

打揚煙火の安全の研究(第一報)

打揚煙火模擬玉の落下位置に及ぼす風向・風速の影響

和田有司*, 畑中修二**, 松永猛裕*, 田村昌三*,
宮原 章**, 二股英雄***, 吉田忠雄*

打揚煙火模擬玉の打揚実験結果を分析し、模擬玉の平均落下位置に及ぼす風向・風速の影響について考察した。

その結果、地上風向及び上空100m風向と模擬玉の平均落下位置の方位のずれは、ほとんどの場合左右45°以内であり、地上風速及び上空100m風速が大きくなるにつれ、ずれが小さくなる傾向があることがわかった。

一方、地上風速及び上空100m風速と打揚地点から風の方に流された距離との間の相関は、あまり良くないが、模擬玉の種類を3~5号玉の割物に限定すれば良い相関がみられた。この相関から模擬玉は平均的にみて、風下方向に地上風速[m/sec]の数値の約10倍程度の距離[m]の地点まで流されることがわかった。

1. はじめに

花火の事故を起こす潜在的要因として黒玉の発生がある。黒玉とは打揚煙火玉が上空に発射されて、上空で開発せずにそのまま地上に落ちてくるものである。

発生した黒玉は、玉が重く(割物)、大きい(尺玉等)ほど、破壊的、火災的な被害が大きい。また、割物は地上破裂を起こして二次的な被害を起こすことがある¹⁾²⁾。従って、玉の重さ、大きさに対する風の効果は、防災上特に重要である。

しかし、黒玉の落下位置に及ぼす風の影響については、従来の報告書³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾の中では解析されていない。

花火の催しを監督する立場にある自治体では、黒玉による被害を防止するために退避距離基準(保安距離)を定めているところが多い。東京都では、この保安距離の見直しに役立てるために、昭和61年4月及び62年3月の2回にわたり千葉県²⁾の2ヶ所の住宅用造成地で、多数の模擬黒玉の打揚実験を行った。

昭和62年6月10日受理

*東京大学工学部反応化学科

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL 03-812-2111

**日本煙火協会玩具煙火検査所

〒183 東京都府中市押立町 1-13-17

TEL 0423-65-9570

***東京都環境保全局

〒100 東京都千代田区有楽町 1-7-1

有楽町電気ビル

TEL 214-7411

これらの実験から得られた結果は報告書⁷⁾⁸⁾としてまとめられている。しかし、今までにつくられた報告書にはこれらの実験で得られた貴重な技術的知見が全て記載されているわけではない。筆者らは、これらの貴重な実験の結果を解析したので、その成果を数報に分けて報告する。

火薬取締法施行規則第五十六条の四の4—二では「煙火の消費に際して、強風その他の天候上の原因により危険の発生するおそれのある場合には、煙火の消費を中止すること」と規定されている。通商産業省立地公害局保安課監修の火薬類取締法令の解説⁹⁾によれば、強風とは風速10 m/sec以上の風を考えている。一方、東京都では、地上風速7m/sec以上の強風が一定時間以上継続して吹くときに煙火打揚を中断する内規をもっている。

今回東京都が行った実験では、地上風速が1~8m/secの状態¹⁾で、打揚模擬黒玉落下位置、地上風向・風速、及び上空風向・風速が同時に測定された。筆者らはそれらの測定データを解析して模擬玉の落下位置に対する風向・風速の影響を調べた。

黒玉が風下方向に流される度合は、風速が大きく、玉が軽く、玉の空気抵抗が大きく、飛翔時間が長いほど大きいことが予想される。ここでは特に風速と模擬玉の落下位置の方位の風向からのずれ、及び風速と模擬玉が風下方向に流された距離の関係について、割物、ぼか物に大別して解析した。

Table 1 Size and weight of dummy shells.

Date	April 1986							
Size [inch]	3.0		3.6		4.8		6.0	
Type	Warimono	Poka	Warimono	Poka	Warimono	Poka	Warimono	Poka
Number	240	240	270	270	240	240	150	150
Diameter [cm]	6.9	6.9	8.6	8.6	11.3	11.3	14.2	14.2
Weight [g]	120	80	230	150	550	260	1,100	500
W/S* [g/cm ²]	3.24	2.16	3.95	2.58	5.45	2.57	6.99	3.18

Date	April 1986				March 1987				
Size [inch]	7.2	8.4	9.6	12	3.6	4.8	6.0	9.6	12
Type	Warimono	Warimono	Warimono	Warimono	Warimono	Warimono	Warimono	Warimono	Warimono
Number	40	40	40	40	27	24	24	4	4
Diameter [cm]	17.1	20.1	23.2	27.5	8.6	11.3	14.2	22.8	27.8
Weight [g]	2,000	3,000	4,500	9,000	230	565	1,070	4,500	9,000
W/S* [g/cm ²]	8.68	9.45	10.63	15.15	3.96	5.63	6.76	11.02	14.83

* W=Weight, S=Maximum sectional area.

