

## 5. 触覚による高齢者の危険認知能力の評価

深谷 潔\*

### 5. Evaluation of Danger Perception Ability by Tactile Sense of the Aged

by Kiyoshi FUKAYA\*

*Abstract*; In this report “danger perception” implies “danger avoidance”, because the concept of “danger” implies the concept of “prediction” and “avoidance”.

Such works as trouble shooting and maintenance for machinery need that a worker approaches the dangerous zone and he has a danger perception ability. In general, the abilities of the aged tend to decrease with getting old. Therefore it is feared that danger perception ability of the aged also decreases and it is difficult for the aged to avoid danger.

In this study, the ergonomic experiments were performed to measure the danger perception ability of the aged and the young. In the experiments, the subject was indicated to take a task in the movable range of an industrial robot. In addition to that, he was indicated to push an emergency stop button in case of sudden start of robot operation, which was the danger. Response time of pushing the button was measured in several conditions, that is, by changing the direction of robot motion, the sense organ to detect the sudden start of robot operation and the work load of additional task. The period between start of trial and sudden start of operation was determined by random number.

The response time was shorter in the tactile perception than in the visual perception. In the perception by vision, a worker needs to share his attention positively not only to the work but also to the movement of robot. On the other hand, in the perception by tactile impression, the motion of the robot can interrupt a worker's operation and compel him to draw attention to the robot. Therefore, a worker can share more attention to the work itself in the tactile sense than in the vision.

The auditory perception was difficult, because the start of robot operation does not generate special sound.

The mean response time of the aged was longer than that of the young, and the deviation was larger in the aged than in the young. That means the danger perception ability of some aged persons were lower than that of the young, and they can not avoid the danger in some works which require quick response. Therefore, a supplementing device is necessary for safe work.

*Keywords*; Safety, Danger perception, Tactile sense, Elderly person

## 5.1 はじめに

生産ラインにおいては、ロボットの教示作業や、トラブルシューティング等の危険点に近接して行わなければならない作業が存在する。また、ライン周辺の物流作業においても、種々の搬送機械に近接して行う作業がある。これらの危険点近接作業は、非定常かつ不定型なことが多く、十分な設備的安全対策を行うことが困難であるため、事故防止が、作業者の危険認知および危険回避の能力に委ねられている場合が少なくない。

しかしながら、生産現場の条件の変化を考慮すると、作業者の能力に依存するのみでは、今後、災害が増大していくおそれがある。すなわち、作業側側の要因として、作業者の高齢化に伴う全般的身体的能力の低下があり、危険認知・回避の能力も低下しているものと思われる。例えば、一般に高齢者は、心身の反応が遅くなると言われているが、危険を認知してそれを回避するという行為においても、その応答が遅くなると考えられる。従って、危険回避のために敏速な応答が必要である場合には、若年者であれば事故を回避できるときにも高齢者では回避しきれず事故になる可能性が高い。また、機械の側から見ると、その高速化、大型化、複雑化により、必要とされる危険対処能力が増大してきていると考えられる。

このようなことを考慮すると、危険点近接作業のような危険性が高い作業について、作業方法を見直す必要がある。このことは、一見すると高齢化社会のデメリットと思われるかもしれないが、むしろ今までの歪みを正す好機と考えるべきである。なぜなら、従来の作業システムは、とかく機械側で容易にできることのみを機械で行い、機械化できないことを人間側の分担とすることが少なくなく<sup>1)</sup>、そのため、時に、苛酷な作業が要求されるという傾向があったからである。人間は融通性が高く、多くの場合、このような過酷な作業もこなしてきたが、事故の事例を見ると人間の能力以上のことが要求されている場合も少なくない。作業者の高齢化は、このような人間が負ってきた無理を解消せざるを得ない状況を作り出している。今後、高齢化に対応した作業形態を考える上では、人間の責任範囲を先に定めて、あとは機械側で対処するという視点が必要である。たとえ、現在の技術で対応できないとしても、必要な技術は開発するといった人間中心の作業にしていくことが

必要と思われる。

このような観点から、危険点近接作業における高齢者の危険認知、回避行動について検討した。

## 5.2 危険点近接作業における危険認知・回避

### 5.2.1 危険認知・回避の一般的性質

危険という概念を分析すると、予測の概念を含み、回避の概念と結びついている事が分かる。すなわち、危険認知は事故の予測行為であり、回避はその予測される事故を事前に避ける行為である。危険を認知するという行為は、この意味で、回避行為と結びついてはじめて完結するものである。

危険の認知・回避も人間の情報処理活動の一つであり、知覚、記憶との照合、判断、行為の実行という一般的な情報処理モデルに基づいて解釈できる。すなわち、感覚によって外界の情報を入力し（知覚）、予測を行い（判断）、知識に蓄えられている危険の条件と照合して（記憶との照合）、危険と判断されれば（判断）、回避行動を行う（行為の実行）という処理となる。

