

3. 1. 2 試験治具の検討

立方体形状に切出した標本は、圧縮試験前に MD-CT にて撮影される。これはこの後に行うシミュレーションのために、圧縮軸を明確にした CT 画像が必要であるためである。

このため、試験用の治具として以下の2つを用意した。

- ・ MD-CT 撮影治具
- ・ 圧縮試験治具

これらに関する検討事項等を以下に示す。

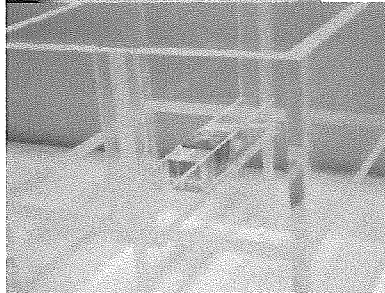
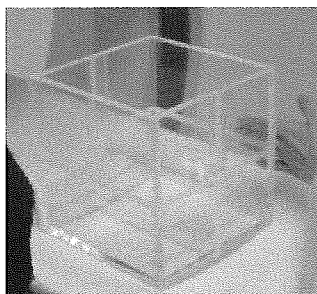
(1) MD-CT 撮影治具

骨強度評価システムは、最終的には臨床応用を目標としているため、生体の MD-CT 画像を元にシミュレーションモデルを生成できる必要がある。したがって、ここで得る標本の CT 画像も、生体内を撮影する状態に極力近い必要がある。空気中での CT 撮影では、その物体の境界で CT 値が急激に変化するため、シミュレーションモデルを作成するためのデータとしては望ましくない。そこでこの MD-CT 撮影用治具は、標本を生理食塩水内で撮影可能であるように製作したものである。具体的な要求事項は以下のとおりである。

- ・ 生理食塩水内での撮影が可能であること
- ・ 標本を生理食塩水内のほぼ中央で撮影可能であること
- ・ 圧縮軸と CT のスライス面が直行した状態で撮影できること
- ・ 治具そのものの材料は、放射線吸収量が標本の撮影に影響しない材料であること

これらの要求を満たすよう製作した治具（水槽）を図 3. 1. 2-1 に示す。主な仕様は以下のとおりである。

- ・ 水槽周囲の材料は 10 mm 厚のアクリル板
- ・ 中央に標本保持用のホルダー（3 mm 厚アクリル板）
- ・ 水槽周囲に MD-CT 装置に対する位置、角度決定用マーキング



- 左 : 位置・角度決定用マーキング確認
- 左下 : 標本保持状態（写真は 20 mm 角標本）
- 右下 : 生理食塩水を満たした状態
（下はファントム）

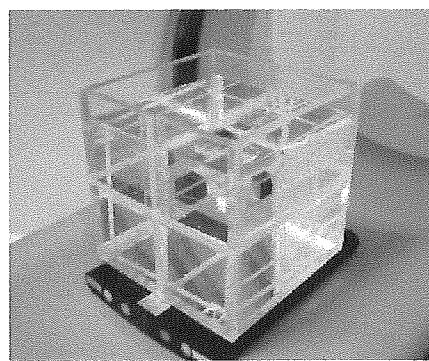


図 3.1.2-1 MD-CT 撮影治具（水槽）

圧縮試験治具

10 mm 角の立方体に加工された標本に対して、静圧縮試験を実施するが、以下に示す要求事項を満足させるため、圧縮試験治具が必要となる。

- ・ 生理食塩水内で圧縮試験が可能であること
- ・ 試験の前後、途中で圧縮変位を保持したままマイクロ CT 撮影が可能であること
- ・ 圧縮試験中の標本の目視観察が可能であること

これらを満足するよう製作した治具を図 3. 1. 2-2 に示す。主な仕様は以下のとおりである。

- ・ 標本をシリンダ内で圧縮
- ・ シリンダ底部にゴムパッキンを挿入、液体を内部に満たすことが可能
- ・ 治具上部にネジ機構を設け、これを締めることにより圧縮時の変位を保持可能
- ・ 圧縮部をアクリル製シリンダとし、内部を観察可能（その他部品はアルミ製）

下 : 図面
右上 : セットアップ中
右下 : 10 mm 角標本をセット

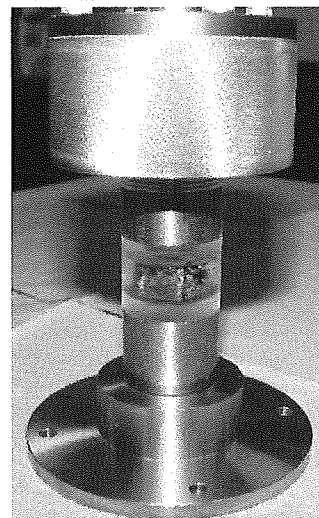
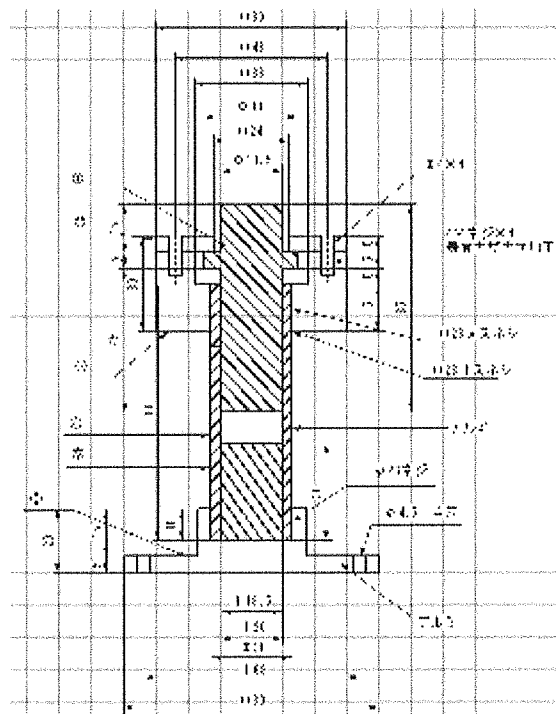


図 3.1.2-2 圧縮試験治具

3. 1. 3 試験手順の検討

本試験に要求される項目は以下のとおりである。

- ・ 本試験に用いる標本と同一形状、同一荷重方向でシミュレーションが可能であること
 - ・ 圧縮試験時の標本の挙動が観察できること（荷重－変位曲線が得られること）
 - ・ 試験の前後、途中で、標本の変位を保持したままマイクロ CT 撮影が可能であること
- 但し、試験中のマイクロ CT 撮影については、変位を保持しているとは言っても、その間、内部の応力は時間とともに緩和されてしまい、荷重－変位の関係は変位を保持した時点で不連続となってしまうため必須ではなく、荷重－変位の関係を観察する試験、マイクロ CT による骨梁の変化を観察する試験、と切り分けることとする。

これらの要求を満たすよう検討した試験手順は以下のとおりである。

- ① 大腿骨頭より 10 mm 角の標本を切出す
- ② MD-CT 撮影治具を用い、生理食塩水内で MD-CT 撮影を実施する
- ③ 標本は、取り扱い中、常に冷凍状態であるため、圧縮試験前に充分解凍する（常温の生理食塩水に浸した状態で解凍。冷凍状態では硬く且つ脆く、骨梁間の氷による力学的悪影響が予想される）
- ④ 圧縮試験治具を用い、圧縮試験機にかけ、以下の 2 通りの圧縮試験を実施する
 - ・ 荷重－変位データを時刻暦で取得する（荷重－変位曲線）
→材料特性データベース拡充のための試験データ蓄積
（圧縮の前後でマイクロ CT 撮影を実施する）
 - ・ 圧縮前／弾性領域／塑性領域初期／圧壊後、の各点で試験治具により変位を固定し、圧縮試験機からはずしてマイクロ CT 撮影を行う
→圧縮時の骨梁構造の変化を観察し、特性や挙動を把握する

本静圧縮試験での圧縮試験機設定は、全て以下の値を用いている。

- 圧縮条件 : 0.5mm/min
- データ取得周期 : 50msec

圧縮試験機および試験治具を試験機にセットした状態を、図 3. 1. 3-1 に示す。

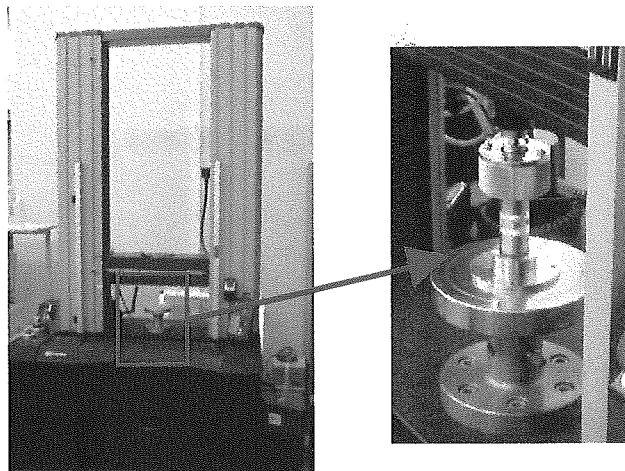


図 3.1.3-1 圧縮試験機および圧縮治具

圧縮の過程を荷重－変位曲線で表すと、典型的には下図 3. 1. 3－2 のようになる (HIP011 による試験結果)。

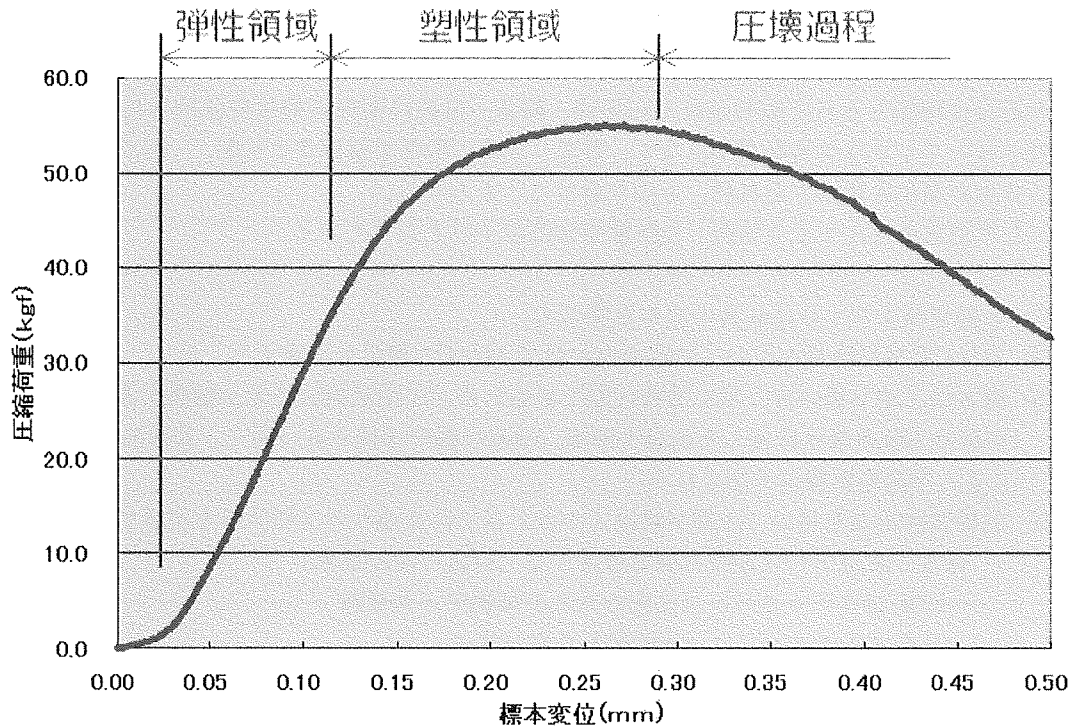


図 3.1.3-2 典型的と思われる荷重－変位曲線 (HIP011)

