収縮性材料の乾燥応力

山 口 信 吉*
Shinkichi YAMAGUCHI

Key Words : Shrinkage Material, Drying Stress, Viscoelastic Property, Hygroscopic Expansion!Coefficient

1. はじめに

水で練った粘土のような微粉体の層や多くの食品・木材類などは乾燥によって著しく収縮し、操作を誤ると乾燥割れを生ずることがある。そのような材料を本稿では収縮性材料と呼ぶことにする。

ある種の含水高分子ゲルを電極ではさみ静電流を流すと電気浸透の脱水が起りその体積は収縮する。電流を切るとゲルは水を含んで可逆的に膨張することより、そのゲルを人工筋肉として利用しようとする試みがある。その場合は脱水収縮を積極的に応用するものであるが、乾燥を目的とする場合は一般に材料の収縮およびそれに伴うき裂の生成は好ましくない現象である。

乾燥割れ発生のメカニズムの追究には乾燥応力を推測して検討するのが有効である。筆者は粘土の乾燥や米粒の乾燥割れについての研究を行なっているが、本稿ではその研究過程で得た知見に基づき、収縮性材料の乾燥応力の問題点について概説する。

2. 熱応力と乾燥応力

乾燥応力は、乾燥過程において材料内に形成される不均一な含水率分布に起因する局所的な収縮量の差によって誘発されるものであり、それは、材料内の不均一な温度分布に由来する熱応力と類似である。

乾燥は熱と物質の同時移動操作であり、乾燥過程の材料内部では温度と含水率がともに変化する。このた

め、乾燥応力として含水率差による応力のほかに熱応力を考慮しなければならないことになる。しかし、通常の乾燥操作における温度範囲では熱ひずみに比べて含水率差によるひずみが桁違いに大きく、一般に熱応力は無視小となる。本稿では、含水率差による応力＝乾燥応力、とおき、その乾燥応力の推定に熱応力解析法を参照する。熱応力の解析には、まず材料内部の温度分布の推定が必要であると同様に、乾燥応力の解析においては含水率分布の変化を求めなければならない。

一般に乾燥割れが問題となる材料は比較的緻密であり、その内部の水分は拡散則にしたがって移動するとみてよい。たとえば、比較的粗大な組織にみえる木材では細胞腔内の毛管水(自由水と呼ぶこともある)の蒸発期間はほとんど収縮せず、繊維飽和点以下の含水率になると緻密な組織である細胞膜内の水分の移動によって収縮が始まる。その繊維飽和点以下における水分の移動は拡散現象として取扱われている²³⁾。

内部水分が拡散によって移動する場合、含水率分布の推定には拡散係数と平衡含水率の値が必要となる。この場合、拡散係数は含水率の関数となることが多く、また、木材のように水分移動の方向によって拡散係数が異なることがあるから厄介である。平衡含水率は材料のおかれた雰囲気との温度と湿度の関数となるが、その値は脱湿過程と吸湿過程では異なること(ヒステリシス)が知られている。材料内部における水分の移動は乾燥応力推定の基礎となる問題であるが、同時に乾燥研究に関する共通の問題でもあるので、本稿では触れないことにする*。

急激な温度変化を受けるとガラス器具が割れるという現象は誰でも知っている。これは普通、秒のオーダー

昭和62年3月9日受付

* 富山大学工学部化学工学科(〒930 富山市五福 3190)
TEL 0764-41-1270

〈著者紹介〉

昭和6年石川県生れ

昭和38年静岡大学工短部工業化学科卒業

昭和39年静岡大学助手、富山大学助手

昭和58年富山大学助教授、現在に至る。

農学博士(昭和58年筑波大学より授与される)

* この問題に関する報告^{2, 23, 26, 30, 39, 41)}、図書あるいは解説は多いが、たとえば、岡崎守男：化学工学，**36**，129(1972)や若林嘉一郎：ケミカル・エンジニアリング，**11**，13(1966)などを参照されたい。

一で起る現象であり、このような急激な熱応力は熱衝撃と呼ばれる。一方、乾燥応力による割れは、分から時間のオーダーで起り、日や月のオーダーのこともある。乾燥応力推定に使用するために材料の機械的性質を測定しようとするとき、そのようなタイムスケールに注意しなければならない。

