

隊員安全管理システムの研究開発 (第5報)

稲村 武敏*、野村 敏幸**、藤田 栄一郎*

概 要

火災現場において消防隊員に発生した異常を正確に覚知することを目的として、隊員が装着し、正常に活動しているか否かを把握するための動態センサーについて、その精度向上に関する検討を行った。

動態センサーの素子として、圧電型加速度センサー、 piezo抵抗型加速度センサー、傾斜スイッチを用いて実験機を製作し、実験を通じて異常と判断すべき境界値を探ると共に、本用途に対する各センサー等の適性、各センサー等の性能を活かす使用方法等を調査した。その結果は次の通りである。

- 1 加速度の値により隊員の活動・静止を判断する場合は、境界値を $1.2\sim 1.8\text{m/sec}^2$ の間に設定するのが適切である。
- 2 動作に伴って発生する加速度は直交する3軸全てに発生するため、加速度センサーは、1軸検出型で十分である。
- 3 piezo抵抗型加速度センサーは重力等静的加速度の検出が可能であるが、隊員が活動しているか否かを調べる用途にはこの長所は生かされず、機能上、圧電型加速度センサーとの差は無い。
- 4 加速度測定は隊員の異常を検出する有効な手段であるが、これ単独による断定はできず、身体が倒れているかどうか等他の要素と組み合わせて判断する必要がある。
- 5 ほふく姿勢での活動を除くと、消防活動中に腰部に装着した実験機の傾斜角度が 60° に達する頻度は低く、隊員が倒れているかどうかを判断する場合の傾斜角度は 60° が適切である。

1 本研究開発の経過

隊員安全管理システムは、大規模建築物、地下構造物等において発生する災害において活動する消防隊員の安全を集中管理するシステムであり、建築物等が大規模化、高層化、地下深層化を続ける現在及び次世代の消防活動における安全対策の徹底と活動の効率化を目指すものである。

システムの基本構想は、次のとおりである。

- (1) 現場指揮本部と活動隊員を結ぶ無線データ通信ネットワークを、災害発生都度、災害現場において構築し、その現場における全活動隊員の掌握及び安全についての集中管理を行う。
- (2) 事故が発生した場合は、事故隊員の携帯する端末機が自動的に緊急信号(氏名、所属小隊名を含む信号)を送信し、現場指揮本部では、無線データ通信ネットワークを経由して指揮本部に設置した監視装置へ着信した緊急信号のデータに基づき、早期の救助態勢を確立する。

開発に当たっては全体計画を2期に分け、第一期(平成8年度～平成10年度)は主に無線によるデータ通信ネットワークの構築について研究開発を行い、試作

機の製作と各種防火対象物での運用実験を通じて、無線データ通信ネットワークの構築については実用レベルに達していることを確認した^{1) 2) 3)}。また、第二期(平成11年～平成12年)は消防活動中における消防隊員の異常検出精度の向上について研究開発を推進した⁴⁾。

隊員の異常を検出する方法には、次の2通りのアプローチがある。

- ① 隊員の生理情報等から異常を直接捉える方法
- ② 隊員の活動状況(動態)を捉え、正常な活動から逸脱している場合に異常と判断する方法

平成11年度は、前①の異常を直接捉える方法として、空気呼吸器面体に組み込んだセンサーにより、隊員の顔面皮膚において血中酸素飽和度を測定する方法及び空気呼吸器のボンベ残圧を測定する方法について検討し、報告した。

2 隊員のより正確な活動状況(動態)の把握のためのセンサー

隊員の安全を現場指揮本部において一元的に管理する本システムにおいては、誤って緊急信号が送出された場

* 第一研究室 ** 施設課

合に消防活動上及びシステム運営上大きな支障が生じることが懸念された。

そこで今回は、前1、②の隊員の活動状況を捉える方法として、加速度センサーにより隊員の活動に伴い身体に発生する加速度を高精度に把握するとともに、隊員の姿勢を傾斜センサーで把握し、隊員が正常な活動を継続しているか否かの判断を行う方法について検討を行った。

