

腰部椎間板内圧に関する研究

慶応義塾大学医学部整形外科科学教室（主任：池田亀夫教授・指導：岩原寅猪名誉教授）

奥 島 平 八 郎

〔原稿受付：昭和44年12月1日〕

Study on hydrodynamic pressure of lumbar intervertebral disc

HEIHACHIRO OKUSHIMA

Orthopedic Department, Keio University

(Chief : Prof. : Kameo Ikeda, Director : Prof. Emeritus : Torai Iwahara)

In order to clarify the mechanism of low back pain intranuclear pressure of lower lumbar discs are checked by self-devised instrument.

Considerable changes of intranuclear pressure are plotted by the position and posture, level of disc and degree of disc degeneration as follows.

- (1) L4-5 revealed highest pressure as compared with L3-4 and L5-S1.
- (2) Normal disc is highest in pressure and decrease is parallel to the degree of disc degeneration.
- (3) Sitting position with anteflexion gives highest pressure and standing position with maximum extension lowest.
- (4) In normal disc, 37% of weight bearing pressure is shared to nucleus and 63% to other supporting tissue, while in degenerated disc, 78% of total pressure which lead to low back pain is shared to other supporting tissue.
- (5) Lying position gives only 0-3 kg/cm² pressure in normal disc and less in disc degeneration. Position change on bed gives no difference.

目 次

I 緒 言

II 研究材料及研究方法

1 内圧測定用針

2 測定方法

a 予備実験（人屍に於ける）

b 実 施 法（生体に於ける）

III 研究成績 結果

1 体位との関係による変化

2 椎間板高位との関係

3 変性度との関係

IV 考 按

V 結 論

I. 緒 言

整形外科を訪れる疾患の中で、腰痛の占める率は大きい。その漠然とした訴えの故に外来において可能な臨床的診断及び補助的診断を試みるにかゝらず、腰痛又は腰部筋々膜炎と云う診断にやむなくあまじなければならぬ症例にしばしば遭遇する。外傷はもちろん、既知の椎間板ヘルニア、脊椎分離症、脊椎過伸症、変形性脊椎症、シュモール結節、椎体隅角分離等と診断の下せるものは腰痛を主訴とするものの半分にも満たない。腫瘍、結核、化膿性疾患等は更に頻度が少ない。

私は、かかる患者に、四足動物の脊椎とほぼ同型の脊柱を有する人類が宿命づけられた起立による腰柱におよぶ負荷の大きさを説き、それに自己満足をせざるを得ない現況に常々不満を感じている。この腰椎負荷の様態の究明に椎間板髄核内圧の測定が必要となる。

腰痛の解明を各方面から行わんとして種々の研究がなされている。腰仙椎の運動から腰痛の原因を究めんとする研究については1827年 Weber 以来諸先達の足跡があり、又髄核の組織学的及び組織化学的の方面の研究には Meyer; Bernardi (1954) 等の業績がある。私が目的とする腰部椎間板内圧に関する研究は1958年 Nachemson が屍体より摘出した腰部椎間板について、更に近くは生体においても Nachemson (1965) は内圧を測定し腰痛の因を究めんとしている。

椎間板が椎体間に介在して緩衝器ないクッションの役を果たしていることは周知のところで、椎間板の内圧を知ることは緩衝器としての椎間板の実相をうかがうようすがとなり、発痛機序の解明につながる。我々は1965年以来 Nachemson とは独立に内圧測定装置の開発に腐心し、慶大整形外科を訪れた腰痛患者を対象として腰部椎間板内圧を測定し、内圧と臨床像との関連を求めんとしてきた。

腰痛性疾患を椎間板起因性のものとそれ以外のものに大別出来るのではないかを考え、更に椎間板起因性とは椎間板自身の疼痛 (Discogenic pain; Oppenheimer) なのか或いはそれが他の荷重支持組織に影響して疼痛を誘発するのかの判別は興味ある問題である。椎間板ヘルニア、変形性脊椎症の如く神経根ないし、脊髄自身への圧迫等の障害のないものにも腰痛が起ることは疑いがない。根性症状と、いわゆる関連痛 referred pain との関係も尚さだかでない。根症状では説明の不可能な脊椎分離症、シュモール結節、椎体

隅角分離に対する椎間板内圧の測定は、その疼痛発生の機序の解明に一役を担うものと考えらる。

II. 研究材料及び研究方法

1 内圧測定用針

椎間板内圧を測定する目的で作成した内圧測定用針はその先端にビニール膜にて被包された開窓部を有する。同部を髄核のほぼ中央且つ軟骨板に平行に位置せしめる事により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、更にレコーダーに記録する。内圧測定用針は、外径 0.8mm、内径 0.4mm、長さ 180mm で、その先端より 10mm の部位に長径 10mm、横径 0.3mm の長方形の孔を穿つ。同針はその全周全長を均一硬度、均一弾性を有する 0.2mm の厚さのビニール膜で被包する。内圧測定用針を椎間板に挿入するために、内径 1.3mm 外径 1.8mm 長さ 150mm の外套針及びそれに適合する同長のマンドリンを作成する。ビニール膜被包針は外套針より 30mm 長く作成してあり、ビニール膜に 5mm 間隔の目盛が記してある。あらかじめ本外套針をガイドとして椎間板に挿入し、後にマンドリンと内圧測定用ビニール膜被包針と交換する。開窓部のビニール膜面に受ける圧を導く目的で蒸溜水を媒体とするが、その蒸溜水を内圧測定用針に気泡等を残すことなく充満させる目的で、長径 190mm 外径 0.35mm の充水用針を作成する (図 1)。

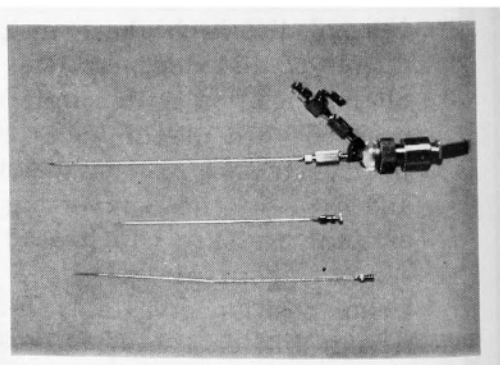


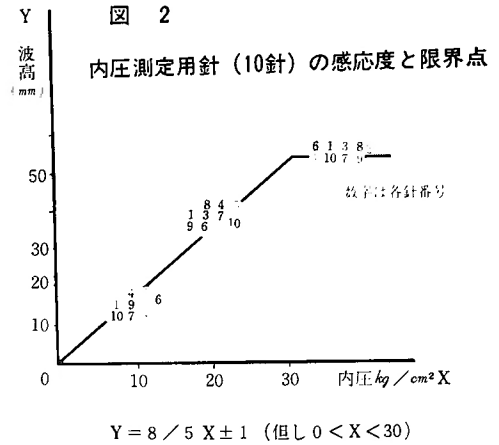
図 1 内圧測定用針

(上よりビニール膜被包針、外套針、充水用針)

