

- SCHN-CS : SPEC**
- PCHN-CS : PPEC**
- Hya-CS : HyaPEC**
- CMCHN-CS : CMPEC**
- CM-C-CS : CM-CPEC**
- Alg-CS : AlgPEC**
- Pec-CS : PecPEC**

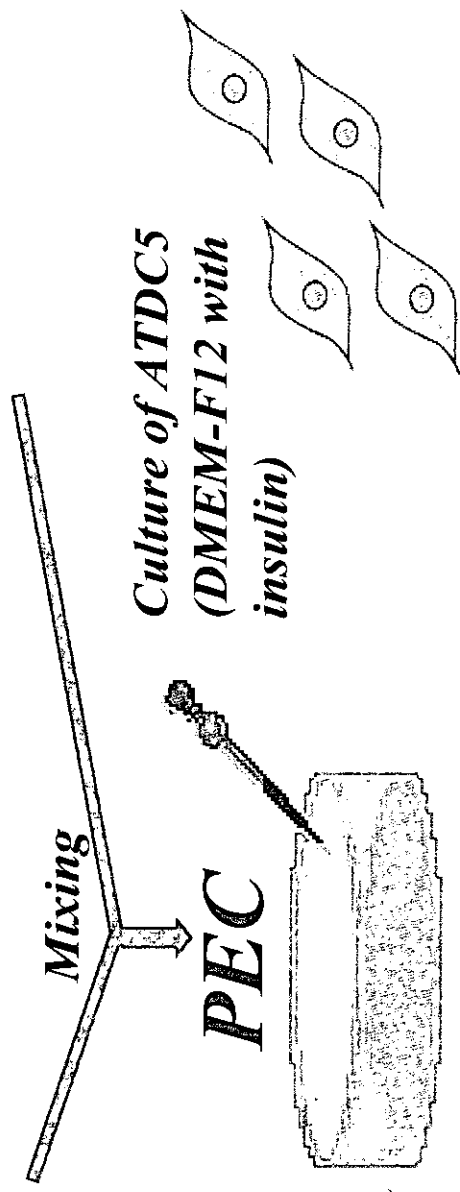
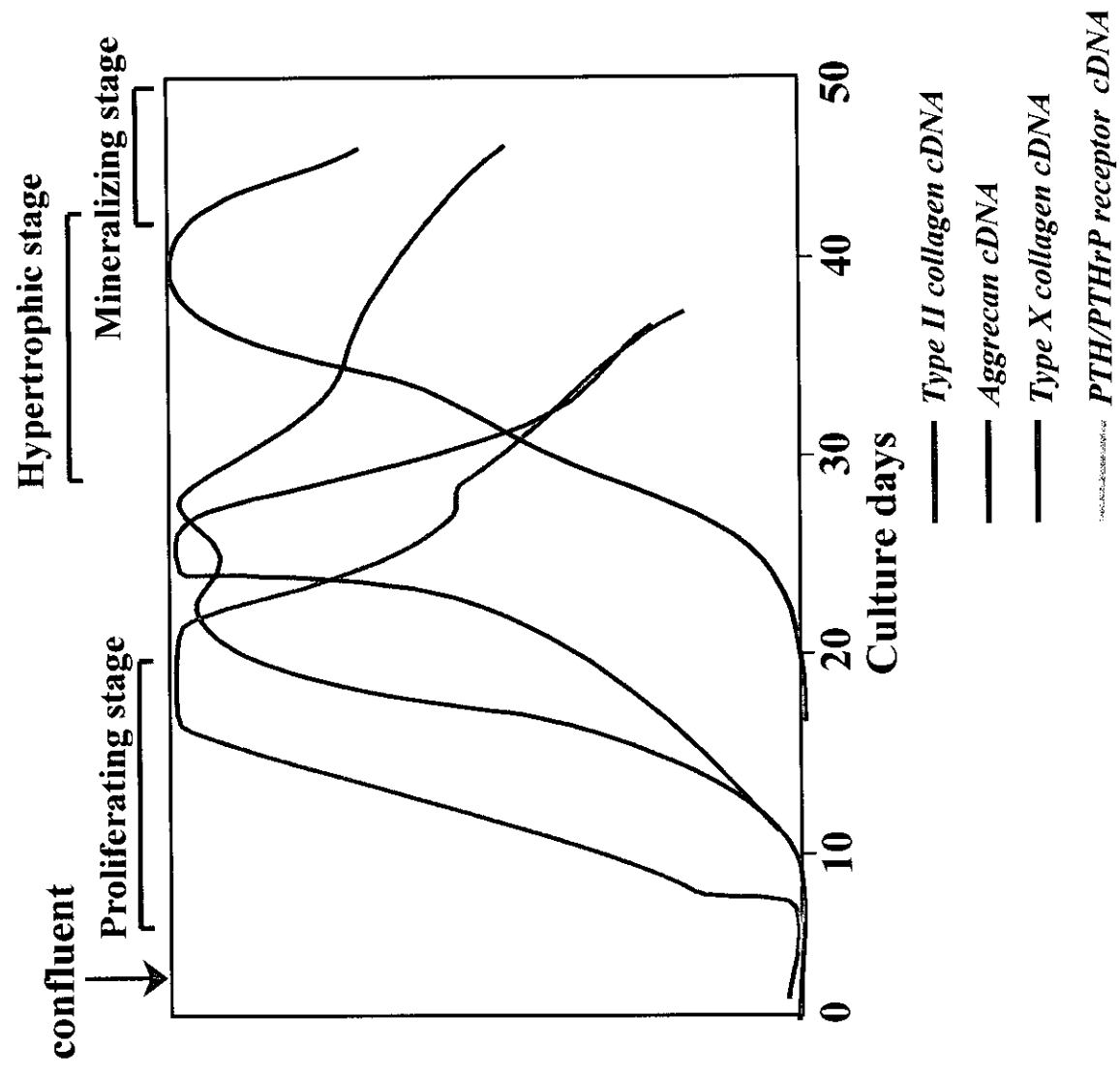


図2 実験方法(1)

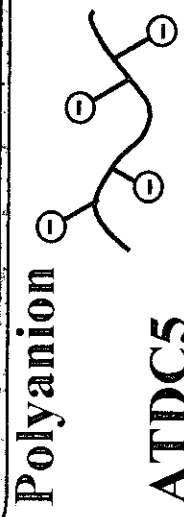
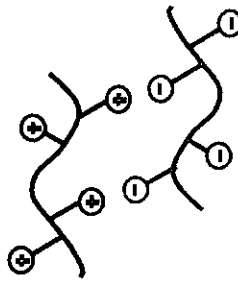
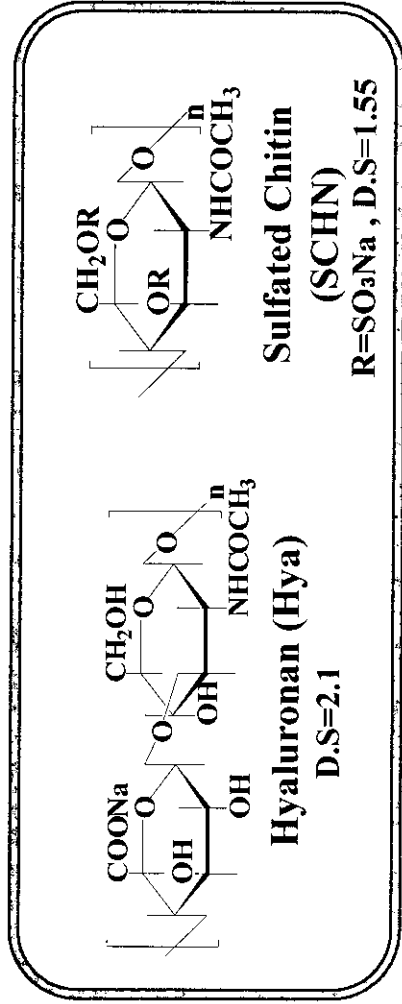
細胞評価 (ATDC5)

- ① 細胞接着 (接着率測定)
- ② 細胞形態
- ③ 増殖 (DNA法)
- ④ 分化  
軟骨基質の染色  
(Alcian blue染色)  
mRNAの発現解析  
(type II collagen, Aggrecan)



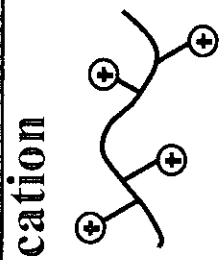
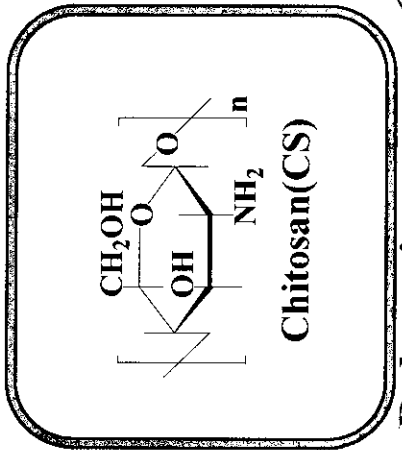
Reference : J Bone Miner Res, 12 (8) : 1174-88. 1997

図3 実験方法(2)

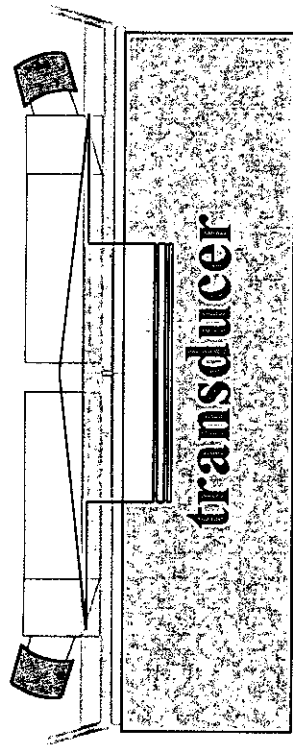


DMEM/F12+5%FBS

1.3 x 10<sup>4</sup> cells/12.5cm<sup>2</sup> flask culture



PEC coating flask



- Cell morphology
- Differentiation  
(Alcian blue, RT-PCR)

**US exposure**  
10min./day  
frequency 1.0MHz  
tone burst 200 μsec.  
repetition rate 1.0kHz

図 4 実験方法 (3)

