

次世代型携帯警報器の研究開発

稲村武敏*, 藤田栄一郎**, 加藤俊之***

概要

現在使われている携帯警報器は、消防活動中の静止状態と事故とを区別できずに誤報を発しやすい。

このことから、誤報原因の分析、活動中の隊員の身体に発生する加速度及び身体傾斜角度の測定と分析、事故発生 の把握に必要な要素の検討を行い、加速度、身体傾斜角度、単独行動、活動場所の明暗を総合的に判断して異常判定を行う手法を開発した。また、この手法による試作機を製作して実験を行い、開発した手法の有効性を検証した。

1 はじめに

災害は発生 の都度様相が異なり、そこに潜む危険性も災害ごとに異なる。部隊活動の指揮に当る隊長は、災害早期鎮圧への指揮活動に加え、いつ、どのように発生するか予測できない事故に対し隊員の安全管理に多大な労力を強いられている。

そのため、災害現場で活動する隊員について身体動作が無い状態が約 25~30 秒間継続した場合に自動的に音響警報を発する携帯警報器(以下「現用機」という。)を装着させ、これを安全管理の一助としてきた。

しかし、現用機は災害活動中などに不必要な警報(以下「誤報」という。)が発生しやすく、警報が聞こえても誤報と決めつける傾向があり、事故への対応の遅れが懸念される場所である。

2 誤報が生じる原因

(1) 現用機の機能から生じる問題点

ア センサーに起因するもの

現用機のセンサーは金属球の転がりを検出するものとおもりの振動を検出するものに大別される。これらは振動の強さとセンサーからの出力信号の大きさが比例関係に無く、身体の動きを精密に把握するには性能が十分ではない。これらのセンサーの構造概要と正弦波振動(図1)を加えた場合の出力信号波形は(7)及び(4)のとおりである。

(7) 金属球を使用したセンサー

円筒容器内に金属球を封入したものであり、圧電素子により金属球の転がる振動を検出するものと、図2のように多数の電気接点を配置し金属球の転がりに伴う導通で発生するパルス状の信号を検出するものがある。この

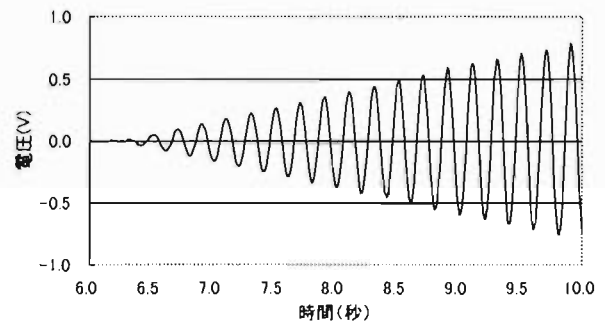


図1 現用機センサーに加えた振動波形
(ピエゾ抵抗型加速度センサーにて測定)

センサーに、振幅が徐々に増大する 5Hz の正弦波振動を加えたところ図3の出力波形となった。ある程度大きい加速度に達するまでは、全く信号が出力されないことが分かる。

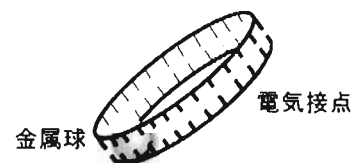


図2 金属球を使用した振動センサー

(4) おもりとスプリングを使用したセンサー

図4のようにおもりを取り付けた軸を歪みゲージ及びスプリングで支え、軸が振動した際に歪みゲージの電気抵抗の変化で振動を検出するものである。このセンサーに前(7)と同様の振動を加えたところ図5の出力波形となった。目的の振動波形がスプリングの共振によって大きく影響を受けていることが分かる。なお、周波数分析の結果、16Hz に明瞭なスプリングの共振峰を認めた。

