

## 高速引張試験における切欠き試験片の 動的応力集中とひずみ速度集中の解析\*

野田 尚昭<sup>\*1</sup>, 大塚 駿<sup>\*2</sup>, 安藤 誠人<sup>\*3</sup>, 佐野 義一<sup>\*4</sup>  
高瀬 康<sup>\*4</sup>, 篠崎 貴宏<sup>\*2</sup>, 管 文海<sup>\*2</sup>

### Analysis of Dynamic Stress Concentration and Strain Rate Concentration for Notched Specimens Used for High Speed Tensile Test

Nao-Aki NODA<sup>\*1</sup>, Hayato OHTSUKA, Makoto ANDO, Yoshikazu SANNO,  
Yasushi TAKASE, Takahiro SHINOZAKI and Wenhai GUAN

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology,  
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-city, Fukuoka, 804-8550 Japan

Engineering plastics provide superior performance to ordinary plastics for a wide range of the use. For polymer materials, dynamic stress and strain rate are major factors to be considered when the strength is evaluated. Recently, high speed tensile test is recognized as a standard testing method to confirm the strength under dynamic loads, and it is analyzed by the finite element method; then, the maximum dynamic stress and strain rate are discussed with varying both the tensile speed and the maximum forced displacement. The strain rate concentration factor is found to be constant independent of the tensile speed, which is defined as the maximum strain rate appears at the notch root over the average nominal strain rate at the minimum section. The maximum strain rate is controlled by the tensile speed alone independent of the magnitude of the forced displacement. It is found that the difference between static and dynamic maximum stress concentrations ( $\sigma_{\max} - \sigma_{st}$ ) at the notch root is proportional to the tensile speed when  $u/t \leq 5000$  mm/s.

**Key Words** : Stress Concentration, Notch, Dynamic Stress, Strain Rate, Finite Element Method

### 1. 結 言

近年、高分子材料は広く工業材料として使用されるようになり、その要求は多様化・高度化してきている。材料の強靱化に関連して、高分子材料の強度は温度と速度によって変化するため、材料によっては特定の条件下でぜい性破壊へと遷移する性質を考慮する必要がある<sup>(1)~(3)</sup>。この性質の変化により衝撃強度が著しく低下し、思わぬ破壊に繋がるため、実用上の問題となっている。特に応力集中がある場合には平滑材では延性を示す温度でも切欠き底でぜい性破壊を起こす場合があり、その原因は切欠き底で部分的に高いひずみ速度が生じるためと考えられる。これまでに用いられてきた材料の衝撃強度試験法としては振り子式試験（アイゾット・シャルピー試験）などが一般的であるが、試験速度を任意に設定することができないため実際の製品の衝撃試験結果と必ずしも相関が良くないことは、製品・材料開発者がしばしば経験するところである。そこで、最近では現象解明のため、切欠き試験片に様々な引張速度を負荷した際のぜい化温度変化の測定が行われている。その測定は試験速度を空気圧や油圧で制御する、高速引張試験機で行われている。この高速引張試験は、新しい衝撃強度試験法として認識され近年普及している<sup>(4)</sup>。

\* 原稿受付 2013年2月6日

<sup>\*1</sup> 正員, フェロー, 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑仙水町1-1)

<sup>\*2</sup> 九州工業大学大学院工学研究科

<sup>\*3</sup> 正員, 九州工業大学大学院工学研究科

<sup>\*4</sup> 正員, 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系

E-mail: noda@mech.kyutech.ac.jp



高分子材料の衝撃強度を高速引張試験で評価するには重要な要素であるひずみ速度をまず求める必要がある。平滑材を用いた高速引張試験の場合、設定した引張速度  $u/t$  ( $u$ :変位,  $t$ :時間) に対するひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  は試験長さ  $l$  から  $\dot{\epsilon} = u/l$  で求めることができる。一方、切欠きを有する試験片の高速引張試験においては切欠き底の動的応力とひずみ速度を測定する場合、簡便な方法として切欠き底にひずみゲージを貼り測定を行う方法が用いられる。しかし、ひずみゲージではどうしてもゲージ幅の平均の値となってしまうため、切欠き底で急激に大きくなる応力を正確に測定することは不可能である。

これまで、動的応力集中については、応力集中部の形状として円孔<sup>(5)</sup>やだ円孔<sup>(6)</sup>が考察され、荷重としてステップ状荷重<sup>(7)</sup>、<sup>(8)</sup>やパルス状荷重<sup>(8)</sup>、<sup>(9)</sup>の研究がなされている。また、衝撃問題に関する研究は展望<sup>(10)-(12)</sup>にまとめられている。しかし、切欠きを有する試験片の応力集中部において、応力やひずみ速度集中に及ぼす境界条件や引張速度の影響を系統的にまとめた研究は見当たらない。そこで本研究では有限要素法を用いて、最近行われている高分子材料切欠き試験片の高速引張試験を動弾性解析によってシミュレートし、切欠き底の動的応力集中係数やひずみ速度集中係数を求め、境界条件や引張速度との関係を調べた。なお、実際の高分子材料の衝撃強度を解析するには、その塑性変形を考慮した応力ひずみ関係を用いる必要があるが、本研究では、まず高速引張試験における動的応力集中とひずみ速度集中の現象を明らかにするため弾性体を取り扱った。本研究では汎用有限要素法解析コード MSC.Marc Mentat 2005 を用いた。試験片が動的荷重を受けるときに生じる応力振幅の減衰を表現するため、質量減衰係数 $\alpha$ と構造減衰係数 $\beta$ をモーダル解析によって求めたものを使用した<sup>(13)</sup>。

## 2. 試験片と静的応力集中

本解析では材料として、高分子材料中で比較的高い衝撃特性をもつポリカーボネートを対象とする。そのヤング率は  $E=2.3\text{GPa}$ 、ポアソン比は  $\nu=0.37$  である。図 1 に解析に用いた試験片の形状を示す。試験片は切欠き半径  $\rho=0.03\text{mm}$ 、 $\rho=0.2\text{mm}$ 、切欠き深さ  $h=5\text{mm}$ 、切欠きの開口角度  $90^\circ$  の両側切欠きをもつ板状試験片である。 $\rho=0.03\text{mm}$

