

造船所における歩行安全評価のための ヒューマンモデルに関する研究

正員 篠田 岳思* 正員 池田 耕平**
 学生員 合戸 崇司*** 正員 田中 太氏*

Evaluation for Safety Walking Environment at Shipyard by Human Model Analysis on Transferring Platform mock-up

by Takeshi Shinoda, Member Kohei Ikeda, Member
 Takashi Goto, Student member Takashi Tanaka, Member

Summary

Present situation surrounding occupational accident in shipyard is described that number of occupational accident is shifting from approximately flat to increase, and these are related with increase of ship construction in Japanese shipyard in recent years. Harmful occupational accidents are not only great loss to workers and companies, but also social and economic loss. And advancement of occupational health and safety represents an important issue in progress of ship industry.

The falling type accident is deal in this paper mainly, because this type of accident is happen 30% of all approximately 130 cases of occupational accident per year and is situated in the top order of all categories of occupational accidents in shipyard. This feature of fall accident is contained fall from high place such as scaffolding and many cases of fall from lower place such as ladder only from one or two meters height and this is also characteristic of all construction industries. So, database about falling type accident has been constructed by use of published reports of occupational accident by the Shipbuilders' Association of Japan. And an introducing mode to falling accident is analyzed through risk matrix method by constructed database, and evaluation of walking environment on harmful introducing mode is considered by experiment on transferring platform mock-up. A trial calculating methodology for body burden on walking is proposed through the construction of human model on walking, the development of instrument of floor reaction force from foot and the motion capture technique.

1. はじめに

造船所における労働災害の我が国の現状について述べると、災害発生度数率は近年の建造量の増加もあり、横ばいから上昇傾向に転じている。労働災害は社会的・経済的損失が大きいため、産業の維持・発展・継承には作業者の安全確保は重要課題である。

労働災害の合理的な抑止対策には、作業および災害のリスク評価を行うことにより、災害への改善対策を検討する必要がある。近年では、英国の安全衛生庁(HSE; Health and safety executive)、労働衛生安全評価シリーズ(OHSAS 18001; Occupational Health and Safety Assessment Series)、ILO(International Labor Organization)のガイドラインでは、労働安全でのリスクアセスメントやリスクマネジメントの重要性が指摘されており、これらを受けて我が国においても平成17年に改正労働衛生法が制定され、労働災害の未然防止を目的としたリスクアセスメントの実施とその結果に基づいた安全対策や是正処置の実施について産業界に働きかけるように変化しつつあるが、現状では未だ動きが鈍い状況にある。

労働災害のリスクアセスメントを行うためには作業分析やその作業の労働災害への危惧される要因分析や、発生の頻度、および危害の大きさを把握して検討する必要がある。現状での休業災害調査報告からでは原因

や危害の規模の推定が難しい部分が多いが、歩行環境のモックアップ実験のようにデータにおいて不足している部分を補完して事故のメカニズムを検証して、対策に反映していく必要がある。

造船所での労働災害は年間130件程度発生するが、ここでは、災害の分類上において30%にのぼる重大事象である墜落・転落事故を扱い、労働災害の報告書から労働災害データベースを構築することによりデータ解析を行い、リスクマトリックスにより災害の特徴について整理を行うことにより、主災害要因の一つである歩行中の労働災害を取上げる。歩行中の労働災害においては災害に至るメカニズムに不明な点が多いため、作業用歩行路での歩行安全について、歩行路モックアップ上での歩行実験により検討を行う。歩行中の身体に作用する負荷には、歩行中のヒューマンモデルを構築し、製作した床反力計とモーションキャプチャーを用いて推定する方法を提案して対策を検討して行く。

2. 歩行路環境のリスク評価

造船所での労働災害についてリスク要因の発生頻度・確率を推定するために、日本造船工業会が毎年取り纏めを行っている「休業災害(含死亡)調査報告」¹⁾を用いて、特に災害の発生度数の高い墜落・転落災害について、平成10年から15年にかけて6年分の災害事例についてデータベースを作成した。このデータベースより発生頻度と危害の大きさをリスクマトリックスにより分析する。

例として、災害発生モードについてTable1に示す。このリスクマトリックスでは、災害の発生頻度として発生した事例数に応じてカテゴリーを1から5段階まで設定した。例えば、カテゴリー1では、労働災害の発生した

* 九州大学大学院工学研究院

** デンソー(研究当時、九州大学大学院工学府)

*** 九州大学大学院総合理工学府

Table 1 Risk matrix related damage level and mode of fall related accident in shipyard by constructed database of reports of occupational accident by the Shipbuilders' Association of Japan

