

## 国連外部火災試験における放射熱測定

宮本健一\*, 松永猛裕\*, 飯田光明\*,  
藤原修三\*, 岩倉正剛\*\*

国連外部火災試験において放射熱を簡易に測定できる放射計の適用性を調べると共に、燃焼時間から放射熱の影響を判定する方法の妥当性を検証することを目的として、国連外部火災試験の実証試験を行った。実験試料には、信号焰管地上固定用、その原料用発煙剤、および、玩具煙火のスパークラーを用い、火炎源には、木材又は灯油を用いた。放射計で測定した放射熱は、火炎源や試料の燃焼を非常に良く反映して変化したことから、放射熱の評価に放射計を用いることは非常に有効であった。また、試料中心部の底面のみでの温度計測は、試験における火の廻り方の検証には有効であるが、試料の放射熱の推定には適していないことも示した。

国連危険物輸送専門家委員会では、米国やスウェーデンが放射熱の推算式を提案したが、それらは最大値よりも平均値に近い値を与えることを明らかにした。また、実験結果から、時間をかけて間欠的に燃焼する試料で、正味の燃焼時間を正確に求めることが困難な場合には、放射計等による放射熱の直接計測を併用する必要があることが示唆された。本実験での燃焼熱量に対する放射熱量の割合は、29%から45%となり、既存の研究とほぼ一致した。

### 1. 緒言

国連経済社会理事会の下部組織である危険物輸送専門家委員会では、火薬類を含めた危険物の運搬における安全を確保し、手続きを簡素化するために、「危険物の輸送に関する勧告<sup>1)</sup>」を策定している。その勧告のうち、危険物の分類試験方法と判定基準は、「試験方法及び判定基準のマニュアル」に定められている。分類試験方法の1つに、「試験6(c)外部火災試験」があり、その試験の中の放射熱の測定に関して、つい最近まで危険物輸送専門家委員会において活発な議論が行われてきた。

1995年発行の試験方法及び判定基準のマニュアル第2改訂版<sup>2)</sup>に規定されている外部火災試験の試験方法(以下、旧試験方法という)では、試験対象物品の縁から15mの位置での試料の放射熱の最大値が4

kW/m<sup>2</sup>を超えるか否かが、判定基準の1つとなっていた。これに対して、放射熱を直接測定することは困難を伴うので、代わりに燃焼時間を測定することで、放射熱の影響を簡易に判定することが米国から提案された<sup>3),4)</sup>。危険物輸送専門家委員会における度重なる議論を経た後、燃焼時間による判定を用いることが合意され、1999年発行の試験方法及び判定基準のマニュアル第3改訂版<sup>5)</sup>に規定されている方法(以下、新試験方法という)に反映されている。ただし、物品(articles:試験対象物のうち物質(substances)以外のもの)と低エネルギー物質(low energy substances)に対しては、燃焼時間による判定の代替法として、放射熱の直接計測による判定も記載されている。

本研究は、危険物輸送専門家委員会において上記のことが議論されている間に行われたものである。本研究の目的は、上記の議論も踏まえて外部火災試験の実証試験を行い、放射熱を簡易に測定できる放射計の適用性を調べると共に燃焼時間から放射熱の影響を判定する方法の妥当性を検証することとした。

### 2. 実験

外部火災試験は、輸送中の物品が火災などの火炎に包まれた場合に、爆発現象、危険な飛散物、放射熱、激しい燃焼等の観点から危険性を分類・判定するため

2000年8月24日受付

2000年11月8日受理

\*物質工学工業技術研究所(現在 産業技術総合研究所)

