

減肉を有する立体配管系の弾塑性応答評価に関する研究

Study on Elasto-Plastic Response Estimation
of 3D Piping System with Degradation

横浜国立大学附属図書館



11734658

寄贈者：三上晃

1734658
載肉を有する立体配管系の弾塑性応
答評価に関する研究

392.51
M1

博士学位論文

減肉を有する立体配管系の弾塑性応答評価に関する研究

Study on Elasto-Plastic Response Estimation
of 3D Piping System with Degradation

横浜国立大学附属図書館



11734658

2005年12月

指導教官 高田 一 教授

横浜国立大学大学院

工学府 システム統合工学専攻

三上 晃

論文概要

現在、我が国では53基の商業用原子力発電所が稼動しているが、原子力発電施設の新規建設は厳しい情勢であり、既存のプラントを維持保全しつつ使用していく必要がある。原子力発電所の耐用年数は従来30年とされていたが、1999年に通産省・資源エネルギー庁（当時）は60年を視野に入れた長期運転が技術的に可能とする報告書を提出した。発電プラントにおける主要構成要素の一つである配管系は、高エネルギー流体を媒体としており、破壊が生じた場合にシステム全体に波及する被害が甚大であると予想されることから、高経年化による欠陥を想定した場合においても十分な安全性が確保されなければならない。しかし2004年8月9日には関西電力美浜原発3号機で経年劣化である減肉が原因で蒸気漏れ事故が発生している。また日本は地震多発国である。1995年の阪神大震災（M7.3）や2000年の活断層がないとされた地域での鳥取県西部地震（M7.3）など想定外の大規模地震が発生してきている。2005年8月16日に宮城県南部で震度6弱の地震では女川原発1号機で記録した揺れの加速度が、設計用限界地震（S2）を上回っていたとの解析結果がでており、原子力安全委員会では耐震指針について議論が進められている。このように耐震安全性も重要である。しかし、配管における高経年劣化が耐震安全性に及ぼす影響は十分明らかにされているとは言えない。

防災科学技術研究所における十年間の試験研究プロジェクト「機器・配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研究」と「地震荷重を受ける減肉配管の破壊過程解明に関する研究」では、減肉が配管系の耐震性にどのような影響を及ぼすかを把握する目的で、エルボ部に減肉を配置した立体配管系加振試験を実施してきている。本研究ではこの実験で行われた膨大な実験データをもとに、この配管系の動的挙動や損傷形態を再現することを目的とし、有限要素法を用いて弾塑性解析を行った。そして構築したモデルを用いてパラメトリック解析を行いどのような条件が危険であるのかを検討した。

1) 有限要素法を用いた動解析において、固有振動数、時間刻み、エルボ分割数、弾性域の減衰、降伏応力、二次勾配の影響を把握するための解析を行い、これらの影響を明らかにすることによってどのような解析モデルが最適であるのかを検討した。その結果、次のようなことが分かった。固有振動数は弾性域では大きく影響するが、弾塑性域ではあまり影響しない。弾性域の時間刻みは5.0ms、弾塑性域での時間刻みは0.1ms、エルボ分割数は4分割で十分である。弾性域の減衰は弾性域では大きく影響するが弾塑性域ではほとんど影響しない。降伏応力が大きくなると応答振幅は大きくなり残留変形量は小さくなる。二次勾配の影響は非常に小さい。

2) エルボ部に減肉を配置した立体配管系加振試験の再現解析を行い、各エルボが面内曲げを主に受ける場合において、損傷形態を非常によく再現して破損箇所と解析での疲労損傷最大箇所を一致させることができた。また実験は非常に費用と時間が掛かるため、実験数には限りがある。そこで、このモデルを用いて配管系のエルボが面内曲げ、面外曲げ、面内+面外曲げを受けるような場合においてパラメトリック解析を行い、最も危険と考えられてきた面内曲げではなく、面内+面外曲げで疲労損傷が大きくなる場合があるという結果を得た。

3) ひとつのエルボが面外曲げを受ける配管系の加振実験において、溶接余盛部近傍からき裂が発生し、破損形態が予測と異なる場合が生じたので溶接余盛を簡易的に考慮するモデルを提案した。そして実験での破損箇所が高い相当塑性ひずみを生じる結果を得た。しか

し、溶接余盛部のモデル化は、まだ不十分である。実際にはより大きなひずみが生じているようである。したがって、現時点のモデルでは溶接余盛部近傍で破損する可能性があるかないか、また破損する場合には溶接余盛のどの位置であるかは判断できるが、寿命については他の破損（エルボ脇）より信頼性が低いと言える。

4) 実験の予備解析結果より破損予測候補地の数箇所にひずみゲージを貼付して平成 17 年 11 月に実施した。その結果、候補地のひとつである余盛部近傍から破損した。また変形形状もよく表現できており、他の候補地においても大きくラチェット変形していた。それらのひずみ値を計測する事ができた。このように構築したモデルは実験を実施にするにあたり有益なデータを取得するのに大いに役立った。

5) 累積解析の結果、加振回数を重ねるごとに F 値の増分は現象することが分かった。加振回数を精度よく予測する場合には累積解析が必要であると言える。しかしながら、解析時間は膨大となってしまう。

6) 現行の設計規定の中にどの程度の裕度が含まれているのかを考察することを目的として、必要最小肉厚まで減肉したエルボが、設計応力強さ S_m の 10 倍相当の静的繰返し面内曲げを受けている場合を想定して、設計規定から求められる許容繰返し数と、弾塑性解析を行った結果から算出される破損寿命とを比較し、現行の設計規定には十分な（寿命換算で 5 倍程度の）安全裕度が含まれていることを確認した。

以上のように、本研究を通じて減肉を有する配管系の弾塑性振動応答における動的挙動や破損形態をある程度、表現することが可能なモデルを構築した。精度についてはまだまだ問題がある。破損予測候補地（数箇所）と実験での破損箇所は一致させることが可能であるが、一箇所に断定することは困難であり、疲労寿命の評価の精度は、加振回数で倍半程度である。しかし、このモデルでのパラメトリック解析や予備解析は、より少ない実験数で有益な結果を得るために十分利用することができる。

目次

第1章 緒言.....	1
1.1 原子力発電の現状.....	1
1.2 プラントの高経年化に伴う配管の欠陥.....	3
1.2.1 減肉配管によるトラブル例.....	3
1.2.2 減肉の発生メカニズム.....	4
1.2.3 原子力発電所の高経年化と対策.....	5
1.3 関連研究調査.....	6
1.3.1 NAP.....	6
1.3.2 海外での高経年化対策.....	7
1.3.3 その他研究機関.....	7
1.4 研究目的.....	8
第2章 解析.....	9
2.1 解析手法.....	9
2.2 動解析.....	10
2.2.1 入力波形.....	10
2.2.2 レーリー減衰.....	11
2.2.3 各種パラメータの影響.....	12
2.2.3.1 固有振動数の影響.....	13
2.2.3.2 時間刻みの影響.....	14
2.2.3.3 エルボ分割数の影響.....	15
2.2.3.4 弾性域の減衰の影響.....	15
2.2.3.5 降伏応力の影響.....	16
2.2.3.6 二次勾配の影響.....	17
2.2.4 動解析諸元.....	19
2.3 静解析諸元.....	19
2.4 疲労評価手法.....	19
2.4.1 累積疲労損傷則を用いた寿命評価.....	19
2.4.2 多軸非線形ひずみ下の低サイクル疲労寿命評価手法.....	21
第3章 実験と解析の比較.....	23
3.1 実験概要.....	23
3.2 固有モード・固有振動数について.....	28
3.3 動解析結果.....	29
3.4 静解析結果.....	36
3.5 破損箇所.....	85

3.6	寿命予測.....	88
3.7	余盛の考慮.....	89
3.7.1	平成16年度再現解析.....	89
3.7.2	平成17年度予備解析.....	91
3.8	累積解析.....	98
3.9	精度検証.....	100
第4章	パラメトリック解析.....	106
4.1	解析概要.....	106
4.2	解析結果.....	106
4.3	結論.....	106
第5章	裕度評価.....	116
5.1	概要.....	116
5.2	設計評価手法.....	118
5.3	解析評価手法.....	119
5.4	裕度評価.....	120
5.5	結論.....	121
第6章	結言.....	122
	<謝辞>	
	<参考文献>	
	<公表論文>	

第1章 緒言

1.1 原子力発電の現状

2003年12月31日現在、全世界で運転中の原子力発電所は434基あり、総発電容量は3億7628万6,000kWとなっている。さらに、建設中の原子力発電所は36基、また、計画中の原子力発電所は28基となっている。

原子力発電は、燃料の供給および価格が安定していることや、温暖化の主要因となっている二酸化炭素の排出が少ないなどの環境負荷が少ないことなどから、エネルギー・セキュリティと環境保全に貢献しており、今日の安定した経済社会を実現するために重要な役割を果たしている。わが国においては今日、53基約4590万kWの商業用原子力発電所が稼働している。この規模は世界第3位であり、原子力のあり方についてその動向に注目することは我々の責務である。

軽水炉には沸騰水型炉（BWR）と加圧水型炉（PWR）の2種類がある。沸騰水型は、原子炉の中で蒸気を発生させ、それを直接タービンに送る方式であり、加圧水型は原子炉の中で発生した高温高压の熱湯を蒸気発生器（熱交換器）に送り、そこで別の系統を流れている水を蒸気に変えてタービンに送る方式である。

これら軽水炉を含めすべての原子力発電所は蒸気のみでタービンをまわすという点では火力発電と同じであるが、火力発電では石油や石炭などの化石燃料を使うのに対し、原子力発電はウラン燃料を使用する。コストや二酸化炭素排出量削減など良いことばかりのようであるが、周知の通りその安全性には、大きな負担がかかるのである。

原子力発電所が事故を起こさないようにする為に、まず機器の故障・破損といった事故の原因となるような異常を極力未然に防止することが重要である。このため、原子力発電所では、十分に余裕をもった設計、厳重な品質管理、多くの点検と検査を行い、異常や故障を起こさないようにしている。例えば耐震設計に関しては過去の地震および過去1万年に活動した活断層による地震を対象に、それぞれ揺れの周期および強さを評価し、これらをすべて上回るような地震動を設定し、設計に役立てるといった具合である。

しかし、万一事故が起こった場合、その評価はどの様にしているであろうか。わが国では国際原子力機関（IAEA）と、経済協力開発機構の原子力機関（OECD/NEA）により提案された、国際原子力事象評価尺度（INES）を使用している。Table 1.1-1 にその評価尺度を示す。これによると旧ソのチェルノブイリ発電所事故（1986）はレベル7、米国のスリースマイル島発電所事故（1979）はレベル5、日本では美浜発電所2号機での蒸気発生器伝熱管損傷事象（1991）がレベル2に位置づけられる（ただし INES の正式使用以前の事故である為、公式に評価されたわけではない）。これらのトラブルに対する評価事例は後々の原子力開発に役立てられ今後の事故に対する抑止力となっている。

以上原子力発電所のシステムに対して簡単に説明したが、近年発電所の老朽化は進み経済産業省（旧通産省）も稼働し始めてから60年までの耐用年数を認める報告書を1999年2月に出している。これらのことから原子力発電所の各箇所において、その老朽化に対する措置が求められるのは必至であり、これから原子力発電所といかにつき合っていくべきかを考慮する必要がある。

以上のことをふまえて本研究では、原子力発電所の各箇所の中でも高経年化に対する安全性が懸念され、原子力発電所の一翼を担う配管系について考察していくこととする。

Table 1.1-1 原子力発電所における国際評価尺度表

(注) レベル0を2つに分けるのは日本のみ

	レベル	基準1 所外への影響	基準2 所内への影響	基準3 深層防護の劣化
事故	7 深刻な 事故	放射性物質の重大な外部放出 よう素 131 等価で数万テラベクレル相当以上の放射性物質の外部放出		
	6 大事故	放射性物質のかなりの外部放出 よう素 131 等価で数千から数万テラベクレル相当の放射性物質の外部放出		
	5 所外へのリスクを伴う事故	放射性物質の限られた外部放出 よう素 131 等価で数百から数千テラベクレル相当の放射性物質の外部放出	原子炉の炉心が重大な損傷	
	4 所外への大きなリスクを伴わない事故	放射性物質の少量の外部放出 公衆や個人が数ミリシーベルト程度の被ばく	原子炉の炉心がかなりの損傷/従業員の致死量被曝	
異常な事象	3 重大な 異常事象	放射性物質の極めて少量の外部放出 公衆の個人の十分の数ミリシーベルト程度の被ばく	所内の重大な放射性物質による汚染/急性の放射線障害を生じる従業員の被ばく	深層防護の損失
	2 異常事象		所内のかなりの放射線物質による汚染/法定の年間線量当量限度を超える従業員の被ばく	深層防護のかなりの劣化
	1 逸脱			運転制限範囲からの逸脱
尺度以下	0 尺度以下			0+ 安全に影響を与えうる事象
				0- 安全に関係しうる事象
評価対象外		安全に関係しない事象		

1.2 プラントの高経年化に伴う配管の欠陥

1.2.1 減肉配管によるトラブル例

前節に示した通り、これからの原子力発電所は高経年化を考えていかななくてはならない。本研究ではその中でも特に配管の高経年化に着目した。高経年破壊ではき裂進展がメジャーであるが、最近の問題として局所的減肉部によるものがある。減肉についての研究は歴史が浅く、これからの原子力プラントの安全面について大きな課題である。では、なぜ局所的減肉部を考慮しなければならないのか、その背景を示す。

1986年12月9日、アメリカ、バージニア州のバージニア電力 Surry 原子力発電所 2号炉内の2次元給水配管において配管破断事故が発生し、近くにいた作業員8名が負傷、うち4名が死亡した。破損部の配管形状はエルボ部であり、その内表面を観察したところ減肉とくぼみをていしていた。配管の肉厚は当初12.7mmであったものが、表面全域にわたり2.29mm～3.56mmとなっており、局所的には1.22mmとかなり薄くなっていた。破面は平面応力状態下での傾斜破面を持った延性引裂き型であり、残存肉厚に対して過大な引張り荷重によるものである。これは破損が時間の問題であったことを示す。

配管内面の著しい減肉の原因は、直接的には当該配管部の配管組み合わせ形状（T継手とエルボ）による局所的乱流によるが、さらに水質管理上の問題、流体温度等の条件が重なった事によるエロージョン・コロージョン（侵食・腐食作用）によるものといわれている。エロージョン・コロージョンについて、その詳細は次節で述べる。

そしてこの減肉により給水ポンプ入口配管のエルボ部で原子炉トリップ後の通常起こりうる圧力上昇により減肉部分が損傷し、延性破断したものとされている。参考までに Fig.1-2-1 に Surry2号炉の給水系配管図とその破断箇所を示す。

以上 Surry2号炉のトラブルについて簡単に述べたが、さらに Surry2号炉以降にも口径配管が減肉によって破断した例は少なくない。事例を以下に示す。

1. Doel Unit (ベルギー)

1987年9月

直径12インチおよび16インチの配管（T継手およびエルボ部）

2. Lovisa VVER 40 Unit 1 (フィンランド)

1990年5月28日

直径12.8インチ主給水管の流量制御口の下部が周方向に破断、破断時の肉厚は1mm（元は18mm）、13年作動

3. Lovisa VVER 40 Unit 2 (フィンランド)

1993年2月25日

直径12インチの配管、給水管系の逆止め弁、12年作動

4. Maanshan Unit 2 (台湾)

1996年6月14日

直径12インチの配管、25年作動

5. Fort Calhour (米国)

1997年4月21日

直径 12 インチの配管, 25 年作動

これらはいずれも PWR (加圧水型) の 2 次系配管でのものである。特に 5 についてはエルボ部でスプリット破断しているが、長半径エルボであるから減肉が発生しないという評価のため、他の配管の大部分は 1985, 1987, 1988, 1990 に交換しているにもかかわらず、当該部は 25 年間一度も板厚検査を行なっておらず、このような結果至ったと考えられる。

また、日本においても減肉による配管破断事故が起こった。2004 年 8 月 9 日、福井県の美浜 3 号機 (関西電力) にて、一次系の配管の直管部 (口径 560 [mm]) が破断し、点検作業等をしてしていた作業員 5 人が死亡、6 人が重軽傷を負った。

破損した箇所は、通過する水の流量を測るために、リング状の金属を入れて断面を細めた「オリフィス」の下流側であり、内部流体が局所的に乱流になり減肉が生じたものと考えられる。

このような事故を防ぐためにも、減肉部を早期に発見し交換するようなシステムを構築すれば良いと考えられるが、商業目的に使用されている原子力プラントについてコストと時間の観点からはあまり効率的であるとはいえない。仮に 100 万 kW 級の発電プラントを 1 日止めただけで、日本では 2 億円の損失になると言われている。そこでこれらの事をふまえて本研究ではき裂の問題と同様、減肉部が発見されてもそれがまだ微量で安全に何ら問題が無ければ交換しなくていいように、その評価法を定量的に決めることを目的としている。

1.2.2 減肉の発生メカニズム

配管の内部減肉の内、ほとんどのものはエロージョン・コロージョン (侵食・腐食) による影響と考えられる。これは内部流体の流速が被膜破壊開始速度に達すると、内部流体のせん断力や衝突効果により被膜がはがされ、地の金属が露出して、反応物や生成物の拡散が促進されて、腐食が加速される現象である。

炭素鋼配管は通常、表面に保護膜としてマグネタイト (Fe_3O_4) が形成されるように水質管理されている。しかしながら前述した Surry2 号炉については後述するように流体条件が不適切であり、また水質の重畳効果により十分なマグネタイト保護膜が形成されず、酸化層の形成とエロージョンによる剥離・除去が生じ、減肉が大きく進行したと推定される。減肉の進行は運転開始当時から始まっていたと推定されているが、当該箇所は供用期間中検査 (ISI: Inservice Inspection) 対象外であったため減肉の進行を発見できなかった。

エロージョン・コロージョンによる減肉の発生における、その影響因子として、流速、溶存酸素、純度、pH、温度、材質などが挙げられる。これらの因子は互いに複雑に影響しあっているが、さらに安定皮膜であるマグネタイト層の形成と剥離についても関与している。

低溶存酸素下ではマグネタイト皮膜の形成が阻害され、エロージョン・コロージョンが促進されるが、pH > 9.2 では抑制される。また水温 91~227°C ではマグネタイトが形成されにくくエロージョン・コロージョンが促進される。さらにエロージョンの発生には流速、特に高速二相流が影響する。エロージョン・コロージョンは炭素鋼配管で多く発生する現象であり、合金元素の添加により耐エロージョン・コロージョン性が著しく改善される。12%Cr 含有量以上の鋼材でエロージョン・コロージョンは発生しなくなる。

例として Surry2 号炉でエロージョン・コロージョンが発生した理由を述べる。破断エルボ部の流体条件を Table 1.2.2-1 に示す。Surry2 号炉 2 次系では一時的に水質管理の不適切な時期もあったが、一般的な水質管理が行なわれてきた。エロージョン・コロージョン発生原因としては、冷却水流路の不適切があった為、高速乱流および局所的蒸気相が当該エルボ周辺に発生し、これと水質 (溶存酸素、pH および温度) の重畳効

果によりエロージョン・コロージョンが発生したと考えられる。PWR2次系の水質管理は、蒸気発生器伝熱管の保護を主目的として行なわれている為、Table1.2.2-1 に示した DO=4ppb および pH=8.8~9.2 の水質は炭素鋼配管のエロージョン・コロージョンの防止上最良とはいえない。しかし 2 次系機器全体の腐食防止をすべて勘案して定められており、さらに設計面の配慮として適切な配管引き回し、あるいは流速条件等によりエロージョン・コロージョンを抑制することができる。

Table1.2.2-1 Surry2 号炉の破断エルボ部近傍における流体条件

温度	193℃
圧力	26.0kg/cm ²
24in.ヘッド管内流速	3.7m/s
18in.エルボ部の流速	5.2m/s
pH	8.8~9.2
電気伝導度	4 μ S/cm
溶存酸素	4ppb

1.2.3 原子力発電所の高経年化と対策

日本初の商業用軽水炉型原子力発電所が 1970 年に運転を開始して以来、いくつかの発電所が 30 年近くを経過しようとしている。現時点では、そのような発電所でのトラブルの増加傾向は見られないが、高経年化についての重要性が高まっている。そこで経済産業省（当時通産省）は 1996 年に以下に示す「高経年化に関する基本的な考え方」を取りまとめ公表した。

1. 先行プラントを対象に、長期運転時に運転上かつ安全上重要で補修・取替が容易でない機器について技術評価を行い、長期運転の見通しを得た。
2. 事業者に対し、運転開始後 30 年を目途に取替容易な機器も含めた原子力発電所の各機器に対し、技術評価と長期保全計画の策定を要請。

これを受けて日本原子力発電、関西電力、東京電力は、敦賀発電所 1 号機、美浜発電所 1 号機及び福島第 1 原子力発電所 1 号機について、経年変化事象に関する技術評価を実施するとともに、営業運転開始後 30 年を契機として講じる長期保全計画を取りまとめた。99 年 2 月、国は報告内容が妥当であると評価した。そこで報告された技術評価とは以下である。

1. 大部分の機器については、現在行なっている設備の保全活動を続けていくことによって、今後の運転を長期間と想定したとしても、安全に運転を続けることは可能である。
2. 一部の機器については、現在行なっている設備の保全活動に加え、点検・検査の充実などが必要である。

また、今後の高経年化に関する具体的取り組みとしては、長期保全計画を確実に実施していくこと、

及び後続プラントについても運転開後 30 年を目途に同様の高経年化対策を実施すること、さらに経年変化評価技術、検査技術の高度化及び補修・取替技術の開発・高度化などを行っていくこととしている。

1.3 関連研究調査

1.3.1 NAP

本研究の実施にあたり、実験実施委員会（以下 NAP 委員会、委員長：白鳥正樹横浜国立大学教授）を組織した。本研究は地震による配管の弾塑性応答から配管の破損に至るまでの領域を対象とした。NAP 委員会ではき裂や減肉といった劣化を有する配管系の動的な加振試験、加えて配管系の個々の部材を取り出し静的な負荷を与える要素試験を行った。また、各々の試験に対して有限要素法に基づく詳細解析を行った。

ここでは、主に解析により得られた知見を抜粋する。

[き裂]

・表面き裂を有する直管の繰返し 4 点曲げ試験に対して、低サイクル疲労き裂進展解析を行った。解析においてはラインスプリング要素を用い、き裂先端各点において破壊力学パラメータ J_{max} を算出することで、き裂の進展量を決定するという手法を用いた。これにより、表面き裂が進展し貫通に至るまでのき裂進展シミュレーションを行うことができ、き裂貫通寿命評価に関しても本解析手法が有効な評価法であることを検証した。

[減肉]

・局所的減肉部を有する直管の繰返し 4 点曲げ試験に対して、シェル要素またはソリッド要素による弾塑性解析を行い、破壊挙動の把握および破壊寿命の考察を行った。その結果、解析による破壊サイクル数は試験破壊サイクル数を比較的精度良く評価することができ、試験における破壊形態を解析結果により検証できた。

・局所的部分減肉を有するエルボ部の繰返し曲げ負荷に対して、局所的部分減肉の位置、幅および深さをパラメトリックに変化させ、弾塑性解析を行った。その結果、変位制御負荷条件下においては、局所的な両脇部分減肉を有するモデルが最も危険であること、減肉量の最も多い全周様減肉モデルより、多くの場合、局所的部分減肉を有するモデルの方が、より危険性が高いことが考察できた。また、ひずみ集中の特性として、断面偏平化による脇腹部へのひずみ集中に加え、腹側および背側に部分減肉がある場合においては、ひずみ集中がその減肉量の大きさに伴って、脇腹部から局所的減肉部分の存在する方向へ移行する傾向が考察された。

1.3.2 海外での高経年化対策

《アメリカ》

アメリカでは、原子力発電所の運転認可は、運転が認められた時から 40 年間とされている。ただし、それを超えて運転を継続する場合には、事業者が法律（運転認可更新規則：10CFR54）に従って再度申請を行い、原子力規制委員会（NRC）の審査によって承認されれば、運転の期間を最長 20 年間延ばすことが認められている。

また、更新のための評価は、経年化による劣化の管理が正しく行なわれていることおよび 40 年を超える運転に対して経年化による劣化を細かく調べて、更新した期間までの安全運転を説明することである。

● アメリカの運転認可更新の実績（2002 年 1 月現在）

（許可済）	カルバートクリフ	1, 2 号機
	オコニー	1, 2, 3 号機
	ANO	1 号機
（申請済）	ハッチ	1, 2 号機
	ターキーポイント	3, 4 号機
	ノースアンナ	1, 2 号機
	サリー	1, 2 号機
	カトーバ	1, 2 号機
	マグワイア	1, 2 号機
	ピーチボトム	2, 3 号機
	セントルーシー	1, 2 号機

《フランス》

運転期間に対する法的な規制はないが、1985 年から、原子力発電所に対する統合的な経年変化評価プロジェクトを実施している。

《イギリス》

運転期間に対する法的な規制はない。イギリスの原子力発電所はガス炉が中心であるが、10 年毎の定期的な安全評価により、今後 10 年間安全に運転できることの確認を行なっている。また、改造すべき項目をあげてそれを実施し、経年劣化の管理プログラムの計画をたて実施している。

1.3.3 その他研究機関

劣化部を有する配管系の健全性評価や耐震安全裕度に関する研究としては、これまでにき裂を有する配管を対象として、多くの研究が行われてきた。日本原子力研究所では、一次冷却配管について構造強度上の信頼性を実験的に検証することを目的として、1975 年から 1992 年にかけて配管信頼性実証試験が実施された。この試験研究では、主にき裂を有する配管を対象として、配管疲労試験、不安定破壊試験、破断試験、解析評価が実施された。また、研究期間中の 1986 年に米国 Surry 原子力発電所で減肉のエルボの破断事故が発生したため、減肉配管の破壊限界を求める試験も実施された。ま

た、電力中央研究所ではアメリカ原子力規制委員会（NRC）が主催した国際共同研究であるき裂を有する配管の健全性評価手法を確立するための研究（IPRG）に参加し、日本国内の炭素鋼配管に対する実断面応力基準の適用生の検討、動的繰返し荷重下におけるき裂進展評価などの研究を実施した。

減肉のような非き裂状欠陥の健全性評価に対しては、大学や民間企業により減肉を模擬した配管の終局強度や破壊形態を得る実験研究が実施され始め、劣化形状と破損条件との関連づけが行われている。また、原子力発電技術機構（NUPEC）では、平成12年度より平成17年度までの予定で、減肉配管の耐震実証試験を実施している。しかし、全体としては劣化条件として減肉を対象とした配管の耐震安全性評価に関する研究は、健全配管を対象としたものが主であり、劣化配管における終局強度や破損形態を対象としたものは、上記のNUPECの研究以外にはほとんど見受けられない。健全配管系を対象としたものとしては、1971年～1973年に実施された、地震時における原子力施設の限界設計に関する試験研究（日本電気協会）、配管耐震設計基準の合理化研究（電力共通研究）や、NUPECにより実施されている配管の終局強度耐震実証試験が挙げられる。また、海外で行われている研究として、米国のEPRIで実施された配管の動的信頼性評価に関する研究プログラム（PFDRP）があり、この実験結果や解析結果から、配管系の終局破損形態や設計基準変更に関する議論が行われている。また、フランスでは原子力庁（CEA）により、基準の緩和を目的として、実規模の配管を用いた振動破壊実験と、簡易解析コードの開発が行われた。

1.4 研究目的

本研究では前述した原子力発電をとりまく背景をふまえ、発電所の長期使用により生ずると想定される経年劣化、その中でも特に局所減肉に対し、どの程度の減肉が許容できるのかを評価することを目的としている。そのために、数多くの実験を行い、実験を模擬できる解析モデルを構築する事に重点を置いた。また加えて、現行の発電所の設計基準が減肉に対しどの程度の裕度が含まれているのかを考察した。

わが国は阪神大震災に代表されるように地震多発国である。そこで、経年劣化した配管に対して我々は運転による高サイクルの疲労破壊だけでなく、地震荷重のような低サイクル疲労破壊に対して考慮しなければならない。このため経年劣化した配管系が、最大級の地震荷重に対しどのような応答をし、応答の結果として生じる低サイクル繰返し負荷に対し強度的に耐えうることを見極めることが重要である。この評価を行なうため、独立行政法人 防災科学研究所の試験研究プロジェクト、「機器・配管系の経年変化に伴う耐震安全評価手法の研究」実施委員会（以下 AP 委員会）が1996年に立ち上げられ膨大な量の実験が行なわれた。実験では経年変化、主に減肉、き裂、を含む配管について強度的な評価を行なうための要素試験と、さらに振動応答まで範囲を加えた立体配管系加振試験が約5年間にわたって行われた。また、平成13年度（2001年度）からは、減肉配管の破損挙動解明に問題を絞った継続課題「地震荷重を受ける減肉配管の破壊過程解明に関する研究」として平成17年度までの予定で、同様の実験と評価を行っていくことになっている。

本研究ではこの実験を再現することのできるモデルを作成し、パラメータをいろいろと変えた解析を行うことによる的確な実験を実施することを目的とする。

なお本研究は独立行政法人防災科学技術研究所、石川島播磨重工業、横浜国立大学の共同研究である。

第2章 解析

2.1 解析手法

実験条件に基づいた3次元立体配管系の弾塑性解析を次のように実施した。動解析は非常に時間が掛かる為、モデルを簡略化する必要がある。シェル要素で動解析を行うことが最良であるが現状のコンピュータのスペックでは困難である。そこで本研究では2段階解析をした。フローチャートを図2.1-1に示す。動解析、静解析、寿命評価の3部から構成される。まずエルボ要素による動解析でおおよその挙動を把握し、エルボ部での変位を得る。その後、シェル要素による静解析でエルボ部にその得られた変位を入力し詳細な挙動を把握していく。解析にあたりソルバーにはABAQUS、ポストプロセッシングにはABAQUS VIEWERをそれぞれ用いた。

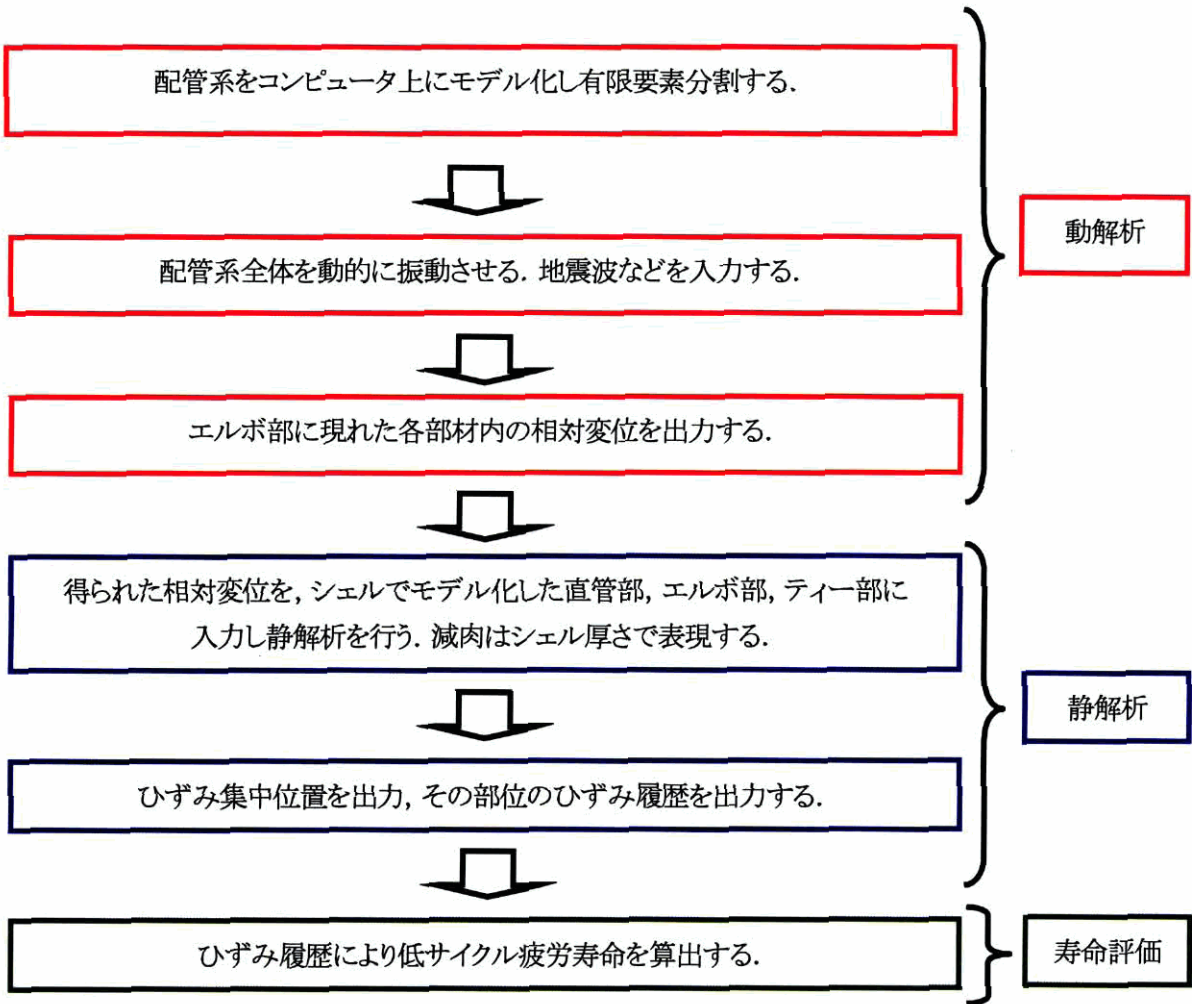


図 2.1-1 疲労寿命評価手法

2.2 動解析

2.2.1 入力波形

入力波形は1次固有振動モードのみを励起するため1.5Hz～3.0Hzの狭帯域ランダム波とした。図2.3.1-1に最大入力レベル1850galのランダム波の時刻歴波形を示す。図2.3.1-2は入力波形の応答スペクトルである。これ以降のグラフで弾性域とは最大入力加速度80gal、弾塑性域とは最大入力加速度1850galの結果である。

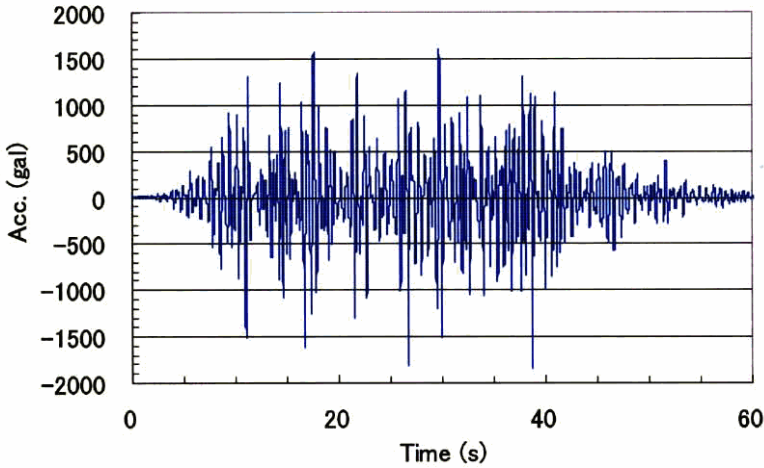


図 2.2.1-1 入力加速度の時刻歴波形（最大入力加速度 1850gal）

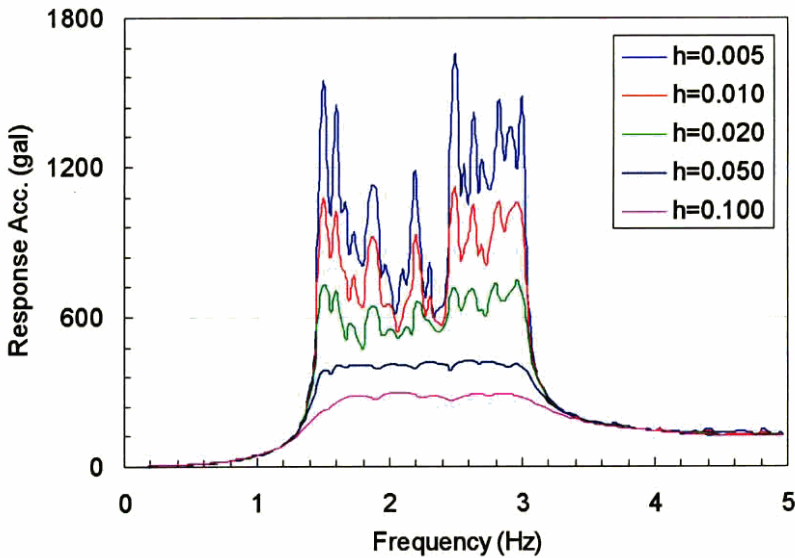


図 2.2.1-2 入力加速度の応答スペクトル

2.2.2 レーリー減衰

ここではレーリー減衰について説明する。弾性域での減衰の設定にはレーリー減衰を用いた。レーリー減衰は α と β で決定される。入力波形が成分を持つ1.5%から3.0%でほぼ一定となるように α , β 値を決定した。弾性設計で用いられる0.5%の例を図2.3.2-1に示す。

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2}$$

$$\alpha = 2\omega\zeta - \beta\omega^2$$

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega^2} = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2}$$

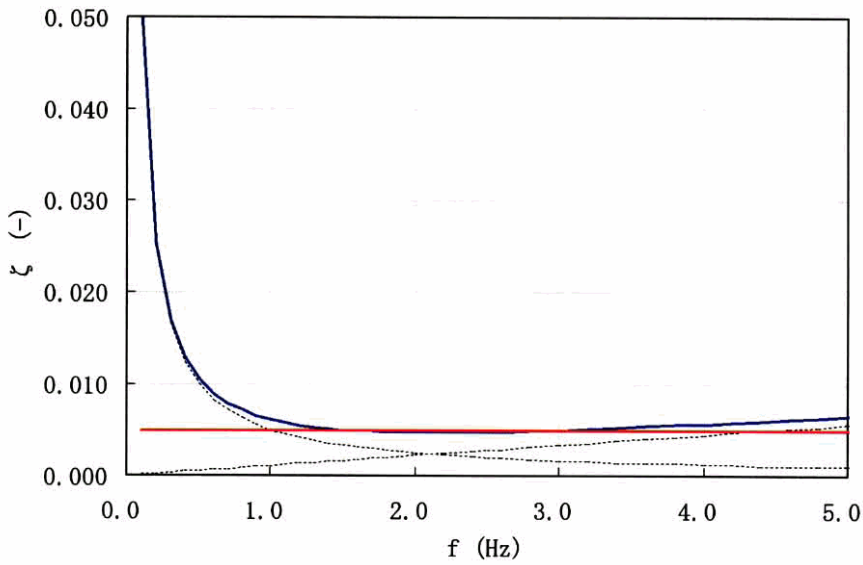


図 2.3.2-1 レーリー減衰

2.2.3 各種パラメータの影響

図 2.23-1 に試験体の概略図を示す。詳細については 3 章で述べる。各種パラメータの影響は全てのエルボが健全である条件を使用した。図 2.2.3-2 に応力-ひずみ曲線を示す。図中のプロットは炭素鋼 STPT370 の単調引張試験結果である。5%ひずみから 10%ひずみまでを最小二乗法で近似した直線を S1-1 として基準とした。

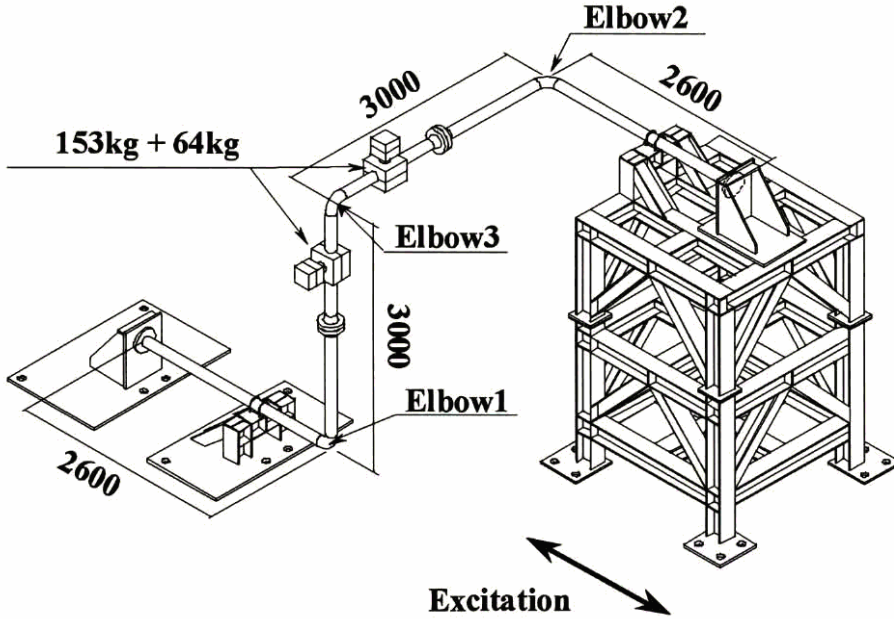


図 2.3.3-1 試験体概略図

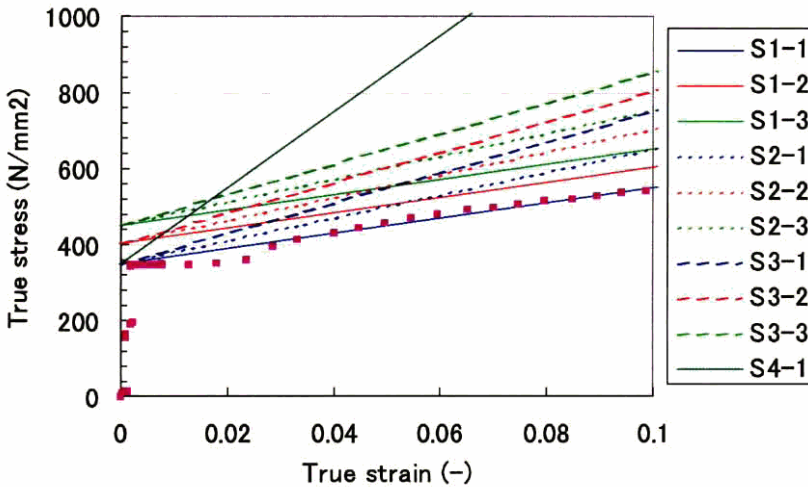


図 2.3.3-2 応力-ひずみ曲線

2.2.3.1 固有振動数の影響

固有振動数の応答に対する影響をみていく。図 2.2.3.1-1 と図 2.2.3.1-2 に固有振動数を調整前の弾性域と弾塑性域でのエルボ 3 上部における加振方向の応答加速度の時刻歴波形をそれぞれ示した。固有振動数は模擬バルブの質量を増やすことによって調整した。実験での固定端での拘束が完全ではない為に解析モデルの固有振動数が高くなってしまいうので最も容易に振動数を低下させることのできるこの方法を用いた。固有振動数の実験値は 2.72Hz, 解析の調整前が 2.92Hz, 調整後が 2.72Hz である。図 2.3.3.1-3 と図 2.3.3.1-4 に固有振動数を調整後の弾性域と弾塑性域での応答加速度の時刻歴波形をそれぞれ示した。これらの結果より配管系の応答に固有振動数が大きく影響することが分かる。また弾塑性域よりも弾性域において影響力が大きいと言える。図 2.3.3-2 の応答スペクトルより弾性域での減衰は 0.5% であり固有振動数が少しでも異なると応答スペクトルがかなり変動するが、弾塑性変形をして減衰が大きくなり 10% 以上となると応答スペクトルは、ほぼフラットとなる。その結果、固有振動数の影響を受けにくくなると考えられる。寿命予測は弾塑性域での応答量が重要であるので固有振動数の微調整を行わなくても可能であることが分かる。

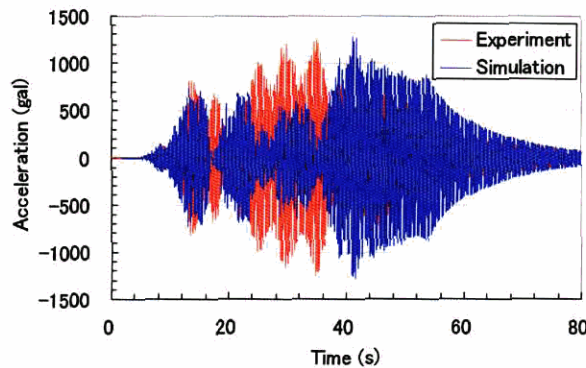


図 2.2.3.1-1 応答加速度の時刻歴波形（固有振動数調整前，弾性域）

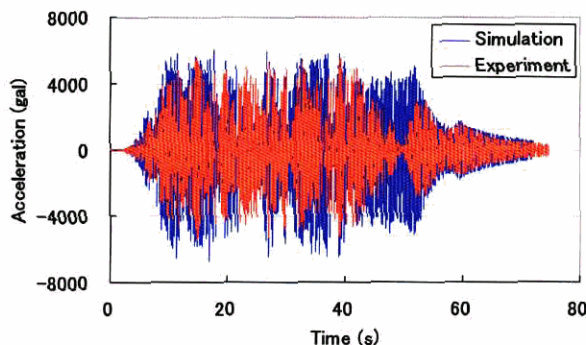


図 2.2.3.1-2 応答加速度の時刻歴波形（固有振動数調整前，弾塑性域）

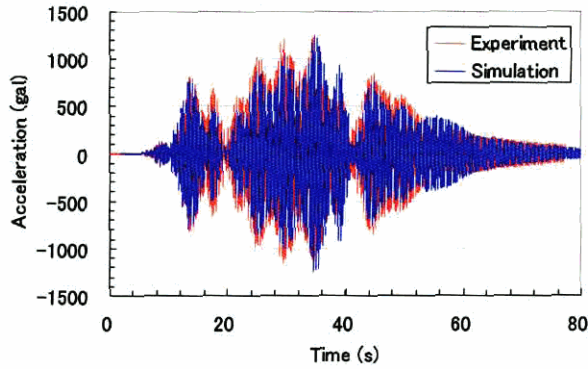


図 2.2.3.1-3 応答加速度の時刻歴波形（固有振動数調整後，弾性域）

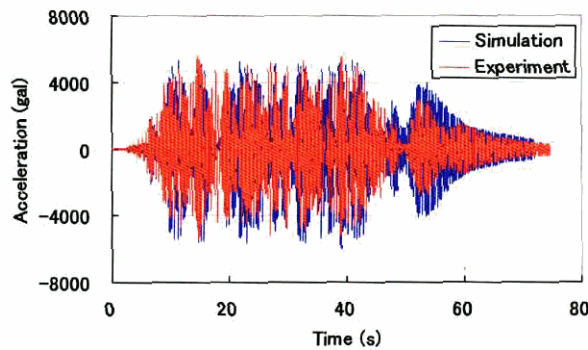


図 2.2.3.1-4 応答加速度の時刻歴波形（固有振動数調整後，弾塑性域）

2.2.3.2 時間刻みの影響

時間刻みの影響を見ていく。ABAQUS には時間増分の指定に HAFTOL (自動的に時間増分を変動) と DIRECT (固定時間増分) がある。解析時間を比較していく。PEN4 2.8GHz の PC を使用した場合に、HAFTOL であると弾性域で約 25 時間、弾塑性域で約 50 時間かかる。DIRECT であると弾性域 (時間刻み 5.0ms) で約 5 時間、弾塑性域 (時間刻み 1.0ms) で約 25 時間と大幅に短縮できる。弾性域の場合には図 2.2.3.2-1 に示すように時間刻みが 2.5ms と 5.0ms で応答加速度がほぼ一致している。この結果より弾性域の時間刻みは 5.0ms で十分であると言える。弾塑性域の場合には 0.1ms と 0.05ms でほぼ一致していた。よって、弾塑性域での時間刻みは 0.1ms で十分であると言える。

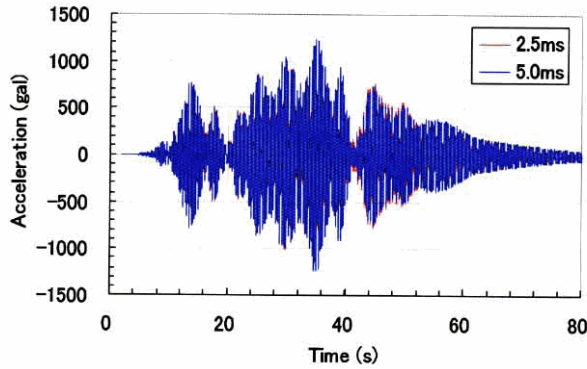


図 2.2.3.2-1 応答加速度の時刻歴波形 (弾性域)

2.2.3.3 エルボ分割数の影響

エルボ分割数の影響を見ていく。図 2.2.3.3-1 にエルボを 8 分割と 4 分割にした場合の比較を示す。ほぼ一致しているのでエルボは 4 分割で十分であると言える。弾塑性域でもほぼ一致する結果が得られた。

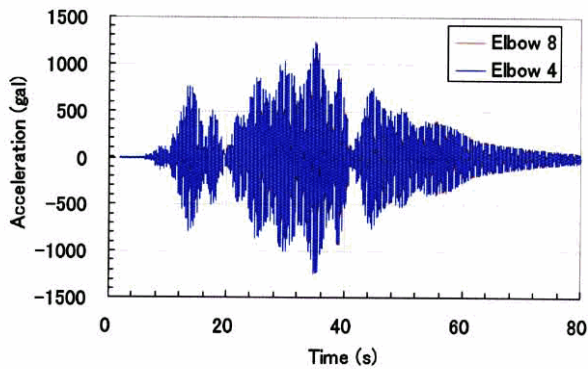


図 2.2.3.3-1 応答加速度の時刻歴波形 (弾性域)

2.2.3.4 弾性域の減衰の影響

弾性域の減衰の応答に対する影響をみていく。減衰の設定にはレーリー減衰を用いており、入力波形が成分を持つ 1.5% から 3.0% でほぼ一定となるように α , β 値を決定した。図 2.2.3.4-1 と図 2.2.3.4-2 に弾性域と弾塑性域でのエルボ 3 上部における加振方向の応答加速度の時刻歴波形をそれぞれ示した。弾性域の減衰が大きくなると弾性域での配管系の応答は小さくなるのが分かる。弾性域の減衰は弾性域では大きく影響するが弾塑性域ではほとんど影響していない。弾塑性応答において弾性域の減衰の影響がほとんど出なくなるのは塑性化によるヒステリシスロスによる減衰効果が弾性変形での減衰と比較して非常に大きい為と考えられる。

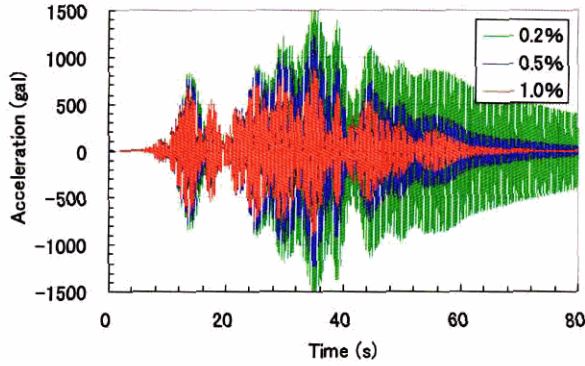


図 2.2.3.4-1 応答加速度の時刻歴波形 (弾性域)

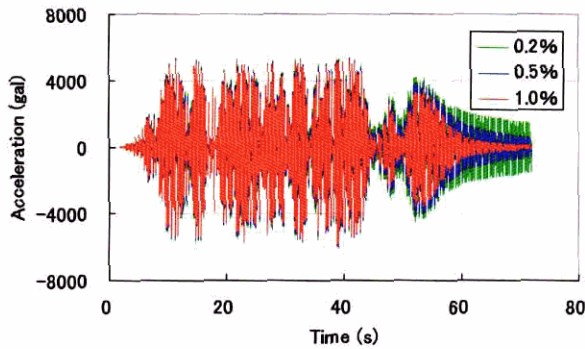


図 2.2.3.4-2 応答加速度の時刻歴波形 (弾塑性域)

2.2.3.5 降伏応力の影響

降伏応力の応答に対する影響をみていく。図 2.2.3-2 に示すように降伏応力が 352MPa, 402MPa, 452MPa である近似直線を S*1, S*2, S*3 とそれぞれ名付けた。2次勾配は図 2.2.3.5-1 が 2000MPa, 図 2.2.3.5-2 が 4000MPa, 図 2.2.3.5-3 が 6000MPa で統一している。図 2.2.3.5-1 から図 2.2.3.5-3 は 3 種類の降伏応力によるエルボ 1 の弾塑性域での開閉変位の時刻歴波形である。降伏応力が大きくなると応答振幅は大きくなり残留変形量は小さくなる事が分かる。

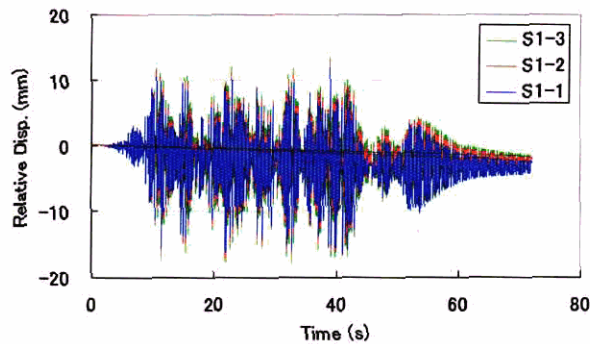


図 2.2.3.5-1 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

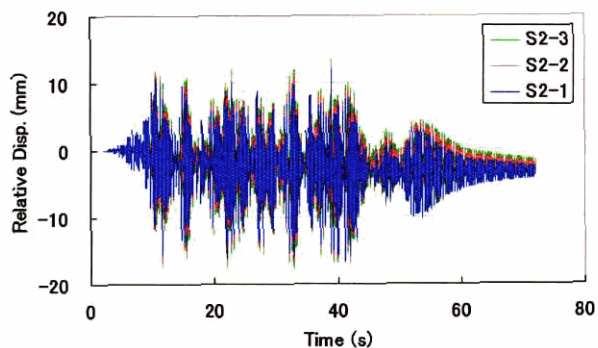


図 2.2.3.5-2 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

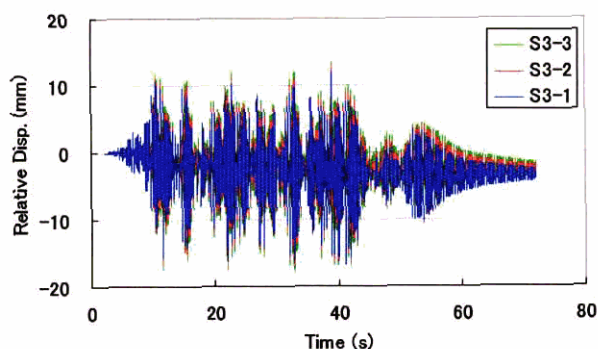


図 2.2.3.5-3 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

2.2.3.6 二次勾配の影響

二次勾配の応答に与える影響をみていく。図 2.2.3-2 に示すように二次勾配が 2000MPa, 4000MPa、6000MPa, 10000MPa である近似直線を S1-*, S2-*, S3-*, S4-* とそれぞれ名付けた。降伏応力は 図 2.2.3.6-1 が 352MPa, 図 2.2.3.6-2 が 402MPa, 図 2.2.3.6-3 が 452MPa, 図 2.2.3.6-4 が 352MPa で統一している。図 2.2.3.6-1 から図 2.2.3.6-4 に 2 または 3 種類の二次勾配によるエルボ 1 の弾塑性域での開閉変位の時刻歴波形を示した。二次勾配のこの配管系に対する影響は非常に小さいと言える。

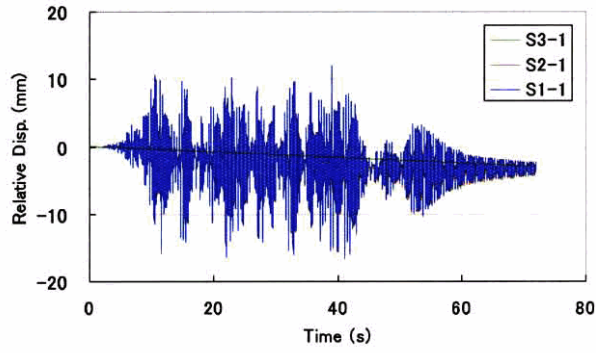


図 2.2.3.6-1 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

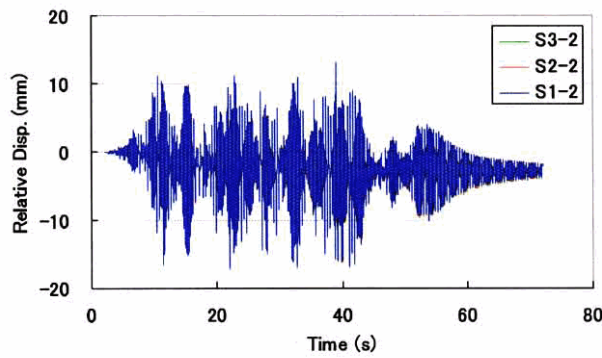


図 2.2.3.6-2 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

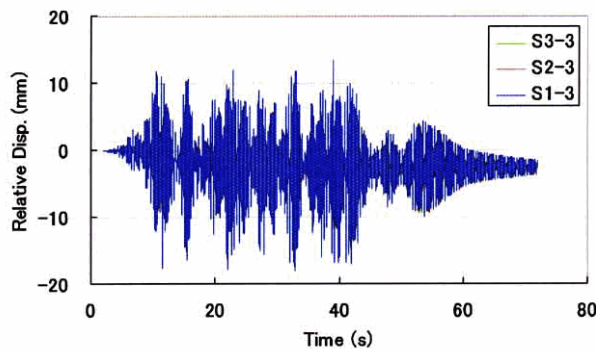


図 2.2.3.6-3 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

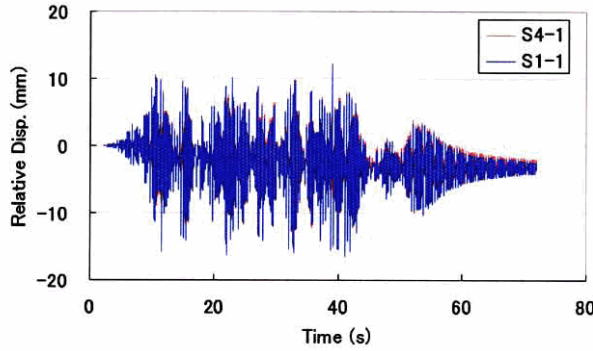


図 2.2.3.5-4 エルボの開閉変位の時刻歴波形 (エルボ 1, 弾塑性域)

