

研究報告

## 腰椎の動的挙動解析の基礎検討

西垣英一，尼子龍幸，三木一生，石山慎一

## Fundamental Study of Dynamic Analysis of Lumbar Vertebrae

Hidekazu Nishigaki, Tatsuyuki Amago, Kazuo Miki, Shin-ichi Ishiyama

## 要 旨

実験では解明することが困難な生体の機能について、有限要素法 (Finite Element Method) を用いた数値計算により解析する研究の一環として、上半身の挙動に大きな影響を及ぼす腰椎に注目し、その動的挙動解析の基礎検討を実施する。

第4, 5腰椎の有限要素解析モデルは、椎骨や椎間円板を線形弾性体のソリッド要素、靭帯を圧縮荷重を受け持たない非線形トラス要素で近似する。

まず、動解析は計算コストが高いため、精度の良い効率的なモデル化はどのようなものかを検討した。その結果、詳細な応力評価が必要なく、その挙動が重要なとき

には硬い部分 (椎骨) の剛体化が効率的であるが、残りの弾性体要素 (椎間円板) の積分点数を低減して計算効率を上げた場合には、過負荷時に精度が悪化することを明らかにすることができた。さらに、髄核の回転装置機能がその非圧縮性に起因することを、髄核を圧縮性と仮定した衝撃解析との比較により検証した。その上、剛性として見れば軟らかな髄核が、軸圧迫時に多くの力を受け持つ現象を考察するため、軸方向圧迫解析を実施した結果、非圧縮性の髄核が線維軟骨や線維輪に囲まれ、体積変化が抑えられ、内圧が高められていく様子が求められた。

## キーワード

腰椎，有限要素法，動的挙動，椎間板，髄核

## Abstract

This paper describes the results of the fundamental study of a dynamic analysis of the lumbar vertebrae. The authors constructed a finite element model with linear brick elements and nonlinear truss elements for the study of dynamic responses of the fifth and fourth lumbar vertebrae.

First, to reduce the calculation time and maintain accuracy, the effects of changing the brick element formulas for rigidity and numerical integration are examined. The results of the analyses showed the following: For estimating the global behavior of vertebrae, it is an efficient method to treat the stiff parts of the bone as rigid elements and apply the 8-point integration to the other soft brick elements.

Second, to verify the function as a rotator of the disk, the impact response analyses that dropped block comes into contact with the upper side of the lumbar vertebrae is performed. Because the nucleus pulposus has a nearly incompressible property, the disk is expected to function as a rotator in extension or flexion. We obtained the results that an incompressible model rotates larger than the compressible one.

Finally, the function of the nucleus pulposus under compressive loading is studied. For the stiffening of the annulus fibrosus, it is more difficult for the nucleus pulposus to change its volume and the pressure becomes higher.

## Keywords

Lumbar vertebra, Finite element method, Dynamic analysis, Disk, Nucleus pulposus

## 1. 緒言

実験では解明することが困難な生体の機能について、有限要素法 (Finite Element Method) を用いた数値計算により解析する研究の一環として、上半身の挙動に大きな影響を及ぼす腰椎に注目し、その動的挙動解析の基礎検討を実施してきたので、その概要について紹介する。頸椎・胸椎・腰椎などからなる脊柱は、上半身の挙動に大きな影響を及ぼす部位であり、精度の良いモデル化が求められる。しかし、今回扱う動的挙動の解析は、従来数多く行われてきた静的解析に比較して多くの計算コストを必要とするため、その挙動を精度が良い上に効率的に表現できるモデル化の検討が重要となる。頸椎・胸椎・腰椎はほぼ似通った構造をしているため、本報では腰椎に注目してモデル化の検討をする。さらに、髄核の回転装置機能がその非圧縮性に起因することを、髄核を圧縮性と仮定した衝撃解析との比較により検討する。その上、剛性として見れば軟らかな髄核が、軸圧迫時に多くの力を受け持つ現象を考察するため、軸方向圧迫解析により、