弾性領域では、ほぼ直線的にグラフが立ち上がり、標本変位と圧縮荷重が比例関係、すなわち荷重をかけた分だけ標本が変位していることを示している。完全な弾性体であれば、この領域で荷重を抜いた場合、変位は元に戻り、このグラフの直線の範囲から逸脱することは無い (弾性変形)。

塑性領域に入ると、既に元に戻り得ない変形が標本の内部で生じており、変位は進むが荷重は増加しない状態となる (塑性変形)。標本内部では、骨梁のいくつかに亀裂や潰れるなどの変形が生じている可能性がある。

圧壊過程では、すでに骨梁構造が破壊されていると考えられ、変位は進むが、荷重は落ちる一方という領域に入る。

次に、圧縮の途中でマイクロ CT 撮影を実施した場合の荷重－変位曲線を図 3. 1. 3－3 に示す (HIP013)。この試験では前述のとおり、①圧縮前／②弾性変形中／③塑性領域初期／④圧壊後、の 4 箇所でマイクロ CT 撮影を実施している。その間、変位は治具により固定されているが、内部の応力は解放されるため、データとしてはここに示すような不連続なデータとなっている。

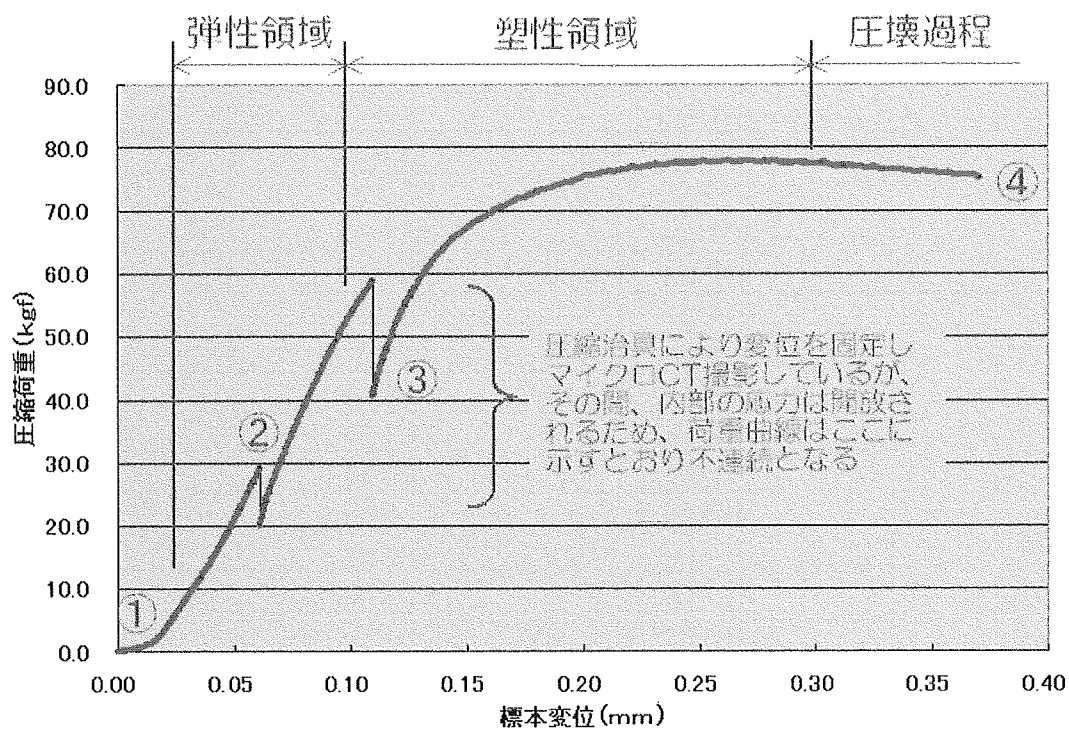


図 3.1.3-3 圧縮途中でマイクロ CT 撮影を実施した場合の荷重－変位曲線 (HIP013)

3. 1. 4 試験データの観察

本研究にて実施した標本の一覧を下表 3. 1. 4-1 に示す。前項で示したとおり、以下の 2 種類の試験を実施している。

- (1) 通常の静圧縮試験
- (2) 圧縮中にマイクロ CT 撮影を実施する静圧縮試験

各標本でどちらの試験を実施したかは、表中の試験種類にて (1) あるいは (2) と示すことで識別し、また各結果 (荷重－変位曲線) の図番号も同表中に示す。

表 3.1.4-1 試験標本一覧

No.	実施年度	標本番号	試験種類	結果グラフ図番	備考	
1	H16 年度	HIP002	(1)	3.1.3-2		
2		HIP011	(1)	3.1.3-3		
3		HIP012	(1)	3.1.3-4		
4		HIP013	(2)	3.1.3-5		
5		HIP014	(1)	3.1.3-6		
6		HIP028	(1)	3.1.3-7		
7	H17 年度	第 1 回	HIP005	(1)	3.1.3-8	
8			HIP023	(1)	3.1.3-9	
9			HIP024	(2)	3.1.3-10	
10			HIP031	(1)	3.1.3-11	
11		第 2 回	HIP020	(1)	3.1.3-12	
12			HIP026	(1)	3.1.3-13	
13			HIP034	(1)	3.1.3-14	
14			HIP039	(1)	3.1.3-15	
15			HIP040	(1)	3.1.3-16	
16			HIP041	(2)	3.1.3-17	
17			第 3 回	HIP044	(1)	3.1.3-18
18		HIP065		(1)	3.1.3-19	
19		HIP068		(1)	3.1.3-20	
20		HIP069		(2)	3.1.3-21	圧縮断面が 8mm×10mm
21		HIP070		(1)	3.1.3-22	
22		第 4 回	HIP043	(1)	3.1.3-23	
23			HIP045	(1)	3.1.3-24	
24			HIP048	(1)	3.1.3-25	

(1) 荷重－変位曲線

図 3. 1. 4-1 に、全ての荷重－変位曲線を示す。ここで分かるように、各データはかなりのばらつきがあるが、標本の切出し手順および試験手順は、プロセスによって生じる差異が最小限となるよう計画されたものであり、したがってこれらの試験データの様相（ばらつき）は、標本の個体差がもっとも大きな要因のひとつであろうと考えられる。

また、これらのデータの中で不連続な曲線となっているものが幾つか見られるが、これらが既出の表中で示した (2) の試験である。マイクロ CT 撮影中に（変位は固定されているが）応力が解放され、そこから再度荷重されているために、グラフが鋸状になっている。

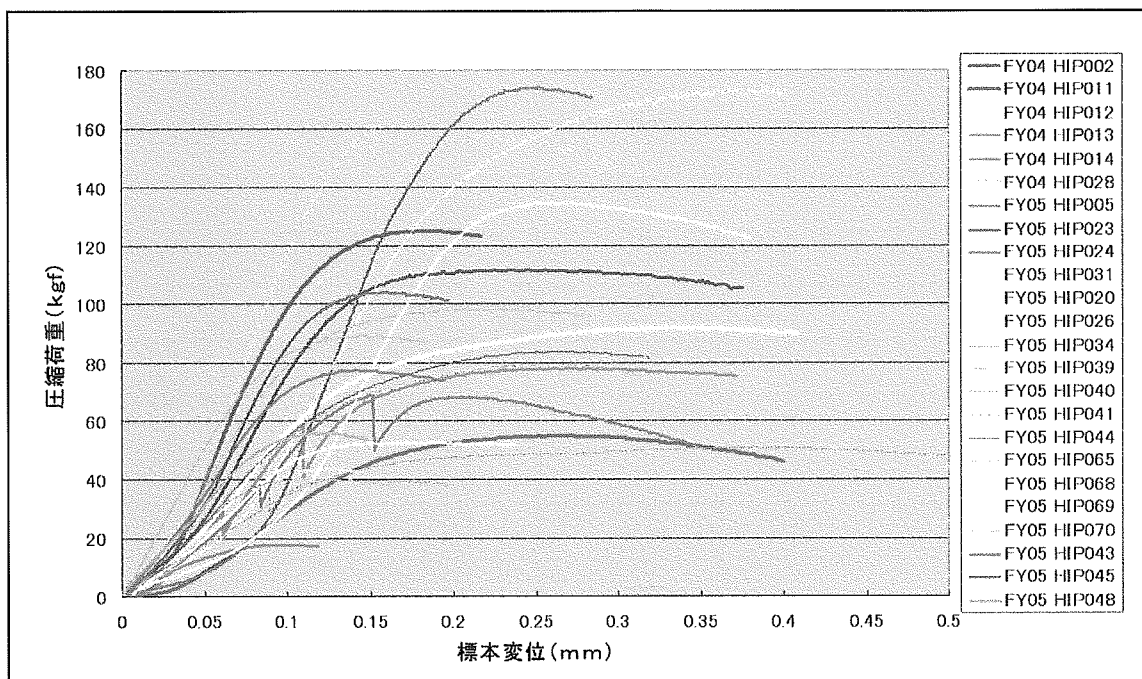


図 3.1.4-1 全 24 標本の荷重-変位曲線

以降で、各標本の試験データについて、計測データ（計測時のノイズが含まれるため最小自乗法により平滑化している）、およびその 1 階微分 (dL/dt : 計測データの傾き)、2 階微分 (d^2L/dt^2 : その傾きの変化率) を合わせて示す (図 3. 1. 4 - 2 ~ 2 5)。典型的には、 dL/dt の極大値/極小値により計測データの傾きが得られ、 d^2L/dt^2 の極小値により計測データの降伏点が判別できると考えられる (上記 (2) の試験では計測データ自体が不連続であるため、これらの微係数もその前後で不連続である)。