2.2.4 動解析諸元

以上の結果より動解析で使用する各種パラメータを決定した。モデル化では全ての配管に対してエルボ要素を使用した。エルボ要素はトーラス半径をゼロとすることにより直管としても使用でき、曲管部と直管部の相互作用を考慮することができる。節点数は 405 (ユーザーが定義した節点数は 54)、要素数は 106 である。図 2.2.3-2 の S1-1 に示すように材料定数は炭素鋼 STPT370 の単調引張試験結果の 5%ひずみから 10%ひずみまでを最小二乗法で近似した直線を二次勾配として 2 直線近似をした。この際、

ヤング率	$E = 203\text{GPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
降伏応力	$\sigma_y = 352\text{MPa}$
二次勾配	$S' = 2000\text{MPa}$

である。硬化則としては移動硬化則を用いた。また弾性域での減衰は弾性設計で用いられる 0.5%とした。減衰の設定にはレーリー減衰を用いており、入力波形が成分を持つ 1.5%から 3.0%でほぼ一定となるように α , β 値を決定した。幾何学的非線形性を考慮した。自重は節点に集中荷重で分布させ、内部水の慣性力は集中質量で分布させた。入力波形は実験での測定結果を使用した。この際、解析が発散しにくいようにラージマス法を用いた。

2.3 静解析諸元

宇田川が平成 17 年度 修士論文「高経年配管の耐震安全裕度評価手法に関する研究」において、降伏点 3 水準、二次勾配 3 水準、計 9 種類の材料特性を用いて実験 8 ケースの破損箇所付近のひずみ計測点におけるひずみ範囲について、実験と解析の比較を行っている。その結果、降伏応力 424.3MPa、二次勾配 1200MPa が最も良いとしているのでこの材料特性を用いた。また現状のコンピューター性能では低減積分厚肉シェル要素で、周方向に 40 分割、軸方向に 30 分割程度、要素数ではモデル全体で 2000 要素程度が限界であるという結論に至っているのでこの要素分割数を適応して解析を行った。

2.4 疲労評価手法

2.4.1 累積疲労損傷則を用いた寿命評価

ラケット変形を伴う疲労評価寿命の予測には、ひずみ振幅に加え、延性消耗を考慮した累積ひ

ずみが重要なパラメータと考えられる。これは Coffin らが提唱する累積ひずみの存在に伴う延性消耗の影響により、低サイクル疲労強度が低下するという考え方に基づいている。基本的な考え方としてはひずみ振幅から求められる疲労損傷のパラメータ D_f に対し、累積ひずみの存在に伴う延性消耗を考慮した D_d を求め、累積ひずみの存在に伴う低サイクル疲労強度の低下を定量的に評価する事を目的としている。

疲労損傷のパラメータ D_f はマイナー則に従うものと考えられ、その際、炭素鋼 STS410 材の低サイクル疲労曲線は Manson-Coffin 則、及び Basquin 則から次式のように表される。この式に従えば全ひずみ範囲 $\Delta \Sigma \epsilon$ と破断寿命 N_f の関係が得られる。

$$\Delta \epsilon_t = C_e N_f^{-k_e} + C_p N_f^{-k_p} \quad (2-1)$$

上式において C_e は弾性疲労強度係数、 $-k_e$ は弾性疲労強度指数、 C_p は塑性疲労強度係数、 $-k_p$ は塑性疲労強度指数である。本研究では次式で表される原子力発電技術機構で求められた炭素鋼 STS410 の室温試験の結果を用いる事とした。

$$\Delta \epsilon_t = 0.6158 N_f^{-0.0746} + 89.08 N_f^{-0.5414} \quad (2-2)$$

上式を用いた結果マイナー式より、複数の全ひずみ振幅 $\Delta \epsilon_{ti}$ がそれぞれ N_i 回繰り返された場合の損傷率 η は次式によって表される。

$$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_f} \quad (2-3)$$

上式において、累積ひずみが無い場合 $\eta=1$ になった時破断する。

また Coffin らによると延性消耗のパラメータ D_d は以下のように表される。

$$D_d = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_{f0}} \quad (2-4)$$

上式において ϵ_f は累積ひずみ量、 ϵ_{f0} は供資材の真破断延性を表す。 ϵ_{f0} については次式で示される単調引張試験で得られる破断絞り ϕ (%) によって定義される。

$$\epsilon_{f0} = \ln \frac{100}{100 - \phi} \quad (2-5)$$

なお本解析で用いた真破断延性 ϵ_{f0} の値は原子力発電技術機構で求められた炭素鋼 STS410 の材料試験結果より 112.4% とした。

低サイクルラチェット疲労強度の評価法として Coffin は次式を提案している。

$$D_d + D_f = 1 \quad (2-6)$$

$$D_f = (\eta)^n \quad (2-7)$$

上式において n は定数を示す。鶴戸口の見解及び朝田らの試験結果に基づけば、一般的な鉄鋼材料の D_f は、 η を 0.6 乗した値とされている。朝田は薄肉部を設けた配管を用いた内圧ラチェット疲労試験の結果から、実験的に内圧による多軸応力場においては、(2-7) 式で求められる値より低サイクル寿

命が短くなるとして、多軸応力場における低サイクルラチェット疲労寿命評価式として、以下の2つの実験式を提案した。

朝田の実験式 I

$$\begin{aligned} 3D_d + D_f &= 1 & (D_f \leq 0.25) \\ D_d + 3D_f &= 1 & (D_f > 0.25) \end{aligned} \quad (2-8)$$

朝田の実験式 II

$$D_f + 2\sqrt{D_f D_d} + D_d = 1 \quad (2-9)$$

なお、上式において ε_f は膨張した配管の最終的な周方向ひずみとしている。また、クロスヘッドによる負荷変位を薄肉部平行長さで除した値を全ひずみ振幅として D_f を算出している。すなわち式(2-7)及び(2-8)ではき裂発生部における試験体の局所的なひずみを用いないマクロ的な変形から類推した実験式である。したがって局所的な真ひずみ範囲を考察できる FEM 解析に適用すると過度に安全側の結果となる事は否めない。しかしながらラチェット変形の考察を行う上で、延性消耗を考慮する事が大変重要な要因であり、 D_f に対する D_d の値を抽出する事は減肉配管の安全性評価に非常に有効であると考えられる。

2.4.2 多軸非線形ひずみ下の低サイクル疲労寿命評価手法

ここでは多軸ひずみ下の低サイクル疲労寿命評価手法について説明していく。

軸方向ひずみを ε_x 、周方向ひずみを ε_y 、せん断ひずみを γ_{xy} する。図 2.5.2-1 に示すように角度 θ については軸方向ひずみ ε_x の方向を 0° としその方向から時計回りを正にとる。また角度 θ のとりうる範囲は $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ となる。

式 (2-10) により、それらのひずみを角度 θ の関数として出力する。次に、角度 θ を固定しひずみ履歴を再出力し、それぞれの角度でひずみ範囲 $\Delta\varepsilon(\theta)$ と累積ひずみ量 $\varepsilon_a(\theta)$ を計算する。算出方法は単軸ひずみの場合と同様である。

次に式 (2-2) により $\Delta\varepsilon(\theta)$ から $D_f(\theta)$ を算出し、また式 (2-4) により $\varepsilon_a(\theta)$ から $D_d(\theta)$ を算出する。これらの計算を行うと図 2.5.2-2 の F 値と角度の関係、図 2.5.2-3 の F 値とサイクル数の関係を作成することができる。

図 2.5.2-2 を見ると、軸方向から 87° 方向に F 値のピークを取る事が分かる。これは、軸方向から 87° 傾いた面が開くようにき裂が入り破壊に至る事を示している。つまり 177° ($87^\circ + 180^\circ$) の軸方向き裂が入る事を示している。

図 2.5.2-3 を見ると、220 サイクルで $F=1.0$ を取る事が分かる。これは、220 サイクルで破壊に至るということを示している。

これにより、き裂の入る方向と、破壊に至るまでのサイクル数を知ることができる。

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \gamma_{xy} \sin 2\theta \quad (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \quad (2-10)$$

$$\Delta\varepsilon(\theta) \xrightarrow{(2-2)} D_f(\theta) \quad (2-11)$$

$$\varepsilon_f(\theta) \xrightarrow{(2-4)} D_d(\theta) \quad (2-12)$$

$$\max[\varepsilon_f(\theta)] \xrightarrow{(2-4)} D_d \quad (2-13)$$

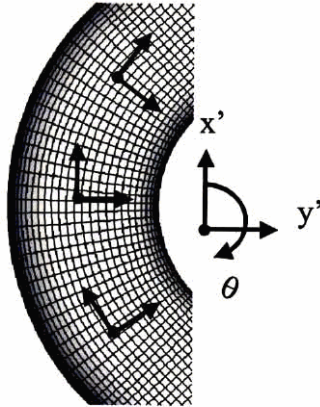


図 2.4.2-1 局所座標系

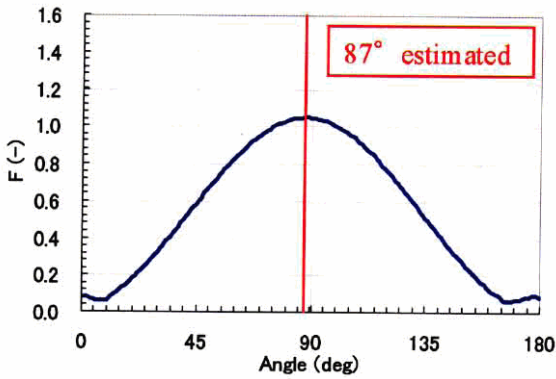


図 2.4.2-2 F 値と角度の関係

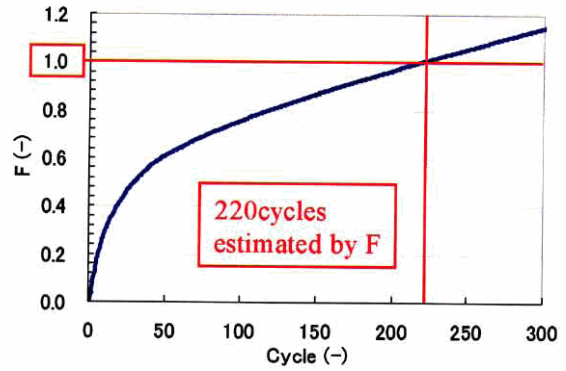


図 2.4.2-3 F 値とサイクル数の関係 (87°)

第3章 実験と解析の比較

3.1 実験概要

配管系の形状を図 3.1-1, 図 3.1-2, 図 3.1-3 に示す。配管系はエルボ部と直管部から構成されており, 各エルボ部を図のように EL1, EL2, EL3 とする。この配管系モデルで一次元大型振動台を用いて加振実験を行った。入力波形は 1 次固有振動モードのみを励起するため 1.5Hz~3.0Hz の狭帯域ランダム波とした。入力加速度の時刻歴波形を図 3.1.1-4 に, 応答スペクトルを図 3.1.1-5 に示す。

配管は高温配管用炭素鋼管 STPT370 100A Sch80 (JIS 規格)を使用した。外径 114.3mm, 健全部肉厚 8.6mm である。減肉エルボは炭素鋼 FSGP エルボで代用した。FSGP エルボの肉厚は公称 4.5mm であり, 減肉量は約 50%となる。エルボに繋がる直管部は肉厚 4.5mm の区間を 60mm おいて, その後にテーパをつけて健全の肉厚にしている。減肉形状を図 3.1-6 に示す。配管系形状と減肉エルボの個数と位置をパラメータとした。EL1 と EL2 が減肉候補である。EL3 を減肉させない理由は, EL1 と EL2 では面内曲げ, 面外曲げ, 面内+面外曲げを生じ塑性変形をするが, EL3 は並進運動するだけでありひずみ範囲は小さく弾性変形となるためである。試験体には模擬バルブ (153k g +64k g) が 2 箇所にある。また内圧として 10MPa を負荷している。表 3.1-1 に試験ケースを示す。

図 3.1-7 にひずみゲージの位置を示す。3.4 ではこの場所でのひずみの実験結果と解析結果を比較する。

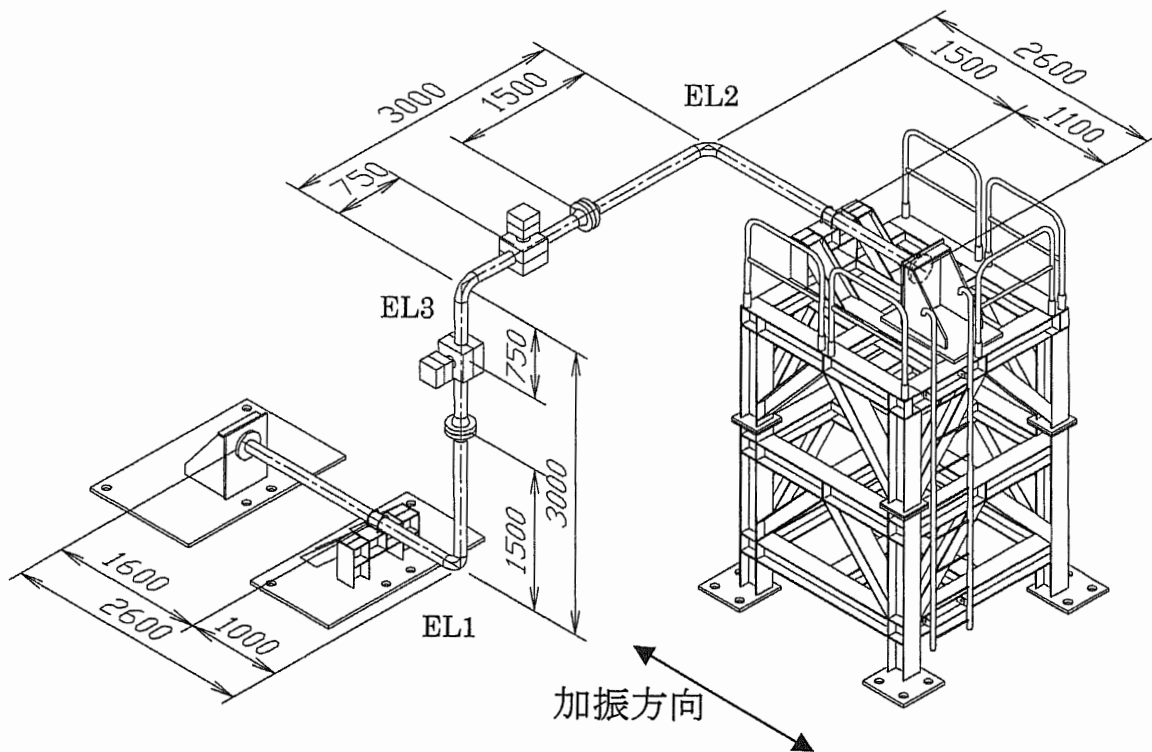


図 3.1-1 配管系動的加振試験概要図 (EL1：面内曲げ)

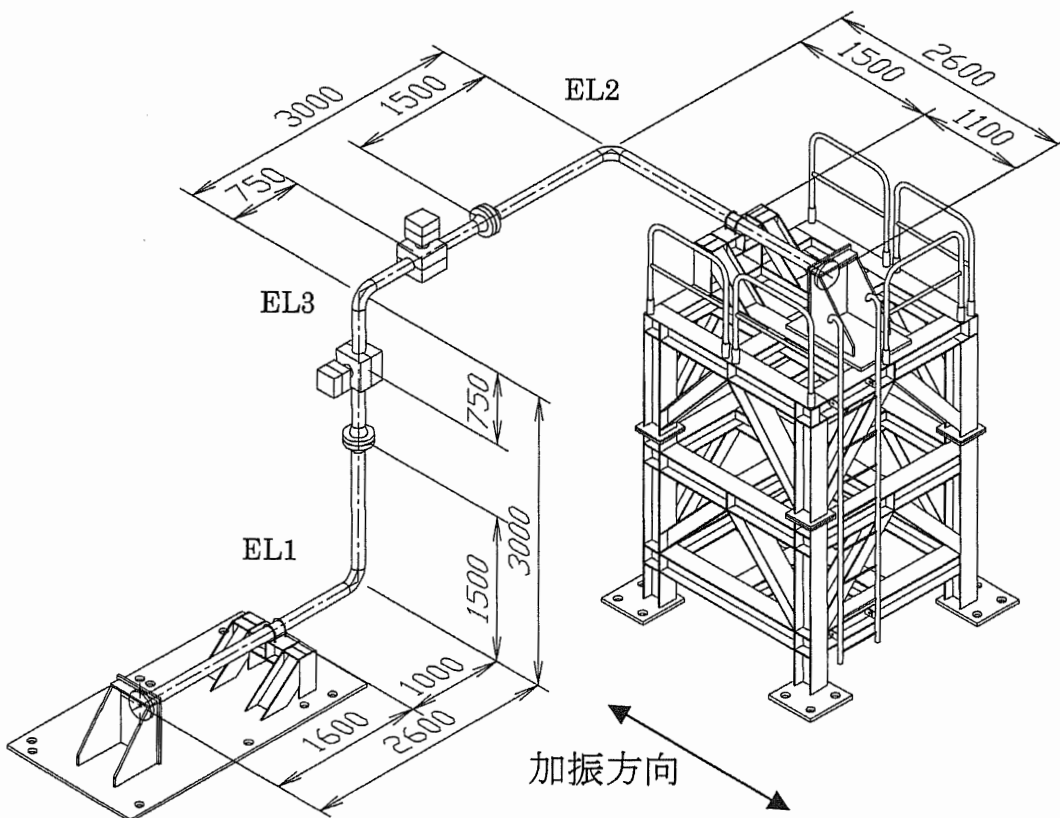


図 3.1-2 配管系動的加振試験概要図 (EL1：エルボ面外曲げ)

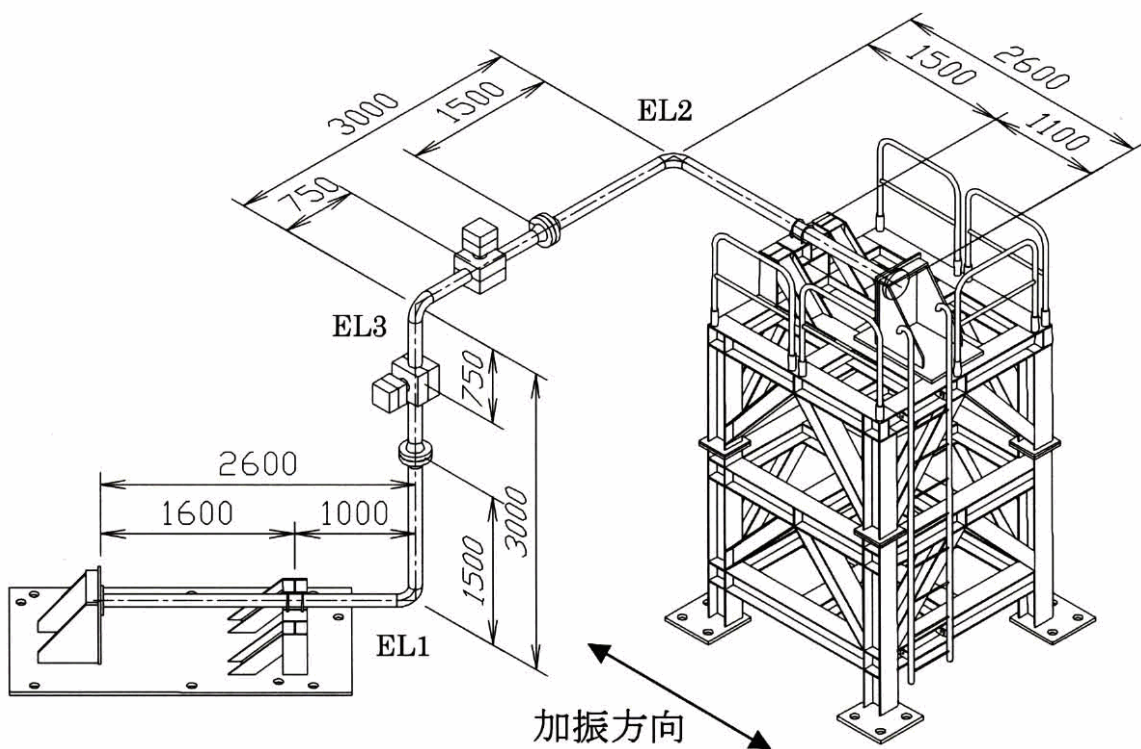


図 3.1-3 配管系動的加振試験概要図 (EL1：面内+面外曲げ)

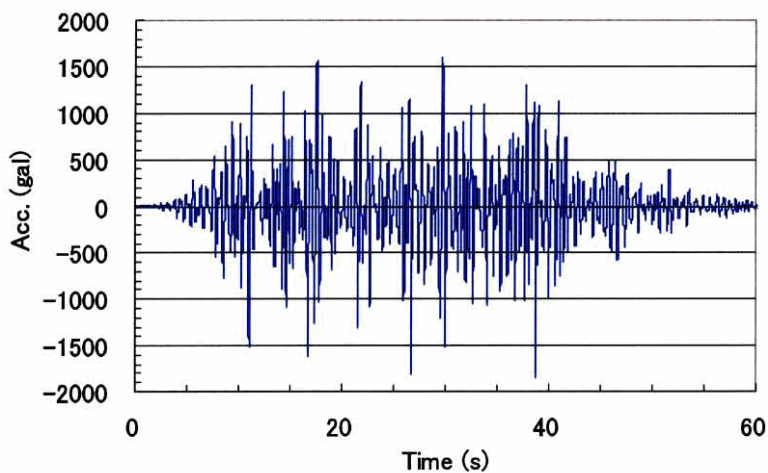


図 3.1-4 入力加速度の時刻歴波形

表 3.1-1 試験ケース

試験ケース	配管系形状	EL1	EL2	EL3
a01	0	健全	健全	健全
c01	0	減肉	減肉	健全
c02	0	減肉	健全	健全
c03	0	健全	減肉	健全
a11	1	健全	健全	健全
c11	1	減肉	減肉	健全
c12	1	減肉	健全	健全
c13	1	健全	減肉	健全
a21	2	健全	健全	健全
c21	2	減肉	減肉	健全
c22	2 <td 減肉	健全	健全	
c23	2	健全	減肉	健全

配管系形状 0…EL1：面内曲げ (図 3.1.1-1)

配管系形状 1…EL1：面外曲げ (図 3.1.1-2)

配管系形状 2…EL1：面内+面外曲げ (図 3.1.1-3)

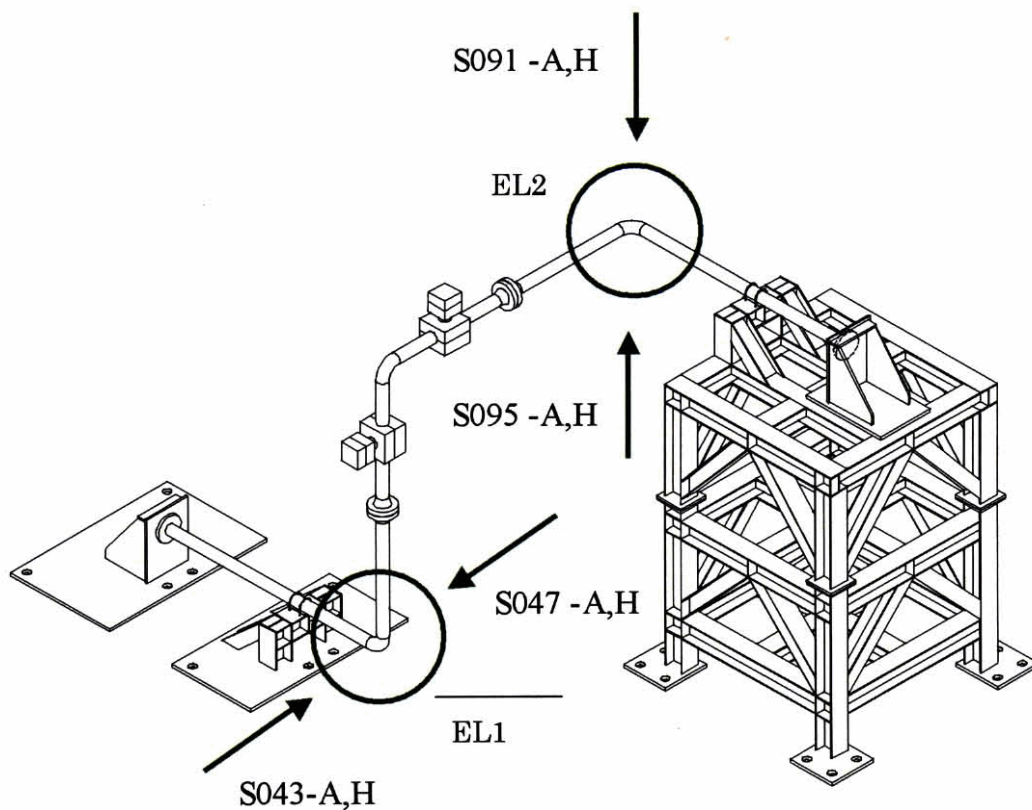


図 3.1-7 ひずみゲージの位置 (すべてエルボ脇部)

3.2 固有モード・固有振動数について

図 3.2-1 に一次固有モード図を示す。全ての配管形状において EL2 はほぼ面内曲げを受けることが分かる。また EL1 については①は面内曲げ、②は面外曲げ、③は面内+面外曲げを受けることが分かる。図 3.2-2 にそれぞれの試験ケースの一次固有振動数を示す。

凡例の ABAQUS とはソルバーとして用いた ABAQUS で固有値解析をした結果の振動数であり、FFT とは最大入力加速度 80gal で解析した応答波形をフーリエ変換した場合のパワースペクトルのピーク周波数である。ABAQUS の固有値解析が若干低く算出されることが分かった。

また実験で得られた固有振動数は A01 が 2.78[Hz], C01 が 2.42[Hz], C02 が 2.55[Hz], C03 が 2.62[Hz] であり、良く一致している。図 3.1-5 に示したように入力加速度は応答スペクトルより 1.5Hz~3.0Hz に成分を持っている。弾塑性状態では減衰は大きくなるのでほぼ同等の入力であると言える。

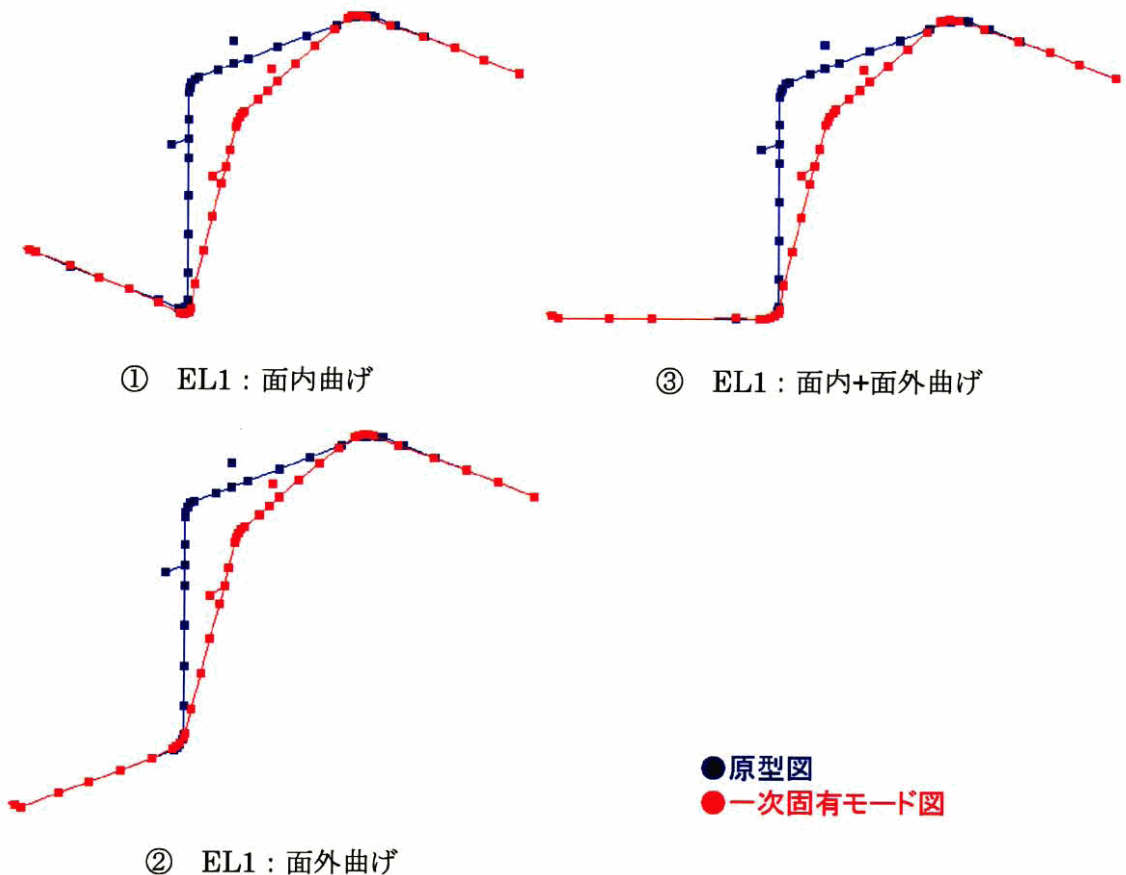


図 3.2-1 一次固有モード図

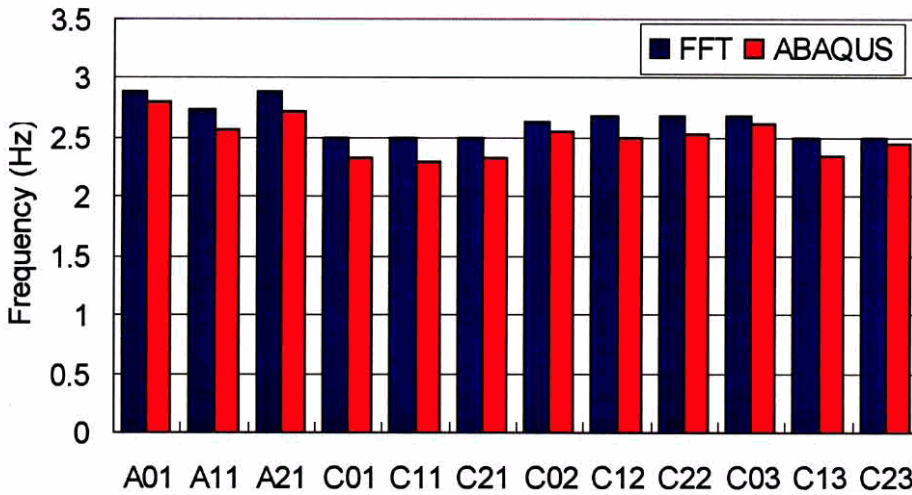


図 3.2-2 固有振動数の比較

3.3 動解析結果

動解析結果と実験結果を比較していく。実験は A01, C01, C02, C03, C12 についてのみ実施されている。また平成 17 年度に A21, C21 を実施予定である。図 3.3-1 から図 3.3-12 に動解析結果を示す。上から順に EL3 上部における加振方向の応答加速度の時刻歴波形, EL1 のエルボ開閉変位の時刻歴波形, 立ち上がり配管の下から 500mm での加振方向の応答変位の時刻歴波形, EL2 のエルボ開閉変位の時刻歴波形となっている。

実験結果より, A01 の EL1 と EL2, C01 の EL2 においてエルボの閉じる方向に, C01 の EL1 においてエルボの開く方向に残留変形が生じている。C03 の EL2 においてエルボの閉じる方向に, C03 の EL1 においてエルボの開く方向に残留変形が生じ, C02 の EL1 と EL2 では残留変形は生じていない。これらの傾向は解析においてよく再現できている。しかし解析でのエルボ開閉変位の平均振幅および残留変形量は実験より少し大きい。

C12 は EL1 が面外変形を主に生じる条件であるが加振方向の応答変位, エルボ開閉変位ともに傾向をしっかりと再現できている。

また実験結果および解析結果より減肉個数が増えると EL3 上部における加振方向の応答加速度は小さくなる傾向にある。またエルボ開閉変位は減肉していると大きくなり, 残留変形は EL2 が減肉している条件で発生しやすいと言える。

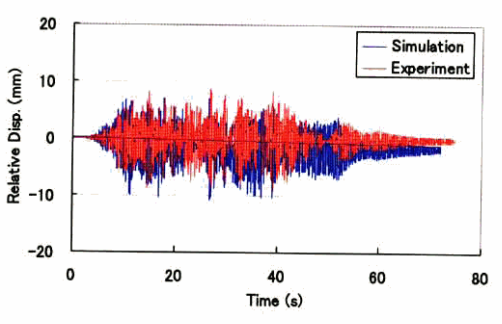
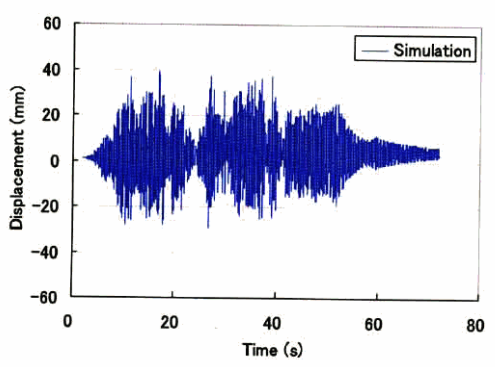
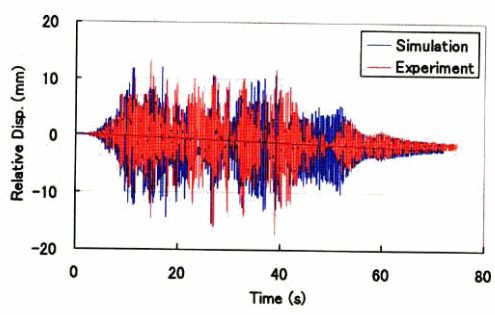
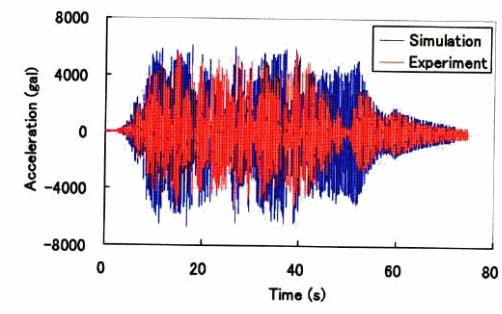


図 3.3-1 動解析結果 (A01)

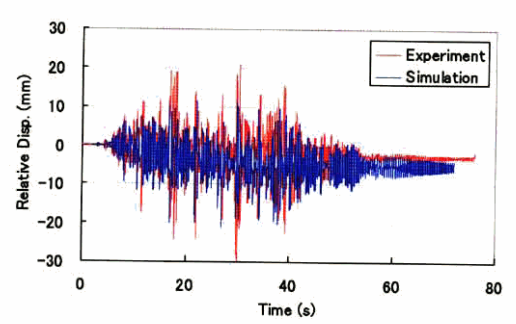
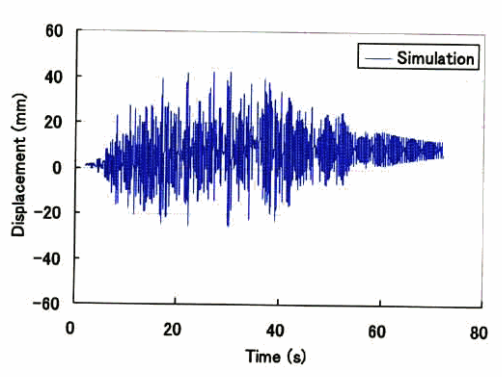
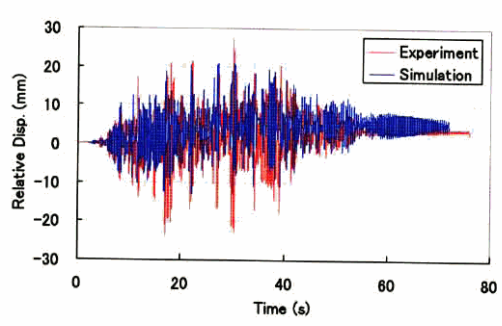
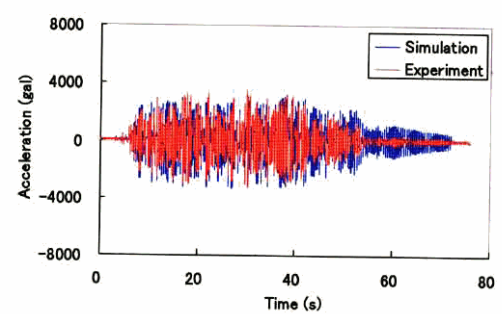


図 3.3-2 動解析結果 (C01)

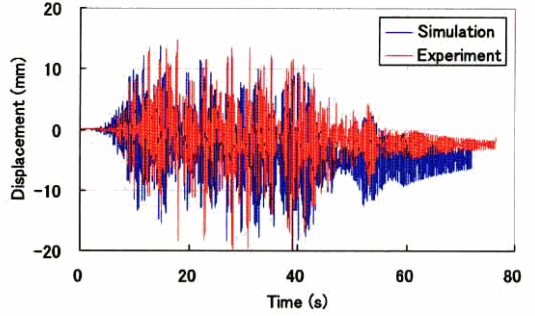
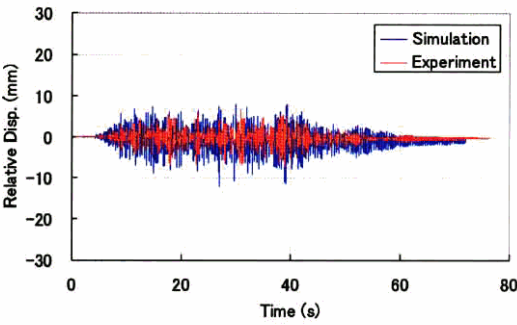
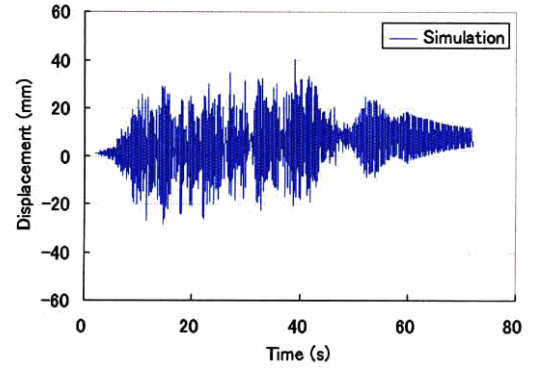
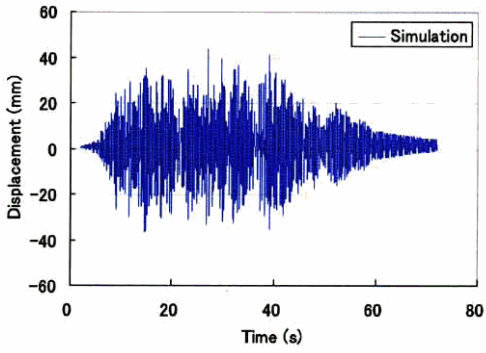
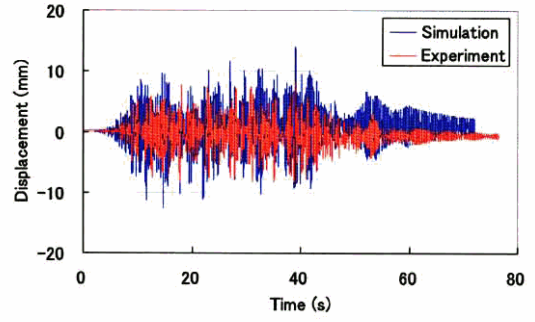
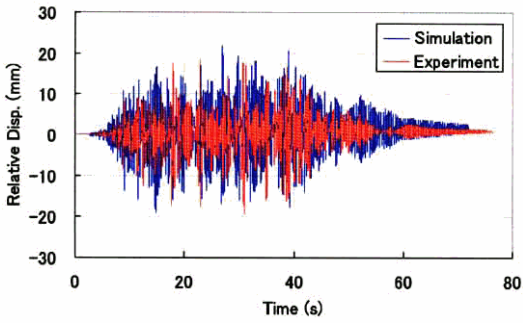
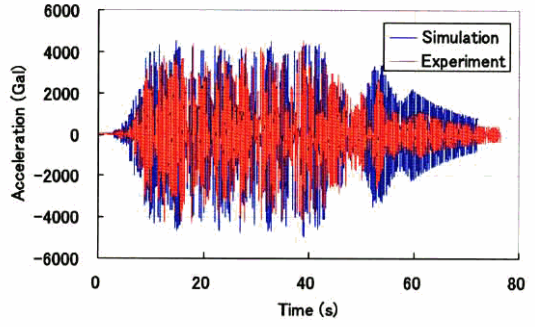
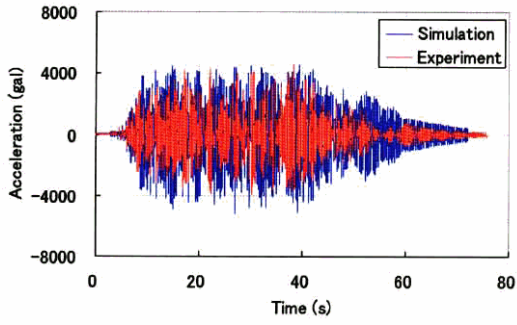


図 3.3-3 動解析結果 (C02)

図 3.3-4 動解析結果 (C03)

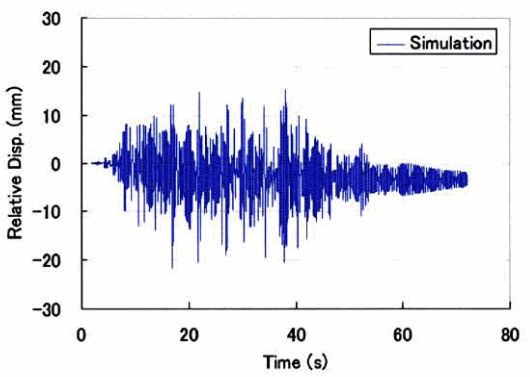
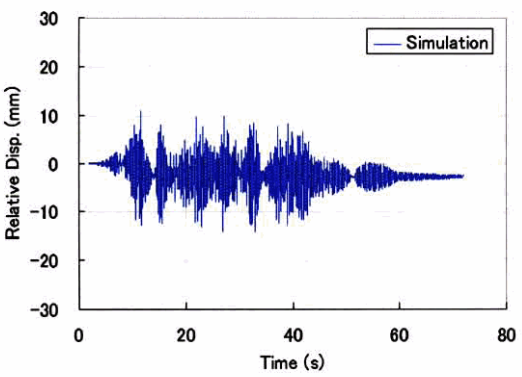
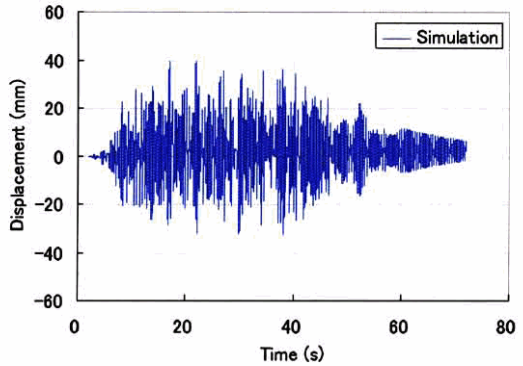
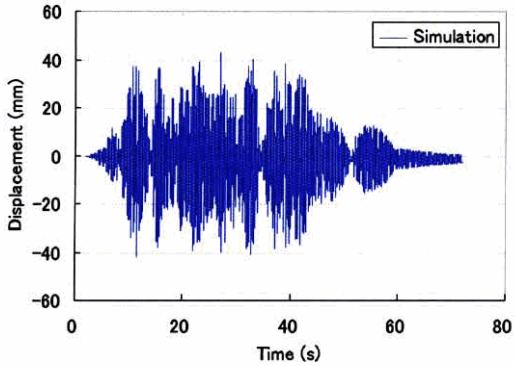
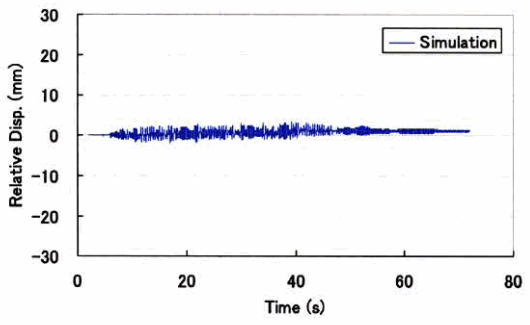
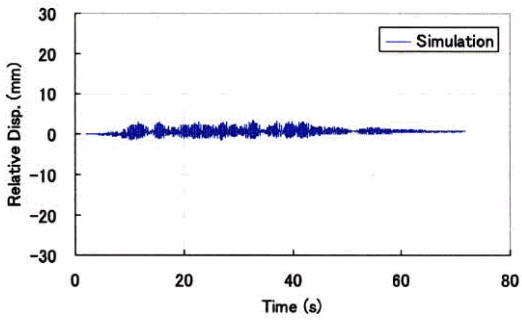
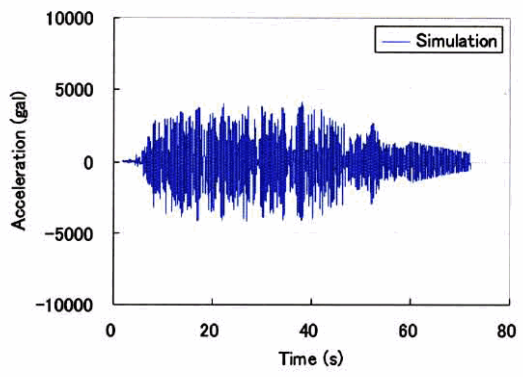
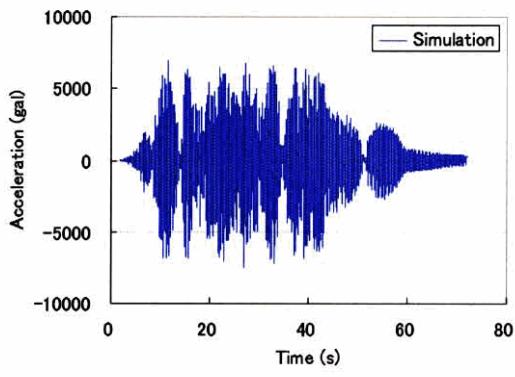


図 3.3-5 動解析結果 (A11)

図 3.3-6 動解析結果 (C11)

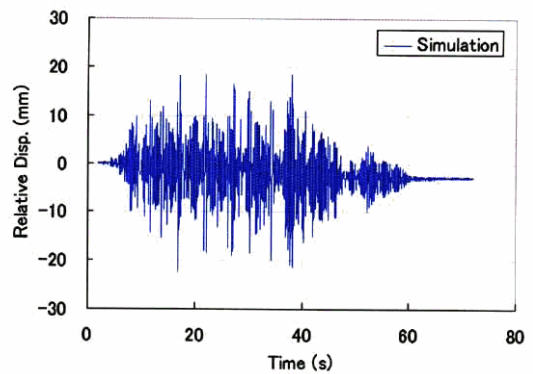
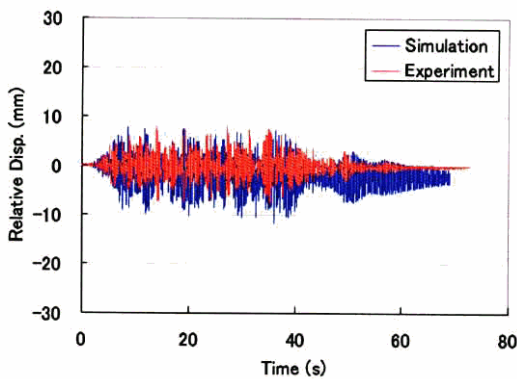
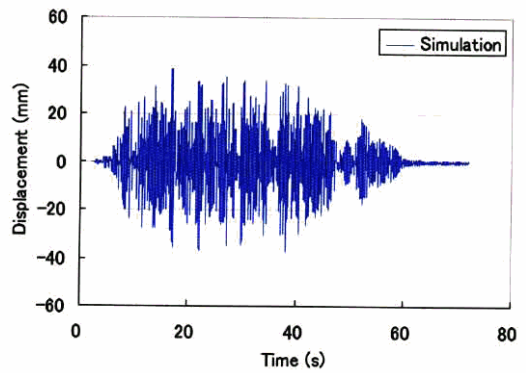
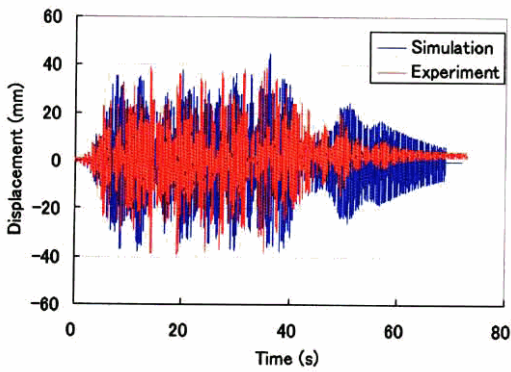
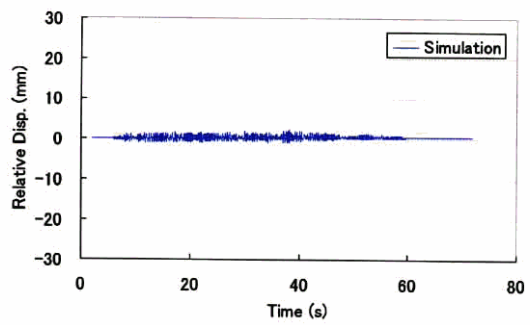
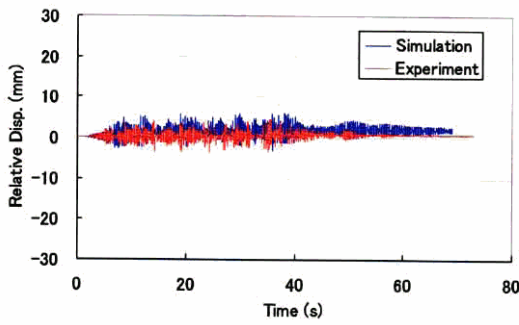
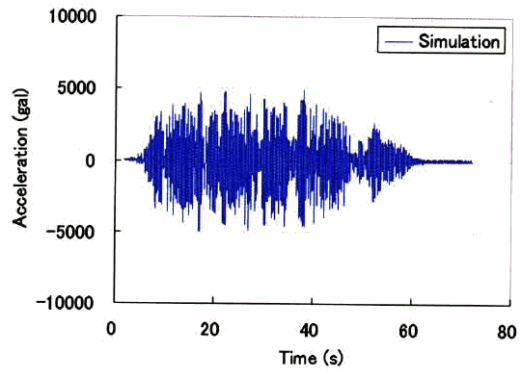
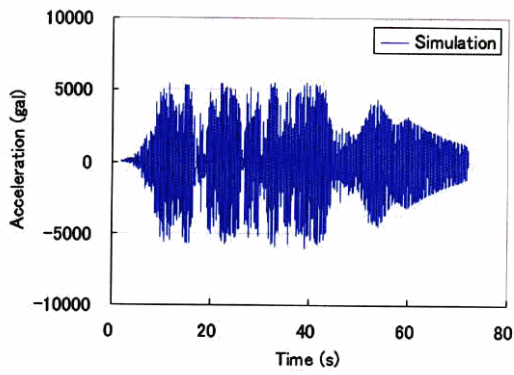


図 3.3-7 動解析結果 (C12)

図 3.3-8 動解析結果 (C13)

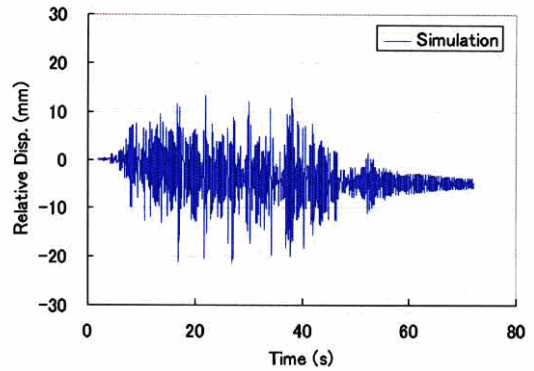
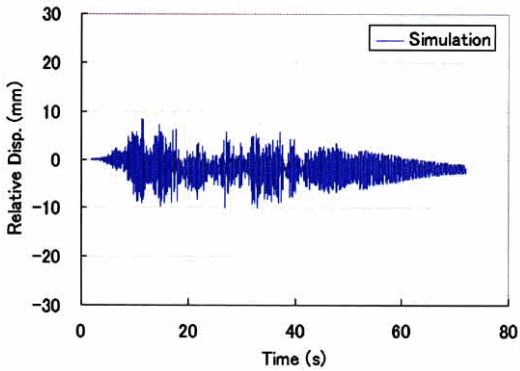
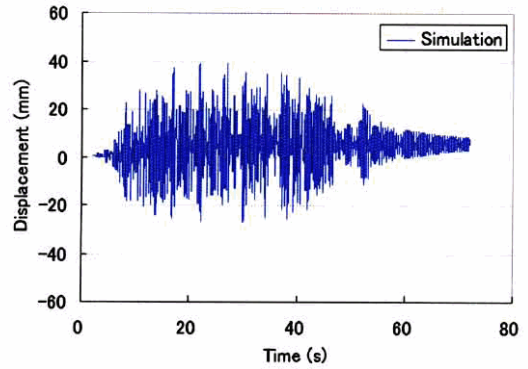
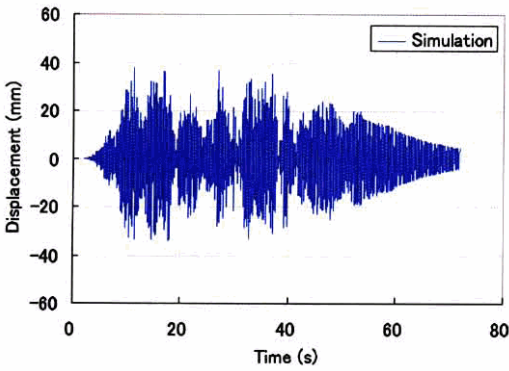
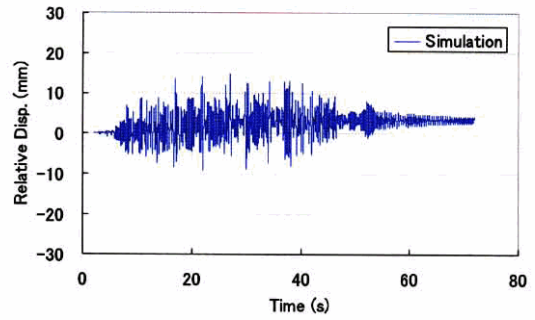
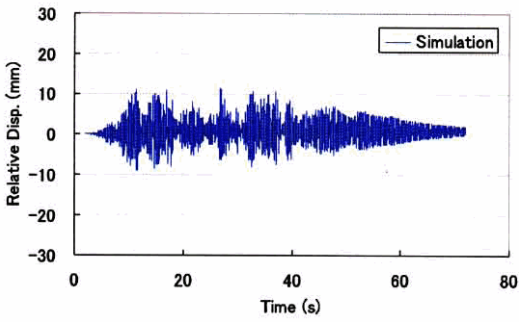
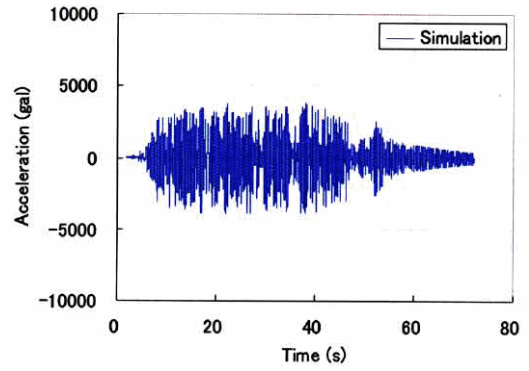
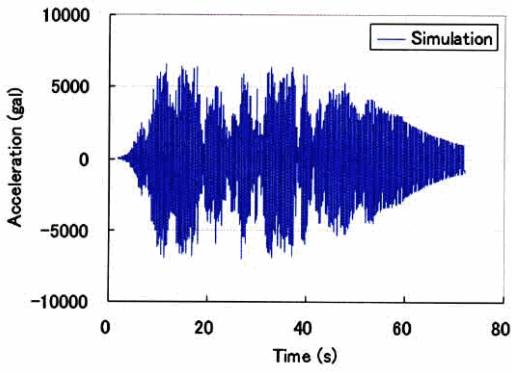


