

## 7. 倉庫作業用挟まれ防止システムの安全性評価に関する研究

梅崎重夫\*, 清水尚憲\*

### 7. Safety Evaluation of Prevention System for Crushing in Warehouse

by Shigeo UMEZAKI\* and Syoken SHIMIZU\*

*Abstract*; The operation in warehouses which many aged workers are engaged in can be characterized by the fact that they are forced to work near many dangerous moving machines such as stacker crane, automatic guided vehicle and motor-driven door of cold warehouse. For this reason, some rules of stopping machines when they operate or approach machines are usually established in industries, but actually there are many other operations without stopping machines, so that many serious accidents have sometimes occurred during the execution of these dangerous operations.

In this report, a new type of prevention systems for crushing which can be adaptable to these operations is proposed. The authors made use of a kind of touch sensor "safety edge"; that is, detect the human presence directly, which is one of effective safety means for these operations.

The conventional "safety edge" has already applied to a motor-driven door for cold warehouses. Nevertheless, many serious accidents due to doors have been caused in warehouses by inappropriateness of safety edges, because the crushing force of doors with safety edge is in large excess or safety edges have not fail-safe characteristics. In addition, the method of deciding human tolerance for crushing and the appropriate design for "safety edge" were also discussed to solve these problems.

The results of this research are summarized as follows:

- (1) A method of deciding human tolerance for crushing with taking no consideration of safety factor was proposed. This method uses the feeling of pain caused by crushing between human and safety edge. If this feeling can be substituted for the physical characteristics of human body, it may be possible to predict real crushing accidents by using this physical characteristics objectively.
- (2) The means of controlling the crushing force with human tolerance was proposed by using the "compliant safety edge" which consists of soft elastic bodies or plate spring. The latter safety edge can suppress the crushing force within about 3 kgf when it is applied to the motor-driven door of cold warehouses.
- (3) The characteristics of fail-safe safety edge is clarified. The output voltage of it decreases according to the distance between the machine movable part and human is coming close.

*Keywords*; Safety, Safety Control, Sensor, Human Engineering, Warehouse

7.1 緒言

高齢者比率の高い倉庫作業場<sup>1)</sup>では、荷の運搬や取扱いのように作業者が直接介在する不定形な作業が多い。この種の作業は機械化の困難なものが多く、仮に機械化しても多くの作業は作業者が機械の危険な可動部に接近した状態で行わざるを得ず、これが災害多発の原因となっている。

一方、近年、大型化した無人倉庫システムが各現場に急速に普及しつつあるが、このシステムでは、倉庫内での保守点検や荷崩れ処理等の作業を、作業者が広大な倉庫内に立ち入って行わざるを得ない。このため、作業者が倉庫内を走行中のスタッククレーンに挟まれるなどの災害が多発している<sup>2)</sup>。また、倉庫周辺に存在するパレタイザや無人運搬車等による挟まれ災害も無視できない。

上記のような災害を防ぐには、現状では「電源を落としてから作業する」、「機械の近くに人がいないことを確認してから電源を投入する」以外に有効な対策はないと考えられている。しかし、現実には、電源を投入したまま機械の危険な可動部に近接した状態で行う作業（以後、これを「危険点近接作業」と呼ぶ）が存在し、これが倉庫作業で災害が多発する原因となっている。そこで、本研究では、上記の危険点近接作業に対する安全手段として、接触式の人体検出センサであるセーフティ・エッジ<sup>3)</sup>を利用した挟

まれ防止システムを提案している。

実際の倉庫作業では、冷蔵倉庫の電動扉のように、セーフティ・エッジを利用した挟まれ防止システムが適用されている例もある。しかし、近年、このシステムが適用されているにもかかわらず、扉に人間が挟まれて死亡するケースが報告されている。この原因には、電動扉の移動速度が比較的遅く危険感に乏しいため、人間の不用意な接近を招く等の要因もあるが、扉に設置されている挟まれ防止システムにも何らかの問題があると考えられる。そこで、本研究では、実機を利用して、既存の挟まれ防止システムが持つ問題点を抽出し、これを解決するための人間工学的条件や、セーフティ・エッジの構成法等に関する基礎的考察を行った。

7.2 電動扉用挟まれ防止システムの問題点

7.2.1 システムの基本構成

冷蔵倉庫は、大量の冷凍食品を保管するために、食品会社や卸売り市場等に設けられている設備である。Fig. 7.1 は、この設備の基本構成である。Photo 7.1 は、この設備の外観である。

この設備では、製品の運搬作業は、人間がフォークリフトを運転しながら倉庫内に入出入りして行うことが多い。このため、多くの倉庫では、フォークリフトを光電管等によって自動的に検出して、倉庫出入口の電動扉 (1)(Fig. 7.1, Photo 7.1 参照) を自動

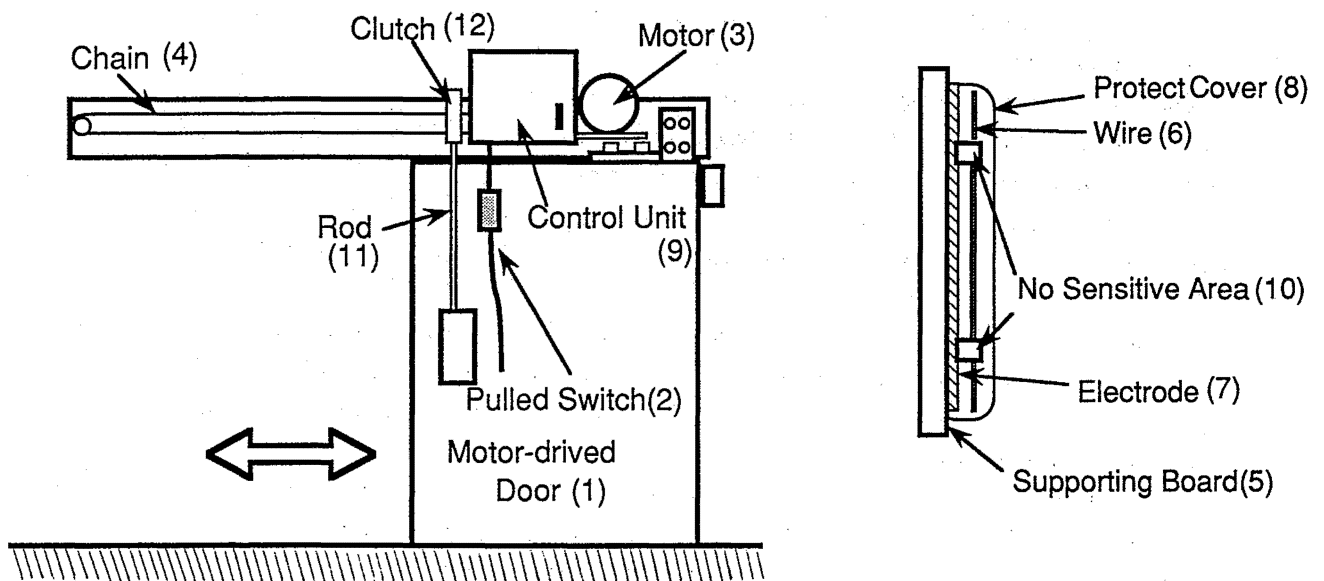


Fig. 7.1 Motor-driven door and safety edge of cold warehouse  
冷蔵倉庫用電動扉のセーフティ・エッジ

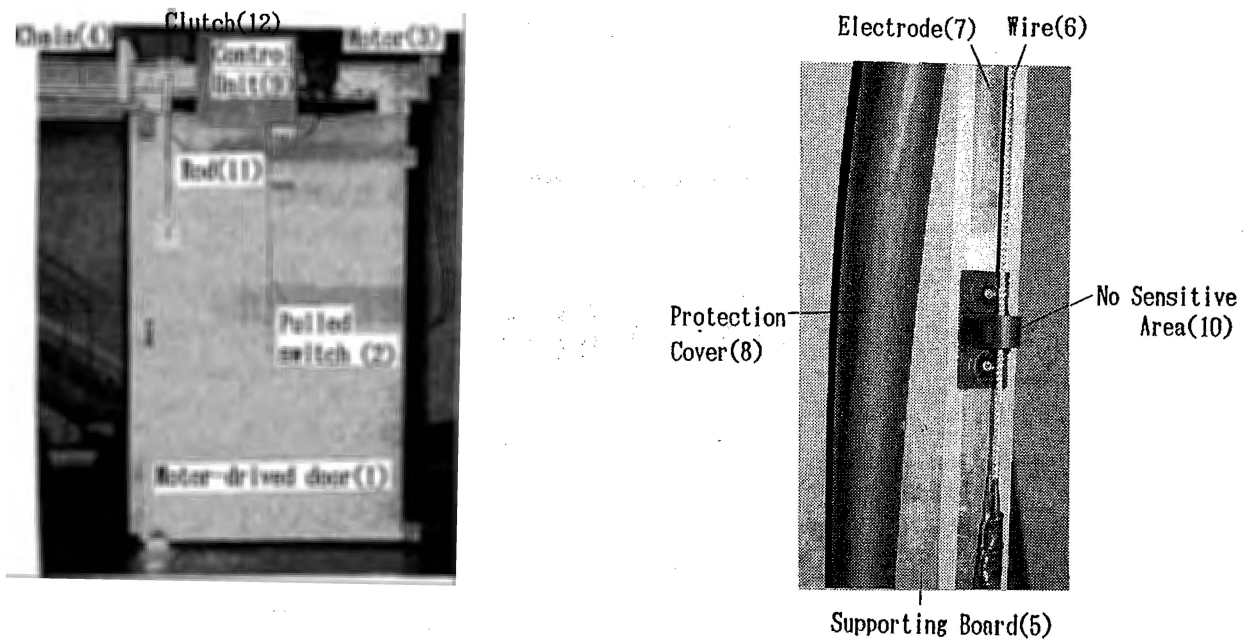


Photo 7.1 Motor-driven door and safety edge of cold warehouse  
冷蔵倉庫用電動扉のセーフティ・エッジ

