

# 燃烧音の周波数分析について

## Burning Sounds Frequency Analysis

脇 賢\*  
太田文和\*  
中西正浩\*

### 概要

ふすまやカーテン等が燃烧する時に発生する音には、周波数として数Hzから20kHz以上の高帯域にいたるまで、広い範囲にわたってその成分が存在している。その特徴として、数Hz以下の超低周波域には、日常の生活に存在する音には多く含まれない成分があることがわかった。この特徴を利用して、火災時に物が燃烧する際に発生する音を検知する新たな火災感知及び警報装置の開発の可能性を追求していく。

Fires are often noticed by their burning sounds.

The burning sounds were proved to contain wider range of frequencies, i.e., from ultra low frequency to high frequency.

And the ultra low frequency components are hardly comprised in the sounds that are produced in a daily life.

These facts give us a hint of a new fire sensor.

This report shows the concept of frequency analysis and the results of the burning sounds measurement.

### 1. はじめに

従来、出火時に警報を発して建物内の居住者等に火災の発生を報知する自動火災報知設備の感知器としては、熱感知器、煙感知器、炎感知器又はこれらを複合した感知器がある。これらの感知器の機能を補完しその信頼性を高めるための火災感知装置を開発しようと考え、燃烧時に発生する第4の物理量としての「音」に着目し、これを感知する新たな火災感知装置の開発のための研究に着手した。

その開発にあたっては、火災時において物が燃烧する際に発生する音を電氣的に処理する機構の構築が必要であり、そのためまず燃烧時に発生する音にどのような特徴があるか確認するため、燃烧実験を行い、その際に発生する音の波形分析及び周波数分析等を行った。

### 2. 周波数分析に関する基礎理論

音とは、空気の振動であり、空気中を伝わる密度変化の波である。すべての音は、いろいろな周波数と振幅を持った波（正弦波）が合成されたものであり、この場合の一つ一つの固有の波を音の成分という。（図1）

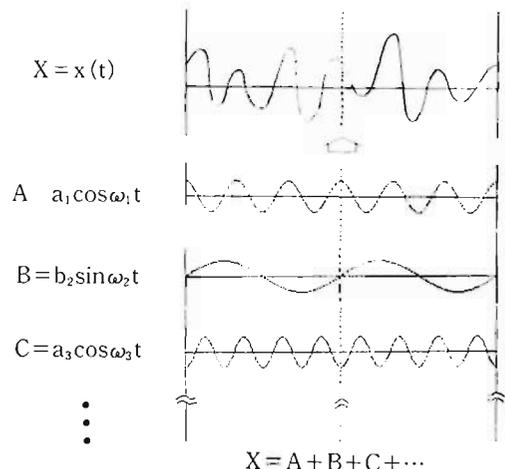


図1 正弦波の合成

\*第三研究室

通常われわれが、音について解析する場合には、ある音の中にどのような成分が含まれているかを調べる方法をとる。各周波数成分ごとの大きさ（レベル）を一つのグラフに表現したものを周波数スペクトルといい、これを求めることによる音の分析方法を周波数分析という。

周波数スペクトルを時間波形から求める手法を「フーリエ変換」というが、以下にその概要について簡単に述べることにする。

(1) フーリエ変換

今ここに、任意の音の波形を時間の関数として  $x(t)$  とおくと、

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi nft + b_n \sin 2\pi nft) \quad \textcircled{1}$$

というフーリエ級数で表すことができる。また、①式の各項の係数は、

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad \textcircled{2}$$

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos 2\pi nft dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin 2\pi nft dt \end{aligned} \right\} \textcircled{3}$$

$$(\sqrt{a_n^2 + b_n^2} = c_n) \quad \textcircled{4}$$

と表すことができ、これをフーリエ展開という。ここで、オイラーの公式により、

$$e^{j2\pi nft} = \cos 2\pi nft + j \sin 2\pi nft \quad \textcircled{5}$$

であるから、

$$\left. \begin{aligned} \cos 2\pi nft &= (e^{-j2\pi nft} + e^{j2\pi nft}) / 2 \\ \sin 2\pi nft &= (e^{j2\pi nft} - e^{-j2\pi nft}) / 2j \end{aligned} \right\} \textcircled{6}$$

となり、これを、 $a_n$ 、 $b_n$ に代入して変形すると、

$$\frac{1}{2} (a_n - jb_n) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{j2\pi nft} dt \quad \textcircled{7}$$

$$\frac{1}{2} (a_n + jb_n) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j2\pi nft} dt \quad \textcircled{8}$$

