原 著

腰 椎 々 間 板 の 力 学 的 研 究

— 偏 心 荷 重 を 中 心 と し て —

A Dynamic Study on the Lumbar Intervertebral Disc

鈴 木 進*

SUSUMU SUZUKI, M.D.

日常診療に当って腰痛を主訴として来院する患者は非常に多くを数え、諸家の報告をみても整形外科領域では、外来患者の約20%前後の比率を占めているのは一般的現象である。また腰痛の起因疾患の範囲もきわめて広く、原因的に分類してみると、①椎間板によるものから、②腰椎構築上の異常によるもの、③軟部組織に由来するもの、④炎症によるもの、⑤外傷によるもの、⑥内臓疾患によるもの、⑦腫瘍によるもの、⑧代謝障害によるもの、⑨心因性のものまで複雑多岐にわたっている。

元来、多くの臨床家により腰痛の原因を解明すべく、臨床的にも実験的にも種々の立場から研究がなされ、その業績を挙げつつあるが、現在なお腰痛の中にはその発生機序の明瞭でないものも多く、したがって治療面においても困難に直面する場合も少なくない。それだけに腰痛に関する研究も興味深く、まだ、未知の分野もあり難解な問題が多く存在するといっても過言ではない。

人類が進化に伴い、獲得した起立姿勢によって腰椎の生理的前彎を余儀なくされた結果、脊柱全体の中で、最も強固な椎体、靱帯組織を持ちながら一方腰椎が最も傷害されやすいと言われ、中でも腰仙移行部は前彎の頂点としてまた最も大きな可動性を有するため臨床的に多くの問題をはらんでいる。前述のごとく腰痛の起因性疾患には多く

を数えるが、その中でも椎間板変性に由来するものが最も多いとされ、その理由として腰椎々間板は緩衝器および安定性保持の器官としての役割を果たしているが、脊柱の構築組織中でも最も大きな荷重にさらされ、屈曲伸展および捻転等の多元的運動も強制され、その上加令の変化等の影響を受けて、変性変化におちいり易いことがあげられている。

病理組織学的には、平田⁵⁾らによると生理的に30才頃より椎間板変性を認め、中でも髄核のゲル構造減退、線維粗大化、基質顆粒状崩壊などの変化が線維輪に先んじて始まると述べており、このような加令の変化に加えて外傷および多元的運動を強いられることが、種々なる椎間板症を引き起こすと考えられる。

1948年、Lindblom⁹⁾ & Perey²²⁾は椎間板内に生理食塩水や造影剤を注入し、椎間板内圧の上昇及び疼痛を発現させ、さらに局所麻酔剤の注入により疼痛が消失することより、椎間板自体に何んらかの刺激受容器のある事を報告して以来、椎間板に関する研究が一躍脚光をあびるようになった。1954年、Hirsch, Nachemson⁶⁾らは、腰椎の前後屈により健康第4腰椎々間板が約30%の体積膨脹をきたすと報告し、1958年、Virgin²⁹⁾は、腰椎々間板が elastic properties であることを報告している。また1957年 Perey²²⁾は椎体の骨破壊荷重量を測定し、その値は300~700 Kpとし高年令では低下すると述べ、荷重が腰椎々体や椎間板に及ぼす影響を力学的立場より究明している。1961年、Naylorは髄核内圧は、①髄核の polysaccha-

* 順天堂大学医学部助手 (整形外科学)
Department of Orthopedic Surgery, Juntendo
University, School of Medicine.
[Apr., 25, 1974 受付]

ride の量, ② 髄核内の protein gel の濃縮程度, ③ 髄核内腔の広さ, ④ 線維輪の弾性度などによると報告している。

また, 解剖学的・X線検査の立場より, Arms-trong²³⁾, Spurling²⁵⁾ らは腰椎々間関節の機構は単なる面関節であり, force-bearing structure ではないと述べ, 髄核は圧力に対して他の流動体と, 同様すべての方向に均等に圧を伝える事を報告している。我国でも1968年, 内西²⁸⁾は腰椎荷重軸に関するレ線学的研究で, 腰椎における脊椎上部よりの荷重は第4腰椎(L₄)にほぼ垂直にかかり, L₄は軀幹の前後屈時には常に水平位を保ち, L₄₋₅, L_{5-S}₁に負荷がかかると報告している。

1967年吉沢³¹⁾は光弾性実験的立場より, 腰部前彎度と荷重相との相互関係について研究し, 前屈位で各椎間はほぼ垂直の圧縮荷重を受けるが, 中間位, 後屈位では圧縮応力と剪断応力がベクトルとして働き, ほぼ垂直の圧縮応力を受ける前屈位で内圧が増加するといひ, 病変椎間板は L₄₋₅ に, 最も好発しやすい事を述べている。

動物実験による椎間板の研究も多く, 1967年花岡⁴⁾は猿を用いて繰返し衝撃が腰仙部椎間板に及ぼす影響に関する実験的研究より, 正常椎間板は大なる衝撃の吸収力・緩和能を有するが, 損傷を受けた椎間板は衝撃に対してその吸収緩和の能力を損じ, 易損性で高度の変化をきたすと述べている。

物理学的立場からは, 1958年, Nachemson¹¹⁾が椎間板内圧を測定して以来, わが国でも力学的挙動が椎間板に与える影響を内圧の面から解明しようとする試みが多くみられるようになった。また数々行なわれている椎間板内圧測定法を分けみると大きく2つに分類できる。

第1の方法は液体などを媒体として椎間板外に誘導した圧を間接的に測定する方法であり, 第2の方法としては, 針型圧力計を直接椎間板に挿入して, それに受ける圧を直接的に測定する方法である。前者に属するものとしては古くより1951年Naylar & Smare³⁾らが椎間板内圧を水銀で満した Open needle を介して取り出して絶対圧測定

を行ない, 平均2~3 Kp/cm²であるとし, これは年令と共に小さくなると述べている。また1960年Nachemson¹²⁾は髄核内に挿入したポリエチレン・チューブ膜を使用して, それに感ずる圧を, 水を満した細長いパイプで取り出し, 椎間板外の圧力トランス・デューサーに導き測定を行ない, 38屍体, 121椎間板の加圧時内圧について報告し, 中等度変性までの髄核ならば加圧により, すべての方向にその圧を伝え流体とみなし得ると述べている。

わが国では1965年, 有田¹⁾らは, 三方活栓を用い, ToYoTA半導体小型圧力変換器に接続し注射針で造影剤を髄核内に注入することにより, これらの間を hydrostatic な状態とし造影剤注入時にみられる圧変化を電気変化にかえ, これを増幅記録し圧測定を行ない, 椎間板の変性と内圧との関係について報告し, Discogram による変性度と, 椎間板内圧の変動の間には明らかな相関々係があり, 変性の進むほど内圧は低くなる傾向を示すと述べている。

以上のこれらの方法は, いずれも受圧部分と誘導装置との間における時間的なズレや受圧部および誘導部の歪みによる誤差はさけられない。また1970年, 奥島²⁰⁾は針の先端より10mmの所にビニール膜にて被包された開窓部を有する内圧測定針を作成し, 髄核に加わる内圧を開窓部膜面で受け水を媒体としてトランス・デューサーに導き, 屍体・生体における髄核内圧の動的測定を行ない, 正常椎間板では, 加わった外力の約37%が髄核内圧として示されるにすぎず, 63%は支持組織に緩衝・吸収されると述べている。この方法も誘導中の歪みによる誤差はさけられず, また受圧部分と誘導装置との間における時間的なズレのために, 内圧の急激な変化をとらえ難い上, 動的測定に適さないという欠点がある。

一方, 後者に属するものとしては, 1965年, 水野, 川村¹⁰⁾は, 椎間板髄核内に挿入できる超小型の圧力トランス・デューサーの試作改良を重ね, 圧の変化を直接電気抵抗の変化として測定できる半導体感圧素子を開発し, これを封入した針

型圧力計を直接椎間板内に挿入して内圧測定を行ない、5°の前・背・側屈荷重時にはいずれの方向にも垂直荷重時の内圧に較べて約40%増加したと述べ、動的測定の可能なことを報告している。この方法によれば受圧部分と誘導装置との間の時間的なズレや変圧部および誘導部の歪みによる誤差は解消されるが、感圧素子の温度変化に対する不安定をさける事はできなかつたと述べている。

