

2026年度 JPECフォーラム

# 合成燃料を対象とした予混合火炎の特性に関する研究

2026年5月12日

九州大学工学研究院機械工学部門

松田 大

—禁無断転載・複製 ©九州大学, JPEC 2026—

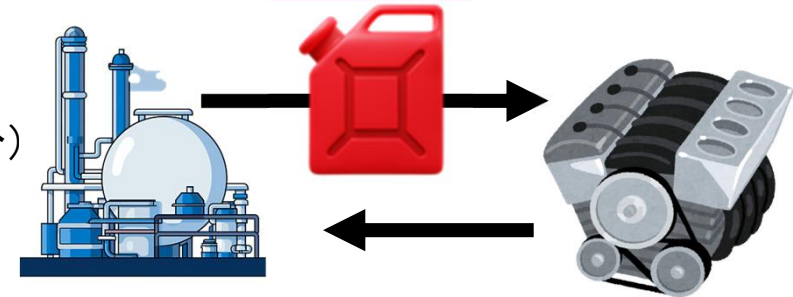
**JPEC**

# 合成燃料のエンジン燃焼と基礎燃焼特性

FT合成由来ガソリン系合成燃料の燃焼検討 / エンジン燃焼試験

## ◆ 燃料性状と燃焼の最適化技術

- ✓ e-fuel の着火燃焼特性評価 (実際に合成された燃料・想定される成分)
- ✓ 燃料合成技術研究に対し、利用技術側から情報をフィードバック
- ✓ e-fuel の燃料性状を活かした燃焼方式の検討

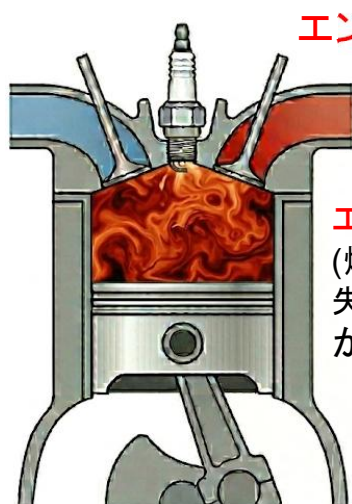


Ref.1) 葛岡浩平, 将来ガソリンエンジンを想定した合成燃料利用技術の研究開発, 2025年度JPECフォーラム, 15.

Ref.2) 葛岡浩平, 小熊光晴, 岡本憲一, FT合成由来ガソリンのエンジン燃焼特性に関する検討, 自動車技術会2025年秋季大会, 講演番号002

Ref.3) 葛岡浩平, ガソリン系カーボンニュートラル燃料の普及に向けた展望と燃焼特性, 2025年度第3回九州先進エンジンテクノロジー研究会

エンジン燃焼試験に基づく実機評価は、社会実装に直結する検証手法として不可欠である。  
しかし、実機燃焼場では複雑流動や熱損失が、燃料組成や燃焼機構に起因する燃焼特性の差異の解析を困難にする。

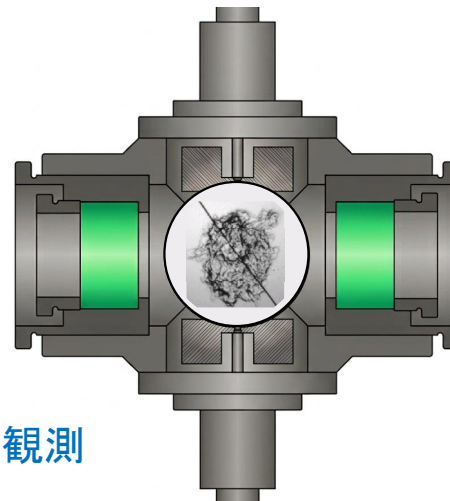


エンジン燃焼試験

### エンジン燃焼

(燃焼, 乱流, 圧力変化, 熱損失, 壁面効果, 残留ガス...)  
から基礎燃焼要素を抽出

球状伝播火炎観測



球状伝播火炎観測により明らかになる燃焼特性

- 燃料固有の層流燃焼速度  $S_L$
- 火炎と流動の相互作用  
(火炎伸長応答, 乱流燃焼速度)
- 詳細化学反応機構の検証
- 燃焼シミュレーションへの入力

エンジン燃焼試験の知見と協調

- エンジン燃焼計算手法の開発と検証
- 次世代の高度燃焼技術の実現

# 球状伝播火炎観測による 層流燃焼速度・火炎伸長応答の定量評価

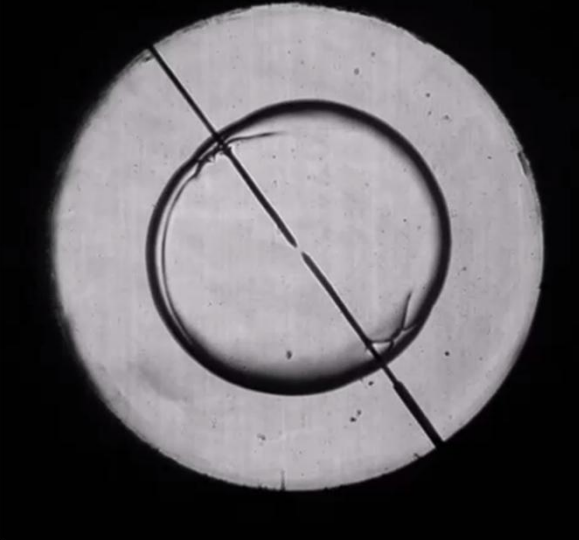
高圧定容燃焼装置



- Volume of chamber: 30 L
- Max pressure: 10 MPa

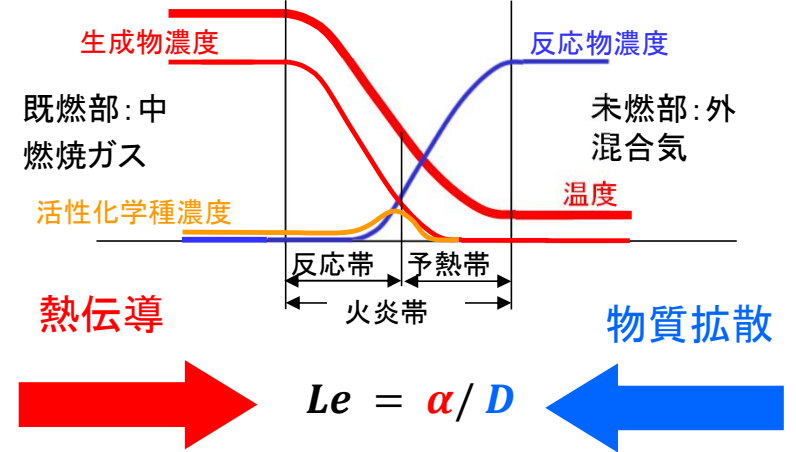
予混合層流火炎伝播  
流動のない均一に混合された  
燃料蒸気と酸化剤の中を火炎面が移動

