

世界き裂発見の旅

広島大学名誉教授 中佐啓治郎

1. 旅のはじめに

各地を訪れたとき、古い建物、絵画、看板、展示品などに、さまざまな形の割れが入っているのを見ることがある。中には、シンボリックなものにまで割れが入っていて残念に思うこともあるが、逆に、なぜ、このような割れができたのかを考えるのは、材料の破壊の一端を研究してきた私にとって、旅のもう1つの楽しみでもある。いつの頃からか、それらを写真やビデオに記録しておこうと思うようになった。割れ形態を分析することは、工学的には、機械・構造物の事故原因を解明するための重要な手段の1つであるが、旅に出たときは、そのような意識はなく、とにかく面白い模様や歴史を感じさせるものがあれば、と思って撮影している。旅の途中では、見つけたき裂を分析する時間はないから、記録しておいて後からゆっくり見る。面白いき裂を見つけても、たまたまカメラを忘れた、写真を撮ったがピンボケだった、人目が恥ずかしいのでやめておこうと思ってシャッターチャンスを逃した、など、失敗は多い。もちろん、観光スポットでは、まず美しい建造物や絵画に見ることが先で、き裂を探すことは二の次であるが、気持ちに余裕ができると、ふっと思いついてき裂を探すこともある。

地震の地割れや、災害で起こる家屋の破壊は、あってほしくない。自分の家の塀にも、割れはできてほしくない。しかし、割れは、「もの」や「時間」を選ばない。美術館にある名画にも、ひび割れはないほうがよいが、幸いなことに、人間の脳が細かいひび割れを無視して眺めるように命令を出してくれるから、それほど気にはならない。割れは自然界にたくさんあるし、歴史のある古い街にも多い。割れは結果であり、その原因は、長い間にたまった、あるいは突然にできたひずみまたはエネルギーである。材料の劣化や、人間の手入れの怠慢も原因である。割れは、内部で進行していたさまざまな変化が、我々の思いとは関係なく、あからさまな形となって姿を現したものといえる。

2. 割れ、はく離のコントロール技術

「割れ」そのものを、悪者呼ばわりすることはできない。人間は、特定の目的のために割れを利用し、割れの起こり方をコントロールしてきた。古くは、中国の殷・周の時代に、亀朴（きぼく：あらかじめ溝を入れた亀の甲羅に、焼いた木の棒を押しつけ、ひび割れの起こり方から、その年の豊作や戦の行方を占う）が、神聖な行事として行われたという（誰かがコントロールしてはいないと思うが）。割り箸、チョコレートの溝、カッターナイフを折るときの切れ目、タイヤの溝の刻み方、茄子や鳥賊の表面に包丁で切れ目を入れて熱や味のしみこみをよくする工夫など、壊れるように、あるいは壊れない程度に、溝やき裂を利用している例はいくらでもある。最近では、切り餅をふっくらと焼くための溝の付け方で、2社が特許争いを演じた。

はく離の技術も重要である。接着したものがはく離しては困る場合もあるが、適当にはがれやすいことが必要な場合もある。ポスト・イット (Post-it) (付箋) は、強力な接着剤を開発しようとしていた 3M (本社：アメリカ・ミネソタ州) で、失敗から偶然生まれた発明として有名である。

3. 割れ・はく離の保存・修復技術

歴史的な物品、たとえば遺跡の壁画では、割れやはく離が進行しては困るので、その保存・修復技術、具体的には、割れを目立たなくする技術、はく離を防止する技術、それ以上の劣化を防ぐために敢えてはく離作業を行って安全な場所に移す技術、などは、文化遺産を守り後世に伝えるという意味で、非常に重要である。建造物や絵画・仏像の修復作業も同じである。実際の作業工程の詳細は分からないが、素材や割れの特性、接着・接合法などに関する知識をもとに、長い間に培われた熟練の技

により、ていねいで心のこもった作業が行われているであろう。古い文化遺産を多くもっている日本でも、近代的な検査技術・材料技術と伝統的な修復技術との融合がますます必要になると思われる。また、文化財を震災・火災・侵入者から守るシステムづくりも重要である。

