

■特集／FEATURE■

—多様化する燃料／Diversification of Fuels—

大規模火災の模型実験

Scale-model Experiment of Large-scale Fires

桑名 一徳*

KUWANA, Kazunori*

山形大学大学院理工学研究科 〒992-8510 米沢市城南 4-3-16
Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

Abstract : Scale-modeling is a powerful tool to understand the detail of a large-scale fire. A scale-model experiment must be so designed that it reproduces the prototype phenomenon. In doing so, several hypotheses must be established based on dimensional considerations and their validity must be tested. This article discusses techniques to conduct a reliable scale-modeling study and presents some examples.

Key Words : Scale modeling, Dimensional analysis, Fire whirl

1. はじめに

「多様化する燃料」というテーマで火災研究について書く機会をいただいた。火災の燃料は社会の多様性 (漠然とした尺度だが……) と同程度に多様である。新しい材料などができれば、それが燃えるかもしれないし、それを製造する工場や取り扱う施設が火事になるかもしれない。また、以下で高層マンション火災について度々言及するが、昔はこのような火災を想定する必要がなかったわけで、火災の形態も多様化してきている。火災研究を行う者が多様化する火災に対応するには、様々な状況に対応できる評価方法や研究手法を確立することが重要なのではないかと思考する。そこで本稿では、多様化する燃料そのものというよりは、火災研究の手法について考えてみたい。

火災の特徴の一つは規模が大きいことである。例えば何かが燃えだしたとしても、数センチメートルこがただけで消火できれば、「火事にならなくてよかった」とほっとするのが普通であろう。つまり、最低でも数十センチメートルの特性長さを持つのが火災というものである。山火事でも起きようものなら、特性長さは数キロメートルかそれ以上になるかもしれない。

さて、このように大規模な火災を研究するとき、実規模の現象のみを対象としていては埒が明かない。もちろん大規模火災実験や大規模火災の数値シミュレーションも大切

だと思うが、それだけでは研究費を湯水のように使ってしまうそうである。火災で重要だと思われる現象や要素を切りだして、それぞれについて実験室規模の実験などで詳細に検討するということが、多くの火災研究室で行われているのではないだろうか (火災研究室が多くあるかという議論はさておき)。例として、バーナー拡散火災の消炎メカニズムや、可燃性液体に沿って火災が燃え広がるメカニズムなどの研究が挙げられる。他のアプローチとして、大規模火災を小規模な模型を使って再現し、再現された小規模な現象を詳細に観察することにより、大規模な現象について類推するという研究手法も考えられる。いわゆる模型実験の手法[1]である。例えば、30階建て高層マンションの10階の一室から出火したときに炎が最上階に達するのにかかる時間を知りたいとする。実規模の実験はもとより不可能に近く、数値シミュレーションを行うにも、相当な計算時間を覚悟するか、計算精度を犠牲にかなりの単純化を行うことになる。そこで、高層マンションの1/100などのスケールの模型を用意し、それに火をつけて火災拡大の様子を観察するのである。あるいは、1/100スケールの現象を対象として数値シミュレーションを行っても良い。このように模型実験の手法を用いることにより、現実的なコストで大規模火災を研究できるようになる。

模型実験を行うときに大問題となるのが、模型で観察された結果を、どのように実規模の現象と対応させればよいかということである。高層マンション火災の例でいうと、1/100スケールの模型実験で出火から火災が最上階に達す

* Corresponding author. E-mail: kuwana@yz.yamagata-u.ac.jp

るのに 10 分かかったとして、実規模では何分かかるのだろうか？ この問いに答えられないようでは、何のために模型実験をしているのかかわからない。ここで必要になるのが模型実験理論である。以下では、模型実験の設計や結果の解釈に必要な模型実験理論について手短かに説明した後、大規模火災の模型実験事例を紹介する。

