

卒業論文

鋳造巣がねじ面の応力分布に及ぼす

影響の有限要素法解析

p.1~p.58 完

平成 23 年 2 月 4 日提出

指導教員 酒井信介教授

03080178 河原畑歩

# 目次

第1章 序論.....	7
1.1 研究の背景.....	7
1.2 研究の目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	8
第2章 解析条件・有限要素法モデリング概要.....	9
2.1 緒言.....	9
2.2 解析条件概要.....	10
2.2.1 解析条件.....	10
2.2.2 ボルト・被締結材の材料.....	11
2.3 有限要素法におけるモデリング概要.....	11
2.3.1 ねじ寸法の設定.....	11
2.3.2 ボルト側のモデリング.....	13
2.3.3 被締結材側のモデリング.....	15
2.3.4 鋳造巢のモデリング.....	16
2.3.5 ワッシャーのモデリング.....	17
2.3.6 接触要素の設定.....	18
2.3.7 弾塑性解析.....	21
第3章 M10 ボルトの有限要素法解析.....	22
3.1 緒言.....	22
3.2 鋳造巢の無いモデル.....	23
3.2.1 解析条件.....	23
3.2.2 解析.....	25
3.2.3 解析結果.....	26

3.2.4	軸力の合わせ込み.....	29
3.2.5	荷重分担率.....	30
3.2.6	設定軸力での解析結果.....	31
3.2.7	妥当性計算.....	33
3.3	鋳造巣のあるモデル.....	35
3.3.1	解析条件.....	35
3.3.2	解析結果.....	36
3.4	鋳造巣の有無による比較.....	36
3.5	パラメータの違いによる比較.....	37
3.5.1	穴径 $d$ について.....	38
3.5.2	穴位置 $y$ について.....	38
3.6	結言.....	41
第4章	M6 ボルトの有限要素法解析.....	42
4.1	緒言.....	42
4.2	鋳造巣の無いモデル.....	43
4.2.1	解析条件.....	43
4.2.2	解析結果.....	44
4.2.3	軸力の合わせ込み.....	45
4.2.4	指定軸力での解析結果.....	46
4.3	鋳造巣のあるモデル.....	49
4.3.1	解析条件.....	49
4.3.2	解析結果.....	50
4.4	鋳造巣の有無による比較.....	51
4.5	パラメータの違いによる比較.....	51
4.5.1	穴径 $d$ について.....	51

4.5.2 穴位置 $y$ について .....	53
4.6 結言 .....	54
第 5 章 結論 .....	55
5.1 結論 .....	55
5.2 課題と展望 .....	55
参考文献 .....	56
謝辞 .....	57

# 図表目次

図 2-1	解析条件図面 .....	10
図 2-2	ねじ部詳細寸法.....	11
図 2-3	おねじ山の作成.....	13
図 2-4	ボルト部完成図.....	14
図 2-5	めねじ部作成 .....	15
図 2-6	被締結材側完成図 .....	16
図 2-7	鋳造巢の作成 .....	17
図 2-8	ワッシャー完成図 .....	17
図 2-9	接触適合性.....	18
図 2-10	ペナルティ法 .....	19
図 2-11	コンタクト面とターゲット面.....	20
図 2-12	軟鋼とアルミニウムの応力-ひずみ曲線 .....	21
図 3-1	M10 寸法図 .....	23
図 3-2	食い込みの有無の図 .....	25
図 3-3	拘束定義.....	25
図 3-4	解析結果( $a=0.05$ ).....	26
図 3-5	コンター幅変更図 .....	27
図 3-6	軸力読み取り ( $a=0.05$ ).....	28
図 3-7	軸力読み取り ( $a=0.12$ ).....	29
図 3-8	おねじ山面.....	31
図 3-9	おねじ山にかかる y 方向応力 .....	32
図 3-10	おねじ山の荷重分担率.....	32
図 3-11	理論値と解析結果の比較.....	33
図 3-12	M10 寸法図(鋳造巢あり).....	35
図 3-13	荷重分担率( $a=0.12$ , $d=5$ , $y=7$ ) .....	36
図 3-14	鋳造巢の有無による荷重分担率の比較のグラフ .....	37
図 3-15	鋳造巢径を変化させた時の荷重分担率の比較のグラフ .....	38
図 3-16	鋳造巢位置を変化させた時の荷重分担率の比較のグラフ .....	39
図 3-17	図 3-15 の拡大グラフ(1~5 山).....	39
図 3-18	鋳造巢が第一山にかかる場合の荷重分担率のグラフ .....	40
図 4-1	M6 寸法図(鋳造巢無し) .....	43
図 4-2	y 方向応力コンター図(ボルト部・ $a=0.05$ ).....	44

図 4-3	軸力読み取り ( $a=0.05$ ).....	45
図 4-4	軸力読み取り ( $a=0.07$ ).....	46
図 4-5	各おねじ山にかかる $y$ 方向応力のグラフ ( $a=0.07$ , 鑄造巢無し).....	47
図 4-6	荷重分担率のグラフ ( $a=0.07$ , 鑄造巢無し).....	47
図 4-7	M6, M10 の荷重分担率の比較のグラフ .....	48
図 4-8	M6 寸法図(鑄造巢あり) .....	49
図 4-9	荷重分担率のグラフ ( $a=0.07$ , $d=3$ , $y=4.5$ ).....	50
図 4-10	鑄造巢の有無による荷重分担率の比較のグラフ .....	51
図 4-11	鑄造巢径の違いによる荷重分担率の比較のグラフ .....	52
図 4-12	鑄造巢位置の違いによる荷重分担率の比較のグラフ .....	53
表 2-1	解析条件 .....	10
表 2-2	被締結材側の材料特性.....	11
表 3-1	M10 寸法表 .....	23
表 3-2	ボルト・被締結材の材料特性 .....	24
表 3-3	妥当性検討.....	34
表 3-4	鑄造巢寸法表 .....	35
表 4-1	M6 寸法表 .....	43
表 4-2	鑄造巢寸法表 .....	49

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

ねじによる締結は、取り付け・取り外しが容易であることや、低価格であるなど、非常に有効な方法であり、一般的な結合方法として機械や構造物の結合に用いられている。その締結力の制御は物と物を締め付けて固定する力で、ねじの軸方向にかかる力である軸力で本来は管理したいが、測定が困難なため一般的には締付トルクなど代用特性で管理されており、締結の際には締め付ける回転数などで制御を行う。しかし、外力が働くことで緩みが発生し、締結力の低下や、最悪の場合ボルトが破損してしまう場合がある。ボルトの緩みのメカニズムについては数多くの戦功研究がなされている。

また、締結材、被締結材の材料に目を移してみると、一般的な自動車などでは、地球環境問題や省エネルギーに関連して、エンジンやサスペンション、ブラケット部品、ホイールなどで軽量化を求めて鋳造により成形されたアルミニウム合金が使用されることがある[1]。アルミニウムは比重が  $2.7[\text{g}/\text{cm}^3]$  で鉄や銅のおよそ  $1/3$  と非常に軽量で、また圧延や熱処理、さらにマグネシウムやマンガン、銅などと合金にすることで高強度にすることもでき、その他では錆びにくい・加工しやすい・リサイクルしやすい・安全性が高い・導電性が高い等、優れた特性をもち、様々な用途に使用されている。

ダイカスト法は熔融金属を精密な金型に高圧・高速で射出する鋳造方法で、短時間で大量生産することが可能だが[2]、実際に完成品として使用される部品でも、その鋳造での製造過程で内部に巣が出来てしまうことがあり、結果として、締結の際におねじとの接触面に鋳造巣がかかることにより、結合する力が下がってしまうことがある。

自動車の内部部品が破損することで、命に関わるような重大な事故が起きてしまうこともあるため、メーカー側としてはその経済的・社会的なリスクを低減するために、必要以上に安全性の高いねじを使用しているが、製造しやすさや組み立てやすさ、コストなどの面から、出来るだけ浅いねじを使用することが望ましい。したがって、鋳造巣によってどれだけ締結力が低下してしまうのか、調べることは非常に有用なことであるとと言える。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、上記したような、鋳造されたアルミニウム合金を被締結材としてねじにより締結した時に、鋳造巣が無い場合とある場合でおねじ面が支える力や荷重分担率にどのような違いが見られるか、また鋳造巣の大きさや位置によってどのような影響が出てくるのかを有限要素法解析ソフトウェアである ANSYS を用いて解析、検討し、今後の締結に用いるねじについて、総合的に考えてより良い規格のものを使用できるような手掛かりを求めることである。

## 1.3 本論文の構成

第 1 章では本論文の背景、目的を述べた。

第 2 章では解析条件や有限要素法モデリングの概要を述べる

第 3 章では M10 のねじについて有限要素法解析、および結果の比較・検討について述べる。

第 4 章では M6 のねじについて、同様に、鋳造巣が無い場合とある場合それぞれの有限要素法解析、および結果の比較・検討について述べる。

第 5 章では本研究のまとめを行う。

## 第 2 章 解析条件・有限要素法モデリング概要

### 2.1 緒言

本章では、まず大まかな解析条件やモデリングについての説明を行う。解析条件は実際の図面をもとに説明し、有限要素法モデリングについてはボルト側、被締結材側、ワッシャーについて説明する。

## 2.2 解析条件概要

### 2.2.1 解析条件

本研究では以下のような図面をもとに、モデリング・解析をおこなった。

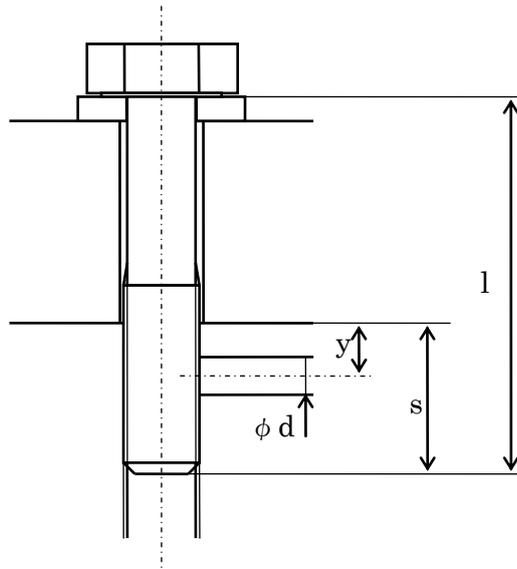


図 2-1 解析条件図面

図はボルトが被締結材に締結されている状態を表しており、ボルトと被締結材の間にはワッシャーが挟み込まれている。また、被締結材下側に鑄造巣が無いモデルと、図のような直径  $d$  の鑄造巣があるモデルの作成を行う。鑄造巣があるモデルについては鑄造巣のパラメータとして横穴位置  $y$  と横穴径  $d$  が与えられている。

今回の研究では M10, M6 のモデルを作成し、解析・検討を行っている。首下長さ  $l$ 、ねじ込み長さ  $s$  は以下のような値になっており、また前述した鑄造巣のパラメータ  $y$ ,  $d$  についてはまずは下表の値を用いており、その後その値を変化させることによる影響の検討を行う。

パラメータ条件	M6	M8	M10
首下長さ( $l$ )	30	40	50
ねじ込み長さ( $s$ )	12	16	20
横穴位置( $y$ )	4.5	5.75	7
横穴径( $d$ )	3	4	5
締付軸力(kN)	15	27	43

表 2-1 解析条件

## 2.2.2 ボルト・被締結材の材料

本研究で扱うケースでは、ボルトと被締結材側では異なる材料が用いられている。ボルト側は引っ張り強さ、降伏応力ともに高い値を持つ高張力鋼(降伏応力 940MPa, 引っ張り強さ 1040MPa)が使用されており、本研究全般に渡って塑性変形が起こらないような材料となっている。

被締結材側の材料は前述したようにアルミダイカストにより製造されたもので、以下の表のような物性をもつ ADC12 を用いる。

被締結材側材料	ADC12
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.68
ヤング率(GPa)	71.0
引張強さ(MPa)	310
0.2%耐力(MPa)	150

表 2-2 被締結材側の材料特性

## 2.3 有限要素法におけるモデリング概要

### 2.3.1 ねじ寸法の設定

本研究ではメートル並目ねじ M10(おねじ外径  $d_k = 10$ , ピッチ  $P = 1.5$ )及び M6(おねじ外径  $d_k = 6$ , ピッチ  $P = 1$ )を想定している。モデル作成に使用する寸法は JIS B 0205 に従って計算している[3][4][5]

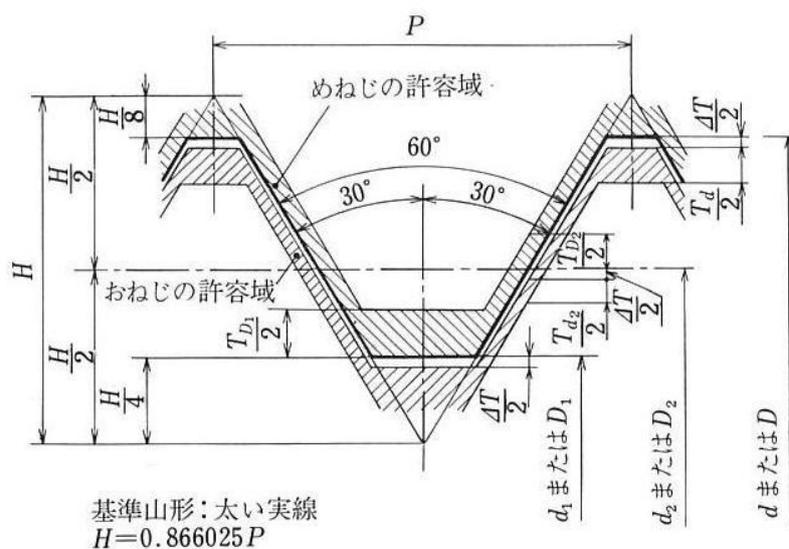


図 2-2 ねじ部詳細寸法

図中の寸法記号の値は全ておねじ外径  $d_k$ 、ピッチ  $P$  を用いて以下のように記述することが出来る。

$$\text{とがり山高さ } H = \frac{\sqrt{3}}{2} P \quad \dots(1.3-1)$$

$$\text{おねじ有効径の基準寸法 } d_2 = d_k - \frac{3\sqrt{3}}{8} P \quad \dots(1.3-2)$$

$$\text{おねじ谷の有効基準寸法 } d_1 = d_k - \frac{5\sqrt{3}}{8} P \quad \dots(1.3-3)$$

図で右肩下がりの斜線で示されているめねじの許容域、および右肩上がりの斜線で示されているおねじの許容域の寸法は

$$\text{おねじ許容域の上限と基準山形の間隙 } \Delta T = 15 + 11P \quad \dots(1.3-4)$$

$$\text{おねじ外径の公差 } T_d = 180^{2/3} - \frac{3.15}{P^{1/2}} \quad \dots(1.3-5)$$

$$\text{めねじ外径の公差 } T_{D1} = 230P^{0.7} (P \geq 1) \quad \dots(1.3-6)$$

$$\text{おねじ有効径の公差 } T_{d2} = 90P^{0.4} d_k^{0.1} \quad \dots(1.3-7)$$

$$\text{めねじ有効径の公差 } T_{D2} = 1.32T_{d2} \quad \dots(1.3-8)$$

本研究ではねじ山寸法について、おねじ、めねじともに許容域の中央の寸法とした。するとおねじ、めねじの谷底、ねじ山先端の直径は以下ようになる。

$$\text{おねじ谷底の直径} = d_k - \sqrt{3}P - \frac{T_d}{2} + \Delta T \quad (1.3-9)$$

$$\text{おねじ山先端の直径} = d_k + \frac{31\sqrt{3}}{32} P - \frac{T_d}{2} + \Delta T \quad (1.3-10)$$

$$\text{めねじ谷底の直径} = d_k + \frac{\sqrt{3}}{8} P + \frac{T_{D1}}{2} \quad (1.3-11)$$

$$\text{めねじ山先端の直径} = d_k - \frac{7\sqrt{3}}{16} P + \frac{T_{D1}}{2} \quad (1.3-12)$$

また、ねじ谷底の丸みは以下のように計算出来るが、本研究には導入していない。

$$\text{おねじ谷底丸み半径} = 0.144P$$

$$\text{めねじ谷底丸み半径} = 0.072P$$

### 2.3.2 ボルト側のモデリング

ボルトのモデリングにおいては、精度を高めるため、ねじ山とボルト軸部の形状をそれぞれ作成し、接合している。その後、要素分割を行う。おねじの形状は ANSYS のらせんボリューム作成マクロを適用する方法もあるが、ねじ山における y 方向応力を見る作業の必要性が高いこと、要素分割が容易であること、計算時間が短縮出来ることなどの理由から図のようなねじ山を一つ作成した後それを y 方向に山の数の分だけ並べていくようなモデルとした。

ねじ山形状については前述したように設定したねじ寸法に基づいてモデリングしている。

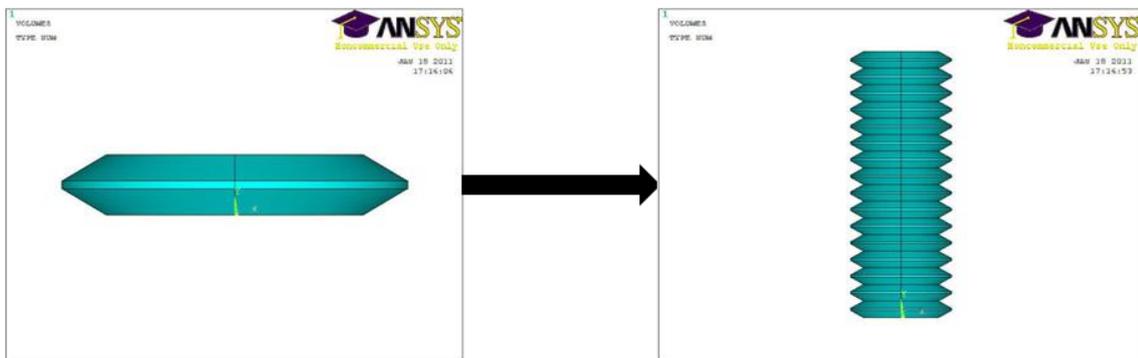


図 2-3 おねじ山の作成

次に、ねじ山の内側のボルト軸部、ねじ山の無い部分(バカ穴部分)の軸部、ボルト頭などを作成し接合する。ボルト軸部、バカ穴部分軸部、ボルト頭の部分については後に  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  の位置に接点を置くことが出来るようにあらかじめ  $90^\circ$  ずつ 4 分割して作成している。