内圧測定用針を作成するに当り、トランスデューサーを使用し、これをレコーダーにて記録する方法を採り入れたが、この誘導にあたり a) 超小型圧力 transducer を作成し針の先端につける方法、b) 液体として注射針の先端に加わる圧を針の後部にとりつけた圧力 transducer に誘導する方法から出発した。超小型圧

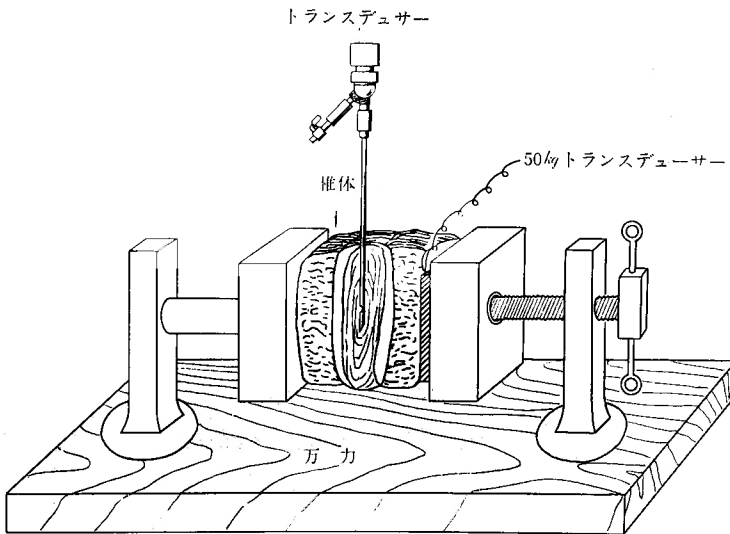
力 transducer については、共和電業、日本光電と研究を重ねたが、針先に装着が可能で 0.3mm 径の transducer の作成は技術的に困難のため断念した。しかしこの作成が将来技術的に可能となれば最も正確な値を得られるであろう。液体を媒体とする方法については、イ)流動パラフィン等を用いて開放窓より誘導する。ロ)弾性を有する被膜窓より誘導する二つの方法が考えられる。基礎実験の段階において、前者は得られる値が不安で内圧として表わすのに不適格であり、後者については開窓部の最先端に置くか、あるいは内圧測定用針を盲管として先端よりやゝさがった位置に開窓するか二通りの試作を行った。その結果最先端では開窓部の面を内圧加重軸に垂直におくことが困難で、又その面積を一定に規格できないので先端を盲管とし先端より10mmの所に開窓した。膜面については、

1) 開窓部のみ被包する。2) 全体を被包する二つの途があるが、後者が技術的にも容易で、破損の危険も少ない。更に、膜面資料については、天然ゴム膜、ポリエチレン膜、ビニール膜の三者を試作した。天然ゴム研究所の沖倉によると、弾性限界点の広さは天然ゴムが最も大きくポリエチレンが最も狭い、レダチサイド消毒に最も適しているのはビニール膜で天然ゴムは最も弱い、等々の検討を加えた結果、ビニール膜がその限界点の広さからも、消毒に適する点から現時では最適である。Nachemson はポリエチレン膜を使用し、グリセリンを媒体としている。



作成した内圧測定用針、10針についてその臨界点及び膜面感態度を検定した。

硬質ゴム栓をした密閉ガラス瓶内のガスを除去し水を充滿する。硬質ゴム栓を経て内圧測定用針及び慶大難波が作成した椎間板注入圧測定用針を平行に挿入する。注入圧測定用針より徐々に蒸溜水を注入し、内圧測定用針の膜面に受ける圧を加えられた注入圧との関連から測定する。内圧測定用針に接続したレコーダーが記録する波高を計測し、それに相当する注入圧のレコーダーが記録する既知の波高より内圧を換算する。かくして各10針について注入圧の変化とビニール膜面の感応度と臨界点を知る。臨界点内において注入圧及



人屍摘出椎間板外圧加圧装置 (図 3)

び内圧は共にその圧の変化に伴い、一次函数関係に変化する。すなわちレコーダーが記録する波高 1 mm は、約 0.62 kg/cm^2 であることを本検定にて認知する。又各針の臨界点は 25 kg/cm^2 である (図 2)。

2 測定方法

a 予備実験

感度とその臨界点の知られた内圧測定用針 1～2 号針を用いて、人屍より摘出した腰部椎間板について、その椎間板に加わる圧を測定する。

病理解剖に付せられた 7 屍体より 18 椎間板を関節突起を付着せるまゝ椎体ごと摘出し、ただちに -70°C 凍結器にて冷凍保存し、実験に備える。椎間板は凍結せるまゝ上、下椎体のほぼ中央にて軟骨板に平行に横断切離し、後に $+40^\circ\text{C}$ 温浴槽にて軟化させる。全例についてアンギオコンレイ 1.0～1.5cc 用いて椎間板造影を行う。作成された椎間板サンドイッチは撮影後直ちに図 3 の如きセットにて垂直に力が加わる様に万力で挟み、万力と輪切りにした椎体の間に 50 kg/cm^2 圧力 transducer を挿入した万力を締めて、加わる外圧を圧力 transducer より誘導する。更に椎間板髓核に挿入せられた内圧測定用針より誘導記録した波高から外圧と椎間板髓核内圧との変動の関連をみる。本実験に使用した 18 椎間板は、あらかじめ行われた椎間板造影にて正常なもの 5 椎間、変性中等度なもの 6 椎間、変性高度なもの 7 椎間である。又椎間の高位は L3～4 間 7 例、L4～5 間 7 例、L5～S₁ 間 4 例である。外圧とそれに対応する内圧の関連は正常例では、臨界点内において一

次函数関係にあり

$Dp \cdots \cdots$ 内圧 kg/cm^2

$P \cdots \cdots$ 外圧 kg/cm^2

$Dp = 0.3 \times P$

となり、高度変性例において函数関係を示さず、図 4 の如く外圧の増加が、内圧と平行して増加せず、 $0 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ あたり迄はさしたる相違をみないが、 20 kg/cm^2 以上の加圧においては内圧の上昇が急激に減少する。 40 kg/cm^2 の外圧に対しては内圧は 9 kg/cm^2 を示すにとどまり、正常例に比して 6.5 kg/cm^2 内圧の減少をみる。正常の椎間板は与えられた外圧の約 37% が髓核の内圧として現われることになり、外圧の 63% は椎間板線維輪、前後縦靱帯、関節突起等で吸収されるものと考えられる。