2. 模型実験の考え方

2.1. 次元解析

まず、模型実験理論の基本になる次元解析の考え方[2,3]について簡単に説明したい。火災研究に限らず、多くの科学研究の目的は、関心のある物理量 x を他のパラメータ p_1, p_2, \dots の関数として表す、つまり、以下のような式を満たす関数 ϕ を求めることである。

$$x = \phi(p_1, p_2, \dots) \quad (1)$$

例えば、先の高層マンション火災の例では、火災が最上階に到達するのにかかる時間が x である。 x が依存すると予想されるパラメータ p_1, p_2, \dots には様々なものが考えられるが、高層マンション火災の場合、建物のスケール、建物内の可燃性物質の燃焼熱、可燃性物質の存在量、重力加速度、建物や空気の物性値などであろうか。

次元解析の基本は (1) 式を無次元化することである。まず, (1) 式の各パラメータの単位に注目して以下のように書きなおす。

$$x = \phi(p_1, p_2, \dots, p_n, q_1, q_2, \dots, q_m) \quad (2)$$

ここで、 p_1, p_2, \dots, p_n は独立でない単位を持つパラメータ、 q_1, q_2, \dots, q_m は独立な単位を持つパラメータである。例えば、長さの単位 (メートルなど) と時間の単位 (秒など) を独立な単位とすれば、速さの単位 (メートル毎秒など) は長さの単位と時間の単位の組み合わせなので独立ではない。あるいは、長さの単位と速さの単位を独立とすれば、時間の単位は独立ではない。このように、パラメータの単位のうち、どれをもって独立とするかは任意である。

独立な単位を持つパラメータ q_1, q_2, \dots, q_m を用いて (2) 式を無次元化すると次式が得られる.

$$\frac{x}{q_1^{a_{1,x}} q_2^{a_{2,x}} \dots q_m^{a_{m,x}}} = \Phi \left(\frac{p_1}{q_1^{a_{1,1}} q_2^{a_{2,1}} \dots q_m^{a_{m,1}}}, \frac{p_2}{q_1^{a_{1,2}} q_2^{a_{2,2}} \dots q_m^{a_{m,2}}}, \dots, \frac{p_n}{q_1^{a_{1,n}} q_2^{a_{2,n}} \dots q_m^{a_{m,n}}} \right) \quad (3)$$

ここで, a_{ij} は p_j と q_i の単位から決まる定数である. (2) 式と (3) 式を比べると, パラメータの数が $m+n$ 個から n 個に減少していることがわかる. これは, (2) 式で独立な単位を持つパラメータ a_i は無次元化すると 1 になってしまい,

もはや (3) 式に含まれなくなるためである。このように一般化した数式で説明するとわかりにくいかもしれないが、非圧縮性流体の挙動が特性長さ、特性速度、流体の密度および粘性係数に依存するとき、実は無次元数 Reynolds 数のみをパラメータとして考えればよいことと全く同じである。このように、考慮すべきパラメータの数を減らせるのが無次元化の利点である。なお、(3) 式で示したように、パラメータを無次元化することにより、少ない数の無次元パラメータで現象を表せることは、次元解析の Π (パイ) 定理と呼ばれる。

さて、高層マンション火災の例の場合に (3) 式がどのようになるか考えてみたい。まず、(2) 式は以下のように書けそうである。

$$t = \phi(L, H_c, M, g, \rho_g, \lambda_g, c_g, \rho_s, \lambda_s, c_s, T, \dots) \quad (4)$$

ここで、 t は火災が最上階に到達するのにかかる時間 [s]、 L は建物のスケール [m]、 H_c は可燃性物質の燃焼熱 [J/kg]、 M は可燃性物質の質量 [kg]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 ρ は密度 [kg/m^3]、 λ は熱伝導度 [W/mK]、 c は比熱 [J/kgK]、 T は初期温度 [K] であり、添え字の g と s は空気 (気体) および建物 (固体) を示す。ただし、気体および固体の物性値は初期温度での値とする。(4) 式では、例えば、空気の粘性係数を考慮していない。これは、気体の粘性係数は λ/c とほぼ等しいためである。また、活性化エネルギーなど化学反応に関するパラメータは全て省略した。これは、一般の火災では燃焼反応を無限に速いとみなせるためである。他にも筆者が気付かないだけで重要なパラメータがあるかもしれないが、全ては (4) 式右辺の最後の ... に含まれているということでご容赦いただきたい。(4) 式のパラメータは様々な単位を持つが、ここでは独立な単位を [K]、[m]、[kg]、[s]、[J] とし、それぞれ T 、 L 、 $\rho_g L^3$ 、 $(L/g)^{1/2}$ 、 $\rho_g c_g T L^3$ で代表させる。すると、(4) 式を以下のように無次元化できる。

