

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車エンジン燃焼解析用遮倍器の高精度化技術の研究開発」

研究開発成果報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局
委託先 アトセンス株式会社

目次

1. 研究開発の概要.....	3
1.1. 研究開発の背景・研究の目的及び目標.....	3
1.1.1. 背景.....	3
1.1.2. 研究目的、方針.....	4
1.2. 研究体制.....	5
1.3. 成果概要.....	7
1.4. 当該研究開発の連絡窓口.....	7
2. 本論.....	8
2.1. 燃焼解析と逡倍誤差の関係.....	8
2.1.1. 目的.....	8
2.1.2. 現行逡倍器の誤差（実測）.....	8
2.1.3. 逡倍誤差が燃焼解析に与える影響（シミュレーション）.....	10
2.1.4. 本研究の目標精度.....	12
2.2. 数理モデル：クランク角予測技術の確立.....	13
2.2.1. 本テーマの目的.....	13
2.2.2. 課題.....	13
2.2.3. 検証実験.....	13
2.2.4. まとめ.....	16
2.3. 数理モデル：クランク角補間技術の確立.....	17
2.3.1. 本テーマの目的.....	17
2.3.2. 課題.....	17
2.3.3. 検証実験.....	17
2.3.4. まとめ.....	20
2.4. 高精度逡倍器の試作.....	21
2.4.1. 目的.....	21
2.4.2. 逡倍誤差と試作機の概要.....	21
3. 全体総括.....	24

1. 研究開発の概要

1.1. 研究開発の背景・研究の目的及び目標

1.1.1. 背景

自動車用エンジンの開発において低燃費性能車の開発競争が激化する中、これまでエンジンテストベンチ内だけで行われてきた燃焼解析をオンロードでも行いたいとの要求が世界的に高まっている。

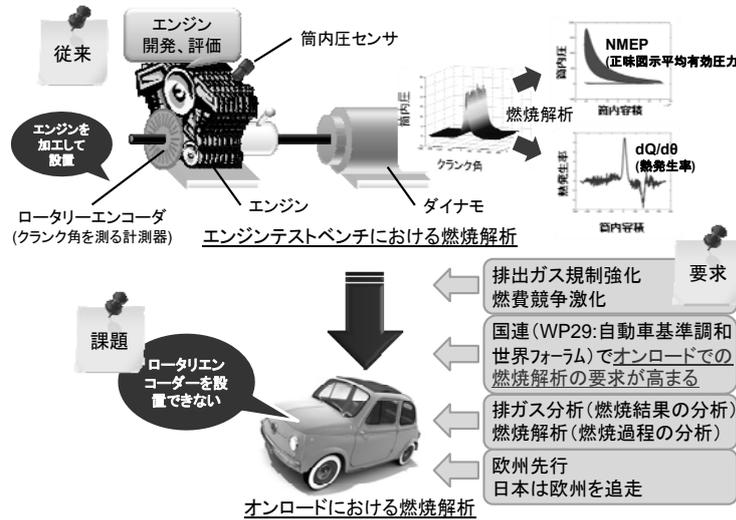


図 1 オンロードでの燃焼解析の要求と課題

しかし、燃焼解析に必要なクランク角を計測するロータリーエンコーダは、設置スペースの関係上、実車に設置できないといった問題があり、この解決手段として逡倍器という装置が使われている。

逡倍器は、自動車部品であるクランクポジションセンサ (MPU: Magnetic Pick Up sensor とシグナルプレートからなる。) の信号を利用し、これをロータリーエンコーダ相当の信号に変換することで、ロータリーエンコーダレスの燃焼解析を実現する。

しかし、逡倍器はロータリーエンコーダ相当の信号を、時間遅れなしでリアルタイムに再現する装置であるため、予測、補間と言った、存在しない情報を補う処理が必要であるため、ロータリーエンコーダに比べて精度が劣るといった問題がある。

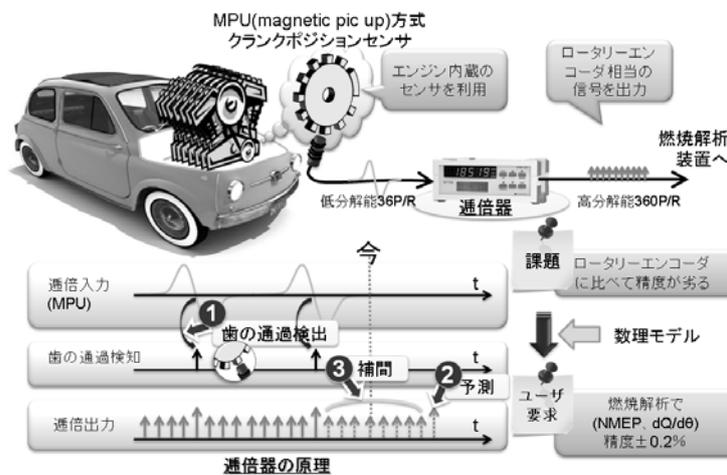


図 2 逡倍器の説明と精度

1.1.2. 研究目的、方針

本研究開発では、システム同定技術をベースとした数理モデル(組込みソフトウェア)で逡倍器を高精度化し、我が国の低燃費次世代自動車の研究開発力アップに貢献することを目的とする。

川下企業(自動車業界)では究極的に燃焼解析精度 0.2%を目標としており、これに近づけるため逡倍機の高精度化を目指す。

本研究では川下企業の要求に近づけるため、以下のサブテーマに取り組んだ。

●燃焼解析と逡倍誤差の関係

現状の逡倍器の誤差の現状把握を行うとともに、誤差の要因を明らかにし、燃焼解析に与える影響を要因別に明らかにした。また、川下企業の要求を見据え、本研究の目標(逡倍精度)を設定した。

●数理モデル：クランク角予測技術の確立

上記で設定した逡倍精度を目標とし、クランク角を予測する数理モデルを構築し、精度を検証した。

●数理モデル：クランク角補間技術の確立

上記で設定した逡倍精度を目標とし、クランク角を補間する数理モデルを構築し、精度を検証した。

●高精度逡倍器の試作

高精度逡倍器の研究開発は、今後も継続して行うが、その中間成果として、平成 25 年度までの研究で得られた知見を元に高精度逡倍器を試作し、燃焼解析精度 1%を目指す。