非圧縮性の髄核が線維軟骨や線維輪に囲まれ、体積変化が抑えられ、内圧が高められていく様子を求める。

ところで、有限要素法とは、対象構造物を細かな有限要素に分割し、変分原理や形状関数およびマトリクス法などの手法を用いて、数値解析的に構造内の応力やひずみなどを求めるものである。さらに、衝突・衝撃問題などの動的解析は、応力の伝播過程を微小時間ステップごとに求めていかなければならないため、時間積分法としては、計算時間や記憶容量を消費する逆行列を解くことなく、現時点の平衡方程式から微小ステップ後の変位を陽な形で求める陽解法が適している。因みに陰解法では、微小ステップ後の平衡方程式も満たすように、逆行列を伴う収束計算が必要となる。そのため、非線形動的応答解析には、1976年に米国ローレンスリバモア国立研究所のJ. O. Hallquistを中心に開発が進められたDYNA3Dを始めとする、中心差分に基づく陽的時間積分法を用いた有限要素法プログラムが現在幅広く用いられている。本研究でも、汎用有限要素法プログラムLS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation) を使用している。

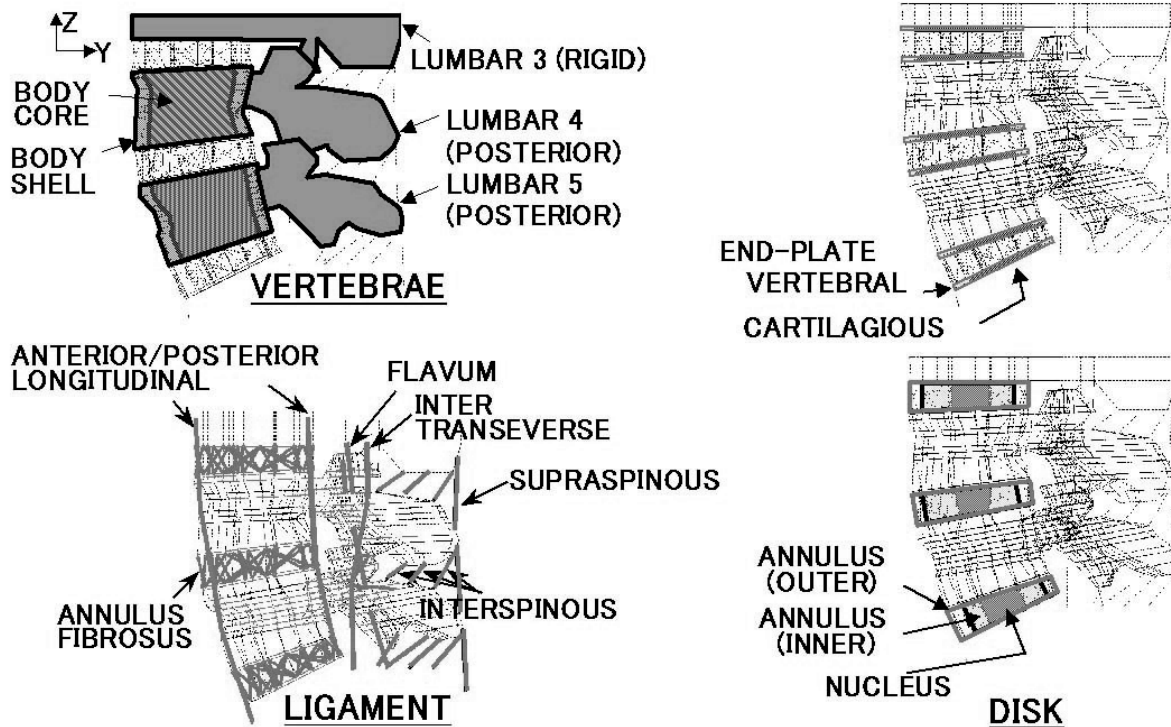


Fig. 1 Finite element model.

## 2. 有限要素モデル

Fig. 1に示す第4, 5腰椎の有限要素モデルは, 44歳男性の標準解剖標本のX線断層写真と解剖学の文献を基に作成されたものである<sup>1)</sup>。椎骨の材料特性は, 後方要素部分を等方線形弾性体とし, 皮質骨と海綿骨から成る椎体部分を横等方な線形弾性体とした。第3腰椎の下側部分は, 第4腰椎以下の要素に荷重を作用させる目的で作成したため, その形状を単純化し, その材料特性は剛体とした。各椎間円板は, 上下に骨性終板と線維軟骨を配置し, その中間を二層の線維輪と髄核で満たした。それらの材料特性は, いずれも等方線形弾性体とした。以上の各部分は, 8節点と6節点のソリッド要素を用いて要素分割した。各靭帯要素は, 圧縮荷重を受け持たない非線形トラス要素で近似した<sup>2)</sup>。このとき, 総節点数は2310, 総要素数は1872であった。

