

# アルミ平板の切欠き曲率半径の応力集中に及ぼす影響

大上 哲郎\*・渡邊 祝幸\*\*

## Influence of circular notch radius on stress concentration of aluminum sheet

Tetsuro OHWUE\* and Noriyuki WATANABE\*\*

(2006年11月30日受理)

The need of weight-reducing of automobile body such as all aluminum car body is increasing from the global atmosphere environmental problem. The stress concentration of circular notch of aluminum sheet becomes more important for automobile use. The experiment by using strain gauge and FEM simulation were carried out in order to investigate the stress concentration of aluminum sheet. The stress concentration factor  $\alpha$ , calculated from the results of FEM analysis, coincide with the results of "JSME Mechanical Engineers' Handbook".

Key Words : aluminum sheet, FEM, simulation, stress concentration factor

### 1. 緒言

地球環境問題から、オールアルミニウムボディー車体などの車体軽量化のニーズが高まり、アルミニウム平板の切欠き部を有する強度部材の応力集中などが今後問題になる可能性がある。また、ナノテクノロジーなど、微小部品を作成する場合、応力集中は大きな課題と考えられる。従来、切欠き部のみあって平行部のない疲労試験片の応力集中は検討されている<sup>1)2)</sup>が、平行部と切欠き部を有する疲労試験片の応力集中は、機械工学便覧<sup>3)</sup>以外にはほとんど検討されていない。また、JIS Z 2275の2号疲労試験片<sup>4)</sup>も切欠き曲率半径  $r$  が平行部幅  $b$  以上のものとするという記述があるだけである。

本報告では、軸荷重を負荷した切欠き曲率半径を有する段付帯板についてのストレインゲージによるひずみと応力の測定実験を行った。それと並行して応力解析を有限要素法によって行い、実験結果と比較した。また、解析結果から応力集中係数  $\alpha$  を求め、それにより機械工学便覧を参考に切欠き曲率半径の影響を評価した。

### 2. 応力集中係数 $\alpha$ について

部材の切欠き部での応力集中の程度を評価する尺度としては、一般に、一次元、二次元、三次元応力集中の各場合とも、応力集中係数  $\alpha$  が用いられている。さて、図1のような段付帯板が引張荷重  $P$  を受けるとき、切欠き底  $A$  点では軸方向に最大主応力  $\sigma_1$  が発生する。また、切欠き底  $A$  点ではその他の中間主応力、最小主応力は0となり一次元応力集中である。

一般に応力集中係数  $\alpha$  とは、図1に示す最大応力点  $A$  における  $\sigma_1 = (\sigma_y)_{\max}$  だけに着目し、これを切欠き底断面の公称応力  $\sigma_0$  で割った値である。定義

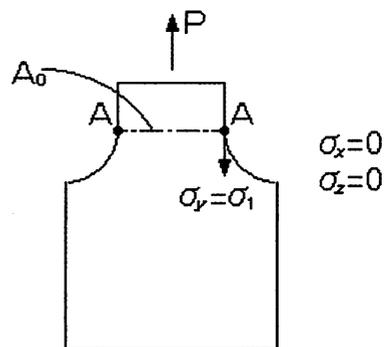


図1 軸荷重を受けているときの段付帯板

\* 秋田工業高等専門学校機械工学科

\*\* 平成18年3月生産システム工学専攻卒，現在五洋電子勤務

式を次式 (1) に示した。

$$\alpha = \frac{(\sigma_y)_{\max}}{\sigma_0} \quad (1)$$

ここで公称応力  $\sigma_0$  とは軸荷重を切欠き底断面 AA の断面積  $A_0$  で割った値で、次式 (2) である。

$$\sigma_0 = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

### 3. 実験方法及び有限要素法による応力解析

#### 3.1 試験片

試験片形状を図 2 に示す。板厚 2 mm のアルミニウム平板であり、また、切欠き曲率半径  $r$  は 0.5 mm, 3 mm, 10mm, 20mm とし、切欠き深さ  $t$  は 10mm として機械加工により試験片を製作した。