以上の要素で解析に用いるおねじ側ボルトが構成されている。なお、製作の便宜上、ボルト頭側を下に作成している。今後全てのモデルについて同様の向きで作成している。また、ボルト部全体の寸法については前述した条件に加え、JIS の規格通りに作成している。

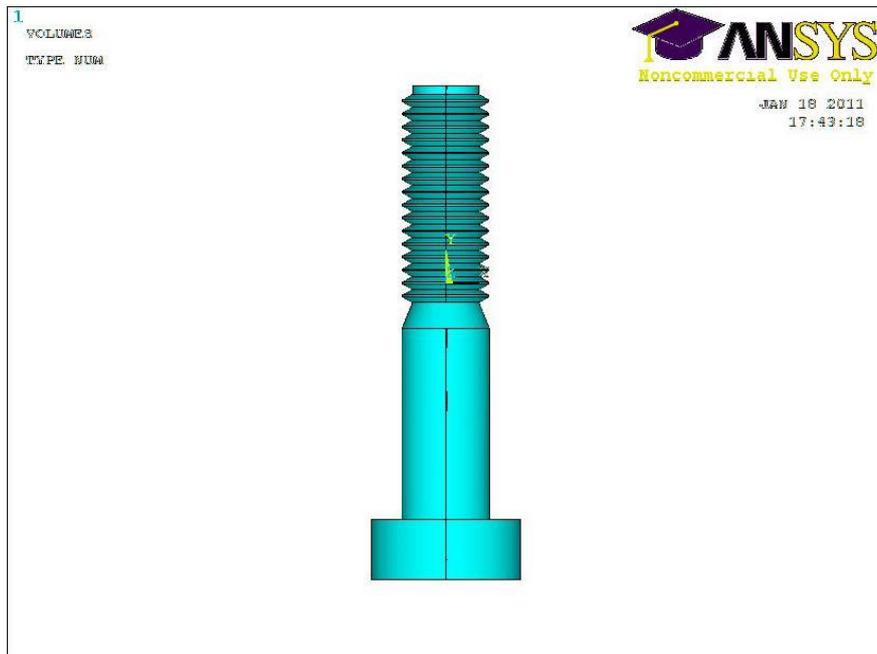


図 2-4 ボルト部完成図

以上のようなボリューム形状を作成後、`vglue` コマンドにより接合し、1つのコンポーネントとする。その後、要素分割へ移る。要素分割は解析時間などを考えて結果に影響が少ない部分については大まかな分割をしている。

### 2.3.3 被締結材側のモデリング

被締結材側もボルト同様、ねじ山とその他の部分を分けて作成し、接合する。被締結材のめねじ部分については、下図のようにボルトの谷に山が来るように位置を決め、そこからおねじ山とめねじ山が接触するように調整している。おねじ山と同様に必要な山の数の分だけ y 方向にねじ山を並べていく方法でめねじ山を作成した。

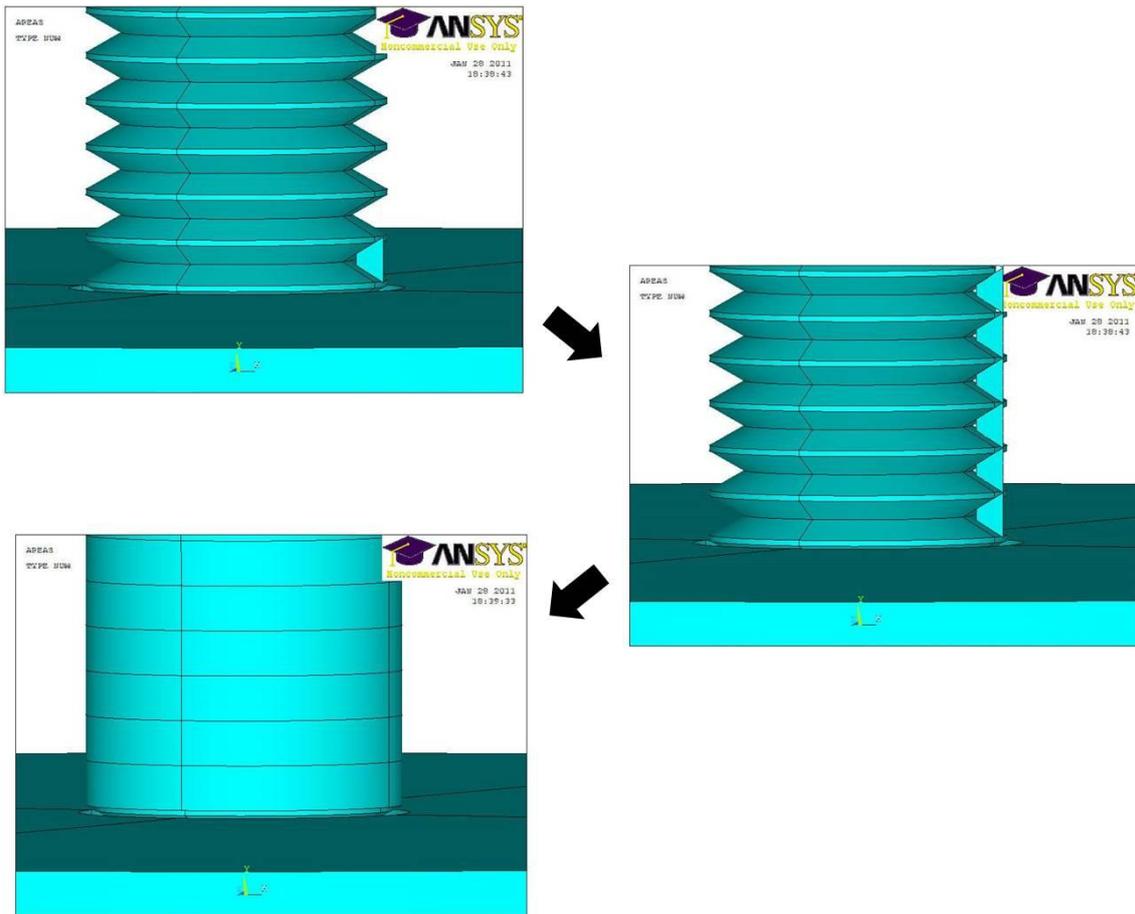


図 2-5 めねじ部作成

被締結材側は図のような被締結材下部，被締結材上部，めねじ部の接合体で，被締結材下部，被締結材上部の形状は円柱としている。

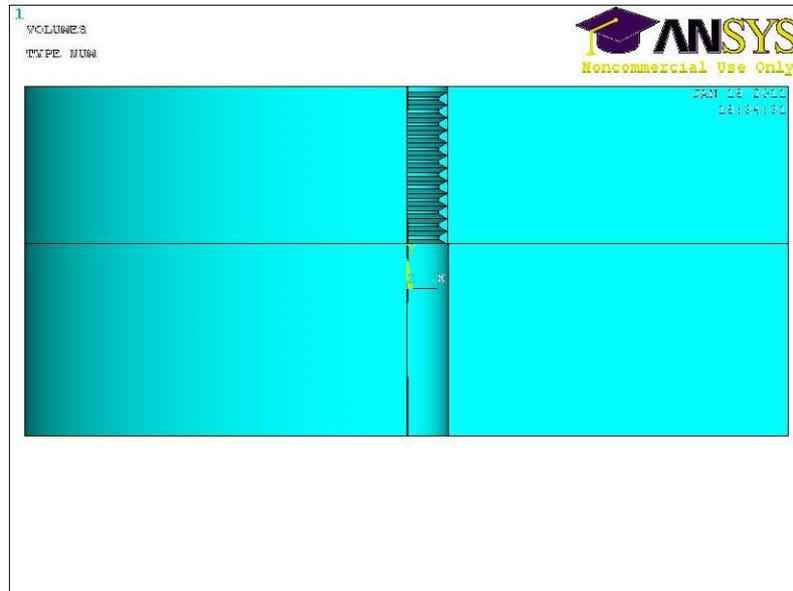


図 2-6 被締結材側完成図

被締結材側の寸法については，前述した条件(首下長さ  $l$ ，ねじ込み長さ  $s$ )に加え，被締結材下部，被締結材上部の外径をボルト外径の 5 倍であるとしている。

#### 2.3.4 鑄造巢のモデリング

鑄造巢があるモデルを作成する際には，前述した解析条件に合わせて，穴径  $d$ ，穴位置  $y$  の穴を下図のように被締結材上部およびめねじ山部にかかるように空ける．実際の鑄造巢は不均一な球のような形状であるが，今回は形状の作り易さや要素分割の都合上  $d \times d \times 2d$  の四角柱と仮定してモデル化する．

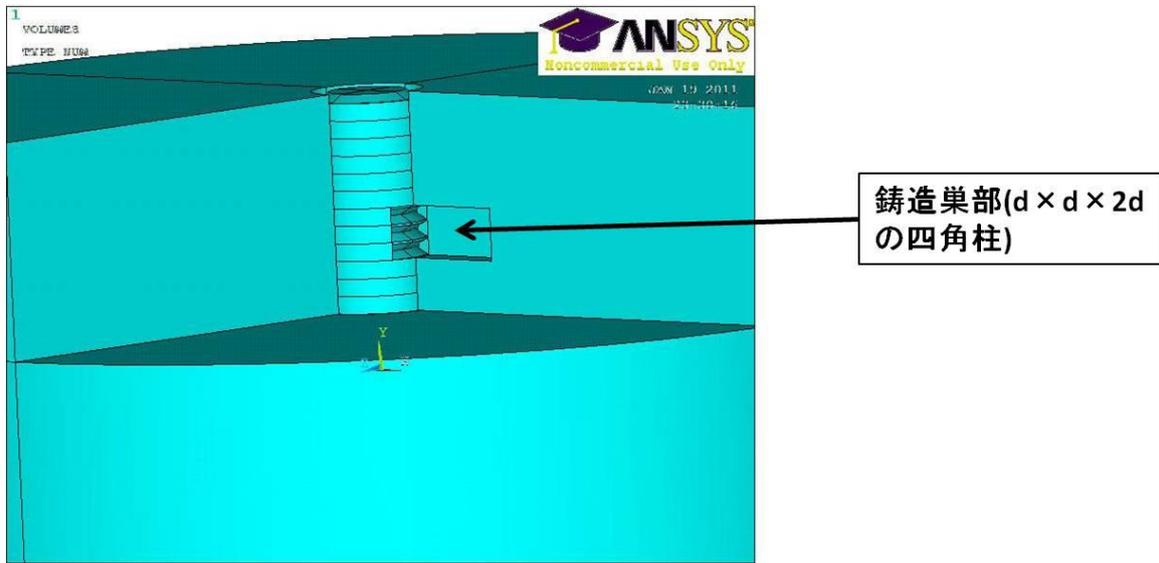


図 2-7 铸造巢の作成

### 2.3.5 ワッシャーのモデリング

ワッシャーはボルトをナットなどに締め付ける際に挟み込んで使用する穴の空いた板状の機械要素で、ボルト頭などが被締結材にめり込むことを防止するために使用されており、使用するねじによって規格化されている。今回の解析では下図のような一般的な平ワッシャーを使用する。

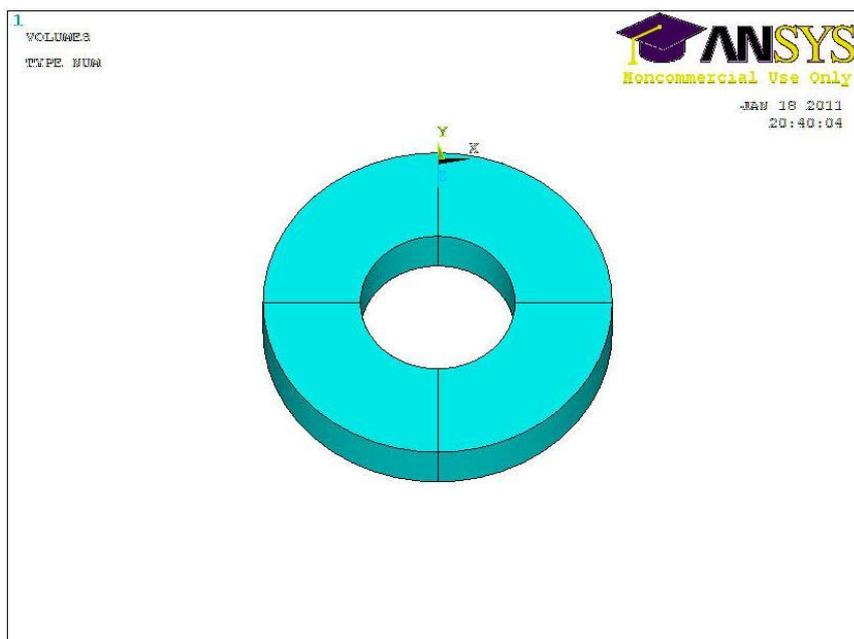


図 2-8 ワッシャー完成図

本研究ではワッシャーが非常に重要な役割を果たしている。現実では軸力はトルク法などの方法で与えるが、本研究ではワッシャーをボルト頭及び被締結材に食い込むような厚さを持たせることにより軸力を再現している。

詳細は次章以降の具体的な解析の説明部分で述べる。

### 2.3.6 接触要素の設定

本研究では接触する対になっている面に接触要素を設定する。具体的にはおねじとめねじの接している面、ワッシャーと被締結材が接している面、ワッシャーとボルト頭が接している面の3組である。以下、接触要素について説明する。

#### ・接触適合性

現実の接触物体間では、当然互いに貫通することはない。ANSYS上で貫通が回避された時、「接触適合性が満足された」という表現をする。

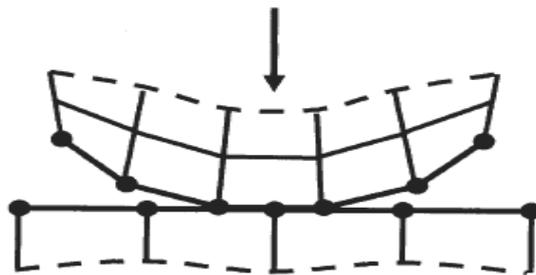


図 2-9 接触適合性

しかし、ANSYS上で何も設定しないと、現実とは異なり2材料は物理的に貫通してしまう。そこで、現実的な解析をするために、ANSYS上で貫通を防ぐような接触面の関係の構築が必要になる。

・ペナルティ法

接触のアルゴリズムとしてペナルティ法とラグランジュ乗数法が用意されているが、本研究では、アルゴリズムとしてペナルティ法を用いる。ペナルティ法は解析が収束しやすいという利点があり、最も一般的に使用されている。

$$F=kD$$

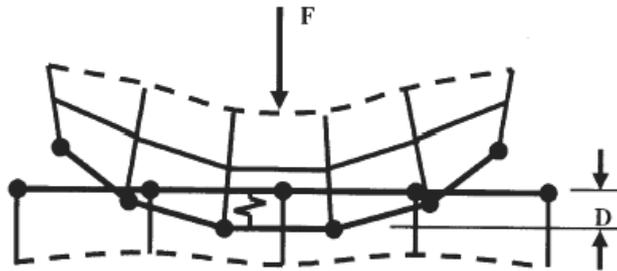


図 2-10 ペナルティ法

ペナルティ法では、界面に、仮想的にばねを配置する。理想的には、接触時にはばねに力が働き、貫通しないようにし、非接触状態ではばねには力が働かないようにする

$$F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} * X_{\text{penetration}}$$

$F_{\text{normal}}$  : 接触力

$k_{\text{normal}}$  : 接触剛性

$X_{\text{penetration}}$  : 食い込み量

という式で定義されるような、仮想ばねを界面に設置する。接触力  $F_{\text{normal}}$  は、仮想ば

ねとして設定された接触剛性  $k_{\text{normal}}$  により設定される。高い接触剛性を設定した場合は、当然食い込み量  $X_{\text{penetration}}$  の値は小さくなる。また、面同士が離れると、当然接触剛性は作用しない。

この方法で、非常に高い解析精度を得ることができる。また、理想的には無限大の接触剛性を設定することによって、食い込み量を 0 にすることが可能である。しかし、解が収束しないということが起きてしまうため、適当な接触剛性を設定する必要がある。

- ・コンタクト要素とターゲット要素

接触要素の設定の際には、コンタクト面とターゲット面を設定する必要がある。

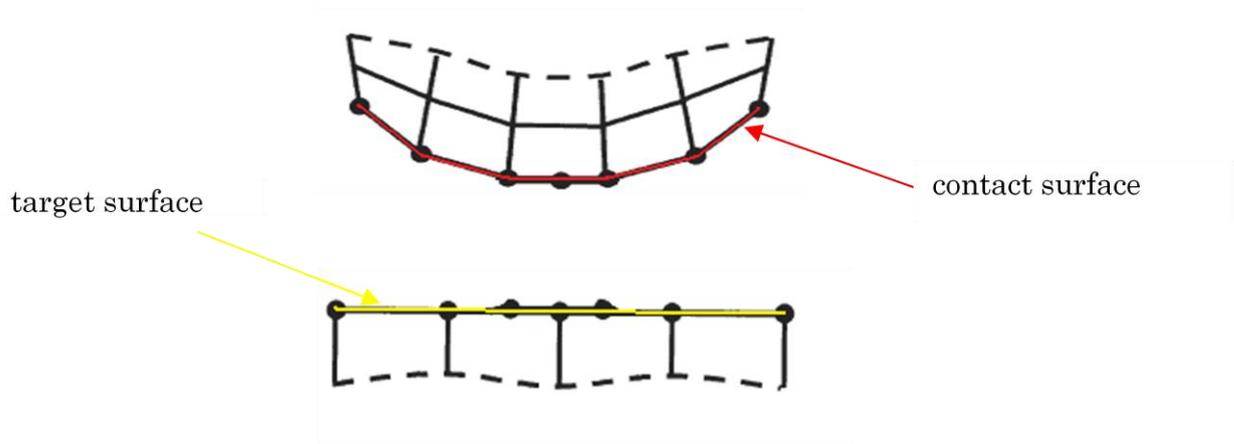


図 2-11 コンタクト面とターゲット面

コンタクト面はターゲット面への食い込みが制限されているが、ターゲット面のコンタクト面への食い込みは制限されていない。したがって、定義の際には凸な面をコンタクト面に設定する。本研究ではともに凸な面を有していないため、どちら側をコンタクト面、ターゲット面と決める必要はない。接触の要素タイプとして、ターゲット要素として **TARGE170**、コンタクト要素として **CONTA174** を使用する。通常接触する 2 面のうち一方にコンタクト要素、もう一方にターゲット要素を定義すれば十分だが、両方の面にコンタクト要素とターゲット要素の両方を定義する対称接触という手法を用いるとより高精度な結果が得られ、本研究でもその方法を採用している。

