

# 球晶中におけるトリーイング進展のシミュレーション

柳原昌輝

## Simulation of Treeing in Spherulites

Masateru YANAGIWARA

(1995年11月30日受理)

### 1. まえがき

現在電力用機器の絶縁に用いられているポリエチレンなどの結晶性高分子材料の絶縁破壊には、トリーイング破壊と呼ばれるものがある。トリーイング破壊の破壊機構が解明されることによりシミュレーションプログラムを作成することができ、又それによって将来的には材料のデータ（球晶密度、熔融温度など）を与えることにより、材料の絶縁破壊電圧などを予測しようとするものである。そこで電界に着目し、これが破壊機構に関与しているのかどうかを解明するためにシミュレーションを行った。

### 2. トリーイング破壊についての基礎的事項<sup>(1),(2)</sup>

トリーイング破壊を解明するにあたって、まず結晶性高分子材料の構造を把握しておかなければならない。構造は図1-1に示されるとおりで、結晶の存在しない非晶質と、球状の結晶である球晶とからなっている。この球晶とは、板状結晶が捻りながら半径方向に成長したラメラと呼ばれるものの集合体であり、ラメラ間は高分子鎖で結合されている。

力学的強度の分布は一般に球晶よりも非晶質の方が弱いとされている。又、非晶質の中でも強度は一様ではない。

次にトリーイング破壊の特徴を挙げる。まずトリーイングの発生において、その原因とされているのがクラック（ひび割れ）、ポイド（微小空隙）、不純物の存在である。特にこれらが電極付近にあるとそこで放電を生じトリー進展のきっかけを作るため、比較的弱電界でも容易にトリーが発生する。トリーが発生すると管内で生ずる放電の熱によって樹脂が熔融してガス状になり、圧力が上昇して他の弱点部にクラックが生じて進展する。この時トリーの形状は殆ど直線とはならず、しかも電界方向に進展していると

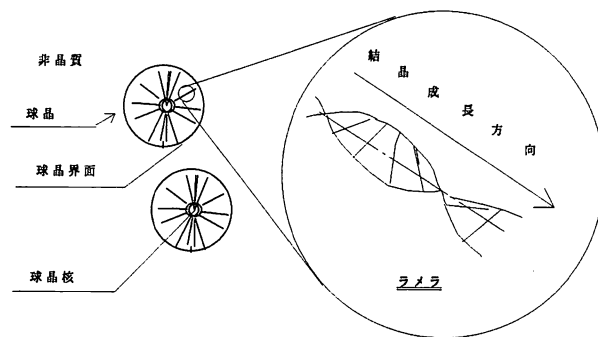


図1 高分子材料の高次構造

は断言できない。この原因としては樹脂内部の強度の不均一性などが考えられる。

### 3. シミュレーションプログラムの作成

#### 3. 1 プログラムの作成にあたって

まず、トリーイング破壊の基礎的事項と、トリーが電界方向に力を受けるという仮定をもとにしてプログラムを作成した。このプログラムの詳しいアルゴリズムは後にして、ある時間における全体の形状をシミュレーションする為に、トリーの進展速度が電界の大きさに比例するものと仮定する。又、トリーの進展をミクロ的にみた場合、トリーが球晶を迂回したりするため、ある時間内にトリーが進展する距離は場所によって異なるが、マクロ的にみた場合、球晶が一様に分布しているものとするれば進展距離も場所によって異なるはずである。そこでトリーの進展速度と電界の強さが比例すると仮定すると微小時間  $dt$  と微小進展距離  $ds$  も比例するはずである。そこでこれをもとに全体の形状を描かせた。