図 3.3-9 動解析結果 (A21)

図 3.3-10 動解析結果 (C21)

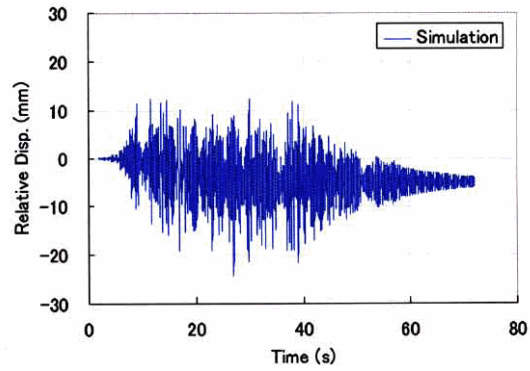
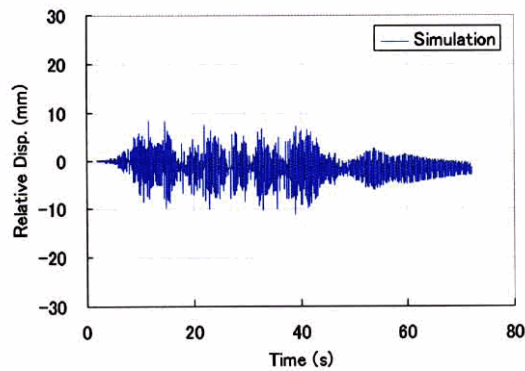
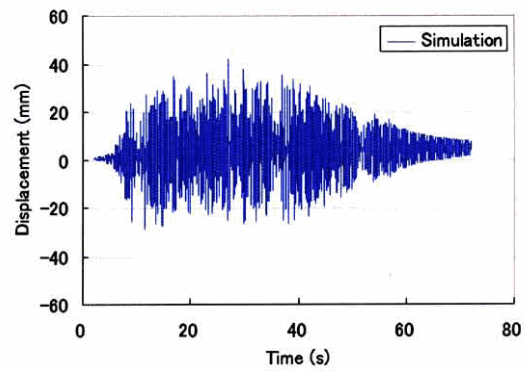
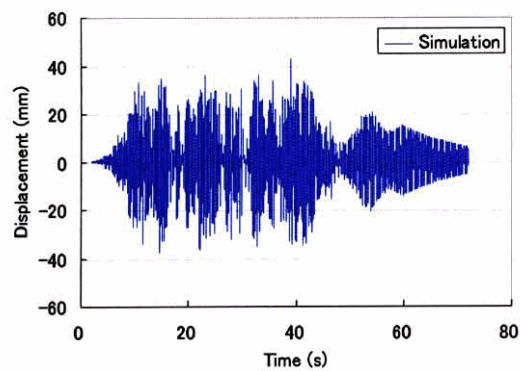
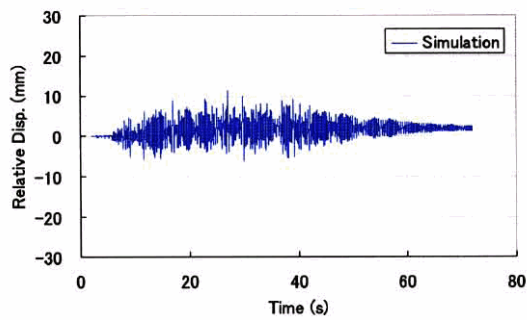
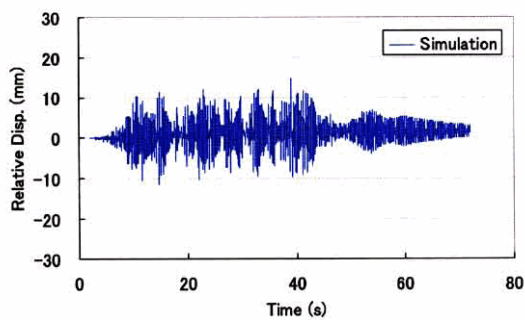
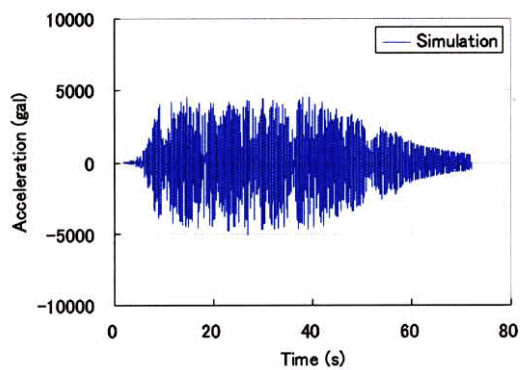
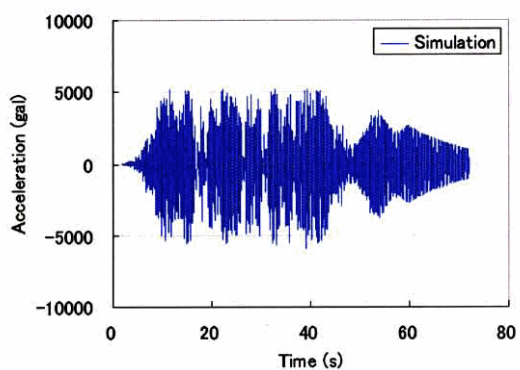
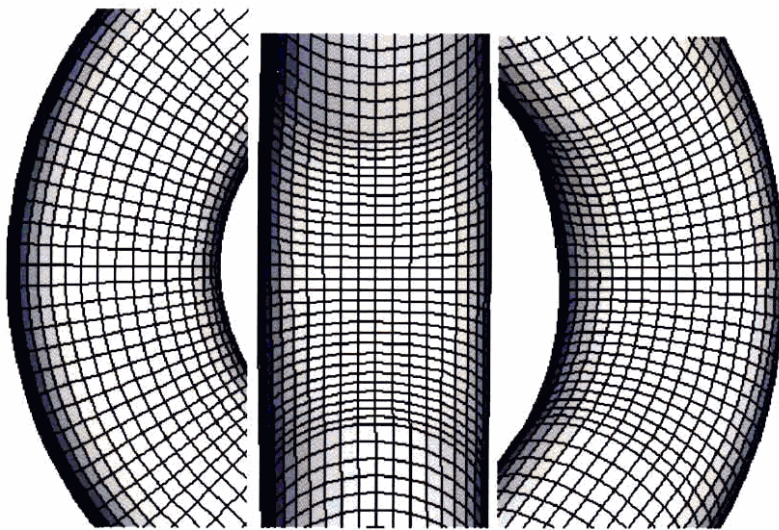


図 3.3-11 動解析結果 (C22)

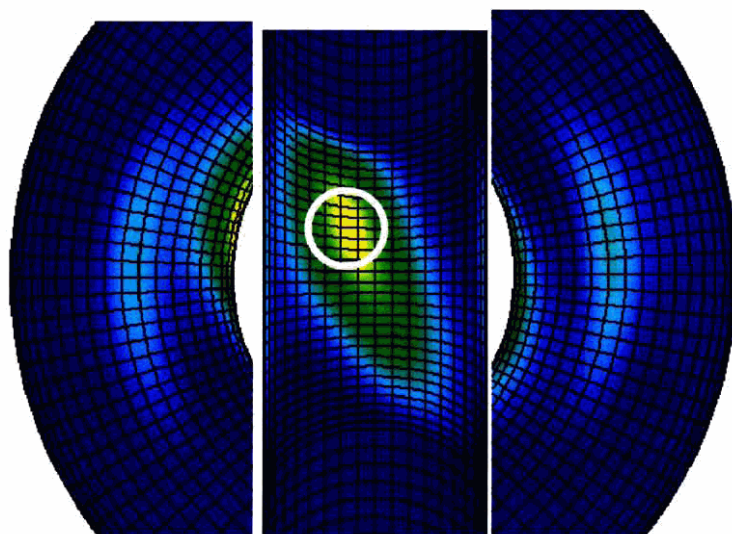
図 3.3-12 動解析結果 (C23)

3.4 静解析結果

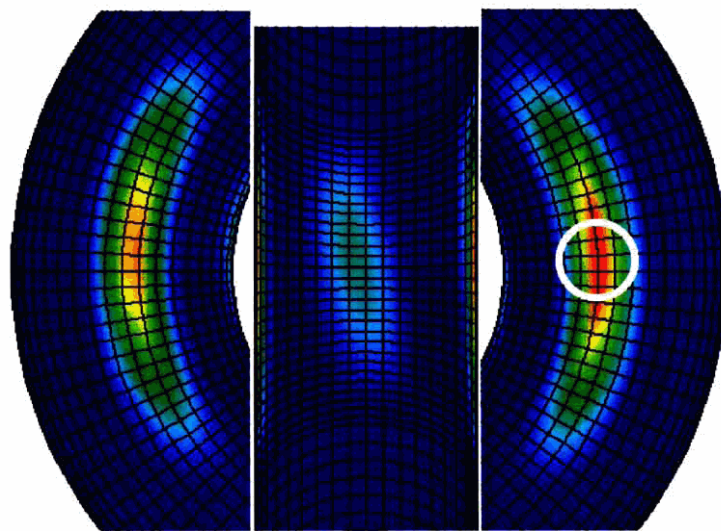
ここでは静解析結果と実験結果を比較検討していく。図 3.4-1 から図 3.4-48 に各条件での変形図（変形拡大率 5 倍）、相当塑性ひずみ分布図（外面）、相当塑性ひずみ分布図（内面）、ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係、実験データがある場合には図 3.1-7 のひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の実験と解析との比較を示す。



変形図 (変形拡大率 5 倍)

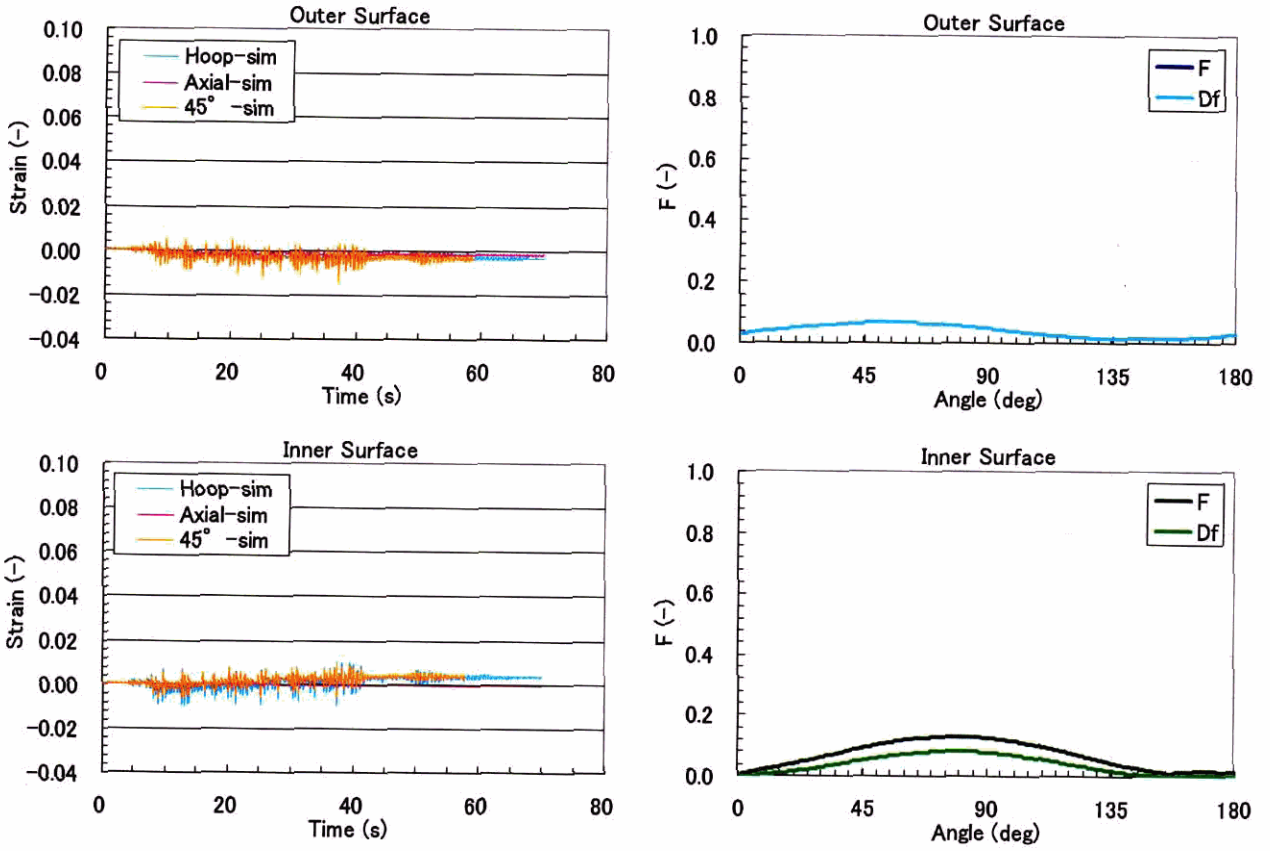


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

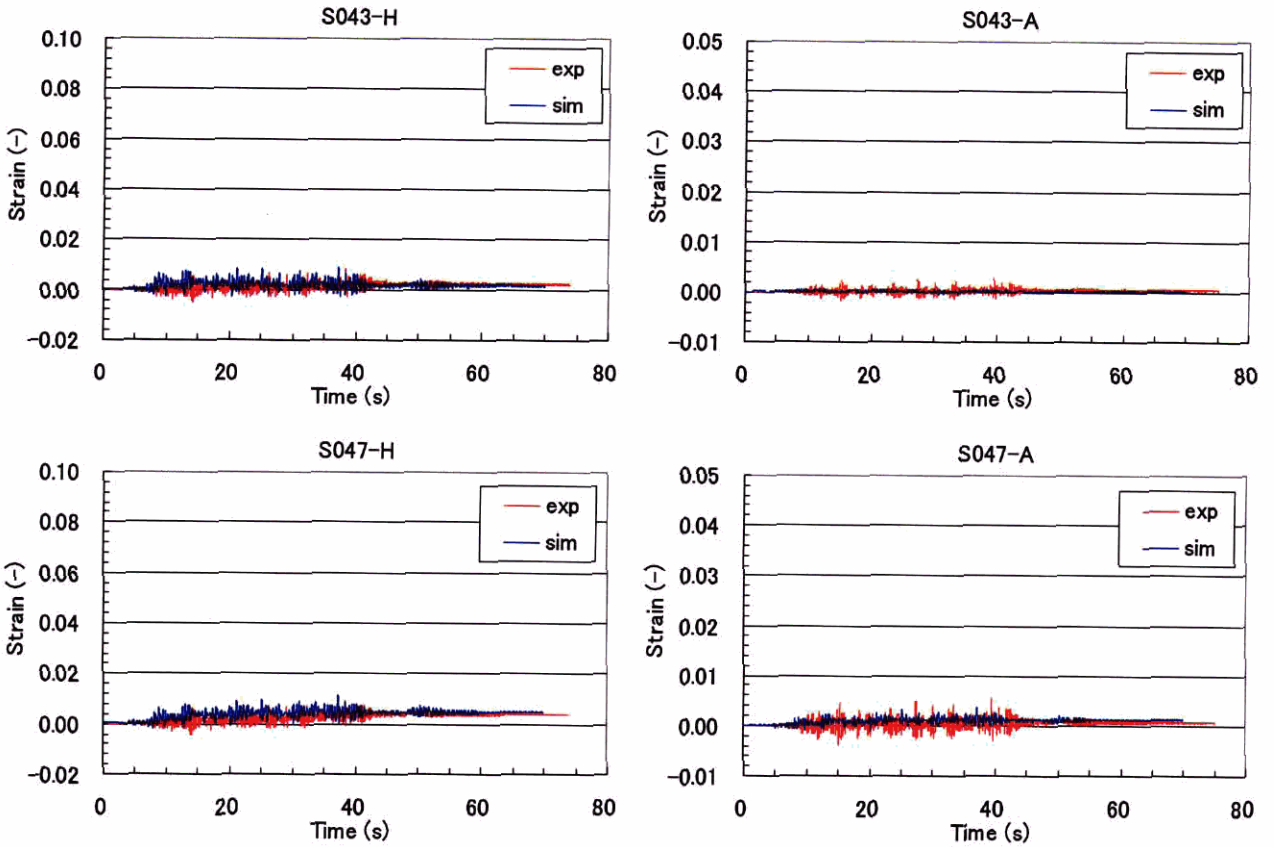


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-1 A01-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

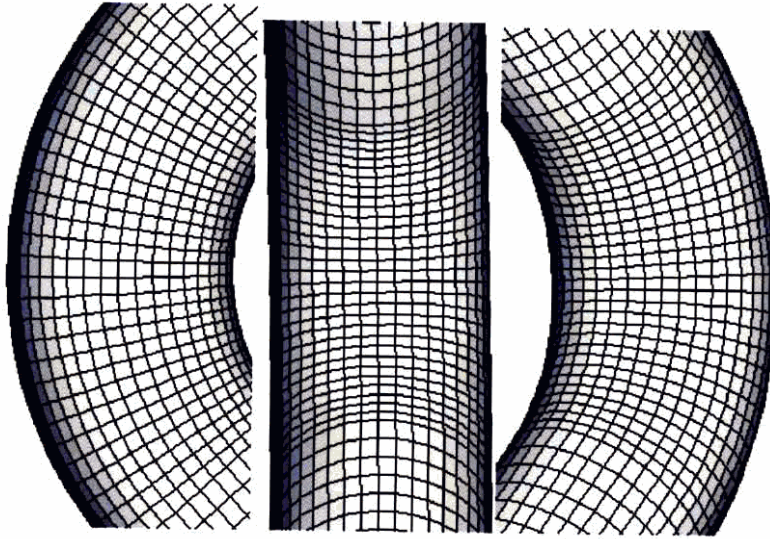


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

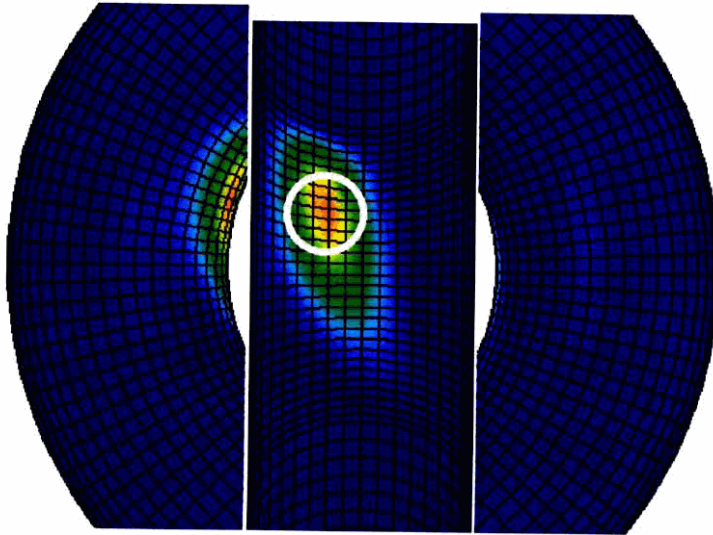


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

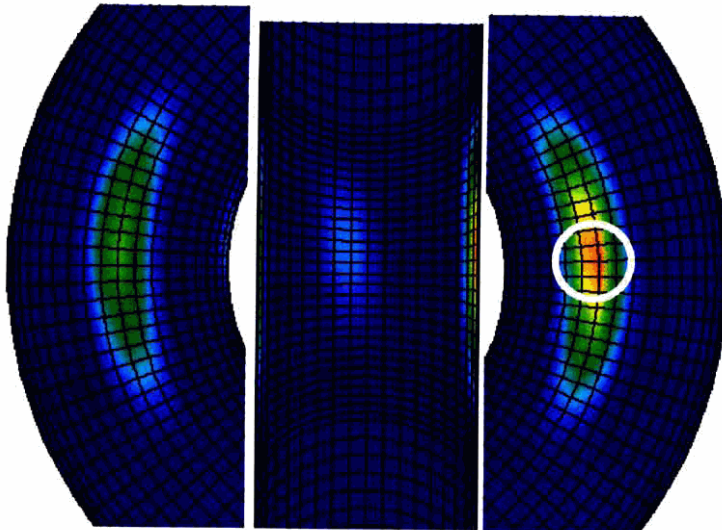
図 3.4-2 A01-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図（変形拡大率 5 倍）

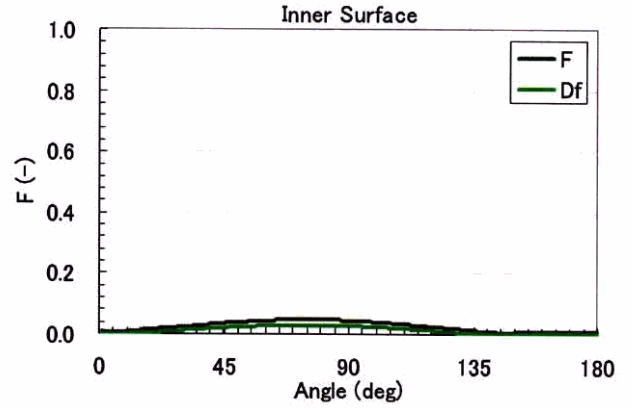
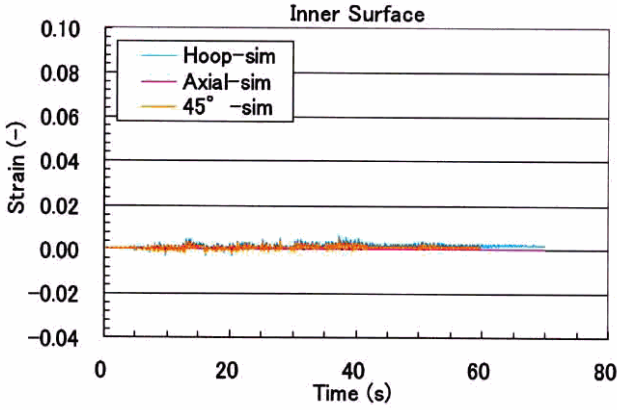
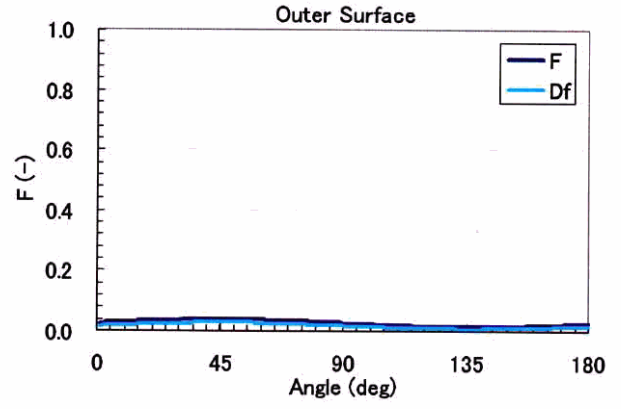
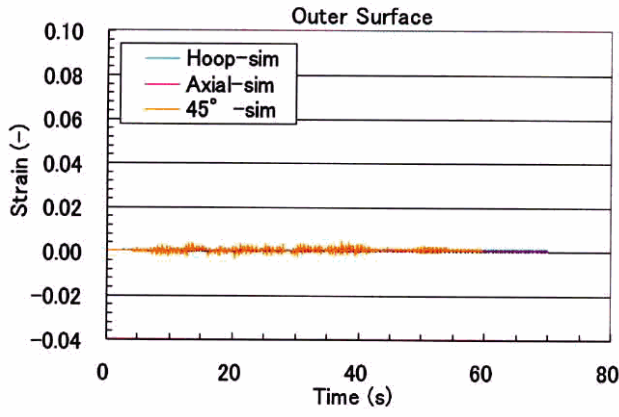


相当塑性ひずみ分布図（外面）

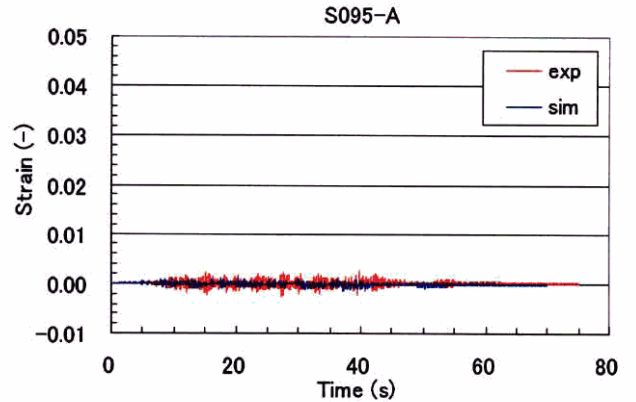
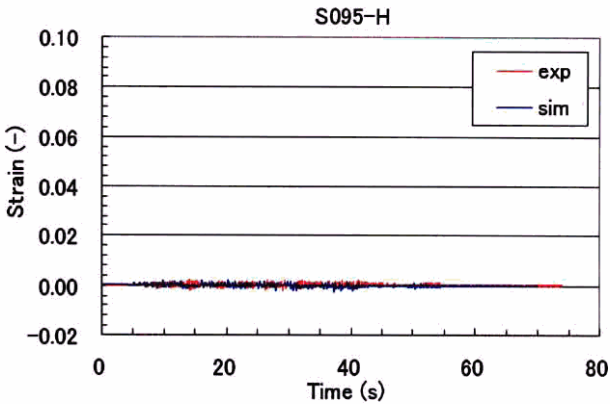
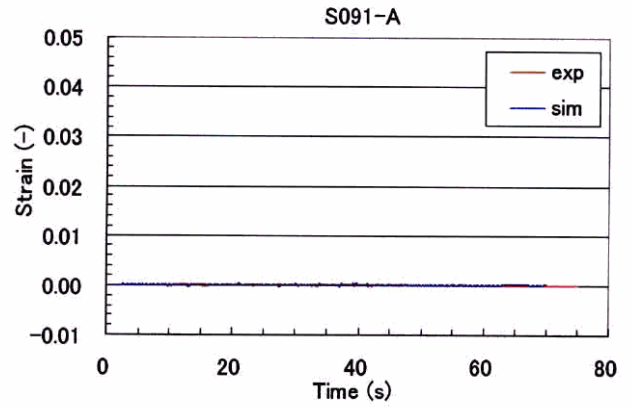
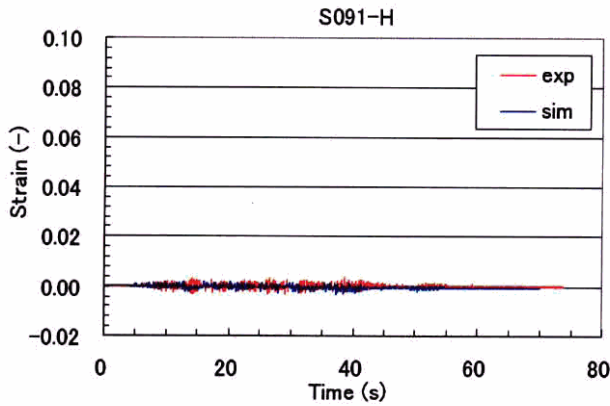


相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 3.4-3 A01-EL2 の静解析結果（変形図・コンター図）

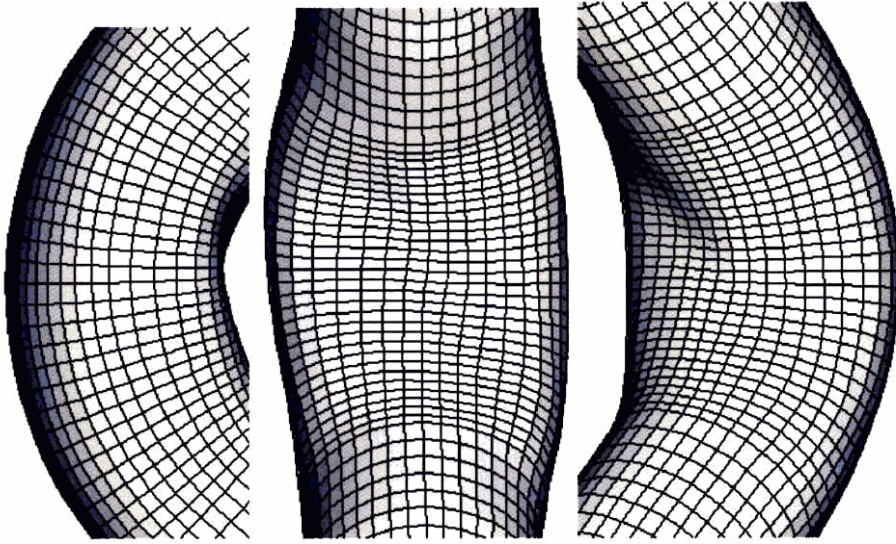


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

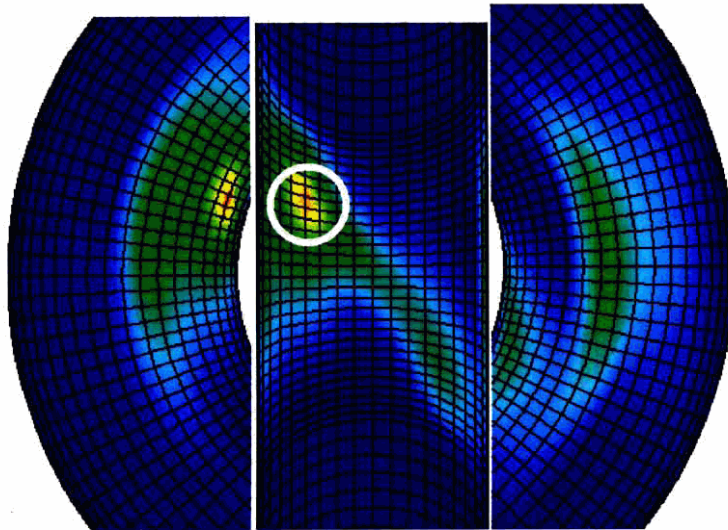


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

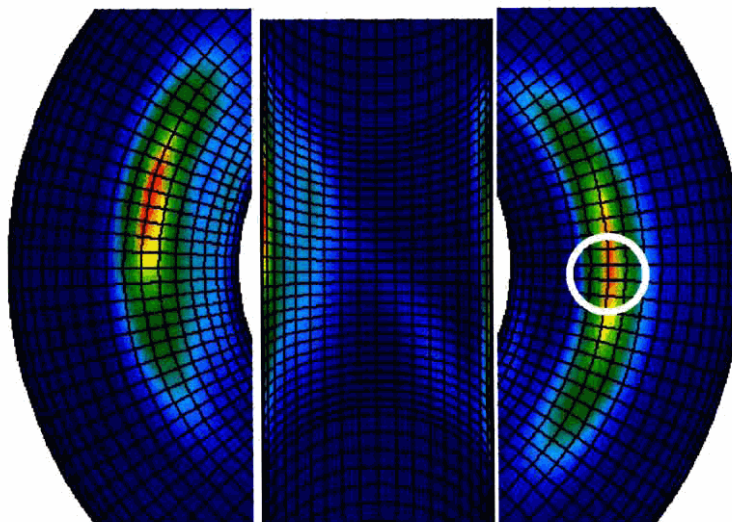
図 3.4-4 A01-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図（変形拡大率 5 倍）

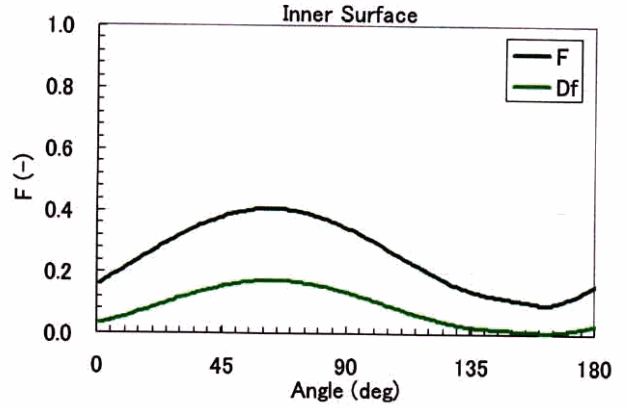
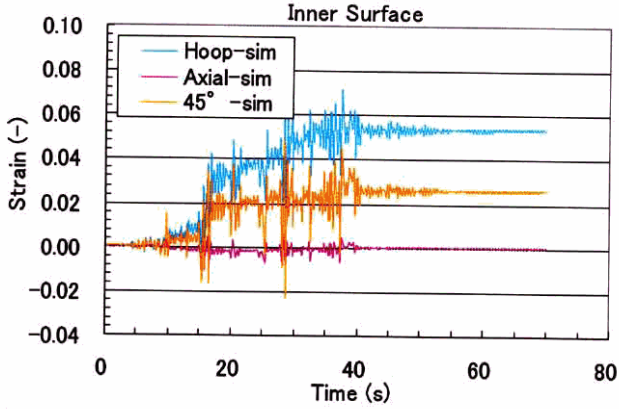
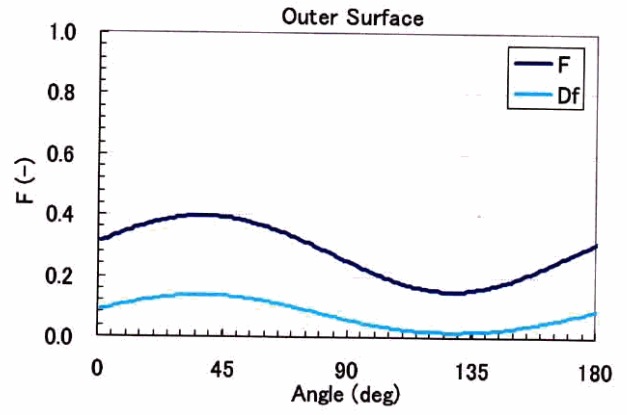
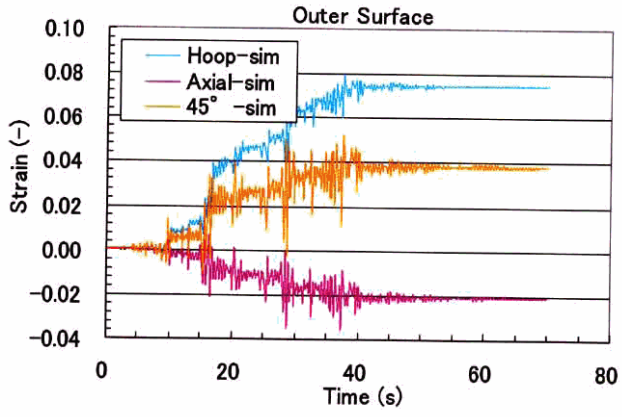


相当塑性ひずみ分布図（外面）

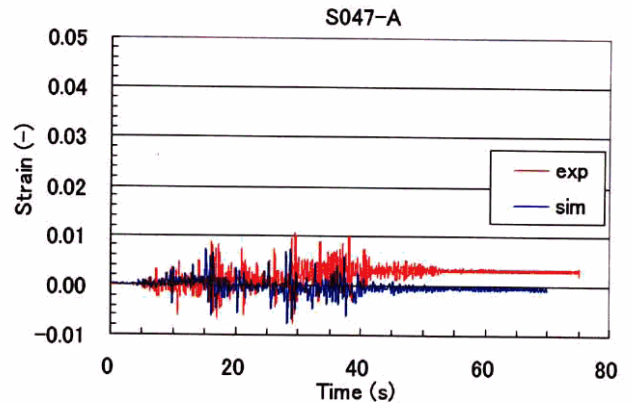
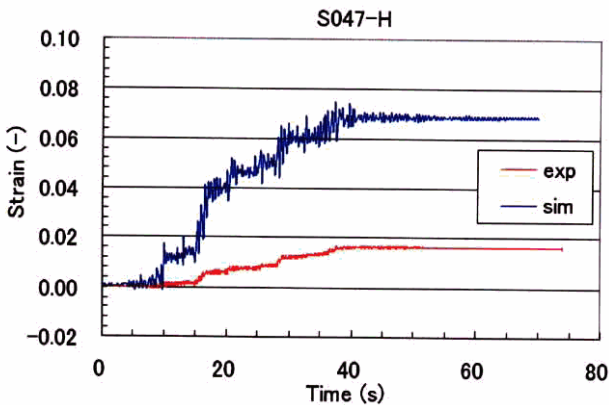
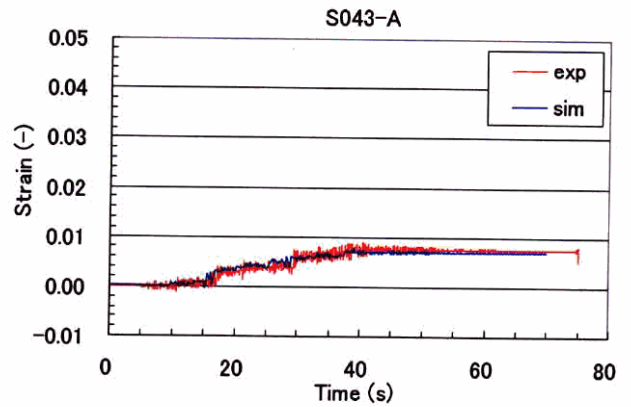
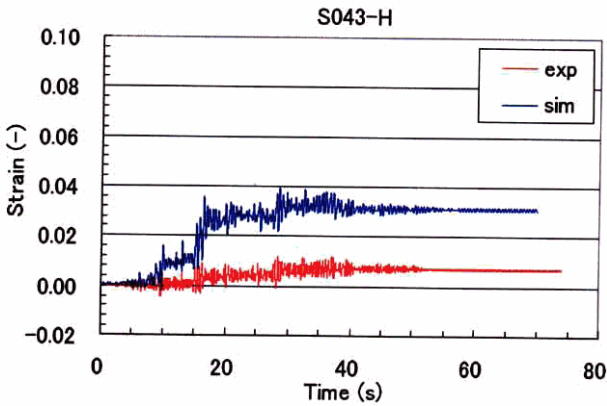


相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 3.4-5 C01-EL1 の静解析結果（変形図・コンター図）

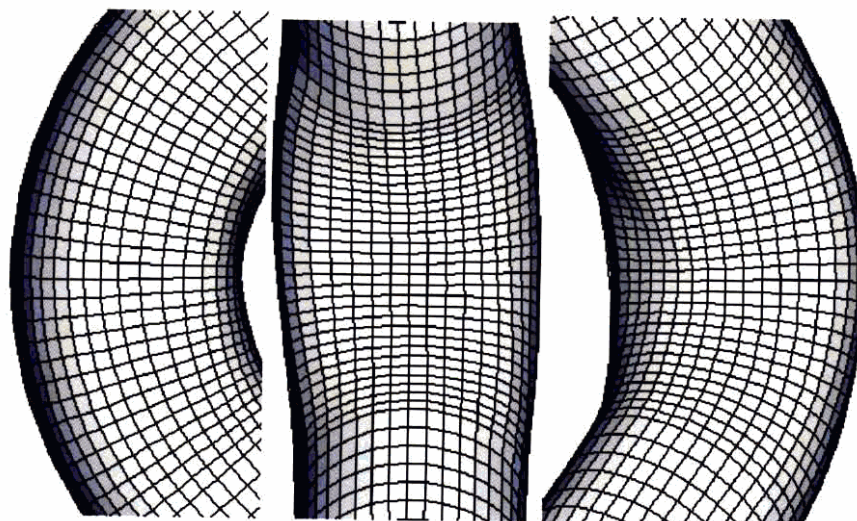


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

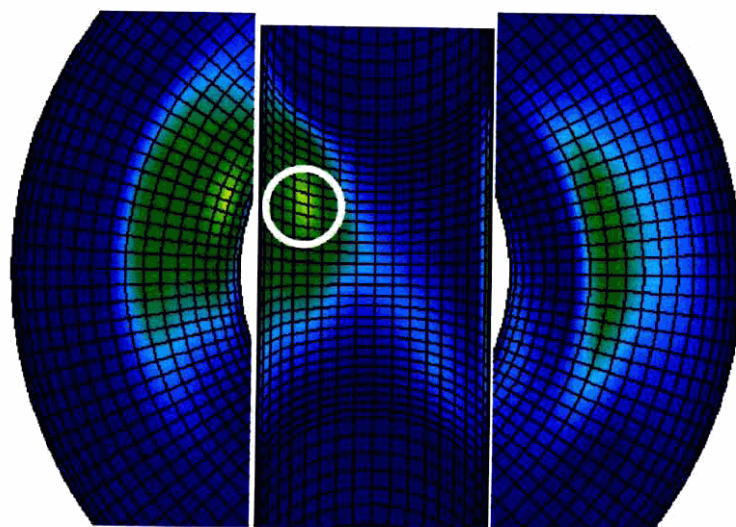


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

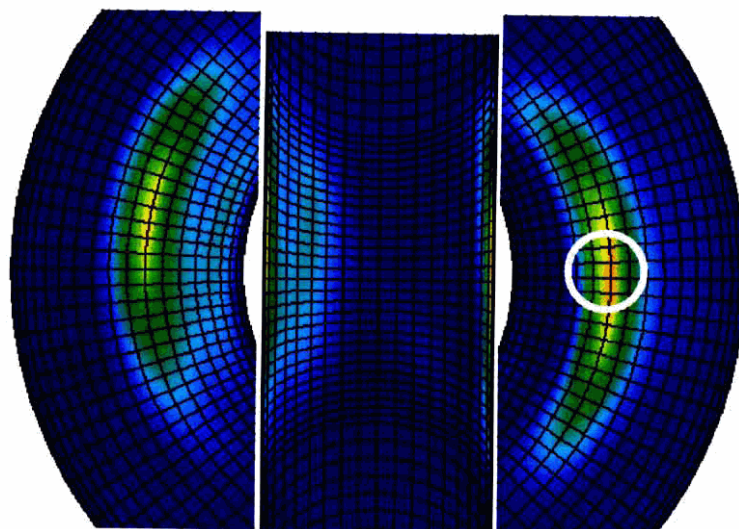
図 3.4-6 C01-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図（変形拡大率 5 倍）

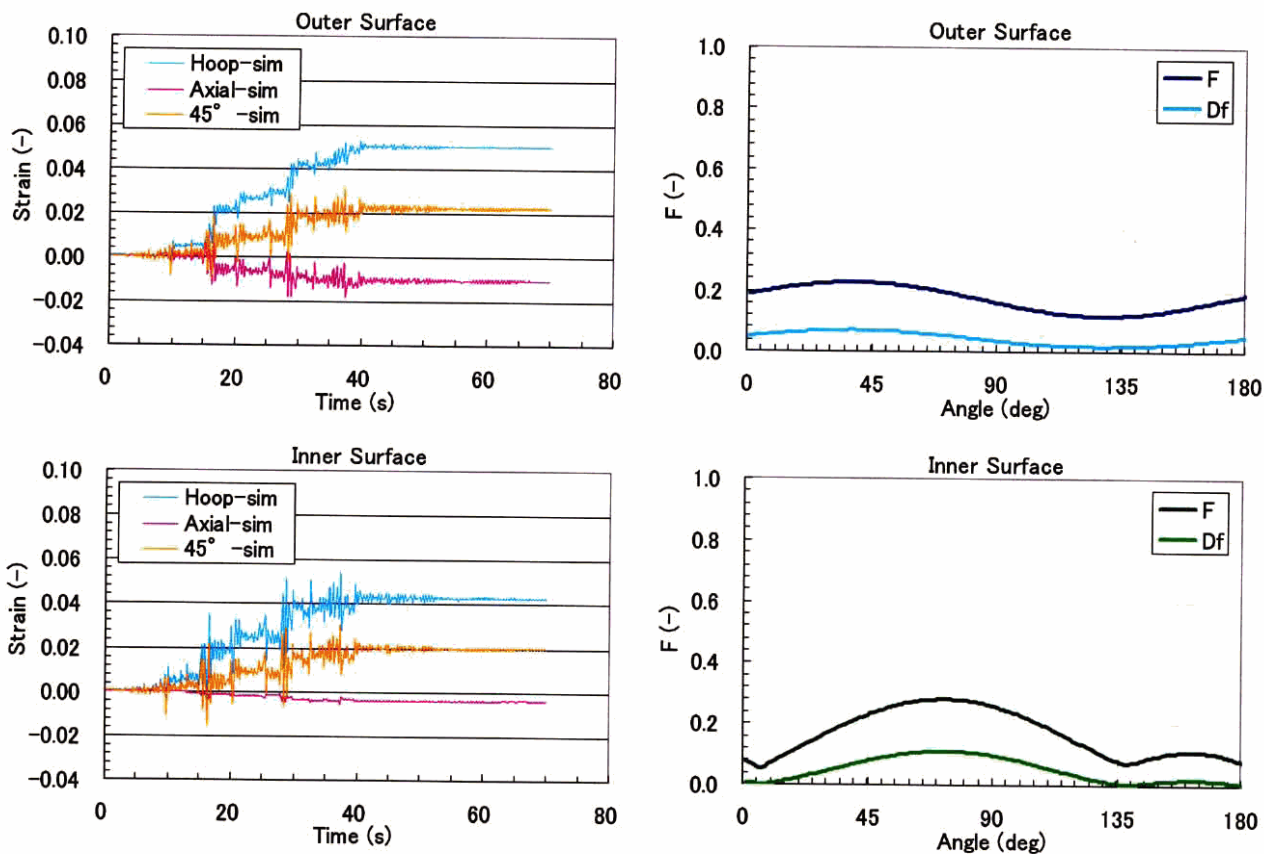


相当塑性ひずみ分布図（外面）

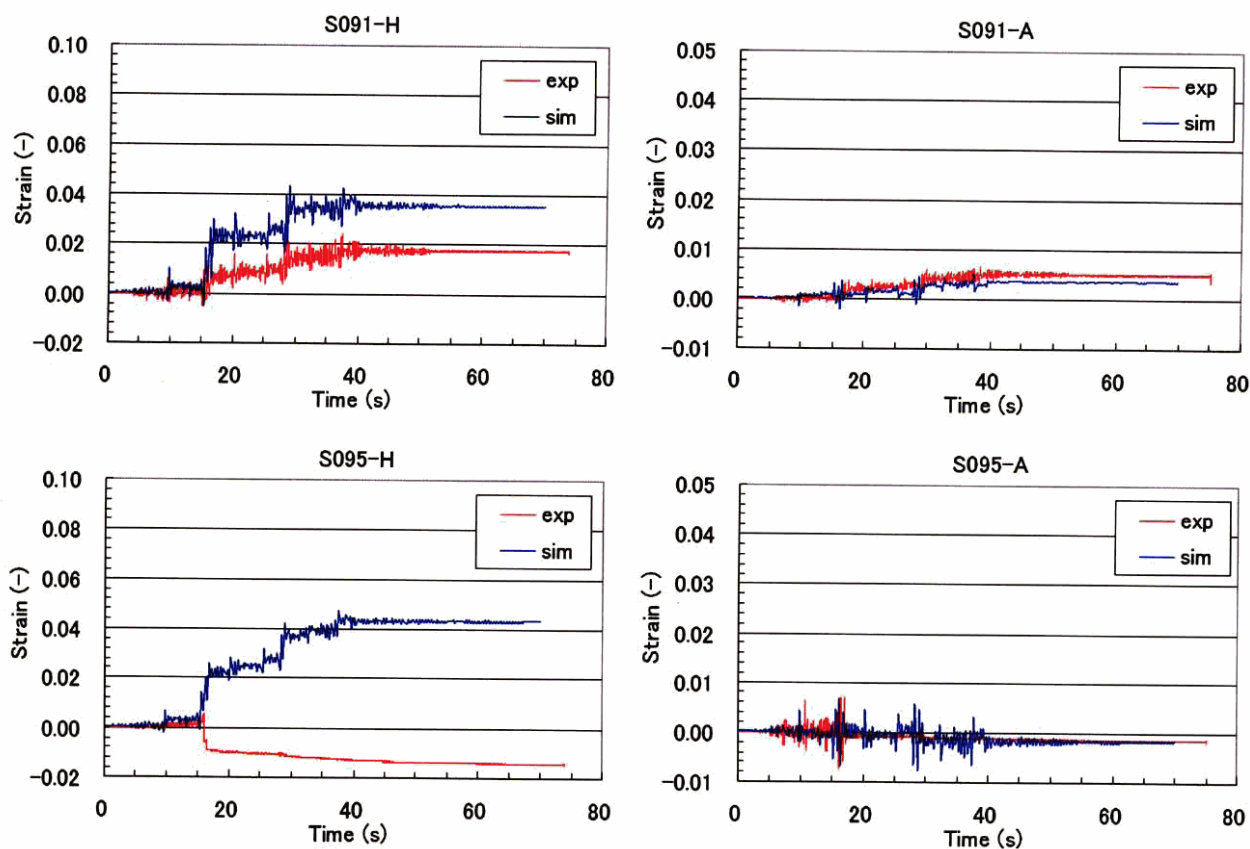


相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 3.4-7 C01-EL2 の静解析結果（変形図・コンター図）

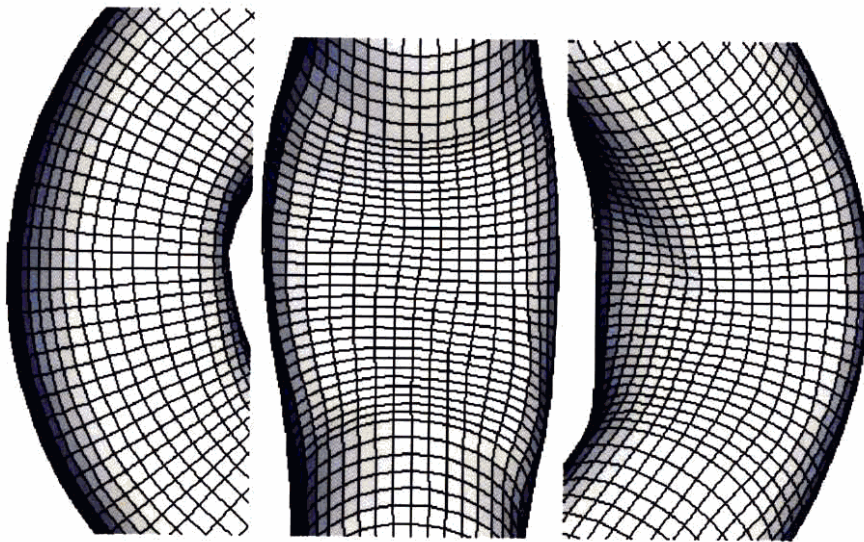


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

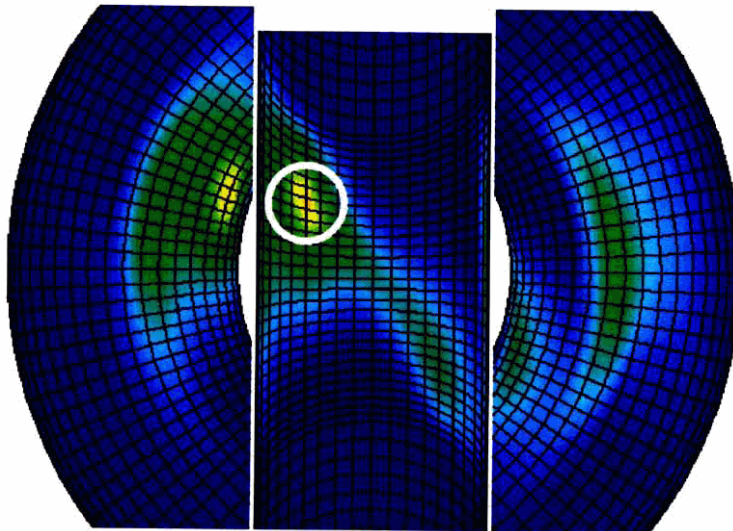


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

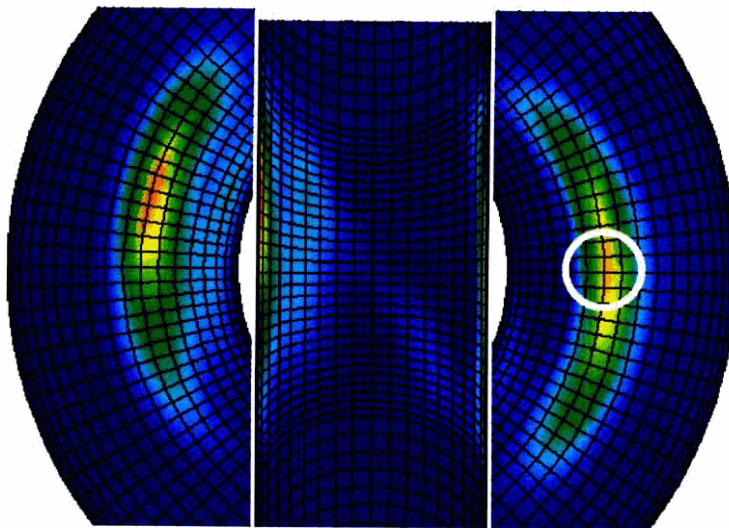
図 3.4-8 C01-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

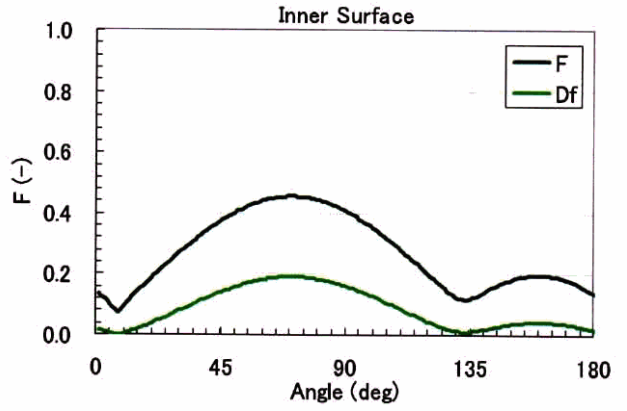
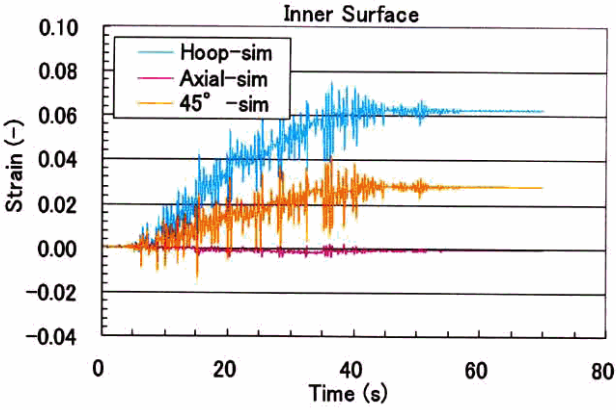
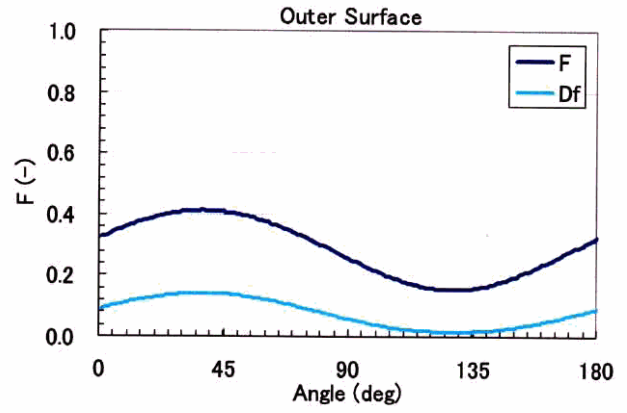
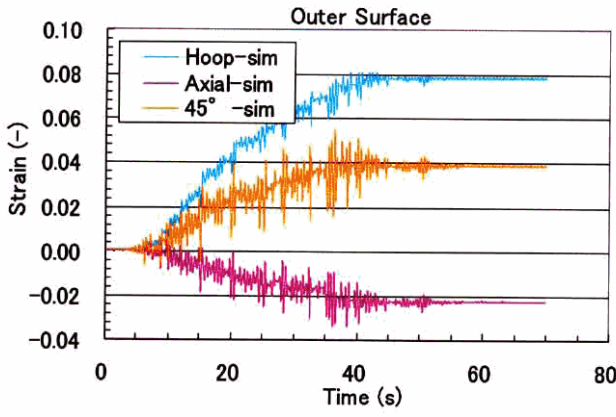