### 2.3.7 弾塑性解析

本研究の主なテーマはおねじ部の荷重分担率を見ることなので、弾性解析を行い結果から荷重分担率を求める。ボルト側の材料である高張力鋼については塑性変形の心配は無いが、被締結材側の材料である ADC12 については弾塑性解析を検討する必要がある。

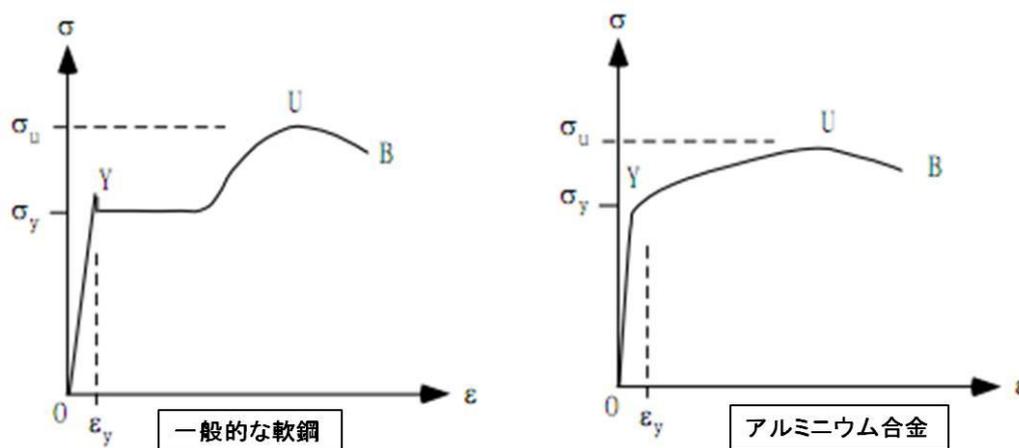


図 2-12 軟鋼とアルミニウムの応力-ひずみ曲線

図左のように、一般的な鋼に応力を加えると、降伏応力  $\sigma_y$  に達するまでは傾きがヤング率で線形に弾性変形する。この弾性域では荷重を除荷すれば元の寸法に戻る性質を持つ。その後塑性域に突入すると、下降伏点で応力一定でひずみが進行し、引っ張り強さ  $\sigma_u$  まで達すると応力は低下を始め、破断点で壊れてしまう。

対して図右のように、アルミニウム合金では明確な降伏点が存在せず、なだらかに塑性変形していく。このような性質を示す場合、除荷した時のひずみが 0.2%(0.002)になる時の応力を 0.2%耐力として定義し、降伏応力と同じような扱いで用いることが多い。その後は引っ張り強さ  $\sigma_u$  まで達すると応力は低下していき、破断点で壊れる。

ボルト側の材料は高張力鋼を使用しており、降伏応力および引っ張り強さの値が非常に大きく、全て弾性域で挙動を示すことになり、塑性変形の心配は無い。しかし、被締結材側の材料である ADC12 は 0.2%耐力が 150MPa と低く、本研究で与える軸力により被締結材にかかる応力が 0.2%耐力を超え塑性変形の影響が無視できなくなるため、弾塑性解析を行い弾性解析の場合とどのような変化が起こるかを M10 のモデルについて検証することにする。

# 第3章 M10 ボルトの有限要素法解析

## 3.1 緒言

本章では、第2章で述べた解析条件やモデリングの手法、理論を用いて M10 のボルトとそれに対応する被締結材について解析を行う。解析は鋳造巣が無い場合、鋳造巣がある場合についてそれぞれモデル化し、主に荷重分担率の傾向の比較や、パラメータを変化させた時の影響などを検討する。

また第2章で述べたような弾塑性解析について、実装し解析・検討を行う。

以下に本章の構成を示す

## 3.1 緒言

### 3.2 鋳造巣の無いモデル

#### 3.2.1 解析条件

#### 3.2.2 解析

#### 3.2.3 解析結果

#### 3.2.4 軸力の合わせ込み

#### 3.2.5 荷重分担率

#### 3.2.6 設定軸力での解析結果

#### 3.2.7 妥当性計算

### 3.3 鋳造巣のあるモデル

#### 3.3.1 解析条件

#### 3.3.2 解析結果

### 3.4 鋳造巣の有無による比較

### 3.5 パラメータの違いによる比較

#### 3.5.1 穴径 $d$ について

#### 3.5.2 穴位置 $y$ について

## 3.6 結言

### 3.2 鋳造巢の無いモデル

第2章で述べた手法の通り M10 のボルトと、それに対応する被締結材，ワッシャーを作成・弾性解析する。

#### 3.2.1 解析条件

・寸法

以下に M10 のモデル全体の寸法図と，図中のパラメータ，またその他使用する寸法を示す。

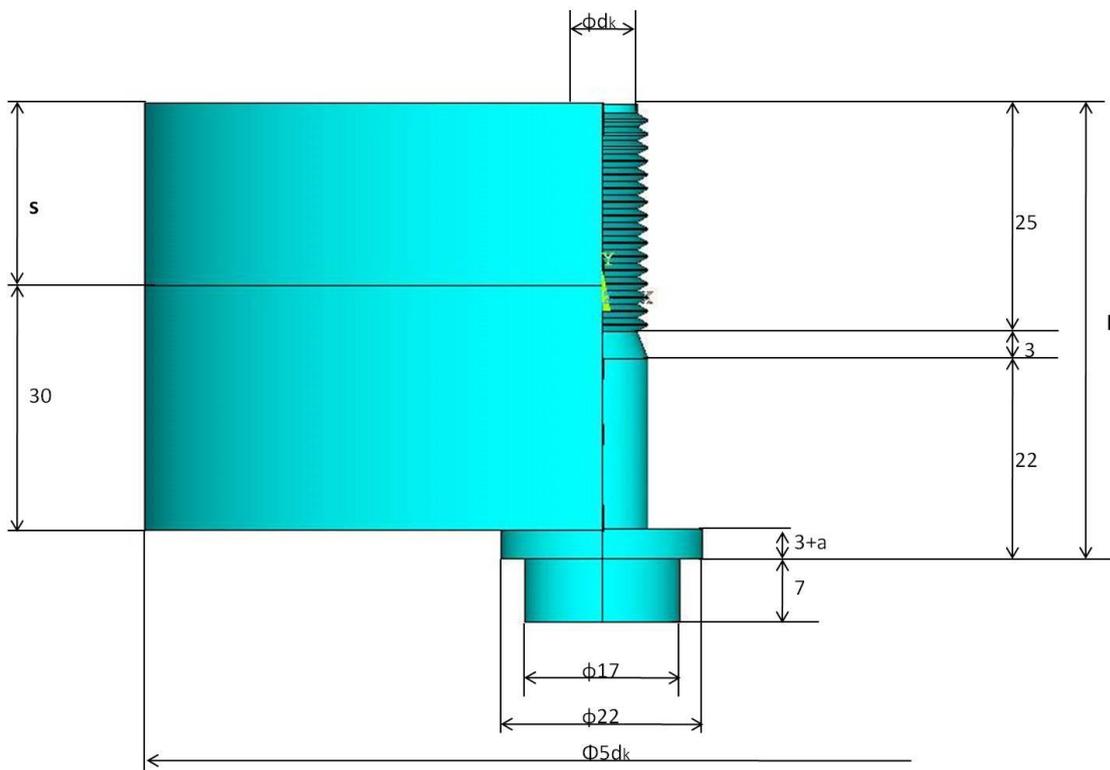


図 3-1 M10 寸法図

寸法	M10
ボルト径( $d_k$ )	10
首下長さ( $l$ )	50
ねじ込み長さ( $s$ )	20
ピッチ( $P$ )	1.5
締付軸力[kN]	43

表 3-1 M10 寸法表

おねじ山，めねじ山については第 2 章で述べたように，おねじ径  $d_k$  とピッチ  $P$  の値を用いてとがり山高さや有効径の基準寸法などの値を用いて，ねじ山のモデリングに組み込んでいる。

・材料特性

以下の数値を解析に組み込んだ。おねじ側は高張力鋼，被締結材側は ADC12 を使用している。

材料特性	ヤング率(GPa)	ポアソン比	材料間の摩擦係数
おねじ側・ワッシャー	205	0.3	0.15
めねじ側	71	0.33	

表 3-2 ボルト・被締結材の材料特性

なお，主に結果として応力などに重きを置いているため，弾性解析を行っており，降伏応力(0.2%耐力)や引っ張り強さなどの値は組み込む必要が無い。それらの値を導入した弾塑性解析については，塑性変形の影響の検討として後述する。

・要素分割

第 2 章で述べたような方法で，モデル化したボルト，被締結材，ワッシャーについて要素分割を行う。前述したとおり，結果として値を細かく抽出したい部分については精細な要素分割を行う。

・接触要素

第 2 章で述べたように，おねじとめねじの接している面，ワッシャーと被締結材が接している面，ワッシャーとボルト頭が接している面の 3 組について対称接触法を用いて接触要素を設定した。

以上が ANSYS 内の総合プリプロセッサ(PREP7)段階で，解析を行う準備が完了したことになる。

### 3.2.2 解析

モデル化，要素分割，接触要素の設定が終了したので，解析に移る．ANSYS 上ではソリューションプロセッサ(/SOLU)段階に入ることになる．

#### ・荷重定義

ANSYS では荷重や変位制御によって，例えばある指定面のある指定方向にある値の荷重をかけるような方法でモデルに力を加えて解析を行うが，本研究ではワッシャーにボルト頭および被締結材に食い込むような食い込み量  $a[\text{mm}]$  を設定することにより軸力を与える．食い込みはボルト頭と被締結材にそれぞれ  $a/2$  ずつ，計  $a$  食い込むように定義している．この方法では荷重や変位制御により力を加える方法に比べて計算時間が短時間で済むこと，軸力の値を予想しやすいことなどの利点がある．

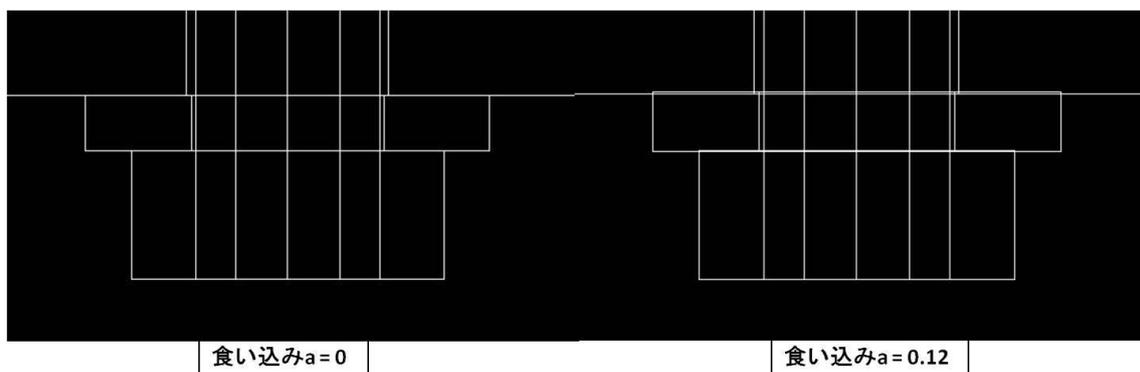


図 3-2 食い込みの有無の図

#### ・拘束定義

今回は被締結材の外周の面全体に全方向拘束を行った．

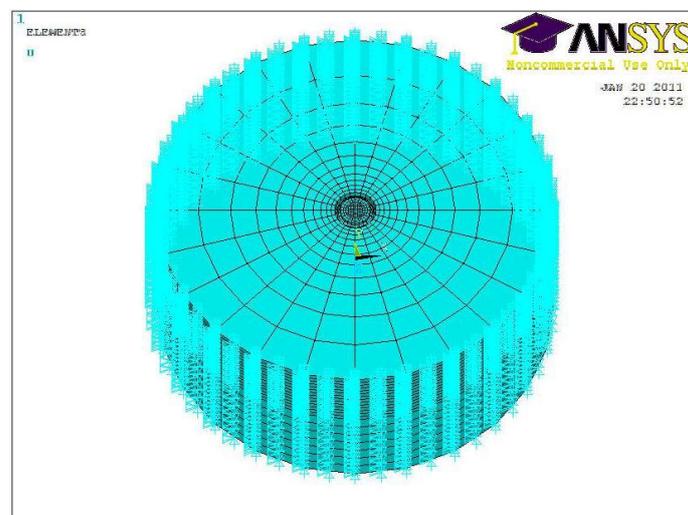


図 3-3 拘束定義

- ・解析開始

solve コマンドで解析を開始する.

### 3.2.3 解析結果

1 例として  $a = 0.05$  と設定した時の解析結果を示す. 図はボルト部の y 方向応力を表すコンター図である.

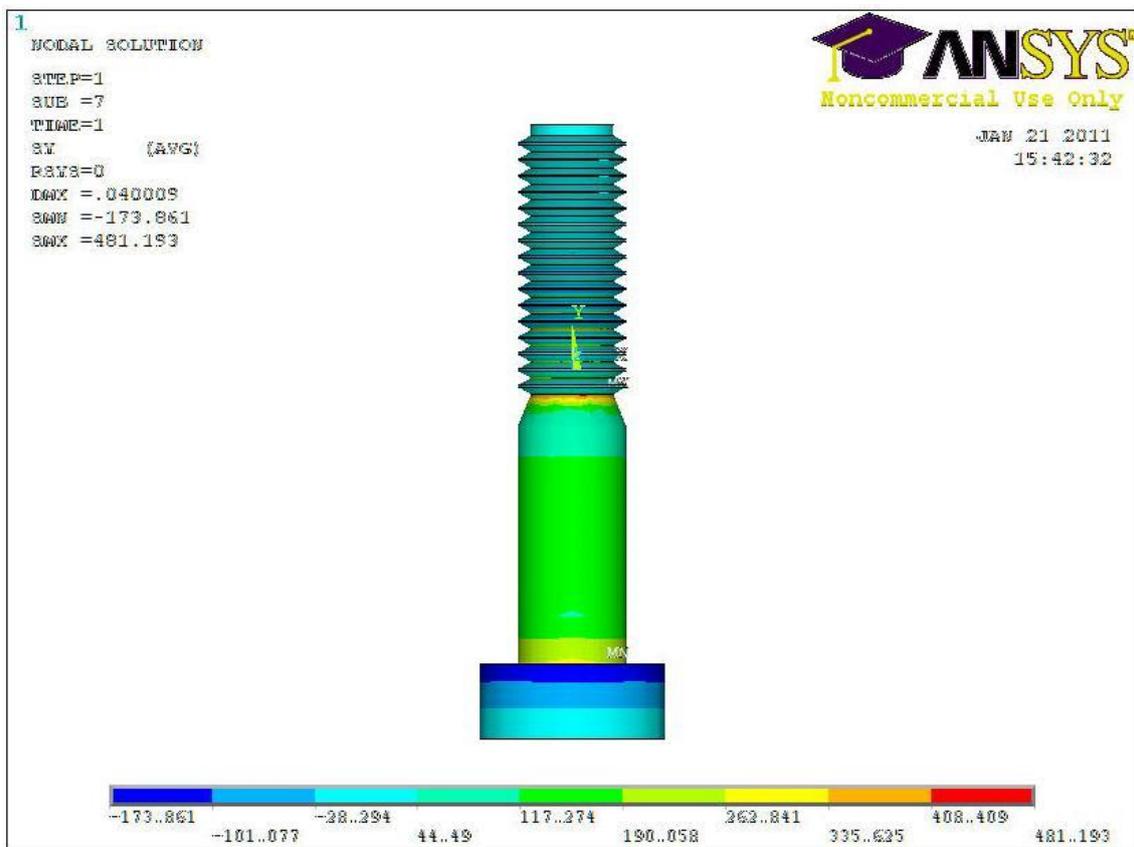


図 3-4 解析結果( $a=0.05$ )

軸力の合わせ込みを行うために, 軸力を読み取る. 軸力は実際の測定法と合わせてボルト軸部の最も値が平均的となっている部分の, 最も外側の値を見る(本来軸力は軸の中心部を採用する方が望ましいが, 中央部の値を直接測定する方法が無いので, 計測装置の取り付け可能位置に合わせる). 図の色分けでは軸部の応力の値が読み取りづらいので, コンター幅を絞った図を示す.

