



京機短信

KEIKI short letter

No.395 2024.08.05

京機会(京都大学機械系同窓会)

tel. & fax. 075-383-3713

E-Mail: jimukyoku@keikikai.jp

URL: <http://www.keikikai.jp>

編集責任者 京機短信編集委員会

目次

- ・ 拡大運営委員会の報告……蓮尾昌裕 (pp.2-3)
- ・ series わたしの仕事 (47) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ……根岸秀世 (pp.4-12)
- ・ series 研究最前線 (17) High-Performance Computing and Big Data for Understanding Lean-Premixed Hydrogen Combustion……Abhishek Lakshman PILLAI (pp.13-21)
- ・ 関西支部 第13回京機会テニスカフェ報告書……成瀬忠史 (pp.22-25)

7月13日(土)に桂キャンパスCクラスターC3棟会議室にて京機会拡大運営委員会が開催され、その懇親会が同棟内のカフェテリアcenatio silva (ケナティオ シルヴァ) で開催されました。下の写真はその一コマです。詳しくは次ページからの記事をご覧ください。



拡大運営委員会の報告

運営委員長 蓮尾昌裕 (S61/1986卒)

2024年7月13日(土)12時より、京都大学桂キャンパス Cクラスター C3棟2階会議室にて、京機会拡大運営委員会が開催されました。運営委員会は京機会の「I 人事・組織に関する内規」により、「幹事会にかける重要案件の事前審議を行う。」とされており、「委員は、各支部代表と大学側代表および会長が指名する若干名とし、委員長は会長が委員中より指名する。」とされています。例年11月上旬に開催される総会に向け、重要な案件は幹事会にて審議されますが、その前に運営委員会にてより長期的な観点から事前審議をしています。また、「拡大」となっていますのは、例年、顧問や重要な案件の担当幹事等、運営委員会委員以外の役員にも参加いただいているためです。今回の出席者は

会長：千々木亨 (S54/1979 年卒)

運営委員長：蓮尾昌裕

運営委員：中部主敬 (関西支部長：S56/1981 卒)

村上弘記 (関東支部長：S60/1985 卒)

近藤功一 (中部支部長：S61/1986 卒)

豊嶋範男 (中国・四国支部長：S57/1982 卒)

中村久志 (九州支部長：S56/1981 卒)

正井健太郎 (S57/1982 卒)

鈴木基史 (S61/1986 卒)

平方寛之 (代表幹事：H9/1997 卒)

土屋智由 (代表副幹事&学生会担当幹事：H3/1991 卒)

小森雅晴 (会計幹事：H7/1995 卒)

名簿担当幹事：泉井一浩 (H8/1996 卒)

学生会：野口 峻 (学生会会長：M1)、

桑原和暉 (B4)

事務局：段 智子

でした。

運営委員会は、千々木会長のご挨拶から始まり、出席者の簡単な挨拶と自己紹介の後、会則・内規改定、次期役員、2024年京機会総会・講演会・懇親会、名簿管理の新システム移行、京機会ニュース・京機短信、会計、学生と先輩との交流会、京機会年間活動優秀賞、活動強化策等について、審議を行いました。所要時間を3時間と見込んでいたのですが、案件数自体が多い上に各案件で京機会の益々の発展に向けた様々な視点からの熱い審議となり、予定時間を大幅に超過しました。

その後、1階のカフェテリアcenatio silva（ケナティオ シルヴァ）に移動し、引き続きの審議を兼ねつつ、懇親会を行いました。懇親会では、カフェテリアで普段提供されている定食等の定番メニューをコース風にアレンジいただいた当日限定のお料理、さらには大変残念ながら所用で当日ご欠席の森雅彦運営委員（S60/1985年



卒）から提供いただいた「まほろばワイン」と「抹茶プリンをあしらったデザートプレート」も堪能しながら、京機会について語り合い、交流を深めました。その一コマを本短信の表紙に掲載しています（表紙写真の左から、中村、野口、豊嶋、村上、桑原、泉井、中部、千々木、平方、小森、鈴木、土屋、近藤、蓮尾、段です）。



まほろばワインをはじめとした飲み物と抹茶プリンをあしらったデザートプレート

series わたしの仕事 (47)

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

根岸秀世 (H12/2000 卒)



1. はじめに

私は社会人博士として熱物理工学研究室(指導教官:黒瀬良一先生)に在籍し、この2024年3月に卒業した京機会新人です。学部と修士は東京工業大学および同大学院(今年10月には東京医科歯科大学と統合して東京科学大学と改名されますので、母校の名前がなくなるのは少し寂しく感じます)の機械系を卒業し、2002年にJAXA(当時は宇宙開発事業団NASDA)に入社して現在に至ります。2024年4月の京機会関東支部総会・新人歓迎会に参加させていただいた折、同じ宇宙業界ということで意気投合した広瀬さん(「わたしの仕事(46)」で寄稿)とセットで蓮尾先生からお声掛けいただき、寄稿させていただくことになりました。この先就活を始められる学生の皆さん、またいずれどこかでお会いするであろう京機会員の皆様に向けて、自己紹介がてらJAXAや私の仕事についてご紹介いたします。

ちなみに、JAXAについては、「わたしの仕事(4)」で藤井剛さん(たまたま、藤井さんが学生の時に就活相談に応じたり、その後、JAXAの宿舎ではご近所になったり、仕事でも絡みがあったりと、親しい友人です)がすでに寄稿されていますので、内容が被らないように工夫して書いてみます。

2. JAXA について

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency、日本語正式名は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構法(平成14年法律第161号。通称「JAXA法」)で定められた組織です。その位置付けや役割は、“宇宙科学に関する学術研究及び宇宙航空に関する基礎・基盤的な研究開発並びに人工衛星等の開発、打上げ、追跡及び運用等並びに宇宙空間を利用した事業の実施を目的として民間事業者等が行う先端的な研究開発に対する助成の業

務を総合的に行うことにより、大学等における学術研究の発展、宇宙科学技術及び航空科学技術の水準の向上並びに宇宙の開発及び利用の促進を図ること”と規定されています。要するに、宇宙航空に関する基礎研究から開発・利用に至るまで、何でもやる我が国唯一の研究機関です（平たく言えば、日本の NASA です）。図 1 に JAXA の役割を示しますが、非常に多岐に渡ります。ここでは、組織概要と、学生さんにとって気になる採用情報について簡単にご紹介します。