さらにこの問題点を解決する方法として、1970年、兼松⁸⁾は豊田中央研究所で開発された半導体ひずみゲージを応用した注射針型小型圧力計を用いて、針の先端に受ける圧変化を直接測定し、屍体・生体における髄核内圧の動的測定を行なって変性の少ない椎間板では髄核だけがforce-bearing structureとして働くことと述べている。この方法によれば時間的なズレもなく受圧部の歪みによる影響もその二重構造によって除外されており、また温度変化に対する不安定さもなく、正確な測定値を得ることが可能であると述べている。

1972年教室、小林、原らもトヨタ超小型細管圧力計を用いて、ヒト剖検例を用いて腰部椎間板の力学的挙動につき種々の検索を行ない発表した。

以上のごとく腰部椎間板についての研究は、古くより形態学的、組織学的、生化学的、物理学的に多方面よりなされている。著者も腰部椎間板の力学的挙動については興味を持つところであり、とくに臨床的にしばしば行なわれる脊椎後方固定の効果を髄核内圧の変動の面より究明することが必要であると考えられるが、この点についての研究がいまだ不十分である。

そこで著者は今回、偏心荷重時における椎間板髄核内圧測定を基礎実験として行ない、それをもとにして脊椎後方固定が固定椎間板および、その隣接椎間板におよぼす影響を解明すべく本実験を行なった。

実験方法

I 実験対象

成熟ヒツジ屍体例の21体より採取した新鮮下部腰椎の41椎間板とヒト剖検例の5体より採取した新鮮下部腰椎の10椎間板である。椎体採取後ただ

ちに-20°Cのdeep freezerに保存して椎間板の変性を防ぎ、できる限り1~2日以内に実験を行なった。

実験椎体の上下縁は椎体軸に対して、直角にしてendplateに近い所でsaw cutし、下部椎体の一端をステンレス製カップに歯科用即効レジンで固定した(図1)。

被検体はヒツジ屍体例では一椎間板=椎体のもの11例(このうち脊椎後方固定を行なったもの5例)、三椎間板、四椎体のもの10例(同一体で脊椎後方固定も行なった)、ヒト剖検例では一椎間板、二椎体のもの10例(このうち脊椎後方固定を行なったもの6例)を実験材料として使用した。

脊椎後方固定は棘突起に双方より、2枚の金属

図1 実験装置への実験試料の装着

図2 脊椎プレートによる後方固定

図3 ヒツジ脊柱のレ線像

プレートを用いネジ固定した。三椎間板例では中央部椎間を固定した(図2)。

付：ヒツジの脊椎々間板の構造

ヒツジの脊椎々体の丈は細長く椎間板は椎体にくらべて薄く、人間の椎間板が椎体の約3分の1の厚さを有するのに比べ、ヒツジの椎間板は相対的にかなり薄く、約10分の1(図3)であるが髄核は乳白色真珠様光沢を呈しており、構造的には人間の椎間板とほとんど差異はないと思われるが後部脊椎支持組織構造に若干の差異が認められ弱いように考えられた。

付：椎間板の変性度

実験終了後次に示す Nachemson の分類に従い椎間板の変性度を肉眼的に分類した。

〔Ⅰ度〕 髄核はゼラチン様の光沢をもち線維輪と明確に境界され、線維輪の走行の乱れはない。

〔Ⅱ度〕 髄核はゼラチン様であるがやや光沢を失い周囲の線維化が始まっているものの、線維輪との境界明瞭であり、線維輪の走行も乱れてないもの。

〔Ⅲ度〕 髄核の線維化が全体に拡がり白色を帯びているが軟らかく、線維輪との境界やや不明瞭なもの。

〔Ⅳ度〕 髄核は線維様で灰白色を呈し、軟性乏しく線維輪との境界は不明瞭で、線維輪に亀裂を認めるもの。

〔Ⅴ度〕 髄核・線維輪共に粗造化し黄色～褐色を呈し、表面に亀裂と陥凹を認める。

以上の分類に従うとヒツジ屍体例では、ほとん

どⅠ～Ⅲ度(主にⅡ、Ⅲ度)であり測定可能であった。ヒト剖検例では3体、6椎間板がⅢ度で、2体、2椎間板はⅣ～Ⅴ度であり、Ⅳ～Ⅴ度のもは測定不能であった。

Ⅱ 実験項目

偏心荷重時の椎間板髄核内圧の変化および脊椎後方固定が固定椎間板とその隣接する椎間板に及ぼす影響を検討するため、次のような測定の項目を選んだ。

④ ヒツジ椎間板の偏心荷重時における髄核内圧変化

(1) 非固定椎間群

(イ) 一椎間板、二椎体のもの

(ロ) 三椎間板、四椎体のもの

(2) 後方固定椎間群

(イ) 一椎間板、二椎体のもの

(ロ) 三椎間板、四椎体のもの

⑤ ヒト椎間板の偏心荷重時における髄核内圧変化

(1) 非固定椎間群

一椎間板、二椎体

(2) 後方固定椎間群

図4 超小型半導体圧力変換器(MPN-3型)

図5 MPN-3型の3本組構造

III 実験装置

1) 圧力検出装置

豊田中央研究所（五十嵐ら）が開発した超小型半導体圧力変換器を利用した注射針型圧力計（M PN-3 型）（図 4）を用いた。この圧力計の構造は受感細管筒と外筒注射針とマンドリンよりなり（図 5），まず目的椎間板に外筒注射針を挿入してマンドリンを抜き、受感細管筒を入れ換え測定するようになっている。また受感細管筒の細部構造は P 型，n 型半導体ひずみゲージが硬質接着剤によりガラス円筒中に埋込まれ，一端は固定され，他端は厚さ 0.01mm の銅-diaphragm に接着されている（図 6）。

図 6 受感細管筒先端部構造

またこの受感部は外径 0.8mm の二重円筒構造になっており，曲げなどの影響を受けないようになっている。温度変化による影響も P 型・n 型半導体ひずみゲージの組み合わせ方により 20°～40°C の間では零点移動は 1°C あたり 0.1% F S 以下のすぐれた特性を持っている（図 7-a, b）。なお圧力—出力特性は 50 kg/cm² までは直線的に変化する（図 8）。

2) 圧縮荷重装置

ヒツジ椎間板の圧縮には東測精密工業の歪応力精密測定装置を用いた（図 9）。この装置は合金，銅，アルミ，高分子材料等あらゆる試料のクリープ特性を測定するために設計製作されたもので，引張りクリープ，曲げクリープ，圧縮クリープ試験ができるようになっており，荷重範囲は 0～50 kg で変位量は 0～2 mm，チャック間の可変は 0～50mm である。

ヒト椎間板の圧縮にはインストロン型島津オートグラフ IS 5000 を使用した（図 10）。この装置は

図 7-a 温度によるゼロ点移動

図 7-b 温度補償回路

図 8 圧力—出力特性

図 9 歪応力精密測定装置（東測精密工業）〈左〉
直流増幅器 〈中上〉
動的ひずみ測定器 〈右〉
オシログラフ 〈中下〉

図 10 インストロン型島津オートグラフ IS 5000
直流増幅器
動的ひずみ測定器
オシログラフ

負荷速度を自由に変えることができ、経時的变化をみることができるようになっている。

3) 記録装置

荷重の測定は試験器に付属したロードセルを介して動的ひずみ測定器により増幅し、電磁式オシログラフに記録される。

髄核内圧の測定は、針ダイヤフラムに受感した圧力を注射針型圧力計を介して直流増幅器 THA-3 型に導き電磁オシログラフに記録する (図11)。

4) 髄核および椎間板横断面積の測定装置

図 11 実験装置シエマ

図 12 万能投影機

万能投影機 (図 12) で 5 倍に拡大し、トレースしたものをプランメーターで測定した。

5) 偏心荷重の方法

図13のごとく、ヒツジでは直径 2.5mm, ヒトでは直径 7mm の金属棒を用いて、脊椎々体の前方、中心、後方、側方と椎弓部にそれぞれ圧縮荷重を加え、荷重量はヒツジでは、10kg, 15kg, 20kg, ヒトでは 50kg をそれぞれ加えた。

なお、図14は偏心荷重時における椎間板の態度を示す。

6) 超小型半導体圧力変換器の刺入方法

外筒注射針を軟骨板に平行に且つ針尖が髄核のほぼ中央に位置するように椎間板の前方より刺入した後、マンドリンを抜き受管細管筒を入れ換えて偏心荷重を加え髄核内圧を測定した。

図 13 偏心荷重の位置

- 1: 前方荷重 4: 側方荷重
2: 中心荷重 5: 椎弓部荷重
3: 後方荷重

図 14 偏心荷重時の椎間板の態度

また、針尖が髄核内にあればその位置、方向に関係なく、ほぼ同等の髄核内圧を示し髄核が流体と同様に反応することを確認えた(図15, 17).

