

糖尿病患者および非糖尿病患者の足背モーションセンサと足底圧センサを用いた歩容の比較

Comparison of diabetic patients gait with non-diabetic subjects gait using plantar pressure sensor and dorsal feet motion sensors

○ 雨宮歩 (東大) 野口博史 (東大) 大江真琴 (東大) 竹原君江 (東大) 大橋優美子 (東大)
植木浩二郎 (東大) 門脇孝 (東大) 真田弘美 (東大) 森武俊 (東大)
Ayumi AMEMIYA, Hiroshi NOGUCHI, Makoto OE, Kimie TAKEHARA, Yumiko OHASHI,
Kohjiro UEKI, Takashi KADOWAKI, Hiromi SANADA, Taketoshi MORI
The University of Tokyo

Abstract: Plantar foot ulceration is a diabetic complication. High plantar pressure is one of the risk of developing diabetic foot ulcer. High plantar pressure may be caused by gait-related factors. However, difference of gait between non-diabetic subjects and diabetic patients is not investigated well. Then, we compared ankle motion and plantar pressure during walking with diabetic patients and non-diabetic subjects who matched with age and sex. Our measurement system contains the motion sensors which measures the angular velocity of ankle motion, and the plantar pressure distribution sensor. Angle of plantar flexion, dorsal flexion, inversion, eversion was calculated by integrating the angular velocity measured by the motion sensors. Diabetic patients has small motion of plantar flexion, dorsal flexion, inversion and large motion of eversion during walking, compared with non-diabetic subjects. Pressure time integral of the diabetic patients was significantly higher than that of the non-diabetic subjects. Furthermore, only peak passive inversion and peak inversion during walking at diabetic patients were weakly correlated. The other passive ranges were not correlated with ankle motion during walking. Consequently, this work suggests the importance of measuring ankle motion during walking and investigating the relationship between limited ankle motion during walking and high plantar pressure.

Key Words: Diabetic foot, Gait analysis, Plantar pressure, Angular velocity

1. 背景

糖尿病性足潰瘍は糖尿病の合併症の一つである。足潰瘍を発症すると感染などを合併し下肢の切断に至ることや、死亡リスクが 2.4 倍⁽¹⁾になることが知られており、身体的予後だけでなく生命予後にも影響を及ぼす深刻な病態であるため予防が重要である。

足底圧の上昇は糖尿病性足潰瘍の重大なリスク要因⁽²⁾⁽³⁾として知られており、糖尿病患者の足関節、特に背屈の可動域制限が最大足底圧の上昇と関連していることが報告されている⁽⁴⁾。しかし、底屈と背屈において静止時に測定される関節可動域と、歩行時の関節角度はほぼ相関がなく⁽⁵⁾、歩行時足関節は底屈・背屈だけではなく、内反・外反といった複雑な動きが組み合わされている。そのため、糖尿病患者の底屈・背屈だけではなく、内反・外反の歩行中の足関節の動きを調査することは糖尿病患者の歩容メカニズム解明のために極めて有用であると考えられる。

本研究の目的は、糖尿病患者と非糖尿病患者の歩行中の足関節角度に違いがあるか、そして、底屈・背屈だけではなく、内反・外反の歩行中の足関節角度と他動で測定する足関節可動域に相関があるかを検討することである。さらに、糖尿病性足潰瘍の重大なリスク要因である足底圧についても同時に調査を行った。