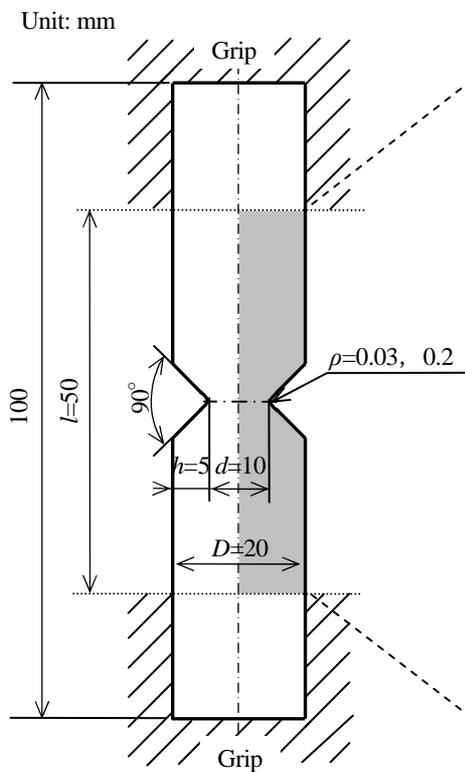


Fig. 1 Geometry of specimen

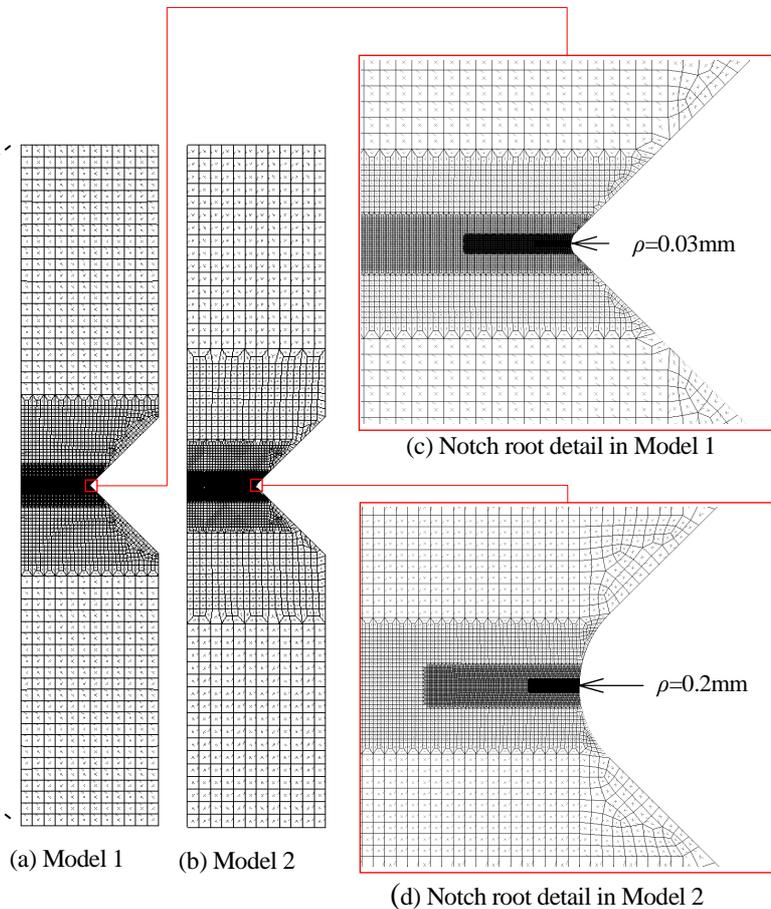


Fig. 2 FEM models

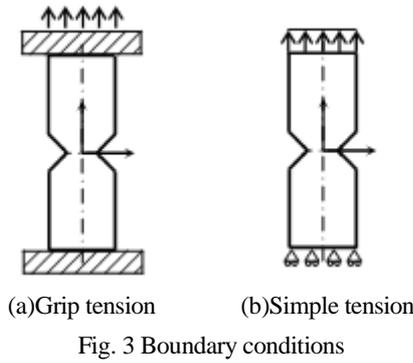


Table 1 Static stress concentration factor  $K_{ts}$  by FEM

Notch (mm)	$K_{ts}$ in Fig. 3(a)	$K_{ts}$ in Fig. 3(b)	Reference for Fig.3(b) <sup>(14)</sup>
$\rho=0.03, h=5$	14.46	14.48	14.49
$\rho=0.2, h=5$	6.14	6.15	6.12

は製品のフィレット部での切欠き半径を想定している。  $\rho=0.2\text{mm}$  は一般にアイゾット・シャルピー試験で用いられる切欠き半径に近い値である。 実際的高速引張試験は試験片端部を鉄鋼製チャック(試験片よりヤング率が  $10^2$  倍近く大きく、剛体と見なす)で固定し、もう一方の端部のチャックを一定速度で変位させるものである。 図2に解析に用いた FEM モデルを示す。 図 2(a), (b)に切欠き半径  $\rho=0.03\text{mm}$  のモデル 1,  $\rho=0.2\text{mm}$  のモデル 2 を示す。 また、図 2(c), (d)にモデル 1, 2 の切欠き底の拡大図を示す。 切欠き底の最小メッシュサイズ  $e$  はそれぞれ  $e=\rho/243$  である。 図 3 に解析モデル端部に与える境界条件を示す。

図 3(a)は剛体チャックにおける境界条件, (b)は一般的に用いられる均一引張応力の境界条件を示す。 表 1 にこれら 2 種類の境界条件の違いが静的応力集中係数  $K_{ts}$  に及ぼす影響を示す。 ここでは有限要素法を用いて静的応力集中係数を求め、文献の近似式<sup>(14)</sup>から算出した応力集中係数と比べて示す。 表 1 よりチャックによる引張と均一引張応力における応力集中係数はほとんど変わりがないといえる。 また、表 1 より、図 2 のメッシュを用いた結果は、精度の高い体積法に準じる精度を有する近似式<sup>(14)</sup>により算出した応力集中係数に対して誤差 1%以内となっており、図 2 のモデル 1, 2 は精度の高いメッシュであるといえる。 以下の動的応力集中の解析では解析時間刻み幅も解析精度に関係するが、時間刻み幅を  $1 \times 10^{-6}$  程度以下<sup>(15)</sup>とすれば 3 桁程度以上の精度が得られることを確認した。

### 3. 動的応力集中

図 4 に図 3(a)の境界条件で端部に与える強制変位  $u(t)$  と時間  $t$  の関係を示し、同時に端部における平均応力  $\sigma_{gross}$

