

インペリアル・カレッジ・ロンドンでの滞在記

Diary from Imperial College London

後藤田 浩 (立命館大学)

Hiroshi GOTODA (Ritsumeikan University)

e-mail: gotoda@se.ritsumei.ac.jp

立命館大学 学外研究員制度を利用して、2012年10月から英国インペリアル・カレッジ・ロンドン 化学工学科 (Department of Chemical Engineering, Imperial College London, United Kingdom) で Visiting Academics として研究活動を行っている。海外レターとして、インペリアル・カレッジ (IC) での研究滞在記をロンドンから発信させて頂く。

1. インペリアル・カレッジ・ロンドン

化学工学科

ロンドン中心部のサウスケンジントン (South Kensington) は高級住宅エリアとしてよく知られているが、1862年のロンドン万国博覧会の跡地に築かれた自然史博物館 (National History Museum)、科学博物館 (Science Museum)、Victoria 女王の夫 Albert 公に捧げられた演劇場 ロイヤル・アルバート・ホール (Royal Albert Hall)、Edward 7世によって設立された王立音楽大学 (Royal College of Music) など、英国の文化・歴史を発信するエリアでもある (図1)。その中心に位置する IC は、2007年にロンドン大学から独立し、Imperial College of Science, Technology and Medicine を正式名とした3学部 (医学部、理学部、工学部) 22学科から構成される理系大学となり、今日の英国のみならず世界を代表する研究拠点大学の地位を築いている。

私が所属する化学工学科は王立音楽大学の隣りに位置し (図1)、航空工学科と一緒の ACE Extension, Bone Building にある。Royal College of Science 化学科の後身である化学工学科の現在の教員数は37名であり、化学工学科は主に7つの研究グループを構成している。生体、マルチスケール、持続可能エネルギー、分子材料領域を対象とした化学工学のトピックを反応・触媒、材料、物性・解析、輸送・分離、システムをキーワードにして基礎から応用まで幅広く取り扱っている。私の専門は燃焼工学ではあるが、マルチスケールの相界面現象の物理を扱う研究グループ: Complex Multiphase System Group (CMSG) [3]で、相界面現

象の非線形ダイナミクスの理論的・数値的研究を進めている。

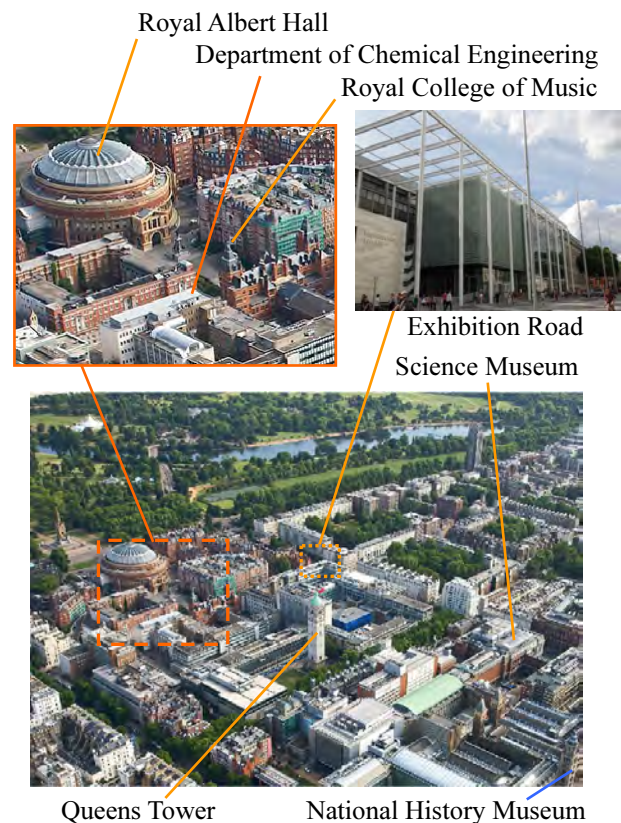


図1 South Kensington エリアと IC [1]