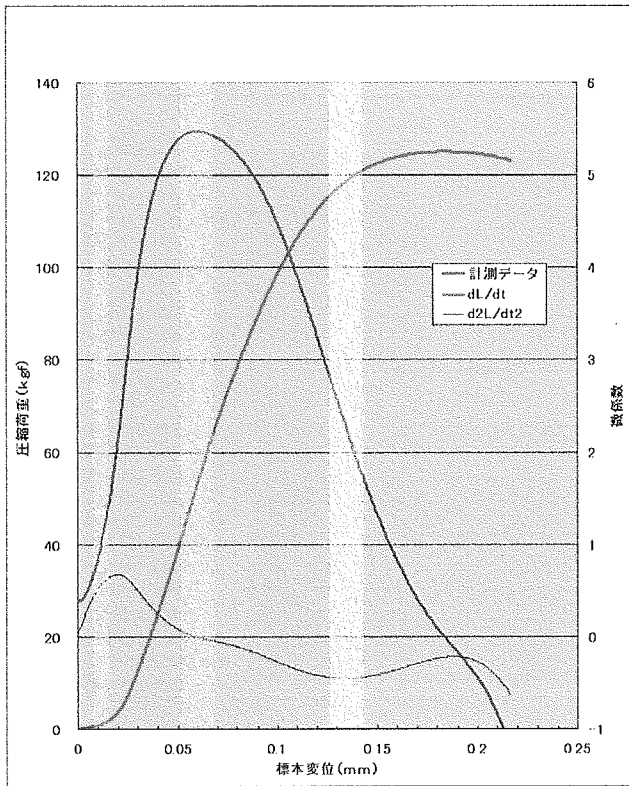


図 3.1.4-2 荷重-変位曲線 HIP002

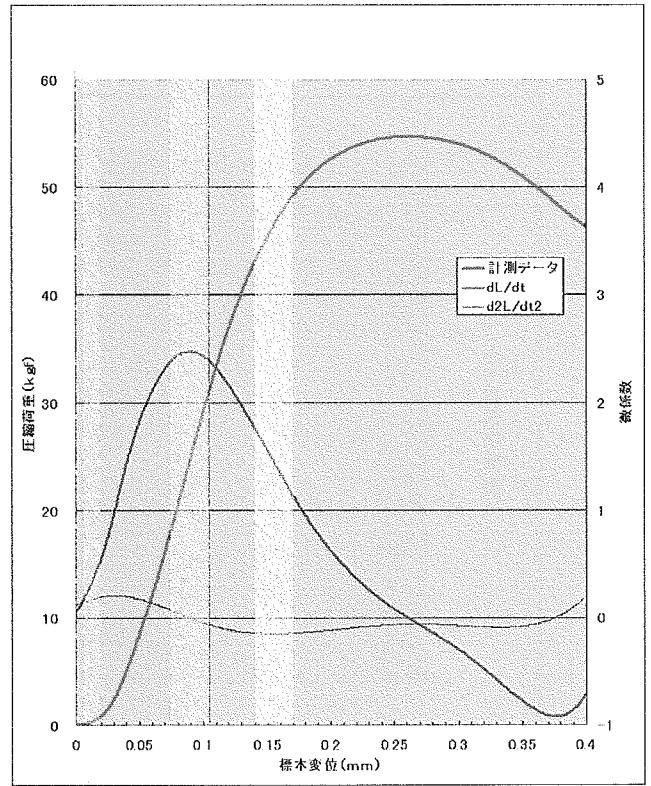


図 3.1.4-3 荷重-変位曲線 HIP011

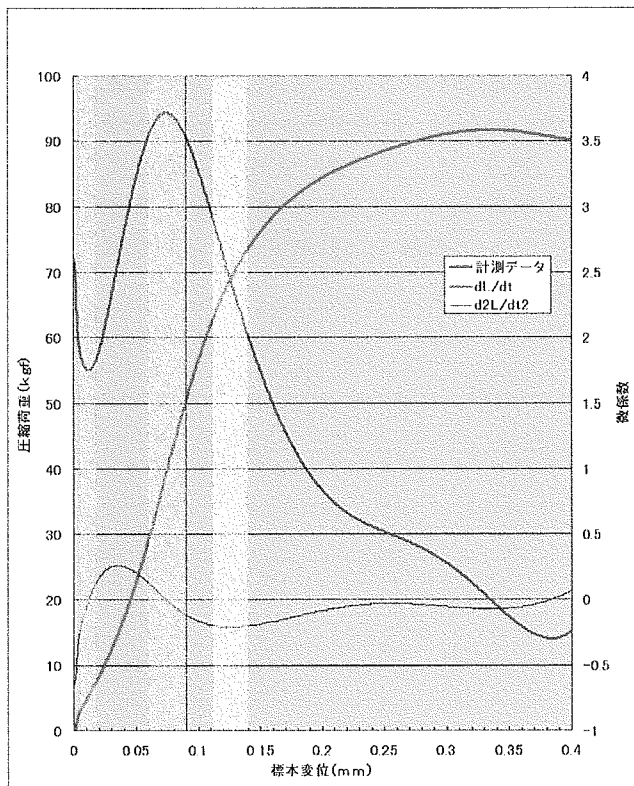


図 3.1.4-4 荷重-変位曲線 HIP012

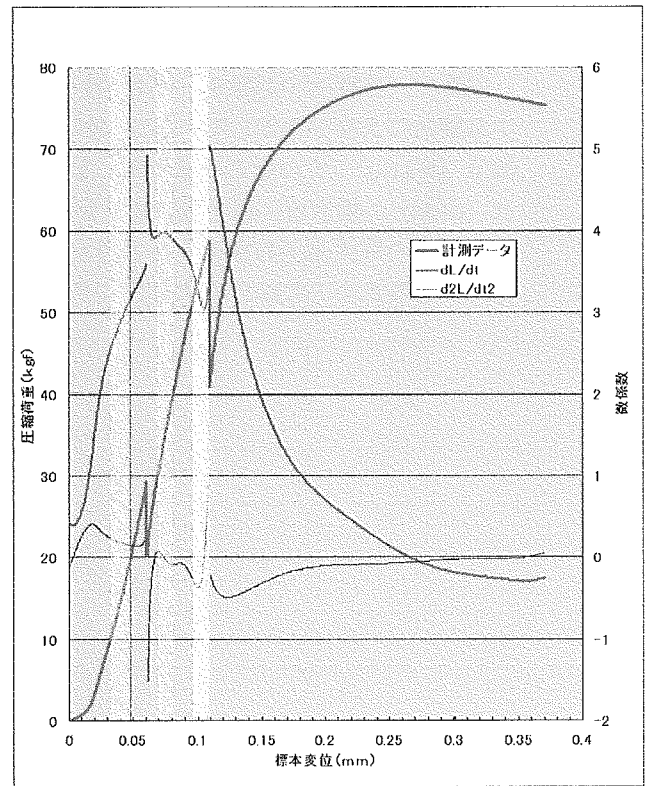


図 3.1.4-5 荷重-変位曲線 HIP013

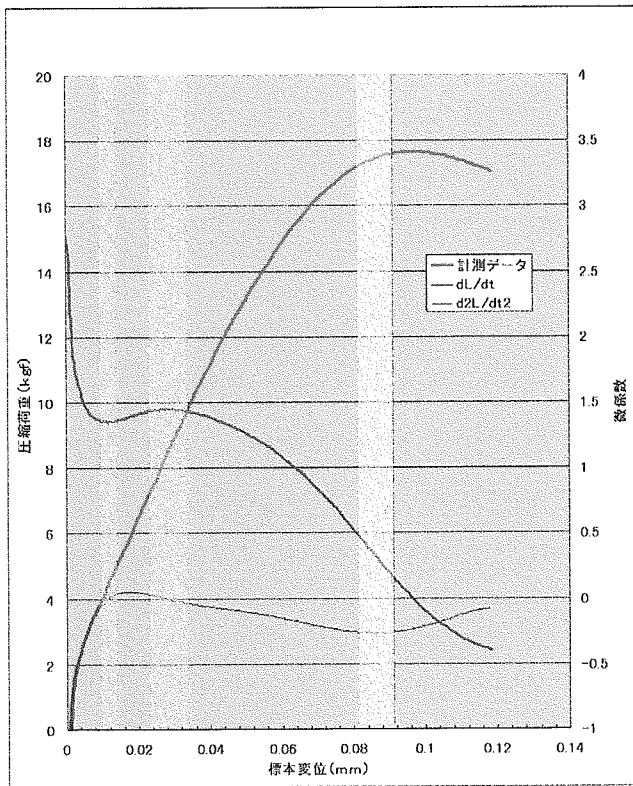


図 3.1.4-6 荷重-変位曲線 HIP014

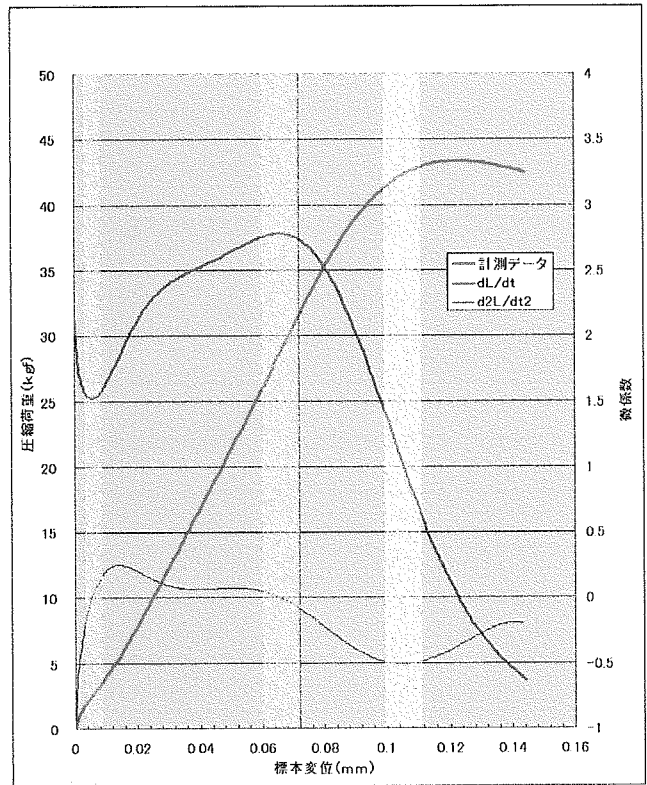


図 3.1.4-7 荷重-変位曲線 HIP028

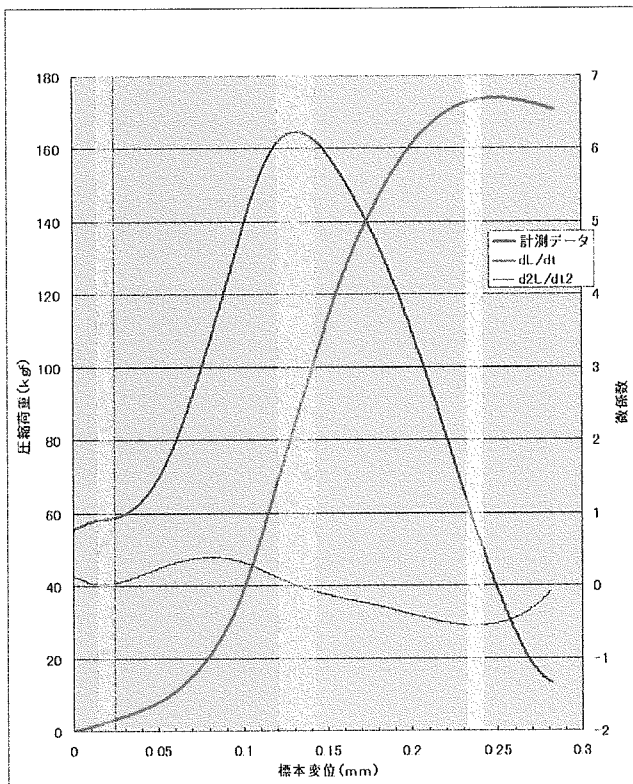


図 3.1.4-8 荷重-変位曲線 HIP005

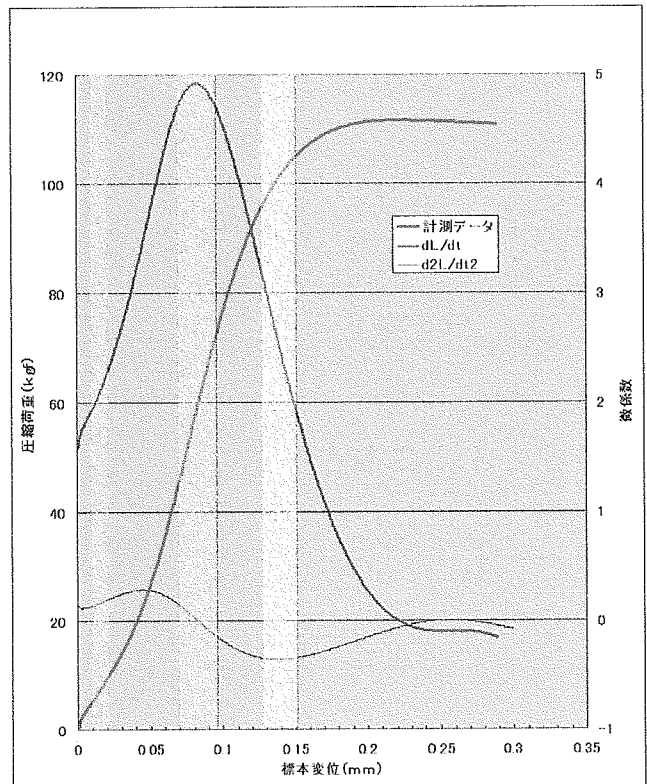


図 3.1.4-9 荷重-変位曲線 HIP023

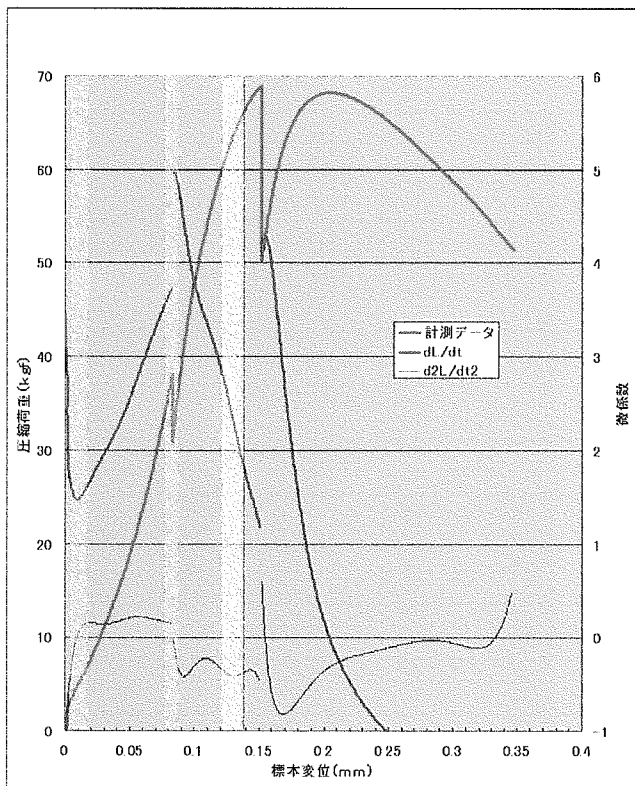


図 3.1.4-10 荷重-変位曲線 HIP024

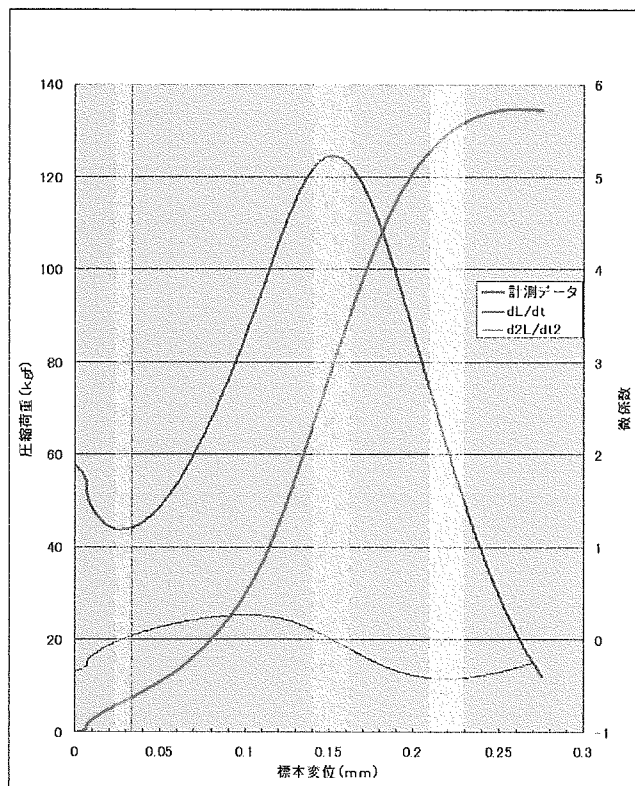


図 3.1.4-11 荷重-変位曲線 HIP031

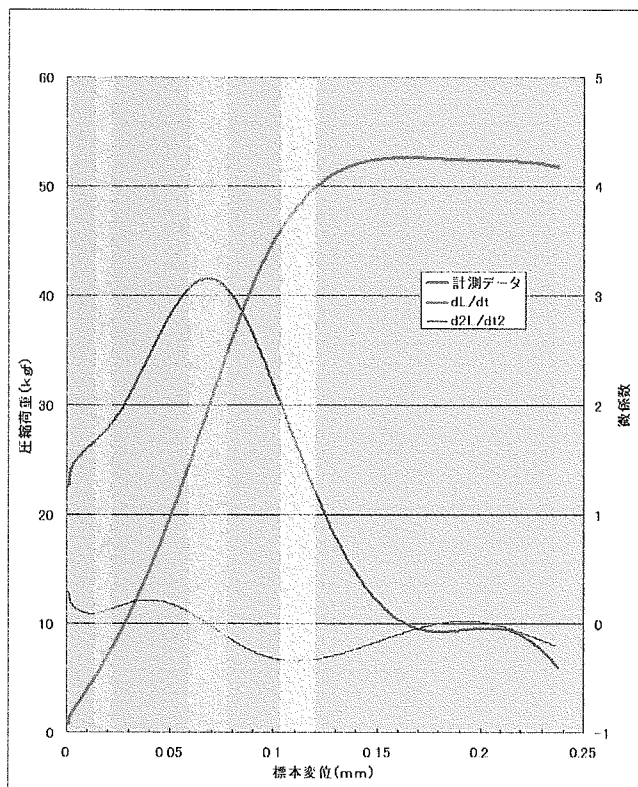


図 3.1.4-12 荷重-変位曲線 HIP020

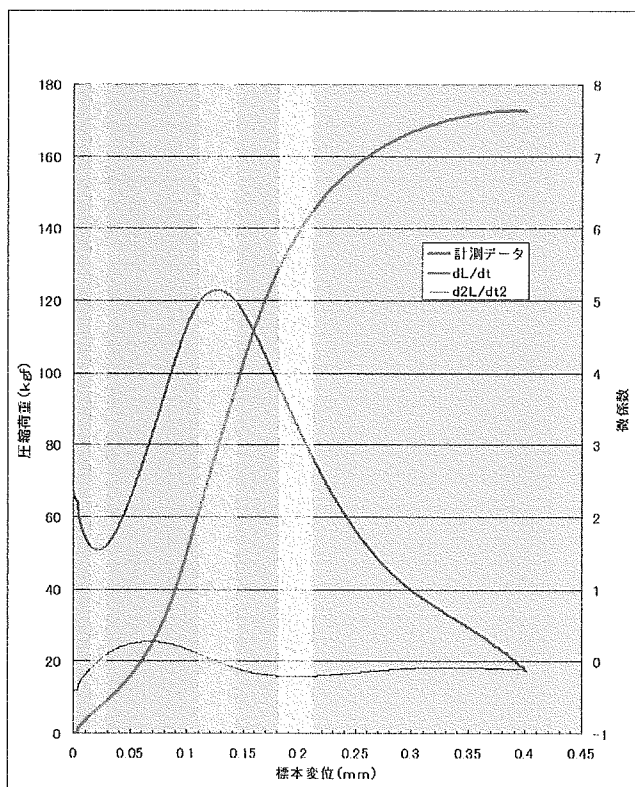


図 3.1.4-13 荷重-変位曲線 HIP026

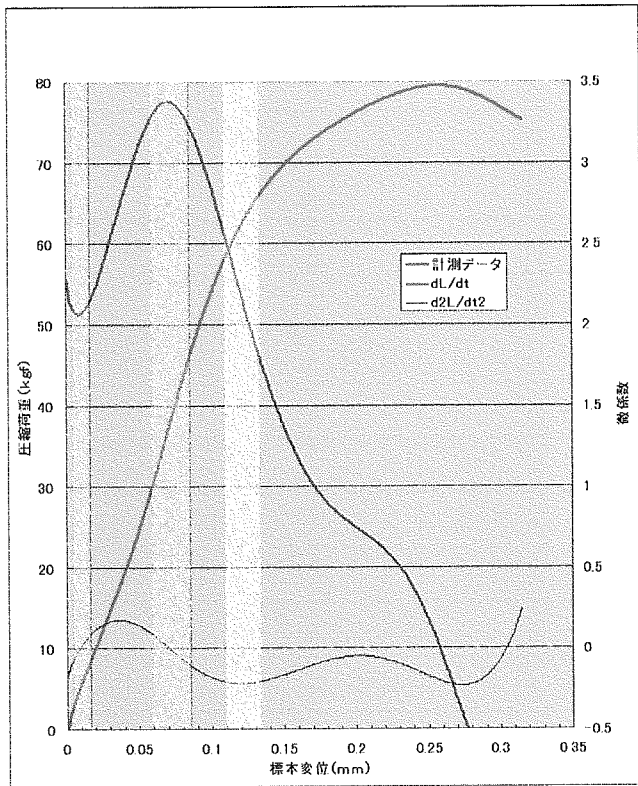


図 3.1.4-14 荷重-変位曲線 HIP034

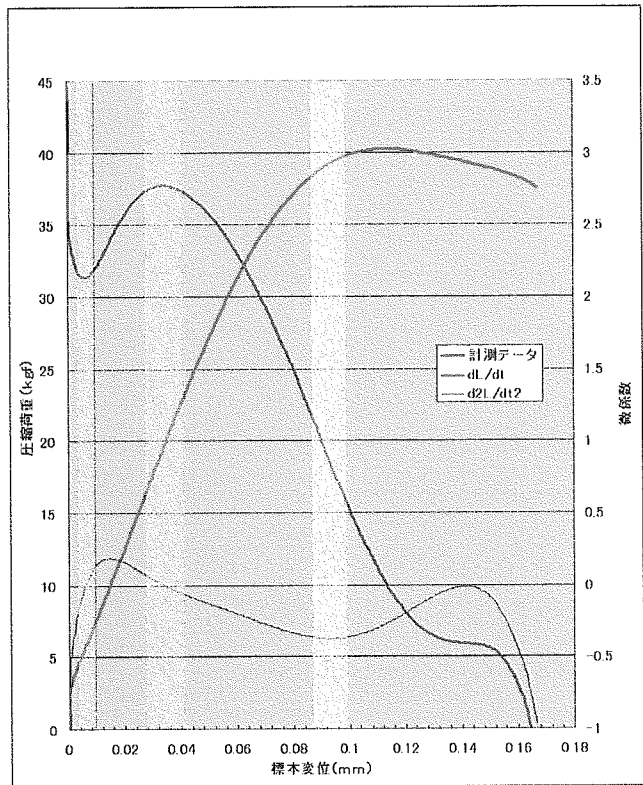


図 3.1.4-15 荷重-変位曲線 HIP039