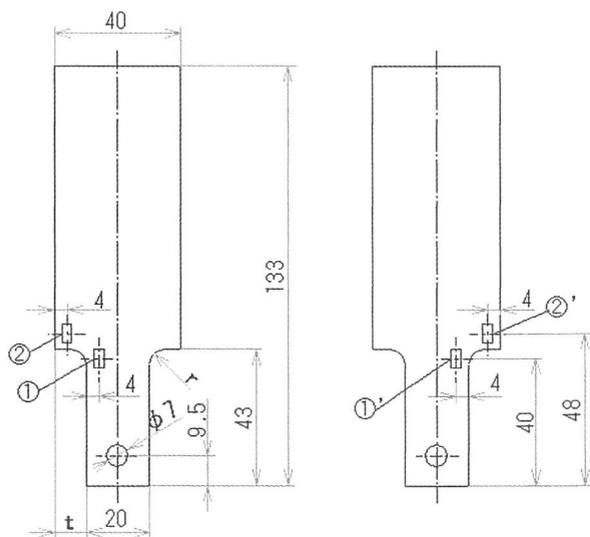


図 2 試験片の形状およびストレインゲージの貼り付け箇所

①, ①', ②, ②' 部分, 表裏対称にストレインゲージを貼り付けることとした。初めは表のみにストレインゲージを貼り付けていたが、ひずみの値が (+), (-) になってしまい安定しなかった。この原因を確かめるために試験片の近傍に重りをつけた糸を吊り下げて x 方向の垂直度を測定した。その結果, x 方向の垂直度には問題はなく, z 方向の垂直度が保たれていないことが原因であった。このため, ストレインゲージを表裏対称, 全 4 箇所貼り付け測定を行った。

#### 3.2 実験方法

引張試験機に試験片の軸が鉛直になるように固定し、重りを吊り下げることにより荷重をかけ測定を行う。取付けの例を図 3 に示す。引張荷重は 49.7N, 61.4N, 75N, 100N の 4 種類とした。試験片をチャックで固定する位置は、サンプナンの原理<sup>5)</sup> から「荷重点から十分 (板幅分) 離れていれば端面から遠く離れたところでは応力分布はほぼ等しくなる」を応用し、ひずみの測定位置から板幅分以上離れた位置を固定することによって応力分布の誤差は無視できるほど小さいことがわかったため、測定位置から 40 mm 以上離れた場所をかむこととした。これは ANSYS による解析で成立していることを確認した。

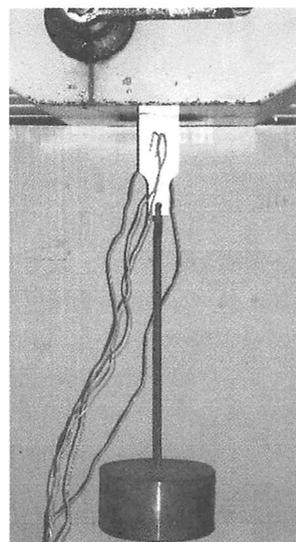


図 3 試験片の取付け例

#### 3.3 ストレインゲージによるひずみ測定の原理

図 4 にストレインゲージの構造を示す。ゲージ長さ  $L$ , 断面積の抵抗線の電気抵抗  $R$  は、材料固有の比抵抗を  $\rho$  とすると (3) 式で表される。

$$R = \frac{L\rho}{a} \quad (3)$$

これを弾性的に  $\Delta L$  だけ引き伸ばしたときの抵抗の変化率は (4) 式である。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4)$$

電気抵抗線のポアソン比を  $\nu_g$  とするとき,  $\Delta a/a = -2\nu_g (\Delta L/L)$  であり, 比抵抗は変化しないので, (4) 式は次のように整理でき, ひずみ  $\varepsilon$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta L}{L} - \left\{ -2\nu_g \left( \frac{\Delta L}{L} \right) \right\} \\ &= (1+2\nu_g) \frac{\Delta L}{L} \\ &= (1+2\nu_g) \varepsilon \\ \therefore \varepsilon &= \frac{\Delta R/R}{(1+2\nu_g)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、(5) 式の比例定数  $(1+2\nu_g)$  はゲージ率と呼ばれる。