表 1 人屍より摘出せる椎間板に於ける外圧と内圧

外圧 kg/cm^2	内 圧 kg/cm^2		
	正 常	中等度変性	高度変性
0	0	0	0
5	1.1	1.0	1.0
10	3.3	3.0	2.8
15	5.2	5.2	4.9
20	7.8	7.5	6.5
25	9.9	8.9	7.7
30	11.5	10.7	8.0
35	13.7	12.5	8.6
40	15.5	13.8	9.0

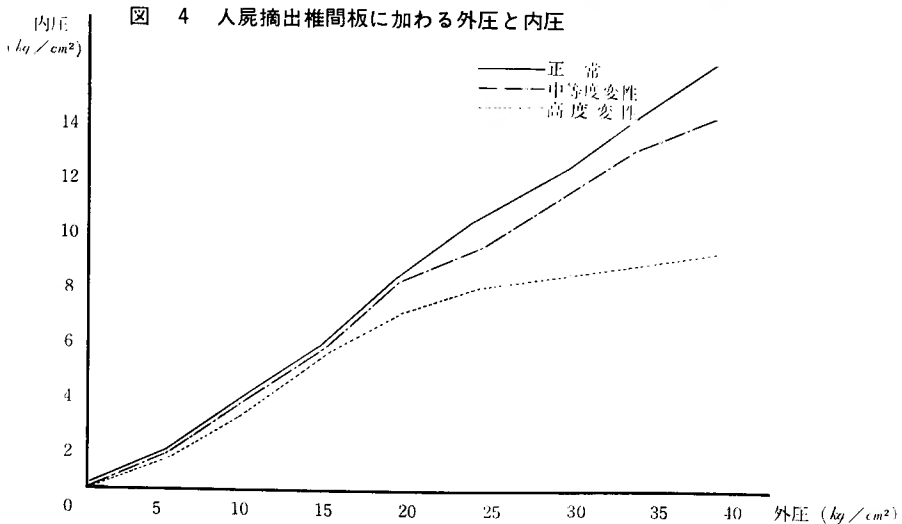


図 4 人屍摘出椎間板に加わる外圧と内圧

表1は後に述べるが変性椎間板を有する者の内圧の低いことは、椎体に加わる外力が少ないものでない事を示しており、更に生体においては椎弓、関節突起等後部支持組織が外力を更に吸収するものと推測出来る。

b 実施法

対象は1965年～1967年の慶大整形外科を訪れた18才～52才までの腰痛患者72名83椎体について検索した(表2)。あらかじめ椎間板造影をL₃₋₄間、L₄₋₅間、L₅～S₁間に慶大平林、河野が作成せる椎間板造影針を用いて行い、検査椎間板をLindblomの分類に従い正常、中等度変性、高度変性の三つに分ける(表2)。生体における椎間板内圧の測定に際しては、前述の内圧測定用針を消毒の目的でレダチサイド液に3時間以上浸す、外套針及び内圧測定用針を実験時に蒸溜水にて洗滌し、ビニール膜被包針に滅菌水を充満する。

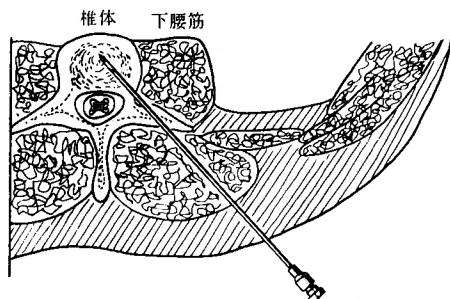


図 5 生体椎間板への進路

椎間板、前縦靱帯などの軟性抵抗部に達した所で、マンドリンを抜き、先記の内圧測定用ビニール膜被包針を挿入する。内圧測定用針を外套針より20～25mm更に深く刺入し、ビニール膜開窓部を椎体軟骨板と平行に維持する。コントロールX線を正側二方向撮影して内圧測定針開窓部が髓核に正しく且つほぼ中央に刺入されたことを確認する。側臥位にて被検者に刺入した内圧測定用針をトランスデューサーに直結する。側臥中間位にて内圧測定後、坐位をとらしめる。坐位中間位における内圧を測定し、次いで最大前屈、後屈位に於ける内圧を測定する。各被検者によってその可動域には多少の差があり、又脊椎の角度を計測することは困難のため対象の最大可動域をもって最大前・後屈位とする。次に被検者を起立させ中間位、最大前屈・後屈位の内圧を測定する(図7.8)。

Ⅲ. 研究成績

1 体位との関係による変化

a 側臥位、側臥位にて被検者に刺入した内圧測定用針はトランスデューサーに直結され測定を行うが、側臥位にてはわずか2～3kg/cm²の値を測定し得るにとどまる。同体位でのValsalva Maneuverでは椎間板の正常、中等度変性、高度変性の度合と比例関係なく、5～7kg/cm²上昇し、有意の差をみない(L₃₋₄間)

b 坐位、中間位における内圧は、6.5～13.0kg/cm²で全研究例83例の平均値は9.8kg/cm²である。中間位L₃₋₄間における正常椎間板内圧は8.5～12.0kg/cm²で、研究対象10例の平均値は9.6kg/cm²である。以下の研究において散布度を標準偏差より算出すると

- $\bar{X}$ …………平均値
- X_i …………内圧階級値
- S …………標準偏差
- N …………件数

表2 椎間板内圧測定症例

臨床診断	L3.4	L4.5	L5, S1	
正 常	10	20	0	
椎間板ヘルニア	4	7	2	
脊椎分離症	2	10	3	
脊椎圧迫症	2	6	1	
変形性脊椎症	3	8	1	
椎体偶角分離	0	2	0	
シュモール軟骨結節	0	2	0	
	21	55	7	計 83
椎間板造影診断				
正 常	10	20	0	
中 等 度 変 性	6	18	2	
高 度 変 性	5	17	5	