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

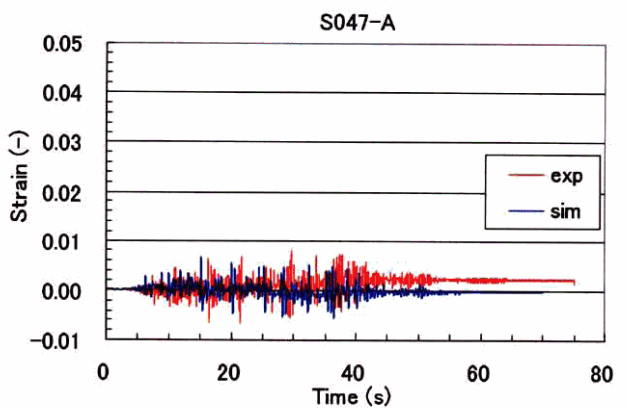
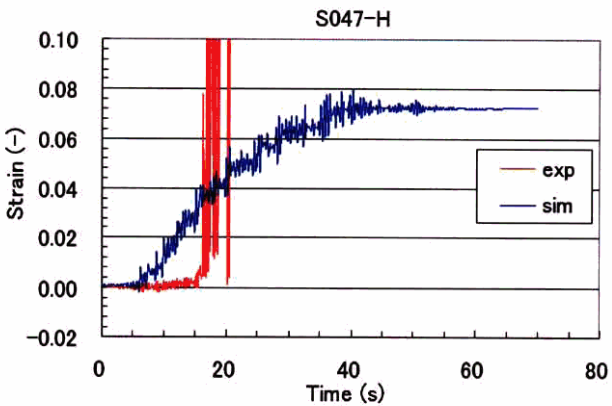
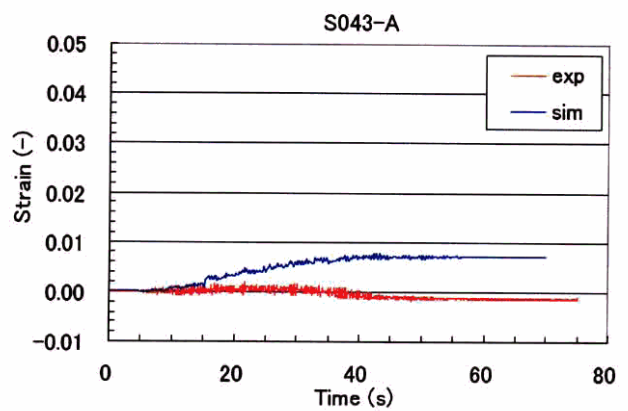
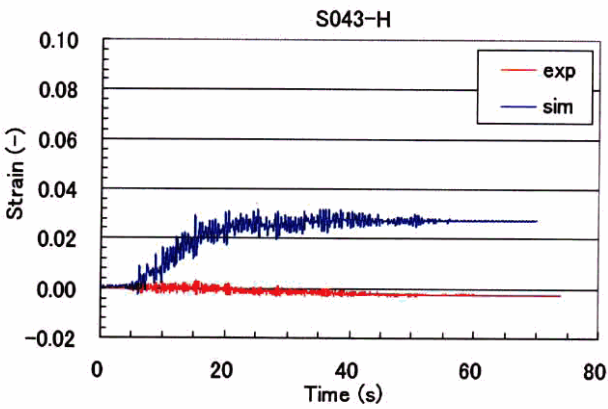


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-9 C02-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

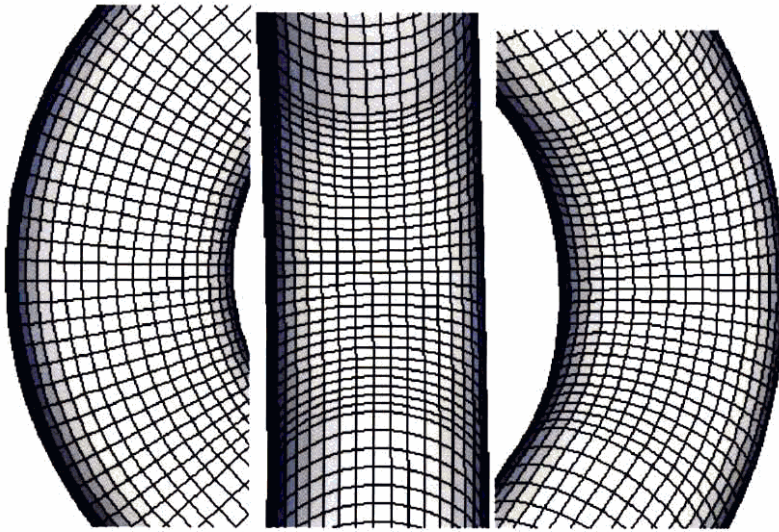


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

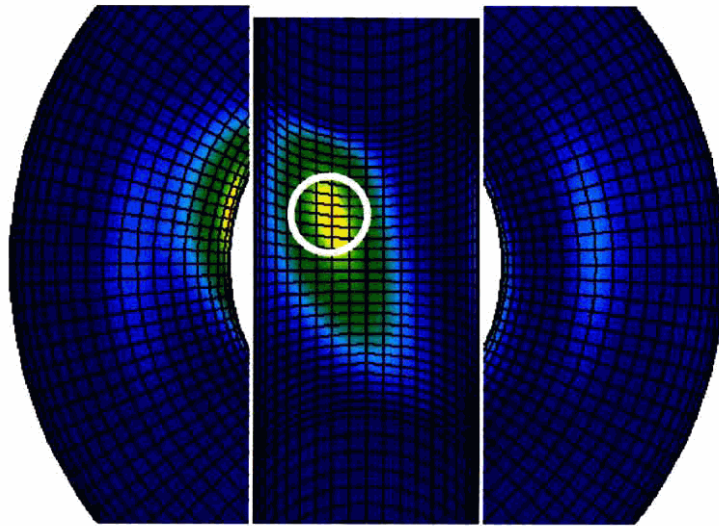


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

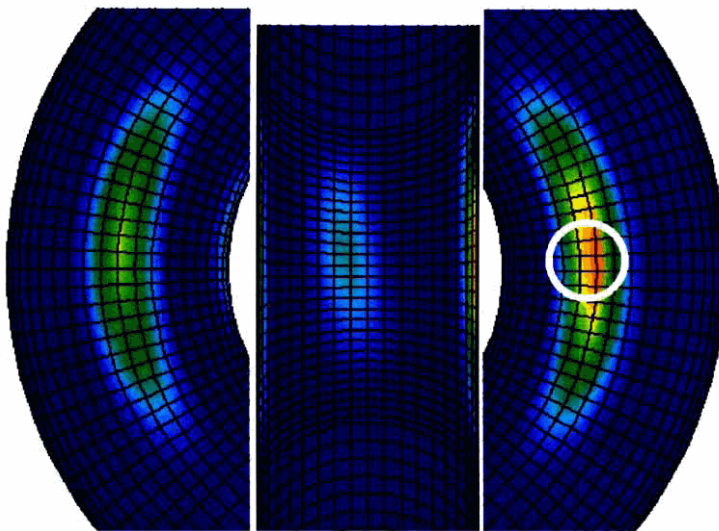
図 3.4-10 C02-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

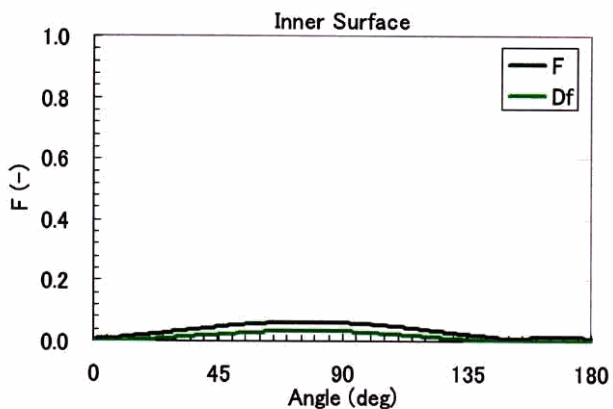
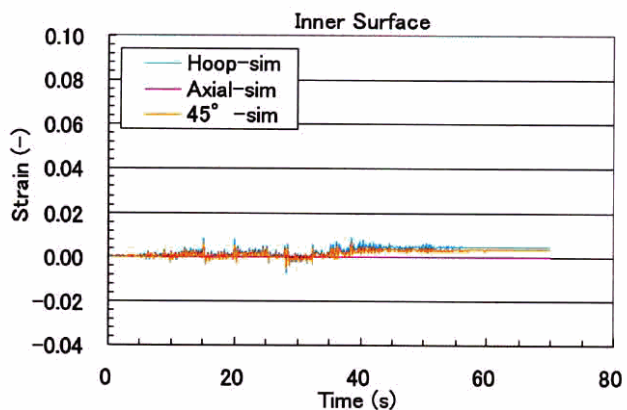
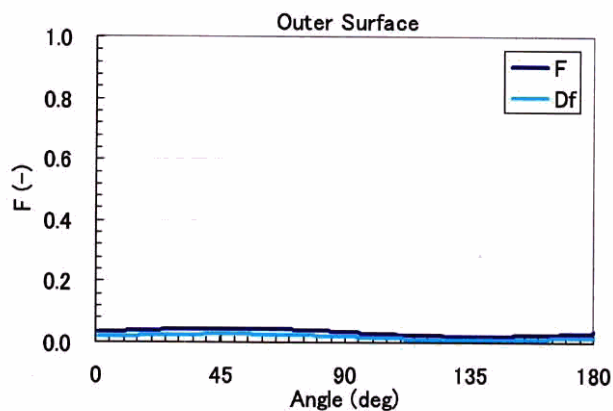
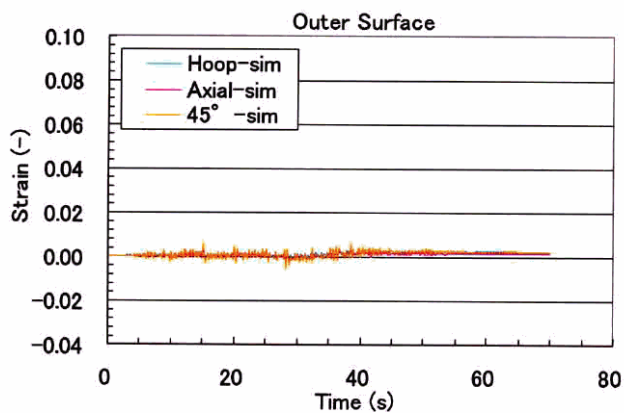


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

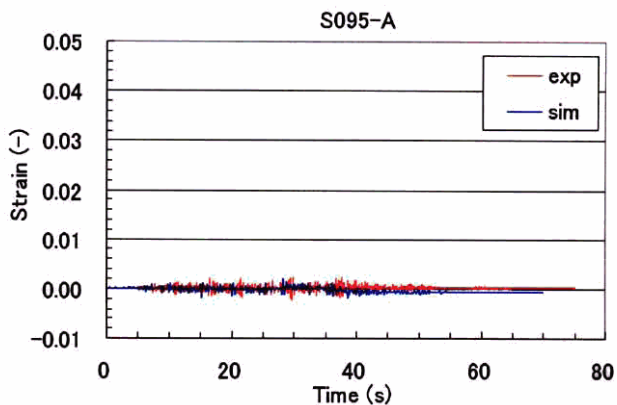
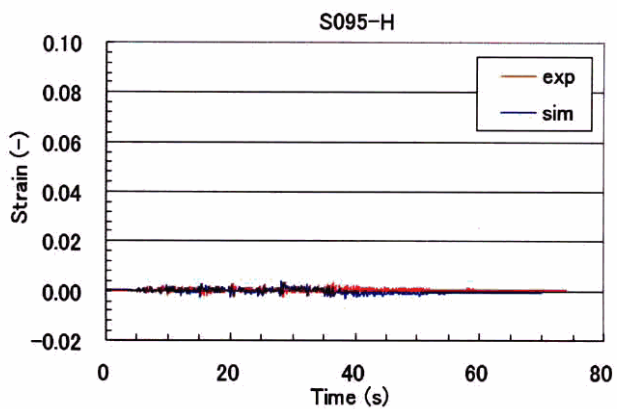
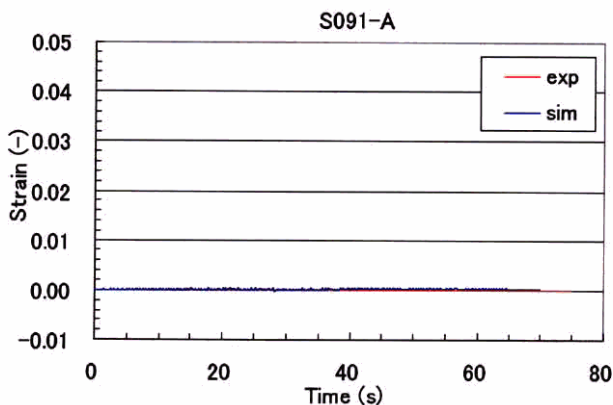
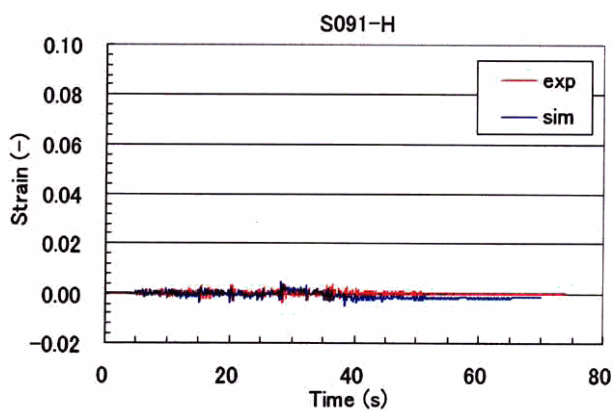


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-11 C02-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

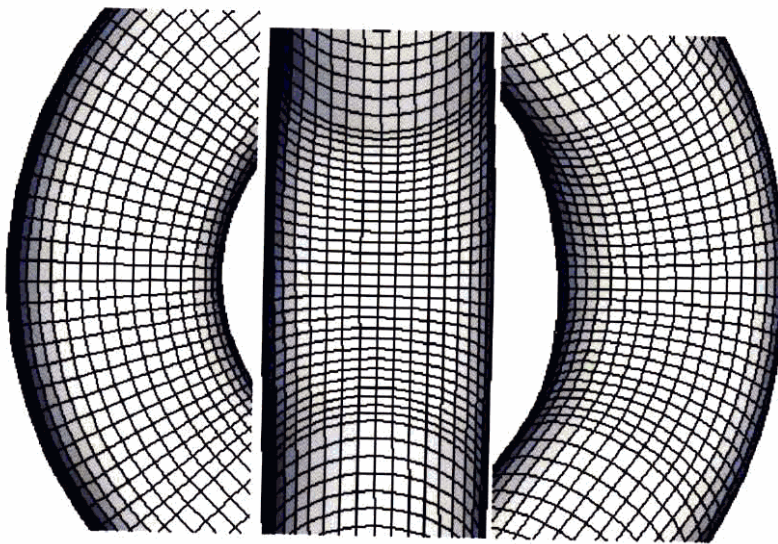


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

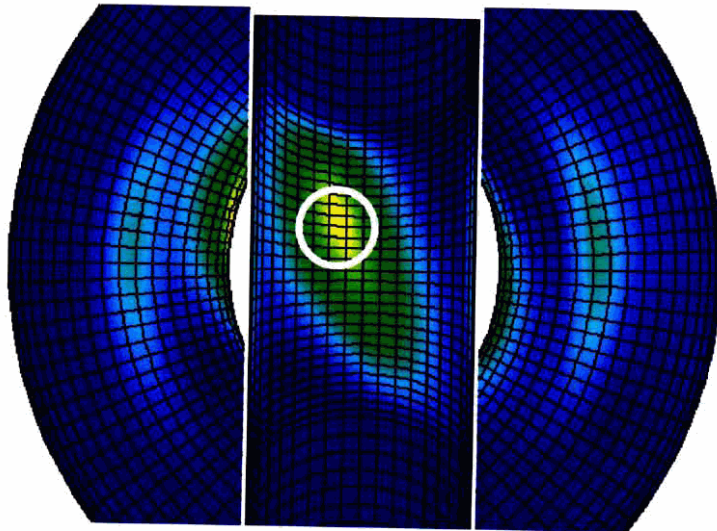


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

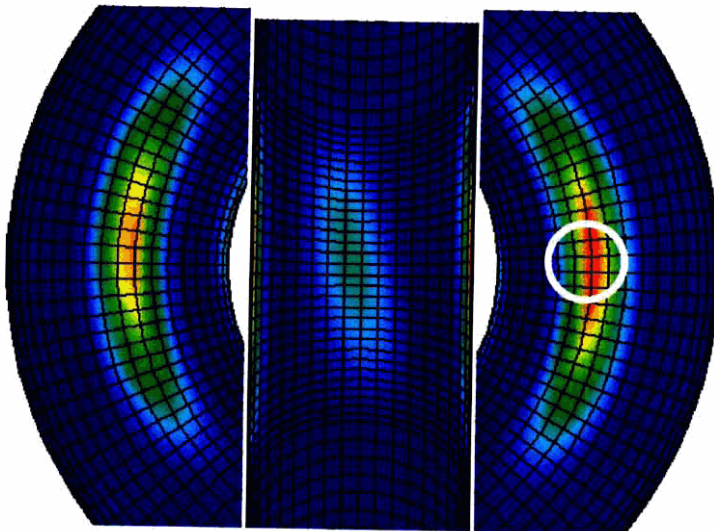
図 3.4-12 C02-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

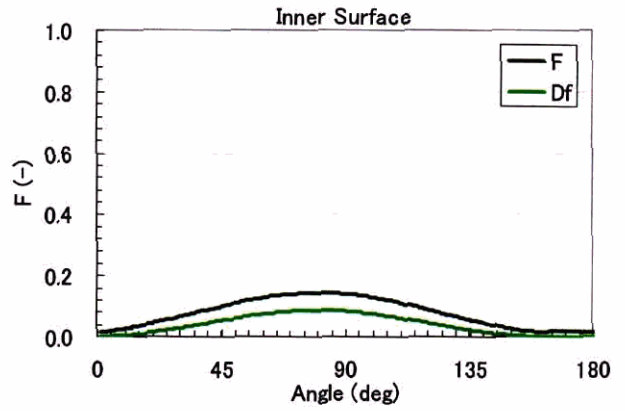
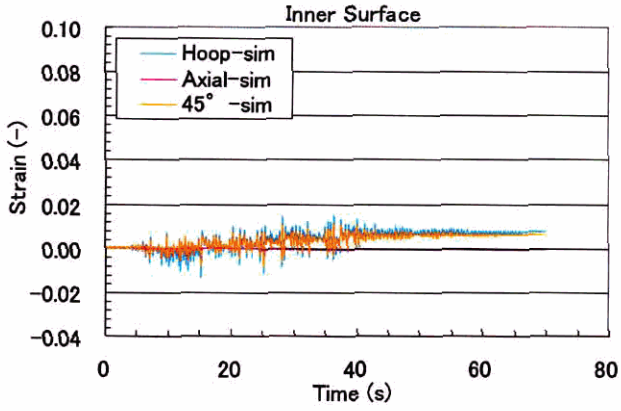
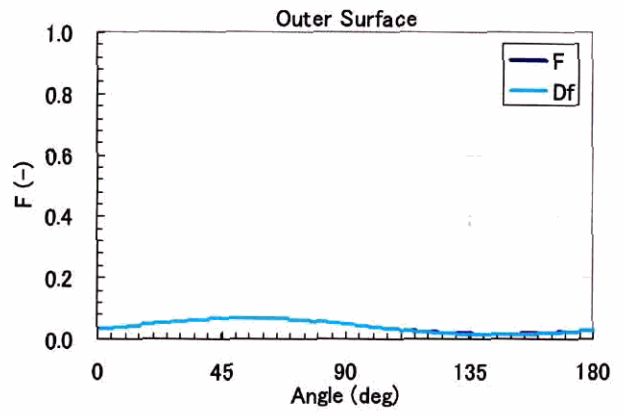
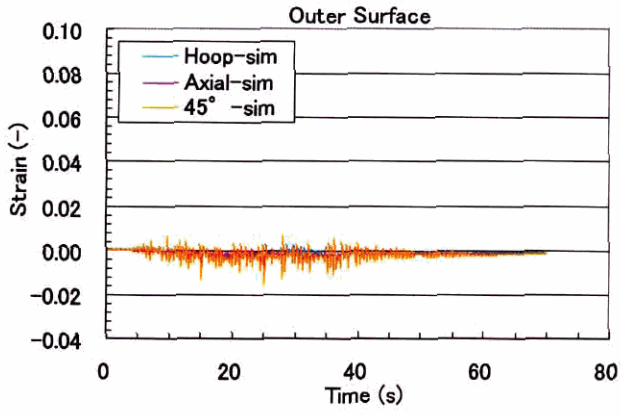


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

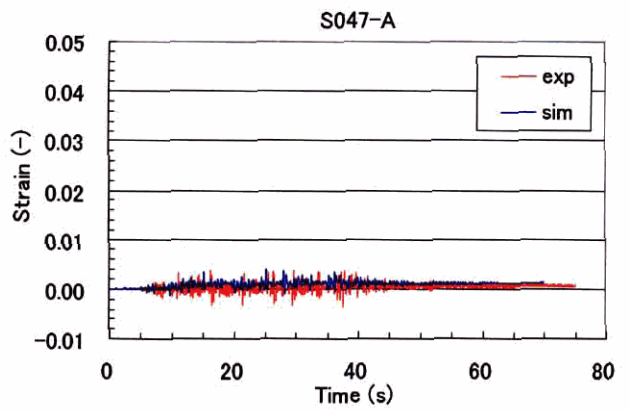
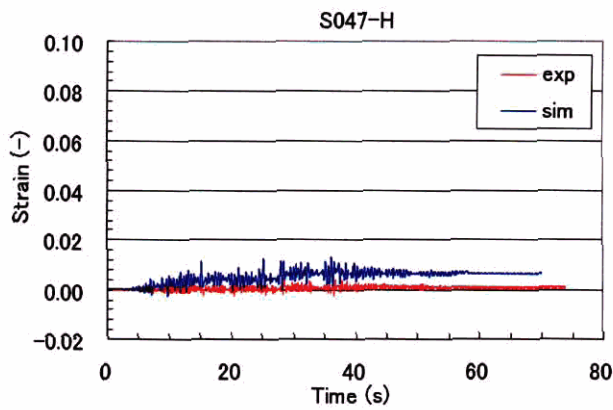
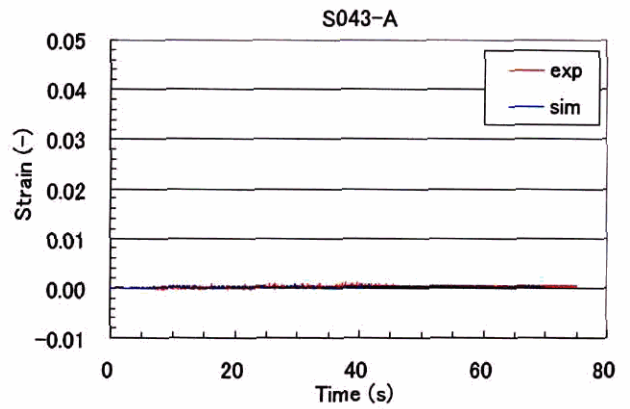
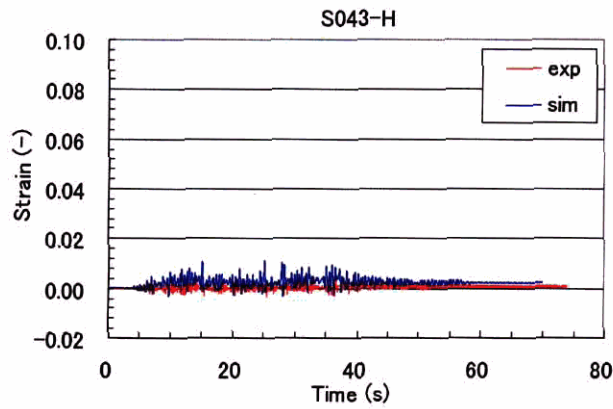


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-13 C03-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

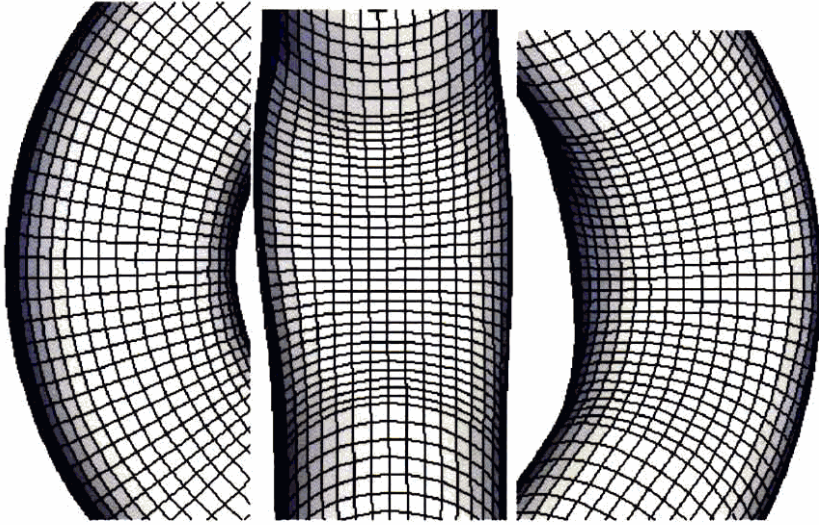


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

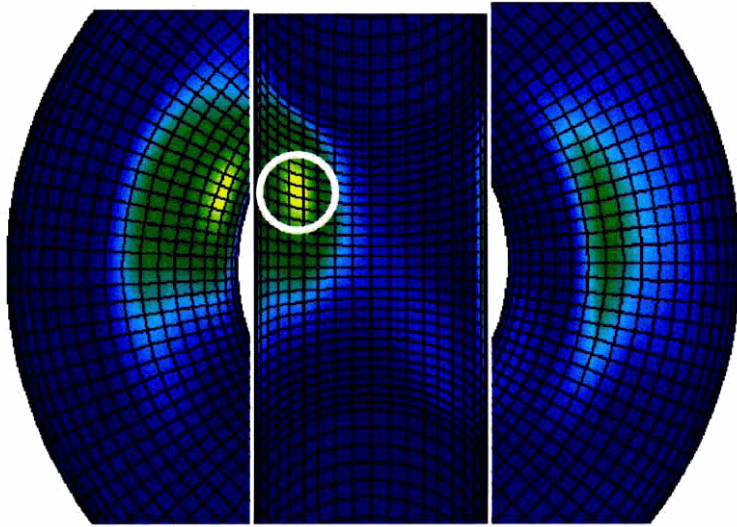


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

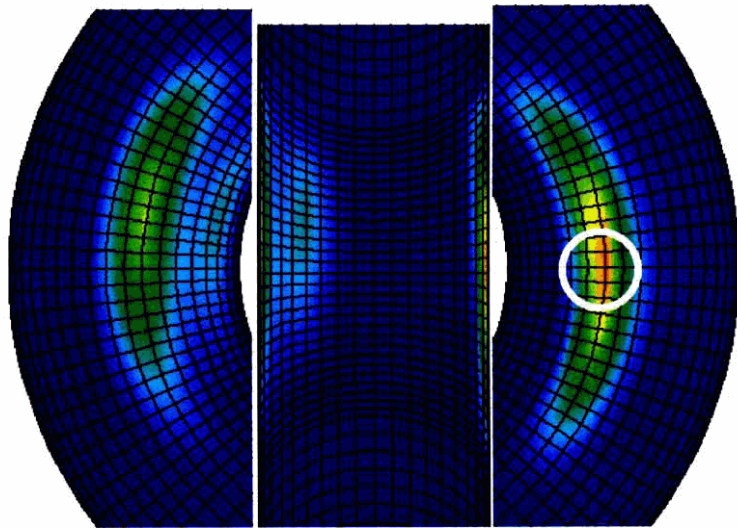
図 3.4-14 C03-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

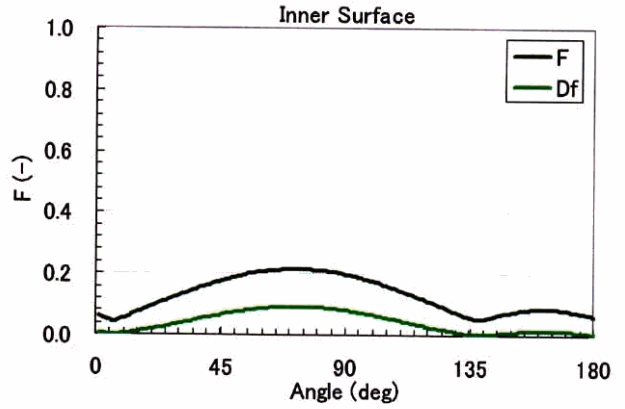
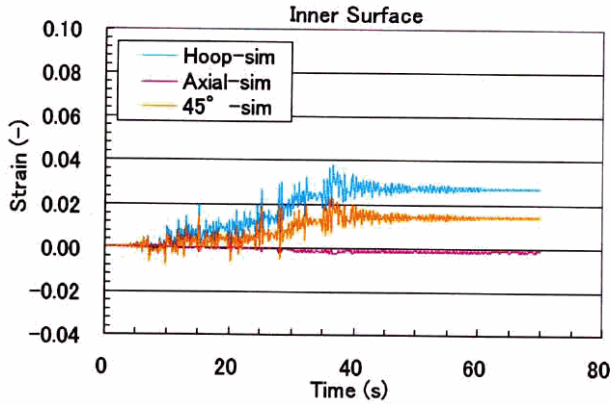
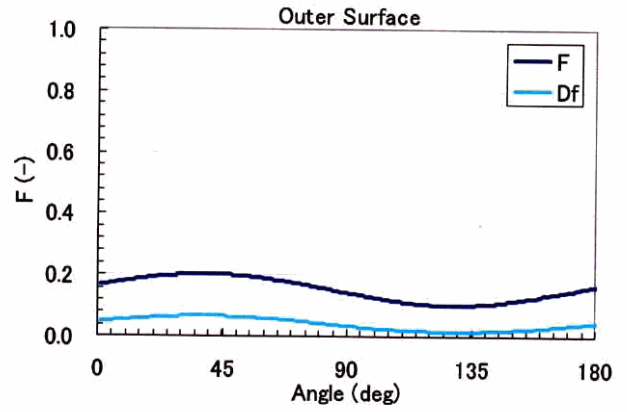
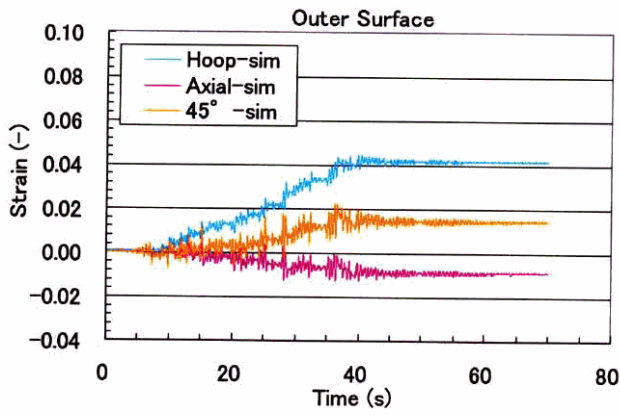


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

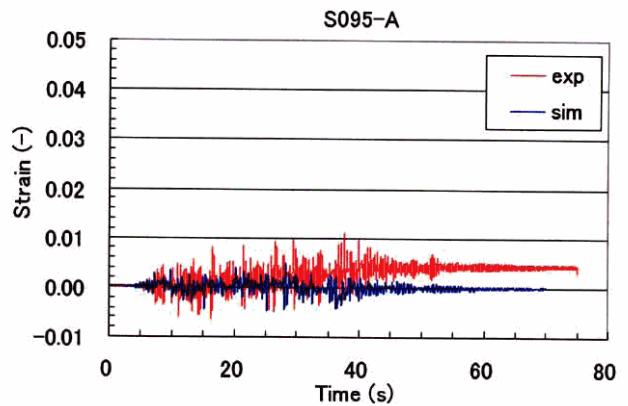
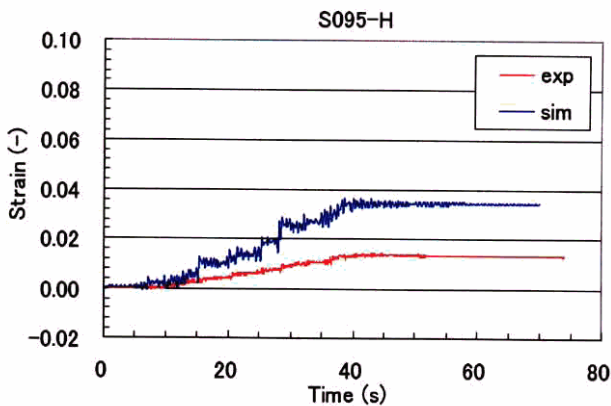
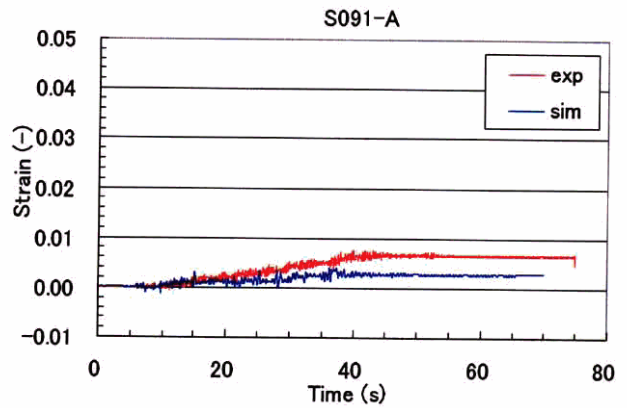
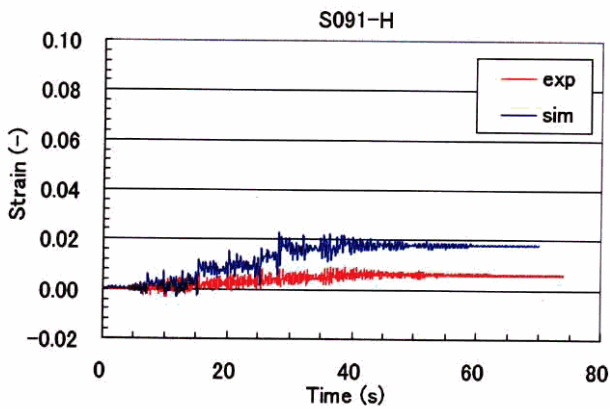


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-15 C03-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

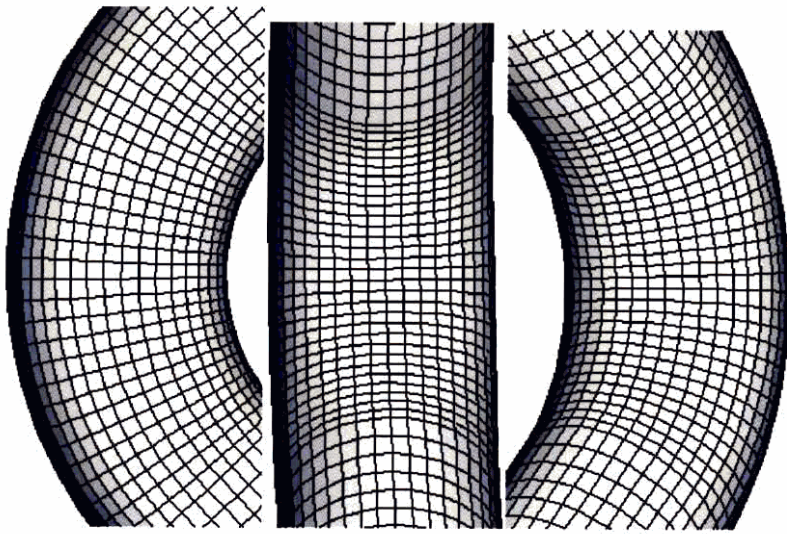


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

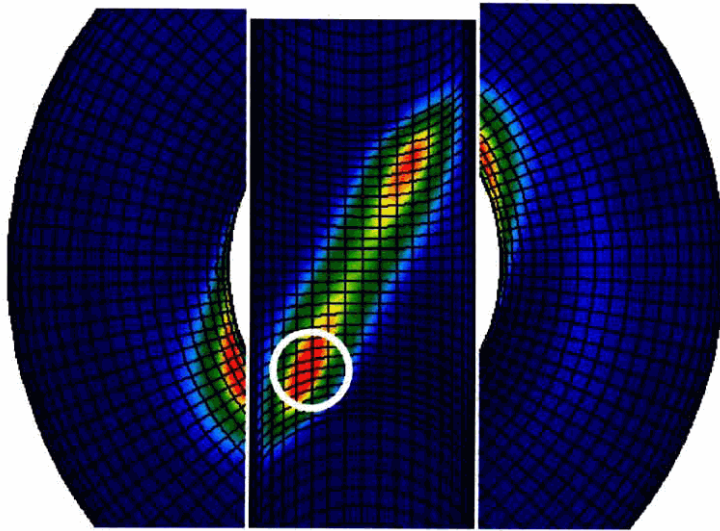


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

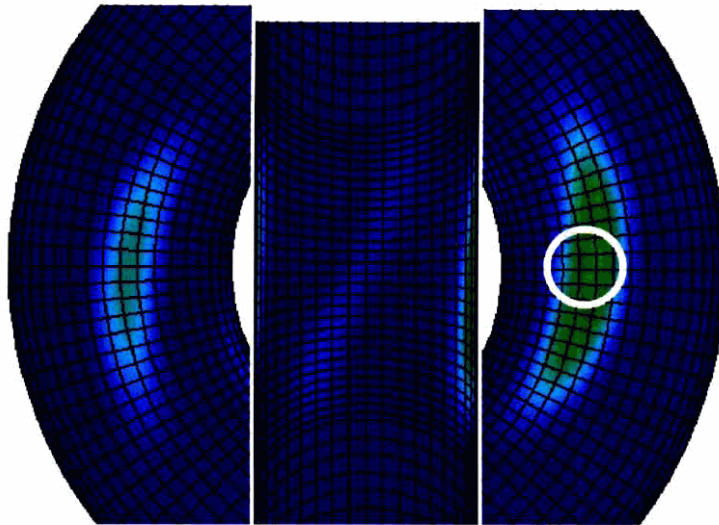
図 3.4-16 C03-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴・F 値と角度の関係)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

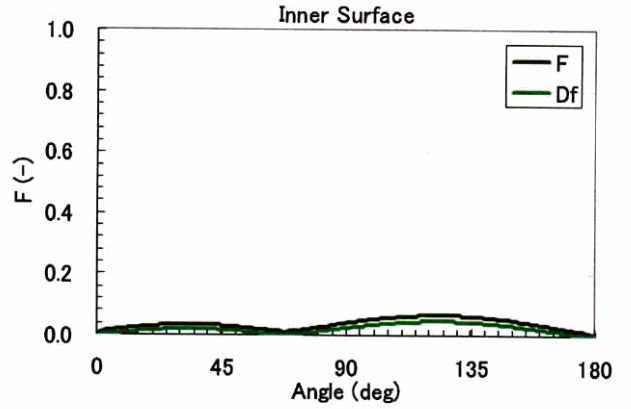
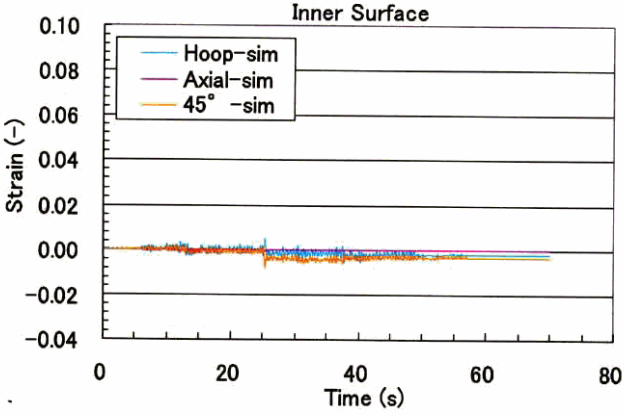
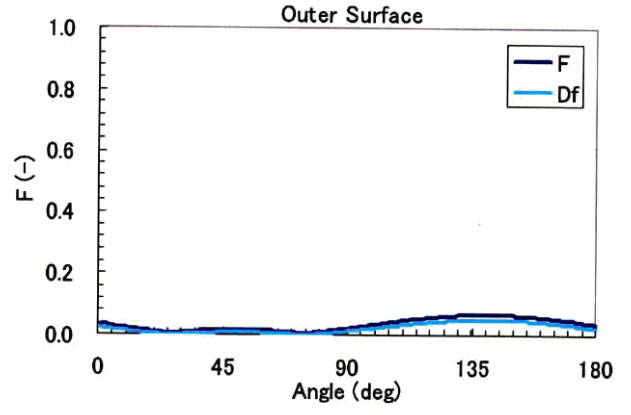
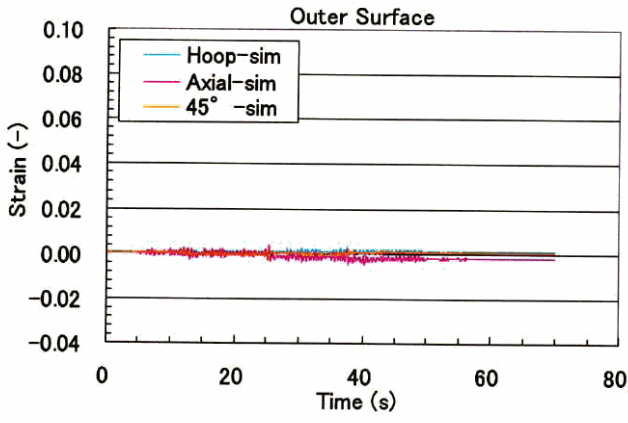


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



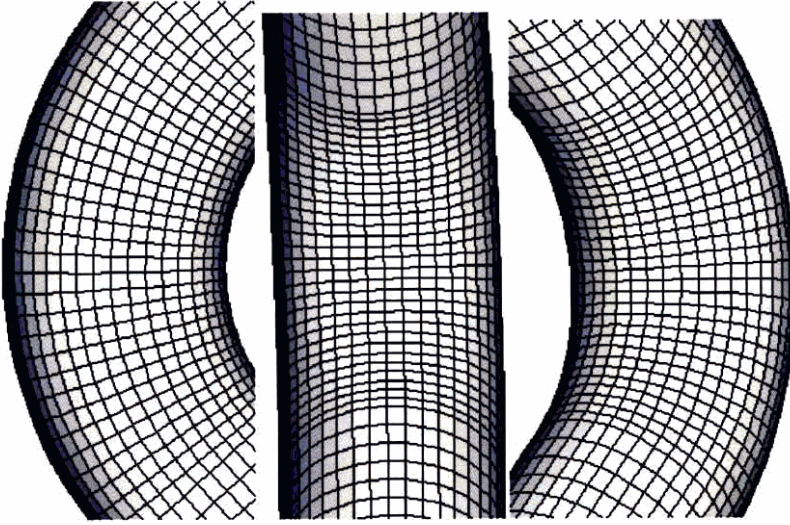
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-17 A11-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

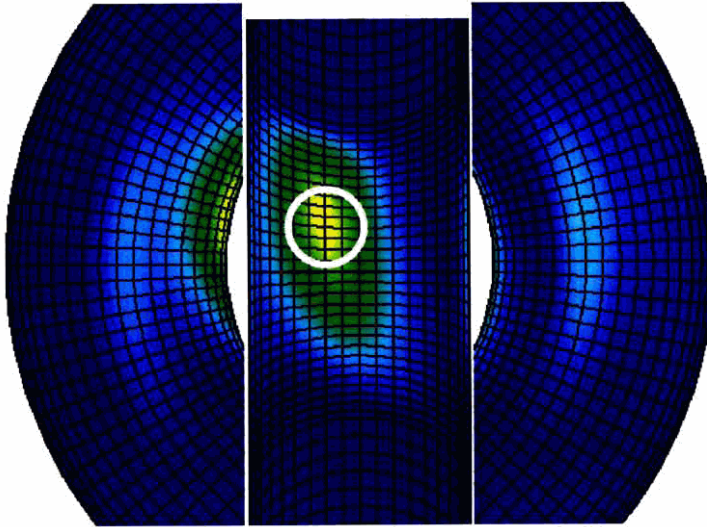


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

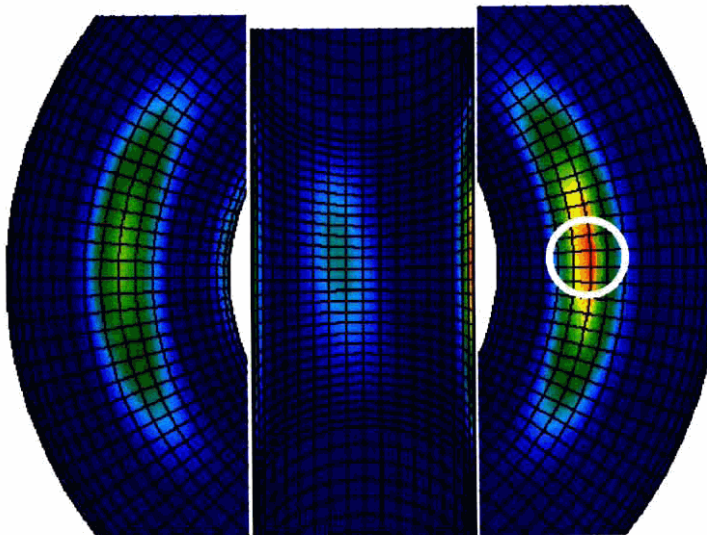
図 3.4-18 A11-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

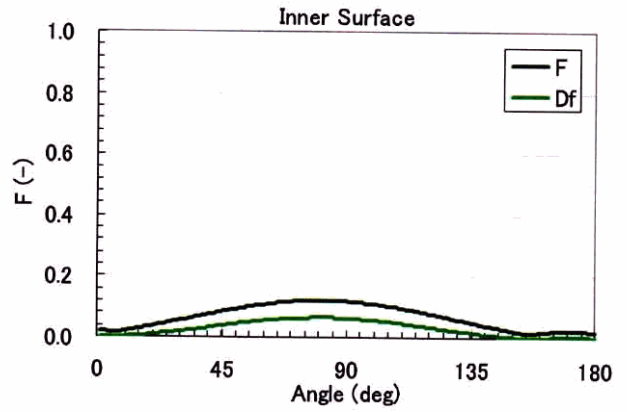
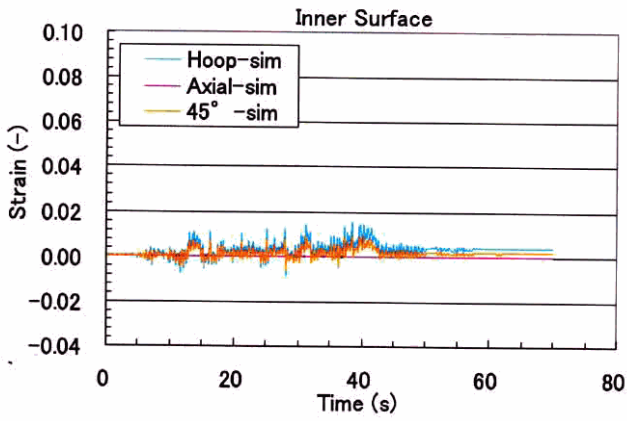
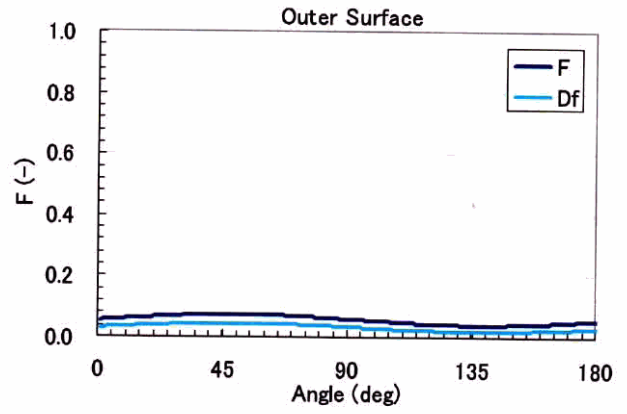
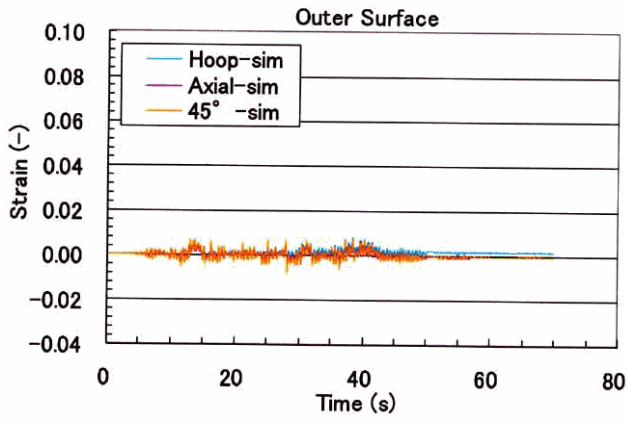


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



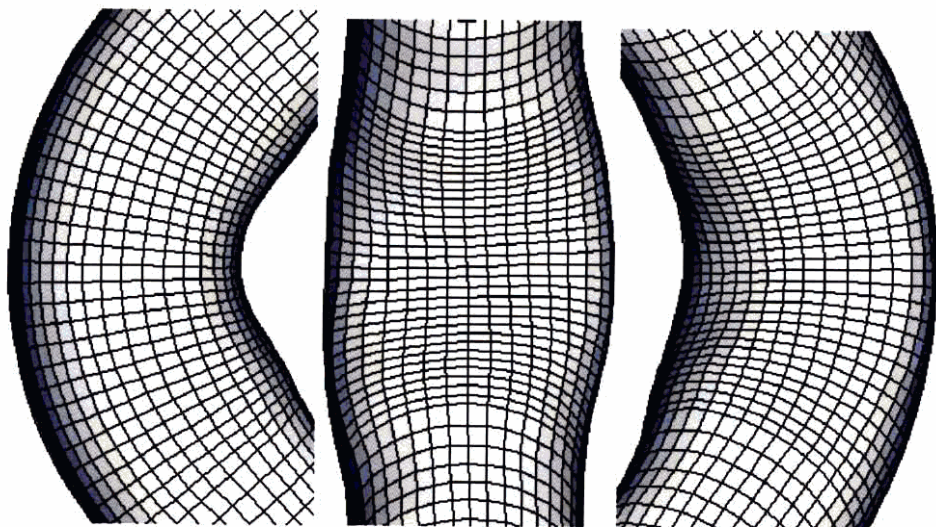
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-19 A11-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

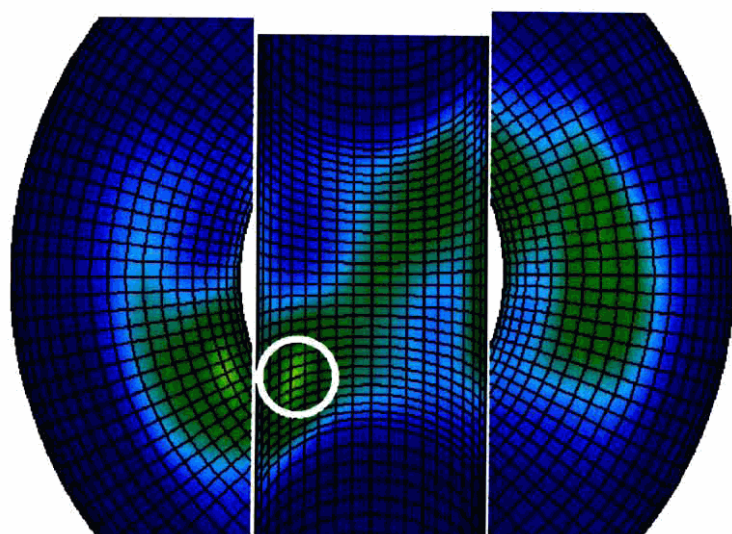


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

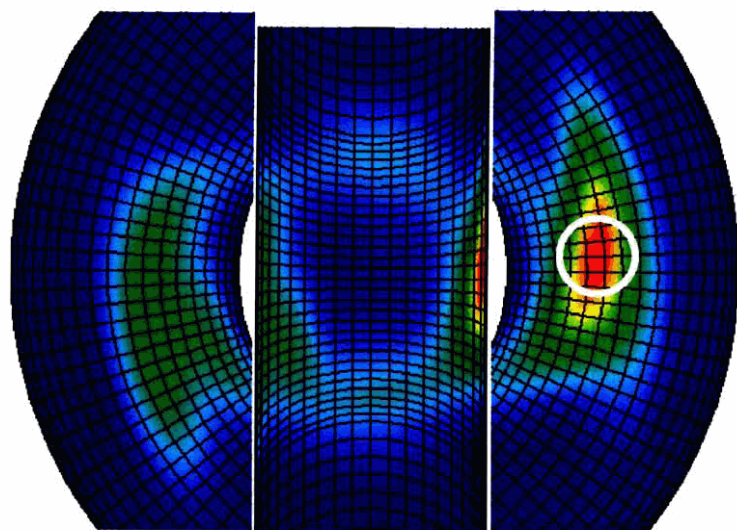
図 3.4-20 A11-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

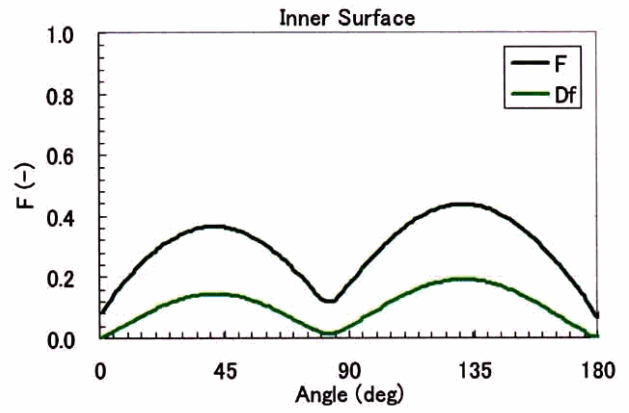
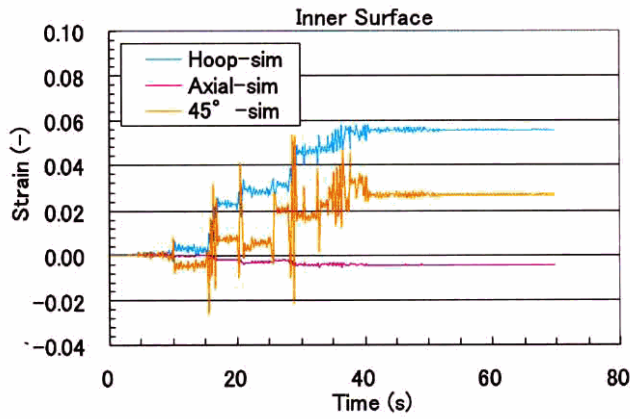
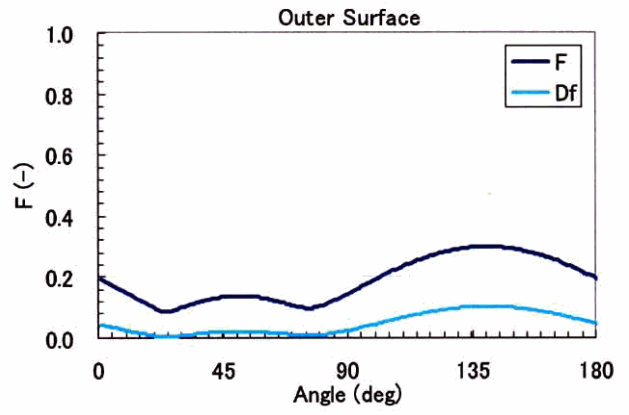
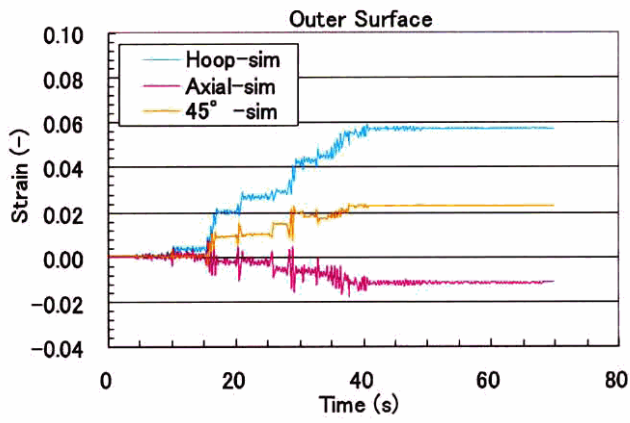


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



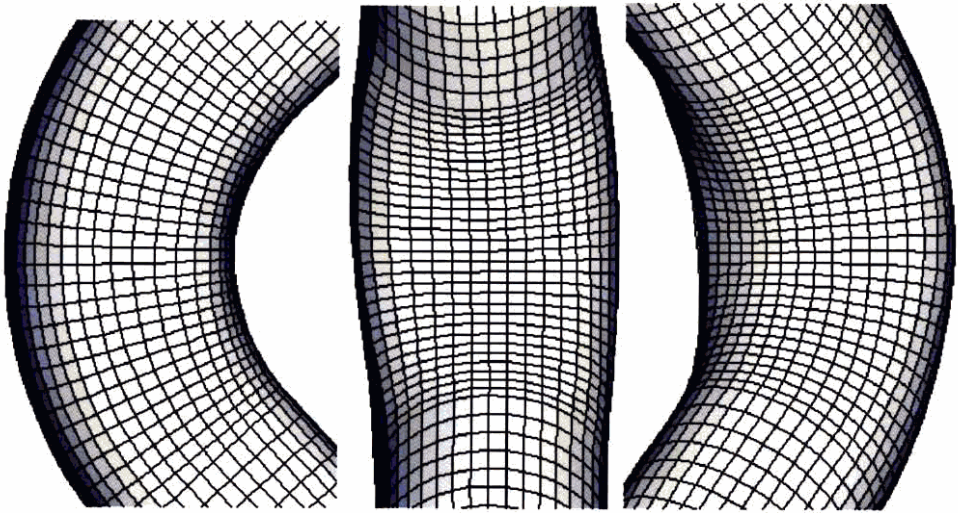
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-21 C11-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