#### 3. 2 トリーイング破壊のアルゴリズム

トリーイング破壊のアルゴリズムを考える場合、トリーが電界方向に力を受けることを大前提とす

球晶中におけるトリーイング進展のシミュレーション

る。トリー進展時の処理は次の2つが挙げられる。

1つはトリーが非晶質を進展する場合である。この場合、厳密には基本事項でも述べた通り非晶質中でも強度分布にばらつきがあるものと思われるので、そこで分岐を生じたり、必ずしも電界方向に進展したりするわけではないが、ここではアルゴリズムを簡単化するために非晶質中ではトリーが単に電界方向に進展するものとした。

2つめはトリーが球晶の周囲にある場合である。この場合の処理は図2、図3、図4に示されるように、次の三つが挙げられる。但し、図においてトリーが球晶に衝突した点をP点、球晶の中心をO点、電界ベクトルをE、P点からO点に向かうベクトルPO、又、ベクトルPOとベクトルEとが成す角を $\psi$ とする。

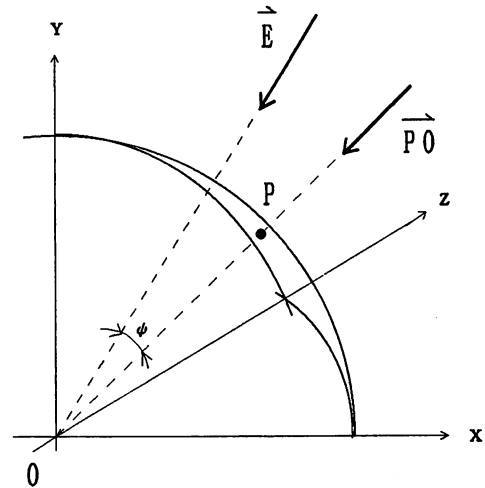


図2 衝突時のトリーの進展

3. 2. 1 トリーが球晶に衝突した場合 (図2)

この場合の処理は $\psi$ の大きさによって次の二つに分けられる。

$\alpha$ .  $\psi$ がある小さな値 $k1$ よりも小さい場合  
この場合トリーは球晶に対して垂直、つまりP点を通る接平面に対してほぼ垂直に力を受ける。この場合はトリーの進展方向を決定する要素は球晶界面の強度分布と考えられるが、これは不確定要素と考えられるので、プログラムではこの場合乱数によって方向ベクトルDvを決定している。

$\beta$ .  $\psi$ がある値 $k1$ よりも大きい場合  
この場合はP点を通る接平面上にベクトルEを投影したときに、接平面上に現れるベクトルを方向ベクトルとした。

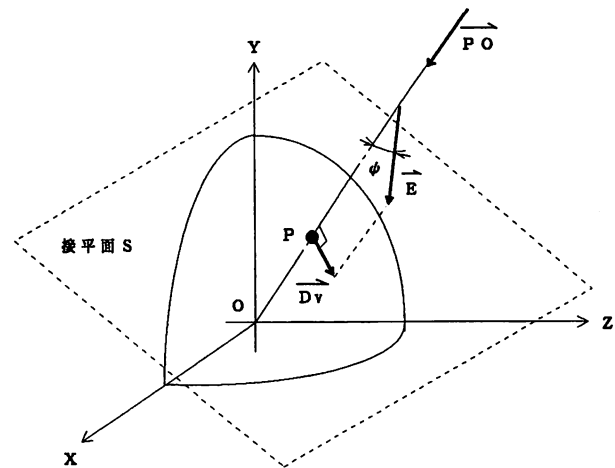


図3 球晶界面におけるトリーの進展

3. 2. 2 トリーが球晶界面を進展する場合 (図3)

この場合は、トリーの先端P点の接平面上にベクトルEを投影した時の平面上のベクトルを方向ベクトルとする。

3. 2. 3 トリーが球晶界面から非晶質へ移る場合 (図4)

