切欠引張強さ比の応力三軸度およびひずみ硬化指数依存性*

大 橋

眞^{*1}

Dependence of Notch Strength Ratio on Stress Triaxiality and Strain Hardening Exponent for Structural Steels

Makoto OHASHI^{*2}^{*2} National Research Institute of Police Science,
6-3-1 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-0882 Japan

Dependence of notch strength ratio on stress triaxiality and strain hardening exponent was investigated for a variety of structural steels. Both the notched specimens with different notch root radii and the unnotched specimens were employed to obtain a wide range of stress triaxiality. All specimens were loaded up to break under tensile loading at room temperature. Notch strength ratio was defined by a ratio of notch tensile strength to tensile strength of the material. The notch tensile strength required to break the notched specimen depends on the stress-state characterized by stress triaxiality. Notch strength ratio increased with increasing stress triaxiality, which eventually reached the limiting value in the range of high stress triaxiality. The limiting notch strength ratio showed a clear dependence on the strain hardening exponent, and could be used conveniently to estimate the upper limit load to break the mechanical component in failure analysis.

Key Words: Notch Strength Ratio, Stress Triaxiality, Strain Hardening Exponent, Limiting Notch Strength Ratio, Failure Analysis

1. 結 言

機械・構造物の破壊事故の原因究明に際しては、破断面の検査、金属組織的な検査など、多くの観点から検査を行い、事故原因を明確に特定する⁽¹⁾。しかし、事故原因をより厳密に特定するには、破断時に加わった負荷荷重の推定が必要となる。この場合、有限要素法、破壊力学に基づいた解析、再現的な強度試験など、詳細な力学的検討が必要となる。

一方、詳細な解析とは別に、構造部材に加わった負荷荷重の推定に関しては、疲れ限度比など、主要な機械的特性値に対する破壊特性値の比率が重要な強度指標値として活用しうる。例えば、回転曲げにより疲労破断した場合、疲れ限度と引張強さの比率で示される疲れ限度比は、一般的な鋼材では0.5⁽²⁾、鋳鋼では0.3程度となる⁽³⁾。ねじりと回転曲げの疲れ限度の比率は、一般的な鋼材では0.5~0.7程度となる⁽⁴⁾。また、転がり疲れ限度は、広範な金属材料について引張強さなどの関数として示されている⁽⁵⁾。破壊力学による強度評価に関しても、下限界応力拡大係数範囲は硬さと相関を示すことが指摘されている⁽⁶⁾。したがって、回転曲

げなどにより疲労破断した場合、部材に加わった繰返し応力の下限値は引張強さなどから簡便に推定が可能となる。

このような観点から、本報では、構造部材の破断時に加わった引張荷重の推定に関して、応力三軸度の変化に伴う上限値を、機械的特性値に基づいた簡便な指標値を用いて推定するため以下の検討を行った。すなわち、破壊事故の一般的なプロセスは、設計ミス・施工ミスなどに起因して部材の一部から疲労き裂が発生・成長し、残された部材断面が荷重に耐え切れず、延性的に破断して大規模な事故に至る例が多い。したがって、欠陥を有する構造部材の破断に要した荷重は、残された部材断面を延性破断させるのに要した最大荷重となる。このため、構造部材の破断時に加わった引張荷重の推定に際しては、延性き裂の発生を対象とした破壊靱性値の評価とは異なり、欠陥を有する部材の延性破断に要した最大荷重の評価が必要となる。

この点に関しては、従来、切欠試験片の破断に要した最大応力を示す切欠引張強さと、引張強さの比率で示される切欠引張強さ比の変化特性について検討がなされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その結果、切欠引張強さ比は、応力の多軸性とともに変形特性によっても影響を受けることが示されている。しかし、応力多軸性の影響に関しては、破壊靱性値の板厚依存性に対する検討と同様、