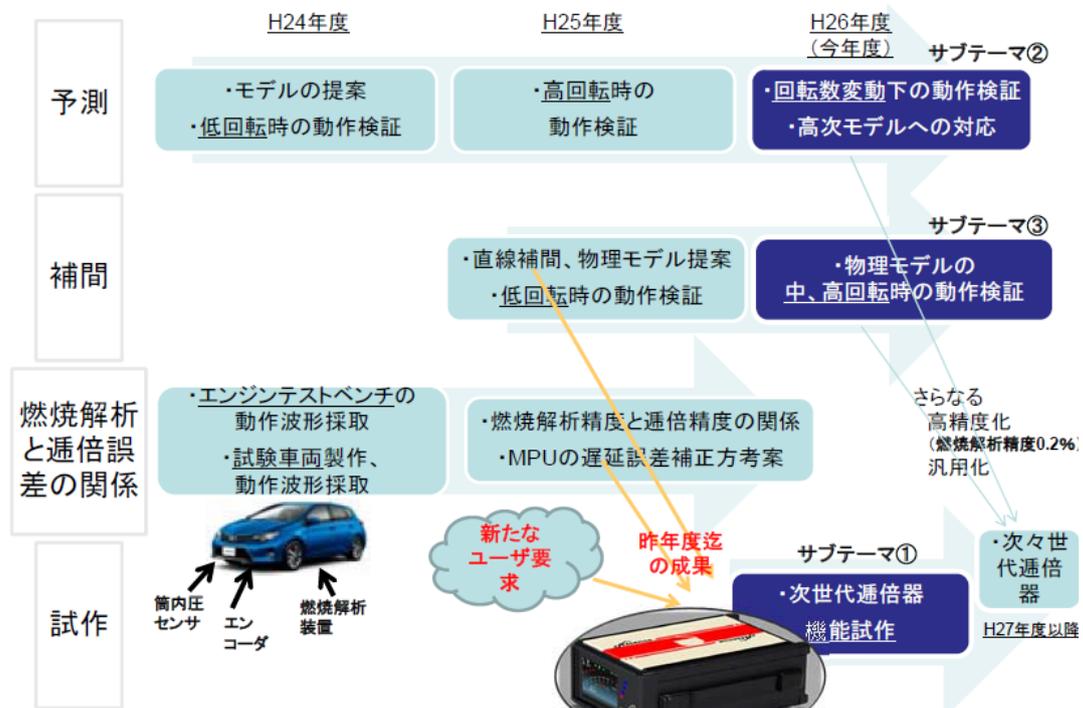


図 3 研究開発方針

1.2. 研究体制

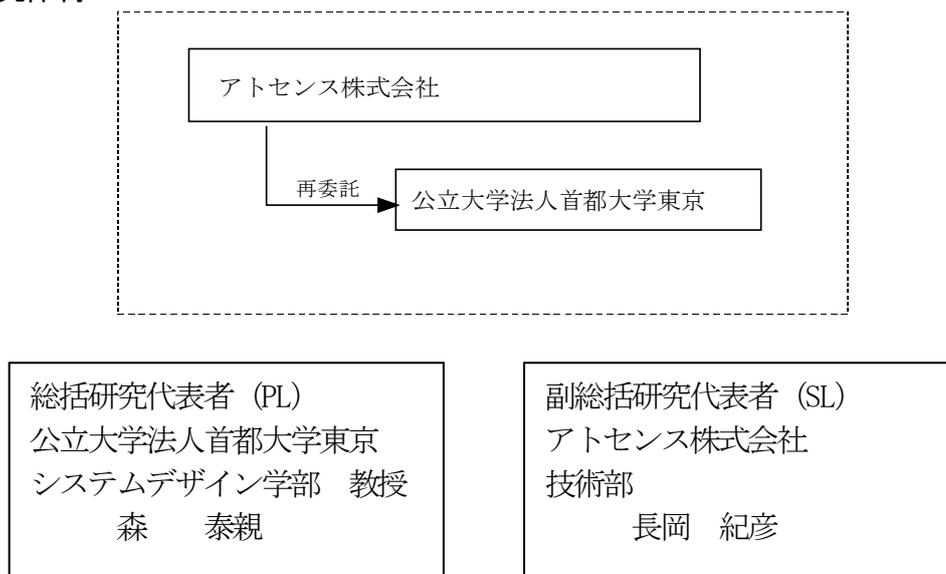


図 4 研究開発方針

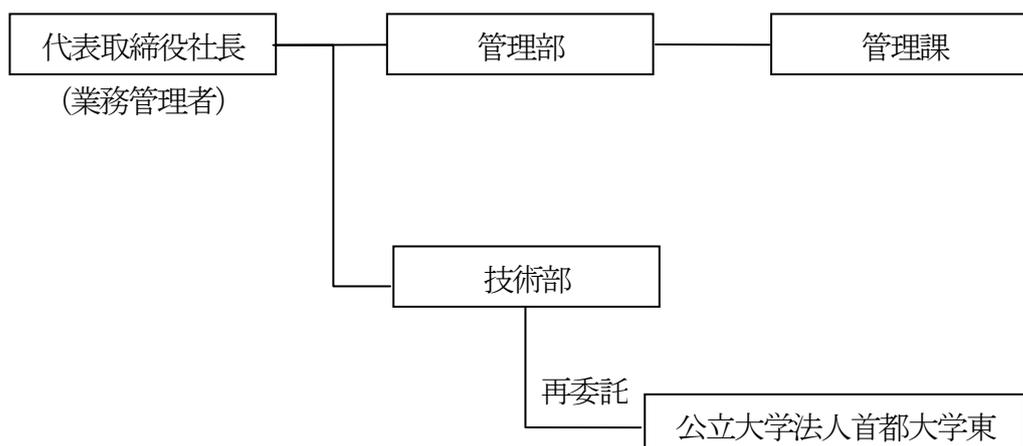


図 5 事業管理機関 (アトセンス株式会社) の管理体制

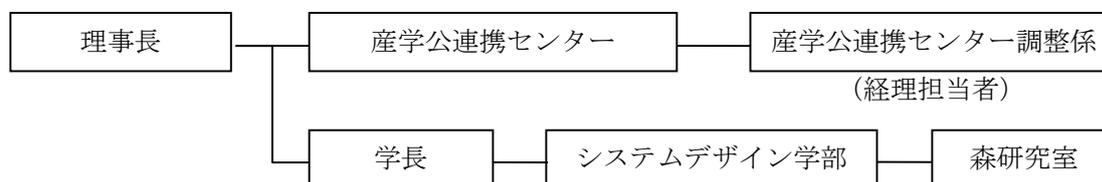


図 6 再委託先 (公立大学法人首都大学東京) の管理体制

表 1 事業管理機関（アトセンス株式会社）の管理員

氏名	所属・役職
渡辺 雅代	管理部部長
細渕 信子	代表取締役社長
長岡 紀彦	技術部

表 2 事業管理機関（アトセンス株式会社）の研究員

氏名	所属・役職
長岡 紀彦（再）	技術部

表 3 再委託先（公立大学法人首都大学東京）の研究員

氏名	所属・役職
森 泰親	システムデザイン学部 教授

表 4 研究開発推進委員会 構成員

氏名	所属・役職	備考
森 泰親	公立大学法人首都大学東京 システムデザイン学部 教授	
細渕 信子	アトセンス株式会社 代表取締役社長	
長岡 紀彦	アトセンス株式会社 技術部	
千葉 龍介	国立大学法人旭川医科大学 脳機能医工学研究センター 准教授	アドバイザー
瀧 昌弘	株式会社豊田中央研究所 機械基礎研究部 大気研究室 主任研究員	アドバイザー
金子 計司	トヨタ自動車株式会社 エンジン統括部 エンジン総括室 第4グループ グループ長	アドバイザー
松本 浩造	一般社団法人首都圏産業活性化協会 研究担 当	アドバイザー

1.3. 成果概要

本研究の目標に対する成果を以下に示す。

表 5 成果概要

項目	目標	成果
サブテーマ① 燃焼解析と逡倍誤差の関係	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現行の逡倍器の精度を把握する。 ・ 逡倍誤差と燃焼解析誤差の関係を明らかにする。 ・ 現行の逡倍器の実力を鑑み、本研究の目標（逡倍精度）を設定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ● できたこと ・ 現行の逡倍器の誤差を可視化し、エンジンテストベンチ及び試験車両による実験から現状の逡倍誤差を明らかにした。 ・ シミュレーションにより逡倍誤差と燃焼解析誤差の関係を明らかにした。 ・ 本研究の目標（逡倍精度=0.1deg）を設定した。
サブテーマ② 数理モデル：クランク角予測技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・ 0.1deg の精度でクランク角を予測する。 	<ul style="list-style-type: none"> ● できたこと ・ 予測のための数理モデルを構築し、定常回転下、回転数変動下で目標の精度が得られることを検証した。
サブテーマ③ 数理モデル：クランク角補間技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・ 0.1deg の精度でクランク角を補間する。 	<ul style="list-style-type: none"> ● できたこと ・ 補間のための数理モデルを構築し、定常回転下で目標の精度が得られることを検証した。 ● 今後の課題 ・ 回転数変動下での精度検証
サブテーマ④ 高精度逡倍器の試作	<ul style="list-style-type: none"> ・ H25 年度までの知見を元に、中間成果として高精度逡倍器を試作する。 ・ 燃焼解析精度 1%を目指す。 	<ul style="list-style-type: none"> ● できたこと ・ ハードウェアの開発が完了した。 ・ 組み込みソフトウェアは7割完成した。 ● 今後の課題 ・ 試作を完了させ、精度を検証する。

1.4. 当該研究開発の連絡窓口

アトセンス株式会社 技術部 長岡 紀彦

TEL 03-5206-8641

FAX 03-5206-8640

E-mail nagaoka-t@atsense.jp

2. 本論

2.1. 燃焼解析と逡倍誤差の関係

2.1.1. 目的

川下企業は究極的に燃焼解析精度 0.2%を目指しているが、逡倍器への要求精度は明確になっていない。そこで、現行の逡倍器の実力、及び、逡倍誤差が燃焼解析に与える影響について調査し、本研究の目標(逡倍精度)を設定する。

2.1.2. 現行逡倍器の誤差(実測)