なお, 軸方向圧迫解析では, 髄核と線維輪を要素分割を細かくした上で切り離し, 両者間および髄核とその上下に位置する椎間円板との間に接触を定義した。髄核の物性もせん断係数をゼロとして, より流体に近い特性を

与えた。さらに, 細かく分割された上, 大変形を受けることになる髄核の各要素のメッシュ形状悪化に対し, 計算精度を確保するため, ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 要素を用いた。ALE要素とは, グリッド点が対象物と一緒に移動する通常のLagrangian法で要素の応力や変形を計算し, グリッド点が空間に固定され対象物の移流を計算するEulerian法で節点のスムージングを行うものである。このとき, 総節点数は4322, 総要素数は3405であった。

## 3. 準静的解析

腰椎は, 「比較的硬い椎体・椎骨」に連結する「柔らかな椎間板や靭帯」の変形により圧縮・屈曲するため, 解析の効率化には, 椎体・椎骨の剛体化が有効と考えられる。そこで, 椎体・椎骨の剛体化による近似モデルの有効性検討と, 解析効率が良いとされる要素積分点数低減積分法の過負荷時における精度悪化の様子などを検討する<sup>3)</sup>。

負荷条件をFig. 2に示す。下面を完全拘束し, 上半身

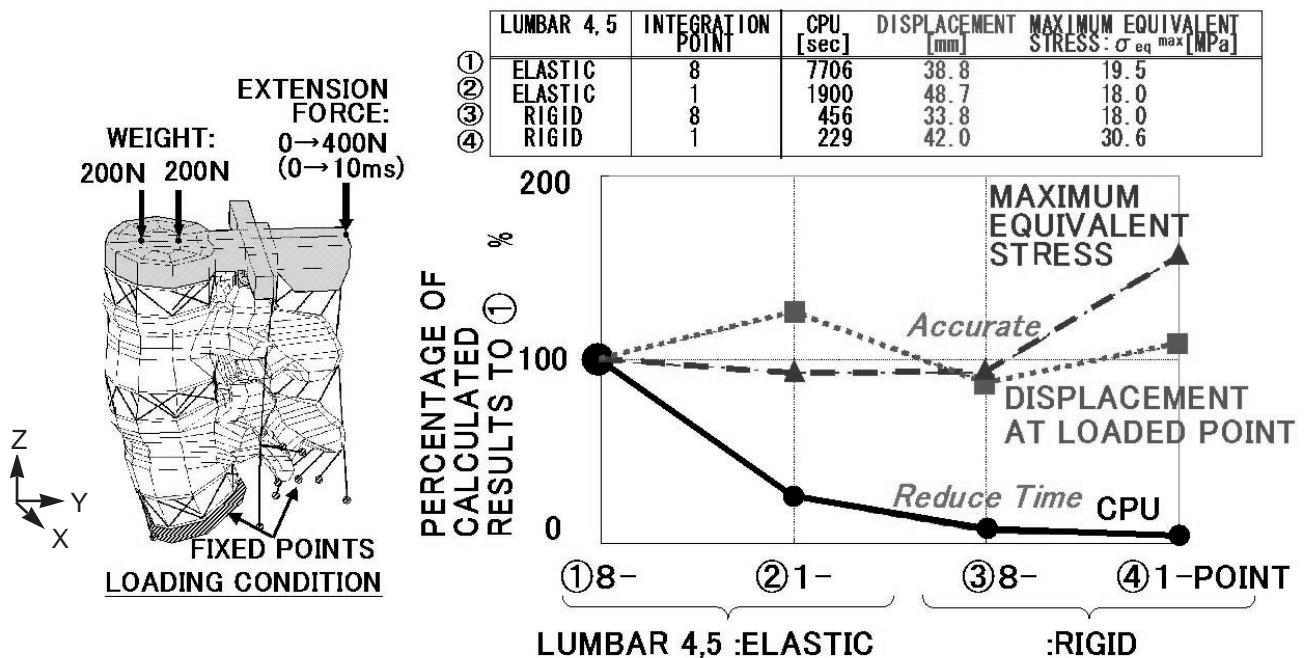


Fig. 2 Percentage of calculated results to the first item.  
(Lumbar4,5 : elastic, 8-points integration)