* 原稿受付 2008 年 5 月 21 日。

*¹ 正員, 科学警察研究所(☎ 277-0882 柏市柏の葉 6-3-1).
E-mail: ohashi@nrips.go.jp

応力三軸度の増加に伴う切欠引張強さ比の飽和特性を明らかにすることが、破断時に加わった引張荷重の上限値を推定する上では重要となる。

このため、本報では、それらの検討⁽⁷⁾⁽⁸⁾に比して応力三軸度の高い切欠試験片を用い、切欠引張強さ比の飽和特性とともに、その上限値となる飽和切欠引張強さ比を、強度レベルが異なり、変形特性の異なる6種の構造用鋼材について検討した。また、変形特性値の影響に関しては、局部伸びと全伸びの比率⁽⁷⁾⁽⁸⁾に比して、切欠試験片の力学的特性を規定するより重要な変形特性値と考えられるひずみ硬化指数と切欠引張強さ比との関係について検討を行った。

2. 実験方法

2・1 供試材および試験片 供試材は、2種の一般構造用圧延鋼材 JIS SS400、2種の溶接構造用圧延鋼材 JIS SM520B, SM570、溶接構造用高降伏点鋼板 JIS SHY685、ニッケルクロム鋼鋼材 JIS SNC631 である。2種の SS400 を SS400(A), (B) とする。6種の鋼材の降伏応力 σ_y 、引張強さ σ_B 、伸び δ_T 、ひずみ硬化指数 n を表1に示す。

Table1 Mechanical properties of the materials

	σ_y (MPa)	σ_B (MPa)	δ_T (%)	n
SS400(A)	308	463	32.5	0.256
SS400(B)	328	474	31.0	0.200
SM520B	396	579	23.6	0.213
SM570	522	635	19.9	0.152
SHY685	730	824	15.2	0.065
SNC631	771	871	16.8	0.119

実験には、応力三軸度を変化させる目的で、直径10mmの平滑丸棒試験片、切欠先端半径 R を6, 3, 1, 0.5, 0.25, 0.1mmと6種に変化させた、外径20mm、内径10mmの円周切欠付き丸棒試験片を用いた。試験片形状を図1に示す。それらの試験片について、平滑丸棒試験片の引張強さ、切欠試験片の切欠引張強さを公称応力一伸び線図上で求めた。

破断試験に加えて、SS400(B), SM520B, SM570 の R6, R1, R0.5, R0.1mm 試験片については、除荷試験により公称応力と切欠断面上の平均ひずみ比率との関係を破断点近傍まで求め、切欠引張強さにおけるき裂の発生状況とともに、切欠断面上の平均ひずみ比率を求めた。平

(a) Unnotched tensile specimen

$R=6, 3, 1, 0.5, 0.25, 0.1$

(b) Notched tensile specimen

Fig.1 Geometries of tensile specimens (dimensions in mm)

均ひずみ比率は、切欠断面上の平均ひずみと一様伸びの比率であり、本報では式(1)により算出した切欠断面上の平均真ひずみと、一様伸びに相当する真ひずみを表すひずみ硬化指数の比率で示した。

$$\varepsilon_m = 2 \ln(d_0/d) \quad (1)$$

ε_m : 平均ひずみ

d_0 : 試験前の切欠断面直径

d : 除荷後の切欠断面直径

2・2 応力三軸度 平滑丸棒試験片と6種の切欠試験片について、破断時の応力三軸度を Bridgman の近似式(2)により求めた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。応力三軸度は変形過程において変化するが、本報では式(2)より算出した破断時の応力三軸度を、個々の試験片の応力三軸度の代表的な値として、切欠引張強さとの関係を検討した。切欠底部の曲率半径の測定例を R0.5mm 試験片について 図2に示す。曲率は破断後の切欠底部の形状に内接する円の半径として、4カ所の測定から平均値を求めた。

$$\sigma_m/\sigma_e = 1/3 + \ln(1 + d/4R) \quad (2)$$

σ_m/σ_e : 応力三軸度

σ_m : 静水応力

σ_e : 相当応力

d : 破断後の最小断面直径

R : 破断後の切欠底部曲率半径

Fig.2 Measurement of profile radius of notch root after fracture

3. 実験結果および考察

3・1 切欠試験片の応力一伸び線図 6種の鋼材のうち、5種の鋼材、SS400(A), SS400(B), SM520B, SM570, SNC631 の6種の切欠試験片は、ほぼ同様の破

Fig.3 Nominal stress-elongation curves for SS400(A)

