

POST-TRAUMATIC SPONDYLOLYSIS
REPORT OF TWO CASES AND REVIEW OF THE LITERATURE

外傷性の脊椎分離症：2例報告と文献的考察

TAKASHI KAWANAMI, M.D. 川波 喬
SHOZO TAMURA, M.D. 田村正三
WALTER J. RUSSELL, M.D., D.M.Sc.



RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION
財団法人 放射線影響研究所

A cooperative Japan - United States Research Organization
日米共同研究機関

ACKNOWLEDGMENT

謝 辞

The authors are indebted to Dr. Philip J. Hodes and Dr. Tokuro Nobechei for reviewing the manuscript, and for their suggestions and criticisms. They thank Mr. Hiroshi Uchikoshi for his assistance with the retrieval and review of the radiographs. The help of Mrs. Grace Masumoto in preparing the manuscript is gratefully acknowledged.

原稿を検討の上、示唆、批評を寄せられた Dr. Philip J. Hodes 及び野辺地篤郎博士に対し謝意を述べたい。レントゲン写真の検索、検討を行う際に協力された打越 俊氏並びに原稿作成に援助された舩本幸江氏に対しても深謝する。

RERF TECHNICAL REPORT SERIES

放 影 研 業 績 報 告 書 集

The RERF Technical Reports provide the official bilingual statements required to meet the needs of Japanese and American staff members, consultants, and advisory groups. The Technical Report Series is in no way intended to supplant regular journal publication.

放影研業績報告書は、日米専門職員、顧問、諮問機関の要求に応えるための日英両語による公式報告記録である。業績報告書は決して通例の誌上発表論文に代わるものではない。

The Radiation Effects Research Foundation (formerly ABCC) was established in April 1975 as a private nonprofit Japanese Foundation, supported equally by the Government of Japan through the Ministry of Health and Welfare, and the Government of the United States through the National Academy of Sciences under contract with the Department of Energy.

放射線影響研究所(元ABCC)は、昭和50年4月1日に公益法人として発足した。その経費は日米両政府の平等分担とし、日本は厚生省の補助金、米国はエネルギー省との契約に基づく米国学士院の補助金とをもって充てる。



POST-TRAUMATIC SPONDYLOLYSIS REPORT OF TWO CASES AND REVIEW OF THE LITERATURE

外傷性の脊椎分離症：2例報告と文献的考察

TAKASHI KAWANAMI, M.D. (川波 喬)*; SHOZO TAMURA, M.D. (田村正三)**;
 WALTER J. RUSSELL, M.D., D.M.Sc.

Department of Radiology

放射線部

SUMMARY

Progression from unilateral to bilateral spondylolysis in the spines of two persons was radiographically documented as due to trauma. The etiology of spondylolysis is discussed, and a review of the scientific literature is included. This report provides additional evidence that trauma causes spondylolysis.

BACKGROUND

Spondylolysis is a defect in the pars interarticularis without displacement of the corresponding vertebral body. Spondylolisthesis consists of spondylolysis with associated forward displacement of the involved vertebral body.

According to some investigators, spondylolysis is never present at birth,^{1,2} and the incidence of spondylolysis increases between 5 and 20 years of age, but not thereafter.²

Radiographic documentation of the development of spondylolysis is rare. The following two cases illustrate the progression from unilateral to bilateral spondylolysis in middle-aged subjects, during or following trauma. The patients are members of the RERF Adult Health Study, the fixed population sample being continually observed for late effects of the atomic bombs.³

要 約

外傷により片側性脊椎分離症から両側性脊椎分離症に進行する過程が2症例の脊椎でレントゲン学的に観察しえた。脊椎分離症の発生要因について考察し、文献的考察も加えた。本報告は、外傷が脊椎分離症の原因となるという一つの証拠を提供するものである。

背 景

脊椎分離症は、対応する椎体の転位を伴わない関節突起間部の分離である。脊椎圧迫骨折は、関連椎体が前方へ転位した脊椎分離症の呼称である。

ある研究者によれば、脊椎分離症は出生時には存在せず、^{1,2} その発生率は5歳から20歳の間に増加を示すが、その後の増加はない。²

脊椎分離症の発現をレントゲン学的に観察した報告は極めて少ない。次に挙げる2症例は、外傷により中年の片側性脊椎分離症が両側性脊椎分離症に進行する過程を示すものである。この2名の患者は、原子爆弾の後影響を継続的に観察する固定集団、すなわち、放影研成人健康調査の対象者である。³

