

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：21501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500596

研究課題名(和文) 足部ロッカー機構の運動力学的分析

研究課題名(英文) Kinetic analysis of rocker functions of the foot

研究代表者

神先 秀人 (Kanzaki, Hideto)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・教授

研究者番号：10381352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：歩行中に足部で生じる3つのロッカー機能の生体力学的役割を、それらに制限を加えることで逆説的に検討した。ロッカー機能の制限により、歩行速度因子の低下とともに、重心移動パターンや下肢の関節運動、関節モーメント、衝撃吸収、足圧分布等に変化をもたらしたが、重心移動の円滑性を示す、運動エネルギーと位置エネルギーの交換率は保たれていた。ロッカー機能の制限により重心の前方移動が阻害されるが、少なくとも若い健康者においては、種々の代償等により、歩行の機械的効率性が保たれることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：By limiting the biomechanical roles of three rocker functions produced at the foot region in the stance phase while walking, we examined those functions. Results show that limited rocker functions change the center of mass (COM) displacement pattern, lower leg joint movement, joint moments, shock absorber, and foot stress distribution, as well as decrease the walking velocity. However, limited rocker functions maintained the rate of exchange between kinetic energy and potential energy, which represents smooth displacement of the COM. Results suggest that limiting rocker functions restricts forward displacement of the COM, but walking mechanical efficiency, at least in a young and healthy person, can be maintained by some compensatory movements.

研究分野：理学療法学

キーワード：足部ロッカー 歩行分析 運動力学 衝撃吸収 足圧分布 重心移動 機械的効率性 エネルギー交換

## 1. 研究開始当初の背景

健常者における歩行では、歩行中の筋による仕事を最小限に押さえるために、重力を推進力に利用している。この重力による下方への作用(位置エネルギー)を重心の前方への動き(運動エネルギー)に変換するために、歩行の立脚相において下記に示す3つのロッカー機構、すなわち、立脚相における踵を中心とした足部の前方回転(ヒールロッカー)、足関節を中心とした下腿の前方移動(アングルロッカー)、前足部を中心として踵を持ち上げる回転運動(フォアフットロッカー)が生じ、それぞれの転がり運動により、身体重心がロッキングチェアのように前方に移動していきと説明されている。

これらのロッカー機構の役割は、重力による下方への作用を身体の前進方向への力に変換するだけではなく、身体の重心移動の減少や床からの衝撃の吸収などが報告されている。重心移動の減少は歩行の機械的効率性を高めることで下肢筋群の活動を抑え、衝撃吸収は下肢や体幹への衝撃を緩和することで関節を保護することに貢献する。さらに、これらの働きによる頭部の安定性の保証は、歩行中の視覚や聴覚などの感覚機能の働きを保ち、環境からの刺激への対応能力を維持することにも貢献すると考えられる。

ロッカー機構のメカニズムに関しては、下肢関節モーメントや角度変化、筋電図学的分析に基づいた説明はなされているが、実際の重心移動や重力方向(位置エネルギー)と前進方向(運動エネルギー)との間でのエネルギー交換、足部から頭部への力の伝達量など運動力学的分析に基づいた検証は殆どなされていない。我々が過去に行った、ロッカー機構に関する研究では、フォアフットロッカーが側方および上下の重心移動の抑制と、Push-off 期における仕事の産出に参与していることが示唆された。また、アングルロッカーに関しては、短下肢装具を用いて、足関節背屈制限が歩行中の重心移動に与える影響を検討した。その結果、制限角度の増加に伴い、制限側立脚期の前後移動幅減少、非制限側立脚期の前後移動幅増加および側方移動幅の増加が認められた。このように、ロッカー機構と重心移動の関係に関しては多少の知見はあるが、各ロッカー機構が重力による下方への作用を重心の前方駆動に変換することにどの程度貢献しているか、あるいは、主に下肢による衝撃吸収に各ロッカー機構がどの程度関与しているかといった運動力学的な知見に関しては殆ど不明である。

