

OS1-3

歩行時の足底圧力・せん断力同時測定システム

Simultaneous measurement system of plantar pressure and shear force during gait

○ 濱谷雅子 (東大) 森武俊 (東大) 野口博史 (東大) 小川有貴 (東大)
 大江真琴 (東大) 真田弘美 (東大)

Masako HAMATANI, Taketoshi MORI, Hiroshi NOGUCHI, Yuki OGAWA,
 Makoto OE, and Hiromi SANADA
 The University of Tokyo

Abstract: Plantar foot ulceration is one of the diabetic complications. It has shown that both pressure and shear force are associated with ulceration. While there are some plantar pressure measurement systems, it is difficult to measure plantar shear force during gait. The aim of this study is to establish the simultaneous in-shoe measurement system of plantar pressure and shear force during gait. The design of the measurement system is based on F-Scan pressure distribution sensor sheet, and shear sensor sheets. The insole with shear sensor sheets was arranged to be applicable for measurement of diabetic neuropathy patients without damaging their skin. It was found that the system could get different shear force data in response to gait pattern, such as shuffle walking and flat-floored walking. Moreover we confirmed the repeatability of the system for 5 healthy individuals. After the clinical study with diabetic patients, the system can be applied not only for prevention of diabetic foot, but also for evaluation of gait posture broadly.

Key Words: Diabetic foot, Gait analysis, Shear force, Force sensing shoes, Insole

1. はじめに

糖尿病患者は2025年には3億8000万人に上ると予測されている⁽¹⁾。糖尿病性足潰瘍は糖尿病の合併症であり、糖尿病患者における全層皮膚病変と定義される⁽¹⁾。患者のなかで生涯に足潰瘍を発症する割合は15%と推定されており⁽²⁾、足潰瘍は著しいQOL低下や医療コストの増大を引き起こすことから、予防方法の確立が急務である。足底圧力とせん断力は足潰瘍発症の要因の1つであり⁽¹⁾、その発症メカニズムを解明し予防するためには、歩行時に靴の中に生じている圧力とせん断力を安全に測定する方法が必要である。圧力の測定には、F-Scan Systemなどが一般的に用いられている。一方、せん断力を測定した研究は限られており、これまで磁気変化を利用した2軸せん断力計測センサ⁽³⁾と3軸反力計⁽⁴⁾などを用いた方法が報告されている。しかし、測定できる領域が極めて小さく、足底の広い範囲でのせん断力分布を評価することは難しい。さらに、センサが硬く皮膚を傷つける恐れがあり、患者に対して安全に測定することができないという問題点がある。

そこで、筆者らは、F-Scan Systemに用いられている圧力センサシートと、柔らかいシート型せん断力センサを埋め込んだインソールを用いることで、足底圧力・せん断力同時測定システムを確立したので報告する。本研究では、糖尿病患者を対象に測定する前段階として、健常者を対象にその妥当性と信頼性を検証した。

2. 作製した圧力・せん断力同時測定システム

作製したシステムは、市販のインソールの中にせん断力センサを埋め込み、底面に圧力センサシート(ニッタ株式会社)を貼った構造になっている。このインソール型センサシステムを専用サンダルに挿入し計測する(Fig.1)。せん断力センサの突出による圧力値への影響を避け、安全性を確保するため、インソールは中足骨頭部と踵部をくり抜き、柔らかいシート型せん断力センサ(有限会社計測サポート)を埋め込むようになっている。インソール全体の厚さは7mmであり、せん断力センサによる圧力値への影響