*Department of Radiology, Emory University Affiliated Hospital, Atlanta, Georgia

**Department of Radiology, University Hospitals of Cleveland, Cleveland, Ohio

*Georgia 州 Atlanta 市 Emory 大学病院放射線部

**Ohio 州 Cleveland 市 Cleveland 大学病院放射線部

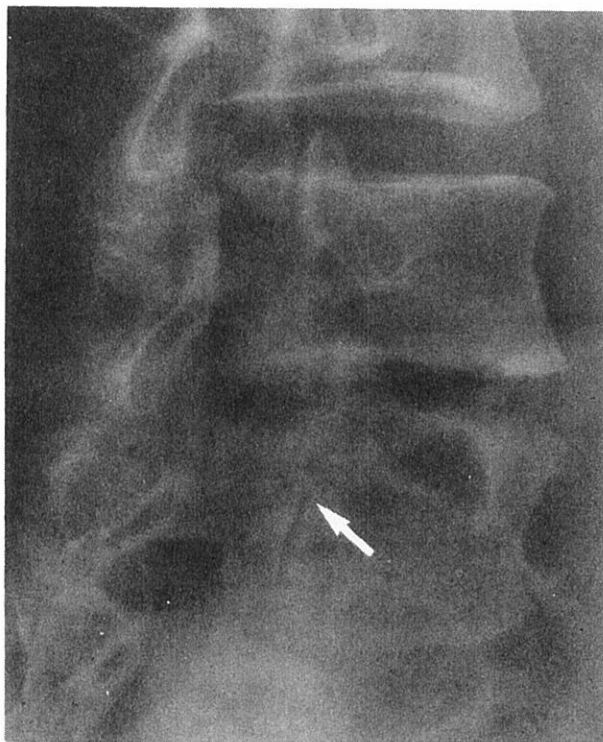


Figure 1. Case 1: Left posterior oblique lumbar spine radiograph of 21 January 1964 shows left-side pars interarticularis defect (arrow) of L5

図1. 症例1: 1964年1月21日に撮影した左背斜方向の腰椎レントゲン写真では、第5腰椎の左関節突起間部に分離が認められる。

CASE REPORTS

Case 1 (MF [REDACTED]). A 51-year-old female received lumbosacral spine radiography in January 1964 because of occasional lumbago of long duration. The radiographs show a unilateral defect in the left pars interarticularis of L5 (Figures 1 & 2). Ten years later, she fell, striking her gluteal region and both elbows, and subsequently experienced occasional lumbago. Lumbar spine radiography in November 1975 showed defects in both partes interarticulares of L5 (Figure 3).

Case 2 (MF [REDACTED]). A 28-year-old male received lumbosacral spine radiography because of occasional lumbago. The radiographs show a defect in the left pars interarticularis of L4 (Figure 4). At L4 there are also minimal indentations on the superior and inferior aspects of the right isthmus. The latter is narrower than its counterpart (Figure 5). Four years later he fell, striking his lumbar region, following which he complained of lumbago, which gradually subsided without treatment. Radiography in August 1976 revealed defects in both partes interarticulares of L4 (Figure 6).

症例報告

症例1 (MF [REDACTED]). 症例は長期間にわたる時折りの腰痛のため1964年1月に腰仙椎のレントゲン撮影を受けた51歳の女性。レントゲン写真では、第5腰椎の左関節突起間部に片側性の分離が認められる(図1, 2)。10年後、患者は転倒し、臀部及び両肘を打撲。その後時折り腰痛があった。1975年11月の腰椎のレントゲン撮影では、第5腰椎の両関節突起間部に分離が認められた(図3)。

症例2 (MF [REDACTED]). 症例は時折りの腰痛のため腰仙椎のレントゲン撮影を受けた28歳の男性。レントゲン写真では、第4腰椎の左関節突起間部に分離が認められる(図4)。また、第4腰椎の右峡部上方及び下方にわずかな陥没がある。下方部の陥没は上方部のそれよりも狭い(図5)。4年後、患者は転倒し、腰部を打撲。その後、腰痛を訴えたが、治療しないままに軽減した。1976年8月のレントゲン撮影では第4腰椎の両関節突起間部に分離が認められた(図6)。

