二重課題条件が歩行時の運動適応反応に及ぼす影響

The Dual-task Condition Affects Motor Adaptation Responses during Gait

本田 啓太¹⁾ 松原 誠仁^{1,2)}

KEITA HONDA¹⁾, SHIGEHITO MATSUBARA^{1,2)}

¹⁾ Division of Health Sciences, Graduate School of Health Sciences, Kumamoto Health Science University: 325 Izumi-machi, Kita-ku, Kumamoto-shi, Kumamoto 861-5598, Japan. TEL+81 96-275-2111 E-mail: keita.honda.0528@gmail.com

²⁾ Division of Physical Therapy, Department of Rehabilitation, Faculty of Health Science, Kumamoto Health Science University

Rigakuryoho Kagaku 30(4): 599-603, 2015. Submitted Feb. 25, 2015. Accepted Apr. 4, 2015.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to investigate the effect of a concurrent cognitive task on the adaptive process of reactive motor control during disturbed gait. [Subjects] Twenty healthy university students participated in this study, and they were separated into a single task group (n=10) and a dual task group (n=10). [Methods] All the subjects performed disturbed gait five times repeatedly and their data was recorded and analyzed by a motion capture system and force platforms. The negative work of each joint of the disturbed leg and the impulse of ground reaction force (GRF) were calculated and compared between the groups. [Results] There were no significant differences in the adaptive process to the impulse of GRF and negative work of the ankle joint. However, the adaptive process of negative work of the knee joint in the dual-task group was later than that in the single-task group. [Conclusion] These results suggest that the dual-task condition partially delays the adaptive process of reactive control in the lower extremity joints.

Key words: dual task, gait, motor adaptation

要旨:〔目的〕二重課題が歩行中の動揺に対する反応的運動制御の適応過程に及ぼす影響を明らかにすることとした。〔対象〕健康男子大学生 20 名で、このうち二重課題群と単一課題群を各 10 名とした。〔方法〕三次元自動動作分析装置および地面反力計による計測値から力学的負仕事および身体に加わる衝撃力を算出し、歩行中の動揺に対する適応過程を両群間で比較した。〔結果〕両群の衝撃力および足関節の負仕事の適応過程に有意な差はなかったが、膝関節の負仕事は、二重課題群の方が有意に遅い適応的变化を示した。〔結語〕二重課題は、歩行時の下肢関節による衝撃吸収能の適応過程を部分的に遅延させるという機能の損失を生じさせることが示され、このことは転倒発生機序の理解に寄与するものである。

キーワード: 二重課題, 歩行, 運動適応

¹⁾ 熊本保健科学大学大学院 保健科学研究科 保健科学専攻: 熊本県熊本市北区和泉町 325 (〒861-5598) TEL 096-275-2111

²⁾ 熊本保健科学大学 保健科学部 リハビリテーション学科 理学療法学専攻

I. はじめに

高齢化社会において転倒事故は重大な問題であり、転倒のリスク要因はさまざま報告されている。中でも、歩行時に生じる滑りや躓きは転倒原因のひとつであり¹⁾、身体動揺を引き起こす外力は、主に下肢関節の衝撃吸収能によって制御される^{2,3)}。歩行時にヒトは身体動揺を経験すると、外力に対する反応を適応的に変更することが明らかにされている⁴⁾。しかし、このような運動適応反応が損なわれた場合、下肢関節による衝撃吸収能が発揮されず転倒に至る可能性があるが、その詳細に言及した報告はみられない。

現代社会では、多重課題条件下で身体運動を適切に制御することがしばしば要求される。Lundin-Olsson ら⁵⁾は、二重課題条件下における運動課題遂行能力と転倒リスクに関連があることを報告している。このような動揺が生じる環境に対する運動適応反応性と二重課題条件下での運動遂行能力に関する報告が多くみられる一方で^{6,7)}、これらの相互作用については不明な点が多いのが現状である。

運動制御とは、予測した外力に対抗するための筋力の逆算（予測的運動制御）および末梢器官からの感覚入力情報に基づく制御（反応的運動制御）から構成され、中枢神経系が関与するものとされている⁸⁾。このような運動制御を適応的に変化させることは、さまざまな環境下で歩行を遂行し、転倒を防止するために必要な能力のひとつであると考えられる。また、二重課題条件下では、運動課題に伴って付加される認知課題の遂行においても中枢神経系が関与しているが、その処理容量には限界がある⁹⁾。これらのことは、二重課題が運動に関する中枢神経系の情報処理能を低下させ、運動適応反応を損なわせることで転倒を誘発する可能性があることを示している。