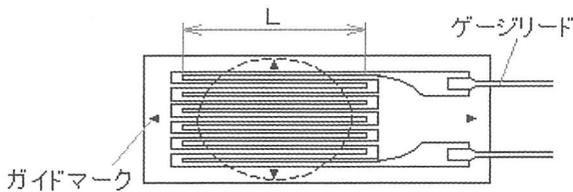
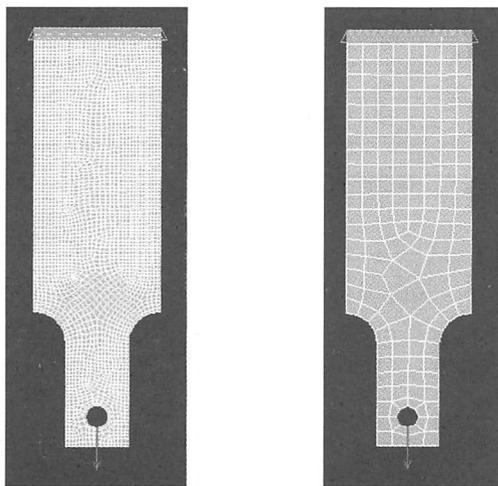


図4 ストレインゲージの構造

### 3.4 有限要素法による応力解析

本研究では、有限要素法ソフト ANSYS を用いて応力解析を行った。

図5に応力解析に用いた要素分割の例を2種類示す。一方のプログラムは ANSYS9.0 といい、設定できる節点数が多くより細かい要素分割をすることができる。もう一方のプログラムは ANSYS/ED といい、ANSYS シリーズの中でも主に教育用・評価用として用いられている有限要素法ソフトである。要素タイプにはどちらも8節点アイソパラメトリック要素を用いた。荷重条件は、実験と同じく4種類



(A) ANSYS による要素分割 (左)  
(B) ANSYS/ED による要素分割 (右)

図5 要素分割の例

の引張荷重を軸方向に負荷した。また、材料定数はアルミニウム試験片なので、ヤング率を  $E=73\text{GPa}$ 、ポアソン比は  $\nu=0.34$  とした。

## 4. 結果

### 4.1 解析結果と実験結果の比較

実験による測定値と解析結果を各々表1、表2にまとめた。ここで、実験の平均値を実験値、ANSYS

表1 各切欠き曲率半径の実験結果および解析結果の応力 $\sigma$ ,  
単位 [MPa]

	実験結果			解析結果A	解析結果B
	①	①'	平均値	①, ①'	①, ①'
r=0.5					
49.7N	-4.502	-1.557	-3.029	1.267	1.288
61.4N	5.037	-1.557	1.740	1.565	1.591
75N	5.402	-1.220	2.091	1.912	1.944
100N	4.891	0.779	2.835	2.549	2.592
r=3					
49.7N	2.190	0.608	1.399	1.206	1.277
61.4N	2.482	0.949	1.716	1.490	1.578
75N	3.066	0.949	2.008	1.820	1.927
100N	3.382	1.703	2.543	2.426	2.570
r=10					
49.7N	0.146	1.874	1.010	1.036	1.031
61.4N	0.170	2.433	1.302	1.280	1.274
75N	0.073	2.993	1.533	1.563	1.556
100N	0.414	3.723	2.068	2.085	2.075
r=20					
49.7N	0.024	1.898	0.961	0.911	0.908
61.4N	0.122	2.385	1.253	1.125	1.122
75N	0.097	2.823	1.460	1.374	1.370
100N	0.365	3.626	1.995	1.832	1.827

表2 各切欠き曲率半径の実験結果および解析結果の応力 $\sigma$ ,  
単位 [MPa]

