

Research Report of the Research Institute of
Industrial Safety, RIIS-RR-86, 1986.
UDC 534.32 : 534.28 : 654.927 : 654.922 : 621.868.62

無人搬送車の警告音評価に関する研究

江 川 義 之*

Study on Auditory Warning Alarms of Automated Guided Vehicles

by Yoshiyuki EGAWA*

Abstract ; The purpose of this study is to establish useful auditory warning alarm criteria (hereinafter referred to as "alarm") for automated guided vehicles.

First, the author suggests 4 groups of alarming wave form for classification of warning alarms. The application of this classification allows a variety of alarms in the factory for proper classification. The 4 groups are termed "Continuous Sound with Periodicity (hereinafter referred to as C.S.P.)", "Continuous Sound with Stability(C.S.S.)", "ON-OFF Sound with Periodicity(O.S.P.)" and "ON-OFF Sound with Stability(O.S.S.)".

Enquete and tapes in respect of alarm are sent to the manufacturing industries of automated guided vehicles and collected to analyze. Problems to be solved are found through the analysis of these data. The problems are as follows.

The alarm of automated guided vehicle has come into use in two cases ; they are in running and at an emergency stop. In case of running, it should be the type of C.S.P., because it is necessary to ring continuously while vehicle's running. The pattern of each periodical form should be the type of "slow rising up" for giving little jarring to the ear. But as a result of the analysis on site, 35 % of the alarms do not satisfy the desirable condition.

In case of emergency stop, the alarm should be the type other than C.S.P.. The rising form of wave should be fast rising for operator's attention, but 33 % of the alarms in emergency stop aren't the type of "fast rising up".

For recommendations about the periodicity of running-alarm, two experiments are carried out. One is the experiment for evaluating the periodical duration by counting cycles and the other is the experiment of sensory detecting abilities for digital & analog sound pressures. In the result of these experiments, the periodicity of C.S.P. type alarm should be designed as the duration of about 900 msec.

In conclusion, the recommendation of auditory warning alarm for automated guided vehicles is given as follows :

"Continuous Sound with Periodicity" should be adopted as warning alarm while in running, and kinds of waving form other than C.S.P. type are preferable when the vehicle stops on emergency. The periodicity of running-alarm should be about 900 msec.

Keywords ; Auditory warning alarm, Automated guided vehicle, Sound periodicity

* 機械研究部 Mechanical Safety Research Division

1. 諸言

最近のメカトロニクスの発達は様々なものを生み出しているが、警告音の分野では、サウンド IC を中に組込んだ『警告音発生ユニット』を各電子部品メーカーで製造販売し始めている。

無人搬送車のメーカーではこれらユニットを電子部品メーカーから購入し、製造車体に取り付け、走行時・異常停車時に鳴らす警告音としているのであるが、これが無人搬送車を購入するユーザ側の工場では混乱を起こさせる原因になっている。

工場では必ずしも一社からのみ無人搬送車を購入するわけではなく、2～3のメーカーからそれを購入している場合が多い。この時、A社の車の発する走行中の警告音と、B社の車の鳴らす異常停車時の警告音の音色が全く同じであるということが現実に生じている。

確かに、サウンド IC の発達が『警告音発生ユニット』を生み出したが、それは同時に警告音の音色の洪水をも生み出し作業者に混乱を与えている。

今後このような傾向がますます助長されていくことを想定して、用途別に警告音の標準化の研究を進めていく必要性を考え、工場等でよく用いられている無人搬送車をその対象として取り挙げ、次の研究を行った。

1.1 研究目的

- I. 警告音の標準化を進めるにあたり、まず警告音の種類の変義を行い、さらに産業現場等で用いられているいろいろな警告音について用途別にどの種の警告音が用いられているか類型化する。
- II. 現状において、無人搬送車に用いられている警告音を、走行時・異常停車時の用途別に分類し、どのような波形が用いられているか？ その特性を解析し問題点を検討する。
- III. IIにおける問題点を踏まえ、走行時における警告音周期が何 msec なら、車両位置関係が周期音の大きさの変化に対応して判別しやすいか？ 実験を通して明らかにする。

以上3つの研究目的を設定し本研究を行った。

2. 警告音の種類の変義

2.1 警告音の種類

用途別に2～3種類の警告音を聞き分けるためには、人間が耳で聞いて警告音の種類が区別されなければな

らない。

現在まだ警告音に関して、その種類の変義はなされておらず、学会誌¹⁾においても「電子ブザー音」、「ホロホロ音」、「フリッカ音」などの表現がなされている。これは、『警告音発生ユニット』のカatalog等においてさらに多くの表現が用いられる傾向にあり、「アラーム音」、「電鈴音」、「ピーポー音」、「チャイム音」、「ピピピ音」等といった呼称が多用されている現状にある。

警告音の研究に当たり、まず警告音の種類を定義して、その上にたち、これらの用途にはこの種の警告音がより適切である、という方向に進めていく必要性があるので、第2章においては警告音の変義に関して述べる。

音を構成する要素として、周波数(音の高さ)、音圧レベル(音の大きさ)及びエンベロープ・パターン(時間経過にともなう波形振幅の変化)の3つがある。このうち周波数と音圧レベルは、警告音が工場内騒音にマスキング(打消)されないよう変化させ決定していく要素であるから、用途別に警告音の種類を定義する要素として用いることは出来ない。それ故エンベロープ・パターンを警告音の種類を定義する要素として用いることが妥当である。

われわれは多くの警告音を耳にするが、その中で聴覚においてははっきりと違いのわかるエンベロープ・パターンは次の4種類で日常生活においても用途別に使い分けられている。それが Fig.1 に示してある。

「連続音周期性あり」は、連続して鳴っており「ルルルル…」というタイプで「ル」という一定の周期が繰り返される。周期にはそれぞれの警告音で長短があるが、電話の例で述べると「ツーツーツー」という相手方が話し中の信号音が挙げられる。

次に「連続音周期性なし」は、連続音であり「ルル…」という周期をもたず、「ル～」と聞こえるタイプの警告音である。受話器を持ち上げた時、まず「ツ～」と聞こえる信号音はこのタイプに含まれる。

続いて「断続音周期性あり」は、鳴っている時(以下「ON 間隔」という。)と鳴っていない時(以下「OFF 間隔」という。)とからなる断続音であり、ON 間隔において周期性が構成されている警告音である。相手方から電話がかかってきた時、そのコール信号音はこのタイプに属する。

