

内燃機関研究室創設100周年

草鹿 研究室

草鹿 仁, 周 蓓霓, 山口 恭平



草鹿 仁 研究室 (1999年ー)

2



1999年 早稲田大学理工学部 専任講師

2001年 同 助教授

2005-2006年 スウェーデン王国

Chalmers University of Tech.

2008年 早稲田大学理工学術院 教授

【学内】

次世代自動車研究機構 機構長

理工学総合研究所 フロンティア機械工学研究所 研究所長

理工学総合研究所 モビリティ研究会 代表

体育会 自動車部 部長

学生の会 モーターボート・水上スキー部 部長

【学外】

環境省 中央環境審議会専門委員会 委員

国土交通省 交通政策審議会専門委員会 委員

経済産業省 総合資源エネルギー調査会専門委員会 委員

東京都 環境政策審議会専門委員会 委員

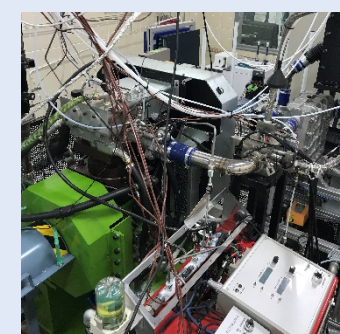
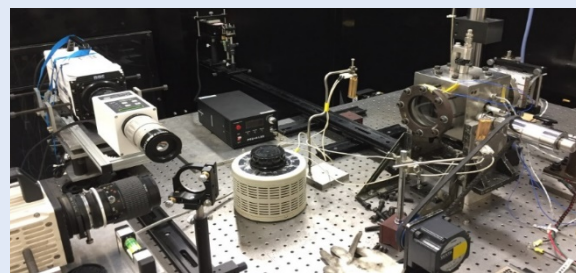
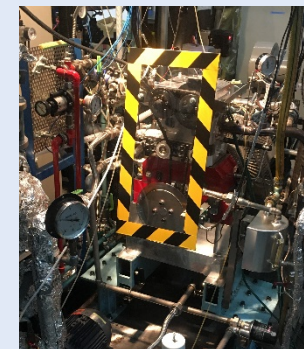
公益財団法人自動車技術会 技術担当理事



草鹿 仁 研究室では

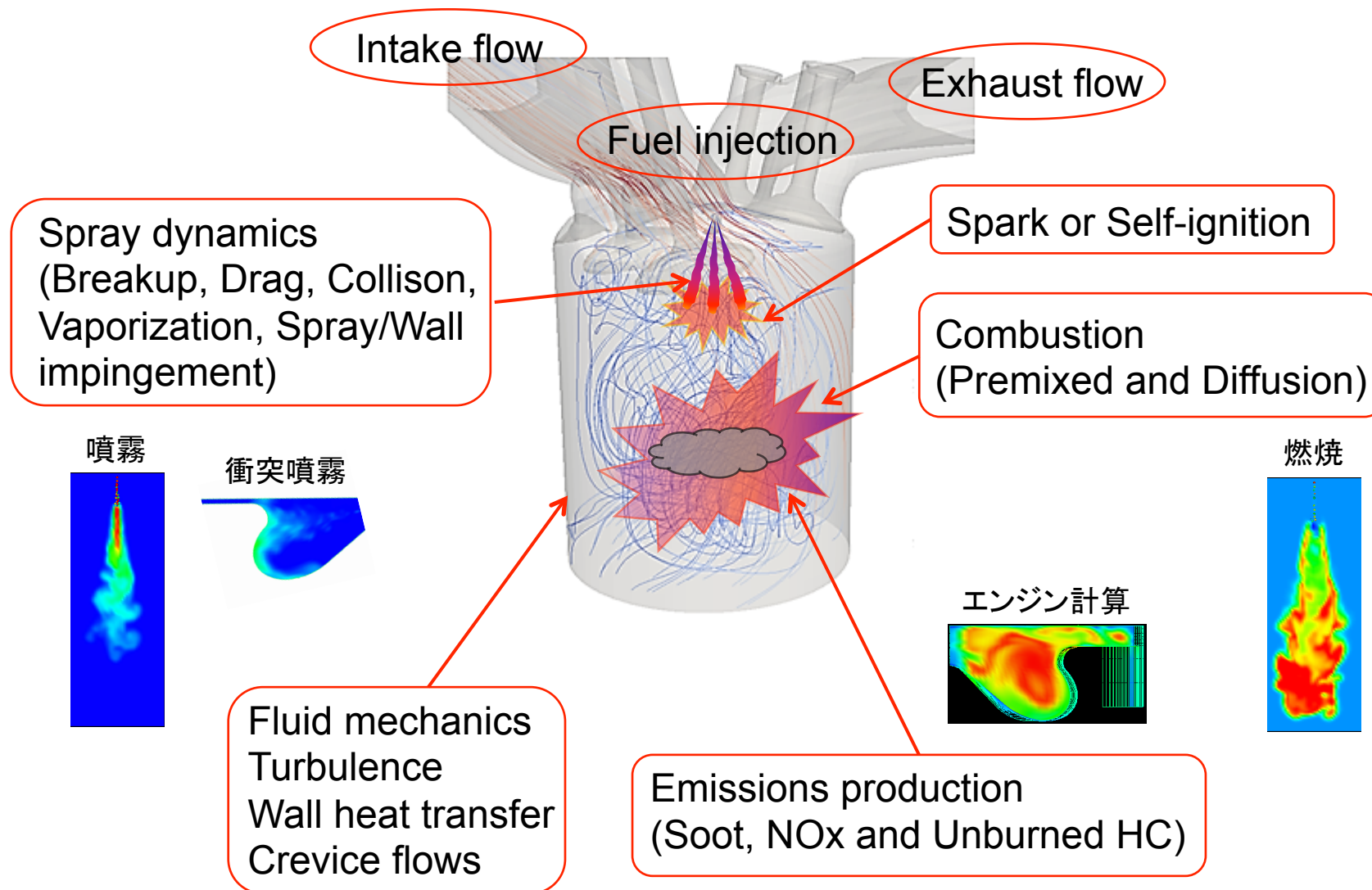
化学反応速度論と数値熱流体工学をコア技術にして自動車メーカーをはじめとする自動車関連企業だけでなく、重工や建機メーカー、燃料会社からの受託研究に加えAICEやSIPのプロジェクト研究に取り組んでいます

