二方向同時 X 線撮影によるせき柱形状解析* (第 2 報, せきつい骨の回転状態を表す三方法の呈示)

玉木 保**, 梅崎 栄作**, 井上 駿一***
高橋 和久***, 三村 雅也***

Spinal Shape Analysis by Bi-Plane X-Ray Photogrammetry (2nd Report, Presentation of Three Calculation Methods of Rotational Angle of Vertebra)

by Tamotsu TAMAKI, Eisaku UMEZAKI, Shun-ichi INOUE,
Kazuhisa TAKAHASHI, and Masaya MIMURA

An expression of the rotational angles of vertebrae which are measured by a system based on photogrammetry has been proposed by the authors. The angle is calculated as the corrective rotational angle of objective vertebrae coordinates to coincide with the reference vertebral coordinates. One of the reference vertebral coordinates can be selected as its rotational axis. Also, the axis of coordinates of the objective vertebra would be selected as its rotational axis. The former rotation is named as the other axes rotation and the latter as the self axes rotation. Two values according to the two cases in these expressions introduced a little confusion to the estimation of the rotated state of the vertebra. Then, the third expression, named the mean rotation, is proposed. By investigation of the proposed three expressions, it is concluded that the expression by mean rotation is useful for the analysis of spinal deformity.

Key Words: Medical Science, Orthopaedic Biomechanics, Bi-Plane X-Ray Photogrammetry, Spinal shape, Vector Analysis, Vertebral Rotation, Direction Cosine, Scoliosis

1. はじめに

せきつい側わん症その他のせき柱疾患に対して Luque segmental wiring (ルーキー法, 椎弓下鋼線締結法) や各種 Instrumentation surgery⁽¹⁾ (脊椎内固定法) が盛んに行われるようになり, 骨の正確な三次元状態を測定し, それを臨床的に利用できる形で呈示することが要求されている。その測定法としては二方向同時 X 線撮影法⁽²⁾が有効である。せきつい骨の三次元の回転は直観的な理解が困難であり, Dimmet⁽³⁾はらせん変位技法による解析を提案している。

著者は前報で示したようにきょう正回転の概念をもとに二方向同時 X 線撮影法に基づくせき柱形状解析装置を開発した。この装置を用いれば各つい骨中心の三次元座標, 基準軸に関するきょう正回転角が求められる。ここで導入したきょう正回転の概念は剛体的回転をしているつい骨の回転状態を表現する一つの方法であったが, 本報ではこの表示法に加えてきょう正回転に基づく新たに二つの回転角の表示法を呈示し, 相

互の関係について検討する。

2. 三表示法の呈示

せきつい骨の中心の座標は前報⁽⁴⁾に示した方法で簡単に求められるが, 回転角については単純には表現できず臨床的に理解しやすい表示法の呈示が必要である。図 1 は正常せき柱各つい骨に導入したつい骨座標の単位ベクトル λ_i (右方), μ_i (前方), ν_i (上方) ($i =$

図 1 正常せき柱のつい骨とつい骨座標

* 昭和 61 年 3 月 14 日 東海支部第 35 期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 5 月 7 日。

** 正員, 日本工業大学 (〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)。

*** 千葉大学医学部 (〒280 千葉市中央区 1-8-1)。

0, 1, 2, 3, ...) を表す。せき柱が変形し各骨座標が相互に回転した場合の各座標は本装置によって測定されている。これをもとにした各骨の回転状態の表示法について論ずる。本報の回転角の計算の基本は、基準状態から剛体的回転を起こしている骨を基準の状態に戻すための回転、すなわちきょう正回転である。きょう正回転の方法として体幹を基準としてこれに各骨を一致させる回転法を絶対的きょう正回転、隣接下位骨を基準状態として上位骨を下位骨に一致させる回転を相対的きょう正回転と呼んだが本報では上位骨 $V_1 (\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ を下位骨 $V_0 (\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ に一致させる相対的回転に限定して検討する。

2.1 他軸回転法 前報の回転角の表示法は対象とする骨を基準となる他の座標軸まわりに回転し、その基準座標軸に一致させるに要する回転角を用いるものであった。そこで以下に述べる新たに呈示する二つの表示法と区別するためこの表示法を他軸回転法 (Method of other axes rotation) と呼ぶ。