2. 方法

2-1 デザイン

横断観察研究

2-2 被験者

糖尿病患者 30 名(糖尿病足病変予防のための外来に来院した患者)、非糖尿病患者 30 名(機縁法により募集を行い、年齢と性別をマッチングさせた被験者)。

除外基準は独立歩行困難な者、脳梗塞や筋萎縮、後遺症のある骨折など歩行に影響のある疾患、既往のある者、測定用フットウェアのサイズが合わない者とした。

2-3 調査施設

東京大学医学部附属病院糖尿病足外来

2-4 調査期間

2012年4-8月

2-5 調査方法

今回の研究では、臥位で他動的に関節角度計で測定した足関節の動きを「足関節可動域」、モーションセンサで測定した歩行時の足関節の動きを「歩行中足関節角」とする。

<足関節可動域測定方法>

足関節可動域は臥位で他動的に関節角度計を使用して測定し、可動域記録は 5 度刻みで計測した。歩行時の関節可動範囲は体重などの負荷もかかることから、自動的よりも他動的な関節可動範囲を反映しているとい一般的に考えられているため、他動的な測定を行った。

<歩行中足関節角、足底圧測定方法>

歩行中足関節角は 9 軸ワイヤレスモーションセンサ(株式会社ロジカルプロダクト)を両足背に装着し、角速度を積分し歩行中足関節角を算出した。9 軸ワイヤレスモーションセンサは、できるだけ低拘束・低侵襲になるよう、軽く(35g)小さい(55x40x22mm)ものであり、加速度センサ、角速度センサ、地磁気センサをそれぞれ 3 軸ずつ搭載し、無線を使用した遠隔計測を行うことができるワイヤレスセンサーモジュールである。今回は歩行中足関節角に着目したため角速度のみを使用した。角速度センサの性能は 1500degree per second である。

フットウェアの影響が結果に混ざらないよう様々なフットウェアに関するプレテストを行い、素足の状態をほぼ再現できたヒールのない靴底の平らな市販のフットウェアを使用した。ポリエステルを使用しており、足を圧迫せず適度に伸縮性があるため糖尿病患者でも安心して着用することができ、フットウェアの中でセンサや足がずれにくいという特徴がある。患者の足のサイズに合わせて3サイズ(22.0-23.0, 23.5-24.5, 25-26cm)用意した。このフットウェアの底面に F-scan system の圧力センサシート(ニッタ株式会社)を挿入した。なお、圧力分布センサシートは約 5×5mm のセルが 960 個あり、分解能としてそれぞれの点は 8bit の情報を収集できる。キャリブレーションにもよるが、1bit あたり約 0.05kg/cm² である。

両足背にモーションセンサを装着する際、固定しやすくするためと被験者の苦痛を軽減するために足背とセンサの間に低反発ウレタンを挟み固定した。また、センサケーブルを足関節と腰にベルトで固定した。調査者は、Figure 1 の左側に示したような圧力データ収集用パソコンとモーションセンサのデータ送受信装置をのせたカートを押して、被験者の後を追ってデータを収集する。練習歩行の後、約 20m の廊下を通常歩行する速度で 1 度歩行した。各センサのデータは全て 200Hz で収集した。

モーションセンサと足底圧センサデータは同期をとり、歩行開始時と終了時の最低3歩分を取り除いた約 15-22 歩分のデータを採用した。

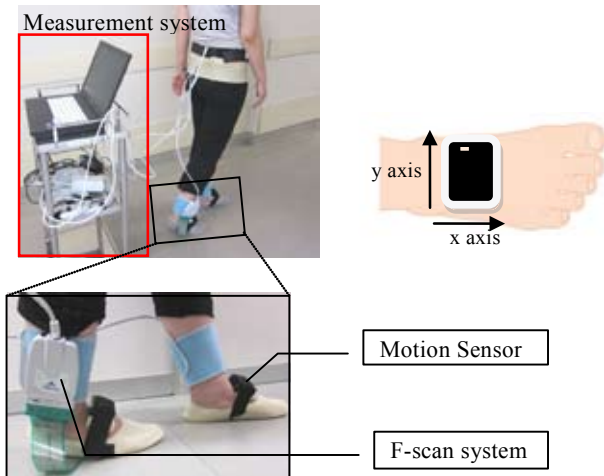


Figure 1 Measurement system of plantar pressure and angular velocity

<基本属性>

足のサイズと体重を測定し、通常の神経障害の検査であるアキレス腱反射、モノフィラメント検査、振動覚検査、心電図、立位・臥位血圧と、血流評価のために ABI、TBI 検査を実施した。非糖尿病患者は年齢と既往歴を聴取、糖尿病患者はその情報に加えて糖尿病型、糖尿病罹病期間やコントロール状況(HbA1c)、治療内容、合併症の重症度をカルテより情報収集した。