この場合は角 $\psi$ がある値 $k2$ 以上の時、非晶質へ移る。

以上がトリー進展のアルゴリズムである。また『プログラムの作成にあたって』でも述べたように、トリーの外形を描くシミュレーションプログラムも作

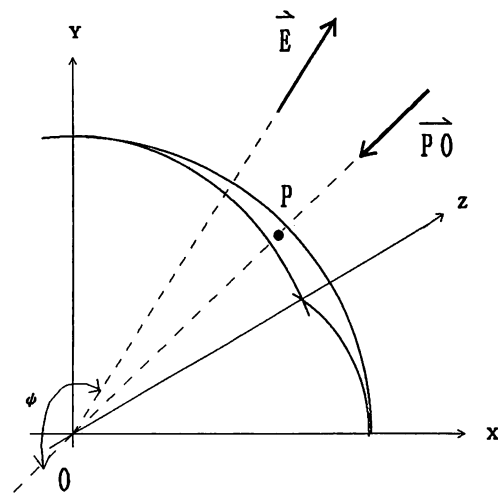


図4 球晶離脱

成しなければならないわけであるが、このアルゴリズムとしてはたんにトリーが電界方向に進む速さを、その各々の点における電界の強さに比例させた。また、この時のトリーの進展経路は球晶に左右されないものとした。

### 3.3 電界の算出

電界ベクトルを求めるに当たって、まず対象となる電極の配置が重要となる。これが分からないと電界の計算が出来ない。そこで今回試作した試料形状(図5)を参照し、この電極の配置から計算するわけであるが、電界ベクトルを必要としている領域が針電極の先端の小さな領域であるため、これを近似計算によって求めることにする。近似計算をするにはまず電極を近似しなければならない。つまり、実際の電極とほぼ同じ電界を作り、かつ電界の計算が容易に出来る架空の電極を仮定するのである。そこで考えた近似電極は(図6)である。針電極はその先端と同じ曲率半径を持つ球導体、銀電極は長さ

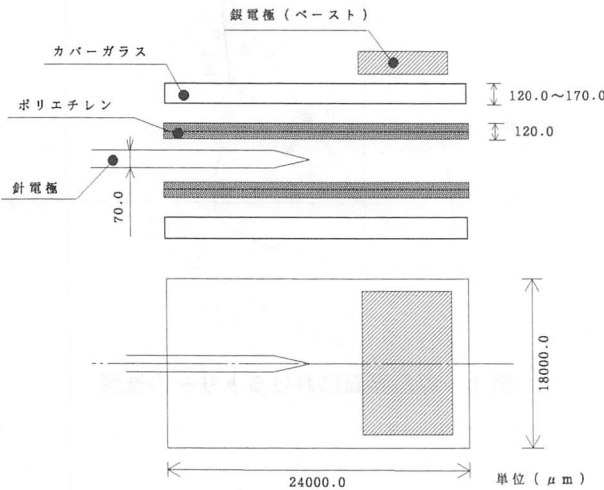


図5 試料形状

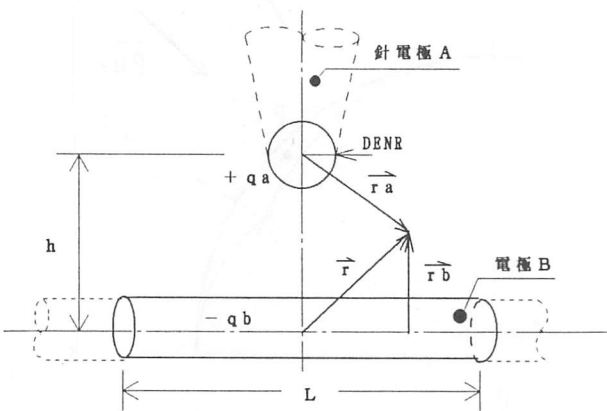


図6 近似電極

Lの線状導体である。このような架空電極で電界を計算すると次に示されるような式になる。但し、これはLに比べてhがかなり小さい場合のみ成り立つ。これは、長さLの線状導体をさらに無限長線状導体と等価としているため、その条件として前述の条件が必要な為である。