図 7に示す現行の逡倍器を対象として現状の誤差を把握する実験を行った。



CPM-100
クランクポジションパルス逡倍器

特長

- 360バレス/回転の逡倍出力
- 1バレス/回転のTDC信号
- 回転速度比例のF/V出力
- 電源DC9~32V ACアダプタ付属

用途

- 燃焼、振動、応力、騒音解析、ECUの制御解析などのサンプリングタイミング用アングル信号生成

アトセンス株式会社
ATSENSE

表示部	
表示項目: 表示方式	回転速度表示: 6桁×1行文字高約14.2mm 7SEG LED、緑 設定表示: 16桁×2行文字高約5.6mm キヤクタLCD、バックライト緑
クランク信号入力部	
コネクタ	BNCレセクタブル及びスクリーンレス端子台
入力周波数	10~20,000Hz
入力信号	正弦波(トリガレベル0V)/矩形波(トリガレベル+2.5V)
トリガスロープ	立ち上がり/立ち下がり
LPF	無し/20kHz(-3dB)
プルアップ	OFF/ON(端子台のみ)
センサ電源	+12V(40mA)
入力抵抗	100kΩ
入力電圧	±50V(最大定格±100V)
波形整形出力電圧	0-5V
逡倍パルス出力部	
出力点数	2点(BNCレセクタブル)
出力項目	ANGLE出力(360P/R)、TDC出力(1P/R)
出力電圧	0-5V
出力論理	正論理/負論理
F/V出力部	
出力点数	1点(BNCレセクタブル)
出力電圧	0~10V
更新時間	1ms更新
移動平均	1~499個
演算部	
時間分解能	40MHz
設定値記憶	EEPROM
仕様	
電源入力電圧(電力)	DC9~32V(10W)
絶縁	DC電源/クランク信号入力/マーク信号入力/F/V出力/ANGLE出力・TDC出力・波形整形出力
外形寸法	184mm(W)196mm(D)70mm(H)(突起部除く)
質量	約81g
使用温湿度範囲	0~40℃/85%RH以下(ただし、結露無き事)
付属品	ACアダプタ、DCプラグケーブル

図 7 アトセンス製クランクポジションパルス逡倍器CPM-100 カタログ抜粋

実験は、図 8に示す通り、エンジンテストベンチでロータリーエンコーダと比較して行った。トルク 3 通り(40, 60, 80N)と回転数 7 通り(1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000rpm)の組み合わせで行った。

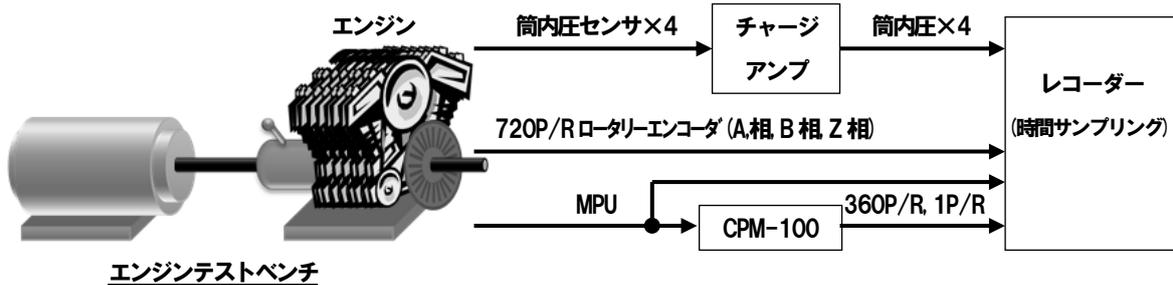


図 8 エンジンテストベンチでの実験方法

また、図 9に示す通り、試験車両を用いてロータリーエンコーダと比較して行った。条件は、空吹かし運転で4通りの回転数(1000, 2000, 3000, 4000rpm)とした。

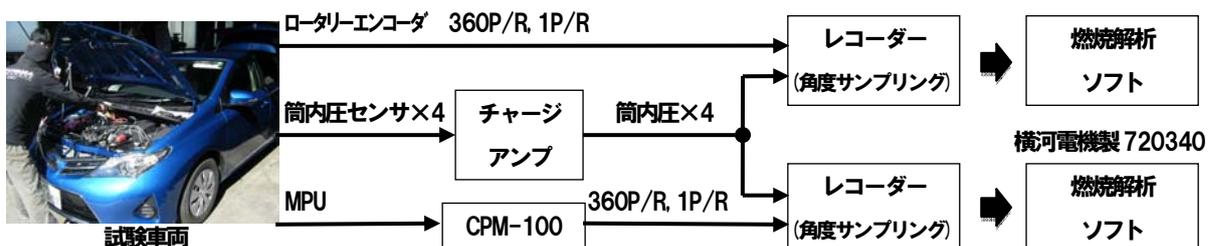


図 9 試験車両での実験方法

エンジンテストベンチで用いたエンジンと、試験車両のエンジンは同型式で、一般的な 1.5L、4 気筒のガソリンエンジンである。

この実験から得られた通倍器の誤差の一例を図 10 に示す。上の図は、横軸をクランク角として通倍誤差を示したものである。下の図は、上の図から予測点を抽出して直線で結んだものである。これから、通倍誤差は、△印で示す全体的にオフセットする誤差、○印で示す 1 ヶ所/1 回転の誤差、☆印で示す 4 ヶ所/1 サイクルの誤差、□印で示す上の図と下の図の差分の誤差から成ることが判った。

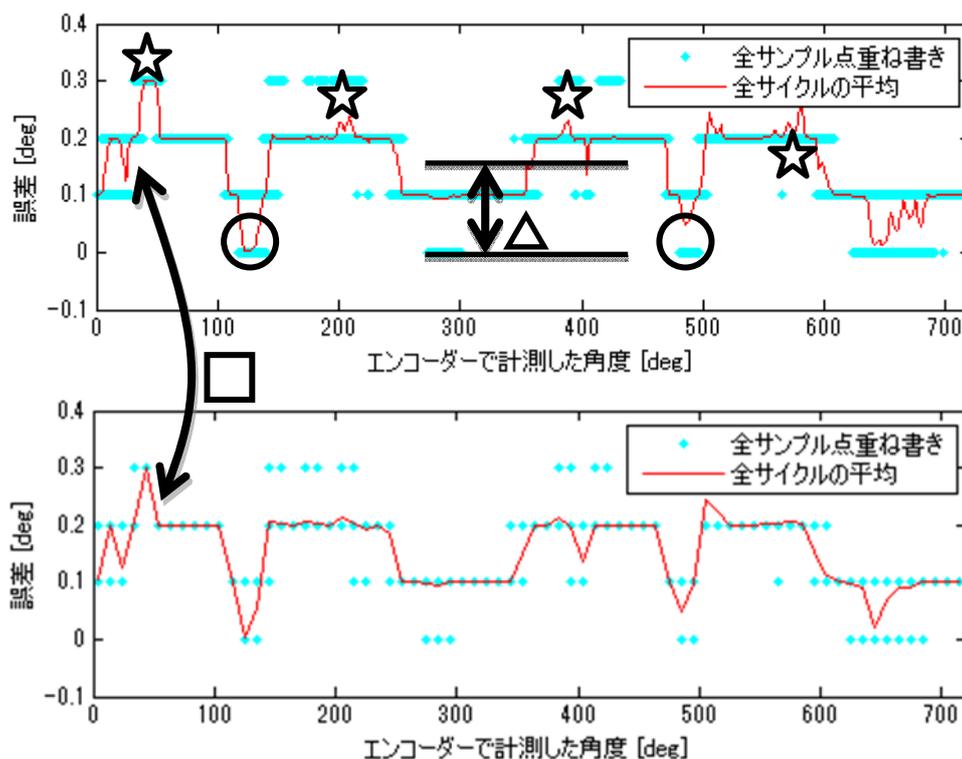


図 10 現行通倍器の誤差(エンジンテストベンチ 1000rpm-80Nm)

以上の実験を、実施した全ての条件についてまとめた結果、表 6 に示す通り、現行の通倍器の実力が明らかとなった。

表 6 実測値から得られた現行通倍器の誤差と燃焼解析に与える影響度

誤差成分	誤差の原因	現行通倍器の誤差	燃焼解析に与える影響度
△印	MPU の遅延	最大 2[deg]	0.35[deg] →IMEP 誤差 1.42%に相当 →dQ/dθ 誤差 2.35%に相当
○印	クランクポジションセンサの歯欠け部の信号ひずみ	-0.5[deg]	0.5[deg] →IMEP 誤差 0.135[%]未満
☆印	爆発圧縮行程に起因する加減速による予測の誤差	±0.15[deg]	※
□印	補間の誤差	※	※

※：今回の実験からは数値化できなかった。

2.1.3. 通倍誤差が燃焼解析に与える影響（シミュレーション）

通倍誤差が燃焼解析に与える影響を調べるため、2.1.2節のエンジンテストベンチでの実験データに対して、意図的に誤差を印加し、燃焼解析の結果がどの程度変化するかを調査した。