球状伝播火炎, 可視化視野:  $\Phi 160$

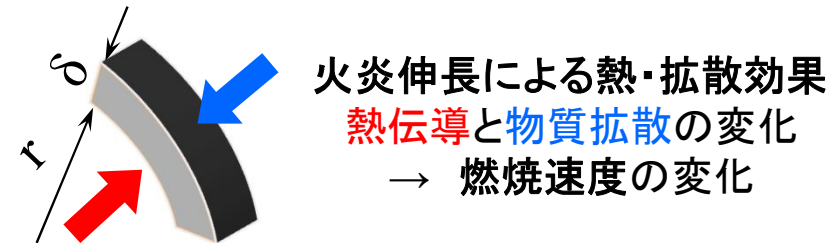


火炎半径の時間変化を計測  
→ 燃焼速度と火炎伸長率を導出

火炎の構造と火炎伝播



火炎伸長と燃焼速度



球状伝播火炎では, 曲率変化に伴う  
火炎伸長と燃焼速度を評価できる. 2/8

# カーボンニュートラル燃料(FT合成油, MtG)とガソリン

本研究で比較するレギュラーガソリン, MtG, 試作FTガソリンはいずれもC5-C12を主成分とする液体炭化水素燃料であり, 沸点範囲は類似している一方で, 炭化水素骨格の分布(直鎖, 分岐, 芳香族)とは燃料ごとに異なっている.

燃料種	製造プロセス	本試験燃料の特長	本研究での位置づけ
レギュラーガソリン*	原油を蒸留・精製 (各種アップグレード)	多様な炭化水素(パラフィン、オレフィン、ナフテン、芳香族)で構成	現行燃料(基準)
MtG*	メタノールの脱水、オレフィン化 →分岐、環化(芳香族化)	芳香族、イソパラフィンが相対的に多い	将来のカーボンニュートラル燃料の一例
試作FTガソリン*	CO <sub>2</sub> の電解→合成ガス→FT合成 →合成粗油のアップグレード	オレフィン、イソパラフィンが相対的に多い	将来のカーボンニュートラル燃料の一例

非常に多数の種類で構成された実在燃料から得られる結果に対する2つの視点

\* 3燃料ともオクタン価は概ね同等

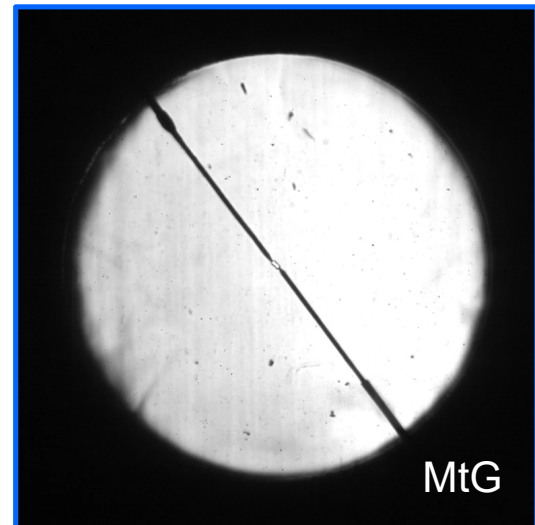
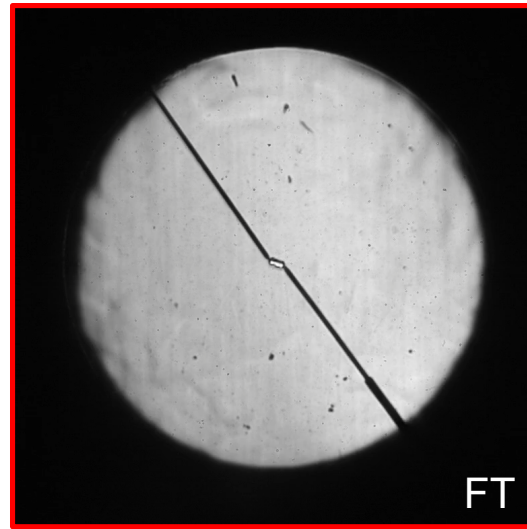
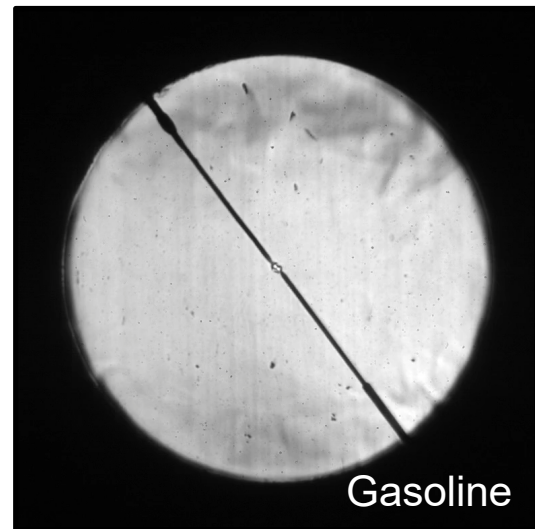
## 1. e-fuelの社会実装に向けたデータ取得(工学的・実務的視点)

- 実機燃焼モデルおよび燃焼安定性評価において直接利用可能な燃焼特性データを取得すること
- 層流燃焼速度および火炎伸長応答を実燃料のまま定量データとして比較可能な形で評価
- 実機適用を前提とした指標であり, 社会実装との距離が最も近い評価