さらに「断続音周期性なし」は、断続音故、ON 間隔と OFF 間隔とから構成されるが、ON 間隔において周期性を含まないタイプの警告音である。

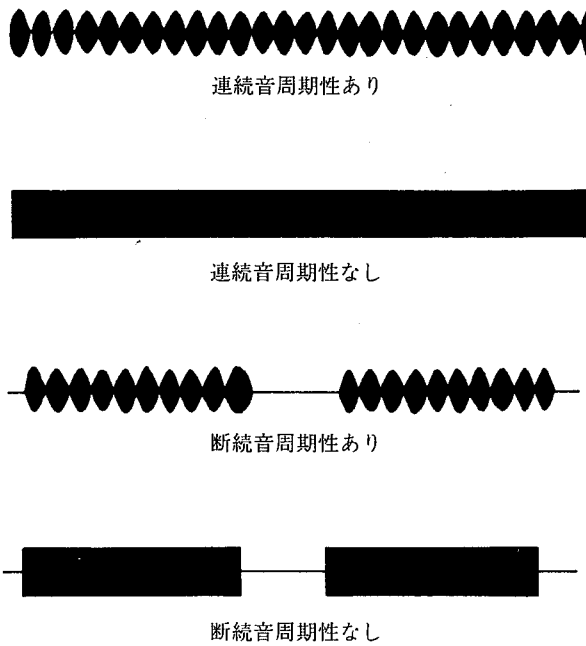


Fig.1 Four kinds of auditory alarming wave.
警告音の種類

以上、日常よく耳にする警告音が、「連続音周期性あり」、「連続音周期性なし」、「断続音周期性あり」及び「断続音周期性なし」の4種に大別されることを述べたが、細部において、なお検討を要する点も含んでいる。

それは、「連続音周期性あり」と「断続音周期性なし」の区別に関してである。断続音において OFF 間隔が短かいと、人間の耳には鳴りやんでるように感じられ

ず、鼓膜が振動停止せず減衰振動している間に次の ON 間隔がやってくる。このような場合、人間の聴感覚では「断続音」とは認められず、むしろ「連続音周期性あり」に感じられる現象が生じる。

ON 間隔-20 msec, OFF 間隔-60 msec の警告音を断続音と述べている研究報告¹⁾(この報告では ON 間隔を発振時間, OFF 間隔を停止時間と表現している。)もあるが、オシロスコープに掃引時, 60 msec 程度の発振停止時間があったとしても人間の耳には鳴りやんで聞こえない。警告音とはそれを聞いて区別するものであるから、人間の感覚尺度に合わせた断続音の定義(たとえば断続音とは OFF 間隔何 msec 以上の警告音など)の必要性を考え実験を計画した。それについては 2.3 節で述べる。

2.2 用途別警告音の種類

2.1 節で述べた 4 つの警告音の種類が、産業現場等で広く用いられている警告音のどのような用途と対応しているか Table 1 で示した。これは前研究報告²⁾と重複する部分であるが、無人搬送車の警告音が様々な警告音の中でどのような範ちゅうに位置づけられるか検討する際に必要なのでここでは表のみを掲載する。

2.3 ON-OFF 型周期音実験

2.3.1 実験目的

「2.1 警告音の種類」の節で、「連続音周期性あり」と「断続音周期性なし」との間の区別は現状においてはな

Table 1 Classification of various uses in auditory warning.
警告音の用途別類型化

分類	内容	警告音の種類
そこのけ そこのけ型	車両等(移動物体)が人間に近づいたことを知らせる警告音	*連続音周期性あり *断続音を用いている例は少ない *波形立ち上がりは“なめらか型”
システム 異常検知型	あるシステム内において、その正常な稼働から外れたことを知らせる警告音	*連続音周期性なし *断続音周期性なし *波形立ち上がりは“絶壁型”
動作 抑止型	結果型 人間側が危険物体に近づいたことを知らせる警告音(プレス稼働域に手を侵入させた場合等)	*連続音周期性なし *波形立ち上がりは“絶壁型”
	喚起型 おだやかな形で人間の注意を喚起させる(踏切の警報器等)	*連続音周期性あり *断続音周期性あり *波形立ち上がりは“なめらか型”

はだあいまいであることを述べた。オシロスコープにおいて掃引波形の発振停止時間が少し(例えば 60 msec)でもあると、「断続音」として扱っている文献もあるが、警告音とは人間が聞き分けて意味をもつので、人間の感覚尺度に合わせた「断続音の定義」が必要と考え、この実験を行った。

実験目的は、人間の感覚尺度に対応した判別式を作成し、その式に ON 間隔 (msec) と OFF 間隔 (msec) を代入すると「断続音」か「連続音」かの種別が行えるようにすることを目的とした。

2.3.2 実験方法

ON 間隔 (msec) ; 20, 50, 100, 200, 400

ON/OFF 比 ; 1/0.5, 1/1, 1/2, 1/3

からなる 20 種類の警告音 (発振周波数 1000 Hz) を、延べ 50 名の被験者に聞かせ、それが日常よく耳にする警告音と比べてみて、断続的に聞こえるか、周期性をもった連続音として聞こえるかを判別させた。

Fig. 2 に実験に用いた波形の一例として、ON 間隔 ; 200 msec, ON/OFF 比 ; 1/1 のものが掲載してある。

2.3.3 実験結果

Fig. 3 に実験結果を示す。このグラフは横軸に OFF 間隔 (msec), 縦軸に断続音と判別した被験者の百分率 (以下「断続音判別頻度」という。) を示し、折れ線がグラフ上方にいくほど断続音と判別した人が多いことを表わしている。

このグラフによると、OFF 間隔 200 msec から断続音と判別する率が増加しはじめ、600 msec 以上になると 85 % 以上の者が断続音と判別する結果を示している。

Fig. 3 は OFF 間隔をパラメータとしたグラフを示したが、人間が断続音と判別する尺度は果たして OFF 間隔のみによるのかあるいはそれ意外の要因にもよるの

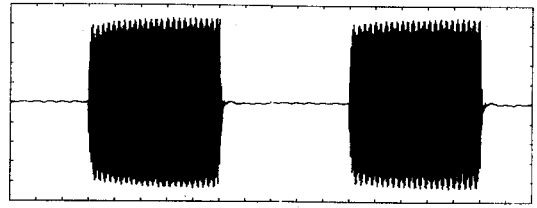


Fig. 2 Periodical warning ON-OFF type wave form used for the experiment.
ON-OFF 型周期音実験 波形事例

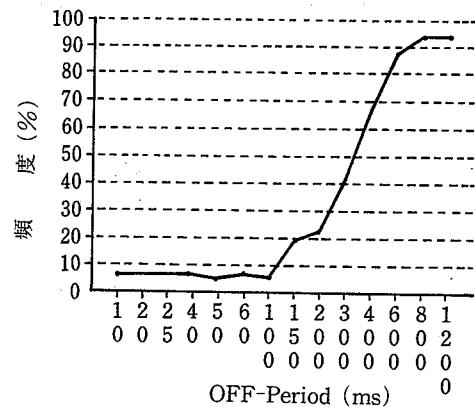


Fig. 3 Result of periodical warning (ON-OFF type) experiment.
ON-OFF 型周期音実験

かを調べるために二元配置法による分散分析を行った。

Table 2 にその結果が示してあるが、因子として、ON 間隔と ON/OFF 比とを取り挙げた。この表によると、断続音であるかないか感覚的に判別する変動要因は、ON 間隔, ON/OFF 比 (ON 間隔を ON/OFF 比で割ると OFF 間隔になる), さらにはこれら 2 つの交互作

