

「歯科用インプラントの静的評価方法について」

エネルギー差法による塑性変形開始荷重値の解析

日本歯科材料工業協同組合
インプラントWG

日本ピストンリング株式会社 藤原聖裕

塑性変形開始荷重値の求め方

1) 塑性変形開始荷重値によるワーストケース選定の評価について

1. 目視法
2. エネルギー差法

2) 目視法による塑性変形開始荷重値の決定方法

目視法による塑性変形開始荷重値の決定方法については、荷重－変位曲線において、弾性直線が明らかに引けるもの、かつ弾性直線との比較により変曲点が明らかに示せるものにしか適用できない。

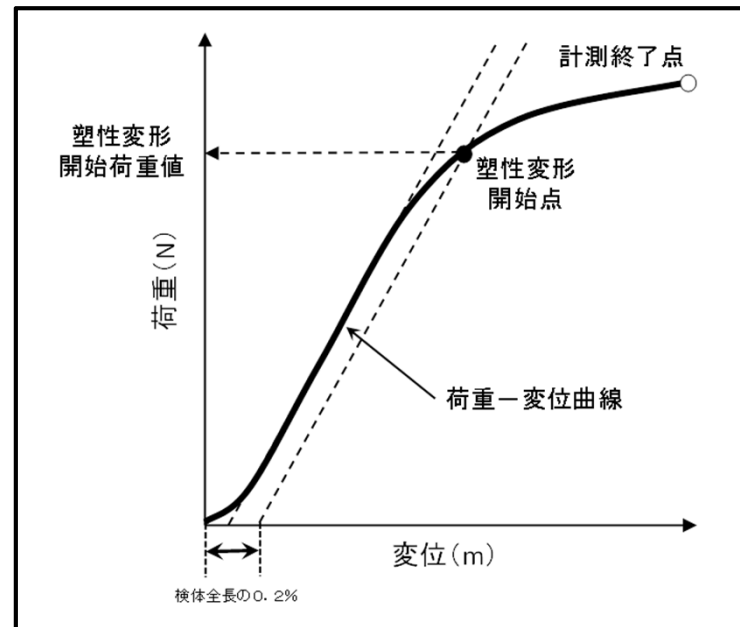


図1. 目視法による塑性変形開始荷重値の決定
(0.2%オフセット耐力を参考)

※通知

「歯科用インプラントの承認申請に係る疲労試験の検体選定に関する取扱いについて」

(平成29年3月23日)

薬生機審発0323第1号)

3) 「荷重－変位曲線」の適切な事例、及び不適切な事例

「荷重－変位曲線」の適切な事例(図3)及び不適切な事例(図4)