の自重を考慮するため、剛体化した第3腰椎椎体上面の2点それぞれに $F_z$ を-200N負荷するものとする。さらに、剛体化した第3腰椎棘突起先端に0~10msの間で $F_z$ を0~-400Nに線形的に増加させて負荷するものとする。

Fig. 2に、第4,5腰椎の椎体・椎骨を弾性体としたモデルと剛体としたモデルのそれぞれに対し、「残りの弾性体要素の数値積分点数の選び方を、厳密な8点積分と計算効率の良い1点積分にした場合」についての計算結果の要約を示す。縦軸は、第4,5腰椎椎体・椎骨の弾性体・8点積分の解析結果 (CPU: 7706秒, 自重負荷後の負荷点変位: 38.8mm, 最大相当応力: 19.5MPa) に対する百分比とした。なお、1点積分要素では、ひずみ成分を計算する際に節点の変位してもひずみが0になり応力が生じないアワグラスモード (砂時計の形をしたゼロエネルギーモード) が発生する場合がある。

負荷点の変位やMisesの相当応力の最大値に注目すると、第4,5腰椎椎体・椎骨を弾性体とし8点積分を用いた計算結果と、第4,5腰椎椎体・椎骨を剛体とし残りの椎間板の弾性体要素に8点積分を用いた計算結果とがほぼ一致していることがわかる。さらに計算時間に注目す

ると、第4,5腰椎椎体・椎骨を剛体としたことにより、94%も時間が短縮されていることがわかる。以下の解析では、この効率的な「椎体・椎骨を剛体/椎間板の弾性体要素を8点積分」とするモデルを用いる。

なお、1点積分の場合は計算時間が短縮されても精度が悪化しているが、ここではアワグラスモードが発生していた。

#### 4. 関節機能の考察

腰椎の関節機能を考察するため、髄核の回転装置機能を確認する衝撃圧縮解析を実施する<sup>4,5)</sup>。負荷条件としては、第4,5腰椎の下面を完全拘束し、簡易的にモデル化した第3腰椎 (剛体) の上面に、2.2kgのブロックを初速5.556m/sで衝撃させるものとする (Fig. 3)。ところで、髄核は88%の水を含んだゼラチン質で非圧縮性を有するため、体積一定と見なしてポアソン比  $\nu$  を0.4999としたモデル化をしている。ここでは、比較のためポアソン比を金属など圧縮性の物質で用いる0.3としたモデルも作成し、2通りの解析を実施した。

