

地下浸水時の避難歩行に対する危険性の筋活動による検討 Risk levels on evacuation walking under flooded underground analyzed by muscular activity

平藤 裕司¹・小谷 賢太郎²・石垣 泰輔³・戸田 圭一⁴
Yuji HIRATO・Kentaro KOTANI・Taisuke ISHIGAKI・Keiichi TODA

This study aimed to evaluate the risk of evacuation in underground flooding by measuring the muscular activity when walking. Eight healthy students participated in the study. The subjects walked on the hallway assuming it is in flooded condition, while muscle activities in six locations of right lower extremity were measured. The experimental conditions included walking under flood conditions with 0.5-m high water flowing at 4 different flow velocities (0, 0.47, 0.76, and 1.12 m/s in the direction opposite to the walking direction) and walking on dry ground. Maximum voluntary contraction (MVC) was used to normalize the EMG value across subjects. The activity of tibialis anterior increased as the flow speed increased especially at their toes were off the ground and it reached to 90 %MVC when 1.12m/s of flow speed was given to the subjects. Since the major role of the tibialis anterior was to avoid tripping their toes by acting as dorsiflexion of the foot, it was concluded that the subjects had a certain risk of tripping in the water when more than 1.12m/s of water flow was given. They may change their walking posture to reduce the risk of tripping by sacrificing walking velocity.

Key Words : urban flood, electromyography, lower limb muscle, evacuation, underground space

1. はじめに

近年, 集中豪雨の増加に伴い都市部での水害による被害が増加してきている. 1999 年, 2003 年に福岡¹⁾, 1999 年に東京¹⁾, 2000 年に名古屋²⁾で水害が発生した. このような都市部での水害は国内に留まらず, 韓国, 中国, 台湾などの東南アジア, チェコやドイツといったヨーロッパにおいても発生している³⁾. また, 1999 年に起こった福岡水害では, 博多駅周辺のオフィス街が冠水し, ビルの地下 1 階で飲食店の従業員が逃げ遅れて死亡する事故が起こっている⁴⁾. これらの被害によって, 浸水による地下空間の危険性が顕在化してきた.

地下空間の危険性を把握するための研究に関しては, シミュレーションによる解析や実験研究がされている. シミュレーションによる解析では, 地下空間を複数の貯留槽が連結して構成される空間とした貯留槽モデルを構築し, 福岡や大阪, 京都などの地下空間の氾濫解析が行われている^{6), 7)}. その結果, 地下外の構造とともに, 地下街に連結する地下鉄の連結位置の高さや地下鉄駅の容量が浸水過程に大きな影響を及ぼすことが明らかになり, 各都市の地下空間の氾濫過程が明らかにされた. 一方, 実験研究では, 地上と地下施設とを連絡する実物大の階段模型を用いて, 階段最上段の水位を変化させた条件の下, 水が流れる階段上を人が昇段する実験を行い, その結果, 階段最上段の水位が 30cm 以上で避難が困難になることが明らかになった^{1), 5)}. また, 地下空間を目的とした研究ではないが, 水平通路模型を用いて水位と流速を変化させた条件の下, 人が歩行する実験を行い, 水平通路での歩行が困難になる水位と流速の関係が明らかにされて

キーワード: 都市水害, 筋電図, 下肢筋, 避難, 地下空間

¹ 非会員 関西大学大学院 工学研究科 システムデザイン専攻

² 非会員 関西大学 システム理工学部 准教授

³ 正会員 関西大学 環境都市工学部 教授

⁴ 正会員 京都大学 防災研究所 教授

いる^{8), 9)}。これらの実験研究によって地下空間が浸水し地上に避難する際の氾濫水が人に及ぼす危険性の把握がされてきている。

地下空間が浸水した際は地下空間を利用している人は地上に避難しなければならない⁴⁾、常に水に逆らって歩くことを強いられ、地下の氾濫水によって避難中に転倒する危険性があると考えられる。しかし、これらの研究では被験者の避難時間をもとに避難が困難になる条件が求められているが、避難歩行中の転倒に関する危険性を述べたものはない。転倒の危険性を把握することで、浸水時に転倒しない歩き方がわかり浸水時の避難対策の知見となると考えられる。