的に開閉している。また、冷蔵倉庫の出入口にプル・スイッチ(2)を設け、これを人間がフォークリフトに搭乗したまま操作して、電動扉を開閉するタイプも多い。特に、この設備で安全上問題となるのは、人間がフォークリフトを使用せずに、出入口を通過する場合である。この場合、人間は、プル・スイッチやボタンスイッチ等を操作して、扉を自動的に開閉する場合が多い。

いづれのタイプの設備でも、電動扉の開閉はモータ(3)と直結したチェーン(4)によって、扉を直接駆動して行われる。このため、万一人間が扉に挟まれると、引張側には遊びの少ないチェーンの作用によって、人体許容限界を超える挟まれ力が生じる。そこで、多くの装置には、人体が扉に挟圧される前に、予めこれを検知して通報するためのセンサ(セーフティ・エッジ)が設けられている。

このセンサは、支持体(5)の上に、人体を検出するためのワイヤ(導線)(6)と電極板(7)を対向して設置し、これを扉の挟圧危険箇所に取り付けた構造のものが多い。このワイヤと電極板は、保護カバー(8)によって防護されている。

上記のような構造のために、この設備では、扉が閉ろうとする時に、人間が扉に向けて進入すると、人体がこのセンサのワイヤと接触し、その結果、ワイ

ヤが電極板に当たり電流が流れる。この電流変化を制御回路(9)が検出すると、制御回路はモータを反転させるための指令を与えるので、これにより扉は開く側に作動し、災害は回避できる。なお、写真の設備は当所の実験装置であり、災害の発生した設備ではない。

#### 7.2.2. 実機による問題点の確認

上記のような挟まれ防止システムの適用により、電動扉による災害は著しく減少したと考えられる。この意味からも、このシステムの災害防止の効果は大きいものであることを、まず認めなければならない。しかし、一方で、このシステムには、安全上、改善を要するいくつかの問題点が認められる。たとえば、このシステムでは、万一センサが故障すると、扉を反転できないおそれがある。

この故障は、きわめて稀にしか起こらないと考えられるが、冷蔵倉庫のように過酷な環境で使用される機械では、フォークの激突によりセンサが破壊したり、温度低下によりセンサや制御回路が異常動作を起こしたり、保護カバーが硬化する等の事態が生じないとも限らない。また、このセンサでは、ワイヤと電極の接触によって人体を検出しているが、金属間の接触には接触不良という問題が必ず伴う。これらは、事実上、センサの故障と同等の影響がある

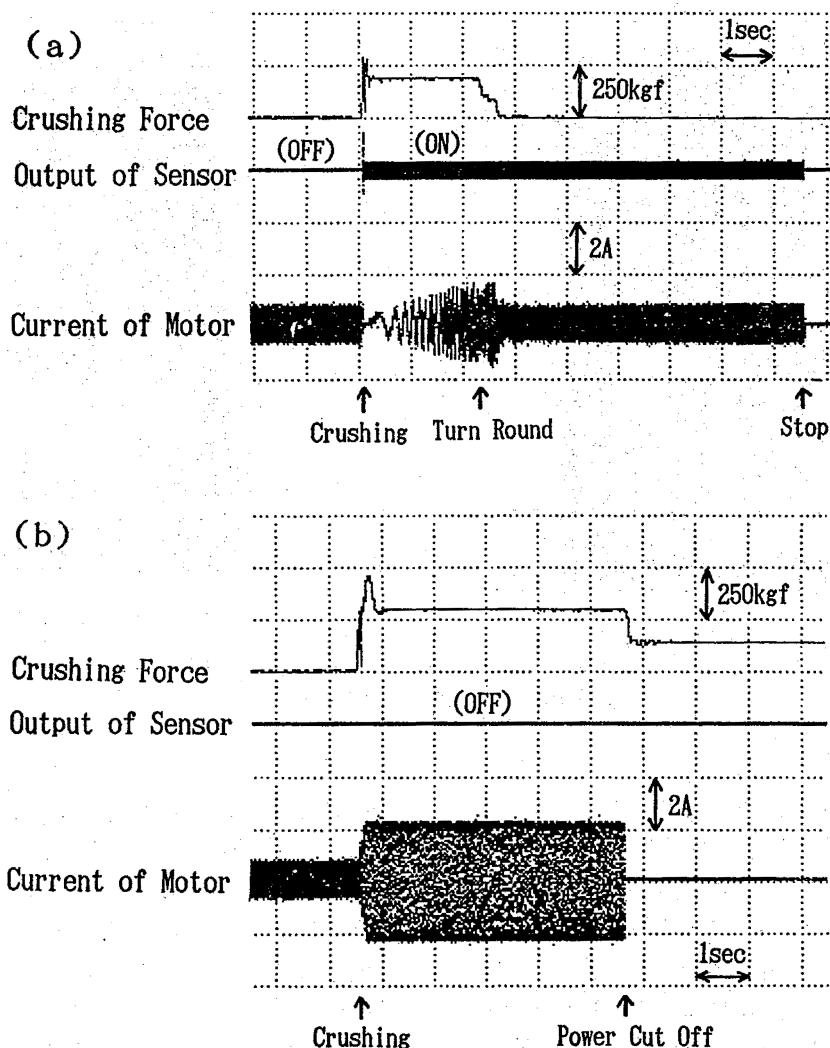


Fig. 7.2 Characteristics of crushing prevention system applied to motor-driven door  
 電動扉用挟まれ防止システムの特徴

と考えられる。そこで、本研究では、当所の試験機として購入した冷蔵倉庫用電動扉を利用して、センサが故障したときの状況を確認するための実験を行った。

実験に使用した電動扉は、モータ（4極、0.3 kw、交流 200V のギヤードモータ）に直結したチェーンによって駆動される両開き扉である。この扉の高さは 2m、幅は 1 枚につき 1.3m、厚さは 13 cm、重量は 90 kg で、扉の移動速度は約 8 m/min を標準としている。なお、挟まれ試験体には、最悪値評価を行うため、人体と比較して剛性の高いアルミ丸棒（直径が 50 mm、全長が 240 mm）を用いた。

Fig. 7.2 は、センサ有効時と故障時の試験体の挟まれ力を比較したものである。この挟まれ力の測定

には、上記のアルミ丸棒の一端に、最大 2000 kgf まで測定可能なロードセルを設けて、計測を行った。

Fig. 7.2(b) より、センサ故障時には、試験体は約 300 kgf の力で挟圧されることが分かる。この力は、センサ正常時の挟まれ力 (Fig. 7.2(a) 参照) より約 50% 大きい。しかも、センサ正常時には、制御回路はただちに扉を開く指令を与えるため挟まれ力は数秒しか作用しないのに対し（インバータの設定を変えれば、数秒を経ずして直ちに扉を反転させることも可能である）、センサ異常時にはこの力が継続して作用するから（仮に電源がトリップしても、扉はロックされたままの状態となるため、挟まれ力は半分程度に減少するものの作用し続ける、Fig. 7.2(b) 参照）、

この力によって人体の胸部等が長時間圧迫され、死亡災害に至るものと推察される。

実験の結果、このセンサの問題点は、必ずしも故障時の挙動だけではないことが分かった。例えば、このセンサは、Photo 7.1 に示すような不感部 (10) を持つために、試験体が不感部に挟まれたときは、センサが故障したときと同様の現象が生じる。

また、このセンサでは、仮にセンサが故障していかなくとも、試験体に作用する力は約 200 kgf と非常に大きい。従って、上記のような災害を防止するには、センサや制御回路をフェールセーフにし、センサの不感部をなくす等の措置を講じるだけでなく、仮に人体が扉にはさまれても、その挟まれ力が人体許容限界以内となるように挟まれ力を抑制しなければならない。以後、この許容限界を人体挟圧限界と呼ぶ。次に、この人体挟圧限界の設定と、挟まれ力の抑制手段について考察する。