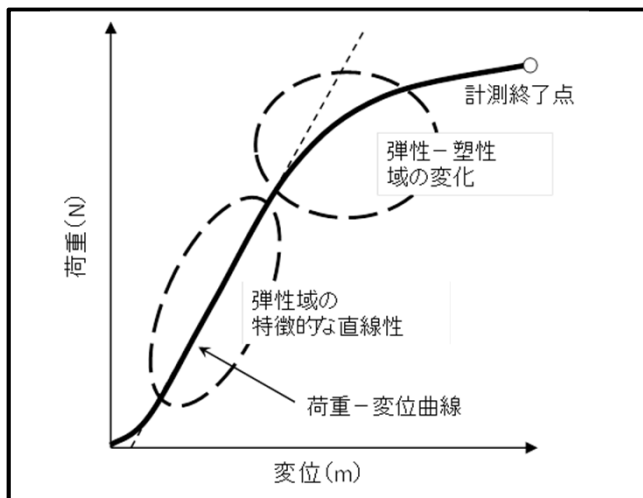


図3. 「荷重－変位曲線」の適切な事例

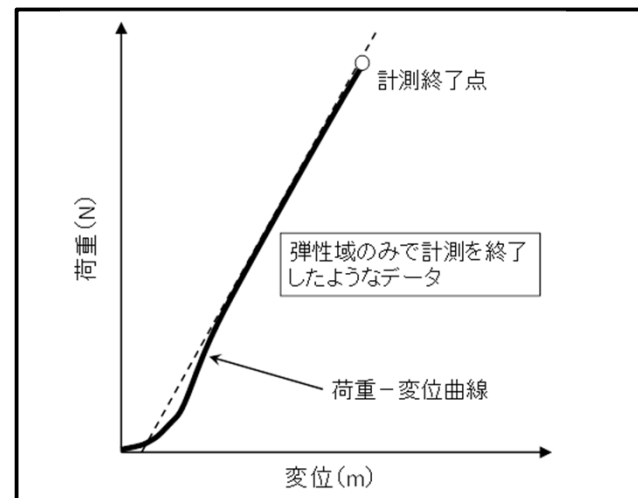


図4-1. 「荷重－変位曲線」の不適切な事例

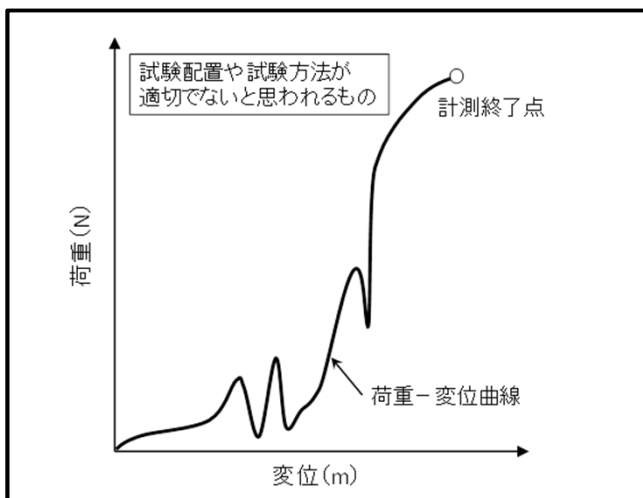


図4-2. 「荷重－変位曲線」の不適切な事例

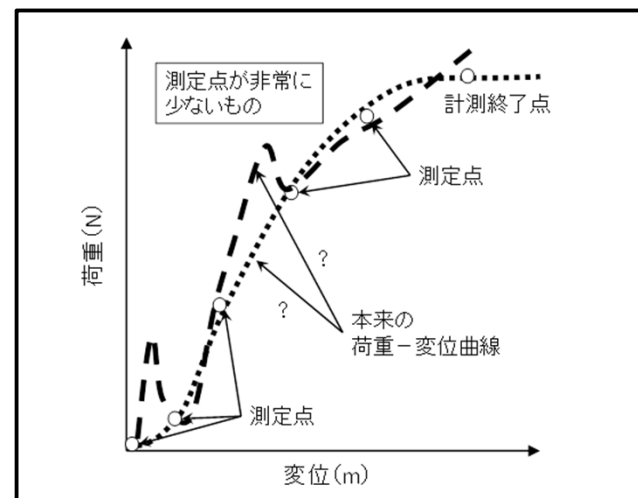


図4-3. 「荷重－変位曲線」の不適切な事例

4) エネルギー差法による塑性変形開始荷重値の数値解析ステップ

4-1) 静的試験による「荷重－変位曲線」デジタルデータの処理

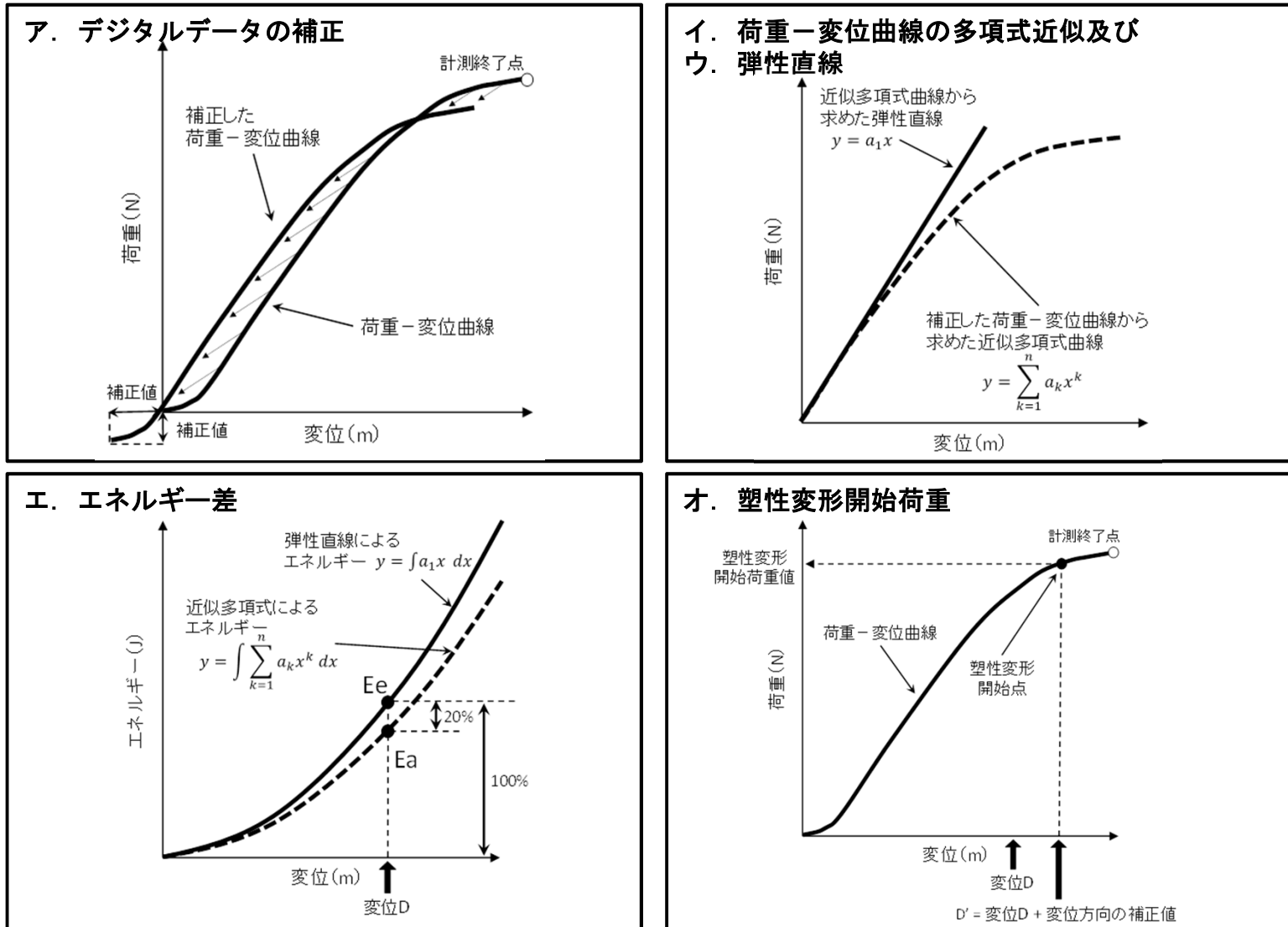


図2. エネルギー差法による塑性変形開始荷重値の決定

4-2) 静的試験による「荷重－変位曲線」デジタルデータの数値解析

(ア-1) 疲労試験装置本体による「荷重－変位曲線」デジタルデータをフィルタリング後、線形近似し弾性域を数値解析可能領域とする

※ 無荷重・装置の遊び・弾性変形・塑性変形のそれぞれの領域に線形性を仮定し近似する
(疲労試験装置本体の特性)

(ア-2) 静的試験による「荷重－変位曲線」デジタルデータの数値解析可能領域で弾性域から塑性域に変化する領域をフィルタリングする

※ 解析処理の負荷低減のために適宜データ数を間引く

(イ・ウ) フィルタリングした「荷重－変位曲線」デジタルデータを多項式近似する

※ デジタルデータは離散的であるため、連続した荷重－変位曲線として多項式近似を行う
(通知：5次以上の多項式を用いることが望ましい。)