記憶、判断等の人間内部の情報処理を、さらに細かく見れば、自動的に対応する熟練ベース、規則によって対応する規則ベース、知識に基づく判断を伴う知識ベースの情報処理に分けられる。これは順番に高度な情報処理となるが、処理が高度になればなるほど処理時間もかかる。そのため、危険認知・回避において、事故発生に対する時間的余裕によって、行うことのできる処理レベルも異なる。

最も事故に対し時間的余裕があるのは、行為実行に先立つ計画段階における事故の予測回避であり、知識ベースの情報処理が中心となる。この段階では、豊富な知識を基にして、種々の事故の可能性をさぐり、対策を検討することができる。例えば、作業設計、作業前の段取り、KYTにおける危険予知とその結果に基づく作業方法の改善、安全装置や安全柵の設置等の段階が、これに該当する。なお、このような危険の認知・回避においては、経験に基づく判断を要し、経験の浅い若年者より、経験の長い高齢者の方がむしろ得意と思われる。

行為の実行時における危険の認知・回避は、十分な時間的余裕が少なくなるので、情報処理は規則ベース、熟練ベースのものが中心となる。この実行段階では、計画段階で明らかにされた危険源に対して、常時監視し、注意を払いながら作業するという行為形

態となる。危険状態が認知されたときには、定められた対処をしたり、教育訓練などで体得した対処を行う。例えば、「昇降盤作業において小物の切断の最後には押し棒を使用する。」「ボール盤加工において、ドリルが加工物にかんだらボール盤を停止する。」等の処理はこれに入る。なお、このような危険の認知・回避においては早い行動が必要となるので高齢者には不利となる。

### 5.2.2 危険点近接作業における判断と回避

危険点近接作業においては、人間が危険箇所へ近接して作業することが前提であり、事故発生要因の危険なエネルギー、人間の2つともが存在する。この場合に、事故と無事故を分けるのは、ほんの少しの距離に過ぎない。このような条件において、事故を防ぐためには、できる限り作業負担を低くするようにしなければならない。

そのためには、まず、作業空間内における危険箇所を明らかにしておくことが必要である。どこから機械が動いてくるか分からないようでは、危険認知・回避は覚束ない。さらに、この危険箇所は作業空間内に一つとなるようにすべきである。複数の危険箇所を同時に見ることは不可能であるし、あちこち注意しながら作業を行うことは、作業効率を下げる。

危険箇所を明確にし、かつそれを1つに限るためには、作業実行前の段階で、十分に危険の検討を行い、回避のための対策を容易しておく必要がある。これらの危険箇所を明らかにしたり、危険を回避する作業方法を考えることは、作業員自身が行うというより、むしろ管理者が行うべき業務である。

作業員自身が行う必要があるのは作業実行時の危険認知であるが、事前に明らかにされた危険源の監視と、明確化された基準に基づく判断であれば、記憶内容をたどっていく必要もなく、記憶誤りや判断誤りもなくすることができる。また、対処方法も明確化しておくことで、回避の誤りも減らすことが可能である。危険回避行動においては、「逃げる」「戦う」等の行為が見られ、特に「逃げる」行為が一般的と思われる。しかし、危険点近接作業においては、危険な機械の動作範囲が限られている場合を除いて、「逃げる」という回避行動は適切ではない。なぜなら、危険点近接作業においては、柵内の作業等、作業空間が限られていて逃げる余地が少なく、また、逃げることで現在の作業空間から出ると、別の危険に遭遇すると考えられる。これに対して、「戦う」すなわち、

「危険な機械を停止させる。」ことは、その手段が与えられていれば、確実な危険回避の手段であり、危険点近接作業に限らず有効な危険回避の手段である。

### 5.2.3 危険点近接作業における知覚

情報の入力感覚として、通常は、視覚的手段によることが多い。しかし、視覚による危険認知の一番の利点は、遠くから危険を認知することができ、従って余裕を持って危険を回避できることであるが、危険点近接作業においては、既に危険に接近しているため、このような利点はなくなる。また、元々危険点に接近するのは何らかの作業を行うためであり、作業の遂行のためには作業点を見る必要がある。そのため、作業点と危険点が一致しない場合には、2カ所を見なくてはならず、危険認知を行う上で不利である。

このため、視覚による知覚以外に、聴覚、触覚による方法も検討した。

これらの感覚による危険認知の特性は異なり、それぞれ、以下に示すような特徴を持つもの。

視覚による危険認知は、「遠くから認知できる。」「ただし、手前に物があるとその後ろを見ることはできない。」「情報量が多いが、一時に一つのものしか見られない。」等の特徴がある。また、作業が視覚に頼ることが多いので、視覚を危険認知のみに使うことはできない。

聴覚による危険認知は、「自分の後ろを含め広い範囲から情報を得ることができる。」「ある程度遠くからでも情報が得られる。」「手前に音源があっても音の大きさによってはそれより後ろの音を聞くことができる。」「視覚よりは情報量が少ない。」等の特徴がある。また、作業に聴覚を使用しないことも多いので、危険認知のみに使用することが可能である。