化学工学科は、英国政府だけでなく、石油会社からの多額の研究助成を受けて、CO₂回収・固定化技術に関する研究・教育に力を注いでいる印象を強く受ける。ACE Extension の中央部にあるパイロットプラント設備 (図2) は CO₂回収の研究のみならず、化学工学科の学生の実習にも使用されている。また、博士課程に在籍する学生の教育の一環として、各研究室から1名だけ選ばれた博士課程の学生が研究室を代表して、年に1度の研究室対抗プレゼンテーションで研究内容を競い合う。上位3名に優秀賞が授与され、博士課程の学生を奨励する教育が積極的に行われている。

図2 CO₂回収用のパイロット プラント設備[2]

2. Complex Multi phase System Group での研究活動

Complex Multiphase System Group (CMSG) は、化学工学科では非常に珍しく、応用数学を専門とする Prof. Serafim Kalliadasis によって運営され、ポスドク4名、博士課程4名で構成されている(図3)。メンバーの国籍はイギリス、ドイツ、スイス、スペイン、ギリシャ、ロシア、インドなど様々で、非常に国際性が強く、私には大変居心地の良い研究環境である。グループ内では、密度汎関数理論を用いたコロイドやキャピラリーの濡れのダイナミクス、固液境界線近傍の流動ダイナミクス、複雑な気液界面の運動を記述する非線形発展方程式の分岐解の解明などを研究対象に、ミクロからマクロレベルまでの様々な相界面のダイナミクスを理論的・数値解析的に明らかにしようとしている。グループ内のミーティングは毎月行われ、Visiting Academics の身である私も例外ではなく、他のメンバーと同様に、研究の進捗状況をプレゼン形式で伝えている。メンバーの約8割が各国の数学科・物理学科出身であることから、グループ内のディスカッションでは難解な数式が多く、機械工学科出身の私には相当厳しいものもある。

図3 CMSG の集合写真
(左端: Prof. Serafim Kalliadasis)

私は非線形発展方程式の解構造に関する3つの研究課題に携わっている。具体的には、

① 反応拡散系のパターン形成、高速の反応面を伴った位相乱流、固相と気相に挟まれる薄い液相の変形運動を記述する Kuramoto-Sivashinsky (KS)/generalized KS 方程式の解の時空構造 (図4) [4], [5].

② 固相表面粗さから生成される外部ノイズの影響を考慮に入れた Noisy-KS 方程式の解の時空構造 (図4)

③ 磁場 Rayleigh-Bénard 対流を記述する非線形力学系モデル[6]に関連した Coupled Lorenz 方程式の解の決定論的性質

の解明などを力学系理論をベースとした複雑系数理学の視点から取り組んでいる。研究課題①, ②については、Prof. Kalliadasis と Dr. Marc Pradas, ③については、数学科に所属する Sebastian Krumscheid も含めて共同で研究を進めている。

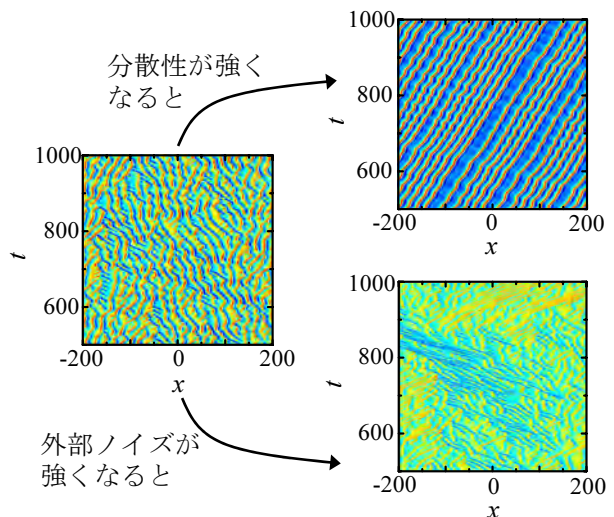


図4 gKS/Noisy-KS 方程式の解の時空構造

3. IC 滞在中における国内外での研究活動

上述の研究トピック以外に、輻射熱損失の影響を受けた火炎面挙動の数値シミュレーション[7]や宇宙航空研究開発機構 航空本部 推進システム研究グループ 立花 繁 主任研究員との共同研究として進めているガスタービン燃焼不安定のダイナミクスの解明[8], [9]も IC 滞在中に進めている。輻射熱損失の影響を受けた火炎面挙動の分岐構造に関する研究内容を11月にアメリカ サンディエゴで開催された第65回 米国物理学会 流体力学部門 年次大会 (65th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics) の「カオス、フラクタル、力学系II」の

