REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Vol. 6 No. 1 August 1955

消防研究所報告

第 6 巻 第 1 号 1955年8月

目 次

研 究

種々の条件におけるたばこの燃焼特性について……新 居 六 郎…(1)

ホースの水撃作用について……研野作一・宮田作・石坂和嘉…(12)

花火の落下運動に関する2～3の計算法について…秋田一雄・青沼孝正…(18)

消 防 研 究 所

東 京 都 三 鷹 市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Vol. 6, No. 1 August 1955

Contents

MEMOIRS

Burning Characteristics of Japanese Cigarets on Several Conditions ..... R. NII ..... (1)

On the Water Hammer in Fire Hose ... . S. TOGINO, T. MIYATA AND K. ISHIZAKA ..... (12)

Some Calculation for the Investigation and Prevention of Fire due to Fire Works ..... K. AKITA AND T. AONUMA ..... (18)

Published by

Fire Research Institute of Japan

700 Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo, Japan.

種々の条件におけるたばこの燃焼特性について

新 居 六 郎

Burning Characteristics of Japanese Cigarets on Several Conditions

By

R. NII

Member of the Institute

(*Received July* 5, 1955)

The measurement of max. burning temperature of Japanese cigarets which are burning naturally or aspirated intermittently (what is called smoking) fixed horizontally, was done previously in the Central Research Institute of the Japan Monopoly Public Corporation and so on.

But the only data on the conditions as mentioned above is not sufficient to make use of in fire research. Moreover there is no investigation on the conditions other than those mentioned above. But the author felt keenly the importance of the investigation of burning characteristics of Japanese cigarets on several conditions by the fact that the cause of fire called by the burning cigaret is counted up in every year as one of the principal causes of fires in Japan, for example, among 25 677 of total fire accidents, 1 833 of fire accidents were caused by the burning cigarets in 1953.

From the view point of fire research the experiment was carried out about four kinds of Japanese cigarets; "GOLDEN BAT", "SHINSEI", "HIKARI" and "PEACE". The results of the experiment are as follows:

(1) The max. burning temperature in °C and burning velocity in mm/min at natural burning of Japanese cigarets fixed horizontally are showed in Table 1.

(2) The max. burning temperature of Japanese cigarets which are fixed horizontally and burning aspirated continuously, increases a little as the aspirating pressure in mm Aq. increases until the aspirating pressure attains to a certain value, but is constant temperature at more than the certain value of the aspirating pressure. The mean burning velocity increases linearly as the aspirating pressure increases. It could be found that the aspirating effects does not contribute to the burning temperature of the cigaret but greatly to the burning velocity.

(3) Effect of the blower's wind on the burning characteristics of a Japanese cigaret ("PEACE").

(a) When the wind direction is parallel to the burning direction of cigaret, the mean burning velocity in mm/min increases as the mean wind velocity (during 5 min) in m/sec (since then the author calls only wind velocity) increases from 0 to 1 m/sec or so and then begins to decrease as the wind velocity exceeds 1 m/sec or so. The probability of the burning cigaret going out half burnt increases as the wind velocity exceeds 1.5 m/sec. The burning cigaret went out half burnt without fail when the wind velocity exceeds 3 m/sec.

(b) When the direction is vertical or anti-parallel to the burning direction of cigaret, the burning cigaret went out half burnt without fail at the velocity of more than 1.4m/sec.

(c) The time taken until the burning cigaret in wind goes out half burnt, was about 3—4min.

§1. 緒　　言

たばこが水平におかれて自然の状態で又は間けつ吸引（いわゆるきつ煙）されて燃焼している場合の最高燃焼温度については，日本専売公社中央研究所その他で二三[1][2][3]しらべられているが，最高燃焼温度の測定値のみでは，火災の研究に役だたしめるには十分と言いがたい。しかも上述以外の条件におけるたばこの燃焼性については，未だほとんど調べられていない状態である。しかるにたばこの火は毎年我が国の主要な火災原因の一つに数えられている。例えば昭和28年における火災原因別の分類[4]では，総火災件数25,677件のうちたばこの火によるものは，1,883件をしめている。このことにかんがみ，更に筆者が一昨年来継続実施している微小な固体熱源による可燃性液体蒸気の着火性についての研究において，微小な固体熱源の見地から種々の条件の場合のたばこの燃焼性について調べておく必要を痛感し，昨年末以来，日本の4種の両切たばこ，ゴールデンバット（以下単にバットと呼ぶ），新生，光，ピースについて自然くん焼時及び吸引時の燃焼特性更に風の影響等について調べてきたが，一応の成果をえたのでここに報告する。

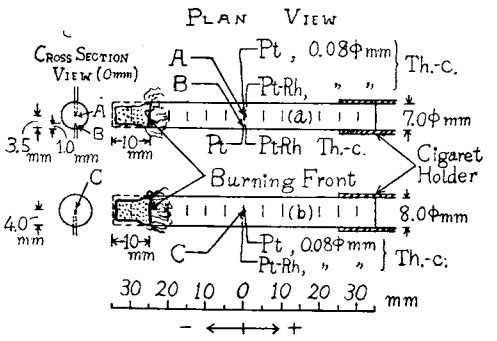
§2. 供試たばこ及び燃焼温度測定等について

包装時のたばこの含水率は大体11%前後（標準偏差±5～7%）で，このときの1本のたばこの重量[5]（紙を除いた，たばこのみの）はバット0.85g，新生1.09g，光1.05g，ピース1.15gである。バット，新生は1包装につき20本入で包装がよくないことを考慮して，供試たばこをなるべく一定の含水率にたもつため，約38%硫酸水溶液（湿度約60%位）入デシケーター中に約1週間放置して平衡含水量（含水率約19～20%）に達せしめて後使用した。ただしたばこの燃焼に及ぼす風の影響を調べる実験においてはピースのみを使用したので，デシケータ中に入れなかつた。たばこの燃焼温度の測定には，Pt，Pt-Rh熱電対 0.08ϕmm のものを使用し（熱接点部は0.2～0.3ϕmm の球状），これを冷接点を通つて mVメーターに持続して，熱接点部の温度と熱起電力との関係を標準の Pt，Pt-Rh熱電対（0.2ϕmm）及び mVメーターにより較正しておいて燃焼温度をきめた。燃焼時間等の測定にはすべてストップウオッチを使用した。

§3. 自然くん焼時の燃焼特性

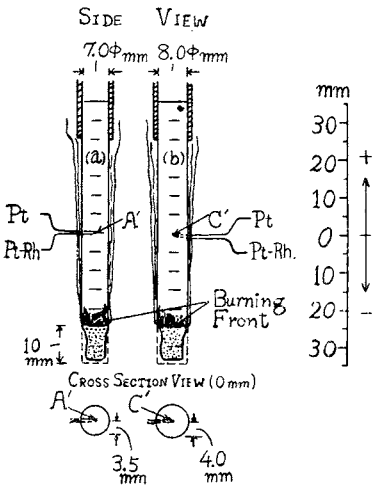
最初たばこの一端をマッチの火により点火すると同時に1回だけ著者が吸引して確実に燃焼するようにした後，A，B，C，A′，C′（Fig. 1 Fig. 2 参照）にそれぞれ熱電対の熱接点部を図示の如く挿入し，−25mmの所から熱電対の起電力，たばこに5mm おきに鉛筆でマークしたスケールにより燃焼フロントの到達した位置及

Fig. 1



(a) A cigaret ("GOLDEN BAT,,) fixed horizontally and marked by a pencil at 5mm intervals.
(b) A cigaret ("SHINSEI,, or "HIKARI,, or "PEACE,,) fixed horizontally and marked by a pencil at 5 mm intervals.
A, B and C show hot junctions of Pt, Pt Rh Thermocouple (Th.—C.) inserted into the cigaret.

Fig. 2



(a) A cigaret ("GOLDEN BAT,,) fixed vertically, burning upwards and marked by a pencil at 5 mm intervals.
(b) A cigaret ("SHINSEI,, or "HIKARI,, or "PEACE,,) fixed vertically, burning upwards and marked by a pencil at 5 mm intervals.
A′ and C′ show hot junctions of Pt, Pt Rh Thermo-couple (Th.—C.) inserted into the cigaret.

び要した時間を測定した。静かな室内でたばこが水平に固定され燃えている場合と垂直に固定されて下から上に向つて燃えている場合の2つの場合について実験を行なつた。いずれの場合においても燃焼フロントの外縁（たばこの紙に着火，顕著に燃焼している部分）は平面でなく実際には僅かな凹凸や燃焼方向に対する傾きはあるが平均的に平面とみなし，これをここでは燃焼フロントと呼ぶ。熱電対の挿入箇所を座標の原点にとり，これより燃焼フロントまでの距離を右に対しては＋，左に対しは－としてあらわした。横軸に熱電対より燃焼フロントまでの距離，縦軸には燃焼フロントの進行にともなう熱電対の温度すなわち燃焼温度をとつた。これらの関係をぐらふ上にプロットすれば，各1本のたばこの実験について1本の折線をえたが，10本前後のものの実験によるプロット点の平均

Fig. 3

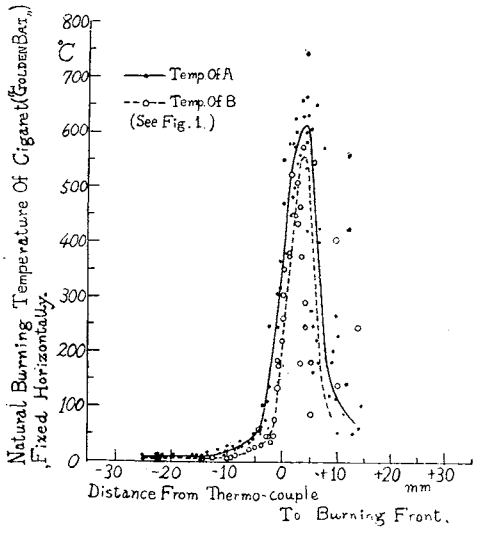
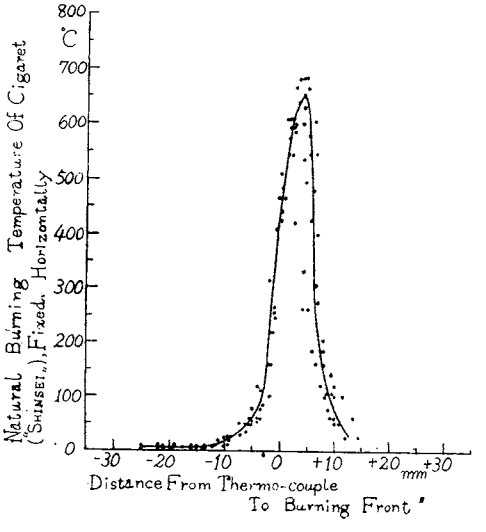


Fig. 4



をとるようななめらかな1本の曲線で表わせばたばこが水平に固定され燃えている場合には，4種のたばこについてFig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6がえられ，垂直に固定されて下から上へ燃えている場合は，同様にFig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10がえられた。ただしパット（Fig. 1, Fig. 3 参照）に対しては，たばこの横断面の半径方向の温度の相異をしるために，中心部より2.5mm離れた所にも熱電対を挿入して調べた。この場合熱電対を同じ断面に2箇も挿入すると燃焼状態を変化させると思われたので，各供試たばこにつき1箇づつすなわちA又はBに挿入したのである。Fig. 1では，あたかもたばこ1本について2箇の熱電対を挿入したように図示してあるのでことわつておく。Fig. 1～Fig. 10からわかるとおり，4種のたばこは燃焼温度と燃焼フロントの進行距離の間に類似の特徴ある曲線を示す。これらの曲線を詳細に比較してみると，まずたばこの燃焼温度は中心部の方が周縁部より高いことを知る。これは外側の気流の冷却効果によると思われる。同種のたばこについては，4種のたばこども，垂直の場合の方が