3 加速度センサー

人間の活動を加速度で捉え、その大小や内容により異常、正常を識別するものである。

加速度を検出するセンサーには圧電型、ピエゾ抵抗型、サーボ型、静電容量型があり、サーボ型を除く3種類の素子については、近年のマイクロマシニング技術により、小型・軽量化が進んでいる。

それぞれの長所と短所は表1の通りである。

表1 加速度センサーの種類

型	長 所	短 所
圧電型	○構造が簡単 ○頑丈、小型、軽量	○出力インピーダンスが高い。 ○静的加速度を検出できない。
ピエゾ抵抗型	○小型、高信頼性 ○静的加速度も検出できる。	○温度によって出力が変化するため、温度補償回路が必要
サーボ型	○精度が高い。 ○静的加速度も検出できる。	○構造が複雑なため大型で高価
静電容量型	○精度が高い。 ○静的加速度も検出できる。	○出力信号にノイズが乗りやすく、信号処理回路を内蔵させる必要がある。

この中で、加速度の3軸成分を検出可能な3軸型加速度センサーとして実用化されているのはサーボ型を除く3種類であり、取扱いの簡便性から、人体に発生する加速度についての基礎データ収集には圧電型加速度センサーを使用し、実験用試作機（以下「実験機」という。）の製作にあたっては、圧電型3軸加速度センサー及びピエゾ抵抗型3軸加速度センサーを使用して、より詳細なデータの収集及びそれぞれのセンサーの特性等の比較検討を行うこととした。それぞれの外観を写真1及び写真2に、構造の略図を図1及び図2に示す^{5) 6)}。