(エ) 「弾性直線」と「多項式近似曲線」それぞれから求められるエネルギー差を数値解析で求める

※ エクセルのソルバー機能を使用

(オ) 定めた閾値となるようなエネルギー差（例：20%）の荷重の値を数値的に求め塑性変形開始荷重値とする

4-3) エネルギー差法による塑性変形開始荷重値決定における留意点

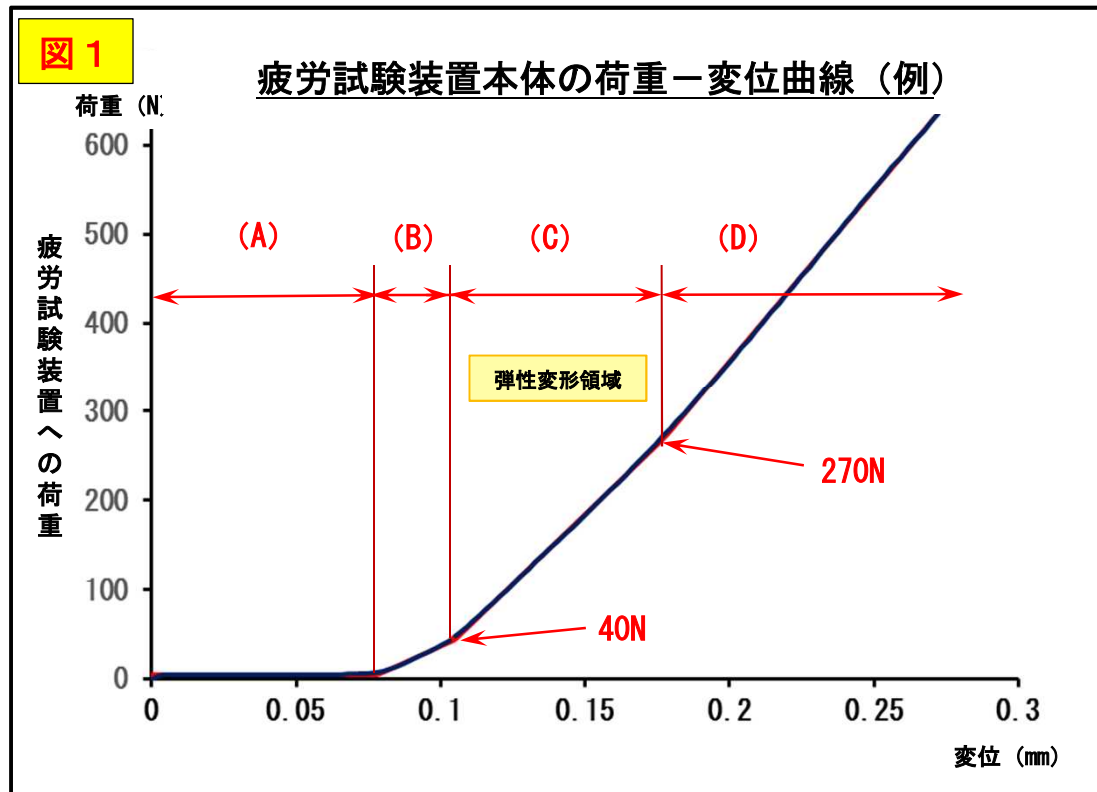
- (1) 疲労試験装置本体の「荷重－変位曲線」を線形近似し、弾性領域を数値解析可能領域とする
- (2) エネルギー差法による数値解析領域は、数値解析可能領域内の「荷重－変位曲線」の弾性域から塑性域に変化する領域から大きく逸脱しない範囲を採用する
- (3) エネルギー差法による塑性変形開始荷重値を用いて検体間の比較を行う場合は
 - ① 検体ごとに異なる閾値を用いず同一の閾値を用いる
 - ② 疲労試験装置が異なる場合の比較は、装置本体の弾性領域内を数値解析領域とする

5. エネルギー差法による塑性変形開始荷重値解析法

ステップ・1 疲労試験装置のエネルギー差法による数値解析可能領域の特定

- ※ 静的荷重試験方法：検体の試験配置については「歯科用骨内インプラントの動的疲労試験方法」・JIS T 6005 (ISO14801 : 2016) に準拠し、試験方法についてはJIS Z 2248に準拠

「荷重－変位曲線」領域を線形近似分類



- (A) 荷重が掛からない領域
- (B) 装置の遊びの領域
- (C) 弾性変形の領域
- (D) 塑性変形の領域

塑性変形開始荷重値
数値解析可能領域

↓
弾性変形領域 (C)
(例：40N～270N)