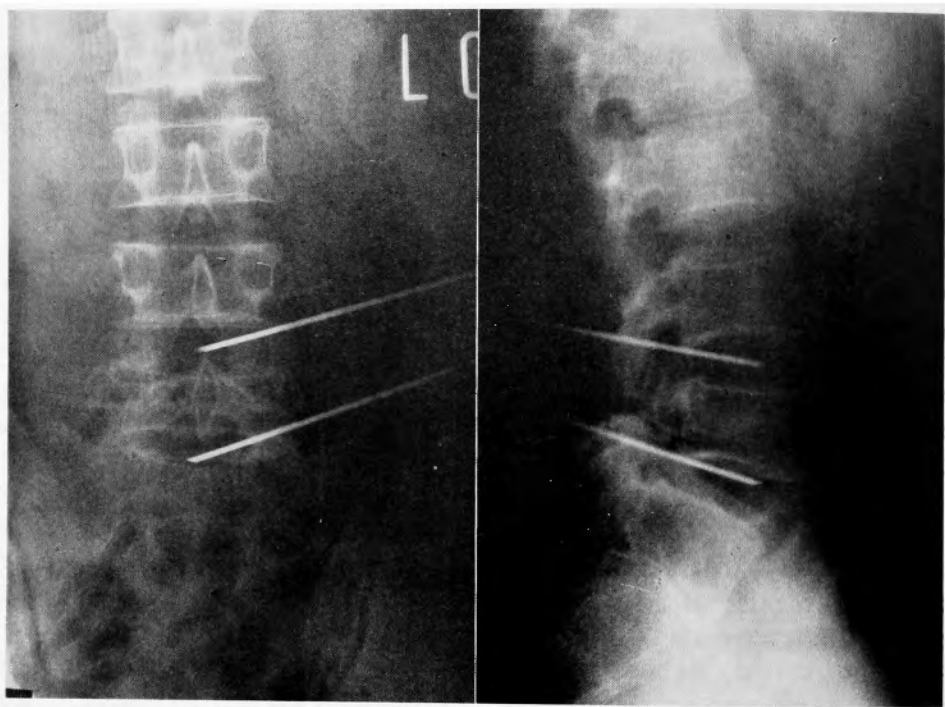


図6 内圧測定用針の挿入

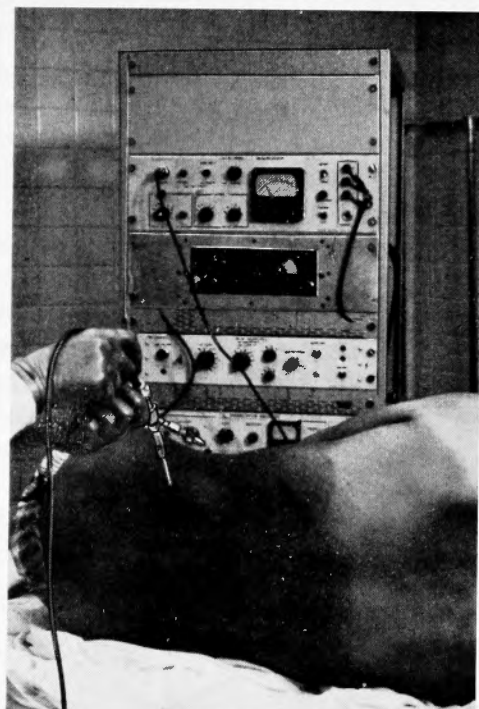


図7 側臥位にて挿入

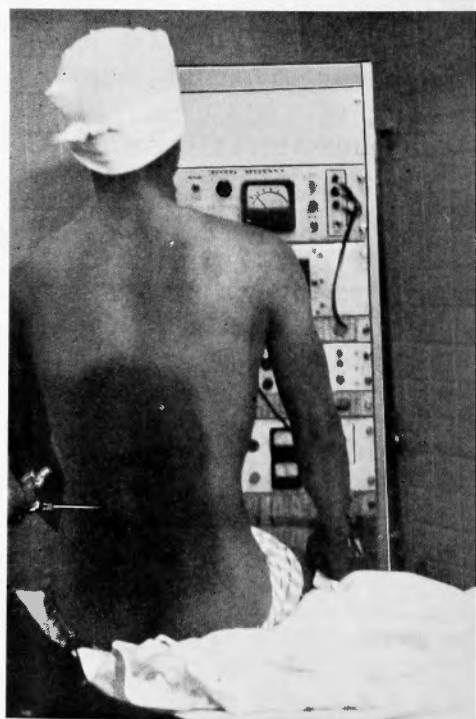


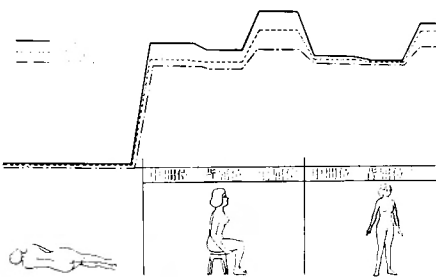
図8 坐位にて内圧測定

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}$$

よって L_{3-4} 間坐位中間位における平均値及び標準偏差は $9.6 \pm 1.01 \text{ kg/cm}^2$ となる。中等度変性例においては $8.0 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、対象7例の平均及び標準偏差は $9.6 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例6例では $6.5 \sim 9.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $7.8 \pm 0.71 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{4-5} 間において、正常例20例について $8.5 \sim 13.0 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $10.7 \pm 0.88 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例においては $9.0 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $10.5 \pm 0.98 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例17例においては $7.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.0 \pm 0.72 \text{ kg/cm}^2$ である。

最大後屈位において内圧は $7.0 \sim 12.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.4 \pm 1.08 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{3-4} 間において正常椎間板10例の内圧は $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.3 \pm 1.01 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例7例の内圧は $8.0 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.4 \pm 0.98 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例6例の内圧は $6.5 \sim 9.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $7.6 \pm 0.78 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{4-5} 間において正常椎間板20例では $8.5 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $10.1 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例17例では内圧は $9.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $10.2 \pm 0.75 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例17例では $7.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $8.9 \pm 0.98 \text{ kg/cm}^2$ である。

図 9 変性度と体位との関連



最大前屈位において内圧は $8.0 \sim 16.0 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $12.2 \pm 1.93 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{3-4} 間において正常10例の内圧は $11.0 \sim 16.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $13.7 \pm 10.5 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例7例の内圧は $10.5 \sim 13.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $13.2 \pm 0.73 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例6例における内圧は $7.5 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.7 \pm 10.01 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{4-5} 間において正常例20例の椎間板内圧は $11.0 \sim 15.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $13.4 \pm 1.04 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例17例において内圧は $11.0 \sim 15.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $12.8 \pm 1.03 \text{ kg/cm}^2$ である。

尚 L_5-S_1 間は症例が少ない。私の研究方法では同

椎間板に内圧測定用針を刺入することは、移行推等、特殊な例を除いては到達しがたく、症例も7例得たにとどまる。立位中間位 $7.5 \sim 10.0 \text{ kg/cm}^2$ 、同最大前屈位 $8.0 \sim 13.0 \text{ kg/cm}^2$ 、同最大後屈位 $8.0 \sim 10.0 \text{ kg/cm}^2$ 、坐位中間位 $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ 、同最大前屈位 $8.0 \sim 13.0 \text{ kg/cm}^2$ 、同最大後屈位 $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ である。同椎間板においても坐位最大前屈位が最も高い内圧を示していることがうかがえる。

C立位、中間位において椎間板内圧は $6.5 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、全研究例83例の平均値は $8.9 \sim 10.7 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{3-4} 間においては正常例10例の内圧は $7.0 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.8 \pm 10.2 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例7例においては $7.5 \sim 9.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.6 \pm 0.59 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示す。高度変性例6例においては $7.0 \sim 9.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $7.8 \pm 0.77 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{4-5} 間においては正常例20例の内圧は $7.0 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.5 \pm 0.73 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度の変性例17例において $8.0 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.2 \pm 0.81 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例17例においては $7.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.7 \pm 1.02 \text{ kg/cm}^2$ である。