### 7.3 人体挟圧限界の設定に関する実験と考察

#### 7.3.1 人体挟圧限界と痛覚情報

解剖学分野では、人体の各要素が破壊に至る力を材料力学的観点から解明する研究が行われている<sup>4)</sup>。従って、この結果に対して適切な余裕度 (安全率) を定めれば、これを人体挟圧限界として扱うことも可能と考えられる。しかし、実際には、安全率の評価は個々の設計者や対象によって千差万別であり、この決定法がルール化されない限り、人体挟圧限界が明確に定められたとは言えない。そこで、本研究では、安全率に依存しない方法として、人体の破壊を予測する何らかの事象を実験的に明らかにし、この事象の発生をもって災害を予測し、回避することにした。このとき、人体挟圧限界は、この事象が発生するときの力として定めることができる。

上記の事象には、人間の何らかの感覚を利用することが考えられる。特に、挟圧現象との関連で言えば、人間による痛みの感覚 (痛覚) を利用する方法がある。なぜなら、人間は生物としての長い歴史の中で、この痛覚情報を利用して、自らの生存を脅かすような事態を巧みに回避してきたからである<sup>5)</sup>。従って、この情報を利用すれば、痛みの発生によって災害を予測したり、痛みの大小を危険度の尺度として利用できるものと考えられる。

一方で、痛みは人間の主観に基づくものであり、客観的な尺度にはなり得ないとの見解もある。しかし、

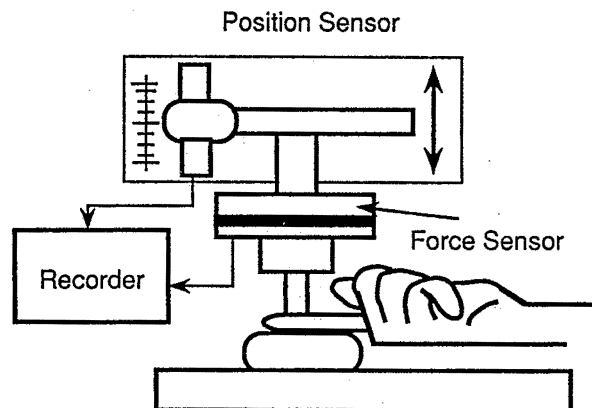


Fig. 7.3 Construction of experimental equipment  
実験装置の構成

いままもし、この痛みの発生と関連して何らかの人体物理特性が変化すれば、「痛み」という主観を「人体物理特性」という客観に置き換えることができるから、主観を客観に置き換えて評価することが可能となる。さらに、この情報が、真の人体破壊に至る以前に必ず生じるものであることが明かとなれば、この情報は災害の予測情報としても利用できる。そこで、本研究では、人体を挟圧していったときの挟圧力-変位曲線を調べ、この曲線上で、痛みの発生を何らかの人体物理特性の変化に置き換えることが可能か否かを検討することにした。また、このときに明らかとなった痛みの受忍限界と、解剖学的実験から知られている人体強度とを比較して、痛みが災害の予測情報となり得るか否かを検討した。

なお、実際の人体挟圧限界を定める場合、人体のどの部位を対象としたものであるかを明確にしておく必要がある。また、この挟圧限界は、変位と力のいずれかの物理量で定めることが可能であるが、ここでは災害の直接原因である力によって人体挟圧限界を定めることにした。さらに、この限界は、単位面積 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) あたりの力とするのか、人体に作用する力の総和 ( $\text{kgf}$ ) とするかで、その数値は大きく異なる。実際には、この両方が必要となる場合が多いが、ここでは実験方法を簡素化するために、まず、対象とする身体部位を最も挟圧災害の多い指 (たとえば、ゴム製品製造業での統計によれば、休業 4 日以上の災害の約 6 割は指の災害である<sup>8)</sup>) に限定し、この指に作用する力の総和をもって人体挟圧限界を定めることにした。

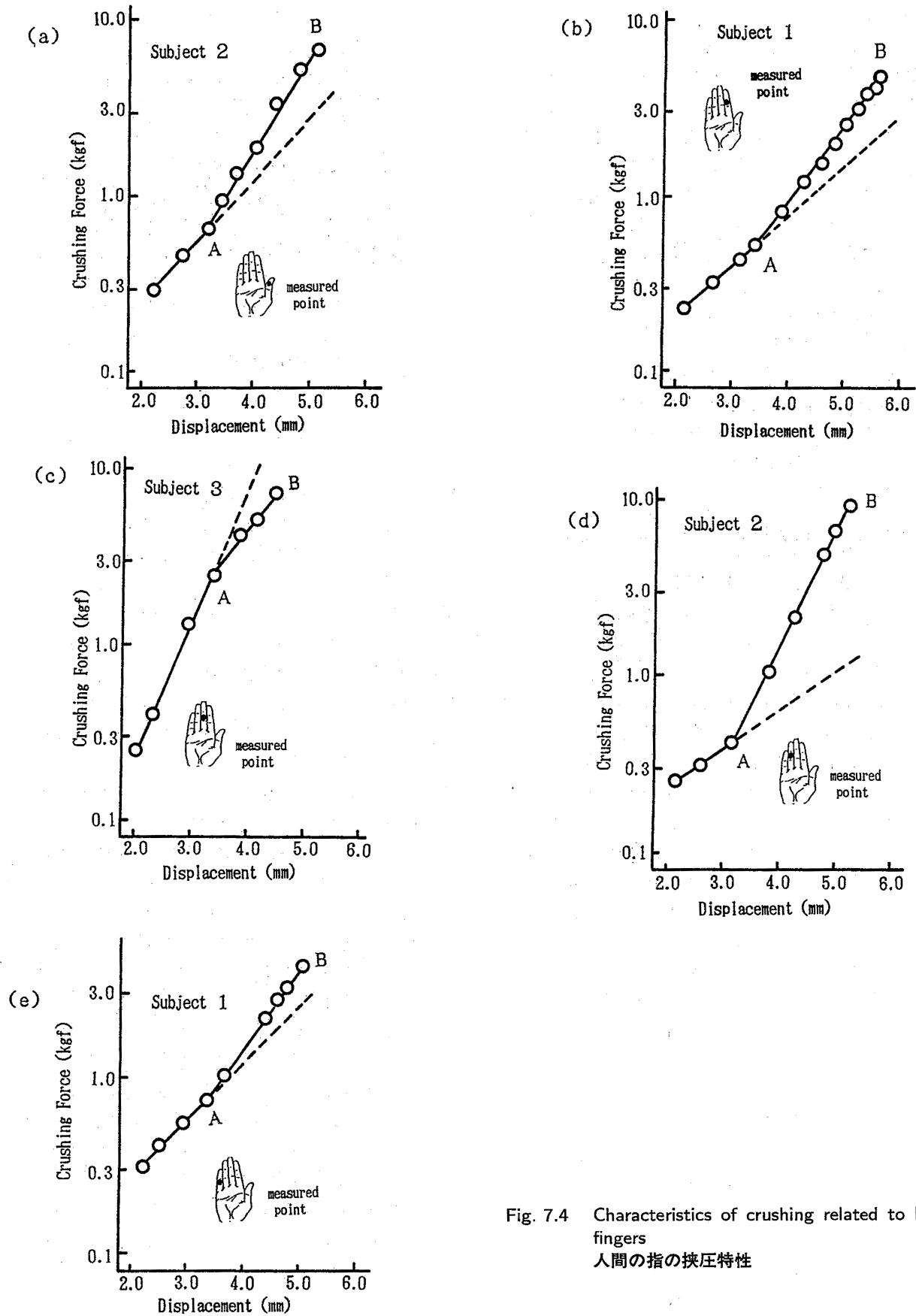


Fig. 7.4 Characteristics of crushing related to human fingers  
人間の指の挟圧特性

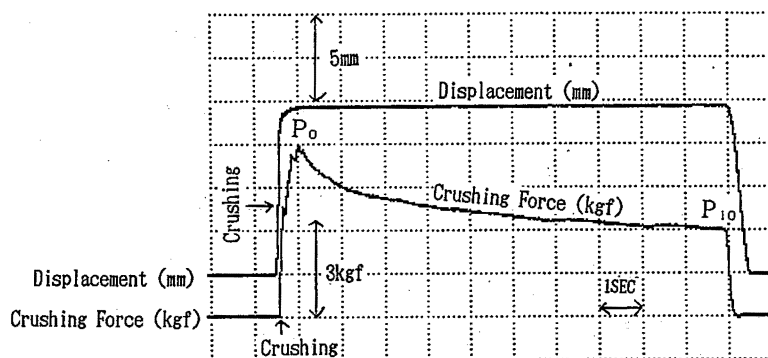


Fig. 7.5 Characteristics of stress relation related to human fingers  
人間の指の応力緩和特性

### 7.3.2 実験方法

Fig. 7.3 に、実験装置の構成を示す。この装置では、人間の指を挟むための接触子と平板を図のように対抗して設置し、接触子の先端には最大 20kgf まで計測できるロードセルを設ける。この接触子の変位は、変位センサ（最小で 0.01 mm の変位の読み取りが可能）で読み取るものとする。なお、接触子と平板はいずれもアルミを利用して製作し、また接触子の直径は  $20\phi$  とした。これは、指全体になるべく均等に力を作用させるためである。

