

ジェット旅客機コメットの空中分解

【1954年1月10日、ローマ沖地中海】

小林英男(東京工業大学大学院 理工学研究科)

寺田博之((財)航空宇宙技術振興財団)

1954年1月10日、ローマを離陸した与圧客室を持つ世界最初のジェット旅客機コメット G-ALYP 機が、地中海エルバ島近くの高度約 8,000mに達したところで与圧の繰返しによる疲労破壊で空中分解事故を起こし、35名の搭乗者全員が死亡した。

1. 事象

コメットは世界最初のジェット旅客機で、英国デハビランド社において第二次世界大戦の末期に開発され、1952年5月に就航した。その第1号機である英国航空のコメット G-ALYP が1954年1月10日、ローマのチアンピーノ空港を離陸して北上中、地中海エルバ島近くの高度約 8,000mに達したところで空中分解事故を起こし、水深180mの海中に墜落した。乗員6人、乗客29人の全員が死亡した。海底から機体を引き上げて調査した結果、自動方向探知機のアンテナ窓に、疲労破壊の起点が発見され、与圧の繰返しによる疲労破壊という原因が解明された。

コメット型機(G-ALYP)を図1に示す。墜落したコメット機の回収部分を図2に示す。疲労き裂を起点として不安定破壊が生じ、空中分解したことがわかる。

2. 経過

事故機は就航後わずか1,290回(3,600飛行時間)のフライト時に破壊した。これは当初の設計寿命のわずか1/10程度に過ぎないものであった。

そこで、就航中のコメット全機の使用が中止され、入念に点検した結果、疑わしい部分60箇所が補強された。同年3月には英国航空局の再使用許可も下り、英国航空は改良型コメット機の就航に踏み切った。ところが、同年4月8日、改良型コメット G-ALYY がナポリ付近で南下中に、またも海中に墜落するという事故を引き起こし、21名の搭乗者全員が死亡した。英国航空は即座にコメット全機の使用を中止し、また耐空証明書は英国航空局から返却を命ぜられることになった。

物理学者まで動員した調査と研究の結果、事故の直接原因が客室内与圧による胴体天井切欠き(アンテナ窓)と客室窓のコーナー部からの疲労き裂の発生であり、疲労き裂が進展して胴体を巻き、不安定破壊を生じて破裂に至ったことが明らかにされた。

航空機が受ける荷重の繰返しを図3に示す。離着陸に伴う荷重と飛行時の突風荷重の繰返しは当時でも、航空機の耐疲労設計において常識的に考慮されていた。しかし、成層圏を飛行するジェット旅客機では、1回のフライトごとに客室内与圧による胴体の内圧変動が生じ、これに起因する低繰返し数、低繰返し速度の疲労(低サイクル疲労)が問題になる。通常、客室内与圧は2,100m上空での大気圧に相当する0.79気圧に保たれており、成層圏飛行が12,000m上空だとすれば大気圧は

0.19 気圧であるから、その差 0.6 気圧分だけの内圧変動が1回のフライトごとに生ずることになる。この程度の内圧変動によって、胴体は 1~2mm 程度の膨張と収縮を繰り返す。

コメット機の耐疲労設計においても、このような内圧変動による疲労の問題は、全く無視されていた訳ではない。1号機の就航に先立ち、実機胴体の内圧疲労試験が地上で行われ、18,000回の繰返しで初めて検知可能な疲労き裂が発生することが確認されており、疲労寿命(フライト回数)の保証は十分であったと考えられる。しかるに、実際の事故はそれよりも1桁少ない、G-ALYPで1,290回、G-ALYYで900回のフライト回数で起きたのである。

コメット機の実機胴体の内圧疲労試験における圧力変動を図4に示す。コメット機では、内圧の差圧を0.56気圧として、内圧疲労試験が実施された。もちろん、実機胴体が受ける圧力変動は、0.56気圧の単純な繰返しである。しかし、内圧疲労試験を地上で実施する場合、圧力容器に関する法規制の対象となり、安全性の確認を目的とした耐圧試験の実施が義務づけられる。図4(a)に示すように試験前と内圧0.56気圧の1,000回の繰返しごとに、2倍の圧力の1.12気圧の耐圧試験が実施され、疲労き裂発生までの繰返し数は18,000回となった。