最大後屈位においては $6.5 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $8.7 \pm 1.02 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{3-4} 間においては正常例10例の内圧は $6.5 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.3 \pm 1.08 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例7例では $7.0 \sim 9.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.4 \pm 0.69 \text{ kg/cm}^2$ を示す。高度変性例では $6.5 \sim 9.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 7.8 ± 0.78 と減少する。 L_{4-5} 間においては正常例20例について $6.5 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $9.1 \pm 1.08 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例17例において $8.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.0 \pm 0.71 \text{ kg/cm}^2$ となる。更に高度変性例17例について内圧は $7.0 \sim 10.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.5 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ と減少する。

立位最大前屈位における椎間板内圧は $8.0 \sim 4.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $11.4 \pm 1.79 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{3-4} 間において正常10例の内圧は $11.0 \sim 14.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $12.7 \pm 1.03 \text{ kg/cm}^2$ を示すに対し、中等度変性例7例においては $11.0 \sim 12.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $11.4 \pm 0.51 \text{ kg/cm}^2$ 、更に高度の変性例6例において椎間板内圧は $9.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $9.7 \pm 0.47 \text{ kg/cm}^2$ と著明に減少する。 L_{4-5} 間において正常椎間板20例は $11.0 \sim 15.5 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $12.5 \pm 1.02 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例においては $10. \sim 14.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $11.8 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ であり、高度変性例17例において $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $1.01 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ である (表3, 4, 5, 6, 7, 8)。

d 小括

体位よりみた内圧の変化は、研究対象83椎間板の平均にて坐位中間位においては 9.8 kg/cm^2 、坐位最大前屈位

では 12.2kg/cm²、坐位最大後屈位では 9.4kg/cm²である。立位中間位において 8.9kg/cm²、立位最大前屈位では11.4kg/cm²を示し、最大後屈位においては 8.7kg/cm² という結果を得ている。体位による内圧は側臥位、立位最大後屈位、立位中間位、坐位最大後屈、坐位中間位、立位最大前屈位、坐位最大前屈位の順に増大する。立位最大後屈位に比して坐位最大前屈位においては約28%の内圧の増加をみる。

表 3 正常椎間板内圧（生体）kg/cm²

I 立位

L 3.4間	中 間 位	最大後屈位	最大前屈位
	9.5	9.0	14.0
	9.0	9.0	13.0
	10.0	9.0	13.0
	11.0	11.0	14.5
	7.0	7.0	14.0
	9.5	9.0	11.0
	7.5	7.0	11.0
	8.5	8.0	12.0
	8.5	8.0	12.0
	7.0	6.5	13.5
平均	8.8kg/cm ²	8.3	12.7
L 4.5間	10.0	10.0	12.5
	11.0	9.5	13.5
	9.0	8.5	12.0
	9.0	8.5	11.0
	10.5	10.0	11.0
	11.0	10.0	12.5
	11.0	10.5	12.5
	10.5	10.5	12.5
	11.0	10.5	14.0
	9.0	9.0	13.0
	10.0	9.5	15.5
	7.5	7.0	14.5
	8.0	8.0	11.0
	9.0	9.0	11.0
	8.0	7.5	13.0
	10.0	9.5	13.0
	9.0	9.0	11.5
	11.0	10.0	13.5
	9.0	8.0	14.0
	7.0	6.5	13.0
平均	9.5kg/cm ²	9.1	12.5

2 椎間板高位との関係

L₃₋₄ 間23においては内圧は 6.5～14.5kg/cm² で、平均 9.7±1.98kg/cm² である。L₄₋₅ 間53例における内圧は 7.0～14.5kg/cm² で、平均 10.2±1.87kg/cm²である。L₅-S₁ 間の測定は本研究方法によっては技術的に困難で研究対象が少ないが、対象 7 例においては 7.5～11.5kg/cm² で平均は 9.6±1.03kg/cm² の内圧を示している。三椎間の平均値よりみれば椎間板内圧は L₄₋₅ 間が最も高く、

表 4 正常椎間板内圧（生体）

II 坐位

L 3.4間	中間位	最大後屈位	最大前屈位
	10.0	9.5	16.0
	9.0	8.5	13.0
	10.5	10.0	14.0
	12.0	11.5	15.5
	9.0	8.0	14.5
	10.0	9.5	12.0
	9.0	9.0	11.0
	9.5	9.5	12.5
	9.0	8.5	14.5
	8.5	8.5	14.0
平 均	9.6	9.3	13.7
L 4.5間	10.5	9.5	12.5
	12.0	12.0	12.0
	9.5	9.5	12.5
	9.5	9.0	11.0
	10.5	10.0	12.0
	11.0	10.0	13.0
	11.5	10.0	13.0
	11.5	11.0	13.0
	12.0	11.5	14.5
	10.5	9.0	13.5
	12.0	12.0	15.5
	9.5	9.5	14.5
	9.5	9.0	12.0
	9.5	9.0	13.0
	8.5	8.5	15.0
	13.0	12.0	15.0
	9.5	9.0	12.0
	11.5	11.0	13.0
	12.0	11.0	14.5
	10.0	11.0	14.5
平 均	10.7	10.1	13.4

次いで L_{3-4} 間, L_{5-S1} 間と並ぶ。

L_{3-4} 間における正常椎間板は立位にて $6.5 \sim 14.5 \text{ kg/cm}^2$ の内圧の変動を示し, 平均は $9.9 \pm 1.98 \text{ kg/cm}^2$ である。 L_{4-5} 間においては $6.5 \sim 15.5 \text{ kg/cm}^2$ の変動域を有し平均 $10.4 \pm 2.10 \text{ kg/cm}^2$ である。坐位にては L_{3-4} 間は $8.5 \sim 16.0 \text{ kg/cm}^2$ の内圧の変動を見, 平均 $10.9 \pm 1.91 \text{ kg/cm}^2$ であり, L_{4-5} 間は同様に $8.5 \sim 15.0 \text{ kg/cm}^2$ にわたり, 平均 $11.4 \pm 1.78 \text{ kg/cm}^2$ と高い。

L_{3-4} 間における中等度変性椎間板は立位にて $7.0 \sim 12.5 \text{ kg/cm}^2$ で, 平均 $9.5 \pm 1.12 \text{ kg/cm}^2$ である。同様 L_{4-5}