一般に材料はごく短い時間における応答では弾性的挙動を示すが、時間が長くなるとその性質は非完全弾性を呈するに至る。とくに含水率の高い材料の場合はその傾向が著しい。また、被乾燥材料には不均質なものも多く、木材¹⁹⁾や成型加工された粘土塊²⁹⁾のように非等方性材料もある。これらの理由により、乾燥応力の予測に必要な物性値の測定は困難であり、その困難さがこの分野の研究推進の妨げとなっている。

3. 収縮特性

含水率変化に伴う皮革・パルプ¹⁷⁾、食品^{3,5,6)}、穀粒^{4,15)}などの収縮量を測定し、収縮特性を定量的に表現しようとした試みがある。水で練った粘土塊の乾燥収縮量は蒸発した水(液体)の体積に等しいことは古くより知られており³⁰⁾、その収縮特性を熱膨張における膨張係数に似た収縮係数として求めた研究がある^{16,17,29)}。

木材は、前述のように繊維飽和点(その乾量基準含水率は材料によって異なるが主に0.25~0.30 kg/kg)以下の含水率範囲で脱湿収縮または吸湿膨張(膨潤)する。その範囲では含水率変化に伴う収縮と膨張は可逆的であるが、著しい異方性を示す。いま、円柱状木材の半径方向、接線方向および軸方向の線収縮率をそれぞれ α_r 、 α_t および α_a とすると、 α_a は他に比べてほぼ一桁小さく、 α_t と α_r との間に大略 $\alpha_t = 1.65 \alpha_r$ なる関係がある^{19,23)}。

筆者らは、粘土層および玄米粒の含水率変化に伴う体積変化を測定し、図1に示す結果を得た^{39,40)}。図の縦軸は乾量基準の湿り比容積(みかけ容積÷乾き質量) v (m^3/kg)であり、横軸は乾量基準含水率 w (kg/kg)である。これらの結果に基づき、熱膨張係数の定義に照らして両試料の収縮・膨張の特性を考察する。

図1の○印は粘土層の測定値を表し、プロットは折れ線ABCで模型化される。区間ABは勾配 $10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ の直線で表され、直線の v 軸切片Dは粘土粒子の比容積 v_p ($= 0.4 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$)となる。区間BCでは v は w の変化と無関係に一定値 v_b を示す(この区間においても v は w によりわずかに変化するという報告^{16,17,29)}がある)。液体水の比容積 v_w が $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ であることより区間ABでは脱水量を液体水に換算した体

図1 粘土層および玄米粒の収縮特性

積だけ層が収縮することが理解できる。B点の含水率 w_c ($= 0.18 \text{ kg}/\text{kg}$)は乾燥速度曲線の限界含水率にほぼ一致する^{16,30)}。区間ABにおける関係は次式で表される。

$$v = v_p + v_w w = v_p (1 + r w) \quad (1)$$

上式の $r = v_w/v_p$ は粘土粒子の比重($= 2.5$)である。

玄米の場合(図1の○印)、 $w = 0.08$ 以上の範囲でプロットは直線で代表される。直線の勾配は $9.45 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$ となり、粘土層における勾配より小さい。これは、失った水分(液状水)に見合うだけ玄米粒は収縮しないこと、すなわち、含水率低下に伴って玄米内部に空隙部分が増えることを意味する。他の穀粒についても同様の傾向が見出されている⁴⁰⁾。 $w < 0.08$ の低含水率ではプロットは直線からはずれ、一旦この範囲にまで乾燥すると収縮と膨張の可逆性は失われる。

含水率範囲 $0.08 < w < 0.43$ において玄米粒に関する実験式は次のようになる。

$$v = 0.672 \times 10^{-3} + 0.954 \times 10^{-3} w \\ = v_p' (1 + 1.42 w) \quad (2)$$

ここに、 v_p' は上式で与えられる直線の v 軸切片 $= 0.672 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ である。

固体の熱膨張における線膨張係数 α_r および体膨張係数 β_r は、普通 0°C における長さ l_0 および体積 V_0 を基準として次のように定義される³¹⁾。

$$\alpha_r = \frac{d}{dT} \left(\frac{l}{l_0} \right), \quad \beta_r = \frac{d}{dT} \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (3)$$

ここに、 T は温度($^\circ\text{C}$ または K)である。固体の場合、膨張が小さいので l_0 、 V_0 のかわりに任意の温度における値を用いてもよく、等方性固体においては $\beta_r = 3\alpha_r$ とおける。