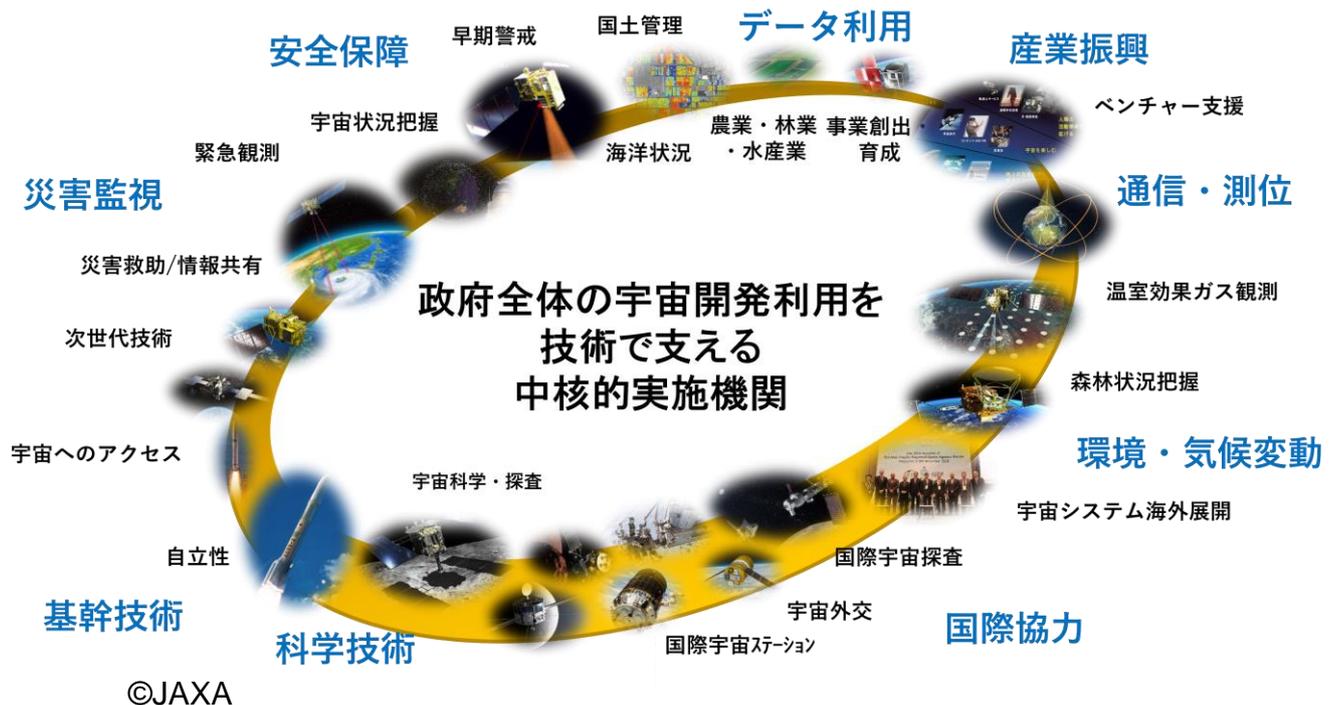


図 1. JAXA の役割

2-1. 組織概要

JAXA は、2003 年 10 月に当時の宇宙 3 機関（宇宙開発事業団 NASDA、宇宙科学研究所 ISAS、航空宇宙技術研究所 NAL）が統合して設立されました。2024 年 4 月 1 日現在の職員数は 1,635 名（技術系が 7 割、事務系が 2 割、教育職が 1 割）[1]、2024 年度予算は 1,548 億円（補正予算除く）[2]で、米国 NASA と比べると人員は約 1/10、予算は約 1/20 の規模感で活動しています。

図 2 に組織図[1]を示します。組織体制は基本的には部門制で、大多数の職員が部門に所属します。ほぼ名前から事業内容が想像できると思いますが、宇宙輸送部門はロケット関連、第一宇宙技術部門は実用衛星関連、有人宇宙技術部門は国際宇宙ステーションやそこへ物資を運ぶ宇宙ステーション補給機関連、研究開発

部門は共通基盤的研究や先進的ミッション/システムの先行研究関連、宇宙科学研究所は「はやぶさ」シリーズなどに代表される宇宙科学関連、航空技術部門は航空関連、そして第二宇宙技術部門は安全保障に係る情報収集衛星関連をそれぞれ担当しています。また、宇宙探査イノベーションハブは産学官の研究結節点として宇宙探査の Game change を実現する組織、また国際宇宙探査センターはその名の通り国際

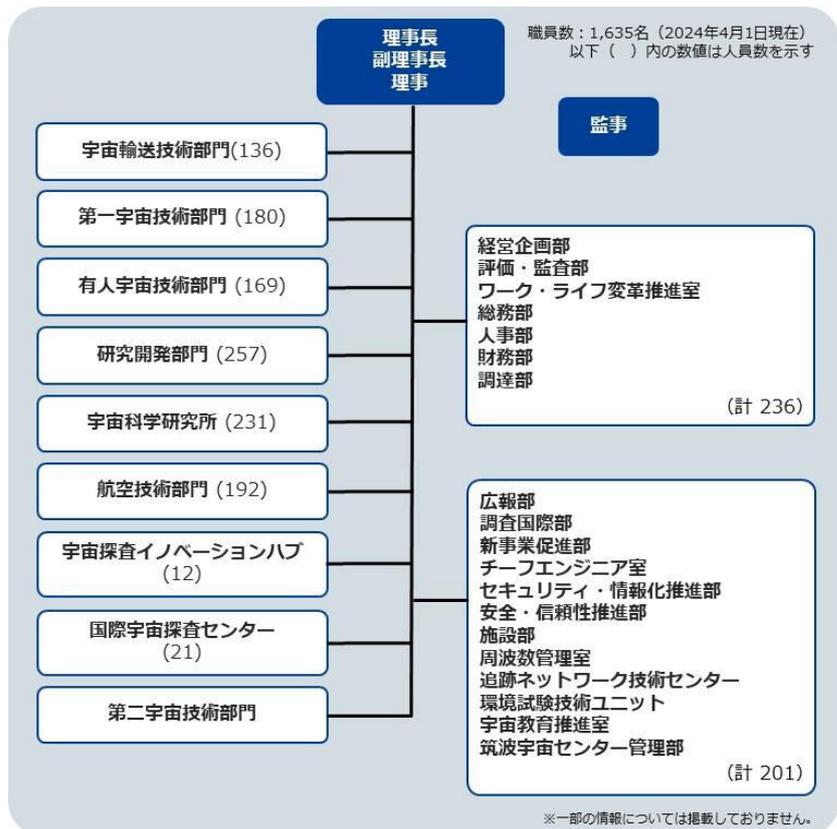


図 2. JAXA の組織図[1]

宇宙探査（主には月や火星を対象とした国際協力）を総合的に推進する組織になります。そして図 2 の右側は HQ 組織で、JAXA 横断の業務を担当しています。

各部門の印象ですが、主観半分で言うと、宇宙輸送部門は体育会系、第一宇宙技術部門はスマートインテリ系、有人宇宙技術部門は半分アメリカ（国際宇宙ステーション関連で NASA との繋がりが強いため）、研究開発部門は個性派集団、宇宙科学研究所はほぼ大学でチャレンジャー、航空技術部門はフロントランナー（昔は CFD のメッカの印象）、第二宇宙技術部門は謎に包まれたブラックホール（異動するとなかなか戻ってこない気が…。ただ話を聞くと、仕事はやり甲斐があり面白いので戻って来れないのだという噂も）という感じです。

図 3 に JAXA の事業所・施設[3]を示します。日本国内だけでもたくさんあり、海外にも各国の宇宙関連機関との調整等のため駐在員事務所が存在します。主要なところをご説明すると、本社機能は調布航空宇宙センター（最寄り駅は JR 中央線の三鷹駅）にあり航空技術部門もその中にあります、本社業務の一部は東京事務所（最寄り駅は JR 中央線のお茶の水駅）にもあり、宇宙科学研究所は相模原キャンパス（最寄り駅は JR 横浜線の淵野辺駅）、その他の宇宙輸送技術部門、第一宇宙技術部門、有人宇宙技術部門、研究開発部門は筑波宇宙センター（最寄

り駅はつくばエクスプレスのつくば駅)にあります。その他、種子島宇宙センターは液体ロケット(H-IIAやH3)の射場、内之浦宇宙空間観測所は固体ロケット(イプシロンや観測ロケット)の射場、角田宇宙センターは液体ロケット関連の試験場、能代ロケット実験場は固体ロケットや極低温流体を使った各種試験場という感じです。大半の職員は、調布航空宇宙センター、東京事務所、相模原キャンパス、筑波宇宙センターが在勤地となります。

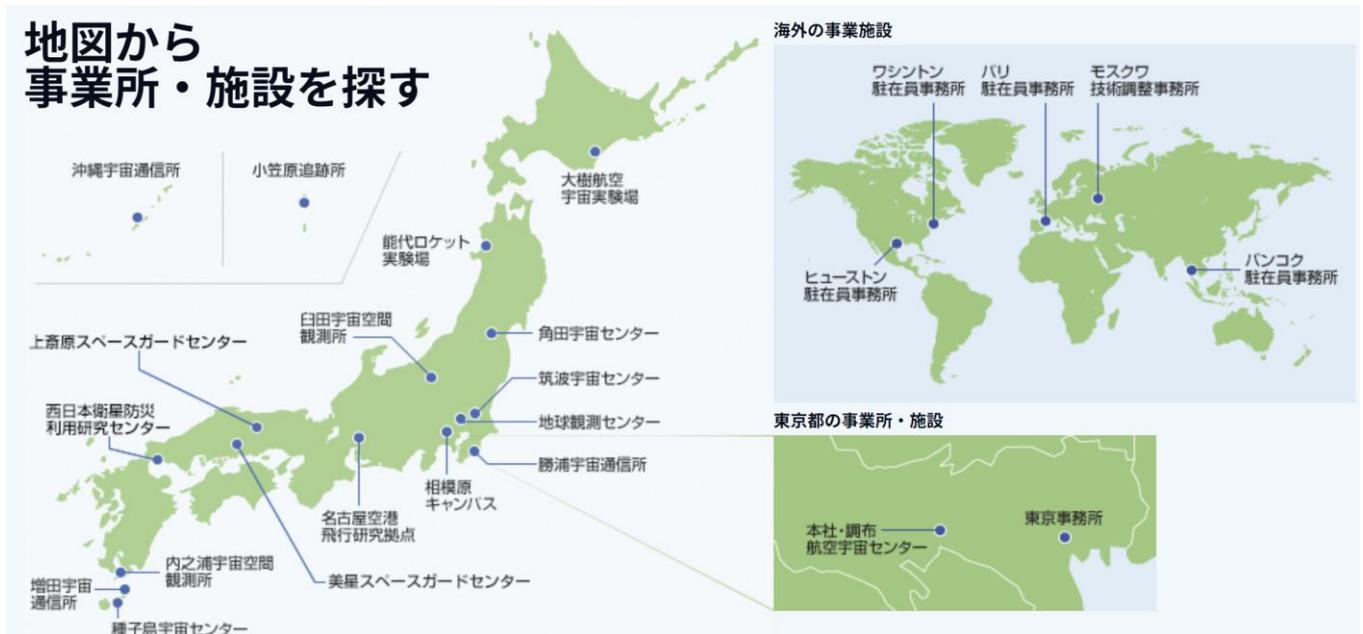


図 3. JAXA の事業所・施設[3]