## 2. 研究の目的

### (1) ヒールロッカーとアングルロッカーの運動学的分析

研究1の目的は、ヒールロッカー(HR)とアングルロッカー(AR)に焦点を当て、各ロッカー機構に制限を加えた場合の運動学的分析を通して、それらの機能的役割を検討する

ことである。

### (2) 歩行におけるフォアフットロッカーの生体力学的分析

研究2の目的は、フォアフットロッカー(FR)に焦点を当て、歩行中の前足部での運動に制限を加えた歩行の運動学、運動力学的分析より、その生体力学的役割を明らかにすることである。

### (3) 足ロッカー制限時の足底圧分布への影響

研究3の目的は、各ロッカー機構に制限を加えた際の、足底各部位への圧分布、足底面上の足圧中心(COP)の描くパターンの特徴から、制限時の足部荷重への影響および代償について検討することである。

## 3. 研究の方法

### (1) ヒールロッカーとアングルロッカーの運動学的分析

対象は、健常男性7名(18-27歳)で、測定方法は、4台の床反力計(Kistler社)及び3次元動作解析装置(VICON MX T20)を備えた約8mの歩行路上にて、金属支柱付短下肢装具を用いて左下肢足部に底屈および背屈制限を加えた条件歩行を行わせ、制限の無い条件での歩行と比較した。3次元動作分析はPlug-In-Gait全身モデルを使用し、身体に貼付した35個の反射マーカを8台の赤外線カメラで測定した。歩行速度は自分で楽と感じる歩き方(快適歩行)で歩くよう指示した。分析項目は、時間・空間因子(歩行速度、歩幅、歩行率)、1歩行周期中の重心移動幅、床反力垂直成分最大値、ならびに立脚期と1歩行周期全体における下肢関節角度最大値、下肢関節モーメント最大値で、3試行の平均値を用いて、無制限と各制限時の比較を反復測定分散分析および多重比較法(Dunnett法)により検定した。

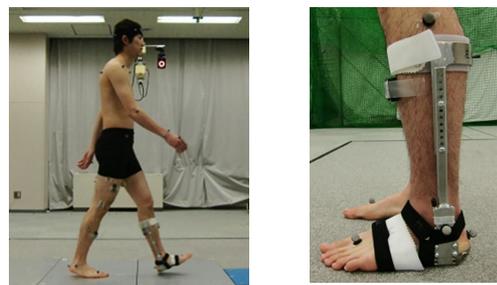


図1 研究1に用いた装具と実験場面

また、ヒールロッカーに関する実験の追加を行い、衝撃吸収への影響を検討した。健常男性10名(20-22歳)を対象とし、右下肢足部に制限を加え、上記と同様の方法で行った。衝撃吸収の指標として立脚初期(荷重応答期)における、踵、大腿骨外側上顆の垂直方向加速度、同時期の床反力垂直成分ピーク値、膝関節屈曲角度、及びエネルギー交換率を求めた。

**(2) 歩行におけるフォアフットロッカーの生体力学的分析**

男女各 6 名 (19 - 22 歳) を対象とした。右足の FR を制限するためにアルミ製の足底板を作製し、足部固定用ベルトを用いて足底部に固定した。3 次元動作解析装置および 4 枚の床反力計を用いて、快適歩行時の運動学および運動力学的データを裸足歩行時と比較した。各歩行パラメーターの 3 回の平均値を用い、対応のある t 検定または Wilcoxon 検定にて条件間の比較を行った。

**(3) 足ロッカー制限時の足底圧分布への影響**

ヒールロッカーとアングルロッカーは女性 8 名 (19 - 21 歳) を対象とし、フォアフットロッカーは、女性 9 名 (21 - 22 歳) を対象とした。実験は異なる時期に行ったが、6 名は両方の実験に参加した。課題に関して、ヒールロッカーとアングルロッカーは、裸足、短下肢装具装着で足関節の運動制限なし (フリー)、底屈制動 (底背屈中間位より底屈しない)、背屈制動 (底背屈中間位より背屈しない) の 4 課題の歩行を各 3 試行実施した。フォアフットロッカーは、フラット靴着用で、右足底全面にアルミ板を敷いた場合と敷かない場合の歩行を各 3 試行実施した。足圧分布は、99 個のセンサーが内蔵されたインソール型圧力分布測定システム (Pedar, novel 社) を用いて、サンプリング周波数 100Hz で測定した。センサー部を後足, 中足, 前足, 足趾の 4 部位に分け (図 2), 各部位を構成する各センサー最大圧の平均値を用いて、各部位への圧分布の比較を行うとともに、足圧中心軌跡の特徴を観察した。

