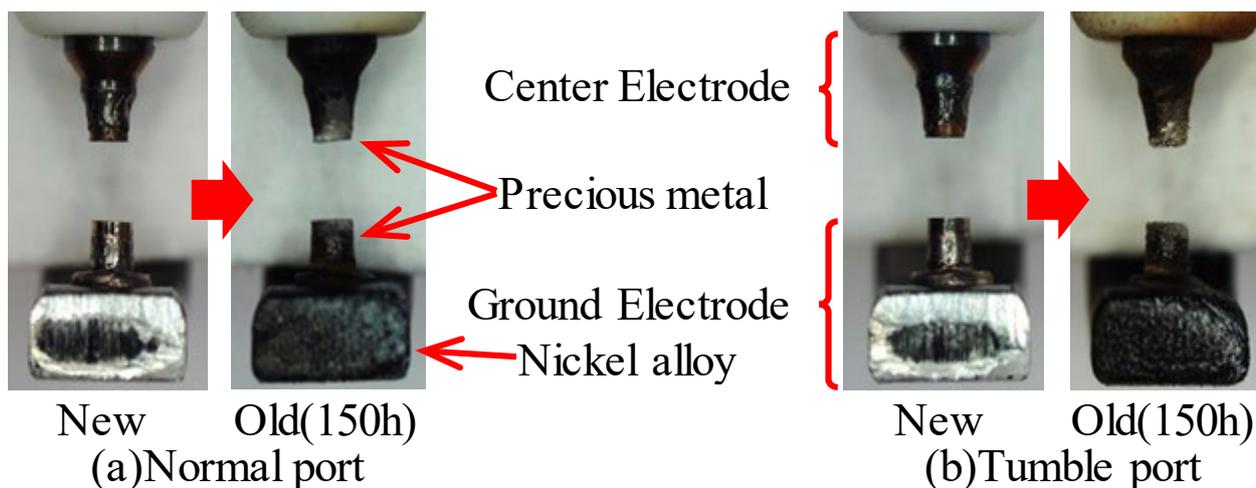


図 1-64 耐久評価における点火電極の外観例

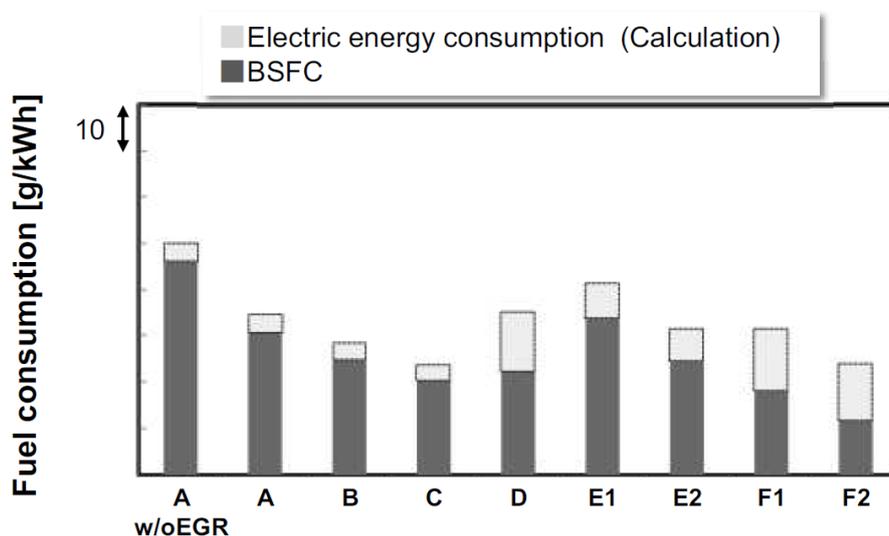


図 1-65 正味燃料消費率と点火に要する燃料消費率 [101]

1.5.希釈燃焼の副作用

1.5.1.耐久性低下の抑制

既に述べたとおり，吸入ガスの希釈に伴い，燃焼が不安定になるため，筒内流動を強化する研究が井上ら [73]によって推進されている．そして筒内の高流速場での着火性確保のため，より着火性の高い点火方法が必要となっており，点火の高エネルギー化が坪井ら [113]によって提案されている．一方で，高エネルギー化による点火プラグの電極消耗が懸念される．

高エネルギー点火を用いた耐久試験結果の例を図 1-64 へ示す。これは、後述する表 2-3 と表 2-4 の試験条件にて筆者らが取得した実験結果である。新品と比べて、150[hour]運転後は電極の形状が変化し、電極の消耗を確認できる。電極消耗はノーマルポートよりも高流動なタンブルポートの方が大きくなっている。特に、電極先端においては、消耗抑制を目的とした貴金属チップが既に使われている。

しかし一般的に、負極側となる中心電極は、正極側となる設置電極と比べて電極の消耗が大きい。さらに、電極チップの消耗は、電極隙間の距離を直接的に延長するため、燃焼性能への影響が大きい。そのため、EGR 燃焼向け筒内高流速エンジンにおける、着火性と耐久性の両立を目的として、中心電極チップにおける消耗要因の特定と低減を試みる。

ここでタンブルポートとは、シリンダーヘッドにある吸気口の設計により、燃焼室内へ導入された吸入ガスが縦渦（タンブル）を発生するようにしたものである。この縦渦のガス流れによって、点火電極間の流速が増大するものである。

1.5.2.電費増大の抑制

既に述べたとおり、吸入ガスの希釈に伴い、燃焼が不安定になるため、筒内流動を強化する研究が佐々木ら [94]によって行われている。そして筒内の高流速場での着火性確保のため、より点火性能の高い点火方法が必要となっており、点火の高エネルギー化が緒方ら [100][101]、坪井ら [113]によって提案されている。しかし、点火の高エネルギー化による電費増大は、正味熱効率の向上を抑制するため、燃費と電費のトレードオフが生じる。

これまでに筆者ら [24]は、点火エネルギーの時間配分に関する研究を行い、再放電の発生抑制による点火プラグの電極消耗への影響を確認した。その後の継続研究において、収録データの追加調査を行ったところ、再放電の発生抑制により点火性能も向上することを確認した。これは電費抑制と点火性能向上を両立できる可能性を示唆しているが、現象解明の課題が残っているため、本研究では数値シミュレーションによる解析と実機検証を実施することとした。

図 1-48, 図 1-67, 図 1-68 は、後述する表 3-2 表 3-3 の条件において筆者らが収録したデータを用いて調査した波形例である。図 1-48 へ定常運転における図示平均有効圧力 (IMEP) の測定例を示す。

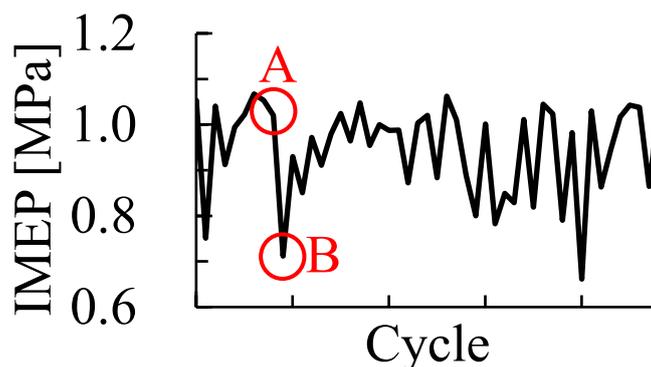


図 1-66 定常運転における図示平均有効圧力 IMEP の測定例

図 1-66 の測定例には正常燃焼サイクル C と半失火サイクル D があり、それぞれにおける放電電力 W_2 の測定波形例を図 1-67, 図 1-68 へ示す. 白石ら [106]によると C と D の W_2 波形では, ガス流速に追従した放電経路の伸長と再放電により, 放電電力 W_2 が変動している. 沢田ら [93]保木本ら [95]によるとこの変動周期は, D より C の方が短くなっていることから, D の方が低流速であり, これが半失火および燃費低下の一因であると考えられる. 本研究では, 燃費と電費のトレードオフ解消を目的として半失火抑制に有効な点火エネルギーの時間配分制御を提案する. そのために, 数値計算を用いた提案手法の現象解明と, 実エンジンを用いた検証を試みる.

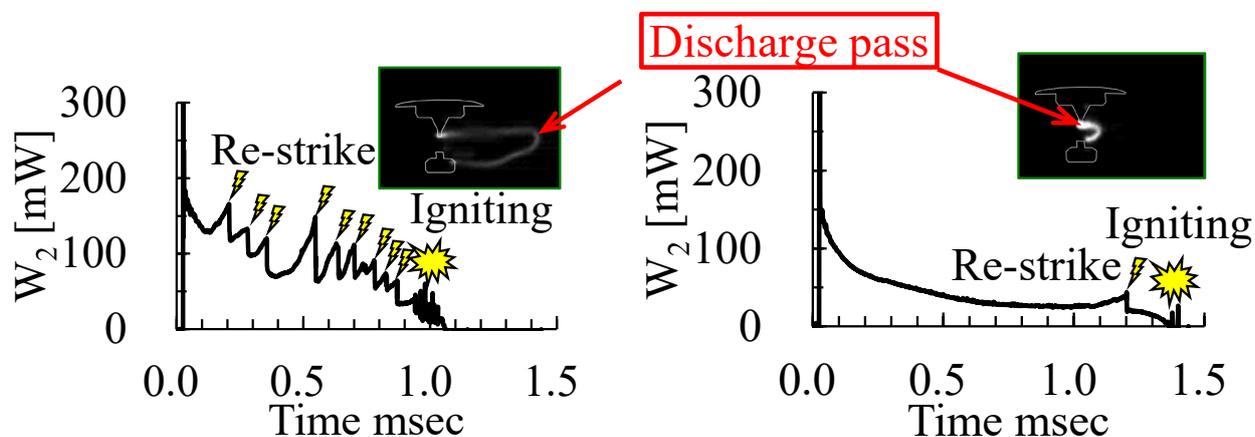


図 1-67 サイクル C の放電電力 W_2 波形例 図 1-68 サイクル D の放電電力 W_2 波形例

1.6.本論文の構成

ガソリンエンジンの希釈燃焼において生じる，副作用の抑制を目的とし，以下の論文構成とする．

第1章：先行研究から希釈燃焼の残課題を抽出し，研究目的を設定する．

第2章：火花点火における，耐久性低下の抑制技術を検討する．

第3章：火花点火における，電費増大の抑制技術を検討する．

第4章：検討結果をまとめ，総括を行う．

1.7.章のまとめ

本章では，社会問題よりエンジンの課題を設定した．最初に，SDGsの目標7と目標13への技術的な貢献方法を検討した．この2つの目標を達成するための，エンジンの社会的な最優先課題の一つは，ガソリンエンジンの燃費低減である．しかし，燃費（CO₂）と排気（NO_xなど）の間にはトレードオフが生じる．そしてさらに，このトレードオフを解消するための方策の1つに希釈燃焼がある．そして次に，希釈燃焼の副作用を抽出し，研究対象を設定した．

希釈燃焼による新たな問題として，着火性低下がある．先行研究について調査を実施した結果，着火性低下については，筒内の流動強化や点火強化が有効であることが判った．しかし，点火強化による，電極消耗や電費の増大が懸念される．そのため，希釈燃焼ガソリンエンジンの着火性向上を目的とした，筒内ガスの高流動化における，点火用電極チップの消耗低減と点火の省エネルギー化の両立を，研究目的とする．

第2章 耐久性低下の抑制技術

2.1.調査

火花点火における、先行研究の包括的なレビューと本研究の位置づけを示す。その上で、耐久性低下の抑制技術を調査する。

2.1.1.消耗要因

電極の消耗要因について、先行研究の調査を基に検討を行う。アーク放電における電極蒸気の生成と、それに伴う電極の浸食については、過去より多くの研究がなされている [29][153][154][155][156]。例えば、放電の悪影響で電極金属が浸食される例として、Llewellyn ら [157][158]や Want [159]が研究している電気接点がある。

その他、パルス電界による電極の浸食について数多くの研究例もある [160][161][162][163][164][165][166]。点火プラグについては、電極材料と浸食メカニズムについての先行研究例があり、以下へその内容を説明する。

2.1.2.電極材料

電極材料について Rager [25]や Llewellyn ら [157]によると、浸食特性に関して有利なのは、高い融点または沸点、高い密度、熱伝導率および熱容量、高い原子量、ならびに高い耐酸化性および耐腐食性である。他にも、十分な電気伝導性、良好な熱衝撃性、製造上重要な役割を果たす十分な延性などが重要な要件となる。

そのため、Llewellyn ら [157]は表 2-1 へ示すように、様々な金属材料を組み合わせることで、性能向上を図っている。これらの材料技術については、主に Chang ら [167][168][169]、Oshima ら [170][171][172]、Matsutani ら [173][174][175][176]によって多くの特許が出願されている。そしてこれらの出願内容において、主に扱われている材料は、ニッケルと、貴金属（プラチナ等）である。

表 2-1 Data on Physical Properties and Erosion [157]

No.	Metal	Density [g/cm ³]	Boiling point[°C]	Thermal conductivity joules/sec cm/° C	Specific heat, joules/ g°C	Atomic weight	Transfer coefficient(cathode loss) in cm' x 10 -6/C	
							Measured	Calculated
1	Ag	10.5	1950	4.2	0.23	108	0.33	0.34
2	Au	19.3	2600	2.9	0.13	197	0.34	1.1
3	Ir	22.4	4800	0.58	0.13	193	0.25	
4	Pd	12.2	2200	0.7	0.29	107	1.51	1.59
5	Pt	21.4	4300	0.7	0.13	195	0.43	0.41
6	10% Ir-Pt	21.6	4400	0.31	0.13	94	0.63	0.81
7	20% Ir-Pt	21.7	4500	0.18	0.13	194	0.6	0.67
8	30% Ir-Pt	21.8	4600	0.2	0.13	94	0.54	0.54
9	Rh	12.4	3880	0.88	0.24	103	0.42	0.5

2.1.3.浸食メカニズムの仮説

Rager ら [23] [28]によれば一般的に、電極の消耗は放電プラズマと電極表面の相互作用によって引き起こされる。そしてその詳細な電極の浸食メカニズムについては、主に4つの仮説が議論されている。

- (1) 粒子放出モデル
- (2) 蒸発モデル (Llewellyn [29]の研究による)
- (3) スパッタリングモデル (Peter [177]の研究による)
- (4) 酸化物除去モデル

これらの仮説を検証するため、Rager ら [23]によって高温圧力容器 (図 2-7) を用いた浸食評価試験が実施された。評価試験において、圧力容器へ封入するガスには、純窒素または合成乾燥空気が用いられた。その結果、合成乾燥空気では電極の浸食を確認できたが、純窒素では顕著な浸食を確認できなかった。

ここで、粒子放出モデル、蒸発、スパッタリングは、周囲の大気とはほとんど無関係に起こると考えられている。そのため、酸化が主な浸食メカニズムであることが示唆された。酸化消耗について、ニッケルの場合は、誘電体として機能する酸化層が除去される、酸化消耗により電極の浸食が生じる。しかし、プラチナ等の貴金属は、高温でも酸化層を形成しないことが Rager ら [23] [28]によって明らかにされた。よって貴金属の場合、酸化消耗は、高い蒸気圧による揮発性酸化物の蒸発によって起こることになる。

2.1.4.浸食現象の観察

図 2-2 は Jeanvoine ら [26]によって撮影された、高圧下において単發放電により白金陰極へ生じたクレータの外観例である。Burkhard [178]によると、これらのクレータの半

径は5~10[μm]である。Jeanvoine ら [26]によるとこのクレータにおいて、Eoin ら [179]の研究による液体粒子の放出、Sylvain ら [180]の研究による気化、または酸化が生じる結果、電極の浸食が生じる。その結果図 2-1 へ示すように表面と層に作用する高いイオン圧力により窪みが形成されて、液体金属がクレータの縁まで押し出され、そこで冷却されて固化していることを Jeanvoine ら [27]や Raymond [181]によって明らかにされた。

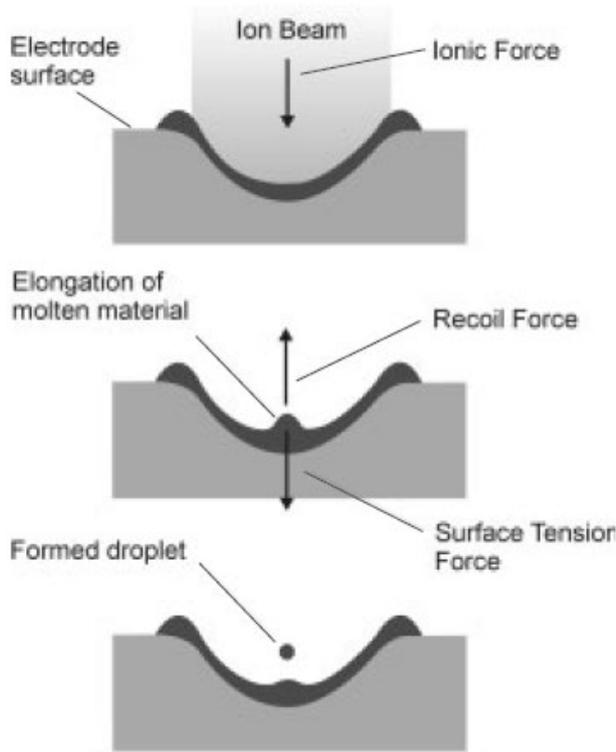


図 2-1 液滴排出モードの模式図 [28]

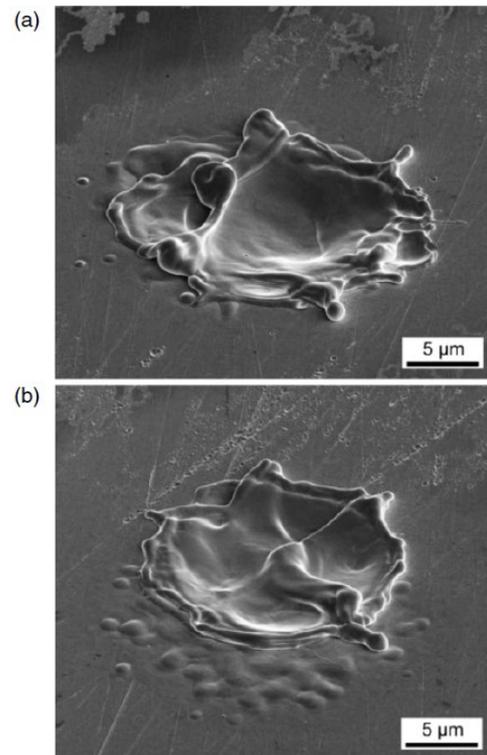


図 2-2 単発放電によるクレータの SEM 写真 [27]

2.1.5.浸食現象の見積

電極における浸食メカニズムを解明するため、数値計算によるクレータ生成シミュレーションの例がある。

(1) Llewellyn ら [29] [157]によって導かれた、放電ごとの蒸発体積（火花浸食）と電極材料の物理的特性との関係式(2-1)。

$$v = \frac{\alpha T^4 - \beta T^4 - \gamma k(T - \theta_{hs})}{\rho\{(T_M - \theta_{hs})s + 2T_M/A\}} \quad (2-1)$$

v : 1回の放電で電極の金属が侵食される量または蒸発量, ρ : 密度 (金属), T_M : 金属の沸点, k : 熱伝導率, A : 原子量, s : 比熱, V : 電圧 (有効放電電位差), α : 局所容量 C と放電条件の係数 (電極で放出される全エネルギーのうち利用可能な割合), β : ステファン定数とホットスポットの面積を含む定数, γ : 金属中のエネルギーの熱伝導率に関連する幾何学的因子, θ_{hs} : ホットスポットから離れた地点の定常温度

(2) Jeanvoine ら [26]による, 有限要素法 (FEM) を用いた, 白金陰極上のクレータ形成の熱シミュレーション.

(3)カソードスポットにおける, イオン照射, 電子放出, 気化, 融解, 熱伝導などのモデリングについては, 多くの研究者によって調べられている [182] [183] [184] [185] [186] [187] [188] [189].

その結果例えば, 放電開始からクレータ形成までの時間は約 100[ns]で, その際の電流範囲は 5~25[A], などの現象が Jeanvoine ら [26]によって明らかにされた.

2.1.6.浸食現象の影響因子

電極における浸食メカニズムを解明する手段として, 実験的なパラメータサーベイが Rager ら [23]によって試みられている. その代表的な影響因子として, 環境温度 (図 2-3), 電極表面積 (図 2-4), 環境圧力 (図 2-5), 点火電圧 (図 2-6) などがある.

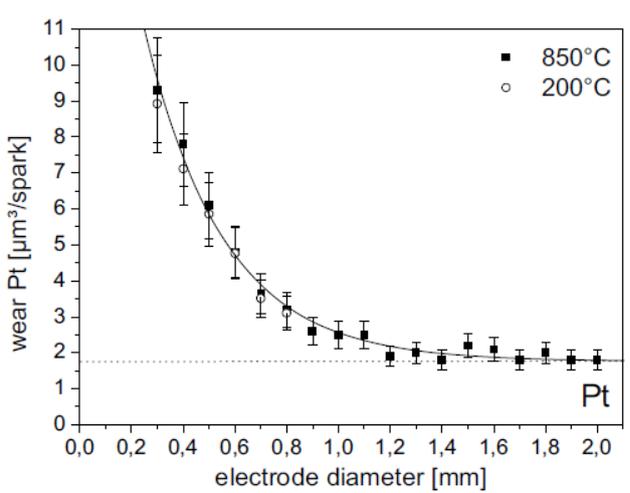
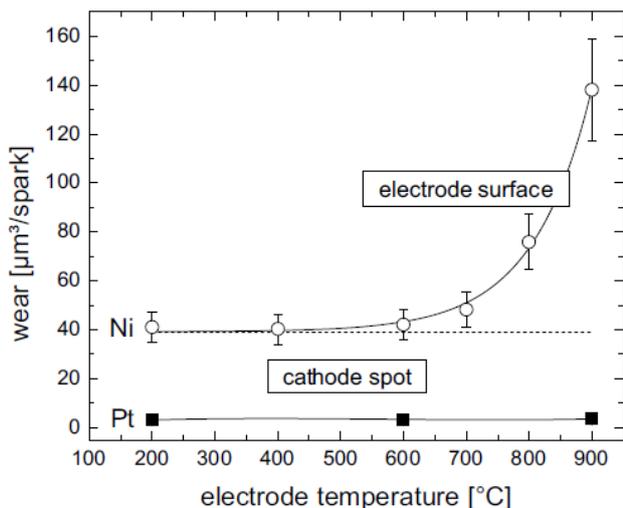


図 2-3 電極消耗と環境温度の関係 [23]

図 2-4 電極消耗と電極表面積の関係 [23]

これら影響因子の中で, 点火電圧については, さらに詳細な調査が行われている. 白金電極の場合, 電極の浸食は点火電圧とともに増加する.

ここで図 2-6 の実験結果によると、容量成分ゼロを想定した場合でも、電極の浸食はゼロにはならない。よってこの場合の浸食は、点火電圧にほぼ依存しない誘導放電のみから発生し、電極の消耗に一定の量で寄与すると考えられる。つまりこの仮定において、点火電圧に依存する追加の電極消耗割合は、容量放電に起因するものである。

したがって、白金電極の耐消耗性は、点火システムや点火プラグの容量成分を減らすことで向上させることができる。ここで、パッシェン [190]の法則によれば、電極ギャップの距離は点火電圧に直結している。したがって、Thomas ら [191]によれば電極ギャップの距離が大きくなると、点火電圧が高くなり、点火プラグの寿命が短くなる。つまり、電極ギャップの距離の変化により、コンデンサの放電に起因する過渡的なアーク相が大きな消耗を引き起こすことを Rager ら [23]は明らかにした。

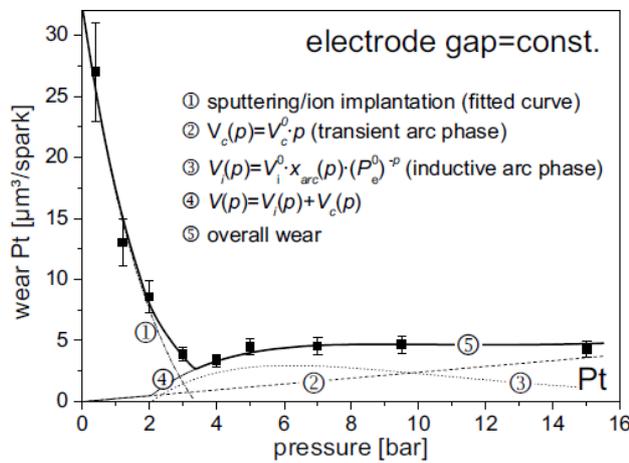


図 2-5 電極消耗と環境圧力の関係 [23]

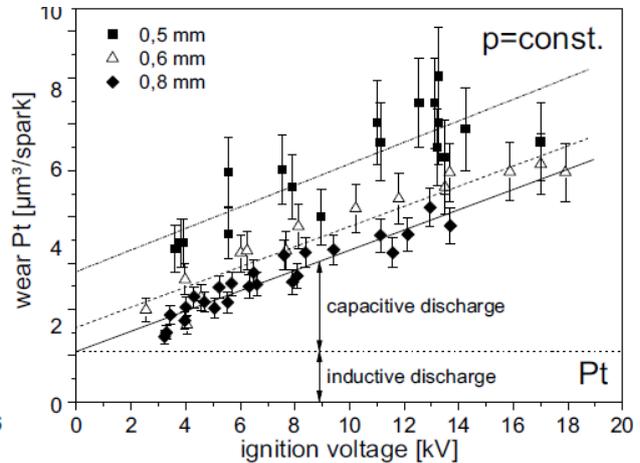


図 2-6 電極消耗と点火電圧の関係 [23]

2.1.7.放電の耐久性評価

以上の研究事例は、Rager ら [28]が図 2-7 へ示すような主に机上の単発放電実験による検討結果である。しかし、連続の多数放電実験を行うと、異なる傾向が示された。

例えば、単発放電実験ではクレータによる電極消耗を確認できるが、耐久試験では放電回数に応じた消耗量を確認できないことを Rager ら [28]は明らかにした。これは、白金電極の消耗は、揮発性の酸化分子が形成されて蒸発することで起こるが、この酸化分子の一部は図 2-8 へ示すような表面への逆反射により再付着するためと Rager ら [28]によって考えられている。よって、電極の表面積が大きいほど、蒸発した分子が表面に再反射されずに逃げ出す確率が低くなるものと考えられている。

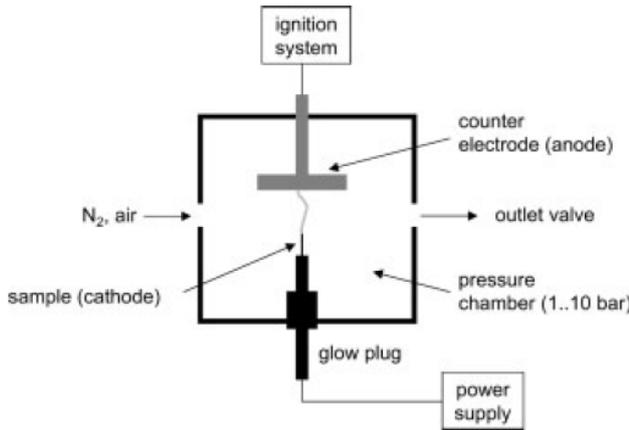


図 2-7 高温高圧の点火試験装置 [28]

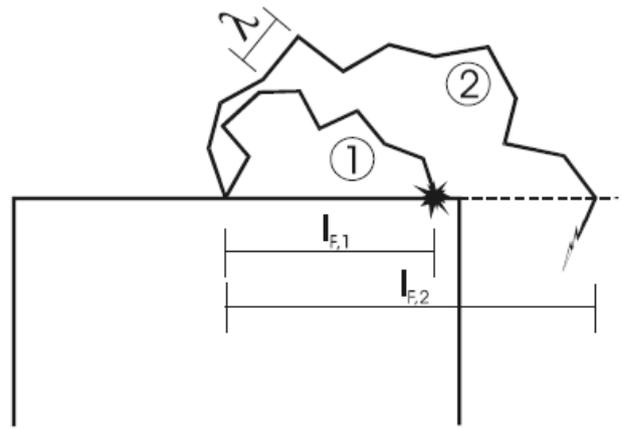


図 2-8 分子逆反射の模式図 [23]

2.1.8.電極消耗の抑制方法

以上の調査結果により、電極消耗の抑制には、容量成分の抑制、電極ギャップの縮小、電極表面積の拡大が有効である。そのため、Rager ら [23]の先行研究においては、今後のエンジンについて以下の見解が示されている。

- (1) 直噴エンジンのような最新のエンジンコンセプトでは、ポート噴射エンジンの約 10[m/s]と比較して、最大[30m/s]という非常に高い流速を示す。
- (2) このような高流速では、火花がかなり反り返る。そのため、火花プラズマや火炎核からの熱放散による電極の消費損失はほとんど無視できる。
- (3) これにより、電極ギャップを小さくすることが可能となり、点火電圧の低下と中心電極径の拡大を実現する。
- (4) そして、中心電極の直径も大きくなり、耐消耗性の面でも有利になる。

しかし、この先行研究においては、実エンジンでの評価はされておらず、ガス流動や燃焼を伴わない圧力容器での検討評価に留まっている (図 2-7)。

また、電極間ガスの高流速化に伴い、電極表面で蒸発した分子が風に流されることで、表面に再反射されずに逃げ出す確率が高くなることなども懸念される。そのため、エンジンにおける電極消耗メカニズムの解明と消耗低減策を検討することとする。

2.1.9.エンジンにおける電極消耗

図 2-9 は筆者による高エネルギー点火試験後の点火プラグ電極外観の例である。中心電極を構成するニッケル (Ni) 材において溶損を確認できる。この試験装置の構成を図 2-11 へ示す。逆流防止用のダイオードボックスを介して 16 個の点火コイルを並列接続することで、最大で約 2[J]の放電を可能とするものであり、電極消耗の加速試験用に筆者らが制作した。そして次に図 2-10 へ西尾 [151]による点火エネルギーと電極消耗の関係を示す。

従来において、電極の消耗要因は点火エネルギーが支配的であると西尾 [151]は述べている。しかし、従来の電極材は主にニッケル合金を使用している。これに対して、近年では、貴金属チップを採用することで、耐久性を保ちながら、電極径を細くしている。これにより、火炎核から電極への伝熱低減や、電界強度の増大による、着火性改善が図られている。しかしこの電極材質の違いによる、電極消耗メカニズムへの影響が考えられるため、調査を実施した。

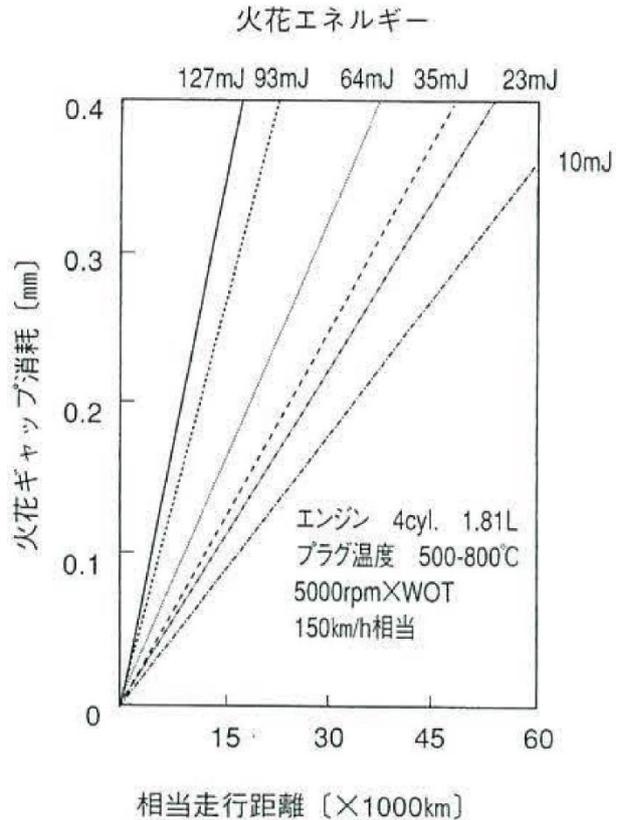
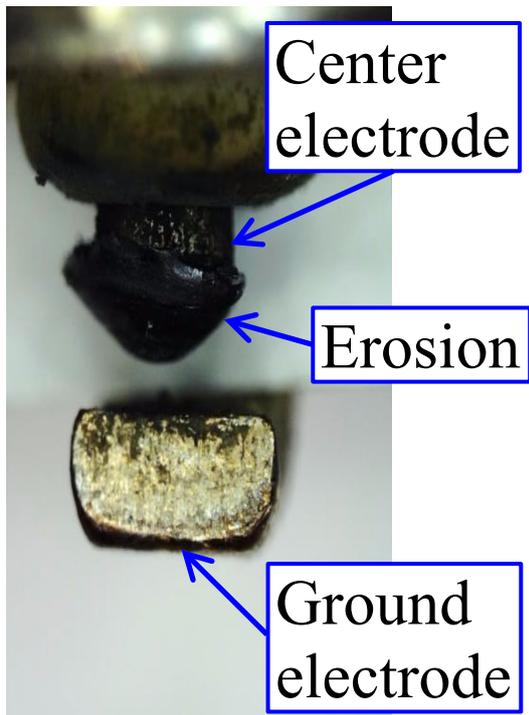


図 2-9 Ni 電極の高エネルギー放電試験例

図 2-10 点火エネルギー電極消耗の関係 [151]

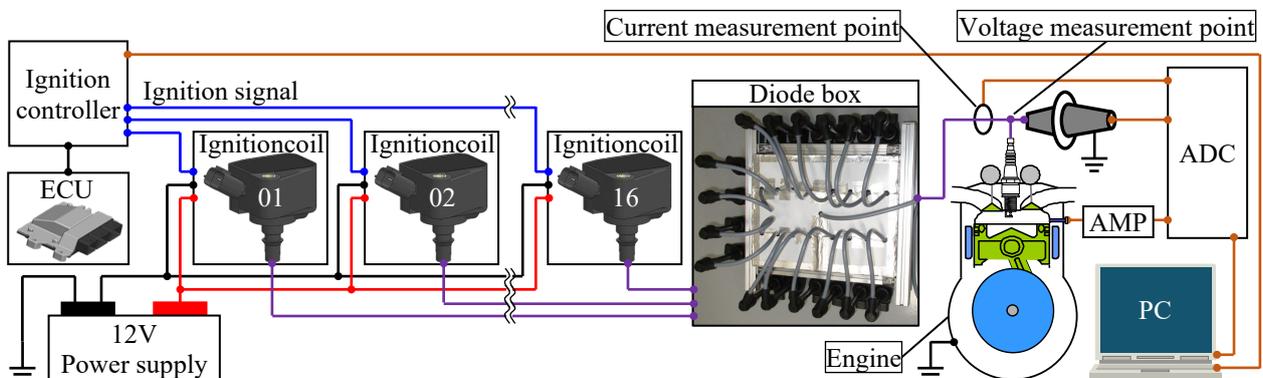


図 2-11 高エネルギー点火試験装置の構成

西尾 [151]による一般的なエンジンにおける、電極部位ごとの材質と消耗要因を表 2-2 へ示す。消耗要因には火花消耗と高温酸化がある。しかし、貴金属は酸化消耗が無いため、消耗要因は火花消耗である。

表 2-2 電極消耗要因

No.	Electrode	Material	Wear factor
1	Center	Precious metal	Wear by spark
2	Ground		
3		Nickel alloy	
4			High temperature oxidation

この火花消耗については、すでに述べた通り、点火放電の電流衝突面である電極が、局部的に高温となり、溶解、離散するものである。この点火放電は容量放電と誘導放電の合成である。図 2-12 は、貴金属電極が影響を受けるそれぞれのエネルギー供給源について、西尾 [151]の文献を整理したものである。一般的に、誘導放電よりも容量放電の方が高電流となるため、消耗体積についても同様の傾向を確認できる。

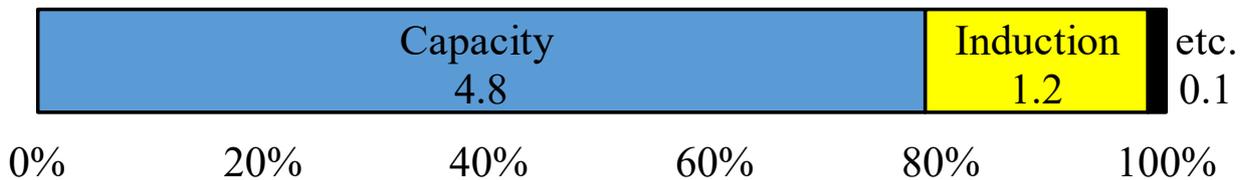


図 2-12 電極消耗体積[fl] (femto litre)

2.1.10.容量放電

西尾 [151]によると容量放電のエネルギー算出式(2-2)について、静電容量 C は、点火プラグや高圧コードなどの浮遊容量であり一定と考えられる。電極間の絶縁破壊に必要な要求電圧 V_2 についても、エンジンの運転を定常とすれば一定である。従って、電極を消耗させる容量放電エネルギー E_2 は一定であると仮定する。以上より、消耗体積は容量放電の回数と相関があると考え、容量放電回数の発生要因を検討することとした。

$$E_2 = \frac{1}{2} CV_2^2 \quad (2-2)$$

E_2 : 放電エネルギー[J], C : 静電容量[F], V_2 : 要求電圧[V]

2.1.11.容量放電回数

容量放電は短時間に高電流と高電圧を伴う．図 2-13 は風洞中の点火放電における， V_2 と放電経路の遷移の例である．一度の点火放電の期間中に複数の容量放電があり，時間の経過と共に周期が短くなっている．2回目以降の容量放電を再放電と定義し，発生メカニズムを検討した．本研究においては，過去の経験値を基に $dV_2/dt \geq 0.7[\text{kV}/\mu\text{s}]$ は容量放電を伴う再放電と定義し，これ以外については容量放電を伴わない放電経路の短絡であると仮定した．

