

Hybrid-IIIダミー足部および足首の シミュレーションモデルの開発

Development of a Simulation Model for Hybrid-III Foot and Ankle

菊池 裕二*
Yuji KIKUCHI

高橋 裕公*
Yuukou TAKAHASHI

菊地 純一**
Junichi KIKUCHI

要 旨

従来の楕円形状を用いたモデルでは再現が困難であったトーボードと段差を持つ面から足部が脱落する挙動の解析精度を向上するため、MADYMOの最新機能であるFacet Surfaceモデルを用いたダミー足部の新しいシミュレーションモデルを開発した。さらに、NHTSAによりHybrid-IIIダミーの足部及び足首の改良がなされたため、これらの部位の特性測定を行い、モデルに反映した。

フットレストから左足が脱落する台車テストの結果、足部の動的挙動及び脛部モーメントに関して高い精度が確認できた。

ABSTRACT

Using a current simulation model representing the dummy's foot by ellipsoids, it was difficult to accurately predict the foot motion rolling off of different surfaces at varying heights from the toeboard surface. A new modelling method using Facet Surface, which is a newly developed function in MADYMO program, was applied to the dummy's foot. Furthermore, properties of the Hybrid-III foot and ankle revised by NHTSA were measured and reflected in the model.

A sled test, in which the dummy's left foot rolled off the foot rest, was conducted to validate the model. When comparing the simulation results with the sled test results, high accuracy for both the dynamic motion of the foot and the tibia moment were confirmed.

1. まえがき

近年、エアバッグやシートベルト等の乗員保護装置の普及により、正面衝突事故における頭部及び胸部の傷害は低減してきている。しかし下肢傷害については、乗員保護装置が正常に作動した場合でも発生頻度が依然高く、頭部や胸部の傷害の減少に伴い相対的に顕在化してきている。また、今後も乗員保護装置の装着率が上昇するため、この傾向はさらに強まってくるものと予想されている。そのうえ、下肢傷害は治療が長引きやすく仕事や日常生活への支障が大きい¹⁾ため、社会的コストが高い¹⁾。

このような背景から下肢傷害が社会的にクローズアップされてきており、中でも受傷頻度の高い足部や足首の傷害が注目されている²⁾³⁾。着座位置別に見ると、これら足部及び足首の傷害はドライバ側で多く発生し⁴⁾、受傷形態としては足首のねじれによる脛骨、腓骨の内果、外果の骨折の発生頻度が最も高い。さらに、足首のねじれによる傷害の主要な受傷メカニズムの一つとして、ペダルやフットレスト等の段差からの足部の脱落が指摘されている⁵⁾。

しかしながら、従来の乗員挙動解析シミュレーションモデルでは、足部形状が楕円体でしか表わせないという制約

から、衝突時に足部が段差から脱落する挙動が正確に再現できなかった。

一方、米国及び欧州の安全情報提供活動では下肢の傷害値の要件化が進められており、現状の評価ツールであるHybrid-IIIダミーについてもより生体への忠実度を向上させるため、NHTSA(米国道路交通安全局)により足部及び足首の改良がなされている。

本研究では、従来の楕円形状を用いたモデル化手法では再現が困難であった段差からの足部の脱落により生じる足首の横ねじれの再現性を向上するため、足部のモデル化に新しい手法を取り入れたシミュレーションモデルを開発した。

さらに、改良されたHybrid-IIIダミーの足部及び足首の特性を新たに測定して、モデルへの反映を行った。

2. Hybrid-IIIダミーの足部及び足首の特性

改良されたHybrid-IIIダミーの足部には、足裏のたわみ特性を生体に近づけるため踵部にスリットが設けられ、その中にウレタン材が追加された。足首については、ジョイント部でのメタルコンタクトを防止するため、ラバーストッ

* 栃木研究所

** 栃木研究所((株)PSGより派遣)

パーが追加された。これらの変更内容をシミュレーションモデルに反映するため、Hybrid-IIIダミーの足部と足首の質量、慣性モーメント及び重心位置、足部のたわみ特性、足首ジョイントの曲げ特性及び可動角度範囲の測定を行った。ここで可動角度範囲とは、足部がストップに接触するまでの曲げ角度のことである。なお、衝突テストにおいてはダミー足部に靴を履かせることが定められているため、足部の特性はすべて靴を履かせた状態で測定した。また、ダミーの改良に伴い、従来使われていた特性の柔らかいウレタン底の靴(Lehigh Safety Shoe)が特性の硬い皮底の靴(Military Specification Shoe)に変更になったため、特性測定時には皮底の靴を用いた。