黒玉の落下位置は滞空中のあらゆる高度での風向・風速に影響されるが、その影響の予測は技術的に困難である。また、実際に煙火打揚中断の決定は、地上の風向・風速の測定結果に頼らざるを得ないので、地上の風向・風速の測定結果から上空の風の状態を予測する現行の方法がどの程度役に立つか、上空の風向・風速の影響との比較から実験的に解明した。

2. 実験

2.1 試料

用いた模擬黒玉は千葉県で打揚煙火業者が分担して作成した。中心部に砂袋をおき、まわりをのみ殻で囲んで、玉がわの中に詰めたものである。昭和61年4月の実験では、軌道追跡用として模擬玉の外側に煙ぼく(発煙筒)を取り付けた。昭和62年3月の実験では、玉内に追跡用として信号炎管を取り付けたが、これだけでは追跡用として光度が不足するので更に外側に銀竜(アルミニウム系発煙筒)を取り付けた。

模擬玉は、2.5号から10号までの大きさのものについて、割物(外殻強固、破裂圧大)、ぼか物(外殻比較的弱、破裂圧小)を準備し、標準玉(外部に何も取り付けない)、あるいは弾道改良用にひも(61年4月実験の5号玉以下はグラスウールひも、それ以外は荒なわ)

または把手(ラングストーン巻紙筒)の付け物を取り付けて、単発、スターマイン(単玉または重ね玉)などの打揚方法¹⁰⁾で実験が行われた⁷⁾⁸⁾。実験に用いた模擬玉の諸元をTable 1に示す。

2.2 実験場所と測定計器の配置

昭和61年4月22、23日の実験は千葉県印旛郡印西町の千葉ニュータウン住宅造成地(東京湾岸より約18km)で行われた。打揚地点を中心に東西南北に50mおきに標識を置き、それらを結んだ線を引き、さらに50mおきの円を描いて落下位置測定に役立った。

昭和62年3月4日の実験は千葉県浦安市日の出町住宅都市整備公園用地内の埋立造成地(東京湾岸)で行われた。落下位置測定用の標識等の配置は前回と同様である。

どちらの実験場所も風に影響を与えるような障害物が周囲にない平坦な地形であった。

測風気球による上空の風向・風速は打揚地点から南東約200m地点、地上風向・風速は打揚地点から南約200m(61年4月)及び南西約200m(62年3月)の所で測定された。

2.3 計測

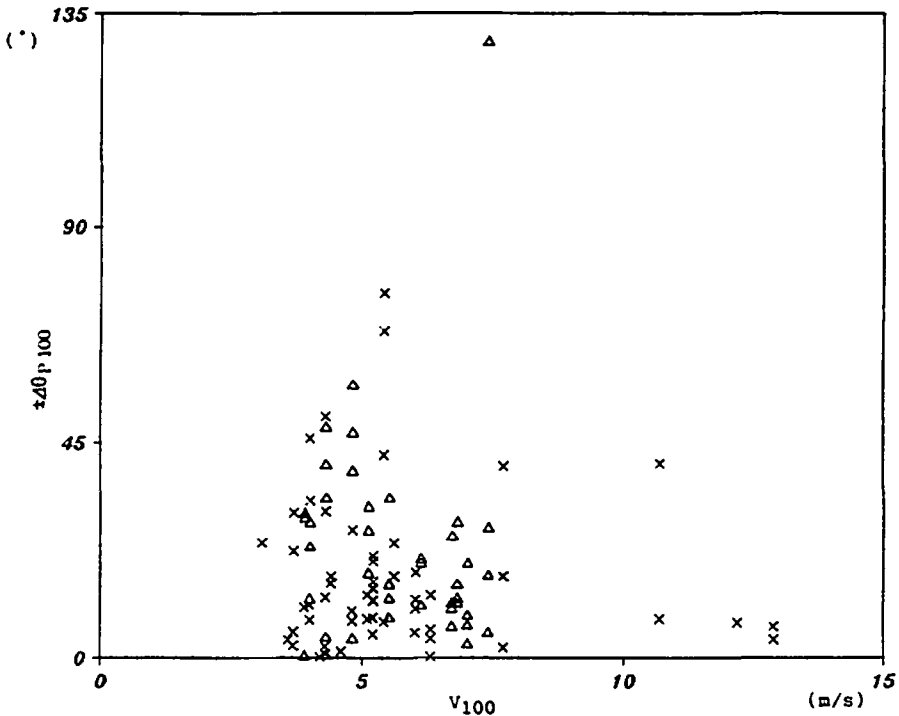


Fig. 1 Influence of wind velocity at 100m height on average fall point of dummy shells. v_{100} : Wind velocity at 100m height. $\pm\Delta\theta_{p100}$: Difference between direction of average fall point of dummy shells and wind direction at 100m height. \times : "Warimono" dummy shells. Δ : "Pokamono" dummy shells.

