

機械学習を用いたエンジンの点火制御

2023年09月

大畠 英一郎

機械学習を用いたエンジンの点火制御

筑波大学

人間総合科学学術院人間総合科学研究群

情報学学位プログラム

2023年09月

大畠 英一郎

機械学習を用いたエンジンの点火制御

概要

本研究では、ガソリンエンジンの燃費低減技術への応用を念頭に、限られた計算リソース、状況変化への対応、実用的なリアルタイム性能を満たすリアルタイムオンライン機械学習・予測手法と実装方法について検討した。

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、燃費と排気の間には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、燃費と失火の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。対策技術に対する、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。次に副作用の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。2つの副作用への対策技術として、能動式コイルを追加した点火コイルを試作し、指定期間の点火エネルギーを増大することで、点火エネルギーの時間配分制御を可能とした。そして、点火エネルギーの時間配分制御により、点火の電力需給差を削減した結果、耐久性と電費を同時に改善できた。

しかしこれは、エンジン筒内の流動状態が常に最悪条件であることを想定しているため、無駄な点火エネルギーが消費されている。つまりこの点火エネルギー増大機能は、低流動な半失火サイクルに対しては有効であるが、高流動な正常燃焼サイクルにおいては無駄な点火エネルギーとなる。この無駄を抑制するためには、将来燃焼サイクルの流動を予測して、最適な点火エネルギーを適切な時期に出力する、点火制御が必要である。この問題は、センサによって得られた回転周期データのオンライン学習によるリアルタイム予測としてモデル化可能であるが、既存のリアルタイム予測手法を、本問題に適用する場

合、実際には (1) 限られたコンピュータリソース (2) 限られた予算 (3) 実用的なりアルタイム性能を出すことへの対応が必要になる。

しかし、これらがどう実現されるのかは明らかでは無い。そのため、上記 (1) (2) (3) の要求事項を実現するような手法と実装方法を明らかにすることを研究の目的とする。本研究の対応による貢献は次のように設定した。

対応 (a) AR モデルと FPGA による限られたリソースによる実用的な手法の開発。

対応 (b) 実装時に予測性能を保ちつつ価格を下げるためのセンサ数と性能のトレードオフの検証。

これらにより、実用的なエンジンでの点火制御を可能とするような、オンライン機械学習の手法と実装方法を明らかにする。

第2章では、対応 (a) についての研究内容を述べた。ガソリンエンジンにおいて、筒内ガスの点火性能は、ガス流動強さの影響を受ける。また、供試される定負荷型エンジンにおいて、ガスの点火性能はクランク軸出力とクランク軸回転周期へ影響する。このため、ガス流動強さの予測指標として、エンジンのクランク軸の回転周期を用いることとした。次に既存研究を精査した結果、統計モデルを用いたエンジン挙動の予測モデルの研究が行われている。しかし、既存研究では計算機上でのシミュレーションに留まっており、実際にエンジンで利用可能な限られた計算リソースでの実装については、考慮されてこなかった。そのため本章では、最適な点火エネルギーに関して、高速かつ高精度な予測計算を行うための手段として、FPGA を用いてリアルタイムに AR モデルを学習・予測する方法を提案し、その評価結果を示すこととした。そこで最初に、研究目標を設定し、エンジン回転周期以内でオフライン学習の AR モデルと、同等以上の予測精度を、実信号を用いた検証実験にて、達成することとした。供試エンジンには、汎用の発電機を用いた。供試エンジンの運転条件より、予測計算の上限時間を 40[ms]へ設定した。この上限時間内に予測演算を実行するために、計算処理の並列化と計算値ビット数の削減を行うこととした。並列化については、AR モデル式を四則演算レベルにまで分解することで、最大で 6 並列の演算を複数個所で実現できた。その上で、シフトレジスタを配置することで、パイプライン処理によるさらなる高速化を図った。次に、計算値ビット数の削減については、使われていない数値範囲の削減や、要求分解能へ合わせたビット数にすることで、精度低下を抑制しながら、浮動小数 64[bit]から固定小数 16[bit]へ削減した。そしてこれらの高速化手法を適用した結果、FPGA の最大動作周波数 124

[MHz]でのコンパイルに成功した。そして、信号入出力を含めた予測計算時間を実測した結果、1778[ns]となり、予測計算の上限時間内とすることができた。

しかし、この高速化手法には、計算値ビット数の削減を用いている。精度低下の抑制を図っているものの、オフライン学習の AR モデルと、同等以上へ予測精度を向上させることは困難である。そのため、新たな予測精度向上策として、位相補償アルゴリズムを考案した。従来の AR モデルにおいては、過去の周期情報のみを用いて、将来を予測するため、実信号では予測誤差が積み重なることになる。そこで、過去の周期情報だけでなく、過去の位相情報を用いて、予測周期を再補正することで、予測誤差の積み重ねを防止した。実信号を用いた検証実験の結果、この位相補償アルゴリズム単体の効果として、予測精度を 36[%]向上できた。そのほか、モデル次数の選定については、赤池情報量規準 (AIC) に加えて、決定係数 (R^2) と、二乗平均平方根誤差 (RMSE) と、平均絶対誤差 (MAE) も検討対象に加えることで、予測の高精度化と計算の高速化の両立を図った。その結果、エンジンの実信号を用いたリアルタイムシミュレーションにおいて、エンジンのクランク軸の回転周期以内でオフライン学習の AR モデルと、同等以上の予測精度を十分なリアルタイム性能で実現できることを実験的に示した。

第 3 章では、対応 (b) についての研究内容を述べた。上記対応 (a) における、高精度な将来予測結果を活かすためには、点火コイルの高精度な充放電時期制御が必要である。しかし、エンジンは数多くの部品で構成していることなどから、角度誤差が懸念される。そのため本研究内容の実用化を考慮した、角度誤差と対策コストの関係を調査した。そこで最初に、研究目標を設定し、リアルタイムな自己校正により、角度誤差を低減できることとした。対応 (a) では、エンジンのクランク軸の回転周期内に将来予測の計算を行っている。この計算結果をエンジン制御へ適用する過程で、角度誤差を低減するためには、リアルタイムの校正処理が必要となる。さらに、エンジンへ基準センサを搭載することはコストの観点からも現実的でないことから、自己校正法が必要である。代表的な自己校正法には、デバイダー法、同時校正法、マルチ再生ヘッド法、等分割平均法などがある。それぞれについて、長所と短所を比較検討した結果、等分割平均法は高精度で一般のエンコーダへの適用が可能であることに加え、国家基準器としての実績があることから、評価対象へ選定した。等分割平均法は、2つ以上の角度センサを、等角度間隔に配置し、すべてのセンサの出力値を平均処理することで、自己校正を行うものである。

しかし、自己校正の対象には限定があり、配置センサ数によって、自己校正対象の周波数次数の割合は増加するというトレードオフが存在する。そこでエンジン制御に最適なセンサ数を導くために、角度誤差の要因を調査した上で、配置センサ数と角度誤差の関係を明らかにすることを研究対象とした。誤差の内訳を調査した結果、角度誤差要因は、(1) 目盛り誤差、(2) 軸偏心誤差、(3) 軸振れ誤差、の3つで構成されており、周波数次数の違いがあることに着目した。そこで、配置センサ数が1個、2個、8個の角度センサを車載上で同時計測できる評価設備を構築した。この中で、配置センサ数が8個というのは、国家基準器と同じ個数であり、本研究の基準センサとして使用することから、国家基準器同等品を用いて校正を実施した。その結果、角度誤差は約 8.5[”](角度秒)となり、これは約 2.3[mdeg.]に相当する精度を達成できた。そのほか、平均処理については、すべての回路をアナログ化することで、リアルタイム性を確保できた。

その結果、クランク軸の回転周期予測結果に基づく、点火制御信号の時期精度向上を目的として、クランク角度センサの角度誤差低減方法を検討し、以下の結論を得た。(1) 実エンジンへ複数のクランク角度センサを搭載することで、等分割平均法の適用を可能とし、角度誤差を低減できる見込みを得た。(2) 実エンジンへ等分割平均法を適用し、角度誤差の低減を確認すると共に、角度誤差の内訳を明らかにした。(3) センサ数と精度改善率の関係より、最良構成を提案し、コストと精度のトレードオフを改善できる見込みを得た。

第4章では、第1章で述べた研究目的を踏まえて、各章で取り組んだ研究とそこから得られた結果について議論した。既存研究に加えて、これまでの研究成果へ本研究の成果を積み上げることにより、燃費と電費を同時に改善できるため、正味熱効率向上の可能性が示唆される。

Ignition control of engines using machine learning

Abstract

In this study, we investigated a real-time online machine learning and prediction method and its implementation method that satisfies limited computational resources, adaptability to changing conditions, and practical real-time performance, with a view to applying the method to fuel consumption reduction technology for gasoline engines.

In a social context where the demand for CO₂ reduction is expected to increase, the transportation sector is expected to continue to account for a higher percentage of CO₂ emissions than other industries. Therefore, there is a need to reduce the fuel consumption of gasoline engines. One of the most effective countermeasures is to increase the thermal efficiency by increasing the compression ratio. However, an increase in compression ratio causes abnormal combustion such as knocking and an increase in exhaust emissions such as NO_x. Therefore, a tradeoff arises between fuel consumption and exhaust emissions. One countermeasure to solve this tradeoff is dilute combustion. Dilute combustion can simultaneously reduce fuel consumption and exhaust emissions. However, an increase in the dilution ratio reduces the ignition performance of the fuel mixture, resulting in ignition failure. This creates a new tradeoff between fuel consumption and ignition. One of the countermeasure technologies to solve this tradeoff is enhanced in-cylinder gas flow and high-energy ignition. The first side effect of the countermeasure technology is a decrease in durability due to increased wear of the spark plug electrodes. As a countermeasure for the two side effects, we developed a prototype ignition coil with an additional active coil to increase the ignition energy during a specified period, thereby making it possible to control the time distribution of ignition energy. The time distribution control of ignition energy reduced the difference in ignition power supply and demand, resulting in simultaneous improvements in durability and power costs.

However, since this assumes that the flow condition in the engine cylinder is always in the worst condition, unnecessary ignition energy is consumed. In other words, this ignition energy augmentation function is effective for low-flow semi-fire cycles but is wasteful in high-flow normal combustion cycles. To suppress this waste, ignition control is needed that predicts the future combustion cycle flow and outputs the optimum ignition energy at the appropriate time.

This problem can be modeled as a real-time prediction by on-line learning of rotation cycle data obtained by sensors. (3) practical real-time performance.

However, it is not clear how these will be achieved. Therefore, the purpose of this research is to clarify the method and implementation method to realize (1), (2), and (3) above. The contributions of this research by correspondence are set as follows.

Response (a) Development of a practical method with limited resources using AR models and FPGAs.

Response (b) Verification of the trade-off between the number of sensors and performance to reduce the price while maintaining predictive performance during implementation.

In Chapter 2, we describe our research on response (a). In gasoline engines, the ignition performance of the in-cylinder gas is affected by the gas flow strength. In the constant-load engine to be tested, the gas ignition performance affects the crankshaft power and crankshaft rotation period. Therefore, the crankshaft rotation period of the engine was used as a predictor of gas flow strength. Next, we examined the existing studies and found that some studies have been conducted on prediction models of engine behavior using statistical models. However, these studies have been limited to simulations on computers and have not considered implementation on the limited computational resources available for actual engines. Therefore, in this chapter, we propose a method for learning and predicting AR models in real time using FPGAs as a means of performing fast and accurate predictive calculations for optimal ignition energy and present the evaluation results. First, we set a research goal to achieve the same or better prediction accuracy as an offline-trained AR model within an engine rotation period in a verification experiment using a real signal. A general-purpose generator was used as the test engine. The upper time limit for the prediction calculation was set to 40 ms based on the operating conditions of the test engine.

In the conventional AR model, only the past period information is used to predict the future, which leads to an accumulation of prediction errors in the actual signal. Therefore, the prediction period is recalibrated using not only the past period information but also the past phase information, thereby preventing the accumulation of prediction errors. Verification experiments using real signals showed that the phase compensation algorithm alone improved prediction accuracy by 36[%].

In Chapter 3, we describe our research on correspondence (b). In order to take advantage of the highly accurate future prediction results in response (a) above, highly accurate charge/discharge timing control of the ignition coil is necessary. However, angular error is a concern because the engine is composed of many parts. Therefore, we investigated the relationship between angular error and the cost of countermeasures, considering the practical application of this research. First, the research goal was set to reduce the angle error by real-time self-calibration. In correspondence (a), the future prediction is calculated within the rotation cycle of the engine crankshaft. In the process of applying the calculation results to engine control, a real-time calibration process is required to reduce the angle error. In addition, since it is impractical from a cost standpoint to install a reference sensor in the engine, a self-calibration method is necessary. In the equally divided averaging method, two or more angle sensors are placed at equal angle intervals, and the output values of all sensors are averaged to perform self-calibration.

We constructed an evaluation facility that can simultaneously measure one, two, and eight angle sensors onboard a vehicle. Calibration was performed using a national standard equivalent. As a result, an accuracy equivalent to about 2.3 [mdeg.] was achieved.

As a result, with the aim of improving the timing accuracy of the ignition control signal based on the results of crankshaft rotation cycle prediction, methods for reducing the angle error of the crank angle sensor were investigated, and the following conclusions were obtained. (1) By equipping an actual engine with multiple crank angle sensors, it is possible to apply the equal division average method, which is expected to reduce the angle error. (2) We applied the equal division average method to the actual engine, confirmed the reduction of the angular error, and clarified the breakdown of the angular error. (3) Proposed the best configuration based on the relationship between the number of sensors and the accuracy improvement rate and obtained the prospect of improving the trade-off between cost and accuracy.

In Chapter 4, based on the research objectives described in Chapter 1, we discussed the studies conducted in each chapter and the results obtained from them. In addition to the existing studies, the results of this research can be added to those of previous studies to simultaneously improve fuel consumption and electricity costs, suggesting the possibility of improving net thermal efficiency.

目次

目次.....	4
図の目次.....	7
表の目次.....	10
略号.....	11
記号.....	13
第1章 背景と課題.....	16
1.1. エンジンの社会課題.....	16
1.1.1. 気候変動の増大.....	16
1.1.2. CO ₂ 排出量の増大.....	20
1.1.3. 自動車の課題.....	23
1.1.4. エンジンの課題.....	24
1.2. ガソリンエンジン.....	26
1.2.1. ガソリンエンジンの構成.....	26
1.2.2. 火花点火.....	27
1.2.3. 点火と燃焼.....	28
1.3. 希釈燃焼の作用.....	30
1.3.1. 理論熱効率の向上による燃費低減.....	31
1.3.2. ポンプ損失の低減による燃費低減.....	31
1.3.3. 冷却損失の低減による燃費低減.....	31
1.3.4. 燃焼温度低下による排気低減.....	32
1.4. 希釈燃焼の課題.....	32
1.4.1. 希釈燃焼の先行研究.....	32
1.4.2. ガソリンエンジンにおける希釈燃焼に関する既存研究.....	33
1.4.3. 乱流強化と点火強化.....	34
1.4.4. 点火の高電流化.....	34
1.4.5. 点火強化の副作用.....	34
1.5. 希釈燃焼の副作用.....	34
1.5.1. 耐久性の低下.....	35
1.5.2. 電費の増大.....	36
1.6. 研究経過.....	38
1.7. 既存研究.....	39
1.8. 研究の目的.....	43

1.9. 研究の貢献.....	44
1.10. 本論文の構成.....	45
1.11. 章のまとめ.....	45
第2章 クランク軸回転周期の予測.....	47
2.1. はじめに.....	47
2.2. 前提知識：AR モデル.....	51
2.3. 提案手法の全体像.....	52
2.3.1. Engine generator (A)	53
2.3.2. Digitizer (B, I)	55
2.3.3. Feature extraction (C)	55
2.3.4. Counter (D)	56
2.3.5. Time series analysis (H)	57
2.3.6. Regression analysis (J)	58
2.4. FPGA の設計フロー.....	58
2.4.1. Program code 64bit (E)	59
2.4.2. Program code 16bit (F)	61
2.4.3. Compiler (G)	61
2.4.4. 初版.....	62
2.4.5. 高速化.....	62
2.4.6. 最終形.....	63
2.5. 位相補償アルゴリズム.....	64
2.6. 事前実験.....	66
2.6.1. 赤池情報量規準 (AIC)	66
2.6.2. モデル次数による精度感度.....	67
2.6.3. 計算入力値のビット数削減.....	69
2.7. 実験手法.....	71
2.7.1. 手法 a.....	72
2.7.2. 手法 b.....	73
2.7.3. 手法 c.....	73
2.7.4. 手法 d.....	74
2.7.5. 手法 e.....	75
2.8. 実験結果および考察.....	76
2.8.1. 実験結果 a.....	77
2.8.2. 実験結果 b.....	77
2.8.3. 実験結果 c.....	78

2.8.4. 実験結果 d.....	78
2.8.5. 実験結果 e.....	79
2.9. 章のまとめ.....	84
第3章 高精度予測とセンサコスト抑制のトレードオフ.....	85
3.1. はじめに.....	85
3.2. 課題と対策.....	85
3.2.1. 誤差要因の推定.....	85
3.2.2. 角度誤差低減方法.....	90
3.3. 実験方法と実験装置.....	93
3.3.1. 実験方法.....	93
3.3.2. ロータリエンコーダの試作と校正.....	94
3.3.3. ロータリエンコーダ内部処理回路.....	96
3.3.4. ロータリエンコーダ試作品の概観.....	97
3.3.5. ロータリエンコーダの単体性能評価実験.....	97
3.3.6. 供試エンジン.....	100
3.3.7. 実験装置.....	100
3.4. 実験結果.....	101
3.5. 考察.....	104
3.6. 章のまとめ.....	106
第4章 結言.....	108
4.1. 本研究における2つの成果の統合利用による予測精度改善への効果.....	108
4.2. 本研究の成果による燃費改善への効果.....	111
4.3. まとめ.....	112
4.4. 結論.....	116
4.5. 今後の課題.....	117
謝辞.....	118
参考文献.....	119
全研究業績のリスト.....	126
付録.....	129

図の目次

図 1-1 SDGs（持続可能な開発目標） [2].....	16
図 1-2 観測された地上気温 [5].....	18
図 1-3 世界的な気候の変化に関する複数の観測指標 [5].....	19
図 1-4 気候変動をもたらす主な駆動要因の、1750 年を基準とした 2011 年における放射強制力の推定値と要因ごとに集計された不確実性 [5].....	21
図 1-5 世界の炭素循環の変化についての複数の観測指標 [5].....	22
図 1-6 世界平均地上気温の上昇量 [5].....	23
図 1-7 WTW CO ₂ 排出量削減効果 [8]	24
図 1-8 TTW CO ₂ 排出量削減効果 [8].....	24
図 1-9 WTW CO ₂ 排出量推計（政策積み上げ） [9]	24
図 1-10 WTW CO ₂ 排出量推計（輸送機器別） [9]	24
図 1-11 CO ₂ 排出量規制値 [10]	25
図 1-12 燃費規制値 [10].....	25
図 1-13 ガソリンエンジンの構成例	27
図 1-14 火花点火現象の概要	28
図 1-15 圧縮比と熱効率の関係	29
図 1-16 日本国内における NO _x 排出規制値の遷移	30
図 1-17 希釈率と比熱比の関係	31
図 1-18 比熱比と熱効率の関係	31
図 1-19 希釈率と最少点火エネルギーの関係 [15].....	33
図 1-20 希釈率と燃焼速度の関係 [15].....	33
図 1-21 希釈燃焼への流動と点火エネルギーの影響 [19].....	33
図 1-22 耐久評価における点火電極の外観例	35
図 1-23 定常運転における図示平均有効圧力 IMEP の測定例	37
図 1-24 サイクル C の放電電力 W ₂ 波形例	38
図 1-25 サイクル D の放電電力 W ₂ 波形例	38
図 1-26 試作した点火コイルの構成仕様	39
図 1-27 点火コイルの動作を表すタイミングチャート	39
図 2-1 エンジンの模式図	48
図 2-2 オンライン学習によるモデル推定のリアルタイム化	50
図 2-3 評価装置群	53
図 2-4 パルス信号の波形例	54

図 2-5 パルス周期情報抽出ツールの画面例と波形例	56
図 2-6 FPGA (D, H) の接続構成	58
図 2-7 プログラムコード	59
図 2-8 線形予測分析プログラムの入出力値比較結果	60
図 2-9 入出力値の偏差	60
図 2-10 初版の FPGA プログラムコード	62
図 2-11 高速化した FPGA プログラムコード	62
図 2-12 最終形の FPGA プログラムコード	63
図 2-13 FPGA における計算時間の実測結果	63
図 2-14 位相補償無し出力アルゴリズム A における誤差の累積	64
図 2-15 位相補償付き出力アルゴリズム B における誤差の累積	65
図 2-16 出力アルゴリズム B の実装結果	65
図 2-17 AIC の算出結果	67
図 2-18 モデル次数とデータ点数に対する予測精度への感度	68
図 2-19 回転速度の燃焼サイクル変動の例	69
図 2-20 縦軸を時間周期へ換算したもの	69
図 2-21 回転周期から 3.1M[tick]を引いた結果	70
図 2-22 グラフの縦軸を[tick]から[bit]へ換算した結果	70
図 2-23 手法 a の構成	72
図 2-24 手法 b の構成	73
図 2-25 手法 c の構成	74
図 2-26 手法 d の構成	75
図 2-27 手法 e の構成	76
図 2-28 手法 a の相関評価	77
図 2-29 手法 b の相関評価	77
図 2-30 手法 c の相関評価	78
図 2-31 手法 d の相関評価	78
図 2-32 手法 e の相関評価	79
図 2-33 手法ごとの評価指標	80
図 2-34 位相補償アルゴリズム有無の比較	82
図 2-35 d 位相補償無しの低回転側	83
図 2-36 d 位相補償無しの高回転側	83
図 2-37 e 位相補償無しの低回転側	83
図 2-38 e 位相補償無しの高回転側	83
図 2-39 位相補償アルゴリズム B と回転域ごとの決定係数	84

図 3-1 物理的な伝達経路の例.....	86
図 3-2 筒内圧力の測定例.....	87
図 3-3 ω_p と ω_1 の比較.....	88
図 3-4 周波数解析結果(ω_p , ω_1).....	88
図 3-5 クランク角センサの構成例.....	89
図 3-6 クランク角センサの配置例.....	91
図 3-74 ロータリエンコーダの外形図と断面図	96
図 3-8 内部処理回路図.....	97
図 3-9 試作品の概要.....	97
図 3-10 角度校正システム.....	98
図 3-11 単体評価実験結果.....	99
図 3-12 角度偏差の周波数分析結果.....	100
図 3-13 評価設備の構成	101
図 3-14 ω_p と ω_2 の比較.....	102
図 3-15 ω_p と ω_8 の比較.....	102
図 3-16 周波数解析結果(ω_p , ω_2).....	103
図 3-17 周波数解析結果(ω_p , ω_8).....	103
図 3-18 実験結果	105
図 3-19 実験結果の正規化	105
図 3-20 センサ数増加に伴う精度の増分	106
図 4-1 予測器の入力データ	109
図 4-2 比較結果（正常運転）バッチ学習	109
図 4-3 比較結果（劣化に伴う周期変化）バッチ学習	109
図 4-4 比較結果（劣化に伴う周期変化）オンライン学習	109
図 4-5 比較結果（正常運転）バッチ学習	110
図 4-6 比較結果（劣化と角度誤差に伴う周期と振幅の変化）バッチ学習	110
図 4-7 比較結果（劣化と角度誤差に伴う周期と振幅の変化）オンライン学習	110
図 4-8 精度評価	110
図 4-9 消費電力低減によるエンジン出力変化 [99].....	112
図 4-10 位相補償アルゴリズムの実施例	130
図 4-11 プログラムコード（最終形）	131

表の目次

表 1-1 実験用エンジンの仕様	36
表 1-2 実験用エンジンの運転条件	36
表 1-3 実験用エンジンの仕様	37
表 1-4 実験用エンジンの運転条件	37
表 1-5 点火放電における電力需給関係の模式図	39
表 1-6 既存研究	40
表 1-7 既存研究 [49]における論文の概要.....	41
表 1-8 既存研究 [50]における論文の概要.....	41
表 1-9 既存研究 [51]における論文の概要.....	42
表 1-10 既存研究 [52]における論文の概要.....	42
表 1-11 既存研究 [53]における論文の概要.....	43
表 1-12 既存研究 [54]における論文の概要.....	43
表 1-13 本研究の位置づけ	44
表 2-1 計算用集積回路の特性比較	51
表 2-2 発電機の仕様	54
表 2-3 デジタイザの仕様	55
表 2-4 FPGA の仕様	57
表 2-5 要求事項 (1) (2) (3) の課題	59
表 2-6 トレードオフの確認結果.....	61
表 2-7 手法	71
表 2-8 PC における CPU の仕様	72
表 3-1 角度の各種の校正法とその特徴	90
表 3-2 自己校正の対象.....	93
表 3-3 測定方法.....	94
表 3-4 角度校正装置の仕様.....	98
表 3-5 供試エンジンの仕様	100
表 3-6 回帰分析結果.....	104
表 4-1 予測器への入力データ仕様	108
表 4-2 乱数の仕様	109
表 4-3 要求事項への対応結果	116

略号

略号	意味
#D	Double Ignition
#F	Full assist Ignition
#H	Half assist Ignition
#N	Not assist Ignition
ADC	Analog-to-digital converter
AICE	The Research association of Automotive Internal Combustion Engines
AR	AutoRegressive
ARMA	Autoregressive moving average
ARIMA	AutoRegressive integrated Moving Average
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
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
LP-EGR	Low Pressure EGR
MA	Moving Average
MBT	Minimum spark advance for Best Torque
MCE	Multi Cylinder Engine
N ₂ O	Nitrous Oxide
Ne	Number of rotations of the Engine
NEDC	New European Driving Cycle

NMOG	Non-Methane Organic Gas
NO _x	Nitrogen Oxide
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PC	Personal Computer
PM	Particulate Matter
PN	Particulate Number
SCE	Single Cylinder Engine
S/B	Bore Stroke ratio
SARIMA	Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average
SDGs	Sustainable Development Goals
SEM	Scanning Electron Microscope
SI	Spark Ignition
SILS	Software In the Loop Simulation
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	定数項		
c_{κ}	周波数 κ の角度誤差の振幅		
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	車両の駆動系の慣性モーメント	kNm^2	
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	
l	コンロッド長さ	m	
M	モデル次数		
M_w	ピストン往復運動部慣性質量	N	
MAE	平均絶対誤差		
N	データ点数		
N_e	エンジンのクランク軸回転速度	rpm.	国際単位系における単位は $[\text{min}^{-1}]$ であるが、可読性を考慮して $[\text{rpm.}]$ (rotations per minute) と表現する。
P_1	1 番気筒の筒内圧力		
P_2	2 番気筒の筒内圧力		
P_3	3 番気筒の筒内圧力		
P_4	4 番気筒の筒内圧力		
R^2	決定係数	-	

RMSE	二乗平均平方根誤差		
T	熱伝導率		
T_e	内部発生トルク	Nm	
T_i	往復運動部慣性によるトルク	Nm	
T_{iN}	N番気筒慣性トルク	Nm	
T_p	筒内圧力Pによるトルク	Nm	
T_{pN}	N番気筒圧力トルク	Nm	
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	
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	-	
p	圧力	Pa	筒内圧力
p_0	大気圧	pa	
r	クランク半径	m	
R_k	自己相関		
s	比熱	J/(kg·K)	
t	時間	s	
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	
y_t	将来予測値		
y_{t-i}	過去データ		
a_i	重み係数		
$a_i^{(m)}$	m次までのモデルのパラメータ		
ε	圧縮比	-	
ε_t	誤差項		
η	熱効率	-	

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
κ	周波数成分	-	
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
θ	クランク角度	rad	
ρ	密度	kg/m ³	気体や金属
σ	角度測定の標準偏差		
$\hat{\sigma}_M^2$	予測誤差の分散		
ω	角速度	rad/sec	
ω_P	筒内圧力センサより算出した角速度		
ω_1	クランク角度センサ 1 個より算出した角速度		
ω_2	クランク角度センサ 2 個より算出した角速度		
ω_8	クランク角度センサ 8 個より算出した角速度		

第1章 背景と課題

本論文は、希釈燃焼ガソリンエンジンの点火性能向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、燃費低減と電費低減の両立による、正味熱効率向上のための点火制御技術へ応用する手法を研究対象とする。この点火制御上の、計算リソース的・コスト的な制約のある環境において、エンジン状態の時系列データをリアルタイムに学習しながら同時に予測を行う、リアルタイムオンライン機械学習・予測手法と実装方法を明らかにすることを研究目的とする。本章においては、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]。

1.1. エンジンの社会課題

1.1.1. 気候変動の増大

SDGs (Sustainable Development Goals) は、2015年に国連加盟国が採択した持続可能な開発目標である (図 1-1)。SDGs は、2030年までに貧困、飢餓、教育の格差、ジェンダー平等、クリーンエネルギーなど、世界の主要な社会・環境課題に取り組むための 17 の目標で構成されている [2]。



図 1-1 SDGs (持続可能な開発目標) [2]

17 の目標に対して、エンジンに関しては、Global Fuel Economy Initiative (GFEI) [3] 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 [4]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 International Council on Clean Transportation (ICCT) [5]による、観測された騎乗気温である。図 1-2 のそれぞれの図について、(a) は観測された世界平均地上気温（陸域+海上）の偏差、(b) は観測された地上気温の変化である。これらの図について翻訳した気象庁 [6]によると、地球の表面では、最近 30 年の各 10 年間はいずれも、1850 年以降の各々に先立つどの 10 年間よりも高温でありつづけた。北半球では、1983～2012 年は過去 1400 年において最も高温の 30 年間であった可能性が高い（中程度の確信度）、と解釈されている。つぎに図 1-3 は、世界的な気候の変化に関する複数の観測指標である。図 1-3 のそれぞれの図について、(a) は北半球積雪面積（春季）、(b) は北半球積雪面積（夏季）、(c) は世界平均海洋表層貯熱量の変化、(d) は世界平均海面水位の変化である。これらの図について翻訳した気象庁 [6]によると、海洋の温暖化は気候システムに蓄積されたエネルギーの増加量において卓越しており、1971 年から 2010 年間に蓄積されたエネルギーの 90%以上を占める（高い確信度）。1971 年から 2010 年において、海洋表層（0～700 m）で水温が上昇したことはほぼ確実でありまた 1870 年代から 1971 年の間に水温が上昇した可能性が高い、と解釈されている。

特に近年は、気温と海面の上昇が観測されていることから、気候変動及びその影響を軽減するための対策が課題となっている。

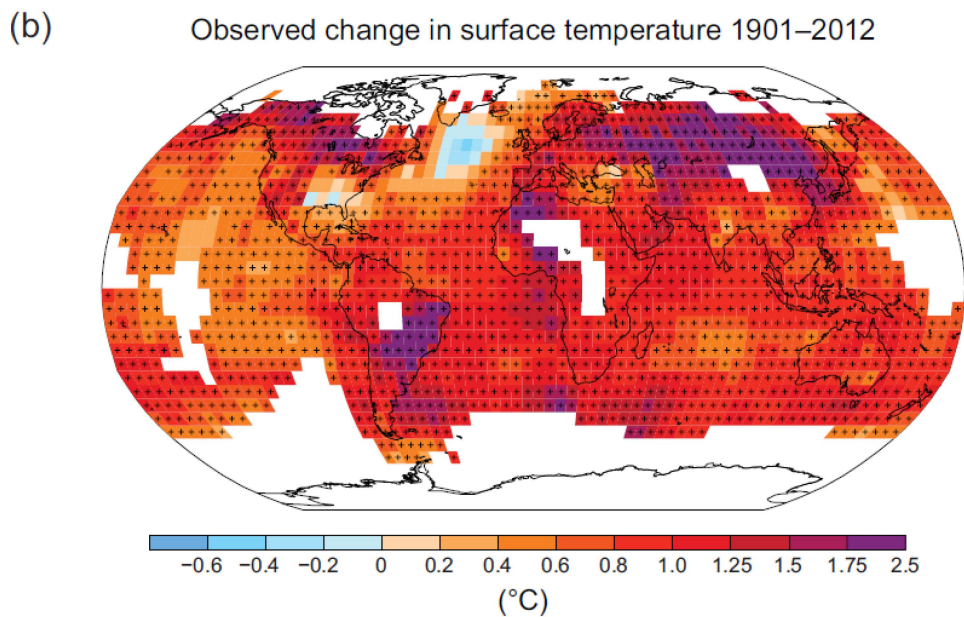
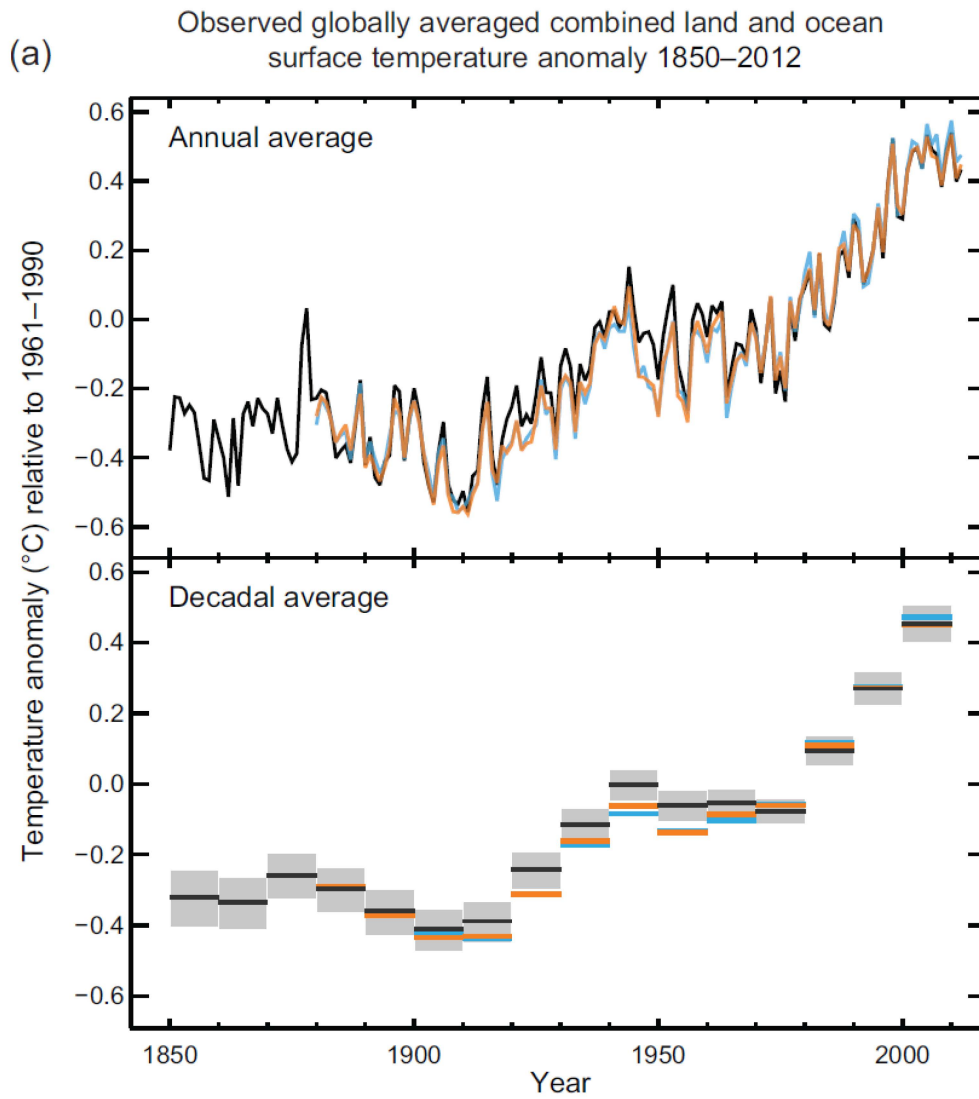


図 1-2 観測された地上気温 [5]

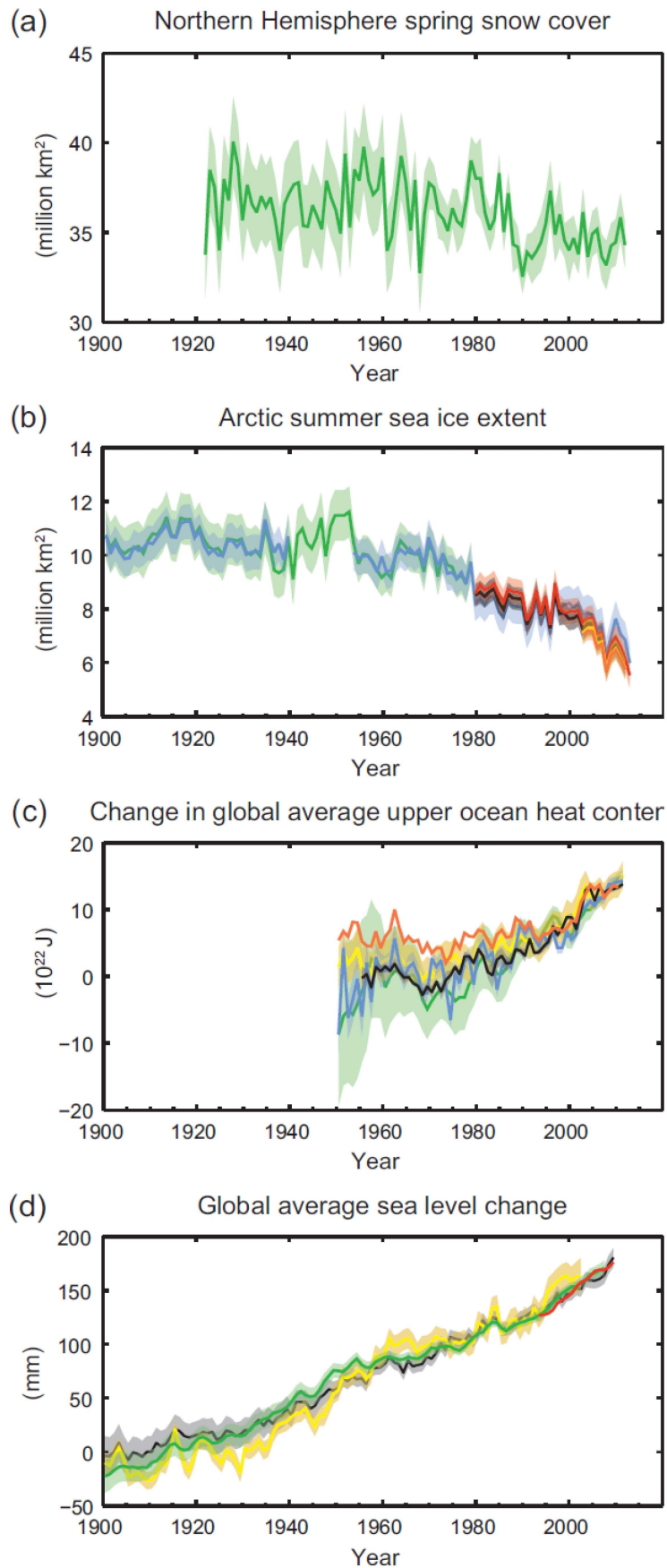


図 1-3 世界的な気候の変化に関する複数の観測指標 [5]

1.1.2.CO₂排出量の増大

目標 13 への対応として、パリ協定¹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）などがある。IPCC [5]によるとこれらの大気中濃度は、人間活動により 1750 年以降全て増加している。

図 1-4 は IPCC [5]による、気候変動をもたらす主な駆動要因の、1750 年を基準とした 2011 年における放射強制力の推定値と要因ごとに集計された不確実性を示している。これを翻訳した気象庁 [6]によると、放射強制力の合計は正であり、その結果、気候システムによるエネルギーの吸収をもたらしている。そして合計放射強制力に最大の寄与をしているのは、1750 年以降の大気中の CO₂ の増加である。

¹ <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>

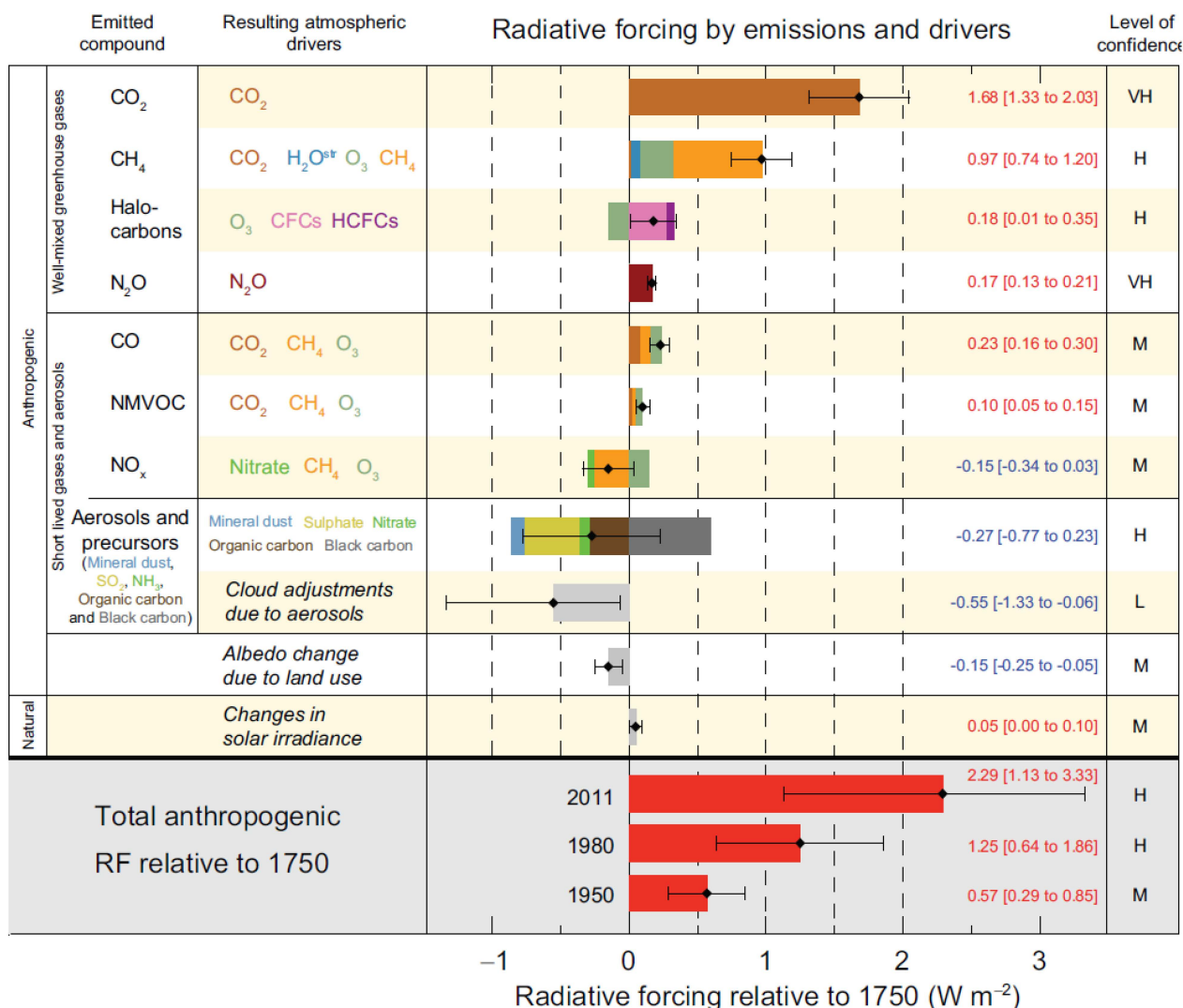


図 1-4 気候変動をもたらす主な駆動要因の、1750 年を基準とした 2011 年における放射強制力の推定値と要因ごとに集計された不確実性 [5]