2. 1. 質量、慣性モーメント及び重心位置の測定

ダミーの足部と足首を分解し、それぞれの質量、慣性モーメント及び重心位置の測定を行った。質量の測定は精密天秤を用いて行った。慣性モーメントと重心位置はねじり振り子装置を用いて測定した。Table 1に質量及び慣性モーメントの測定結果をダミー改良前の結果と比較して示す。また、重心位置の測定結果をFig.1に示す。

2. 2. 足部のたわみ特性の測定

たわみ特性の測定は衝突時の足裏への入力点として踵部と足前方部が考えられるため、これらの二か所に負荷中心を設定して行った。静的特性についてはFig.2に示すように静的圧縮試験装置に足部をジグで固定し、各負荷部位より面積の大きいジグを介して負荷を加えた。また、動的特性についてはFig.3に示すように足部をジグでロードセルに固定し、スライド式の衝撃試験装置を用いて動的負荷を与え

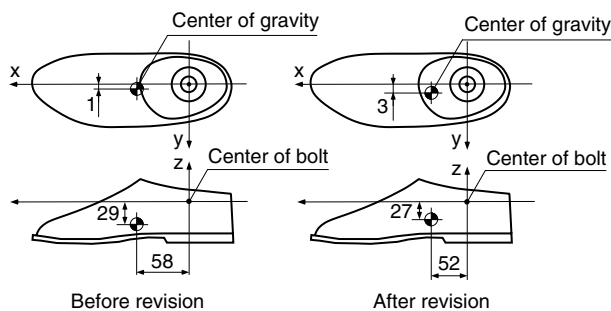


Fig.1 Center of gravity of the Hybrid-III foot with shoe

た。インパクトガイドには変位計を取り付け、動的荷重と同時に足部のたわみ量を測定した。衝突テストでの足部への入力荷重を想定し、インパクトの質量は5.6kg、速度3 m/sの条件で足裏に衝突させた。

Fig.4に踵部及び足前方部の静的及び動的たわみ特性の測定結果を、ダミー改良前の結果と比較して示す。踵部、足前方部とも、改良後のダミーでは改良前に比べ静的及び動的たわみが大幅に減少している。シミュレーションモデルには、足部の動的挙動を再現するため動的たわみ特性の測定結果を反映した。なお、段差からの脱落時には靴と足部との間にずれが生じ足首の曲げ角度に影響するため、そのずれを簡易な手法で測定しモデルに反映した。

2. 3. 足首ジョイントの曲げ特性及び可動角度範囲の測定

改良後のダミーでは、足首ジョイントにFig.5に示すようなラバーストップが追加され、ジョイント部のメタルコンタクトが生じない構造となった。ジョイント部の曲げ特性の測定は、曲げ方向によってラバーストップの厚さが異なるため、Fig.6に示すように22.5°毎に曲げ方向を変えて行っ