挟圧力—変位特性の測定にあたっては、まず、接触子を指に近づけていき、被験者が接触感を得た位置を原点 (0) とする。その後、約 10 mm/sec なる速度を基準として順次変位を増加させながら、被験者が「耐えられない痛み」を感じる変位まで測定を続ける。なお、上記の実験では、各変位での測定は約 10 秒継続して行うものとし、挟圧力はそのときのピーク値をとるものとした。

以上の実験では、被験者として 9 名の協力を得た。

### 7.3.3 実験結果

#### (1) 挟圧力—変位特性

Fig. 7.4 に、人間の指を挟圧していったときの挟圧力—変位特性を示す。図より、人間の指では、変位の増加と共に挟圧力も指数関数的に増大していくことが確認できた。しかも、この特性では、人間が圧迫感を感じ初める点（図の A 点、ただし「痛み」と異なり「圧迫感」の感覚はあいまいであり、そのため、この感覚が発生する変位を正確に測定することは困難であった）付近を超えると、指の弾性係数は急激に増大することが分かった。

このことは、圧迫感という主観を、挟圧力—変位

特性における弾性の急激な増大という人体物理特性に置き換えて客観化できることを意味する。なお、同様の傾向は、挟圧力—変位特性を測定した被験者 3 名（15 指）全部に認められた。

#### (2) 指の応力緩和特性

Fig. 7.5 に、人間の指を挟圧していったときの応力緩和特性を示す。図より、人間の指では、変位を増大させた直後に挟圧力は最大（図の  $P_0$ ）となり、その後は時間の経過と共に、挟圧力が徐々に減少していく特性を示すことが分かった。ただし、 $P_0$  は位置が変化した直後の挟まれ力であり、 $P_{10}$  は位置が変化してから 10 秒を経過した後の挟まれ力である。

Fig. 7.6 は、Fig. 7.4 に対応する応力緩和特性の実測値である。図からも明らかなように、人間が耐えられない痛みを感じる点（図の B 点）付近となると、顕著な応力緩和現象が認められるようになる。このことは、耐えられない痛みという主観を、応力緩和特性の顕著化という人体物理特性に置き換えて客観化できることを意味する。

### 7.3.4 考察

#### (1) 指の人体物理特性

以上より、痛みという主観は、指の弾性係数や応力緩和特性の変化という人体物理特性に置き換えて客観化できることが分かった。しかし、この議論では、挟圧力—変位特性の A 点における変化が何を意味するかは明らかではない。そこで、これを解明するために、挟まれ力を指数関数  $\exp(mx)$  ( $m$  は比例常数、 $x$  は挟圧時の指の変位) で近似し、この A 点の前後における  $m$  の変化を調べた。これを図示したのが、Fig. 7.7 である。

図からも明かなように、 $m$  値は、A 点より変位が

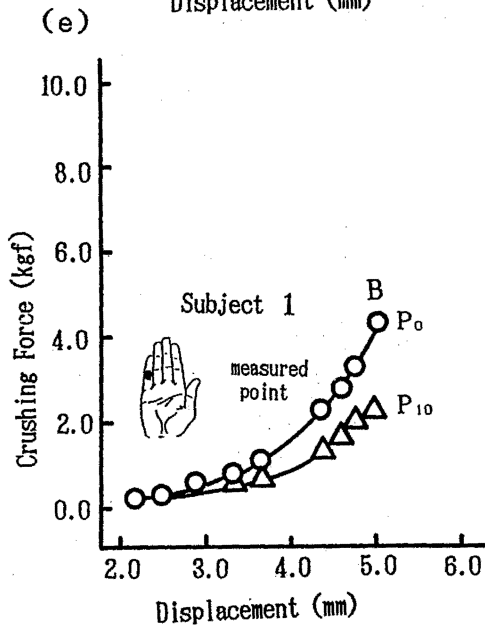
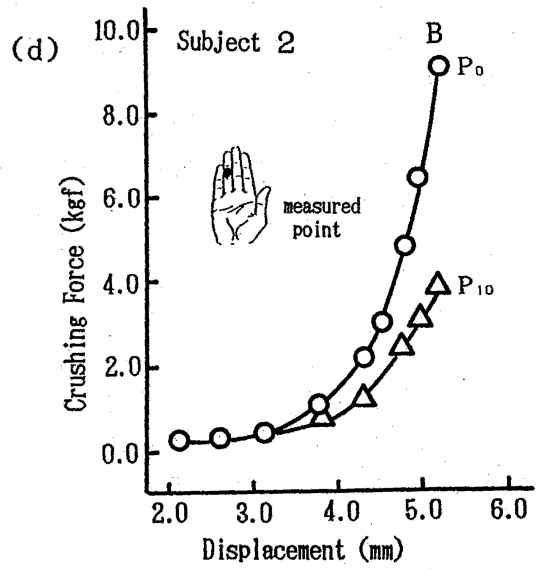
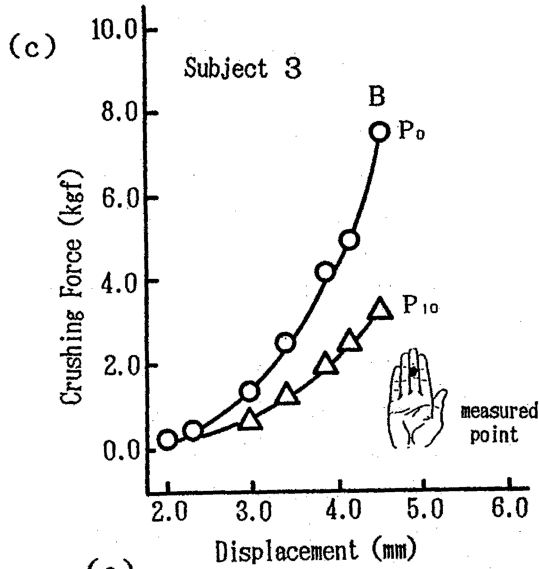
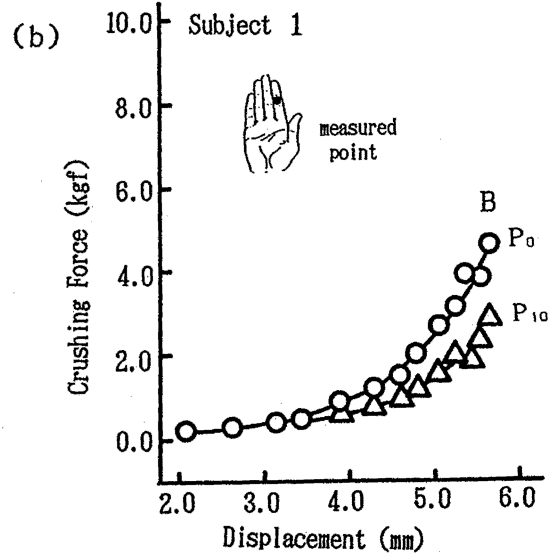
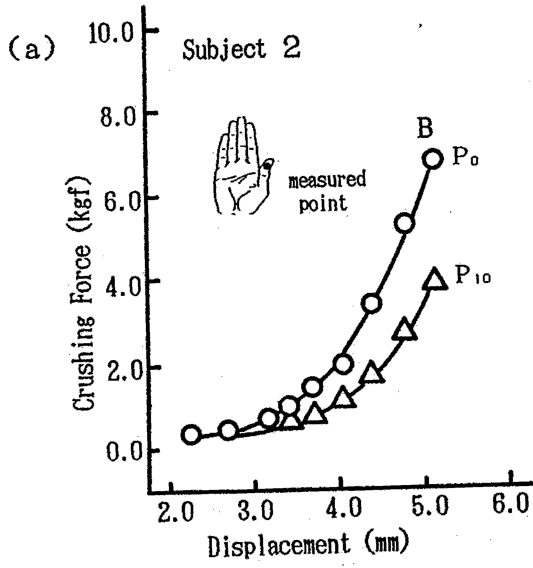


Fig. 7.6 Relieved force characteristics of stress relaxation related to human fingers  
人間の指における応力緩和の程度



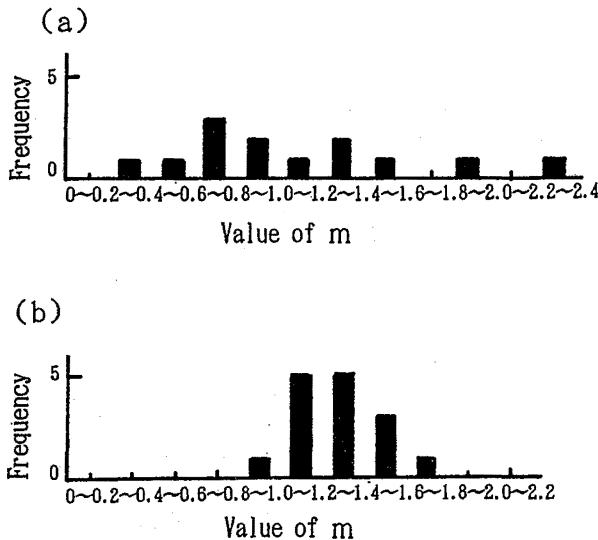


Fig. 7.7 Alteration of values of  $m$   
 $m$  値の変化

小さい領域 (Fig. 7.7(a)) では 0.2 ~ 2.4 とかなり幅広い値をとるが、A 点より変位が大きい領域 (Fig. 7.7(b)) では 1.0 ~ 1.6 の付近に収斂する。この  $m$  値の急変は、指の構造を対象とする解剖学的立場では、接触子による圧迫が肉の部分を終えて骨にまで達したことを示す現象として扱われる。