2.3.1 地上風向・風速

日本煙火協会玩具煙火製検査所所有の自記風向風速計(懐いすず製作所, ビラム型携帯用風向風速計)を用いて地上約1.5mの高さの風向・風速を測定した。風速は打揚時前後の30秒間の風速の平均である。風向も同時刻における30秒間の風向の平均値である。

2.3.2 上空風向・風速

日本気象協会に依頼して測定した。測風気球を定時あるいは打揚げの直前に上げ、50m毎に位置を測定して、その高度間の平均の風向・風速を算出した。

2.3.3 落下位置

模擬玉の落下位置から東西及び南北の最寄の基線までの最短距離を計測した。

2.4 実験手順

打揚筒に所定量の発射薬を装填し、模擬玉を入れ、点火用の黒色火薬を入れ、秒読みの後、点火・発射した。その際にトランシーバーによる合図によって風向・風速の測定を行った。同時に8~20発の打揚が行われ、落下位置が計測班によって測定された。

3. 結果と考察

3.1 上空風速が平均落下位置の方位と上空風向とのずれに及ぼす影響

平均落下位置は同時に打揚げられた模擬黒玉の落下位置のx座標及びy座標を平均して求めた。落下位置の方位及び風向は北向きを 0° とし、時計まわりの方向の角度 $[\circ]$ で表した。

模擬玉の平均落下位置の方位のほぼ同時刻における上空100mの風向からのずれ($\pm\Delta\theta_{p100}$)とその時の上空100mの風速(v_{100})の関係をFig. 1に示した。

この図から模擬玉の平均落下位置の方位はほとんど上空100mの風向の左右 45° 以内で一致し、一致の度合いは上空100mの風速が大きいほど良くなる傾向がある。図中に一点 90° を超える点があるが、これは昭和61年4月の実験のうちスターマイン単玉の把手付ばかり物で、その落下位置は、同時に打揚げられた14個の玉が風向と同じ方位と風向と反対の方位に7個ずつ別れて分布している。風向と反対の方位に落下した原因についてはわからない。

ここで上空の風として上空100mの風向・風速を採ったのは、100mという高度がほぼすべての打揚げに関係する高度であること、高度が上がるにつれ測風気球の雲入の割合が高くなり風向・風速の測定ができなくなるなどの理由による。

3.2 地上風向と上空風向の関係

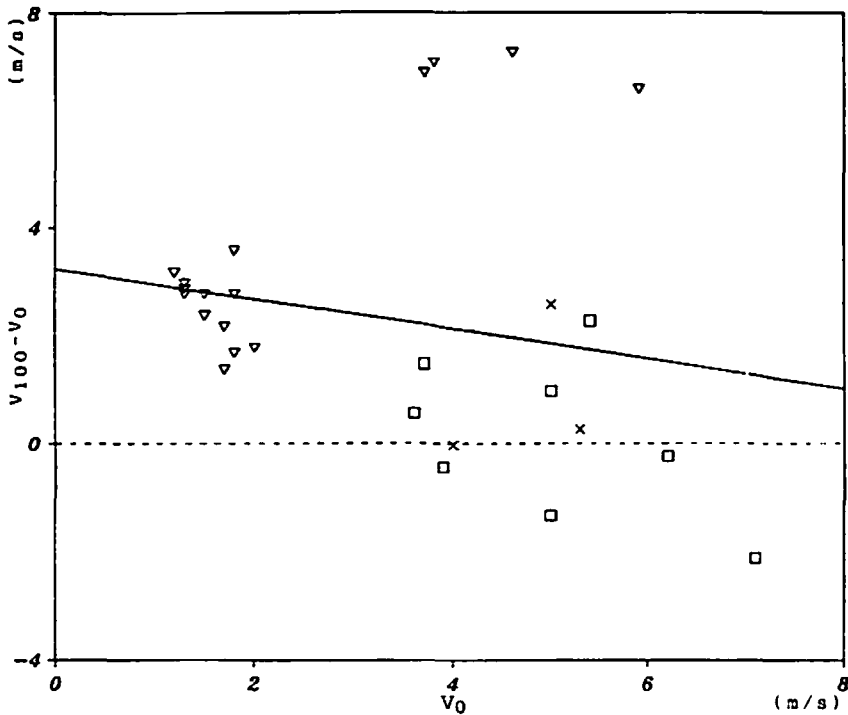


Fig. 2 Influence of surface wind velocity on wind velocity at 100m height.
 v_0 : Surface wind velocity. $v_{100}-v_0$: Wind velocity at 100m height minus surface wind velocity. □: Experiments on April 22, 1986. ×: Experiments on April 23, 1986. ▽: Experiments on March 4, 1987.