研究室・実験室の風景

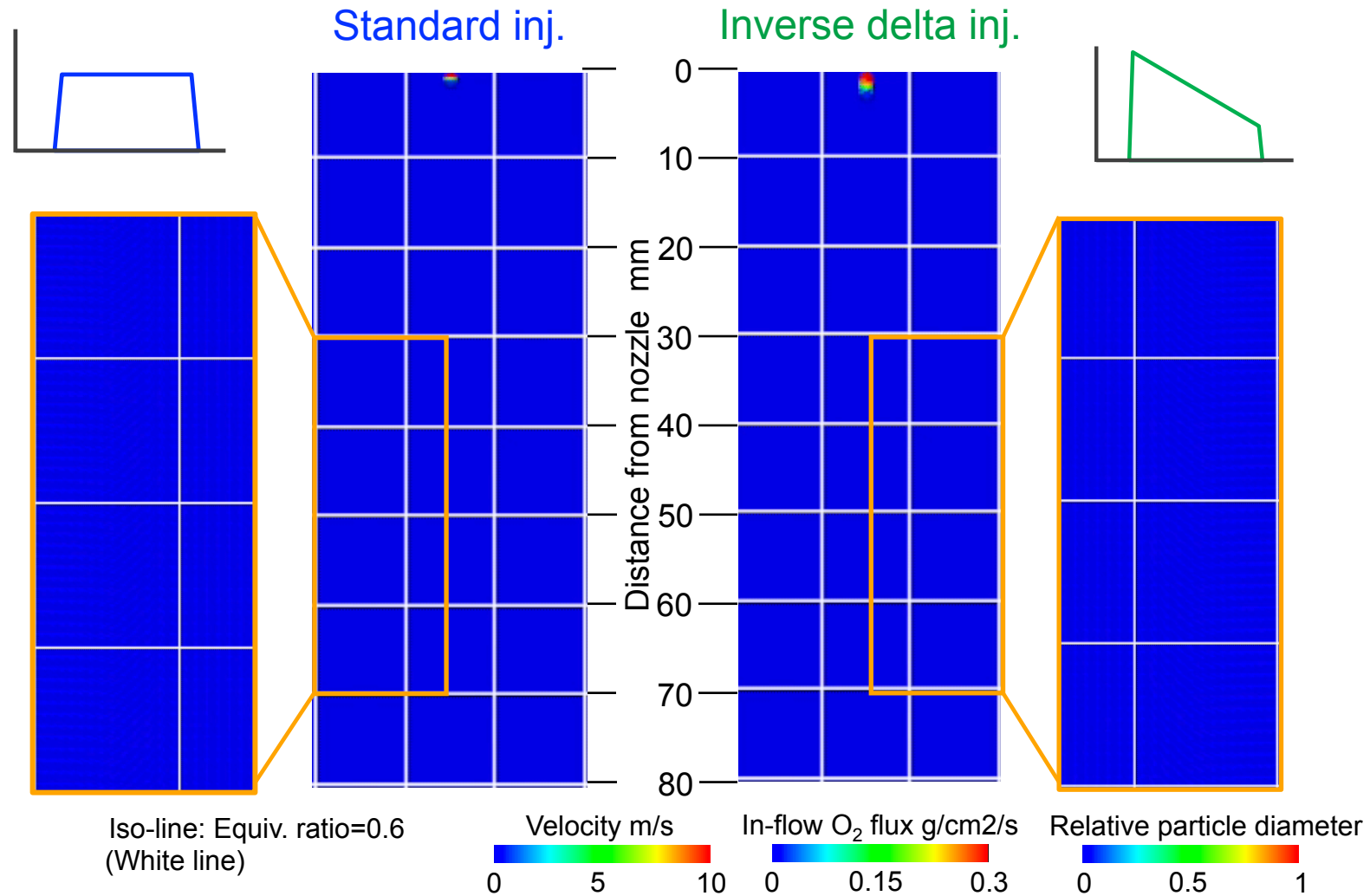




数値熱流体シミュレーション、近年の取り組み



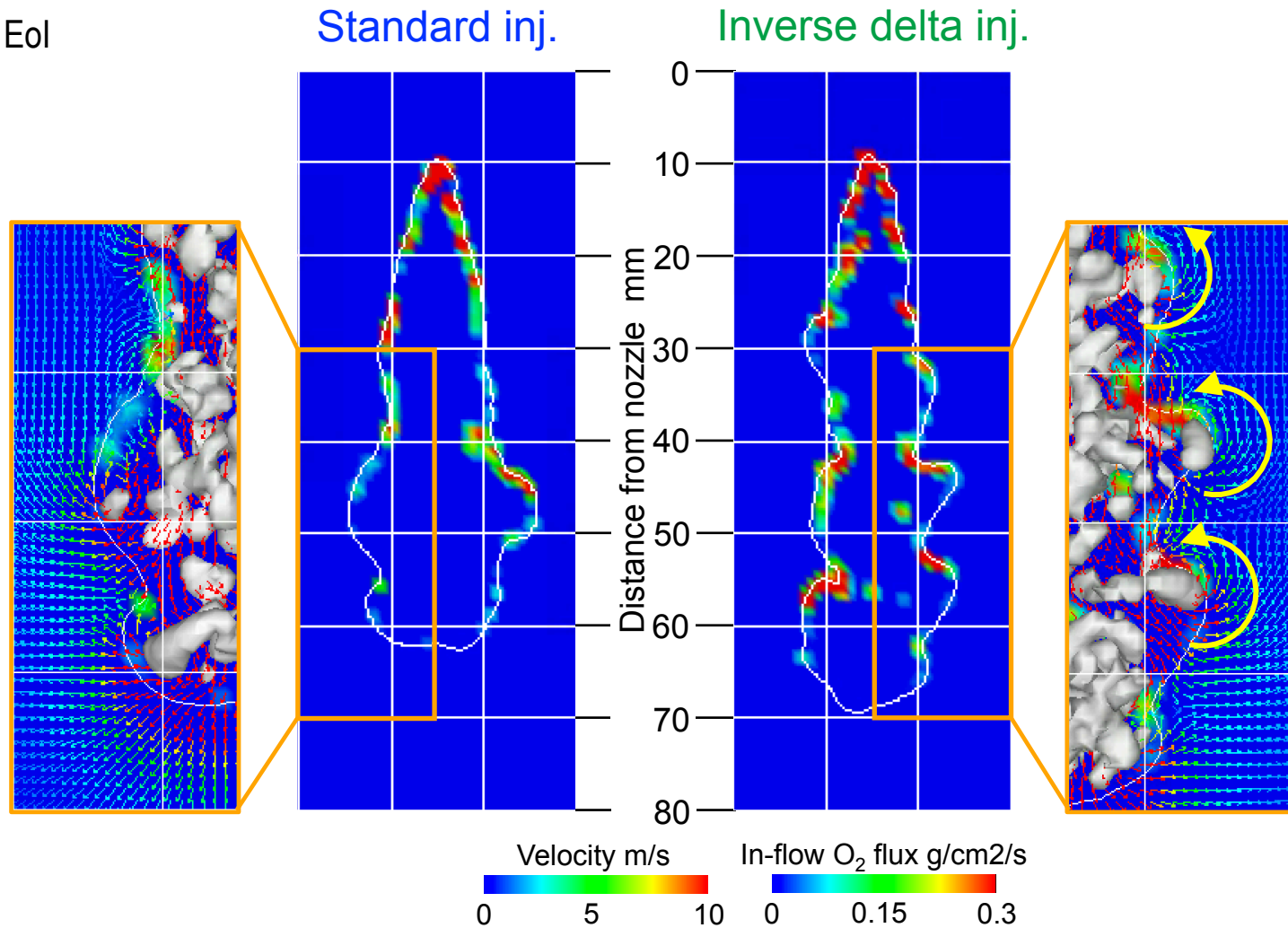
Chemically Reactive Multiphase Flow



足立 隆幸, 周 蓓霓 他, " 詳細な素反応過程を考慮したLESによるディーゼル噴霧燃焼の熱発生過程に関する数値解析", 自動車技術会, 2018年秋季大会

In-flow O_2 flux by vortices in spray periphery

Just after Eol

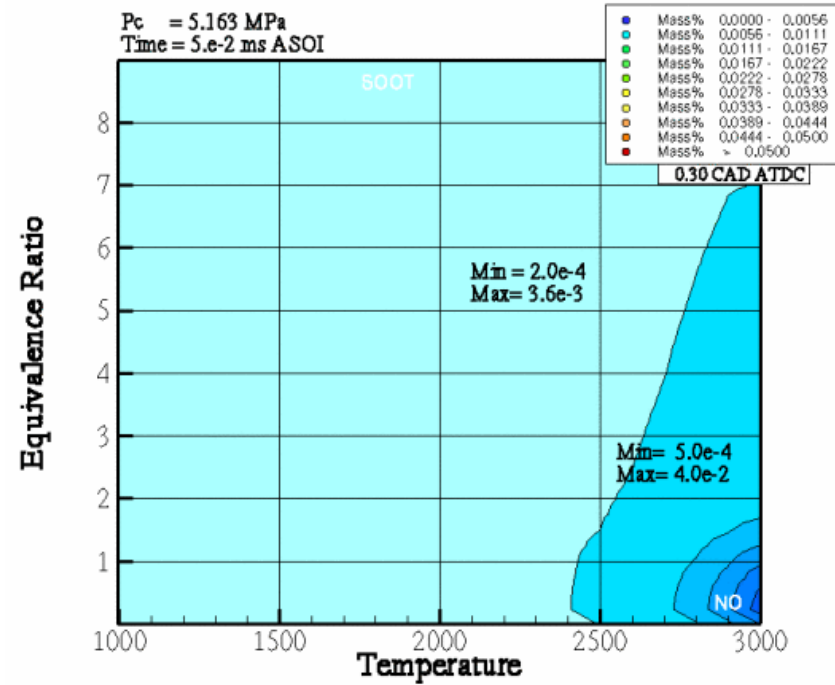
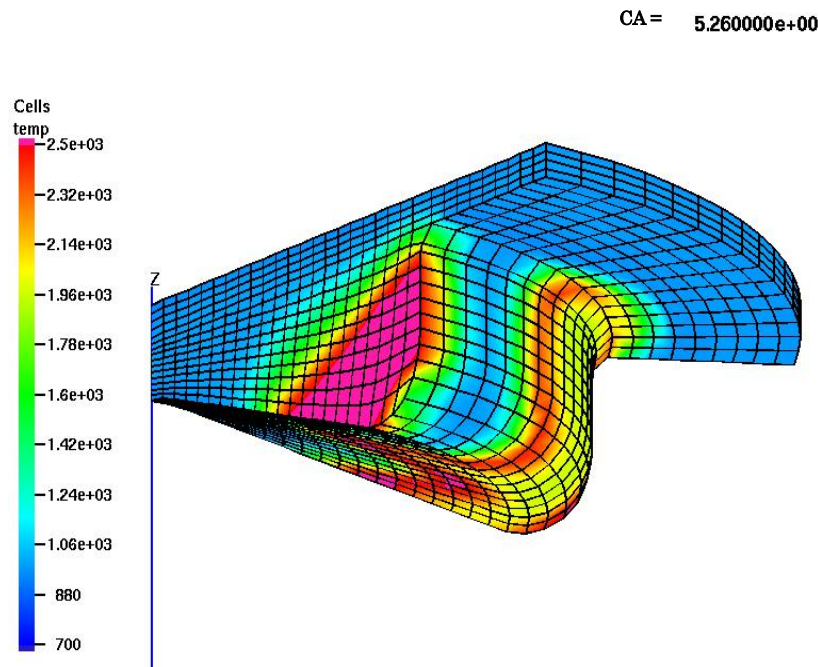


足立 隆幸, 周 蓓霓 他, " 詳細な素反応過程を考慮したLESによるディーゼル噴霧燃焼の熱発生過程に関する数値解析", 自動車技術会, 2018年秋季大会



ダイナミック ϕ -T マップ (2006年)

Jin Kusaka, Luca Montorsi, Valeri Golovitchev, Ingemar Denbratt, Numerical Simulation of Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine, FISITA, FISITA 2006 World Automotive Congress, 2006年11月