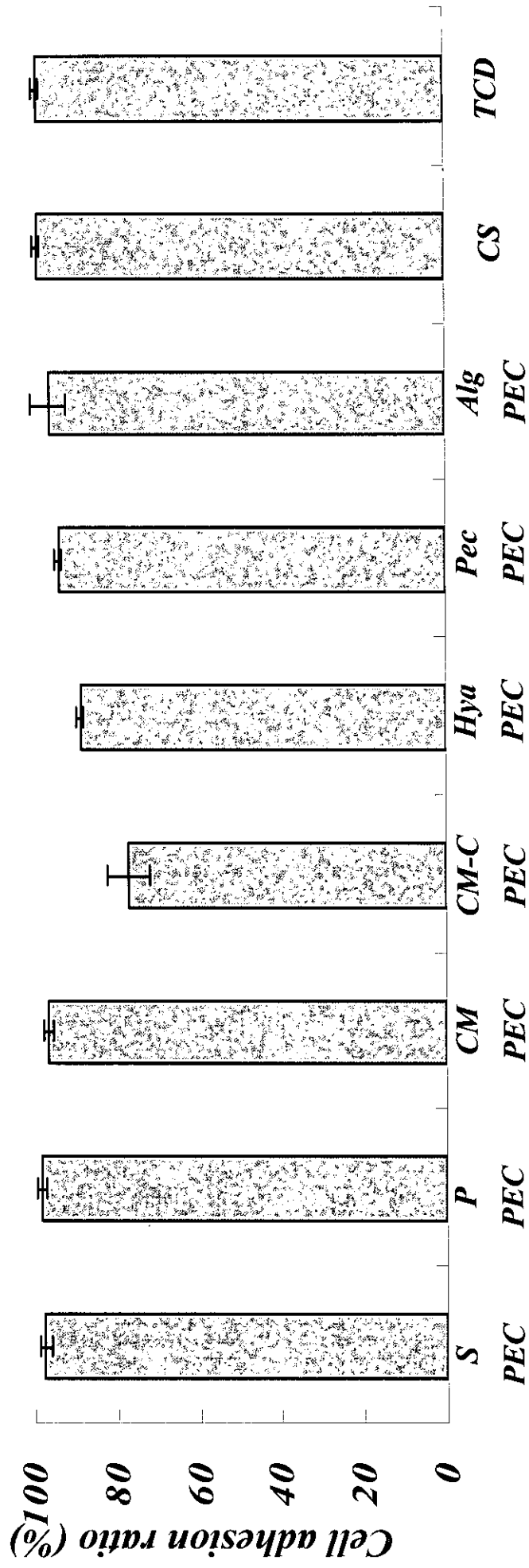
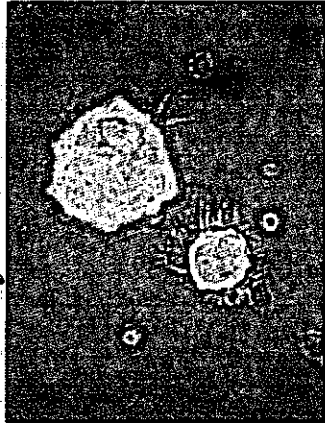
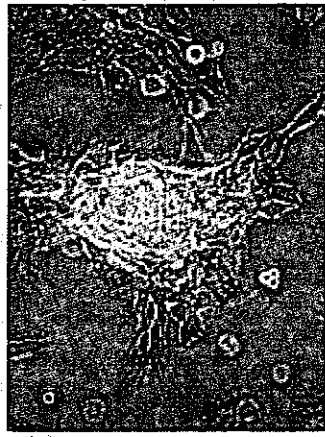