Fig. 5

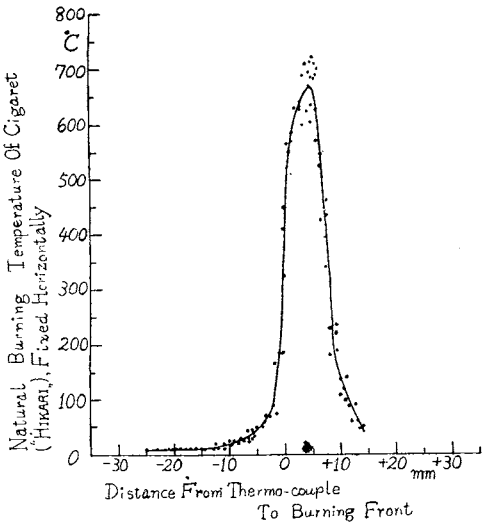


Fig. 6

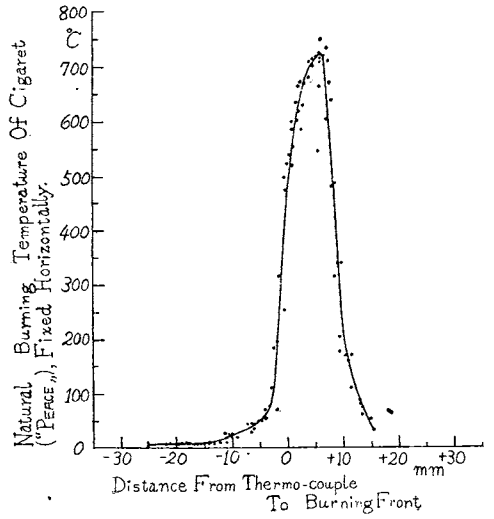


Fig. 7

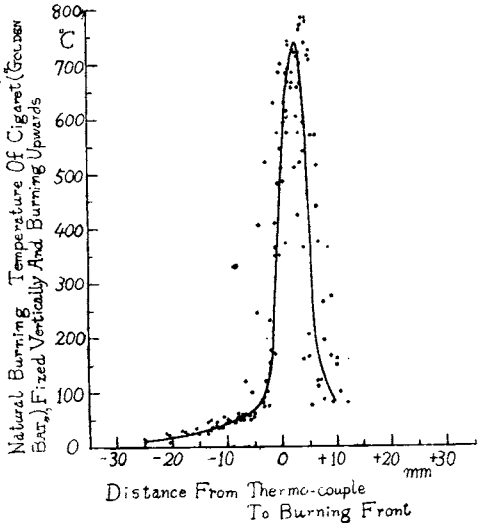


Fig. 8

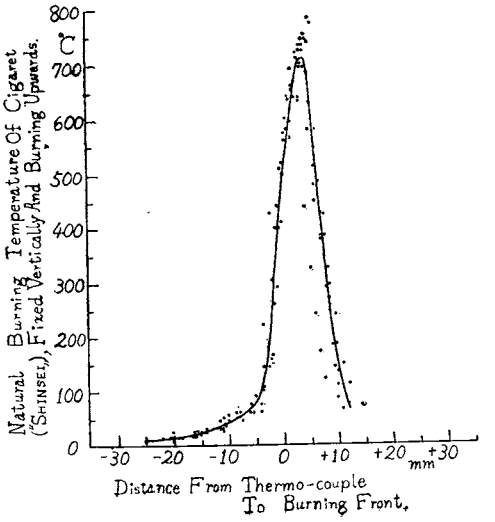


Fig. 9

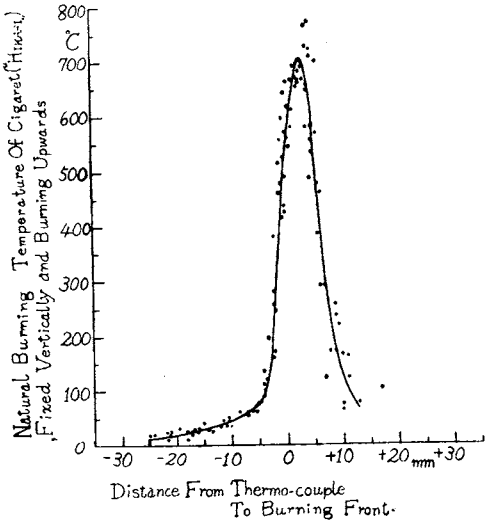
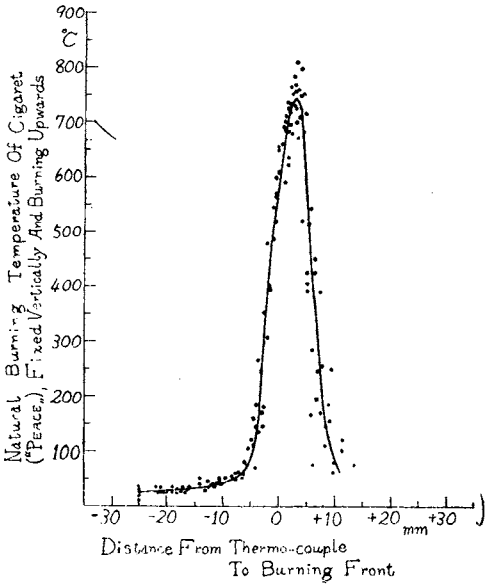


Fig. 10



水平の場合よりも燃焼温度が高い。これは垂直の方が空気の供給が水平の場合よりも良好で燃焼が盛になるためと思われる。燃焼フロントはほぼ抛物曲面をなし外側につきでているので，燃焼フロントの外縁部の断面の所では，中心部は未だ最高温度に達していない。中心部がその断面で最高温度になるのは，燃焼フロントが更に水平の場合には 7～11mm，垂直の場合には 6～8mm 進行したときである。水平の場合にはバット，新生，光，ピースの順に最高燃焼温度に到達するまでに燃焼フロントの進行する距離が小さくなつているが，垂直の場合にはたばこの種類による差はほとんど認められない。これはたばこの種類による単位長さ当りのたばこの重量の相異，すなわち密度の相異が水平の場合に影響を及ぼすが垂直の場合にはその影響が殆んどないことを示し，密度相異による空気供給の難易したがつて燃焼の難易を示すと考えられる。水平，垂直の別，たばこの種類を問わず，最高燃焼温度に向つて上昇曲線をたどる場合，プロットされた点は非常に良く曲線上にのり，ばらつきは少ないが，最高燃焼温度に達して後燃焼温度が下降するにつれ，下降曲線のまわりのばらつきが大きくなるのは，既に燃焼完了して完全に灰になつた部分の灰の落ち方の不均一によるのである。したがつてたばこ葉のすぢ等の不均一の部分を含んでいるバット，新生のような安価なたばこ程ばらつきが大きく，光，ピースのような均一で，燃焼性の良好なすなわち良質のたばこの葉を含む高価なたばこ程ばらつきが少ないことは興味深い。

燃焼フロントが 1 Min. 間に進行する距離を mm であらわし，これを燃焼速度と定義する。この自然くん焼の実験においては，燃焼フロントが40mm を進行する時間を測定し，燃焼速度を算出した。次に水平，垂直の 2 つの条件の場合に，4 種のたばこの平均最高燃焼温度，最高燃焼温度（最小—最大），平均燃焼速度，燃焼速度（最小—最大）を Table. 1に示す。これによると平均最高燃焼温度は，水平の場合には，ピース，光，新生，バットの順に次第に低くなつており，又垂直の場合には，バットが例外的に高温度を示したほかピースはやはり水平の場合と同様最高の温度を示している。同一種類のたばこについては，勿論垂直の場合が水平の場合よりも高い温度を示す。平均燃焼速度については，水平の場合には，たばこの種類による差はほとんどなく，垂直の場合には，バット，新生光，ピースの順に次第にその燃焼速度が小さくなつている。水平，垂直いずれの場合にもバットの燃焼速度は最大である。この表中，平均最

Table 1 The Average Max. Burning Temp. in °C and Average Burning Velocity in mm/min of four kinds of Japanese cigarets on two conditions of natural burning; fixed horizontally, or vertically and burning upwards.

Two Conditions	The Kins of Japanese Cigarts	"GOLDEN BAT,,	"SHINSEI,,	"HIKARI,,	"PEACE,,
fixed horizontally	Average Max. Burning Temp. (Max.～Min.) °C	617 (560～745)	650 (600～685)	669 (605～720)	724 (715～750)
	Average Burning Velocity (Max.～Min.)mm/min	4.4 (3.7～4.9)	4.3 (3.8～4.7)	4.2 (3.9～4.9)	4.3 (3.8～4.7)
fixed vertically and burning upwards	Average Max. Burning Temp. (Max.～Min.) °C	741 (710～785)	712 (640～755)	706 (695～770)	744 (670～810)
	Average Burning Velocity (Max.～Min.)mm/min	5.3 (4.2～6.7)	5.0 (4.4～6.3)	4.9 (4.0～6.7)	4.4 (3.9～4.7)

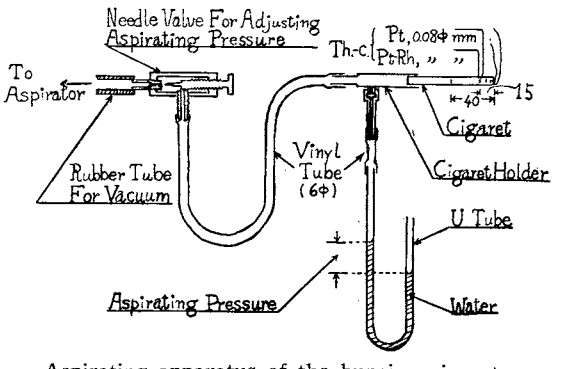
高燃焼温度及び平均燃焼速度は，バットに対しては13本，新生，光，ピースに対しては，それぞれ8本づつの平均値である。この実験中の湿度65～77%で，このような湿度範囲では，湿度は燃焼速度にほとんど影響しないことがわかつた。

§4. 吸引時の燃焼特性

4a. アスピレーターによる速続吸引時の燃焼特性

この実験には Fig. 11 に示す装置を用いた。すなわち，上水道の蛇口に連結されたアスピレーターを用いて吸引させた。ここで吸引圧力と

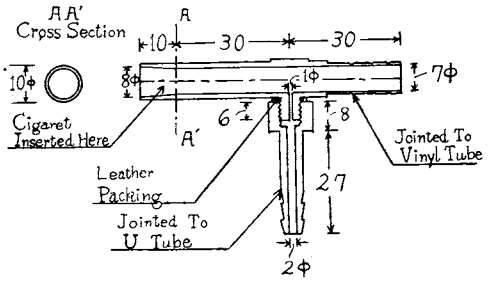
Fig. 11



Aspirating apparatus of the burning cigaret.

は図示の如き大気圧に対する水柱の高さで示すことにする。この吸引圧力を測定するため，U字管を連結できる Cigaret Holder (Fig. 12参照) を用いた。又吸引圧力を一定に調整するた

Fig. 12



Cigaret holder to connect with U tube.

めの Needle Valve (Fig. 13参照) を用いた。この Needle Valve を用いた実験中の吸引圧力の変動は水柱±（2～5）mmであつた。たばこの1本毎に，点火する一端より15mmの所の断面の中心部に横腹より§3で使用したと同じPt，Pt-Rh熱電対を挿入して，この熱電対挿入箇所を燃焼フロントが通過するときの温度と通過後点火端より40mmの距離を燃焼フロントが進行する間の最高温度及びこれに要する時間を測定した。なおたばこの点火はマッチによつた。Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 に図示したグラフよりわかるようにたばこの種類によらず，燃焼フロント通過時の温度は常に通過後

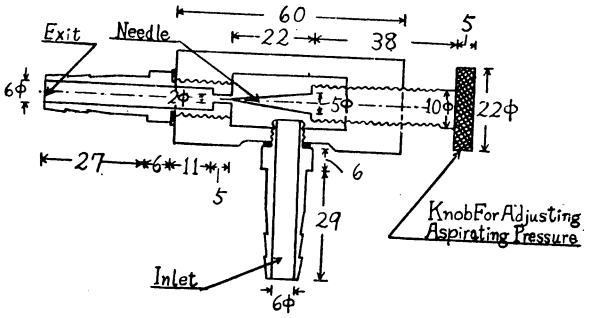


Fig. 13

Needle valve for adjusting the aspirating pressure.

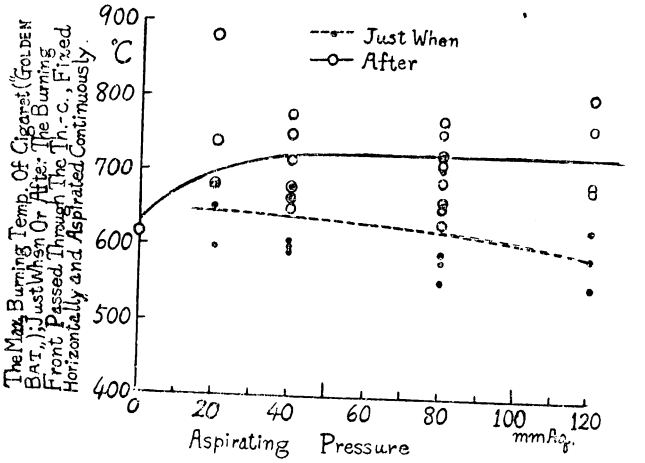


Fig. 14

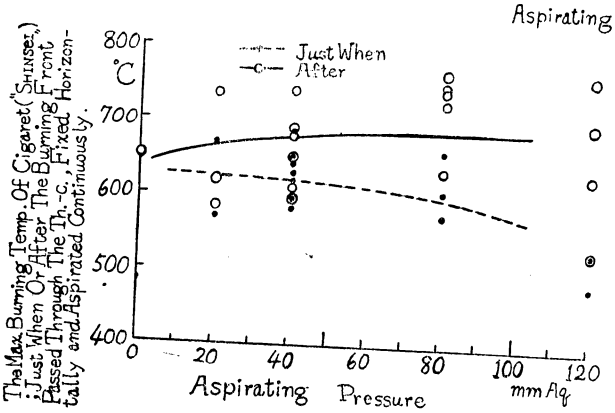


Fig. 15

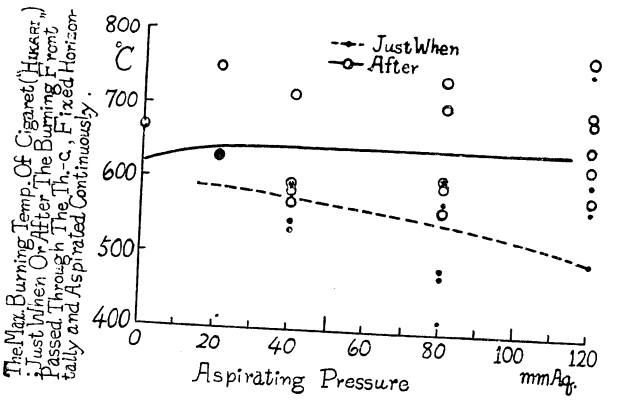
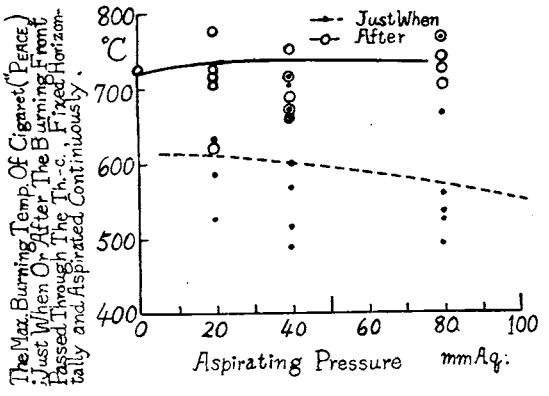


