

局部破損メカニズムの検討とそれに基づく破壊曲面の提案

Study on Mechanism of Local Failure and Proposal of Fracture Surface Based on the Mechanism

東京大学	窪田 穰穂	Shigeho KUBOTA	Non-Member
東京大学	小木曾 慎	Shin OGISO	Non-Member
東京大学	佐藤 拓哉	Takuya SATO	Non-Member
東京大学	笠原 直人	Naoto KASAHARA	Member

Abstract

The failure mode so called a local failure could occur at a specific structural discontinuities of pressure vessels. Local failure, which is a type of ductile fracture, generally occurs under multiaxial stress conditions. In this paper, tensile tests and elastic plastic finite element analyses for smooth and notched specimens were performed to study a mechanism of local failure. From these investigation, it was concluded that the local failure occurs under high triaxial stress conditions and this conditions are affected by plastic constraint, which is controlled by configurations of structural discontinuity. Based on these results, the new fracture surface considering effects of hydrostatic stress components was proposed. This fracture surface can express the ductile fracture and the local failure by unified manner.

Keywords: local failure, triaxiality factor, tensile test, FEM simulation, fracture surface, Misses stress, hydrostatic stress

1. 序論

福島第一原子力発電所事故の教訓から「事故が起こらないように設計する」から「事故が起こることを前提とした設計と対策」への意識転換が求められるようになった⁽¹⁾。一方で、原子炉等の機器構造物に、シビアアクシデント等の従来想定していなかった極限荷重が作用した時の原子炉構造物の壊れ方は十分には解明されていない。

従来、高温高压状態における原子炉構造物等の機器構造物の構造不連続部では、内圧に対する破損モードとして局部応力による塑性崩壊及びその延長上の延性破壊が取り上げられてきた。しかし、近年条件によっては、局部破損の可能性があることが指摘され、非原子力分野の設計コードでは既に取り上げられている⁽¹⁾。一般に、多軸応力状態を考慮した限界ひずみは式(1)で表すことができる。

$$\varepsilon_{mf} = [TAF] \cdot \varepsilon_{uf} \quad (1)$$

ε_{mf} : 多軸応力状態での限界ひずみ

ε_{uf} : 単軸応力状態での限界ひずみ

[TAF] : 多軸応力状態を考慮した限界ひずみ減衰率

式(1)の[TAF]にはいくつかの式が提案されている。⁽²⁾
⁽³⁾

多軸応力状態が激しい特定の構造不連続部は、一般部のような単軸応力場を形成する箇所に比べて、[TAF]が小さくなり、限界ひずみが低下する。これが要因となる破損がいわゆる局部破損である。

以上のように、これまでの局部破損の研究の多くは多軸応力状態を考慮した限界ひずみに関するものであり、局部破損のメカニズムについてはあまり解明されていない。

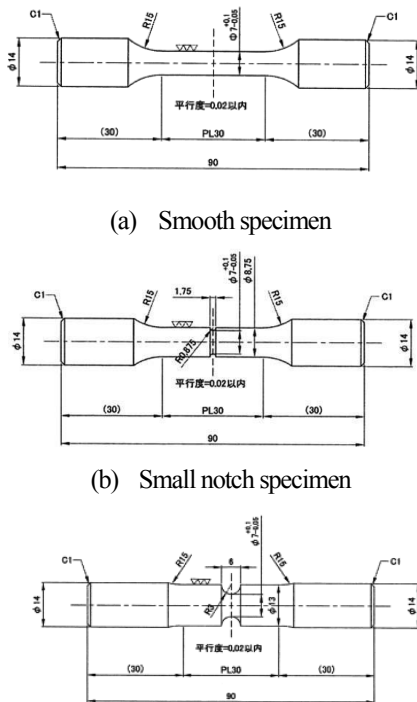
本研究では、一般部のような単軸応力場を模擬する平滑丸棒試験片と構造不連続部のような多軸応力場を模擬する切欠き付き丸棒試験片を用いた引張り試験および有限要素法による大変形弾塑性解析を行い、局部破損メカニズムの分析を行う。さらに、その結果に基づいて延性破壊から局部破損まで統一的に説明できる破壊曲面の提案を行う。

