日本機械学会エンジンシステム部門

Engine Systems

エンジンシステム部門ニュースレター
No. 53 feb. 2015
http://www.jsme.or.jp/esd/

1. 部門企画行事のお知らせ（P.2）

［2015年度 年次大会のご案内］
柴田　元（北海道大学）

［第26回 内燃機関シンポジウムのご案内］
石山　拓二（京都大学）
川那辺　洋（京都大学）

2. 会議報告（P.3～4）

［第25回 内燃機関シンポジウム開催報告］
後藤　新一（産業技術総合研究所）
小熊　光晴（産業技術総合研究所）

3. 活動紹介（P.5～6）

［エンジン先進技術の基礎と応用研究会］
石山　拓二（京都大学）

4. エンジン研究最前線（P.7～8）

［International Journal of ENGINE RESEARCH（IJER）誌からの最新情報］
神本　武征（International Jouarnal of Engine Research）

5. 特集記事 “化学反応から見たエンジン燃焼”（P.9～12）

［エンジン燃焼の化学反応はどこまで解ったのか］
三好　明（東京大学）

［自動車会社はガソリン燃焼反応モデルをどのように活用するのか?］
橋本　公太郎（本田技術研究所）

［「化学反応」がわかるとエンジンはどうなるか?］
田中　光太郎（茨城大学工学部機械工学科）

6. 海外国際学会参加記（P.13）

［SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meetingに参加して］
大友　光彰（（株）豊田中央研究所）

7. 研究エッセー（P.14～15）

［反応中間体同士の混合の影響］
安東　弘光（イマジニアリング（株））

8. 行事カレンダー（P.15）

部門企画行事のお知らせ

2015年度 年次大会のご案内

2015年度 年次大会企画委員会
柴田　元（北海道大学）

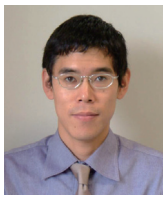
2015年度 年次大会が，2015年9月13日（日）から16日（水）の期間，北海道大学工学部（札幌市北区北13条西8丁目）で開催されます．大会テーマは「Be Ambitious!～機械工学の新たな挑戦～」です．13日（日）の市民フォーラムでは「冬季オリンピックにみるスポーツ工学（仮題）」と題し，冬季オリンピックジャンプ競技のメダリストを講師に招いての特別講演を予定しております．また，エンジンシステム部門においては，部門特別企画として基調講演，先端技術フォーラム，ワークショップなどを企画しております．基調講演では，東海大学の畔津昭彦先生にご講演を賜る予定です．

先端技術フォーラムでは「排気触媒システム技術（仮題）」と題し，今後益々重要となるエンジン排出ガス浄化に関する最新技術について，専門家をお招きし話題提供と討論をする予定です．さらに，「最新エンジン燃焼技術」と題するワークショップでは，最新のエンジン技術を紹介し今後の技術動向について議論をする予定です．
また，部門同好会においてはエンジンシステム部門賞贈賞式を実施する予定です．詳細については，年次大会ホームページ（http://www.jsme.or.jp/conference/nenji2015/）に順次掲載される予定です．

エンジンシステム部門のメンバーにおかれましては奮ってご参加いただきますよう，ご案内申しあげます．

第26回 内燃機関シンポジウムのご案内

第26回 内燃機関シンポジウム実行委員会
委員長
石山　拓二（京都大学）



第26回 内燃機関シンポジウム実行委員会
幹事
川那辺　洋（京都大学）

本シンポジウムは，国内で毎年定期的に開催されるエンジン関連の最高峰のシンポジウムと位置付けられ，「エンジン技術発展のために，大学教員や大学院生，企業若手エンジニア，ベテランエンジニアとの研究・技術の交流の場とする」ことを目的の一つとしています．2015年度は第26回となり，自動車技術会を幹事学会として開催されます．

現在のエンジン技術の課題は熱効率の向上と環境影響の極小化の両立をますます高いレベルで実現することであり，この困難な命題に立ち向かう意味を込めて，シンポジウムのタイトルを「挑戦を続けるエンジンシステム技術」としました．活発な議論を通じて研究者の技術交流を図り，エンジンシステム技術の発展に貢献したいと思います．エンジンシステム部門の皆様におかれましては，奮ってご参加いただきますようご案内申し上げます．

■ 開催日：
2015年12月8日（火）～12月10日（木）（3日間）

■ 開催場所：
京都テルサ（京都市南区東九条下殿田町70）

■ 共催学会：
公益社団法人 自動車技術会（幹事学会）
一般社団法人 日本機械学会エンジンシステム部門

■ 協賛：
可視化情報学会，石油学会，日本液体微粒化学会，
日本エネルギー学会，日本ガス協会，
日本ガスタービン学会，日本トライボロジー学会，
日本内燃機関連合会，日本燃焼学会，
日本マリンエンジニアリング学会，日本陸用内燃機関協会

■ 主要日程：
【2015年4月】論文募集開始
【2015年7月上旬】応募（アブストラクト提出）締切
【2015年10月上旬】講演原稿提出締切

■ 内容：
【学術講演】
ガソリン燃焼，予混合圧縮着火，着火・燃焼，ノッキング，混合気形成，ディーゼル燃焼，噴霧，排気，排気後処理，ガスエンジン，代替燃料，新型エンジン，冷却・伝熱，潤滑，振動・騒音，各種計測・診断などエンジンシステムに関連する技術一般

基調講演2件，
パネルディスカッション，テクニカルワークショップ，
各1件程度

※詳細については，本会および自動車技術会の会誌およびホームページに後日掲載される案内をご覧ください．

第25回 内燃機関シンポジウム 開催報告

第25回 内燃機関シンポジウム実行委員会
委員長
後藤　新一（産業技術総合研究所）

第25回 内燃機関シンポジウム実行委員会
幹事
小熊　光晴（産業技術総合研究所）

■ **開催日：**
2014年11月26日（水）～ 28日（金）

■ **開催場所：**
独立行政法人産業技術総合研究所
つくば中央第1共用講堂

2014年11月26日（水）～ 28日（金）に，（独）産業技術総合研究所つくば中央第1共用講堂にて，第25回内燃機関シンポジウム（幹事学会：日本機械学会，共催学会：日本機械学会）が開催され，昨年の第24回の421名には届かなかったものの，374名の参加で盛会のうちに終えることができた．今回は「エンジンシステムを支える基礎技術」をテーマとし，100件の講演が30のセッションで行われた．さらなる熱効率向上を目指し，高度化，複雑化および統合化が進むエンジンシステムを支える基礎技術の最新動向に関して，企業，大学，研究所等に属する研究者，技術者，学生が意見交換を行った．

初日の基調講演では，自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）理事長・本田技術研究所の大津啓司氏に「内燃機関技術開発の現状と産学連携の重要性」と題して，主に本田技術研究所の視点による，自動車業界の置かれる環境と技術の方向，および研究開発への取り組みに対する自動車会社の課題に関する内容と，AICE理事長の視点によるAICEの概要，理念および将来像についてご説明いただいた．また，最終日の基調講演では，元日野自動車副社長の鈴木孝氏に「Innovationを求める」と題して，研究開発に関するご自身の経験談をベースに，如何にしてアイデアを具現化していくか?，技術屋の哲学について，若手技術者への熱いメッセージとともにご講演いただいた．

