

5. 構造物の崩壊等による人間への影響の解明に関する調査

5.1 背景と目的

防災の目的は、災害時あるいは災害後において人間への影響を最小限にとどめるとともに、財産を保全することにある。大地震時における人間への影響としては、生命はもちろん、人体のあらゆる損傷などの物理的な影響ばかりでなく、生理的な影響あるいは心理的・精神的な影響が考えられる。心理的・精神的な影響は地震直後ばかりでなく数年以上の非常な長期にわたることもある。地震時あるいは直後の心理的な影響は、パニックに代表されるように人体に対する、あるいは火災の発生等の二次的な災害につながっていく可能性もある。

防災対策は、究極的には人間への影響を最小限にとどめるよう計画・実施されねばならない。建物は崩壊してはならないし、橋は落橋してはならない。あるいは崩壊したとしても人体への影響が決定的にならないよう、ないしは脱出・救援が容易なよう崩壊しなければならぬ。地下街、大規模商店、鉄道ターミナル駅など大勢の人の集まる場所では、停電時、火災発生時を考慮して避難設備等非常用設備が準備されているのは当然として、これらが正常に機能しない状況において、人間が避難しやすいような構造ならびに平面計画がなされ、さらに避難誘導等の適切な応急対策計画が作成、運用されねばならない。消火設備や非常電源設備等の施設内ライフラインは、大地震時においても機能するのは当然である。また、建物が倒壊したり、人間が家具の下敷きになったような場合、人体への損傷を最小限に抑えるような適切な救出方法および応急的な治療方法がなされねばならない。

強い地震動によってパニックが発生しないような配慮が必要である。パニックに至らないまでも、心理的な動揺を前提とした建物あるいは施設内における防災設備や避難対応のソフトウェアが必要である。この段階での個人や集団の対応如何により、災害は非常に拡大する可能性がある。個々のパニックも恐ろしいが集団的なパニックが発生すると悲惨な事態が予想される。パニックに陥らないような施設計画、サインや放送による適切な誘導等がなされねばならない。被害の記憶は非常な長期にわたって人間の精神に影響を与えつづけることが精神医学の面から明らかにされている。このような影響については、発災直後から長期にわたる心のケアが必要になる。

これまでの地震防災研究において、人間という観点からの研究はそれほど多くない。もちろん応急医学や精神衛生の分野では阪神大震災以前から精力的な研究が行われ、防災対策に活かされてきたが、阪神大震災を経験した現在、さらに分析・研究が行われるべきと考えられる。特に、人的被害と建物被害の関係等医学と工学の学際領域の分野ではほとんど研究が行われていない。また、土木や建築の防災に関する分野で、これまで人間工学的な観点から施設の計画や設計が行われてきたとは言い難い。かろうじて大規模建物や地下街等における避難を考慮した施設設計、防災計画が見られる程度である。

上で見てきたように、人間に係わる分野はきわめて幅広くまた学際的である。大地震時

に人間（人体）が物理的、生理的、あるいは心理的にどのように応答するのか、建物被害や家具の転倒等がどのような過程で、どの程度の損傷を人体に与えるのか、このような基礎的知見に基づき精神的影響を含む人的被害をどのように減らしうるのか等、人間の観点からこれまでの地震工学・地震防災の見直しが必要であり、これには医学、工学の学際領域において総合的な研究が必要である。

この調査における「人間工学的な評価」では、上で述べたような人間の観点から見た地震防災研究の必要性を評価し、研究すべき課題を抽出、各課題についての研究方法、内容等について提案することを目的とするものである。ここで「人間工学的」とはあくまで「人間の観点から見た」といった意味合いで用いており、家具の転倒や屋内ライフライン設備等の人間（の生命）に係わる部分はこのWGの検討課題とすることとする。

5.2 過去の震災における被災実態および研究の現状

地震工学、地震防災分野における人間工学的な研究は、近年の地震災害が直接的な人的被害をそれほど多く発生させていないことから、それほど活発に行われてきたとは言えない。後述するが、地震被害推定に用いることを念頭に置いた死者・負傷者数の推定方法に関する研究、住居内における地震時の人間行動に関する研究、閉鎖空間内における避難等に関する研究等が行われ、相応の成果が得られてきている。このような状況で、1995年兵庫県南部地震が発生、それまでほとんど地震工学の世界では考えられてこなかった6,000名を超える死者の発生をみることとなり、人的被害に関する研究を一挙に活発化させることになった。

ここでは、まず、阪神・淡路震災における人的被害の状況を、最近のこの問題に関する研究からとりまとめる。また、阪神・淡路以前であるが、上で述べた従来の研究の現状についても整理する。

上で述べたように、従前、地震工学の分野では、建物の被害に関する研究はされていても、その被害がどのように人間に影響を与えるかといった観点からの研究はほとんどなかったと考えられる。一方、地震ではないが、自動車の設計の分野においては衝撃力が人体に与える影響に関する研究は古くから行われてきている。この分野の研究においては衝突実験等で人体への影響を精密に計測する人体ダミー（人形）が開発され、定量的な研究の基礎になっている。大地震時における人的被害を研究するためには、建物崩壊等の人体への影響を計測する人体ダミーが必要と考えられ、自動車分野における人体ダミーの研究等についても本節でレビューすることとする。

5.2.1 阪神・淡路大震災における人的被害状況

平成7年1月17日5時46分、淡路島北部を震源とするM7.2の地震（1995年兵庫県南部地震）が発生し甚大な被害をもたらした¹⁾。災害規模はこれまでの災害と比較しても大きく、政府はこの地震災害を阪神・淡路大震災と呼称することとした。

(1) 被害の統計

表-5.2.1^{1),2)}に示すように、阪神・淡路大震災による被害は、関東大震災（1923年9月1日、M7.9）による被害に匹敵するとまでは言えないが（オーダーが一つ違う）、それに次ぐということが出来る。この地震による直接的な死者は5,502人とされており、1948年の福井地震（約3,800人）を上回り、関東大震災（死者約14万人）以降2番目に大きい人的被害を出す地震となった。なお、死者の数は数え方によって異なるが、一般的には6500名程度と言われている。上で述べた5,502名はあくまで直接的な死者数である。

阪神・淡路大震災では、地震発生から4日目までは死者数が毎日1,000人づつ増加した。自治省消防庁発表資料に基づく死者・行方不明者数の時間推移を図-5.2.1³⁾に示す。また、地震発生から1週間経っても100名以上の行方不明者がおり、地震被害情報もかなり混乱していた。厚生省資料に基づく性別・年齢別（5歳階級）の死亡者数を図-5.2.2⁴⁾に示す。震災による全死亡者数は5,488人であり、男性が2,211人、女性が3,277人である（なお、先の図-5.2.1に示した消防庁の数値とは数えかたの相違で4名異なる）。集計されている個人情報年齢・性のみであり、男女共に高齢（50歳以上）の死亡者が多く特に高齢の女性死亡者が多い。また、高齢死亡者の中では男性よりも女性の平均死亡年齢が高い。