2-2. 採用情報

JAXA は国立研究開発法人ということもあり、理化学研究所などと同様に博士卒が基本なのでは？と誤解されている方も時々おられますが、技術系新卒採用の大半は修士卒です。最近になって、博士卒の新卒採用も増えてきた感があります。採用枠も、プロパー職員ですと、新卒採用、既卒採用（卒業から6年以内の就業経験がある方）、キャリア採用（いわゆる中途採用で個別具体的な業務を対象に即戦力を求める枠）、教育職採用（宇宙科学研究所の教育職枠）の各枠があります。任期付きですと、宇宙航空プロジェクト研究員（いわゆるPDで最長3年）、招聘職員（高い学識と経験を有する中堅以上の専門家で最長5年）の枠があります。最近では採用情報 HP[4]も内容が充実していますので、ご興味あれば是非ご覧ください。あと、新卒採用や既卒採用をお考えの方は、何とか人脈を駆使、もしくは学会等でコンタクトして、JAXA 職員と直接話をしてみることをお勧めします。

3. わたしの仕事

現在、私は研究開発部門の第三研究ユニット（情報・計算工学を専門とする研究部隊）に所属しています。在勤地は筑波宇宙センターです。JAXA 入社以来、一貫して液体ロケットの数値流体シミュレーション技術（いわゆる Computational Fluid Dynamics、以下「CFD」）の研究開発と、それを活用したプロジェクト課題解決に従事してきました。

CFD は、自動車や航空機の設計開発では先行して利用されてきており、現在ではロケットの設計開発でも当たり前のように使われています。ただ、私が JAXA（旧 NASDA）に入社した 2002 年頃は、ほとんど使われていませんでした。当時、ロケットの設計開発はひたすら試験ベースで行われていた時代でした。実際、東西冷戦時代に行われた米国とソビエト連邦の宇宙開発競争（1957 年のソビエト連邦による人類初の人工衛星スプートニク 1 号の打ち上げに端を発する）も、両国の膨大な資金や人材を背景とした試験ベースの設計開発スタイルだったこともあり、日本もそれを踏襲していたという流れになります。一方で、私が入社する少し前、1999 年 11 月に H-II ロケット（我が国初の全段国産化を実現したロケット）8 号機の打ち上げが失敗し、海底 3000 m に落下したエンジンを回収してまで実物による徹底的な分析と試験ベースによる事故原因究明活動を進める中で、CFD 技術の必要性が認識された時期でもありました。それを受け、2001 年に専門チームが NASDA 内に発足し、私はその 1 年後、2002 年にそのチームに配属され、現在に至ります。

入社してから今日に至るまで、私の研究開発業務の目的は、液体ロケットの設計開発で使える CFD 技術を獲得することでした。私自身は、修士で宇宙往還機用エンジンノズル周りの圧縮性流体解析をしていたこともあり、入社時点で基礎知識とスキルは持っていました。これまでに私個人としては、液体ロケットエンジンシステムの動的挙動評価技術（いわゆる 1 DCAE）、推進薬タンクの液面挙動解析技術（いわゆる VOF 法ベースの自由表面流れ解析技術）の構築、液体ロケットエンジン燃焼器の冷却性能評価技術（図 4（左）：燃焼、固体熱伝導、冷却剤流れの熱-流体連成解析技術）の構築、液体ロケットエンジンターボポンプの性能評価技術（図 4（右））の構築等に従事し、液体ロケットの主要コンポーネントの CFD 技術構築は、一通り経験することができました。研究テーマは、将来プロジェクトを見据えて、潜在ニーズやリスクを先読みして設定します。また、研究期間は

3年～5年単位が基本です。(JAXA の中期計画が 5 年単位だった点が大きいです。今は 7 年になっています。) 学術研究でもありますので、国内外との共同研究、学会・論文発表も随時行いながら進めます。

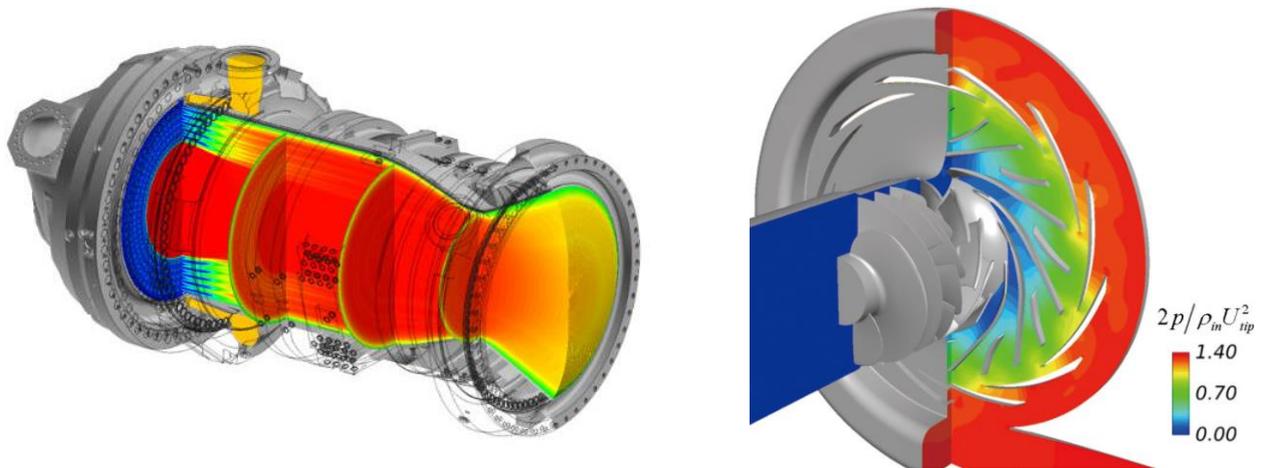


図 4. ロケットエンジン解析事例：(左) 燃焼器[5]、(右) ターボポンプ[6]

液体ロケットの設計開発で CFD の適用が遅れていた理由は、主に以下 3 点ありました (これらは世界的にも CFD の技術課題でした)：

- ①液体ロケット内部の熱流動に関する現象理解と物理数学モデルの不足
- ②CFD 用検証データの不足
- ③計算リソースの不足

これまで、これら 3 つの課題をいかに解決するか? の戦いでした。

①の課題については、2008 年から 2017 年にかけて東京大学と JAXA で実施した社会連携講座が有効でした。共同研究の一種なのですが、ALL JAPAN の研究拠点として東京大学の中に専任の教員を置いた研究室を設置しました。そこに産学官の研究者、技術者が定期的に集まり議論を交わす中で、専任の教員や JAXA 研究員が研究を推進する体制で、液体ロケットに係る現象理解と物理数学モデルの構築が確実に進みました。私も一人の研究員として参加しましたが、学術知見を積み上げる上で、いかに多くの人と議論を交わすことが大切かを学びました。

②の課題については、CFD 用検証データ取得を目的とした試験の実施と、複雑な実問題を基礎的な要素にブレークダウンし、ボトムアップ方式で検証を積み上げる (図 5) ことが有効でした。従来の試験は、設計妥当性評価が目的で、現象理解を目的とした内部の可視化や CFD の検証に繋がる定量データの取得は考えられてきませんでした。幸いにして、現在開発中の H3 ロケット 1 段エンジン LE-9

の技術実証プロジェクトでは、設計開発における CFD の導入も目的になっており、ちょうど①の活動時期と重なったこともあって、実現することができました。CFD 技術の研究開発は、実験と両輪で進めて始めて実現できることを学びました。