* 第一研究室、** 品川消防署、*** 管理課

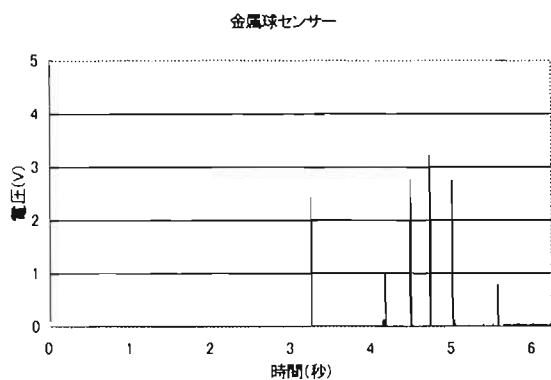


図3 金属球を使用した振動センサーの出力波形の例

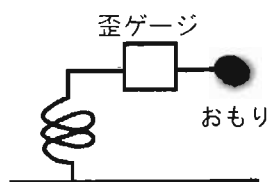


図4 おもりとスプリングを使用した振動センサー

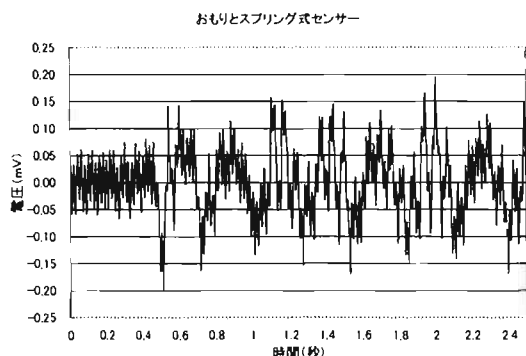


図5 おもりとスプリングを使用した振動センサーの出力波形の例

以上の結果から、金属球を使用したセンサーは振動の強さがある値を超えないと振動の有無を全く検出できず、おもりとスプリングを使用したセンサーはスプリングによる共振の影響を強く受けて、振動を正しく検出することが困難であることが分かる。

イ 異常判定の条件に起因するもの

現用機は静止状態の継続のみで異常の判定を行っているが、消防活動中には事故以外にも異常判定の設定時間と同等の長さの静止状態が継続することがあり、静止状態の継続だけで異常を判定するのは十分でない。

(2) 消防活動の特性から生じる問題

火災への出動から鎮火までの消防活動の例を図6に示す。この中で「静止1」は静止を継続する必要がある活動、「静止2」は身体の大きな動作が伴わないと考えられ

る活動であり、前(1)の問題点のために誤報が生じるおそれがある。



図6 消防活動と静止状態の例

3 消防隊員の身体に発生する加速度等測定実験

加速度から身体の動作を把握することを目的として、消防隊員の身体に加速度センサー等を装着し、消防活動中の加速度を測定した。

また、隊員の姿勢を把握するため、傾斜スイッチとビデオ撮影で腰部の傾斜角度を測定した。

(1) 活動内容

活動の頻度が高いもの²⁾及び誤報が多いものとして表1のとおりとした。測定状況の例を写真1に掲げる。

(2) センサー等の装着

圧電型及びピエゾ抵抗型3軸加速度センサー及び傾斜スイッチ(30°, 45°, 60°)を一つの筐体に組み込み、被験者の右腰部ベルトへ装着した。

(3) 被験者及び測定方法

被験者は28歳~52歳男性12名であり、各被験者に活動内容①~⑩の活動を項目ごとに5回ずつ行わせ、記録計(NEC三栄RA1200)にて測定した。

(4) 結果

ア 加速度の大きさと周波数成分

活動内容に応じた加速度の大きさ及び主な周波数成分を表1に、この結果における加速度の大きさ及び周波数成分の分布概要を図7に示す。また、それぞれの活動において身体に発生した加速度の波形及びFFT(高速フーリエ変換)による周波数成分分析結果の例を図8~15に掲げる。周波数成分分析結果の各図における縦軸はパワースペクトルであり、振動をさまざまな周波数の正弦波に分解した場合のそれぞれの正弦波の振幅を表す。周波数分析の結果、図7及び8~15に見られるように身体に生じる加速度の周波数成分は5Hz以下が多く、「⑨放水」のように5Hzより高い周波数成分が強い活動内容でも、5Hz以下の成分は出現していた。

イ 身体傾斜角度(垂直からの角度)

45°を超えることは頻繁にあり、60°以上は少なかった。60°以上が出現した活動内容は検索活動及び救助活動である。

4 開発への検討

事前調査において、異常判定の手法として生理学的な手法である脈拍や血中酸素飽和度 (SPO₂) 測定、空気呼吸器ボンベの空気残圧測定等の検討・試作・実験を行った。しかし、生理学的な手法は有効性は認められるものの測定装置の小型化が困難かつ高額なこと、空気ボンベ残圧測定は空気残量に関連した事象以外の異常把握がで

きないことから、次の要素を総合して異常の判定を行うこととした。

- ① 活動しているか。(主要素)
- ② 倒れているか。(補助要素)
- ③ 単独行動か。(補助要素)
- ④ 活動場所が暗所か。(補助要素)

表 1 活動内容及び加速度測定結果 (加速度値については、単発的なものを除外して記載した。)

活動内容	加速度値(m/sec ²)	主な周波数成分 (Hz)	顕著な軸	出現状況等の特徴
① ホースカーえい行 (直線、屈曲 50m)	6.0~10 以上 (直線時) 2.0~5.0 (屈曲時)	3.6 1.8	—	常時
② 資機材搬送 (発電機、ホース等)	3.0~10 以上	2.6 4.2	—	常時
③ 検索活動	1.0~8.0	0.7, 1.4	Y,Z 軸	X 軸は他の 1/2 程度の値
④ 救助活動 (40kg 重量物の移動)	5.0~8.0	2.5	—	下肢の動きに伴い約 0.5 秒間隔で出現
⑤ はしご確保	0.2~0.8 (登梯者なし) 0.8~1.4 (登梯者あり)	9.0 2.2	—	上方確認等頭部のみの動作では変化なし。
⑥ はしご昇降	6.0~9.0 (登梯中) 3.0~6.0 (下降中)	1.6 0.8	Z 軸	個人差はあるが Z 軸に大きい値が出現する頻度が高い。
⑦ 消防車乗車 (構内道路)	1.0~2.0 (定常走行中) 0.3~0.7 (停車中)	3.6 15.0	—	発車時は X、Y 軸に大きい値 (3~5 m/sec ²) が出現
⑧ 静止 (立位、うつ伏せ等)	0.2~0.6	1.0 1.4	—	頻度は低いが最大値 1.0m/sec ² に達することがあった。
⑨ 放水 (圧力 1.5 及び 0.5Mpa)	1.0~1.8 (圧力 1.5Mpa) 0.3~0.9 (圧力 0.5Mpa)	17.2	—	スペクトルが 0.7Hz~20Hz の範囲でほぼ均等に出現
⑩ 消防車乗車 (一般道路)	1.0~2.5 (定常走行中)	⑦と同じ	—	⑦と同じ

