

建築・都市における火災の性状とリスクの制御

田中哮義

要 旨

本稿は、平成23年度京都大学防災研究所研究発表会における退職教授特別講演の趣旨にそって、筆者が1973年に建設省建築研究所に採用されてから2012年の京大退職までの39年間に行った火災研究の概要を記述したものである。建築研究所での約24年間は専ら建築の火災安全設計法に関する研究に従事した。京大での約15年間は都市火災に関する研究を主課題としながらも建築火災の課題にも依然として関った。従って、両課題に関する研究は時系列的には分離し難いが、本稿は課題別に纏める構成とした。

キーワード：火災安全設計，建築火災，都市火災，火災モデル，火災リスク

1. はじめに

私は京大卒業後の職業としてエンジニアを考えていた。研究者とか科学者などと言う高尚な感じのある職業は自分とは縁遠いものと思っていたので、そのような職に就けると想像もしていなかった。修士課程終了後、建設省建築研究所（建研）に入ったのも一寸した好奇心と国家公務員試験に合格していたというひょんな偶然でしかない。このため、研究とは何をしたら良いものか全くと言ってよいほど分っていなかった。というより、京大を退職した今になっても、研究とはこう言うものだと言い切る自信はない。もしかしたら、建研に入ってから京大を退職するまでの39年間、科学者という意識はあまりなく、エンジニアであり続けたのではないかとも思う。

建研に入ったときは、世界的に有名な防火研究者である川越先生が所長を退職して大学に移ったばかりであったが、川越先生は「建研では純粋に研究に没頭していれば良く、行政対応など社会のことは気にしないで良い」と言うのが持論であった。実際、建研の研究室の雰囲気は大学と余り変わらなかった。しかし、私は大先生の高邁な御考えに楯突くようであったが、社会への貢献を考えないような研究所に対し、社会がただ研究者の学術的名声を高めるためだけのために給与や研究費を提供し続ける義務が何故あるのか？研究者はどんな資格があってそんな特権があるのか？と自問していた。京大に移って後も退職した今もその気持ちは変わらない。

工学系の研究は、電気，機械，化学，土木・建築

等いずれの分野をとっても各々対応する産業活動と関連を持っている。それぞれの産業の、国民生活の視点も含めた広い意味での、ニーズに有益な研究成果で応えるのが研究の基本的な任務である。

では火災研究の主要な任務とはなにか？それは建築や都市の安全に関わる国や地方の行政、消防および建築や都市の建設に関わる建設産業に有用な研究成果を提供することである。これによって安全で魅力的な建築や都市を経済的に実現出来るようになることが公共の福祉の増進につながる。

私が建研に入った時には、火災研究は社会との連携が円滑ではなかった。仮に優れた研究成果を得たとしても、研究社会の中だけの自己満足でしかなく、それを社会のために生かす術が殆どなかった。私が性能的火災安全設計法の開発に拘ってきたのは防火研究の成果が行政や建設産業のために生かされるための仕組み・技術基盤を整備したかったことによる。

2. 火災のモデリング研究

2.1 建研の火災研究の背景

従来、建築物の防火設計は建築基準法や消防法に定められる仕様書的基準に基づいて行われてきた。これらの基準は過去に起こった多くの火災事故から建築物の火災に対する弱点を学びながら専門家の経験的判断によって制定されたもので、火災性状に関する科学的・工学的基盤の薄弱さが指摘されていた。火災性状に関する科学研究は、主として東京大学によって関東大震災の頃から行われて来た。当時は

地震火災以外にも日本各地で都市大火が頻発しており、また昭和も10年代に入って日米開戦の可能性が高まってくると本土空襲に備えた防空対策も重要になってきたこともあって、戦前の研究対象は主として都市大火であった。

俗にビル火災と言われる耐火建築物の火災について研究が始まったのは戦後の事であり、その研究は大蔵省、戦災復興院を経て建設省に引き継がれた建築研究所（建研）を中心として行われた。第二次大戦は世界各国で膨大な破壊をもたらしたので、それからの速やかな復興のために戦後多くの国で建設技術の研究のための研究所が設立された。建研も同様な目的で設立されたものであり、昭和54年（1979）につくばに移転するまでは新宿区百人町の旧陸軍の研究所の跡地にあった。

戦時中のB29戦略爆撃機による空襲によって、日本の主要都市の殆どは焼け野原となり、そこに残ったものは火災に曝された焼けビルのみとって過言ではなかった。また戦争によって失われた膨大な家屋を速やかに回復する必要があったが、建築資材を始めあらゆる資材の不足する中で良質な家屋を供給することは不可能であり、低質な家屋で復興された日本の都市では各地で大火が頻発していた。このため、建研で始まった防火研究は、焼けビル再利用のための火害診断を行う上で必要となる建物火災性状の解明、市街地大火性状の解明を課題としていた。これらの研究に携わった第一世代の研究者からは、藤田金一郎（後の所長、東北大学教授）、川越邦雄（後の所長、東京理科大学教授）、横井鎮男、戸川喜久二など世界的業績を上げた著名な研究者が輩出された。因みに、後に京大の建築学科教授から京大総長になった前田敏男先生も戦地からの引き上げ後、建研第5研究部長を務められ、火災研究の指導にも当たられたことは特筆して良いと思う。

2.2 建築火災のモデリング研究

(1)建研の火災研究

言うまでもなく、モデリングは理系の研究においては一般的な手法であり、建研の第一世代の研究者たちも種々のモデルを提示していたが、火災研究一般には法規などに規定される試験法などによって実験結果を出すと言った類のものが主であった。

私が建研に入った1973年頃には、千日前デパートビル火災を始めとする重大なビル火災の頻発を受けて、研究の主テーマもビル火災に移っており、研究者も既に第2世代に入って、若松孝旺（後に第5研究部長、東京理科大学教授）、斉藤文春（後に試験室長）と言った方々が中心となっていた。若松先生は火災時の建物内煙流動モデルの開発で有名であるが、そ

の他にも耐火部材の温度予測などで理論的アプローチの研究を多く手がけていた。一方、斉藤（文）先生は、実験的アプローチで建材の燃焼性や発煙性の研究を精力的に行っていた。

因みに、若松先生は建研の防火研究体制の拡充についても大きな功績のあった方で、建研には当初防火研究室しかなかったが、防煙研究室、防火研究調整官などが新設された。当時も組織の拡大には厳しいハードルがあったので、これらは稀有のことであり、先生による火災時の防煙研究の業績が非常に高い評価を受けていた結果である。

(2)火災シミュレーション研究会

同時期、東京大学の秋田一雄先生は火災研究分野で理論的研究を進める必要があると考えられていたようで、建研、消防研究所（消研）、東大などの研究者に火災シミュレーション研究会を呼びかけた。これに私自身、長谷見（建研、後に早稲田大学教授）、平野敏右（東大助教授、後に教授）、斉藤孝三（成蹊大、後にケンタッキー大教授）などの若手研究者が多く集まり、回り持ちで互いのモデルを発表しながら勉強した。建研に入ったばかりで学生の延長でしかなかった私にとって、この研究会から教えられたことは多いが、特に印象づけられたことは2つある。その1つは、モデルあるいは理論は自分のアイデアで自ら作るものであると云うことである。それまでの自分は、理論は誰かとしてつもなく偉い人が作って、自分のような凡人はそれを習うのだと思っていた。また2つ目は、秋田先生の言われたことだが、「他人がやっていることをやっても詰まらない。他人がやってないことをやれ」と言う言葉である。大学卒業までは他人と同じ問題をどれだけ旨く出来るかという取り組みに慣れてきた自分には衝撃でもあったが新鮮でもあった。他人もやったことが無いことをやる限り、やり方が正解かどうかを知るものは何処にもいない。従って自分自身の判断で進めてみるしかない。孤独ではあるが、他人に逐一判断を求める必要が無い点で自由であるし、またやり方がベストでなくても目的とする結果が得られさえすれば足りることは気楽である。

(3)UJNR防火部会

そのうち1975年からは天然資源の開発と利用に関する日米共同会議（UJNR）に防火分科会が設置されることになった。米国商務省国立標準局（NBS）のQuintireに初めて会ったのは彼が新宿の建研を訪れたときで、確かUJNR防火部会設置の前年くらいと記憶する。UJNR防火部会が始まってみると、米国の火災研究においても種々の課題で火災のモデリングが始められていることが分かった。特に、20世紀末までに火災による死者を半減するという目標を掲げた

Home Fire Projectは、このプロジェクトを提唱したEmmons教授の率いるHarvard大学のチームが二層ゾーンの区画火災モデルの開発を先導していた。この点で、予め火災シミュレーション研究会を持っていたのは幸運であった。もしこの研究会が無ければ、いつまでも米国研究の後追いを続けて行かなければならなかったかも知れない。

因みに、このUJNR防火部会の設立を米国議会に働きかけ実現したのもEmmons教授であり、この枠組みの中で、私自身も含め日本から多くの火災研究者がNBSなど米国の研究所・大学での研究経験を持つことが出来た。この意味で日本の火災研究の発展についてEmmons教授には深く感謝しなければならない。Emmons教授は戦時中に焼夷弾の研究を行っており、そのことが結果として日本に甚大な被害と苦痛を与えることに繋がってしまったことを悔いておられたと聞いている。Emmons教授はHome Fire Projectが開始されるに先立って世界各国の火災研究所を歴訪しているが、共同研究の相手として最終的に日本を選んだのは、秋田一雄、川越邦雄など多くの著名な研究者が居たことに加えて、先のような思いが反映されていたのかも知れない。

3. ゾーン煙流動モデルの開発

3.1 開発の背景

建築研究所に採用されて2年目だったと思います。建設省総合技術開発プロジェクト（総プロ）：「住宅性能評価技術の開発」が始まった。私は若手と言うことで、その部会の1つである「住宅防火性能評価技術部会」の幹事をやらされることになり、最初1000万円の予算計画を作成させられることになり、急に偉くなった気がしたが、その後変更々々でその度毎に予算書を作り直させられ不愉快になった覚えがある。結局最終的には400万円位に減額されてしまったが、当時の私の月給は4万円余りだったので、今から思えば、それでも結構な額だったと思う。

さて、その部会では住宅の防火性能の1課題として、延焼防止性能の評価方法を開発する必要があった。しかしプロジェクトの中間年度まで委員会で議論しても一向にこれといった良い手法が出て来なかった。そこで、いっそのこと物理的な延焼予測モデルを作ってみることにした。住宅内の延焼を予測する目的なので、モデルは複数室を対象とし、階も少なくとも2階程度は扱える必要があった。また、延焼現象をモデル化するためには、出火室で空気が不足するために燃焼し切れなかった未燃ガスの伝播も追跡する必要があり、このモデル化にも相当力を入れた。こうして開発したのが複数室、複数階を対象

とする2層ゾーンの火災モデルである。このモデルは延焼予測モデルとしては不十分なところもあり、また手続きとしても複雑過ぎたこともあって、結局総プロの延焼防止性能評価手法に使われることはなかったが、後に「小規模建築物の火災のモデル化に関する研究」としてまとめ、京大から工学博士の学位を授与して貰った。