4 基礎データ収集

(1) 目的

人体に発生する加速度の値を測定し、実験機製作等の基礎資料とする。

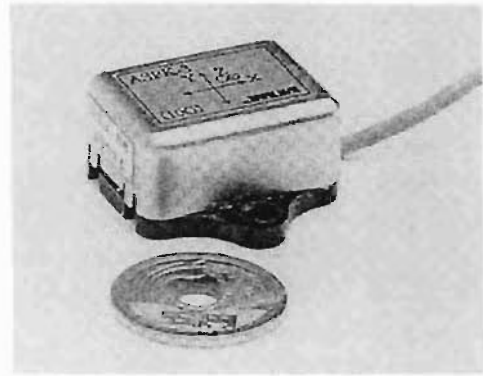


写真1 圧電型3軸加速度センサー

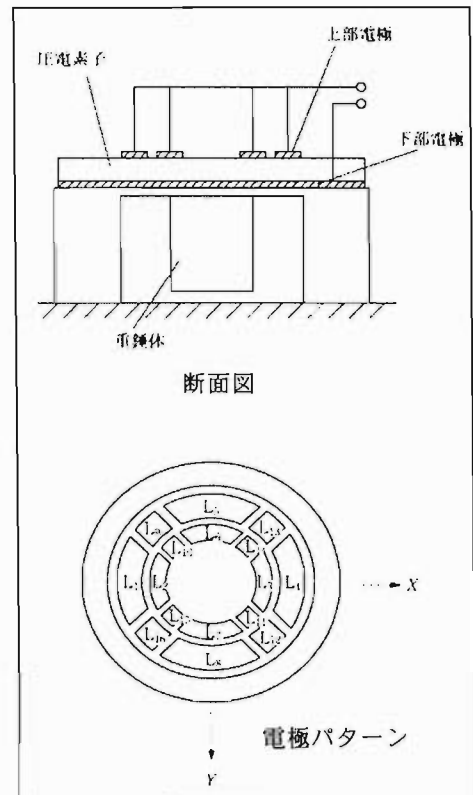


図1 圧電型3軸加速度センサー構造図

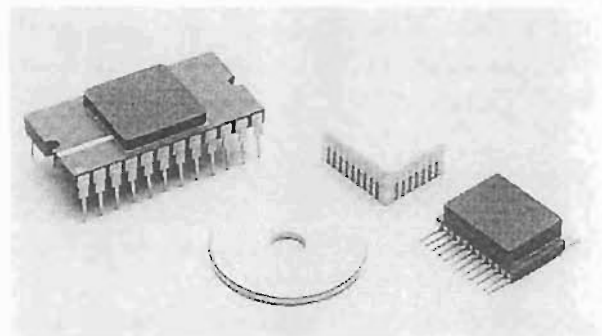


写真2 ピエゾ抵抗型3軸加速度センサー

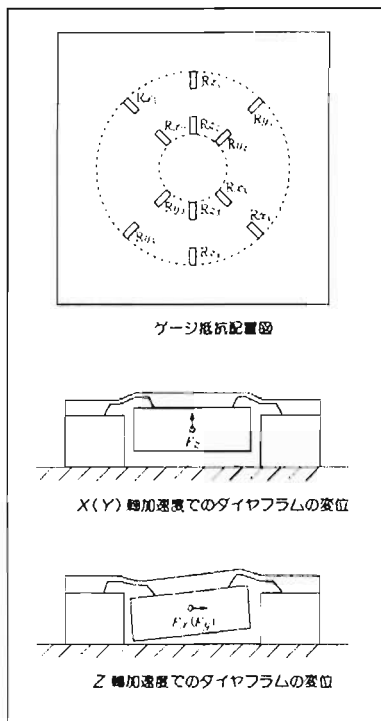


図2 ピエゾ抵抗型3軸加速度センサー構造図

(2) 実施日

平成12年8月16日～同年8月30日

(3) 被験者

男性5名(うち1名はフォグガンによる放水のみ)

(4) 測定方法

被験者の腰ベルト部に圧電型3軸加速度センサーを装着し、次のそれぞれの動作等において発生する加速度を1/100秒ごとに60秒間測定した。

ア 立位静止

イ 仰臥静止

ウ 伏臥静止

エ 歩行

オ フォグガンによる噴霧放水(立位)

カ フォグガンによる直状放水(立位)

(5) 使用資機材

ア 加速度ピックアップ(株)NEC三栄製SV1302

イ チャージコンバーター(株)NEC三栄製AP11-901

ウ 測定器(株)NEC三栄製RA1200

(6) 測定結果

収集したデータ(加速度)について閾(しきい)値を0.6~2.0m/sec²(絶対値、以下同様)に設定し、閾値を超えるデータ数を集計した結果は表2の通りである。

表2から次のようなことがわかる。加速度の閾値が1.0m/sec²の場合は、伏臥静止の項目で60秒間に3回(単純平均で20秒に1回)の頻度で閾値を超えるデータが出現しているため活動中であるとの誤った判定になり、また、加速度の閾値が2.0m/sec²の場合は、フォグガンによる噴霧放水の項目で閾値を超えるデータが出現せず、静止しているとの誤った判定になる。

(7) 閾値の適性範囲の検討

ア 次の(7)及び(イ)を前提として、「立位静止」、「仰臥静止」及び「伏臥静止」を静止状態と、また、「歩行」及び「フォグガン注水」を活動状態と判断するには、閾値の設定について、表2の閾値に達したデータ数が静止状態では2未満、活動状態では2以上となる範囲としなければならない。

(7) 閾値に達した場合は活動状態(正常)、閾値に達しない場合は静止状態(異常)と判断する。

(イ) 判断するための間隔は30秒とする。

イ 以上のことから閾値(加速度)は1.2~1.8m/sec²の間に設定するのが適切であると考えられる。

5 実験機概要

加速度センサー等を使用した実験機を製作した。

実験機の構成は次のとおりであり、外観を写真3に、回路の概要を図3に示す。

ア 加速度センサー

表2 60秒間に閾値を超えたデータの数

区分	被験者の動作等 (総データ数)	集計のために設定した閾値(m/sec ²)と閾値に応じたデータ出現数								
		0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
静止	立位静止(4名) (72,000データ)	0 (0%)								
	仰臥静止(4名) (72,000データ)	4 (≒0%)	1 (≒0%)	0 (0%)						
	伏臥静止(4名) (72,000データ)	46 (0.06%)	8 (0.01%)	3 (≒0%)	1 (≒0%)	1 (≒0%)	1 (≒0%)	0 (0%)		
活動	歩行(4名) (72,000データ)	35470 (49%)	27293 (38%)	21046 (29%)	16527 (23%)	13804 (19%)	10556 (15%)	8545 (12%)	6758 (9.4%)	
	フォグガンを用いた注水(1名)	噴霧 (18,000データ)	1066 (5.9%)	326 (1.8%)	111 (0.62%)	34 (0.18%)	16 (0.09%)	5 (0.03%)	3 (0.02%)	0 (0%)
		直状 (18,000データ)	1553 (8.6%)	710 (3.9%)	360 (2.0%)	222 (1.2%)	148 (0.82%)	99 (0.55%)	76 (0.42%)	58 (0.32%)