基調講演（初日）

基調講演（最終日）

二日目午前中には，パネルディスカッションとして「エンジン研究，いま起死回生に向けて，日本の産学官は何に取り組むべきか?」（司会：秋濱一弘（日本大学），モデレータ：飯田訓正（慶應義塾大学））を企画した．次世代を担う若手～中堅の研究者・技術者6名（大学4名，企業2名）と，産学官連携を推進する科学技術振興機構（JST）コーディネータ1名の方々に，それぞれのテーマに対する取り組みや考えを話題提供いただき，全体討論を行った．新たな発見（知の創造）を商品化（知の具現化）し，よりよいものにしていこうとすると不可能領域と遭遇し，これを打破するためにさらに新たな発見を求めるべく知の創造が行われるという技術開発の論理や，産学の壁，異分野間の言語の違いを壊す存在「通訳者（Gatekeeper）」の必要性など，興味深い企画であった．

パネルディスカッション

最終日午後には，先端技術フォーラムとして，「エンジンシステムのさらなる高効率化・低公害化を支える最新の計測・解析技術」について，公的研究機関，大学および企業より，燃料噴霧，燃焼，排気後処理システムに関する解析・計測技術，数値計算・解析モデル，可視化技術など5件の技術紹介があった．

二日目夕方には懇親会が開催され，134名の方々にご参加いただき，限られた時間の中，アルコールの力も借りつつ，活発かつ和やかな雰囲気の中で，コミュニケーションを取ることができた．地酒や筑波山がまの油売り口上の余興などで地域色も多少出せたかと思う．

一般セッション（A室）

懇親会

機器展示会場

次回は，2015年12月8（火）～10日（木）に京都テルサでの開催を予定しており，石山拓二実行委員長（京都大学）を中心に準備を進めている．次回も多数の発表・参加となることを期待している．

末筆ながら，準備に時間を要し実行委員会の運営が大幅に遅れてしまい，実行委員をお引き受けいただいた企業・大学・公的研究機関の各委員の皆様には大変なご心配とご迷惑をおかけしたことをまずはお詫びし，皆様のご協力に感謝の意を表する次第である．幹事学会が毎年交互に担当する運営形態のため，運営ノウハウの引き継ぎは実行委員会として重要な最後の任務と感じている．今回の運営で得たノウハウを，可能な限り文書化・データ化し，以降の事項委員会へと確実に引き継いでいきたいと思う．

【第25回 内燃機関シンポジウム実行委員会】

■ 実行委員長：
後藤 新一（産業技術総合研究所）

■ 副 委 員 長：
石山 拓二（京都大学）

■ 幹　　事：
小熊 光晴（産業技術総合研究所）
金野 満（茨城大学）
文石 洙（産業技術総合研究所）
高橋 栄一（産業技術総合研究所）
柴田 元（北海道大学）
他
委員28名（企業20名，大学4名，公的研究機関4名）

エンジン先進技術の基礎と応用研究会

代表
石山　拓二（京都大学）

本研究会は，エンジン技術の基礎や最新動向に関する情報提供，見学会の開催など，幅広く活動を行っています．会員は現在54名で，関西圏を中心に大学と企業関係者がほぼ同数となっています．幹事 中村博司氏をはじめとする堀場製作所のメンバーの尽力により企画・実施した今年度の活動の概要を以下に紹介します．

1. 第82回研究会・見学会
（2014年5月9日，京都大学本部キャンパス）

【話題提供1】
燃焼動力工学研究室における研究の概要
（京都大学：石山 拓二）

【話題提供2】
エンジン燃焼の数値計算（京都大学：川那辺 洋）

【見学会】
燃焼動力工学研究室

同研究室の研究内容が概説された後，数値流体力学（CFD）によるエンジン燃焼の解析・予測における燃焼モデル（火炎伝播，自着火反応，不均一燃焼モデル）の考え方や計算例，問題点の解説が行われました．見学会では，ディーゼル，天然ガス燃焼の研究に使用している単気筒試験機関，急速圧縮膨張装置，定容燃焼装置などの実験装置の紹介と説明がありました．

2. 第83回研究会
（2014年7月11日，同志社大学大阪サテライト）

【話題提供1】
燃焼の速さ（大阪大学名誉教授：香月 正司先生）

【話題提供2】
熱伝達モデルの到達点と課題
（立命館大学 特任教授：西脇 一宇先生）

【話題提供3】
私の時代の自動車産業の発展
（元同志社大学 講師：中村 成男氏）

この研究会は，燃焼懇話会（日本機械学会関西支部）との合同で開催し，強力な講師陣のせいもあって多くの（60名近い）参加者が集まりました．香月先生は，長年に渡る燃焼研究の成果をもとにしながらも，着火遅れや燃焼率を現象の理解から出発してどのようにモデル化するのかを易しく解説されました．西脇先生は，これまでのエンジン熱伝達に関する研究の結果を紹介しながら，数値計算による壁面熱流束の予測精度と限界についてお話されました．中村氏（元堀場製作所）は，歴史を振り返りつつ，発展してきた自動車技術の概要と排気エミッションの測定技術について，開発の経験を交えて解説されました．

3. 第84回研究会
（2014年11月1日，兵庫県立大学 姫路環境人間キャンパス）

【話題提供1】
三菱UE機関の環境対応技術
（三菱重工舶用機械エンジン（株）：上田 哲司氏）

【話題提供2】
IMO NOx TierⅢ対応
2ストロークディーゼル機関用SCRシステム
（日立造船（株）：中尾 徹氏）

【話題提供3】
低速2ストローク舶用ディーゼル機関の環境規制対応技術について
（三井造船（株）：桑田 隆司氏）

【話題提供4】
ヤンマー舶用機関における環境対応技術
（ヤンマー（株）：古東 文哉氏）

この研究会は，日本機械学会関西支部の第15回秋季技術交流フォーラムに参加する形で開催しました．四名の講師により，IMO（国際海事機関）の第三次NOx排出規制，燃料中硫黄分規制，CO_2排出規制に対応する船舶用エンジンの技術について話題提供が行われました．還流排気ガス中のSOxを除去するためEGR（排気再循環）経路中にスクラバーの設置が必須であることや，エンジン熱効率の高さゆえ排気温度が低いため，ターボ過給機のタービン上流にSCR（選択還元触媒）装置を設置する方式があること，過給機効率が非常に高いことを利用し，タービンの余剰エネルギーを使って発電や動力回収ができるなど，自動車用エンジンとは違った興味深い技術が紹介されました．

4. 第85回研究会
（2014年12月18日, マツダ（株）本社）

【見学会】
マツダミュージアム, 車両組み立て工場

【話題提供1】
マツダの内燃機関進化①
（マツダ（株）：寺沢 保幸氏）

【話題提供2】
マツダの内燃機関進化②
（マツダ（株）：山本 博之氏）

マツダ殿の会社概要説明の後, ミュージアムと車両組み立て工場を見学しました. 話題提供においては, SKYACTIVE第一世代の技術として, ガソリン機関の圧縮比上昇とディーゼル機関の低圧縮比化の効果と実現のための方法について解説され, 第二世代の技術では, ガソリン機関においては, さらなる圧縮比の上昇とHCCI燃焼適用範囲の拡大により, またディーゼル機関については混合気の均質化促進と冷却損失低減により, いっそうの熱効率向上を目指す道筋が示されました. また, 冷却損失低減への取り組みの一環として, 壁面熱流束および境界層内流速分布の計測技術, 化学反応計算の高速化手法などが解説されました.