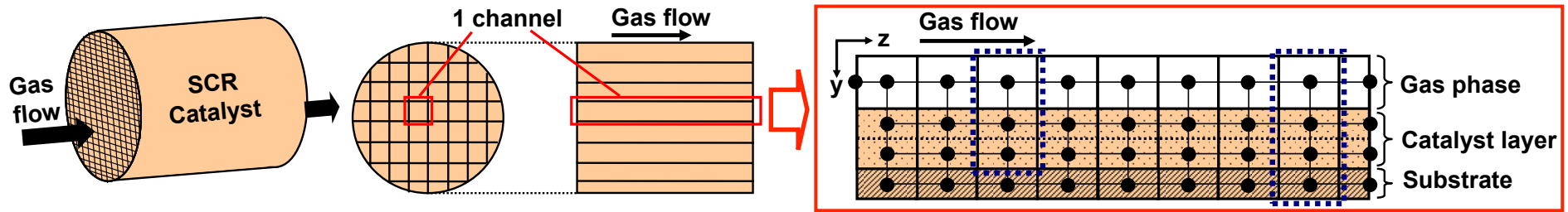
公表時期 2001年～ エンジン

- 草鹿 仁, 大聖泰弘, 詳細な素反応過程を考慮した多次元モデルによる天然ガス予混合圧縮着火に関する基礎的研究, 自動車技術会, 自動車技術会論文集 Vol.32, No.2, pp.43-48, 2001年4月
- 都築宏一郎, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 斎藤 孟, 詳細な素反応過程を考慮した多次元モデルによるデュアル燃料ガスエンジンの燃焼に関する基礎研究, 自動車技術会, 秋季大会学術講演前刷集No.114-01, pp.23-26, 2001年10月
- 中間健二郎, 村瀬栄二, 草鹿 仁, 大聖泰弘, ガソリンエンジンにおけるノッキング予測解析, 自動車技術会, 秋季学術講演会学術講演会前刷集No.104-04, pp.7-12, 2004年10月 (スズキとの共同研究)

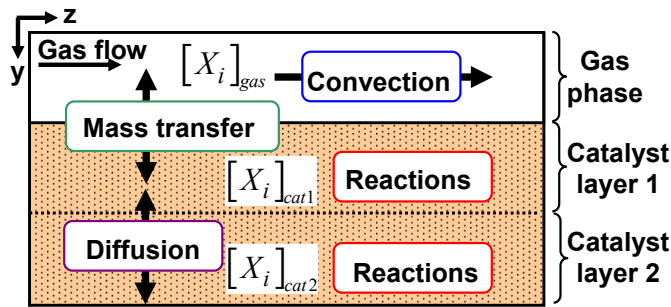
公表時期 2004年～ 改質触媒, 排出ガス浄化触媒

- 末岡賢也, 高田 圭, 大賀康史, 長崎央雅, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 中型ディーゼルエンジンにおけるUrea-SCRシステムに関する基礎研究, 自動車技術会, 春季学術講演会学術講演会前刷集No.29-04, pp.17~20, 2004年5月
- 長崎央雅, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 詳細な素反応過程を考慮した固体高分子型燃料電池用改質器の二次元輸送解析, 自動車技術会, 秋季学術講演会学術講演会前刷集No.88-04, pp.5~8, 2004年10月

表面反応をともなう触媒内輸送モデリング



Mass balance



D_i : diffusion coefficient
 A, C : constant number

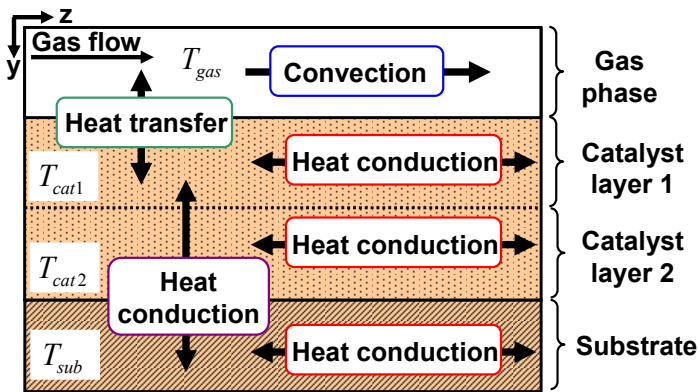
$$\text{Gas: } \frac{\partial [X_i]_{gas}}{\partial t} + \frac{\partial w [X_i]_{gas}}{\partial z} = h_i ([X_i]_{cat1} - [X_i]_{gas}) S v_{gas}$$

$$\text{Cat. 1: } \frac{\partial [X_i]_{cat1}}{\partial t} = -h_i ([X_i]_{cat1} - [X_i]_{gas}) S v_{cat1} + D_c \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial [X_i]_{cat}}{\partial y} \right) + \dot{S}_{react}$$

$$\text{Cat. 2: } \frac{\partial [X_i]_{cat2}}{\partial t} = D_c \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial [X_i]_{cat}}{\partial y} \right) + \dot{S}_{react}$$

$$h_i = \frac{Sh D_i}{dp} \quad Sh = A \left[Re \left(\frac{dp}{dz} \right) \right]^{0.43} Sc^{0.56} \quad D_c = C \frac{d}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

Energy balance



dp : hydraulic diameter
 A_{therm} : constant number

$$\text{Gas: } \frac{\partial (\rho_{gas} c_{gas} T_{gas})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{gas} w c_{gas} T_{gas})}{\partial z} = \alpha S v_{gas} (T_{cat1} - T_{gas})$$

$$\text{Cat. 1: } \frac{\partial (\rho_{cat} c_{cat} T_{cat1})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{cat} \frac{\partial T_{cat1}}{\partial z} \right) - \alpha S v_{cat} (T_{cat1} - T_{gas})$$

$$\text{Cat. 2: } \frac{\partial (\rho_{cat} c_{cat} T_{cat2})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{cat} \frac{\partial T_{cat2}}{\partial z} \right)$$

$$\text{Sub.: } \frac{\partial (\rho_{sub} c_{sub} T_{sub})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{sub} \frac{\partial T_{sub}}{\partial z} \right)$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_g}{dp}$$

$$Nu = A_{therm} \cdot \left[Re \left(\frac{dp}{dz} \right) \right]^{\frac{2}{3}}$$

微粒子生成過程 (齋藤研-大聖研から継承)

過濃混合気における多環芳香族及び微粒子の生成過程に関する研究※

公益財団法人自動車技術会 2001年 浅原賞学術奨励賞 受賞

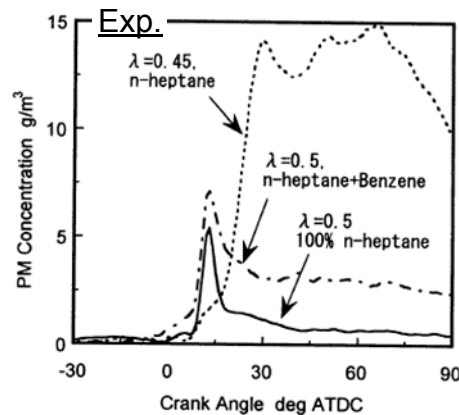


Fig.5 Comparison of PM concentration profiles in the cylinder for each experimental condition (Engine speed : 1,000 rpm)

- $\lambda=0.45$ 付近で微粒子生成が急増
- 環数の多い芳香族を燃料に含有すると、微粒子は増加

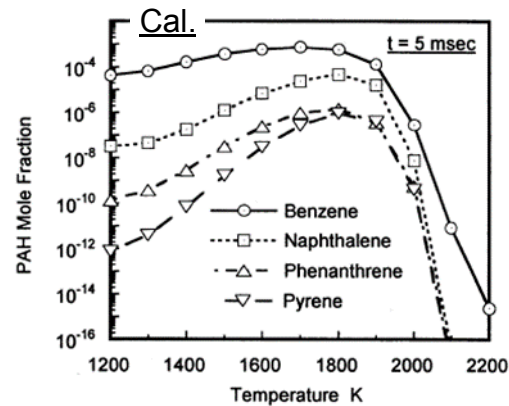


Fig. 8 Effect of temperature on PAH formation at given constant temperature and pressure (Pressure:3MPa, $\lambda=0.50$)

- PAHは1800 K付近で最も生成 (低温域では反応が進行せず、高温域では低級な分子に分解するため)

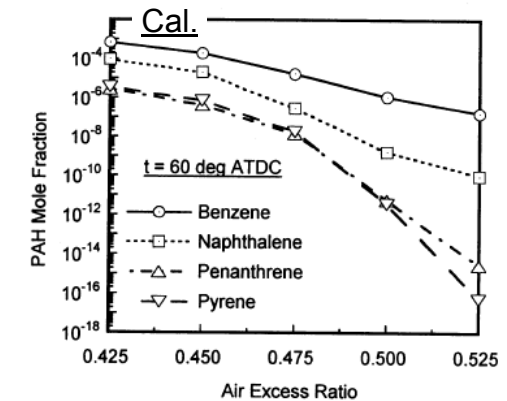


Fig.11 PAH mole fraction in the cylinder at 60 deg ATDC (Engine speed : 1,000 rpm, Fuel : n-heptane)