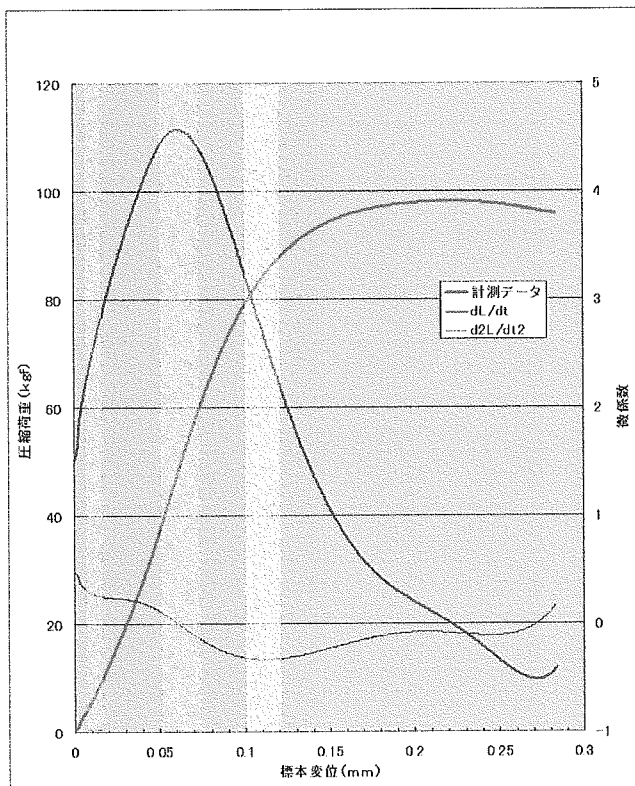


図 3.1.4-16 荷重-変位曲線 HIP040

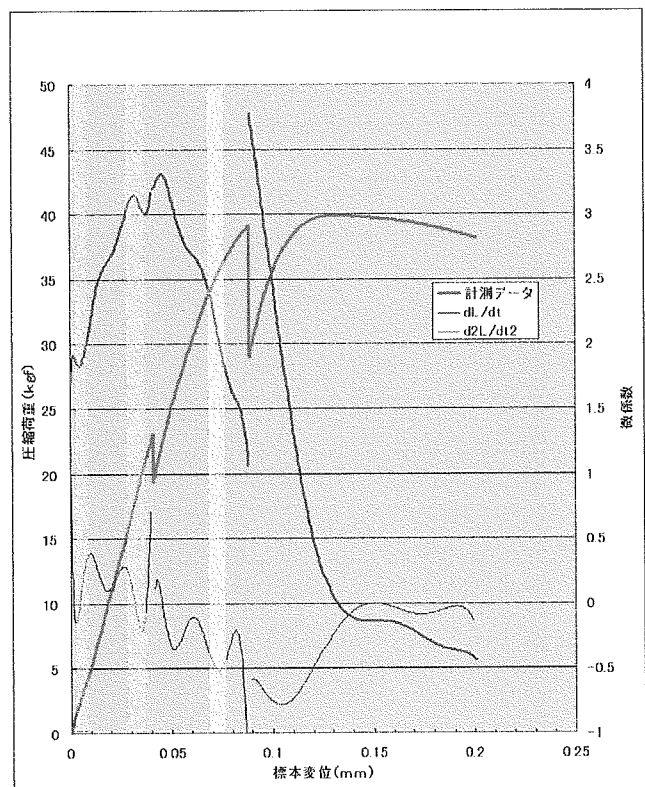


図 3.1.4-17 荷重-変位曲線 HIP041

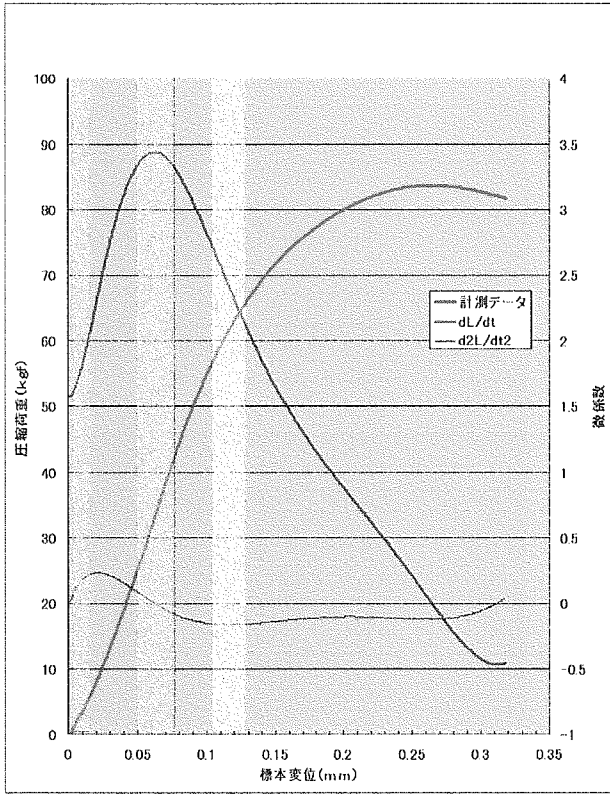


図 3.1.4-18 荷重-変位曲線 HIP044

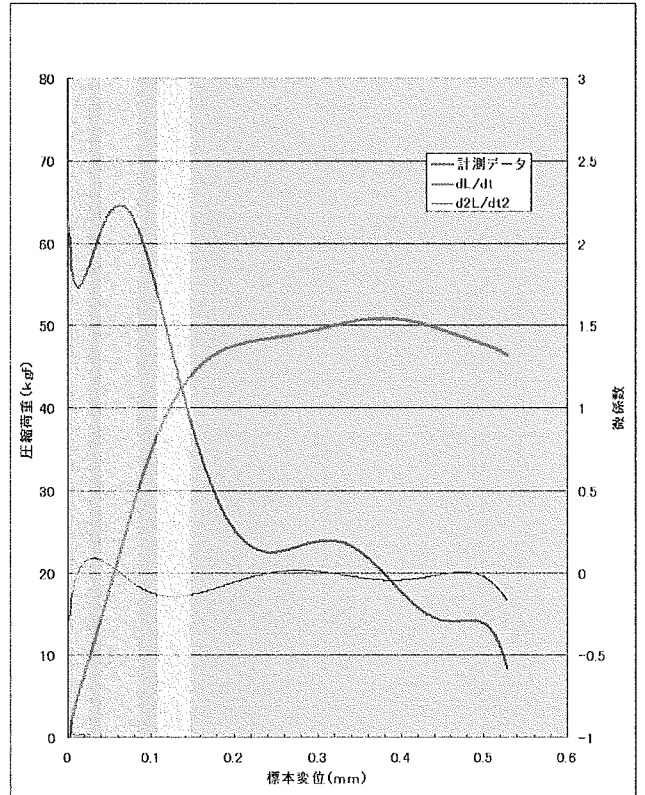


図 3.1.4-19 荷重-変位曲線 HIP065

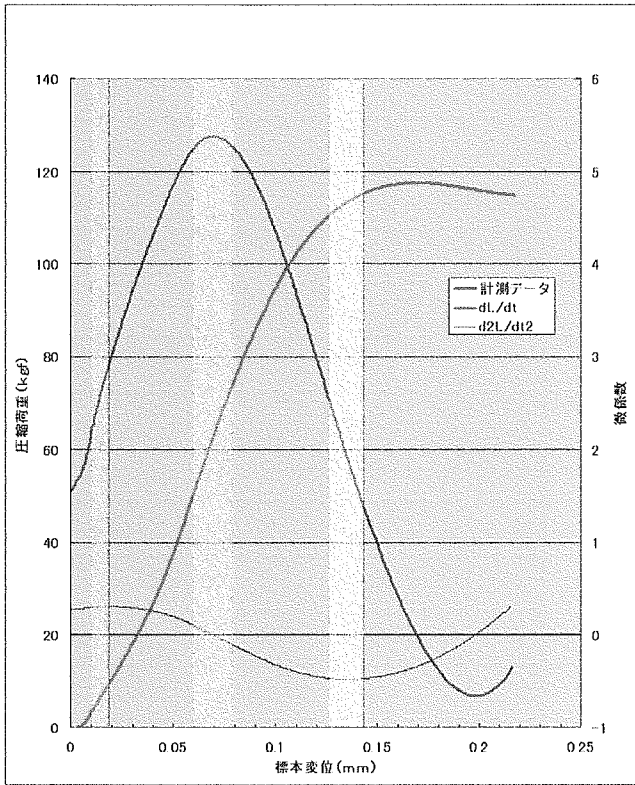


図 3.1.4-20 荷重-変位曲線 HIP068

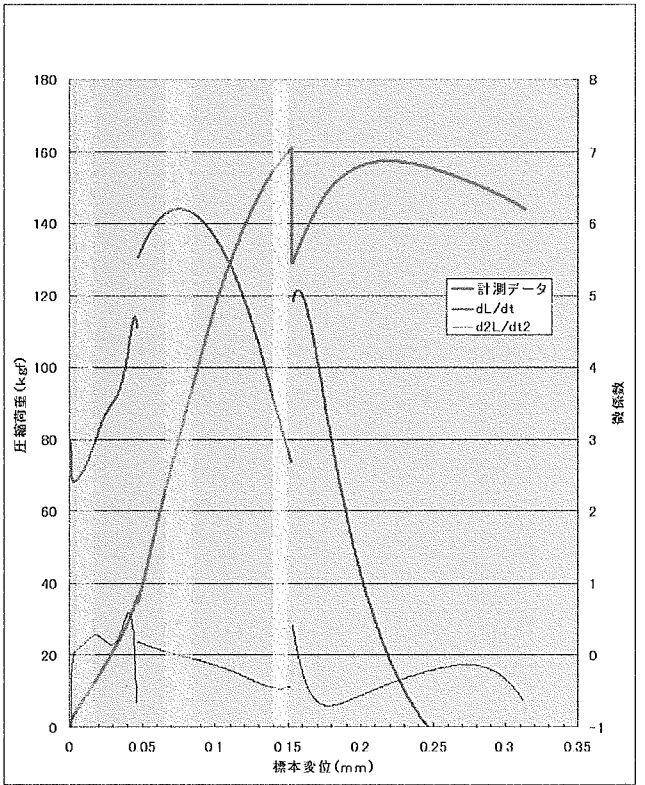


図 3.1.4-21 荷重-変位曲線 HIP069

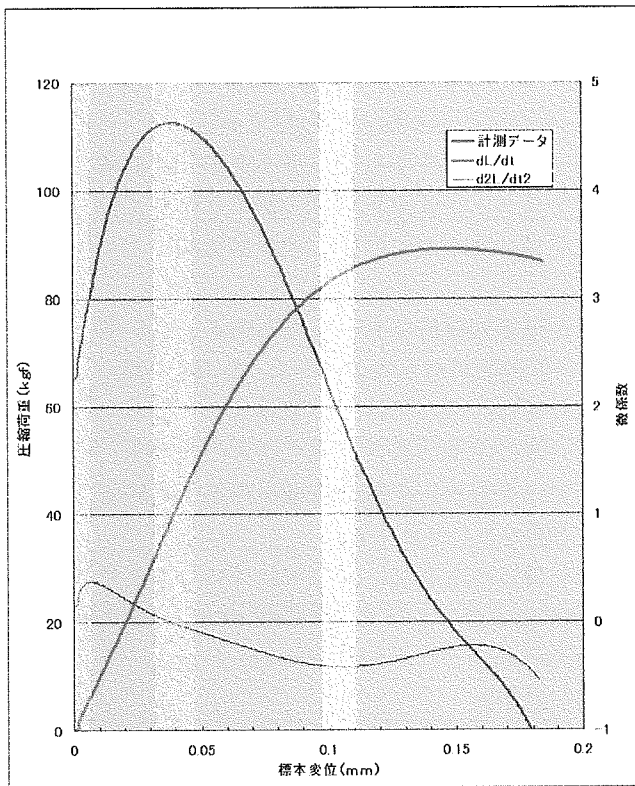


図 3.1.4-22 荷重-変位曲線 HIP070

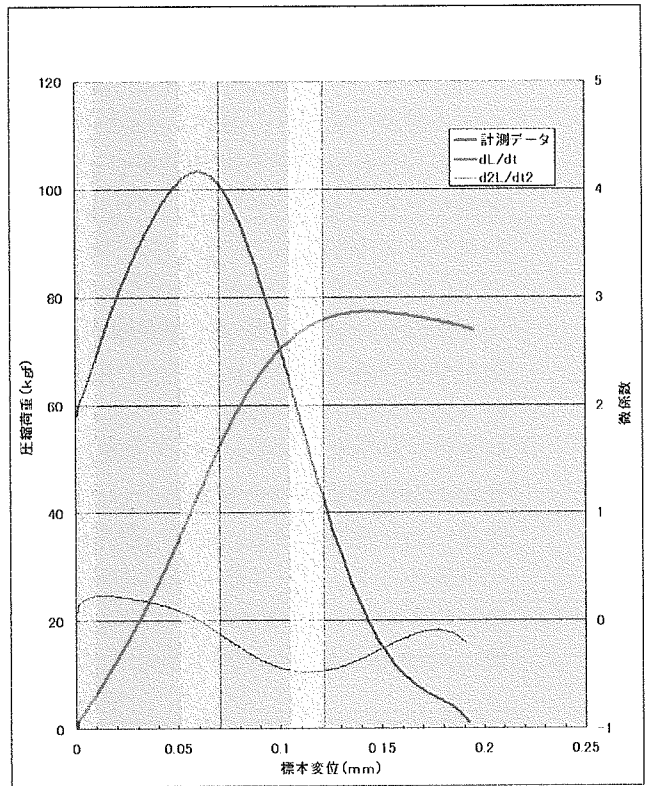


図 3.1.4-23 荷重-変位曲線 HIP043

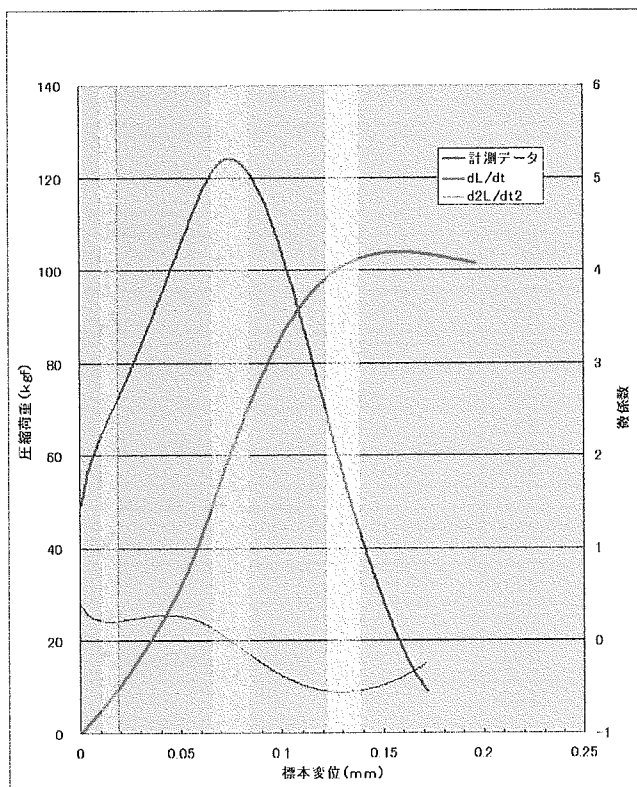


図 3.1.4-24 荷重-変位曲線 HIP045

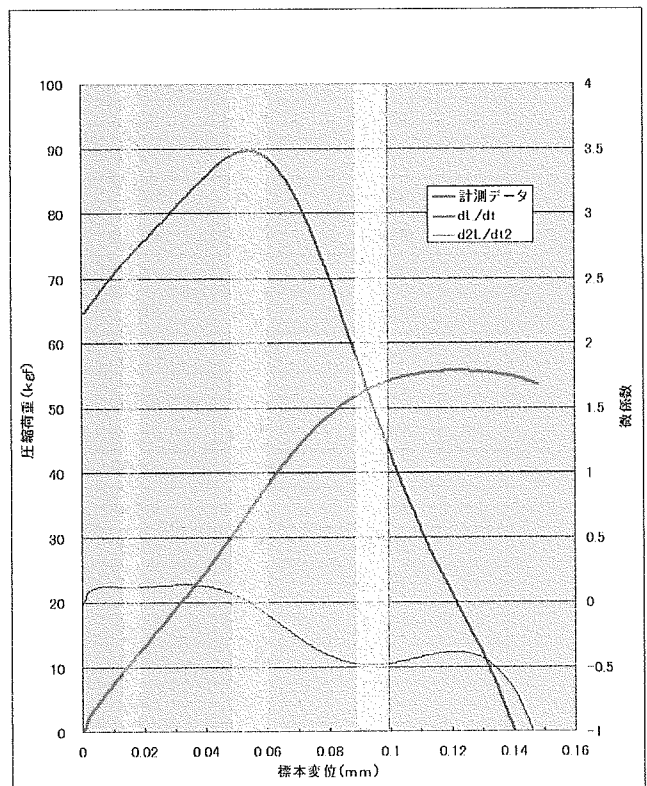


図 3.1.4-25 荷重-変位曲線 HIP048

前述のとおり、 dL/dt の極大値（橙の帯）で計測データの主要な弾性領域の傾きと、 d^2L/dt^2 の極小値で（灰の帯、 dL/dt の変曲点）で計測データの降伏点を知ることができる。

また、これらのグラフを観察すると、圧縮のごく初期にわずかな計測データの不連続的挙動を見ることができ、これは恐らく、圧縮治具および圧縮試験機と標本とのごく僅かなアソビや馴染んでいない部分等の移動、また圧縮治具のごく初期での摩擦抵抗などにより、このようなデータとなっていると考えられる。