実験結果

(A) ヒツジ椎間板の偏心荷重時における髄核内圧変化.

1) 脊椎非固定椎間群

(イ) 一椎間板非固定群の髄核内圧変化(表1)

10kg 荷重において前方荷重での髄核内圧は4.4~8.6kg/cm²で平均 6.4kg/cm², 中心荷重時; 4.3~5.6kg/cm², 平均 5.1kg/cm², 後方荷重時; 4.8~7.2kg/cm², 平均 5.4kg/cm², 側方荷重時; 6.0~8.8kg/cm², 平均 7.2kg/cm², 椎弓部荷重時; 10.2~14.0kg/cm², 平均 12.4kg/cm²である.

20kg荷重において, 前方荷重での髄核内圧は9.8~14.8kg/cm², 平均 12.0kg/cm², 中心荷重時;

図 15 超小型半導体圧力変換器の刺入レ線像

図 16 各偏心荷重時における一椎間板非固定群の髄核内圧平均値(ヒツジ)単位 kg/cm²表 1 各偏心荷重時における一椎間板非固定群の髄核内圧測定値(ヒツジ) 単位: kg/cm²

症例	偏心荷重	10 kg 荷 重					20 kg 荷 重				
		前方荷重時	中心荷重時	後方荷重時	側方荷重時	椎弓部荷重時	前方荷重時	中心荷重時	後方荷重時	側方荷重時	椎弓部荷重時
1		5.8	4.3	4.8	6.2	10.2	14.8	10.4	10.8	15.1	22.2
2		6.2	5.6	5.8	6.0	12.4	13.0	11.8	12.4	14.5	25.2
3		4.8	5.6	7.2	7.2	12.4	10.0	12.0	12.2	15.7	28.0
4		4.4	4.8	6.6	7.1	12.6	9.8	9.8	12.0	13.9	23.2
5		6.8	5.2	5.8	8.8	13.2	11.6	8.0	10.0	12.3	20.8
6		8.6	5.6	5.4	7.6	14.0	13.0	8.2	9.4	12.9	23.4

9.8~12.0kg/cm², 平均10.0kg/cm², 後方荷重時; 9.4~12.4kg/cm², 平均11.1kg/cm², 側方荷重時; 12.3~15.7kg/cm², 平均14.0kg/cm², 椎弓部荷重時; 20.8~28.0kg/cm², 平均23.8kg/cm²である.

図16は10kg, 20kg 荷重時の髄核内圧の平均値を示す。これより明らかなの如く荷重量を増加すると、各偏心荷重時の髄核内圧もほぼ比例して増殖し、髄核内圧の相互関係も同じ傾向を示すことがわかった。

なお、圧力検出計の曲げに対する影響があるか否かを確かめるため、圧力検出計の方向を変え、同じ偏心荷重位置と荷重量を加え測定した。図17は圧力検出計を前方、前斜方、右側方、左側方より刺入した場合の髄核内圧値を示すもので、方向に関係なく同等の値を示し曲げの影響のないことを確かめえた。

図 17 針尖の方向と髄核内圧関係 (10kg 偏心荷重時)

(ロ) 連続三椎間板非固定群の髄核内圧変化
(表 2 左)。

各偏心荷重時の髄核内圧は、荷重量にほぼ比例

表 2 各偏心荷重時における連続三椎間板の非固定群および中央椎間部固定群の髄核内圧測定値 (ヒツジ)

(): 15kg 荷重 単位: kg/cm²

椎間板高位	症例	非 固 定 群					固 定 群 (中 央 椎 間)				
		前方荷重時	中心荷重時	後方荷重時	側方荷重時	椎弓部荷重時	前方荷重時	中心荷重時	後方荷重時	側方荷重時	椎弓部荷重時
最上椎間	1	5.2(7.8)	4.6 (6.4)	4.4 (6.4)	5.3 (7.6)	9.8(17.2)	5.0(8.0)	3.8 (6.0)	4.0 (6.2)	5.5 (7.9)	8.4(13.8)
	2	6.0(9.6)	4.6 (7.0)	4.8 (7.4)	6.6(10.4)	16.8(24.0)	6.2(9.2)	4.4 (6.8)	4.4 (7.0)	5.8 (9.2)	14.4(20.1)
	3	5.2(8.4)	3.8 (6.0)	4.0 (6.4)	5.9(10.1)	8.0(12.0)	5.0(8.0)	3.8 (6.0)	4.0 (6.0)	6.6(10.3)	6.4 (9.2)
	4	5.8(8.6)	4.0 (6.0)	4.4 (6.8)	6.2(10.0)	10.4(17.0)	4.8(7.6)	3.6 (6.0)	4.4 (6.6)	6.1 (9.0)	9.0(13.6)
	5	3.4(5.6)	3.2 (4.8)	3.2 (5.2)	4.4 (6.8)	5.6 (9.6)	3.6(5.6)	3.2 (4.8)	3.6 (5.4)	4.4 (7.0)	6.0(10.4)
	6	4.0(6.4)	4.0 (5.8)	5.2 (8.0)	6.1 (9.5)	15.2(23.6)	3.6(6.0)	3.4 (5.2)	5.2 (8.0)	6.4 (9.9)	14.0(20.6)
	7	4.6(7.2)	3.6 (5.6)	4.4 (6.8)	5.3 (8.0)	8.8(15.6)	4.4(6.2)	2.8 (5.0)	3.6 (5.6)	4.8 (7.4)	7.4(12.4)
中央椎間	1	5.2(8.4)	4.6 (7.2)	4.8 (7.2)	5.3 (8.2)	9.6(18.0)	5.6(8.4)	5.0 (7.8)	4.6 (6.8)	5.0 (7.3)	2.2 (3.6)
	2	5.2(8.0)	5.0 (7.6)	5.4 (8.0)	5.8 (9.2)	12.0(19.0)	5.6(8.8)	4.8 (7.4)	4.4 (6.8)	5.0 (7.8)	2.4 (3.0)
	3	4.4(7.0)	4.0 (6.4)	4.2 (6.4)	5.2 (7.8)	6.0(10.0)	4.0(6.2)	3.6 (5.4)	3.2 (4.8)	3.5 (5.4)	2.0 (3.2)
	4	5.6(9.0)	4.0 (7.8)	4.8 (7.6)	6.6(10.7)	8.8(14.8)	4.0(6.2)	3.6 (5.6)	3.2 (5.2)	3.8 (5.9)	2.4 (3.8)
	5	3.4(5.0)	3.0 (4.6)	3.2 (4.8)	3.5 (5.2)	4.8 (7.4)	2.4(4.0)	4.8 (3.4)	1.8 (3.2)	1.9 (3.4)	1.2 (2.4)
	6	2.4(4.6)	2.8 (4.8)	4.4(6.6)	4.1 (6.6)	2.8(17.6)	3.2(4.6)	2.8 (4.0)	2.4 (3.6)	2.8 (4.3)	1.6 (2.2)
	7	3.4(5.4)	3.0 (4.8)	3.6 (5.6)	4.2 (6.3)	5.6(12.4)	3.6(5.4)	3.2 (4.8)	3.2 (4.8)	3.5 (5.1)	2.4 (3.6)
最下椎間	1	5.4(8.6)	6.0 (9.8)	5.6 (8.4)	5.6 (8.6)	11.2(20.8)	5.2(7.6)	4.8 (7.8)	5.2 (8.0)	5.4 (9.0)	6.8(16.0)
	2	5.6(7.4)	5.8 (8.6)	5.4 (8.2)	5.9 (8.6)	11.2(20.0)	4.8(7.2)	4.8 (7.6)	5.0 (8.0)	5.6 (8.6)	9.8(19.6)
	3	4.2(6.6)	4.4 (6.6)	4.2 (6.6)	4.6 (8.5)	7.6 (9.6)	4.4(6.8)	4.4 (6.8)	4.4 (7.0)	5.2 (7.9)	4.8 (8.6)
	4	7.8(7.6)	5.0 (7.6)	4.8 (7.4)	5.2(10.2)	6.8(14.4)	4.8(7.2)	4.6 (7.2)	5.0 (7.6)	5.3 (7.8)	6.2 (8.8)
	5	3.0(4.6)	3.4 (4.8)	3.4 (5.2)	3.6 (5.1)	7.2(12.0)	2.4(3.8)	3.0 (4.4)	3.4 (5.0)	3.5 (5.0)	4.2 (6.8)
	6	4.0(6.8)	5.6 (8.4)	6.0 (9.2)	5.7 (8.5)	13.6(17.2)	2.8(5.2)	4.4 (5.8)	4.2 (6.2)	4.9 (6.9)	3.6 (7.2)
	7	2.8(4.8)	2.8 (4.8)	3.8 (6.0)	3.6 (5.5)	6.2(15.6)	1.8(3.2)	1.4 (3.0)	3.0 (4.2)	3.1 (4.6)	4.2 (6.8)