一方、この現象を、指の機能を対象とするバイオメカニズムの立場から考察するなら、 $m$  値の一定値への収斂は、指がアクチュエータとしての機能を実現するために、弾性係数を一定値にしていると考えれば理解しやすい。これに対し、 $m$  値がばらつくのは、指がセンサとしての機能を実現するために、センシング対象に応じた弾性係数となるようにしていると考えられる。そこで、本論文では、A 点をセンサ (情報処理系) としての機能と、アクチュエータ (エネルギー処理系) としての機能を指が担う際の分岐点と考えることにした。以後、A 点より左の領域を情報空間、右の領域をエネルギー空間と呼ぶことにする。

次に、B 点付近で応力緩和特性が顕著化するという特性が何を意味するかを解明するために、各変位での応力緩和係数 ( $P_{10}/P_0$ ) を求めた。なお、実際の、 $P_0$ ,  $P_{10}$  の測定例は Fig. 7.5 に示した通りである。

実験の結果、応力緩和係数は、変位の増大と共に低下していき、その後ほぼ一定値に収斂し、B 点付近になると逆に増大する傾向が認められた。これを図示したのが、Fig. 7.8 である。これは、挟圧が進む

に従い、人体は挟まれ力を緩和して危害を防ごうとするが、これがある限度を超えると人体はもはやこれに対応できなくなるという人体特有の特性が反映されているものと考えられる。ただし、この特性は、必ずしもすべての指については認められず、常にこの特性が認められるかは確認できなかった。

## (2) 人体挟圧限界の設定

Fig. 7.9 に、被験者 9 名 (45 指) が耐えられない痛みを感じたときの、挟圧力の頻度分布を示す。図からも明らかなように、上記被験者の挟圧力の受忍限界は約 2 kgf から約 10 kgf までの比較的広い範囲に分布しているが、その最大値 10 kgf のときでさえ、人体強度学の結果から推察した破壊限界<sup>5)</sup>よりはるかに小さいと考えられる。これは、この集団で見える限り、痛みを災害の予測情報として扱っても差し支えないことを意味する。

また、Fig. 7.4 の特性からも明らかなように、挟圧力—変位特性の弾性係数が急変する点 (A 点) での挟まれ力は、必ず耐えられない痛みを生じる点 (B 点) における挟まれ力より小さい。このことは、人体挟圧限界の候補として、挟圧力—変位特性の弾性係数が急変する点と耐えられない痛みを生じる点の両方が考えられることを意味する。この両者のいずれを挟圧限界とするかは、いずれも災害の予測事象であることから論理的には差異がないが、ここでは測定 of 容易さを考慮し、B 点での値を人体挟圧限界として採用することにした。

実際の挟圧限界の設定にあたっては、被験者の固体差を考慮する必要がある。この固体差には、性別、年齢、指の種類や太さ等の様々な要因が考えられるが、ここでは、指の太さについて、個々人の B 点での値を調べて、Fig. 7.9 の結果を得た。

図からも明らかなように、指の太さが太くなるに従い B 点での値も若干増大する関係にあることが分かったが、この傾向は顕著には認められなかった。これに対し、指の種類について言えば、5 指のうち小指だけが極端に B 点での値が小さくなる傾向が認められた (親指の B 点での値の平均値 7.4 kgf, 人差指 6.7 kgf, 中指 6.8 kgf, 薬指 6.7 kgf に対して、小指の B 点での値の平均値 4.1 kgf)。そこで、本研究では、最も条件の悪い指として小指を指定し、この指に対する B 点の値の最悪値 2.1 kgf を、この集団における人体挟圧限界として設定した。なお、この値は実験対象とした母集団での仮の値であるので、今

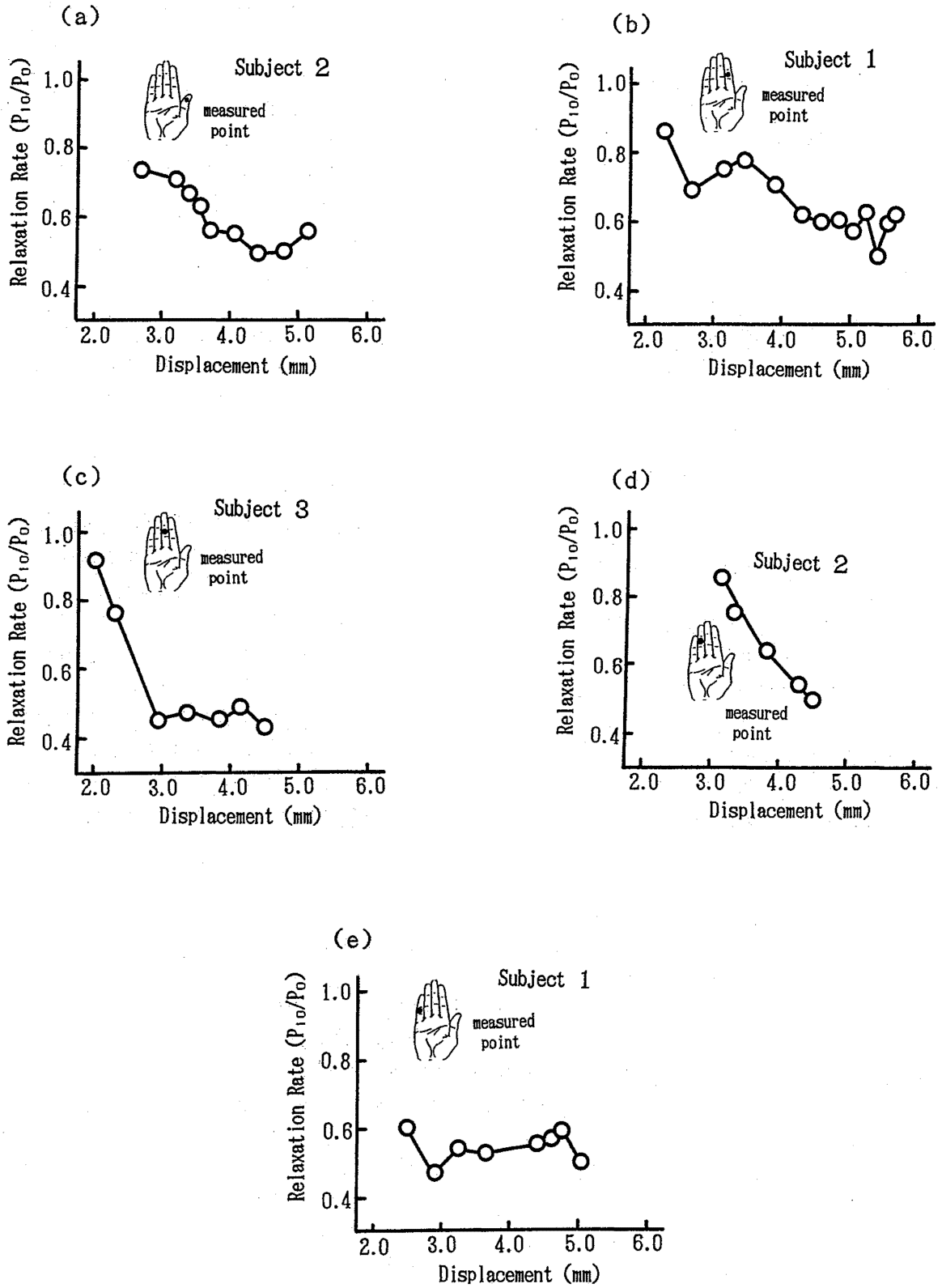


Fig. 7.8 Alteration related to modulus of stress relaxation  
 応力緩和係数の変化

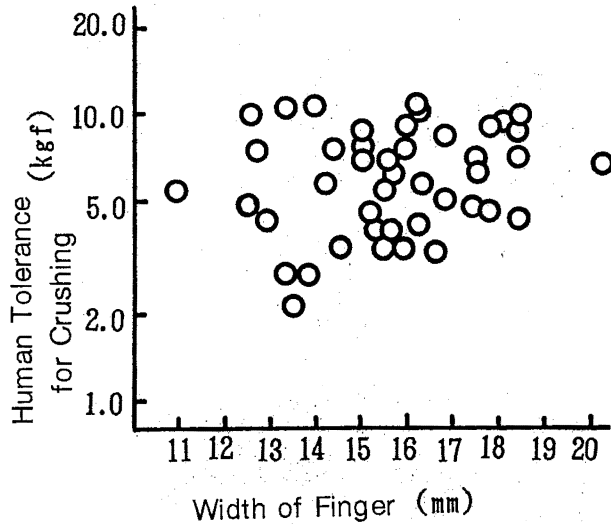


Fig. 7.9 Experimental result related to limitation of crushing force  
人体挟圧限界に関する実験結果