2.1.2節の○印の通倍誤差、☆印の通倍誤差が燃焼解析に与える影響を調べるため、エンジンテストベンチでの実験で得られたロータリーエンコーダ波形に対して、図 11に示す誤差を印加した。

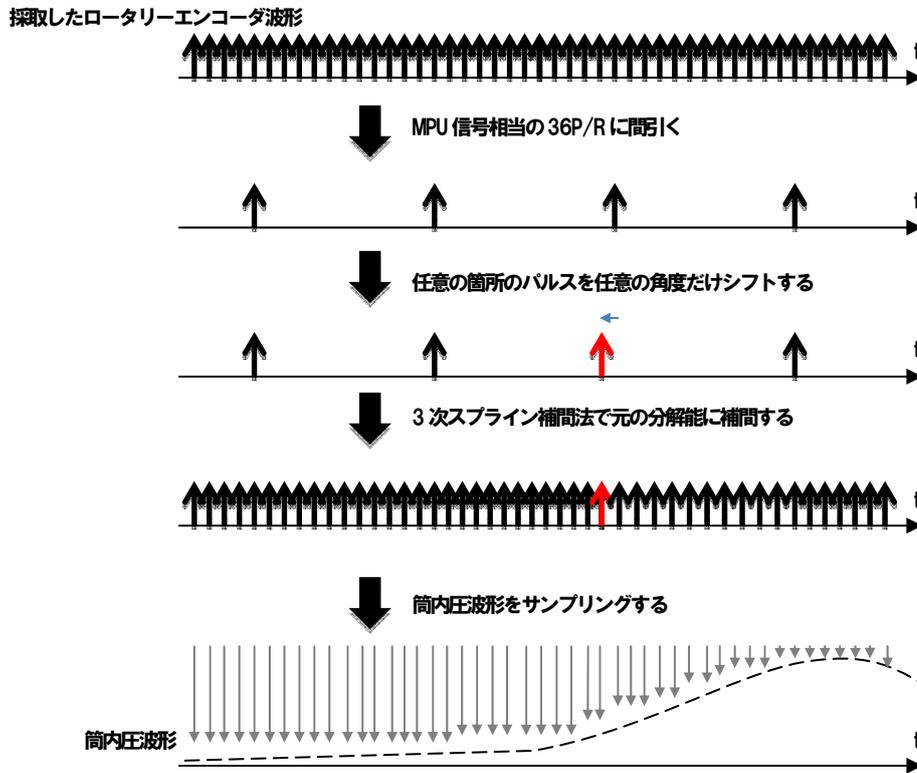


図 11 予測誤差による燃焼解析への影響のシミュレーション方法

この実験（シミュレーション）から得られた、○印や☆印の通倍誤差と燃焼解析の関係を図 12、図 13 に示す。

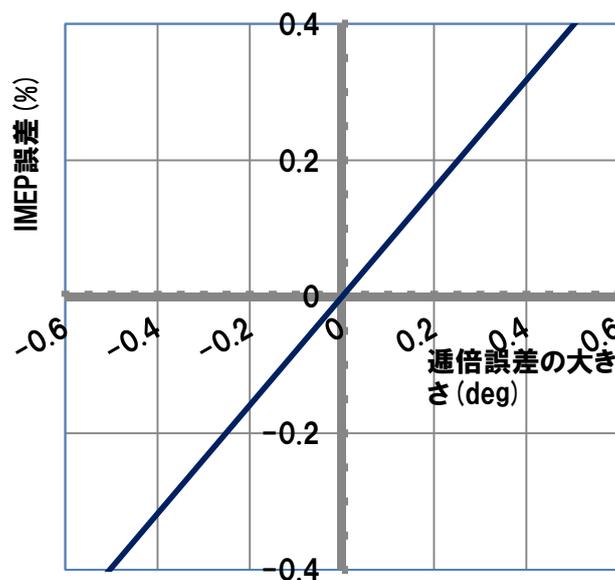


図 12 通倍誤差（○印、☆印） 対 IMEP 誤差（1000rpm-60Nm、CA=30deg に予測誤差を印加）

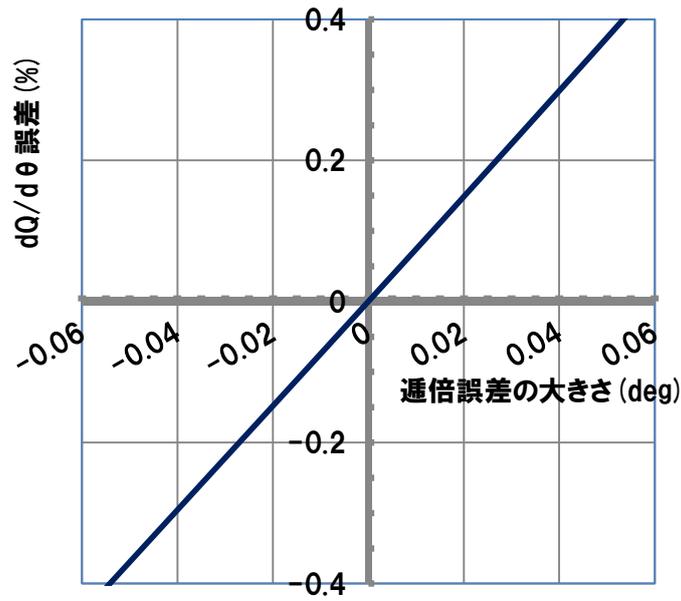


図 13 通倍誤差 (○印、☆印) 対 $dQ/d\theta$ 誤差 (1000rpm-60Nm、CA=10deg に予測誤差を印加)

次に、2.1.2節の△印の通倍誤差が燃焼解析に与える影響を調べるため、エンジンテストベンチでの実験で得られた通倍出力波形に対して、意図的に、進角/遅角させて、燃焼解析に与える影響を調査した。図 14、図 15にその結果を示す。

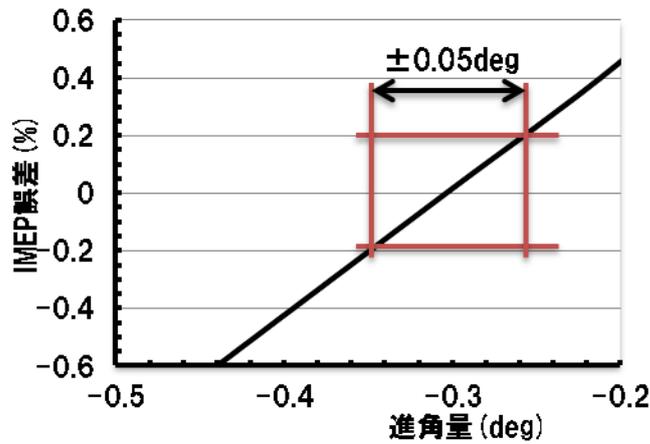


図 14 通倍出力の進角量 対 IMEP 誤差 シミュレーション結果 (2500rpm-40Nm)

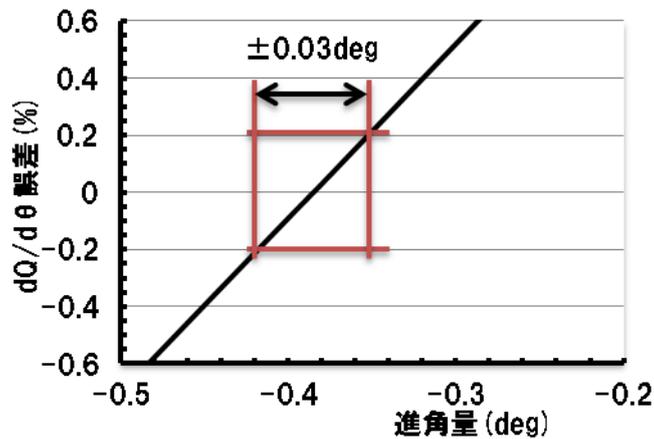


図 15 通倍出力の進角量 対 $dQ/d\theta$ 誤差 シミュレーション結果 (2500rpm-40Nm)