さらにその後、主要な弾性領域に入り圧縮荷重がほぼ直線的に立ち上がる前に、低い荷重かつその後の傾きに比べ小さい傾きで変位している領域があるのが分かる。 dL/dt の極小値のあるものはその部分、そうでないものは d^2L/dt^2 の極大値（ dL/dt の変曲点、すなわち荷重データの傾きが変わる点）の直前の部分である（図で左側の橙の帯部）。このことから、骨梁の圧縮荷重に対する挙動として、複数（ここでは2箇所）の弾性領域が存在するのではないかと推測できる。本件に関する考察は次項で述べることとする。

下表3. 1. 4-2に前掲の荷重-変位曲線から得られた荷重、変位等についてまとめる。本表の中で、主微係数とは前述の主要な弾性領域のグラフの傾き（微係数 dL/dt の極大値）、初期微係数とは同様に前述の初期の部分に見られるグラフの傾きである。

表 3.1.4-2 各標本主要値

No.	標本	最大荷重 (kgf)	降伏荷重 (kgf)	降伏変位	主微係数	初期微係数	備考
1	HIP002	124.99	118.35	0.134	5.475	1.110	
2	HIP011	54.71	46.60	0.156	2.475	0.368	
3	HIP012	91.69	68.81	0.127	3.718	1.753	
4	HIP013	77.81	53.58	0.100	3.982	2.867	圧縮中 μ -CT 撮影標本
5	HIP014	17.66	17.43	0.086	1.451	1.353	
6	HIP028	43.33	42.18	0.105	2.777	1.525	
7	HIP005	173.89	173.26	0.237	6.232	0.920	
8	HIP023	111.61	100.54	0.138	4.920	2.100	
9	HIP024	68.97	63.92	0.131	3.730	1.475	圧縮中 μ -CT 撮影標本
10	HIP031	134.68	129.08	0.219	5.226	1.188	
11	HIP020	52.63	48.18	0.111	3.157	1.753	
12	HIP026	172.74	137.50	0.196	5.148	1.543	
13	HIP034	79.46	61.86	0.120	3.379	2.068	
