

サッカーにおけるボールインパクト局面のバイオメカニクス
—ボールインパクトによる足甲部圧力分布測定法の検討—
布目寛幸
名古屋大学総合保健体育科学センター

Abstract

The purpose of this study was to establish the procedure for measuring a pressure applied on the dorsal surface of the foot during ball impact in soccer instep kicking. A flexible in-shoe pressure measurement device (Footscan insole, RSscan International Ltd.) was selected to measure the time-series change of the dorsal pressure. Two experienced soccer players were volunteered to participate this study. They were instructed to kick the ball (FIFA standard) with the instep of the foot as hard as possible. The pressure measurement device attached on the dorsum of the kicking foot was used to sample the pressure data at 500 Hz. The pressure measurement device used in the present study succeeded in illustrating the time-series change of the dorsal pressure on the foot during ball impact. These data indicated that the centre of pressure during ball impact was located around the base of the first metatarsal bone of the foot. However, there were several concerns about the breakage of the current sensors when it was required bending the sensor array in two directions over the dorsum of the foot. The sensor system also tended to underestimate the amount of force applied on the foot. Currently developing new sensor materials with more robust connection against bi-directional bending and higher sampling frequency (1000 Hz) expected to allow further close and repetitive examination of foot to ball interaction.

1. 緒言

ボールをキックする動作は、サッカーにおいて最も頻繁にスポーツバイオメカニクスの分析対象となっている動作である。その中でも足甲部でボールにインパクトし、シュートなど速いボール速度が求められる状況で多用されるインステップキックは、動作を2次元的に近似する初期の映像解析手法によくマッチしたことからこれまでに数多くの研究報告がみられる (Asami and Nolte 1983; Isokawa and Lees, 1988; Rodano and Tavana 1993; Barfield, 1995; Lees, 1996; Lees and Nolan, 1998; Andersen et al., 1999; Teixeira, 1999; Dörge et al., 2002)。近年では映像解析手法の進歩に伴い、キック動作の3次元的なキネマティクスの特徴 (Levanon and Dapena, 1998) や力学動態が明らかにされている (Nunome et al., 2002)。しかしながら、これら一連の研究報告はボールインパクトにむけて下肢をスイングする局面を扱っており、足がボールにインパクトする局面の動作を捉えた研究はほとんどみられない。

映像解析法から運動中の身体の座標データを得る場合、微分変量を算出する過程で座標データに混入したノイズが増幅され、正しい動作を観察することが難しくなる。通常は平滑化によって増幅されたノイズを除去することが行われるが、従来型の平滑化フィルターでは、遮断周波数がひとつに固定されているため、サッカーのようにボールインパクトによってその前後の周波数特性が急激に変化するような動作に対しては、適切な遮断周波数を設定することが極めて難しいことが知られている。このような背景からボールインパクト局面における足部の動作は、長らく分析不可能な局面として扱われてきた。

近年、Nunome et al., (2005)は、超高速度 (1000 fps) でサンプリングされたインパクト局面の下肢の座標データを時間一周波数解析の理論 (Giakas et al., 2000; Georgakis et al., 2002a,b) を応用し、局面ごとに遮断周波数を変化させることができたフィルターによって平滑化し、インパクト中の下

肢の速度・加速度動態を正しく捉えることに成功している。これらのキネマティクス的なデータにボールインパクト中にボールから足部へと加わる力のデータを加えることができるならば、ボールインパクト局面における足部・下腿の力学動態が明らかにすることが可能となる。

本研究では、これまで不明であったボールー足部間の力学現象を詳細に記述するための第一歩として、ボールインパクト中にボールから足部へと加えられる圧力を実測する各種手法の妥当性を検討し、実際に足甲部上に加えられる圧力の動態と分布を明らかにすることであった。

2. 研究方法

2-2. 小型圧力センサーによる足部圧力実測の検討

Johannes et al. (2002) は、on-off のみを検知するタッチセンサーを足甲部の数箇所に貼付し、実際に足甲部の解剖学的な部位がボールと接触する頻度を報告している。本研究では、Johannes et al. (2002) らが用いたタッチセンサーに換えて、小型の圧力センサー（協和電業、PS-5KA）を用いることで部位ごとの圧力の測定できると考えた。その予備実験として床面に固定されたセンサーに対してボールを衝突させる実験を行った（図1左側）。

