

TECHNORIDGE

2016 313



特集

プラスチックの破損に対する取組

これまで、これからも



TECHNORIDGE

2016 313



目次

- 巻頭言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
- プラスチック破損が発生したら・・・・・・・・・・・・・3
- 成形不備による破損・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
- 劣化による破損—保管・使用中の破損—・・・・・・・・・・・・・5
- 応力集中による破損・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
- 機器紹介・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8

プラスチック破損に対する取組を紹介します

編集担当

梶本 武志

プラスチックは軽量・安価・複雑な加工がしやすいといった特徴のある材料です。そのため、ガラス瓶はペットボトルに、車のバンパーは鉄製からポリプロピレン製に等々ガラスや金属で作られていた製品が近年次々とプラスチックに置き換えられ、工業の広い分野で使用されるようになってきました。自動車は金属で構成されているというイメージが強いのですが2011年度の統計では、重量比で1割がプラスチック材料となっています。これは体積比でほぼ4割にプラスチックが使用されていることとなります（図1）。

しかし、プラスチックはガラスや金属とは異なり、使用環境条件によって劣化や変形等様々な経時変化を示しやすいという特徴があります。そのため信頼性のある製品設計を行う上で、金属やガラスと同じ性質を備えた材料としてプラスチックを使用してしまうと、製品が破損し思わぬトラブルの原因になってしまいます。実際、当センターにも「プラスチック製の部品や製品が割れてしまった・・・」といった相談が数多く寄せられています。

そこで、本稿では、プラスチック製品の破損に対する当センターでの取組を紹介することにしました。まず、破損が発生した場合にその発生原因をどのように探索していくのかについて紹介し、具体例として成形不備による破損、保管・使用中の破損を取り上げ、それぞれに対する当センターでの対応について紹介します。また、設計ミスによる破損の主要原因である応力集中も取り上げ、コンピュータシミュレーションを活用した応力集中の回避方法を紹介します。

製品破損によるトラブルはネガティブにとらえがちですが、それはより良い製品に改良するチャンスでもあります。そのためには原因究明をしっかりと行うことが重要となります。その際に、本稿の内容を参考の一つとしてご活用いただければ幸いです。

なお、次ページより使用しているプラスチックの略称を表1に示しますのでご参照ください。

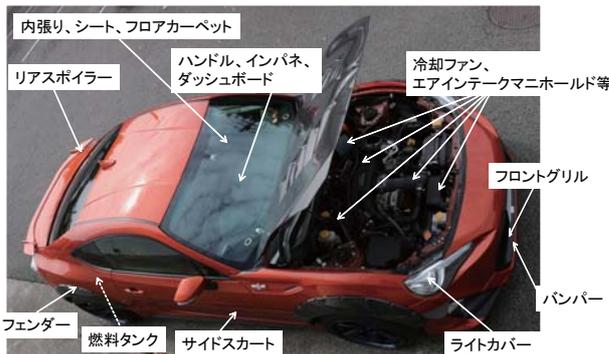


図1 自動車に使われている主なプラスチック部品

表1 一般的なプラスチックの名称と略称

名称	略称
ポリプロピレン	PP
ポリエチレン	PE
塩化ビニル樹脂	PVC
ポリエチレンテレフタレート	PET
ポリカーボネート	PC
ポリスチレン	PS

プラスチック破損が発生したら

生活・環境産業部 宮崎 崇

はじめに

プラスチックが破損する原因は実に様々です。破損原因調査の相談を受けた際には、

- 1) 製品のユーザーから破損品の使用状況や使用環境
- 2) 破損部品の成形メーカーから使用材料や成形条件
- 3) 製品メーカーから破損した製品の設計仕様

など様々な情報を確認し、原因を絞り込んで仮説をたてていく必要があります。

聞き取り調査

最初に確認するのは、その破損が一例だけなのか、それとも多発しているのかの確認です。一例だけの場合、想定外の使用法で破損したと考えられるため、どのような使用状況で破損が発生したか、使用時の周囲の温湿度や油や薬品の付着、オゾン等の酸化性ガスの有無、想定外の応力がかかっていないか等を確認します。破損物から分析で情報を得ること（付着物の検出や使用環境）は非常に難しいため、使用環境をどれだけ聞き取りできるかが原因推定の鍵となります。

