

安息香酸カリウムと過塩素酸カリウム混合物の熱挙動 (笛薬の研究)

石川弘毅*, 古賀道生*, 松本 勝*,
津留壽昭*, 吉永俊一*

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、実用化されている笛薬として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し、笛薬の反応を検討した。また、笛音は波形、周波数、音圧を測定し、笛薬混合比と筒長、筒材を変化させた場合の笛音を比較検討し、以下の結果を得た。

- (1) 笛薬が笛音を出す混合比は安息香酸カリウム：過塩素酸カリウム=2：8, 3：7, 4：6の場合であった。また、笛音を出す笛薬は線燃焼速度が0.4cm/secかつガス発生速度が1500cm/sec以上であった。
- (2) 笛音の基本周波数は2kHz付近であり、基本音に対し、倍音が発生していた。また、笛音の周波数と筒の長さは反比例した。したがって、笛音は筒の共鳴により発生するものと考えられる。
- (3) 筒材を変化させても笛音の周波数と線燃焼速度はほとんど変化しなかった。しかし、音圧は筒材によって異なり紙筒で100dB未満のものが、アルミニウム、ガラス、塩化ビニルでは110dB前後に大きくなった。

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。音響学的な観点から笛音の周波数と音圧の関係など、鳴笛現象の解析についてはマクスウェルによってすでに研究されている¹⁾。

本研究では、化学的な観点から、笛薬として実用化されている芳香族化合物の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、混合比を変化させ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、既往の研究において、詳細に示されていない笛音波形、周波数と音圧の関係、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への影響などを検討

した。

2. 実 験

2.1 試 料

笛薬としての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。

笛薬は、150 μ m篩いを通した安息香酸カリウム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 $^{\circ}$ C/minで測定した。

試料の昇温による状態変化は、共栄理科学器店製ホットサーモカップル装置を使用し、昇温速度100 $^{\circ}$ C/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RADIIIaを使

2001年1月9日受付

2001年9月10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

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。筒の影響については、直径、筒長、筒材を変えたものについて検討した。

笛薬は、直径1.2cmの筒を使用する場合は総量5g、直径0.9cmの筒を使用する場合は総量3gを筒に入れ、筒底から2cm前後にまで圧搾した。

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、周波数および音圧を測定した。集音の際の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。

線燃焼速度の測定法とガス発生速度の計算法をFig. 1に示す。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、直径1.2cmの筒を使用する場合は 2.2g/cm^3 、直径0.9cmの筒を使用する場合は 2.4g/cm^3 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。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(cm^3/sec)になる。

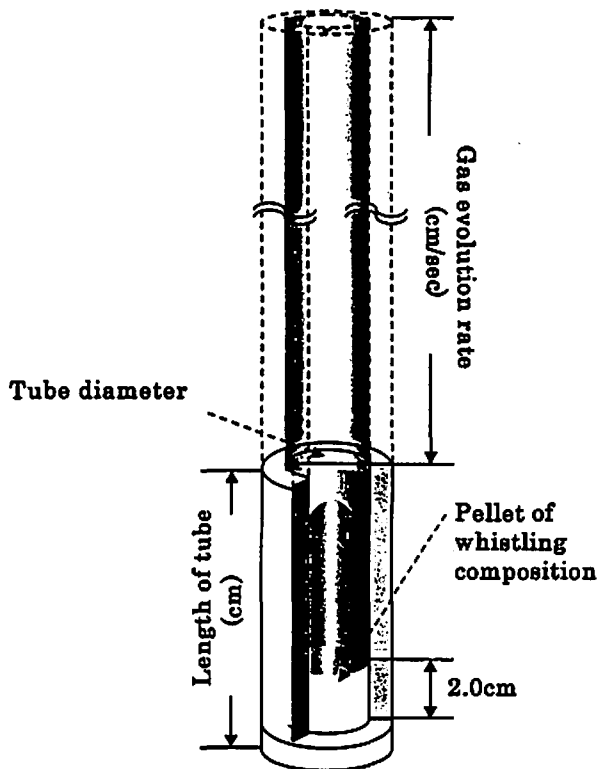


Fig. 1 Schematic representation for measuring of linear burning rate and gas evolution rate