実機では実施されることがない耐圧試験の影響について、検討が行われた。図4(b)を参照して、1,230回のフライトを終えた実機の胴体について、耐圧試験の圧力を0.75気圧まで下げて内圧疲労試験を行ったところ、その後の圧力0.56気圧の1,830回の繰返しで疲労き裂が発生した。合計の繰返し数は3,060回で、耐圧試験ありの繰返し数18,000回の約1/6である。耐圧試験を全く行わなければ、疲労寿命はさらに減少し、事故機の1,290回と900回に近づくであろうことが容易に予想される。

すなわち、地上での実機胴体の内圧疲労試験によって得られる疲労寿命は、試験中に行われる耐圧試験の効果で極めて長くなり、実機の疲労寿命を安全側に予測できないことが明らかになった。

3. 原因

地上での実機胴体の内圧疲労試験においてフライト回数にして18,000回が保証されていたにもかかわらず、このように少ないフライト回数で破壊に至った原因として、以下のことが考えられた。

- (1) 内圧疲労試験において、英国航空局の規準に従い、2倍の圧力で耐圧試験を周期的に行い、繰返し数18,000回で疲労き裂が発生することを確認した。耐圧試験の過大圧力で窓のコーナー部には応力集中のために引張塑性変形が生じた。この塑性変形域では除荷後に周囲の弾性部分に拘束されて圧縮残留応力場となる。この状態で内圧の繰返しを行えば、平均応力を低く抑えた場合と同様の効果をもたらす、結果的に疲労寿命を長寿命側に誤認した(図5参照)。
- (2) 内圧疲労試験において、機体の全体構造を用いるのではなく、胴体の一部を輪切りにし、それを鋼鉄製の反力壁に固定した試験を行ったため、変形やひずみが実際の機体の場合より小さく見積もられた。
- (3) 窓の形状が現在の長楕円形のものとは異なり、コーナー部をやや丸めた程度の矩形に近い形状であったため、窓コーナー部の応力集中率は現在のものよりもかなり高く、疲労き裂の発生が容易であった。

4. 対処

水深 180mの海底からの機体の残骸の回収、運用中の同型機を用いた地上での内圧疲労試験の実施、物理学者まで動員した調査と研究など、大英帝国の威信をかけて原因究明を行った。

5. 対策

航空機の耐疲労設計と疲労強度確認試験(耐久性評価試験)が抜本的に見直された。

- (1) これ以後、航空機の開発に際しては、部分構造ではなく完全な機体を製作した上で、1号機は静強度試験に供し、2号機は与圧の繰返しを含めた耐久性評価試験に供して、破壊強度特性を評価することとなった。
- (2) 疲労寿命に及ぼす荷重の大きさと繰返し数の影響に加えて、荷重順序の影響を評価する。
- (3) 切欠きなどの応力集中係数を正しく評価するとともに、構造設計ではその値を極力低減する。

6. 知識化

耐圧試験の効果

耐圧試験は安全性の確保に有用であり、また耐圧試験の周期的実施によって圧力容器の寿命延伸を図ることができる。しかし、宇宙航空の分野では、実機の使用に周期的な耐圧試験がなく、寿命確認のための地上での実機疲労試験に際して、周期的な耐圧試験の実施が要求される場合があり、疲労寿命の予測に注意を要する。他の分野でも、あり得ることかもしれない。

疲労寿命に及ぼす荷重順序の影響

不規則な変動荷重(ランダム荷重)を受ける機器の疲労寿命の評価に際して、全寿命にわたって数回程度しか発生しない過大荷重の荷重順序は、疲労寿命に大きな影響を及ぼす。評価と試験に注意が必要である。

疲労寿命に及ぼす切欠き効果

切欠きなどによる応力集中が疲労き裂発生の起点となる。切欠き効果を正確に予測することは難しい。切欠きなどの曲率半径は、できる限り大きくとり、応力集中を軽減することが望ましい。