セッションで発表した。このとき、同セッションで熱音響不安定を記述する非線形力学系の分岐構造を発表していた英国 ケンブリッジ大学 工学部 Dr. Matthew Juniper が、ガスタービン燃焼不安定の研究内容[8]を紹介していた[10]。そのことがきっかけとなり、1月にケンブリッジ大学 工学部燃焼グループの招待セミナーで約1時間の研究発表を行った(図5)。セミナー終了後にペンブローク・カレッジ (Pembroke College) の食堂で、Dr. Juniper と彼のポスドク、博士課程の学生らと一緒に昼食をとった。映画「ハリーポッター」の魔法学校の食堂のモデルとなったオックスフォード大学 グレート・ホールと同様に、私が昼食をとったカレッジの食堂の壁にもいくつかの肖像画が飾られており、Navier-Stokes 方程式を作った Stokes の肖像画(図5)が飾られていた。Stokes はアイルランド出身の数学者であり、このカレッジの卒業生であるということをこのとき初めて知った。

ケンブリッジ大学での招待セミナーから2ヶ月ほど過ぎた4月に、CMSG で進めている研究課題①の一部をリーズ大学で開催された第55回 英国応用数学会議 (55th British Applied Mathematics Colloquium) の「制御・カオス」のセッションで



図5 ケンブリッジ大学 工学部 燃焼グループ 招待セミナーでの研究発表と Stokes の肖像画

研究発表した[5]。応用数学の分野で研究発表を行ったのは、機械工学科出身の私にとっては初めての経験である(図6)。CMSG のグループでは毎年、この会議で研究発表を行うことが義務づけられており、私も例外ではなく、グループ内での発表練習を行い、当日の研究発表に臨んだ。

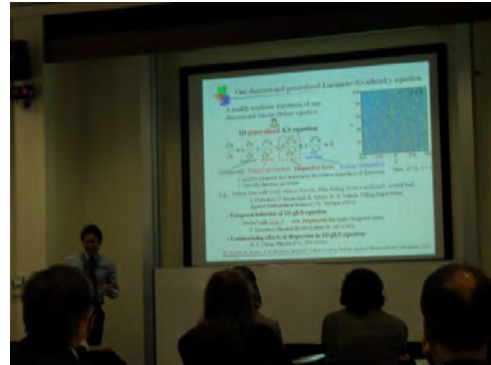


図6 第55回 英国 応用数学会議での研究発表

5月には、Prof. Kalliadasis と機械工学科の Prof. Yannis Hardalupas が世話人となり、IC の機械工学科の招待セミナーで約1時間の研究発表を行った(図7)。セミナーでは、力学系理論の基本的な考え方や燃焼不安定のダイナミクスの解明とその工学的応用の可能性を発表した[6-9], [11]。発表後の夜に、ベルギーのブリュッセルに入り、ブリュッセル自由大学 (Universite Libre de Bruxelles) で開催されたソルベー研究会 反応系のパターンと流れの不安定性 (Solvay Workshop, Patterns and Hydrodynamic Instabilities in Reactive Systems) に出席した。Scientific Committee を務めていた Prof. Kalliadasis が、年末頃からこの研究会での発表を私に強く勧めていたため、輻射熱損失の影響を受けた火炎面挙動の短期予測に関する研究内容を発表した(図8)。高校化学で習ったアンモニアソーダ法、いわゆるソルベー法の Ernest Solvay が設立した国際ソルベー協会 (National Solvay Institute) は、物理学者 Einstein, Schrödinger, Bohr, 湯川秀樹や数学者 Poincaré が研究発表したソルベー会議 (Solvay Conference) の他に、特定の研究領域を対象としたソルベー研究会を3年ごとに開催している。私が発表した研究会も数ある研究会の一つである。国際ソルベー協会の事務局には、KS 方程式の蔵本 由紀 京都大学 名誉教授がエントロピー生成極小の原理や著書「現代熱力学: 熱機関から散逸構造へ」などで有名な化学者 Prigogine に贈った書(図8)があり、ケンブリッジ大での Stokes の肖像画と同様に感銘を受けた。