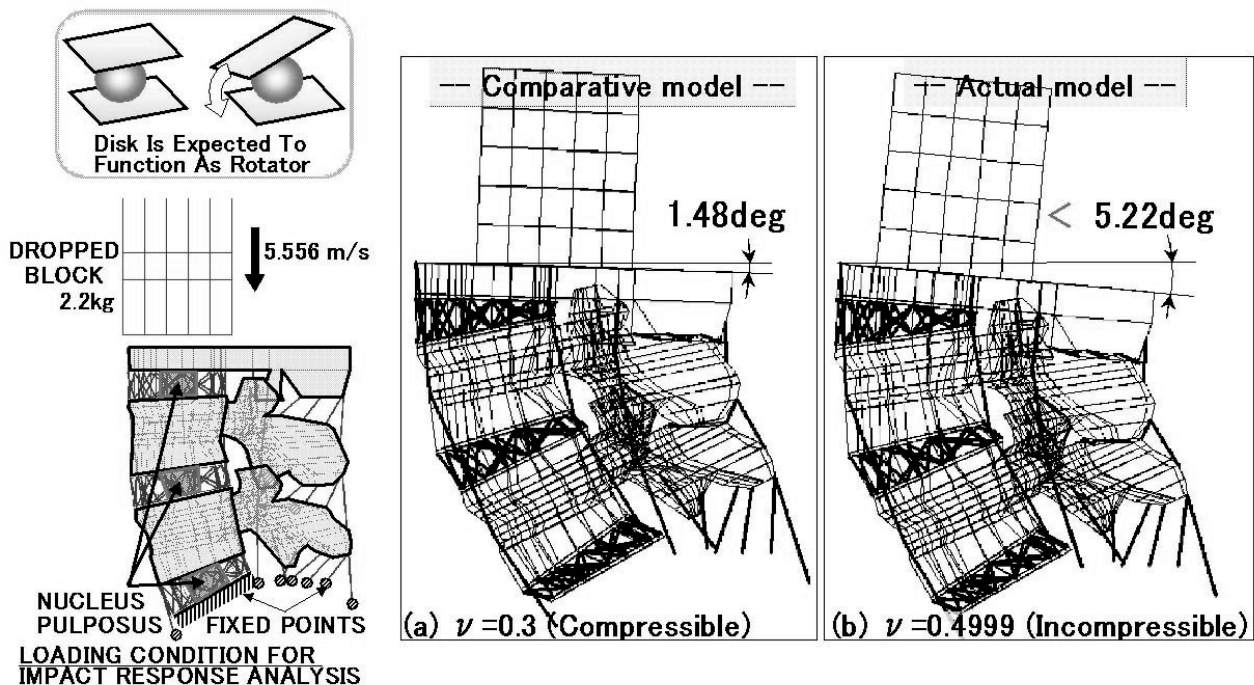


Fig. 3 Results of impact response analyses ( Displacements at 5ms).

Fig. 3に、衝撃後5ms時の衝撃圧縮解析結果の変形図を示す。髄核のポアソン比が0.4999のものは、0.3のものに対し、第4椎体上下の椎間板の傾き角はそれぞれ0.4deg, 1.1deg大き目でくさび形状により近く、椎間板中央部の縮み量も小さいことがわかる。このように、ポアソン比が0.4999のものは、個々の椎間板が回転装置の傾向を有し、腰椎の上面とブロックの回転量( = 0.3 : 1.48deg, = 0.4999 : 5.22deg )も大きくなっていることがわかる。

## 5. 軸方向圧迫解析

剛性として見れば軟らかな髄核が、軸圧迫時に多くの力を受け持つ現象を考察する意味で、非圧縮性の髄核が線維軟骨や線維輪に囲まれ、体積変化が抑えられ、内圧が高められていく様子を求めるため、軸方向圧迫解析を実施する<sup>6)</sup>。

負荷条件をFig. 4に示す。下面を完全拘束し、第3腰椎と剛結合された質量30kgのブロックに、初速2.22m/s (8km/h)を下方向に与えるものとする。

また、解析により得られた髄核と線維輪の変形状態をFig. 4に示す。髄核が非圧縮性を有し体積変化をしないため、軸方向に圧縮された髄核がそれと直角方向に変形

しようとするが、線維輪により水平方向にも拘束されているため、大きな圧力が発生して四方に拡散する。その結果、髄核が線維輪を押しのけるように樽型に変形している様子がわかる。この変形は、線維輪の外周部にも及んでいる。この際、髄核は軸方向にも大きな圧力を受け持っている。

## 6. まとめ

以上、有限要素法を用いた腰椎の動的挙動解析の効率的なモデル化手法を検討した結果、剛性の高い部分の剛体化は効率的であったが、残りの弾性体要素の積分点数低減は過負荷時に精度が悪化した。さらに、髄核の回転装置機能がその非圧縮性に起因することを衝撃圧縮解析により検討したところ、髄核のポアソン比が0.4999の非圧縮性のものは、0.3の圧縮性に比べ、個々の椎間板が回転装置の機能をより良く示した。その上、剛性として見れば軟らかな髄核が、軸圧迫時に多くの力を受け持つ現象を考察するために軸方向圧迫解析を実施したところ、髄核の内圧が高まり、周囲の線維輪を押しのけようとする樽型の変形が求められた。