乾燥収縮あるいは吸湿膨張において、基準含水率 w_s における長さを l_s 、体積を V_s とおき、熱膨張におけると同様に、線膨張(収縮)係数 α_w および体膨張(収縮)係数 β_w を次のように定義することができる。

$$\alpha_w = \frac{d}{dw} \left(\frac{l}{l_s} \right), \quad \beta_w = \frac{d}{dw} \left(\frac{V}{V_s} \right) \quad (4)$$

この場合の膨張は小さくないので、熱膨張における近似は許されない。すなわち、基準含水率値を定めるとそれを任意に変えることはできず、また等方性固体においても β_w は $3\alpha_w$ に一致しない。

図1に示した粘土層および玄米粒のように高含水率域における v 対 w の関係が直線で表される場合、その直線範囲において式(4)より次の関係が得られる。

$$\frac{V}{V_s} = \frac{v}{v_s} = 1 + \beta_w(w - w_s) \quad (5)$$

ここに、 V および v はそれぞれ含水率 w における体積および比容積であり、 V_s および v_s は基準含水率 w_s における値である。 w_s の選び方は任意であり、 $w_s = w_c$ とおいた報告^{16), 17), 29)} その他¹⁷⁾ がある。 $w_s = 0$ とおくと、上式の形は式(1)のように単純となり、粘土層の場合、 v_s として粒子の物性値(比容積) v_p を使用できるという便がある。式(1)と(5)とを比較すると、粘土層の体膨張(収縮)係数 β_w が粒子の真比重 γ に一致することがわかる。

ここでは便宜上、基準含水率 $w_s = 0$ と定め、含水率変化に伴う収縮と膨張に可逆性があるとみなして β_w と α_w を水分膨張係数と呼ぶことにする。すると式(1)は $v = v_p(1 + \beta_w w)$ (6) となり、玄米粒に関する式(2)においても $v_p = 0.672 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $\beta_w = 1.42 \text{ kg/kg}$ とおけば、上式と同じ形が得られる。

体積 V は長さ l の3乗に比例(比例定数 C)する。

$$V = Cl^3, \quad \frac{V}{V_s} = \frac{v}{v_s} = \left(\frac{l}{l_s} \right)^3$$

含水率変化に伴う収縮・膨張が等方性であれば、上式と式(4)より次の関係が導かれる。

$$\beta_w = \frac{d}{dw} \left(\frac{l}{l_s} \right)^3 = 3 \left(\frac{l}{l_s} \right)^2 \frac{d}{dw} \left(\frac{l}{l_s} \right) = 3\alpha_w \left(\frac{l}{l_s} \right)^2$$

$w_s = 0$ とおき、そのときの比容積を v_p 、長さを l_p とすると、 $(l/l_p)^3 = v/v_p$ であり、式(6)より次の関係が得られる。

$$\alpha_w = \frac{\beta_w}{3(1 + \beta_w w)^{2/3}} \quad (7)$$

一方、線膨張係数 α_w を定数とみなすと、 $l/l_s = (v/v_s)^{1/3} = 1 + \alpha_w w$ と表され、次の関係が得られる。

$$\beta_w = 3\alpha_w(1 + \alpha_w w)^2 \quad (8)$$

熱膨張でも上の2式と同様な関係が成立するが、熱膨張係数は一般に小さい($10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度)ので、 $\beta_T t \ll 1$ 、 $\alpha_T t \ll 1$ となり、 $\beta_T = 3\alpha_T$ と表せる。しかし、含水率変化による収縮・膨張の場合、膨張係数が大きいため、式(7)、(8)に示したように、 β_w と α_w のどちらかを定数とおくと、他は定数とならず w の関数となる。

応力解析において α_w を定数とおくと都合である。粘土層および玄米粒を等方性材料とみなして α_w を求めてみた。 v の実測値より $v^{1/3}$ を計算し、それと w の関係をプロットすると、含水率の高い範囲でプロットを一本の直線で結ぶことができる。その直線の勾配より、粘土層および玄米粒の α_w をそれぞれ 0.51 および 0.39 kg/kg と推定できた。

結局、等方性の粘土層の $\beta_w = 2.5$ (このとき α_w は定数でない)、 $\alpha_w = 0.51$ (このとき β_w は定数でない) となる。玄米粒についても同様に $\beta_w = 1.42$ 、 $\alpha_w = 0.39$ が求められたことになり、両試料とも $\beta_w \neq 3\alpha_w$ となることがわかる。