2.2 自軸回転法 他軸回転法の対をなすものとして対象とする骨をその骨自身の軸まわりに回転し、基準座標軸に一致させる回転角を用いて、対象とする骨の回転状態を表すことが考えられる。これを自軸回転法 (Method of self axes rotation) と呼ぶ。なおこの表現法は Euler 角の表示法と基本的には同じである。

2.3 平均回転法 他軸回転法は μ_0 軸まわりのきょう正回転を先に、続いて ν_0 軸まわりの回転を行う (ケース A) かあるいは ν_0 軸まわり、 μ_0 軸まわりの順にきょう正回転を行う (ケース B) かによって、その回転角は異なるものである。このことは自軸回転法にもいえることでケース A, B として表現する必要がある。

図2 対象骨 $(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ と基準骨 $(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ の配置

る。ケース A, B の回転角の値は、隣接上下骨の相対的きょう正回転の場合にはあまり大きな違いとはならないが、離れた骨間の相対的きょう正や絶対的きょう正では $10^\circ \sim 20^\circ$ の違いとなる。この角度はきょう正回転の順序と対応したものでこの角度に合わせて、具体的に骨のきょう正を行うことが可能であれば、この数値の違いも積極的に利用されることが考えられるが、現段階では骨回転状態を三次元的ではあるが、概括的に理解することが要求されている。そこで回転の順序の考えを必要としない平均回転法 (Method of mean rotation) を考案した。これは二つの骨の対応する軸 λ_0 と λ_1 , あるいは μ_0 と μ_1 , ν_0 と ν_1 をまず一致させ (このときの回転角を一致角と呼ぶ)、一致した軸まわりに対象とする骨を回転させて基準の骨に一致させる (このときの回転角を平均回転角と呼ぶ) ものである。そして平均回転角を各軸まわりの回転状態を表す値とする。よって一致角はデータとしては使わない。このようにすれば回転順序に無関係な回転状態の表示が得られる。この方法は例えば二つの軸 λ_0 と λ_1 を一致させる場合、 λ_0 を λ_1 に一致させたと考えても、 λ_1 を λ_0 に一致させたと考えても二つの骨の相対的配置は同じである。さらに平均回転角の値も対象骨を基準骨に一致させたと考えても逆に基準骨を対象骨に一致させたと考えても結果は同じである。このような性質から求められる平均回転角の値も基準軸まわりに対象骨を回転させる他軸回転法の回転角および対象骨自身の軸まわりに回転させる自軸回転法の回転角の中間的な値となっており、平均回転法と呼ぶゆえんである。

3. 回転角の方向余弦による表示

図2に示す対象とする骨 V_1 の単位ベクトル $(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ の基準となる骨 V_0 の単位ベクトル $(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ に関する方向余弦を C_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) とし、これを用いて呈示した三方法の角度を表す。 C_{ij} は

図3 ベクトル K_1 の e 軸まわりに θ の回転

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= \lambda_1 \cdot \lambda_0, & C_{12} &= \lambda_1 \cdot \mu_0, & C_{13} &= \lambda_1 \cdot \nu_0 \\ C_{21} &= \mu_1 \cdot \lambda_0, & C_{22} &= \mu_1 \cdot \mu_0, & C_{23} &= \mu_1 \cdot \nu_0 \\ C_{31} &= \nu_1 \cdot \lambda_0, & C_{32} &= \nu_1 \cdot \mu_0, & C_{33} &= \nu_1 \cdot \nu_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

である。

3.1 回転角計算の基本式 きょう正回転を行う際に図3に示す任意の単位ベクトル K_1 を任意の単位ベクトル e 軸まわりに任意の角度 θ だけ回転することを繰返し利用している。そこで K_1 の回転後のベクトル K_2 ($\overrightarrow{OA_2}$) を K_1 ($\overrightarrow{OA_1}$), e , θ を用いて表す。点 Q は面 QA_1A_2 が e と直交するように選んだ e 軸上の点である。図から

$$K_1 = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QA_1}, \quad K_2 = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QA_2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。 $\overrightarrow{QA_2}$ は $\overrightarrow{QA_1}$ を θ だけ回転させたベクトルであり、

$$\overrightarrow{QA_2} = \overrightarrow{QA_1} \cos \theta + e \times \overrightarrow{QA_1} \sin \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表される。

$$\overrightarrow{OQ} = (K_1 \cdot e)e \quad \dots\dots\dots (4)$$

であるので式(2), (3), (4)から

$$K_2 = (1 - \cos \theta)(e \cdot K_1)e + \cos \theta K_1 + \sin \theta e \times K_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

