



加速度センサーを用いた牛運動器疾患の早期診断システムの開発

宮本 亨^{1)*}, 堀野理恵子²⁾, 塩野浩紀³⁾, 高橋雄治¹⁾, 大橋 傳¹⁾, 中村正斗⁴⁾,
高田真人⁵⁾, 米山 満⁵⁾, 納本 淳⁵⁾

(平成19年8月20日 受付)

Development of an early diagnosis system of foot diseases in cows using acceleration sensors

Toru MIYAMOTO^{1)*}, Rieko HORINO²⁾, Hiroki SHIONO³⁾, Yuji TAKAHASHI¹⁾, Tsutai OOHASHI⁴⁾, Masato NAKAMURA⁴⁾
Makoto TAKADA⁵⁾, Mitsuru YONEYAMA⁵⁾ & Atsushi OKUMOTO⁵⁾

牛の運動器疾患に伴う歩行異常を早期に発見するシステムを開発するため、加速度センサーを用いた牛の歩行データ採取法およびその解析方法について検討した。牛の四肢および背中に加速度センサーを取り付け、歩行運動のデータを採取した。得られたデータについて歩行リズムの揺らぎ解析 (Detrended Fluctuation Analysis: DFA 解析) を行い、そのパターンと、典型的跛行モデルのデータを同様に DFA 解析して得られたパターンとの類似性を解析することにより、歩行スコアを計算した。この歩行スコアの再現性は良好であった。またパソコン上で操作できる歩行スコア算出ソフトウェアの開発もおこなった。このシステムを乳牛群 (後肢異常のあるもの8頭, ないもの20頭) に応用したところ、正常牛の歩行スコアはほとんどが0.1以下であったのに対し、後肢に異常のある牛では、0.2以上のスコアを示すものが多かった。したがって、このシステムは、蹄病などに起因する歩行異常の摘発に有効であると考えられた。

はじめに

肥育牛、泌乳牛の生産現場では生産性向上のため、効率的、集約的な飼育管理が行なわれているが、経済性のみを重視する結果、いわゆる生産病が多発している。特に蹄病をはじめとする運動器疾患は、繁殖障害、乳房

炎とともに乳牛における三大病のひとつとなっており、死産原因の17%を占めている (平成17年度家畜共済統計) ほか、増体低下や泌乳量低下の直接の原因ともなる。運動器疾患の対策には早期発見が最も重要であるが、多頭化された飼育環境の中では十分に監視の目が行き届かず、重症化してから発見されるケースが多い。また軽微な兆候を人の目で見分けるのは非常に困難であり、高感度で客観的な方法が強く求められている。そこで、動物の行動を理工学的な方法で捉えて疾病診断に応用する様々な試みが行われている。

例えば、動物の体表面にマーカーを取り付け、コンピュータを用いて歩行時におけるマーカーの移動軌跡の画像データを解析し、正常時における足動変化との比較により、装蹄異常や跛行状態等を検出及び診断する方法¹⁾、動物にロードセル (反力検出装置, すなわち荷重計) 上を通過させたときの地面反力の大きさや位置変動, 歩幅, 移

- 1) 動物衛生研究所
- 2) 東北農業研究センター
- 3) 動物衛生研究所 (現農業・食品産業技術総合研究機構本部)
- 4) 北海道農業研究センター
- 5) 三菱化学株式会社

* Corresponding author; Mailing address : Toru MIYAMOTO, Production Diseases Research Team, National Institute of Animal Health, 3-1-5 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-0856, Japan.
Phone & Fax : +81-29-838-7795.
E-mail : miyamoto@affrc.go.jp

動速度, 立脚時間等に基づいて, 動作の左右対称性を評価し, 歩行障害の有無やその重度といった健康状態を客観的に診断する方法²⁾などが特許公開されている。しかし, これらの方法は, 大規模な装置を必要とするため, 現場での自然な状態での診断には不適な面がある。比較的小規模な投資で診断する方法として, 中村らは牛の蹄にかかる加重の分布を測定することで蹄の状態を診断する方法を報告している³⁾。また最近, 坂本らは加速度センサーを蹄の診断を行う方法を報告している⁴⁾。加速度センサーは, 縦, 横, 垂直の3方向の動きを加速度量として1秒間に100回計測できる装置で, 体表面に装着することにより, 運動を計測できる。坂本らは, 加速度センサーを背中に装着して得られたデータを画像(リサージュ画像)として出力し, 歩行時の体の傾きから蹄の状態を把握することで, 削蹄の良否判断への応用を試みている。