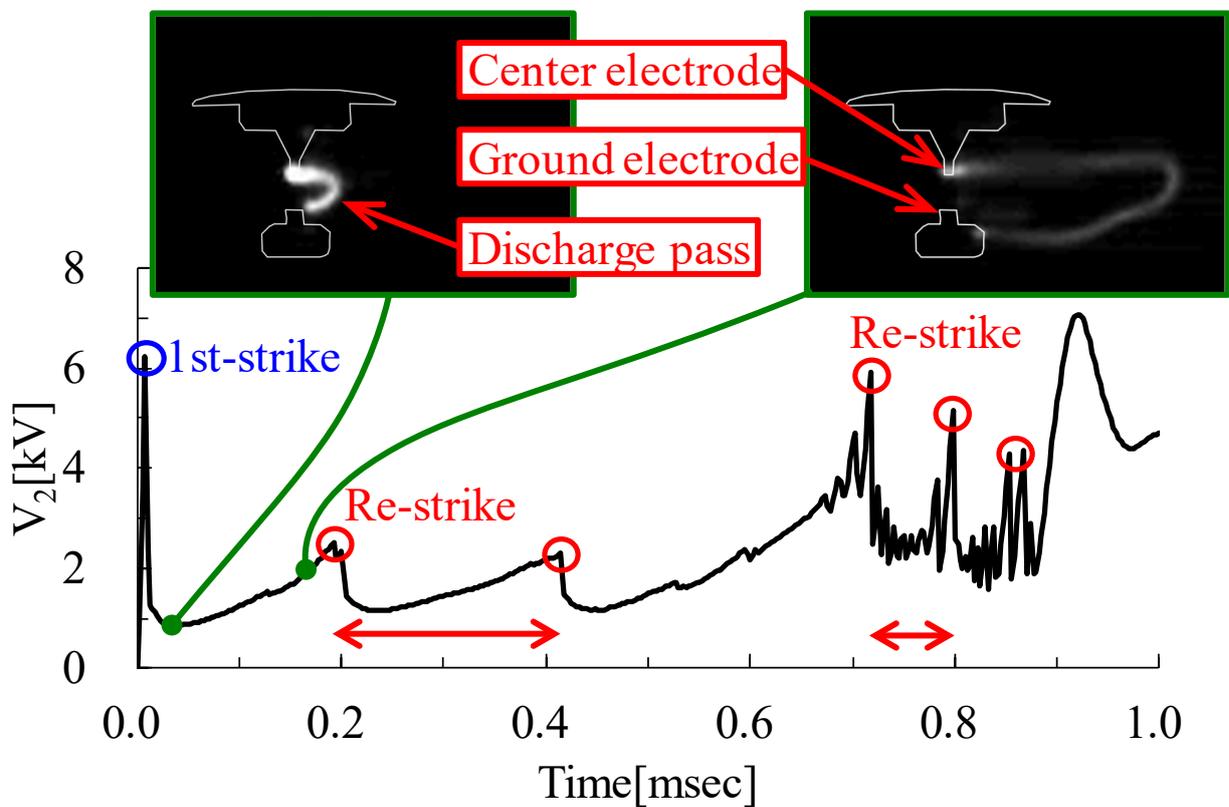


図 2-13 風洞実験による再放電の波形例

放電経路の遷移を撮影するにあたり，図 2-14 へ示す専用の風洞実験装置を制作した．透明アクリル管へ点火プラグを取り付けた状態で，掃除機で管内を吸引することでエンジン筒内の流動状態を模擬した．放電経路の再現性を確保するため，アクリル管の吸気口へ整流板を取り付けることで，管内流れの乱れを抑制することに努めた．点火制御においては，筆者が FPGA を用いて製作した簡易 SILS よりエンジンを模擬した信号を出力

させることで、実エンジンと同等の制御機能を実現できた。さらに各計測器からの出力信号はAD変換器を経由してパソコンへ収録される。簡易SILSによりエンジンと同様の時期基準信号を基に収録できるため、エンジンベンチ試験と同じ収録装置を用いた。これによりエンジンベンチ試験とのデータ比較を可能にした。

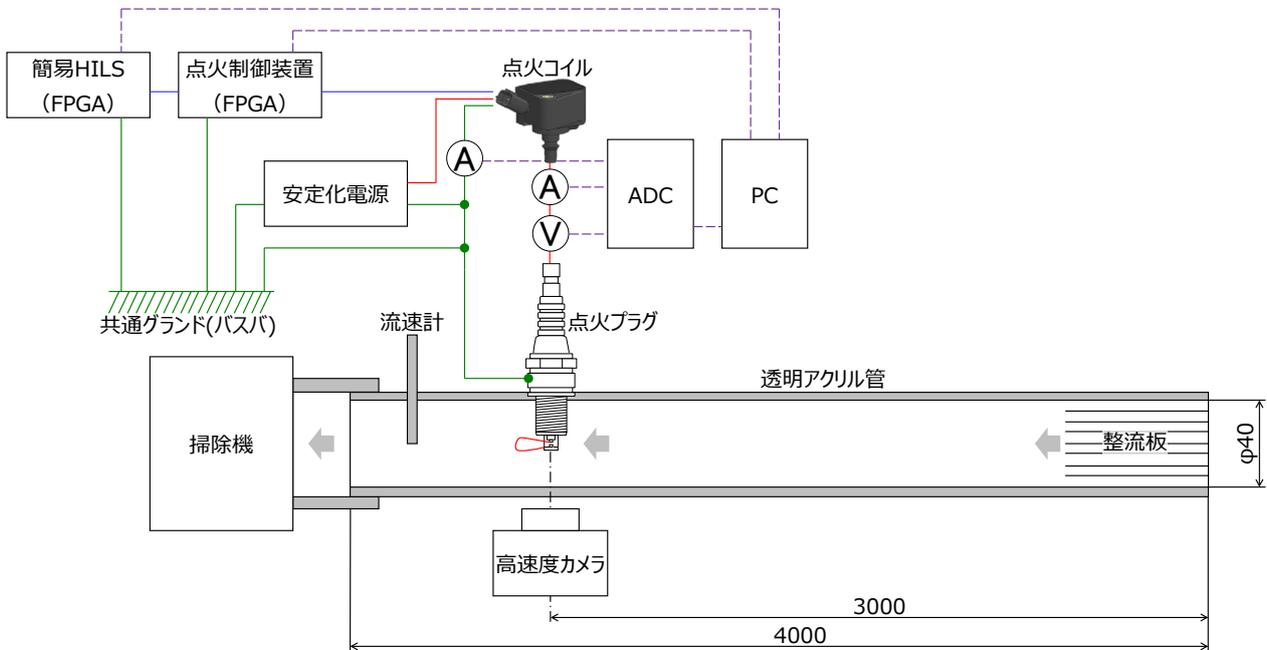


図 2-14 風洞試験装置の構成

2.1.12.再放電

図 2-13 において、放電経路は、時間の経過と共に風に流されて伸長している。放電経路が流速で移動すると仮定した場合、放電経路長さは式(2-3)で表される。

$$l_{spk} = d_{gap} + 2C_g u_g t \quad (2-3)$$

ここで V_2 は Kim ら [124]による実験式より、放電経路長さから式(2-4)で算出できる。この実験式の確からしさについては、今村らによって確認されている。そして今村ら [117]によると、グロー放電においてばらつきはあるものの Kim ら [124]の式は現象を良く捉えていることが分かっている。

$$V_2 = 40460 l_{spk} I_2^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} \quad (2-4)$$

次に点火コイルの出力電流 I_2 は、時間に比例して低下するため、式(2-5)で算出できる。

$$I_2 = I_{2S} - C_C t \quad (2-5)$$

そして式(2-3)、式(2-5)を、式(2-4)へ代入し、 V_2 の遷移を算出できる。

$$V_2 = 40460 (d_{gap} + 2C_g u_g t) (I_{2S} - C_C t)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{0.51} \quad (2-6)$$

l_{spk} : 放電経路長さ[m], p_0 : 大気圧[pa], p : 筒内圧[Pa], I_2 : 電流[A], I_{2S} : 初期電流[A],
 u_g : 流速[m/sec], d_{gap} : 電極間距離[m], C_g : 放電経路定数[-] (=1), C_C : コイル特性定数
 [A/sec], t : 時間[sec]

ここで、点火放電時間は燃焼サイクルに対して、十分に短いため、 d_{gap} , C_g , I_{2S} , C_C ,
 u_g , p , p_0 を一定と仮定する。

式(2-6)より、 V_2 は、電極間の流速に加えて、時間と共に上昇する。つまり、図 2-15 へ
 表す模式図のように、出力可能電力 W_2' と要求電力 W_2 の差は時間と共に縮小するため、
 流速が高いほど、より早期に電力不足が生じることから、再放電の周期は短くなる。

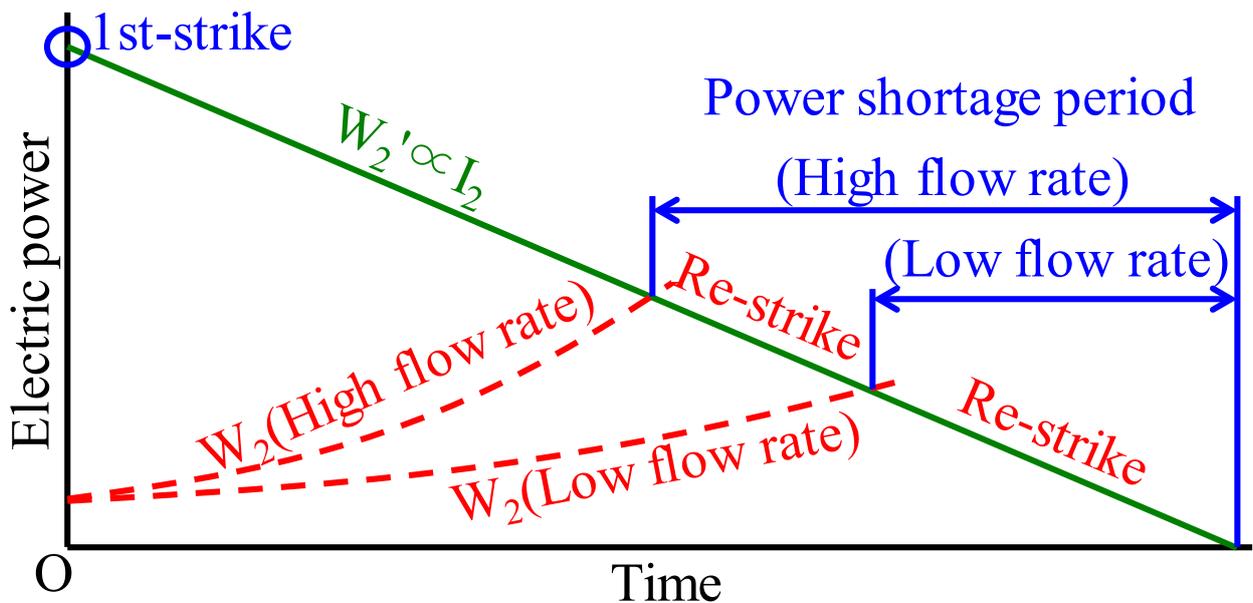


図 2-15 放電中における電力不足期間を表す模式図

2.1.13.対策

電力不足期間において、再放電が増加するため、対策には、 W_2' 自体の増加による W_2 との交差ポイントの遅延と、 W_2' の減少傾きの急峻化による電力不足期間の減少が有効である。ここで本研究においては、 $W_2' \propto I_2$ と仮定した上で、電流補助による再放電回数の抑制方策を考案し [57] [119] [192]、放電電流補助機能を付加した点火コイルを開発した [193] [194]。

電流不足期間における電流を補うには、この期間の放電電流を増加させる必要があるが、従来の1次コイルへ蓄積したエネルギーの放出のみで実現させることは困難である。そこで本研究では、従来方式の点火コイルの1次側へ3次コイルを追加し、このコイルに蓄積したエネルギーを電流補助に使用する方式を採用した。図 2-16 へ試作した点火コイルの構成を示す。

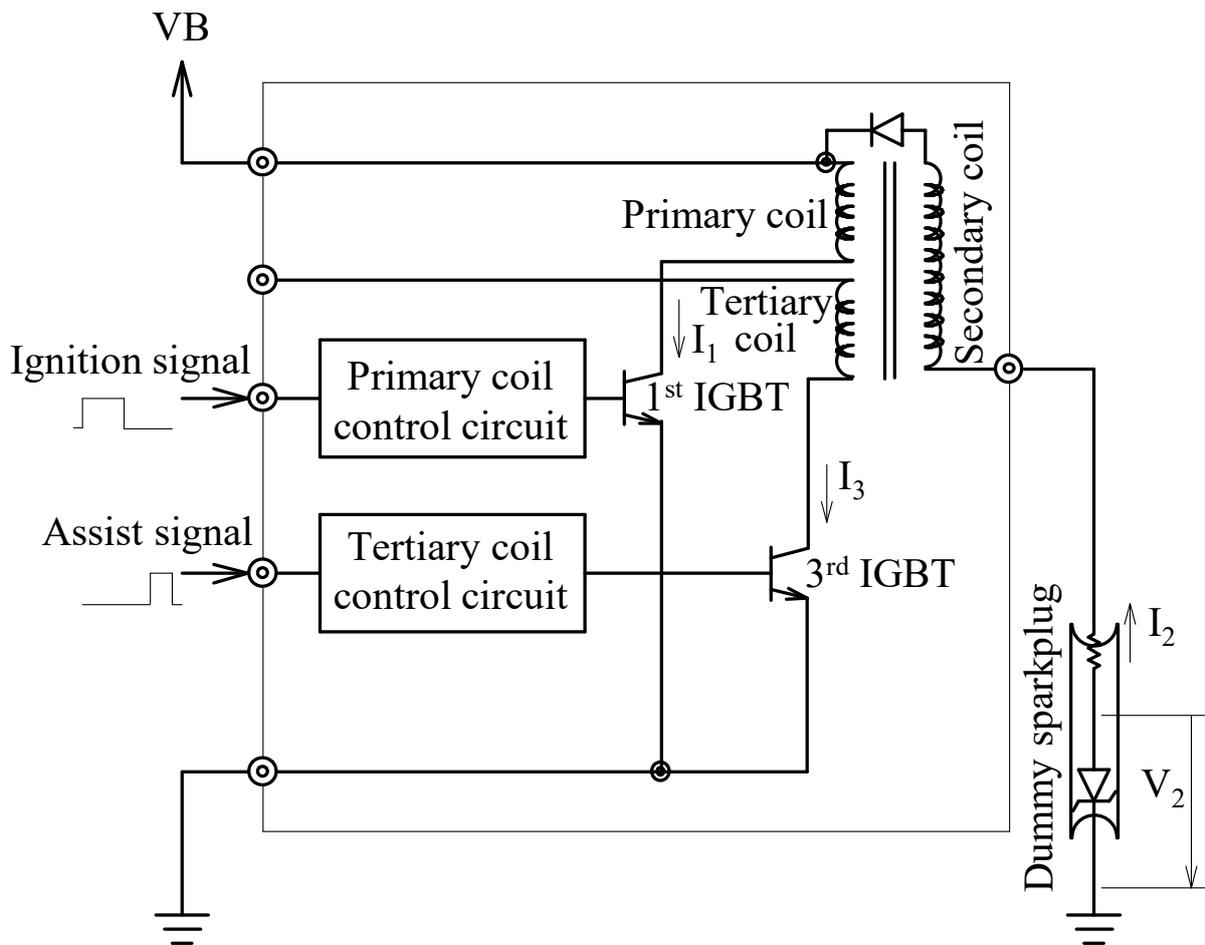


図 2-16 試作した点火コイルの構成仕様

3次コイルは1次回路と同様に、IGBTと制御回路を備える。つまり2次電流の補助を制御するための補助信号線が制御回路へ入力され、制御回路からはIGBTを駆動するためのゲート信号が出力される。

図2-17へ試作した点火コイルの動作原理を示す。1次コイルの通電が遮断されたことに伴い、2次コイルで生じた電圧を受けて、点火プラグの電極間が通電する。通電期間中に補助信号をONにすると、3次コイルで生じた電流変化が2次コイルの電流を増幅する。2次コイルの放電期間中であれば、補助の期間を自由に設定できるため、放電エネルギーの時間配分制御が可能である。

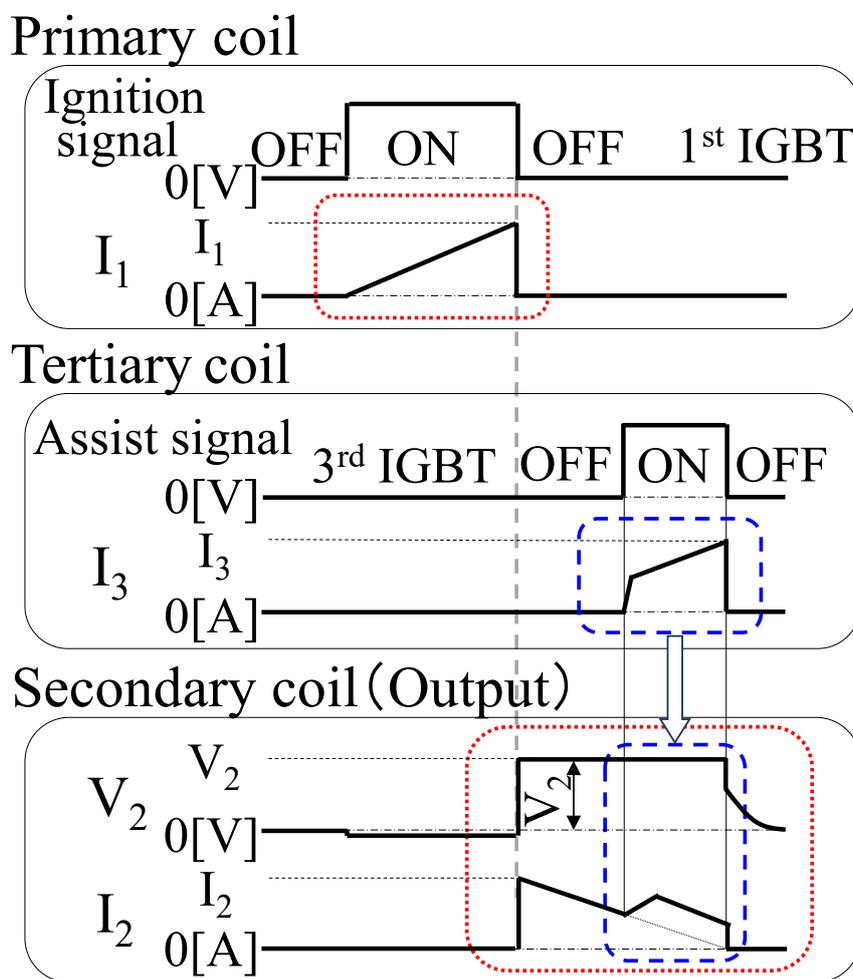
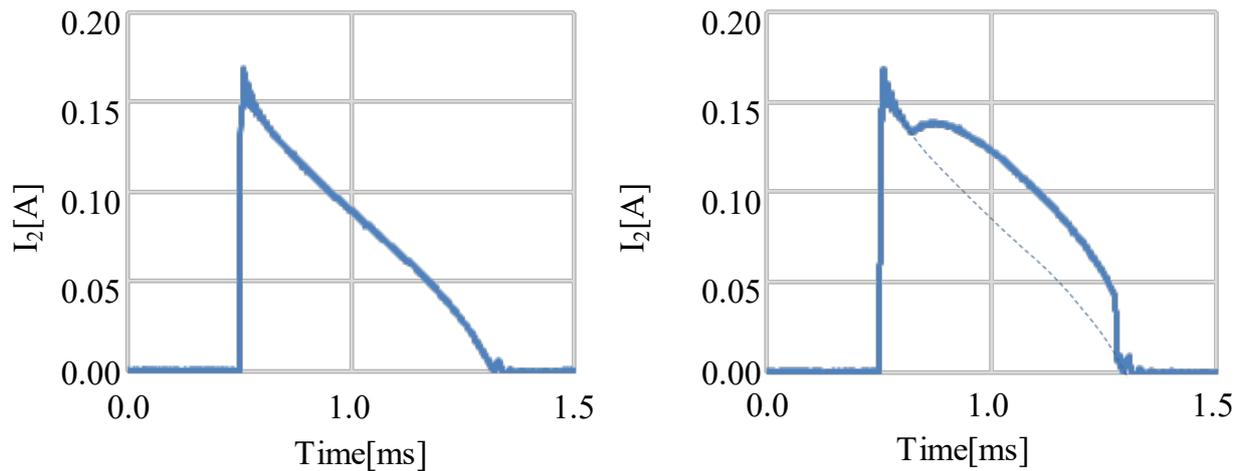


図 2-17 点火コイルの動作を表すタイミングチャート

図2-16の試作品を動作させた結果の I_2 波形例を図2-18へ示す。電流補助機能により、ノーマルと比べて、出力可能電流 I_2' の減少傾きが急峻になっていることから、電流不足期間を短縮できる可能性を確認できた。



(a) 電流補助なし

(b) 電流補助あり

図 2-18 点火コイル試作品を動作させた結果の I_2 波形例

以上、特定した電極の消耗要因について、考案した対応策を実エンジンへ適用し、検証した結果を次に述べる。

2.2.試験方法と試験装置

2.2.1.試験方法

本研究においては、次の手順で試験を行う。

- ・単気筒エンジン（SCE）による、再放電回数抑制効果の検証
- ・4気筒エンジン（MCE）を用いた、電極消耗抑制効果の検証

各エンジンにて筒内流速向上策を施した上で、 V_2 を測定し、再放電回数を算出する。MCE では、耐久評価 150[hour]の後に、CT 撮像にて電極消耗の体積を評価する。

2.2.2.試験エンジン

試験用エンジンの仕様と運転条件を表 2-3、表 2-4 へ示す。低圧 EGR 付エンジンへ、排気絞り弁を追加することで排圧を上げて EGR 率を上昇させ、点火時期を進角することで、筒内のタンブル流れが崩壊する前の筒内流速が速い期間に点火時期を設定した。運転条件については SCE と MCE で共通とした。

表 2-3 試験用エンジンの仕様

No.	Index	Spec.	
		SCE	MCE
1	Engine	SCE	MCE
2	Bore[mm]	73.0	79.7
3	Stroke[mm]	102.2	81.1
4	Compression ratio[-]	12.7	10.4
5	Displacement[cc]	427.7	404.6
6	S/B[-]	1.4	1.0
7	Con.rod length[mm]	199.3	139.0
8	EGR loop	LP.	LP.

表 2-4 試験用エンジンの運転条件

Index	Spec.
Ne[rpm]	2400
IMEP[bar]	10
Ignition timing[deg.BTDC]	32
A/F[-]	14.7
EGR Ratio[%]	28
Fuel[RON]	100
Intake temp.[deg.C]	25
Intake Humidity[%]	60

2.2.3.筒内流速の向上策

筒内流速の向上を目的に、SCE と MCE の吸気ポートへ流速向上デバイスを追加した。SCE は図 2-19 へ示すように、吸気ポートへ流路を分割する隔壁を設けることで、流路断面積を小さくした。さらに、南波ら [82] の検討内容と同様に、ボアストローク比 (S/B) を大きくすることで、ピストン速度を増加させた。流体解析 (CFD) の結果、図 2-20 のとおり、点火時期における流速は約 20[m/s] となった。

数値シミュレーションにおいては、保坂ら [195] によって構築された解析ツールを利用した。このツールは、流体解析用のオープンソースソフトウェアである OpenFOAM を用い、Hosaka ら [150] によって精度検証されている。本検討にあたっては、Nguyen ら [196] によって提案されたエンジンの移動境界を考慮した流動解析モデルを組み込むことで、吸気行程から圧縮行程までの現象予測を可能とした OpenFOAM を用いた。

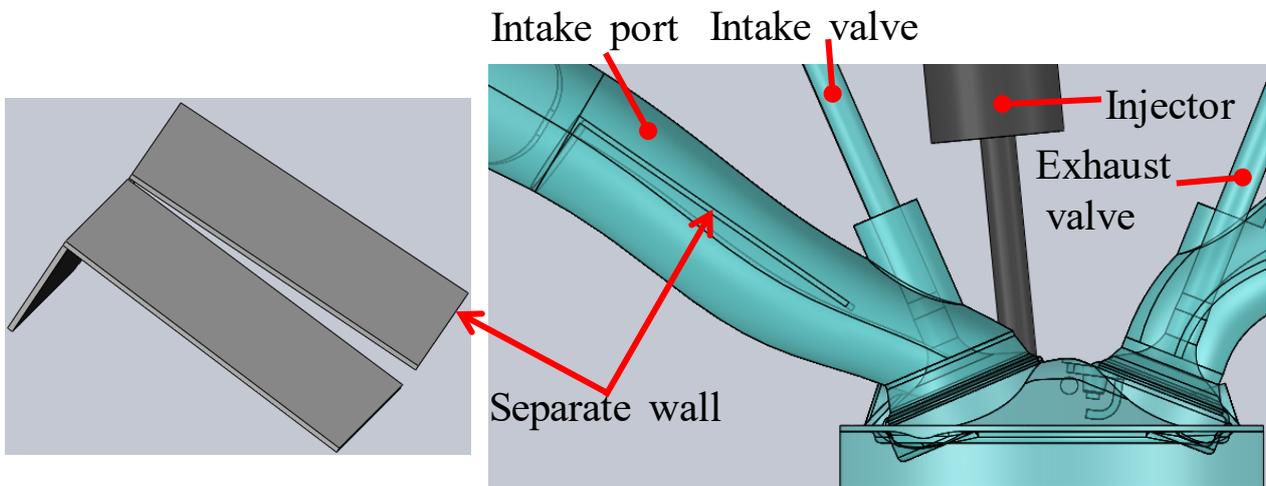


図 2-19 吸気ポートの流速向上デバイス (SCE)

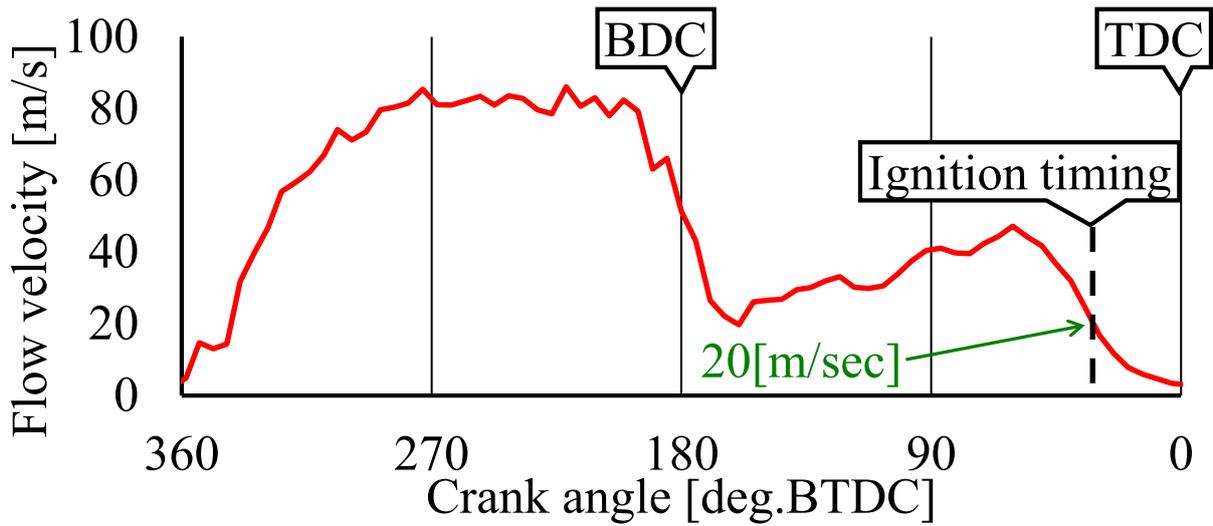


図 2-20 点火電極間における流速の見積もり (SCE)

MCE は SCE と比べて S/B が小さいため、より強力な流速向上策が必要である。筆者らによる CFD による検討の結果、図 2-21 のように、吸気ポートへノズルアダプタを設置した。このノズルアダプタは形状が複雑なため 3D プリンタで制作した。さらに、エンジン振動環境における、耐久性を考慮して材質をステンレスにした。その結果、図 2-22 のように、点火時期における流速の見積もり値は約 8[m/s]となった。

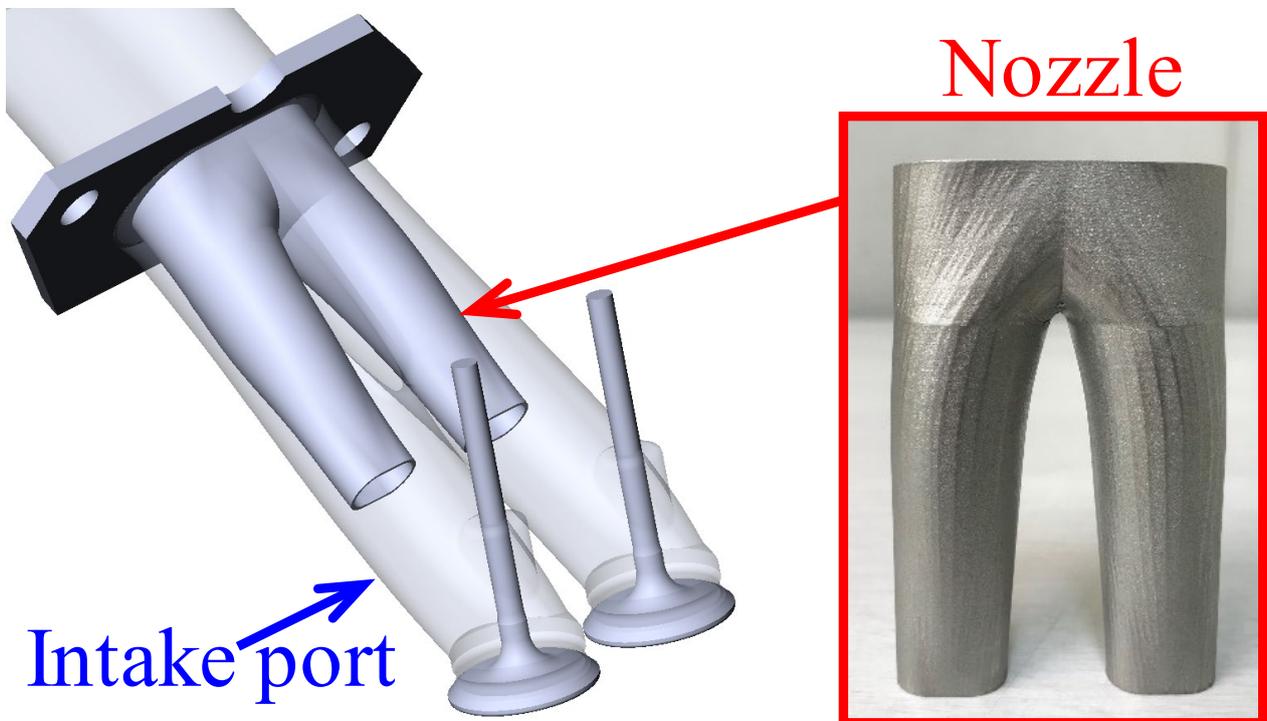


図 2-21 吸気ポートの流速向上デバイス (MCE)

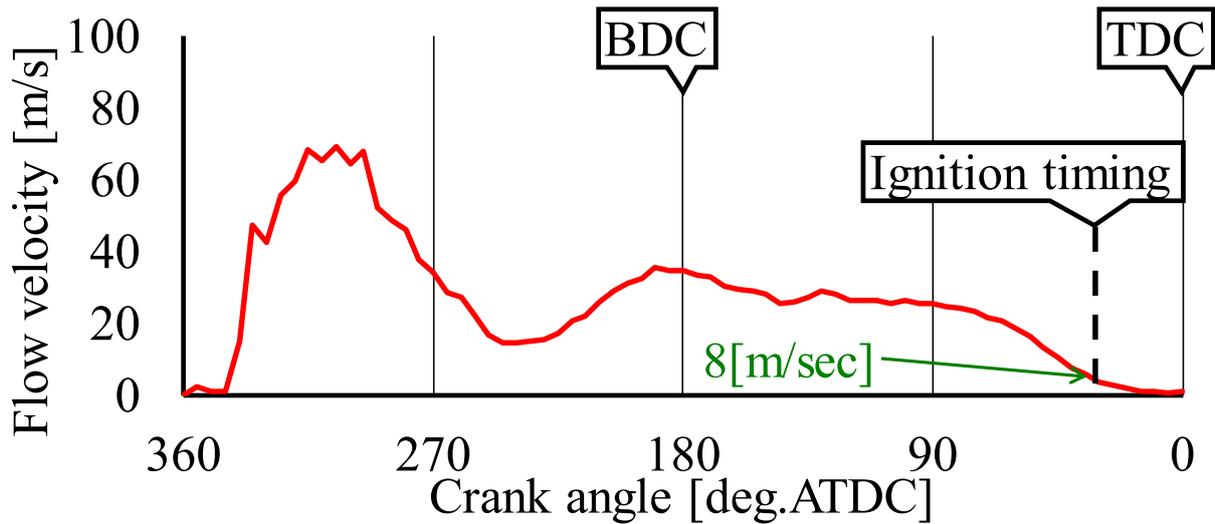


図 2-22 点火電極間における流速の見積もり (MCE)

吸気行程における、筒内流動の見積り結果を図 2-23、図 2-24 へ示す。ノズルアダプタの追加により、筒内の流速が2倍程度へ増加できる可能性がある。点火時期における、筒内流動の見積り結果を図 2-25、図 2-26 へ示す。点火電極付近の流動方向は、吸気側から排気側へ向かっていることを確認できる。

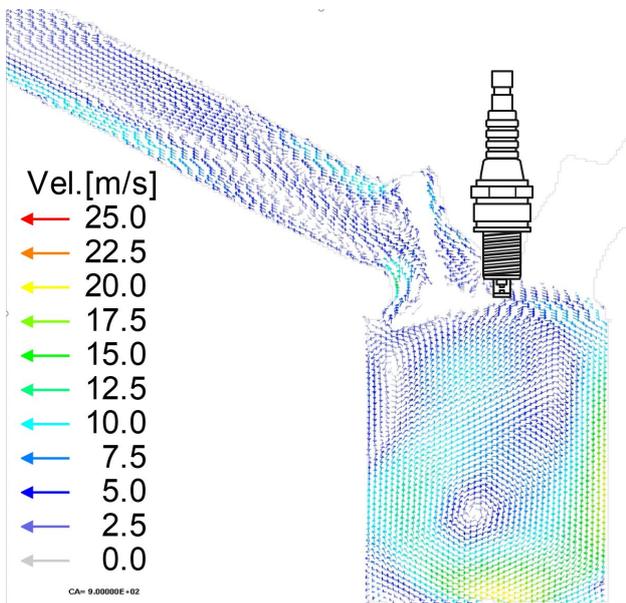


図 2-23 吸気行程の筒内流動
(ノズルアダプタ無し)

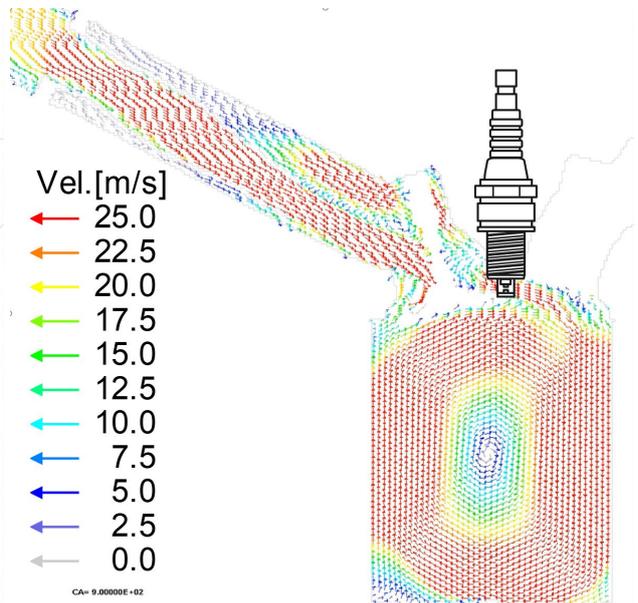


図 2-24 吸気行程の筒内流動
(ノズルアダプタ有り)

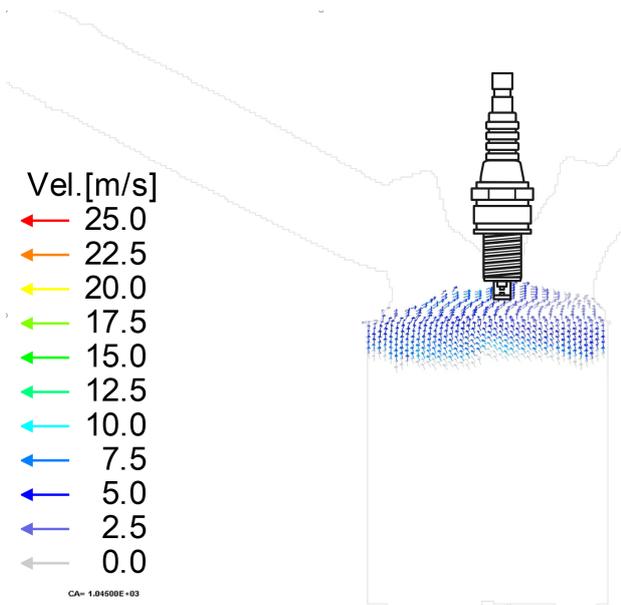


図 2-25 点火時期の筒内流動
(ノズルアダプタ無し)

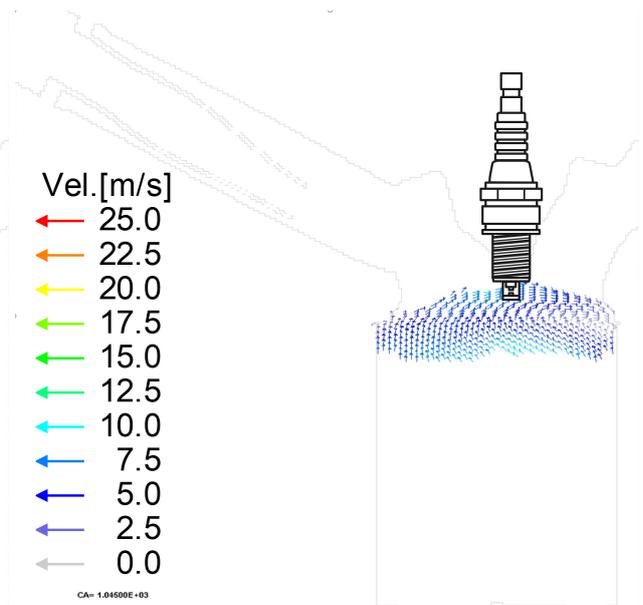


図 2-26 点火時期の筒内流動
(ノズルアダプタ有り)

2.2.4.点火デバイス

試験用点火プラグと点火コイルの仕様を表 2-5, 表 2-6 へ示す. 点火プラグは市販品の中から, 中心電極と接地電極へ貴金属チップが採用されているものを用いた. 点火コイルは一般市販品と比べて, 高エネルギーのものを基に, 放電電流補助機能を追加し, 追加した制御信号配線へ補助信号を与えることにより, 放電電力補助の有無や期間を設定できる.

表 2-5 点火プラグの仕様

No.	Index	Spec.
1	Electrode gap	1.1 [mm]
2	Tip material	Iridium
3	Tip diameterφ	0.8 [mm]

表 2-6 点火コイルの仕様

No.	Index	Spec.
1	Secondary energy E_2	160 [mJ]
2	Initial current I_{2Peak}	160 [mA]
3	Discharge time	1 [ms]

2.2.5.電極消耗抑制効果の検証方法

電極消耗の評価には体積測定が必要である. 図 2-60 へ示すように, 電極には, 煤や再凝固した熔融金属と思われる, 異物が付着するため, 顕微鏡を用いた外観観察のみによる評価は困難と判断し, 密度分解が可能な CT 撮像を用いた. CT 撮像装置の概観と仕様と設置値をそれぞれ図 2-27, 表 2-7, 表 2-8 へ示す.