〒305-8565 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-61-9390

FAX 0298-61-8796

e-mail ken-ichi.miyamoto@aist.go.jp

\*\*細谷火工株式会社

〒197-0801 東京都あきる野市菅生1847

TEL 0425-59-2578

FAX 0425-58-5441

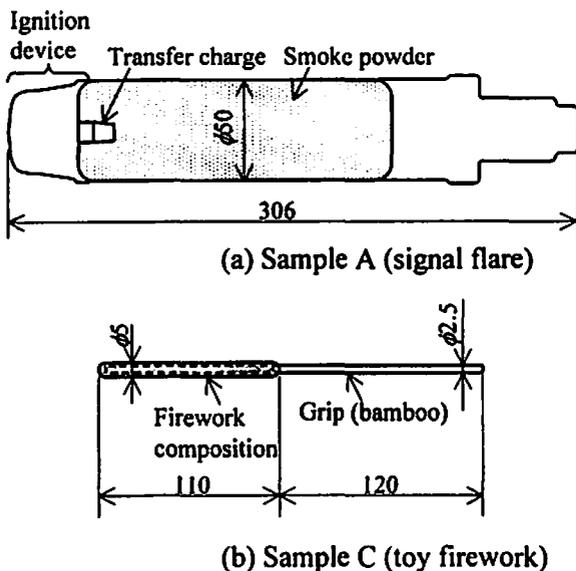


Fig. 1 Schematic diagram of samples used for the UN bonfire test

の試験である。すなわち、実際に木材あるいは液体燃料などの火炎の中に試料を置き、反応を観察する。実験方法・手順の詳細は、旧試験方法<sup>2)</sup>に従った。ただし、新試験方法<sup>3)</sup>でも、判定基準に大きな変更があったものの、試験方法は旧試験方法とほとんど同じであり、観察項目である爆発現象、飛散物、熱効果の特性値そのものが変わりうるような変更点はない。以下では、国連勧告では選択肢となっている部分、詳細に規定されていない部分を中心に実験方法の概略を記す。

## 2. 1 試料

試験試料には、日本カーリット株式会社製信号炎管地上固定用(以下試料Aという)とその原料用発煙剤(以下試料Bという)および中国製玩具煙火のスパークラー(以下試料Cという)とを用いた。試料A及び試料Cの概観をFig. 1に示す。

外部火災試験では、輸送に供せられる包装形態を用いることが規定されている。試料Aでは、1つ1つの製品を個装段ボール箱に入れ、個装箱10個を外装段ボール箱に収納して実験に用いた。予備実験では外装段ボール箱1箱分を用いた。本実験では、国連勧告の試料体積 $0.15\text{m}^3$ 以上で試験を行うという規定を満たすために9箱( $0.162\text{m}^3$ )を用いた。試料Aの製品1つ当たりに含まれる火薬類は、発煙剤400g、伝火薬7g、着火薬3g、電気発火管0.2gであった。したがって、予備実験で燃焼させた火薬の重量は4.1kg、本実験では36.9kgであった。なお、火薬類の大部分を占める発煙剤の組成は、過塩素酸塩25%、硝酸塩60%、燃料成分他15%であった。

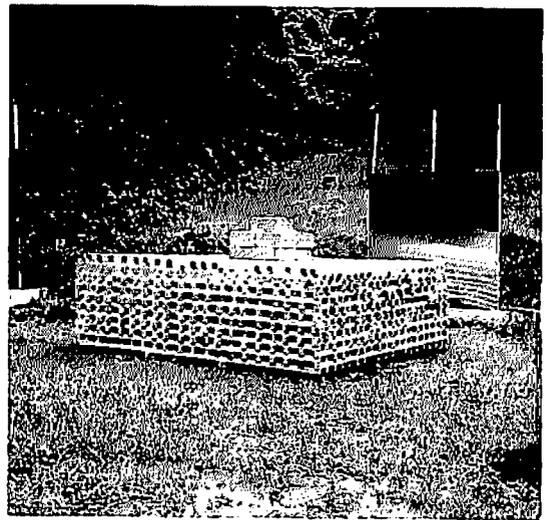


Fig. 2 Photograph of heating system used for samples A and B

試料Bについては、400gをビニール袋に入れた後、試料Aと同じ個装箱に入れ、個装箱10個を外装段ボール箱に収納した。これを、試料Aと同様に、予備実験では1箱(火薬量4kg)、本実験では9箱(火薬量36kg)を用いた。