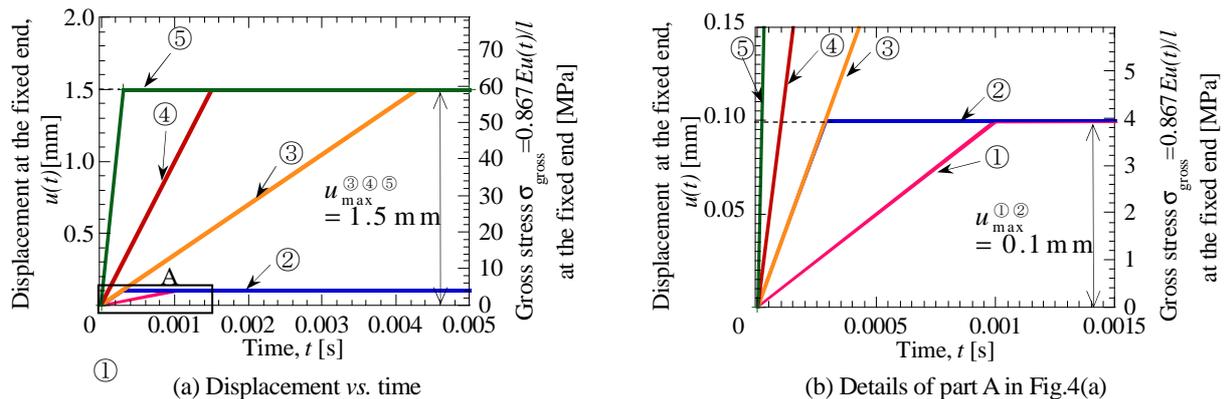


Fig. 4 Loading conditions

Table 2 Displacement  $u$  at the fixed end

Case		①	②	③	④	⑤	
Condition	Maximum displacement	$u_{max}$	0.1 mm $t=0.00100\text{s}$	0.1 mm $t=0.00029\text{s}$	1.5 mm $t=0.00429\text{s}$	1.5 mm $t=0.00150\text{s}$	1.5 mm $t=0.00030\text{s}$
	Tensile speed	$u/t$	100 mm/s $t<0.00100\text{s}$	350 mm/s $t<0.00029\text{s}$	350 mm/s $t<0.00429\text{s}$	1000 mm/s $t<0.00150\text{s}$	5000 mm/s $t<0.00030\text{s}$

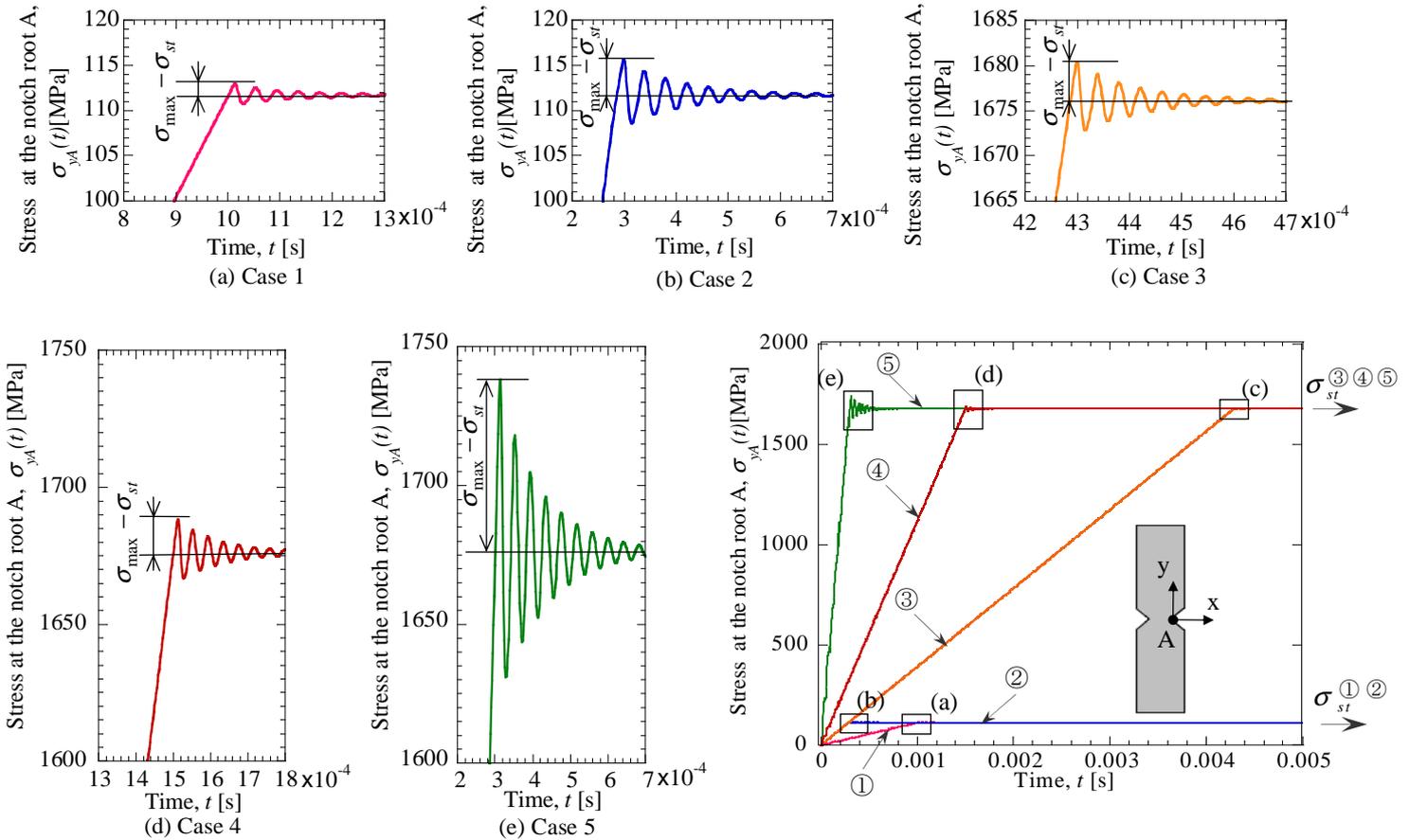


Fig. 5 Dynamic stress at notch root A for  $\rho=0.03\text{mm}$

も示す。この端部の平均応力は解析によって得られた値であり、 $\sigma_{gross}(t) = 0.867E \cdot u(t)/l$ である。ここでは図4に示すように強制変位条件として5つの場合を考える。表2にそれぞれのケースにおける引張速度 $u/t$ と最大変位 $u_{max}$ および時間 $t$ をまとめて示す。引張速度 $u/t = 5000\text{mm/s}$ は携帯電話等の製品の落下速度を想定しており、それ以下の引張速度 $u/t = 100\text{mm/s}, 350\text{mm/s}, 1000\text{mm/s}$ についても比較のために検討した。また、最大変位 $u_{max} = 1.5\text{mm}$ は実際の高速引張試験で脆性破壊を起こす伸びを想定しており、最大変位 $u_{max} = 0.1\text{mm}$ は破壊を生じない範囲の伸びを想定している。