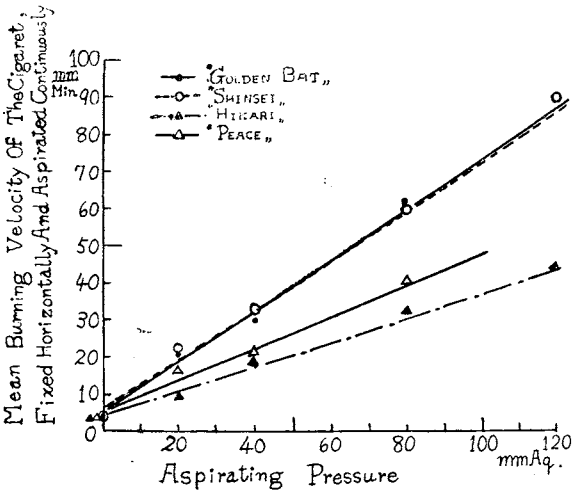
Fig. 16

Fig. 17



にあらわれる最高温度よりも低くなり，バット新生では吸引圧力40mmAq.（水柱）以上では吸引圧力を増加させても最高温度はほとんど増加せず，ほぼ一定で，光，ピースでは吸引圧力20mmAq. 以上では，吸引圧力を増加しても同様に最高温度はほぼ一定である。4 種のたばこにおいて，最高温度は900°Cをこえることはなかつた。連続吸引実験であるので，吸引圧力40 mmAq. 以上になると燃焼速度が自然くん焼の場合の数倍以上となる結果，現在燃焼している部分が燃焼完了までの間に，既に燃焼フロントはたばこの大半部までも進行して，たばこの大半が赤熱されたいわゆるおきの状態になる。燃焼フロントの通過時の温度が低いのは，常温の空気の流入が盛になり，燃焼によつて発生した熱が奪い去られるのと，熱電対の金属線に若干熱が吸収される結果，その近傍附近の燃焼が悪くなり，観測していると，熱電対のある部分を燃焼フロントがよけて進もうとする傾向が認められるので，このような 2 つの場合によるのではないかと思う。この実験の結果，吸引の燃焼に及ぼす効果は，燃焼速度の増大に大いに寄与するが，燃焼温度上昇には，少ししか寄与しないといえる。4 種のたばことも，それらの燃焼速度は吸引圧力の増加と共に直線的に増加することがわかる（Fig. 18参照）。

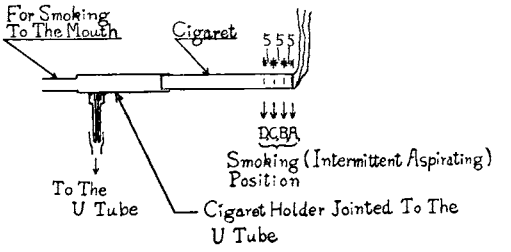
Fig. 18



4b. 8 人の間けつ吸引（きつ煙）試験

Fig. 11に示した U 字管つき Cigaret Holder よりビニール管をはずして，この部に直接被試験者の口をつけてもらつて，実際に人間がこの装置で喫煙するときの吸引圧力はどの位かを試験した。被試験者は当研究所の 8 人の職員（25～40才の男）であつた。バット，新生，ピース

Fig. 19



の 3 種のたばこにつき，A，B，C，D（Fig. 15 参照）の 4 箇所で 1 回づつ，8 人の被試験者に各自の平常のきつ煙状態という条件できつ煙してもらつた。この試験結果は Table. 2 に示す通りであつて平均最大吸引圧力は80～100mmAq. 位になつている。A，B，C，Dとたばこの未燃部分の長さが短くなるにつれ，たばこ内えの流入空気の流入抵抗が小さくなるから，次第に最大吸引圧力も増大してくることがわかる。ただしこの試験では，Cigaret Holder が普通のものと異なり，又安楽な姿勢で試験できなかつたことのほかに，被試験者が試験をされ

Table 2 Max. Smoking (Intermittent Aspirating) Pressure and Smoking Time of eight men tested.

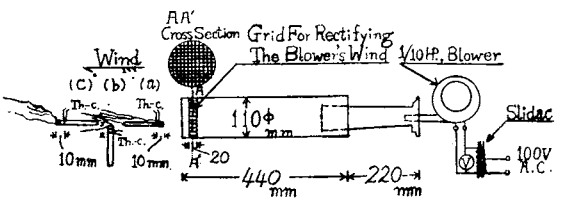
The Kinds of Japanese Cigarets	Max. Smoking Pressure in mm Aq. or Smoking Time in Second.	Smoking Position (See Fig 19)			
		A	B	C	D
"GOLDEN BAT,,	Max. Smoking Pressure of 8 men (Mean)	32～150 (52)	24～154 (78)	24～110 (70)	36～156 (92)
	Smoking Time of 8 men (Mean)	0.8～2.2 (1.2)	0.8～2.2 (1.5)	0.8～2.2 (1.5)	1.0～1.6 (1.4)
"SHINSEI,,	Max. Smoking Pressure of 8 men (Mean)	50～120 (76)	64～140 (110)	84～132 (102)	50～176 (112)
	Smoking Time of 8 men (Mean)	1.0～2.0 (1.6)	1.0～2.0 (1.6)	1.0～3.0 (1.7)	0.8～2.0 (1.6)
"PEACE,,	Max. Smoking Pressure of 8 men (Mean)	48～114 (80)	32～108 (78)	40～148 (86)	44～176 (106)
	Smoking Time of 8 men (Mean)	0.6～1.5 (1.2)	0.8～2.0 (1.3)	1.0～2.0 (1.4)	1.0～2.0 (1.5)

ているという意識による，平常のきつ煙の時とは異つた心理状態にあつたことは確かである。

§5. たばこの燃焼に及ぼす風の影響その他

Fig. 20 に示す装置を使つてたばこの燃焼に及ぼす風の影響をしらべた。使用したたばこはデシケーターにいれなかつたピースである。1/10HP. のブロアーの端子をスライダックに連結して，電圧を変化させることによつて風速を変化せしめ，ブロアーの使用可能の範囲でいくつかの風速の所で行なつた。ここでは風速として5Min. 間の平均風速をとり，ブロアーの端子電圧と風速との関係をビラムの風速計により較正しておいた。燃焼しているたばこを風筒の吹出口の中央部に，風の方向が燃焼方向と同方向の場合，燃焼方向に垂直方向の場合，燃焼方向に逆方向の場合の3種の異つた条件に配置してそれぞれの場合の燃焼特性をしらべた。熱電対の挿入位置は，点火した一端より10mmの所の切断面の中央部である。

Fig. 20



The apparatus for studying the effect of the wind on the burning cigaret.

(a) The burnining direction of cigaret is parallel to the wind direction.

(b) The burning direction of cigaret is vertical to the wind direction.

(c) The burning direction of cigaret is anti-parallel to the wind direction.

5a. 燃焼方向と同方向に風が吹く場合

この場合には，風速と燃焼温度との関係は Fig. 21に図示のとおりで，風速1.0～1.5m/sec 位で最高の燃焼温度を示している。風速と燃焼速度との関係（Fig. 22参照）は，風速約 1.0m/sec で最大となり，これ以上の風速ではかえつて減少しているが，特に注目すべき点は，立ち消えする確率が，風

Fig. 21

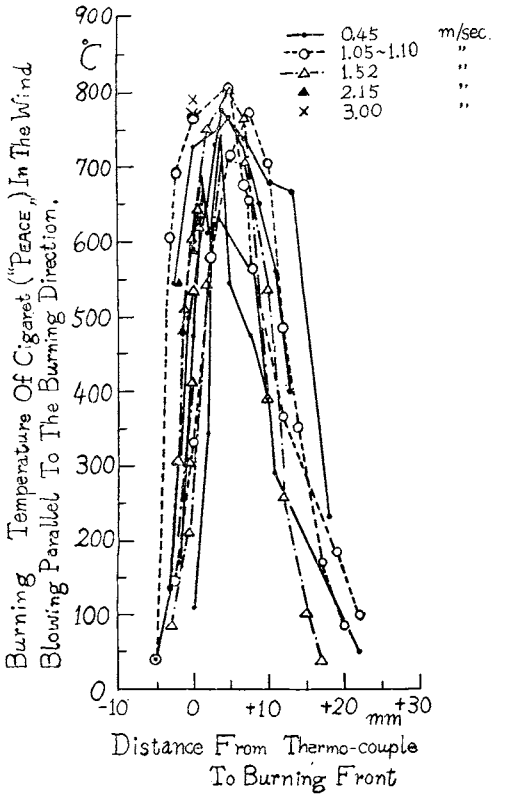


Fig. 20. The relation bet. burning temperature and mean wind velocity.

Fig. 22

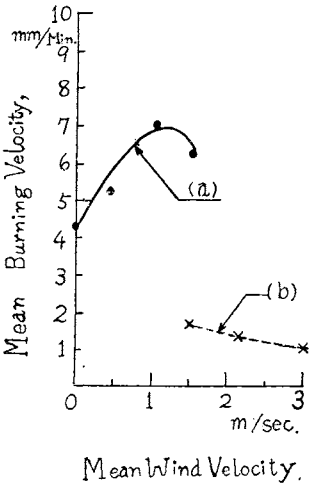


Fig. 21. The relation bet. mean burning velocity and mean wind velocity.
(a) When didn't go out half burnt, i. e. continued to burn.
(b) When went out half burnt.

速 1.5m/sec では3/6, 風速2.0m/secでは4/6 風速 3.0m/sec では 6/6 と風速の増加と共に増加し，風速3m/sec 以上では必ず立ち消えてしまうということである。

5b. 燃焼方向に垂直又は逆方向に風が吹く場合

最高の燃焼温度は，5a においてえた値とほとんどかわらないが，風速 1.4m/sec, 2.0m/sec いずれの場合とも 6/6 の確率で常に立ち消えした。

5a, 5bいずれの場合も，立ち消えするまでの時間は約3～4Min. 間である。この実験では，ブロアーによる人口風であるから連続的な風で，自然風の場合には，ある時間の間はほとんど風速がなくなるか又は全くなくなるいわゆる風の息（いき）といわれるものが存在するので，自然風における風速とはいくらか異なつてくるが，自然風の場合でも，あまり大きな風速では立ち消えする可能性の方が大きいように思われる。実験に使用したブロアーでは風速 0.5 m/sec 以下のいわゆる微風がだせなかつたので，風速 0.5m/sec 以下のものはしらべてないが，風速0.5m/sec と風速0m/sec（自然くん焼の場合）との内挿により，大体の燃焼温度及び平均燃焼速度の見当をつけることができる。その他火のついたたばこの吸殻をなげすてた場合等の落下途中のたばこの温度となると，測定は非常に困難で 5a の結果から推定するほかないが，微小固体熱源による可能性液体蒸気の着火性についての研究と関聯して，加速度約 0.4 m/sec^2 で落下しつつあるたばこの火の内部の温度変化を，既述のものと同じPt, Pt-Rh熱電対を使つて，これをたばこの燃焼している部分に挿入してたばこと共に落下させ，オッシロを使つてしらべてみたが，落下距離約50cm 位の短時間の運動では，落下中のたばこの内部の温度はほとんど一定と考えてよいようである。しかし比較的表面の部分の温度変化等については測定困難でよくわからない。

この報告を終るにあたり，たばこについて二三引用した事柄は，日本専売公社中央研究所たばこ部長大西勲氏に直接おあいして，筆者が同

氏より直接聞いた話をその時ノートしたものであることをおことわりしておく。同時に貴重な資料を見聞させて戴いたことに対し同氏に深く感謝申上げます。なお本実験の一部を実施するにあたり，樋口桃子，荒井春之助両氏の多大の御協力を戴いたことを心から感謝致します。