注) 軸の方向は、身体を円柱とした場合、X 軸は水平断面 (円) の接線、Y 軸は法線、Z 軸は円柱軸の方向である。

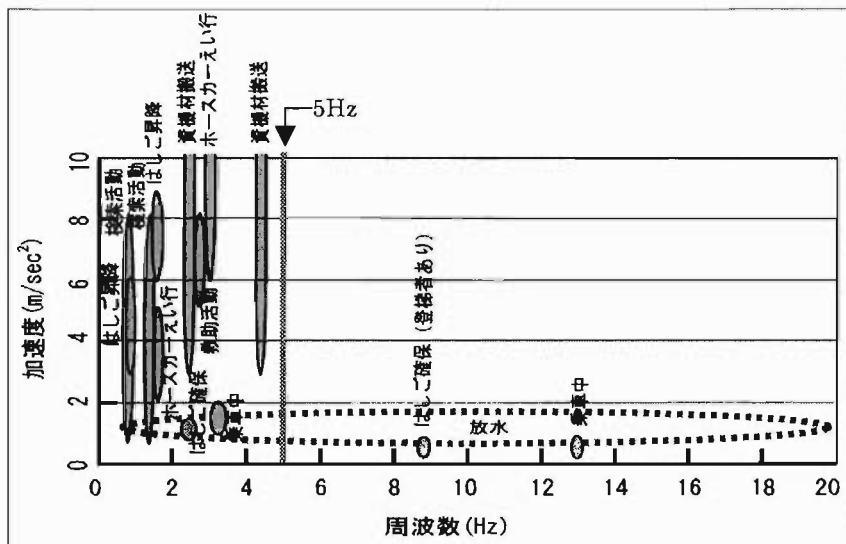


図 7 消防活動において身体に発生する加速度の大きさと周波数成分の分布概要



(ホースカーえい行) (救助) (はしご確保) (放水) (資機材搬送)