2. 平滑丸棒および切欠き付き丸棒引張り試験

2.1 試験条件

SUS 304 (ステンレス) 製の丸棒試験片を用いて引張り試験を行った。丸棒試験片は、一般部のような単軸応力場を模擬する平滑丸棒と、構造不連続部のような

多軸応力場を模擬する大小の切欠きを付けた切り欠き付き丸棒を用いた。これらの3種類の丸棒の具体的な形状及び寸法を以下の図1、表1に示す。また、塑性拘束の影響を直接比較観察できるように、これらの試験片は最小断面積を一致させている。



(a) Smooth specimen

(b) Small notch specimen

(c) Large notch specimen

Fig.1 Shape of specimens

Table.1 Test specimen data

Specimen No.	Shape	Notch radius	Stress concentration factor
(a)	smooth	-	1
(b)	small notch	0.875	2.0
(c)	large notch	3	1.37

引張試験には、図2に示す SHIMADZU AG-XDplus 試験機を用いた。最大負荷容量は50kNであり、負荷方式は高精度定速ひずみ制御方式である。試験片を8 mm / min の一定速度で引張って変位を記録し、ロードセルで荷重を記録する。



Fig.2 Tensile testing machine

2.2 試験結果

図3に各試験片の破面を示す。この図から、平滑丸棒の破面は典型的なカップアンドコーン型の破面を形成しており、丸棒表面付近ではせん断型の破面を、丸棒中心付近では繊維状型（ディンプル型）の破面を形成しており、比較的せん断型の破面の割合が大きいことがわかる。切欠き付き丸棒では、切欠き底付近のせん断型の破面の割合が小さく、全断面にわたり繊維状型の破面の割合が大きいことがわかる。また、切欠きが大きくなるほどこの傾向が強くなっている。

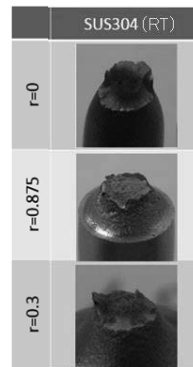


Fig.3 Fracture surface

荷重—変位曲線を図4に示す。この図から、最小断面積が同じであるにも関わらず、切欠き付き丸棒のほうが平滑丸棒よりも、最大荷重が上昇している。また、切欠きが大きいくほどこの傾向が強くなっている。一般に、応力集中係数が大きい形状ほど強度が低下することが知られている。つまり、切欠きの曲率半径が小さいほど強度が低下する（切欠き弱体化）。しかし、今回の結果は、切欠きの曲率半径が大きいような形状ほど最大荷重が大きくなっており、切欠きによって強化されていることがわかる。

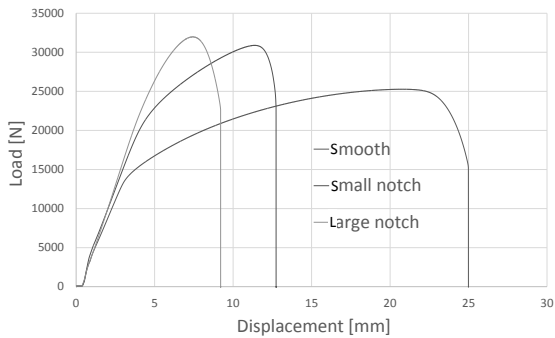


Fig.4 Load – Displacement curves obtained by experiments

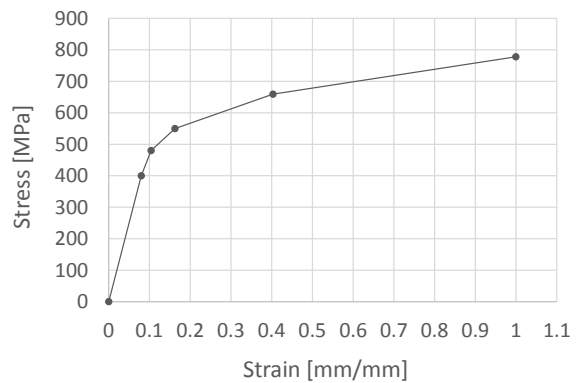


Fig.6 Stress – Strain curve for FEM

3. 有限要素法解析

3.1 解析条件

上記のような試験結果となった理由を明らかにするために、平滑丸棒および切欠き付き丸棒試験片モデルについて有限要素法による大変形弾塑性解析を行った。3種類の解析モデルおよび境界条件を図5に示す。解析コードはFinasとし、軸対称要素を用いた。解析モデルは対称性を考慮して1/2モデルとした。荷重は試験片モデルの上部に強制変位を与えた。