Frequency level (Number of cases)	Damage level (Days of leave for injury)					
	Category A (Bellow 60 days)	Category B (61 to 120 days)	Category C (121 to 180 days)	Category D (181 to 240 days)	Category E (Above 241 days)	Category F (Loss of life)
Category 1 (1 case)	Off-balance and slip at various place, and so on	Off-balance and slip at rare situation, and so on				Off-balance at footstool
Category 2 (2 cases)	Misstep on scaffold board	Slip on the rail of scaffolding, Off-balance on the top of folding stepladder, Off-balance on support of block	Falling with folding stepladder or footstool, Break of rail of scaffolding, Slip at inclined ladder, Miss lasing of inclined ladder			
Category 3 (3 to 4 cases)		Sway of scaffolding or scaffold board, Misstep at opening, Miss grip on the wall	Off-balance at edge of block or on folding stepladder, Slip at stairway or on the face plate	Off-balance or Slip at inclined ladder, Off-balance at block support, Miss grip of vertical ladder		Sway of scaffolding or scaffold board
Category 4 (5 to 9 cases)					Slip at edge of block or at ladder, Fall of scaffold board	Fall of scaffold board
Category 5 (Above 10 cases)					Off-balance at edge of block or at scaffolding, Lack of cover or unawareness at opening	Off-balance at scaffolding, Lack of cover at opening

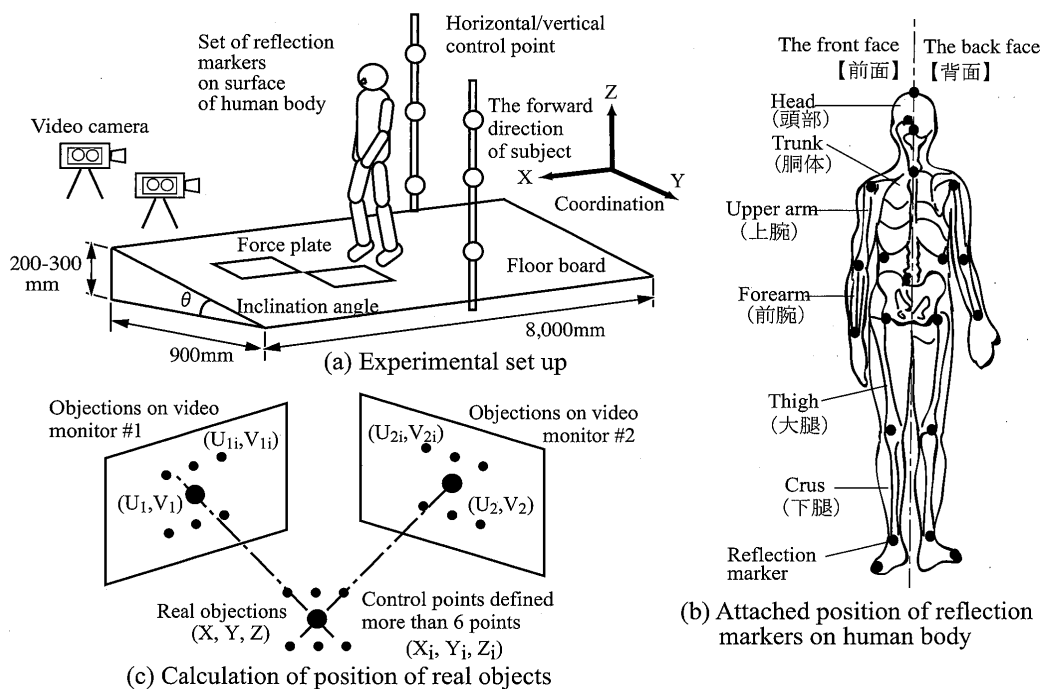


Fig. 1 Experimental set up on human walking and 3D data acquisition by DLT method

頻度は1件であるものを示しており、カテゴリー5では事例が10件以上あったものを示している。また、危害の規模としては、ここでは、発生した災害における休業日数を取ることにし、カテゴリーをAからFまでの6段階に表した。造船所内でリスクの高い労働災害の発生場所としては大組・総組の船殻ブロック、マンホールおよびパイプ類貫通のための開口部、作業用の仮設足場、垂直梯子、および脚立等が挙げられる。これらの場所では作業時間が長いことや通行上の接触頻度が高いことから、これらでの滑りや躓きのように身体のバランス崩壊から、事故回避の際に必要な身体能力が対応できないことや安全対策が十分でない場合には、墜落・転落災害に至る可能性がある。そこで、歩行動作中に歩行環境

から身体への負荷があるときの身体のバランスについてモックアップによる歩行実験と歩行中のヒューマンモデルにより検討を行う。

3. 歩行路モックアップ実験

3.1 実験方法の概要

Fig.1に歩行路のモックアップ実験の概要を示す。歩行動作中の身体各部位の位置座標の時系列データの取得にはモーション・キャプチャー法を用いる。Fig.1(a)(b)に示すように被験者の身体各部分(19点)の動作中心位置に球形の反射マーカを付け床面上を歩行している様子を2方向から2台のビデオカメラを用いて撮影(30