表-5.2.1 阪神・淡路大震災の被害状況〔文献2〕に加筆

被害項目		阪神・淡路大震災 (1995/1/17, M7.2)	関東大震災 (1923/9/1, M7.9)
被害者	死者	6,425人 ⁽¹⁾ (1996年12月26日消防庁調査)	99,331人 ⁽³⁾
	不明	—	43,476人 ⁽³⁾
	負傷者	43,772人 ⁽¹⁾ (1996年12月26日消防庁調査)	103,733人 ⁽³⁾
	避難者	最高時32万人 ⁽¹⁾	約130万人 ⁽⁴⁾ (最高時約12万5千人がバラック生活 ⁽⁵⁾)
家屋	全壊家屋	約11万棟 ⁽¹⁾	128,266棟 ⁽³⁾
	半壊家屋	約14万7千棟 ⁽¹⁾	126,233棟 ⁽³⁾
	焼失家屋	約7,500棟 ⁽¹⁾	447,128棟 ⁽³⁾
	焼失面積	83万平方メートル以上 ⁽¹⁾	—
ライフライン	停電	地震直後で約260万戸 ⁽²⁾	(電力施設の被害大 ⁽⁶⁾)
	都市ガス供給停止	約86万戸 ⁽²⁾	(ガス施設の被害大 ⁽⁶⁾)
	断水	約123万戸 ⁽²⁾	(上水道施設の被害大 ⁽⁶⁾)
	電話不通	約29万回線 ⁽²⁾ (交換障害) 約19万3千回線 ⁽²⁾ (ケーブル破損など)	約8万回線 ⁽⁶⁾ (ケーブルの焼失被害大)
	鉄道	JR・民鉄13社で不通 ⁽²⁾	14路線が被災 ⁽⁶⁾
	道路	27路線36区間で交通止め ⁽²⁾	532ヶ所で被災 ⁽⁶⁾
	被害額	約9兆6千億円 ⁽²⁾ (1995年度一般会計予算の14%)	約55億円 ⁽⁶⁾ (当時の一般会計予算の3.7倍)

- (1) 国土庁：平成8年版防災白書。
- (2) 国土庁：平成7年版防災白書。
- (3) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，1987。
- (4) 吉村昭：関東大震災，文春文庫，1977。
- (5) 内務省：大正震災誌，1925。
- (6) 東京市役所：東京震災録前輯，1926。

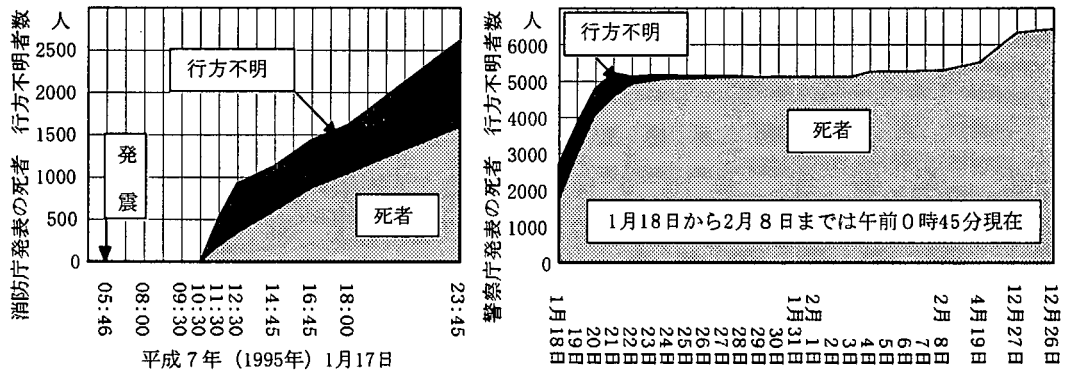


図-5.2.1 自治省消防庁発表資料に基づく死者・行方不明者数の時間推移³⁾

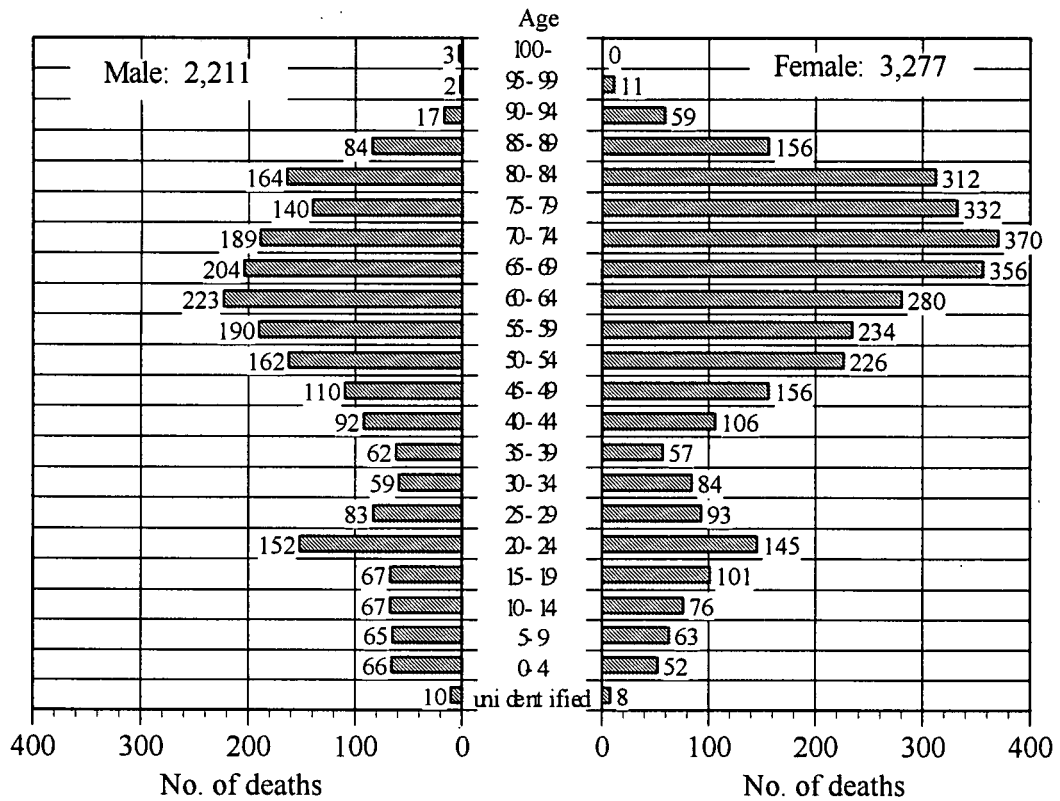


図-5.2.2 厚生省資料に基づく性別・年齢別（5歳階級）の死亡者数⁴⁾

(2) 被害原因等に関する分析

阪神・淡路大震災に関して、(1)では主に被害全般の概要および死亡者の統計量について示したが、ここでは建物と人的被害、負傷者の統計量、死亡場所・死因などに関する被害調査の現状を示す。