風向は上空風向の方が地上風向より安定しているが、地上風向と上空風向ではある程度の相関がある。この相関は(1)式で表される。

$$\theta_{100} = 0.96\theta_0 - 6.5 \quad (1)$$

$$r = 0.979$$

$$n = 99$$

θ_{100} : 上空100m風向[°]

θ_0 : 地上風向[°]

r : 相関係数

n : データ数

地上風向は30秒間の測定時間内でもかなり変動する。それにもかかわらず相関係数 $r=0.979$ とかなり良い相関が得られていることから、この程度の時間の地上風向を平均すればほぼ上空風向に一致するといえる。

3.3 地上風速と上空風速の関係

地上風速と上空風速の関係を明らかにするために、地上風速が上空風速と地上風速の差に及ぼす影響を調べた。これをFig. 2に示した。この相関は(2)式で表される。

$$v_{100} - v_0 = -0.28v_0 + 3.24 \quad (2)$$

$$r = 0.208$$

$$n = 27$$

v_{100} : 上空100風速[m/sec]

v_0 : 地上風速[m/sec]

今回の測定の中では他の測定結果との開きの大きい、62年3月4日の午後のデータ(上空風速と地上風速の差が6m/secを超えている)を除けば、全体として地上風速が大きいときほど上空風速と地上風速の差は小さくなる傾向がある。

上空風速と地上風速との関係は、Fig. 2で区別してあるように、日によって異なり一定しないことが示されている。昭和61年4月22日及び23日は天候が雨から雲、晴と移行し、地上風速は4~7m/secで地上風速と上空風速は平均するとあまり変わらなかった。昭和62年3月4日は快晴で午前中地上風速は2m/sec程度で午後4~6m/secの風が吹いた。この場合は上空風速が地上風速に比べてかなり大きくなった。代表的な風速の高度変化をFig. 3に示した。

3.4 地上風速が平均落下位置の方位と地上風向とのずれに及ぼす影響

上空の場合と同様に、模擬玉の平均落下位置の方位のほぼ同時刻における地上風向からのずれ($\pm \Delta \theta_p$)とその時の地上風速(v_0)の関係をFig. 4に示した。

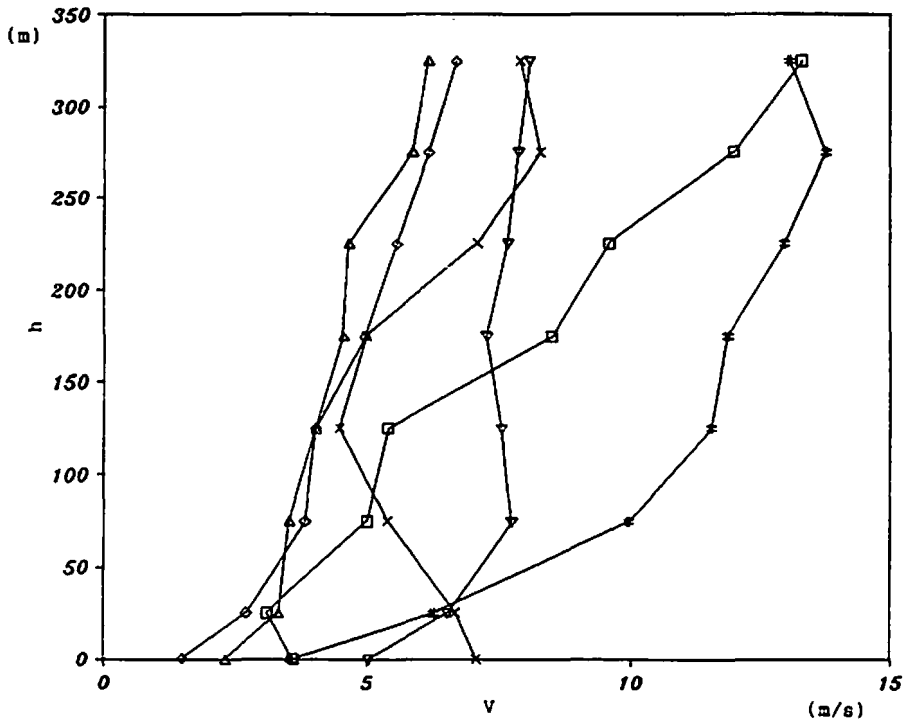


Fig. 3 Examples of variation of wind velocity with height.

□ : 11 : 06, April 22, 1986. × : 13 : 42, April 22, 1986. ▽ : 11 : 31, April 23, 1986.
 ◇ : 10 : 04, March 4, 1987. △ : 11 : 03, March 4, 1987. # : 15 : 32, March 4, 1987.