図5 ATDC5のPECへの接着挙動

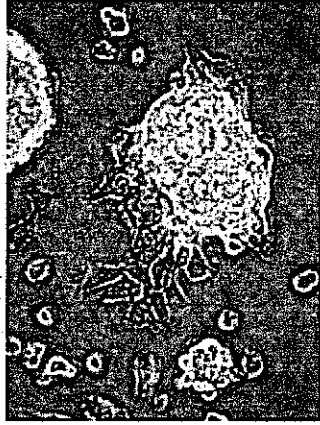
*HyaPEC*



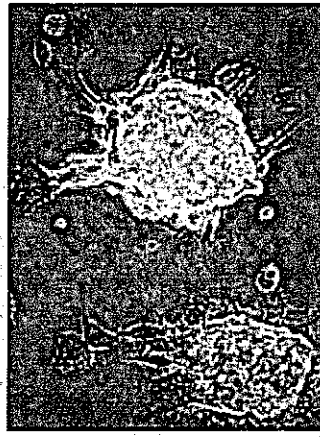
*CMPEC*



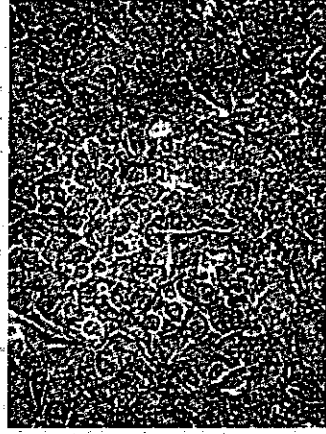
*CM-CPEC*



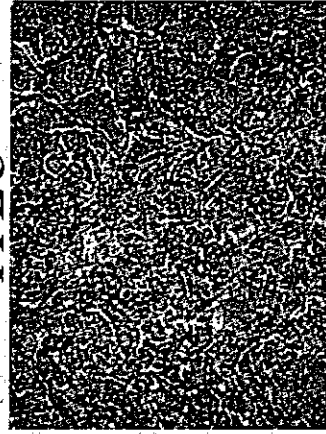
*PecPEC*



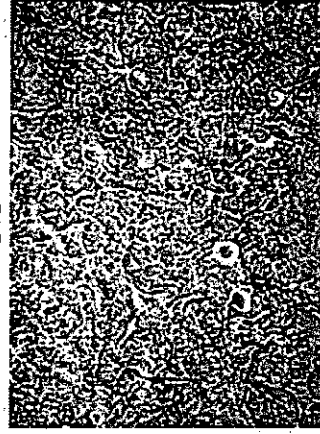
*SPEC*



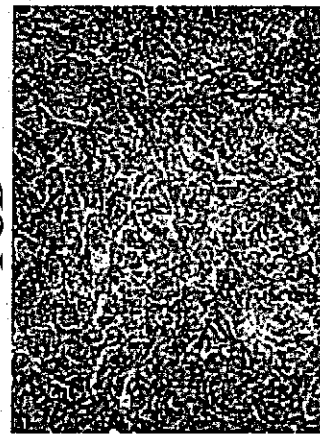
*PPEC*



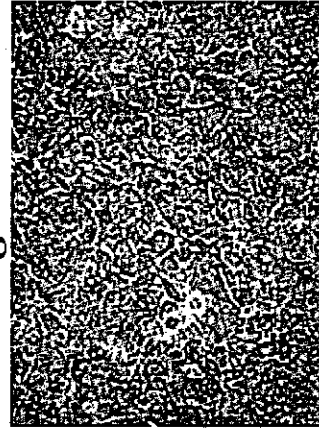
*CS*



*TCD*

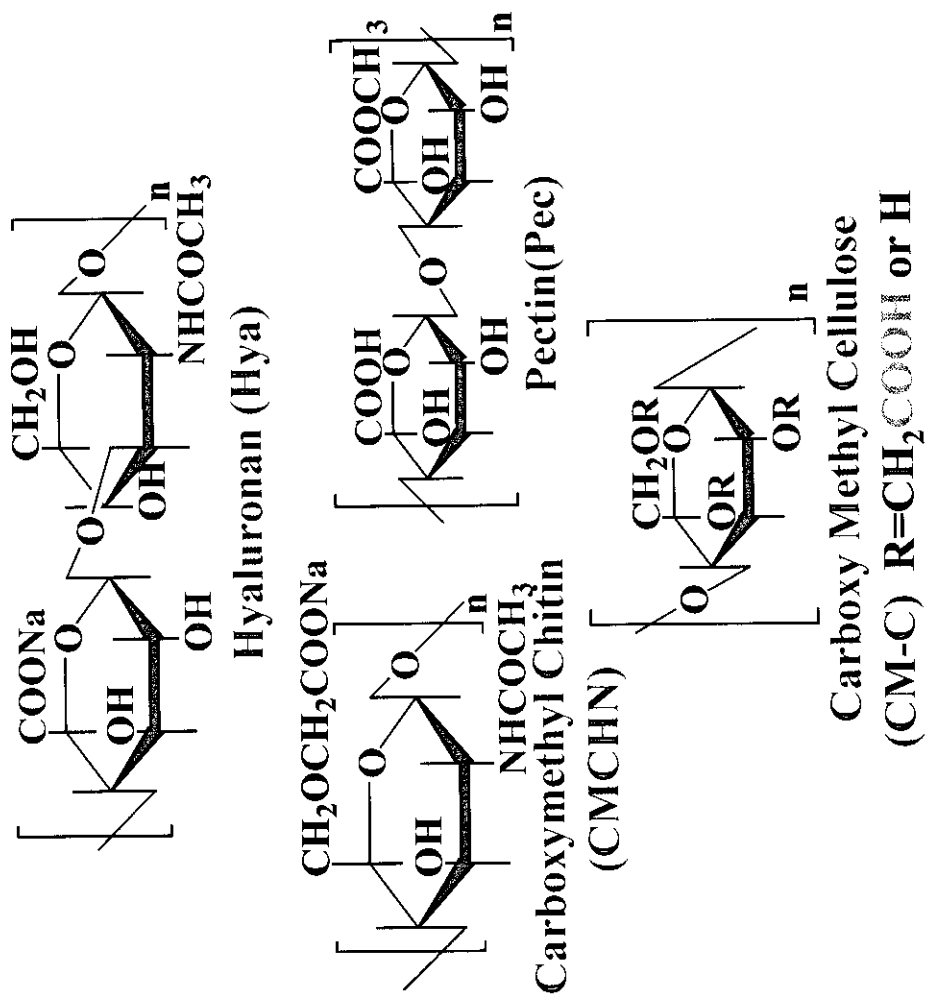


*AlgPEC*

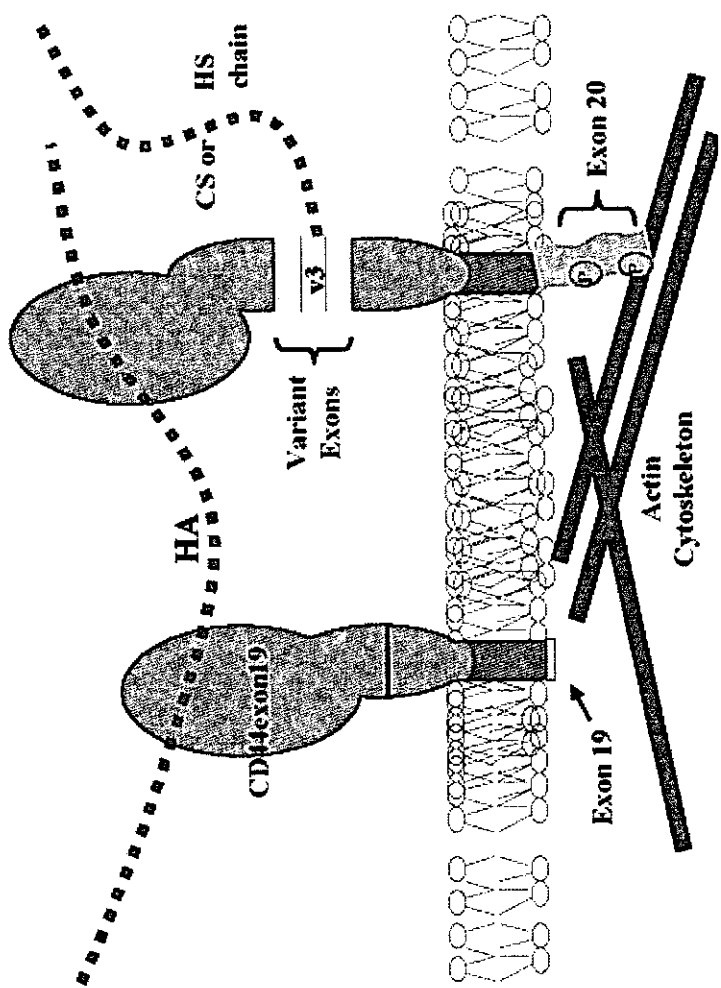


100  $\mu$ m

図6 ATDC5の形態 (培養10日目)



また、ヒアルロン酸と構造が類似しているためPecPEC, CMPEC, CM-CPEC上の細胞も凝集したと推測される。



軟骨細胞の表面にはCD44と呼ばれるヒアルロン酸レセプターが存在し、細胞同士を架橋することが明らかとされている。

図7 ATDC5の凝集挙動

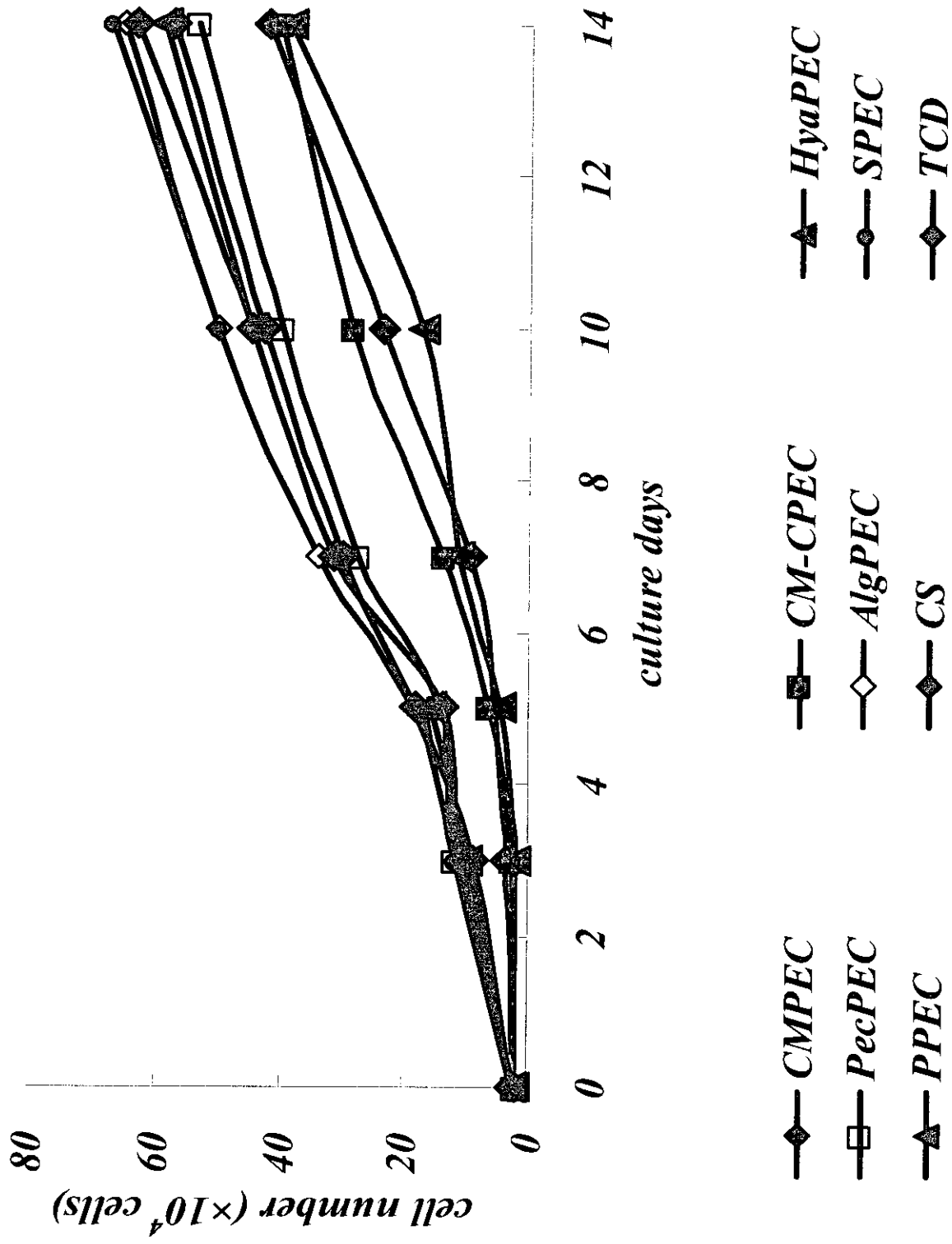
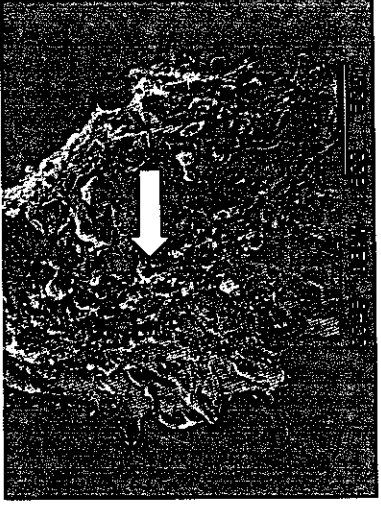


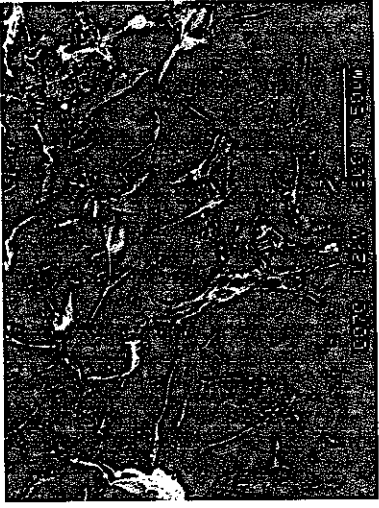
図8 ATDC5の増殖挙動



*CMPEC*



*HyalPEC*



*CS*



*SPEC*



*PPEC*



*TCD*

$50\ \mu\text{m}$

図9 ATDC5の走査電顕による形態 (培養10日目)