一方, 歩行などの運動リズムの揺らぎを解析して疾病診断に利用する試みも行われている。Hausdorffらは, 健康な人の歩行間隔(一歩前進するために要する時間)を測定すると, その揺らぎがフラクタル・パターンを示すことを明らかにした⁵⁾。反対に, 転倒のリスクの高い高齢者やパーキンソン病やハンチントン病の患者の場合, 歩行リズムのフラクタル性が失われる傾向にあること, 「フラクタル性」の喪失と病気の重度とはほぼ一致していることを示し, 歩行リズムの解析が, 「転倒の危険」を警告する手段として有効であると述べている⁶⁾。

(補足:フラクタルとは, 一見無秩序な形のようにであるが, スケールを変えて観察しても, それ自身に相似な部分から成り立っている「自己相似性」の構造を表す。動物の血管の分布や植物の枝わかれのように自然界に広く見ることができ)

このような考えに基づいて, 加速度センサーを用いて歩行などの繰り返しリズム運動を計測し, これを解析することにより得られる歩行の「ゆらぎ」の数値から, 人の健康状態を診断するシステムの開発が進められている⁷⁾。運動リズムの解析には, DFA解析という手法が用いられる。DFA解析はフラクタル解析の1種で心拍数のような非定常的な生理学データを解析するために開発され, 時系列の長期相関性を解析するのに優れている^{8) 9)}。これまで牛の運動状態をDFA解析し疾病診断に応用した例はないが, これを用いることにより, これまで人の目では認識されなかったわずかな歩行の乱れを検出できる可能性がある。そこで本研究では, 歩行異常を早期に発見するシステムの構築を目的とし, まず加速度センサーを用いた牛の歩行リズムデータの採取法について検討し, 次に

正常牛および運動器疾患牛における歩行パターンの解析法の検討を行った。さらに, パソコン上で歩行データの解析を行うソフトウェアを開発し, 実際の牛群に応用して手法の有用性について検討した。

歩行センサー装着方法の検討

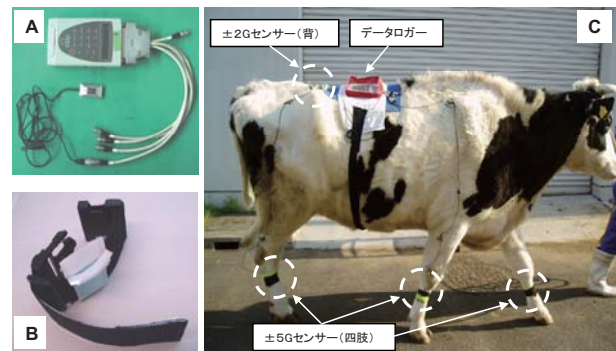
運動リズムデータの採取には, 加速度センサー(マイクroston社MA3)を用い, これを牛の四肢および背中に装着した(図1)。各センサーからの信号は, 背中に乗せたデータロガー(ユニパルス社UL84:8ch)に記録し, 歩行試験終了後, パソコンに落として解析に用いた。背センサーは, 歩行に伴う前後, 左右, 上下3方向の体の揺れを検出できるが, これらのデータは, 四肢のセンサーから得られたデータとの関連についての検討に用いた。

図1. 加速度センサーによる牛歩行データ採取法

A: 加速度センサー及びデータロガー

B: 四肢に加速度センサーを取り付けるための器具

C: 加速度センサー及びデータロガー装着部位



加速度センサー感度は, 足の場合, 比較的大きな加速度がかかるため, $\pm 5G$ (G は重力加速度)センサーが適当であった。背の場合は歩行の際の揺れが小さく, より感度の高い $\pm 2G$ センサーが適当であった。センサーの分解能は10msとした。

牛になるべくストレスを与えずにセンサーを脱着するため, ワンタッチで操作できるバックル式のベルトを作成しこれにセンサーを装着して用いた。またデータロガーについても, マジックテープで素早く脱着できる胴巻き上のケースに入れて使用した。これらを装着した牛を約30mの直線舗装道路上で, 人が一定の速さで引くことにより往復し, その間の加速度データを採取した。また, 歩行試験時にはビデオ撮影も同時行い, データ解析時の参考とした。