参 考 文 献

(1) 志方益三：日本農芸化学会誌，第2巻，648 -654
(2) 藤貫　清：専売局中央研究所業程報告，昭12—13
(3) 仁尾正義，豊田幾久：日本専売公社中央研究所研究報告，第82巻（昭25年11月）
(4) 国家消防本部：火災年報第10号（昭29刊），20
(5) 日本専売公社中央研究所 たばこ部長，大西勲氏談による。

（昭和30年7月5日受理）

ホースの水撃作用について

研野作一・宮田 作・石坂和嘉

On the Water Hammer in Fire Hose

By

S. TOGINO, T. MIYATA AND K. ISHIZAKA

Members of the Institute

(*Received July* 12, 1955)

Fire hose, in practice, is subject to occasional danger of rupture due to water hammer pressure caused, for instance, by sudden closing of a shut-off nozzle or by car passing over the hose line. The authors' work to be reported here was made to clarify the nature of the phenomenon cited and thereby furnish basic data usable in testing hose for pressure. In the first stage of the work, both the wave form and the propagation velocity of pressure surge in hose line were measured. Pressure pick-up heads employed were of wire strain gauge type (Fig. 2), the outputs of which were recorded by both pen and optical oscillographs (Fig. 3—(b)). An example of pressure surge record is shown in Fig. 4. The crest values of pressure rise (Δp) measured of 2.5-in unlined linen and rubber-lined nylon-cotton hoses are plotted against mean flow velocity (v_0) in Fig. 5. Applying Allievi's formula $\Delta p = c\rho v_0$ (c=the propagation velocity of pressure wave in m/sec and ρ=the density of water in kg. sec^2/m^4) to our results, we get c=262 m/sec for linen and c=118 m/sec for rubber-lined hoses, respectively, while the actual measurements of c give 250 m/sec (linen) and 110 m/sec (rubber-lined). This shows that Allievi's general formula is well applicable to water hammer in fire hose. In the second stage, attempt was made to estimate the water hammer pressure rise on the basis of the expressions:

$$c = \sqrt{\frac{J}{\rho}}, \quad \frac{1}{J} = \frac{1}{K} + \frac{1}{K'}$$

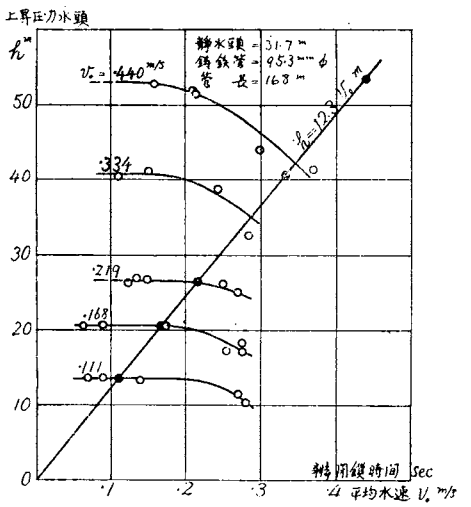
where, K=the bulk modulus of hose (kg/m^2) and K'=bulk modulus of water=2.07 $\times 10^8$ kg/m^2. K is computed from measured values for both elongation and expansion of hose under pressure. The values of c calculated by this method were 270 m/sec for linen hose and 108 m/sec for rubber-lined hose, respectively, showing fairly good agreement with the above mentioned dirct measurement. Thirdly, another indirect method to estimate Δp was tried, in which only c was measured with pressurized hose line, a pressure surge being applied by knocking a piston attached to one end of hose (Fig. 7). This method, however, tends to give values for c rather greater than those obtained by foregoing two methods (Fig. 8).

1. 緒　言

放水中のホースの一部を自動車で押しつぶすとか弁によつて流れを急にとめるといわゆる水撃作用を生じ，ために給水側には新たな圧力の上昇を，放水側には圧力の低下を生ずる。この圧力はそれぞれの側に圧力波として一定の速度でつたわる。ホースは放水の際の定常圧力と水撃圧力の和圧に耐えなければならない。この研究はホースの弾性的性質と水撃圧力との関係を明かにし，各種ホースの耐圧検定規格を定める上の基礎資料を得んがために行われたものである。

2. 水撃作用の理論

水撃作用に関する Allievi[1] 理論によれば，弁閉鎖により生ずる水撃圧力波形は閉鎖時間の長短に左右されるが，その圧力の最高値はこの時間がある限度以下ならば閉鎖時間の長短にかかわらず一定で管中の平均流速に正比例する。この限度というのは圧力波が管に沿うて1往復するに要する時間である。弁閉鎖がこの時間以下のときを急閉鎖といい，それ以上を緩閉鎖といつている。**第1図**は Gibson[2] が鋳鉄管で行つた実験結果でこの理論をよく説明している。



第1図　Gibson の鋳鉄管の実験結果

Allievi の考えによりホースの急閉鎖の場合の諸式を導きだせば次の通りとなる。

$$\Delta p = c\,\rho\,v_0 \qquad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{J}{\rho}} \qquad (2)$$

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{K} + \frac{1}{K'} \qquad (3)$$

ここに

v_0	：ホース中の平均流速	m/sec
Δp	：水撃最高圧力	kg/m²
c	：圧力波の伝わる速度	m/sec
ρ	：水の密度(1000/9.8＝101.96)	kg. sec²/m⁴
K	：ホースの体積弾性率	kg/m²
K'	：水の体積弾性率(2.07×10^8)	kg/m²
J	：合成体積弾性率	kg/m²

Kは次の式で表わされる。すなわち内圧の変化Δpに対し長さおよび内径がΔL，Δdだけ変つたとすれば，体積ひずみ$\Delta V/V$は

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + 2\frac{\Delta d}{d} \qquad (4)$$

したがつて K は

$$K = \Delta p \Big/ \frac{\Delta V}{V} = \Delta p \Big/ \left(\frac{\Delta L}{L} + 2\frac{\Delta d}{d}\right) \qquad (5)$$

以上の結果から水撃圧力は弁閉鎖の直接測定によつて求められる以外につぎの2つの間接的方法がある。

その第1の方法は適当な条件のもとに内圧の増減に伴う長さおよび直径（または周）の変化を測定し(4)(5)式からKを求め(1)式の常数を算出する。その第2は圧力波の伝わる速度cの直接測定による方法である。

第1法は最も簡単であるが，ホースは金属とちがつて内圧による変形は加圧速度の複雑な函数であるから，加圧条件が一番問題となる。また温度，湿度の影響を受け，更に麻においては濡れの影響を受けることが甚だしい。ホースの弾性的性質に関する組織的な研究は今後の問題としてさし当り水撃圧力の第1次近似値を求めるための加圧方法について検討した。あとでわかるように加圧ポンプさえあれば簡単な加圧条件により所期の目的を達することがわかつた。

第2の法は弁閉鎖直接法に比して可成簡単であるが後述の結果でわかるように現に用いた装置では実際と合う結果が得られない。

以下順次これらの実験および結果について述べる。

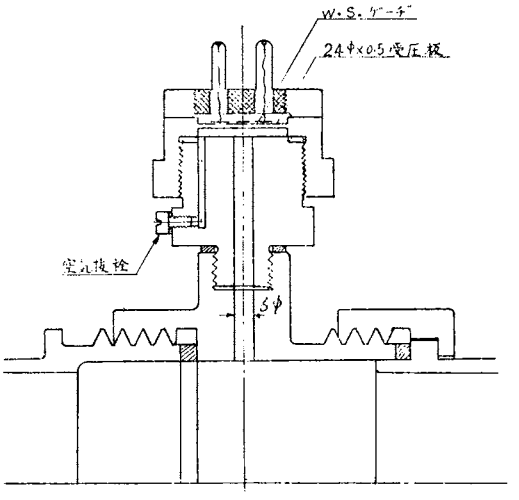
3. 水撃圧力の直接測定

3.1 測定装置の概要

第1回(29.8.24)は送水源に小型消防ポンプ(25 HP ラビット)に2.5″麻ホース2本連結し手動弁を経て筒先を装着した。

第2回(29.10.22)は送水源に当所施設の給水タンク(最高水圧6気圧,容量約10m³)を利用し約20m離れたところの消火栓に麻ホース2本をつないだ。また筒先側の1本を2.5″ゴム引ホースにつなぎかえてこの水撃圧力をも試験した。弁は仕切弁を改造したものを用いその閉鎖は落下重錘(約5kgの円板形)を20〜40cmの高さから自由落下させて行つた。

両回とも流量測定はノズル端から管口半径だけ前方にピトー管をあてがう方法により,定常放水静圧は較正されたブルドン圧力計によつた。水撃圧力は**第2図**に示すような受感頭部の



第2図 受感頭部の構造

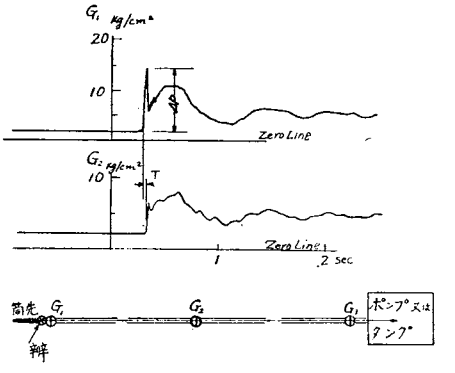
受圧板(24φ×0.5)に抵抗線ひずみ計を貼り圧力変化に伴う電流変化を増巾し,光学式およびペン書オッシロに同時記録させた。この受感頭部とブルドン圧力計はねじ式結合具の側口にねじ込みこれを固着した。**第3図**は第1回試験の際の概観を示す。

ホースの両端すなわち筒先とポンプは水撃圧力に耐えるようにしつかりと地面に固定した。したがつて弁を閉鎖すると内圧増加のためにホースは伸びるから甚だしく蛇形をなす。

平均流速をかえる方法として第1回試験ではエンジンを全力(回転数毎分3400)としノズルの口径を変え流速1〜5.5 m/secを得た。第2回試験では同一流速に対し3つの異なる口径のノズルを選び3通りの放水定常静圧力で試験した。しかし今の測定精度ではこの範囲の静圧(最高約5 kg/cm²)の相違による影響は明かでなかつた。

水撃圧力の波形はペン書と光学オシロとではよい一致を示した。そこで水撃圧力はペンオッシロの記録により圧力の波の伝る速度を求めるには光学オッシロ記録を用いた。また平均流速は静圧の変化に伴うその都度のホース内径によるべきであるが,これは一定と見なして呼称寸法2.5″を用いて計算した。

弁の閉鎖時間を調べると第1回は約0.17 sec(ほぼ限界に近い)第2回は約0.04 secで何れも急閉鎖の条件を満足している。**第4図**は第2回試験麻ホースのときのペンオッシロ記録の例を示す。



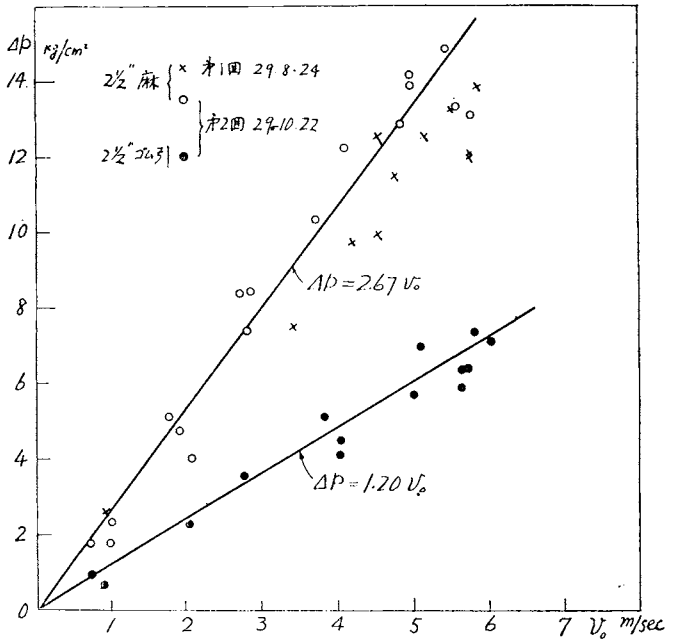
第4図 ホースの配列と圧力波形

3.2 測定結果

水撃圧力と平均流速との関係を図示すると**第5図**の如くなる。両者はほぼ直線的関係にありこれを式で示すと

$$\left.\begin{aligned} \Delta p &= 2.67\,v_0 \quad \text{麻} \\ \Delta p &= 1.20\,v_0 \quad \text{ゴム引} \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