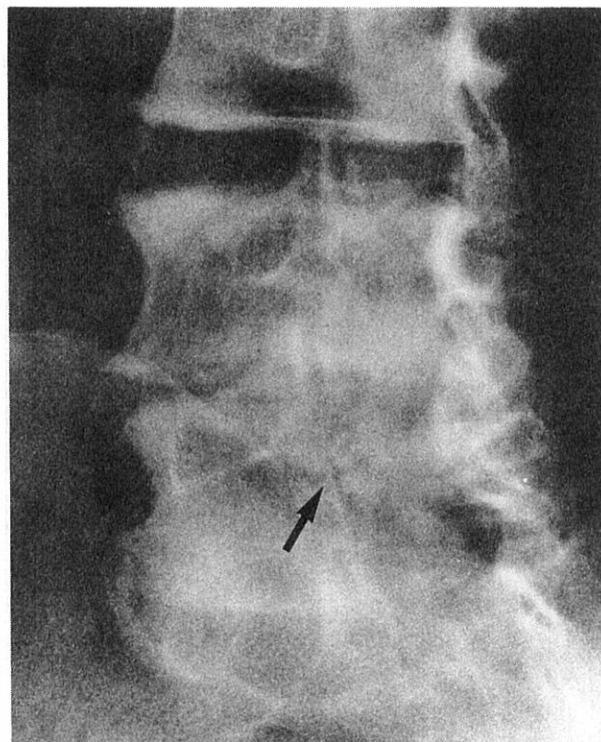
Figure 2. Case 1: Right posterior oblique lumbar spine radiograph of 21 January 1964 shows no right-side pars inter-articularis defect (arrow) of L5

図2. 症例1: 1964年1月21日に撮影した右背斜方向の腰椎レントゲン写真では、第5腰椎の右関節突起間部に分離が認められない。



Figure 3. Case 1: Right posterior oblique lumbar spine radiograph of 7 November 1975 shows a new right-side pars inter-articularis defect (arrow) of L5

図3. 症例1: 1975年11月7日に撮影した右背斜方向の腰椎レントゲン写真では、第5腰椎の右関節突起間部に新しく分離が認められる。



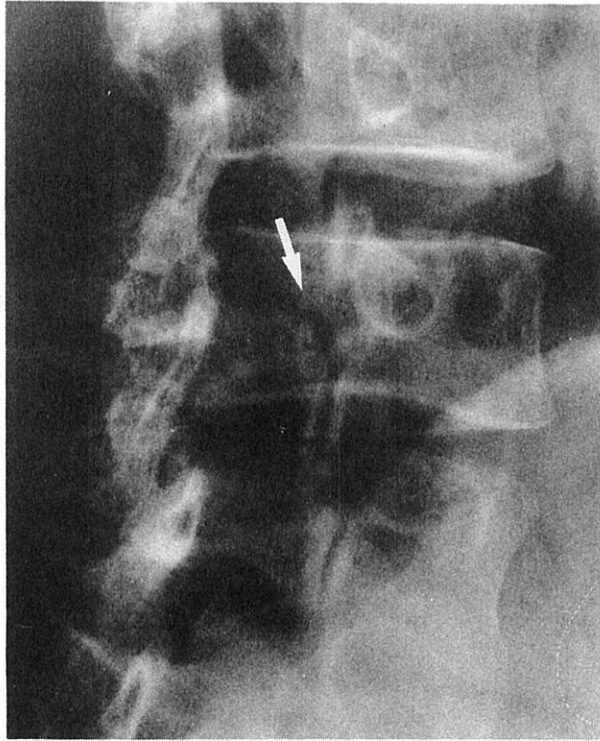


Figure 4. Case 2: Left posterior oblique lumbar spine radiograph of 14 March 1968 shows a left-side pars interarticularis defect (arrow) of L4