更に、歩行時の toe-off に影響があると考えられている足趾筋力を測定するため、チェッカーくん(日伸産業株式会社)をプロトコールに従って左右 2 回ずつ測定し 4 回の測定値の最大値を採用した。

2-6 センサで測定した変数

実際に測定した波形を Figure 2 に示し、変数を以下のように算出した。

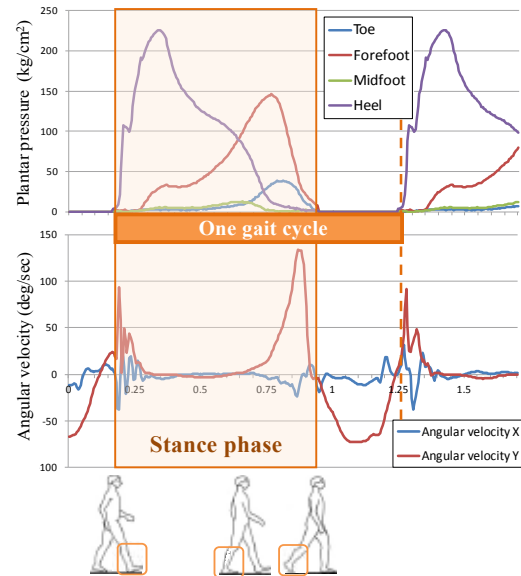


Figure 2 One gait cycle of plantar pressure and angular velocity

2-6-1 歩行中足関節角

20Hz でローパスフィルタをかけた後に、歩行前の立位静止時を基準とするため、最初の 3 秒間の平均した角速度を引き補正を行った後、各角速度を積分し角度を算出した。Figure 3 に示す方向を、それぞれの可動域方向の初期角度の差の最大値・最小値とした。

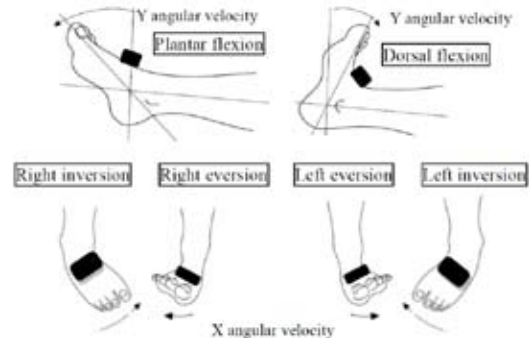


Figure 3 Relationship between passive range of ankle motion and axis direction of angular velocity sensor

2-6-2 歩行周期

モーションセンサの波形よりも明確に立脚期の区別ができるため、足底圧波形を歩行周期を区切る基準とした。足底圧の立ち上がりから次の同足側の足底圧の立ち上がりまでを一歩行周期とし、基本的な歩行のパラメーターである一歩行周期時間と一立脚期時間を算出した。

2-6-3 足底圧

足底を足趾(Toe)、前足部(Forefoot)、中足部(Midfoot)、踵(Heel) の 4 部位に分け(Figure 4)、部位毎と足底全体(Plantar) の圧ピーク値 (Peak Pressure: PP)、圧時間積分値 (Pressure Time Integral: PTI)を算出した⁽⁶⁾。PP は解析に使用する全ての立脚期の一立脚期毎の圧ピークを平均して算出し、PTI は一立脚期毎の圧時間積分値を平均し被験者毎に算出した。PP は足にかかる瞬間的な負荷、PTI は足にかかる継続的な負荷を反映している。