7. 背景

本事故の前年の1953年5月2日、同様の原因が疑われる事故がカルカッタ離陸の際に発生していた。その際も、離陸8分後に墜落し、48人全員が死亡した。ただし、航空機事故原因究明の手法が確立されていなかった当時は、操縦士のエラー、砂嵐または旋風によるものと推定され、それ以上の詳しい調査はされなかった。

8. 後日談

コメット機の事故調査の当時は、疲労寿命に及ぼす過大荷重(過大圧力)の影響について、正確な知見がなかった。内圧疲労試験の前に実施した耐圧試験の過大圧力によって、窓のコーナー部に圧縮残留応力が生じ、疲労寿命を増加させたと考えられていた。現在では、以下のように解釈できる。

過大荷重を周期的に伴う一定振幅荷重の繰返しの疲労試験において、き裂長さ a と繰返し数 N

を実測した結果を図6に示す。Aが過大荷重なしの一定振幅荷重の場合、Bが正と負の過大荷重を伴う場合、Cが正の過大荷重のみを伴う場合の結果である。3回の過大荷重を周期的に伴うCの場合は、Aの場合に比較して、疲労寿命が4倍以上も増加することがわかる。これは、図の下の説明(a)(b)に示すように、正の過大荷重の負荷と除荷によって圧縮残留応力が生成し、その寄与によってき裂進展の遅れ遅延が生ずるためである。疲労の研究の分野では、き裂閉口という考え方で、これを説明する。いずれにしても、過大荷重の周期的な繰返しによって、疲労寿命を延伸できることが、現在では理論と実験によって実証されている。

9. よもやま話

英国がデハビランド社のコメット機の飛行を停止して事故原因の究明、安全対策の策定で時間を費やしていた間に、米国のボーイング社がジェット旅客機B-707型機の開発に成功し、デハビランド社が問題点を克服したコメット型機の開発を終えた時点で時すでに遅く、ジェット旅客機の世界市場が完全に米国のものとなっていた。

10. シナリオ

- 1 無知
- 2 知識不足
- 3 評価・試験方法の誤り

- 4 調査・検討の不足
- 5 事前検討不足
- 6 圧縮残留応力効果の看過

- 7 調査・検討の不足
- 8 環境調査不足
- 9 応力・ひずみの過小評価

- 10 計画・設計
- 11 計画不良
- 12 応力集中低減不回避

- 13 使用
- 14 運転・使用
- 15 航空機の運航

- 16 破損
- 17 破壊・損傷
- 18 疲労破壊

- 19 破損
- 20 大規模破損
- 21 空中分解
- 22 墜落

- 23 組織の損失

- 24 経済的損失
- 25 世界市場での敗北
- 26 社会の被害
- 27 人の意識変化
- 28 ジェット機に対する不信増大

11. 社会への影響

与圧のための気密室を備えたジェット機の実用化は、時期尚早であるとの印象を世界に植え付けるとともに、その信頼性に不安を抱かせた。

<参考文献>

- (1) ICAO Aircraft Accident Digest, Vol.6-2(1956), pp16-45
- (2) 小林英男,高圧ガス,22-12(1986),pp.649-659