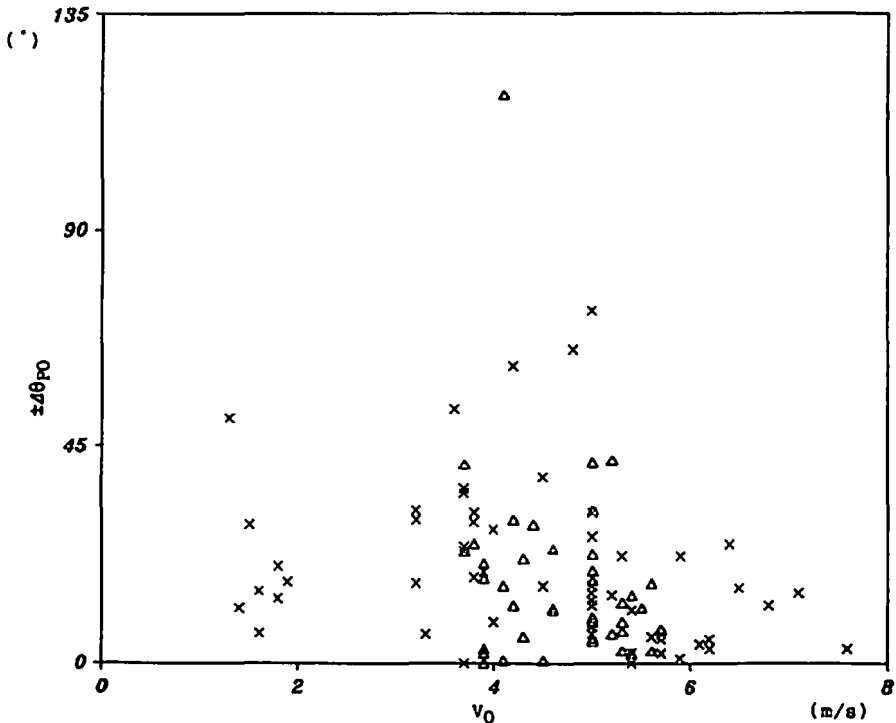


Fig. 4 Influence of surface wind velocity on average fall point of dummy shells.
 v_0 : Surface wind velocity. $\pm\Delta\theta_{p0}$: Difference between direction of average fall point of dummy shells and surface wind direction.
 Signs are the same as figure 1.

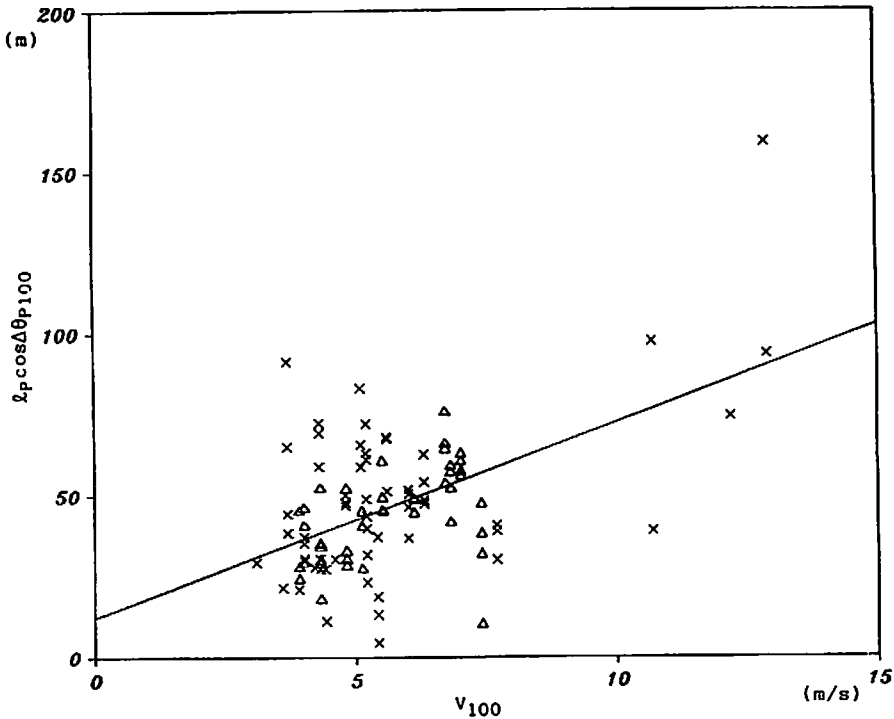


Fig. 5 Influence of wind velocity at 100m height on distance from firing point to average fall point of dummy shells.
 v_{100} : Wind velocity at 100m height. $l_p \cos \Delta\theta_{p100}$: Distance dummy shells drift along wind at 100m height. Signs are the same as figure 1.

