日米科学セミナー “燃焼科学における数学モデル” *1

竹 野 忠 夫*2

Key Words: Fluid Dynamics, Combustion Science, Workshop

1. はじめに

標記セミナーが1987年8月17日(月)から21日(金)までの5日間、Juneau (Alaska) の Hotel Baranof で開かれた。このセミナーは日米科学協力事業の一環として、日本学術振興会と米国科学振興財団 (NSF: National Science Foundation) の後援のもとに行われた。筆者はこのセミナーの責任者として、その準備から開催までを担当したので、その経過、背景、内容および成果について報告させていただくことにする。

2. 開催に至るまでの経過

1984年8月、第20回国際燃焼シンポジウムがMichigan大学で開催されたが、その期間中Cornell大学のLudford教授より筆者に日米セミナーの計画の話があり、日本と米国両方で検討することになった。ついで1985年1月にIllinois大学のBuckmaster教授が来日し、筆者との間で話し合っただけ基本的な考えについて合意した。その後二人がそれぞれの国の研究者と相談して意見をまとめ、さらに数回手紙を往復して最終案を作った。同年5月には日本側申請書を筆者が作成して日本学術振興会に提出し、一方、Buckmaster教授が米国側の申請書をNSFに提出した。幸いにも同年11月に採択の通知を受けたので、その後日本側出席予定者で数回集まって議論して計画の詳細を詰めた。

米国側のセミナー出席者は、最終的にはJ. Buckmaster (Univ. of Illinois), Bebernes (Univ. of Colorado), A. Kapila (Rensselaer Polytechnic Inst.), D. Kassoy (Univ. of Colorado), C. K. Law (Univ. of California), M. Matalon (Northwestern Univ.), D. Mikolaitis (Univ. of Florida), Scott Stewart (Univ.

of Illinois), F. A. Williams (Princeton Univ.) の9名、それにオブザーバーとしてG. Leave (ANL) が参加した。また日本側の出席者は、藤原俊隆 (名古屋大), 石塚 悟 (埼玉工大), 三谷 徹 (航技研), 新岡 嵩 (航技研), 柘植俊一 (筑波大), 梅村 章 (山形大), 吉田 亮 (東京電機大) それに筆者を加えた8名である。なお出席を予定していた辻 広 (埼玉大) と久保田浪之助 (防衛庁三研) の両氏は都合により出席できず、論文発表の代読が行われた。

以上の参加者の顔ぶれは、そのほとんどが何らかの意味で航空に関係があるという共通項があるものの、その研究スタイルにおいて米国側と日本側とで著しい相違がある。米国側出席者のほとんどは純粋な理論研究者で、しかも燃焼というよりもむしろ応用数学の専門家である。これに対して日本側は理論のみの研究者は少数であり、そのほとんどが理論と実験の両方を手掛ける燃焼の専門家である。なぜこのような相違が生じたのであろうか? 次にその背景について紹介する。

3. 燃焼の理論的研究

燃焼はきわめて複雑な現象である。化学反応をはじめ、相変化、熱や物質移動、ガスの流れなど幾つかの過程が、互いに密接に関連しながら同時に進行する。このため現象の理論的解析がむづかしく、従来の燃焼研究では実験観察に基づいた現象論的研究が中心となり、理論的研究の貢献はごく限られたものにすぎなかった。たとえば燃焼の分野では、隔年ごとに開催される国際燃焼シンポジウムが世界の研究をリードしているが、この学会は伝統的に実験研究の報告が主流であり、理論解析によって現象の本質に迫ろうとする報告は少ない。しかし一方では、欧米において第二次大戦後主として流体力学の研究者たちが、燃焼を化学反応を伴った流れとして捉える立場から理論研究に取り組んできた。その努力がしだいに実を結び始め、ごく最近になって理論解析のめざましい発展をもたらすことになった。その結果、条件を整えた実験での観察を解

*1 昭和62年10月7日原稿受理 Report on Joint USA/Japan Seminar on "Mathematical Modelling in Combustion Science"

*2 東京大学工学部境界領域研究施設 Tadao TAKENO

析と直接比較することが可能となり、燃焼における基本的現象の解明に大きく貢献することになった。さらに、この解明に基づいた現象の数学的記述と数値計算による厳密解によって、現象の定量的把握が可能となりつつある。