しかしながら予備実験のほとんどのケースにおいて、図1右側に実線で示されたような圧力波形が得られ、ボールからの圧力は適切には測定されなかつた。この原因として、ボールがセンサーの外周部分との衝突によってセンサー中央部を回り込むように変形し、圧力を感知する中央部分に均一に接触していないことが考えられた。またボールの縫い目部分との衝突においても同様の現象が起きることなどが確認された。さらに小型圧力センサーから足甲部の圧力分布を得ようとする場合、大量のセンサーを足甲部に貼付する必要があり、それに伴うアンプの多チャンネル化と複雑化する配線処理などを考え合わせると現実的な方法ではないと考えられた。

2-3. 圧力センサーシートによる足部圧力実測の検討

小型圧力センサーの問題点として明らかになった点は1) ボールの変形具合とその形状（縫い目）によって適切な圧力信号が得られないことと、2) 足甲部の圧力分布を高い解像度で得ようする場合、多数のセンサーが必要となり、その設置を考えると測定手法として現実的ではないことであった。これらの問題点を解決する手段として、近年歩行やランニング中の足底圧力測定に多用されているセンサーシートの流用が考えられた。小型圧力センサーと同様の予備実験の結果、良好な結果が得られため今回の実験ではシューズ内に挿入するタイプのセンサー（Footscan insole, RSscan International Ltd.）を流用し、センサーを蹴り足の甲に直接固定することによってボールインパクトによる足甲部の圧力変化を捉えることを試みた（図2左側）。

2名のサッカー熟練者に実験協力の同意、十分なウォームアップの後、被検者は蹴り足（右）の足甲部にセンサーを貼付し、5m先に設置されたハンドボールゴールめがけて全力でインステップキックを行う試行を繰り返した。ボールはFIFA公認の5号球を用い、実験を通してボールの空気圧を750 hPaにコントロールした。足部とボールのインパクトの成否は、当該被検者と検者両方によって判断され、それぞれの被検者において成功と判断された10試行のデータが得られるまで試技を繰りかえした（図2右側参照）。

ボールインパクト中に足甲部にかかる圧力データは500 Hzの速度でサンプリングされ、有線で腰部に固定されたデータロガーへと出力された。出力されたデータはPCカードを解してコンピュータに取り込まれた。

3. 結果

図3と4にそれぞれの被検者において得られた典型的な足甲部の圧力分布の変化（上段）と、センサーに加えられた圧力の総和から求めた力の変化（下段）を示した。

図示されたように、足部に加えられた圧力は足甲部においてかなり先端の部分にまで広がっており、予想に反して足関節付近にはほとんど圧力がかかっていないかった。

センサーの圧力の総和から求めた力のピークは、両被検者とも 700N 程度であった。また力波形は、ボールインパクトから力のピークに至る過程（負荷）と、力のピークから力がかかるなくなる過程（除荷）では若干異なる波形を示した。

負荷過程においては、力はやや急峻な上昇を見せながらピークを迎えるが、除荷過程はそれに比べ、緩やかな力の減少がみられた。

2例の典型例において、インパクト中の圧力を合計し、最も高い圧力がかけられた部分（圧力中心）を図5に示した。2名の被検者に共通して、足甲内側部の第1中足骨基部付近と考えられる部位にインパクト中、最も高い圧力がかかっていた。

4. 考察

これまでのサッカーに関する多くの先行研究においてボールインパクト中の力学現象は、その前後の足部とボールの挙動から算出される変量によって記述されてきた。最も代表的な変量としてインパクト直前の足部速度に対するインパクト後のボール速度の比が数多く報告されており、その比が通常は1を超えることが知られている。Asami and Nolte (1983)は、この関係に運動量保存の法則を適用することでボールインパクトに有効な足部質量（ストライキング・マス）の算出を試みており、近年の研究（Andersen et al. 1999; Dörge et al. 2002）においても同様なエネルギー返還係数（Coefficient of restitution）などを求める試みがなされている。しかしながら、Isokawa and Lees (1988) が示したように足部速度をどの部位で代表させるかによって、前述した変量の値が大きく異なってしまうばかりか、いくつかの先行研究においてはどの部位によって足部の速度を代表したかが不明瞭であるなど研究者間で統一がとれていない。またインパクト中の力学量を実測する方法は、今のところ確立されていない。

4-1. インパクト中心

石井と磯川（2002）は、インステップキックにおいてボールを設置する高さを段階的に変化させることで足部とボールの衝突位置をコントロールし、そのデータから理論的に最適なインパクト位置を推測している。その結果によれば、最適なボールインパクトはボール反力の作用線が足部重心付近を通るときであるとされている。本研究で得られたボールインパクト中の圧力中心（図5参照）は、足部の矢状面における重心位置とほぼ一致すると考えられ、石井と磯川（2002）の報告を実測データから支持するものである。しかしながら石井と磯川（2002）の研究は2次元的な映像解析手法を用いているために、最適なインパクト位置は2次元的にしか求められていない。