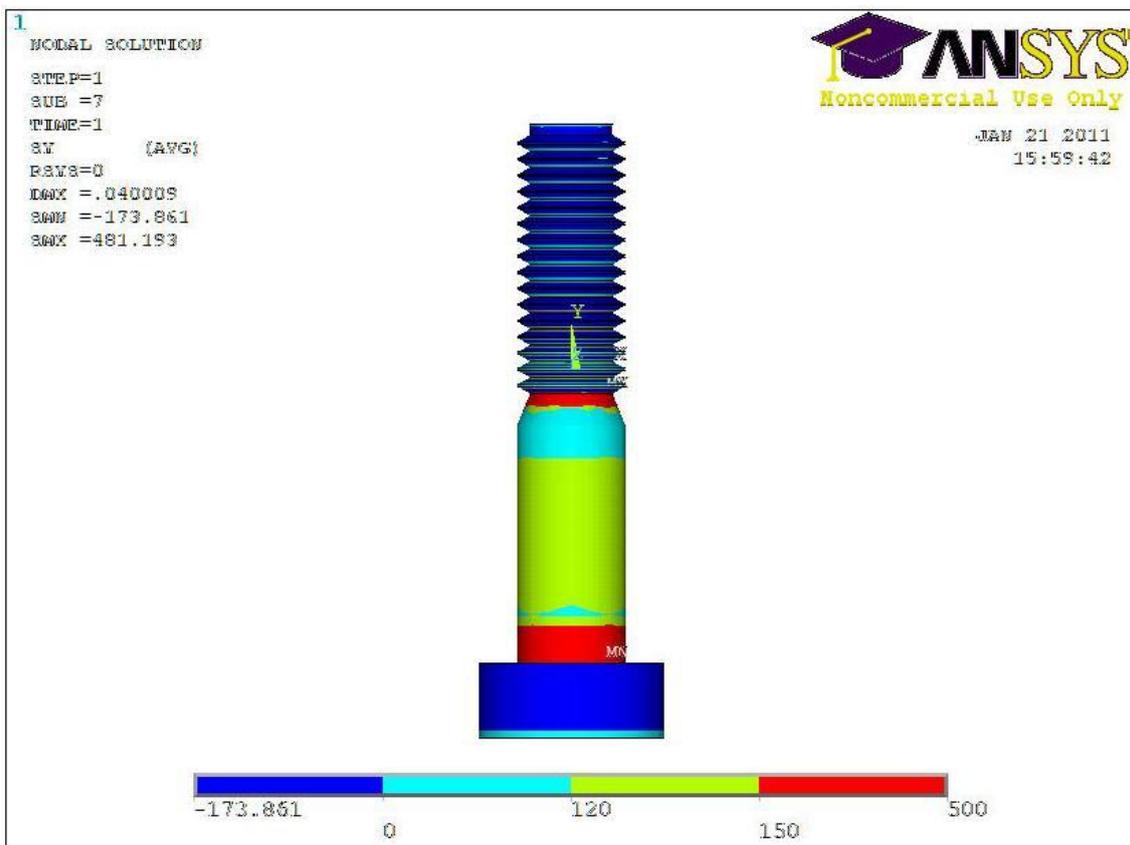


図 3-5 コンター幅変更図

上図のようにコンター幅を決定すると、軸部の大部分が 120 ~ 150MPa の間の値になっていることが分かる。今後、図の黄緑色部の中間地点となる部分( $y = -10 \sim -12$ )における最小値を、その食い込み量の時の軸力とする。

つまり,

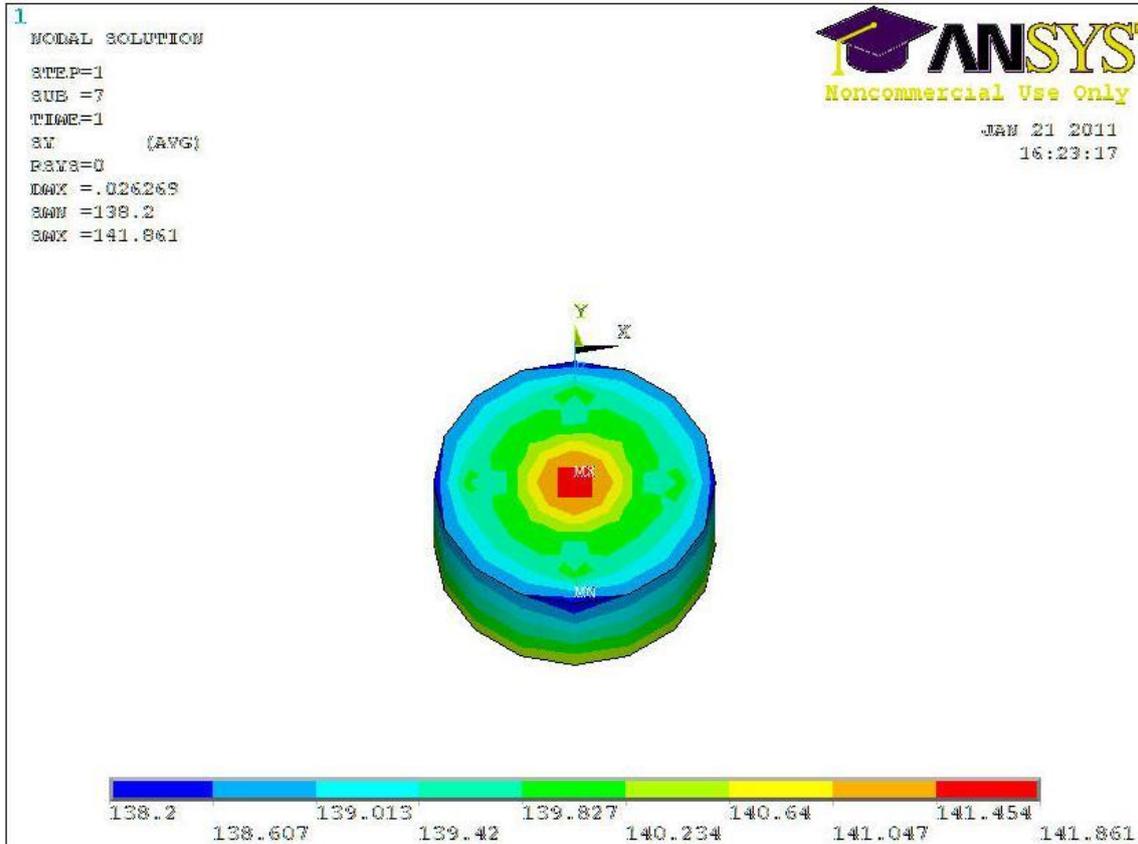


図 3-6 軸力読み取り(a=0.05)

図から読み取れる最小値 138.2MPa を、食い込み量  $a = 0.05$  の時の軸力とする.

### 3.2.4 軸力の合わせ込み

3.2.1 の解析条件に記したように、M10 のモデルの時の指定された締付軸力の値は 43kN であり、a の値を調節することで指定された軸力を満たすようにする。ANSYS の出力結果は MPa 単位であるので、43kN が何 MPa であるか計算する必要がある。単位間の相関関係は、

$$(\text{kN 単位の軸力}) [\text{kN}] \times 1000 \div (\text{ボルト軸部の断面積 } A) [\text{mm}^2] = (\text{MPa 単位の軸力}) [\text{MPa}]$$

であるので、

$$(\text{kN 単位の軸力}) = 43$$

ボルト軸部の断面積  $A = (d_k/2)^2 \pi$  を代入すると

$$\begin{aligned} (\text{MPa 単位の軸力}) &= 43 \times 1000 \div 25\pi \\ &\approx 554 [\text{MPa}] \end{aligned}$$

となる。食い込み量 a を大きくすると軸力の値も当然大きくなる。

a = 0.12 としたとき、

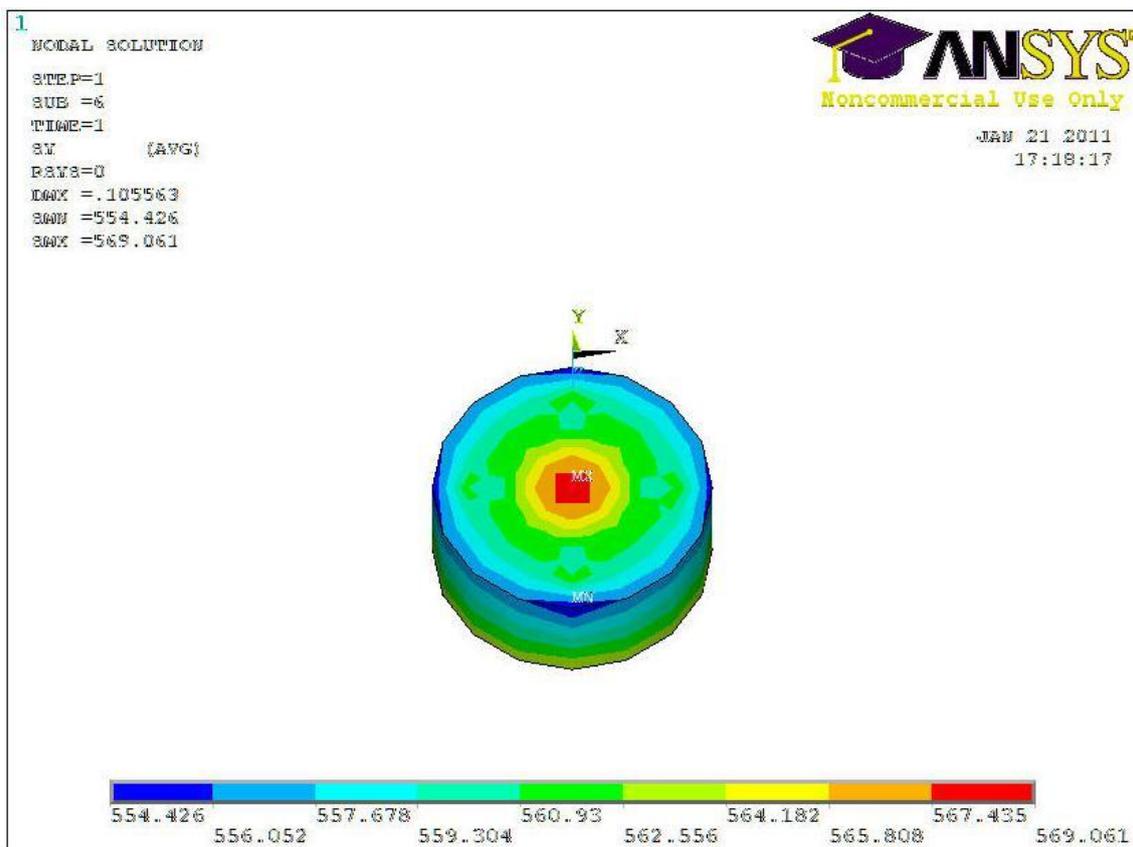


図 3-7 軸力読み取り(a=0.12)

図から読み取れる最小値 554.426MPa となり，指定された軸力 43kN を MPa 単位に変換した時の値 554MPa とほぼ一致する．軸力の合わせ込みが出来たので，以降の解析は全て食い込み量  $a = 0.12$  で進めていく．

### 3.2.5 荷重分担率

本研究で非常に重要になってくるのが「荷重分担率」という概念である．ボルトを締結する時，ボルトに発生する締結力は接触しているねじ山で負担されるが，一般に，ナット座面に近いねじ山ほど大きな荷重を負担することが知られている[6][7]．荷重分担率はねじ設計や締結力制御の観点から非常に重要で，本論文ではおねじ部分における製造巣の有無による荷重分担率への影響を調べるのが議題の一つとなっている．

単純なボルト，ナット締結体について考えると，ねじ山の荷重分担率は，ボルト(添え字  $b$ )，ナット(添え字  $n$ )の剛性  $k$  を用いて求めることが出来る．ナット高さ  $L$  のナットにおいて，座面から第  $n$  ピッチまでのねじ山荷重分担率  $F/F_b$  は次式のように表すことができる．

$$\frac{F}{F_b} = \frac{\sinh(\lambda n P)}{\sinh(\lambda L)} \dots (1)$$

ただし，

$$\lambda = \sqrt{\frac{\frac{1}{A_b E_b} + \frac{1}{A_n E_n}}{\left(\frac{k_b}{E_b} + \frac{k_n}{E_n}\right) \tan \beta}}$$

ここで， $A$ ， $E$  はそれぞれ軸直角断面積，ヤング率で， $\beta$  はリード角である．式(1)では平面変形問題として扱っていること，被締結物を剛対としていること，ナットからボルトの突き出しを考慮していないことなどの仮定が含まれている．

本研究での検討では、おねじ山の、めねじ山と接している(接触要素を設定した)面の、それぞれの山について面上の点を取り、その点における y 方向応力の値の平均をその山の y 方向応力の値として、荷重分担率を導出する。ねじ山番号は図のようにボルト頭側から 1 山, 2 山, …, 12 山とする。

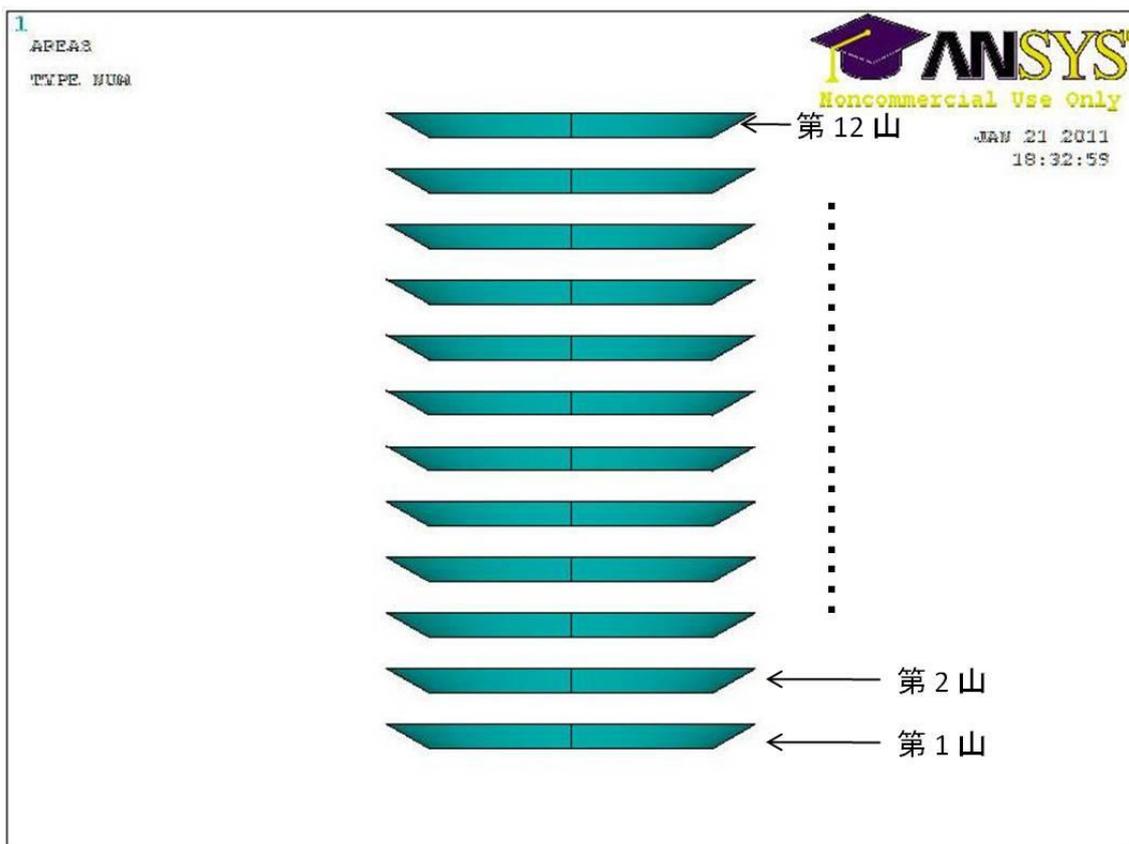


図 3-8 おねじ山面

### 3.2.6 設定軸力での解析結果

3.2.4 で述べた食い込み量  $a = 0.12$  の解析結果よりまとめた各ねじ山での y 方向応力及び荷重分担率のグラフを下に示す。

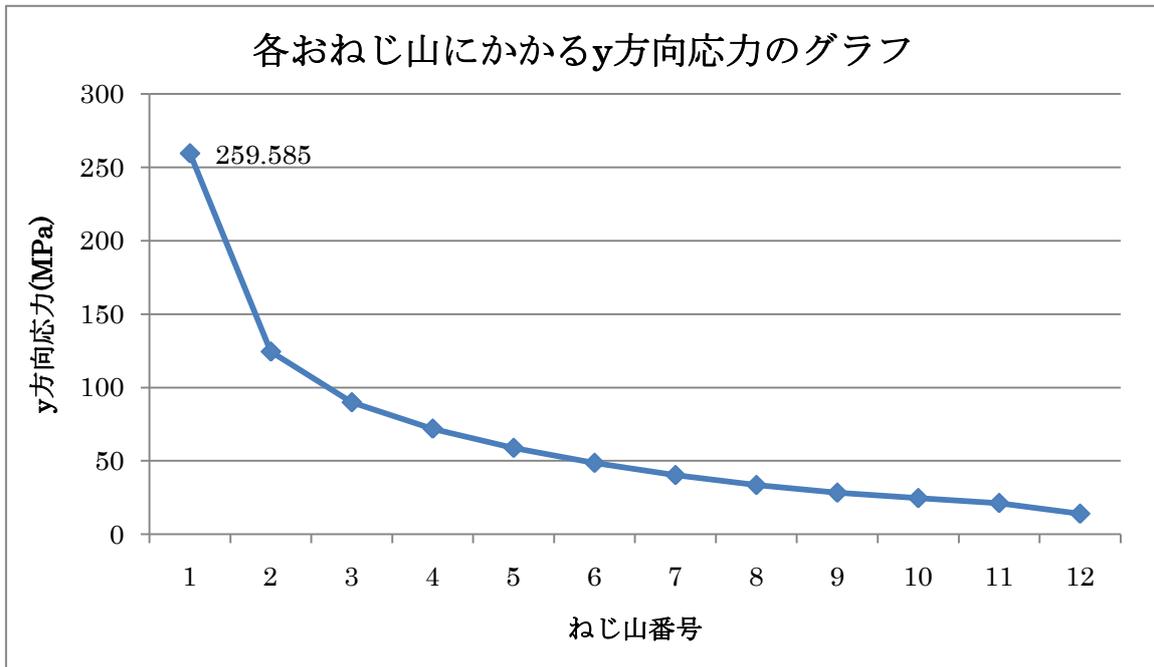


図 3-9 おねじ山にかかる y 方向応力

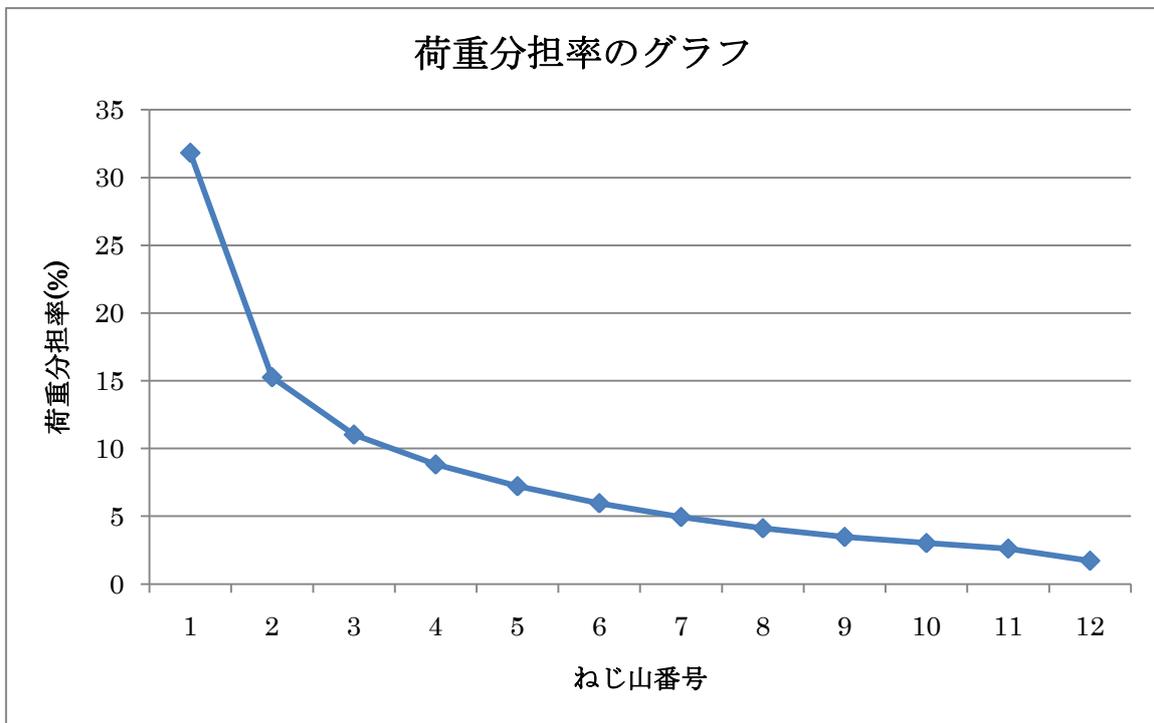


図 3-10 おねじ山の荷重分担率

結果を見て分かる通り，第一山が全体の 30%程度支えており，これはねじ山の荷重分担率に関する先行研究の結果と一致する．またおねじで現実的に起こる破壊の多くが第一山で起こっており，それを裏付ける結果となった．