今年度はさらに, 2015年3月に見学会を兼ねた研究会を開催する予定です.

この研究会は, メンバーの所属が多岐に渡っていることから, 自動車, 建機, 船舶, 発電用と, 幅広いエンジン技術の分野で情報を交換し, 和やかな雰囲気の中で議論をする場となっています. また, これまでの活動において, 前述の燃焼懇話会, 自動車技術会関西支部, 日本マリンエンジニアリング学会などと合同で研究会を開催するなど外部との交流も盛んで, 今後もこうした幅広さを活かした活動を続けていきたいと考えています.

International Journal of ENGINE RESEARCH（IJER）誌からの最新情報

Co-edditor
神本　武征
（International Jouarnal of Engine Research）

【IJER誌の紹介】

IJER誌は本格的な国際ジャーナルとしてC Arcoumanis, Prof. City University London; R Reitz, Prof. University Wisconsin – Madisonと私の3名が企画して英国機械学会から2001年に創刊した国際雑誌です．エンジンシステム部門では学会の方針に沿って，部門運営委員会（2003年8月井上悳太部門長）の審議を経てIJER誌を部門の公式英文ジャーナルと決定しました．その後の経緯は以下の通りです．

1. IJER誌の表紙にはIMechEのロゴマークと並んで日本機械学会から提供されたJSMEのロゴマークを付与しています．

2. エンジンシステム部門にIJER編集委員会を設け，委員の中から国際編集委員会の委員を推薦しています．この委員は毎年4月にデトロイトで開催される国際編集委員会に出席しています．また，編集委員会の委員は日本機械学会主催の国際会議COMODIAや内燃機関シンポジュームの講演論文のなかからIJER誌にふさわしい優秀論文を選び，著者に執筆を依頼しています．

3. IJER誌は年8回の発行で，年間の掲載論文数は約70篇です．2013年のPaper article Downloadは57,307件，2013年のImpact Factorは1.4で，機械工学系雑誌126の内35位のランクとなっています．IJER誌は内燃機関分野の世界で最も権威ある国際雑誌になっています．

4. 会員サービスの一環として，IJER誌の定期購読販売を会員特価（定価26万円を62,000円）にて，日本機械学会が代行しています．ホームページに定期購読申し込み様式が出ていますので，お申込み下さい．

【最近の注目すべき論文2件の概要】

Thermodynamic sweet spot for high-efficiency, dilute, boosted gasoline engines Lavoie GA. Ortiz-Soto E. Babajimopoulos A. Martz JB and Assanis DN. Vol.14, Isuue3, June 2013

欧州が主導するダウンサイジングガソリンエンジンの燃費メリットについては我が国においても議論のあるところである．本研究では，ダウンサイジングエンジンの燃費に及ぼす運転パラメータの影響をGT-powerを用いて計算し，最小燃費条件を探索している．計算の結果，最高正味熱効率はブースト圧力3bar以下，等量比～0.5，ピーク筒内圧力150bar以下，ピーク温度2100K以下の条件で得られること，この条件はHCCI燃焼と予混合燃焼の中間的な領域であること，さらにこの燃費が実現できれば車両の燃費を25%～58%改善できる可能性のあることを示した．

図1は，ターボ過給器の効率を50%と仮定し，等量比の範囲を0.2から1.2として，ブースト圧力が正味熱効率に及ぼす影響を予測した結果である．一番下の理論等量比・予混合燃焼の場合に対して，等量比0.5～0.6の稀薄燃焼でブースト圧2.5～3.0barとすることで，大幅な正味熱効率の向上得られることが示されている．

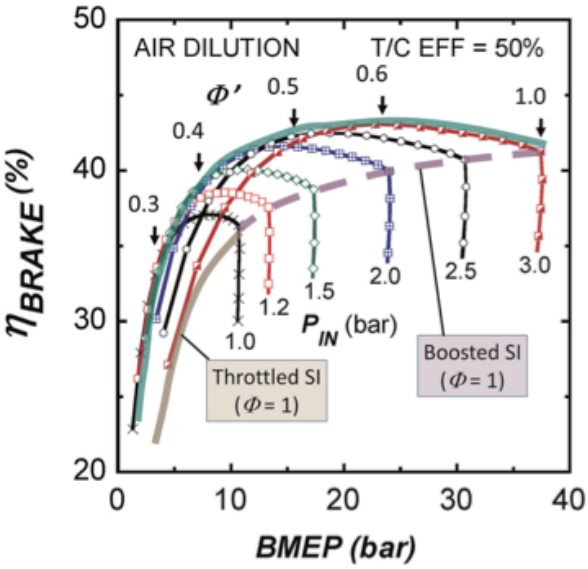


図1 稀薄燃焼と高ブースト運転による正味熱効率の向上（予測計算）

Quantitative high-speed imaging of burnt gas temperature and equivalence ratio in internal combustion engines using alkali metal fluorescence
M Mosburger, V Sick and MC Drake
Vol.15, issue3, April 2014

ガソリンエンジンシリンダ内の燃焼温度と等量比の2次元分布を画像計測する新しい計測法が提案された．燃料にリチウム，ナトリウム，カリウムの3成分を含む発光剤を微量混合し，火花点火ガソリン光学エンジン火炎の蛍光を画像化した．NaLi/K_2の値が火炎温度に比例すること，

他の二つの成分の発光強度比が等量比に比例することから，燃焼温度と等量比の2次元分布を同時に画像計測する方法を案出した．

図2の下の検定曲線は，Na/Li/K2は圧力と等量比に対して変化が小さいので，この比から燃焼温度が求まること，また温度が求まれば他の添加剤の発光比から等量比が求まることを示している．図3は，画像測定結果例である．色チャートから最高燃焼温度は2700～2750K，等量比は理論等量比付近であることが分かる．今後，成層直接噴射式ガソリンエンジンの燃焼研究などへの応用が期待される．