試料Cは、最小包装単位として5本1組をセロハンの袋に入れ、その袋20セットをボール紙製の箱に入れ、その箱60個を外装段ボール箱に収納した。この外装段ボール箱の容積は、1箱 $0.06\text{m}^3$ であったので、3箱( $0.18\text{m}^3$ )を本実験に用いた。試料Cは、1本あたりの火薬量が1.9gであるので、試験に用いた火薬量は予備試験で11.4kg、本実験で34.2kgであった。火薬類の組成は、過塩素酸カリウム48%、アルミニウム24%、硫黄8%、樹脂他20%であった。なお、試料A、Cの予備試験では、放射熱の測定は行わなかった。

## 2. 2 方法

試料A、Bの実験では、縦 $1\text{m}$ ×横 $1\text{m}$ ×高さ $1\text{m}$ の鉄製架台の上に試料を、下段4箱、中段4箱、上段1箱に積み重ねて針金で固定した。さらに、鉄製架台の下および周りに長さ $2.9\text{m}$ 、 $50\text{mm}$ 角の角材を $100\text{mm}$ ずつ間隔をあけて20本並べ、その上に井桁状に $1.0\text{m}$ の高さまで同じように積み上げて火炎源とした。試料A、Bの実験における火炎源の写真をFig. 2に示す。試料への着火は、試料A、Bの予備実験及び試料Aの本実験では、中央部の地表付近で点火具1個で行った。また、試料Bの本実験では、風上側の端の2カ所から同時に点火した。

試料Cについては、縦 $1\text{m}$ ×横 $1\text{m}$ ×高さ $0.5\text{m}$ の鉄製架台の上に試料を、下段に2箱、上段に1箱積み

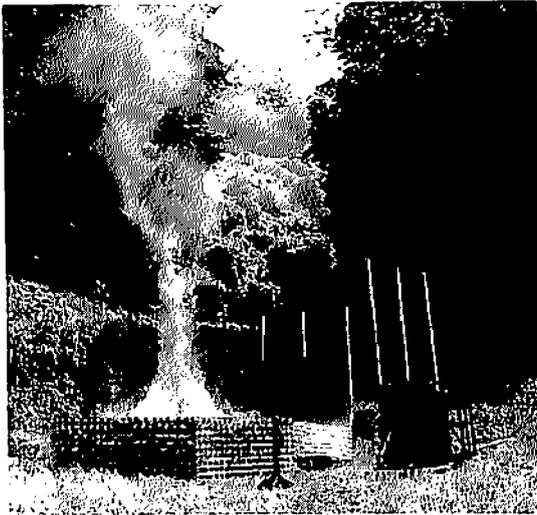


Fig. 3 Photograph of the test system when the sample A (signal flare) was burning

重ねた。火炎源には、1 m 四方のオイルパン 9 個を正方形に並べ(3 m 四方)、それに灯油を注いで用いた。

いずれの実験についても、放射熱の測定は、東京精工(株)製の放射計 RE-4 型を、試料の端から 15 m の位置に、放射計の感温部の中心の高さと試料の中心の高さが等しくなるように設置して行った。この放射計は、受熱素子として、多数の熱電対を直列に結合したサーモパイルが使用されており、その温接点の表面には白金ブラックが塗布されている。この放射計の特性は、受感部内部抵抗  $20 \pm 1 \Omega$ 、受熱面積  $100 \text{ mm}^2$ 、受感度  $2.786 \times 10^{-3} \text{ mV/kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $2.397 \text{ mV/kW} \cdot \text{m}^{-2}$ )、最高受熱放射量  $20,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  ( $23.2 \text{ kW/m}^2$ )、最高出力電流約 70 mV、立体角  $119^\circ 41'$  である。放射熱の測定は、1 地点のみで行った。また、燃焼状況を VTR で撮影し記録した。さらに、国連試験方法では規定されていないが、燃焼火炎温度を測定するために、JIS K タイプ(クロメル-アルメル)のシース熱電対を、外装段ボールと鉄製架台の間に設置した。