間にては $8.0 \sim 14.0 \text{ kg/cm}^2$ で, 平均 $11.8 \pm 1.70 \text{ kg/cm}^2$ の値を示す。中等度変性 L_{3-4} 間の坐位における内圧は $8.0 \sim 13.0 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $10.7 \pm 1.07 \text{ kg/cm}^2$ であり, L_{4-5} 間にては $9.0 \sim 15.0 \text{ kg/cm}^2$ で, 平均 $11.2 \pm 1.71 \text{ kg/cm}^2$ と増加している。 L_{3-4} 間において高度変性例では立位 $6.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し, 平均 $8.4 \pm 1.05 \text{ kg/cm}^2$ で, L_{4-5} 間にて $7.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ で, 平均 $9.1 \pm 1.02 \text{ kg/cm}^2$ と増加するがその増加率は低い。

高度変性 L_{3-4} 間坐位にて $6.5 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し平均 $8.4 \pm 1.02 \text{ kg/cm}^2$ で, L_{4-5} 間では $7.0 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$

表5 中等度変性椎間板内圧

I 立位			
L 3.4間	中間位	最大後屈位	最大前屈位
	9.0	9.0	10.5
	9.0	9.0	11.0
	9.0	9.0	11.0
	9.0	9.0	11.5
	7.5	7.0	11.0
	8.0	8.0	12.0
	8.5	8.0	12.5
平均	8.6	8.4	11.4
L 4.5間			
	9.0	9.0	12.0
	9.0	9.0	11.0
	9.0	9.0	11.0
	9.0	9.0	10.5
	9.5	9.5	12.0
	9.0	8.5	11.0
	11.0	10.5	12.0
	10.0	10.0	12.0
	9.5	9.0	11.0
	8.0	8.0	12.0
	9.0	8.5	13.0
	10.0	9.5	14.0
	10.0	10.0	13.0
	9.0	8.5	10.5
	8.0	8.0	10.0
	8.5	8.5	12.0
	8.0	8.0	12.0
平均	9.2	9.0	11.8
L 5, S1間			
	10.0	10.0	11.0
	10.0	10.0	13.0
平均	10.0	10.0	12.0

表6 中等度変性椎間板内圧

II 坐位			
L 3.4間	中間位	最大後屈位	最大前屈位
	9.5	9.5	10.5
	9.0	8.5	10.5
	10.0	10.0	12.5
	9.5	9.0	12.0
	8.0	8.0	11.5
	11.0	11.0	13.0
	10.5	10.0	13.0
平均	9.6	9.4	13.2
L 4.5間			
	9.5	9.5	11.5
	9.5	9.0	12.0
	9.0	9.0	12.0
	10.0	9.5	13.0
	10.0	10.0	13.0
	11.5	11.0	13.5
	11.5	11.0	13.5
	11.5	11.5	13.0
	9.5	9.0	12.0
	9.0	9.0	11.0
	11.0	11.0	14.0
	12.0	11.5	15.0
	10.5	10.0	13.0
	11.5	11.0	13.5
	11.0	11.0	13.0
	11.5	11.0	12.0
	9.5	9.5	12.5
平均	10.5	10.2	12.8
L 5 S1間			
	11.5	11.5	13.0
	11.0	11.0	13.0
平均	11.3	11.3	13.0

の内圧を示し、平均 $9.4 \pm 1.07 \text{ kg/cm}^2$ となる (表3, 4, 5, 6, 7, 8). 以上の始く高位より椎間板内圧をみると、 L_{4-5} 間が最も高い圧を示す. このことは臨床例と比較して、椎間板症の好発部位と一致をみることは興味深い.

3 変性度との関係

研究対象は正常例30椎間、中等度変性25椎間、高度変性例28椎間計83椎間である. 正常椎間板は7.0~16.0

kg/cm^2 の内圧を呈し、平均 $10.6 \pm 2.12 \text{ kg/cm}^2$ である. 中等度変性例では $6.5 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $9.1 \pm 1.09 \text{ kg/cm}^2$ と減少する. 立位中間位では正常椎間板は7.0~11.0 kg/cm^2 の内圧を呈し、平均 $9.3 \pm 1.01 \text{ kg/cm}^2$ であるのに対し、中等度変性例では $7.5 \sim 11.0 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $9.0 \pm 1.01 \text{ kg/cm}^2$ であり、更に高度変性例では $6.5 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し、平均 $8.5 \pm 1.09 \text{ kg/cm}^2$ と著明に減少する. 立位最大後屈位にては正常例は6.5~10.5 kg/cm^2 の内圧を示し、

表7 高度変性椎間板内圧

I 立位

L 3,4間	中間位	最大後屈位	最大前屈位
	8.5	8.5	10.5
	8.0	7.0	9.5
	7.0	7.0	9.5
	7.5	7.0	9.5
	6.5	6.5	9.0
	9.0	9.0	10.0
平均	7.8	7.8	9.7
L 4,5間	8.5	8.5	10.5
	9.5	9.0	11.0
	8.0	7.5	10.5
	8.0	8.0	10.0
	8.5	8.5	9.5
	8.5	8.0	9.5
	8.0	8.0	9.5
	9.0	9.0	9.5
	9.0	9.0	10.0
	10.5	10.0	11.5
	9.5	9.0	11.0
	9.0	9.0	11.0
	8.0	8.0	10.0
	10.0	9.5	11.5
	10.0	9.5	10.0
	7.0	7.0	8.5
	7.0	7.0	8.0
平均	8.7	8.5	10.1
L 5 S1間	7.5	9.5	9.0
	8.0	8.0	8.0
	8.5	8.0	10.5
	9.0	9.0	10.0
	8.5	8.0	10.0
平均	8.3	8.5	9.5

表8 高度変性椎間板内圧

II 坐位

L 3,4間	中間位	最大後屈位	最大前屈位
	8.5	8.5	10.5
	7.0	7.0	7.5
	7.5	7.0	9.5
	8.0	7.5	10.0
	6.5	6.5	9.5
	9.0	9.0	11.0
平均	7.8	7.6	9.7
L 4,5間	8.5	8.5	10.0
	9.5	9.0	11.0
	8.5	8.5	11.0
	8.5	8.5	10.0
	8.0	7.5	9.5
	9.0	9.5	10.0
	9.0	9.0	9.5
	9.5	9.5	9.5
	10.0	10.5	11.0
	10.5	10.5	12.0
	9.5	9.5	11.5
	9.5	9.0	12.0
	8.0	8.0	10.0
	10.0	10.0	11.5
	10.5	10.0	11.0
	7.0	7.0	8.5
	7.5	7.5	8.0
平均	9.0	8.9	10.4
L 5 S1間	8.5	9.0	9.5
	8.0	8.0	8.0
	8.5	8.5	11.0
	10.0	10.0	11.0
	8.5	8.0	11.0
平均	8.7	8.7	10.1