### 3.2.7 妥当性計算

- ・荷重分担率の理論との照らし合わせ

3.2.5 で述べたように，先行研究として荷重分担率についての理論が用意されている本研究で用いる値を代入した理論値により描いたものと，解析結果によって描いた荷重分担率の比較のグラフを示す

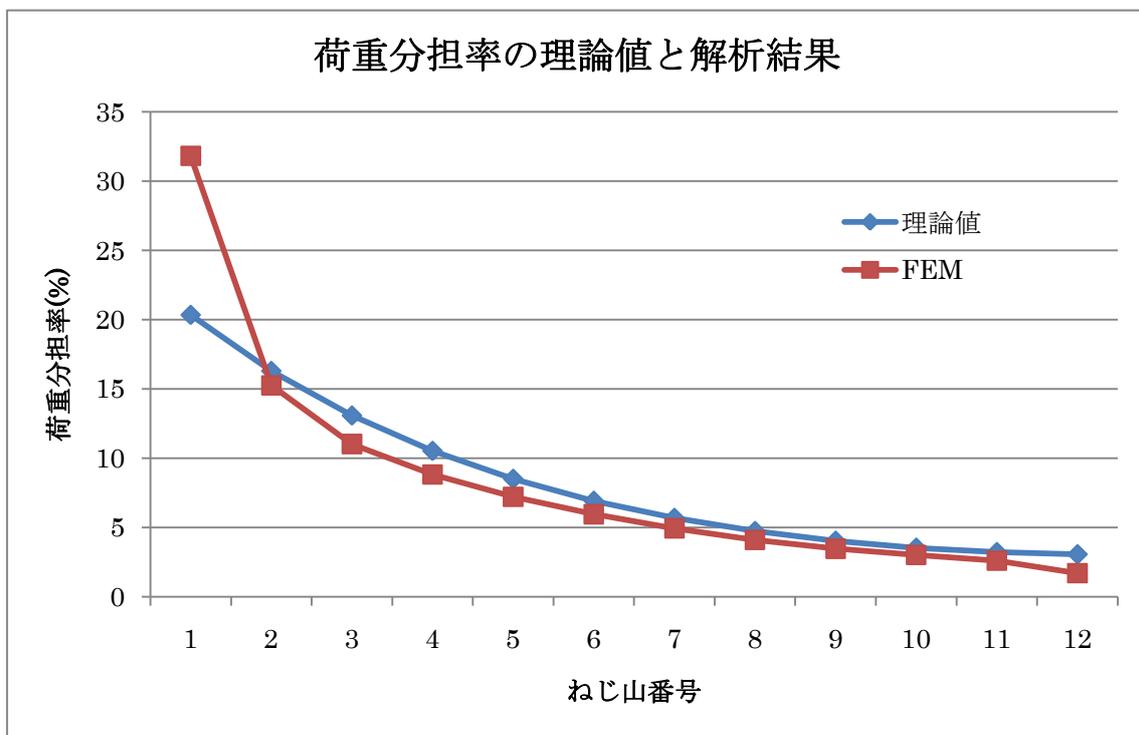


図 3-11 理論値と解析結果の比較

グラフを見て分かる通り，理論値に比べて解析結果の第一山は飛びぬけて高いことが読み取れる．この差は，理論が単純なボルト・ナットの組み合わせかつねじ山が多くない場合について考察したものであり，本研究で取り扱うモデルとは前提条件が異なるために生じたものであると考えられる．

・軸力と、おねじ山の y 方向応力の関係

与えた軸力がおねじ山で分担されているので、軸力の値と、おねじ山 12 山が支えている力と面積の積の値の合計は近い値になるはずである。前述した通り、かかっている軸力は軸部で観察した値が 554MPa(≒43kN)であった。この値と、ねじ山全体が支えている値を比較する。以下にその結果を示す。

和(MPa)	一山当たりの側面積(mm <sup>2</sup> )	12 山の積(kN)	軸力(kN)
815.4827	52.45	42.77207	43

表 3-3 妥当性検討

結果として非常に近い値が求められ、与えた軸力が計算上失われることなくねじ山で分担されていることが確認でき、この点で解析が妥当であることが確認できた。

### 3.3 鋳造巣のあるモデル

#### 3.3.1 解析条件

- ・寸法

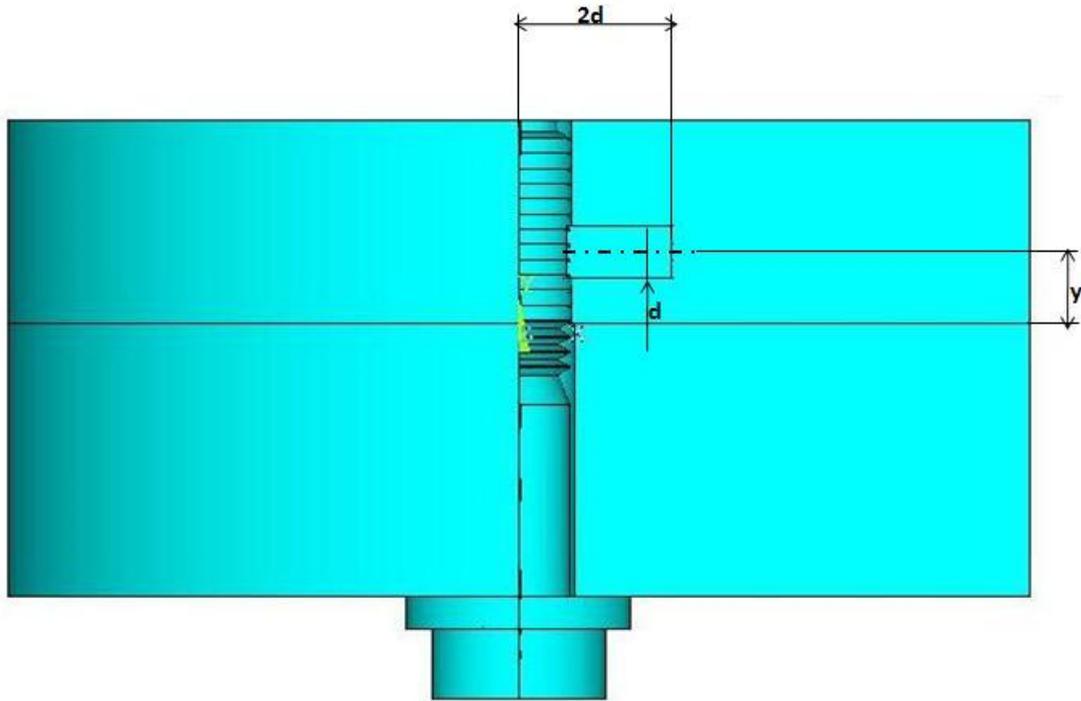


図 3-12 M10 寸法図(鋳造巣あり)

寸法	M10
鋳造巣位置(y)	7
鋳造巣径(d)	5

表 3-4 鋳造巣寸法表

鋳造巣として  $d \times d \times 2d$  の四角柱をモデル化し、3.2.1 で示した図から穴をあけた形状をしている。  $y = 7$  の場合は 4, 5, 6 山目に巣がかかっている。

また、同様に食い込み量  $a = 0.12$  で解析を行う。

### 3.3.2 解析結果

$d = 5$ ,  $y = 7$ ,  $a = 0.12$  とした場合の解析結果から計算した、おねじ山での荷重分担率の結果を示す.

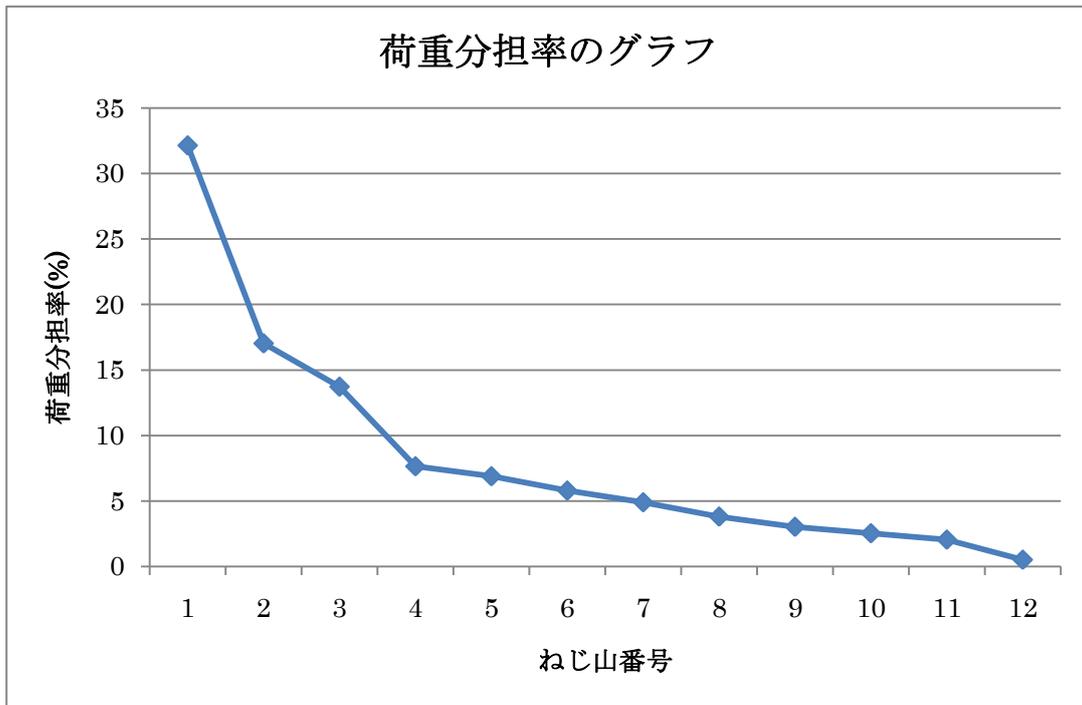


図 3-13 荷重分担率( $a=0.12$ ,  $d=5$ ,  $y=7$ )

鑄造巣が無いモデルと同様に第一山の分担率が高いことがグラフからわかる. 鑄造巣が無い場合との詳しい比較は後述する.

### 3.4 鑄造巣の有無による比較

本項目では荷重分担率について, 3.2 で解析を行った鑄造巣が無いモデルと, 3.3 で解析を行った鑄造巣があるモデルの結果の比較を行う.

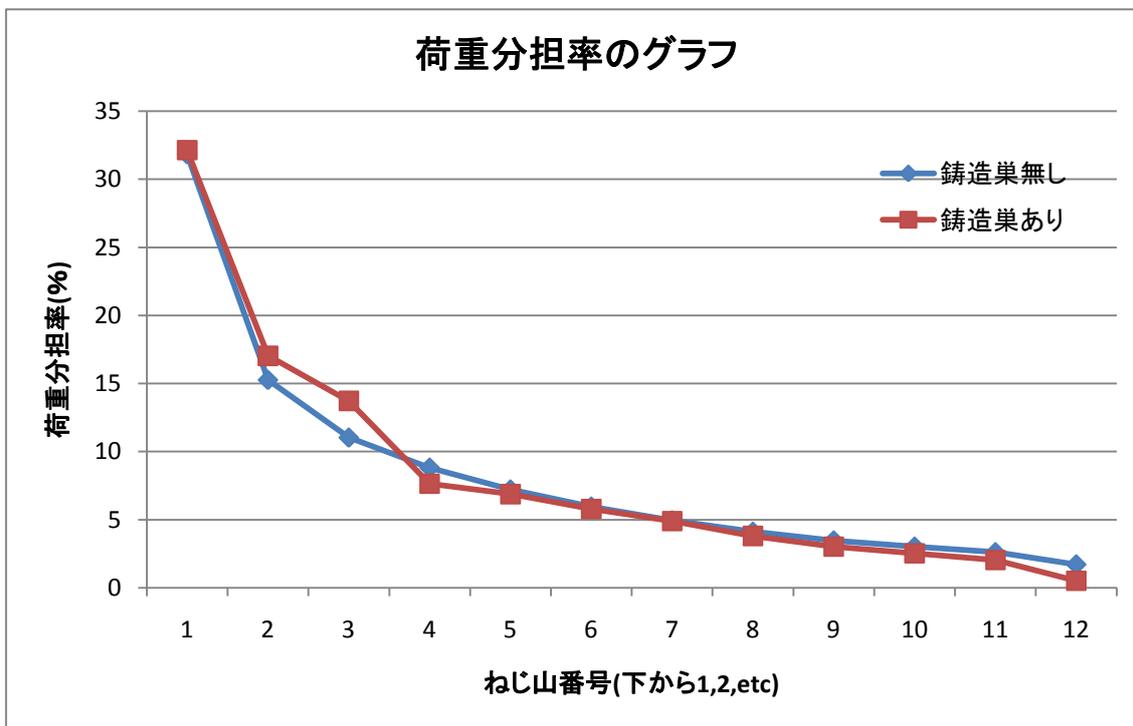


図 3-14 鑄造巢の有無による荷重分担率の比較のグラフ

前述した通り、鑄造巢の有無に関わらず第一山の荷重分担率が飛び抜けて大きい(ともに約 32%)ことが読み取れる。また、鑄造巢の有無で違いがはっきりと出ているのは 2 山目から 3 山目の部分で、鑄造巢がある場合の方が 2, 3 山目の負担が大きくなっており、グラフ全体でボルト頭に近い部分のほうの分担率がより高くなっている。

また鑄造巢がかかる 4~6 山目の分担率が若干ではあるが低くなっていることも読み取れ、その分を 2, 3 山目が負担していると考えられる。

### 3.5 パラメータの違いによる比較

3.4 までの鑄造巢は与えられた条件穴径  $d = 5$ , 穴位置  $y = 7$  でおこなったが、当然  $d$ ,  $y$  の値によって荷重分担率の傾向に違いが現れると考えられる。以降、穴径  $d$ , 穴位置  $y$  それぞれについて値を変化させた結果を比較・検討する。

### 3.5.1 穴径 $d$ について

以下に鑄造巣径  $d = 1.5$ ,  $d = 3$ ,  $d = 5$ ,  $d = 7$  の場合の荷重分担率のグラフを示す.

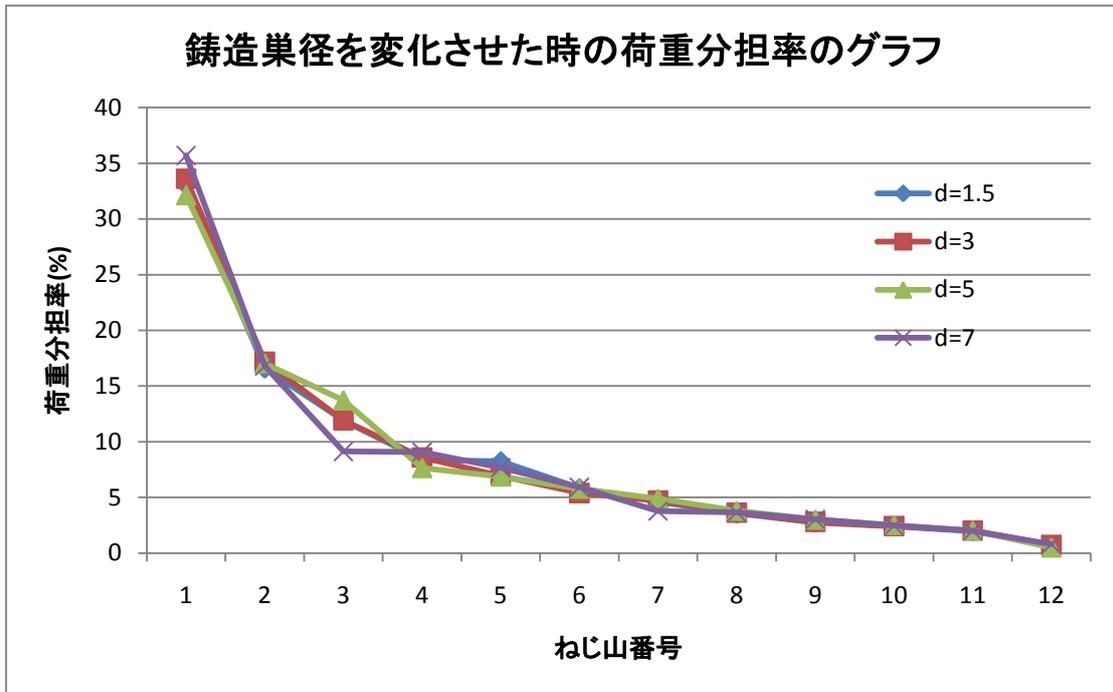


図 3-15 鑄造巣径を変化させた時の荷重分担率の比較のグラフ

いずれも第一山の分担率がやはり飛びぬけて大きいことが読み取れ、鑄造巣が大きいほど第一山の分担率が大きくなっていることがわかる。また 6 山目以降、先端に近づくと値にばらつきがなく、パラメータの影響を受けにくいとわかる。

### 3.5.2 穴位置 $y$ について

以下に  $y = 4$ ,  $7$ ,  $10$  の場合の荷重分担率のグラフおよびその一部分(1~5 山目)を拡大したものを示す。  $y$  は  $P = 1.5$  であるので、2 ピッチずつ指定条件からずれるように作成している。穴径は全て  $d = 5$  のままである。

$y = 4$  は第 2 山~第 4 山,  $y = 7$  は第 4 山~第 6 山,  $y = 10$  は第 6 山~第 8 山の部分に鑄造巣がかかっている。