図 1-5 は IPCC [5]による、世界の炭素循環の変化についての複数の観測指標である。図 1-5 のそれぞれの図について、(a) は大気中の二酸化炭素濃度、(b) は海面付近の海水の二酸化炭素分圧（青線）と、海水の酸性度を示す pH の現場観測値（緑線）である。これを翻訳した気象庁 [6]によると、大気中の CO₂, CH₄, N₂O は、少なくとも過去 80 万年間で前例のない水準にまで増加している。これらの中でも二酸化炭素濃度は、第一に化石燃料からの排出、第二に正味の土地利用変化による排出により、工業化以前より 40%増加した。海洋は排出された人為起源の CO₂ の約 30%を吸収し、海洋酸性化を引き起こしている。

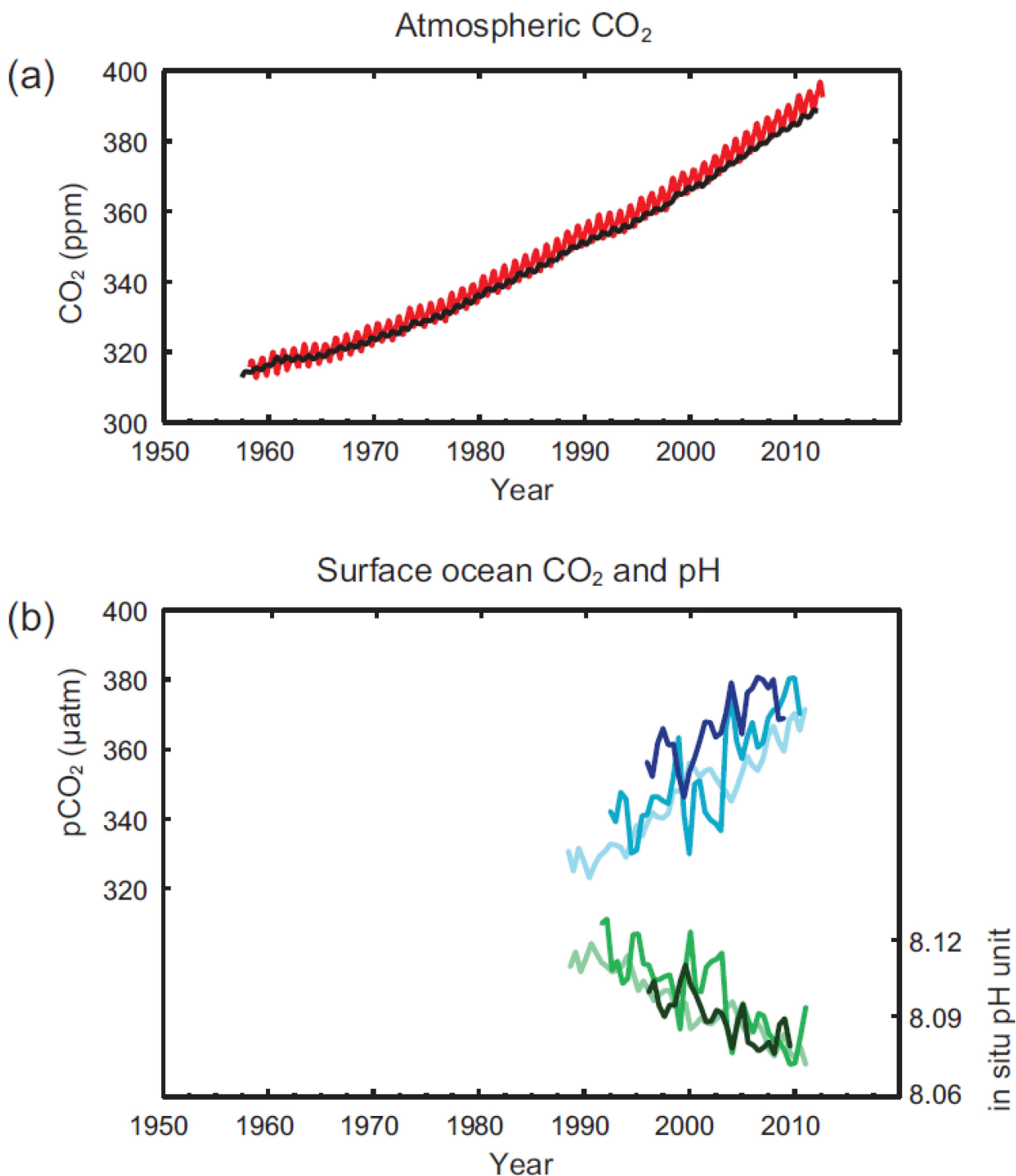


図 1-5 世界の炭素循環の変化についての複数の観測指標 [5]

図 1-6 は IPCC [5]による、世界全体の CO₂ の累積総排出量の関数として示した、様々な一連の証拠による世界平均地上気温の上昇量である。これを翻訳した気象庁 [6]によると、CO₂ の累積排出量によって、21 世紀後半及びその後の世界平均の地表面の温暖化の大部分が決定づけられる。気候変動の特徴の大部分は、たとえ CO₂ の排出が停止したとしても、何世紀にもわたって持続するだろう。このことは、過去、現在、及び将来の CO₂ の排出の結果による、大規模で数世紀にわたる気候変動の不可避性を表している。

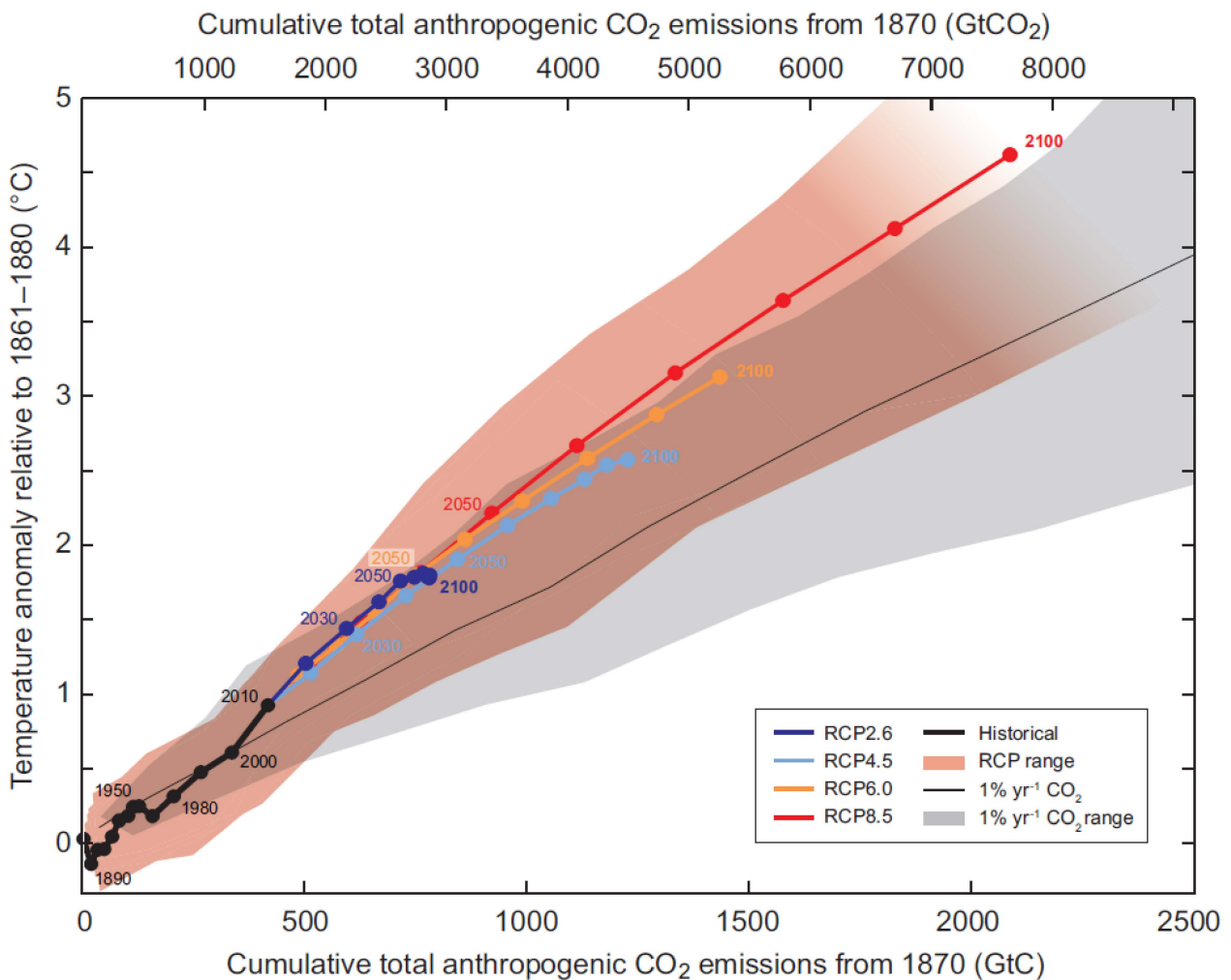


図 1-6 世界平均地上気温の上昇量 [5]

1.1.3. 自動車の課題

具体的な CO₂ 排出量の削減目標として国連は、2070 年までにゼロにすべきであると報告²している。そして近年、この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) [7]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。図 1-7 と図 1-8 は、GFEI [8]により試算された、新型車導入に伴う WTW (Well to Tank) と TTW (Tank to Wheel) 双方についての CO₂ 排出量の削減見通しが示されている。

² <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2014>

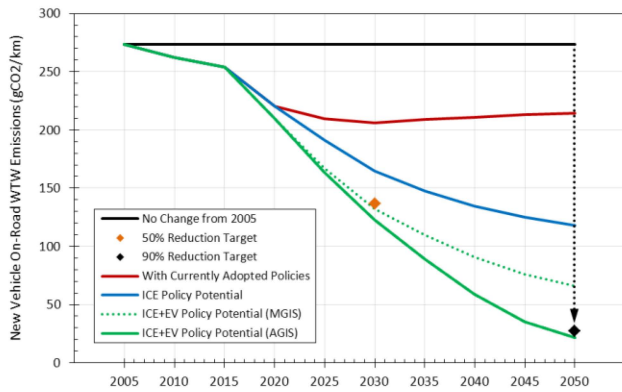


図 1-7 WTW CO₂ 排出量削減効果 [8]

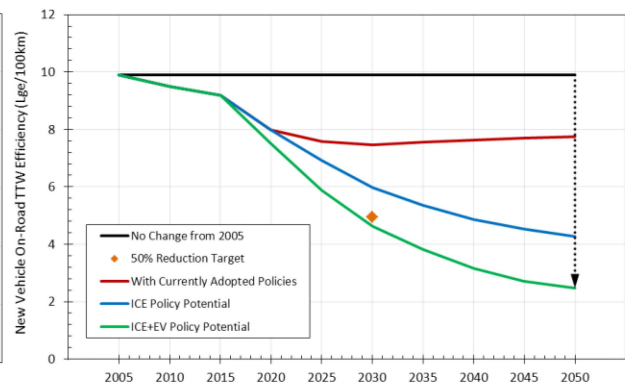


図 1-8 TTW CO₂ 排出量削減効果 [8]

次に図 1-7 と図 1-8 を基に GFEI [8]が見積もった、全体の WTW CO₂ 排出量を図 1-9 と図 1-10 へ示す。現在の見通しでは、WTW で 2000[Mtonnes]以上の目標未達である。これは現状の政策を維持する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。

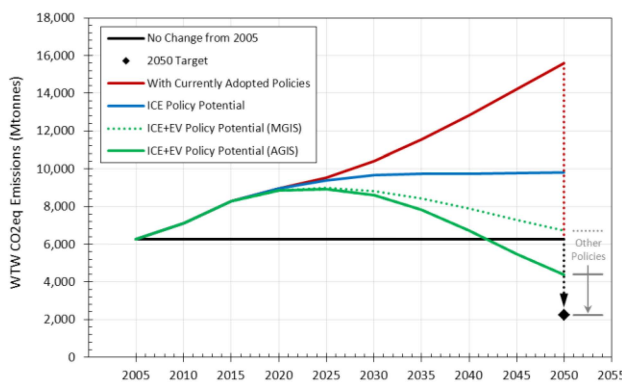


図 1-9 WTW CO₂ 排出量推計
(政策積み上げ) [9]

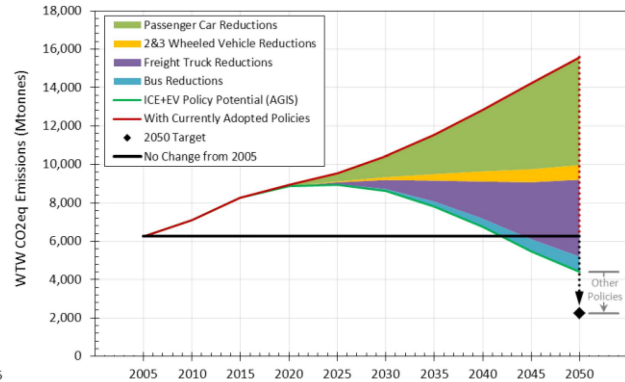


図 1-10 WTW CO₂ 排出量推計
(輸送機器別) [9]

1.1.4. エンジンの課題

CO₂ 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。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。

自動車の CO₂ 排出量規制値と燃費規制値について、ICTT [10]による今後の見通しはそれぞれ図 1-11 と図 1-12 へ示すとおりである。そして FOURIN [11] [12]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。

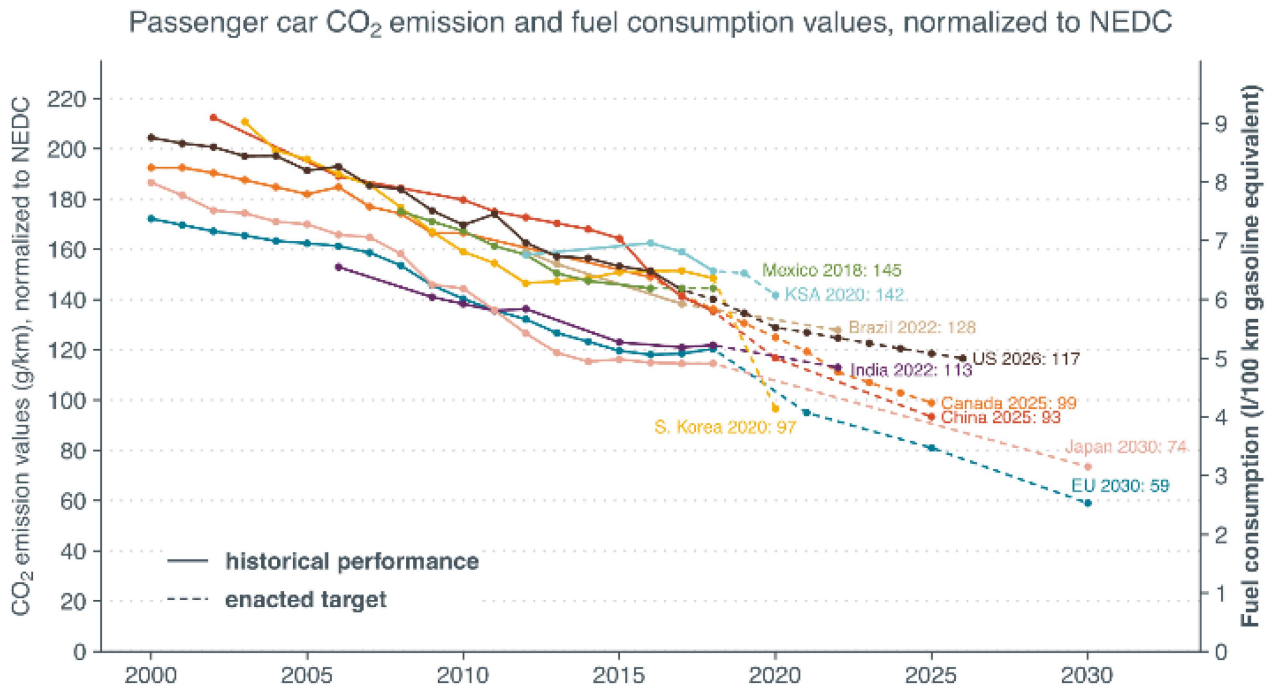


図 1-11 CO₂排出量規制値 [10]

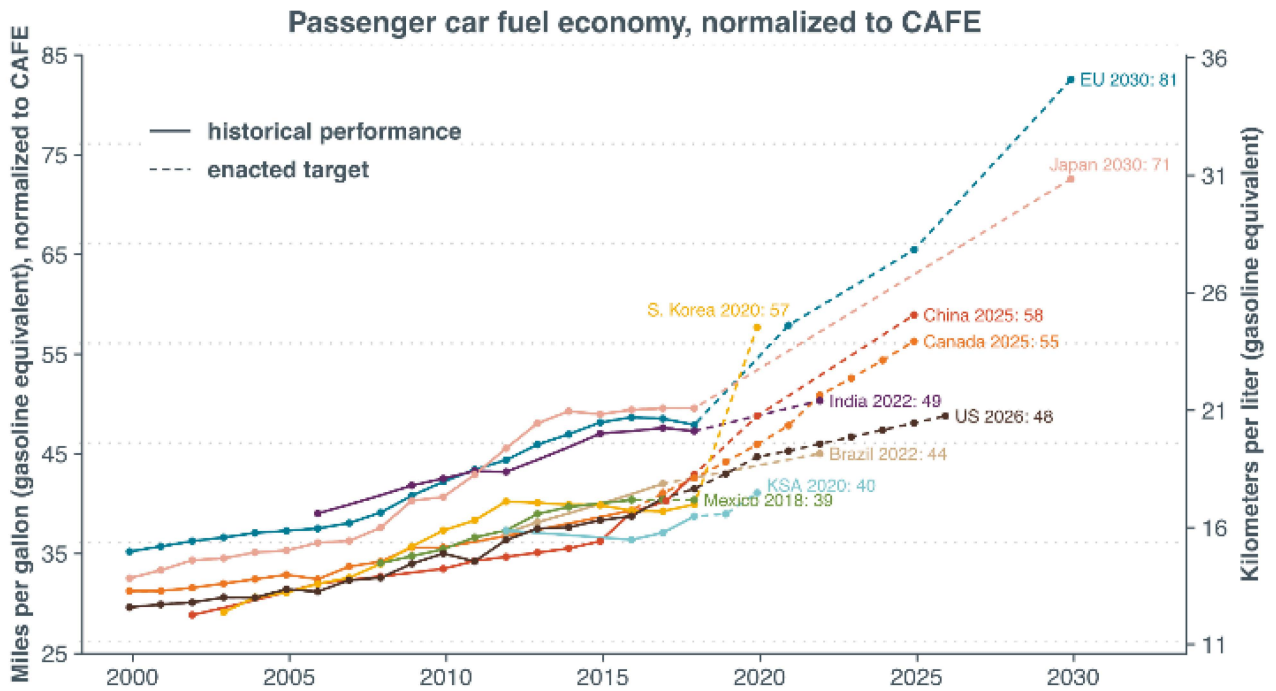


図 1-12 燃費規制値 [10]

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、自動車の燃費低減である。この自動車においては、ガソリンエンジンが多用されていることから、本研究においては、ガソリンエンジンの燃費低減を研究対象とする。

1.2.ガソリンエンジン

1.2.1.ガソリンエンジンの構成

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。

一般的なガソリンエンジンの構成を図 1-13 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。

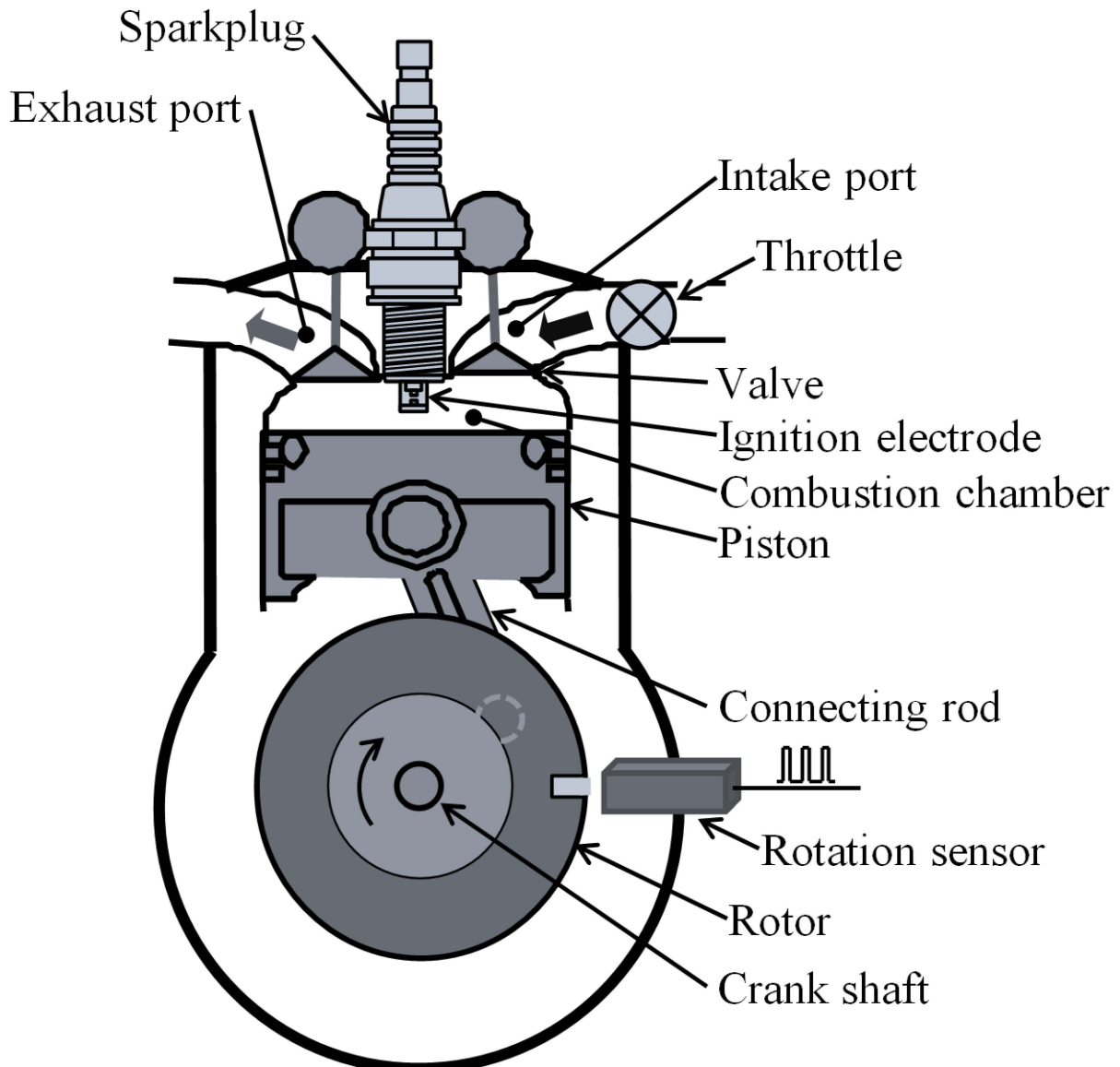


図 1-13 ガソリンエンジンの構成例

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 1-14 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ことで、火花が出力される。

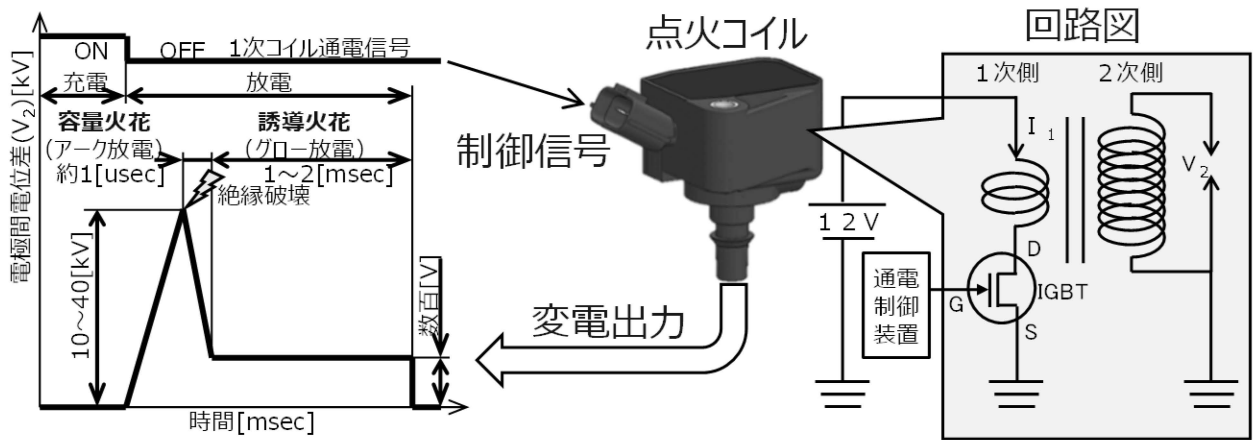
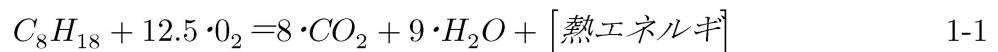


図 1-14 火花点火現象の概要

1.2.3. 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。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 1-15 へ示す。図 1-15 へ示すとおり，圧縮比の増大に伴い，熱効率も増大する。

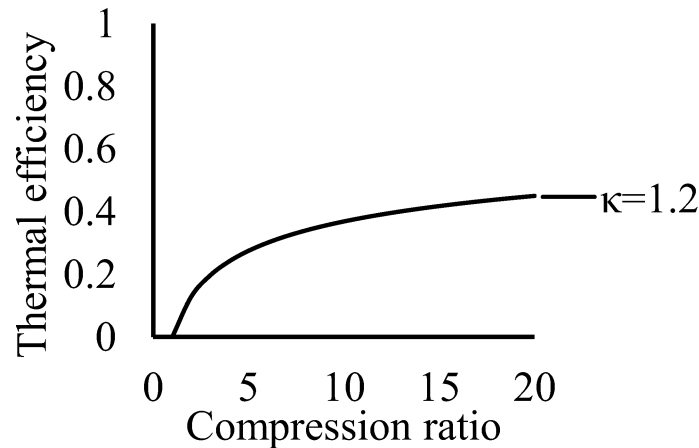


図 1-15 圧縮比と熱効率の関係

しかし，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。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。NO_xは，人体へ対して有害であることなどから，各国で排出量が規制されている。

図 1-16 は日本国内における NO_x の排出量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 の排出量規制値は 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，さら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。

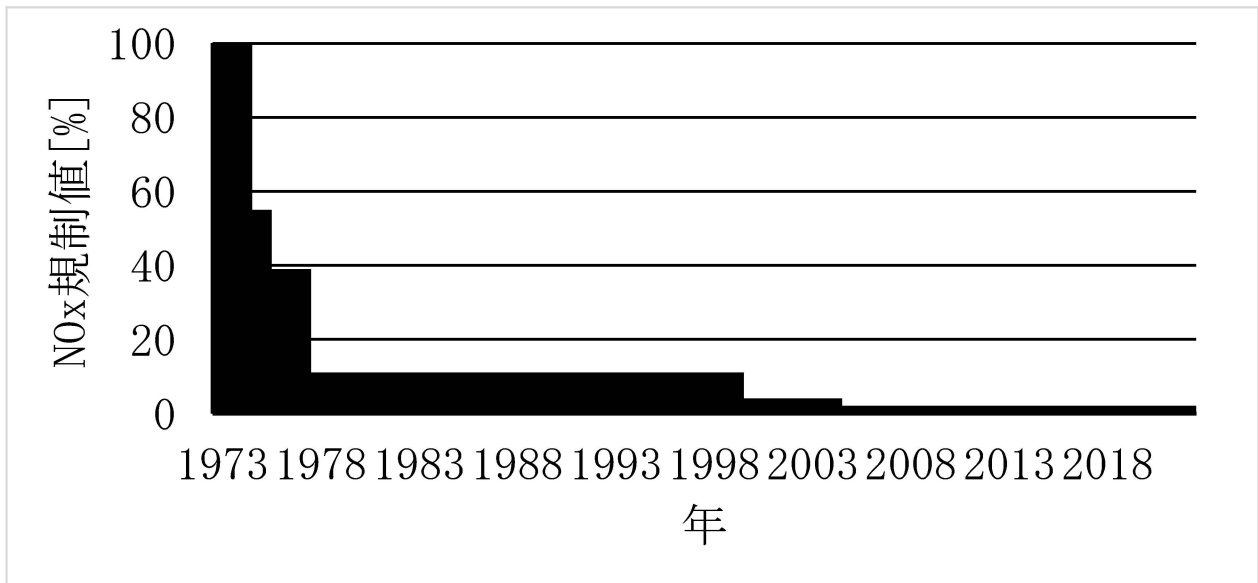


図 1-16 日本国内における NOx 排出規制値の遷移

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 [13] [14]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)

希釈燃焼は、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。この希釈燃焼による直接的な効果は、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。

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 1-17 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 1-18 へ示すように理論熱効率を向上できる。

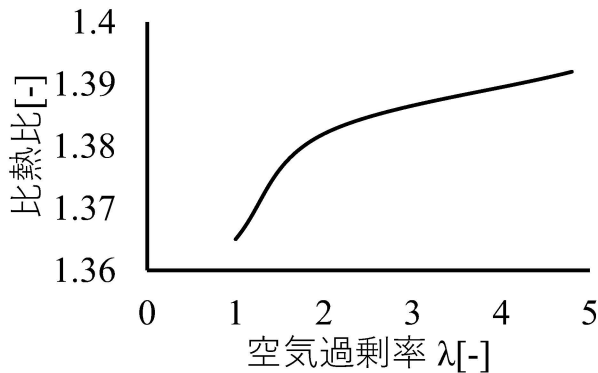


図 1-17 希釈率と比熱比の関係

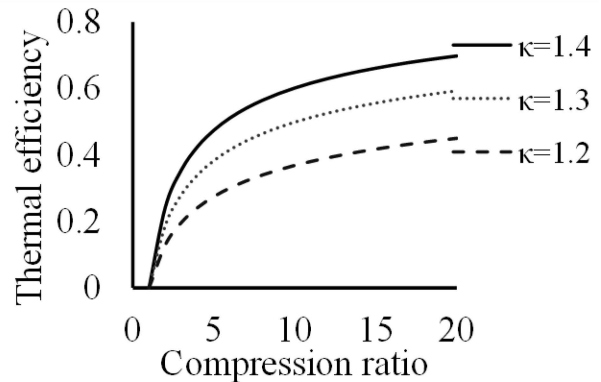


図 1-18 比熱比と熱効率の関係

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。エンジンの主な諸損失には、熱損失と機械損失とポンプ損失がある。そしてさらに主な熱損失には、冷却損失と排気損失とふく射損失があり、主な機械損失には、摩擦損失と補機駆動の損失がある。そのため、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、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

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、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。

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。そのため、希釈率の増大によって燃焼温度が下がることで、NO_x 排出量が減少する。特に $A/F > 30[-]$ になると、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。

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 1-19 は、Desmond [15]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 1-20 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 [16]。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 [17] [18]。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。

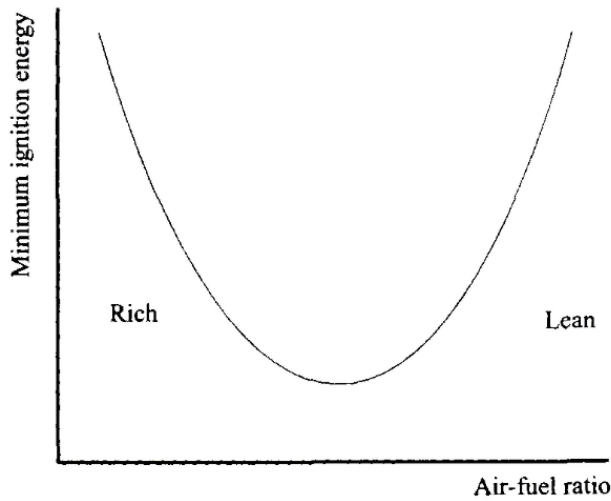


図 1-19 希釈率と最少点火エネルギーの関係 [15]

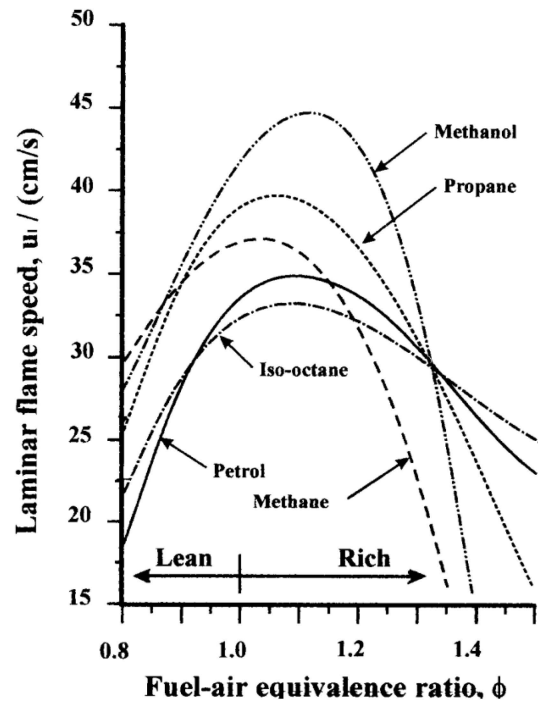


図 1-20 希釈率と燃焼速度の関係 [15]

1.4.2.ガソリンエンジンにおける希釈燃焼に関する既存研究

ガソリンエンジンへ希釈燃焼を適用する場合の要求として、草壁ら [19]が図 1-21 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 [20]や井上ら [21]より報告されている。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 [22], Ikeya ら [23], Nakata ら [24], 柿沼ら [25], 南波ら [26]によって検討されている。

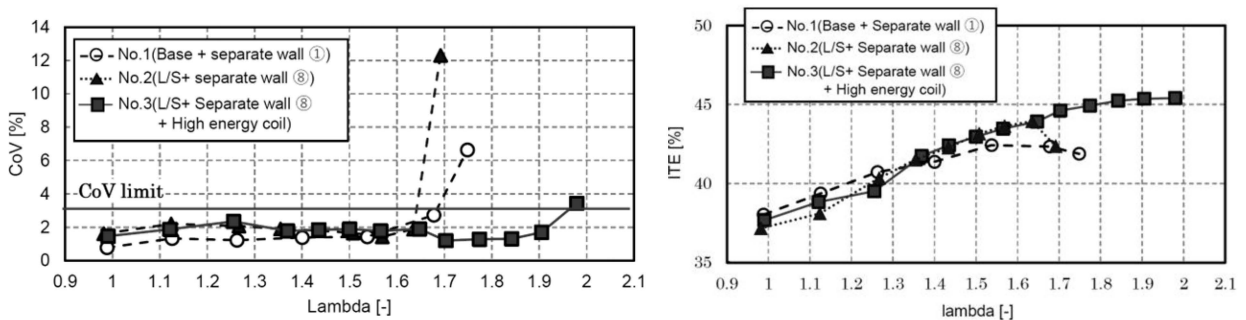


図 1-21 希釈燃焼への流動と点火エネルギーの影響 [19]

1.4.3.乱流強化と点火強化

乱流強化の評価方法についても検討が進んでおり、計算値と計測値の比較検証が進んでいる。しかし、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 [16]や Wei ら [27]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 [28], Walter ら [29], Shy ら [30], 緒方ら [31]によって述べられている。そこで緒方ら [32]は、様々な放電特性の点火コイルについて評価し、EGR 限界へ寄与する放電仕様を調査した。その結果緒方ら [32]や草壁ら [33]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。

1.4.4.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 [34]や白石 [35]によって考えられている。そして横森 [36]は、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 [37]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。

1.4.5.点火強化の副作用

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 [38], 緒方ら [31] [32], 西尾 [39], Hayashi ら [40]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 1-22)
- ・電費増大による正味燃費の悪化

1.5.希釈燃焼の副作用

これまでの様々な既存研究により、希釈燃焼の課題は低減してきた。今後さらに、希釈燃焼の作用効果を最大限にすることで、燃費や排気を最小化するためには、希釈燃焼による副作用の問題を解消する必要があると考える。希釈燃焼による副作用の主な問題には、「耐久性の低下」と、「電費の増大」の2つがある。これまで筆者らは、耐久性の低下についての解決手段を提案し、対策を完了している。そのため、本研究においては、「電費の増大」を研究対象とする。

これら2つの問題について、現時点の状況を以下へ説明する。

1.5.1.耐久性の低下

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 [21]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 [41]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実験結果の例を図 1-22 へ示す。これは、表 1-1 と表 1-2 の実験条件にて筆者ら [42]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。

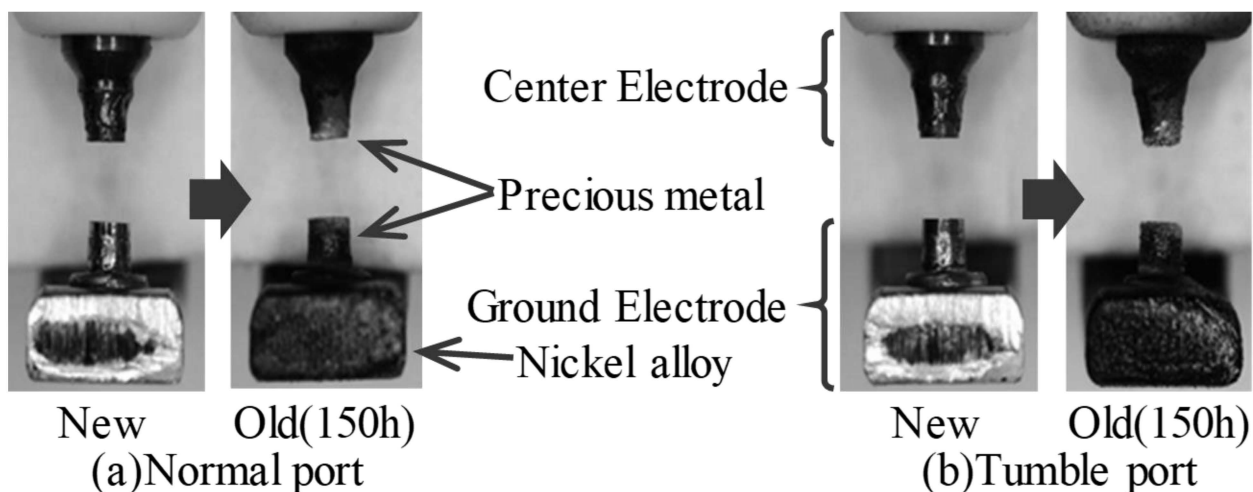


図 1-22 耐久評価における点火電極の外観例

表 1-1 実験用エンジンの仕様

No.	Index	Spec.	
		SCE	MCE
1	Engine		
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 1-2 実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

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。そのため筆者ら [42]は、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。よって、耐久性低下への対策は完了している。

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.電費の増大

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 [43]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 [31] [32]、坪井ら [41]、木村ら [44]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 [42]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。図 1-19、図 1-24、図 1-25 は、表 1-3 と表 1-4 の条件において筆者ら [45]が収録したデータを用いて調査した波形例である。

表 1-3 実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 1-4 実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[%]

図 1-19 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。

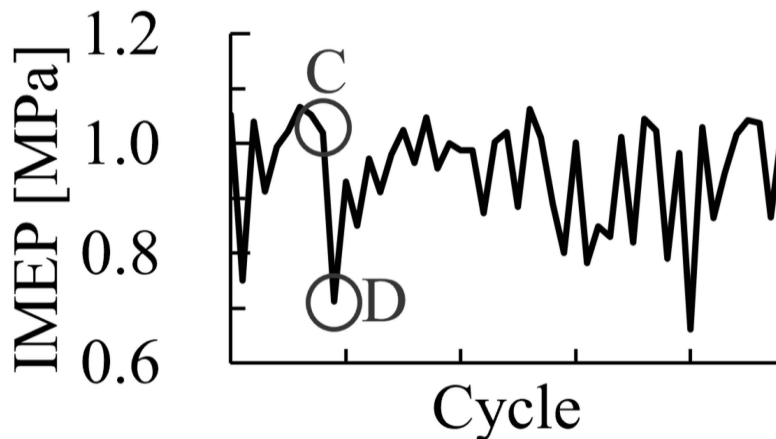


図 1-23 定常運転における図示平均有効圧力 IMEP の測定例

図 1-23 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 1-24, 図 1-25 へ示す。白石ら [34]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 [46]保木本ら [47]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。そのため筆者ら [48]は、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。

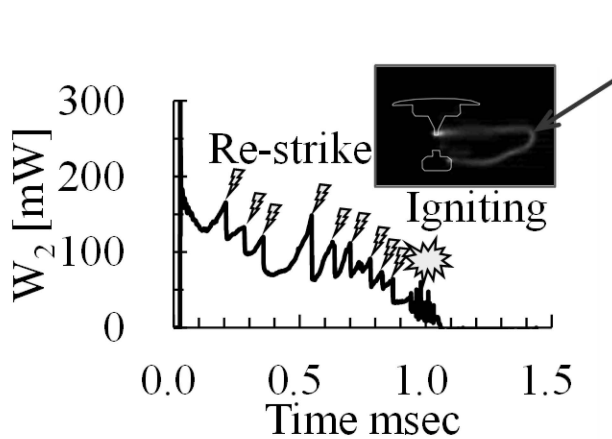


図 1-24 サイクル C の放電電力 W_2 波形例

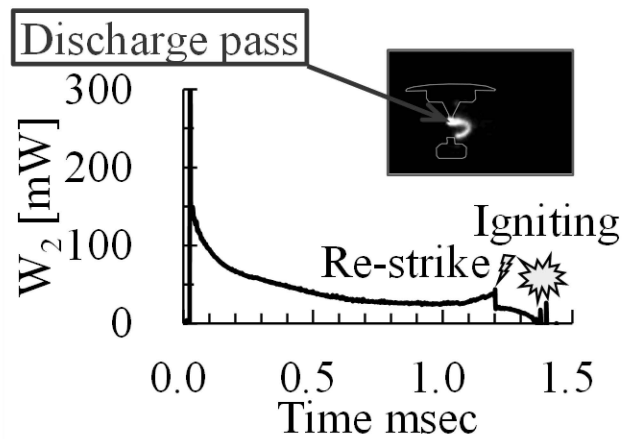


図 1-25 サイクル D の放電電力 W_2 波形例

1.6. 研究経過

希釈燃焼の課題に対する、筆者によるこれまでの研究の位置づけを示す。最初に、希釈燃焼時の燃焼不安定へ対応するために、筒内流動や点火エネルギーを強化している。

そして上記対応による、電費の増大を抑制するために、筆者らは電力需給差削減コンセプトを提案し、これの効果を実証している。

これは、従来方式の点火コイルの回路構成図 1-14 に対して、図 1-26 へ示すように、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。その結果、図 1-27 へ示すように、任意の期間へ点火エネルギーを増大できるようにした。