写真1 加速度、身体傾斜測定状況の例

ホースカーえい行

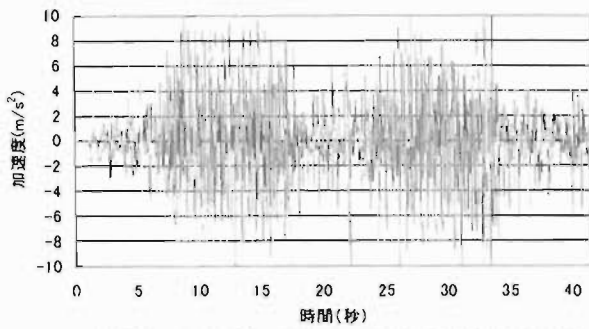


図8-1 ホースカーえい行の加速度波形

ホースカーえい行

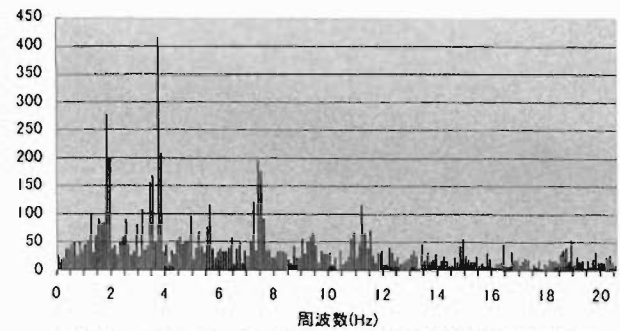


図8-2 ホースカーえい行の加速度周波数成分

資機材搬送

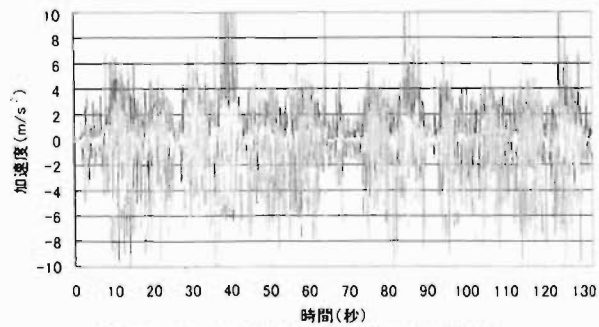


図9-1 資機材搬送の加速度波形

資機材搬送

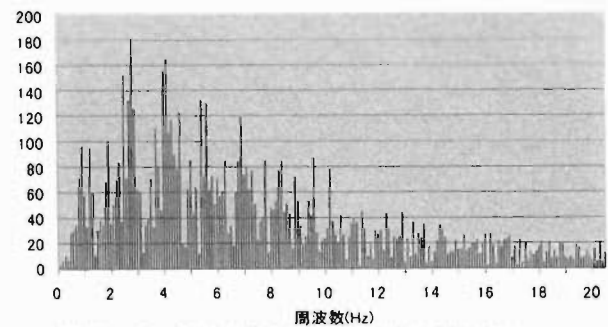


図9-2 資機材搬送の加速度周波数成分

救助

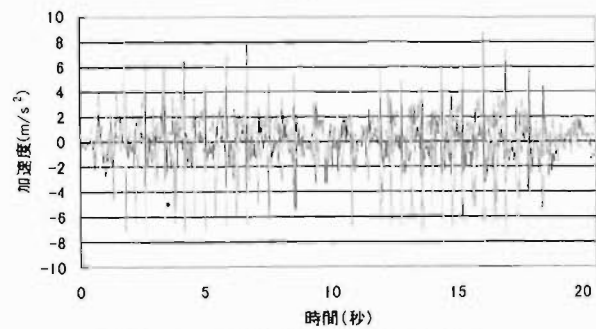


図10-1 救助活動の加速度波形

救助

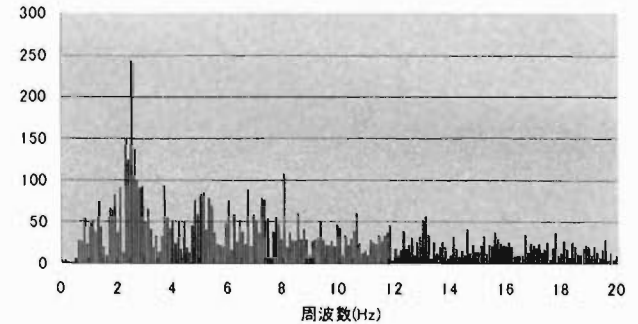


図10-2 救助活動の加速度周波数成分

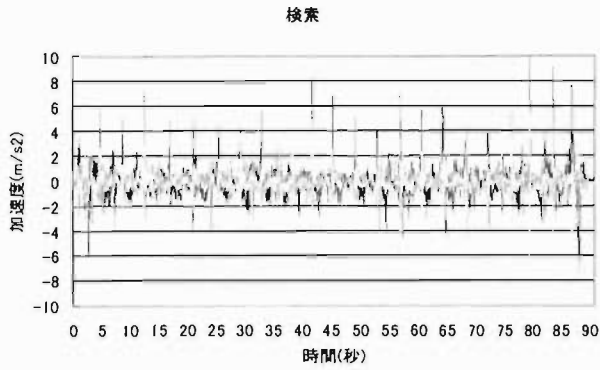


図 11-1 検索活動の加速度波形

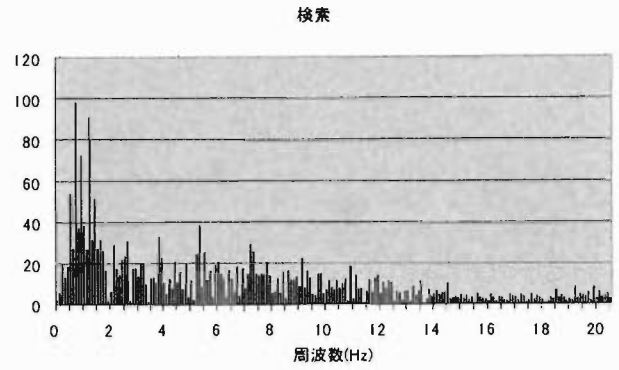


図 11-2 検索活動の加速度周波数成分

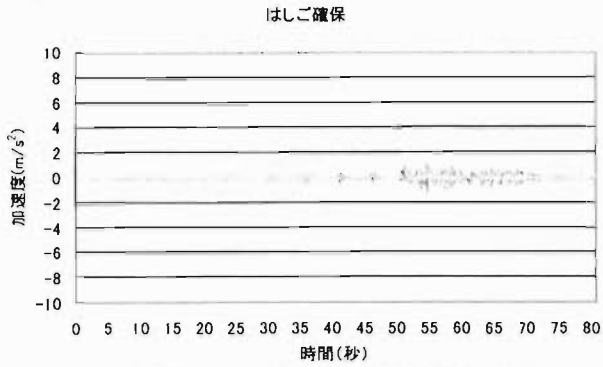


図 12-1 はしご確保の加速度波形

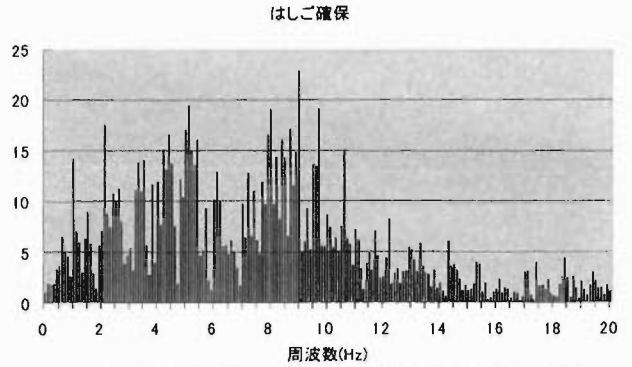


図 12-2 はしご確保の加速度周波数成分

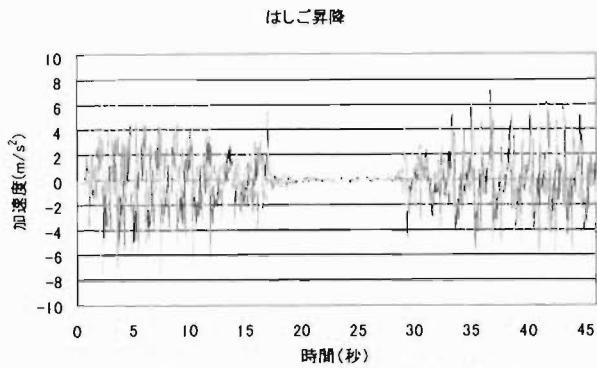


図 13-1 はしご昇降の加速度波形

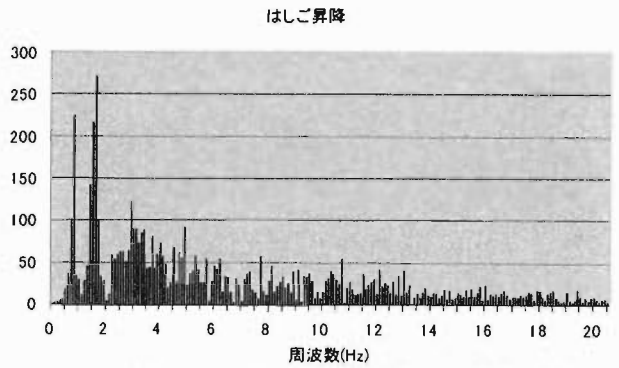


図 13-2 はしご昇降の加速度周波数成分

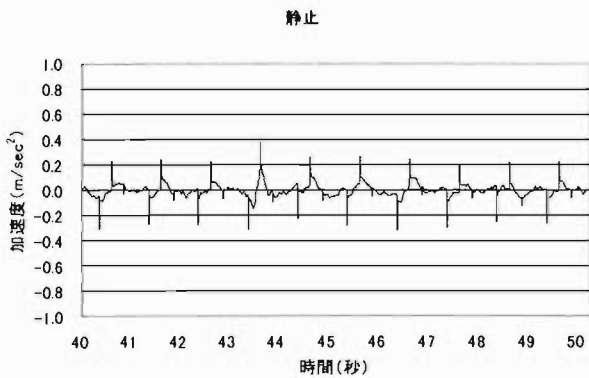


図 14-1 静止の加速度波形

(注) 図 14-1 は他のグラフと X、Y 軸のスケールが異なっている。

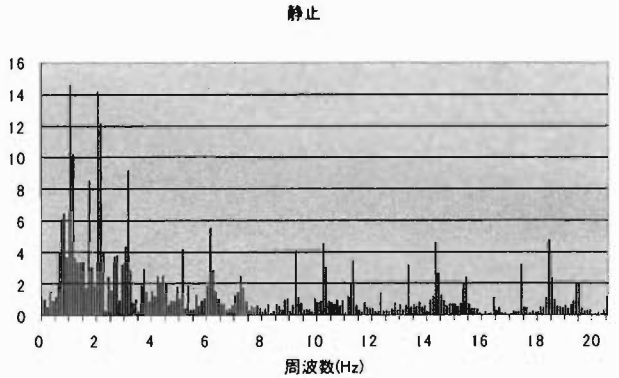


図 14-2 静止の加速度周波数成分

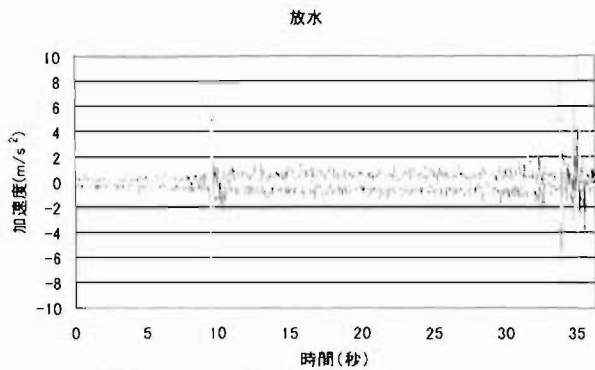


図 15-1 放水の加速度波形

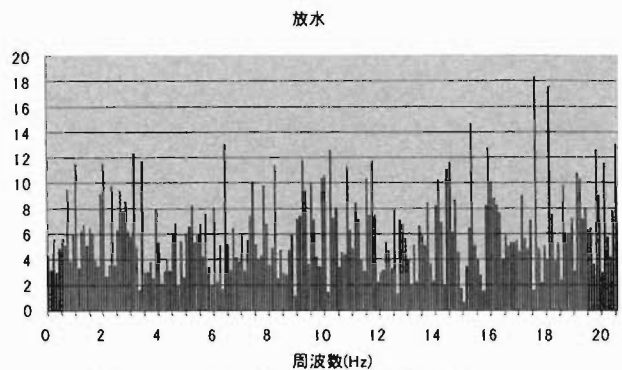