この⑦及び⑧を、同じく⑥を  $x(t)$  に代入して得られた式に再び代入して整理すると、

$$x(t) = \sum_n \frac{1}{2} (a_n - jb_n) e^{j2\pi nft} \quad \textcircled{9}$$

ここで、 $\frac{1}{2} (a_n - jb_n)$  は  $x(t)$  のフーリエ展開であり、これを  $C_n$  と置くと、⑦から、

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{j2\pi nft} dt \quad \textcircled{10}$$

と表現できる。ところで、フーリエ展開とは、フーリエ級数の中に含まれる各周波数とその成分の大きさの関係を示すものであるから、これは、時間領域から周波数領域への変換をすることであり、ここから、 $T \rightarrow \infty$  と考えて導かれた、

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{j2\pi ft} dt \quad \textcircled{11}$$

を「フーリエ変換」という。

すなわち、一般的にいう時間波形を周波数スペクトルに変換することである。なお、

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad \textcircled{12}$$

を「フーリエ逆変換」という。(図2)

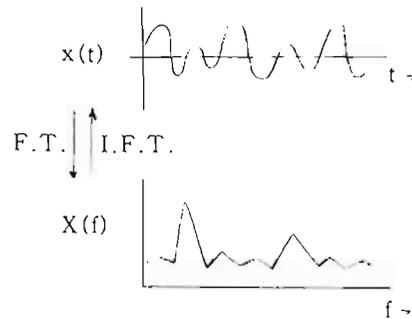


図2 フーリエ変換 (F.T.) 及び逆フーリエ変換 (I.F.T.) の概念

(2) 離散フーリエ変換の導入

フーリエ変換は、数学的には前(1)のように表されるが、実際に電氣的に波形を処理する場合には、入力信号におけるいくつかの点をサンプリングして、数値計算により周波数スペクトルを求める。

今、あるサンプリング周期で、1～Nのデータを通るような有限項のフーリエ級数は、

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{n=2} A_n \cos \frac{2\pi nt}{T} + \sum_{n=1}^{n=1} B_n \sin \frac{2\pi nt}{T} \quad (13)$$

であり、これからフーリエ変換すると、

$$X(f_k) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (14)$$

が求められる。ここからさらに、行列式等を使って数値計算を簡略化し、時間波形から瞬時に周波数スペクトルを表示する装置がFFT (Fast Fourier Transform) 分析器である。

### 3. 実験目的及び項目

#### (1) 実験目的

各種の燃焼供試体を燃焼させ、その際に発生する音を記録し、その波形分析及び周波数分析等を行うことにより、物が燃焼する際に発生する音にどのような特徴があるかを調べる。

#### (2) 実験項目

燃焼実験の燃焼供試体として、通常使用されるクリブ (杉の気乾材) 及びわが国の標準的な住宅内に存在する襖等の可燃物を使用して、燃焼させた時に発生する音をデータレコーダーに記録し、データアナライザーにより次の波形分析を行う。

- ア 燃焼時に発生する音の時間波形
- イ 燃焼時に発生する音の周波数スペクトル

### 4. 実験資器材等

#### (1) 測定機器

- ア 高周波対応型コンデンサーマイク 1本
- イ メインアンプ 1台
- ウ 電源装置 1台
- エ データレコーダー (TEAC: XR-5000) 1台
- オ データアナライザー (FFT分析器) (共和電業: DAA-110A) 1台

#### (2) 実験機材

- ア 実験用模擬ハウス (3.6m×3.6m≒13m<sup>2</sup>) 1基
- イ クリブ用架台 (900mm×900mm×400mm) 1基
- ウ 立上り材固定用架台 1基
- エ オイルパン (100cm×100cm) 1台

#### (3) 燃焼供試体

- ア クリブ (900mm×35mm×30mm) 40本
- イ ふすま (和襖) (900mm×1700mm×20mm) 1枚
- ウ ふすま (段ボール製/アルミ箔入り) (900mm×1700mm×20mm) 1枚
- エ 紙 (新聞紙) 20枚

### 5. 実験方法

#### (1) 録音用マイクの設定

実験用模擬ハウス (以下「ハウス」という。) の中央付近に、燃焼音録音用の高周波対応型コンデンサーマイク (以下「マイク」という。) をスタンドに取付け、床面から50cmの位置に設置する。

#### (2) 測定機器の設定

ハウス前面のテーブル上に、データレコーダー及びデータアナライザーを設置し、(1)のマイクをアンプを介して接続する。(写真1)