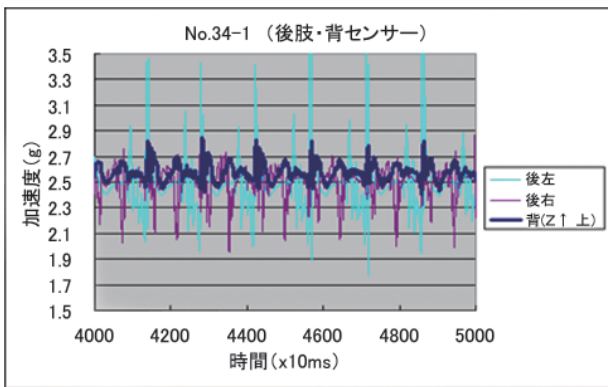
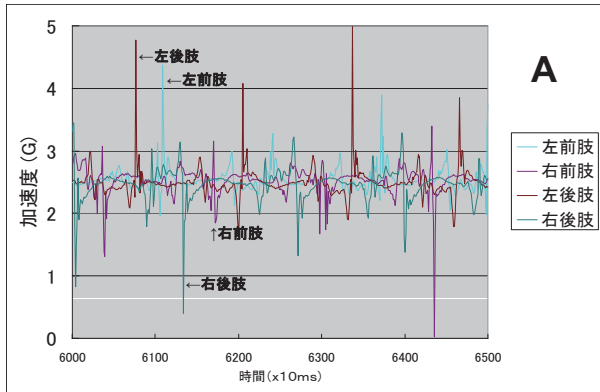
四肢の加速度データ

図2に実際に牛を歩行させて得られたデータをそのままグラフ化したものを示す。それぞれ, 足に装着したセンサー

図2. 加速度センサーデータ

A: 四肢センサーのデータ

B: 後肢センサーと背センサーの上下動との関係。矢印部分が一致している。(センサーは左右の足にそれぞれ反対向きに取り付けられているため、加速度の向きが逆になる。)



からのY軸方向(牛の前後方向の動きを感知)の加速度を表している。各足を前へ振り出す動きが加速度のピークとして検出されるが、右足に取り付けたセンサーはY軸が後方向の加速度を示すため、加速度データはマイナスとなる。グラフを見てわかるように、一般に後肢の加速度は明瞭であるのに対して、前肢の加速度は小さい。

背センサーから得られたデータのうち、Z軸(上下方向の動きを感知)の動きは足の動きと連動しており、背センサーだけでも後肢の動きが把握できる可能性が示唆された。ただし、その後の検討で、跛行のある牛ほどそのピークは不明瞭になる傾向にあり、安定したデータとして使用するためにはセンサー感度の改良が必要であると考えられる。

解析データとしては、各足の振り上げに伴う主ピークを特定し、各足のピークの間隔時間(秒)を解析データとして用いた。すなわち4本の足すべての加速度ピークを解析する場合は、左後肢→左前肢、左前肢→右後肢、右後肢→右前肢、右前肢→左後肢の各ピーク間隔(秒)のデータを用いた。また前肢、後肢に分けて解析する場合は、左右の前肢間、あるいは後肢間のピーク間隔デー