Johannes et al. (2002) は、足部に貼付した on-off のみを検知するタッチセンサーからインステップキックにおいてボールと接触する部位を調べ、ボールインパクト中に第1中足骨基部が最も高い頻度（全試行の 89%）でボールに接触していることを示している。本研究では、図5に示されたようにボールインパクトによる足甲部への圧力を連続的に測定することにより、その圧力中心が被検者に共通して、第1中足骨基部付近であることが明らかになった。この結果は、Johannes et al. (2002) によって最も頻繁にボールに接触する箇所であることが明らかとなった第1中足骨基部がボールインパクトに

おいて最も圧力がかかる部位（圧力中心）であるという力学的な意味を与えるものである。したがって本研究で用いた手法は、これまでのボールインパクト中の足部とボールとの力学動態に対する理解を大きく拡張しうる画期的なものになりうると考えられる。

従来、サッカーの指導現場ではしばしばインステップキックはスパイクの紐の部分、つまり足甲部の中央部でボールにインパクトするという指導が行われており、同様な記述がサッカーの指導書にも散見される。しかしながら実際のインステップキックにおいて多くの熟練した選手は、斜め後方からの助走を行い、蹴り脚をボールに対して水平面内で円を描くよう回転させながらキックすることが経験的に知られている。太田と服部（1983）は、キック中に足とボールが接触する位置をボールのインパクト面にカーボン紙を貼付することで明らかにし、サッカーの経験年数が多いものほどボールの中心から下、そして右側（ゴール方向に対して）をインパクトしている傾向を報告している。このことから、前述したような熟練選手のインステップキックでは、従来言われているような足甲部の中央部ではなく、その内側部がボールの中心にインパクトしていることが推察されるのである。本研究で得られた知見は、熟練者のインステップキックが足甲部の第1中足骨基部でボールを捉えていることを示すもので、経験的に知られている事実を客観的に裏付けるものであると考えられる

4-3. 測定に関する課題と問題点

ボールインパクト中に足甲部にかけられた圧力からセンサー当たりの力を算出し、それを合計することで足部に加えられたボール反力を算出した。先行研究ではボールインパクト前後のボールの運動量からインパクト中の平均のボール反力が求められている。Asai, et al., (1995)によれば、25 m/sの速度で蹴り出されたボールから足部が受けた反力は平均で1200N、そのピークが2400Nであるとされている。これに対して、図3と図4に示されたように本研究で測定された力のピークは700Nと明らかにインパクト中のボール反力が低く見積もられる傾向が明らかとなった。これには本研究で流用した足圧センサーの応答周波数特性の関与が考えられた。つまり、足圧測定のように常に体重のような一定の圧がかけられた状態からの応答とは異なり、ボールインパクトのように無負荷の状態から急激に負荷が立ち上がるような圧力変化には適切に応答しきれない可能性を考えることができる。しかしながら、ボール反力の力波形は負荷過程の方が除荷過程に比べやや急峻である傾向を示したもの、基本的にはボールの加速度曲線と同様の変化を示している。このことは映像解析の手法を併用することで映像解析から算出されたボールの加速度からセンサーによる値が補正できる可能性を示している。

また、今回は使用したセンサーシートは足底部の圧力を測定するものをそのまま流用したものである。したがってこのセンサーは、足底部の形状にフィットするように前後には柔軟であるが、横方向への変形は想定されていない。足甲部の形状は足底部に比べやや複雑で、センサーシートはボールとのインパクトにより前後および左右への2方向の曲げ負荷がかけられることになる。今回の実験では、想定されたボール反力の大きさはセンサーシートの対荷重の範囲内であったものの、数回の試技でセンサーの接続部が回復不能なダメージを追ってしまうことが明らかとなった。したがって、現状では足底圧測定用のセンサーをそのままの形で流用することは、コストの面からも現実的ではないことが明らかとなった。現在、この問題点を解決すべく RSscan International Ltd. と共同で2方向への曲げ荷重によっても強固な接続が保たれ、且つ2倍の速度でデータを採取できるシステムを開発中である（図6）。現在は先方と今回の実験データをやりとりし、足甲部によりフィットした形状のデザインを検討段階である。

5. 結語

本研究では、極めて短時間に行われるサッカーのボールインパクト中に足甲部にかかるボール反力を

足底圧計測用のセンサーシートによって実測し、その圧力分布や圧力中心などの時系列変化を明らかにする方法を確立することを試みた。その結果、足底圧センサーシートの流用によりボールインパクト中の足甲部上の圧力変化を捉えることが可能となり、その圧力中心位置が第1中足骨基部付近であることが明らかとなった。