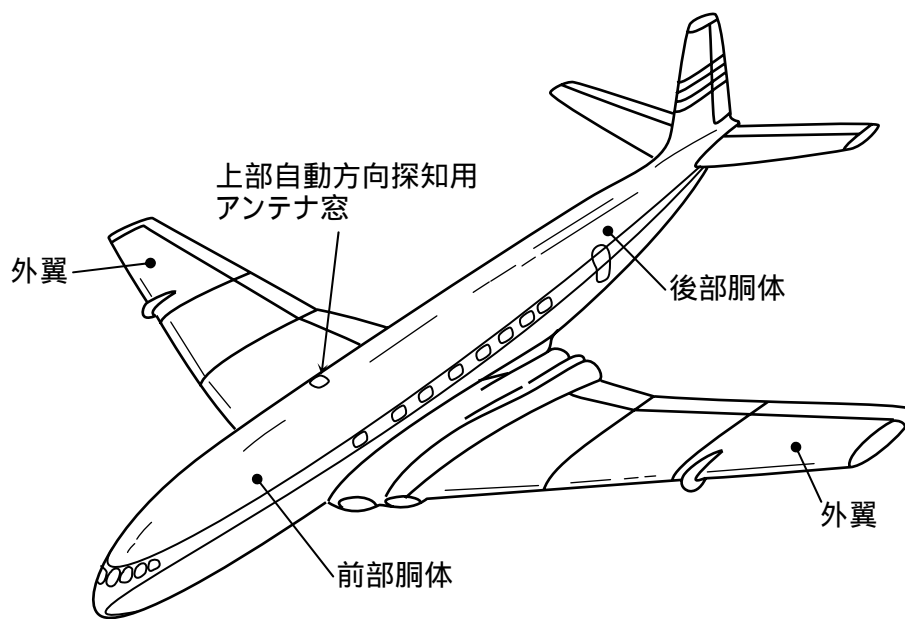


図1 コメット 型機(G-ALYP)