することがわかったので、以後の実験は10kg荷重における各椎間部の髄核内圧につき主として検索した。

まず、最上椎間部の髄核内圧変化は前方荷重時；
3.4~6.0kg/cm²、平均4.9kg/cm²、中心荷重時；
3.2~4.6kg/cm²、平均3.9kg/cm²、後方荷重時；
3.2~5.2kg/cm²、平均4.2kg/cm²、側方荷重時；
4.4~6.6kg/cm²、平均5.7kg/cm²、椎弓部荷重時；
5.6~16.8kg/cm²、平均10.6kg/cm²である。

中央椎間部での髄核内圧変化は、前方荷重時；
2.4~5.6kg/cm²、平均4.5kg/cm²、中心荷重時；
2.8~5.0kg/cm²、平均4.2kg/cm²、後方荷重時；
3.2~5.4kg/cm²、平均4.3kg/cm²、側方荷重時；
3.5~6.8kg/cm²、平均5.0kg/cm²、椎弓部荷重時；
3.5~10.7kg/cm²、平均8.7kg/cm²である。

最下椎間部での髄核内圧変化は、前方荷重時；
2.4~5.6kg/cm²、平均4.3kg/cm²、中心荷重時；
2.8~5.0kg/cm²、平均4.6kg/cm²、後方荷重時；
3.2~5.4kg/cm²、平均4.7kg/cm²、側方荷重時；
3.5~6.6kg/cm²、平均4.9kg/cm²、椎弓部荷重時；
4.8~12.8kg/cm²、平均8.8kg/cm²となる。
椎弓部および側方荷重時の髄核内圧はかなりのバラツキを示している。

表3は、10kg、15kg荷重時の髄核内圧の平均値を示し、図18は10kg荷重時の各椎間部の髄核内圧変化を図示したものである。

表3 各偏心荷重時における連続三椎間板の非固定群の髄核内圧平均値(ヒツジ)

単位：kg/cm²

椎間板高位	偏心荷重	10 kg 荷 重					15 kg 荷 重				
		前方荷重時	中心荷重時	後方荷重時	側方荷重時	椎弓部荷重時	前方荷重時	中心荷重時	後方荷重時	側方荷重時	椎弓部荷重時
最上	椎間	4.9	3.9	4.2	5.7	10.6	7.7	6.0	6.7	8.9	17.0
中央	椎間	4.5	4.2	4.3	5.0	8.7	7.0	6.2	6.7	7.7	15.0
最下	椎間	4.3	4.6	4.7	4.9	8.8	6.6	7.2	7.3	7.9	14.0

図 18

〔小括〕

(イ) 一椎間板非固定群の10kg偏心荷重よりみても髄核内圧の変化を平均値より検討してみると、中心荷重時の髄核内圧に対して前方荷重時；25%、後方荷重時；6.0%、側方荷重時；41.0%、椎弓部荷重時には約2倍の髄核内圧増加を示しており、椎弓部荷重時が最も大きく側方部および前方荷重時がこれにつぎ、後方荷重時、中心荷重時となる。この関係は荷重量を10kgより20kgに増しても同じ傾向を示し、各荷重時髄核内圧は荷重量に比例して増加する(図19)。

10kg中心荷重時による実測値(kg/cm²)に髄核断面積(cm²)を乗ずると、5.1(実測平均値)×1.06(ヒツジ髄核断面積平均値)=5.4kgとなり、約54%が髄核内圧として認められる。

(ロ) 連続三椎間板非固定群の10kg偏心荷重時の髄核内圧変化を平均値より、その相関々係を検討してみると、各椎間部の髄核内圧変化は最上椎間部および中央椎間部では、中心荷重時のそれぞれの髄核内圧に対して前方荷重時が前者25.6%、

図 19

なる (図20 A_{1,2})。

最下椎間部では、中心荷重時のそれぞれの髄核内圧に比し、前方荷重時; -6.6%, 後方荷重時; 2.1%, 側方荷重時; 7.0%, 椎弓部荷重時が約2倍の髄核内圧増加を示し、椎弓部荷重時が最も大きく、ついで側方部、後方、中心、前方荷重時となる。これは最上椎間部および中央椎間部といくぶん傾向が異なる (図20 A₃)。

図 21 各偏心荷重時における一椎間板固定群の髄核内圧平均値 (ヒツジ) 単位: kg/cm²

つぎに椎間板高位による 髄核内圧の関係を検討してみると、中心および後方荷重時では最下椎間部に行くほど大きくなり、最上椎間部に比し最下椎間部での 髄核内圧は、前者; 17.9%, 後者; 11.9%の増加をみる。一方前方および椎弓部荷重時では逆に 最上椎間部に行くほど大きくなり、最上椎間部に比し、最下椎間部での 髄核内圧は前者; -12%, 後者; -17%の増加となる (図20 A_{1,2}, 3)。

椎弓部荷重時ではかなりのバラツキを示すが、これは椎弓部荷重点が 海绵体になっているため、荷重時に加圧金属棒がめり込んで 荷重圧がにげられたためと思われる。

2) 脊椎後方固定椎間群

(イ) 一椎間板固定群の髄核内圧変化 (表 4)

10kg荷重において 前方荷重での髄核内圧は4.2~4.8kg/cm²、平均4.5kg/cm²、中心荷重時; 3.4~3.8 kg/cm²、平均 3.6 kg/cm²、後方荷重時; 3.2~3.6kg/cm²、平均 3.4kg/cm²、側方荷重時; 3.6~4.0kg/cm²、平均3.8kg/cm²、椎弓部荷重時; 2.0~3.4kg/cm²、平均2.7kg/cm²である。固定部に近い椎弓部荷重時では著明な髄核内圧減少をみる。

図 20 各偏心荷重時における連続三椎間板の非固定群および中央椎間部固定群の髄核内圧平均値 (ヒツジ)

後者 7.1%, 後方荷重時; 8.0%, 2.0%, 側方荷重時; 46%, 19%, 椎弓部荷重時; 172%, 107%の髄核内圧増加を示し、椎弓部および側方荷重時が最も大きく、ついで前方、後方、中心荷重時と