一方、現状のシステムでは圧力の総和として算出されるボール反力が低く見積もられる傾向が明らかとなつた。また足甲部の形状からセンサーシートに対して2方向への曲げ負荷がかかることにより、数回の試技によってセンサーの接続部に回復不能なダメージを負ってしまうことも明らかとなった。これらの問題点を解決すべく2方向への曲げによっても強固な接続が保たれ、これまでの2倍の速度でデータを採取できるシステムを鋭意開発中である。このセンサーシートによって信頼性の高いデータを繰り返し採取できることが期待される。

6. 参考文献

References

1. Andersen, T. B., Dörge, H. C. and Thomsen, F. I. (1999). Collisions in soccer kicking. *Sports Engineering*, **2**, 121–125.
2. Asai, T., Akatsuka, T. and Kaga, M. (1995). Impact process of kicking in football. In *Proceedings of International Society of Biomechanics XVth Congress* (edited by K. Hakkinnen, K. L. Keskinen, P. V. Komi and A. Mero), pp. 74–75. Jyvaskyla: Gummerus Printing.
3. Asami T., and Nolte, V. (1983). Analysis of powerful ball kicking. In *BiomechanicsVIII-B: Proceedings of International Society of Biomechanics VIII th Congress* (edited by H. Matsui and K. Kobayashi), pp. 695–700. Champaign, IL: Human Kinetics.
4. Barfield, W. R. (1995). Effects of selected kinematic and kinetic variables on instep kicking with dominant and nondominant limbs. *Journal of Human Movement Studies*, **29**, 251–272.
5. Dörge, H. C., Andersen, T. B., Sørensen, H. and Simonsen, E. B. (2002). Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences*, **20**, 293–299.
- Georgakis, A., Stergioulas, L. K. and Giakas, G. (2002a). Winger filtering with smooth roll-off boundary for differentiation of noisy non-stationary signals. *Signal Processing*, **82**, 1411–1415.
6. Georgakis, A., Stergioulas, L. K. and Giakas, G. (2002b). An automatic algorithm for filtering kinematic signals with impact in the Winger representation. *Medical and Biological Engineering and Computing*, **40**, 625–633.
7. Giakas, G., Stergioulas, L. K. and Vourdas, A. (2000). Time-frequency analysis and filtering of kinematic signals with impacts using the Wigner function: accurate estimation of the second derivative. *Journal of Biomechanics*, **33**, 567–574.

8. 石井秀幸, 磯川正教 (2002). インステップキックにおけるインパクトの運動力学解析. サッカー医科学研究, 22, 227-231.
9. Isokawa M. and Lees, A. (1988). A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. In: *Science and Football: Proceedings of the First World Congress of Science and Football* (edited by T. Reilly, A. Lees and K. Davis and W. J. Murphy), pp. 449-455. London: E & FN Spon.
10. Johannes L. T, Slim, E., van Soest, A. J. and van Dijk, C. N. (2002). The relationship of the kicking action in soccer and anterior ankle impingement syndrome: a biomechanical analysis. *American Journal of Sports Medicine*, 30, 45-50.
11. Lees, A. (1996). Biomechanics applied to soccer skills. In *Science and Soccer* (edited by T. Reilly), pp. 123-134. London: E & FN Spon.
12. Lees, A., and Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: a review. *Journal of Sports Sciences*, 16, 211-234.
13. Levanon and Dapena (1998). Comparison of the kinematics of the full-instep and pass kicks in soccer. *Medicine and Science in Sports Exercise*, 30, 917-927.
14. Nunome, H., Asai, T., Ikegami, Y. and Sakurai, S. (2002). Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks. *Medicine and Science in Sports Exercise*, 34, 2028-2036.
15. 太田茂秋, 服部恒明 (1983). インステップキックにおけるボールと足の接触点について. 日本体育学会第34回大会号, 607.
16. Rodano, R., and R. Tavana. (1993). Three dimensional analysis of the instep kick in professional soccer players. In *Science and Football II: Proceedings of the Second World Congress of Science and Football* (edited by T. Reilly, J. Clarys and A. Stibbe), pp. 357-361. London: E & FN Spon.
17. Teixeira, L. A. (1999). Kinematics of kicking as a function of different sources of constraint on accuracy. *Perceptual and Motor Skills*, 88, 785-789.