Table 2 Experimental condition on mock-up

Variation of inclination of floor		Slippery condition		Control of height of ceiling		Work shoes
Nominal designation	Condition	Nominal design.	Condition	Nominal design.	Condition	New/ worn-out rubber-soled shoes New/ worn-out protective footwear Nylon socks
Flat	Horizontal condition	Slip 1	Plywood board	High	Height ceiling 166cm	
Left 1 down Right 1 down	Incline to the left or right side of the forward direction of subject (inclination angle 13°)	Slip 2	Polyethylene vinyl on board	Middle	154cm	
Left 2 down Right 2 down	Do. and more inclination (inclination angle 20°)	Slip 3	Detergent within polyethylene vinyl on board	Low	127cm	

フレーム / 秒) し, 反射マーカの 2 次元ビデオ画像データを DLT(Direct Linear Transformation) 法により 3 次元の歩行動作として再構成して取得する。2 方向からのビデオ画像を 3 次元座標として算出するには, カメラから反射マーカまでの位置, カメラの設置角度, レンズの焦点距離等のデータを設定する必要があるが, これらを予め設定することは困難であるため, DLT 法ではコントロールポイントと呼ばれる実距離が計測可能な 3 次元座標点を基準点として多数設置しておき, これらを身体に取り付けた反射マーカと同時に撮影することにより, これらの位置座標を計算により求める。

DLT 法の計算方法について述べると, 得られる画像データの 2 次元座標を (U, V) とし, 求める 3 次元座標を (X, Y, Z) とし, カメラに依存するカメラ定数を $L_1 \sim L_{11}$ とすると次の関係式が成り立つ。

$$L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 - L_9 XU - L_{10} YU - L_{11} ZU = U \quad (1)$$

$$L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 - L_9 XU - L_{10} YU - L_{11} ZU = V \quad (2)$$

これらの式より, 初めにカメラ定数 $L_1 \sim L_{11}$ を計算するが, これには (1) および (2) 式に 6 カ所以上のコントロールポイントについての空間上の 3 次元座標位置および画面上 2 次元座標の数値を代入して連立方程式をたてて $L_1 \sim L_{11}$ を未知数として解くことにより求める。次に $L_1 \sim L_{11}$ が求まると, 2 台以上のカメラから得られる画像データ (U, V) を用いて先の (1) および (2) 式を用いて連立方程式をたてることにより 3 次元位置座標が求まる。なお, 連立方程式では方程式の方が未知数の数より多い過剰な条件となるため, 最小二乗法により計算する。なお, ここでは DLT 法のソフトウェアとして Frame-DIAS (DKH 社製) を用い, またコントロールポイントは歩行域周囲に 90 点設定して, これらのコントロールポイントの位置の 3 次元座標の取得には精度向上のために測量器 (PENTAX 社製 R-316c) を用いた。

また, 労働災害データベースの分析によると, 歩行路環境の中での墜落・転落災害の副次的要因としては, 靴底の劣化, グラインダーの削り粉や油の靴裏への付着による滑り, 曲面のある大組ブロックの外板上および足場での傾斜, これらの交通装置等からなる天井をくぐる際の身体の屈み移動に着目して, Table2 に示す実験条件を設定した。表に示すように, 実験では歩行環境状態として, 床面の滑りの違い, 床面の傾斜角度の違い, 床面と天井の高さの違いをモックアップにより再現して歩行実験を行った。なお, 作業者の履物として, ゴムラバー靴, 安全靴を用意して使い古し等の使用条件による違いも検討した。

3.2 床反力計による計測

足底にかかる床反力の計測は市販の床反力計では歩行路の傾斜状態においては計測が困難であるため, 傾斜状態に対応して計測できるように床反力計の製作を行った。この装置は薄型ロードセル (テック技販社製) をステンレス製支持台に埋込み, この支持台に軽量化したアルミ合金の平板を設置したものである。

製作した床反力計により, 床板が水平な状態において歩行した際の足裏からの床反力を計測したデータを Fig.2 に示す。床反力の 3 軸の向きは, 進行方向, 床面より鉛直上向き方向, 左右方向右側を正とする。この図によると床反力の垂直方向成分は, 足裏の踵の着地から爪先に床反力が移行する間に大きく M 字形を示し, M 字のボトム部では体重よりも軽い状態となる。また, 左右方向の成分は力が身体の内側に向くように現れ常にエッジを取りながら歩行を行い, 進行方向の力成分は踵の接地を支えてから, 爪先に床反力が移行して蹴り出す際に, 負から正に移行することが分かり, 他の同種の計測器により平面状態において計測したものと同様のものが得られることが分かった。