手の触覚による危険認知は、「近くのものしか認知できない。」「狭い範囲しか認知できない。」「情報量が少ない。」「振動等目に見えないものを認知できる。」「認知対象と力による相互作用を行う。」等の特徴がある。また、力による相互作用のため、腕をつつぱることで、対象との距離を一定に保つことが可能である。しかし、作業のためには手を使うなど、必ずしも情報入力に使用できない。ただし、手は2本あるので、作業が片手でできる場合には、片手で危険認知・回避を行うことも不可能ではない。

危険回避のためにはいずれにしても片手を使う必要があり、触覚による認知のために、片手が塞がれることは必ずしも不利ではない。

以上で検討したように、本研究においては、危険の認知・回避における情報処理のうち、記憶・判断・回避については、事前に検討して限定されているものとする。すなわち、危険点が明らかであり、かつ一か所に限定されていて、危険回避手段として、機械の停止手段が用意されているものとする。この条件の基で、知覚のための感覚として、視覚、聴覚、触覚を用いた場合の高齢者の危険の認知・回避行動について検討した。

具体的には、危険点近接作業として、人間が動力を入れたままロボットの可動範囲に入って何らかの作業を行う場合を想定した。この場合の危険とは、ロボットが不意起動することであり、回避行動としては非常停止をかけることを想定した。本来、ロボット作業においては、危険点近接作業のようなロボットの可動範囲に入って行う場合は、1人を監視役とする2人作業とする等の安全対策が必要である。本実験においては、ロボット作業そのものを対象とするというより、危険点近接という状況をつくるためロボットを用いた。

### 5.3 危険認知・回避の実験

#### 5.3.1 予備実験の方法

既知の危険に対して、それを認知し回避するまで応答時間を測定した。既知の危険としては、ロボットが急に動き出すというものを用い、被験者をロボットの隣に座らせて、それを監視させた。この場合、ロボットが動き出すということは既知であるが、それがいつ起こるか分からないように、ロボットが動くまでの時間を乱数によって変化させた。また、回避のための行動としては、非常停止ボタンを押すことを想定してキーを叩くという行為を行わせた<sup>2)</sup>。

ロボットが動きだしたことを認知する手段として、視覚によるものの他に、触覚による方法、すなわち、ロボットの腕を触っていて動きを認知する方法、聴覚による方法、すなわち、ロボットのモータの動作音による方法を用いた。なお、視覚によらない場合は、ロボットは被験者の横において視野に入らないようにした。

ロボットが動き出すまでの間は、ロボットの監視に専念する（作業D）という条件のほか、種々の作業を行いながら監視も行うという条件で実験した。これらの付加作業としては、作業Aは本を読む、作業Bはマイコンゲームを行う、作業Cは英語のテープ

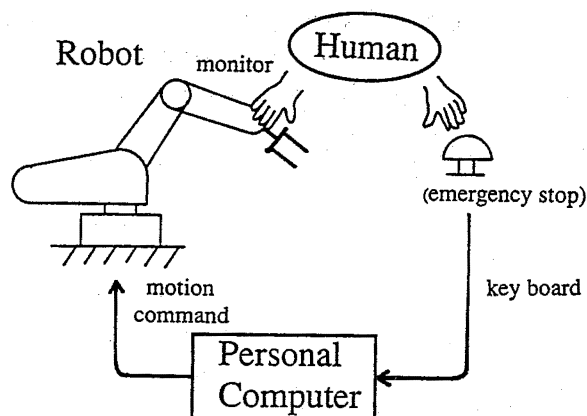


Fig. 5.1 Experiment system  
実験システム

を聴くというものを用いた。

その他の実験条件として、ロボットの運動方向、動作速度等の条件を変えて測定を行った。ロボットの運動方向は、被験者に接近する方向とそれに垂直な方向について実験した。動作速度は、高速、中速、低速の3段階について実験した。また、1回の試行開始時に被験者に合図をし、この合図からロボットの動作開始までの時間はランダムに設定したが、この待時間の平均値は何段階かに変えた。同一条件による試行は、10回行った。

なお、ロボットは小型の産業用ロボットであるムーブマスタを用い、実験の制御、時間の測定はマイコンを用いた。この実験システムの構成を Fig. 5.1 に示す。

#### 5.3.2 実験結果と考察

ロボットが動き出してから非常停止を押すまでの、応答時間を Table 5.1 に示す。

実験①では、ロボットとの距離を変えて、視覚、聴覚、触覚の3つの感覚による危険認知の応答を比較した。感覚や距離の条件の違いは、視覚相互をのぞき有意な差が見られた。

聴覚においては、ロボットが動いたことに気付かない場合が存在した。Table 5.1 の応答時間ではそのような場合は除いてある。ロボットの動作音が小さいこともあり他の感覚に較べて明らかに認知しにくいことがわかる。この実験は、事務室と同程度の騒音環境であったが、工場内ではロボットの動作音がより大きいとしても、騒音はそれ以上に大きいと考えられるので、聴覚による監視は効果を期待できない。