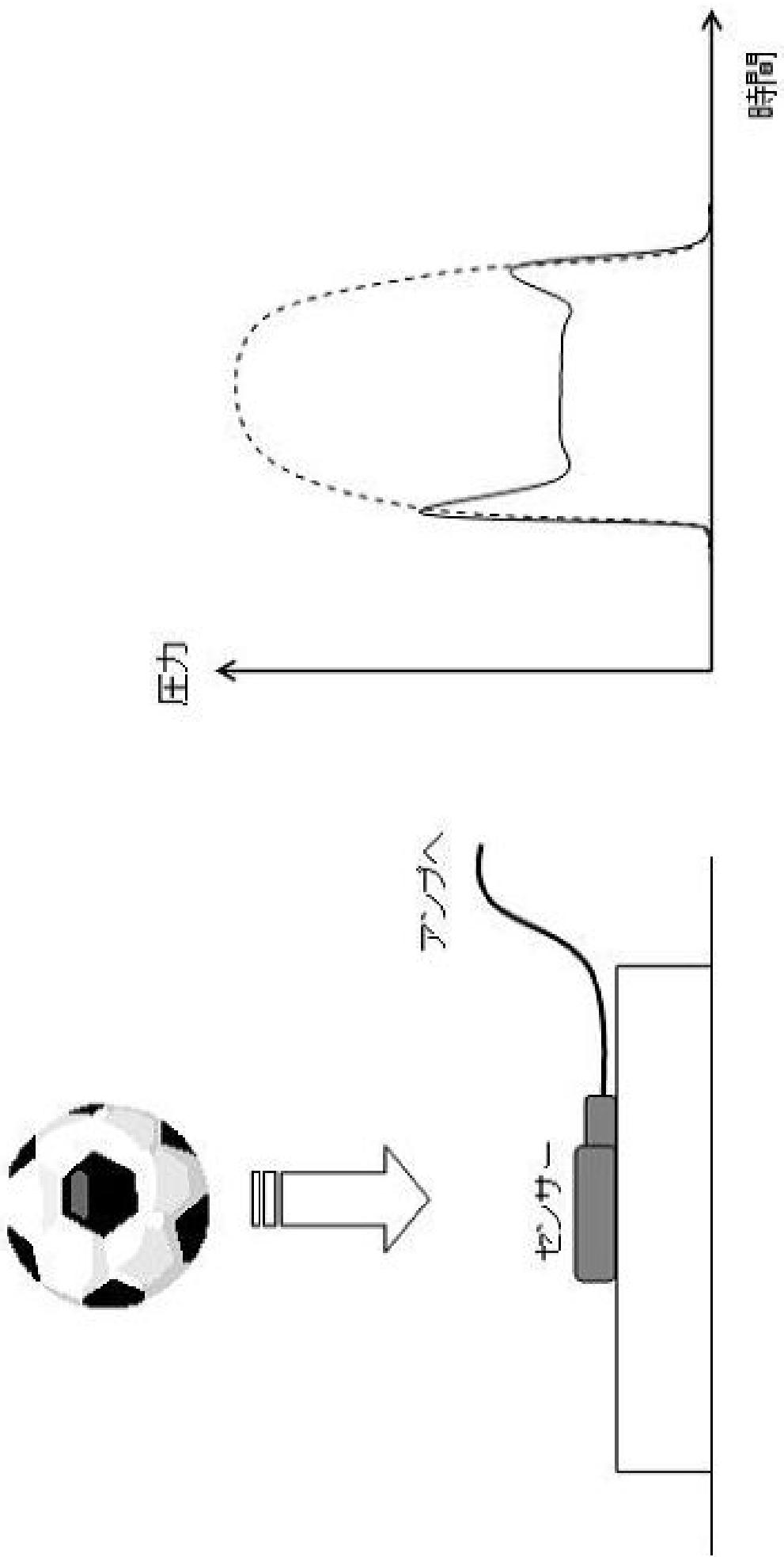


図1. 小型圧力センサーによる予備実験の模式図(左)と予備実験で得られた典型的な圧力波形(右)。右側の図中の図中の実線は実測データ、破線は本来あるべき圧力波形由縁を示している。