図 7 IC 機械工学科 招待セミナーでの研究発表

私は立命館大学に籍を残したまま IC に滞在しているが、当然ながら、私自身の研究室の運営も行っていかなければならない状況であった。平成 24 年度 日本燃焼学会奨励賞の受賞者を対象とした 6 月の討論会での研究発表[12]も含め、2 ヶ月半に一度程度は日本に一時帰国している。ロンドン時間の早朝から定期的に学生とスカイプで研究の進捗状況や研究室内行事などの打ち合わせした後、IC に出勤することで日本と IC での研究の両立を可能な限り努めている。

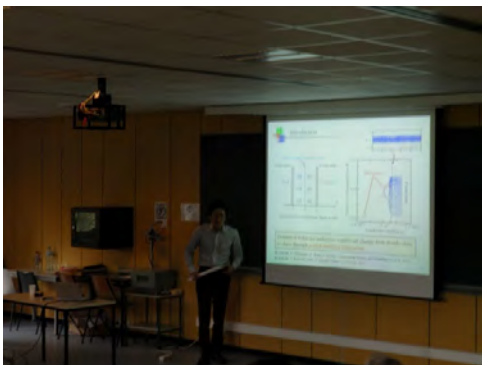


図 8 ソルバー研究会での研究発表

4. 最後に

IC に滞在中の研究活動を中心に、海外レターを執筆させて頂いた。私が IC での研究活動を始めた数日後の夜に CMSG の隣りの実験室で水素漏れによる火災事故が起きた。グループの居室が封鎖され、メンバーが別々の部屋に移動したままである現状や事故後の Visiting Academics 向けの危機管理対策など、本稿では触れられなかったが、興味ある方は個人的に聞いて頂ければと思う。

本稿執筆の貴重な機会を頂いた京都大学 中部主敬 教授からは、機械工学科 Prof. Yanniss Hardalupas と Prof. Alex Taylor が運営する研究室の施設見学の機会までも頂いた。化学工学科 Prof. Serafim Kalliadasis からは、IC 滞在中に数多くの貴重な研究機会を頂いた。航空工学科で研究活動をしておられた(独)海洋研究開発機構 大西 領 研究員には、IC での研究生活等で大変お世話になった。立命館大学 宮野 尚哉 教授には、IC 滞在中の本研究室の運営を分担して頂いた。(独)宇宙航空研究開発機構 立花 繁 主任研究員からは、IC 滞在中にガスタービン燃焼不安定の共同研究で多大なる力添えを頂いた。改めて深く感謝申し上げます。

最後に、私が不在の中、研究室活動を積極的に進めてくれた立命館大学 本研究室メンバー一同に感謝する。

参考文献

- [1] <http://www3.imperial.ac.uk/interactivemap>
- [2] <http://www3.imperial.ac.uk/chemicalengineering/discovery/facilities/plant>
- [3] <http://www3.imperial.ac.uk/complexmultiphasesystems>
- [4] H. Gotoda, M. Pradas and S. Kalliadasis, *63th British Applied Mathematics Colloquium* (2013).
- [5] H. Gotoda, M. Pradas and S. Kalliadasis, *Chaos*, (2013) Submitted.
- [6] H. Gotoda, R. Takeuchi, Y. Okuno and T. Miyano, *Journal of Applied Physics* 113, 124902 (2013).
- [7] H. Gotoda, T. Ikawa, K. Maki and T. Miyano, *Chaos* 22, 033106 (2012).
- [8] H. Gotoda, H. Nikimoto, T. Miyano and S. Tachibana, *Chaos* 21, 013124 (2011).
- [9] H. Gotoda, M. Amano, T. Miyano, T. Ikawa, K. Maki and S. Tachibana, *Chaos* 22, 043128 (2012).
- [10] <http://www.sms.cam.ac.uk/media/1379230>
- [11] H. Gotoda, T. Miyano and I.G. Shepherd, *Physical Review E* 81, 026211 (2010).
- [12] 後藤田 浩, 日本燃焼学会誌 55, 221 (2013).