避難歩行中の転倒に関する危険性について調べるためには、浸水時の人の歩行動作について調べる必要がある。動作を分析する方法として筋電図を用いた手法がある。古くから筋電図を用いた動作の解析が行われており、通常歩行時や階段昇段時の筋活動が調べられている^{10), 12)}。その結果、歩行周期と各筋の活動のタイミングとの関係や各筋の活動量、各筋の動作中の役割が明らかにされている。そこで、本研究でもこの手法を用いて浸水歩行中の筋活動を調べる。

本研究では、地下空間が浸水したときを想定した避難歩行時の下肢筋の筋電位を計測し、歩行条件の違いによる各筋の筋活動の違いから避難時の転倒の危険性について評価することを目的としている。

2. 方法

(1) 対象

対象者は下肢・体幹に障害は認められなかった健康な男性8名（年齢 22.8 ± 1 歳、身長 172.9 ± 5.7 cm、体重 63.6 ± 4.7 kg）とした。対象者全員に対して事前に本研究の主旨を説明し、十分な理解を得た上で本研究への参加の同意を得て実験を行った。

(2) 実験環境

実験に用いた装置の概要を図-1に示す。この装置は実物大の通路模型であり、通路の全長は30mで、長辺12.7m、短辺3m、幅1mで通路側面の高さは0.65mとなっている。通路に備え付けられているポンプから水を流すことで、水流を作り出している。流速の調整は通路の幅とポンプからの距離によって行った。

(3) 筋電位の計測方法

被検筋は右側下肢の大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋長頭、前脛骨筋、腓腹筋内側頭とした。被検筋に電極（NM-512、日本光電）を貼付し、マルチテレメーターシステム（WEB-5000、日本光電）を用いて筋電図を記録した。計測部位をスキンプイア（日本光電）で角質除去した後、消毒用エタノールで消毒し、電極を計測部位に貼付した。ただし、角質除去を行う前に必要に応じて毛の除去を行った。電極を計測部位に貼付した後、電極の上から医療用の防水フィルムで防水加工を施した。アース電極は右側の肘に貼付した。電極はWEB-5000の送信機に接続され、受信機に筋電データを送信し、基礎医学研究システム（LEG-1000、日本光電）を介してパーソナルコンピュータに転送し記録した。時定数0.03sec、サンプリング周波数を2kHzに設定した。右足の踵が地面に接地するときと、右足のつま先が地面から離れるときを計測するため、右足の踵とつま先にフットスイッチを貼付した。このフットスイッチにより、右足の立脚期と遊脚期の判別を行った。被験者間、筋群間での比較を可能にするために、最大随意収縮時の筋電位（MVC）を100として正規化を行った。MVCの計測方法は、実験者が徒手で被験者の力を発揮する方向に対して抵抗を加え、被験者は抵抗に逆らって3秒間の最大等尺性筋力の発揮を2回行った。この信号に対し、RMS処理をして平滑化し、平均RMS値の高い方をMVCとして採用した。

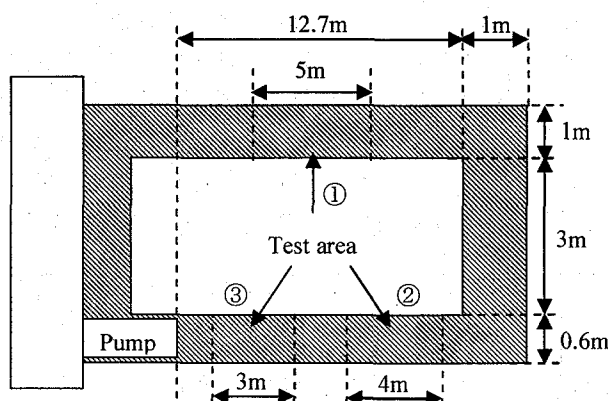


図-1 実物大通路模型

(4) 実験方法

被験者に異なる歩行条件で歩いてもらい、そのときの筋電位を計測した。歩行条件は非浸水状態の水位0cm、浸水状態の水位50cm（流速0, 0.47, 0.76, 1.12 m/s）の5条件とした。水位0cmは水路の外で、流速0m/s, 0.47m/sはTest area①, 流速0.76m/sはTest area②, 流速1.12m/sはTest area③で行った（図-1参照）。歩行方向は水流に逆らう方向とし、各条件につき、5回ずつ歩行を行った。被験者には歩行速度の指定はせず、自由な速度で歩くように教示した。