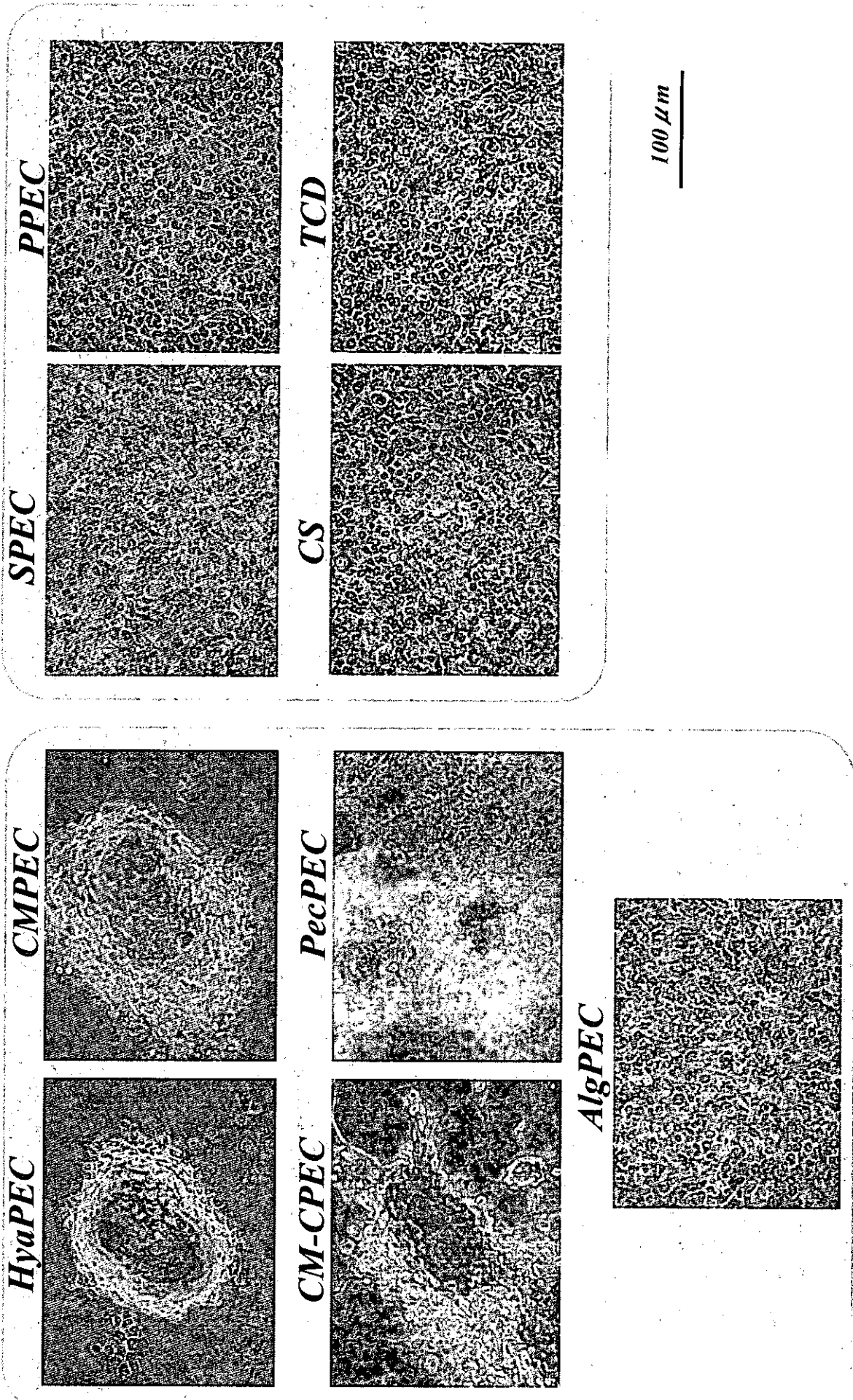


図10 ATDC5のAlcianblue法による染色（培養10日目）

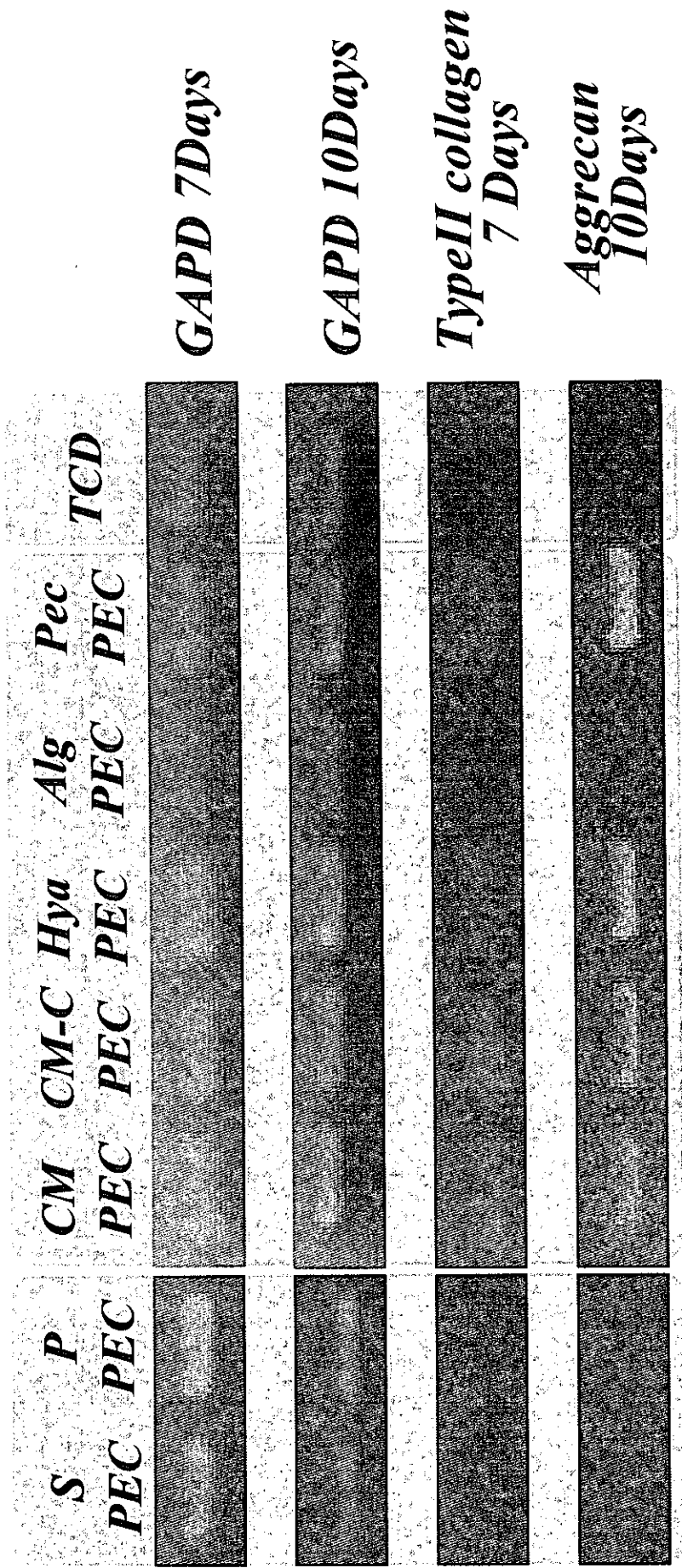
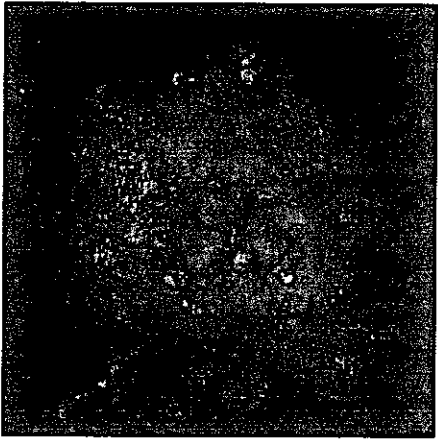
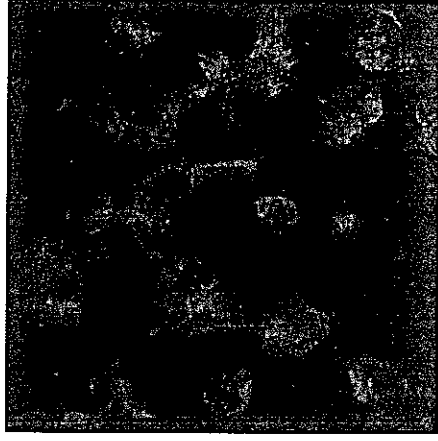


図11 ATDC5のRT-PCR法による分化評価



**HyaPEC**

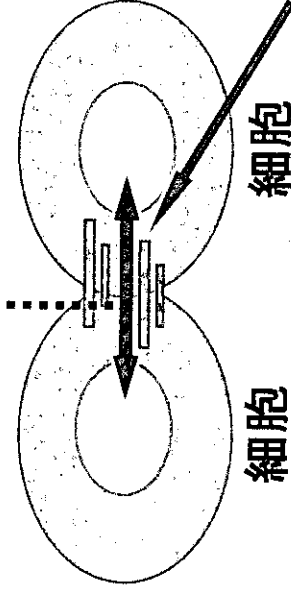
Red:nucleas, Green:N-cadherin



**Control**

50  $\mu$ m

細胞-細胞間の情報  
伝達が盛んになる



細胞

細胞

N-カドヘリン

軟骨形成が  
促進される

図12 N-cadherinの免疫染色 (培養7日目)