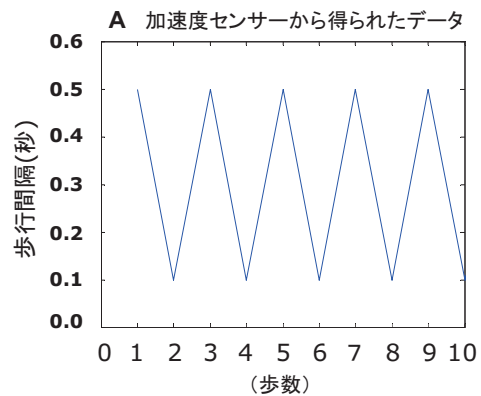
タを用いた。

なお、加速度ピークの検出およびその解析に関して、動物衛生研究所内牛による検討(平成17年分)については、三菱化学科学計算センターに依頼して行った。

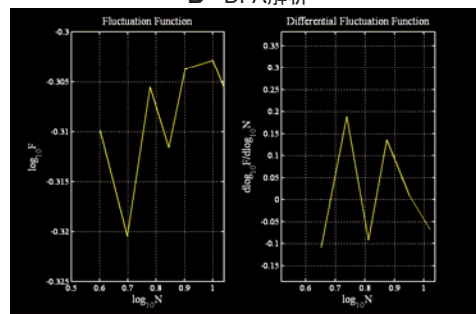
牛歩行データの解析法および歩行スコアの算出

まず、得られた牛の歩行データを直接DFA解析し、そ

図3. 跛行モデルとDFA解析を用いた歩行スコア算出方法(まず歩行間隔が極端に変動するモデルパターン(A)を想定し、これをDFA解析して得られた傾きの最初の4点の値をr1, r2, r3, r4とする(B)。実際の歩行間隔データも同様にDFA解析し、得られた傾きの最初の4点の値をx1, x2, x3, x4とする。両者の類似性をCに示した式によって計算して、これを歩行スコアとした。)



B DFA解析



C 典型的跛行モデルとの相似性の比較、計算

$$Score I = \frac{1}{3} \left(\frac{x2 - x1}{r2 - r1} + \frac{x3 - x2}{r3 - r2} + \frac{x4 - x3}{r4 - r3} \right)$$

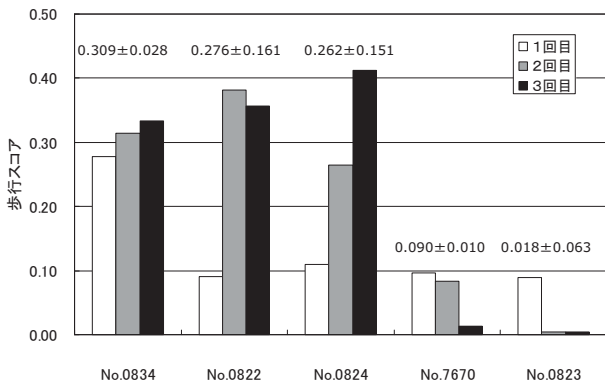
の「揺らぎ」と蹄の状態や歩行異常との関係について検討した。しかし、牛の歩行運動時における肢の加速度変動の揺らぎをDFA解析して求めたグラフについて、後肢に異常のある牛と四肢に異常のない牛を比較しても、具体的な診断指標作成に利用できるような明確かつ顕著な差は見出せなかった。

そこで、典型的な跛行モデルを想定し(図3-A)、そのDFA解析(図3-B)結果と、実際の測定によって得られた数値のDFA解析結果とを比較検討することにより歩行スコアを算出する方法について検討した。まず歩行間隔が極端に変動するモデルパターンを想定し、これをDFA解析して得られた傾きの最初の4点の値をr1, r2, r3, r4とすると、 $r1 = -0.1093$, $r2 = 0.1892$, $r3 = -0.0914$, $r4 = 0.1362$ となる。実際の歩行間隔データも同様にDFA解析し、得られた傾きの最初の4点の値をx1, x2, x3, x4とする。両者の類似性を図3-Cに示した式によって計算して、これを歩行スコアとした。スコアが1に近いほど歩行間隔の変動が激しく、跛行モデルパターンに似ていること、すなわち歩行リズムが乱れていることを表している。

歩行スコア測定の再現性

上記方法で算出した歩行スコアの再現性について確認するため、動物衛生研究所内飼養牛4頭について、3日間にわたり繰り返し歩行データを採取して、得られた歩行スコアを比較した(図4)。おおむね良好な再現性を示したが、No.0822, No.0824の1回目など一部大きく外れる値もみられた。この変動原因としては、立ち止まる、走るなど、歩行速度の乱れが影響していると考えられる。実際、大きくはずれたデータは立ち止まり回数が多く、解析に必要な有効なデータが不十分であった。また静止した状態のデータをそのまま解析した場合、スコアは低くなることが判明した。そこで安定した歩行スコア算出のため、以後の歩行データ採取では、立ち止まりなど歩行速度の乱れ