実験期間の天候は晴れ、気温は 27 度~31 度、湿度は 52%~86%、風速はほぼ 0 m/s であった。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 放射熱の経時変化

試料 A の実験における燃焼の様子を Fig. 3 に、放射熱の経時変化を Fig. 4 に示す。点火から 6 分 25 秒後に、信号焰管のプラスチック部分が破裂したと思われる音の発生と同時に木材由来とは異なる白煙が少量上がり、その数秒後に信号焰管の朱色の炎も確認された。この破裂音の発生時間を燃焼開始時間とした。この現象とちょうど同じ頃に、放射熱の増加速度も大き

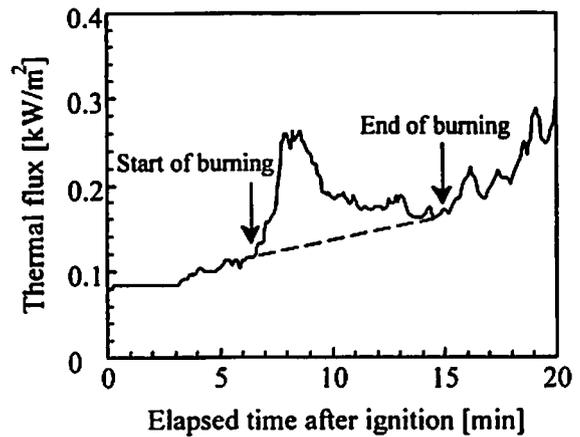


Fig. 4 Thermal flux of the sample A (signal flare) measured with a radiometer

くなり、点火後約 8 分には、放射熱は  $0.26 \text{ kW/m}^2$  に達した。放射熱は、それから約 1 分間程度ほぼ一定の値であった。この時間帯に放射熱が大きくなったことの主たる要因は、試料の燃焼が次第に広がっていったためと考えられた。点火後約 9 分からは、放射熱の減少が始まり、点火後約 15 分には、大きな破裂音もせず、煙の色も木材由来の薄い白色となってきたので、試料の燃焼はほぼ終了したと思われた。試料の燃焼が終わっても放射熱がしだいに大きくなっていったのは、木材の燃焼が激しさを増していったためである。Fig. 4 には記されていないが、点火後 31 分から消火を始めると放射熱量は速やかに減少していった。以上の観察結果から、放射熱は、木材および試料の燃焼状態を非常によく反映して変化したと言える。

試料 B も試料 A と同じように試料由来の放射熱のピークが確認できたが、試料 C では Fig. 5 のようにピークが幾つにも分かれて観察された。試料 C では、点火から 53 秒後に最初に試料由来の炎が確認されたので、この時間を燃焼開始時間と判定した。燃焼終了