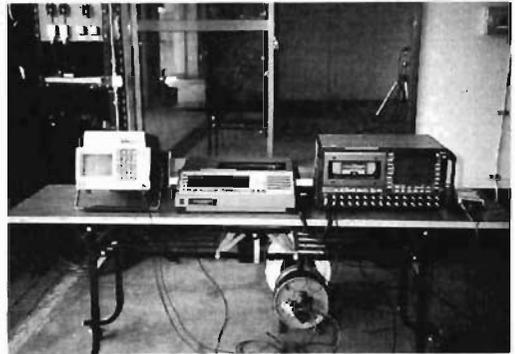


写真1 測定機器の設定状況

#### (3) 試料の燃焼方法

##### ア クリブ

ハウスのコーナーに設置されたクリブ用架台上に、クリブを1段あたり5本で井桁状に4段積みとし、クリブ下方の燃焼皿にノルマルヘプタン約30cm<sup>3</sup>を入れ、点火する。(写真2)

##### イ ふすま

立上り材固定用架台に和襖を取付け、ハウスのコーナーに対し斜め45度の角度に設置し、ふすまの下方に点火する。また、段ボール襖についても同様とする。(写真3、4)

##### ウ 紙



写真2 クリブの燃焼音の測定状況



写真3 和襖の燃焼音の測定状況



写真4 段ボール襖の燃焼音の測定状況



写真5 紙の燃焼音の測定状況

コーナーに置かれたオイルパンの上に、丸めた新聞紙を載せ、点火する。(写真5)

(4) 測定内容

前(3)、ア〜ウのそれぞれについて、燃焼時に発生する音声をマイクにより集録し、データレコーダーにより記録する。

なお、集録条件は次のとおりとする。

- ア 入力電圧最大値 5 V
- イ 帯域選択 HIGH BAND
- ウ テープスピード 76.2cm/s

(5) 分析方法

前(4)で集録された、各燃焼供試体を燃焼させたときの音の分析にあたって、データアナライザーを使用し、その音の時間波形及び周波数スペクトルを作成し、次の内容を検討する。

ア 時間波形について

波形の立ち上がり部分の特徴の抽出とその活用方策

イ 周波数スペクトルについて

音の周波数成分のうち、特徴を有する帯域の抽出及びその日常存在する音との識別の可能性

6. 実験結果

(1) 各燃焼供試体の燃焼時に発生した音の時間波形及び周波数スペクトル

ア クリブ

イ 高周波域

図3、4に示すとおり。

ロ 低周波域

図5、6に示すとおり。

エ ふすま(和襖)

図7、8に示すとおり。

ウ ふすま(段ボール襖)

図9、10に示すとおり。

エ 紙

図11、12に示すとおり。

※ 今回使用したデータアナライザー(DA A-110A)により作成されたスペクトルは、周波数が概ね25kHz以下の成分のみである。今後、同データを電算により処理し、40kHzの範囲までのスペクトルを作成する予定である。

(2) 燃焼時における目視観察結果

## ア クリブ

点火後約1分ごろから、「パチッ」という小さい音が発生し始め、3分経過した後は、その音はかなり顕著で高いレベルのものとなり、盛んに「パチパチ」という音を発生させながら燃焼を続けた。

なお、5分経過後に、消火した。

## イ ふすま (和襖)

点火後、約1分未満で炎は一気に拡大し、天井付近まで立ち上がった。ただし、燃焼時には「パチパチ」という音はあまり発生せず、燃焼時に発生する音としてはほとんど耳には感じないものであった。

## ウ ふすま (段ボール襖)

和襖ほどの急激な炎の拡大はなく、クリブと比較してレベルは低いものであるが、「パチパチ」という音を発生して燃焼した。

## エ 紙

前イの和襖と同様に、火炎の発生は著しいが、耳に感じる音として顕著なものは発生していない。

## 7. 考 察

### (1) 実験結果について

ア 物が燃焼する際に発生する音（以下「燃焼音」という。）の特徴は、今回の実験結果からみると、大きく二つに分けられるものと考えられる。その一つは、主として「クリブ」を燃焼させた場合において、高周波数帯(概ね10kHz以上)における音圧レベルが高いことである。

この場合の音（「パチッ」という音）の原因は明確ではないが、熱により、木材の組織が膨張して弾ける際に発生するものとも考えられ、図3の時間波形は、その一つの音の立ち上がりから概ね減衰するまでの過程を一つの枠内にとらえたものであり、その所要時間は約0.15~0.2秒程度であることがわかる。

そして、図4の周波数スペクトルをみてわかるように、ほとんど白色雑音に近い特性を持っているが、その中でも特に、高い周波数帯域に比較的高いレベルの成分が存在していることが確認できる。