Table 2 Analysis of variance between ON-duration and ON/OFF ratio.
分散分析結果 (ON 間隔と ON/OFF 比)

	平方和	自由度	不偏分散	分散比
ON/OFF 比	11388.691	3	3796.230	650.318 ★
ON 間隔	22928.668	4	5732.164	981.955 ●
交互作用	7989.004	12	665.750	114.047 ■
誤差変動	116.750	20	5.837	
全変動	42423.113	39		

★ $F(3, 20; 0.005) = 3.86$
● $F(4, 20; 0.005) = 3.51$
■ $F(12, 20; 0.005) = 2.77$

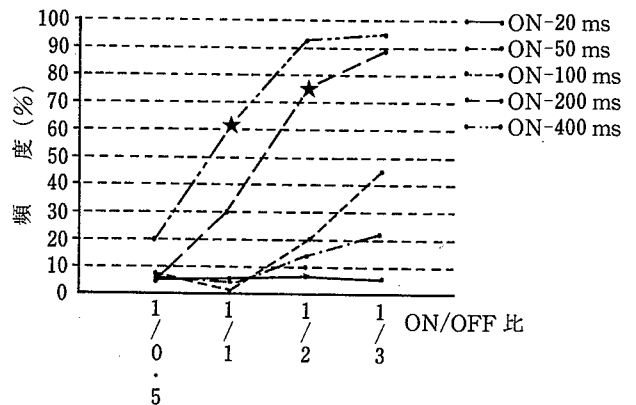


Fig. 4 Relation between ON-duration and ON/OFF ratio.
ON 間隔と ON/OFF 比との関連性

用にも危険率0.5%の有意差において影響を受けている結果が得られた。これは断続音と判別する感覚尺度がOFF間隔ばかりでなく発振時間であるON間隔にも依存することを示している。

その点を検討するために、Fig.4として横軸にON/OFF比、縦軸に断続音判別頻度、パラメータとしてON間隔を示したグラフを掲載する。

このグラフによると、ON間隔20 msec、50 msecでは、ON/OFF比を変化させてもあまり断続音判別頻度は上昇しないが、ON間隔200 msec以上になるとON/OFF比が断続音判別頻度にかなり影響してくることを示している。またON間隔が200 msec以上の信号音においては、OFF間隔が同じであってもON間隔の短い方が断続音と判別される頻度が高い結果を現わしている(例えばOFF間隔が400 msecで同じ場合、ON間隔200 msecの断続音判別頻度は74.8%であるのに対して400 msec時のそれは61.6%である。図中★印で表示)。それ故、ある警告音が断続音であるか否か人間が識別する要因として、OFF間隔ばかりでなくその時のON間隔も考慮の対象に加えなければならないことがわかった。

この節の最後として実験目的で述べた判別関数の設定を行う。この判別関数とは説明変数として前述した2つの要因、すなわちON間隔とOFF間隔(共にmsec)を代入すると、目的変数において人間の感覚尺度では断続音と判別するか、周期性のある連続音と判別するかを決定する関数である。このような関数を設定する場合、前述した実験における断続音判別頻度が何%以上のものを断続音と判定するかという問題が残る。本研究においては断続音判別頻度80%をその境界値とした。理由は火災に関する警報音の了解度を求める実験等において80%了解度をひとつの目安にしている⁴⁾ことによる。

そこで80%を境界とし、断続音判別頻度がそれより高いONとOFFとの時間間隔の実験条件の組合せを第1グループ、又、80%より低いONとOFFとの時間間隔の実験条件の組合せを第2グループとして、これら第1グループと第2グループとを判別するための関数を求めてみた。

次に判別関数を示す。

$$Y = -1.560 \times 10^{-3} \times \boxed{\text{ON間隔}} + 3.273 \times 10^{-3} \times \boxed{\text{OFF間隔}} - 1.157 \quad (1)$$

(1)式において、ON間隔とOFF間隔にはそれぞれの

警告音の発振時間と停止時間を msec 単位で代入した場合、Y が正值を示せば断続音、負値を示せば連続音を示す。

2.1節において警告音の種類のうち「連続音周期性あり」と「断続音周期性なし」との区別は現状ではあいまいであることを述べたが、警告音を標準化していくに当たり、今後(1)式を用いこれらの区別を明確化していくことが望ましいと考える。

3. 無人搬送車に用いられている警告音の実状

現状において、無人搬送車の警告音にどのような音を用いられているか調べるために、(株)日本産業車両協会に属している12メーカーにアンケート及びテープを送付し、27種類の警告音及びデータを収集した。

無人搬送車の警告音をその用途別に分類すると、走行時、異常(緊急)停止時、その他(発車時・目的地到着時・バック時)に分類されるが、その頻度からみて9割が走行時、異常停車時のものに限られ、その他は極めて少ない。そこで本報告においては、無人搬送車が警告音を鳴らす用途として走行時及び異常停車時の2つの場合を挙げ、これらの警告音の特性を検討していく。

警告音の音圧レベルは平均すると、走行時は86.6 dB(A)(標準偏差4.5 dB)で、異常停車時は88.3 dB(A)(標準偏差7.8 dB)であり、若干異常停車時の方が音圧レベルが高い。警告音の音圧レベルは、工場内暗騒音との相対的関連において決定され、騒音に打ち消されにくいレベルに設定されていなければならない。しかし、この点については前研究報告²⁾ですでに言及しているので今回はこの点には触れず、用途に応じた警告音の種類という側面から述べる。

3.1 用途別警告音の種類

無人搬送車の警告音を用途別にTable 1に当てはめると、走行時は「そのけ・そのけ型」であり、異常停車時は「システム異常検知型」、つまり無人搬送車システムのどこかに異常が生じ車両が停止したことを人間に検知させる警告音であると言える。

次に、実際無人搬送車にどのような警告音の種類が用いられているか解析した結果を示す。

Fig.5は、走行時に多用される警告音の種類を示したものであるが、「連続音周期性あり」が約8割用いられており、残りの2割は断続音が用いられている。

「そのけ・そのけ型」の警告音の特徴は、車両が

近くにある時は音が大きく聞こえ、それが遠のくに違って次第に小さく聞こえるという音の距離減衰特性を利用したものである。そこで走行中の警告音が満たすべき要件を挙げると次のようになる。

- i. 走行中常時鳴らす必要がある。
- ii. 警告音が周期音から構成されており、そのひとつひとつの周期音の大きさが、移動車両の位置を表わしていることが、はっきりと人間に認知される周期間隔 (msec) を有していなければならない。

まず i の要件であるが、常時鳴らす必要があるので断続音は用いない方がよい。その理由は断続音は、鳴っている時 (ON 間隔) と鳴っていない時 (OFF 間隔) とから構成されているので、OFF 間隔にも車両は定速度で接近してきている点に危険性を含んでいることによる。