図 15-2 放水の加速度周波数成分

5 技術的な解決過程

(1) 消防隊員の動作の検出

ア センサーの選択

活動の有無を加速度によって把握することとした。

加速度センサーには圧電型、 piezo抵抗型、静電容量型の3種類があるが、いずれも小型で精密測定が可能¹⁾とされている。

イ 加速度の判定値

前3の加速度測定実験の結果から、 1.0m/sec^2 未滿を静止、 2.0m/sec^2 以上を活動中として扱うこととし、 $1.0\text{m/sec}^2 \sim 2.0\text{m/sec}^2$ は加速度だけでは判定が困難な領域のため、補助要素を加味することとした。

ウ 身体に発生する加速度の選別

(7) 3軸検出と1軸検出

実験の結果、身体にセンサーを装着した場合どの方向の身体動作でも加速度変化は3軸全てに出現した。従って、本用途では3軸のいずれか1軸の検出でも3軸検出と遜色が無い効果が得られるものと考えられる。

(1) 身体動作による加速度の周波数

周波数分析結果から身体の動作による加速度スペクトルが集中している周波数帯域を抽出するために、信号処理を行うこととした。

① 加速度センサー素子は一般的に 1kHz 以上の高い周波数に共振点を有し、共振点近傍で高い感度を有するため、携帯警報器と衣服や消防資機材との接触によるノイズの影響を受けて身体に発生する加速度の計測が不正確になるおそれがあり、フィルターにより身体に発生する加速度のみを抽出する必要がある。

② 建物内では商用電源 (50Hz) の誘導ノイズがあり、加速度センサーの特性に合わせた高入力インピーダンスの増幅器はその誘導ノイズの影響を強く受けることが懸念され、増幅器から出力される信号に含まれる誘導ノイズが判定回路へ達しないよう、商用電源の周波数である 50Hz を十分に抑圧できるフィルターが必要である。

③ ローパスフィルターの遮断周波数の検討

前3の結果から、身体動作による加速度スペクトルが集中している周波数帯域を抽出するためには、ローパスフィルターの遮断周波数 (レベルが -3dB となる周波数)

を 5Hz に設定することが適切である。

④ ローパスフィルターの減衰特性の検討

加速度センサー素子の、加速度の値に対する出力信号の大きさの精度は、一般的には 10% (-20dB) 程度である。従って、加速度センサーの精度を最大限生かすには目的信号以外のノイズの混入割合を -20dB 以下に抑制する信号処理が必要である。