イ もう一つは、主として「ふすま」や「新聞紙」等の紙類が燃焼する場合に発生した音に

おいて顕著に現れる特徴で、概ね数Hz以下の超低周波の成分が存在することである。

図7、9及び11をみてわかるように、1秒間に数回程度の大きなうねりが存在し、その中に、細かい振動が含まれる形の波形であり、これは、図8、10及び12のスペクトルからも読み取れるように、概ね数Hzの基本周波数をもった音が発生しているということがわかる。

音といっても、実験結果の項で述べたように、人間の耳にはほとんど感覚としては存在しないものである。これは、炎の発生に伴って、そこから発せられる熱により室内の気圧に急激な変化が生じたことにより発生しているものと考えられる。そして、この圧力変動は、炎のゆらぎに伴って生じているためであると推測され、周波数としては、概ね数Hz以下の超低周波の音となる。

また、この成分は、図5、6に示すように、クリブを燃焼させた場合においても、検出されることがわかる。

なお、ふすまは、木製の枠が燃焼する際にクリブと同様の音が発生しているはずであるが、上記の低周波の成分が大きすぎて高周波成分はあまり顕著に現れていない。

ウ いわゆる「ポーッ」と表現される音は、この超低周波の音（実際には耳には感じていない）を擬似的に表現したか、又は熱の対流に伴う室内の乱流現象により発生する風の音を表したものであると思われる。

エ 前述の二つの特徴は、いずれについても、通常の日常生活において使用される音声又は日常において人為的又は自然に発生する雑音等の音（以下「生活音」という。）にはほとんどない特徴的なパターンであることが推測される。従って、これを活用して燃焼音の特徴をとらえて火災を感知するセンサーの開発の可能性が認められるようになった。

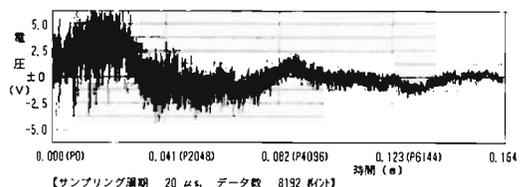


図3 クリブ燃焼音の高周波の時間波形

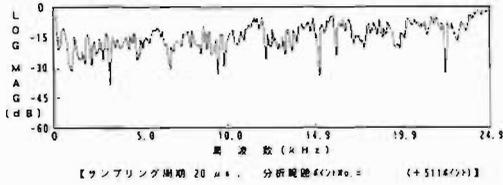


図4 クリブ燃焼音の高周波の周波数スペクトル

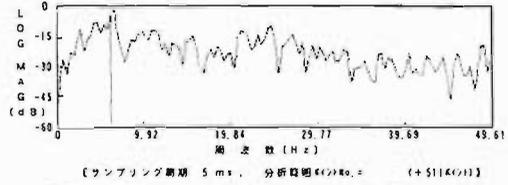


図10 段ボール襖燃焼音の周波数スペクトル

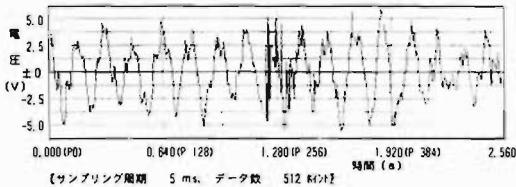


図5 クリブ燃焼音の低周波の時間波形

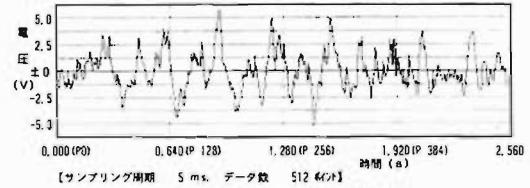


図11 紙燃焼音の時間波形

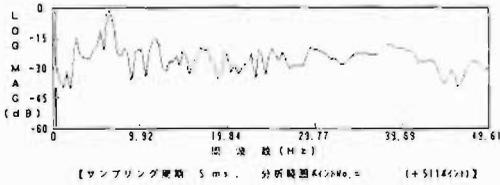


図6 クリブ燃焼音の低周波の周波数スペクトル

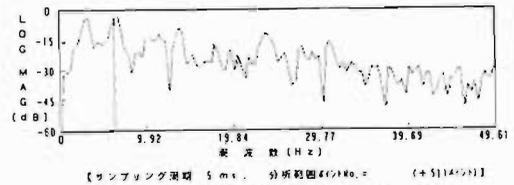


図12 紙燃焼音の周波数スペクトル

(2) 分析手法について

燃焼音を解析する場合、まず燃焼のメカニズムあるいは分子レベルでの音の発生メカニズムを解明していくことから始めることが本来の方法であろうが、時間的、物理的な制約から実際は困難ではあるため、本論では、実際に燃焼時に発生する音をマクロ的に捕らえ、一般的な解析手法に基づいて進めていくこととする。