なお, この歩行環境状態は Table1 の実験条件 Flat に相当するが, この歩行環境状態を規準として, 次に各歩行環境状態との違いを比較して述べる。

床板の傾斜による歩行環境状態の影響として, 初め

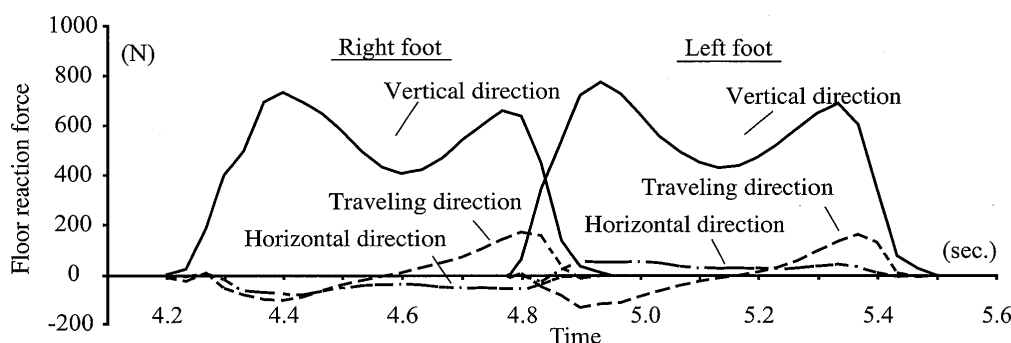


Fig.2 Floor reaction force on experimental condition of inclination of floor flat

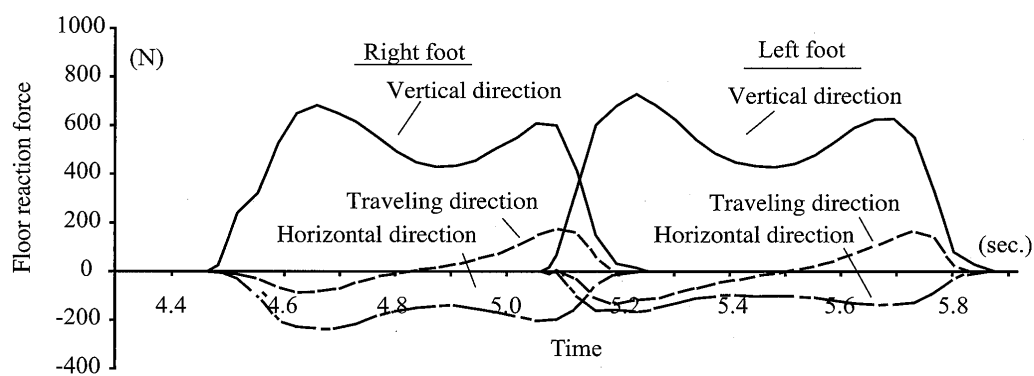


Fig.3 Floor reaction force on experimental condition of inclination of floor right two down

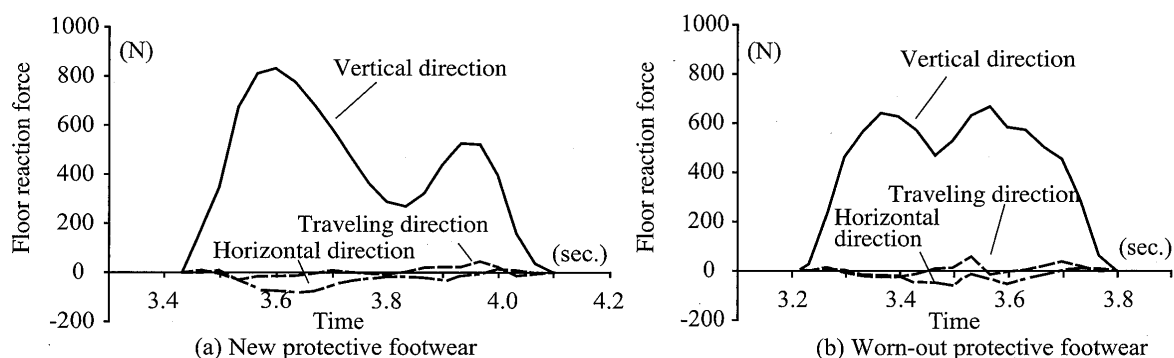


Fig.4 Difference of floor reaction force on friction of work shoes on experimental condition slip3

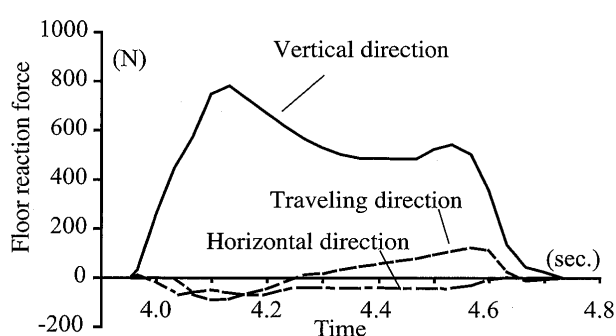


Fig.5 Floor reaction force on experimental condition of control of height of ceiling (middle height)