多発している場合は、使用環境だけではなく、破損の発生率や破損までの時間等様々な情報をもとに、原因を絞り込んでいきます。例えば、発生率に関して、①製品製造の全般にわたって破損が発生している、②特定の時期から突然発生するようになった、③ある特定のロットだけ破損が発生している、といった情報をもとに①の場合、耐熱性が不足している、耐候性が不足している等用途に適さない材

質を使用していないか？製品設計における強度見積もりが間違っていないか？応力集中部への考慮がされているか（コーナー部に十分なアールがついているか、ウエルドラインの位置）？といった確認を行います。②の場合、原材料の変更や装置の更新など、その時期の前で製造環境に変化がないかの確認を行います。③の場合、成形条件等そのロットだけ他のロットと違う事象がないかの探索を行います。また、良品との比較も原因推定を行う上で重要な手がかりとなります。

破面解析

破損状況の聞き取りと同時に、必ず行うのが破面の観察です。破面には破損の発生起点や進行方向を示す痕跡が残されており、どのような応力がかかって破損したかの重要な手がかりが残されています。図1は顕微鏡でプラスチックの破面を観察した例です。起点と書かれた部位から右下に向けて破損が進行していったことがわかります（黒いライン）。またオレンジのラインから下の部位は、圧縮によって破壊された痕と考えられます。これらの情報より画面下側から上側へ力がかかって起点部位に引張の力がはたらき、亀裂が入って破損したと推測されます。当センターでは聞き取り情報と破面の情報をもとに表1のような破損原因の仮説をたて検証・究明を行っています。プラスチックが破損する原因は実に複雑で様々であり、ご依頼いただいても原因が特定できない場合も多いですが、トラブル発生時には一度ご相談ください。

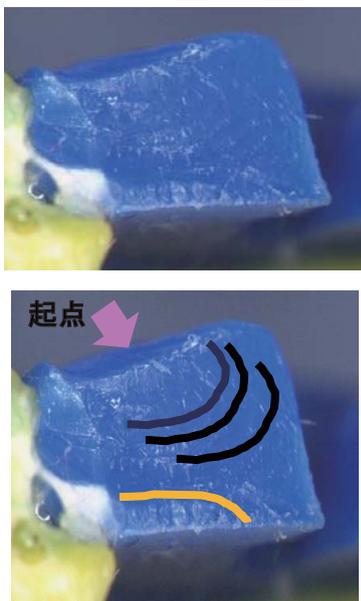


図1 マイクロスコープによるプラスチック破面の観察
(上：プラスチック破面、下：破面の解析例)

表1 破損原因の仮説と検証方法の一例

仮説	検証方法	用いる機器や手法
使用時に材料が熱、紫外線、温水、薬品により劣化して破損	使用環境の調査、外観観察、劣化部位と正常部位の熱分解温度、ガラス転移温度、粘度等の比較	顕微鏡 分子量分布 (GPC) メルトフローレート (MFR) 示差走査熱量計 (DSC) 熱重量分析 (TGA) 赤外分光分析
成形時の結晶化不足により強度が低下し破損	成形品の結晶状態が不適切	示差走査熱量計 (DSC) 密度測定 偏光顕微鏡
隣接する材料における膨張率の差で破損	使用材料における線膨張率の測定	熱機械分析 (TMA)
強度見積もり間違い (設計ミス) による破損	材料試験による強度測定など	万能材料試験機 CAEによる構造解析 力学計算
可塑剤付着による破損	破面解析、可塑剤の分析	顕微鏡 赤外分光分析 ガスクロマトグラフ質量分析 (GC/MS)

成形不備による破損

生活・環境産業部 宮崎 崇

はじめに

成形をA社で行っていたときは、全く問題がなかったのに、B社に成形依頼先を変えたら成形品が割れ始めた・・・、冬場に作った製品は問題ないのに、夏場の製品が割れてしまう・・・こんな相談を受けることがあります。どちらのケースも同じ金型を用いて樹脂も同じ物を使用しているというのですが、これはどのようなことが考えられるのでしょうか？このような場合、成形条件の違いによる結晶化度の違いや残留ひずみが原因になっていることが多いようです。