調査によると、比較的地盤のよい地区にあった古くて耐震性能の低い建物が極めて強い地震動によりほとんど瞬間的に崩壊し、家屋の被害は全壊が 100,302 棟、半壊が 108,741 棟であった⁵⁾。一方、液状化による建造物の被害は海岸沿いの埋め立て地等でもかなりあったが、崩壊にいたるような被害は少なく、人的被害にはほとんどつながっていない。

直接的な死亡者約 5,500 人の死因は大部分が梁、壁、天井の落下等建物損壊によるもので、この内の約 95%は木造住宅におり、しかもその内の約 85%が 1 階にいた。建物全壊棟数と死亡率の間には高い相関が見られ、震度 7 地区ではおおむね全壊率が 20~30%、死亡率が 0.25~0.5% (1,000 人の内 3~5 人が死亡)となる³⁾。死亡の約 4 割はなんらかの形で家具がからんでいた (家具の作用が大きかったと考えられるのは約 6%)といわれるが、家具の移動・転倒等のみにより死亡した例はまれであった。一方、家具によりスペースの確保がなされ脱出あるいは救出・生存した人がかなりいたといわれる⁶⁾。

建物の下敷きになった人の正確な数は不明であるが、被災地全域で 43,000 人が負傷し、この内の 19,000 人が救助を必要とし、約 14,000 人が救出され (生存率約 74%)、この内の約 8 割が消防団を含む近隣住民に救出されたといわれる。神戸市で見ると、地震後 8 日目までにほとんどの人が救出されたが、地震発生後の時間経過とともに生存率は急激に下がり (当日の生存率は約 75%)、地震後 3 日を過ぎると生存率は 15%以下に落ちる⁵⁾。建物等の下敷きになり救出された人 2,718 例の内 372 例 (14%) がクラッシュ症候群と判定され、この内の 50 例 (13.4%) が死亡した⁷⁾。負傷に関しては、切り傷 (46.3%) がもっとも多く、打撲等 (26.2%)、骨折等 (12.9%)、挫滅等 (9.9%)、やけど (1.8%) が続くというアンケート調査結果がある⁸⁾。

厚生省資料によると、死亡者の約 7 割の障害発生場所は神戸市であった。死亡場所および死因に関して、神戸市における 3,651 死体検案書に基づく地区別死因分布を表-5.2.2⁹⁾に示す。この内訳は窒息死が 53.9%と過半数を占め、圧死 (12.4%)、焼死・火傷 (12.2%)、打撲・打滅傷 (8.2%)、頭部損傷 (3.4%)、外傷性ショック (2.2%)、頸部損傷 (1.7%)、内臓損傷 (1.5%) と続く。頭部・頸部損傷、外傷性ショックは瞬間的な外力の作用と考えられるが、実際には建物の崩壊に伴いその下敷きになり圧迫を受け、比較的ゆっくりと窒息等により死亡した人が多かったといわれる⁹⁾。また、心理的・精神的な影響として不特定多数収容施設におけるパニックの問題や被災者の心的外傷後ストレス傷害 (PTSD) の問題などがあり、生理的・生体工学的方法を用いて、現在各方面で調査されている。

表-5.2.2 表神戸市における1995年の死者検案書に基づく地区別死因分布⁹⁾

No. 死因	須磨区	長田区	兵庫区	中央区	灘区	東灘区	計	
1 窒息	219	201	209	83	585	670	1,967	53.9%
2 圧死	53	176	3	18	70	132	452	12.4%
3 頭部損傷	2	21	21	22	25	33	124	3.4%
4 頸部損傷	0	9	11	30	9	4	63	1.7%
5 臓器損傷	1	2	7	12	15	18	55	1.5%
6 外傷性ショック	7	8	10	6	24	27	82	2.2%
7 全身打撲	0	29	0	2	0	262	293	8.0%
8 焼死	12	248	77	15	77	15	444	12.2%
9 不詳・不明	19	12	34	9	4	38	116	3.2%
10 衰弱・凍死	0	1	0	0	6	0	7	0.2%
11 その他	0	16	0	0	21	11	48	1.3%
計	313	723	372	197	836	1,210	3,651	100.0%

(3) 阪神・淡路大震災における人間への影響の整理

阪神・淡路大震災の人間への影響を表-5.2.3 にまとめた。地震の発生から時間軸に沿って人間への影響を整理しているが、時間経過にしたがって、物理的影響から心理的影響が強くなる。死傷という物理的損傷から、また生存した場合でもパニックなどにより2次災害につながる場合もある。火災の発生は避けられず、救出が遅れば急激に被害は増大する。火災が発生しなくても「黄金の24時間」¹⁰⁾といわれるように救出が早ければ早いほど生存率は高い(3日を経過すると生存率は急激に低下する)。

表-5.2.3 時間経過に沿った人間工学的影響の整理(阪神・淡路震災を参考)

時間の経過	物理的な損傷	心理的影響	行動・対応
振動時	衝突・落下等による損傷 生理的影響(血圧上昇等)	恐怖 パニック	防御 行動不能
振動終了時	落下物等による衝撃、圧迫、 呼吸困難	恐怖 パニック	行動不能 脱出 避難
1時間経過	火災による焼死 クラッシュ症候群	空白、高揚 余震による恐怖	避難 他者救出 消火 初期医療
24時間経過		同上(継続)	組織的救出・医療の 開始 重傷患者搬送
1週間経過		喪失感	医療の継続
1月経過		心的障害	同上
以降		同上(継続)	精神的医療継続

上で見たように、震災による人間への影響は、長期におよび時間経過ごとに影響や程度は異なる。時間経過ごとの人間への影響を明らかにし、それに対する防災対策を適切に設定する必要があり、各現象や人間行動に対して、工学、医学を包含する学際的な調査・研究が必要となる。

震災による被害は、地震動と建物の関係はもちろん、地震発生時の季節、時間帯、気象条件により大きく異なる。特に人的な被害に関しては、地震発生の時間帯にかなり依存するとともに、地震発生からの経過時間および周囲の環境が影響因子となる。このような面を考慮すると、阪神・淡路大震災は一つのサンプルに過ぎない。条件によっては様々な現象の出現、多様な人間への影響が考えられる。

これまでの震災などから想像でき、阪神・淡路大震災ではあまり顕在化しなかった事象がいくつかある。以下に、発生が少なく定量的な分析が難しいものとほとんど発生しなかったものの2つに分けてこれらの事象を示す。今後の地震防災を考える上で、阪神・淡路大震災の分析に基づき、これらのあまり顕在化しなかった事象についても研究が必要である。