3.2 他軸回転角 本回転法の回転角の計算式は前報に示したが、ここでは新たに式(5)に基づいて計算を行い、その結果を方向余弦を用いて表す。図4はケースAの場合でつい骨 $V_1(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ を μ_0 軸まわりに β_a , ν_0 軸まわりに γ_a , λ_0 軸まわりに α_a 順次回転してつい骨 $V_0(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ に一致させる。表1は図4に対応したもので3ステップの回転によって V_1 が V_0 に一致する過程を示す。

$\beta_a, \gamma_a, \alpha_a$ を求める。 β_a は λ_1 が μ_0 軸まわりに回転し、 ν_0 面内の λ^* となる回転角であり、 γ_a はこの λ^* がさらに ν_0 軸まわりに回転して λ_0 と一致するための

回転角である。式(5)を用いて λ^* は

$$\lambda^* = (\mu_0 \cdot \lambda_1)(1 - \cos \beta_a)\mu_0 + \cos \beta_a \lambda_1 + \sin \beta_a \mu_0 \times \lambda_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表される。 λ^* は ν_0 面内にあり、当然のことながら λ_0 軸の正または零の方向を向いているべきであるので

$$\lambda^* \cdot \nu_0 = 0, \quad \lambda^* \cdot \lambda_0 \geq 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる条件を満たさなくてはならない。式(6), (7)から

$$\left. \begin{aligned} C_{13} \cos \beta_a - C_{11} \sin \beta_a &= 0 \\ C_{11} \cos \beta_a + C_{13} \sin \beta_a &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。この式から β_a は

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_a &= \frac{C_{11}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{13}^2}} \\ \sin \beta_a &= \frac{C_{13}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{13}^2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。次に γ_a は

$$\cos \gamma_a = \lambda^* \cdot \lambda_0, \quad \sin \gamma_a = (\lambda^* \times \lambda_0) \cdot \nu_0 \quad \dots\dots (10)$$

と表されるので式(7), (9)を用いて

$$\cos \gamma_a = \sqrt{C_{11}^2 + C_{13}^2}, \quad \sin \gamma_a = -C_{12} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。表1に示すように μ_1 はステップ1, 2, 3で μ^*, μ^{**}, μ_0 となる。 μ^{**} から μ_0 への変化は λ_0 軸まわりに α_a 回転した結果であるので

$$\cos \alpha_a = \mu^{**} \cdot \mu_0, \quad \sin \alpha_a = (\mu^{**} \times \mu_0) \cdot \lambda_0 \quad \dots\dots (12)$$

である。なお μ^*, μ^{**} は式(5)を用いて

$$\left. \begin{aligned} \mu^* &= (1 - \cos \beta_a)(\mu_0 \cdot \mu_1)\mu_0 \\ &\quad + \cos \beta_a \mu_1 + \sin \beta_a \mu_0 \times \mu_1 \\ \mu^{**} &= (1 - \cos \gamma_a)(\nu_0 \cdot \mu^*)\nu_0 \\ &\quad + \cos \gamma_a \mu^* + \sin \gamma_a \nu_0 \times \mu^* \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

と表される。式(12)に式(13)を代入すると

$$\cos \alpha_a = \frac{C_{22}(C_{11}^2 + C_{13}^2) - C_{12}(C_{11}C_{21} + C_{13}C_{23})}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{13}^2}}$$

$$\sin \alpha_a = \frac{C_{13}C_{21} - C_{11}C_{23}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{13}^2}}$$

.....(14)

となる。以上はケースAであるがケースBの場合は

図4 他軸回転 (ケースA)

表1 他軸回転 (ケースA) の回転後の座標の単位ベクトル

Procedure of rotation			Unit vectors of vertebra after rotation		
Step	Axis	Angle	Initial state		
			λ_1	μ_1	ν_1
1	ν_0	β_a	λ^*	μ^*	ν^*
2	ν_0	γ_a	λ_0	μ^{**}	ν^{**}
3	λ_0	α_a	λ_0	μ_0	ν_0