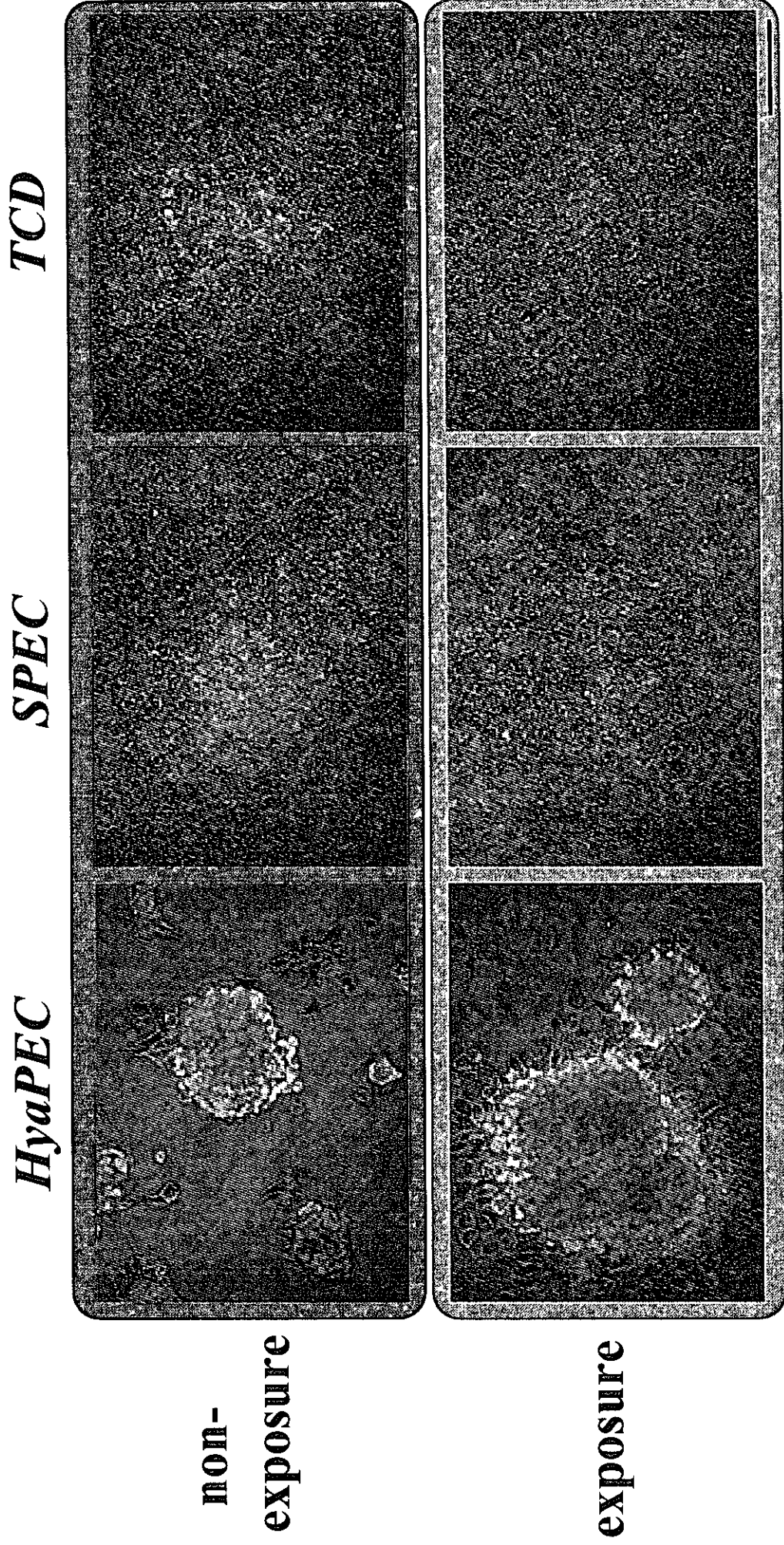


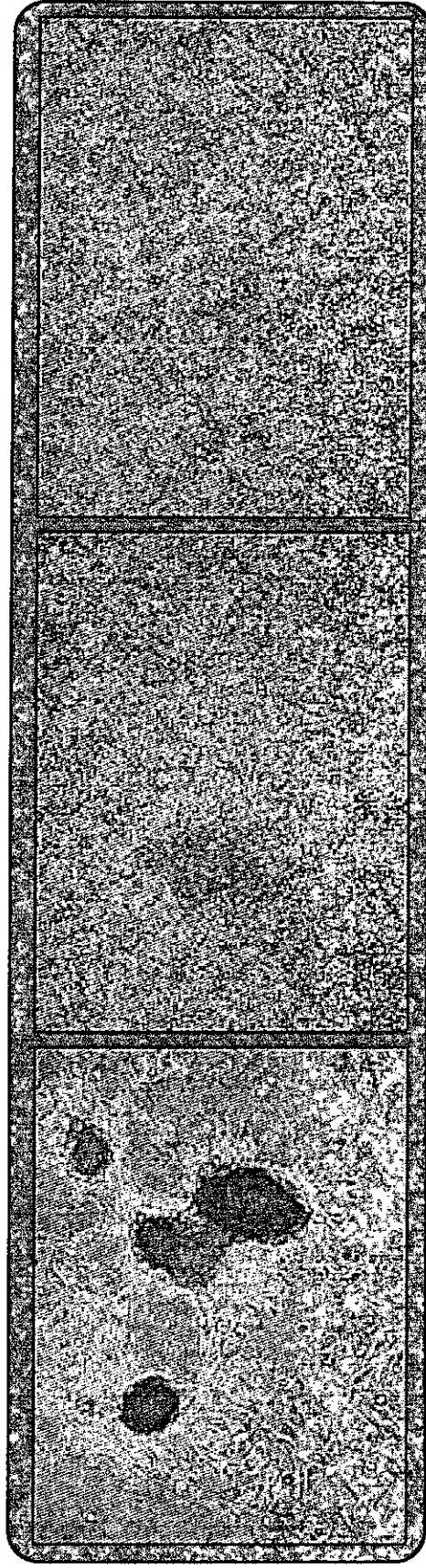
図13 低出力超音波パルス照射下におけるATDC5の形態  
(培養10日目)

*HyaPEC*

*SPEC*

*TCD*

**non-  
exposure**



**exposure**

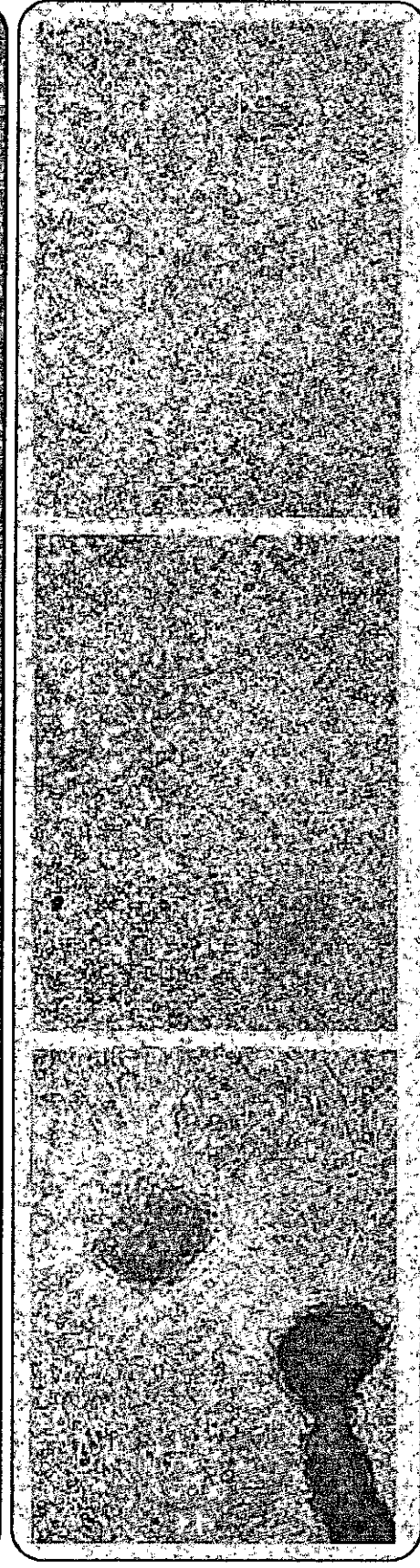


図14 低出力超音波パルス照射下におけるATDC5のAlcianblue  
染色（培養10日目）

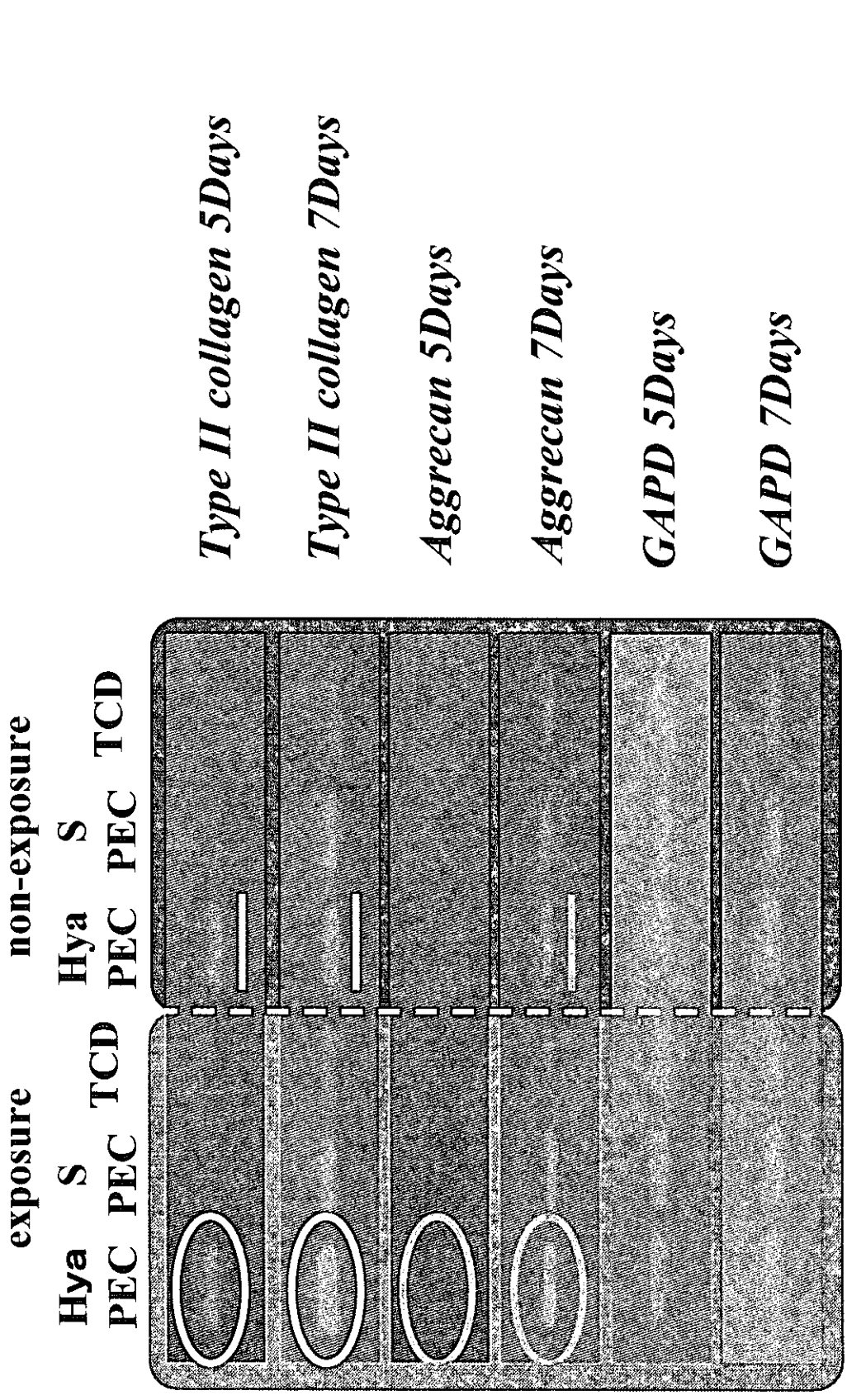


図15 低出力超音波パルス照射下におけるATDC5のRT-PCR法による分化評価

## 転倒のセンシング技術開発と Hipprotector 設計に関する研究

分担研究者 但野 茂 北海道大学大学院工学研究科

### 研究要旨

本研究では、まず、装着型加速度・角速度センサーを用いて、転倒しやすい雪道凍結路や擬似凍結路における歩行とスリップ時の身体加速度や角速度を測定した。その結果、路面状況によって足首進行方向加速度や腰部加速度、さらに歩行周期、遊脚期や立脚期が異なることを明らかにした。また、スリップが foot flat による重心移動時に起こりやすいことを確認した。これらを基に、雪道においてスリップや転倒のしにくい歩き方を検討した。次に、高齢者の転倒による大腿骨頸部骨折を防ぐために開発されたヒップパットの衝撃吸収性能を測定するための装置を作製し、さまざまなヒップパットや緩衝材について実験を行なった。その結果、最大衝撃加重や衝突時間から衝撃吸収性能の違いを定量的に明らかにすることができた。装着感を含め、より優れたヒップパットについて検討した。

### A. 研究目的

転倒による大腿骨頸部骨折は、高齢者が寝たきりとなる主要な原因の一つとなっている。したがって、転倒の防止や転倒による大腿骨骨折予防は、高齢化社会において早急に解決すべき課題である。

本研究では、まず、装着型加速度・角速度センサーを用いて、雪道凍結路や擬似凍結路における歩行とスリップ時の身体加速度や角速度を測定する。路面状況による歩行因子や歩行の特徴を明らかにする。これらを基に、雪道においてスリップや転倒のしにくい歩き方を検討する。次に、高齢者の転倒による大腿骨頸部骨折を防ぐために開発されたヒップパットの衝撃吸収性能を測定するための装置を作製する。市販されているさまざまなヒップパットや緩衝材について実験を行ない、最大衝撃加重や衝突時間から衝撃吸収性能の違いを定量的に明らかにする。これらの結果を基に、装着感に優れた機能的なヒッププロテクターについて検討する。