後はこの実験を多くの被験者で行って、この値を厳密化していく必要がある。

#### 7.4 セーフティ・エッジの構成法に関する考察

##### 7.4.1 センサとしてのセーフティ・エッジの構成

本研究で提案する挟まれ防止システムでは、人体と扉の間に両者の物理的接触を予測するセーフティ・エッジをもうけて、このエッジから得られる情報に基づいて、挟まれ災害を回避する。

いま、このシステムで、扉による人体の挟圧を正確に予測しようとするならば、セーフティ・エッジが生成する情報は、人体—扉間の相対距離に応じて一意的に定まることが望ましい。そこで、本研究では、セーフティ・エッジを弾性体により構成し、この弾性体から作用する「力」を情報として利用することにより、この要件を満足できるエッジの構成を試みた。

ここで、人体—扉間の相対距離を  $y$ 、弾性体の厚さを  $d_p$ 、弾性体が人体と接触したときの位置を  $x = 0$ 、その後の弾性体の変位量（圧縮量）を  $x$ 、このときに弾性体から人体に作用する力を  $F(x)$ 、弾性体のコンプライアンス<sup>9)</sup>を  $C_P$ とすると、 $y$ は次式で与えることができる。

$$y = d_p - C_P \cdot F(x) \quad (0 \leq x < d_p) \quad (7-1)$$

実際のセーフティ・エッジでは、距離  $y$ は情報（人体—扉間の距離に関する情報） $w(x)$ として出力され

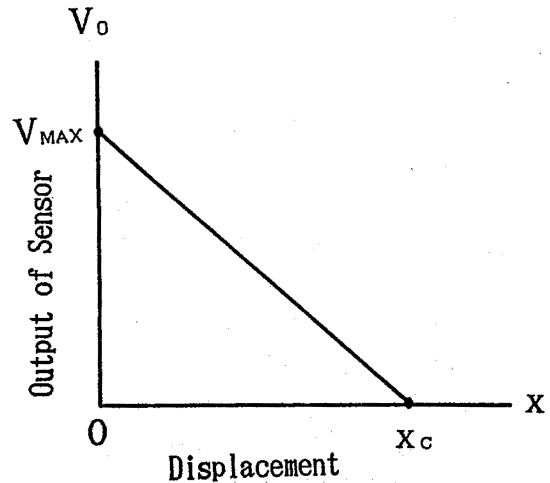


Fig. 7.10 Sensor output of fail-safe safety edge  
フェールセーフなセーフティ・エッジのセンサ出力

る。このとき、 $w(x)$ はセンサの故障により、真の  $y$ とは異なって出力される可能性があるが、このような場合にも、 $w(x)$ を  $y$ より長い距離として出力してはならない。

なぜなら、 $w(x)$ が  $y$ より短いときは安全側であるが、 $w(x)$ が  $y$ より長いときは危険側となるからである。この関係は、次のように定式化できる。

$$y \geq w(x) \quad (7-2)$$

(7-2)式は、情報  $w(x)$ を真の距離  $y$ より短い距離で出力することは許されるが、 $y$ より長い距離で出力することは許されない関係として、安全確保の空間条件を規定している。これは、論理数学で定義されるユネイトな関係<sup>6)</sup>に対応する。以後、この関係を「空間的にユネイトな関係」と呼ぶ。

上記のような関係を満たすには、センサ出力  $V_0$ が位置  $x$ の増加に対して単調減少となる関係、すなわち、Fig. 7.10のような空間特性を持てばよい。これは、次式で与えられる。

$$V_0(x) = K' \cdot (d_p - x) \quad (0 \leq x < d_p) \quad (7-3)$$

ただし、 $K' > 0$ は比例常数であり、位置  $x$ とセンサ出力  $V_0$ は一次比例の関係にあるものとする。

(7-3)式は、セーフティ・エッジのセンサ出力を  $x = 0$ で最大とし、 $x = d_p$ で最小となるように設計すべ

きことを意味している。以後の議論では、この要件を満足するものを、フェールセーフなセーフティ・エッジと呼ぶことにする。

#### 7.4.2 人体に対して順応性のあるセーフティ・エッジの構成

上記のシステムでは、セーフティ・エッジが人体と接触したときに、人体に危害を与えるような大きな力を生じるならば、これに起因して災害が生じることも考えられる。そこで、本研究では、セーフティ・エッジが人体と接触したときにも災害が生じることはないように、人体に対して順応性のある（作用力が挟圧限界以下となる）エッジの試作を試みた。

試作は、次の2つの方法によって行った。第一は、柔らかな弾性体を利用してエッジを構成する方法である。ここで、人体の接触による弾性体の変位を  $x$ 、弾性体の厚さを  $D_L$ 、コンプライアンスを  $C_L$ 、人体挟圧限界を  $F_{max}$  とすると、人体に作用する力  $F$  を  $F_{max}$  以下とするためには、弾性体は次の条件を満たす必要がある。

$$C_L \geq (x + b) / F_{max} \quad (7-4)$$

$$D_L \geq (x + b) \quad (7-5)$$

ここで、 $b$  は制御回路がモータに停止命令を与えてから、実際に扉が停止するまでのブレーキ距離である。

(7-4)、(7-5) 式は、適切なコンプライアンスと厚さを持つ弾性体を選択すれば、挟まれ力を人体挟圧限界以下に制御できることを意味している。この意味で、セーフティ・エッジの弾性体は、広義の「力制御要素」としての役割を持つと解釈することもできる。

第二の方法は、人体に作用する力が確実に挟圧限界以内となるような材料を利用して、セーフティ・エッジを構成するという方法である。ここでは、板バネを利用した方法について、7.5.2 節で詳述する。

### 7.5 セーフティ・エッジの安全性評価

#### 7.5.1 安全性評価の対象

以上、第7.3 節から第7.4 節にわたり、セーフティ・エッジが満足すべき基礎的要件について述べた。次に、本研究では、以上の議論を基にして、既存の、あるいは、本研究で試作した各種のセーフティ・エッジを対象として、その安全性評価を行う。なお、対象としたセーフティ・エッジには、次のものがある。



Photo 7.2 Safety edge of light-beam type and conductive rubber type  
光線式と導電ゴム式のセーフティ・エッジ

① ワイヤ式 (Photo 7.1 参照)

この構造については、7.2.2 節を参照されたい。

② 強制開離式

これは、人体が扉と接触したときは、扉とチェーンの連結を切り離すことによって、挟まれ力を低減する機構である。この機構では、人体が人体検知用の可動片と接触すると、可動片はロッド (11) (Fig. 7.1, Photo 7.1 参照) の戻りバネの力に抗してロッドを押し下げ、扉 (1) とチェーン (4) を連結させているクラッチ (12) を強制的に切り離す。この強制開離によって、扉はチェーンからの拘束を離れて自由に運動できる状態となるから、挟まれ力を著しく低減することが可能となる。

③ 光線式 (Photo 7.2)

これは、当所で開発したシールドビームセンサ (投光器と受光器の間をゴムチューブで継いだもの<sup>7)</sup>を弾性体の中、あるいは板バネの上に組み込んだ機構である。この機構では、人体がセンサに接触したときは、ゴムチューブがへこみ通過光量が減少して、判定回路は OFF 信号を出力する。

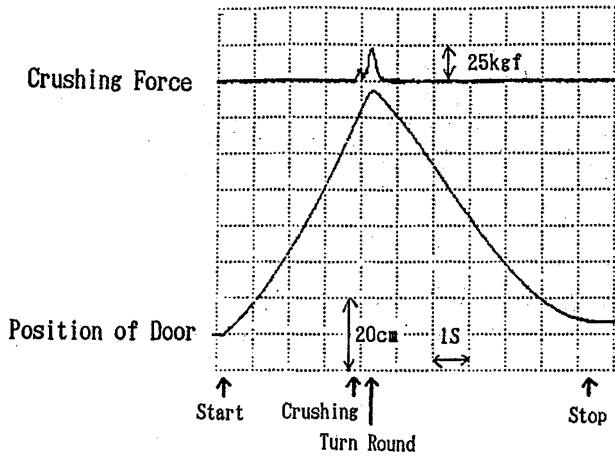


Fig. 7.11 Experimental result of mechanical release type  
強制開離式の実測結果

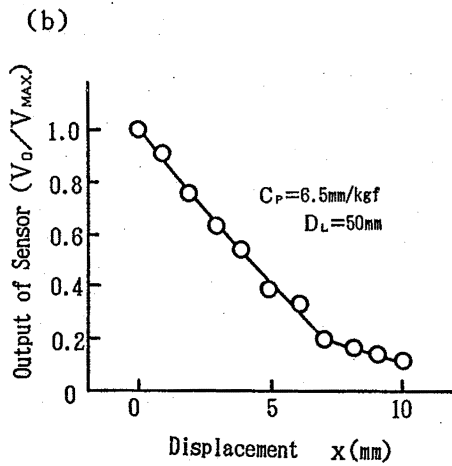
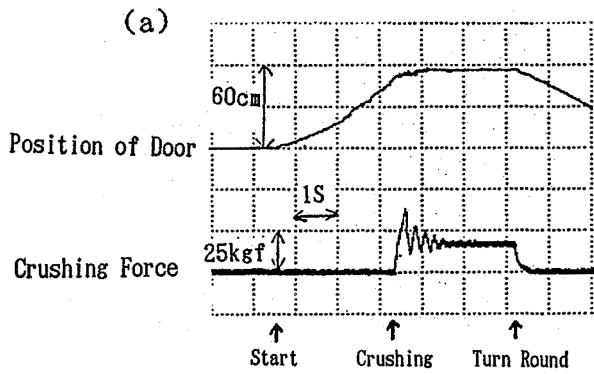