図5にモデル1の切欠き底の動的応力 $\sigma_{yA}(t)$ と時間 $t$ の関係、およびそれぞれのケースで生じる応力振動の拡大図を示す。図5に示すように切欠き底での応力は、端部に与える強制変位に対して直線的に増加し、端部が最大変位に達した時間とほぼ同時に最大値を示す。それぞれのケースにおける動的応力の最大値を最大動的応力 $\sigma_{max}$ と定義する。動的応力は弾性波の効果で振動し、最終的にはそれぞれ静的な応力 $\sigma_{st}$ に収束する。図5(a)~(e)

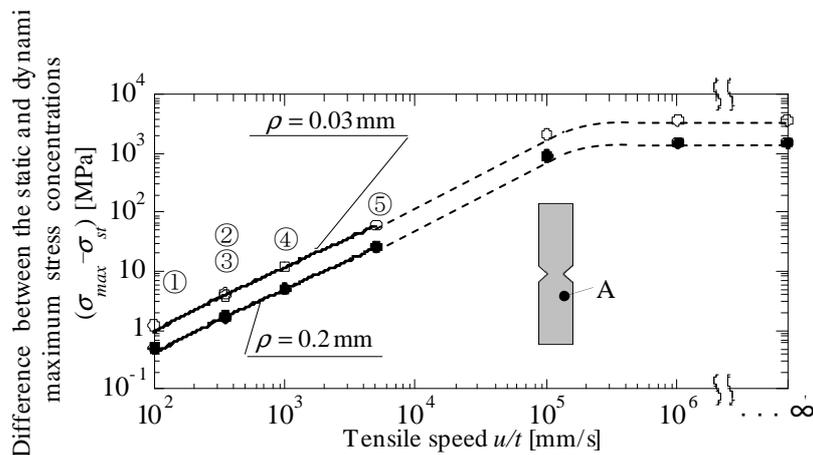


Fig. 6 Difference between the static and dynamic maximum stress concentrations ( $\sigma_{max} - \sigma_{st}$ ) vs. tensile speed

を比較すると引張速度が速くなるにつれ動的応力振動の振幅が大きくなっていることが分かる。また、図 5(b)と図 5(c)を比較すると、引張速度が等しいケース②と③において、ケース③は最大変位  $u_{\max}$  が 15 倍大きいにもかかわらず動的応力振動の振幅は等しい。そこで、それぞれのケースにおける切欠き底での最大動的応力と静的な応力との差 ( $\sigma_{\max} - \sigma_{st}$ ) に注目し、引張速度  $u/t$  との関係を図 6 に示す。図 6 では最大変位 1.5mm として引張速度  $u/t = 10^5, 10^6$  mm/s およびステップ荷重(引張速度  $u/t = \infty$ ) について行った追加計算結果も示す。図 6 に示すように高速引張試験の試験速度  $u/t \leq 5000$  mm/s では振幅 ( $\sigma_{\max} - \sigma_{st}$ ) が引張速度に比例している。本解析で仮定したケース①~⑤における最大引張速度 5000mm/s は、携帯電話の落下する際を想定したもので、この程度の引張速度までは振幅が引張速度に比例して増加する。しかし、自動車などの衝突を想定した引張速度が  $u/t \geq 10^5$  mm/s になるとひずみ速度は一定値へと収束していくことが明らかになった。これは応力波が音速で伝播することと関係している。

#### 4. ひずみ速度集中

図 7 に①~⑤のケースにおける  $\rho=0.03$ mm の切欠き底のひずみ速度と時間の関係を示す。図 7 に示すようにひずみ速度は荷重を与えると同時に最大のひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\max}$  を生じ振動する。そして、切欠き底でのひずみ速度は引張速度を与え続ける間、一定の値へと収束し、引張速度が 0 になる(最大変位  $u_{\max}$  で固定する)とひずみ速度は振動し 0 に収束する。ここで図 7(b)と図 7(c)を比較すると、引張速度の等しいケース②と③において、ケース③は最大変位  $u_{\max}$  が 15 倍大きいにも拘わらず、切欠き底の最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\max}$  と収束ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{const}$  が等しい値を示す。よって、ひずみ速度は最大変位に依存せず引張速度によって決まることが分かる。また、荷重を与え始めの際のひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{yA}(t)$  の振動の形態と、荷重が最大値に達した際に生じる振動の形態は全く同じである。なお図示していないが  $\rho=0.2$ mm の切欠きについても  $\rho=0.03$ mm と同様に切欠き底のひずみ速度は引張速度のみによって決まる。 $\rho=0.2$ mm に対して  $\rho=0.03$ mm の切欠き底の最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\max}$  は 2.33 倍大きい。また、最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\max}$  は収束ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{const}$  の 3.21 倍である。ここで図 8 に切欠き半径  $\rho=0.2$ mm,  $\rho=0.03$ mm のそれぞれの