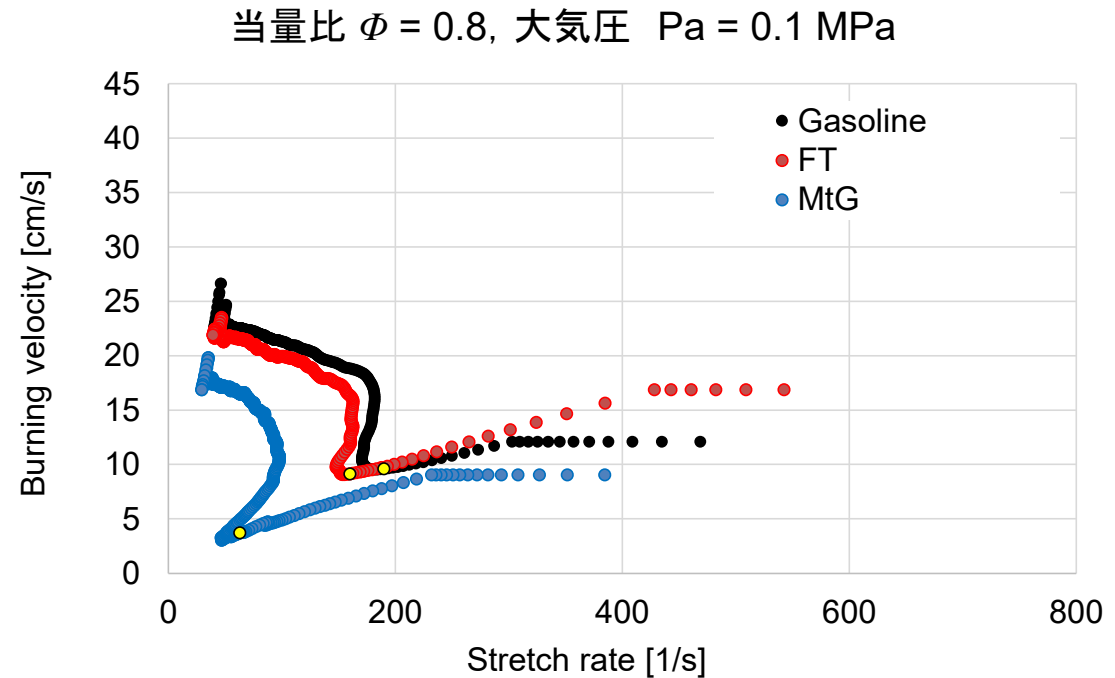
## 2. 学術的評価指標(解釈・理解のための視点)

- 多成分燃料中の炭化水素骨格分布(直鎖・分岐・芳香族)に着目したデータの解釈
- 火炎帯における反応速度およびラジカル生成・消費特性の相対差に着目したデータの解釈
- 詳細反応機構作成の際の検証データ

# 燃焼特性の比較検証(当量比 $\phi=0.8$ / 燃料希薄)



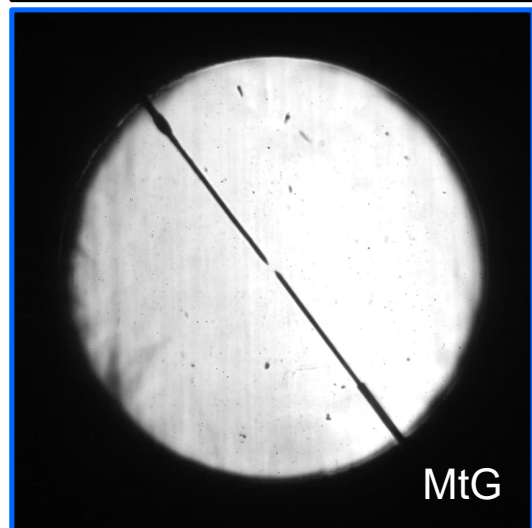
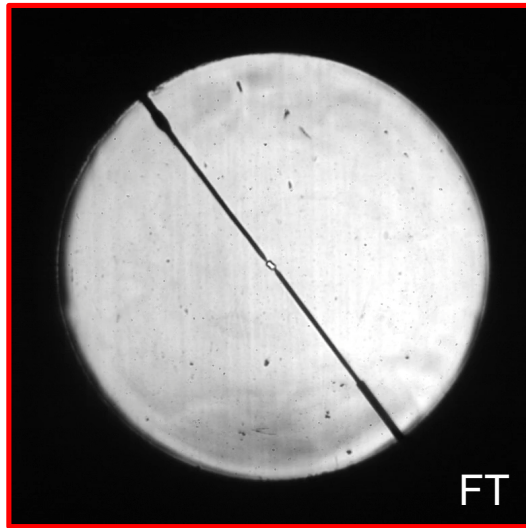
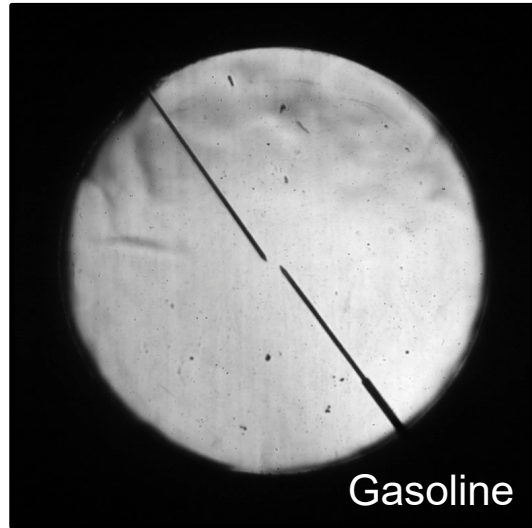
静止混合気条件  
当量比  $\phi=0.8$   
初期圧力P:0.1 MPa  
初期温度T: 341 K  
シュリーレン法  
連続光源:500 W  
撮影速度 7,000 fps  
可視化視野  $\phi 160$