①発生が少なく定量的な分析が難しい事象

- ・大規模な火災延焼
- ・建物、高架橋、擁壁、電柱、ブロック塀等の倒壊による死傷（高架橋で若干あり）
- ・道路走行中（ある程度混雑）車両の路盤被害による事故、それに伴う死傷（高架橋で若干あり）

②ほとんど発生しなかった事象

- ・地下街、ターミナル駅、大規模商店等人の多くあつまる個所での混乱、死傷
- ・オフィスや工場等の生産現場および事業所（非木造建物）における死傷
- ・走行中の線路被害による鉄道車両事故（脱線による死傷）
- ・建物外壁、看板等落下物による死傷
- ・遊園地等の行楽地における人的被害
- ・危険物の漏洩（一部あり）・それによる死傷
- ・建設現場（高所作業現場）における被害

5.2.2 災害時における人間行動に関する研究事例

火災時における事例調査から、災害時の人間行動には、避難行動およびその場の社会的要因に基く行動があるということが知られている。ここで、社会的要因とは、職業的責任感、年齢などの上下関係、命令系統などである。この火災時における人間行動（避難など）を把握するために、災害事例調査、被験者実験、VR（バーチャルリアリティ）被験者実験¹¹⁾、数値シミュレーションを利用した研究などが行われており、避難時意思決定過程の把握や避難誘導施設の最適配置などが検討されている^{12), 13)}。これらは災害時の避難計画の作成などに利用されている。

被験者実験では迷路を用いた個人の避難行動が調査されているが、この場合は被験者を危険な状態にできないため、火災時と実験時の状況がかなり異なる。近年、この危険回避などを目的として、VRを利用した被験者実験が行われるようになってきている。一方、火災時人間行動は、個人か集団（不特定、多数）、あるいは各個人の社会的要因によって異なり、特に不特定かつ多数の人間行動の把握は困難である。近年、多人数が参加できるVRを用いた数値シミュレーションが行われるようになっており、この不特定多数の人間行動の把握が試みられている。一例として、この多人数参加型の防災訓練シミュレータ画面¹³⁾を図-5.2.3に示す。また、不特定多数の避難誘導に着目した研究として、避難の数値シミュレーションが行われており、避難誘導施設の配置による影響が調査されている。

以上のように、火災時の人間行動に関しては、様々な研究が行われているが、地震を対象とした場合は、まだ若干の事例調査が行われているにすぎない。



図-5.2.3 多人数参加型のVR活用防災訓練シミュレータ画面¹³⁾

【(財) 未来工学研究所およびNTT ソフトウェアの許可により転載】

5.2.3 人体ダミーに関する研究事例

人体ダミー（人形）は、交通事故などによる人的被害を計測するために利用されている。自動車の衝突実験では、人体に加わる荷重、加速度、変位などの計測に、人間の代りとしてダミーが用いられ、前面衝突事故や側面衝突事故などに応じて様々なタイプのダミーが開発されている¹⁴⁾。最も一般的なダミーは、図-5.2.4に示すような前面衝突試験用のダミーである。このダミーには、衝突による人体各部の傷害を対象として、加速度計、変位計、荷重計などのセンサーが取付けられ、各センサーの計測量を用いて人体各部分の傷害を表す指標が設定されている。頭部に関してはHICという加速度記録から得られる指標、頸部に関しては伸張、圧縮およびせん断荷重に対する時間依存性の指標が用いられている。また、胸部に関しては3成分合成加速度、たわみ量およびVC（変形速度とたわみ率の積）が各々指標として用いられ、脚部に関しては大腿部圧縮加重が指標として用いられている。

上記の傷害指標およびそれらの許容値は、人体各部に対する衝撃耐性値に基づいて提案され実用されている。しかし、自動車衝突時に人体の各部に作用する衝撃力が衝突物の形状や剛性に依存することはわかっているが、その依存性がまだはっきりわかっていないこと、生体忠実性がダミーに求められる最も重要な性能であるにもかかわらず、現行のダミーは死体に基いて設計されていることなどがあり、自動車の衝突実験においてもダミーに関する基本的な問題がまだ残されている。

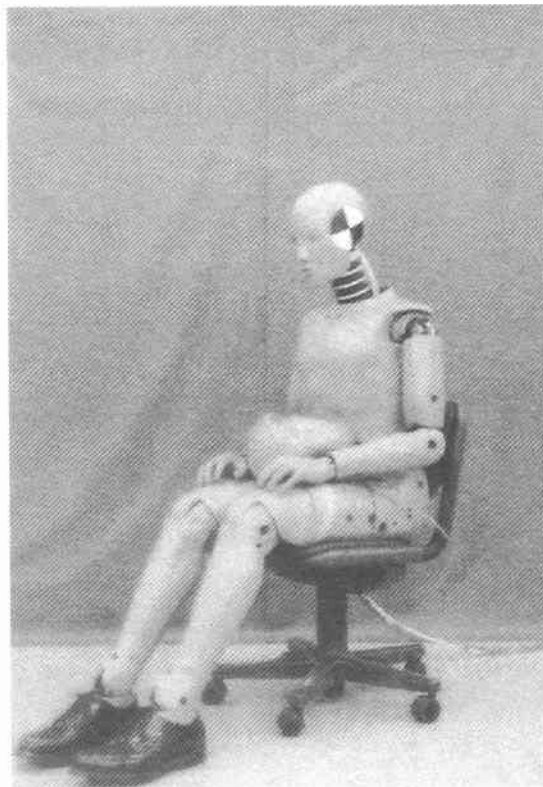


図-5.2.4 人体ダミーの例【(財)日本自動車研究所の許可により記載】

5.3 研究すべき課題の整理と抽出

以下では、人間工学的評価の調査対象および対象とすべき現象を明らかにし、震災時における人的被害を低減するために研究すべき課題を整理・抽出する。

5.3.1 対象および対象とすべき現象

人間および生活空間（建物内部空間、都市空間）を対象とし、大規模震災が発生した場合のあらゆる状況における人間の損傷（物理的、生理的・生体工学的、心理的・精神的）、人間の対応行動およびそれに関連する災害の拡大（減少）等の現象に関して、震災の人間工学的影響を低減するための基礎的な調査・研究課題を整理・抽出する。すなわち、ここでの課題は以下のように集約されよう。

- ①地震時における直接的な死傷の低減
- ②直後の心理的な動揺の抑圧および災害拡大の防止
- ③円滑な避難・救出・救援（救出生存率を高める）

長期的な精神障害については大きな問題ではあるものの、もっぱら精神医学の領域であり、ここではこの問題を取り扱わないこととする。

5.3.2 課題

5. 2で述べた阪神・淡路大震災における人間への影響、および既往の研究の現状から人間工学的な観点から必要と考えられる課題を以下に整理する。これらの課題は、大部分、医学、工学、心理学の学際領域にあり、課題の解明には3者の密接な協力が必要である。