14	HIP039	40.25	39.20	0.093	2.773	2.136	
15	HIP040	98.15	84.59	0.112	4.575	2.553	
16	HIP041	39.91	35.36	0.073	3.148	1.833	圧縮中 μ -CT 撮影標本
17	HIP044	83.67	61.64	0.116	3.438	1.817	
18	HIP065	50.86	40.78	0.127	2.231	1.735	
19	HIP068	117.45	113.51	0.136	5.379	2.640	
20	HIP069	161.02	157.06	0.145	6.196	2.590	圧縮中 μ -CT 撮影標本
21	HIP070	89.06	84.52	0.106	4.630	2.688	
22	HIP043	77.25	74.35	0.114	4.163	2.170	
23	HIP045	103.93	100.61	0.130	5.207	2.379	
24	HIP048	55.71	52.99	0.094	3.487	2.688	

(2) 弾性領域での骨梁構造の挙動

前項で述べたように、各標本の荷重－変位曲線を観察すると、複数（ここでは2箇所）の弾性領域が存在するように見える。弾性領域とは、標本への荷重以降、降伏荷重に達するまでの、荷重と変位が直線的に変化している領域である。これを模式的に図に示すと、下図3. 1. 4－26のようになる。

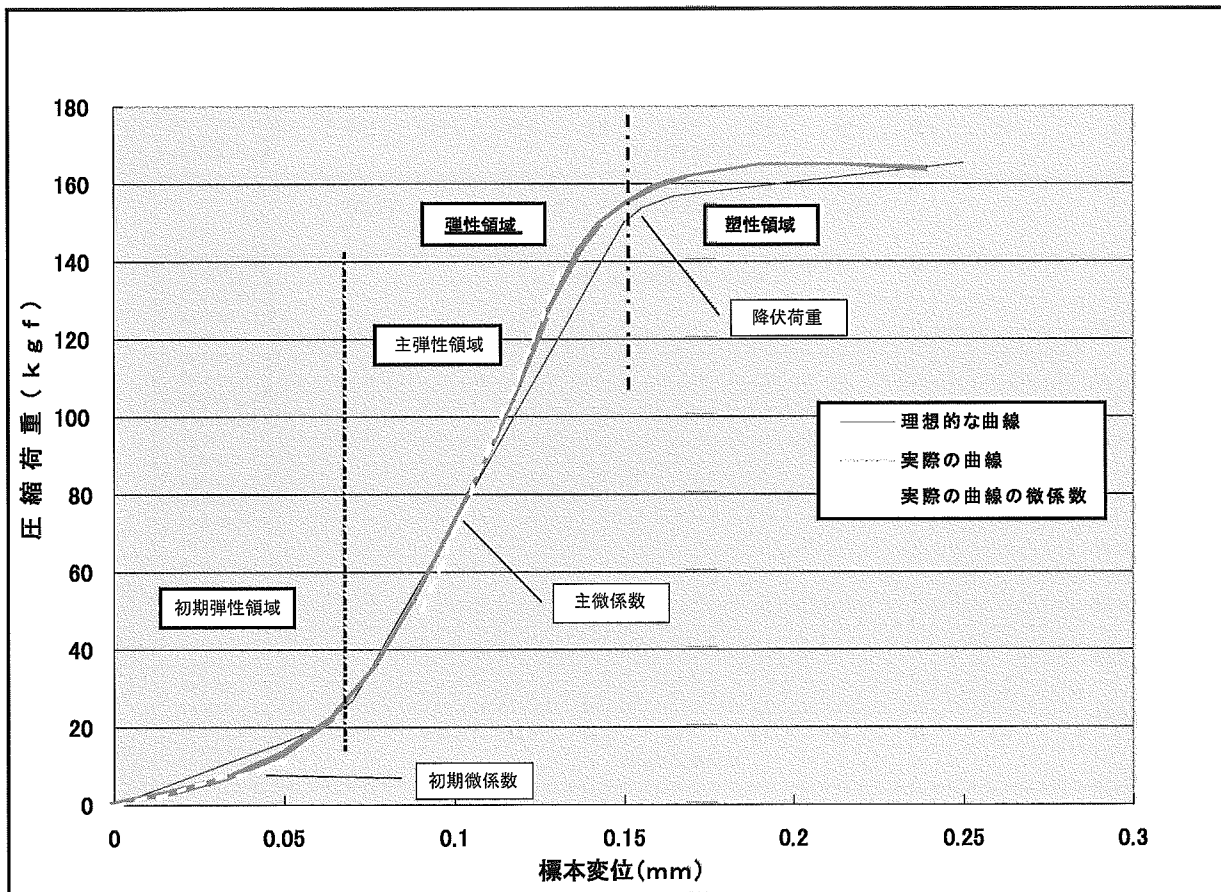


図 3.1.4-26 荷重－変位曲線 模式図

特に既出の図3. 1. 4－1のグラフ中の各曲線を観察すると、降伏荷重の大きい標本ほど、上図のような傾向が顕著である（初期に柔らかいほど、降伏荷重が大きい）ように見える。このことから、各標本について、表3. 1. 4－1に記した降伏荷重に対する、初期微係数、主微係数および初期微係数と主微係数の比（＝初期微係数／主微係数）の相関図を、各図3. 1. 4－27, 28, 29にそれぞれ示し、その関係について以下で検討する。なお、以下の図中に示した破線はそれぞれの散布図に関する回帰直線である。