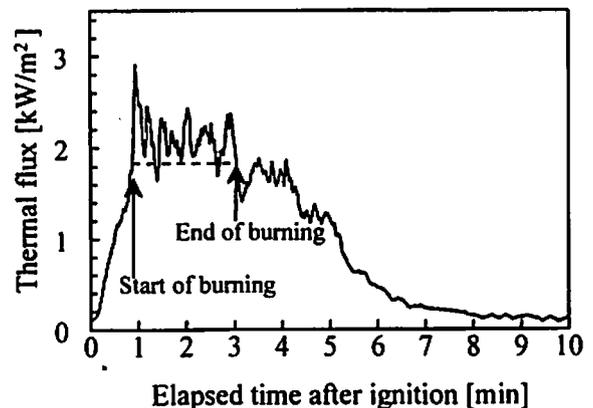


Fig. 5 Thermal flux of the sample C (toy firework) measured with the radiometer

時刻は、試料由来と思われる炎が確認できなくなり、かつ、試料由来の白煙が薄くなり、かつ、放射熱が燃焼開始時の値を下回った3分3秒後と判定した。試料の燃焼開始から燃焼終了までの間にあるピークの頂点での時刻では、VTR映像で試料由来の炎が確認された。また、ピークの谷間の時刻では、試料由来の炎は確認されなかった。すなわち、燃焼状態を非常に良く反映して放射熱が変化した点は、試料A、Bと同様であった。しかし、試料Cは、他の試料とは異なり大きなピークが7本以上も観察された。これは、試料Cでは包装が3段階になっているので、試料から試料へと炎が移りにくく、間欠的に試料が燃焼したためと考えられた。

一般的に、放射計の時間応答性はそれほど良くない。用いた放射計については、メーカーの話によると、正確な時定数は測定していないが、黒体炉での較正の際に平衡に到達するのに、10秒～15秒かかるという。試料Cのように、放射熱の時間変動が激しい時には、放射熱のピークトップでは実際よりもやや低めに、ピークの谷ではやや高めに測定される可能性がある。そのような時に、判定基準の4 kW/m<sup>2</sup>をやや下回る試料正味の放射熱が測定された場合には、注意が必要である。

### 3. 2 放射熱と燃焼温度との比較

試料Bの本実験における放射熱と燃焼温度の経時変化をFig. 6に示す。放射熱の最初のピークは、木材にかけた灯油が点火後すぐに燃焼したためのものである。放射熱は、試料に着火後、すぐに増大したが、燃焼温度は、試料着火から約30秒の遅れ時間の後に増大した。これは、放射熱は15m離れた地点で熱源全体を測定しているのに対し、燃焼温度は、試料中心の

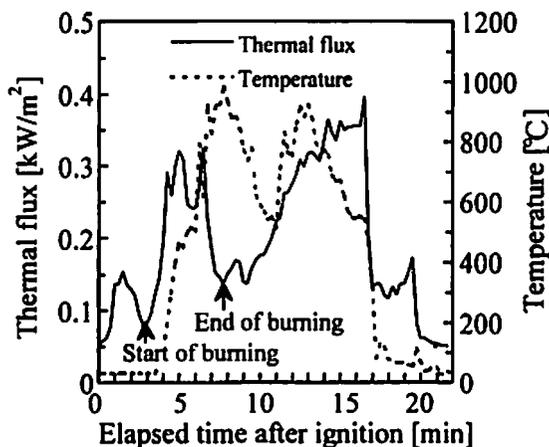


Fig. 6 Thermal flux and temperature of the sample B (smoke powder)

下に置いた熱電対の先端の温度を測定しているためである。すなわち、試料が端から着火したため、試料中心が燃焼するまでに遅れ時間が存在したことを意味する。また、放射熱には試料の燃焼由来のピークが認められたが、燃焼温度では、認められなかった。これは、熱電対は、試料中心の一点の温度しか計測していないため、そこから離れた試料の燃焼よりも、近くにある木材の燃焼の影響を強く受けたためと考えられた。以上のことから、試料中心部の底面のみでの温度計測は、試料の放射熱の推定には適していないことが明らかになった。ただし、試験における火の廻り方を検証するには有益であった。

### 3. 3 試料正味の放射熱量

外部火災試験の判定では、試料からの放射熱と燃料からの放射熱とを区別する必要がある。試料Aについては、木材の燃焼は徐々に強くなっていったことがVTR映像から確認できたので、燃焼開始時刻と燃焼終了時刻とを結んだ直線(Fig. 4の破線)を燃料からの放射熱とした。灯油を火炎源とした試料Cでは、試料に着火する頃には、火炎の強さはほぼ最大となり、そのまましばらく維持されたとVTR映像から判断された。試料の燃焼時間中にVTR映像から試料由来の炎が確認されなかった時の放射熱は、最大値が2.10 kW/m<sup>2</sup>であり、最小値が1.64 kW/m<sup>2</sup>であった。したがって、両者の平均をとって、1.87 kW/m<sup>2</sup>を燃焼由来の放射熱とした(Fig. 5の破線)。なお、この値は、試料の燃焼開始時刻の放射熱の値と同じである。