静的荷重試験

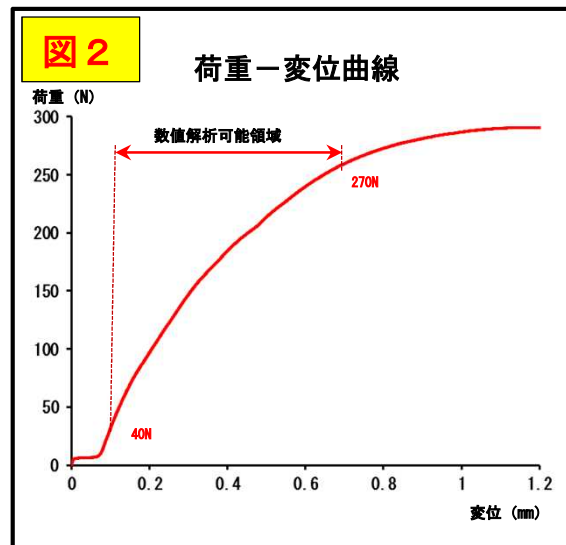
各領域に線形性を仮定し、4つの直線で近似する

ステップ・2 デジタルデータのフィルタリング

静的試験による「荷重－変位曲線」デジタルデータの数値解析可能領域の弾性域から塑性域に変化する領域をフィルタリングする

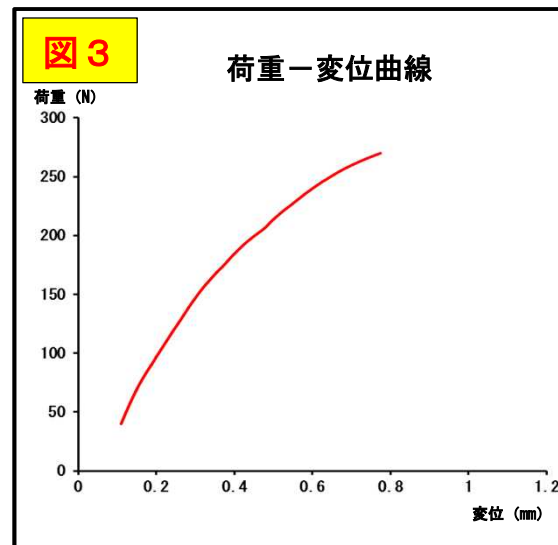
※ 解析処理の負荷低減のためにデータ数を間引く（Excelマクロを用いた処理）

(1) 元デジタルデータ



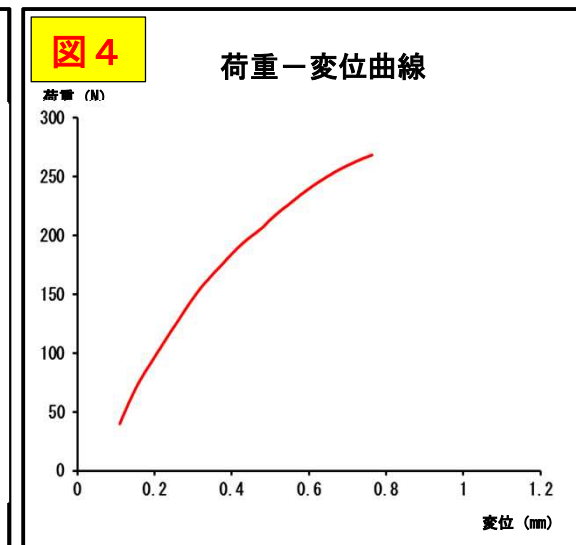
データ数 : 54,000

(2) 数値解析可能領域補正



データ数 : 30,200

(3) 解析データのフィルタリング



データ数 : 100

ステップ・3 エネルギー差法による塑性変形開始荷重値の解析シート例

表 1 法による塑性変形開始荷重値解析結果

典方法：歯科用骨内インプラントの動的疲労試験方法：ISO13488：2016(JIS T 6005)に準拠

試料：

データ入力箇所

多項式近似曲線の係数	
5次	-4435.20
4次	3.77E+03
3次	9.30E+02
2次	-1.92E+03
1次	9.57E+02

データ数	デジタルデータの補正(補正後)			
	変位 (mm)		荷重 (N)	
	補正前	補正後	補正前	補正後
装脱回数	0.0977	0.0000	30.09	0.0000
1	0.1029	0.0052	41.37	11.28
2	0.1076	0.0059	41.37	11.28
3	0.1126	0.0149	46.49	16.40
4	0.1178	0.0201	51.49	21.40
5	0.1231	0.0254	56.32	26.23
6	0.1284	0.0307	60.79	30.00
7	0.1335	0.0357	64.82	33.74
8	0.1385	0.0408	68.63	37.44
9	0.1437	0.0460	72.25	41.09
10	0.1488	0.0511	75.76	44.67
11	0.1540	0.0562	79.07	48.19
12	0.1591	0.0614	82.24	51.65
13	0.1642	0.0665	85.29	55.09
14	0.1692	0.0715	88.21	58.57
15	0.1743	0.0765	91.01	61.99
16	0.1795	0.0817	94.55	65.36
17	0.1845	0.0867	97.90	68.81
18	0.1891	0.0913	100.88	70.78
19	0.1942	0.0965	103.93	73.85

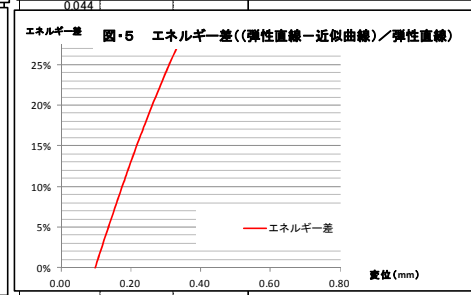
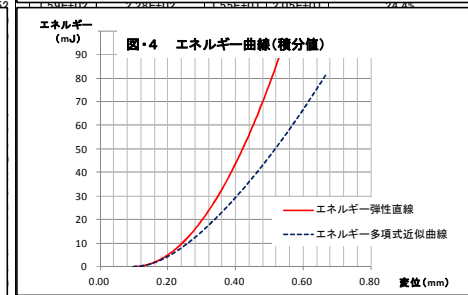
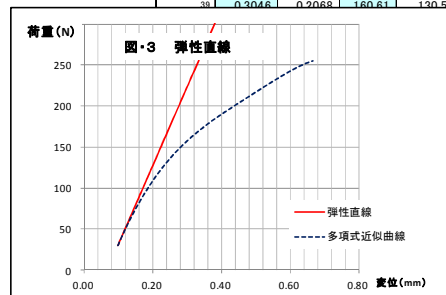
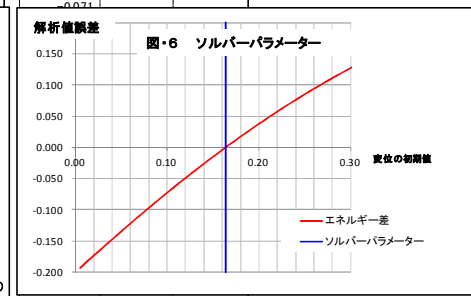
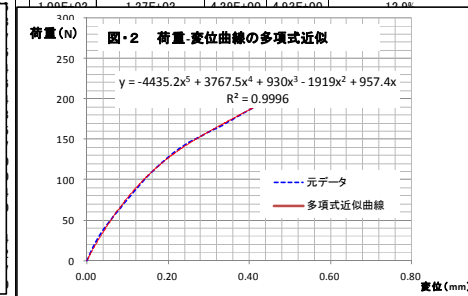
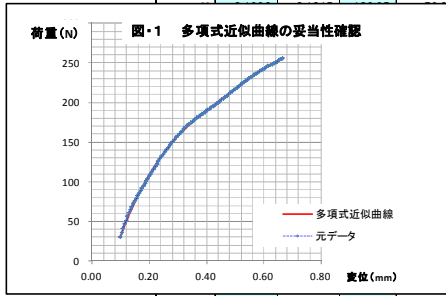
荷重-変位曲線の多項式近似		エネルギー(積分値)		
荷重 (N)	弾性直線 (N)	多項式近似曲線 (mJ)	弾性直線 (mJ)	エネルギー差 (弾性直線/近似曲線%)
3.01E+01	3.91E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.0%
3.50E+01	3.50E+01	1.27E-02	1.28E-02	0.7%
3.94E+01	3.95E+01	4.60E-02	4.66E-02	1.3%
4.40E+01	4.44E+01	1.05E-01	1.07E-01	2.0%
4.85E+01	4.85E+01	1.86E-01	1.93E-01	2.7%
5.31E+01	5.44E+01	2.97E-01	3.08E-01	3.4%
5.77E+01	5.94E+01	4.32E-01	4.50E-01	4.0%
6.20E+01	6.43E+01	5.95E-01	6.11E-01	4.7%
6.60E+01	6.91E+01	7.81E-01	7.95E-01	5.4%
7.02E+01	7.41E+01	9.51E-01	1.01E+00	6.0%
7.41E+01	7.91E+01	1.17E+00	1.26E+00	6.7%
7.81E+01	8.39E+01	1.40E+00	1.51E+00	7.2%
8.19E+01	8.89E+01	1.66E+00	1.80E+00	7.8%
8.54E+01	9.35E+01	1.92E+00	2.00E+00	8.6%
8.91E+01	9.85E+01	2.22E+00	2.45E+00	9.3%
9.27E+01	1.04E+02	2.55E+00	2.82E+00	9.9%
9.67E+01	1.08E+02	2.86E+00	3.20E+00	10.5%
9.97E+01	1.13E+02	3.20E+00	3.60E+00	11.1%
1.02E+02	1.18E+02	3.53E+00	3.99E+00	11.7%
1.06E+02	1.22E+02	3.91E+00	4.46E+00	12.3%
1.09E+02	1.27E+02	4.20E+00	4.92E+00	12.9%

エネルギー差		20.00%
弾性直線/近似曲線(%)	20.00%	
解析値誤差	3.356E-30	
変位の初期値仮入力 (mm)	0.164	
-0.193	0.164	-0.2
-0.187	0.164	0.2
-0.180		
-0.173		
-0.166		
-0.160		
-0.153		
-0.146		
-0.140		
-0.133		
-0.127		
-0.120		
-0.114		
-0.107		
-0.101		
-0.095		
-0.089		
-0.083		
-0.077		
-0.071		

ソルバー解析結果	
変位 mm	0.261
荷重 N	141.7

塑性変形開始荷重値		
エネルギー差(%)	変位 (mm)	荷重 (N)
5%	0.14	64
10%	0.18	93
15%	0.22	119
20%	0.26	142
25%	0.31	162