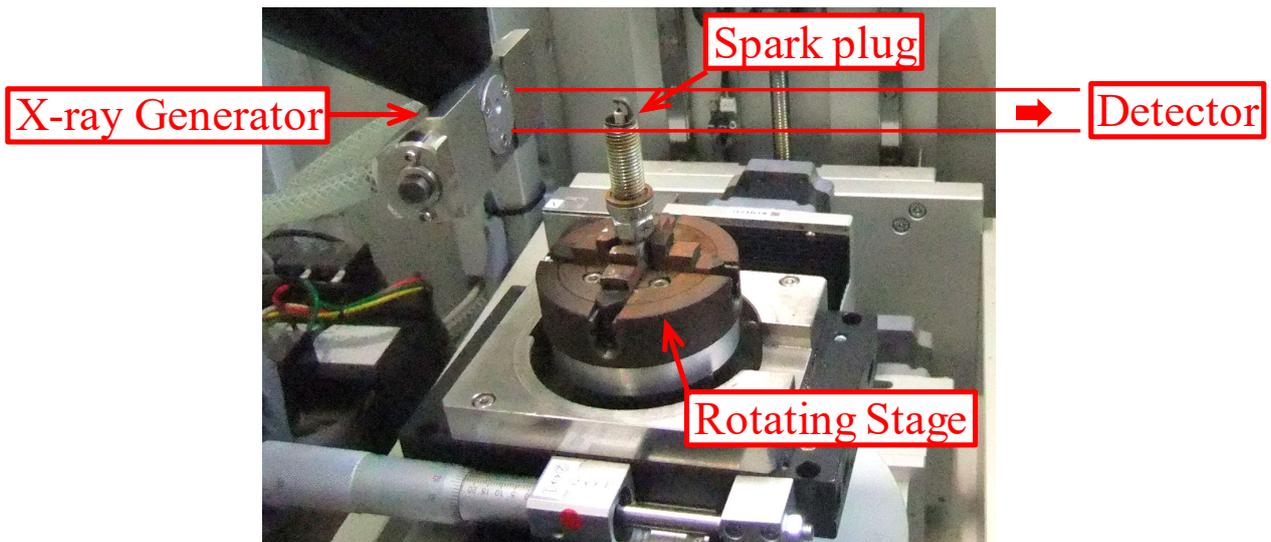


図 2-27 CT 撮像装置の概観

表 2-7 CT 撮像装置の仕様

No.	Index	Spec.
1	X-ray maximum energy[kV]	165
2	Slice thickness[mm]	0.1
3	Number of shots[page/piece]	407
4	CT image size[pixel]	512×512
5	Pixel size[μ m]	24.414

表 2-8 CT 撮像装置の設定値

X線管電流	50 [μ A]
I.I.サイズ	9インチ I.I.
S.I.D	516.300000 [mm]
S.O.D	49.980000 [mm]
テーブル位置(Z)	108.800000 [mm]
スライス厚	0.100000 [mm]
ビュー数	600 [View]
アベレージ数	6 [回]
スケーリング係数	10.000000
Conv.フィルター	Laks
CTモード1	Cone-CT
CTモード2	ノーマルスキャン
CTモード3	フルスキャン
FOV (XY)	12.488954 [mm]
FOV (Z)	9.912291 [mm]
ピクセル当量長	0.024295 [mm/pixel]
スライスピッチ	0.024295 [mm]
スライス番号	0
断面像方向	上から

2.2.6. CT 撮像データ解析

CT 撮像に際して、照射する X 線のエネルギーなどを調節することで測定対象の密度範囲を設定できる。さらに主材質と空気の境界面の定義には、CT 値の閾値を設定する必要がある。図 2-28 のヒストグラムは CT 値の頻度分布を示しており、グラフの横軸は CT 値で、縦軸は CT 値の頻度である。CT 値とは、単位体積（ボクセル＝ピクセル×スライス厚）当たりの、被写体の空間的な X 線吸収値である。

そして、CT 値の閾値は、バックグラウンド（空気）とマテリアル（主材質）の中間に設定される。ただし、点火プラグは、セラミックや貴金属などの複数の材質で構成される

ことや、異物付着の影響もある。そのため、マテリアルの位置を調整することで、最終的なCT値の閾値を決定した。

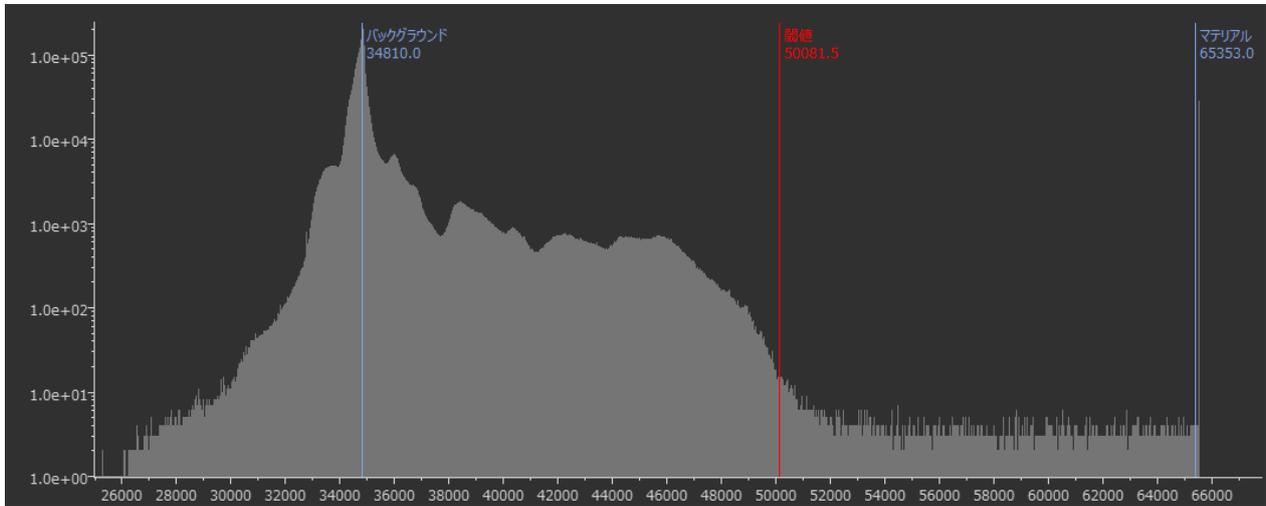


図 2-28 ヒストグラムと電極チップ面定義情報

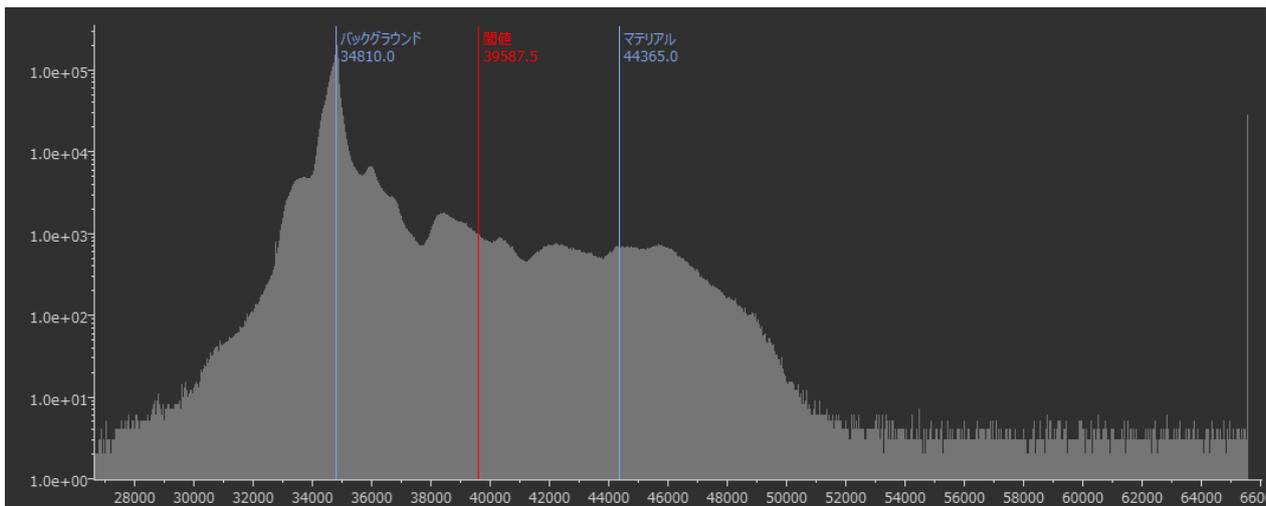


図 2-29 ヒストグラムと接地電極母材面定義情報

そしてさらに図 2-30 の CT 撮像例へ示すように、0.1[mm]ごとに 407 回の CT 撮像を行い、輪郭を重ね合わせることで、3次元形状を取得する。図 2-30 では、セラミック材で構成された低密度な碍子が除去され、金属で構成された高密度な電極を抽出できており、異物影響の低減を期待できる。

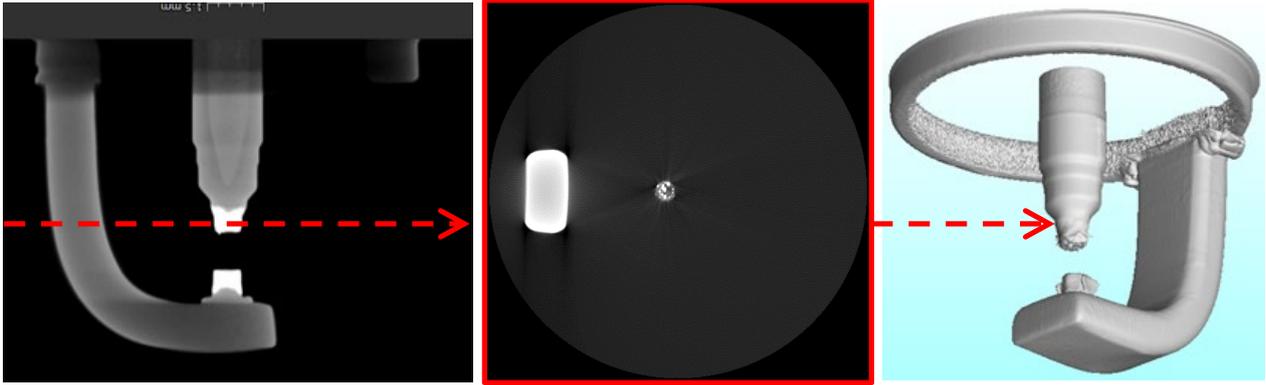


図 2-30 点火プラグ電極部の CT 撮像例

2.2.7. 消耗体積の算出方法

電極消耗の抑制効果を評価するためには、耐久試験前後の体積を測定して、差分を求める必要があるため、3次元CADを活用した。図2-31を電極消耗前の形状例、図2-32を電極消耗後の形状例とすると、この差分である図2-33が電極消耗分となる。

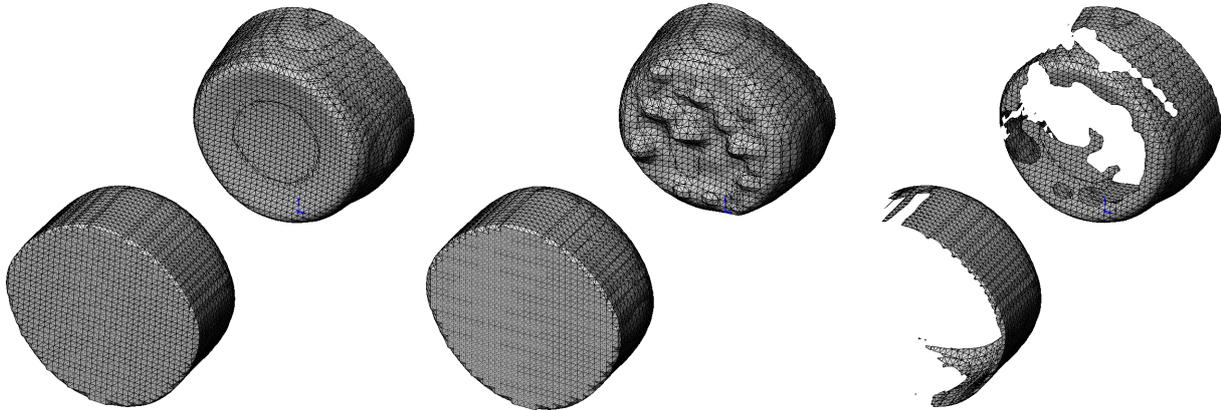


図 2-31 電極消耗前の形状例 図 2-32 電極消耗後の形状例 図 2-33 電極消耗分

2.2.8. 解析範囲の分割

電極には極性があり、正極側と負極側へ分類される。一般的な点火プラグの場合、中心電極は負極側、接地電極は正極側へ接続される。大島 [197]によると放電の際、電極間には、陽イオンと電子が生じる。そして、陽イオンは負極側、電子は正極側へ衝突する。

西尾 [151]によると陽イオンは電子と比べて、約1840倍質量が大きいいため、正極側よりも負極側の消耗量が大きくなると予想される。この極性影響を分離するため、図2-34へ示すような解析範囲の分割を定義した。

- (1) 電極チップ部（正極と負極の貴金属部分）
未使用状態のチップ先端より根本方向へ接地電極は 0.4mm，中心電極は 0.5mm を解析範囲とした。
- (2) 母材（ニッケル材）
チップが接合されている皿状座面から，先端方向へ 0.1mm 下げた位置を解析範囲の底面として指定。（座面エッジに減耗がみられるため範囲内に含めた）底面より上の母材すべてを含める範囲を設定した。
- (3) 全体
中心電極根本の段差あたりから上方すべてをまとめて解析範囲として設定した。
全体の場合，複数の材質の情報が混合している。各材質にはそれぞれの最適な密度分離のための情報があり，混合した状態では適切な分離・体積計測が出来ない。
そのため，それぞれの余分な体積も含まれており，体積情報としては信頼に値しない。よって，異材混合状態でのおおまかな体積とした参考情報として扱う。

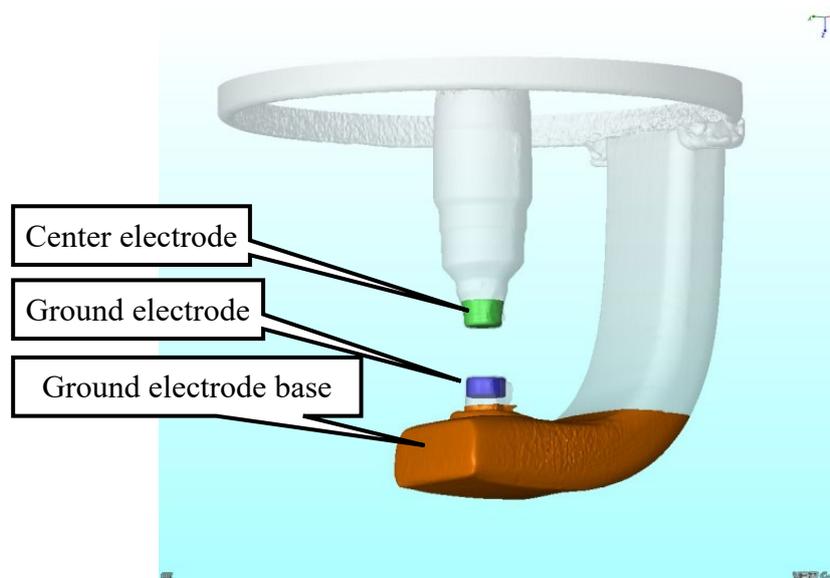


図 2-34 解析範囲の分割

上記において検討した寸法を設定した結果を図 2-35 へ示す。

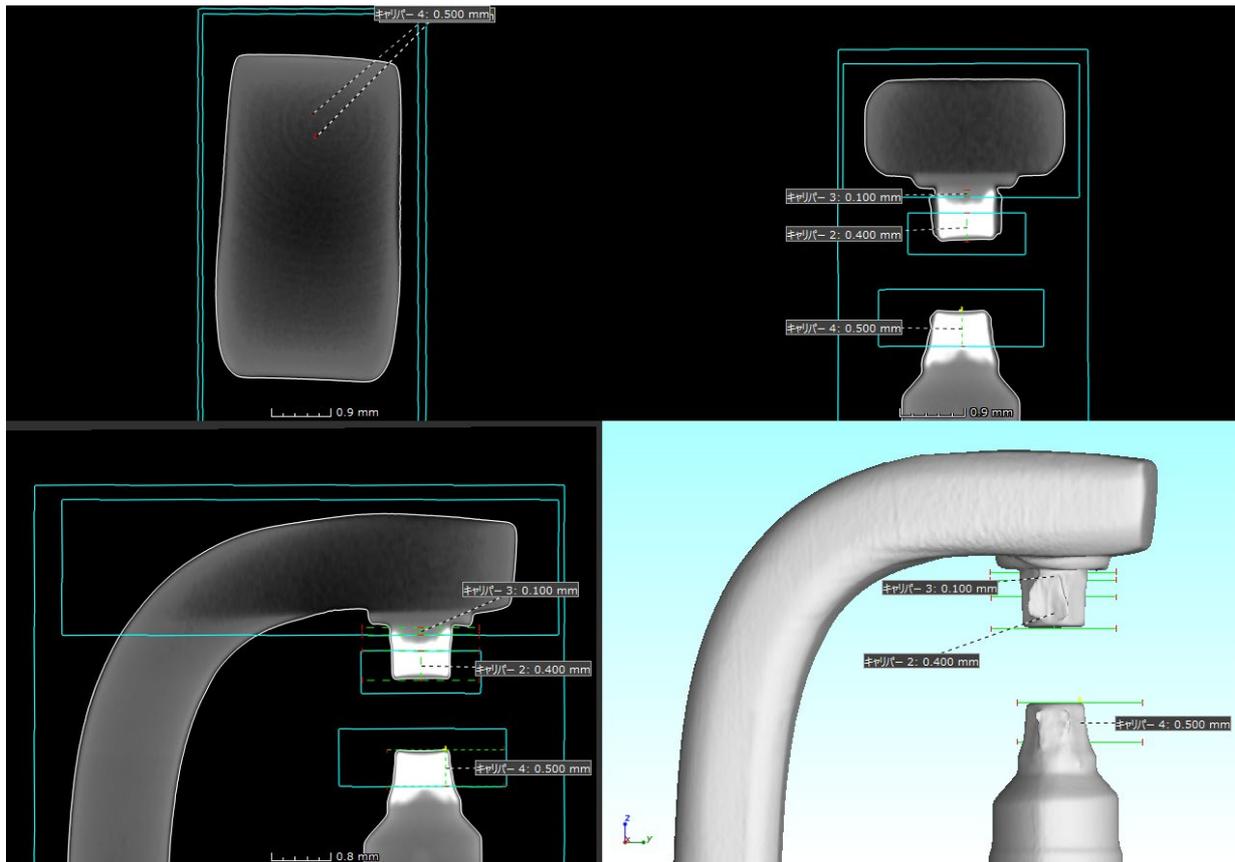


図 2-35 解析範囲の寸法設定結果

2.2.9.計測項目

エンジン試験において、点火放電と燃焼の状態を確認するために収録した項目を表 2-9 へ示す。点火放電は微小時間に生じるため、計測器と収録器には高い時間確度と短い収録周期が要求される。本研究においては、ベースクロック確度が 50[ppm]の計測装置を用いて、2.5[μ s]周期で全ての信号を同時に収録した。

表 2-9 計測項目

No.	Index	Signal	Sensor	Bandwidth	Rise time
1	In-cylinder pressure [MPa]	Analog	Piezoelectric (KISTLER 6052C31)	160 [kHz] (Natural frequency)	
2	I_1 [A]		Current probe (Yokogawa Electric 701917,701933)	50 [MHz]	7 [ns]
3	I_2 [mA]				
4	I_3 [A]				
5	V_2 [kV]		Voltage probe (Tektronix P6015A)	75 [MHz]	4 [ns]
6	Crank angle	Rotary encoder (AVL 365C)	50 [MHz]		
7	Ignition signal	Digital	Direct wiring		
8	Assist signal				

2.2.10.試験装置

表 2-9 に基づき、構成した試験装置を図 2-36 へ示す。全ての計測信号を収録器へ接続し、全気筒分をリアルタイムで PC (Personal Computer) へ計測データを保管する。収録データは PC にて、燃焼解析などの後処理を行う。点火プラグの取り付け方向は、接地電極をクランク軸方向に統一した。再放電回数について、ベースの点火方法では気筒差が無いことを予め確認した。構築した評価設備や操作画面の例を図 2-37、図 2-38 へ示す。

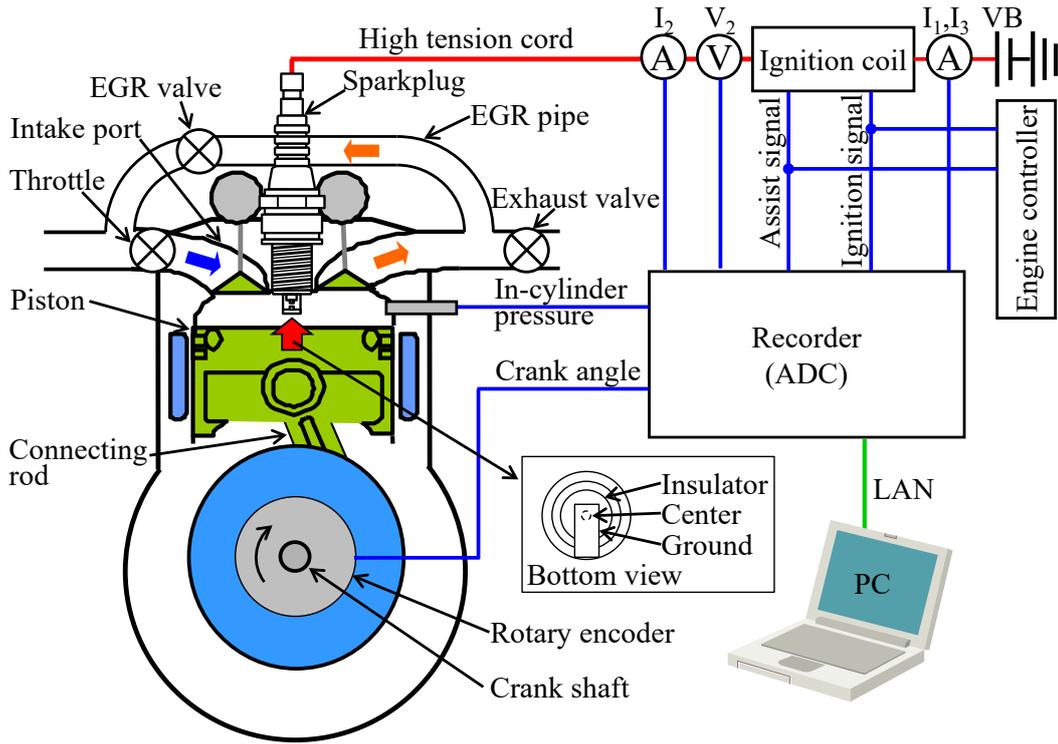


図 2-36 構築した試験装置



図 2-37 FPGA 制御装置操作画面例



図 2-38 収録装置操作画面例

2.2.11.収録波形の確認

評価設備の動作確認を目的として、MCE 評価設備の各気筒番号 (#1~#4) のそれぞれにおいて、後に述べる表 2-10 (#F)、表 2-11 (#H)、表 2-12 (#N)、表 2-13 (#D) の放電仕様に基づき、収録した波形の一例を示す。

図 2-39 は筒内圧波形例である。希釈燃焼ため、筒内流動のサイクル変動に伴う気筒ごとの波形に偏差は見られるが、過去の経験より想定される範囲内であり試験装置の問題は無いと考える。

図 2-40 は点火コイルの 1 次電流 (I_1) と 3 次電流 (I_3) を同時に測定した波形例である。横軸の始点は 1 サイクル中、初回の点火時期である。収録チャンネル数削減のため、 I_1 と I_3 の配線を同じ電流プローブへ装着して測定した。

図 2-17 へ示すように、 I_1 と I_3 の通電制御信号が ON になっている状態でそれぞれの電流値は変化する。この I_1+I_3 の測定値は点火コイルへの供給電流である。そのため、この供給電流と点火コイルの電源電圧を乗じた上で、時間積分することで、点火コイルの 1 次消費エネルギーを算出できる。また、 I_1 の通電期間は放電前で、 I_3 の放電期間は放電中のため、 I_1 と I_3 の電流測定値が重畳することは無い。

以上を踏まえた上で、各気筒の出力波形について、試作した点火コイルの動作を説明する。

- (1) #1 気筒
点火時期よりも前に I_1 の通電を完了しているため、 I_1 の電流値は表示されない。そして点火時期の後からアシスト信号を出力開始するため、 I_3 の電流変化が生じている。
- (2) #2 気筒
点火時期よりも前に I_1 の通電を完了しているため、 I_1 の電流値は表示されない。そして点火時期の後から#1 よりも遅れてアシスト信号を出力開始するため、 I_3 の電流変化が#1 よりも遅い時期に表示されている。
- (3) #3 気筒
点火時期よりも前に I_1 の通電を完了しているため、 I_1 の電流値は表示されない。そしてアシスト信号を出力していないため、 I_3 の電流値も表示されない。
- (4) #4 気筒
2回放電するため、1回目の点火時期の後に2回目点火用の充電が必要である。そのため、点火時期の後に I_1 の電流変化が表示される。そしてアシスト信号を出力していないため、 I_3 の電流値は表示されない。

以上のことより、全ての気筒における点火コイルは放電仕様通りに動作していることを確認できた。

なお図 2-41 は既に述べた再放電の定義を基に、再放電回数の集計を自動化した。ここで各気筒の再放電回数は、点火時期の後から増加している。そして#4 では、放電が一時停止する再充電期間(1~2[ms])において、再放電回数が増加していない。このことから、問題無く再放電回数を認識できていることを確認できた。

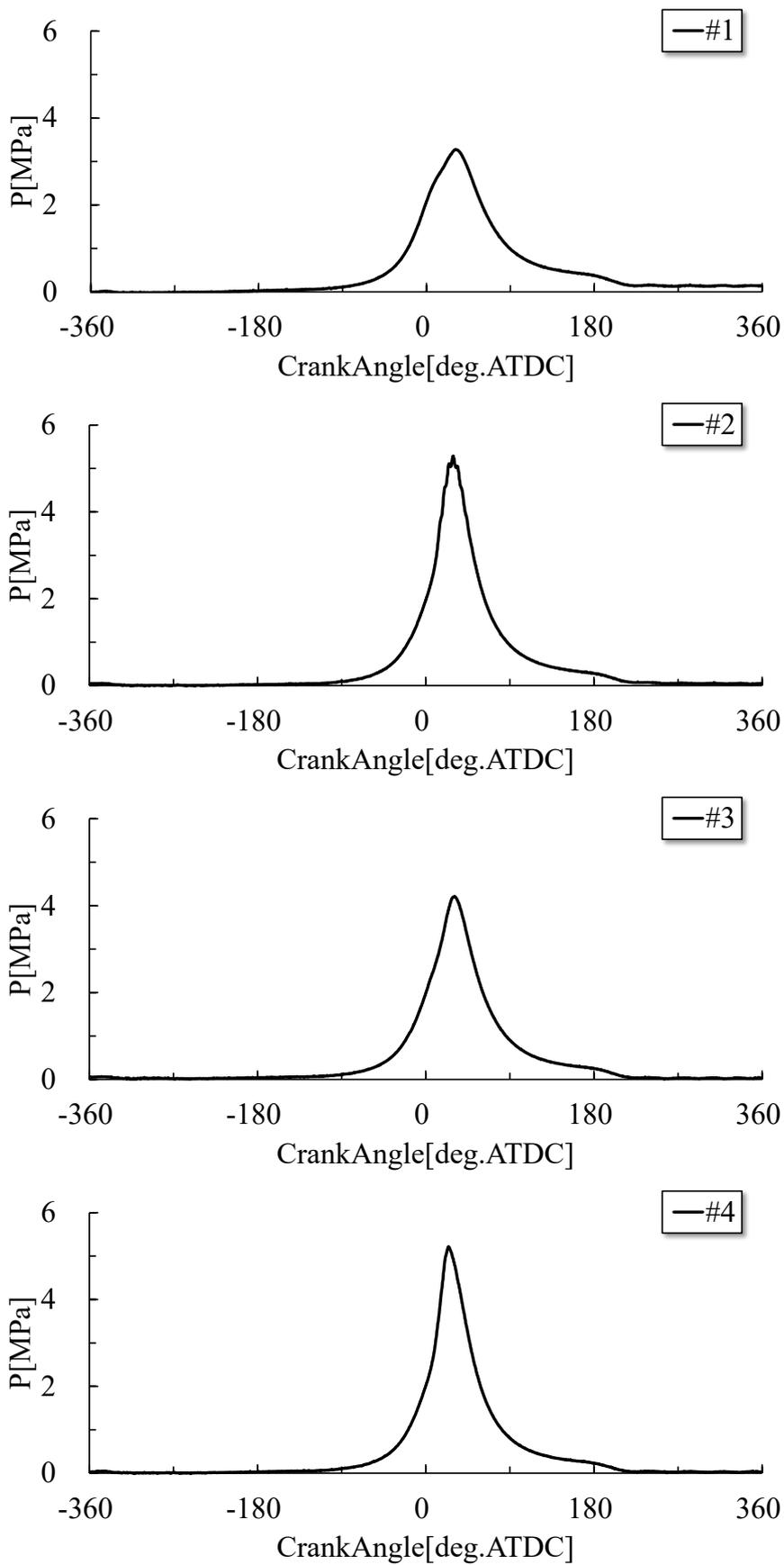


図 2-39 筒内圧力の波形例

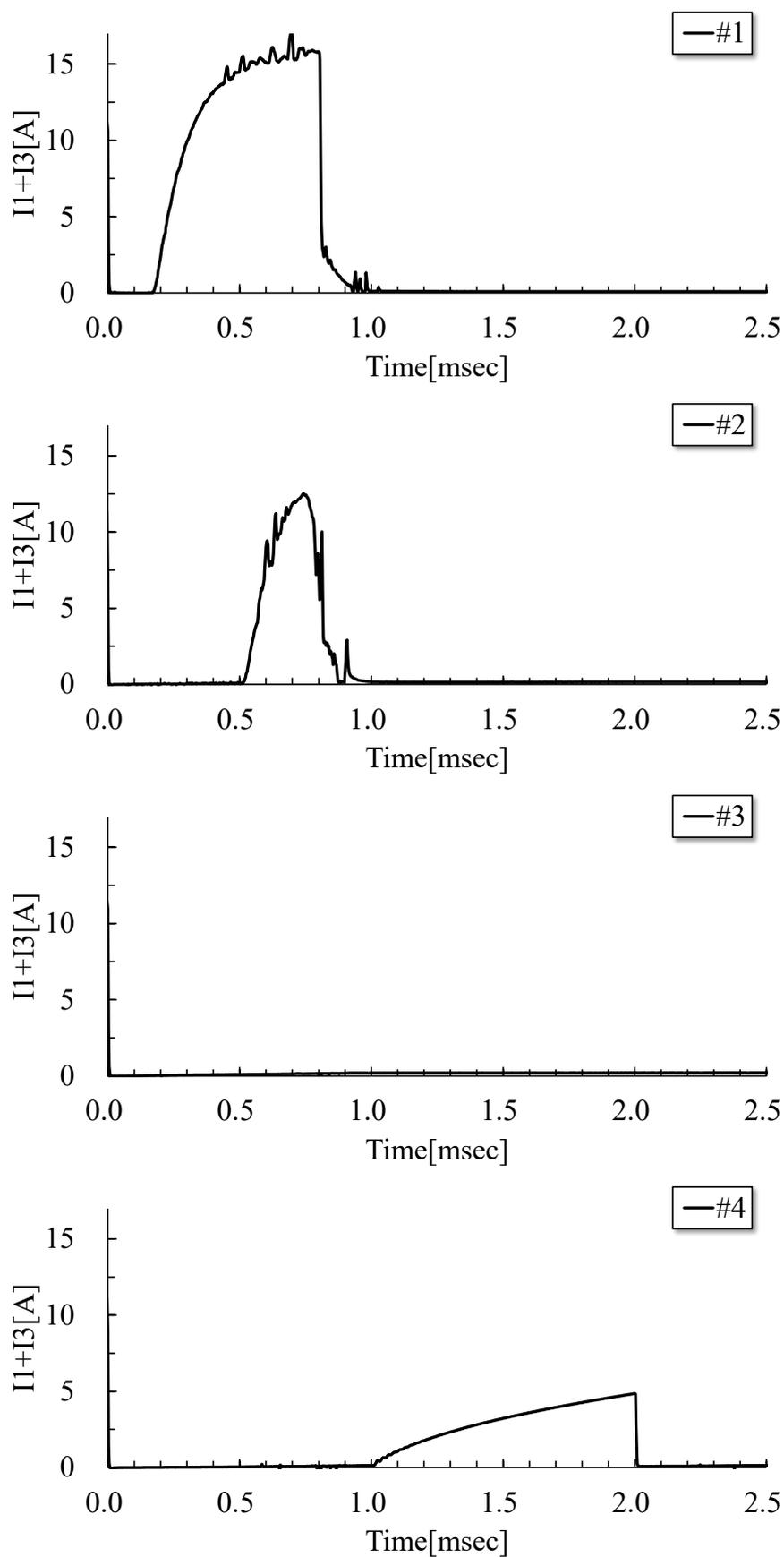


図 2-40 I_1+I_3 の波形例

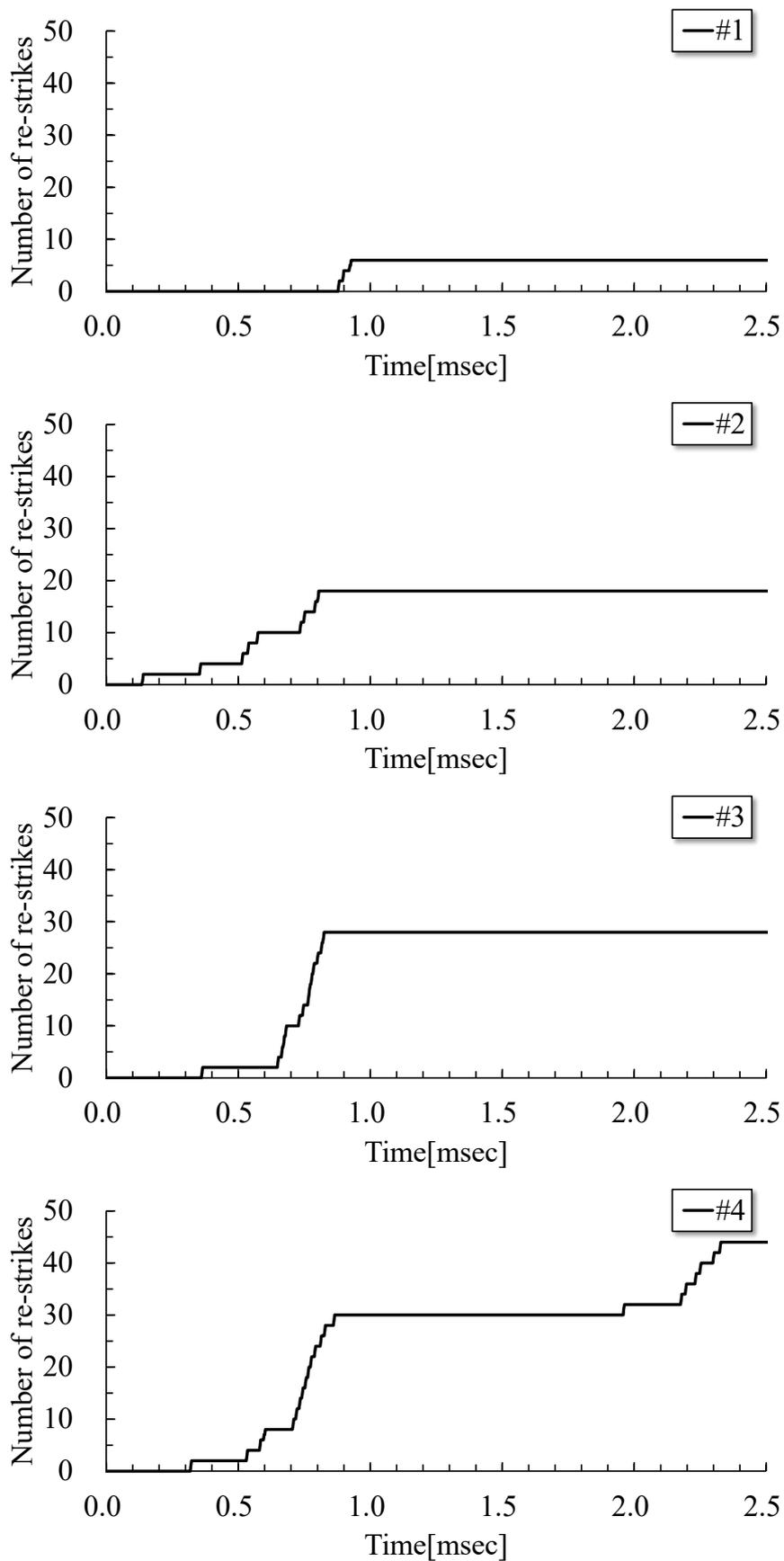
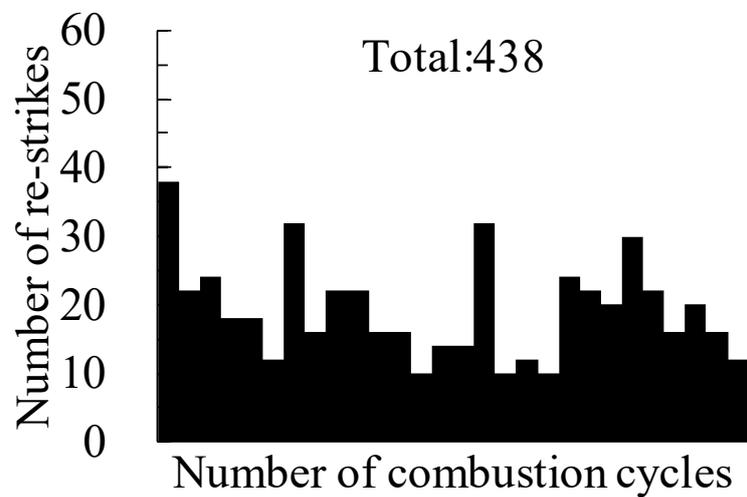


