

芳香族化合物と過塩素酸カリウム混合物の熱挙動 ——笛薬の研究(第2報)——

古賀道生*, 石川弘毅*, 園田真三*, 李 晶*, 津留壽昭*, 吉永俊一*

現在、煙火の笛薬は、芳香族化合物のカリウム塩と過塩素酸カリウムとの混合物が使用されている。本研究では、芳香族化合物としては、テレフタル酸、フタル酸水素カリウム、安息香酸カリウムを選び、過塩素酸カリウムとの混合物について熱分析法等により、反応機構を推定した。また、線燃焼速度測定により、ガス発生速度を計算し、芳香族化合物の酸とカリウム塩の笛薬としての効果を比較し、笛音測定などにより、鳴笛機構を検討し、以下の結果を得た。

- 1) フタル酸水素カリウムまたは安息香酸カリウムと過塩素酸カリウム系の笛薬は笛音を発生し、テレフタル酸系笛薬より線燃焼速度、ガス発生速度が大きい。したがって、芳香族化合物のカリウム塩は笛薬として使用できる。
- 2) テレフタル酸のように、過塩素酸カリウムと反応以前に昇華するような芳香族化合物の酸は、線燃焼速度やガス発生速度が低下するので、笛薬として使用できない。
- 3) 笛音の倍音周波数は基本周波数の奇数倍でなく整数倍であった。したがって、笛音は閉管の共鳴によって発生するのではなく、両端の開いた管(開管)の共鳴によって発生する。また、基本音に対する整数倍音の合成により笛音の音色が得られる。

1. 緒言

現在、煙火の笛薬は、安息香酸、テレフタル酸、サリチル酸などの芳香族化合物のカリウム塩ないしナトリウム塩と過塩素酸カリウムとの混合物が使用されている¹⁾。第1報では、実用化されている安息香酸カリウムと過塩素酸カリウムとの混合物について熱分析法等により、笛薬の反応機構を推定した。また、笛薬の線燃焼速度の測定により、ガス発生速度を計算し、笛音発生の原因について検討した。さらに、笛音波形、周波数と音圧レベルの関係、筒長を変化させた場合の周波数、筒材を変化させた場合の音圧レベルへの影響などを報告した²⁾。しかし、笛薬に含まれる酸化剤および還元剤の選択にあたっての一般的法則は確立しておらず、鳴笛機構についても不明な点が多い。したがって、本研究では、芳香族化合物として、テレフタル

酸、フタル酸水素カリウム、安息香酸カリウムを選び、過塩素酸カリウムとの混合物について熱分析法等により、笛薬の反応機構を推定した。また、各々の笛薬の線燃焼速度測定により、ガス発生速度を計算し、芳香族化合物の酸とカリウム塩の笛薬としての効果を比較した。さらに、笛音測定などにより、鳴笛機構を検討した。

2. 実験

2.1 試料

テレフタル酸はキシダ化学(株)製特級試薬、純度99.0%、フタル酸水素カリウムは和光純薬工業(株)製特級試薬、純度99.8%、安息香酸カリウムは和光純薬工業(株)製特級試薬、純度99.0%を使用した。

酸化剤としての過塩素酸カリウムは片山化学工業(株)製特級試薬、純度99.5%を使用した。

有機物および過塩素酸カリウムは各々10gを磁製乳鉢で60分間粉碎し、篩い分けし150 μ m以下のものを使用した。

笛薬はクラフト紙上で、150 μ m篩いを通過し

2002年5月28日受付

2002年11月26日受理

*九州産業大学工学部工業化学科

〒813-0004 福岡市東区松香台2-3-1

TEL: 092-673-5668

FAX: 092-673-5699

た有機物と過塩素酸カリウムを種々の割合で混合して調整した。

2.2 実験方法

熱分析は、セイコー電子工業(株)製、示差熱重量同時測定装置、TG/DTA-300, SSC5000TAステーションを使用し、昇温速度10℃/minで測定した。

試料の昇温による状態変化は、共栄理化学店製ホットサーモカップル装置を使用し、昇温速度100℃/minで観察した。

反応後の残留物の定性分析は、理学電機工業(株)製粉末X線回折装置ガイガーフレックスRAD IIIAを使用した。

発音現象は、笛薬を入れた筒を導火線で着火して発音させて観察した。

笛薬は、直径0.9cmの筒に総量3gを入れ、筒底から2cm前後にまで圧搾した。

線燃焼速度の測定は、筒底から2cm前後にまで圧搾した笛薬ペレットが燃焼した時間を測定して求めた。笛薬ペレットの装填密度は2.4g/cm³である。ガス発生速度の計算は、使用した筒の長さが十分に長いものと仮定し、笛薬の燃焼により発生した気体が占める体積を筒の長さで示した³⁾。したがって、これらのガス発生速度(cm/sec)に筒口の面積を掛けると単位時間に発生する気体の体積で示したガス発生速度(cm³/sec)になる。ガス発生速度を求めるために、笛薬の燃焼温度はヘルムホルツの共鳴式より計算した。