3.2 米国の火災研究との関わり

このモデルは、初めて海外出張した1978年のUJNR防火部会で発表したところ、随分と高い評価を受けた。当時米国ではHarvard大学、その他で二層ゾーンの火災モデルの開発に力を入れており、Emmons教授が再三強調していた言葉によれば、将来の目標は「建物内のどの室でどのような条件の火災が発生しても、その火災が任意の室に引き起こす環境を予測出来るようにする」ことであったが、まだ単室のみしか対象に出来ていなかった。因みに、当時Harvard大学のチームがこの研究のために受けていたGrantは35万ドル、当時の為替レートは凡そ250円/ドルであったから約9千万になる。一方、私の方ではこのモデル開発は殆どデスクワークだったので、殆ど給与のみで、よく覚えていないが多分200万円にもなっていないと思う。ただ、この期間は頭をかなり酷使したことは確かで、前日考えたことが翌日に途切れないように、夜遅く帰宅して朝早く帰り、妻とも殆ど口をきかずモデルのことばかり考えていた。

その後、1980年1月から翌年4月まで、NBS火災研究センターの建物火災モデル研究室の室長になっていたQuintiere先生（後にメリーランド大教授）の下に、パートタイムのNBS職員と言う形で留学する機会を得た。ここではMcCafferyの火災プルームモデルやModakの煙粒子・ガス混合体の輻射率計算手法など火災モデル改良に関連する研究情報を始め、非常に多くの情報が得られ、帰国後の様々な研究テーマのヒントとしても大いに役立った。

それにしても機械、数学、物理などの優秀なメンバーが集まったHarvardチームは知識の量が多すぎたのかも知れない。実際、Harvardモデルに関する論文を幾つか読んだが、難し過ぎて自分には歯が立たなかった。建築出身の私は燃焼や数学などに彼らほど豊富な知識を持たなかったので、最善の方法かどうかは分からなかったが、自分に分かる方法でモデルを作ったということである。NBSのシニア研究員でHarvard大学と協力してモデル開発に携わっていたRockett氏は私の論文に興味を持ってじっくり読んでくれ、‘簡単に言えば確かに田中さんの言う通りだ。我々は不必要に難しく考えすぎたのかも知れない’と評価してくれた。このときは、色々と不備の

多いモデルながらも、火災モデリングの研究に一応の貢献が出来た感じがして嬉しかった。因みに、彼はNBSを退職してコンサルタントになった後にも、私のモデルを盛んに使うと同時に、他の米国内のコンサルタント会社などにも推薦してくれた。また、モデルの改良のためのアイデアも沢山くれたが、その頃は性能的火災安全設計法の仕事が忙しくて殆ど対応出来ず、折角の好意を無駄にする結果となったのは申し訳なかったと思っている。

3.3 NBSにおけるゾーンモデルの開発

私がQuintire先生のところへ留学した時、同じ研究室に最近海軍研究所から移ってきたJonesという人が居た。彼は化学出身のコンピューティングに強い人であったが、移って来たばかりということもあって対象とする研究テーマを模索している段階であった。その頃存在していた幾つかのゾーンモデルをNBSでの実験結果と比較対照して検証したのが恐らくNBSでの彼の最初の仕事だったと思う。その結果、種々の条件に対して最も矛盾なく、精度良く実験結果に合致したのは私のモデルだったのである。それで気に入ったのか、Jonesは私のモデルをベースに変更・改良を加えFAST, CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transport) モデルを開発して行った。また、この開発のためにNBSには研究室が新たに設置され、避難モデルを加えたパッケージとしてHAZARD-Iなどのモデルも開発された。因みに、CFASTは、ユーザーインターフェースを備えていたこともあって、米国内のみならず世界中に普及した有名なゾーンモデルとなった。

火災研究の中心となったNBSには世界各国から多くの研究者が客員研究員として滞在したが、ゾーンモデルについて学習する者も少なくなかった。彼らによって、例えばフランスのCiFiなど類似のモデルの開発も進められた。

3.4 その後の二層ゾーンモデルの改良

Quintire先生はNBS滞在をもっと延長して好きなだけでも良いと言ってくれたが、建研からは総プロが始まるので帰って来いと言う命令があって、結局1年と3ヶ月余りの滞在で帰国した。その年から始まった総プロ「建築物の防火設計法の開発」には、ゼネコンなどから技術者が部外研究員として派遣されて来てくれたので、その協力によって設計法開発に並行してゾーンモデルの改良を継続することが出来た。それまでのモデルの大幅な書き換えで多大な貢献してくれたのは中村和人さん(清水建設)である。新たな知見を入れた物理モデルや数値計算手法の改善は私自身も頭に入れていたが、彼が組み込

んでくれた排煙機能や開口条件のスケジューリングなど迄は想定していなかった。しかし、これらの機能を組み込むことでモデルは実際の設計で非常に有効に使えるものとなり、その後幾度かの改良は行われたものの基本的な構成は変わらないまま、現在まで既に30年以上も使われている。因みにBRI2のモデル名は中村さんが名づけたものである。

その後、BRI2の改善に多大な貢献をしてくれたのはやはり部外研究員として来てくれた山田茂さんである。その1つはCOの予測機能の導入である。周知のようにCOは火災時の有毒ガスの中で最も重要なものであるが、発生が燃焼材料の特性より寧ろ燃焼環境に依存する。そこでGlobal EquivalenceとCO発生の関係に関する実験結果をベースのCO発生をモデル化しBRI2に組み込んだ。他の1つは火災室内の対流熱伝達である。対流熱伝達については機械工学分野で多くの研究蓄積があるが、対流形態が強制対流と自然対流の2つに明確に分類されている。しかし火災室内での対流は周壁と火災室内ガスとの温度差に伴う自然対流的なものもあれば、火災ブリュームや開口流によって引き起こされる強制対流的なものも混ざっていて、いずれとも区別が出来ない性格のものであり、測定するにしても手法の方針が立てにくい。そこで火災区画内でのグローバルな熱損失量を室内圧の変化、およびそれに伴う空気の流出量から求める方法を考案し、火災区画サイズと発熱速度をパラメータとする無次元数の関係として対流熱伝達率を求めた。これらを順次組み込んでBRI2の改定バージョンであるBRI2000シリーズが作成された。

ゾーンモデルでは市販のグラフィック表示ソフトが無いので、データの入出力に幾分の習熟と手間が必要であった。これに見通しがついたのは京大に移ってから暫く後のことである。平成17年(2005)学部卒業の金井良智君はプロに匹敵するプログラミング技術を持った学生であり、卒論研究でBRI2000のGUI(Vprestと名付ける)を開発してくれたことでゾーンモデルが格段に利用し易くなったと言える。

3.5 多層ゾーン煙流動予測モデル

建物火災時の煙流動性状を解析する手法としては、ゾーンモデルの他にCFD (Computational Fluid Dynamics)モデルも頻繁に用いられる。しかし、CFDの欠点は計算に時間が掛かり過ぎることである。建築物の避難安全設計において煙流動予測を行う目的は、避難経路の寸法や排煙・煙制御設備の能力の設計値などが適切か否かを調べることであり、この作業においては火災時に起こりうる種々のシナリオに対しての検討を網羅することが精緻な予測を行うこと以上に重要となる。建築設計が最終的に固まるま

では頻繁な変更が生ずることもあって、1回の予測に何十時間も要する計算を逐一行うことは実際的ではない。この意味で計算時間の負担を殆ど意識なくして良いゾーンモデルは避難安全設計実務に使う上で頗る便利なツールと言える。

しかし二層ゾーンモデルは上・下の2層がそれぞれに一樣と見なしているため、何らかの評価を行う目的で温度分布を把握したい場合には使えない。また、火災プルームが上部層に流入すると瞬時に上部層と混合するという仮定も荒すぎると前々から思っていた。そこで、鈴木圭一さん（本学建築卒、清水建設）の博士研究のテーマとして多層ゾーン煙流動モデルの開発をして貰うことにした。このモデルでは建築物の任意の室内を複数の水平の層に分割し、火災プルームはそれらの層を貫通しながら室の天井まで達するとしている。

多層ゾーンモデルは、火災室その他の室における高さ方向の温度分布などを、世界で最も良く使われているCFD火災モデルであるFDSと遜色無い精度で予測できる。一般に煙流動の計算では最も時間を要するのは圧力を反復計算で解く部分であるが、多層ゾーンモデルでは、層の数は多くても、各層のエネルギー保存式を合計することで、各室に1つずつの圧力を変数とする圧力支配方程式が得られる。このため、計算負荷は二層ゾーンモデルと同様にCFDモデルとは比較にならないほど軽い点が大きなメリットである。

このような多層ゾーンモデルの計算の軽さは、トンネルや地下鉄火災など、土木的的巨大空間での火災の場合の煙流動解析を対象とした場合にも、CFDモデルと比較して大きな優位性を持つと考えられる。このため、多層ゾーンモデルをトンネル空間に展開し、模型トンネルでの実験結果で検証しながら、トンネル火災時の煙流動予測モデルを開発した。

4. 性能的火災安全設計法に関する研究

都市が伝統的に木造家屋で営まれてきた日本は元来都市大火の国であった。江戸における大火の頻発は周知のことであるが、大火は日本のどの都市においても日常の脅威であり、明治以降欧米との交流が盛んになってからは、耐火的建築によって不燃都市を建設することが悲願となった。しかし、経済的、技術的制約のために不燃建築の建設は当初遅々として進まず、やっと目に見えて増加し始めたのは戦災復興期からと言って良いであろう。戦時中の空襲火災による被害が深刻であったことから、戦後の復興では耐火建築促進法を始め種々の不燃ビル建設奨励策がとられた。これによって我が国にも次第に不燃

建築が増加して来たが、それは反面で、ビル火災による大事故を増やす結果にもなり、我が国におけるビル火災対策に対する経験の不足と防火基準の不備を露呈することになった。このため特に1960年代に入ってから1970年代の初めにかけては、相次ぐ重大火災事故を受けて、建築基準法や消防法の規定が矢継ぎ早に強化された。そして、その一連の防火基準強化の結果、施主や設計など建設側では防火基準の過重感が生じ性能的設計の要望が出されるようになって来ていた。

4.1 防火総プロ

性能的防火設計法を望む声が高くなって来たのは、防火基準に過重感が出来たことと同時に、仕様書的に書かれている基準の目的や担保される性能が理解しにくいということにもあったと考えられる。一方、1980年頃までには建研、消研、大学等での火災研究がかなり進み、またUJNR防火部会を通じて多くの研究成果・情報が入手できるようになって来ていた。建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の防火設計法の開発」（通称：防火総プロ）はこのような状況を受けて1982～1986年の5カ年の研究として実施された。このプロジェクトには総合防火設計法、出火拡大防止設計法、避難・煙制御設計法、耐火設計法の4部会と既存建築物の防火改修の、合わせて5部会が設けられたが、私は避難・煙制御設計法および既存建築物の防火改修の2部会について建研幹事を割り当てられた。自分としては新規設計を対象とした避難・煙制御設計法に集中したかったため、既存建築物の防火改修部会の世話を削られるのは正直なところ迷惑に思っていたが、結局これも良い経験にはなった。