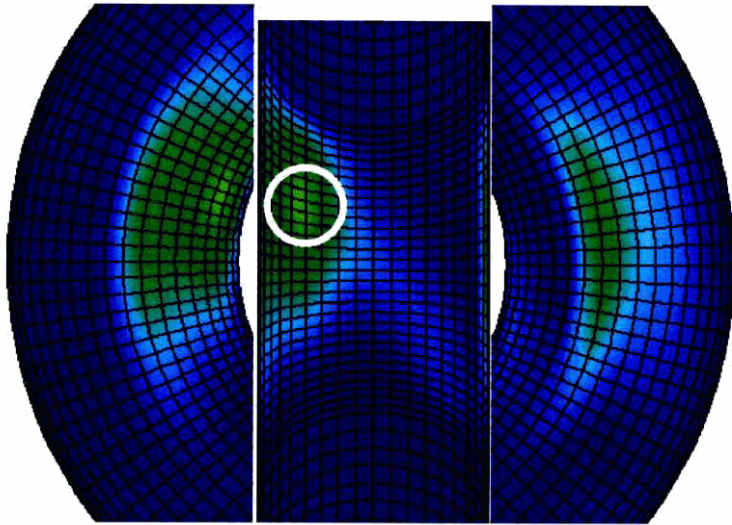


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

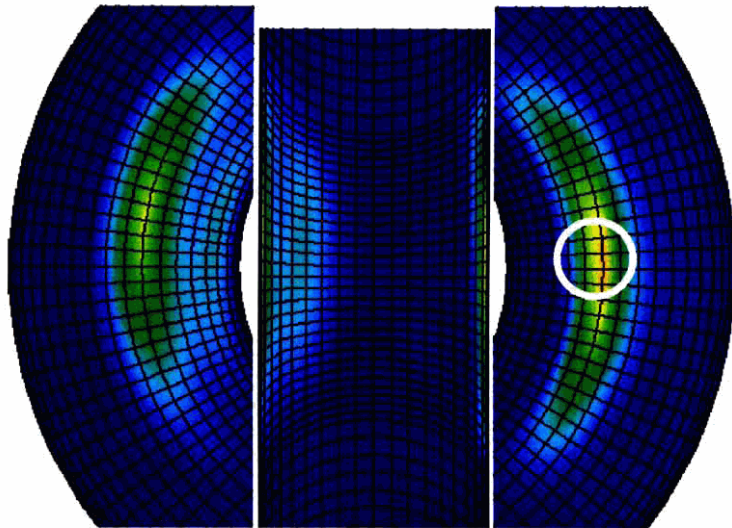
図 3.4-22 C11-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図（変形拡大率5倍）

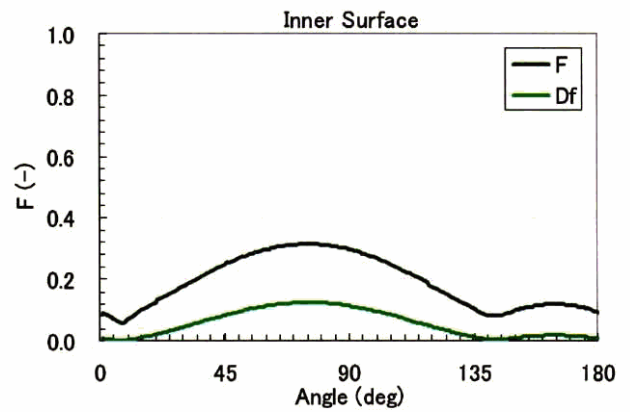
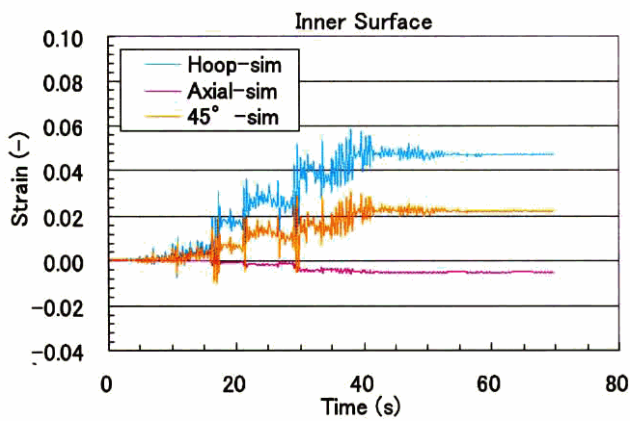
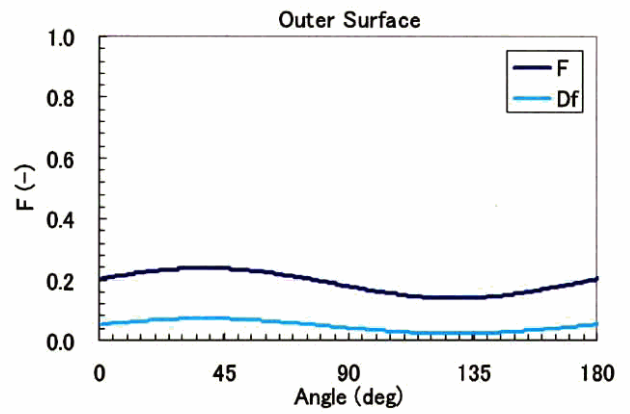
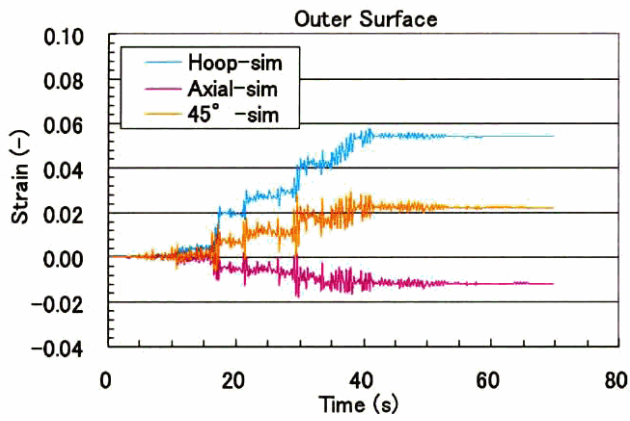


相当塑性ひずみ分布図（外面）



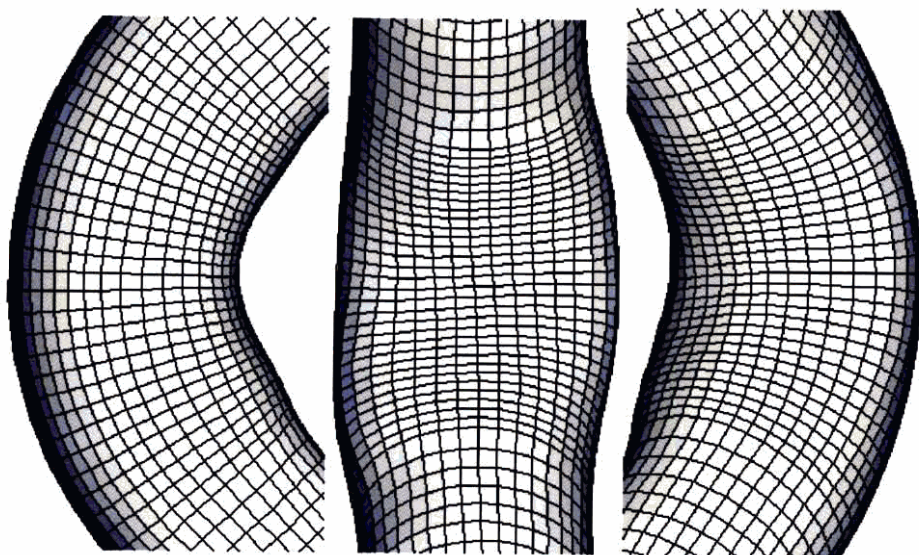
相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 3.4-23 C11-EL2 の静解析結果（変形図・コンター図）

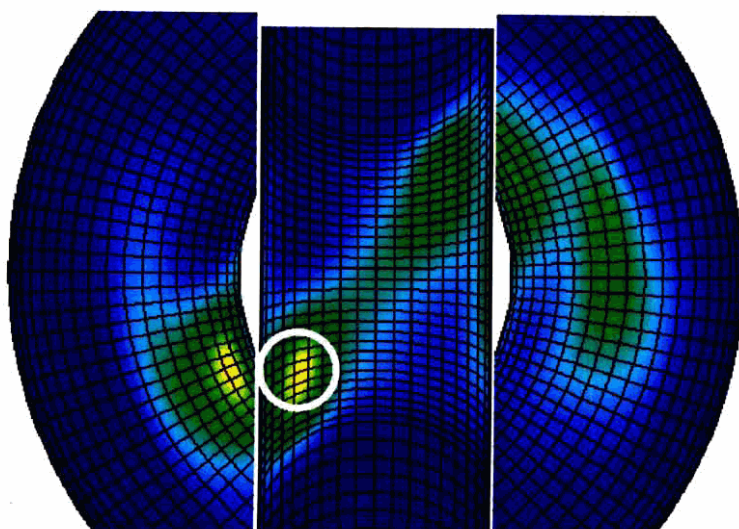


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

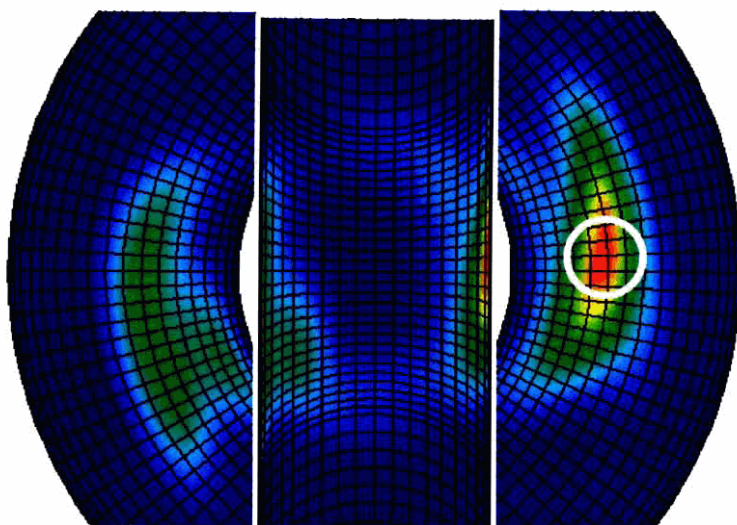
図 3.4-24 C11-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

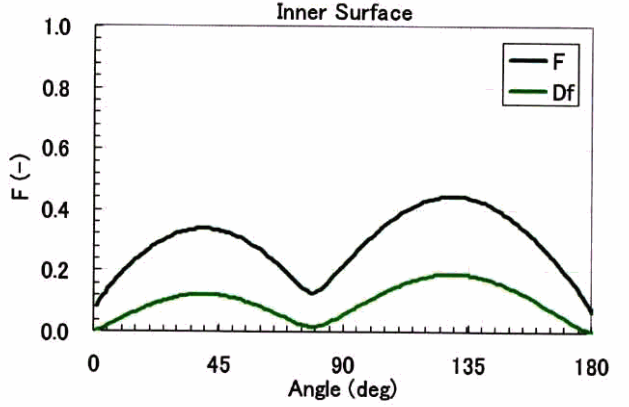
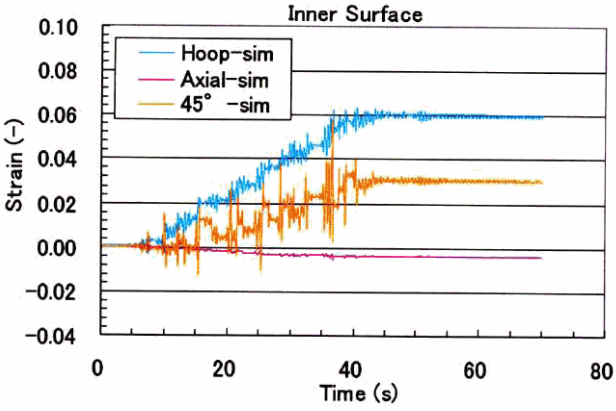
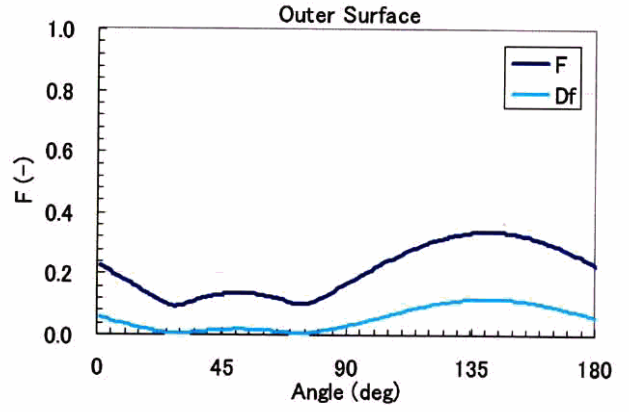
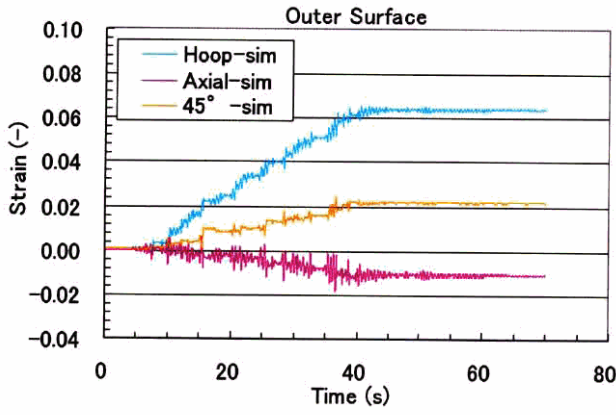


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

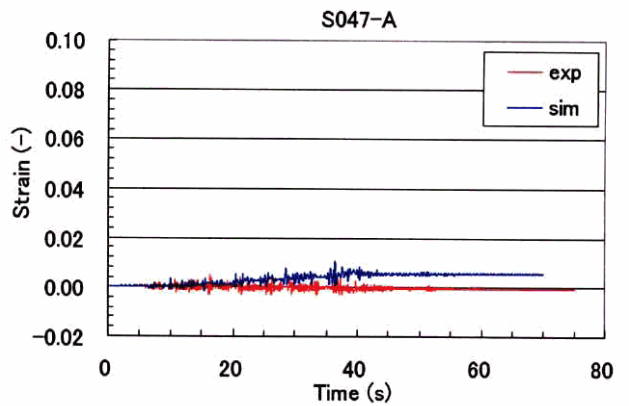
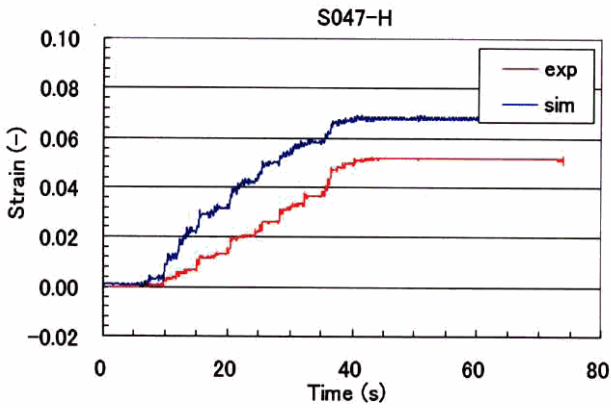
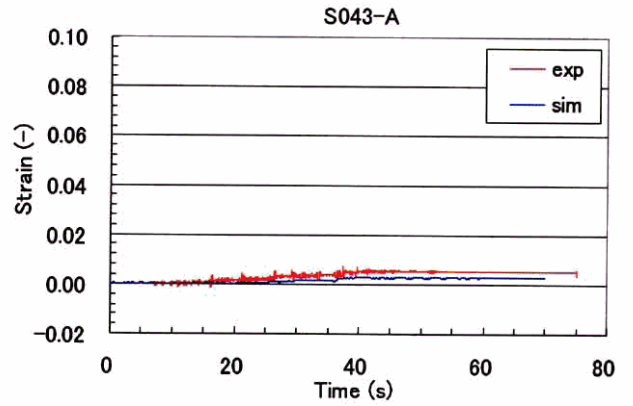
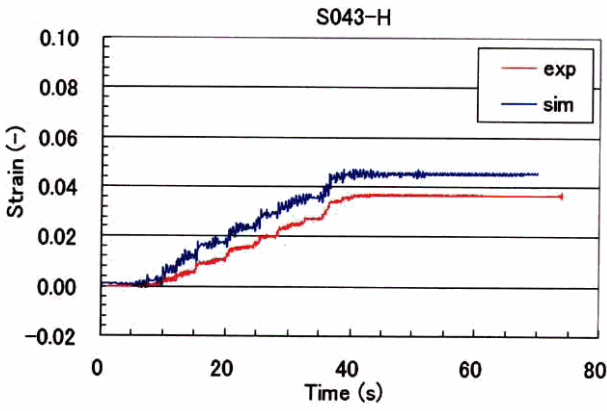


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-25 C12-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

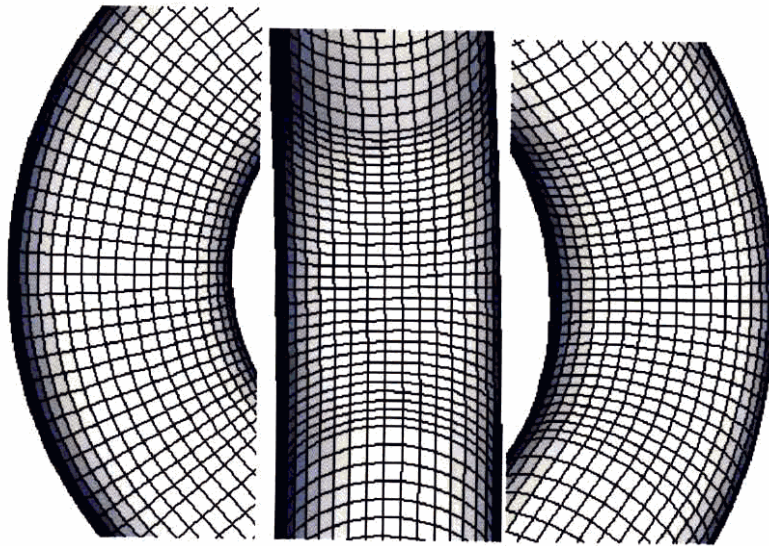


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

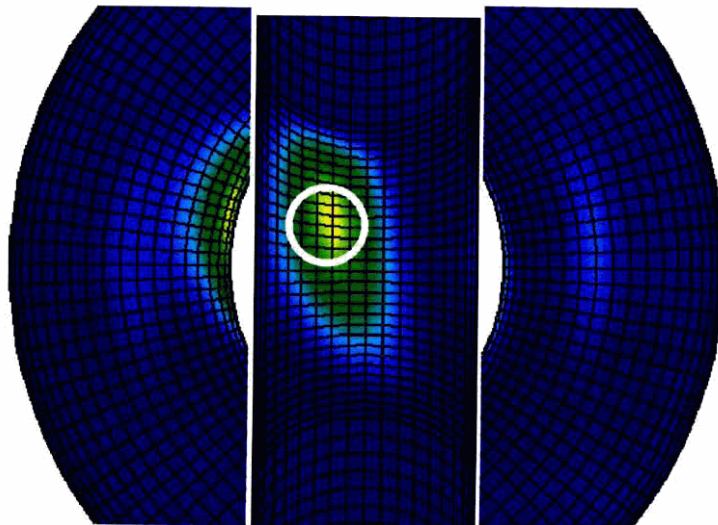


ひずみゲージ位置におけるひずみ履歴の比較

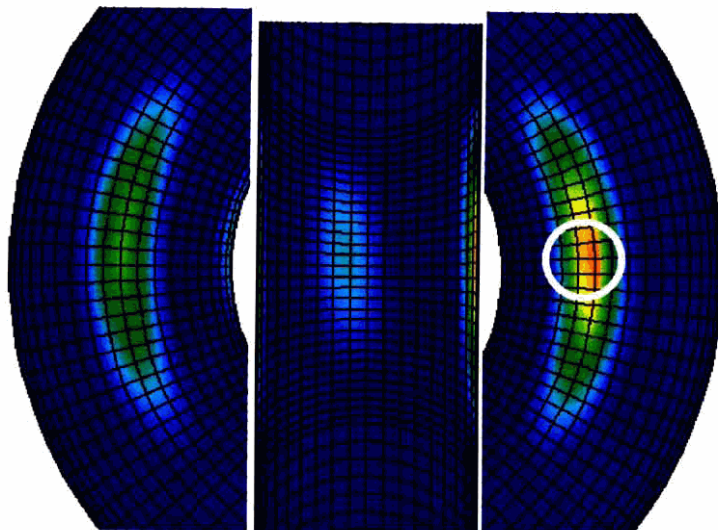
図 3.4-26 C12-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図（変形拡大率 5 倍）。

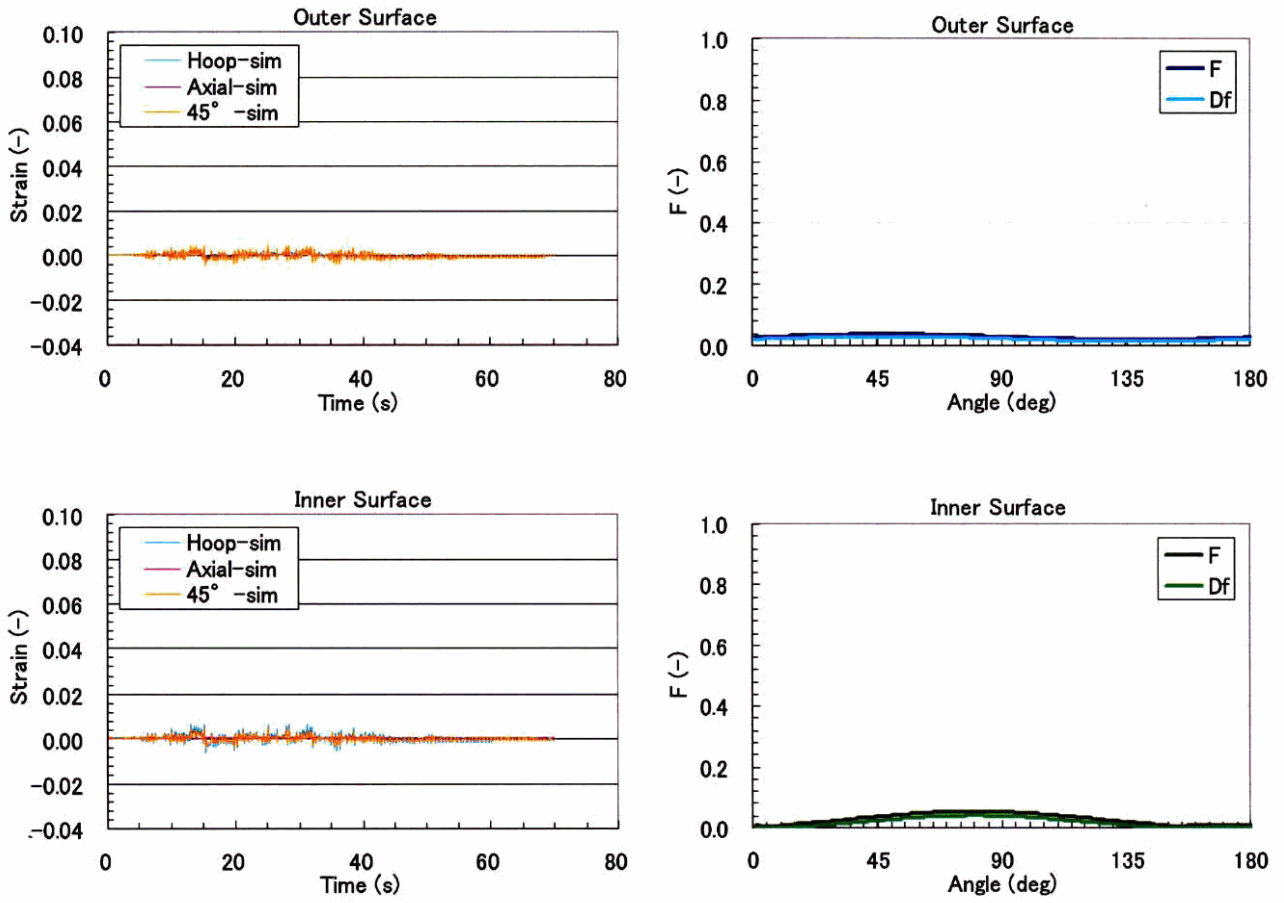


相当塑性ひずみ分布図（外面）



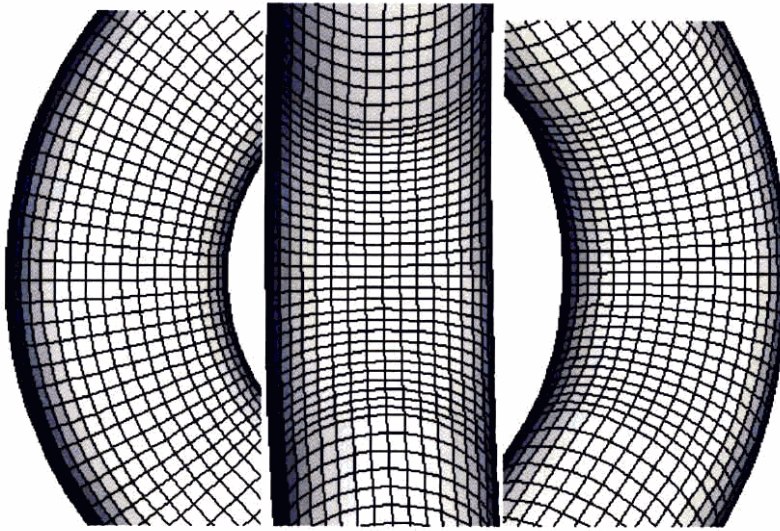
相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 3.4-27 C12-EL2 の静解析結果（変形図・コンター図）

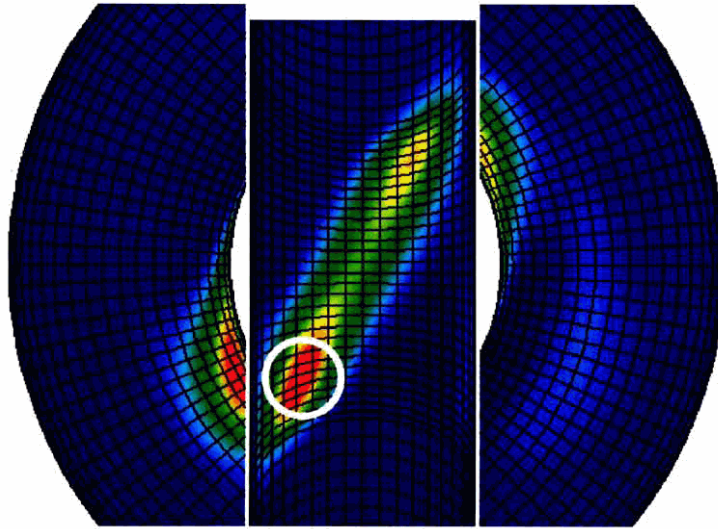


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

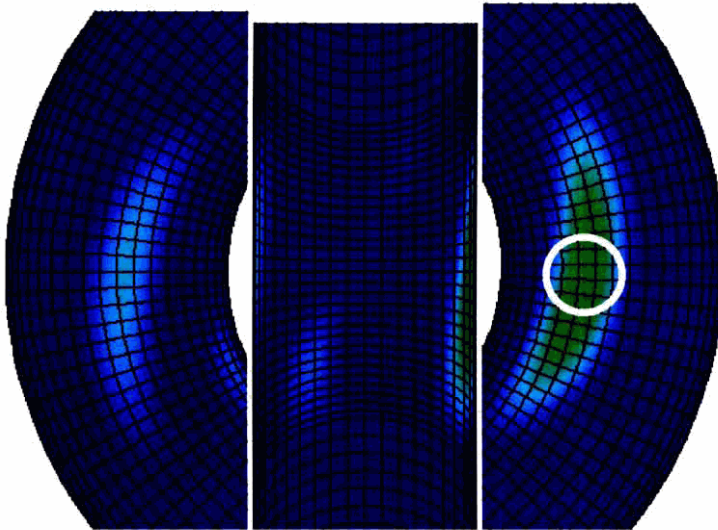
図 3.4-28 C12-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

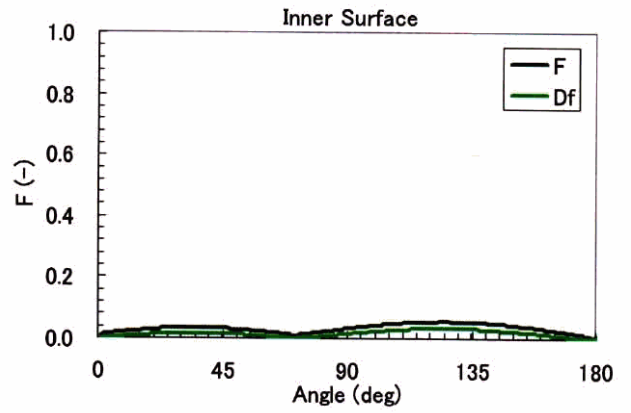
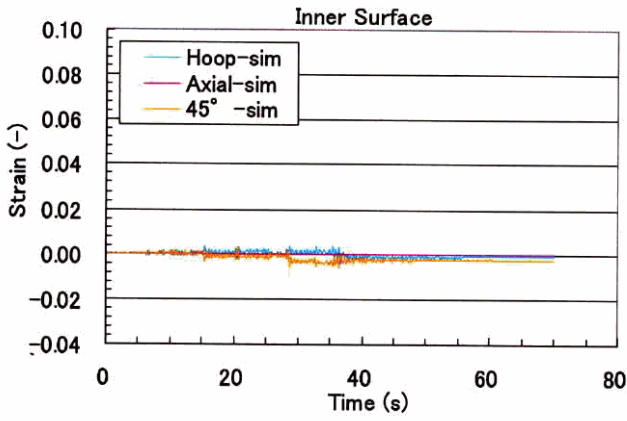
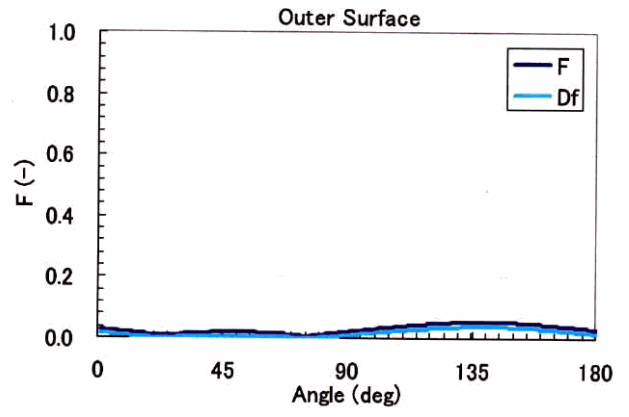
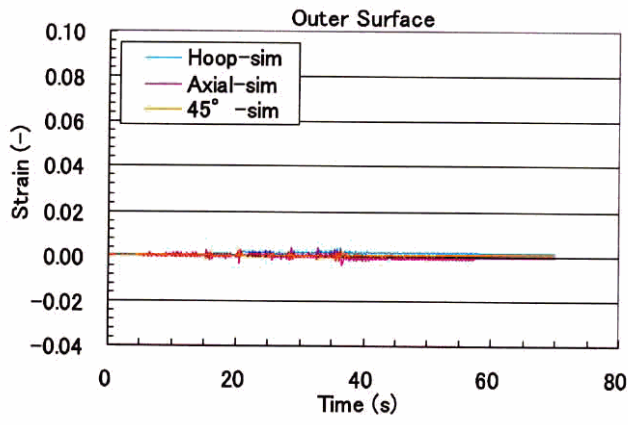


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



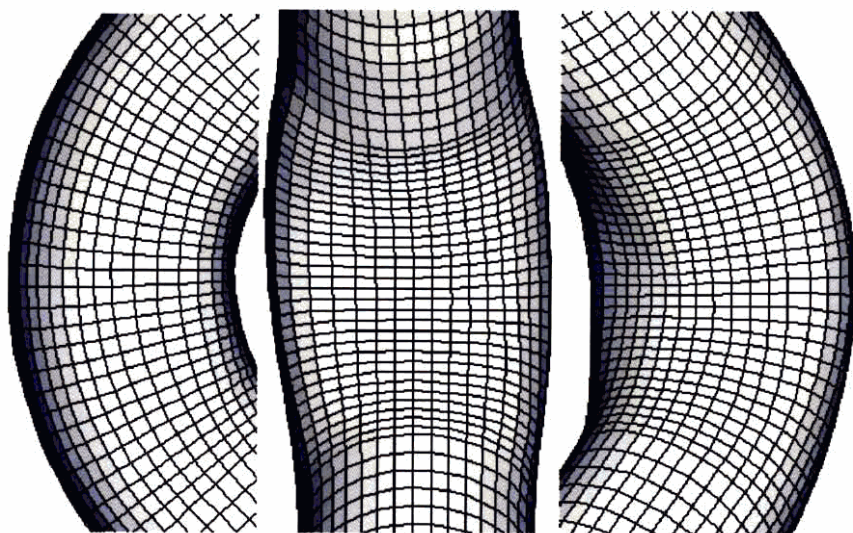
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-29 C13-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

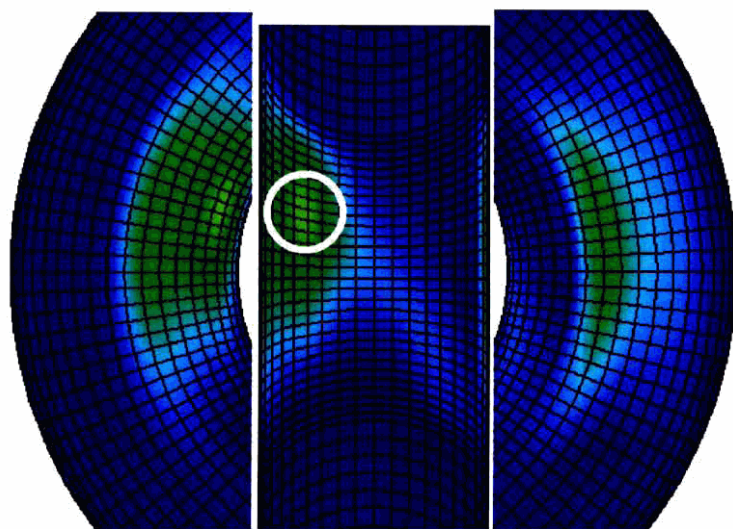


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

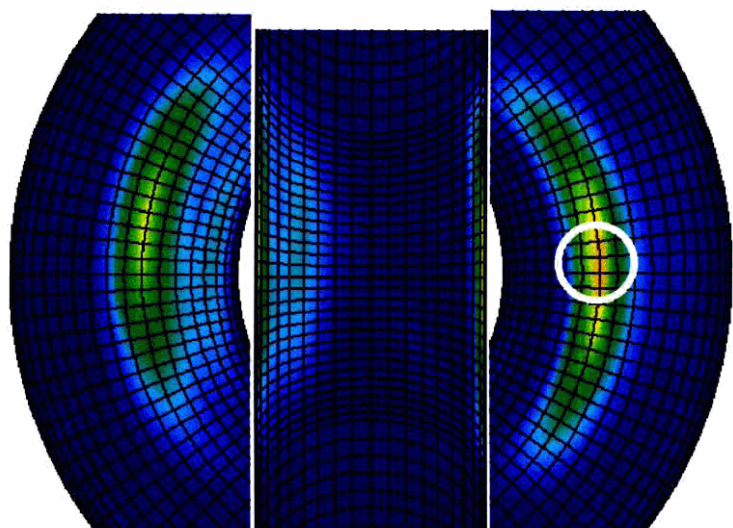
図 3.4-30 C13-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

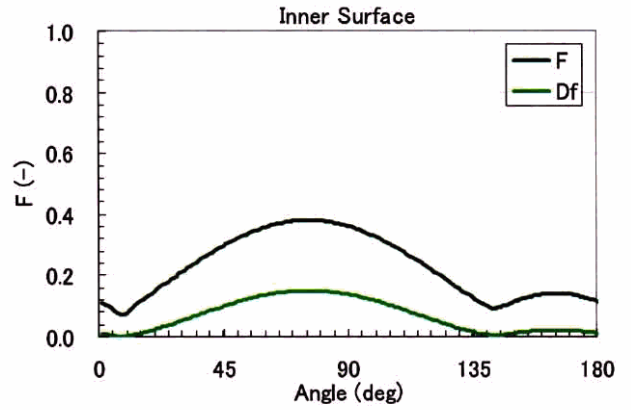
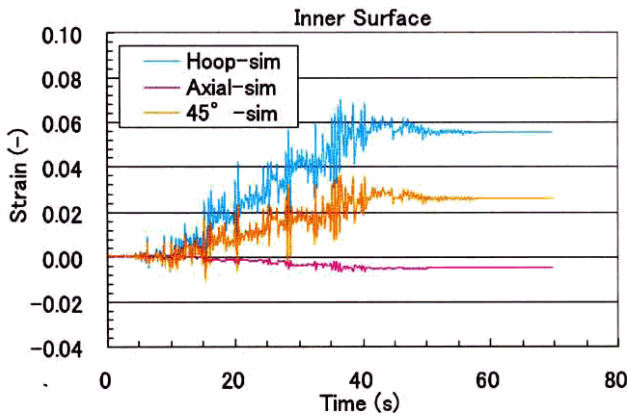
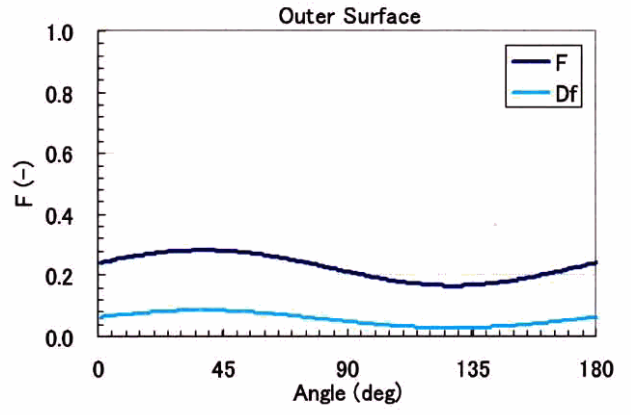
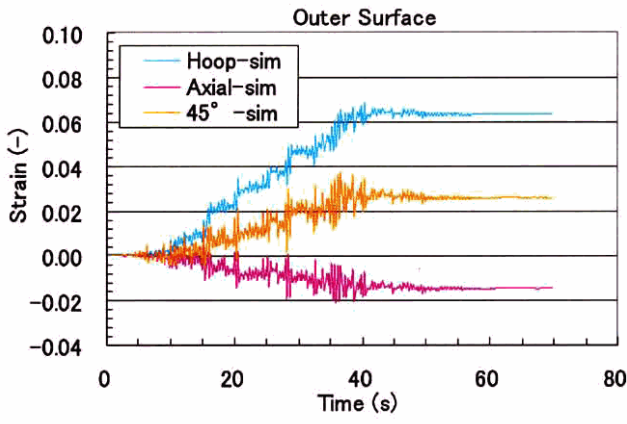


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



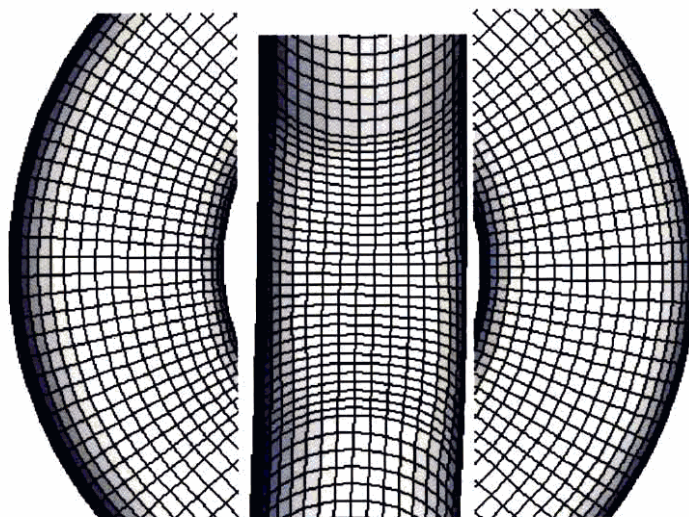
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-31 C13-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

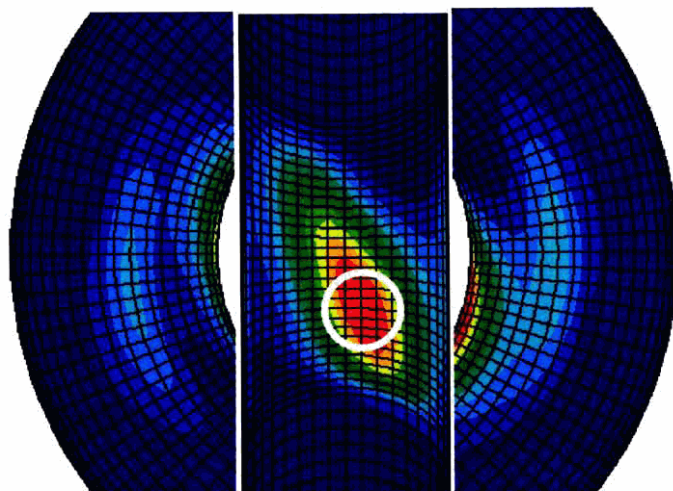


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

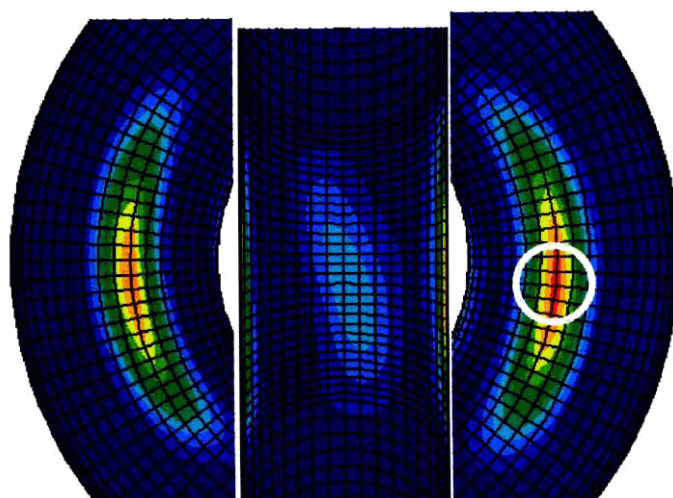
図 3.4-32 C13-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

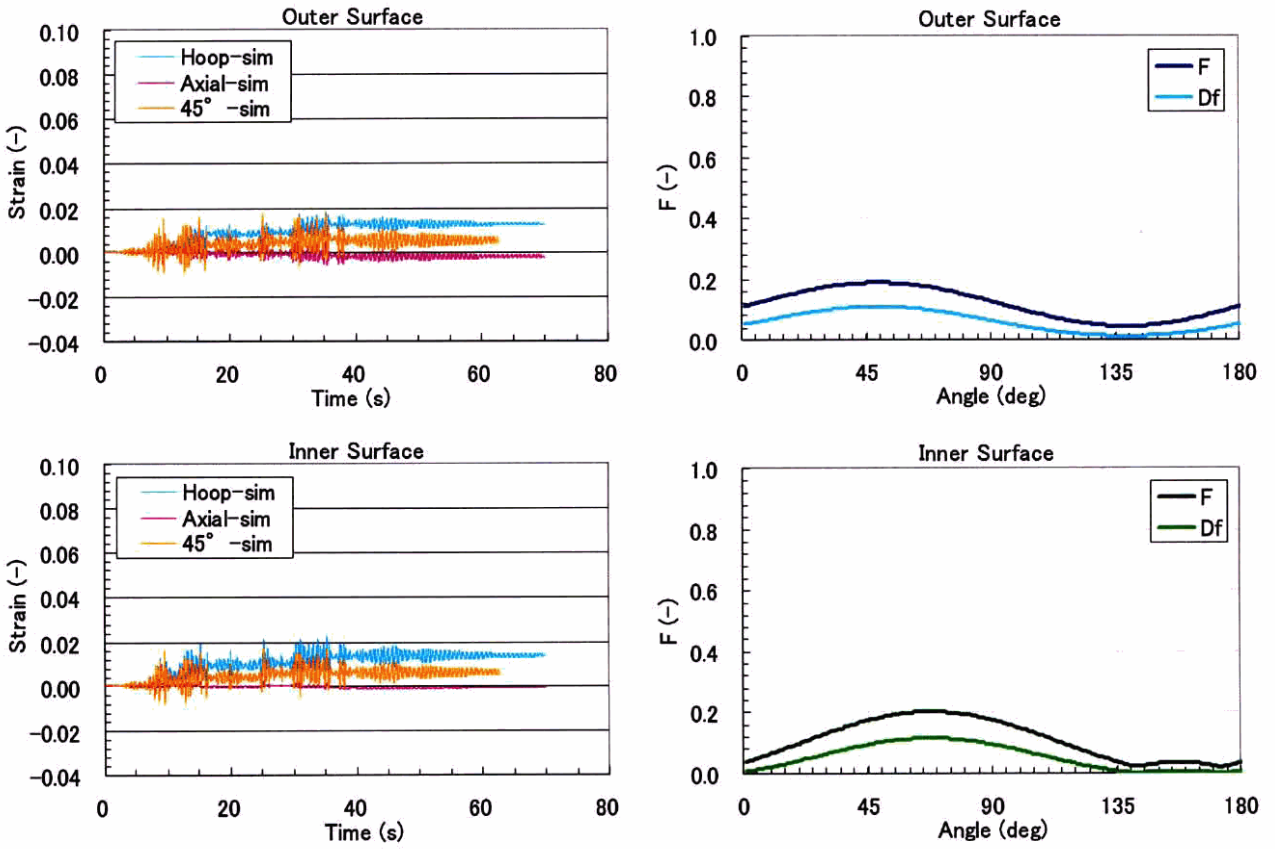


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



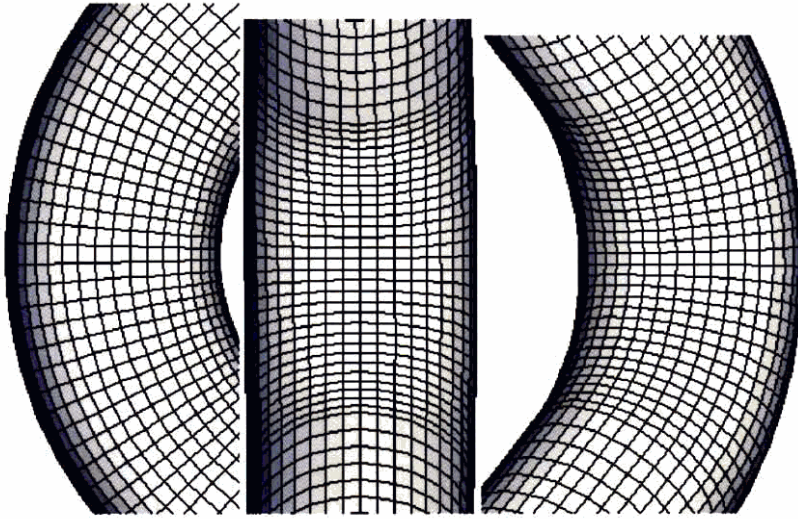
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-33 A21-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

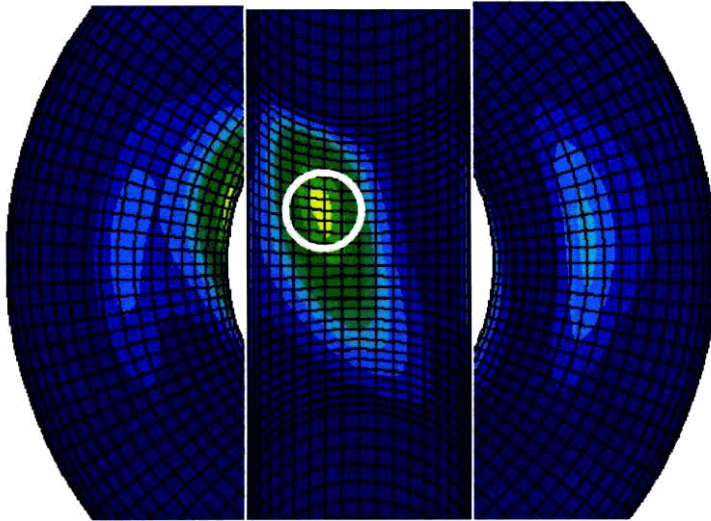


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

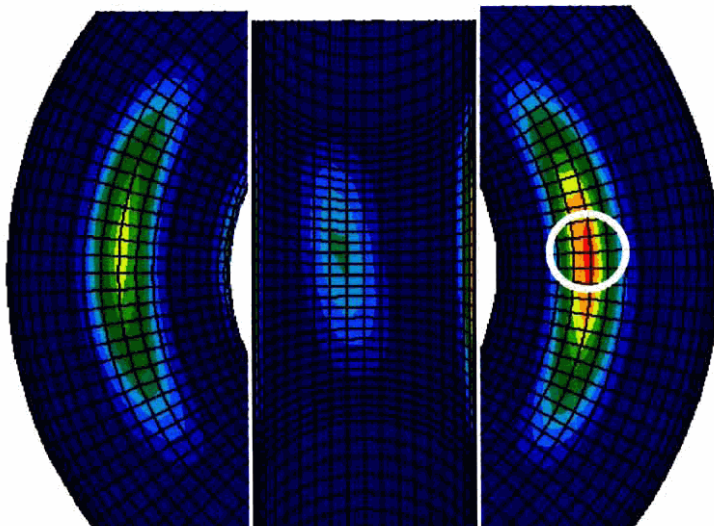
図 3.4-34 A21-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

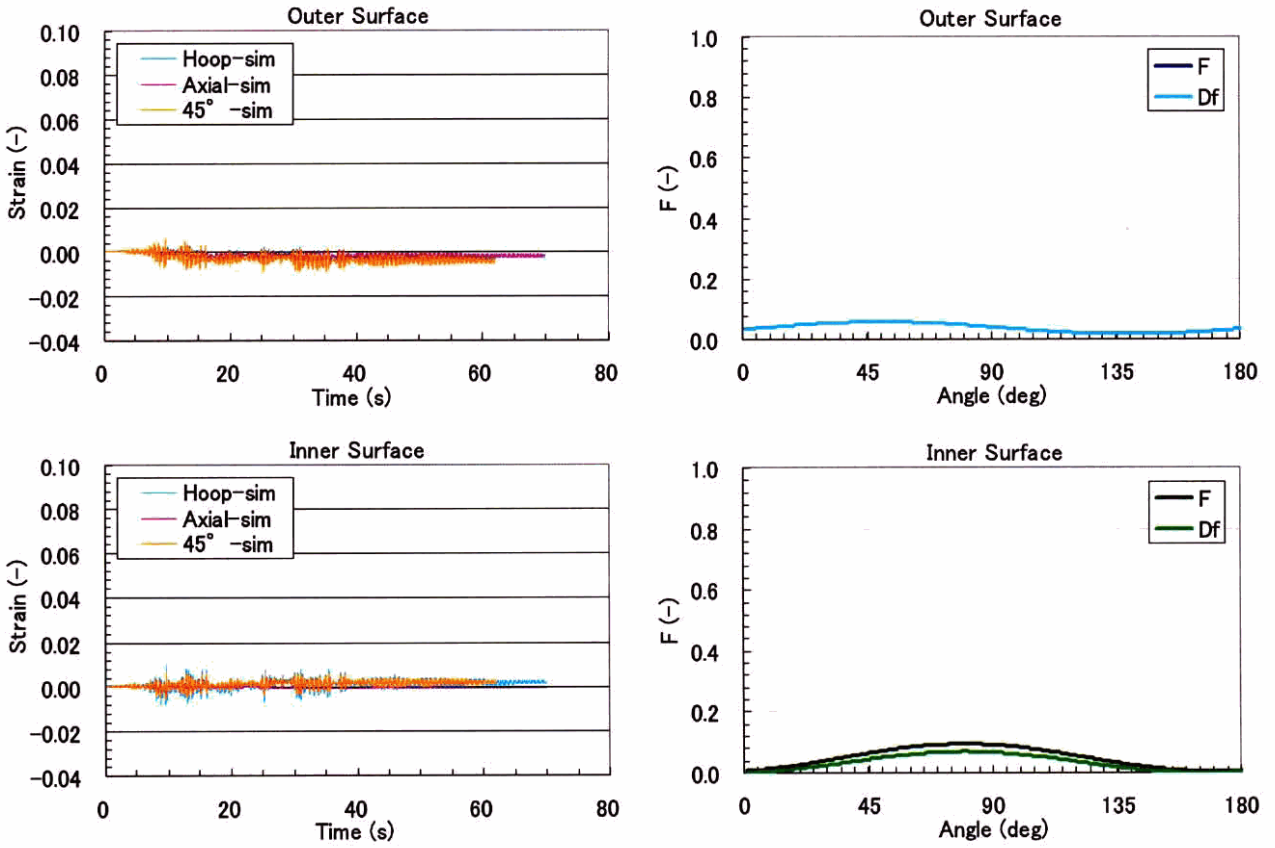


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



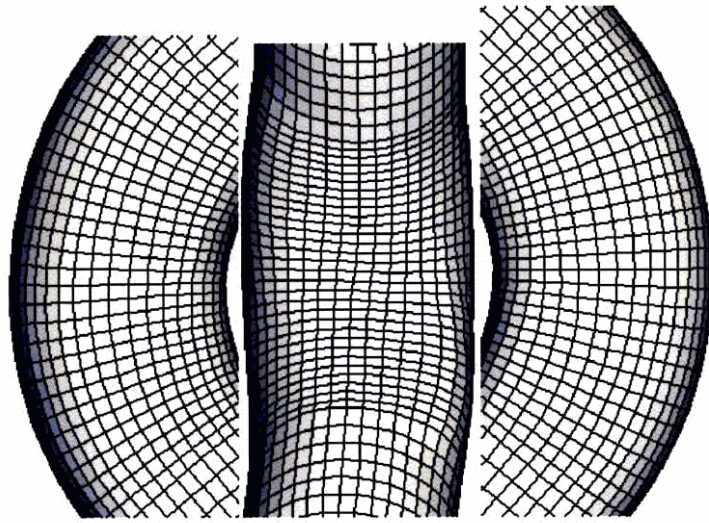
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-35 A21-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

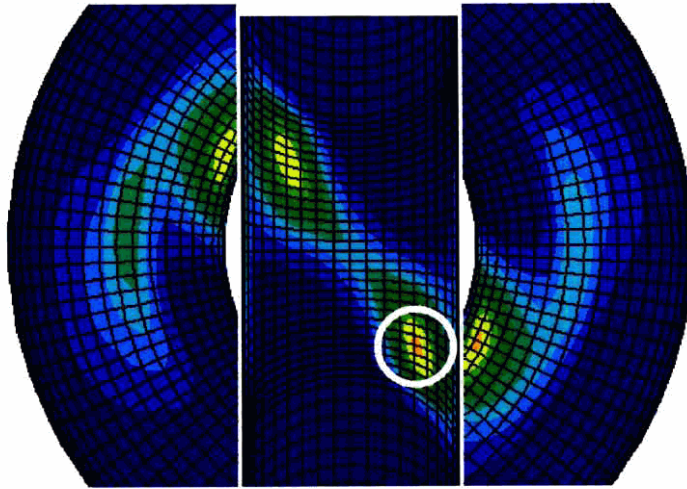


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

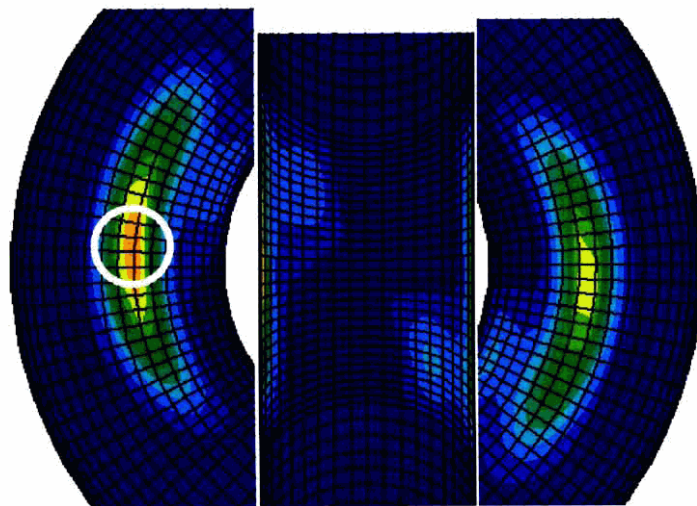
図 3.4-36 A21-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