試料Bについては、予備実験では、燃料からの放射熱を試料Aと同様にして計算した。試料Bの本実験では、試料が燃焼する間に木材の燃焼が徐々に強くなっていったのか、あるいは一定であったのかを、VTR映像から判定することができなかったため、どちらの場合についても放射熱を求め、範囲として示した。Table 1に各試料の正味の放射熱の最大値と平均値を示す。

危険物輸送専門家委員会において、米国は1995年に提出したドキュメントで、放射熱の測定は困難を伴うので、その代わりに燃焼時間の測定によって、放射熱の影響を簡易に判定することを提案している<sup>9)</sup>。米国の提案した計算式は次式の通りである。

$$F = C \cdot M \cdot Q / (4\pi R^2 \cdot t) \quad (1)$$

米国の他にも、スウェーデンが次式を提案した<sup>10)</sup>。

$$F = 2.02 (P_w \cdot R)^{0.09} \times (C \cdot M \cdot Q) / (4\pi R^2 \cdot t) \quad (2)$$

ここで、(1)、(2)式中のF[W/m<sup>2</sup>]は放射熱、M[kg]

Table 1 Comparison between the measured thermal flux and that calculated from the burning time

Sample	Heat of combustion [J/kg]	Burning time [s]	Thermal flux[kW/m <sup>2</sup> ]			
			Measured		Calculated	
			Maximum	Average	eq.(1)	eq.(2)
A	5.77×10 <sup>6</sup>	510	0.13	0.045	0.049	0.041
B (Preliminary test)	5.77×10 <sup>6</sup>	120	0.048	0.020	0.023	0.019
B	5.77×10 <sup>6</sup>	270	0.18~0.21	0.085~0.11	0.091	0.073
C	6.03×10 <sup>6</sup>	130	1.0	0.25	0.19	0.16

は火薬類の正味の質量、 $Q$  [J/kg] は火薬類の燃焼熱、 $R$  [m] は熱源からの距離、 $t$  [s] は燃焼時間、 $P_w$  [Pa] は水蒸気分圧、 $C$ 、 $C'$  は定数でそれぞれ 0.33、0.35 である。(1)式と(2)式との違いは、後者が水蒸気による放射熱の吸収を考慮している点である。

Table 1 には上記 2 つの式で計算した放射熱の値も記した。(1)式と(2)式による計算値の結果を比較すると、両者の比は 1.2 倍程度でいずれの試料でも大差ない。また、計算値と実測値とを比較すると、計算値は実測の平均値と近い値となった。(1)式による計算値と実測の平均値とを比較すると、両者の違いは 0.76 ~ 1.2 倍であった。また、(2)式による計算値と実測の平均値とを比較すると、両者の違いは、0.64 ~ 0.95 倍であった。計算値が実測の最大値よりも平均値に近いことは、(1)式、(2)式が燃焼時間内では放射熱は一定値となること、すなわち、試料が一様に燃焼することを仮定していることから理にかなった結果と言える。