また、視覚による認知より、触覚による認知の方

Table 5.1 Summary of preliminary experiment  
予備実験の結果

① Relation between response time and sense  
感覚と応答時間の関係

sense	distance	response time	no response
vision	50cm	612 ± 92 ms	
vision	100cm	620 ± 40 ms	
vision	150cm	728 ± 137 ms	
audition	50cm	894 ± 69 ms	30%
audition	150cm	1106 ± 104 ms	50%
tactile	50cm	494 ± 71 ms	

② Relation between response time and robot's speed  
ロボットの速度と応答時間の関係

robot's speed	response time	wait time
16 mm/s	416 ± 96 ms	<10sec
86 mm/s	391 ± 180 ms	<10sec
163 mm/s	396 ± 57 ms	<10sec

③ Relation between response time and robot's motion direction  
動作方向と応答時間の比

up/total	forward/total	back/total
0.99		1.02
1.10	0.91	

④ Relation between response time and robot's motion direction  
付加作業と応答ボタンの位置及び待機時間

work	wait time	response time (ms)	
no	<10sec	390 ± 43	718 ± 32
no	2 ~ 3 min		72 ± 91
reading	2 ~ 3 min	608 ± 136	922 ± 79
game	<20sec		913 ± 214
hearing	<40sec	453 ± 110	
dist. hand & bottun		contact	apart

が有意に応答時間が短い。

以下の実験は、触覚による認知方式で行うこととした。

実験②では、ロボットの速度による差を比較したが、有為な差は見られず、速度による応答時間の増加/減少の傾向は見られなかった。

実験③ではロボットの動作方向による差をみたが、自分に近づくとときに応答が速い傾向が見られる。す

なわち、自分に近づくとときには、ロボット側からの働き掛けが一番大きいものと考えられ、その効果が見られたものと思われる。これについては、さらに検討を必要とする。

実験①②のように、危険検知作業に専念させた場合は良い検知能力を示すように見える。しかし、これは、危険動作が起こることが前もって分かっている場合で、かつ、待ち時間も非常に少ない場合（1分以内）である。それに対して、実験④のように、誤作動が起きるまでの待ち時間も2分以上になると、監視に専念していても明確に応答時間が遅くなる。さらに、他の作業と重なる場合には遅れが現れる。他の作業を行う場合の遅れの要因として、応答ボタンから手が離れていることが見てとれるが、現実この形態で作業を行うためには、作業のために非常停止ボタンから手が離れるものと見なくてはならない。

5.3.3 本実験の方法

ムーブマスタを用いた実験によって、

- ① 危険認知手段として、触覚、視覚、聴覚の順で応答時間の差が見られた。
- ② ロボットの動作方向により、応答時間に差の傾向が見られた。これは必ずしも有意ではない。
- ③ ロボットの動作速度は、応答時間に関係しない。
- ④ なんらかの作業を行うために、手が非常停止ボタンから離れていると、その分だけ応答が遅れる。
- ⑤ ロボットが動き出すまでの時間が長くなると、応答が遅れるという傾向がある。
- ⑥ ムーブマスタは小型で、人間の力で動作を止められそうな感じを与え、危険感がほとんどない。等の結果が得られた。これらの結果を基に、実験方法、実験内容について検討しなおした。

予備試験のときと同様に、ロボットが動き出すことを認知して、非常停止を模擬したボタンを押し、その応答時間を測定するという実験を行った。ただし、実験に使用したロボットは、ムーブマスターに代えて、中型の産業用ロボットであるモトマン L10（最大半径 1,425mm 最大回転速度 90°/s）を用いた。このロボットは人間を負傷させる能力を持つため、万一の誤動作に備えて、Fig. 5.2 に示すようにロボットをその可動範囲の一番外側近くまで移動させ、可動範囲の外側にいる被験者が手を延ばしてロボットと接触することとした。この実験の状況を Photo 5.1 に示す。

本研究は、高齢者の安全確保のための手段を検討

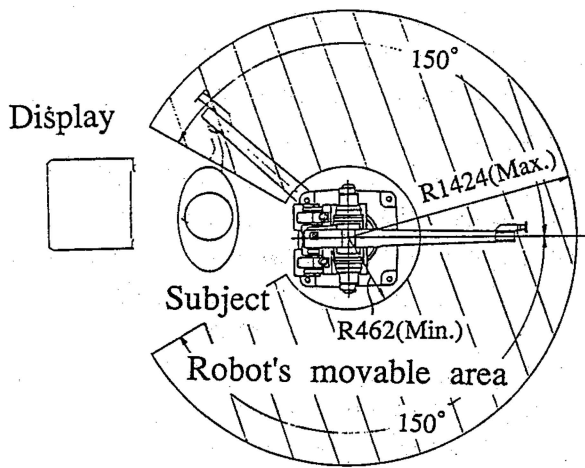


Fig. 5.2 Position of the subject  
被験者の位置



Photo 5.1 Circumstances of experiments  
実験の状況

するという目的を持つもので、被験者に高齢者 9 名（64～75 才、平均 68 才）と若年者 4 名（22～24 才）を用い、その能力を比較した。

予備試験によって、視覚と触覚による方法に差が現れたが、これについて確認するための実験を行った。視覚による方法と、触覚による方法の 2 通りについて、監視作業に専念する場合と作業を行いながら監視を行うという実験を行った。行わせた作業は、手を使用する作業であると、ボタンまで手を動かす時間が必要になるので、手を使用しない作業とした。すなわち、CRT 画面上に表示した数字を次々に読み上げさせるとした。