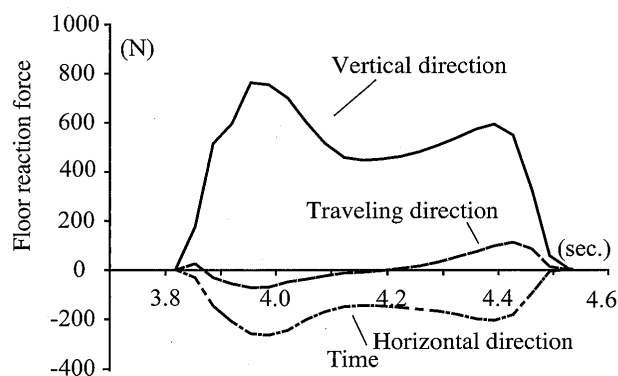


Fig.6 Floor reaction force on cumulative experimental condition of inclination of floor right two down and slippery condition slip 2

に床板が水平な状態で歩行し、その後床板の斜度傾きを進行方向に対して斜度を変化させ、傾斜した床板上での歩行状態の床反力について調べた。歩行環境状態として Right one down および Right two down について Fig.3 に示す。この図によると、傾斜は進行方向に向かい左側に傾いているが、左右方向の反力は、水平な状態では身体の内側にエッジを取りながら歩行していた傾向が、両足とも傾斜から身体を支える側に現れ、また床反力を垂直方向と供に分配している。この傾向は傾斜角の大きさに応じて、さらに顕著となる。なお、進行方向の反力成分は水平状態と同様に、踵の接地を支持した後に爪先に床反力が移行して蹴り出しながら、歩行を行っている。

次に、床面の滑り状態を変化させた場合について、初めに、Slip1 市販の合板の上を歩行した状態から、摩擦係数の小さな状態に変化させるために、Slip2 ではビニールを用い、さらに Slip3 ではビニールの中に洗剤を注入して滑りやすい状態を作り、新しい安全靴と造船所において使い古した安全靴を履いて歩行することにより、滑りやすい歩行環境状況を作り床反力の計測を行った。

Slip3 における結果を Fig.4 に示す。Fig.4(a) では新しい安全靴を履いた歩行について示すが、左右方向の反力成分は強く現れずエッジを取ることが困難であり、また進行方向の反力成分は踵の接地を支えることも、爪先での蹴り出すことも困難な状況になる。また Fig.4(b) 古い安全靴を履いた際には、垂直方向の反力成分は形状が平坦化しており、これは身体のバランスを取るために、足底全体で鉛直方向の荷重を受け持ちながら歩行している状況を示している。踵の接地や爪先の蹴り出しの際に、床面反力を支持できない状態では身体バランスを保つことができず、転倒に繋がることもある。

また、床面から天井高さを変化させた歩行環境状態について、初めに、Flat な床板の上を歩行した状態から、床面の高さを変化させて、身体を直立させた状態で、頭と天井が接近している High のように首を少し傾けながら歩行する環境状態から、Middle のように背を少し丸めながら歩行する環境状態、さらに、Low のように

屈んで歩行する環境状態へ天井高さを徐々に変化させて実験を行い、床反力の計測を行った。これをFig.5に示す。この図によると、進行方向および左右方向の反力成分の形状は実験条件 Flat に似ているが、顕著では無いが、天井高さの制約が加わると歩行中の膝関節角に制約が生じ、特に鉛直方向の反力成分に顕著に現れ、爪先での蹴り出しが困難な状況になっている。

さらに、床板の傾きが Right one down 状態と滑り状態 Slip2 を組み合わせた歩行環境状態について実験を行った。これをFig.6に示す。この図によると、床の滑りのために、垂直方向の反力成分の内、特に蹴り出しが適正に行えず、転倒に繋がる可能性がある。

4. 歩行環境評価のためのヒューマンモデル

静止時での座位等の特定の条件による膝等の関節部に働く負荷を計測する機器は存在するが、身体の状態や動的な状態において関節部に働く負荷を計測する機器は無く、関節部の負荷は計算により定める方法が提案されている。例えば、作業時の静的な身体負荷については奥村等による溶接時作業におけるヒューマンモデルによる解析²⁾があり、また、動的な歩行解析には、臨床歩行学会による歩行面側面における2次元平面での関節モーメント法³⁾のプログラムが提供されている。ここでは、ブロック形状によっては斜路となる歩行路や階段等への環境状態と歩行状態の解析のために、新たに歩行時のように動的な3次元のヒューマンモデルの構築を図る。

4.1 ヒューマンモデルの構築

歩行時の各関節部への負荷についての計算方法としては、臨床歩行学会による関節モーメント法が提案されておりプログラムの提供もなされている。この方法では、関節の負荷は関節トルクとして計算されるが、計算モデルでは矢状面と呼ばれる歩行の進行方向の真横からみた