- λ が低いほどPAHの生成は増加
- $\lambda=0.475$ 付近で各種PAHの生成が急増

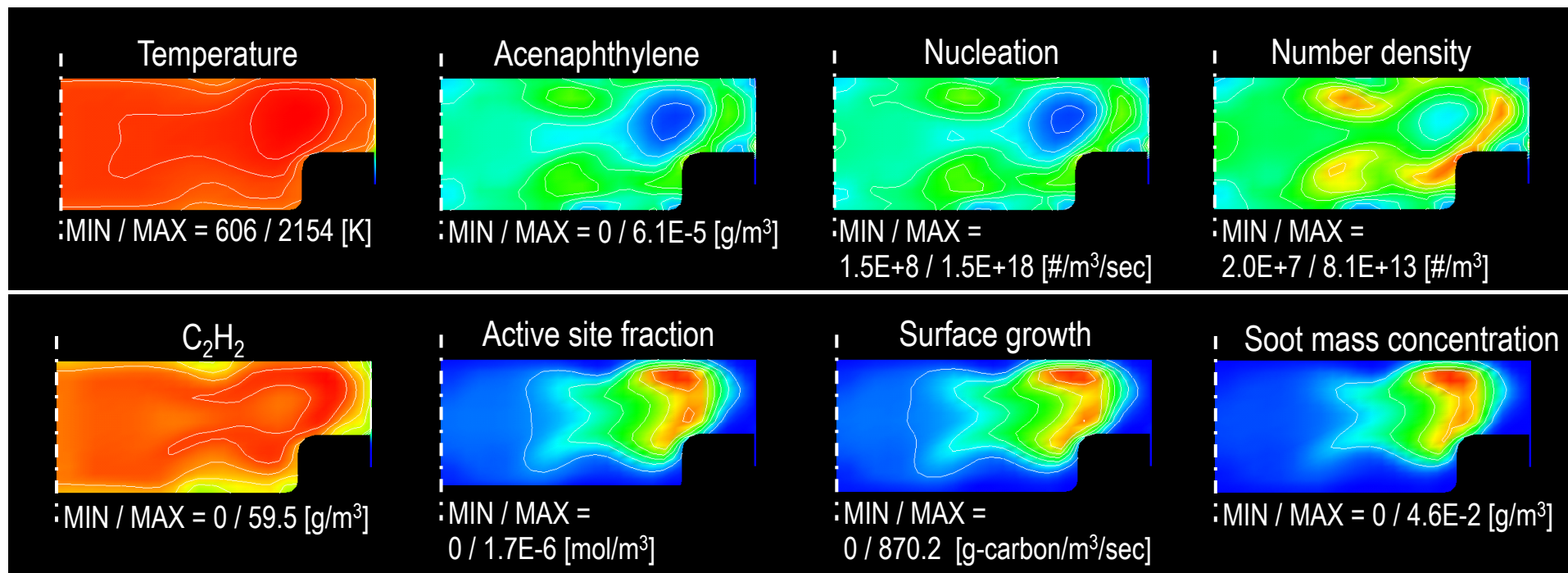
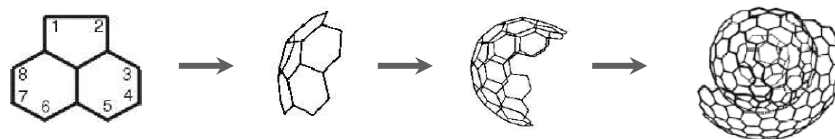
※ 草鹿 仁, 山本 高之, 大聖 泰弘, 齋藤 孟: 過濃混合気における多環芳香族及び微粒子の生成過程, 自動車技術会論文集, Vol.31, No.3, p.63-69, 20004347, 2000年7月



Waseda Phenomenological SOOT Model ¹¹

ディーゼル, ガソリン噴霧燃焼に適応できる, 不飽和炭化水素, 多環芳香族, 微粒子の生成モデル ※

– Soot particle formation @ TDC –



※ 森島彰紀, 草鹿仁, 大聖泰弘:ディーゼル燃焼における微粒子生成過程の解析—過濃予混合燃焼場における検討—, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.1, p.151-156, 20004347, 2007年1月



高圧縮比ガソリンエンジン (2003年～)

低温酸化ガソリン混合気中の火炎伝播特性に関する研究 (マツダとの共同研究)※

公益財団法人自動車技術会 2011年 論文賞 受賞

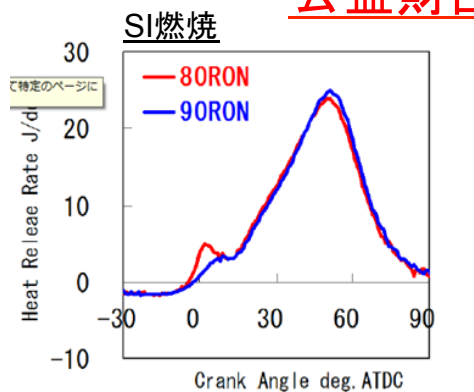


Fig.7 Comparison of H.R.R. at TDC (1500rpm WOT Ig.Timing 8deg.ATDC)

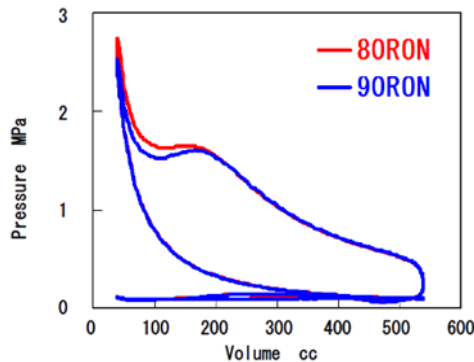


Fig.8 Comparison of Pressure-Volume diagram (1500rpm WOT Ig.Timing 8deg.ATDC)

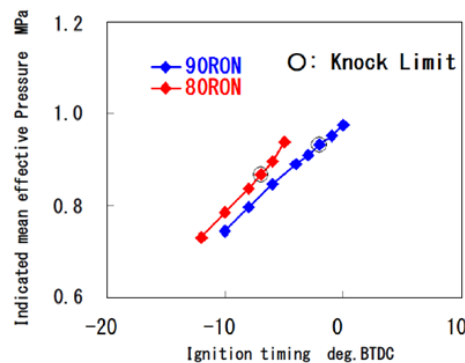


Fig.9 Characteristic of IMEP at 1500rpm WOT

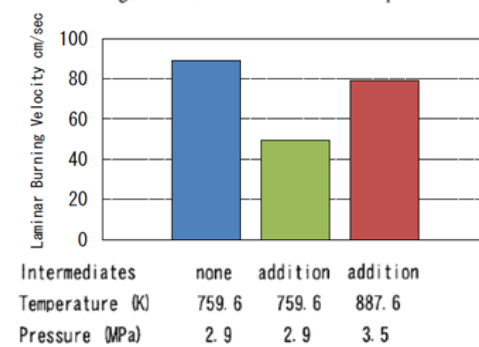


Fig.11 Comparison of Laminar Burning Velocity

Table 1 Engine Specifications and Operation Conditions

Engine Type	DOHC 4-valve
Bore X Stroke mm	87.5 X 83.1
Compression Ratio	14.0
Combustion Chamber	Pent-roof
Fuel System	Direct Injection
Water / Oil Temp. °C	88 / 90
Engine Speed rpm	1500

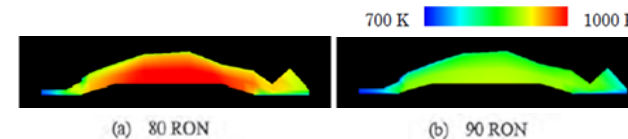


Fig.12 In-Cylinder Temperature Distribution at 8deg. ATDC

- ・ 高圧縮比のSI燃焼においてはTDC付近で熱発生が見られる
- ・ これによる火炎伝播速度, エンドガス部の温度の差は小さい
- ・ ノッキング限界を大きく悪化させることなく等容度改善で図示平均有効圧を向上

※養祖 隆 他:ガソリンHCCI機関における燃料特性と自己着火に関する検討, (第1報):自動車技術会論文集, Vol.40, No.1, p.99-104, 20094054, 2009年1月 (第2報):自動車技術会論文集, Vol.41, No.3, p.623-628, 20104391, 2010年5月

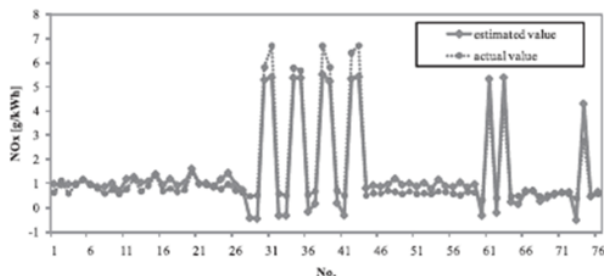


エンジンの応答曲面モデルと制御パラメータ最適化手法の開発※

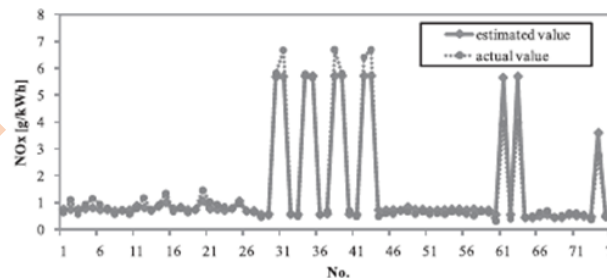
公益財団法人計測自動制御学会 2013年 論文賞 受賞

エンジン応答曲面モデルの構築

$$\hat{y}_2 = \sum_{j=1}^8 \gamma_j x_j + \gamma_0 \quad \text{重相関係数:0.9491} \\ \text{(説明変数:8)}$$

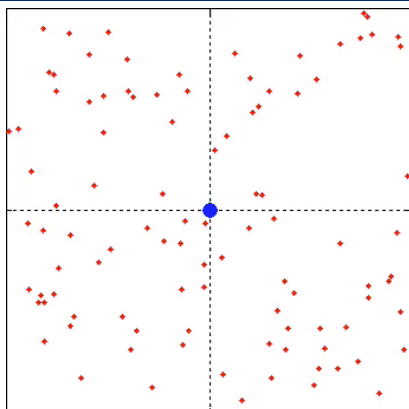


$$\hat{y}_2 = \gamma_1 x_5^2 + \gamma_2 x_3^2 + \gamma_3 x_3 x_5 + \gamma_0 \quad \text{重相関係数:0.9753} \\ \text{(説明変数:3)}$$



少ない説明変数で
高精度なモデルを構築

エンジン制御パラメータの最適化手法



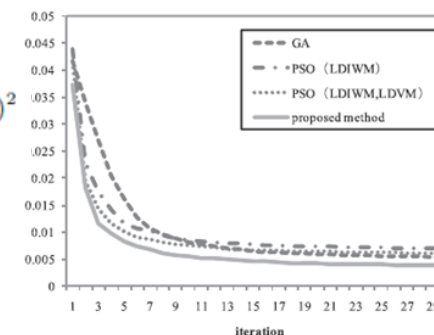
粒子群最適化手法(PSO)にお
Particle挙動の概念図

目的関数

$$J_i = f(x_i) = \sum_{l=1}^3 s_l (\hat{y}_{il} - r_l)^2$$

- y₁: 燃費
- y₂: NOx
- y₃: Smoke

収束性能を改善



※ 小川 雅俊, 鈴木泰政 他: エンジンの応答曲面モデルと制御パラメータ最適化手法の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.47, No.10, p.501-510, 20124653, 2011年10月