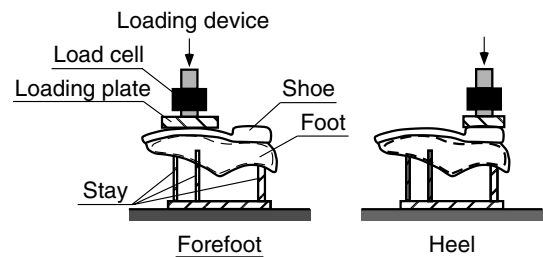


Fig.2 Test setup for static compression of hindfoot with shoe

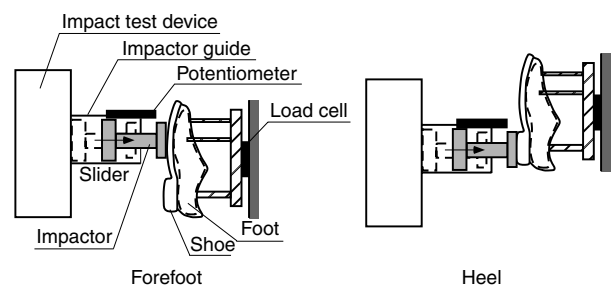


Fig.3 Test setup for dynamic compression of hindfoot with shoe

Table 1 Mass and moment of inertia of the Hybrid-III ankle and foot

Segment	Before revision				After revision			
	Mass (kg)	Ixx ($\times 10^{-3} \text{kgm}^2$)	Iyy ($\times 10^{-3} \text{kgm}^2$)	Izz ($\times 10^{-3} \text{kgm}^2$)	Mass (kg)	Ixx ($\times 10^{-3} \text{kgm}^2$)	Iyy ($\times 10^{-3} \text{kgm}^2$)	Izz ($\times 10^{-3} \text{kgm}^2$)
Ankle	0.76	0.52	0.52	0.67	0.75	0.77	0.77	0.56
Foot with shoe	2.10	1.34	4.73	4.48	1.79	1.14	11.15	11.14

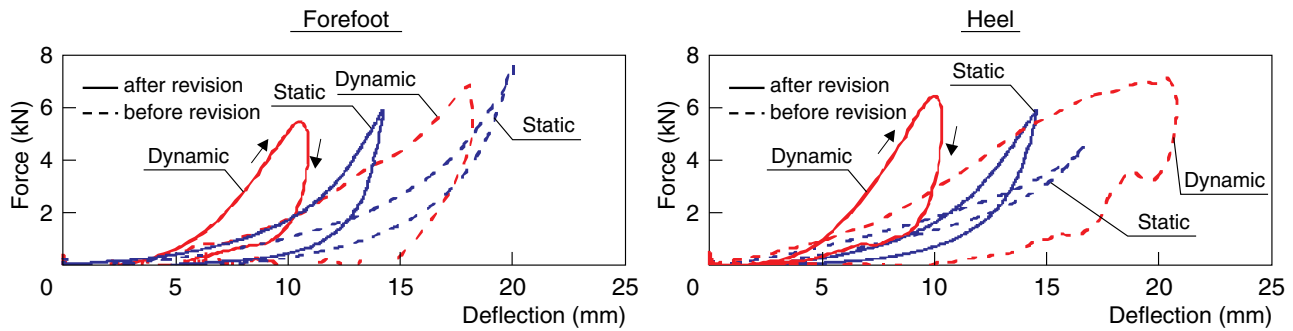


Fig.4 Static and dynamic force-deflection properties of hindfoot with shoe

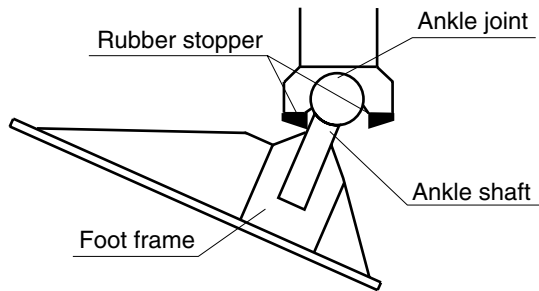


Fig.5 Ankle joint structure after revision

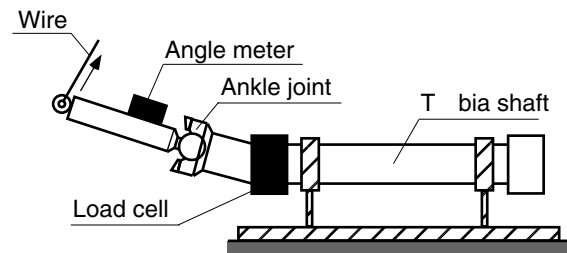


Fig.7 Test setup for the measurement of range of motion and torque properties of ankle joint

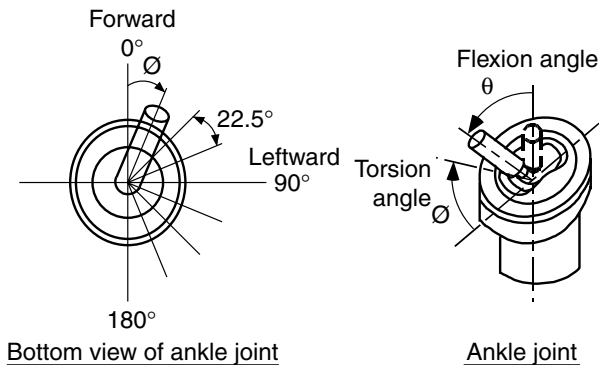


Fig.6 Definition of bending direction for the measurement of range of motion and torque properties of ankle joint