を最小限にするため、くり抜いた部分の厚さも中足骨頭部

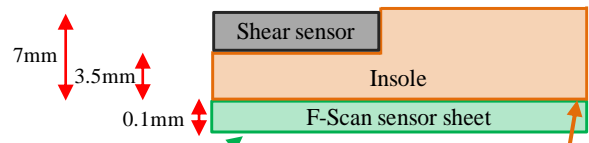


Fig.1-1 The structure of insole sensor system



Fig.1-2 F-Scan pressure distribution sensor sheet

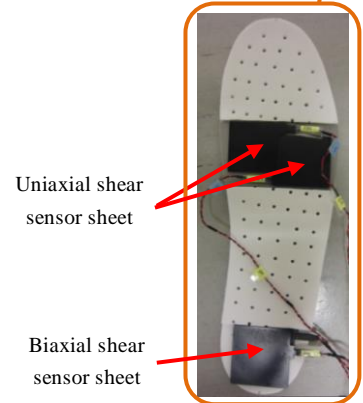


Fig.1-3 Insole with shear sensor sheets

Fig.1 The structure of measurement sandal

で4.5mm、踵部で3.5mmとなるようにした。中足骨頭部に35×35×1.2mmの1軸せん断力センサを2枚、踵部に40×40×3mmの2軸せん断力センサを1枚貼付した。なお、1軸センサは、前後方向のせん断力を測定できるように配置した。被験者全員において潰瘍発症割合の大きい中足骨頭部での測定を可能にするため、足のサイズに合わせたせん断力センサ付きインソールを5種類(21.5-22.4、22.5-23.4、23.5-24.4、24.5-25.4、25.5-26.4cm用)用意した。

被験者は圧力センサシートとせん断力付きセンサシートを貼付した計測用サンダル(Fig.2)を、踵に合わせて着用

し、マジックテープで足を固定した。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、Fig.3の左側に示したような圧力データ収集用パソコンとせん断力データ収集用データロガーをのせたカートを押し、被験者の後を追ってデータを収集する (Fig.3)。なお、圧力分布センサシートは約 $5 \times 5 \text{mm}$ のセルが 960 個あり、キャリブレーションにもよるが、分解能としてそれぞれの点は 8bit の情報を収集できる。1bit あたり約 $5.0 \times 10^{-2} \text{kg/cm}^2$ である。一方せん断力は、14bit の情報を収集でき、1bit あたり約 $6.1 \times 10^{-4} \text{kgf}$ である。約 1 秒間である歩行周期のそれぞれのフェーズでの特徴を捉えるため、圧力データは 50Hz、せん断力データは 500Hz で収集した。

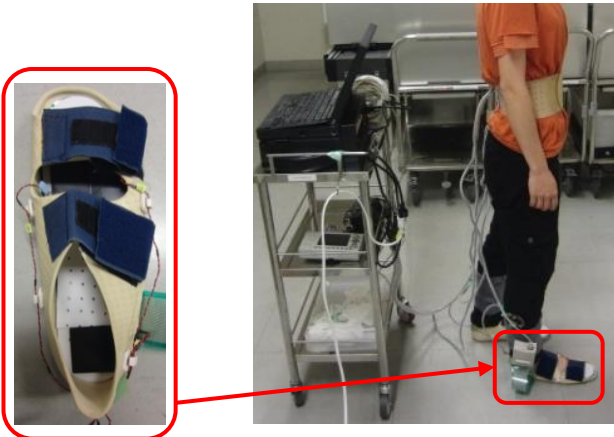


Fig.2 Sandal with F-Scan sensor sheet and shear sensor sheets
 Fig.3 Simultaneous measurement system of plantar pressure and shear force

3. 実験

3-1 実験 1

歩行測定システムによって得られたデータが、歩行の特徴を適切に反映できるかを確認するため、普段の歩行、すり足の歩行、片足を引きずったときの歩行の 3 パターンに関して実験を行った。なお、解析には最初の 1 歩目を除いた左右各 3 歩のデータを用いた。