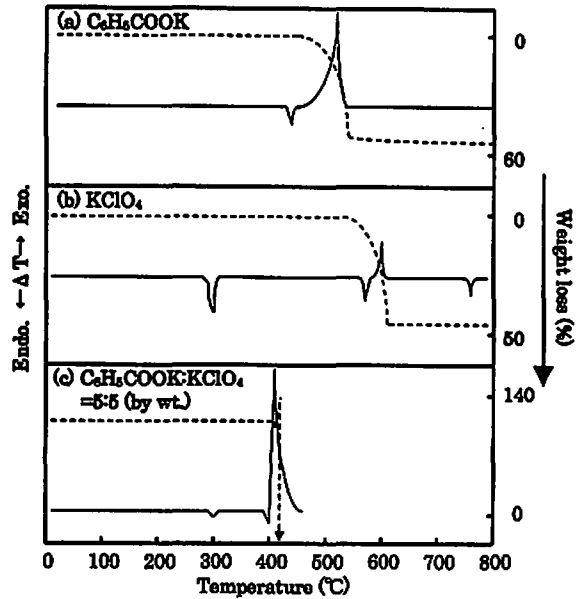


Fig. 2 DTA and TG curves of potassium benzoate, potassium perchlorate and the mixture of potassium benzoate with potassium perchlorate

-----;TG, ———;DTA

Sample weight; 2mg, atmosphere; in air, heating rate; $10^\circ\text{C}/\text{min}$

3. 結果および考察

3. 1 笛剤および酸化剤の熱的性質

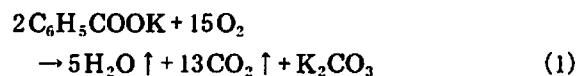
安息香酸カリウムと過塩素酸カリウムのDTA, TG曲線をFig. 2の(a)および(b)に示す。

安息香酸カリウムは 430°C で融解による吸熱ピーク、 $450^\circ\text{C}\sim 550^\circ\text{C}$ で酸化による発熱ピークを示し、 530°C での重量減少は56wt%であった。過塩素酸カリウムの熱分析では、 300°C で相転移による吸熱ピークを 570°C で融解と同時に発熱分解し、 770°C で生成した塩化カリウムの融解が認められた²⁾。また、 610°C で47wt%の重量減少が認められた。

加熱残留物の粉末X線回折より、安息香酸カリウムは 800°C まで加熱すると炭酸カリウムを生成した。また、過塩素酸カリウムは 600°C まで加熱すると、塩化カリウムを生成した。

上述の結果から安息香酸カリウムの空気中の反応と過塩素酸カリウムの分解を、(1)および(2)式とした。

安息香酸カリウムの場合、次式より 530°C の分解における重量減少率を計算すると56.9wt%であった。



TGによる重量減少率の実測値は56wt%で、これは(1)式による計算値とほぼ一致した。したがって、安

安息香酸カリウムの空気中の加熱時の反応として(1)式を推定した。

また、過塩素酸カリウムの620℃における重量減少率は47wt%で、(2)式による計算値とよく一致した。



3. 2 安息香酸カリウムと過塩素酸カリウム混合物(笛薬)の熱的性質

笛薬のDTA, TG曲線をFig. 2の(c)に、熱的状態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。笛薬は、加熱前の25℃では白色粉体(a)である。DTA曲線では、390℃付近に吸熱ピークが認められた。ホットサーモカップルの観察では、笛薬は390℃で融解し始め(b)、400℃で笛薬は完全に融解した(c)。410℃では笛薬は黒変し(d)、泡立ちながらフィラメント全体に融解した笛薬が広がり(e)、直後に体積膨張した(f)。TG曲線では、410℃で若干の重量減少が認められたのち、30%の重量増加が認められた。また、430℃に大きな発熱ピークが認められ、試料皿が吹き飛んだため、100%以上の急激な重量減少が認められた。さらに、同温度付近で、笛薬は火柱を上げて激しく爆発した(g)。この際、同温度で笛薬は発音し、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、

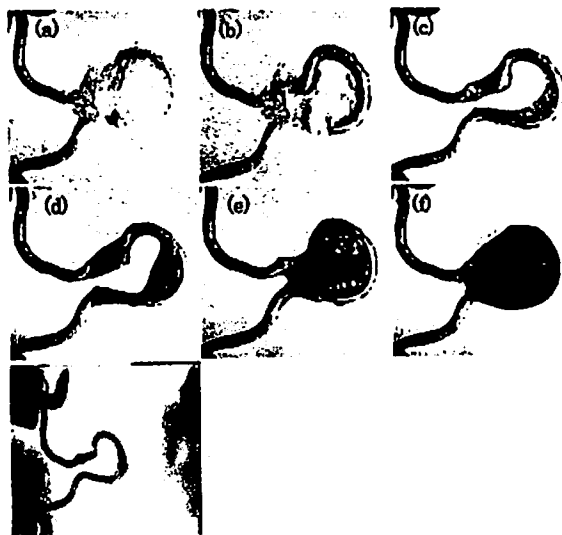
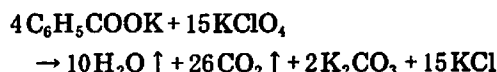