図4. 歩行スコアの再現性の検討



た部分のデータを取り除くこと、少なくとも2回は繰り返してデータを採取してその平均値を用いることとした。

歩行スコアと蹄の状態の比較

動物衛生研究所内で飼育している牛を用いて、平成17～平成18年度に2～3回加速度センサーによる歩行スコアを測定した。また同時に蹄の状態を観察し、歩行スコアとの関連について検討した。毎年放牧している牛(ホルスタイン種♀4頭, 黒毛和種♀3頭)の場合は蹄、歩行状態に異常は見られず、歩行スコアもほとんどが0.1以下であった(平均 0.053 ± 0.13)(図5A)。一方、周年舎飼いされている牛(ホルスタイン種♀2頭, ホルスタイン種去勢2頭)には歩行異常が多かった(図5B)。No.7670は、全期間を通じて歩行、蹄の状態は良好であり、歩行スコアは低い値を示した。No.0823は、H17年4月には跛行を示し歩行スコアも高値であったが、その後削蹄、放牧を行なったところ、跛行は見られなくなり、歩行スコアも低下した。No.0822は、両後肢とも、内蹄がえぐれた状態で、H18年2月削蹄時に過去の蹄底潰瘍痕を確認した。H17年4月からH18年2月にいたるまで跛行を示し、高い

図5. 動衛研飼育牛の歩行スコアとその蹄の状態

(A群は毎年春～秋放牧, B群はNo.0832を除き, 周年舎飼いされていた。No.0832はH17年の春～秋放牧。下の写真はB群各牛の左後肢蹄。)

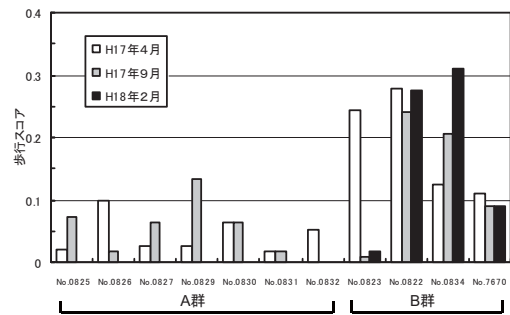
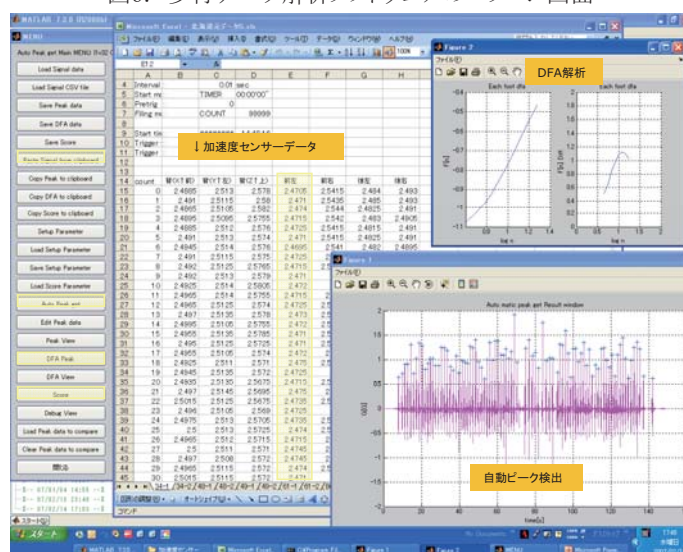


図6. 歩行データ解析ソフトウェアのパソコン画面



歩行スコアであった。No.0834は、H17年4月には跛行はなく、歩行スコアは低値であったが、H18年2月には跛行を示し、歩行スコアは高くなった。

以上の結果より、跛行モデルと実際の歩行データから得られたDFAパターンの類似性に基づいて得られた歩行スコアは、牛の蹄の状態や歩行の状態を反映しており、跛行診断に有効であると考えられた。また正常な牛の歩行スコアはほとんどが0.1であったのに対し、蹄の状態が悪く、跛行が認められる牛の歩行スコアは0.2以上を示したことから、このスコアを跛行の基準とすることとした。