Fig. 7.12 Experimental result of light-beam type  
光線式の実測結果

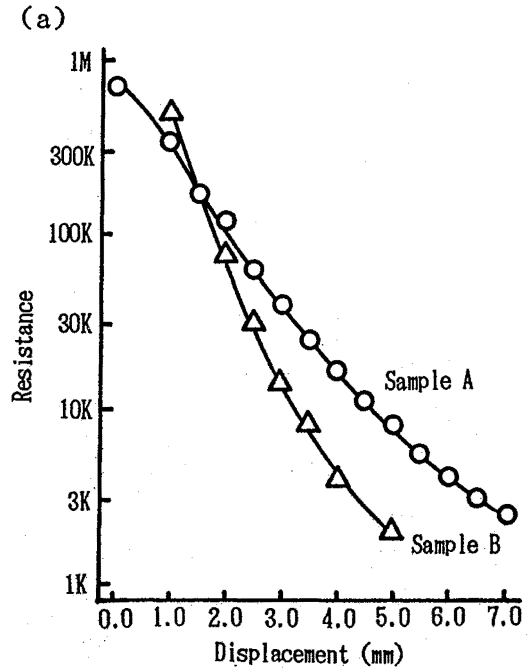


Fig. 7.13 Experimental result of analog conductive rubber type  
アナログ導電ゴム式の実測結果

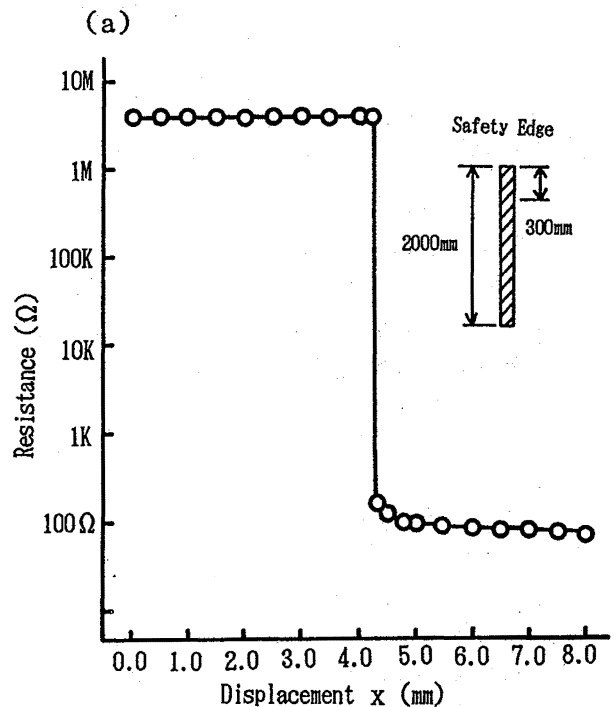


Fig. 7.14 Experimental result of ON-OFF conductive rubber type  
ON-OFF 導電ゴム式の実測結果

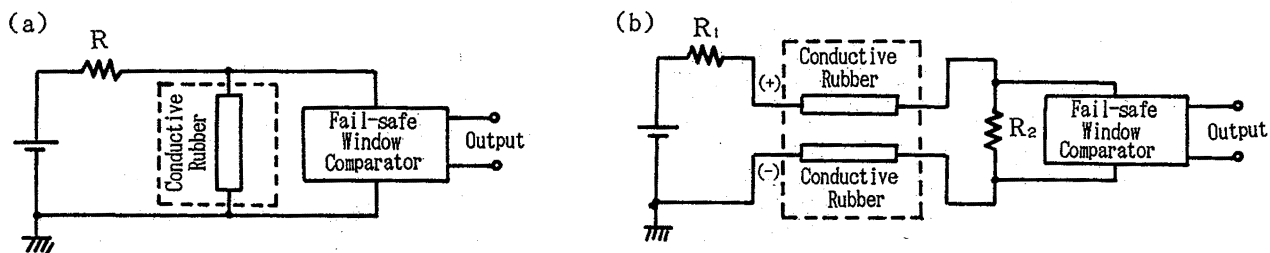


Fig. 7.15 Decision circuit of safety edge  
セーフティ・エッジの判定回路

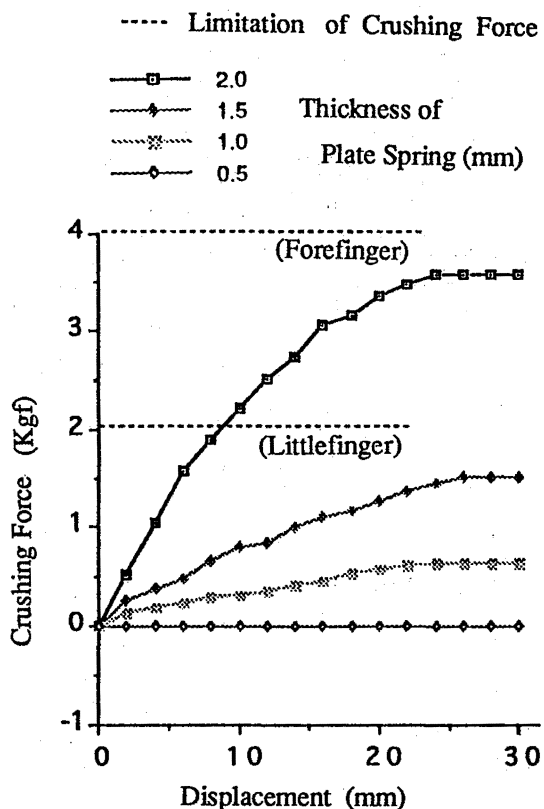


Fig. 7.16 Characteristics of spring plate  
板バネの特性

④ アナログ型導電ゴム式

これは、従来と比較して著しい柔らかさを持ち、かつ、人体からの力の作用によって電気抵抗がアナログ的に変化する導電ゴムを用いた機構である。このセンサは、導電ゴムの原料に空孔形成材を加え、これを基に数 100 μm の厚みのフィルムを作り、これを重ねてプレス成形した後、空孔形成材を溶出させるという過程を経て製作するため、形状、柔らかさ、抵抗値等を自在に変えることができる。このため、人

間の生体組織の特性に類似した特性を実現することも可能である。

⑤ ON-OFF 型導電ゴム式 (Photo 7.2)

これは、導電ゴムの (+) 極と (-) 極を対向させ、人体からの力の作用によって両電極が接触したときに、これを電気的な ON-OFF 特性の変化として検出する機構である。この機構の特徴は、電極の (+) 極と (-) 極がいずれもゴムであるため、接触不良のきわめて少ない機構を実現できることである。

7.5.2 安全性評価

以上のうち、①の方式は、挟まれ力が過大であり、かつ、ワイヤー電極間の接触不良を免れないという欠点を持つ。これに対し、②の方式では、Fig. 7.11 の実測結果からも明らかなように、挟まれ力を 25 kgf 程度まで低減できる。

この結果に基づく限り、②の方式は安全上有効と考えられるが、実はこの方式では、扉と人体の接触は現象論的には衝突に近い過程となるので、そのときの挟まれ力  $F$  と作用時間  $t$  は一意的には規定されず、その大きさは衝突時の運や偶然に左右される。言い換えれば、この機構では、挟まれ力を確率的に低減することは可能であっても、これを人体挟圧限界以下となるように確定的に制御することは難しい。

これに対し、③~⑤の方式では、(7-4)、(7-5) 式を満足できるようにセーフティ・エッジの弾性体を選択するか、あるいは適切な板バネを使用すれば、挟まれ力を人体許容限界以内に抑えることが可能である。Fig. 7.12(a) は、③の方式で、 $C_P = 6.5 \text{ mm/kgf}$ 、 $D_L = 50 \text{ mm}$  としたときの装置を Fig. 7.1(a) の実機に適用したときの実測結果である。図より、この方式では、挟まれ力を 30 kgf 程度の力とできることが確認できた。また、この方式では、センサの変位量  $x$  が増大するに従い、センサ出力  $V_0$  は減少してい