Fig. 3 Observation by microscope photos of mixtures of potassium benzoate with potassium perchlorate on heating at (a) 25°C, (b) 390°C, (c) 400°C, (d), (e), (f) 410°C and (g) 430°C
Composition; $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOK}:\text{KClO}_4=5:5$ (by wt.)
Sample weight; 2mg, atmosphere; in air, heating rate; 100°C/min

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の安息香酸カリウム、過塩素酸カリウム単品および混合物の熱分析結果より、笛薬の反応はつぎ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、安息香酸カリウム23.5に対して過塩素酸カリウム76.5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。

3. 3 笛音と笛薬混合比の関係

量論比付近で、混合比を変えた笛薬の発音状況をTable 1に示す。笛薬を入れた紙筒は、直径1.2cm、筒長6.0cmのもの(Table 1 a)と、直径0.9cm、筒長5.7cmのもの(Table 1 b)を使用した。笛音を出した混合系は重量比で安息香酸カリウム:過塩素酸カリウム=4:6, 3:7, 2:8であった。これらの混合比は、実際の笛薬組成より幅広いことがわかった。(a)の筒を使用した場合、笛音の周波数は2300~2525Hzであり、(b)の筒を使用した場合、笛音の周波数は2500~2800Hzであった。また、(a)の筒を使用した場合、笛音の音圧は90ないし100dBであり、(b)の筒を使用した場合、笛音の音圧は95dB以上110dB未満であった。したがって、体積が小さい筒から出る笛音の方が高音かつ大音量であった。以上の混合比以外の笛薬は、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。

3. 4 笛薬の線燃焼速度とガス発生速度

混合比の差異による笛音の有無について、原因を検討する目的で、混合比を変えた笛薬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。過塩素酸カリウムの混合割合と線燃焼速度の関係をFig. 4の(a)に示す。直径1.2cm、筒長6.0cmの紙筒を使用した場合と直径0.9cm、筒長5.7cmの紙筒を使用した場合のいずれも、過塩素酸カリウムの混合割合が増加するにつれて安息香酸カリウム:過塩素酸カリウム=2:8混合比まで線燃焼速度は大きくなる傾向が認められた。さらに、過塩素酸カリウムを加えた場合(安息香酸カリウム:過塩素酸カリウム=1:9の笛薬)は線燃焼速度が小さくなる傾向が認められた。

また、量論比の笛薬5gを直径1.2cm、筒長6.0cmの紙筒に入れた場合、笛薬の燃焼温度は700~900℃、燃焼時間は約3.5秒であった。

したがって、3.2の笛薬の反応式と燃焼速度測定結

Table 1 Effect of composition on whistling noise of the compositions of potassium benzoate with potassium perchlorate

(a) paper tube diameter; 1.2cm, length; 6.0cm

| $C_6H_5COOK:KClO_4$ (by wt.) | whistling properties | frequency (Hz) | sound pressure (dB) |
|---------------------------------|--|-------------------|------------------------|
| 5:5 | whistled with very low intensity, just faintly audible | — | — |
| 4:6 | whistled with somewhat less intensity than 3:7 | 2300 | 93.5 |
| 3:7 | whistled with somewhat less intensity than (b)-3:7 | 2525 | 96.9 |
| 2:8 | whistled with somewhat less intensity than 3:7 | 2513 | 91.1 |
| 1:9 | no-whistling | — | — |

(b) paper tube diameter; 0.9cm, length; 5.7cm

| $C_6H_5COOK:KClO_4$ (by wt.) | whistling properties | frequency (Hz) | sound pressure (dB) |
|---------------------------------|--|-------------------|------------------------|
| 5:5 | whistled with very low intensity, just faintly audible | — | — |
| 4:6 | whistled with somewhat less intensity than 3:7 | 2500 | 97.5 |
| 3:7 | whistled with strongly | 2775 | 109.8 |
| 2:8 | whistled with somewhat less intensity than 3:7 | 2800 | 97.0 |
| 1:9 | no-whistling | — | — |