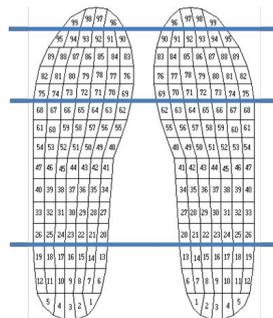
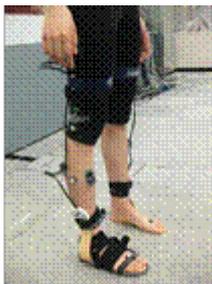


図 2 足圧分布測定装置と足底部分け (上位より, 足趾, 前足, 中足, 後足)

**4. 研究成果**

**(1) ヒールロッカーとアングルロッカーの運動学的分析**

平均歩行速度は、無制限時と比較して背屈制限時に有意な減少を示した。立脚期の膝関節最大屈曲角度は無制限時が 14.6 度、底屈制限時が 18.6 度、背屈制限時が 7.9 度で、無制限時と比較し、底屈制限時には増加傾向、背屈制限時には有意な減少がみられた。下肢関節モーメントに関しては、底屈制限時に対側下肢の底屈モーメントの低下が、背屈制限時には、立脚期における同側膝関節伸展モーメントの減少および底屈モーメントの減少、

対側下肢の底屈モーメントの増大が認められた。また、背屈制限時に側方重心移動幅の増大がみられた。(表 1)

底屈制限時にはヒールロッカー機構が困難となり、下腿が過度に前方移動することで膝の屈曲角度が増加するとともに、同時期の対側下肢による蹴りだし (Push-off) を抑制する代償が生じることが窺えた。背屈制限時には、立脚中期の下腿の前方移動が阻止されることで、速度が減少するとともに、膝が自動的に伸展し、無負荷時にみられる膝伸筋群や足底屈筋の遠心性収縮が不要になること、また、下腿に対するブレーキ作用に抗して、対側下肢による Push-off が増大する可能性が示唆された。

追加実験の衝撃吸収に関しては、ヒールロッカー制限により、歩行速度が減少するにもかかわらず、踵と膝間での衝撃吸収率の減少がみられた。床反力垂直成分ピーク値に差はみられなかったが膝屈曲角度は増加傾向を示し (表 2)。しかし、重心移動の機械的効率性を示すエネルギー交換率に差はなかった。

表 1 研究(1)結果:左下肢に制動を加えた条件歩行

	フリー	底屈制動	背屈制動
歩行速度 (m/sec)	1.18 ± 0.05	1.14 ± 0.08	1.10 ± 0.08 *
ストライド長 (m)	1.30 ± 0.06	1.28 ± 0.08	1.25 ± 0.07 *
側方重心移動幅 (cm)	2.8 ± 0.7	3.1 ± 0.7	3.7 ± 1.1 *
上下重心移動幅 (cm)	3.4 ± 0.5	3.6 ± 0.7	3.1 ± 0.4
立脚初期床反力垂直成分最大値 (%BW)			
右	116 ± 11	111 ± 9	121 ± 6
左	113 ± 6	113 ± 6	107 ± 9
立脚初期膝最大屈曲角 (degree)			
右	19.5 ± 8.0	20.6 ± 8.6	17.0 ± 6.5
左	14.6 ± 7.4	18.6 ± 7.2	7.9 ± 5.3 *
右立脚期膝最大伸展トルク (mmN/BW)			
右	685 ± 417	642 ± 313	578 ± 314
左	710 ± 360	831 ± 418	480 ± 331 *
右足最大底屈トルク (mmN/BW)			
右	1505 ± 139	1450 ± 142 *	1568 ± 136 *
左	1344 ± 187	1463 ± 143	1048 ± 100 *