以上のシミュレーションによる検討から、表 7に示す通り、逡倍誤差が燃焼解析に与える影響度が明らかとなった。

表 7 シミュレーションから得られた、逡倍誤差が燃焼解析に与える影響度

誤差成分	説明	燃焼解析に与える影響度
△印	MPU の遅延による逡倍誤差	IMEP 誤差 0.2% →逡倍誤差 0.05deg に相当 dQ/dθ 誤差 0.2% →逡倍誤差 0.03deg に相当
○印	クランクポジションセンサの歯欠け部の信号ひずみによる逡倍誤差	IMEP 誤差 0.2% →逡倍誤差 0.3deg に相当 dQ/dθ 誤差 0.2% →逡倍誤差 0.03deg に相当
☆印	爆発圧縮行程に起因する加減速による予測の誤差	同上

2.1.4. 本研究の目標精度

川下企業が究極的に目指している燃焼解析精度と、現行逡倍器の逡倍誤差の実力（表 6）、シミュレーションから得られた逡倍誤差が燃焼解析に与える影響度（表 7）を考慮し、本研究の目標精度を以下の通り設定した。

目標精度：逡倍精度 0.1deg

2.2. 数理モデル：クランク角予測技術の確立

2.2.1. 本テーマの目的

シグナルプレート歯の数が最大で 34 歯程度であるため、クランクポジションセンサ（MPU+シグナルプレート）より得られるパルス間時間の分解能は 10[deg]程度となり、エンジン評価に必要である 1[deg]のパルス間時間を得るためには、10[deg]先を予測し、補間を行う必要がある。

そこで、本テーマではクランクポジションセンサから得られる 10[deg]先、30[deg]先の角度となる時間を正確に予測することを目的とする。

2.2.2. 課題

予測を行う際に解決すべき課題として、「クランクポジションセンサによるノイズ（シグナルプレートの歯欠け）」と「エンジンによるノイズ（爆発によるシャフトの加減速）」の存在によりクランクの回転速度が一定ではないことが挙げられる。そこで、本テーマではこれらの課題にして、エンジンの回転を予測するためのモデルを構築することで高精度な測定を可能とする。

2.2.3. 検証実験

本節では、実際のエンジンよりクランクポジションセンサで計測したデータを用いて数値実験を行う。エンジンの回転を予測するためのモデルを構築し、そのモデルに従って予測を行う。予測値と実測値と比較することで、本テーマの有効性を検討する。また、定常回転、非定常回転の 2 通りの予測実験による検証を行う。

実験 2 は実際の使用を想定し、回転速度が変化する場合のデータを対象とする。クランク角が加速、減速する場合においてもエンジン回転予測モデルの構築が有効であるかを検証する。

●要求仕様

燃焼解析を行うために、クランク角度の測定誤差は 0.1[deg]以内であることが要求される。したがって当該数値を本テーマの要求仕様とする。

●実験 1

実験 1 は定常回転のデータを対象として、予測実験を行う。1000, 3000, 5000[rpm]の 3 種類の回転速度に対して予測実験を行い、低速から高速回転時において予測が行えることを示す。

●実験条件 1

今回は使用するデータと条件を以下のように設定する。

- ・使用データ：ファイアリング, 1000, 3000, 5000[rpm]
- ・サンプル時間：1[μ s] (1000[rpm]), 0.5[μ s] (3000[rpm]), 0.2[μ s] (5000[rpm])
- ・データ数：6801 個, 0[deg] ~ 72000[deg] (パルス間時間)

●実験結果 1

図 16 ~ 図 18 に 1000, 3000, 5000[rpm]におけるモデルの予測値と実測値の比較を示す。これより、すべての回転速度において予測値は実測値と細かい差はあるもの近い傾向を示していることが分かる。

続けて誤差（予測値-実測値）を使用データの全範囲で算出し、標準偏差（3 σ ）を比較したものを表 8 に示す。標準偏差 3 σ は全体の誤差の約 99.7%が存在する範囲を示している。この表より、要求仕様である 0.1[deg]を満たす範囲で予測が行えていることが分かる。

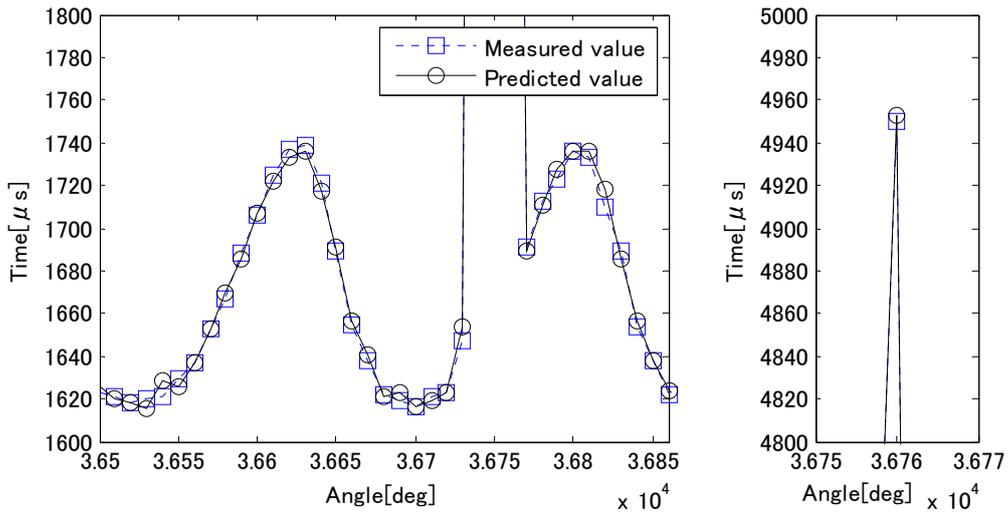


図 16 定常回転時の予測値と実測値の比較 (1000[rpm])

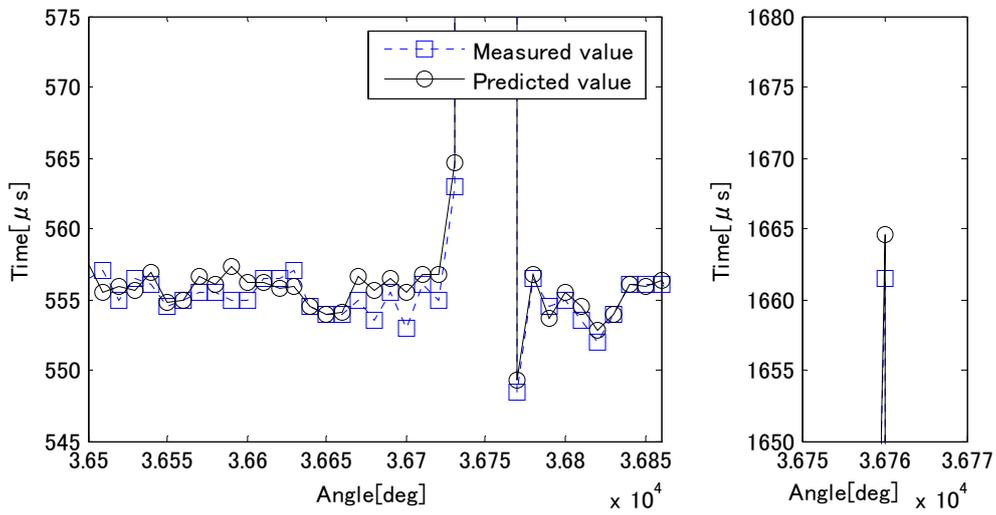


図 17 定常回転時の予測値と実測値の比較 (3000[rpm])

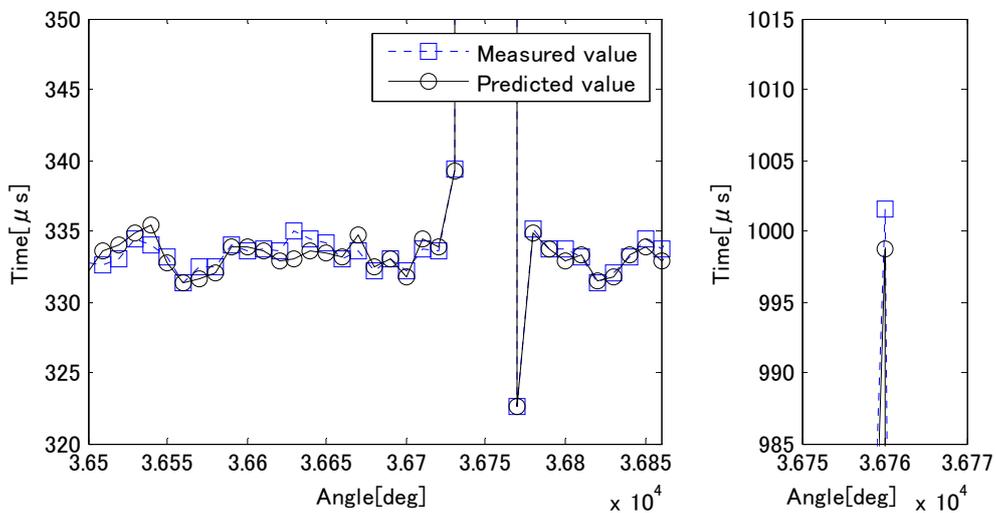


図 18 定常回転時の予測値と実測値の比較 (5000[rpm])