### B. 雪道歩行解析

#### B-1. 研究方法

歩行時の身体各部の 3 軸加速度測定にはモーションレコーダ MVP-A3 (Micro Stone 社) を用いた。大きさは  $W85 \times D50 \times H30$  (mm)、重さ 90g である。加速度の検出範囲は  $\pm 20$  m/s<sup>2</sup> と  $\pm 50$  m/s<sup>2</sup> と  $\pm 100$  m/s<sup>2</sup> の 3 種類である。角速度測定には 2 軸ジャイロセンサー MVP-G2 (Micro Stone 社) を用いた。大きさは  $W85 \times D50 \times H30$  (mm) である。角速度の検出範囲は  $\pm 90$  deg/sec である。

角速度の測定位置は腰部中央(腸骨上端の上 5cm)、加速度は、腰部中央(腸骨上端の上 5cm)、左右膝関節上方大腿部(膝蓋骨上端の上 5cm)、左右足関節上下方腿部(腓骨外果中央の上 5cm)の 5 箇所とした。サンプリング周期は 10ms とした。測定座標系は運動座標系(センサー設定方向基準)とし、x: 進行方向、y: 進行方向に対し垂直上方、z: 左足内側方向である。被験者は健常成人

男性 3 名 (年齢 22, 23 歳) である。万が一転倒した場合に被験者の身体を守るために、ホッケー用パンツ、ヘルメット、肘用パッド、膝用パッド、手首用パッドを着用した。被験者の外観とセンサー取り付け位置を図 B-1 に示す。

歩行路は、屋内平坦路、屋内階段(段差 17cm、段幅 30cm、段数 10 段)、舗装路坂道(傾斜角 5°)、雪道凍結路(気温 -0.1°C、図 B-3)、擬似凍結路(ビニールシート上にサラダオイル塗布、図 B-2)の 5 箇所とした。

屋内平坦路、雪道凍結路はできるだけ定常歩行に近くなるように歩行距離 20m とし 2 往復した。屋内階段は段差 17cm、段幅 30cm、段数 10 段、擬似凍結路面上では歩行距離 5m、舗装路坂道では歩行距離 6m とした。歩行距離が短い箇所では測定回数を増やすことにより、できるだけ定常歩行に近いデータがとれるようにした。歩行は直立静止からの正常歩行とし、ステップ時間、



図 B-1 加速度・角速度測定位置と測定方向

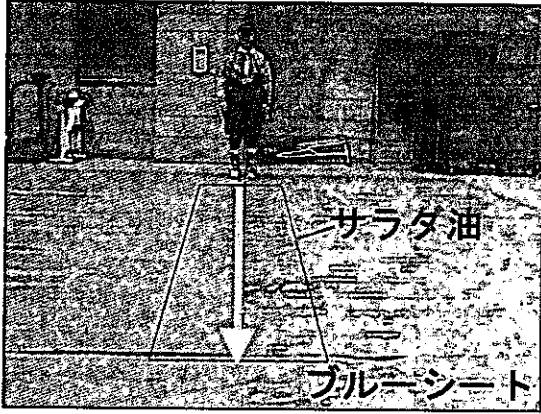


図 B-2 擬似凍結路

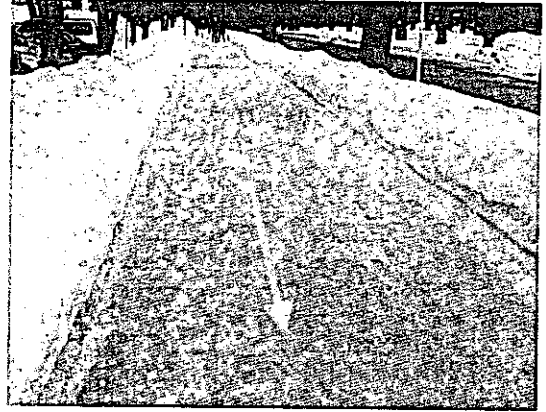


図 B-3 雪道凍結路

ステップ長はともに任意とした。

靴による影響をなくすために、被験者は同じシューズで歩行を行なった。シューズと歩行路面との最大静止摩擦係数を事前に計測した。重さ 0.33kg のシューズに 2.0kg の錘を乗せ、シューズの紐を水平方向に引張り、動き出す瞬間のばねばかりの値を読み、最大静止摩擦係数を求めた。その結果、屋内平坦路、階段では 0.47、舗装路では 0.9、擬似凍結路、雪道凍結路では 0.22 であった。

#### B-2. 結果と考察

どのような路面条件においても左右足首加速度の x 方向の波形には周期的な最小値と最大値がみられた。一例として屋内平坦路歩行時の足首加速度を図 B-4 に示す。図のように足の踵が接地する heel contact の瞬間と、足の裏が接地し膝から下が前方に傾く foot flat の瞬間とは同時であると考えられる。また、左右足首加速度の y 方向の波形から、周期的に見られる波形の最大値は足

のつま先が路面から離れる toe-off の瞬間であると考えられる。

図 B-5 に示すように、加速度波形の heel contact から heel contact までは歩行周期と定義され、さらに toe-off の前後で、足が路面に着いている状態の立脚期と足が路面から完全に離れている状態の遊脚期とに分けることができる。路面条件と歩行周期の関係を図 B-6 に、立脚期・遊脚期の割合との関係を図 B-7 に示す。図 B-6 から、歩行周期は、雪道凍結路では坂道下りや階段下りのときと同様に短いことがわかる。また、図 B-7 から立脚期と遊脚期の割合は各路面条件でほぼ同じ 6 : 4 であった。

heel contact 時と foot flat 時の左右足首加速度 ( $A_x$ ) を各路面条件について平均した値を、それぞれ図 B-8 と図 B-9 に示す。図から、雪道凍結路や擬似凍結路において、特に foot flat 時の加速度が他の路面歩行に比べ、小さくなっていることがわかる。

図 B-10 に各路面条件における腰部の 3 軸方向加速度 (絶対値平均) を示す。角速度センサーの情報を基に固

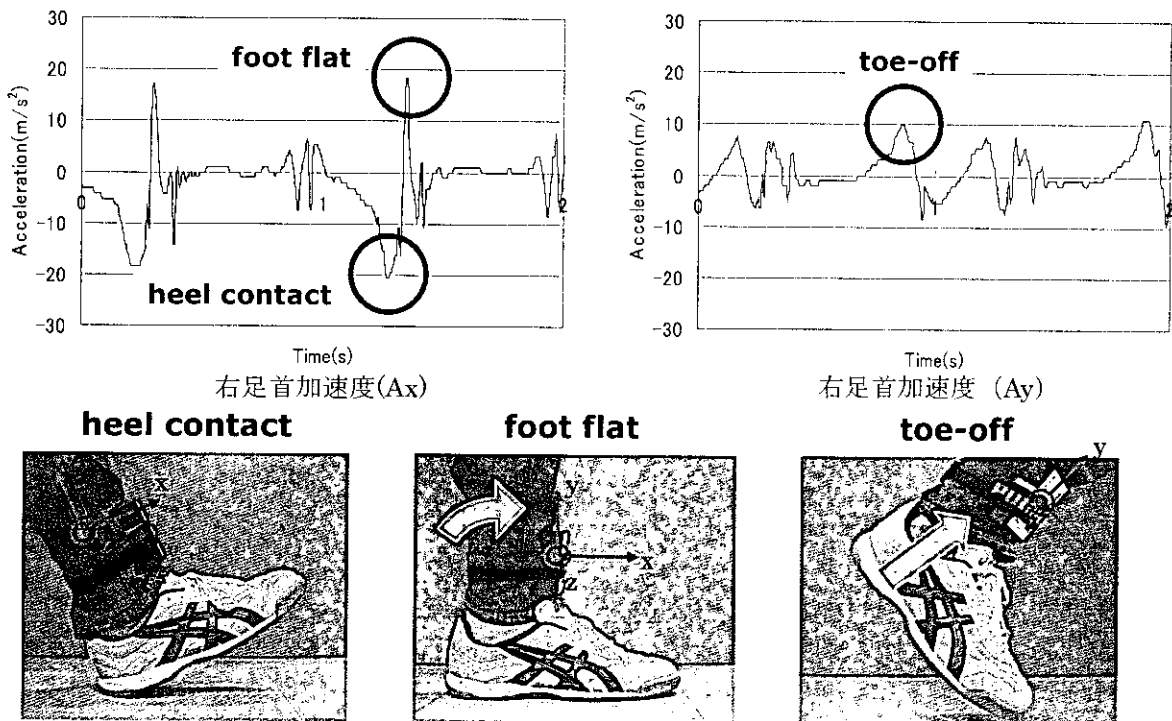


図 B-4 屋内平坦路歩行時の右足首の加速度



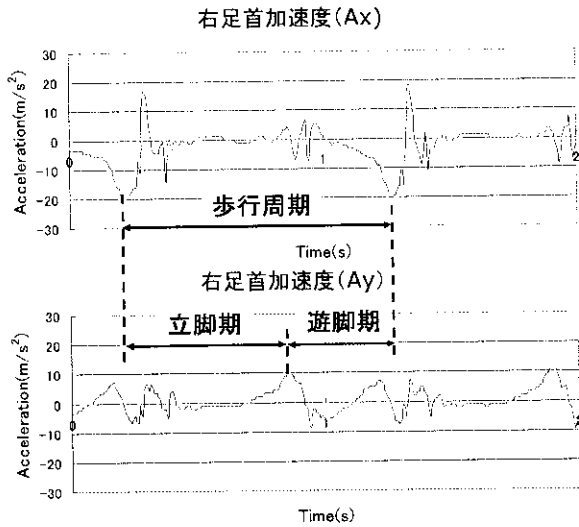


図 B-5 歩行周期と立脚期・遊脚期

定座標系に変換してある。図から、雪道凍結路や擬似凍結路のように非常に滑りやすい路面では、腰部の各軸方向の絶対値平均も小さい。これは他の路面歩行に比べ腰部の上下左右への変動が小さいことを示している。

擬似凍結路歩行に数回のスリップが見られた。スリップ直後のリカバリー動作によっていずれも転倒には至っていない。スリップは進行方向への足首前方スリップが多く、進行方向に対して直交横方向へは少なかった。一例として、スリップ時に特に大きく体勢を崩したとき