壊挙動を示している。このうち、図3には、SS400(A)のR6, R3, R1, R0.1mm試験片について代表的な公称応力-伸び線図を示す。上記の5種の鋼材の場合、切欠の鋭いR0.1mm試験片を含め、いずれの試験片も破断に要した最大応力である切欠引張強さに到達後、明瞭に応力低下を伴って破断している。一方、延性のやや低いSHY685のR1, R0.5, R0.25, R0.1mm試験片では、全断面降伏後の応力上昇過程において、最大応力で応力低下を伴うことなく破断している。このため、それらの4種の切欠試験片では破断時の最大応力を切欠引張強さとした。

3・2 切欠引張強さおよび切欠引張強さ比の応力三軸度依存性 6種の鋼材の引張強さ、および切欠引張強さを応力三軸度に対して図4に示す。6種の鋼材のうち、SHY685のR1mm以下の4種の切欠試験片では、切欠引張強さで応力低下を伴うことなく破断している。このため、それらの試験片では、応力低下を生じる領域まで変形が可能であれば、切欠引張強さはやや高い値を示すと考えられる。しかし、いずれの鋼材に関し

Fig.4 Relation between notch tensile strength and stress triaxiality

Fig.5 Relation between notch strength ratio and stress triaxiality

ても、切欠引張強さは、個々の試験片の塑性拘束の程度を示す応力三軸度の増加とともに上昇しており、応力三軸度の高い試験片では飽和する傾向を示している。同様に、切欠引張強さと引張強さの比率で示した切欠引張強さ比を、応力三軸度に対して図5に示す。

いずれの鋼材の切欠引張強さ比も、応力三軸度の増加とともに上昇した後、応力三軸度の高い領域では飽和している。切欠引張強さ比が飽和傾向を示しているR0.5, R0.25, R0.1mm試験片の切欠引張強さ比の平均値を飽和切欠引張強さ比とする。飽和切欠引張強さ比は、SS400(A)では1.72, SS400(B)では1.8, SM520Bでは1.79, SM570では1.89, SHY685では1.96, SNC631では1.92であり、個々の鋼材の変形特性に応じた差異を示していると考えられる。

切欠引張強さ、切欠引張強さ比の飽和特性に関しては、切欠試験片における延性き裂発生時のひずみは、R0.5, R0.2mm試験片ではき裂試験片と比べて差がないとされている⁽¹⁰⁾。したがって、R0.5~0.2mm程度以下の切欠の鋭い試験片では、延性的な破壊挙動に及ぼす応力三軸度の影響はほぼ飽和していると考えられる。また、破断後の切欠断面直径から、式(1)を用いて求めた個々の試験片の破断ひずみは、いずれの鋼材についても延性の低下を促進する応力三軸度の増加とともに低下する傾向を示している。このため、式(2)より算出した応力三軸度はおおむね妥当な値を示していると考えられる。

3・3 切欠試験片の応力-平均ひずみ比率線図

6種の鋼材のうち、SNC631を除いた5種の鋼材のR0.1, R0.25, R0.5mm試験片など、応力三軸度の高い試験片では、ディンプル破面にへき開破面が一部混在した破断面を示している。このため、延性き裂の発生に伴う応力低下、へき開破面への遷移が切欠引張強さの飽和特性に影響を及ぼしていることも考えられる。この点に関しては、SS400(B), SM520B, SM570のR0.1, R0.5, R1, R6mm試験片について、切欠引張強さにおける延性き裂の発生状況を検討した。

4種の試験片のうち、R0.1, R6mm試験片について求めた公称応力-切欠断面上の平均ひずみ比率線図を図6に示す。個々の試験片の切欠引張強さを→で示す。除荷試験により求めた延性き裂の発生点を⇒で示す。

4種の試験片のうち、R0.1mm試験片では、切欠引張強さに到達後、応力がやや低下した時点において延性き裂が発生している。この点については、塑性拘束の高い側溝付き裂試験片では、延性き裂は最大応力近傍で発生することが示されており⁽¹¹⁾、切欠の鋭い試験片では同様の傾向を示していると考えられる。それに対

Fig.6 Nominal stress—average strain ratio curves

し、R6mm 試験片では、切欠引張強さに到達後、応力が明瞭に低下した状況下で延性き裂が発生している。R 0.5, R1mm 試験片についても、切欠引張強さに到達後、応力が明瞭に低下した後に延性き裂が発生している。一方、延性き裂からへき開破壊への遷移は応力がさらに低下した破断時と考えられる。このため、延性き裂の発生に伴う応力低下、へき開破壊への遷移は切欠引張強さに影響を及ぼしていないと考えられる。