表 8 定常回転時の標準偏差 3σ の比較

回転速度[rpm]	標準偏差 3σ [deg]
1000	0.0644
3000	0.0571
5000	0.0768

●実験 2

実験 2 は実際の使用を想定し、回転速度が変化する場合のデータを対象とする。クランク角が加速、減速する場合においてもエンジン回転予測モデルの構築が有効であるかを検証する。

●実験条件 2

今回は使用するデータと条件を以下のように設定する。

- ・使用データ：ファイアリング，非定常回転，約 1000～4000[rpm]で変化 (図 19 参照)
- ・サンプル時間：0.5[μ s]
- ・データ数：20065 個，0[deg]～212440 [deg] (パルス間時間)

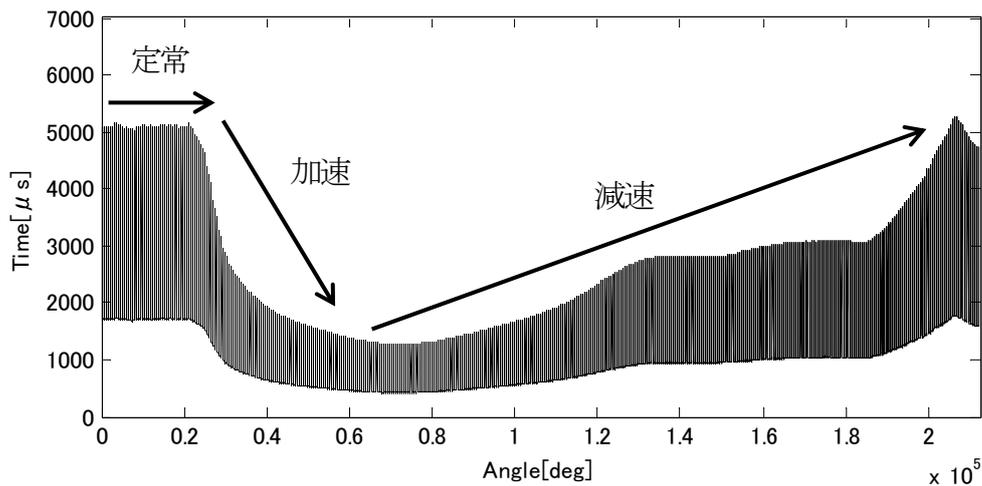


図 19 回転速度が変化するデータ

●実験結果 2

実測値と予測値の比較を図 20、誤差を全範囲でプロットしたものを図 2.2-6 に示す。図 2.2-5 は速度変化の大きい部分のデータであるが、予測値は実測値に近い値を示していることが分かる。また、図 21 の誤差をみると、要求仕様である 0.1[deg]を満たさない点が存在するものの、全体的に小さい値を示していることが分かる。

実験 1 と同様に、誤差 (予測値－実測値) の標準偏差 (3σ) を表 9 に示す。この表より、要求仕様である 0.1[deg]を満たす範囲で大部分の予測が行えていることが分かる。

表 9 非定常回転時における標準偏差 3σ

回転速度	標準偏差 3σ [deg]
非定常回転	0.0657

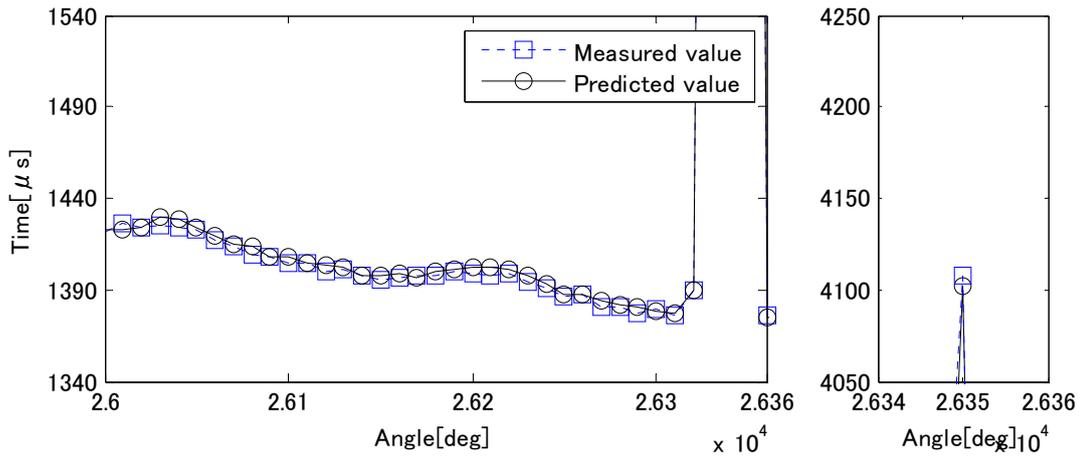


図 20 非定常回転時の予測値と実測値の比較

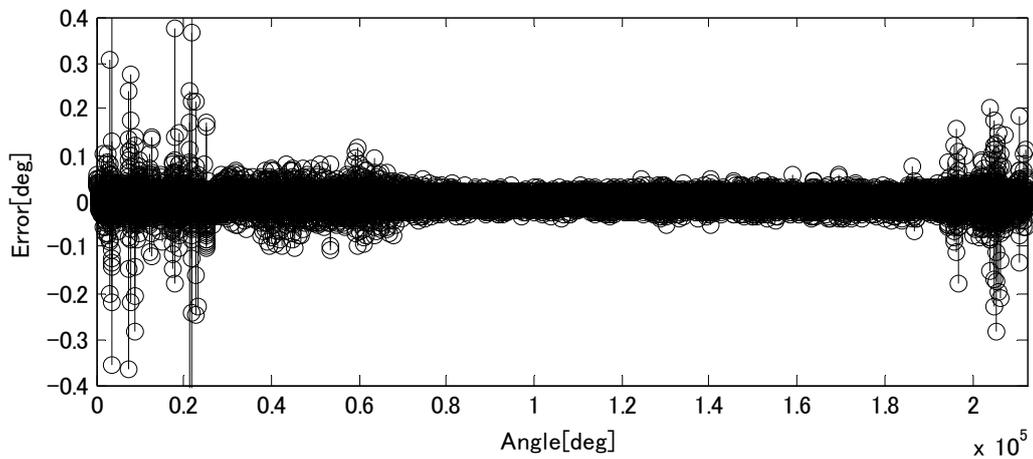


図 21 非定常回転時の予測値と実測値の誤差

2.2.4. まとめ

本テーマでは、エンジン回転予測モデルを構築することにより、クランク角を予測する手法の検討を行った。一定速度に近い定常回転時と回転速度変化が生じている非定常回転時の 2 通りのデータを使用することで、実際の使用や条件を想定した予測実験を行った。実験結果より、要求仕様を満たす高い予測精度を達成できることを確認し、提案したモデルによる予測手法はクランク角度の予測に使用可能であることを示した。

したがって、本テーマであるクランク角予測技術の確立は概ね達成できたと言える。

2.3. 数理モデル：クランク角補間技術の確立

2.3.1. 本テーマの目的

クランクポジションセンサにおいて、シグナルプレートは1周に34個の歯(2歯かけ)を持つことから、センサから得られる信号は10[deg]ごとに1パルスである。エンジンの性能評価をする際に行われる燃焼解析には1[deg]の分解能を持ったデータが必要なため、クランクポジションセンサの信号を予測し、補間を行わなければならない。ところが、エンジンには複雑な加減速が生じているために正確な予測・補間は困難である。

上記背景を踏まえ、本テーマでは、エンジンの挙動を考慮したエンジン物理モデルを構築し補間に適用することで補間の向上を目指す。

2.3.2. 課題

補間処理は、直近の過去の10[deg]のパルス間時間である現在値を得たのち、予測により得た次の10[deg]のパルス間時間(予測値)とのあいだを連続値でつなぎ、1[deg]ごとのパルス間時間へと分割することで行われる。しかし、クランク角速度は10[deg]回転する間に複雑に変化するために、現在値と予測値を正確につなぐことは困難である。したがって、どのように2点間を連続値でつなぎ、分割するのかを考えることが、補間精度向上において重要となる。そこで本テーマでは、エンジンの状態のデータやパーツの寸法が利用可能であることを考慮し、エンジンの状態からクランク角加速度を算出可能な物理モデルを構築する。構築した物理モデルを利用して補間を行うことで、後述する要求仕様を満たす精度での補間法の実現を目指す。