笛音測定は、松下電気工業(株)製VS3310シグナルチャンネルFFTアナライザーを使用し、笛音の波形、周波数および音圧レベルを測定した。收音の際のFFTアナライザーのマイクロホンと笛薬を入れた筒の距離は3mであった。

3. 結果および考察

3.1 芳香族化合物の熱的性質

テレフタル酸、フタル酸水素カリウムおよび過塩素酸カリウムのDTA, TG曲線をFig.1に示す。

テレフタル酸は加熱により、260~330℃で100wt%の重量減少を示しながら昇華した(Fig.1(a))⁴⁾。

フタル酸水素カリウムは260~300℃付近で吸熱ピークを示し、40wt%の、460~520℃付近で発熱反応を起こし26wt%の重量減少を示した

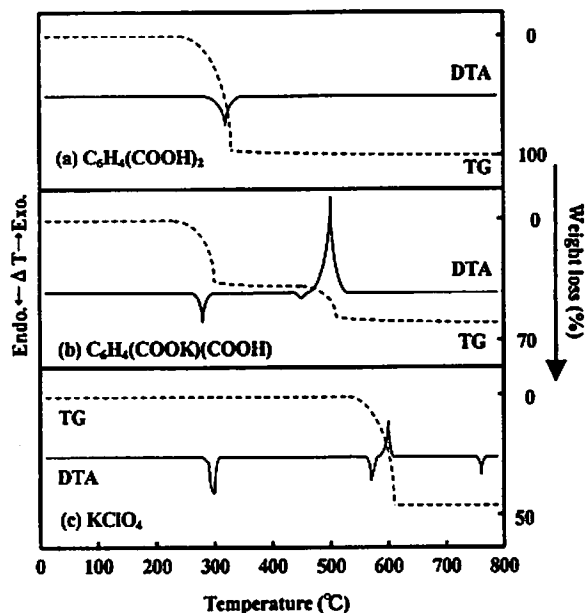


Fig.1 DTA and TG curves of C₆H₄(COOH)₂, C₆H₄(COOK)(COOH) and KClO₄. Sample weight; 2mg, atmosphere; heating rate; 10℃/min

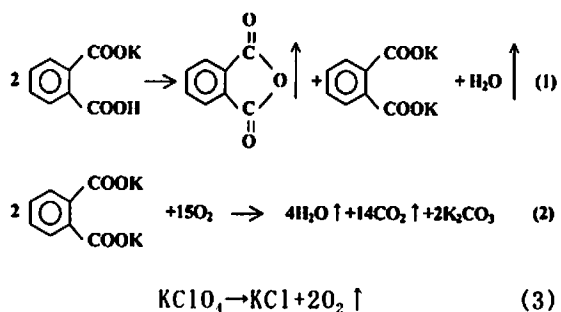
(Fig.1(b)).

800℃迄加熱した残留物の粉末X線回折より、炭酸カリウムの生成が認められた。

過塩素酸カリウムは280~300℃で相転移による吸熱ピークを示し、570~600℃で融解と同時に発熱分解し770℃で生成した塩化カリウムの融解⁵⁾が認められた。また、550~610℃で47wt%の重量減少を示した(Fig.1(c))。

800℃迄加熱した残留物の粉末X線回折より、塩化カリウムの生成が認められた。

上述の結果から、フタル酸水素カリウムの空気中の反応で、260~300℃の低温部の反応を(1)式、460~520℃の高温部の反応を(2)式および過塩素酸カリウムの620℃の反応を(3)式と推定した。



(1)式でのフタル酸水素カリウムの吸熱分解と生成物の無水フタル酸と水の蒸発、昇華による重量減少率は40.7wt%であった。さらに(2)式での残留物のフタル酸水素カリウムの酸塩(フタ

ル酸カリウム)と炭酸カリウムの生成による重量減少率は25.4wt%となる。また、(3)式での過塩素酸カリウムの酸素放出による分解の重量減少率は47wt%であった。これらは上述の実測値と良く一致した。

以上の結果より、フタル酸水素カリウムは空气中での加熱により、低温部では吸熱分解してフタル酸カリウム、無水フタル酸および水を生成し、高温部では生成したフタル酸カリウムが酸化分解して炭酸カリウムを生成するものと考えられる。また、過塩素酸カリウムは加熱により分解して塩化カリウムを生成し、酸素を放出するものと考えられる。