成形条件の違いによる破損

プラスチックはPPやPET等の樹脂中で一部が結晶化する結晶性プラスチックとPVCやPCのように結晶化しない（厳密には結晶の割合が少なくて実用上影響をあたえない）プラスチックにわかれます。結晶性樹脂の場合、冷却速度等の成形条件が違えば同じ樹脂でも結晶化する割合が変わってしまい、力学物性に大きな影響がでてしまいます。図1は全く同じ樹脂を用いて意図的に①結晶化しにくい条件と②結晶化しやすい条件で成形したPPを引張試験した結果です。図1内の小図には引張ひずみ20%までを拡大して表記しています。図2は試験後の試料の外観及び破断面です。①の試料は非常によく伸び、引張ひずみ約400%で破断しているのに対し、②はわずか11%ですぐに破断しています。一方で強度比較すると②は①よりも最大引張応力が大きくなっています。また破断面も①と②で大きく異なり、特徴のある破断面となっています。

非結晶性樹脂の場合は、結晶化度の違いに関するトラブ

ルはおこりませんが、成形時の冷却速度の違い等で成形品内に収縮率の違う部位が発生します。この収縮率の違いにより成形品内にひずみ（残留ひずみ）が発生してしまいます。残留ひずみが大きいと、衝撃で割れやすくなったり、溶剤の付着等のきっかけで割れが発生しやすくなります。

上記以外にも、成形時によくあるトラブルとして、成形時の樹脂が劣化して破損した（成形温度が高すぎる、あるいは溶融時間が長すぎて樹脂が熱分解した、乾燥が不十分で成形時に樹脂が加水分解した）や、成形品中に異物や気泡が入り込み、そこに応力が集中して破損した等の事例があげられます。

プラスチックの強度に関わる因子

本間技術士事務所所長でプラスチックに関する数多くの書籍を執筆している本間精一先生によると⁽¹⁾、実用強度を強化する手法として、⑦分子間の塑性変形をおこりにくくする（分岐化、架橋等）、⑧分子量を大きくする、⑨結晶構造をとらせる、⑩ポリマー分子を延伸させる、⑪繊維強化材で強化する、⑫ポリマーアロイで強化する、の6点が書かれています。これらの因子のうち、⑦、⑧、⑨、⑩は材料に関わる因子ですが、⑪、⑫は成形条件に関わる因子ですし、⑧の分子量も成形条件によって変化します。割れが発生すると、付着物や材質検査等の化学分析を希望されるお客様が多いのですが、実は本稿のように、成形条件や、成形品の設計に関わる割れも見受けられます。割れが発生した状況を精査して、原因探査を行っていただければと思います。

〔参考文献〕

(1) 本間精一, "設計者のためのプラスチックの強度特性", 丸善出版.

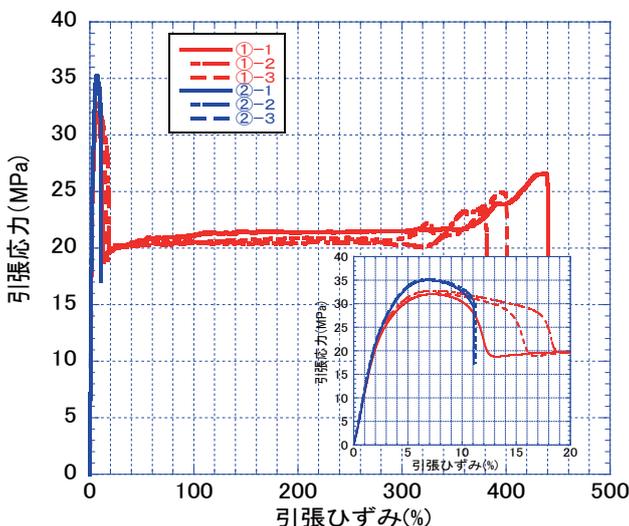


図1 異なる条件で成形したPPの引張試験結果

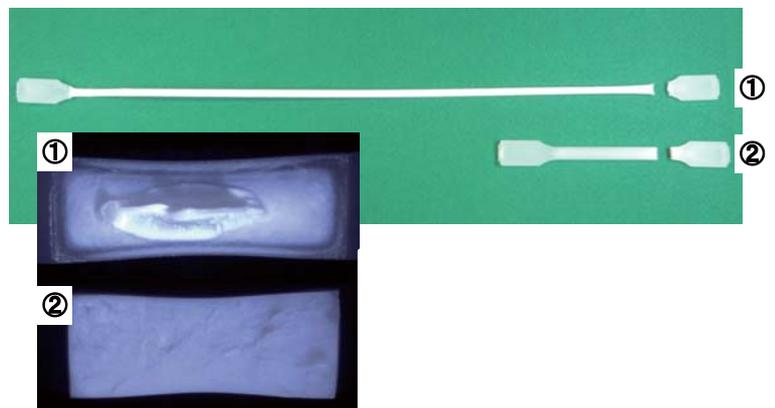


図2 引張試験後の試料概観と破断面
(上: ①、下: ②)