平均 $8.8 \pm 1.05 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例においては $7.0 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.8 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例では $6.5 \sim 1.00 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $8.3 \sim 1.01 \text{ kg/cm}^2$ である。立位最大前屈位にては正常例は $11.0 \sim 15.5 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し、平均 $12.6 \pm 1.03 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例においては $10.0 \sim 14.0 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し平均 $11.7 \pm 1.04 \text{ kg/cm}^2$ である。高度変性例においては $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $10.0 \pm 0.99 \text{ kg/cm}^2$ と著明な減少を認める。坐位中間位では正常椎間板は $8.5 \sim 13.0 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し平均 $10.3 \pm 1.03 \text{ kg/cm}^2$ である。中等変性例では $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ を示し平均 $10.0 \pm 1.00 \text{ kg/cm}^2$ である。更に高度変性例においては $6.5 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $8.7 \pm 1.06 \text{ kg/cm}^2$ と減少する。坐位最大後屈位では、正常椎間板は $8.0 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し、平均 $9.8 \pm 1.04 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例においては $8.0 \sim 11.5 \text{ kg/cm}^2$ で、平均では $9.6 \pm 1.01 \text{ kg/cm}^2$ である。更に高度変性例では $6.5 \sim 10.5 \text{ kg/cm}^2$ で平均 $8.6 \pm 1.04 \text{ kg/cm}^2$ と減少する。坐位最大前屈位においては正常椎間板は $11.0 \sim 16.0 \text{ kg/cm}^2$ の内圧を示し、平均 $13.5 \pm 1.24 \text{ kg/cm}^2$ である。中等度変性例においては $10.5 \sim 15.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $12.9 \pm 1.08 \text{ kg/cm}^2$ である。これに対し高度変性例では $8.0 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$ で、平均 $10.2 \pm 1.07 \text{ kg/cm}^2$ と最も著明な減少を示している(表3, 4, 5, 6, 7, 8)。椎間板はその変性に従い内圧を減少し、高度変性例では正常のものに比して約15%の減少をみる。更に最大前屈時における内圧の変動は正常椎間板においては坐位にて約43%の増加をみるが、高度変性例では約23%の増加をみるにとどまる。

IV. 考 按

重い軀幹の保持と運動を義務づけられている脊柱にあって、椎間板は緩衝器として重要な役割を持つ。椎間板の変性自体は特に病的意味を持たないが、椎間板の変性による脊椎支持の破綻、衝撃吸収の減弱による障害は多くの場合腰痛の因として問題となる。

腰仙椎の運動に関しては1827年 Weber の研究以来、幾多の研究があり、1931年 Junghans の研究で一段と発展した。1950年 Lindblom が椎間板造影法を発表し、それまで椎骨間の間隙としてX線上眺められていた椎間板が一躍注目を集めた。Hirsch (1959) により組織化学的に、又 Rooffe (1939) の神経終末発見と椎間板の形態、組織学的研究の進歩発展はこの10数年間において著しい。更に物理的研究として1958年来

Nachemson が椎間板内圧測定について一連の研究発表を行っている。生体においては Nachemson は

L_{3-4} 間に内圧測定針を刺入し、各体位及び荷重時の内圧変動を報告しているが、私は下位腰椎、腰仙椎々間板が臨床的に病変椎間となり易いためこの部の内圧測定を行った。Nayler (1961) によれば髄核の内圧は、1) polysaccharide の量、2) 髄核内の protein gel の濃縮程度、3) 髄核内腔の広さ、4) 線維輪の弾性度によるとしている。然しこれらの臨床的測定は不可能であり、私や Nachemson の法によらねば内圧の測定は出来ない。

正常椎間板と高度変性椎間板の内圧の差は L_{3-4} 坐位中間位の平均値で $9.6:7.8 \text{ kg/cm}^2$ と有意の差を認め、正常椎間板の内圧は高い。組織化学的差は髄核緊張度の低下及び線維輪弾性度の差をもたらすと解釈出来る。静臥時の椎間板内圧は椎間板造影時の注入圧の高低で類推出来る。教室内西(1968)の腰椎荷重軸に関する研究によれば、腰椎における脊椎上部よりの荷重は第4腰椎にほぼ垂直にかゝり、第4腰椎は軀幹の前後屈に際して常に水平位を保たんとし、 L_{4-5} 及び L_5-S_1 に負荷がかかると報告している。私の内圧測定は、 L_5-S_1 の測定が多くの場合困難なため、刺入可能の症例の他は L_{3-4} 、 L_{4-5} 間を測定し、椎間板高位と内圧との関係及び体位変換による内圧の変化との関係を検討した。対象椎間板では、 $L_{4-5} > L_5-S_1 \approx L_{3-4} < L_{4-5}$ の内圧が高いことを実証し、内西のX線学的研究と同一結果を得ている。

椎間板内圧は体重によって差が見られ、 L_{3-4} 正常椎間板の坐位中間位をみても、 $8.5 \sim 12.0 \text{ kg/cm}^2$ と差を認める。各被検者についてその体重より補正を行うと、

被検者内圧……………pt

被検者体重……………Tg

対象平均体重………Ta

$$pt \times \frac{Ta}{Tg} = 9.6 \pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$$

となり研究成績欄の平均とほぼ同様の値を得られ、又体重補正後の誤差は $\pm 0.6 \text{ kg/cm}^2$ にとどまる。

体位により椎間板内圧は変化し、側臥位よりも立位、立位よりも坐位と内圧は増し、正常椎間板 L_{3-4} では側臥位：立位：坐位は2.0：8.8：9.6である。坐位より立位の内圧の低いことは立位が脊柱支持筋群の緊張度の減少、即ち屈筋群及び伸筋群の調和をもたらし、坐位では腰椎前彎を減少せしめ、伸筋群の緊張を増加する(Keegan. 1953) ためと考えられる。正常椎間板でも変性椎間板でも、椎間高位に関係なく内圧は、

前屈位>中間位>後屈位を示す。教室吉沢(1967)の光弾性実験によれば、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解される。更に吉沢は同研究にて病変椎間板は L_{4-5} に最も好発しやすいことを示唆している。

Nachemson の研究と本研究はほぼ同一手法、手段で行われたが、本研究は臨床的、実験的に病変椎間となり易い L_{4-5} に注目施行し、椎間高位による差を明らかにした。

L_{3-4} 間において正常椎間板の内圧は、坐位中間位 $9.6\text{kg}/\text{cm}^2$ で前・後屈運動により $9.3\sim 13.7\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧差を示すが、中等度変性例においては中間位 $9.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 、前・後屈運動により $9.0\sim 13.2\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧差を示す。更に高度変性例においては中間位 $7.8\text{kg}/\text{cm}^2$ で、前・後屈運動により $7.6\sim 9.7\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧差を示すにとどまる。椎間板内圧は正常例において最も高い圧を有し、変性に従い内圧の減少を示すと共に変性椎間板の前・後屈運動による圧差の減少を示している。坐位前屈位における正常例と高度変性例の圧差の比は、 $(13.7\sim 9.6):(9.7\sim 7.8)$ で最大前屈位における内圧の増加は高度変性例では正常の椎間板における内圧増加率の約 $1/2$ にとどまる。椎間板内圧は坐位中間位にて平均 $9.6\text{kg}/\text{cm}^2$ であるが、人屍椎間板の実験において