・図6の補足

qa：電極 A の電荷

qb：電極 B の電荷密度 (単位長あたり)

DENR：針電極先端曲率半径

ベクトル rbn：ベクトル rb の単位ベクトル

・電界ベクトルの算出

$$\begin{cases} \vec{r} = (x, y, z) \\ \vec{ra} = (x, y-h, z), \quad ra = |\vec{ra}| \\ \vec{rb} = (0, y, z), \quad rb = |\vec{rb}| \end{cases}$$

また、qa = qbL とする。

$$\text{電極 A による電界 } \vec{EA} = \frac{+qa}{4\pi\epsilon_0 ra^3} \vec{ra}$$

$$\begin{aligned} \text{電極 B による電界 } \vec{EB} &= \frac{-qbL}{2\pi\epsilon_0 Lrb} \vec{rbn} \\ &= \frac{-qa}{2\pi\epsilon_0 Lrb^2} \vec{rb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{合成電界 } \vec{E} = \vec{EA} + \vec{EB} &= \frac{qa}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{\vec{ra}}{2ra^3} - \frac{\vec{rb}}{Lrb^2} \right\} \\ &= K \left\{ \frac{\vec{ra}}{2ra^3} - \frac{\vec{rb}}{Lrb^2} \right\} \end{aligned}$$

★定数 K は、球導体と線状電極との間の積分で求めることができる。

### 3.4 データ検索

球晶の位置データを作る場合、及びトリーの衝突判定を行う場合球晶データの検索が必要になる。例えば、球晶の位置データを作る場合、以前に作られたデータの中に新しく作られたデータと重複するものがないか検索して、もし重複するものがあつたなら、またデータを作り直さなければならない。トリーの衝突判定も同様に、トリーの進展方向に球晶があるかを検索しなければならない。そこで検索ルーチンを作るわけだが、新しく作ったデータと重複するものを既成の全データから検索するのは、データ数が少ないうちはいいが多くなってくると検索時間がかかるうえ、効率も悪い。そこで球晶の存在する領域を(図7)のようにいくつかの小さな領域に分割し、球晶の位置データをこの領域に割り当てることにより、データの検索は数個の小さな領域の中で行えばよくなるので、検索の高速化が可能となる。

データの検索は対象となる小領域を中心としてその周りの小領域も検索する。従って、最大27個の領域を検索することになる。なぜ対象となる領域の周りも調べるのかというと、球晶のデータというのは中心の位置データと半径のデータとからなり、たとえ中心が対象となる領域の中にあるとしても外周が領域の外にはみだす場合があるためである。

領域の分割数は多ければ多いほど検索速度は高速になるが、計算機のメモリとのかねあいから余り多くできない。また、球晶データの作成で用いる場合は、小領域の大きさが球晶の直径よりも大きくなるように分割数を決めなければならない。

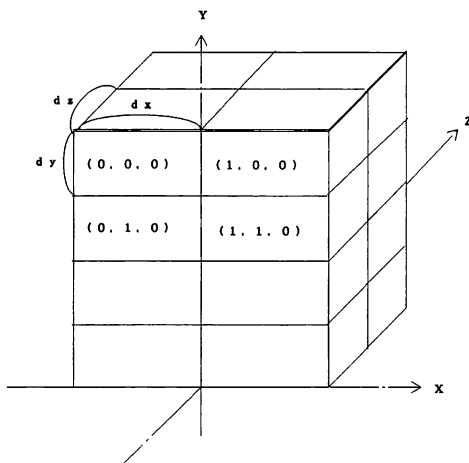


図7 データ検索の高速化

### 3. 5 DATA 作成プログラムについて

DATA 作成プログラムでは、球晶の中心座標、及び半径の大きさを乱数によって作成している。データ作成時に、さきに述べたように複数の領域に作成したデータを割り振っている。当然のことだが、データ数が多くなると作成に時間がかかるわけだが、特にデータ数がある値を越えると急激に速度が遅くなる。これはデータを乱数で作成しているために生ずるもので、これを防ぐにはある程度データを作成したら、こんどは球晶が入ることの出来る空き領域を検索しそこにデータを格納すればよい。これによって作成速度を上げることが可能と思われる。