\* : 制限なし (フリー) と比較して、有意差 (p<0.05)

表2 研究(1)追加結果:右下肢に制動を加えた条件歩行

	フリー	底屈制動
歩行速度 (m/sec)	1.24 ± 0.16	1.10 ± 0.10 *
ストライド長 (m)	133 ± 0.05	1.29 ± 0.04 *
右立脚初期最大垂直床反力 (%BW)		
	116 ± 5.3	116 ± 7
右立脚初期最大膝屈曲角度 (degree)		
	13.4 ± 6.7	15.7 ± 7.4
右立脚初期最大加速度踵-膝間減少率 (%)		
	32.9 ± 24.6	17.8 ± 20.1 *
エネルギー交換率: Recovery (%)		
	64.4 ± 6.6	65.1 ± 7.2

\* : P<0.05

## (2) 歩行におけるフォアフットロッカーの生体力学的分析

アルミの足底板を装着した FR 制限歩行では、歩行速度、歩行率の減少、右の片脚支持期間の短縮とその後の両脚支持期間の増加、右立脚後期における同側足底屈角度の減少と背屈角度の増大、膝伸展角度の増大がみられた。(表3) 重心移動では、前後の重心移動動揺が有意に増加した。水平面上に投影した重心の軌跡は、右側が前方に変位した非対称な8の字型波形を示した(図3)。床反力では、左脚接地時の垂直床反力および右足の駆動力の顕著な減少がみられた。また、右立脚後期の足関節パワーおよび仕事量の減少、右遊脚初期の股関節パワーの増大が認められた。重心移動から算出したパワー曲線においては、FR 制限歩行時に同側の蹴り出し期(Push-off)のパワーの減少がみられた(図4)が、運動エネルギーと位置エネルギーの交換率に差はなかった。

右足のFRが制限されることにより、左下肢の振り出しや左前方への円滑な重心移動が妨げられ、歩行速度の低下や両脚支持期の延長、非対称な重心移動を招いたと考えられる。また、FRを制限することで足底屈筋などによるPush-offが妨げられ、前進移動に支障をもたらすが、同側の股関節屈筋等による補償などが生じる可能性が示唆された。

表3 研究(2) 結果: 右下肢に制限を加えた条件歩行

	裸足	アルミ	
歩行速度 (m/min.)	72.9 ± 6.1	69.5 ± 3.4	*
両脚支持期時間比 (%)	23.0 ± 2.5	25.6 ± 1.6	*
床反力 (%BW)			
右立脚初期最大垂直床反力	117 ± 13	113 ± 10	*
左立脚初期最大垂直床反力	119 ± 11	107 ± 13	*
右制動力(後方分力)	21.2 ± 4.2	18.8 ± 3.2	*
左制動力(後方分力)	23.4 ± 4.0	21.5 ± 2.5	*
右駆動力(前方分力)	23.1 ± 3.2	11.3 ± 1.1	*
左駆動力(前方分力)	23.5 ± 3.6	16.4 ± 3.5	*
重心移動幅 (cm)			
側方移動幅	2.4 ± 0.7	2.5 ± 0.9	
上下移動幅	3.7 ± 0.7	3.9 ± 0.5	
前後移動幅	2.3 ± 0.2	2.5 ± 0.3	*
エネルギー交換率: Recovery (%)	64.8 ± 4.8	63.9 ± 3.7	
下肢関節角度 (°)			
右足背屈最大値	15.9 ± 6.0	17.9 ± 5.8	*
足底屈最大値	13.4 ± 7.7	1.89 ± 7.6	*
右接踵期膝屈曲角度	3.6 ± 4.2	5.3 ± 5.1	*
右立脚後期膝最大伸展	2.5 ± 5.0	5.6 ± 5.3	*
下肢関節モーメント (Nmm)			
右足最大底屈	1451 ± 183	1538 ± 156	*
左足最大底屈	1394 ± 148	1365 ± 171	
下肢関節による仕事			
右足Push-off期仕事量 (J/kg)	0.33 ± 0.083	0.16 ± 0.04	*
左足Push-off期仕事量 (J/kg)	0.28 ± 0.07	0.27 ± 0.05	
右股遊脚初期仕事量 (J/kg)	0.17 ± 0.03	0.20 ± 0.03	*