写真3 実験機の外観

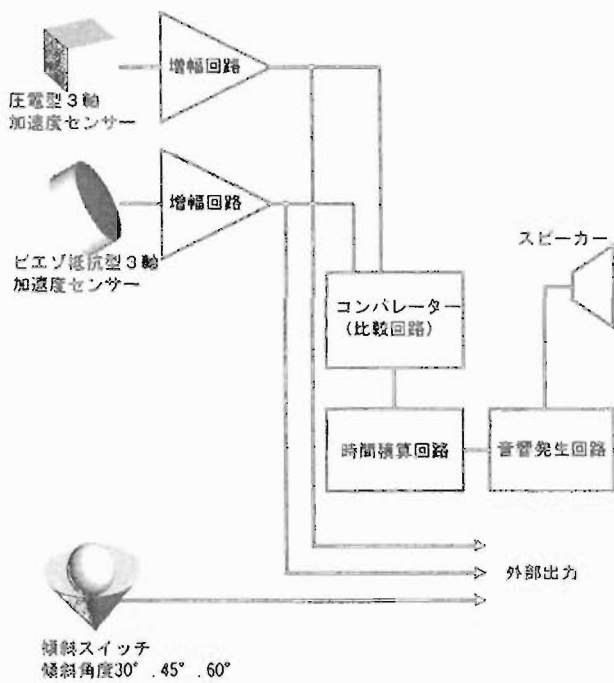


図3 回路概要図

圧電型 3 軸加速度センサー及び piezo 抵抗型 3 軸加速度センサー

イ 傾斜スイッチ（動作角度 30°、45°、60° の 3 種類、図 4）

ウ 各センサー出力を処理する電子回路

エ 静止時間を計る時間積算回路

オ 一定の静止秒数後に警報音を発する音響発生回路

なお各センサー等からの電圧出力はケーブル接続によ

り測定器へ出力することが出来る。

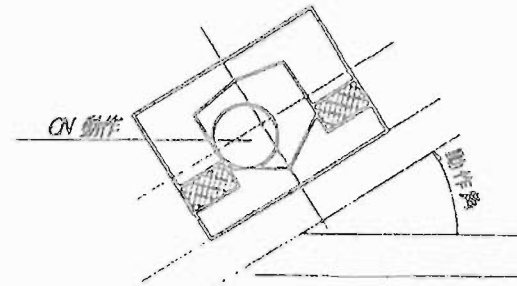


図4 傾斜スイッチ構造図

6 実験

(1) 目的

ア 基礎データ収集において静止状態と活動状態を区分する適切な加速度設定値が $1.2 \sim 1.8 \text{ m/sec}^2$ の間に存在すると見込まれたことから、さらに詳しく調査する。

イ 前アを判断する間隔(時間)を調査する。

ウ 圧電型加速度センサーと piezo 抵抗型加速度センサーの適性を比較する。

エ 加速度センサーについて 3 軸型の必要性を調査する。

オ 隊員が倒れているかどうかを傾斜スイッチで検出する場合に、傾斜スイッチの検出角度（垂線からの角度）について 30°、45°、60° のうち、適している角度を調査する。