次に表 1-5 は、点火放電における電力需給関係の模式図を示している。各グラフの横軸は放電開始後の時間で、縦軸は需給電力である。先に述べた図 1-23 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 #B へ示している。次に #E は、D が C と同様の点火性能になるように、点火エネルギーを強化したものであり、緑色の要求エネルギーに対して、赤色の供給エネルギーが過大になっていることを想定している。そこで、点火エネルギー増大機能を用いて、点火エネルギーの時間配分制御を行うことで、燃焼要求電力と点火コイル供給電力の差を削減できる。具体的な削減内容は、表 1-5 の #E に対して、#A のように、電力需給差を削減することで、無駄な点火エネルギーを抑制するものである。

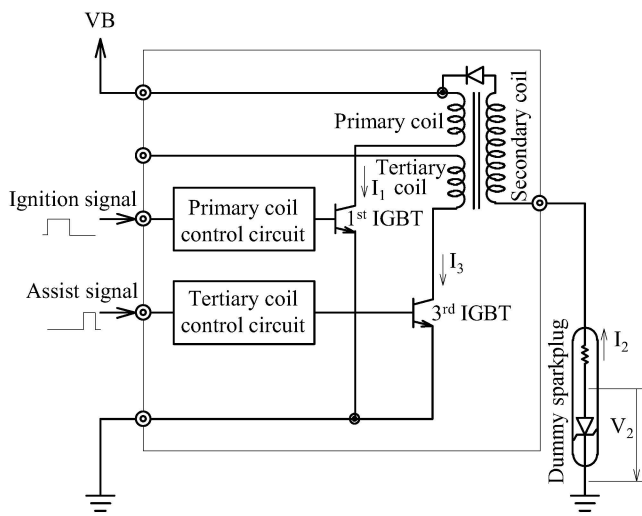


図 1-26 試作した点火コイルの構成仕様

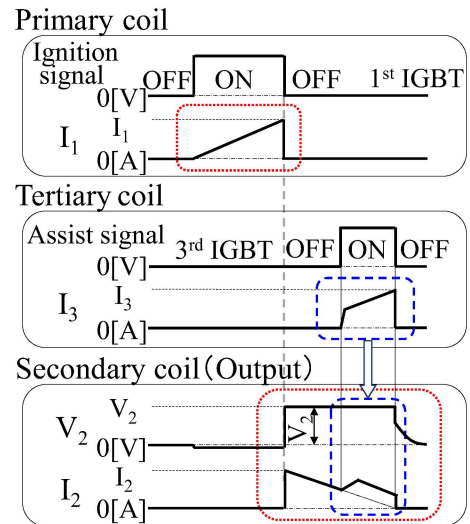


図 1-27 点火コイルの動作を表すタイミングチャート

表 1-5 点火放電における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	<p>Point C</p>	<p>Point D</p>		

しかしこれは、筒内の流動状態が常に最悪条件であることを想定しているため、無駄な点火エネルギーが消費されている。つまりこの点火エネルギー増大機能は、低流動な半失火サイクル D に対しては有効であるが、高流動な正常燃焼サイクル C においては不要であり、無駄な点火エネルギーとなる。

よって、この無駄な点火エネルギーを抑制するためには、将来予測手法により次の将来燃焼サイクルの流動を予測して、最適な点火エネルギーを適切な時期に出力する、点火制御が必要である。

1.7.既存研究

将来予測手法の中に、オンライン機械学習によるリアルタイム予測があり、様々な研究がこれまでも行われている。表 1-6 へ示すように、例えば、自動運転 [49]、空母着艦 [50]、地震早期警報 [51]などに関する先行研究がある。また、オンライン機械学習など、動的に新しいデータを獲得して、高速に学習し予測する手法が存在する [52] [53]。

表 1-6 既存研究

要求項目		Levenberg–Marquardt algorithm	Kalman filter	Recurrent Neural Network	Online Machine Learning		ARMA
		自動運転	空母着艦	地震早期警報	オンライン機械学習	オンライン機械学習	クランク軸回転速度予測
(1)	限られたコンピュータリソース	—	—	○	—	—	○
(2)	状況変化への対応	○	○	—	○	○	○
(3)	実用的なリアルタイム性能	—	○	○	—	—	—

○：本研究へ適用可能，—：明らかにされていない

文献番号	[49]	[50]	[51]	[52]	[53]	[54]
対応内容	表 1-7	表 1-8	表 1-9	表 1-10	表 1-11	表 1-12

表 1-6 の各既存研究における論文の概要および、その中で提案されたアルゴリズムの、1.8 章研究の目的で述べる要求事項 (1) (2) (3) への対応内容を、表 1-7 から表 1-12 へ示す。

表 1-7 既存研究 [49]における論文の概要

引用番号	[49]
タイトル	人間ドライバの操作特性を考慮した追従車両軌道予測
要旨	本稿では、ドライバの操作特性に基づいて後続車両の進路を予測する新しい手法を提案している。前方車両が割り込み車両との衝突を避けるために急減速すると、後続車両との事故につながるおそれがある。このような事故を防ぐためには、周囲の車両の将来の位置を予測することが有益である。既存研究でも同様の予測方法が提案されている。しかし、これらの研究では、予測性能はドライバの操作特性に大きく依存するにもかかわらず、ドライバの操作特性は考慮されていない。本研究では、人間のドライバが自動運転車に追従する走行シーンを想定している。提案手法は自動運転車に実装された。その結果、この方法は人間のドライバが操作する後続車両の軌道を予測することができた。
(1)限られたコンピュータリソース	計算能力に一定の限界がある場合において、カルマンフィルターは、計算の安定性が問題 ³ となるため、本研究に適用する際の問題点となる。
(2)状況変化への対応	人間ドライバの運転特性を推定するために、拡張カルマンフィルターの手法を用いた。
(3)実用的なリアルタイム性能	計算能力に一定の限界がある場合において、カルマンフィルターは、演算時間が問題 ³ となるため、本研究に適用する際の問題点となる。

表 1-8 既存研究 [50]における論文の概要

引用番号	[50]
タイトル	海上における空母の動きのリアルタイム予測の実現可能性
要旨	空母への航空機の着陸は、海上での飛行業務の中で最もデリケートな段階である。合理的な誤差範囲内で数秒の間隔で空母の動きを予測できる機能により、航空機の軌道がより滑らかになる。本稿は、さまざまな船舶や海象条件で測定されたピッチとヒーブのパワー密度スペクトルデータに基づいて、運動を予測できることを示した。
(1)限られたコンピュータリソース	計算能力に一定の限界がある場合において、カルマンフィルターは、計算の安定性が問題 ³ となるため、本研究に適用する際の問題点となる。
(2)状況変化への対応	リアルタイム演算に適応した離散時間カルマンフィルター予測の手法を用いた。
(3)実用的なリアルタイム性能	リアルタイムで船の動きのパワー密度スペクトルを取得するために、高速フーリエ変換アルゴリズム(FFT)の手法を用いた。

³ https://orsj.org/wp-content/or-archives50/pdf/bul/Vol.22_11_634.pdf

表 1-9 既存研究 [51]における論文の概要

引用番号	[51]
タイトル	地震動強度の傾向をリアルタイムに予測
要旨	本稿では、地震被害の強さを事前に予測し、地震緊急対策の効果を高めるために、地動強度の傾向をリアルタイムで予測するためのディープラーニングモデルを提案している。入力サンプルは、現在受信している地盤変動加速度のリアルタイムモニタリング記録である。モデルの学習と検証を行った結果、テストセットで75%の精度を示し、地盤変動強度のリアルタイム予測に有効であることがわかった。
(1)限られたコンピュータリソース	時間的位置によって異なるサンプリング周波数を分けることで、演算量を低減する手法を用いることで、PGA で予測した。
(2)状況変化への対応	畳み込みニューラルネットワーク (CNN) は、回転や拡張等の視点変換には向いてない ⁴ ため、本研究に適用する際の問題点となる。
(3)実用的なリアルタイム性能	他のネットワーク構造と比較して計算時間が短くなるモデルとして、FCNN (Fully Connected Neural Network) 手法を用いた。

表 1-10 既存研究 [52]における論文の概要

引用番号	[52]
タイトル	オンライン学習についての総合調査
要旨	オンライン学習は、多くの実世界のアプリケーションにおけるデータの継続的なストリームから学習するための有望な手法となっている。本稿では、基本的な考え方と主要な原則を体系的にレビューし、さまざまなアルゴリズムと技術を適切に分類することにより、オンライン機械学習文献の包括的な調査を提供することを目的としている。
(1)限られたコンピュータリソース	エンジン制御用の限られたコンピュータリソースで搭載可能か明らかにされていない。
(2)状況変化への対応	エンジンにおいて発生しうる状況の変化に対して対応可能かは明らかにされていない。(オンライン学習に関する一般的な手法の解説書である。)
(3)実用的なリアルタイム性能	エンジンの燃焼周期内に学習と予測の演算処理を完了できるかは明らかにされていない。

⁴ <https://medium.com/lsc-psd/aaai2020-hinton%E6%B0%8F-cnn%E3%81%AF%E3%82%B4%E3%83%9F%E3%81%A0-%E6%9C%80%E6%96%B0%E3%81%AEcapsule%E3%82%92%E8%A6%8B%E3%81%A6%E3%81%8F%E3%81%A0%E3%81%95%E3%81%84-f8caafcd3797>

表 1-11 既存研究 [53]における論文の概要

引用番号	[53]
タイトル	機械学習におけるオンライン学習のアルゴリズム
要旨	オンライン・アルゴリズムと機械学習は、どちらも過去の知識に基づいて現在を判断する問題を扱っている。これらの領域は、その重点と典型的な研究対象の点で異なっているが、計算機学習理論には、「オンライン・アルゴリズム」の枠組みにうまく適合する結果が多数存在する。オンライン・アルゴリズムの観点から特に興味深いと思われる、計算機学習理論の結果、モデル、および未解決問題について述べている。
(1)限られたコンピュータリソース	エンジン制御用の限られたコンピュータリソースで搭載可能か明らかにされていない。
(2)状況変化への対応	エンジンにおいて発生しうる状況の変化に対して対応可能かは明らかにされていない。(オンライン学習に関する一般的な手法の解説書である。)
(3)実用的なリアルタイム性能	エンジンの燃焼周期内に学習と予測の演算処理を完了できるかは明らかにされていない。

表 1-12 既存研究 [54]における論文の概要

引用番号	[54]
タイトル	ARMA モデルを用いたクランクポジションのリアルタイム測定
要旨	本稿では、自動車用エンジンのクランク角度をリアルタイムで計測するための新しい手法を提案している。クランク角の計測には、ロータリエンコーダの代わりにクランクポジションセンサを用いることで、手動による駆動の問題点を解決し、リアルタイムでの計測を可能にした。計測値に基づいて設計された自己回帰移動平均 (ARMA) モデルを用いてエンジン回転数予測モデルを設計することで、十分な精度を得ることに成功した。
(1)限られたコンピュータリソース	クランクポジションセンサのシグナルプレート形状を基に、モデル次数を最小化する手法を用いることで、モデル構築・予測時の計算時間の増加および、オーバーフィッティングによる悪影響を同時に低減した。
(2)状況変化への対応	逐次型のパラメータ推定の手法を使用して ARMA モデルを構築した。
(3)実用的なリアルタイム性能	オフライン学習を用いているため、エンジンの燃焼周期内に学習と予測の演算処理を完了できるかは明らかにされていない。

1.8.研究の目的

しかし、エンジン特有の経時劣化（図 1-22）や製造個体差に加えて、リアルタイムに環境が変化するシステムに対して、リアルタイムな学習と予測の双方を実現する手法はこれまで存在しない。そして、リアルタイム予測をエンジンへ適用する場合、実際には要求事項 (1) (2) (3) への対応が必要になる。

そして、これらがどう実現されるのかは明らかでは無い。

(1) 限られたコンピュータリソース（車両搭載マイコン上での計算が必要なため）

(2) 状況変化への対応（エンジンは製造個体差や経時劣化の影響を受けるため）

(3) 実用的なリアルタイム性能を出す（燃焼サイクル周期内での演算が必要なため）

そのため、上記 (1) (2) (3) を実現するような手法と実装方法を明らかにすることを研究の目的とする。

1.9.研究の貢献

以上の検討結果を整理して、本研究の位置づけを表 1-13 へ示す。要求事項 (1) (2) (3) に対して、(a) (b) の対応を行うことで、次の貢献への積み重ねを期待できる。

対応 (a) AR モデルと FPGA による限られたリソースによる実用的な手法の開発。

機械学習モデルの中でも計算リソースが小さい AR モデルを FPGA へ実装することで、リアルタイムな将来予測を実現する。FPGA の限られた計算リソースと予測精度の間に生じるトレードオフを低減するため、実信号を用いた予測結果の補正ロジックを検討する。

対応 (b) 実装時に予測性能を保ちつつ価格を下げるためのセンサ数と性能のトレードオフの検証。

高精度な将来予測結果を活かすためには、点火コイルの高精度な充放電時期制御が必要である。しかし、エンジンは数多くの部品が連成していることなどから、角度誤差が懸念される。実用化に向けて、角度誤差と対策コストの関係を調査する。

表 1-13 本研究の位置づけ

対応\要求事項		(1)	(2)	(3)
		限られたコンピュータリソース	状況変化への対応	実用的なリアルタイム性能
(a)	ARモデルとFPGAによる限られたリソースによる実用的な手法の開発。（第2章）	○	○	○
(b)	実装時に予測性能を保ちつつ価格を下げるためのセンサ数と性能のトレードオフの検証。（第3章）		○	○

これらにより，実用的なエンジンでの点火制御を可能とするような，オンライン機械学習の手法と実装方法を明らかにする．

予測対象について，ガスの点火性能はガス流動強さの影響を受ける．また，供試される定負荷型エンジンにおいて，ガスの点火性能はクランク軸出力とクランク軸回転周期へ影響する．このため，ガス流動強さの予測指標として，クランク軸回転周期を用いることとする．

1.10.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，研究対象を設定する．

第2章：クランク軸回転周期の予測を構築する．

第3章：クランク軸角度の高精度予測とセンサコスト抑制のトレードオフを調査する．

第4章：検討結果をまとめ，総括を行う．

1.11.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．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，燃費と失火の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．筆者らは過去の研究において，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．

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．

2つの副作用への対策技術として、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。

そして、点火エネルギーの時間配分制御により、点火の電力需給差を削減した結果、耐久性と電費を同時に改善できた。

しかしこれは、筒内の流動状態が常に最悪条件であることを想定しているため、無駄な点火エネルギーが残っていることが懸念される。この無駄な点火エネルギーを抑制するためには、次の将来燃焼サイクルの流動を予測して、最適な点火エネルギーを適切な時期に出力する、点火制御が必要である。

この将来予測手法について、リアルタイム予測をエンジンへ適用する場合、実際には(1)(2)(3)への対応が必要になる。そして、これらがどう実現されるのかは明らかでは無い。

- (1) 限られたコンピュータリソース（車両搭載マイコン上での計算が必要なため）
- (2) 状況変化への対応（エンジンは製造個体差や経時劣化の影響を受ける）
- (3) 実用的なリアルタイム性能を出す（燃焼サイクル周期内での演算が必要）

そのため、上記(1)(2)(3)を実現するような手法と実装方法を明らかにすることを研究の目的とする。

第2章 クランク軸回転周期の予測

2.1.はじめに

既に述べたとおり、熱効率向上策のひとつに、燃料と空気の混合気（以下、混合気）を空気や既燃ガスなどで希釈する方法がある。しかし、希釈率の増大に伴い、混合気の点火性能は低下する。混合気の点火性能低下により、燃焼サイクル変動 [55] [56]が大きくなると、エンジンの振動は増大する。このエンジン振動が設計上のボトルネックとなり、熱効率最大となる高い希釈率へ設定できないという問題がある。そしてこの燃焼サイクル変動の主な要因には、混合気濃度のサイクル変動がある [21]。

また点火性能は、混合気濃度と火花放電のエネルギーが主に影響する [45]。そのため、より高い希釈率でも点火させるために、火花放電のエネルギー強化 [42]や、放電経路から混合気への伝熱効率を向上し、点火性能を確保する手法 [48]が提案されている。しかしこの手法では、高い希釈率における混合気の濃度が最も低い条件に合わせて火花放電の点火性能を決めることになる。その結果、混合気の濃度が高い燃焼サイクルにおいて、火花放電のエネルギーは供給過剰となるため、電費の悪化が懸念される。

そこで放電エネルギーの需給バランス [57]を改善するためには、混合気の点火性能の将来予測が重要となるため、これらの予測に関する研究が行われてきた [58] [59] [60] [61]。

しかし、ガソリンエンジンにおける筒内ガスの点火性能は、筒内ガス流動 [62] [63] [64]、燃料供給量、筒内の燃料分布 [16]、放電挙動 [65]など、乱流や化学反応を含む複雑な現象の影響を受けるため、物理式を用いた予測モデルの構築は困難である [66]。

物理モデルの代替候補の一つに、統計モデルがあり、これは比較的エンジン内部の特徴をとらえた柔軟な予測モデルの構築が可能という特徴がある。この統計モデルの一つに、時系列解析があり、一般的に時系列データにおいて周期性などを有する場合に有効である。ガソリンエンジンへの時系列解析の適用例として、例えば中村らは、クランク軸回転周期の将来予測精度を数値実験で検証している [54]。

ここで一般的なエンジンの模式図を、図 2-1 へ示す。エンジン燃焼室 (Combustion chamber) 内での点火により混合気が燃焼し、燃焼圧力の変化はピストン (Piston) の上下運動へ変換される。さらにこのピストンの上下運動はコンロッド (Connecting rod) を介してクランク軸 (Crank shaft) の回転運動へ変換される。一般的なエンジンにおいて、クランク軸に装着された回転板 (Rotor) には、切り欠き加工がされており、クランク

軸回転センサ (Rotation sensor) へ内蔵したホール素子などが距離の変化を電圧へ変換することで、クランク軸の1回転あたり1パルスのクランク軸回転周期信号を出力する。

つまり、点火性能とクランク軸の回転周期は連動していることから、エンジンの負荷が一定の運転中においては、クランク軸の回転周期は点火性能の指標となる [67]。そのため、過去のクランク軸回転周期の履歴から、将来のクランク軸回転周期を予測できれば、間接的に点火性能の将来を予測できる可能性がある。ここで問題となるのが、点火性能の将来予測を用いた燃焼サイクルごとのフィードバック制御の実現には、少なくとも燃焼サイクル周期内に予測計算を行う必要があることである。この燃焼サイクルは、4サイクルエンジンではクランク軸2回転分に相当し、例えば回転速度 $N_e=3000[\text{rpm}]$ ⁵ の場合は $40[\text{ms}]$ となる。

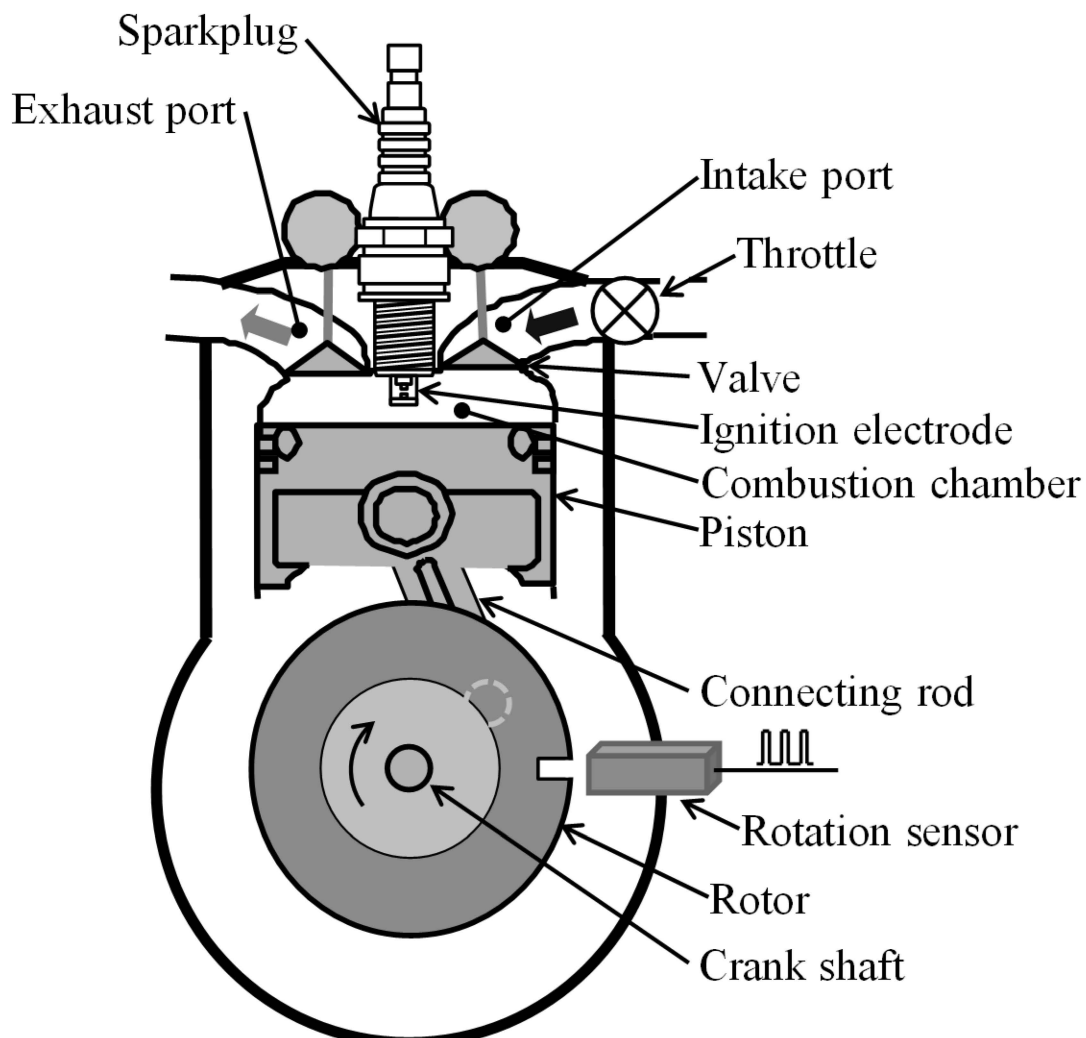


図 2-1 エンジンの模式図

⁵ Number of rotations of the Engine, Revolutions Per Minute

回転周期予測の計算時間は、少なくともこれ以下にする必要があるだけでない。今後の排気や安全などに関する規制強化 [68]に伴い、さらにエンジン制御の計算量は増大して、ECU⁶ 計算リソースの枯渇が懸念される。また通常のプロセッサでは、計算内容の組み合わせによって計算時間が変化するため、時間確度が低いという問題もある。そのような背景から、計算時間が長い上に計算コストが高い、統計モデルを用いた将来予測機能の実用化は限定的になっている。

このように計算コストと汎用性（様々な種類のエンジンで使える共通的な要求機能）の高い機能については、並列処理による高速計算を特徴とする、ASIC や FPGA といった独立した計算機構を導入することで、安価に計算リソースの枯渇へ対応することが可能と考えられる。

そこで、本論文では、高速かつ高精度な将来のクランク軸回転周期の予測を実現するため、時系列解析 [69]の中で最も基本的かつ拡張性が高い AR モデルを、FPGA によってリアルタイムに学習・予測する手法を提案する。AR モデルを採用した理由は、以下の3点である。(1) エンジンの掃気効率は 100[%]にはならないことから、過去のデータが将来予測へ影響すると考えられる。(2) 本研究で使用する供試エンジンの運転条件が一定であるため、目的変数であるクランク軸の回転周期には定常性があることから AR モデルで十分な予測精度を実現できると考えられる。(3) 学習と予測の際の計算効率の観点から、ARMA モデルのようなより高度な時系列解析モデルよりもパラメータ数を削減可能である。

アルゴリズムのハードウェア化については、様々な関連技術が提案されてきた。例えば、三角関数や対数関数を高速に演算するアルゴリズム [70]や、FPGA を用いた誤差逆伝搬法の実装 [71] [72]、ネットワークトラフィックの異常検出 [73]などの先行研究がある。本研究は、時系列予測手法の AR モデルに着目し、パラメータ推定のためのアルゴリズムを FPGA へ実装し、リアルタイムな学習および予測を実現した点で、既存研究とは異なる。

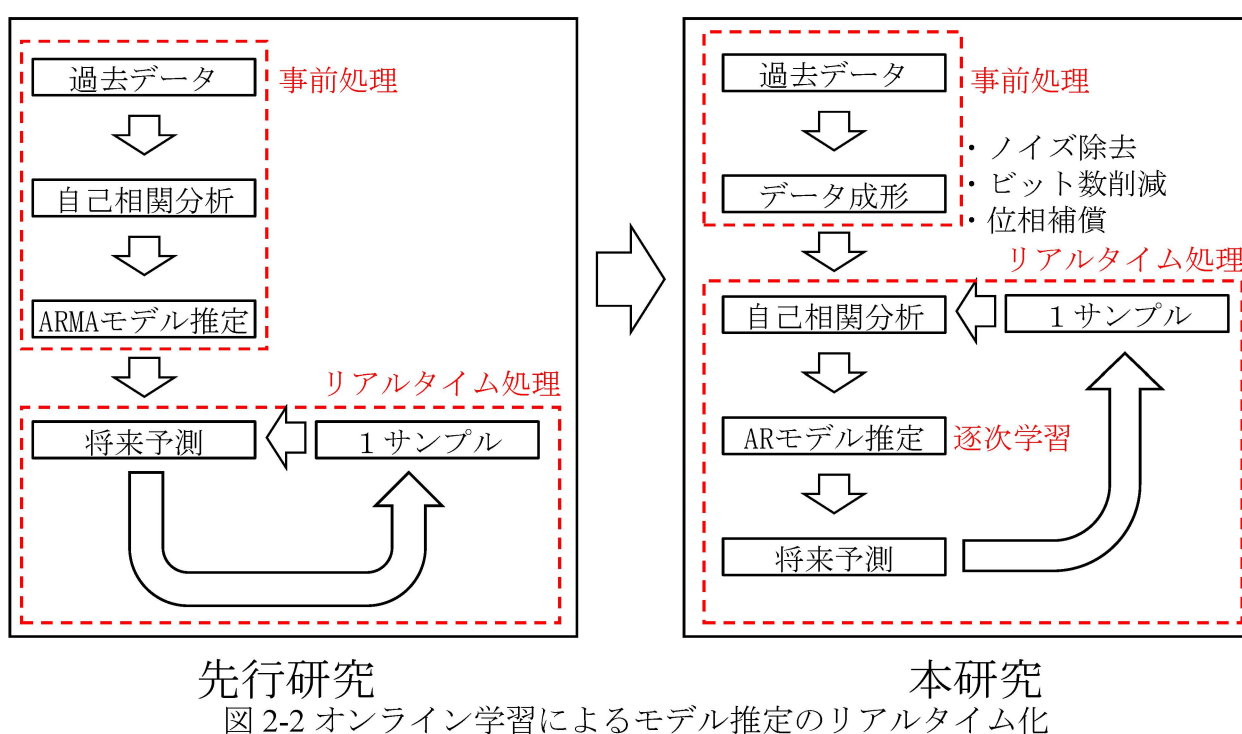
また、本研究では、Xilinx 社製の低価格型 FPGA デバイスである SpartanTM-6⁷を採用し、予測手法を実装する。これは、一般的に、ガソリンエンジンが多用される自動車においては、計算用集積回路に対して高い信頼性と低いコストが要求されるため、実用化や量産化を考慮する場合には、長期間の市場実績を積んだ部品にも対応させる必要があるためである [74]。しかし、SpartanTM-6 はハードウェアリソースが少ないことから、高い分解能や複雑な計算が難しく、浮動小数点を用いた計算へも対応していない。そのため、低い分解能の固定小数点しか扱えず予測精度への影響が懸念される。

⁶ Electronic Control Unit

⁷ <https://japan.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6.html>

このトレードオフ関係を解消するための予測アルゴリズムを考案し、FPGA による並列計算に基づき、図 2-2 の右側へ示すリアルタイムなモデル学習を実現した。これにより、エンジンの製造個体差や経時劣化などによる予測誤差の低減を期待できる。

このアルゴリズムを用いて、エンジンの実信号を用いたリアルタイムシミュレーションの実験を行った結果、FPGA を利用しない AR モデルによる予測と同等以上の予測精度が得られた。なお、図 2-2 の左側へ示す先行研究 [54]では、ARMA モデルを使用しており、モデル推定を事前に行っている一方で、本研究ではハードウェアの特性に対応するためのデータ成形を行い、AR モデルのモデル推定と予測の双方をリアルタイムに行うという点で異なる。



本研究において、ASIC でなく FPGA を利用した理由は、表 2-1 へ示すように、ASIC は低コストかつ小形のため最終製品用途には適しているが、開発コストと開発期間が大きくなる問題があるからである。本研究の成果は ASIC を利用した最終製品にも適用できる。

表 2-1 計算用集積回路の特性比較⁸

	開発期間	開発費	コスト	性能	柔軟性	サイズ
プロセッサ	優	優	良	可	良	良
FPGA	優	優	可	良	優	可
ASIC	可	可	優	優	可	優

本論文の貢献は次の通りである。(1) ガソリンエンジンのクランク軸回転周期の予測というリアルタイム性能が必要な環境において、高速かつ高精度な予測計算を行うための手段として、ARモデルに着目し、FPGAを用いてリアルタイムにモデルを学習・予測する方法を提案する。(2) 実際のエンジンの信号を用いたリアルタイムシミュレーションにより、提案手法がエンジン回転周期以内で既存の最高性能の手法と、同等以上の精度が得られることを示す。

2.2.前提知識：ARモデル

本研究における将来予測アルゴリズムには、ARモデル [75]を採用している。一般的なARモデルの式 (3-1) を示す。

$$y_t = c + \sum_{i=1}^M a_i y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3-1)$$

ここで、 t は時刻、 y_t は将来値、 y_{t-i} は過去データ、 M はモデル次数、 a_i は重み係数、 c は定数項、 ε_t は誤差項を表す。

式 (1) を基に Collomb が提案した将来予測式 (3-2) [76]は、マイナスを含み、定数項を省いているが、実用上はオフセットとスケール処理を追加することで対応できる。誤差項については、ノイズ除去の処理を入力データに施したためモデルの式に含めていない。

$$\hat{y}_t = - \sum_{i=1}^M a_i y_{t-i} \quad (3-2)$$

ここで、 \hat{y}_t は将来予測値を表す。

⁸ <https://emb.macnica.co.jp/articles/8204/>

AR モデルのパラメータ推定方法は一般的に、Yule-Walker 法、最尤法、最小二乗法、PARCOR 法、などがある。この中で Yule-Walker 法については、方程式を効率的に解く方法として、レビンソン・ダービン再帰法 (Levinson-Durbin Recursion) というアルゴリズムがある [77]。はじめに、AR モデルの係数に対する方程式である Yule-Walker 方程式 (3-3) を示す。

$$R_k + \sum_{i=1}^M a_i R_{k-i} = 0 : k = 0, 1, \dots, M \quad (3-3)$$

これらの式をすべての a_i について解くことで、予測モデルのパラメータをこれまでの時系列データから学習できる。ここで、 R_k は自己相関であり、これまでに観測された時系列データ点の集合を $\{x_t | t = 0, 1, \dots, N-1\}$ とすると、式 (3-4) のように定義される。

$$R_k = \sum_{t=0}^{N-k-1} x_t x_{t+k} \quad (3-4)$$

式 (2) を次数の方向へ逐次的に解く方法がレビンソン・ダービン再帰法であり、 m 次までのモデルのパラメータ $a_i^{(m)}$ が既知とすると、 $m+1$ 次モデルのパラメータ $a_i^{(m+1)}$ を求める漸化式 (3-5) は次のようになる [78] [79]。

$$\begin{cases} a_i^{(m+1)} = a_i^{(m)} + \lambda_{m+1} a_{m+1-i}^{(m)} : i = 1, 2, \dots, m \\ \lambda_{m+1} = -\frac{1}{\sigma_m^2} \left(R_{m+1} + \sum_{i=1}^m a_i^{(m)} R_{m+1-i} \right) \\ \sigma_{m+1}^2 = (1 - \lambda_{m+1}^2) \sigma_m^2 \\ \lambda_1 = R_1 / R_0 \\ \sigma_1^2 = (1 - k_1^2) R_0 \end{cases} \quad (3-5)$$

ここで、 λ_k は補助変数である。この更新式を用いて、次数 M のモデルパラメータを再帰的に求めることで、最終的な予測モデルのパラメータを学習できる。

2.3.提案手法の全体像

本研究で提案する評価装置群を図 2-3 にて説明する。これにより、(1)AR モデルの計算に求められるリアルタイム性能の必要性和、(2) AR モデルの入力データへのノイズを削減する工夫について述べる。

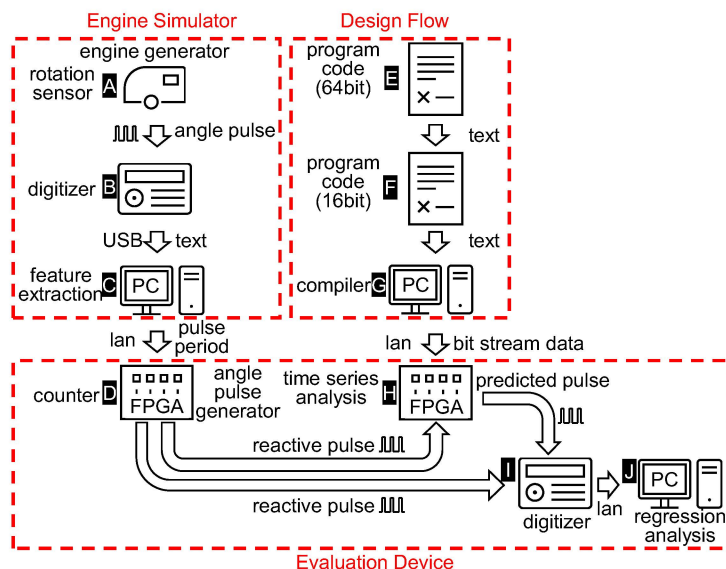


図 2-3 評価装置群

燃焼サイクル周期の予測精度を評価するため、図 2-3 左側のエンジンシミュレータ (A~C) と、図 2-3 右側の設計フロー (E~G) と、図 2-3 下部の評価装置群 (D, H, I, J) の構成とした。実際には、PC (C, G, J) と FPGA (D, H) について、それぞれへ複数の機能を搭載することにより、物理的には各 1 台で構成している。また、本研究におけるプログラム開発ツールには、LABVIEW® 2019SP1⁹を用いた。これの FPGA 開発モジュールへ備わった、シングルサイクルタイミングループ (SCTL)¹⁰機能を用いることで、高速化と効率化の両立を図るものとする。

2.3.1. Engine generator (A) ¹¹

一般的に、ガソリンエンジンの熱効率は、クランク軸回転速度や出力トルクなどの運転条件によって熱効率が異なる。しかし、ガソリンエンジンを搭載した自動車の要求出力は、ドライバや走行環境により変動する。要求出力の変動状態において、熱効率が最も高い運転条件を維持する方法の一つに、車載の蓄電池を大容量化したシリーズハイブリッドがある [80]。これは、要求出力の変動分を蓄電池が吸収するため、最大の熱効率となる一定の運転条件で長時間稼働できるようになる。そのため供試エンジンには、ク

⁹ LABVIEW は National Instruments 社の登録商標です。

¹⁰ Single Cycle Timed Loop: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000P8sWSAS&l=ja-JP>

¹¹ 本田技研工業製 EU9i

クランク軸回転センサが内蔵された汎用発電機を用いた。なお、1.4 章において、希釈燃焼の課題を述べているが、設定される希釈率は一定ではないため、様々な希釈率への対応が必要である。そこで、最も将来予測が難しい運転条件として、クランク軸回転周期の変化が最小となる、希釈率ゼロ（ストイキ燃焼）にて、運転することとした。発電機の仕様を表 2-2 へ示す。

表 2-2 発電機の仕様

No.	Index	Specification
1	Type	Air-cooled 4-stroke single-cylinder OHV
2	Total displacement	49.4[cm ³]
3	Fuel type	Unleaded gasoline for automobiles
4	Rated output	900[VA]
5	Starting method	Recoil starter (manual)

図 2-4 ヘデジタイザ (B) により収録した、供試エンジンが出力するパルス信号の波形例を示す。

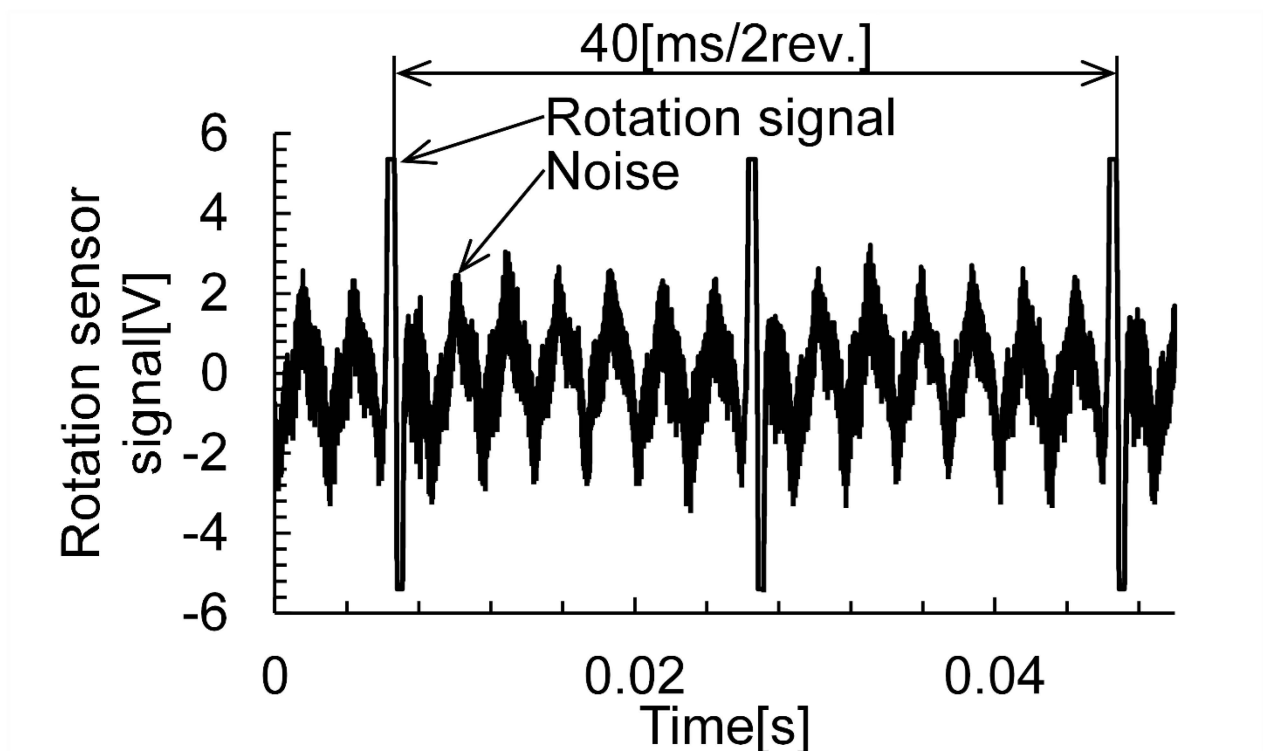


図 2-4 パルス信号の波形例

図 2-4 のパルス周期より、発電機のエンジンクランク軸回転速度は 3000[rpm.]一定である。図 2-4 へ示すように、パルス信号の波形には、発電によるものと思われる、ノイ

ズが重畳している。このパルス信号を直接的に予測装置へデジタル信号として入力した場合、予測誤差の増大が懸念される。そのため、パルス信号をデジタイザ (B) でアナログ収録したデータから、PC (C) でノイズ成分を除去した後に、カウンタ回路 (D) にてパルス周期情報を再生出力することとした。

2.3.2. Digitizer (B, I) ¹²

表 2-3 ヘオシロスコープの機能に近い、デジタイザの仕様を示す。

表 2-3 デジタイザの仕様

Resolution	8[bits]
Voltage Levels Range (Vpk-pk)	10[V]
Timebase frequency	50[MHz]
Timebase accuracy	±50[ppm]
Input coupling	DC

クランク軸回転周期の予測精度を検証するためには、計測誤差を低減する必要がある。標本数について検討したところ、エンジンのクランク軸回転速度が 3000[rpm.]の場合、4 サイクルエンジンの燃焼周期は 40[ms]である。これに対して、十分にサンプリング頻度が高い 222[ns]をサンプリング周期とした。また量子分解能について、本研究においてはノイズ除去を目的としているため、8[bit]で充分であると判断した。エンジン運転中に約 3 分間の連続収録を行なった結果、定常状態で 4844 燃焼サイクル分の本実験用評価データを収録できた。

2.3.3. Feature extraction (C) ¹³

既に述べたとおり、図 2-3 における Feature Extraction は PC (C) で実装する。この PC において、デジタイザ (B) でアナログ収録したパルス波形から燃焼サイクルの周期情報

¹² National Instruments 社製 USB-5132

¹³ HP 社製 Pavilion Aero Laptop13-be0000

報を抽出している。PC (C) へ搭載した、パルス周期情報抽出ツールの画面例と波形例を図 2-5 へ示す。

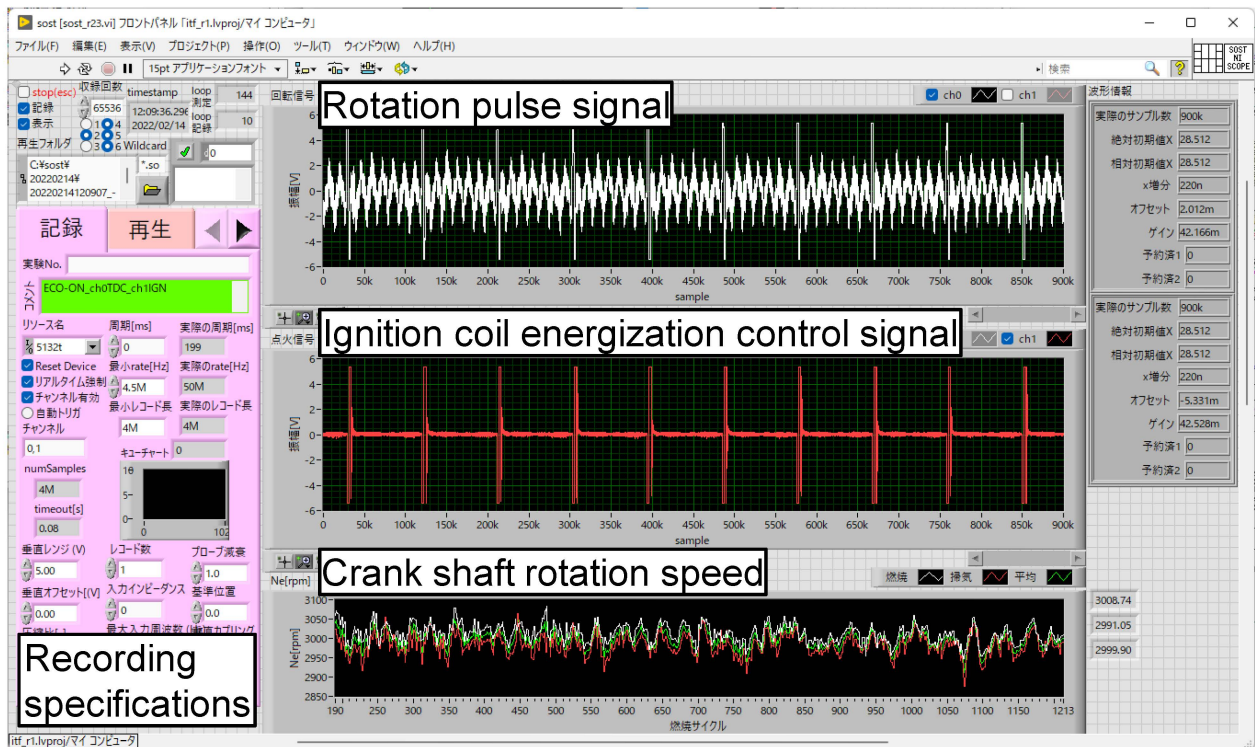


図 2-5 パルス周期情報抽出ツールの画面例と波形例

次に Feature Extraction における処理内容を列記する。

- 1) デジタイザが記録したアナログ波形データを読み取る。
- 2) ノイズ影響を除去するため、4[V]~5[V]の間を不感帯に設定。
- 3) パルス立下り周期を取得。
- 4) パルス立下り周期を2回分ずつ加算した結果を記録。

その結果、図 2-5 下部へ示すように、燃焼サイクルごとの周期情報を得ることができる。

2.3.4. Counter (D) ¹⁴

一般的なカウンタ出力回路と同等の機能を FPGA で実現している。この FPGA プログラムのロジックを列挙する。

- 1) 周期情報を読み取る。
- 2) パルス立下り時期からの時間をカウントする。

¹⁴ National Instruments 社製 cRIO-9076

- 3) 周期情報と一致した時点でパルスを立ち下げる.
- 4) 予め定めた一定時間でパルスを立ちあげる.
- 5) FPGA (H) とデジタイザ (I) へ出力する.