【投稿歓迎】

IJER誌では常時論文の投稿を受け付けています．
カラー図面を含めて投稿料は無料です．

■ 詳しくは
http://www.editorialmanager.com/jer

■ 不明な点は，神本武征までお問い合わせください．
takekamimoto324@gmail.com
または，
takekamimoto@aol.com

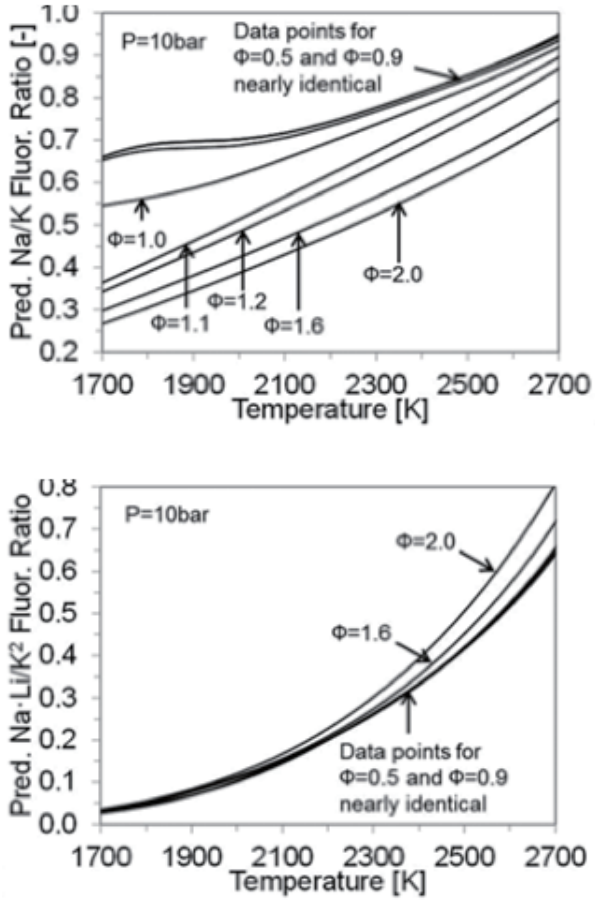


図2 アルカリ金属の蛍光強度比に及ぼす燃焼温度，等量比，圧力の影響

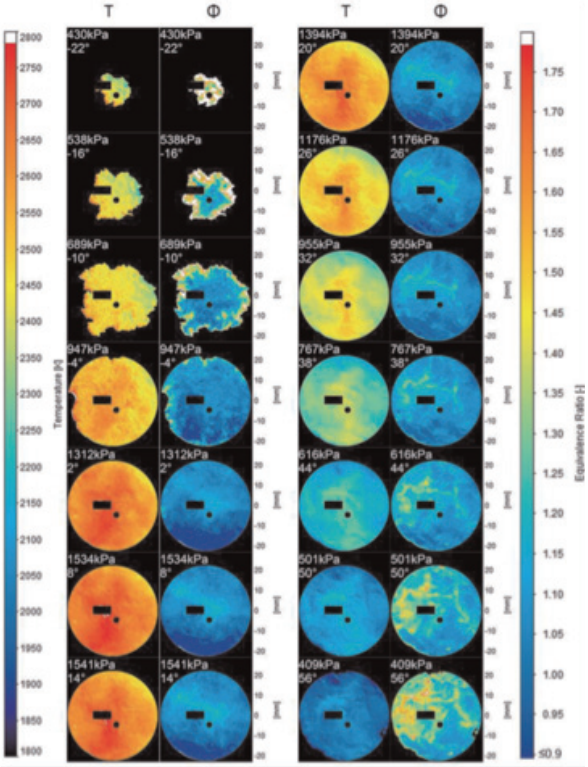


図3 燃焼温度と等量比の2次元分布と時間経過

エンジン燃焼の化学反応はどこまで解ったのか

三好　明
（東京大学）

燃焼の本質は化学反応である―この後の句はあえて継がない.

20世紀前半, セミョーノフは酸素-水素混合気の奇妙に湾曲した爆発限界を, 原子・分子レベルの素過程から成る連鎖反応によって見事に説明した. それ以来, 連鎖反応と素過程を明らかにすることは燃焼現象解明の鍵であると考えられてきた.

炭化水素燃焼の化学反応の理解は, ここ30年ほどの間に大きく進歩した. 特に21世紀に入ってからの進歩は, 化学反応を第一原理に従って解き明かす量子化学の進歩に負うところが大きい. そうは言っても, 実用燃料の反応機構の解明は容易ではない. 一つの理由は炭素を骨格に持つ有機化合物の多様さにあり, それが生命の複雑な機能を形づくることと無縁ではないように思われる.

量子化学によって反応素過程を解明する手法は, ほぼ完成の域にあるが, その実際は決して一筋縄ではない. 例として, 基本的な炭化水素の一つであるC_3H_6の分解反応経路を量子化学計算によって追跡した結果を図1に示す. ここでは個々の経路の解説は意図していない. 結果として重要な経路は太線で示した1aと1bであり, 実用的な温度・圧力領域では99%を占める. このことは多くの過去の実験結果からも支持される. しかし, この図は, もし実験研究の成果の歴史的な積み上げがなければ, この結論を導くために, これだけの経路を計算しなければならないことを意味している. 反応機構の中ではわずか2つの反応式でしかない, この結論を得るために, 熟練した研究者・技術者であっても少なくとも1週間を要するだろう.

このようなアプローチは, ある側面では重要であるが, 同じ方法論で実用燃料の反応機構を構築することは事実上不可能である. 結果として, 実際の反応機構の構築においてはもっとずっといいかげんな「経験的な推定」を行う. したがって出来上がった反応機構は, 程度の差こそあるものの, ほとんどの場合に, 起こるかどうか怪しい反応や, 速度定数が1桁以上違っているかもしれない反応を多数含んでいる. そういう意味で, ブラックボックスとしてどのように使っても何の問題もない, というような反応機構は水素燃焼など限られたものしか存在しない.

このことは, 決して多くの反応機構が使い物にならないことを意味しているわけではない. 飽和炭化水素の燃焼反応機構は40年以上の歴史の中で大きく改善されてきた. 典型的な条件での燃焼現象はかなりよく再現できるようになっている. それでも, たとえば, 反応機構中に中間体として記述されている化合物の燃焼をきちんと再現するかと言われると, 多くの場合には問題がある. しかし, 必要であれば量子化学計算などを駆使して, 1～数ヶ月の短期スパンで満足のいく反応機構に改善することは可能である. 完全な反応機構でなければ使い物にならない, などということは決してない.

逆にいえば, 完全無欠な反応機構があるだけでは, 化学反応が解ったことにも, 使えたことにもならない. 基本的な燃焼現象を説明できるレベルの反応機構は, 多くの示唆を与えるポテンシャルを持っている. 燃焼の化学反応を「わかる」ということは, 現時点の化学反応の知識を最大限に使って燃焼現象をわかることに他ならない. そのために完璧な反応機構は必要ない. それは我々の先達が踏んできた轍に他ならないのである.

"Truth, in science, can be defined as the working hypothesis best fitted to open the way to the next better one." — Konrad Lorenz

我々は今, 20年前や30年前には決して持ちえなかった化学反応の知識を持っている. それを生かすかどうかは我々にかかっている. 素過程の数が数個を超えれば, ほとんどの場合に解析解は得られない. しかし数値シミュレーション技術は我々にこのような複雑なシステムにアプローチする方法論を与えてくれる. その結果をデータの羅列としてではなく, ブラックボックスの応答としてでもなく, 「わかる」ための方法論も用意されている. 後は我々がどれだけ, そこから何かを掴み出そうとしているか, だけなのである.