歩行スコア算出ソフトウェアの開発

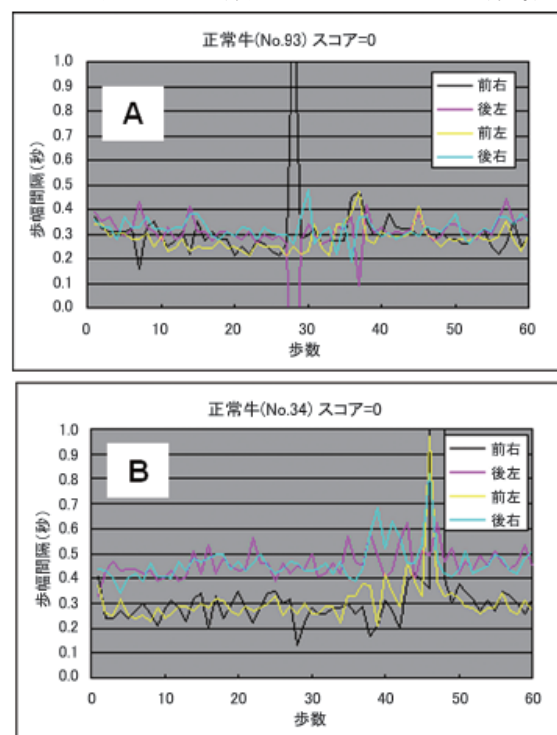
動物衛生研究所飼育牛の歩行データを元に歩行スコアを算出するソフトウェアを開発した。このソフトウェアは、加速度センサーから得られたデータから足の振り上げに伴う加速度ピークを自動的に検出する部分（「リズムのピーク自動検出手法に関する特許」として特許出願中）と、得られたピーク間隔データをDFA解析し、歩行スコアを算出する部分からなる。これらのソフトにマイクロソフトエクセルを併用することで、手元のパソコンで歩行データ解析が可能となった（図6）。

乳牛群における検討

蹄病が大きな問題となるは主として乳牛であるため、北海道農業研究センターの泌乳牛約28頭（後肢に異常が認められる牛11頭（うち後肢異常8頭）、認められない牛17頭）を用いて、歩行や蹄の状態と、上記ソフトウェアで算出した歩行スコアとの関連を調べ、この方法の有効性について検討した。歩行データ採取法は、動物衛生研

図7. 乳牛の歩幅間隔

- A：四肢の歩行間隔がほぼ一定な牛
- B：後肢→前肢、前肢→後肢の歩行間隔が異なる牛。（A、B牛とも蹄の異常はなかった。歩行間隔が大きく乱れている部分は立ち止まりがあった部分。）



究所飼育牛の場合と同様、各足および背中に5個のセンサーを取り付け、牛舎内のコンクリート通路約20mを往復させて採取した。

当初、得られた四肢すべての歩行間隔データ（左後肢→左前肢、左前肢→右後肢、右後肢→右前肢、右前肢→左後肢）を用いて解析したところ、約80%の牛が

歩行スコア0.5以上の異常値を示すという結果が得られた。これは後肢→前肢の歩行間隔が、前肢→後肢の歩行間隔より長いためであることが判明した。図7に示すように、乳牛の歩行間隔データをグラフに表すと、2種類に分類される。A牛は四肢の歩行間隔が0.3秒前後とほぼ一定であるのに対し、B牛では、後肢→前肢が0.4-0.5秒、前肢→後肢が0.2-0.3秒と大きく異なり、歩行スコア算出に用いた典型的モデルに近い動きをするためである。乳牛がこのような歩行パターンを示すのは、後部に大きな乳房を抱えているためと考えられる。

そこで、乳牛については後肢（左後肢→右後肢、右後肢→左後肢）、前肢（左前肢→右前肢、右前肢→左前肢）に分けて解析を行うこととした。その結果を図8に示す。後肢のピークデータを元に歩行スコアを算出した場合、後肢が正常な牛の歩行スコアはほとんどが0.1以下であったのに対し、後肢になんらかの異常が認められた牛はほとんどが0.2以上のスコアを示した。すなわち、後肢異常については、ほぼ正確に検出することができた。なお蹄、歩行状態が正常とされていたにもかかわらず歩行スコアが0.32と高値を示したNo.68については、この測