(2) 実施日

平成 13 年 2 月 15 日～同年 3 月 20 日（予備実験）

平成 13 年 3 月 29 日～同年 7 月 3 日（本実験）

(3) 被験者

男性 5 名

(4) 実験方法

被験者の腰部に実験機を装着し、空気呼吸器の着脱操作及び模擬検索活動中の加速度測定及び傾斜スイッチの作動状況確認を行った。

(5) 使用資機材

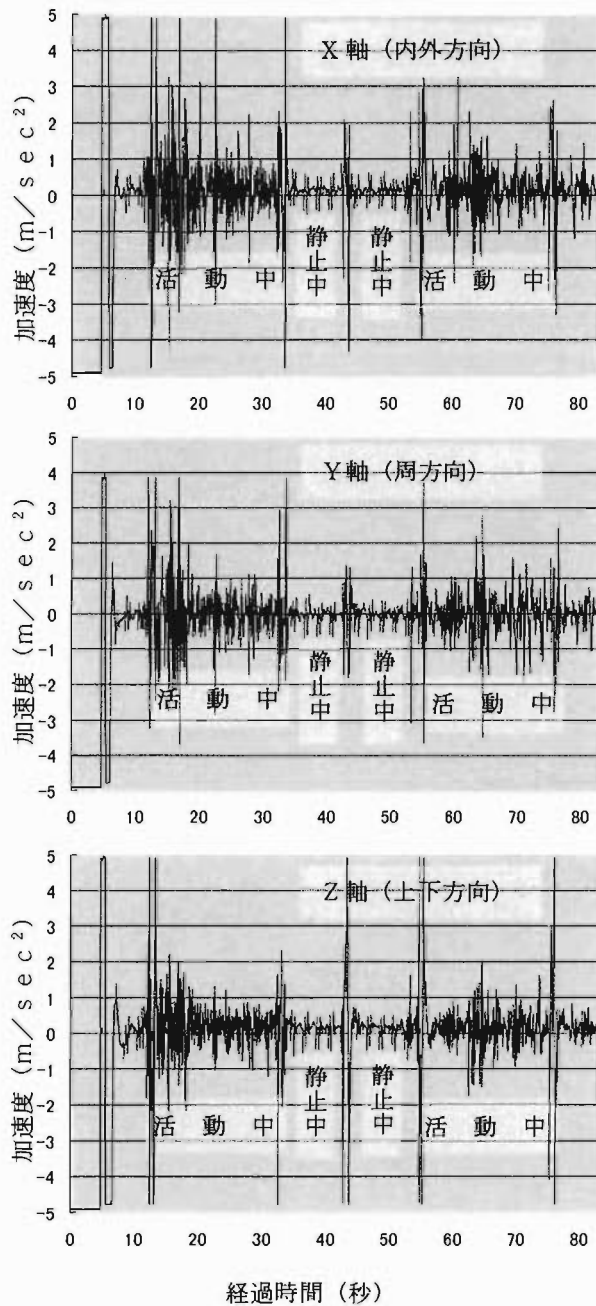
ア 実験機

イ 測定器 ㈱NEC 三栄製 RA1200

7 実験結果と考察

(1) 被験者が静止している場合の加速度は、3 軸方向のいずれの軸についても 1 m/sec^2 を超えることはなかった。

被験者が動作している場合は 2 m/sec^2 （約 1/5 G）を超える加速度が頻りに現れた。なお、この場合の最大値は 5 m/sec^2 （約 1/2 G）を超えているものと推測されるが、測定器の計測範囲を超えているため正確な値は不明である（図 5）。



各軸の方向
 内外方向：身体表面に対して法線方向
 周方向：身体表面に対して接線方向
 上下方向：頭部を上、脚部を下とする方向

図5 加速度測定グラフ

また、前4の基礎データ収集において動作と静止を区分する加速度の境界値が $1.2\text{m/sec}^2 \sim 1.8\text{m/sec}^2$ の範囲にあると推測されたことから、 1.2m/sec^2 以上及び 1.8m/sec^2 以上の加速度の出現状況について、被験者の動作中、静止中に区分して集計した(表3及び表4)。これから、静止中と動作中を見分けるには、加速度の値

が 1.2m/sec^2 及び 1.8m/sec^2 のいずれでも可能であることが分かった。なお、この表は被験者の一連の動作の中から、静止中及び動作中について各5秒間を抜粋したものである。

表3 5秒間のサンプリングで加速度の値が 1.2m/sec^2 以上であったデータの数

測定対象	軸	データ数	
		動作中	静止中
被験者1	X	155	0
	Y	133	0
	Z	102	0
被験者2	X	81	0
	Y	99	0
	Z	103	0
被験者3	X	113	0
	Y	46	0
	Z	54	0
被験者4	X	179	0
	Y	178	0
	Z	80	0
被験者5	X	204	0
	Y	125	0
	Z	115	0