$$\begin{aligned} & \frac{t}{(L/g)^{1/2}} \\ &= \Phi \left(\frac{H_c}{c_g T}, \frac{M}{\rho_g L^3}, \frac{\lambda_g / \rho_g c_g}{g^{1/2} L^{3/2}}, \frac{\rho_s}{\rho_g}, \frac{\lambda_s / \rho_g c_g}{g^{1/2} L^{3/2}}, \frac{c_s}{c_g}, \dots \right) \\ &\equiv \Phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \dots) \end{aligned} \quad (5)$$

なお、(5) 式の無次元パラメータをそれぞれ π_i と呼ぶことにする。(4) 式と比べるとパラメータの数が 5 個減っているので、随分すっきりした感がある。しかし、(5) 式が模型実験設計における苦悩のはじまりなのである。なお、繰り返しになるが、どの単位を独立とするかは任意である。同様に、どのパラメータで独立な単位を代表させるかも任意である。どのような選択をしても、同じように議論でき、同じ結論を導ける(が、ぱっと見でわかりやすい、わかりにくいの違いはある)。

2.2. 模型実験

(5) 式によると、左辺の無次元火炎到達時間は右辺に含

まれる無次元パラメータの関数である。したがって、実際の高層マンション火災(以降は、模型に対して「原型」と呼ぶことにする)と右辺の無次元パラメータ(π_i)が全て等しいような模型実験を行い、火災到達時間を測定すれば、原型の火災到達時間に換算することができる。原型と模型で π_i が全て等しければ右辺は定数なので、火災到達時間 t は $(L/g)^{1/2}$ に比例する。したがって、 g が同じ条件で実験するなら、 t はスケールの1/2乗に比例する。つまり、1/100の模型で t が10分なら、原型のそれは100分である。

ところが、普通はそう簡単にはいかない。次元解析で得られた無次元パラメータを原型と全て等しい条件で模型実験を行うのが極めて困難なのである。例えば、(5)式の場合、空気、建物、建物中の可燃物の物性値を原型と等しくし(つまり、原型と同じ物質を使って模型実験し)、可燃性物質の存在量 M を L^3 に比例するように調節すれば、 π_3 と π_5 以外のものを原型と模型で等しくできる(また、 π_3 が原型と模型で等しければ π_5 も自動的に等しくなる)。しかし、そうすると、 π_3 (および π_5)を原型と模型で等しくすることが困難になってしまう。重力加速度を L^3 に反比例するように変化させて実験すれば、 π_3 が等しい模型実験になるが、模型実験実施のハードルが急に上がってしまう(その点、数値シミュレーションで重力加速度を変化させるのは、数値的な安定性はともかくとして、容易である。模型実験理論を応用して数値シミュレーションを行うのは非常に有効である)。

(4)式では無視した活性化エネルギーやその他のパラメータを全て考慮すると、(5)式右辺の無次元パラメータの数は膨大になる。一般に、燃焼現象で考慮しなければならない無次元数は数十もあるとされており、これらのパラメータが全て原型と等しい模型実験を行うことは不可能である。そこで、重要でないパラメータを選択し、それらの影響を無視して模型実験を設計することになる(このプロセスは相似則の緩和と呼ばれる[1])。

模型実験のエキスパート、ケンタッキー大学の斉藤孝三教授が編集した『Progress in Scale Modeling』という模型実験の論文集[4]があり、その第1部は火災・爆発がテーマである。この第1部の冒頭解説で「a scale-modeling study is a journey to identify important parameters」つまり「模型実験とは重要なパラメータを探す旅のようなものである(意識)」とあるが、まさに名言である(と誰も言ってくれないので書いた本人が言うはめになった)。

閑話休題でパラメータの取捨についてである。無次元パラメータが1より極めて小さい、あるいは逆に、極めて大きいといった情報が、パラメータ取捨選択において重要になる。例えば、 $\rho_g/\rho_s \ll 1$ だからこのパラメータが多少変化しても現象は変わらないな、とか、Reynolds数が極めて大きいので粘性に対する依存性は小さいな、といった具合である。火災の場合は、Damköhler数が極めて大きいから燃焼反応速度は考えなくていいな、という状況も多いだろう。また、大規模火災には当てはまらないかもしれないが、