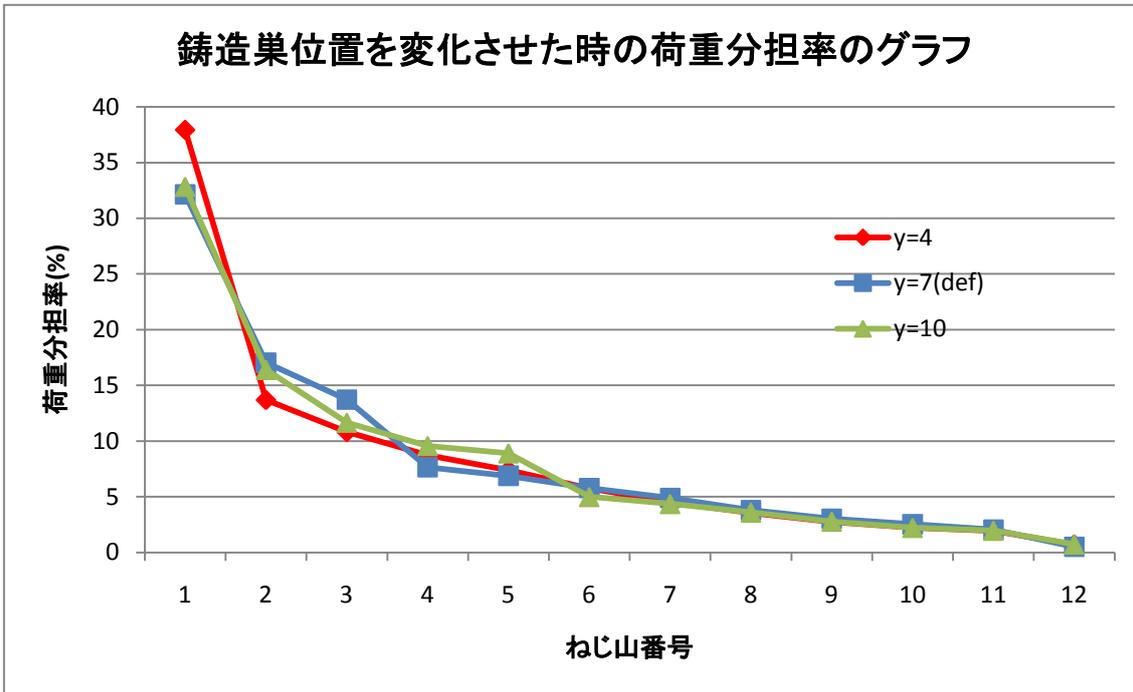


図 3-16 鋳造巣位置を変化させた時の荷重分担率の比較のグラフ

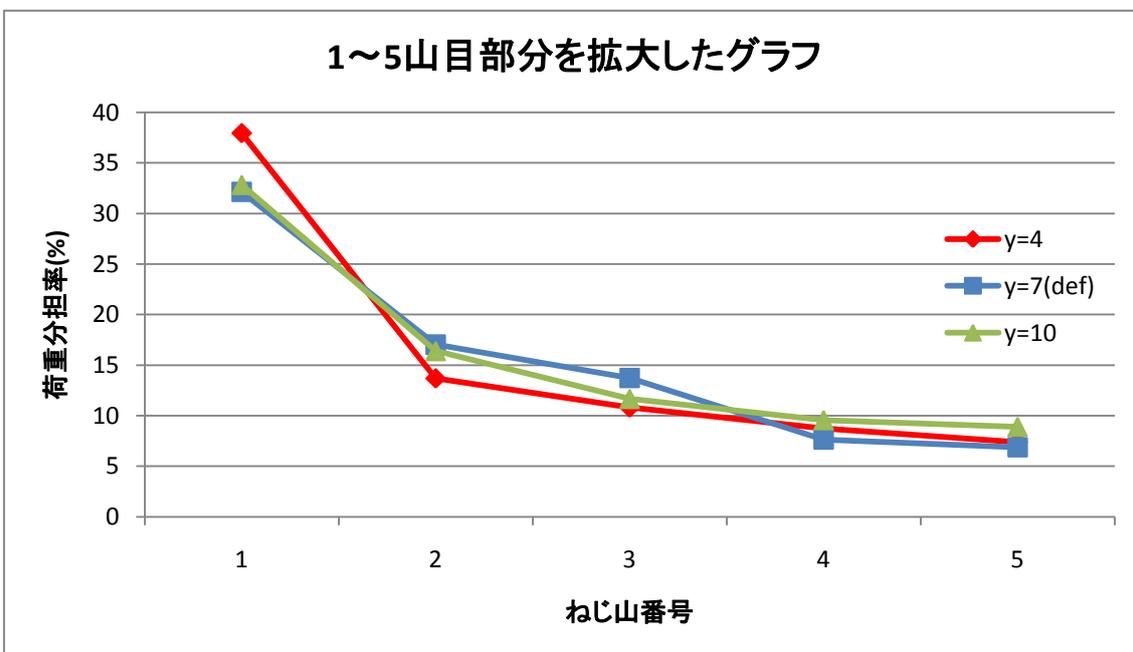


図 3-17 図 3-15 の拡大グラフ(1~5 山)

上グラフから、やはり 6 山目以降は穴位置に関係なく分担率が推移していることが分かる。特徴的なのが 1~5 山目の部分で、その部分を拡大しているのが下グラフである。前述した通り  $y = 4$  は 2~4 山目、 $y = 7$  は 4~6 山目、 $y = 10$  は 6~8 山目に巣がかかっており、グラフを見るとかかる直前の山( $y = 4$  では第 1 山、 $y = 7$  では第 3 山、 $y = 10$  では第 5 山)の分担率が他と比べて大きくなっていることが分かる。

また、以下に特殊な例として第一山に铸造巣がかかってしまうようなモデル( $y = 2.5$ )と  $y = 7$  の場合の荷重分担率を比較したグラフを示す。 $y = 2.5$  の場合は铸造巣が 1~3 山目にかかっている。

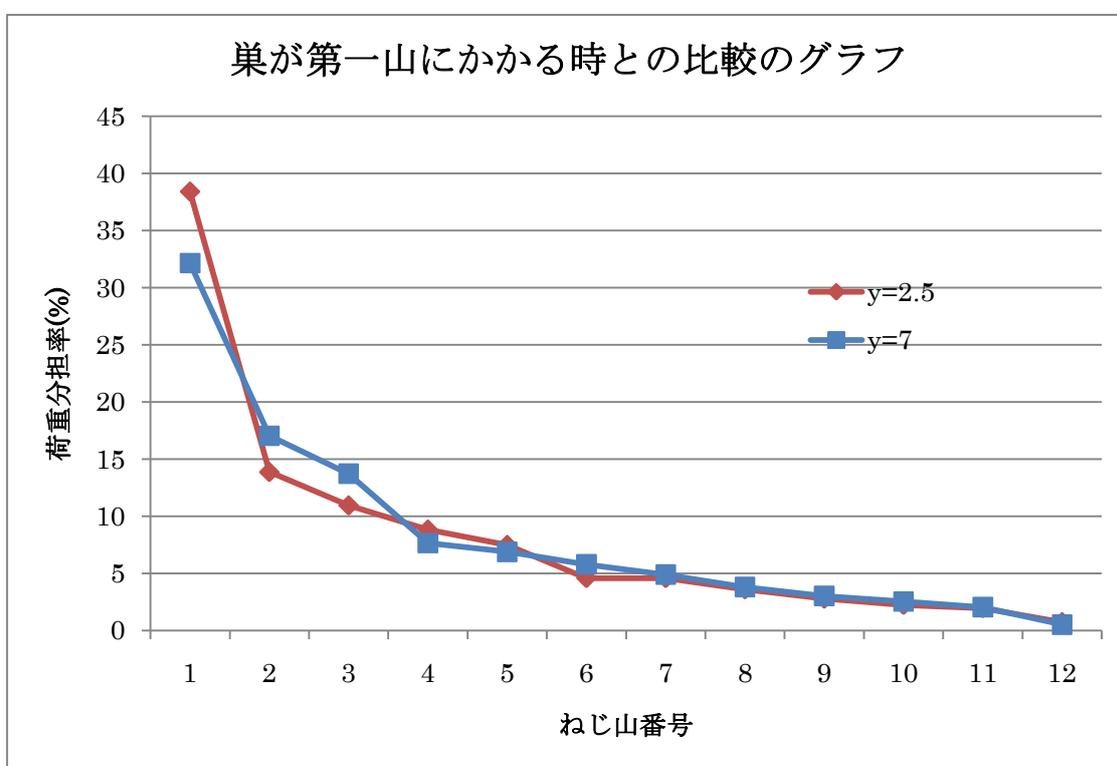


図 3-18 铸造巣が第一山にかかる場合の荷重分担率のグラフ

グラフを見ると、巣が第一山にかかっているモデルの第一山での荷重分担率が 38% を超え、非常に大きくなっていることが分かる。つまり、第一山における破壊が起きる可能性が高くなっていることが読み取れる。

全グラフを総合すると、铸造巣位置がボルト頭側に近ければ近いほど第一山およびねじ山番号の小さいねじ山の荷重分担率が大きくなり、ねじ山の破壊につながるといえる。

### 3.6 結言

本章では M10 のボルトおよびそれに対応する被締結体，ワッシャーについて鑄造巣が無い場合とある場合についてそれぞれモデリングし，軸力を与える形で有限要素法解析を行い，その結果を主に荷重分担率について検討してきた．以下にその結果をまとめる．

- ・ 鑄造巣の有無に関わらず，おねじ山の第一山の荷重分担率が飛びぬけて大きい(約 30%)ことが読み取れ，現実におねじの第一山部分がへたり，壊れることが多いということ解析により裏付けることが出来た．

- ・ 鑄造巣がある場合，その位置や径の大きさに関わらず，第 6 山以降先端にかけて，荷重分担率の傾向は変わらず推移する．

- ・ 鑄造巣径  $d$  を変化させると，径が大きいほど第一山の荷重分担率が大きくなり壊れやすいことがわかった

- ・ 位置  $y$  については，鑄造巣がかかっている直前の山の分担率が増加するという傾向が読み取れる．

- ・ 鑄造巣が第一山にかかる場合は第一山の荷重分担率が非常に大きく，第一山からの破壊が起こりやすいと言える．

# 第 4 章 M6 ボルトの有限要素法解析

## 4.1 緒言

本章では，第 3 章で M10 ボルトで行った解析に続いて，同様に第 2 章で述べた解析条件やモデリングの手法，理論を用いて M6 のボルトとそれに対応する被締結材について解析を行う．解析は全て同様に鋳造巣が無い場合，鋳造巣がある場合についてそれぞれモデル化し，主に荷重分担率の傾向の比較や，パラメータを変化させた時の影響などを検討する．

以下に本章の構成を示す

## 4.1 緒言

### 4.2 鋳造巣の無いモデル

#### 4.2.1 解析条件

#### 4.2.2 解析結果

#### 4.2.3 軸力の合わせ込み

#### 4.2.4 指定軸力での解析結果

### 4.3 鋳造巣のあるモデル

#### 4.3.1 解析条件

#### 4.3.2 結果

### 4.4 鋳造巣の有無による比較

### 4.5 パラメータの違いによる比較

#### 4.5.1 穴径 $d$ について

#### 4.5.2 穴位置 $y$ について

## 4.6 結言

## 4.2 鋳造巣の無いモデル

第2章で述べた手法の通り M6 のボルトと、それに対応する被締結材，ワッシャーを作成・弾性解析する。

### 4.2.1 解析条件

・寸法

以下に M6 のモデル全体の寸法図と，図中のパラメータ，またその他使用する寸法を示す。

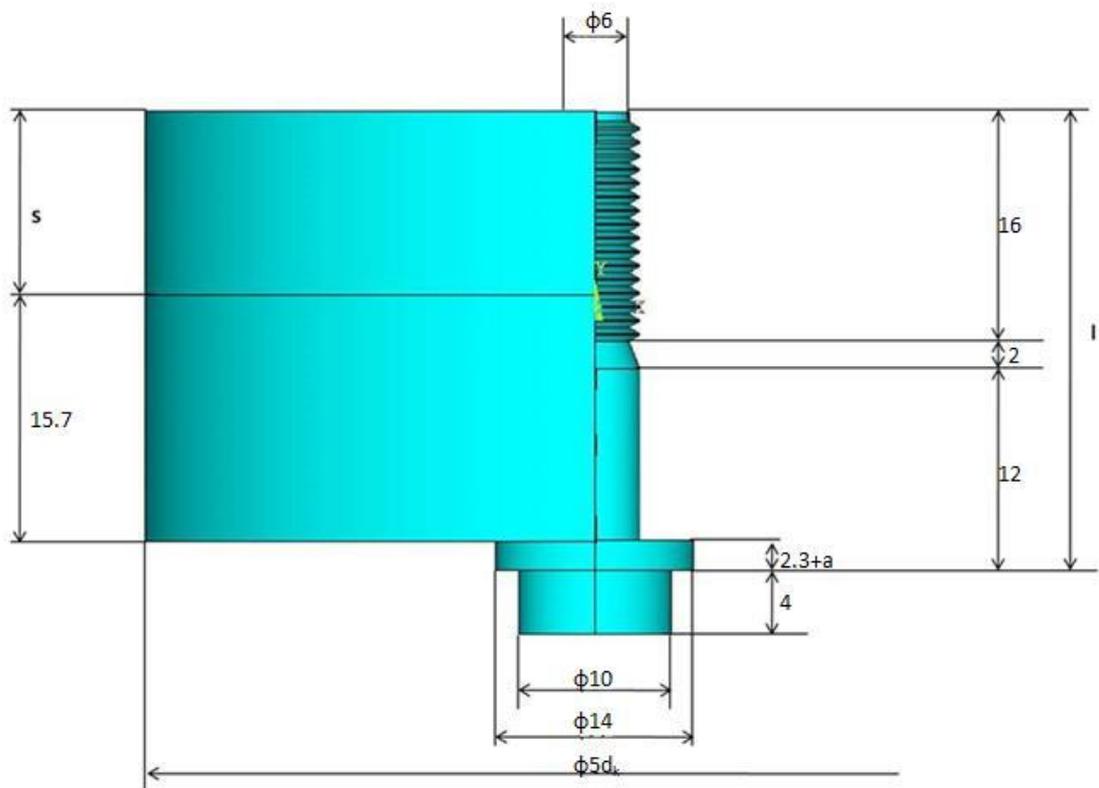


図 4-1 M6 寸法図(鋳造巣無し)

寸法	M6
ボルト径( $d_k$ )	6
首下長さ( $l$ )	30
ねじ込み長さ( $s$ )	12
ピッチ( $P$ )	1
締付軸力[kN]	15

表 4-1 M6 寸法表

以下,モデリングから解析まで3章のM10のモデルの手順と全く同様に進めていく.  
M10 同様にワッシャーに厚みを持たせて軸力を与える.

#### 4.2.2 解析結果

1 例として  $a = 0.05$  と設定した時の解析結果を示す. 図はボルト部の  $y$  方向応力を表すコンター図である.

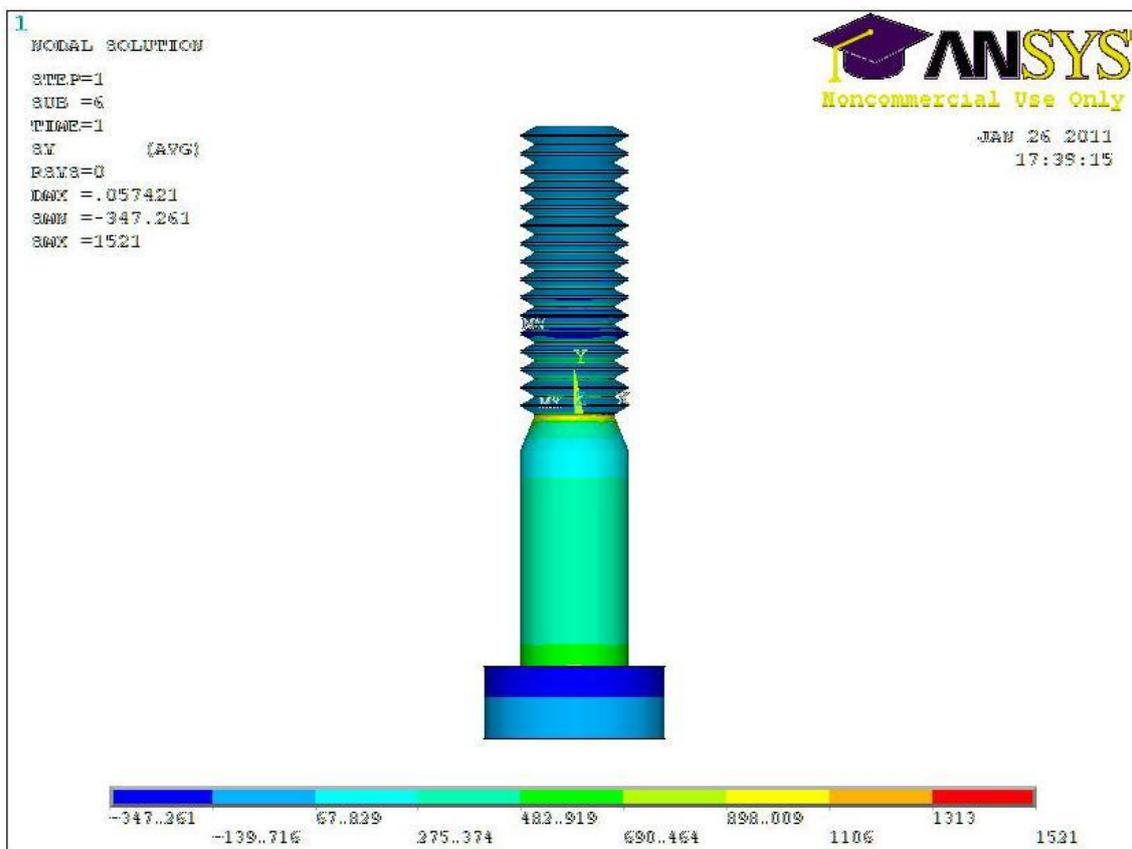


図 4-2  $y$  方向応力コンター図(ボルト部・ $a=0.05$ )

軸部(円錐台形状部)とねじが切つてある部分の境目の  $y$  方向応力の値が非常に大きくなっていることが読み取れるが,有限要素法解析において形状のつなぎ目では応力集中が発生し,値が飛んでしまうことがよくあり,塑性変形の影響は考えないことにする.

M10 の場合と同様に軸部で  $y$  方向応力がほぼ一様となっている部分( $y = -7 \sim -9$ )を取りだして軸力を読みとる. その部分の  $y$  方向応力のコンター図を下に示す.