試みにこの式の比例常数から(1)式により圧力波の伝わる速度を算出して見るとそれぞれ



第5図　流速と水撃圧力

c = 262 m/sec　　麻

c = 118 m/sec　　ゴム引

となる。

一方ホースの長さとその両端につけた受感頭部 G_1, G_2 の圧力記録の時間遅れからその速度を計算し全体の平均値を出して見ると

c = 250 m/sec　　麻

c = 110 m/sec　　ゴム引

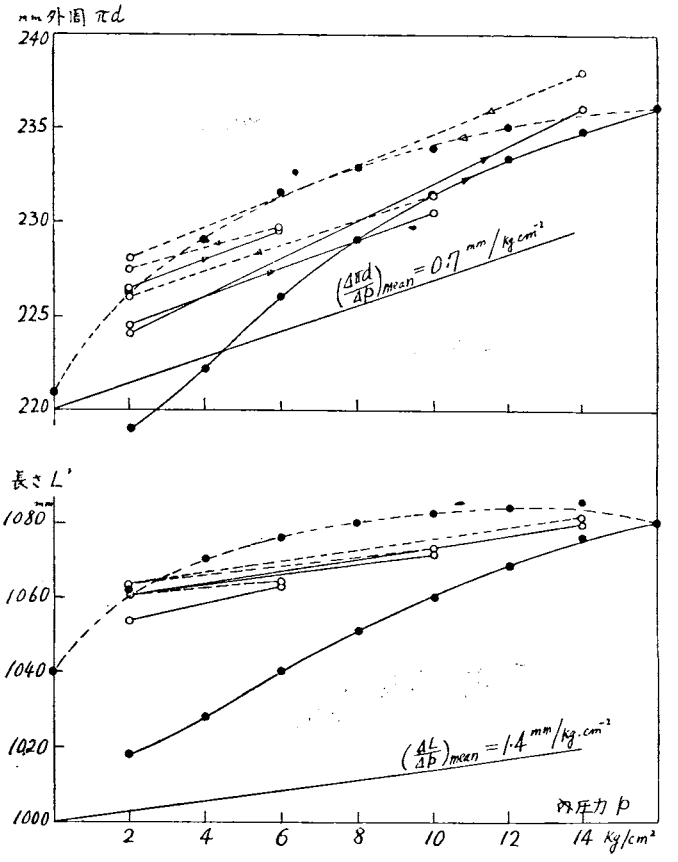
前結果と非常によく一致している。以上の結果によれば供試2種のホースの水撃圧の比は同一条件下で0.5以下である。

4. 水撃圧力の間接的測定

4.1 ホースの弾性的特性による方法

すでに述べたように水撃圧力はホースの弾性的性質から算出できるはずで供試ホースの弾性試験をつぎの要領で行つた。

供試ホースの一端は当所施設の水圧ポンプに連結し他端は閉栓し初めよく水を通して空気を放出する。ホースの中央部と両端に近く長さ1mのゲーヂマークをし圧力による長さの変化とこのマークの中央部における直径の変化（実際は5×0,1mmの鋼尺を用いて周を測る）を測定した。**第6図**はゴム引ホースについての試験結果を示す。圧力は2kg/cm²づつあげてその都度3箇所において測定を行うのである。この一回を終るに約3～4分間を必要とする。従つて加圧曲線（実線）と減圧曲線（破線）とは著しいループを画く。これは3箇所で測つたものの平均値である。この曲線からは水撃圧力に関連する要素を見出すことは不可能である。



第6図　ゴム引ホースの圧力試験結果

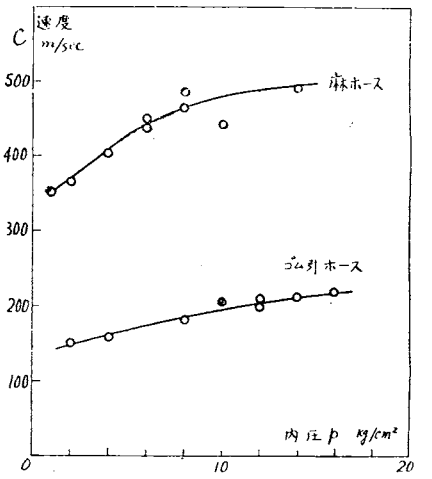
水撃作用の性質上急激な圧力変化に対するホースの性質こそ最も重要な関連性のある当面の問題と考えられる。急激な加圧減圧は 2⇄6, 2⇄10, 2⇄14 kg/cm²の3通りについて行つた。急な加圧減圧を行う操作に要する時間はポンプの性能によつて限度がある。例えばゴム引ホースでは前記3通りにつき加圧の場合にはそれぞれ8, 15, 27 secを要する。逆に減圧の場合には2 sec内外で十分である。このために加圧の場合の長さ直径の変化率は減圧の場合に比し大きく現われている。また同じ減圧の場合でも圧力変化が大きい程これらの変化率は大きい。ここでは一応減圧の場合の平均変化率を求めこれをもととしておのおのホースについて次表を得た。

	$\Delta L/L$	$\Delta d/d$	K	c m/sec	摘　要
麻ホース	.00095	.00029	7.41×10^6	270	亜　麻
ゴム引ホース	.0014	.0035	1.19×10^6	108	綿ナイロン交織

両ホースの縦横使用繊維の特性がよく表われている。水撃圧力波の伝わる速度は前節の直接測定結果によく合つていることから与えられたホースの水撃圧力は簡単なポンプ圧力試験の結果から容易に求められることがわかつた。

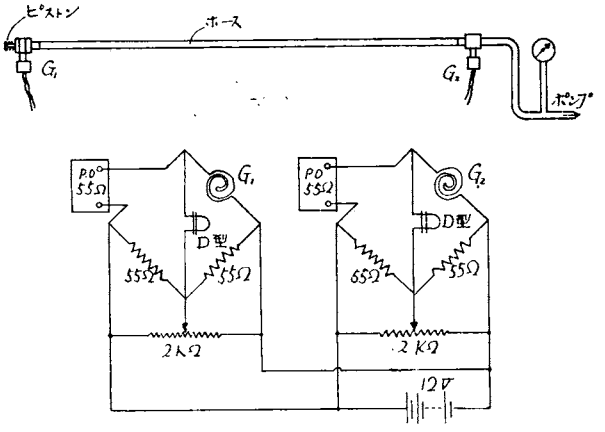
4.2 圧力波の伝わる速度の直接測定

ホースの一端はポンプに結合され他端にはピストンを装着した。両端の結合金具には水撃圧力測定の場合と同様に受感頭部をつけ，圧力波は光学オッシロに書かせた（第7図）。受圧板には線状抵抗の代りにリボン状抵抗を貼付し電流容量を大きくし増幅器なしでD型振動子につないだ。静圧試験によれば像の振れは5 mm/kg•cm⁻²であつた。実験は1～14 kgcm²の静圧のもとに測定された。圧力波は8kg程度のハンマーでピストンの端を打つことによつて発生させた。実測の結果は第8図の通りである。



第8図　圧力波の伝わる速度

この結果はこれまでの直接および間接測定で得られた速度に比べて可成り大きい。この相違についてはもつと進んだ研究にまたなければならないが，これはハンマーの打撃による波形（正圧のあとに直に負圧を伴う尖鋭な波）およびエネルギーの相違によるものと考えられる。記録に表われた撃圧力は 1.5 kg/cm² 程度でこれを水撃作用のときに生ずる圧力に比べると非常に小さい。ピストンの改造と加圧方式を改めるならば水撃圧力につながりをもつ速度を求めることができるだろう。

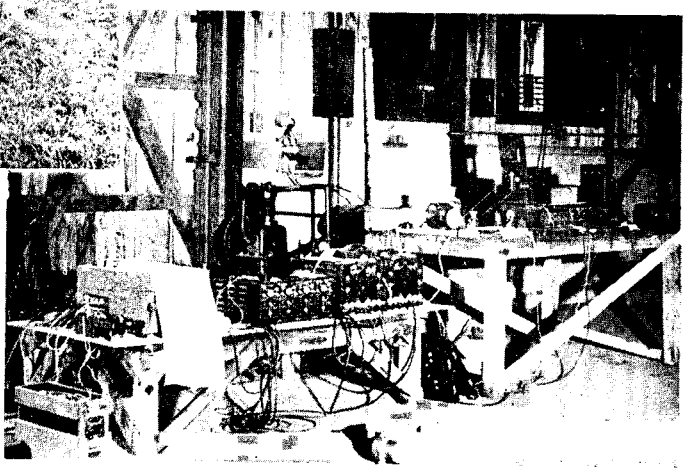


第7図　第図圧力の伝わる速度測定装置配管と配線図

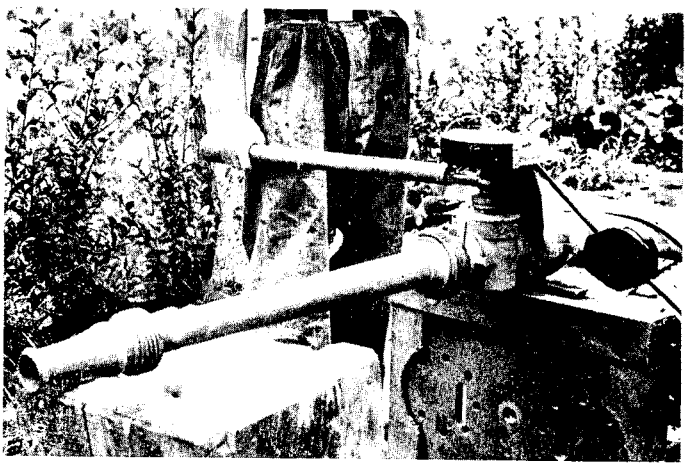
5. ホースの耐圧規格

以上の実験から水流閉鎖点直後の水撃圧力の大さは放水量とホースの体積弾性率の平方根との積に比例することが明かにされた。次にこの圧力はある速度でポンプ側に向つて減衰しながら伝つて行く。減衰の原因は管壁の摩擦，管壁の非弾性的性質に基くエネル

（a） 放　　水



（b） 左方からペンオッシロ，増幅器，光学オッシロ



（c） 筒先，弁，ブルトン圧力計，受感頭部（圧力計の向側）

第3図 第 1 回 試 験（29.8.24）

花火の落下運動に関する 2~3の計算法について

—花火による火災の調査及び予防のための資料として—

秋田一雄
青沼孝正

Some Calculation for the Investigation and Prevention of Fire due to Fire Works

By
K. AKITA AND T. AONUMA
Member of the Institute

(*Received July* 13, 1955)

In summer, fire works exhibition is often held in Japan and fire occurred by fire works is not rare. For the purpose of using to investigation and prevention of this fire, in this report, the falling rate and displacement by wind of fire works is estimated from the numerical calculation.

By this result, fire works with parachute is flown by wind over the large region unexpectedly and there is possibility that parts of fire works fall down on the ground in burn.

1. まえがき

例年夏になると花火によると思われる火災がいくつか発生する。この中には，勿論製造中の事故もあるが，打揚げられて後の不注意に基ずく火災も多い。しかも後者の場合には火種が不明瞭の上，火災の発生場所と花火の打揚場所が離れていることが多いため，それが果して煙火に原因を有するものなのかどうかの判定に苦しむことが多い。そこでこのような場合にはどうしても

(1) 花火が火のついた儘で地上に達し得るか。

(2) 花火がそこ迄とぶ可能性があるか。

(3) 火種が可燃物の上におちて果して火災になり得るか。

という3点について，相当に確かな証拠を持たないと判断が出来ない。しかし実際には，(3)はとも角—これは火種の種類，大きさ等が分りさえすれば一般火災の場合と何等変る所がない—(1)，(2)は実測も出来ないし，といつてもとより記録のあろう筈もないから，大凡の推定や聞込みに頼る他はなく，従つて多くの場合，確信の持てる判断は難しいのが現状である。そして，このことは調査ばかりでなく予防の面からみても全く同様であつて，少くとも花火に関する限り，火災のための安全距離にしても何にしてもそれが充分科学的根拠の上に立つているといえるものは殆どないように思われる。そんなわけ

ギーの損失にある。圧力損失は供試ホース1本につき麻ホースでは約60%，ゴム引ホースについては約45%であつた。一方ホースの静圧力はポンプのところが最高で先に行く程摩擦損失だけ次第に減つて行くが，この方の減衰は水撃圧力のそれより小さい。故にホースに沿うて両圧力の和を考えて見るとその最大は閉鎖点直後に生ずることがわかる。よつて強度均一なホースで若し破れるとすればこの位置に生ずるだろうことはいうまでもない。

そこでホースの耐圧規格を定める上にはそのホースの実際における使用状態において生ずる最高圧を見積り，この上に安全率（この内容はいろいろ考えられる）を見込めばよい次の例は2.5″ホースの使用状態として最も多い場合と考えられる。

1人で筒先操作をする普通の放水状態は反動力が約60 lbsが限度であつて，ノヅル径 1″ のときはノヅル圧力は40 lbs/in²＝2.8 kg/cm², 放水量187g. p. m＝3.74 m/sec である。この放水は何本かのホースが連結され A_1 級のポンプすなわち 120 lbs/in²＝8.5kg/cm² の圧力で行われているものとする。今

(1) 筒先附近で急閉鎖したとき

(2) ポンプ附近で急閉鎖したとき

の2つの場合に起り得る最高圧力を本文に扱つた供試ホースについて計算して見る。(6)式から

(1) $2.8+\begin{cases}2.67\times3.74=12.8\text{kg/cm}^2=180\text{ lbs/in}^2 & \text{麻}\\ 1.20\times3.74=\ \ 7.3\ \ \text{〃}\ \ =\ 94\ \ \text{〃} & \text{ゴム引}\end{cases}$

(2) $8.5+\begin{cases}2.67\times3.74=18.5\text{kg/cm}^2=237\text{ lbs/in}^2 & \text{麻}\\ 1.20\times3.74=13.0\ \ \text{〃}\ \ =167\ \ \text{〃} & \text{ゴム引}\end{cases}$