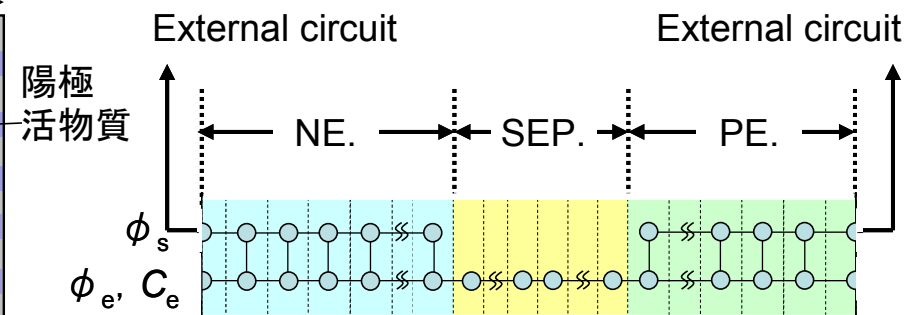
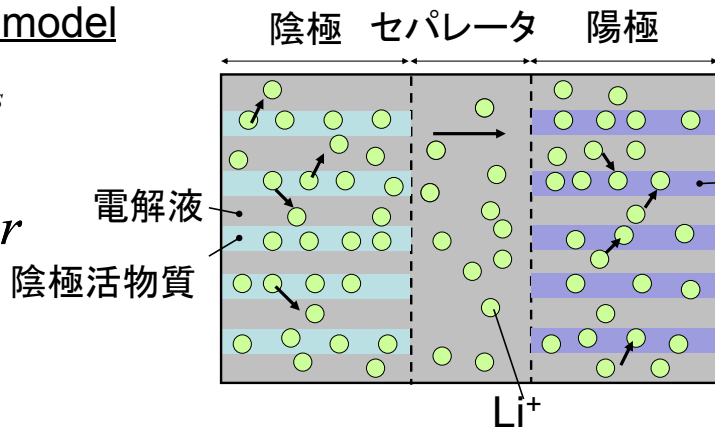
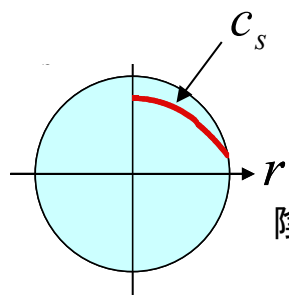


バッテリー モデリング(2012年～)

- 中村俊貴, 中野大夢, 草鹿仁, パラレル方式ディーゼルHEVの構成要素最適化の基礎検討, 自動車技術会論文集 Vol.43 No.5 (P.1081-P.1086), 2012年9月

phase		Conservation equations	Boundary conditons
Solid phase	Charge	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) = j^{Li}$	$-\sigma_-^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big _{x=0} = \sigma_+^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big _{x=L} = \frac{I}{A}, \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big _{x=\delta_-} = \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big _{x=L-\delta_+} = 0$
	Species	$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right)$	$\frac{\partial c_s}{\partial r} \Big _{r=0} = 0, -D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big _{r=R_s} = \frac{j^{Li}}{a_s F}$
Electrolyte phase	Charge	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_D^{eff} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \right) = -j^{Li}$	$\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big _{x=0} = \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$
	Species	$\frac{\partial (\epsilon_e c_e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + \frac{1-t_+^0}{F} j^{Li}$	$\frac{\partial c_e}{\partial x} \Big _{x=0} = \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$

Pseudo2D model



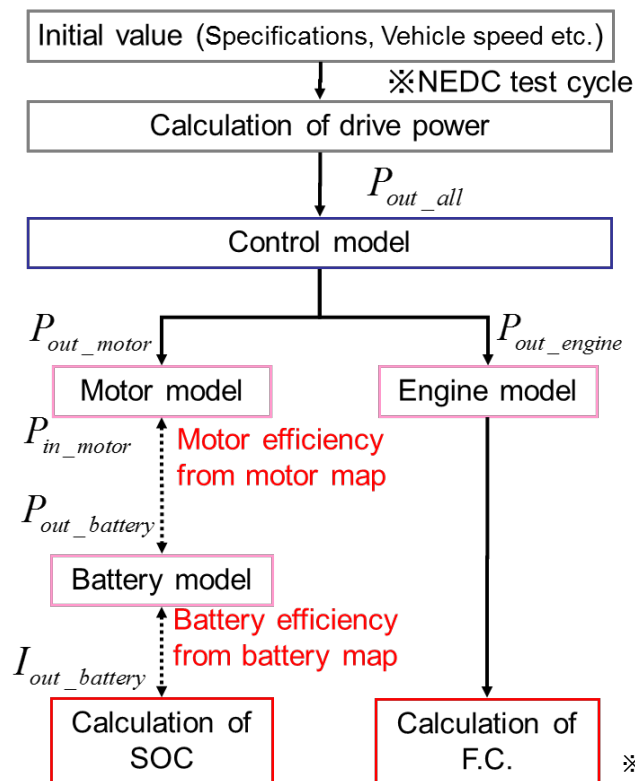


粒子群最適化手法とHEV制御

パラレル方式ディーゼルHEVの構成要素最適化の基礎検討*

公益財団法人自動車技術会 2013年 論文賞 受賞

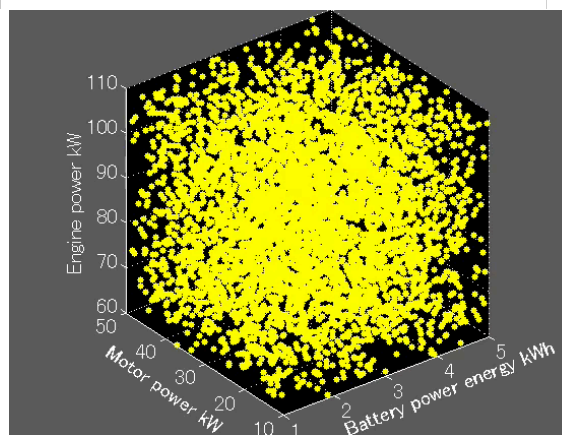
HEVモデル概要



PSOを用いた構成要素最適化

Curb weight kg	1655, 1860, 2080
Vehicle type	1 clutch parallel HEV

Engine power kW	90
Motor power kW	22
Battery power energy kWh	1.7



- Diesel 1655kg ● Diesel HEV 1655kg
- Diesel 1860kg ■ Diesel HEV 1860kg
- △ Diesel 2080kg ▲ Diesel HEV 2080kg

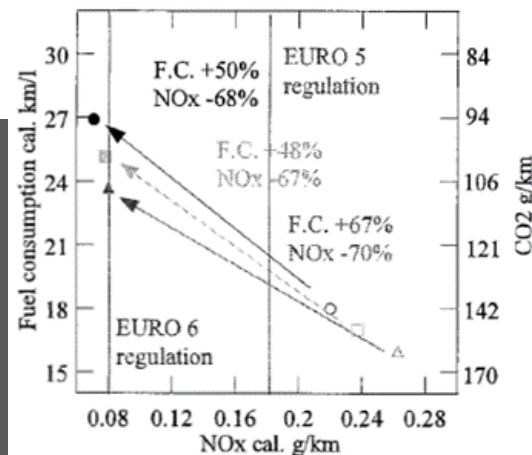
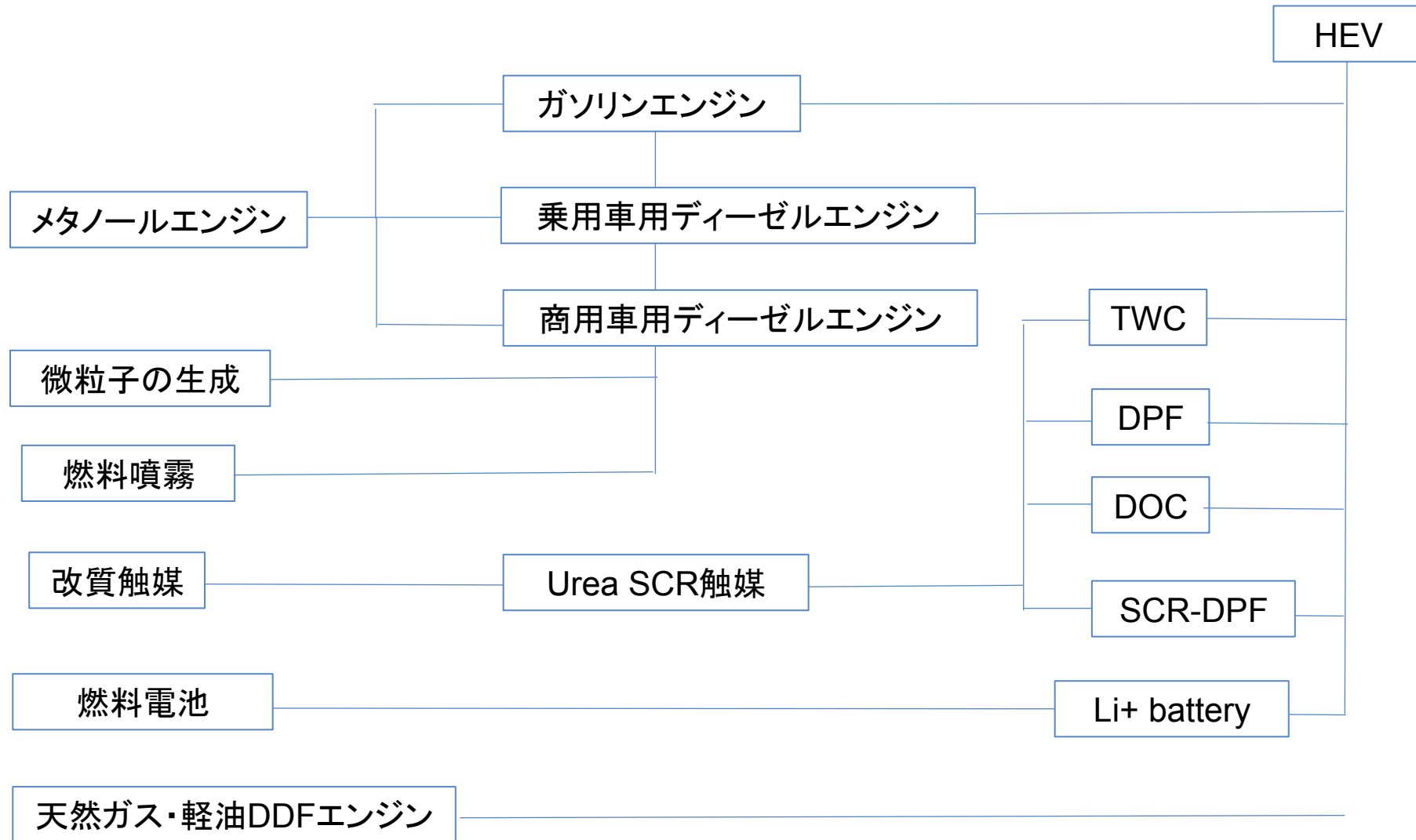