Santello¹⁰⁾は、落下時の衝撃力に対する反応的制御は予測の有無により変化することを報告し、反応的運動制御は予測的制御によって適応的に変化することが明らかにされている。しかし、二重課題条件下における反応的制御の適応的变化に関する報告は少ない。以上のことから、二重課題条件下における反応的制御の適応的变化について、身体に加わる衝撃力に対する制御方法に着目して検討することは、ヒトが有する転倒予防戦略の理解に寄与することができると考えられる。

本研究では、繰り返し生じる予期した動揺に対する反応的制御の適応過程に着目することで、二重課題条件が運動適応反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は整形外科および神経学的疾患を有さない健常男子大学生 20 名とした。本研究は、熊本保健科学大学疫学・行動科学倫理審査分科会の承認（疫 25-26）を受けており、同意が得られたのちに測定を行った。被験者は運動課題のみを行う単一課題群（ $n=10$ ）、運動課題と認知課題を同時に行う二重課題群（ $n=10$ ）に分類した。

2. 方法

本研究の運動課題は、最大速度での 8 の字歩行 1 周とし、歩行路は約 1.9 m 離れた 2 つのコーンで構成され、入れ替えが可能な 2 種類の踏み台（幅 25 cm、長さ 60 cm、高さ 7 cm）が布で覆われた状態で、歩行路の曲線部分に設置された。踏み台は、平らなもの（以下、平地歩行）と接地面が傾斜したもの（以下、動揺歩行）が用意され、それぞれの環境下で歩行させた。動揺歩行時の踏み台接地面は、右脚接地時に足部が他動的に回外方向へ動くように傾斜角を設定した。両群ともに、歩行プロトコルに従って平地歩行を 3 回行った後、踏み台が入れ替えられたことを知らない状態で、動揺歩行を 1 回行った。次いで、被験者に踏み台が入れ替わったことを伝え、引き続き 4 回の動揺歩行を行わせた。なお、本研究では Bierbaum ら¹¹⁾のプロトコルを参考にした。

運動課題と同時に、二重課題群は 1.75 秒間隔で鳴るベルの音および犬の鳴き声に基づいて計算することを指示された。回答 8 回を 1 試技とし、1 回目には課題開始前に最初の数字（20、30 または 40）を与えられ、2 から 8 回目には前の回答から加算および減算することとした。音は 1 回あたり最大連続 3 回までに設定し、ベルの音は、1 回鳴る毎に与えられた数字に 1 点加算し（チリン；+1、チリン×2；+2、チリン×3；+3）、犬の鳴き声は、1 回鳴る毎に与えられた数字から 1 点減算する（ワン；-1、ワン×2；-2、ワン×3；-3）こととした。なお、認知課題は Bohm ら¹²⁾の方法を参考に設定され、パフォーマンスの評価には正答率を用いた。また、二重課題群は認知課題のみの練習を十分に行った後、運動課題開始前に座位で認知課題のみを行い、2 試技連続で正答率が 100% に達していることを確認した。

歩行動作の計測には、光学式三次元自動動作分析装置 EVaRT（Motion analysis 社製）のカメラ 6 台と同期した 2 台のフォースプラットフォーム（AMTI 社製）を用いた。サンプリング周波数はともに 100 Hz とした。分析対象は、踏み台接地から離地までの接地脚とした。なお、足および膝関節の関節中心は、各関節軸の両側 2 ヶ所に貼付したマーカ座標の中点とした。股関節における関節中心は、臨床歩行分析研究会の推定法に基づいて算出した¹³⁾。身体分析点の 3 次元座標値は、Butterworth

digital filter¹⁴⁾により 5～15 Hz の遮断周波数で平滑化され、セグメントの質量、重心位置および主慣性モーメントは阿江ら¹⁵⁾の身体部位慣性係数を用いて推定された。次いで、Vaughan ら¹⁶⁾の方法に従って設定された骨盤、大腿、下腿および足部の移動座標系の各軸方向ベクトルを用いて、下肢各関節の運動学的変数（関節角度、角速度および角加速度）を算出した。また、得られた身体分析点の 3 次元座標値および接地脚に作用する地面反力を用いて逆動力学演算を行い、運動学的変数（関節トルク、関節トルクパワーおよび力学的仕事）を算出した。