図4. 症例2: 1968年3月14日に撮影した左背斜方向の腰椎レントゲン写真では、第4腰椎の左関節突起間部に分離が認められる。

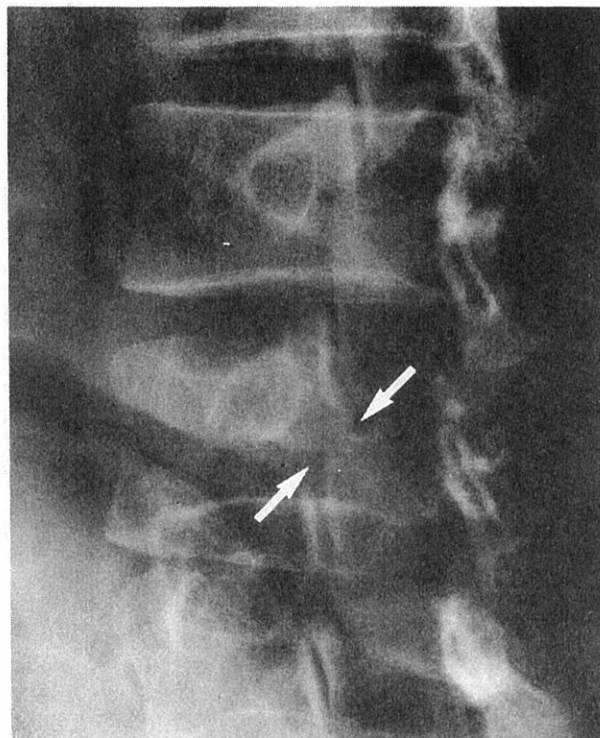
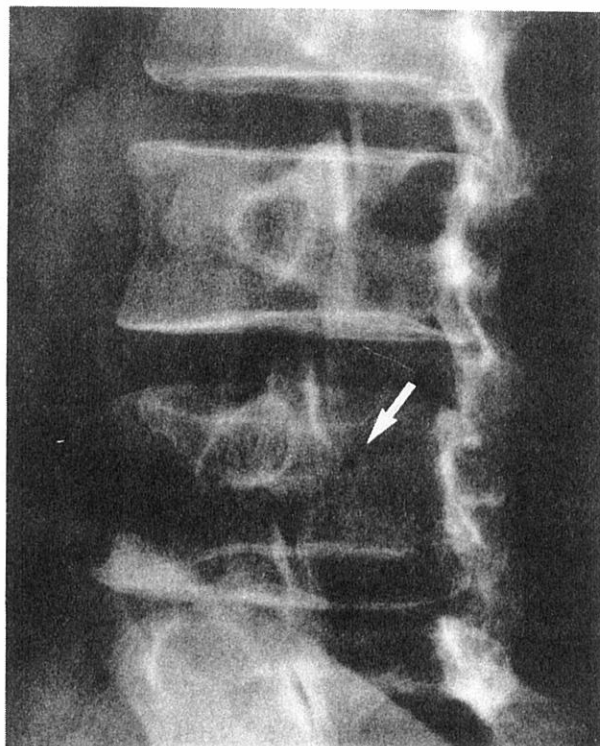


Figure 5. Case 2: Right posterior oblique lumbar spine radiograph of 14 March 1968 shows right-side minimal indentations (arrows) on the superior and inferior aspects of the pars interarticularis defect of L4

図5. 症例2: 1968年3月14日に撮影した右背斜方向の腰椎レントゲン写真では、第4腰椎の右関節突起間部上方及び下方にわずかに陥没が認められる。

Figure 6. Case 2: Right posterior oblique radiograph of 9 August 1976 shows a new right-side pars interarticularis defect (arrow) of L4

図6. 症例2: 1976年8月9日に撮影した右背斜方向のレントゲン写真では、第4腰椎の右関節突起間部部に新しく分離が認められる。



DISCUSSION

The several theories proposed for the etiology of spondylolysis can be summarized as follows.

Congenital

Ramnaud and Renault⁴ concluded in 1864 that spondylolysis results from failure of fusion between two separate ossification centers on each side of the neural arch. This theory was long and widely accepted. However, Mutch and Walmsley⁵ histologically observed serial sections of the lumbar vertebrae of seven fetuses, concluding that the ossification of the vertebral arch is not endochondral, and that it is not consistent with the existence of two ossification centers on each side of the neural arch. Numerous investigators have tried without success to find pars interarticularis defects in fetal and neonatal cadavers.^{1,2} For these reasons, the congenital theory has practically been abandoned.

Familial and Racial Prevalence

There are numerous reports of increased racial and familial prevalence of spondylolysis.^{1,2,6-12} Roche and Rowe¹ reported that the frequency of spondylolysis was 5.8% in Whites, that it was

考 察

脊椎分離症の発生要因に関して提案された学説は、次のようにまとめられる。

先天性

脊椎分離症は、椎弓側面にある二つの化骨中心の融合不全の結果生じるという1864年のRamnaud及びRenault⁴の説が長い間広く認められていた。これに対し、Mutch及びWalmsley⁵は7例の胎児の腰椎の連続切片を組織学的に観察し、椎弓の化骨は軟骨性のもではなく、椎弓の各側面に二つの化骨中心の存在はあり得ないという結論に達した。多数の研究者が死亡した胎児及び新生児の脊椎関節突起間部の分離を見付けようと試みたが、いずれも失敗に終わっている。^{1,2} 以上のような理由から、先天性説は事実上棄却された。

家系及び人種的発生

脊椎分離症が特定の人種及び家系に多発するという多数の報告がある。^{1,2,6-12} Roche及びRowe¹は、脊椎分離症の頻度が白人では5.8%で、白人男性の

twice as frequent in White males as females, and that its prevalence was 2.4% among American Negroes. Kettelkamp and Wright⁶ found a 27.4% frequency among Eskimos, and Hasebe¹³ reported a 5.6% rate among Japanese, sexes combined.