2-7 解析

糖尿病患者と非糖尿病患者の基本属性は Student の t 検定と χ^2 検定、フィッシャーの正確確率検定で比較し

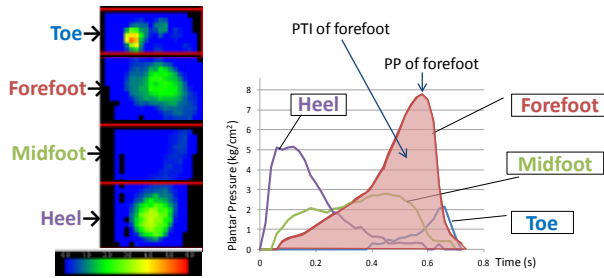


Figure 4 How to divide the plantar and how to calculate PP and PTI

た。関節可動域と角度、足底圧の測定値は足毎に特性が異なると考えられるため被験者毎ではなく足毎に分析を行いt検定で比較した。足関節の関節可動域と歩行時の関節角度の関連はピアソンの積率相関係数を用いた。分析はMatlab[®]を使用し、有意水準は0.05とした。

3. 結果

3-1 基本属性

糖尿病患者と非糖尿病患者の年齢、性別に有意差はなく、マッチングできていることが確認できた。また、身長、体重、BMI、血流障害・足変形・運動習慣・関節痛の有無にも有意差はなかった。知覚神経障害、運動神経障害を有する者は糖尿病患者で有意に多く、今回ほとんどの糖尿病患者が神経障害を有していた。足趾筋力は非糖尿病患者と比較して糖尿病患者は有意に小さかった(Table 1)。

Table1 Demographic data

| | Non-diabetic subjects | Diabetic patients | p-value |
|------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| | n=30 | n=30 | |
| Age(y), mean ± SD | 69.6 ± 9.1 | 69.2 ± 8.7 | 0.878 ¹⁾ |
| Sex, n (%) | | | |
| Male | 16(53.3) | 16(53.3) | 1.000 ²⁾ |
| Female | 14(46.7) | 14(46.7) | |
| Height (m), mean ± SD | 1.60 ± 0.10 | 1.61 ± 0.08 | 0.783 ¹⁾ |
| Weight (kg), mean ± SD | 58.1 ± 12.2 | 62.3 ± 12.9 | 0.210 ¹⁾ |
| BMI, mean ± SD | 22.4 ± 2.9 | 24.0 ± 5.0 | 0.128 ¹⁾ |
| Neuropathy | | | |
| Monofilament examination abnormalities, n (%) | 0(0.0) | 11(36.7) | 0.000 ³⁾ |
| Vibration perception test abnormalities, n (%) | 6(20.0) | 17(56.7) | 0.000 ²⁾ |
| Achilles tendon reflex abnormalities, n (%) | 9(30.0) | 23(76.7) | 0.000 ²⁾ |
| CVRRR, mean ± SD | 2.74 ± 1.43 | 2.37 ± 1.12 | 0.277 ²⁾ |
| No neuropathy, n (%) | 10(33.3) | 4(13.3) | 0.001 ²⁾ |
| Angiopathy, n (%) | 0(0.0) | 2(6.7) | 0.246 ³⁾ |
| Foot deformity, n (%) | 13(43.3) | 9(30.0) | 0.111 ²⁾ |
| Toe gap force(kg), mean ± SD | 2.9 ± 0.9 | 2.4 ± 0.9 | 0.004 ¹⁾ |
| Has exercise habits, n (%) | 17(56.7) | 12(40.0) | 0.062 ²⁾ |
| Has joint pain, n (%) | 2(6.7) | 6(20.0) | 0.068 ²⁾ |
| Type of diabetes, n (%) | | | |
| Type1 | - | 2(6.7) | - |
| Type2 | - | 27(90.0) | - |
| Other | - | 1(3.3) | - |
| HbA1c (NGSP) (%), mean ± SD | - | 6.6 ± 1.8 | - |
| Diabetes duration(y), mean ± SD | - | 14.5 ± 12.0 | - |