表 4 各偏心荷重時における一椎間板固定群の
髄核内圧測定値(ヒツジ) 単位: kg/cm^2

症 例	偏 心 荷 重	10 kg 荷 重					15 kg 荷 重				
		前 方 荷 重 時	中 心 荷 重 時	後 方 荷 重 時	側 方 荷 重 時	椎 弓 部 荷 重 時	前 方 荷 重 時	中 心 荷 重 時	後 方 荷 重 時	側 方 荷 重 時	椎 弓 部 荷 重 時
1		4.8	3.8	3.2	4.0	3.4	7.6	6.0	5.4	5.2	5.6
2		4.4	3.6	3.6	4.0	2.0	6.8	5.6	5.4	6.4	2.8
3		4.2	3.4	3.2	3.6	2.7	7.2	5.4	5.0	6.0	4.0
4		4.8	3.7	3.6	3.8	2.5	7.4	5.8	5.2	5.5	4.6
5		4.3	3.5	3.4	3.6	2.9	7.0	5.7	5.0	5.9	4.0

(図21)は 10kg, 15kg 荷重時の髄核内圧の平均値を示す。

(ロ) 連続三椎間の中央椎間部固定群の髄核内圧変化(表2右)。

10kg荷重における各椎間部の髄核内圧について述べる。

最上椎間部では前方荷重時; $3.6 \sim 5.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $4.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 中心荷重時; $2.8 \sim 4.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $3.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 後方荷重時; $3.6 \sim 5.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $4.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 側方荷重時; $4.4 \sim 6.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $5.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 椎弓部荷重時; $6.0 \sim 14.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $9.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ となる。

中央椎間部では, 前方荷重時; $2.4 \sim 5.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $4.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 中心荷重時; $1.8 \sim 5.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $3.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 後方荷重時; $1.8 \sim 4.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $3.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 側方荷重時; $1.9 \sim 5.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $3.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 椎弓部荷重時; $1.2 \sim 2.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $2.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ となる。

最下椎間部では前方荷重時; $1.8 \sim 4.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $4.3 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 中心荷重時; $1.4 \sim 4.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $4.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 後方荷重時; $3.0 \sim 5.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $5.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 側方荷重時; $3.1 \sim 5.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $4.7 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 椎弓部荷重時; $3.6 \sim 9.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 平均 $6.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$ となる。

椎弓部荷重時の最上椎間部および最下椎間部における髄核内圧の値はバラツキを示す。

(表5)は 10kg, 15kg 荷重時の髄核内圧の平均値を示す。

表 5 各偏心荷重時における連続三椎間部の中央
椎間部固定群の髄核内圧平均値(ヒツジ)
単位: kg/cm^2

椎 間 部 高 位	偏 心 荷 重	10 kg 荷 重					15 kg 荷 重				
		前 方 荷 重 時	中 心 荷 重 時	後 方 荷 重 時	側 方 荷 重 時	椎 弓 部 荷 重 時	前 方 荷 重 時	中 心 荷 重 時	後 方 荷 重 時	側 方 荷 重 時	椎 弓 部 荷 重 時
最上	椎間	4.6	3.5	4.1	5.6	9.5	7.2	5.6	6.4	8.6	15.7
中央	(固定部)	4.0	3.5	3.2	3.6	2.0	5.4	5.2	5.0	5.6	3.1
最下	椎間	4.3	4.5	5.0	4.7	6.6	6.7	7.1	7.7	7.1	11.8

図 22

〔小括〕

(イ) 一椎間板固定群の10kg偏心荷重よりみた髄核内圧の変化を平均値より検討してみると, 中心荷重時の髄核内圧に対して, 前方荷重時では25%, 後方荷重時; -5.6%, 側方荷重時; 5.5%, 椎弓部荷重時; -25%の髄核内圧増加がみられ,

図 23

前方荷重時が最も大きく側方，中心，後方荷重時がこれにつき椎弓部荷重時が最も小さい（図21，22b）。

（ロ）連続三椎間の中央椎間部固定群の10kg偏心荷重時よりみた髄核内圧の変化を平均値より検討すると，各椎間部の髄核内圧変化は最上椎間部では，中心荷重時の髄核内圧に対して，前方荷重時；31.4%，後方荷重時；17.1%，側方荷重時；60%，椎弓部荷重時；171%の増加を示し，椎弓部荷重時が最も大きく，ついで側方，前方，後方荷重時がこれにつき，中心荷重時が最も小さい（図23a）。

中央椎間固定部では中心荷重時の髄核内圧に対して前方荷重時；14.2%，後方荷重時；-8.6%，側方荷重時；2.8%，椎弓部荷重時；-42.9%の髄核内圧増加を示し，前方荷重時が最も大きく，側方，中心，後方荷重時がこれにつき椎弓部荷重時が最も小さい（図23b）。

最下椎間部では中心荷重時の髄核内圧に対して前方荷重時；-4.4%，後方荷重時；11.0%，側

方荷重時；4.4%，椎弓部荷重時；46.4%の髄核内圧増加を示し，椎弓部荷重時が最も大きく，ついで後方，側方，中心荷重時がこれにつき前方荷重時が最も小さい（図23c）。

この関係もまた15kg荷重時でも同様の傾向を示し，各椎間部髄核内圧は荷重量に比例し増加する。

つぎに椎間板高位による髄核内圧の関係を検討すると，いずれの偏心荷重時においても中央椎間固定部の髄核内圧は最上椎間部および最下椎間部の髄核内圧より小さくなること以外，連続三椎間非固定群の場合と椎間板高位による髄核内圧の大小における相互関係に変わりはない（図20A，B）。

（B）ヒト椎間板の50kg偏心荷重時における髄核内圧変化。

椎体がもろく偏心荷重時に椎体の海綿体にめり込むものもあるので，できる限り endplate に近い所で Saw Cut し予防した。また椎間板変性度の高度のもの（IV～V度）は測定不能であった。

1) 脊椎非固定椎間群について

一椎間板非固定群の髄核内圧変化（表6左）。50kg荷重における前方荷重での髄核内圧は，8.3～11.9kg/cm²，平均9.36kg/cm²，後方荷重時；6.2～9.1kg/cm²，平均7.38kg/cm²，中心荷重時；5.1～8.6kg/cm²，平均7.04kg/cm²，側方荷重時；4.2～7.7kg/cm²，平均6.56kg/cm²である。

2) 脊椎後方固定椎間群について

一椎間板固定群の髄核内圧変化（表6右）。

50kg荷重における前方荷重での髄核内圧は0.5～3.8kg/cm²，平均2.30kg/cm²，中心荷重時；0.2～3.0kg/cm²，平均1.68kg/cm²，後方荷重時；0.1～3.0kg/cm²，平均1.41kg/cm²，側方荷重時；0.1～2.8kg/cm²，平均1.13kg/cm²である。

脊椎非固定時より髄核内圧低下は著しく認められた。

〔小括〕

脊椎非固定椎間群の50kg荷重における髄核内圧の変化を平均値より検討してみると，中心荷重時の髄核内圧に対して前方荷重時；32.9%，後方荷重時；4.8%，側方荷重時；-7.0%の髄核内圧増

表 6 各偏心荷重時における一椎間板非固定群および固定群の髄核内圧測定値 (ヒト)

症 例	年 令	性	髄核断面 面積 (cm^2)	椎 間 板 高 位	変 性 度	非固定群 kg/cm^2				固 定 群 kg/cm^2			
						前方 荷重時	中心 荷重時	後方 荷重時	側方 荷重時	前方 荷重時	中心 荷重時	後方 荷重時	側方 荷重時
1	62	♂	4.9	L 4-5	Ⅲ	8.5	5.1	6.6	4.2	1.5	1.1	0.1	0.1
2	50	♂	4.0	L 4-5	Ⅲ	8.6	8.0	6.9	7.5	3.8	2.1	2.2	1.5
3	55	♀	3.5	L 4-5	Ⅲ	11.9	8.6	9.1	7.7	3.6	3.0	2.8	2.8
4	72	♂		L 3-4 L 4-5	Ⅳ ~ Ⅴ	測	定	不	能				
1	62	♂	4.0	L 3-4	Ⅲ	8.3	6.0	6.2	5.1	0.5	0.2	0.2	0.2
2	50	♂	4.7	L 3-4	Ⅲ	9.0	7.5	8.2	7.6	3.6	3.1	3.0	2.0
3	55	♀	3.0	L 3-4	Ⅲ	9.8	7.1	7.3	7.3	0.8	0.6	0.2	0.1
5	68	♂		L 3-4 L 4-5	Ⅳ ~ Ⅴ	測	定	不	能				
平均 値						9.36	7.04	7.38	6.56	2.30	1.68	1.41	1.13

加を示し、前方荷重時が最も大きく後方、中心荷重時が、これにつぎ側方荷重時が最も小さかった

(図24 a).