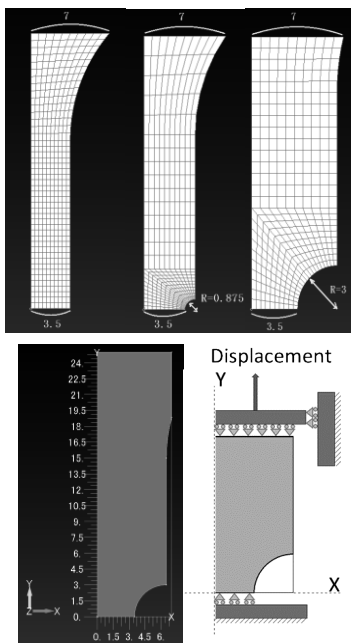


Fig.5 FEM models

また、図5にメッシュモデルと境界条件を、塑性解析に用いる構成式(公称応力-公称ひずみ関係式)を図6に示す。

3.2 解析結果

解析により得られた、荷重-変位曲線を図7に示す。図7から、切欠き付き丸棒のほうが平滑丸棒よりも、最大荷重が上昇していることが確認できた。また、切欠きが大きくなるほど、最大荷重が上昇していることも確認できた。この傾向は実験と一致している。

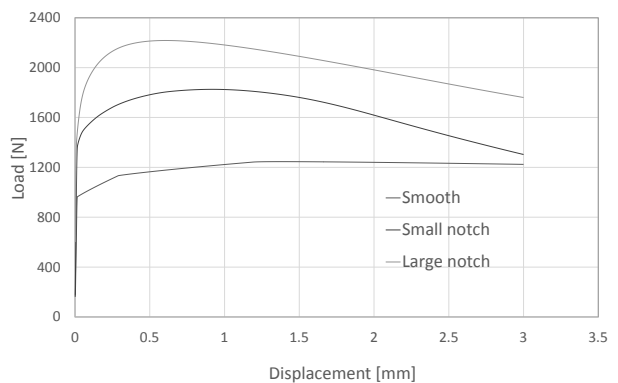
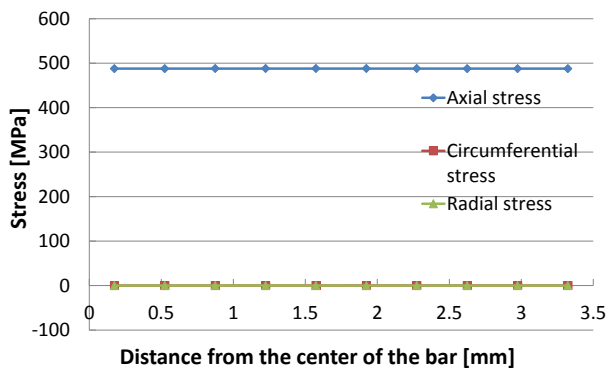