果より、800℃におけるガス発生速度を計算できる。発生ガスが水蒸気と二酸化炭素であるものとする、発生ガスの総量は、 $5800\text{cm}^3/3.5\text{sec}$ であった。

したがって、1秒間に発生した気体の体積(ガス発生速度)は、 $1700\text{cm}^3/\text{sec}$ である。

前述の通り、本研究では、1秒間に発生した気体の体積が用いた筒において占める高さ(cm)をガス発生速度(cm/sec)とした。ガス発生速度は、 $1700\text{cm}^3 / \{(1.2/2)^2 \times \pi\} \text{cm}^2 \approx 1500\text{cm}/\text{sec}$ となる。

混合比を変えた笛葉についてもガス発生速度を計算した。過塩素酸カリウムの混合割合と線燃焼速度の関係を図4の(b)に示す。図より、直径1.2cm、筒長6.0cmの紙筒を使用した場合と直径0.9cm、筒長5.7cmのいずれの紙筒を使用した場合も、安息香酸カリウム：過塩素酸カリウム=4:6の混合比のとき、ガス発生速度は最も大きく約2000cm/secであり、量論比の笛葉のガス発生速度より大きい事がわかった。さらに、過塩素酸カリウムの割合が大きい場合、ガス発生速度は小さくなる傾向が認められた。笛音を出し

た混合系は安息香酸カリウム：過塩素酸カリウム=4:6、3:7、2:8の笛葉である。以上の結果より、線燃焼速度が0.4cm/secかつ、ガス発生速度が1500cm/secより大きい笛葉は笛音を出す、ガス発生速度が1500cm/secより大きい笛葉(安息香酸カリウム：過塩素酸カリウム=5:5)でも、線燃焼速度が0.3cm/secより小さい笛葉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がわかった。

3.5 FFTアナライザーによる笛音の測定

安息香酸カリウム：過塩素酸カリウム=2:8の組成の混合物の笛音について波形測定結果を図5に示す。図5の(a)は直径1.2cm、筒長6.0cmの紙筒を使用した場合の笛音波形、図5の(b)は直径0.9cm、筒長5.7cmの紙筒を使用した場合の笛音波形、図5の(c)は競技用ホイッスルの笛音波形である。いずれの笛音も規則的なうなり、または振幅変調が認められた³⁾。したがって、耳では識別できないが、音

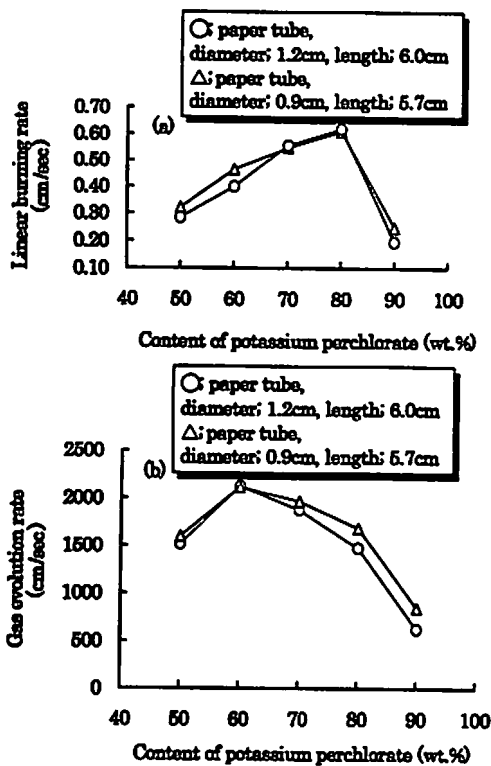


Fig. 4 (a) Effect of potassium perchlorate content on linear burning rate
(b) Effect of potassium perchlorate content on gas evolution rate