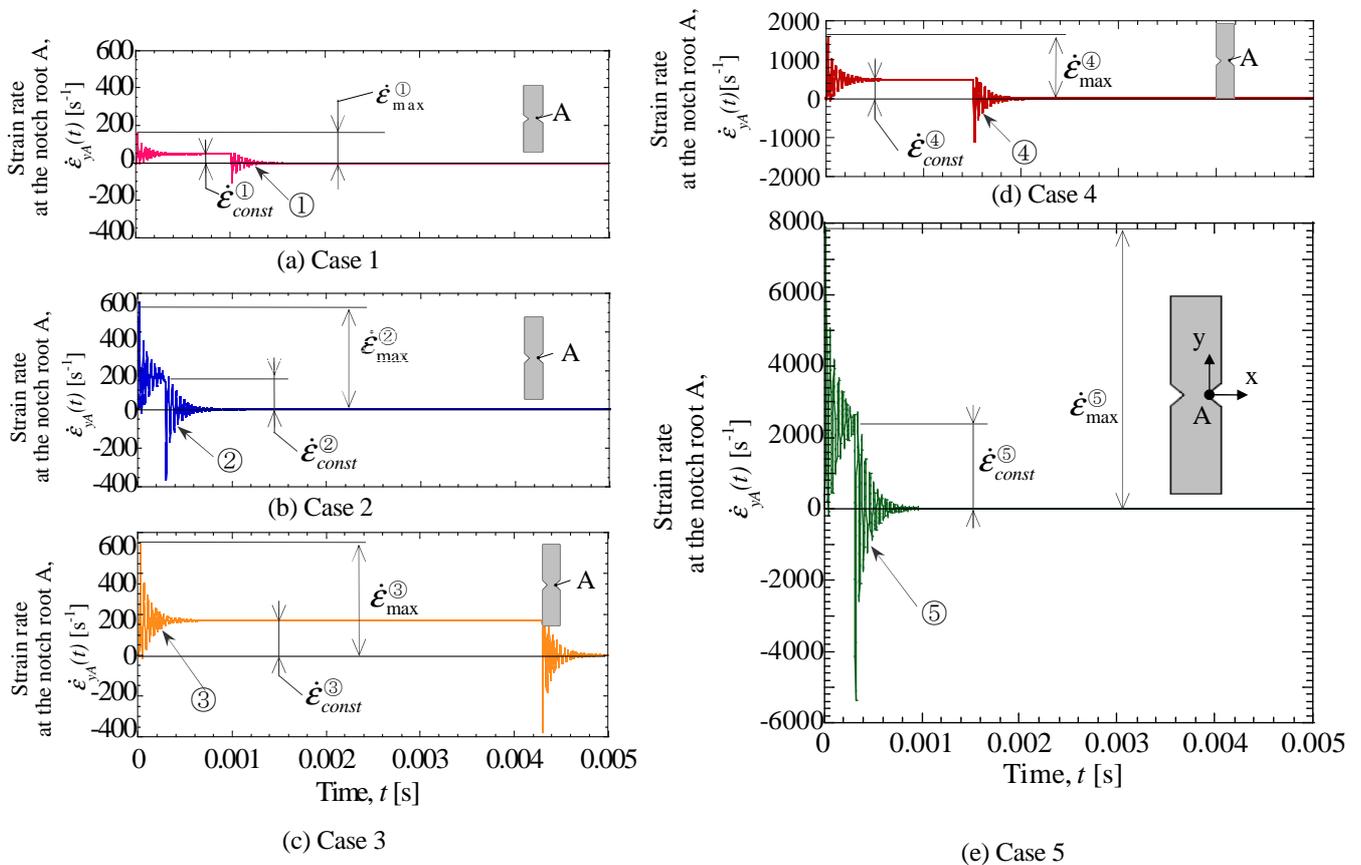


Fig. 7 Strain rate at notch root A for  $\rho=0.03$ mm

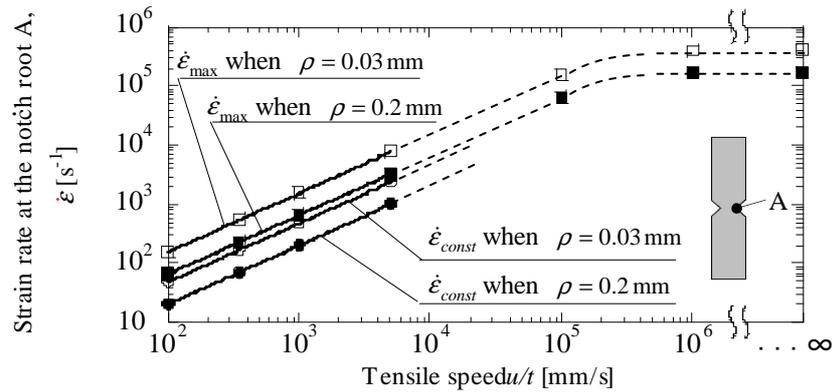


Fig. 8 Maximum strain rate and converged strain rate vs. tensile speed

ケースにおける最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{max}$  および収束ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{const}$  の引張速度  $u/t$  との関係を示す. 図 8 では最大変位 1.5mm として引張速度  $u/t = 10^5, 10^6$  mm/s およびステップ荷重(引張速度  $u/t = \infty$ ) について行った追加計算結果も示す. 図 8 に示すように高速引張試験の試験速度  $u/t \leq 5000$  mm/s ではひずみ速度が引張速度に比例している. しかし引張速度が  $u/t \geq 10^5$  mm/s になるとひずみ速度は一定値へと収束していく. このような図 8 の傾向は図 6 と類似している.

### 5. 最小断面の応力分布とひずみ速度分布

#### 5・1 動的応力集中係数

図 9 に最大動的応力  $\sigma_{yA}(t) = \sigma_{max}$  が発生した時間  $t$  における最小断面の最大動的応力分布を示す. ここでは, ケース②, ③, ⑤を比べて示す. 図 9(a)と図 9(b)を比較すると, 引張速度は等しいが最大変位  $u_{max}$  は異なるため応力分布は大きく異なることがわかる. また図 9(b)と図 9(c)を比較すると, 最大変位は等しいが引張速度が異なるため応力分布は多少異なる.

これは図 6 に示したように引張速度  $u/t$  が速くなると  $(\sigma_{max} - \sigma_{st})$  が大きくなり最大動的応力  $\sigma_{max}$  が変化するためである. つぎに動的応力集中係数  $K_{td}$  を  $K_{td}(t) = \sigma_{yA}(t) / \sigma_{nom}(t)$  と定義する. 図 9 より,  $\rho=0.03$ mm では  $\sigma_{yA}(t) / \sigma_{nom}(t) = 14.48$  となり, 全てのケースで一致する. また  $\rho=0.2$ mm においても  $K_{td} = 6.14$  となり, 動的応力集中係数  $K_{td}()$  は全てのケースで一致する. これより最小断面における平均動的応力に対する切欠き底の動的応