燃焼速度  
Gasoline > 試作FTガソリン > MtG

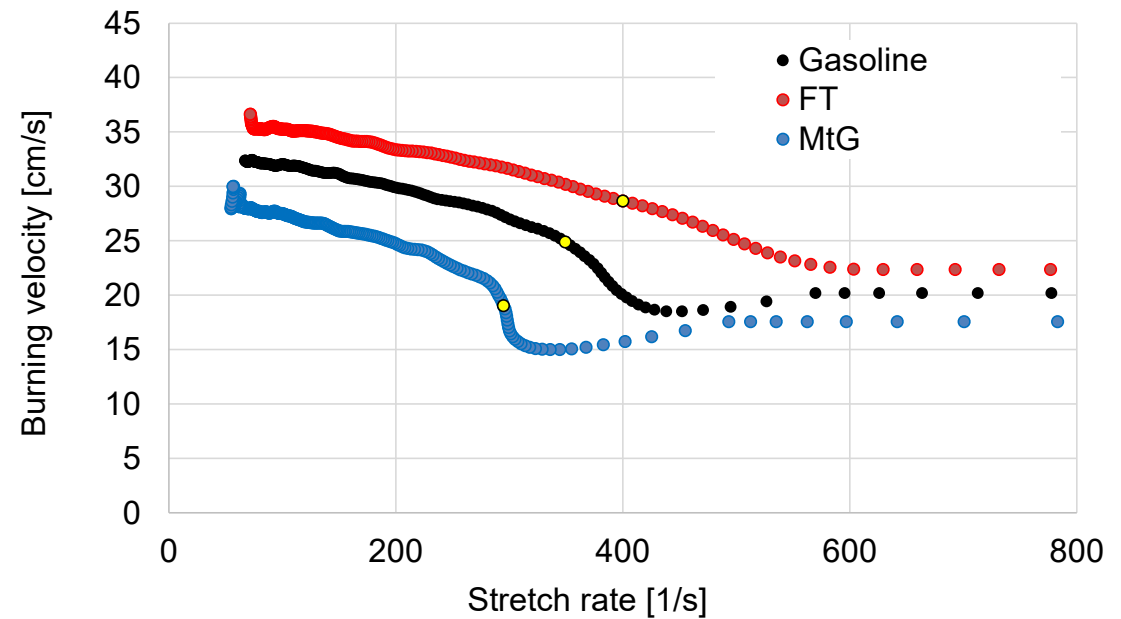
火炎伸長応答  
ガソリンと比較して、試作FTガソリンは火炎伸長を受けると燃焼速度が低下、MtGはさらに低下しやすい。

# 燃焼特性の比較検証(当量比 $\phi=1.0$ / 量論混合比)



静止混合気条件  
 当量比  $\phi=1.0$   
 初期圧力P:0.1 MPa  
 初期温度T: 341 K  
 シュリーレン法  
 連続光源:500 W  
 撮影速度 7,000 fps  
 可視化視野  $\phi 160$

当量比  $\phi = 1.0$ , 大気圧 Pa = 0.1 MPa



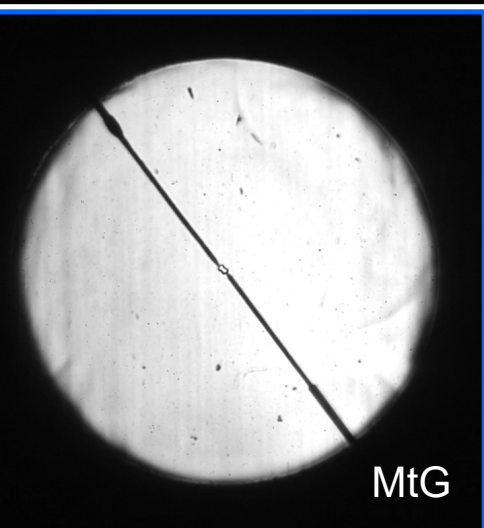
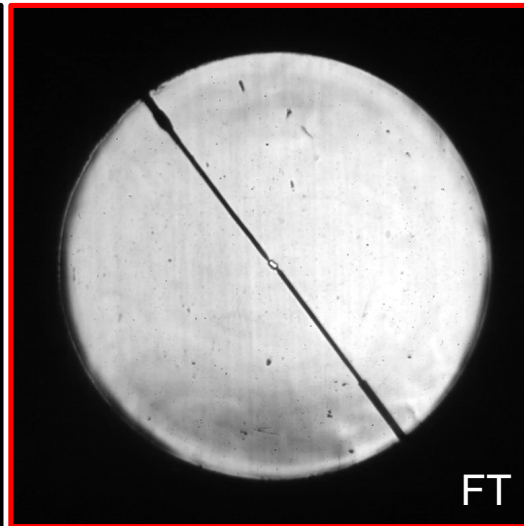
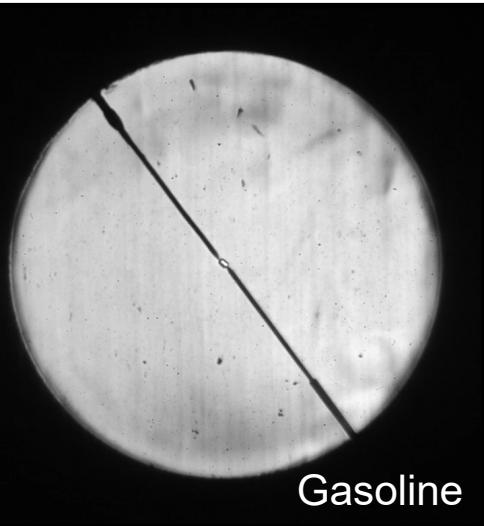
燃焼速度