試料 C では、計算に用いた燃焼時間  $t$  として、最初の試料の燃焼開始から全ての試料の燃焼終了までの時間(みかけの燃焼時間)をとったが、試料が間欠的に燃焼したため、実際には試料が燃焼していない時間も含めてカウントしている。そこで、放射熱が燃料からの放射熱の平均値である 1.87 kW/m<sup>2</sup> を下回った時間をみかけの燃焼時間から差し引いた値を、正味の燃焼時間とすると、その値は 119 秒となった。この値を(1)式、(2)式に入れて、放射熱を計算すると、それぞれ、0.20 kW/m<sup>2</sup>、0.17 kW/m<sup>2</sup> となった。すなわち、試料 C 程度の間欠燃焼であれば、みかけの燃焼時間を用いても、正味の燃焼時間を用いても、計算値には大きく影響しないことが分かった。しかし、正味の燃焼時間を用いると、計算値は、より実測の平均値に近い値となることは間違いない。試料 C の正味の燃焼時間を VTR 映像だけから正確に求めることは、燃料である灯油の燃焼に伴って発生する黒煙のために、不可能

であり、本研究では、放射熱の実測値と VTR 映像とを比較して正味の燃焼時間を求めることができた。

以上のことから、燃焼時間を用いた計算による放射熱の評価方法は、平均値の推定には妥当であるが、旧試験方法で定められていた最大値を推定する場合には過小評価となることが明らかになった。なお、本研究の実験結果とオランダにおいて行われた同様の実験結果が、国連危険物輸送専門家委員会 6 (c) テスト作業部会において報告され、討議された結果、試験方法及び判定基準のマニュアルの放射熱の基準を最大値から平均値に変更し、放射熱の直接測定でなく、燃焼時間の測定からの推算値を用いることが合意された<sup>7),8)</sup>。さらに、2 つの推算式を比較すると、アメリカが提案した式の方が安全側の値となるので、式(1)を採用することも合意された<sup>7),8)</sup>。ただし、試料が長い時間をかけて間欠的に燃焼し正味の燃焼時間が判断できない場合には、計算による方法は、平均値の推定においても過小評価となることが本研究の結果から推定される。したがって、物品や低エネルギー物質を試験する場合には、新試験方法で代替法として位置付けられている放射熱の直接測定による評価基準も併用しなければ、正確な判定が困難となる場合もあると思われる。

### 3. 4 熱放射に使われたエネルギーの割合

Burgess ら<sup>9)</sup> は、LNG やメタノール等の 5 種類の燃料について、燃料容器の径を変えて行った燃焼実験の結果から、(1)式の定数  $C$  の値は、多くの場合で 0.2 から 0.4 の間に入ると指摘している。すなわち、球状熱放射を仮定した時の放射熱量は燃焼熱量の 20% から 40% になったという。Table 2 に各試料について、燃焼熱量、放射熱量、両者の比率を示す。燃焼熱量は、単位重量あたりの燃焼熱と試料重量との積から求め、放射熱量は、熱放射が球状に起こったと仮定し、実測の放射熱の平均値、燃焼時間、および、半径 15m の球の表面積との積から求めた。試料 C では、

Table 2 Comparison between heat of combustion and that of radiation

Sample	Heat of combustion A[MJ]	Heat of radiation B[MJ]	Ratio of B to A [%]
A	213	64.9	31
B (Preliminary test)	23	6.8	29
B	208	64.9~83.9	31~40
C	206	91.8	45

燃焼熱量に対する放射熱量の割合は20%~40%の範囲からやや外れているが、他の試料では、いずれも範囲内であった。また、試料Aと試料Bでは、燃焼熱量に対する放射熱量の割合が30%前後でほぼ同じ値となったが、これは火薬の組成が同じためと考えられた。