3.2 芳香族化合物と過塩素酸カリウム混合物(笛薬)の熱的性質

種々の芳香族化合物と過塩素酸カリウム混合物の熱分析の結果をFig.2に示す。また、これら

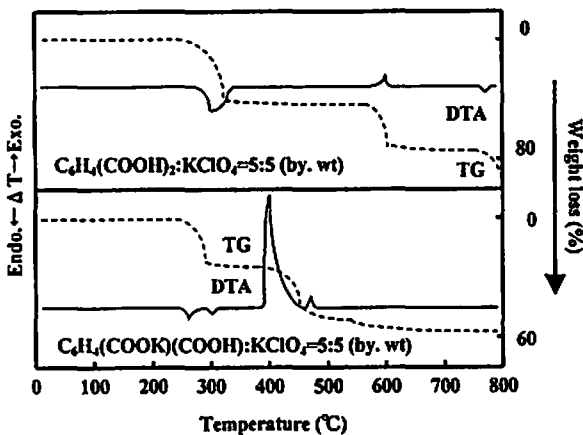


Fig. 2 DTA and TG curves of mixtures of $C_6H_4(COOH)_2$ and $C_6H_4(COOK)(COOH)$ with $KClO_4$
 Sample weight ; 2mg, atmosphere ; in air, heating rate ; 10°C/min

の熱的状态変化をホットサーモカップル装置で観察した結果をFig.3に示す。

テレフタル酸を含む笛薬は、加熱前の25°Cでは白色粉体である。ホットサーモカップルの観察では、300°Cで昇華し始めた。一方、DTA曲線では300°Cに吸熱ピークが認められて45wt%の重量減少を示した。600°Cでは笛薬は泡立ちながらフィラメント先端に集中するとともに発熱反応を起こして31wt%の重量減少を示した。また、

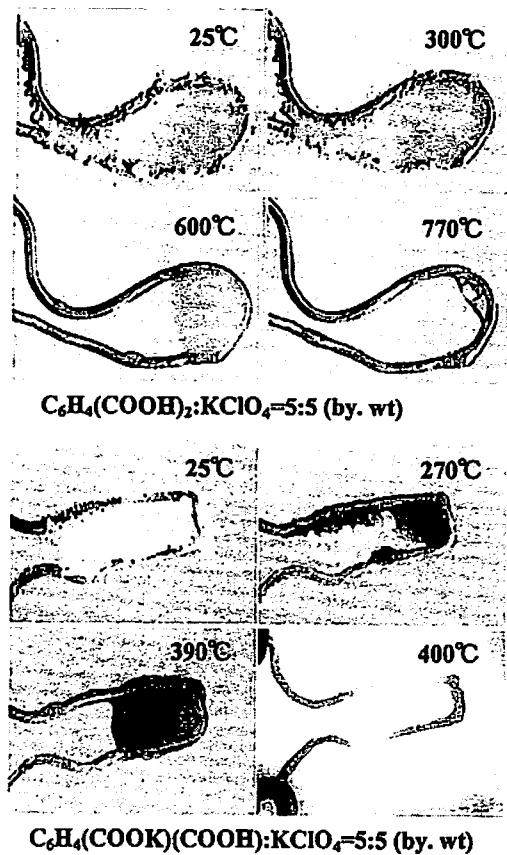


Fig. 3 Observation by microscope photos of mixtures of two aromatic compounds with potassium perchlorate on heating at various temperatures
 Composition ; $C_6H_5COOK : KClO_4 = 5 : 5$ (by wt.)
 Sample weight ; 2mg, atmosphere ; in air, heating rate ; 10°C/min

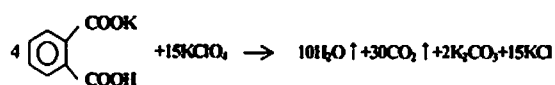
770°Cでは、笛薬は完全に液化し、同温度に吸熱ピークが認められ、800°C以上で100wt%の重量減少を示した。

フタル酸水素カリウムを含む笛薬は、加熱前の25°Cでは白色粉体である。ホットサーモカップルの観察では、笛薬は270°Cで融解し始め、300°Cで完全に融解した。DTA曲線では、260°Cのフタル酸水素カリウムの融解と300°Cの過塩素酸カリウムの相転移による小さな吸熱ピークが認められた。390°Cでは笛薬は黒変し、泡立ちながらフィラメント先端に融解した笛薬が集中した。TG曲線では290°Cで23wt%、450°Cで23wt%、540°Cで9wt%の重量減少が認められた。また、400°Cに大きな発熱ピークが認められ、笛薬は紫色の火柱を挙げて激しく爆発した。この時、笛薬は発音し、同時に発煙も認められた。