ア 一般的に音の分析方法としては、最も代表的なものとして、時間波形を周波数領域に変換したスペクトルによる分析（以下「周波数分析」という。）がある。

イ 周波数分析の方法としては、サンプリング周期を細かくして短い時間に対して分析する方法と、サンプリング周期を長くとり、ある一定の範囲全体に対して分析する方法とがあり、前者は高周波域を調べる場合に、また後者は、比較的低周波域を調べる場合に用いることが多い。

ウ 燃焼音を分析する場合の手法としては、一つには、前(1)、アに述べたとおり、クリブを燃焼した場合等に発生する「パチッ」という音に含まれる高い周波数成分をみるため、ご

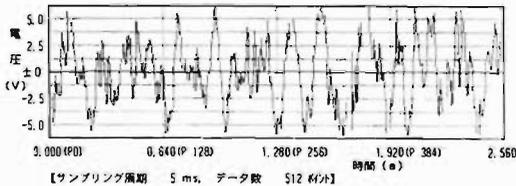


図7 和襖燃焼音の時間波形

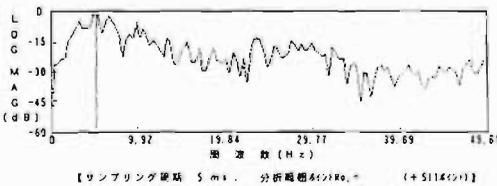


図8 和襖燃焼音の周波数スペクトル

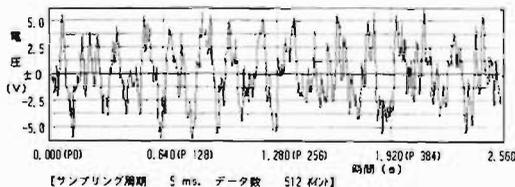
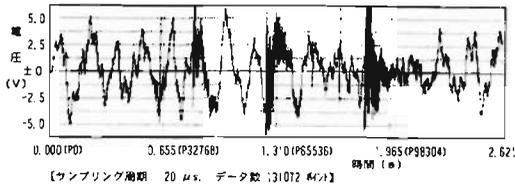
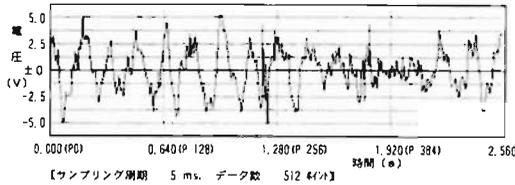


図9 段ボール襖燃焼音の時間波形

く短時間の範囲に発生している波形をサンプルとして抽出する方法がある。

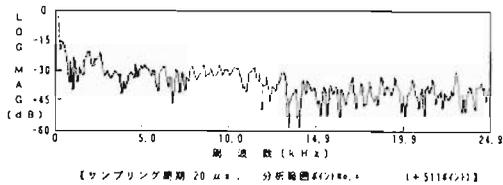


(1) 波形1 (サンプリング: 20 $\mu$ s、131072ポイント)

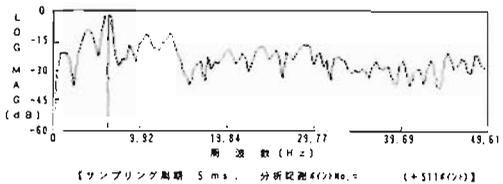


(2) 波形2 (サンプリング: 5 ms、512ポイント)

図13 同一時間において、サンプリング周期を変えた場合の時間波形の相違



(1) 波形1 (高周波域) のスペクトル



(2) 波形2 (低周波域) のスペクトル

図14 周波数分析の結果

エ 分析のためのもう一つのサンプルの抽出方法は、「音のエンベロープ (全体の形)」をとらえる方法である。例えば、燃焼音の場合、「パチパチ」という音の発生周期を平均化することにより標準的な燃焼音を仮想して一つのサンプルとするものである。これは、前(1)、イに述べたとおり、比較的長い時間内に発生する空気の圧力変動等を見る場合に有効であるといえる。

オ 燃焼音の分析においては、前述のとおり高周波域及び低周波域のいずれについても見る

必要があることから、周波数分析におけるサンプリング周期の取り方についてはそれらの両方が必要であると思われる。(図13,図14)

カ 周波数分析の他に時間領域のまま分析する方法もある。燃焼音のうち、特にクリブが燃焼した場合に発生する音については、時間波形をみるだけで、ある程度の特徴が存在することがわかり、例えば火災感知装置へ活用する場合には、この時間波形の信号を活用する方法も考えられる。