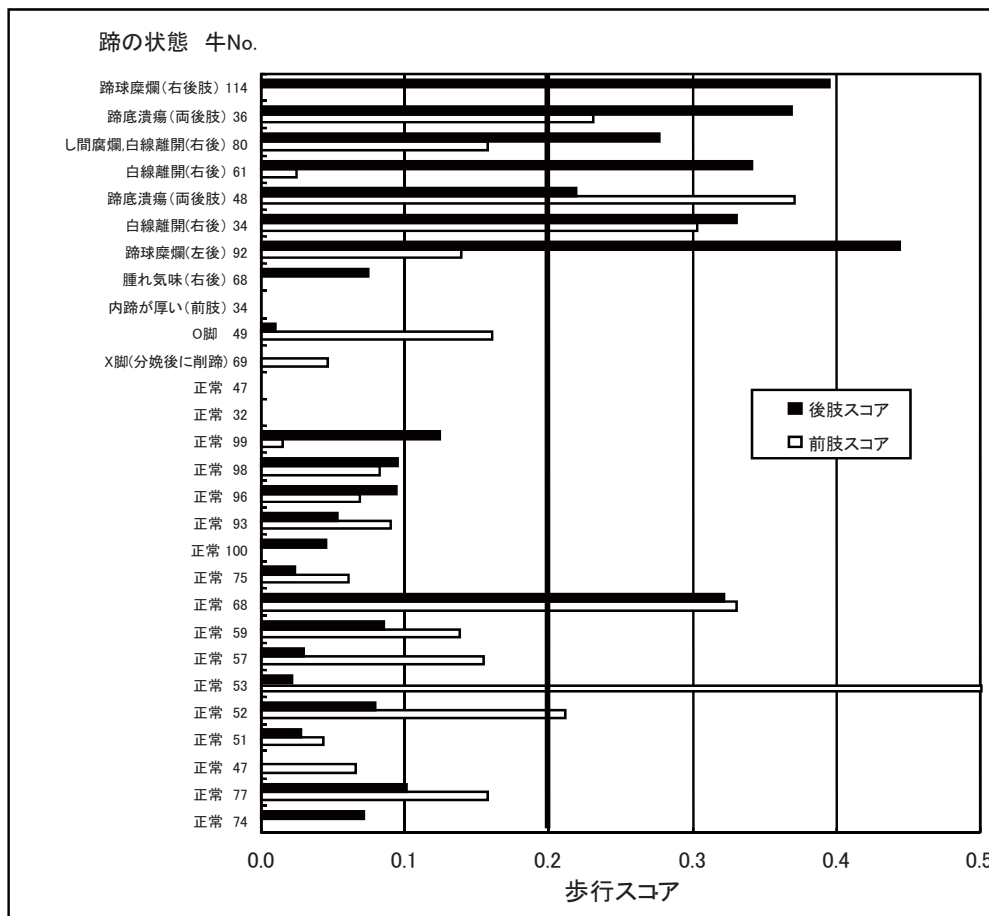
定後後肢異常が認められたことが確認されている。これは、この方法による蹄病早期診断の可能性を示すデータとして注目される。

前肢スコアについては、ばらつきが多く蹄の異常を反映しなかった。これは前肢振り上げ時のピーク強度が後肢に比べて小さく、そのピークを正確に検出できないことに原因があると考えられた。したがって前肢についてはピーク検出法の改良が必要であると思われる。ただ、乳牛の場合、多くの異常は後肢に好発するため後肢異常のみの検出でも十分有効性があると考ええる。

まとめ

以上のように、我々は加速度センサーによって牛の四肢の動きを捉え、そのデータをもとに歩行スコアを算出する方法およびその解析に用いるソフトウェアを開発した。これを乳牛に用いることにより、蹄病などに起因する歩行異常の摘発に有効であることが確認され、「移動運動状態の診断プログラム、移動運動常置の診断装置及び移動運動状態の診断方法」として特許出願中である（宮本亨, 堀野理恵子, 塩野浩紀, 高田真人, 納本淳, 米山

図8. 北海道農業研究センター乳牛群における歩行スコアの測定



満：特願2007-109379)。しかし蹄病の早期診断への有効性についてはまだ実証されていない。この点について明らかにするため、引き続き、北海道農業研究センター等の協力を得て、定期的なデータ採取を行っている。

このシステムは、技術的には発展途上であり、多くの問題点が残されている。まず、今回は典型的跛行モデルとの類似性を元にスコア化を行ったが、この基準となるモデルについても検討が必要である。上述のように乳牛の歩行は、正常牛であっても後肢→前肢と前肢→後肢では、歩行間隔が異なり、四肢すべてのデータを使った解析ができない。したがって、乳牛特有の四肢の動きを考慮した基準モデルの検討が必要と思われる。