(5) データ解析

歩行周期はフットスイッチの信号によって右足の踵が地面に着いたときを歩行周期0%, 再び右足の踵が地面に着いたときを歩行周期100%として正規化を行った。筋電図の解析は、1試行につき、Test areaの中心の1歩行周期の筋電図を取り出し、RMS処理で平滑化してMVCをもとに正規化を行った。各筋の筋電図の波形の処理は、Katoら¹⁴⁾の解析方法を参考にして、全被験者の1歩行周期のデータから歩行周期4%間隔で%MVC値を取り出して、それぞれ歩行周期4%間隔で歩行条件別に加算平均を行った。

3. 結果・考察

(1) 大腿直筋・外側広筋

図-2、図-3にそれぞれ大腿直筋と外側広筋の歩行条件別の筋活動を示す。図-2、図-3の歩行周期60%の線は立脚期と遊脚期の境界を示しており、歩行周期0~60%は立脚期、歩行周期60~100%は遊脚期を示している。非浸水状態時の大腿直筋と外側広筋の筋活動は共に歩行周期の初期と終期に活動がみられている。これは膝関節を伸展させることで踵に体重がかかる際に膝関節の屈曲を調節し、足部接地による衝撃を吸収するために活動するからである¹²⁾と考えられる。しかし、非浸水状態においては大腿直筋と外側広筋の活動の違いがみられた。浸水状態時の歩行は、外側広筋では非浸水状態の歩行と比べて変化がみられなかった。一方、大腿直筋では遊脚期において、非浸水状態には活動がみられないが、浸水状態の流速0m/sでは最大25%MVC、流速0.47m/sでは最大37%MVC、流速0.76m/sでは最大43%MVC、流速1.12m/sでは最大49%MVCの活動がみられた。この理由として、外側広筋が膝関節の伸展を行うだけであるのに対し、大腿直筋が膝関節の伸展だけでなく股関節の屈曲の際に活動する筋であることが挙げられる。リハビリを目的として行われる水深が腰から剣状突起までである水中歩行の場合においても大腿直筋が遊脚期に活動を示す結果が得られるとされている^{13), 14), 15)}。浸水状態の歩行は、水深に関係なく遊脚期に股関節の屈曲を行い脚を前進させる必要があり、そのために大腿直筋の活動がみられたと考えられる。また、浸水状態における大腿直筋の遊脚期の活動は、流速が増加するにつれて活動が大きくなることから、股関節の屈曲が水の抵抗を強く受けることがわかる。外側広筋に非浸水状態と浸水状態で変化がみられず、流速による活動量の変化もみられないことから、膝関節の伸展は浸水時にそれほど水の抵抗による影響を受けていないことがわかる。