麻ホースを単位にとつて比較すれば(1)の場は合約0.5，(2)の場合は約0.7となる。水撃圧に関する限り膨らみ易いゴム引ホースの方が有利である。

6. 結　論

ありあわせの 2.5″ 麻ホースとゴム引ホース（綿ナイロン交織）を用い水撃作用を調べた結果次の結論を得た。

1. 急閉鎖の際に生ずる水撃圧力はホースにおいても Allievi の理論があてはまる。

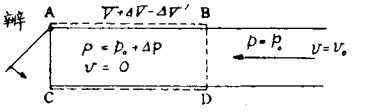
2. 水撃圧を求める間接的方法として (i) ホースの体積弾性率を測定すること，(ii) 圧力波の伝わる速度を測定する2つを試みたところ (i) 法が簡単な実用的であることを確めた。この方法によりあらゆる種類のホースおよび新旧ホースの耐圧性に関する資料が得られる。

終りに臨み圧力測定に多大の援助をして載いた運輸技研ぎ装部小林，高田，竹沢技官に厚く御礼申上げる。

附　録

水撃圧力の(1)式の導入

弁を急閉鎖したため流れていた水は静止し内圧は増加する。ホースは ABCD の如く膨脹する。この水の運動エネルギーは，ホースの弾性位置エネルギーと水の圧縮エネルギーに転換される。両エネルギーを等しいと置いて次の式が成立つ。



第 9 図

$$\frac{1}{2}\rho V v_0^2=\frac{1}{2}\Delta p\Delta V+\frac{1}{2}\Delta p\Delta V'$$

ここに ΔV はホースの膨脹，$\Delta V'$ は水の圧縮量を表わす。これから

$$\rho v_0^2=\frac{\Delta V}{V}\Delta p+\frac{\Delta V'}{V}\Delta p$$

$$=\left(\frac{1}{K}+\frac{1}{K'}\right)\Delta p$$

$$\therefore \Delta p^2=\rho v_0^2 J$$

圧力波の伝わる速度 c は

$$c^2=J/\rho$$

であるから

$$\Delta p=c\rho v_0 \qquad (1)$$

引 用 文 献

1) Allievi : Theorie du Coup de Bélier 1921

2) 沖：水力学

（昭和30年7月12日受理）

で筆者等はこれ等の問題を一歩でも先に進めるという目的から，この種の必要な数値を近似的な計算によつて推定することを試みているので玆では今迄に考えた方法をまとめて報告し，大方の御批判を仰ぎたいと思う。

なお，本報では便宜上，記述の範囲を花火の中でも火災危険が大きい夜物の打揚花火（割物と吊物）に限定した。

2. 打揚高度（開発高度）の推定

火の着いた花火又はその一部が地上に達するか否かの問題にしろ，風による花火の飛翔距離の問題にしろ，先ず花火の打揚高度が決定していなくてはどうにもならない。そこで，この打揚高度は最も必要な数値の一つであるが，現在迄の所，これを正確に測定した例はなく，確実と思われる数字も発表されていない。確にいざこれを測定しようとすると良い測定法がなく，相当に困難な仕事のようにみえる。そこでここでは計算によつてこれを推定することから始めるが，そのためには先ず花火の上昇運動から考えてみる。

2.1. 花火の上昇運動

この場合には花火の重量は大体不変とみて良いから，風による流れの影響を考えなければ頗る簡単で，運動方程式は次の如くになる。但しこの際，上下座標を x（上向を正），速度を v，重さを m とし，空気抵抗は速度の2乗に比例するとした。

$$m\frac{dv}{dt}=-mg-kv^2 \quad \cdots\cdots(1)$$

そこで(1)式を $t=0$ で $v=v_0$（初速）として解くと

$$v=\sqrt{\frac{g}{K}}\tan\{\tan^{-1}(\sqrt{\frac{g}{K}}\cdot v_0)-\sqrt{Kg}\cdot t\},$$

$$\left[K\equiv\frac{k}{m}\right] \quad \cdots\cdots(2)$$

となる。x と t の関係を出すには(2)を積分すれば良い。$t=0$ の時 $x=0$ として次式を得る。

$$x=\frac{1}{K}\log\left\{\frac{\cos[\tan^{-1}(\sqrt{\frac{K}{g}}\cdot v_0)-\sqrt{Kg}\cdot t]}{\cos[\tan^{-1}(\sqrt{\frac{K}{g}}\cdot v_0)]}\right\} \quad \cdots\cdots(3)$$

但し，(3)式は $\tan^{-1}\sqrt{\frac{K}{g}}\cdot v_0\geqq\sqrt{Kg}\cdot t$ の間だけに通用するもので，これから最高位置及びそれに達する時間は次のように求まる。

$$x_u=-\frac{1}{K}\log\cdot\cos[\tan^{-1}(\sqrt{\frac{K}{g}}\cdot v_0)] \cdots(4)$$

$$t_u=\frac{1}{\sqrt{Kg}}\cdot\tan^{-1}(\sqrt{\frac{K}{g}}\cdot v_0)] \cdots\cdots(5)$$

かくて，若し初速が分りさえすれば，我々は(4)式から直接，最高位置を求めることができ，これがその儘花火の打揚高度となる筈である。（花火の場合，開発を上向の速度がある内に行うと慣性のため開発時に飛び出す星，分包等の両く円がゆがむので速度零の位置で開発が起るように導火を調節する）しかし，残念なことにこの初速 v_0 の値は測定がない。—打揚薬量，性質，筒の大きさ等から計算して出来ないことはないが—そこで(4)式のみではこの高さの推定は不可能で，筆者等は別の方法で推定を行つた。その方法とゆうのは花火の実験の一つに黒玉実験とゆうのがあり，これは普通の花火と全く同じ構造をもつが導火の入つていないもの（これを黒玉とゆう）を打揚げるものであるが*，この実験において，花火を打揚げてから地上に落下する迄の時間（これは簡単にしかも正確に測れる）が測つてあるのでこれを利用したものである。

* 此の実験の目的は打揚げの圧力に花火の殻が耐えるか，地上に落下した時爆発しないか等を調べるもので，打揚方法は標準方式が取られている。

2.2. 花火（黒玉）の落下運動

いう迄もなく，黒玉実験の結果を用いて，打揚高度を求めるためには更に黒玉の落下運動を知らなくてはならない。そこで，次にはこれを求めるとこの場合の運動方程式は前と同一記号を用い，下向を正にして次式で与えられるから

$$m\frac{dv}{dt}=-mg-kv^2 \quad \cdots\cdots(6)$$

$t=0$ で $v=0$，$t=0$ で $x=0$ の条件について速度，距離は次のようになる。

$$v=\sqrt{\frac{g}{K}}\tanh(\sqrt{Kg}\cdot t) \quad \cdots\cdots(7)$$

$$x=\sqrt{\frac{1}{K}}\log\cdot\cosh(\sqrt{Kg}\cdot t) \cdots\cdots(8)$$

かくて，(7)(8)式が求める結果となるが，この時には前の最高位置がここの原点で，$x=0$ と取つてあることに注意を要する。

2.3. 打揚高度の推定法

上記の理論式によれば花火が最高位置迄上るに要する時間（t_u とする）及びそこから地上迄落下するに要する時間（t_d とする）は，それぞれ分つているわけだから，黒玉実験の結果を用いて高度を推定するには先ず測定されている全時間を適当に t_u と t_d に分ける。そして各々の時間を用いて(4)，(5)式及び(8)式より x を求めると，若し t_u と t_d の分け方が正しければ両者から出した x の値は当然一致する筈である。そこで，かくして得た x を較べ，これが一致するように trial and error 法で計算を繰返し，完全に一致した時の x の値をもつて最高々度（x_m）即ち開発高度とすれば良い。なお，この場合，t_d か t_u のいずれかの大体の値でも知られていると計算は大部楽になる。又かくの如くにして最高々度が求まれば，これから初速 v_0，t_u 及び t_d の正しい値も同時に決定されるわけである。

2.4. 花火の空気抵抗

(4)，(5)，(8)式を用いて計算をするに当つては，花火の落下時の空気抵抗の値を必要とするから，この値も求めねばならないが，それには簡単に次式を用いれば良い。

$$F=CS\frac{\rho v^2}{2} \quad \cdots\cdots(9)$$

ρ：空気の密度（gr/cm³），C：係数，S：断面積（cm²）

しかも，式中の係数 C は運動体が球で，Reynolds 数が $10^2 \sim 10^5$ 位の間について $C=0.04$ と取れるから――我々が利用する場合の Reynolds 数は適当な数値を入れて計算すると $Re=\frac{\rho v r}{\eta}=10^4 \sim 10^5$ 位になる。――(9)式は次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} F&=0.173\rho D^2 v^2 \\ k&=0.173\rho D^2 \end{aligned}\right\} D：直径\ (\mathrm{cm}) \cdots\cdots(10)$$

2.5. 計 算 例

ここでは昨年行われた実験結果[1]を使用して以上の方法により打揚高度，初速，上昇時間，落下時間を計算した例を示す。

種類	花火の大きさ		実測値	計算値				
				落下時間より		上昇時間より		
	寸度	重量 (gr)	t_u+t_d (sec)	t_d(sec)	$x_{m\cdot d}$(m)	t_u (sec)	v_0 (m/s)	$x_{m\cdot u}$(m)
擬弾	5	1200	10.0*	9.2	304	6.8	137	312
	4	563	13.0	7.6	200	5.4	122	200
	3	263	11.0	6.4	147	4.6	82	141
割物	5	1100	14.4	8.4	246	6.0	135	254
	4	542	15.2*	9.4	270	5.8	193	276
	3	228	11.2	6.6	149	4.6	107	151
雷	5	662	14.9	9.4	233	5.5	187	229
	4	339	14.2*	9.3	227	4.9	243	223
	3	155	11.5	7.3	154	4.2	155	150
号砲	5	845	14.9	9.2	264	5.7	172	258
	3	213	9.2	5.2	101	4.0	72	103
吊物	5	722	14.1	8.8	235	5.3	166	226
	4	356	12.3	7.7	180	4.6	137	168
	3	135	9.9	6.1	115	3.8	117	115

＊印は測定値が不正確なもの。

なお，この計算において使用した抵抗係数 $k=\frac{cs\rho}{2}$ の値，及び打揚条件は次の通りである。

諸量＼大きさ	5 寸	4 寸	3 寸
直 経 (cm)	15.1	12.1	9.1
k (gr/cm)	47.33	30.39	17.19
筒の長さ (cm)	118.5	91.5	82.0
〃 径 (cm)	15.3	12.3	9.3
〃 厚さ (cm)	2.0	1.3	1.3
打揚薬 (匁)	20	10	5

もつとも打揚条件はいつも厳密にこうなるわけではないが上の値は最も標準的なものである。

3. 花火の落下速度の推定

火のついた丸星が落下する場合や吊物の傘が星から分離したり，開かなかつたりして異常に落下する場合の落下速度，落下時間は火種が地上に達するかどうかの判定に極めて重要な意味をもつので，ここでは花火が燃えながら落下する場合の上記の値を計算によつて求める方法を記すことにする。なお，光剤（彩色用，照明用の火薬）の燃焼が完了した後は一定速度で落下するとみて良く，この速度は後の(27)式で容易に計算出来るのでここでは触れない。

3.1. 光剤が燃焼している間の運動方程式とその解

先ず落下の運動方程式を立てると，この場合には重さが時間的に変化するから，前の(1)式では具合が悪く，一次元の場合，次の(11)式となる。

$$\frac{d(mv)}{dt}=mg-kv^2 \cdots\cdots(11)$$

但し，ここに m は花火の重さ，v は速度，k は抵抗係数を示し方向は下向を正にとつてある。さて，この式を解くに当つては m の時間的な変化即ち光剤の燃焼速度が既知でなくてはならないが，この場合には第一近似として，これを次の形の一次函数で表わされるとした。

$$m=a+b-ct,\quad t\leqq\frac{b}{c} \cdots\cdots(12)$$

式中，b は光剤の始めの重さ，a は殻その他の重さを示し，c は燃焼の速さを与える係数とする。

そこで，今(12)式を(11)式に入れると

$$\frac{dv}{dt}+\frac{k}{a+b-ct}v^2-\frac{c}{a+b-ct}v-g=0 \cdots(13)$$

となる。

しかるに，一見明な通り，(13)式は Riccati 型の微分方程式で一般には解けない。そこで，これを変換して2階の微分方程式に直してみる。その前に便宜上変数 t を m に換えると

$$\frac{dv}{dm}-\frac{k}{mc}v^2+\frac{v}{m}+\frac{g}{c}=0 \cdots\cdots(14)$$

となる。ここで(14)式に

$$v=-\frac{mc}{k}\cdot\frac{d(\log u)}{dm}=-\frac{mc}{k}\cdot\frac{1}{u}\cdot\frac{du}{dm}$$

なる変換を施すと

$$\frac{d^2u}{dm^2}+\frac{2}{m}\left(\frac{du}{dm}\right)-\frac{kg}{c^2m}\cdot u=0 \cdots\cdots(15)$$

