

# 北欧諸国における火災煙流動シミュレーションの現状

Simulation of Smoke Movement in a Building on Fire in the European Countries

加 藤 信 介\*  
Shinsuke KATO

## 1. は じ め に

可燃物があるかぎり建物における火災の発生確率はゼロとはならない。宝くじと同じで特定の建物が当たりくじを引いて火災に遭遇する可能性は小さいが、いずれかの建物は確実に火災に遭遇する。火災発生の多くは人の営みに関連するので、多くの人を収容する大規模なビルほど火災に遭遇する確率が高い。多数の人が利用する大規模建物では、火災発生を前提として人命や財産被害を最小化する対策を講じることは法律で規定される以前の常識となっている。

大規模な建築で不幸にも火災が発生し人命が失われた場合の多くは、火災初期の発煙によって逃げ場を失ったため生じている。このため火災に対する安全計画は、火災の発生・拡大防止と消火などの基礎的検討の他に、安全避難のための迅速な火災覚知と避難路の確保の検討、そのための建物内の煙流動予測とその制御すなわち防煙計画が必要とされる。火災時の煙流動は、建物内で主に高温の煙の密度差による自然対流として生じる。建物内の空気流動を扱うという観点から、煙流動予測と空調される室内の熱・空気流動予測は多くの共通点を持つ。筆者は主として空調される建物内の平常時の熱・空気流動予測と制御の研究に携わっており、火災時の熱気流に関しては必ずしも十分な情報を持つ訳ではない。しかし今回、デンマークで開催された「室内換気に関する国際会議」および英国で開催された「乱流の数値シミュレーションに関するセミナー」に出席した合間に、火災研究に関し定評のある北欧諸国において主に流れの数値シミュレーションによる煙流動予測研究の現状を視察する機会を得たのでここに報告する。

## 2. 火災時の煙流動予測

特定の建物に関し、煙流動特性を実大規模の実験で個別に予測することは容易でない。流れの数値解析による煙流動予測法は、個別の建物の多様性に容易に対応できることから、多くの火災研究者、建築設計実務者からそ

\*東京大学生産技術研究所 第5部

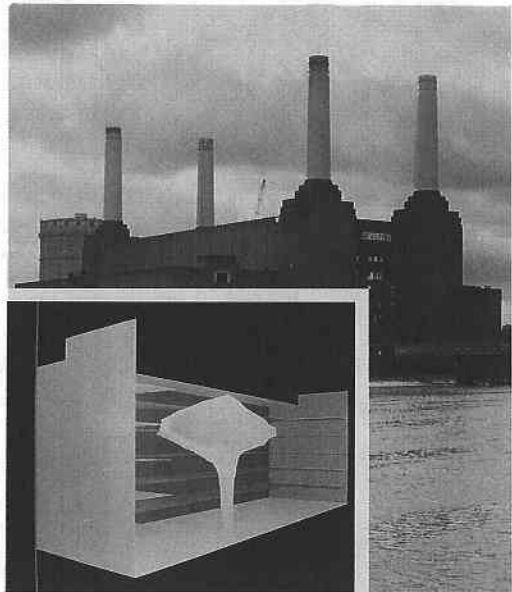


図1 アトリウム空間内の煙流動解析

の開発、実用化が期待され、一部には実際の設計実務に用いられるようになってきている。現在、商用に開発された CFD コードは、 $k-\epsilon$  モデル等の乱流モデルを内蔵し、浮力による自然対流の解析は無論のこと、建物内の煙流動予測、さらには燃焼過程も含め火災現象の予測にも適用可能なことを謳っているものもある。また欧米各国の火災研究者は、火災現象に関して煙流動も含めた総合的な CFD シミュレーションコード（火災現象のフィールドモデル）の開発を進めている。図1は英国 BRE（建築研究所）Fire Research Station（火災研究局）で開発されたコードによるアトリウム空間内の煙流動解析結果である。