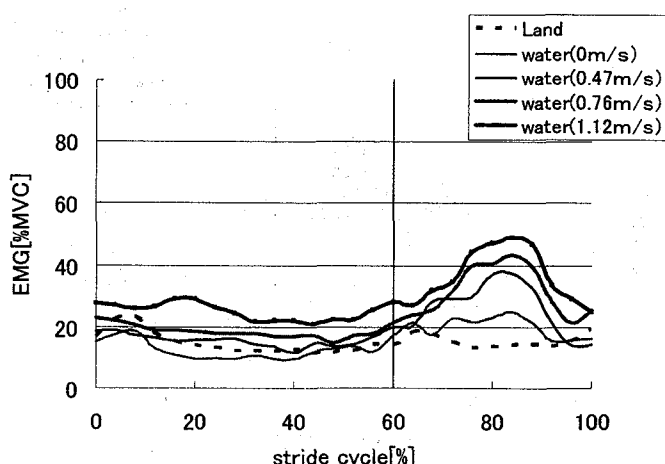


図-2 一歩行周期における大腿直筋の筋活動

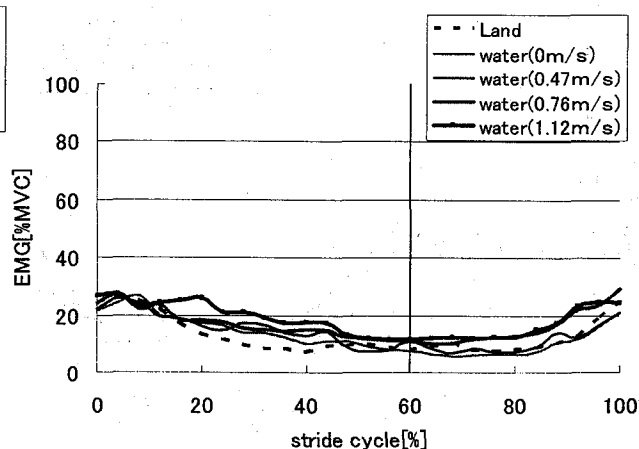


図-3 一歩行周期における外側広筋の筋活動

(2) 大腿二頭筋

図-4 に大腿二頭筋の筋活動を示す。歩行時に大腿二頭筋は立脚期の初期に衝撃を吸収するために働き、さらに、股関節を伸展させて推進力を生み出すとされている¹²⁾。立脚期の非浸水状態では歩行周期 0～30%に活動がみられるが、浸水状態の流速 1.12m/s では歩行周期 0～40%まで活動がみられ、歩行条件が厳しくなるにつれて活動期間の増加がみられた。さらに、条件が厳しくなるにつれて%MVC 値も増加する傾向がみられた。これはリハビリを目的とした水中歩行においても同じような結果が得られている¹⁶⁾。この傾向は水中歩行時の大腿二頭筋の活動は水の抵抗に抗するために、推進力を生み出す際の貢献度が高いからである^{13), 16)}と推測される。さらに、流速が速くなるにつれて筋活動が増加したのは、水の抵抗が増し、より大きな推進力が必要になり、より強く股関節の伸展を行ったからであると考えられる。

(3) 腓腹筋

図-5に腓腹筋の筋活動を示す。すべての歩行条件において腓腹筋の%MVC値のピークは歩行周期40%のときにあり、流速の違いによる%MVC値の最大値はそれほど違いはみられなかった。非浸水状態と流速0m/sでは歩行周期20～50%に活動がしているが、流速0.47m/s以上の流速では歩行周期5～50%まで活動し、非浸水状態や流速0m/sに比べ活動期間が増加した。腓腹筋の立脚期は足関節を底屈させて推進力を生み出すために活動するといわれており¹⁸⁾、流速が上がることによって水の抵抗が増すと腓腹筋は短い期間で推進力を生み出すのではなく、活動の期間を長くすることによって、より大きな推進力を生み出していると考えられる。

歩行条件別に腓腹筋の%MVC値の最大値を見た場合、必ずしも、流速が速くなるにつれて、筋活動の最大値が大きくなるとはいえなかった。これは活動の期間を長くすることによって、より大きな推進力を生み出しているからであると考えられる。しかし、もうひとつの理由として、腓腹筋と同じ足関節の底屈を行うヒラメ筋の活動が考えられる。非浸水状態での速度が遅い歩行では腓腹筋よりもヒラメ筋の方が筋の活動レベルが高いという報告がある¹⁷⁾。また、水中歩行の際は歩行速度が遅く、ヒラメ筋の活動が大きいという報告がある¹³⁾。今回の実験では、流速1.12m/sの歩行速度は0.47m/sであり、非浸水状態時の歩行速度1.14m/sと比べると半分以下の速度であり、非浸水状態の歩行速度と比べ、流速大の歩行速度が遅いことがわかる。つまり、流速大ではヒラメ筋が活動したために、歩行条件別に腓腹筋の筋活動の最大値を見た場合、必ずしも、流速が速くなるにつれて、筋活動の最大値が大きくなる結果にはならなかったと考えられる。