既存建築物の防火改修が防火総プロに付け加えられたのは、先年の法規改正で導入された新たな規定が、消防法関係は既存建築物に遡及適用されるが、建築基準法関係は遡及されないことに原因している。建設省では、遡及適用が見送られたことの代替措置として防火改修指針を作成し、行政指導によって改修を誘導することになった。指針の内容を調べると、改修について複数のオプションが示されており、実情によってやり易い方法を選択することが出来るので、それ程困難は無いように思われた。しかし、それでも経済的な困難があって改修が進められない既存建築物が少なくなく、中には改修が無理なため廃業するとした病院なども有ったのである。安全基準を厳格にすることが‘角を矯めて牛を殺す’ことに繋がる危険について考えさせられた部会であった。

避難・煙制御部会は京大建築学科教授の寺井俊夫先生に部会長をお願いし、委員として大学やゼネコ

ンなどから多くの参加を頂いた。最初は設計の手順のようなものを考え、そのフローチャートを色々と検討していたが、その中に、性能と言う共通の言葉で意味することが、人により千差万別であることが明らかになった。そこでまず、防火設計は本来何を目的とし、どの程度の安全レベルを達成しようとするものなのかを明確にする必要があると考え、プロジェクトの3年目くらいから、部外研究員の高橋清さん（フジタ）に協力して貰いながら、建築基準法の規定の内容、制定された歴史的な経緯の分析を行った。この中で高橋さんの整理してくれた建築基準の変遷に関する研究資料は、建研の研究報告として出版しておこうとしたが残念ながら査読を通らなかった。理由は良く分からない。仕方がないので原稿のまま持っていて今迄何度も参考にしてきた。

ともかくも、このような分析によって建築基準法の意図するところを同定・抽出し、‘建築物の火災安全上の要件’として整理した。この要件の抽出は避難・煙制御設計に関わる分だけに限定して行うことは出来ない。建築基準法の規定では、一つの仕様規定が複数の目的や性能の達成に当てられていることが少なくないからである。例えば、ある条件の空間に防火壁を要求されるとすれば、それは避難安全のためでも、財産保護のためでも、建物倒壊防止のためでも、また消火活動の容易化のためでも有り得るし、またその壁の仕様が10cm厚のコンクリートであれば、火災加熱による壁の破壊を防止し、熱の伝導を遮断し、また煙の伝播を防ぐ性能を兼ねているかも知れない。

この分析の結果建築基準法の防火規定の目的として抽出されたのは①出火防止、②人命安全、③第三者の権利保護、④消防活動の確保、⑤市街地火災の防止、である。この枠組みは、表現に若干変更はあるが、建築基準法の性能規定化を目指した2000年の改正に受け継がれた。

建築基準法の仕様規定の中には、上記のような目的を達成するために、建築物はどのような要件を満たすべきかと言う指示が埋め込まれている。例えば‘③人命安全’の目的だけを掲げておいて、後は勝手に考えろと言っている訳ではない。これらは、建築物の火災という条件を考えた場合、人命安全を図る手段として概ね現実的な解になっている。上記の‘建築物の火災安全上の要件’の抽出は、③人命安全のみならず全ての目的について行った。

しかし言うまでもなく、要件を文章化しただけでは実際の建築物が要件に適合しているか否かを客観的に判断することが出来ない。具体的な寸法、材料、設備等を選択した建物の設計の適合検証のためには、具体的にどのような条件の下でどのような性能を満

たせば良いかを具体的・客観的に示すための技術的基準が必要である。建築基準法はそのような技術的基準を規定する法規であるが、性能設計のメリットを生かすためには、これらの技術基準は出来るだけ性能的基準に変換する必要がある。火災安全設計の場合、その性能基準は‘設計火源’と‘安全判定基準’の対で与えられるのが自然である。避難・煙制御設計法に関する各要件については、このような性能基準を含め、何らかの形での技術基準が少なくとも1つは検証のため利用可能なように作成した。

防火総プロの成果は総合防火設計法というタイトルの4分冊の書籍として出版された。私としては性能的火災安全設計法として不備が多く未完成と思っていたが、意外な大人気となり、性能的防火設計は活況を呈することになった。特殊な建設方法について大臣の許可が得られる38条の規定は建築基準法の制定の最初から存在したが、防火関係の申請はそれまで時折ある程度で殆どの年は申請0に近い状況であった。それが防火総プロの最終年度1986年位から急速な増加を始め、建築基準法の改正により38条が廃止される2000年の近年には年間150~200件のペースで申請がなされるようになっていた。

この成功の原因を考えて見れば、先ず背景として現行法規による制約に飽き足らず新たな設計の可能性を希求する建築界があり、そこに防火総プロが火災性状予測に関する様々な技術を紹介したこと、および設計火源や許容安全基準の形で明示的な判断基準を提供し、安全検証の手続きを大幅に透明化したことが挙げられよう。

4.2 海外における性能的火災安全設計法

日本における性能的火災安全設計法の成功はUJNR防火部会を通じて米国の着目するところとなった。米国の火災研究は多様な課題を扱っていたが、元々Home Fire Projectが中心であったことでも窺えるように、死者が最も多い住宅火災を対象としており、日本でのように特殊建築物（Unusual building）は念頭に無かったようである。先述のように、米国留学から帰った後は防火総プロで設計法の開発を中心に研究していたが、米国研究者には私は火災モデリング屋のイメージが定着していたようで、最近では設計法をやっていると話すと、設計法？それは何だ？というような反応であった。性能的火災安全設計法について米国側が興味を持ち出したのは、多分UJNR防火部会が日本で開催された時、性能設計特別シンポジウムを那須温泉で開催しゼネコンなどによる設計例の紹介をやって貰った頃からである。因みに、その頃のUJNR防火部会は、米国で開催される場合は会場が回ごとに色々な都市に移って楽しめたが、

日本開催の場合はつくばの建研ばかりであったので、少しは景勝地で楽しんで貰おうと言う配慮もあった。そのためにゼネコンの方などには高い参加費を負担頂き、また自分でも開催費の工面をしなくてはならず結構苦労したが、同伴者も含めてそのときの参加者が後々までも‘那須のシンポジウムは素晴らしかった’と言って喜んで貰ったので、苦労の甲斐があったと思っている。

閑話休題。程なく、米国側は「総合防火設計法」全4巻を英訳したいと言い出した。私は‘未完成なので薦めないよ’と再三止めたけれども結局は英訳してしまった。落胆したところも多かったと推測するが、Center for Fire ResearchのSnell所長が‘分かった、分かった。要はDesign fireとSafety criteriaだろう’と言っていたところをみると、ある程度の役には立ったのであろう。ともあれ、米国でも性能設計の議論が活発になり、それはやがてヨーロッパなどにも波及していった。現在では、仕様規定の経験さえない途上国も一足飛びに性能設計に走っており、寧ろ過熱気味で不安なところもある。

4.3 火災リスクの観点からの防火法規の分析

防火総プロは性能設計の端緒を開いたと言う意味で大きな意義を持ったが、未だ多くの点で不備を残していることは認識していた。その1つは基本要件への適合検証に必要となる技術基準が、避難・煙制御設計に関わる部分以外は未作成だったことである。そこで殆ど防火総プロ終了直後から、場を日本建築学会防火委員会傘下の火災安全設計小委員会に移して、これらの欠落部分を補い「総合防火設計法」を真に建築基準法の防火規定に代替し得る自立的な設計法として完成させる作業を行った。しかし、学会での作業は基本的にはボランティアであるから各自の仕事の関係もあり、必ずしも順調には進捗しない。一時熱心にやってくれる人も途中から出席しなくなって、代わりに新たに参加する人があり、などの繰り返しで、まるで‘青の洞門’（菊池寛「恩讐の彼方に」参照）さながらの作業であった。やっと「建築物の火災安全設計指針」として出版した時には既に2002年になっていた。

しかし、この作業に時間が掛かった原因はそれだけではなく、技術基準の作成作業の段階で、設計火源と安全基準の他にリスクの観点を入れて定めるべき基準があることを感じたためである。例えば、火災時の避難経路計画では2方向避難の原則があり法規にも反映されているが、法規は規模が一定以下の場合には、避難出口が1ヶ所しかない室、階段が1つしかない建築物を認めている。

このような仕様規定の適切性については、建築基

準法だけ見ても分からないので、先ず諸外国ではどう規定されているか調べて比較したいと防火総プロの実施中から考えていた。そこで、フランス政府の給費留学生制度に応募して防火総プロが終了した年の8月から1年間CSTB（フランス建築科学・技術研究センター）に留学して各国の資料を集めた。

建築の防火基準についてはロンドン大火(1666)の後で作成された基準は有名であり、また言語、知人の存在などの面からも、資料調査にとって最も適切なのは英国と考えたが、留学のための費用を提供してくれるシステムが無かったのがフランスを選んだ理由である。フランス政府給費留学生については勿論選考に受かる必要があったが、建研に既に留学経験者が5～6名は居て、話を聞く限りある程度フランス語が出来ればチャンスは有るように感じた。そこで、科学技術庁が提供していたフランス語研修に、防火総プロの期間中であつたが、10ヶ月ほど通って勉強した。しかし後で知ったことだが、私が応募した時にはフランス政府の予算削減で留学生数は以前の1/3に減らされており、思わぬ難関となっていた。応募の前には、書類選考で通れば先ず合格と経験者から聞いていたので、東京での試験で顔を合わせた人（工学分野で10人くらい、全国で何人かは不明）は全て合格するものと思っていたが、蓋を開けてみれば工学分野での最終合格者は全国で僅か3人に過ぎなかった。つたないフランス語能力で良く合格したものだと思う。こんな激戦を始めから知っていれば最初から諦めていたであろうから、知らなかったことが幸いしたと言える。これも後で知ったことだが、受け入れ先のCSTBの研究者が火災モデルの研究で米国NBSに滞在していたことがあり、面識は無かったが名前では私を良く知っていてくれたため、フランス政府からの受け入れの問い合わせに相当好意的にレスポンスしてくれた様子である。

ヨーロッパに各国の防火法規を調べている内に、全国レベルの近代的法規の制定は意外と遅く、早いものでも1970年代、大半は1980年に入ってから制定であることが分かった。これは日本では1920年代から既に市街地建築物法などを発展させていたことが頭にあった私には意外な発見であった。また、近代的防火法規の制定に当たってはLife Safety Codeなど結局米国で作成された規定が大幅に参考にされていることも明らかになった。このため、仕様書規定の意味を探るには米国の防火規定の制定過程を歴史的に追ってみる必要を感じたが、日本に帰ってから調べてみると、NBSの図書館にNFPAのSafety to Life Committeeの議事録やBoard of Underwriters, New YorkのBuilding Codeなど、1900年頃からの資料が多数あることが分かった。そこで、それらのコピーを