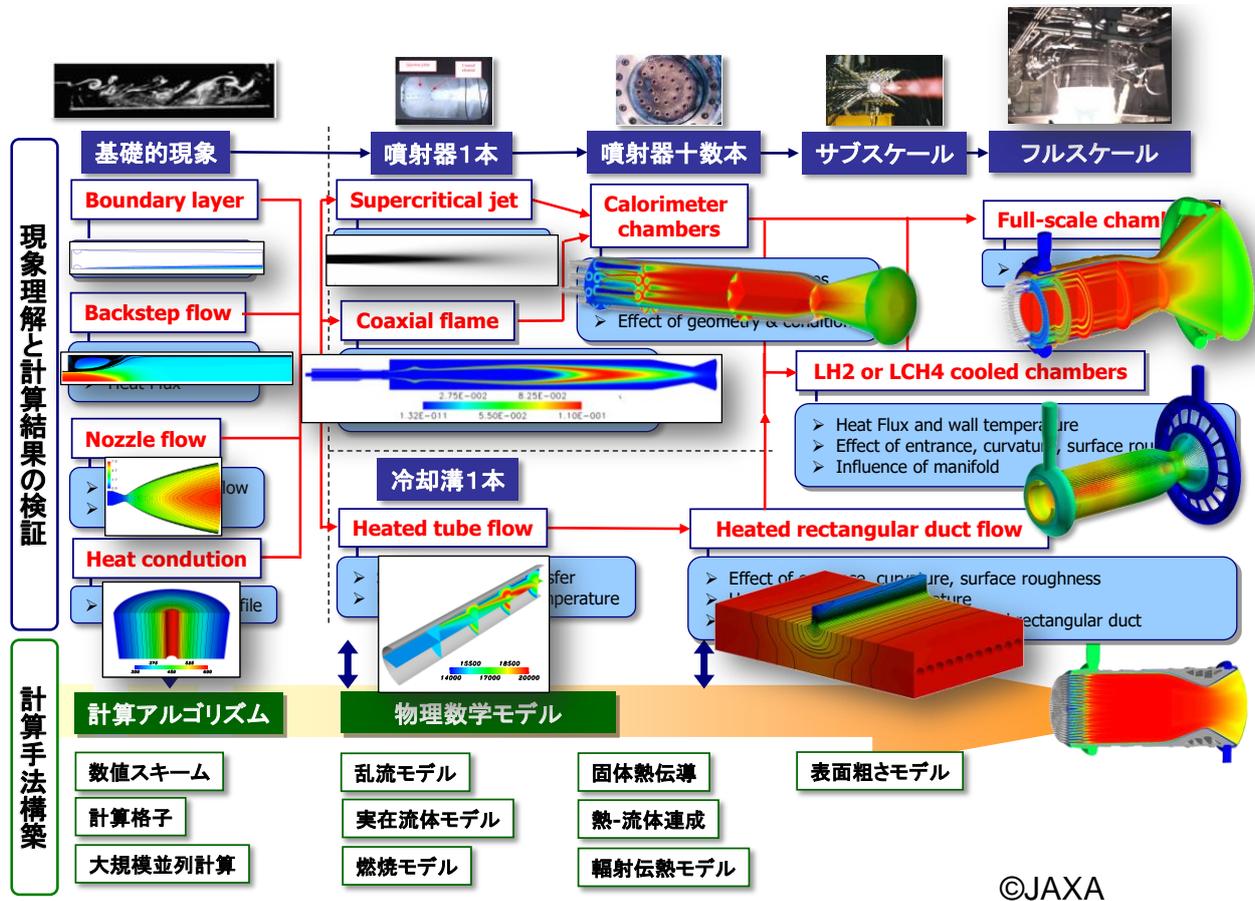


図 5. ロケットエンジン燃焼器解析技術の構築と検証プロセス例

③の課題については、液体ロケット内部が複雑形状であり、実機の形状や内在する物理現象を再現するための空間解像度を確保しようとする場合、計算格子点数が数千万点から数十億点規模となるため、2000年代前半のスーパーコンピュータでは計算が困難でした。幸いにして、ムーアの法則（1965年にゴードン・ムーア氏が提唱した“半導体の性能は18か月で2倍になる”という経験則）に従いスパコン性能の確実な向上が実現してきたことで、現在では実形状・実条件の計算が可能となっています。つまり、コンピュータの性能向上を待つ必要がありました。現在ではムーアの法則の終焉が見えつつあり、GPUや量子コンピュータなど新たなハードウェアを見据えた研究開発の必要性を強く感じ始めています。

もう1つのわたしの仕事、研究開発で獲得した CFD 技術を活用したプロジェクト課題解決ですが、社内コンサルティング業務の様な活動になります。昨今では液体ロケットの設計開発プロセス全般で CFD 技術が利用できるようになっていきますので、設計上流段階での設計妥当性評価、CFD による開発試験の代替や削減、性能向上のための設計提案、また開発後期や運用段階で出てきた不適合・不具合の原因究明や改善提案など、活躍の場面は多岐に及びます。この種の仕事は、明確に Output の期限（“明日まで”から“年度末まで”と、ケースバイケースです）が切られ、プレッシャーのかかる仕事ですが、自分が開発した CFD 技術でプロジェクトからの依頼に応えられた時は、大きな達成感が得られます。また、実はこれら実設計開発における技術課題の中から次の研究課題が見い出せる場合が多く、研究課題には事欠きません。実機を扱える JAXA だからこそ、研究者としては恵まれた環境と感じています。

私個人としては、JAXA 入社以来、H-IIA、H-IIB、H3 の各ロケットの設計開発に貢献してきました。特に H3 に関しては、構想段階からお付き合いしており、先日の 2024 年 7 月 1 日の三号機打ち上げで、初めて実用衛星の打ち上げに成功した時（図 6）は感無量でした。開発完了に向けて、気合を入れ直しているところです。

4. おわりに

本稿では、自己紹介がてら、JAXA と私の仕事についてご紹介してきました。昨今の宇宙開発は世界的に競争が激化し、また米国 SpaceX 社に代表されるように、民間企業の存在感が急速に増しています。宇宙産業は、世界全体で現在約 54 兆円規模であり、2040 年までに 140 兆円規模になると予想される成長産業です。我が国も、世界に遅れを取ることなく、産学官総力を挙げて産業規模を拡大していく必要があります。

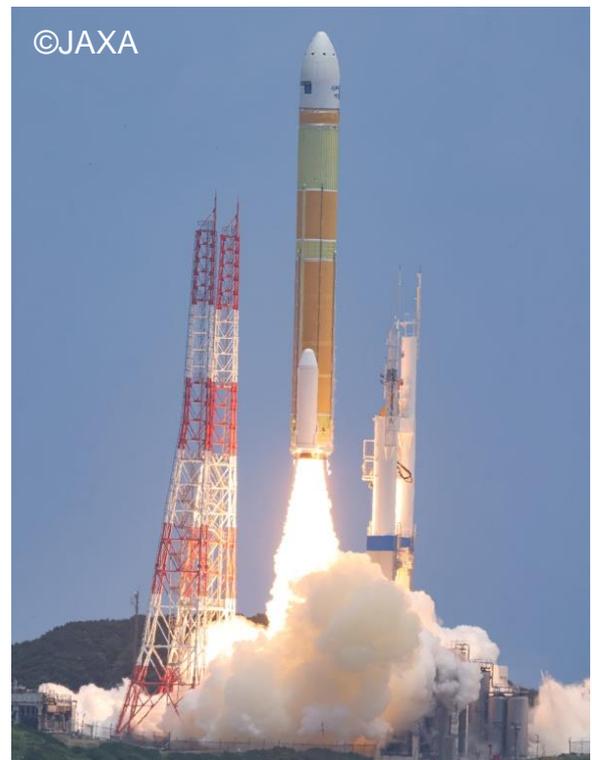


図 6. H3 ロケット 3 号機の打ち上げ

私は前述の通り修士までは他大学出身ですが、機械系だけの同窓会組織が存在し、またしっかり大学と連携して日本全国で積極的に活動しているという同窓会は聞いたことがなく、京機会は非常に希少なコミュニティーであると感じています。京機会の繋がりから、宇宙人材の発掘、また新たな共同研究や宇宙ビジネスのチャンスが生まれると面白いかも…と期待しつつ、今後の京機会活動に参加させていただきます。今後ともよろしく願いいたします。

参考 URL :