さらに、触覚による監視については、作業として、単に数字を読むだけでなく暗算を行うものも行った。

Table 5.2 Summary of experiments  
実験の概要

No	sense	work	button	Subject
(a)	tactile	no	hand	aged, young
(b)	tactile	read	hand	aged, young
(c)	vision	no	hand	aged, young
(d)	vision	read	hand	aged, young
(e)	tactile	add	hand	aged, young
(f)	tactile	add	robot's arm	young

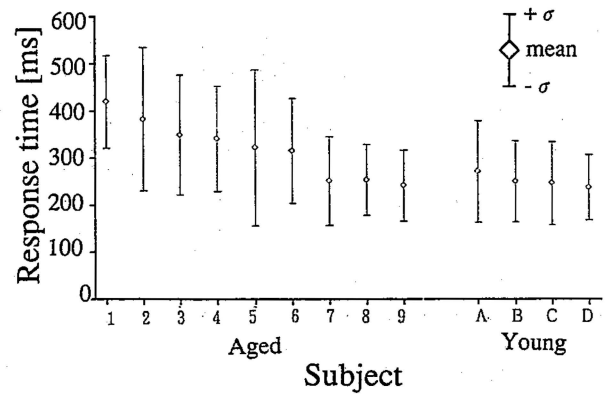


Fig. 5.3 Response times of each subject  
被験者ごとの応答時間

すなわち、表示された数字の各桁ごとにそれより 1 多い数字を読み上げさせた。数字は、0～9999 までの整数であり、乱数を用いて生成させた。表示は、右詰めで上位桁の 0 は出力されない。

予備実験では、ロボットの動作方向によって応答時間に多少の差がみられたが、これについて検討するため、ロボットの動作方法は上、下、手前、後ろの 4 方向となるようにし、どの方向に動くかは事前に乱数によって決めた。

### 5.3.4 本実験の結果

各被験者ごとの応答時間の平均と標準偏差を Fig. 5.3 に示す。高齢者群においては、個人差が大きいことがわかる。高齢者 7～9 は若年者と有意な差はないが、高齢者 1～6 は若年者群と 1% で有意差がある。また、高齢者 1～6 内でも、高齢者 1 は 3～6 と高齢者 2 は 5, 6 と有意な差がある。

高齢者と若年者ごとの、実験 (a)～(e) での応答時間の平均と標準偏差を Fig. 5.4 及び Table 5.3 に示す。また、各実験間および各実験ごとの年代間の差の

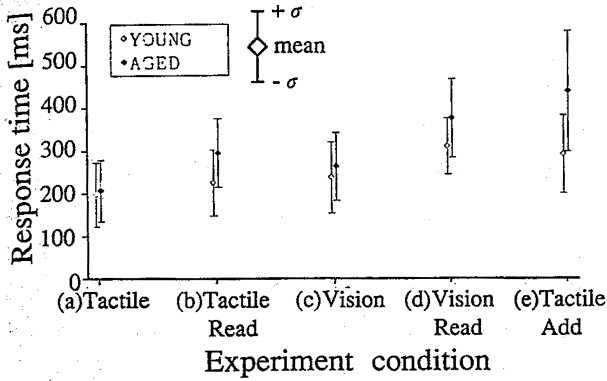


Fig. 5.4 Relation between response time and sensing organ  
感覚と応答時間

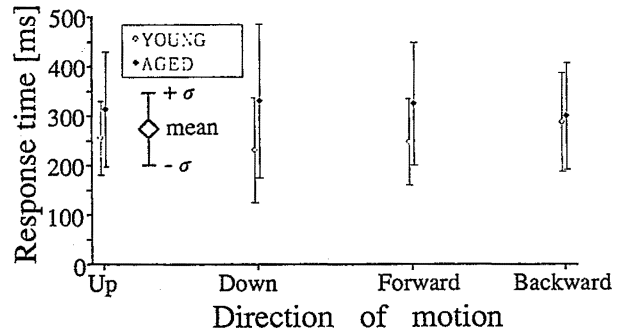


Fig. 5.5 Relation between response time and motion direction  
ロボットの動作方向と応答時間

Table 5.3 Relation between response time and sensing organ  
感覚と応答時間

expt	aged	young	total
(a)	207 ± 72	197 ± 75	224 ± 73
(b)	296 ± 81	225 ± 77	272 ± 86
(c)	263 ± 80	237 ± 84	254 ± 82
(d)	377 ± 92	310 ± 66	356 ± 90
(e)	440 ± 141	292 ± 91	394 ± 145