貰い、萩原一郎さん（建研）と一緒に調べた。

これによって色々な防火基準が定まってきた事情については大分良く分かってきたが、専門家の判断とは言え経験的に作成した基準なので、その根拠は薄弱に感じられるものも少なくない。また、米国に倣ったとはいえ、各国でまた専門家による味付けが入っていて、類似の規定でも国により結構差が見られる。つまり、多くの基準が何か決めなければならないことは皆が思っているが、どう決めれば良いかの切り札が無いという困った状況にある。そこで、ある防火基準が想定しているリスクを許容値以下にするという観点から基準を定められないかと考え幾つかの分析を行った。このような分析を行った基準に、居室避難出口の数、単一階段が許される建物の条件、行き止まり廊下の許容条件、耐火設計における設計可燃物密度がある。この結果、仕様書基準の不合理ばかりではなく、経験的に定めたとしても結果的に合理性が高いと考えられるものも見出された。仕様書的に一意に定めるより許容リスクに基づいて決める方が設計上の柔軟性もあり、重要性の度合いも理解し易いので、他の基準についても同様な手法の可能性を探るべきだと思う。

4.4 リスク基盤の避難安全設計法

性能規定化を目指した 2000 年の建築基準法改正は、防火総プロの時代から求められてきたものの集大成かと思われたが、最近は何種の問題点があらわになり、寧ろ性能設計の後退を招くようになっている。この原因は色々考えられるが、最大の原因は火災リスクの観点の欠如と考えてきた。この点については京大に移ってから建研などに再三指摘し検証法の改善を求めてきたが中々進捗しないことから、自分でリスク基盤の避難安全設計法の開発に着手することにした。

建物火災時の避難リスクは、居室避難に関しては多くの場合非常に低い。一方、階避難、全館避難での避難リスクは居室避難に比較して潜在的に非常に高い。これは、特定の空間での出火率や在室者は少なくても、階や建物には複数の空間があるため、その数に比例して出火率や潜在的避難者数が増加するためである。例えば、各階に 10 世帯が入る 10 階の共同住宅では、出火率と在館者数は 1 世帯の場合に対してそれぞれ 10 倍、100 倍になり、潜在的人命リスクは 100 倍、10,000 倍となる。伴って避難安全対策の重要性が高くなるのは当然である。

しかし、2000 年の建築基準法改正に伴い導入された避難安全検証では重点が完全に逆転しており、居室避難の検証に多大の労力と時間が費やされる一方で、階避難や全館避難は非常に軽く扱われている。

この原因の 1 つは、火災リスクの観点が欠けているためである。従来の法規では小規模な空間に対する規制は緩やかに、大規模な空間、共用廊下、階段などやの制限は厳しくなっており、経験的ながらも火災リスクに対する考慮が働いていた。

潜在的リスクの大きい空間に対しては防火戸、煙制御設備、スプリンクラー設備などの防災設備が設けられるが、これらのいずれも信頼性は 100%ではない。このため、従来の法規で複数の設備を要求し、これらの組み合わせで生まれる防災システムの冗長性 (redundancy) により信頼性を高めることが意図されていたと考えられる。しかし、検証法では、防火戸の閉鎖は 100%信頼する反面でスプリンクラーは無視しているなど、防災設備の扱いにバイアスがあり、これが避難安全検証に不合理を生じている。不自然な前提が火災安全設計の在り方を歪めているのである。スプリンクラー、防火戸、排煙・煙制御設備など火災時の避難安全に影響が大きい防災設備の効果は、それらの各避難段階における信頼性のレベルを考慮しながら評価に組み込むことで防災設備の役割がより良く理解され、合理的、効果的な設備設計につながる。

ここでリスク基盤の避難安全設計法の詳細を示すことは出来ないが、要点だけ述べると、この設計法は

- 火災時の避難リスクを安全側に許容レベル以下に抑制する方法である
- 性能設計における決定論的検証手続きは変更しない
- 避難安全検証に用いるべき設計火源とシナリオを対で組織的に決定する
- いずれのシナリオにおいても避難不能者は 0 とすることが求められる
- 下記を基本要素とする
 - ① 設計ベースの許容避難リスク
 - ② 防災設備の作動/不作動に基づくシナリオイベントツリー
 - ③ 火災成長係数の確率密度分布
- 設計ベースの許容避難リスクは対象空間の規模、用途に伴う出火率から計算される
- 各シナリオへは対象空間の許容避難リスクが部分許容避難リスクとして分配される
- 部分許容リスクと在館者数から決定される設計火源の下で避難不能者が 0 となることを検証する

避難安全に関連する防災設備の数は居室避難では少ないが階避難、全館避難では必然的に多くなるので、これに従ってシナリオの数が増加する。しかし、最も不利なシナリオについて検証すれば自動的に安

全側に検証済みになるシナリオも多いので、実際に検証計算が必要なシナリオの数は大幅に減らすことが出来る。各シナリオへの許容リスクの分配および実際に検証を必要とするシナリオの見極めは、検証の論理と防火設備の特性に対する防火技術者の知識に依存するが、それは本来防火技術者が備えていなければならない知識・技術である。

リスク基盤の避難安全検証によって、防火設備の信頼性の向上策や防災システムへの冗長性の付与も避難安全設計の重要な部分であることが客観的に理解される。それは防火設備システムの総合的計画を促し、ひいては防火技術者が建築設計の早い段階から防災設計に関わって行く契機になると考える。

5. 火災安全工学ツール（計算式）の開発

性能的火災安全設計では、与えられた設計火源とシナリオの下で安全基準が満足されることを設計段階で検証しなければならない。このために火災の諸側面に亘る現象を工学的に評価するための解析手法が必要となる。

世界的には火災性状の予測にはコンピュータモデルの使用が人気があるが、検証方法の透明性が必要な適合確認においてはブラックボックスになり易いコンピュータモデルの使用には出来る限り慎重でありたい。この点、簡易な計算式は、複雑な条件下の解析は難しいが、設計は科学ではないので計画内容の安全検証は保守的に行えば足りることを考えれば有効に利用できるものが多い。また、建築設計では、建物の完成までに頻繁な変更が生ずるが、その度にコンピュータモデルで再計算するのは計算のための労力が大きすぎる。

更に、簡易な計算式は、例えば火源の発熱速度や空間のスケールなど、現象に関連する量が結果にどの程度影響するかについての本質的な理解を防火技術者に与えてくれるが、コンピュータモデルの濫用はその能力を養わない。構造工学でも機械工学でも、コンピュータ時代以前から工学技術を発達させた分野では様々な計算式の蓄積が存在し、技術者が現象の本質を理解する上での助けとなっている。一方、工学的技術の発展がコンピュータ技術の発展とほぼ重なってしまった火災安全工学の分野では、火災高さや火災プルームなど一部の対象に集中して多くの計算式が存在するものの、一般には計算式の蓄積が乏しい。‘個体発生は系統発生を繰り返す’と言われるが、防火技術者の成長についても同様であり、火災現象の本質を教える計算式などの火災安全工学ツールの蓄積が必要と考えた。

5.1 煙流動と制御に関する計算式

(1) 出火室での煙制御

建物火災時の避難安全の検証には煙流動性状と煙制御システムの効果の予測は欠かせない。このため最初に作った計算式は火災室内における煙層の自然降下予測式である。煙層降下は火災室での避難との関係で速度が問題となる。火災プルームの性状については多くの提案式があるので、これを利用して空間上部に発達する煙層の降下式を導いた。煙層温度を一定と見做した比較的簡単な式であるが、発熱速度、空間面積、天井高さが煙降下時間にどう影響するかを知ることが出来る。因みに、このとき機械排煙が作動している条件での煙降下式も導いたのだが、こちらは少々式が複雑になって関連パラメタとの関係が直観出来ないので数値計算と比較してメリットがなかった。

建築基準法に規定される排煙方法には自然排煙と機械排煙があり、それぞれ排煙口面積および機械排煙風量が床面積に対して規定されている。しかし、規定される自然排煙口面積と機械排煙風量は同性能なのか、あるいはどんな性能を持つのか全く分からない。これらの効果を評価するためには、煙層に対する質量および熱量の保存、圧力と流量の連立方程式を解かなければならないので、一般には反復計算を必要とする。しかし、一般の条件で計算が難しくても、設計目標が明確にされれば容易に解ける場合がある。排煙の問題では、‘想定する火源の発熱速度の下で避難や消火のために必要な煙層高さを維持する’などが妥当な目標である。そうすると、そのために必要な自然排煙口面積なり機械排煙風量を芋づる式に簡単に求めることが出来る。これらは、いずれも簡単な計算式あるいは計算手順であるが、火災安全工学の初学者に有用と考えられたのか、外国の教科書などに取り入れられている。

(2) 付室加圧煙制御

高層建築物では階段に火災の煙が侵入すると重大な結果に繋がるので、建築基準法では排煙設備を有する付室を設けた特別避難階段を要求している。この付室における排煙の代わりに、給気加圧することで煙の侵入防止を図る付室加圧煙制御方式は、38条の時代に設計側から発案されたもので、建設大臣の許可の制度を通じて広く普及した。この当時の付室加圧方式の安全検証は、先ず付室への給気量の値を経験的に与え、コンピュータモデルによる計算で付室への煙侵入が起こらないことを確かめる方法であった。京大に移ってから立ち上げていた日本建築学会近畿支部に加圧防煙研究会では、この設計法をより合理的なものにしようと考え、付室への必要給気量をコンピュータモデルに頼らないで計算する方法

を開発することにした。

この場合には火災室、廊下、付室、堅穴空間などでの質量および熱量の保存、開口における圧力と流量の連立方程式を解くことが計算法の前提となる。これを一般的な条件で解く事は火災室の排煙の場合以上に難しいので、通常はコンピュータモデルに頼ることになる。しかし、設計目標として付室に煙を入れないための条件、いわゆる遮煙条件が予め定まるため、火災室の排煙の場合と同様に、芋づる式に各室の圧力と開口流量が求まり、最終的に付室への必要給気量を求めることができる。寧ろ難しいのは、開口の開放程度をどう設定すれば良いかというシナリオ選択の問題であったが、これについても検討して付室への必要給気量の点で最も不利な条件を見出すことで解決した。この研究では研究会メンバーの皆で議論したが、日建設計の久次米真美子さんが最も頑張ってくれた。