試作FTガソリン > Gasoline > MtG

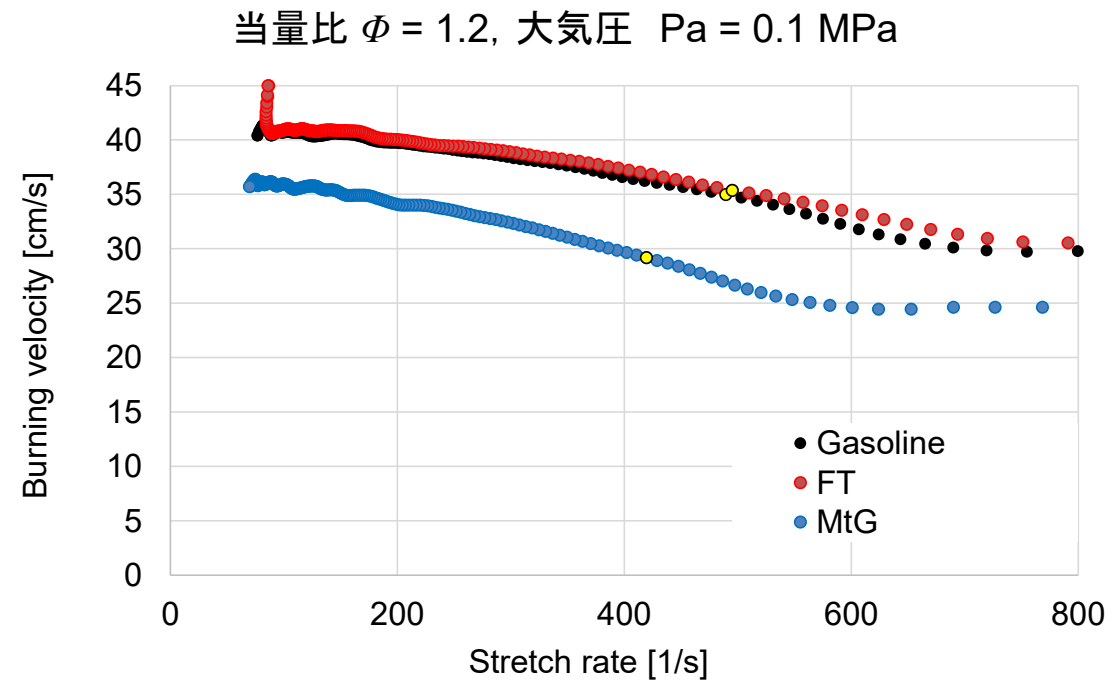
火炎伸長応答

ガソリンと比較して, 試作FTガソリンは火炎伸長を受けても燃焼速度が低下しにくい一方でMtGは低下しやすい

# 燃焼特性の比較検証(当量比 $\phi=1.2$ / 燃料過濃)



静止混合気条件  
当量比  $\phi=1.2$   
初期圧力P: 0.1 MPa  
初期温度T: 341 K  
シュリーレン法  
連続光源: 500 W  
撮影速度 7,000 fps  
可視化視野  $\phi 160$



燃焼速度

試作FTガソリン  $\geq$  Gasoline > MtG

火炎伸長応答

ガソリンと比較して、試作FTガソリンは火炎伸長の影響はほぼ同等、MtGはやや低下しやすい。

## 今年度の成果まとめと今後の予定

### 今年度の主な成果

燃料組成や燃焼機構に起因する燃焼特性の差異の解析を目的に、カーボンニュートラル燃料を実組成のまま取り扱った球状伝播火炎実験により、層流燃焼速度および火炎伸長応答の系統的差異を定量解析した。

- オクタン価が同等であっても、燃焼速度に最大約20%の差が生じることを実験的に確認した。
- 試作FT合成ガソリンは、従来ガソリンに対して量論混合比・過濃条件で燃焼速度が大きく、火炎伸長に対して燃焼速度が低下しにくい。
- MtGは、従来ガソリンに対してすべての当量比で燃焼速度が小さく、特に希薄燃焼下では火炎伸長に対して燃焼速度が低下しやすい。

### 今後の予定

実燃焼機関により近い高圧燃焼実験を実施し、e-fuelのドロップイン燃料の互換性・安定性を引き続き検証するとともに、高効率燃焼条件である希薄燃焼(リーンバーン)や希釈燃焼(高EGR燃焼)の可能性を調査していく。

## 本研究の進展が社会に与える影響



合成燃料は既存の燃料インフラ・内燃機関をそのまま活用可能な「ドロップイン燃料」であり、新規インフラ構築へのコストを抑制しつつ、GHG(温室効果ガス)の大幅な排出削減に貢献する。

本研究は、その社会実装に不可欠な「燃焼の安定化」と「高効率化」を基礎データから支えるものである。

### 研究の進展により得られる成果 ガソリン(既存燃料)との燃焼特性の類似性と差異の体系化

1. 燃焼機器シミュレーション開発の高度化と期間の短縮とコスト低減
  - 燃焼速度のデータベース化: 層流および乱流燃焼速度の高精度データは、燃焼CFDの最重要入力パラメータ。
  - モデルの高精度化: 燃焼現象の計算精度を高め、実機に近い環境下での火炎伝播予測を可能に
2. エンジンの最適制御と効率化
  - 高度燃焼技術の適用: 燃料特性の正確な把握によるリーンバーンや予混合圧縮着火などの高度燃焼技術の適用
  - ガソリンを超える性能: e-fuel特有の燃焼特性を活かした超高効率エンジン開発の可能性
3. ドロップイン燃料としての「互換性」と「安定性」の両立
  - 利用促進: 燃焼特性の類似性を定量的・網羅的に示すことが、ドロップインとしての互換性を担保し利用を促進。
  - 安定運転への寄与: 燃焼速度や消炎特性の差異が引き起こす燃焼不安定化の予測・回避

# END

## 謝辞

本研究は、一般財団法人カーボンニュートラル燃料技術センター(JPEC) 若手研究者基礎研究委託事業の一環として実施されました。  
試験燃料FT合成油およびMtGのご提供、ならびに燃料性状および燃焼特性に関する専門的なご指導を賜りました関係各位に、ここに深く感謝の意を表します。

## 火炎伸長率

$$\alpha = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$$

$$= -\nabla \times (\mathbf{V}_f \times \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})(\nabla \cdot \mathbf{n})$$

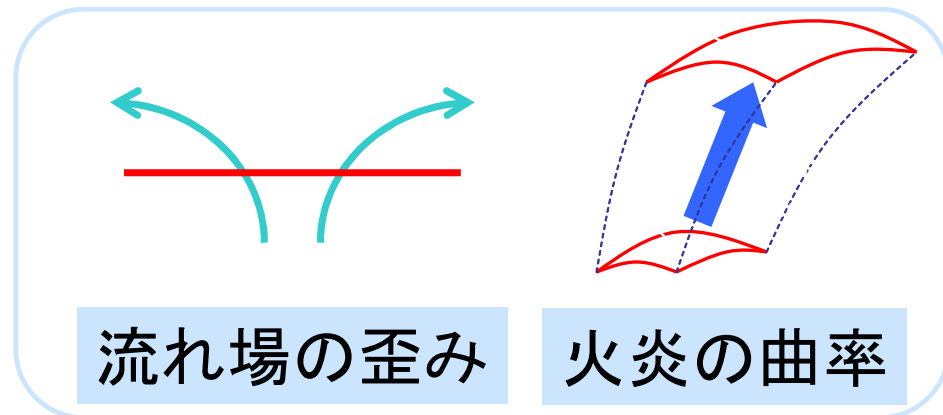
$\alpha$ : Flame stretch rate 1/s

$A$ : Flame front area  $\text{m}^2$

$\mathbf{v}$ : Velocity of flame surface m/s

$\mathbf{n}$ : Unit normal vector of the flame

$\mathbf{V}_f$ : Fluid velocity at the flame m/s



- S.H.Chung, C.K.Law, Combustion and Flame, 55, 123-125, 1984.
- M.Matalon, Combustion Science and Technology, 31, 169-181, 1983.