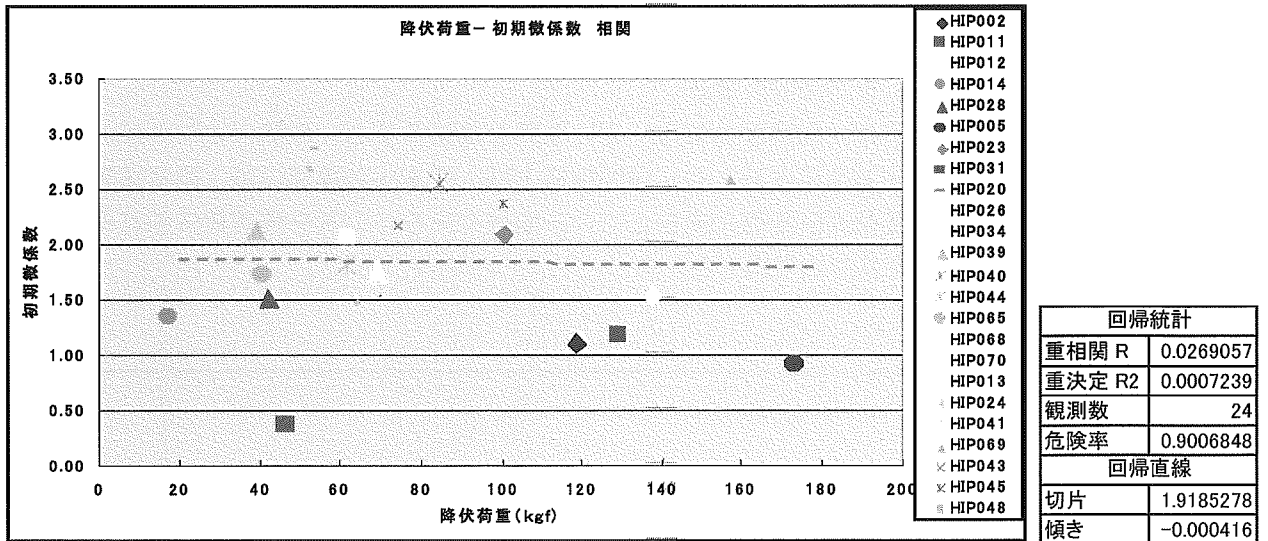


図 3.1.4-27 降伏荷重-初期微係数 相関

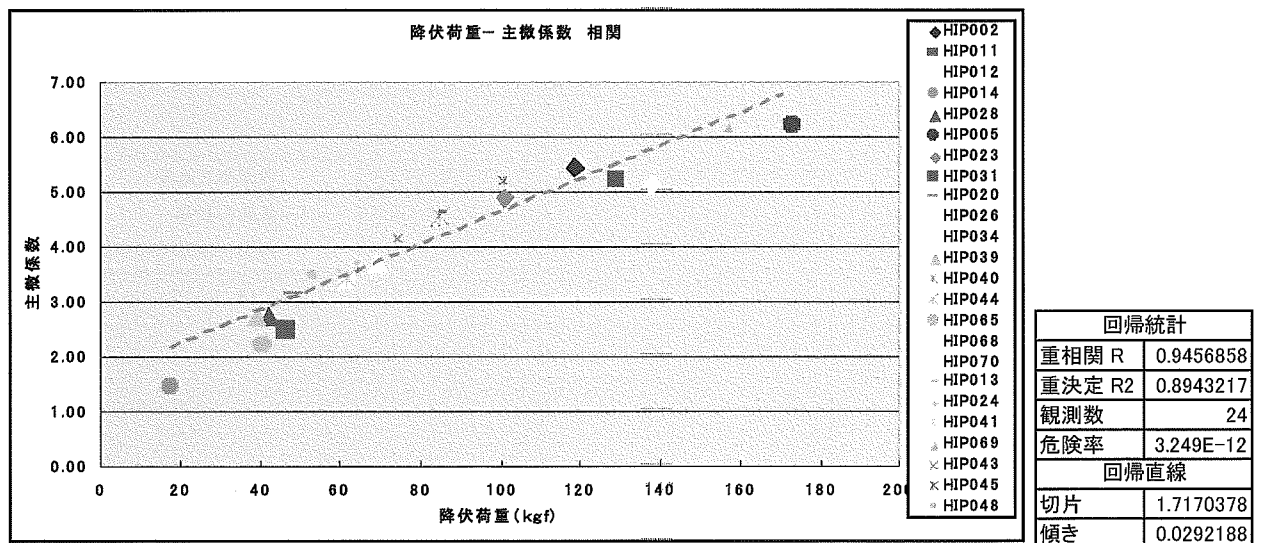


図 3.1.4-28 降伏荷重-主微係数 相関

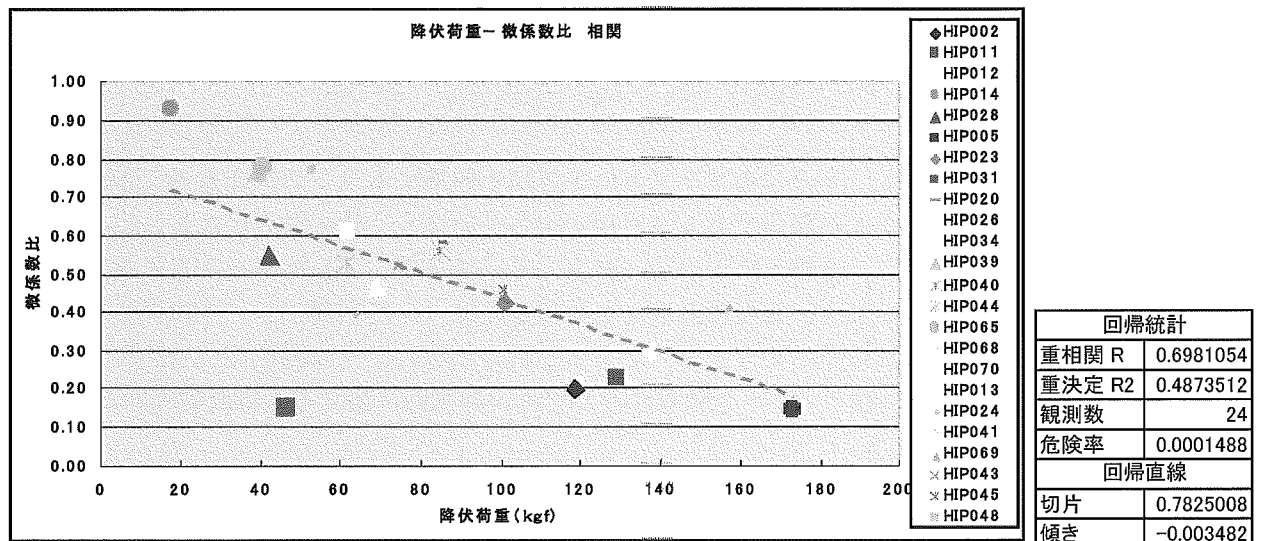


図 3.1.4-29 降伏荷重-微係数比 (初期微係数/主微係数) 相関

これらの図から、主微係数と降伏荷重の間には明らかな相関が認められる（荷重-変位曲線の主たる傾きが大きいほど（=弾性係数が大きいほど）降伏荷重が大きい）が、初期微係数と降伏荷重の間には明確な相関は認められないと言える。また、微係数比（初期微係数/主微係数）と降伏荷重の関係に注目してみると、非常に弱いながらも負の相関がある可能性が考えられる。それぞれの標本の個体差がある可能性を考慮し、図3.1.4-27および29で極端に値の外れているHIP011および、既出の表3.1.4-1に示した、圧縮断面が他の標本に比して20%少ないHIP069をここで考慮の対象から外すと、それぞれの相関図は以下の図3.1.4-30, 31, 32のようになる。

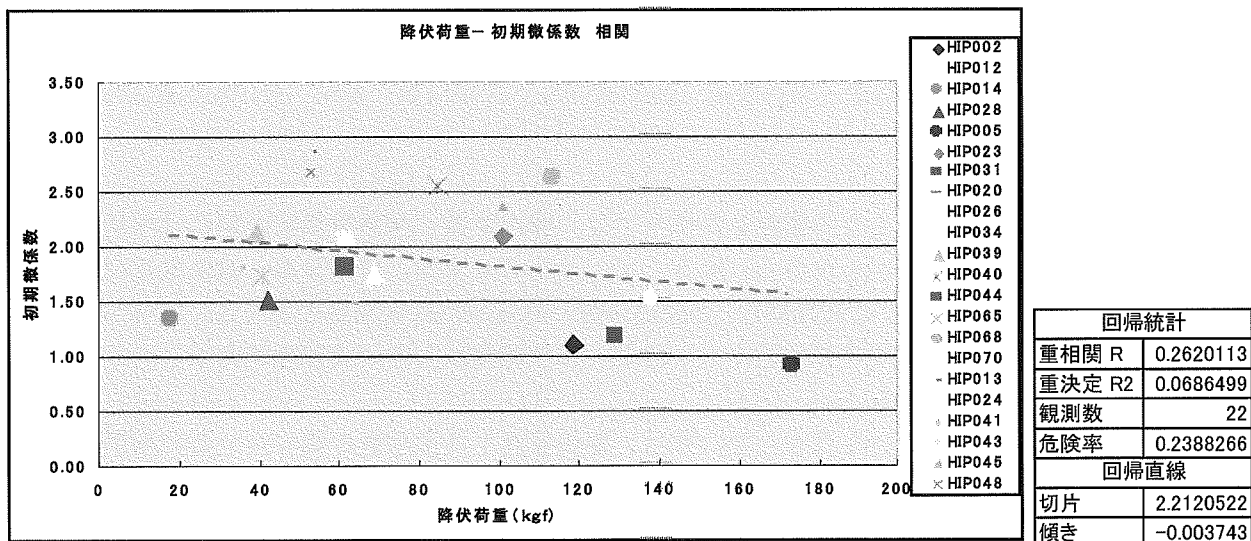


図 3.1.4-30 降伏荷重-初期微係数 相関 (HIP011,HIP069 除く)

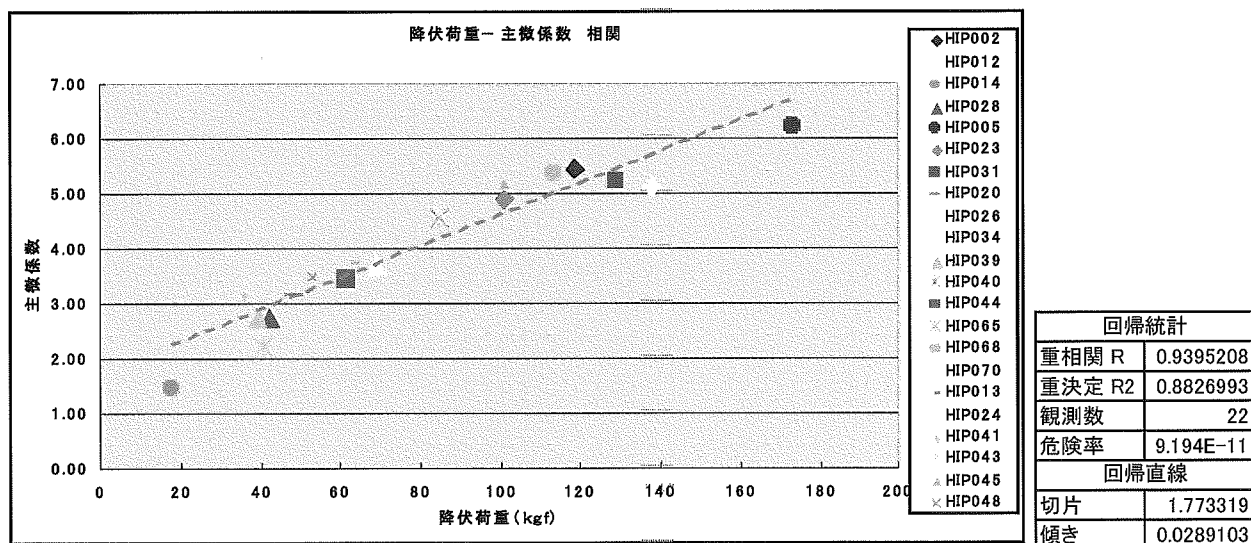


図 3.1.4-31 降伏荷重-主微係数 相関 (HIP011,HIP069 除く)