Fig.7 Load – Displacement curve estimated by FEM

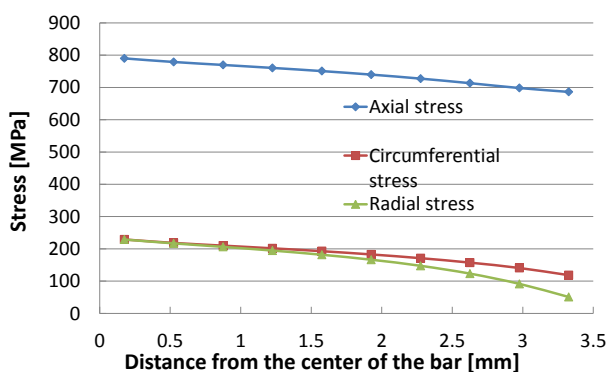
4. 考察

4.1 切欠き効果

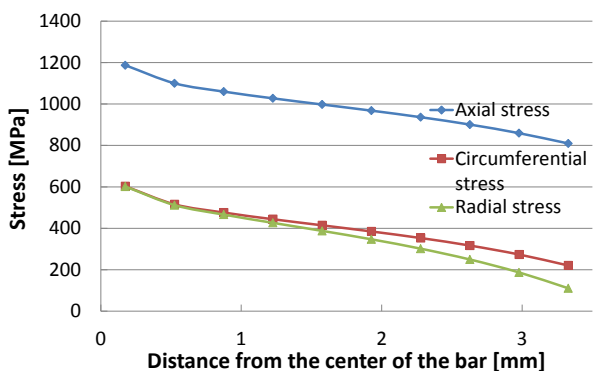
各試験片の弾性領域から塑性領域に遷移直後の主応力(軸方向、半径方向、周方向応力)を図8に示す。図8より、平滑丸棒では軸方向応力に比べて半径方向応力や周方向応力が無視できるくらい小さいので、応力状態は単軸応力状態であるといえる。一方、切欠き付き丸棒では軸方向応力に比べて半径方向応力や周方向応力が無視できない大きさなので、応力状態は多軸応力状態であるといえる。また、この傾向は切欠きが大きくなるほど強いことがわかる。



(a) Smooth specimen



(b) Small notch specimen



(c) Large notch specimen

Fig.8 Stress distributions on minimum cross-sections

各試験片の最小断面に生じる応力状態がどの程度なのかを定量的に求めるために、式 (2) で定義される 3 軸応力度を求めた。その結果を図 9 に示す。

$$T_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_{Mises}} \quad (2)$$

この図から明らかなように、平滑丸棒の 3 軸応力度は、最小断面全域にわたって単軸応力状態を表す 0.333 となった。また、切欠き付き丸棒の 3 軸応力度は、最小断面全域にわたって 0.333 よりも大きな値となってお

り、多軸応力状態となっていることを表している。また、切欠きが大きくなるほど、3 軸応力度も大きくなっている。さらに、切欠き付き丸棒では表面よりも中心部付近で 3 軸応力度が大きくなる傾向にある。

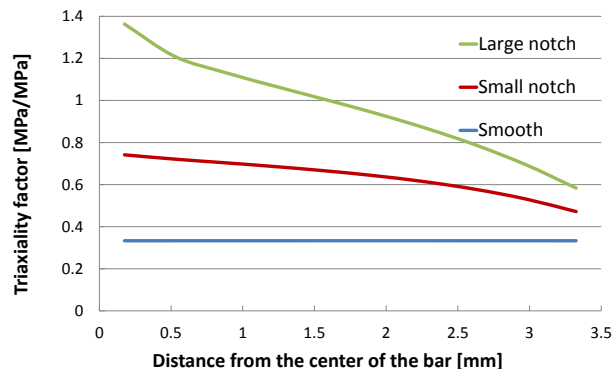


Fig.9 Triaxiality factor distributions on minimum cross-sections

切欠きが大きいくほど半径方向応力や周方向応力が大きくなり 3 軸応力度が大きい値を示す理由として塑性拘束が挙げられる。

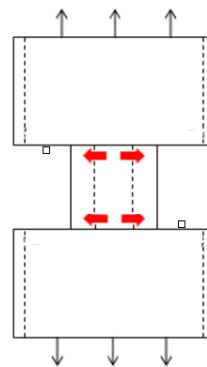


Fig.10 Explanation of plastic constraint

図 10 のような丸棒試験片に引張荷重を与えたときを考える。すると、太い部分と細い部分では、ポアソン比効果によって縮む総量に差が出てくる。この差によって、太い部分と細い部分のつなぎ目では、お互いがお互いの変形を拘束しあい、軸方向応力以外にも半径方向応力や周方向応力が発生する。その結果、多軸応力状態が形成される。そして、太い部分と細い部分の大きさの差が大きければ大きいほど、この傾向は強くなり、3 軸応力度は大きい値を示す。これが塑性拘束の考え方である。塑性拘束は形状の差異によって引き起こされることから、塑性拘束の度合いは、荷重のかか