2.3.3. 検証実験

燃焼試験で計測された実測値を用いてエンジン物理モデルを構築する。また、構築した物理モデルを補間に利用し、要求仕様を満たす補間が行えているのか検証する。今回は非定常回転時への対応を見据え、1000[rpm]と3000[rpm]、5000[rpm]の3種類の定常回転時における補間処理について検証を行う。また、クランク角速度が常に一定であるものとして補間を行う「単純分割補間」、1次関数的に補間を行う「直線補間」を比較対象に加える。

●要求仕様

燃焼解析を行うために、クランク角度の測定誤差は0.1[deg]であることが要求される。したがって当該数値を本研究の要求仕様とする。

●検証条件

- ・1000[rpm]、3000[rpm]および5000[rpm]の定常回転時にエンジンテストベンチにおいて測定されたデータをモデルのパラメータ同定用に0~3599[deg](5サイクル分)を使用する。
- ・1000[rpm]および3000[rpm]の定常回転時においてエンコーダにより計測された値を用いて補間を行い、実測値と比較する。
- ・タイミングプレートの基準位置から30[deg]の区間には30[deg]分の歯かけ部が存在するものとして実験を行う。
- ・比較対象として「単純分割補間」、「直線補間」を加える。

●実験結果

クランク角度 3600~7199[deg](5 サイクル)の間で 10[deg]のパルス間時間(クランク角度が 1[deg]回転するために必要な時間)に対し各種手法で補間を行った結果の一部を次の図に示す。1000[rpm], 3000[rpm], 5000[rpm]回転時の結果が、図 22, 図 23, 図 24にそれぞれ対応する。また、エンコーダによる計測値と補間後の値との差分を誤差とし、最大誤差と 3 倍標準偏差 3σ についてまとめたものを表 10に示す。

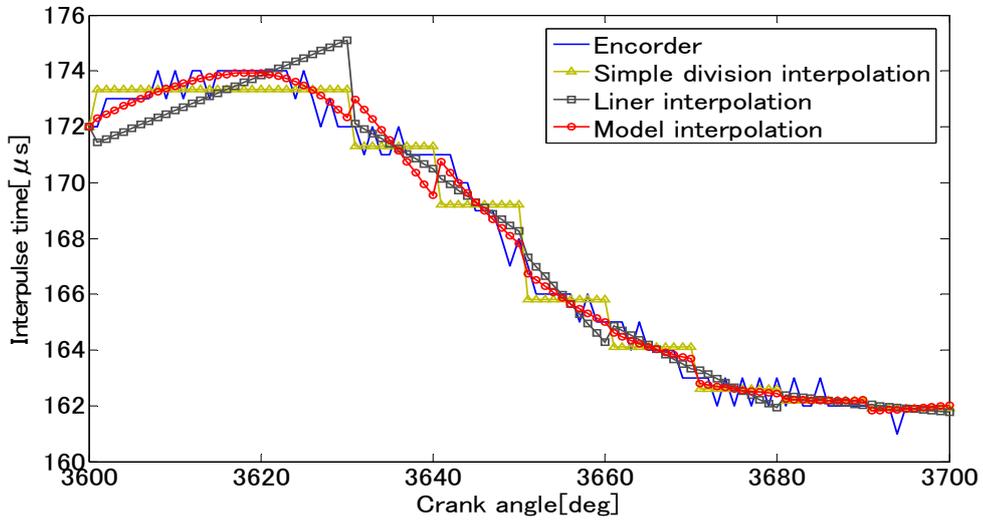


図 22 1000[rpm]回転時における各種補間と実測値の比較

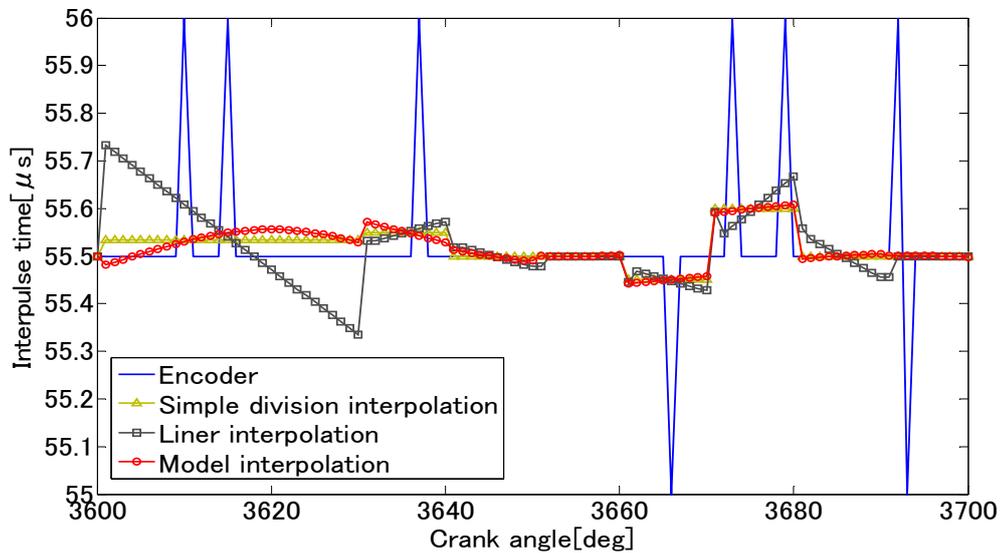


図 23 3000[rpm]回転時における各種補間と実測値の比較

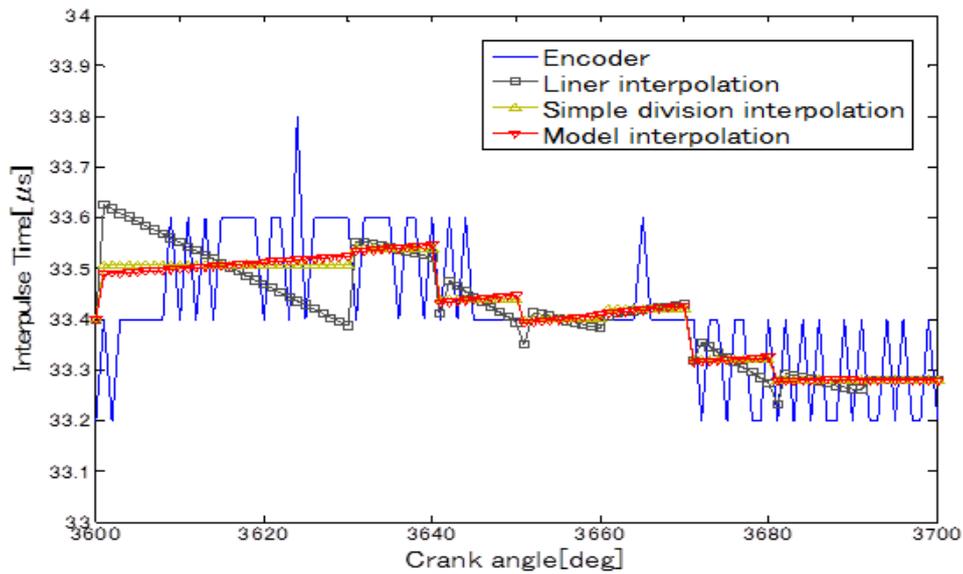


図 24 5000[rpm]回転時における各種補間と実測値の比較

表 10 最大誤差と 3σ

1000[rpm]		
補間手法	最大誤差[deg]	3σ [deg]
単純分割補間	0.0138	0.0071
直線補間	0.0209	0.0063
モデル補間	0.0097	0.0046
3000[rpm]		
補間手法	最大誤差[deg]	3σ [deg]
単純分割補間	0.0400	0.0114
直線補間	0.0429	0.0115
モデル補間	0.0394	0.0114
5000[rpm]		
補間手法	最大誤差[deg]	3σ [deg]
単純分割補間	0.1034	0.0072
直線補間	0.1029	0.0072
モデル補間	0.1032	0.0072