既に述べたとおり、FPGA は D, H の機能を備えている。表 2-4 へ FPGA の仕様を示す。

表 2-4 FPGA の仕様

Device	Xilinx Spartan-6 LX 45
Logic cells	43661
Slices	6822
Flip-Flops	54576
Block RAM Blocks(18kb)	116
DSP48A1Slices	58

FPGA 装置のベースクロック周期は 25[ns] であるが、これを 2 通倍することで、12.5[ns] の計算周期とした。なお、デジタル信号入出力器 (IO) の周波数帯域は 1[MHz]¹⁵である。

2.3.5. Time series analysis (H)

G のコンパイラで生成したビットストリームファイルを FPGA デバイスへ書き出して、FPGA 論理回路を構成の上実行する。FPGA (D) より入力したパルス信号からパルス周期を認識し、次のパルス周期を予測した上で、予測パルスを生成する。図 2-6 へ示すように、実際の接続構成は、FPGA 内で独立した D と H の機能それぞれより、過去信号と予測信号が出力された配線をデジタイザで収録している。

¹⁵ National Instruments 社製 NI-9401

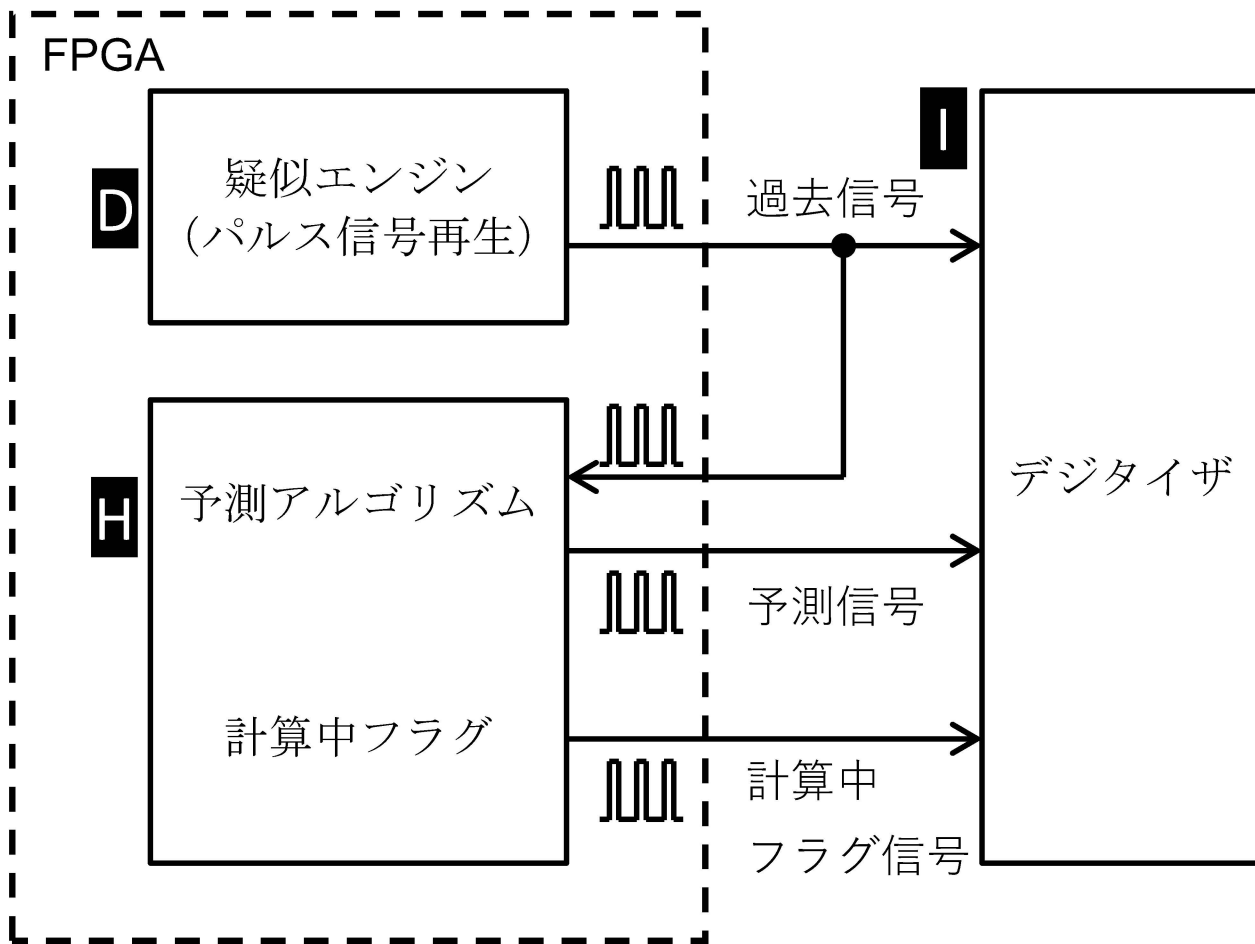


図 2-6 FPGA (D, H) の接続構成

2.3.6. Regression analysis (J)

FPGA (I) から伝送されたパルス周期について、FPGA (D)の標本値と FPGA (H)の予測値の間で回帰分析を行う。予測精度の評価指標を算出する。

2.4.FPGA の設計フロー

本章では、0 章のエンジンシミュレータで説明した要求されるリアルタイム性能を満たすために実施した、AR モデルの FPGA プログラムコード作成について説明する。

本研究内容に最も近い中村ら [54]の研究における、1.8 章で述べた要求事項 (1) (2) (3) の課題を表 2-5 へ示す。

表 2-5 要求事項 (1) (2) (3) の課題

要求事項	要求仕様	既存研究の手法	要求達成可否	課題
(1)限られたコンピュータリソース	車載ECU搭載	PC(プロセッサ)	否	省メモリ
(2)状況変化への対応	オンライン学習	バッチ	否	高精度
(3)実用的なリアルタイム性能	1回転周期内	ポスト処理	否	高速

表 2-5 の課題を同時に対応するためには、「省メモリ」「高精度」「高速」の両立手法が必要である。そのため FPGA に関する既存研究を調査した結果、並列処理 [81]、パイプライン [82]、分解能削減 [83]、固定小数 [83]、SCTL [83]、などの手法が有効であることが判り、FPGA プログラムコードへ反映することとした。

2.4.1. Program code 64bit (E)

AR モデル推定を含めた線形予測分析のプログラムは、Cedrick による C++コード¹⁶と、これを参考に aidiary が Python®¹⁷コードを作成したものが¹⁸。後者の Python®コードについては、パラメタサーベイによる妥当性評価が実施されているため、これを基に LABVIEW®コードへ変換した。このプログラムコード内の処理は、図 2-7 へ示すように、64bit の浮動小数点を用いて逐次処理を行っている。

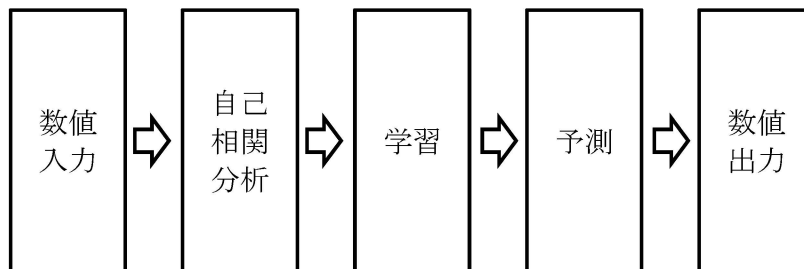


図 2-7 プログラムコード

プログラムコードの変換影響を確認するため、Python®コードと LABVIEW®コードのそれぞれへ、同じ配列値を入力した結果を図 2-8 へ示す。図 2-8 右側のグラフ凡例について、r, a, e は計算中の内部変数値である。なお、上記プログラムコードで用いられる変数は、倍精度の浮動小数点である。

¹⁶ <http://www.emptyloop.com/technotes/A tutorial on linear prediction and Levinson-Durbin.pdf>

¹⁷ Python は、Python Software Foundation の登録商標です。

¹⁸ <https://aidiary.hatenablog.com/entry/20120415/1334458954>

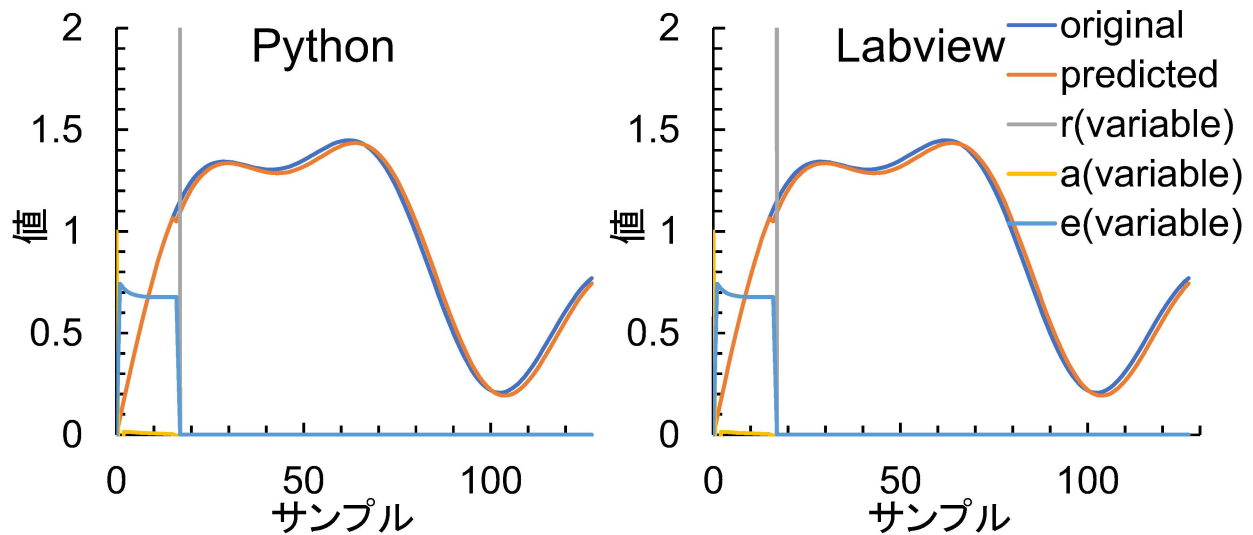


図 2-8 線形予測分析プログラムの入出力値比較結果

図 2-8 における，入出力値の一致を確認するため，左右グラフの偏差を図 2-9 へ示す．偏差はゼロであり，実験的にほぼ一致することが確認できたので，この LABVIEW®コードによる予測精度を評価基準とする．そして，FPGA 実装過程におけるプログラムコード修正の遷移に伴う，予測精度影響を評価することとする．

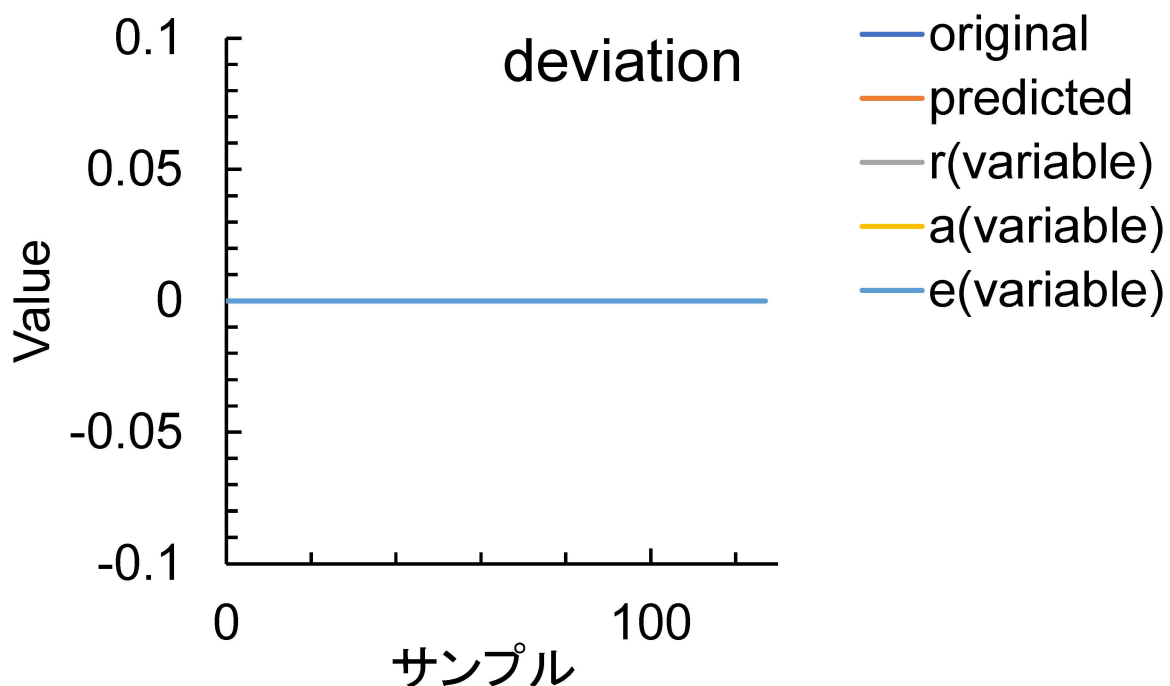


図 2-9 入出力値の偏差

2.4.2. Program code 16bit (F)

本研究で用いる FPGA 用のコンパイラは、ほとんどの関数が SCTL 内で単精度浮動小数点演算を実行できないため¹⁹、E のプログラムコードを基に、固定小数点へプログラムコードを変換した。さらに、FPGA の計算負荷とハードウェアリソース消費量を低減するため、図 2-7 のプログラムコードを基に計算変数の分解能を 64[bit]から 16[bit]へ変換した。これは、2.8 節で示す実験結果より、計算変数の分解能が 16[bit]の場合は、64[bit]の場合と比較した場合と同等精度を達成できることが示されており、16[bit]にした時点で既に FPGA リソースの範囲内に収まっていることから、実験で想定した環境においては、16[bit]が高精度な予測と FPGA リソース消費量の抑制の観点で、適切なポイントと判断した。なお、計算入力値の分解能 (8[bit]) については、後に詳細を説明する。

2.4.3. Compiler (G)

F のプログラムコードを基に、FPGA 用のビットストリームファイルへ、PC 上で変換する。この変換過程において、FPGA 内論理回路の構成が定義されるが、高速計算処理のために並列計算にすると、論理回路等のハードウェアリソース消費量は増大する。つまり、ハードウェアリソースの消費量と計算処理の高速化との間には、トレードオフが生じることになる。この関係を確認した結果を表 2-6 へ示す。

表 2-6 トレードオフの確認結果

Index	リソース供給量 (ハード仕様)	リソース消費量					
		初版		高速化		最終形	
要求動作周波数 [MHz]	—	80	120	80	120	80	120
パイプライン	—	なし		あり			
パルス信号出力機能	—	なし			あり		
コンパイル結果	—	成功	失敗	成功			
Slices	6822	2909	2970	2945	2882	2923	2995
CLB Flip-Flops	54576	8126	8128	8238	8238	8365	8368
Block RAM Blocks (18kb)	116	7	7	7	7	7	7
DSP48A1 Slices	58	1	1	1	1	1	1
最大動作周波数 [MHz]	—	88.71	111.36	85.44	121.40	89.10	124.63

¹⁹ <https://www.ni.com/docs/ja-JP/bundle/labview-fpga-module/page/lvfpgaconcepts/fpgasingleprecisfloat.html>

2.4.4.初版

Fのプログラムコードは逐次処理のため、計算時間をFPGAの最長計算周期（25[ns]）以内にできない。そのため、プログラムコードの内容を、四則演算レベルにまで分解することで、図2-10へ示すような並列処理を実現し、最長計算周期内の演算を可能にした。より具体的には、データ点数とモデル次数を固定値にすることで、総和記号（ Σ ）内の繰り返し演算を分解した上で、並列処理にて演算した。そしてこのプログラムコードをコンパイルした結果、表2-6へ示すように、ハードウェア仕様と比べてリソース消費量は少ないことを確認できた。

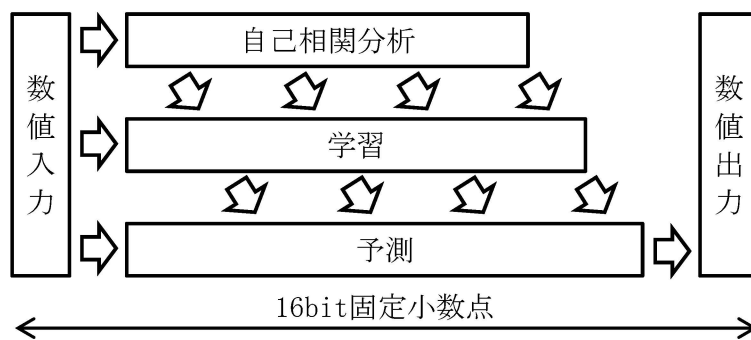


図 2-10 初版の FPGA プログラムコード

2.4.5.高速化

このリソース余剰分を並列処理へ振り分けるため、図2-11へ示すように、シフトレジスタや乗算におけるパイプライン設定を追加した。その結果、リソース消費量は約3倍、最短動作周期は約2/3倍の8[ns]となった。

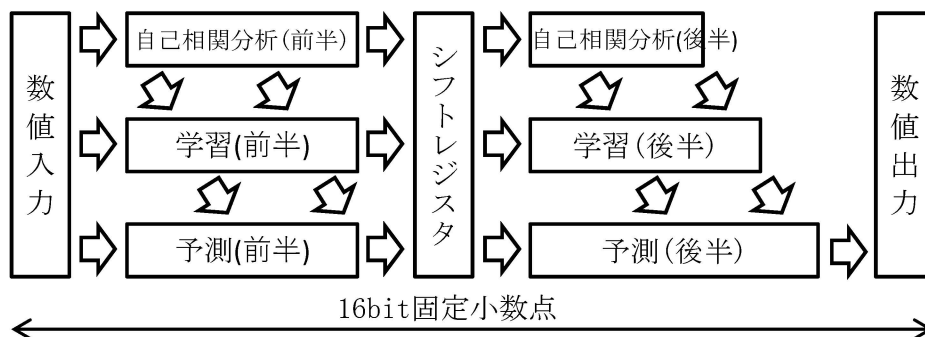


図 2-11 高速化した FPGA プログラムコード

2.4.6.最終形

最終的な評価用プログラムとしては、図 2-12 へ示すように、D (Counter) による、数値とパルス波形間の変換機能を、プログラム内の分離した形で追加した。

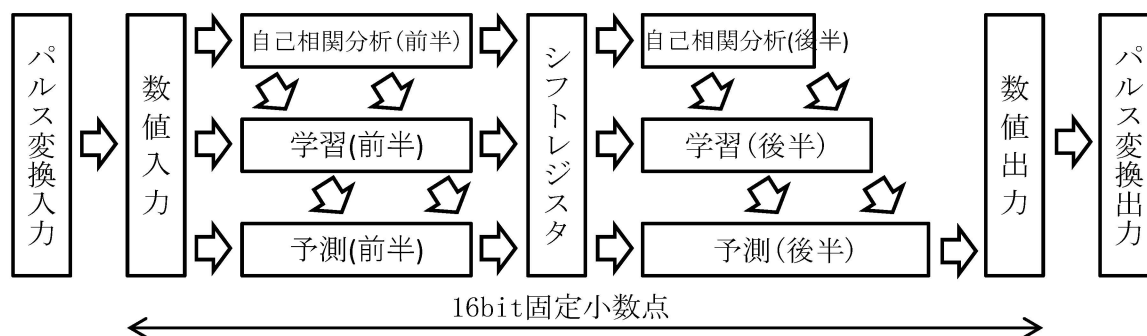


図 2-12 最終形の FPGA プログラムコード

この機能追加による影響はほとんど無く、設定実行計算周期 8.3[ns]での動作は可能であるが、将来的な予測モデル拡張への余地を残すため、設定実行計算周期を 12.5[ns]とした。

この FPGA における実計算時間を確認するため、プログラムコードへ計算中のフラグを設定し、デジタル信号として出力させた。デジタル信号をデジタイザで 2[ch]同時収録した結果を図 2-13 へ示す。

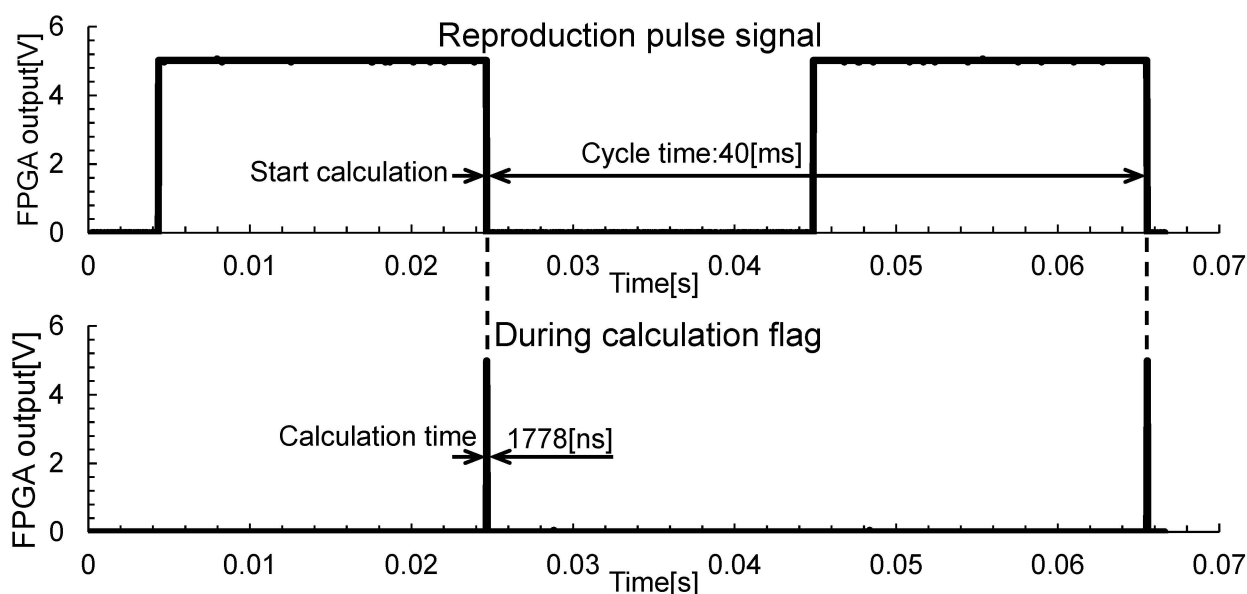


図 2-13 FPGA における計算時間の実測結果

図 2-13 において、上段のグラフは回転パルスの入力信号である。下段のグラフは計算中フラグである。各グラフの横軸はサンプル数である。サンプル周期は 222[ns]であるた

め、横軸全体で約 67[ms]分に相当する。クランク軸回転周期のパルス信号の立下り時にパルス周期が確定し、その直後から計算が開始しており、想定通りに動作していることを確認できた。そして、再生パルス信号の周期（燃焼サイクル周期）が 40[ms]であるのに対して、FPGA の実計算時間は 1778[ns]と、十分に短いことを確認できた。

2.5.位相補償アルゴリズム

図 2-6 へ示す FPGA の接続構成では、物理配線を用いた入出力を行っている。そのため、予測アルゴリズムの前後には、パルス幅の読み取り機能と、予測結果に基づくパルス信号の生成機能を追加した。ここで図 2-14 へ示す、前回出力パルスをカウント基準とした、位相補償無し出力アルゴリズム A のように、予測結果に応じたパルス幅の出力を繰り返すと、繰り越し誤差が積算されるという問題が生じる。その結果、FPGA による予測が、実際の予測時期とずれるという問題がある。

この問題を解決するために、入力パルスをカウント基準とした、位相補償付き出力アルゴリズム B を考案し、手法 e に対して実装した。具体的には図 2-15 へ示すように、パルス幅のカウント基準を、前回出力パルスから入力パルスへ変更する。これにより、繰り越し誤差が解消されると同時に、予測後のパルス幅が補正される。

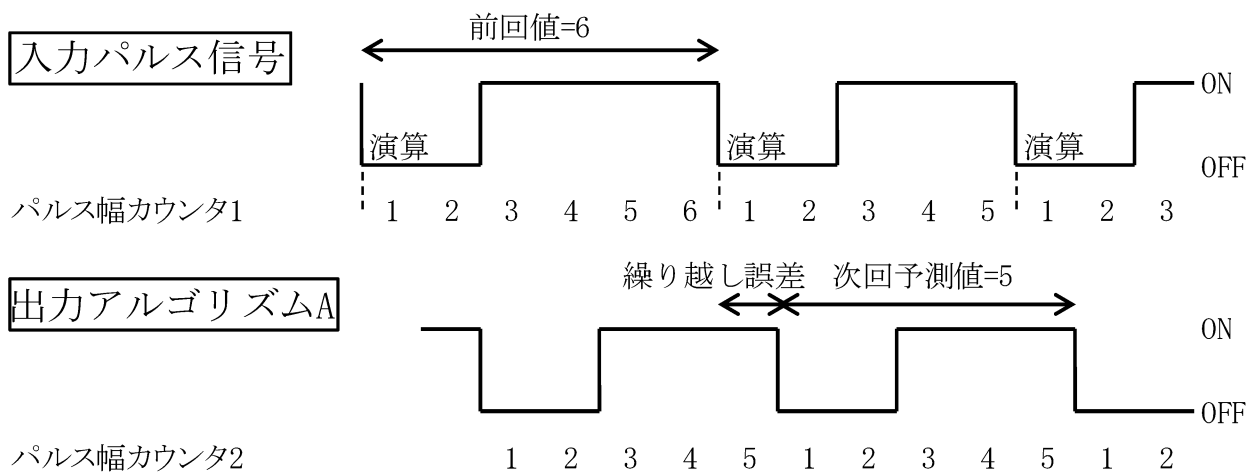


図 2-14 位相補償無し出力アルゴリズム A における誤差の累積

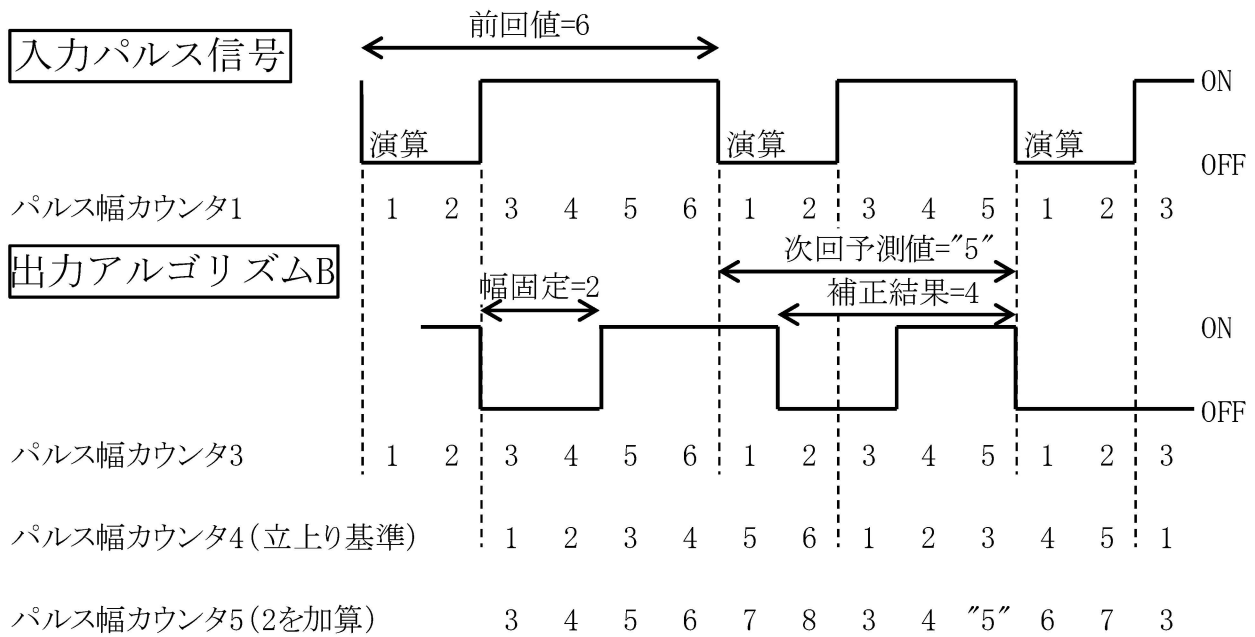


図 2-15 位相補償付き出力アルゴリズム B における誤差の累積

予測アルゴリズムにおいて、出力アルゴリズム B を実装した場合の、入出力信号を同時収録した結果を図 2-16 へ示す。

図 2-16 上側の入力信号に対して、下側の出力信号の位相がほぼ一致していることから、想定通りに動作できていることを確認した。

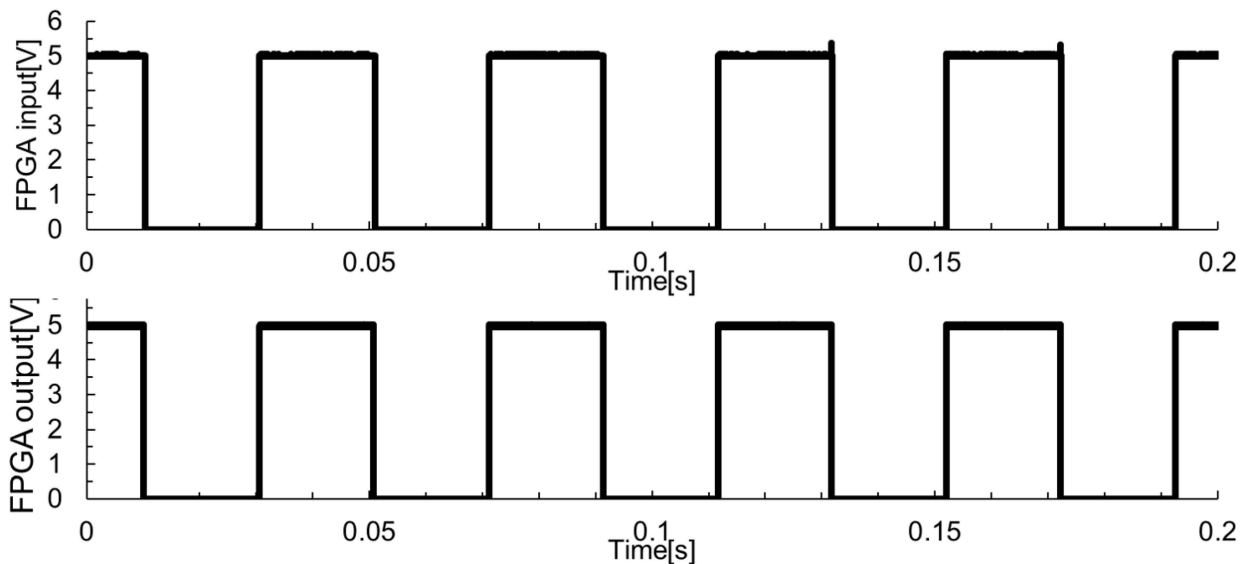


図 2-16 出力アルゴリズム B の実装結果

この位相補償アルゴリズムを用いた予測値補正による予測精度向上効果については、本実験において検証する。

2.6.事前実験

一般的に AR モデルは，モデル次数により計算時間と予測精度との間にトレードオフが発生し，さらに，オンライン学習を FPGA へ実装する場合，パルス幅の時間分解能によっても計算時間と予測精度との間にトレードオフが発生する．本節では，モデルの最適なパラメータ数と，時間分解能の決定方法について述べる．なお，事前実験で用いた開発データは，本実験で用いた評価データとは異なるデータを用いた．

2.6.1.赤池情報量規準 (AIC)

式 (1) ～ (4) において，一般的に，モデル次数は値が大きいほど予測精度と計算負荷が増大するため，トレードオフの関係にある．その状況下において，最適なモデル次数を選定する必要がある．

最適なモデル次数を選定するための指標の一つに AIC [84]がある．この AIC が最も小さくなるモデル次数が最適とされる．AR モデル用の AIC 計算式 (3-6) ²⁰を示す．

$$AIC = N \log(2\pi \times \hat{\sigma}_M^2) + N + (M + 1) \quad (3-6)$$

N : データ点数 (オンライン学習用)，M : モデル次数， $\hat{\sigma}_M^2$: 予測誤差の分散 (推定値)

次に，図 2-3 の評価装置 A, B, C を用いて取得したデータを式 (5) へ代入してモデル次数とデータ点数ごとに AIC を算出した結果を図 2-17 へ示す．

²⁰ http://www.kumst.kyoto-u.ac.jp/kougi/time_series/ex1113.html

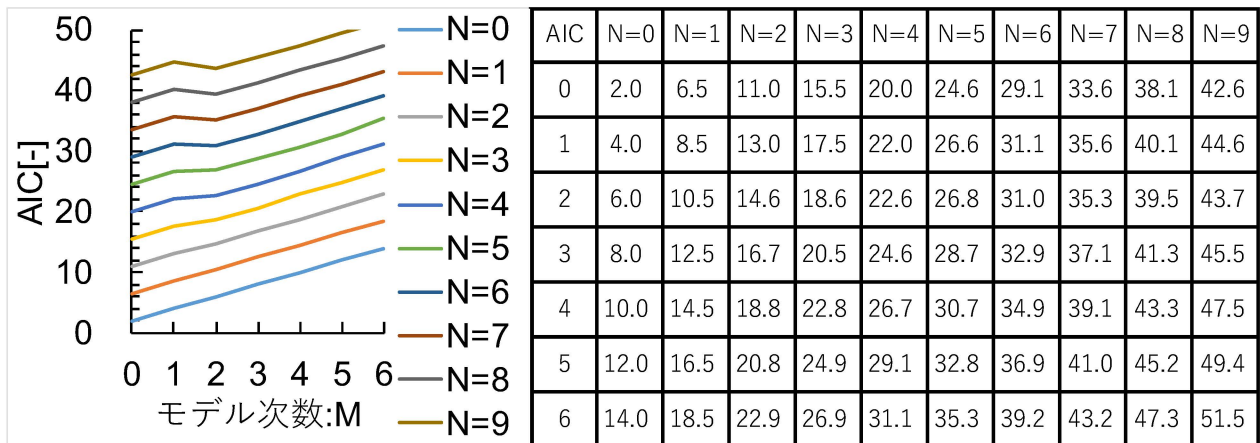


図 2-17 AIC の算出結果

図 2-17 へ示すように AIC が最小となるモデル次数はおよそ 2 であり、これはデータ点数によって異なる。計算負荷を低減するためには、モデル次数を低減する必要があるが、モデル次数が 0 では予測ができない。そのため、予測精度の評価によるモデル次数の選定を試みた。

2.6.2. モデル次数による精度感度

図 2-18 は予測精度の評価指標として、決定係数 (R^2) と、二乗平均平方根誤差 (RMSE) と、平均絶対誤差 (MAE) を選定し、モデル次数 M とデータ点数 N のそれぞれについて算出したものである。評価指標の算出方法を式 (3-7) ~ (3-9) へ示す。なお、各指標と精度の関係について、一般的に R^2 は大きい方が高精度で、RMSE と MAE は小さい方が高精度である。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3-7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2} \quad (3-8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - y_i| \quad (3-9)$$

標本値 : $y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$

推定値 : $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$

その結果 M, N 双方ともに 3 以上では、各評価指標における予測精度の改善幅が小さくなっていることから、 M と N は 3 とした。なお、ビット数削減等の数値加工に伴う、

予測値を実測値へ合わせるため、オフセットとスケーリング処理を追加しているが、決定係数への影響は無い。また、スケーリング処理によってMとNが1以下の場合、予測ができないことから、図 2-18 のグラフと表の表示を省略した。

ガソリンエンジンにおいて、燃焼室内のガスは前サイクルの既燃ガスが一部残留（内部 EGR²¹）する。そのため、希釈率に加えて、筒内残留既燃ガス中の不活性ガス濃度が点火性能へ影響する。この筒内残留ガスの成分は過去直近の燃焼サイクルの燃焼状態によって決まることから、NとMが比較的小さな値で問題ないと考える。

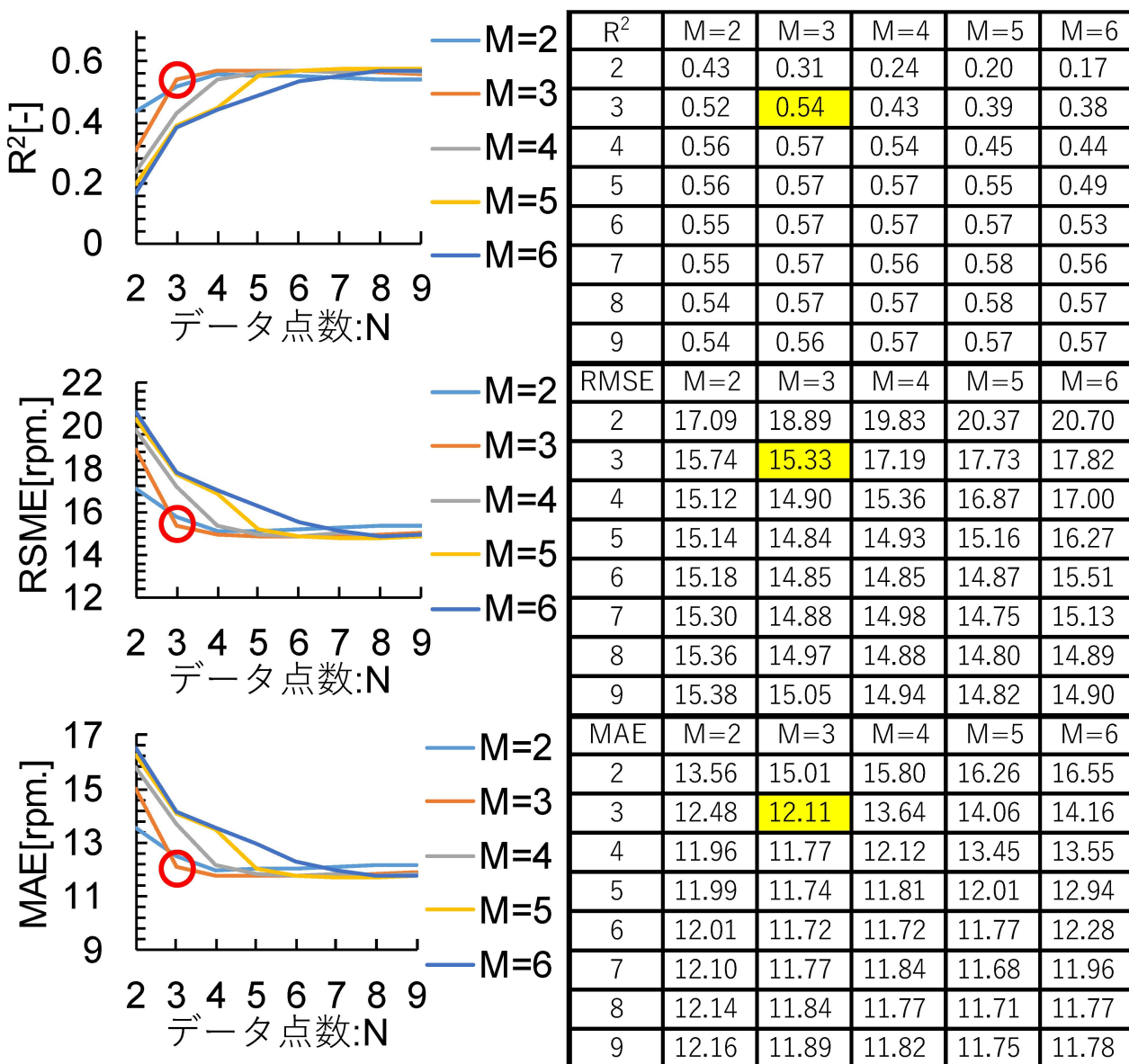


図 2-18 モデル次数とデータ点数に対する予測精度への感度

²¹ Internal Exhaust Gas Recirculation

2.6.3. 計算入力値のビット数削減

図 2-19 は、評価装置 C より得た、回転速度の燃焼サイクル変動の例である。

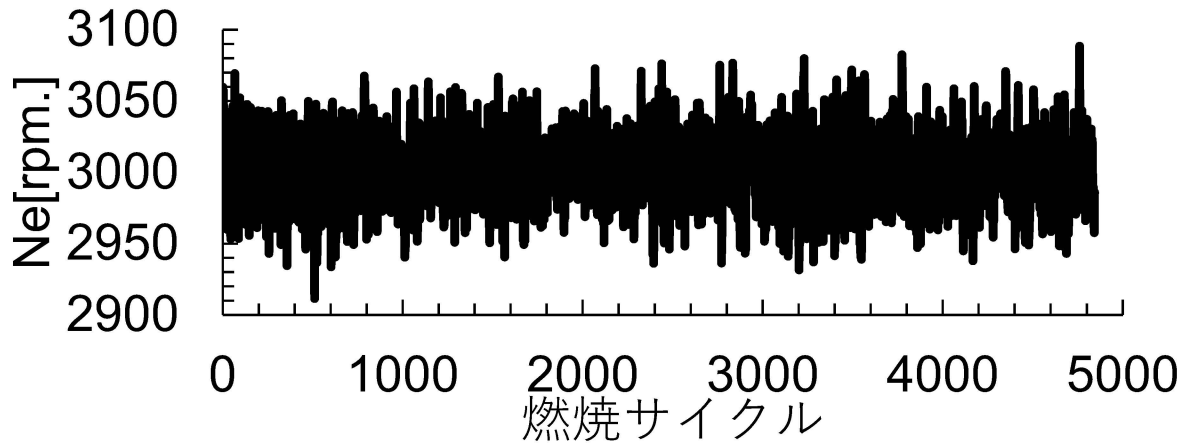


図 2-19 回転速度の燃焼サイクル変動の例

次に、図 2-19 の縦軸を、 $1[s]=80[Mtick]^{22}$ として時間周期へ換算したものを図 2-20 へ示す。FPGA 内部で認識する回転周期の最小値は約 $3.1[Mtick]$ であり、これは予測精度へ影響しない無駄な数値である。そのため、回転周期から $3.1M$ を引いた値を入力することとした。その結果、予測精度を維持したまま約 $4[bit]$ 分の計算負荷を低減できた。