対象とするついで骨 $V_1(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ をまず ν_0 軸まわりに γ_0, μ_0 軸まわりに β_0 , そして λ_0 軸まわりに α_0 の角度回転させて基準となるついで骨 $V_0(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ に一致させるものである。このときの回転角も同様にして求められる。その結果は

$$\begin{aligned} \cos \gamma_0 &= \frac{C_{11}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2}}, \sin \gamma_0 = \frac{-C_{12}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2}} \\ \cos \beta_0 &= \frac{C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2}}, \sin \beta_0 = \frac{-C_{23}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2}} \\ \cos \alpha_0 &= \frac{C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2}}, \sin \alpha_0 = \frac{-C_{23}}{\sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。

3.3 自軸回転角 他軸回転同様、きょう正回転の方法としてケース A, B が考えられる。まずケース A について検討する。このときの回転の状態を図 5, 表 2 に示す。図 5 から

$$\left. \begin{aligned} \lambda^* &= \mu_1 \times \nu^* \\ \mu^* &= \nu^* \times \lambda_0 \\ \nu^* &= \lambda_0 \times \mu_1 / |\lambda_0 \times \mu_1| \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

の関係がある。回転角 $\alpha_a, \beta_a, \gamma_a$ は

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_a &= \nu^* \cdot \nu_0, \sin \alpha_a = (\nu^* \times \nu_0) \cdot \lambda_0 \\ \cos \beta_a &= \nu_1 \cdot \nu^*, \sin \beta_a = (\nu_1 \times \nu^*) \cdot \mu_1 \\ \cos \gamma_a &= \lambda^* \cdot \lambda_0, \sin \gamma_a = (\lambda^* \times \lambda_0) \cdot \nu^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

表 2 自軸回転 (ケース A) の回転後の座標の単位ベクトル

Procedure of rotation			Unit vectors of vertebra after rotation		
Step	Axis	Angle	Initial state		
			λ_1	μ_1	ν_1
1	μ_1	β_a	λ^*	μ_1	ν^*
2	ν^*	γ_a	λ_0	μ^*	ν^*
3	λ_0	α_a	λ_0	μ_0	ν_0

図 5 自軸回転 (ケース A)

より求められる。結果は

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_a &= \frac{C_{22}}{\sqrt{1 - C_{21}^2}}, \sin \alpha_a = \frac{-C_{23}}{\sqrt{1 - C_{21}^2}} \\ \cos \beta_a &= \frac{C_{11}}{\sqrt{1 - C_{21}^2}}, \sin \beta_a = \frac{-C_{31}}{\sqrt{1 - C_{21}^2}} \\ \cos \gamma_a &= \sqrt{1 - C_{21}^2}, \sin \gamma_a = C_{21} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

である。次にケース B は $V_1(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ をまず ν_1 軸まわりに β_0 回転し [ついで骨の状態は $V_1(\lambda^*, \mu^*, \nu_1)$ となる] 続いて μ^* 軸まわりに γ_0 回転 [ついで骨の状態は $V_1(\lambda_0, \mu^*, \nu^*)$ となる], 最後に λ_0 軸まわりに α_0 回転し [ついで骨の状態は $V_1(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ となる], $V_0(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ と一致させるものである。このときの回転角 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ もケース A と同様にして求められる。結果は

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_0 &= \frac{C_{33}}{\sqrt{1 - C_{31}^2}}, \sin \alpha_0 = \frac{C_{32}}{\sqrt{1 - C_{31}^2}} \\ \cos \beta_0 &= \sqrt{1 - C_{31}^2}, \sin \beta_0 = -C_{31} \\ \cos \gamma_0 &= \frac{C_{11}}{\sqrt{1 - C_{31}^2}}, \sin \gamma_0 = \frac{C_{21}}{\sqrt{1 - C_{31}^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

である。

3.4 平均回転角 λ 軸 (平均回転法には回転軸としての λ_0, λ_1 軸の区別がないので λ 軸と表す) まわりの回転角 α を求めるためのきょう正回転の手順を図