Fig.9 Fuel consumption and NOx predicted after the optimization of components

*中村俊貴, 中野大夢 他:パラレル方式ディーゼルHEVの構成要素最適化の基礎検討, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.5, p.1081-1086, 20124653, 2012年9月



これまでの実験系の研究の流れ





早稲田大学モビリティ研究室STAFF

理工学術院 創造理工学部 創造理工学研究科 環境・IT情報研究科	草鹿 仁 教授 紙屋 雄史 教授 周 蓓霓 講師 山口 恭平 助手	福間 隆雄 野寄高宏	客員教授 非常勤講師
研究院 次世代自動車研究機構	大聖 泰弘 研究特任教授 Sok Ratnak 講師 伊藤 公威 招聘研究員 国須 正洋 招聘研究員 塚本 佳久 招聘研究員 辻本 大輔 招聘研究員 吉村 佳	足立 隆幸 梅澤 克則 神長 隆史 高林 徹 山田 健人	客員講師 招聘研究員 招聘研究員 招聘研究員 招聘研究員
環境総合研究センター	廣田 寿男 客員教授 渡部 陽 招聘研究員 樋口 世喜夫 招聘研究員 石 太郎 招聘研究員 小林 三郎 招聘研究員		



早稲田大学モビリティ研究室STAFF

18

博士課程学生（5名）	山口 恭平 塚本 佳久 辻本 大輔 神長 隆史 伊藤 公威
技術職員	石井 泉 古賀 守
秘書	鈴木 祥子 羽生 恵理 桑田 匡美 大滝 彩
修士課程学生	23名
学部学生	27名
受託研究	23件（15機関）
早大モビリティ研究会員	52社（企業会員）
実験室	58号館 第1-6機関室，吹き抜け 63号館 第7-9機関室，研究用車両
計算機室	61号館336室



早稲田大学モビリティ研究室STAFF

19

修士課程 2年生 (15名)

井手口 悟士 大橋 禅 上入佐 慶太 佐原 賢 滋野 豪規 曾根 遼太 高橋 克仁
田那村 正志 畑 裕登 陳 紹康 松尾 涼平 茂木 隆秀 野々村 仁志 山田 祥太郎
巖 燮陽

修士課程 1年生 (8名)

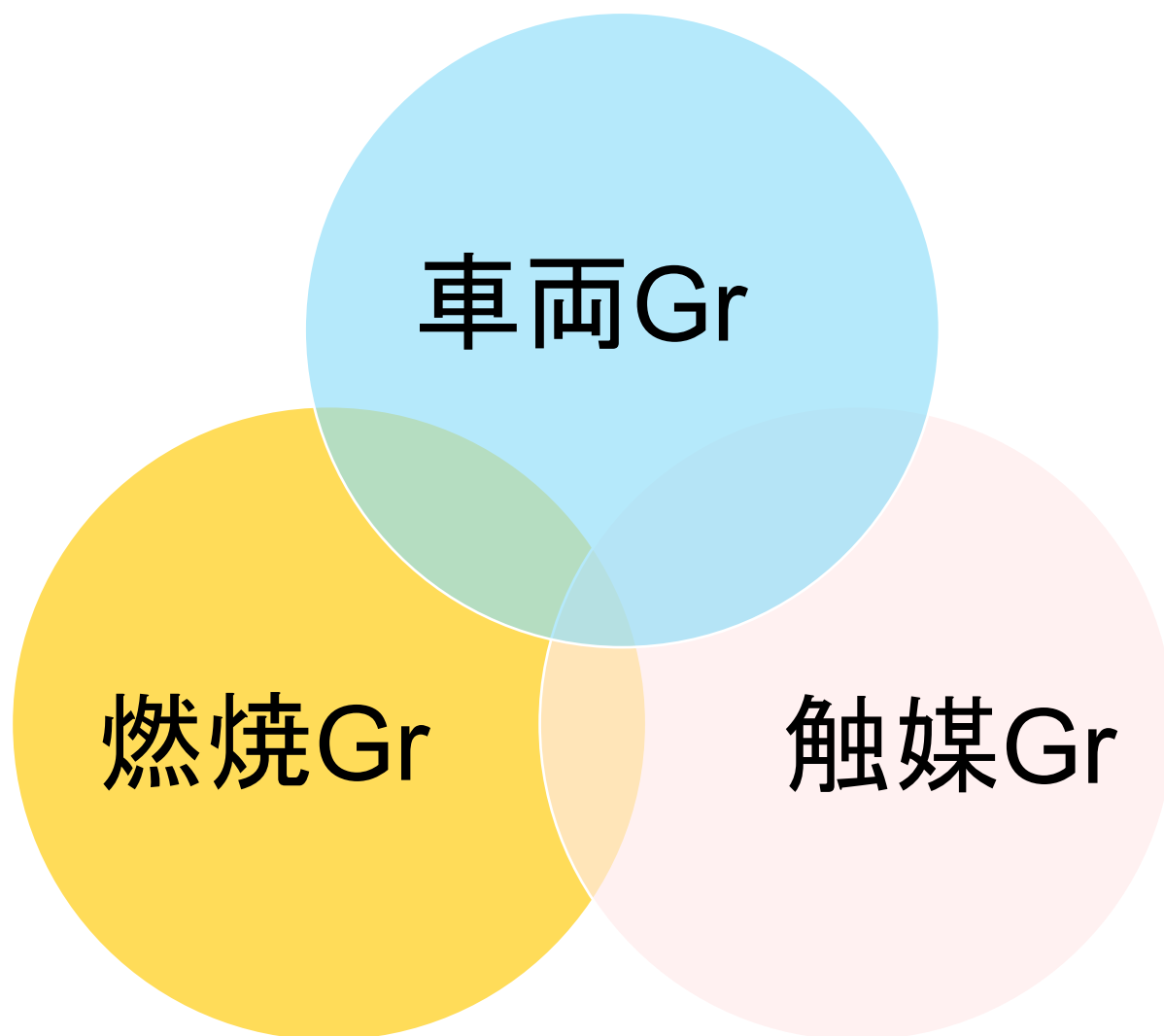
井上 遼哉 許斐 俊輝 鈴木 敬也 竹内 一稀 森元 溪 八幡 萌 横田 圭祐
Suchitra Sivakumar

学部 4年生 (16名)

石丸 彰久 金 大奎 上山 陸人 小川 賢也 小澤 幸平 加藤 雄大 古満 勇汰
清水 豊禾 新行内 一 園田 俊介 瀧 翔太 中井 模太郎 中塚 万穂子 平川 慶一

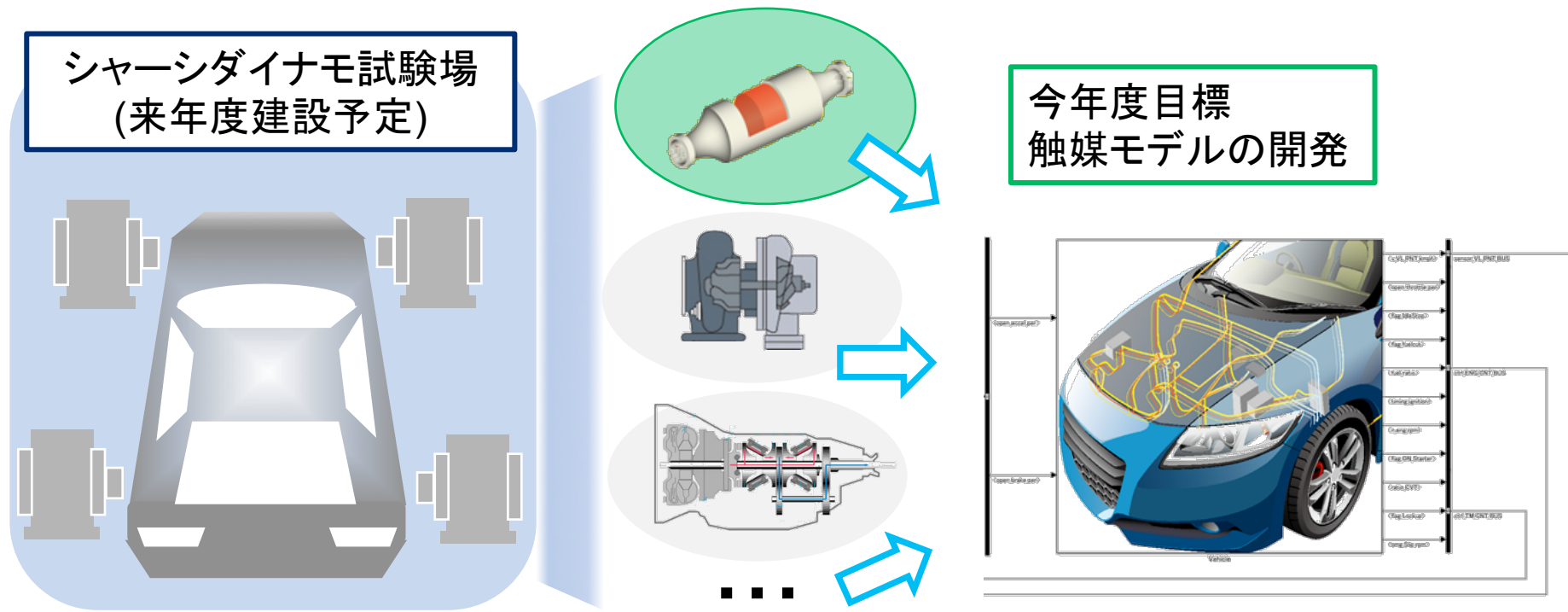
学部 3年生 (13名)