劣化による破損—保管・使用中の破損—

生活・環境産業部 宮崎 崇

はじめに

「プラスチック製品を長期間保管中に割れてしまった」とか「プラスチック製品を使用中に割れてしまった」といった経験をされた方も多いと思います。このような場合、そのプラスチックと相性の悪い物質と接触していたことやプラスチックが劣化して、力学強度が弱くなったことが予想されます。前者は、環境応力割れ（ESC）と呼ばれるものです。樹脂に溶剤や可塑剤等が接触し、そこに残留ひずみやネジの締め付け等で応力がかかると、それらの弱い力で割れてしまうという現象です（TECHNORIDGE285、289号にて詳述）。後者は、光や熱等によりプラスチックが酸化されプラスチックを構成する高分子の分子量が下がり、所定の強度を発現できなくなって割れてしまう現象です（TECHNORIDGE289号にて詳述）。劣化の場合、プラスチック表面に細かなクラックが入っていたり、白化したりしているなど見た目ではわかるため、劣化しているかどうかを調べて欲しい・・・というご相談ではなく「この樹脂はどのくらい劣化が進んでいますか？」や「10年間保証したいのですが、もちますか？」といった相談が多くなります。本稿では、このような依頼に対し当センターでどのような対応をしているかご紹介したいと思います。

酸化誘導時間（OIT）測定

プラスチックの酸化劣化は、プラスチック中の酸化防止剤がプラスチックの代わりに酸化されてから進行します。そのため、「どのくらい劣化が進んでいるか？」ではなく「どのくらい劣化しやすい状況になっているか？」という意味でプラスチック中の酸化防止剤の残存量を指標にすることができます。図1は示差熱分析装置（DTA）を用いてPPのOITを測定した例です。測定は試料を窒素雰囲気下で所定温度（今回は200℃）まで升温し、その後雰囲気を空気に変えてPPの酸化劣化（発熱してDTA曲線が変化し始める点）が起こるまでの時間を評価します。空気雰囲気に変わってから発熱が起こるまでは酸化防止剤が消費されている時間と考えられますので、この時間が長いほど酸化防止剤の残存量が多いと考えられます。実際に未使用のPPと長期間使用したPPを比べるとOITが短くなっています。長時間使用したPP2では酸化防止剤はほぼ消費されており空気雰囲気に切り替わった直後から酸化劣化が起こっていることがわかります。

寿命を予測するための目安となる手法

「この製品を10年間保証したいのですが、もちますか？」という質問へは、正直にわかりませんと解答させていただいております。使用環境によってその製品の寿命が大きく変わってしまうからです。それでも予測するための目安となる

いくつかの手法を紹介します。屋外で使用する製品にはキセノンウェザオメーターによる促進劣化試験があります（TECHNORIDGE289にて詳述）。プラスチックの劣化に主として関与する紫外域の日本の平均年間放射露光量306(MJ/m²)を基準とすると、放射照度60W/m²のキセノンウェザオメーターでは1,417時間が1年相当となります。加水分解が劣化の主要因となるプラスチックでは、多湿な条件に保持し促進劣化試験を行います。ウレタン樹脂（人工皮革）の業界では70℃95%RHで1週間放置が実使用の1年間という目安になっています。光の当たらない場所で使用する製品については、熱による促進劣化試験となります。熱劣化は分解反応ですので、アレニウスの式を利用して、寿命を予測することができます。製品が割れることの指標を仮に強度が半分になることと仮定して評価する場合、①複数の温度で促進劣化させて強度が半分になるまでの時間を実測、②それらをプロットして室温で強度が半分になる時間を推測する、という手法で行います。また、経験則でラフな見積もりですが、昔から10℃2倍則として知られるものがあります（表1）⁽¹⁾。繰り返しますが今回ご紹介した方法は全てあくまで大ざっぱな目安です。決して実際の寿命ではないということを理解した上で利用していただければと思います。

〔参考文献〕

(1) 坪井学, 吉村達彦, ” 機器構造部品の安全設計・予防保全における信頼性工学適用”, 材料, 50(2), (2001), pp.187-192.