4. 米国と日本における燃焼の理論研究の現状

最近の理論解析の進歩は漸近解析と呼ばれる新しい解析手法の出現によるところが大きい。この方法の源は1930年代のソ連のZeldovich, Frank-Kamenetskiの仕事に遡るが¹⁾、その後主として今回のセミナーの出席者であるLudford, Buckmaster, Williams, Kasoy, Lawらの米国の研究者によって開発され、体系化されたものである。これによって層流火炎を中心とする燃焼の基本的な問題の解明に威力を発揮することになった^{2,3)}。このためとくに米国において従来の流体力学の専門家のみならず、応用力学や応用数学の専門家がこの手法に関心をもつことになり、燃焼の理論研究がきわめて活発に行われるようになった。その反面数学的手法の開発に重点がおかれ、現象そのものへの理解が十分であったとはいえない。ところがこの手法は、化学反応を簡単な総括反応で置き換えたモデルに基づいており、その対象も比較的取扱いの容易な低速の層流火炎に限られていた。その範囲内にとどまる限り、漸近解析手法の適用は一段落したといえることができる。今後より複雑な現象への適用を可能とするためには、新しい展開を図る必要があるものと考えられている。これが米国における燃焼の理論研究の現状である。

これに対して、残念ながら我が国における燃焼の理論的研究はそれほど盛んではない。むしろ伝統的に、燃焼のような複雑な現象の本質が簡単な理論解析でわかるはずはないといった雰囲気さえある。あくまで実験研究が中心であって、純粋の理論研究に対しては空理空論に基づくものとして評価が厳しい。これまでに幾つかの優れた理論研究が独自に行われてきたが、そのほとんどが実験観察を説明するためのものである。すなわち日本の理論研究のほとんどは、燃焼の専門家が自分の実験を説明するために行ったものである。したがって、たえず実験との対応が意識されており、現象を正確に記述することに注意がはらわれた。しかし一方では、理論が単に実験の付け足しの役割しか果たしていないことが多かったといえる。このため我が国の理論研究は個々の問題にのみ適用できるような個別的なものに留まり、全体を包括できるようなものになっていない。これが我が国における燃焼の理論研究の現状である。

5. セミナーの目的

このような日米の研究の現状を背景として今回のセミナーでは、今後の理論研究の展開を図る上で最も重要であると考えられる次の三つのテーマに的を絞り、応用数学の専門家が中心の米国側参加者と実験研究者が中心の日本側参加者との間で討論を行うことを目的とした。

5.1 高速気流中の化学反応 超音速で伝播するデトネーション波のように、圧縮性や対流による輸送過程が支配的となる高速反応性気流中での現象について、その理論解析の手法や問題点を探る。

5.2 化学反応機構のモデル化 多数の素反応群からなる複雑な反応機構を、解析可能な数個の反応で代表させることにより、反応が支配的な現象をも解析によってその本質を解明する可能性を議論する。

5.3 乱流燃焼モデル 乱流燃焼過程を幾つかの層流火炎要素に分解し、個々の火炎の解析を行い、その結果を組み合わせることで全体のふるまいを記述する可能性について検討する。

討論においては現象の本質の解明を目指す科学的な立場からの議論を重視するものとした。その成果のエネルギー問題や環境問題への工学的応用は比較的容易であると考えられるからである。また現在盛んに行われている数値計算によるシミュレーションも対象としないことにした。本質が明らかにできれば、シミュレーションは容易であると考えられるからである。

6. セミナーの経過

小人数の特徴を生かして、形式的な論文発表よりも徹底した討論を行うことを意図したセミナーを企画した。このため三つの発表方法を採用した。まず参加者は上記三つのテーマのいずれかについて、45分の発表と15分の討論からなる普通講演を必ず一つ行う。これによって月曜日の午前と午後のセッションで5.1についての論文が5編、火曜日の午前と午後のセッションで5.2についての論文が同じく5編、木曜日の午前、午後と金曜日の午前のセッションで5.3についての論文が8編発表された。

第二の発表方法はワークショップである。これはあらかじめ特定のテーマを決めておき、それに対して各参加者が自分の意見をまとめておいて、その場で集中した議論を行うものである。月曜日の夜には“高速気流中での燃焼”、火曜日の夜には“燃焼科学における理論と実験の役割”、そして木曜日の夜には“乱れ強度が強くスケールが小さい乱流中での予混合火炎”のテーマのワークショップを行った。第三の方法は討論セッ