	実験結果			解析結果A	解析結果B
	②	②'	平均値	②, ②'	②, ②'
r=0.5					
49.7N	1.144	-0.754	0.195	0.205	0.261
61.4N	1.265	-0.754	0.256	0.254	0.323
75N	1.363	-0.754	0.304	0.310	0.394
100N	1.095	-0.316	0.389	0.413	0.526
r=3					
49.7N	0.560	-0.074	0.243	0.261	0.259
61.4N	0.608	-0.025	0.292	0.322	0.320
75N	0.706	0.049	0.377	0.393	0.391
100N	0.779	0.219	0.499	0.524	0.521
r=10					
49.7N	-0.049	0.730	0.341	0.346	0.425
61.4N	-0.097	0.925	0.414	0.427	0.525
75N	-0.219	1.192	0.487	0.521	0.641
100N	-0.146	1.411	0.633	0.695	0.855
r=20					
49.7N	-0.122	0.998	0.438	0.459	0.507
61.4N	-0.073	1.192	0.560	0.567	0.627
75N	-0.195	1.582	0.694	0.692	0.765
100N	-0.048	1.898	0.925	0.923	1.021

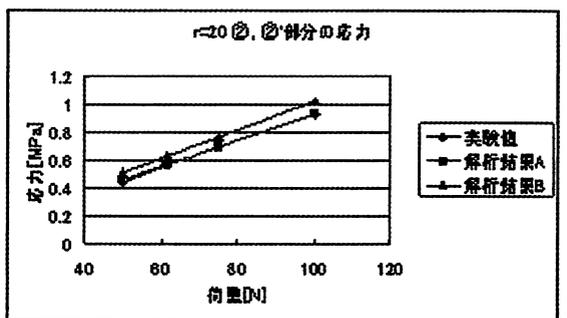
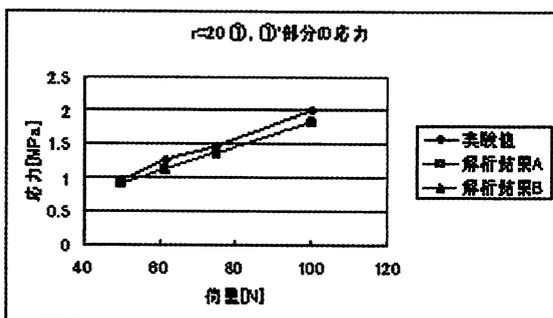
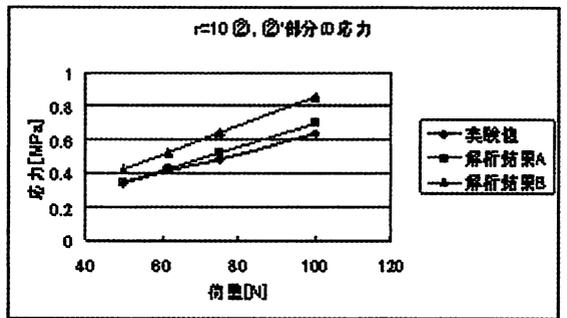
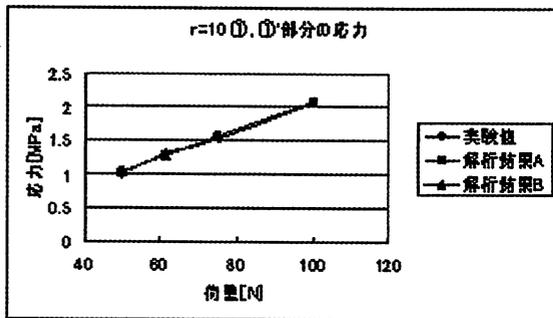
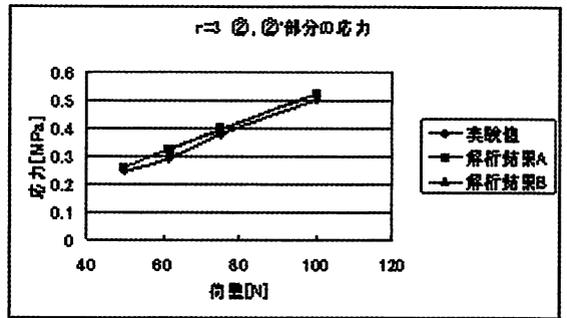
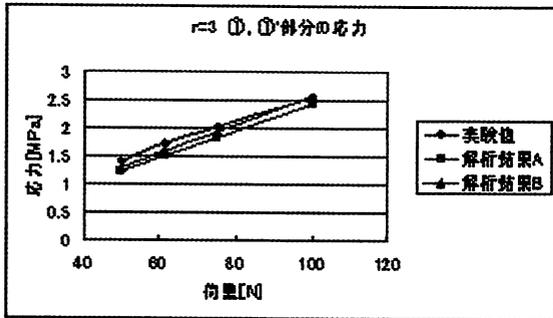
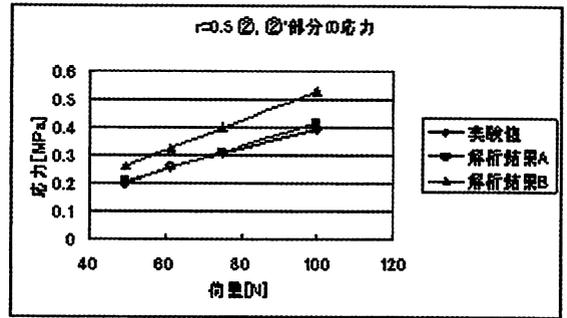
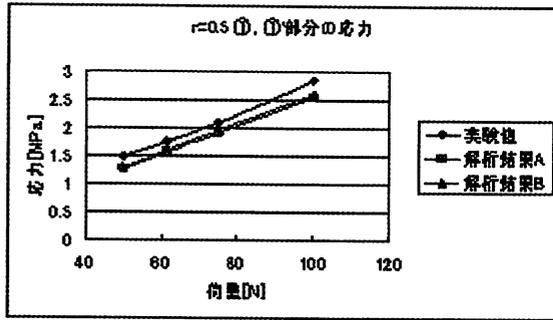