[1] https://www.jaxa.jp/about/org/index_j.html

[2] https://www.jaxa.jp/about/transition/index_j.html

[3] https://www.jaxa.jp/about/centers/index_j.html

[4] https://www.jaxa.jp/about/employ/index_j.html

[5] <https://fanfun.jaxa.jp/jaxas/no084/03.html>

[6] <https://stage.tksc.jaxa.jp/jedi/simul/index.html>

series 研究最前線 (17)

High-Performance Computing and Big Data for Understanding Lean-Premixed Hydrogen Combustion

Abhishek Lakshman PILLAI (H22/2010 卒)



「Can High-Performance Computing (HPC) and Big Data be leveraged to enable a comprehensive understanding of lean-premixed hydrogen combustion?」

1. Introduction

Modern numerical simulation methods, such as Large-scale Direct Numerical Simulation (DNS) for the prediction of complex flow and transport phenomena in the turbulent combustion of hydrogen (H_2) have become realizable with the advent of massive High-Performance Computing (HPC) infrastructure like the supercomputer “FUGAKU” in Japan. Given their immense computing capacity, supercomputers can play a pivotal role in the development of next-generation clean gas turbine combustors powered by carbon-free fuels like hydrogen, which can help Japan meet its target of Net Zero CO_2 emissions by 2050. The Lean-Premixed combustion of H_2 which offers advantages like higher thermal efficiencies and low NO_x emissions (due to lower flame temperatures) is a viable approach to develop next-generation clean combustion technologies. However, insight is lacking about the complex physics of flame-turbulence interactions in swirling lean-premixed H_2 flames, which is relevant for developing accurate turbulence and combustion models used in numerical simulations. With this objective in mind and as a first step towards turbulent combustion modeling of lean-premixed swirling H_2 flames, a large-scale DNS database, AKA “Big Data”, is generated using the supercomputer FUGAKU at RIKEN Center for Computational Science, Japan.

2. Computational Configuration and Numerical Methods

The configuration used in this study mimics a lab-scale low-swirl burner (LSB) used at JAXA by Shoji et al. [1]. The LSB has an inner exit diameter of $d = 35$ mm. A swirler assembly comprising an annular vane swirler and a central channel, is recessed from the burner exit plane in the upstream direction at a distance of 43 mm as shown in Fig. 1. The annular swirler is equipped with 12 curved blades, each inclined at 37° with respect to the burner axis. A perforated screen with a diameter of 25 mm is fitted to the bottom of the vane swirler to enable a portion of the reactants to bypass the swirl annulus, and thus remain unswirled. The geometric swirl number of the annular vane swirler is 0.39. Similar to Shoji et al.'s experiment [1], unburned swirling H_2 -air premixed gas at an equivalence ratio of $\phi = 0.45$ and temperature of 300 K, flows out of the burner exit into air at 300 K and standard atmospheric pressure. The bulk velocity of the gas mixture at the burner exit is 15 m/s. The DNS domain measures 1000 mm \times 560 mm \times 560 mm in the x -, y - and z -directions, respectively. The DNS is performed on a non-uniform staggered Cartesian grid featuring 1800 grid points in the streamwise x -direction, and 1800 grid points each in the y - and z -directions as well. The minimum grid spacing used in the DNS grid is $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 50$ μm which ensures the flame thickness of this lean-premixed H_2 flame is resolved by at least 9 grid cells (since the laminar flame thickness of a premixed H_2 -air flame is about 450 μm for $\phi = 0.45$ at an unburned H_2 -air

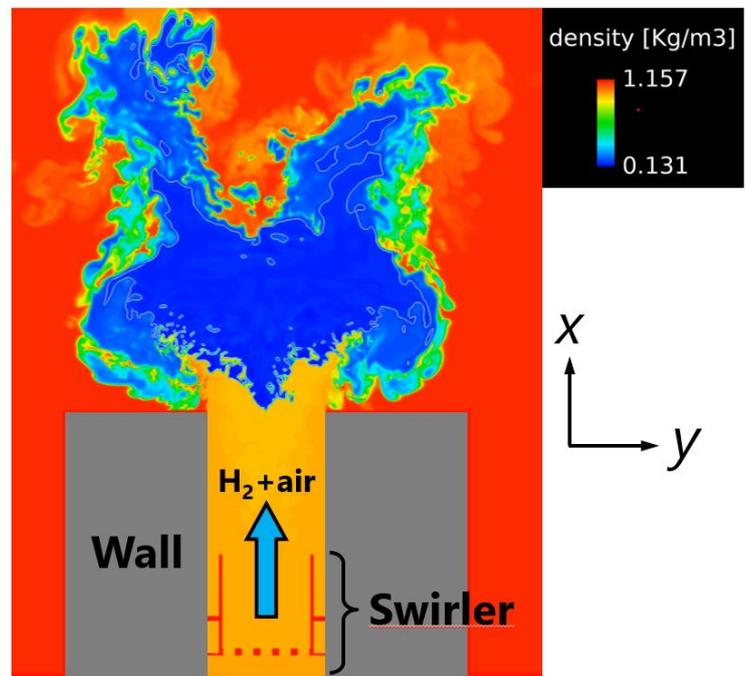


Fig. 1 Instantaneous distribution of density in the central x - y plane (i.e., $z = 0$ mm) predicted by the large-scale DNS. The white isoline denotes the reaction progress variable (RPV), $c = 0.858$, which corresponds to the peak mean heat release rate value and is representative of the flame-front or reaction zone.

premixed gas temperature of 300 K [2]).

The DNS is performed using an in-house code called FK³ [3], which employs a pressure-based semi-implicit solver for compressible flows, whose algorithm comprises a fractional-step method [4]. The governing equations of DNS solved using our code are the standard conservation equations of mass, momentum, enthalpy, and species mass fractions for multi-component reacting flows. Combustion of H₂ is modeled using a detailed chemical kinetics mechanism comprising 20 chemical species and 73 elementary reactions [5], and the differential diffusion of chemical species and heat (i.e., the non-unity Lewis number effect) is considered by solving the Maxwell-Stefan system of equations to compute the diffusion velocities of each chemical species as described in [2]. Details of these governing equations, the FK³ code, and the numerical schemes used for the spatial and temporal discretization can be found in [2,3]. The instantaneous distribution of density in the central x-y plane of the computational domain obtained from the DNS is depicted in Fig. 1 along with the isoline of the reaction progress variable, $c = 0.858$ (explained in Section 3) corresponding to the peak mean heat release rate. It is evident that a lifted flame is formed above the burner exit that spreads radially as it swirls, and interactions of the flow-field turbulence with the flame-front, produce deformations/wrinkling of the flame surface. The lifted flame can freely propagate upstream (towards the burner exit) and stabilizes aerodynamically at the axial location where the local flow velocity equals the flame's turbulent burning velocity.

3. Results and Discussion

Before performing any analysis on the Big Data, it is essential to validate the DNS against experimental measurements to assess the DNS's fidelity. Therefore, as depicted in Fig. 2, the radial profiles of the time-averaged axial velocity (U) and radial velocity (V) components predicted by the DNS are compared with the corresponding experimentally measured [1] velocity component profiles, at different axial distances from the burner exit plane. Reasonably good agreement is found between the DNS and experiment data, and hence it is safe to say that