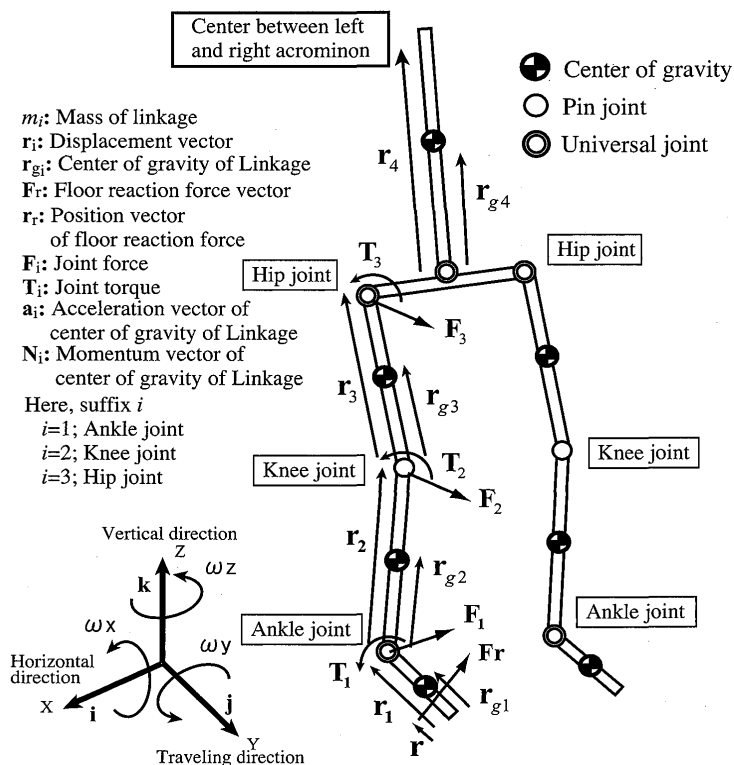


Fig.7 Human body model by linkage of rigid body

2次元平面において計算を行うため、船体ブロックやブロックに掛けられる足場上での歩行のように歩行路が斜路である3次元状態についてはトルク推定が困難である。このため、ここでは新たに歩行時の身体負荷を3次元のヒューマンモデルの構築を図ることにより計算により身体脚部に負荷としてかかる関節トルクを求める。

3次元の歩行状態での関節トルクとして負荷量を求めるため、Fig.7に示すように、ロボット工学において用いられているリンクモデル⁴⁾を用いる。このリンクモデルは、ロボットの構造をリンクとジョイントによりモデル化して、各リンクやジョイントに作用させるトルクを計算により求める方法である。

ここでは、人体の各骨格部と関節を剛体のリンクとジョイントによりモデル化して表し、画像処理と床反力計とを組合せて、各関節に働く負荷を力およびトルクとして計算して求める。なお、ロボットでの計算モデルの違いは足底からの摩擦力を考慮している点にある。