最後に、本研究を進めるにあたり、第4,5腰椎の静的有限要素モデル<sup>1)</sup>のご提供やご教授を頂いた、名古屋大

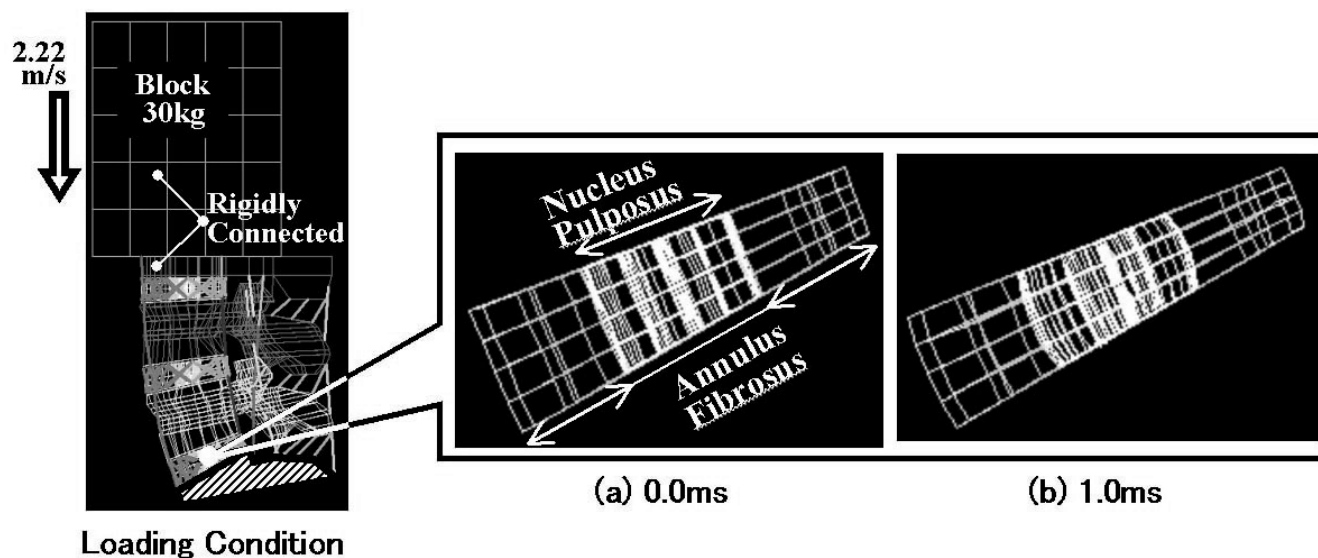


Fig. 4 Deformation of nucleus pulposus and annulus fibrosus.

学大学院工学研究科機械情報システム工学専攻の田中英一教授，山本創太助手に感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 田中英一, 百鳥誠, 今木圭, 井上英則, 大森和夫: "下位腰椎システムの有限要素応力解析", 日本機械学会論文集A編, 62-600 (1996), 184 ~ 190
- 2) Yamamoto, S., Tanaka, E., Mihara, K., Inoue, H. and Ohmori, K.: "Finite Element Evaluation of Spondylolysis Taking Account of Nonlinear Mechanical Properties of Ligaments and Annulus Fibrosus", JSME Int. J. C, 42-3(1999)
- 3) 西垣英一, 尼子龍幸, 三木一生, 三原兼二郎, 山本創太, 田中英一: "腰椎の動的挙動解析の基礎検討", JSME Annu. Meet., No.99-1, (1999), 343 ~ 344
- 4) 西垣英一, 尼子龍幸, 三木一生, 山本創太, 田中英一: "腰椎の動的挙動解析の基礎検討 ( その2. 椎間板機能の考察 )", 日本機械学会第12回バイオエンジニアリング講演会, No.99-37, (2000), 255 ~ 256
- 5) Nishigaki, H., Amago, T., Miki, K., Ishiyama, S., Tanaka, E. and Yamamoto, S.: "Human Biomechanics and Injury Prevention", Ed. by Kajzer, J., Tanaka, E. and Yamada, H. (2000), 243, Springer-Verlag
- 6) 西垣英一, 尼子龍幸, 三木一生, 石山慎一, 山本創太, 田中英一: "腰椎の動的挙動解析の基礎検討 ( その3 軸方向圧迫時の髄核機能の考察 )", 日本機械学会2000年度年次大会, No.00-1, (2000), 489 ~ 490

(2000年11月22日原稿受付)

### 著者紹介



西垣英一 Hidekazu Nishigaki

生年：1961年。

所属：設計工学研究室。

分野：人体の有限要素解析に関する研究。ボデー構造の初期設計法に関する研究。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。  
工学博士。



尼子龍幸 Tatsuyuki Amago

生年：1963年。

所属：設計工学研究室。

分野：ブレーキ摩擦振動に関する研究。ボデー構造の初期設計法に関する研究。人体有限要素モデルに関する研究。

学会等：日本機械学会会員。



三木一生 Kazuo Miki

生年：1953年。

所属：人体モデリング研究室。

分野：生体力学。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。



石山慎一 Shin-ichi Ishiyama

生年：1942年。

所属：機械2部。

分野：生体力学。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。