\* : p < 0.05

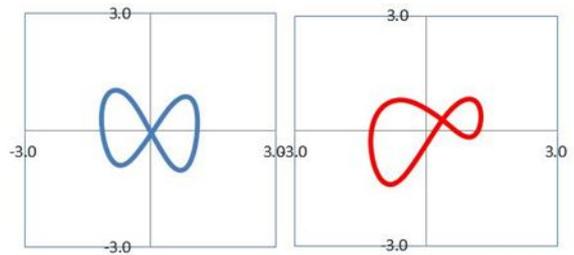


図3 歩行中の水平面上の重心移動 (左:裸足,右:アルミ足,12名3試行平均)

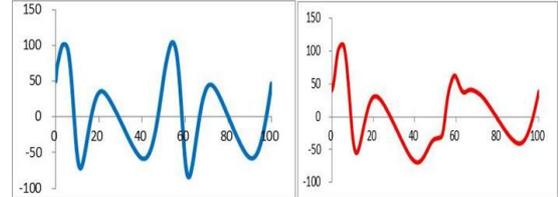


図4 歩行中の重心のパワー曲線 (左:裸足,右:アルミ足,12名3試行平均)

## (3) 足ロッカー制限時の足底圧分布への影響

右側への装具装着による影響として、右後足部への圧分布の減少がみられた。右底屈制動では、右後足部への圧分布がさらに減少を示した。右背屈制動では、右中足、前足部の圧分布が減少するとともに、左後足部の圧分布の増大がみられた。(表4)

底屈制動では、速度の低下や膝屈曲角度の増大が同側の後足部の圧力低下をもたらしたと考えられた。背屈制動では立脚期における下腿の前方への回転が制限を受け、足部前方への重心移動が妨げられることが要因の一つではないかと考えられた。

靴にアルミ板を挿入したFR制限においては、靴着用時と比較して、同側後足部の足圧分布の増加と対側後足部の減少がみられた(表5)。円滑な重心移動の欠如が一要因と考えられるが、アルミ素材による影響も考慮に入れる必要がある。

表4 足圧分布 (各部位を構成する各センサーの最大値の平均) 女性8名,各3試行の平均

	裸足	右装具制限無 (装具の影響)	右底屈制動 (HR制限)	右背屈制動 (AR制限)
(kp)				
左後足部	209 ± 32	222 ± 30	218 ± 26	232 ± 37
右後足部	203 ± 21	156 ± 22	139 ± 33	167 ± 28
左中足部	45 ± 12	48 ± 10	48 ± 12	51 ± 12
右中足部	43 ± 10	48 ± 8	50 ± 9	33 ± 7
左前足部	129 ± 29	135 ± 26	131 ± 27	140 ± 30
右前足部	131 ± 29	117 ± 26	117 ± 25	79 ± 13

表5 足圧分布（各部位を構成する各センサーの最大値の平均:女性9名）

(k p)	靴装着	右アルミ底 (FR制限)
左後足部	141 ± 29	129 ± 23
右後足部	143 ± 22	160 ± 25
左中足部	57 ± 12	55 ± 13
右中足部	50 ± 18	54 ± 18
左前足部	135 ± 34	131 ± 30
右前足部	128 ± 41	130 ± 43

COP の軌跡では、裸足や制限無しの場合と比較して、底屈制動では同側の後方部分が、背屈制動では前方部分の欠けた特徴的で短い軌跡を描いた。この結果から、底屈制動では立脚初期の後足部への荷重が減少していること、背屈制動では立脚中期以降の下腿の前方への回転運動や Push-off が妨げられ円滑な前方への重心移動が阻害されていることが推測される。しかし、重心移動の機械的効率性を示す運動エネルギーと位置エネルギーの交換率が保たれていることから、効率性を維持するための他部位や対側による代償が働いていることが考えられる。