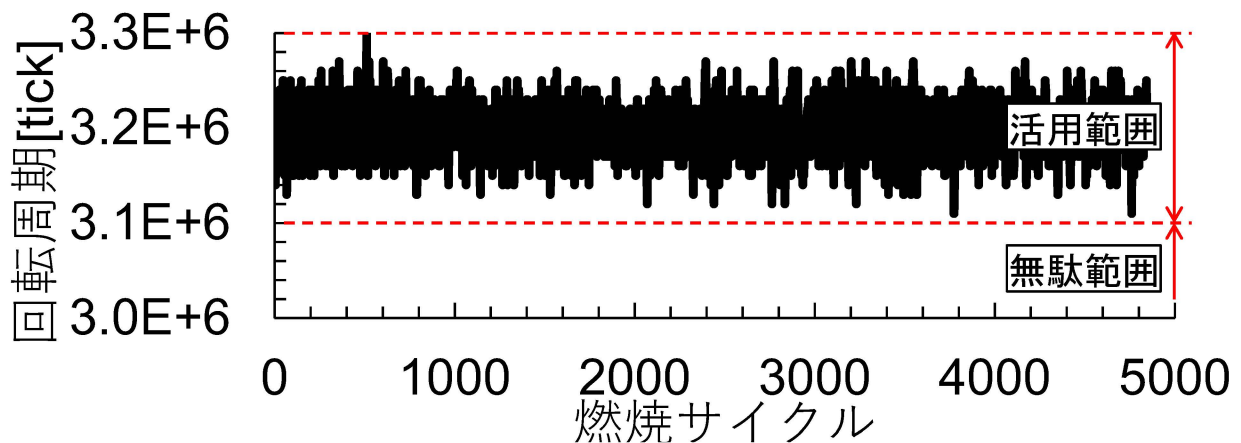


図 2-20 縦軸を時間周期へ換算したもの

次に、回転周期から $3.1M$ を引いた結果を図 2-21 へ示す。

²² Tick : 1 か 0 (オンかオフ) を表す最小単位のデータ。FPGA の動作周波数。

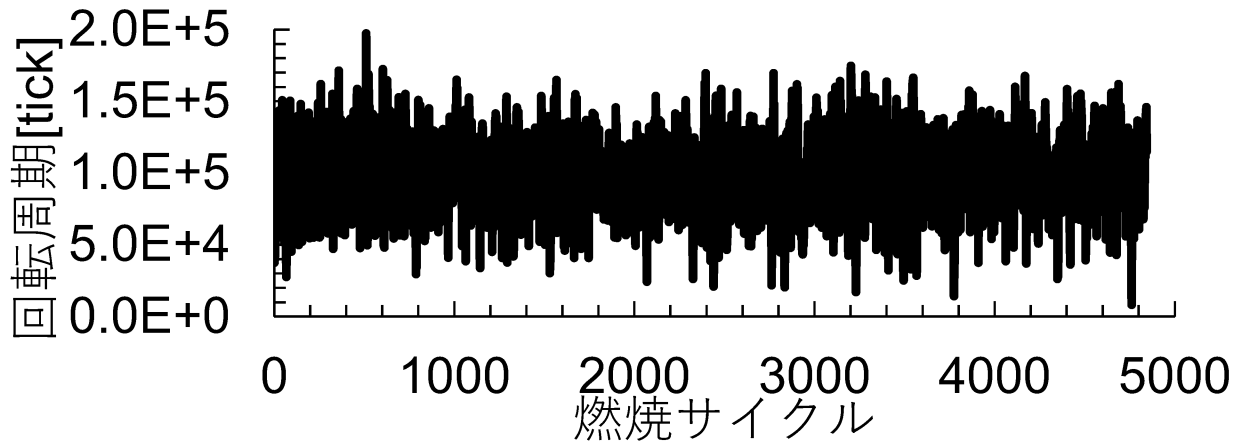


図 2-21 回転周期から 3.1M[tick]を引いた結果

さらに、グラフの縦軸を[tick]から[bit]へ換算した結果を、図 2-22 へ示す。この時点で、周期の表現に 18[bit]が必要である。

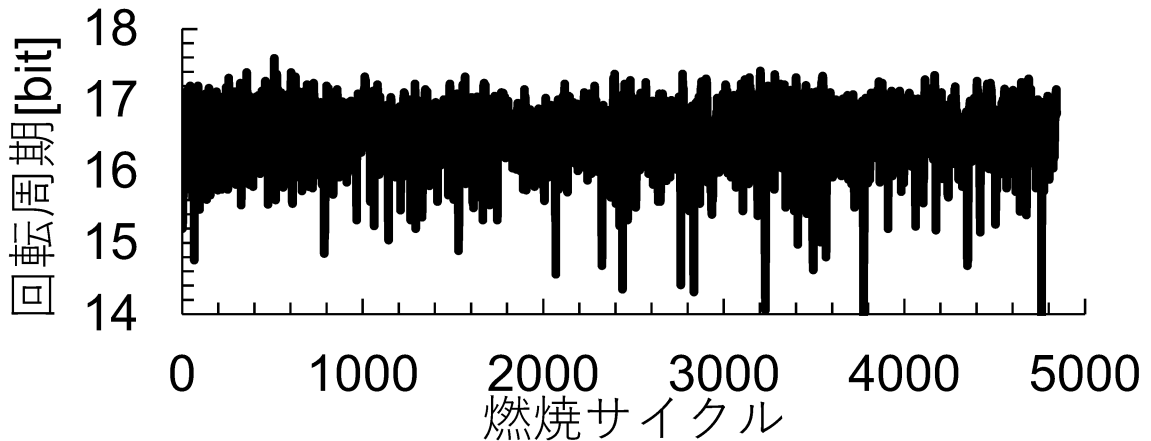


図 2-22 グラフの縦軸を[tick]から[bit]へ換算した結果

ここで、要求分解能を 1[rpm.]とすると、これはおよそ $1066[\text{tick}] \div 10[\text{bit}]$ に相当する。つまり、下位 10[bit]を除外しても要求分解能を維持できることになる。そのため、ビットシフトを用いて 10[bit]分を削減した。その結果、入力値の分解能を 8[bit]まで低減することができた。

これらの過程を数式 (3-10) ~ (3-12) へ整理する。

1) 無駄範囲を削減した有効分解能 N_A [bit]

$$N_A = \log_2 \left\{ \left(\frac{1}{N_{\min}} - \frac{1}{N_{\max}} \right) 60 \times 2 \times 80 \times 10^6 \right\} \quad (3-10)$$

1[s]=80×10⁶[tick], 4 サイクルエンジンの燃焼サイクルは, クランク軸 2 回転である.

2) 要求分解能 (1[rpm.]) の N_B [bit] 換算.

ここでは, 平均回転数 $Neavg = 60$ [s/min] ÷ 0.02 [s/rev.] = 3000 [rpm.] とする.

$$N_B = \log_2 \left\{ \left(\frac{1}{Neavg} - \frac{1}{Neavg + 1} \right) 60 \times 2 \times 80 \times 10^6 \right\} \quad (3-11)$$

3) 必要分解能 N [bit] の算出

$$N \text{ [bit]} = N_A - N_B \quad (3-12)$$

2.7.実験手法

本研究では, AR モデル予測アルゴリズムの FPGA 実装過程に伴う, 予測精度に対する感度を評価する. 具体的には, 評価装置の接続構成を入れ替えることで, 表 2-7 へ示すように, FPGA 実装過程を分解した a~e それぞれの構成に対応する手法について, 予測精度の評価を行う. ここで, 手法 a は既存の手法へ対応し, b~e は本研究において新規に提案する方法へ対応している.

表 2-7 手法

Experimental method	a	b	c	d	e
Study	Off-line	Online			
Resolution	Double precision floating point		16bit fixed point		
Execution environment	PC			FPGA	
Input-output data	Period value				Pulse Signal
Previous research	←→				
Main research	←→				

なお, 手法 a, b, c で使用する PC (図 2-3 の C, G, J) における CPU (Central Processing Unit) の仕様は表 2-8 のとおりである.

表 2-8 PC における CPU の仕様

CPU	AMD Ryzen 7 5800U 1.9GHz/8core
Memory capacity	16[GB]
Memory standard	DDR4 PC4-25600
OS	Windows 11 Pro

また、予測幅は 1 とした。予測結果の反映先である、点火コイルの制御信号周期が 1 燃焼サイクル以内であるため、高精度な最近の予測結果を点火制御へ適用できる。

2.7.1.手法 a

図 2-23 へ示すように、先行研究の再現を目指した構成である。プログラムコードからオンライン学習機能を省き、プログラム内部変数を浮動小数点とした状態で回転速度を PC の AR モデルへ入力している。この実験結果から得られた決定係数を、評価基準とする。

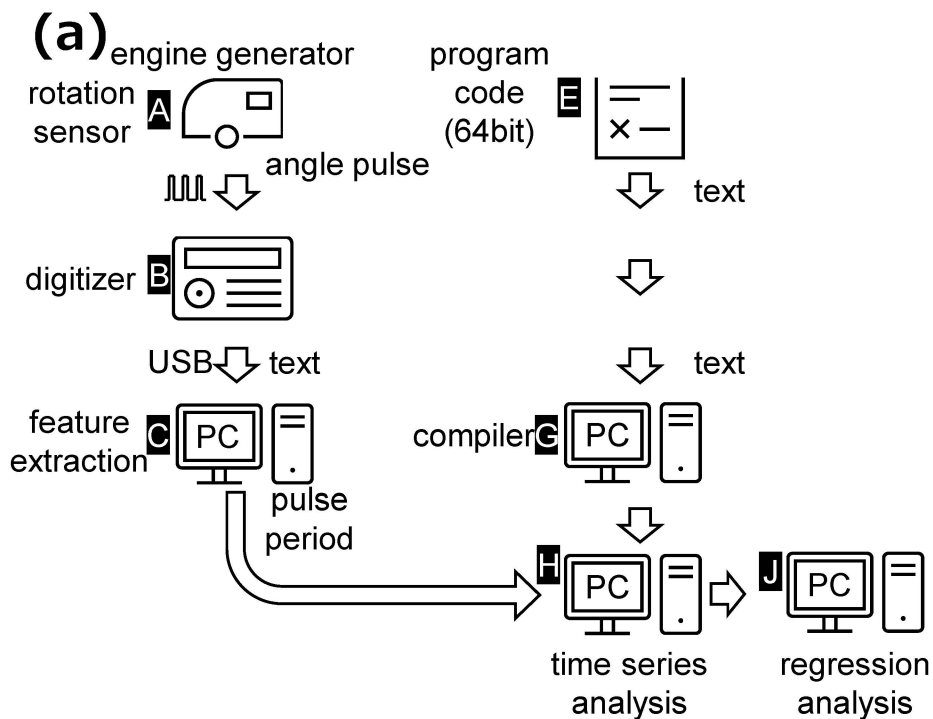


図 2-23 手法 a の構成

2.7.2.手法 b

図 2-24 へ示すように、手法 a に対して、オンライン学習機能を追加したものである。将来予測の計算に用いる係数は、1 サンプルごとに再学習するため、エンジンの特性変化後も予測精度を保てることが期待できる。

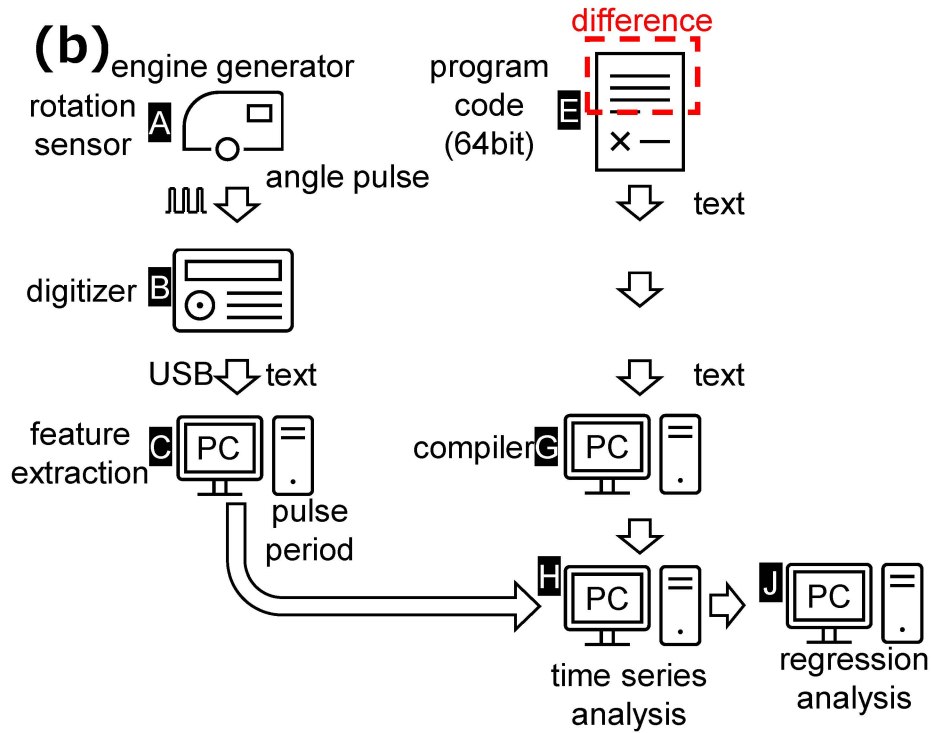


図 2-24 手法 b の構成

2.7.3.手法 c

図 2-25 へ示すように、手法 b に対して、プログラムコードの変数を 16[bit]固定小数へ変換したものである。ビット数が 1/4 になるため、演算負荷を最大で 75[%]低減できることが期待できる。

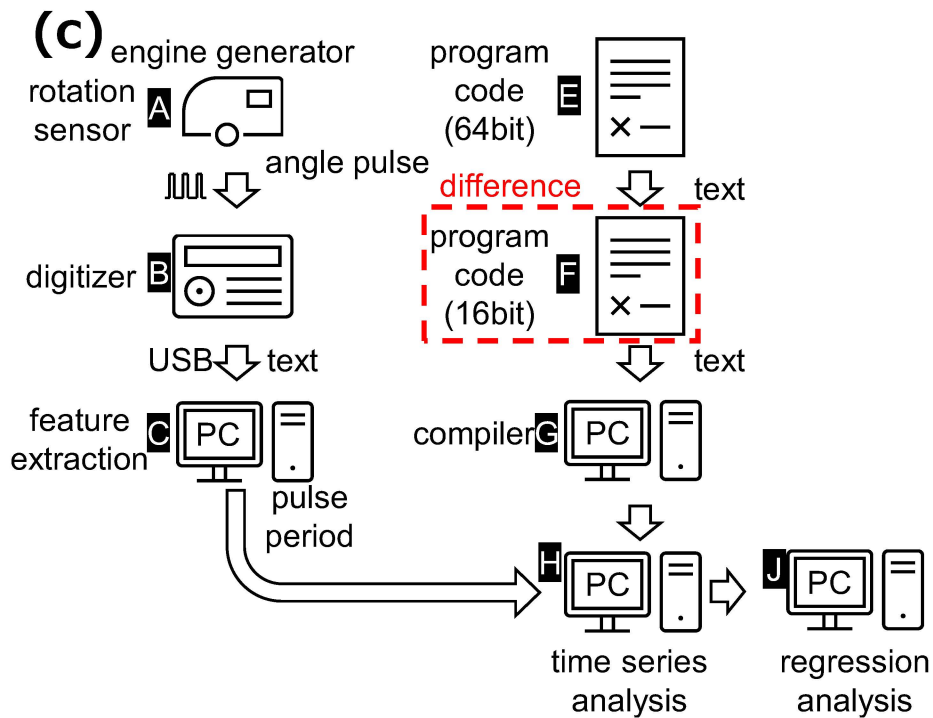


図 2-25 手法 c の構成

2.7.4.手法 d

図 2-26 へ示すように、手法 c に対して、プログラムの実行環境を PC から FPGA へ変更したものである。SCTL 内での実行に伴い、1 回の計算を複数の計算サイクルで行う非同期式設計が必要となる。そのため、ハンドシェイクアルゴリズムの追加などによる計算タイミングの差異が生じる。

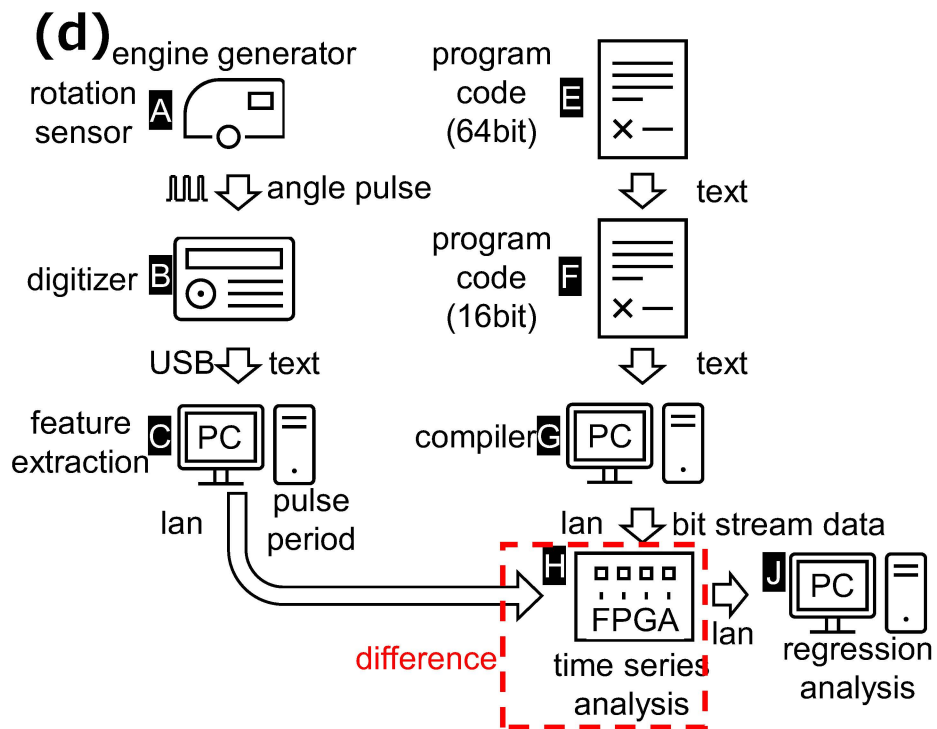


図 2-26 手法 d の構成

2.7.5.手法 e

図 2-27 へ示すように、手法 d に対して、時系列解析装置 H の入出力情報を、物理配線によるパルス信号へ変更したものである。すなわち実エンジンからの実際の入力信号を想定した構成であり、位相補償アルゴリズムを適用している。

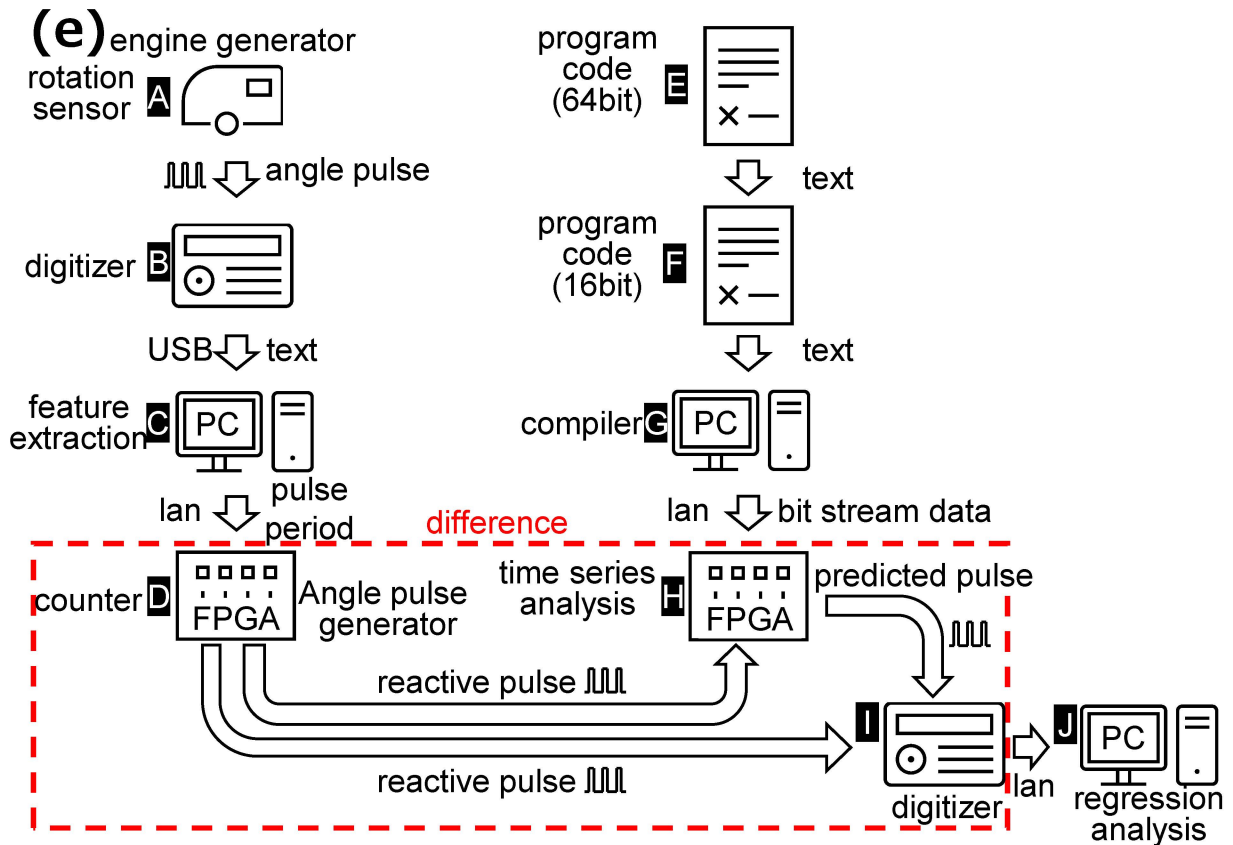


図 2-27 手法 e の構成

2.8.実験結果および考察

手法ごとの、標本値と予測値の相関を図 2-28～図 2-32 へ示す。各図において、左側のグラフは、予測した 4844 回の燃焼サイクル分のうち、100 燃焼サイクル分を拡大表示したものである。右側のグラフは標本値に対する、予測値の分布図である。また、本実験で用いた評価データは、事前実験で用いた開発データと同一である。

2.8.1. 実験結果 a

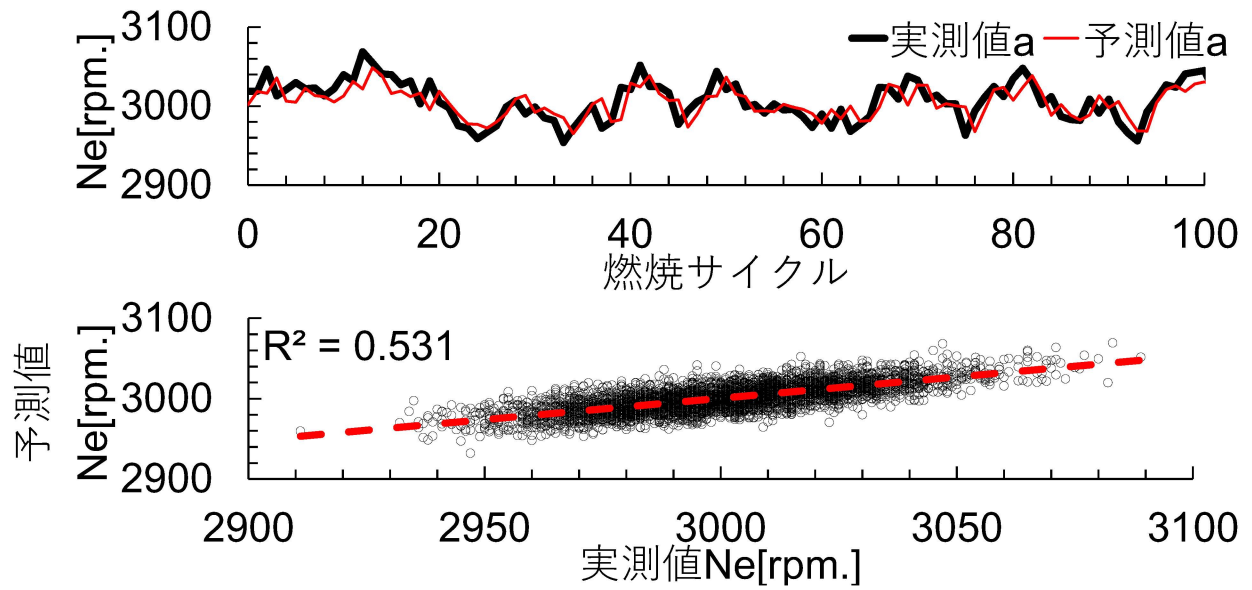


図 2-28 手法 a の相関評価

2.8.2. 実験結果 b

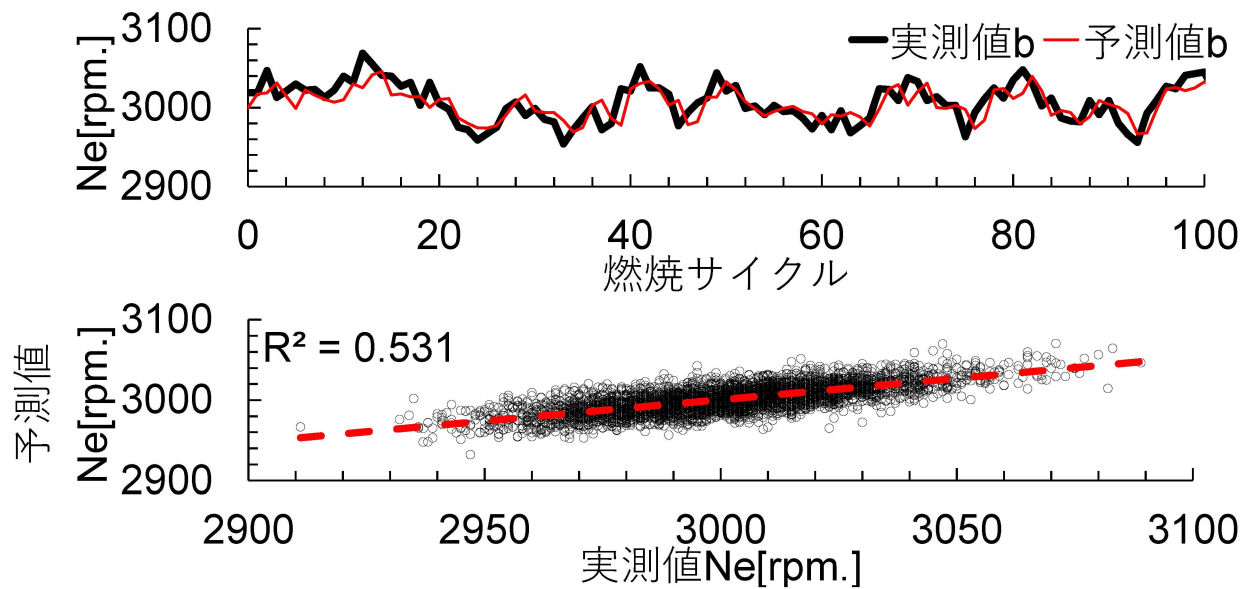


図 2-29 手法 b の相関評価

2.8.3. 実験結果 c

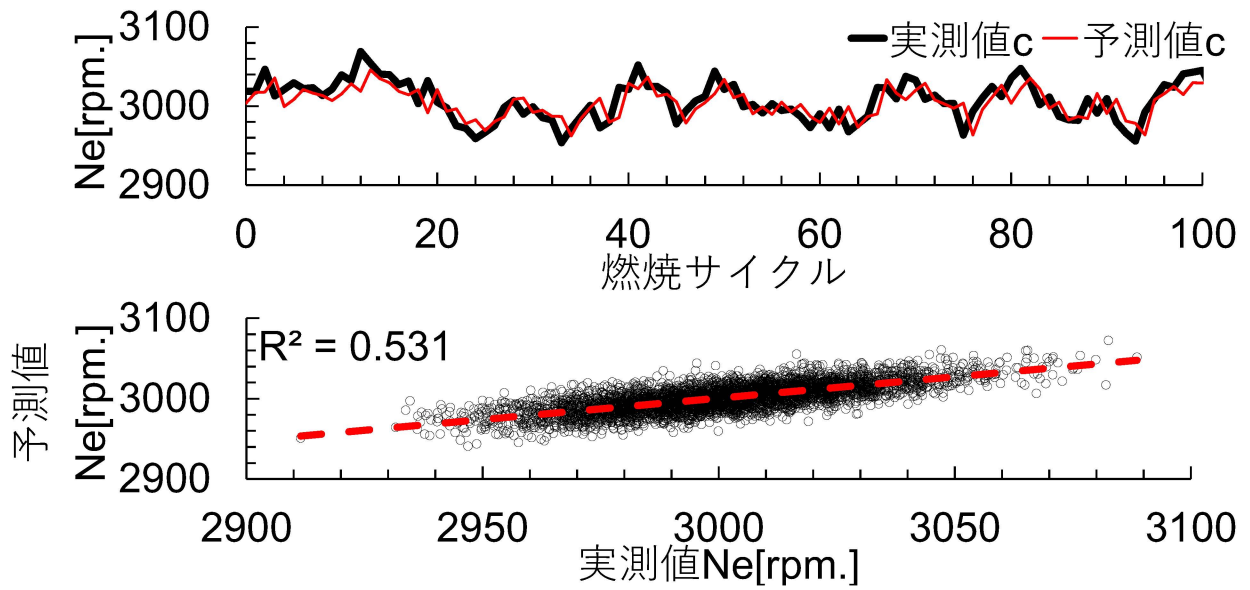


図 2-30 手法 c の相関評価

2.8.4. 実験結果 d

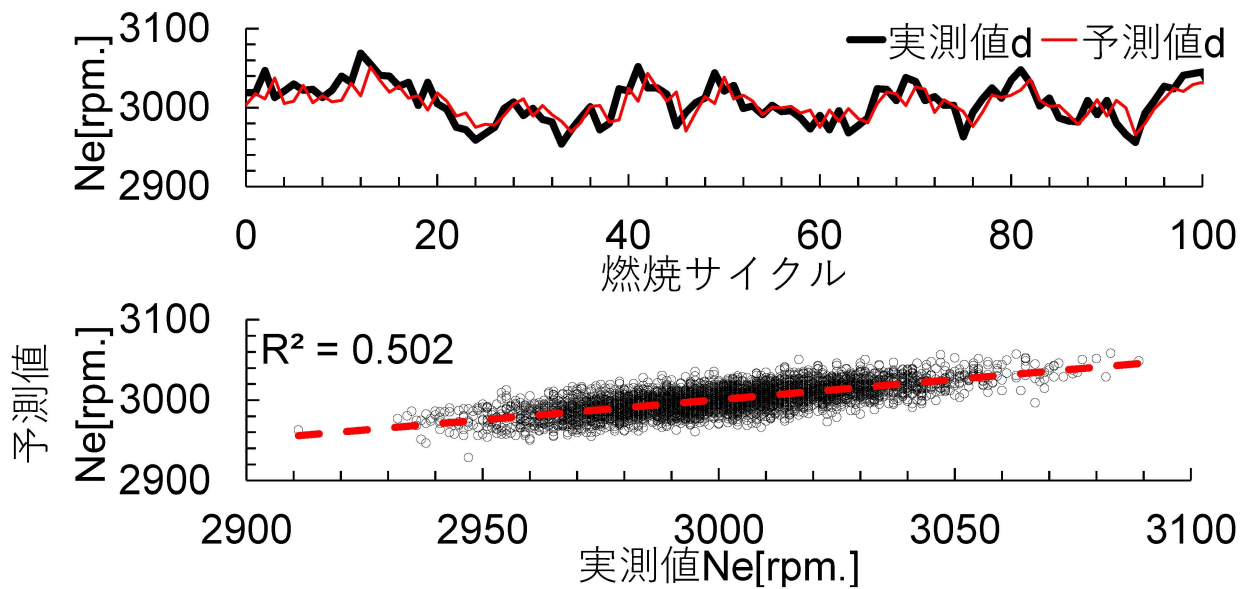


図 2-31 手法 d の相関評価

2.8.5.実験結果 e

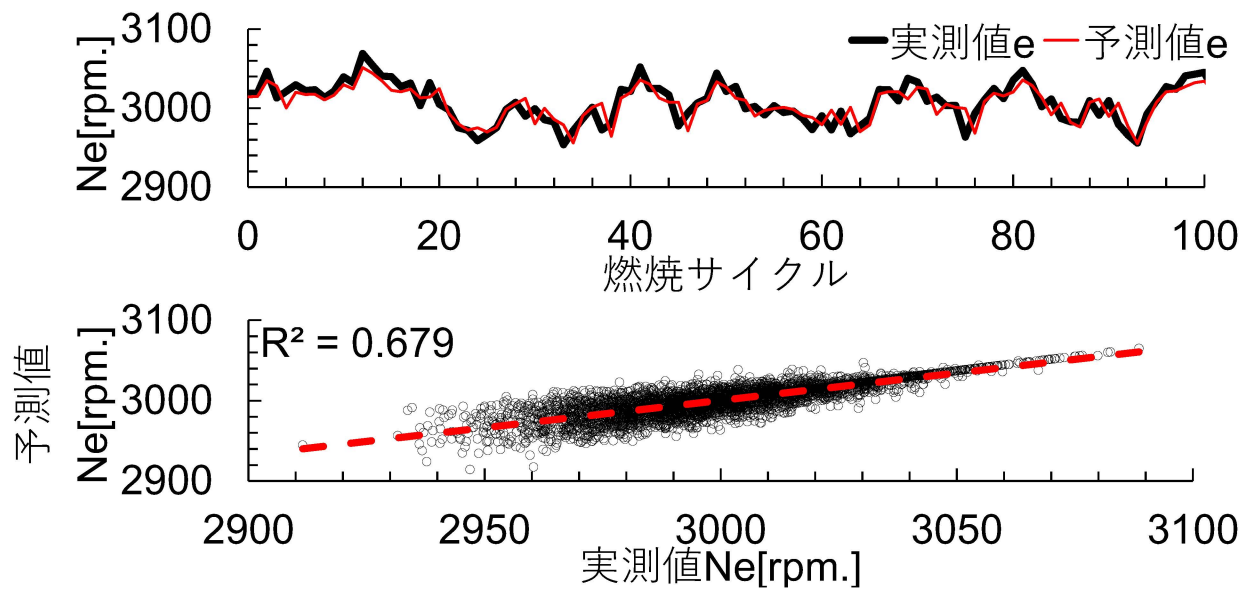
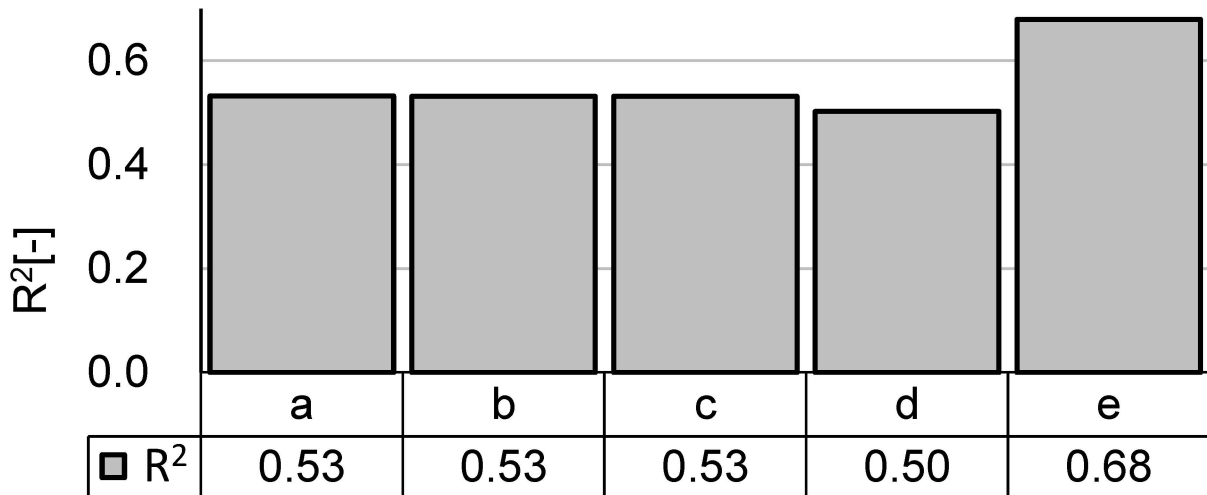


図 2-32 手法 e の相関評価

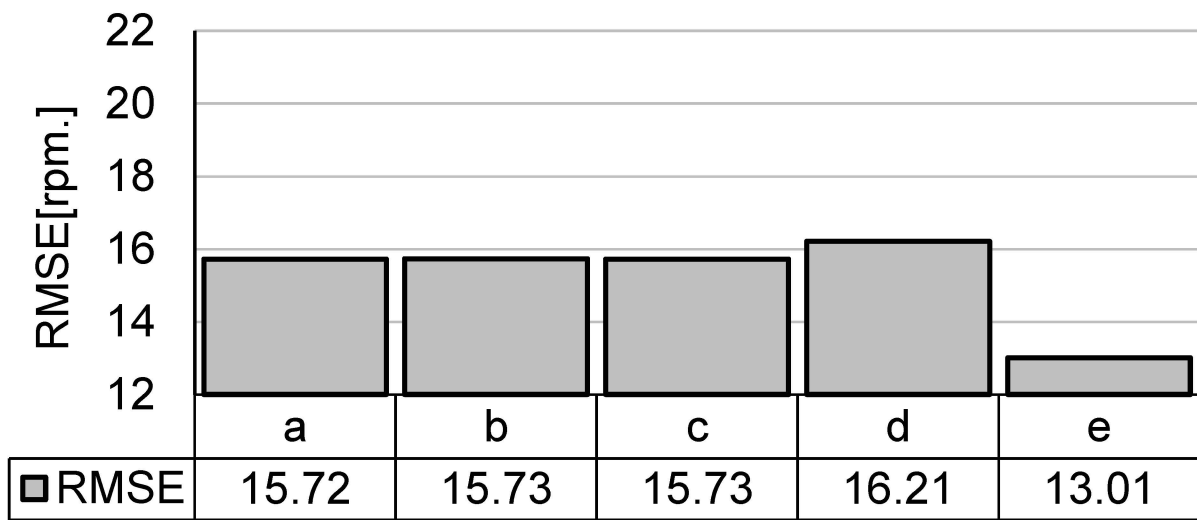
各図の右側にある分布図の右上へ示す，手法ごとの決定係数について比較評価した結果を図 2-33 へ示す．

図 2-33 へ示すとおり，手法 a, b, c, d における RSME と MAE の差は，2.6.3 節において記述した本研究の要求分解能（1[rpm.]）未満であった．そのため，FPGA を活用したリアルタイムのオンライン学習による予測精度を，既存の手法と同等にすることができた．

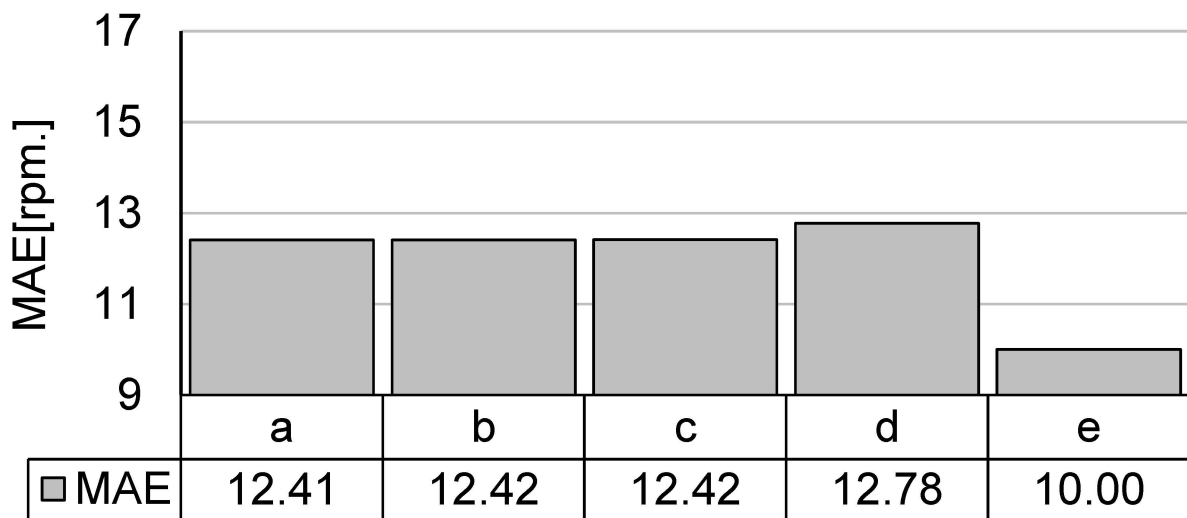
特に，手法 a のオフライン学習と比べて，手法 b のオンライン学習においては，演算軽量化のためにデータ点数を削減したにも関わらず，決定係数が同等以上となっている．これは，2.6.2 項における，オンライン学習におけるデータ点数と次数を適切に選定した結果であると考えられる．



Experimental method



Experimental method



Experimental method

図 2-33 手法ごとの評価指標

一方で、手法 e については、ほかの手法よりも決定係数が高くなっている。これは、入力信号をパルスに変換する際に導入した、位相補償付き出力アルゴリズム B により、繰り越し誤差が解消されると同時に、予測後のパルス幅が補正されたことにより、副次的に決定係数が向上したと考えられる。

図 2-34 は、位相補償付き出力アルゴリズム B の影響を確認するために、位相補償アルゴリズム B の有無（手法 e と d）を重ねてプロットした、相関グラフである。位相補償アルゴリズムの適用により、実測値 N_e （クランク軸回転速度）の低回転域と比べて高回転域の方は、相関が高くなっていることが分かる。

図 2-35 図 2-36 図 2-37 図 2-38 は、相関の回転域依存性を確認するため、位相補償アルゴリズムの有無それぞれについて、3000[rpm.]を基準に低回転域と高回転域へ分割した相関グラフと決定係数である。この決定係数について、比較評価したものを図 2-39 へ示す。図 2-39 によると、低回転域と高回転域の両方において、位相補償アルゴリズム B による決定係数の増大を確認できた。特に、低回転域と比べて高回転域は、決定係数の増大が大きい傾向にあることから、予測精度のクランク軸回転速度依存性が考えられる。

ここで図 2-34 へ着目すると、高回転域においては、相関の高い部分が集中して、一本の線が見られる。仮にこの部分は位相補償のみで予測精度を向上できたものとするれば、予測誤差はパルス位相とパルス幅へ要因が分類され、高回転域においては、誤差要因がパルス位相のみの予測結果が存在することが示唆される。

この高回転域でのみ生じうる、パルス位相による予測誤差の可能性について、演算軽量化の過程で削減した数値分解能の切り捨て影響が考えられる。しかし、位相補償アルゴリズム B 適用後の手法 e は、数値分解能の削減前の手法 b と比べて、予測誤差が低減しているため、説明根拠としては不十分である。