(4) 前脛骨筋

図-6に前脛骨筋の筋活動を示す。立脚期と遊脚期の境界から遊脚期の歩行周期90%までの間で、歩行条件が厳しくなるほど活動が大きくなる傾向がみられた。この時期の前脛骨筋は、つま先離地の際に足が地面に引っ掛からないようにするために、足の背屈を行っている¹⁸⁾。このことから、流速が増加するにともない足に受ける水の抵抗が大きくなり、足が地面に引っかからないように、より強く足の背屈を行うため前脛骨筋の活動が大きくなると考えられる。流速1.12m/sのとき、前脛骨筋は90%MVCまで活動していた。もし今

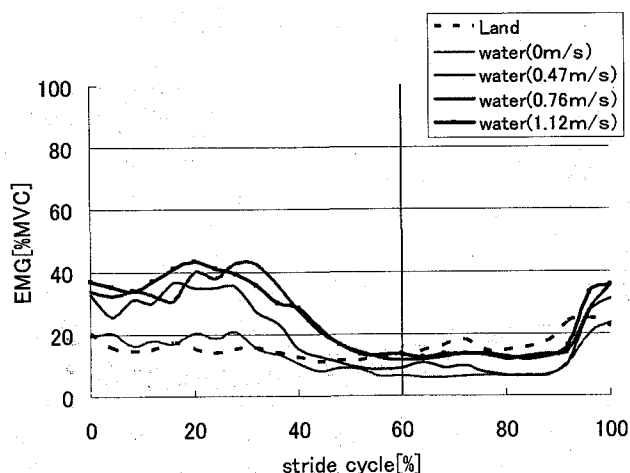


図-4 一歩行周期における大腿二頭筋の筋活動

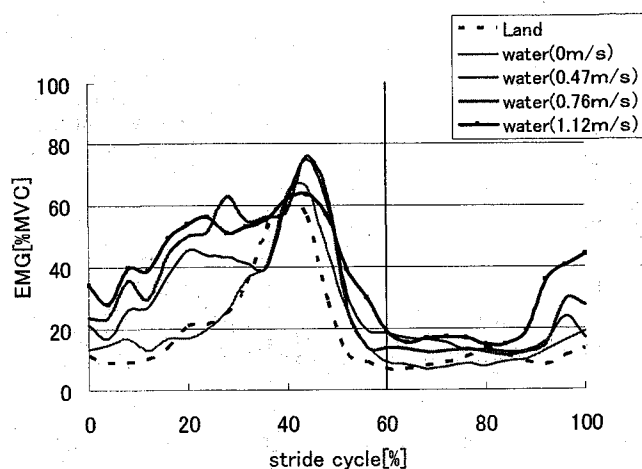


図-5 一歩行周期における腓腹筋の筋活動

回設定した流速大よりも速い水流が流れてきた場合に、流速大時と同じ歩行の姿勢で歩行をしたとき、つま先離地の際に背屈することができずに、つま先が地面にひかかり転倒することが予想される。したがって、転倒を避けるためには、例えばすり足で歩くようになるといった歩行時の足の運び方が変える必要があると予想される。

また、Wolfsonら¹⁹⁾は高齢者が転倒しやすい要因として、足底屈力と足背屈力の低下を指摘し、Whippleら²⁰⁾は高齢者が転倒しやすい要因として特に足背屈力の低下を指摘している。そして、今回実験から得られた浸水時の歩行中の前脛骨筋の活動は他の筋に比べ、筋活動の最大値が高いことから、浸水時の避難歩行において、若者に比べて足背屈力の低い高齢者は若者に比べ転倒の危険性が高く、転倒を避けるために歩行の姿勢を若者よりも早い段階で変えなければならないと予想される。