となり，更にこの式で $u=\frac{\omega}{\sqrt{m}}$ と置くと次式を得る。

$$\frac{d^2\omega}{dm^2}+\frac{1}{m}\left(\frac{d\omega}{dm}\right)-\frac{\omega}{4u^2}-\frac{kg}{c^2m}\omega=0 \cdots\cdots(16)$$

次に(16)式を Bessel 方程式にするため $\xi=\rho m^\sigma$ とおいてみると

$$\frac{d^2\omega}{d\xi^2}+\frac{1}{\xi^2}\left(\frac{d\omega}{d\xi}\right)-\frac{\omega}{4\sigma^2\xi^2}-\frac{kg}{\sigma^2\rho^2c^2}m^{1-2\sigma}\cdot\omega=0 \cdots\cdots(17)$$

ここで最後の項の係数が1になるように ρ, σ を選ぶと次のようになる。

$$\sigma=\frac{1}{2},\quad -kg=c^2\rho^2\sigma^2\quad \therefore\rho=\frac{2\sqrt{kg}}{c}\cdot i \cdots(18)$$

かくて(17)式は $\xi=\frac{2\sqrt{kg}}{c}i\,m^{\frac{1}{2}}$ を入れることにより

$$\frac{d^2\omega}{d\xi^2}+\frac{1}{\xi^2}\left(\frac{d\omega}{d\xi}\right)+\left(1-\frac{1}{\xi^2}\right)\omega=0 \cdots\cdots(19)$$

となつて，1次の Bessel 方程式に変換出来る。従つてこの場合元の (13) 式は解けるわけで，(19)式の解は

$$\omega=AJ_1(\xi)+BY_1(\xi) \cdots\cdots(20)$$

として与えられるから，求める解は変数を全部元に戻すことにより(21)式の如くに求められる

$$(a+b-ct)^{\frac{1}{2}-\frac{kv}{c}}=AJ_1\left\{\frac{2\sqrt{kg}}{c}i\sqrt{a+b-ct}\right\}+BY_1\left\{\frac{2\sqrt{kg}}{c}i\sqrt{a+b-ct}\right\}\quad\cdots\cdots(21)$$

なお，ここにA，Bはそれぞれ定数，J_1は1次のBessel函数，Y_1は1次のNeumann函数を示す。

次に定数の決定であるが，この場合には2階の微分方程式に直したので，未知定数は2つあり，これを決める条件も2つ必要となる。このためにここでは次の2つを採る。

$$\left.\begin{array}{ll} t=0 & \text{で}\quad v=v_0\ (\text{初速}) \\ t=\dfrac{b}{c} & \text{で}\quad v=v_1\ (\text{一定}) \end{array}\right\}\quad\cdots\cdots(22)$$

後者は光剤の燃焼完了時にaなる重さで一定速度で落ちるとしたものである。

これから(21)式に基ずいてA，Bを決めると

$$A=\frac{Y_1(\alpha i\sqrt{a})(a+b)^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_0}-Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})a^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_1}}{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})Y_1(\alpha i\sqrt{a})-J_1(\alpha i\sqrt{a})Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})}\quad\cdots\cdots(23)$$

$$B=\frac{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})a^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_1}-J_1(\alpha i\sqrt{a})(a+b)^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_0}}{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})Y_1(\alpha i\sqrt{a})-J_1(\alpha i\sqrt{a})Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})}\quad\cdots\cdots(24)$$

$$\left[\alpha=\frac{2\sqrt{kg}}{c}\right]$$

となり，これを(21)式に入れることにより次式を得る。

$$(a+b-ct)^{\frac{1}{2}-\frac{kv}{c}}=\frac{Y_1(\alpha i\sqrt{a})(a+b)^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_0}-Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})a^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_1}}{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})Y_1(\alpha i\sqrt{a})-J_1(\alpha i\sqrt{a})Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})}\times J_1(\alpha i\sqrt{a+b-ct})$$

$$+\frac{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})a^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_1}-J_1(\alpha i\sqrt{a})(a+b)^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_0}}{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})Y_1(\alpha i\sqrt{a})-J_1(\alpha i\sqrt{a})Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})}\times Y_1(\alpha i\sqrt{a+b-ct})\quad\cdots\cdots(25)$$

(25)式が終局の求める解である。若し初速v_0が零ならば

$$(a+b-ct)^{\frac{1}{2}-\frac{kv}{c}}=[\{Y_1(\alpha i\sqrt{a})(a+b)^{\frac{1}{2}}-Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})a^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_1}\}\cdot J_1(\alpha i\sqrt{a+b-ct})$$

$$+\{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})a^{\frac{1}{2}-\frac{k}{c}v_1}-J_1(\alpha i\sqrt{a})(a+b)^{\frac{1}{2}}\}\cdot Y_1(\alpha i\sqrt{a+b-ct})]$$

$$\times\frac{1}{J_1(\alpha i\sqrt{a+b})Y_1(\alpha i\sqrt{a})-J_1(\alpha i\sqrt{a})Y_1(\alpha i\sqrt{a+b})}\quad\cdots\cdots(26)$$

となつて，いくらか簡単になる。

3.2. 落下速度の計算例

次に前項の理論式を用いて実際に落下速度，落下距離を計算する例を示すが，この場合には1例として吊星の吊糸が開発時に切れて星だけ落下する場合（この時は光剤の燃焼秒時が長いので火災上危険が大きい）の計算をしてみることとし，星の諸元は次のようなものとした。

星の半経　$D=2.5$cm
穀(容器)の重さ　$a=2$gr
光剤の重さ　$b=20$gr
燃焼秒時　$\tau=10$秒

(1) 抵抗係数の決定

この際は星だけの空気抵抗を考えれば良いので，前項と同じ方法で計算すれば良いが，ここでは簡単に星は球で，その直径は時間と共に変らないとして(10)式より次の値を得る。

$k=0.00520$ (gr/cm)

(2) 燃焼の速さを示す係数cの決定

この値は燃焼秒時と光剤量より次のように求まる。

$$c=\frac{b}{\tau}=2\ (\text{gr/sec})$$

(3) 燃焼完了時の落下速度v_1の決定

光剤が燃え切つた時の落下速度v_1の値は計

算上必要である。ここでは簡単のため燃焼完了後は一定の終速度で落下すると考えて次節の(27)式より求めた。

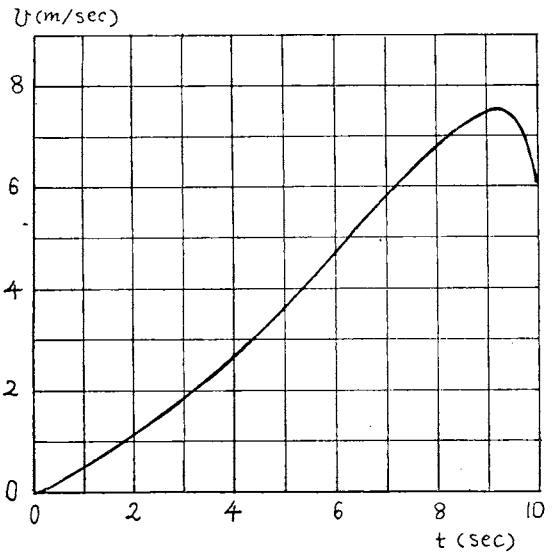
$$v_1=\sqrt{\frac{mg}{k}}=614\ \text{(cm/sec)}$$

(4) 落下速度の計算

以上で必要な数値が全て求まつたから，これ等を(25)又は(26)式に入れることにより v と t の関係が得られる。初速 $v_0=0$ とした場合のこの関係を第1図に示した。これによると速度は最初0から，次第に増し，極大値を経て減少してきて最後に v_1 になる。即ちここで光剤の燃焼は完了したわけで，これから後は v_1 の速度で等速運動をする。

なお，この計算には Bessel 函数及び Neumann 函数の表が必要であるが，ここでは Watson の著書[2] の附録のものを用いた。この表は変数が0から16迄，0.02おきに出ていて我々の目的のためには最も適している。

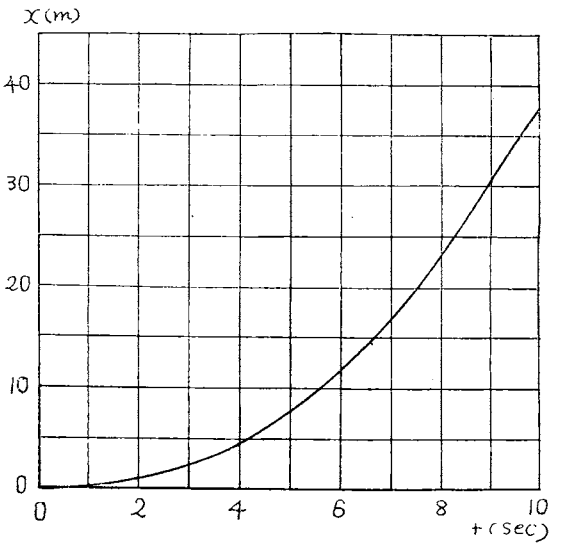
第1図　落下速度と時間の関係



3.3. 落下距離の計算法と例

次に光剤が燃焼中のある時間における落下距離は原理的には(25)，(26)式を v について解き，これを t で積分すれば良いが，これは仲々難しい。そこで，簡単にはこれ等の式を用いて曲線

第2図　落下距離と時間の関係



（第1図）を画き，それを図上で積分してゆくのが便利である。第2図には第1図の曲線で囲まれた面積をプラニメーターで測り，これと同面積を有する矩形を画いて平均速度を求め，それから燃焼継続中の全落下距離を出し，後各時間毎に全面積に対する比をはかつて落下距離を求めたものを示す。

3.4. 検　　討

以上のような方法によれば，落下物の諸元が分りさえすれば，それらの落下運動が一応数値的に求まるわけで，必要に応じて所要の数値を前式に入れ計算することにより，果して火のついたものが地上に達するか否かの判定も出来る。しかし第2図の1例からも分る通り，一般に光剤の燃焼中に落下する距離は吊星のように燃焼時間の長いものにおいても30mとか40m位のものであるから，普通の高度に打揚げられた花火が地上に落下して未だ燃えているというケースは極めて少く，地上に達して火種が残る場合は後記のように過早発で，特に打揚げ高度が低い場合か，光剤の入つている紙製の容器，吊糸等がくすぶつている異常な場合であろうと考えられる。

なお，この種の落下は速度が相当に早い関係で風の影響は余り受けないと考えられたので，この影響については計算を略したが，若し必要ならば後の 5. と同じ方法で計算すれば良い。

4. 吊物の落下速度の推定

花火の落下運動はいかなる場合でも前節に示した方法により計算出来るものであるが（燃焼速度が直線近似をとり得る場合）吊物のように傘がついていて，これが開いて，ゆるやかに落下する場合には，空気抵抗が前に較べて遙に大きいので，容易に終速度に達し，前節のような複雑な計算を行わないでも割合正確な値が求められる。そこでここでは吊物のような場合について落下速度その他を推定する方法を記すことにする。

4.1. 運動方程式とその解

勿論，基礎となる運動方程式は光剤の燃焼中については(11)式，燃焼完了後については(6)式が適用されるわけであるが，この場合には空気抵抗即ち方程式の右辺第2項が大きいので，落下速度は短時間内に終速度に達し，後は重力の加速度と空気抵抗が釣合いつつ一定の速度で落下すると見られる。そこで今このような見地に立つて落下速度を求めると，速度は落下開始直後から一定で次式により与えられる。

$$v=\sqrt{\frac{mg}{k}}=K\sqrt{m},\quad (K\equiv\sqrt{\frac{g}{k}})\cdots\cdots\cdots(27)$$

更に光剤が(12)式に従つて燃焼している場合には

$$v=K\sqrt{a+b-ct}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

となる。記号は今迄の所と同じである。

そして，この場合の落下距離と時間の関係は上の2式より $t=0$ の時 $x=0$ とみて

$$x=K\sqrt{m}\cdot t\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

$$x=\frac{2K}{3c}\{(a+b)^{\frac{3}{2}}-(a+b-ct)^{\frac{3}{2}}\}\cdots\cdots\cdots(30)$$

により求められる。

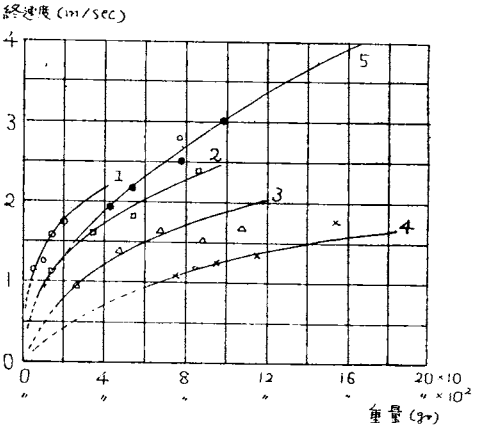
4.2. 落下傘の空気抵抗

吊物においては上式により落下速度，落下距離の算出が出来るので，3. 節の場合より簡単であるが，一般に落下傘の空気抵抗はこれを理論的に求めることは極めて難しい。（この際傘の抵抗に較べ吊つた物体の抵抗は遙に小さいので無視しても良い）そのため実際には前よりも一層やつかいなケースとなるが，ここではこの値を決める最も手軽な方法として花火に使用される傘を使用して実測を行つた。