図 2-41 再放電回数の波形例

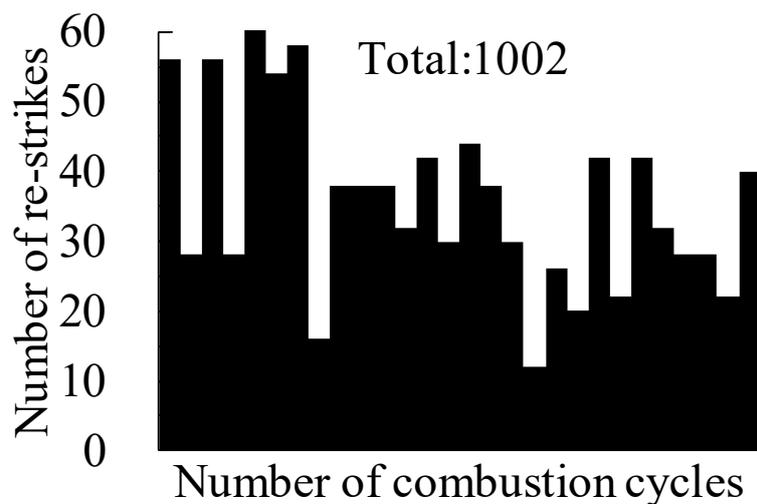
2.3. 試験結果および考察

2.3.1. 再放電回数抑制効果の検証結果

既に試験方法において述べたように、単気筒エンジン（SCE）による、再放電回数抑制効果の検証結果を図 2-42 へ示す。図 2-42 は、後に述べる表 2-10 (#F)、表 2-12 (#N) の放電仕様に基づき、収録した波形よりカウントした再放電回数のサイクル遷移を示したものである。試験エンジンは SCE であり、気筒ばらつきや気筒間の干渉などの影響が無いため、MCE と比べて再現性の高い評価が可能である。図 2-42 の再放電回数は $\#F < \#N$ となり、放電の低電流期間を短くすることで、再放電回数を低減できることを確認した。



(a) Full assist sample (#F)



(b) Base sample (#N)

図 2-42 再放電回数 (SCE)

2.3.2.放電仕様

MCEの各気筒へ設定した、4種類の放電仕様(#F, #H, #N, #D)をそれぞれ表2-10, 表2-11, 表2-12, 表2-13のNo.1~4へ示す。#F, #Hへ放電電流補助機能を適用した結果、放電電流補助機能を用いていない#Nと比べて、 I_2 が増加しており、図6の設計仕様とおり動作していることを確認できた。点火放電仕様ごとに異なる再放電回数にするため、点火信号の出力回数と補助信号の期間を組み合わせることで、 W_2' の低い期間が#F<#H<#N<#Dとなるように点火信号と補助信号の期間を調節した。その結果、No.4の目標に近い波形が得られることを、No.5の I_2 測定例で確認した。

各表においてNo.5の I_2 波形例において、再放電が少ない I_2 領域(few re-strike)と再放電が多い I_2 領域(many re-strike)があることを確認できる。

本研究の試験条件において、この I_2 の閾値は約70[mA]であり、全ての気筒(放電仕様)で同様の傾向である。このことから、図2-15で示した仮説の検証が得られた。

各表においてNo.6の V_2 測定例では、概ね再放電回数が#F<#H<#N<#Dとなっている。ただし、表2-10, 表2-11, 表2-12, 表2-13は1燃焼サイクル分の波形例であるため、統計的な確認を行った。再放電回数を自動集計した上で、放電仕様ごとの平均値を算出した結果を図2-43, 図2-44, 図2-45, 図2-46へ示す。その結果、図2-47においても再放電回数が#F<#H<#N<#Dとなることを確認できた。このことから、表2-10, 表2-11, 表2-12, 表2-13の点火放電仕様は、評価目的に対して満足していると判断した。

なお、MCEの#F, #N(図2-43, 図2-45)はSCEの#F, #N(図2-42)と比べて再放電回数が減少している。これは既に述べた流体解析の数値シミュレーション結果を参考にすると、エンジン違いによる筒内ガスの流速差が影響していると考えられる。

表 2-10 MCE#1 気筒の放電仕様

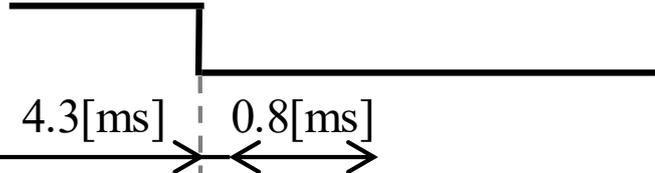
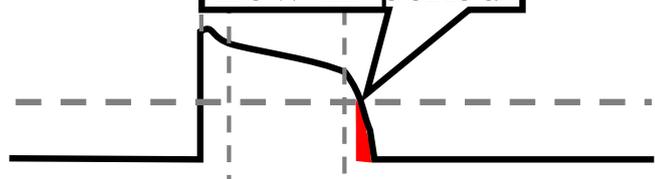
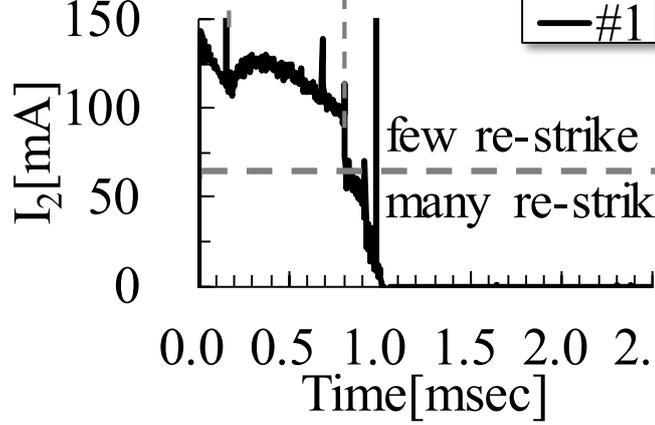
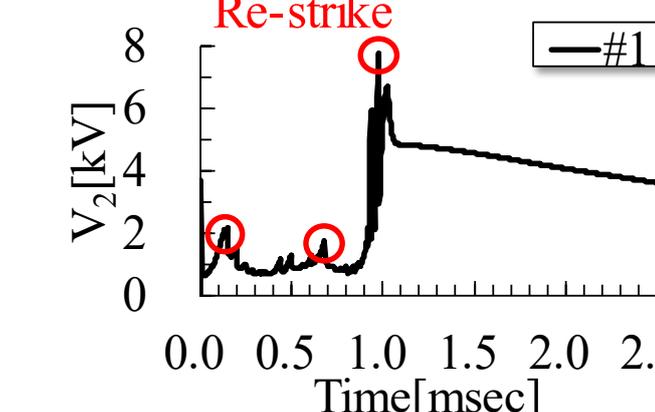
No.	Ignition discharge specification	Full assist(#F)
1	Cylinder	#1
2	Ignition signal	
3	Assist signal	
4	I_2 (Target)	
5	I_2 Measurement example	
6	V_2 Measurement example	

表 2-11 MCE#2 気筒の放電仕様

No.	Ignition discharge specification	Half assist(#H)
1	Cylinder	#2
2	Ignition signal	
3	Assist signal	
4	I_2 (Target)	
5	I_2 Measurement example	
6	V_2 Measurement example	

表 2-12 MCE#3 気筒の放電仕様

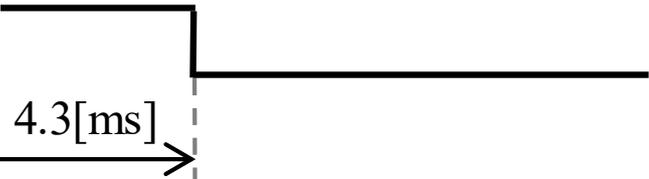
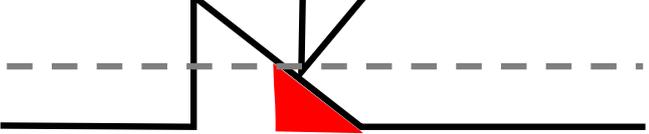
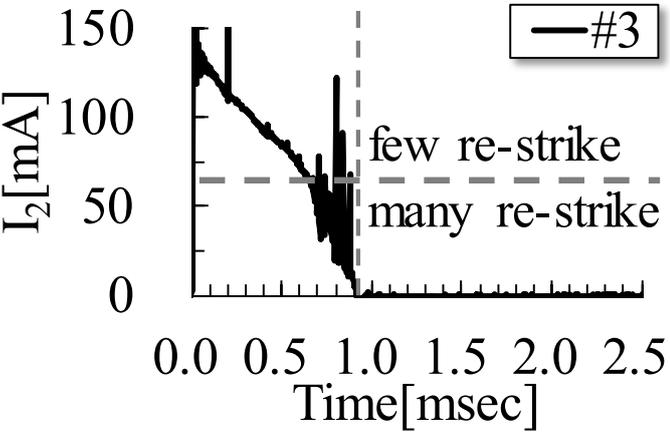
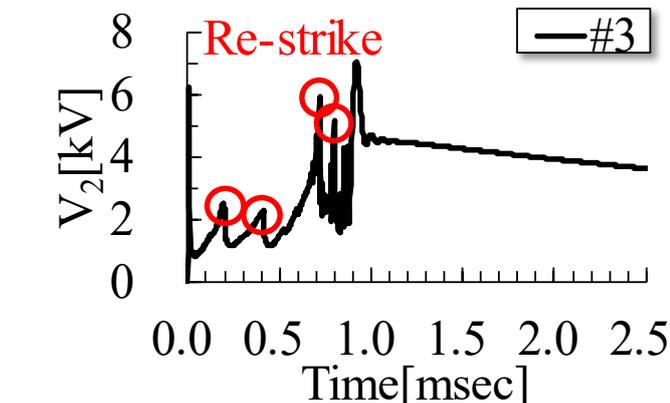
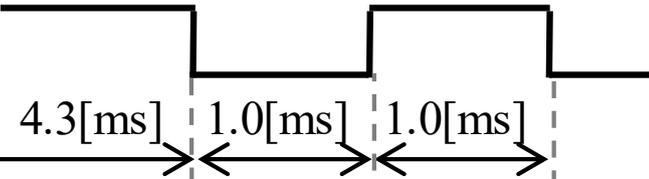
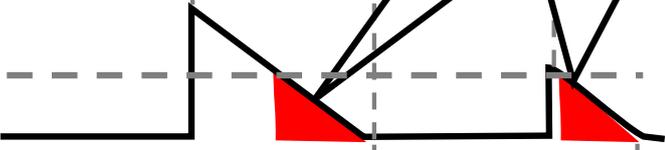
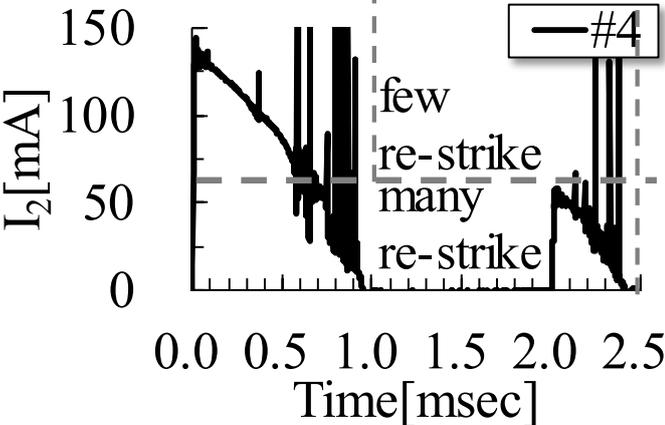
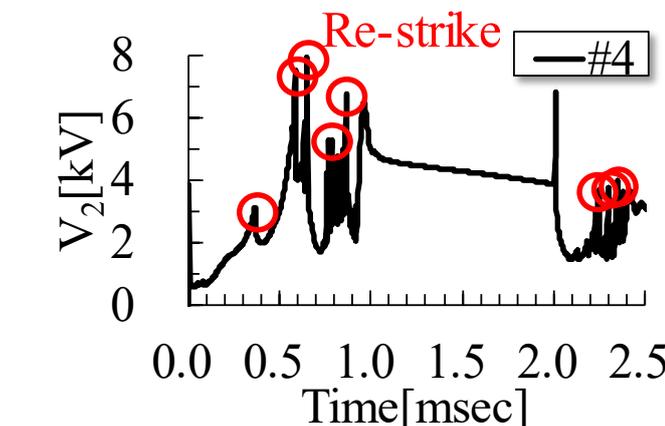
No.	Ignition discharge specification	Not assist(#N)
1	Cylinder	#3
2	Ignition signal	
3	Assist signal	
4	I_2 (Target)	
5	I_2 Measurement example	
6	V_2 Measurement example	

表 2-13 MCE#4 気筒の放電仕様

No.	Ignition discharge specification	Double ignition(#D)
1	Cylinder	#4
2	Ignition signal	
3	Assist signal	
4	I_2 (Target)	
5	I_2 Measurement example	
6	V_2 Measurement example	

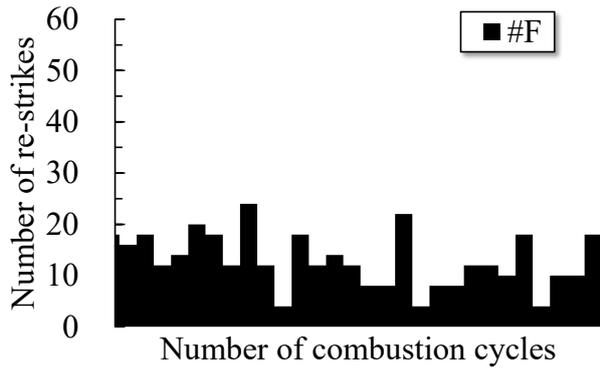


図 2-43 #F の再放電回数

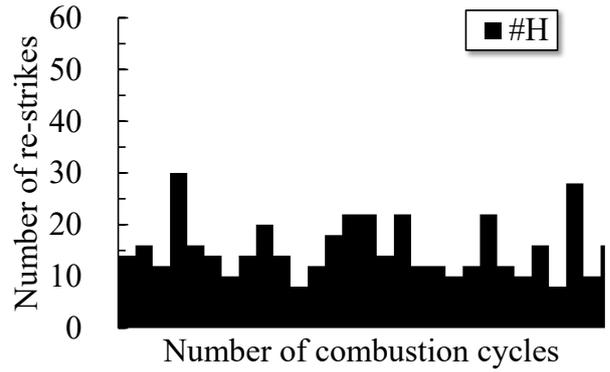


図 2-44 #H の再放電回数

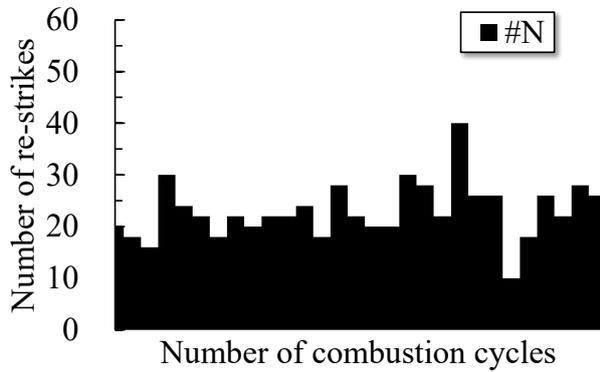


図 2-45 #N の再放電回数

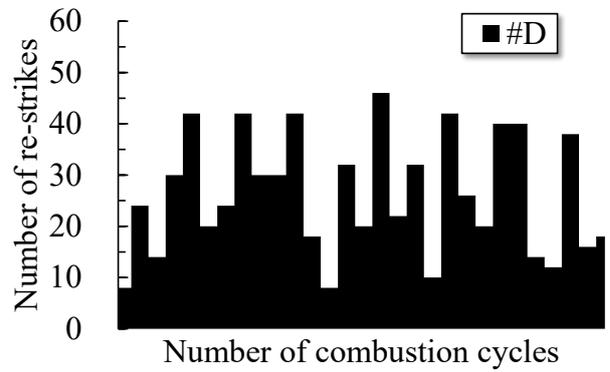


図 2-46 #D の再放電回数

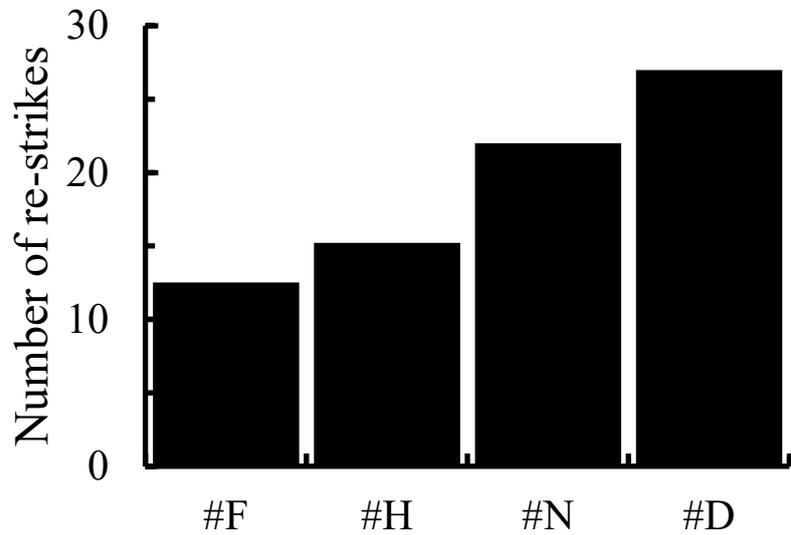


図 2-47 放電仕様ごとの再放電回数平均値

2.3.3.電極の外観変化

表 2-14, 表 2-15, 表 2-16 へ中心電極チップの3方向からの外観と, 試験前後の画像を重ね合わせたものを示す. 電極の向きは図 2-36 を基に, 正面, 吸気側, 排気側としている. 150[hour]運転後の外観は, 新品と比べて, 茶色い異物が付着しており, 重ね合わせ画像からの消耗評価は困難である. 異物の付着量は, #F, #H, #N と比べて, #D の方が多くなっていることから, 点火回数が影響しているものと考えられる. さらに, 異物の付着位置は, 吸気側と比べて, 排気側の方が多くなっていることから, 電極間のガス流動方向は吸気側から排気側へ向かっており, 電極間で異物が発生したものが下流側へ堆積したものと考えられる.

比較検討のため, 接地電極チップの外観を表 2-17, 表 2-18, 表 2-19 へ示す. 中心電極チップと比べて, 接地電極チップの異物付着量は少なく, 重ね合わせ画像からの消耗評価は可能である. このことから, 陽イオンの衝突影響が異物生成に影響していることが考えられる. また, 実線指示部は明確に形状変化を識別できる部位であり, 点線指示部は差を判別できる程度の箇所である. 形状変化は電極先端のみならず, 台座部分の形状変化が生じている. このことから, 放電中の電極間ガス流動により, 放電経路と電極の接触位置が移動したものと考えられる.

次に異物付着の無い部分を観察すると, 電極先端と台座部分の消耗は同程度である. しかし, 電極先端の材質が貴金属であるのに対し, 台座部分はニッケル合金である. 既に述べたように, 松井 [198]や大林ら [199]によると貴金属の消耗要因は火花消耗のみであるが, ニッケル合金の消耗要因は, 火花消耗に加え, 高温酸化などによる消耗がある.

そして, Peter [177]によれば酸化されない低い温度では, 火花放電による火花消耗が支配的になる. この火花消耗について志水ら [200]によれば, 主に陽イオンの電極面へ衝突による溶解・離散やスパッタリングによって生じる. そのため, 西尾 [151]や大島 [197]が述べているように電極先端部は, 台座部分と比べて, より質量の大きな陽イオンの衝突が多く生じているものと考えられる.

表 2-14 中心電極チップ外観（正面）

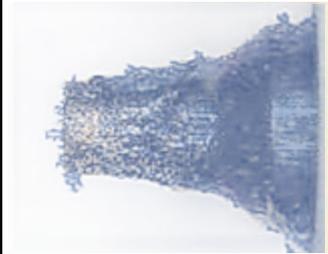
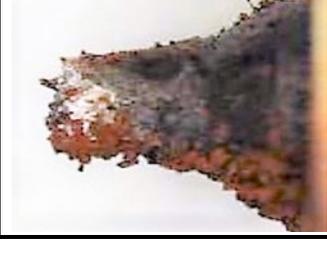
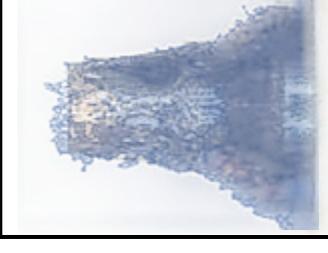
		Front side		
		0[hour](NEW)	150[hour]	Overlay images <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white;"></div> 0hour <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: lightblue;"></div> 150hour </div>
Center electrode	#F			
	#H			
	#N			
	#D			

表 2-15 中心電極チップ外観（吸気側）

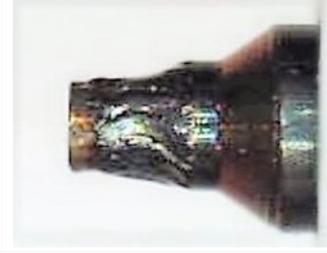
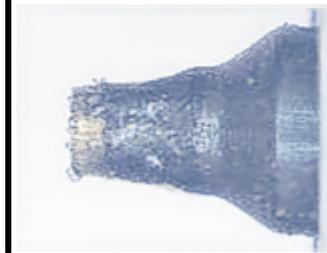
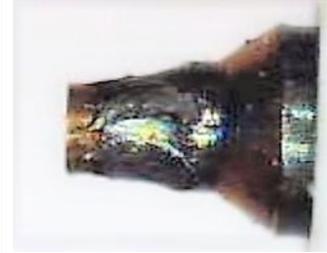
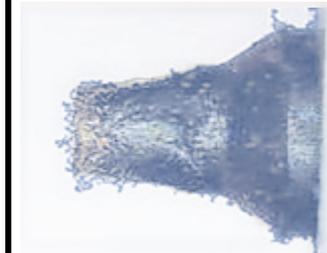
		Intake side		
		0[hour](NEW)	150[hour]	Overlay images <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white;"></div> 0hour <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: lightblue;"></div> 150hour </div>
Center electrode	#F			
	#H			
	#N			
	#D			

表 2-16 中心電極チップ外観（排気側）

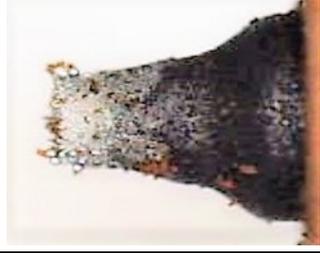
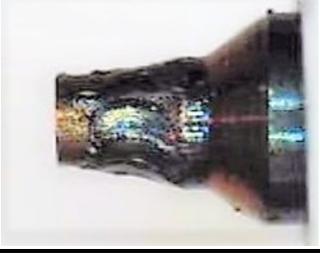
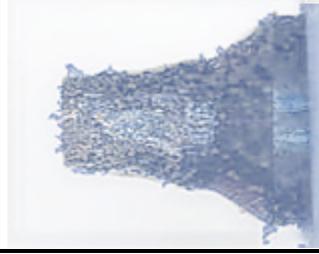
		Exhaust side		
		0[hour](NEW)	150[hour]	Overlay images <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white;"></div> 0hour <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: lightblue;"></div> 150hour </div>
Center electrode	#F			
	#H			
	#N			
	#D			

表 2-17 接地電極チップ外観（正面）

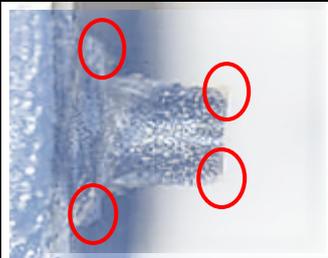
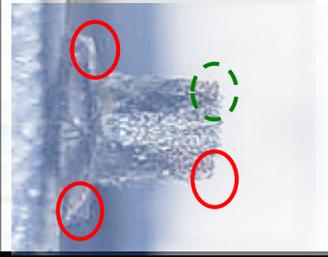
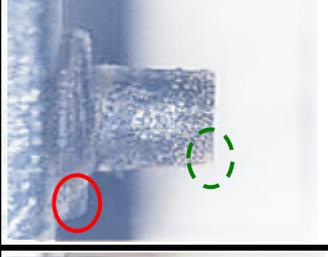
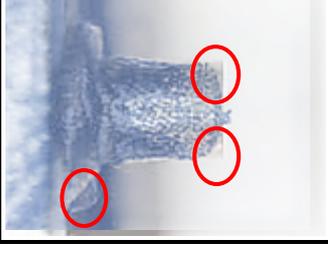
		Front side		
		0[hour](NEW)	150[hour]	Overlay images <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> 0hour <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid blue; margin-right: 5px; margin-left: 10px;"></div> 150hour </div>
Ground electrode	#F			
	#H			
	#N			
	#D			

表 2-18 接地電極チップ外観（吸気側）

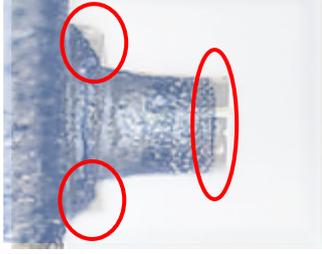
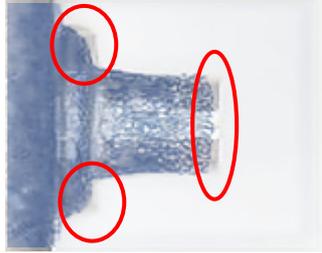
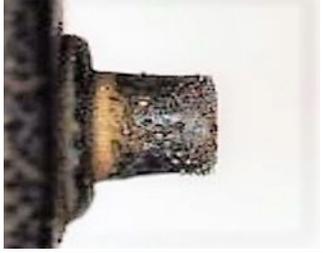
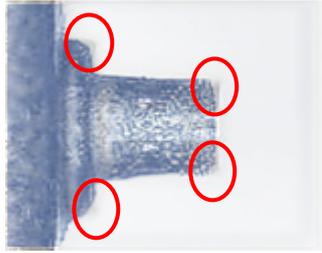
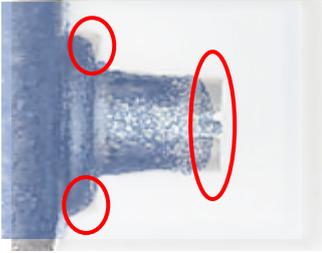
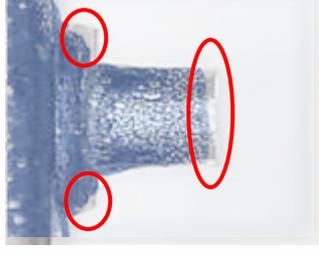
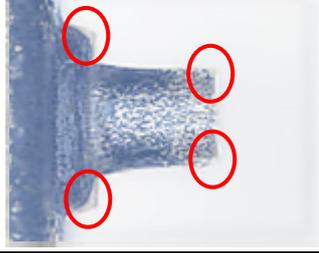
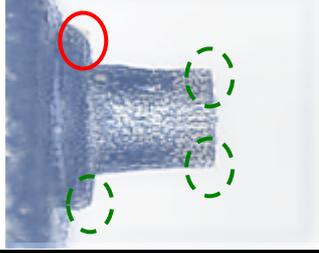
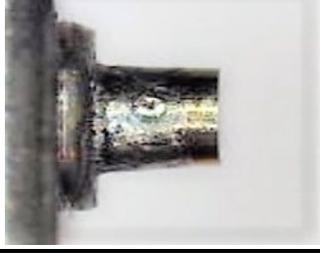
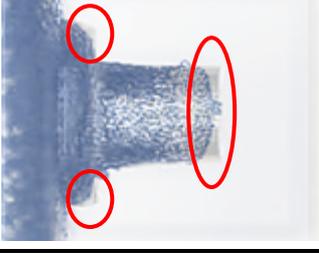
		Intake side		
		0[hour](NEW)	150[hour]	Overlay images <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white; margin-right: 5px;"></div> 0hour <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: lightblue; margin-right: 5px; margin-left: 5px;"></div> 150hour </div>
Ground electrode	#F			
	#H			
	#N			
	#D			

表 2-19 接地電極チップ外観（排気側）

		Exhaust side		
		0[hour](NEW)	150[hour]	Overlay images <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> 0hour <div style="width: 15px; height: 10px; border: 1px solid blue; margin-right: 5px; margin-left: 10px;"></div> 150hour </div>
Ground electrode	#F			
	#H			
	#N			
	#D			

2.3.4. CT 撮像結果

中心電極先端部付近における，CT 撮像結果を図 2-48，図 2-49，図 2-50，図 2-51 へ示す．設置電極母材と比較して，中心電極の放電仕様ごとの形状違いは大きくなっている．このことから，中心電極先端部の消耗は均一ではなく，凹凸が生じているものと考えられる．

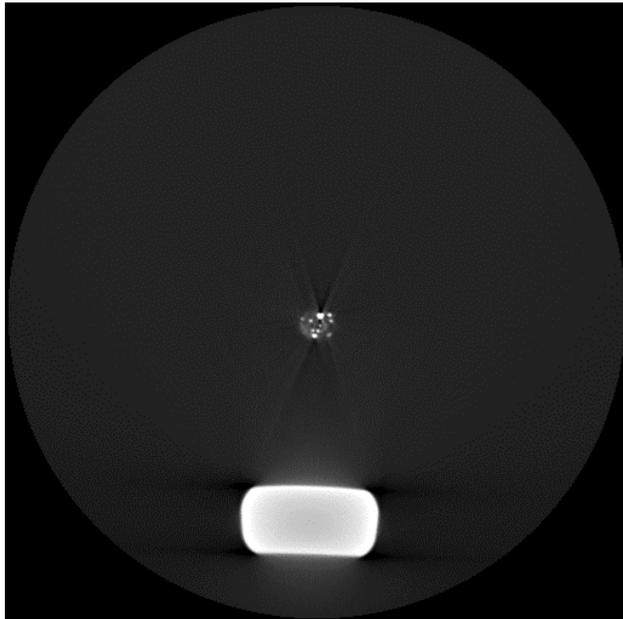


図 2-48 #F の CT 撮像結果

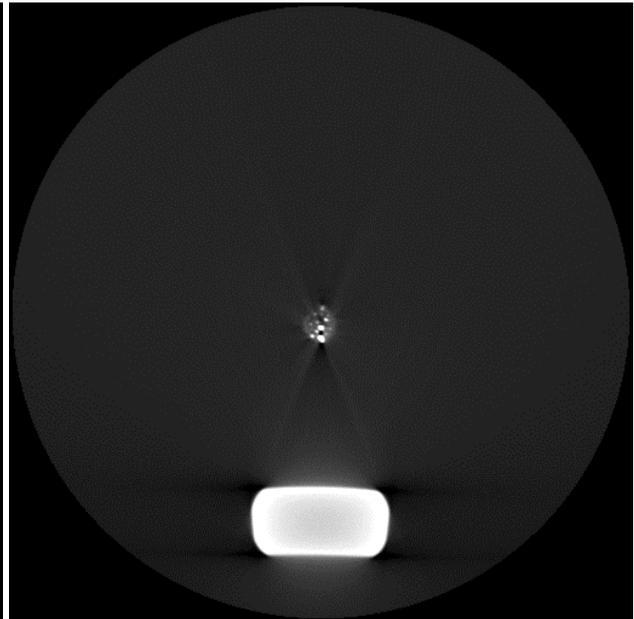


図 2-49 #H の CT 撮像結果

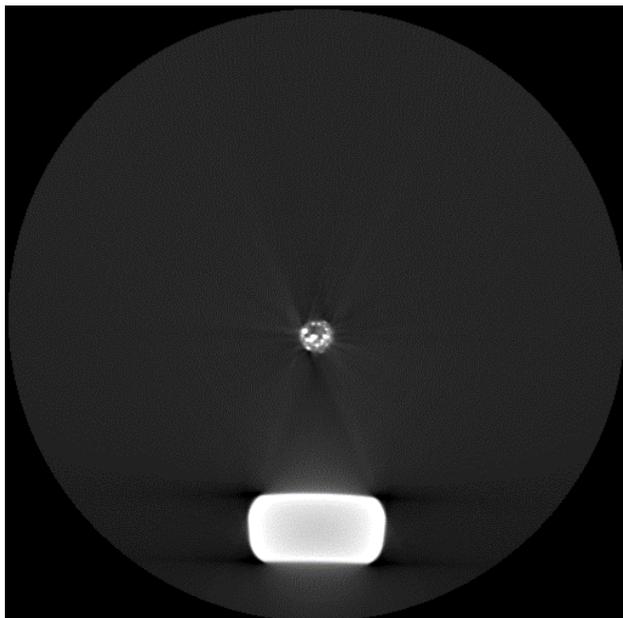


図 2-50 #N の CT 撮像結果

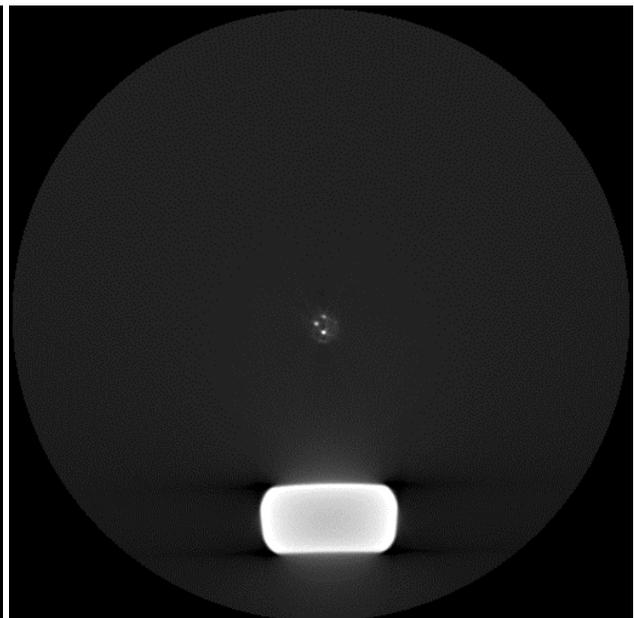


図 2-51 #D の CT 撮像結果

2.3.5. 消耗体積評価

CT 撮像の画像を重ね合わせることで、立体的に評価した結果を表 2-20, 表 2-21, 表 2-22, 表 2-23 へ示す. 消耗解析用のソフトウェアとして, ドイツ VolumeGraphics 社製の VGStudio MAX3.3 を用いた. 電極の新品状態と比較して, 表面変位が小さい部位は緑色, 凹面部位は青色, 凸面部位は赤色で着色している.

接地電極チップは, 他の部位と比べて変化が小さい. これは, 電極材質が貴金属であるため, 高温酸化による消耗が無いことが原因と考えられる. さらには, 放電回路構成により陽イオンよりも質量の小さい電子が電極へ衝突しているためであると考えられる.

次に接地電極母材は, 双方のチップ電極と比べて, 凹面部が多い. これは, 接地電極母材の材質にニッケル材を用いているため, 高温酸化による消耗が生じたためと考えられ, 表 2-2 の文献調査結果とも一致する. また, 凹面は電極の片側のみに生じており, エンジンレイアウト上の排気側である. このことから, 点火時期における筒内ガス流動は, 吸気側から排気側へ向かっていると考えられる. これは, CFD 解析結果とも合致する.

さらに中心電極チップは, 凸面と凹面の両方が生じている. これは, 放電回路構成により電子よりも質量の大きい陽イオンが電極へ衝突して熔融したことが一因と考えられる. つまり, 中心電極は陽イオンの衝突影響が大きく, 電極表面の溶解により, 異物が付着して, 凸面が生成されるものと推察する.