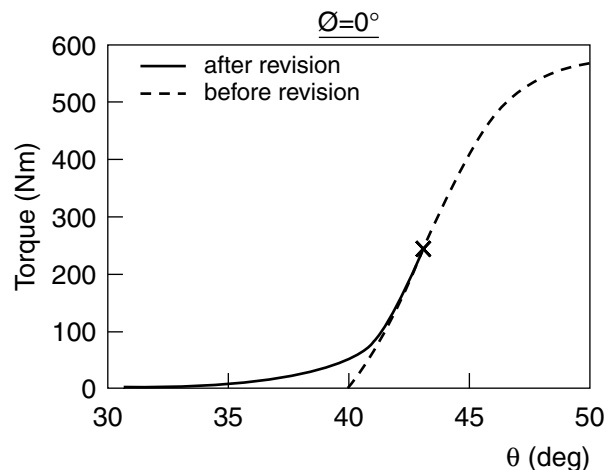


Fig.8 Torque-angle properties for ankle joint

た。Fig.7に示すように、脛部に足首ジョイントを取り付けた状態でジグに固定し、足首ジョイントのシャフト部に200mmの延長棒を取り付け、延長棒には角度計を取り付けた。ワイヤーを介して延長棒の先端をオートグラフで牽引し、角度計を用いて曲げ角度を測定した。足首ジョイントのスティック後の曲げトルクは、脛下部に取り付けられているロードセルを用いて測定した。Fig.8に足首ジョイントの背屈方向の曲げ特性の測定結果を、Fig.9に足首ジョイントの可動角度範囲の測定結果を、それぞれダミー改良前と比較して示す。改良後の足首ジョイントの曲げ特性は、ラバーストッパーのたわみにより角度変化に対するトルクの立ち上がりが滑らかになっている。また、可動角度範囲はラバーストッパーの厚さにより背屈方向で12.5°小さくなっている。これらの測定結果をシミュレーションモデルに足首ジョイントの特性として反映した。

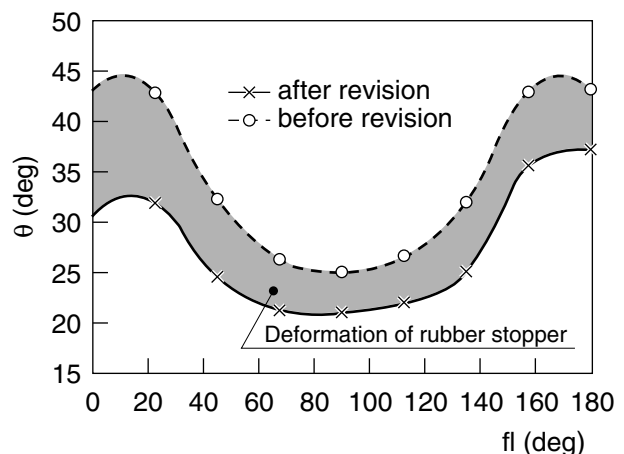


Fig.9 Ankle joint range of motion

3. 足部のモデル化手法

従来のシミュレーションモデルでは、楕円形状の剛体セグメントをジョイントで結合してモデル化する手法が広く用いられてきた。しかしながら、楕円形状を用いたモデル化では、靴底のような平面部の場合表面形状に実際にはない曲率が生じてしまう。また、接触計算においては着力点が一点に限定され、着力点は楕円形状に強く依存する。このため、足部とペダルやフットレストなど比較的面积の小さい部材との接触では、足首まわりのモーメントが実際よりも小さくなり、足首の横ねじれ挙動の再現が困難であった。

そこで、足首の横ねじれ挙動の計算精度を向上するため、MADYMO(MAthematical DYnamic MOdels)を用いて、新しいモデル化手法を取り入れた計算モデルを開発した。MADYMOの特長として、剛体モデルだけでなく有限要素モデルとの組み合わせで解析が可能であることが挙げられる。さらに最新の機能として、剛体セグメントの表面形状を有限要素モデルと同様に節点の集合体で表現できる、Facet Surfaceというモデリング機能が追加された⁷⁾。

ここでは、このFacet Surfaceモデルを用いてダミー足部のモデル化を行った。Facet Surfaceでは節点を用いて3次元的に形状を表現できるため、Hybrid-IIIダミーの靴底面の形状をベクトロン装置を用いて精密に測定し、靴底面の形状の節点データを作成した。

これにより、Fig.10に示すように、従来の足部モデルに対しFacet Surfaceを用いた新しいモデル化手法では、靴底面の形状をより忠実にモデル化することが可能になった。