ションで、これは参加者のなかの希望者が自分の好きなテーマで討論会を開くもので、各テーマに対して30分程度の時間が与えられる。この方法では、水曜日の午前に5テーマ、そして金曜日の午後4テーマの合計9テーマについて討論が行われた。

以上の三つの方法で朝の9時から昼食、夕食をはさんで夜の10時すぎまで連日討論を行ったが、かなりきついスケジュールとなった。このため水曜日の午後はセミナーを休み、まったくの自由行動とした。近くのMendenhall 氷河の見物に行く人、あるいは買い物を楽しむ人などさまざまであった。また最後の金曜日の夕方には、お別れパーティをかねて全員で Salmon Bake に出かけ、鮭の豪快なバーベキューを楽しんだ。

7. セミナーでの討論

前述した三つの方法で発表された個々の内容は、すべて Springer から発行の Proceedings に掲載される予定なので、関心のある人はそれを参照されたい。ここではまず、三つの基本テーマについての討論の様子を簡単に紹介する。

5.1 の高速気流中の化学反応では、従来数値計算にのみ頼っていたデトネーションの発生や3次元構造の記述に漸近解析が適用できることが示され、今後この方向への研究が促進されるものと予想される。これによってこれらの現象についての我々の理解がいちだんと進むものと考えられる。また超音速燃焼に関連して超音速せん断層での混合の問題に関心が集まり、混合が予想されていたほど速くない原因について、圧縮性や発熱を伴った反応がどのような影響を与えるものかが議論された。この問題は今後引き続き関心がもたれるものと考えられる。また5.2の反応機構については、簡単な総括反応に基づく漸近解析の手法が、固体推進剤の燃焼のように相変化を伴ったより複雑な系にも適用できることが示された。さらに超臨界圧力下での液滴の燃焼のような、新しい現象の解析にもこの手法が利用できることも示された。またメタン空気混合気について、実際の複雑な反応機構を4ステップの反応で置き換える方法が提案され、これによって計算された燃焼速度が厳密な計算値によく一致することが示された。この方法は今後一次元非定常問題や二次元定常問題に大いに利用されるものと考えられる。

5.3の乱流燃焼は依然として燃焼研究最大の問題である⁴⁵⁾。これについては二つの場合に分けて議論できる。第一は、乱れによる熱や物質の輸送速度に比べて反応速度が速い場合で、火炎帯厚さはコロモグロフスケールよりも薄く、時々刻々と変動する流れ場中の

火炎は局所的瞬間的には層流火炎によって置き換えることができ、乱流火炎全体がこのような層流火炎の集合によって記述できる。いわゆる Laminar Flamelet Model⁶⁾が有効な場合である。このモデルでは、火炎要素としていろんな流れ場での層流火炎のふるまいを調べておく必要がある。このような新しい火炎の解析には漸近解析はきわめて有用である。今回のセミナーにおいても、管状火炎⁷⁾や部分予混合拡散火炎をはじめ、曲率や伸張を伴う幾つかの火炎についての討論が行われ、このような火炎の特性がしだいに明らかにされつつある。乱流燃焼の第二の場合は、乱れ強度が強くしかもスケールが小さな乱流場での燃焼である。実際のガスタービンやレシプロエンジン内での燃焼はこれに近い。この場合には厚い火炎帯内に未燃ガス、燃焼ガス、反応中のガスが混在するものと考えられているが、その構造が解明されていず、理論的にもほとんど手が付けられていない。今回のセミナーでは木曜日夜のワークショップで、吉田助教授の新しい方法による実験結果を基にしてモデリングの討論を行った。火炎の一部が局所的な伸張によって消炎を生じたとき、それによって反応を中断されたガスはその後混合によって加熱されて自発着火するの、あるいは火炎を伴わないゆるやかな反応を持続するのに議論が集中した。翌日の問題について Kassoy 教授が新しいクライテリアを提案した。きわめてむづかしい問題であるが、このようなアプローチが現象解明の突破口になることを期待したい。

8. 今後の問題

次に全体を通して筆者が感じたことをまとめてみたい。いちばんの印象は漸近解析の有用性である。実験で次々に発見される新しい火炎、あるいはデトネーション、超臨界圧力下での燃焼や乱流燃焼のような、未開拓なより複雑な現象の解明など、この手法が力を発揮できる対象がいくらかでも存在するように思われる。この方法の利点は、簡単な数学で現象の本質が記述できる点にある。しかし出発点のモデルを間違えればとんでもない結論が導かれることになり、それだけに危険も大きい。今後の発展には、実験での観察や数値計算との密接な協力が重要になってくるものと考えられる。