図2. 足甲部へのセンサー配置(左)と実際のキック動作における測定風景(右)。



圖2 足底壓縮力分布圖(上段)及足底壓縮力曲線(下段)。由左至右分別為Frame 1~Frame 6。

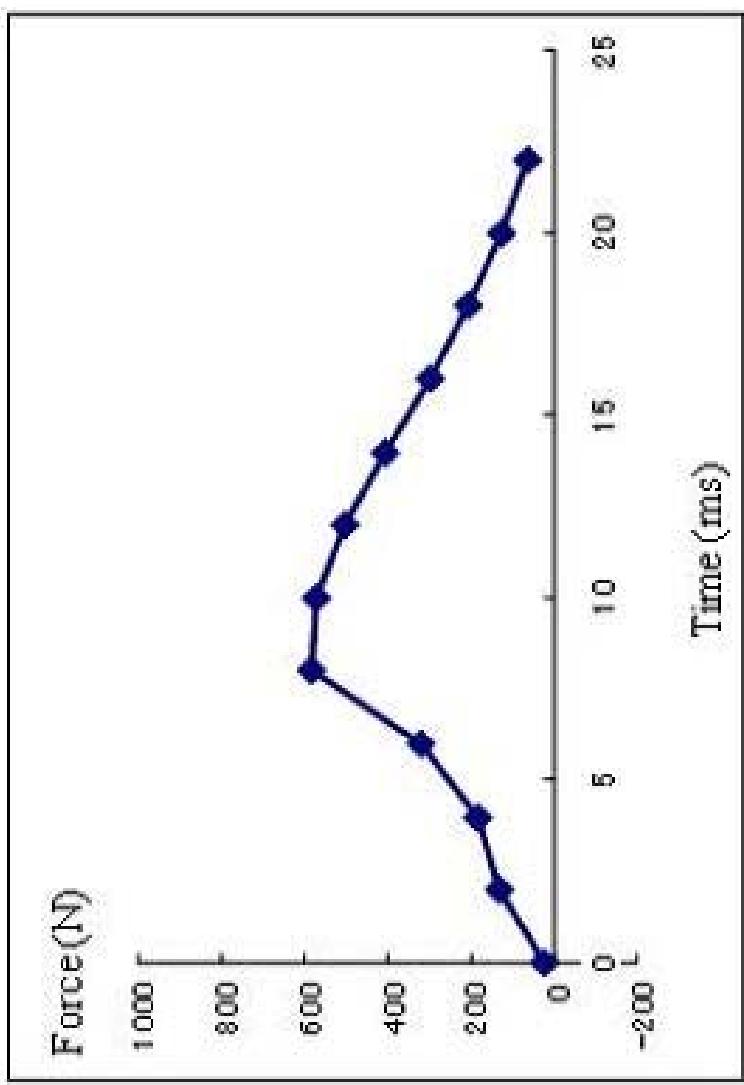
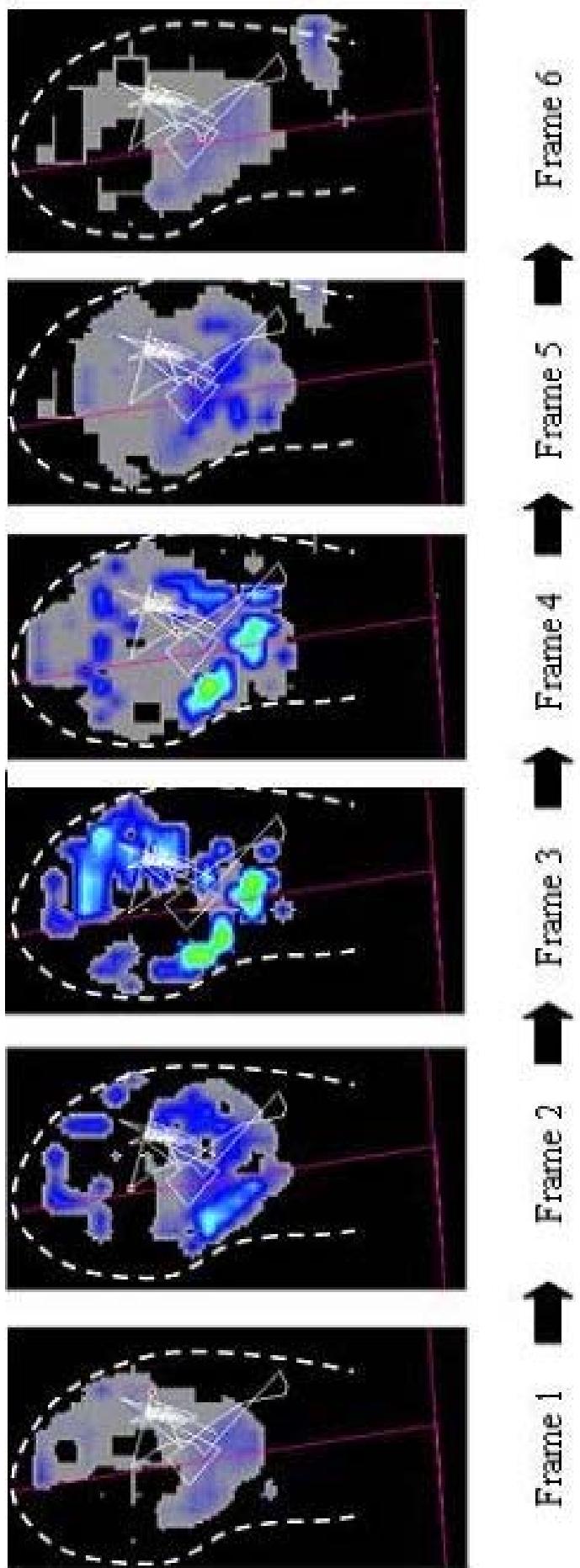