ローパスフィルターの減衰特性は一般に $-n\text{dB/oct}$ (n は6の倍数) と表記される。なお、 1oct (オクターブ) とは2倍の周波数関係を指す。

遮断周波数を f_0 、検討する周波数を f 、 f_0 と f の周波数比を oct 数 y で表し、 y を求めると

$$a^y = x \quad \text{のとき} \quad y = \log_a x \quad \cdots \text{①} \quad \text{であるから対数}$$

の底を2、 x を周波数の比 $\frac{f}{f_0}$ として①式は

$$y = \log_2 \left(\frac{f}{f_0} \right) = \frac{\log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right)}{\log_{10} 2} \quad \text{と書ける。}$$

従って遮断周波数が f_0 、減衰特性が $-n\text{dB/oct}$ の場合の、検討周波数 f における減衰量 N は

$$N = -n \times y = -n \times \frac{\log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right)}{\log_{10} 2} \quad \text{となる。}$$

ここで $f_0 = 5$ (Hz)、 $f = 50$ (Hz)、減衰特性を -6dB/oct とすると、 f における減衰量 N は

$$N = -6 \times \frac{\log_{10} 10}{\log_{10} 2} = -19.9 \quad (\text{dB}) \quad \text{となって、必要な減衰量}$$

(-20dB) に達していない。

しかし同じ遮断周波数でも減衰特性が -12dB/oct の場合は 50Hz で -39.9dB となり、十分な減衰となる。

なお 50Hz を超える高い周波数ではさらに大きな減衰量が得られる。

⑤ フィルターの伝達特性（フィルター特性）の検討
理想的なフィルターは、通過帯域が平坦であり、遮断帯域は信号を完全に遮断する特性である（図 16）。しかし実際にはこのようなフィルター回路は存在せず、用途に応じて各種のフィルター回路が使われている。