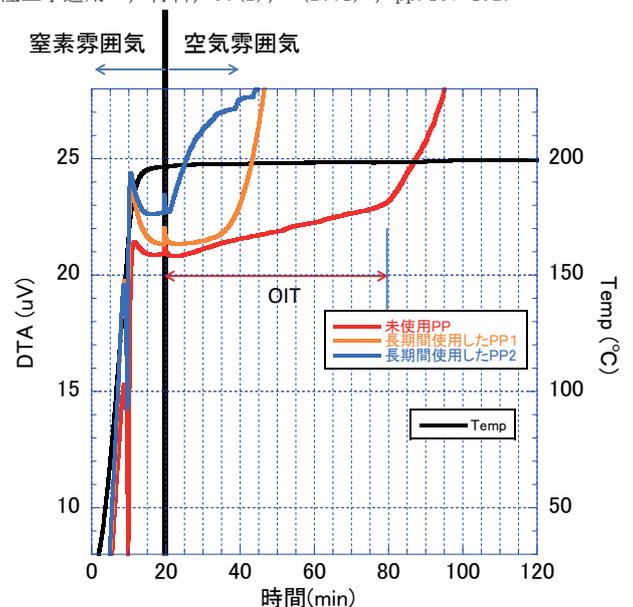


図1 PPのOIT測定例

表1 80℃で促進した場合の各温度における換算の目安

温度	促進時間
80℃	100時間 で熱劣化(実測)
70℃	200時間相当(80℃の2倍)
60℃	400時間相当(70℃の2倍)
50℃	800時間相当(60℃の2倍)
40℃	1600時間相当(50℃の2倍)

応力集中による破損

機械産業部 上森 大誠

はじめに

「壊れない製品を設計したい」。これは、設計技術者が抱く共通の想いではないでしょうか。ハワイのマウナケア山に設置された天体望遠鏡「すばる」は、2016年現在、運用から17年が経過していますが、いまだに設計ミスに起因するような大きな故障は発生していません。開発に携わった技術者は、その理由として、CAEの活用により設計段階における机上検討がしっかりとできたことをあげています⁽¹⁾。なお、CAEとは、コンピュータ上で仮想試験を行い、製品性能を評価するシミュレーション技術のことをいいます（TECHNORIDE 307号にて詳述）。

そこで、本稿では、「壊れない製品設計」を目指し、設計ミスによる破損の主原因である応力集中に焦点をあて、CAEを活用した応力集中の回避方法について紹介します。

机上検討で必要な知識

机上検討では、材料力学と材料強度学の知識が必要となります。材料力学では、基本公式による力学計算により、部材に働く応力や変形量を求めます。最近では、CAEによる応力や変形量の計算が主流になってきており、材料力学では対応できない複雑な形状に対しても応力や変形量を計算することが可能になってきました。一方、材料強度学では材料が有する強度について考え、材料の破壊を取り扱います。机上検討では、材料力学を用いて部材に加わる応力や変形量を計算し、材料強度学に基づいて計算値を解釈することで部材が破損しないかどうかを判断していきます。

机上検討での着眼点

機械部品の破損原因に関する調査結果によると、87%が疲労現象（材料が長期間に渡って繰り返し応力を受けた時、応力の大きさが材料の引張強さより小さい応力でも亀裂が発生し破損に至る現象）によるものであると報告され

ています。また、破損箇所に関する内訳（図1参照）より、90%が応力集中に関係しており、加えて破損事故の80%がメーカ側の強度検討不足が原因と指摘されています⁽²⁾。以上より、机上検討では疲労破壊をおこしやすい応力集中部に特に注意をはらう必要があるといえます。

応力集中

応力集中について簡単な例で解説します（図2参照）。

(A)、(B)、形状の異なる紙を上下方向に引張った場合、どちらが破損しやすいでしょうか。(B)と答える方が多いと思いますが、これを応力という物理量で考えてみましょう。応力とは、部材内部に発生している単位面積あたりの力であるため、(A)では、荷重Fが作用する断面積をAとした時、応力は $\sigma = F/A$ で求められ、(C)に示すとおり断面Aには一様な応力が作用します。しかし、(B)のように切欠きがあれば、その部分で応力が一様にならず、局所に応力が集中します。(B)を引張った場合、切欠き部分から破損を起こすことが直感的に分かるとは思いますが、これは切欠き部に応力が集中するためです。実際、断面Bに発生する応力は荷重Fを断面積Bで割った平均応力 F/B よりもずっと大きな応力 σ_{max} となります（(C)参照）。すなわち、切欠きがある場合は、切欠きがない場合の荷重より小さな荷重で破損に至ります。