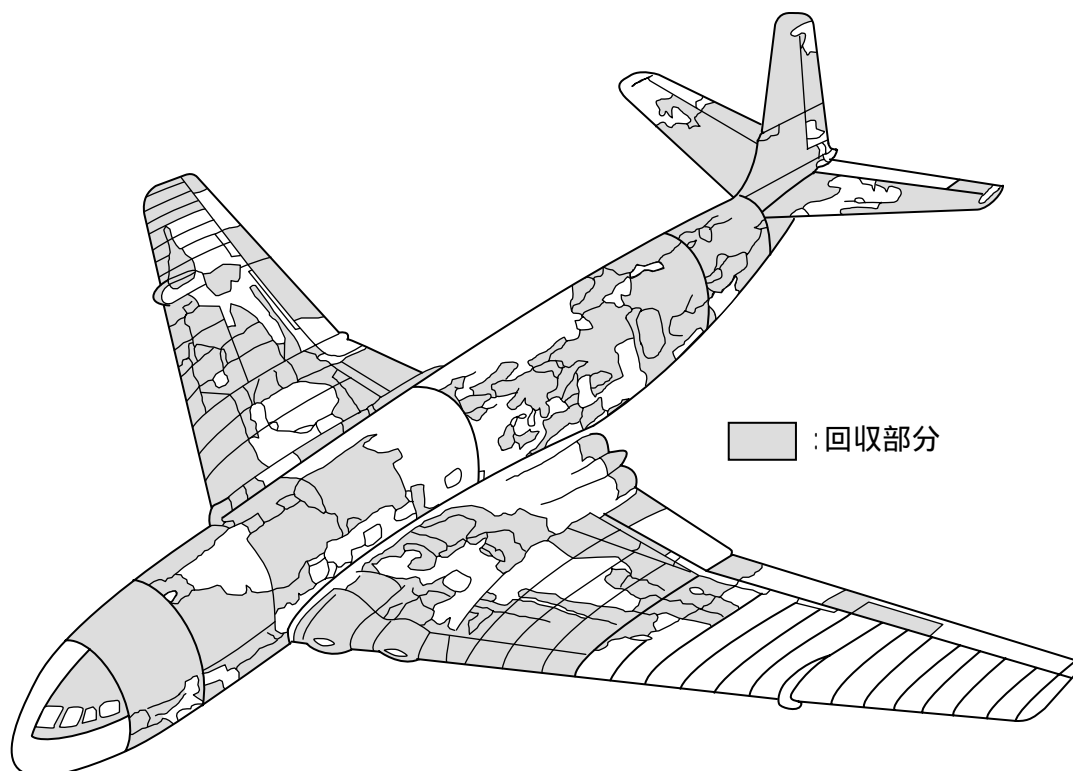


図2 墜落したコメット機の回収部分

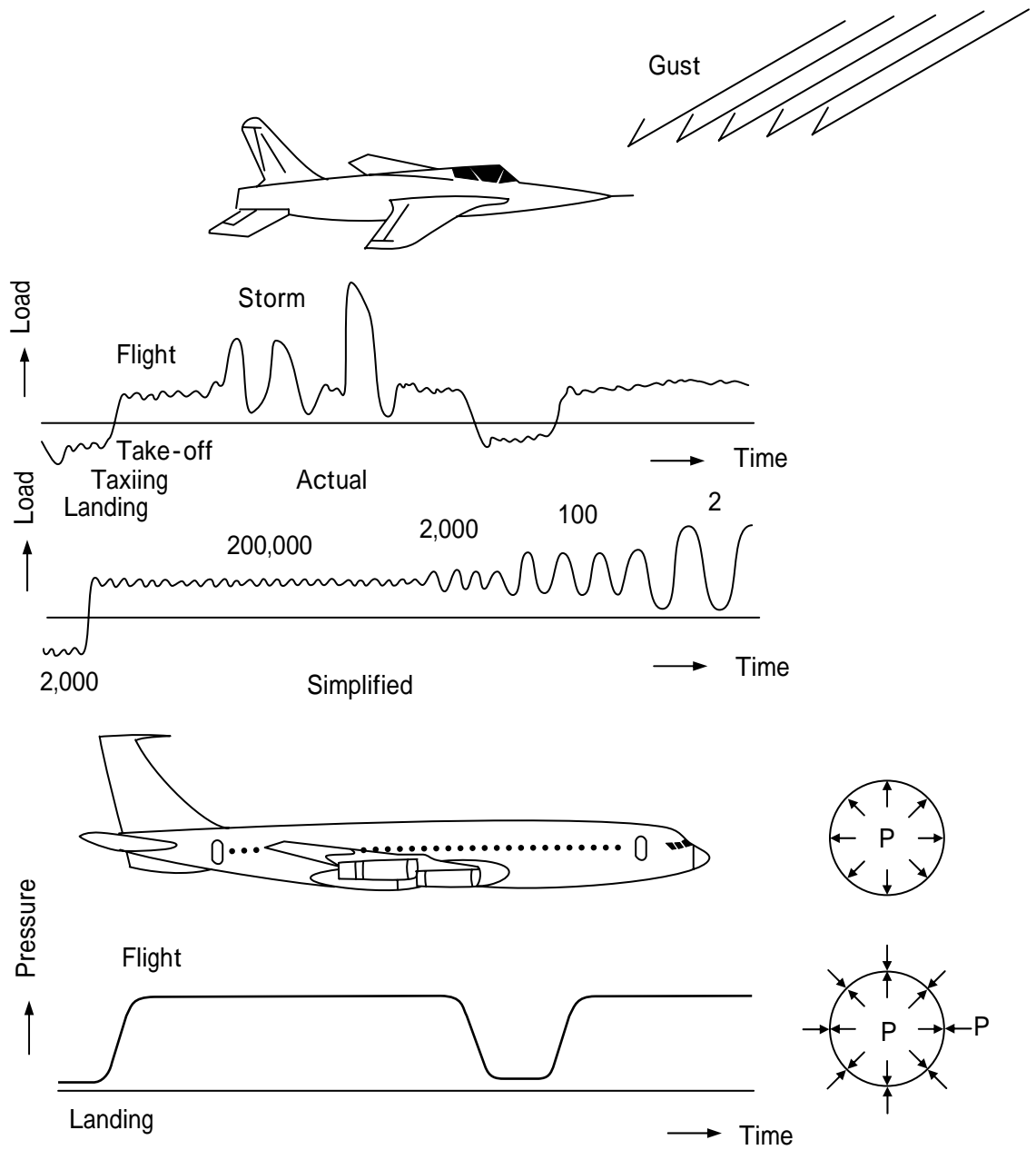


図3 航空機が受ける荷重の繰返し