3・4 切欠引張強さ比と限界平均ひずみ比率の関係

延性き裂は切欠引張強さに到達後、応力低下の過程で生じている。このため、切欠引張強さは、切欠試験片が最大応力に到達して不安定変形を開始する、平滑丸棒試験片の引張強さに相当する応力と考えることが出来る。

この場合、各種切欠試験片の切欠引張強さにおける切欠底部の限界ひずみは、ひずみ勾配の影響により、平滑丸棒試験片の一樣変形の限界ひずみである一樣伸びと比べて高い値を示している⁽¹²⁾⁽¹³⁾。また、ひずみ勾配が高くなるほど、塑性拘束の影響により限界ひずみは上昇すると考えられる⁽¹⁴⁾。したがって、切欠が鋭く、ひずみ勾配の高い試験片では⁽¹⁵⁾、切欠底部の限界ひずみがより高い値に到達するまで引張荷重が上昇し、切欠引張強さが高い値を示すと考えられる。この点に関しては、切欠試験片の大規模降伏状態における応力場は、切欠鋭さと切欠底部の最大ひずみにより一意的に決定されており⁽¹⁶⁾、限界ひずみは切欠試験片の力学的特性を規定する重要なパラメータと考えられる。

一方、切欠引張強さ比は、切欠底部における限界ひ

ずみが一樣伸びに比してどの程度上昇しているか、切欠底部の塑性拘束の強さを反映した両者の比率と相関を示していると考えられる。このため、本報では、切欠底部の限界ひずみの増加に対応して上昇していると考えられる、切欠断面上の平均ひずみに対する一樣伸びの比率と、切欠引張強さ比との関係を検討した。図6に R0.1, R6mm 試験片についての線図を示した SS400 (B), SM520B, SM570 の4種の切欠試験片の公称応力—平均ひずみ比率線図上で、個々の試験片の切欠引張強さにおける平均ひずみ比率を限界平均ひずみ比率として求め、切欠引張強さ比に対して図7に示す。

Fig.7 Relation between notch strength ratio and critical average strain ratio

切欠引張強さ比は、切欠の鋭い試験片では塑性拘束の程度が上昇して高い値を示しており、切欠が鈍く、切欠引張強さ比の低い R6mm 試験片ではその変化もわずかであるが、4種の試験片における限界平均ひずみ比率は、図7に示した R0.1, R0.5, R1, R6mm のいずれの試験片についても、SM520B, SS400 (B), SM570 の順にひずみ硬化指数の低い鋼材ほど高い値を示しており、その比率の増加とともに切欠引張強さ比は上昇している。すなわち、切欠試験片が最大応力を示す限界平均ひずみ比率は、切欠鋭さが同一の試験片においても、ひずみ硬化指数の低い鋼材ではやや高い値を示している。このため、その比率の高い試験片ほど、切欠底部の限界ひずみの増加に対応して、切欠断面上の平均ひずみが一樣伸びに比してより高い値に達するまで引張荷重が上昇し、切欠引張強さ比が高い値を示していると考えられる。

3・5 飽和切欠引張強さ比とひずみ硬化指数の関係

図7に示した結果から、切欠引張強さ比は、切欠鋭さとともに、ひずみ硬化指数の影響を受けていると考えられる。この点については、切欠試験片あるいはき裂試験片の力学的特性は、個々の材料の応力—ひずみ関係を規定するひずみ硬化指数の影響を受けていると考えられ、例えば弾塑性状態における切欠底部の最大ひずみは、負荷応力などとともにひずみ硬化指数の関

数として近似的に与えられている⁽¹⁷⁾。切欠底部の鈍化挙動もひずみ硬化指数の影響を受け、ひずみ硬化指数が低い材料では、より明瞭に鈍化が進行することが示されている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。切欠底部のひずみ分布に相当すると考えられる、ひずみ勾配を生じている引張試験片が、最大応力に到達して不安定変形を開始する限界ひずみも、ひずみ硬化指数の関数として与えられている⁽¹⁴⁾。