普段通り歩行したときの左中足骨頭部の足底せん断力と平均圧力波形、圧力分布図を Fig.4 に、右中足骨頭部の足底せん断力波形を Fig.5 に示す。せん断力は縦軸の正が前方向の、負が後方向を示している。柔らかいシート型せん断力センサを用いることで、Fig.4 のようにせん断力、圧力ともに連続的に変化する波形が得られている。また、圧力は中足骨頭部内側と外側の示す波形がほぼ一致しているのに対し、せん断力は大きく異なっており、せん断力データがより歩行の特徴を反映することが示唆された。さらに Fig.4 より、左足は踏切期において、内側センサは前方向に、外側センサは後方向にせん断力が生じており、足を反時計回りに回転させるように蹴り出していることが分かる。一方 Fig.5 より、右足は足底接地期において、内側と外側センサともに前方向にせん断力が生じていることから、足を前方向に接地していることが分かる。踏切期においては、内側と外側センサともに後方向にせん断力が生じており、後ろに蹴り出している。

次に、すり足の歩行と右足を引きずって歩行をしたときの、右中足骨頭部の足底せん断力波形をそれぞれ Fig.6、Fig.7 に示す。すり足の歩行では普段の歩行に比べて、足底接地期での前方向のせん断力が内側、外側ともに顕著に大