縣 滉人 佐々木 勝太 須藤 善太 関 圭一朗 関 実姫 田邊 郁 平子 凜太郎
松永 堯明 水野 文彬 山岸 健広 棚町 昌彌 夏 周正 薛 博文





車両Group



実験データの取得 → 各モデルの作成 → 車両モデルへの組み込み
経済産業省標準車両モデル”suriawase2.0”

規制強化, 車両の複雑化による開発工数の増加

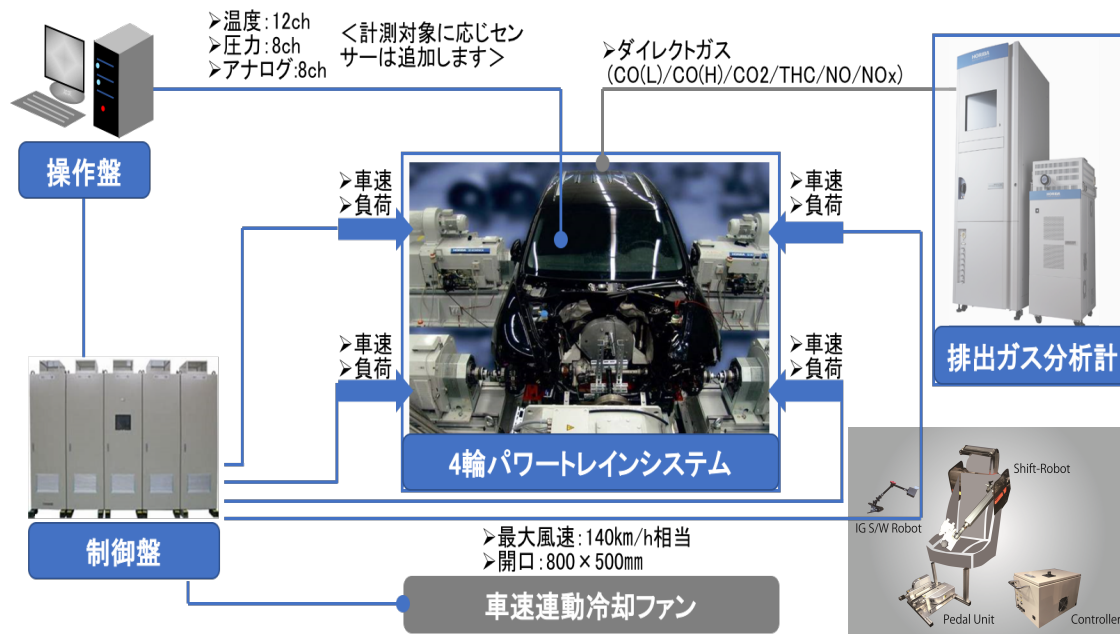


統括的な車両モデルの構築
開発の上流段階で全体最適を考慮でき, 開発の高効率化に貢献

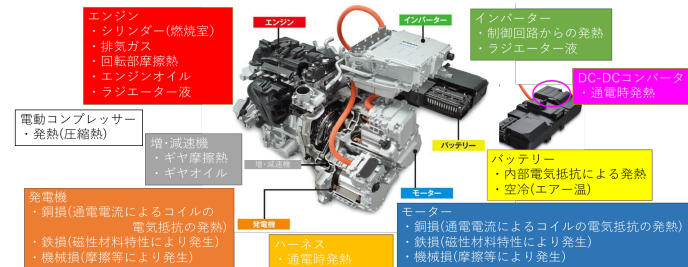


シャシーダイナモメーター

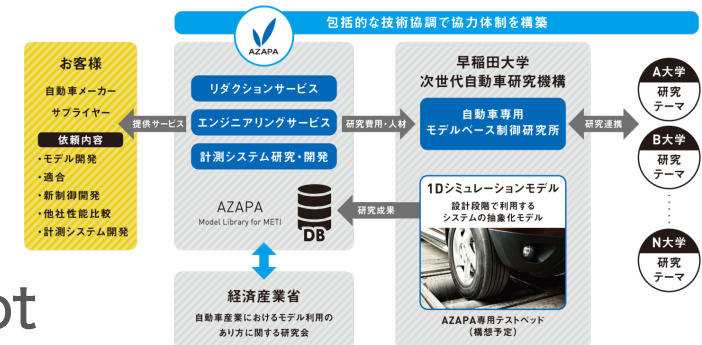
AZAPA社のシャシーダイナモ設備は、早稲田大学との共創環境を実現



Power Management

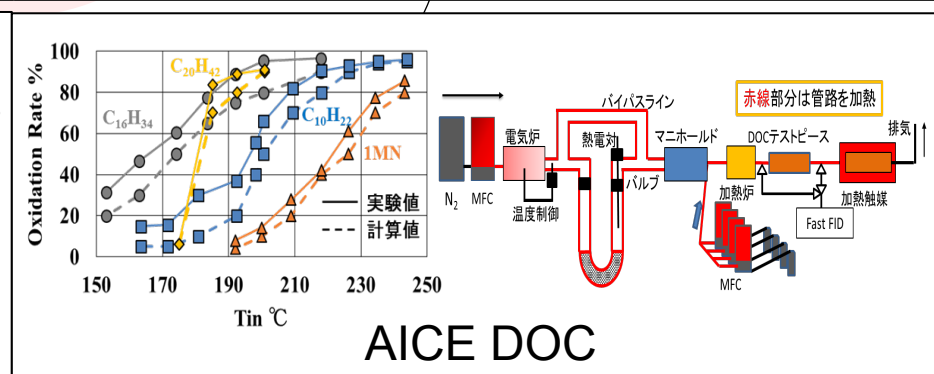
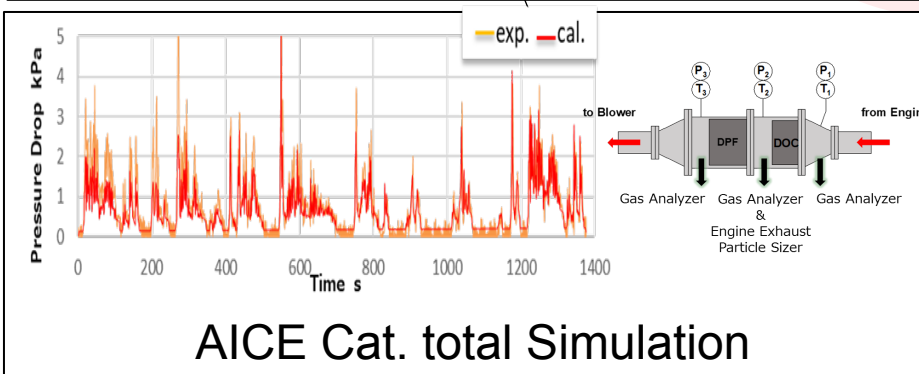
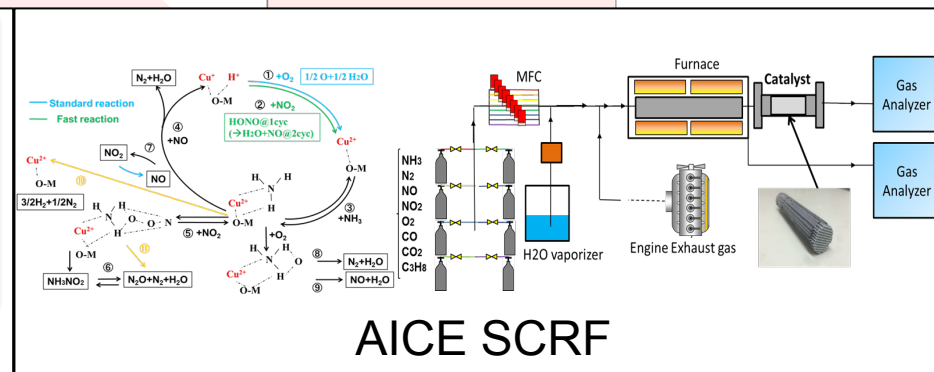
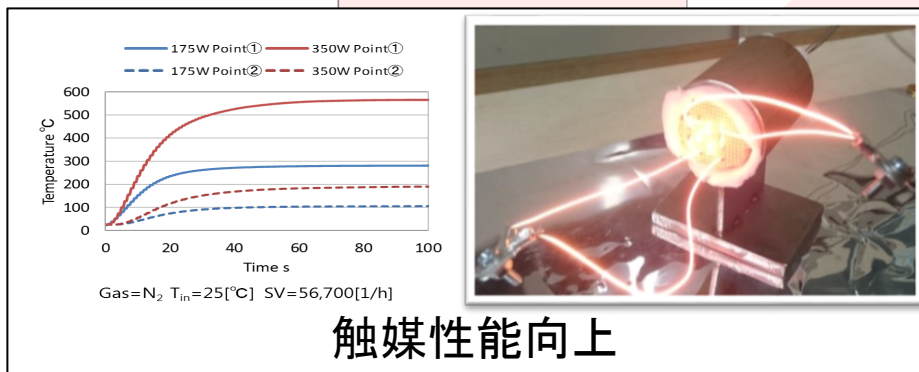
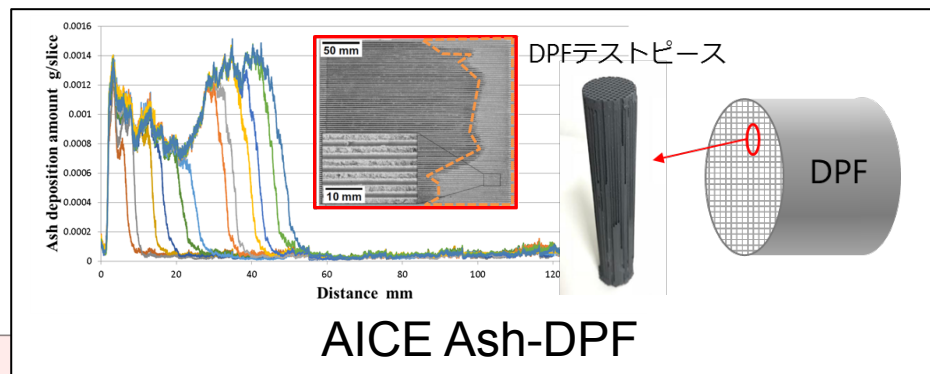