次章の研究によると、エンジンのクランク軸回転周期信号には、目盛り誤差、軸偏心誤差、軸振れ誤差などが含まれている [85]。これらの機械的な誤差についても、クランク軸共振影響などのクランク軸回転周期依存性が考えられることから、これらの関係性についての要因分析を、今後の研究課題とする。

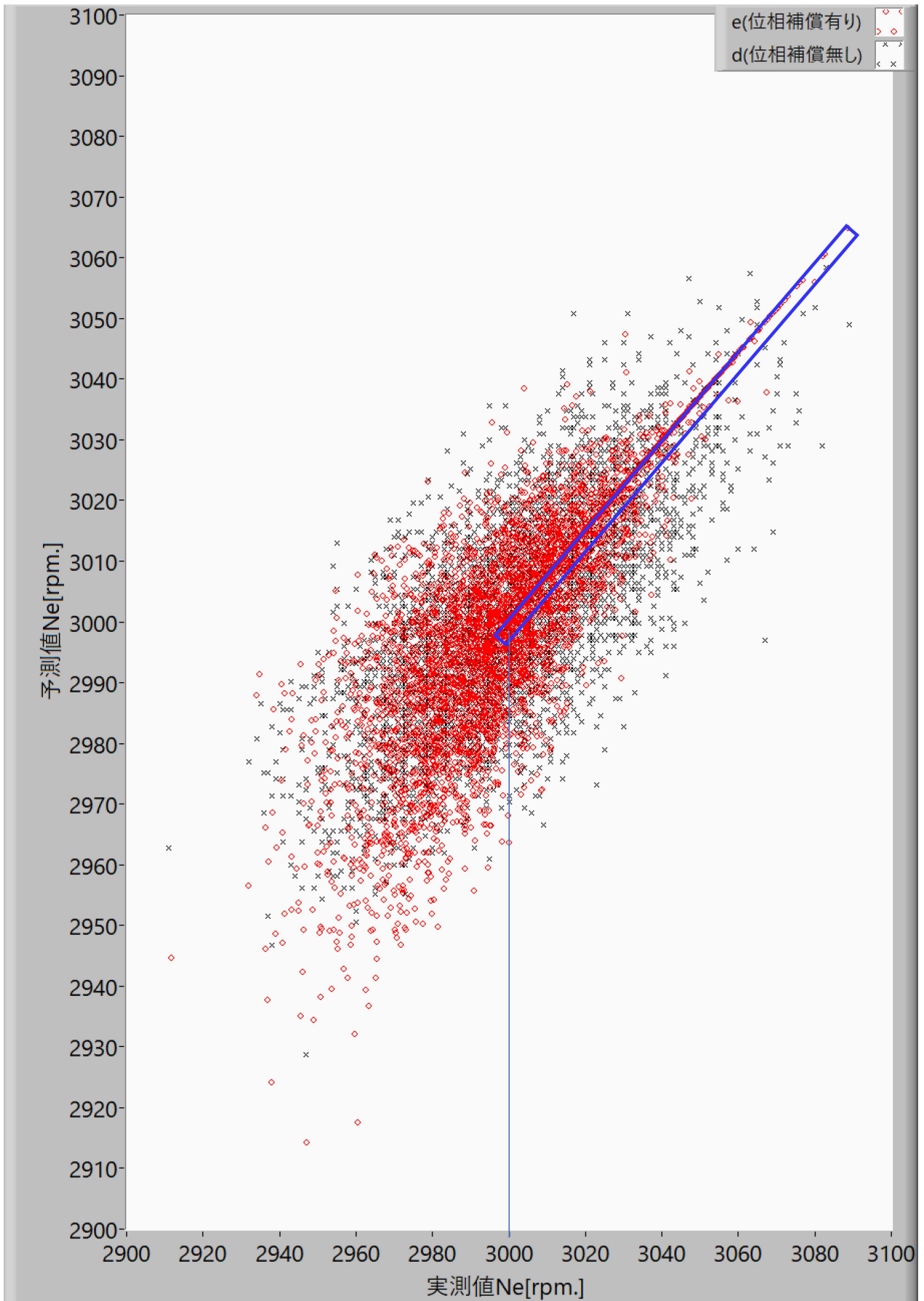


図 2-34 位相補償アルゴリズム有無の比較

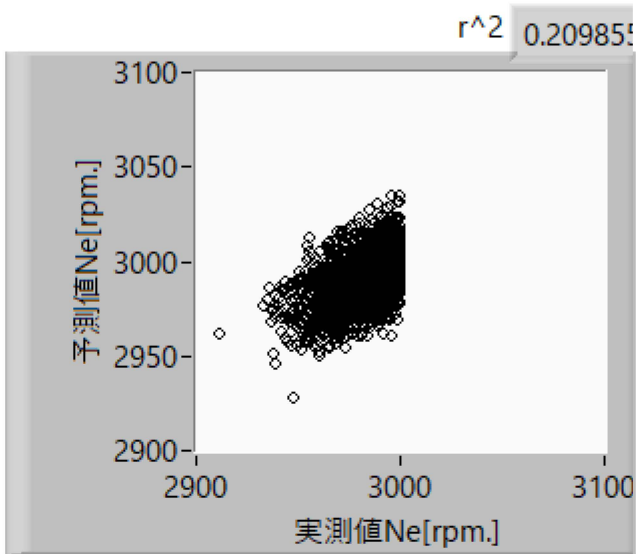


図 2-35 d 位相補償無しの高回転側

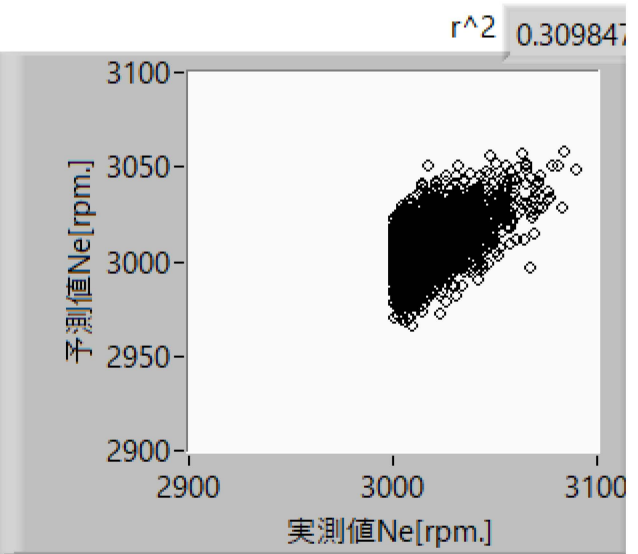


図 2-36 d 位相補償無しの高回転側

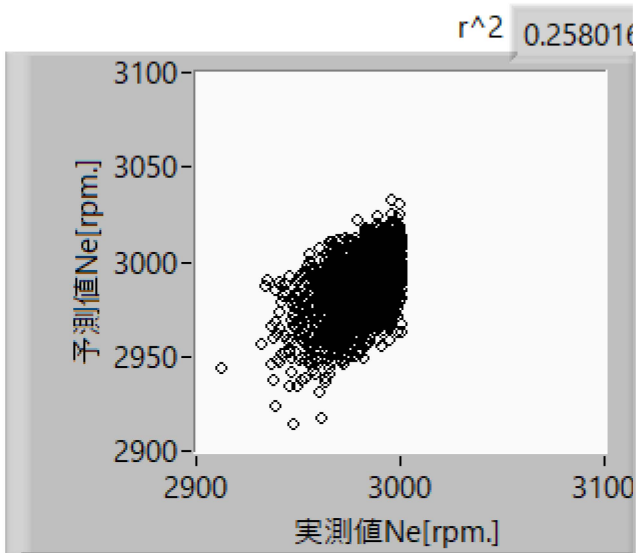


図 2-37 e 位相補償無しの高回転側

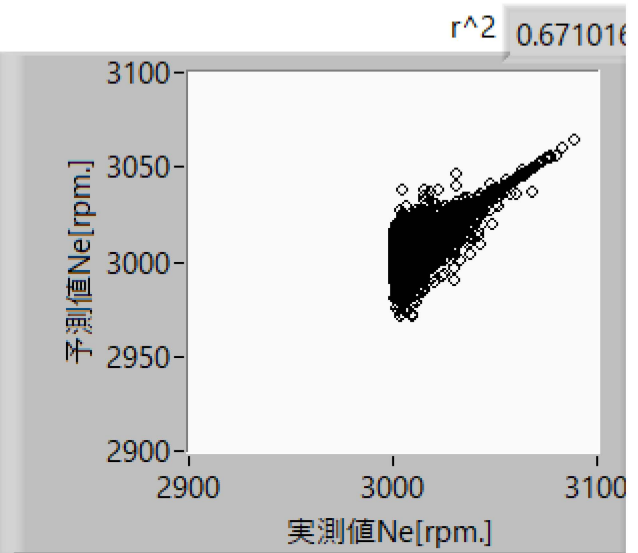


図 2-38 e 位相補償無しの高回転側

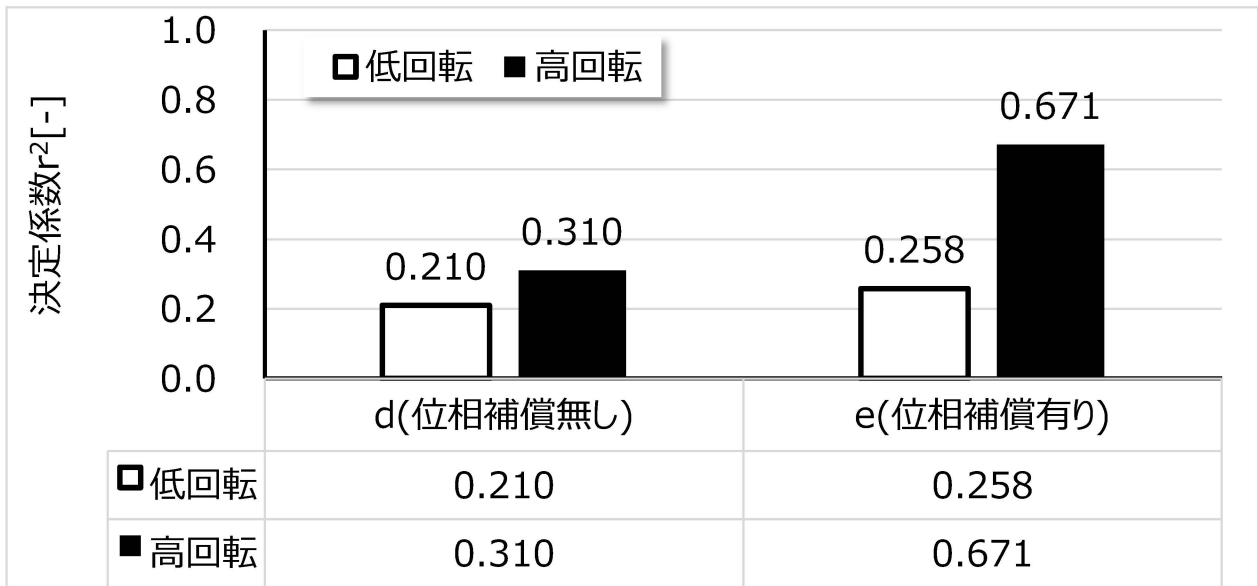


図 2-39 位相補償アルゴリズム B と回転域ごとの決定係数

2.9.章のまとめ

本論文では、ガソリンエンジンの最適な点火エネルギーに関する高速かつ高精度な予測計算を行うための手段として、代表的な時系列予測モデルである AR モデルを適用した。本研究では FPGA を用いた AR モデルの実装方式を提案し、オフライン学習の AR モデルと同等以上の予測精度を十分なリアルタイム性能で実現できることを実験的に示した。

今後の課題としては、

- 1) MA, ARMA, ARIMA, SARIMA [69]等, ほかの予測モデルへの適用.
- 2) 物理モデルを参考にした入力項目の追加による予測精度への感度評価.
- 3) 本研究において, リアルタイムでの予測精度の向上が見られた, 位相補償アルゴリズムの発展や, より詳細な評価.

などがある.

第3章 高精度予測とセンサコスト抑制のトレードオフ

3.1.はじめに

既に述べたとおり、筆者らによる従来の研究においては、筒内の流動状態が常に最悪条件であることを想定しているため、無駄な点火エネルギーが残っていることが懸念される。そのため前章では、筒内の流動状態を間接的に将来予測した。そして、点火制御装置においては、将来予測した筒内の流動状態に応じて、必要な点火エネルギーおよび点火コイルの充電時間を算出する。この充電"時間"を基に点火コイルの充電信号のパルス幅を設定する際、エンジンのクランク角度信号から取得する"角度"単位へ変換する必要がある。しかし後に述べるように、角度信号には複数種類の角度誤差要因が混在していることから、角度誤差に応じた安全率が設定されることになる。つまり、計算リソースを追加投入して、高精度な筒内流動状態の将来予測を行い、電費削減効果を得るためには、角度誤差の低減技術が必要となる。既存研究において角度誤差の低減手法は複数あるが、本研究においては、リアルタイムに自己補正が可能な等分割平均法に着目した。この等分割平均法において、角度誤差を低減するためには、角度センサを増大する必要があるため、精度とコストのトレードオフが生じる。そこで本研究は、コスト指標に角度センサ数、精度指標に決定係数を用いることとし、トレードオフを低減するための最良構成を提案する。

3.2.課題と対策

3.2.1.誤差要因の推定

エンジンのクランク角度の変位は、燃焼室の筒内圧力の変動により生じている。この筒内圧力を基準として、クランク角度の変位を検出するまでの間に生じる誤差を研究対象とする。そのため、筒内圧力センサとクランク角度センサを測定対象とした場合、両者間の物理的な伝達経路はおよそ図 3-1へ示すものとなる。

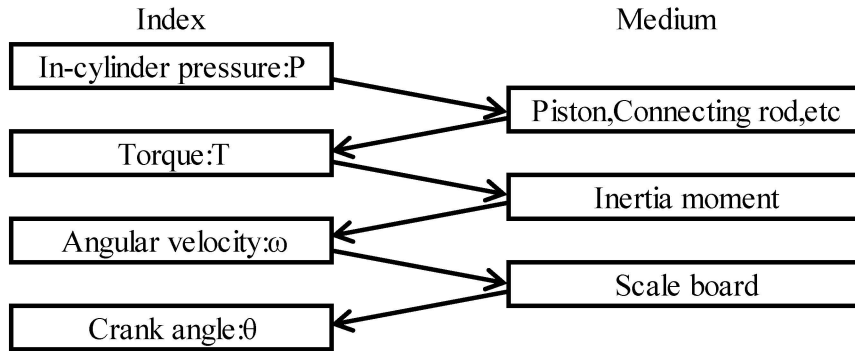


図 3-1 物理的な伝達経路の例

この経路間関係式について、株式会社 エー・アンド・デイ [86]の検討によれば、4サイクル直列4気筒エンジンの場合は、以下となる。

筒内圧力Pによるトルク : T_p

$$T_p = P \frac{\pi}{4} D^2 * r \left(\sin \theta + \frac{r}{2l} \sin 2\theta \right) \quad (4-1)$$

往復運動部慣性によるトルク : T_i

$$T_i = M_w * r^2 \omega^2 \left(-\frac{r}{4l} \sin \theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta + \frac{3r}{4l} \sin 3\theta \right) \quad (4-2)$$

内部発生トルク : T_e

$$T_e = T_{p1} + T_{i1} + T_{p2} + T_{i2} + T_{p3} + T_{i3} + T_{p4} + T_{i4} \quad (4-3)$$

角速度 : ω

$$\omega = \int_{\theta=0}^{\theta=360} \frac{T_e}{I} \quad (4-4)$$

P [Pa]:各クランク角度における筒内圧力, D [m]:シリンダ直径, r [m]:クランク半径, l [m]:コンロッド長さ, θ [rad]:クランク角度, M_w [N]:ピストン往復運動部慣性質量, ω [rad/sec]:角速度, T_{pN} [Nm]:N番気筒圧力トルク, T_{iN} [Nm]:N番気筒慣性トルク, I [kNm²]:車両の駆動系の慣性モーメント

式(1)～(4)の関係には様々な誤差要因が含まれており、このほかにも実用上はトランスミッションやカム駆動などの負荷変動、軸ねじり振動などが加わるため、厳密な計算は困難である。このため、実験的な誤差要因の特定を試みた。

図 3-2と図 3-3は、筒内圧力センサとクランク角度センサの出力を同時測定し、筒内圧力センサと式(1)～(4)より算出した角速度 ω_P と、クランク角度センサより算出した角速度 ω_I を示したグラフの一例である。横軸はクランク角度 θ であり、クランク軸1回転分を表示している。気筒番号ごとの筒内圧力をP1～P4とする。図 3-3は、1回転の始点と終点における角速度 ω_I の値が一致するように、傾きを補正している。図 3-2の筒内圧力と図 3-3の角速度の変動周期が一致しており、伝達関係にあることを確認できる。 ω_P と ω_I の相関関係を分析した結果、決定係数は0.17であり、誤差要因が含まれていると考えられる。図 3-3の ω_P と ω_I は相似形であるが、10[deg.]ごとに ω_P と ω_I の誤差が大きく変化している。図 3-1の筒内圧力からクランク角度への伝達経路において、10[deg.]ごとに変化する箇所は目盛り盤であるため、クランク角度センサによる角度検出が誤差要因と考えられる。図 3-3の ω_P と ω_I を周波数解析した結果を図 3-4へ示す。グラフの縦軸はリアスペクトルである。すべての次数において誤差が存在していることから、誤差には様々な周波数成分が含まれていることが分かる。

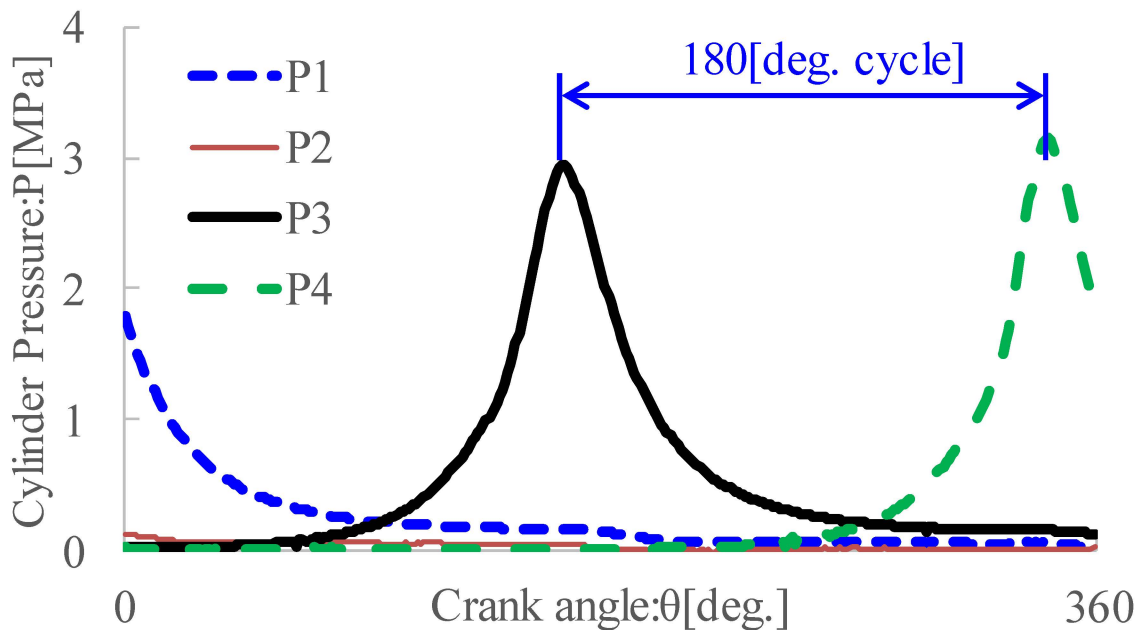


図 3-2 筒内圧力の測定例

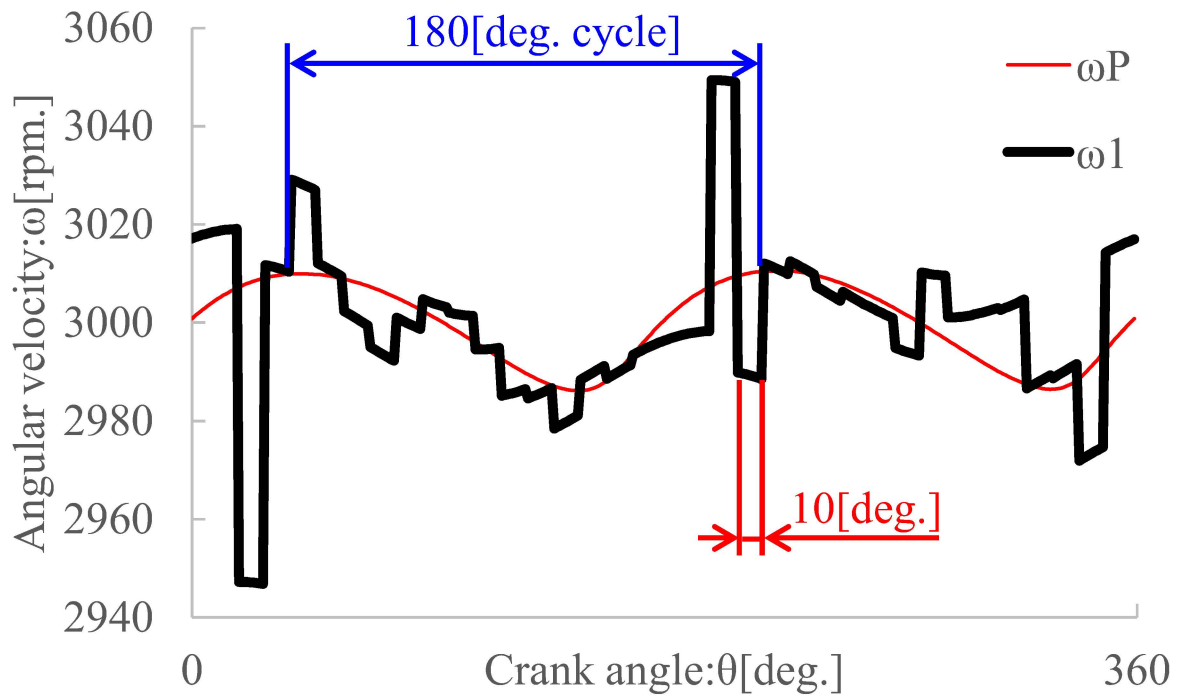


図 3-3 ω_p と ω_1 の比較

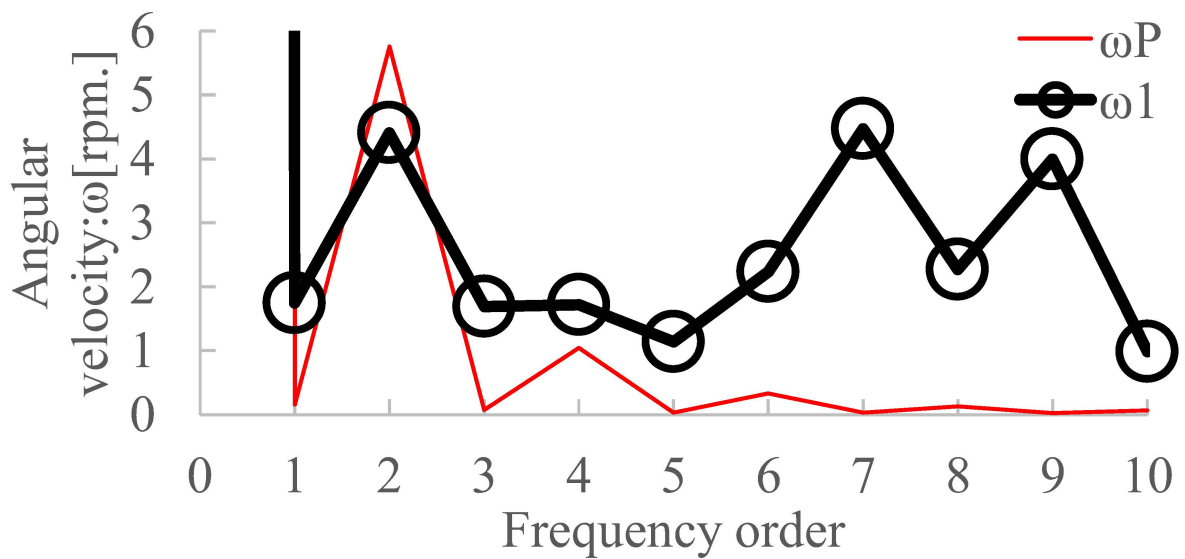


図 3-4 周波数解析結果(ω_p , ω_1)

クランク角度センサの角度検出原理は、図 3-5へ示すように回転軸に固定された目盛り盤に目盛りが刻まれており、回転軸の回転とともに移動する目盛りの数をクランク角度センサ²³で検出し、角度信号を出力する。渡部 [87]の報告によると、この角度信号に含まれる角度誤差の発生要因は、大きく分けて以下の3つがある。

²³ <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/allegro-technology/hall-effect-sensor-technology/chopper-stabilization>

1) 目盛り誤差

目盛り盤へ刻まれた目盛り線が、等角度間隔の理想位置からずれていることによる誤差である。目盛り盤において、目盛り線は外周部の切欠き加工により形成されている。切欠き加工誤差のほか、磁性材異物の付着、熱変形、などが誤差要因となる。加工方法によっては規則性が無く、ランダムにずれが生じるため、周波数成分ではすべての次数成分で誤差を発生させる可能性がある。

2) 軸偏心誤差

クランク軸の回転中心とシグナルロータの回転中心の偏心による誤差。偏心がクランク角度センサの磁界へ影響を及ぼすことで、角度誤差が生じるものである。偏心の周期は $360[\text{deg.}]$ のため、周波数成分は1次成分のみとなる。

3) 軸振れ誤差

クランク軸に取り付けられたベアリングや、エンジン自体の振動等による誤差。エンジン振動などの規則性の無い要因によって生じるため、周波数成分はすべての次数成分で誤差を発生させる可能性がある。

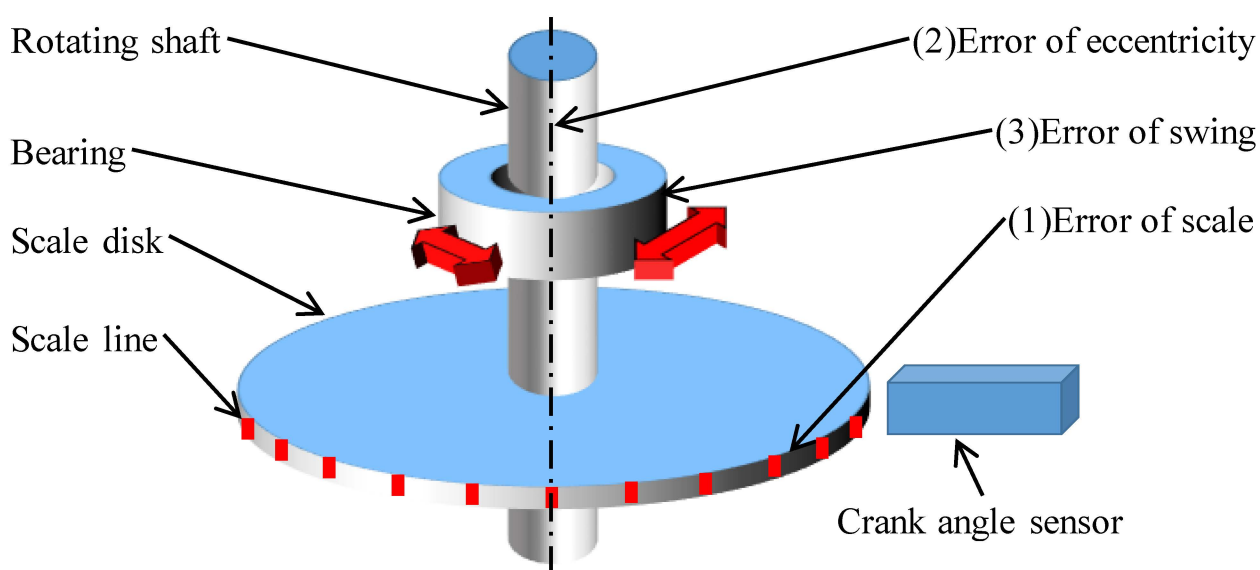


図 3-5 クランク角センサの構成例

3.2.2.角度誤差低減方法

益田 [88], 豊山 [89]の報告によると, 主要な角度の自己校正法としては, 表 3-1へ示すように, デバイダー法 [89], 同時校正法 [89], マルチ再生ヘッド法 [90], 等分割平均法 [91] [92] [93]などがあり, それぞれに長所と短所がある.

表 3-1 角度の各種の校正法とその特徴

校正法	標準器との比較測定	自己校正法(一段高精度な標準器を必要としない)			
		デバイダー法	同時校正法	マルチ再生ヘッド法	等分割平均法
長所	高精度な校正が容易	校正が容易	高精度	高精度な校正が短時間に可能	高精度. 一般のエンコーダに適用可
短所	高精度な標準器が必要	目盛数大で高精度不可	目盛数大で作業量極端に増加	校正できるエンコーダに制限あり	高精度割出機構が必要
校正作業量	N:校正目盛数	2N	N ²	N	5~30N
校正値の標準偏差	σ :角度測定の標準偏差	$\sqrt{(N/2)}\times\sigma$	$\sqrt{(2/N)}\times\sigma$	$0.7\times\sigma$	$\sigma/\sqrt{(5\cdots 30)}$

表 3-1において, 等分割平均法は, 高精度且つ一般のエンコーダに適用が可能で, 国家標準²⁴への採用実績もあることから, エンジンへの適用を検討した. 等分割平均法は図 3-6へ示すように, 目盛り盤の周方向へ複数個のクランク角度センサを, 等角度間隔に配置して, 各クランク角度センサから出力した角度信号の周期を平均する方法である.

²⁴ https://www.jqa.jp/service_list/measure/service/length_angle/rotari.html

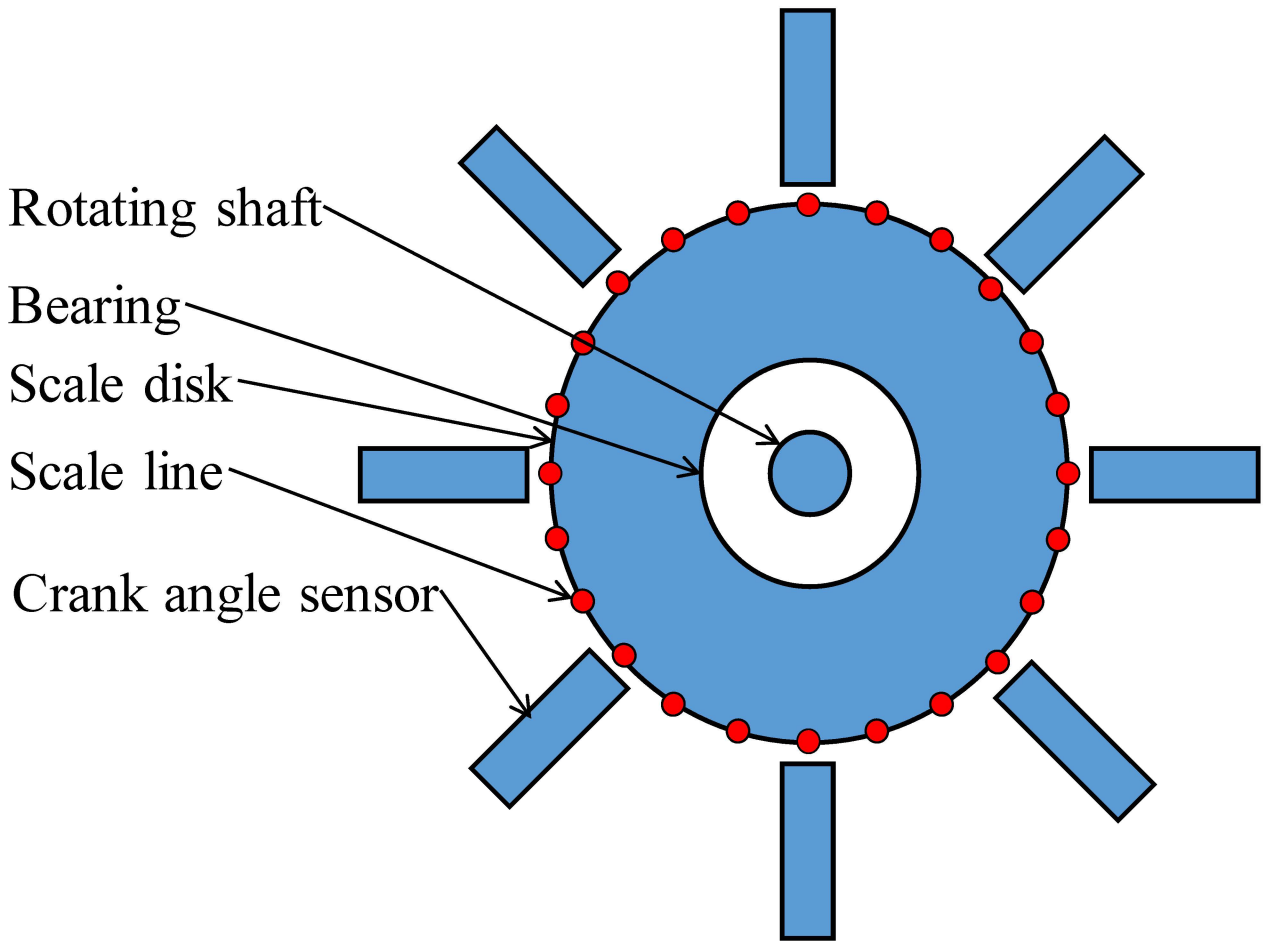


図 3-6 クランク角センサの配置例

クランク角度センサの個数と自己校正対象の関係は次のとおりである。角度誤差 $f(\theta)$ は離散フーリエ級数の和として、式(4-5)で表す。

$$f(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{ik\theta} \quad 4-5$$

θ :クランク角度, N :目盛り数, M :クランク角度センサの個数, m :クランク角度センサの番号($=0, 1, 2, \dots, M-1$), κ :周波数成分, c_κ :周波数 κ の角度誤差の振幅

式(4-5)の $f(\theta)$ は、クランク角度センサ $m=0$ が検出する角度誤差となり、クランク角度センサ m が検出する角度誤差は $f(\theta)$ から θ_m だけ位相がずれる。

$$\theta_m = \frac{2\pi}{M} m \quad (4-6)$$

よって、クランク角度センサ m が検出する角度誤差は式(4-7)で表される。

$$f(\theta - \theta_m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{ik(\theta - \theta_m)} \quad (4-7)$$

式(4-7)の m に対する平均は、目盛り盤の周方向へ配置した M 個のクランク角度センサから出力される信号の平均値となるため、角度誤差もそれぞれのクランク角度センサからの角度誤差の平均値となる。

$$\overline{f(\theta - \theta_m)} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f(\theta - \theta_m) \quad (4-8)$$

式(4-6)(4-7)を代入し、等比級数の公式を適用すると

$$\overline{f(\theta - \theta_m)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{ik\theta} d_k \quad 4-9$$

$$d(k) = \begin{cases} 1 & k = Mz \\ 0 & k \neq Mz \end{cases} \quad (Mz < N, z \text{は正の整数})$$

式(4-9)は、角度誤差 $f(\theta)$ から M の倍数となる周波数成分のみを持つ値となり、角度誤差の低減にはクランク角度センサ数の増加が有効である。誤差成分の次数ごとの自己校正可否を表 3-2へ示す。クランクセンサの数で校正対象の誤差要因を調節可能なことから、誤差要因の推定へ活用可能と考えられる。以上より、角度誤差の低減と、要因推定の見通しを得た。

表 3-2 自己校正の対象

		Frequency order												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	359	360
Number of sensors	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	...	×	×
	2	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	...	○	×
	3	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	...	○	×
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	8	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	...	○	×
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	360	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	...	○	○

○ : Self-calibration, × : No-calibration

3.3.実験方法と実験装置

3.3.1.実験方法

誤差要因の推定要因を検証するため、表 3-3へ示す測定手段を実エンジンへ装着した。表 3-3において、列方向は測定手法を示し、行方向は誤差要因の分類を示している。

測定手法について、筒内圧力センサとクランク角度センサの個数を示している。それぞれの測定手法による計測値を比較するための指標に角速度を用いることとし、記号を ω_P , ω_1 , ω_2 , ω_8 と定義する。

次に誤差要因の分類について、角度誤差とそのほかの誤差に分類し、さらに角度誤差の内訳として、軸偏心誤差、目盛り誤差、軸振れ誤差を示している。筒内圧力より算出した角速度 ω_P を基準とした場合、図 3-1へ示すような伝達経路において、様々な誤差が生じる。この誤差の中において、角度誤差以外をそのほかの誤差へ分類した。

表 3-3中の数値は、図 3-3の回帰分析による決定係数 (0.17) で、 ω_P を基準にしている。ここで、決定係数を精度指標として、誤差要因ごとの決定係数の合計が1になると仮定する。例えば、クランク角度センサ1個の場合は、すべての誤差を含んだ状態になるため、1から0.17を減じた0.83が誤差の総和であるものとする。

そして各測定手段からの出力信号を同時に測定し、それぞれの測定値を角速度へ変換することで、誤差の内訳を比較評価できるようにした。表 3-3において、図 3-2と図 3-3の測定に用いた、筒内圧力とクランク角度センサ1個に加えて、クランク角度センサ2個とクランク角度センサ8個での測定を行う。クランク角度センサ2個を用いた測定では、主に軸偏心誤差の低減を期待できる。クランク角度センサ8個を用いた測定では、すべての角度誤差についての低減を期待できる。エンジンへ等分割平均法を適用するためには、目盛り盤の周方向に複数個のクランク角度センサを、等角度間隔に配置する必要がある。このため、クランク角度センサ2個の場合については、既存のクランク角度センサの軸対称位置へクランク角度センサを追加で取り付け付けた。しかし、クランク角度センサ8個の場合については、取り付けスペースを確保できないことから、クランク軸先端部へロータリエンコーダ²⁵を取り付けて、ロータリエンコーダ内の目盛り盤の周方向へ8個のクランク角度センサを等角度間隔で配置した。

表 3-3 測定方法

		In-cylinder pressure sensor	Crank angle sensor		
			1 crank angle sensor	2 crank angle sensors	8 crank angle sensors
Error factor	Base		0.17		
	Error of angle	Eccentricity	1.00	Calibable	Calibable
		Scale		0.83	
		Swing			
Other error					
Symbol of angular velocity		ω_p	ω_1	ω_2	ω_8

3.3.2.ロータリエンコーダの試作と校正

表 3-3において、クランク角度センサ8個を用いたロータリエンコーダは、角度誤差と角度誤差以外の要因分離を目的としていることから、高精度な角度基準器として用いる。しかし、供試エンジンへ搭載可能なロータリエンコーダで、角度誤差を自己校正できるものが無いため、試作と校正を行った。試作品の設計仕様を示す。

²⁵ <http://ednjapan.com/edn/articles/1205/28/news007.html>

1) センサ数の選定

角度誤差の低減には、角度センサの個数を増やす必要がある。しかし、クランク角度センサの個数を増やすと、サイズやイナーシャが増大するため、エンジンへの搭載が難しくなり、角速度へ影響することも考えられる。本稿では、クランク角度センサの個数による、角度誤差の低減能力を評価することも検討し、クランク角度センサの個数を8個とした。

2) 検出方式

小型化のため、インクリメント方式とした。

3) 出力相・出力形態

ノイズ対策のため、角度信号の出力を差動とした。

4) 角度分解能

標本化数を増やすことで、より詳細な評価が行えるため、供試エンジンへ搭載された目盛り盤の36[ppr]と比べて、10倍の360[ppr]とした。

5) 最高応答周波数

供試エンジン最高回転数と角度分解能より36[kHz]とした。

6) 出力容量

測定器側の仕様により、TTL信号出力とした。

7) 最高許容回転数

供試エンジンの最高回転数と同様に6000[rpm.]とした。

8) 保護構造

ダストの影響を受けない様、防塵構造とした。

9) 設計結果

以上の試作仕様に基づいた、ロータリエンコーダの外形と断面を図3-7へ示す。

ロータリエンコーダを小形化するため、内蔵するクランク角度センサにフォトICを用いた。8個のフォトICそれぞれが目盛り盤の目盛りとの距離に対応したアナログ電圧信号を出力する。

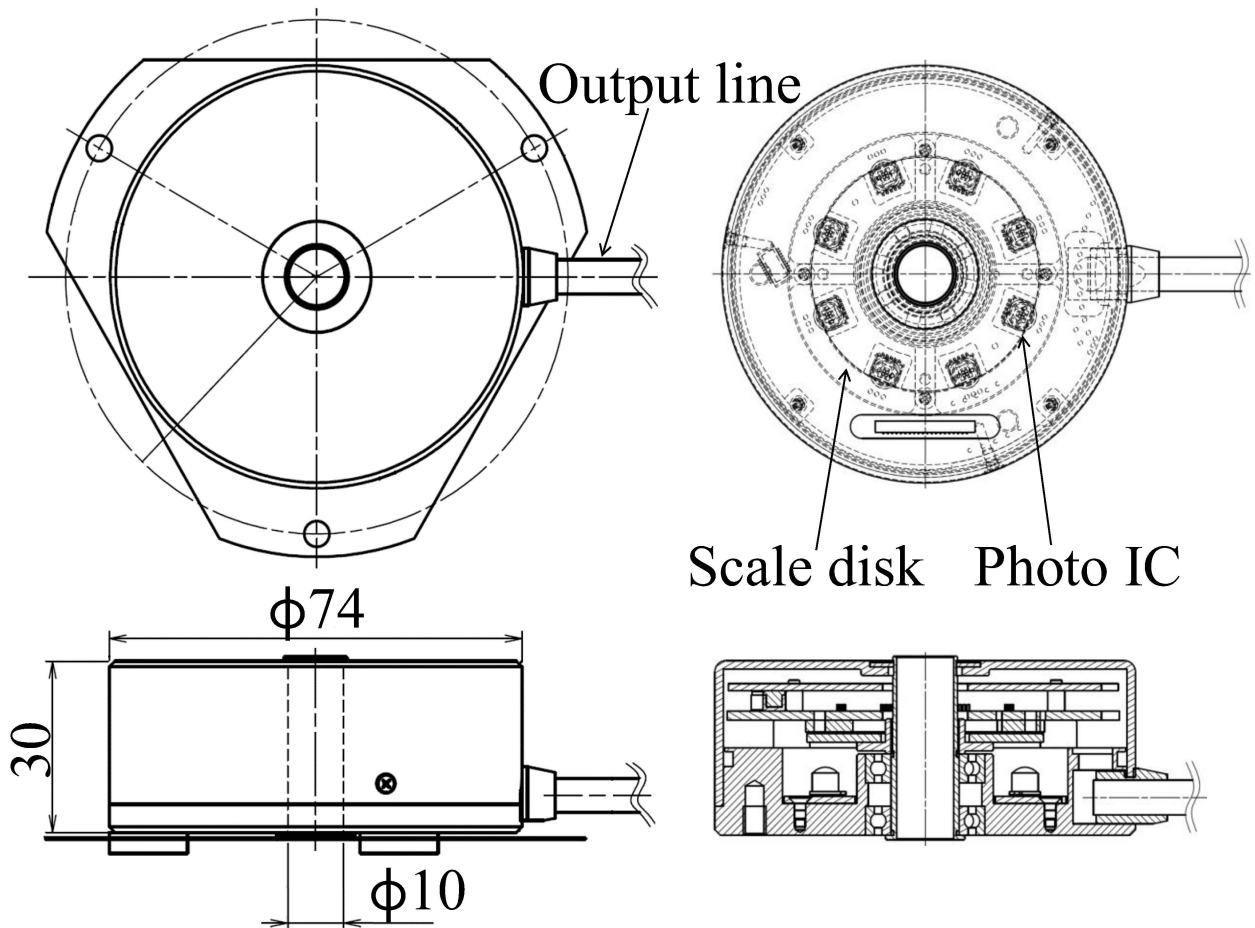


図 3-74 ロータリエンコーダの外形図と断面図

3.3.3. ロータリエンコーダ内部処理回路

試作仕様に基づいた、ロータリエンコーダの内部処理回路図を図 3-8へ示す。8個のフォトICから出力されたアナログ電圧信号を、演算回路で平均化処理する。平均化されたアナログ電圧信号はコンパレータ回路を介してデジタル信号へ変換され、出力信号線へ出力する。デジタル信号へ変換する前に平均化処理することで、自己校正がリアルタイムに行われる。