また、鳴笛現象観察後の筒中の加熱残留物の粉末X線回折結果より、テレフタル酸を含む笛薬

の場合、塩化カリウムが定性できた。フタル酸水素カリウムを含む笛薬の場合、炭酸カリウムと塩化カリウムが定性できた。以上の結果と、3・1の芳香族化合物、過塩素酸カリウムのみの熱分析結果より、テレフタル酸を含む笛薬では、テレフタル酸が昇華した後に過塩素酸カリウムが分解したものと考えられる。したがって、笛薬としての大きな発熱反応は認められなかった。

以上の結果からフタル酸水素カリウムを含む笛薬の反応は、380~450℃で次のように進行するものと推定した。



量論比を重量比に換算すると、フタル酸水素カリウム28.2に対して過塩素酸カリウム71.8であった。この混合比は実際の煙火の笛薬組成とほぼ一致する⁶⁾。

3.3 FFTアナライザーによる笛音の測定

量論混合比の笛薬の発音状況をTable 1に示す。ただし、テレフタル酸を含む笛薬の反応は次のように進行するものと仮定した。



量論比を重量比に換算すると、テレフタル酸24.2に対して過塩素酸カリウム75.8であった。笛音を出した笛薬はフタル酸水素カリウムを含む笛薬と安息香酸カリウムを含む笛薬であった。

フタル酸水素カリウムを含む笛薬の場合、笛音の基本音の周波数および音圧レベルは2400Hz、100dBであり、安息香酸カリウムを含む笛薬の場合、笛音の基本音の周波数および音

圧レベルは2300Hz、117dBであった。

以上の結果より、笛音は基本周波数2300~2400Hzのとき、100dB以上の大きな音が出た。これは、筒内の空気柱(気柱)も固有振動数を持っていて、これと等しい周波数の音や振動が伝わってくると気柱が振動するためと考えられる⁷⁾。また、いずれの笛音も基本音に対し、倍音が発生しているため、笛音は筒や容器の共鳴により発生しているものと考えられる⁸⁾。

しかし、テレフタル酸を含む笛薬は、ほとんどわずかにしか笛音を出さないか、全く笛音を出さなかった。したがって、昇温速度が遅いDTA、TG測定の際だけでなく、導火線を用いた急激な加熱でも、テレフタル酸は過塩素酸カリウムと反応以前に昇華するものと考えられる。

以上の結果より、笛薬として、芳香族化合物のカリウム塩は使用できるが、テレフタル酸のように過塩素酸カリウムと反応以前に昇華するような芳香族化合物の酸は使用できないものと考えられる。

3.4 鳴笛機構

以上の結果より、鳴笛機構を推定した。Fig.4に示すように、筒底には笛薬を圧搾しているため、筒は閉管であるものと仮定し、笛薬を導火線で着火して笛音を発生させた気柱の振動をモデル化する。Fig.4中の灰色の濃淡は、実線で示した変位の波形に伴う密度変化を示したものである。濃い部分では密度が大きく、薄い部分では密度が小さい。閉管の場合、音波は気柱の両端で反射を繰り返して互いに重なり合い、管内には定常波ができる。この定常波による空気の振動が気柱の固有振動である。

筒の閉じた端(筒底)では空気が振動できないため、定常波の節となり、筒口(開口端)では、

Table1 Effect composition on whistling noise of the compositions of various aromatic compounds potassium perchlorate

Sample	Note	Fundamental		Harmonic tone (twofold)		Harmonic tone (threefold)	
		Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
C ₆ H ₄ (COOH) ₂ :KClO ₄ = 25:75 (by wt.)	no-whistling	-	-	-	-	-	-
C ₆ H ₄ (COOK)(COOH):KClO ₄ = 30:70 (by wt.)	whistling	2400	100.0	4725	74.8	7350	69.2
C ₆ H ₅ COOK:KClO ₄ = 25:75 (by wt.)	whistling	2300	117.4	4600	96.5	6875	89.5

Paper tube, diameter; 0.93cm, length; 5.65cm, and length of tube above the burning surface; 2.34~2.83cm