表4 5秒間のサンプリングで加速度の値が 1.8m/sec^2 以上であったデータの数

測定対象	軸	データ数	
		動作中	静止中
被験者1	X	78	0
	Y	56	0
	Z	36	0
被験者2	X	24	0
	Y	20	0
	Z	48	0
被験者3	X	47	0
	Y	15	0
	Z	12	0
被験者4	X	119	0
	Y	35	0
	Z	80	0
被験者5	X	124	0
	Y	61	0
	Z	76	0

これらの結果から動作中と静止中を区分する加速度の値は厳密なものではなく、 $1.2 \sim 1.8\text{m/sec}^2$ の範囲で設定すれば足りるものと判断される。

(2) 前(1)により、加速度の閾値を $1.2 \sim 1.8\text{m/sec}^2$ の範囲で設定すれば監視秒数に関わりなく動作中と静止中を明瞭に見分けられることがわかったが、前4の基礎データ収集において、フォグガンによる噴霧放水の際に

1.8m/sec²以上の加速度の発生頻度が60秒間に3回であり、単純平均で20秒に1回の割合であったことから、加速度の境界値を1.8m/sec²に設定する場合には20秒以上の監視秒数を要するものと判断される。

なお、隊員が何ら活動せず静止状態にある場合は加速度測定のみによる正常・異常の判定は困難である。

(3) 圧電型加速度センサーとピエゾ抵抗型加速度センサーの適性については、特段の差はない。

圧電型加速度センサーは加速度の変動成分のみの検出、ピエゾ抵抗型加速度センサーは重力等静的成分も含んだ加速度の検出ができる。しかし、隊員の活動状況を把握する用途に用いる場合は、活動に伴う加速度と重力を分離することが出来ず、結果として加速度変動成分のみを利用することとなって、適性に関する差はないと考えられる。

なお、各センサーの特性として高い周波数成分まで感度を有して衣服と機器のこすれや音響を拾うおそれがあり、身体の動きを監視する用途に用いる場合は、これらの不要な高い周波数成分の信号を抑制する電子回路設計が必要である。

(4) 動作に伴って発生する加速度は、特定の1軸だけに発生することではなく、強弱・正負の違いはあっても直交する3軸全てに加速度は発生した(図6)。このことから、本用途では1軸の検出が出来れば十分であり、また、軸の方向については個人差はあるものの、身体に対して内外方向(身体表面に対して法線方向)の加速度を検出するのが最も効果的である。

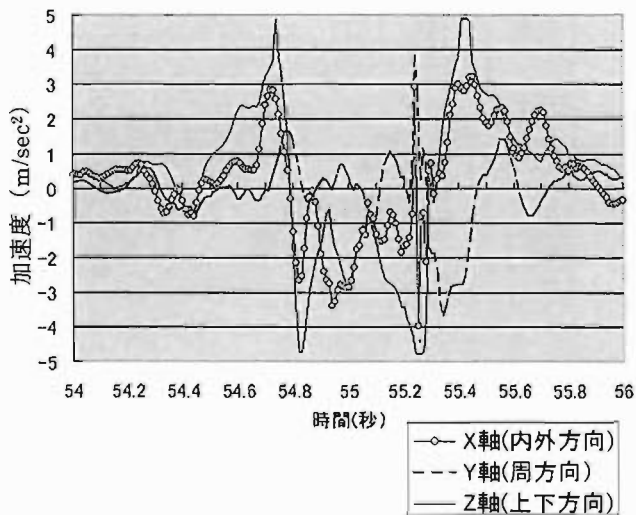


図6 3軸の加速度検出状況

(5) 傾斜スイッチについては、30°、45°、60°の中では60°が適切であった。

実験における模擬検索活動においては30°及び45°の傾斜スイッチは頻繁に作動してしまい、倒れた状態であるという誤った信号が出された。また、60°より大

きい角度について確認するため、60°の傾斜スイッチの作動角が75°相当になるよう実験機を後方へ傾けて装着した。この場合、被験者が伏臥姿勢をとっても傾斜スイッチが作動角に達せず、倒れているという信号が出ない場合があった。