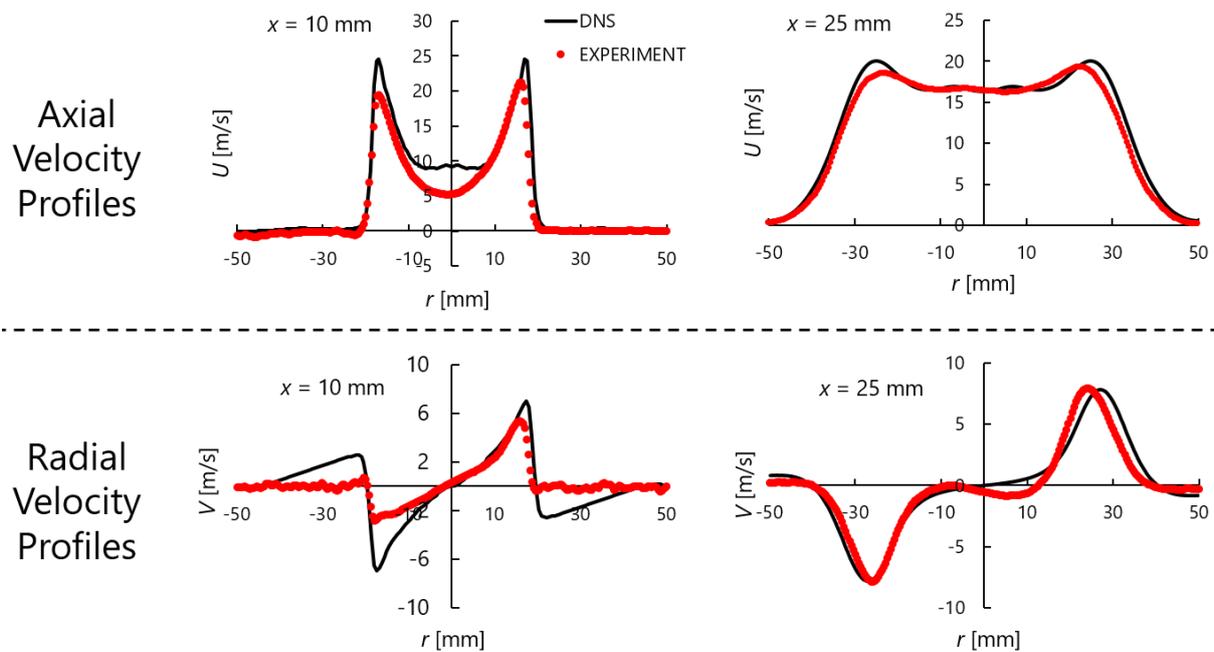


Fig. 2 Comparisons of radial profiles of time-averaged axial velocity (top row) and radial velocity (bottom row) between the DNS predictions and corresponding experimental data at different axial distances ($x = 10$ mm and 25 mm) from the burner exit.

the DNS accurately predicts this lab-scale lean-premixed swirling H_2 flame, including features such as the flame's spread and the radial locations of the velocity components' peak values.

Following the DNS validation, focus can now be shifted on analyzing the flame structure in some detail. When talking about flame-turbulence interactions, we are mainly concerned with the phenomena occurring close to and within the flame-front (i.e., the reaction zone of the flame) and a comprehensive characterization of the flame-front structure is helpful in this regard for robust turbulent combustion modeling. To do this, the flame-front location first needs to be identified, which can be directly done using the heat release rate (HRR) in DNS. However, when performing Large-Eddy Simulations (LES) or Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) simulations which are computationally much faster and cheaper than a DNS, the information about HRR or reaction rate in the flame is not readily available. Instead, the HRR or reaction rate in LES and RANS simulations are modeled in terms of a more basic statistical quantity called the reaction progress variable (RPV) denoted by c . The RPV, c , is a characteristic non-conserved active scalar quantity which quantifies the progress of chemical reactions in the inhomogeneous gas mixture of a flame, and is defined using the mass fraction of

water vapor, H_2O (i.e., the product of H_2 combustion), in this study as follows [2]:

$$c = (Y_{H_2O} - Y_{H_2O,u}) / (Y_{H_2O,b} - Y_{H_2O,u}) \quad (1)$$

where Y_{H_2O} is the mass fraction of H_2O in a given computational cell within the computational domain, $Y_{H_2O,u}$ is the mass fraction of H_2O in the unburned H_2 -air gas mixture introduced into the LSC, so $Y_{H_2O,u} = 0$ in this study, and $Y_{H_2O,b}$ is the mass fraction of H_2O in the fully burned gas mixture. Knowledge of the statistical behavior of RPV is necessary for developing computationally efficient turbulent-combustion models and closures for reaction rate that are used in LES and RANS simulations. Hence, all further analysis of the flame structure is based on the RPV.

Coming back to the identification of the flame-front location, it is possible to compute the correlation between mean heat release rate (HRR) in the flame-front and the RPV. This is illustrated in Fig. 3, which shows the variations of mean values of the HRR conditioned on the reaction progress variable (RPV), c , at various axial distances from the burner exit as well as for the entire flame (Global). It is evident that the value of c corresponding to the peak mean HRR varies minutely depending on the axial location, but is usually within $0.84 < c < 0.88$, and the value of RPV c corresponding to the peak mean

HRR when the entire flame is considered (i.e., the solid black line in Fig. 3), is $c = 0.858$. Therefore, a c value of 0.858 lies in the flame's reaction zone (flame-front) and can be used as a marker to identify the flame-front location. The iso-surface of RPV $c = 0.858$ which is representative of the flame-front is then used to characterize the different combustion modes

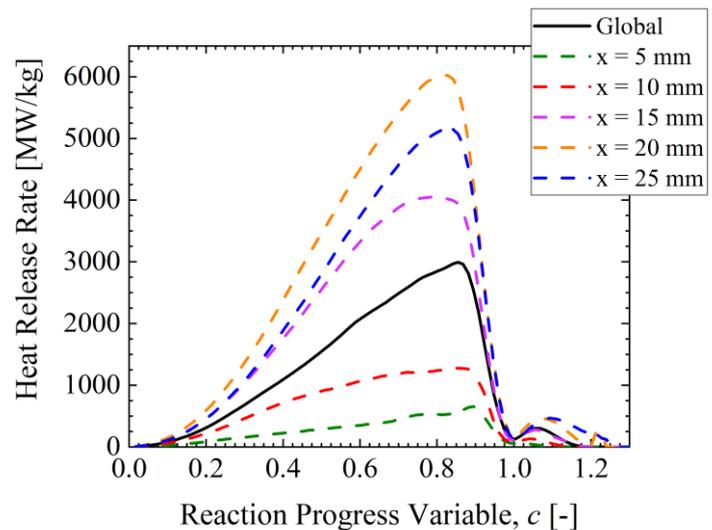


Fig. 3 Variations of mean values of heat release rate conditioned on reaction progress variable c at various axial distances (x -locations) and for the entire flame (Global).

occurring in this swirling H_2 flame using a parameter called the Flame Index, FI , whose definition follows that of Briones et al. [6]:

$$FI = 0.5 \times (Z - Z_{st}) / (|Z - Z_{st}|) (1 + (\nabla Y_{H_2} \cdot \nabla Y_{O_2}) / (|\nabla Y_{H_2}| \cdot |\nabla Y_{O_2}|)) \quad (2)$$

where Y_{H_2} and Y_{O_2} are the mass fractions of H_2 and O_2 , respectively, Z is a characteristic conserved scalar called the mixture fraction which measures the local fuel/oxidizer ratio and characterizes the inhomogeneity in the composition of the mixture of reactants and products, and Z_{st} is the value of Z corresponding to the stoichiometric fuel-oxidizer mixture ($Z_{st} = 0.0283$ for H_2). Figure 4 depicts the iso-surface of $c = 0.858$ colored by the Flame Index, FI . An FI value of -1 indicates the presence of lean-premixed combustion mode, while a value of 0 indicates the non-premixed combustion mode. While combustion is found to occur predominantly in the lean-premixed mode (blue regions), some local regions of non-premixed combustion (red regions) are present in the shear layers as a consequence of spatial inhomogeneities in the mixture fraction (see Fig. 5(a)) caused by the flame stretch-induced preferential diffusion of light chemical species such as H_2 , and mixing/entrainment of the ambient air into the swirling H_2 flame's turbulent shear layers.

To understand the preferential diffusion effect of H_2 in more detail, the iso-surface of $c = 0.858$ (viewed from the unburned gas side) colored by the ratio of local mixture fraction Z to the mixture fraction of the unburned H_2 -air mixture, Z_{in} , flowing out of the burner exit ($Z_{in} = 0.0128$) is depicted in Fig. 5(a). It can be seen that the ratio Z/Z_{in} is greater than 1 in certain regions and less than 1 in other regions,

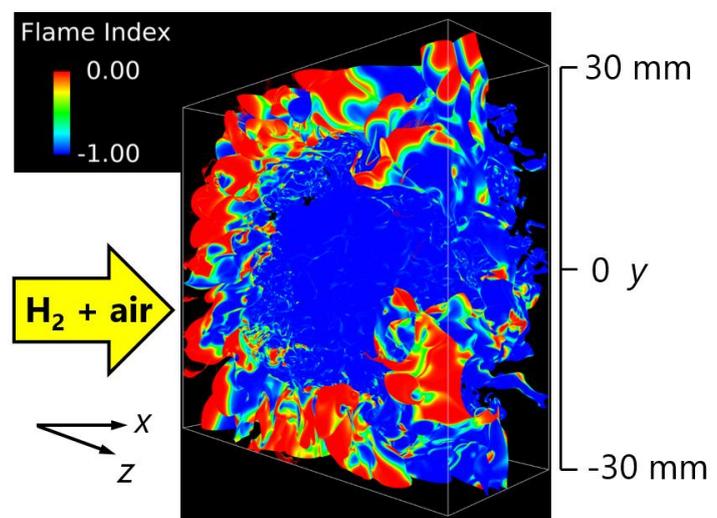


Fig. 4 Iso-surface of RPV, $c = 0.858$ colored by Flame Index, FI . x is the streamwise direction.