Dysplasia of the Neural Arch

Dysplasia reportedly predisposes to the development of spondylolysis.¹⁴⁻¹⁷ Brocher¹⁸ and Zippel¹⁹ proposed the theory that dysplasia of the vertebrae, such as hypoplasia of the neural arch and the inferior articular process, and elongation and narrowing of the partes inter-articulares, predisposes to spondylolysis. Arai²⁰ opposed this theory with the concept that hypoplasia of the neural arch and the inferior articular process is a morphological abnormality caused by sacralization. He was of the opinion that elongation and deformity of the neural arch develops in adolescence and results in spondylolysis. Wiltse² regarded dysplasia as an inability of bone to repair.

Mechanical Factors

Pincer Action. According to Nathan,²¹ no preexisting bony abnormalities or congenital defects of the isthmus are necessary for the development of spondylolysis. Spondylolysis can result from mechanical pressure and erosion of the isthmus by two impinging articular processes. In the immediate vicinity of the defect, both on the lamina and on the isthmus, the bony surfaces are rough and irregular. In the unilateral spondylolysis, reactive sclerosis has been reported in the contralateral pars and pedicles.²²

Cailliet²³ also reported that spondylolysis results from a pincer action on the pars interarticularis. Wiltse² opposed this theory because the "pinched-off" appearance Nathan²¹ described was not present in children at the ages when the defects appeared, only in older individuals.

In our Case 2, there were minimal indentations suggesting a pincer action on the superior and inferior margins of the right L4 isthmus before the isthmus defect developed. However, the defect in the right isthmus was fine and linear. The affected isthmus was nearly normal in width; it did not have a "pinched-off" appearance, though its appearance could have been due to a pincer action. More than half of

頻度は白人女性の2倍であり、米国黒人では2.4%であると報告した。Kettelkamp 及び Wright⁶ は、エスキモーではその頻度が27.4%であることを認め、Hasebe¹³ は、日本人の男女合わせて頻度は5.6%であると報告した。

椎弓の形成不全

形成不全が脊椎分離症発生の誘因となると報告されている。¹⁴⁻¹⁷ Brocher¹⁸ 及び Zippel¹⁹ は、椎弓や下関節突起の低形成、関節間部の伸長及び狭小化などの脊椎形成不全が脊椎分離症の誘因であるとする説を提案した。これに対し、荒井²⁰ は、椎弓及び下関節突起の低形成は、仙椎化によって誘発された形態異常であるとみなし、Brocher の説に反対した。彼は、発育途上、椎弓に歪みが起こり、峡部に伸びや変形を生じ、ついに分離に至ると考えた。Wiltse² は、形成不全は骨の修復不能にあるとみなした。

機械的要因

ベンチ作用。 Nathan²¹ によれば、既存の骨の異常や先天性峡部欠損は脊椎分離症の発生には必要ない。脊椎分離症は、峡部が上下の関節突起にはさまれて pressure erosion を生じることによって起こると思う。その証拠に、脊椎茎及び峡部は分離部のすぐ近辺の骨が粗く不規則となっている。片側性脊椎分離症の対側峡部や脊椎茎が反応性硬化を示すと報告されている。²²

更に、Cailliet²³ も脊椎分離症は関節突起間部が受けるベンチ作用の結果発生すると報告した。Wiltse² は、Nathan²¹ が述べた「ベンチされた」形状は分離の出現する年齢の子供にはみられず、高齢者にだけみられるとして、この説に反対した。

症例2では、峡部に分離が発生する前に右第4腰椎峡部の上下方端にベンチ作用を示唆するわずかな陥没が認められた。しかし、右峡部の分離は細く、線状で峡部分離部の幅はほぼ正常であった。峡部の分離はベンチ作用によるものと考えうるが、「ベンチされた」形状 (Pinched-off appearance) ではなかった。高齢

our older patients had "pinched-off" partes interarticulares; the others had none.²⁴ The "pinched-off" appearances may be secondary changes. One who develops an isthmus defect early in life may tend to have such a secondary change. This is contrary to the opinion of Wiltse.²

Fatigue Fracture. Many advocate this theory.^{15,17,25-27} Wiltse et al²⁶ reported that defects in the partes interarticulares most often result from fatigue fractures. They also cited the difficulty in determining whether a fracture is more likely due to single or repeated episodes of trauma. In nearly all of their patients, fatigue fractures had been developing. Then more severe traumatic episodes completed the dissolution and separation of bone.