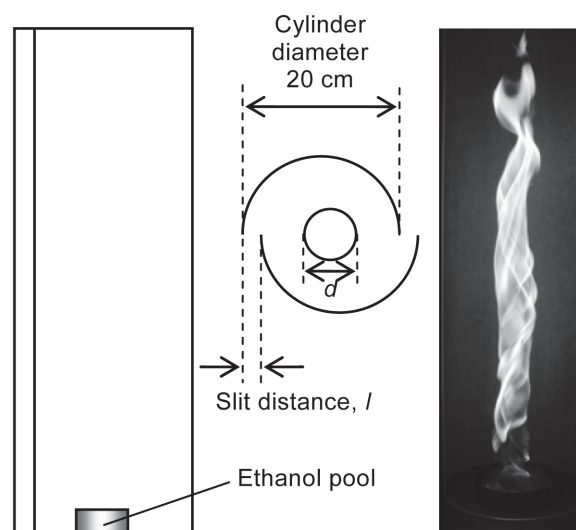


Fig.1 Fire-whirl generator and a generated fire whirl.

$L \rightarrow 0$ の極限では現象が L に依存しなくなることも多い。しかし、これらは全て仮説であり、検証が必要である。特に、根拠のはっきりしない仮説は検証が不可欠である。例えば、高層マンション火災の模型実験で、(5)式の π_3 が1に比べて極めて小さく、現象が λ_g に依存しなくなると仮定(つまり、 π_3 の変化を無視できると仮定)したとする。どうすればこの仮説を検証できるだろうか？ わかりやすく容易な方法は、スケールを変えて模型実験を行うことである。1/100だけでなく、1/50、1/200など異なるスケールで実験することにより π_3 の値を変化させ、(5)式左辺の無次元火災到達時間が π_3 に依存するかどうかを検討するのである。仮に依存したとしても、その依存性から原型の火災到達時間を外挿的に推定することができる。このように、模型実験を実施する際は、複数のスケールで実験することにより更なる知見が得られることが多い。

3. 大規模火災の模型実験例

大規模火災の模型実験は数多く行われている[4]が、ここでは、火災旋風の模型実験を紹介したい。火災旋風とは、火災時に何らかの理由で火災と旋回流が相互作用すると発生する、炎の竜巻のような現象である。火災旋風が発生すると、火災高さが通常の数倍から十倍以上に増加し、火災被害が拡大する傾向がある。したがって、火災旋風の発生機構や被害評価方法についての研究が重要である。火災旋風研究では、図1のような火災旋風発生装置を用いて強制的に旋回流を与えることが多い[5,6]。しかし、実際の火災旋風は、多くの場合、大規模火災からの上昇気流と横風の相互作用により発生すると言われている[7]。図1のような実験では、火災旋風の被害評価に関する知見は得られるかもしれないが、火災旋風の発生機構を検討しづらい。そこ

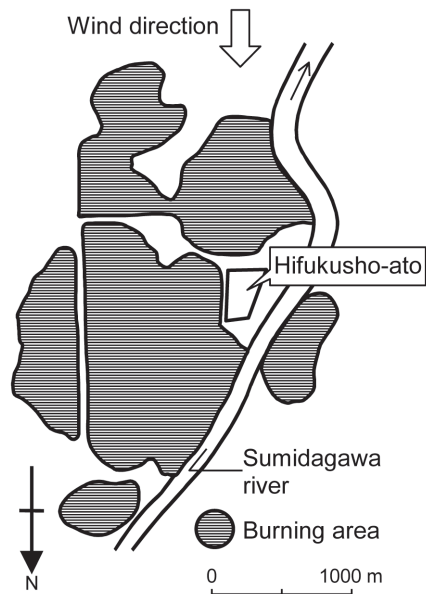


Fig.2 Geometrical map of Hifukusho-ato from Ref. [8].

で模型実験の出番である.