CAEの活用による応力集中部の把握

部品の破損は、応力が集中する部分から発生することが多いため、可能な限り応力集中を低減させる設計が求められます。よって、応力集中が発生する部分を把握する必要がありますが、この把握に有効なのがCAEです。例として、図3(A)の部品を3DCADで設計し、S面を完全拘束、T面に等分布荷重の境界条件を与えた際のミーゼス応力に関するCAE解析の結果を(B)に示します。(B)より、(1)切欠き部、(2)コーナー部、(3)空洞部が

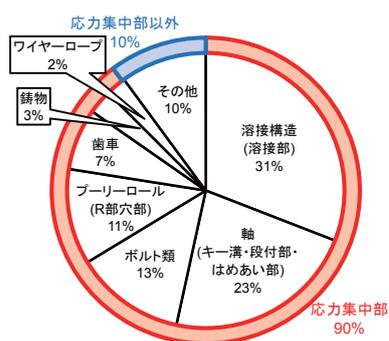


図1 機械部品の破損箇所の内訳⁽²⁾

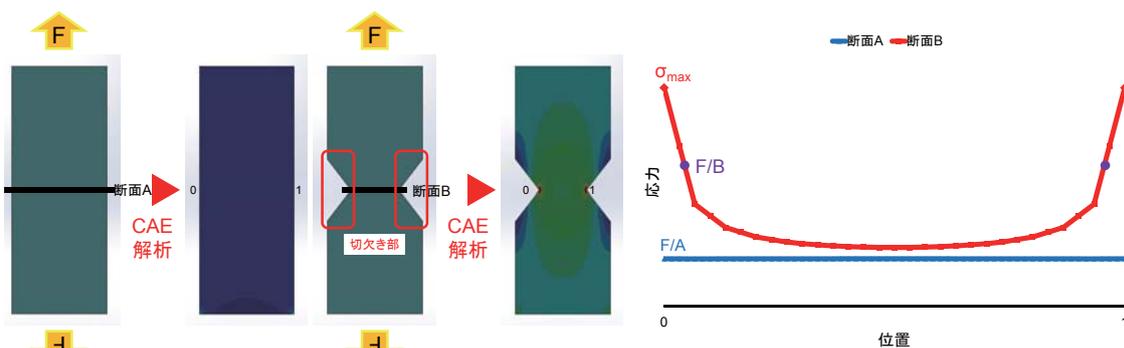


図2 応力集中の事例

赤くなっているため、この部分が応力集中部であるといえます。ゆえに、この部分の応力を低減させるように形状変更する必要があります。今回の場合では、各応力集中部に対して、(1)切欠き部➡無くす、(2)コーナー部➡十分なフィレットを付ける、(3)空洞部➡肉ヌキを入れるといった形状変更を行うことにより、(C)に示した解析結果のとおり応力集中を回避することができました。

CAEの活用による応力集中部の評価

応力集中を低減させるために形状変更は有効ですが、実設計では加工性やコストも考慮する必要があるため、常に形状変更ができるわけではありません。その際には、応力集中部の応力値をCAE等により計算し、材料強度学に基づいた応力値の解釈により部品が破損しないかどうかを判断します。しかし、CAEでは応力集中部の応力値を正しく計算することができません(応力特異点問題)。その一例を紹介します(図4参照)。(A)、(B)に示すモデルA、Bを左右方向に引張った場合を考えます。なお、両モデルの違いは、切欠き部の先端におけるフィレットの有無だけです。CAEでは、応力値等を計算するためにメッシュ分割を行うため、(C)、(D)に示すように、切欠き部先端のメッシュ分割の粗細とそれに伴う切欠き部の最大応力値の変化を観察しました。これより、最大応力値に関して、モデルAでは漸増している一方で、モデルBではある一定値に収束しています。モデルAのようにメッシュ分割を細かくしていった応力がいつまでも収束しない点があれば、それが応力特異点になります。よって、このような特異点が存在するモデルではその周辺を評価対象から外して応力の分布を見る必要があります。一方、モデルBはフィレットにより特異点が存在しなくなるので最大応力値で評価できます。また、メッシュを細かくしていくと応力値が収束しているの、得られた応力結果も良好な精度があると判断できます。