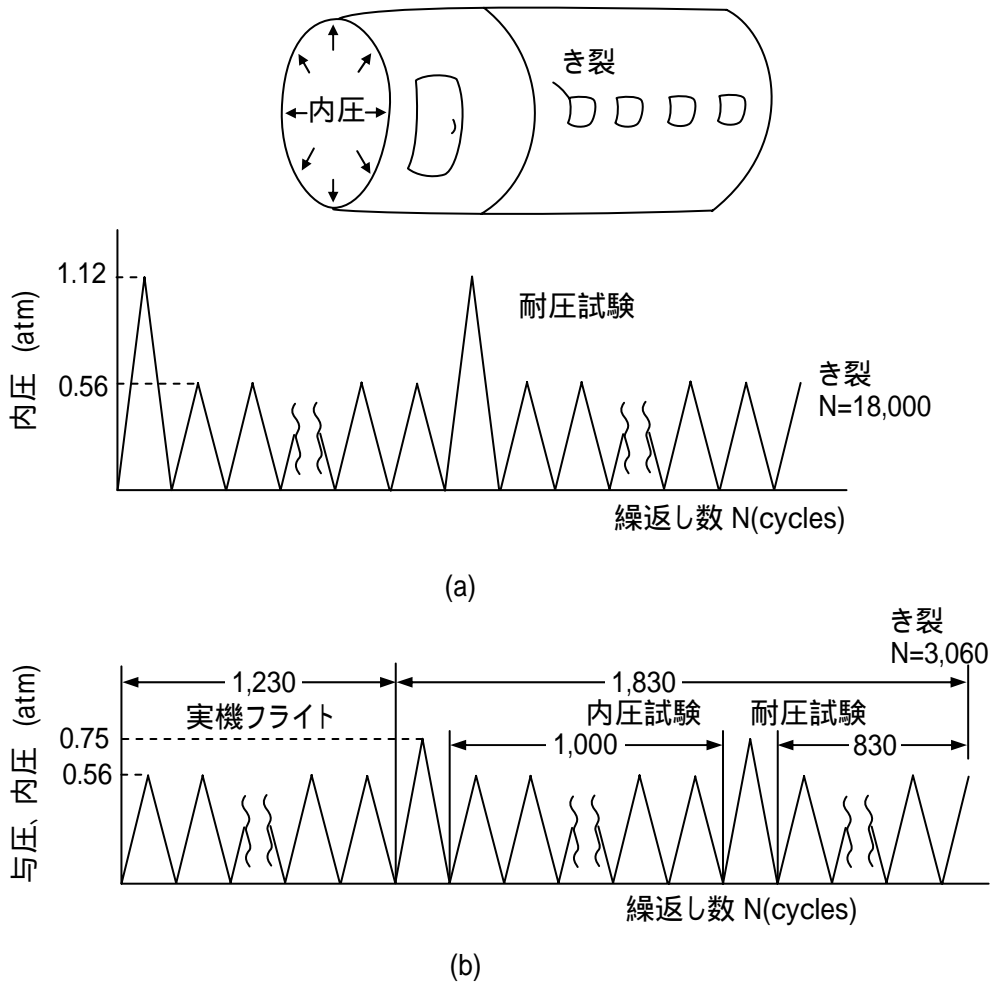


図4 コメット機の実機胴体の内圧疲労試験における圧力変動

(a) 耐圧試験圧力大

(b) 耐圧試験圧力小

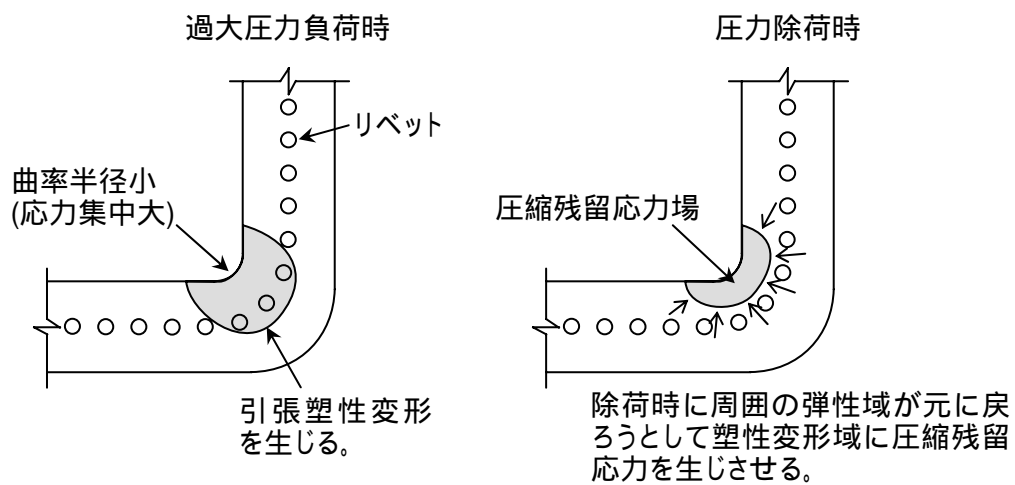