3.1. 関東大震災後の火災旋風 (1923 年)

火災旋風の模型実験事例として, まず, 大正 12 年の関東大震災後に本所被服廠跡で発生し, わずか 15 分程度の中に 38,000 人が焼死する原因となった火災旋風の模型実験 [8-11]を挙げたい.

被服廠跡は面積 10 万平方メートルほどの広場で, 関東大震災直後, 周囲の火災から避難するため約 40,000 の人が集まっていた (被服廠跡の周囲の火災の様子を図 2 に示す). 火災から避難できて少しは安心したであろう人々を火災旋風が襲い大惨事となったわけで, 避難場所指定の難しさを物語っている. 当時の風速を推定するのは困難だが, Soma and Saito [8]の検討では 4-5 m/s の南風が吹いていたとされている. 周囲の火災からの上昇気流とこの南風が相互作用し, 火災旋風が発生したと考えられている. この火災旋風を図 3 のような L 字の燃焼域 (可燃性液体であるヘプタンをプール燃焼させる) を用いた模型実験により再現したいとする. 図中の open space とある部分が被服廠跡を模擬しているわけである. そして, 原型の南風を風洞からの横風により模擬する. このとき問題となるのが, 横風速度 U をどうすればよいか, ということである. 火災旋風が発生するような風速 U があるはずで, 原型では 4-5 m/s なのだが, 模型実験ではどのような値に設定すれば良いのだろうか? 浮力による上昇気流と横風の相互作用により火災旋風が発生するのだから, U [m/s] は, 燃焼域のスケール L [m], 発熱速度 Q [W], 重力加速度 g [m/s²], 空気熱物性値などに依存すると考えられる. したがって, 次式が得られる.

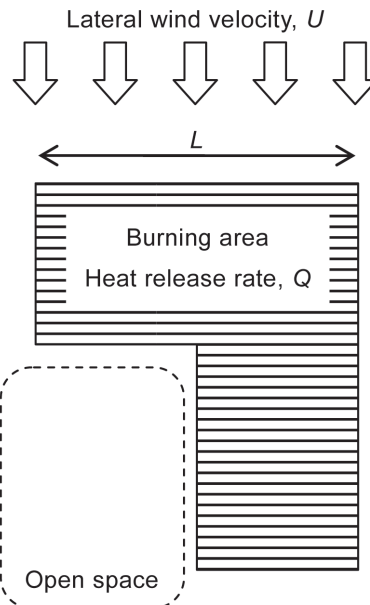


Fig.3 Schematic of scale-model experiment.

$$U = \phi(L, Q, g, \rho_g, c_g, T) \quad (6)$$

なお, 大規模火災では粘性や熱伝導, 拡散といった分子運動による輸送現象は重要でないと考えられるので, それらを表すパラメータは (6) 式に含まなかった. (6) 式を無次元化すると次式が得られる.

$$\frac{U}{(gL)^{1/2}} = \Phi\left(\frac{Q}{\rho_g c_g T g^{1/2} L^{5/2}}\right) \equiv \Phi(Q^*) \quad (7)$$

(7) 式に出てくる無次元発熱速度を Q^* と記すことにする. この Q^* は火災現象では重要な役割を果たすことが多い [12]. $Q/(\rho_g c_g T L^2)$ [m/s] は燃焼域における可燃性気体 (蒸気) の供給流速と関連付けられるので, Q^* は燃料流速基準の Froude 数の平方根でもある. (7) 式より, 原型と Q^* が等しい条件で模型実験するならば, U をスケールの平方根に比例させれば良いことになる. しかし, 原型と模型の Q^* を等しくするのが非常に困難なのである. その理由を以下に説明する.