この計算法は、東京では近畿支部方式と名づけて、消防法の性能規定化のときに消防排煙の計算方式として取り入れられている。

その後、建築基準法にも付室加圧煙制御の告示が規定されることになった。これに似たものは、2000年の改正の時に押し出し排煙の名で導入されていたが、付室を守るための煙制御方式としては考え方が中途半端であったし、給気風量が小さ過ぎて役に立ちそうもなく、また消防排煙とも矛盾した方式であったため、これらの矛盾を解消しようとしたものである。しかし、この告示もまた実際の建物での運用を難しくする規定を盛り込んでいた。それは給気による過剰圧力を防止するために廊下あるいは一般室に規定の大きさの圧力逃し口を設けることとされている点である。最近の大規模な建物では廊下が外気に面しておらず、外周も嵌め殺し窓になっていて、規定の大きさの圧力逃し口を設けることが中々に難しい場合が多い。そこで、圧力逃し口は一般室に設けてもよいとされる点と有効な機械排煙がある場合はその風領分圧力逃し口の面積を減らせるとされている点を有効に活用できるよう、様々なケースの解決方法を検討し、また通常の機械排煙を有効な排煙と出来る手法を考案した。この検討で取り分け頑張ってくれたのは角谷三夫さん（関西建築防災研究所）である。

(3) 階段加圧煙制御

高層建築の階段は火災時には在館者全員を収容する避難空間として位置づけられて来た。その階段への煙侵入防止のために、海外では階段室に機械給気する階段加圧が採用されることが多い。反面、この方式が日本で殆ど採られないのは、階段室各所の隙間からの空気の漏れが大きく、煙侵入防止に必要な

圧力を出すための風量が大きくなり過ぎると考えられているためである。必要風量の算定には煙突効果をもたらす階段室の温度想定も関わっており、給気したとき初期の内外圧力差分布が保たれたまま煙侵入防止に必要な値まで圧力を上げなければならないとすると、給気された空気の漏れ量も大きくなってしまふのである。

しかし、給気をすることは低温の外気を階段室に導入することなので、給気自体が温度低減効果を持つ筈である。そこで給気による温度低下の予測式を導いた。この式は模型実験での比較では、実験値と良好に一致したものの思ったほど大きな低減効果は得られなかった。階段周壁からの対流熱伝達の影響は結構大きいのである。予測式を実大建物に適用して見ると模型の場合より温度低減効果はかなり上がるようであるが、実験での実証は出来ないでいる。

5.2 火災プルームの性状に関する計算式

火災プルームに関係する性状は火災研究分野において最も多くの研究蓄積があるテーマの1つである。しかし、これらは殆ど機械工学あるいは物理出身の研究者によって行われて来たためか、殆どが自由空間中の火源からのプルームに集中しており、建築空間の条件との関係で性状を扱ったものは少ないので火災安全設計への応用と言う面で物足りないところがある。建築火災安全設計では色々な場面で火災プルーム関係の現象を扱う必要が生ずるため、その便宜を考えて次のような問題に対する計算ツールを開発した。

(1) 開口噴流プルーム流量

火災室の開口などから温度の高い煙が他の空間に噴出すると、浮力プルームとなって周囲から空気を連行しながら上昇する。そのプルーム流量の把握は建物内の煙伝播の予測や制御の上で重要である。この研究ではスケールの異なる2つの模型火災室を作り、種々の発熱速度と開口幅について開口噴出プルームの流量を測定し、一般的に適用できる流量計算式を無次元巻き込み高さと無次元流量の関係として導いた。この実験手法での主な工夫は、小規模実験で開口流量やプルーム流量を精度良く測定することは難しいので、ガス分析と集煙ダクトの流量から求めたこと、および巻き込み高さを明確にするため火災プルームからの煙を溢れさず小フードを設けたことである。

(2) 開口噴流の相似則

開口噴流が屋外側に流出すると上階の窓がその熱に曝され上階延焼を引き起こす恐れがある。このため建築基準法では90cmのスパンドレルを設けることが規定されているが、噴出気流の性状は開口部の形

状に大きく影響されるので条件によらず90cmで大丈夫という訳ではない。外壁の条件が典型的な場合の噴出気流の性状については多くの研究があるが、考え得る種々のデザイン条件に対する性状を一般化することは勿論難しい。しかし模型と実大との相似則があれば、特定の外壁デザインの場合の気流性状を縮尺模型実験で調べ実大に換算できると考え、規模の異なる模型で異なる火源発熱速度、開口条件、外壁形状に対する実験を行い、無次元相似則の有用性を確認した。

(3) ボイド空間の煙性状

建築物には、ボイド、光庭、中庭などの名で屋根の無い空間が組み込まれることが少なくない。このような空間は面積が広く、高さが小さい場合には通常の外部空間と同様に考えて良いが、細長い井戸のような空間になると竪穴空間のように建物内への煙伝播経路となる恐れがある。しかし、外気同等空間か竪穴空間かの判断は建築主事によって感覚的になされている。そこで、このようなボイド空間の煙性状を模型実験で調べ、空間の幅、高さ、火源の発熱速度からプルーム温度を予測する無次元式を確立した。また、このプルーム性状はボイドの底部に給気口を設けることでも影響を受けるので、その影響の程度も調べた。

因みに、この結果は東京消防庁のボイド空間を有する集合住宅の煙に対する安全指針に反映された。

(4) 火災プルーム先端の上昇速度

ゾーンモデルでは火災プルームが上部層に到達するまでの時間は無視しているが、実際には幾分の時間が掛かる。従って、火災プルームの上昇時間は天井高の大きい空間における火災感知時間にも関係するが、室内煙性状の基礎的情報の一部としても意味がある。この研究では模型実験結果を基に、空間の幅、火源からの高さ、発熱速度と火災プルーム先端の上昇時間の関係を表す無次元式を確立した。竪穴空間では頂部の開口があるか無いかで上昇時間の傾向が変わるが、空間の幅が一定以上大きくなると自由空間の上昇時間になることは勿論である。

(5) 二層環境下の天井ジェット性状予測

建築空間に設置されるスプリンクラーや火災感知器は、火災プルームが天井に衝突した後水平に広がる天井ジェットに反応して作動する。この天井ジェットの性状についてはAlpertによる有名な研究があり温度や流速などの予測式が確立しているが、これは天井の周囲が開放されている条件で適用可能なものである。一方で、建築空間の天井は周囲が壁で閉じられているので、火災プルームや天井ジェットは室の上部に蓄積される煙層の中を挙動することになり、温度や煙濃度は煙層の影響を受ける。

この研究では、煙層内でのガス巻き込みを考慮したプルームのエネルギー保存を考えることで、天井ジェットの温度や煙濃度の予測式を導いた。この温度の予測式は、煙層の寄与分と開放天井に対するAlpertの予測式を足し合わせると言う非常に簡便なものになった。また、煙濃度の式も同じ構成だが、天井ジェット中の煙濃度の予測式を必要とせず、Alpertの式に煙発生量に関するパラメータを掛けて使うことが出来ることを見出された。

(6) 高温層への火災プルーム貫入

アトリウムなどが日射を受ける場合を始め、天井高さの大きい空間では通常時上部に温度の高い層が形成されている場合がある。このような空間で火災が発生したとき、火源の発熱速度が小さい段階では火災プルームは浮力が小さいため高温の層を貫通して天井まで達しない可能性が出てくる。すると天井に設置された感知器が作動せず、火災感知が遅れる可能性が生ずる。そこで、このプルームの貫入条件を把握する研究を行った。実験では、予めメタノールを火源として上部層の温度を高くしておいた後火源を取り除いて、新たに設置した定常火源からの火災プルームが上部層の温度低下とともに上部層内に貫入する高さを測定した。一方で理論的には、煙層境界高さにおいて火災プルームが持つ運動エネルギーと上部層貫入後にプルームが高温の上部層から受ける負の浮力によるエネルギーの関係から、貫入高さを支配する関係を導いた。

5.3 換気支配火災の温度予測式

火災区画の火盛り期温度の予測は耐火設計の基盤であり、従来から多くの予測式が提案されてきたが、適用限界がはっきりしないものも多かった。一方、比較的近年になって半経験的であるが火災温度予測にMQH手法が出され、また酸素消費法の理論が出されたこともあって換気支配時の火災室内での最大発熱量が抑えられるようになった。そこで、これらの知見を利用して換気支配火災時の火災室最大温度上昇と隣接廊下の温度上昇を予測する式を導いた。MQH式では輻射失熱の影響が入っていないので、火災室が著しい高温になるときは補正が必要であったが、この式はSFPE (Society of Fire Protection Engineers)基準の第1号となったと米国の友人から聞いている。また、同様の計算式は2000年の建築基準法改正で導入された耐火性能検証法でも用いられている。

6. 都市火災性状の研究

私が防災研究所に来たのは1997年、阪神大震災の2

年後であった。恐らくは阪神大震災で大規模な火災が数多く発生したので防災研にも火災の専門家が1人くらいは必要と言うことだったのであろう。私は卒論と修論で地震火災対策に関連して市街地火災延焼と住民避難の関係の研究を少しやったことがあるが、建研に就職してからは専ら建築単位の火災を扱っていたので市街地火災に関する知見は殆ど無いと言ってよかった。しかし、配属が巨大災害研究センターと銘打つ分野であるし、また建研でのような実験施設も全く無いので、やるとすれば大規模火災を扱ったソフトな手法の研究だろうと考えた。と言うわけで、修士卒業以来24年ぶりにまた奇しくも延焼モデルと住民避難モデルという同じテーマを扱うという巡り合わせになった訳である。しかし、このテーマに関して先行する研究や類似の研究は内外のどこにも存在しないことから、開発までに時間がかかることも覚悟していた。退職までの何とか形を着けられたのは偏に優秀な学生に恵まれたお陰であり、幸運に感謝している。しかし、モデルは飽くまで安全な都市を実現するという目標のための支援ツールに過ぎない。この目標のためには退職後も微力を尽くす積りではあるが、やはり若い世代に自分のこととして取り組んで貰う必要がある。

6.1 物理基盤の市街地火災延焼予測モデル

戦後の復興が進むとともに市街地大火は劇的に減少したが、地震火災のリスクは潜在的に存在しているので、その被害予測のために幾つかの市街地火災延焼モデルは使われていた。しかし、それは基本的に「浜田式」と呼ばれる、過去の大火における延焼速度と風速との統計的関係を基に作成された経験的モデルを基盤にしたものであった。一方、現在の市街地の条件は、大火が頻発していた過去の市街地とは色々な面で大きく変貌しており、統計的モデルの予測妥当性が疑われる状態になっている。しかし、大火が稀な現在では、モデルを更新するための統計的データも得られないことは明らかである。

反面で現在は建築火災性状に関する多くの知見と工学技術が蓄積されており、市街地火災の性状予測モデルの構築にもこれらが応用できるであろうと言う予想があった。また、コンピュータの計算能力の向上が著しいことから、多数の建築物の火災を対象にしても実務的時間内に予測計算を可能とする条件が出てきている。加えて、近年では延焼予測に必要な都市データなど、多くのデータが電子データで提供されるようになってきていることも大きな便宜である。

このような開発環境を考えて、従来のモデルとは全く異なる物理基盤の市街地火災延焼予測モデルを次のような概念で開発することにした。

- ① 市街地火災を個々の建物の火災の集合と考える
- ② 個々の建物は他の建物の火災からの熱的影響の下で燃焼する
- ③ 個々の建物の各室を一層ゾーンの検査体積として物理量の保存を考える