(5) 中殿筋

図-7に中殿筋の筋活動を示す。立脚期の中殿筋はどの歩行条件でも歩行周期0~40%で活動しているが、流速が増加するにつれて活動が増加した。遊脚期では非浸水状態では活動がみられないが、浸水状態では流速の増加に伴い活動も増加した。中殿筋は主に踵が地面に接地し、体重が骨盤にかかる間や反対側の脚が遊脚期にある時に骨盤の安定をはかる役割や股関節の伸展の調節を助ける役割をしている¹²⁾。また、浸水状態での歩行は流速の増加とともに、非浸水状態の歩行にくらべ歩行時に上半身が左右に動き、少し支持脚側に体が傾く様子がみられた。これらのことから、浸水状態での歩行では上半身が動き、骨盤が陸上歩行時より傾き、骨盤の安定をはかるために、中殿筋の活動が活発になったと考えられる。また、流速大の時にみられる遊脚相の活動についても、この時の上半身の動きが大きく、遊脚期に体が支持脚に傾いたため、骨盤の安定をはかるために、中殿筋の活動が活発になったと考えられる。

4. まとめ

水平通路を避難歩行中の転倒の危険性を浸水時の流速と対応づけて評価するために、浸水を想定した実物大の水平通路を用いて筋電位の計測を行った。その結果、浸水を想定した水位が0.5mの時の水中歩行時の各筋の活動の傾向がわかった。その中でも腓腹筋と前脛骨筋の%MVCが高いことから、特に足関節筋に負担がかかることがわかった。また、流速1.12m/s以上の水流が流れた場合は、前脛骨筋は足関節の背屈を行うことができずに転倒する危険性があり、転倒をさけるため歩き方が変わることを示唆された。

今後の課題として、実物大階段模型を用いて階段昇段時の筋電位を計測し、若年者の歩行データから、加齢による筋力の変化を考慮し、高齢者の避難危険性のモデルの構築を行っていきたい。