次に常時鳴らすタイプの警告音 (そのけ・そのけ型) は人間に耳ざわりな音になってはいけないという点が挙げられる。耳ざわりであると警告音の音源を切断し走行させている例がしばしば見受けられる (これに比較し「システム異常検知型」はシステムの異常を人間側に気付かせることがその目的であるから、耳ざわりであることは許される要件であり、又走行時に比較し異常停車時は若干音圧レベルが高いものこのことによる)。

耳ざわりでないということは次の2点による。第1点は前述した要件 ii も関連してくるが、連続音の場合周期性をもたせるということである。連続音が周期性をもたないと人間の内部雑音 (耳なり) のように極めてわずらわしく感じる。第2点は各周期の波形の立ち上がりに関することであり、当然「ゆるやかな立ち上がり」の方が「絶壁立ち上がり」より耳ざわりのよい警告音に聞こえる。そこで、走行時・異常停車時に

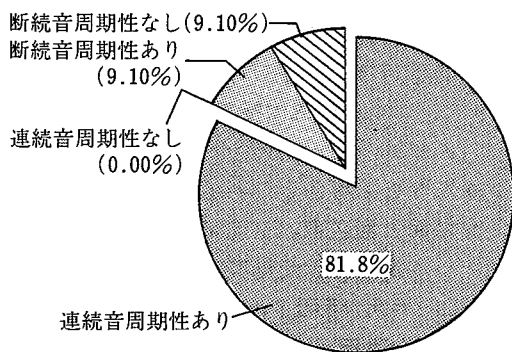


Fig. 5 Kinds of warning alarm while running. 走行時における警告音の種類

ついて警告音波形の立ち上がりを調べてみた。

Fig. 6 にその結果が示してある。これはメモスコープにトリガーをかけ、警告音の立ち上がり波形を 80 msec 間隔で掃引したものである。

走行中においては、80%が「ゆるやか立ち上がり型」を示し、20%が「絶壁立ち上がり型」を示している。異常停車時についても同じく波形の立ち上がりを調べてみると、こんどは逆に「絶壁立ち上がり型」が67%と多く「ゆるやか立ち上がり型」が33%と少ない結果が得られた。

以上 i の要件 (走行中常時鳴らす必要性あり) についてまとめてみると断続音より連続音がよく、しかも常時鳴っている必要性から耳ざわりのよい音にすべきであり、そのためには周期性をもたせ、波形の立ち上がりを「ゆるやか」に加工すべきである。

実状において上記の事項を満たしていない走行時警告音は34.6%あった。

要件 ii の走行時警告音の周期については節を改め 3・2 で述べることにする。

次に異常停車時における警告音の種類を Fig. 7 に示す。これによると「連続音周期性なし」が約 54%用いられており、残りを「断続音周期性あり」と「連続音周期性あり」とが2分し、「断続音の周期性なし」は用いられていなかった。

異常停車時の警告音が満たすべき要件を挙げると、それは走行時に鳴らす警告音との区別が明確につくということである。そのためには警告音の種類そのものを変えることが必要であり、走行時に「連続音周期性あり」を用いるのなら、異常停車時にはそれ以外のものを用いなければならない。「連続音周期性あり」以外の警告音の種類で何が適切であるかということは、ここで論じるべき問題ではなく、無人搬送車を走らせている工場内において、搬送車以外の警告音にどんな種類のものが用いられているかという点に関係しており、これらと聞き間違いが生じないように設定されるべきである。例えば工場内に電話が取り付けられているとしたら、これと聞き違える可能性のある「断続音周期性あり」の警告音は異常停車時には用いるべきではないということである。

この用途の警告音の満たすべき要件を次に挙げると、搬送車が異常停車していることを人間に早く伝えなければならない。それには波形の立ち上がりに工夫を施すべきで、「ゆるやか立ち上がり型」より「絶壁立ち上がり型」の方がその効果は大である。

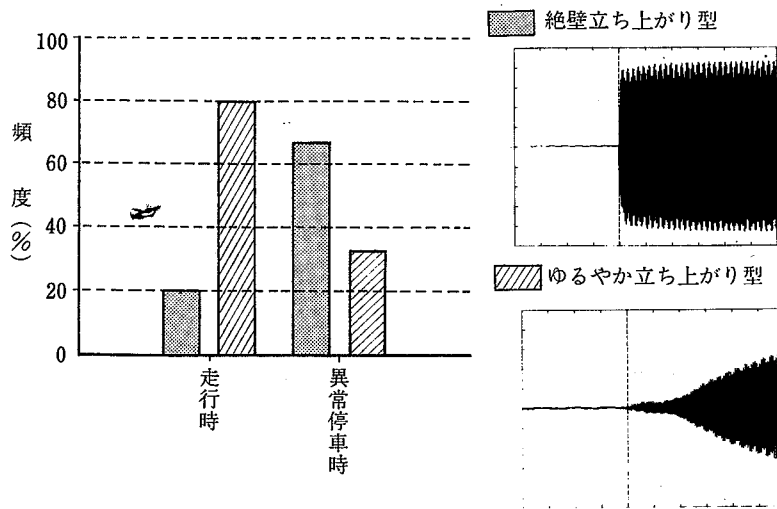


Fig.6 Differences in initial envelope patterns of warning sound (in running and at an emergency stop).
走行時と異常停車時における警告音の立ち上がり

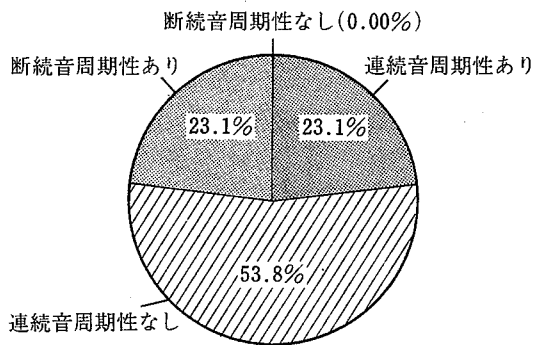


Fig.7 Kinds of warning alarm at an emergency stop.
異常停車時における警告音の種類

Fig.6によると、実状では33%が「ゆるやか立ち上がり型」を用いているが、無人搬送車システムの異常をオペレータにいち早く気付かせるためには、「絶壁立ち上がり型」の波形を用いた方がより適切である。

以上が無人搬送車異常停車時の警告音が満たすべき要件である。

3.2 走行時警告音の周期性

無人搬送車の走行中の警告音に「連続音周期性あり」が多く用いられていることは前述したが、この節では実状においてその周期間隔はどのくらいであるかについて述べる。

走行中の警告音が音の距離減衰特性を利用したものであることは先に述べたが、走行中において警告音の

周期間隔も重要な意味をもってくる。それは3.1節の要件iiでも若干触れた点であるが、車両が近づいてくるに従い距離に対応して、ひとつひとつの周期が徐々に大きくなっていくことがはっきりとわかるような周期間隔であるという必要性があり、これは車両の速度とも関連してくることである。

3.2.1 無人搬送車の速度

Fig.8に無人搬送車の车速の分布を示す。分布は3峰型で構成されているが、これは多くの車両において高速・中速・低速という3段階表示において切替えが出来、ユーザー側での選択が可能になっているためである。しかし実際、高速においては50~170 cm/sec、中速においては30~90 cm/secのバラツキを含んでおり低速においては、そのバラツキが少ないため、10 cm/secの頻度が高い。又、各工場においては高速が最も多く用いられていた。