表 3 平均回転 (λ 軸に関する) の回転後の座標の単位ベクトル

Procedure of rotation			Unit vectors of vertebra after rotation		
Step	Axis	Angle	Initial state		
			λ_1	μ_1	ν_1
1	$\lambda_1 \times \lambda_0$	θ_a	λ_0	μ^*	ν^*
2	λ_0	α	λ_0	μ_0	ν_0

図 6 平均回転 (λ 軸に関する一致角 θ_a , 平均回転角 α)

6, 表3に示す。まず対象つい骨 $V_1(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)$ の λ_1 を基準つい骨 $V_0(\lambda_0, \mu_0, \nu_0)$ の λ_0 に一致させる。このときの回転軸は λ_1 と λ_0 に垂直であり、その角度 θ_a を一致角と呼んだ。次に λ_0 軸まわりに α 回転すると V_1 は V_0 に完全に一致する。この角度 α が λ 軸まわりの平均回転角である。一致角 θ_a は $0^\circ \leq \theta_a \leq 180^\circ$ であるので

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_a &= \lambda_1 \cdot \lambda_0 \\ \sin \theta_a &= \sqrt{1 - \cos^2 \theta_a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

である。方向余弦を用いて表すと

$$\cos \theta_a = C_{11}, \sin \theta_a = \sqrt{1 - C_{11}^2} \dots\dots\dots (21)$$

である。一致角 θ_a 回転するときの回転軸 e (単位ベクトル) は

$$e = (\lambda_1 \times \lambda_0) / \sqrt{1 - C_{11}^2} \dots\dots\dots (22)$$

である。よって μ_1 の回転後のベクトル μ^* は式(5)から

$$\begin{aligned} \mu^* &= (1 - \cos \theta_a)(e \cdot \mu_1)e \\ &+ \cos \theta_a \mu_1 + \sin \theta_a e \times \mu_1 \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

である。平均回転角 α は

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \mu^* \cdot \mu_0 \\ \sin \alpha &= (\mu^* \times \mu_0) \cdot \lambda_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

によって与えられる。方向余弦を用いて表すと

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21} - \frac{C_{13} \cdot C_{31}}{1 + C_{11}} \\ \sin \alpha &= C_{13}C_{21} - C_{11}C_{23} - \frac{C_{12} \cdot C_{31}}{1 + C_{11}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

となる。 μ, ν についても同様に一致角 $\theta_\beta, \theta_\gamma$, 平均回転角 β, γ が求められる。これらの角度を方向余弦を用いて表わすと

$$\begin{aligned} \cos \theta_\beta &= C_{22}, \sin \theta_\beta = \sqrt{1 - C_{22}^2} \\ \cos \beta &= C_{22}C_{33} - C_{23}C_{32} - \frac{C_{21} \cdot C_{12}}{1 + C_{22}} \\ \sin \beta &= C_{21}C_{32} - C_{22}C_{31} - \frac{C_{23} \cdot C_{12}}{1 + C_{22}} \\ \cos \theta_\gamma &= C_{33}, \sin \theta_\gamma = \sqrt{1 - C_{33}^2} \\ \cos \gamma &= C_{33}C_{11} - C_{31}C_{13} - \frac{C_{32} \cdot C_{23}}{1 + C_{33}} \\ \sin \gamma &= C_{32}C_{13} - C_{33}C_{12} - \frac{C_{31} \cdot C_{23}}{1 + C_{33}} \end{aligned} \dots\dots\dots (26)$$

となる。こうして得られた平均回転角 (α, β, γ) によっ

表4 特発性側弯症(16歳, 女)に関する平均回転法による相対的回転角と三方法5計算ケース間の最大差

Vertebrae	Lateral rotation		Axial rotation		A-P rotation	
	Mean method (deg.)	Maximum difference (deg.)	Mean method (deg.)	Maximum difference (deg.)	Mean method (deg.)	Maximum difference (deg.)
T5 / T6	12.24	2.29	11.11	2.53	10.83	2.37
T6 / T7	1.77	1.53	12.69	0.21	6.68	0.56
T7 / T8	-7.93	1.15	5.51	1.66	-11.70	0.80
T8 / T9	-1.62	0.25	5.12	0.06	2.66	0.15
T9 / T10	-26.31	0.24	-1.78	3.57	-7.24	1.61
T10 / T11	-10.57	2.25	12.32	1.92	-9.42	2.30
T11 / T12	-10.40	0.61	5.38	1.19	-6.06	1.04
T12 / L1	0.92	0.49	-9.55	0.04	-2.88	0.19
L1 / L2	4.27	0.02	-2.31	0.04	-0.47	0.18
L2 / L3	7.15	0.04	1.10	0.27	-2.09	0.15
L3 / L4	15.64	0.42	4.23	1.59	-5.25	1.34