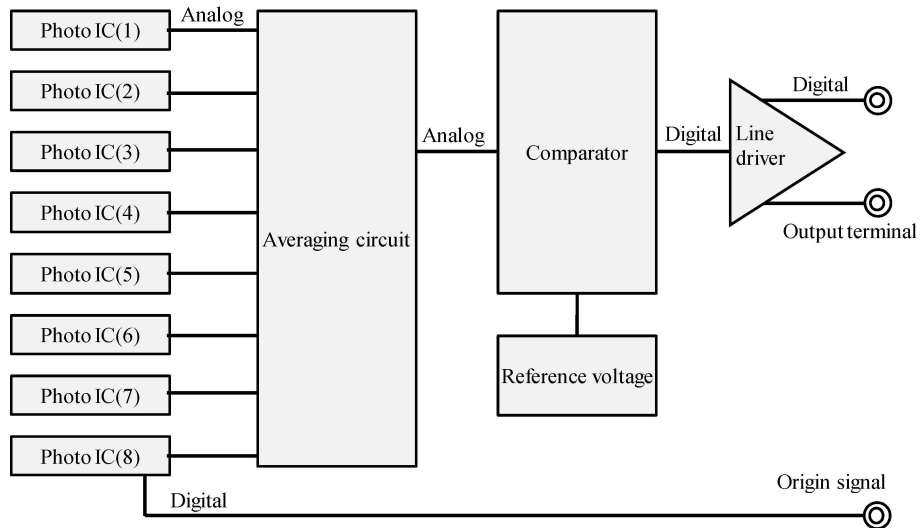


図 3-8 内部処理回路図

3.3.4. ロータリエンコーダ試作品の概観

試作品の概観を図 3-9へ示す。エンジン振動に伴う、スラスト荷重による破損を防止するため、ロータリエンコーダの固定具を板バネとした。

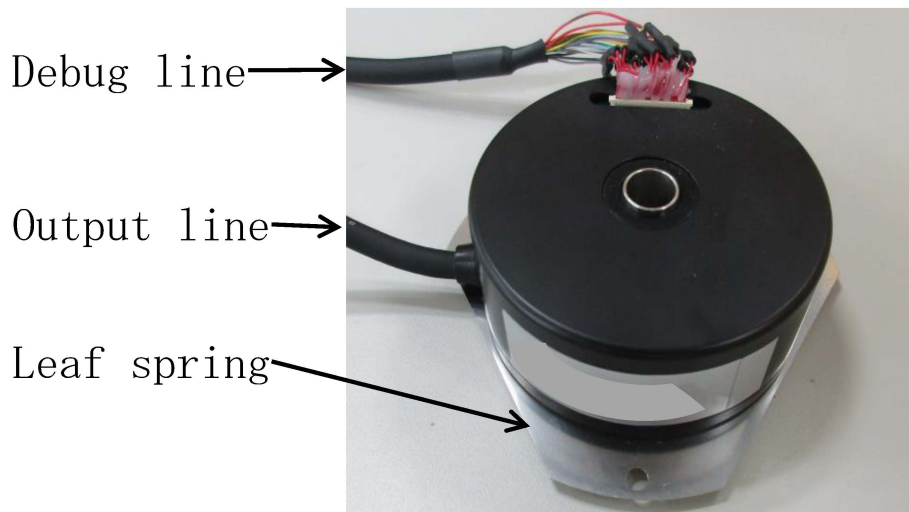


図 3-9 試作品の概要

3.3.5. ロータリエンコーダの単体性能評価実験

試作したロータリエンコーダの計量トレーサビリティを確保するため、単体性能評価実験を実施した。角度校正装置の仕様を表 3-4へ示す。校正の不確かさは0.01[角度秒]となっている。これは約2.8[μ deg.]であり、これが最高の測定能力となる。

表 3-4 角度校正装置の仕様

	Specification
Target equipment	Rotary encoder with an origin signal and within 225,000 angular points
Calibration items	Angle deviation
Calibration range	360[deg./round]
Calibration uncertainty	0.01["] (Maximum measurement capability)
The level of trust	About 95[%]
Rotational speed	0.1~10[rpm.]
Ambient temperature	Normal temperature

角度校正装置と試作品の接続構成を図 3-10へ示す。角度校正装置の回転軸へ試作したロータリエンコーダを装着し、角速度5[rpm.]にて単体性能実験を実施した。

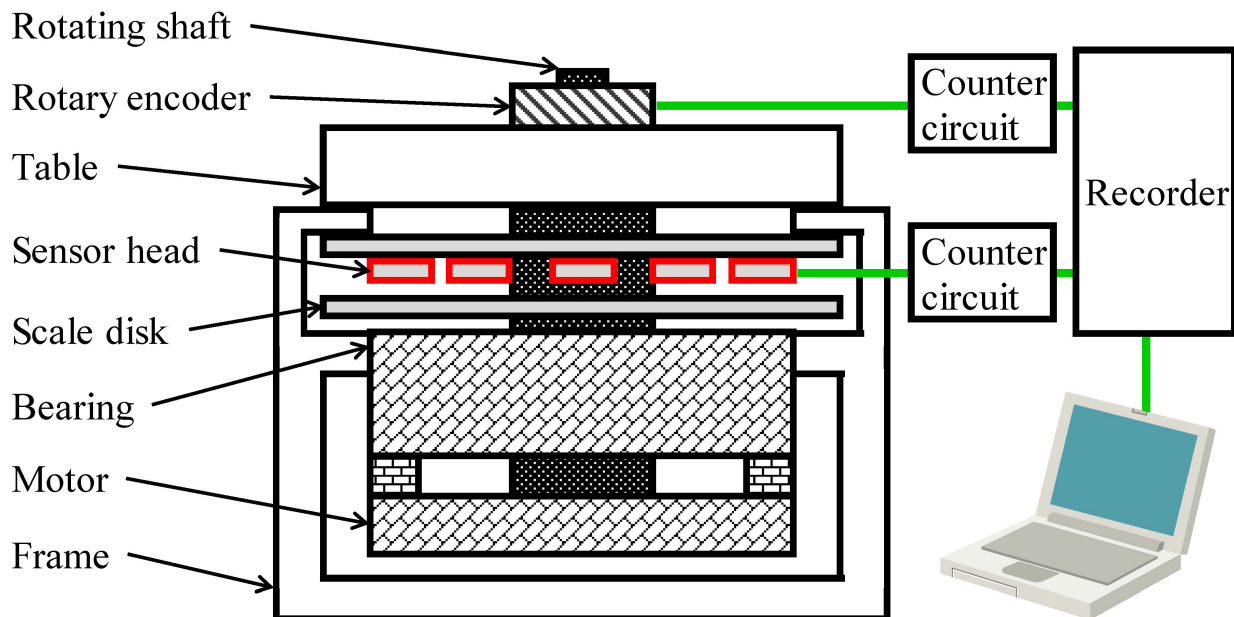


図 3-10 角度校正システム

性能評価結果を図 3-11と図 3-12へ示す。図 3-11の横軸は、角度校正装置を回転駆動させて評価した際の回転位置（角度）であり、図 3-8のOrigin signalを基準（ゼロ）としている。図 3-11の縦軸は、角度校正装置により設定された回転位置（角度）と、試作品が出力した回転位置（角度）の偏差（誤差）である。

図 3-11へ示す通り，角度誤差は約8.5["](角度秒)となり，これは約2.3[mdeg.]に相当する．表 3-5の目盛り線設計公差±0.1[deg.]の範囲0.2[deg.]と比較すると，角度誤差が約98 [%]低減している．角度誤差が十分に小さいと判断し，高精度な角度基準器として用いることとした．

図 3-12は，図 3-11のFFT（高速フーリエ変換）処理により，周波数解析した結果である．図 3-12の横軸は，周波数の次数である．図 3-12の縦軸は，角度校正装置により設定された回転位置（角度）と，試作品が出力した回転位置（角度）の偏差（誤差）であり，FFT処理により振幅として算出される．図 3-12へ示す通り，周波数次数ごとの角度誤差は，8の倍数次において角度誤差が相対的に大きくなっている．表3-2によると，クランク角度センサが8個の場合，8の整数倍の次数は校正不可となることから，推定通りの結果を得た．そのほか，8次未満においてもほかの次数と比べて角度誤差が大きくなっている．これは，アナログフォトICの感度特性の個体差や，配置ずれが要因と考えられ，更なる角度誤差低減の可能性を示している．

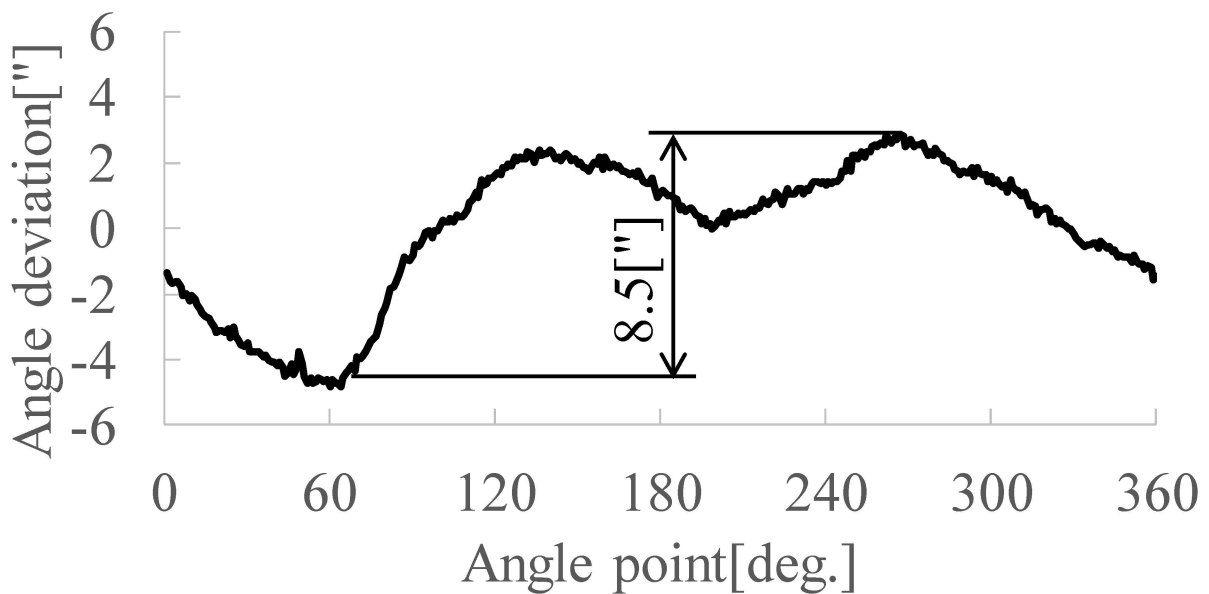


図 3-11 単体評価実験結果

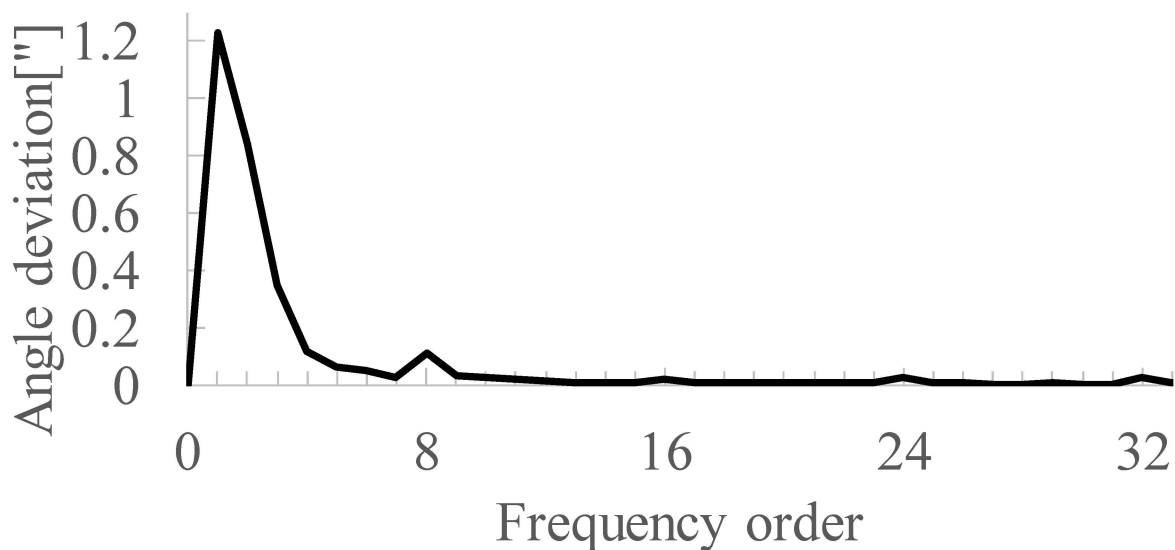


図 3-12 角度偏差の周波数分析結果

3.3.6. 供試エンジン

供試エンジンには市販自動車用の量産エンジンを用いた。主な諸元を表 3-5へ示す。

表 3-5 供試エンジンの仕様

Format	In-line four-cylinder, 4 cycle
Total displacement	1.6[litre]
Compression ratio	10.5[-]
Fuel	Unleaded Premium Gasoline
Scale line design tolerance	±0.1[deg.]

3.3.7. 実験装置

表 3-3へ示す4種類の測定手段を供試エンジンへ装着し、図 3-13へ示す構成で角度信号を同時測定する。各測定手段からの出力信号は測定器経由でPCへ同時収録する。クランク角度センサより出力されるパルス信号は、測定器内のカウンタ回路にて周期情報へ変換される。ロータリエンコーダはリアルタイムで自己校正し、クランク角度センサと同様のパルス信号を出力する。カウンタ回路の基準周波数は、クランク角度センサに対して、エンコーダの角度分解能を10倍としたことに伴い、量子化数を確保する観点か

ら、100[MHz]とした。筒内圧力センサの出力信号は、増幅アンプとAD変換器(ADC)を介して電圧情報へ変換され、ロータリエンコーダから出力されるパルス信号の立下り時期に同期して測定する。以上により、筒内圧力と角速度を同時に測定した。

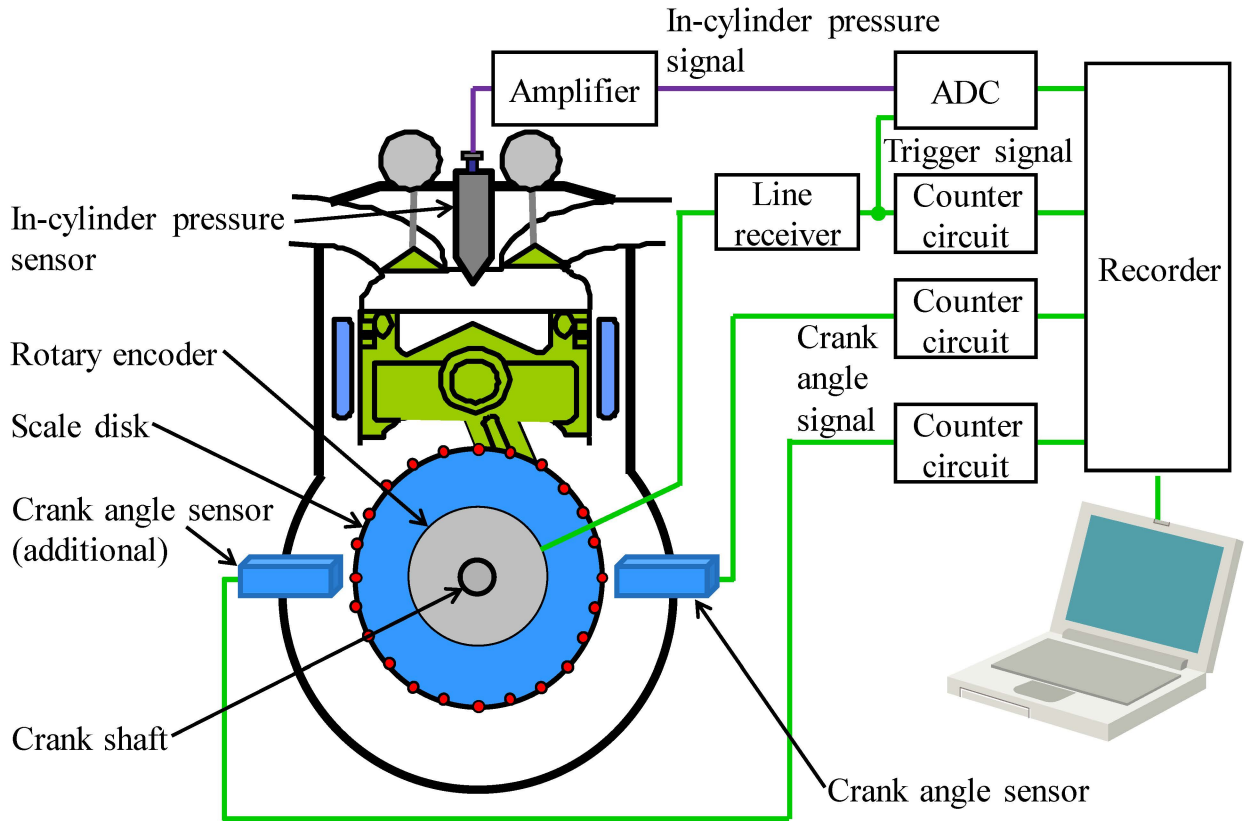


図 3-13 評価設備の構成

3.4.実験結果

供試エンジンをクランク軸角速度3000[rpm.]，クランク軸出力トルク50[Nm]にて運転した場合の測定波形の一例を，図 3-3，図 3-14，図 3-15へ示す。グラフの横軸はロータリエンコーダより検出したクランク角度で， ω_p と ω_1 ， ω_2 ， ω_8 の角速度を比較したものである。各波形は相似であり，筒内圧力の位相に応じた変化を示していることから，筒内圧力の変化が角速度の変化へ反映されていることが分かる。そして，クランク角度センサの数の増加と共に ω_p との偏差が小さくなっている。このことから，等分割平均法が位相の遅れなく，角度誤差を低減していることを確認できた。

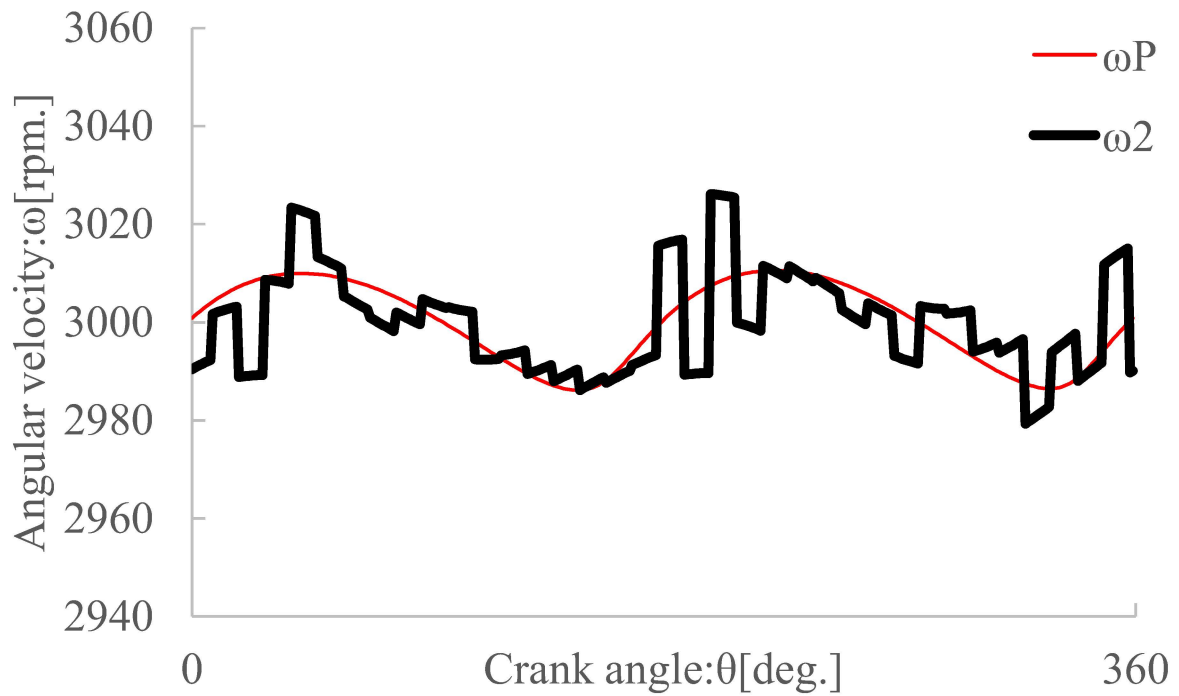


図 3-14 ω_p と ω_2 の比較

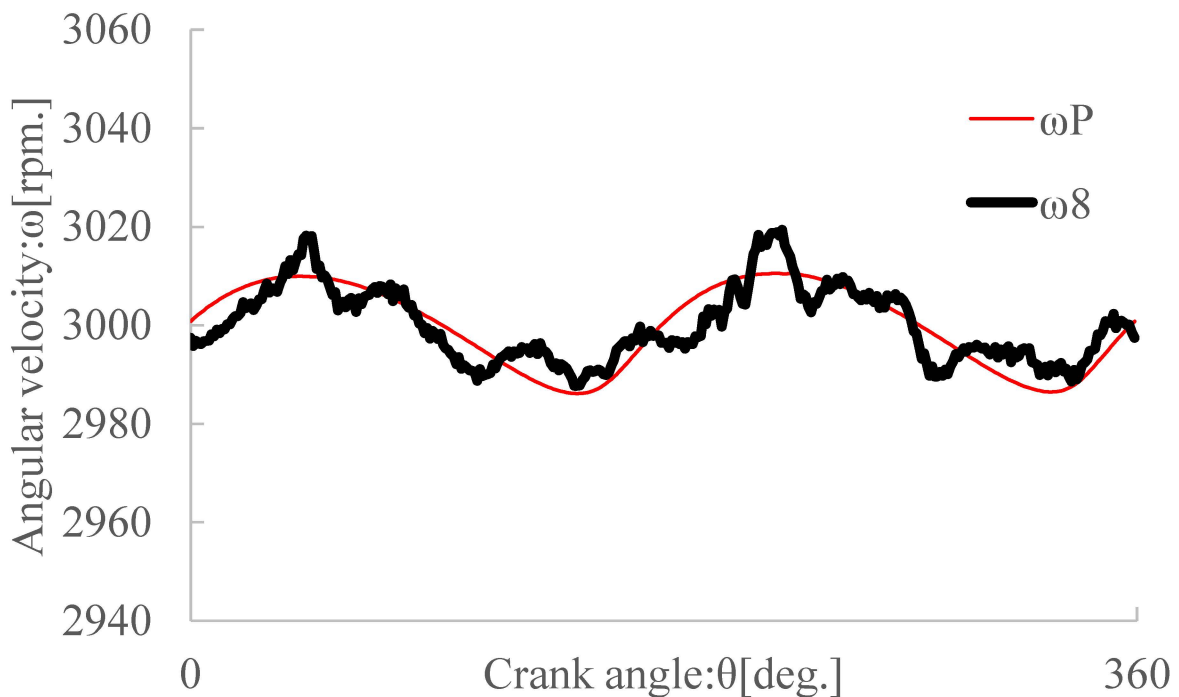


図 3-15 ω_p と ω_8 の比較

ω_p と ω_1 、 ω_2 、 ω_8 についての、周波数分析結果を図 3-4、図 3-16、図 3-17へ示す。 ω_1 と比べて ω_2 は1次における ω_p との偏差が小さくなり、 ω_p と ω_2 の1次はほぼ同等である。このことから、 ω_1 の1次における偏差の要因は角度誤差であることが分かる。 ω_p と比べて ω_8 は8次のみ偏差が大きくなっており、実エンジン上でも等分割平均法の特性が反映されていることを確認できた。

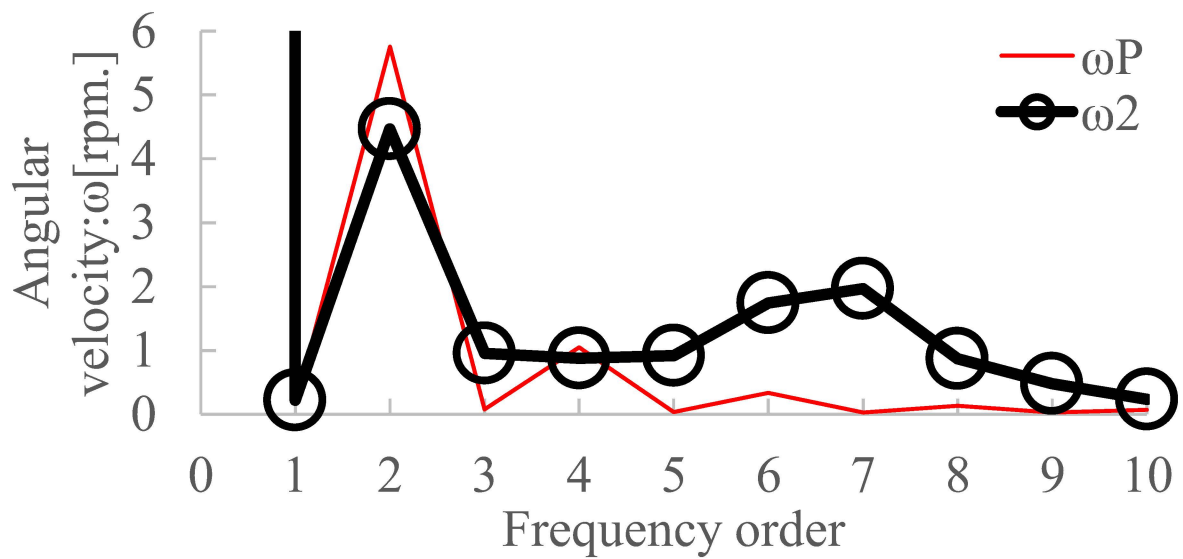


図 3-16 周波数解析結果(ω_p , ω_2)

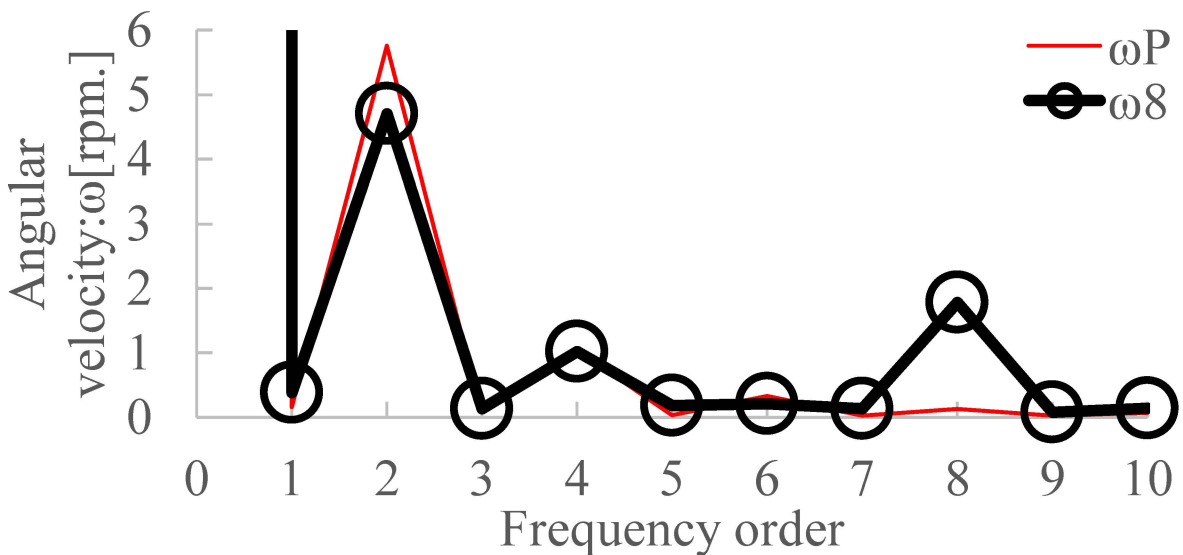


図 3-17 周波数解析結果(ω_p , ω_8)

ω_p に対する、 ω_1 , ω_2 , ω_8 の回帰分析結果を表 3-6へ示す。クランク角度センサの数と共に決定係数が増加しており、表 3-2の見通し通りに角度誤差を低減できたものと考ええる。表 3-6は、 ω_p の決定係数を1として、表 3-3の既知の値と実験値との偏差により、算出した内訳を示している。決定係数の内訳の和が1になると仮定した場合、角度誤差全体に相当する決定係数が0.54であるのに対して、角度誤差の1次成分に相当する決定係数は0.23である。つまり、角度誤差の1次成分が軸偏心誤差のみであると仮定した場合、角度誤差の内訳として、クランク軸の軸偏心要因が約43[%](=0.23/0.54)であることを示している。

表 3-6 回帰分析結果

		Measurement methods			
		In-cylinder pressure sensor	Crank angle sensor		
			1 crank angle sensor	2 crank angle sensors	8 crank angle sensors
Error factor	Base		0.17	0.17	0.17
	Error of angle	Eccentricity	1.00	0.23	0.54
		Scale		0.6	0.54
		Swing			
	Other error				0.29
Symbol of angular velocity		ω_p	ω_1	ω_2	ω_8
Coefficient of determination		1.00	0.17	0.40	0.71

3.5. 考察

既に述べたとおり，等分割平均法において，自己校正対象には限定があり，配置センサ数によって，自己校正対象の周波数次数の割合は増加するというトレードオフが存在する．図 3-18 は，トレードオフの関係を確認したものであり，横軸をセンサ数としている．図 3-18 の○プロットは，表 3-6 の決定係数であり，△プロットは，表 3-2 における自己校正の次数割合（○と×の比率）である．決定係数と自己校正次数割合は，同様の傾向を示している．

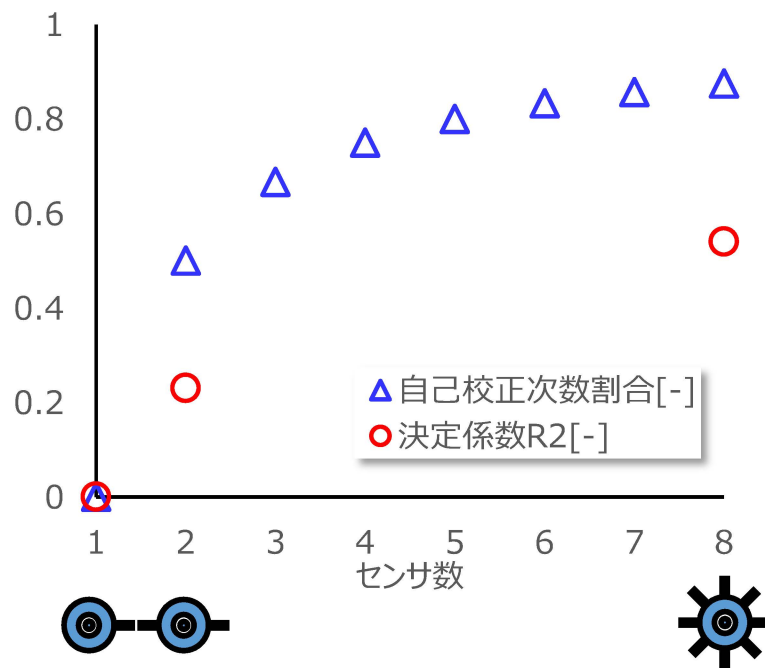


図 3-18 実験結果

決定係数と自己校正次数割合の関係性を確認するため、正規化することで単位を無次元化した結果を図 3-19 へ示す。図 3-19 より、決定係数と自己校正次数割合の値はほぼ一致していることから、3.2.2 章で示した誤差要因の仮説を実験的に検証できた。

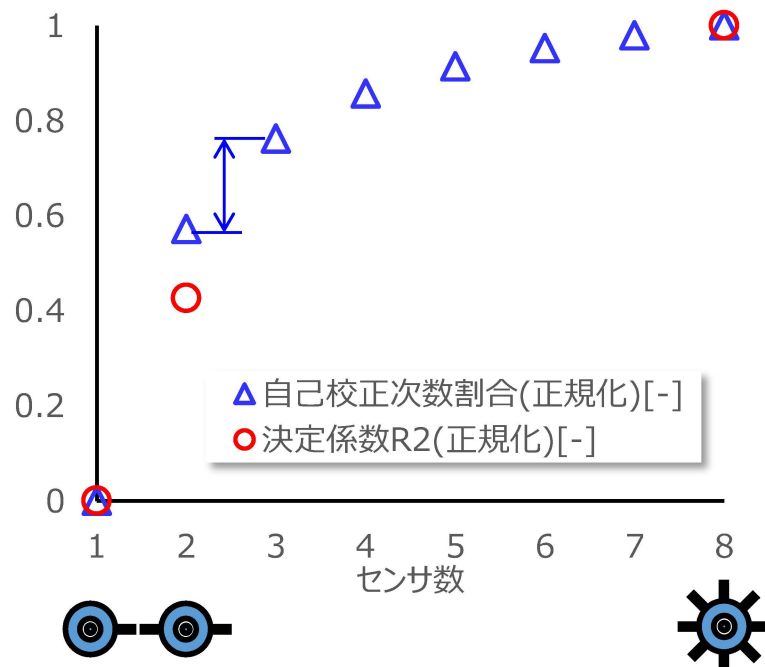


図 3-19 実験結果の正規化

決定係数と自己校正次数割合を正規化することで、値がほぼ一致することから、自己校正次数割合を精度指標として代用することとする。これにより、センサ数ごとの精度

指標が得られることになる。図 3-20 はセンサ数と正規化した自己校正次数割合の増分の関係を示したものである。図 3-19 より、センサ数の増加に伴い、正規化した自己校正次数割合は増加している。しかし図 3-20 より、センサ数の増加に伴い、正規化した自己校正次数割合の増分は減少している。

3.2.1 項において説明したように、(1) 目盛り誤差、(2) 軸偏心誤差、(3) 軸振れ誤差のすべての角度誤差は 1 次成分を含んでいる。表 3-2 によると、この 1 次成分を自己校正するために必要なセンサの数は 2 以上であり、センサ数 1 の場合はすべての角度誤差を自己校正できないことになる。そのためセンサ数を 1 から 2 へ増加することで、自己校正無しから、(1) 目盛り誤差、(2) 軸偏心誤差、(3) 軸振れ誤差、のすべての誤差が自己校正対象へ変化することから、センサ数 2 における、正規化した自己校正次数割合が最も増加しているものと考えられる。そのため、センサ数とコストが比例関係にあると仮定した場合、コストと精度のトレードオフを低減可能なセンサ数 2 が最良構成であると考えられる。

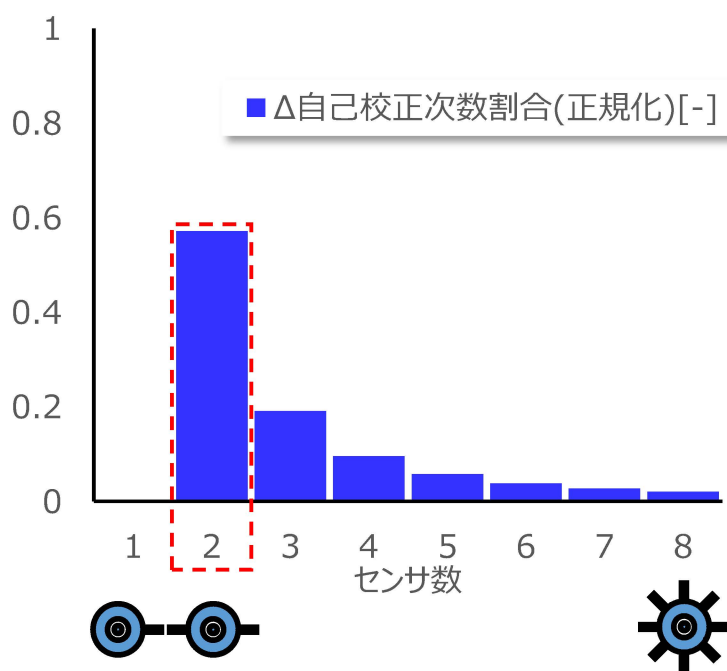


図 3-20 センサ数増加に伴う精度の増分

3.6.章のまとめ

エンジンの燃焼状態検知における、間接測定の精度向上を目的として、クランク角度センサの角度誤差低減方法を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 実エンジンへ複数のクランク角度センサを搭載することで、等分割平均法の適用を可能とし、角度誤差を低減できる見込みを得た。
- 2) 実エンジン上での角度誤差を評価するため、等分割平均法を適用したロータリエンコーダを開発し、最大誤差2.3[mdeg.]を達成した。
- 3) 実エンジンへ等分割平均法を適用し、角度誤差の低減を確認すると共に、角度誤差の内訳を明らかにした。
- 4) 精度指標とした決定係数と自己校正次数割合の関係を確認し、センサ数と精度の関係を明らかにすることで、最良構成を提案した。

第4章 結言

4.1.本研究における 2 つの成果の統合利用による予測精度改善への効果

本研究では、点火制御へ影響する主要なノイズとして、点火電極周り流動（クランク軸の回転周期）のサイクル変動、および角度誤差を抽出し、誤差低減を図っている。しかし、これらのノイズを完全にキャンセルすることは困難であるため、ノイズの重畳による、オンライン学習の効果が懸念される。そのため、エンジンの経時劣化を模擬したノイズ#E と、さらに角度誤差を模擬したノイズ#C を追加した場合における、オンライン学習の有効性を評価するための、予備的な数値実験を実施した。

予測器の入力データを図 4-1 へ示す。正常運転期間は、クランク軸回転速度 3000[rpm.]で振幅周期が一定の条件を 40 燃焼サイクルとした。次に、劣化に伴う周期変化期間は、エンジンの経時劣化を模擬したノイズ#Eとして、クランク軸回転速度の振幅周期を正常正常運転期間と比べて短縮した。この#Eは、燃料ガス供給装置の故障モードを想定したものである。次に、劣化と角度誤差に伴う周期と振幅の変化期間は、角度誤差を模擬したノイズ#C として、振幅をランダムに変化させて重畳させた。この#C は、角度誤差のスペクトルが全域となる、クランク軸の軸振れ誤差を想定したものである。以上の検討結果より策定した、予測器への入力データ仕様を表 4-1 へ示す。

表 4-1 予測器への入力データ仕様

No.	想定環境	クランク軸 回転速度	クランク軸回転 速度の振幅周期	燃焼 サイクル	備考
1	正常	3000[rpm.] (平均)	一定	40	—
2	劣化		短縮		燃料ガス供給装置の故障モード
3	劣化と角度誤差		短縮+ランダム		クランク軸の軸振れ誤差

バッチ学習における学習期間を最初の 10 サイクルとし、そのほかの評価手法については、本論文と同様である。

ここで、振幅をランダムに変化させる際には、乱数を用いた。木村 [94]によると、乱数には様々な種類があるが、線形合同法は高速かつ省メモリで実装可能である。そのため本研究においては、表 4-2 へ示す乱数の仕様に基づいて、Wichmann ら [95] [96]が作成したアルゴリズムを採用した。

表 4-2 乱数の仕様

No.	指標	仕様
1	ノイズの値の範囲	0~1
2	ノイズの分布	一様分布
3	乱数の生成方法	線形合同法

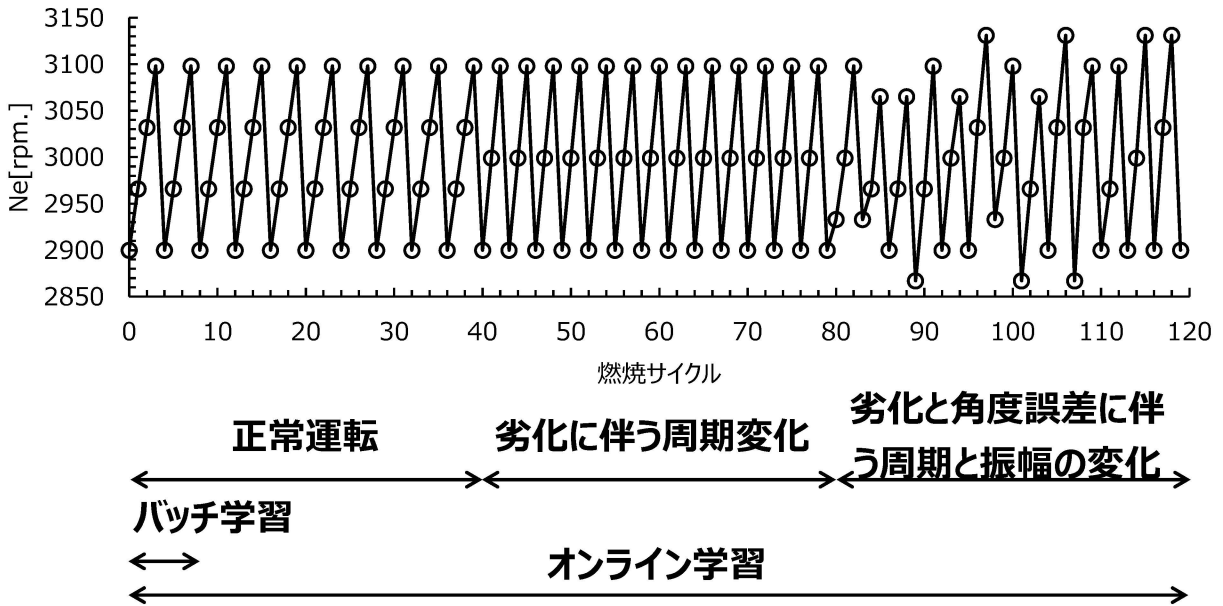


図 4-1 予測器の入力データ

実測値と推定値の比較結果を図 4-2 図 4-3 図 4-4 図 4-5 図 4-6 図 4-7 へ示す。劣化に伴う周期変化期間、および、劣化と角度誤差に伴う周期と振幅の変化期間のそれぞれにおいて、バッチ学習よりも、オンライン学習の方が、実測値に近い予測となっている。