火災研究の分野では, 火炎高さ H が次式のように Q^* の関数であることがよく知られている [12-14].

$$\frac{H}{L} \sim Q^{*n} \quad (8)$$

n の値は, 小スケールの乱流拡散火災では 2/5, 大規模火災などでは 2/3 である. これらの値は次元解析的に導ける [13] が, 小スケールで $n = 2/5$ というのは, 2.2 節で述べた, $L \rightarrow 0$ の極限では現象が L に依存しなくなることと対応している ($n = 2/5$ とすると, (8) 式に L が現れなくなる). さて, (8) 式より, 原型と模型で Q^* を等しくすることは, 原型と模型で H/L を等しくすることと同じである. 原型の火炎高

さは数メートル程度だろうから、1/1,000のスケールで模型実験を行うとすれば、火炎高さを数ミリメートルにしなくてはならない。原型の火災が非常に大規模なので、1/1,000のスケールでも燃焼域の大きさは1 m以上になる。それで火炎高さを数ミリメートルにしと言われても……長嘆息である。

というわけで、何らかの仮説を立て、相似則を緩和しなければならない。まず、(8)式より、(7)式を次のように書き直せることを確認しておく。

$$\frac{U}{(gL)^{1/2}} = \Phi' \left(\frac{H}{L} \right) \quad (9)$$

さて、ここでは、現象に影響を及ぼす重要なスケールは L でなく H である、という仮説を立てる。これは、火災旋風の発生には浮力が重要な役割を果たしていて、浮力流速は水平方向のスケール L よりも垂直方向のスケール H に大きく依存するためである。この仮説が正しければ、(9)式は L に依存しなくなるはずである。このような関数 Φ' は、以下のものに限られる。

$$\frac{U}{(gL)^{1/2}} \sim \left(\frac{H}{L} \right)^{1/2} \quad (10)$$

つまり、火災旋風が発生するような横風速度 U は次式で与えられる。

$$U \sim (gH)^{1/2} \quad (11)$$

(11)式には L が含まれないが、 H は L に依存し得る((8)式参照)。したがって、ここでの仮説は、正確には、 L の影響は H を通してのみ現れるということである。なお、火災旋風が発生すると火炎高さが著しく増加することが多いが、 H は火災旋風が起きていないときの火炎高さなので注意が必要である。

以上のような仮説に基づき条件設定された(つまり、(11)式に基づき横風速度を決めた)模型実験の結果を図4に示す。仮説の妥当性を検証するために、1/1,000と1/10,000の異なる二つのスケールで模型実験が行われた。はたして、被服廠跡を模擬した場所に火災旋風が発生したのである。図4の(a)と(b)を見比べると、スケールは違えども相似な現象が起きていることがよくわかる。また、横風速度を変化させて実験したところ、風速がある狭い範囲にある場合のみ火災旋風が発生することがわかった。これらの結果から(10)式の相似則が妥当なものと確認された。

図4のような火災旋風の発生機構であるが、炎を伴わない渦がまず形成され、そこに周囲の炎が巻き込まれていくようである[9]。つまり、流体力学的に渦が発生しやすい場所が燃焼域の近くに存在すると、火災旋風発生の危険があるということになる。

なお、(8)式および(10)式から、



(a) 1/1,000 scale [10]



(b) 1/10,000 scale [11]

Fig.4 Fire whirl generated by scale model experiment.

$$\frac{U}{(gL)^{1/2}} \sim Q^{* \frac{n}{2}} \quad (12)$$

という関係が成り立つ。(12)式のような相似則の比例係数は、幾何学的条件((12)式の場合は燃焼域の形状)等に依存するものの、オーダーとしては1程度の値になることが多い。関東大震災やハンブルグ空襲など実際の火災で起きた火災旋風、および、火災実験で発生が記録された火災旋風の発生条件を図5にまとめる。これらのデータの元になった火災実験のリストに関しては、文献[10]を参照されたい。ちなみに、左下の二点が関東大震災およびハンブルグ空襲で起きた火災旋風のデータである。これらの火災旋風が発生した地理的条件や燃焼域の形状はそれぞれ全く異なるので、無次元風速と無次元発熱量の間に強い相関があるとまでは言えないが、おおむね(12)式の相似則が成り立っていることがわかる。指数 n の値は、図5のデータでは約0.66で、火炎高さの相関式から予想される値の2/3にほぼ等しい。