脊椎後方固定群の50kg荷重における髄核内圧の変化を平均値より検討すると、中心荷重時の髄核内圧に対して前方荷重時; 36.9%, 後方荷重時; -16.1%, 側方荷重時; -32.8%の髄核内圧増加を示し、前方荷重時が最も大きく中心荷重時がこれにつぎ後方、側方荷重時が最も小さく、いずれの偏心荷重時においても脊椎非固定時より髄核内圧低下は著しく認められ、脊椎非固定時に比し前方荷重時; 75.5%, 中心荷重時; 76.2%, 側方荷重時; 83.0%, 後方荷重時; 81.0%の髄核内圧減少がみられた (図24 b).

また脊椎非固定椎間群において、中心荷重時による、実測値(kg/cm^2)に髄核断面積(cm^2)を乗ざると、症例1では L_{3-4} ; $6.0 \times 4.0 = 24.0\text{kg}$ (48%), L_{4-5} ; $5.1 \times 4.9 = 24.9\text{kg}$ (49.8%), 症例2では L_{3-6} ; $7.5 \times 4.7 = 35.3\text{kg}$ (70%), L_{4-5} ; $8.0 \times 4.0 = 32.0\text{kg}$ (64%), 症例3では L_{3-4} ; $7.1 \times 3.0 = 21.3\text{kg}$ (43%), L_{4-5} ; $8.6 \times 3.5 = 39.1\text{kg}$ (60%) となり加わった外力 (50kg) の平均 58%が髄核内圧として認められる (表7).

図 24

表 7 中心荷重時髄核内圧値
(kg/cm^2) $\times$ 髄核断面積 (ヒト)

症例	年齢	性	椎間板高位	中心荷重時 髄核内圧値 (kg/cm^2) $\times$ 髄核断面積	髄核断面積 (cm^2)
1	62	♂	L 3-4	(6.0 $\times$ 4.0)	24.0kg
			L 4-5	(5.1 $\times$ 4.9)	24.9kg
2	50	♂	L 3-4	(7.5 $\times$ 4.7)	35.3kg
			L 4-5	(8.0 $\times$ 4.0)	32.0kg
3	55	♀	L 3-4	(7.1 $\times$ 3.0)	21.3kg
			L 4-5	(8.6 $\times$ 3.5)	30.1kg

総括並びに考案

1) 脊椎非固定群の偏心荷重時における 髄核内圧の変化について

(イ) 一椎間板非固定群において、ヒツジ屍体例では、中心荷重時の髄核内圧に対して前方荷重時; 25%, 後方荷重時; 6.0% の髄核内圧増加を示し、一方ヒト剖検例の場合も中心荷重時の髄核内圧に対して、前方荷重時; 32.9%, 後方荷重時; 4.8% の髄核内圧増加となり、個体差は認められたが、ヒツジ、ヒト共に、脊椎々体部の偏心荷重時(側方を除く)における髄核内圧変化は、前方>後方>中心荷重時の順になり同様の傾向を示す。この傾向は奥島、兼松、杉浦らの報告と一致する。

ヒツジ脊柱の椎弓部および側方部荷重時の髄核内圧変化はかなりのバラツキがあり、脊椎々体部の偏心荷重(側方を除く)時の髄核内圧変化より大きく約 0.5~2 倍の増加を示し、この点はヒト剖検例と若干異なる。

髄核が force-bearing structure としての役割を果たすとの考えには異論はないが、その荷重分担率について、奥島²⁰⁾は生体にて正常椎間板では加わった外力の約 30% が髄核内圧として示されるにすぎないと報告し、また兼松⁸⁾は屍体剖検例の偏心荷重結果より中央荷重による実験値 (kg/cm^2) に髄核断面積 (cm^2) を乗じた値が、ほぼ加圧値に一致することより加圧量のほとんどが髄核だけに作用すると述べている。

しかしながら著者の実験結果では、ヒツジ・ヒト共に加わった外力の約 50~60% が髄核荷重分担として計測された。

(ロ) 連続三椎間板非固定群について

各椎間部の髄核内圧変化は最上椎間部および中央椎間部では椎弓部荷重時が最も大きく側方、前方、後方荷重時がこれに次ぎ、中心荷重時が最も小さい。最下椎間部では椎弓部荷重時が最も大きく側方、後方、中心荷重時がこれに次ぎ前方荷重時が最も小さい。

椎間板高位による内圧差については、杉浦²⁶⁾は生体における測定にて L₃₋₄、L₄₋₅ については特に明らかな差は認められなかったと報告し、有田¹⁾らも生体での実験結果より有意差はなかったと述べている。また奥島²⁰⁾は、生体における測定より L₄₋₅ は L₃₋₄、L_{5-S₁} に比し髄核内圧が高いと述べている。しかし著者のヒツジにおける髄核内圧測定では、中心および後方荷重時には最下椎間部での髄核内圧が最上椎間部より約 12~18% の内圧増加を示し、前方および椎弓部荷重時には、最上椎間部での髄核内圧が最下椎間部より約 14~20% の増加を示している。

2) 脊椎後方固定群の偏心荷重時における髄核内圧の変化について

(イ) 一椎間板固定群ではヒツジ屍体例、ヒト剖検例共にいずれの偏心荷重時においても、髄核内圧減少を認め特に椎弓部荷重時の髄核内圧減少が著しい。

固定椎間部の髄核内圧は後方固定をする前の状態に比べ、ヒツジ屍体例では、前方荷重時; 29.7%, 中心荷重時; 29.5%, 後方荷重時; 37.1%, 側方荷重時; 47.3%, 椎弓部荷重時; 78.4% の髄核内圧減少をみる。ヒト剖検例では前方荷重時; 75.5%, 中心荷重時; 76.2%, 側方荷重時; 83.0%, 後方荷重時; 81.0% の著明なる髄核内圧減少を示し、ヒツジ屍体例と著しく異なる。

これは脊椎(後方)固定器具にヒトでは脊椎用プレートを用いたのに対して、ヒツジでは骨接合用プレートを用いて固定したため、両者の固定力の差によるものではないかと考える。

(ロ) 連続三椎間の中央椎間部固定群において各椎間部の髄核内圧変化は最上椎間部では、椎弓部>側方>前方>後方>中心荷重時の順となり、

また最下椎間部では椎弓部>後方>側方>中心>前方荷重時の順となり、非固定群と同じ傾向を示すが、中央椎間固定部では前方>側方>中心>後方>椎弓部荷重時の順となり、一椎間板固定の場合と同様な傾向が認められる。

椎間板高位による髄核内圧の関係は、いずれの偏心荷重時でも、中央椎間固定部の髄核内圧が最も小さくなるが、それに隣接する上下椎間板の髄核内圧の大小における相互関係は非固定群の場合と変わらない。

脊椎後方固定が中央椎間固定部と、その隣接椎間板に及ぼす影響を髄核内圧変化の平均値より検討してみると、固定椎間群の髄核内圧は後方固定をする前の状態に比べ、最上椎間部では前方荷重時; 6.2%, 中心荷重時; 10.3%, 後方荷重時; 2.4%, 側方荷重時; 1.8%, 椎弓部荷重時; 10.4%の髄核内圧減少をきたしている。また中央椎間固定部では前方荷重時; 11.2%, 中心荷重時; 16.7%, 後方荷重時; 25.6%, 側方荷重時; 28%, 椎弓部荷重時; 77.1%の髄核内圧減少を認め、最下椎間部では前方荷重時; 0%, 中心荷重時; 2.2%, 後方荷重時; -6.3%, 側方荷重時; 4.1%, 椎弓部荷重時; 25.0%の髄核内圧減少を示す。

中央椎間固定部での髄核内圧減少は当然としても、隣接する椎間板の髄核内圧にも減少(平均6%)が認められた。

荷重量と椎間板髄核内圧との関係について; 脊椎非固定群および脊椎後方固定群ともに荷重量を15kg, 20kgと増加するに伴い椎間板髄核内圧も約1.5倍, 2倍とほぼ比例的に増加し、各椎間部の偏心荷重時の髄核内圧関係も同じ傾向を示す。