(1)建物等の被害と人間の損傷との関連

地震時における直接的な死傷を低減するために、建物の崩壊、部材の落下、家具の移動・転倒あるいは路上における落下物等と人間の損傷との関係を医学、工学の両面から調べる。

- ・建物の被害パターンと人的被害の関係
- ・人体に作用する力と損傷の関係
- ・死亡にいたる原因・メカニズムの解明
- ・損傷と時間経過

(2)人間（人体）の物理的生理的な応答・損傷

立っている場合、歩いている場合、寝ている場合、自動車運転時、電車に乗っている場合等における人体の地震応答（いわゆる地震応答の他、とっさの反応挙動も含む）を解明する。

- ・さまざまなシチュエーションにおける人体の地震時における物理的および生理的応答

- ・上記における人間の反応（とっさの危険回避あるいは防御、アドレナリンの影響？）

(3)人間の地震応答・損傷程度計測手法および数値解析手法の開発

上で述べた人間の物理的・生理的応答、人体の損傷のメカニズム等を研究するためには、検視報告等の分析に加えて、実験により人体がどのように応答するかを把握する必要がある。ごく弱い振動レベルでは、実際の人間による実験、計測も可能であるが、大地震時を再現するのは困難と考えられる。そこで、自動車の衝突実験に用いられる人体ダミーをベースに震災用人体ダミーを開発、これによる様々な実験、解析が必要となる。また、人体ダミーとあわせ、人体の数値解析モデルの開発が必要となる。

(4)地震時の心理的応答・人間行動

震災直後の心理的な動揺を抑制し災害拡大を防止するために、たとえば夜間・昼間、家庭（起きている場合と寝ている場合）・オフィス、路上・屋内、地下街・大規模商業施設等の多くの人の集まる施設にいた場合、閉鎖空間等さまざまな状況における人間の心理的応答および具体的な行動を解明する。常時とは全く異なる（異常な音響・視覚）状況下における人間の応答。

- ・地震振動時、地震終了直後、1時間経過時、1日経過時等、時間の経過に沿った人間の心理状態、結果として現れる行動形態・様式
- ・パニックあるいは精神的崩壊過程・行動様式・形態（パニック、高揚の心理変化過程とその行動等）の解明とその影響の解明（個人、集団）
- ・消火等の防御行動の可能性（状況、個人的差異等）
- ・余震の影響
- ・救出・救助に携わる人間の心理・行動
- ・災害対策室、施設制御室等の危機管理現場における人間の心理・行動

(5)救助および応急医療の最適化

円滑な避難・救出・救援を行うために、事前の対応を充分にしておく。

- ・救出・救助・救急医療の戦略
- ・建物崩壊からの救出方法、火災発生時の対応、救出後の介護・医療

(6)地震時の人間のレスポンスを考慮した施設・建物の計画・防災計画の検討

- ・閉鎖空間等における人間行動のシミュレーションモデルの開発
- ・地下街・大規模商業施設等におけるダメージコントロール、避難、救助
- ・施設・屋内ライフライン設備（電気、消火等）
- ・最適な平面計画・家具の配置、家具の転倒防止、内装構造の強化

5.4 研究課題および内容

5.3.2 で課題を列挙したが、これらの課題はいずれも緊急性の高い研究と考えられる。以下では、研究の実施体制も考慮し、5.3.2 の項目を可能な限り含むように、各研究課題をとりまとめた。図-5.4.1 に各課題の関連性および期待される成果の概要を示す。

5.4.1 強震動への人体応答と家屋被害等が人体に与える影響に関する研究

(1) 目的と必要性

震災プロセスの再現が工学的に困難であったため、地震動および建物被害による人間への影響を定量的に測定・把握することはほとんど不可能であった。また、医学的にみても同様で、阪神・淡路大震災において、ストレス症状が認められた被災者に対して精神心理学的な事後調査がなされているに過ぎない。しかし、大規模振動台の利用により、大震災時における家屋等の被害パターンと人的被害の関係、人的損傷メカニズムの分析、人間の挙動や行動、精神心理学的ストレスなどを直接把握できるような環境が整えられつつあり、これらを活用して震災時の人的被害を軽減するための基礎的データの収集分析および人体被災プロセスの解明と有効な対応策の評価が可能になる。また、これらのことを客観的に評価し把握しておくことは、耐震性の高い構造物や地震に強い生活環境を整備する上でも極めて重要である。

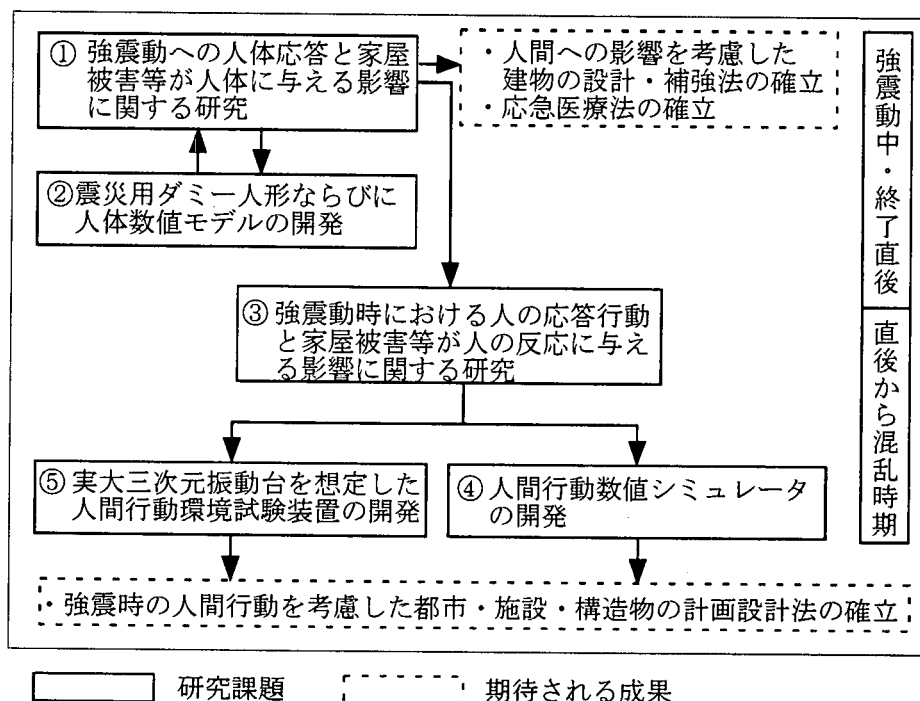


図-5.4.1 人間への影響に関する研究課題と期待される成果の概要

以上より、工学と医学の学際的研究として、建物被害形態と人的被害の事例調査、振動台を用いた人体の物理的・生理的応答実験および建物倒壊による人体被災計測ダミーの損傷実験により、人体被災と家屋被害等の関係を総合的に調査研究する。