Table 5.4 Significance of difference between experiments and difference between ages  
実験間および年代間の応答時間の差の有意性

expt	aged				young				total				aged-young	
	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)		(d)
(a)	*	*	*	*						*	*	*	*	
(b)		+	*	*										*
(c)			*	*										*
(d)				*										*
(e)														*

+5% significant      \* 1% significant

有意性について Table 5.4 に示す。

図から明らかなように、付加作業を行った場合 ((b) と (d)) も、監視に専念した場合 ((a) と (c)) も、触覚の方が視覚より有意に (高齢者の場合は 1%, 若年者の場合は 5%の有意水準) 応答時間が短い。また、高齢者と若年者を比較すると、若年者の方が応答時間が短く、その有意水準は 1%である。ただし、監視に専念した場合 ((a) と (c)) には、その差は有意で

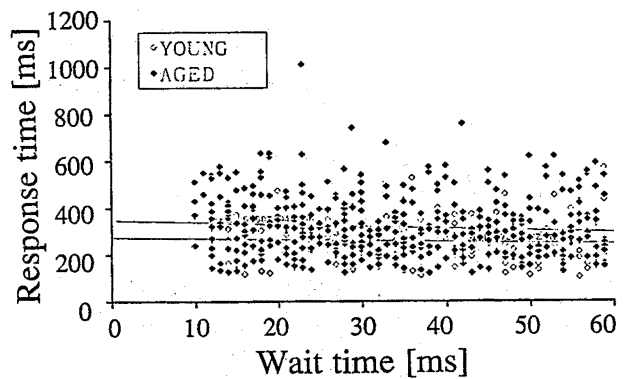


Fig. 5.6 Relation between response time and wait time  
待ち時間と応答時間

はない。

また、触覚における 3 種類の課題、視覚における 2 種類の課題については、課題が難しくなるほど応答時間が遅れるが、1%の有意水準で差がある。

高齢者と若年者ごとのロボットの動作方向による応答時間の平均と標準偏差を Fig. 5.5 に示す。図から明らかなように、高齢者においても若年者においても、ロボットの動作方向による有意な差は見られない。

ロボットが動きだすまでの時間と、応答時間の間の関係を Fig. 5.6 に示す。図より明らかなように、今回の実験のように短い待ち時間の場合には、ロボットが動き出すまでの時間と、応答時間の間には、相関は見られない。

非常停止ボタンを手に持ったときと、ロボットに取りつけたときの違いを Fig. 5.7 に示す。図に見られるように、非常停止ボタンをロボットに取りつけた

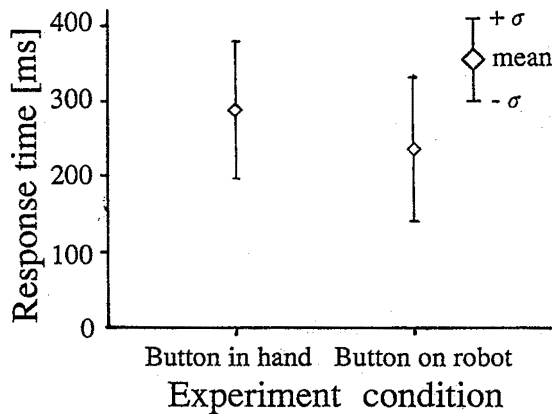


Fig. 5.7 Relation between response time and position of stop button  
停止ボタンの位置と応答時間

場合の方が応答が早い。これは5%の有意水準で差がある。

## 5.4 考察

### 5.4.1 触覚の優位性に関する考察

本実験においても、視覚による監視より、触覚による監視の方が応答が早いということが確認された。これについては、監視専業の場合も、付加作業を行った場合も、それぞれ、有意に触覚の方が応答時間が短く、予備実験の結果が確認された。

この結果を知覚の情報処理形態の特性から考察してみた。一般に感覚について、物理的刺激と感覚量の間にはWeber-Fechnerの法則が成り立ち、一対一の対数関係があることが知られている。しかし、これは、個々の感覚器官において個々の刺激に対して測定を行ったときの話であり、日常生活における刺激条件では必ずしもそのまま当てはまるわけではない。例えば、単一の感覚については、順応という現象があって、持続的に同じ刺激が継続する場合には、知覚されなくなる。また、注意という現象があって、多くの物理刺激の中から自分が得たいと思う情報を抽出している。人間の知覚において、この注意というものは重要な役割を持ち、目を向ける、近づく等の積極的な働きかけによって、関心のある対象について情報を得ている。逆にいえば、関心を積極的に持たない対象については、十分な対応はできない。