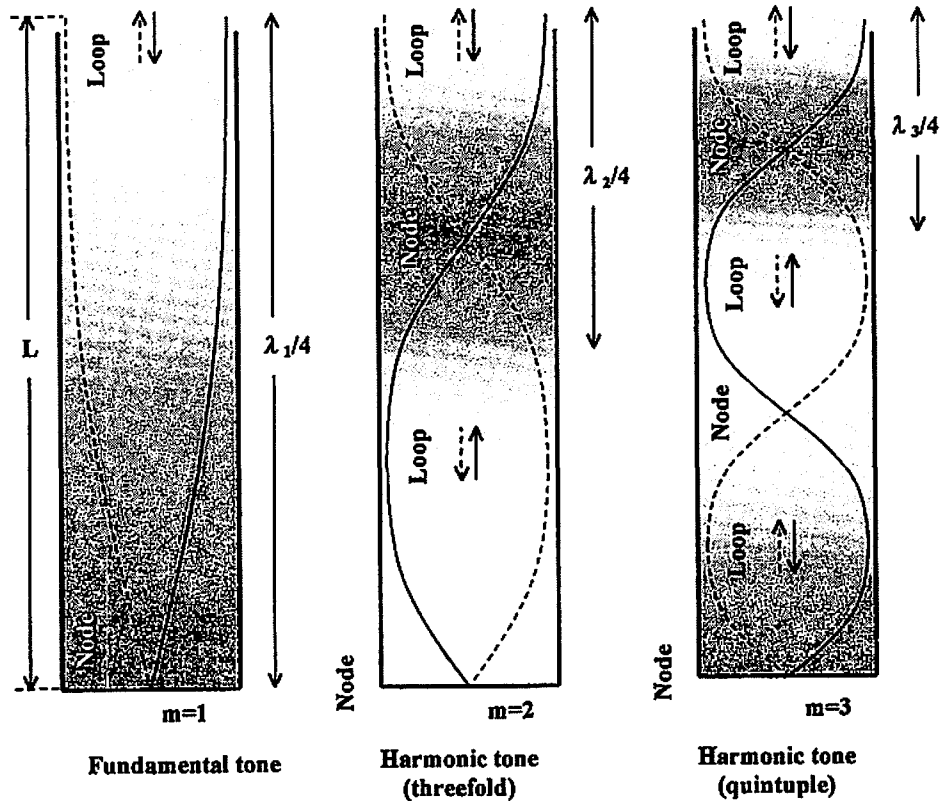


Fig. 4 Stationary wave of closed tube

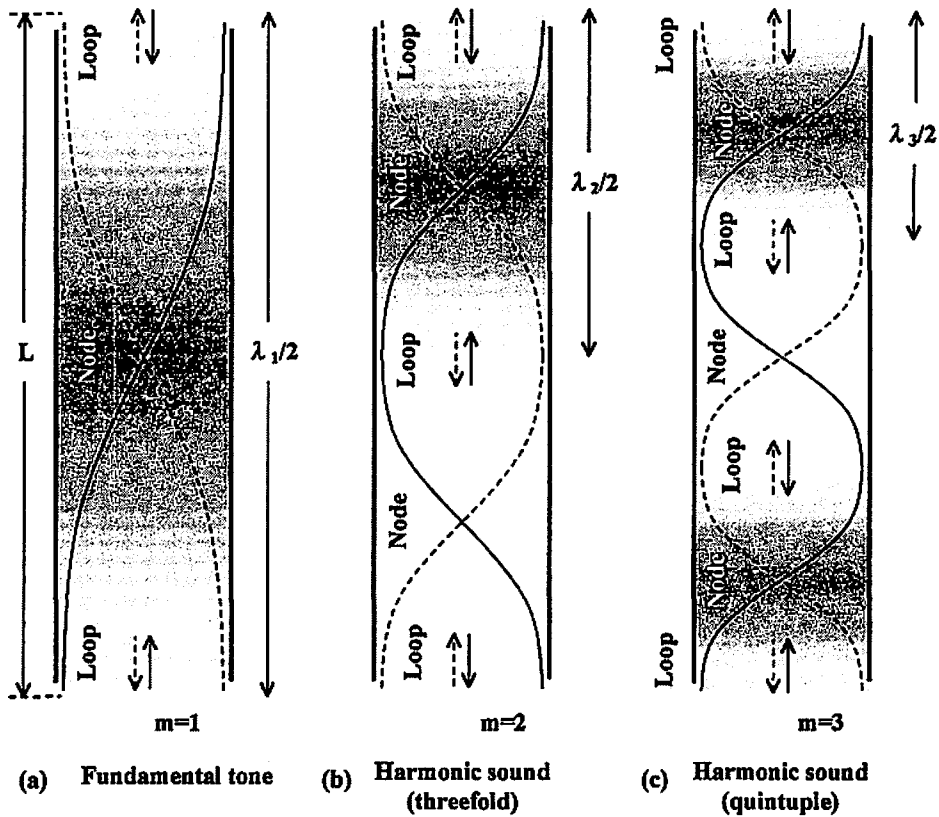


Fig. 5 Stationary wave of open tube

空気が自由に振動できるため、ほぼ腹になっているものと考えられる。一般に、定常波の節の部分では密度変化が大きく、腹の部分では密度は変化しない。

Fig.4からわかるように、閉管の場合、定常波の節の数を m とすると、音波の波長 λ_m と気柱の長さ L との間には、(1)式の関係が成立つ。

$$(\lambda_m/4) = \{L/(2m-1)\} \quad (m=1, 2, \dots, \text{正の整数}) \quad (1)$$

管内の音速をVとすると、音波の周波数 f_m は、(2)式で示される。

$$f_m = (2m-1)V/4L \quad (m=1, 2, \dots, \text{正の整数}) \quad (2)$$

これは気柱の固有振動数 f_m に等しい。したがって、閉管の倍音の周波数は、基本音の周波数の奇数倍となる。しかし、本研究における笛音の倍音の周波数は、基本音の周波数の整数倍となっていた(Table 1)。したがって、笛音は閉管の共鳴によって発生するのではなく、両端の開いた管(開管)の共鳴によって発生するものと考えられる。

開管では、Fig.5に示すように、両端を腹とする定常波ができる。このとき、気柱にできている節の数をmとすると、音波の波長 λ_m と気柱の長さLとの間には、(3)式の関係が成立つ。

$$(\lambda_m/2) = L/m \quad (m=1, 2, \dots, \text{正の整数}) \quad (3)$$

気柱の固有振動数 f_m は、次の(4)式のようにになる。

$$f_m = mV/2L \quad (m=1, 2, \dots, \text{正の整数}) \quad (4)$$

したがって、開管の倍音の周波数は、基本音の周波数の整数倍となる⁹⁾。