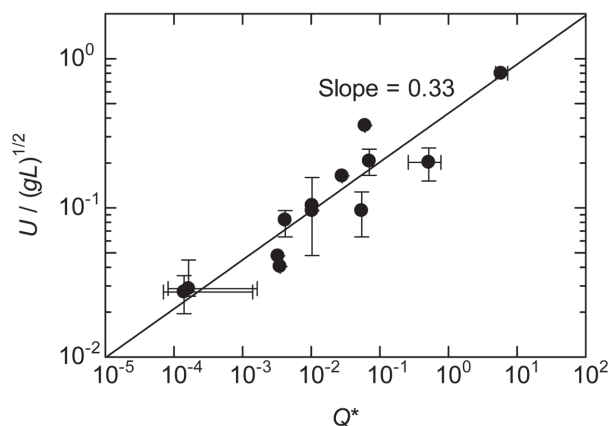


Fig.5 Dimensionless wind velocity and dimensionless heat release rate of previously reported fire whirls. Data from Refs. [10,15].

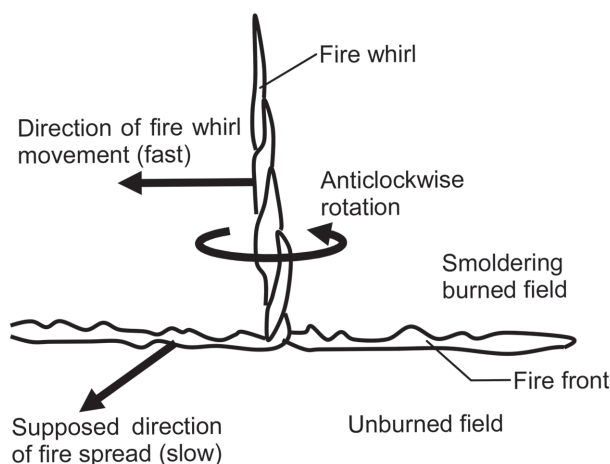


Fig.6 Schematic diagram of Brazil fire whirl occurred in August, 2010.

3.2. ブラジル火災旋風 (2010 年)

最近ブラジルで発生した火災旋風が、火災研究関係者の間で話題になった。2010 年 8 月にサンパウロ州で起きた林野火災で、線状の火災前線上に火災旋風が発生したのである。なぜ話題になったかという点、火災旋風の発生とともに火災高さがどんどん増加する様子や、火災旋風が火災前線に沿って移動していく様子がはっきりと映像にとらえられていたためである。インターネットの動画共有サービスで「2010 Brazil fire tornado」などと検索すれば、この映像を見ることができる。このブラジル火災旋風の様子を図 6 に模式的に示す。映像に写りこんでいる鳥の大きさなどと比較すれば、火災前線における火災高さは 1 m 程度であることがわかる。火災前線は、幅は数メートル程度だが長さは非常に長く、線状火災と呼べるような燃焼形態である。前線背後で燻焼しているところから立ち上る白煙の動きより、強くはないが風が吹いていることが知れる。初めは、普通に火災前線で 1 m 程度の炎を上げて燃焼しているのだが、突如として火災旋風が立ち上がり、前線に沿って移動していくのである。なお、映像をよく見ると、火災旋風は

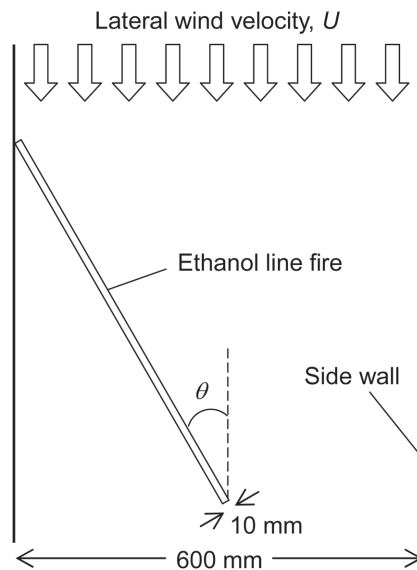


Fig.7 Schematic of scale-model experiment.