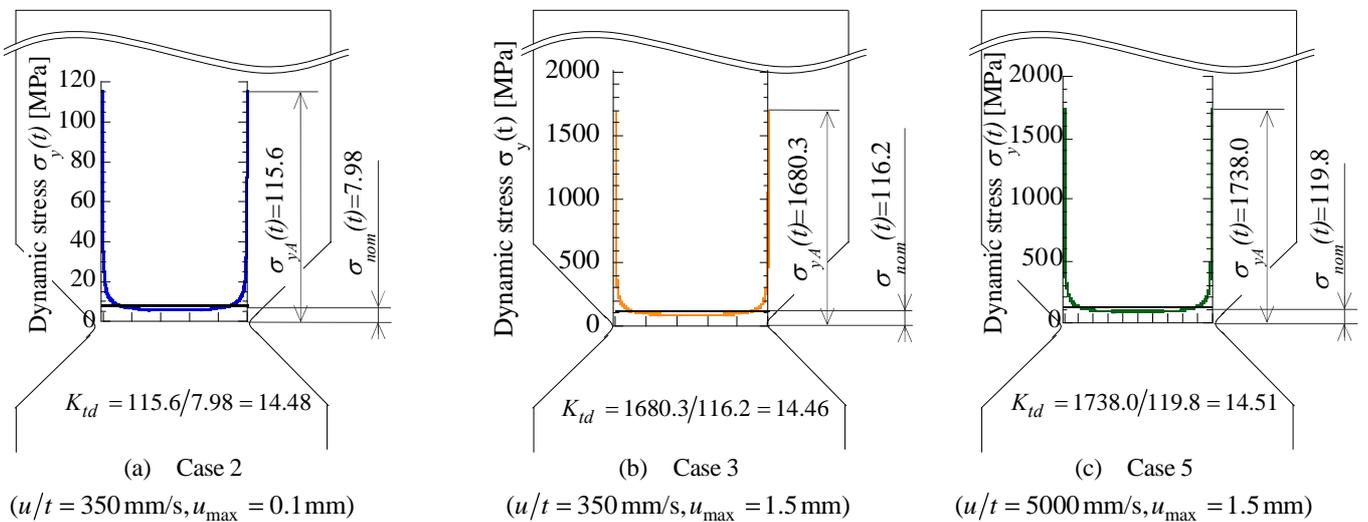


Fig. 9 Dynamic stress distribution along minimum section when the maximum dynamic stress appears for  $\rho=0.03$ mm

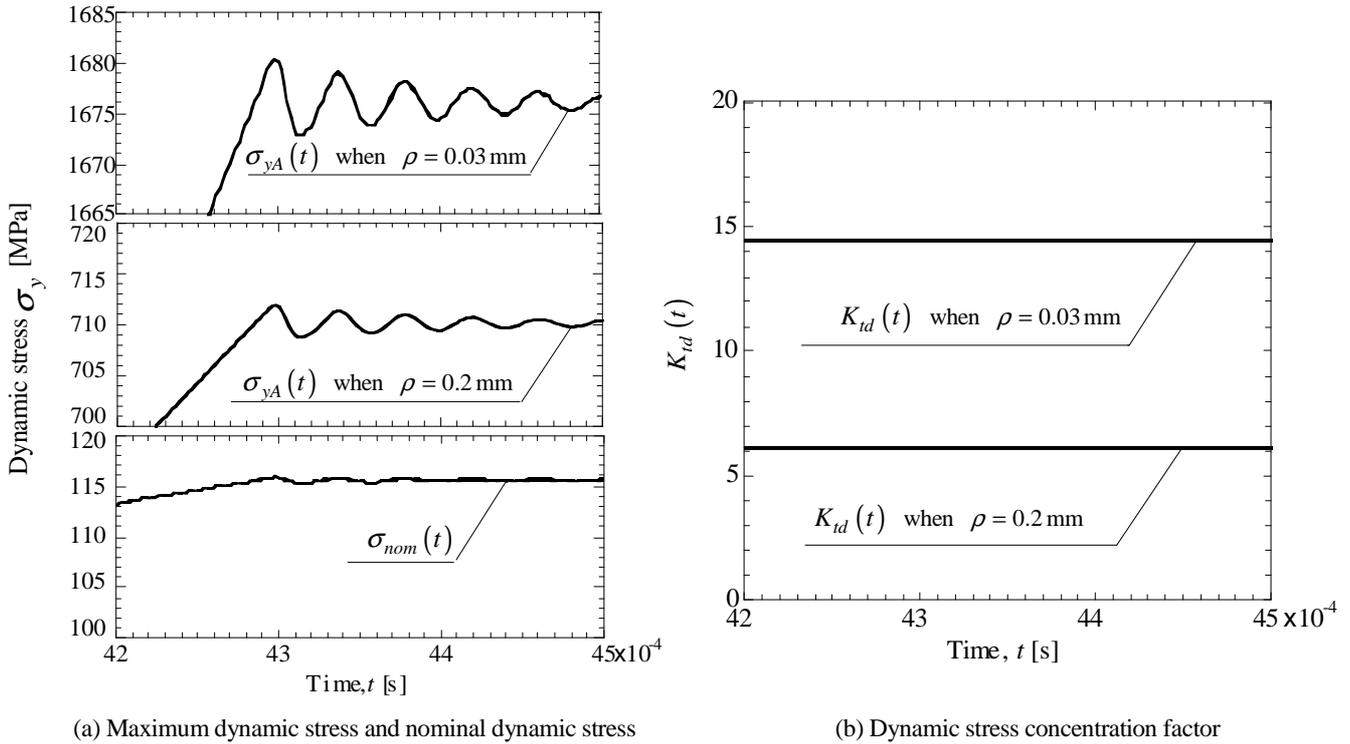


Fig.10 Constancy of dynamic stress concentration factor

力の比, すなわち, 動的応力集中係数  $K_{id}(t)$  が引張速度や最大変位によらず常に一定であることが分かる. 図 10(a) に,  $\rho=0.03$ mm, 0.2mm の切欠き底の動的応力  $\sigma_{yA}(t)$  の時間変化と最小断面の平均応力  $\sigma_{nom}(t)$  の時間変化を比べて示す. 図 10(b)に, 任意の時間  $t$  における  $K_{id}$  を示す. これより最小断面における平均動的応力に対する切欠き底の動的応力の比, すなわち, 動的応力集中係数  $K_{id}(t)$  が時間によらず常に一定であることが分かる. これは切欠き底の応力  $\sigma_{yA}(t)$  と最小断面の平均応力  $\sigma_{nom}(t)$  が同様の周期で振動しているためである. また  $\rho=0.03$ mm における動的応力集中係数  $K_{id}(t) = 14.48$  は表 1 の静的応力集中係数  $K_{is} = 14.49$  <sup>(13)</sup> に対して計算誤差の範囲で等しい.  $\rho=0.2$ mm における動的応力集中係数  $K_{id}(t) = 6.14$  も表 1 の静的応力集中係数  $K_{is} = 6.12$  <sup>(13)</sup> に対して計算誤差の範囲で等しい. よって, 切欠き底で最大応力を求める場合, 直接切欠き底で測定する必要はなく, 最小断面上の中央部での平均的な応力が分かれば静的応力集中係数  $K_{is}$  を用いて算定することができる.