## 球状伝播層流火炎の層流燃焼速度と火炎伸長率

$$u_n = \frac{\rho_b}{\rho_u} \frac{dr}{dt}$$

$$\alpha = \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{2}{r} S_n$$

$u_n$ : Stretched laminar burning velocity m/s

$r$ : Flame front radius m

$\rho_u$ : Density of unburned gas kg/m<sup>3</sup>

$\rho_b$ : Density of burned gas kg/m<sup>3</sup>

$\alpha$ : Flame stretch rate 1/s

$S_n$ : Flame propagation speed m/s

$t$ : Time s

# 数値計算における燃料組成の代替



近似前 **Curran** Gasoline, FT

燃料名	Gasoline		FT		MtG	
	物質名	mass%	物質名	mass%	物質名	mass%
1	Toluene	14.284	Isopentane	7.738	iso-pentane	12.290
2	Isopentane	8.300	2-Methyl-2-butene	6.887	1,2,4-trimethylbenzene	10.602
3	2-Methylpentane	5.890	2-Methylpentane	4.991	2-methylpentane	10.499
4	n-Pentane	5.398	trans-2-Pentene	3.385	1,3-dimethylbenzene	7.695
5	ETBE	4.963	3-Methylpentane	3.341	3-methyl-pentane	6.616
6	n-Hexane	4.644	2-Methylhexane	3.137	3-methyl-hexane	4.543
7	3-Methylpentane	4.021	2-Methyl-1-butene	3.071	Toluene	3.593
8	3-Methylhexane	2.333	3-Methylhexane	2.940	1,4-dimethylbenzene	3.561
9	2-Methylhexane	2.158	n-Pentene	2.309	1,2-dimethylbenzene	3.236
10	Isobutane	2.010	1,3-Dimethylbenzene	2.112	2-methyl-hexane	3.143
11			n-Hexane	2.082	1-methyl-3-ethylbenzene	3.017
12					n-pentane	2.109

近似前 **Ranzi** MtG

燃料名	Gasoline		FT		MtG	
	物質名	mass%	物質名	mass%	物質名	mass%
1	Toluene	14.284	Isopentane	7.738	Isopentane	12.290
2	Isopentane	8.300	2-Methyl-2-butene	6.887	1,2,4-trimethylbenzene	10.602
3	2-Methylpentane	5.890	2-Methylpentane	4.991	2-methylpentane	10.499
4	n-Pentane	5.398	trans-2-Pentene	3.385	1,3-dimethylbenzene	7.695
5	ETBE	4.963	3-Methylpentane	3.341	3-methyl-pentane	6.616
6	n-Hexane	4.644	2-Methylhexane	3.137	3-methyl-hexane	4.543
7	3-Methylpentane	4.021	2-Methyl-1-butene	3.071	Toluene	3.593
8	3-Methylhexane	2.333	3-Methylhexane	2.940	1,4-dimethylbenzene	3.561
9	2-Methylhexane	2.158	n-Pentane	2.309	1,2-dimethylbenzene	3.236
10	Isobutane	2.010	1,3-Dimethylbenzene	2.112	2-methyl-hexane	3.143
11			n-Hexane	2.082	1-methyl-3-ethylbenzene	3.017
12					n-pentane	2.109

近似後 **Curran**

燃料名	Gasoline		FT		MtG	
	物質名	mass%	物質名	mass%	物質名	mass%
1		14.284	Isopentane	7.738	iso-pentane	12.290
2	Isopentane	8.300	2-Methyl-2-butene	6.887		10.602
3	2-Methylpentane	5.890	2-Methylpentane	4.991	2-methylpentane	10.499
4	n-Pentane	5.398	trans-2-Pentene	3.385	1,3-dimethylbenzene	7.695
5		4.963	3-Methylpentane	3.341	3-methyl-pentane	6.616
6	n-Hexane	4.644	n-Heptane	3.137	n-Heptane	4.543
7	3-Methylpentane	4.021	2-Methyl-1-butene	3.071		3.593
8	n-Heptane	2.333	n-Heptane	2.940	1,4-dimethylbenzene	3.561
9		2.158	n-Pentene	2.309	1,2-dimethylbenzene	3.236
10	Isobutane	2.010		2.112	n-Heptane	3.143
11			n-Hexane	2.082		3.017
12					n-pentane	2.109

近似後 **Ranzi**

燃料名	Gasoline		FT		MtG	
	物質名	mass%	物質名	mass%	物質名	mass%
1	Toluene	14.284	n-Pentane	7.738	n-Pentane	12.290
2	n-Pentane	8.300	2-Methyl-2-butene	6.887	1,2,4-trimethylbenzene	10.602
3		5.890		4.991		10.499
4	n-Pentane	5.398	iso-amilene	3.385	1,3-dimethylbenzene	7.695
5	ETBE	4.963		3.341		6.616
6		4.644	n-Heptane	3.137	n-Heptane	4.543
7		4.021	isoamilene	3.071	Toluene	3.593
8	n-Heptane	2.333	n-Heptane	2.940	1,4-dimethylbenzene	3.561
9		2.158	n-Pentane	2.309	1,2-dimethylbenzene	3.236
10	Isobutane	2.010	1,3-Dimethylbenzene	2.112	n-Heptane	3.143
11				2.082	n-propyl-Benzene	3.017
12					n-pentane	2.109

# 多成分液体燃料に対応した予混合気作成手法

- 液体燃料の予混合気精度は、燃焼速度計測精度に直結する。
- ガソリンおよび e-fuel は多成分燃料であり、蒸留特性を有する。
- 液体と同一組成の蒸気を作成することが不可欠である。

## 従来法

予蒸発器内で液体燃料を蒸発させ、蒸気を輸送

燃料と空気は混合気組成に基づく分圧充填法で作成(理想気体近似)