A greater prevalence of spondylolysis has been reported among students engaged in sports, compared to students who were sedentary.²⁷⁻³⁰ Kono²⁷ considered early transverse sclerotic changes in the partes interarticulares of eight persons with spondylolysis as prelytic, early signs of fatigue fractures.

The two cases of unilateral spondylolysis described here and one previously reported³¹ developed bilateral pars interarticularis defects following trauma. Because of instability, the intact sides were liable to stresses and were considered fractured during single respective episodes of trauma.

Experimental Evidence. Pfeil³² fractured the partes interarticulares of L5 vertebrae in young child cadavers using "rhythmic loading." Lamy et al³³ succeeded in fracturing the partes interarticulares of freshly autopsied lumbar vertebrae by "loading" them, but could not fracture the neural arch unless the vertebrae were in flexion. They concluded that a traumatic episode and subsequent nonunion are the more likely causes of spondylolysis than is bone fatigue, though the latter cannot be excluded. Cyron and Hutton³⁴ found the partes interarticulares, and to a much lesser extent the pedicles, susceptible to fracture when the inferior articular facets of L3-5 of cadaveric specimens were loaded repetitively to determine their vulnerability to stress. Saito,³⁵ using a three-dimensional photoelastic study concluded that 1) the neural arches and inferior articular processes are subject to bending forces,

患者の分離症の半分以上に「ペンチされた」型の関節突起間部が認められたが、残りの者にはそれは認められなかった。²⁴ 「ペンチされた」形状は二次的変化かもしれない。若年時に峡部分離を生じた者は、このような二次的変化を来す傾向があるかもしれない。これは Wiltse² の考えに反するものである。

疲労骨折. 多くの研究者がこの説を唱えている。^{15, 17, 25-27} Wiltse ら²⁶ は、関節突起間部の分離は疲労骨折の結果生じるのが最も多いと報告した。彼らは、更に、骨折が1回若しくは繰り返しのどちらによってより起こりやすいのか決定するのは困難だと述べた。彼らの意見によれば彼らの患者の場合、ほぼ全員が、徐々に疲労骨折を起こしつつあったときに、より強度の外傷を受け峡部の分離に至った。

活動の少ない生徒に比べ、スポーツをする生徒に脊椎分離症の頻度が高いことが報告されている。²⁷⁻³⁰ 河野²⁷ は、脊椎分離症患者 8 名の関節突起間にみられた帯状硬化性変化を疲労骨折の初期徴候と考えた。

ここで述べた 2 例及び以前に観察した 1 例³¹ の片側性脊椎分離症例は、外傷後に対側関節突起間部に分離を生じた。安定性がないため、分離のない側はストレスを受けやすい状態であり各々 1 回の外傷で骨折をきたしたと考えられる。

実験的所見. Pfeil³² は、「律動的な負荷」を加えることにより屍体幼児の第 5 腰椎の関節突起間部を骨折させた。Lamy ら³³ は、「負荷」を加えることにより、剖検直後の腰椎関節突起間部に骨折を起こすことに成功したが脊椎を屈曲させた状態でなければ、骨折させることはできなかった。彼らは、疲労骨折を除外することはできないにしろ、それよりも外傷及びその後の癒合不全の方が脊椎分離症の原因となりやすいとした。Cyron 及び Hutton³⁴ は、ストレスに対する易損性を評価するために、屍体標本の第 3-5 腰椎の下関節突起に繰り返し負荷を加えると、関節突起間部及びはるかに低い頻度で、脊椎茎も骨折しやすいことを見付けた。斎藤³⁵ は、脊椎の三次元光弾性実験により、1) 椎弓及び下関節突起は屈曲力

and 2) the tension and stress concentrated at the ventral margins of the pars interarticularis are the greatest of these on the posterior spinal elements. He suspects that spondylolysis is initiated in this portion of the vertebrae.

Postspinal Fusion. Harris and Wiley³⁶ described five cases of acquired spondylolysis after spinal fusion, and concluded they may have resulted from concentrated chronic stresses at the junction of fixed and adjacent mobile spinal segments. He also concluded that flexion combined with rotation of the lumbar spine is responsible for the development of spondylolysis.

Healing Spondylolysis as Evidence of Fracture. There have been many recent reports of spontaneously healing spondylolysis^{25, 26, 37-43} following conservative therapy or immobilization of the affected vertebrae.