圖 4 當一隻大鼠在足底受到壓力時，足底的反應。

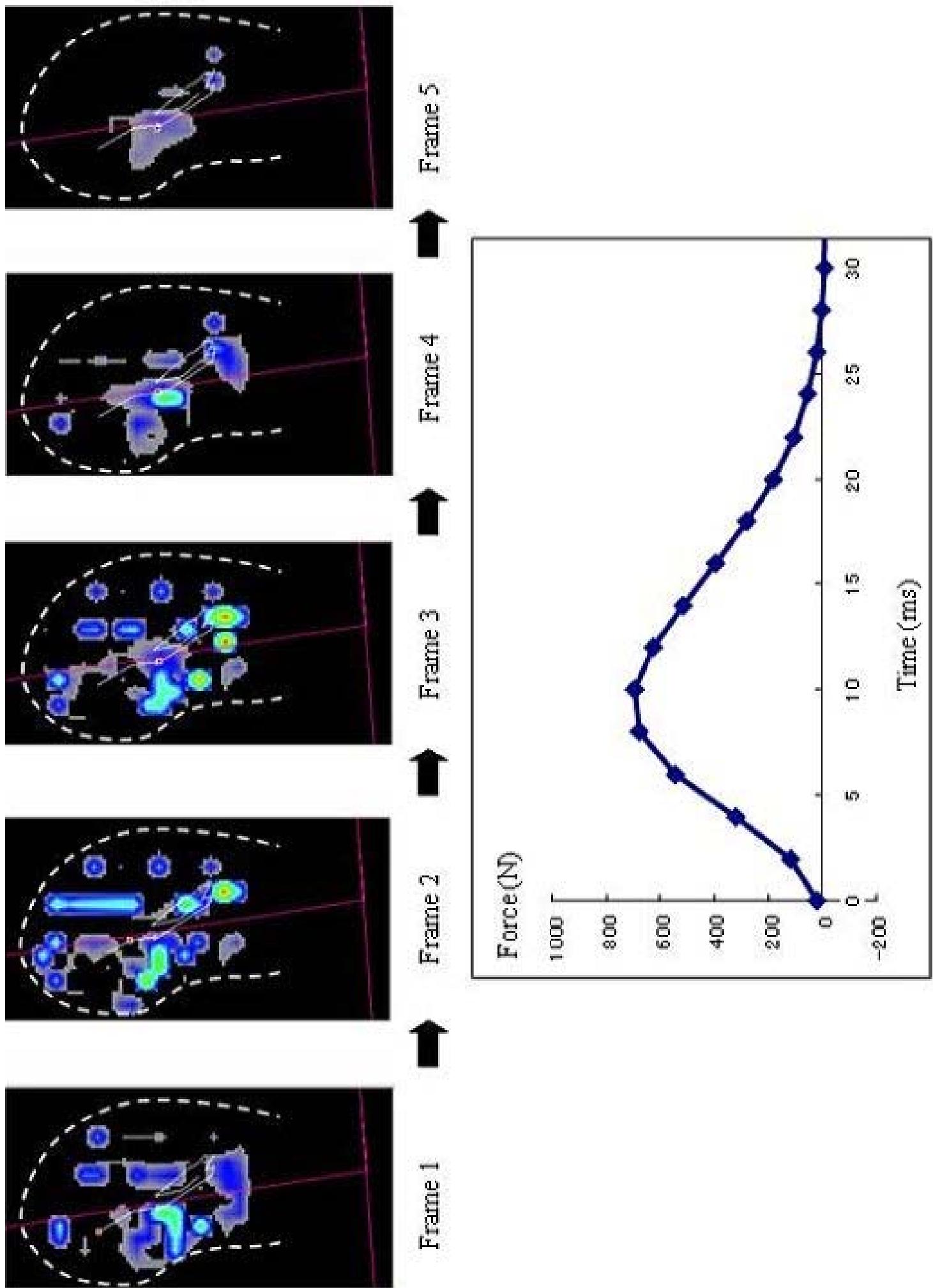


図5. ボールイシンパクト中に足甲部がかけられた圧力の総和（図中赤破線で囲まれた部位）は高い、圧力が集中している部位。