(3)式より開管における笛音の基本音($m=1$)の波長を計算できる。前報より、笛音の基本周波数と筒の長さはほぼ反比例することが判っている²⁾。また、共鳴における筒の実効長は実際の筒の長さ半径 r (cm)の0.6倍程度長くなる(筒の実効長=実際の筒長+ $0.6 \times r$)¹⁰⁾。したがって、安息香酸カリウムを含む笛葉を直径0.9 cm、筒長5.7 cmの紙筒に圧搾した場合の筒の長さ L と笛音の周波数変化をFig.6に示し、笛音の基本周波数 f (Hz)と筒の長さ L (cm)は、 $2.5 \text{ cm} \leq L \leq 12 \text{ cm}$ において、累乗近似し、次の(5)式に従うものと仮定した。

$$f = 10878(L+0.6r)^{-0.818} \quad (5)$$

この式より、2300 Hzの笛音が発生した際の筒の実効長は、7.22 cmであった。したがって、開管における笛音の基本音($m=1$)の波長は、 $2 \times 7.22 \approx 14.5 \text{ cm}$ となる。

また、笛音の実測値からも波長を計算した。空気中の音速 C (cm/sec)は、温度 t (°C)において、次の(6)式で表される¹¹⁾。

$$C = 33150 + 60t \quad (6)$$

室温を20 °Cとすると、筒から発音した笛音の波長は、 $(33150 + 60 \times 20) / 2300 \approx 14.9 \text{ cm}$ となる。したがって、開管における笛音の基本音($m=1$)の波長の計算値は14.5 cmであり、笛音の実測値から求めた笛音波長の計算値14.9 cmとほぼ一致した。以上の結果より、笛音は両端の開いた管(開管)の共鳴によって発生するものと解釈でき、笛音の基本音はFig.5の(a)のように振動する。この振動は1/4波長のため、1波長に換算した周波数の音(2300~2400 Hz)が得られる。

2倍音は(b)のように振動する。この振動は1/2波長のため、この周波数の2倍の音(4600~4725 Hz)が得られる。しかし、基本音に比べて振動が小さくなるため音圧レベルが多少減少し、74.8~96.5 dB程度になる。3倍音は(c)のように振動する。この振動は基本音に対し3倍の周波数の音(6875~7350 Hz)が得られる。やはり、この音は基本音に比べ音圧レベルがさらに減少し69.2~89.5 dB程度になる。このように耳に聞こえる範囲で n (n は正の整数)倍音が発生するものと考えられる。したがって、基本音に対する n 倍音が得られ、これらの音の合成により笛音の音色が得られることが判った¹²⁾。