The congenital theory for the etiology of spondylolysis is no longer widely accepted. The two cases reported here are further proof of the role of trauma in the development of fractures of partes interarticulares of the neural arch. Familial and racial predisposition to spondylolysis and dysplasia of the neural arch may be concomitant in the development of spondylolysis, but the factors most responsible are mechanical ones, such as pincer action of the superior and inferior articular facets on the isthmus, and fatigue fractures.

を受けやすく、2) 関節突起間峽部の腹側に働く引っ張り応力は脊椎後方部分に受ける応力中最大であるとした。彼は、分離はこの部分に始まると推定した。

脊椎固定術後分離症。 Harris 及び Wiley³⁶ は、脊椎固定術後に起こった脊椎分離症 5 例について述べ、これらが固定された脊椎部と上位の可動脊椎部との間に働く慢性ストレスの結果生じるものであると推定した。彼は、また、腰椎の軸回旋を伴った屈曲が脊椎分離症発生の原因であると結論を下した。

脊椎分離症の治癒（骨折の証拠）。 損傷脊椎の保存的療法ないしは固定療法後に脊椎分離症が自然に治癒するという報告が最近になって多数発表されている。^{25, 26, 37-43}

脊椎分離症の発生要因としての先天性説はもはや一般に認められていない。ここで報告した 2 症例は、外傷が椎弓の関節突起間部分離の発生に果たす役割を更に実証したものである。脊椎分離症及び椎弓形成不全にかかりやすい家系的、人種的素質が脊椎分離症の発生にかかわっているかもしれないが、最も大きな原因は、峽部上下関節面のベンチ作用及び疲労骨折などの機械的要因である。

REFERENCES

参考文献

1. ROCHE MB, ROWE GG: The incidence of separate neural arch and coincident bone variations. A survey of 4,200 skeletons. *Anat Rec* 109:233-52, 1951
2. WILTSE LL: The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg (Am)* 44:539-60, 1962
3. BELSKY JL, TACHIKAWA K, JABLON S: The health of atomic bomb survivors: A decade of examinations in a fixed population. *Yale J Biol Med* 46:284-96, 1973
4. RAMBAUD A, RENAULT C: *Origine et Developpement des Os*. Paris, F. Charmerot, 1864
5. MUTCH J, WALMSLEY R: The etiology of cleft vertebral arch in spondylolisthesis. *Lancet* 1:74-7, 1956
6. KETTELKAMP DB, WRIGHT DG: Spondylolysis in the Alaskan Eskimo. *J Bone Joint Surg (Am)* 53: 563-6, 1971
7. SHAHRIAREE H, HARKESS JW: A family with spondylolisthesis. *Radiology* 94:631-3, 1970
8. BAILY W: Observations on the etiology and frequency of spondylolisthesis and its precursors. *Radiology* 48:107-12, 1947
9. TOLAND JJ: Spondylolisthesis in identical twins. *Clin Orthop* 5:184-9, 1955
10. BAKER DR, MCHOLICK W: Spondylolysis and spondylolisthesis in children. *J Bone Joint Surg (Am)* 38:933-4, 1956
11. KING AB: Experiences with spondylolisthesis. *Bull Johns Hopkins Hosp* 118:2-9, 1966
12. AMUSO SJ, MANKIN HJ: Hereditary spondylolisthesis and spina bifida. Report of a family in which the lesion is transmitted as an autosomal dominant through three generations. *J Bone Joint Surg* 49-A:507-13, 1967
13. HASEBE K: Die wirbelsaule der Japaner. *Z Morphol Anthropol* 15:259-380, 1913
14. MORISAKI N, SUGAWARA S, et al: Spondylolysis and spondylolisthesis in children. *Rinsho Seikei Geka-Clin Orthop Surg* 5:160-6, 1970
15. EXARHOU E, PANATAZOPOULOS T: Spondylolytic spondylolisthesis. *Int Surg* 58:446-50, 1973
16. OOI Y, SUZUKI Y, SUGAWARA S, YAMASAKI N, MORISAKI N: Acquired spondylolysis in child and young adult. Report of two cases, *J Bone Joint Surg (Am)* 50:1649-56, 1968
17. PRIVETT JTJ, MIDDLEMISS JH: Multiple lower lumbar spondylolyses. *Br J Radiol* 48:866-9, 1975
18. BROCHER JEW: Recent advances in the diagnosis of the spine. In *Roentgen Diagnostics. Progress, Vol 1*, ed by HR Schinz, R Glauner, F Uehlin. New York, Grune & Stratton, Inc., 1958. pp 22-77
19. ZIPPEL H: Zur Spondylolysis und Spondylolisthesis bei Wirbelmissbildungen im Kindes und Jugendalter. *Z Orthop* 103:432-54, 1967
20. ARAI M: Deformities of the neural arch in spondylolysis. *Nihon Geka Hokan-Arch Jpn Chir* 39:217-32, 1970
21. NATHAN H: Spondylolysis. Its anatomy and mechanism of development. *J Bone Joint Surg* 41-A:303-20, 1959
22. SHERMAN FC, WILKINSON RH, HALL JE: Reactive sclerosis of a pedicle and spondylolysis in the lumbar spine. *J Bone Joint Surg (Am)* 59:49-54, 1977