解析シート例



38	0.4107	0.3129	192.46	162.37
59	0.4165	0.3188	193.71	163.63

1.93E+02	3.30E+02	3.11E+01	4.69E+01	33.7%
1.95E+02	3.35E+02	3.20E+01	4.87E+01	34.2%

0.137		
0.142		

ステップ・3 デジタルデータの補正（装置の遊び補正）

①フィルタリング後の変位とその時の荷重を入力

②遊び補正後のデータは、補正値を加味し計算

表2 デジタルデータの補正（補正後）				
データ数	変位 (mm)		荷重 (N)	
	補正前	補正後	補正前	補正後
装置遊び	0.1097	0.0000	40.00	0.0000
1	0.1156	0.0059	44.64	4.64
2	0.1213	0.0115	49.00	9.00
3	0.1271	0.0173	53.30	13.29
4	0.1329	0.0231	57.71	17.71
5	0.1387	0.0289	61.67	21.66
6	0.1449	0.0352	66.00	25.99
7	0.1506	0.0408	69.81	29.81
8	0.1564	0.0466	73.51	33.51
9	0.1622	0.0525	76.95	36.94
10	0.1680	0.0582	80.05	40.05
11	0.1738	0.0641	83.30	43.30

通知

ア. デジタルデータの補正（装置の遊び補正）

試験装置の遊びの影響を取り除くため、変位及び荷重の実測データをそれぞれ補正値（正の値）だけ負方向にシフトさせてデータ全体を平行移動し、原点を補正する。

以下、イ. からエ. において変位、荷重ともに補正データを用いる。

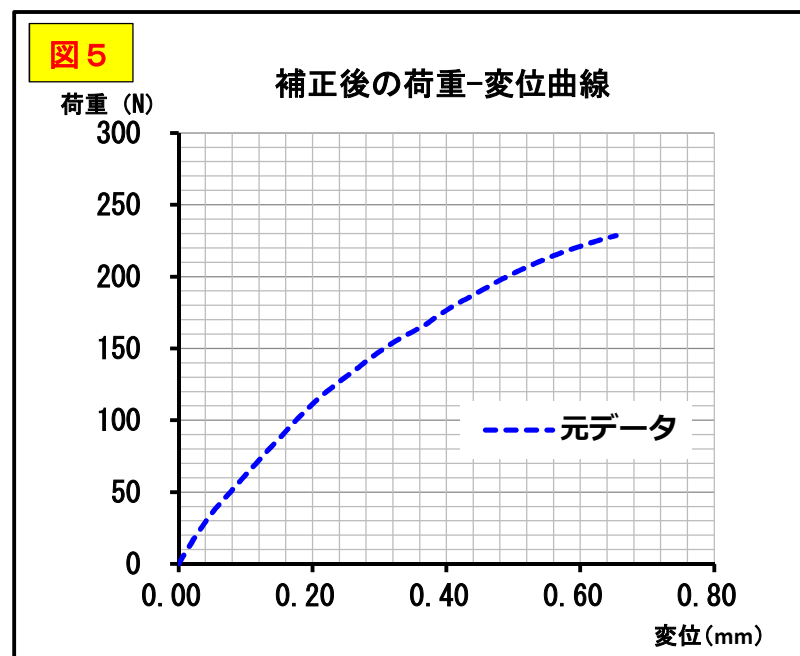
ステップ・4 デジタルデータの補正後の荷重－変位曲線確認

① 表2の補正後のデータを散布図5でグラフ化

② 補正後の荷重－変位曲線

表2

デジタルデータの補正（補正後）				
データ数	変位 (mm)		荷重 (N)	
	補正前	補正後	補正前	補正後
装置遊び	0.1097	0.0000	40.00	0.0000
1	0.1156	0.0059	44.64	4.64
2	0.1213	0.0115	49.00	9.00
3	0.1271	0.0173	53.30	13.29
4	0.1329	0.0231	57.71	17.71
5	0.1387	0.0289	61.67	21.66
6	0.1449	0.0352	66.00	25.99
7	0.1506	0.0408	69.81	29.81
8	0.1564	0.0466	73.51	33.51
9	0.1622	0.0525	76.95	36.94
10	0.1680	0.0582	80.05	40.05
11	0.1738	0.0641	83.30	43.30
12	0.1795	0.0698	86.28	46.28
13	0.1854	0.0756	89.13	49.13



通知

イ. 荷重－変位曲線の多項式近似

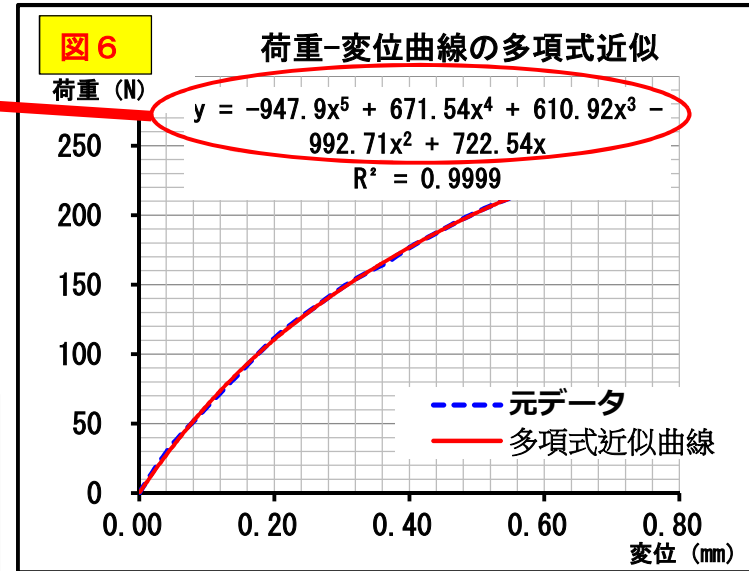
デジタルデータは離散的であるため、連続した荷重－変位曲線として多項式近似を行う。

5次以上の多項式を用いることが望ましいが、弾性域から塑性域に変化する変曲点を求める上で、十分な近似精度が得られる適切な多項式を用いることが前提となる。

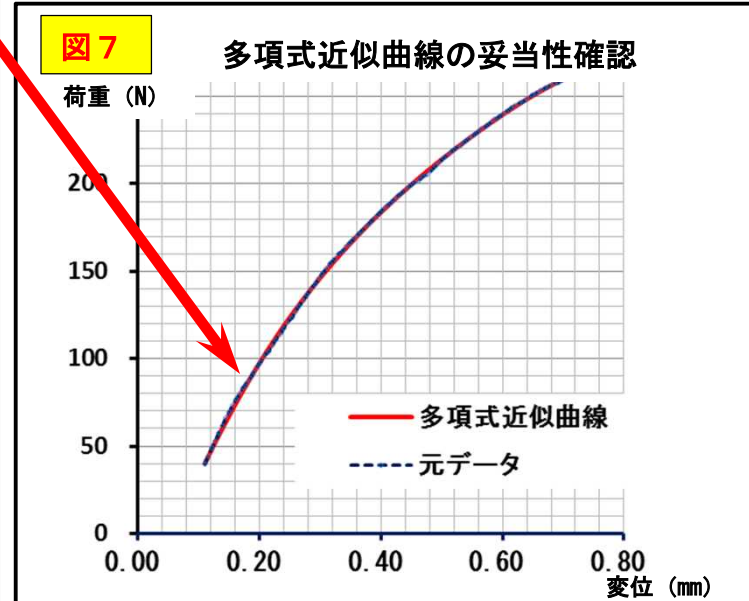
ステップ・5 荷重-変位曲線の多項式近似とエネルギー計算のデータ入力

① 図6の高次多項式の各項の係数を入力
(目安として有効数字3桁程度は必要)