おわりに

本稿では、破損の主原因である応力集中に焦点をあて、

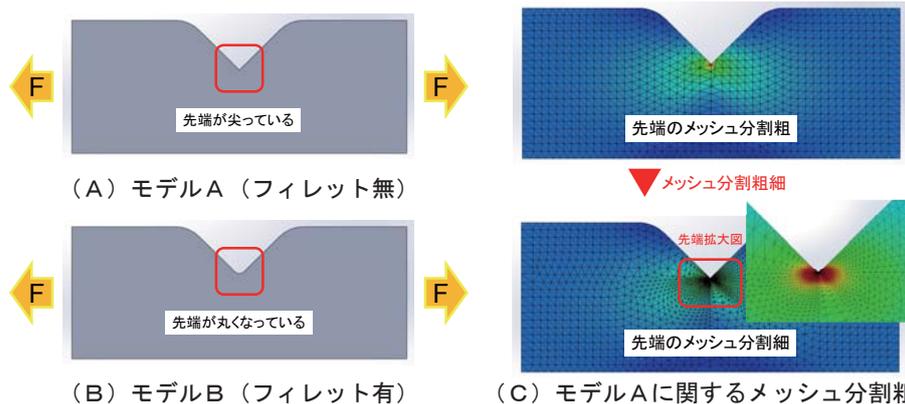
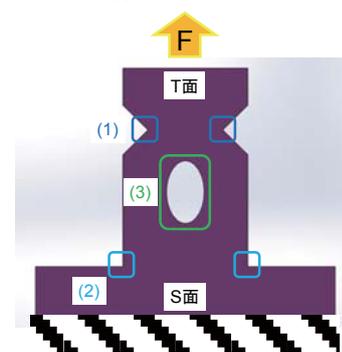


図4 CAEの活用による応力集中部の評価事例

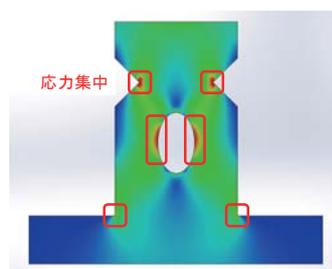
主にCAEとの関係について述べました。CAEを始めて間もない設計技術者の中には、「CAEは万能である」と考え、あらゆる問題をCAEで評価しようとする方がいますが、例えば本稿で取り上げた応力特異点問題はCAEでは適切に解くことができません。よって、CAEを行う際には、前項で述べたようにメッシュ分割数を最低3回程度変化させて計算を繰り返し、解析結果の傾向を確認してください。度々1回の解析結果で評価しようとする方をみますが、1回のみでは適切な評価ができないということは必ず覚えておいてください。最後に、CAEに関する試験依頼、または技術相談があれば随時対応させていただきますので、その際は当センター機械産業部までご連絡ください。

[参考文献]

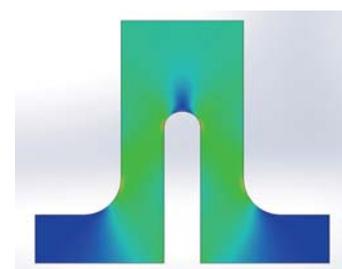
- (1) 遠田治正, 強度検討のミスをなくすCAEのための材料力学, (2015), 日刊工業新聞社.
- (2) 西田新一, ”溶接構造物の疲労破壊と疲労強度因子(1)”, 溶接学会誌, 62(8), (1993), pp. 595-598.



(A) 3Dモデル (応力集中モデル)

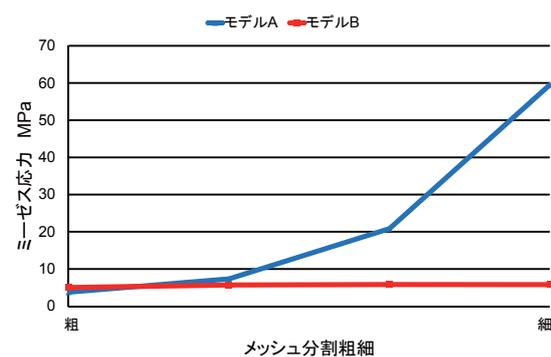


(B) ミーゼス応力 (応力集中モデル)



(C) ミーゼス応力 (応力集中緩和モデル)