以上、ヒツジ屍体例およびヒト剖検例の屈曲による髄核内圧変化を述べたが、これをもってすべて生体にあてはめることはできない。たとえば、Morrisらは、前屈に際しては腹圧による支持が大きく作用すると述べており、また奥島²⁰⁾および兼松¹⁸⁾らは立位時より坐位時の髄核内圧の高いことは坐位では腰椎前彎を減少せしめ、腰伸筋群の緊張を増加させるためだと説明している。このように生体においては屈曲の他に体重、荷重、腰筋群

の緊張および靱帯組織の弾性など、種々の因子が影響することは当然のことである。今回著者はヒツジ屍体例およびヒト剖検例を用いて椎間板内圧測定立場より脊椎後方固定の有意義性について知ることを目的とした。

以上の実験結果を力学的に究明すると、椎間板に外力を加えた場合、それに対応する力として髄核部における抗力と線維輪および後方脊椎部における抗力が考えられる。それをシェーマで示せば図25のごとくであり、いわゆるテコの原理を応用、考察することができる。

すなわち非固定時においては、荷重が髄核中心部より前方にあり、後方線維輪部を支点Aとした場合は図25aのごとくであり、また荷重が髄核中心部より後方にあり、前方線維輪部を支点Bとした場合は、図25bに示す。さらに固定時においては脊椎後方固定部を支点Aとした場合は図25cのごとく示される。

外力に抵抗するモーメントを M_0 、荷重を P 、髄核部における抗力を R 、支点(A, B)より荷重点までの距離を l 、支点(A, B)より髄核中心部までの距離を L とすると、支点AまたはB点のま

力学モデル(テコの原理を利用したもの)

No: 外力に抵抗するモーメント P : 荷重
 R : 髄核部における抗力 A, B : 支点
 l : 支点A, Bより荷重Pまでの距離
 L : 髄核中心部より支点A, Bまでの距離

図 25 偏心荷重時における椎間板の挙動の力学的モデル・シェーマ

わりのモーメントのつりあいは、

$$Mo - Pl + RL = 0$$

$$\therefore Mo = Pl - RL \dots \dots \dots (1)$$

となる。なお $R = \rho$ (髄核内圧測定値 kg/cm^2) $\times A$ (髄核断面積 $\cdot \text{cm}^2$) であり、ヒツジおよびヒトの l 、 L の平均測定値は図26に示すごとくである。

以上の数値を (1) 式にあてはめヒツジおよびヒト脊椎の前方・中心・後方荷重 (ヒツジ: 10kg. ヒト: 50kg) 時における外力に抵抗するモーメント: Mo を非固定時および固定時に求め比較検討した。

求められた R , Pl , RL , Mo の計算値は (表 8 a, b) に示す。すなわちこの表に示すごとくヒツジ脊椎においては非固定時の Mo 値は、前方荷重時; 10.58 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 中心荷重時; 5.67 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 後方荷重時; 10.14 $\text{kg} \cdot \text{cm}$ となり、また固定時の Mo 値は前方荷重時; 21.6 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 中心荷重時; 18.07 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 後方荷重時; 11.64 $\text{kg} \cdot \text{cm}$ となる。以上のことより固定時の Mo 値は非固定時の Mo 値より大きい値を示している。

一方ヒト脊椎例では、非固定時の Mo 値は、前方荷重時; 116.05 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 中心荷重時; 52.55 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 後方荷重時; 56.92 $\text{kg} \cdot \text{cm}$ であり、また固定時の Mo 値は、前方荷重時; 255.04 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 中心荷重時; 184.54 $\text{kg} \cdot \text{cm}$, 後方荷重時; 108.53 $\text{kg} \cdot \text{cm}$ を示し、ヒツジ脊椎と同様に固定時の Mo 値は非固定時より大きい値を示した。

このことは、後方固定による椎間板変形量の減少を意味し、脊椎後方固定の効果を示すものであり、いわゆる脊椎後方固定術の臨床的有意義性を証明できたと考える。

結 語

偏心荷重が椎間板に及ぼす影響並びに脊椎後方固定が固定椎間板と、それに隣接する椎間板に及ぼす影響をおよぼすかについて、椎間板髄核内圧の面から検討しえた結果を要約すると次のごとくである。

1) 脊椎非固定群の偏心荷重時における髄核内

表 8-a 力学的モデルにもとづく R , $P \cdot l$, $R \cdot L$, Mo の計算値 (ヒツジ屍体例)

		$R \text{ (kg)}$ $R = \rho \times A$	$P \cdot l \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$	$R \cdot L \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$	$Mo \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$ $Mo = P \cdot l - R \cdot L$
非 固 定 時	前 方	6.78 ($\rho = 6.4$, $A = 1.06$)	16 ($P = 10$, $l = 1.6$)	5.42 ($R = 6.78$, $L = 0.8$)	10.58
	中 心	5.41 ($\rho = 5.1$, $A = 1.06$)	10 ($P = 10$, $l = 1.0$)	4.33 ($R = 5.41$, $L = 0.8$)	5.67
	後 方	5.73 ($\rho = 5.4$, $A = 1.06$)	17 ($P = 10$, $l = 1.7$)	6.86 ($R = 5.72$, $L = 1.2$)	10.14
固 定 時	前 方	4.77 ($\rho = 4.5$, $A = 1.06$)	34 ($P = 10$, $l = 3.4$)	12.40 ($R = 4.77$, $L = 2.6$)	21.60
	中 心	3.82 ($\rho = 3.6$, $A = 1.06$)	28 ($P = 10$, $l = 2.8$)	9.93 ($R = 3.82$, $L = 2.6$)	18.07
	後 方	3.60 ($\rho = 3.4$, $A = 1.06$)	21 ($P = 10$, $l = 2.1$)	9.36 ($R = 3.60$, $L = 2.6$)	11.64

表 8-b 力学的モデルにもとづく R , $P \cdot l$, $R \cdot L$, Mo の計算値 (ヒト剖検例)

		$R \text{ (kg)}$ $R = \rho \times A$	$P \cdot l \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$	$R \cdot L \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$	$Mo \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$ $Mo = P \cdot l - P \cdot L$
非 固 定 時	前 方	39.3 ($\rho = 9.36$, $A = 4.01$)	175 ($P = 50$, $l = 3.5$)	58.95 ($R = 39.3$, $L = 1.5$)	116.05
	中 心	28.3 ($\rho = 7.04$, $A = 4.01$)	95 ($P = 50$, $l = 1.9$)	42.45 ($R = 38.3$, $L = 1.5$)	52.55
	後 方	29.6 ($\rho = 7.38$, $A = 4.01$)	125 ($P = 50$, $l = 2.5$)	68.08 ($R = 29.6$, $L = 2.3$)	56.92
固 定 時	前 方	9.2 ($\rho = 2.30$, $A = 4.01$)	290 ($P = 50$, $l = 5.8$)	34.96 ($R = 9.2$, $L = 3.8$)	255.04
	中 心	6.7 ($\rho = 1.68$, $A = 4.01$)	210 ($P = 50$, $l = 4.2$)	25.46 ($R = 6.7$, $L = 3.8$)	184.54
	後 方	5.65 ($\rho = 1.41$, $A = 4.01$)	130 ($P = 50$, $l = 2.6$)	21.47 ($R = 5.65$, $L = 3.8$)	108.53

R : 髄核部における抗力

Mo : 外力に抵抗するモーメント

L : 支点より荷重点までの距離

P : 荷重

l : 支点より髄核中心部までの距離

図 26 力学的モデルにもとづくヒツジおよびヒトの支点から荷重点、髓核中心部までの平均測定値

圧の変化について

(イ) 一椎間板非固定群では脊椎々体部の偏心荷重（側方を除く）時の髓核内圧変化は、ヒツジ屍体例、ヒト剖検例共に前方＞後方＞中心荷重時なる傾向を示し、ヒツジ脊椎においては椎弓部および側方部荷重時の髓核内圧が最も大きい。