(2) 研究の内容・方法

1) 既存震災における地震動・建物被害・人的被害の相関関係についての実証的研究

阪神・淡路大震災等を研究事例として、建物被害形態と人的被害に関する工学・医学両面からの実証的研究（統計的分析）、人的損傷メカニズムの分析（臨床医学的研究）、救出および救急医療活動の実態分析（時系列での生存率変化など）などを行う。

2) 大地震発生時における人間の反応とストレスに関する研究

人間がストレス要因にさらされた場合に、体内で起っているストレスの大きさ、不安の程度、緊張の度合いを客観的に評価する手段として、自律神経系の各種指標（心電図、脳波、皮膚温、発汗、呼吸パターンなど）のモニタリング、ある種のレセプター（血小板におけるベンゾジアゼピン・レセプターなど）活性の測定、あるいはコルチゾールなどのストレスホルモンの測定が知られている。これらの医学的測定検査と各種心理テスト（恐怖・不安度の指標）を組み合わせることにより、様々なストレス状況における人間の心理的・肉体的負担が評価可能である。ここで、実験時の過剰なストレスによる不慮の事故を防ぐために、加えるべき振動の強さを十分に検討する。また、被験者に対しては、十分に説明を行い承諾を得る必要がある。

3) 人体被災計測ダミーを用いた建物倒壊等による人体被災に関する研究

震災時の人体応答を調査するために、各種センサーを装備した人体被災計測ダミー（5.4.2で開発）を用いて振動台上における家屋倒壊・家具落下などを再現し、人体強度や人体損傷に対する家屋倒壊パターンや家具などの影響、人体への外力の加わり方（部位、大きさ、速度等）に関する基礎的なデータを取得。また、人間挙動調査に当たって、人間の視点にたった撮影技術の開発や、直接人間を試験体とする場合の安全性などを考慮した実験技術の開発を行う。なお、本実験結果を5.4.2の人体被災計測ダミーの開発に反映させる。

4) 震動台実験による防災行動の評価と対策研究

十分に安全を確保しつつ、振動台（三次元が望ましい）上の被験者に様々な地震動を体験させ、振動中の消火活動、非常停止作動、とっさの防御姿勢などの防災行動が、どの程度可能かを評価するとともに、振動時により迅速かつ確実に防災行動が確保されるためのマンマシンインタフェースの開発を行う。

(3) 期待される効果

- a) 工学的面からは、家屋等の被害パターンと人的被害の関係、人的損傷メカニズムの分析が定量的かつ直接に把握できることが期待される。
- b) 医学的面からは、性格、性別、年齢、生活環境、状況的役割、被災経験および防災訓練の有無などを考慮した人間の挙動・行動・ストレスの測定により、震度に応じた

ストレス過敏性を明確にでき、心理的耐性限界を特定できることが期待される。

- c) 本研究成果は、防災訓練の有効性を証明するための客観的な資料となり、この結果を今後の防災対策の資料とすることができる。また、人命確保に有効な建物・設備の耐震安全設計、実効ある救急医療マニュアルの作成などに活かすことができる。

5.4.2 強震動による人体被災計測ダミーおよび数値シミュレーション技術の開発

(1) 目的と必要性

震災時の人的被害の軽減を図る上では、建物の倒壊や家具の転倒が人間に損傷を与え、場合によっては死に至らしめる過程を解明することが重要である。その為には、人体損傷の過程をリアルタイムで再現することが必要となる。室内環境の地震時の挙動については、震動台で再現することが可能であるが、人間が受ける影響の測定には、人体を用いることは現実的でなく、人体を模したもの（ダミー人形）を使用することになる。自動車の衝突実験では、このような目的のために人体ダミーが用いられており、人体損傷を人体の各部位にかかる荷重や相対変位を測定することで評価している。地震時の人体損傷についても、人体ダミーを用いての測定は十分可能であると考えられる。

自動車衝突実験用ダミーは50年以上の研究の歴史があり、現在最も進んだ人体ダミーである。このダミーは生体忠実性の追求のため、姿勢を座位に固定し、測定部位も限定をするなど自動車衝突実験用に特化している。しかし、地震時の人体損傷の計測には、全身を対象とし、各種の体位あるいは行動中における各種衝撃を総合的に計測し得るものでなければならない。そこで研究目的に合った、震災用ダミーの開発が必要となる。

また、近年研究されている人体の数値シミュレーションモデルについても、震災用モデルを開発する。数値モデルは劣化がなく、コスト面でも有利である。さらに他のシミュレーションとの統合が可能である。震災用人体数値モデルの開発は、各種の災害シミュレータに与える効果も大きい。

(2) 研究の内容・方法

1) 自動車衝突実験用ダミーの地震被害計測への適用評価

自動車衝突実験用人体ダミーの研究は現在最も進んでおり、学ぶ点が多いと思われる。よって文献調査、ダミーの仕様の調査を行う。加えて実際に自動車衝突実験用ダミー人形を使用して適用性を評価し、同時に震災用ダミー人形を開発する上での課題を抽出する。

2) 震災用ダミーの開発

課題 5.4.1 の(3)「建物倒壊等による人体損傷に関する研究」や衝突実験用ダミーの分析を踏まえ、震災用人体ダミーを開発する。開発にあたっては、汎用性があり、メンテナンスが容易でかつ低コストを目指すものとする。ダミーのタイプとしては、年齢・性別等に基づく身体能力別、立位、座位等の姿勢別が考えられる。

3) 震災用人体数値モデルの開発

シミュレーションモデルの開発では、震災用ダミーの数値モデル化を行い、それをより人体の挙動に近いように精度を上げてゆく。

(3) 期待される効果

開発した震災用ダミー人形は、振動台実験に用いるなどして人的損傷過程の解明に用いられる。また、人体数値モデルは、人体損傷の基礎的な研究に用いるほかに、構造物崩壊解析モデル等に組み込み、建物等の崩壊シミュレーションにより人体への影響を検討する場合に利用される。

5.4.3 強震動時における人の応答行動と家屋被害等が人の反応に与える影響に関する研究

(1) 目的と必要性

防災・耐震研究が人間の安全空間に貢献する事を目的とするなら、様々なレベル、特性の強震動によって生じる諸現象が人間に与える影響について調査分析する事は、実大試験体の破壊を含む応答試験結果の解釈、活用にも大きく係わり、極めて重要である。理学、工学、医学、心理学など学際的な研究チームを構成して取り組む必要がある。

阪神大震災での人間の死亡、重傷の原因は倒壊破損した構造物部材による圧迫であったとされている。被災、避難、脱出に関連する環境と対応行動に関する解明は、重要な研究課題である。人間の被害は肉体的なものだけではない。生理的、心理的な影響は震動時や直後の行動ばかりでなく長期に及ぶ事も指摘されている。揺れ以外の音響環境や映像環境の影響も大きい。特に、集団行動では相互に影響を及ぼしあう事で状況の展開が大きく変わる可能性がある。そこで、本課題では、強震動中あるいは直後の時期における人間の心理的応答およびその結果としての人間行動に関して基本的な知見を得ることを目的とする。