また、き裂端近傍のひずみ場は、き裂端からの距離を r 、ひずみ硬化指数を n とした場合、HRR 場では $r^{-1/(1+n)}$ で表される特異性を示している⁽²⁰⁾。このため、本報では、切欠引張強さ比に及ぼすひずみ硬化指数の影響を検討するため、切欠引張強さが飽和傾向を示している切欠の鋭い試験片では $r^{-1/(1+n)}$ 特異性に基づいたひずみ分布を示していると考え、切欠底部のひずみの分布に相当する分布を以下のように便宜的に求めた。6種の鋼材について、切欠底部近傍の任意の箇所 r_0 における $r^{-1/(1+n)}$ を1として、切欠端部の各位置における $r^{-1/(1+n)}$ との比率分布を、それぞれの鋼材のひずみ硬化指数から求めた。6種の鋼材について求めた $r^{-1/(1+n)}$ の比率分布を図8に示す。横軸は r_0 に対する比率 r/r_0 を示す。

Fig.8 Normalized strain ratio distribution

SHY685のひずみ硬化指数はSS400(A)の約1/4であり、切欠端部におけるひずみ比率は、ひずみ硬化指数の低い鋼材ほど上昇して、分布の勾配は高くなる傾向を示している。したがって、ひずみ硬化指数の低下は、切欠の先鋭化⁽¹⁵⁾と同等の効果を示していると考えられ、ここでは横軸の比率が0.05の箇所におけるひずみ比率を、ひずみ比率の分布の勾配を示す値として飽和切欠引張強さ比に対して図9に示す。

飽和切欠引張強さ比は、切欠底部のひずみ比率の分布の勾配が増加するとともに上昇する傾向を示しており、ひずみ硬化指数が低く、ひずみ勾配の高い切欠試験片の端部では、低ひずみ領域による塑性拘束が増大して、切欠引張強さ比が上昇していると考えられる。このため、切欠引張強さ比は、切欠鋭さの変化に加えて、ひずみ硬化指数の影響を受けていると考えられ、

Fig.9 Relation between limiting notch strength ratio and strain ratio gradient

Fig.10 Relation between limiting notch strength ratio and strain hardening exponent

図10には、飽和切欠引張強さ比とひずみ硬化指数の関係を示す。6種の鋼材の飽和切欠引張強さ比は、ひずみ硬化指数の低下とともに上昇する傾向を示しており、いずれの鋼材の飽和切欠引張強さ比も、両者の関係を近似した式(3)により、ひずみ硬化指数から容易に推定が可能となる。このため、破壊事故の原因究明に際しても、飽和切欠引張強さ比は、破断時に加わった引張荷重の上限値を推定する上で重要な強度指標値として活用しようと考えられる。

$$y = -3.32n^2 - 0.23n + 1.99 \quad (3)$$

y : 飽和切欠引張強さ比

n : ひずみ硬化指数

なお、図11には、切欠引張強さ比との相関が指摘されている、全伸びに占める局部伸びの比率⁽⁷⁾⁽⁸⁾とひずみ硬化指数の関係を示す。局部伸び比率は、一様伸びに相当するひずみ硬化指数の低下とともに上昇する傾向を示しており、飽和切欠引張強さ比とも相関を示している。しかし、局部伸びが全伸びに占める局部伸び比率は物理的な意味が必ずしも明確ではなく、板厚の増加に伴う全伸びの上昇によっても変化すると考えられる⁽²¹⁾。このため、安定した材料定数とはならないことが考えられ、切欠引張強さ比は、切欠鋭さとともに、変形特性値の影響としては、ひずみ硬化指数の低下に伴う変形の局所化により上昇する傾向を示していると考えられる。

Fig.11 Variation of local elongation ratio with strain hardening exponent

機械・構造物の力学的な解析に際しては、延性的な破壊挙動を対象とした大変形の解析を行う場合、ボイドの発生などに係わる材料特性値を適切に設定する必要がある、それらの値を引張特性値から推定するための検討もなされている⁽²²⁾。破壊靱性値に関しても、引張特性に基づいた簡便な評価が検討されている⁽²³⁾。したがって、詳細な解析とは別に、疲れ限度比などと同様^{(2)~(5)}、引張特性に基づいた簡便な強度評価は実用的には極めて重要と考えられ、ひずみ硬化指数から容易に推定が可能な飽和切欠引張強さ比は、構造部材の破断に要した引張荷重の上限値を推定する上で重要な強度指標値として活用しようと考えられる。