NGSP : National Glycohemoglobin Standardization Program
 1) t-test
 2) Chi-square test
 3) Fisher's exact test

3-2 足関節の動き

臥位他動時の足関節可動域は外反のみ、糖尿病患者は非糖尿病患者と比較して有意に小さかった(Table 2)。

Table 2 Peak passive range of ankle motion

| | Non-diabetic subjects | Diabetic patients | p-value |
|--------------------------|-----------------------|-------------------|---------|
| Plantar flexion (degree) | 46.3 ± 5.9 | 45.3 ± 6.3 | 0.185 |
| Dorsal flexion (degree) | 16.3 ± 6.7 | 15.1 ± 7.7 | 0.188 |
| Inversion (degree) | 42.8 ± 5.7 | 42.2 ± 9.1 | 0.316 |
| Eversion (degree) | 31.1 ± 8.5 | 25.9 ± 9.5 | 0.001 |

t-test mean ± SD

歩行中足関節角は非糖尿病患者と比較して糖尿病患者では底屈・背屈・内反の角度が有意に小さく、外反では有意に大きかった(Table 3)。

Table 3 Peak ankle motion during walking

| | Non-diabetic subjects | Diabetic patients | p-value |
|--------------------------|-----------------------|-------------------|---------|
| Plantar flexion (degree) | 38.1 ± 7.0 | 35.6 ± 5.9 | 0.018 |
| Dorsal flexion (degree) | 2.1 ± 1.5 | 1.5 ± 1.3 | 0.010 |
| Inversion (degree) | 7.0 ± 3.6 | 4.8 ± 2.7 | 0.000 |
| Eversion (degree) | 3.3 ± 1.9 | 4.2 ± 2.7 | 0.028 |

t-test mean ± SD

足関節可動域と歩行中足関節角にほとんど相関はみられなかった(Figure 5-8)。

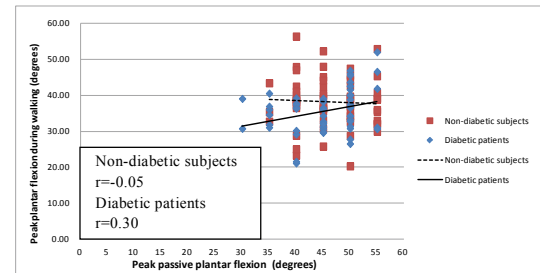


Figure 5 Correlation between peak passive plantar flexion and peak plantar flexion during walking.

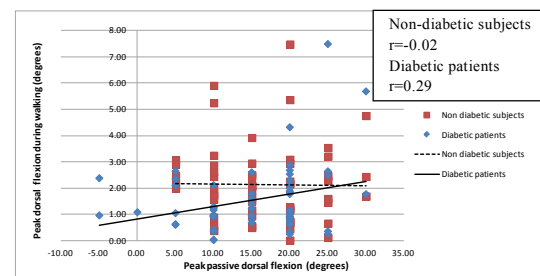


Figure 6 Correlation between peak passive dorsal flexion and peak dorsal flexion during walking.

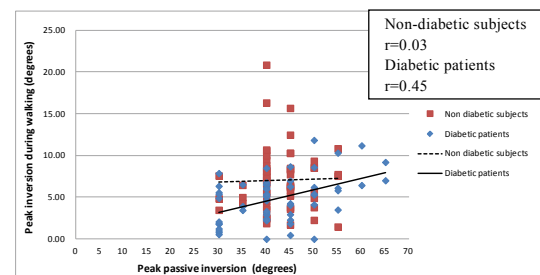


Figure 7 Correlation between peak passive inversion and peak inversion during walking.