図6 解析結果と実験結果の比較 (①, ①')

図7 解析結果と実験結果の比較 (②, ②')

による解析結果を解析結果 A, ANSYS/ED による解析結果を解析結果 B とし, 縦軸に応力  $\sigma_y$ , 横軸に引張荷重をとり比較したものを図6, 図7に示した。また図8には①, ①'部分に関して縦軸に応力  $\sigma_y$ , 横軸に切欠き曲率半径  $r$  をとり実験値と解析結果 A, B を比較したものの3種類を示した。

(1) ①, ①'部分の実験値と解析結果 A, B の比較  
 $r=0.5, 3$  の場合, 実験値と解析結果 A, B とでは誤差が10%前後となっている。しかし,

$r=10$  ではいずれの誤差も2%前後まで抑えられている。 $r=20$  の場合では誤差5%前後となった。このように  $r$  が小さいほうが実験値と解析結果の誤差が大きくなっていることがわかった。

(2) ②, ②'部分の実験値と解析結果 A, B の比較  
 $r=0.5$  の場合, 実験値と解析結果 A とでは誤差が3%前後までになってしまっている。 $r=3$  の場合, 実験値と解析結果 A, B との誤差は共に5%前後まで抑えられている。次に  $r=10$  の場合, 実験

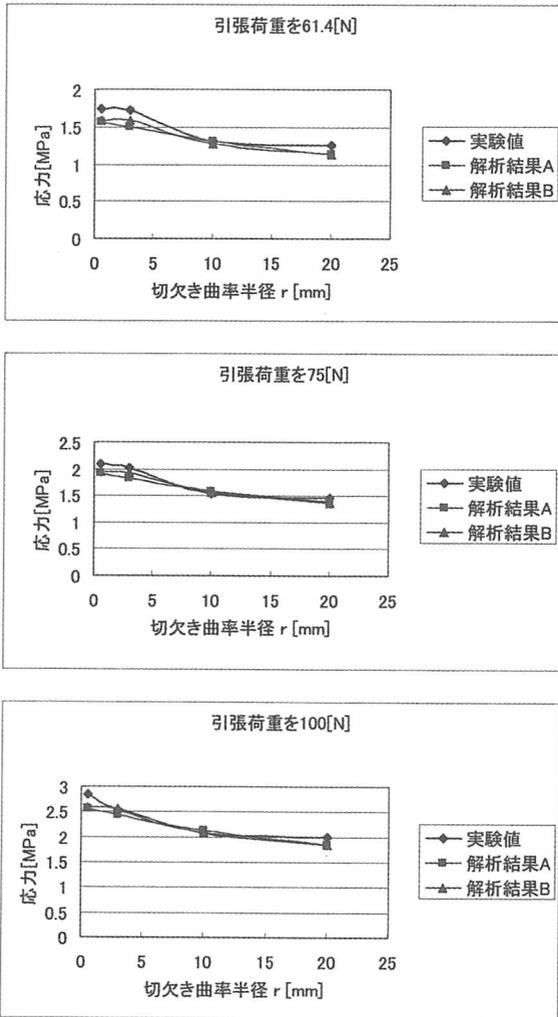


図8 切欠き曲率半径  $r$  と応力  $\sigma_y$  の比較 (①, ①'部分)

値と解析結果 A とでは誤差が 5%前後まで抑えられているが、解析結果 B と比較すると 25%前後となってしまう。  $r=20$  の場合、実験値と解析結果 A との誤差は 5%前後であるが、解析結果 B との誤差は 10%前後となった。このように②, ②'部分においては解析結果 B が実験値と大きくずれる場合が多く発生することがわかった。

(3) 切欠き曲率半径と応力  $\sigma_y$  の比較 (①, ①'部分)

図10を見てみると、ほとんどの場合で切欠き曲率半径が小さいものほど実験値と解析結果 A, B の誤差が大きいことがわかる。

(1), (2), (3) で述べたことから、要素分割数が少ない、もしくはほとんどの場合で切欠き曲率半径が小さいものほど誤差が大きいことがわかる。

4.2 切欠きによる応力集中係数  $\alpha$  への影響

表 3, 図 9 に切欠き曲率半径  $r$  の切欠き深さ  $t$  に対する比率  $r/t$  と応力集中係数  $\alpha$  の関係を示す。

図 9 から、 $r/t \leq 0.3$  の場合では  $\alpha$  の値は急激な変化を伴い、 $r/t > 0.3$  の場合は  $\alpha$  の変化が小さくなり、徐々に安定していくことから段付帯板を使用するとき、 $r/t > 0.3$  の関係が望ましいことがわかる。また、 $r/t \leq 0.3$  の場合では  $\alpha$  の値は急激な変化を伴うということが 4.1 で述べた切欠き曲率半径  $r$  が小さいも

表 3 応力集中係数  $\alpha$  の解析結果

$r/t$	解析結果 A		解析結果 B	
	応力 $\sigma_y$ [MPa]	$\alpha$	応力 $\sigma_y$ [MPa]	$\alpha$
0.05	11.216	4.486	10.813	4.325
0.1	7.956	3.182	7.554	3.022
0.3	5.427	2.171	5.186	2.074
0.5	4.592	1.837	4.558	1.823
0.7	4.165	1.666	4.197	1.679
1	3.787	1.515	3.783	1.513