しかし、周波数領域又は時間領域のどちらによるべきかは、データを多く収集してから決めるべきである。

キ 一般的に、分析を行うに十分なデータを得るために必要な実験回数は、何らかの特徴付けられるような結果が得られれば数回でよい。

しかし、場所等の条件によりパターンが変わるような場合には、数多くの回数が必要となるであろう。

ク この意味から、燃焼実験の際の燃焼供試体は、クリブなどに限定することなく、ふすま、紙類などできるだけ多く、かつ、条件を変えてデータを収集する必要があると思われる。今後の課題として、いろいろな方向にマイクを設置して収録し、データを蓄積していくこととしたい。

### (3) 燃焼音と生活音との判別方法について

燃焼音の周波数分析を行う目的は、火災時に発生する音をとらえて火災信号を発する新しい火災感知装置を開発するところにあるが、その場合、仮に火災時の燃焼音をとらえることができるようになったとしても、燃焼音以外の擬似的な音に感知するものであってはならないことはいうまでもない。

そこで、火災時の燃焼音と平常時に発生する生活音とを分離することによる真火災の判別処理をいかに行うかが、火災検出及び誤作動防止策において最大の問題となるところである。以下に、その具体的な方策について検討することとする。

ア 燃焼音は、火災時であるが故に「異常」であるということを前提に、日常と違う点を見つけて第一に重要であると考え。この「異常」状態を何を材料に判断するかが一

つの問題となるところである。

イ 通常、人間の場合は燃焼音と生活音を容易に区別し、また、同じ燃焼音においても、例えば、木材が燃えたときと紙が燃えたときの区別がある程度できる。

しかし現段階では、機械にそれを正確に判断させることができるようにするためには、それらの音の性質をパターン化することが必要であり、技術的に困難な部分が多い。

ウ 一つの方法として、火災感知装置に、人工知能としてCPUを組み込むことでかなり高度な処理が可能になり、人間とある程度同じ認識機構を備えさせることができるようになることが考えられるが、ここでは、CPUの搭載による判断以前に、まず基本的な音の認識方法について検討する必要がある。

エ 具体的に、燃焼音の中に含まれるいろいろな周波数域の成分を、次のように、「可聴域」、「超音波域」及び「超低周波域」の3つに分けて、それぞれについて生活音との比較検討を行うこととする。(図15)

#### (ア) 「可聴域」の場合

可聴域の成分から火災を判断しようとする場合は、日常あるいは火災時に発生する個々の音を対象に分析するのみでは、生活雑音との区別が困難であるため、ある範囲の一定時間内に存在する音のエンベロップにより、その周波数成分のレベルとその発生頻度をもって判断するような機構にすべきである。

しかし、実際の生活音にはさまざまなものがあり、仮に、その中から火災特有な音の性質をとらえることができた場合でも、擬似音(例えば、テレビ等で火災の音が流れた場合)に対しても対策を講じる必要がある、こうなるとかなり大掛かりな仕組みが必要となるため、現実には厳しいと思われる。

#### (イ) 「超音波域」の場合

周波数が20kHzを超える超音波域の成分の活用の可能性については、この領域は生活音にはあまり存在しない成分であり比較的有効と思われる。実験の結果によれば、クリブの燃焼音の場合にそういう成分が多く含まれていることがある程度わかったが、例えば、ふすま等を燃焼させた場合には当該成分は殆ど

発生しないなど、すべての燃焼現象に対応できない場合がある。

また、生活音の中には同じような超高周波域の成分をもったものがある可能性もあるため、それらを抽出して燃焼音と区別できるかどうかの確認実験も今後行っていく必要がある。

#### (ウ) 「超低周波域」の場合

この成分も生活音には少ないと思われる。燃焼音の中のこの成分は、主として燃焼時の炎のゆらぎに伴って発生するものと推定され炎の熱がゆらぐたびに室内空気にゆっくりとした圧力変動が生じ、これが周波数にしてわずか数Hzという音としてとらえられているものと考えられる。そして、これは、どんな燃焼現象においても存在するということが、今回の実験である程度確かめられ、これを活用する方策が最も有効であると思われる。

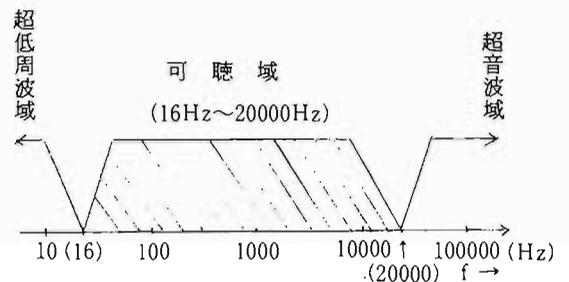


図15 各帯域の区分

ただし、生活音においても、同様の圧力変動が存在する場合(例えば、遠くの部屋のドアの開け閉めによって発生する微小かつゆっくりとした圧力変動又は風による圧力変動(いわゆる風の音とは異なるもの)等)があり、これによって圧力センサーが感知するようなこともあり得る。