従って、傾斜センサーにより転倒状況を把握する場合、その動作角度は60°程度が適している。

なお、ほふく姿勢で活動している場合には60°、75°相当の傾斜スイッチはいずれも作動したままとなった。

8 まとめ

隊員の異常の把握手法として、動態センサーを用いて正常な動作が継続されているかどうかというアプローチから検討を進めてきた。

(1) 従来から携帯警報器に使われている動態センサーの構造には次の2種類がある。

ア 円筒容器に金属球を封入し、身体の動きによって金属球が転がるかどうかをセンシングするもの(図7)



図7 金属球を封入したセンサー

イ 歪ゲージをスプリングで支え、身体の動きで歪が発生するかどうかをセンシングするもの(図8)

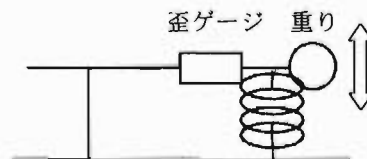


図8 歪ゲージを使ったセンサー

アは金属球が円筒容器内を転がる振動を捉えるものであり、金属球が転がる際に発生する振動の大きさが必ずしも身体の動きの大きさに比例するとはいえず、また、イは歪ゲージを支えるスプリングによって共振周波数を有することとなり、共振の有無によって感度が大幅に変化することとなり、いずれも身体に発生する加速度を精密に測定して「静止中」と「活動中」を判別するには十分な性能ではない。

(2) 実験機に用いた圧電型加速度センサーとピエゾ抵抗型加速度センサーは身体の動きによって発生する加速度の大きさに比例する出力が得られ、小型・軽量であることから、動態センサーに最適の素子であると考えられる。

(3) 加速度による判定を厳密に行ったとしても、実態上、活動中に静止状態が存する状況があるため、加速度

のみでは異常の断定は不可能であり、さらに精度を向上させるためには、隊員が倒れているかどうかの情報を異常判定の項目に加えることが有効であり、その方法として傾斜スイッチの組み込みが有効である。

(4) 消防活動中の危険な要素として単独行動が挙げられる。本システムでは無線通信可能エリアから出てしまった隊員について監視装置に表示し指揮者の注意を喚起する機能を有するが、加えて、他の隊員の端末機が発する電波の強さから、単独行動に陥っているかどうかを各隊員の端末機が自動的に判断して監視装置へその旨の情報を送信し表示する等、単独行動について監視を強化することも事故発生防止にさらに有効であると考えられる。

(5) 隊員安全管理システムの根幹技術である隊員の異常把握について 2 ヶ年をかけて二つのアプローチから追求した。今年度のアプローチは「正常な活動から逸脱したものを異常と判断する」という考え方に基づくものであるが、消防活動のように動と静が激しく入り乱れる状況では、抜本的な解決には達することが出来なかった。

しかし、高精度の加速度センサーを用いて身体の動きを精密に測定し、かつ、判断項目として身体の傾斜、単独行動の有無を組み合わせることで、異常の判定精度を飛躍的に向上させることが出来ると考える。

9 おわりに

本研究開発は平成 6 年度に開催された消防科学化推進委員会（現在は、東京消防庁消防科学の研究及び開発等に関する規定第 13 条の「消防科学推進委員会」という）において、警防部から研究開発の要望が出されたのを受け、平成 7 年度の基礎調査、予算の編成等を経て、平成 8 年度から本格的に開発に着手したものであり、各年度の研究開発内容は表 5 のとおりである。

表 5

期	年度	研究開発内容
第一期	H8	1 開発基本方針の策定 2 実験用機器製作 3 市街地電波伝搬実験を実施
	H9	1 伝送データ精査 2 ネットワーク設計 3 試作機を製作
	H10	試作機を用いた運用実験を実施し（各種対象物合計 13 回）、無線ネットワーク構築について実用レベルにあることを確認
第二期	H11	消防隊員の生理情報等から隊員の異常を直接捉える手法の検討 ○ 血中酸素飽和度測定による方法 ○ 空気呼吸器空気残量測定による方法
	H12	消防隊員の動態から隊員の異常を捉える手法の検討 ○ 静止状態の継続を検出する手法 ○ 身体の傾斜を検出する手法 ○ 単独行動を検出する手法