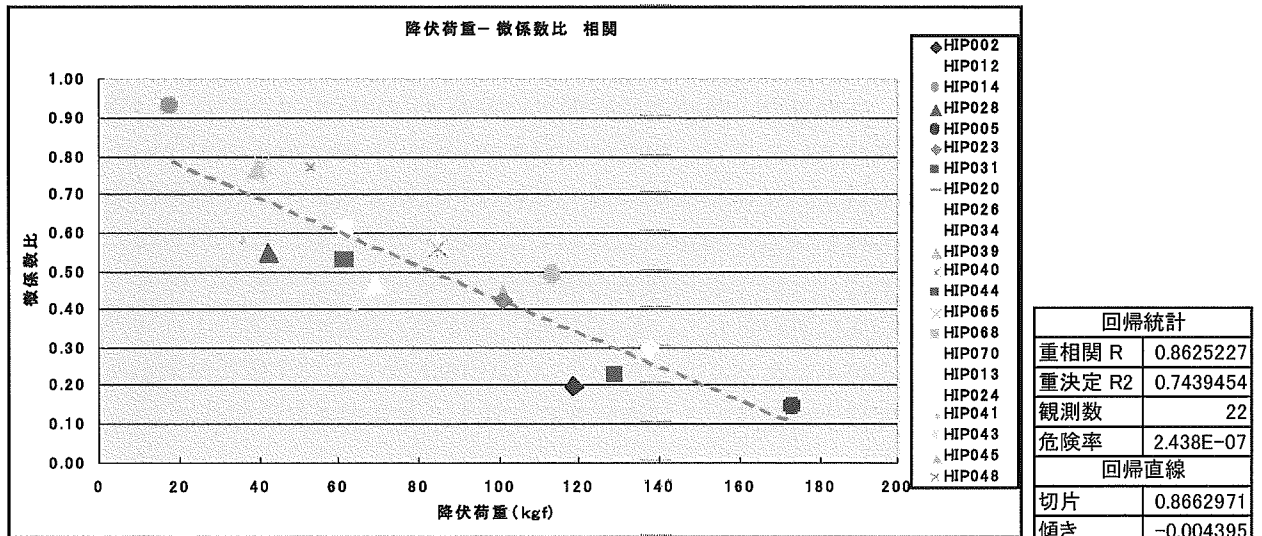


図 3.1.4-32 降伏荷重-微係数比（初期微係数／主微係数）相関（HIP011,HIP069 除く）

図 3. 1. 4-30 を観察した限りでは、降伏荷重と初期微係数の間には相関関係はなさそうである。しかしながら、図 3. 1. 4-32 では、降伏荷重と微係数比の間に負の相関が認められる。これは即ち、初期微係数の絶対値は降伏荷重の大きさに関与しないが、主微係数と比較してその値が小さいほど、降伏荷重が大きい可能性があるという事を示していると考えられる。

ここで注意しなければならない事は、降伏荷重と主微係数の間に強い正の相関が有るために、降伏荷重と微係数比の負の相関が強調されている可能性があるという事である。現時点では観測数も 22 標本とそれほど多くはなく、また骨梁の走行も標本によっては圧縮軸に対して少なからず傾きを持っている場合も有り、その傾斜の程度も考慮する必要があるであろう事などから、ここでは、初期の柔らかさは強度に関して何らかの影響を与える可能性はあるが、明確な相関は認められない、と言うに留めることとする。

(3) 塑性領域での骨梁構造の挙動

塑性領域とは、図3.1.4-26に示す降伏荷重以降、荷重はそれ程上昇せずに変位が増大している領域である。この領域では既に骨梁構造には元に戻り得ない変形が生じており、部位によっては骨梁の圧縮による破壊（圧壊）が起きていると考えられる。

その部分の観察も考慮し、圧縮の前後および標本によっては圧縮の途中でマイクロCT撮影を実施しているが、塑性領域に入ってもその時点での全体の変位は0.1～0.2mm程度と、標本1辺の長さの2%以下に過ぎない。マイクロCT画像の各断面を観察すればその変形は確認できるものの（とは言ってもそれが弾性変形、塑性変形いずれかであるかの判別は難しい）、圧壊となると無数に存在する骨梁の中でそれを特定するのはさらに難しい。

以下の図に今年度実施した静圧縮試験で、圧縮の前後および圧縮中にマイクロCT撮影を実施した3標本の縦断面画像を示す。それぞれ、図3.1.4-33がHIP024、図3.1.4-34がHIP041、図3.1.4-35がHIP069である。いずれも最も左の画像が圧縮前、次いで右に弾性領域、塑性領域、圧縮後の順で並んでいる。

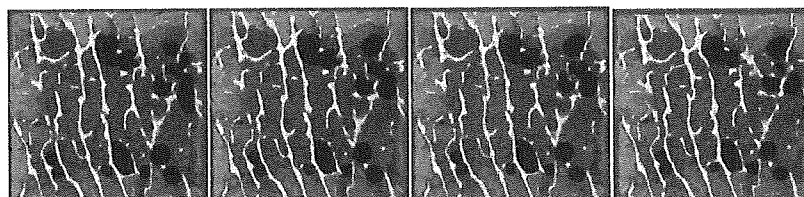


図 3.1.4-33 HIP024 マイクロ CT 画像

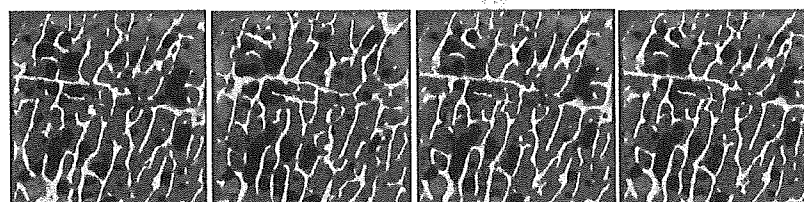


図 3.1.4-34 HIP041 マイクロ CT 画像

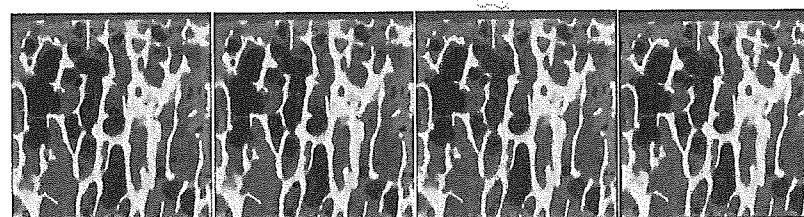


図 3.1.4-35 HIP069 マイクロ CT 画像

いずれも圧縮軸に沿ったほぼ同一箇所の中核部縦断面であり、圧縮に伴って高さが減じられているのが分かるが、圧縮や応力の解放等に伴い微妙に紙面奥行き方向に骨梁が移動しているなどの影響と思われる、見かけ上変化している部分もあり、明確に変形あるいは圧壊と指し示すことが可能な箇所を探すのは難しい。画像データの差分を抽出するツール等を用いた判別も検討したが、上述の微妙に移動している骨梁が大部分を占めるため、やはり断面画像の中で特定の部位のみを抽出することは難しい。

次に、骨梁の圧壊と思われる部分の観察ができた標本について示す。本標本については、圧縮の前後でのみマイクロ CT 撮影を実施した例であるため、弾性領域～塑性領域での状態が確認できないが、画像を 3次元（立体）モデルに再構成して観察した結果、圧壊であることが確認できたものである（図 3. 1. 4 - 3 6）。

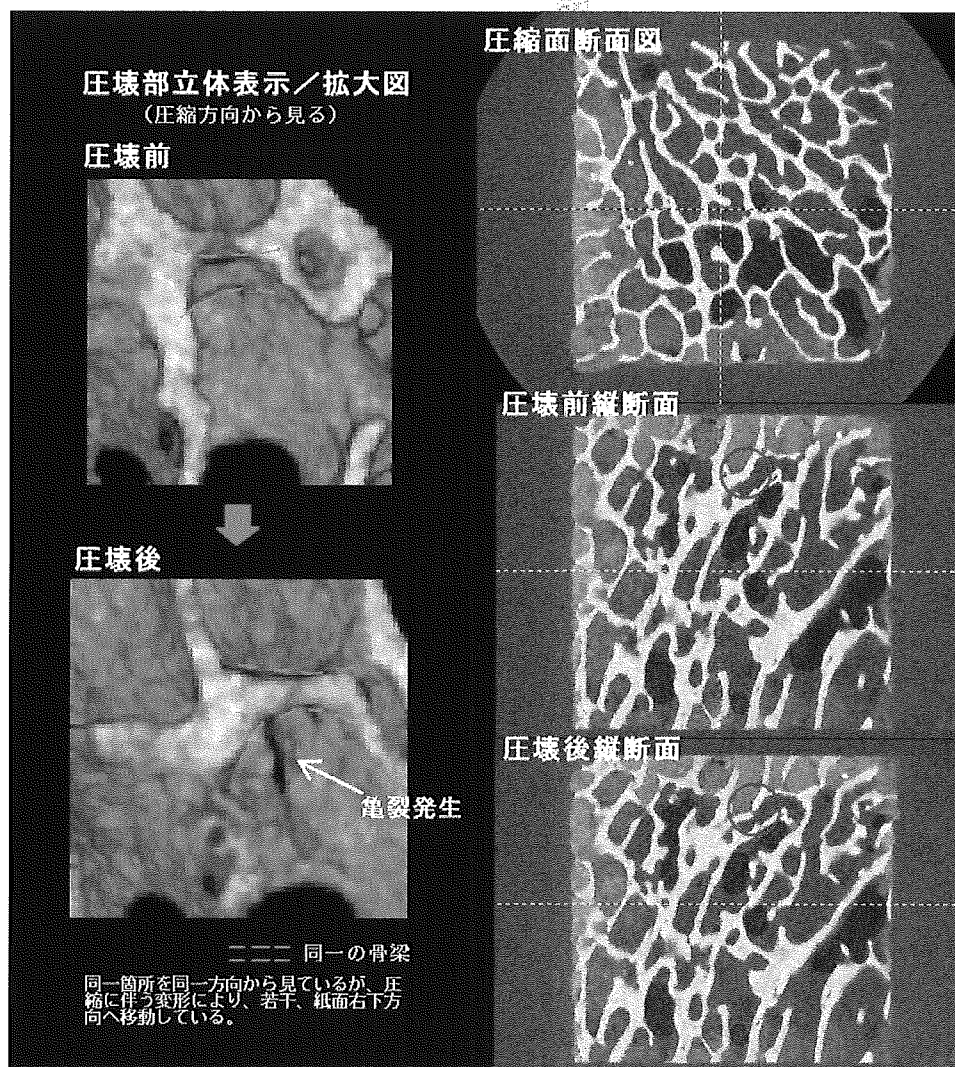


図 3.1.4-36 HIP023 圧壊部分マイクロ CT 画像

図の右下赤丸部分が、標本の縦断面画像で圧壊と思われる部位を示している。この部分についてマイクロ CT データを 3次元的に再構成し、圧縮方向から観察したものが図の左側に示したものである。青い破線で示した骨梁の裏側に壁状の骨梁があり、圧壊後と示した画像でその壁状部分に亀裂が発生しているのが分かる。他の部位や他の標本についても、この様な方法で詳細に調査する事により、同様の亀裂や破壊等を観察することは可能と思われる。