② 入力に間違いが無い事を、図7で確認
近似曲線と、元データがほぼ一致していれば
OK



データ入力箇所		表2				表3	
多項式近似曲線の係数		デジタルデータの補正 (補正後)				荷重-変位曲線の多項式近似	
次数	係数	変位 (mm)		荷重 (N)		荷重 (N)	弾性直線 (N)
		補正前	補正後	補正前	補正後		
5次	-947.90					0.00E+00	4.00E+01
4次	6.72E+02					4.42E+01	4.43E+01
3次	6.11E+02					4.82E+01	4.83E+01
2次	-9.93E+02					5.22E+01	5.25E+01
1次	7.23E+02					5.62E+01	5.67E+01
装置遊び		0.1097	0.0000	40.00	0.0000	6.01E+01	6.09E+01
1		0.1156	0.0059	44.64	4.04	6.42E+01	6.54E+01
2		0.1213	0.0115	49.00	9.00	6.79E+01	6.95E+01
3		0.1271	0.0173	53.30	13.29	7.16E+01	7.37E+01
4		0.1329	0.0231	57.71	17.71	7.53E+01	7.79E+01
5		0.1387	0.0289	61.67	21.66	7.88E+01	8.21E+01
6		0.1449	0.0352	66.00	25.99	8.24E+01	8.63E+01
7		0.1506	0.0408	69.81	29.81	8.58E+01	9.04E+01
8		0.1564	0.0466	73.51	33.51	8.93E+01	9.47E+01
9		0.1622	0.0525	76.95	36.94	9.25E+01	9.87E+01
10		0.1680	0.0582	80.05	40.05	9.58E+01	1.03E+02
11		0.1738	0.0641	83.30	43.30	9.91E+01	1.07E+02
12		0.1795	0.0698	86.28	46.28	1.02E+02	1.11E+02
13		0.1854	0.0756	89.13	49.13	1.06E+02	1.16E+02
14		0.1910	0.0812	92.04	52.04	1.09E+02	1.20E+02
15		0.1968	0.0871	95.20	55.19	1.12E+02	1.25E+02
16		0.2026	0.0928	98.18	58.17	1.16E+02	1.30E+02
17		0.2083	0.0986	101.22	61.22	1.19E+02	1.34E+02
18		0.2147	0.1049	104.32	64.32	1.22E+02	1.39E+02
19		0.2207	0.1110	107.62	67.62		
20		0.2274	0.1176	110.92	70.91		
21		0.2336	0.1239	114.21	74.20		
22		0.2398	0.1300	117.35	77.35		
23		0.2461	0.1364	120.54	80.53		



ステップ・6 弾性直線の解析

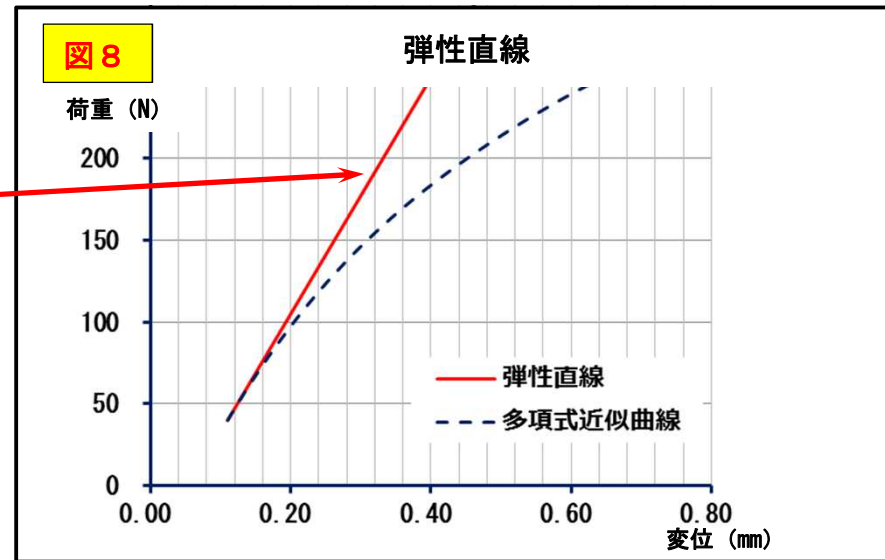
①弾性直線の計算

②図8で確認

③弾性直線（赤線）が近似曲線（青線）の下になる場合は、「遊び」の補正が不正確、または、及びデータそのものの信頼性が乏しい

$$(y = -947.9x^5 + 671.54x^4 + 610.92x^3 - 992.71x^2 + 722.54x)$$

データ入力箇所		表2				表3	
多項式近似曲線の係数		デジタルデータの補正（補正後）				荷重-変位曲線の多項式近似	
次数	係数	変位 (mm)		荷重 (N)		荷重 (N)	弾性直線 (N)
		補正前	補正後	補正前	補正後	(N)	(N)
5次	-947.90	0.1097	0.0000	40.00	0.0000	0.00E+00	4.00E+01
4次	6.72E+02	0.1156	0.0059	44.64	4.64	4.42E+01	4.43E+01
3次	6.11E+02	0.1213	0.0115	49.00	9.00	4.82E+01	4.83E+01
2次	-9.93E+02	0.1271	0.0173	53.30	13.29	5.22E+01	5.25E+01
1次	7.23E+02	0.1329	0.0231	57.71	17.71	5.62E+01	5.67E+01
		0.1387	0.0289	61.67	21.66	6.01E+01	6.09E+01
		0.1449	0.0352	66.00	25.99	6.42E+01	6.54E+01
		0.1506	0.0408	69.81	29.81	6.79E+01	6.95E+01
		0.1564	0.0466	73.51	33.51	7.16E+01	7.37E+01
		0.1622	0.0525	76.95	36.94	7.53E+01	7.79E+01
		0.1680	0.0582	80.05	40.05	7.88E+01	8.21E+01
		0.1738	0.0641	83.30	43.30	8.24E+01	8.63E+01
		0.1795	0.0698	86.28	46.28	8.58E+01	9.04E+01
		0.1854	0.0756	89.13	49.13	8.93E+01	9.47E+01
		0.1910	0.0812	92.04	52.04	9.25E+01	9.87E+01
		0.1968	0.0871	95.20	55.19	9.58E+01	1.03E+02
		0.2026	0.0928	98.18	58.17	9.91E+01	1.07E+02