23. CAILLIET R: Low Back Pain Syndrome. Philadelphia, F.A. Davis Company, 1968
24. KAWANAMI T, TAMURA S, RUSSELL WJ: Radiological features of spondylolysis and spondylolisthesis in the Adult Health Study. RERF TR 8-79
25. KRENZ J, TROUP JDG: The structure of the pars interarticularis of the lower lumbar vertebrae and its relation to the etiology of spondylolysis with a report of a healing fracture in the neural arch of a fourth lumbar vertebra. J Bone Joint Surg (Br) 55:735-41, 1973
26. WILTSE LL, WIDELL EH JR, JACKSON DW: Fatigue fracture: the basic lesion in isthmic spondylolisthesis. J Bone Joint Surg 57-A:17-22, 1975
27. KONO S: Spondylolysis and spondylolisthesis. Igakuno Ayumi-Strides of Medicine 99:293-300, 1976
28. ICHIKAWA N, et al: Spinal injuries in athletes - especially referring to the athlete who practices a lifting-up style. Rinsho Seikei Geka-Clin Orthop Surg 9:140-8, 1974
29. LEIDHOLT JD: Spinal injuries in athletes sports injuries. Orthop Clin North Am 4:691-707, 1973
30. SCHWERDTNER HP, SCHOBERTH H: Die Spondylolyse im Hochleistungs sport bei Gerateturnerinnen. Z Orthop 111:934-40, 1973
31. RUSSELL WJ, NAKATA H: Spondylolysis following trauma: A case report. Radiology 91:973-4, 1968 (ABCC TR 27-68)
32. PFEIL E: Experimentelle Untersuchungen zur Frage der Entstehung der Spondylolyse. Z Orthop 109: 231-8, 1971
33. LAMY C, BAZERGUI AN, KRAUS H, FARFAN HF: The strength of the neural arch and the etiology of spondylolysis. Orthop Clin North Am 6:215-31, 1975
34. CYRON BM, HUTTON WC: The fatigue strength of the lumbar neural arch in spondylolysis. J Bone Joint Surg (Br) 60:234-8, 1978
35. SAITO M: Photo-elastic study on the spinal posterior element. Nippon Seikei Geka Gakkai Zasshi-J Jpn Orthop Assoc 47:951-62, 1973
36. HARRIS RI, WILEY JJ: Acquired spondylolysis as a sequel to spine fusion. J Bone Joint Surg (Am) 45: 1159-70, 1963
37. ROCHE MB: Bilateral fracture of the pars interarticularis of lumbar neural arch. J Bone Joint Surg (Am) 30:1005-8, 1948
38. AHLGREN SA: Spontaneous healing of spondylolisthesis. Acta Orthop Scand 28:306-10, 1959
39. COLLARD M, BRASSEUR P: Roentgenologic proof of the traumatic origin of an instance of spondylolysis. Fortschr Geb Roentgenstr Nuklearmed 117:647-53, 1972. Surg Gynecol Obstet 137: 1081, 1973 (Abstract)
40. SULLIVAN CR, BICKELL WH: The problem of traumatic spondylolysis; a report of three cases. Am J Surg 100:698-708, 1960
41. MELAMED A: Fracture of pars interarticularis of lumbar vertebra. Am J Roentgenol 94:584-6, 1965
42. HIRABAYASHI K, IKEDA K, TSUCHIHASHI Z, FUKUDA K, MORITA T, SAITO M: Spondylolysis and spondylolisthesis - pathological conditions and therapeutic indication - Nippon Seikei Geka Gakkai Zasshi-J Jpn Orthop Assoc 46:675-94, 1972
43. LITTLETON JT: The Spine Tomography: Physical Principles and Clinical Applications. Baltimore, Williams and Wilkins Co. 1976, pp 410-413