"アイデアの秘訣は, 執念である" — 湯川 秀樹

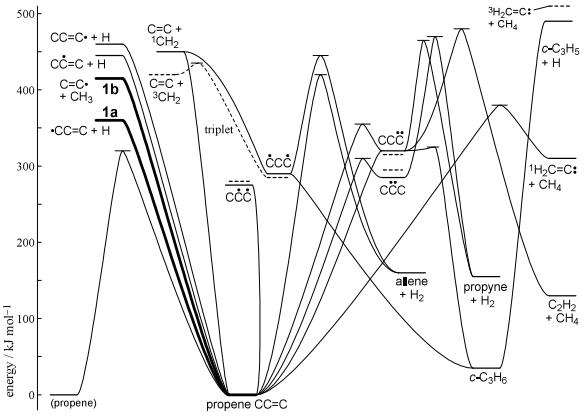


図1 C_3H_6の熱分解反応経路

自動車会社はガソリン燃焼反応モデルをどのように活用するのか?

橋本　公太郎
（本田技術研究所）

1. はじめに
－なぜガソリン燃焼反応モデルが必要なのか?－

自動車会社は，自動車用ガソリンエンジンにおいて高効率でクリーンな燃焼を実現させることを目的として，ガソリンエンジンの燃焼研究を行っている．従来のガソリンエンジンの燃焼制御では，主として流れや混合などの物理的過程について制御が行われてきた．一方で，予混合圧縮着火（HCCI）燃焼のような着火タイミング制御や，高圧縮比SIエンジンでのノッキング抑制などの課題に対しては，ガソリン燃焼反応モデルを用いた燃焼反応の理解による，燃焼反応制御が必要となる．

ガソリンは多種多様な成分が含まれており，各種燃料成分に関する低温酸化から着火に至るまでの反応モデルが必要である．また，バイオ燃料の利用拡大による，成分の多様化に対応する必要もある．一方で，数百にわたる燃料成分の全てを組み込むことは非現実的である．

そこで，ガソリン成分として含まれるパラフィン（飽和炭化水素），ナフテン（環状飽和炭化水素），オレフィン（二重結合を有する炭化水素），芳香族炭化水素，バイオ由来成分であるアルコール，エーテルについて，代表となる化学種を選び，それらの化学種の詳細素反応モデルを含む，ガソリンを模擬した燃料（ガソリンサロゲート）の反応モデルを構築することにした．本稿では，化学反応研究の専門家である東京大学の越先生，三好先生を中心とした先生方との共同研究プロジェクトによって構築されたガソリン燃焼反応モデルと，そのモデルの活用事例について紹介する．

2. ガソリン燃焼反応モデルの構築

ガソリン燃焼反応モデル構築の方針を図1に示す．反応機構解明，速度定数予測には量子化学計算の利用を基本とした．まず，三好先生が開発したユーティリティソフトウェア・ライブラリKUCRS（Knowledge-basing Utilities for Complex Reaction Systems）を拡張することにより，パラフィン，ナフテン，オレフィン，アルコールの反応の自動生成ができるようにした．一方で，芳香族成分の反応は，過去に構築された反応モデルを改良した．そして，KUCRS作成したモデルにトルエンのモデルを追加することにより，図2の成分を含むガソリンサロゲートマスターメカニズムを構築した．さらに，燃焼反応の挙動を変化させない範囲で化学種および反応数の削減を行うことにより，化学種803/反応数3222のガソリンサロゲートモデルを構築した．

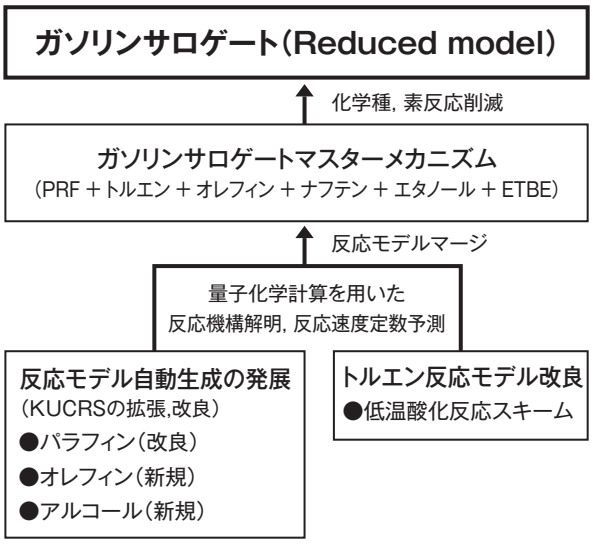


図1 ガソリン燃焼反応モデル構築スキーム

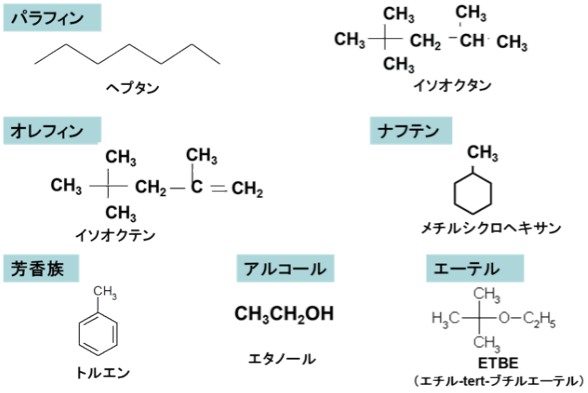


図2 ガソリンサロゲートモデルに含まれる燃焼成分

3. 燃焼反応モデルの活用

ガソリンの詳細燃焼反応モデルの活用する方法としては，(1)エンジン内の現象を単純化させ，化学反応計算のみの解析により現象の理解を深める，(2)エンジン内の現象をそのまま解析できるように，CFD（数値流体力学計算）と組み合わせる，の二つが上げられる．ここでは，(1)の例として，空燃比30の均一希薄燃焼を火花点火で実現したHomogeneous Lean Charge Spark Ignition（HLSI）燃焼[2]について，層流燃焼速度計算からの考察を示す．

ガソリンエンジンの高効率化の有効な手段として，希薄燃焼が検討されてきた.希薄燃焼領域では三元触媒によるNOx浄化が難しいので，燃焼で生成するNOxを十分に低減する必要がある．そこで，均質予混合気を安定的に火花点火する希薄燃焼の検討を行ってみた．図3にリーン限界に至るまでのNOx排出結果を示す．SIエンジンに均質な予混合気を与え,筒内温度が高くなるように圧縮比と吸気温度を調整することによりリーン限界が向上し，NOx排出

量が20ppm以下の燃焼が実現した. リーン限界前後の運転条件における筒内温度履歴から, 安定的に燃焼しているリーン限界前の空燃比においては全てのサイクルの上死点での平均温度が1000Kを超えているが, リーン限界後の空燃比ではどの組合せにおいても1000Kに達しないサイクルが出現し, 燃焼変動率を増加させていることがわかった.

エンジン内の燃焼は乱流燃焼であり, 乱流燃焼速度は乱れの強さと層流燃焼速度の関数になる. 未燃ガス温度は層流燃焼速度に大きな影響を及ぼすと考えられるので, TDCにおける筒内圧力相当である3MPa, 当量比0.5におけるPRF90の層流燃焼速度を反応計算で求めた. 図4に層流燃焼速度に及ぼす未燃ガス温度の影響を示す. 未燃ガス温度が1000K近傍で層流燃焼速度が急激に増大することがわかる. 未燃ガス温度が900Kと1000Kの条件での層流燃焼速度に寄与する化学反応を感度計算で求めた. その結果, 未燃ガス温度900Kでは, 通常知られている通り, 酸水素反応が主に層流燃焼速度に寄与するのに対し, 未燃ガス温度1000Kでは, 自着火反応と同じようにH_2O_2が分解してOHラジカルが生成する反応が寄与していることがわかった. 以上のことから, 筒内温度が1000K以上では, H_2O_2分解反応が寄与するため燃焼速度が増大し, 均質な希薄混合気でも安定的に燃焼すると推測した. この推測をもとに, 吸気ヒーターを用いずに上死点での平均温度が1000K以上となるように, 量産エンジンの圧縮比, 吸気系, ピストン形状および点火システムを変更した. その結果, 空燃比 30と非常に希薄な均一混合気による非常に低いNOx排出量を達成した.