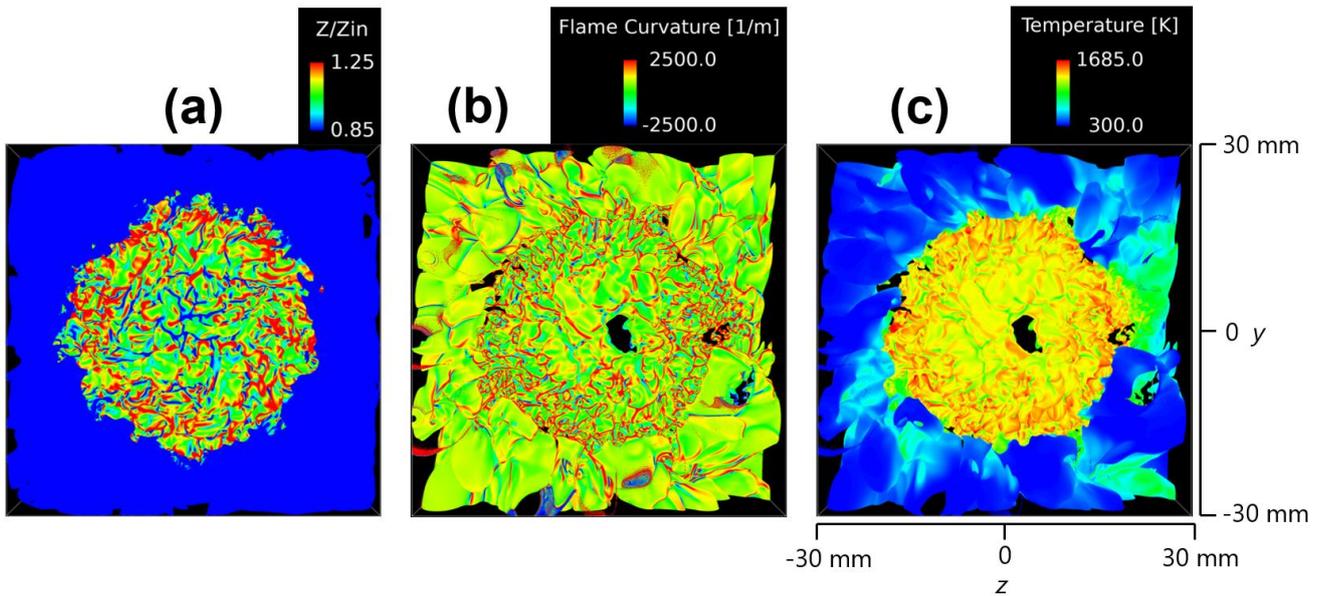


Fig. 5 Iso-surface of RPV, $c = 0.858$ colored by (a) ratio of local mixture fraction Z to the mixture fraction of the unburned H_2 -air mixture at burner exit Z_{in} , (b) Flame Curvature κ , and (c) Temperature T (Adiabatic flame temperature = 1530 K).

due to a phenomenon called preferential diffusion, which arises from the stretching of the flame-front due to its interaction with the flow-field turbulence. Preferential diffusion refers to the molecular diffusion of a highly diffusive chemical species, such as H_2 in this study, from the unburned to the burned gas side causing it to converge across the regions where the flame-front is convex towards the unburned gas side (i.e., upstream of the flame-front), and diverge across the concave regions of the flame-front. In Fig. 5(b), the same iso-surface of $c = 0.858$ is colored by the Flame Curvature κ , and a positive value of κ denotes a convex flame-front while a negative κ denotes a concave flame-front. So from Fig. 5(a) and 5(b), it can be seen that $Z/Z_{in} > 1$ at the positive curvature regions of the flame-front, and $Z/Z_{in} < 1$ at the negative curvature regions of the flame-front. This results in an increase and decrease, respectively, in the burned gas temperature, as shown in Fig. 5(c), due to a higher H_2 concentration (higher Z) at the positive curvature (convex) flame-front regions, and lower H_2 concentration (lower Z) at the negative curvature (concave) flame-front regions. Additionally, super-adiabatic flame temperatures (i.e., temperatures > 1530 K, which is the adiabatic temperature of H_2 -air flame at $\phi = 0.45$) are observed at certain convex flame-front regions owing to high H_2 concentrations in those regions resulting in intense heat release.

4. Conclusions and Future Work

Large-scale Direct Numerical Simulation (DNS) of a laboratory-scale lean-premixed ($\phi = 0.45$) swirling H_2 flame has been performed on the supercomputer FUGAKU at RIKEN, Japan. Fidelity of this DNS has been established by comparing the experimental measurements of velocity statistics with the corresponding DNS predictions. Interrogation of the generated DNS database, AKA Big Data, reveals that while combustion mostly occurs in the lean-premixed mode, some localized regions with non-premixed combustion mode occur in the turbulent shear layers of the swirling premixed H_2 flame due to flame stretch-induced preferential diffusion of H_2 , and mixing/entrainment of the ambient air into the flame. Preferential diffusion of H_2 also influences the flame structure, such as the mixture fraction values in the reaction zone exceeding that on the unburned gas side along the positive curvature regions of the flame-front and vice-versa, and the occurrence of localized super-adiabatic temperatures in the positive curvature regions of the flame-front. These findings have major implications for the turbulent combustion modeling of lean-premixed H_2 flames and therefore, the future work will involve further interrogation of the Big Data for turbulence and scalar statistics, such as the Probability Density Functions (PDFs) and joint-PDFs of the reaction progress variable, c , and the mixture fraction, Z , and their gradients as they are relevant to the modeling of reaction rate and other closures used in LES and RANS simulations.

Acknowledgments

This research used the computational resources of supercomputer FUGAKU provided by the RIKEN Center for Computational Science (Project ID: hp230234), and was partially supported by JSPS KAKENHI (Grant Numbers 22H00192 and 23KK0069).

References

[1] T. Shoji, Y. Iwasaki, K. Kodai, S. Yoshida, S. Tachibana, T. Yokomori, "Effects of flame behaviors on combustion noise from lean-premixed hydrogen low-swirl

flames,” *AIAA J.*, vol. 58, no. 10, pp. 4505–4521, 2020.

[2] R. Kai, T. Tokuoka, J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose, “LES flamelet modeling of hydrogen combustion considering preferential diffusion effect,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 29, pp. 11086-11101, 2023.

[3] A. L. Pillai, S. Inoue, T. Shoji, S. Tachibana, T. Yokomori, R. Kurose, “Investigation of combustion noise generated by an open lean-premixed H₂/air low-swirl flame using the hybrid LES/APE-RF framework,” *Combust. Flame*, vol. 245, 112360, 2022.

[4] V. Moureau, C. Bérat, H. Pitsch, “An efficient semi-implicit compressible solver for large-eddy simulations,” *J. Comput. Phys.*, vol. 226, pp.1256–1270, 2007.

[5] J.A. Miller, C.T. Bowman, “Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 15, pp. 287–338, 1989.

[6] A. M. Briones, S. K. Aggarwal, V. R. Katta, “A numerical investigation of flame liftoff, stabilization, and blowout,” *Phys. Fluids*, vol. 18, 043603, 2006.

Profile

Assistant Professor, Thermal Science and Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering and Science, Graduate School of Engineering, Kyoto University.

Born in Nagpur City, India in 1988. Graduated from the Department of Mechanical Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology, India with a Bachelor’s degree in 2010. Obtained his Master’s degree in Aerospace Engineering from the Indian Institute of Technology Bombay, India in 2013. Completed the Doctoral course in the Department of Mechanical Engineering and Science, Graduate School of Engineering, Kyoto University in 2018 to obtain his Ph.D. degree. Then worked as a Program-Specific Researcher in the Graduate School of Engineering, Kyoto University. Attained the current position of Assistant Professor in 2019.