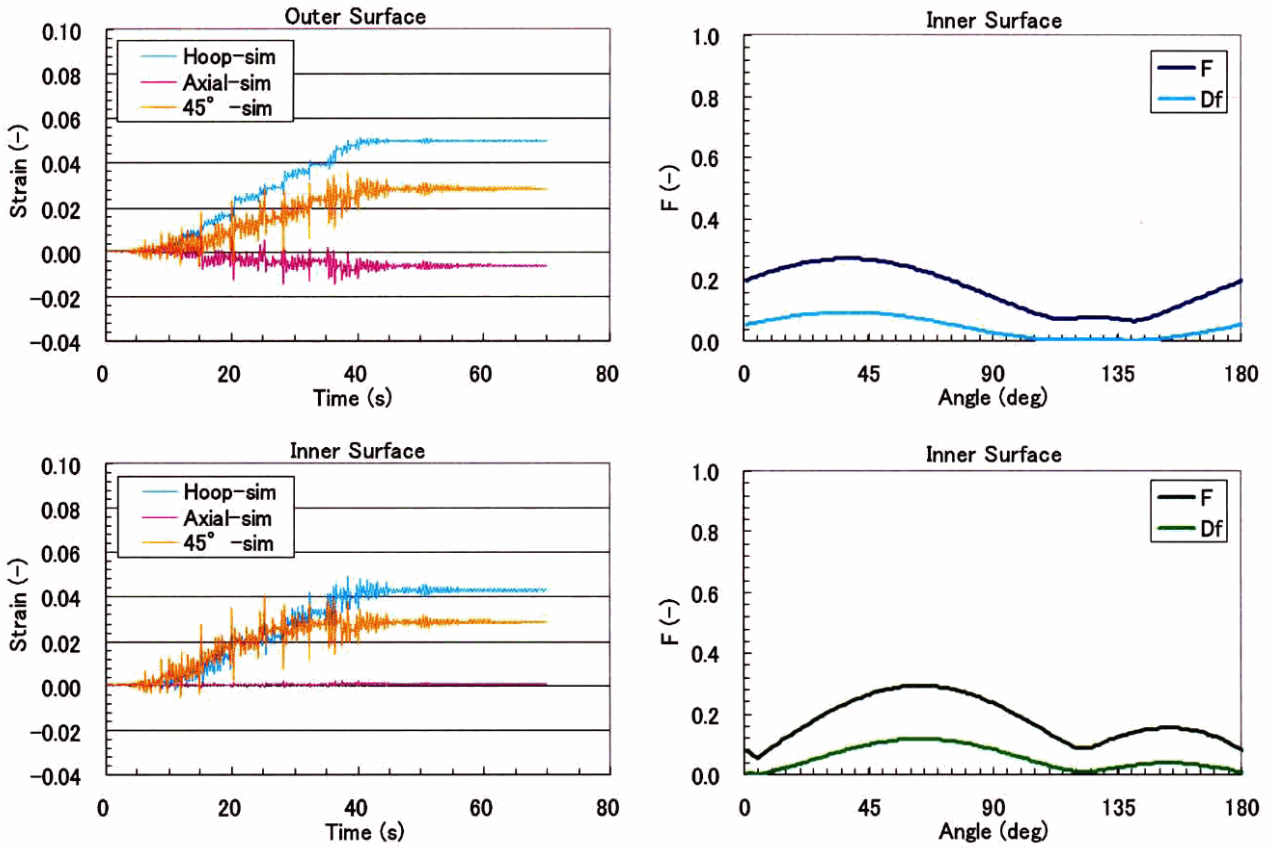


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



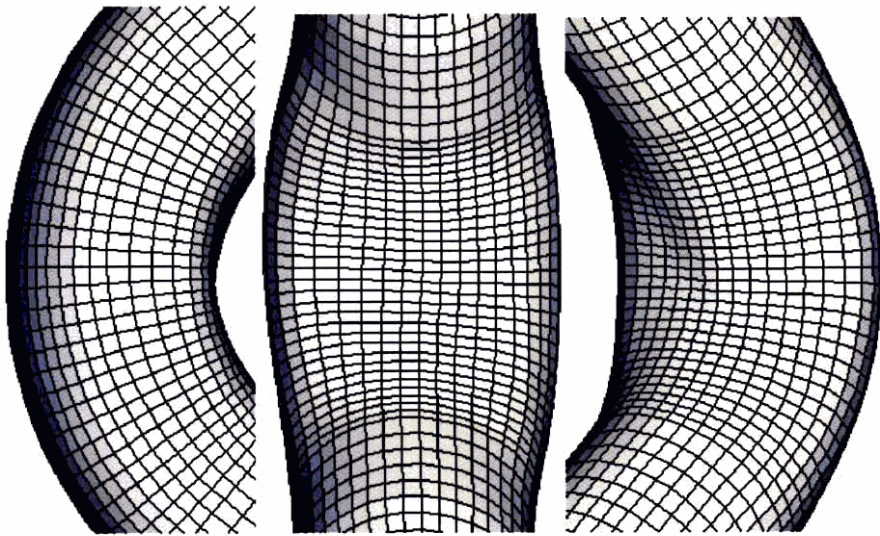
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-37 C21-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

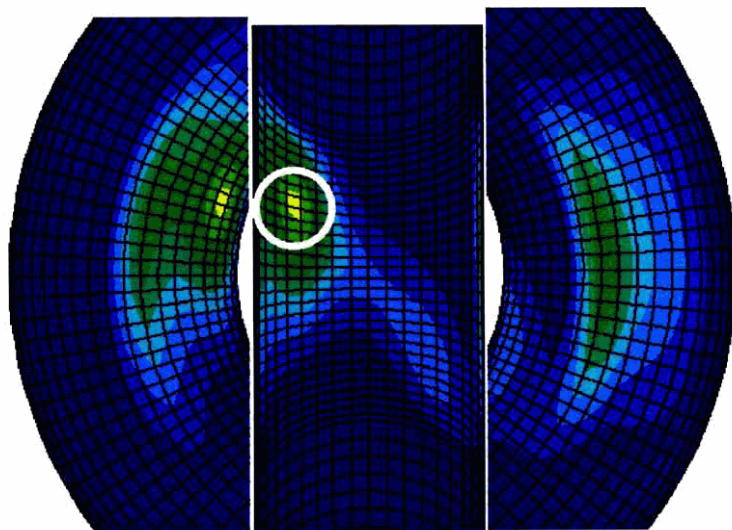


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

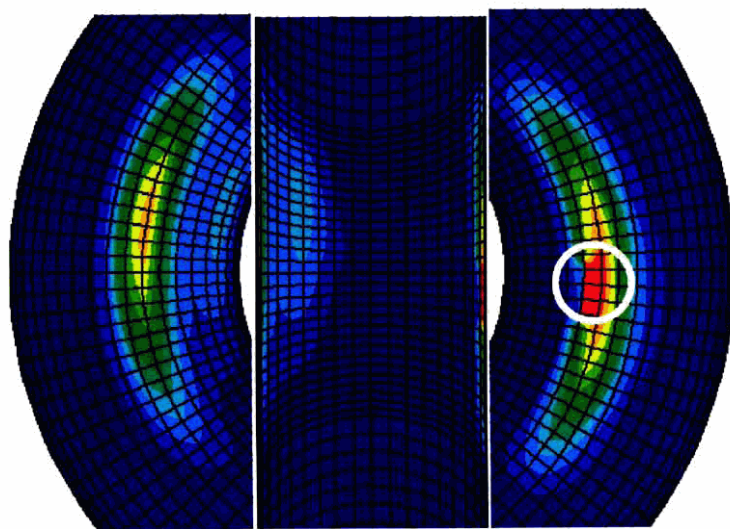
図 3.4-38 C21-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

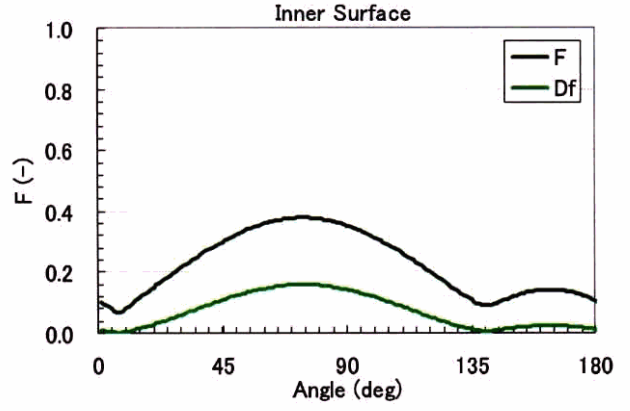
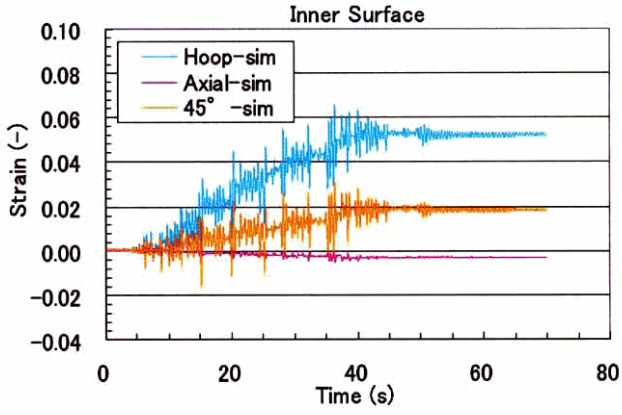
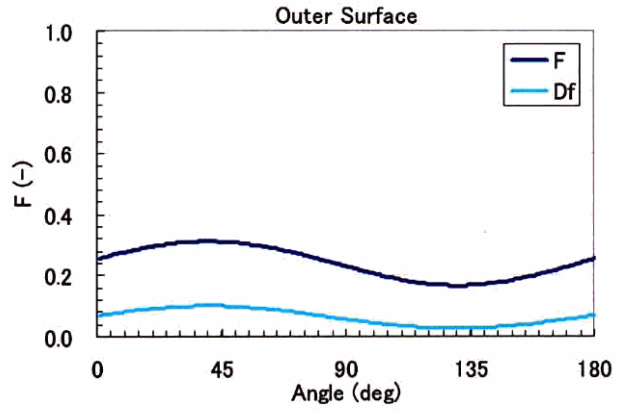
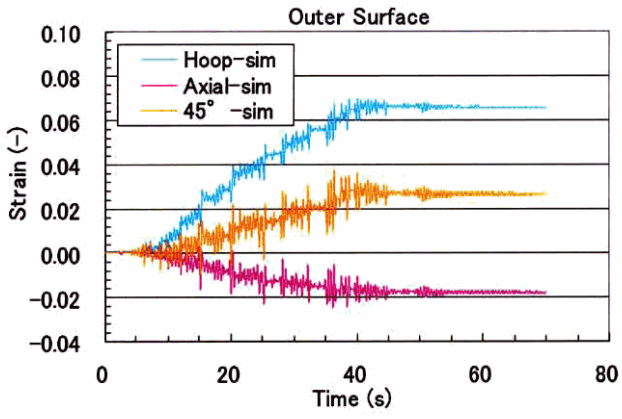


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



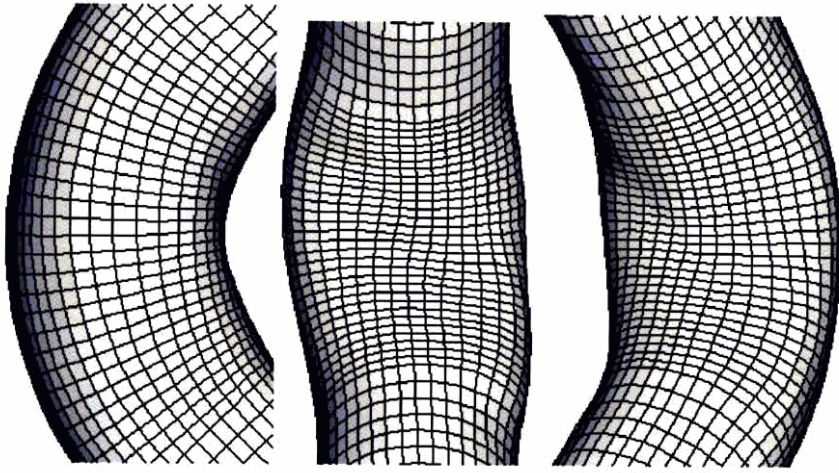
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-39 C21-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

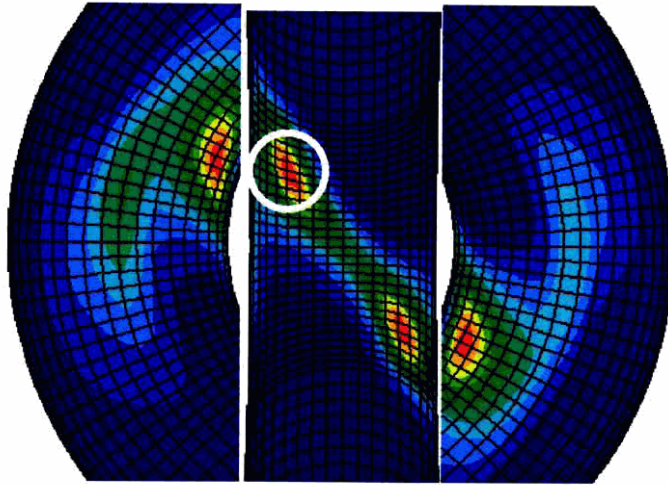


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

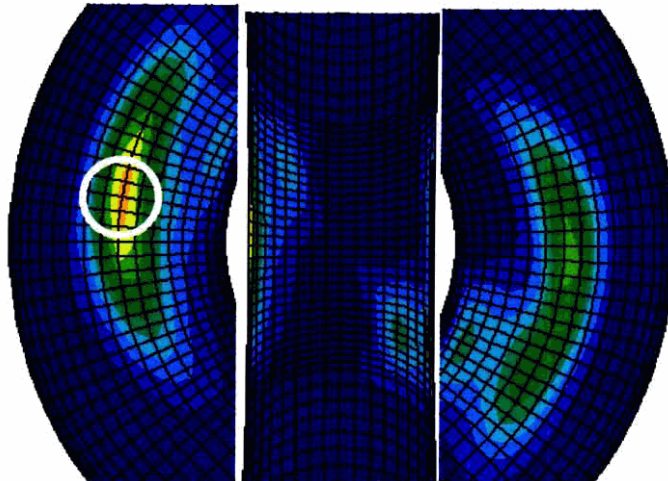
図 3.4-40 C21-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

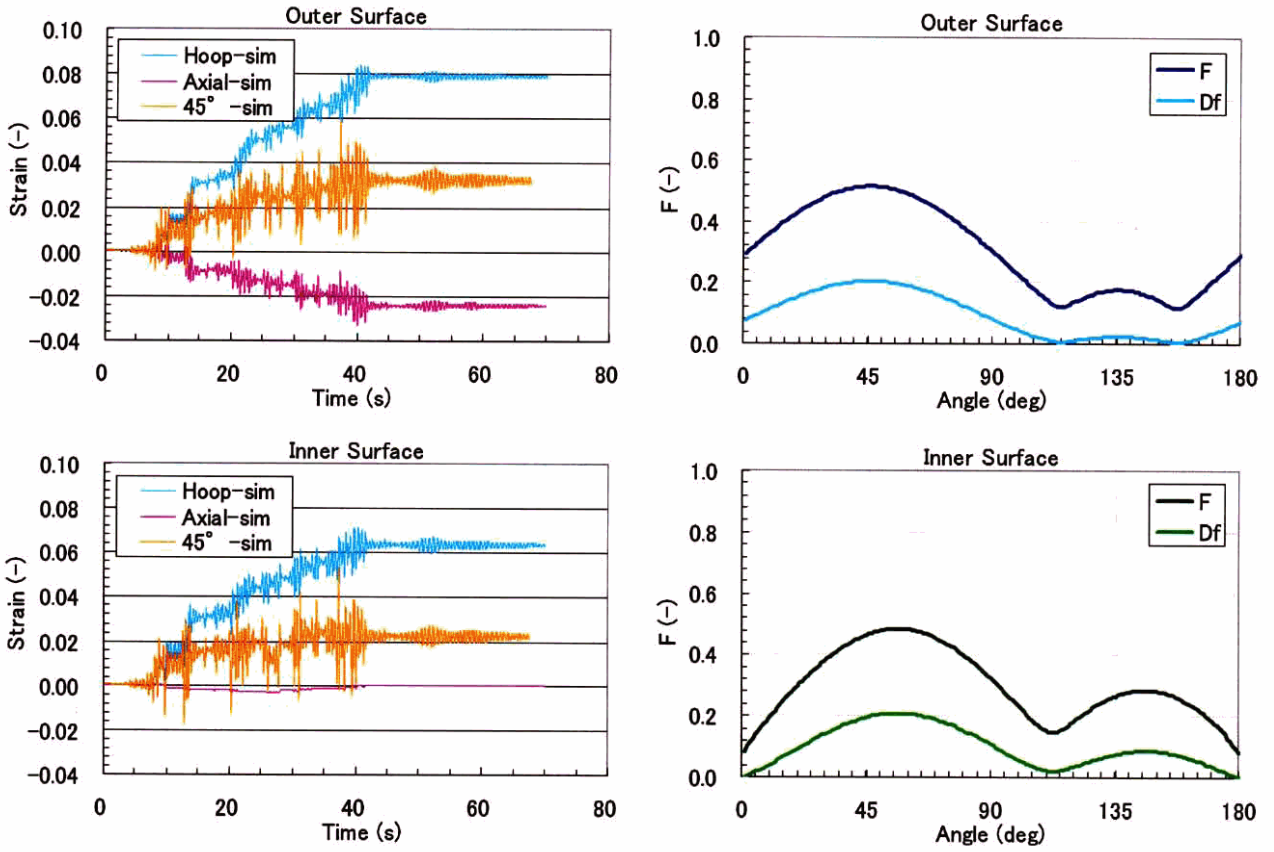


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



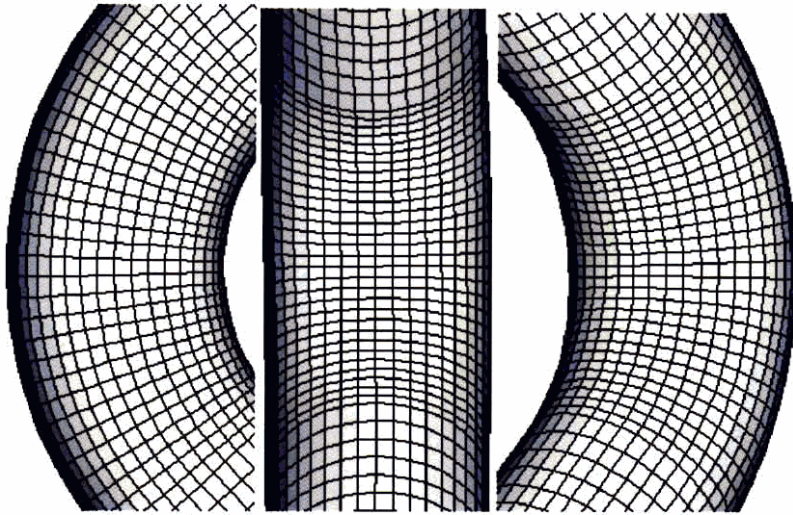
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-41 C22-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)

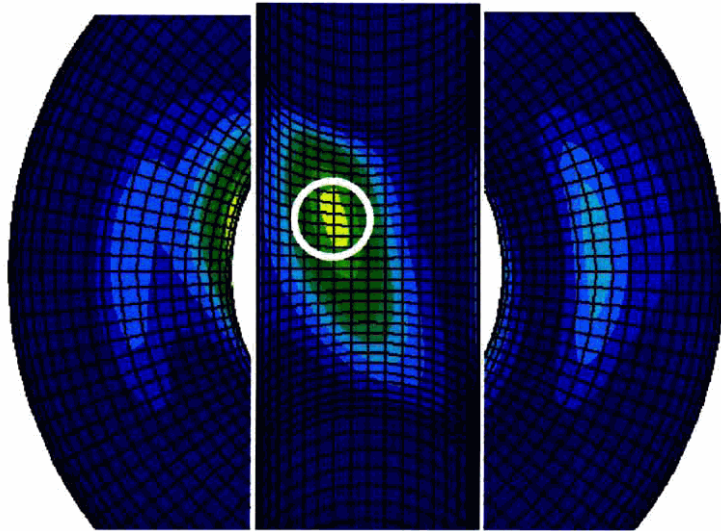


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

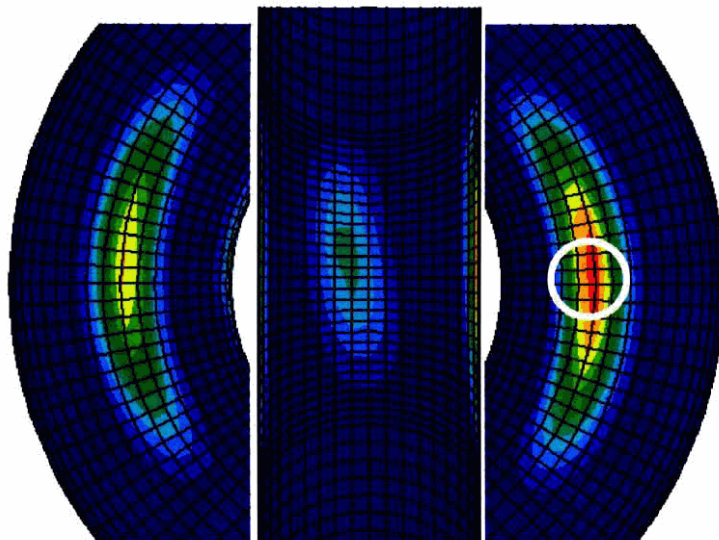
図 3.4-42 C22-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

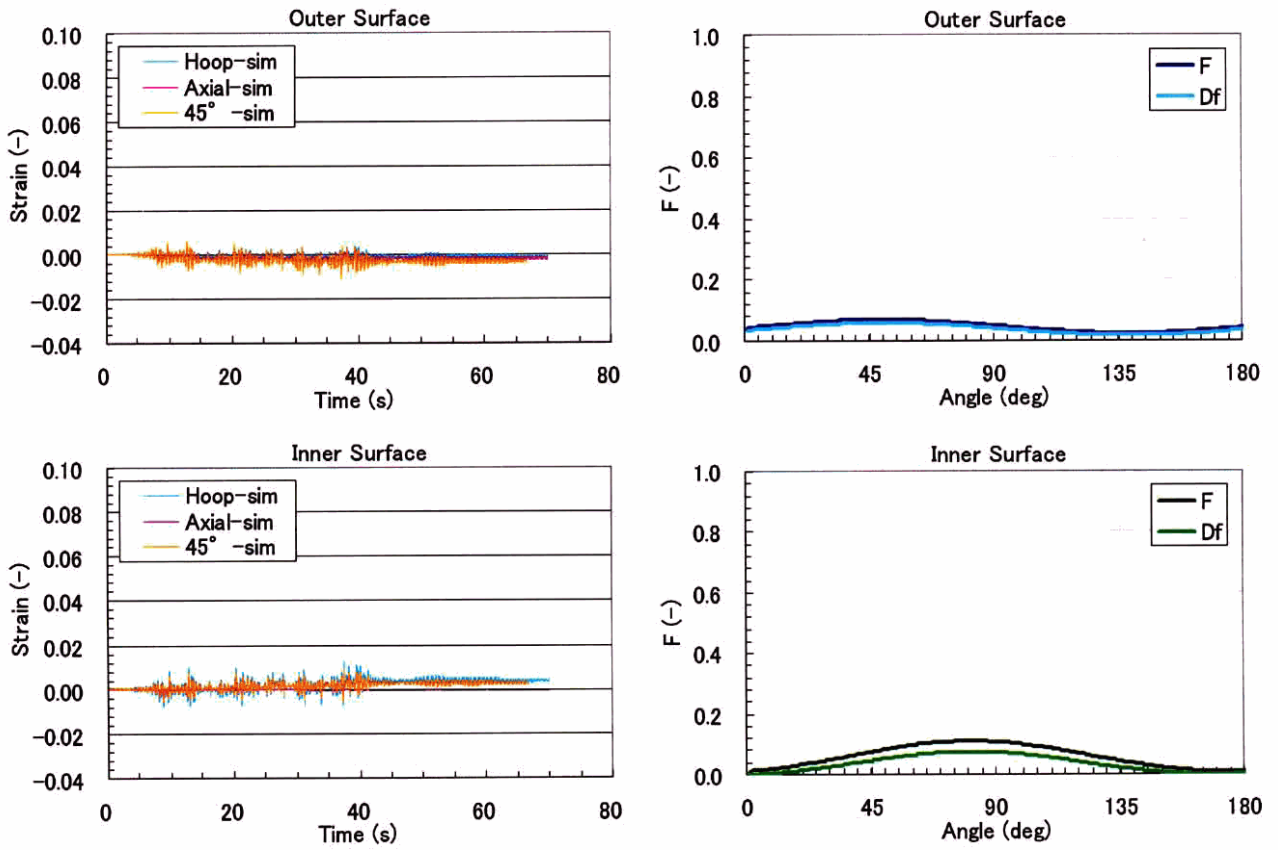


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



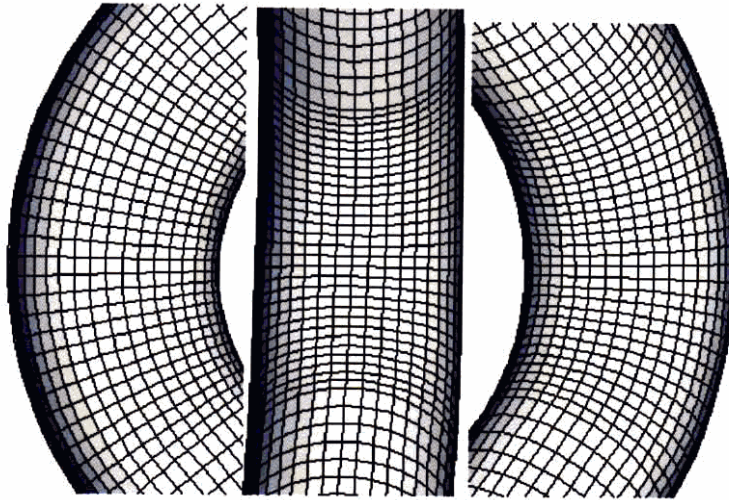
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.4-43 C22-EL2 の静解析結果 (変形図・コンター図)

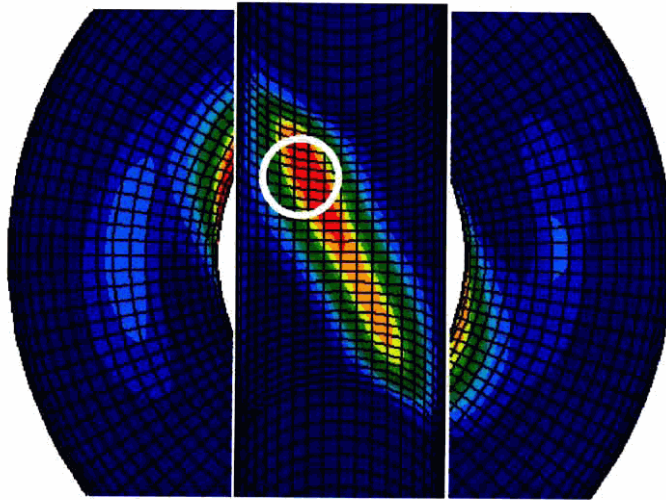


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

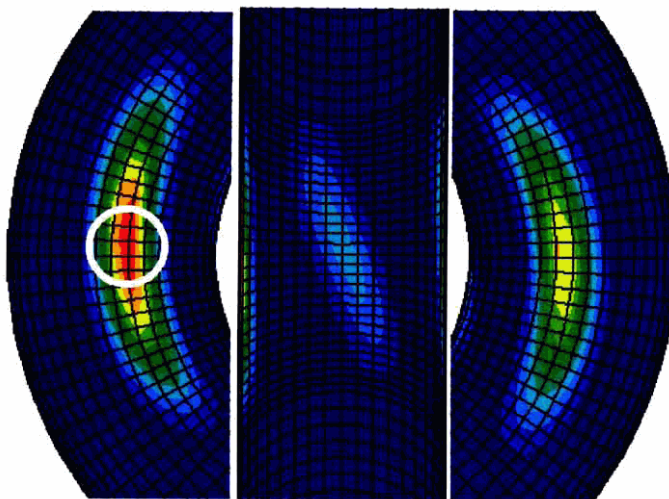
図 3.4-44 C22-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

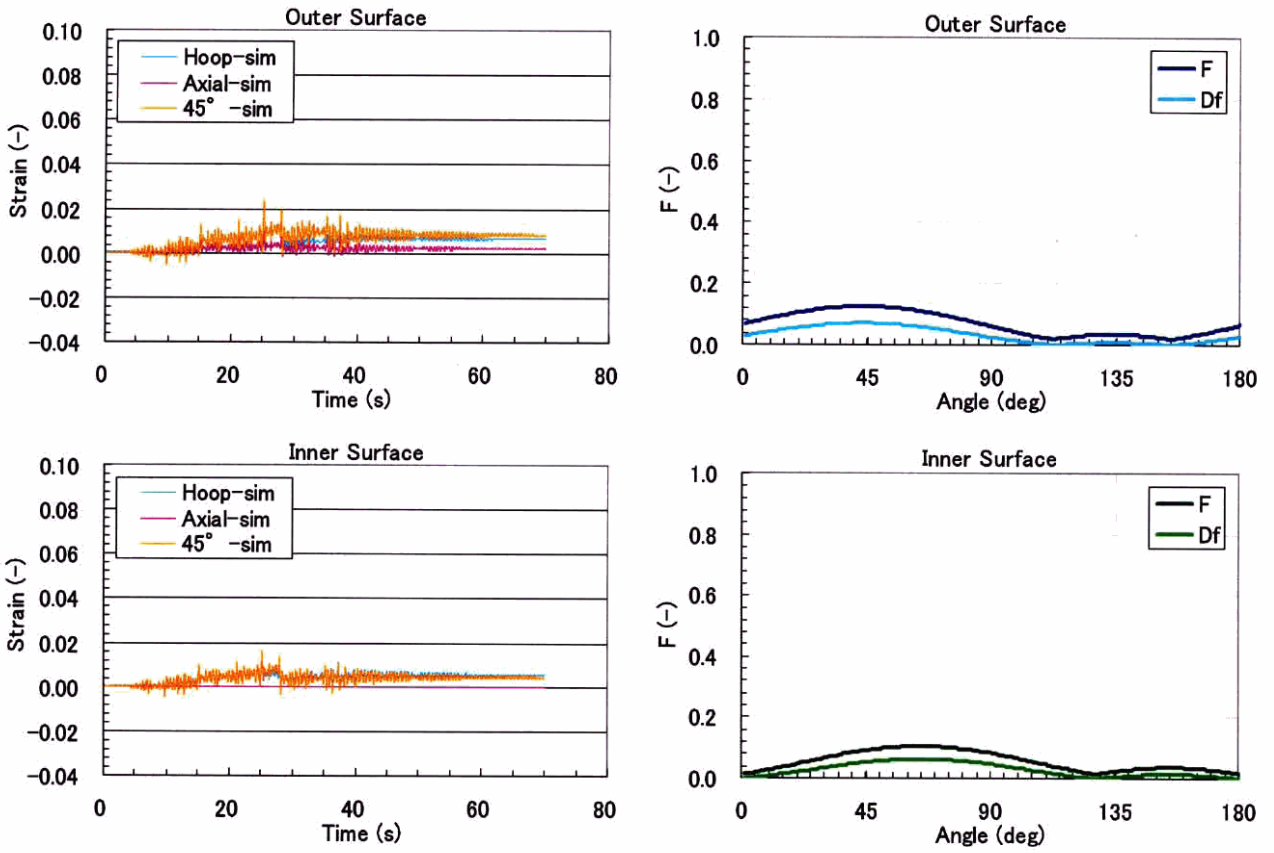


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



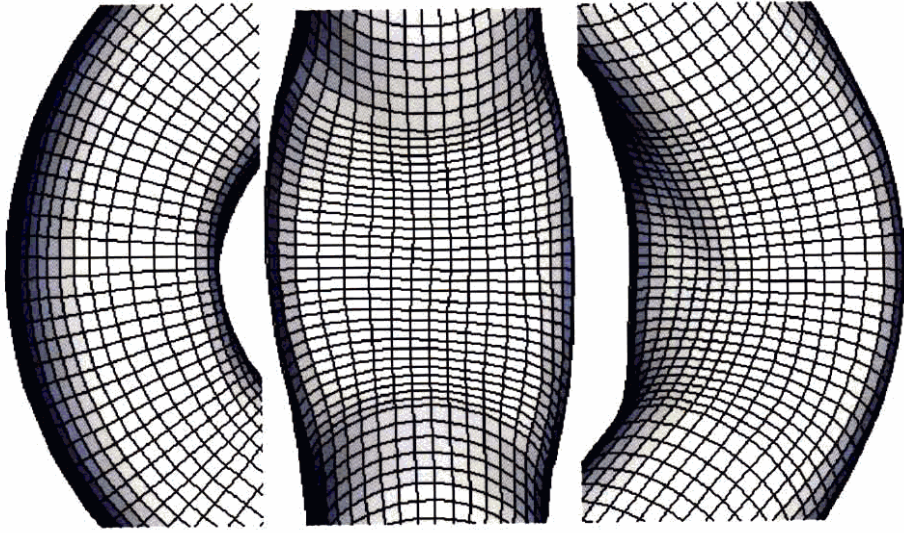
ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

図 3.4-45 C23-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)

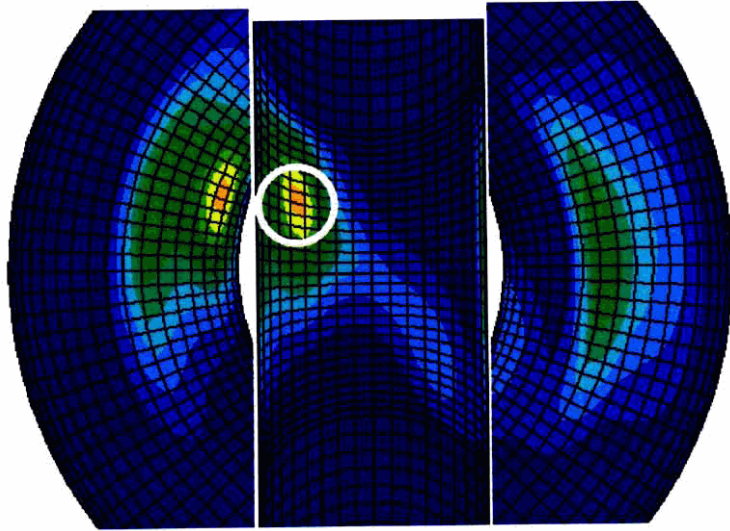


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

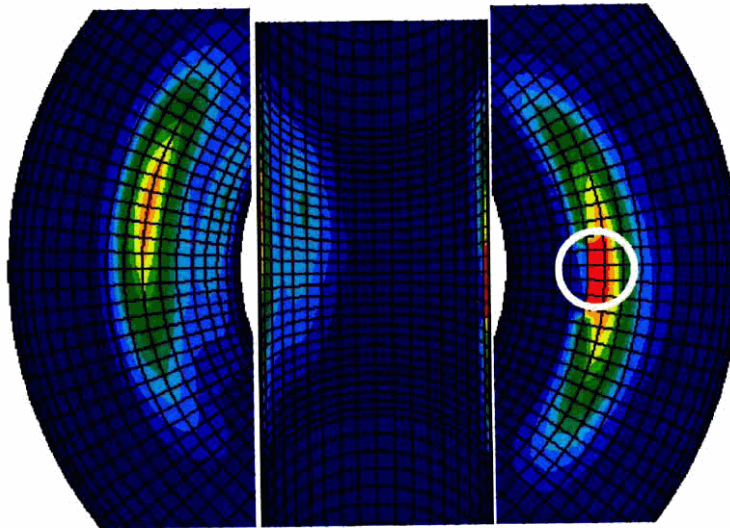
図 3.4-46 C23-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

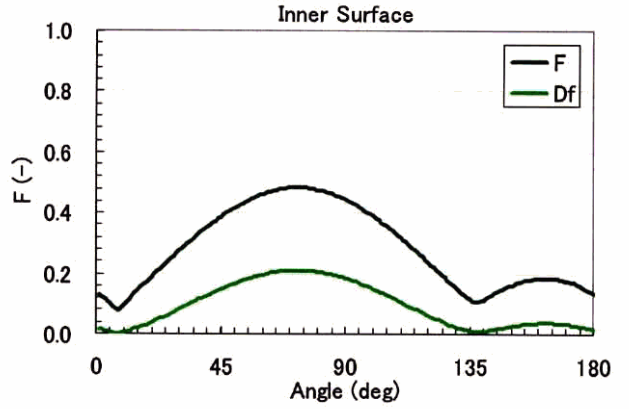
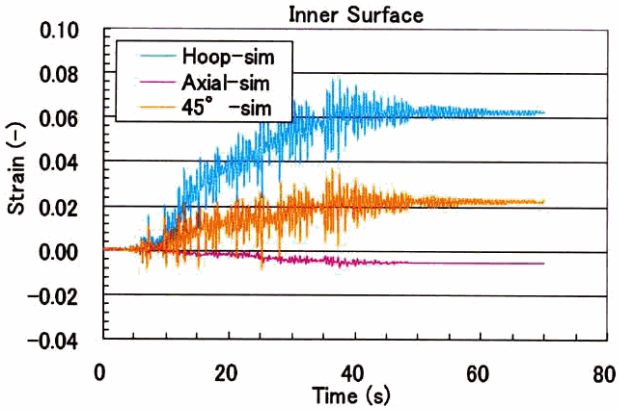
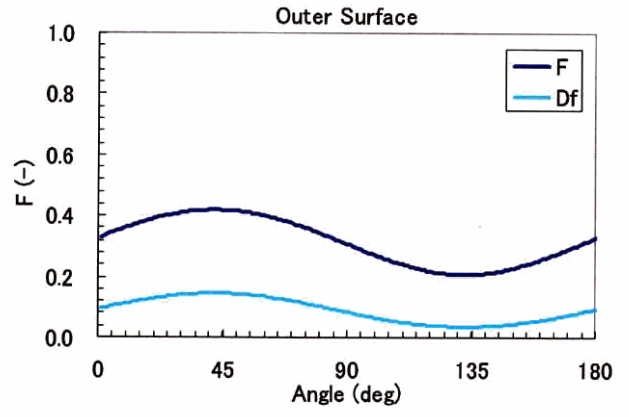
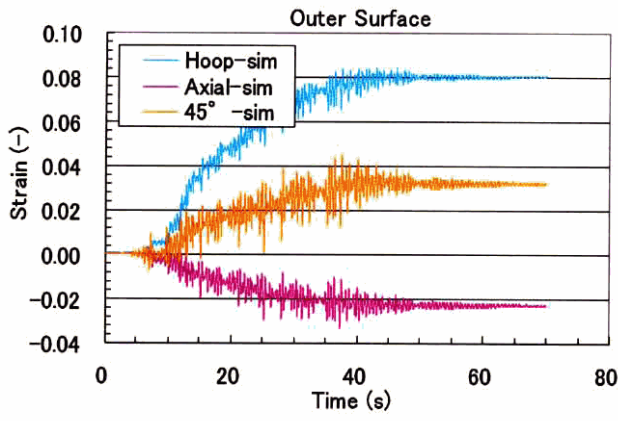


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

図 3.4-47 C23-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

図 3.4-48 C23-EL2 の静解析結果 (ひずみ履歴)

3.5 破損箇所

ここでは破損箇所について検討する。表 3.5-1 に実験破損箇所と解析破損予測箇所をまとめた。赤い丸が実験破損箇所，青い丸が解析破損予測箇所である。図 3.5-1 から図 3.5-5 に実験での破損箇所の写真を示す。3.4 の静解析結果と比較すると A01, C01, C02, C03 においてよく一致している。C12 は EL1 が面外曲げを受ける条件であるが実験では余盛の近傍で亀裂が入っている。今回の解析モデルでは余盛は考慮していないのでこの結果を再現できていない。3.7 で余盛を考慮した解析結果を示す。

表 3.5-1 破損箇所の比較

	EL 1	EL 2
A01	●●	
A11		●
A21	●	
C01	●●	
C11	●	
C21		●
C02	●●	
C12	●●	
C22	●●	
C03		●●
C13		●
C23		●

●● : 実験破損箇所 ●● : 解析破損予測箇所
 : 健全 : 減肉



図 3.5-1 破損箇所 (A01, EL1)



図 3.5-2 破損箇所 (C01, EL1)

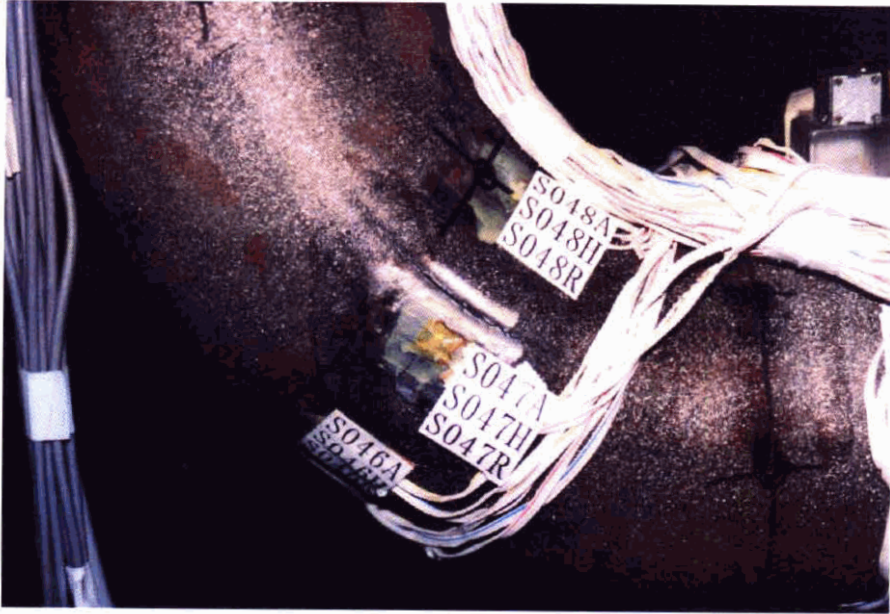


図 3.5-3 破損箇所 (C02, EL1)

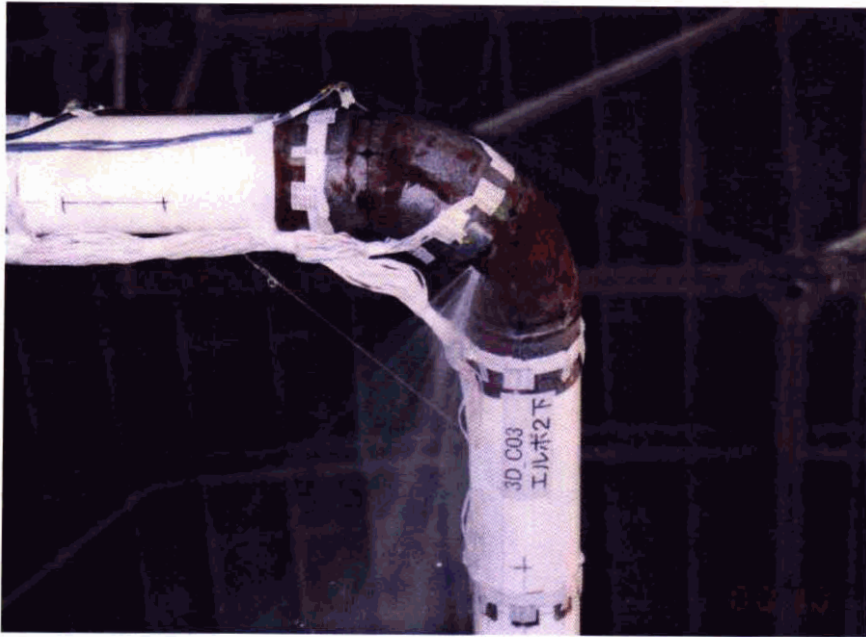


図 3.5-4 破損箇所 (C03, EL2)



図 3.5-5 破損箇所 (C12, EL1)

3.6 寿命予測

ここでは寿命予測結果と実験結果を比較検討する。

図 3.6-1 に実験と解析の破壊回数を示す。図の青い数字は解析による破壊に至るまでの加振回数であり、赤い数字は実験での破壊に至った加振回数である。棒グラフのひとつひとつの長方形は一回の加振での F 値を現している。

図 3.6-2 に各試験ケースによる F 値を示す。配管形状では全てのエルボが健全のもの (A*1) と減肉が一箇所のもの (C*2, C*3) で EL1 が面内+面外曲げを受ける場合が最も F 値が大きくなった。減肉の位置と個数では、全ての配管形状で EL1 のみが減肉している条件で最も F 値が大きくなった。

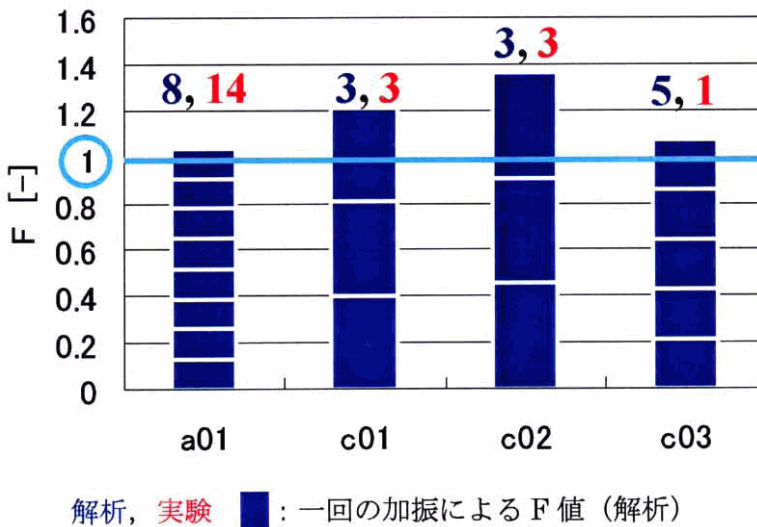


図 3.6-1 実験と解析の破壊回数

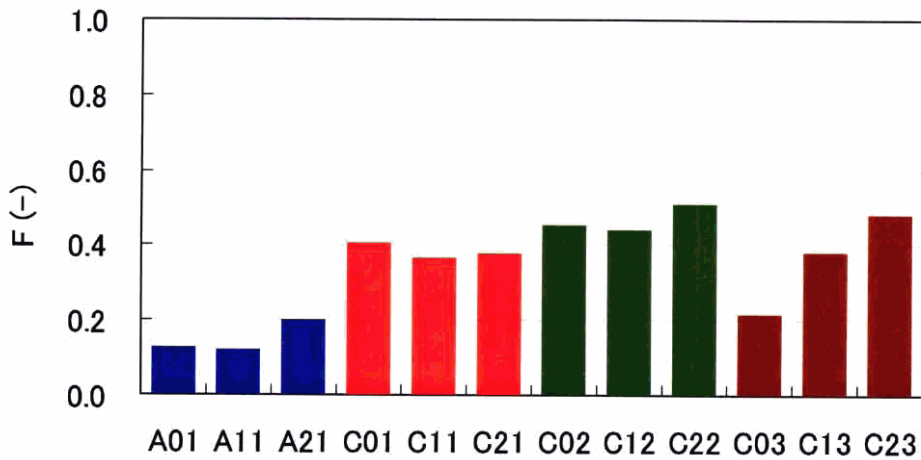


図 3.6-2 各試験ケースによる F 値

3.7 余盛の考慮

3.7.1 平成 16 年度再現解析

実験において図 3.5-4 に示したように C12 は溶接余盛の近傍で亀裂が生じた。そこで溶接余盛を考慮したモデルで解析を行う。溶接余盛部は凹凸がありモデル化は非常に難しい。図 3.7.1-1 に示すようにシェル要素の一部を厚くすることで溶接余盛を模擬した。余盛部の厚さは 7.0mm、降伏応力は 500MPa と他の部分の 424MPa より高く設定し、二次勾配は共通で 1200MPa とした。図 3.7.1-2 に変形図 (変形拡大率 5 倍), 相当塑性ひずみ分布図 (外面), 相当塑性ひずみ分布図 (内面) を示す。実験での破損箇所で高い相当塑性ひずみとなっている。図 3.7.1-3 に C12 の EL1 のひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係を示す。最大の F 値は 0.17 であり、6 回の加振で破壊に至る計算となる。実験では 3 回の加振で破壊に至っているのでまずまずの結果であると言える。

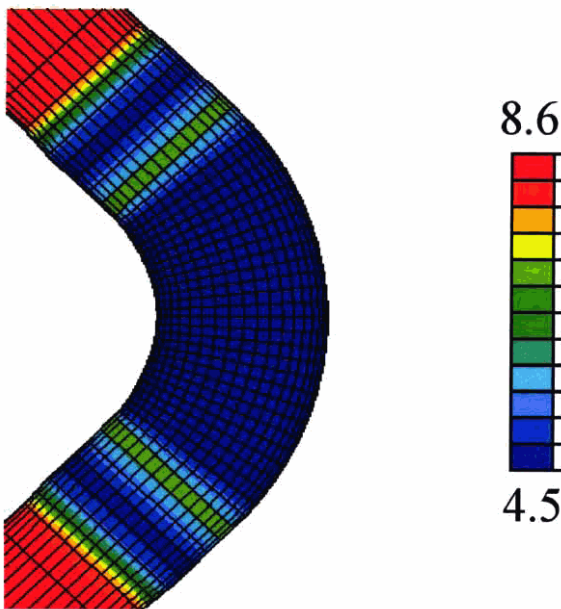
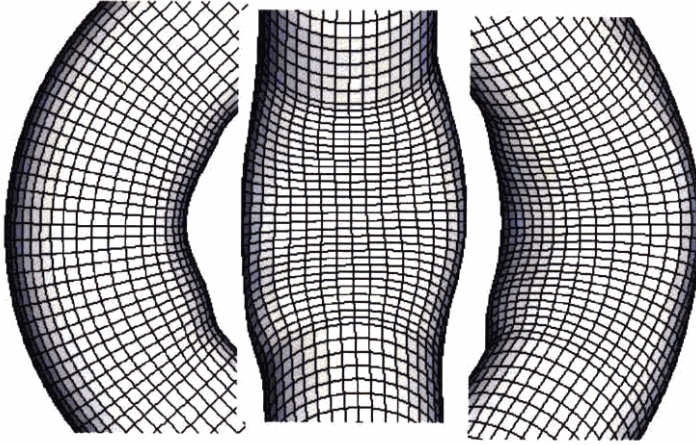
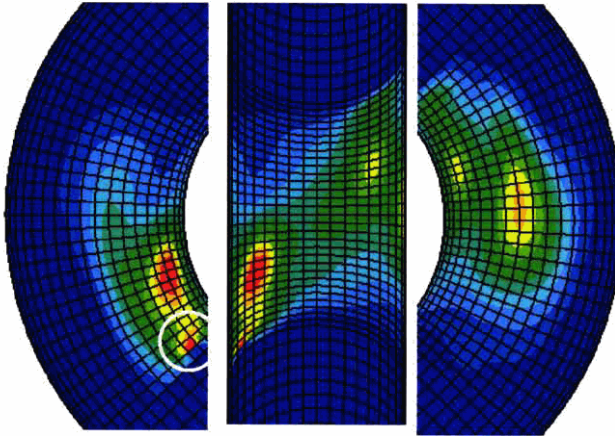


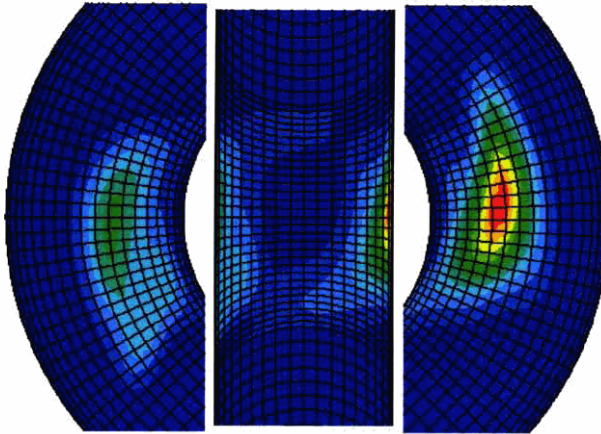
図 3.7.1-1 溶接余盛を考慮したエルボ部の厚み



変形図 (変形拡大率 5 倍)

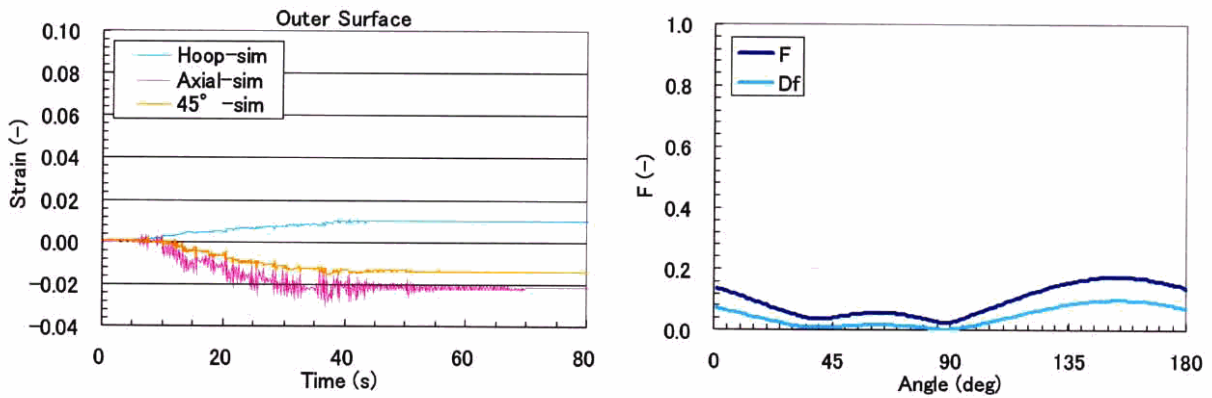


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.7.1-2 C12-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

図 3.7.1-3 C12-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)

3.7.2 平成 17 年度予備解析

平成 17 年度実施の予備解析を実施した。また実験が実施されたので実験結果と解析結果を比較していく。平成 17 年度は、下側のエルボが面内+面外曲げを受けるような配置である A21 (全て健全エルボ) と C22 (EL1 のみ減肉) である。図 3.7.2-1 に A21, 図 3.7.2-2 に C22 の動解析結果をそれぞれ示した。上から順に EL3 上部における加振方向の応答加速度の時刻歴波形, EL1 のエルボ開閉変位の時刻歴波形, 立ち上がり配管の下から 500mm での加振方向の応答変位の時刻歴波形, EL2 のエルボ開閉変位の時刻歴波形となっている。図 3.7.2-3, 5 はそれぞれ A21, C22 の EL1 の変形図 (変形拡大率 5 倍), 相当塑性ひずみ分布図 (外面), 相当塑性ひずみ分布図 (内面) である。図 3.7.2-4, 6 はそれぞれ A21, C22 のひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係である。図 3.7.2-6 のグラフについては、上から順に図 3.7.2-5 の図中 1,2,3 のひずみ集中箇所に対応している。図 3.7.2-7 は実験での C22 の破損箇所の写真である。余盛部で破損しているが、これは解析での予測点 1 と一致している。図 3.7.2-8 に EL1 が健全の場合の面内曲げ, 面外曲げ, 面内+面外曲げを受ける条件での F 値の比較を示した。図 3.7.2-9 は EL1 が減肉の場合である。赤い数字は実験での破損までの加振回数, 青い数字は一回加振の F 値を係数倍して算出した破損までの加振回数である。A11, A21 は実験で 20 回の加振を行っても破損に至らなかった。F 値を係数倍して算出する方法に、誤差が大きくなる要因があるので 3.8 で検証する。