## 4. トリーイング破壊試験

### 4. 1 試料の作成

トリーイング破壊試験を行うため、試料の作成を行った。使用機器、使用材料並びに試料構造を次に示す。

#### ・使用機器、道具

カバーガラス (24 mm×18 mm×0.12 mm)  
銅線 ( $\phi = 70 \mu\text{m}$ )  
銀ペースト、カッター、ルーペ  
潤滑油  
鋼 (面を鏡面に仕上げているもの)×2  
電気炉 (最高温度が200°C 位のもの)

#### ・使用材料

高密度ポリエチレン (HD-PE No.6050)  
厚さ 60  $\mu\text{m}$

#### ・試料

次に作成手順であるが、これは次の通りである。

1. 試料をカバーガラス大に切る。また、銅線の先端をカッターで鋭くし、ルーペで確認する。
2. 試料に針電極をはさみ、それらをさらにカバーガラスではさむ。それを鋼ではさみ、加重を加える。
3. 電気炉に入れ、炉内温度170°C 付近とし、その状態をおよそ1時間位保つ。
4. 炉から取り出しゆっくり冷やす。
5. 針電極の先端からおよそ1 mm 以内のところに銀ペーストを塗る。

作成した試料形状は図5に示した。

### 4. 2 トリーイング破壊の撮影

前述のようにして作成した試料に高電圧を加え、トリーイング破壊の様子をビデオに納める。ビデオに納めることにより、トリーの進展の時間的な変化が把握できる。ただ、今回は700倍の偏光顕微鏡によって球晶のトリーの進展に与える影響を観察する予定だったが、顕微鏡の対物レンズが余りにも試料に近づく為、高電圧を加えた場合顕微鏡が破損する危険性があるので700倍での電圧を印加しながらの撮影は断念した。そこで電圧を印加しながらの撮影は64倍で行い、電圧を切った状態の画像を100倍で撮影した。700倍の画像はカメラの解像度その他の関係でうまく撮影できなかった。

撮影したトリーイング破壊の画像は重要と思われ

る部分をコンピュータに取り込み、「花子」によっておおよその電極間距離などを割り出した。なお、撮影した画像及びディスクに落とした画像データの詳しいことは結果に記載する。

4.3 実験結果および考察

ビデオ画像に納めた画像は次の通りである。

試料 No.	電圧印加時間 (分)	印加電圧 (kv)	倍率 (倍)	電極間距離 ( $\mu\text{m}$ )
1	5	5.0	64	
2	23	5.0~6.0	64 100	1251 362
3	3	5.0	64	100

ディスクの画像データは次の通りである。

ファイル名	試料 No.	取り込み時間 (分:秒)
data 1	2	33:30
data 2	2	33:30

data 3	2	34:00
data 4	2	34:43
data 5	2	35:05
data 6	2	35:19
data 7	2	35:19
data 8	3	36:25
data 9	3	38:40
data10	3	38:56
data11	3	40:20
data12	3	40:34
data13	3	40:56
data14	3	41:07
data15	3	41:44

次に球晶内におけるトリーイング劣化球晶の進展のシミュレーション結果を図8に示す。

実際のトリーイング破壊と比較して分かるように、球晶による曲がりやうまく表現されているが、データの球晶密度が低いことと、非晶部、球晶界面部における分岐をプログラムに組み込んでいないため、トリーが同一地点で発生する場合以外は、トリーの分岐がうまく表現されない。ただ実際のトリー