表 2-20 CT 撮像の立体評価 (#F)

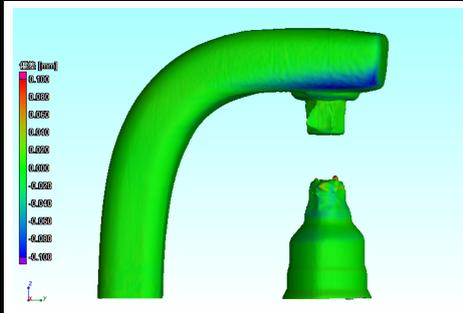
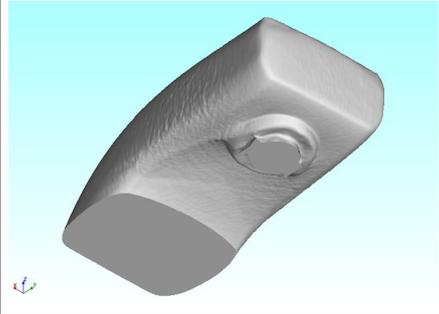
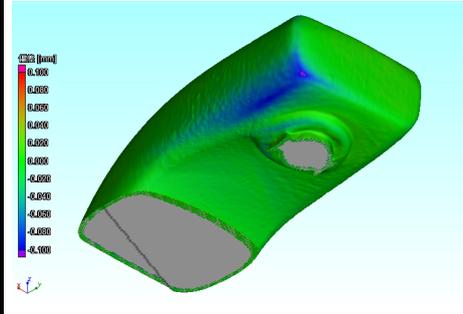
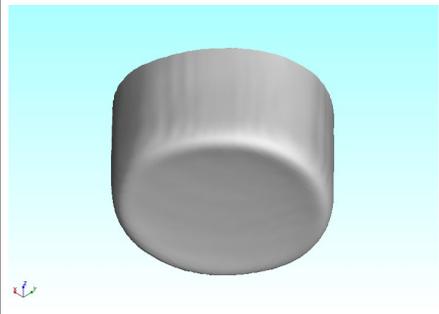
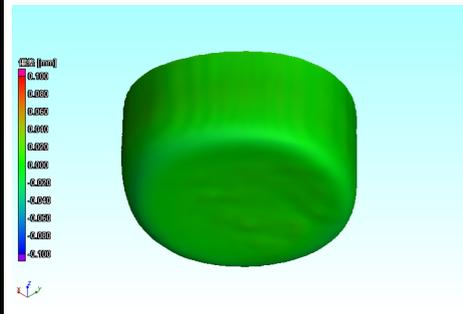
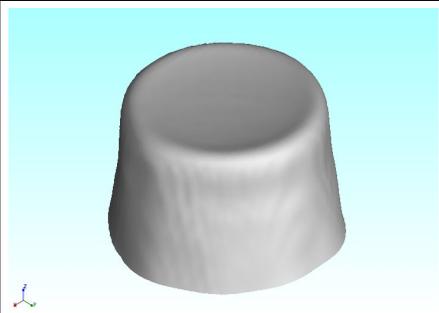
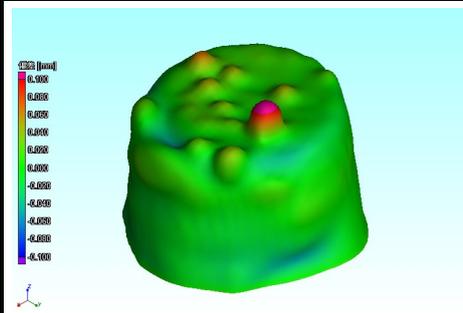
Test time [hour]			0	150	Δ delta (150h-0h)
Overall (chip + base material) (Values are in volume [mm ³])		Viewpoint: Right	35.810	35.671	-0.139
					
Ground electrode	Base material	Viewpoint: Lower right rear	17.170	17.031	-0.139
					
	Tip	Viewpoint: Lower right rear	0.161	0.158	-0.003
					
Center electrode	Tip	Viewpoint: Upper Right Rear	0.211	0.207	-0.004
					

表 2-21 CT 撮像の立体評価 (#H)

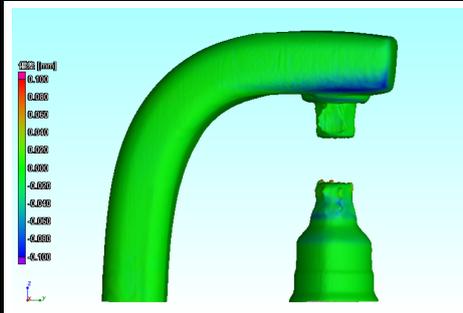
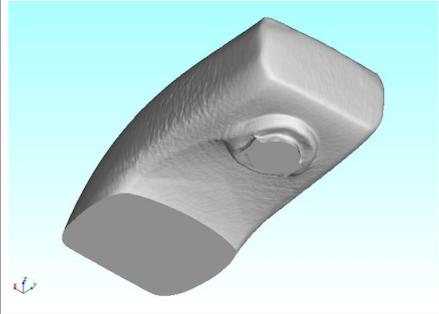
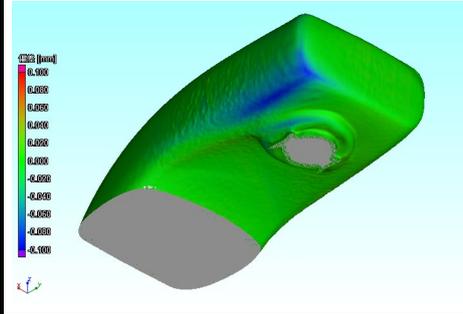
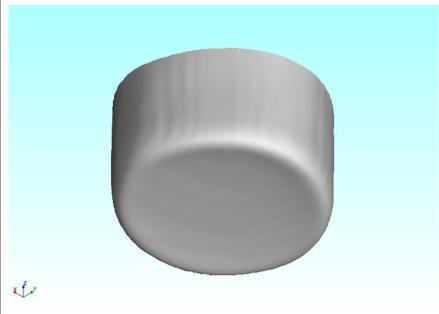
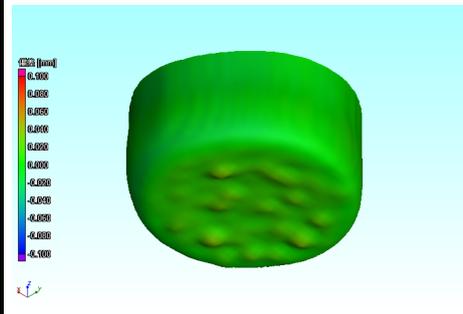
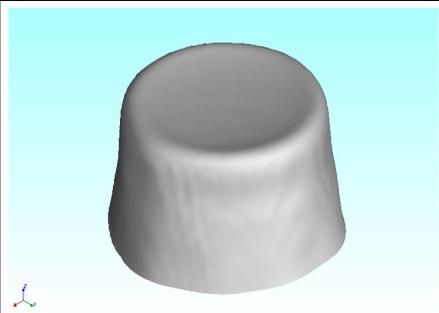
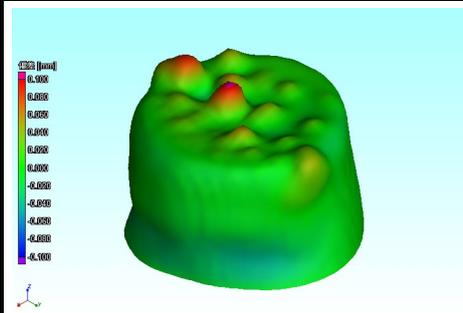
Test time [hour]			0	150	Δ delta (150h-0h)
Overall (chip + base material) (Values are in volume [mm ³])		Viewpoint: Right	35.974	35.873	-0.101
					
Ground electrode	Base material	Viewpoint: Lower right rear	17.264	17.210	-0.054
					
	Tip	Viewpoint: Lower right rear	0.165	0.162	-0.003
					
Center electrode	Tip	Viewpoint: Upper Right Rear	0.199	0.194	-0.005
					

表 2-22 CT 撮像の立体評価 (#N)

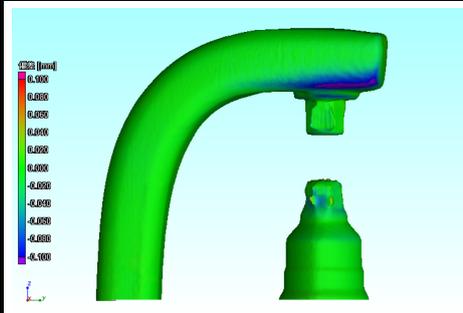
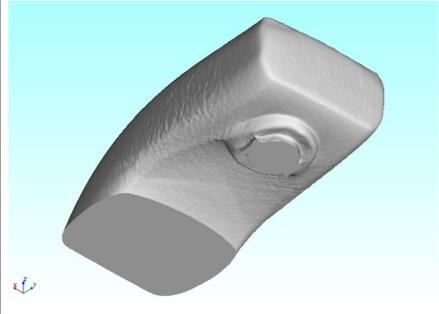
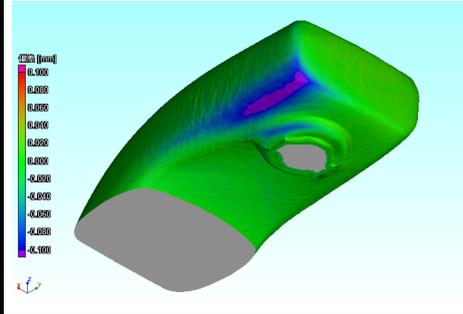
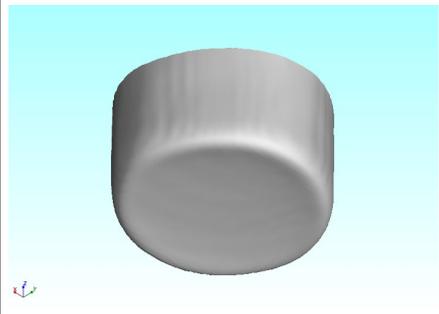
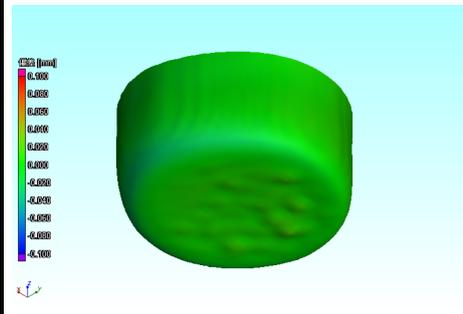
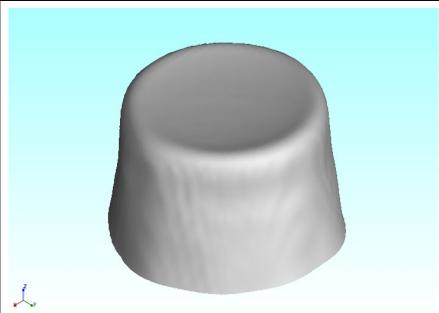
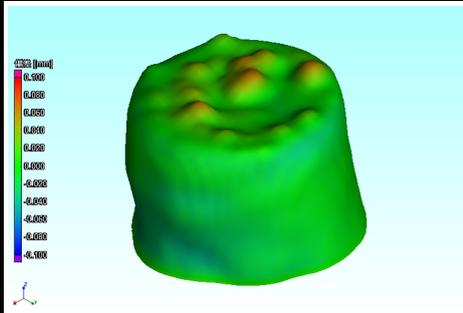
Test time [hour]			0	150	Δ delta (150h-0h)
Overall (chip + base material) (Values are in volume [mm ³])		Viewpoint: Right	35.810	35.693	-0.117
					
Ground electrode	Base material	Viewpoint: Lower right rear	16.747	16.677	-0.070
					
	Tip	Viewpoint: Lower right rear	0.166	0.159	-0.007
					
Center electrode	Tip	Viewpoint: Upper Right Rear	0.215	0.210	-0.005
					

表 2-23 CT 撮像の立体評価 (#D)

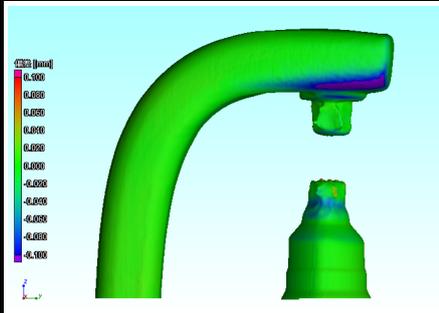
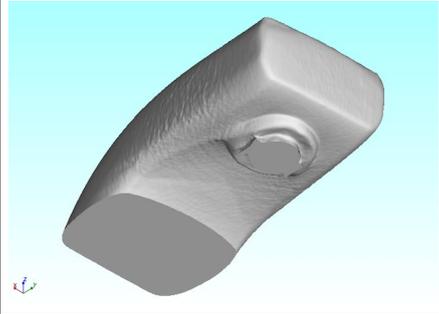
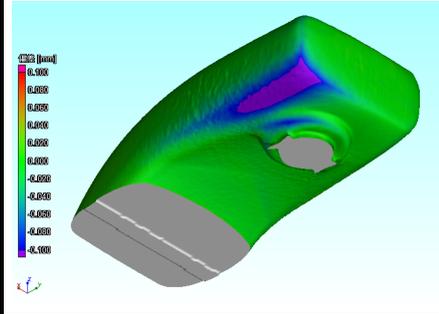
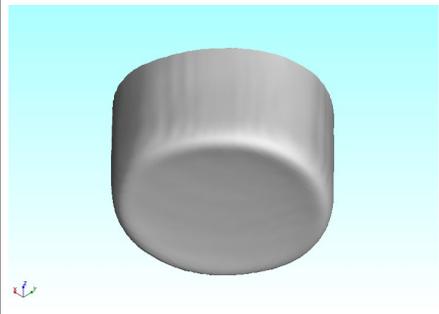
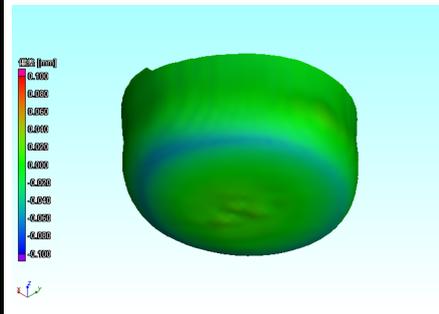
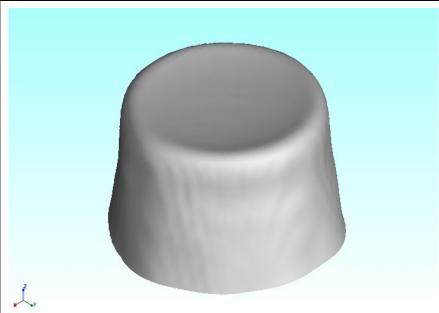
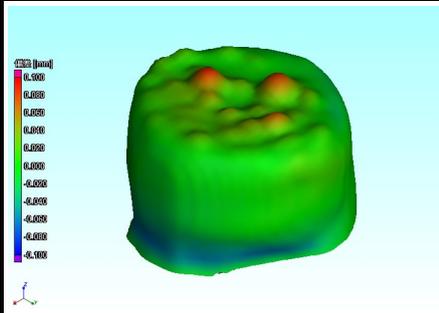
Test time [hour]			0	150	Δ delta (150h-0h)
Overall (chip + base material) (Values are in volume [mm ³])		Viewpoint: Right	35.732	35.559	-0.173
					
Ground electrode	Base material	Viewpoint: Lower right rear	17.130	16.970	-0.160
					
	Tip	Viewpoint: Lower right rear	0.167	0.153	-0.014
					
Center electrode	Tip	Viewpoint: Upper Right Rear	0.215	0.200	-0.015
					

図 2-35 にて定義した、解析範囲の体積を図 2-52 図 2-53 図 2-54 図 2-55 へ示す。新品と比べて、150[hour]経過後の体積は、全ての部位において明確に減少していることを確認できた。

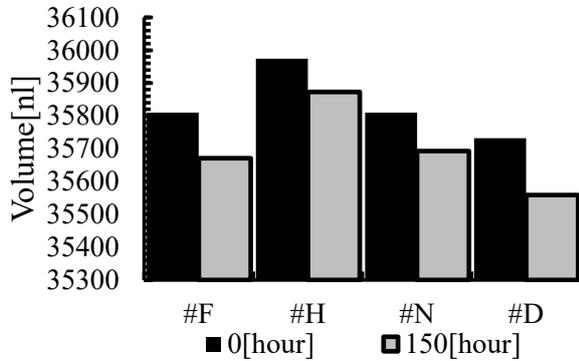


図 2-52 撮像範囲全体の容積遷移

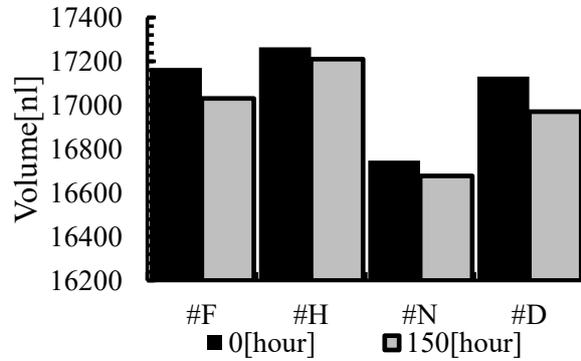


図 2-53 接地電極母材の容積遷移

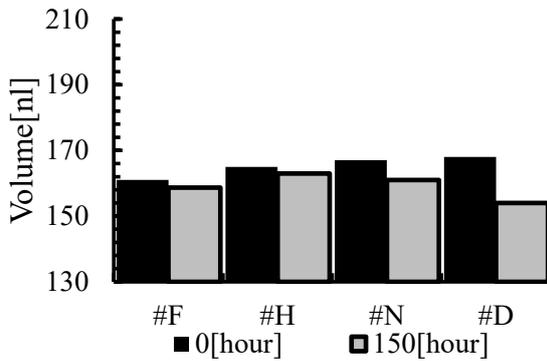


図 2-54 接地電極チップの容積遷移

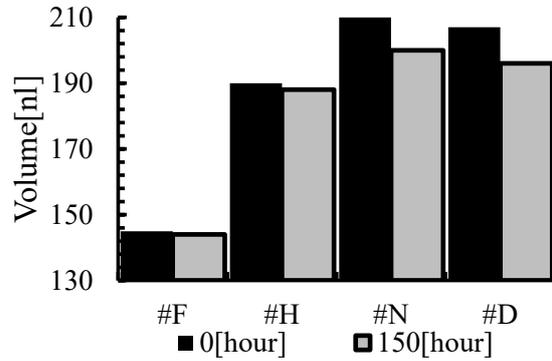


図 2-55 中心電極チップの容積遷移

図 2-52, 図 2-53, 図 2-54, 図 2-55 より算出した、体積変化を図 2-56, 図 2-57 へ示す。撮像範囲全体と解析部位の合計を比較すると、同様の傾向を確認できた。このことから、電極体積の算出上は問題無いと判断した。

図 2-57 によると、設置電極母材は、中心電極チップや接地電極チップと比べて、体積変化が大きく、体積変化の大部分を占めていることが分かる。しかし、西尾 [151]によると燃焼性能へ直接影響するのは、中心電極チップと接地電極チップの消耗による、電極隙間である。そのため、中心電極チップと接地電極チップの体積消耗について詳細に分析する。

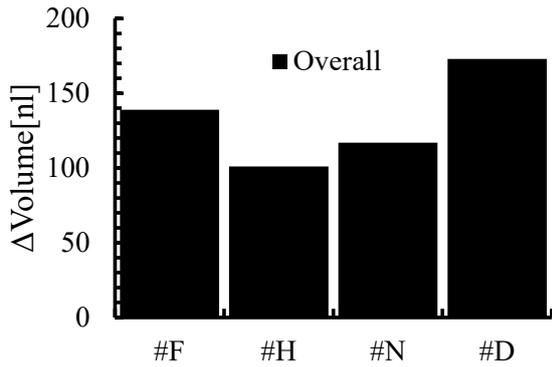


図 2-56 撮像範囲全体の容積変化

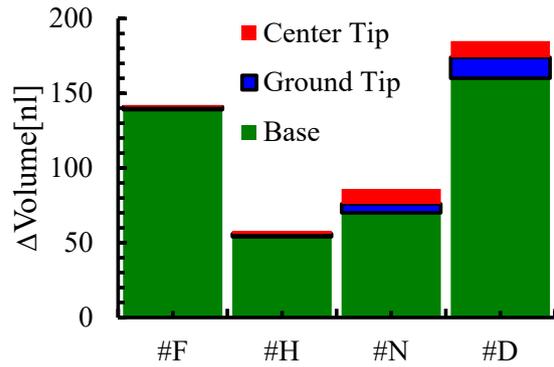


図 2-57 解析部位ごとの容積変化

2.3.6. 電極消耗抑制効果の検証結果

中心電極チップと接地電極チップそれぞれの体積変化量を図 2-58 へ示す。図 2-58 によると、#F、#H、#H、#D の順に増加している。しかし、#N と#D の間の変化量は、中心電極チップと接地電極チップで乖離が見られる。これは、既に述べたとおり、中心電極チップへの異物付着分が誤差要因になっている可能性がある。

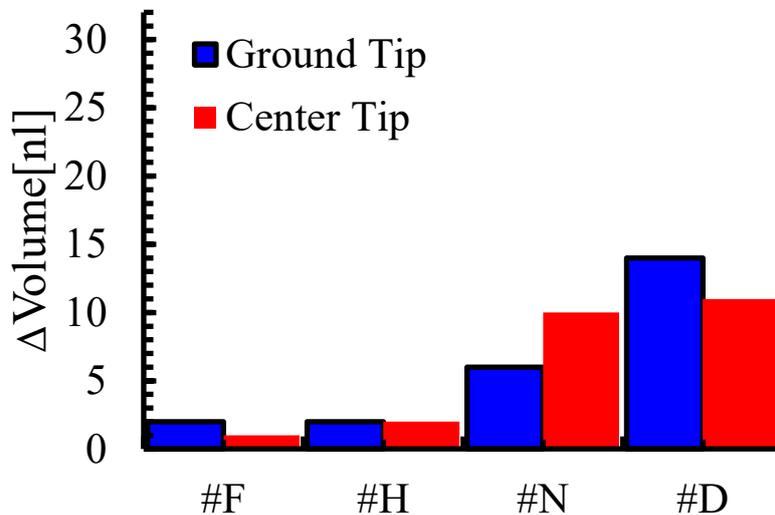


図 2-58 チップ電極の体積変化

図 2-59, 図 2-60 へ示す中心電極の形状について、新品と比べて、150[hour]経過後は消耗による凹部と、異物付着と思われる凸部を確認できる。消耗体積を検出するにあたり、異物などの影響を低減するため、新品の表面から 50[μm]除いた部分を評価範囲とした。(図 2-61)

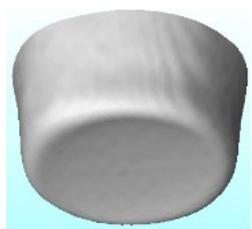


図 2-59 新品状態

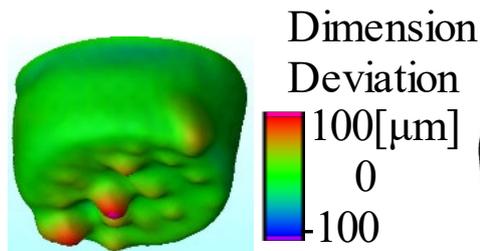


図 2-60 150[hour]経過後

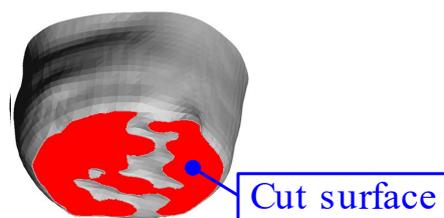


図 2-61 評価範囲

中心電極チップの評価範囲を見直した結果を図 2-62, 図 2-63 へ示す. 図 2-63 へ示すとおり, #N と#D の間の変化量は, 中心電極チップと接地電極チップで乖離が小さくなっている. このことから, 中心電極チップと接地電極チップが同じ割合で体積変化しているとみられる.

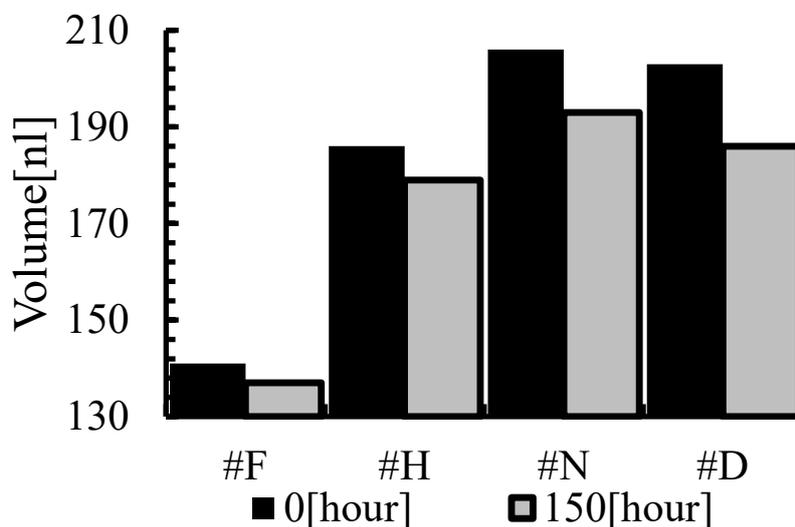


図 2-62 中心電極チップの容積遷移 (見直し後)

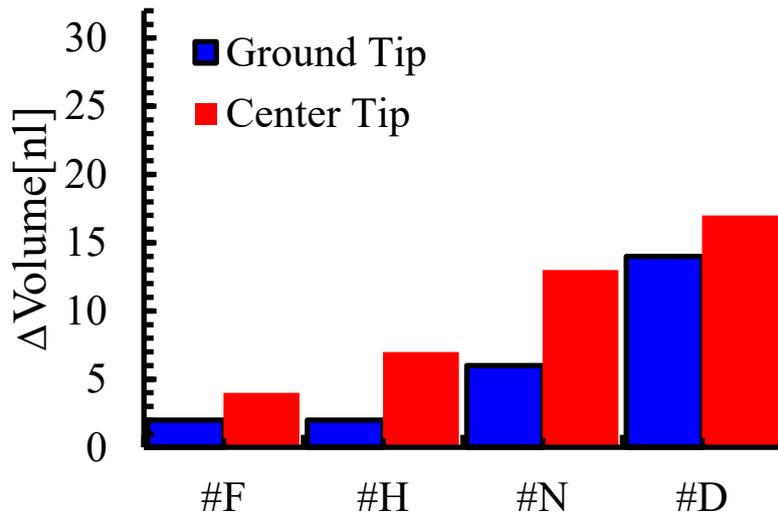


図 2-63 チップ電極の体積変化

図 2-64 へ、各試験条件の電極チップ体積変化量の合計値を示す。表 2-10、表 2-11、表 2-12、表 2-13 において想定した、低電流期間（赤色）と同様に、#F、#H、#N、#D の順で電極チップ体積変化量が増大することを確認できた。

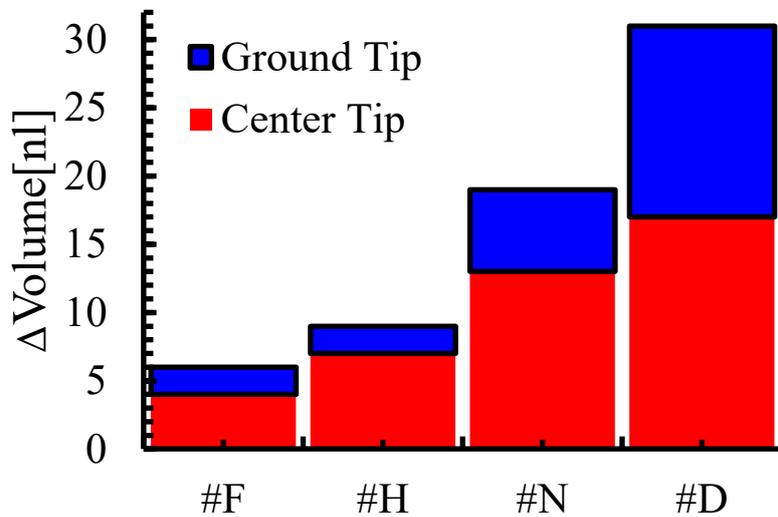


図 2-64 チップ電極の体積変化（合計）

その他、燃焼解析装置などより出力された、各試験条件における、燃焼安定性（COV of IMEP）と点火コイルの消費エネルギー（ E_1 ：1次エネルギー）を、図 2-65、図 2-66 へ示す。燃焼安定性が最も優れた点火方法は#Fであるが、点火コイルの消費エネルギーは最大である。そのため、電極消耗体積への影響を確認する必要がある。

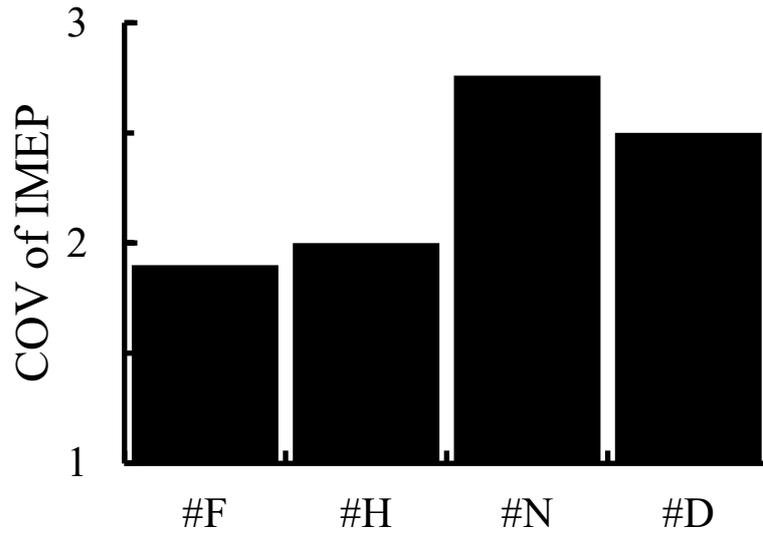


図 2-65 燃焼安定性

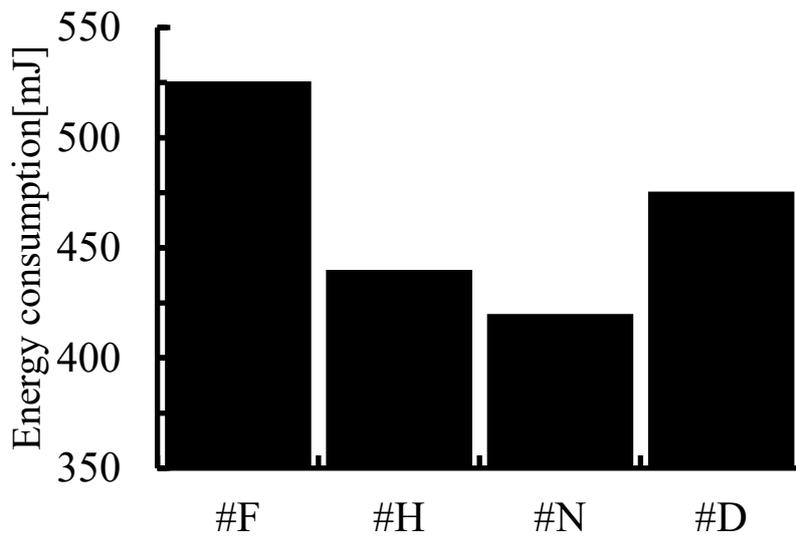


図 2-66 点火コイルの消費エネルギー

2.3.7. 考察

図 2-12 にて示した、電極消耗メカニズムの仮説を検証するため、再放電回数と電極消耗体積の関係を図 2-67 へ示す。図 2-67 によると、回帰分析による決定係数は 0.98[-]であり、再放電回数と電極消耗体積にはかなり強い相関があることから、再放電回数を低減することで、電極チップの消耗体積を低減できることを確認した。

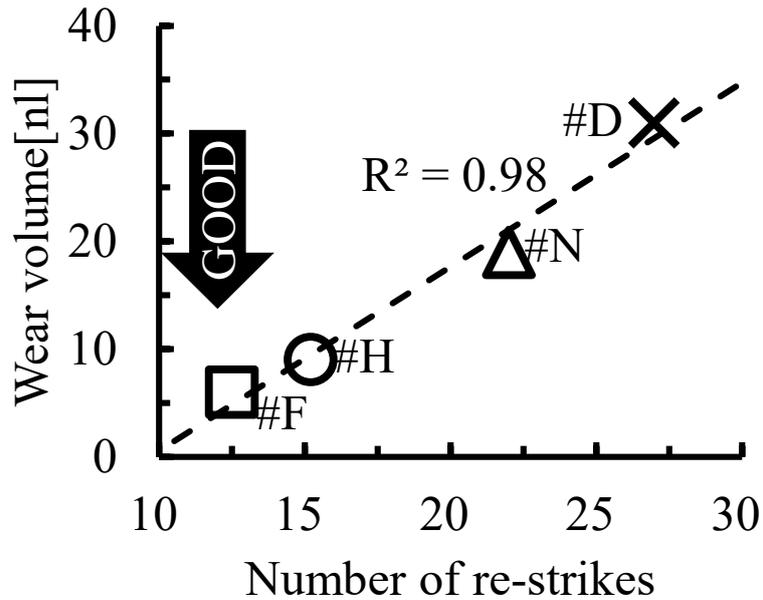


図 2-67 再放電回数と電極消耗体積間の回帰分析

次に点火コイルの消費エネルギーと電極消耗体積の関係を図 2-68 へ示す。放電電力補助機能を用いずに、点火コイルの消費エネルギーを増大させた場合、電極消耗体積は増大する。（#N から#D へ遷移）これに対して、放電電力補助機能を用いて、点火コイルの消費エネルギーを増大させた場合、電極消耗体積は減少した（#N から#H と#F へ遷移）。

これは放電エネルギーの収支上、電極消耗に消費される容量分のエネルギーが低下して、誘導分のエネルギーが増大しているものと考えられる。そして図 1-48 より、点火エネルギーの増大により、着火性が向上することから、放電電力補助機能を用いることで、燃焼安定性の改善を期待できる。

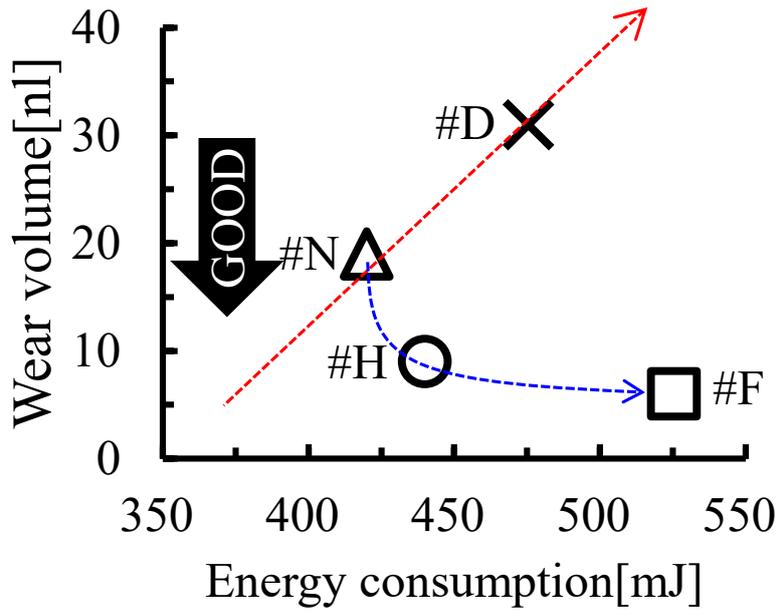


図 2-68 点火コイルの消費エネルギーと電極消耗体積の関係

電極消耗体積と燃焼安定性の関係を図 2-69 へ示す. 点火コイルの消費エネルギーが最も小さい#N は燃焼安定性が最も低い結果であり, 図 1-48 の傾向を示している. 放電電力補助機能を用いる#F と#H は, 放電電力補助機能を用いない#N と#D と比べて, 燃焼安定性の改善と電極消耗体積の低減を両立できた.

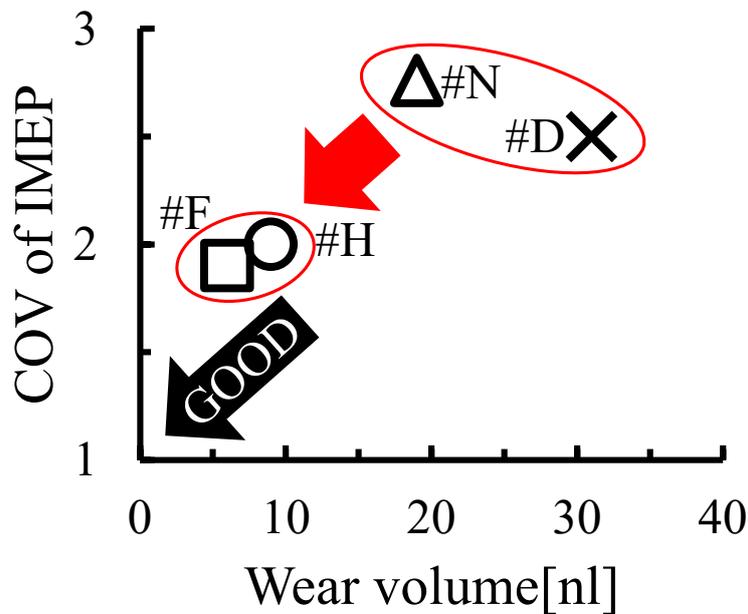


図 2-69 電極消耗体積と燃焼安定性の関係

先に述べた図 1-48 の傾向を確認するため、点火コイルの消費エネルギーと燃焼安定性の関係を図 2-70 へ示す。図 1-48 より、点火エネルギーと燃焼安定性にはトレードオフの関係が生じるものと考えられる。しかし、図 2-70 において、#H は #F、#D、#N と比べて、トレードオフを改善している。つまり #H は、電極消耗体積低減と点火コイルの消費エネルギー低減と燃焼安定性の向上を同時に改善している。これを言い換えれば、#H は耐久性と燃費と電費を同時に改善できたことになる。#H は最も効果的な使用法と考えられるが、新たな発見でもあることから、次章にて、詳細なメカニズム説明を行う。

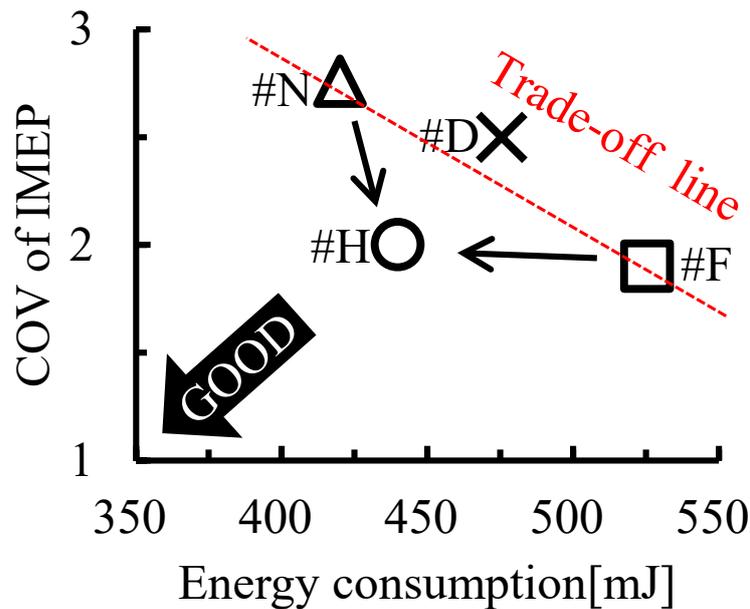


図 2-70 点火コイルの消費エネルギーと燃焼安定性の関係

2.4.章のまとめ

EGR 燃焼の着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火用電極チップの消耗低減を研究目的として、再放電回数の低減方法を検討し、実エンジンで検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 放電の低電流期間を短くすることで、再放電回数を低減できる。
- (2) 再放電回数を低減することで、電極チップの消耗体積を低減できる。
- (3) 放電エネルギーの時間配分制御により、再放電回数を従来比で半減し、同時に燃焼安定性を向上した。

第3章 電費増大の抑制技術

3.1.調査

火花点火における，電費増大の抑制技術を調査する。

3.1.1.供給電力増強コンセプト

先に述べた図 1-66 において，点火コイルの供給可能電力が C と D で同じであると仮定した場合の，電力需給関係の模式図を表 3-1#B へ示す。押領司ら [108]によると，消炎抑制のための着火性向上手段には，放電経路から混合気（未燃ガス）への伝熱量を増大する必要がある。

伝熱量の増大手段には，放電経路から混合気への伝熱面積を増やす方法があり，放電経路の伸長と持続が有効であると考えられる。これに関して今村ら [117]は，放電路の延伸が点火に及ぼす影響としては，延伸しない場合に比べてより広い体積にエネルギーを与え点火に至る効果が想定されると述べている。

ここで，放電経路が伸長すると，電極間抵抗が増大するため，必要電力が増大する。よって，電極間のガス流動下における，放電維持に必要な電力は，経時増加する。しかし，表 3-1#B へ示すように，一般的な受動式点火コイルにおいては，コイルへ蓄積された磁気エネルギーが，通電開始からの消費に伴い経時低下するため，出力可能な電力は放電開始後から経時低下する。そして，出力可能な電力と電極間の電力が一致する時点（需給一致時点）で放電経路の伸長停止後，再放電する。

この過程における必要電力の時間積分（緑の面積）が伝熱量であり，希釈率が同じであれば着火に必要な伝熱量が一定と仮定する。電極間ガス流速の違いにより，放電経路の伸長差が生じて，放電経路とガスの接触面積が異なる。

そのため，D は C に比べて，伝熱速度が低く，着火に必要な伝熱量へ到達する前に，点火コイルからの供給可能電力が不足してしまう可能性がある。この伝熱時間不足により，失火等が生じて，IMEP が低下しているものとする。即ち，電極間の流速が小さいサイクルにおける失火等を抑制するためには，放電期間後半の供給電力増強が有効であると考えられる。

表 3-1 電力需給関係の模式図

Index	High flow rate	Low flow rate	
General view	Base(#B)	High energy(#E)	Assist(#A)
Size	90 [ml]	180 [ml]	110 [ml]
Electric power hypothesis			

放電期間後半の供給電力増強には、表 3-1#E へ示すように、点火コイルの大形化による伝熱時間の延長で対処できる。しかし、点火コイルの充電エネルギー増大により、電費が増大する。さらに、巻き線の電流と発熱が増大し、熱設計上の目標温度超過という問題が生じる。

ここで筆者 [192] [201]は、電力需給差（赤の面積）の変化へ着目し、電極間の流速が小さいサイクルにおいては放電期間前半の電力需給差が十分に大きいことから、放電期間前半は供給電力を増強せず、電力需給差が小さくなる放電期間後半のみ供給電力を増強することで、コイルの発熱低減と燃焼安定化の両立を考えた。以下、放電期間前半の電力需給差の削減を課題とし、解決策の一例として考案した表 3-1#A の制御方法について検討した。

3.1.2.効果の見積り

放電期間後半の供給電力増強による着火性向上効果の仮説を検証するため、電極間の電圧のモデル式を用いた放電経路の時間変化の検討と、保坂ら [195]によって構築された電流波形を入力し火炎形成過程を予測する数値シミュレーションにより火炎形成に対する効果を検討した。