謝辞

本研究の一部は京都大学防災研究所萌芽的共同研究（課題番号19H-02）の援助を受けた。

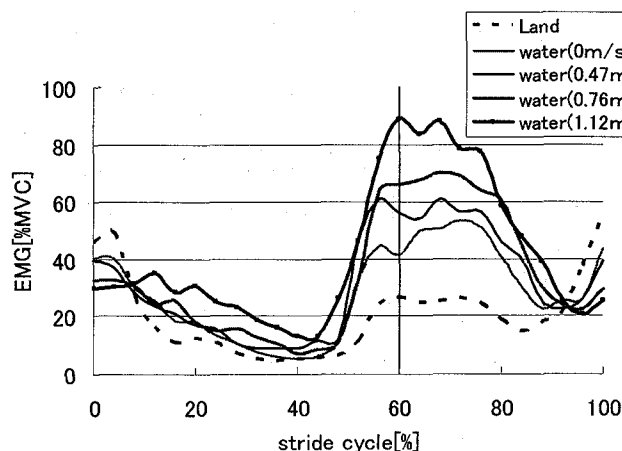


図-6 一歩行周期における前脛骨筋の筋活動

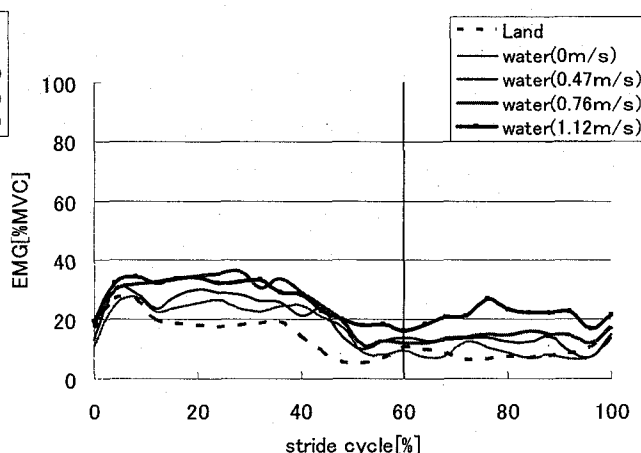


図-7 一歩行周期における中殿筋の筋活動

参考文献

- 1) 武富一秀, 廣木謙三: 地下空間の浸水リスク評価に関する検討, 土木技術資料, Vol. 45, No. 12, pp. 34-39, 2003.
- 2) 牛山素行, 石垣泰輔, 戸田圭一, 千木良雅弘: 2000年9月11日から12日に東海地方で発生した豪雨災害の特徴, 日本自然災害学会, Vol. 19, No. 3, pp. 359-373, 2000.
- 3) 戸田圭一: 都市水害とその対策, 都市問題研究, Vol. 58, No. 7, pp. 35-47, 2006.
- 4) 地下空間における浸水対策検討委員会: 地下空間における浸水対策ガイドライン解説, 2002.
- 5) 石垣泰輔, 戸田圭一, 馬場康之, 井上和也, 中川一, 吉田義則, 多河英雄: 実物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験, 京都大学防災研究所年報, No. 48B, pp. 639-646, 2005.
- 6) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 間嶋真嗣: 都市水害時の地下空間の浸水過程について, 京都大学防災研究所年報, No. 47B, pp. 293-302, 2004.
- 7) 井上和也, 戸田圭一, 川池健司, 栗山健作, 大八木亮, 地下空間における浸水過程の解析について, 京都大学防災研究所年報, No. 45B, pp. 173-184, 2002.
- 8) 須賀堯三, 上坂恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一郎, 陳志軒: 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集, Vol. 39, pp. 879-882, 1995.
- 9) 須賀堯三, 上坂恒雄, 白井勝二, 高木茂知, 浜口憲一郎, 陳志軒: 避難時の水中歩行に関する実験, 水工学論文集, Vol. 38, pp. 829-832, 1994.
- 10) Battye, CK., Joseph, J.: An investigation by telemetering of the activity of some muscles in walking, Medical & biological engineering & computing, Vol. 4, No. 2, pp. 125-135, 1966.
- 11) McFadyen, BJ., Winter, DA.: An integrated biomechanical analysis of normal stair ascent and descent, Journal of biomechanics, Vol. 21, No. 9, pp. 733-744, 1988.
- 12) Winter, DA.: The Biomechanics and Motor Control of Human Walking, University of Waterloo Press, pp. 45-55, 1987.
- 13) Kato, T., Sugajima, Y., Koeda, M., Fukuzawa, S.: Electromyogram Activity of Leg Muscles During Different Types of Underwater Walking, Advances in Exercise and Sports Physiology, No. 2, Vol. 8, pp. 39-44, 2002.
- 14) Kato, T., Sugajima, Y., Yamamoto, H.: Electromyogram activity of leg muscles during underwater walking, Research reports of Suzuka University of Medical Science, Vol. 8, pp. 58-68, 2001.
- 15) Masumoto, K., Takasugi, S., Hotta, N., Fujishima, K., Iwamoto, Y.: Electromyographic Analysis of Walking in Water in Healthy Humans, Journal of physiological anthropology and applied human science, Vol. 23, No. 4, pp. 119-127, 2004.
- 16) Ana, MFB., Sandro, FS, Marcos D.: Biomechanical Characteristics of Adults Walking in Shallow Water and on Land, Journal of Electromyography and Kinesiology, Vol. 16, No. 3, pp. 250-256, 2006.
- 17) Duysens, J., Tax, AAM., van der Doelen, b., Trippel, M., Dietz, V.: Selective activation of human soleus or gastrocnemius in reflex responses during walking and running, Experimental Brain Research, Vol. 87, No. 1, pp. 193-204, 1991.
- 18) 田中繁, 高橋明: モーターコントロール, 医歯薬出版株式会社, 第3部, 2002.
- 19) Wolfson, LI., Whipple, R., American, P., Kaplan, J., Kleiberg, A.: Gait and balance in the elderly, Clinics in Geriatric Medicine, Vol. 1, No. 3, pp. 649-659, 1985.
- 20) Whipple, R., Wolfson, LI., American, P.: The relationship of knee and ankle weakness to falls in nursing home residents, Journal of the American Geriatrics Society, Vol. 35, No. 1 pp. 13-20, 1987.