4. 割れ、しわ(膨れ、はく離), しみの関係

割れは、引張り応力のもとで、材料の伸びが足りなくなったときにできる。「しわ」は、内部が縮もうとして、表面に圧縮応力が作用したとき、表面の材料が縮めなくなったときにできる。「しみ」は、ある場所から染み出した液体あるいは外部から物体にかかった液体の形が残ったもので、これを支配するのは、流体力学、表面張力、吸着力、浸透力、材料の特性であろう。「しわ」や「しみ」も、工学的には重要な問題である。たとえば、車のボディーに使う薄い鋼板をプレス成形するとき、ストレッチャー・ストレインという「しわ」ができて不良品となることがある。また、一枚の布にどのようなしわを作れば、小さくたたみこめて、すぐに広げられるかという問題は、朝顔の花などの植物が一部解決しているが、折りたたみ傘、さらには「ミウラ折り」の発明にまでつながる。絞り染めは、「しわ」と「しみ」が組み合わさった芸術と言える。私は「しわ」や「しみ」まで手は広げられないが、「割れ」、「しわ」、「しみ」を支配する物理法則には共通点があると思われるので、「割れ」の観察のついでに、記録の中に入れておきたい。

5. あまり観察したくない割れ

300年に一度の大地震は、1年に一度の小さな地震の繰返して置き換わってほしいと思うが、地殻はそのように動かない。現在、我々のできることは、活断層の上に街をつくらないとか、被害を最小限にとどめる態勢を確立しておくくらいしかない。人間が起こした戦争でできた破壊と割れの跡を見ることは、そこに暮らしていた人々の犠牲を想像させ、心が痛む。列強の探検隊が遺跡から剥ぎ取って持ち帰った壁画の一部は、博物館で見ることができても、剥ぎ取られた現地でその痕跡を見ると、さまざまな思いが浮かぶ。原因はどうあれ、割れている、はく離している、という事実は、事実として見るしかないが、生々しい現実や悲惨な歴史にまつわる証拠を見ることは、心が重い。それらの歴史的事実を肌で知ることにも旅の目的であるが、旅で楽しめるのは、それらとは無関係な割れの模様を偶然見つけたときである。

き裂の分岐に限らず、分岐現象には、さまざまなものがある。人間に関係するものでは、一族の盛衰を示す家系図、政党の分裂と合体、企業組織図・支店網、情報収集網・連絡網など、たくさんあるが、これらは、あまりにも人間くさくて、複雑で、難しく、分析する気は起こらない。人間界の権力争いや分裂はたくさん見たし、経験もした。枝分かれした大河の景観、巨大な樹木の枝分かれ、雷の稲妻などは壮大である。自然界を観察するほうが、はるかに気が休まる。

6. 身の回りの割れ

話が半分発散してしまったが、我々の身の回りにも「割れ」は無数に存在する。水溜りが乾いたあとの土の割れ、割れて剥げたペンキ、舗装道路のひび割れ、など、いくらでも見ることができる。陶磁器では、「貫入」と呼ばれる割れ模様が多くの人々を魅了している。「石はぜ」、「虫食い」といった欠陥までもが尊重され、作画的に作る技法もあるくらいであるから、日本人は、小さな「割れ」は、きれいではないようである。「金直し」あるいは「金継ぎ」は、今日でも割れの修復に用いられているが(この技術を習う人もおられる)、これは不思議なことである。現在では、割れがわからないようにする技術はいくらでもあり、わざわざ割れがわかるように金で強調することはないと思うが、これも「割れ」を逆手に取った美意識の1つであろうか。あるいは、割れを隠すことを潔し、としない気持ちの現れであろうか。もし、割れがわからないように修理した骨董品を高く買ったら、腹が立つであろう(私にはその経験はないと思うが、割れない偽物は多く買ったことは間違いない)。遠く

の旅に出ることができなくなったら、身のまわりの割れを観察する旅で退屈さを紛らわすつもりである。

7. 旅の準備

旅に出るには、身支度や心の準備が必要である。ガイドブックであらかじめ予備知識を仕入れておいたほうが、実物を見たときの印象に深みが出る。「き裂発見の旅」は気楽な旅ではあるが、それでも、下記に述べるような知識が頭にあるかないかで楽しみの程度が異なる。実際に観察されるき裂模様には、すぐには説明がつかないものも多いが、それは、旅のあとの楽しみである。