4. 結 論

強度レベルが異なり、変形特性の異なる6種の鋼材について、応力三軸度の変化に伴う切欠引張強さ比の飽和特性とともに、飽和切欠引張強さ比とひずみ硬化指数の相関について検討を行った。結論を以下に示す。

(1) 6種のいずれの鋼材に関しても、切欠引張強さ、切欠引張強さ比は、応力三軸度の増加とともに上昇して飽和する傾向を示している。

(2) 6種の鋼材の飽和切欠引張強さ比は1.72~1.96程度の値を示しており、ひずみ硬化指数の低下とともに上昇する傾向を示している。

(3) 飽和切欠引張強さ比は、ひずみ硬化指数から容易に推定が可能であり、構造部材の破断に要した引張荷重の上限値を推定する上で簡便かつ重要な強度指標値として活用しようと考えられる。

文 献

(1) Ohashi, M., *Forensic Science*, Vol.2(in Japanese), (2005), pp.115-143, Reibunsha.
 (2) Abe, T., Furuya, Y., Matsuoka, S., *Trans. JSME, Series A*,

Vol.67, No.664(2001), pp.1988-1995.
 (3) Nishida, S., Hattori, N., Nakade, N., Takigawa, H., *Trans. JSME, Series A*, Vol.64, No.621(1998), pp. 1215-1220.
 (4) Nisitani, H., Fukuda, T., *Trans. JSME, Series A*, Vol.59, No.558(1993), pp.311-318.
 (5) Morimoto, A., Matsumoto, E., Takeda, H., *Trans. JSME, Series A*, Vol.66, No.647(2000), pp.1337-1342.
 (6) Masuda, C., Nishijima, S., Tanaka, Y., *Trans. JSME, Series A*, Vol.52, No.476(1986), pp.847-852.
 (7) Majima, T., Anzai, M., Nakazawa, H., *Trans. JSME, Series A*, Vol.52, No.476 (1986), pp.1171-1176.
 (8) Majima, T., Ogata, Y., Nakazawa, H., *Trans. JSME, Series A*, Vol.53, No.488(1987), pp. 809-815.
 (9) Geni, M., Yanagi, K., Kikuchi, M., *Trans. JSME, Series A*, Vol.66, No.648(2000), pp.1461-1467.
 (10) Otsuka, A., Miyata, T., Nishimura, S., Kimura, M., Mabuchi, M., *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.29, No.322(1980), pp.717-723.
 (11) Mutoh, Y., Sakamoto, I., Nomura, K., Aya, K., *Trans. JSME, Series A*, Vol.51, No.468(1985), pp.2008-2013.
 (12) Majima, T., Miyagawa, M., *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.29, No.317(1980), pp.130-136.
 (13) Majima, T., *Trans. JSME, Series A*, Vol.57, No.534(1991), pp.398-403.
 (14) Masuda, M., Tozawa, Y., *Trans. JSME*, Vol.27, No.178 (1961), pp.776-782.
 (15) Fujisaki, W., Nisitani, H., Tanaka, S., Teranishi, T., *Trans. JSME, Series A*, Vol.60, No.575(1994), pp.1545-1550.
 (16) Nisitani, H., Fujisaki, W., *Trans. JSME, Series A*, Vol.60, No.579(1994), pp.2525-2531.
 (17) Takase, T., Koyama, A., Yoneda, R., *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.56, No.12(2007), pp.1145-1149.
 (18) Kishimoto, K., Takeuchi, N., Aoki, S., *Trans. JSME, Series A*, Vol.57, No.539(1991), pp.1506-1513.
 (19) McMeeking, R. M., *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.25(1977), pp.357-381.
 (20) Rice, J. R., Rosengren, G. F., *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.16 (1968), pp.1-12.
 (21) Gotoh, M., Amaki, H., Tanaka, K., *Trans. JSME, Series A*, Vol.53, No.491(1987), pp.1440-1446.
 (22) Aoki, S., Amaya, K., Suga, K., Sekido, K., *Trans. JSME, Series A*, Vol.67, No.664(2001), pp.1892-1897.
 (23) Shiraki, N., Nakayama, S., Sugiyama, Y., Asami, K., *Trans. JSME, Series A*, Vol.63, No.611(1997), pp.1437-1441.