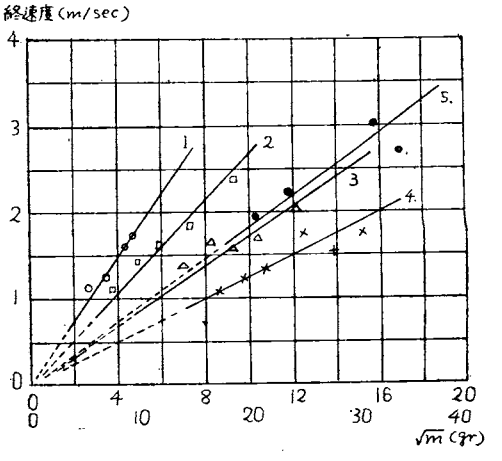
（測定法）

(27)式によれば傘のついた物体が落下する時の終速度 v と重量 m の平方根の間には直線関係があり，その傾斜は $K\equiv\sqrt{\frac{g}{k}}$ を与える。そこでこの関係を利用すれば抵抗係数 k が求まるから，ここでは種々の大きさの傘に既知重量を吊り，これを無風時に15mの目盛のついた塔上から落下さして終速度を求め，これから K 及び k

第3図　終速度と重量の関係



第4図　終速度と重量の平方根の関係



を算出した。但しこの際使用した傘はジンピ繊維からなる薄い和紙でその諸元は表に一緒に示した。

（結　　果）

測定結果は第3図に示したが，これを$\sqrt{m}$と終速度vの関係に plot すると第4図のようになる。確に直線になるので，これからKとkを計算すると各傘について次のようになる。

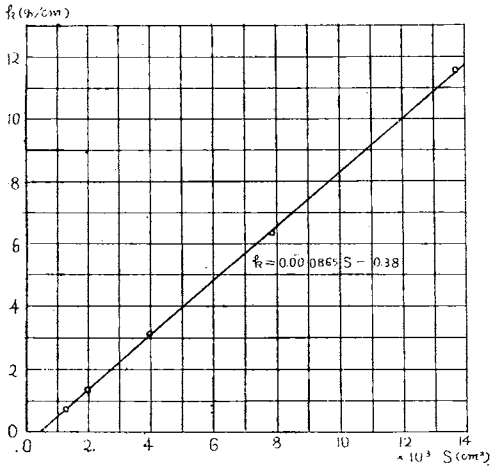
実験番号	傘の半経 r (cm)	傘の面積 S (cm²)	傘の重量 M (gr)	糸の長さ l (cm)	糸の本数	K	k (gr/cm)
1	20	1256	2.2	30	8	36.0	0.75
2	25	1965	3.8	40	8	27.0	1.34
3	35	4070	6.9	65	8	17.6	3.17
4	50	7850	13.5	83	12	12.4	6.40
5	66	13677	29.5	93	16	9.2	11.5

なお，この結果によると傘の抵抗はここで使用した大きさの傘についてのみしか分らないわけだが，今この表の値を使つて傘面積S (πr^2)と抵抗係数kを plot してみると第5図の如くに大体直線になるから，理由はとも角として，近似的にはSとkの間に

$$k=A\cdot S+B.\ (\mathrm{gr/cm})\cdots\cdots(31)$$

の関係があることが分り，これから任意の大きさの傘の抵抗係数を推定することが出来る。そしてこの係数A，Bの値としては，花火用傘について，大体 $A=0.000865$，$B=-0.38$ となる。

第5図　抵抗係数と面積の関係



4.3. 計　算　例

吊物が上空から地上に落下する間の運動を計算するには，先ず傘の大きさから(31)式により，抵抗係数を出し，次いで(12)式に基ずいてcを定めれば後は(30)式よりx即ち燃焼中に落下する距離が求まる。従つて，打揚高度x_mよりxを差引けば，この距離を吊星は傘と薬の重さだけで落下する。そして前の方の速度は(28)式で，後の場合の速度は(27)式で与えられるから，吊物の全落下時間も容易に計算出来る。

今，例として半径25cm，重さ3.8grの傘を用い，これに燃焼秒時 12sec の光剤を 20gr 成形して吊り（紙筒は使用しないとする）150m の高度より落下させた場合の燃焼中に落下する距離と地上に達するに要する時間を計算してみると次のようになる。

k (gr/cm)	c (gr/sec)	燃焼中に落下する距離 (m)	傘だけで落下する距離 (m)	左の時の終速度 (cm/sec)	全時間 (sec)
1.34	$\frac{5}{3}$	11.7	138	52.6	274

これから吊物は傘が完全に開いた場合には，普通では到底光剤の燃焼しているものが地上に達する可能性はないことが明になる。

5.　風の影響と飛翔距離

5.1.　落下運動に対する風の影響

花火の落下に対する風の影響としてはこれは時間には関係しないので，専ら風による花火の流れ（飛翔距離）の問題になる。しかし，この種の問題は実際に花火がそこ迄とぶか否かとゆ

う問題と関連して極めて重要であつて，これがはつきりしていないと花火に原因があるか何うかの判定は全然意味をなさない。そこで本節では花火の飛翔距離の推定法を考えることにするが，当然のことながら風による流れの大きいのは同じ花火の中でも傘のついた落下速度の小さい吊物であるので，ここでもこれを中心にして考察を進めてゆく。

5.2. 風速の垂直分布

それで，次にはその推定方法なのであるが，花火のように200mも300mも上空に打揚げられるとなると，風速を一様と考えることはできないので，その前に我々は先ず風速の垂直分布を明にしなければならない。所が一般に風速の垂直分布を表わす法則には冪法則と対数法則が提出されていて，それぞれ，可成り実測値に合う式が導かれてはいるが，実際には種々の条件下における地上から，このような高度迄の間の風速の変化を完全に表現出来る風速分布式はなく，又これ等の風速が昼夜で異ることを考慮に入れた式もない。そこで，ここでは実測結果を利用する方がむしろ妥当と考え，最も新しく且つ相当高空迄測定のしてあるTohsha氏の測定値[3]を用いることにした。次にこの数値を表にしておく。

高さ(m) ＼ 時刻	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
10	2.12	1.78	1.94	1.87	2.13	1.89	2.03	1.93	2.10	2.43	2.71	2.57
90	4.59	5.00	5.04	4.43	4.96	4.46	4.77	4.01	3.90	4.45	4.37	4.48
210	6.79	7.83	6.94	7.55	7.80	7.69	7.37	5.88	4.81	4.89	5.06	5.15
312	7.06	8.96	8.87	9.06	9.19	8.26	8.51	7.06	6.13	5.56	5.81	5.01

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	平　均
2.45	2.48	2.22	2.04	2.50	2.13	1.99	2.14	2.55	2.47	2.33	2.22	2.21
4.11	4.21	4.41	4.21	5.45	5.49	5.55	4.89	5.91	6.19	5.56	5.51	4.09
5.14	5.07	5.11	5.19	4.96	5.61	7.04	7.02	6.97	7.00	7.94	7.09	6.35
5.11	5.70	5.44	5.82	6.32	6.53	6.72	7.22	8.53	8.47	8.48	8.28	7.22

もとより，これは場所により異るものであるが，花火の打揚げられた時刻について大体こんな傾向で上にゆく程風速は大になると考え，地上風速にこれ等の係数をかけて，その時の風速分布としても大雑把には良いように思える。

5.3. 風による花火の飛翔距離の推定

風による花火の飛翔距離を計算するには，元来，前記(1)，(11)等の垂直方向の運動方程式とこれと直角な方向（風方向）の運動方程式を連立させて解く必要がある。しかし，これは数学的に相当に難しい上，横方向の抵抗係数を知ること自体，極めて困難な仕事であるから，この種の純計算による推定方式は目下の場合不適当であつて，むしろ図式でこれを求める方が簡単で優れている。

即ち落下速度が大きい状況の場合には(25)，(62)式より各時間におけるvを求め，次に3.5.で行つた図式計算よりtなる時間に対するxを出す。するとxなる高さにおける下向の速度が決まるから，図上においてこの点の下向速度v_dとこの高さにおける風速値wとを合成し，風による移動点を定め，次いで新しい点を原点にしてこの操作を繰返し落下始めから光剤の燃焼迄の風による移動距離を求める。光剤の燃焼が完了して後は花火は一定速度で落下するとして(27)，(29)式を用い，同じような方法を用いれば（この時は直線的に流れる）結局，全落下時間における流れの距離即ち飛翔距離が求まる。そして距離の区分を小さくすればする程精度が良くなることはゆう迄もない。

又，傘がついている場合のように落下速度が小さい場合には，下向の速度，距離として(28)，(30)式を用い，全く同じことを行えば良い。

た時，爆発するか否かであるが，後者にはその可能性はなく，前者のみにいくらかその可能性がある。

この場合の計算は最も容易で，傘のついていないものについては(11)，(13)式から，傘のあるものについては(30)，(32)式で必要な数値が求まる。

(2) 過早発による高度の低下

導火の長さを誤つたり，成分の配合が違つていたりすると，予定より早い時間で炸薬に火が入り，必要な高度迄上昇しない内に開発する。この場合には高度が低いから風による移動距離は正規の場合より却つて小になり，安全側に移るが，燃焼秒時の長いものでは，高度いかんで地上に燃焼中の光剤が落下する可能性がある。

この際の計算法としては開発高度の推定が難しく，打揚後開発迄の時間（t_u）が測られてないと全く不可能である。若しもこの値が何等かの手段で推定されれば，これと2.5.の表から求めた初速を(5)式に入れることにより高度の概略値の見当はつく。なお，落下に要する時間，燃焼中に落下する距離，風による流れなどは 2, 3, 4, に記した一般的な方法で割物であろうと吊物であろうと一応求められる。

(3) 吊物で傘と星が分離した場合

吊物では開発時に傘と星が分離して，光剤だけ燃えながら傘のある場合より遙に早い速度で落下することがある。割物と違つて吊物は燃焼秒時が長いので，この場合も火災的には危険が多いケースである。かかる場合の落下速度，落下時間等を求める方法は 3. において詳説した通りであるが，傘と星が分離する原因としては次のものが考えられる。

a) 吊糸が開発の際，焔に吹かれて焼切れる。

b) 吊糸が星の重量の割に細くて，開発の際切れる。

c) 吊糸が星から脱れる。

(4) 吊物で傘が開かなかつたり，破損又は変形して落下する場合

元来，花火用の落下傘は薄い和紙を用いるが破損に耐えるだけの丈夫なものが使用してあり，このもののたたみ方，殻の内への組み入れ方等にも充分注意が払われてはいるが，上に掲げたような状態で異常な落下をする場合がある。

この場合，火災危険としては前の(3)と似たもので，特に取上げることはないが，これ等の場合の計算をするとなると，傘の空気抵抗を決めることが出来ないので極めて困難を感じる。とゆうのは，傘が開かない場合には落下速度は相当に早いが，やはり傘がある以上，下に吊られた星だけの抵抗としては計算出来ないからである。そして，このことは破壊，変形した時も全く同様で，後の場合にはその程度により，それぞれ異るから一層都合が悪い。

止むなく，かかる場合の計算をせねばならない時は傘が開いた場合と，傘がない場合の中間の抵抗係数を，その時の傘の状態によつて適宜選んで行うより方法がない。使用する計算式としては(29)式を使用する方が無難である。

(5) 光剤の燃焼後，容器，吊糸等が燃えている場合

割物では殆どないが，吊物では星の光剤が燃焼して後，容器，糸等に火が残つて落下する場合がある。この場合は容器（紙）の燃焼速度がおそく，いつ迄も火があることと重量のある光剤が燃え切つているので風により運ばれる距離が長いことから，火災上充分注意する必要がある。

このケースの計算法としては容器の燃焼による重量減少は一般に小さいので，4.，5.で示した計算法をその儘適用して差支えない。

なお，紙筒を使用せず光剤をいきなり練り固め成形した星を用いたり，光剤の燃焼の終りの時期に少量の炸薬で爆発を起させたりすると，このような火種が残る現象は大部防げるので，火災予防上からはこのような工夫が望ましい。

7. あとがき

以上，花火の落下運動に関する諸数値を計算

によつて求める方法を記してきたわけであるがもとよりこれ等の運動は状況によつて，いくらでも変りうるものだから，いつでもこれで充分正確に必要な値を求められるとゆうわけにはいかない。その意味で本報の計算法は不備，不正確ではあるが，花火の実際が極めて複雑なことを考える時，これでも一応近似的な値の推定には役立ち，過去の経験一点張りの方法による推定よりも大部正確であると考えるのであえて記した次第である。

参考文献

1) "花火の爆発実験について" 通産省軽工業局無機化学課プリント (1954)

2) Waston : *The Theory of Bessel Functions* (1922)

3) M. Tohsha : *Paper in Met. Geo.* (1954)

(昭和30年7月13日受理)

消防研究所報告　第6巻　第1号

昭和30年8月1日印刷
昭和30年8月10日発行

【通巻15号】

編輯者兼発行者　消防研究所

発行所　国家消防本部消防研究所
三鷹市新川700

印刷所　加藤印刷工業株式会社
東京都港区芝田村町3ノ9