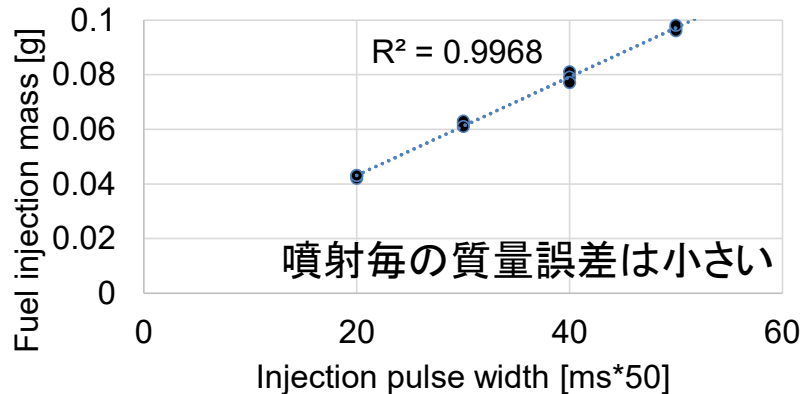
蒸留特性の影響で多成分燃料の組成を正しく保持できない

## 本手法

合成燃料の蒸気と空気を定容燃焼容器内に充填する技術

液体燃料を燃焼容器内に直接噴射し、噴射量(質量)で当量比を制御

蒸留特性の影響を排除し、多成分燃料の組成を保持した予混合気を作成



e-fuel 当量比  $\Phi=1$ 条件

必要燃料量 : 2.0123 g

噴射量/50 ms : 0.0985 g

噴射量を固定し噴射回数制御

最大充填誤差 : 1.5%

# エンジン燃焼を想定した燃焼条件



本研究の実験条件は、火花点火エンジンにおける筒内圧力(~高負荷/高過給), 当量比(希薄~), 乱流強度を基準に設定しており, 燃焼モデルへ直接入力可能な基礎燃焼特性データの取得を目的としている.

高圧条件では燃料量が圧力倍必要になるため, 燃料の残量次第で変更

実施済み, 火炎伝播せず, 実施予定

## 2025年度計画

### 層流燃焼速度に影響を与える因子

- 燃料組成
- 当量比
- 初期圧力
- 火炎伸長

Laminar	0.1 MPa	0.4 MPa	0.7 MPa	0.95 MPa
$\Phi = 0.6$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	
$\Phi = 0.8$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	
$\Phi = 1.0$	Gasoline/ FT/ MtG	Gasoline/ FT/ MtG	Gasoline/ FT/ MtG	Gasoline/ FT/ MtG
$\Phi = 1.2$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	
$\Phi = 1.4$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	

## 2026年度計画

### 乱流燃焼速度に影響を与える因子

- 燃料組成
- 当量比
- 初期圧力
- 乱流強度

\* 本装置での積分乱流スケール  $L_f$ : 28 mm

乱流強度 [m/s] = 2.46, グレー:乱流強度 [m/s] = 1.23, 2.46, 3.68

Turbulent	0.1 MPa	0.4 MPa	0.7 MPa	0.95 MPa
$\Phi = 0.6$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	
$\Phi = 0.8$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	
$\Phi = 1.0$	Gasoline/ FT/ MtG	Gasoline/ FT/ MtG	Gasoline/ FT/ MtG	Gasoline/ FT/ MtG
$\Phi = 1.2$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	
$\Phi = 1.4$	Gasoline/ FT/ MtG		Gasoline/ FT/ MtG	

# 多成分合成燃料の数値解析における近似手法

## 実験の位置づけ

- 対象燃料(ガソリン, MtG, FT合成油)は数百成分から成る多成分
- 燃料実験では燃料を実組成のまま取り扱い燃焼現象を観測

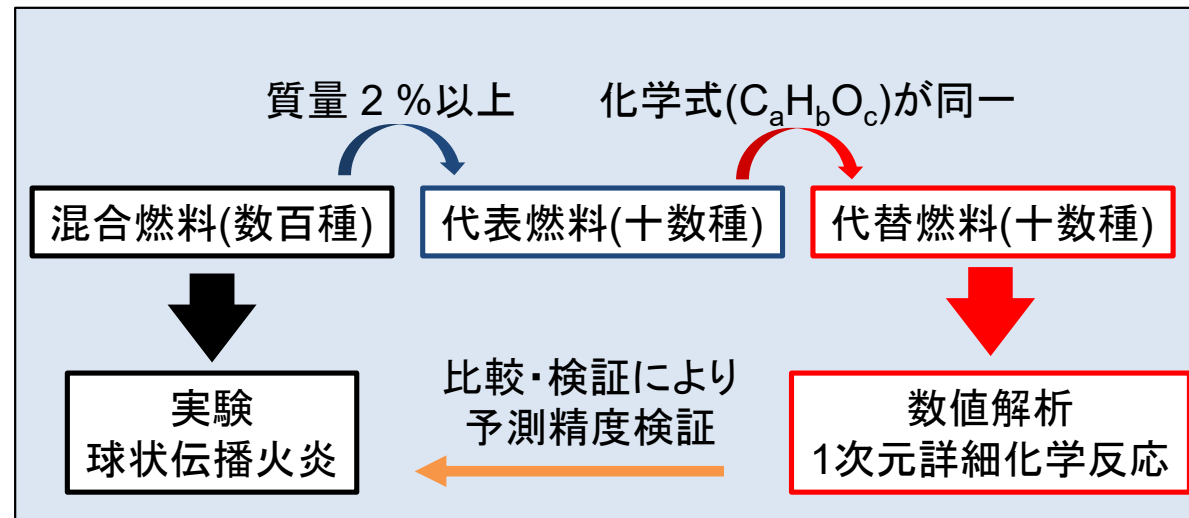
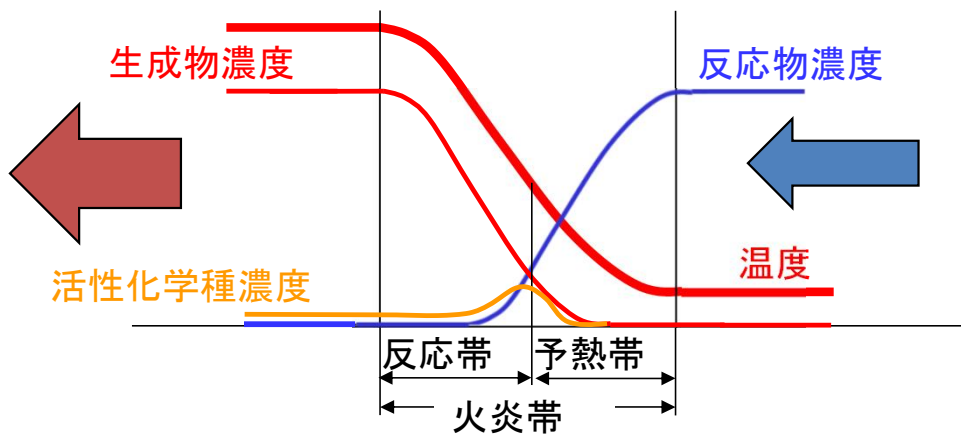
## 数値解析の制約