保坂ら [122]による数値シミュレーションツールは、流体解析用のオープンソースソフトウェアである OpenFOAM を用いられた。本検討にあたっては、乱流燃焼モデルの一種である HTA (Hyperbolic Tangent Approximation) モデルと、ラグランジュ粒子を用いた AKTIM モデルを組み込むことで、点火から燃焼までの現象予測を可能とした OpenFOAM を用いた。

まず、再放電による放電経路抑制が可能な電力波形を、Kim ら [124]の式を用いて検討した。Kim らの式は、式(3-1)のとおりである。

$$V_{gap} = A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} l_{dis} \quad (3-1)$$

ここで、 V_{gap} [kV]は電極間の電圧 A [-]は定数、 I_2 [mA]は2次電流、 p [MPa]は筒内圧力、 l_{dis} [m]は放電経路長さである。また、 p_0 は定数であり、0.1[MPa]とした。図 3-1 へ示すように、点火プラグ周囲に流れがある場合、放電経路長さは流れによって変化する。

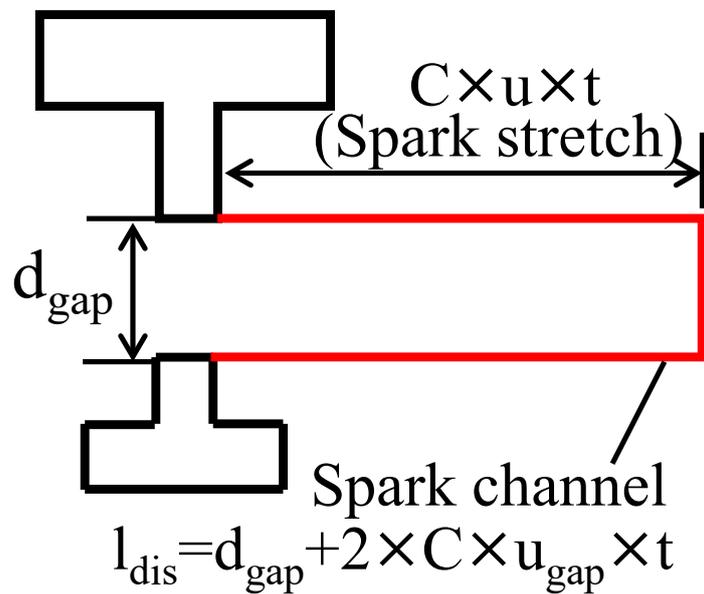


図 3-1 放電経路モデル

流れによる放電経路長さの変化は式(3-2)でモデル化できる。

$$l_{dis} = d_{gap} + 2C_D u_{gap} t \quad (3-2)$$

ここで、 d_{gap} [m]は電極間（中心電極と接地電極の間）の距離、 C_D [-]は流速に対する放電経路の変化の追従性を示すモデル定数、 t [s]は放電開始からの経過時間、または、再放電後からの経過時間、 u_{gap} [m/s]は混合気の流速、である。式(3-1)と式(3-2)より電極間の電圧は、式(3-3)で与えることができる。

$$V_{gap} = A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} (d_{gap} + 2C_D u_{gap} t) \quad (3-3)$$

式(3-3)から、プラグ周囲に流れがある場合、時間の経過とともに放電経路が伸長し、この結果、ギャップ間の電圧が増加する。ギャップ間の電圧が増加すると中心電極と接地電極の間で新たな放電経路が形成されることがある。これが再放電である。ここでは、電極間の電圧が所定値 V_{rs} [V]を超えると再放電が発生すると仮定する。そして再放電を防ぐためには、 V_{gap} が V_{rs} よりも小さい状態を保てばよい。これは式(3-4)となる。

$$V_{rs} \geq A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} (d_{gap} + 2C_D u_{gap} t) \quad (3-4)$$

ここで、再放電が発生する要件は、式(3-4)における左辺と右辺が等しくなることである。式(3-4)における等式から式(3-4)を用いて、再放電時期 t_{rs} [s]を算出できる。

$$t_{rs} = \frac{1}{2C_D u_{gap}} \left\{ \frac{V_{rs}}{A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51}} - d_{gap} \right\} \quad (3-5)$$

次に流速 7[m/s]における放電経路長さの変化を推定し、効率的に放電経路長さを大きくできる電力波形を検討した。計算に当たっては実験結果を参考に、圧力 p を 0.65[MPa]、再放電電圧 V_{rs} を 2.25[kV]、モデル定数 C_D を 0.8[-]と設定した。

圧力 p の燃焼前の断熱変化分については、ピストン位置が上死点付近であるため圧力変化が十分に小さく無視できる。さらに圧力 p の燃焼に伴う圧力変化分については、一般的に火炎核が放電後半に火炎核が形成され始めることから、放電終了時点における圧力変化が十分に小さく無視できる。また電極間の電圧 V_{gap} のうち、カソードでの電圧降下分については、堀 [133]の検討を参考にした。その結果、カソード側の電圧降下は 109[V]であり、再放電電圧 V_{rs} と比べて十分に小さいため、放電路内の電界分布が一様であると仮定した。

ここで電力波形としては、供給可能電力が時間経過とともに徐々に減少するプロファイル (Case1)、放電開始直後から電力アシストにより供給可能電力が増強されるプロファイル (Case2)、放電開始後 0.5[ms]から電力アシストにより供給可能電力が増強されるプロファイル (Case3)、を想定した。図 3-2 へ同状態を再現するための入力値とした電流波形 (Case1~3) と、放電経路の維持に必要な要求値 (REQ) を示す。図 3-2 の REQ は、式 (3.5) を I_2 で整理したものである。

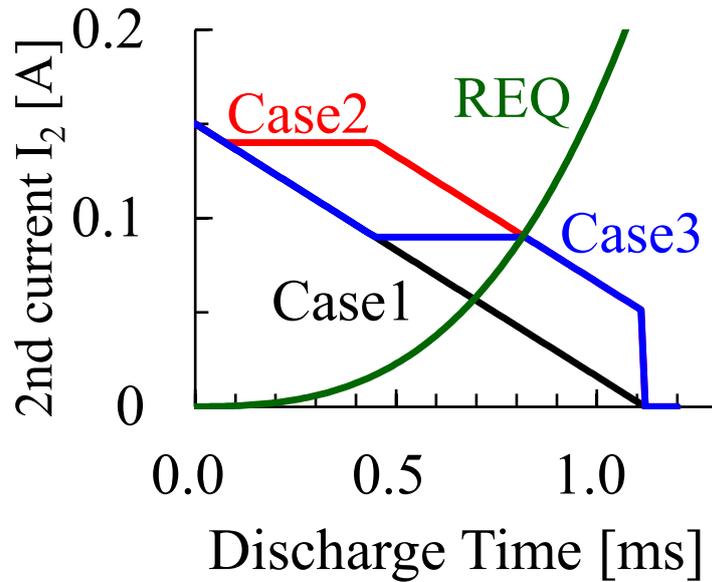


図 3-2 2次電流の推定

この結果、与えた流速により放電経路が伸長した結果、図 3-3 へ示す波形が結果として得られた。ここで図 3-3 の REQ は、図 3-2 の REQ へ V_{rs} を乗じた値である。図 3-3 において、Case2 と Case3 の再放電時期は同じであるが、2次電力は Case2 よりも Case3 の方が低くなっている。この結果から、放電後半において電力アシストにより供給可能電力を増加させることは、流速の遅いサイクルにおいて、2次エネルギーを低減（Case2 と Case3 の W_2 差分の面積）させるために有効であることを確認できた。

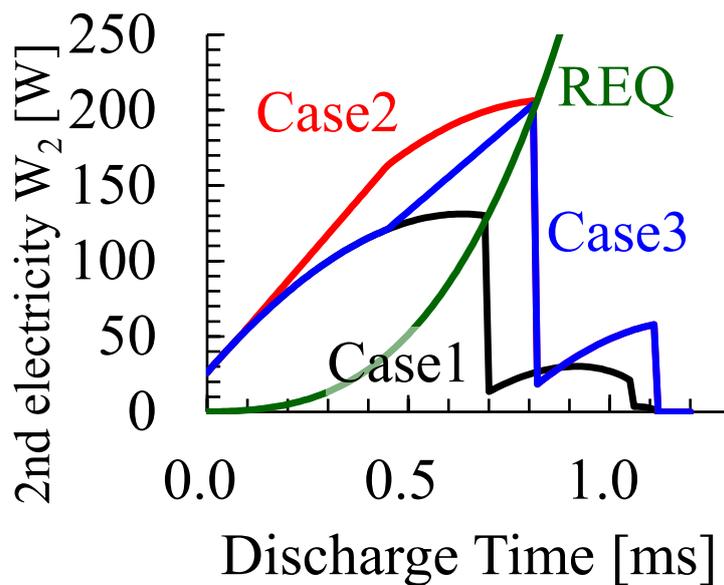


図 3-3 2次電力の推定

図 3-4 へ式 (3.2) と式 (3.5) を用いて算出した放電経路長さの時間変化を示す. 図 3-3 Case1 の電力波形の場合, Case2, Case3 と比べて早いタイミングで, 初回の再放電が発生することと, Case2 と Case3 の放電経路の長さの変化が一致することが示された. Case2 および Case3 では, 放電開始後 0.8[ms]のタイミングにおいて, コイルが発生している電流は, 再放電抑制のために要求される電流を下回るため, 再放電が生じることが分かる.

再放電のタイミング以前では, Case2 および Case3 の電流値は再放電抑制のために要求される電流値以上であり, かつ, 再放電のタイミングでは同一値となっていることから, 再放電までの放電経路長さの履歴が同一になったと考える. この結果から, 放電後半において電力アシストにより供給可能電力を増加させることが, 流速の遅いサイクルにおいて, 放電経路の長さを延長させるために有効であることを確認できた.

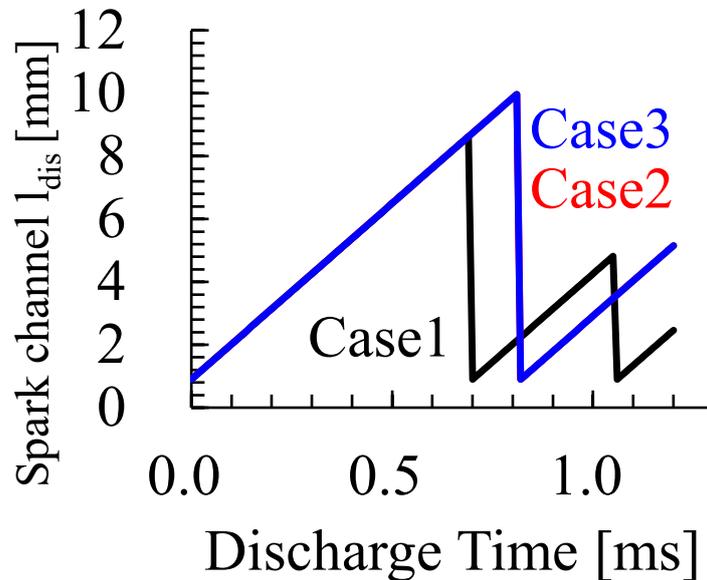


図 3-4 放電経路長さの推定

続いて, 図 3-3 Case1~3 の電力波形を入力した, 火炎核形成過程の算出結果を示す. 本計算においては一様流の条件下へ点火プラグを設置した体系で計算を実行した. 流速の遅い条件の電圧挙動を再現することから流速を 7[m/s]と設定した. また, 雰囲気圧力 p は 0.65[MPa], 雰囲気温度は 300[K], EGR 率 30[%]を想定条件とした. Duclos ら [126] による火炎各形成過程の推定に用いた式を次へ示す.

$$\rho \frac{dr_{FK}}{dt} = \rho_u (s_{DC} + s_T) \quad (3-6)$$

$$s_{DC} = \frac{\eta_{eff} Q_{gap}}{4\pi r_{FK}^2 B} \quad (3-7)$$

$$B = \rho_u (u_{FK} - h_u) + 10^6 p \frac{\rho_u}{\rho_{FK}} \quad (3-8)$$

$$\dot{Q}_{gap} = \left(\frac{I_2}{1000} \right) V_{gap} \quad (3-9)$$

ここで、 ρ [kg/m³]は密度、 r [m]は火炎核半径、 t [s]は時間、 sr [m]は乱流燃焼速度、 sDC [m]は初期火炎核の膨張速度、 Q_{gap} [J/s]は電極間へ形成される放電経路の発熱率、 η_{eff} [-]は放電エネルギーの伝達係数、 u [J/kg]は比内部エネルギー、 h [J/kg]は比エンタルピー、 p [MPa]は圧力、である。また、添え字については、 FK は火炎核または火炎核内部の物理量であることを示し、 u は未燃ガスの物理量であることを示す。式(3-6)(3-7)(3-8)(3-9)からなるサブモデルを OpenFOAM へ導入し、推定した結果を図 3-5、図 3-6 へ示す。図 3-5 には、推定したコイルエネルギーのガスへの伝達割合（エネルギー伝達割合）を示し、図 3-6 には推定した火炎核体積の結果を示す。ただし、図 3-5、図 3-6 に示す値は、Case1 の値を用いて正規化した値とした。

図 3-5 において、放電経路の伸長が同等であった Case2 と Case3 のエネルギー伝達割合は Case1 に比べて大きい。よって、低流速条件において放電後半の電力供給増加は、ガスへのエネルギー供給量を効率的に増加させることへ寄与することを確認できた。図 3.6 において、火炎核の大きさは、放電開始直後から電力アシストにより供給可能電力を増加させた Case2 で最も大きくなった。また、放電開始後 0.5[ms]から電力アシストにより供給可能電力を増加させた Case3 の電力波形を用いた場合も、Case1 の電力波形に比べて火炎核増大へ寄与することが確認できた。

以上の検討から、放電後半の出力可能な電力を増加させる Case3 の波形は、火炎核の増大に対して効果があり、同条件における燃焼状態の改善につながる可能性が示唆された。図 3-6 へ示すように、Case3 の電力流波形を用いることで、従来 (Case1 相当) に比べて火炎核成長を促進し、安定燃焼へ繋がる見込みを得た。ただし、エンジンの安定燃焼に必要な火炎核の増大要求 (図 3-6 では仮に 102[%]を REQ と想定) の推定は困難であるため、表 3-1#A の仕様に基づいた点火コイルを試作し、実機エンジン評価を行うこととした。

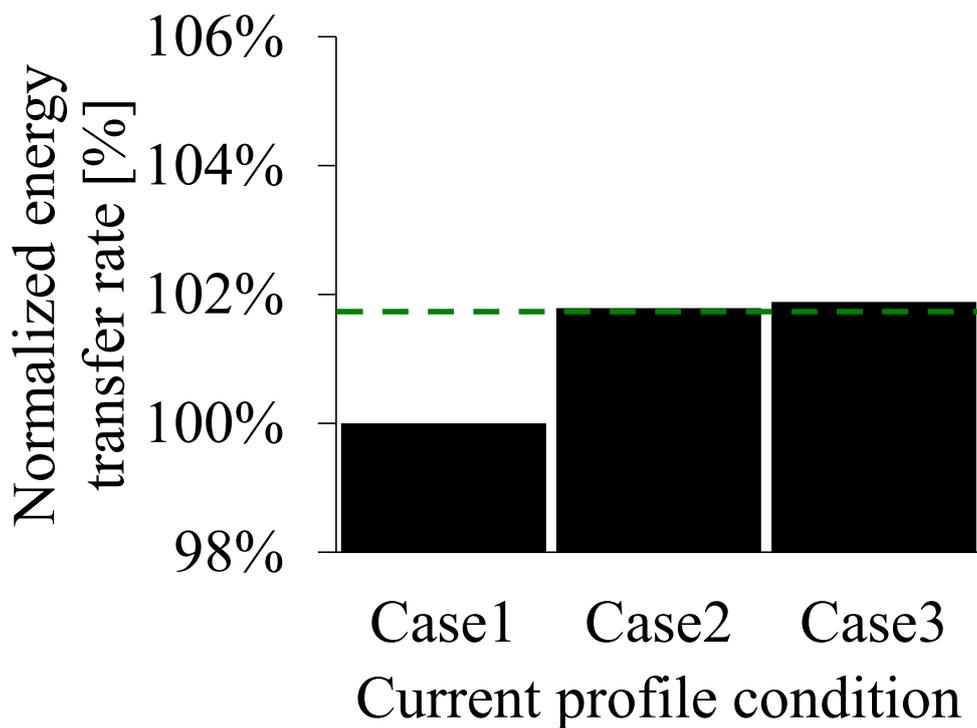


図 3-5 放電エネルギーのガスへの伝達割合

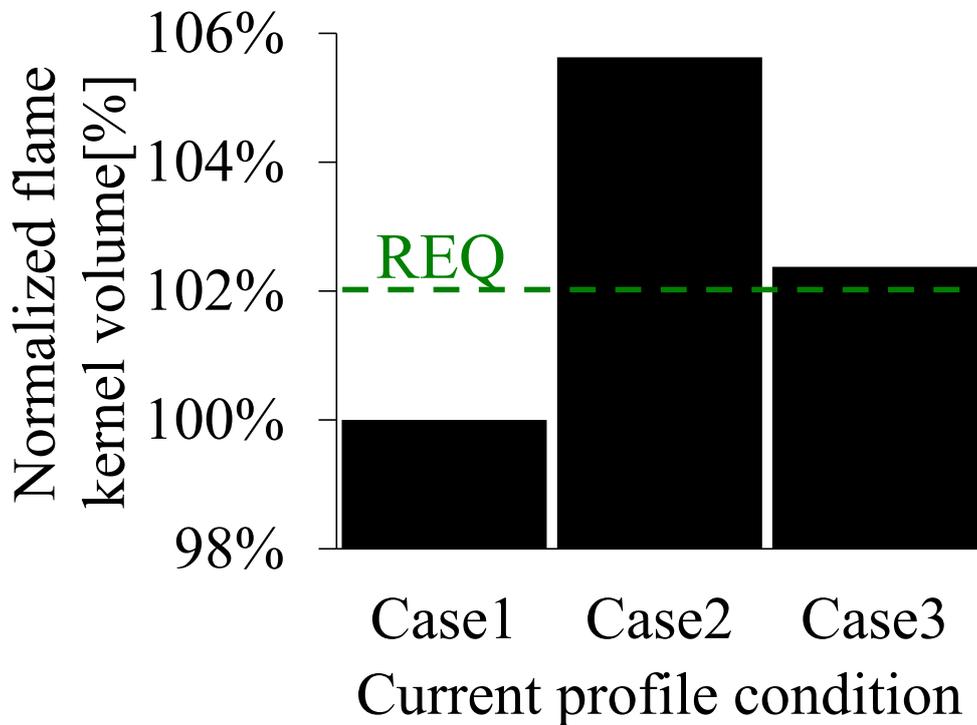


図 3-6 火炎核体積の推定結果

3.2. 解決策

表 3-1#A の電力波形を実現するには、経時低下する放電電力の後半で放電電力を増加させる必要がある。しかし、従来の 1 次コイルへ蓄積したエネルギーの放出のみで実現させることは困難である。そこで筆者ら [24]は、従来方式の点火コイル#B へ 3 次コイルを追加し、このコイルへ蓄積したエネルギーを電力補助に使用する方式を考案した。

3.2.1. 試作した点火コイルの構成

図 2-16 へ試作した点火コイルの構成を示す。3 次コイルは 1 次回路と同様に、通電制御用 IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）と制御回路を備える。2 次電流の補助を制御するための補助信号線が制御回路へ入力され、制御回路からは IGBT を駆動するためのゲート信号が出力される。

3.2.2. 試作した点火コイルの動作原理

図 2-17 へ試作した点火コイルの動作原理を示す。1 次コイルの通電が遮断されたことに伴い、2 次コイルで生じた電圧を受けて、点火プラグの電極間が通電する。通電期間中に補助信号を ON にすると、3 次コイルで生じた電流変化が 2 次コイルの電流を増幅する。通電期間中であれば、補助の期間を自由に設定できるため、放電エネルギーの時間配分制御が可能となる。

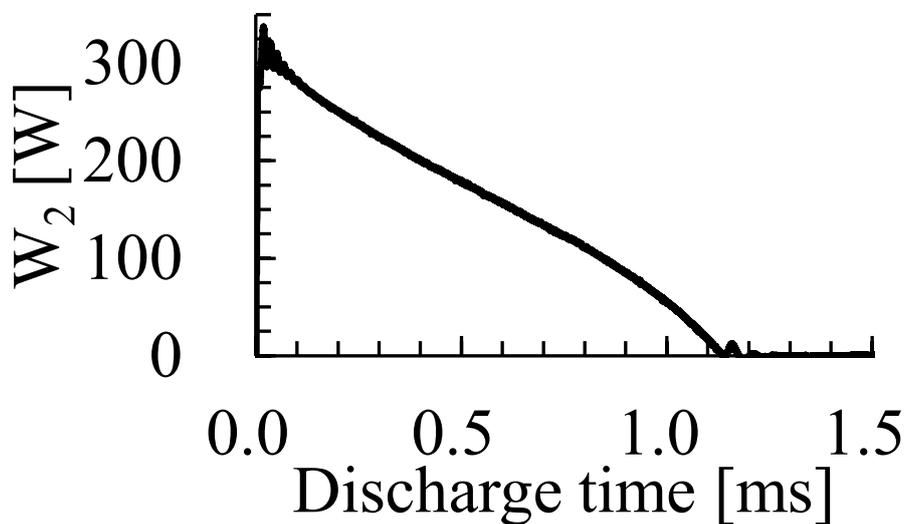
3.2.3. 試作点火コイルの動作確認結果

図 2-16 の試作品を動作させた結果の W_2 波形例を図 3-7 (a) (b) (c) へ示す。Case1, 2, 3 それぞれへ相当する放電方法として Not assist (#N), Full assist (#F), Half assist (#H) を設定し、電力補助機能による電力の増加を確認できた。放電電力補助機能の応答遅延は約 0.1[ms]であり、放電期間に対して十分小さいため問題無いと判断した。

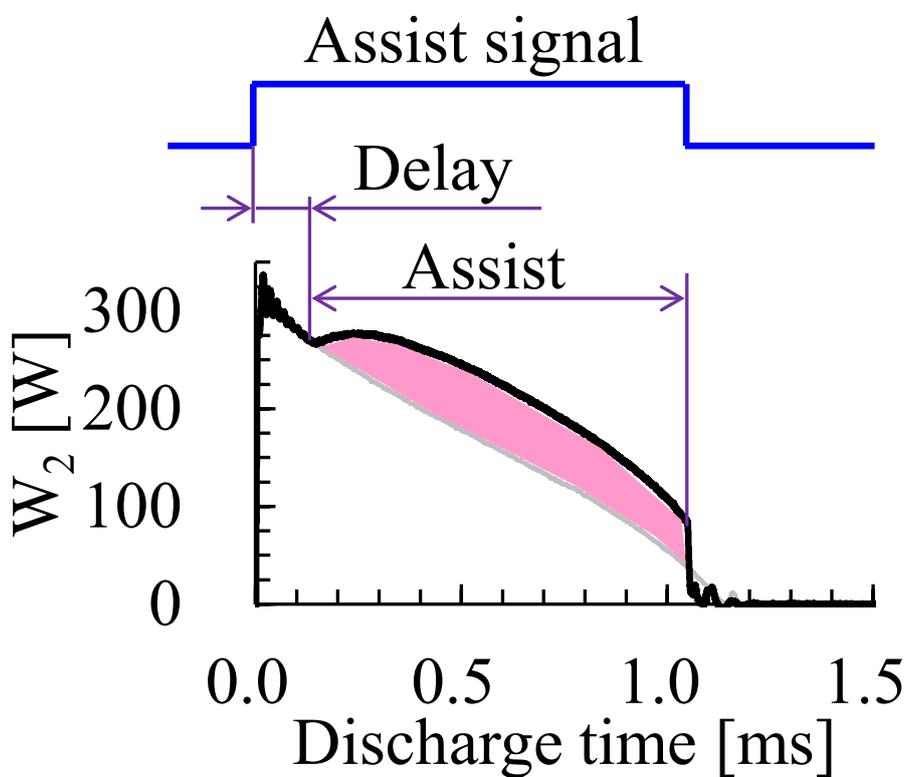
3.2.4. 試作点火コイルの変電効率

#N, #F, #H のそれぞれについて、1 次エネルギーと 2 次エネルギーの関係を図 3-8 へ示す。エネルギーの入出力比より、電力変換効率は約 30[%]である。この変換効率は#N, #F,

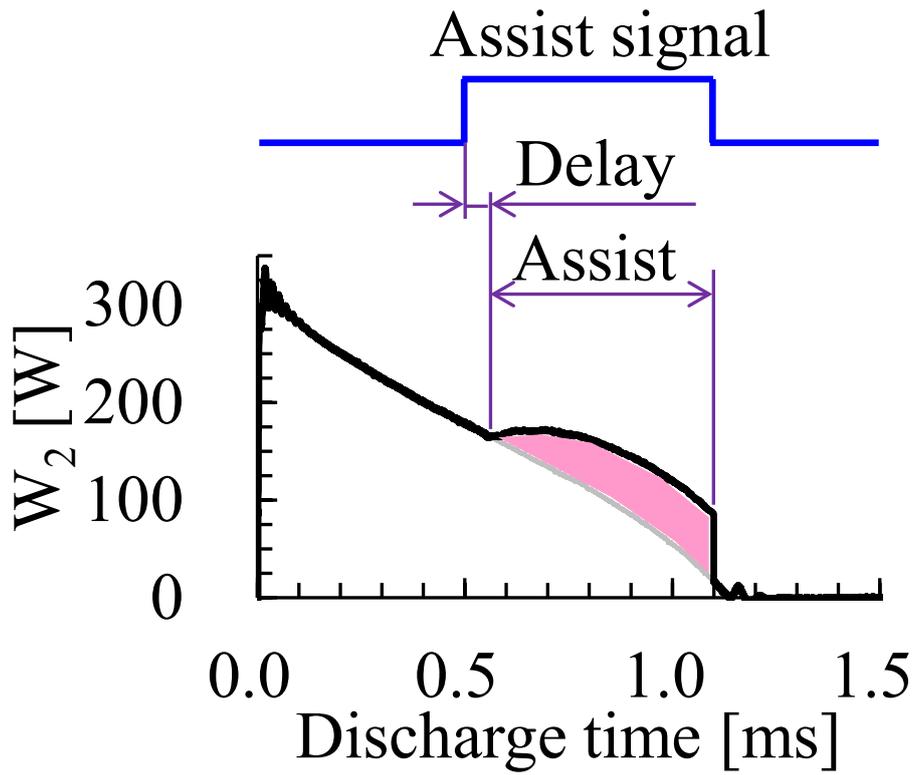
#Hの何れの場合でも同様である。そのため、3次コイル使用による電費影響は少ないものと考えられる。



(a) Case1:Not assist (#N)



(b) Case2:Full assist (#F)



(c) Case3:Half assist (#H)

図 3-7 点火コイル試作品を動作させた結果の W_2 波形例

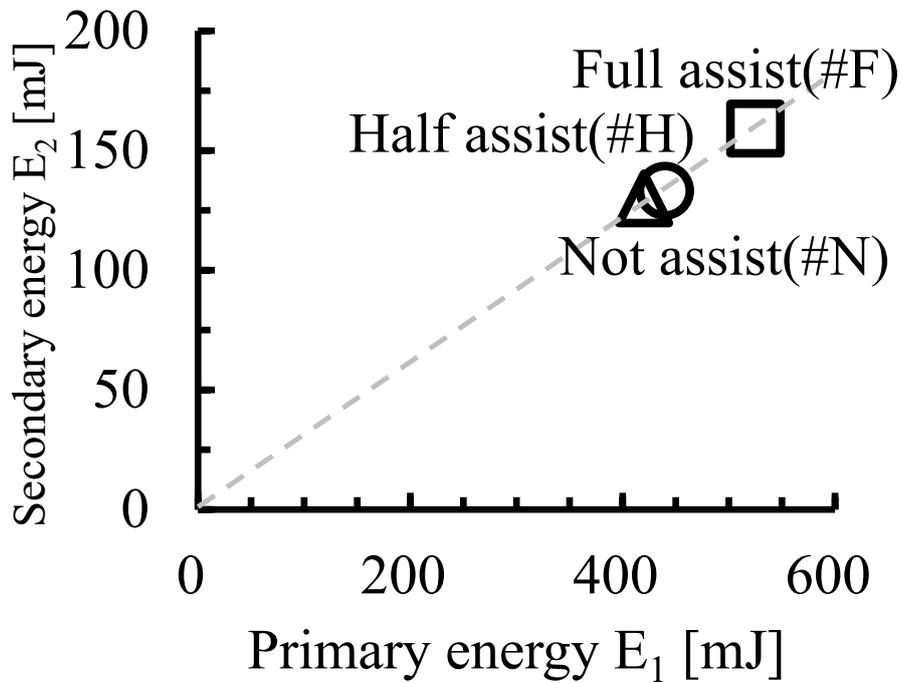


図 3-8 点火コイルの変電効率

3.3.試験方法と試験装置

3.3.1.試験方法

本研究においては、次の手順で試験を行う。

- (1) 自動車用多気筒ガソリンエンジンの各気筒へ、放電電力補助機能付き点火コイルを装着。
- (2) 気筒ごとに放電電力補助機能無しと有りで分け、「燃費」「電費」「発熱」の比較評価を行う。

3.3.2.試験エンジン

試験用エンジンの仕様と運転条件を表 3-2、表 3-3 へ示す。低圧 EGR 付エンジンへ、排気絞り弁を追加することで排圧を上げて EGR 率を上昇させ、点火時期を進角することで、タンブルが崩壊する前の筒内流速が速い期間へ点火時期を設定した。

表 3-2 試験用エンジンの仕様

No.	Index	Spec.
1	Engine	Four-cylinder
2	Bore	79.7[mm]
3	Stroke	81.1[mm]
4	Compression ratio	10.4[-]
5	Displacement	404.6[ml]
6	S/B	1.0[-]
7	Con.rod length	139.0[mm]
8	EGR loop	Low pressure

表 3-3 試験用エンジンの運転条件

No.	Index	Spec.
1	Ne	2400[rpm]
2	IMEP	1.0[MPa]
3	Ignition timing	32[deg. BTDC]
4	A/F	14.7[-]
5	EGR Ratio	28[%]
6	Fuel	100[RON]
7	Intake temp.	25[deg.C]
8	Intake Humidity	60[%]

3.3.3.筒内流速の向上策

筒内流速の向上を目的として、南波ら [82]の研究を参考に、吸気ポートへ流速向上デバイスを追加した。図 2-21 へ示すようなノズルアダプタを吸気ポートへ設置した。流体解析 (CFD) の結果、図 2-22 へ示すとおり、点火時期における流速は約 8[m/s]となった。

3.3.4. 点火デバイス

試験用点火プラグと点火コイルの仕様を表 2-5, 表 2-6 へ示す. 点火コイルは一般市販品と比べて, 高エネルギー品を基に, 放電電力補助機能を追加し, 追加した制御信号配線へ補助信号を与えることにより, 放電電力補助の有無や期間を設定できる. 点火プラグは特殊な電極形状のものではなく, 市販品の中から中心電極と接地電極へ貴金属チップが採用されているものを用いた.

3.3.5. 効果検証方法

本研究では, 「燃費」と「電費」のトレードオフと, 「発熱」抑制効果について評価する. 評価対象ごとの評価指標と計測方法を示す.

(1) 燃費

燃費の悪化要因に失火等による出力低下があるため, 変動係数 COV of IMEP を評価指標とする. 具体的には, 筒内圧力とクランク角度から IMEP を算出し, 各気筒 68 サイクル分の変動係数を算出する.

(2) 電費

点火コイルの充電エネルギー E_I を評価指標とする. (気筒別のサイクル平均) 具体的には, プローブを用いて I_I と V_I を測定, 乗じた上で, 時間積分して, E_I を算出.

(3) 発熱

点火コイル内部の温度を評価指標とする. 具体的には, 点火コイル内部へ熱電対を埋設し, 温度計測する.

以下, 放電に関わる計測や評価に用いる記号と単位は次のとおりとする.

1 次電流 I_1 [A], 2 次電流 I_2 [mA], 3 次電流 I_3 [A], 1 次電圧 V_1 [V], 2 次電圧 V_2 [kV], 3 次電圧 V_3 [V], 1 次電力 W_1 [W], 2 次電力 W_2 [W], 3 次電力 W_3 [W], 1 次エネルギー E_1 [mJ], 2 次エネルギー E_2 [mJ], 3 次エネルギー E_3 [mJ]

3.3.6. 実験装置

点火放電と燃焼の状態を確認するために収録した項目を表 2-9 へ示す. 点火放電は微小時間に生じるため, 計測器と収録器には高い時間分解能と短い収録周期が要求される.

本研究においては, ベースクロック確度が 50[ppm]の計測装置を用いて, 2.5[μ s]周期で全ての信号を同時に収録した. 表 2-9 に基づき, 構成した試験装置を図 2-36 へ示す. 全ての計測信号を収録器へ接続し, 全気筒分をリアルタイムで PC へ計測データを保管する. 収録データは PC にて, 燃焼解析などの後処理を行う. 点火プラグの取り付け方向

は、接地電極をクランク軸方向に統一した。再放電回数について、ベースの点火方法(#N)では気筒差が無いことを予め確認した。

3.4.試験結果および考察

3.4.1.実験結果

放電電力の補助機能無し(#N)と補助機能有り(#F)(#H)それぞれについて、 θ_{IG-10} とIMEPの測定結果を図3-9、図3-10、図3-11へ示す。点火性能を評価するための一般的な指標として θ_{IG-10} [deg.]があり、これは放電開始から燃焼質量割合10[%]へ至るまでのクランク角度である。図3-9は、燃焼サイクルごとの θ_{IG-10} の遷移を示したものである。

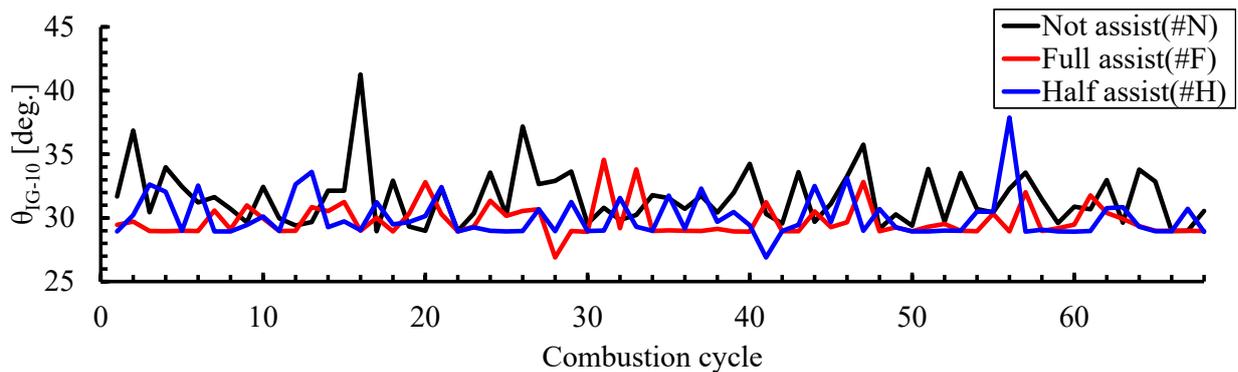


図 3-9 燃焼サイクルごとの θ_{IG-10}

図3-10は、図3-9の平均値と標準偏差を示したものである。図3-10において#Fと#Hの θ_{IG-10} は、#Nと比べて短縮した上、サイクルばらつきも低減しており、点火性能の向上を確認できた。さらに、#Fと#Hの θ_{IG-10} は同等である。筆者ら[24]による過去の試験結果(図2-47)では、#Fと#Hは#Nと比べて、再放電が抑制されることを確認している。これらのことから、数値計算により示されたように、放電経路が伸長した際の再放電を抑制することで、点火性能が向上したものと考えられる。

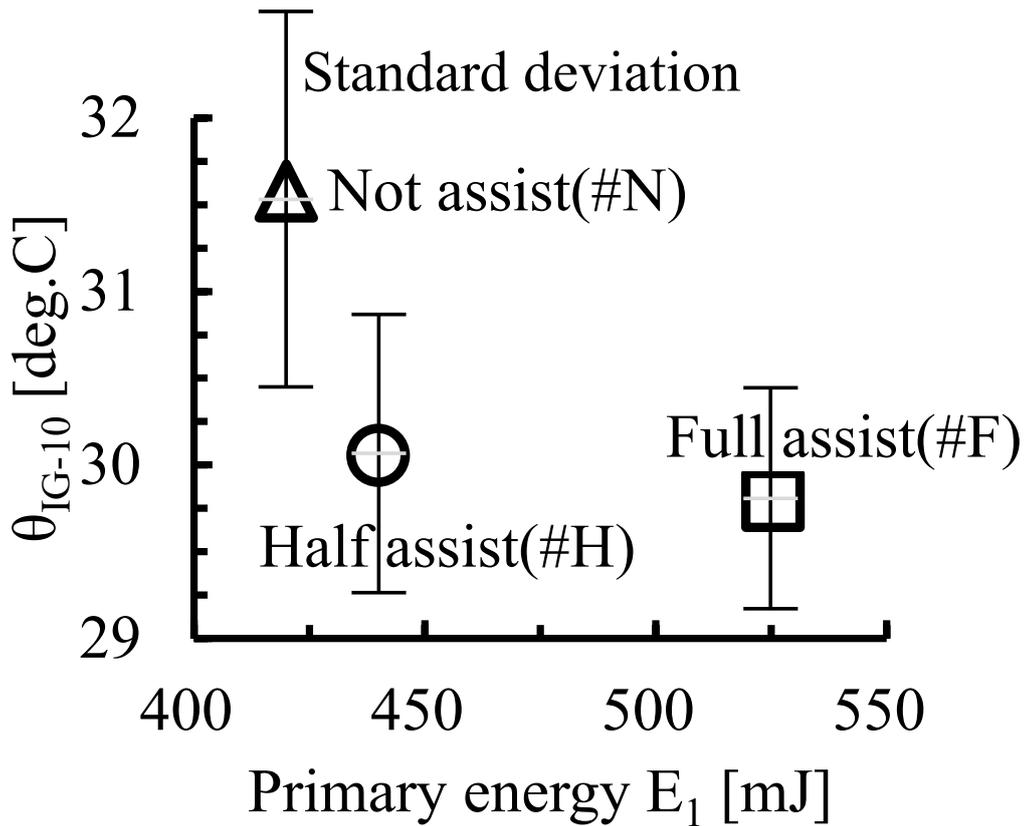


図 3-10 θ_{IG-10} の平均値

その結果，図 3-11 において#F と#H は#N と比べて IMEP の低下抑制を確認できた。(図 3-12)