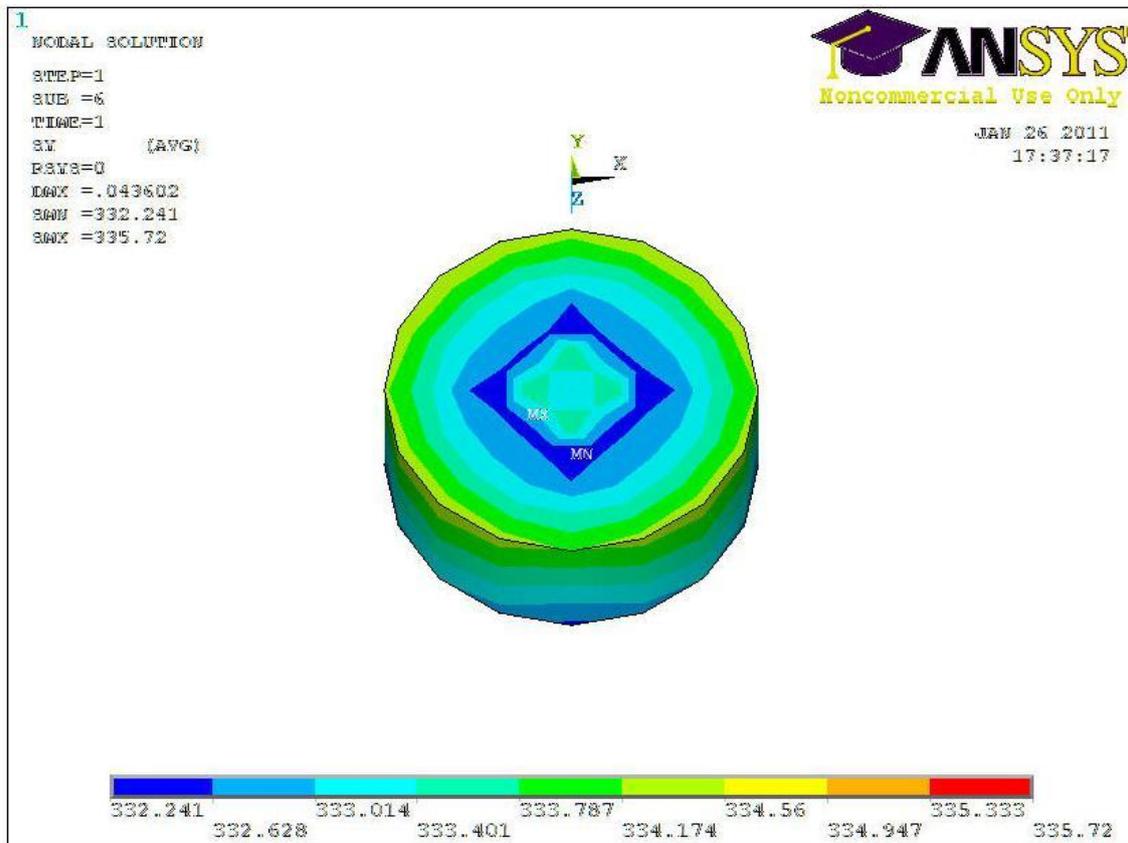


図 4-3 軸力読み取り(a=0.05)

図から読み取れる最小値  $y = 332.241\text{MPa}$  を、食い込み量  $a = 0.05$  のときの軸力とする。次に軸力の合わせ込みを行う。

#### 4.2.3 軸力の合わせ込み

4.2.1 の解析条件に記したように、M6 のモデルの時の指定された締付軸力の値は  $15\text{kN}$  であり、ワッシャーの食い込み量のパラメータ  $a$  の値を調節することで指定された軸力を満たすようにする。M10 の場合と同様に、 $15\text{kN}$  が何  $\text{MPa}$  かを計算しておく必要がある。改めてパラメータ間の相関関係は、

$$(\text{kN 単位の軸力}) [\text{kN}] \times 1000 \div \{(d_k/2)^2 \times \pi\} [\text{mm}^2] = (\text{MPa 単位の軸力}) [\text{MPa}]$$

であるので、(kN 単位の軸力) = 43,  $d_k = 6$  を代入すると

$$\begin{aligned} (\text{MPa 単位の軸力}) &= 15 \times 1000 \div 9\pi \\ &\approx 531[\text{MPa}] \end{aligned}$$

であるので、 $a$  の値を調節して指定軸力に合うようにする。

a = 0.07 としたとき、

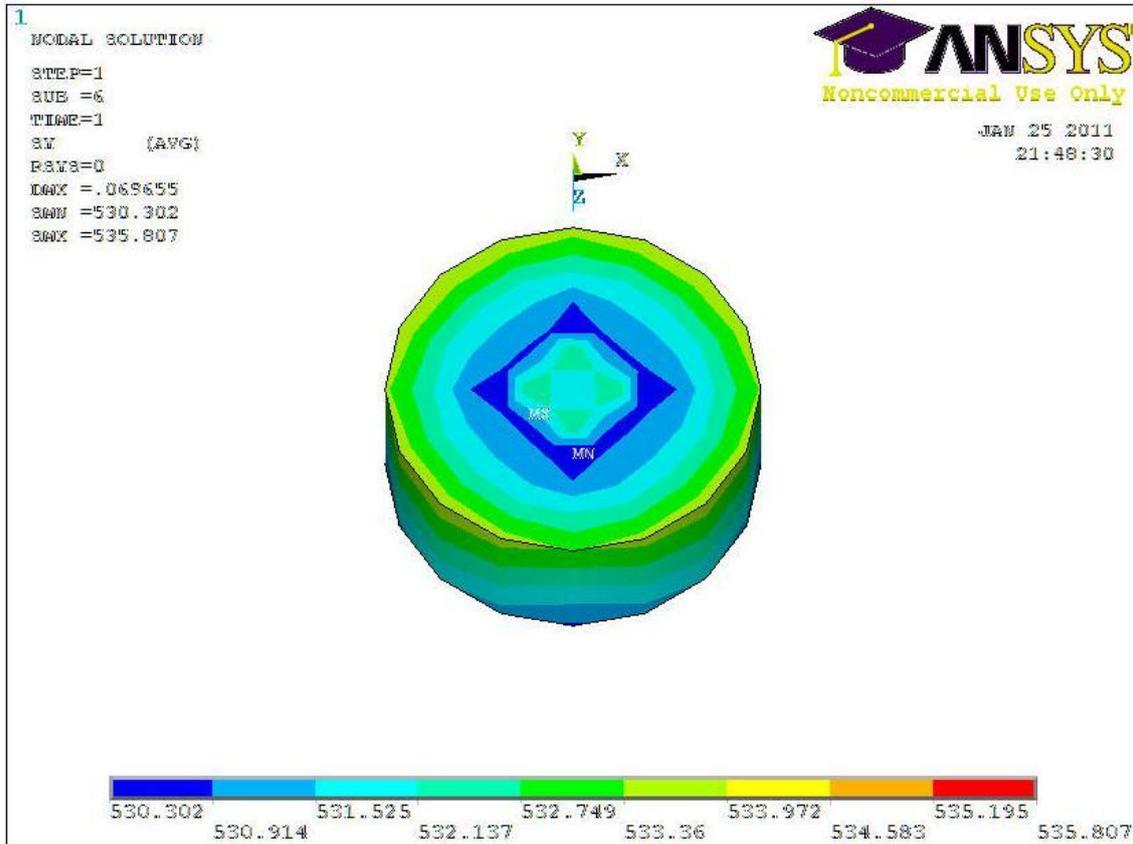


図 4-4 軸力読み取り(a=0.07)

図から読みとれる、y 方向応力の値の最小値は約 530MPa で、指定された軸力 15kN を MPa 単位に変換した値とおおよそ一致している。以後、パラメータ a = 0.07 として解析をおこなっていく。

#### 4.2.4 指定軸力での解析結果

食い込み量 a = 0.07 での各ねじ山における y 方向応力および荷重分担率のグラフを示す。

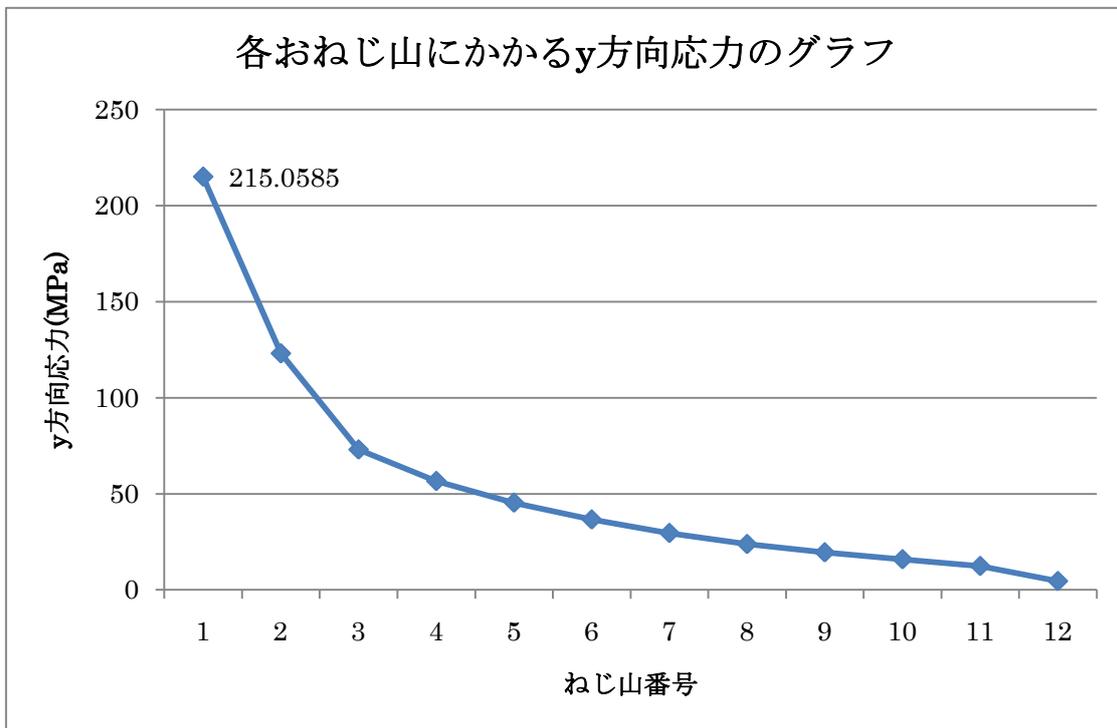


図 4-5 各おねじ山にかかる y 方向応力のグラフ(a=0.07, 鋳造巣無し)

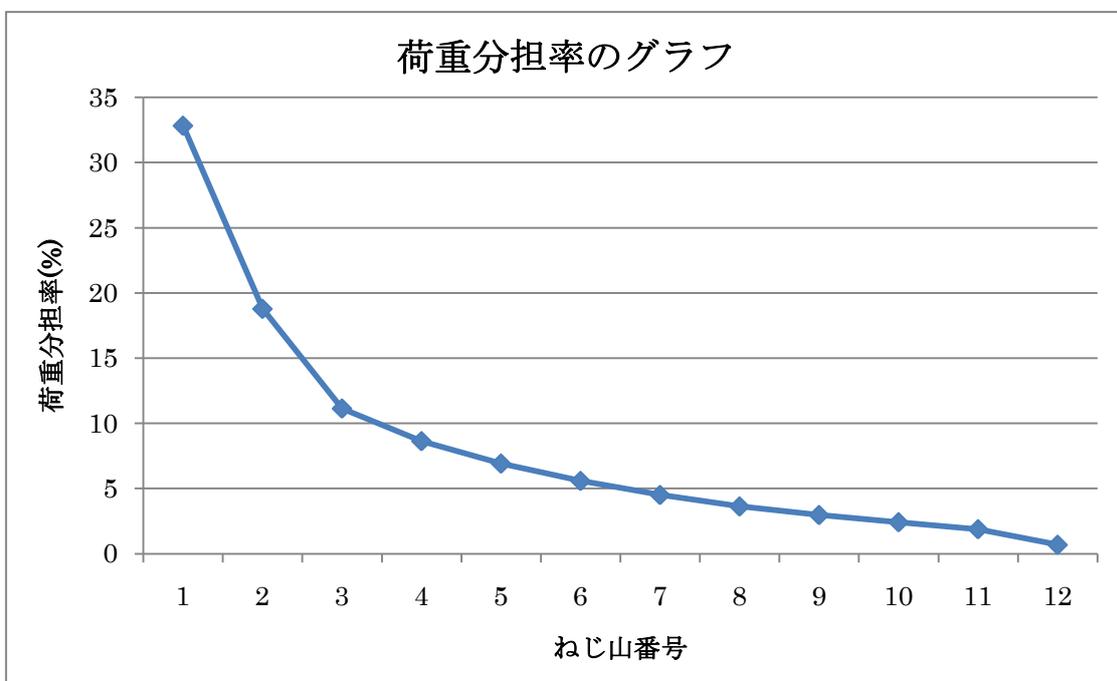


図 4-6 荷重分担率のグラフ(a=0.07, 鋳造巣無し)

やはり第一山の荷重分担率が飛びぬけて大きく、全体の約 32%程度である。M10 の場合と荷重分担率の傾向を比較してみると、

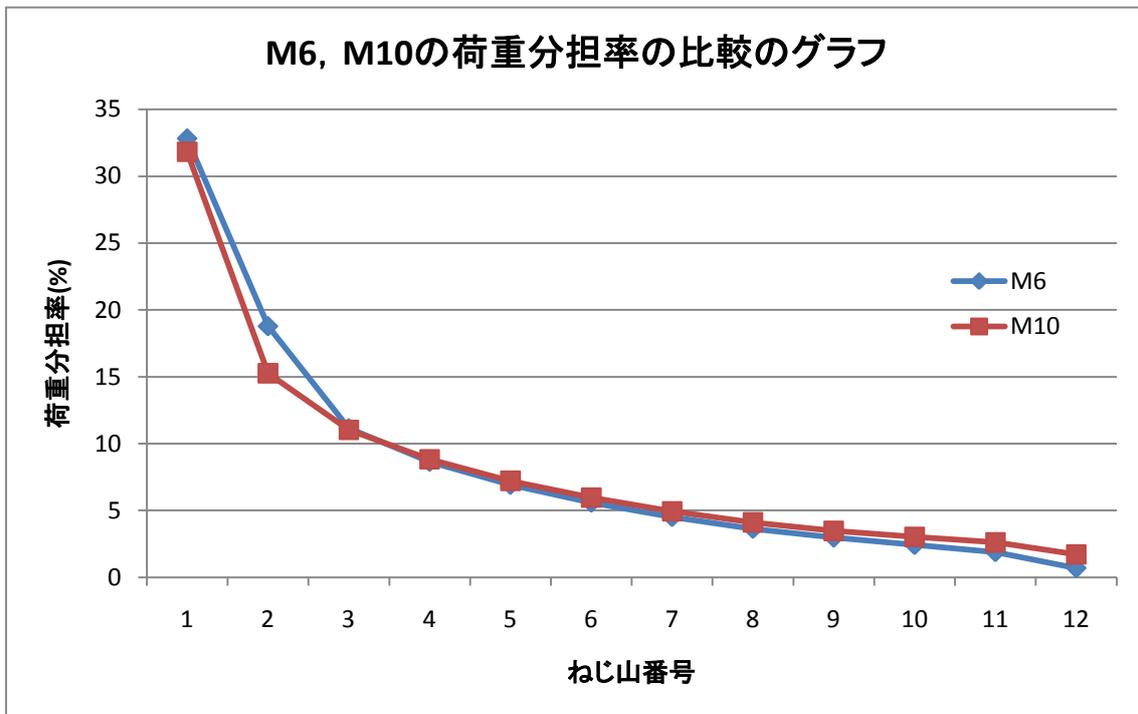


図 4-7 M6, M10 の荷重分担率の比較のグラフ

荷重分担率の推移の全体的な傾向としてはほとんど変わらないが、M6 のモデルの方が第 1, 2 山での分担率が若干大きくなっている。基本的には M6 のモデルは M10 のモデルを縮小した寸法になっているが、被締結材の寸法のバランスが異なっていたり、鑄造巣が M10 の方が 1/3 ピッチほど多くかかっているなどの違いによりそのような傾向が現れていると考えられる。

### 4.3 鋳造巣のあるモデル

#### 4.3.1 解析条件

- ・寸法

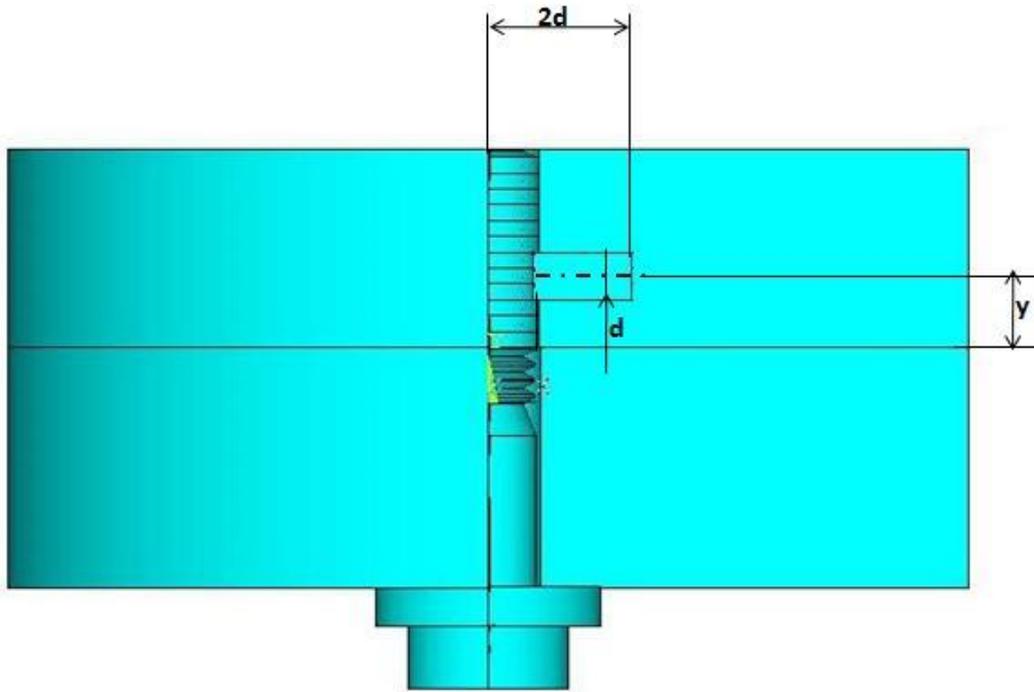


図 4-8 M6 寸法図(鋳造巣あり)

寸法	M6
鋳造巣位置(y)	4.5
鋳造巣径(d)	3

表 4-2 鋳造巣寸法表

同様に  $d \times d \times 2d$  の四角柱を鋳造巣としてモデリングした。表記されていない寸法は 4.2.1 の通りで、また鋳造巣位置  $y = 4.5$  の時、鋳造巣は 4~6 山目にかかっている。

軸力を合わせ込んだ結果、食い込み量  $a = 0.07$  として以下解析を進めていく。

#### 4.3.2 解析結果

$d = 3$ ,  $y = 4.5$ ,  $a = 0.05$  としたときの解析結果より計算したおねじ山の荷重分担率のグラフを示す.