これらの問題を解決するための方策としては、この圧力変動を熱現象に伴うものものとして複合的に処理する等の措置が必要であろう。

オ 将来的に火災感知装置の中に組み込む火災センサーとして、どの帯域を利用したものが有効であるかという点については、前項で述べたように、超低周波域が望ましいということになるが、実際に実用面を考慮した場合、可聴域、超音波域又は超低周波域のうちのど

- れか一つの要素をとらえて作動するものよりも、それぞれを複合させた場合の方が信頼性は高まる。この場合は、可聴域を除いた残り2つを複合させるのが現実的であるといえる。
- カ 燃焼音の特性が把握できた次の段階として必要なことは、擬似音との分離である。仮に燃焼音を確実にとらえる装置が完成できたとしても、先に述べたように、例えば、「火事の音」を録音したものがスピーカーから流れたときに、それに反応するようでは問題がある。
- キ 前項で述べた点を解決しようとする場合、現時点での技術レベルでは、音のみでそれを達成するのは困難であるといわれる。
- 従って、実用化に際しては、音以外の要素、即ち、従来から存在する熱や煙又は炎等の感知信号とを組み合わせることによる複合装置とすることが最も現実的な手段として考えられる。
- ク また、一般的に音は、その立ち上がりをとらえることが難しいため、キッカケを別の要素でとらえるようにした方がより性能を高めることができる。具体的には、熱と複合させる場合について考えれば、まず温度の高いところを見つけて、燃焼音の発生の可能性が高いと判断し、その方向に感知装置の指向性を持たせ又は重み付けを行い、音をとらえようとするものである。しかし、この場合でも、例えば、調理時の熱と火災の熱との認識の区別の問題の解決が必要となるが、いずれにしても、そういう意味においても、音以外の要素との複合の必要性が認められるところである。
- ケ 一般的な従来の火災感知装置の誤報対策の方法としては、誤報の実態を調査してその要因をつかみ、ターゲットを絞って、実際にその要因に近い条件で作動するかしないかの検証実験を行う等して改良点を見出していくのであろうが、「音」については、現時点ではハードが存在せず実績が全くないので、何が音の感知装置の誤認要因となり得るかがわからない段階である。
- コ この他に、参考として、環境の中におけるバックグラウンドノイズと、日常発生する生活音を含めた火災時の燃焼音との関係を検討す

る方法がある。これは、長時間測定（1日中、あるいは季節ごと、できれば通年）を行うことにより、常時存在するバックグラウンドノイズと一時的又は突発的に発生する燃焼音との関係を見出すことによって、生活音と燃焼音との分離方策を確立しようとする手法であり、これも重要であると考えられる。

#### (4) 燃焼音を検出するセンサーについて

燃焼音をとらえるセンサーを開発するにあたって、これまで燃焼音の特性を把握するための分析方法並びに燃焼音と生活音との分離方策等について述べてきたが、それらを踏まえて、実際にセンサーを製作する場合において、どのような材料をどのように利用していくかについて考えられるところを述べてみたい。

ア 燃焼音の中で、とりわけクリブ等の木材を燃焼させた場合に発生する「パチパチ」という音については、時間領域だけで特徴をもっていることがわかる。また、その波形を微分した場合にその特徴は更に鮮明になる。

したがって、この音をとらえるためのハードを作る場合には、周波数スペクトルではなく時間波形を利用して行う方法も有効であると思われる。

イ 具体的な手法としては、例えば、入力信号を微分回路(時定数 $0.1\text{ms}=100\text{pF}\times 1\text{M}\Omega$ )に通してトリガー信号として取り出し、それによってある一定の範囲において発生したパルス数を数えること等により、その特徴をとらえて火災と判断するものである。

ウ このように、時間領域の波形からその立ち上がりの回数を取り出すための回路とセンサーとの組み合わせという簡単なハードによって一つの装置を作ることができる。しかし、新聞紙、カーテンなど木材と異なる燃焼音を感知する装置を製作することについては、現段階ではハードの制約から難しいと思われる。

エ 音をとらえるセンサーとしては、「マイク」を使用することが考えられる。マイクは、他のセンサーに比較すれば取扱いやすいセンサーであり、通常コンデンサーマイクを使用する。これ一つであらゆる周波数域の音を捕捉することができ、そこから取り出された出