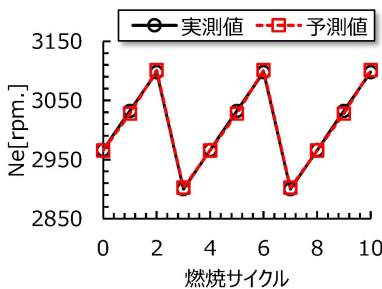


図 4-2 比較結果 (正常運転) バッチ学習

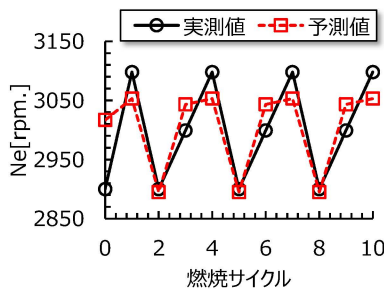


図 4-3 比較結果 (劣化に伴う周期変化) バッチ学習

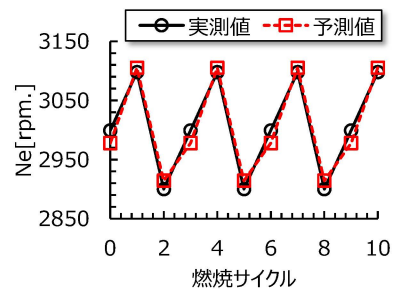


図 4-4 比較結果 (劣化に伴う周期変化) オンライン学習

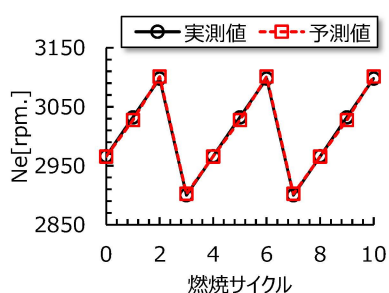


図 4-5 比較結果（正常運転）
バッチ学習

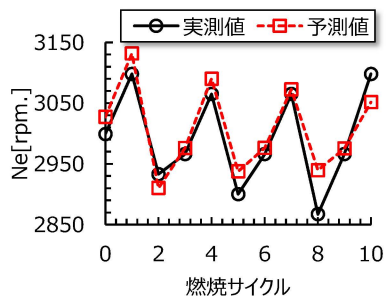


図 4-6 比較結果（劣化と角度
誤差に伴う周期と振幅の変
化）バッチ学習

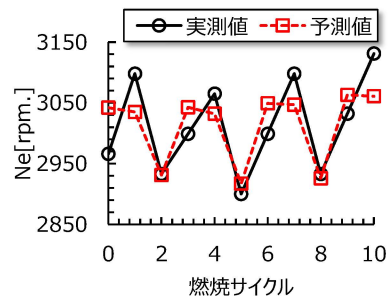


図 4-7 比較結果（劣化と角度
誤差に伴う周期と振幅の変
化）オンライン学習

実測値と予測値の相関関係から、決定係数を算出し、精度評価した結果を図 4-8 へ示す。劣化と角度誤差を想定した場合の、バッチ学習による決定係数は、0.596 となっている。しかし、この状態において、オンライン学習を適用することで、決定係数は、0.845 となった。このことより、ノイズの重畳が生じた場合においても、オンライン学習により予測精度が改善する可能性があることを確認できた。そして仮に、オンライン学習に加えて、等分割平均法により、角度誤差を完全にキャンセルできた場合には、正常時と同等の予測精度（決定係数 0.962）を得られることが示唆された。

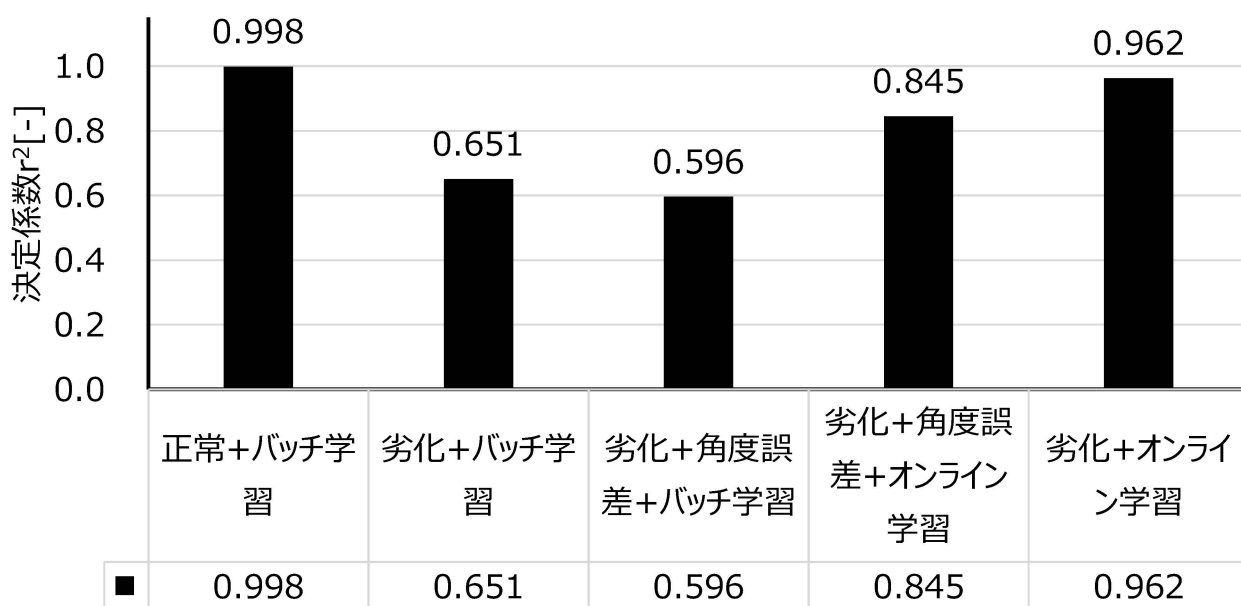


図 4-8 精度評価

ただしこの数値実験は、予測器へ入力するデータの仮定次第で、予測精度が変わってしまう。そのため、実際に車に載っているエンジンの経時劣化において、どの程度の予測精度の低下が起きるのかを明らかにすることを、今後の研究課題とする。

4.2.本研究の成果による燃費改善への効果

既に述べたとおり，本研究の目標は，ガソリンエンジンの燃費と電費の低減による，CO₂ 排出量の削減である．ガソリンエンジンの燃費性能については，使用環境，運転負荷，経年劣化，使用頻度，など様々な要因が複雑に影響する．そのため，計算を簡素化するために以下の条件を設定し，概算する．

- (1) ガソリンエンジンの搭載先として，ガソリン自動車のみを対象とする．
- (2) ガソリン消費量や CO₂ 排出量は，最新値（2020 年度）を用いる．
- (3) 機械学習を用いた将来予測による，点火エネルギーの増大機能による消費エネルギーを半減できる．

2020 年度のガソリン消費量は，OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development)13236[100 万トン]，Non-OECD:11088[100 万トン]である [4]．

この中の自動車の CO₂ 排出量は，図 1-9，図 1-10 より約 9000[100 万トン]であり，これに対する低減寄与率を評価する [97]．

放電エネルギーの時間配分制御を用いていない，先行研究 [98]として図 1-21 がある．先行研究と比べて，エンジンの諸元は異なるが，筆者ら [48]の研究と運転条件は同一である (Ne:2400[rpm.]，IMEP:1[MPa])．そして先行研究 [98]において，COV of IMEP を約 2.76[-]から約 2.0[-]へ低減するために，点火コイルのエネルギーを約 3.73 倍増大している．ここで，筆者ら [48]の研究で用いた実験エンジンにおいて，COV of IMEP を約 2.76[-]とするために必要な点火コイルの消費エネルギー E_I は 420[mJ]である．そのため，筆者ら [48]の研究で用いた実験エンジンにおいて，COV of IMEP を約 2.0[-]とするために必要な点火コイルの消費エネルギー E_I を 1566[mJ]と推定できる．一方で，放電エネルギーの時間回分制御を適用した，筆者ら [48]の研究では COV of IMEP が約 2.76[-]となるから約 2.0[-]へ低減するために，点火コイルのエネルギーを#N の 420[mJ]から#H の 440[mJ]へ，20[mJ]増大している．

次に，希釈燃焼時における失火頻度について，図 1-23 によると，30 サイクルに対して 1 回の失火が生じている．つまり，失火の生じていない，29 サイクルについては，440[mJ]から 420[mJ]へ低減できることになる．この 30 サイクル分の E_I を平均すると，1 サイクル当たりの E_I は 421[mJ]となる．増大したエネルギー 19[mJ]のうち，半分の 50[%]については機械学習の将来予測精度不足による制御マージンと仮定して，430.5[mJ]とする．

よって，放電エネルギーの時間回分制御による，点火コイル消費エネルギーの低減効果を，9.5[mJ]と仮定する．式(4-1)より，消費電力低減値を概算する．

$$9.5[mj/Cycle] \times 2400[rpm] \times 4[平均気筒数] \times 0.5[燃焼Cycle] \div 60[s] = 90.88[W] \quad (4-1)$$

ここで、オルタネータの発電負荷低減による出力低減分を燃費低減効果と仮定する。参考文献 [99]より引用した図 4-9 より、燃費低減効果を 0.002[%]とする。

次に、図 1-9 より現在の自動車による、CO₂ 排出量を 90[億トン/年]として、これに燃費低減効果の 0.002[%]を乗じると、本研究の成果による CO₂ 排出量低減効果を試算できる。

本研究の成果である点火制御技術は適用先の車種を問わないため、仮に全世界新車販売見込みの乗用車（約 1[億台/年]）へ、本研究成果を適用された場合は、最大で 180[万吨]の CO₂ 排出量低減効果を期待できる。

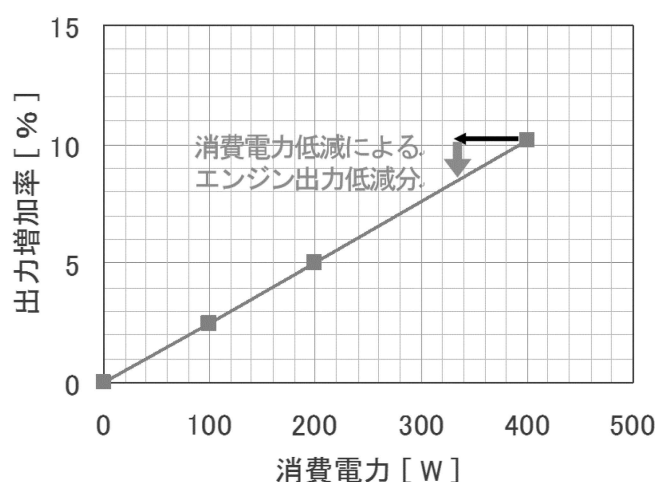


図 4-9 消費電力低減によるエンジン出力変化 [99]

4.3.まとめ

本研究では、ガソリンエンジンの燃費低減技術への応用を念頭に、限られた計算リソース、状況変化への対応、実用的なリアルタイム性能を満たすリアルタイムオンライン機械学習・予測手法と実装方法について検討した。

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、燃費と排気の間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、燃費と失火の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。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。次に副作用の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。2つの副作用への対策技術として、能動式コイルを追加した点火コイルを試作し、指定期間の点火エネルギーを増大することで、点火エネルギーの時間配分制御を可能とした。そして、点火エネルギーの時間配分制御により、点火の電力需給差を削減した結果、耐久性と電費を同時に改善できた。

しかしこれは、エンジン筒内の流動状態が常に最悪条件であることを想定しているため、無駄な点火エネルギーが消費されている。つまりこの点火エネルギー増大機能は、低流動な半失火サイクルに対しては有効であるが、高流動な正常燃焼サイクルにおいては不要であり、無駄な点火エネルギーとなる。よって、この無駄な点火エネルギーを抑制するためには、(1) 次の将来燃焼サイクルの流動を予測して、(2) 最適な点火エネルギーを適切な時期に出力する、点火制御が必要である。そこで、これらの要求に対応する、2つの研究対象を設定した。

研究対象1：エンジンのクランク軸の回転周期の将来予測。

研究対象2：クランク軸角度予測の高精度化とセンサコスト抑制のトレードオフ。

本論文は4章で構成される。第1章では、研究の背景と目的、研究対象、論文構成について述べた。

第2章では、研究対象1である、エンジンのクランク軸の回転周期の将来予測についての研究内容を述べた。ガソリンエンジンにおいて、筒内ガスの点火性能は、ガス流動強さの影響を受ける。また、供試される定負荷型エンジンにおいて、ガスの点火性能はクランク軸出力とクランク軸回転周期へ影響する。このため、ガス流動強さの予測指標として、エンジンのクランク軸の回転周期を用いることとした。次に既存研究を精査した結果、統計モデルを用いたエンジン挙動の予測モデルの研究が行われている。しかし、既存研究では計算機上でのシミュレーションに留まっており、実際にエンジンで利用可能な限られた計算リソースでの実装については、考慮されてこなかった。そのため本章では、最適な点火エネルギーに関して、高速かつ高精度な予測計算を行うための手段とし

て、FPGA を用いてリアルタイムに AR モデルを学習・予測する方法を提案し、その評価結果を示すこととした。そこで最初に、研究目標を設定し、エンジン回転周期以内でオフライン学習の AR モデルと、同等以上の予測精度を、実信号を用いた検証実験にて、達成することとした。供試エンジンには、汎用の発電機を用いた。供試エンジンの運転条件より、予測計算の上限時間を 40[ms]へ設定した。この上限時間内に予測演算を実行するために、計算処理の並列化と計算値ビット数の削減を行うこととした。並列化については、AR モデル式を四則演算レベルにまで分解することで、最大で 6 並列の演算を複数個所で実現できた。その上で、シフトレジスタを配置することで、さらなる高速化を図った。次に、計算値ビット数の削減については、使われていない数値範囲の削減や、要求分解能へ合わせたビット数にすることで、精度低下を抑制しながら、浮動小数 64[bit]から固定小数 16[bit]へ削減した。そしてこれらの高速化手法を適用した結果、FPGA の最大動作周波数 124.63[MHz]でのコンパイルに成功した。そして、信号入出力を含めた予測計算時間を実測した結果、1778[ns]となり、予測計算の上限時間内とすることができた。

しかし、この高速化手法には、計算値ビット数の削減を用いている。精度低下の抑制を図っているものの、オフライン学習の AR モデルと、同等以上へ予測精度を向上させることは困難である。そのため、新たな予測精度向上策として、位相補償アルゴリズムを考案した。従来の AR モデルにおいては、過去の周期情報のみを用いて、将来を予測するため、実信号では予測誤差が積み重なることになる。そこで、過去の周期情報だけではなく、過去の位相情報を用いて、予測周期を再補正することで、予測誤差の積み重ねを防止した。実信号を用いた検証実験の結果、この位相補償アルゴリズム単体の効果として、予測精度を 36[%]向上できた。そのほか、モデル次数の選定については、赤池情報量規準 (AIC) に加えて、決定係数 (R^2) と、二乗平均平方根誤差 (RMSE) と、平均絶対誤差 (MAE) も検討対象に加えることで、予測の高精度化と計算の高速化の両立を図った。その結果、エンジンの実信号を用いたリアルタイムシミュレーションにおいて、エンジンのクランク軸の回転周期以内でオフライン学習の AR モデルと、同等以上の予測精度を十分なリアルタイム性能で実現できることを実験的に示した。

第 3 章では、研究対象 2 である、クランク軸角度予測の高精度化とセンサコスト抑制のトレードオフについての研究内容を述べた。上記研究対象 1 における、高精度な将来予測結果を活かすためには、点火コイルの高精度な充放電時期制御が必要である。しか

し、エンジンは数多くの部品で構成していることなどから、角度誤差が懸念される。そのため本研究内容の実用化を考慮した、角度誤差と対策コストの関係を調査した。そこで最初に、研究目標を設定し、リアルタイムな自己校正により、角度誤差を低減できることとした。研究対象 1 では、エンジンのクランク軸の回転周期内に将来予測の計算を行っている。この計算結果をエンジン制御へ適用する過程で、角度誤差を低減するためには、リアルタイムの校正処理が必要となる。さらに、エンジンへ基準センサを搭載することはコストの観点からも現実的でないことから、自己校正法が必要である。代表的な自己校正法には、デバイダー法、同時校正法、マルチ再生ヘッド法、等分割平均法などがある。それぞれについて、長所と短所を比較検討した結果、等分割平均法は高精度で一般のエンコーダへの適用が可能であることに加え、国家基準器としての実績があることから、評価対象へ選定した。等分割平均法は、2つ以上の角度センサを、等角度間隔に配置し、すべてのセンサの出力値を平均処理することで、自己校正を行うものである。

しかし、自己校正対象には限定があり、配置センサ数によって、自己校正対象の周波数次数の割合は増加するというトレードオフが存在する。そこでエンジン制御に最適なセンサ数を導くために、角度誤差の要因を調査した上で、配置センサ数と角度誤差の関係を明らかにすることを研究対象とした。誤差の内訳を調査した結果、角度誤差要因は、(1) 目盛り誤差、(2) 軸偏心誤差、(3) 軸振れ誤差、の3つで構成されており、周波数次数の違いがあることに着目した。そこで、配置センサ数が1個、2個、8個の角度センサを車載上で同時計測できる評価設備を構築した。この中で、配置センサ数が8個というのは、国家基準器と同じ個数であり、本研究の基準センサとして使用することから、国家基準器同等品を用いて校正を実施した。その結果、角度誤差は約 $8.5[^\circ]$ (角度秒) となり、これは約 $2.3[\text{mdeg.}]$ に相当する精度を達成できた。そのほか、平均処理については、すべての回路をアナログ化することで、リアルタイム性を確保できた。

その結果、クランク軸の回転周期予測結果に基づく、点火制御信号の時期精度向上を目的として、クランク角度センサの角度誤差低減方法を検討し、以下の結論を得た。(1) 実エンジンへ複数のクランク角度センサを搭載することで、等分割平均法の適用を可能とし、角度誤差を低減できる見込みを得た。(2) 実エンジンへ等分割平均法を適用し、角度誤差の低減を確認すると共に、角度誤差の内訳を明らかにした。(3) センサ数と精

度改善率の関係より、最良構成を提案し、コストと精度のトレードオフを改善できる見込みを得た。

第4章では、第1章で述べた研究目的を踏まえて、各章で取り組んだ研究とそこから得られた結果について議論した。既存研究に加えて、これまでの研究成果へ本研究の成果を積み上げることにより、燃費と電費を同時に改善できるため、正味熱効率向上の可能性が示唆される。

4.4. 結論

1.8章研究の目的において設定した、要求事項への対応結果を表4-3へ示す。3つの要求事項を満足するために必要な、6つの実現手法および実装方法を明らかにすることができた。これにより、本研究の目的を達成できた。

表 4-3 要求事項への対応結果

No.	実現手法・実装方法	章	要求事項		
			省メモリ	高精度	高速
			(1) 限られたコンピュータリソース（車両搭載マイコン上での計算が必要なため）	(2) 状況変化への対応（エンジンは製造個体差や経時劣化の影響を受けるため）	(3) 実用的なリアルタイム性能を出す（燃焼サイクル周期内での演算が必要なため）
1	AREモデルの係数最適化	2	適用	適用	適用
2	位相補償アルゴリズム	2		適用	
3	分解能の削減	2	適用		適用
4	FPGAの並列化	2			適用
5	等分割平均法	3		適用	
6	平均処理回路	3			適用
7	要求仕様		Slices : 6822以下 CLB Filp-Flops : 54576以下	決定係数 : 0.53[-]以上	計算時間 : 40[ms]以下
8	結果		Slices : 2995 CLB Filp-Flops : 8368	決定係数 : 0.68[-]	計算時間 : 1.78[μs]
9	判定		満足	満足	満足

4.5.今後の課題

1. 本研究における，今後の課題について述べる．
2. 位相補償アルゴリズムの，詳細なメカニズム解明
メカニズムの解明により，さらなる精度改善の技術向上を期待できる．
3. 点火制御へ将来予測技術の実装
本研究成果を実エンジンの点火制御へ実装することで，燃費低減効果を明らかにする．
4. 実車両を用いた効果の検証
実際に車へ搭載されているエンジンの経時劣化において，どの程度の予測精度の低下が起きるのかを明らかにする．

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. 森嶋 厚行（指導教員）
筑波大学 図書館情報メディア系 教授
2. 若林 啓（副指導教員）
筑波大学 図書館情報メディア系 准教授
3. 伊藤 寛祥（副指導教員）
筑波大学 図書館情報メディア系 助教
4. 鈴木 伸崇（副査）
筑波大学 図書館情報メディア系 教授
5. 三河 正彦（副査）
筑波大学 図書館情報メディア系 准教授
6. 天笠 俊之（副査）
筑波大学 計算科学研究センター 教授

参考文献

- [1] 大島 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," つくばリポジトリ, 筑波大学大学院 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群 構造エネルギー工学学位プログラム, 2022.
- [2] UNITED NATIONS, "United Nations Sustainable Development – 17 Goals to Transform Our World," [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. [Accessed 28 06 2021].
- [3] 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].
- [4] 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].
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Climate Change 2013: The Physical Science Basis," [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. [Accessed 24 06 2023].
- [6] 気象庁, "「気候変動 2013－自然科学的根拠」政策決定者向け要約," [Online]. Available: https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf. [Accessed 24 06 2023].
- [7] 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].
- [8] 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].
- [9] 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].
- [10] 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].
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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].
- [14] 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].

- [15] 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].
- [16] 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.
- [17] E. Ohata, "Control Device Of Internal Combustion Engine". WIPO (PCT) Patent WO2019/073815, JP06815534, US10995690, DE112018004280.4, 10 01 2021.
- [18] E. Ohata, "Vehicle control device". Japan 特許番号: JP2019002307A, 10 01 2019.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.

- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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).
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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).
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 西尾 兼光, *スパークプラグ*, Japan: 山海堂, (1999), (ISBN-10 4381101537, ISBN-13 9784381101532).
- [40] 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.
- [41] 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).
- [42] 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.
- [43] 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).
- [44] 木村 幸四郎, 坂井 洋志, 大村 哲生, 高橋 大志, "カーボンニュートラル実現に向けた熱効率 50%スーパーリーンバーンエンジンの開発," *公益社団法人自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2023).

- [45] 大島 英一郎, 押領司 一浩, 保坂 知幸, "多重放電のプレ点火による主点火性能向上に関する一考察," *自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2022).
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] W. Hanwool, M. Hirokazu, S. Kazuhito, T. Yusuke, Y. Atsushi and A. Hajime, "Prediction of Following Vehicle Trajectory Considering Operation Characteristics of a Human Driver," *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 1-6, (2020), DOI:10.1109/SII46433.2020.9026243.
- [50] M. Sidar and F. B. Doolin, "On the feasibility of real-time prediction of aircraft carrier motion at sea," *NTRS - NASA Technical Reports Server*, Vols. A-6169, pp. 1-26, (1975), .
- [51] L. Tao and D. Zhijun, "Real-Time Prediction of the Trend of Ground Motion Intensity Based on Deep Learning," *Shock and Vibration*, pp. 1-9, (2021), 10.1155/2021/5518204.
- [52] S. C.H.Hoi, D. Sahoo, J. Lu and P. Zhao, "Online learning: A comprehensive survey," *Neurocomputing*, vol. 459, no. 12, pp. 249-289, (2021), DOI:10.1016/j.neucom.2021.04.112.
- [53] A. Blum, "On-Line Algorithms in Machine Learning," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1442, pp. 306-325, (1996), DOI:10.1007/BFb0029575.
- [54] 中村 昂洋, 森 泰親, "ARMA モデルを用いたクランクポジションのリアルタイム測定," *自動制御連合講演会講演論文集*, vol. 57, no. 2B07-4, pp. 1445-1448, (2014), DOI:10.11511/jacc.57.0_1445.
- [55] 森吉 泰生, 窪山 達也, 楯村 俊希, 金子 誠, 山田 敏生, "リーンバーンガソリン機関におけるサイクル変動要因の解析," *自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2017).
- [56] 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.
- [57] 久保田博信, 梅川明彦, 田中嘉之, 蒔田薫, "高压下の可燃性混合気体の最小発火エネルギー," *安全工学*, vol. 18, no. 5, pp. 264-270, (1979), DOI:10.18943/safety.18.5_264.
- [58] T. Amano, "Control device for internal combustion engine". Japan Patent JP2005048644A, 24 02 2005.
- [59] H. Shimizu, "Crank angle position detector for engine". Japan Patent JP2000329044A, 28 11 2000.
- [60] N. Suzuki and M. Isou, "Ignition timing controller for internal combustion engine". Japan Patent JPH0735014A, 03 02 1995.

- [61] 阿部 己和, 梶谷 満信, 瀧山 武, "リーン限界性能向上のための燃焼変動率の予測に関する基礎検討," *自動車技術会論文集*, vol. 52, no. 1, pp. 1-6, (2021), DOI:10.11351/jsaeronbun.52.1.
- [62] 森吉 泰生, "燃焼室形状がガス流動のサイクル変動に与える影響の予測," *日本機械学会論文集 (B 編)*, vol. 61, no. 590, pp. 3446-3451, (1995), DOI:10.1299/kikaib.61.3446.
- [63] 森吉 泰生, 森 一弘, 最首 陽平, 山田 修治, "直噴ガソリン機関の吸気行程中における筒内ガス流動の検討," *日本機械学会論文集 (B 編)*, 第巻 67, 第 659, pp. 1861-1867, (2001), DOI:10.1299/kikaib.67.1861.
- [64] 服部正, 深見彰, 西田実, 後藤堅司, 大東俊一, "可燃性混合気の気流中における火花点火," *日本機械学会論文集 B 編*, vol. 49, no. 447, pp. 2437-2445, (1983), DOI:10.1299/kikaib.49.2437.
- [65] 朝倉 遼太, 北田 泰造, 井上 欣也, 中田 涼太, 倉田 和郎, "高 EGR 燃焼における放電挙動と燃焼サイクル変動の関係," *自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会講演予稿集*, pp. 1-6, (2022).
- [66] 鈴木 隆, "ガソリンエンジンの燃焼変動低減を目的とした高精度シリンダ内状態予測法の開発," *科研費 科学研究費助成事業 研究成果報告書*, vol. 16K06129, no. 32621, pp. 1-20, (2020), <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-16K06129/16K06129seika.pdf>.
- [67] 小熊 正, *機械設計 3 エンジンの設計製図*, (1964), ISBN-10:4827710031.
- [68] 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," (2020).
- [69] 田中 勝人, *時系列解析 (理論統計学教程:従属性の統計理論)*, vol. 4, (2020), ISBN-10:4320113543, pp. 51-64.
- [70] R. Andraka, "A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers," *Computer Science*, pp. 191-200, (1998), DOI:10.1145/275107.275139.
- [71] E. Toth, A. Brath, A. Montanari, "Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting," *Journal of Hydrology*, vol. 239, p. 132-147, (2000), DOI:10.1016/S0022-1694(00)00344-9.
- [72] G. Chowell, R. Luo, K. Sun, K. Roosa, A. Tariq, C. Viboud, "Real-time forecasting of epidemic trajectories using computational dynamic ensembles," *Epidemics*, vol. 30, no. 100379, pp. 1-10, (2020), DOI:10.1016/j.epidem.2019.100379.
- [73] T. Iwata, K. Nakamura, Y. Tokusashi and H. Matsutani, "An FPGA-Based Change-Point Detection for 10Gbps Packet Stream," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E102.D, no. 12, pp. 2366-2376, 2019.
- [74] 日産自動車株式会社 第一電子技術開発本部 田中 裕史, "カーエレクトロニクスの信頼性ーデバイス・ECU・車両の三位一体での信頼性作り込みー," *OKI エンジニアリング 技術論文*, pp. 1-36, (2014), <https://www.oeg.co.jp/Exhibition/pdf/14oeg1.pdf>.
- [75] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th Edition, (2015), ISBN: 978-1-118-67502-1.
- [76] C. Collomb, "Linear Prediction and Levinson-Durbin Algorithm," 3 2 2009. [Online]. Available: <http://www.emptyloop.com/technotes/A%20tutorial%20on%20linear%20prediction%20and%20Levinson-Durbin.pdf>. [Accessed 14 8 2020].

- [77] J. Durbin, "The Fitting of Time-Series Models," *Review of the International Statistical Institute*, vol. 28, no. 3, pp. 233-244, (1960), DOI:10.2307/1401322.
- [78] 中溝 高好, 信号解析とシステム同定 (現代制御シリーズ), コロナ社, (1988), ISBN-10:4339030813.
- [79] N. Levinson, "The Wiener (Root Mean Square) Error Criterion in Filter Design and Prediction," *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 25, no. 1-4, pp. 261-278, (1946), DOI:doi.org/10.1002/sapm1946251261.
- [80] 日産技報編集委員会, "新世代ハイブリッドパワートレイン e-POWER," *日産技報*, no. 80, pp. 1-64, (2017), https://www.nissan-global.com/JP/TECHNICALREVIEW/PDF/NISSAN_TECHNICAL_REVIEW_80.pdf.
- [81] H. Chenini, J. P. Dérutin, R. Aufrère and R. Chapuis, "Parallel embedded processor architecture for FPGA-based image processing using parallel software skeletons," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 153, pp. 1-23, (2013) DOI:10.1186/1687-6180-2013-153.
- [82] K. Vladimir and A. Kurecka, "FPGA Implementation of a Simple 3D Graphics Pipeline," *CONTROL ENGINEERING*, vol. 13, no. 1, pp. 39-47, (2015), DOI:10.15598/aece.v13i1.1125.
- [83] NATIONAL INSTRUMENTS CORP., "NI LabVIEW High-Performance FPGA Developer's Guide," 02 2014. [Online]. Available: <https://www.ni.com/ja-jp/support/documentation/supplemental/13/the-ni-labview-high-performance-fpga-developer-s-guide.html>. [Accessed 04 05 2023/05/04].
- [84] H. Akaike, "Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle," *Institute of Statistical Mathematics*, vol. 1, pp. 267-281, (1973), DOI:10.1007/978-1-4612-0919-5_38.
- [85] 大畠 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, pp. 1272-1277, (2019), DOI:10.11351/jsaeronbun.50.1272.
- [86] 株式会社 エー・アンド・デイ, "内部発生トルク波形演算による損失トルク解析," [Online]. Available: https://www.aandd.co.jp/adhome/pdf/tech_doc/dsp_automotive/cas-rts.pdf. [Accessed 10 12 2014].
- [87] 渡部 司, "自己校正型ロータリエンコーダ," *精密工学会誌*, vol. 82, no. 9, pp. 792-796, (2016), DOI:10.2493/jjspe.82.792.
- [88] 益田 正, "角度標準の動向," *光学*, vol. 32, no. 2, pp. 82-86, (2003).
- [89] 豊山 晃, "角度の標準器とその校正法," *精密機械*, vol. 44, no. 521, pp. 539-544, (1978), DOI:10.2493/jjspe1933.44.539.
- [90] 益田 正, 梶谷 誠, "角度検出器の精密自動校正システムの開発," *精密工学会誌*, vol. 52, no. 10, pp. 1732-1738, (1986), DOI:10.2493/jjspe.52.1732.
- [91] M. Tadashi and M. Kajitani, "High Accuracy Calibration System for Angular Encoders," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 5, no. 5, pp. 448-452, (1993), DOI:10.20965/jrm.1993.p0448.
- [92] 渡部 司, "ロータリエンコーダの高精度な角度計測," *応用物理*, vol. 84, no. 3, pp. 224-230, (2015), DOI:10.11470/oubutsu.84.3_224.
- [93] 渡部 司, 益田 正, 梶谷 誠, 藤本 弘之, 中山 貫, "ロータリーエンコーダの高精度校正装置の開発(第 1 報)," *精密工学会誌*, 第 67 巻, 第 7 号, pp. 1091-1095, (2001), DOI:10.2493/jjspe.67.1091.

- [94] 木村 麻友子, "乱数発生法," *高知工科大学 平成 1 2 年度 卒業論文*, pp. 1-47, (2000).
- [95] B. A. Wichmann and I. D. Hill, "An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator," *Oxford University Press*, vol. 31, no. 2, pp. 188-190, (1982), DOI:10.2307/2347988.
- [96] NATIONAL INSTRUMENTS CORP., "Algorithm Used by the LabVIEW Random Number (0 - 1) Function," 11 08 2021. [Online]. Available: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000fykQSAQ>. [Accessed 11 06 2023].
- [97] Global Fuel Economy Initiative, "GFEI Working Paper 20," [Online]. Available: <https://www.globalfueleconomy.org/data-and-research/publications/gfei-working-paper-20>. [Accessed 28 06 2021].
- [98] Ryo Kusakabe, Shogo Namba, Hisahiro Oba, Zhimin Lin, "Investigation of Improvement of Lean Limit in an DI Gasoline Engine," *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, vol. 52, no. 3, pp. 645-652(20214256), 2021, DOI:10.11351/jsaeronbun.52.645.
- [99] 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.
- [100] 松原雄二 and 鐘ヶ江英俊, "点火時期制御装置". Japan Patent 特開昭 55-029005, 01 03 1980.
- [101] 服部正 and 山口公昭, "内燃機関用点火装置". Japan Patent 特公昭 60-053183, 19 06 1979.
- [102] 坂本伸一, 笹山隆生 and 天野松男, "エンジンの点火時期制御方法". Japan Patent 特公昭 63-043579, 31 08 1988.

全研究業績のリスト

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, 伊藤寛祥, 若林啓, 森嶋厚行, FPGA を用いたガソリンエンジンの最適点火エネルギー予測のためのリアルタイムモデル推定, 情報処理学会論文誌データベース (TOD) , vol.16, no.1, p.26-40, (2023).
- (2) 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, 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.
- (4) 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.

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.
- (10) 大島英一郎,押領司一浩,保坂知幸 : 多重放電のプレ点火による主点火性能向上に関する一考察,自動車技術会春季大会,2022年5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

付録

付録 A.1 位相補償アルゴリズムの実施例について

従来の点火時期制御アルゴリズム [100] [101] [102]に加えて,入力パルスをカウント基準とした,位相補償付き出力アルゴリズム B を有効に活用するための,具体的な説明図 4-10 と実施例は次のとおりである.

- イ) ガソリンエンジンの燃焼周期ごとに出力される立下り時期を基準位置とするパルス信号と,
- ロ) パルス信号の OFF 時間を一定にするタイマ回路と,
- ハ) 過去のクランク軸回転周期の履歴から次の周期を予測するアルゴリズムを備え,
- ニ) タイマ回路の OFF 時間は予測計算時間より長く,
- ホ) タイマ回路の OFF 時間は燃焼サイクルの最小周期よりも短く,
- ヘ) アルゴリズムは,前回予想誤差の位相ずれを前回入力パルスで位相補償し,
- ト) 過去実績の平均周期と次の予測周期の差より予め定めた点火コイルの充電時間を補正し,
- チ) 補正は,差が大きい場合は充電時間を延長するようにし,
- リ) 次の予測周期から点火時期を逆算し,
- ヌ) 逆算した点火時期から補正後の充電時間を減算し,
- ル) 減算した時期から補正した充電時間の間,点火コイルを充電する,点火コイルの制御装置および制御方法.

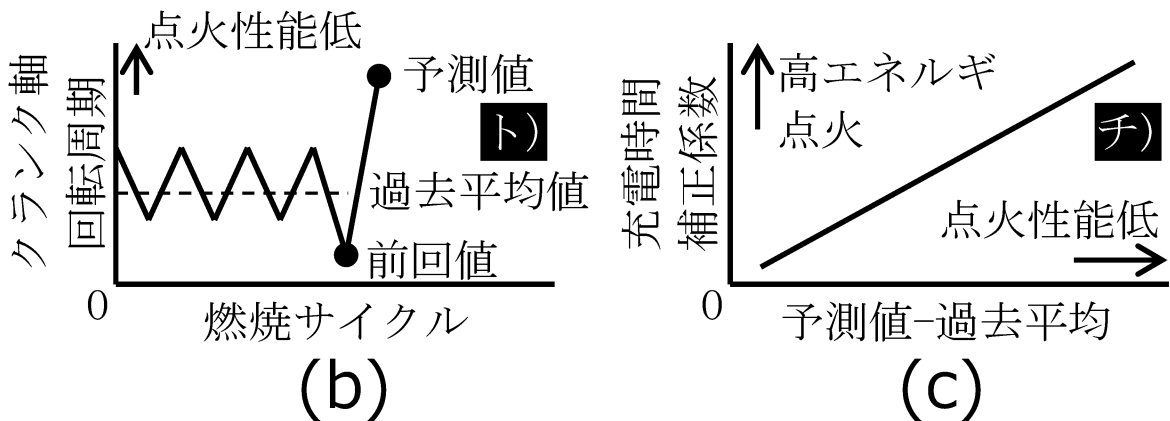
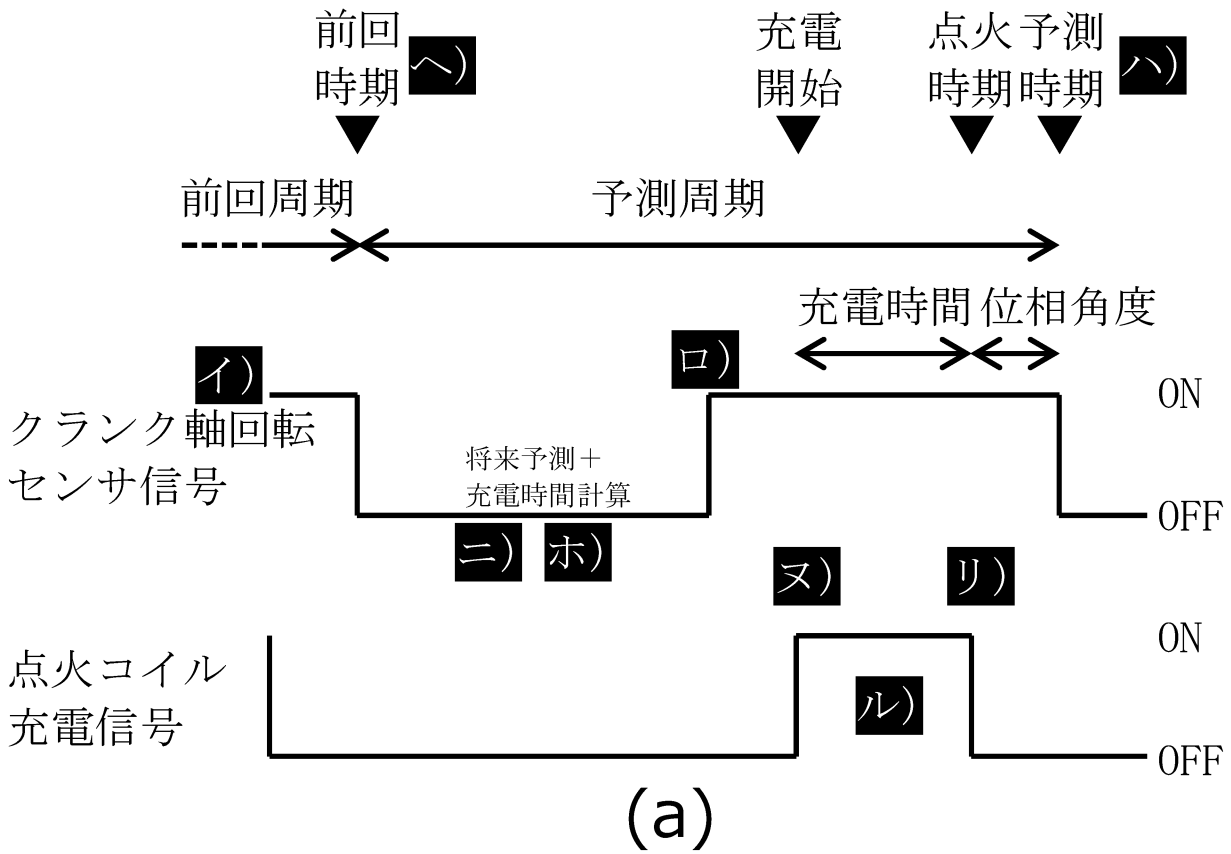


図 4-10 位相補償アルゴリズムの実施例

図 4-10 において、クランク軸回転周期の予測値が過去実績平均値よりも大きな場合、燃焼期間が長いため、次回燃焼サイクルの点火性能は低いものと予想される。これを補うために充電時間を延長するように補正することで、混合気の点火性能と火花放電の点火性能を合わせた点火性能を一定に保つことができる。その結果、ガスの点火性能に合わせた、放電の点火性能を決定できるようになるため、過剰な放電エネルギーを抑制して、電費を低減できる。

付録 A.2 プログラムコード (最終形)

図 4-11 は,LABVIEW®にて作成したプログラムコードの最終形である。「再生データをメモリへ書き込み」と「信号再生」と「予測」の独立した3つのループで構成されている。

予測ループにおいては,式 (2) ~ (5) を四則演算レベルにまで分解し, $N=3, M=3$ とすることで繰り返し演算を並列処理にて演算している.より具体的には,式 (4) の R_1, R_2, R_3 の総和を6並列,式 (5) の計算を3並列,式 (2) の総和を3並列で計算した。

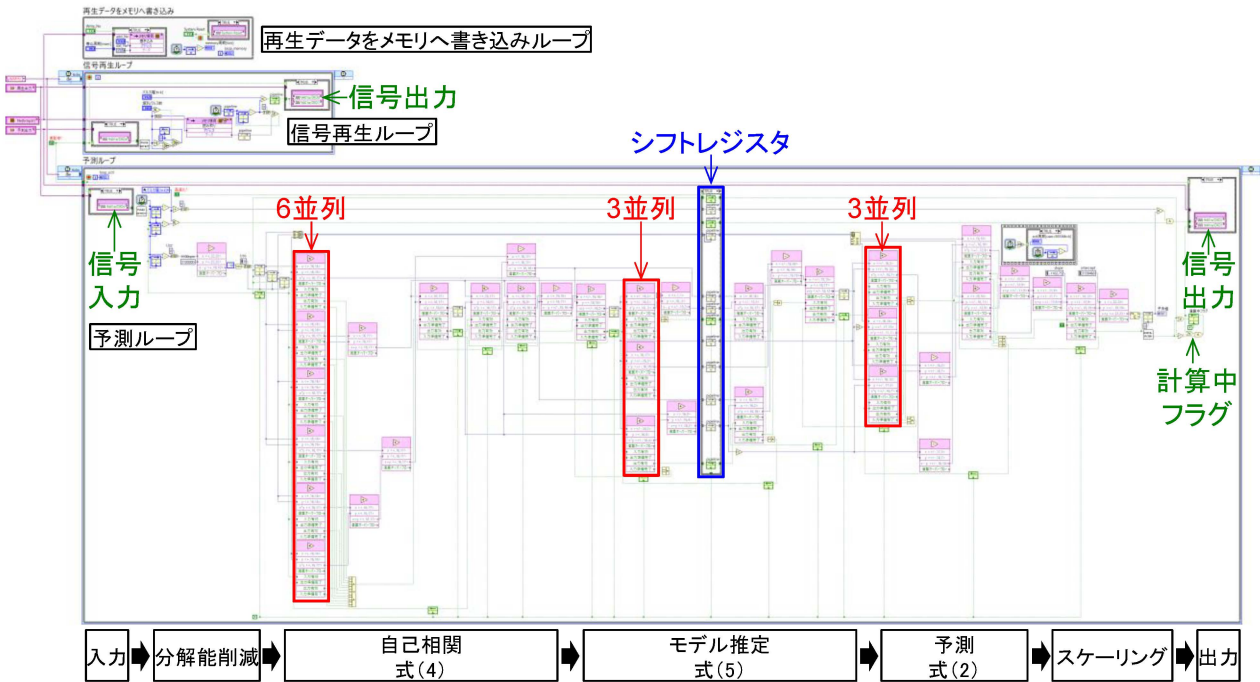


図 4-11 プログラムコード (最終形)