っている物体の最大主応力方向の断面積の変化率に比例して大きくなると思われる。つまり、塑性拘束は荷重方向の形状の変化の激しさに比例して大きくなると思われる。切欠き付き丸棒においては、最小断面から最大断面までの軸方向の距離と、最小断面積と最大断面積の差の比に依存すると思われる。以上の検討より、切欠き付き丸棒の強度に大きく影響する3軸応力度は最小断面の塑性挙動に影響を与える塑性拘束によって決まることが明らかになった。一方、切り欠きによる応力集中係数は強度に影響を与えないことが、2章の実験から明らかになっている。

4.2 破壊曲面の検討

引張試験と解析から得られた結果に合理的な説明を与えるために、静水圧応力を考慮した破損メカニズムを検討する。設計の基礎となっている強度モデルでは、物体の降伏挙動は Mises 応力のみ依存し、結果として破損に関しても Mises 応力のみ依存するとしている(図 11 上)。しかし、ミーゼス応力が小さければ静水圧応力がどれだけ大きくても破損には至らないという考え方は、すべての条件における破損現象に則しているとは言い難い。以上のような理由から、図 11 に示すような Mises 応力と静水圧応力に依存した破壊曲面が存在すると考えた。この曲面に応力状態が達したときに物体は破損に至ると考えられる。

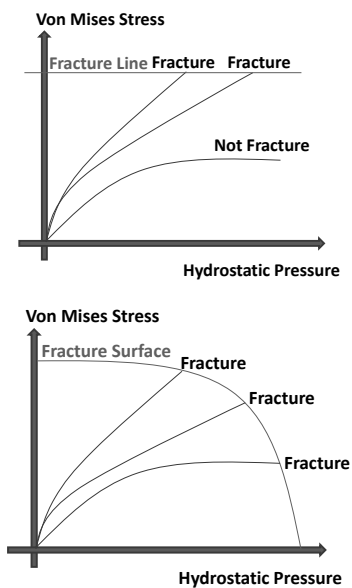


Fig.11 Upper : Failure criteria without considering triaxiality
Lower : Failure criteria considering triaxiality

限界ひずみ評価式としては次式の ASME Sec. VIII Div. 2^[1] の式 (3) を適用した。

$$\varepsilon_{Lm} = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\alpha_{sl}}{1+m_2} \right) \left(T_r - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (3)$$

α_{sl} , m_2 : 材料定数

T_r : 3 軸応力度 = 静水圧応力/Mises 応力

ε_{Lu} : 単軸状態での限界塑性ひずみ

ε_{Lm} : 多軸状態での限界塑性ひずみ

この式と図 4 の平滑丸棒の荷重—変位曲線から求めた応力—ひずみ関係を用いて、以下の手順を各 T_r に対して繰り返すことにより破壊曲面を作成した。図 12 に破壊曲面の作成手順を、図 13 に作成した破壊曲面を示す。

$$\varepsilon_{Lm,1} = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\alpha_{sl}}{1+m_2} \right) \left(T_{r,1} - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (4)$$

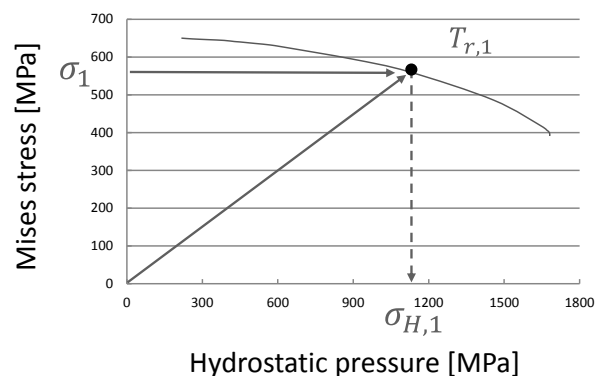
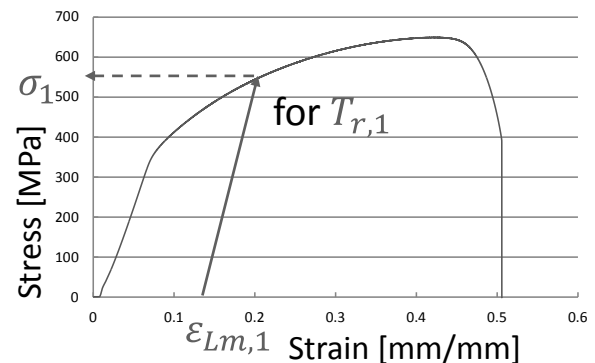