の様子を図 B-11 に示す。これは進行方向への足首前方スリップである。図中の白線は、スリップした側の足の踵が接地した場所を示す。図中 1 枚目で heel contact し、図中 4 枚目でスリップが起きている。このときの左右足首加速度を図 B-12 に示す。図中の点 A は足首進行方向 (X 方向) に対してマイナス方向の加速度のピークが足の踵接地 (heel contact) の瞬間をあらわす。これは進行方向 (X 方向) に出した足の踵が着地することで足首がストップするため、加速度は進行方向に対してマイナスとなるためである。図 B-12 の点 B は足首進行方向 (X 方向) に対してプラス方向の加速度ピークを示しており、体重が足に乗って足の膝から下が前方に傾く瞬間を表す。点 B は足底接地 (foot flat) とほぼ同じ瞬間だと考えられる。また、歩くリズムなどの変化により、どちらのピーク値も大きく変化する。図 B-11 から、足首前方スリップは foot flat 開始直後に起きていると考えられる。このとき、図 B-12 に示した左右足首加速度 (進行方向) の波形は、スリップしなかった場合、foot flat 時の加速度ピーク後に加速度のマイナス方向への減少が見られるが、スリップした場合は、この減少が見られないという特徴を示した。これは他の足首前方スリップでも観察された。このことから、足首の加速度変化からスリップや転倒を検出できる可能性がある。

以上より、雪道凍結路における歩行の特徴をまとめると以下となる。

- foot flat 時の足首進行方向加速度が小さい。
- 他の歩行条件に比べ歩行周期が短く、遊脚期、立脚期

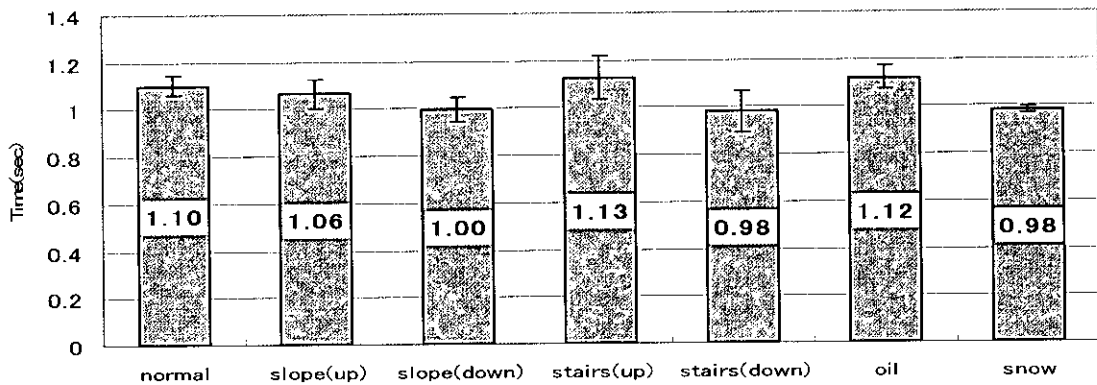


図 B-6 歩行周期

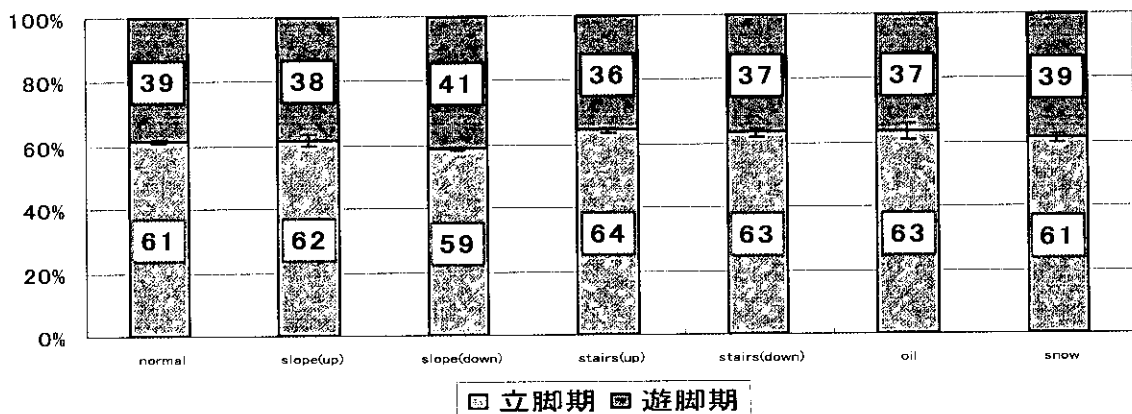


図 B-7 立脚期と遊脚期

ともに短い。

さい。

・腰部（重心位置）加速度の各軸方向の絶対値平均が小

また、屋内平坦路と雪道凍結路における heel contact

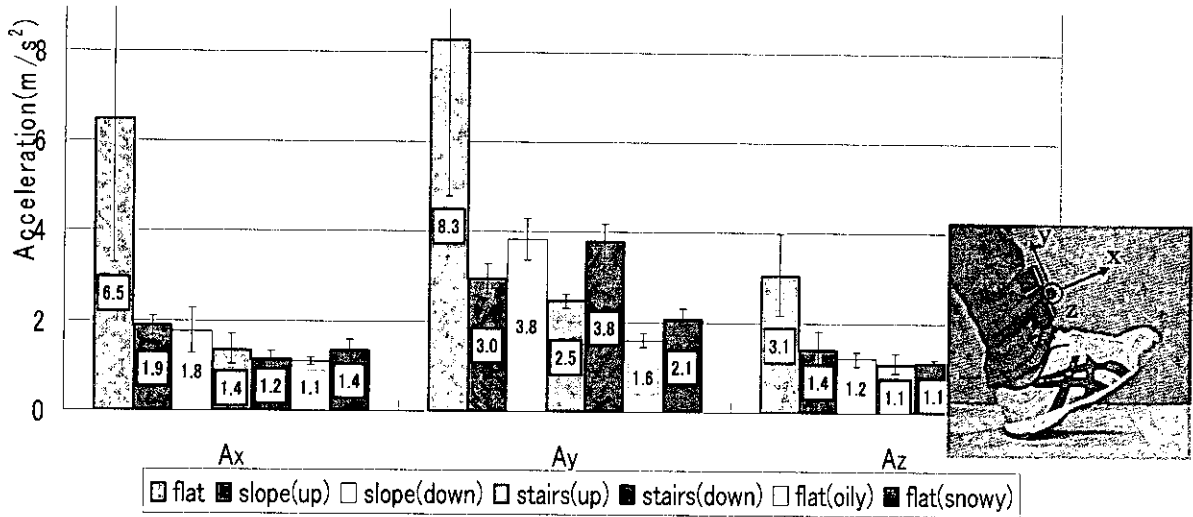


図 B-8 heel contact 時 足首加速度 (Ax)

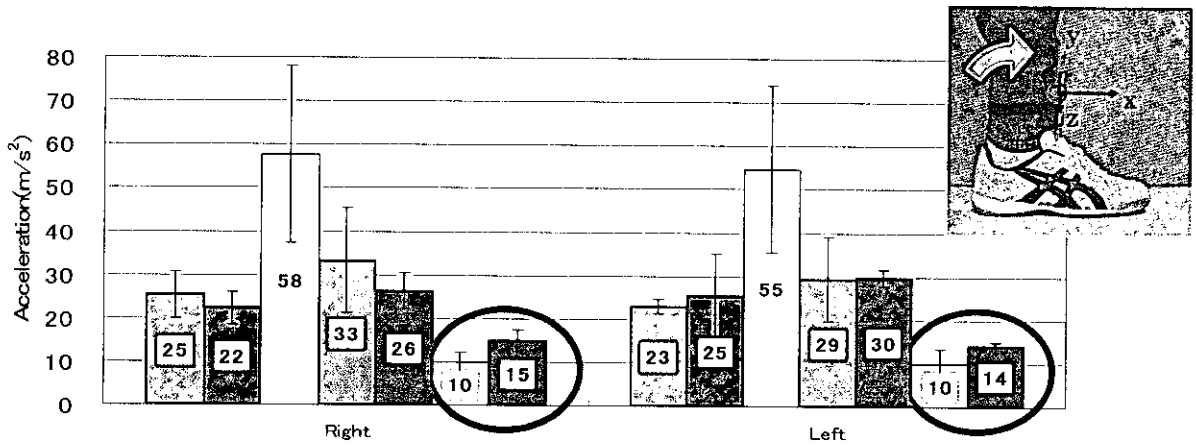


図 B-9 foot flat 時 足首加速度 (Ax)

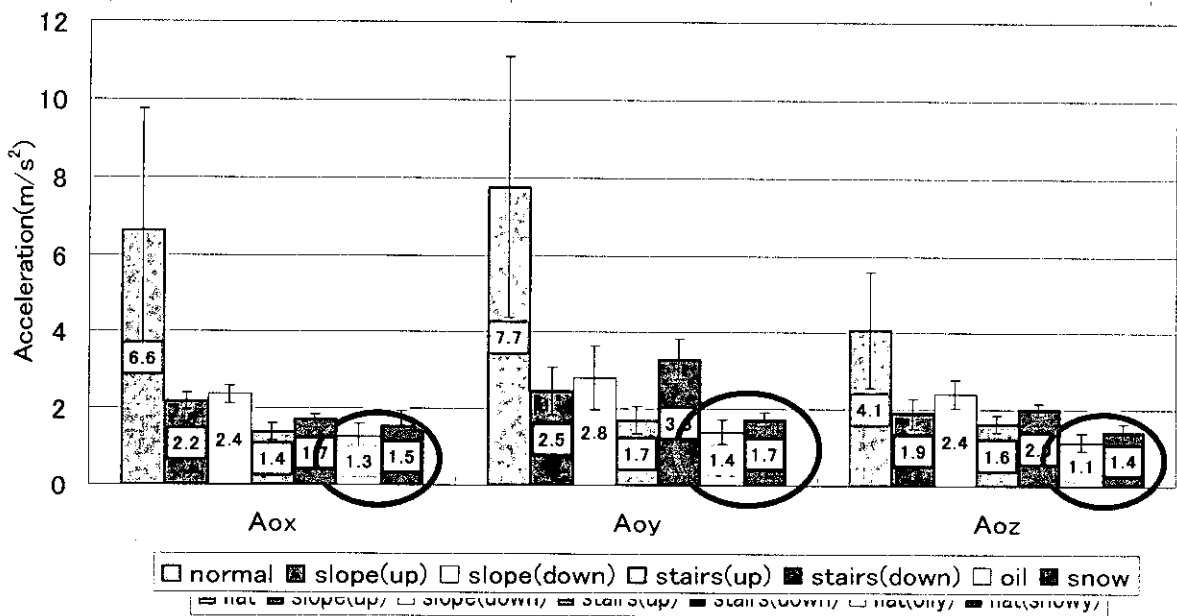
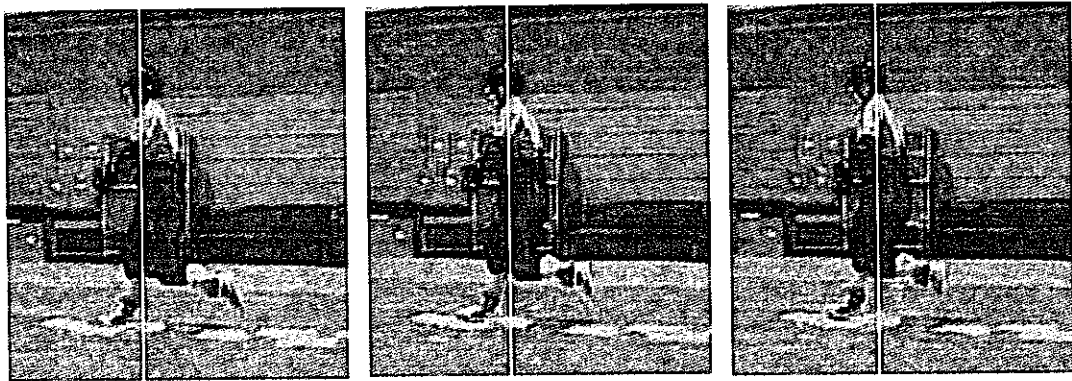