(2) 研究の内容・方法

本課題の特性から、かなりの部分が被験者実験による研究に頼らざるを得ない。しかしながら、震災が人間にもたらす影響は不明な点も多く、また長期に及ぶ可能性もあることから、実験的なアプローチには慎重を期さねばならない。

1) 阪神・淡路大震災などこれまでの大規模震災における人間行動、心理的・生理的影響などに関する調査研究：実態調査研究

震災後に種々の研究機関などで試みられた被災地や周辺地域の対応行動についてのアンケート調査資料などを収集し、また関係者への聞き取り調査を行なって地震動および被害状況への対応行動に関する整理・分析を行なう。

2) 地震動特性（揺れの強さ、周波数特性、継続時間、上下動・水平動の組み合わせなど）と環境条件が対応行動へ及ぼす影響に関する研究

揺れの特性、音響（破壊音、悲鳴など）、映像（暗闇、物の転倒・飛散、火災拡大、負傷者の姿など）の組み合わせが対応行動へ及ぼす影響を実験的に研究する。

ただし、安全と心理的、生理的な影響に十分な配慮を行ないながら段階的に実施する。

3) 震災時の環境、言語情報が集団対応行動へ及ぼす影響に関する研究

地震時及び地震後の集団行動について、リーダーの存在や集団規模、提供される情報などによる効果を実験的に研究し、分析・評価手法を開発する。

4) 地震時の自動車の走行性と制御性に関する研究

自動車の社会活動に果たしている役割は大きい。地震動が激しくなると運転に支障が生じることが指摘されている。車の制御性が低下すると2次災害の誘因になる可能性がある。車の走行試験装置を振動台上へ搭載して、震動のレベルや周波数特性によって走行性、制御性へ及ぼす影響を実験的に研究する。

(3) 期待される効果

これまでの大規模震災時(主に阪神・淡路大震災)における人間行動の実態分析と振動台を活用した実験的な研究により、非常事態での人間行動についての知見を得ることが出来る。すなわち、個人あるいは集団のレベルでは、どのような条件下でパニックが起こるのか、その制御方法にはどのようなものがあるかを見極めることが可能となる。得られた知見は、都市、建築物などの安全空間計画へ反映されることが期待出来る。また、非常・緊急時の避難、誘導などの機能検討にも活用されることが期待出来る。

5.4.4 人間行動数値シミュレータの開発

(1) 目的と必要性

地震による人的被害の軽減には、地震の最中や地震後の混乱の中で、人々がどのような反応や行動をとるのかを十分理解することが不可欠である。土木構造物や建築構造物など、構造物の地震時の挙動についての研究が、過去の地震被害の経験や教訓を踏まえて、様々な実験や数値シミュレーションによって行われ、現在も精力的に進められている一方で、人間行動についての研究はまだ不十分な状況である。

従来この種の人間行動の研究は、大きく分類すると「過去の災害事例の調査」「被験者実験」「コンピュータシミュレーション」の3つ手法を用いて行われてきたが、それぞれ以下に示すような課題を有している。「過去の災害事例の調査」では、得られるデータが実際の災害時のデータである点が、他の手法と決定的に違う重要な点であるが、データ数が少ないこと、防災上重要となる死者の行動が基本的に不明であることなどの点で、この事例調査からは十分な分析が行えない場合が多い。「被験者実験」については、被験者の安全性の問題から、災害時の環境を再現することが難しく、災害時の緊迫した状況下での実験データの収集は困難である。また、大規模な都市空間や構造物全体を対象とするような実験の実施は困難である。「コンピュータシミュレーション」は可能性を秘めているが、従来の手法ではモデルやパラメータが多く、仮定に基づくし、個人特性や避難空間の細かな情報を考慮することができない。以上の問題を各手法が抱えている。

本研究の目的は、上記の各手法の課題点を踏まえるとともに、最近のコンピュータ技術や様々な数値解析技術の進展を背景として、災害時の環境再現とその環境下における人間の反応や行動を分析可能とする装置の開発にある。すなわち、コンピュータによる仮想環境内に災害時の状況をリアルに再現し、それぞれの状況下での人間の反応や行動に関する情報の収集とデータベース化、その調査や分析を可能とするシミュレータを作り上げる。次項 5.4.5 の「舞台装置」が実物としての災害環境再現舞台であるとすれば、ここでの人間行動数値シミュレータは、仮想空間内に災害環境を再現するコンピュータ仮想災害環境再現舞台として位置付けられるもので、両者は互いに補完し合う関係にある。

(2) 研究の内容・方法

本課題は、内容的には次項 5.4.5 の課題（人間行動環境試験装置の開発）と密接に関係し若干重複するところもあるが、「数値シミュレータの開発」である点が他の課題と違うユニークな点である。以下の 1) の「試験装置の種類・仕様の設定に関する研究」では、本課題で取り扱う研究全体における問題点の洗い出しと研究全体の位置付け方向性を検討し、これを踏まえて、2) と 3) で、災害時の「本能的・生理的的反応」と「意識的・戦略的な人間行動」を分析する装置の設計と開発のための研究を行う。そして 4) で、2) と 3) の中から、それぞれ 1 種類の装置を試作する。

1) 試験装置の種類・仕様の設定に関する研究

災害時の環境とは何を再現することで達成されるのか。この点が明確にならないと、システムの設計にすら着手できない。特にコンピュータによる仮想空間に災害環境を再現しようとする場合には、5.4.5 の実物装置以上に、この点をあらかじめ詰めておくことが研究を遂行する上で重要となる。まず、この点を明らかにするために、状況に応じた適切な災害環境の再現法の検討を行う。すなわち、映像・音響・振動・におい・熱・圧力などを多様に組み合わせた環境の中で、災害状況に応じて何が最も支配的な要因か、コンピュータで再現できるものの限界を明確にするとともに、他の装置とのハイブリッドな仕組を考えた場合の再現性の可能性についても検討を行う。また、それぞれの災害環境において重要となる人間の反応や行動データの洗い出しとデータ収集を適切に行うモニタリング法も研究する。そして、これらの検討事項の結果を反映した装置の種類や仕様の設定を検討する。この際に、災害弱者向けの装置も研究対象とする。

2) 本能的・生理的的反応調査装置の設計と開発

仮想空間内に災害状況を再現し、その環境下に置かれた人間の本能的・生理的な反応や行動に関する情報を収集し、これを調査・分析する装置の設計と開発を行う。ここで扱う反応や行動は、個人の意識や認識とは無関係に生じる（あるいは関係の小さい）生態的な反応や衝動であり、これらを分析するために必要な各種センサーの設計や開発も手掛けることになる。多くの装置は、既に医療関係分野で開発・使用されている可能性も高いので、医療分野の調査を基本調査としてまず実施し、装置の有無の確認、本目的に利用するための改良点などについて研究する。この装置は、その性格上、被験者を装置に固定して実験