3.5 笛葉の線燃焼速度とガス発生速度

芳香族化合物の酸または塩の違いによる笛音発生原因を確認する目的で、量論混合比の笛葉について線燃焼速度測定を行い、ガス発生速度を計算した。ガス発生速度を求めるために、笛葉の燃焼温度をヘルムホルツの共鳴式より推定した¹³⁾。

前報および3.4より、笛葉の笛音が共鳴により発生することを確認した。したがって、煙火の鳴笛現象にもヘルムホルツの共鳴式が適用できるものと考えられる。共鳴の音響モデル(ヘルムホルツの共鳴式)は、(7)式で示される。

$$f_0 = (c/2\pi)(s/lv)^{1/2} \quad (7)$$

ここで、 f_0 (Hz)は共鳴周波数、 c (cm/sec)は空気中の音速、 s (cm^2)は筒口の面積である。 l (cm)は筒長の実効長であり、実際の筒の長さ l_0 (cm)に筒の半径 r (cm)の0.786倍を長くしたものである($l = l_0 + 0.786 \times r$)。 v (cm^3)は筒の容積である。

また、(6)式を(7)式に代入し整理すると、笛葉が燃焼する際の筒内の温度は、(8)式で示される。

$$t = (2\pi f_0)(lv/s)^{1/2} \quad (8)$$

Table 2 Effect of linear burning rate and gas evolution rate on whistling noise of mixtures of various aromatic compounds potassium perchlorate

Sample	Linear burning rate	Gas evolution rate
$C_6H_4(COOH)_2 : KClO_4 = 25 : 75$ (by wt.)	0.318cm/sec	1318cm ³ /sec (838cm ³ /sec)
$C_6H_4(COOK)(COOH) : KClO_4 = 30 : 70$ (by wt.)	0.565cm/sec	1855cm ³ /sec (1180cm ³ /sec)
$C_6H_4COOK : KClO_4 = 25 : 75$ (by wt.)	0.597cm/sec	2032cm ³ /sec (1292cm ³ /sec)

Paper tube, diameter ; 0.93cm, length ; 5.65cm, and length of tube above the burning surface ; 2.34~2.83cm

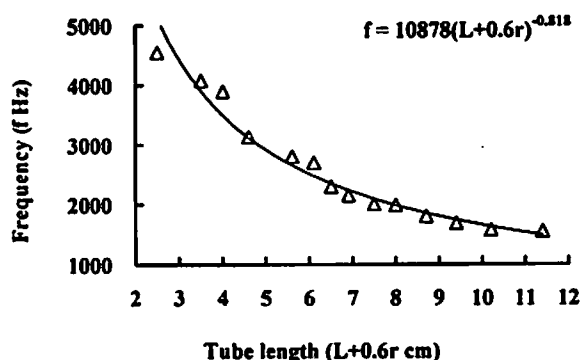


Fig. 6 Effect of tube length on frequency for whistling noise Composition ; $C_6H_5COOH : KClO_4 = 2 : 8$ (by wt.) paper tube, diameter ; 0.9 cm

(8)式より、笛薬を直径0.9cm、筒長5.7cmの紙筒に圧搾した場合、筒内の温度の計算値は、フタル酸水素カリウムを含む笛薬の場合、1219℃であり、安息香酸カリウムを含む笛薬の場合、1227℃であった。したがって、各笛薬の線燃焼速度および1200℃におけるガス発生速度の計算値をTable 2に示す。

笛音を発生したフタル酸水素カリウムを含む笛薬および安息香酸カリウムを含む笛薬はいずれも、線燃焼速度約0.6cm/secであり、ガス発生速度はフタル酸水素カリウムを含む笛薬の場合、1855cm/sec(1180cm³/sec)、安息香酸カリウムを含む笛薬の場合、2032cm/sec(1292cm³/sec)であった。しかし、線燃焼速度約0.3cm/secおよびガス発生速度1318cm/sec(838cm³/sec)のように小さいテレフタル酸を含む笛薬はほとんどわずかにしか笛音を出さないか、全く笛音を出さないことを確認した。

前報²⁾より、混合比を変えた笛薬の線燃焼速度およびガス発生速度は、過塩素酸カリウムの混合割合が最論比よりも増加すると減少した。この結果からも、テレフタル酸は過塩素酸カリウムと反応以前に昇華するものと考えられる。また、芳香族化合物の酸または塩の違いによる笛音発生原因も線燃焼速度およびガス発生速度に