本研究では、身体に加わる衝撃力の指標を地面反力鉛直成分の力積、最大値および立脚時間とし、各関節筋群による衝撃吸収能に関する指標を力学的負仕事とした。力積とは地面反力の大きさと立脚時間により決定され、分析区間において地面から身体へ作用する力の総和を示すものである。また、力学的負仕事は負の関節トルクパワーの時間積分によって求めることができ、筋が遠心性収縮によって吸収したエネルギーの総和を意味するものである。

本研究では、同時認知課題および運動適応による影響

を検討するために、動揺歩行の 1 から 5 回目までを分析対象の試行とし、二重課題群および単一課題群間の差を ANOVA (Statcel3) を用いて検討した。その際、身体に加わる衝撃力および衝撃吸収能に関する評価量は、群と試行回間の関係を検討するために、反復測定分散分析を用いて比較した。また、認知課題の正答率は、試行回間の検討をするために、一元配置分散分析を用いて比較した。両検定の結果をもとに、有意な差が認められた場合は多重比較検定 (Tukey-Kramer 法) を行った。なお、いずれも有意水準は 5% とした。

III. 結 果

被験者の属性において、単一課題群と二重課題群の間に年齢、身長および体重に有意差はなかった (表 1)。

地面反力鉛直成分において、最大値は試行回の主効果が認められ、両群ともに、動揺歩行 3 から 5 回目の最大値は、動揺歩行 1 回目より有意に小さい値を示した (表 2)。

力学的負仕事は、足関節において試行回の主効果が認められ、両群ともに、動揺歩行 5 回目の足関節の負仕事は、動揺歩行 1 回目より有意に大きかった (表 2)。膝関節では、試行回と群の間で有意な交互作用が認められ、二重課題群の膝関節の負仕事は、動揺歩行 1 回目と比較して、3 から 5 回目で有意に大きかった (表 2)。

認知課題の正答率は、動揺歩行 1 および 3 回目と比較して、動揺歩行 5 回目が有意に高かった (表 3)。

なお、地面反力鉛直成分の力積および立脚時間には、試行回と群の主効果およびこれらの間の交互作用は認め

表 1 対象者の属性

	二重課題群 (n=10)	単一課題群 (n=10)
年齢 (歳)	20.9 ± 1.0	21.0 ± 0.8
身長 (cm)	171.4 ± 3.2	170.9 ± 4.7
体重 (kg)	62.7 ± 5.0	61.2 ± 6.5

平均値 ± 標準偏差。

表 2 認知課題の有無が地面反力鉛直成分および力学的負仕事の適応過程に及ぼす影響

		二重課題群					単一課題群					有意 差
		P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	
地面反力鉛直成分												
力積	Mean	240.8	261.9	242.5	241.4	236.5	264.8	284.5	267.5	266.4	253.5	
	(Ns/kg) SD	61.6	50.5	50.4	48.2	48.0	70.2	67.6	67.1	53.3	61.3	
最大値	Mean	16.1	12.0	12.9	12.8	11.7	17.6	16.0	13.5	13.6	13.4	*1
	(N/kg) SD	4.9	2.9	3.7	3.5	3.4	2.2	4.1	2.8	3.0	2.4	
立脚時間	Mean	542.0	608.0	583.0	569.0	576.0	578.0	619.0	617.0	617.0	596.0	
	(msec) SD	123.1	84.9	107.9	86.3	79.8	124.1	115.8	111.4	112.4	101.6	
力学的負仕事												
股関節	Mean	-0.45	-0.40	-0.36	-0.32	-0.38	-0.51	-0.38	-0.34	-0.33	-0.34	
	(J/kg) SD	0.26	0.17	0.21	0.18	0.26	0.21	0.12	0.13	0.10	0.17	
膝関節	Mean	-0.28	-0.19	-0.14	-0.11	-0.14	-0.21	-0.13	-0.20	-0.17	-0.16	*2
	(J/kg) SD	0.10	0.13	0.14	0.06	0.09	0.08	0.06	0.10	0.09	0.06	
足関節	Mean	-0.17	-0.19	-0.10	-0.08	-0.08	-0.15	-0.11	-0.14	-0.12	-0.10	*3
	(J/kg) SD	0.10	0.11	0.07	0.05	0.07	0.07	0.04	0.09	0.08	0.04	

*1：動揺歩行 1 回目と 3 から 5 回目間に有意な差がある ($p<0.01$)、*2：二重課題群において、動揺歩行 1 回目と 3~5 回目間に有意な差がある ($p<0.05$)、*3：動揺歩行 1 回目と 5 回目間に有意な差がある ($p<0.05$)。

表3 運動適応が正答率に及ぼす影響

	P1	P2	P3	P4	P5	有意差
正答率 (%)	63.8 ± 16.1	77.5 ± 21.1	73.8 ± 16.1	85.0 ± 20.2	97.5 ± 5.3	*1

*1: 動揺歩行5回目と動揺歩行1および3回目間に有意な差がある (p<0.01). 平均値 ± 標準偏差.