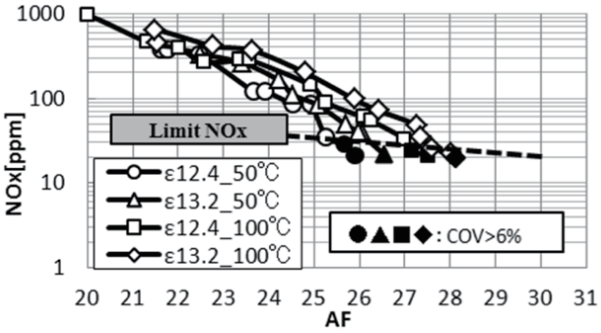


図3 圧縮比, 吸気温度, 空燃比がNOx排出に及ぼす影響

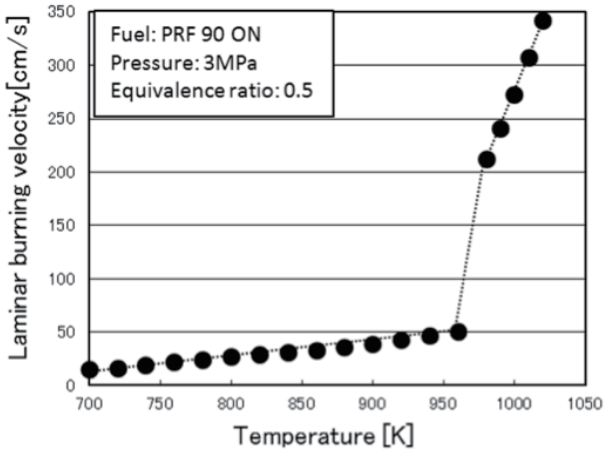


図4 層流燃焼速度に及ぼす未燃ガス温度の影響

4. おわりに

本稿では, ガソリンの代表成分を含む燃焼反応モデルの構築と, そのモデルの活用事例としてHLSI燃焼の層流燃焼速度計算による考察について紹介した.

自動車会社としては, 燃焼反応モデルの利用の理想は, 3.の中の(2)に示すように, CFDへの詳細化学反応計算組み込みにより, エンジン内現象をそのまま解析できるようになることである. CFDで詳細反応計算を行う場合, 素反応数の多さや移流拡散計算させる化学種の多さのため, 計算負荷など大きな課題がある. しかしながら, 多くの研究者がこれらの課題解決に取り組んでおり, 将来は理想に近い計算が実現することが期待される.

【参考文献】

(1) Hashimoto, K., et al., "Development of Gasoline Combustion Reaction Model", SAE Paper, 2013-01-0887 (2013)

(2) Hanabusa, H., et al., "Study on Homogeneous Lean Charge Spark Ignition Combustion", SAE Paper, 2013-01-2562 (2013)

「化学反応」がわかると エンジンはどうなるか?

田中　光太郎
（茨城大学工学部機械工学科）

このようなタイトルで，原稿を書きなさいと言われ，引き受けたものの，答えは，「わからない」である．熱効率の向上と排気清浄化というキーワードで，エンジン研究は日々進歩し続けており，その進歩に化学反応研究も貢献している．しかし，化学反応だけがわかったからといって，高効率なエンジンや排気のきれいなエンジン開発に単純に結びつくわけではないのが現実である．

化学反応はエンジン燃焼の何に寄与しているかを考えると，燃料の着火タイミング予測，酸化過程中の中間生成物や，また芳香族炭化水素（PAH）の成長に伴う生成物などの燃焼排出物予測，実際には化学反応を解いていない場合も多いと思われるが，層流燃焼速度の見積もりなど，多岐にわたる．特に，燃料の自着火を予測する詳細素反応モデルはガソリン機関のノック，予混合圧縮自着火燃焼の制御に大きく寄与することから，盛んに研究，構築が行われてきた．ディーゼル噴霧の自着火においてももちろん詳細素反応モデルは重要である．しかし，ノックの予測シミュレーションなどでは，燃料が自着火するか否かを化学反応計算で判定するものの，ノックには，燃焼場の乱れや，火炎伝播，壁面近傍の熱伝達など様々な要素が必要になり，化学反応だけでノック予測ができるようになるわけではない．ただ，近年では，詳細素反応モデルと流体計算をカップルさせた計算もできるようになり始めており，着火を予測できる化学反応研究は，ノック予測技術の進歩に，不可欠であることは間違いない．

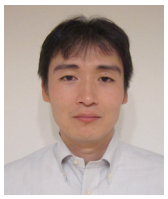
エンジン燃焼の多くの場に寄与している化学反応がわかると，エンジン研究のどういう側面を発展させていくことができるかを考える．化学反応は，あくまで燃料の着火や中間生成物予測を行うために必要なものあり，今の燃料を用いて最適なエンジン開発を行う際に有効である．それと同時に，エンジンに最適な燃料設計にもつなげていくことができると考えられる．また，現在の燃料の着火指標であるオクタン価やセタン価に代わる指標の構築にも役立てられる．現在はオクタンインデックスや，予混合圧縮自着火燃焼での着火指標などが提案され，オクタン価やセタン価などの指標にそぐわない燃焼条件でのエンジン燃焼では，新たな指標が今後も必要になると考えられる．昭和40年代にはDistribution Octane Number（DON）と呼ばれるガソリンの軽質留分のオクタン価を評価する指標があったようである．エンジンの燃焼条件に応じた燃料の着火指標は必要であり，化学反応は，それらの総括的な理解に役立てられると思われる．