警告音周期は車両速度とも関係してくるので、本研究テーマからは外れるが、無人搬送車の车速はどのくらいであるべきかという点に関し目安をたてておく必要がある。

车速を考える場合次の2つの事項を考慮しなければならない。ひとつは人間の歩速より速くないことであり、他のひとつは、検出センサーが障害物を検出し制動ブレーキを作動させた際、障害物に接触せず停止可能な车速を用いるということである。

高速表示において最も頻度の高い90 cm/secは、データ³⁾によると55歳の人間の歩速であること、また工

場内における運搬効率等を考えた時、高速—90 cm/sec、中速—50 cm/sec は妥当なものであると考え、第4章ではこの数値を目安として警告音の周期間隔を検討していくことにする。

3.2.2 走行時の警告音周期

Fig.9 に、無人搬送車の走行時警告音、「連続音周期性あり」について、実状において用いられている周期間隔を示す。

このグラフによると周期性のある警告音の6割以上は200 msec 以下の短周期を用いているが、他は301~400 msec, 501~600 msec, 801~900 msec と周期間隔のバラツキは大きく統一が図られていない。ひとつひとつの周期が音の距離減衰特性により、速度と同期して車両の位置を表わす信号音となるためには標準化が図られる必要がある。

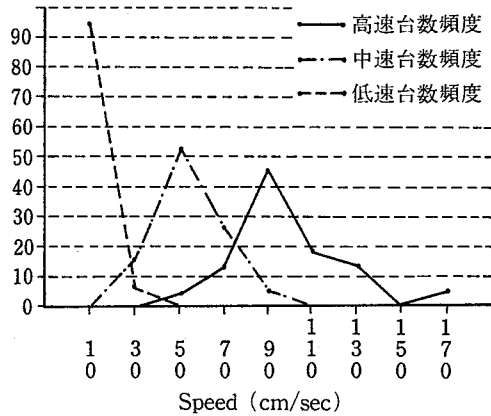


Fig.8 Distribution of speed of automated guided vehicles.
無人搬送車・車速

Fig.10 は、無人搬送車の警告音周期を、自動車のバック時の警告時あるいは我々が日常よく耳にする周期性をもった信号音と同一数直線上に位置づけてみたものである。

これによると、「そのけ・そのけ型」としてよく我々が耳にする自動車バック時の警告音周期に比べ、無人搬送車のそれは極めて短周期から構成されていることがわかる。200 msec 未満の周期というと、駅で耳にする電車発車時のベル音、火災警報器のベルと同程度の周期間隔であり、ひとつひとつの周期が搬送車の位置を知らず信号音としては周期間隔が短かすぎる。この点に関し第4章で実験を行い検証するが、少なくとも車のバック時の警告音のように500~600 msec 以上の周期間隔にすべきであることが推測される。

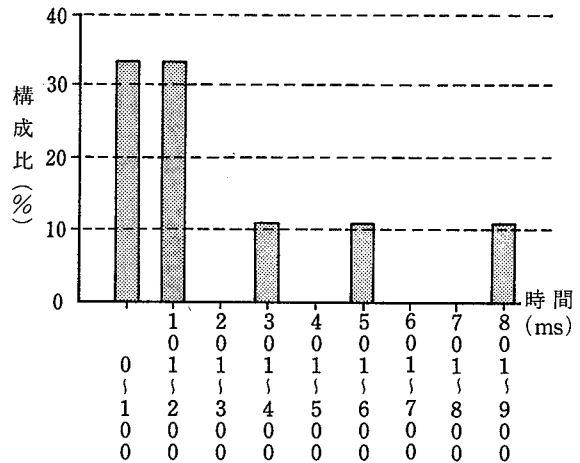


Fig.9 Periodical duration of continuous alarm while running.
走行時 連続音周期性ありの周期間隔

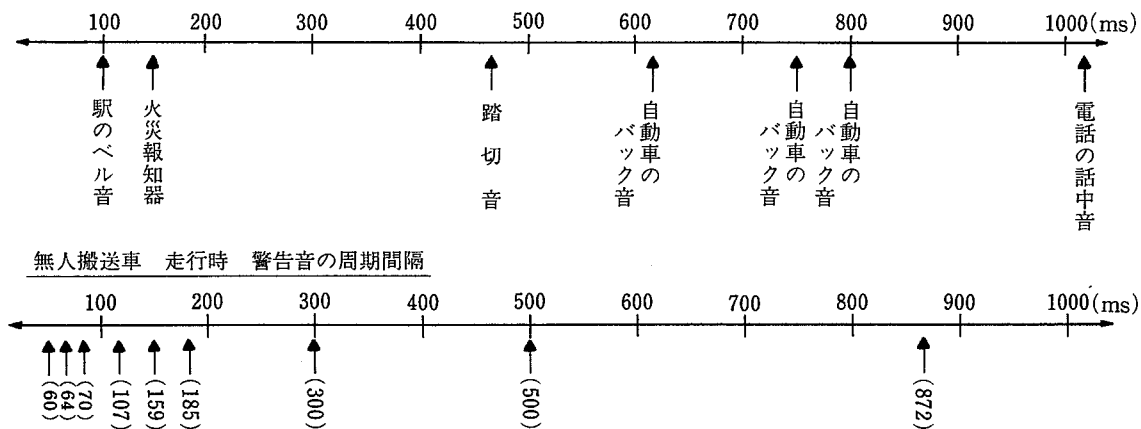


Fig.10 Periodical duration of continuous alarm used for various situations.
「連続音周期性あり」型 警告音の周期間隔

3.3 実状における問題点

無人搬送車の警告音の実状における問題点を整理すると次のようになる。

走行時の警告音について要件 i, つまり走行時常時鳴らす必要性があるので耳ざわりにならない音という点に関しては、「連続音周期性あり」で各周期の波形立ち上がりがなめらかなものが望ましいが、この条件を満たしていない走行時警告音が約 35 % あった。

要件 ii, 各周期における音の大きさが人間にはっきり認知される程度の周期間隔を要するという点に関しては、約 60 % のものが要件を満たしておらず、短か過ぎるという結果が得られたので、第 4 章において実験を行い、無人搬送車走行時警告音の至適周期間隔を検討する。

異常停車時に用いられる警告音について、波形の立ち上がりは「絶壁立ち上がり型」が望ましいが、約 33 % のものがこの要件を満たしていなかった。

4. 走行時警告音の周期間隔に関する実験

3.3 節において、無人搬送車の走行時警告音は「連続音周期性あり」が望ましいと述べたが、実状における周期間隔は 200 msec 未満の短周期が多く (60 % 以上)、音の距離減衰による周期音の大きさの変化が人間に識別されない可能性がある点を言及した。そこで本章においては、走行時警告音の至適周期間隔について実験を通して検討する。