られなかった (表2).

IV. 考 察

本研究の結果は、歩行時に生じる予測可能な動揺に対する反応的運動制御の適応的变化に着目して、二重課題条件下での同時認知課題と反応的運動制御の適応過程の干渉に関する知見を示すものである。

踏み台接地時に生じる動揺を予測しているとき、二重課題群および単一課題群が受ける衝撃力は予測がないときと比較して減少した。また、足関節の衝撃吸収能も予測によって減少した。本研究の結果と同様に、Bierbaumら¹⁷⁾は、動揺の経験が動的安定性に関する反応的運動制御を改善すると報告している。さらに、本研究では同時認知課題の正答率が適応的な改善を示したことから、健常者は認知課題を処理する課題が付加されても運動を適応的に変化させることが可能であり、その結果、同時認知課題の有無にかかわらず、動揺の予測は動揺脚の衝撃吸収に関する反応的制御を適応的に変化させたと考えられる。

一方で、二重課題群における膝関節の衝撃吸収能は、動揺歩行の3から5回目において、1回目より減少した。効率の良い歩行を達成するために、ヒトが各関節を協調的に駆動させることはよく知られている¹⁸⁾。したがって、運動制御の適応過程では、動揺に対する反応的制御は効率の良い一定のパターンへ収束するが、この過程は二重課題条件下で遅延する可能性があると考えられる。

二重課題条件下で運動適応反応が遅延した原因として、反応的運動制御の関与が考えられる。運動の適応過程において、予測的制御は反応的運動制御を向上するとされている^{10,12)}。また、二重課題条件下での同時認知課題により反応的運動制御は損なわれるが、予測的運動制御は損なわれないことがそれぞれ報告されている^{12,19)}。以上のことを考え合わせると、本研究では、反応的運動制御に対する予測的制御の効果は、同時認知課題の影響を受けなかったが、二重課題条件下で低下した反応的制御を改善するには不十分であった可能性がある。その結果、両群間に運動適応反応の相違がみられたと考えられる。さらに、Bierbaumら^{11,17)}は、高齢者における反応的運動制御の適応能は若年者より低い傾向にあるが、予測的運動制御の適応は加齢による影響を受けないと報告している。これらのことは、反応的制御の適応は、二重

課題などの妨害刺激や加齢による機能低下の影響を受けやすい可能性があることを示すものである。また、反応的運動制御は予測的制御と異なり、運動中の感覚入力情報を処理する必要があるため、運動に関する中枢神経系の情報処理能力を低下させやすい可能性がある^{20,21)}。したがって、同時認知課題および反応的制御の並列処理が運動に関する情報処理能力を低下させた結果として、二重課題条件が反応的制御の適応的变化を部分的に遅延させたと考えられる。

本研究の限界は、衝撃吸収パターンを変化させる原因を特定できなかったことである。歩行時に加わる衝撃力の制御には、下肢関節の衝撃吸収機構が関与するとされている^{2,3)}。しかし、本研究では衝撃力の減少に伴って各関節の衝撃吸収が大きくなることはなく、むしろ動揺の予測がないときに大きかった足関節の衝撃吸収は、予測時に小さな値を示した。したがって、反対側の下肢による制御が動揺脚の適応的变化を引き起こした可能性があり、反対側下肢の衝撃吸収能について検討することは今後の課題である。同時に、転倒が好発する高齢者について言及できなかったことが挙げられる。運動制御の基盤となる身体機能は、加齢による影響を受けるとされているため^{22,23)}、二重課題条件下での適応能力に対する年齢の影響を検討することで、転倒発生機序の理解に寄与することができると考えられる。

本研究結果の示す、二重課題条件下において衝撃力制御に関する反応的運動制御の適応的变化が部分的に影響を受けること、また、動揺を予測している場合、踏み台接地時の衝撃力および各関節で吸収する衝撃力の大きさを適応的に減少させるが、膝関節による衝撃吸収機構の適応的变化は認知課題の付加によって遅延することは、二重課題条件下で損なわれやすい機能であり、この知見は転倒発生機序の理解に寄与するものである。