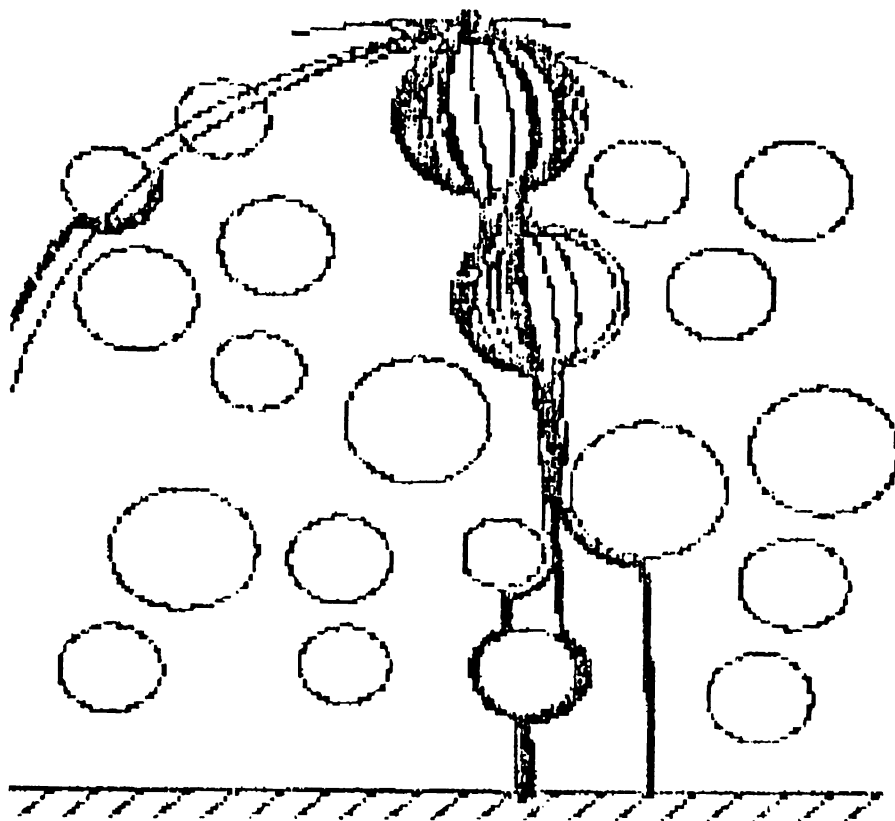


図8 シミュレーション結果

## 球晶中におけるトリーイング進展のシミュレーション

は数本の基幹となるトリーから分岐が生じているので、このプログラムで描かれるトリーを基幹と考えれば、これらのトリーを中心として分岐させるようにすればよい。この点については、非晶部での分岐はともかく球晶界面における分岐は、プログラムを少し手直しするだけで可能である。またこのプログラムは一本のトリーを書き終えてから次のトリーを書いているので、実際の現象にみられるようにトリーが同時に多方面に進展していく様が見られない。さらにこのプログラムの終了判定は、絶縁破壊が生じたら終了するというものではないためシミュレーションによる破壊電圧等については検討の余地がある。

## 5. あとがき

トリーの進展が電界に決定づけられるという仮定を基に考えを進めてきたが、結果としては電界がトリーの進展の要素の一つとなっている可能性が強い

と思われる。ただトリーの進展を決定する要素には先にも述べた通り、強度分布の不均一などを初めとして他にもあるため電界だけを基にしたシミュレーションの結果を単純に実際のものと比較するのは難しいと思われる。ただし、球晶中のトリー進展の基本的なシミュレーションはある程度満足いくものが得られた。

これからの課題としては、先の二つのプログラムを一つにして、同時に多方向に進展するシミュレーションを完成させること、非晶質での分岐アルゴリズムを考えること、表示ルーチンを三次元化することなどが挙げられる。

## 参考文献

1. 穂積直裕：高分子の高次構造と絶縁破壊現象，静電気学会誌，15, 5, pp 357-362 (1991)
2. 山北隆征：高分子球晶と電気劣化，静電気学会誌，15, 5, pp 363-368 (1991)