エンジン燃焼に対する燃料の最適化という側面での貢献を書いたが，化学反応の理解は，エンジン燃焼場のシミュレーション精度向上にも貢献し，これまでにない燃焼場の計算にも役立てられる．詳細素反応モデルも，化学反応研究の蓄積により，自動生成できるようになってきた．世界的にはKUCRS，EXGAS，RMGという3つのプログラムが存在し，化学反応モデルの構築も簡便に行うことができるレベルに突入しつつある．KUCRSとEXGASはモデルの構築も簡便に行うことが可能で，特にKUCRSは着火遅れ時間の予測では世界で最も優れたものになっている．RMGは詳細素反応モデルの構築に，化学反応に関する専門的な知識が必要であることから，構築に利用する場合は注意が必要である．さらに，流体計算とのカップリングのためにはモデルの簡略化も必要になり，いくつか手法が考案され，反応動力学計算ソフトなどに実装されている場合もある．このように，化学反応の理解と共に，その使用環境も以前より整えられており，エンジン燃焼シミュレーションの高精度化につながり，これまでにない燃焼方式を活用した高効率エンジンや損失低減に貢献していけるものと考えられる．今後は，希薄化，高EGR化による低温燃焼により，高圧縮比化と熱損失の低減により，エンジンの高効率化が進む．しかし，詳細素反応モデルもあくまで「モデル」であり，モデルの適用範囲を超えた場合，信頼性の低下は免れない．特に低温燃焼で狙うような低酸素，低燃料濃度場の燃料の着火特性については，これだけ研究が進んでいても未知な部分が存在し，まだまだ化学反応に関する精力的な研究が必要である．特に，最近では，炭素数の大きな炭化水素の詳細素反応モデルの構築もできるようになってきているが，意外に，C1～C2の化学反応機構に問題がある場合もあり，化学反応メカニズムに関する研究は，熱効率向上を目指すエンジン研究の一部として，今後も必須である．また，それがエンジンの進歩を導くものと考えられる．着火以外では，すす生成の前駆物質であるPAH類の成長過程を記述する化学反応もすす生成のシミュレーションでは重要である．今後の粒子数規制などに対応していくためには，考慮すべき化学反応であり，PAH類の化学反応の理解は，排気の清浄化に大いに貢献できる．

化学反応がわかるとエンジンはどうなるかという点では，冒頭にわからないと書いたが，エンジンに劇的な変化をもたらすとは書き難いが，エンジンシステムの高効率化，環境負荷低減を今以上に加速していけるものと確信している．

化学反応研究は，エンジン燃焼に必須でありながら，それに従事する研究者は日本において絶滅危惧種と言っていいほど少ない．古典的な手法に頼ることも多く，派手さはないが，決して絶やしてはならない分野である．化学反応に興味を持つ人間として，今後のエンジン燃焼研究の発展に貢献できるよう活発な研究活動をしていきたいと考えている．

SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meetingに参加して



大友　光彰
（㈱豊田中央研究所）

2014年10月20日から23日まで開催された“SAE 2014 International Powertrain, Fules & Lubricants Meeting”に参加しました．本学会は，毎年開催されているエンジン燃焼や燃料，潤滑油などに関する国際会議で，今年はイギリスのバーミンガムにて開催されました．

バーミンガムは，イングランドの中部，ロンドンの北西約180kmに位置します．バーミンガムには国際空港がありますが，日本からの直行便はありません．ロンドンのユーストン駅から列車で約1時間30分ほどでバーミンガムの中心に位置するニューストリート駅に行くことができるため，ロンドンヒースロー空港からでも，比較的容易に訪問することができます．18世紀までバーミンガムは小さな村だったそうですが，産業革命に伴い交通の要所として発展し，現在は人口100万人ほどであり，イギリス第2の都市とされています．しかし，ロンドンに比べて観光地に乏しく，イギリスのガイドブックではバーミンガムを紹介していないものもあるそうです．

学会は，ニューストリート駅から徒歩10分ほどのところにあるInternational Convention Centerにて，20日～22日までテクニカルセッションが行われました．この会場は，1998年にG8サミットが開かれた場所です．また，会場前の広場は学会の前日に開かれていたハーフマラソンのスタート場所にもなっており，バーミンガムの中心的な建物となっています．

テクニカルセッションでは，オーラルのみ，ペーパーのみを合わせて，計325件の発表がありました．プログラムに書かれているセッションは以下のようになります．（）内は発表件数を示しています．

・Engine Combustion（101）
・Exhaust Aftertreatment & Emissions（41）
・Fuels & Lubricants（75）
・Hybrid Electric Powertrains（20）
・New Engines, Components, Actuators & Sensors（34）
・Powertrain System Modeling, Controls, & Diagnostics（54）

Engine Combustionsが約1/3を占めていることがわかります．また，New Enginesのセッションは今年から新たに分類されており，関連発表が増加しているようです．

今回，私は過給エンジンで発生する低速プレイグニッションの研究結果について発表させていただきました．最近多くの研究が行われているテーマでもあり，多くの方に聴講していただくことができ，議論させていただきました．他にもトヨタ自動車やIFPから低速プレイグニッションに関する研究が報告されていました．その他の発表では，主にSIエンジン関係のセッションを中心に聴講しました．ノッキングや，EGRなどの希薄燃焼に関するテーマで聴講者が多く，関心が高いという印象を受けました．内容としては，基礎的な研究発表は少なく，エンジンを用いたパラメータスタディなどが多い印象を受けました．

23日は，場所をバーミンガム大学に移して，Outlook for Future Engines / Fuels & Future Engineersと題し，シンポジウムが開かれました．バーミンガム大学はニューストリート駅から列車で10分ほどの郊外にあり，緑に囲まれた美しい場所です．22日に行われたバンケットもこちらが会場でした．シンポジウムは，参加費が別であったこともあり，参加者は100名程度でした．シンポジウムの後には，今回General Chairを務められていたバーミンガム大学のProfessor Hongming Xuの実験室見学をさせていただきました．10台以上のテストエンジンがあり，また−20℃程度の冷間試験ができるベンチもそろえており，ヨーロッパの大学における研究設備の充実ぶりに驚きました．

次回の本学会は，2015年9月に京都にて開催されます．暑さが残る厳しい時期ですが，エンジンに関する最新の研究発表を国内で聞くことができるよい機会だと思います．

会場であるInternational Convention Center（ICC）と前日行われていたハーフマラソンの様子

バーミンガム大学キャンパス内の様子．右のテントではフォーミュラカーの展示もされていた

反応中間体同士の混合の影響

安東　弘光
（イマジニアリング（株））

【化学反応の理解の意義に関する誤解】

最近，エラリークインの「上海の謎」の原題がShanghai Solutionであることを見つけた．英語では「謎」にぴったりと対応する表現がなく，日本語にはSolutionに対応する表現が無いのかもしれない．学理の世界でもビジネスの世界でも最高の価値を持つのは，「とびっきり上等の謎と目の覚めるようなSolutionの組み合わせ」だと思う．現実の世界ではSolutionの価値が高く，謎の価値が低いことはやむを得ない．しかし，誰が謎に関する感受性を維持する役割を担うかという問題は真剣に考える必要がある．

内燃機関の世界では，化学反応の謎の解明がエンジンに適用できるSolutionの発見につながるといった安易な意見も見受けられる．化学反応，エンジン内の現象についてできるだけ多くの知見を集め，できるだけ多くの仮説を立て，そのひとつひとつを論理の世界で検証していくことを経ることによって初めて，化学反応に関する理解の意義が議論できるはずだ．

エンジンのなかの現象を説明するのに必要な化学反応に関するシンプルな理解は時代に応じて進化してきた．ここでは，燃焼途中の中間生成物同士の混合が全体の燃焼形態に及ぼす影響について，筆者らの最近の理解を記述しておくことにしたい．

【炭化水素の燃焼過程】

炭化水素の燃焼過程は図1に示す4つのゾーンによって構成される．

- ゾーン A：LTBC（低温連鎖分岐）ゾーン
- ゾーン B：H_2O_2 反応ループゾーン
- ゾーン C：HTBC（高温連鎖分岐）ゾーン
- ゾーン D：平衡ゾーン