7.1 き裂の伝ば様式

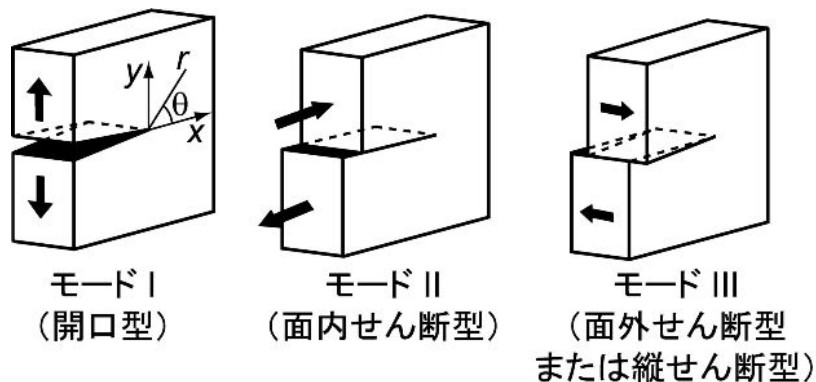


図1 き裂が伝ばするときの力の加わり方。モード I：割り箸を割るときのように、上下に引張り力を加える。モード II：トランプを重ねて横にずらすときのように、せん断力を加える。モード III：「するめ」の入った袋を開けたり、「するめ」そのものを裂いたりするときのように、前後にせん断力を加える。実際には、2つ以上のモードが混じっている場合も多い。

7.2 乾燥した木の皮の割れは、なぜほぼ同じ間隔になっているか？ その間隔はどのようにして決まるのか？



図2 乾燥した木の枝で観察される平行なき裂

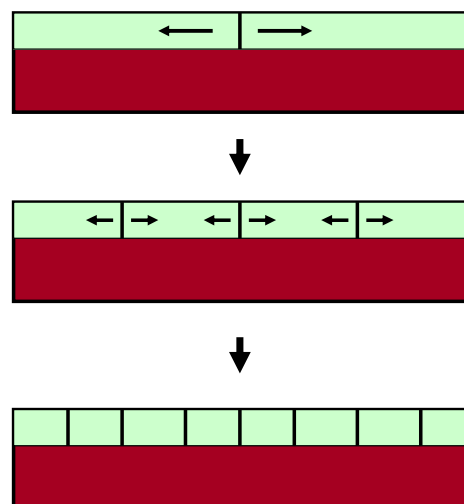


図3 「繰返し分割型の割れ」のモデル

切り倒された木材や枝の樹皮の割れが起こる原因には、乾燥と降雨による湿潤サイクル、昼夜の温度サイクルによる熱膨張・収縮サイクル、長期間の放置による材質の変化、引張り力あるいは曲げモーメントが加わることによる引張り応力の発生、などが複雑にからまっている。

1. 樹皮と素地がくっついているとき、樹皮が乾燥して収縮しようとする場合、樹皮に引張り応力が作用し（弾性係数が増加したことに対応）、樹皮の一番弱い部分で、最初の割れができる。一度割れができると、割れの近くの樹皮の引張り応力は小さくなっているので、最初の割れから遠く離れた部分で つぎの割れが起こる。このようにして、乾燥が進むにつれて、ほぼ等間隔の多数の割れができる。樹皮が素地から剥がれてしまうと、樹皮は素地とは無関係に自由に収縮できるので、それ以上割れは起こらない。

2. 木材が引張り力あるいは曲げモーメントを受けたとき、樹皮と素地の弾性係数が異なると、樹皮に引張り応力が作用し、引張り力あるいは曲げモーメントの増加とともに、上記と同様の割れが繰返し起こる。

3. 樹皮と基材の熱膨張係数が異なると、温度差により樹皮に引張り応力が作用し、割れが生じる。

皮膜をコーティングした材料が引張り力あるいは曲げモーメントを受けて割れが生じるときの、皮膜に作用する応力や割れの間隔の計算に興味をお持ちの方は、このホームページの「[広島大学時代の研究](#)」[5-B](#) ご覧ください。

7.3 陶磁器で観察される「斜めき裂」と残留応力の関係は？

陶磁器に、轆轤（ろくろ）の回転方向に関係する、ねじれたき裂模様が表面にできることがある。これは、なぜできるのだろうか。また、素地を作るときのろくろの回転方向は、どちらだったのか。



図5 カップの側面にできた斜めの割れ
（島根県 温泉津：松溪山焼）



図6 カナダ・ビクトリアの陶器店で見た
壺表面の斜めの割れ（図5とは逆方向の
斜め割れができている）

ろくろ成形を行うときの変形の程度は内表面よりも外表面の方が大きい。また、形状の複雑な陶器では、場所によって肉厚も異なる。焼成時の温度の上昇・冷却の熱履歴も複雑である。さらに、釉薬の変形特性、熱的性質、割れ強度は、素地のそれと異なる。したがって、以下に示す、斜めき裂ができる理由の説明は定性的なものであり、多くの推測が含まれることをご了承いただきたい。