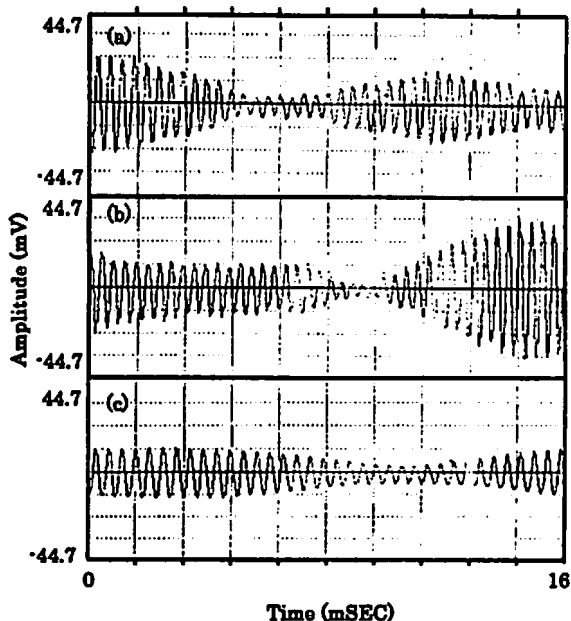


Fig. 5 Waveform amplitude of whistling noise composition by FFT analyzer
Composition: $C_6H_5COOK:KClO_4=2:8$ (by wt.)
(a) tube diameter: 1.2cm, tube length: 6.0cm, sample weight: 5g
(b) tube diameter: 0.9cm, tube length: 5.7cm, sample weight: 3g
(c) whistle used in competition

の大小が繰り返されているものと考えられる。

また、発音体が1秒間に繰り返す振動の回数が周波数であるので、波数を数えて周波数を計算した結果を(a)~(c)に記す。

- (a) 直径1.2cm, 筒長6.0cm 紙筒の笛音の場合
 $39/0.016 \approx 2438\text{Hz}$
(b) 直径0.9cm, 筒長5.7cm 紙筒の笛音の場合
 $42/0.016 \approx 2625\text{Hz}$
(c) 競技用ホイッスルの笛音の場合
 $36/0.016 \approx 2250\text{Hz}$

したがって、煙火の笛音(a)および(b)は競技用ホイッスルの笛音(c)より高音であることがわかった。また、(b)の筒を使用した笛音の周波数が(a)の筒を使用した笛音の周波数より大きく、振幅も大きいことが認められた。以上の結果より、体積が小さい紙筒から出る笛音の方が高音かつ大音量であることがわかった。この結果は、笛薬の発音状況を示したTable 1の結果とほぼ一致した。

次に、これらの笛音を分解し、周波数と音圧の関係をFig. 6に示す。直径1.2cm, 筒長6.0cmの紙筒を使用した笛音の基本周波数は2.5kHz付近であり、音圧も最大値91.1dBを示した。また、基本周波数の2

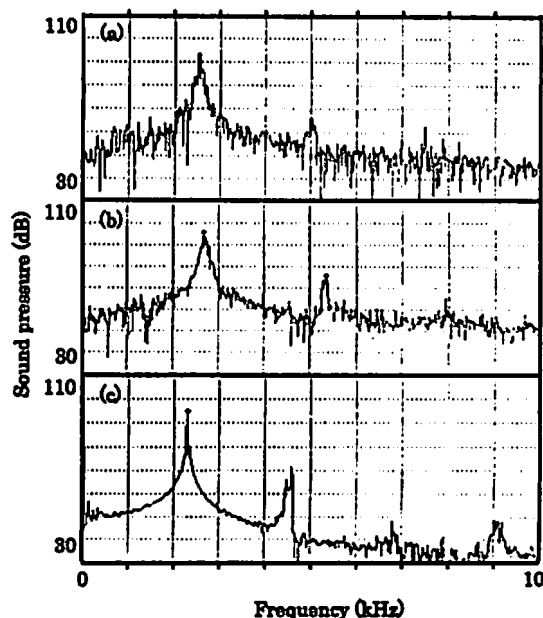


Fig. 6 Relation between sound pressure and frequency for whistling noise observed by FFT analyzer
Composition: $C_6H_5COOK:KClO_4=2:8$ (by wt.)
(a) tube diameter: 1.2cm, tube length: 6.0cm, sample weight: 5g
(b) tube diameter: 0.9cm, tube length: 5.7cm, sample weight: 3g
(c) whistle used in competition

倍周波数である5.0kHzの時にも音圧のピークが認められた(Fig.6のa)。直径0.9cm, 筒長5.7cmの筒を使用した場合の笛音の基本周波数は2.8kHz付近であり, 音圧も最大値97.0dBを示した。また, 基本周波数の約2倍周波数である5.3kHzの時にも音圧のピークが認められた(Fig.6のb)。競技用ホイッスルの基本周波数は2.3kHz付近であり, この時に最大音圧94.5dBを示した。さらに, 基本周波数の2倍周波数である4.6kHzの時にも音圧のピークが認められた(Fig.6のc)。