(ロ) 連続三椎間板非固定群（ヒツジ）では各椎間部の髓核内圧変化は最上椎間部および中央椎間部においては、椎弓部＞側方＞前方＞後方＞中心荷重時の順となり、最下椎間部では椎弓部＞側方＞後方＞中心＞前方荷重時となる。

椎間板高位による髓核内圧の関係は、中心および後方荷重時では最下椎間部＞中央椎間部＞最上椎間部の順となり、前方および椎弓部荷重時では最上椎間部＞中央椎間部＞最下椎間部となる。

(ハ) 髓核の荷重分担率について

中心荷重時の髓核内圧実測値 (kg/cm^2) に髓核断面積 (cm^2) を乗じた値と荷重量を比較すると、ヒツジ屍体例、ヒト剖検例共に荷重量の約50～60%が髓核内圧として認められる。

(ニ) 荷重量と髓核内圧との関係について

髓核内圧は荷重量に比例して増加し、各偏心荷重時の髓核内圧の相互関係は変わらない。

2) 脊椎後方固定群の偏心荷重時における髓核内圧の変化について

(イ) 固定椎間板における髓核内圧変化はヒツジ屍体例、ヒト剖検例ともに、いずれの偏心荷重時においても非固定時に比し著しい髓核内圧減少を示し、なかでも椎弓部および後方荷重時が最も小さい。

(ロ) 固定椎間板に隣接する上・下椎間板の髓核内圧変化は、いずれの偏心荷重時においても、約10%以下（平均6%）の髓核内圧減少を示す。

稿を終るに際し、ご懇切なるご指導とご校閲を賜った青木虎吉教授、岡村豊治講師に深謝致します。

また、本実験に関して日夜、種々のご助言とご協力を賜った、順大整形腰痛研究班の小林孝光先生、原利郎先生、ならびに東医歯大医器研の永井正洋先生に深甚な謝意を表します。

文 献

- 1) 有田親央：腰椎々間板内圧に関する実験的及び臨床的研究，中部整災誌，14(4)，558，1971。
- 2) Armstrong, J.S.: Lumbar Disc Lesion. Livingstone Ltd., Edinburgh, 1952.
- 3) Bush, H. D., Horton, W.G., Smare, D. L., and Naylor, A.: Fluid content of the nucleus pulposus as a factor in the disc syndrome. Further observations. Brit. Med. J., 2, 81, 1956.
- 4) 花岡英弥：繰り返し衝撃が腰仙部椎間板に及ぼす影響に関する実験的研究，目整会誌，41，399，1967。
- 5) 平田晴夫：椎間板組織の胎生期及び生後の加齢的变化，中部整災誌，15 (1)，67，1972。
- 6) Hirsch, C., and Nachemson, A.: New observation on the mechanical behavior of lumbar discs. Acta orthop. scand., 23, 254, 1954.
- 7) Hirsch, C.: The reaction of intervertebral discs to compression forces. J. Bone & Joint Surg., 37-A: 1188, 1955.
- 8) 兼松 弘：椎間板内圧に関する実験的研究，日整会誌，44，589，1970。
- 9) Lindblom, K.: Technique and results in myelography and disc puncture. Acta Radio. Stock., 34, 321, 1950.
- 10) 水野祥太郎：椎間板内圧に関する実験的研究，中部整災誌，8，613，1965。
- 11) Nachemson, A.: Measurement of intradiscal pressure, Acta, Ortho., 28, 269, 1958.
- 12) Nachemson, A.: Lumbar intradiscal pressure experiment studies on the postmortem material.

- Acta Ortho. Scand., **43**, 1, 1960.
- 13) Nachemson, A. : The influence of spinal movement on the lumbar intradiscal pressure and on the tensile stress in the annulus fibrosus. Acta. Ortho. Scand., **33**, 183, 1963.
 - 14) Nachemson, A. : The lumbar discometries lumbar intradiscal pressure measurement in vivo. Lancet., **1**, 1140, 1963.
 - 15) Nachemson, A. : In vivo measurement of intradiscal pressure in the lower lumbar discs. J. Bone & Joint Surg., **46-A**: 1077, 1964.
 - 16) Nachemson, A. : The effect of forward leaning on the lumbar intradiscal pressure. Acta. Ortho. Scand., **35**, 314, 1965.
 - 17) Nachemson, A. : In vivo discometry in lumbar discs with irregular nucleogram. Acta, Ortho Scand., **36**, 418, 1965.
 - 18) Nachemson, A. : The load on lumbar discs in different position of the body. Clin. ortho., **45**, 107, 1966.
 - 19) Nachemson, A. : and Elfström, G: Intravital dynamic pressure measurements in lumbar discs. A study of common movement, maneuvers and exercises. Scandinv. J. Rehabil, Med. suppl., **1**, 1, 1970,
 - 20) 奥島平八郎：腰部椎間板内圧に関する研究，日外宝，**39**, 45, 1970.
 - 21) 大久保吉修：犬の腰椎部椎間円板の圧縮荷重による力学的挙動，医用器材研究所報告，**4**, 16, 1970.
 - 22) Perey, O.: Fracture of the vertebral endplate in the lumbar spine. An experimental biomechanical investigation. Acta Orthop. Scand, Supple., **25**, 1957.
 - 23) Petter, C. K. : Method of measuring the pressure of the intervertebral disc. J. Bone & Joint Surg., **15**, 365, 1933.
 - 24) 桜井忠一：新版材料力学，産業図書，東京，昭和41年.
 - 25) Spurling, R.G.: Lesions of the lumbar intervertebral disc. C. Thomas Publ., Springfield, 1953.
 - 26) 杉浦 皓：超小型半導体圧力変換器による腰椎々間板内圧の測定. 中部整災誌，**14**, 137, 昭和46.
 - 27) 上野榮雄：新編大学物理学，上下巻，内田老鶴園新社，東京，昭和42年.
 - 28) 内西兼一郎：腰椎荷重軸に関するレ線学的研究. 日整会誌. **42**, 951, 1968.
 - 29) Virgin, W. J. : Experimental investigation into the physical porporties of the intervertebral disc. J. Bone & Joint Surg. **33** (B), 607, 1951.
 - 30) 鷺津久一郎：力学概論，培風館，東京，昭和43年.
 - 31) 吉沢英造：腰部前彎度と荷重相との相互関係に関する光弾性実験的研究. 日整会誌，**41**, 529, 1967.

Summary

A Dynamic Study on the Lumbar Intervertebral Disc

The experiment was conducted on forty-one lower lumbar intervertebral discs of 21 freshly autopsied mature sheep and 10 lower lumbar intervertebral discs from five fresh human cadavers.

The results are summarized below.

- 1) In both the sheep and human cadavers the specimens consisting of one unit of vertebra-disc-vertebra combination without a posterior metal fixation, the highest intradiscal pressure was noted with anterior loading (flexion) of the vetebra body, followed by posterior loading (extension) and then by neutral loading, in that decreasing order.

- 2) In the sheep specimens which consisted of four vertebrae and three connecting discs without a posterior fixation, the magnitude of the intradiscal pressure produced by the load on the upper and middle discs was in the following descending order according to the site of loading: vertebral arch > lateral portion > anterior portion > posterior portion > central portion. In the lower disc the order was: vertebral arch > lateral portion > posterior portion > central portion > anterior portion.

A study of the magnitude of intradiscal pressure according to the level of discs revealed that the pressure produced by either central or posterior loading was highest in the lower disc, followed by the middle and the upper discs in that descending order. With anterior loading or loading of the vertebral arch the order was: upper disc > middle disc $\geq$ lower disc.

- 3) A study of the stress distribution against the compressive load showed that 50 to 60% of the load was born by the nucleus pulposus.
- 4) The intradiscal pressure produced was proportional to the amount of load applied.
- 5) Both in sheep and humans the intradiscal pressure produced by any type of eccentric loading was lower with a posterior metal plate fixation than without it.
- 6) With any type of eccentric loading the discs adjacent to the fixed disc showed an intradiscal pressure value of about 10% (average: 6%) lower than a value for a disc without fixation.

SUSUMU SUZUKI, M. D.

*Department of Orthopedic Surgery, Juntendo University,
School of Medicine.*