内圧 $= 0.37 \times$ 外圧

であるから同位においては $26\text{kg}/\text{cm}^2$ の外圧が同椎間板に負荷されていることになる。その差 $16.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 、63%が椎体線維輪、前後靭帯により吸収又は支持されていることになる。生体内においては更に筋肉、関節突起、後部諸靭帯により支持されていて、一層大きく吸収緩衝されることは容易に推測出来る。高度変性せる椎間板を有する例では同型、同体重の正常椎間板を有する例と比較して、いずれにも負荷されると推測できる $26\text{kg}/\text{cm}^2$ の外圧に対して $7.8\text{kg}/\text{cm}^2$ の内圧を示すにとどまり、約20%の支持を周囲の支持組織に依存することになる。

Bernadi(1957)、鈴木(1966)は椎間板の代謝物質たる Chondroitinsulfata, hyaluronic acid, Kerato-sulfate にその因を求めんとした。然し腰痛はその度合が日々に一進一退し、時に急激に発症し、又自然に消失することすらある。腰痛発症は代謝物質だけでは理解しにくく、物理的条件の関与が考えられる。Char-niey(1952)は突然の内圧の増加が、腰痛を起こすと述

べているが、その意味するところは椎間板自身の痛みを主体としている。椎間板自身からの痛みもあり得るし、神経根、馬尾神経への圧迫による腰痛もあり得る。しかし緩衝し得ない内圧を、椎間板がその任を他の支持組織にゆだねる為に起る腰痛も否定出来ない。高度変性せる椎間板を有する患者が、体位変換にて、特に前屈位で重い物を挙上しようとし、いわゆるギックリ腰を起す例は加わる外圧を内圧として吸収出来ず、周囲支持組織に負荷するためと考えるが、更に Keegen(1953)は坐位及び、起立前屈位は、内圧の増加に加えて、後方への応力スペクトルが変性椎間板においては Protrusion 又 herniation をおこすと説いている。かゝる腰痛は生化学的代謝産物で説明するにはあまりに急激、突発性である。

正常の椎間板が立位中間位にて $8.8\text{kg}/\text{cm}^2$ であり、坐位前屈を強いられる体位では $13.7\text{kg}/\text{cm}^2$ で約44%の内圧の増加をみるが、この体位変換が内圧を44%増加せしめるものと考えられない。坐位前屈位では周囲支持組織が免荷され、より多くの椎間板内圧が加わる。従って坐位にて前屈位を長時間強いられる職業に従事する者は、より多くの椎間板の負担が加わり、ひいては椎間板症の一因となり得る。

V. 結 論

1. 高位に関し、 L_{4-5} は L_{3-4} 、 L_1-S_1 に比して内圧は高い。椎間板疾患の好発部位となり易く内圧異常亢進によって発症すると考えられている椎間板ヘルニアの好発部位と一致する。

2. 同一体位にて正常椎間板内圧が最も高く変性に従い減少する。

3. 正常椎間板では、加わった外圧の約37%が髄核内圧として示めされるにすぎず、63%は支持組織に緩衝、吸収され、変性椎間板では周辺支持組織の負荷78%と増大し、椎間板原性の腰痛を発症する。

4. 椎間板内圧は坐位前屈位にて最も高く、立位最大後屈位にて最も低い。長時間の前屈位保持は椎間板及び脊椎支持組織に有害である。

5. 側、仰臥位にては椎間板内圧は $0\sim 3\text{kg}/\text{cm}^2$ にとどまり、体位の変換による内圧の変動は変性するに従い少なくなる。

終りに本研究の御指導をいただいた池田亀夫教授、岩原培名教授に深謝いたします。本論文の要旨は第15回東日本臨床整形外科学会にて発表した。

文 献

- 1) Bartelink, D. L.: The role of abdominal pressure in relieving the pressure of the lumbar intervertebral discs. *J. Bone & Joint Surg.*, **39-B**:718, 1957.
- 2) Cloward, R. B.: Anterior herniation of ruptured lumbar intervertebral disc. *AMA Arch. Surg.*, **64**:459, 1952.
- 3) Hirsch, C.: studies on the parthology of low back pain. *J. Bone & Joint Surg.*, **41-B**:237, 1959.
- 4) Keegan, J. J.: A herations of the lumbar curve related to posture and seating. *J. Bone & Joint Surg.*, **35-A**:589, 1953.
- 5) Lindblom, K.: Technique and results in myelography and diso puncture. *Acta Radio. Stock.*, **34**:321, 1950.
- 6) Nackemson, A.: Measurement of intradiscal pressure. *Acta Ortho.*, **28**:269, 1958
- 7) Nachemson,, A.. Lumbal intradiscal pressure experiment studies on the post-morten material. *Acta Ortho. Scand.*, **43**:1, 1960.
- 8) Nachemson, A.: The influence of spinal movement on the lumbar intradiscal pressure and on the tensile stress in the annules fibrosus. *Acta Ortho. Scand.*, **33**(3):183, 1963.
- 9) Nachemson, A.: The lumbar discometries lumbar intradiscal pressure measurement in vivo. *Lancet* **1**:1140, 1963.
- 10) Nachemson, A.: In vivo measurement of intradiscal pressure in the lower lumbar discs. *J. Bone & Joint Surg.*, **46-A**:1077, 1964.
- 11) Nachemson: The effect of forward leaning on the lumbar intradiscal pressure. *Acta. Ortho. Scand.*, **35**:314, 1965.
- 12) Nachemson; A.. In vivo discometry in lumbar discs with irregular nucleogram. *Acta Ortho. Scand.*, **36**:418, 1965.
- 13) 小川源太郎:機械的荷重による腰部椎間板の変化に関する実験的研究. *千葉医学会誌*36(3):841, 昭35.
- 14) 沖倉元治:高分子材料による金属表面加工. 財団法人天然ゴム研究開発財団研究所機関誌.
- 15) Sylven: Biophysical and physiologic investigations on cartilage and other mesenchymal tissures. Ultrastructure of bovine and human nuclei pulposi. *J. Bone & Joint Surg.*, **33-A**:333, 1951.
- 16) Thompton, Br.: Some mechanical test on the lumbosacrol spine with particular reference of the intervertebral discs. *J. Bone & Joint Surg.*, **39-A**:1135, 1957.
- 17) Gardner, W. J.: X-ray visualization of the intervertebral disc. *AMA Arch. Surg.*, **64**:355, 1952.
- 18) 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**:941, 1968.
- 19) 吉沢英造:腰部前変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**:429, 1967.