きくなっている。一方、右足を引きずって歩行したときは前方向のせん断力が継続して生じており、いずれも歩行を反映した足底せん断力波形が得られている。

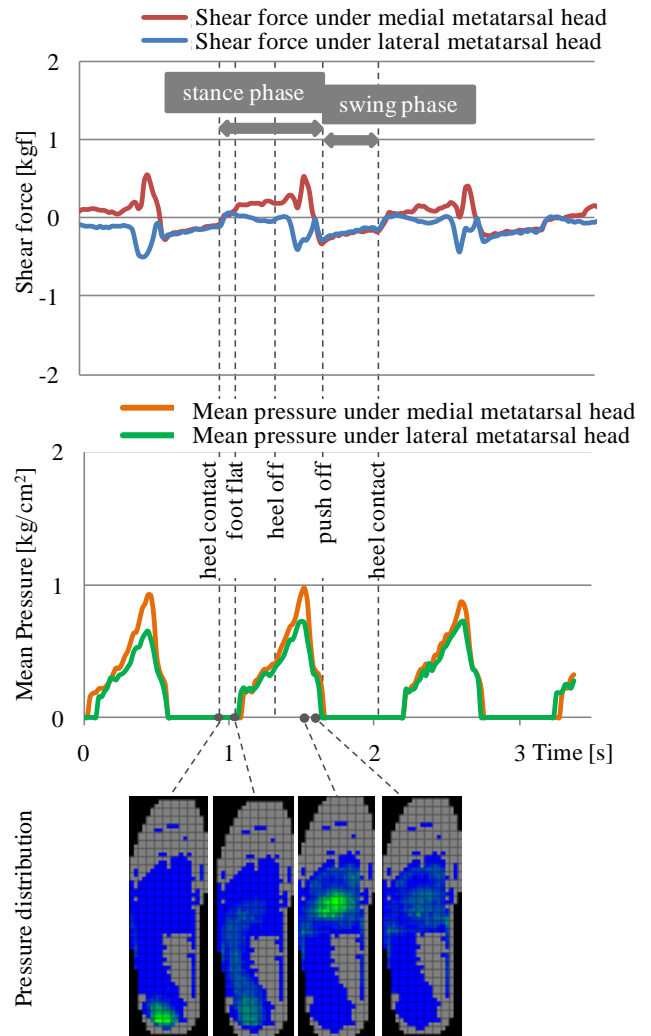


Fig.4 Shear force and mean pressure under left metatarsal head

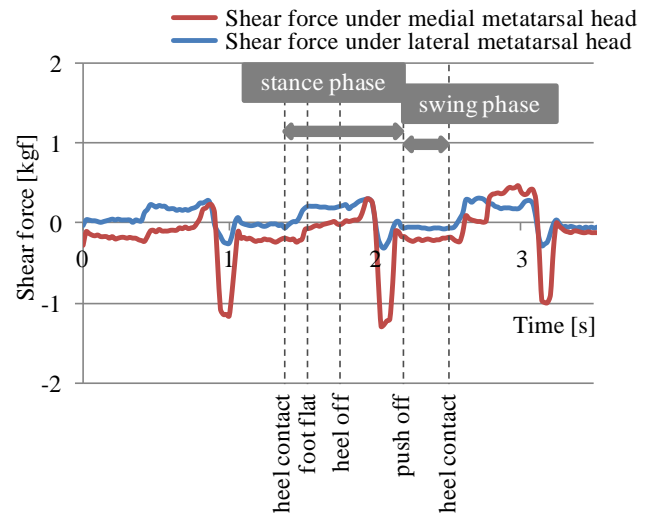


Fig.5 Shear force under right metatarsal head during normal walking

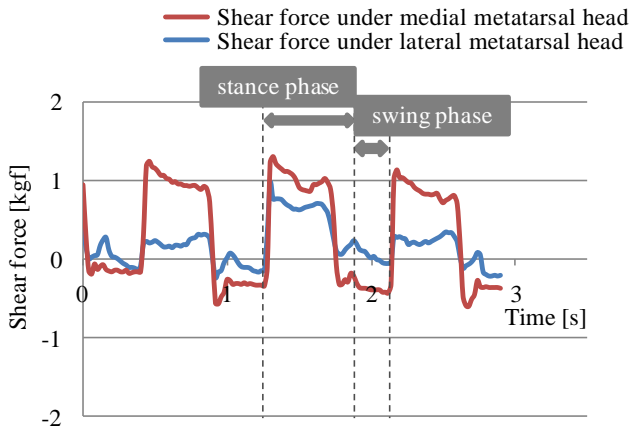


Fig.6 Shear force under right metatarsal head during shuffle walking

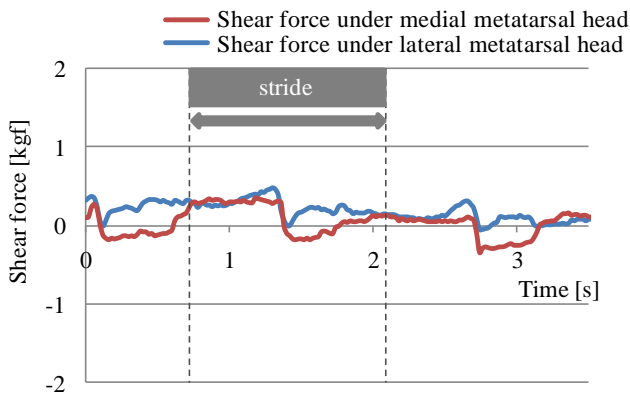


Fig.7 Shear force under metatarsal head during flat-footed walking

3-2 実験 2

足底圧力・せん断力同時測定システムによって、歩間、試行間で安定してデータが得られるかを確認するため、成人男女5名を対象に実験を行った。歩行前に立位で足長を測定し、あらかじめ用意した5種類から足のサイズに合ったインソールを選択して使用した。対象者はそれぞれ3回ずつ歩行し、解析には実験1と同様に1回あたり左右各3歩、合計左右各9歩(3歩×3試行)のデータを用いた。

対象者は、年齢 25-31 歳、男性 2 名、女性 3 名で、BMI17.8-26.1kg/m²、立位足長 21.8-26.6cm であった。

Fig.8 と Fig.9 はそれぞれ左足と右足の内側と外側中足骨頭部に生じた足底せん断力の最小値を、Fig.10 は左足と右足の踵部に生じた足底せん断力の最大値を対象者ごとにプロットした図である。なお、踵部については前後方向と内外方向を合成して算出したせん断力値の最大値をプロットした。