燃焼理論は非線形理論の典型的な例として、数学的に見てもきわめて面白い問題である。たとえば伸張を受ける流れ場中での火炎のふるまいは、定常解の分岐の問題として表される。速度などのパラメータの連続的な変化に対して、多重解の存在する限界において解の不連続的ジャンプが生じる。これが着火や消炎などの明確な物理現象に対応する。また非定常の問題で

は、着火は解の発散に対応する。今回のセミナーでも指摘されたように、簡単な微分方程式の解の分岐や発散などについても、未解決の数学的問題がたくさん存在する。欧米において数学者が燃焼理論に関心をもつゆえんである。我が国においても多くの若い人が、このような挑戦的な問題に関心をもち、燃焼の理論研究がさらに発展することを期待したい。

9. おわりに

今回のセミナーではまる1週間ホテルにかんづめになり、英語での討論に終始した。とにかくくたびれた1週間であったが、無事セミナーを終えることができてほっとしている。今回の企画に対して、後援していただいた日本学術振興会に厚く御礼を申し上げたい。また、日本側の幹事としてご協力いただいた埼玉工業大学の石塚 悟助教授にも厚く御礼申し上げます。最後に、このセミナーを最初に企画した Ludford 教授について報告しておく。教授は Mathematical Research Institute の再建に尽力し、それを Cornell

にもって来て初代の Director になったばかりの人である。残念ながらセミナーに参加することができなかった。奇しくも筆者が Cornell を訪れた 1986 年 7 月 25 日脳腫瘍を発病し、同年 12 月 11 日帰らぬ人となったからである。心からご冥福を祈る次第である。

参考文献

- 1) 三谷 徹, 新岡 嵩: 燃焼現象における漸近解析, 日本航空宇宙学会誌, 31 (1983), pp. 14-26.
- 2) Buckmaster, J. D. and Ludford, G. S. S.: Theory of Laminar Flames, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- 3) Williams, F. A.: Combustion Theory, 2nd ed., The Benjamin/Cummings, Reading, 1985.
- 4) 竹野忠夫: 乱流噴流拡散火炎, 日本航空宇宙学会誌, 26 (1978), pp. 510-518.
- 5) 吉田 亮: 乱流予混合火炎, 日本航空宇宙学会誌, 29 (1981), pp. 182-194.
- 6) Peters, N.: Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion, 21st Symposium (International) on Combustion, in press.
- 7) 竹野忠夫, 石塚 悟, 西岡牧人: 管状火炎の研究, 日本航空宇宙学会誌, 印刷中

—寄 書—

第6回国際複合材料会議 (ICCM-VI)/第4回国際複合材料構造会議 (ICCS/4) 出席報告*1

武 田 展 雄*2・近 藤 恭 平*3

Key Words: International Conference, Composite Materials, Composite Structures

1. 第6回国際複合材料会議 (ICCM-VI)

1987年(昭和62年)7月20~24日の間、第6回国際複合材料会議 (the Sixth International Conference on Composite Materials: 略称 ICCM-VI) が英国ロンドンのインペリアル・カレッジで開催された。同会議は、第2回欧州複合材料会議 (the Second European Conference on Composite Materials: 略称 ECCM-II) も兼ねていた。今回の主催は欧州複合材料連合 (the European Association for Composite Materials, EACM) であるが、組織、運営などの実務

はインペリアル・カレッジの複合材料センターがあつた。会議組織委員長は同センター長の Mr. F. L. Matthews であった。ICCM は、1975 年ジュネーブとボストンでの第1回会議以来、ほぼ2年おきにトロント、パリ、東京、サンディエゴで開催されてきた複合材料に関する最大の国際会議である。一方、ECCM はその第1回が1985年ボルドーで開催されている。

一般講演は、最高6会場を同時に使い、口頭発表論文が39セッション、211篇にも及んだ。その他にポスターセッション論文が40篇程度発表された。参加国は28カ国、参加人数は1,000名近くにも達し、ICCM 史上最大となった。このうち、日本からは論文23篇と前回を下回ったが、参加者は数十名に達した。なお Proceedings は5巻、全2,600頁にも及び、4.7

*1 昭和62年11月27日原稿受理 Report on ICCM-VI/ICCS-4

*2 九州大学応用力学研究所 Nobuo TAKEDA

*3 東京大学工学部航空学科 Kyohei KONDO