## 3. 調査対象研究所

調査は、1992年9月2-4日にデンマーク、オールボー市で開催された「室内換気に関する国際会議 (ROOMVENT 92)」と9月21-25日に英国、マンチェ

スター市, UMIST で開催された乱流の数値シミュレーションセミナーの間を縫って行った。以下, 調査対象とした研究機関および受け入れて下さった研究者を挙げる。

- 9月3日 デンマーク, オールボー大学 HVAC (空調) 研究室 Prof. Nielsen
- 9月7日 フィンランド, ヘルシンキ大学 HVAC 研究室 Dr. Sateri
- 9月7日 フィンランド工学研究センター 火災研究所 Dr. Keski-rahkonen
- 9月9日 スウェーデン建築研究所 Prof. Sandberg
- 9月10日 スウェーデン王立研究所 ガスダイナミクス部門 Dr. Lee
- 9月10日 スウェーデン公衆衛生院 Dr. Holmberg
- 9月11日 ノルウェー, トロンハイム工科大 HVAC 研究室 Prof. Tjelflaft
- 9月11日 ノルウェー, SINTEF, 火災研究所 Dr. Wighus
- 9月14日 スウェーデン, ルンド大学, 火災安全研究室 Prof. Holmstedt
- 9月15日 デンマーク, デンマーク工科大学 HVAC 研究室 Dr. Melikov
- 9月16日 ベルギー, カソリック大学ルーベン, 農業建築研究室 Prof. Berkmann
- 9月17日 英国, インペリアルカレッジ Prof. Gosman
- 9月18日 英国, 建築研究所 (BRE), 火災研究局 Dr. Kumar
- 9月18日 英国, 建築研究所 (BRE), 建築環境研究局 Mr. Smith
- 9月23日 英国, マンチェスター大学, 土木工学 Prof. Stansby
- 9月25日 英国, UMIST, 機械工学科 Prof. Launder

#### 4. 研究所見学印象記

以下, 火災研究所を中心に多少独善と偏見に満ちた筆者の印象を記す。

フィンランド: フィンランド工学研究センターの火災技術研究所は, ヘルシンキ工科大学と同一敷地内にあり, 同大学との密接な協力のもとに研究を進めている。火災シミュレーションコードについては, 燃焼, 放射, 火災伝搬, 煙伝搬, CFD, 回路網等, 総合的なコードを北欧 (フィンランド, スウェーデン, ノルウェー), 英国等が中心になって開発中であり, 12月に中間報告ができる由である。残念ながらフィンランドには火災シミュレーションのフィールドモデルの開発を積極的にすすめてい

る火災研究者がいないとのことである。なおこの火災シミュレーションコードに関する国際共同研究は相当遅れており, 筆者の問い合わせに対し, 1993年6月現在まだまとまっていないとのことである。コードはオープンコードとして誰にでも (無論共同研究実施国に限定されるが) 利用可能なものになるとのことである。現在, 筆者らが生産技術研究所ですすめている密度変動乱流のモデリングに関して説明した所, 訪問を受け入れて下さった Professor Keski-rahkonen 先生は強い興味を示し, 上記国際共同研究への日本の協力余地も示唆された。研究所内を一通り見学させて頂いたが, 日本に比べ人口が著しく少ないにもかかわらず実験設備はかなり立派な物であった。中でも筆者の目を引いたものは, 大型の火災実験室内に備えられた, 家庭やオフィス内に存在する各種可燃物の燃焼実験を行うためのモデルルームである。このモデルルームは, 米国 NBS (現 NIST) および ISO 基準による標準的な形状であるが, 今後筆者らが予定している単純な火災シミュレーションおよび実験に際しては, この標準モデルの次元を尊重することが必要と感じられた。なお, 各種の材料の基本的な燃焼試験に用いるコンカロリーメータに関して, 米国 NBS (現 NIST) が当初測定法の基準を策定したが, フィンランドでの改良結果を受けてフィンランドでの基準が ISO 基準となるとのことで, Professor Keski-rahkonen 先生自慢の成果との印象を受けた。

ノルウェー: SINTEF (ノルウェー技術研究所科学専門研究財団) NBL (ノルウェー火災研究所) の大型火災実験室もフィンランドの火災研究所のものと同規模 (天井高30m, 幅50m, 長さ50m位) である。人手不足で実験はあまり行われていない感じを受けたが, これは日本を含めて各国の火災研究機関共通の印象である。実験用の断熱材には高温に耐えるため, ガラス繊維ではなくセラミックス繊維を使用しこれをステンレス板でサンドウィッチしてパネルを作成し, 火災実験用のモデルルームを構成していた。測定は温度が主で風速測定は可視化程度である。ノルウェーは北海油田をかかえているため, 研究の主体は石油, ガス火災の性状, 消火であり, 煙流動は特に考えられていないようである。SINTEF ではトロンハイム工科大学の Professor Magnussen 先生が開発した KAMELEON という名の放射熱伝達を連成する圧縮性乱流シミュレーションコードを用いた火災シミュレーションがよく行われるとのことであった。フィンランド同様, 火災研究者はシミュレーションコード開発者でなく, ユーザーである。