以上の結果より, 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⁹⁾。

3.6 筒の長さとの周波数変化

安息香酸カリウム: 過塩素酸カリウム=2:8の組成の混合物の笛音について直径1.2cmと0.9cmの2種の紙筒を使用した場合の筒の長さとの周波数変化をFig.7に示す。笛音の周波数は長さにはほぼ反比例することがわかった。また, 直径1.2cmの紙筒を使用した場合は長さが4cmより短くなると, 笛音は出さなくなり, 直径0.9cmの紙筒を使用した場合は長さが2.5cmより短くなると, 笛音は出さなくなった。

以上の結果より, 笛音は笛葉が燃焼し, 笛葉の長さが短くなるにつれて, すなわち筒の長さが長くなるにつれて連続的に低くなるように聞こえてくることを確認した⁹⁾。したがって, 笛音は筒や容器の共鳴により発生していることがわかった。

3.7 笛音に及ぼす筒材の影響

安息香酸カリウム: 過塩素酸カリウム=4:6の組成

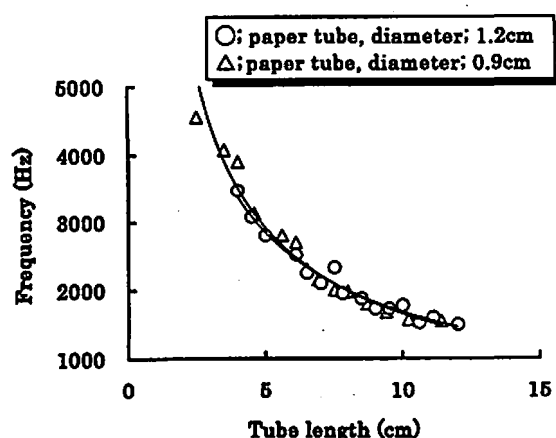


Fig. 7 Effect of tube length on frequency for whistling noise
Composition: $C_6H_5COOK:KClO_4=2:8$ (by wt.)

成の笛葉の直径1.2cm, 筒長6.0cmのアルミニウム, ガラス, 塩化ビニルを筒材に使用した場合の笛音についての波形測定結果をFig.8に示す。(a)はアルミニウム筒を使用した笛音波形, (b)はガラス筒を使用した笛音波形, (c)は塩化ビニル筒を使用した笛音波形である。いずれの笛音も紙筒を使用した場合と同様に規則的なうなり, または振幅変調が認められた。したがって, 耳では識別できないが, 音の大小が繰り返されているものと考えられる。しかし, 紙筒を使用した笛音波形よりも振幅が大きいことが認められた。

また, 波数を数えて周波数を計算した結果を(a)~(c)に記す。

(a) アルミニウム筒を使用した笛音の場合

$$38/0.016 \approx 2375 \text{ Hz}$$

(b) ガラス筒を使用した笛音の場合

$$35/0.016 \approx 2188 \text{ Hz}$$

(c) 塩化ビニル筒を使用した笛音の場合

$$35/0.016 \approx 2188 \text{ Hz}$$

ここで, 同成分, 同体積の紙筒を使用した笛音の周波数が約2300Hzであるので, この場合と比較してもほぼ同等の周波数であることが認められた。

次に, これらの笛音を分解し, 周波数と音圧の関係

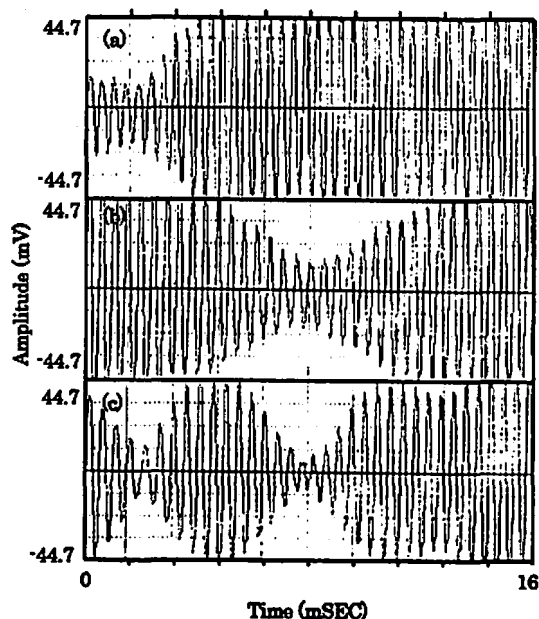


Fig. 8 Waveform amplitude of whistling noise composition by FFT analyzer
Composition: $C_6H_5COOK:KClO_4=4:6$ (by wt.)
Tube materials;
(a) aluminum tube, (b) glass tube, (c) vinyl chloride tube
tubes diameter; 1.2cm, tubes length; 6.0cm, sample weight; 5g