4.1 周期音カウント実験

4.1.1 実験目的

ひとつひとつの周期音の大きさの変化を人間が識別するためには、警告音がある一定時間以上の周期間隔を有していなければならない。そこでこの実験では周期間隔が何 msec 以上になると、個々の周期の識別が可能になるかを調べるため、周期間隔を変えた周期音を何周期か被験者に聞かせ、その数をカウントさせてみた。

4.1.2 実験方法

周期間隔, 150, 200, 250, 300, 350, 500, 700, 900 msec からなる周期音を 4 ~ 8 周期分作成し、それぞれの警告音において何周期鳴ったか被験者にその数を解答させた。

Fig. 11 に実験に用いた波形の一例として、周期間隔 250 msec の警告音を 4 周期分鳴らした時のものが掲載

してある。

4.1.3 実験結果

Fig. 12 に実験結果を示す。横軸に周期間隔, 縦軸には何周期分の警告音が鳴ったかについて被験者が正答した百分率 (以下正答率という) を示してある。

このグラフによると、周期間隔が 200 msec 以下では正答率が 90 % 未満であるが、500 msec になった時 99.7 % という高い正答率が得られている。

これより、周期間隔が 200 msec 未満 (現状における無人搬送車の走行時警告音の約 6 割を占める) では、ひとつひとつの周期音を識別することはむずかしいが、500 msec になるとほとんどの者が識別可能になることがわかる。

Fig. 13 は、Fig. 12 の折れ線について最小 2 乗法により近似式を求めグラフ化したものである。近似式は、

$$Y = -3.20 E(-10) \times x^4 + 8.08 E(-7) \times x^3 - 7.38 E(-4) \times x^2 + 0.29 \times x + 59.89 \quad (2)$$

であり、実験においては、350 msec の次は 500 msec とそのパラメータが離散的数値であるのでスムージング化を行ってみた。(2)式によると $x=460$ msec で最大値を示す。



Fig. 11 Countable periodical duration wave form used for the experiment.

周期音カウント実験 波形事例

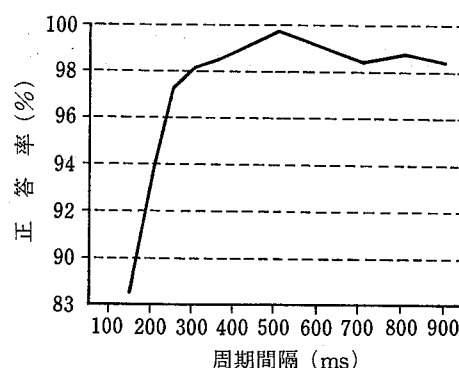


Fig. 12 Relation between periodical duration and correctness ratio.

周期間隔と正答率との関連性

また Fig.12 及び 13 をみると、周期間隔 500 msec 以上で正答率が 98 %以下にはならないが若干の低下を示している。これは、周期間隔を長くすると同じ周期回数分鳴らしたとしても、全体としての警告音発振時間は長くなることに依っている（例えば周期回数を同じに 7 回鳴らす場合、周期間隔 200 msec なら発振時間 1.4 秒、周期間隔 900 msec なら発振時間 6.3 秒）。つまり警告音の鳴っている時間が長くなると、それに伴う数え違い（短期記憶ミス）が若干生じてくるようである。しかしこれは周期間隔が短かくて周期回数を数えることが不可能であったのではなく、可能であったが数え違いをしたということなので「周期音カウント実験」の実験結果は次のように考える。

周期性をもつ警告音において、周期間隔が 500 msec 以上になると、人間はそのひとつひとつの周期について

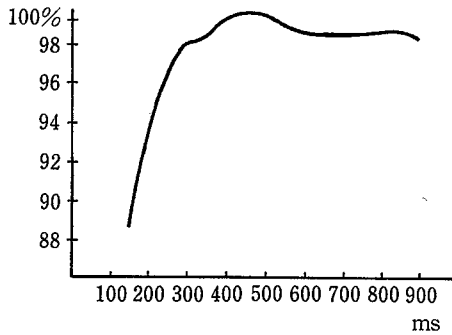


Fig. 13 Approximate curve by least squares of polynomial.
最小 2 乗法による近似曲線

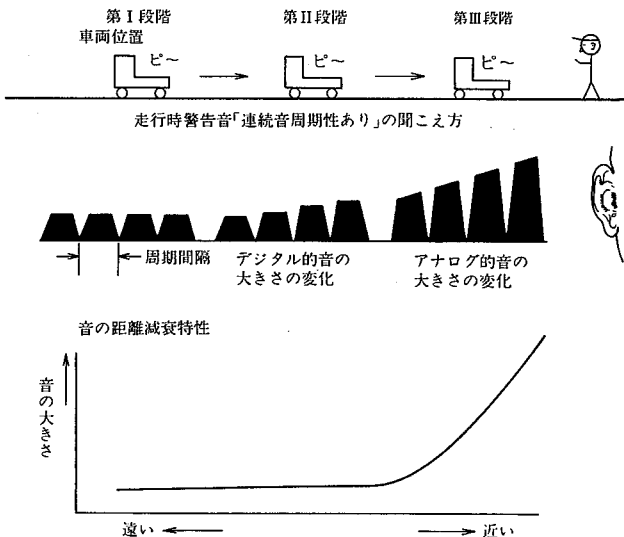


Fig. 14 Relation between alarming sound sonority and vehicle's position.
車両の位置による警告音の聞こえ方相違

て識別が可能になる。

4.2 デジタル及びアナログ音圧変化実験

移動車両の鳴らす「連続音周期性あり」型警告音を聞く時、車両が近づくに従って「ピ〜、ピ〜」というひとつひとつの周期音が徐々に大きく聞こえてくるわけであるが、その聞こえ方は人間と車両との位置関係において異なり、次の 3 段階のプロセスを示す。

第 I 段階；車両がかなり遠くにある場合

警告音が鳴っていることは聞こえているが、車両が移動するにつれての、ひとつひとつの周期音の大きさの変化は未だ感じ取れない。

第 II 段階；車両が少し近づいてきた場合

警告音が徐々に大きくなってきていると感じられる。その大きくなり方は、1 周期を単位としてその個々の周期がひとつひとつ大きくなるように聞こえる（これを「デジタル的音の大きさの変化」と名付ける）。

第 III 段階；車両が人間に接近してきた場合

警告音は次第に大きく聞こえるようになるが、その聞こえ方は第 II 段階と異なり次のように聞こえる。

すなわち、ひとつの周期音内における漸増的な音の変化が感じ取れるようになる（これを「アナログ的音の大きさの変化」と名付ける）。

この現象は音の距離による減衰のしかたが対数的に変化することにもとづいているが、Fig. 14 にその模式図が示してある。すなわち第 II 段階においては音の大きさの変化が少ないため、個々の周期間の音の大きさの変化（デジタル変化）しか聞き取れないが、第 3 段階になると音の大きさの変化分が対数的に増大するため、ひとつひとつの周期内の漸増的な変化（アナログ変化）まで聞き取れるようになる。