図3 CAEの活用による応力集中部の把握事例



(D) メッシュ分割粗細と最大応力値の関係

事業名：平成28年度自転車等機械工業振興補助事業（公益財団法人JKA）

機器名：非接触三次元変位変形計測システム



この設備の仕様は？

製品名（メーカー）

ARAMIS 6M Professional Line（GOM社）
仕様

- ・カメラ解像度：600万画素
- ・計測範囲（画像撮影範囲）：縦50mm×横50mm～縦560mm×横440mm
- ・ひずみ計測範囲：0.005%～2000%（ $50\mu\varepsilon \sim 20 \times 10^6 \mu\varepsilon$ ）
- ・サンプリングレート：25Hz（フル解像度）
- ・計測により得られる代表的な物理量
各方向ひずみ、最大／最小主ひずみ、ミーゼス相当ひずみ（それぞれ、公称ひずみ、真ひずみ）、ヤング率、ポアソン比、応力ひずみ線図

この設備の特徴・用途は？

○特徴

計測物が変形したときの変形量やひずみ量の分布を非接触・三次元で計測できるシステムです。従来からある接触式のセンサーでは計測が難しかった計測物に対しても、適用することが可能となります。

○用途

- ・強度評価
（例）複合素材を含む金属や合成樹脂等の材料試験による機械的性質の評価
- ・挙動解析
（例）電子部品の熱膨張解析、溶接部の剥離挙動解析
- ・CAE解析の妥当性検証
（例）材料モデルの同定



詳しくは、機械産業部までお問い合わせください。

事業名：平成27年度地方創生加速化交付金

機器名：物性予測計算ソフト

この設備の仕様は？

製品名（メーカー）

J-OCTA（株）JSOL

仕様

- ・計算手法
分子動力学法、平均場法、散逸粒子、動力学法、有限要素法
- ・計算タスク：全原子モデル計算、粗視化モデル計算等
- ・計算で得られるプロパティ
3次元構造、相分離構造・界面構造、緩和弾性率、貯蔵・損失弾性率、伸長粘度、密度、熱膨張係数、ガラス転移温度、ポアソン比、誘電率、熱伝導率、熱拡散率、気体透過率等

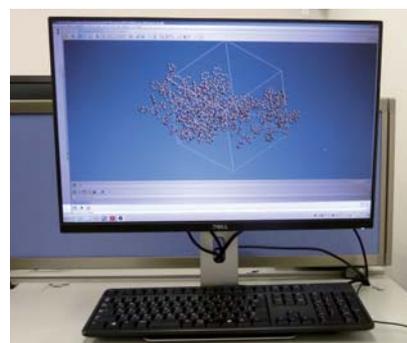
この設備の特徴・用途は？

○特徴

各種ソフトマテリアルを原子単位あるいは集合体単位でシミュレーションを行い、原子からマイクロメートルスケールの特性を予測するシステムです。視覚的に非常にわかりやすい操作画面になっており、初心者でも利用しやすい環境になっています。

○用途

- ・一軸伸長
（例）ポリマー等の応力ひずみ曲線の作成
- ・ガラス転移温度
（例）各温度での比体積計算によるガラス転移温度の算出



詳しくは、化学産業部までお問い合わせください。

事業名：平成27年度地方創生加速化交付金

機器名：量子化学計算ソフト

この設備の仕様は？

製品名（メーカー）

SPARTAN'16（Wavefunction Inc.）

仕様

- ・計算手法：分子力場、半経験的分子軌道、HF分子軌道、密度汎関数（DFT）等
- ・計算タスク：エネルギー、平衡構造、遷移状態構造、各種スペクトル（IR、NMR、UV等）、配座解析、エネルギープロファイル等
- ・計算で得られるプロパティ
原子電荷、熱力学定数、静電的プロパティ、酸性度／塩基性度、溶媒効果等

この設備の特徴・用途は？

○特徴

各種化合物を分子レベルでシミュレーションを行い、化合物の安定構造や電子状態を予測するシステムです。視覚的に非常にわかりやすい操作画面になっており、初心者でも利用しやすい環境になっています。

○用途

- ・反応性評価
（例）化学反応の位置選択性の予測、反応メカニズムの解析
- ・スペクトル予測
（例）色素等の紫外可視吸収スペクトルの予測



詳しくは、化学産業部までお問い合わせください。

技術情報誌
編集・発行
和歌山県工業技術センター
和歌山市小倉60番地
テクノリッジ

発行日
2016年11月30日
FAX
073-477-2870

印刷
和歌山市中之島1-4-5
TEL
073-431-5517