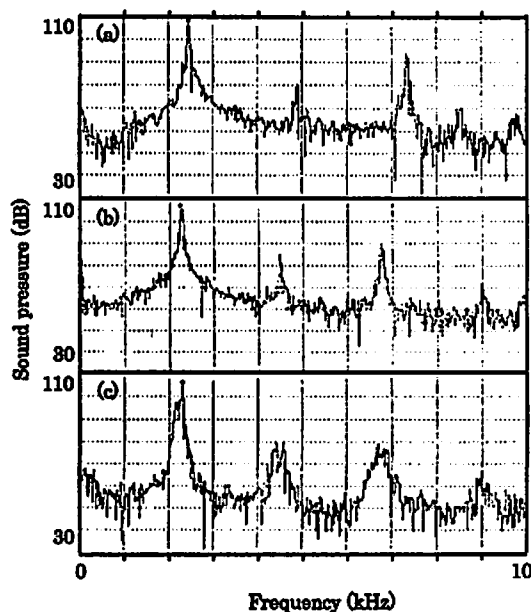


Fig 9 Relation between sound pressure and frequency for whistling noise observed by FFT analyzer
Composition; $C_6H_5COOK:KClO_4=4:6$ (by wt.)
Tube materials;
(a) aluminum tube, (b) glass tube, (c) vinyl chloride tube
tubes diameter; 1.2cm, tubes length; 6.0cm,
sample weight; 5g

を Fig. 9 に示す。アルミニウム筒を使用した笛音の基本周波数は 2.5kHz 付近であり、音圧も最大値 108.2 dB を示した (Fig. 9 の a)。また、基本周波数の約 2 倍周波数である 4.9kHz の時にも音圧のピークが認められた。ガラス筒を使用した笛音の基本周波数は 2.2 kHz 付近であり、音圧も最大値 107.1 dB を示した (Fig. 9 の b)。また、基本周波数の約 2 倍周波数である 4.5kHz の時にも音圧のピークが認められた。塩化ビニル筒を使用した笛音の基本周波数は 2.3kHz 付近であり、音圧も最大値 105.9 dB を示した (Fig. 9 の c)。また、基本周波数の約 2 倍周波数である 4.5kHz の時にも音圧のピークが認められた。同様の条件での紙筒を使用した笛音の音圧は 93.5 dB であったものが、筒材としてアルミニウム、ガラス、塩化ビニルを使用することにより、音圧が 110dB 付近になった。

次に、各々の筒材について混合比を変えた笛葉の周波数、音圧、線燃焼速度測定を行った結果を Table 2 に示す。笛葉を入れた筒は、直径 1.2cm、筒長 6.0cm のものを使用した。

この結果より、笛音の周波数は異なった筒材を使用しても 2.2~2.5kHz である。また、笛音の線燃焼速度は異なった筒材を使用しても 0.5~0.8cm/sec である。したがって、音の高低と線燃焼速度については筒

Table 2 Effect of tube materials on whistling noise

(a) paper tube

| $C_6H_5COOK:KClO_4$ | frequency (Hz) | sound pressure (dB) | rate of burning (cm/sec) |
|---------------------|----------------|---------------------|--------------------------|
| 4 : 6 | 2300 | 93.5 | 0.49 |
| 3 : 7 | 2525 | 96.9 | 0.69 |
| 2 : 8 | 2513 | 91.1 | 0.62 |

(b) aluminum tube

| $C_6H_5COOK:KClO_4$ | frequency (Hz) | sound pressure (dB) | rate of burning (cm/sec) |
|---------------------|----------------|---------------------|--------------------------|
| 4 : 6 | 2450 | 108.2 | 0.53 |
| 3 : 7 | 2300 | 108.8 | 0.66 |
| 2 : 8 | 2250 | 105.5 | 0.80 |

