834 はじける植物果実の残留応力分布と種子散布に関する研究

A study of residual stress distribution and seed dispersion on bursting fruits.

○ 正 遠藤 安浩 (金沢大院), 正 坂本 二郎 (金沢大院), 木下栄一郎 (金沢大)

Yasuhiro Endo, Graduate School of Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192

Jiro Sakamoto, Graduate School of Kanazawa University

Eichiro Kinosita, Institute of Natural and Environmental Technology, Kanazawa University

Key Words: Bioengineering, Biomechanics, Plant Pericarp, Stress Analysis, Residual Stress, High-Speed Video Recording

1. はじめに

工業の分野で残留応力は成型や加工を妨げるものとして取上げられるが、生物の中には残留応力を力学的機能高めるために積極的に利用しているものがある。その仕組みについて解明することは工業的にも興味深い。その観点から我々は植物が残留応力を利用して種子を散布する仕組みに注目し研究を行ってきた⁽¹⁾。植物はその種子を広範囲に移動させることで、生育範囲を広げるが、動物や風、水などで種子を移動させるものの他に自らの力で、種子を移動させる自動散布型と呼ばれるものがある。自動散布型の植物はハウセンカに代表されるように、種子を内包している果実がはじけることで種子を散布する。果実の構造は簡単であるが、種子を遠くまではじき飛ばすことができる。この、果実がはじける現象は、成長、膨潤もしくは乾燥により発生した残留応力が、果実の部分的な破壊に伴い、短時間で開放されることによると考えられる。効率よく種子を散布し、より遠くへ移動させるには果実がはじける際に特定の方向に大きく速く運動する必要があり、このような現象は果実の構造やはじける直前の応力状態に強く依存していると考えられる。これらを調べることは果実がはじけるメカニズムを解明する上で重要である。また自然選択の過程で、より効率的に種子を遠くに飛ばし生存範囲を広げてきたものが生き残ってきたとするならば、現存するものは、種子を飛ばす機構が最適化されていると考えることが出来る。以上のような観点から、我々はハウセンカの仲間であるツリフネソウ属のインパチエンスを対象に研究を行った。本研究では計算力学の技術を用いてはじける現象を再現する力学モデルを確立し、種子を遠くへ飛ばすために最適な残留応力分布を明らかにすることを目的にする。

2. インパチエンスの構造と種子の発射メカニズム

果実とは子房が成熟したものであり、心皮が成長した果皮と、果皮同士をつなぐ筋の部分によって構成される。本研究ではその筋の部分を果皮接合部と称することとする。Fig.1に果実とその断面図を示す。果実の中には種子が含まれており、種子は胎座に取り付くように配置されている。また Fig.2に示すように果皮の細胞を観察したところ果皮の外側が主に膨潤し内側の細胞よりも大きくなっていることが観察できた。

種子が発射されるメカニズムを観察するため高速度ビデオカメラを用いて果実がはじける瞬間を異なる2方向から撮影した(Fig.3)。果実は刺激を受けることで果皮接合部の一部が破断して周方向に展開する。その後それぞれの果皮が軸方向に丸まる。この際に種子は果皮の運動によって莖方向に発射されることが分かった。実験から種子は約1m飛ばされることが分かった。種子は果実の先端部分に集まっておりはじける際に高い初速度を得られる位置に

配置されていることが観察できた。種子の他に胎座も同時に発射されるが、観察から種子の発射には大きく影響していないと考えられる。

Fig.1 Flower, Fruit of impatiens and cross section of central part.

Fig.2 Cells of Impatiens pericarp

Fig.3 Sequential images during fruit burst taken by high-speed video camcorder from two-direction.

3. 引張試験による材料定数の測定

インパチェンスの果皮の材料定数を求めるためにトマトの果皮のヤング率を求めた実験方法を参考に⁽²⁾インパチェンスの果皮のヤング率を求める実験を行った。一枚の果皮を送りねじのついたステージに連結した二つのクリップで固定し、片方のステージを移動させることで果皮を引張る実験装置を作成した。果皮引張時の荷重はロードセルによって求めた。引張る果皮中央部の断面積は軸方向に一樣と仮定して応力を計算した。得られた荷重から作成した応力-ひずみ曲線を Fig.4 に示す。個体差によってばらつきはあるが本実験の範囲においては応力-ひずみ関係はほぼ線形と考えた。実験で得られたヤング率は約 17KPa であり、破断応力は約 35KPa であった。

Fig.4 Tensile stress and strain diagram

4. 種子の発射シミュレーション

実際の果実を参考に Fig.5 に示すような果実モデルを作成し解析を行った。これまでの研究では種などの内容物を含んでいない果実モデルのはじけるシミュレーションを行ってきたが⁽¹⁾、今回のシミュレーションではこのモデルの内部に種子モデルを内包させて解析を行った。実際の果実は 45~60 個の種子を内包しているが、今回の解析では種子モデルを 5 つとし最も発射速度を得られると考えられる果皮先端にそれぞれ一つずつ配置した。種子モデルについては運動を観察することを目的とするため形状は六面体とした。またはじける瞬間の観察から種子以外の内容物については、発射に影響することがないと考え省略した。このシミュレーションでは水分を吸収し膨潤する現象を等価な熱膨張で置き換え残留応力を発生させている。実際の果実においては各果皮で異なる膨張が見られるが、今回はすべての果皮において同様な条件で解析を行うこととした。果実モデルの材料定数はヤング率 17KPa、ポアソン比 0.3、線膨張係数を $0.04/^{\circ}\text{C}$ として与えた。種子モデルは質量が 0.6mg(実験値)となるように密度を与えた。境界条件は茎につながると想定した果皮の端部を完全拘束した、また膨張時に破断すると仮定した果皮接合部を軸方向以外で拘束した。果皮の外側に約 20°C 程度の温度分布を与えることで各果皮を膨張させはじける直前に発生している応力状態⁽¹⁾を再現した。膨張後に拘束していた果皮接合部を開放することとした。接触に関してはそれぞれの果皮と種子において摩擦無し(摩擦係数 $\mu=0$)として解析を行った。Fig.6 に示すようにこのシミュレーションで果実

モデルは実際の果実と同様に展開する挙動を示した。種子についても果皮の運動に従って果皮先端部から茎側に発射されていることから実際の挙動を再現できたと考えられる。果実の挙動については種子モデルの質量が果実に比べて小さいため種子を内包していない果実モデルと比較しても大きな違いは見られなかった。

Fig.5 FE model of Impatiens fruit (after expansion)

Fig.6 Simulation of fruit bursting and seed catapulting.

5. 今後の課題

今回の解析により、果実がはじけ種子を発射するシミュレーションを行うことができた。しかし今回果皮に与えた膨張による残留応力分布は観察をもとに仮定したものであり、種子を遠くに飛ばすために最適なものは不明である。今後は最適化手法を用いて最適な残留応力分布を求め、そこで得られたモデルと実際の果実の違いを比較、検討する予定である。

参考文献

- (1) 遠藤, 坂本, 木下, 日本機械学会第 18 回バイオフロンティア講演会講演論文集, 71-72 (2007).
- (2) Hendrik Bargel, Christoph Neinhuis, Altered Tomato (*Lycopersicon-esculentum* Mill.) Fruit Cuticle Biomechanics of a Pleiotropic Non Ripening Mutant, J Plant Growth Regul 23:61-75, (2004)