(1) 陶磁器を作るときには、まず、粘土の塊をろくろの台に載せて回転させるので、粘土は回転方向

に捩じられる（せん断応力を受ける）。この状態は、図7(a)のように、45°の方向に粘土が引張りまたは圧縮の応力（変形）を受けることと等価である。このため、粘土の粒子もその方向に変形している。（雑巾を固く絞っている状態）

- (2) 器の成形が終わると、粘土の粒子はもとの形に戻ろうとするが、ろくろ成形時の変形の程度は内部よりも表面の方が大きいので、表面の粘土粒子には、(b)のように、ろくろ回転時に受けた応力と反対方向の応力が残る。これを残留応力と呼んでいる。（雑巾を絞るのをやめると、元へ戻ろうとする力が働くが、元の形には戻ることができない）
- (3) 半乾きの素地に釉薬をかけて乾燥させ、高温で焼成するとき、素地はさらにもとの形にもどり、残留応力の大部分が解放される。一方、釉薬は高温でガラス状になっているが、素地と一体化しているので、釉薬にも(b)に示すような応力が作用する。しかし、高温では釉薬は容易に変形できるので、釉薬には大きな応力は残らない。
- (4) 高温で長時間保持されたのちに、陶器は徐冷されるが、冷却途中も素地が元の形に戻ろうとする。釉薬は冷却過程で硬化するので、素地のもとの形に戻ろうとする変形（応力）に耐えきれず、(b)に示すように割れる。
- (5) 釉薬の熱膨張係数は素地よりも大きいので、冷却時には素地よりも収縮が大きく、釉薬に軸方向および接線方向の引張り応力が発生する。これと、上記の応力が合成されて、最終的な割れのパターンが決まる。軸方向よりも接線方向の熱収縮応力が大きければ、割れは45°よりも縦割れに近い方向になるであろう。
- (6) 結局、き裂が斜めに流れている方向に、ろくろが回っていたことになる。

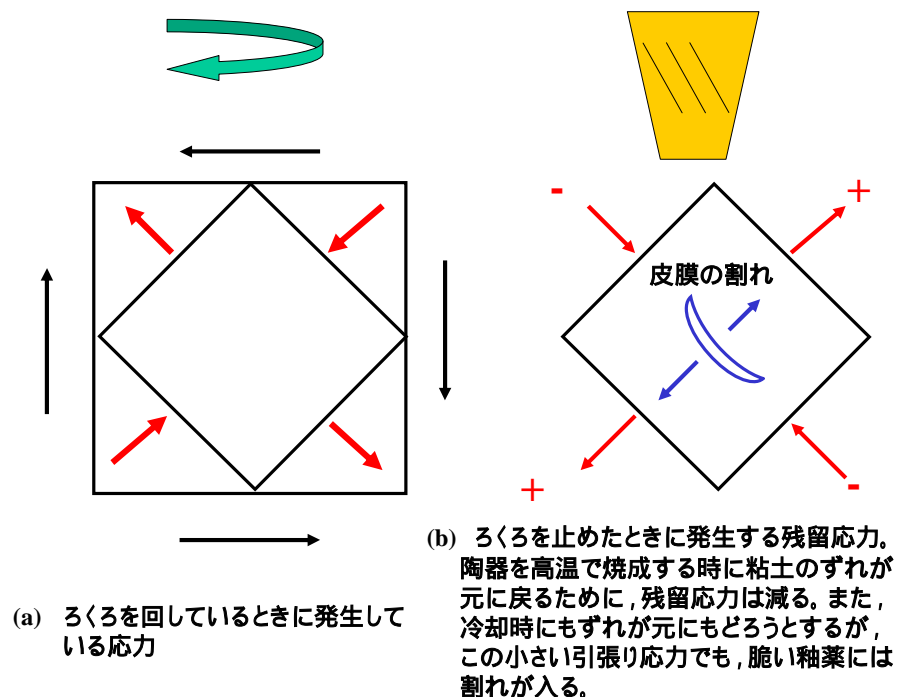


図7 陶器に発生する残留応力と斜め割れ

長い間金属材料を扱ってきた私には、土は「塑性体」の代表であり、成形後に残留応力が存在したり、焼成の際に元の形に戻ろうとしたりするとは思っていなかった。しかし、文献(4)によると、壺に耳をつける場合、もし、ろくろ成形後、壺に耳をまっすぐにつけて焼成すると、耳はろくろの回転方向とは逆方向に曲がってしまうそうである。