この図から模擬玉の平均落下位置の方位は上空の場合と同様に地上風向の左右45°以内で一致する。一致の度合は上空の場合よりさらにはっきりしないが風速が大きいくほど良くなる傾向がある。図中に一点90°を超える点があるが、上空の場合と同一の点である。

以上の結果から打揚げられた模擬玉は平均すると地上風向の風下側に落下するといえる。

3.5 上空の風の方向に流された距離に及ぼす上空風速の影響

空気中で模擬玉が垂直に打揚げられると風によって風下方向に流される。その流される度合いは風速が大きい程、また、玉が軽いほど大きいことが期待される。上空100mの風速と上空100mの風の方向に流された距離(打揚地点から平均落下位置までの距離に平均落下位置の方位の上空100mの風向からのずれの角度の余弦を掛けた長さ)との関係をFig. 5に示した。この相関は式(3)で表される。

$$l_p \cos \Delta\theta_{p100} = 6.23v_{100} + 11.4 \quad (3)$$

$$r = 0.541$$

$$n = 98$$

$l_p \cos \Delta\theta_{p100}$: 上空100mの風の方向に流された距離 [m]

上空100m風速と上空の風の方向に流された距離との相関は存在するが、相関関係はあまりよくない。これは、この相関が2.5号玉から10号玉までの広い範囲の大きさや割物、ぼか物、単発、スターメインなどの広範囲の玉種について行われたものであり、それらの滞空時間はばらついており、又、上空風速の測定時間と打揚時間が必ずしも一致していないという事情によるものと思われる。

3号玉から5号玉までの割物に限ってデータを整理した場合をFig. 6に示した。この相関は式(4)で表される。

$$l_p \cos \Delta\theta_{p100} = 6.39v_{100} + 12.1 \quad (4)$$

$$r = 0.576$$

$$n = 18$$

以上から類似の玉で類似の条件で打揚げられた場合でも必ずしも相関は改善されていない。しかし、強風時のデータが1点だけある62年3月実験に限ってみれば、原点を通る良い相関を示している。

3.6 地上の風の方向に流された距離に及ぼす地上風速の影響

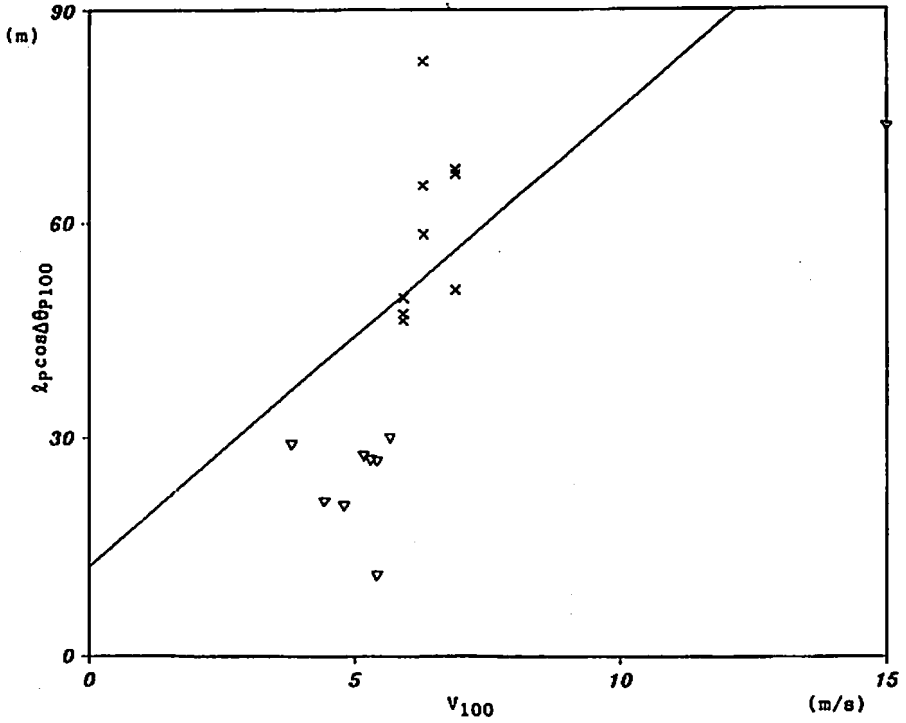


Fig. 6 The result picked out of figure 5 for 3.6 to 6.0 inch "Warimono" dummy shells.
 x : Experiments on April 22 and 23, 1986. ∇ : Experiments on March 4, 1987.