Fig.12 Method to make fracture surface

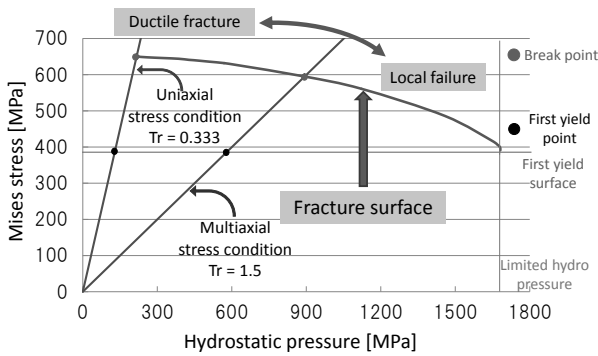


Fig.13 Fracture surface 1

図13に示す破壊曲面という考え方を導入することにより、延性破壊から局部破損までを統一的に説明することができる。さらに、図13の考えを拡張したものを図14に示す。

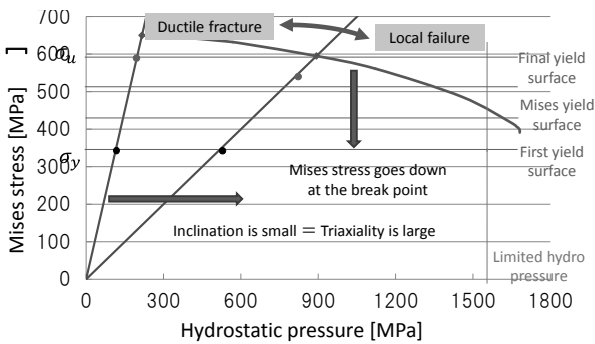


Fig.14 Fracture surface 2

図14から、以下のようなことが言える。

- 3軸応力度が大きくなるような構造不連続部では破壊時のMises応力が低下する
- 3軸応力度が大きくなるような構造不連続部では破壊時の静水圧応力が増加する
- 3軸応力度が大きいほどMisesの降伏曲面を通過しにくいので、塑性変形が進みにくい

以上のように、この破壊曲面は、3軸応力度が大きいほど塑性変形しにくくなるとともに、比較的小さなMises応力でも破壊が生じるという局部破損の現象をうまく表している。また、提案した破壊曲面は、延性破壊と局部破損を連続的な現象として表現できることに特徴がある。

4.3 破壊曲面を用いた試験結果の考察

図13に示す破壊曲面を用いて、試験結果である図4に示した最大荷重の上昇といった現象に合理的な説明を与える。まず、切欠き丸棒試験片の3軸応力度が大きくなるのは、最小断面の塑性変形が断面積の大きい周辺によって拘束される（塑性拘束）ことによる。また、切欠き丸棒試験片の最小断面の3軸応力度が大きいということは、図13,14から分かるように破壊時の静水圧応力が大きくなる。これは軸方向応力も大きくなることを意味し、結果として図4のように最大荷重が増加する。

5. 結論

平滑丸棒試験片と切欠き丸棒試験片の引張り試験及び有限要素法による大変形弾塑性解析を行い、以下のような結論を得た。

- 構造不連続部を模擬した切欠き付き丸棒の強度は、Mises応力と共に、最小断面の塑性挙動に影響を与える塑性拘束によって生じる静水圧応力の両者から決まるという局部破損のメカニズムを明らかにした。
- このメカニズムに基づいて、延性破壊と局部破損の両破損モードの強度をMises応力-静水圧応力の平面で記述する破壊曲面を提案した。
- この破壊曲面によって圧力容器一般部の延性破壊から構造不連続部の局部破損まで統一的に説明できた。
- この破壊曲面により、平滑丸棒より切欠き丸棒の引張り強度が大きいという試験結果を説明できた。

参考文献

- [1] David A. Osage, P.E., "ASME Section VIII-Division 2 Criteria and Commentary", The Equity Engineering Group, Inc., (2009).
- [2] 宮崎他, "局部減肉を有する炭素鋼配管の破壊クラテリオン", 圧力技術, 第40巻第2号, 2002.
- [3] McClintock, F.A., "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes," Tran. ASME, J. of Applied Mechanics, 1968.