図 B-10 各路面条件における腰部の3軸方向加速度 (固定座標系, 絶対値平均)



Slip

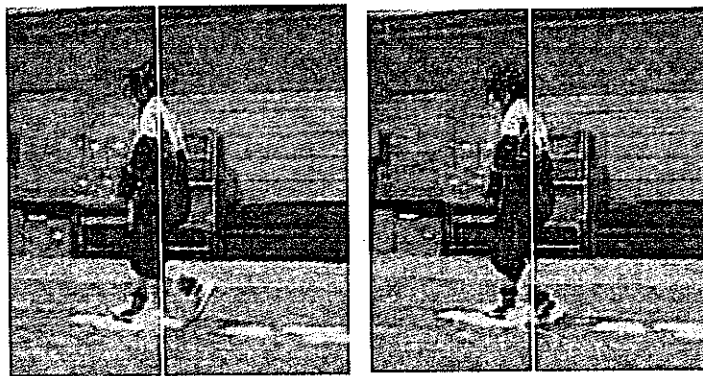


図 B-11 擬似凍結路面歩行時のスリップ

時と **foot flat** 時の歩行の様子から、滑りやすい雪道凍結路では、膝をしっかりと曲げ、特に **heel contact** 時には膝から下の部分が地面に対して垂直に近い角度であることがわかる。さらに、雪道歩行では舗装路平坦路と比べ、歩幅が狭く、歩行速度が遅いことがわかっている。

これらのことから、雪道でスリップや転倒のしにくい歩き方をまとめると以下となる。

- ・歩幅を狭め小刻みに歩行する。
- ・膝の屈伸を使って、**foot flat** 時の重心移動をスムーズに行う。
- ・**heel contact** 時に膝から下をできるだけ垂直に立て、路面にかかる力をできるだけ鉛直方向にする。

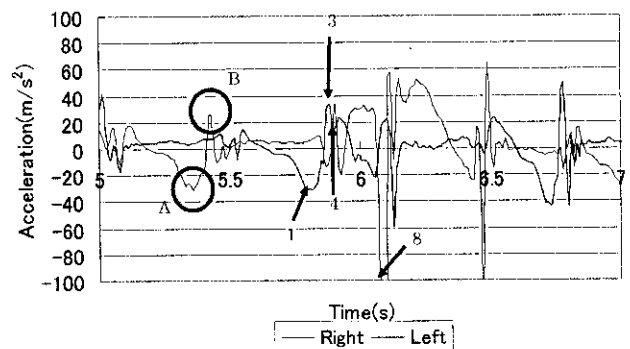


図 B-12 スリップ時の左右足首加速度

## C. ヒッププロテクター

高齢者の大腿骨頸部骨折の原因には、骨がもろいこと、転倒しやすいことその他に、転倒して臀部を打ちつけた際に、衝撃力を吸収する皮下組織が薄いことも関係している。このことより、大腿骨頸部の骨折を防ぐ手段として、近年、さまざまなヒップパットが開発されている。

ヒップパットは、材質や形状によって防御の方法が変わってくる。一つはポリプロピレンなどの比較的硬い材質で作られている皿状のタイプで、一点に加わった外力を皿の端に分散させる。もう一つは、ゴムや自動車用エアバックと同じ形状で柔らかい素材(ゲル状もしくはやや硬質のプラスチック)によって外力を吸収するタイプである。いずれもパンツなどの下着に縫い付けたり、下着に付けられたポケットにいれたりして着用する。また、市販の商品では、外側に硬い皿状のパット、内側に柔らかい素材のパットを重ねている構造のものもあり、そのような構造のほうが柔らかい素材のみよりも衝撃吸収能力が優れているという研究結果も出ている。

ヒップパットの効果を期待するには、就寝時も含めて一日中着用できることが望ましいが、着用時の見た目やはき心地がよくないことが多く、実際には24時間着用することは難しいため、その点においても改善の余地が残されている。

### C-1. 研究方法

#### 1) 衝撃力測定装置

転倒の状況を再現し、大腿骨に加わる衝撃力を測定するために、本研究では大腿骨モデルの大転子部上に錘を落下させる装置を製作した(図 C-1)。外枠はすべてアングルで組み、ボルトで固定した。錘に連結された棒の先端を落下させたい高さまで持ち上げ電磁石で保持し、それを解除することで錘が自由落下するという機構になっている。錘は直径 99mm、高さ 32mm の鉄製の円柱の中心にねじ穴を切り、先端にねじが切られている直径 9mm の細い金属棒につないで作製した。錘の質量は 2kg である。大腿骨モデルの固定は、外径 125mm、内径 106mm、長さ 101mm 金属の円筒の側面に、円筒の中心軸に向かって M6 のねじ穴を 16 個切った。そこにボルトを通し、それを締め付けることにより円筒と骨端

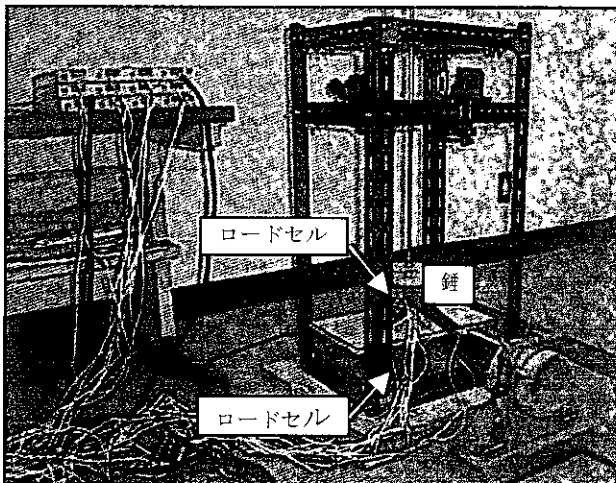


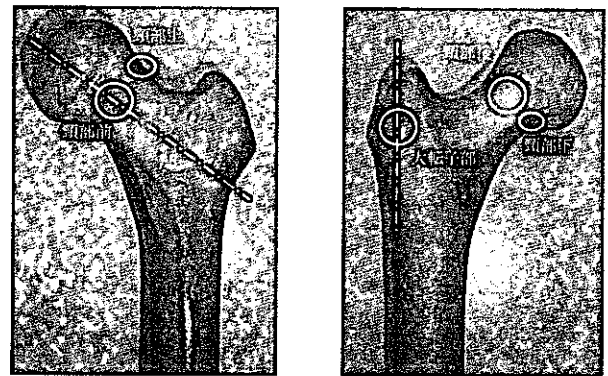
図 C-1 衝撃力測定用錘落下装置

部を固定した。その円筒を金属の治具でさらに固定した。骨頭部は、ロードセルの上に置くだけで固定はしない。錘の底面には、ロードセル LU-500KE (共和電業)、大腿骨モデルの骨頭部の下には、ロードセル LMR-S-20KNSA2 (共和電業)、計 2 つのロードセルを設置した。骨頭部の下に置いたロードセルは、上面に縦 200mm、横 390mm、厚さ 15mm の木の板をとりつけている。AD 変換機には、PCD-300A (共和電業) を用いた。ひずみゲージとロードセルの測定値は、この AD 変換機を介してパソコンに入力される。ロードセルとひずみゲージの測定周波数は 5000Hz とした。

#### 2) 実験条件

a) 大腿骨モデル 大腿骨 Composite bone (SAWBONE 社) を用い、頸部 4 箇所、骨軸部と大転子部に各 1 箇所ひずみゲージ KFG-1-120-D16-11LIM3S (共和電業) を貼った。ひずみゲージの測定値は、AD 変換機を介してパソコンへ入力した。ひずみゲージの貼り付け位置は図 C-2 の丸印のとおりである。Composite bone は左足の大腿骨のモデルなので、直立した状態を基準として図のようにひずみゲージの貼り付け位置に、頸部上・頸部下・頸部前・頸部後・骨軸・大転子部と名前をつけた。また、頸部のひずみゲージについては頸部の軸に、骨軸と大転子部のひずみゲージに関しては骨軸に平行なひずみの成分を軸方向、それに垂直な成分を直交とした。

b) 腰部モデル 本研究では、実際にヒップパットを着用している状態に近づけるために大腿骨モデルを用いて腰部モデルをつくった(図 C-3)。腰部モデルは、大腿骨骨頭部と大転子部を隠さないようにスポンジで覆い、その上から緩衝材である人肌のゲル(エクシールコーポレーション)を厚さ 3mm のシート状に加工したものを被せた。その後、スポンジと緩衝材の位置を固定するため布で覆った。



(頸部前方) (頸部後方)  
図 C-2 大腿骨モデルひずみゲージ貼付位置

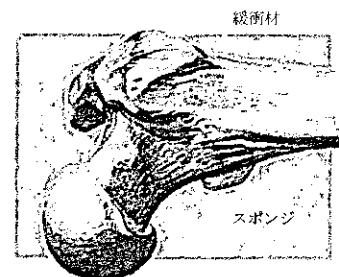


図 C-3 腰部モデル概要図