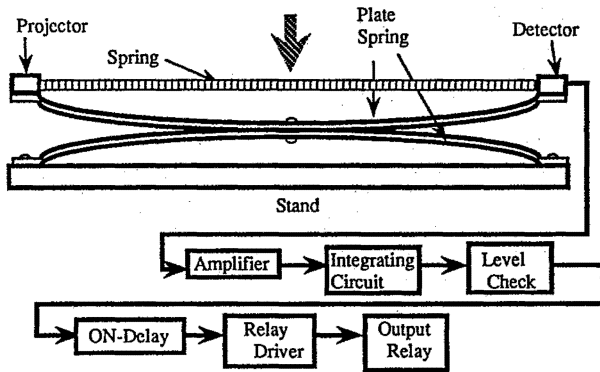


Fig. 7.17 Structure of sensor which is developed to prevent crushing  
試作した挟まれ防止センサの構造

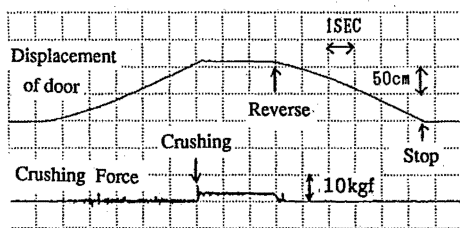


Fig. 7.18 Experimental result of sensor which is developed to prevent crushing  
試作した挟まれ防止センサの実測結果

く。Fig. 7.12(b) は、その実測結果であり、明らかに(3)式の条件を満足するものである。

これに対し、④の方式では、Fig. 7.13のように変位  $x$  の増加により抵抗値は減少していき、また、⑤の方式では、Fig. 7.14のように、(+)極と(-)極の接触によって、抵抗値は約  $4\text{ M}\Omega$  から約  $100\Omega$  へと急減するから、このままでは(7-3)式の特性を満足できない。そこで、④の方式には Fig. 7.15(a)、⑤の方式には Fig. 7.15(b) のような判定回路を利用して、(7-3)式に相当する特性を実現することを考えた。この場合、判定回路は、故障時に OFF 出力とできるフェールセーフな特性を必要とする。

次に、挟まれ力を抑制する手段としては、板バネによる方法が有効であることが分かった。Fig. 7.16 は、縦  $1500\text{ mm}$ 、横  $60\text{ mm}$ 、厚さ  $0.5\text{ mm}$  から  $2.0\text{ mm}$  の板バネ(材質ステンレス)を、セーフティ・エッジの背面に沿って取り付けたときの実測結果である。

図からも明らかなように、この機構から人体に作用する力は、最大でも  $3.5\text{ kgf}$  (板バネの厚さ  $2.0\text{ mm}$  のとき)であり、これは親指 ( $4.2\text{ kgf}$ )、人差指 ( $4.1\text{ kgf}$ ) の挟圧限界よりも小さく、中指 ( $3.3\text{ kgf}$ )、薬指

( $3.4\text{ kgf}$ ) の挟圧限界とほぼ同等で、小指の挟圧限界より僅かに大きい。

Fig. 7.17 は、この機構を③の方式に適用したモデルである。Fig. 7.18 は、これを電動扉に適用したときの実測結果である。図からも明かなように、この機構では挟まれ力を僅か  $3\text{ kgf}$  程度に抑制できる。その結果、この方式では、挟まれ力を人体挟圧限界と同程度にまで抑制できることが確認できた。

なお、実際の挟まれ防止システムでは、人体がセーフティ・エッジと接触したときは、扉が停止するのではなく、開く側に動作するのが望ましい。そこで、本研究では、モータの正転・逆転回路の正転側(閉じる側)だけにインターロック回路を挿入して、モータによる正転(閉じる)動作だけを禁止する回路構成を検討中である。ただし、このときにインバータから扉開の指令が出ているにも係わらず、誤って扉閉側の動作が生じてはならない。このため、実際の装置では、扉の開閉が「開」「閉」のどちら側であるかを確認するための方向監視装置が必要になる。

さらに、実際の扉では、人体がセーフティ・エッジと接触した後にエッジから離れる(このとき、セーフティ・エッジの出力は ON→OFF→再び ON となる)ことがあるが、このときにも、判定回路は OFF 出力を継続する必要がある。そこで、本研究では、フェールセーフな自己保持回路を構成して、この機能を実現することを検討中である。

## 7.6 結 言

本研究では、機械の危険な可動部に近接した状態で行う作業(危険点近接作業)に対する安全手段として、接触式の人体検出センサであるセーフティ・エッジを利用した挟まれ防止システムを提案した。

このシステムは、既に冷蔵倉庫の電動扉等に適用されているが、近年、このシステムが構成されているにも係わらず、扉に人間が挟まれて死亡するケースが報告されている。そこで、実機を利用した実験を行ったところ、このような災害を防止するためには、挟まれ防止用のセーフティ・エッジや制御回路をフェールセーフにするだけでなく、仮に人体が扉に挟まれても、その挟まれ力が人体挟圧限界以内になるように挟まれ力を抑制する手段が必要であることが分かった。

そこで、本研究では、以上の項目について検討を行い、次のような結果を得た。

- 1) 安全率に依存せずに人体挟圧限界を定めるための方法として、人間による痛みの感覚を利用して災害を予測する方法を提案した。この痛みは、人間の主観に基づくものと考えられているが、人間の指を挟圧していく実験の結果、痛みの発生と関連して人体物理特性も顕著な変化を示すことが分かった。これは、痛みという主観を人体物理特性という客観に置き換えて尺度化できることを意味する。
- 2) 人体と扉の間に両者の物理的接触を予測するセーフティ・エッジを設けて、このエッジから得られる情報に基づいて、挟まれ災害を回避するシステムを提案した。このシステムでは、セーフティ・エッジが人体と接触したときに、人体に危害を与えるような大きな力を生じるならば、これに起因して災害が生じることも考えられる。そこで、これを防止するために、柔らかな弾性体や板バネを利用して、挟まれ力を人体挟圧限界以内に抑制することを試みた。
- 3) フェールセーフなセーフティ・エッジは、空間的ユネイト性（人体と扉の間の真の距離が  $y$  であるときに、誤って両者の間の距離に関する情報を  $y$  より短い距離として出力しない性質）を満足する必要があることを明らかにした。
- 4) 1)～3)の結論に基づき、①ワイヤ式、②強制開離式、③光線式、④アナログ導電式、⑤ON-OFF型導電ゴム式の各方式について安全性に関する比較・評価を行い、センサ構成については③～⑤の方式が、人体に対して順応性を持たせるためには板バネによる方式が、上記の要件を満足できる基礎的要件を備えていることを確認した。

以上、挟まれ防止システムの開発に必要な基礎的条件として、人体挟圧限界の設定法、挟まれ力抑制手段の構成法、フェールセーフなセーフティ・エッジの構成法等について述べたが、本研究が現在継続中のものであるため、残された課題は非常に多い。

たとえば、今回の報告では、人体挟圧限界の設定は、指の挟圧限界を定めるための方法論を述べたに留まり、腕・足・胸等の各身体部位の挟圧限界については、系統的な実験を行っていない。今後、この研究は、平成6年度まで続く予定であるので、以後の研究では、可能な限り多くの被験者の協力を得て、このデータを充実させていく予定である。このとき、高

齢者と非高齢者の差異についても必要な検討を行う予定である。

また、実際の電動扉用のセーフティ・エッジでは、寒冷環境に対する耐久性や実用性等にも十分配慮する必要がある。今回はこのような面までは十分検討できなかったため、今後はこれらの点を十分考慮した上で、上記各方式の改良を行い、倉庫作業に最適な挟まれ防止システムを開発していきたい。

#### 謝 辞

本研究に御協力いただいたスガツネ工業（株）営業企画部の西室氏、（株）ポリテック・デザインの倉持氏、（株）KDK 岩手工場の今田氏に深く感謝致します。また、ON-OFF型導電ゴム式セーフティ・エッジを提供していただいた英国EJAのMartin Wadsworth氏と（株）山武商会の三平氏、北嶋氏に深く感謝致します。

さらに、本研究に関する討論に参加いただいた当研究所の桑川主任研究官、杉本主任研究官と、セーフティ・エッジの試作に御協力いただいた村田氏に感謝致します。

（平成5年8月3日受理）

#### 参 考 文 献

- 1) 高齢者向けME機器等の研究開発報告書、労働省（高齢者向けME機器等の開発に関する研究調整会議）（平成2年）pp. 26
- 2) 自動倉庫の安全対策に関する調査研究委員会報告書、中央労働災害防止協会（平成4年）
- 3) British Standard Code of practice for Safety of machinery, Fig. 7.49 (1988)
- 4) 山田、人体と強度の老化、日本放送出版協会（昭和54年）
- 5) Ronald Melzack, THE PUZZLE OF PAIN, 誠信書房（1973）
- 6) 杉本・深谷、安全の基本原則と安全制御技術、産業安全研究所特別研究報告、RIIS-SRR-90, pp. 7-21, (1990)
- 7) 桑川・杉本・深谷・清水、安全制御における計測技術、産業安全研究所特別研究報告、RIIS-SRR-86 No. 1, pp. 48-53, (1986)
- 8) 豊島、なくそう！はさまれ・巻き込まれ、中央労働災害防止協会（平成2年）pp. 16-20
- 9) 池田・梅崎他、振動素子を用いた触覚センサの構