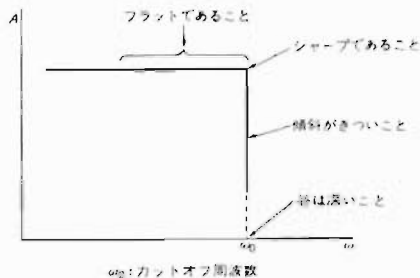


図 16 理想的なフィルター特性³⁾

電子回路で実用的に使われているフィルターは次の近似により解析・設計が行われており、それぞれの特徴は次のとおりである³⁾。（図 17）

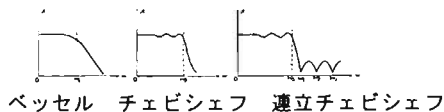
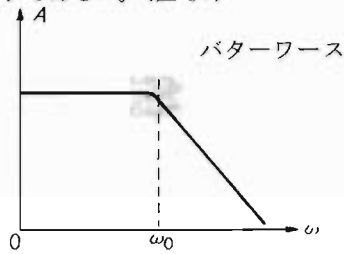


図 17 フィルター特性の比較

- バターワース特性：ある程度の急峻な減衰特性を有するが、信号の群遅延特性（周波数によって位相変化が異なる現象）がやや悪い。
- ベッセル特性：遮断特性は急峻ではないが、信号の群遅延特性が良好である。
- チェビシェフ特性：遮断特性は極めて急峻だが、群遅延特性が悪く、かつ、通過帯域にリップル（山谷）が生じる。
- 上記の組み合わせ（連立チェビシェフ、バターワース・チェビシェフなど）：それぞれの回路の特徴を活かし、用途に応じて組み合わせるものである。

本用途としては、センサーの固有共振周波数の抑圧については周波数が 1kHz 以上と高いためにいずれのフィルター特性でも支障ないが、50Hz の商用電源ノイズに対しては周波数が人体の動作周波数に近いので、遮断特性の急峻性が求められる。このことから、ある程度急峻な遮断特性を有し、かつ、通過帯域内ではリップルが発生せずに入力電圧と出力電圧の比例関係が優れているバターワース特性が適していると考えられる。例として加

速度センサーが衣服と擦れながら振動した際の出力信号を -12dB/oct バターワース特性ローパスフィルターにより処理し、5Hz 以下の周波数成分のみを取り出した信号波形を図 18 に示す。

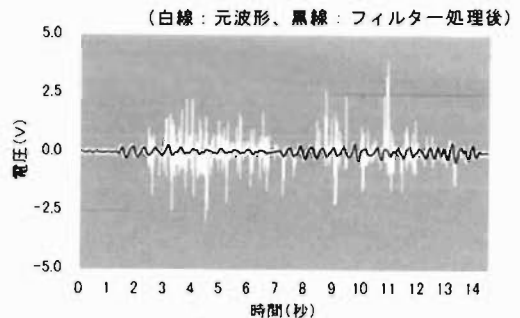


図 18 加速度センサーからの元波形とフィルター処理後の比較

(2) 補助的判断要素

身体に生じる加速度以外に、更に身体の異常検出を補助するものとして次の 3 項目について検討した。

ア 身体の傾斜

身体傾斜は事故を示唆する要素である。

傾斜角度については、実験中に 60° を超える状況がわずかにあった。しかし、さらに大きな値に設定した場合に倒れ方によっては設定値に達しないおそれがあるので判定値は 60° が妥当であると考えられ、 60° の傾斜スイッチを採用した。

イ 単独行動

災害現場での単独行動はそれ自体がすでに危険な状態であり、これを自動的に検出する機能（以下「単独行動センサー」という。）は安全対策に高い効果が期待できる。

単独行動センサーは微弱電波の送受信によるものとし、間欠的に送信を行い、送信時以外は受信を継続する。他機からの電波が判定値以上の強さで受信できれば他の隊員が近くに存在し、判定値に達しなくなった時点で単独行動と判定する。なお、単独行動とみなす距離は 5 m 以上とし、周波数は 315MHz 帯を採用した。

ウ 活動場所の明暗

暗所での危険性が高いことを考慮し、床方向の照度を測定して 10lx 未満を暗所と判定することとした。

(3) 加速度と補助要素の組み合わせ

身体傾斜と単独行動については、動作の有無を判断する加速度判定レベル（以下「しきい値」という。）の切り替えに用いることとした（表 2）。理由は、正常活動中は誤報を抑制し、事故が懸念される場合には確実に警報を発するためである。明暗については、暗さが直接的に事

表 2 しきい値の切替え（しきい値未満は静止と判定）

しきい値(m/sec ²)	1.0	1.5	2.0
傾斜 60° 以上	両方	いずれか	両方
単独行動	なし	が有り	有り

故を示唆するものではないことから、暗所かつ単独行動の場合に単独行動である旨の警報音を鳴動させる制御に用いることとした。

6 試作機

圧電型及び静電容量型加速度センサーを用いて2機種
の試作機を製作した。(写真2)