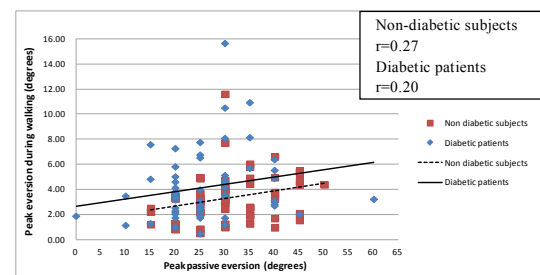


Figure 8 Correlation between peak passive eversion and peak eversion during walking.

3-3 歩行周期

一歩行周期時間の平均は非糖尿病患者が 1.07 ± 0.01 秒、糖尿病患者が 1.08 ± 0.01 秒であり有意な差($p=0.381$)はなかった。一立脚期時間の平均は非糖尿病患者が 0.67 ± 0.01 秒、糖尿病患者が 0.68 ± 0.00 秒で有意な差($p=0.171$)はなかった。

3-4 足底圧分布

非糖尿病患者と比較して糖尿病患者では Heel 以外の全ての部位と足底全体の PP に有意差はなかった(Figure 9)。非糖尿病患者と比較して糖尿病患者では全ての部位と足底全体の PTI が有意に高値だった(Figure 10)。

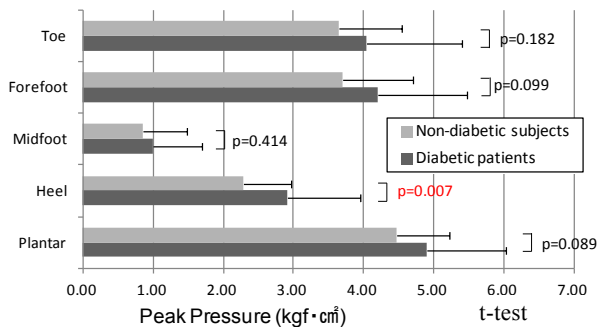


Figure 9 Comparison of Peak Pressure between diabetic patients and non-diabetic patients.

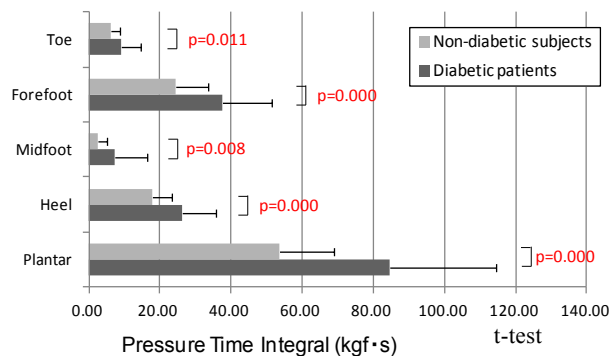


Figure 10 Comparison of Pressure Time Integral between diabetic patients and non-diabetic patients.

4. 考察

今回、糖尿病患者は非糖尿病患者と比較して歩行時足関節の底屈、背屈、内反が有意に小さく、外反が有意に大きいことが新たに示された。糖尿病患者は非糖尿病患者と比較して足趾把持力が有意に小さいことから下肢の筋力が弱いと考えられ、筋力が弱いために足関節の動きが小さくなっている可能性がある。外反のみ有意に大きいことに関しては、他の動きを補完するような働きをしている可能性が考えられる。

先行研究に反して両群において底屈・背屈で足関節可動域と PP に有意差がなかったことに関しては、HbA1c や糖尿病罹病期間、足潰瘍歴などから、今回の糖尿病患者の糖尿病の程度としては軽度であり、神経障害のアセスメントや胼胝のケアなどを目的とした患者であった。これは、調査を行った足外来での診療の目的が足潰瘍の予防であるため、合併症の進行していない軽度の糖尿病患者が多かった可能性が高い。そのため今回は、足潰瘍歴のある糖尿病患者を対象にした先行研究と比較して非糖尿病患者との違いが出にくかったと考えられる。