引用文献

- 1) Berg WP, Alessio HM, Mills EM, et al.: Circumstances and consequences of falls in independent community-dwelling older adults. *Age Ageing*, 1997, 26(4): 261-268.
- 2) Kameyama O, Ogawa R, Okamoto T, et al.: Electric discharge patterns of ankle muscles during the normal gait cycle. *Arch Phys Med Rehabil*, 1990, 71(12): 969-974.
- 3) Sadeghi H, Allard P, Barbier F, et al.: Main functional role of knee flexor/extensors in able-bodied gait using principal

- component analysis (I). *Knee*, 2002, 9(1): 47-53.
- 4) Marigold DS, Patla AE: Strategies for dynamic stability during locomotion on a slippery surface: effects of prior experience and knowledge. *J Neurophysiol*, 2002, 88(1): 339-353.
 - 5) Lundin-Olsson L, Nyberg L, Gustafson Y: "Stops walking when talking" as a predictor of falls in elderly people. *Lancet*, 1997, 349(9052): 617.
 - 6) Abbud GA, Li KZ, DeMont RG: Attentional requirements of walking according to the gait phase and onset of auditory stimuli. *Gait Posture*, 2009, 30(2): 227-232.
 - 7) Rhea CK, Rietdyk S: Influence of an unexpected perturbation on adaptive gait behavior. *Gait Posture*, 2011, 34(3): 439-441.
 - 8) Shumway-Cook A, Woollacott M: モーターコントロール原著第4版. 医歯薬出版, 東京, 2013, pp495-521.
 - 9) 亭阪直行, 船橋新太郎, 渡邊正孝・他: 脳とワーキングメモリ. 京都大学学術出版会, 京都, 2008, pp1-18.
 - 10) Santello M: Review of motor control mechanisms underlying impact absorption from falls. *Gait Posture*, 2005, 21(1): 85-94.
 - 11) Bierbaum S, Peper A, Karamanidis K, et al.: Adaptational responses in dynamic stability during disturbed walking in the elderly. *J Biomech*, 2010, 43(12): 2362-2368.
 - 12) Bohm S, Mersmann F, Bierbaum S, et al.: Cognitive demand and predictive adaptational responses in dynamic stability control. *J Biomech*, 2012, 45(14): 2330-2336.
 - 13) 倉林 準, 持丸正明, 河内まき子: 股関節中心推定法の比較・検討. *バイオメカニズム学会誌*, 2003, 27(1): 29-36.
 - 14) Winter DA: バイオメカニクス人体運動の力学と制御 [原著第4版]. ラウンドフラット, 東京, 2011, pp14-44.
 - 15) 阿江通良, 湯 海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム学会誌*, 1992, 11: 23-33.
 - 16) Vaughan L, Davis L, O'Connor C: *Dynamics of Human Gait*. Human Kinetics Publishers, Champaign, 1992, pp89-106.
 - 17) Bierbaum S, Peper A, Karamanidis K, et al.: Adaptive feedback potential in dynamic stability during disturbed walking in the elderly. *J Biomech*, 2011, 44(10): 1921-1926.
 - 18) Farley CT, Ferris DP: Biomechanics of walking and running: center of mass movements to muscle action. *Exerc Sport Sci Rev*, 1998, 26: 253-285.
 - 19) Uemura K, Oya T, Uchiyama Y: Effects of visual interference on initial motor program errors and execution times in the choice step reaction. *Gait Posture*, 2013, 38(1): 68-72.
 - 20) Bastian AJ: Learning to predict the future: the cerebellum adapts feedforward movement control. *Curr Opin Neurobiol*, 2006, 16(6): 645-649.
 - 21) Morton SM, Bastian AJ: Cerebellar contributions to locomotor adaptations during splitbelt treadmill walking. *J Neurosci*, 2006, 26(36): 9107-9116.
 - 22) Lin SI, Woollacott MH: Postural muscle responses following changing balance threats in young, stable older, and unstable older adults. *J Mot Behav*, 2002, 34(1): 37-44.
 - 23) Brauer SG, Woollacott M, Shumway-Cook A: The influence of a concurrent cognitive task on the compensatory stepping response to perturbations in balance-impaired and healthy elders. *Gait Posture*, 2002, 15(1): 83-89.