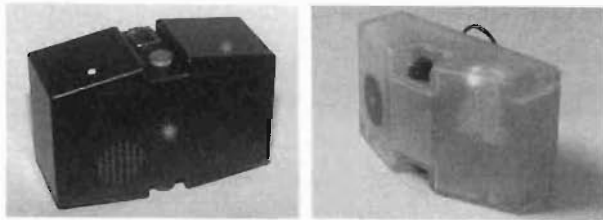


写真2 試作機

試作機は、検討した内容を盛り込んだことから、次の特徴がある。

- (1) 隊員の身体に発生する加速度、身体傾斜、単独行動、暗所活動を総合判断して異常判定を行う。
- (2) 身体動作により発生する加速度のみを抽出する信号処理を行っている。
- (3) 単独行動を監視する機能を有する。

7 試作機使用実験

携帯警報器に求められる性能は事故(異常)と正常活動の確実な判別であり、機器の動作としては次の2項目になるため、それぞれ実施した。

- ア 事故発生時に確実に警報を発する。
- イ 正常活動時には誤報を発しない。

(1) 被験者及び実験方法

被験者 29歳～52歳 男性5名 次の各項目について被験者1名あたり10回以上実施した。

- ア うつ伏せ及び仰向けの「静止」30秒間における警報発生
- イ 歩行、検索、はしご確保の「活動」30秒間における誤報の有無

(2) 結果

- ア 「静止」では全て警報を発した。
- イ 歩行、検索では誤報は発生しなかった。
- ウ はしご確保(5人×10回)では試作機Aが10回、Bが29回の誤報があった。これに対し、現用機の中には、はしご確保で40回の誤報が発生した機種がある。

なお、この実験では、予備警報が鳴動した場合に通常行っている携帯警報器に振動を与える等の回復操作は全く行わなかった。

8 まとめ

- (1) 隊員の異常を自動的に把握するには、身体の動作、身体傾斜角度、単独行動の有無、活動場所の明暗等複数の情報により総合判定する必要がある。

- (2) 隊員身体の動作の有無を調べるには、加速度を精密に測定できる加速度センサーを用いる必要がある。
- (3) 加速度センサーにより隊員の身体動作を把握する場合、身体動作による信号を抽出する信号処理を行う必要がある。
- (4) 現用機は事故が発生した後に警報するものであったが、単独行動監視機能を付加することにより、事故の予防効果が期待できる。

9 今後の課題

試作機が現用機より高い信頼性を有することを確認した。しかし、さらに高い信頼性を発揮できるよう、設定値の精査等を行うとともに、今回の試作機で設定した予備警報鳴動まで25秒及び予備警報から本警報まで5秒の静止時間について伸長する等の対策を検討したい。

隊員の活動に伴って身体に発生する加速度の周波数分析については、今回は身体動作による加速度成分抽出のためのフィルター設計資料として用いたが、周波数スペクトルとその強度の関係から動作を表す新たな特徴量を抽出する手法も研究されており⁴⁾、このような新たな手法の導入は今後の課題である。

開発した次世代型携帯警報器には今までに例の無い単独行動センサーを組み込んだ。このことにより、その電波を探索して早期の事故者発見を行うなど、今後の技術展開の可能性も生まれている。

10 おわりに

携帯警報器の直接の目的は、消防活動における隊員の安全対策である。

安全対策の確立により、職員一人ひとりが安心感に支えられ積極果敢な活動を行うことができれば、災害の早期鎮圧や逃げ遅れ者の救出などにも反映され、災害による人的・物的被害を軽減する効果を発揮するはずである。

消防職員として安全対策機器の更なる信頼性向上と普及を強く望むものである。

(参考文献)

- 1) T.業調査会編:センサ/計測モジュール活用技術百科、p113、1996年6月
- 2) 伊藤、正木、小原:消防隊員の体力管理に関する研究、東京消防庁消防科学研究所報36号、p98、平成11年9月
- 3) アナログIC活用ハンドブック:CQ出版社、P155、昭和62年1月
- 4) 鶴沼、宇佐美、野中:加速度センサを用いた人間の歩行動作の認識方法、電気学会論文誌A、平成10年3月

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A NEW TYPE “PASS”

Taketoshi INAMURA*, Eiichiro FUJITA**, Toshiyuki KATO***

Abstract

Firefighters stand still in a fire due to their operations, or the suffering of the damage caused by an on-scene accident.

The PASS(Personal Alert Safety Systems) in current use is unable to distinguish between them. Therefore, it often gives accidental/wrong alarms.

We developed the technique for correct judgment through the following study.

- 1 The analysis of accidental/wrong alarm causes.
- 2 The measurement of the acceleration which occurs to active firefighters
- 3 The measurement and analysis of the body inclining angle of an active firefighter

Also, we manufactured a prototype by this technique, and conducted tests with it. We confirmed that the developed technique was effective.

*First Laboratory **Shinagawa Fire Station ***Equipment section