第一期研究開発については富士通電装株式会社との共同研究という形で警防部警防課、同救助課（現訓練課）、装備部通信課（現総務部情報通信課）の参画を得て検討を進め、実用レベルの無線データ通信ネットワークを開発した。

また、第二期研究開発については、特に平成 12 年度に実施した研究において、高精度加速度センサー素子等を用いて、より高い精度で消防隊員の異常を検出する手法を開発した。

これら第一期及び第二期の研究開発成果により、隊員安全管理システム全般について実用レベルに達したものと判断し、研究開発を完了する。

【参考文献】

- 1) 三好和人ほか 4 名：隊員安全管理システムの研究開発（第 1 報）、消防科学研究所報第 34 号、pp1～11、平成 9 年
- 2) 三好和人、稲村武敏、鈴木幸之：隊員安全管理システムの研究開発（第 2 報）、消防科学研究所報第 35 号、pp26～31、平成 10 年
- 3) 野村敏幸、稲村武敏、鈴木幸之：隊員安全管理システムの研究開発（第 3 報）、消防科学研究所報第 36 号、pp50～60、平成 11 年
- 4) 野村敏幸、稲村武敏、藤田栄一郎：隊員安全管理システムの研究開発（第 4 報）、消防科学研究所報第 37 号、pp32～40、平成 12 年
- 5) 工業調査会：センサ／計測モジュール活用技術百科、株式会社工業調査会、平成 8 年
- 6) 工業調査会：これでわかるセンサ技術、株式会社工業調査会、2000 年
- 7) トランジスタ技術編集部：温度・湿度センサ活用ハンドブック、CQ 出版社、第 3 版、1989 年
- 8) トランジスタ技術編集部：アナログ IC 活用ハンドブック、昭和 62 年
- 9) 谷本茂：オペアンプ実戦技術、誠文堂新光社、昭和 55 年
- 10) 逆瀬川皓一郎：エレクトロニクスライフ 5 月号特集 OP アンプの機能別基本回路とその応用、日本放送出版協会、1995 年

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A SAFETY MANAGEMENT SYSTEM FOR FIREFIGHTERS (Series V)

Taketoshi INAMURA*, Toshiyuki NOMURA**, Eiichirou FUJITA*

Abstract

With the purpose of accurately detecting irregularities and troubles occurring to firefighters at the scene of a fire, we conducted research on how to improve the accuracy of the mobile sensors that firefighters carry to enable their activities to be monitored.

We fabricated an experimental mobile sensor using three types of devices: piezoelectric accelerometer, piezoelectric resistance accelerometer, and clinograph switching device. We conducted tests using this mobile sensor to detect the threshold between irregularities/troubles and normal conditions. We also studied the suitability of each device for the purposes of this mobile sensor and found ways of using the sensor to best utilize the properties of each device.

The results were as follows:

- 1 The threshold should be set between 1.2m/sec^2 and 1.8m/sec^2 when acceleration measurement determine the presence of active firefighters.
- 2 Since acceleration takes place on all three axis, firefighter activities can be determined with a one-axis acceleration measurement.
- 3 The piezoelectric resistance accelerometer can detect static acceleration such as gravity. However, this feature does not affect the function of this mobile sensor, which is to detect the presence of firefighter activities. Therefore, the piezoelectric resistance accelerometer is not functionally different from the piezoelectric accelerometer.
- 4 The measurement of acceleration is an effective means of detecting the irregular conditions of firefighters. However, it is impossible to determine the conditions of firefighters only by the acceleration measurement. Other factors should be taken into consideration, such as whether a firefighter has fallen down or not.
- 5 Unless firefighters are crawling flat on the ground, their bodies are seldom inclined at more than 60 degrees from vertical line. Since the mobile sensor is attached to the waist of a firefighter, it seldom indicates an angle of 60 degrees or more. As such, 60 degrees is an appropriate threshold for determining whether or not a firefighter has fallen to the ground.

*First Laboratory ** Installation Section