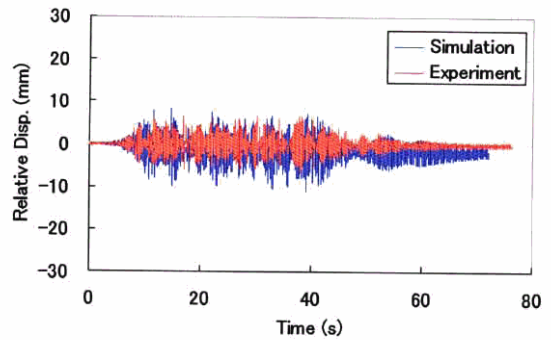
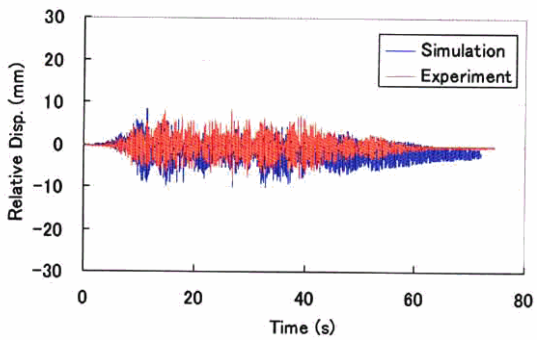
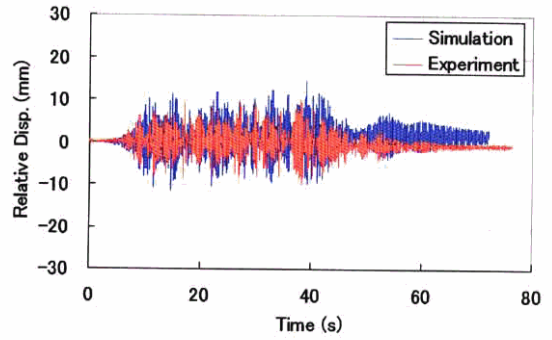
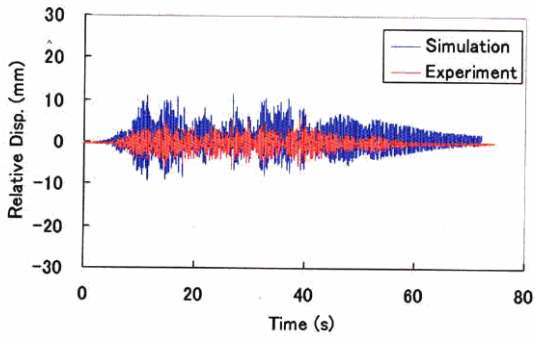
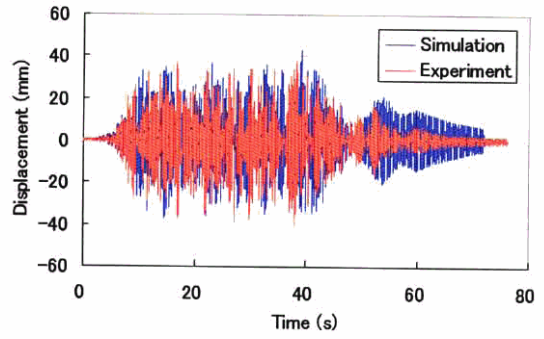
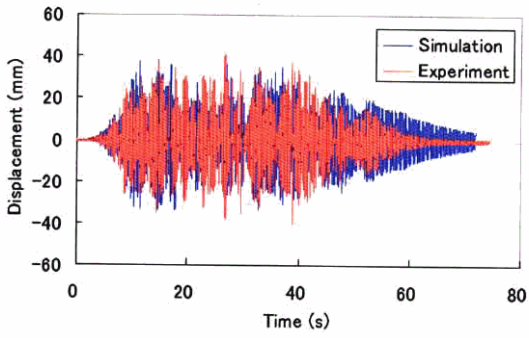
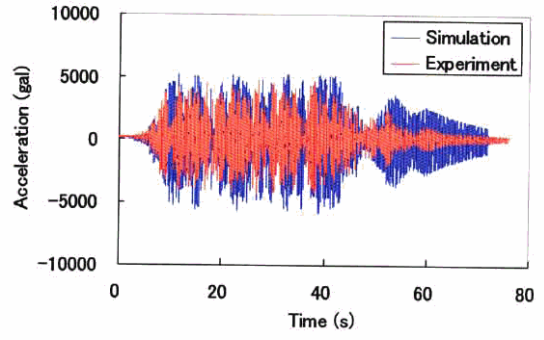
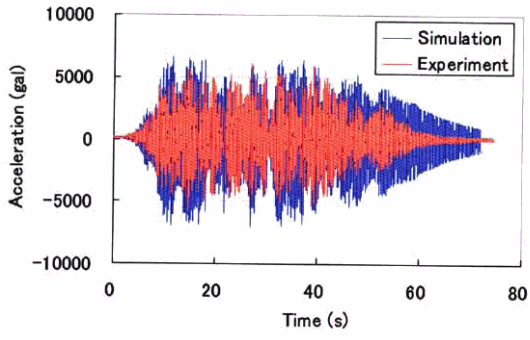
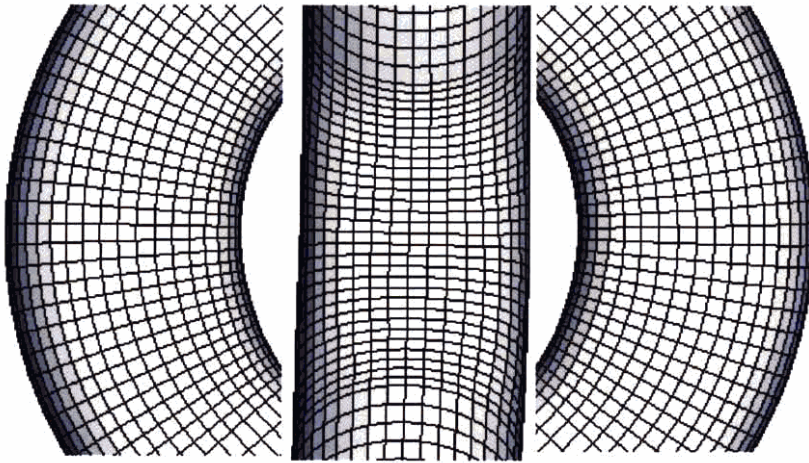
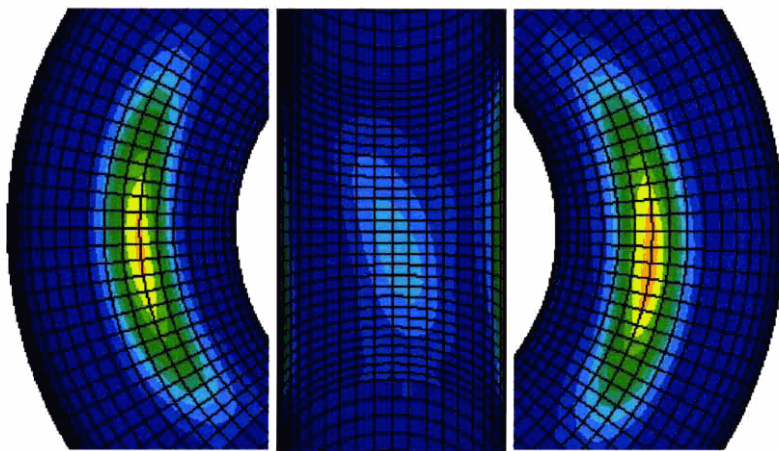


図 3.7.2-1 動解析結果 (A21)

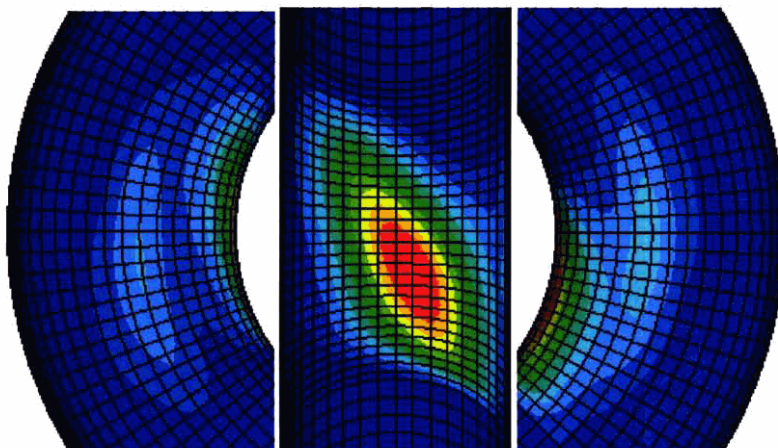
図 3.7.2-2 動解析結果 (C22)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

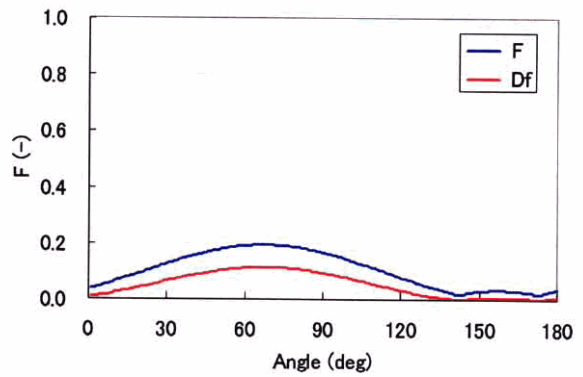
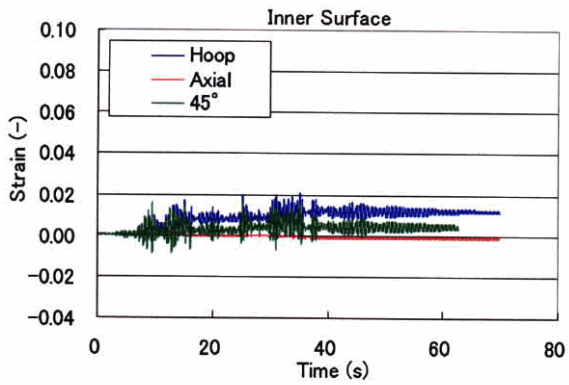
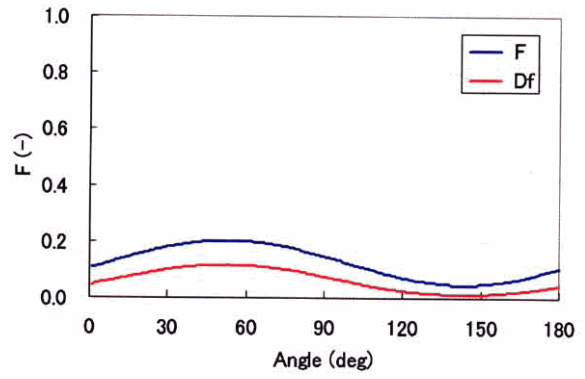
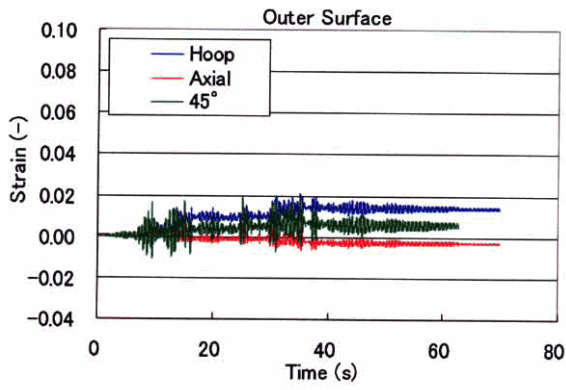


相当塑性ひずみ分布図 (外面)

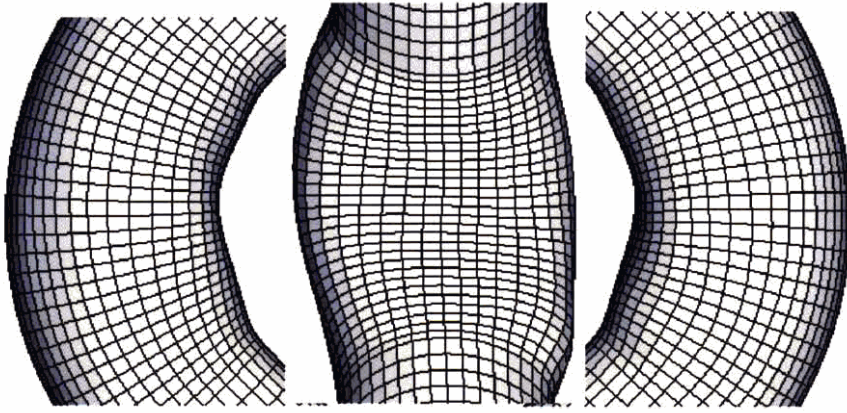


相当塑性ひずみ分布図 (内面)

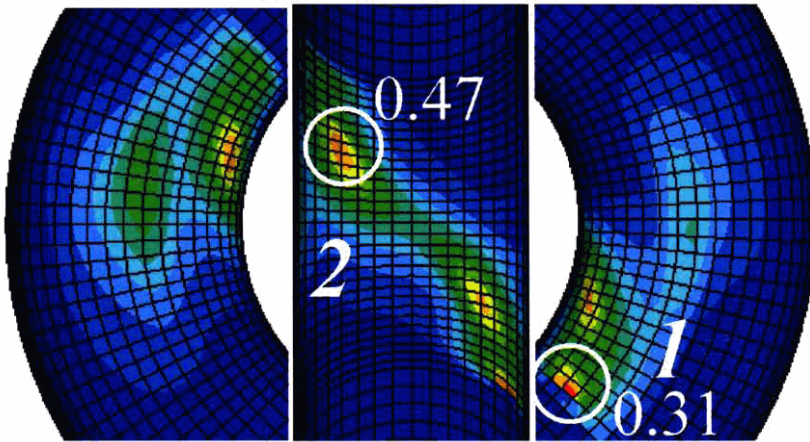
図 3.7.2-3 A21-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)



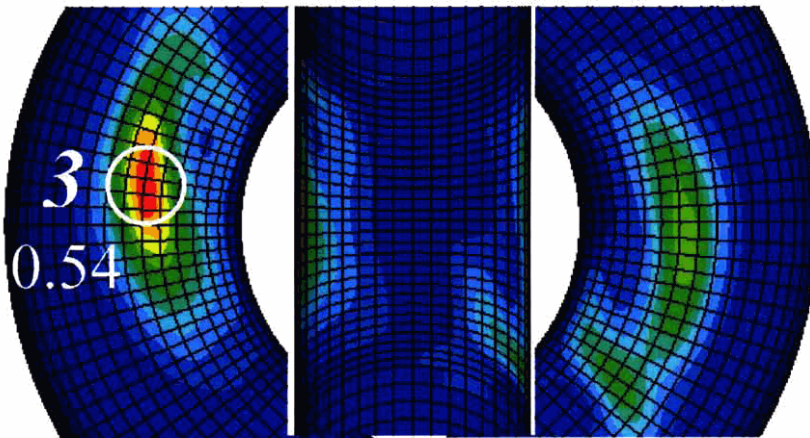
ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係
 図 3.7.2-4 A21-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

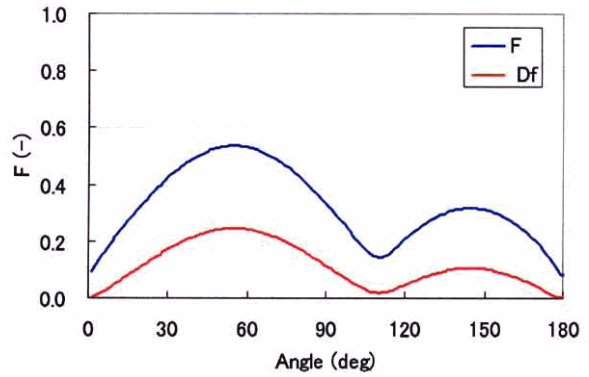
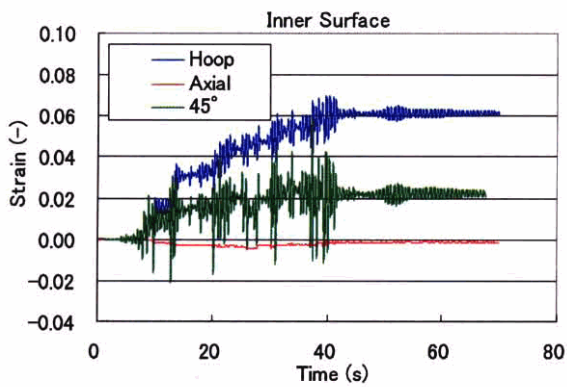
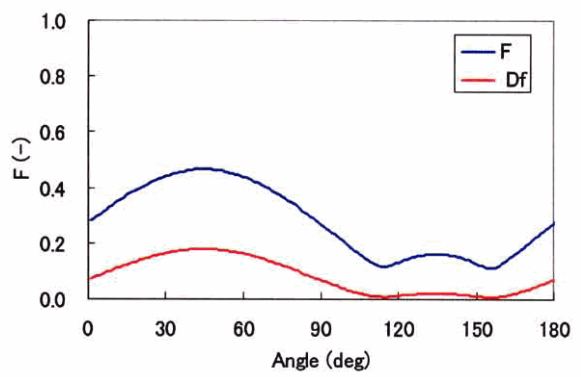
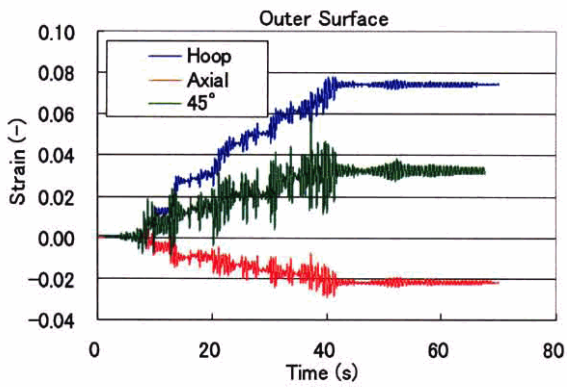
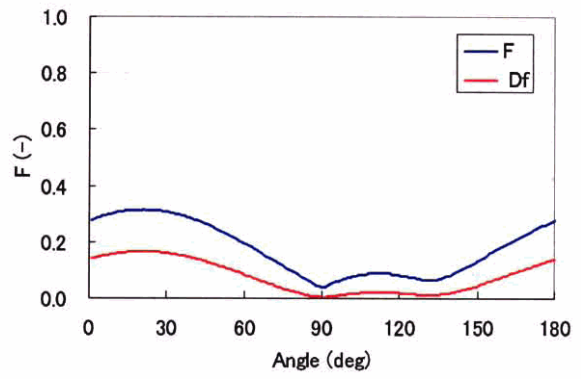
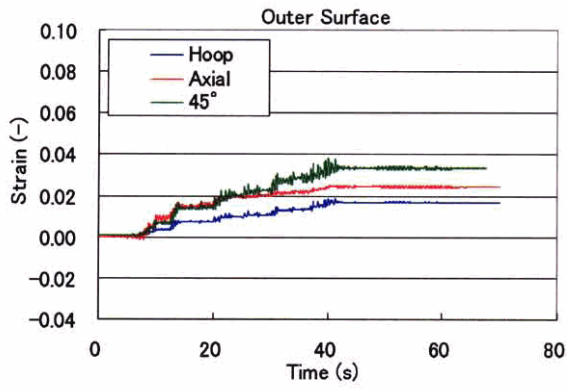


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 3.7.2-5 C22-EL1 の静解析結果 (変形図・コンター図)



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

図 3.7.2-6 C22-EL1 の静解析結果 (ひずみ履歴)

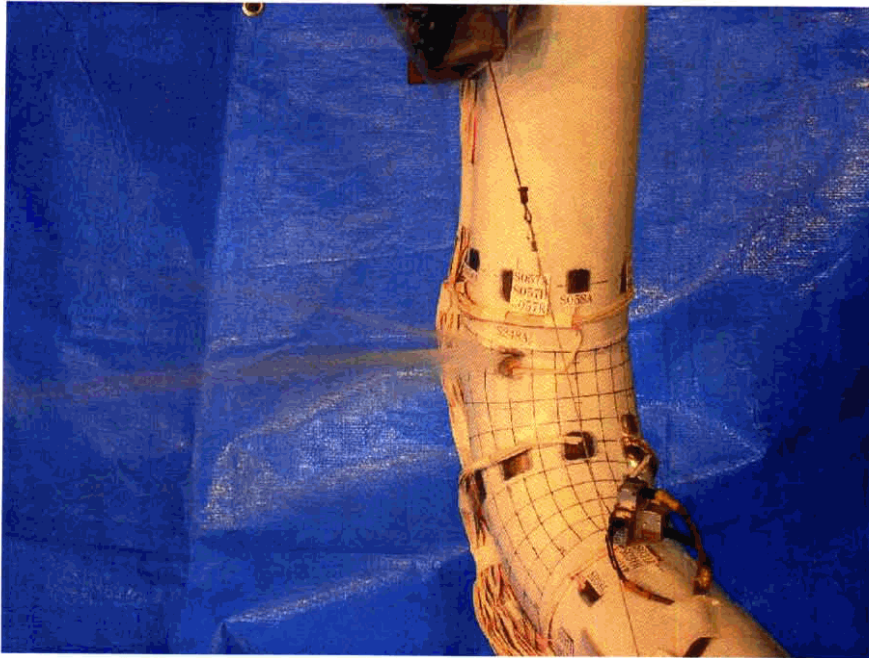


図 3.7.2-7 破損箇所 (C22, EL1)

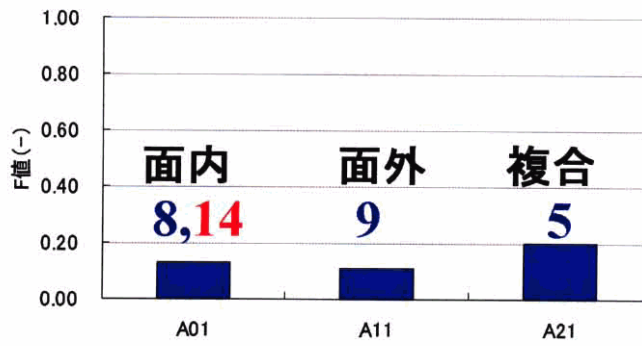


図 3.7.2-8 各条件の F 値 (EL1 : 健全)

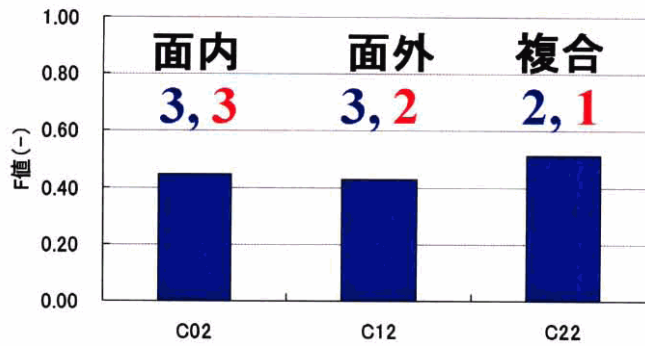
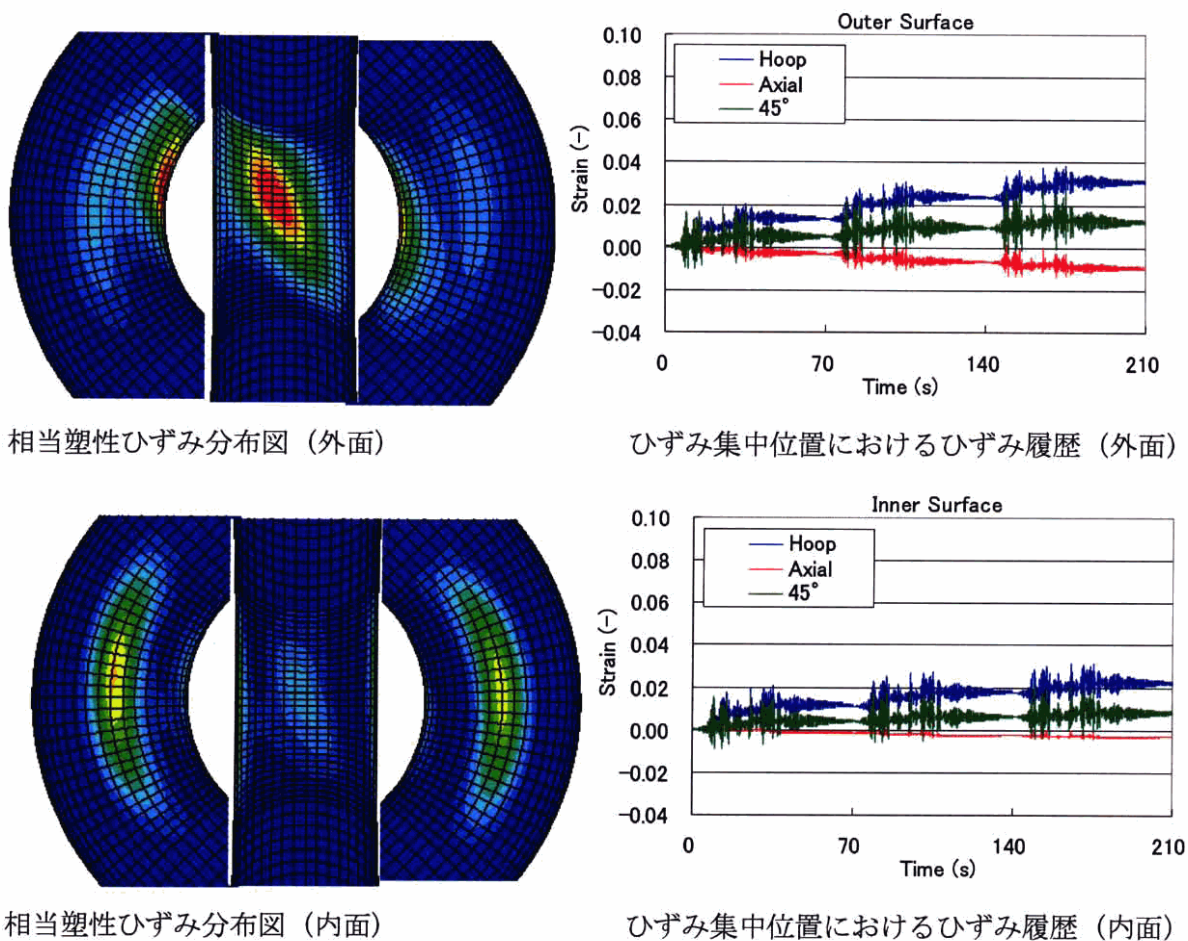


図 3.7.2-9 各条件の F 値 (EL1 : 減肉)

3.8 累積解析

累積解析として、1850gal の加振を連続で 3 回行った場合の F 値を算出した。図 3.8-1 は A21、図 3.8-2 は C22 の静解析結果である。左側に外面および内面での相当塑性ひずみ分布図、右側にひずみ集中位置におけるひずみ履歴を示した。図 3.8-3 に累積 F 値と加振回数との関係、図 3.8-4 に正規化した F 値と加振回数との関係を示した。正規化した F 値とは各加振ごとの F 値の増加分を 1 回目の加振の F 値で除したものである。このように線形の関係ではなく、加振回数を重ねるごとに F 値の増分は減少している。これまでは一回の加振での F 値を係数倍することによって複数回加振時の F 値を算出していたので、ここに誤差の原因があることが分かった。また、実験では 1400gal を 2 回実施してから 1850gal で加振しているのので、累積 F 値として解析すれば精度向上が可能であると考えられる。



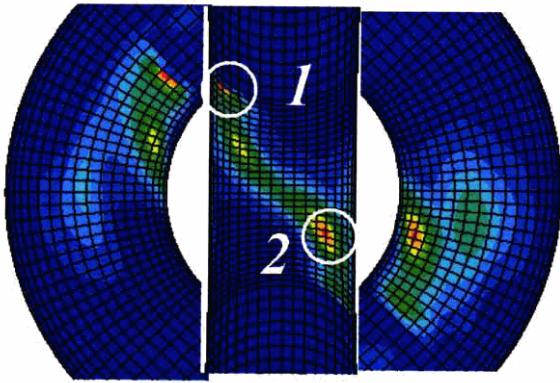
相当塑性ひずみ分布図 (外面)

ひずみ集中位置におけるひずみ履歴 (外面)

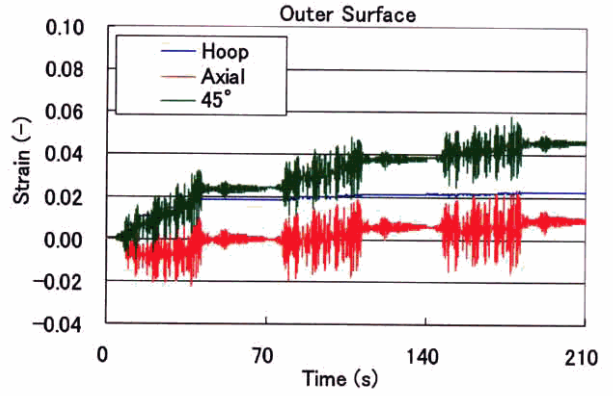
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

ひずみ集中位置におけるひずみ履歴 (内面)

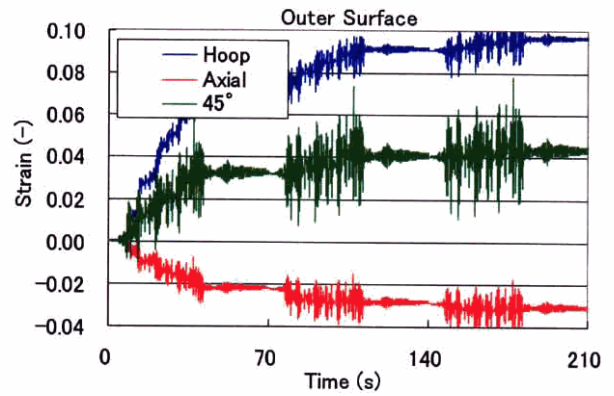
図 3.8-1 A21-EL1 の静解析結果



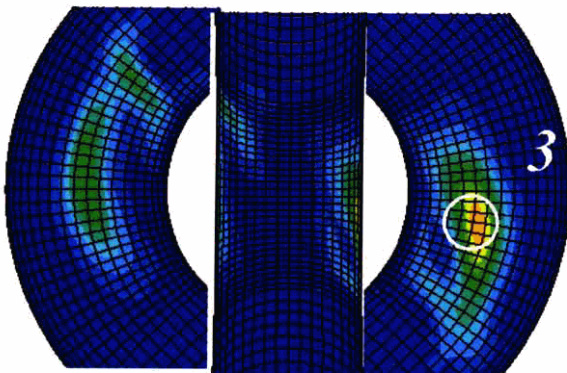
相当塑性ひずみ分布図（外面）



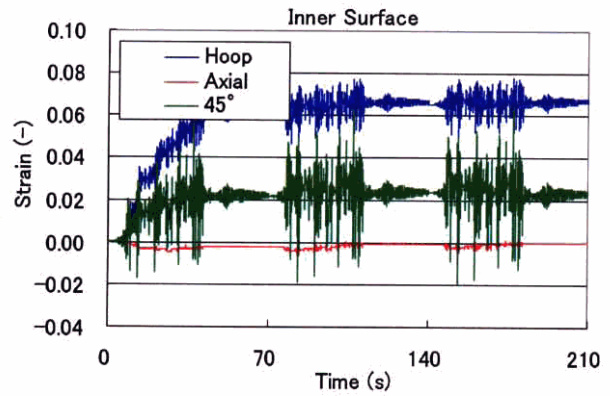
ひずみ集中位置におけるひずみ履歴（外面：1）



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴（外面：2）



相当塑性ひずみ分布図（内面）



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴（内面：3）

図 3.8-2 C22-EL1 の静解析結果

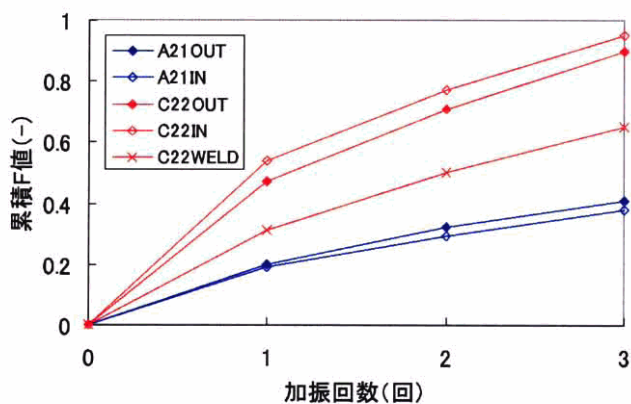


図 3.8-3 累積 F 値と加振回数の関係

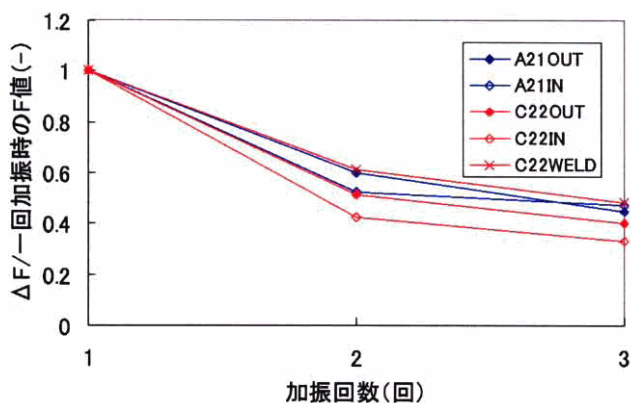


図 3.8-4 正規化した F 値と加振回数関係

3.9 精度検証

ここでは動解析の精度検証をしていく。図 3.9-1 から図 3.9-8 ではエルボ開閉変位の頻度分布を実験と解析で比較した。A01 については良く一致していると思われる。C01 は 2 箇所のエルボが減肉している場合であるが 35mm 以上の高い応答（時刻歴波形で所々に見られるスパイク）が再現できていない。C02, C03 は一箇所が減肉している場合であるが、健全エルボでの解析結果が実験結果より大きく出る傾向にある。図 3.9-9 に最大値と最小値の差の誤差率を示した。A01 はよく一致しているが C01 では両エルボとも解析結果が小さく、C02 と C03 では健全エルボの解析結果が大きくなっている。このことより、解析モデルでは減肉部への変形の集中が実際より少ないと考えられる。

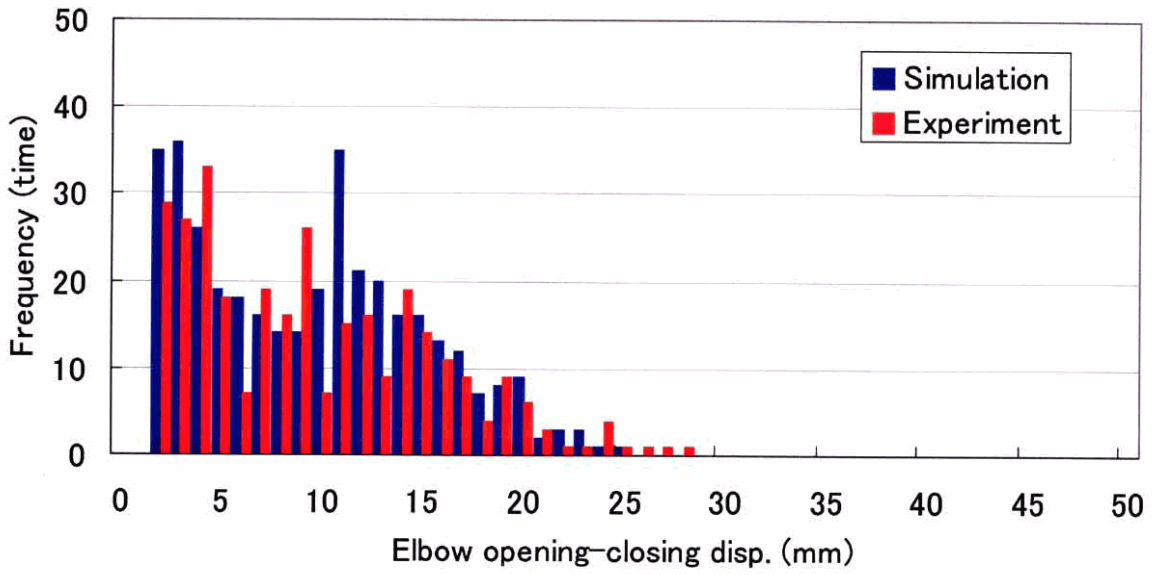


図 3.9-1 エルボ開閉変位の頻度分布 (A01, EL1)

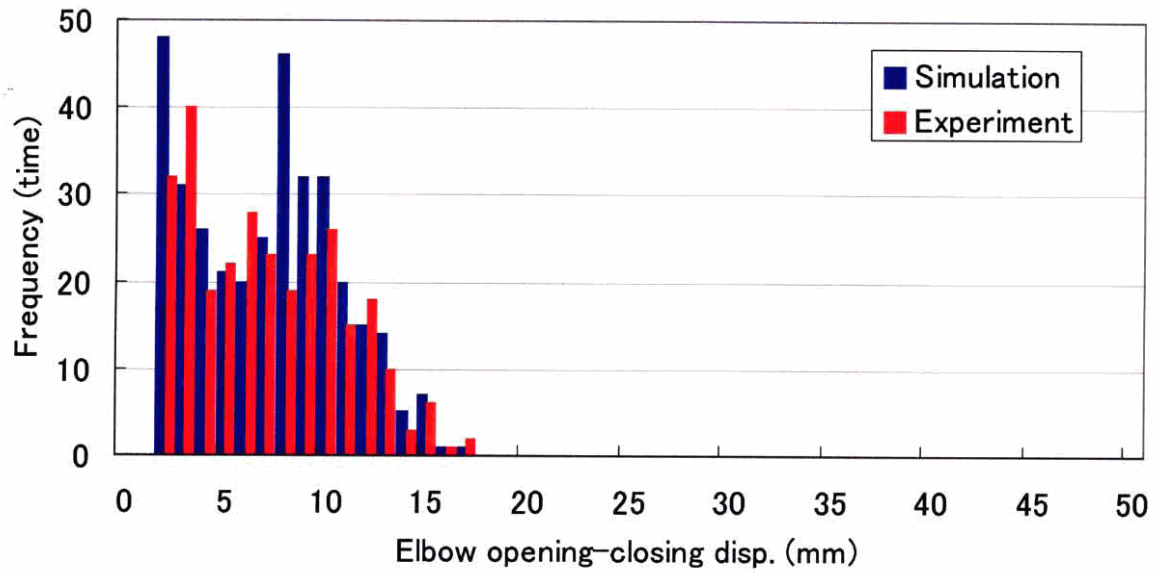


図 3.9-2 エルボ開閉変位の頻度分布 (A01, EL2)

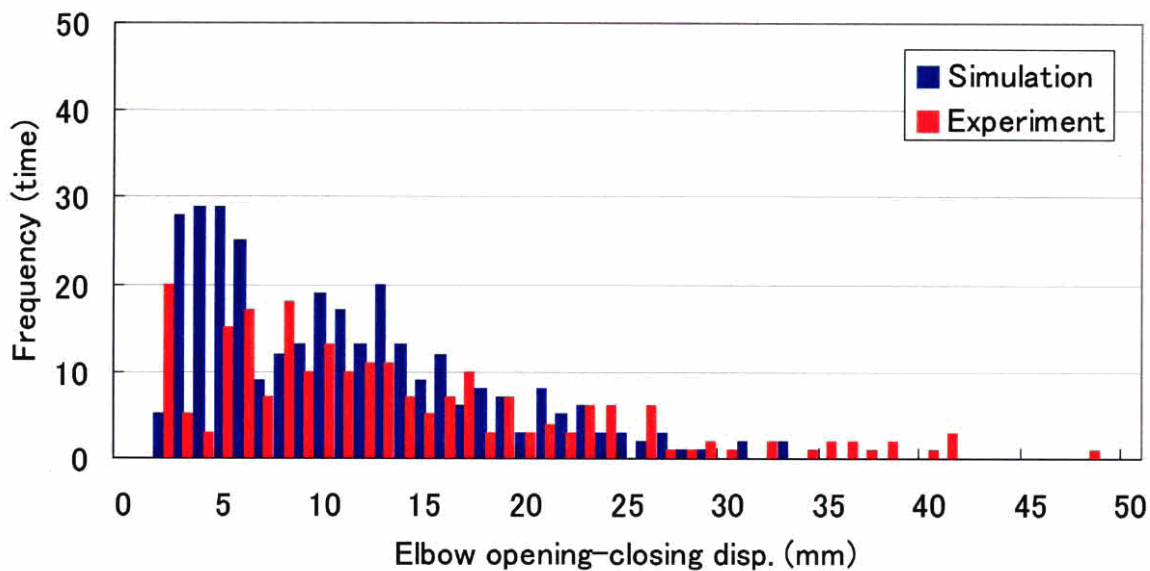


図 3.9-3 エルボ開閉変位の頻度分布 (C01, EL1)

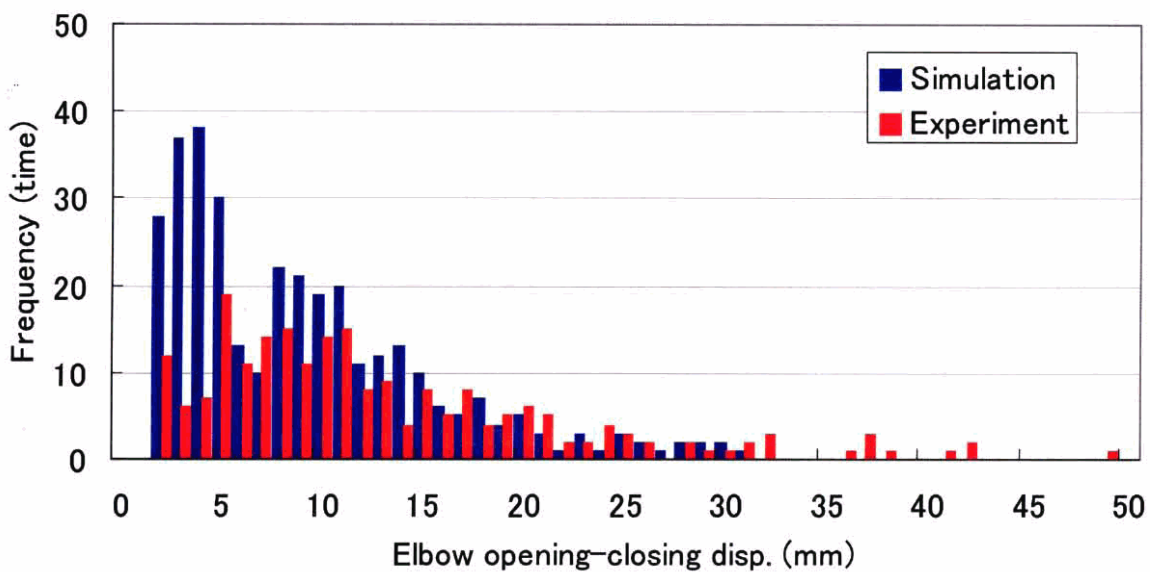


図 3.9-4 エルボ開閉変位の頻度分布 (C01, EL2)

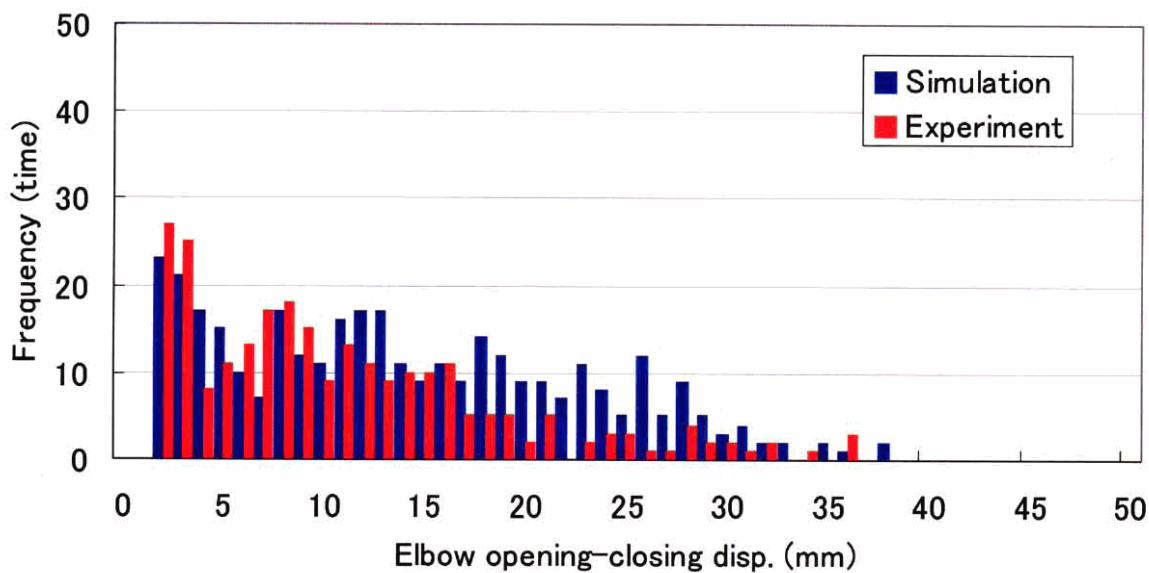


図 3.9-5 エルボ開閉変位の頻度分布 (C02, EL1)

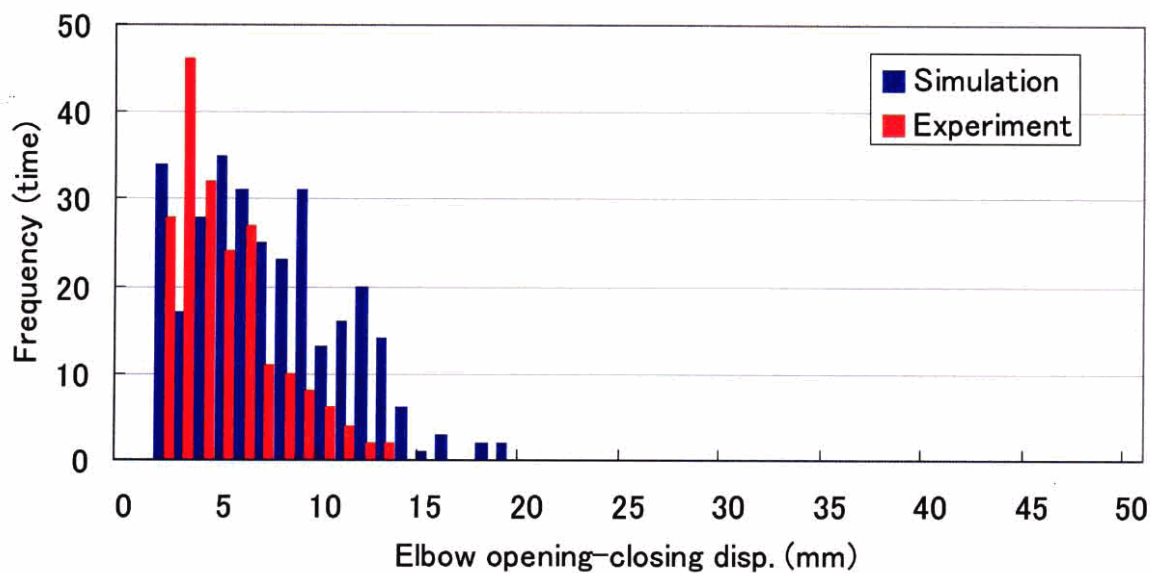


図 3.9-6 エルボ開閉変位の頻度分布 (C02, EL2)

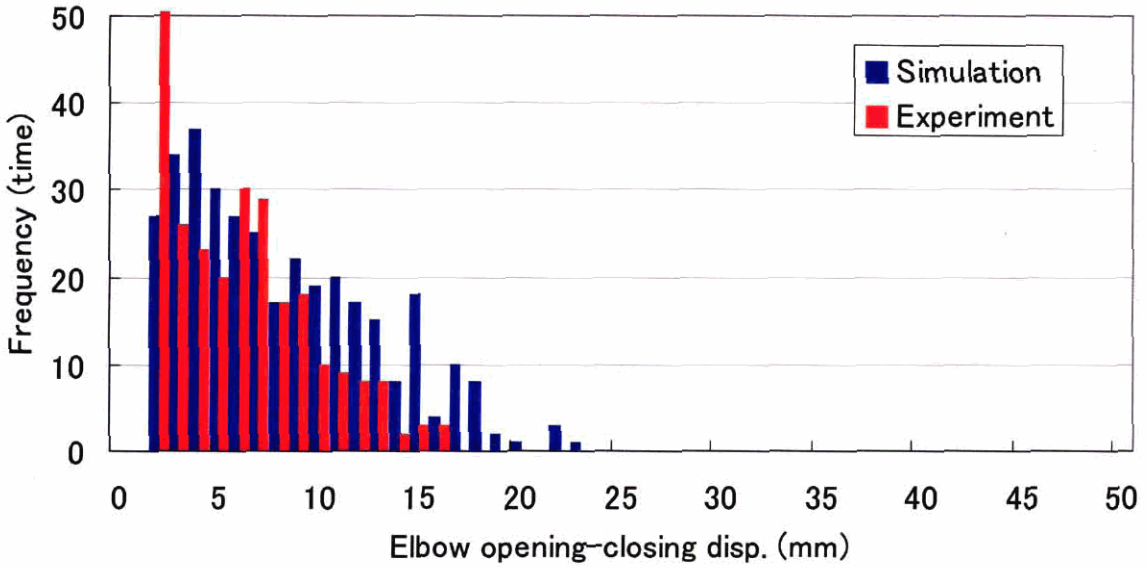


図 3.9-7 エルボ開閉変位の頻度分布 (C03, EL1)

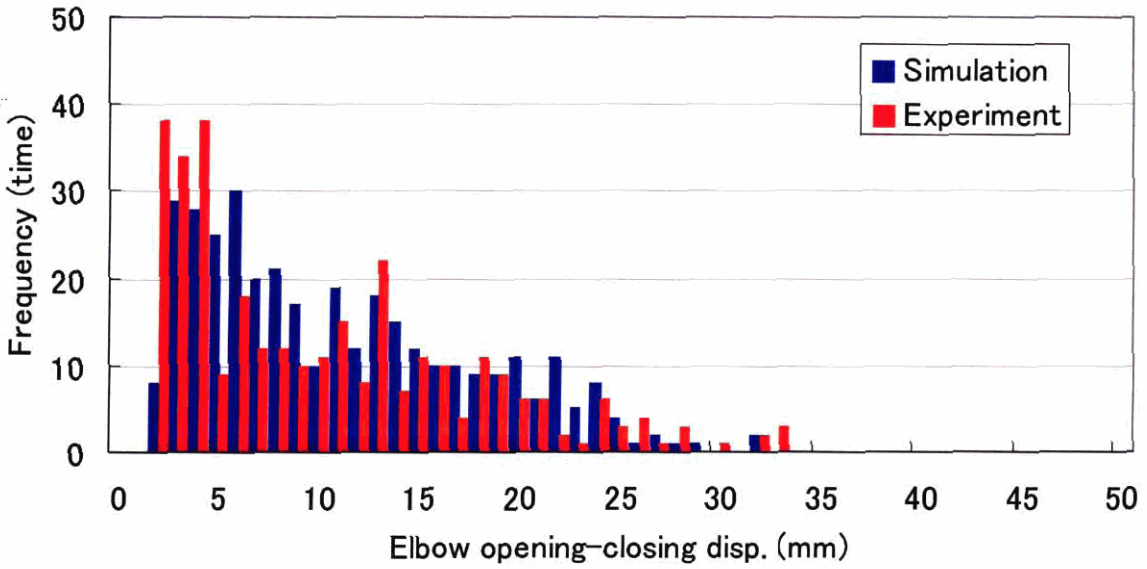


図 3.9-8 エルボ開閉変位の頻度分布 (C03, EL2)

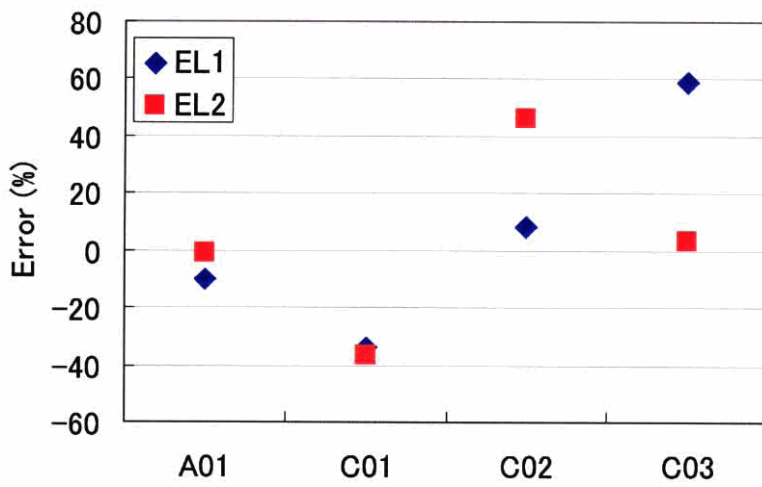


図 3.9-9 各条件における最大値—最小値の誤差率

第4章 パラメトリック解析

4.1 解析概要

図 4.1-1 のように θ を取り，下の配管の配置を θ が 0° ， 15° ， 30° ， 45° ， 60° ， 75° ， 90° の場合について解析を行う．EL1 は 50%減肉で，EL2 は健全である．

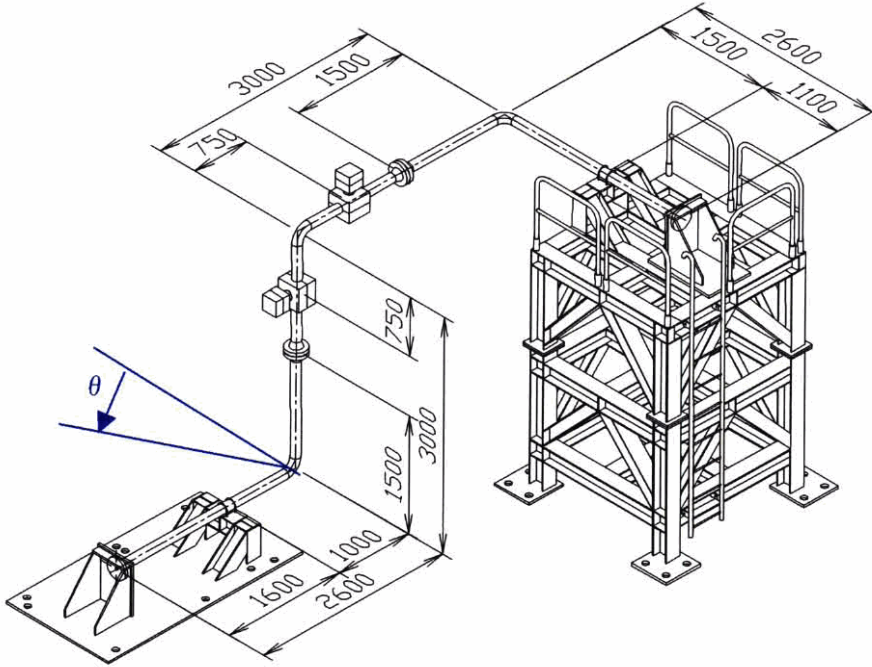


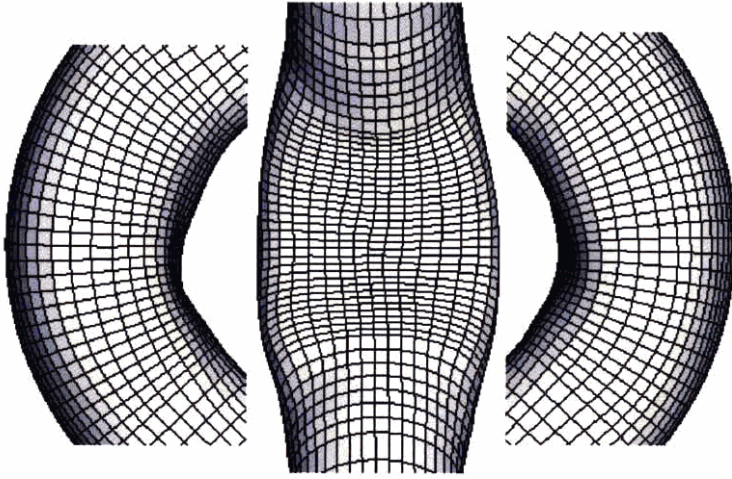
図 4.1-1 試験体概略図

4.2 解析結果

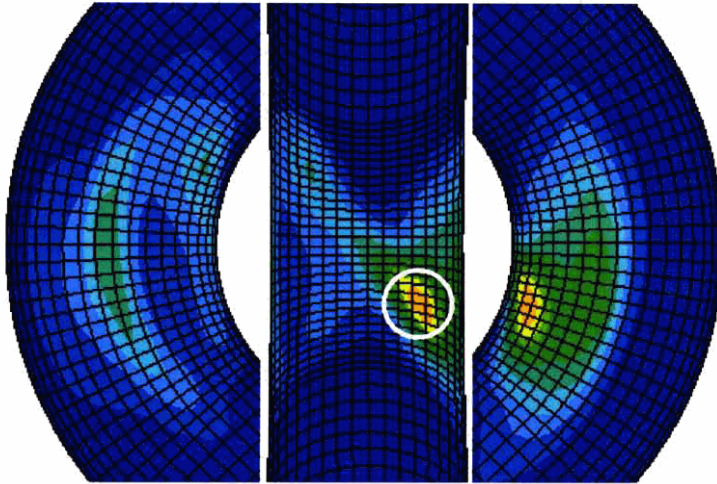
図 4.2-10 に各角度における一回の加振での疲労寿命を示した．図 4.2-1 から図 4.2-9 に 15° ， 30° ， 60° ， 75° の EL1 の変形図（変形拡大率 5 倍），相当塑性ひずみ分布図（外面），相当塑性ひずみ分布図（内面）およびひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係を示した． 0° ， 45° ， 90° はそれぞれ C02，C22，C12 に対応しているので結果は 3.4 を参照されたい．図 4.2-7 より 75° ではエルボの腹にひずみ集中箇所が見られる．これは加振開始後 40 秒付近でラチェットした結果である．図 4.2-9 に 20 秒での相当塑性ひずみ分布図を示した．この段階では兆候はあるものの最終的に最大の相当塑性ひずみとなった部分の値はまだ小さい．図 4.2-8 のひずみ履歴からも 40 秒付近でひずみ集中箇所が遷移したことが確認できる．

4.3 結論

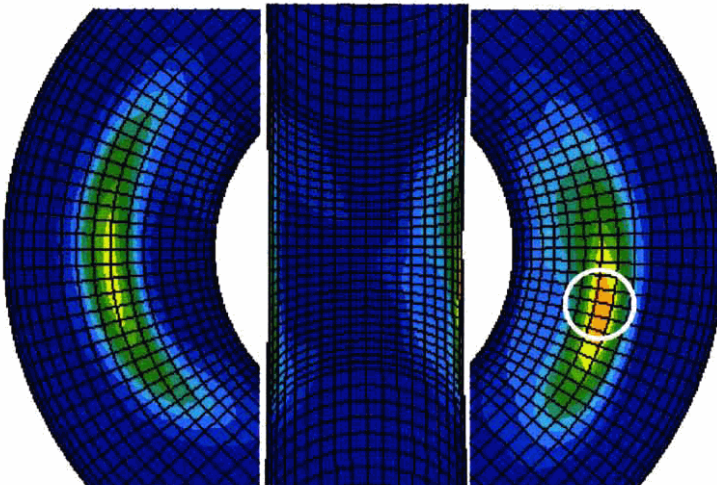
いままで面内曲げが最も危険であると考えられていたが，今回パラメトリック解析を実施した結果，面内曲げや面外曲げよりも加振方向から 15° ， 30° ， 75° ずれている条件で F 値が大きくなった． 75° の結果が高くなっているがこれはエルボの腹でラチェットが生じた為である．実際にこのような現象が生じるならばかなり短寿命となってしまふ．どのような場合に生じるのかを検討することは今後の重要な課題である．