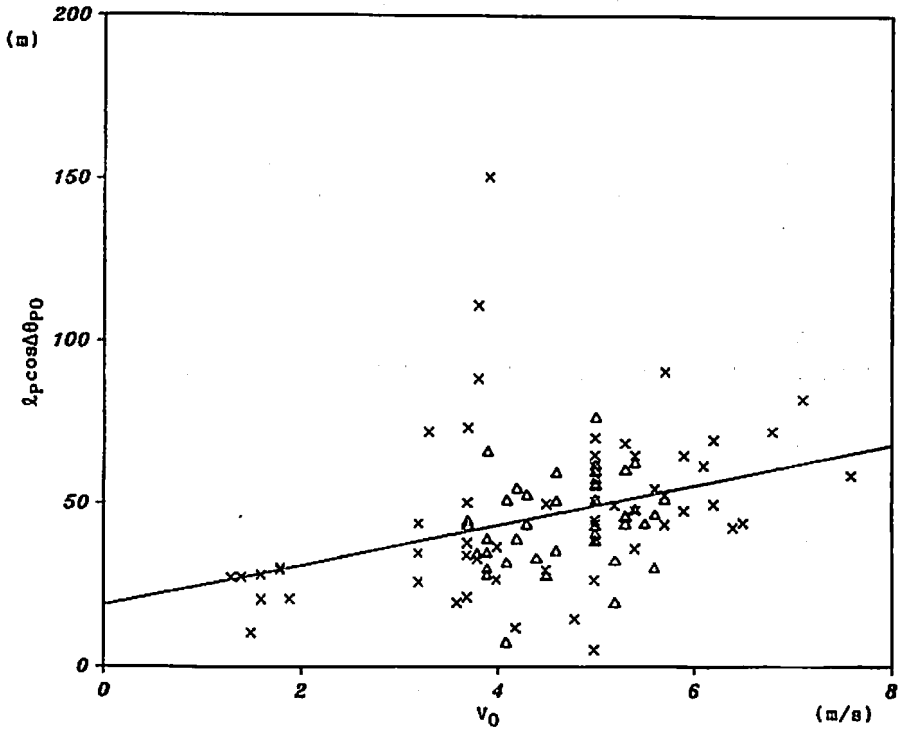


Fig. 7 Influence of surface wind velocity on distance from firing point to average fall point of dummy shells.
 v_0 : Surface wind velocity. $l_p \cos \Delta \theta_{P0}$: Distance dummy shells drift along surface wind. Sings are the same as figure 1.

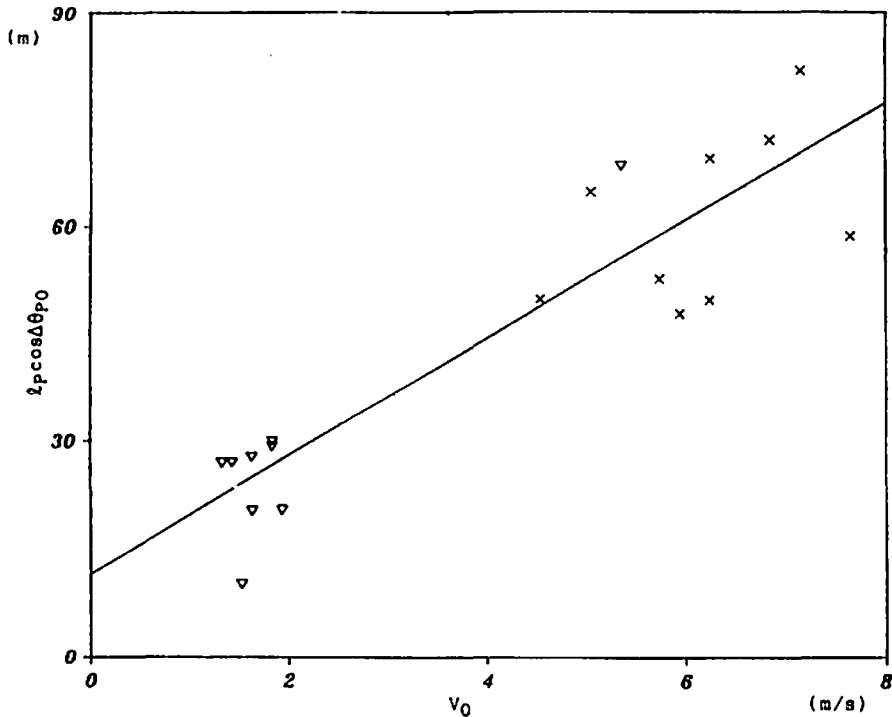


Fig. 8 The result picked out of figure 7 for 3.6 to 6.0 inch "Warimono" dummy shells. Sings are the same as figure 6.