### 5・2 ひずみ速度集中係数

図 11 に荷重軸方向に最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{yA}(t) = \dot{\epsilon}_{max}$  が発生した時間  $t$  における最小断面の最大ひずみ速度分布を示す. 図 11(a)と図 11(b)を比較すると, 最大変位  $u_{max}$  は異なるが引張速度  $u/t$  が等しいためひずみ速度分布は等しい. 図 11(b)と図 11(c)を比較すると, 最大変位  $u_{max}$  は等しいが引張速度  $u/t$  が異なるためひずみ速度分布は異なる. これは第 4 章で述べたように, ひずみ速度は最大変位にかかわらず引張速度に依存するためである.

つぎに, ひずみ速度集中係数  $K_{i\dot{\epsilon}}(t)$  を  $K_{i\dot{\epsilon}}(t) = \dot{\epsilon}_{yA}(t) / \dot{\epsilon}_{nom}(t)$  として定義する. 図 11 より,  $\rho=0.03$ mm では  $K_{i\dot{\epsilon}}(t) = 20.8$  となり, 全てのケースで一致する. また  $\rho=0.2$ mm においても  $K_{i\dot{\epsilon}}(t) = 8.65$  となり, ひずみ速度集中係数  $K_{i\dot{\epsilon}}(t)$  が全てのケースで一致する. つまり, 切欠き底に生じる最大ひずみ速度と最小断面の平均ひずみ速度の比, ひずみ速度集中係数  $K_{i\dot{\epsilon}}(t)$  は, 引張速度に拘わらず切欠き形状で決まる値である.

図 12(a)に, 任意の時間  $t$  における  $\rho=0.03$ mm, 0.2mm の切欠き底のひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{yA}(t)$  と最小断面の平均ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{nom}(t)$  を示す. 図 12(b)に, 任意の時間  $t$  における  $K_{i\dot{\epsilon}}(t)$  を示す. 図 12(b)より,  $K_{i\dot{\epsilon}}(t)$  が時間によらず常に一定であることが分かる. よってひずみ速度に関しても動的応力と同様, 最小断面の中央で測定すれば切欠き底の最大ひずみ速度が確定する.

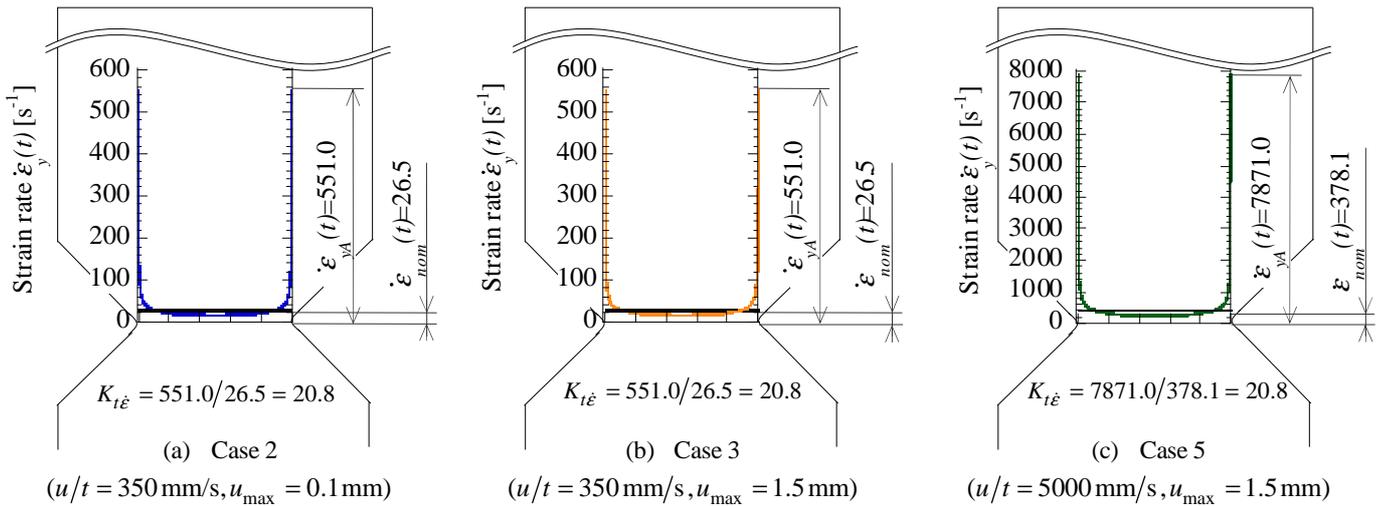


Fig. 11 Strain rate distribution along minimum section when the maximum strain rate appears for  $\rho=0.03\text{mm}$