通知

ウ. 弾性直線

イ. の多項式近似曲線から弾性直線（近似曲線の1次の項の直線）を求める。

ステップ・7 エネルギーの解析

①エネルギーの計算

近似曲線の係数

- 5次・A ●4次・B ●3次・C ●2次・D ●1次・E ($y = -947.9x^5 + 671.54x^4 + 610.92x^3 - 992.71x^2 + 722.54x$)
- 変位・x

近似曲線エネルギー

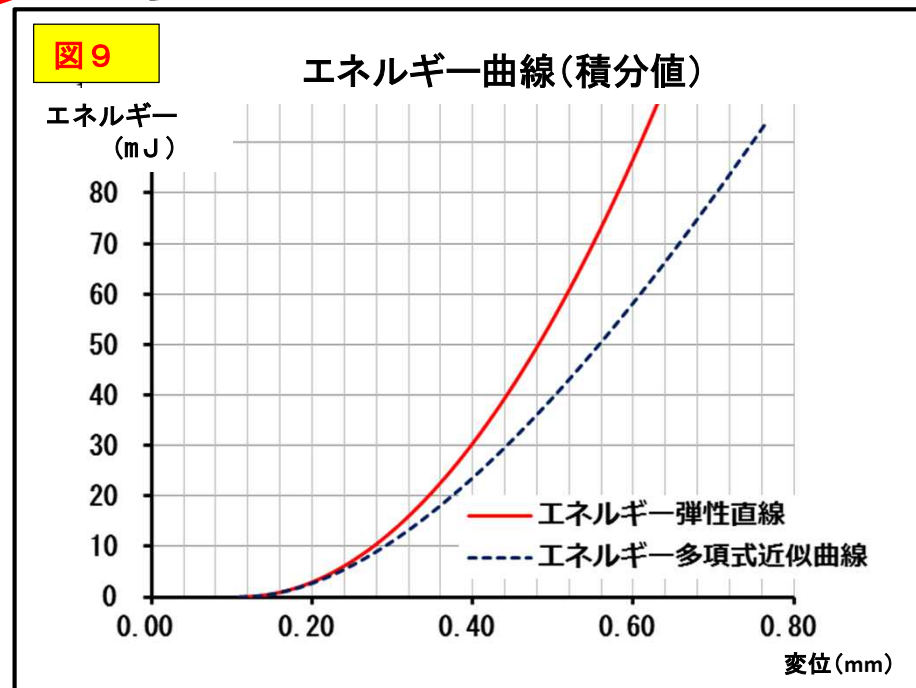
$$\left[\frac{A}{6}x^6 + \frac{B}{5}x^5 + \frac{C}{4}x^4 + \frac{D}{3}x^3 + \frac{E}{2}x^2 \right]$$

弾性変形エネルギー

$$\left[\frac{E}{2}x^2 \right]$$

表 4 エネルギー（積分値）

多項式 近似曲線 (mJ)	弾性直線 (mJ)	エネルギー差 弾性直線/近似曲線 (%)
0.00E+00	0.00E+00	0.0%
1.24E-02	1.25E-02	0.5%
4.77E-02	4.82E-02	1.1%
1.07E-01	1.09E-01	1.6%
1.89E-01	1.93E-01	2.1%
2.95E-01	3.03E-01	2.6%
4.33E-01	4.47E-01	3.2%
5.80E-01	6.02E-01	3.7%
7.53E-01	7.86E-01	4.2%
9.48E-01	9.95E-01	4.7%
1.16E+00	1.22E+00	5.2%
1.40E+00	1.48E+00	5.7%
1.65E+00	1.76E+00	6.2%
1.93E+00	2.07E+00	6.7%
2.21E+00	2.38E+00	7.1%
2.53E+00	2.74E+00	7.6%
2.86E+00	3.11E+00	8.1%



通知

エ. エネルギー差

- ① 近似曲線から得る、検体に蓄積されるエネルギーEa（近似曲線の積分値）を求める。
- ② 塑性域に至らず永続的に弾性域が続いたと仮定した場合の、検体に蓄積される弾性エネルギーEe（弾性直線の積分値）を求める。
- ③ ②で求めたエネルギーと①で求めたエネルギーの差（Ee - Ea）がある閾値（ $(Ee - Ea)/Ee \times 100 = 20(\%)$ （※1））となる点を求め、その点における変位をDとする。

※1）本研究での検討の際、検体の疲労試験の強度と塑性変形開始荷重値に相関が確認されたときに用いた値。

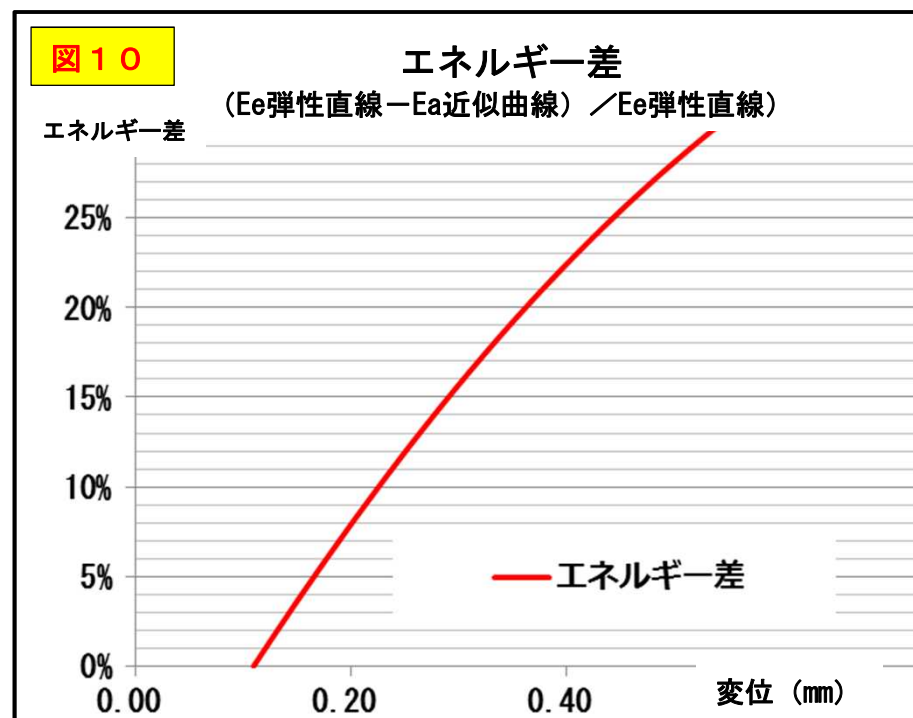
ステップ・8 エネルギー差 (%) の計算

①エネルギー差 (%) の計算

$$\frac{\text{Ee弾性直線エネルギー} - \left(\frac{A}{6}x^6 + \frac{B}{5}x^5 + \frac{C}{4}x^4 + \frac{D}{3}x^3 + \frac{E}{2}x^2 \right)}{\text{Ea近似曲線エネルギー}} = \frac{E}{2}x^2$$