#### 4. 結 論

国連外部火災試験において、受感度約 $2.4\text{mV/kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、最高受熱放射量約 $23\text{kW/m}^2$ で受熱素子にサーモパイルを用いた放射計を用いて、15m離れた1点から放射熱を計測し評価する方法の適用性を調べると共に、燃焼時間から放射熱の影響を判定する方法の妥当性を検証することを目的として、国連外部火災試験の実証試験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 連続的に燃焼する試料では、放射熱のピークは1本であるが、間欠的に燃焼する試料では、放射熱のピークは幾つかに分かれることが観察され、放射計により測定された放射熱は、燃料及び試料の燃焼を非常に良く反映して変化したので、放射熱の評価に放射計を用いることは、有効な方法の1つである。
- (2) 試料中心部の底面のみでの温度計測は、試験における火の廻り方の検証には有効であるが、試料の放射熱の推定には適していない。
- (3) 国連危険物輸送専門家委員会で米国やスウェーデンが提案した放射熱の計算式は、最大値よりも平均値に近い値を与える。
- (4) 時間をかけて間欠的に燃焼する試料で、VTR映像等から正味の燃焼時間を正確に求めることが困難な場合には、放射計等による放射熱の直接計測を併用する必要がある。
- (5) 燃焼熱量に対する放射熱量の割合は、29%から45%となり、既存の研究とほぼ一致した。

#### 謝 辞

本研究は、平成9年度及び平成10年度通商産業省委託事業国際化対応事業により、(社)全国火薬類保安協会が設置した国連勧告対応委員会国連試験方法検討小委員会(平成9年度)及び国連試験方法検討委員会(平成10年度)において検討されたものの一部である。関係各位に謝意を表す。

#### 文 献

- 1) United Nations, "Recommendation on the transport of dangerous goods: Model regulations (eleventh revised edition)" (2000).
- 2) United Nations, "Recommendation on the transport of dangerous goods: Manual of tests and criteria (second revised edition)" (1995).
- 3) R. W. Watson, "An Alternative to Thermal Flux Measurements in UN Test 6(c)", Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, United Nations, ST/SG/AC.10/C.3/R.641/Add.1 (1995).
- 4) Expert from the United States of America, "Draft Amendments to Part 1 of the Manual of Tests and Criteria", Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, United Nations, ST/SG/AC.10/C.3/1997/19 (1997).
- 5) United Nations, "Recommendation on the transport of dangerous goods: Manual of tests and criteria (third revised edition)" (2000).
- 6) S. Lamnevik, "Fire ball duration and heat flux", Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, United Nations, ST/SG/AC.10/C.3/1997/INF.25 (1995).
- 7) 新井充, Explosion, 8, 103(1998)
- 8) Expert from Norway, "Report of the informal working group on UN Test 6(c), Washington, DC, 2-6 February 1998", Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, United Nations, ST/SG/AC.10/C.3/1998/10 (1998).
- 9) D. S. Burgess, A. Strasser, J. Grumer, Fire Research Abstracts and Reviews, 3, 177(1961).

## Measurement of heat flux for the UN bonfire test

Ken-ichi MIYAMOTO<sup>\*</sup>, Takehiro MATSUNAGA<sup>\*</sup>, Mitsuaki IIDA<sup>\*</sup>,  
Shuzo FUJIWARA<sup>\*</sup>, and Masatake IWAKURA<sup>\*\*</sup>

Combustion experiments were carried out to determine the applicability of a radiometer to the UN bonfire test. At the same time, validity of estimation methods of thermal flux proposed by the United States and Sweden in the committee of experts on the transport of dangerous goods was evaluated. Signal flares, smoke powder contained in the signal flares, and a kind of toy fireworks were used as test samples. Major results and conclusions were as follows: (1) the use of a radiometer is effective to assess the effects of thermal flux because the heat flux measured with the radiometer well reflected the burning condition. (2) Temperature measurement with a single thermocouple under the test samples was not suitable for the assessment of the thermal flux but helpful to verify the spread of fire. (3) The estimation equations of thermal flux proposed by the United States and Sweden underestimated the maximum value but evaluated the average value adequately. (4) It is necessary to measure the thermal flux directly in the case of articles and low energy substances, especially when their burning is intermittent. (5) The ratio of heat of radiation to the heat of combustion was ranged from 0.29 to 0.45, which corresponded to the reported studies.

<sup>\*</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1 Higashi, Tsukuba  
305-8565, JAPAN

<sup>\*\*</sup>Hosoya Kako Co., Ltd., 1847 Sugao, Akiruno, Tokyo 197-0801, JAPAN)