- 1次元詳細化学反応計算では計算負荷および反応機構整備の観点から大胆な近似が必須
- 既存反応機構(Ranzi, Miyoshi, Curran 等)は含有成分が限定的であり, 機構に存在しない成分は解析不可

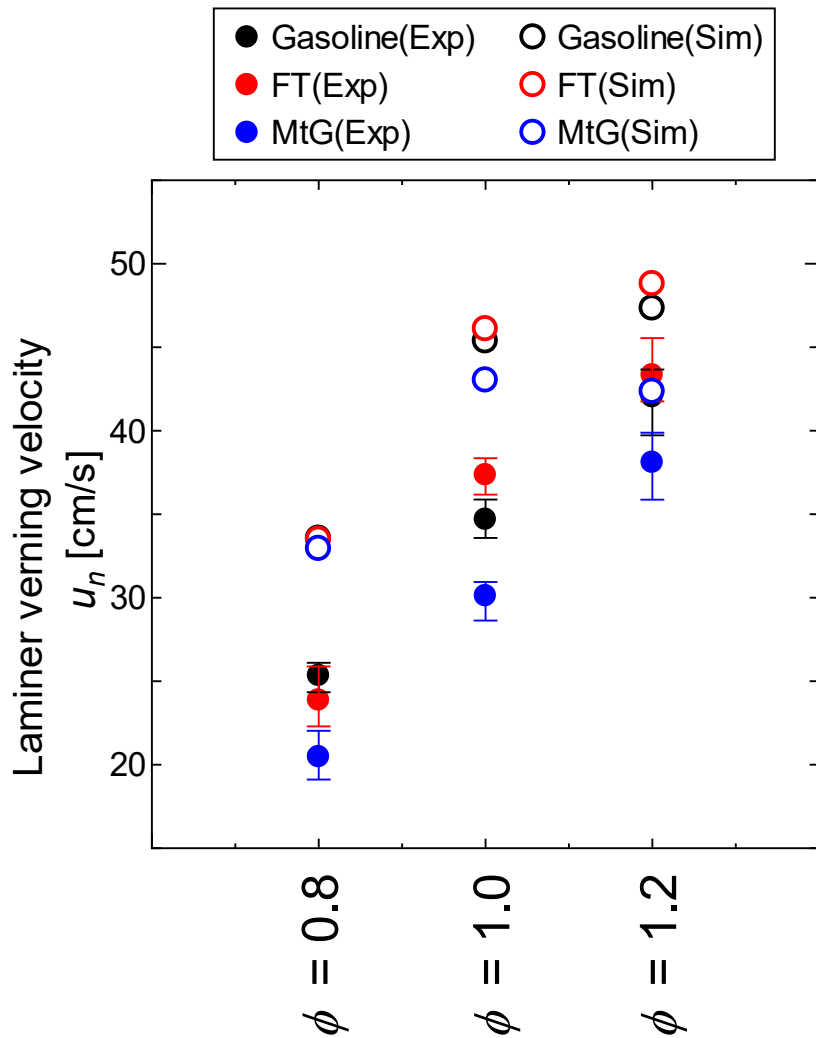
## 数値解析における近似と役割

- 多成分燃料を質量割合2%以上のもののみを解析対象とした.
- 既存反応機構に存在しない燃料は, 化学式( $C_aH_bO_c$ )が同一の代替燃料を用いた.
- 数値計算は既存反応機構の枠内での精度を実験を基準として比較・検証

## 1次元詳細化学反応計算



# 燃焼特性の比較検証(実験と数値計算)



火炎伸長の影響を受けない条件での層流燃焼速度  $u_n$

- 実験値は燃焼速度と火炎伸長の関係から外挿により算出
- 計算により得られるのは火炎伸長の影響を受けない条件のみ



## 実験結果のみでの燃料毎の比較

- 希薄条件において FT合成油 > ガソリン > MtG, 量論混合比~リッチ条件では ガソリン > FT合成油 > MtG の順となる.
- オクタン価が同等であるにもかかわらず, 燃焼速度には最大で約20%の差が生じており, 燃焼特性は燃料組成に強く依存している.

## 実験結果と数値計算との比較

Gasoline, FT: Curranモデル, MtG: Ranziモデル

- 数値計算は定性的傾向の把握には有用であるが, 燃焼速度を30%程度過大評価している.
- 特にMtGでは, 燃焼速度が最大となる当量比を誤って予測しており, 多成分燃料近似に起因する反応性評価の限界が顕在化している.

# 今後の計画



## 今後の実験予定

- 層流燃焼(高圧)
- 乱流燃焼(低圧・高圧)
- PRF燃料の検討
- ピンポイント条件での乱流スケール変更

## 今後の解析予定

- 線形近似による燃焼速度推定→理論式ベース(物性入力)
- Lewis数, Markstein数の解析
- 詳細反応機構に対する検討

## 実験装置改造予定

- マスフローメータ導入による空気量の高精度化

## 学会発表の計画

- 層流燃焼速度の特性解析  
内燃機関シンポジウム 2026@京都
- 乱流燃焼速度の特性解析  
Powertrains, Energy and Lubricants 2027
- 合成燃料の燃焼特性解析  
Fuel 投稿

## 提出したスケジュール

項目	2025年	2026年	2027年
(1) 合成燃料の予蒸発システム構築	→		
(2) 予混合層流火炎の計測	→		
(3) 層流燃焼速度の解析	→		
(4) 予混合乱流火炎の計測 ・当量比, 圧力の影響解析 ・乱流スケールの影響解析		→	→
(5) 乱流燃焼速度の解析 ・当量比, 圧力の影響解析 ・乱流スケールの影響解析		→	→
(6) 合成燃料の燃焼特性解析			→