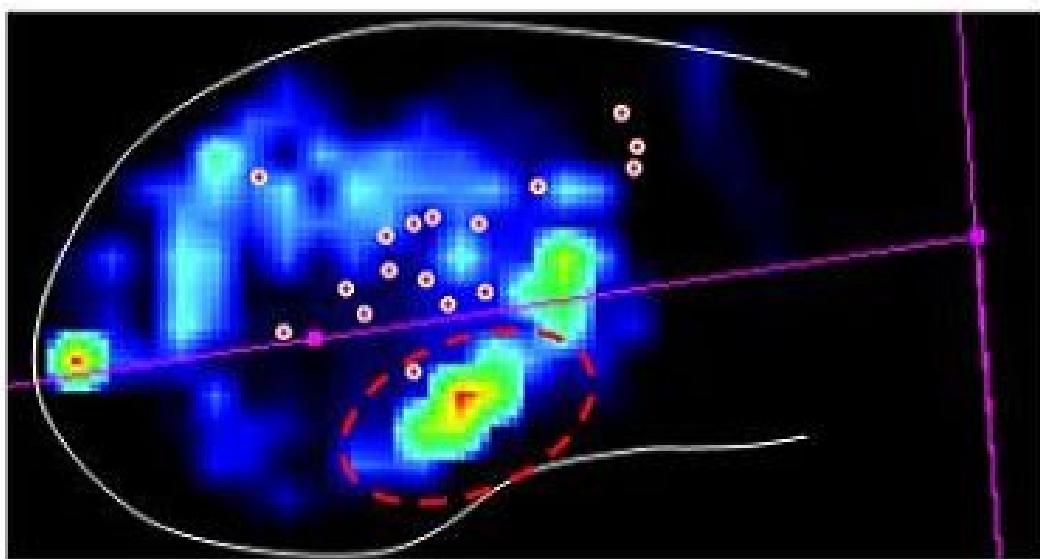
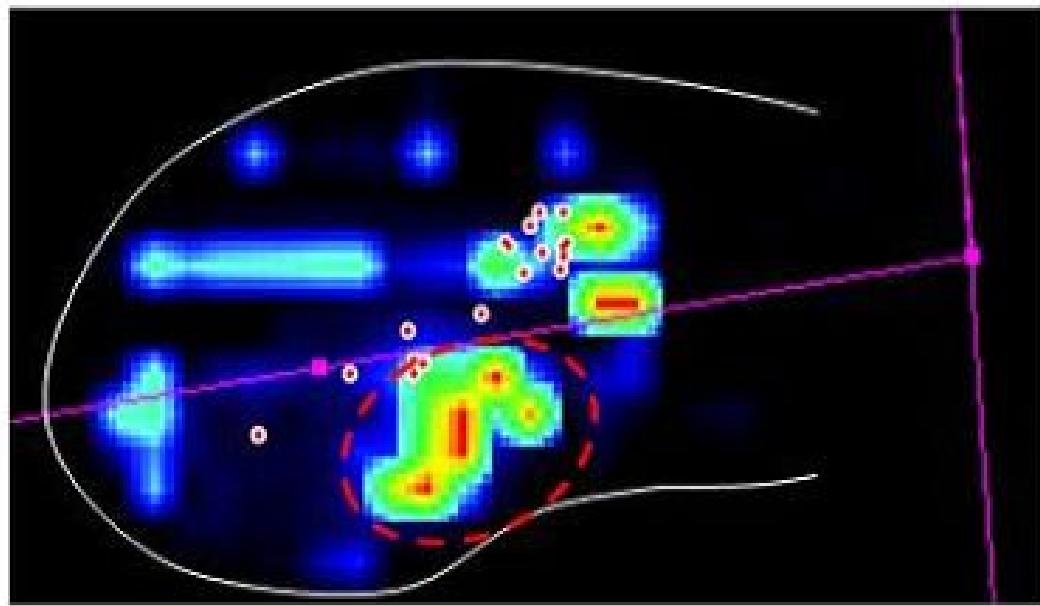


図6.新規に開発中のセガソナーの概要。圧力測定部(9×8cm) [1440]セガソナーを配置。



データロガーへの接続部

圧力測定部