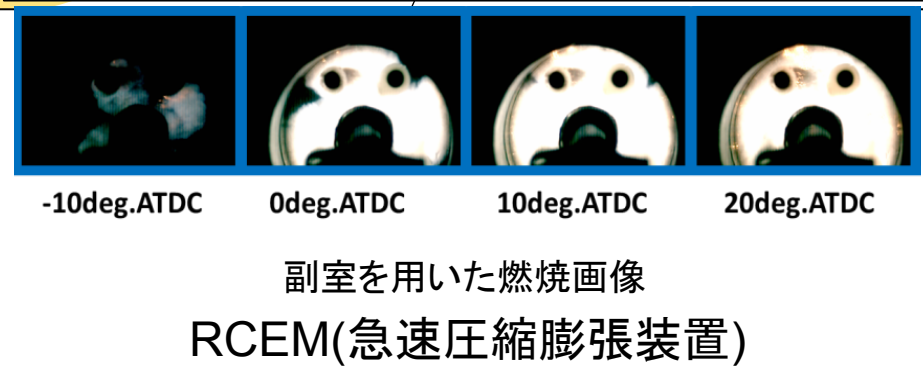
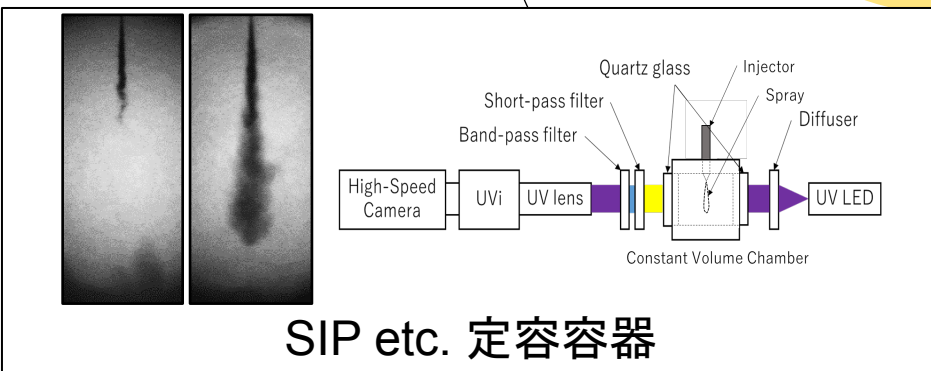
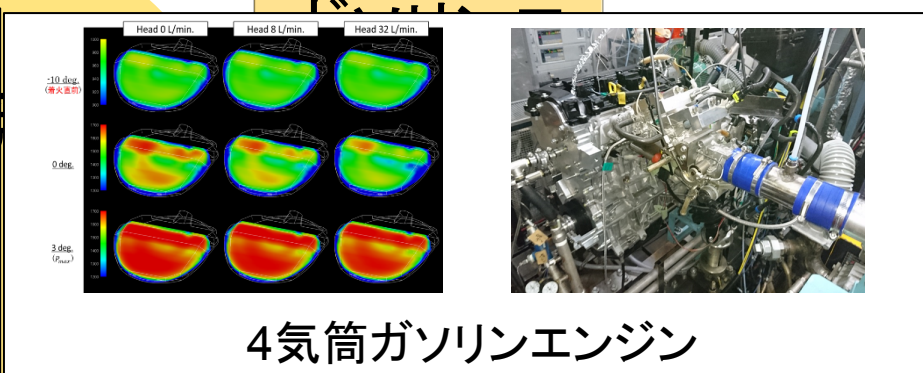
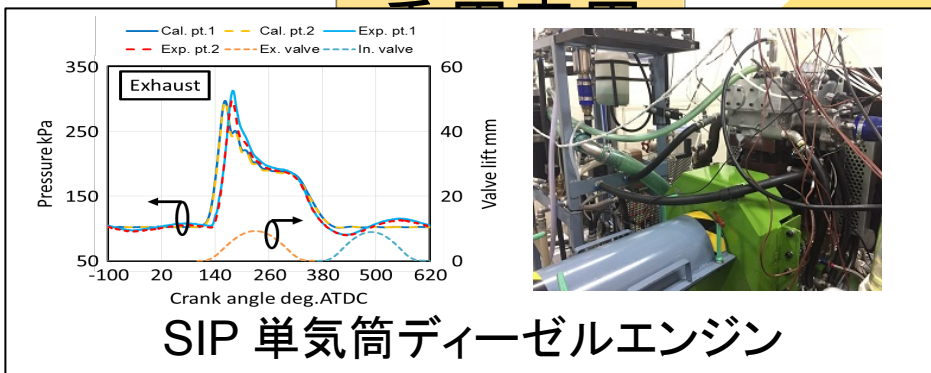
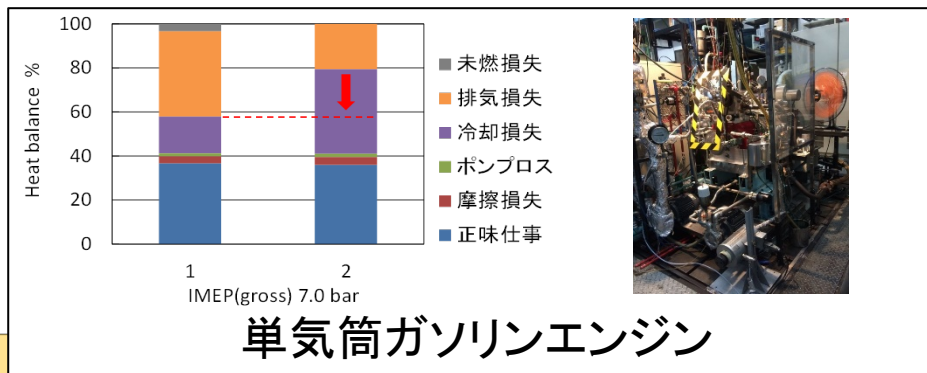
Analysis Management



Driving Robot

開発のための計測とサービスを提供





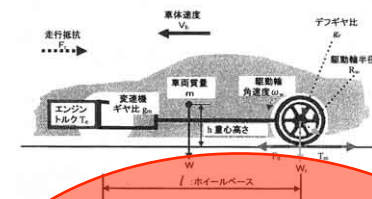


Next 100 years

出典: <http://zaidantj.hiho.jp/ron/13ron/13-2ron/model.html>

簡易化
速い
モデル
計算時間
遅い
細

- モデルベースエンジン燃焼制御
- 内燃機関の変動を考慮した燃焼制御
- 燃焼最適化手法と車両モデルに関する研究



車両モデル用へ応用
エンジンモデルの構築

従来の専門領域

噴霧燃焼

熱流体
化学反応
有害排出ガス
高効率燃焼

エンジン燃焼計算

モデルのReduction

- ✓ 計算時間の高速化
- ✓ 計算精度の担保

今後は車両、触媒、燃焼から要素のモデル化により自動車トータルでの効率向上を目指した研究を展開していく

エンジン 変速機 動力系 走行モデル 車両



Next 100 years

現在自動車は、100年に一度の大変革期と言われているが、これを大学人として「危機」と考えるか「好機」と考えるかは、既に、60年前に渡部先生が明示されている。

再掲すれば、「技術者は個々の実験的知識を総合的に把握し、整理し、それを自分が選んでいる専門分野の研究の掘り下げに結びつけて考察する態度が好ましく、また、これを理論的にいうならば弁証法的にアウフヘーベンすることが肝要だ」である。このような姿勢があればいかなる事象にも対応できるであろう。

以上から、早稲田大学モビリティ研究室は、盤石の運営・研究体制で、次の200周年もさらに発展していることをお約束する次第である。OBの皆様には変わらぬご支援を宜しくお願い致します。



Thank you for your attention !

内燃機関研究室創設100周年記念式典
2018年11月25日
大隈講堂