このうち①は考えて見れば最も素直な考え方であり、ただ統計的モデルでは都市をマクロに観ていたもので考えられることがなかっただけである。②は建築単体の火災性状予測には出てこない、市街地火災の問題で独自に考えねばならない項目である。③は建築火災工学ではお馴染みの手法である。

以上のように市街地火災延焼モデルの開発は、可能性はあると思っていたが、何しろ初めての試みなので、当初は2~300棟程度の市街地が扱えれば一応の成功かなと考えていたのが正直なところであった。しかし、卒論から私の研究室に迷い込んで来て、結局博士課程まで居てくれた樋本圭佑君（現防災研究所助教）の意欲的研究のお陰でモデルは長足の進展を遂げ、現在では2~3万棟の市街地の延焼予測が通常のパソコンを使って30分程度で出来るようになってきている。因みに地震火災時の住民避難モデルを作ってくれた西野智研君（現神戸大学助教）は避難モデルに関連して樋本君の詳細モデルを基に少し簡易化した延焼モデルを開発したが5~60万棟ある京都市全域の延焼予測を10分程度でやっているようである。

樋本モデルは密集木造市街地、伝建地区、京都の文化財建築の地震火災リスクや防火対策の検討に頻繁に使われるようになって来ている。また何しろ世界初の斬新なモデルなので世界的知名度も高くなってきており、台湾や韓国では既に使われているが、色々な国からの問い合わせも増えているようである。一般が自在に使えるようになるには、GUIの開発が少し課題として残っているが、実務者が地震火災に関する色々なシナリオに対して、延焼予測モデルを軽快に使いながら、対策を考えることが出来るようになるのも遠くないだろうと思う。

6.2 地震火災時の都市避難予測モデル

都市大火では避難者の人的被害は一般に少ないと思われがちであるが、江戸時代の大火は言うに及ばず、比較的近年でも関東大震災(1923)や函館大火(1934)、更には戦時中の空襲などでは非常に多くの犠牲者が出ている。市街地火災の延焼速度は比較的大きい場合でも100m/h程度なので、避難者の歩行速度に比較して著しく遅いにも関わらず多数の犠牲者が出ることは何故なのかは疑問であった。一方、多数の犠牲者が出る市街地火災は例外なく強風下の火災である。このような場合には飛び火によって延焼拡大が大きくなることも影響するであろう

が、強風下の市街地火災での避難者にとって最大の危険は、建築火災でもそうであるように、煙ではないか、と考えたのがこの研究の契機である。

この研究は卒論や修論のテーマとして繰り返し上げながら少しずつ進めていたが、学生がコンスタントに得られないので滞りがちであり、防災研在職中での発展は諦めかかっていた。状況が一変したのは西野智研君が卒論で迷い込んで来てくれたことが大きい。彼が博士課程まで居て、精力的に研究してくれたことで、地震火災時の住民避難モデルは一気に進展し、目標としていた関東大震災における130万人の避難の全容の予測が可能になった。このような大規模な避難の全容を正確に知るためには様々なデータが不足しているので、もちろん精度高くということは望めなおもの、犠牲者の発生位置の分布傾向は予測と調査でかなり良く一致している。なお、この研究で出された予測データの一部は米国で出版される著書に掲載される予定である。

因みに、近年は諸外国でも災害やテロとの関係で群集避難 (Mass evacuation) の研究が盛んになりつつあり、西野モデルにも関心が持たれているようである。今後、このモデルが地震火災時の住民避難を始め、様々な災害時の避難対策を策定するための有効なツールとして発展して行くことを期待している。

7. おわりに

私が建研に採用されてから京大防災研を退職するまでの39年間に携わってきた火災研究の概要について述べた。このうち性能的火災安全設計法に関するは火災研究の成果を社会に還元するための基盤整備を目的としていた。火災モデルなどの個別課題に関する研究と火災安全設計の枠組みとは唇歯輔車の関係にあり、並行的に進める必要があった。それは性能の高い車が開発されることで道路を整備する事業の効果が高まり、また道路の整備が進むことによって更に性能の優れた車の開発が触発されると同様である。

京大防災研に来てからは地震火災の問題に関わったが、この分野でもやはり延焼モデルなどのツール開発から始める必要があり、これに約15年間を費やした。都市規模の事象を扱う課題では、GISを始め様々な最先端技術を使いこなす必要があるが、それらの習熟に要する時間を利用のために残された時間を比較すると、私の齢ではとても割に合わないと感じず。都市の防災設計・計画の枠組みをどう構築して行くかは今後の重要課題として残されているが、若い世代に期待したいと思う。

謝 辞

こうして改めて振り返ってみると、つくづく1人でやれる研究は僅かではないことを感ずる。非才ながらも私が何とかやって来られたのは、諸先輩、同僚、建築学会や火災学会の友人の方々と言うまでも無く、建設企業、設計事務所などの実務者の方々、更には京都大学や東京理科大学の学生諸君に様々な場面で協力して御蔭である。ここに記して深謝の意を表したい。また本稿の構成の中では割愛せざるを得なかったが、文化財、都市景観、災害対応などの研究を手がけた中でも多くの方の協力を頂いた。合わせて感謝したい。

参考文献

[ゾーン煙流動モデルの開発]

- 田中哮義 (1979) : 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究; (1)小規模建築物の火災の基礎的モデル, 日本火災学会論文集, Vol.29, No.2, pp11-20.
- 田中哮義 (1979) : 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究; (2)火災時の熱移動のモデル化, 日本火災学会論文集, Vol. 29, No.2, pp21-31
- 田中哮義 (1980) : 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究; (3)火災時の流れに関するモデル化, 日本火災学会論文集, Vol. 30, No.1, pp7-18
- 田中哮義 (1980) : 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究; (4)モデルに基づく計算と模型実験との比較, 日本火災学会論文集, Vol. 30, No.1, pp19-29
- 田中哮義 (1980) : 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究; (5)シミュレーションによる初期火災性状の検討, 日本火災学会論文集, Vol. 30, No.2, pp1-12
- Tanaka, T. (1983): A Model of Multiroom Fire Spread, Fire Science and Technology, Vol.3, No.2, pp105-121
- Quintiere, J. G. and Tanaka, T. (1983): Some Analyses of FAA Post Crash Aircraft Fire Scenario, Fire Technology, Vol. 19, No.2, pp77-89
- 中村和人, 田中哮義, 山名俊男 (1989): 科技博展示館に於ける排煙実験; (1)UN館に於ける蓄煙実験, 日本火災学会論文集, Vol. 37, No.1, pp1-11
- Tanaka, T. and Nakamura, K. (1987): Refinement of A Multiroom Fire Spread Model, Thermal Engineering, Vol. 1, ASME (1987 ASME-JSME Thermal Engineering Conference), (Hawaii, USA)
- Nakamura, K. and Tanaka, T. (1989): Predicting Capability of a Multiroom Fire Model, Fire Safety Science, Proc. of the 2nd Int'l Symposium, pp907-916
- 田中哮義, 中村和人 (1989) : <二層ゾーン概念に基づく>建物内煙流動予測モデル, 建築研究報告, No. 123, 建設省建築研究所
- 田中哮義, 山田茂 (1993) : 火災時の一酸化炭素生成予測モデル (火災時における建物内の一酸化炭素濃度予測に関する研究 その1), 日本建築学会計画系論文報告集, No.447, pp1-8.

- 山田茂, 田中哮義 (1993): 一酸化炭素濃度の非定常予測モデル (火災時における建物内の一酸化炭素濃度予測に関する研究 その2), 日本建築学会計画系論文報告集, No. 458, pp1-8
- Yamada, S. and Tanaka, T. (1994): A Model for Predicting Concentration of Carbon Monoxide in Building Fires, Fire Safety Science, Proc. of the 4th Int'l Symposium, pp539-550
- Tanaka, T. and Yamada, S. (1994): An Empirical Model of the Yield of Carbon Monoxide in Fire, Fire Science and Technology, Vol. 14, No.1-2, pp19-29
- 山田茂, 田中哮義, 吉野博 (1997): 小規模区画における火災初期の対流熱伝達, 日本建築学会計画系論文報告集, No.491, pp1-8
- 山田茂, 田中哮義, 吉野博 (1997): 熱伝達率と発熱速度及び区画規模との関係 (小規模区画における火災初期の対流熱伝達 その2), 日本建築学会計画系論文報告集, No.495, pp1-8
- 山田茂, 田中哮義, 吉野博 (1999): 火災区画内の対流熱伝達に及ぼす換気の影響, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 515, pp1-8
- Tanaka, T. and Yamada, S. (2004) BRI2002: Two Layer Zone Smoke Transport Model, Fire Science and Technology, Vol.23, No.1(Special Issue)
- Suzuki, K., Harada, K. and Tanaka, T. (2002): A Multi-Layer Zone Model for Predicting Fire Behavior in a Single Room, Fire Safety Science, Proc. of the 7th Int'l Symposium, pp851-862
- Akizuki, Y, Tanaka, T., Suzuki, H. and Tsuchihashi, T. (2005): Calculation Method for Visibility of Emergency Sign in Fire Taking into Account of Smoke Adherence, Fire Safety Science, Proc. of the 8th Int'l Symposium, pp1093-1108, Beijing, China
- Akizuki, Y., Tanaka, T., Yamao, K. (2008): Calculation Model for Travel Speed and Psychological State in Escape Routes Considering Luminous Condition, Smoke Density and Evacuee's Visual Acuity, Fire Safety Science, Proc. of 9th Int'l Symposium, pp365-376, Karlsruhe, Germany
- 鈴木圭一, 田中哮義, 原田和典, 吉田治典 (2004): 火災空間における垂直温度分布の予測モデル 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その1, 日本建築学会論文集 No.582 (環境系), pp1-7
- 鈴木圭一, 田中哮義, 原田和典, 吉田治典 (2005): 区画火災鉛直温度分布予測モデルの拡張と検証および火災プルーフへの連行を考慮した天井ジェット温度予測 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その2, 日本建築学会論文集 No.590 (環境系), pp1-7
- Suzuki, K., Tanaka, T., Harada, K. (2008): Tunnel Fire Simulation Model with Multi-Layer Zone Concept, Fire Safety Science, Proc. of 9th Int'l Symposium, pp713-726
- [性能的火災安全設計法に関する研究]
- 国土開発技術センター編 (1989) 建築物の総合防火設計法 第3巻 避難安全設計法, 日本建築センター, (共著)
- 建築物の火災安全設計指針 (2002), 日本建築学会, (共著)
- Takahashi, K., Tanaka, T. and Kose, S.(1989): An Evacuation Model for Use in Fire Safety Design of Buildings, Fire Safety Science, Proc. of the 2nd Int'l Symposium, pp551-560
- 田中哮義, 高橋清 (1989): 建物火災時の避難性状予測モデル, 建築研究報告, No.119, 建設省建築研究所
- Tanaka, T. (1991): A Study for Performance Based Design of Means of Escape in Fire, Fire Safety Science, Proc. of the 3rd Int'l Symposium, pp729-738
- Bukowski, R.W. and Tanaka, T. (1991): Toward the Goal of a Performance Fire Code, Fire and Materials, Vol.15, pp175-180
- Tanaka, T. (1994): Concept and Framework of a Performance Based Fire Safety Design System of Buildings, J., Applied Fire Science, Vol. 3, No.4, pp335-358
- Hagiwara, I. and Tanaka, T. (1994): International Comparison of Fire Safety Provisions for Means of Escape, Fire Safety Science, Proc. of the 4th Int'l Symposium, pp633-644
- 萩原一郎, 田中哮義 (1995): 避難安全規定の国際比較, 日本建築学会計画系論文報告集, No.470, pp1-10
- 油野健志, 山仲秀利, 大宮喜文, 高橋清, 田中哮義, 若松孝旺 (1996): 実態調査に基づく可燃物量とその表面積の分析, 日本建築学会計画系論文報告集, No.483, pp1-8,
- Koya, K., Ohmiya, Y., Harada, K., Tanaka, T., Hokugo, A. and Hagiwara, I. (1998): A Pilot Case Study of a Performance-Based Fire Safety Design Method to a Multi-Tenant Office Building, Fire Science and Technology, Vol. 18, No.1, pp43-69
- 小屋かおり, 大宮喜文, 原田和典, 田中哮義, 北後明彦, 萩原一郎 (1997): 性能的火災安全設計法によるテナントオフィスの防災設計, 日本建築学会技術報告集, pp138-143
- 水野雅之, 松山賢, 田中哮義, 萩原一郎, 原田和典, 大宮喜文, 富松太基 (1999): 性能的火災安全設計法による超高層オフィスのケーススタディー, 日本建築学会技術報告集 第8号, pp107-110
- 田中哮義, 萩原一郎, 三村由夫 (1997): 居室における2以上の避難出口の要求 (2方向避難経路の基準に関する性能的考察 その1), 日本建築学会計画系論文報告集, No.491, pp17-22
- 萩原一郎, 田中哮義, 三村由夫 (1997): 単一の避難経路が許容される条件 (2方向避難経路の基準に関する性能的考察 その2), 日本建築学会計画系論文報告集, No.498, pp7-14
- Hagiwara, I., Tanaka, T. and Mimura, Y. (1997): A Consideration on Common Path Length and Single Stairway, Fire Safety Science, Proc. of the 5th Int'l Symposium, pp759-770
- Tanaka, T., Hagiwara, I. and Mimura, Y. (1998): A Consideration on Required Number of Exits in a Room, J., Applied Fire Science, Vol. 7, No. 1, pp3-16, 1997-98.
- Aburano, K., Yamanaka, H., Ohmiya, Y., Suzuki, K.,