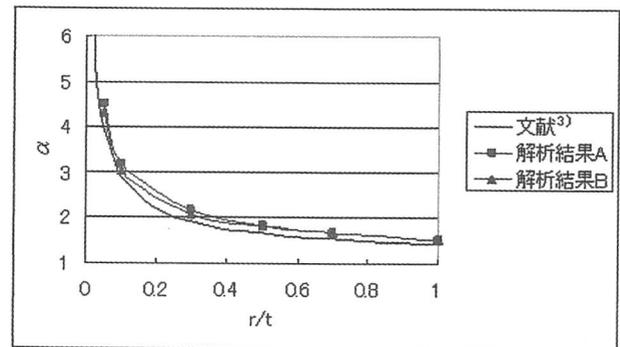


図9 切欠きと  $\alpha$  の関係

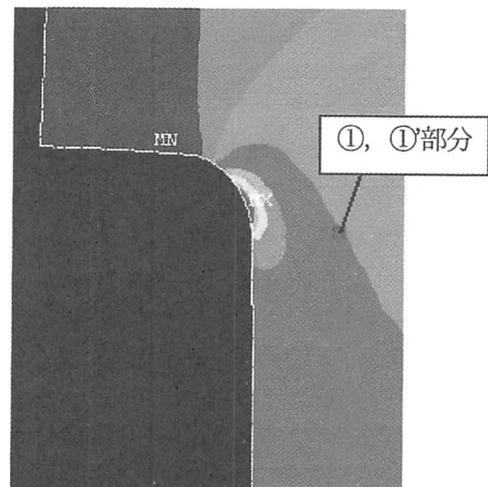


図10  $r=3$  の場合の  $\sigma_y$  の応力分布図

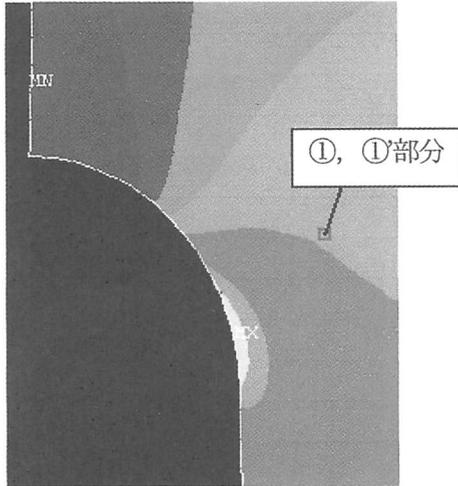


図11  $r=10$ の場合の $\sigma_y$ の応力分布図

のほど実験結果と解析結果との誤差が大きくなる原因となっていると考えた。ここで、図10、図11にANSYSで計算された応力 $\sigma_y$ の応力分布を2種類( $r=3$ ,  $r=10$ )示した。図10、図11から、 $r=3$ の場合、①、①'部分は応力集中部に近いため測定箇所周辺の応力の変化が大きい。しかし、 $r=10$ では、①、①'が $r=3$ よりも応力集中部から離れた位置を測定しているため測定箇所周辺の応力の変化が小さくなる。よって $r$ が小さいとき、実験及び解析においてわずかでも測定箇所の座標がずれてしまうことで誤差が大きく生じてしまうことがわかる。

## 5. 結 言

軸方向に引張荷重を負荷した切欠き曲率半径を有する段付帯板について、実験によるひずみと応力の測定、有限要素法による応力解析を行った。その結果より応力集中係数 $\alpha$ を求め、切欠き曲率半径と切欠き深さと $\alpha$ との関係について調べた。

本研究によって次のことがわかった。

- (1) 実験結果と解析結果 A, B の誤差が①、①'箇所では最大10%前後となり、②、②'箇所では最大30%前後(解析結果 B のみ)になった。

- (2) この誤差の原因は①、①'箇所では切欠き曲率半径が小さい場合、測定箇所が応力集中部に近いため、測定箇所周辺
- (3) 辺での応力の変化が大きくなりストレインゲージがわずかにずれてしまったためと推定される。また、解析結果 B の誤差でいえることは、解析において要素分割数に限りがあるため測定箇所の正確な座標を得ることができなかったためと推定される。
- (4) 切欠き底近傍の $\alpha$ において、ANSYSによる $\alpha$ 、ANSYS/EDによる $\alpha$ 、及び機械工学便覧<sup>3)</sup>による $\alpha$ を比較すると、誤差は小さかった。この結果から切欠き底近傍のみで考えると要素分割数が少なくても一次近似としては実用上さしつかえない。
- (5)  $r/t > 0.3$ では $\alpha$ の変化が小さいことから、段付帯板を使うとき $r/t > 0.3$ の関係が望ましいと考えられる。

## 6. 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、指導教官の大上哲郎先生には多大なる御指導、御鞭撻を、副指導教官の茂木良平先生、小林義和先生からは数多くの御指摘を頂いたことをここに深く感謝の意を表します。

## 7. 参考文献

- 1) 野田尚昭, 西谷弘信, 深迫泉, 原田昭治: 日本機械学会論文集 (A 編) 51巻467号 (1985), p1804
- 2) 野田尚昭, 毛映紅, 高瀬康, 西谷弘信: 日本機械学会論文集 (A 編) 66巻646号 (2000), p1197
- 3) 機械工学便覧, A4-p97
- 4) JIS Z 2275 (1978), p231
- 5) 例えば, 村上敬宜: 弾性力学, 養賢堂 (1985), p35