力信号の中で、必要な部分を回路的に処理することによって、いろいろ目的に応じた活用ができる。

オ 市販されている通常のマイク(標準マイク)は、0.1Hz~20kHzの非常に幅広い範囲の音をとることができるが、実際に使用する場合にはアンプに通してフィルターをかけ可聴域外の音をカットすることによりノイズを排除するようにしている。また、高周波用(超音波用)の特殊マイクの場合は、それ自体の周波数域の範囲は狭い。

カ マイクの精度については、いろいろなものがあるが、火災感知装置に用いられるマイクの場合は、例えば、何mVが何Paに相当するかというような精密さまでは要求されないと考える。

キ 火災感知装置の開発において、将来実験用又は試作機用として組み込むマイクについては、標準マイクを使用するのではなく、商品化の際に実用機に実際に使用されるマイクを使うことが望ましい。ただし、当該マイクの特長把握においては標準マイクを使用するものとする。

以上、火災感知装置のハードに関して基本的な考え方を述べた。

(5) 燃焼音の活用に関してのその他の手法について

ア 音を処理する場合に、今まで述べてきたような燃焼音の時間波形や周波数スペクトラム等から信号を処理する手法の他に、「アコースティック・エミッション(acoustic emission)：音響放射」(以下「AE」という。)といわれる手法がある。

これは、物が破壊する直前に非常に高い周波数をもった微小な音が発生するといわれているが、これをとらえて、そこから得られる危険情報をもとに、必要な措置をとることで、未然に原子炉、ダム等の破壊事故を防止する場合等に活用される「故障診断」の一つの手法である。

イ このAEを火災感知装置に応用できる可能性がある。故障診断に例えれば、燃焼する前に、分子レベルで発する音をとらえるということ、画期的な手法といえる。

ウ 燃焼現象に係るAEについては過去に研究されているかを確認する必要があるが、分子レベルで燃焼を研究した例は今までにはないと思われる。例えば、「パチパチ」という音の発生のメカニズムの解明は困難が予想されることから、別の観点から研究することも必要であり、その意味でAE的センスで検討することも意義がある。

エ AEを活用した火災感知装置を開発する場合には、燃焼時において物質に高いテンションが掛かった状態から発する音をとらえることとなるので、その前段階として、高い周波数域での分析を行うことが必要となる。

オ AEの場合についても、生活音との分離の問題は共通であり、これが解決できれば、その火災感知装置への応用も可能と思われる。

カ その他として、「音源探査」による故障発見方法の研究も行われている。音源探査の研究は、ある程度実績があるので、今後これを応用して火源を特定することにより効果的な初期消火手段が確立されることも期待される。

## 8. ま と め

燃焼音には、ほとんどあらゆる周波数帯の成分を含んでいるが、この燃焼音を火災感知装置に活用するための方策を見出すためには、いずれの周波数帯においても、生活音にない成分をとらえることが必要である。

可聴域にも生活音にない成分が存在する可能性はあるが、他の雑音が多いため、これらから、当該成分を切り離すのは困難である。したがって、比較的雑音の存在が少ない超音波域及び超低周波域において当該成分をとらえ、なおかつ、これらを複合して感知する方法が最も有効であるということが考えられる。今後、これを実現するハードの開発について検討を進めていく予定である。

## 9. 今後の課題

以上のように、今回は、燃焼音に含まれる特徴の一部を確認することができたが、今後さらに深く燃焼と音との係わりを解明するための実験及び研究項目として、次のものが考えられる。

- (1) 超低周波域の成分の特性把握
- (2) 炎の変化(ゆらぎ)と圧力変動の相関関係の

#### 有無の確認

- (3) 熱と圧力変動（音）との関係の把握（熱の発生→物質の破壊→音の発生の一連のメカニズムの解明）
- (4) 日常生活における燃焼によるもの以外の破壊音との分離方法の検討
- (5) 火災荷重及び開口部の設定条件の違いにおけるマイクの出力（音の発生）の違いの確認
- (6) センサーの配置と感知時期及び感知場所の関係の把握

本報告にあたり、実験及び測定分析に際し、ご指導頂いた法政大学工学部の渡辺嘉二郎教授、早稲田大学理工学研究所の山崎芳男教授及び株式会社プリモの前川泰夫氏に対し、厚くお礼申し上げます。

#### （参考文献）

- (1) 「新訂 騒音と振動のシステム計測」北村恒二  
コロナ社
- (2) 「騒音・振動」安全工学協会 海文堂出版株式会社
- (3) 「音と音波」小橋 豊 裳華房
- (4) 「音声の合成と認識」城j「健一 オーム社
- (5) 「フーリエの冒険」トランスナショナルカレッジ  
ジオブックス編 ヒッポファミリークラブ