危険近接作業において、主要な関心は作業にあり、監視作業はむしろ不随作業であることを考慮すれば、危険点の監視に関心を持続することは困難であると

考えるべきであろう。特に、今回の実験のように監視対象のロボットがなかなか動かない場合には関心を持続するのは難しい。

関心が低下したときに注意を引くためには、相対的に大きな刺激が必要である。ロボットが動いたときに得られる刺激は、視覚や聴覚的な刺激としては必ずしも大きくはない。視覚については、目を作業対象に向けていても、視野の周辺で物が動くのが見えると思われるが、刺激として小さい。ちょうど動きだしたときに目を向けたとしても、刺激として大きいとはいえない。聴覚についても、動くときの音の変化は少なく、刺激としては小さい。それに対して、触覚においては、ロボットが動くことによる刺激は大きい。実際、作業に注意が向いていて監視を怠っていても、ロボットが動くので、いやでも気付かされるという側面がある。

これについては、被験者の感想として、「手を当てておくと、ロボットが動いたときに体がもっていかれる。」という感想がその意義を良く示しているものと思われる。すなわち、視覚による監視は、単に情報として与えられるが、触覚の場合には、エネルギーとしても作用するので、付加作業から回避行動に切り換えるまでの反応時間が少なくなるものと考えられる。

触覚による認知の場合、危険源と接触しているため、そのことによる危険性がある。すなわち、視覚的な監視の場合にはある程度離れていてもかまわないわけであるが、触覚による場合には、接触は不可欠であり、危険源から離れるわけにはいかない。しかしながら、手を触れるという場合には、腕の長さ分は離れることが可能でありまた、手は自由に伸び縮みすることから、コンプライアンスが大きいといえることができる。すなわち、ロボットを急停止させたとき、この腕の長さ以内で停止できないという場合には、危険認知しても回避しきれないといえるが、少なくともこの範囲で停止するという場合には、手がこの空間内の変位を吸収できる。

以上の考察から、危険認知に触覚を活用することを考えていく必要があると思われる。

### 5.4.2 高齢者の能力と安全

今回の実験で得られた応答時間がどの程度のものか検討をつけるための概算を行った。

今回の実験で用いた産業用ロボットの本モトマンの最大速度は、上腕の上下の動きが1.4m/sで、下腕の前後の動きが1m/sである。人間が、腕の長さ分約



0.5m だけロボットから離れて横に立つとしたら、水平方向に動く時人間に当たるが、最高速度で暴走するとすると、0.5 秒以内に停止させる必要があるということになる。

また、今回の実験とは条件が異なるが、ロボットの教示作業時の挙動を考える。人間がロボットに 0.3m 程度まで接近し、教示速度 0.3m/s のロボットの教示を行うものとする。このとき、操作エラー等により教示速度で接近を始めた場合、余裕をみて 0.15m 以内で停止させようとする、0.5 秒以内に応答しなくてはならない<sup>3)</sup>。

Table 5.3 に示したように、 $3\sigma$ までとって、監視に専念する場合には、危険認知・回避時間は高齢者で 503 ms, 若年者で 489 ms であり、ほぼ安全条件内に入る。しかし、何かの作業を行う場合には、 $3\sigma$ までとると若年者で 564 ms, 高齢者で 863 ms になり、若年者はともかく高齢者についてはこの安全条件ではかなり危ないといえる。まして、現在では、ロボットの最大速度が 6m/s に達するものもあるということとを考慮すると、若年者といえども回避可能とはいえない。

機械には、非常に早く動くものから非常にゆっくり動くものまであり、高齢者であっても危険を認知し回避できる可能性があるといえる。また、非常に早く動いて、瞬時に応答することを要するものでは、若年者といえども対応しきれない。逆に、非常に動きが遅いものについては、気付いたら挟まれていたという災害事例から考慮すると、今回の実験とは別種の資質が必要であり、別途検討すべきものと思われる。

この実験において、ロボットが動くという危険状態が発生することが明らかであり、かつ、それまでの時間がかなり短かったので、高齢者でも敏速に異常に対処できる人がいた。危険点近接作業は、望ましい作業ではなく短時間に限り認めてもよいということを前提とすれば、この実験の条件が現実から掛け離れているというわけではない。しかし、作業時間が長くなると、今回の実験と現実の条件が離れてくる。従来から、起きるかどうかが事前に分からない異常の発生をじっと待つということは人間は苦手であり、その検知成績は大幅に低下することが知られている。そのため、検場作業では、わざわざ不良な場を混入し、異常状態に対する準備態勢を維持している。また、高齢者は、個人差が大きく、個別に能力

を試験して選別するのでなければ、平均的に応答の敏速性は若年者より劣ると考えるべきであり、危険によっては回避できたものが回避できなくなることがある。この面から、人間の能力のみに頼ることは危険である。

#### 5.4.3 非常停止方式の改良と評価

実験で行ったような、動きだしたことを検知して (T) 非常停止ボタンを押す (B) のでは、検知とボタンを押すという 2 カ所で積極的行為を必要とする。検知については、触覚を用いる事で、ロボットの側からのエネルギーとしての働き掛けが期待でき、これについては、人間がある程度怠けていても気付かせることができると思われるが、非常停止ボタンを押す行為は怠けてはできない。この部分も含めて、ロボットの側から補助できれば、人間の失敗を防止できる可能性がある。