Tanaka, T. and Wakamatsu, T. (1999): Survey and Analysis on Surface Area of Fire Load, Fire Safety Science and Technology, Vol.19, No.1, pp11-26, 1999
 大宮善文, 田中哮義, 野竹宏彰 (2002) リスク概念に基づく建築物の設計可燃物密度, 日本建築学会計画系論文集, No. 551, pp1-8
 山口純一, 伊藤彩子, 田中哮義 (2008): リスクの概念に基づく避難安全設計火源の決定方法, 日本火災学会論文集, Vol.58, No.3
 Tanaka, T., Nii, D., Yamaguchi, J., Notake, H., Ikehata, Y.(2010): The Risk-based Evacuation Safety Design Method and Its Practicability in the Safety Verification of Realistic Buildings, Fire Sci. Tech., Proc. 8th Asia-Oceania Symposium
 野竹宏彰, 池島由華, 山口純一, 田中哮義 (2011): 住宅・共同住宅火災の統計的分析に基づく設計避難リスクの算出—火災安全設計における設計避難リスクに関する研究—, 日本火災学会論文集, Vol.61, No.2, pp1-12
 池島由華, 野竹宏彰, 山口純一, 田中哮義 (2011): 統計データに基づく用途別の避難リスクの算出—火災安全設計における設計避難リスクに関する研究—, 日本火災学会論文集, Vol.61, No.2, pp1-12
 Tanaka, T. (2011): Integration of Fire Risk Concept into Performance-Based Evacuation Safety Design of Buildings (Howard Emmons Invited Plenary Lecture), Fire Safety Science, Proc. of 10th Int'l Symposium, pp3-21, Maryland, USA

[火災安全工学ツール（計算式）の開発]

建築火災安全工学入門(1993), 日本建築センター, (単著, 257頁)
 改定版 建築火災安全工学入門(2002), 日本建築センター, (単著, 357頁)
 The SFPE HANDBOOK OF Fire Protection Engineering, 4th Edition, Chapter 2-3 Vent Flow (2008), Society of Fire Protection Engineers (共著)
 (社) 日本火災学会監修: 火災と消火の理論と応用 (2005), 東京法令出版 (共著)

(煙流動と制御に関する計算式)

Tanaka, T. and Yamana, T.(1985): Smoke Control in Large Scale Spaces; (Part 1 Analytic theories for simple smoke control problems), Fire Science and Technology, Vol.5, No.1, pp31-40
 Yamana, T and Tanaka, T. (1985): Smoke Control in Large Scale Spaces; (Part 2 Smoke control experiments in a large scale spaces), Fire Science and Technology, Vol.5, No.1, pp41-54
 山口純一, 田中哮義 (2004): 初期火災時における煙層下端高さの簡易予測式, 日本建築学会論文集 No.581 (環境系)
 石野修, 田中哮義 (1993) アトリウム空間の自然排煙効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 451, pp137-144
 吉澤昭彦, 榎本篤, 石野修, 片山潤, 田中哮義, 若松孝旺 (1997): 堅シャフトの加圧防煙に関する研究

—加圧堅シャフトの煙突効果の経時変化に関する模型実験及び解析式—, 日本建築学会構造系論文報告集, No.499, pp155-162

Kujime, M., Matsushita, T. and Tanaka, T. (1999): Hand Calculation Method for Air Supply Rates in Vestibule Pressurization Smoke Control System, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 1, pp.27-41
 久次米真美子, 松下敬幸, 田中哮義 (2000): 附室加圧煙制御システムにおける給気量の手計算方法, 日本建築学会計画系論文集, No. 531, pp1-8
 久次米真美子, 松下敬幸, 田中哮義(2001): 事務所ビルにおける附室加圧煙制御に対する扉の開口条件による影響, 日本建築学会計画系論文集, No. 540, pp1-7
 Kujime, M., Matsushita, T. and Tanaka, T. (2002) Influence of Doorway Opening Conditions on Vestibule Pressurization Smoke Control in Office Buildings, Fire Safety Science, Proc. of the 7th Int'l Symposium, pp741-752
 久次米真美子, 田中哮義 (2004): 必要排煙量に基づいた居室避難安全評価手法, 日本建築学会環境系論文集, No.586, 1-8
 角谷三夫, 吉田俊之, 中道明子, 北後明彦, 田中哮義 (2003): 耐火性能設計における無耐火被覆鋼材の温度算定方法に関する提案, 日本建築学会環境系論文集, No.573, pp17-24
 森山 博, 角谷三夫, 久次米真美子, 田中哮義 (2011): 避難階段の付室への適用に関する検討—告示の読み解きと付室加圧煙制御設計の手順—, 日本建築学会技術報告集 第 37 号, pp921-926
 小林陽一, 角谷三夫, 吉田俊之, 森山博, 田中哮義 (2011): 加圧防煙に関する改正告示 (平成 21 年 9 月) の特別避難階段の付室への適用に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 39 号, pp589-594

(火災プルームの性状に関する計算式)

Delichatios, M.A., Ishino, O. and Tanaka, T. (1994): Validation of Zone Models; Entrainment rate and convective heat losses from atria tests, Fire Safety Science, Proc. of the 4th Int'l Symposium, pp481-492
 田中哮義, 熊井直, 福田晃久, 吉沢昭彦, 石野修, 若松孝旺 (1995): ボイド空間における煙流動性状, 日本建築学会計画系論文報告集, No.469, pp1-8.
 福田晃久, 吉沢昭彦, 熊井直, 石野修, 田中哮義, 若松孝旺 (1995): ボイド空間における煙流動性状 (その 2 火源がボイド空間の壁際または隅角部にある場合), 日本建築学会計画系論文報告集, No.478, pp1-8.
 福田晃久, 田中哮義, 若松孝旺 (1997): ボイド空間における煙流動性状 (その 3 空間底部に給気口がある場合), 日本建築学会計画系論文報告集, No.491, pp9-16
 Tanaka, T. and Kumai, S. (1994): Experiments on Smoke Behavior in Cavity Spaces, Fire Safety Science, Proc. of the 4th Int'l Symposium, pp289-300
 Fukuda, T., Tanaka, T. and Wakamatsu, T. (1997): Experiments on Smoke Behavior in Cavity Spaces (Part 2 The case of a cavity with an opening at the bottom),