また、歩行中に最大可動域まで関節を動かしている者は

糖尿病患者、非糖尿病患者ともにほとんどいなかった。更に、糖尿病患者の臥位他動の足関節可動域と、歩行中足関節角の相関は先行研究と同じく底屈・背屈の動きでほぼみられず、今回新たに内反・外反でもみられなかった。底屈、背屈、内反において糖尿病患者で非糖尿病患者と比較すると若干の相関がみられたのは、筋力低下などにより床からの反力がより影響し他動と類似した影響が出ている可能性がある。しかし相関としてはどちらの群も弱いため、今後我々の研究で歩行時の足底圧などとの関連を調査する場合には静止時の足関節可動域ではなく歩行中足関節角を計測する。

足底圧分布は非糖尿病患者群と比較して糖尿病患者群では全ての部位と足底全体の PTI が有意に高値であった。両群の PTI の差は糖尿病性足潰瘍の好発部位である前足部に一番顕著にあらわれている。また、一歩行周期時間、一立脚期時間は両群で有意差がみられなかったことから、糖尿病患者は非糖尿病患者と比較して立脚中に高めの足底圧がかかり続けている可能性が考えられる。

糖尿病患者の足関節の動きが小さいことと、足底圧分布、調査時の調査者の印象からも、糖尿病患者は歩行時に足関節の動きが小さく、足全体、特に前足部が早めに立地する、いわゆる「擦り足」のようになっている可能性が考えられる。これを検証するために、今後、身体の重心の動きも合わせて調査することを検討している。

5. まとめ

糖尿病性足潰瘍予防のため、糖尿病患者と非糖尿病患者で底屈・背屈・内反・外反の足関節の動きを調査した研究である。糖尿病患者は、歩行中の底屈、背屈、内反の足関節の動きが小さく、外反が有意に大きいことが今回新たな知見として得られた。また、角度計で行う静止時の関節可動域測定で得られた値と、歩行時の足関節の動きに相関がない可能性があることも明らかになったため、今後足関節と足底圧の関連などを調査する際には静止時の関節可動域ではなく、歩行時の足関節の動きを測定する必要がある。

この研究の将来の見通しとしては、歩行時の足関節の動きと足底圧分布の関連について更に検討し、足潰瘍の原因となる異常な足底圧の更に原因となる足関節の動きを同定することで、足潰瘍を予防するためのリハビリテーションやフットウェアの選択といった介入につなげることができると考える。

参考文献

- (1) Boyko EJ, Ahroni JH, et al, Increased mortality associated with diabetic foot ulcer, *Diabet Med*, vol. 13, no. 11, pp. 967-972, 1996.
- (2) Caselli A, Pham H, et al, The forefoot-to-rearfoot plantar pressure ratio is increased in severe diabetic neuropathy and can predict foot ulceration, *Diabetes Care*, vol. 25, no. 6, pp. 1066-1071, 2002.
- (3) Pham H, Armstrong DG, et al, Screening techniques to identify people at high risk for diabetic foot ulceration: a prospective multicenter trial, *Diabetes Care*, vol. 23, no. 5, pp. 606-611, 2000.
- (4) Bennett PJ, Stocks AE, et al, Analysis of risk factors for neuropathic foot ulceration in diabetes mellitus, *J Am Podiatr Med Assoc*, vol. 86, no. 3, pp. 112-116, 1996.
- (5) Rao S, Saltzman C, et al, Ankle ROM and stiffness measured at rest and during gait in individuals with and without diabetic sensory neuropathy, *Gait Posture*, vol. 24, no. 3, pp. 295-301, 2006.
- (6) 青木主税, 金森晃ら, 糖尿病性神経障害患者における歩行時の足底圧および靴中敷きのクッション効果について, *北里医学*, vol. 27, no. 4, pp. 230-237, 1997.