そのため、この部分を統合した形態として、非常停止ボタンをロボットの腕に設置し、人間は常に非常停止ボタンに手をかけて作業するという方法を考えた。この場合、人間が腕を保持している (H) ところに向かってロボットが暴走する (Rel) と、その動きで非常停止ボタンが押される (B) ことになる。誤りを考慮した論理構造は、

$$B = H^* \cdot H \cdot \text{Rel}$$

となる。ただし、 $H^*$  は H の正常性を示す論理変数である。最初から手を出していないとか、ロボットを避けるために手をどける等をしなければ、非常停止ボタンを押すのに必ずしも人間の積極的行為を必要としないので、非対称性を持ち得ると考えられる。

このような予想の下に、ロボットの腕に押しボタンを取り付け、前述の危険認知実験 (f) を行った。

その結果は、Fig. 5.7 に示したように応答時間は多少早くなったが、必ずしも自動的にボタンが押されるということにはなかった。すなわち、ロボットが動くことで人間の腕を動かし、これによって危険を認知し、指でボタンを押すという形態であった。ロボットがボタンを押すのではないということは、ロボットがボタンを押すことができる接近方向の動きとそれには寄与しない遠ざかる動きあるいは、人間に対して距離が変わらない上または下への動きの間に、応答時間の差が見られないという結果からも明らかである。予想したように、ロボットが非常停止ボタンを押すためには、人間が空中に手を保持しなければ

ならないが、これは非常に困難であり、実際には、手をロボットにもたれるかたちとなる。これでさえ疲れることが、被験者の「ボタンを押すために腕の位置が決められてしまい、動かさないので疲れた。」という実験に対する感想からわかる。

この実験の結果から、ロボットの腕に非常停止ボタンを設けることは、動きだしたという危険の認知と回避のための停止操作を片手で行うという意味しか持たないことが明らかになった。

## 5.5 おわりに

危険点近接作業を高齢者が行うということを想定して、危険認知・回避の実験を行った。その際に、危険点が明確になっていて、かつ一つに限定されているものと仮定した。現実の危険近接作業においては、もっと多くの危険点が存在すると思われるが、その場合には、危険の認知・回避が一層困難になる。最初に述べたように、人間のできる範囲を明確にし、現実をそれに近づけるという観点からは、人間にとって容易な条件から検討することが適切である。

実験においては、ロボットに接近して何らかの作業を行っているときに、ロボットが急に動き出すという危険が発生してから、非常停止ボタンを押すという回避行動を取るまでの応答時間を測定した。

ロボットの動作を検知するために、視覚によるもの、触覚による方法、聴覚による方法を用いて比較検討し、触覚が優位であるという結果を得た。作業を行っているときどうしても注意が作業の方に向いてしまい、監視の方に注意を払うのを怠りがちになる。このような場合に注意を引きつけるには、大きな刺激が必要であるが、ロボットが動くことは、視覚上や聴覚上は大した刺激にはならないが、触覚に対しては大きな刺激になる。従って、このような危険を認知する上で、触覚をもっと活用すべきと思われる。なお、危険回避を成功させるためには、最低限度の距離を危険点から離すということが必要であるが、腕を伸ばすことで、この距離を確保できる。

高齢者と若年者を較べてみると、監視に専念する場合には両者で有意な差はない。高齢者でも人によっては若年者と変わらない等の結果もあるが、高齢者

全体としては若年者より認知回避が遅い。これは、高齢者は個人差が大きく、若年者よりかなり応答が遅い人がいるためであるが、その人達も、特に身体に問題があるというわけではない。

高齢者をこの種の作業に従事させるためには、応答速度の試験をして早い人間のみ選ぶという考え方もあるが、その人達も常時そのレベルを維持できるとはいえない。すなわち、危険事態が発生しない場合には、段々注意が低下する等により、危険回避が間に合わなくなる可能性もある。その意味で、人間の認知回避能力のみに期待することは、事故を招くおそれがある。むしろ、適切な安全対策を施して、応答の遅い高齢者でも安全の作業できるようにしていくことが望ましい。

そのため、人間に代わって機械の監視を行う安全装置を検討、開発中である。これについては、特別研究第2報において報告する予定である。このような安全手段を用いることで、高齢作業も安心して作業ができるようになると思われる。

(平成5年10月1日受理)

## 謝 辞

討論に参加してくれた機械研究部の糸川主任研究官、杉本主任研究官、ならびに被験者として協力してくれた清瀬市の高齢者、東京工科大、明大の学生諸氏に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば、森清：ハイテク社会と労働 — 何が起きているか —、岩波新書 (1989), p. 34.
- 2) 深谷、池田：接触による人間の危険認知能力とそれを補完する簡易型ホールド検知センサについて第8回ロボット学会学術講演会、(1990), pp. 351-354.
- 3) 杉本、深谷：教示操作実験による産業用ロボットの教示速度の限界、JASME 関西支部 59 期総会 (1984), pp. 88-90.
- 4) 糸川、杉本、深谷、他：安全制御のための基本要素、産業安全研究所特別研究報告 (RIIS-SRR-90), (1990), pp. 55-58.