地上風速と地上の風の方向に流された距離との関係を Fig. 7 に示した。この相関は式(5)で表される。

$$l_p \cos \Delta \theta_{p_0} = 6.00 v_0 + 19.7 \quad (5)$$

$$r = 0.355$$

$$n = 98$$

$l_p \cos \Delta \theta_{p_0}$: 地上の風の方向に流された距離[m]

上空100m風速との相関より相関係数は更に小さい。この場合も3~5号玉の割物についてのみ整理すると Fig. 8 のようになり、この相関は式(6)のようによくよくなる。

$$l_p \cos \Delta \theta_{p_0} = 8.21 v_0 + 11.5 \quad (6)$$

$$r = 0.903$$

$$n = 18$$

4. まとめ

昭和61年4月22日、23日及び昭和62年3月4日に東京都主催で行われた打揚煙火模擬玉実験の結果から、模擬玉の平均落下位置に及ぼす風向・風速の影響を解析し、次の結果を得た。

- (1) 模擬玉の平均落下位置の方位と地上観測の風向のずれは、ほとんどが地上風向の左右45°以内に収まっており、平均すると黒玉は風下方向に落下する確率が高い。
- (2) 地上風向と上空風向はほぼ一致する。

(3) 3~5号玉割物が地上の風の方向に流される距離は、地上風速に比例して長くなる。したがって、一定以上の風速で煙火打揚を中止させる現行の規制は妥当である。

(4) 2.5号玉から10号玉までについて2回にわたって行われた実験の全データについては風速と風の方向に流された距離について良好な相関は得られなかった。

(5) データを解析した結果、割物とぼか物の間に玉の断面比重による風の影響の度合いに明確な差は見られなかった。

(6) 地上風速と上空風速との関係は日によってかなり異なることが示された。

(7) 今回の実験は地上風速が比較的小さい場合のデータが多く、結果の利用のためには地上風速が大きい場合についてのデータの補足を要する。

注) 実験の詳細記録は損保料率算定会の災害科学研究会の化学部会資料(昭和62年6月)に記載してある。

文 献

- 1) 日本産業火薬会保安部編、「火薬類による事故例集、明治35年~昭和37年」、日本産業火薬会資料編集部(1964)

- 2) 通商産業省立地公害局保安課編,「高圧ガス・火薬類取締月報」,石油産業新聞社(月刊)
- 3) 山本祐徳,「黒玉対策を主とした煙火消費の安全化に関する研究,第一報,黒玉による危害を避けるための安全距離についての研究要報」,東京都,煙火に関する委託研究,第一編,首都整備局都市公害部産業保安課(1966)
- 4) 山本祐徳,「黒玉対策を主とした煙火消費の安全化に関する研究,東京都,煙火に関する委託研究,第二編,首都整備局都市公害部産業保安課(1966)
- 5) 山本祐徳,「黒玉対策を主とした煙火消費の安全化に関する研究,東京都,煙火に関する委託研究,第三編,首都整備局都市公害部産業保安課(1966)
- 6) 通産省化学工業局・工業技術院,「昭和44年度,岩手山爆発実験報告書」(1970)
- 7 a) 東京都環境保全局助成指導部火薬電気課「煙火打揚消費実験報告書」(1986)
- b) 東京都環境保全局助成指導部火薬電気課「煙火打揚消費実験報告書・資料編」(1986)
- 8 a) 煙火消費の保安距離基準見直し検討委員会,「煙火消費の保安距離基準見直し検討委員会報告書」,東京都環境保全局助成指導部火薬電気課(1987)
- b) 東京都環境保全局助成指導部火薬電気課,「煙火打揚消費補足実験・資料編(Ⅱ)」(1987)
- 9) 通商産業省立地公害局保安課監修,「火薬類取締法令の解説」,日本産業火薬会(1980)
- 10) 山川道雄編,「産業火薬」,日本産業火薬会, p.273 (1986)

Safety of Shooting Firework Shells (I)

Effect of Wind Direction and Speed on the Average Fall Points of Black Shells

by Yuji WADA*, Syuji HATANAKA**, Takehiro MATSUNAGA*,
Masamitsu TAMURA*, Akira MIYAHARA**, Hideo FUTAMATA***
and Tadao YOSHIDA*

About 2,000 dummy shells including 3 to 12 inches "Warimono" and "Pokamono" types were fired with surface wind velocities 1 to 8m/s. At the same time, the wind directions and speeds at high altitude were measured by pilot balloons.

The results were statistically analyzed to see the relations between the average fall points of the shells, and wind directions and speeds of surface and 100m height.

The difference between the direction of average fall point of dummy shells and wind direction was, in most cases, within 45°. There was a tendency that the difference decreases with increase of wind velocity.

In general, the correlation between wind velocities and the distances of dummy shell drifts in the wind directions from the firing point was not good. However, when the results with 3.6 to 6.0 inch "Warimono" dummy shells were picked out, the correlation was good. It shows the dummy shells drift along wind about 10 times as large as the surface wind velocity on average.

(*Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo, 113, Japan

**Japan Fireworks Association, Testing Laboratory for Toy Fireworks, 1-13-17 Oshitate-machi, Fucyu-shi, Tokyo, 183, Japan

***Environmental Protection Bureau of Tokyo, 1-7-1 Yuraku-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 100, Japan)