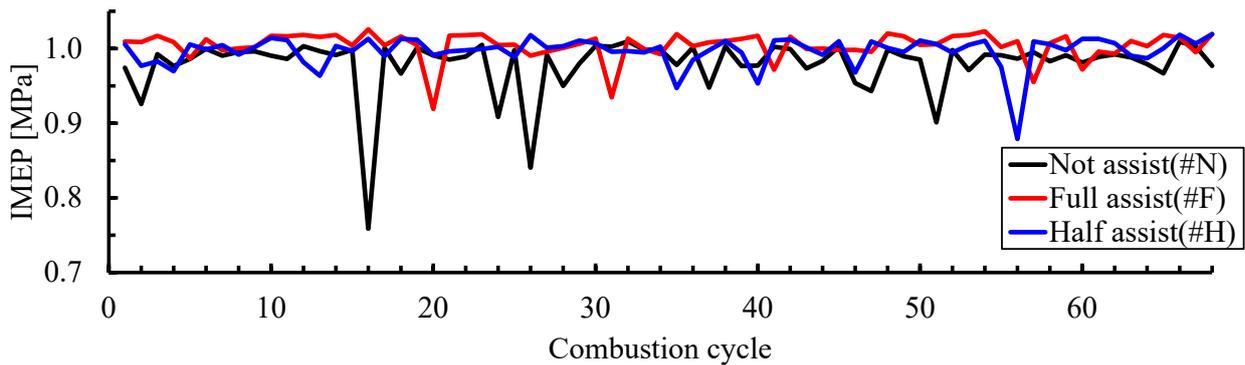


図 3-11 燃焼サイクルごとの IMEP

次に，放電電力の補助機能無し (#N) と補助機能有り (#F) (#H) それぞれについて， I_2 ， V_2 ， W_2 の測定結果をそれぞれ表 3-4，表 3-5，表 3-6 へ示す。

表 3-4 Case1 実験結果 (#N)

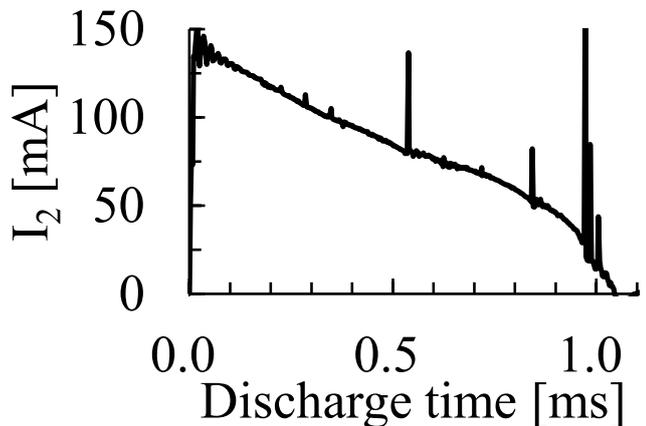
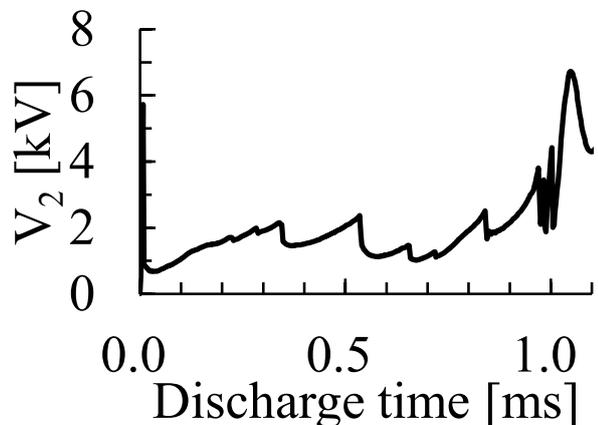
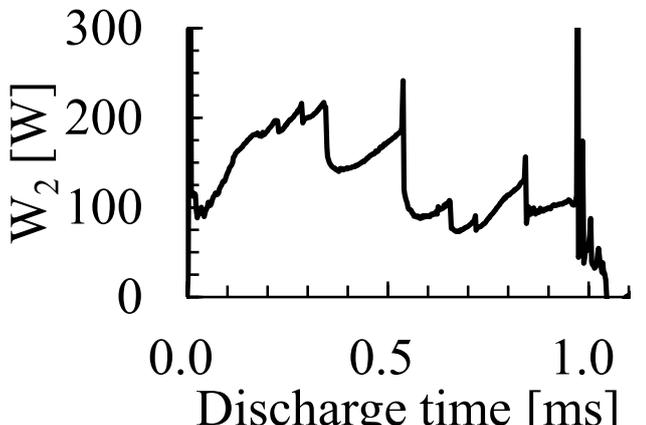
No.	General view	<p style="text-align: center;">Not assist(#N)</p> 
1	<p style="text-align: center;">I_2 Measurement example</p>	
2	<p style="text-align: center;">V_2 Measurement example</p>	
3	<p style="text-align: center;">W_2 Measurement example</p>	

表 3-5 Case2 実験結果 (#F)

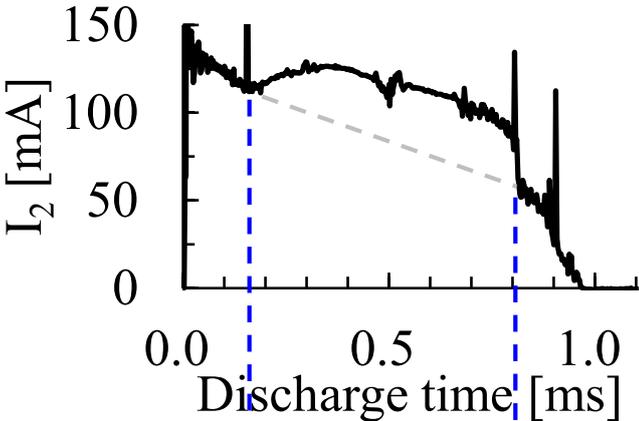
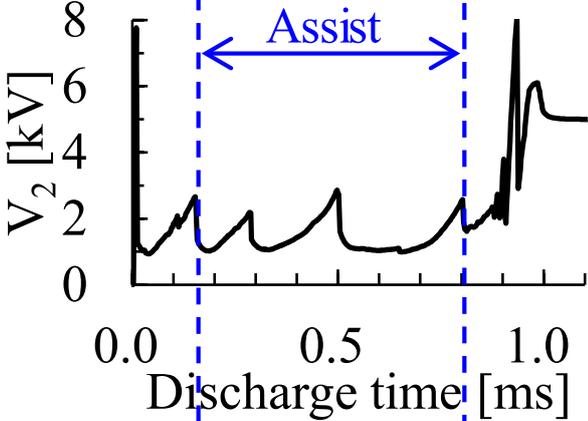
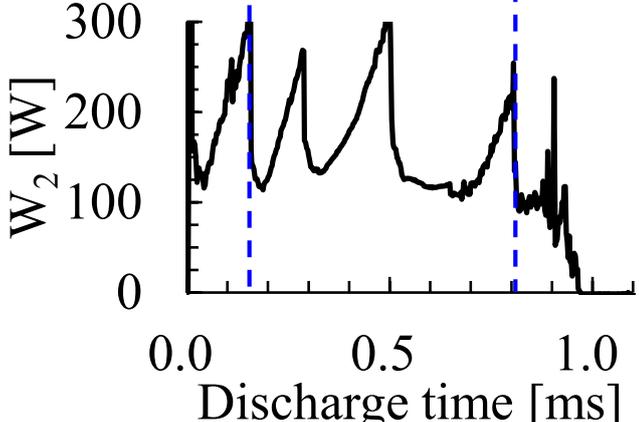
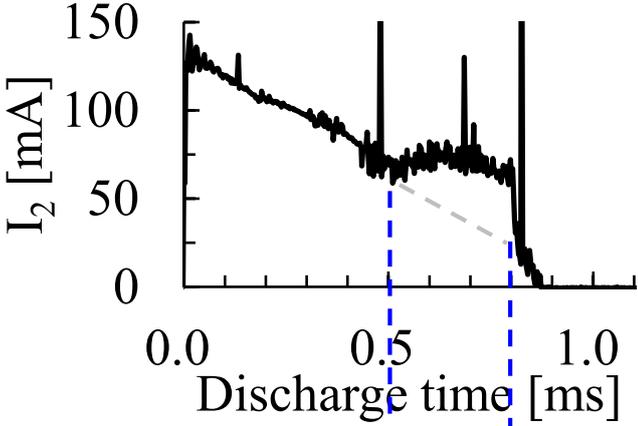
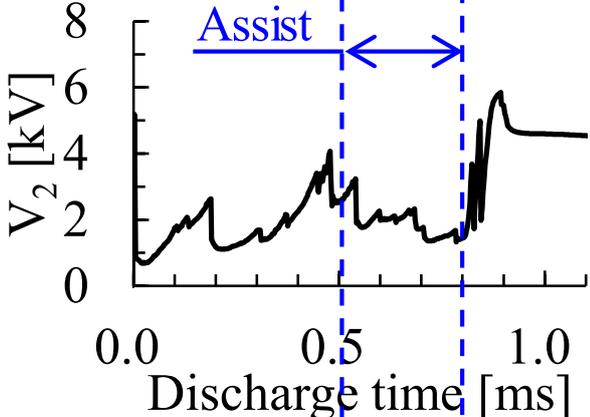
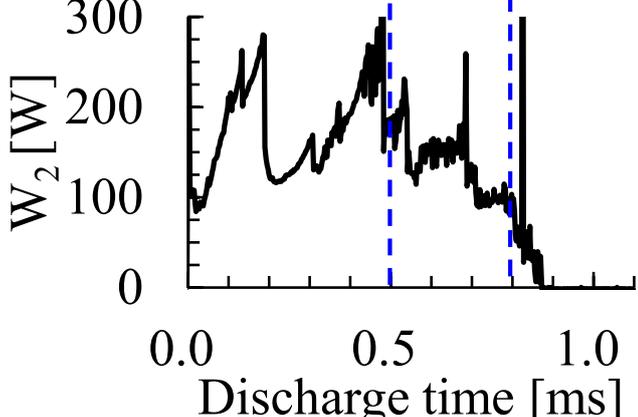
No.	General view	<p style="text-align: center;">Full assist(#F)</p> 
1	I_2 Measurement example	
2	V_2 Measurement example	
3	W_2 Measurement example	

表 3-6 Case3 実験結果 (#H)

No.	General view	<p style="text-align: center;">Half assist(#H)</p> 
1	<p style="text-align: center;">I_2 Measurement example</p>	
2	<p style="text-align: center;">V_2 Measurement example</p>	
3	<p style="text-align: center;">W_2 Measurement example</p>	

ここで表 3-4, 表 3-5, 表 3-6 の W_2 は, I_2 と V_2 を乗じることで算出した. さらに #F, #H の I_2 , W_2 , については, I_3 , W_3 , が含まれた値である.

V_2 波形において, 放電期間終盤で電圧が上昇している. これはグロー放電期間の終了に伴い, 放電経路が消失して, 電極間電圧が上昇したものと考えられる.

I_2 波形において, #H は #N と比べて, 放電期間後半に電流が増加していることから, 実エンジン環境において, 放電電力補助機能が有効に動作し, エネルギーの時間配分制御が可能であることを確認できた.

W_2 波形において, #H は #N と比べて, 放電期間後半の電力が低下していない. このことから, #F と #H は #N と比べて, 放電期間後半においても放電経路が伸長し, 着火性の改善が期待できる. 一方, W_2 の時間積分値は, #N および #H と比べて #F が大きくなっていることから, #F の発熱増大が懸念される. そのため次に点火コイル温度の評価を行う.

3.4.2. 考察

先に述べた効果検証方法に基づき, 燃費, 電費, 発熱についての評価結果を図 3-12 と図 3-13 へ示す.

放電電力補助機能を用いた点火エネルギーの時間配分制御による, 燃焼安定性, 点火コイルの充電エネルギー, 点火コイルの発熱への影響について確認する. 図 3-12 図 3-13 において, #N, #H, #F は, 点火エネルギーが増大すると, 燃焼が安定しており, トレードオフの関係にある. 一方 #H は, #N と同等の点火エネルギーで, 且つ #F と同等の燃焼安定性であり, トレードオフ解消のポテンシャルがある.

ここで, #N, #F, #H の燃焼安定性は, 点火エネルギーに対して線形関係になく, 図 3-6 の傾向と異なる. これは, 失火等の抑制に必要な火炎核体積 (図 3-6 の REQ) があると仮定すれば, #H と #F で生成した火炎核体積が, 要求火炎核体積を満足したものと考えられる. その結果, #H と #F で失火等が抑制され, 燃焼が安定したものと考えられる.

また, 図 3-14 へ示すとおり, #H と #N の点火コイル温度はほぼ同等であり, #F より大幅に低下していることから, 提案した点火エネルギーの時間配分制御による発熱抑制効果を確認できた. 以上の実エンジン検証結果は, 数値計算による現象解明結果と傾向が一致していることから, 提案した点火エネルギーの時間配分制御により電費抑制と点火性能向上を両立する現象を解明できた.

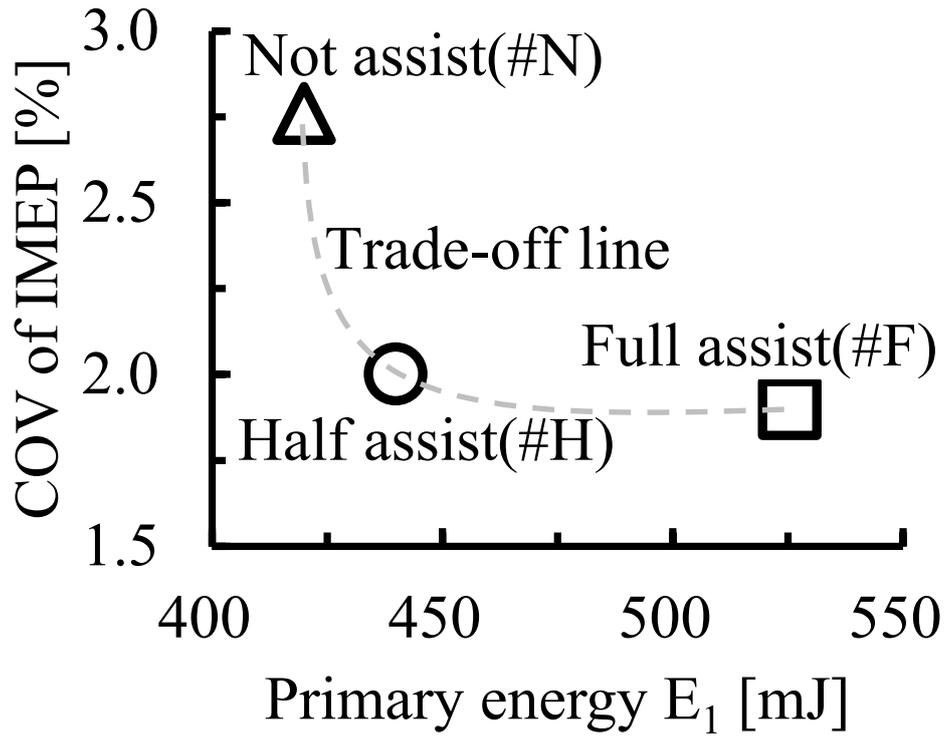


図 3-12 1次エネルギーに対する燃焼安定性の評価

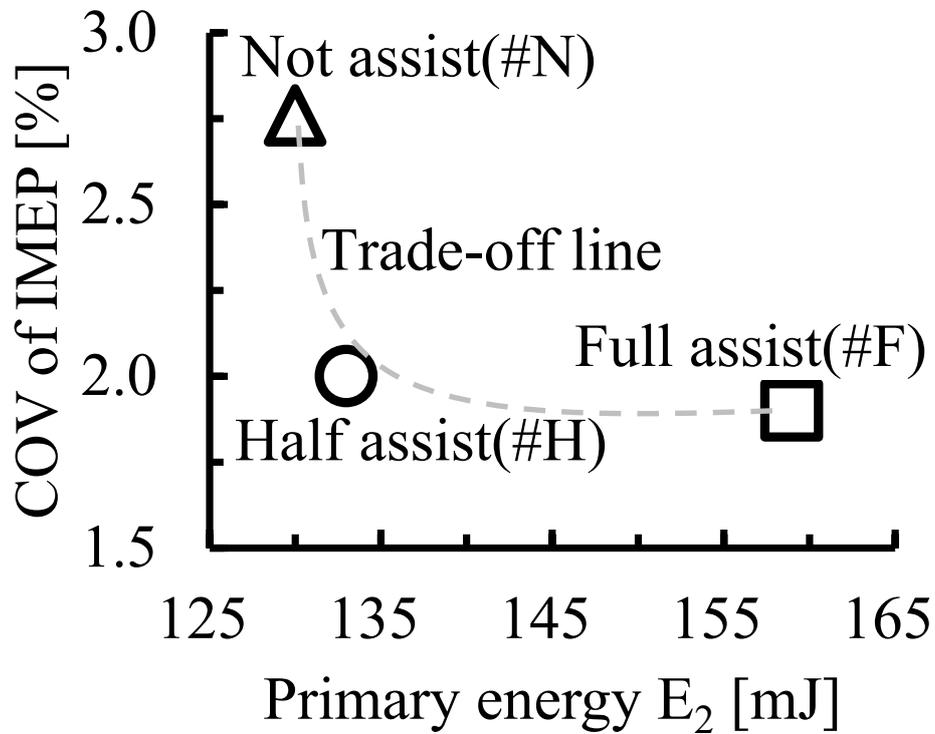


図 3-13 2次エネルギーに対する燃焼安定性の評価

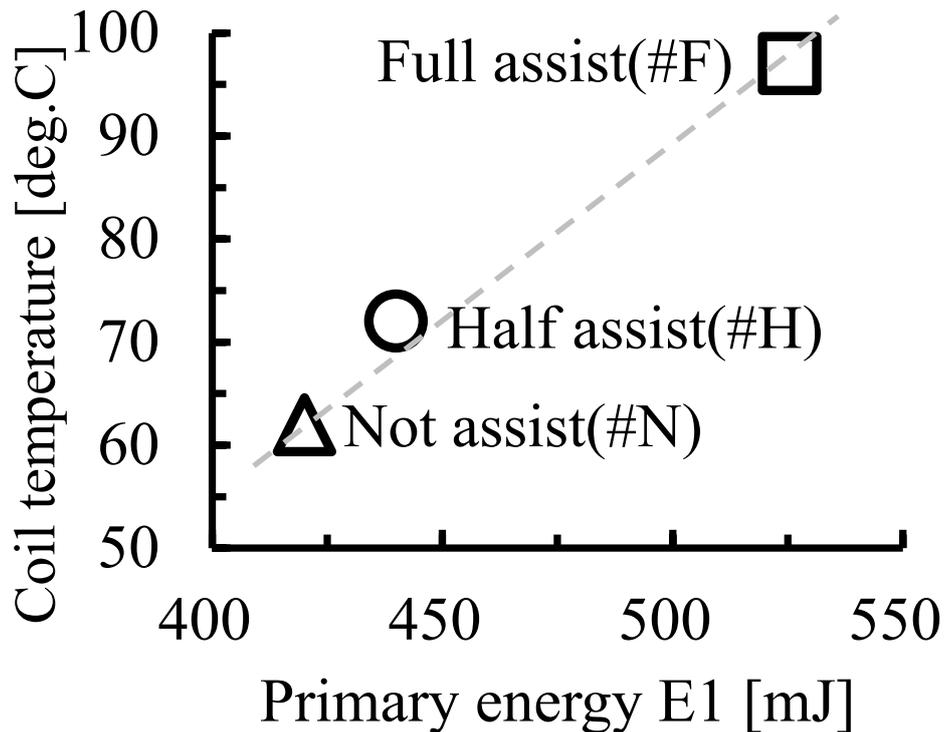


図 3-14 点火コイル温度評価

3.5.章のまとめ

希釈燃焼の着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火の省エネルギー化を研究目的として、放電中の電力需給差削減を検討し、実エンジンで検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 火炎核成長を阻害しない、電力需給差削減コンセプトを提案した。
- (2) 電力需給差削減のため、能動式コイルを追加した点火コイルを試作し、点火エネルギーの時間配分制御を可能とした。
- (3) 点火エネルギーの時間配分制御により、点火の省エネルギー化と着火性を両立し、正味燃費改善の見通しを得た。

第4章 結言

本研究では、ガソリンエンジンの課題である「燃費」「電費」「耐久性」の両立を目標とした。その上で、点火における放電エネルギーの時間配分制御を提案し、効果検証と現象解明について研究を行ってきた。

第1章では、社会問題よりエンジンの課題を設定した。最初に、SDGsの目標7と目標13への技術的貢献を研究目的とした。この2つの目標を達成するための、エンジンの社会的な最優先課題の一つは、ガソリンエンジンの燃費低減である。しかし、燃費(CO₂)と排気(NO_x)の間にはトレードオフが生じる。解決策の1つに希釈燃焼があり、これによるトレードオフ解消を、ガソリンエンジンの課題とした。

そして次に、希釈燃焼の副作用を抽出し、研究対象を設定した。希釈燃焼による新たな問題として、着火性低下がある。先行研究について調査を実施した結果、着火性低下については、流動強化や点火強化が有効であることが判った。しかし、点火強化による、電極耐久性低下や電費増大が懸念される。そのため、「耐久性低下の抑制」と「電費増大の抑制」を研究対象とした。

第2章では、耐久性低下の抑制方法を調査した。EGR燃焼の着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火用電極チップの消耗低減を目的として、再放電回数の低減方法を検討し、実エンジンで検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 放電の低電流期間を短くすることで、再放電回数を低減できる。
- (2) 再放電回数を低減することで、電極チップの消耗体積を低減できる。
- (3) 放電エネルギーの時間配分制御により、再放電回数を従来比で半減し、同時に燃焼安定性を向上した。

第3章では、電費増大の抑制方法を調査した。希釈燃焼の着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火の省エネルギー化を目的として、放電中の電力需給差削減を検討し、実エンジンで検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 火炎核成長を阻害しない、電力需給差削減コンセプトを提案した。
- (2) 電力需給差削減のため、能動式コイルを追加した点火コイルを試作し、点火エネルギーの時間配分制御を可能とした。
- (3) 点火エネルギーの時間配分制御により、点火の省エネルギー化と着火性を両立し、正味燃費改善の見通しを得た。

謝辞

本論文の執筆に当たり、各位より助言を頂き、感謝申し上げます。（敬称略，順不同）

- (1) 西岡 牧人（指導教員）
筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 教授
理工情報生命学術院長
- (2) 藤野 貴康（副指導教員）
筑波大学 システム情報系 准教授 構造エネルギー工学域
- (3) 横田 茂（副指導教員）
筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 准教授
- (4) 嶋村 耕平（副指導教員）
筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 助教授
- (5) 高橋栄一（副指導教員）
日本大学 生産工学部 教授

その他、筆者の勤務先である日立 Astemo 株式会社より、学費の一部を補助頂いた。および、日立 Astemo 阪神株式会社、株式会社日立製作所、などの関係者より、解析や実験の協力を頂いた。社内機密情報保護や、個人情報保護の観点より、具体的な個人名等の紹介は控えさせて頂く。

参考文献

- [1] UNITED NATIONS, "United Nations Sustainable Development – 17 Goals to Transform Our World," [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. [Accessed 28 06 2021].
- [2] Global Fuel Economy Initiative, "State of the World Report 2016," 2016. [Online]. Available: <https://www.globalfueleconomy.org/data-and-research/publications/state-of-the-world-report-2016>. [Accessed 11 02 2022].
- [3] The British Petroleum Company plc, "Statistical Review of World Energy 2021 | 70th edition," 2020. [Online]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. [Accessed 03 07 2021].
- [4] 環境に優しい生き方を考える方のための情報サイト「エコライフ.com（ドットコム）」, “地球温暖化による影響,” [オンライン]. Available: https://standard-project.net/global_temperature.html. [アクセス日: 11 02 2022].
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change," 2014. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>. [Accessed 28 06 2021].
- [6] United States Environmental Protection Agency, "Global Greenhouse Gas Emissions Data _ Greenhouse Gas (GHG) Emissions," [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. [Accessed 11 02 2022].
- [7] 大嶋 和雄, "二酸化炭素濃度と気候変動史," *石油技術協会誌*, vol. 56, no. 4, pp. 300-309, (1991), DOI:10.3720/japt.56.300.
- [8] W. Seth and A. N. Kimberly, "The climate mitigation gap: education and government recommendations miss the most effective individual actions," *Environmental Research Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 1-9, (2017), DOI:10.1088/1748-9326/aa7541.
- [9] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives 2020," 09 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>. [Accessed 11 02 2022].
- [10] 小鹿 健一郎, 奥井 伸宜, 新国 哲也, “電気自動車の間接的な CO2 排出と環境影響評価の考え方,” 06 11 2012. [オンライン]. Available: <https://www.nts-el.go.jp/forum/forum2012.html>. [アクセス日: 11 02 2022].

- [11] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives 2012," 06 2012. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2012>. [Accessed 11 02 2022].
- [12] International Council on Clean Transportation, "Pathways to decarbonization: The European passenger car market, 2021–2035," 19 05 2021. [Online]. Available: <https://theicct.org/publications/decarbonize-EU-PVs-may2021>. [Accessed 28 06 2021].
- [13] Standard Chartered, "Net-zero by 2050: Half of companies not transitioning fast enough," 12 05 2021. [Online]. Available: <https://www.sc.com/en/explore-our-world/net-zero-by-2050-more-than-half-of-companies-not-transitioning-fast-enough-to-meet-paris-goals>. [Accessed 28 06 2021].
- [14] テレ東 BIZ, “自工会 豊田会長が全面 EV 移行に懸念 小泉環境大臣「脱炭素への考えは同じ」,” テレビ東京, 18 12 2020. [オンライン]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=6zoznIVU0VU>. [アクセス日: 28 06 2021].
- [15] United Nations Framework Convention on Climate Change, "Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050," [Online]. Available: <https://climateaction.unfccc.int/views/cooperative-initiative-details.html?id=94>. [Accessed 28 06 2021].
- [16] 木村 修二, 松浦 浩海, 菊池 隆司, 土屋 賢次, "内燃機関搭載車両におけるカーボンニュートラルに向けた技術シナリオの検討," *自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2021).
- [17] Global Fuel Economy Initiative, "Vehicle Efficiency and Electrification: A Global Status Report," [Online]. Available: <https://www.globalfueleconomy.org/data-and-research/publications/vehicle-efficiency-and-electrification-a-global-status-report>. [Accessed 11 02 2022].
- [18] Global Fuel Economy Initiative, "GFEI Working Paper 20," 05 2019. [Online]. Available: <https://www.globalfueleconomy.org/data-and-research/publications/gfei-working-paper-20>. [Accessed 28 06 2021].
- [19] International Certificate Testing Technology, "Vision 2050: A strategy to decarbonize the global transport sector by mid-century," 21 09 2020. [Online]. Available: <https://theicct.org/publications/vision2050>. [Accessed 28 06 2021].
- [20] International Certificate Testing Technology, “Chart library: Passenger vehicle fuel economy,” [オンライン]. Available: <https://theicct.org/chart-library-passenger-vehicle-fuel-economy>. [アクセス日: 28 06 2021].

- [21] 株式会社 FOURIN, 2020 年代後半に導入予定の欧州次期排ガス基準 Euro 7 の影響と対策, 株式会社 FOURIN, (2020).
- [22] 株式会社 FOURIN, 脱炭素社会の実現に向けた LCA 規制と主要自動車各社の取り組み, 株式会社 FOURIN, (2021).
- [23] J. Rager, J. Böhm, T. Kaiser, A. Flaig and F. Mücklich, "Design and Materials for Long-Life Spark Plugs," *SAE Technical Paper*, pp. 1-10, (2006), DOI:10.4271/2006-01-0617.
- [24] 大畠 英一郎, 藤山 幸雄, "EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討," *自動車技術会論文集*, vol. 51, no. 4, pp. 669-674, (2020), DOI:10.11351/jsaeronbun.51.669.
- [25] J. Rager, "Funkenerosion an Zündkerzenelektroden," *Dissertation(Universität des Saarlandes)*, pp. 1-152, (2006).
- [26] N. Jeanvoine and F. Muecklich, "FEM Simulation of the temperature distribution and power density at platinum cathode craters caused by high voltage ignition discharges," *Journal of Physics*, vol. 42, no. 3, pp. 1-9, (2009), DOI:10.1088/0022-3727/42/3/035203.
- [27] N. Jeanvoine, "Plasma-Material Interaction And Electrode Degradation in High Voltage Ignition Discharges," *Dissertation(Universität des Saarlandes)*, pp. 1-150, (2009).
- [28] J. Rager, A. Flaig, G. Schneider, T. Kaiser, F. Soldera and F. Mücklich, "Oxidation Damage of Spark Plug Electrodes," *Advanced Engineering Materials 2005*, vol. 7, no. 7, pp. 633-640, (2005), DOI:10.1002/adem.200500025.
- [29] F. J. Llewellyn, "Electrode Erosion by Spark Discharges," *British Journal of Applied Physics*, vol. 1, no. 3, pp. 60-65, (1950), DOI:10.1088/0508-3443/1/3/302.
- [30] 三好 明, "燃焼の反応機構と反応素過程—(1) 概要," *日本燃焼学会誌*, vol. 60, no. 191, pp. 41-48, (2018), DOI:10.20619/jcombsj.60.191_41.
- [31] 三好 明, "燃焼の反応機構と反応素過程—(2) 反応速度定数," *日本燃焼学会誌*, vol. 60, no. 192, pp. 112-121, (2018), DOI:10.20619/jcombsj.60.192_112.
- [32] 酒井 康行, "燃焼の反応機構と反応素過程 —(3) 反応機構簡略化," *日本燃焼学会誌*, vol. 60, no. 193, pp. 191-198, (2018), DOI:10.20619/jcombsj.60.193_191.
- [33] M. ZAJEMSKA, A. POSKART and D. MUSIA, "The kinetics of nitrogen oxides formation in the flame," *Econstor*, vol. 15, no. 4, pp. 445-460, (2015).

- [34] 松岡 一哉, 木賀 新一, 土屋 順久, 山田 幸誉, 安藤 太一, "新型 高効率 1.5L 3 気筒 可変圧縮比エンジン開発," *自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2021).
- [35] 中島 泰知, 楠本 繁子, 織田 肇, "窒素酸化物による大気汚染と生体影響," *生活衛生*, vol. 17, no. 2, pp. 32-43, (1973), DOI:10.11468/seikatsueisei1957.17.32.
- [36] 大島 英一郎, 東澤 晋二郎, 吉田 幸司, 庄司 秀夫, 斎間 厚, "ノッキング発生時のラジカル挙動の発光分析," *自動車技術会論文集*, vol. 27, no. 4, pp. 15-20, (1996).
- [37] S. Higashizawa, E. Ohata, H. Shoji, K. Yoshida and A. Saima, "Emission Spectroscopic Measurement of Radical Behavior During Combustion in a Two-Cycle Engine," *The Third KSME-JSME Thermal Engineering Conference*, vol. 2, pp. 371-376, 1996.
- [38] H. Terashima, A. Matsugi and M. Koshi, "Origin and reactivity of hot-spots in end-gas autoignition with effects of negative temperature coefficients: Relevance to pressure wave developments," *Combustion and Flame*, vol. 184, pp. 324-334, (2017), DOI:10.1016/j.combustflame.2017.06.016.
- [39] A. Iijima, T. Izako, T. Ishikawa, T. Yamashita, S. Takahata, H. Kudo, K. Shimizu, M. Tanabe and H. Shoji, "Analysis of Interaction between Autoignition and Strong Pressure Wave Formation during Knock in a Supercharged SI Engine Based on High Speed Photography of the End Gas," *SAE International Journal of Engines*, vol. 10, no. 5, pp. 2616-2623, (2017).
- [40] 国土交通省, "燃費改善要因について," [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001267000.pdf>. [アクセス日: 28 06 2021].
- [41] 国土交通省, "燃費改善技術について," [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001193322.pdf>. [アクセス日: 28 06 2021].
- [42] 窪山 達也, 鐘ヶ江 優, 森吉 泰生, 金子 誠, "過給リーンバーンガソリン機関の希薄限界における燃焼解析," *自動車技術会論文集*, vol. 47, no. 2, pp. 351-355, (2016), DOI:10.11351/jsaeronbun.47.351.
- [43] 菅田 健志, 李世竣, 横森 剛, 飯田 訓正, "乱流燃焼ダイアグラムを用いた スーパーリーンバーン SI エンジンにおける燃焼形態の検討," *自動車技術会論文集*, vol. 48, no. 4, pp. 801-806, (2014), DOI:10.11351/jsaeronbun.48.801.
- [44] 横森 剛, 松田 昌祥, 飯田 訓正, 浦田 泰弘, 横尾 望, 中田 浩一, "高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究," *自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1413-1418, (2016).

- [45] K. C. Law, A. Makino and F. T. Lu, "On the off-stoichiometric peaking of adiabatic flame temperature," *Combustion and Flame*, vol. 145, no. 4, pp. 808-819, (2006), DOI:10.1016/j.combustflame.2006.01.009.
- [46] 東野 一郎, "自動車用エンジン排ガスの技術的対策," *生活衛生*, vol. 20, no. 1, pp. 1-11, (1976), DOI:10.11468/seikatsueisei1957.20.1.
- [47] 小川 誠, 北本 雄祐, 深田 隆文, "車両電源系でのエネルギーマネージメント," *いすゞ技報*, 第 127, pp. 1-5, 2015.
- [48] 三原 雄司, "エンジンの摩擦損失低減の要素研究と焼付き及びオイル消費予測モデルへのアプローチ," *JSAE Engine Review(特集 : SIP 「革新的燃焼技術」 最大熱効率 50% 超への挑戦 IV)*, vol. 11, no. 4, (2021).
- [49] 森吉 泰生, "自動車の燃費改善のための熱制御技術," *Calsonic Kansei Technical Review*, vol. 12, pp. 8-19, (2016).
- [50] 角倉 盛義, 今野 大輔, 江崎 浩, 関根 和憲, 勝山 千春, 西澤 智博, "車両のエネルギー収支シミュレーション技術の開発," *Calsonic Kansei Technical Review*, vol. 11, pp. 45-51, (2014).
- [51] 一般社団法人中部産業連盟, "将来の自動車用エンジン技術動向," [オンライン]. Available: https://www.chusanren.or.jp/whatsnew/next_vehicle_2013/pdf/engineer/engine_motor/engine_motor01.pdf. [アクセス日: 28 06 2021].
- [52] 松野 孝充, "自動車の熱管理技術と課題," [オンライン]. Available: https://www.nisri.jp/jisedai/docs/lecture_20140327_matsuno.pdf. [アクセス日: 28 06 2021].
- [53] 株式会社八光電機, "熱の実験室－新館 第 14 回 熱エネルギー保存の法則を確かめる," [オンライン]. Available: <https://www.hakko.co.jp/expe/new/exnew1402.htm>. [アクセス日: 28 06 2021].
- [54] 英 寿, 松浦 勝也, 古谷 正広, "均質希薄 SI 燃焼の排気窒素酸化物生成解析," *自動車技術会論文集*, vol. 50, no. 3, pp. 748-754, (2019), DOI:10.11351/jsaeronbun.50.748.
- [55] E. W. Desmond, "Advanced Thermodynamics for Engineers," (1997). [Online]. Available: <https://chembugs.files.wordpress.com/2015/12/advanced-thermodynamics-for-engineers-by-desmond-e-winterbone2.pdf>. [Accessed 28 06 2021].

- [56] 井上 欣也, 北田 泰造, 菊池 開, 菅田 佳博, 朝倉 遼太, 津田 晃弘, 田中 大, "ガソリンエンジンの燃焼サイクル変動の実験解析," *自動車技術会論文集*, vol. 52, no. 3, pp. 659-664, (2021), DOI:10.11351/jsaeronbun.52.659.
- [57] E. Ohata, "Control Device Of Internal Combustion Engine". WIPO (PCT) Patent WO2019/073815, JP06815534, US10995690, DE112018004280.4, 10 01 2021.
- [58] E. Ohata, "Vehicle control device". Japan 特許番号: JP2019002307A, 10 01 2019.
- [59] T. Kume, Y. Iwamoto, K. Iida, M. Murakami, K. Akishino and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine," *SAE Technical Paper*, (1996), DOI:10.4271/960600.
- [60] 松田 実, 脇本 一成, 田中 誠, "着火アシスト噴射による弱成層リーン燃焼の開発," *自動車技術会 2021 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2021).
- [61] J. Marty, "GM's HCCI Engine Nears Reality," WIRED, 28 08 2007. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2007/08/gms-hcci-engine/>. [Accessed 09 07 2021].
- [62] 白石 拓也, 緒方 健一郎, "点火系による直噴ガソリンエンジンの EGR 限界拡大に関する研究," *自動車技術会論文集*, vol. 45, no. 4, pp. 677-682, (2014), DOI:10.11351/jsaeronbun.45.677.
- [63] 川那辺 洋, "ディーゼルエンジンの熱効率向上," *JSAE Engine Review*(特集: SIP 「革新的燃焼技術」最大熱効率 50%超への挑戦 II -ディーゼル燃焼チーム: 高速空間燃焼の実証-), vol. 10, no. 6, (2020).
- [64] 緒方 健一郎, "ガソリン予混合圧縮着火燃焼エンジンの燃焼状態検出フィードバック制御に関する研究," 千葉大学学術成果リポジトリ(CURATOR), 千葉大学 工学研究科 人工システム科学専攻機械系コース, (2017), DOI:10.20776/103654.
- [65] A. Fuerhapter, E. Unger, W. F. Piock and G. K. Fraidl, "The new AVL CSI Engine - HCCI Operation on a Multi Cylinder Gasoline Engine," *SAE Technical Paper*, pp. 337-348, (2004), DOI:10.4271/2004-01-0551.
- [66] T. Kuboyama, Y. Moriyoshi, T. Yamada, K. Hatamura, J. Takanashi and Y. Urata, "A Heat Balance Analysis of the HCCI Combustion Using the Blowdown Supercharge System," *Proceedings of COMODIA2012*, pp. 30-35, (2012), DOI:10.1299/jmsesdm.2012.8.30.
- [67] 漆原 友則, 松本 浩太, 末岡 賢也, 井上 淳, 丸山 慶士, 山口 直宏, 森本 博貴, 松尾 佳朋, "SKYACTIV-X を実現する燃焼技術," *マツダ技報*, vol. 36, pp. 24-31, (2019), DOI:10.34338/mazdagihou.36.0_24.