- Fire Safety Science, Proc. of the 5th Int'l Symposium, pp1305-1316
- 山口純一, 山田茂, 田中哮義, 若松孝旺 (1997): 区画火災における開口噴流の流量測定, 日本建築学会計画系論文報告集, No.501, pp1-7
- 藤田隆史, 山口純一, 田中哮義, 若松孝旺 (1997): 火災ブルーム先端の上昇時間に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.502, pp1-8
- 山口純一, 細沢貴史, 田中哮義, 若松孝旺 (1998): 開口噴流ブルームの巻き込み性状に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 511, pp1-7
- 山口純一, 岩井裕子, 田中哮義, 原田和典, 大宮喜文, 若松孝旺 (1998): 開口噴出気流温度の相似則としての無次元温度の適用性, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 513, pp1-8
- Tanaka, T. and Yamaguchi, J. (1999): Investigations into Flow Rates of Opening Jet Plumes from A Fire Space, Fire Safety Science, Proc. of the 6th Int'l Symposium, pp1113-1124.
- Tanaka, T., Fujita, T. and Yamaguchi, J. (2000): Investigation into Rise Time of Buoyant Fire Plume Fronts, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Code, Vol.2, No.1, pp14-25
- Watanabe, J., Shimomura, S., Aoyama, Y. and Tanaka, T. (2002): A Formula for Prediction of Ceiling Jet Temperature in Two Layer Environment, Fire Safety Science, Proc. of the 7th Int'l Symposium, pp431-442
- Watanabe, J. and Tanaka, T. (2004): Experimental Investigation into Penetration of a Weak Fire Plume into a Hot Upper Layer, Journal of Fire Sciences, Vol. 22, NO.5, pp. 405-420
- J. Watanabe and T. Tanaka (2005): Prediction of Ceiling Jet Smoke Concentration under Two Layer Environment, Fire Science and Technology, Vol.24, No.3, pp151-164
- (換気支配火災の温度予測式)**
- Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M. and Steckler, K.D. (1987): Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol. 10, No.3, pp185-195
- 大宮喜文, 佐藤雅史, 田中哮義, 若松孝旺 (1995): 区画内に於ける可燃物の燃焼速度と噴出火炎の発生限界, 日本建築学会構造系論文報告集, No.469, pp149-158
- 大宮喜文, 佐藤雅史, 田中哮義, 若松孝旺 (1995): 換気支配型火災時の可燃物への入射熱流束と燃焼速度, 日本建築学会構造系論文報告集, No.472, pp169-176
- 大宮喜文, 田中哮義, 若松孝旺 (1996): 可燃物量を考慮した区画火災性状予測モデルの構築, 日本建築学会計画系論文報告集, No.487, pp1-8
- 松山賢, 藤田隆史, 金子英樹, 大宮喜文, 田中哮義, 若松孝旺 (1995): 区画内火災性状の簡易予測法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.469, pp159-164
- 佐藤雅史, 田中哮義, 若松孝旺 (1996): 火災室及び廊下の温度の簡易予測式, 日本建築学会構造系論文報告集, No.489, pp137-145
- Ohmiya, Y., Tanaka, T. and Wakamatsu, T. (1996) : Burning Rate of Fuels and Generation Limit of the External Flames in Compartment Fire, Fire Science and Technology, Vol. 16, No. 1 & 2, pp1-12
- Ohmiya, Y., Tanaka, T. and Wakamatsu, T. (1998): A Room Fire Model for Predicting Fire Spread by External Flames, Fire Science and Technology, Vol. 18, No.1, pp11-22
- Sato, M., Tanaka, T. and Wakamatsu, T. (1997): Simple Formula for Ventilation -Controlled Fire Temperatures, J., Applied Fire Science, Vol. 6, No. 3, pp269-290, 1996-97.
- Matsuyama, K., Fujita, T., Kaneko, H., Ohmiya, Y., Tanaka, T. and Wakamatsu, T. (1998): A Simple Predictive Method for Room Fire Behavior, Fire Science and Technology, Vol. 18, No.1, pp23-32
- [都市火災性状の研究]**
- (物理基盤の市街地火災延焼予測モデル)**
- Himoto, K. and Tanaka, T.(2002): A Physically Based Model for Urban Fire Spread, Fire Safety Science, Proc. of the 7th Int'l Symposium, pp129-140
- 丸山敬, 田中哮義 (2002): 高温乱流場における風速・温度の計測 —乱流境界層内の二次元火災後方熱流場の気流・温度性状に関する実験的研究(その1), 日本建築学会計画系論文集, No. 557
- 樋本圭祐, 田中哮義 (2003): 炭化層を形成する可燃物の経時的な燃焼モデルと区画火災への適用, 日本建築学会計画系論文集, No.568, pp9-16
- 樋本圭祐, 田中哮義 (2003): 区画間の火災拡大を考慮した建物燃焼性状予測モデル, 日本建築学会環境系論文集, No.573, pp1-8
- K. Himoto and T. Tanaka (2004): A Burning Model for Charring Materials and Its Application to the Compartment Fire Development, Fire Science and Technology, Vol.23, No.3, pp170-191
- K. Himoto and T. Tanaka (2005): Transport of Disk-shaped Firebrands in a Turbulent Boundary Layer, Fire Safety Science, Proc. of the 8th Int'l Symposium, pp433-444, Beijing, China
- 樋本圭祐・土橋常登・田中義昭・田中哮義 (2005): 給気した火災室の開口から噴出する火炎・熱気流の温度と軌跡～開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その1～, 日本建築学会環境系論文集, No.598, pp.1-8
- 樋本圭祐, 土橋常登, 田中義昭, 田中哮義 (2006): 開口上方壁面の影響を考慮した噴出火炎・熱気流の軌跡モデル, 開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その2, 日本建築学会環境系論文集 No.607, pp1-8
- 樋本圭祐, 田中哮義 (2006): 都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集 No.607, pp15-22
- 樋本圭祐, 幾代健司, 秋元康雄, 北後明彦, 田中哮義 (2006): 放水の物理的火災抑制効果に着目した地域住民の消火モデル, 日本火災学会論文集, Vol.56, No.3, pp9-20
- 樋本圭祐, 田中哮義 (2007): 延焼シミュレーションによる歴史的市街地の火災安全対策の検討, 歴史都市防災論文集, Vol.1, pp21-26

- Himoto, K., Akimoto, Y. Hokugo, A. Tanaka, T. (2008): Risk and Behavior of Fire Spread in A Densely-built Urban Area, Fire Safety Science, Proc. of 9th Int'l Symposium, Karlsruhe, Germany
- 樋本圭佑, 秋元康男, 北後明彦, 田中哮義 (2008): 伝統的木造密集市街地の延焼火災リスク評価に関する基礎的検討, 歴史都市防災論文集, Vol.2, pp7-14
- Himoto, K., Tanaka, T. (2008): Development and Validation of A Physics-based Urban Fire Spread Model, Fire Safety Journal, Vol. 43, No.7, pp.477-494
- 樋本圭佑, 西田幸夫, 諸隈貴寛, 芝真理子, 秋元康男, 北後明彦, 関澤愛, 田中哮義 (2008): 地域防災力評価のための消防用可搬ポンプを利用した消火活動実験, 本建築学会計画系論文集 No.634, pp2665-2672
- Himoto, K., Tsuchihashi, T., Tanaka, T., Tanaka, T. (2009): Modeling the Trajectory of Window Flame with regard to Flow Attachment to the Adjacent Wall, Fire Safety Journal, Vol.44, No.2, pp.230-240
- Himoto, K., Tsuchihashi, T., Tanaka, T., Tanaka, T. (2009): Modeling Thermal Behaviors of Window Flame Ejected from a Fire Compartment, Fire Safety Journal, Vol.44, No.2, pp.250-258
- 横山昇平・樋本圭佑・田中哮義 (2009): GIS を用いた市街地火災延焼リスク評価システムの入出力データ管理手法に関する検討, 歴史都市防災論文集, Vol.3, pp.211-216
- 樋本圭佑, 向坊恭介, 秋元康男, 黒田良, 北後明彦, 田中哮義 (2010): 地震動による建物構造被害と火災加熱による損傷の進行を考慮した地震火災延焼性状予測モデル, 日本建築学会環境系論文集, Vol.175, No.653, pp.543-552
- 井元駿介, 大窪健之, 樋本圭佑, 田中哮義 (2010): 木造文化都市を守る「延焼抑止放水システム (WSS)」の配置計画に関する研究 ~京都市清水周辺での延焼シミュレーションによる評価を通して~, 歴史都市防災論文集, Vol.4, pp.21-28
- 横山昇平, 樋本圭佑, 田中哮義 (2010): 建築部材単位の耐火性向上や防災水利整備といった歴史都市に適用可能な延焼火災対策とその評価支援システム, 歴史都市防災論文集, Vol.4, pp.13-20
- 樋本圭佑, 田中哮義 (2010): 木造家屋群に取り囲まれる文化財建造物の地震延焼火災による焼失リスク, 日本建築学会計画系論文集, No.669, pp2135-2142
- Himoto, K., Mukaibo, K., Akimoto, Y., Kuroda, R., Hokugo, A. and Tanaka, T. (2011): A Post-Earthquake Fire Spread Model considering Damage of Building Components due to Seismic Motion and Heating of Fire, Fire Safety Science, Proc. of 10th Int'l Symposium, Maryland, USA, pp1319-1332
- 水上点晴, 北後明彦, 田中哮義 (2011): 既存土壁を生かした防火改修方法の実験的検討, 日本建築学会論文集 No.660, pp97, 2011.1
- 水上点晴, 田中哮義 (2011): 水分を含む壁体の遮熱性の数値解析と公式化, 日本建築学会論文集, No.668, pp871-878
- (地震火災時の都市避難予測モデル)
- Nakao, M. and Tanaka, T. (2002): Study on the Estimation of the hazard to Evacuation Due to Wind-blown Fire Flow Induced by Urban Fire, Fire Safety Science, Proc. of the 7th Int'l Symposium, pp679-690
- Nishino, T., Tsuburaya, S., Himoto, K., Tanaka, T. (2008): A Study on the Estimation of Evacuation Behavior of Tokyo Residents in the Kanto Earthquake Fire, Fire Safety Science, Proc. of 9th Int'l Symposium, pp.453-464, Karlsruhe, Germany
- 西野智研, 円谷信一, 樋本圭佑, 田中哮義 (2009): 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究 -ポテンシャル法に基づく地震火災時の避難シミュレーションモデルの開発-, 日本建築学会環境系論文集 NO.636, pp105-114
- 西野智研, 円谷信一, 樋本圭佑, 田中哮義 (2009): 準定常的な計算による都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発, 歴史都市防災論文集, Vol.3, pp.5-12
- 西野智研, 円谷信一, 樋本圭佑, 田中哮義 (2009): 準定常的な計算法を用いた都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集 No.647号, pp.9-18
- 西野智研, 樋本圭佑, 田中哮義 (2010): 飛び火現象の確率的予測モデルの開発, 日本火災学会論文集, Vol.60, No.2, pp.11-20
- T. Nishino, K. Himoto and T. Tanaka(2010): A Probabilistic Model of Spot Fires in Urban Fire Considering Resident Firefighting, Fire Sci. Tech., Proc. 8th Asia-Oceania Symposium
- Nishino, T., Himoto, K. and Tanaka, T. (2011): Modeling of Recognition Degree of Refuges by Kyoto City Residents in Post-earthquake Fire Event, Fire Safety Science, Proc. of 10th Int'l Symposium, Maryland, USA
- 西野智研, 樋本圭佑, 田中哮義 (2011): 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻 第663号, pp467-474
- 西野智研, 田中哮義, 北後明彦 (2012): 市街地避難の性状を支配する不確定要因の影響を考慮した地震火災リスクの評価に関する基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 第77巻, 第676号, pp1265-1272
- 秋月有紀, 田中哮義, 岩田美千子 (2004): 災害時の避難誘導に関する行政管轄下の標識の視認性 -京都市東山区を対象とした実態調査-, 都市計画論文集 No.39-3, pp589-594
- 秋月有紀, 岩田三千子, 奥田紫乃, 田中哮義 (2009): 立体角投射率を用いた避難経路のサイン設置状況の把握 円滑な避難誘導のための視環境計画に関する研究 その1, 日本建築学会環境系論文集 NO.641, pp767-773

Prediction of Behavior and Risk Control of Building and Urban Fires

Takeyoshi TANAKA

Synopsis

This paper outlines the 39 years of fire research activities of the author since starting to work at the Building Research Institute, Ministry of Construction in 1973 to retiring from Kyoto University in 2012, enriching the special talk by retiring professors at the DPRI annual meeting in March, 1923. The author's researches in 24 years of the service at the Building Research Institute were basically for constructing a performance-based fire safety design method of buildings. The main topic of researches after having moved to Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, shifted to urban fire, while the author continued to be involved various topics on building fires. Although the author's research activities on two main topics, i.e. building fire and urban fire, cannot be separated in terms of timeline, the manuscript is organized in terms of topics for readability.

Keywords: building fire, urban fire, fire model, fire risk