各リンクにおける力とモーメントのベクトル量による力学的な釣合式は次式で表される。なお式中の×記号はベクトルの外積を表す。

(1) 足関節トルク

$$m_1 a_1 = F_r + F_1 - m_1 g k \quad (3)$$

$$N_1 = T_1 + (r - r_{g1}) \times F_r + (r_1 - r_{g1}) \times F_1 \quad (4)$$

(2) 膝関節トルク

$$m_2 a_2 = F_2 - F_1 - m_2 g k \quad (5)$$

$$N_2 = T_2 - T_1 + (r_2 - r_{g2}) \times F_2 - r_{g2} \times F_1 \quad (6)$$

(3) 股関節トルク

$$m_3 a_3 = F_3 - F_2 - m_3 g k \quad (7)$$

$$N_3 = T_3 - T_2 + (r_3 - r_{g3}) \times F_3 - r_{g3} \times F_2 \quad (8)$$

モーションキャプチャーにより取得した身体各部の変位の時系列データから身体各部における変位、加速度、角

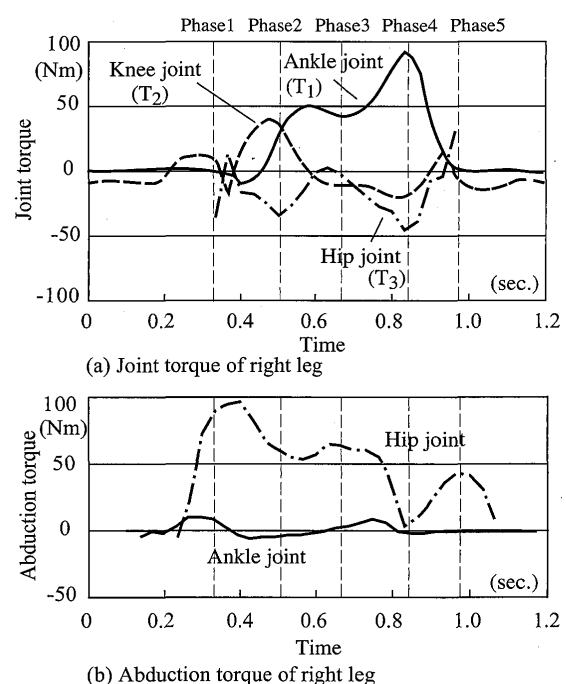


Fig.8 Calculated joint and abduction torque of right leg under flat condition

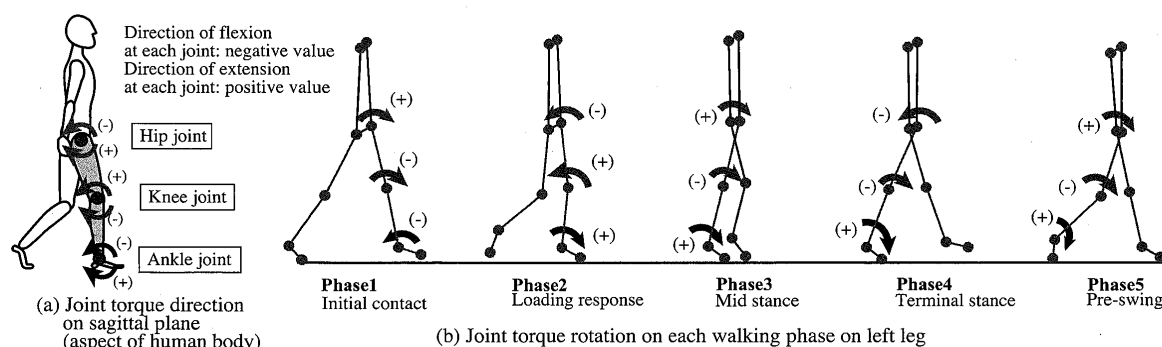


Fig.9 Direction of rotation of joint torque and each walking phase

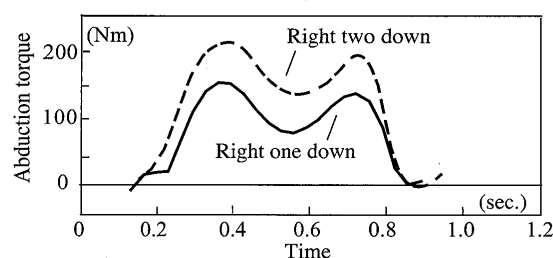


Fig.10 Calculated abduction torque on experimental condition right down

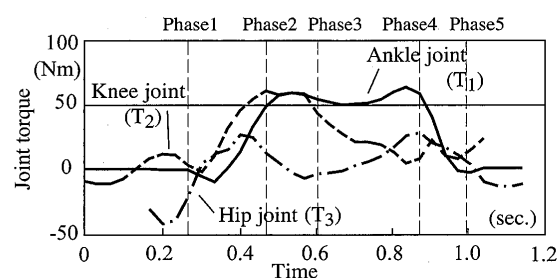


Fig.12 Calculated joint torque on experimental condition of control of height of ceiling (middle height)

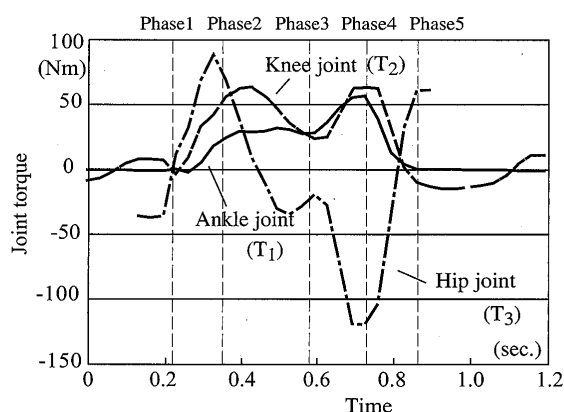


Fig.11 Calculated joint torque on experimental condition slip3

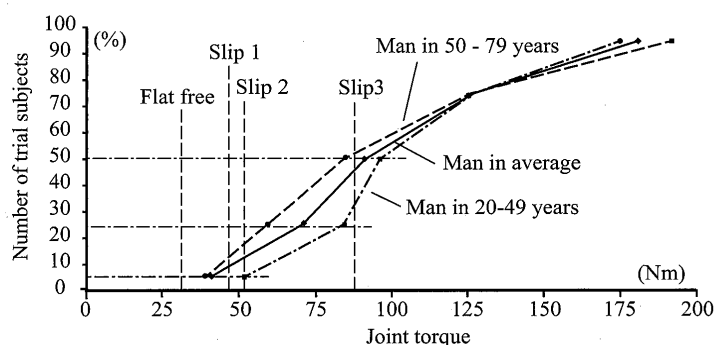


Fig.13 Tolerable joint torque by statistical data

速度を数値的に求め、また床反力計により得られる床から身体にかかる反力の時系列データから、これらの数値を(3)から(8)式に代入することにより、各時刻における各関節にかかる力やトルクについての連立方程式を導出して、この方程式を解くことにより各関節における負荷量である関節トルクを得る。なお、ここでは連立方程式の解法には Gauss-Jordan 法を用いた。