しかしこれは周期間隔がある程度長い場合のことであり、短周期の警告音であると、車両が接近してきた場合において周期内におけるアナログ的音の大きさの変化は感じ取れない。

デジタル及びアナログ音圧変化実験とは、周期間隔が何 msec であると人間がデジタル的あるいはアナログ的音の大きさの変化を感じ取れるか調べることを目的とした実験である。

4.2.1 実験パラメータの設定

実験パラメータは、デジタル音圧変化実験及びアナログ音圧変化実験とも同一のものとした。

Fig. 15 に音の距離減衰グラフが示してあるが、音圧

レベルは発生源との距離が近づくにつれて対数的増加をする。そこでこの対数曲線を3本の線分で近似した。すなわち10~4 m 近づくに従がい8 dB 増加する変化量, 4~1 m 近づくに従がい12 dB 増加する変化量, 1~0 m 近づくに従がい10.3 dB 増加する変化量という3つの

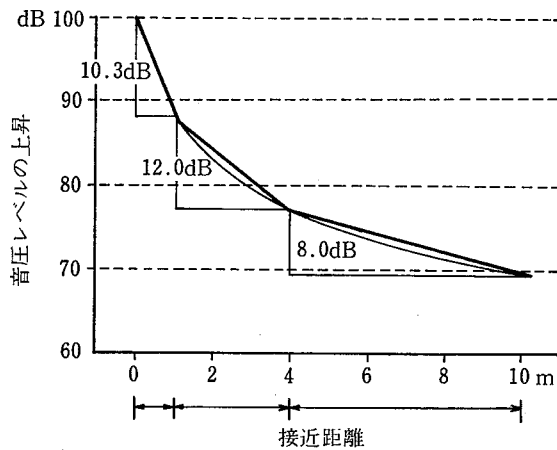
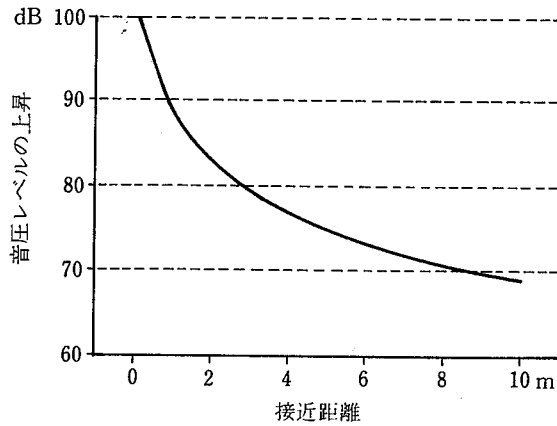


Fig.15 Decrease in sound pressure level in respect of distance.
音の減衰特性

変化量で近似し実験パラメータを設定した。

Table 3 に実験に用いたパラメータが示しており、この表における数値はひとつの周期内における車両接近による音圧上昇量を示したものである。この数値は無人搬送車車速にも関係してくるので、車速は3.2.1項で述べた高速—90 cm/sec, 中速—50 cm/sec を用いている。

次に実験パラメータの算出の仕方を示す。

遠距離(10~4 m), 高速(0.9 m/sec), 周期間隔(500 msec=0.5 sec)の欄の0.6 dB/500 msec という数値(表中★印で表示)は、

$$0.6 = 8 / ((10 - 4) / 0.9 / 0.5)$$

という式により算出している。

つまり、10 から 4 m 接近することによる音圧上昇分 8 dB を、0.9 m/sec の車速でその距離を走行する間に鳴る警告音の周期数で除して求めたものであり、線形近似量である。

Fig. 16・17 は実際に用いた波形の一例が示してある。Fig. 16 はデジタル音圧変化実験の例であるが、周期間隔 300 msec において、5 周期分示してあるうち 2 番目の周期が他の周期より 3 dB 音圧を上昇させて作成してある。また Fig. 17 はアナログ音圧変化実験の波形事例であるが、周期間隔 300 msec において、6 周期分示してあるうち 4 番目の周期の周期内音圧上昇分が 3 dB 変化させて作成してある。実験ではこれらの警告音波形を被験者に聞かせ、何周期鳴ったうち第何番目の周期の音圧レベルが上昇しているか解答させた。

4.2.2 実験結果

Fig. 18 にデジタル音圧変化実験結果が、Fig. 19 にアナログ音圧変化実験結果が示してある。両グラフ共横軸は車両位置、縦軸は何番目の周期の音圧レベルが上昇したかについて被験者が正答した百分率(以下正答率という)を示してあり、グラフ折線は各周期間隔である。

Table 3 Experimental parameters.

実験パラメータ

距離 車	遠距離(10m~4m) 8.0dB		中距離(4m~1m) 12.0dB		近距離(1m~0.1m) 10.3dB	
	高速	中速	高速	中速	高速	中速
300ms	0.4	0.2	1.1	0.6	3.1	1.7
500ms	★0.6	0.3	1.8	1.0	5.2	2.7
700ms	0.8	0.5	2.5	1.4	7.4	4.0
900ms	1.1	0.6	3.2	1.8	9.4	5.2



Fig. 16 Variation in digital S.P.L. wave form.
デジタル音圧変化実験 波形事例



Fig. 17 Variation in analog S.P.L. wave form.
アナログ音圧変化実験 波形事例

これらのグラフは無人搬送車車速が 90 cm/sec の時のものであるが、Fig. 18 によるとデジタル的音圧変化、つまりひとつひとつの周期間における音の大きさの変化は、周期間隔 900 msec の場合 10 m から感じられるが、700 あるいは 500 msec の周期間隔であると 4 m に接近してきて始めて感じ取れるようになる（正答率 80 % 以上準拠⁴⁾）。

Fig. 19 は、ひとつの周期内における漸増的音の大きさの変化（アナログ的变化）を同じく接近距離との関係で示したものである。80 % 以上の正答率が得られた

ものを挙げると、車両が 10 m の位置においてはどの周期間隔においても周期内における漸増的音の大きさの変化は感じられず、4 m に接近して始めて 700 msec と 900 msec の周期間隔で大きさの変化が感じ取れるようになる。

グラフは掲載していないが、中速の場合について調べてみると、高速に比較し速度が遅く 1 周期当たりの音圧増加分が少ないため、10~4 m の接近においてはデジタル的にもアナログ的にもその大きさの変化は感じられない。4 m に近づいてきて始めて周期間隔 900 msec の場合においてアナログ的音の大きさの変化が感じられるようになるという結果が得られた。