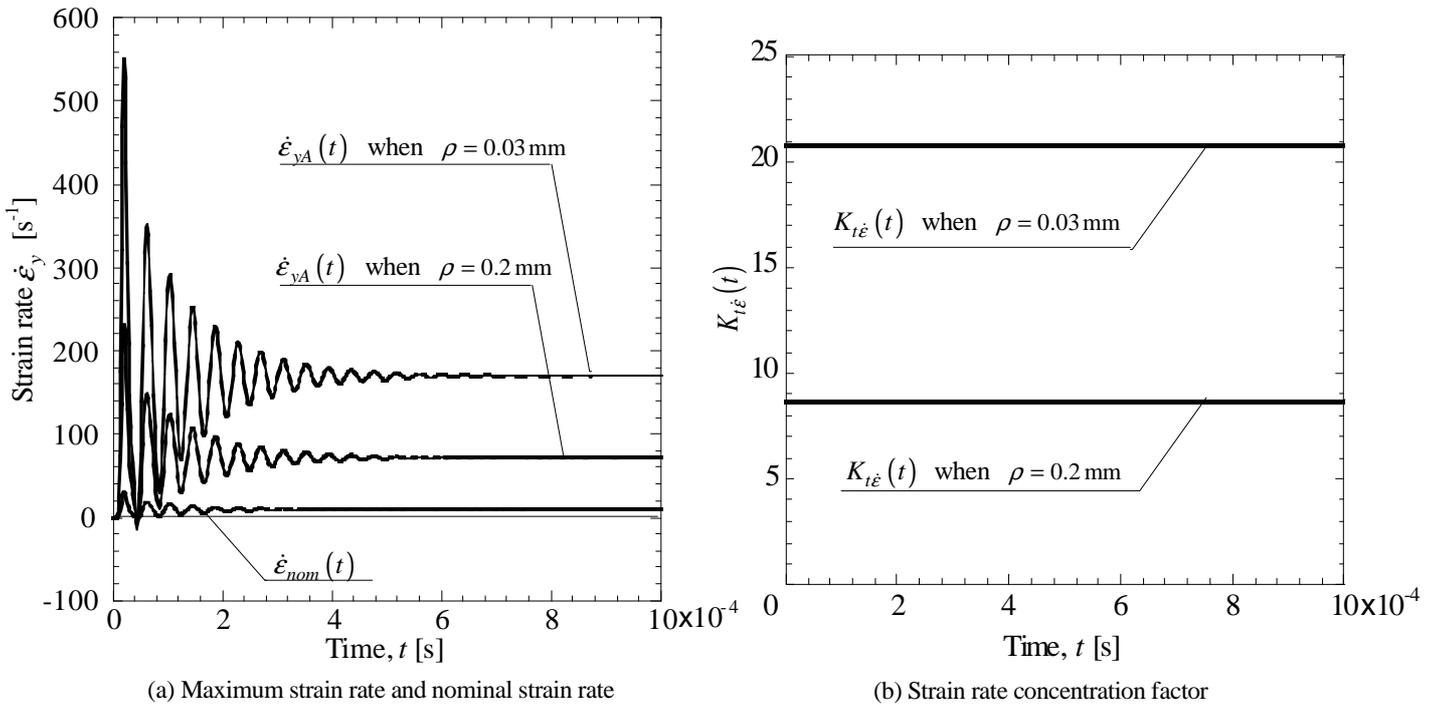


Fig.12 Constancy of strain rate concentration factor

## 6. 結 言

最近では製品の落下等の実態に則した衝撃試験として高速引張試験が行われ始めている．高分子材料の衝撃強度評価において、ひずみ速度はぜい性破壊遷移に影響を与える大きな要因の一つである．しかし、高速引張試験において切欠き底の動的応力やひずみ速度を正確に測定することは極めて困難である．そこで本研究では正確な評価が可能な有限要素法を用いた切欠き試験片における高速引張試験についての動弾性解析を行った．そして種々の引張速度および最大変位が動的応力集中およびひずみ速度集中におよぼす影響について考察し、以下の知見を得た．

- (1) ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}(t)$  は、引張速度に拘わらず切欠き形状で決まり、すべての時間において常に一定値を示す。
- (2) 動的応力集中係数  $K_{td}(t)$  は、静的応力集中係数  $K_{ts}$  と計算誤差の範囲で等しく、すべての時間において引張速度や最大変位によらず常に一定値を示す。
- (3) 切欠き底のひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  は、通常の高速引張試験で用いる引張速度の範囲 ( $u/t \leq 5000 \text{ mm/s}$ ) で、引張速度に比例する。
- (4) 切欠き底の動的応力の振幅(最大動的応力  $\sigma_{\max}$  と静的な応力  $\sigma_{st}$  との差 ( $\sigma_{\max} - \sigma_{st}$ )) は、高速引張試験で用いる引張速度の範囲 ( $u/t \leq 5000 \text{ mm/s}$ ) で、引張速度に比例する。

## 文 献

- (1) Radin, J., and Goldsmith, W., "Normal missile penetration and perforation of layered plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 7, (1988), pp. 229-259.
- (2) 綾哲也, 中山登史男, "高分子材料の縦弾性係数に及ぼすひずみ速度の影響", 塑性と加工, Vol. 36, No. 413 (1995), pp. 665-670.
- (3) 本間精一, "プラスチックの実用強さと耐久性(4)", プラスチックス, Vol. 55, No.1 (2004), pp.174-182.
- (4) 竹田英俊, "樹脂材料の高速引張試験法", マテリアルライフ学会誌, Vol. 20, No. 3 (2008), pp.118-124.
- (5) 茶谷明義, 内山進, "帯板の円孔および半円切欠き部の動的応力集中", 材料, Vol. 21, No. 226 (1972), pp. 636-640.
- (6) Altenhof, W., Zamani, N., North, W., and Arnold, B., "Dynamic Stress Concentrations for an Axially Loaded Strut at Discontinuities Due to an Elliptical Hole or Double Circular Notches", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.30, No.3 (2004), pp. 255-274.
- (7) 河田幸三, 橋本彰三, "動的引張りをうける長い切欠き弾性棒での動的応力集中について", 東京大学宇宙航空研究所報告, Vol. 8, No. 2 (1972), pp. 377-384.
- (8) 松本浩之, 中原一郎, "内外面に等分布衝撃圧力を受ける有孔円板および円筒", 日本機械学会論文集, Vol. 32, No. 237 (1966), pp. 709-717.
- (9) Georgiadis, H.G., "Dynamic Stress Concentration Around a Hole in a Viscoelastic Plate", *Acta Mechanica*, Vol. 111, No. 1-2 (1995), pp. 1-12.
- (10) 谷村眞治, "材料・構造物の衝撃問題研究(これまでの推移と今後の展望)", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 63, No. 616 (1997), pp. 2466-2471.
- (11) 武田展雄, "先進複合材料/構造の衝撃損傷と破壊", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 63, No. 616 (1997), pp. 2472-2477.
- (12) 井上裕嗣, 岸本喜久雄, 青木繁, "衝撃問題における逆解析", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 63, No. 616 (1997), pp. 2478-2484.
- (13) MSC. Marc 2005, VolA-Z, MSC.Software Co., p.5 (2004).
- (14) 野田尚昭, 高瀬康, 設計に活かす切欠き・段付き部の材料強度, (2010), p.187, 日刊工業新聞社.
- (15) 内藤正鄰, 台丸谷政志, "衝撃荷重下における金属材料の動的降伏について", 材料, Vol.33, No.370 (1984), pp.801-807.