4.2 実験に基づくトルク推定値

構築したヒューマンモデルを用いて、水平な床板の上を通常の歩行時 (Flat) の関節トルクを Fig.8 に示す。なお、図中の Phase とは文献⁵⁾に基づき歩行状態を定義した歩行 Phase であり、歩行に伴う関節トルクの正負方向の定義として、各関節において部位を伸ばす側に働く伸展トルクを正方向として、これとは逆に部位を曲げる側に働く屈曲トルクを負側とする。なお、Fig.9 には Initial Contact と呼ばれる足の踵が地面に触れた瞬間から Pre-Swing と呼ばれる反対側の足の踵が触れるまでの間について関節トルクの向きとしての特徴を示す。

Fig.8(a) には、人体側面から見た矢状面での関節トル

クを示している。Phase1 では、接地時に転倒しないように、股関節に伸展トルクを生じさせ、後屈した体幹を引き起こす。Phase2 では、膝折れによる転倒を防止して姿勢を保つために、膝関節に伸展トルクを生じさせ、ショックを吸収する。また、股関節は身体の重心の上下動を抑えるため、屈曲トルクを生じさせている。Phase3 では、爪先に圧力中心が移動して、踵が浮き始める時であり、主に足関節に伸展トルクを生じさせており進行方向への推進力を生じさせ始め、同時に膝関節および股関節に働く関節トルクを屈曲側に移行して、身体のバランスを制御している。Phase4 では、足関節トルクが最大となり推進力を強く発揮させ、同時に膝関節および股関節への屈曲トルクが最大となり、推進力を増長させる。Phase5 では、逆側の左足の接地時にいて、事前の膝折れを防止するために、膝関節に屈曲トルクを生じさせ始めている。このように歩行の各 Phase での関節トルクによっても歩行が特徴付けられる。

また、Fig.8(b) には前額面と呼ばれる歩行正面から見た平面内での関節トルクを示している。主に股関節において股を開く側である外転側にトルクを生じさせていることが分かる。

Fig.10 には、歩行環境において進行方向に向かって右

側傾斜がある Right down の場合の前額面での外転トルクを示す。傾斜角度が大きくなるに従い、斜面の下方の右脚の外転トルクは Flat 状態に比べて 1.5 倍から 2 倍大きくなるため、仮にこの状態で滑りが発生した場合には転倒に繋がることがありうる。なお、矢正面では平板での関節トルクの傾向と大差は無い。

Fig.11 には滑り Slip3 状態での関節トルクを示す。この図によると、Phase1 での接地時に転倒しないように、股関節に伸展トルクを生じさせ、後屈した体幹を引き起こすことや、Phase4 では膝関節トルクを進展させ体が転倒することを防止していることが分かる。

Fig.12 には歩行環境の天井高さに制約がある Mid 状態での関節トルクを示す。この図によると、股関節トルクは Phase2 から 3 にかけて伸展トルクが強く働いていることを特徴としている。これは、身体の上半身が天井の制約を受け屈むことにより、これを支えバランスを取るために、脚部にも制約が働き伸展トルク働かせながら歩行していることによる。また、膝関節トルクも身体上部の制約から同様に Phase4 において伸展トルクを生じさせている。なお推進力となる足関節トルクは High 状態での歩行と比較して小さくなる。

また、Fig.13 には(社)人間生活工学研究センターの調査による、一般男性 114 人における静止状態での各関節に働く最大トルクについてまとめられた資料⁶⁾から、歩行状態での、歩行バランスをとる Phase1 から 2 にかけての股関節の伸展トルクの最大値を、床滑り歩行についてプロットしたものを示す。この図によると Flat 状態の歩行では関節トルクの負荷は問題ないと考えられるが、歩行環境での滑り状態になると、バランス制

御に必要な関節トルクを生じさせることが難しくなる可能性があり、特に Slip3 状態では 50 歳以上の半数の人達に、バランスの維持に困難な状態が現れることが分かった。

5. 結言

人体を剛体のリンクでモデル化することによって、歩行安全評価のためのヒューマンモデルを構築し、歩行環境が人体のバランス制御に与える影響の定量化を試み、環境要因と歩行動作との因果関係を確認した。

提案のモデルを用いて検討を行うことにより、負荷の少ない作業環境のガイドラインの設定が可能になるものと考ええる。次号では他の異なる環境状態での影響について検討を進める。

参考文献

- 1) 日本造船工業会：休業災害（含死亡）調査報告
- 2) 奥本泰久他：バーチャルヒューマンモデルによる作業性、安全性の研究，第一報 溶接作業時の人体負荷について，日本造船学会論文集，Vol.187, pp.383-393, 2000
- 3) 臨床歩行分析会：関節モーメントによる歩行分析，医歯薬出版，(1997)
- 4) 広瀬茂男：ロボット工学，裳華房，(1987)
- 5) Jaquelin Perry: Gaint Analysis, SLACK, (1992)
- 6) (社)人間生活工学研究センター：人間の動作等に係る動的特性の計測評価，(1998)