図7 三方法による5計算ケースの相対的回転

図 8 特発性側弯症 (16 歳, 女) の二方向同時 X 線撮影 (直交)

てついで骨の回転状態を表す。

4. 三・回転表示法の比較

臨床的なせき柱変形で起こり得る最も極端な回転状態を想定して、自作のついで骨モデル ($V_0, \dots, V_{10}$) を配置し、二方向同時 X 線撮影による測定を行った。その結果を基に各ついで骨モデル間の相対的きょう正回転を三方法で計算した結果を図 7 に示す。この図から他軸回転、自軸回転、平均回転で数値が異なることはもちろん同じ回転でもケース A, B で値が大きく異なっている。そして平均回転の値はほとんどの場合他の 4 計算ケースの値の中間的な値となっている。ただ単純な平均値ではなく、場合によっては 5 計算ケース中の最大値または最小値となることもある。図 8 は特発性側弯症 (16 歳, 女) の二方向同時 X 線撮影 (直交) の a, b フィルム像である。このフィルムからも要治療の側弯症であることがわかるが相対的きょう正回転の T5 から L4 までの解析結果を平均回転法による回

転角および 5 計算ケース (他軸および自軸回転のケース A, B, 平均回転) 間の差の最大値を表 4 に示す。この症例では T9/T10 の側方回転 -26.31° が最大であり、5 ケース間の差の最大値のうち最も大きい値は T9/T10 の軸回転 3.57° であり、5 計算ケースにあまり差がないことがわかる。以上せきついで骨の回転においては、平均回転法は他軸、自軸回転法の間値を取るものであり、表現が単純であることからせきついで骨の回転状態を概括的に表示する方法として有効である。

5. おわりに

せき柱側弯症をはじめとするせき柱変形疾患の診断においてはついで骨の三次元配置とくに回転状態を把握することが必要である。前報ではその表示法として他軸回転法を用いた。本報はこれを発展させたもので次の結果を得た。

(1) 回転角の表示法として前報の他軸回転法に加えて自軸回転、平均回転法を考察し、その角度の計算法をベクトル解析的に述べ、結果を二ついで骨座標軸間の方向余弦によって表した。

(2) 平均回転法は側方回転、軸回転、前後回転を各々一つの数値で表示するものであり、他軸回転法 (ケース A, B)、自軸回転法 (ケース A, B) による回転角の中間の値を与える。せき柱の変形状態を概括的に理解する方法として平均回転法は有効である。

文 献

- (1) 井上, Segmental spinal instrumentation とその考察, 臨床整形外科, 17-10 (昭 57), 966.
- (2) 玉木, 二方向同時 X 線撮影による骨柱形状解析, 整形外科, 35-4 (昭 59), 438.
- (3) Dimnet, J. and Guingaud, M., *The finite displacements vector's method: An application to the scoliotic spine*, J. Biomech., 17-6 (1984), 397.
- (4) 玉木・ほか 5 名, 二方向同時 X 線撮影によるせき柱形状解析 (せきついで骨回転の三次元的きょう正角の計算), 機論, 51-465, A (昭 60).

討 論

〔質問〕 立石 哲也

〔工業技術院機械技術研究所〕

椎体・椎間板を単位要素とするせき柱形状解析に多自由度回転法を導入した興味深い研究である。椎体は剛体とみなしてさしつかえないが、せき柱の回転に伴う椎間板の変形を考慮した理論は可能か。

〔回答〕 ついで骨間にあるついで間板は椎骨の相対回転の影響を直接受け、その構造と関連して各種のついで間板疾患を生じる。本解析によってついで骨の配置が臨床的要求に合うだけの精度で求まるので、著者も本解析の結果をついで間板の変形解析に応用することを検討中である。