図 22, 図 23, 図 24から、物理モデルを用いた補間(モデル補間)ではよりなめらかな補間が行えていることがわかる。また、表 10から、モデル補間は 1000[rpm], 3000[rpm]回転時では要求仕様を満足し、高い精度で補間が行えていることがわかる。5000[rpm]回転時には要求仕様をわずかに上回る最大誤差が見られたが、これは直線補間、単純分割補間においても同様に最大誤差が大きくなっていることから、エンコーダ計測値に生じている突発的なノイズの影響が原因であると考えられる。 3σ が要求仕様に対し十分に小さい値であることから、5000[rpm]回転時においても、実際の使用に耐えうる精度を持った補間ができているといえる。

2.3.4. まとめ

本研究ではエンジン物理モデルを構築し、パルス間時間の補間に利用することで要求仕様を満たす補間が行えるか検証した。その結果、要求仕様を満たす補間が行えていることが確認できた。また、区間によっては直線補間の精度がモデル補間の精度を上回ることがあり、補間手法を組み合わせることで更なる精度向上が期待できると考えられる。したがって、本テーマの目的は概ね達成できたと言える。

2.4. 高精度逡倍器の試作

2.4.1. 目的

川下企業である自動車メーカーでは燃焼解析精度 0.2%を究極的に目指しており、逡倍器にもさらなる高精度化が望まれている。

しかし、逡倍器は時間遅れなしにロータリーエンコーダ相当の信号をリアルタイムに再現する装置であるため、予測と言った不確定な処理をベースにしていることや、精度が不十分なクランクポジションセンサを信号源としていることから、ロータリーエンコーダに比べて精度が劣る問題がある。

現状は燃焼解析で2%相当の精度である。

高精度逡倍器の研究開発は、今後も継続して行うが、その中間成果として、昨年度までの研究で得られた知見を元に高精度逡倍器を試作し、燃焼解析精度1%を目指す。

2.4.2. 逡倍誤差と試作機の概要

逡倍器の誤差を可視化した結果を図 25に示す。上の図は、横軸にクランク角を取り、縦軸にロータリーエンコーダに対する逡倍器の誤差を示している。下の図は、上の図から予測点の誤差のみを抽出したものである。

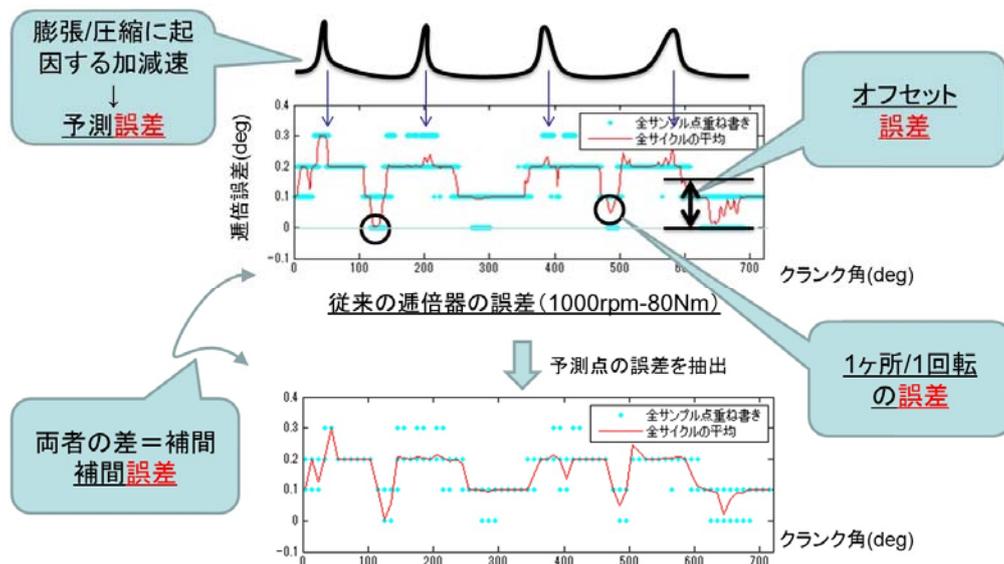


図 25 逡倍器の誤差

このように逡倍器の誤差を可視化することで、逡倍器の誤差には以下の 4 つの成分から構成されることが判った。

表 11 逡倍器の誤差

誤差の成分	説明
オフセット誤差	クランク角に依存しない誤差で、図 25では、上下方向にオフセットした形で現れている。
1ヶ所/1回転の誤差	360deg (1 回転) に 1ヶ所現れる誤差で、図 25では、○印で示される。
予測誤差	膨張/圧縮行程に起因する加減速により生じる予測誤差。図 25では、720deg (1 サイクル) 回転する間に4つの山となって現れている。
補間誤差	膨張/圧縮行程に起因する加減速により生じる補間誤差。図 25では、上の図と下の図の差分として現れている。

オフセット誤差の原因を図 26に示す。MPU 方式のクランクポジションセンサには、漏れ磁束、巻線抵抗、線間容量等の寄生素子が存在し、これらにより、高域において位相シフトするのが原因である。そのため、位相は回転数に依存し、高回転になると遅延する特徴がある。

また、回転数が高くなるとセンサの出力が増大し、センサの磁性体が磁気飽和するため、位相シフト量は単純な回路解析の結果とはズレが生じる特徴がある。

さらに、センサはエンジンの熱にさらされており、キュリー温度に近づくに連れ、位相シフト量は変化する特徴がある。

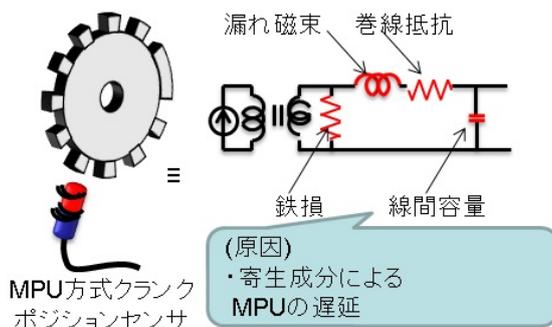


図 26 オフセット誤差の原因

本研究開発ではこのオフセット量を推定する技術を開発した。

この技術でオフセットを推定した結果を図 27に示す。2500rpm において 0.3deg ずれて入るものの、1000~5000rpm の全体では精度よく推定できている。本研究開発の試作機では、この推定値による補正法を採用した。

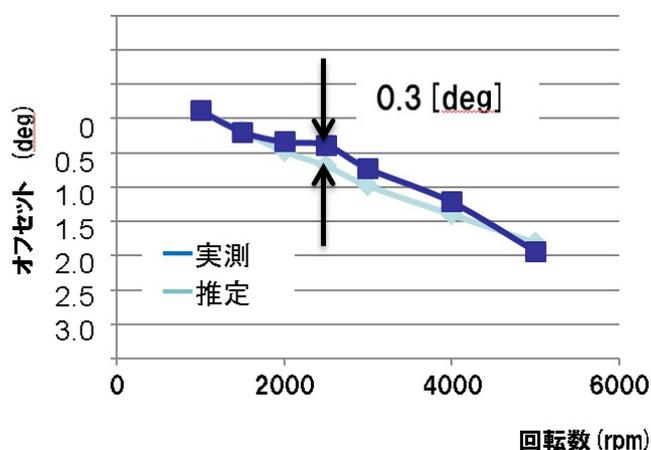


図 27 オフセット誤差の推定

1ヶ所/1回転の誤差は、クランクポジションセンサの原点を示す歯欠け部で発生する誤差である。本研究開発の試作機では、この誤差が多い時に、クランクポジションセンサの信号をバイパスする技術を開発し、本研究開発の試作機に採用した。

予測誤差については、2.2節で精度を検討した。

補間誤差については、2.3節で精度を検討した。

以上の検討を経て以下の試作を行った。図 28に試作機の外観を示す。

寸法は W210xH88xD210mm、電源は DC12V と実車両内に設置可能で、オンロードで使用可能なものとした。



図 28 試作機の外観

本研究開発の期間内では試作完了、評価には至らなかったが、今後、フィールド試験を重ねた後、事業化を目指す予定である。

3. 全体総括

川下企業の要求である燃焼解析精度 0.2%を実現するため、システム同定技術をベースとした数理モデルを検討し、クランク角の予測、及び補間において、目標精度 0.1deg を達成できることを実証した。

特に、予測アルゴリズムについては、回転数変動下においても、目標精度 0.1 を達成できることが確認できた。

また、通倍器の高精度化の検討は今後も続けるが、中間成果として、3年間の研究開発の内、2年目までの検討を採り入れた試作を行った。期間内に試作、評価には至らなかったが、ハードウェアの開発は完了した。今後、フィールドと試験を重ね、1年以内の事業化を目指す。