LTBC エンドポイントとHTBC スタートポイントがゾーンを分ける．

LTBCゾーンでは，複雑な連鎖分岐を経て，$RH+2O_2 \rightarrow Aldehyde+Ketone+OH$の総括反応式で表わされる反応が進行する．この過程で連鎖担体であるOHは指数関数的に増大する．反応が進行するとCH_2Oが増え，やがて$CH_2O+OH \rightarrow HCO+H_2O$の速度が，LTBCの開始反応$H+OH \rightarrow R+H_2O$の速度を上回り，LTBCは終了する．このポイントが，LTBCエンドポイントである．

この後に，H_2O_2反応ループゾーンと名付けた奇妙なゾーンが現われる．このゾーンではLTBCで重要な役割を果たしたラジカル類の濃度はゼロ近くに低下し，アルデヒド，アルケン，環状エーテルなどの安定な分子だけが高い濃度を保つ．このゾーンでは，$H_2O_2+M \rightarrow 2OH+M$ -216kJ，$OH+CH_2O \rightarrow HCO+H_2O$ +122kJ，$HCO+O_2 \rightarrow HO_2+CO$ +139kJ，$2HO_2 \rightarrow H_2O_2+O_2$ +168kJの連鎖反応が進む．総括反応速度式は$2CH_2O+O_2 \rightarrow 2CO+2H_2O$ +473kJとなる．これはH_2O_2を消費することなく，CH_2Oの酸化だけが進む過程である．このゾーンでは一見何の反応も進んでいないように見えるが，重要なのは総括反応式に示されるように比較的多い熱が放出され，温度が徐々に上昇する過程であるということである．低温では，HとO_2は$H+O_2+M \rightarrow HO_2+M$ +202kJのように反応するが高温では$H+O_2 \rightarrow O+OH$ –71kJのパスを経る．高温のパスはラジカル連鎖分岐のキーとなる反応である。この2つの反応のクロスポイントがHTBCスタートポイントである．

HTBCゾーンは酸水素系の反応が支配する連鎖分岐反応ゾーンで，急速な燃焼反応が進行する．

【それぞれのゾーンに存在する中間生成物の混合の効果】

あらゆるゾーンで，連鎖担体となっているのはOHである．OH濃度が低いゾーンに他のゾーンから大量のOHが移入してくると反応は加速される．ゾーンCやDのようにガス温度が高いゾーンのガス温度が，低いゾーンに移入されると温度の効果で反応が加速される．ゾーンBには，大量のCH_2Oが存在する．これが，ゾーンAに移入するとLTBCが停まり，反応の進行が妨げられる．

それぞれのゾーンに存在する中間生成物の混合の効果をまとめると次のようになる．

- ゾーンA+ゾーンA：加速
- ゾーンB+ゾーンB：影響なし
- ゾーンA+ゾーンB：減速
- ゾーンC or D+ゾーンA or B：加速

【エンジンで観測される現象との関係】

ノックについて，エンジンで観測されるいくつかの現象を上記の混合の効果によって説明することができる．

エンドガスゾーンに火炎面が近付くと火炎面の進行が局所的に減速し，火炎面前方にポケットができ，エンドガスの自着火はこのポケットのなかで起こるという現象は繰り返し観測されているが，これはエンドガスの反応がゾーンBまで進行，フレームフロント最前面の反応がゾーンAに留まっているために起こるゾーンA+ゾーンBの混合である

と説明できる. 壁面近傍ではなく, 火炎面近傍で自着火が起きる現象も観測されているが, これは, ゾーンBにあるエンドガスがゾーンCにある火炎面から熱を貰いHTBC開始ポイント温度を上回った結果ではないかと推測できる.

ゾーンBで温度がHTBC開始温度に達するのを待っており, 他のゾーンと混合しても他のゾーンの反応を妨げるだけとういう状態のガスも, 圧力波の到来で局所温度が上昇しただけでHTBC開始温度を超え, ただちにHTBCゾーンに移行する可能性がある.

化学反応とエンジン内の現象の関係を理解するには, 解っていることと解っていないことの整理を通じて謎を導き出し, この謎の解明に向かって議論を進めるべきであると思う. この議論が未熟な段階では, 謎の解明がエンジンのSolutionにつながるといった無責任な信念は何の意味も持たない.

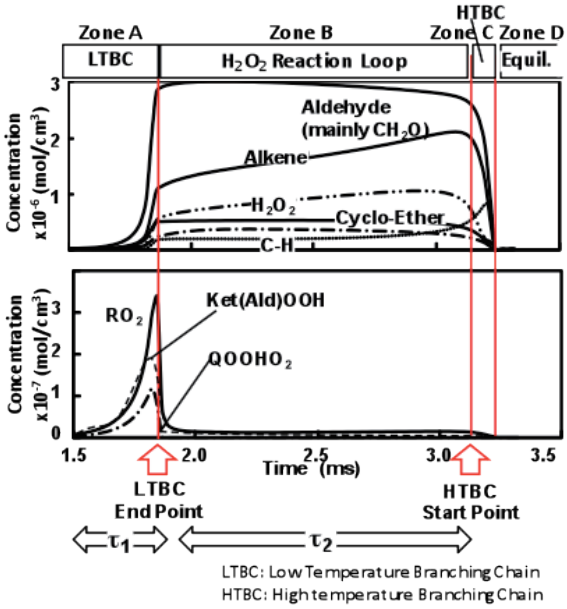


図1 炭化水素の酸化反応過程を構成する4つのタイムゾーン

行事カレンダー

●SAE 2015 World Congress & Exhibition

開 催 日:2015/4/21-23
開催場所:Detroit, MI, USA
http://www.sae.org/congress

●自動車技術会2015年 春季大会

開 催 日:2015/5/20-22
開催場所:パシフィコ横浜(神奈川県)
http://www.jsae.or.jp/2015haru/

●JSAE/SAE 2015 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting

開 催 日:2015/9/1-4
開催場所:Kyoto, Japan
http://pfl2015.jp/

●日本機械学会2015年度 年次大会

開 催 日:2015/9/13-16
開催場所:北海道大学 工学部(北海道)
http://www.jsme.or.jp/conference/nenji2015/

●自動車技術会2015年 秋季大会

開 催 日:2015/10/14-16
開催場所:西日本総合展示場(福岡県)
http://www.jsae.or.jp/index.php

●第53回 燃焼シンポジウム

開 催 日:2015/11/16-18
開催場所:つくば(茨城県)
http://combustionsociety.jp/

●第26回 内燃機関シンポジウム

開 催 日:2015/11/29-12/2
開催場所:京都テルサ(京都府)
http://www.jsae.or.jp/index.php

第 92 期広報委員会:委員長 首藤 登志夫 (首都大学東京, shudot [AT] tmu.ac.jp)
幹 事 山田 裕之 (交通安全環境研究所, h-yamada [AT] ntsel.go.jp)

発行年月日:2015年2月27日(アップロード) 組版:まゆみ堂

発 行 者:〒160-0016 東京都新宿区信濃町35(信濃町煉瓦館5階)
一般社団法人日本機械学会エンジンシステム部門 TEL.(03)5360-3500 FAX.(03)5360-3508

(C)著作権:(2015)日本機械学会エンジンシステム部門