4. シミュレーション精度の検証

新しいモデル化手法を取り入れたシミュレーションモデルの精度検証のため、台車テストを行った。足部の段差からの脱落による横ねじれ挙動を再現するため、台車テスト

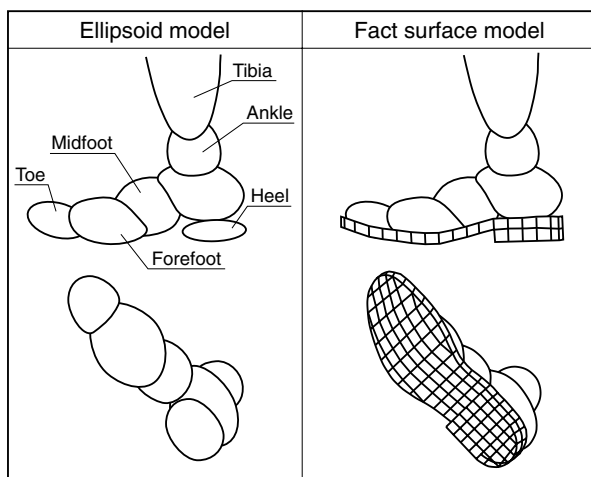


Fig.10 Comparison of shape of foot between ellipsoid model and facet surface model

では、Fig.11に示すように左足をフットレストに対して約半分だけ載せて足が脱落しやすい配置とした。

なお、足部が段差から脱落するケースとしては、ブレーキペダル上に足を配置した場合なども考えられるが、ブレーキペダルの場合には接触面積がさらに小さく、足前方部のみがペダル面と接触することになるため、ペダル面のモデル化にも工夫が必要となる。ここでは足部のモデル化手法を改良した効果を確認するため、比較的面积が大きくつま先から踵までが接触するフットレストに足を配置した場合について精度検証を行った。

4. 1. 台車テスト

Fig.12に示すようにダミーを3点式のシートベルトで拘束し、トーボード、ステアリングホイール、ニーボルスタ、アクセルペダル、フットレストを台車に取り付けドライバの設定とした。トーボードは台車に対して固定とし、室内侵入のない条件とした。台車に与えた加速度波形(実機の35mph正面バリア衝突相当)をFig.13に示す。

4. 2. 精度検証

台車テスト結果とシミュレーション計算結果を比較するため、Fig.14に示すような台車テストと同等条件のシミュ

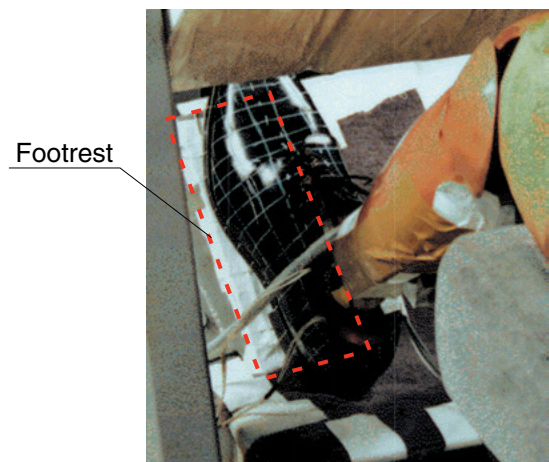


Fig.11 Foot position on the footrest

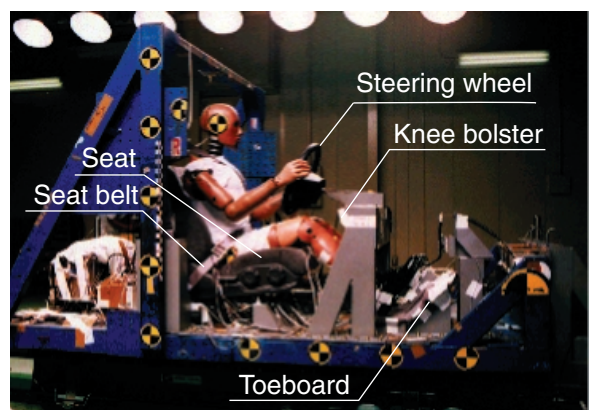


Fig.12 Setup for sled test

レーションモデルを作成した。シートベルトはダミーとの接触部をFEMモデルとし、端末部をBar要素で構成した。フットレスト、トーボード及びフロアは平面形状でモデル化した。また、加速度は台車テストの波形を与えた。