依存することが判った。

4. 結論

笛薬の芳香族化合物として、テレフタル酸、フタル酸水素カリウム、安息香酸カリウムについて熱分析や鳴笛現象の観察などから、以下のことが判った。

1) 笛剤として、線燃焼速度、ガス発生速度がテレフタル酸を含む笛薬より大きいフタル酸水素カリウムを含む笛薬と安息香酸カリウムを含む笛薬は笛音を発生する。したがって、笛剤として、芳香族化合物のカリウム塩は使用できる。

2) 笛剤として、テレフタル酸のように過塩素酸カリウムと反応以前に昇華するような芳香族化合物の酸は線燃焼速度、ガス発生速度低下の原因となり使用できない。

3) 笛音の倍音周波数は基本周波数の奇数倍ではなく、整数倍であった。したがって、笛音は閉管の共鳴によって発生するのではなく、両端の開いた管(開管)の共鳴によって発生する。また、基本音に対する整数倍音の合成により笛音の音色が得られる。

謝 辞

本研究を行うに当たり、笛薬の調整法について助言をいただいた飯村製作所の皆様と、笛音発生実験にご協力いただいた日本煙火協会の畑中修二氏に心から感謝します。

参考文献

- 1) W.R.Maxwell, "Pyrotechnic Whistles", Fourth Symposium (International) on Combustion, pp.37-46 (1952), The combustion Institute, Williams and Wilkins, Baltimore, Md.
- 2) 石川弘毅, 古賀道生, 松本勝, 津留壽昭, 吉永俊一, 火薬学会誌, 62, 208 (2001)
- 3) 石川弘毅, 古賀道生, 松本勝, 津留壽昭,

- 吉永俊一, 2001 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, p.631 (2001),
- 4) 永倉三郎, 井口洋夫, 江沢洋, 岩村秀, 佐藤文隆, 久保亮五, 「改訂5版 理化学辞典」, p.285 (1998), 岩波書店
- 5) 日本化学会編, 「改訂3版 化学便覧 基礎編 I」, p.140 (1984), 丸善
- 6) J. A. コンクリン著, 吉田忠雄・田村昌三監訳, 「エネルギー物質の科学 基礎と応用」, p.157, p.159 (1996) 朝倉書店
- 7) 大熊恒靖, 日本音響学会誌, 53, 208 (1997)
- 8) 小暮陽三著, 「入門ビジュアルサイエンス 物理のしくみ」, p.32 (1992) 日本実業出版社
- 9) 小橋豊著, 「音と音波」, p.107, p.182 (1973) 裳華房
- 10) 牧田康雄編著, 「現代 音響学」, p.88, p.214, p.260, p.269, p.279 (1976) オーム社
- 11) 鹿児島誠一著, 「振動・波動入門」 p.43, p.176 (1992), サイエンス社
- 12) ラストルグエフ著, 山崎義武訳, 「おもしろい音の生理学」, p.10 (1981) 東京図書
- 13) 唐澤誠著, 「音の科学ふしぎ事典」, p.14, pp.35-37, p.40, pp.42-51, p.76, pp.78-79 (1997) 日本実業出版

~~~~~

## Thermal behavior of the mixtures of aromatic compounds with potassium perchlorate (Study on pyrotechnic whistling noise)

Michio Koga\* · Koki Ishikawa\* · Masami Sonoda\* Li Jing\*  
· Toshiaki Tsuru\* and Shun-ichi Yoshinaga\*

The mixtures of potassium salt of aromatic compounds such as benzoic acid, terephthalic acid and salicylic acid and potassium perchlorate were widely used as a pyrotechnic whistle composition.

In this report, the pyrotechnic whistle compositions of the mixtures of aromatic compounds with potassium perchlorate were investigated by thermal analysis, calculation the gas evolution rate by measurement of linear burning rate and sound tests such as the waveform, frequency and sound pressure analysis of the whistling noise for contained whistling noise compositions. The results obtained are as follows:

- 1) Compositions capable for producing whistling noise are the mixtures of potassium salt of aromatic compounds such as potassium biphthalate and potassium benzoate with potassium perchlorate which proportions are in the stoichiometric composition.
- 2) It is suggested that, terephthalic acid which sublime before the reaction with potassium perchlorate is unusable for whistle composition due to the cause of decreasing the linear burning rate and the gas evolution rate.
- 3) The harmonic frequency of the whistling noise was integral multiple of the fundamental frequency as opposed to anisoploid of the fundamental frequency. Therefore, whistling noise was considered to appear by the resonance of the open tube and the tone of the whistling noise can be synthesized from the fundamental frequency and the harmonic frequency.

(Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University 3-1, Matsukadai 2-Chome, Higashi-ku Fukuoka 813-0004, JAPAN tel. 092-673-5668, fax. 092-673-5699, e-mail m.koga@ip.kyusan-u.ac.jp)

---