表4 エネルギー（積分値）

多項式 近似曲 線 (mJ)	弾性直線 (mJ)	エネルギー差 弾性直線/近似曲線 (%)
0.00E+00	0.00E+00	0.0%
1.24E-02	1.25E-02	0.5%
4.77E-02	4.82E-02	1.1%
1.07E-01	1.09E-01	1.6%
1.89E-01	1.93E-01	2.1%
2.95E-01	3.03E-01	2.6%
4.33E-01	4.47E-01	3.2%
5.80E-01	6.02E-01	3.7%
7.53E-01	7.86E-01	4.2%
9.48E-01	9.95E-01	4.7%
1.16E+00	1.22E+00	5.2%
1.40E+00	1.48E+00	5.7%
1.65E+00	1.76E+00	6.2%
1.93E+00	2.07E+00	6.7%
2.21E+00	2.38E+00	7.1%
2.53E+00	2.74E+00	7.6%
2.86E+00	3.11E+00	8.1%



通知

エ. エネルギー差

- ① 近似曲線から得る、検体に蓄積されるエネルギーEa（近似曲線の積分値）を求める。
- ② 塑性域に至らず永続的に弾性域が続いたと仮定した場合の、検体に蓄積される弾性エネルギーEe（弾性直線の積分値）を求める。
- ③ ②で求めたエネルギーと①で求めたエネルギーの差 (Ee - Ea) がある閾値 ((Ee - Ea)/Ee × 100 = 20%) (※1) となる点を求め、その点における変位をDとする。
※1) 本研究での検討の際、検体の疲労試験の強度と塑性変形開始荷重値に相関が確認されたときに用いた値。

ステップ・9 エネルギー差(%)がある閾値の時の塑性変形開始荷重値のソルバー計算

①狙いのエネルギー差を%単位で入力しその時の変位Xと塑性変形開始荷重値をソルバーで計算

$$\frac{\frac{E}{2}x^2 - \left(\frac{A}{6}x^6 + \frac{B}{5}x^5 + \frac{C}{4}x^4 + \frac{D}{3}x^3 + \frac{E}{2}x^2 \right)}{\frac{E}{2}x^2} - 0.2 \quad \text{①}$$

②計算の初期値として図11の青線と赤線の交点付近の変位（今回の例では0.24）を仮入力

※ソルバー実行後のグラフ表示

計算が成功すれば赤線（解析値の誤差）と青線（変位の値）と横軸が一点で交わる

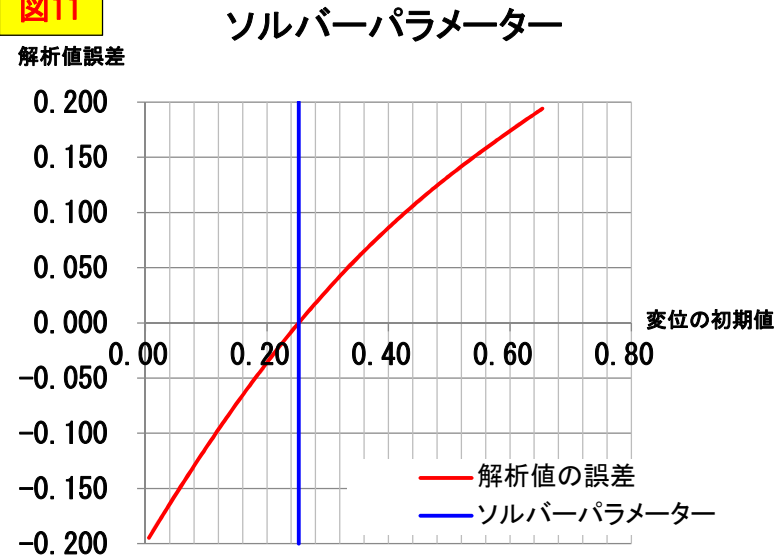
表5

エネルギー差 弾性直線/近似曲線(%)		20.00%
解析値誤差		4.102E-21
変位の初期値仮入力 (mm)		0.252
-0.195	0.252	-0.2
-0.189	0.252	0.2
-0.184		
-0.179		
-0.174		
-0.168		
-0.163		
-0.158		
-0.153		
-0.148		
-0.143		
-0.138		

ソルバー解析結果	
変位 mm	0.362
荷重 N	170.7

**塑性変形開始荷重値
171 N
変位
0.36mm**

図11



通知

オ. 塑性変形開始荷重値

エ. で求めた変位Dにア. で求めた変位方向の補正值を加えた値（変位D'）、における実測データの荷重値を塑性変形開始荷重値とする。

塑性変形開始荷重値の求め方『まとめ』

1) 塑性変形開始荷重値によるワーストケース選定の評価について

1. 目視法
2. エネルギー差法

2) 目視法による塑性変形開始荷重値の決定方法

目視法による塑性変形開始荷重値の決定方法については、荷重－変位曲線において、弾性直線が明らかに引けるもの、かつ弾性直線との比較により変曲点が明らかに示せるものにしか適用できない。

塑性変形開始荷重値の求め方『まとめ』

3) 静的試験による「荷重－変位曲線」デジタルデータのエネルギー差法による数値解析

- (ア-1) 疲労試験装置本体による「荷重－変位曲線」デジタルデータをフィルタリング後、線形近似し弾性領域を数値解析可能領域とする
(領域：無荷重・装置の遊び・弾性変形・塑性変形)
- (ア-2) 静的試験による「荷重－変位曲線」デジタルデータの数値解析可能領域の弾性域から塑性域に変化する領域をフィルタリングする
(解析処理の負荷低減のために適宜データ数を間引く)
- (イ・ウ) フィルタリングした「荷重－変位曲線」デジタルデータを5次の多項式近似する
- (エ) 「弾性直線」と「多項式近似曲線」それぞれから求められるエネルギー差を数値解析で求める
- (オ) 定めた閾値となるようなエネルギー差（例：20%）の荷重の値を数値的に求め塑性変形開始荷重値とする

4) エネルギー差法による塑性変形開始荷重値決定における留意点

- (1) 疲労試験装置本体の「荷重－変位曲線」から数値解析可能領域を把握する
- (2) エネルギー差法による数値解析領域は、数値解析可能領域内の「荷重－変位曲線」の弾性域から塑性域に変化する領域から大きく逸脱しない範囲を採用する
- (3) エネルギー差法による塑性変形開始荷重値を用いて検体間の比較を行う場合は
 - ① 検体ごとに異なる閾値を用いず同一の閾値を用いる
 - ② 疲労試験装置が異なる場合の比較は、装置本体の弾性領域内を数値解析領域とする

「歯科用インプラントの静的評価方法について」

エネルギー差法による塑性変形開始荷重値の解析

ご清聴ありがとうございました