Fig.15に時系列での足部の挙動を、台車テスト結果とシミュレーション計算結果を比較して示す。シミュレーション計算結果については、従来の楕円形状モデルとFacet Surfaceを用いたモデルを併せて示している。

Facet Surfaceを用いたモデルでは、台車テストと同じタイミングから足部に横ねじれが生じてフットレストから脱落しているが、楕円形状モデルでは、足部の横ねじれは小さくフットレスト上を横すべりしながら脱落する。

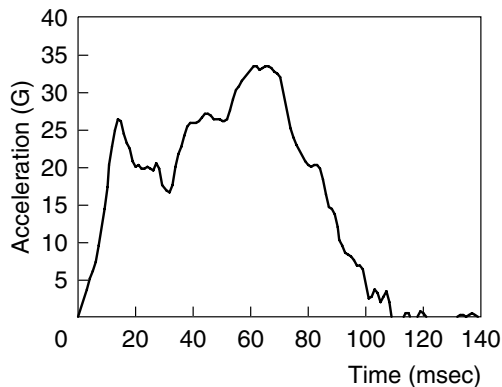


Fig.13 Acceleration time history for sled test

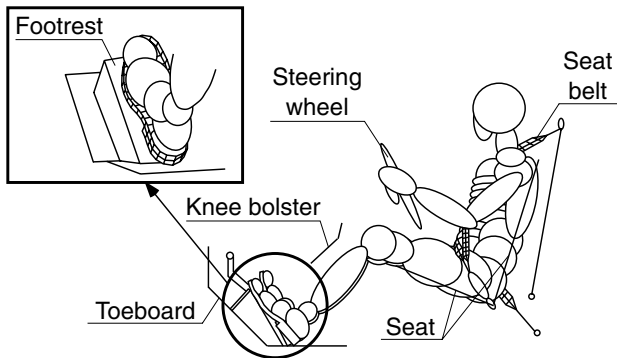


Fig.14 Schematic of sled test model

Fig.16に脛下部の軸力Fzと前後及び左右軸まわりのモーメントMx,Myの波形を、台車テスト結果とシミュレーション計算結果を比較して示す。

楕円形状モデルでは、モーメントMx,Myが台車テストよりも早いタイミングで立ち上がっており、またモーメントMxについてはピーク値がかなり高くなっている。これに対してFacet Surfaceモデルでは、軸力Fz、モーメントMx,Myに関して波形、ピーク値とも台車テストの結果とよく一致している。