4.3 走行時周期間隔実験のまとめ

「周期音カウント実験」において、周期間隔が 500 msec 以上になるとひとつひとつの周期の識別が可能になることを述べた。

そこで周期間隔 500 msec 以上のものについて、デジタル及びアナログ実験結果をまとめてみた。

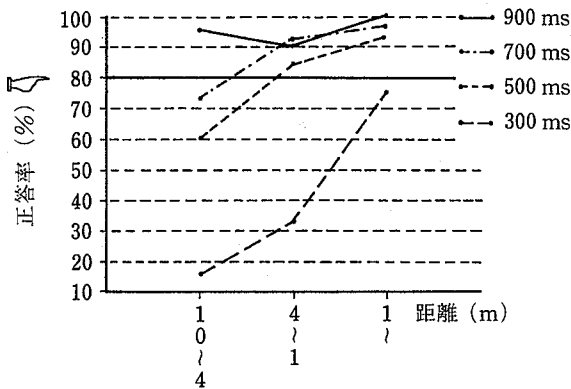


Fig. 18 S.P.L. variation of warning alarm (digital sound).
警告音における音圧変化（デジタル的）

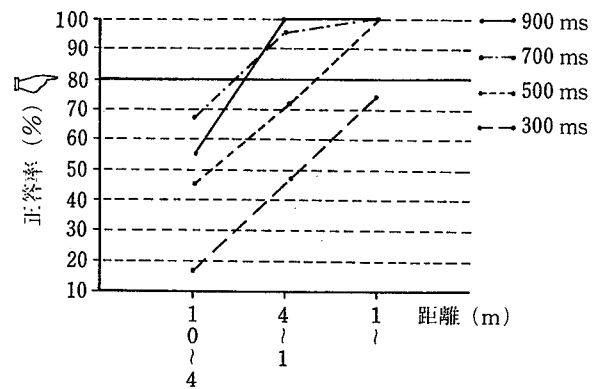


Fig. 19 S.P.L. variation of warning alarm (analog sound).
警告音における音圧変化（アナログ的）

Table 4 Arrangement of experimental results.

デジタル・アナログ実験結果

		10~4m		4~1m		1m~	
		デジタル	アナログ	デジタル	アナログ	デジタル	アナログ
500ms	高速			○		○	○
	中速					○	○
700ms	高速			○	○	○	○
	中速					○	○
900ms	高速	○		○	○	○	○
	中速			○	○	○	○

高速;90cm/s, 中速;50cm/s

Table 4 にそれが示してあるが、正答率 80 % 以上の実験⁴⁾条件についてのみ○印を付けてみた。

接近距離が 1 m 未満になると音の大きさの変化が対数的に増加するため、どんな周期間隔であっても音の大きさの変化の検出は可能である。しかし遠距離になるに従がい、周期間隔の長さが音の大きさの変化を検出する要因として影響を及ぼすようになってくる。

以上、無人搬送車の走行時警告音「連続音周期性あり」についている至適周期間隔を設定する実験を行ってきたが、遠距離 (10 m) からでも音の大きさの変化が検出可能な点において 900 msec の周期間隔を推奨する。その場合、無人搬送車が 10~4 m の接近においては個々の周期間の音の大きさの変化 (Fig. 14 における第 II 段階) のみが感じられるが、4 m からの接近においてはひとつの周期内の漸増的大きさの変化 (Fig. 14 における第 III 段階) まで感じ取れるようになる聞こえ方をする。

5. 結 論

本研究における結論を箇条書きで記すと次のようになる。

1. サウンド I.C. の普及に伴い、いろいろの音色の警告音が聞かれるようになった。現状において「ホロホロ音」、「ピーポ音」とそれらの呼称は多用であるが、安全の立場から警告音の標準化を進める際に、その用途別に警告音の呼称の統一を図っていく必要がある。
2. 本研究において、すべての警告音についてその分類が可能である 4 つの警告音の種類を提示した。それらは「連続音周期性あり」、「連続音周期性なし」、「断続音周期性あり」及び「断続音周期性なし」の 4 種類である。今後、警告音はこれら 4 種類で呼称し、現在多用化されている音色の呼称を、その用途別に整理する必要性を提案した。……Table 1 参照
3. 2 で述べた警告音の種類のうち、「連続音周期性あり」と「断続音周期性なし」との種別は人間の間隔に依存しているので不明確である。そこで感覚実験を行い、その結果を判別関数で表わし、両者の種別を判別式で行えるようにした。
4. 現状において使用されている無人搬送車の警告音を分析した。警告音は「走行時」と「異常停車時」との 2 つの用途において用いられている。

「走行時」においては走行中常時鳴らす必要があることから「連続音周期性あり」が望ましく、しかも耳ざわりにならないように、波形の立ち上がりは「ゆるやか立ち上がり型」である方がよい。実状において、35 % のものがこの条件を満たしていなかった。

「異常停車時」においては区別を明確にするため、「連続音周期性あり」以外の警告音が望ましい。又、波形の立ち上がりは「絶壁立ち上がり型」である方がよいが、実状において 33 % のものが、この条件を満たしていなかった。

5. 無人搬送車の走行時警告音「連続音周期性あり」は、車両の接近を各周期の音の大きさの変化で人間側に伝達しなければならない。そのため至適周期間隔 (msec) を求める 3 つの実験を行った。
6. 「周期音カウント実験」において、周期性をもつ警告音は周期間隔が 500 msec 以上になると、ひとつひとつの周期について識別可能になる結果が得られた。この実験結果から、現状において使用されている走行時警告音の周期間隔は、60 % のものが短か過ぎることがわかった。
7. 走行時警告音「連続音周期性あり」は、人間と車両との位置関係において次のような聞こえ方をする。第 I 段階； 車両がかなり遠くにあり、警告音が鳴っていることは聞こえるが、車両接近に伴う周期音の大きさの変化は感じ取れない。第 II 段階； 車両が少し近づいてくることにより、警告音が各周期を単位として、そのひとつひとつが大きくなるように聞こえる。…これを「デジタル的音圧変化」という。第 III 段階； 車両がかなり接近してくることにより、警告音はひとつの周期内の漸増的音の変化まで聞こえるようになる。…これを「アナログ的音圧変化」という。
8. 「デジタル音圧変化実験」及び「アナログ音圧変化実験」において、遠距離からでも周期音の大きさの変化が感じられる周期間隔を求める実験を行った。
9. 8 の実験において、周期間隔が 900 msec であると、遠距離からでも周期音の大きさの変化が感じられる結果が得られた。その際、車両と人間の位置関係 10~4 m において、7. に示した第 II 段階の変化が感じら、4 m 未満におい

て第Ⅲ段階の変化が感じ取られる(車速 90 cm/sec の場合)。

(昭和 62 年 2 月 6 日受理)

参考文献

- 1) 笹原邦夫, 佐々木弘明, “簡易型火災報知器の警報音の選択について”, 火災, 35(6), pp.18~22(1985)
- 2) 深谷 潔, 江川義之, “音響的安全防護”, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS - SRR -86, No.1(1986)
- 3) 大島正光, “高齢者労働”, 人間工学, 19(1), pp.1~7 (1983)
- 4) 神 忠久, 大串健吾, “音による避難誘導について” 照明, No.177 (通巻), pp.13~19 (1986)
- 5) I.L.McClelland, “Audible warning signals for police vehicles”, Applied Ergonomics, 11(3), pp.165~170(1980)
- 6) Peter Andow, “Alarm Systems and Alarm Analysis” Plant/Operations Progress, 4(2), pp.116~119 (1985)