できるようなシステムであり、避難行動ほど大きな行動を伴わない範囲での行動分析を主眼とする。

3) 避難行動を中心とした人間行動解明装置の設計と開発

災害時の環境を認識して人間はどのような行動をとるのか？ 災害環境下での意識的・戦略的な行動の分析を行う装置の設計と開発を試みる。この装置により、災害時の避難行動特性を分析することで、安全上、施設や空間が性能・機能として持ち合わせるべき空間的な特性や周辺設備、安全性評価手法、安全空間設計法などの提案が可能となる。ここでの人間行動は、避難行動が中心的になり、バーチャルリアリティー技術を基本ツールとし、それを共通の環境として、構造物の破壊・崩壊状況の再現を応用要素法(AEM)で、空間内での家具などの挙動を個別要素法(DEM)で、その空間内での人間行動をポテンシャルモデルで再現する方法とする。また、情報の有無による行動の差なども考慮できる装置とする。

4) 装置の試作

基本的にはコンピュータによる仮想空間内に、最新の様々な数値シミュレーション手法を用いて、災害環境を再現することをめざすが、外部からのインプットなしには再現の難しい振動・におい・熱・圧力などについては、実環境とのハイブリッド装置により対応する。このようなモデルを、上記の2)、3)の設計から各々1種類選び、計2種類の装置を実際に試作する。

(3) 期待される効果

地震災害時に「ひと」をとりまく環境に発生する様々な状況下での「ひと」の反応や行動の基礎データの蓄積とそのデータに基づく防災対策を検討する。すなわち、「事前・最中・事後」のそれぞれのフェーズで、人的被害を最小に押さえるための防災対策法を具体的に立案できる。

5.4.5 実大三次元震動破壊実験を想定した人間行動環境試験装置の開発

(1) 目的と必要性

実大三次元震動実験を想定して建物被害に係わる人体被災の研究(5.4.1)や地震後の人間行動に関する研究(5.4.2)を行うのに際しては、研究のツールとして、特に地震時に問題となるような住居や危機管理室などを正確に再現した、いわば舞台装置が必要である。この舞台装置は住居を例にとれば単に室内の再現ではなく、脱出や避難等の人間行動を考慮しうるよう住居環境全体を再現したものでなければならない。この装置は、実大三次元震動台に載せ、弱および中振動における実際の被験者による各種挙動・行動試験を行う。

本課題は、研究の目的に応じてどのような舞台装置が必要か、その装置の仕様・構造はどのようなものがよいのか等について研究し、各種舞台装置を設計、最終的にはこの装置を試作するものである。これらの装置、特に屋内環境を用いた震動体験によって一般住民の防災意識、対応の啓蒙にも役立てることを考える。

(2) 研究の内容・方法

本課題は5.4.1から5.4.4の課題と密接に関係し、若干重複するところもあるが、以下の内容の研究あるいは開発を行う。

1) 試験装置の種類・仕様の設定に関する研究

他の研究課題の研究内容および阪神・淡路大震災の事例調査等から、試験装置の種類、その仕様等を設定する。たとえば住居については、一般的な木造住居、商店との併用住居、マンション等が考えられる。この他、工場の作業現場、一般的なオフィス、あるいは、消防、ライフラインの管制室等危機管理の中核となる場なども考えられる。

試験装置は実大三次元震動台に載せることを最終目標とするが、テストを兼ねた事前の研究のため、(財)原子力発電技術機構多度津工学試験所、防災科学技術研究所の振動台に裁荷しうるような大きさとする。

2) 人間行動環境試験装置の設計

各種の条件において、震動中あるいは震動終了後の人間の行動を解明するための装置を設計する。この装置は、基本的には被験者（単数、複数）による弱および中振動レベルでの実験を想定する（したがって、振動により破壊する必要はなく、家具の転倒や梁の落下等の被害はあらかじめ状況として創り出しておく）。屋内における人間行動としては、住居での振動中のとっさの防御、火の始末、他者防護、振動終了後の脱出、消火、他者救助等、危機管理室等での主に振動終了後を対象とした情報途絶下、逆に情報が溢れる状況下における状況把握、必要な措置の実施等とする。

さらに、阪神・淡路大震災では顕在化しなかった都心商業地域における滞留者の混乱を再現し得る屋外環境試験装置を開発する。

3) 装置の試作

実大三次元震動破壊実験施設に実際に載せて実験することを目的として、上記の設計から3種類程度の装置を実際に試作する。

(3) 期待される効果

大地震時における人体の損傷、人間行動に関する研究は阪神・淡路大震災等のデータによる実証的な研究、あるいはダミーを用いた要素試験等からある程度明らかにされるが、本実験装置により、ほぼ実際に近い状況において検証することができる。

また、開発した装置による一般住民を対象とした震動体験（施設の一般公開時等に体験してもらう）を広く行うことにより、実大三次元震動破壊実験施設そのものを広く社会的に還元することができる。

参考文献 (5章)

- 1) 国土庁：防災白書（平成9年版）、大蔵省印刷局、1997.
- 2) 鹿島都市防災研究会：地震防災と安全都市（3.3人的被害：戦後最悪となった大量犠牲者）、都市・建築防災シリーズ5、鹿島出版会、1996.
- 3) 熊谷良雄：死者発生状況の全体像、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 4) 近代消防編集局：一人口動態統計からみた一阪神・淡路大震災による死亡者の実態（厚生省資料）、近代消防'96年2月臨時増刊号、1996.
- 5) 村上ひとみ：1995年阪神・淡路大震災における応急救助の実態と活動、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 6) 大津俊雄：死亡に対する家具の影響と震災に備えた住み方の改善、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 7) 田中裕、吉岡敏治：阪神・淡路大震災時のクラッシュ症候群の実態について、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 8) 室崎益輝：阪神・淡路大震災における負傷と医療、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 9) 西村明儒：法医学から見た死亡原因、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 10) 塩野計司：地震による人的被害—世界の状況—、人的被害研究会地震時死傷問題に関する学際シンポジウム報告書、1997.
- 11) 目黒公郎、芳賀保則、山崎文雄、片山恒雄：バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用、土木学会論文集、No. 556 / I-38、1997.
- 12) 目黒公郎、原田雅也：最適避難誘導のための基礎研究、地域安全学会論文報告集、1997.
- 13) 和田雄志：新しい防災・教育訓練ツールとしてのVR（バーチャルリアリティ）、福井震災50周年記念事業世界震災都市会議予稿集、1998.
- 14) (社)日本機械工業連合会、(財)日本自動車研究所：平成6年度衝突試験用ダミーに関する調査研究報告書、1995.