参考文献

(4) やきもの入門, 佐藤雅彦, 平凡社, (1983), p.16

7.4 木材が乾燥すると、なぜ半径方向（放射状）に割れるか？

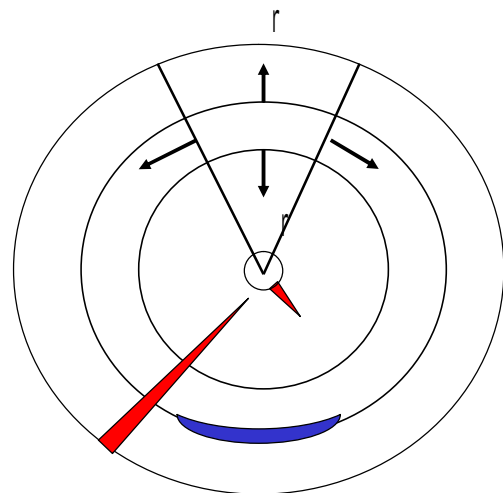


図8 木材に発生する放射状割れ

まず、切り倒した木材に放射状の割れが入る状況を考える。

1. 乾燥による割れ：生木では、割れは起こらないが、切った木材が乾燥すると割れが起こる。これは、乾燥・収縮により接線方向の引張り応力が発生すること、乾燥により木材の引張り強度（あるいはき裂の伝ぱに対する抵抗が低下すること（生木よりも乾いた木が割れやすい）が原因である。乾燥は外側から起こるから、放射状割れ割れも外側から起こり、7.2 で述べたように、理想的には割れの間隔は等しいはずである。

なお、外表面では、半径方向の応力 r は常に 0 であり、外表面から乾燥が進んで外側が収縮すると、内部の r は負（圧縮）となる。このため、接線方向（同心円状）の割れは生じない。

よく知られているように、床柱の裏には、あらかじめ縦溝（人工的な割れ）がつけてあるが、これは、表側（正面）に割れが発生するのを防ぐためである。

2. 昼・夜、夏・冬の温度変動による割れ：夕方になり陽があたらなくなると、表面近傍の材料が収縮して接線方向に引張られ、半径方向（放射状）に割れる可能性がある。一方、夜が明けて陽があたり始めると、表面近傍の材料が膨張して、接線方向の応力は負（圧縮）となる（内部は引張り）。一方、半径方向の応力は、表面では 0 であるが、内部では引張りとなる。

3. 年輪があると、境目付近の半径方向応力 σ_r が大きくなる可能性がある。また、長年の熱サイクルによって、境目付近が弱くなって、接線方向に割れる可能性がある。

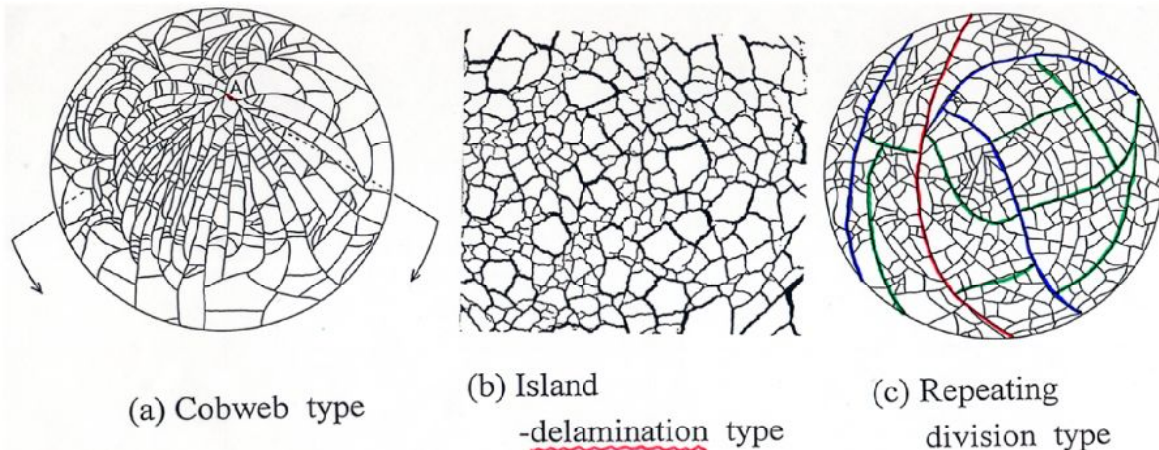
表面と内部で一定の温度差がある場合(定常状態)あるいは表面から熱が伝わる場合(非定常状態)の、中実あるいは中空円筒(円板)に発生する熱応力の解析については、下記の文献を参考にしてください。