- [68] 米谷 直樹, 熊野 賢吾, 島田 敦史, 助川 義寛, 光藤 健太, 保坂 知幸, "モデルベース設計による副室ジェット点火システムの検討," *自動車技術会論文集*, vol. 52, no. 6, pp. 1292-1297, (2021), DOI:10.11351/jsaeronbun.52.1292.
- [69] E. C. A. Carlos, E. C. Giselle, R. R. Vinícius, B. T. Arthur and M. V. Ramon, "A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines," *Applied Thermal Engineering*, vol. 128, pp. 107-120, (2018), DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.118.
- [70] C. Adrian, H. Anthony, B. Michael, B. Mike , B. Hugh, "Passive pre-chamber technology applied to a range of engine applications from high performance to dedicated hybrid engines," *The proceeding for 2021 JSAE Congress (Spring)*, pp. 1-8, (2021).
- [71] S. Magistrali, D. Mazzoni, E. Musu, G. Pivetti and P. Zolesi, "Gasoline Internal Combustion Engine Having Precombustion Chamber and Two Spark Plugs.". European Patent Office Patent EP3453856B1, US10612454B2, JP6699050B2, 04 07 2020.
- [72] 草壁 亮, 南波 昇吾, 大場 久浩, 林 智敏, "直噴エンジンの希薄限界向上に関する検討," *自動車技術会論文集*, vol. 52, no. 3, pp. 645-652, (2021), DOI:10.11351/jsaeronbun.52.645.
- [73] 井上 欣也, 北田 泰造, 菅田 佳博, 朝倉 遼太, 菊池 開, 倉田 和郎, 田中 大, "希薄燃焼でのタンブル強化が点火直後の火炎成長に及ぼす影響," *自動車技術会論文集*, vol. 52, no. 4, pp. 820-825, (2021), DOI:10.11351/jsaeronbun.52.820.
- [74] N. Peters, "The turbulent burning velocity for large-scale and small-scale turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 384, no. 10, pp. 107-132, (1999), DOI:10.1017/S0022112098004212.
- [75] L. R. David, "Cyclic Variability of Large-Scale Turbulent Structures in Directed and Undirected IC Engine Flows," *SAE Technical Paper*, pp. 128-145, (2000), DOI:10.4271/2000-01-0246.
- [76] K. Liu and D. C. Haworth, "Large-Eddy Simulation for an Axisymmetric Piston-Cylinder Assembly With and Without Swirl," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 85, p. 279-307, (2010), DOI:10.1007/s10494-010-9292-1.
- [77] K. Tang-Wei, Y. Xiaofeng, G. Venkatesh and C. Zhaohui, "Large Eddy Simulation for Internal Combustion Engine Flows," *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 61-81, (2014), DOI:10.2516/ogst/2013127.

- [78] W. Tianyou, L. Daming, T. Bingqian, W. Gangde and P. Zhijun, "An Investigation into In-Cylinder Tumble Flow Characteristics with Variable Valve Lift in a Gasoline Engine," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 94, pp. 285-304, (2015), DOI:10.1007/s10494-014-9562-4.
- [79] K. Ikeya, M. Takazawa, T. Yamada, S. Park and R. Tagishi, "Thermal Efficiency Enhancement of a Gasoline Engine," *SAE International Journal of Engines*, vol. 8, no. 4, pp. 1579-1586, (2015), DOI:10.4271/2015-01-1263.
- [80] K. Nakata, S. Nogawa, D. Takahashi, Y. Yoshihara, A. Kumagai and T. Suzuki, "Engine Technologies for Achieving 45% Thermal Efficiency of S.I. Engine," *SAE International Journal of Engines*, vol. 9, no. 1, pp. 179-192, (2016), DOI:10.4271/2015-01-1896.
- [81] 柿沼 王基, 辻村 彬人, 菅沼 邦彦, 糸櫻 洋, 脇本 一成, "新型水平対向 1.8L 直噴ターボエンジンの燃焼技術," *自動車技術会 2021 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2021).
- [82] 南波 昇吾, 草壁 亮, 林 智敏, "直噴エンジンの希薄限界の向上 (第 1 報) -流動強化と点火強化が希薄限界に与える影響-, " *第 30 回内燃機関シンポジウム講演予稿集*, pp. 1-5, (2019).
- [83] R. D. Keane and R. J. Adrian, "Optimization of particle image velocimeters: II. Multiple pulsed systems," *Measurement Science and Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 963-974, (1991), DOI:10.1088/0957-0233/2/10/013.
- [84] B. Enaux, V. Granet, O. Vermorel, C. Lacour, C. Pera, C. Angelberger and T. Poinso, "LES study of cycle-to-cycle variations in a spark ignition engine," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 2, pp. 3115-3122, (2011), DOI:10.1016/j.proci.2010.07.038.
- [85] E. Benoit, G. Victor, V. Olivier, L. Corine, T. Ludovic, D. Vincent and P. Thierry, "Large Eddy Simulation of a Motored Single-Cylinder Piston Engine: Numerical Strategies and Validation," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 86, pp. 153-177, (2011), DOI:10.1007/s10494-010-9299-7.
- [86] V. Granet, O. Vermorel, C. Lacour, B. Enaux, V. Dugué and T. Poinso, "Large-Eddy Simulation and experimental study of cycle-to-cycle variations of stable and unstable operating points in a spark ignition engine," *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 4, pp. 1562-1575, (2012), DOI:10.1016/j.combustflame.2011.11.018.
- [87] E. Baum, B. Peterson, B. Böhm and A. Dreizler, "On The Validation of LES Applied to Internal Combustion Engine Flows: Part 1: Comprehensive Experimental Database,"

Flow, Turbulence and Combustion volume, vol. 92, pp. 269-297, (2014),
DOI:10.1007/s10494-013-9468-6.

- [88] M. Baumann, F. D. Mare and J. Janicka, "On the Validation of Large Eddy Simulation Applied to Internal Combustion Engine Flows Part II: Numerical Analysis," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 92, pp. 299-317, (2014), DOI:10.1007/s10494-013-9472-x.
- [89] M. Shimura, S. Yoshida, K. Osawa, Y. Minamoto, T. Yokomori, K. Iwamoto, M. Tanahashi and H. Kosaka, "Micro particle image velocimetry investigation of near-wall behaviors of tumble enhanced flow in an internal combustion engine," *International Journal of Engine Research*, vol. 20, no. 7, pp. 718-725, (2019), DOI:10.1177/1468087418774710.
- [90] H. R. S. Müller, B. Böhm, M. Gleißner, R. Grzeszik, S. Arndt and A. Dreizler, "Flow field measurements in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV," *Experiments in Fluids*, vol. 48, pp. 281-290, (2010), DOI:10.1007/s00348-009-0742-2.
- [91] B. Peterson, L. D. Reuss and V. Sick, "High-speed imaging analysis of misfires in a spray-guided direct injection engine," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 2, pp. 3089-3096, (2011), DOI:10.1016/j.proci.2010.07.079.
- [92] B. Peterson, L. D. Reuss and V. Sick, "On the ignition and flame development in a spray-guided direct-injection spark-ignition engine," *Combustion and Flame*, vol. 161, no. 1, pp. 240-255, (2014), DOI:10.1016/j.combustflame.2013.08.019.
- [93] 沢田 龍作, 小池 竜治, 西野 耕一, "モータリングエンジン筒内気流のサイクル間変動に関する研究—PIV 計測と LES の比較検証—," *自動車技術会論文集*, vol. 47, no. 3, pp. 711-716, (2016), DOI:10.11351/jsaeronbun.47.711.
- [94] 佐々木 耕作, 鄭 棟元, 菅田 健志, 横森 剛, 飯田 訓正, "SI エンジンにおける強タンブル流動下での火花放電特性が着火および燃焼のサイクル間変動に及ぼす影響," *自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1076-1081, (2017).
- [95] 保木本 聖, 窪山 達也, 森吉 泰生, 孕石 三太, 渡辺 敬弘, 飯田 実, "高速 PIV 計測および初期火炎伝播可視化による低負荷運転時における燃焼サイクル変動の解析," *日本機械学会論文集*, vol. 84, no. 865, pp. 1-17, (2018), DOI:10.1299/transjsme.18-00051.

- [96] Z. Wei, S. Magnus and R. David, "Using PIV Measurements to Determine the Role of the In-Cylinder Flow Field for Stratified DISI Engine Combustion," *SAE International Journal of Engines*, vol. 7, no. 2, pp. 615-632, (2014), DOI:10.4271/2014-01-1237.
- [97] J. Bengt, "Cycle to Cycle Variations in S.I. Engines - The Effects of Fluid Flow and Gas Composition in the Vicinity of the Spark Plug on Early Combustion," *SAE Technical Paper*, pp. 1-16, (1996), DOI:10.4271/962084.
- [98] F. P. Walter, W. Peter, W. Edgard and H. Volker, "Ignition Systems for Spray-Guided Stratified Combustion," *SAE International Journal of Engines*, vol. 3, no. 1, pp. 389-401, (2010), DOI:10.4271/2010-01-0598.
- [99] S. S. Shy, C. C. Liu and T. W. Shih, "Ignition transition in turbulent premixed combustion," *Combustion and Flame*, vol. 157, no. 2, pp. 341-350, (2010), DOI:10.1016/j.combustflame.2009.08.005.
- [100] 緒方 健一郎, 片岡 徹夫, 鈴木 俊靖, 窪山 達也, 森吉 泰生, "EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討 (第 2 報) ," *自動車技術会論文集*, vol. 47, no. 5, pp. 1073-1078, (2016), DOI:10.11351/jsaeronbun.47.1073.
- [101] 緒方 健一郎, 片岡 徹夫, "EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討," *自動車技術会論文集*, vol. 47, no. 2, pp. 357-362, (2016), DOI:10.11351/jsaeronbun.47.357.
- [102] 草壁 亮, 大場 久浩, 中山 智裕, 加藤 真亮, "流動と混合気分布改善による直噴エンジンの EGR 限界向上," *第 32 回内燃機関シンポジウム講演予稿集*, pp. 1-8, (2021).
- [103] 助川 義寛, 大畠 英一郎, 山岡 士朗, "ディーゼルエンジンにおける EGR ガスの気筒分配の計測と数値解析(エンジン現象解析-基礎計測と数値計算-)," *日本機械学会 年次大会講演論文集*, vol. 3, pp. 295-296, (2006), DOI:10.1299/jsmemecjo.2006.3.0_295.
- [104] E. Ohata, "Control apparatus of egr control valve". European Patent Office Patent EP1914415B1, JP4713437B2, US7866306B2, CN100585148C, 29 06 2011.
- [105] 桑原 一成, "高精度エンドガス自着火予測モデルの開発 (第 6 報) - 遡り型 Livengood-Wu 積分による EGR 条件の自着火予測 -," *自動車技術会論文集*, vol. 52, no. 5, pp. 929-935, (2021), DOI:10.11351/jsaeronbun.52.929.
- [106] 白石 泰介, 寺地 淳, 森吉 泰生, "スパーク放電チャンネル形成に関する点火環境および放電波形特性の影響解析," *自動車技術会論文集*, vol. 46, no. 2, pp. 283-288, (2015), DOI:10.11351/jsaeronbun.46.283.

- [107] 白石 拓也, “火花点火式筒内噴射エンジンの混合気形成に関する研究,” 千葉大学学術成果リポジトリ(CURATOR), 千葉大学 工学研究科 人工システム科学専攻機械系コース, 2016.
- [108] 押領司 一浩, 赤城 好彦, 内勢 義文, 周 玉宇, 窪山 達也, 森吉 泰生, "筒内可視化を用いた希薄燃焼の限界空燃比制御因子の分析," *日本機械学会論文集*, vol. 84, no. 863, pp. 1-12, (2018), DOI:10.1299/transjsme.18-00002.
- [109] 横森 剛, "スーパーリーンバーンエンジンの実現とそれを支える要素研究," *JSAE Engine Review(特集 : SIP 「革新的燃焼技術」 最大熱効率50%超への挑戦*), vol. 10, no. 4, (2020).
- [110] T. Shiraishi, A. Kakuho, T. Urushihara, C. Cathey, T. Tang and M. Gundersen, "A Study of Volumetric Ignition Using High-Speed Plasma for Improving Lean Combustion Performance in Internal Combustion Engines," *SAE International Journal of Engines*, vol. 1, no. 1, pp. 399-408, (2008), DOI:10.4271/2008-01-0466.
- [111] A. Terrence, G. Jess, M. Barrett and R. Charles, "A Continuous Discharge Ignition System for EGR Limit Extension in SI Engines," *SAE International Journal of Engines*, vol. 4, no. 1, pp. 677-692, (2011), DOI:10.4271/2011-01-0661.
- [112] Z. Anqi, C. Khanh, L. Seong-Young, N. Jeffrey, H. Garlan, C. Michael and Q. Qiuping, "The Impact of Spark Discharge Pattern on Flame Initiation in a Turbulent Lean and Dilute Mixture in a Pressurized Combustion Vessel," *SAE International Journal of Engines*, vol. 6, no. 1, pp. 435-446, (2013), DOI:10.4271/2013-01-1627.
- [113] 坪井 星磨, 御代川 慎司, 松田 昌祥, 横森 剛, 飯田 訓正, "火花放電特性がスーパーリーンバーンエンジンの着火および燃焼過程に与える影響," *自動車技術会 2019 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2019).
- [114] D. Jung and N. Iida, "An investigation of multiple spark discharge using multi-coil ignition system for improving thermal efficiency of lean SI engine operation," *Applied Energy*, vol. 212, no. 15, pp. 322-332, (2018), DOI:10.1016/j.apenergy.2017.12.032.
- [115] 大畠_英一郎, “内燃機関用点火装置および車両用制御装置” .Japan 特許番号: JP6818157B2, 31 10 2017.
- [116] T. Shiraishi, A. Teraji and Y. Moriyoshi, "The Effects of Ignition Environment and Discharge Waveform Characteristics on Spark Channel Formation and Relationship between the Discharge Parameters and the EGR Combustion Limit," *SAE International Journal of Engines*, vol. 9, no. 1, pp. 171-178, (2015), DOI:10.4271/2015-01-1895.

- [117] 今村 幸, 文 鉦太, 岩田 和也, 秋濱 一弘, "小型風洞を用いた高速気流中における火花放電の放電特性に関する研究," *自動車技術会論文集*, vol. 50, no. 3, pp. 737-742, (2019), DOI:10.11351/jsaeronbun.50.737.
- [118] Q. Chen, T. Kuboyama, M. Y. and K. Oryoji, "Effect of Discharge Characteristics on Ignition Performance with Diluted mixture under enhanced flow conditions," *The proceeding for 2021 JSAE Congress (Spring)*, pp. 1-7, (2021).
- [119] E. Ohata, "Control device for internal combustion engine". WIPO (PCT) Patent WO2020262098A1, 16 06 2020.
- [120] E. Ohata, "Controller for internal combustion engine" . Japan 特許番号: JP2019210827A, 12 12 2019.
- [121] 堀 司, "スーパーリーンバーンに対応した火花点火モデルの開発," *JSAE Engine Review(特集 : SIP 「革新的燃焼技術」 最大熱効率 50%超への挑戦 III)*, vol. 11, no. 3, (2021).
- [122] T. Hosaka, E. Ishii, K. Oryoji and Y. Sukegawa, "Combustion simulation for gasoline engine using lagrangian ignition model," *Proceedings of the 14th OpenFOAM Workshop*, pp. 1-8, (2019).
- [123] A. A. Amsden, P. J. O'Rourke and T. D. Butler, "KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays," *NASA STI/Recon Technical Report N*, pp. 1-158, (1989), DOI:10.2172/6228444.
- [124] J. Kim and W. R. Anderson, "Spark Anemometry of Bulk Gas Velocity at the Plug Gap of a Firing Engine," *SAE Technical Paper*, pp. 187-197, (1995), DOI:10.4271/952459.
- [125] L. Fan, G. Li, Z. Han and D. R. Reitz, "Modeling Fuel Preparation and Stratified Combustion in a Gasoline Direct Injection Engine," *SAE Technical Paper*, pp. 105-119, (1999), DOI:10.4271/1999-01-0175.
- [126] J.-M. Duclos and O. Colin, "Arc and Kernel Tracking Ignition Model for 3D Spark-Ignition engine calculations," *The proceedings of COMODIA 2001*, pp. 343-350, (2001), DOI:10.1299/jmsesdm.01.204.46.
- [127] D. P. Gardiner, G. Wang, M. F. Bardon, M. LaViolette and W. D. Allan, "An Experimental Study of Spark Anemometry for In-Cylinder Velocity Measurements," *J. Eng. Gas Turbines Power(Internal Combustion Engines)*, vol. 130, no. 4, pp. 1-12, (2008), DOI:10.1115/1.2898835.
- [128] N. R. Dahms, C. M. Drake, D. T. Fansler, T.-W. Kuo and N. Peters, "Understanding ignition processes in spray-guided gasoline engines using high-speed imaging and the

- extended spark-ignition model SparkCIMM. Part A: Spark channel processes and the turbulent flame front propagation," *Combustion and Flame*, vol. 158, no. 11, pp. 2229-2244, (2011), DOI:10.1016/j.combustflame.2011.03.012.
- [129] F. W. Z. Gerhard, P. W. Eberhard and R. M. Rudolf, "Ignition of lean methane-air mixtures by high pressure glow and ARC discharges," *Symposium (International) on Combustion*, vol. 20, no. 1, pp. 1817-1824, (1985), DOI:10.1016/S0082-0784(85)80679-2.
- [130] L. Cornolti, T. Lucchini, G. Montenegro and G. D'Errico, "A comprehensive Lagrangian flame–kernel model to predict ignition in SI engines," *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 91, no. 1, pp. 157-174, (2014), DOI:10.1080/00207160.2013.829213.
- [131] 山村 英穂, 改訂新版 定本 トロイダル・コア活用百科 —トロイダル・コイルの理論・製作と応用回路 (定本シリーズ), Japan: CQ 出版, (2006), (ISBN-10 4789830675, ISBN-13 9784789830676), p. 528.
- [132] Sifoen, "Sifoen.Project(Parts room)," Sifoen.Project, 26 04 2021. [Online]. Available: <http://www.msl.mctv.ne.jp/sifoen.project/PARTS/Parts-Doc/3%20Core.pdf>. [Accessed 01 05 2021].
- [133] 堀 司, "火花点火機関における放電経路伸長と再放電のモデリング," *自動車技術会論文集*, vol. 48, no. 3, pp. 641-647, (2017), DOI:10.11351/jsaeronbun.48.641.
- [134] 佐山 勝悟, 木下 雅夫, 政所 良行, 増田 糧, 冬頭 孝之, "高流速条件での放電経路の短縮化現象のモデル化 (第1報) 一点火現象の可視化による定量解析一," *自動車技術会論文集*, vol. 49, no. 4, pp. 726-731, (2018), DOI:10.11351/jsaeronbun.49.726.
- [135] 増田 糧, 佐山 勝悟, 冬頭 孝之, 永岡 真, 野口 泰, 杉浦 明光, "高流速条件での放電経路の短縮化現象のモデル化 (第2報) 一火花点火シミュレーションへの適用一," *自動車技術会論文集*, vol. 49, no. 4, pp. 732-738, (2018), DOI:10.11351/jsaeronbun.49.732.
- [136] 津江 光洋, 河野 通方, "可燃性混合気の火花点火過程に関する数値シミュレーション," *日本燃焼学会誌*, vol. 48, no. 145, pp. 257-264, (2006), DOI:10.20619/jcombsj.48.145_257.
- [137] 山下 清孝, 今村 幸, 大坂 淳, 津江 光洋, 河野 通方, "一様電界中におけるエタノール液滴燃焼の促進に関する数値計算," *日本マイクログラフィティ応用学会誌*, vol. 25, no. 1, pp. 17-22, (2008), DOI:10.15011/jasma.25.1.17.

- [138] 山下 清孝, 謝 林, 今村 幸, 大坂 淳, 津江 光洋, 河野 通方, "電界中における多孔質円筒バーナー拡散火炎の挙動," *日本航空宇宙学会論文集*, vol. 54, no. 633, pp. 455-460, (2006), DOI:10.2322/jjsass.54.455.
- [139] 中谷 辰爾, 津江 光洋, 河野 通方, 瀬川 大資, 角田 敏一, "メタン/空気混合気の火花点火過程の初期火炎核形成に及ぼす電極間隙や熱損失の影響に関する数値解析," *日本機械学会論文集 B 編*, vol. 77, no. 773, pp. 177-185, (2011), DOI:10.1299/kikaib.77.177.
- [140] N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion," *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, vol. 21, no. 1, pp. 1231-1250, (1986), DOI:10.1016/S0082-0784(88)80355-2.
- [141] M. Metghalchi and J. C. Keck, "Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature," *Combustion and Flame*, vol. 48, pp. 191-210, (1982), DOI:10.1016/0010-2180(82)90127-4.
- [142] J. R. Kee, F. J. Grcar, A. J. Miller and E. Meeks, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames," *Sandia National Laboratories Report*, pp. 1-87, (1985).
- [143] R. Herweg and R. R. Maly, "A Fundamental Model for Flame Kernel Formation in S. I. Engines," *SAE Technical Paper*, pp. 1947-1976, (1992), DOI:10.4271/922243.
- [144] M. S. William, "The Algorithmic Structure of the Air/Fuel Ratio Calculation," *HORIBA Technical Reports*, no. 15, pp. 17-24, (1997).
- [145] O. Colin, A. Benkenida and C. Angelberger, "3D modeling of mixing, ignition and combustion phenomena in highly stratified gasoline engines," *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 47-62, (2003), DOI:10.2516/ogst:2003004.
- [146] T. Zhichao and D. R. Rolf, "An ignition and combustion model based on the level-set method for spark ignition engine multidimensional modeling," *Combustion and Flame*, vol. 145, no. 1-2, pp. 1-15, (2006), DOI:10.1016/j.combustflame.2005.12.007.
- [147] K. Hiraoka, Y. Naka, M. Shimura, Y. Minamoto, N. Fukushima, M. Tanahashi and T. Miyauchi, "Evaluations of SGS Combustion, Scalar Flux and Stress Models in a Turbulent Jet Premixed Flame," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 97, p. 1147-1164, (2016), DOI:10.1007/s10494-016-9756-z.
- [148] R. Dahms, D. T. Fansler, C. M. Drake, W. T. Kuo, M. A. Lippert and N. Peters, "Modeling ignition phenomena in spray-guided spark-ignited engines," *Proceedings of*

- the Combustion Institute*, vol. 32, no. 2, pp. 2743-2750, (2009),
DOI:10.1016/j.proci.2008.05.052.
- [149] N. Lamoureux, P. Desgroux, A. ElBakali and F. J. Pauwels, "Experimental and numerical study of the role of NCN in prompt-NO formation in low-pressure CH₄-O₂-N₂ and C₂H₂-O₂-N₂ flames," *Combustion and Flame*, vol. 157, no. 10, pp. 1929-1941, (2010), DOI:10.1016/j.combustflame.2010.03.013.
- [150] T. Hosaka, T. Sugii, E. Ishii, K. Oryoji and Y. Sukegawa, "Numerical Study of Internal Combustion Engine using OpenFOAM®," *SAE Technical Paper*, pp. 1-7, (2016), DOI:10.4271/2016-01-1346.
- [151] 西尾 兼光, スパークプラグ, Japan: 山海堂, (1999), (ISBN-10 4381101537, ISBN-13 9784381101532).
- [152] N. Hayashi, A. Sugiura, Y. Abe and K. Suzuki, "Development of Ignition Technology for Dilute Combustion Engines," *SAE International Journal of Engines*, vol. 10, no. 3, pp. 984-995, (2017), DOI:10.4271/2017-01-0676.
- [153] F. J. Llewellyn, "Incomplete Breakdown: a Cathode De-ionization Effect," *Nature*, vol. 157, p. 480, (1946), DOI:10.1038/157480a0.
- [154] D. K. Froome, "The Rate of Growth of Current and the Behaviour of the Cathode Spot in Transient Arc Discharges," *Proceedings of the Physical Society*, vol. 60, pp. 424-435, (1948), DOI:10.1088/0959-5309/60/5/303.
- [155] F. Wolfgang, "A Theory of the Production of Electrode Vapor Jets by Sparks and Arcs," *Physical Review*, vol. 74, no. 10, pp. 1475-1477, (1948), DOI:10.1103/PhysRev.74.1475.
- [156] C. G. Williams, D. J. Craggs and W. Hopwood, "The Excitation and Transport of Metal Vapour in Short Sparks in Air," *Proceedings of the Physical Society. (Section B)*, vol. 62, pp. 49-61, (1949), DOI:10.1088/0370-1301/62/1/307.
- [157] F. J. Llewellyn, M. A., D. Phil, D. Sc. and I. F. P., "The Mechanism of Electrode Erosion in Electrical Discharges(Physical Basis of the Low Erosion Rate of the Platinum Metals)," *Platinum Metals Review*, vol. 7, no. 2, pp. 58-65, (1963).
- [158] F. J. Llewellyn, "Physics of Electric Contacts," *Nature*, vol. 160, p. 417, (1947), DOI:10.1038/160417a0.
- [159] J. G. Want, "The Design of Light Duty Electrical Contacts," *Platinum Metals Review*, vol. 5, no. 2, pp. 42-50, (1961).

- [160] W. Lijun, H. Xiaolong, J. Shenli, L. Yu, S. Shaohuang and D. Tao, "Experimental Investigation of Electrode Erosion of Trigratron in Microsecond Arc Discharge Process," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 5, pp. 1393-1399, (2014), DOI:10.1109/TPS.2014.2313554.
- [161] V. K. Anatoliy, "Arc Motion and Electrode Erosion in High-Current Rail Spark Gaps," *IEEE Transactions On Plasma Science*, vol. 38, no. 9, pp. 2474-2478, (2010), DOI:10.1109/TPS.2010.2052929.
- [162] A. R. Petr and R. T. Burkes, "Acoustic phenomena in erosion of spark-gap electrodes," *Applied Physics Letters*, vol. 36, no. 7, pp. 536-537, (1980), DOI:10.1063/1.91570.
- [163] A. L. Donaldson, M. O. Hagler, M. Kristiansen, G. Jackson and L. Hatfield, "Electrode Erosion Phenomena in a High-Energy Pulsed Discharge," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 12, no. 1, pp. 28-38, (1984), DOI:10.1109/TPS.1984.4316289.
- [164] A. Watson, A. Donaldson, K. Ikuta and M. Kristiansen, "Mechanism of electrode surface damage and material removal in high current discharges," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 22, no. 6, pp. 1799-1803, (1986), DOI:10.1109/TMAG.1986.1064660.
- [165] W. Lijun, J. Shenli, L. Yu, C. Bin, Y. Dingge and S. Zongqian, "Mechanism of electrode surface damage and material removal in high current discharges," *Journal of Applied Physics*, vol. 107, pp. 1-12, (2010), DOI:10.1063/1.3386568.
- [166] W. Lijun, W. Liuhuo, J. Shenli, S. Zongqian, Y. Dingge and L. Yu, "Experimental Study of Anode Activities in High Current Vacuum Arc Subjected to Axial Magnetic Fields Under Different Conditions," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 38, no. 7, pp. 1682-1691, (2010), DOI:10.1109/TPS.2010.2049666.
- [167] C.-F. Chang, R. D. Taylor, L. R. Franz and E. A. Leone, "Spark plug tip having platinum based alloys". WIPO (PCT) Patent WO2000003464A1, 13 7 1999.
- [168] C.-F. Chang, R. D. Taylor, L. R. Franz, E. A. Leone and A. Kozlov, "Wear-resistant spark plug electrode tip containing platinum alloys, spark plug containing the wear-resistant tip, and method of making same". WIPO (PCT) Patent WO2000003463A1, 13 7 1999.
- [169] C.-F. Chang, M. S. Zedalis, R. D. Taylor and E. A. Leone, "Spark plug electrode tip for internal combustion engine". United States Patent US5973443A, 6 5 1996.
- [170] T. Oshima, "Spark plug". European Patent Office Patent EP0418055B1, 12 9 1990.
- [171] T. Oshima, K. Iwata and T. Okayama, "Spark plug". European Patent Office Patent EP0537031B1, 12 10 1992.

- [172] T. Oshima, "Spark plug for use in an internal combustion engine". European Patent Office Patent EP0635920B1, 30 6 1994.
- [173] W. Matsutani, "Spark plug". European Patent Office Patent EP0866530B1, 5 3 1998.
- [174] W. Matsutani and J. Kagawa, "Spark plug". European Patent Office Patent EP0817341B1, 27 6 1997.
- [175] W. Matsutani and T. Okayama, "Spark plug for internal combustion engine". European Patent Office Patent EP0805534B1, 30 4 1997.
- [176] W. Matsutani and K. Okazaki, "Spark plug". European Patent Office Patent EP0817342B1, 27 6 1997.
- [177] S. Peter, "Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets," *Physical Review Journals*, vol. 184, no. 2, p. 383, (1969), DOI:10.1103/PhysRev.184.383.
- [178] J. Burkhard, "Cathode spots of electric arcs," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 34, pp. 103-123, (2001), DOI:10.1088/0022-3727/34/17/202.
- [179] W. G. Eoin and R. P. Julian, "Electrode erosion by particle ejection in low-current arcs," *Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 2, pp. 667-671, (1973), DOI:10.1063/1.1663300.
- [180] C. Sylvain and M. Jean-Luc, "Theoretical prediction of non-thermionic arc cathode erosion rate including both vaporization and melting of the surface," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 239-247, (2000), DOI:10.1088/0963-0252/9/3/301.
- [181] L. B. Raymond, M. S. David and J. M. Philip, *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*, United States of America: William Andrew, 1996, (ISBN-13 9780815513759).
- [182] C. Sylvain and M. Jean-Luc, "A comparison of electron-emission equations used in arc - cathode interaction calculations," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 30, pp. 2905-2910, (1997), DOI:10.1088/0022-3727/30/20/019.
- [183] J. Rossignol, S. Clain and M. Abbaoui, "The modelling of the cathode sheath of an electrical arc in vacuum," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 36, no. 13, pp. 1945-1503, (2003), DOI:10.1088/0022-3727/36/13/311.
- [184] X. Zhou and J. Heberlein, "Analysis of the arc-cathode interaction of free-burning arcs," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 3, pp. 564-574, (1994), DOI:10.1088/0963-0252/3/4/014.

- [185] B. Rethfeld, J. Wendelstorf, T. Klein and G. Simon, "A self-consistent model for the cathode fall region of an electric arc," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 29, no. 1, pp. 121-128, (1996), DOI:10.1088/0022-3727/29/1/021.
- [186] H. Zhong-Jun and H. Robert, "Cathode spot initiation in different external conditions," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 30, pp. 603-613, (1997), DOI:10.1088/0022-3727/30/4/016.
- [187] J. Mitterauer and P. Till, "Computer Simulation of the Dynamics of Plasma-Surface Interactions in Vacuum Arc Cathode Spots," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 15, no. 5, pp. 488-501, (1987), DOI:10.1109/TPS.1987.4316742.
- [188] T. Klein, J. Paulini and G. Simon, "Time-resolved description of cathode spot development in vacuum arcs," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 27, no. 9, pp. 1914-1921, (1994), DOI:10.1088/0022-3727/27/9/015.
- [189] M. Mohammed, W. B. Ahmed, A. M'hammed and L. André, "Numerical Model on the Interaction of a Vacuum Arc with a Copper Cathode," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 46, no. 11, pp. 1618-1625, (2006), DOI:10.2355/isijinternational.46.1618.
- [190] F. Paschen, "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz," *Annalen der Physik*, vol. 37, no. 69, pp. 1-35, (1889), DOI:10.1002/andp.18892730505.
- [191] K. Thomas and H. Alfredo, "Einfluss der Zündkerzen auf das Entflammungsverhalten in modernen Motoren," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 61, no. 10, pp. 656-663, (2000), DOI:10.1007/BF03227303.
- [192] E. Ohata, "Control Device For Internal Combustion Engine". WIPO (PCT) Patent WO2021095456A1, 20 05 2021.
- [193] Y. Fujiyama, "Internal Combustion Engine Ignition Device". WIPO (PCT) Patent WO2021064851A1, 01 10 2019.
- [194] Y. Uchise, "Internal Combustion Engine Ignition Device". WIPO (PCT) Patent WO2018083719A1, JPWO2018083719A1, 07 01 2020.
- [195] 保坂 知幸, 光藤 健太, 杉井 泰介, 米谷 直樹, "OpenFOAM を用いた自動車用エンジンのシミュレーション技術の開発," *日本伝熱学会誌「伝熱」*, vol. 60, no. 252, pp. 28-33, (2021).
- [196] T. Nguyen, P. Janas, T. Lucchini, G. D'Errico, S. Kaiser and A. Kempf, "LES of Flow Processes in an SI Engine Using Two Approaches: OpenFoam and PsiPhi," *SAE Technical Paper*, pp. 1-13, (2014), DOI:10.4271/2014-01-1121.

- [197] 大島崇文, “内燃機関用スパークプラグ”. Japan 特許番号: 特開平 7-37675, 07 02 1995.
- [198] 松井 榮一, "点火栓用電極材料の研究(第 1 報)梗概並に火花放電試験に就て," *応用物理*, vol. 16, no. 10, pp. 175-179, (1947), DOI:10.11470/oubutsu1932.16.175.
- [199] 大林 幹男, 中村 元志, 小松 登, "酸化鉛によるニッケルの高温腐食におよぼす加熱雰囲気の影響," *日本金属学会誌*, vol. 32, no. 7, pp. 655-659, (1968), DOI:10.2320/jinstmet1952.32.7_655.
- [200] 志水 隆一, 山村 泰道, 松波 紀明, 森田 健治, 西堂 雅博, 伊藤 憲昭, "スパッタリング," *応用物理*, vol. 50, no. 5, pp. 470-488, (1981), DOI:10.11470/oubutsu1932.50.470.
- [201] E. Ohata, "Control Device For Internal Combustion Engine". WIPO (PCT) Patent WO2021095505A1, 20 05 2021.

研究業績

本論文の主な内容は、下記にて公表済みである。

参考論文（査読付き公表済み）

- (1) 大島英一郎, 押領司 一浩, 希釈燃焼エンジンにおける点火エネルギー時間配分制御の効果検証, 日本機械学会論文集, vol.87, no.896, pp.1-12, (2021), DOI:10.1299/transjsme.21-00077.
- (2) 大島英一郎, 藤山 幸雄, EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 自動車技術会論文集, vol.51, no.4, pp.669-674, (2020), DOI:10.11351/jsaeronbun.51.669.

その他の論文（査読付き公表済み）

- (1) 大島英一郎, 東澤晋二郎, 吉田幸司, 庄司秀夫, 斎間厚, ノッキング発生時のラジカル挙動の発光分析, 自動車技術会論文集, vol.27, no.4, p.15-20, (1996).
- (2) Shinjiro Higashizawa, Eiichiro Ohata, Hideo Shoji, Koji Yoshida, Atsushi Saima, Emission Spectroscopic Measurement of Radical Behavior During Combustion in a Two-Cycle Engine, The Third KSME-JSME Thermal Engineering Conference, vol.2, p.371-376, (1996).
- (3) 大島英一郎, 渡部司, 落合憲司, 青野俊宏, クランク角度測定を用いた筒内圧推定に関する一考察, 自動車技術会論文集, vol.50, no.5, p.1272-1277, (2019), DOI:10.11351/jsaeronbun.50.1272.

その他の論文（査読無し公表済み）

- (1) 助川義寛, 大島英一郎, 山岡士朗, ディーゼルエンジンにおける EGR ガスの気筒分配の計測と数値解析(S55-2 エンジン現象解析-基礎計測と数値計算-(2),S55 エンジン現象解析-基礎計測と数値計算-), 日本機械学会年次大会講演論文集, vol.3, p.295-296, (2006), DOI:10.1299/jsmemecjo.2006.3.0_295.

口頭発表

- (1) 大島英一郎, 東澤晋二郎, 庄司秀夫, 吉田幸司, 斎間厚, 2 サイクルエンジンのノッキング時のラジカル挙動, 自動車技術会学秋季大会, 1995 年 9 月.
- (2) 東澤晋二郎, 大島英一郎, 吉田幸司, 庄司秀夫, 斎間厚, 2 サイクルエンジンのノッキング時のラジカル挙動, 日本機械学会山梨講演会, 1995 年 10 月.

- (3) 東澤晋二郎, 大島英一郎, 吉田幸司, 庄司秀夫, 斎間厚, 2 サイクルエンジンにおけるラジカル発光強度の挙動, 第 39 回日本大学理工学部学術講演会, 1995 年 11 月.
- (4) 東澤晋二郎, 大島英一郎, 吉田幸司, 庄司秀夫, 斎間厚, 2 サイクルエンジンにおけるラジカル発光強度の測定, 日本機械学会第 73 期通常総会講演会 No.96-1, 1996 年 4 月.
- (5) Shinjiro Higashizawa, Eiichiro Ohata, Hideo Shoji, Koji Yoshida, Atsushi Saima : Emission Spectroscopic Measurement of Radical Behavior During Combustion in a Two-Cycle Engine, The Third KSME-JSME Thermal Engineering Conference(日韓熱工学会), 2016 年.
- (6) 助川義寛, 大島英一郎, 山岡士朗 : ディーゼルエンジンにおける EGR ガスの気筒分配の計測と数値解析, 日本機械学会年次大会, 2006 年.
- (7) 大島英一郎, 渡部司, 落合憲司, 青野俊宏 : クランク角度測定を用いた筒内圧推定に関する一考察, 自動車技術会春季大会, 2019 年 4 月.
- (8) 大島英一郎, 藤山幸雄 : EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 自動車技術会春季大会, 2020 年 5 月.
- (9) 大島英一郎, 押領司一浩 : 希釈燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 日本機械学会 第 31 回内燃機関シンポジウム, 2020 年 11 月.

特許(登録査定済)

- (1) Hitachi Ltd., Eiichiro Ohata, Shiro Yamaoka, Yoshihiro Sukegawa, Hiroaki Hoshika, Kaori Kashio, Control apparatus of egr control valve, CN100585148C, EP1914415B1, JP4713437B2, US7866306B2, 2006-10-18
- (2) Hitachi Astemo Ltd., Eiichiro OHATA, Apparatus for measuring in-cylinder pressure, JP5023039B2, US8606484B2, 2008-10-30
- (3) Hitachi Automotive Systems, Ltd., Eiichiro Ohata, Strain detection device, JP6214941B2, 2013-06-28
- (4) Hitachi Astemo Ltd., Eiichirou OOHATA, Control device for internal combustion engine, CN108350826B, EP3369918B1, JP6420915B2, US10533512B2, 2015-10-27
- (5) Hitachi Automotive Systems, Ltd., Eiichiro Ohata, Angle detector, JP6709863B2, 2017-02-20
- (6) Hitachi Automotive Systems, Ltd., Eiichiro Ohata, Internal combustion engine control device, JP6815534B2, US10995690B2, 2017-10-12

- (7) Hitachi Astemo Ltd., Hitachi Astemo Electric Motor Systems Ltd., Eiichiro OHATA, Internal-combustion-engine control device, US10975797B2, 2017-11-28
- (8) Hitachi Astemo Ltd., Eiichiro Ohata, Internal combustion engine control device and internal combustion engine control method, JP6893997B2, US11067052B2, 2017-09-29
- (9) Hitachi Astemo Ltd., Akihiro Komori, Eiichiro Ohata, Angle detection device and angle detection method, JP6860744B2, 2018-03-26
- (10) Hitachi Astemo Ltd., Eiichiro Ohata, Fuel injection control device and fuel injection control method, JP6882516B2, 2017-11-24
- (11) Hitachi Automotive Systems, Ltd., Eiichiro Ohata, Ignition system for internal combustion engine and control device for vehicle, JP6818157B2, US11198425B2, 2017-10-31
- (12) Hitachi Astemo Ltd., Eiichiro Ohata, Control device for internal combustion engine, JP6942885B2, 2018-05-23
- (13) Hitachi Astemo Ltd., Eiichiro Ohata, Control device for internal combustion engine, JP6906106B2, 2018-06-08
- (14) Hitachi Astemo Ltd., Eiichiro Ohata, Control device for internal combustion engine, JP6931127B2, 2018-06-08