火災前線の端付近で発生していることがわかる。周囲に高木や建物、山や丘などは無く、特別に渦が発生しやすい地理的条件ではなさそうである。つまり、線状火災と横風の相互作用のみで火災旋風が発生したものと考えられる。図 4 など比較的複雑な燃焼域の形状により発生した火災旋風とは違い、ブラジルのそれは最もシンプルな火災旋風発生モードだと言えるかもしれない。したがって、実際の林野火災でこのモードにより発生する火災旋風はかなり多いだろうと推察される。そこで、このモードの火災旋風発生機構を検討すべく、早速、風洞を用いた模型実験が行われた[15]。

図 7 に模型実験の模式図を示す。この実験では、幅 10 mm のまっすぐで細長い容器にエタノールを満たし燃焼させ、風洞を用いて横風を当てた。ブラジル火災旋風が火災前線の端付近で発生しているので、図 7 の模型実験でも容器の端が装置の中心近くに来るようにした。もう一方の端と干渉しないように、もう一方の端が観測部の壁に当たるように容器長さを調節した。

風洞からの風速 U やエタノール火災と横風の成す角度 θ を変化させて実験を行ったところ、 θ が $20\text{--}30^\circ$ 程度のときに旋風が発生しやすいようである。また、図 3 および 4 の実験と同様、風速 U がある狭い範囲にある場合のみ旋風が発生する。図 8 に観察された火災旋風の例を示す。エタノール火災の端付近で火災旋風が立ち上がり、上流側へと移動していく様子がわかる (図は下流側から撮影したものである)。なお、写真中の白煙は流れの可視化のためのスモークで、上から垂れ下がっている線は熱電対である。

この火災旋風の発生機構や発生条件の詳細は機会を改めて検討したい。なお、図 5 の一番右上の点はこの模型実験の結果である。

(a) $t = 0$ s(b) $t = 2$ s

Fig.8 Fire whirl generated by scale model experiments.

4. おわりに

大規模火災旋風の模型実験事例を紹介させていただいた。こうして文章にするとはいとも簡単に火災旋風発生を模型で再現しているように見えるかもしれないが、実際は失敗の連続で、試行錯誤の末ようやく再現に成功したという感じである。模型実験が成功するということは、その現象の本質を理解して実験条件を設定できているということなので、成功したときの喜びは格別である。大規模火災では様々な現象が起きるが、模型実験により詳細を解明できるものが多く残されていると思う。最近では数値シミュレーションに押され気味の模型実験だが、火災に限らず多くの分野で、模型実験はまだ重要な役割を果たせるはずである(なお、2.2節でも触れたが、模型実験理論に基づいて条件設定された数値シミュレーションは数値模型実験とも言うことができ、模型実験の範疇に含まれると考える)。

最後に、模型実験のいろはから醍醐味まで教えていただき、かつ、本稿で紹介した模型実験実施にご助言ご協力いただいた齊藤孝三先生、関本孝三氏に深謝いたします。

References

1. 江守一郎, 齊藤孝三, 関本孝三, 模型実験の理論と応用, 第三版, 技報堂出版(2000).
2. Barenblatt, G.I., *Scaling*, Cambridge University Press (2003).
3. 桑名一徳, 土橋律, 日本火災学会論文集 57: 39-44 (2007).
4. Saito, K. (Ed.), *Progress in Scale Modeling*, Springer (2008).
5. 桑名一徳, 森下聡, 土橋律, 櫛田玄一郎, 日本燃焼学会誌 51: 56-62 (2009).
6. Kuwana, K., Morishita, S., Dobashi, R., Chuah, K.H., Saito, K., *Proceedings of the Combustion Institute*, 33: 2425-2432 (2011).
7. 篠原雅彦, 日本火災学会論文集 58: 1-12 (2008).
8. Soma, S., Saito, K., *Combustion and Flame* 86: 269-284 (1991).
9. Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., Williams, F.A., Hayashi, Y., Masuda, H., *AIAA Journal*, 45: 16-19 (2007).
10. Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., Williams, F.A., *Fire Safety Journal*, 43: 252-257 (2008).
11. Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 43: 952-955 (2010).
12. Quintiere, J.G., *Principles of Fire Behavior*, Delmar (1997).
13. Thomas, P.H., *Proceedings of the Combustion Institute*, 9: 844-859 (1963).
14. Williams, F.A., *Progress in Energy and Combustion Science*, 8: 317-354 (1982).
15. Kuwana, K., Sekimoto, K., Akahuah, N., Chuah, K.H., Lei, J., Saito, K., Williams, F.A., *7th US National Combustion Meeting, Atlanta, GA, Paper 2F04* (2011).