(c) glass tube

| $C_6H_5COOK:KClO_4$ | frequency (Hz) | sound pressure (dB) | rate of burning (cm/sec) |
|---------------------|----------------|---------------------|--------------------------|
| 4 : 6 | 2225 | 107.1 | 0.49 |
| 3 : 7 | 2450 | 110.7 | 0.58 |
| 2 : 8 | 2225 | 92.6 | 0.57 |

(d) vinyl chloride tube

| $C_6H_5COOK:KClO_4$ | frequency (Hz) | sound pressure (dB) | rate of burning (cm/sec) |
|---------------------|----------------|---------------------|--------------------------|
| 4 : 6 | 2300 | 105.9 | 0.48 |
| 3 : 7 | 2250 | 110.8 | 0.64 |
| 2 : 8 | 2500 | 105.6 | 0.59 |

Tubes diameter; 1.2cm, tubes length; 6.0cm

材の影響はほとんど認められなかった。しかし、音の大きさに関しては、筒材としてアルミニウム、ガラス、塩化ビニルを使用することにより、紙筒を使用した笛音の音圧よりも 10dB 以上大きくなることが認められた。

以上の結果より、笛葉が燃焼するときの固有振動数はやわらかい紙の固有振動数よりも硬いアルミニウム、ガラス、塩化ビニルの固有振動数とより近いものと推測される^{6,7)}。

4. 結 論

煙火の笛葉として実際に使用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

析や笛音測定などから、以下のことがわかった。

- (1) 笛葉が笛音を出す混合比は、安息香酸カリウム：過塩素酸カリウム=2:8, 3:7, 4:6(重量比)の場合であった。また、笛葉が笛音を出す条件は線燃焼速度が0.4cm/secかつガス発生速度が1500cm/sec以上であった。
- (2) 笛音の基本周波数は2kHz付近であり、基本音に対し、倍音が発生していた。また、笛音の周波数と筒の長さは反比例した。したがって、笛音は筒の共鳴により発生するものと考えられる。
- (3) 筒材を変化させても笛音の周波数と線燃焼速度はほとんど変化しなかった。しかし、音圧は紙筒で100dB未満であったが、アルミニウム、ガラス、塩化ビニルを筒に使用することで110dB前後に大きくなった。

謝 辞

本研究を行うに当たり、笛葉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。

文 献

- 1) W. R. Maxwell, "Pyrotechnic Whistles", Fourth Symposium (International) on Combustion, p37 (1952), The combustion Institute, Williams and Wilkins, Baltimore, Md.
- 2) 日本化学会編, 「改訂3版 化学便覧 基礎編I」, P. 140(1984), 丸善
- 3) 鹿児島誠一著, 「振動・波動入門」, p. 43, p. 176 (1992), サイエンス社
- 4) 牧田康雄編著, 「現代 音響学」, p. 88, p. 214, p. 269(1976), オーム社
- 5) 唐澤誠著, 「音の科学ふしぎ事典」, p. 76(1997), 日本実業出版社
- 6) 小橋豊著, 「音と音波」, P. 107, P. 182(1973), 裳華房
- 7) 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

Thermal behavior of the mixtures of potassium benzoate with potassium perchlorate

(Study on pyrotechnic whistling noise)

Koki ISHIKAWA*, Michio KOGA*, Masaru MATSUMOTO*,
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 reactions of pyrotechnic whistle compositions of the mixtures of potassium benzoate with potassium perchlorate were investigated by thermal analysis, observation by microscope and sound test such as the waveform, frequency and sound pressure analysis of the whistling noise for different compositions, tube length and material of tube. The results obtained are as follows:

- (1) The compositions capable for producing whistling noise are the mixtures of potassium benzoate with potassium perchlorate which compositions are in the proportions 40/60, 30/70, and 20/80 ($C_6H_5COOK/KClO_4$, by wt.).
- (2) The fundamental frequency of the pyrotechnic whistling noise is about 2kHz, and harmonic sound appears beside the fundamental sound. The frequency is inversely proportional to the length of tube. Therefore, whistling noise was considered to appear by the resonance of the tube.
- (3) Although different materials were used for the tubes, they made little difference in frequency and linear burning rate, when whistling compositions pressed into the aluminum, glass, and vinyl chloride tube. The sound pressure increases about 10dB louder compared to that one which pressed into the paper tube.

(*Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University 3-1, Matsukadai 2-Chome, Higashi-ku, Fukuoka 813-0004, JAPAN)