変形図（変形拡大率 5 倍）

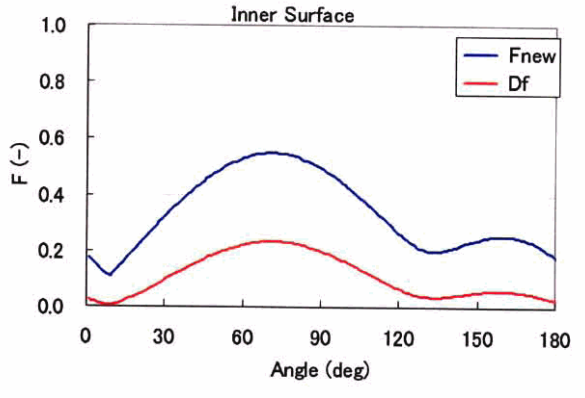
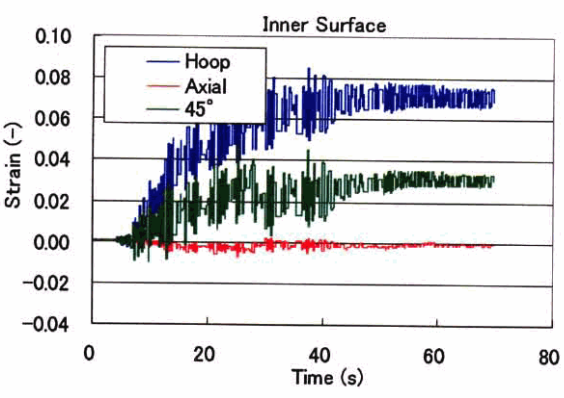
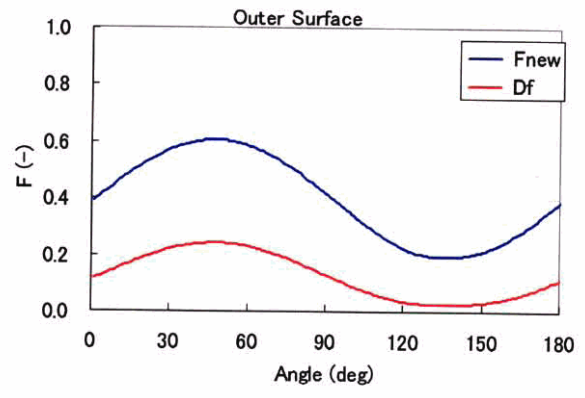
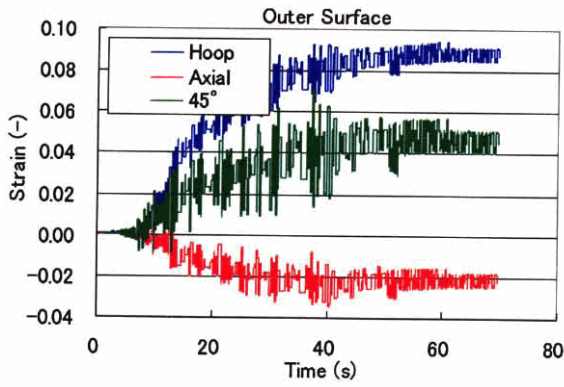


相当塑性ひずみ分布図（外面）



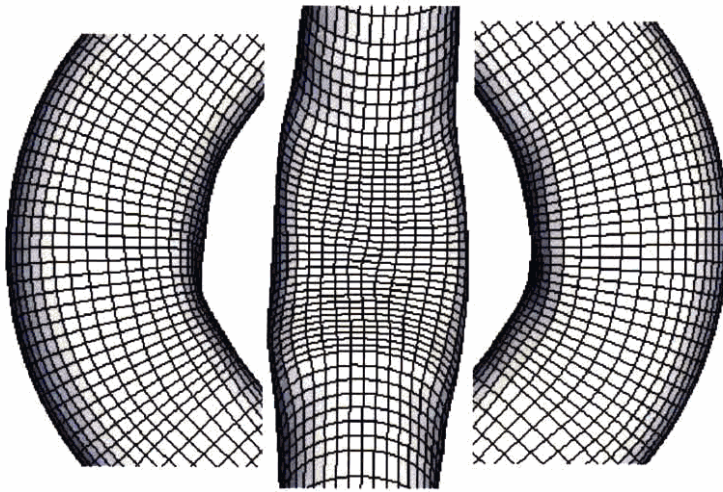
相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 4.2-1 15° の静解析結果（変形図・コンター図）

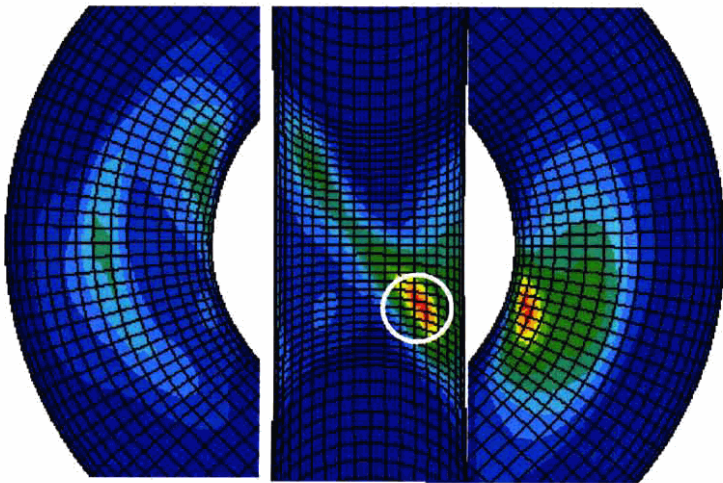


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

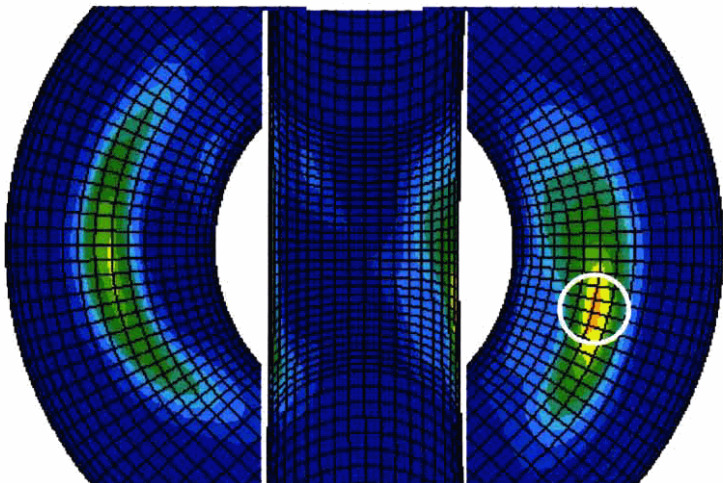
図 4.2-2 15° の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

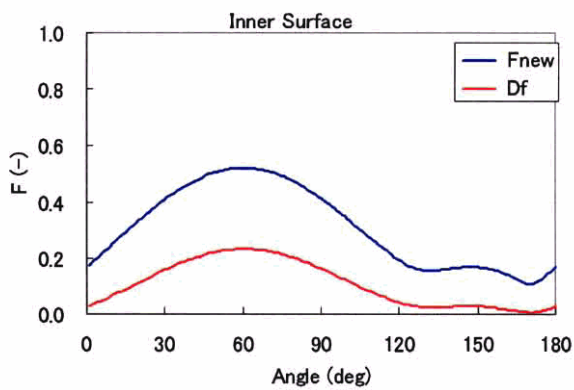
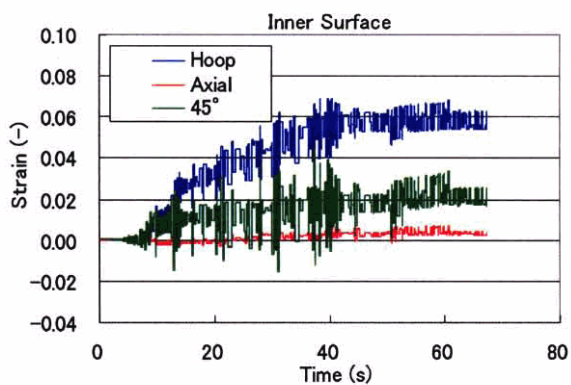
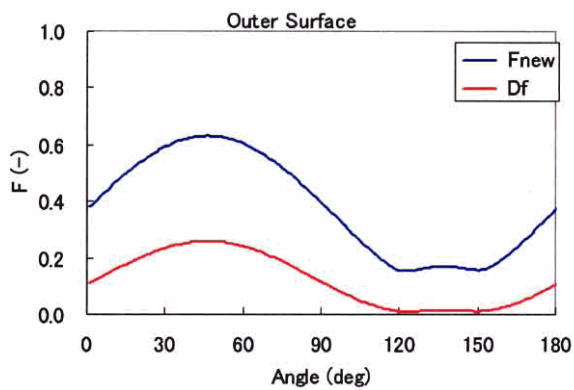
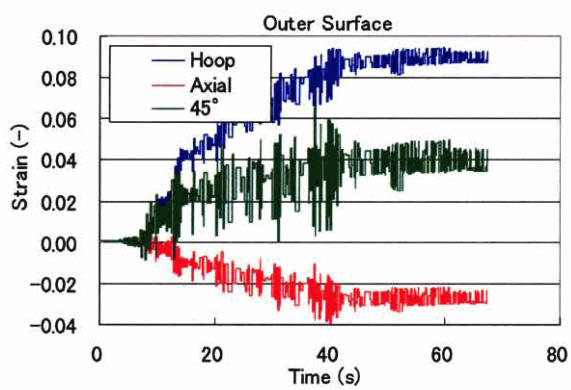


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



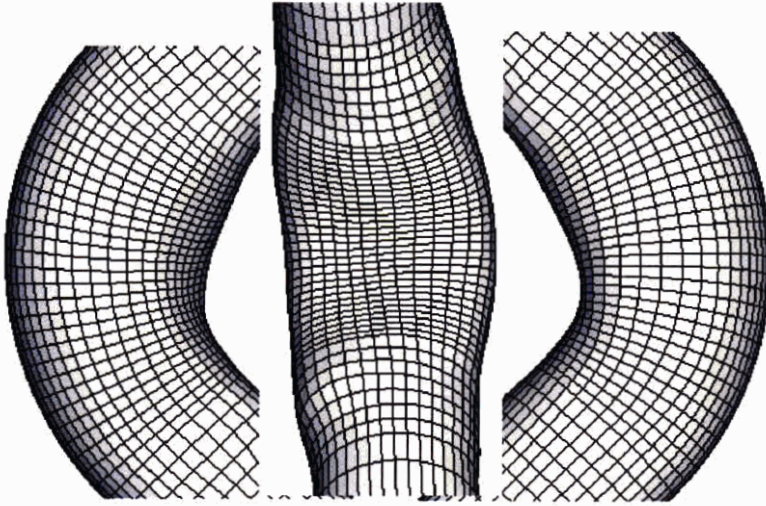
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 4.2-3 30° の静解析結果 (変形図・コンター図)

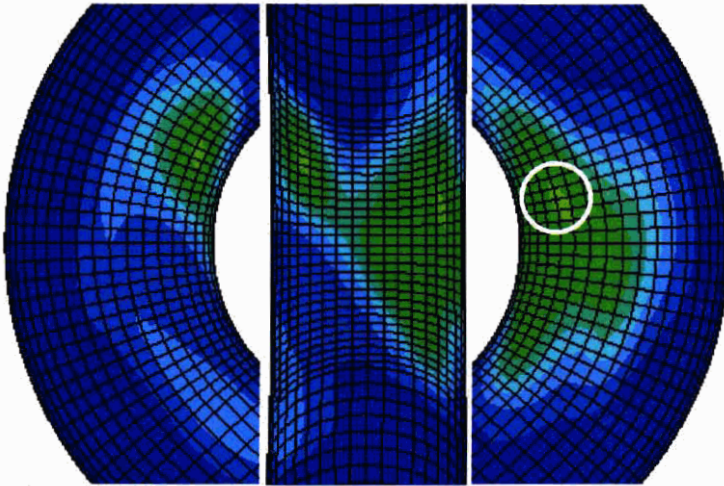


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

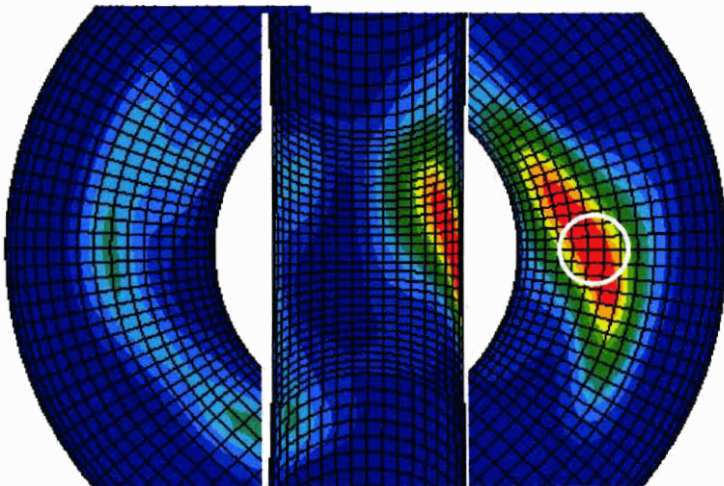
図 4.2-4 30° の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図 (変形拡大率 5 倍)

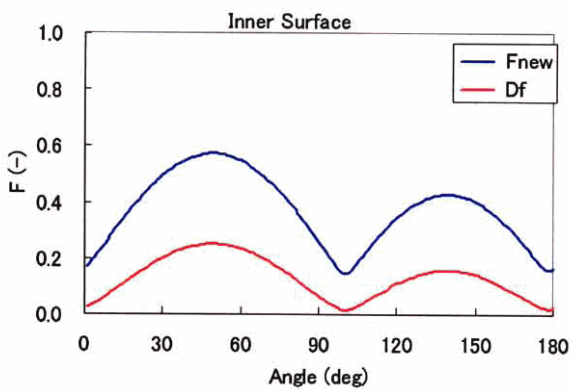
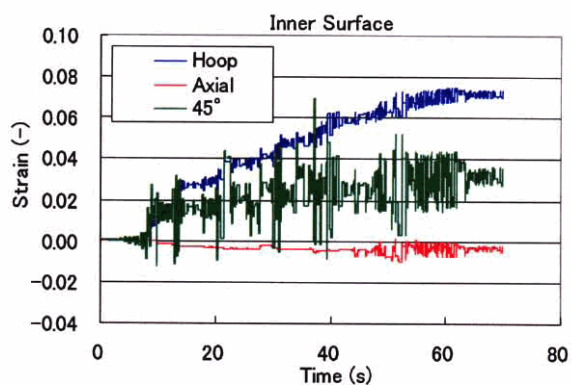
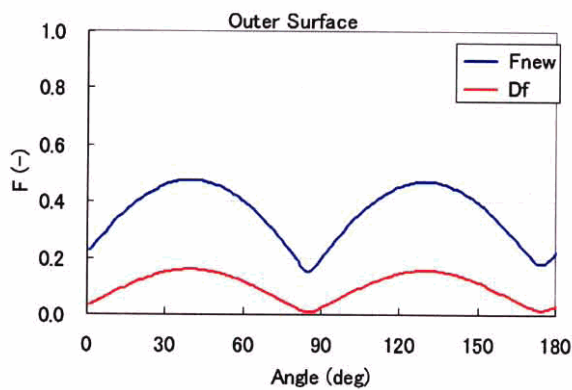
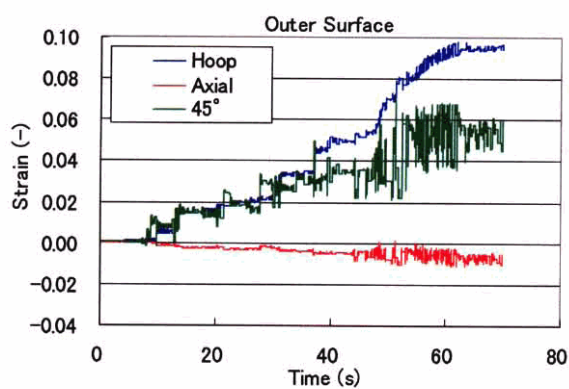


相当塑性ひずみ分布図 (外面)



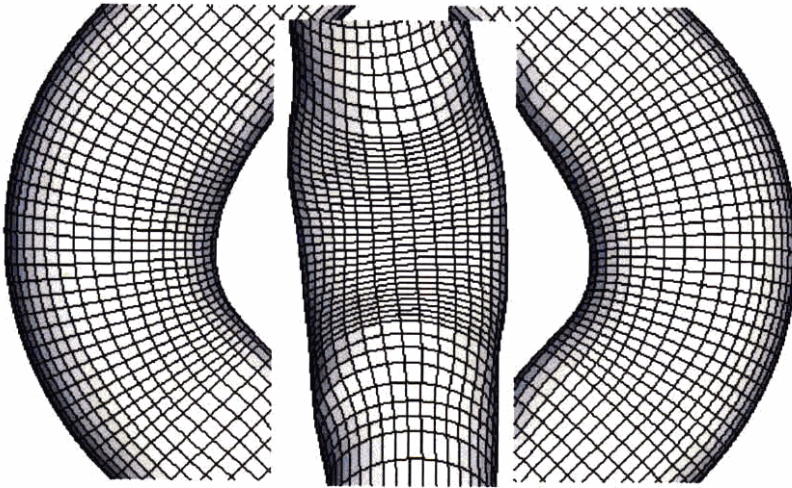
相当塑性ひずみ分布図 (内面)

図 4.2-5 60° の静解析結果 (変形図・コンター図)

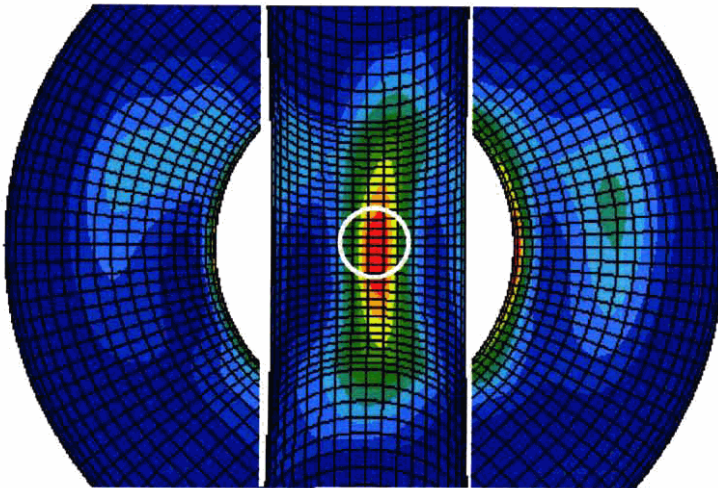


ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

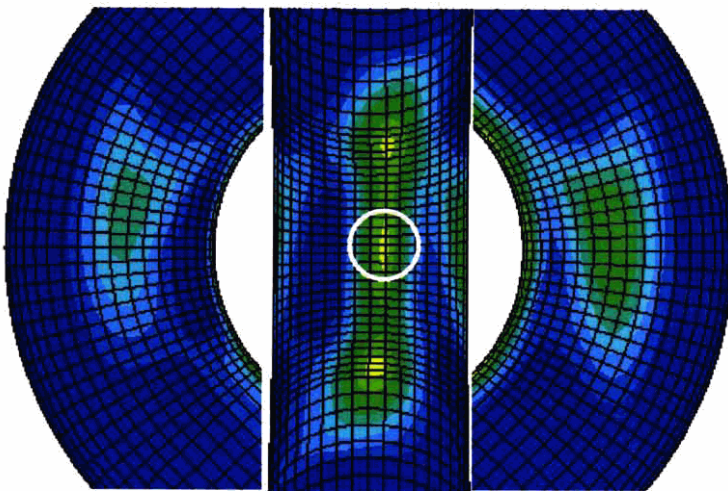
図 4.2-6 60° の静解析結果 (ひずみ履歴)



変形図（変形拡大率5倍）

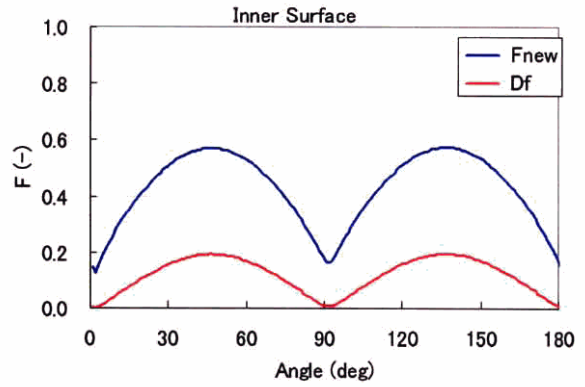
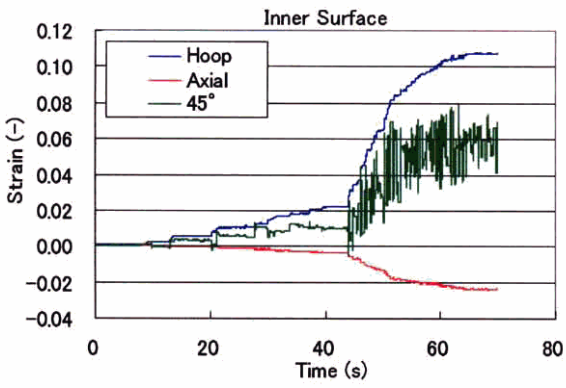
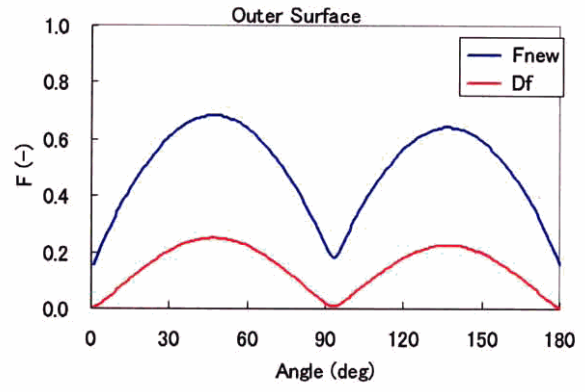
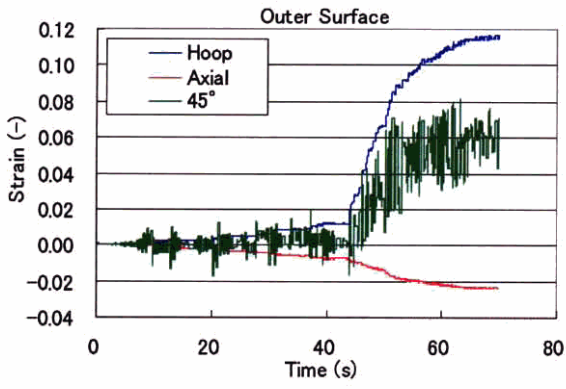


相当塑性ひずみ分布図（外面）



相当塑性ひずみ分布図（内面）

図 4.2-7 75° の静解析結果（変形図・コンター図）



ひずみ集中位置におけるひずみ履歴と F 値と角度の関係

図 4.2-8 75° の静解析結果 (ひずみ履歴)

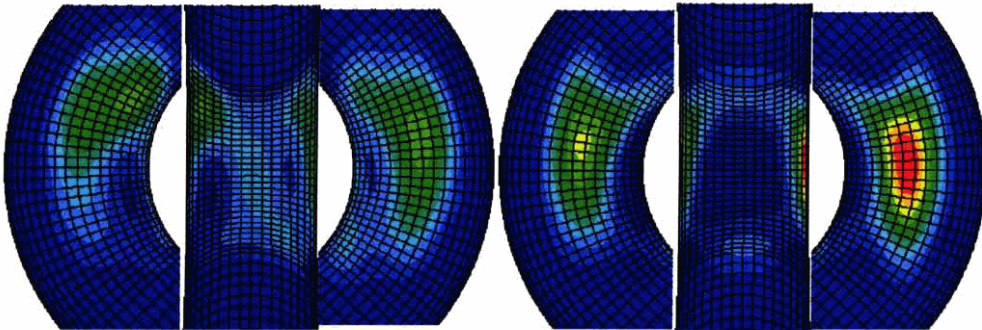


図 4.2-9 75° の 20 秒での静解析結果 (コンター図)

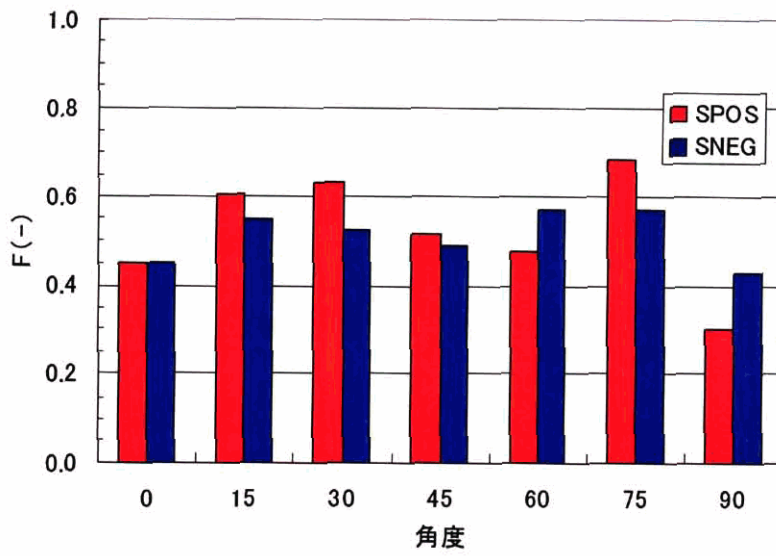


図 4.2-10 各角度における一回の加振での疲労寿命

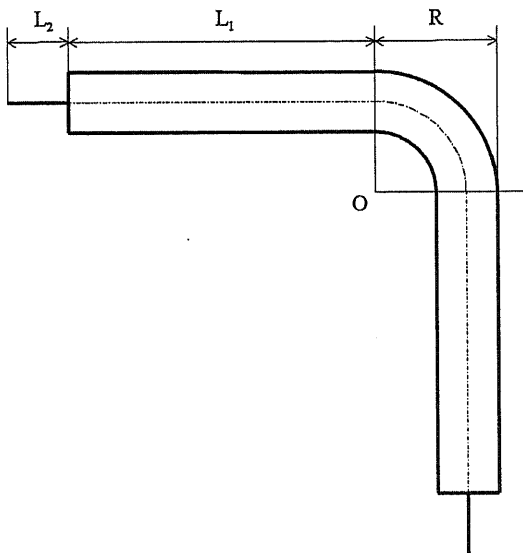
第5章 裕度評価

5.1 概要

ここでは現行の設計指針の妥当性を評価する。すべて弾性計算により成立している設計指針が、非線形領域に対して適切な評価をするのか、また安全であると判断された場合、どの程度の裕度を含んでいるのかを評価する。一方で、設計指針の一部は現行の維持基準としても用いられ、設計指針の妥当性を評価することは重要な問題である。

評価対象として減肉したエルボを取り挙げる。まず、エルボが設計指針により規定される必要最小肉厚まで減肉したと仮定する。口径は規格 100A, 200A とする。配管の形状は 100A の場合は代表的な寸法を 200A の場合の半値とする。図 5.1-1 に試験体の形状を示す。表 5.1-1 に必要最小肉厚の計算結果を示す。そのエルボが片端ピン固定、他端強制変位の繰返し面内曲げを受けるものとする。設計指針により算出される許容繰返し数と、エルボの解析モデルが算出する破損回数を比較する。また軸方向の減肉角度を 65° の場合、 90° の場合、さらに直管部まで減肉した場合 (120° とする)、合計 3 種類挙げて、その影響を考察した。図 5.1-2 に想定した軸方向変化に変化させた肉厚分布図を示す。内圧は実験に従い $9.8[\text{MPa}]$ を負荷されているものとする。

設計規定により算出される許容繰返し数を N_{design} とし、解析により算出される破損回数を N_{analysis} とする。そして $N_{\text{design}}/N_{\text{analysis}}$ を安全裕度とする。



	100A	200A
直管部長さ L_1	537.6[mm]	1075.2[mm]
剛体部長さ L_2	135[mm]	270[mm]
回転半径 R	152.4[mm]	304.8[mm]

Fig.5.1-1 試験体の形状

表 5.1-1 必要最小肉厚

規格	100A	200A
外径 D_0	114.3[mm]	216.3[mm]
内圧 p	9.8[MPa]	9.8[MPa]
設計応力強さ S_m^*	184[MPa]	184[MPa]
健全部肉厚	8.6[mm]	12.7[mm]
必要最小肉厚 t_n	2.98[mm]	5.64[mm]
減肉率	65[%]	56[%]

$$\text{必要最小肉厚の算出式 } t_n = \frac{pD_0}{2S_m + 0.8p}$$

$$* \cdot S_m = \min (2/3S_y , 1/3S_u)$$

S_y : 降伏応力=362[MPa] S_u : 引張り強さ=553[MPa]

上記の値は実験にて使用された鋼材の、引張り試験の結果による

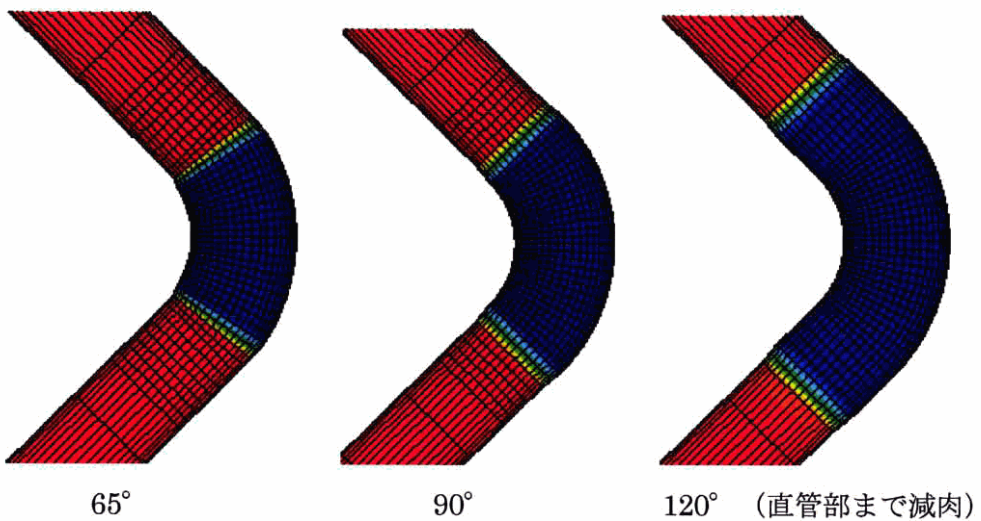


Fig.5.1-2 軸方向減肉角度

5.2 設計評価手法

ここでは、5.1 で想定した問題に対し、設計指針にて規定される手法にて許容繰返し回数を算出する。設計指針を適用する配管は健全試験体とする。まず、設定する入力レベルは以下に示す一次+二次応力 S_n が、設計応力強さの 10 倍の $10S_m$ となるように設定し、A 点でのモーメント全振幅 M_{is} と、それに付随する入力変位を求める。

モーメント全振幅 M_{is} を算出するために、単調载荷を行い図 5.2-1 の A 点でのモーメント M —変位関係を導く。また、そのモーメントは非線形領域においても弾性域での入力変位に対し線形を保つものとする。これを仮想弾性モーメントと呼ぶ。その入力変位—仮想弾性モーメント関係の導出には FEM モデルを使用する。 M_{is} はエルボ開閉時のモーメントの全振幅とされているため、仮想弾性モーメントの値を二倍することにより算出した。そのモーメント全振幅 M_{is} の値を用い以下の式によりピーク応力 S_1 を算出し、図 5.2-2 の設計疲れ線図により、設計での許容繰返し数を求めた。

この設計指針に従い設計された配管系が減肉した場合、地震などの外部荷重であるモーメント全振幅 M_{is} は低下せず、断面係数 Z_i のみの低下が予想される。すると、ピーク応力 S_1 は増加し許容繰返し数は減少する。しかし、ここではそれらを考慮せず、設計規定での減肉配管の許容繰返し数は健全配管の許容繰返し数と同じであるとして比較を行う。

設計指針にて算出された許容繰返し数は 100A、200A とも、 $10S_m$ レベルで 16 回となった。

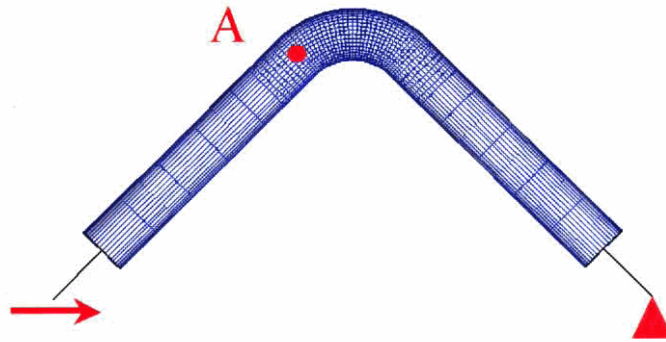


図 5.2-1 モーメント—変位関係の算出点

一次+二次応力の計算

$$S_n = \frac{C_2 M_{is}}{Z_i} \quad C_2 = \frac{1.95}{h^{\frac{2}{3}}} \quad h = \frac{tR}{r^2}$$

(Z_i : 断面係数, h : bend factor, t : 肉厚, R : 回転半径, r : 断面の半径)

ピーク応力の計算

$$S_l = \frac{S_p}{2n} \quad S_p = \frac{K_2 C_2 M_{is}}{Z_i} \quad K_e = 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left(\frac{S_n}{3S_m} - 1 \right)$$

$n=0.3, m=1.7$

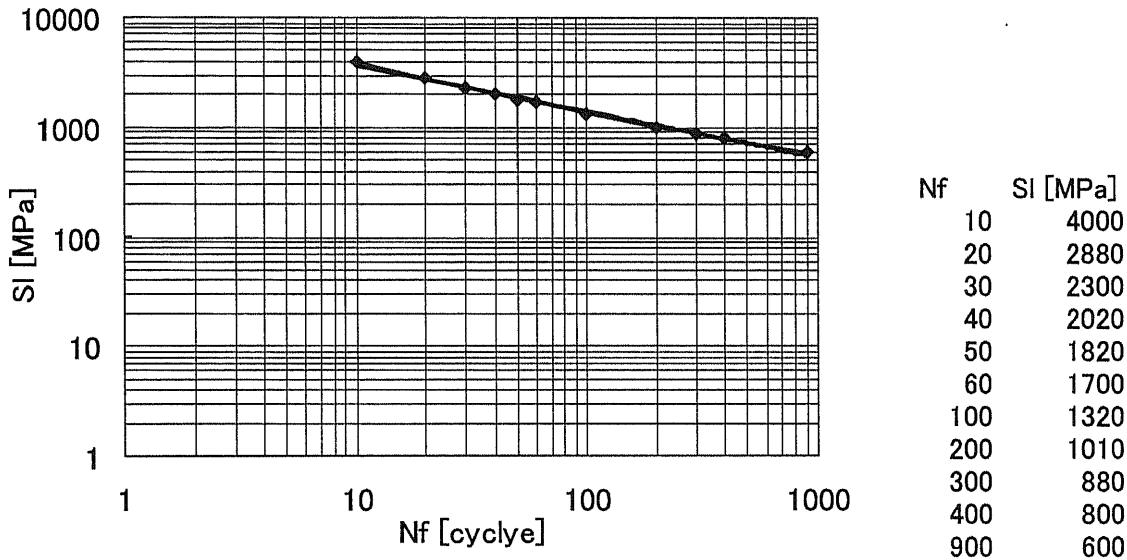


図 5.2-2 設計疲れ線図

5.3 解析評価手法

入力変位の決定方法は次の通りである。

図 5.3-1 に各試験ケースに対する繰返し入力変位の設定方法を示す。これは 100A の場合に解析モデルにより求められたグラフであり、縦軸は仮想弾性モーメント、横軸は入力変位となっている。健全配管 $10S_m$ 相当の仮想弾性モーメントは $20.0[\text{kNm}]$ と算出され、このモーメントは減肉した場合でも一定であると見做し、減肉配管に対し入力すべき片振幅変位を決定した。実際は圧縮側も含めるので、その値を 2 倍して全振幅とし、繰返し入力変位とした。算出した繰返し入力変位の値（片振幅）を表 5.3-1 に示す。

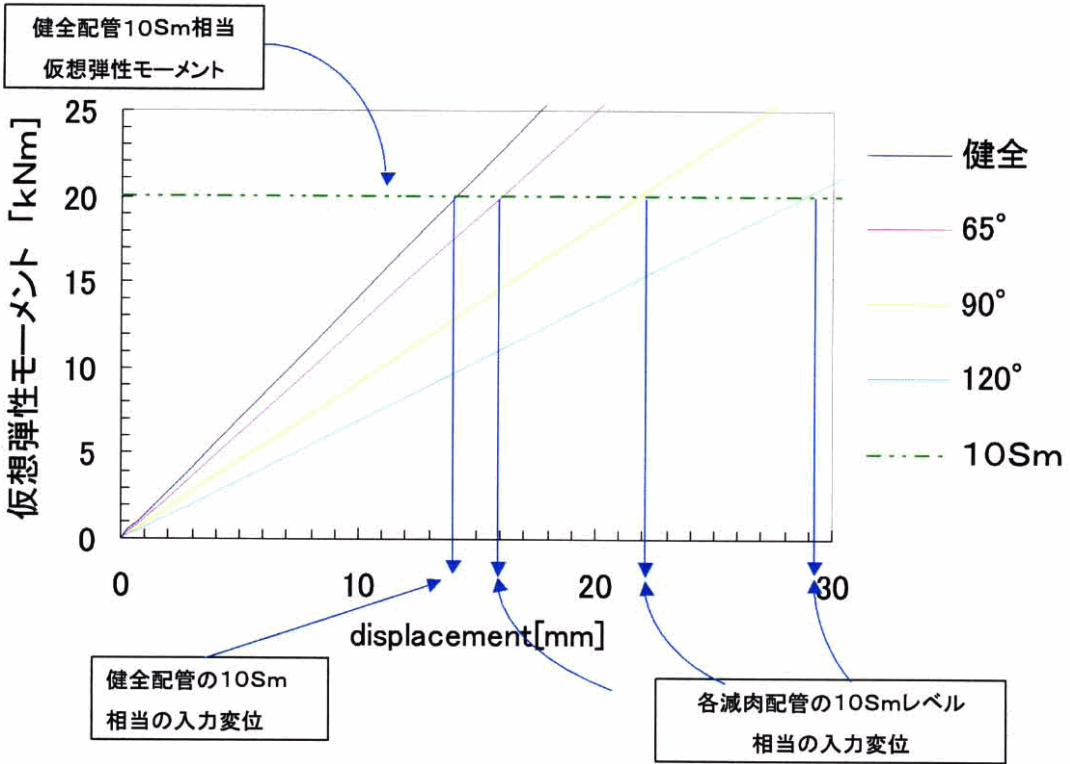


図 5.3-1 各減肉ケースに対する繰返し入力変位の設定方法 (100A)

表 5.3-1 繰返し入力変位 (片振幅)

	100A	200A
健全	13.50	29.45
65°	15.88	56.88
90°	21.66	70.65
120°	28.63	85.04

5.4 裕度評価

表 5.4-1 と図 5.4-1 に設計規定により算出された許容繰返し回数 N_{design} と解析モデルを用いた弾塑性解析により算出された破損回数を口径・減肉ケースにわけて表示した。 $N_{\text{design}} / N_{\text{analysis}}$ を設計指針に含まれる裕度として算出した。最も裕度が少ないケースは 200A-65° (200A・軸方向減肉角度 65°) であった。また、口径が大きくなるほど、また 200A の場合軸方向減肉が狭いほど裕度が少なくなることが分かった。

表 5.4-1 設計規定と弾塑性解析の比較

	N_{design}	$N_{analysis}$	N_d/N_a
100A-健全	16	1454	91
100A-65	16	365	23
100A-90	16	346	22
100A-120	16	331	21
200A-健全	16	1686	105
200A-65	16	73	5
200A-90	16	134	8
200A-120	16	188	12

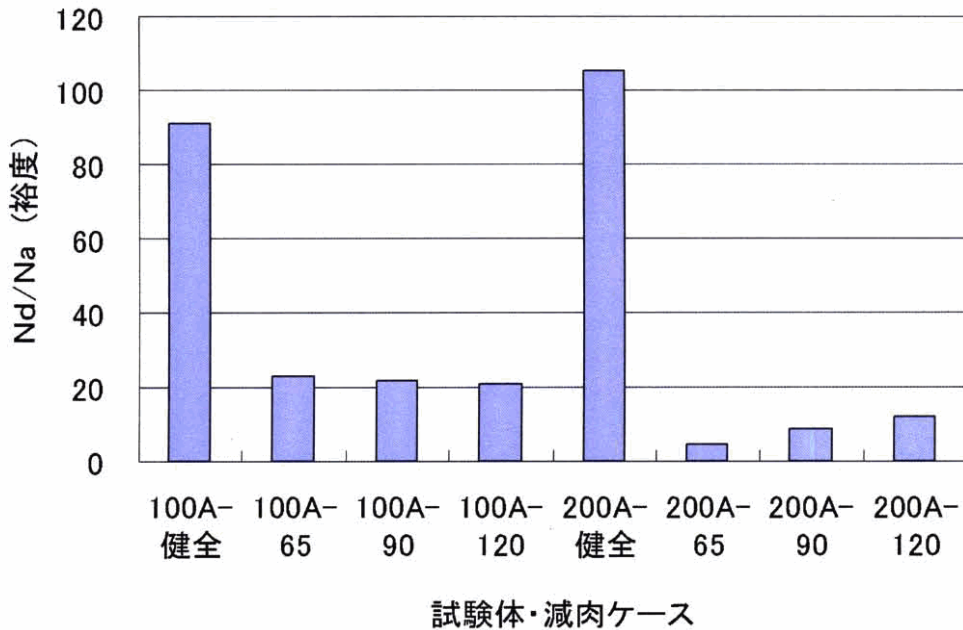


Fig. 5.4-1 裕度評価

5.5 結論

現行の設計規定の中にどの程度の裕度が含まれているのかを考察することを目的として、必要最小肉厚まで減肉したエルボが、設計応力強さ S_m の 10 倍相当の静的繰返し面内曲げを受けている場合を想定して、設計規定から求められる許容繰返し数と、弾塑性解析を行った結果から算出される破損寿命とを比較し、現行の設計規定には十分な（寿命換算で 5 倍程度の）安全裕度が含まれていることを確認した。

第6章 結言

本研究ではこの実験で行われた膨大な実験データをもとに、この配管系の動的挙動や損傷形態を再現することを目的とし、有限要素法を用いて弾塑性解析を行った。そして構築したモデルを用いてパラメトリック解析を行いどのような条件が危険であるのかを検討した。

1)有限要素法を用いた動解析において、固有振動数、時間刻み、エルボ分割数、弾性域の減衰、降伏応力、二次勾配の影響を把握するための解析を行い、これらの影響を明らかにすることによってどのような解析モデルが最適であるかを検討した。その結果、次のようなことが分かった。固有振動数は弾性域では大きく影響するが、弾塑性域ではあまり影響しない。弾性域の時間刻みは 5.0ms、弾塑性域での時間刻みは 0.1ms、エルボ分割数は4分割で十分である。弾性域の減衰は弾性域では大きく影響するが弾塑性域ではほとんど影響しない。降伏応力が大きくなると応答振幅は大きくなり残留変形量は小さくなる。二次勾配の影響は非常に小さい。

2)エルボ部に減肉を配置した立体配管系加振試験の再現解析を行い、各エルボが面内曲げを主に受ける場合において、損傷形態を非常によく再現して破損箇所と解析での疲労損傷最大箇所を一致させることができた。また実験は非常に費用と時間が掛かるため、実験数には限りがある。そこで、このモデルを用いて配管系のエルボが面内曲げ、面外曲げ、面内+面外曲げを受けるような場合においてパラメトリック解析を行い、最も危険と考えられてきた面内曲げではなく、面内+面外曲げで疲労損傷が大きくなる場合があるという結果を得た。

3)ひとつのエルボが面外曲げを受ける配管系の加振実験において、溶接余盛部近傍からき裂が発生し、破損形態が予測と異なる場合が生じたので溶接余盛を簡易的に考慮するモデルを提案した。そして実験での破損箇所が高い相当塑性ひずみを生じる結果を得た。しかし、溶接余盛部のモデル化は、まだ不十分である。実際にはより大きなひずみが生じているようである。したがって、現時点のモデルでは溶接余盛部近傍で破損する可能性があるかないか、また破損する場合には溶接余盛のどの位置であるかは判断できるが、寿命については他の破損（エルボ脇）より信頼性が低いと言える。

4)実験の予備解析結果より破損予測候補地の数箇所にひずみゲージを貼付して平成17年11月に実施した。その結果、候補地のひとつである余盛部近傍から破損した。また変形形状もよく表現できており、他の候補地においても大きくラチェット変形していた。それらのひずみ値を計測する事ができた。このように構築したモデルは実験を実施にするにあたり有益なデータを取得するのに大いに役立った。

5) 累積解析の結果、加振回数を重ねるごとにF値の増分は現象することが分かった。加振回数を精度よく予測する場合には累積解析が必要であると言える。しかしながら、解析時間は膨大となってしまう。

6) 現行の設計規定の中にどの程度の裕度が含まれているのかを考察することを目的として、必要最小肉厚まで減肉したエルボが、設計応力強さ S_m の10倍相当の静的繰返し面内曲げを受けている場合を想定して、設計規定から求められる許容繰返し数と、弾塑性解析を行った結果から算出される破損寿命とを比較し、現行の設計規定には十分な（寿命換算で5倍程度の）安全裕度が含まれていることを確認した。

以上のように、本研究を通じて減肉を有する配管系の弾塑性振動応答における動的挙動や破損形態をある程度、表現することが可能なモデルを構築した。精度についてはまだまだ問題がある。破損予測候補地(数箇所)と実験での破損箇所は一致させることが可能であるが、一箇所に断定することは困難であり、疲労寿命の評価の精度は、加振回数で倍半程度である。しかし、このモデルでのパラメトリック解析や予備解析は、より少ない実験数で有益な結果を得るために十分利用することができる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、学部生の時から約6年にわたり実験や解析の実施、結果の処理や検討など、様々な面において多大なるご指導、ご助言を頂きました横浜国立大学高田一教授に深く感謝の意を表します。また、横浜国立大学白鳥正樹教授、安藤柱教授、藪田哲郎教授、萩原剛客員助教授には、お忙しい中、審査委員の労をお取り頂きました。厚く御礼を申し上げます。本研究で扱った実験および解析は、原子力安全研究「機器・配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研究」(平成8年度から平成12年度)、「地震荷重を受ける減肉配管の破壊過程解明に関する研究」(平成12年度から平成17年度)で実施したものです。この研究の実施にあたり組織されましたAP委員会、NAP委員会では、各分野の専門家、電力会社、プラントメーカーなどの委員の方々から貴重なご意見を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

横浜国立大学白鳥正樹教授には、研究方針や解析結果の検討などで多大なるご指導、ご助言を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

柴田碧東京大学名誉教授には、高田研究室の研究会やNAP委員会などで多大なるご指導とご助言をして頂きました。厚く御礼を申し上げます。

大谷章仁博士(石川島播磨重工業)と中村いずみ博士(防災科学技術研究所)には、お忙しい中、何度となく打ち合わせの為に足を運んで頂きました。そして研究方針、解析手法、結果に対する議論など様々な面で適切なお指導とご助言を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

高田研究室松浦慶総助手と白鳥研究室渋谷忠弘助手には、諸般の事務手続きでご協力を頂きました。また、研究について特にコンピューター関連で多大なるご指導、ご助言を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

白鳥研究室秘書廣田光女さんには、諸般の事務手続きで数多くのサポートを頂きました。厚く御礼を申し上げます。

共同研究者の宇田川誠氏(日本原子力研究開発機構、白鳥研究室OB)、楊毓傑氏(白鳥研究室M2)、角井聖氏(白鳥研究室B4)には、研究計画や解析実施にあたり多大なる補助をして頂きました。厚く御礼申し上げます。

原拓巳氏(高田研究室B4)には、委員会の会場準備や資料作成などでサポートをして頂きました。厚く御礼申し上げます。

6年間在籍しました高田研究室と3年間共同研究をしました白鳥・宇研究室の方々には多くの議論を頂き、研究室での生活においても大変お世話になりました。記して感謝の意を表します。

参考文献

第1章

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁資料
- (2) 豊田, 湯原, 水野, 桑島, “原子力発電技術読本”, オーム社
- (3) 矢川元基, “米国 Surry 原子力発電所2号炉2次系配管破断事故の報告”, 日本原子力学会誌, Vol.29, No.7(1987)
- (4) 日本原子力研究所, “サリー原子力発電所の配管破断事故”, 日本原子力学会誌, Vol.29, No.11(1987)
- (5) 朝日新聞社資料
- (6) 安碩煥, “原子力プラント配管での疲労き裂進展・貫通挙動及び局所的減肉部の許容限界に関する研究”, 横浜国立大学大学院工学研究科, 博士論文, 1998
- (7) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄, “数値破壊力学”, 実教出版
- (8) 日本構造協会, “構造工学における有限要素法の理論と応用”
- (9) 三好, 他, “日本機械学会論文集, Vol.48-433,p.1128(1982)”
- (10) Rice, J.R., and Levy, N. “J. Appl. Mechs. , Vol.39, p.185 (1972)”
- (11) Rice, J.R. “The Surface Crack, ASME, p.171 (1972)”
- (12) Parks, D.M. “Trans.ASME, J.Press.Vessel Tech., Vol.103-3, p246 (1981)”
- (13) Tada, H. “The Stress Analysis of Cracks Handbook”, Der Research Corporation, 1973
- (14) Lee,H and Parks, D.M. ”LINE-SPRING FINITE ELEMENT FOR FULLY PLASTIC CRACK GROWTH-1. FORMULATION AND ONE-DEIMENSIONAL RESULTS” Int.J.Solids Structures Vol.35,No.36,pp.5115-5138,1998
- (15) Lee,H and Parks, D.M. ”LINE-SPRING FINITE ELEMENT FOR FULLY PLASTIC CRACK GROWTH-2. SURFACE-CRACKED PLATES AND PIPES ” Int.J.Solids Structures Vol.35,No.36,pp.5139-5158,1998
- (16) Lee,H and Kim, Y.J. ”Interfacial crack-tip constraints and J-integrals in plastically mismatched bi-materials” Engineering Fracture Mechanics 68 (2001) 1013-1031
- (17) 矢倉武蔵, “高経年配管の耐震裕度評価に関する解析的研究” 横浜国立大学大学院 工学研究科 生産工学専攻 平成 12 年度修士論文
- (18) 越智洋二, “配管の低サイクル疲労シミュレーション” 横浜国立大学大学院 工学研究科 生産工学専攻 平成 13 年度修士論文
- (19) 青島誠, “構造的劣化部を有する配管の耐震安全裕度に関する解析的研究” 横浜国立大学大学院 工学研究科 生産工学専攻 平成 13 年度修士論文
- (20) 宇田川誠, “高経年配管の耐震安全裕度評価手法に関する研究” 横浜国立大学大学院 工学府 システム統合工学専攻 平成 17 年度修士論文

第2章

- (1) (財)原子力発電技術機構, “平成 11 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その3 配管系終局強度耐震実証試験”(2000)
- (2) 日本機械学会, “金属材料疲労強度の設計資料IV 低サイクル疲労強度”, (1983)
- (3) Namaizawa,J., Ueno,K, Ishikawa,A., and Asada,Y., ”Life Prediction Technique for Retheting Fatigue” PVP-Vol.266, Creep, Fatigue Evaluation, and Leak Before Break Assessment, ASME PVP 1993 pp.3-11.
- (4) 伊藤隆基, 宮崎俊樹 “非比例・多軸低サイクル疲労寿命の簡易推定法” 日本機械学会材料力学部門講演会論文集 716 (1999)
- (5) 伊藤隆基 “非比例多軸低サイクル疲労寿命評価モデル” 日本機械学会 (2000)
- (6) 矢倉武蔵, “高経年配管の耐震裕度評価に関する解析的研究” 横浜国立大学大学院 工学研究科 生産工学専攻 平成 12 年度修士論文
- (7) Izumi Nakamura, Nobuyuki Ogawa, Akihito Otani, Hiroe Kobayashi and Masaki Shiratori, ”An Experimental Study on Dynamic Behavior of Piping Systems with Local Degradation”, Paper presented at this conference, Session of Seismic Engineering, ASME PVP 2000.
- (8) Akihito Otani, Izumi Nakamura, Nobuyuki Ogawa and Masaki Shiratori, “The Damping Characteristics of Piping with Plastic Deformation”, Paper presented at this conference, Session of Seismic Engineering, ASME PVP 2000.
- (9) 宇田川誠, “高経年配管の耐震安全裕度評価手法に関する研究” 横浜国立大学大学院 工学府 システム統合工学専攻 平成 17 年度修士論文

第3章, 第4章

- (1) (財)原子力発電技術機構, “平成 11 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その3 配管系終局強度耐震実証試験”(2000)
- (2) (財)原子力発電技術機構, “平成 12 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その2 配管系終局強度耐震実証試験”(2001)
- (3) 矢倉武蔵, “高経年配管の耐震裕度評価に関する解析的研究” 横浜国立大学大学院 工学研究科 生産工学専攻 平成 12 年度修士論文
- (4) Asada, Y., “Fatigue Criterion on Low-Cycle Fatigue with Excessive Progressive Deformation, ” Proceeding of 3rd German-Japanese Joint Seminar, II 2.2, pp.3-11, (1985).
- (5) (財)原子力発電技術機構, “平成 11 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その3 配管系終局強度耐震実証試験”(2000)
- (6) 日本機械学会, “金属材料疲労強度の設計資料IV 低サイクル疲労強度”, (1983)
- (7) Namaizawa,J., Ueno,K, Ishikawa,A., and Asada,Y., ”Life Prediction Technique for

Ratheting Fatigue” PVP-Vol.266, Creep, Fatigue Evaluation, and Leak Before Break Assessment, ASME PVP 1993 pp.3-11.

- (8) 宇田川誠, “高経年配管の耐震安全裕度評価手法に関する研究” 横浜国立大学大学院 工学府 システム統合工学専攻 平成 17 年度修士論文

第 5 章

- (1) 矢倉武蔵, “高経年配管の耐震裕度評価に関する解析的研究” 横浜国立大学大学院 工学研究科 生産工学専攻 平成 12 年度修士論文
- (2) 白鳥正樹, 矢倉武蔵, 小笠原永久, 中村いずみ, 大谷章仁, “局所減肉部を有する配管の耐震裕度評価に関する解析的研究” 日本機械学会論文集(A 編), 67 巻 654 号, pp.209-215, 2001.
- (3) Izumi Nakamura , Nobuyuki Ogawa, Akihito Otani, Hiroe Kobayashi and Masaki Shiratori, “Dynamic Collapse Test of Cracked Pipes”, 15th SMiRT, vol. IX , pp.69-76,1999
- (4) Akihito Otani, Hiroe Kobayashi, Nobuyuki Ogawa, Izumi Nakamura and Masaki Shiratori, “Strength of Locally Thinned Piping Suubjected to Cyclic Loading”, PVP-Vol.387, Seismic, Engineering-1999-, ASME 1999 pp.55-62.
- (5) Akihito Otani, Nobuyuki Ogawa, Akihito Otani, Hiroe Kobayashi and Masaki Shiratori, ”An Experimental Study on Dynamic Behavior of Piping Systems with Local Degradation”, Paper presented at this conference, Session of Seismic Engineering, ASME PVP 2000.
- (6) Akihito Otani , Izumi Nakamura, Nobuyuki Ogawa and Masaki Shiratori, “The Damping Characteristics of Piping with Plastic Deformation”, Paper presented at this conference, Session of Seismic Engineering, ASME PVP 2000.
- (10) (財)原子力発電技術機構, “平成 11 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その 3 配管系終局強度耐震実証試験”(2000)
- (11) 日本機械学会, “金属材料疲労強度の設計資料IV 低サイクル疲労強度”, (1983)
- (12) Namaizawa,J., Ueno,K, Ishikawa,A., and Asada,Y., ”Life Prediction Technique for Ratheting Fatigue” PVP-Vol.266, Creep, Fatigue Evaluation, and Leak Before Break Assessment, ASME PVP 1993 pp.3-11.
- (13) 宇田川誠, “高経年配管の耐震安全裕度評価手法に関する研究” 横浜国立大学大学院 工学府 システム統合工学専攻 平成 17 年度修士論文

公表論文

1. 査読付論文

1) 三上晃, 高田一, 大谷章仁

「経年劣化を有する三次元配管系の疲労寿命予測に関する研究」

日本機械学会論文集 C 編 (2006 年 2 月号掲載予定)

2. 国際会議

1) Akira Mikami, Makoto Udagawa and Hajime Takada,

"STUDY ON ESTIMATION METHOD FOR SEISMIC SAFETY MARGIN OF 3D PIPING SYSTEM WITH DEGRADATION

- ESTABLISHING ELASTO-PLASTIC ANALYSIS MODEL -"

ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol.473, pp.125-132

(2004.7, San Diego, CA, USA)

2) Akira Mikami, Makoto Udagawa, Izumi Nakamura, Akihito Otani, Hajime Takada and Masaki Shiratori,

"STUDY ON ELASTO-PLASTIC ANALYSIS OF 3D PIPING SYSTEM FOR NUCLEAR POWER PLANT"

Joint Symposium between Sister Universities in Mechanical Engineering, pp.324-329

(2004, Yokohama)