スウェーデン: スウェーデンでの火災の数値シミュレーション (フィールドモデル) は, ルンド大学の

Professor Magnussen 先生の研究室（ノルウェー，トロンハイム大学の Magnussen 先生とは別人）の研究が参考になると日本の関係者から伺っていたが，ルンド大学では煙流動は非圧縮， $k-\epsilon$ モデルまでしかやっていない由であり，特に進んでいるという印象はない。ただし火災や燃焼のシミュレーションに関しては多くの論文があり，この種の研究で著名な米国 NIST (旧 NBS) の Dr. Baum 氏の研究に類似している印象を得た。日本の火災研究者の間では火災のフィールドモデルはこのルンド大学 (Professor Magnusson 先生，および Holmstedt 先生) と英国 BRE 火災研究所 (Cox 氏，Kumar 氏) の 2 研究機関が進んでいるとの評判である。火災で最も大事なことは煙が建物内をどう流れるかといった移流拡散現象の予測よりは，まず煙がどの程度発生するかを明らかにすることであるというのがヨーロッパのみならず，日本の一般的な火災研究者の研究認識である。Holmstedt 先生からどのような条件で発熱量，発煙量が定まるかをまず明らかにすることが大事であると認識しており，煙流動のシミュレーションはその次の研究課題であるとの見解を伺った。さらに煙流動予測に関しても，通常火災時にはスプリンクラーが作動するので，その水滴の影響で空気流動が大きく影響されることもとり込む必要があり，そのモデル化は相当，困難ではないかとの見解を示された。ルンド大学では Flamlet モデルと称する火災構造の解析すなわち発熱量，発煙量，一酸化炭素発生量などを予測する研究に力を注いでいる。ルンド大学は国立の研究機関ではないこともあり，大掛かりな実験装置を用いた火災実験施設はない。モデル実験が主である。ただし実験の質は非常に高いことが伺われた。燃焼や空気流動現象の測定には LDV (レーザー流速計) を使用している。トラバースは中古の工作機械の 3 次元移動テーブルを利用しており，強い剛性を確保し，かつコンピュータコントロールを可能として，高精度な測定を安価な設備で実現しており，大変合理的である。LDV 測定では筆者らがいつも苦労しているシー징ングに関しても，酸化チタンの粉末を用いたシー징ングで何の問題もないとのことで高い測定技術を擁していることが伺われた。

英国：インペリアルカレッジにおける Professor Whitelaw 先生および Professor Gosman 先生の研究室における高温流体計測の実験技術はすばらしいものであった。今回視察した各研究所の中でも実験技術の質の高さは圧倒的との印象を受けた。Professor Whitelaw 先生の指導のもと LDV が完全に使いこなされているように強い印象を受けた。LDV 関連の測定装置はすべて研究室内で作成されている。火災中のヒートフラックス

を LDV とサーモカップルで測定していたが，これは筆者も是非実行したいと思っていたことの 1 つである。Professor Gosman 先生は，汎用的な乱流シミュレーションコードを自身でも開発されているが，その応用例の多様さ，複雑さは相当のものであった。

英国：BRE 火災研究局で筆者を受け入れて下さった Dr. Kumar 先生は，CFD 特に Turbulence Model に関し大変に詳しい専門家である。BRE では，火災のフィールドモデルとしては， $k-\epsilon$ モデルに基づく密度変化流体解析が主であるが，その裏付け知識として DSM などの高次モデルに対しても大変詳しくレビューしており，乱流シミュレーションに対する十分な検討が行われていることが伺われた。前述したように BRE では Jasmin という火災のフィールドモデル (流体解析コード) を開発している。これには  $k-\epsilon$ モデルに基づく 3 次元シミュレーションと放射シミュレーションが組み込まれており，さらに建物内のマクロ的な空気流動解析手法である回路網計算も組み込み可能となっている。この Jasmin による住宅内およびアトリウム内の煙流動シミュレーションの CG (コンピュータグラフィックス) を見せてもらった。開口から吹き込む気流が煙を横方向に移流し避難する人々に煙が吹きつけられることがあるとのデモであった。Jasmin の密度変動乱流モデルは一般的な方法である簡易なファブルアベレージ  $k-\epsilon$ モデルとして考慮されている。BRE の火災局の火災実験はわれわれが訪問した Bore hamwood とは別の場所で行われており，残念ながら欧州一という火災実験室の見学はできなかった。今回は Dr. Kumar 先生と直接意見交換をし，生研における筆者らのシミュレーション技術をアピールしたに留まった感じである。Dr. Kumar 先生の研究室でも基礎実験は多少行われているが，火災の性状を基礎的に測定する研究で小規模なものである。

## 5. お わ り に

火災時の煙流動を乱流の数値シミュレーションにより予測する研究の現状を，火災研究が活発な北欧諸国を中心に視察した。乱流シミュレーションの開発自身は，専門の流体機械研究者に準ずる印象を受けたが，火災現象のフィールドモデルを開発する熱意は相当に強いとの印象を受けた。またこの分野で本所における乱流シミュレーション研究が国際貢献をはたす余地が充分にあることを確認したことは今後の筆者の研究の大きな励みになる。最後に筆者にこのような調査の機会を与えて下さった三好研究助成に深い感謝を捧げます。

(三好研究助成報告書 1993年8月4日受理)