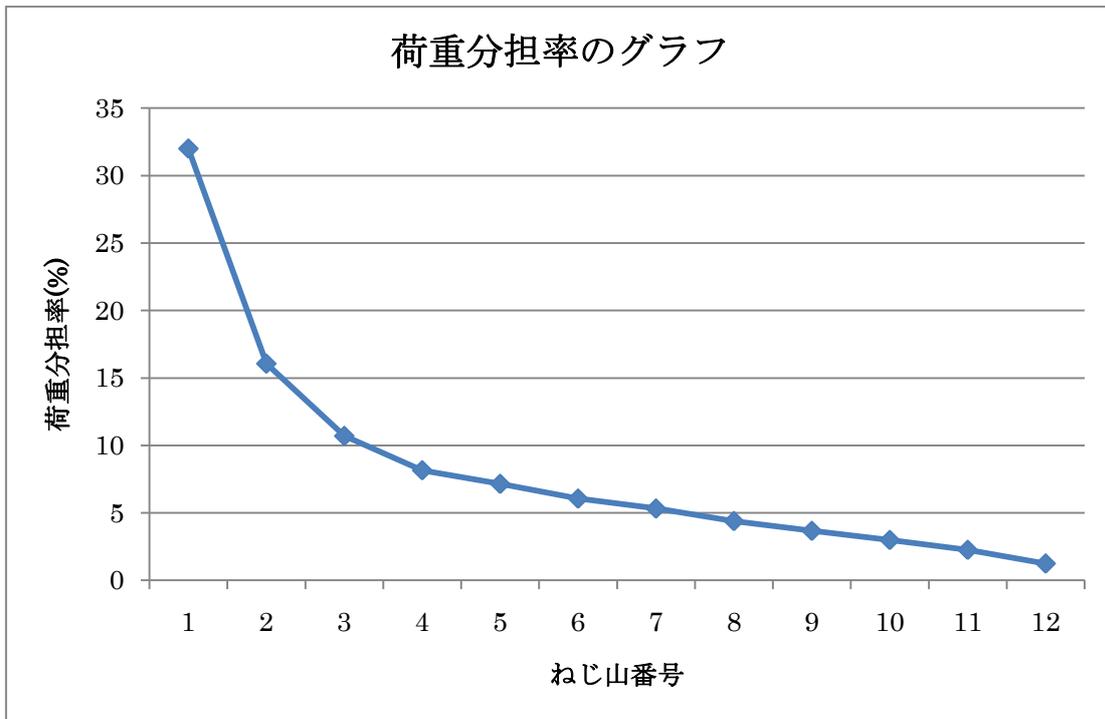


図 4-9 荷重分担率のグラフ( $a=0.07$ ,  $d=3$ ,  $y=4.5$ )

傾向としてはM10のグラフと変わらず, またやはり第一山の分担率が約32%ほどと, 高い値となっている.

#### 4.4 鑄造巣の有無による比較

4.2, 4.3 の結果から鑄造巣の有無による影響を検討する. 以下にそれぞれについての荷重分担率のグラフを示す.

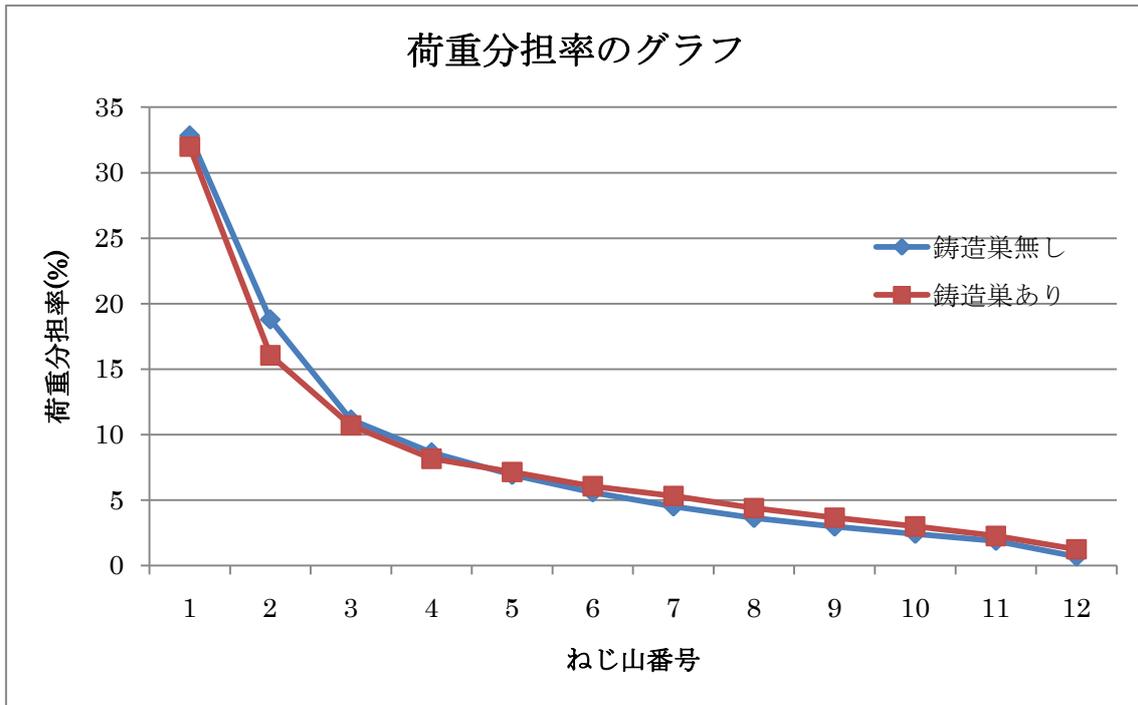


図 4-10 鑄造巣の有無による荷重分担率の比較のグラフ

グラフを見ると, M10 の場合と異なり荷重分担率の傾向に鑄造巣の影響が明らかに現れていない

#### 4.5 パラメータの違いによる比較

##### 4.5.1 穴径 d について

以下に  $d=1.5, 3, 4.5$  の場合の荷重分担率のグラフを示す. 穴位置は全て  $y=4.5$  のままである.

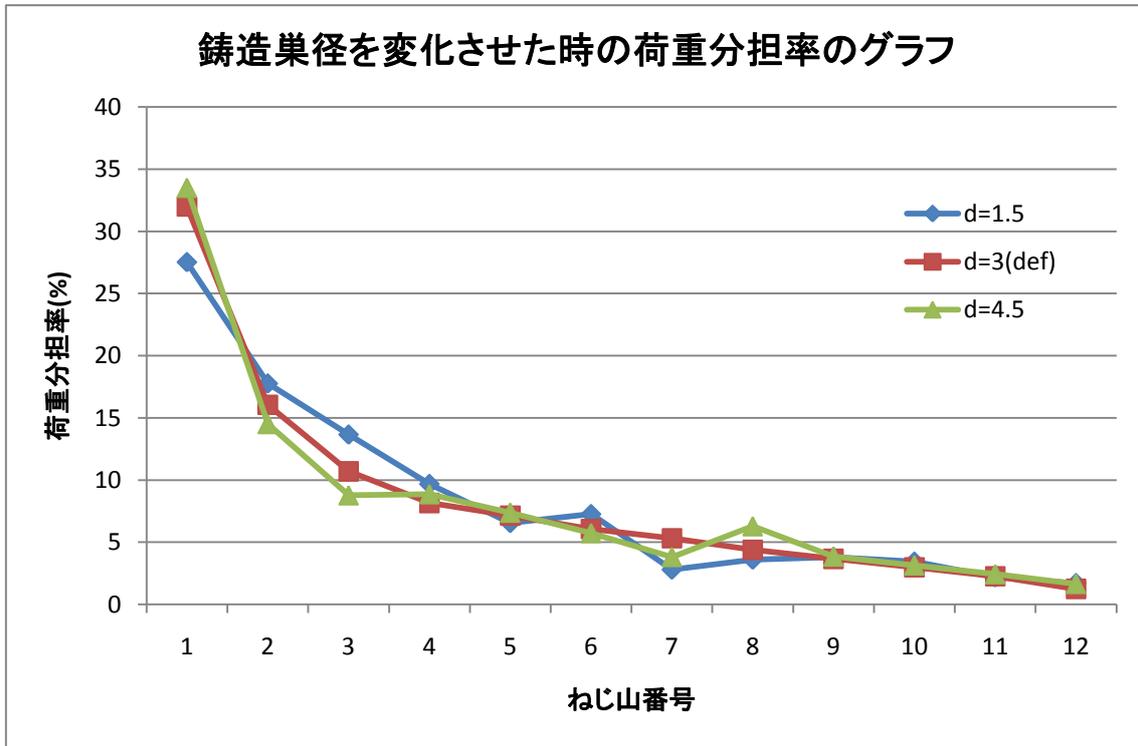


図 4- 11 鋳造巣径の違いによる荷重分担率の比較のグラフ

M10 と同様に鋳造巣が大きくなるほど第一山の荷重分担率が大きくなっている。穴が小さいほどねじ山番号が小さい山が全体として支えており、大きくなるほど第一山の負担が大きくなることが読み取れる。

#### 4.5.2 穴位置 $y$ について

以下に  $y = 2.5, 4.5, 6.5$  の場合の荷重分担率のグラフおよびその一部分(1~5 山目)を拡大したものを示す.  $y$  は  $P = 1$  であるので, 2 ピッチずつ指定条件からずれるように作成している. 穴径は全て  $d = 3$  のままである.

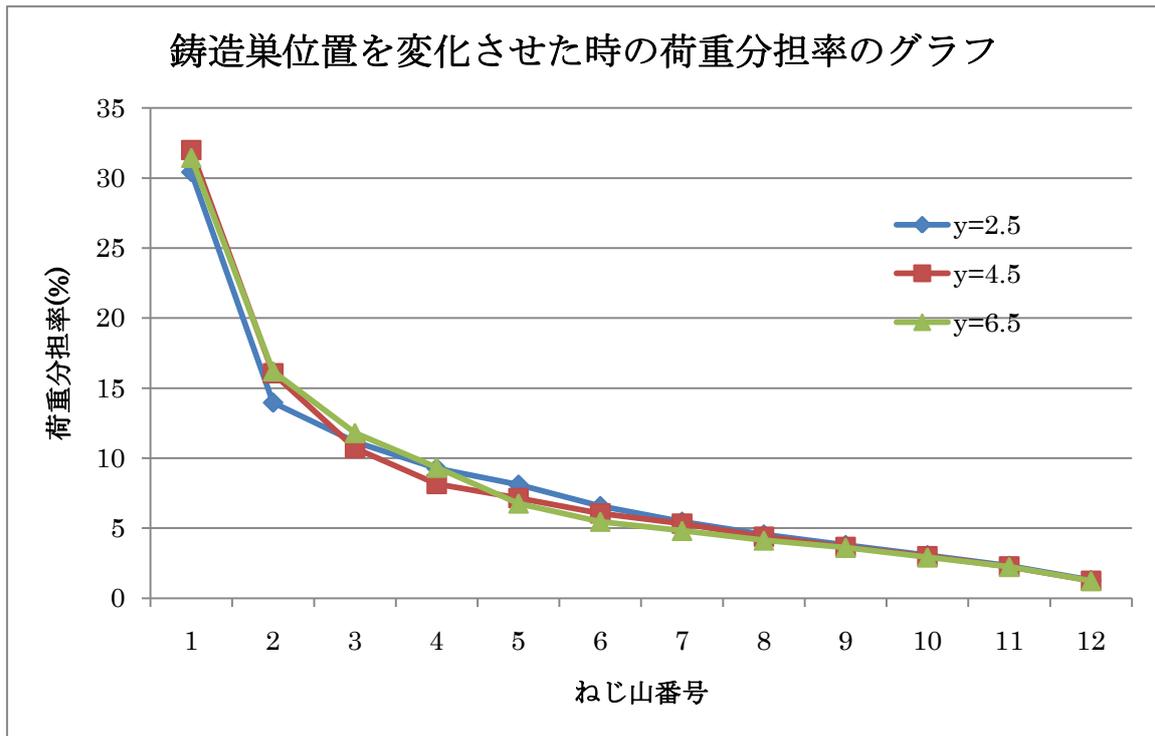


図 4-12 鑄造巣位置の違いによる荷重分担率の比較のグラフ

$y = 2.5$  のモデルは 2~4 山,  $y = 4.5$  のモデルは 4~6 山,  $y = 6.5$  のモデルは 6~8 山に鑄造巣がかかっている. 鑄造巣径は全て元の設定値  $d = 3$  である.

結果のグラフを見ると, やはり第一山の分担率がいずれも約 32%程度と大きく, また M10 の場合と同様に第 6 山以降は鑄造巣位置に影響なく推移している. しかし, M10 のモデルで見られた鑄造巣のかかる一つ前の山の分担率が大きくなるという傾向はそれほど見られなくなっており, 全体として一様に荷重分担率が推移している.

## 4.6 結言

本章では第3章の延長として、M6のボルトおよびそれに対応する被締結体、ワッシャーについて鑄造巣が無い場合とある場合についてそれぞれモデリングし、軸力を与える形で有限要素法解析を行い、その結果を主に荷重分担率について検討してきた。以下にその結果をまとめる。

- ・ M10 のモデルと同様に鑄造巣の有無に関わらず第一山の荷重分担率が飛びぬけて大きい(約 32%)ことが読み取れる。
- ・ 第6山以降は基本的に傾向が変わらず推移するが、鑄造巣径を大きくした場合若干のばらつきが出ている。またグラフ全体としても他の場合よりもばらつきが多い。これは鑄造巣径を大きくした時のねじ山への巣のかかり方が影響していると考えられる。
- ・ 鑄造巣径  $d$  を変化させると、径が大きいほど第一山の荷重分担率が大きくなり壊れやすいことを読み取ることが出来た。
- ・ 鑄造巣位置  $y$  については、M10 ほど顕著ではないが鑄造巣がかかっている直前の山の分担率が増加するという傾向が読み取れる。

## 第5章 結論

### 5.1 結論

本研究では M10, M6 のボルトと、それに対応する材質がアルミダイカストの被締結材について、軸力を与えた時の鑄造巣の有無による影響を主に荷重分担率に注目して解析・検討を行ってきた。本研究で得られた結果のまとめを行う。

まず、鑄造巣の有無に関わらず、ボルトの第一山の荷重分担率がいずれも全体の 30% 以上で非常に高く、現実にかかる、へたってしまうなどのねじ山の破壊の多くが第一山で起きるということを裏付けることが出来た。したがって締結体の設計においては第一山の強度を重視して行う必要がある。

また、鑄造巣があると第一山およびボルト頭に近い、ねじ山番号が若い山の分担率が大きくなることが求められた。さらに、鑄造巣のかかる山の直前の山の分担率が高くなることが読み取れた。鑄造巣が第一山にかかる場合は第一山の分担率がさらに大きくなり、第一山での破壊がさらに起きやすい状況になることが解析により導出することが出来た。

### 5.2 課題と展望

本研究では内容のほとんどが有限要素法解析およびその検討で、本研究に対応する理論や先行研究がほとんど無く、比較や考察が十分に行えなかったため、その部分を補完していく必要があると感じた。また実際の現場で起こっている事象との照らし合わせや解析側がどのような役割をするべきかを理解するという意味で、実験結果との比較・検討も必要であると感じた。

また、本研究ではモデリングの都合上、鑄造巣を四角柱で再現したが、実際の鑄造巣はより複雑な形をしている。したがって鑄造巣の形状を検討することがより実際の挙動と近い解析結果を求めることには必須で、今後の課題であると言える。

さらに、有限要素法解析では、弾塑性解析の計算結果のデータ数が M10 については鑄造巣が無いモデルのみ、M6 については全くなしと、十分な検討が行えなかった。実際の挙動は弾塑性挙動であるので、破壊のメカニズムを知るうえでは計算が上手く収束するような工夫や、さらなる検討が必要だと考えられる。

## 参考文献

- [1]姚強,小林俊郎,戸田裕之,堀久司 “鋳造アルミニウム合金鋳物の破壊靱性に及ぼすミクロ組織の影響” 軽金属 第 47 卷 第 11 号(1997) p613-619
- [2]半谷禎彦,北原総一郎,天田重庚 “圧縮荷重不可によるアルミニウム合金ダイカストの鋳巣欠陥と低減” 軽金属 第 56 卷 第 2 号(2006) p112-116
- [3]山本晃 “ねじ締結の原理と設計” p3(1995) 養賢堂
- [4]山本晃 “ねじのおはなし” p11-16(1990) 日本規格協会
- [5]酒井智次 “増補 ねじ締結概論” 養賢堂
- [6]泉聡志,横山喬,岩崎篤,酒井信介 “ボルト締結体の締付けおよびゆるみ機構の三次元有限要素法解析” 日本機械学会論文集(A 編) 第 71 卷 第 702 号(2005-2) p18-26
- [7] 横山喬 “軸直角方向外力を受けるボルト締結体挙動の力学モデルの構築”2010 年度博士論文

## 謝辞

本論文作成にあたり、まずは指導教官の酒井教授、研究手法や考え方についてたくさんのお話を伺って下さった泉准教授に深く感謝いたします。お二人には研究だけでなく進路についての相談もしていただき、本当にありがとうございました。また、助教の田中さんにも研究だけでなく色々な面で助けていただき、ありがとうございました。

酒井・泉研究室では学業以外でも様々な勉強をさせていただきました。温かく心地良い雰囲気の研究室で、明るく話しかけてくれたり、テーマ関係無くわからないことを聞ける雰囲気をつくって下さった M2 の先輩方や、昨年・今年で研究や就職活動に悩み諦めかけたときに相談に乗り励まして下さった M1 の方々に感謝します。また 4 年生みんなと協力し合って最後まで乗り切ることが出来て、非常に嬉しく満足しています。

さらに、卒論提出前に勇気をくれたザックジャパンの皆様ありがとうございました。神がかった準決勝、決勝の戦いっぷりや、まるで私の大学、研究室生活のような山あり谷ありの予選リーグの試合は感動でした。次のワールドカップも頑張れ！応援してます！

最後に落ち込んだ時に支えてくれた友人や家族に感謝します。皆様ありがとうございました。社会人になっても頑張ります。

以上

p.1～p.58 完

卒業論文

平成 23 年 2 月 4 日提出

03080178 河原畑 歩