対象者内において、中足骨頭部、踵部ともにプロットした値は集まっており、安定性のあるデータを得ることができた。また、特に値の大きかった中足骨頭部内側と踵部において、対象者間で異なる値となっており、測定データは個人の歩行の特徴を反映していることが示唆された。

4. まとめ

圧力センサシートとシート型せん断力センサを用いた足底圧力・せん断力同時測定システムが、歩行の種類や個人の歩行の特徴を反映し、安定性のあるデータが得られることを確認した。今後糖尿病患者を対象に測定を行うことで、

足潰瘍の発症メカニズムを解明していく。さらに、圧力とせん断力を適切に評価し軽減することで、予防に繋げていく予定である。なお、本システムは糖尿病性足潰瘍の予防だけでなく、歩行姿勢評価や転倒予防トレーニングなど広く使用できる可能性がある。

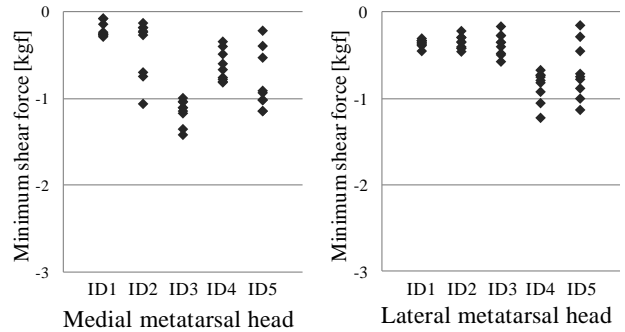


Fig.8 Shear force under left metatarsal head during normal walking

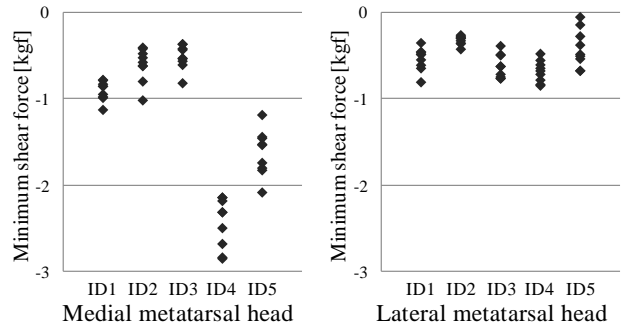


Fig.9 Shear force under right metatarsal head during normal walking

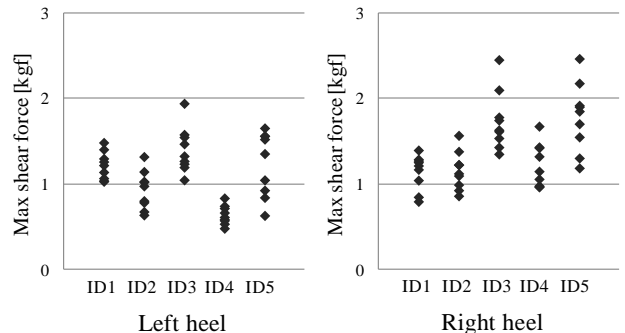


Fig.10 Shear force under heel during normal walking

参考文献

- (1) International Consensus on the Diabetic Foot & Practical Guideline on the Management and Prevention of Diabetic Foot 2007 by the International Working Group on the Diabetic Foot
- (2) Singh N, Armstrong DG, Lipsky BA, Preventing foot ulcers in patients with diabetes, JAMA, vol. 293, no. 2, pp. 217-228, 2005.
- (3) Lord M, Hosein R, A study of in-shoe plantar shear in patients with diabetic neuropathy, Clin Biomech (Bristol, Avon), vol. 15, no. 4, pp.278-283, 2000.
- (4) Cong Y, Tak-Man Cheung J, Leung AK, Zhang M, Effect of heel height on in-shoe localized triaxial stresses, J Biomech. vol. 44, no.12, pp. 2267-2272, 2011.