これらの結果から、靴底面の形状を忠実にモデル化することにより、段差からの足部の脱落挙動のシミュレーション精度を大幅に向上できることがわかった。

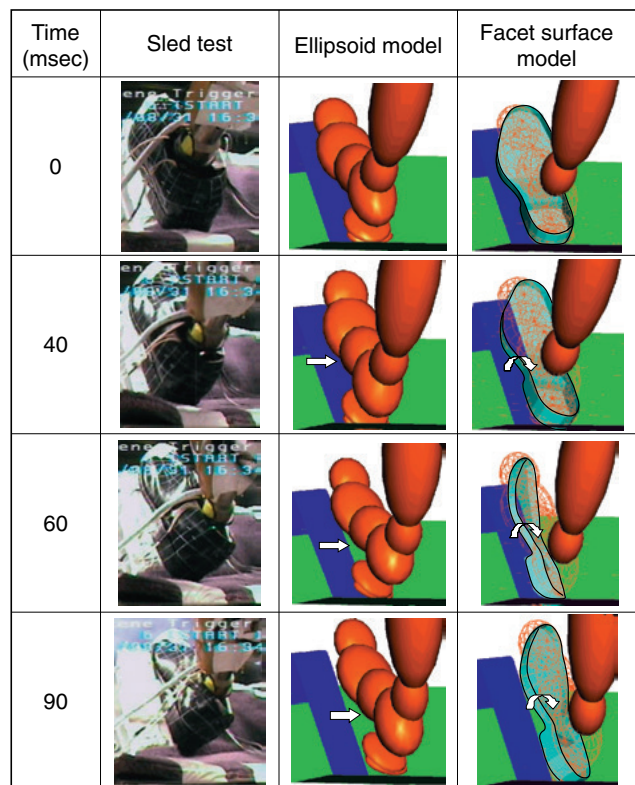


Fig.15 Comparison of foot motion between sled test and simulation

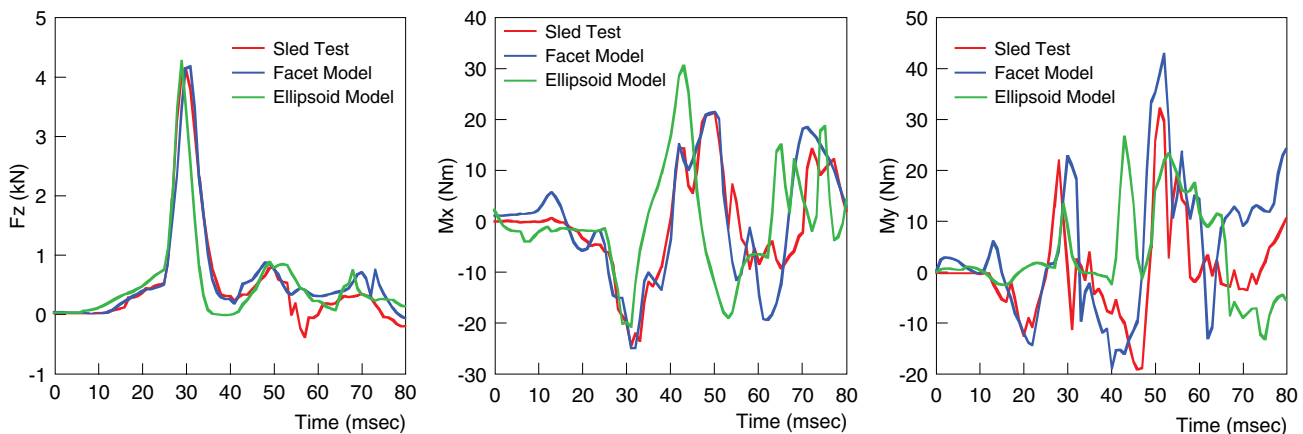


Fig.16 Comparison of axial load and moment in tibia between sled test and simulation

5. まとめ

- (1) 靴底面の形状を精密に測定し、MADYMOプログラム上の最新機能であるFacet Surfaceを用いて、改良されたHybrid-IIIダミーの足部及び足首のシミュレーションモデルを開発した。これにより、従来の楕円形状モデルでは再現が困難であった足部の横ねじれ挙動のシミュレーション精度向上を図った。
- (2) Hybrid-IIIダミーの足部及び足首の改良に対応し、質量、慣性モーメント、重心位置、足部のたわみ特性、足首ジョイントの曲げ特性、足首の可動角度範囲の測定を行い、シミュレーションモデルに反映した。
- (3) フットレストに足を配置した場合について、シミュレーション計算結果を台車テスト結果と比較したところ、足部がフットレストから脱落する挙動が定性的に良く表されていることがわかった。また、足首のモーメントについては定量的に高い精度が得られ、モデルの妥当性が検証できた。
- (4) ブレーキペダルのように接触面積がさらに小さく、足前方部のみが接触する場合の計算では、ペダル面のモデル化にも工夫が必要となる。このような場合の精度向上が今後の課題である。

参考文献

- 1) Ted R. Miller et al.: Costs of Lower Limb Injuries in Highway Crashes, International Conference on Pelvic and Lower Extremity Injuries Proceedings, 1995
- 2) Lisa Shoaf Ore et al.: Accident Investigation and Impairment Study of Lower Extremity Injury, SAE Paper 930096, 1993
- 3) Richard M. Morgan et al.: Ankle Joint Injury Mechanism for Adults in Frontal Automotive Impact, SAE Paper 912902, 1991
- 4) Dan Pattimore et al.: The Nature and Cause of Lower Limb Injuries in Car Crashes, SAE Paper 912901, 1991
- 5) Andrew Morris et al.: Mechanisms of Fractures in Ankle and Hind-Foot Injuries to Front Seat Car Occupants - An In-Depth Accidents Data Analysis, SAE Paper 973328, 1997
- 6) 高橋裕公ほか：Hybrid-IIIダミー下肢のシミュレーションモデルの開発, HONDA R&D Technical Review vol.10, p.189-196, 1998
- 7) TNO Road-Vehicles Research Institute: MADYMO Theory Manual Version 5.3, 1997

■ 著 者 ■



菊池 裕 二



高橋 裕 公



菊 地 純 一