図5 過大圧力の負荷と除荷における窓コーナー部の変形挙動

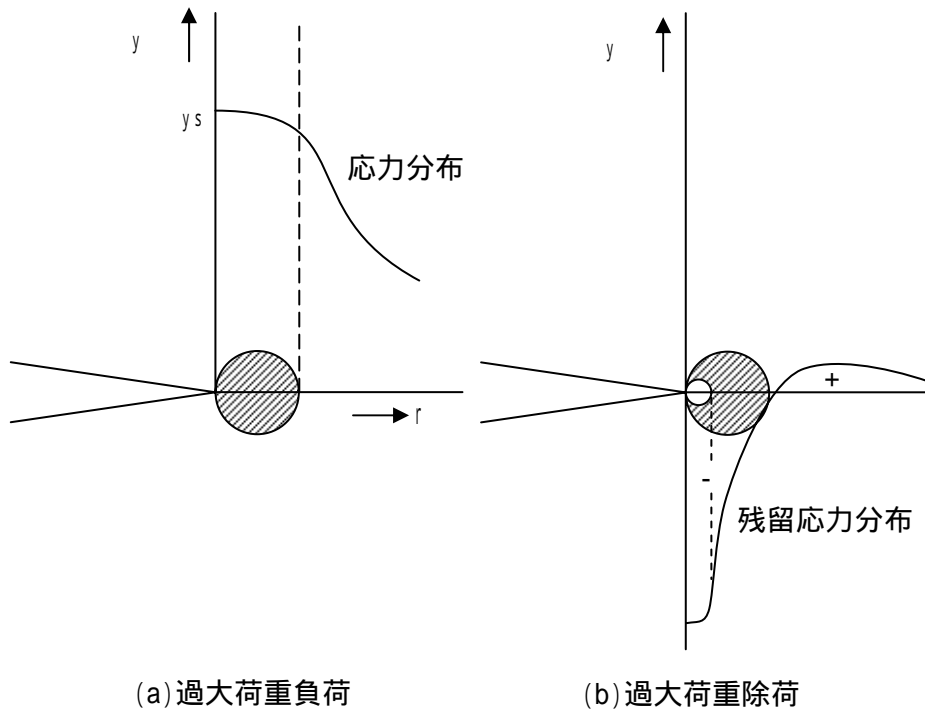
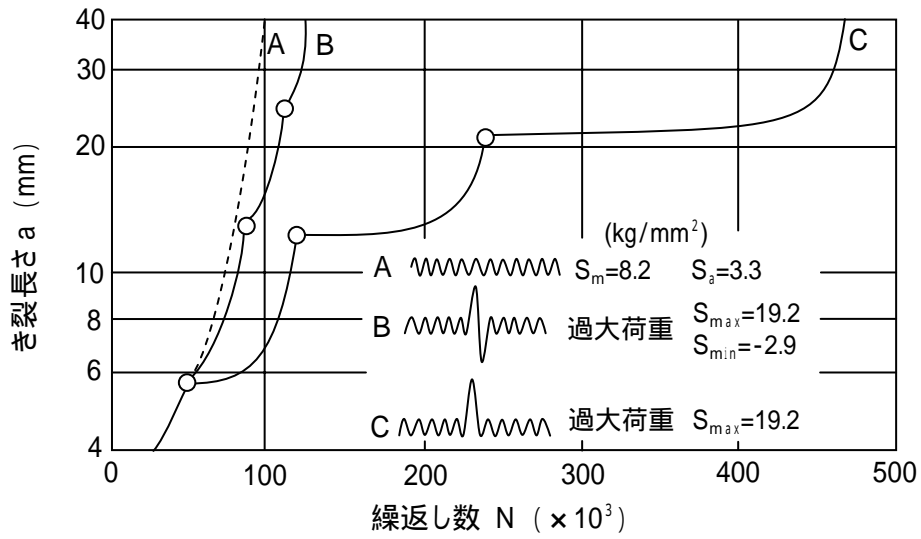


図 6 過大荷重を周期的に伴う疲労試験におけるき裂長さ a と繰返し数 N の関係