Laboratory homepage: <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp>

関西支部 第13回京機会テニスカフェ報告書

成瀬忠史 (S47/1972卒)

日時：令和6年6月15日(土) 13時～17時30分

場所：(テニス) 島津製作所三条工場内テニスコート(屋内2面、屋外2面)

〒604-8511 京都市中京区西ノ京徳大寺町1番地

<http://www.shimadzu.co.jp/aboutus/company/access/kyoto.html>

(懇親会) 飲茶・点心 美龍(メイロン) TEL(075)-841-4765

〒604-8472 京都市中京区西ノ京北壺井町88-1 二条プラザ1F

次第：PART1 紅白対抗ダブルス戦

PART2 決勝トーナメント・親睦試合

参加者：20名

趣旨：テニス愛好の皆さんに、プレーを通じて交流の機会を増やす目的で、平成28年1月からテニスカフェを立ち上げ、開催地を神戸と京都に適宜交替しながら、これまで、兵庫・京都・大阪から80歳代から現役30歳代までの方々が参加いただいております。今年も、島津製作所様のご好意で6月に京都会場での開催といたしました。今回は、学生会 SMILE の会員にも募集をかけ、学生会員2名を含む18名が参加、累積参加者としては200名を超え211名になりました。これまでに総勢70名(女性12名含む)が参加いただく賑やかなイベントになってまいりました。今後も、年2回程度、関西一円(兵庫・京都・大阪他)でこれまでテニスを楽しんでこられた方々はもちろん、関西出張中の方、大学研究室の方や学生さんまで、テニスレベルにかかわらず、参加していただきたいと考えております。そのため、京機会員であるかないかに拘わらず、神戸や京都の地域のテニス仲間にも声をかけながら、開催を企画していきたいと思っております。

実施結果：前週に九州や四国が梅雨入りし、近畿もいよいよ梅雨入りかと懸念されましたので、PART1 紅白対抗戦、PART2 個人戦決勝トーナメント&親睦試合ともに屋内と屋外コートを併用して無事に実施、新たな京機会メンバー4名の初参加者と共に、大いに盛り上がり、元気いっぱいプレーを楽しんで

いただくことができました。アフターテニスの懇親会も有志 10 名（うち院生を含む京機会員 9 名）がコート近くの会場に移動し、楽しい交流の時間を持つことができました。終了したとたんに雨が降り出しましたが、再会を誓い帰宅の途につきました。

次回のご案内：次は、11 月頃の土曜日午後には神戸の会場を確保する予定であります。テニス愛好の皆さんのご参加をお待ちしています。

| 紅組 | | 白組 | |
|--------------|------|--------------------------|------|
| お名前 | 個人番号 | お名前 | 個人番号 |
| 本地 美紀 | 1 | 成瀬 千鶴子 (JOY/瀬戸TC) | ① |
| 成瀬 忠史(S47卒) | 2 | 徳岡 哲夫(S45卒) | ② |
| 藤本 知司(S49卒) | 3 | 土井 誠(S52卒) | ③ |
| 富田 直秀(S54卒) | 4 | 北野 幸彦(S56卒) | ④ |
| 寺崎 肇(S58卒) | 5 | 山下 託嗣(H9卒) | ⑤ |
| 野口 峻(R6卒) | 6 | 北山 大智(R6卒) | ⑥ |
| 黒田 誠(今津) | 7 | 石鍋 一史(JOY) | ⑦ |
| 松原 守(住吉) | 8 | 古佐小 慎也(瀬戸) | ⑧ |
| 茶谷 真希(今津) | 9 | — | ⑨ |
| 本地 眞一郎(S45卒) | 見学 | 松原 美千代(住吉) | 見学 |

対抗戦成績

| 勝数 | |
|----|----|
| 紅組 | 白組 |
| 9 | 7 |

個人戦上位者

| |
|--------------|
| 1位：(山下)・(黒田) |
| 2位：(土井)・(茶谷) |
| 3位：(北野)・(松原) |

斜体は女性、丸囲み数字は白組

戦績とスナップ

第13回 テニスカフェ 紅白ダブルス対抗戦 2024年6月15日(土)

組み合わせ表 紅:左列、白:右列、丸囲み数字

京都地区:島津製作所三条工場内テニスコート

| 試合 | 第一コート (屋内西) | | 第二コート (屋内東) | | 第三コート (屋外西) | | チーム勝数 | |
|------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------|----|
| | 紅組 | 白組 | 紅組 | 白組 | 紅組 | 白組 | 紅組 | 白組 |
| 第①試合 | 本地・成瀬 | 成瀬・徳岡 | 藤本・富田 | 土井・北野 | 寺崎・野口 | 山下・北山 | 1 | 1 |
| 第②試合 | 黒田・松原 | 石鍋・古佐小 | 本地・茶谷 | 成瀬・北山 | 成瀬・藤本 | 徳岡・土井 | 1 | 2 |
| 第③試合 | 富田・寺崎 | 北野・山下 | 野口・松原 | 北山・古佐小 | 黒田・茶谷 | 石鍋・徳岡 | 2 | 1 |
| 第④試合 | 本地・藤本 | 成瀬・土井 | 成瀬・寺崎 | 徳岡・山下 | 富田・茶谷 | 徳岡・古佐小 | 1 | 1 |
| 第⑤試合 | 野口・黒田 | 北野・石鍋 | 富田・野口 | 北山・石鍋 | 寺崎・松原 | 山下・古佐小 | 2 | 1 |
| 第⑥試合 | 成瀬・松原 | 北野・土井 | 本地・黒田 | 成瀬・石鍋 | 藤本・茶谷 | 土井・北山 | 2 | 1 |

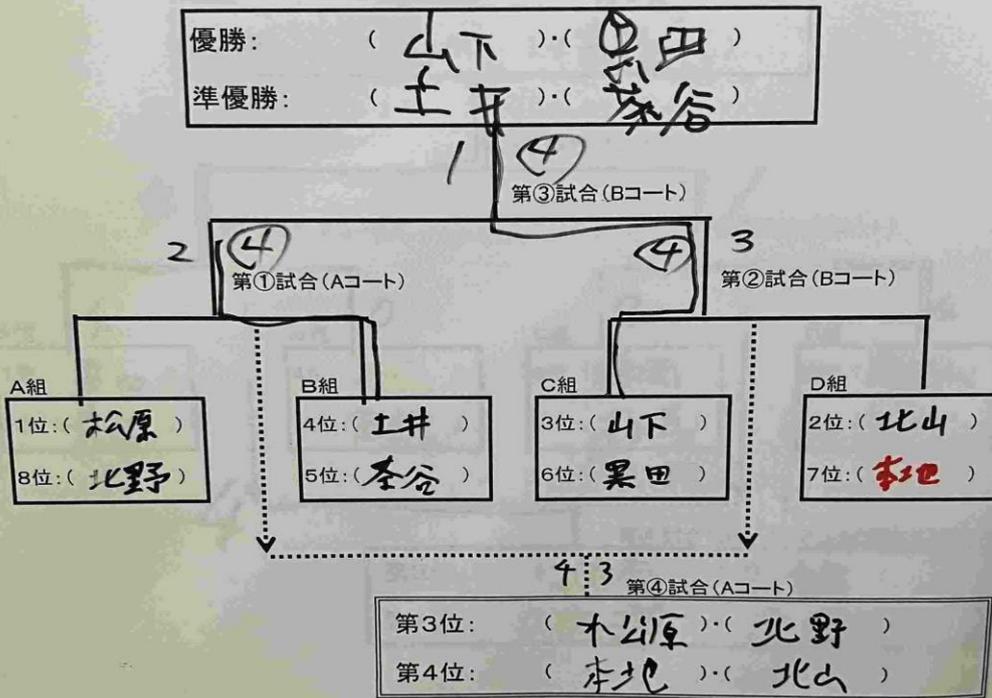
一人3~4試合出場していただきます。

総数
紅組 9
白組 7

京都地区: 島津製作所三条工場内テニスコート

個人戦決勝トーナメント組合せ表

●決勝トーナメントは、2面(A,Bコート)使用、4ゲーム先取、ノーアド、セルフジャッジ



親睦試合組合せ・順番表

●親睦試合は、C,Dコートを使用、お互いに誘い合って、17:00過ぎまでお楽しみください。

| | | | |
|---------|-----------|-----|-----------|
| 第一試合 E組 | 9位: (佐藤) | 対F組 | 11位: (石川) |
| 16 | 17位: (藤本) | 14 | 15位: (幸い) |
| 第二試合 G組 | 10位: (水) | 対H組 | 12位: (寛田) |
| 15 | 16位: (佐藤) | 13 | 14位: (石川) |



優勝 山下・黒田ペア

準優勝 土井・茶谷(右端)ペア



全スケジュールを終え、コート上で集合写真を撮りました

以上