文献

- (5) S.P.Timoshenko and J.N.Goodier, Theory of Elasticity, MacGraw-Hill Book Company,1970.
 (6) 野田直剛, 谷川義信, 須見尚文, 辻 知章, 基礎弾性力学, 日新出版, 1992

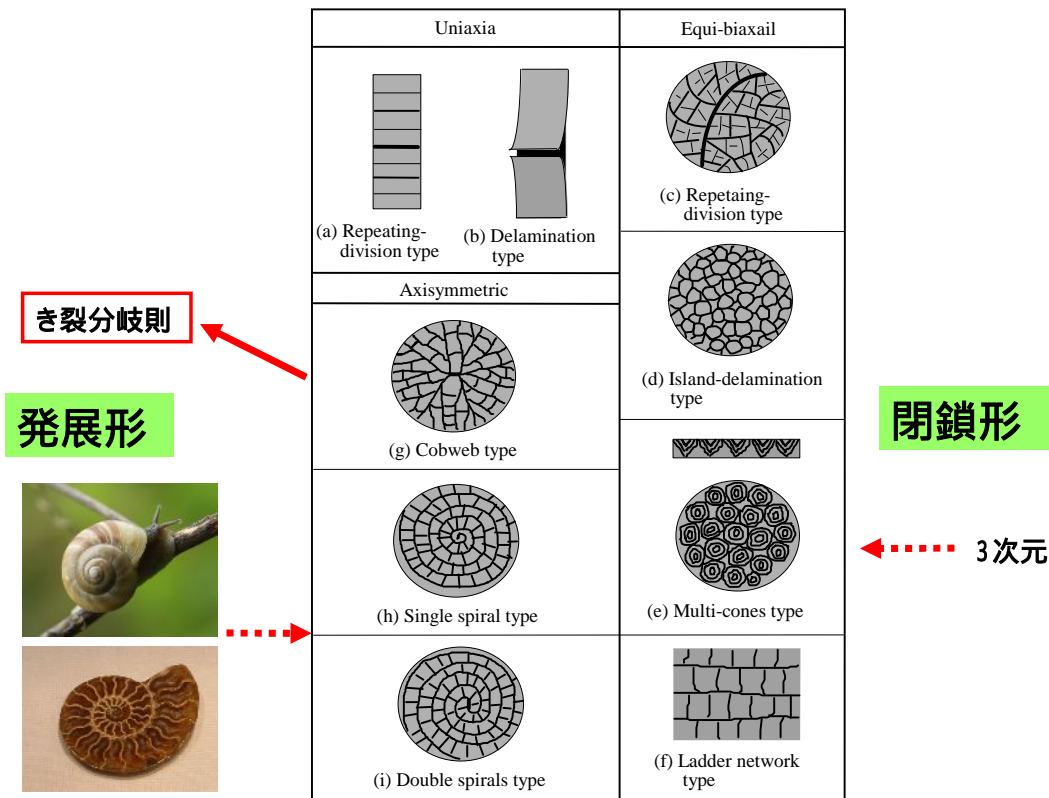
7.5 表面割れ形態の分類

下の図は、私と高 三徳 博士(現在:いわき明星大学教授)が分類した、材料表面あるいはコーティング材で見られるき裂の分岐パターンである。等二軸引張り応力を受ける材料あるいはコーティング材で起こるき裂の分岐を、蜘蛛の巣型(Cobweb type), 島状はく離型(Island-delamination type), 繰返し分割型(repeating division type), らせん型(Spiral type), 円錐き裂集合型(Multi-cone type)と名づけた。その他にもあるかもしれない。不十分ながら、すでに解析したものもあるが、今後解析したいと思っているものもたくさんある。



$$a_i \doteq \frac{2^{2i+1}}{2^{i+1}-1} \cdot \frac{E \gamma}{\pi \sigma_i^2}$$

き裂分規則



研究の内容と文献について興味のある方は、このホームページの「広島大学時代の研究」の [3-B](#) をご覧ください。

未完成です

ホームページに戻る <http://www006.upp.so-net.ne.jp/nakasa/>