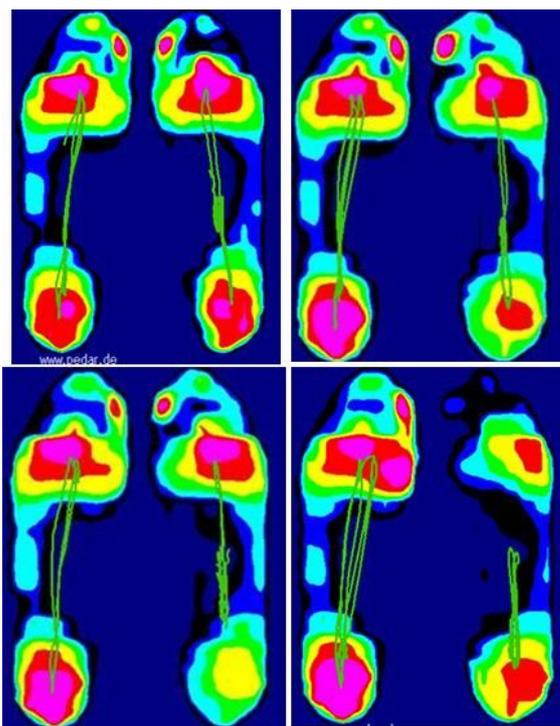


図5 歩行立脚期のCOP軌跡(同一例)  
 左上:裸足,右上:装具着用で制限無し  
 左下:右底屈制動,右下:右背屈制動

一連の研究を通して示唆されたことは、足部各ロッカー機構の制限により、前方への円滑な重心移動が妨げられ、歩行速度や歩幅の低下をもたらすこと、また、非対称な重心移動パターンや下肢の関節運動、関節モーメントの部位による増減、衝撃吸収の低下、不均衡な足圧分布等をもたらすということである。各ロッカー機構の制限により生じたこれらの変化は、同時に各ロッカーが通常の歩行において果たしている機能的役割ということもできる。

しかし、本研究において重心移動の円滑性を示す、運動エネルギーと位置エネルギーの交換率が保たれていたことから、少なくとも若い健康者の快適歩行においては、各ロッカー機構に制限を加えても、種々の代償等により、歩行の機械的効率性が保たれることがわかった。いくつかの代償に関しては、本研究の中で示唆されているが、詳細に関してさらに検討する必要がある。また、この代償による局所の関節や筋への過負荷など、リスク要因に関して検討を加える必要性があると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

1) 神先秀人, 永瀬外希子, 南澤忠儀, 赤塚清矢, 高橋俊章, 真壁寿, 伊橋光二. 足部ロッカー機構の運動学的分析. 日本体力医学会東北地方会第 22 回大会, 山形市, 2013. 6. (体力科学 2013; 62: 435.)

2) 神先秀人, 永瀬外希子, 南澤忠儀, 赤塚清矢, 高橋俊章, 真壁寿, 伊橋光二. 歩行におけるフォアフットロッカーの生体力学的分析, 第 69 回日本体力医学会大会, 長崎市, 2014. 9.

3) Kanzaki H, Nagase T, Minamisawa T, Akatuka S, Takahashi T, Makabe H, Ihashi K. Biomechanical analysis of forefoot rocker in walking. 16th International Congress of the World Confederation for Physical Therapy, 2015. 5.1-4, Suntec City, Singapore

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕  
 出願状況(計 件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:

出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

神先 秀人 (KANZAKI HIDE TO)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
教授

研究者番号：10381352

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

伊橋 光二 (IHASHI KOUJI)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
教授

研究者番号：40160014

真壁 寿 (MAKABE HITOSHI)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
教授

研究者番号：60363743

高橋 俊章 (TAKAHASHI TOSHI AKI)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
准教授

研究者番号：50464508

南澤 忠儀 (MINAMISAWA TADAYOSHI)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
講師

研究者番号：40347208

赤塚 清矢 (AKATUKA SEI YA)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
講師

研究者番号：70363744

永瀬 外希子 (NAGASE TOKI KO)  
山形県立保健医療大学・保健医療学部・  
助教

研究者番号：10404865