また四肢すべてにセンサーを取り付けるのは実用上大きな問題がある。図2-Bに示すように背センサーの上下動ピークは後肢ピークとよく一致する。したがって背センサーを改良して感度を上げること、ピーク検出法の改良により、背センサーのみで、足センサーを用いることなく、後肢歩行スコアを算出できる可能性がある。現在これについても検討中である。この方法の弱点としては、安定した歩行スコアを得るために比較的長距離（約20m、歩数にして100歩）程度牛を歩行させる必要があることである。しかし背中センサーだけで歩行スコアを算出できれば、ミルクパーラーでの搾乳への行き帰りにデータを取得するなどの方法も可能であろう。また解析に用いるソフトウェアもまだ操作がやや煩雑であり、プログラミング等も合わせて改良していかなければならない。

このように検討すべき点は多々あるが、リズム解析を応用した手法は、牛の行動あるいは生理諸元に応用することにより、疾病の早期診断や飼養管理技術の向上につながるものと期待され、引き続き研究が必要な分野であると考えられる。

参考文献

1) メリーランド州立大学；動物の歩行障害を発見す

るための方法及び装置。特表2004-513613号公報(2004)。

- 2) 千田廉, 折戸謙介, 松田浩珍；跛行診断システム。特開2003-228701号公報(2003)。
- 3) 中村正斗, 森岡理紀, 矢用健一, 伊藤秀一.；分娩前に削蹄したフリーストール飼養乳牛の分娩後における蹄形状と蹄荷重変化。日本畜産学会報76(2), 183-190(2005)。
- 4) 坂本志摩子, 嵐 泰弘, 畠中みどり, 松岡 健, 生田健太郎, 三隅隆也, 白鳥典彦, 古本 彰, 星 信彦, 千田 廉；人工的に蹄バランスを変えた乳牛の歩様解析。第139回日本獣医学会講演要旨, 182(2005)。
- 5) Peng, C.-K., Buldyrev, S.V., Havlin, S., Simons, M., Stanley H.E. & Goldberger A.L.；Mosaic organization of DNA nucleotides. Phys. Rev. E49,1685-1689(1994)。
- 6) Peng, C.-K., Havlin, S., Stanley H.E. & Goldberger A.L.；Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. Chaos 5(1), 82-87(1995)。
- 7) 荒井邦晴, 米山満, 宮島佐介；生体リズム検査装置及び生体リズム検査方法。特開2000-166877号公報(2000)。
- 8) Hausdorff, J.M., Peng, C.K., Ladin, Z., Wei, J.Y. & Goldberger, A.L.；Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. J. Appl. Physiol. 78(1), 349-358(1995)。
- 9) Hausdorff, J.M., Mitchell, S.L., Firtion, R., Peng, C.K., Cudkovicz, M.E., Wei, J.Y., Goldberger, A.L.；Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. J. Appl. Physiol. 82(1), 262-269(1997)。

Summary

Development of an early diagnosis system of foot diseases in cows using acceleration sensors.

Toru MIYAMOTO^{1)*}, Rieko HORINO²⁾, Hiroki SHIONO³⁾, Yuji TAKAHASHI¹⁾, Tsutai OOHASHI⁴⁾, Masato NAKAMURA⁴⁾
Makoto TAKADA⁵⁾, Mitsuru YONEYAMA⁵⁾ & Atsushi OKUMOTO⁵⁾

To develop a system for early diagnosis of foot disease, we examined the methods for collection and analysis of walking motions of cattle using acceleration sensors. The walking motion data were obtained from five sensors attached to the four legs and backs of cattle. The data were analyzed using Detrended Fluctuation Analysis (DFA). The walking score was determined by calculation of the similarity between the model limp pattern and the pattern from cattle. The reproductivity of the score among repeated measurements was acceptable. We also developed software that could determine peaks automatically and calculate the score on a personal computer. To confirm the availability of this system, we measured the walking scores of cows (8 cows with disease in a hind foot and 20 cows without disease in any hind foot). The scores for normal cows were less than 0.1; however, those for most cows with foot disease were more than 0.2. These data suggest that this system is available for diagnosis of foot disease.