なお、成型加工された粘土層²⁹⁾ および玄米粒²⁰⁾ について収縮の非等方性を認めた報告がある。

4. 機械的性質

極めて短時間に外力を加えると流体でも弾性を示す。一方、固い水でできている氷河は絶えず流れていて、固体でも長い時間をかけると永久変形することを示している¹³⁾。これらの現象より、材料の機械的性質は観測のタイムスケールによって大いに異なる³³⁾ことが理解できる。

前述のように、乾燥割れを生ずるまでの時間は短くないので、その間の応力追究に使用する機械的性質の測定においては、相応のタイムスケールを考慮しなければならない。通常の収縮性の被乾燥材料は非完全弾性体であり、負荷に応じて永久変形が現れる。そのような材料の性質は弾塑性あるいは粘弾性モデルで記述される。温度と含水率一定の材料について考えると、弾塑性モデルでは、完全弾性体と同様に応力はひずみだけの関数となり、その応力・ひずみ関係に時間は全く関与しない。これに対し粘弾性モデルでは、応力・ひずみ関係が時間的に変化するのが特徴である。この特徴の故に、粘弾性モデルに基づく応力解析は複雑となる。なお、乾燥過程では材料の温度と含水率が変化するので、乾燥応力解析に使用する機械的性質はそれらの関数として測定すべきである。

図2 等変位速度の引張り試験における応力・ひずみ曲線の模型

通常、固体の機械的性質の測定には単軸圧縮・引張り試験、曲げ試験あるいはねじり試験などが用いられる。その他に、粘弾性材料の短いタイムスケールの特性の測定法として、試片に振動を与える動的測定法が知られている³⁹⁾。

被乾燥材料試片に対する定変位速度の引張り（圧縮でもよい）試験の結果は、たとえば図2の曲線のように得られることがある。ひずみの小さい区間OAで応力・ひずみ関係がほぼ直線となることより、その範囲で材料を完全弾性体とみなした報告がある^{1, 18, 22)}。また、曲線の形が鑄鉄などの試験結果に似ていることより、その材料を硬化弾塑性体とみなしたものもある³⁶⁾。

ここで、図2の曲線は等変位速度という極めて特殊な条件下における試験結果であることを強調しなければならない。図の区間OAのように応力・ひずみ関係が原点を通る直線になることは完全弾性体の備えるべき必要条件であるが十分な条件ではない。すなわち、対応のタイムスケールにおいて、異なる変位速度で除荷と負荷を繰り返しても、同じOAという軌跡をたどることを確認しなければ、その材料を完全弾性体と断定することはできない。また、硬化弾塑性体の場合、上記のOAに関する検討ののち、さらに硬化塑性を示す区間AD上の任意の点Bにおいて除荷と負荷を繰り返す、図上のB→C→Bの軌跡をたどることを確かめなければならない。

鑄鉄や銅のような金属材料の性質は、たとえば人間の寿命程度のタイムスケールで考えるならば、図2のような結果よりその性質を硬化弾塑性体とみなしてもよいであろう。しかし、地球の歴史といった壮大なタイムスケールでは、もはやそのような理想化は許されないに違いない。

粘土粒子の形状は板状のことが多い³⁴⁾。初めは粒子がまったく無秩序に配列していて層の性質は等方性であったとしても、その層に変位を与えると粒子配列にある規則性が現れて非等方性を示すおそれがある。そ

のため、粘土層の機械的性質の測定には潜在的な難しさがあると予測される。

塑性の塑は、元来、土をこねて像などを作ることである²⁴⁾。したがって粘土層の特性は典型的な塑性体モデルで表されるかといえばそうではない。円柱状の試片に対してねじり試験を行なった詳しい実験によると、水で練った粘土層の性質は粘弾性を呈する³⁵⁾。また、引張り試験の結果より、粘土層の応力緩和係数（後述のように粘弾性体の性質を表す量）を測定した報告もある³⁴⁾。

このように、粘土層でさえ粘弾性体と定めることより、筆者は、収縮性材料の力学モデルを弾性体や弾塑性体となくとも粘弾性体で表現するのが妥当と考える。それを弾性体や弾塑性体で表現する場合、少なくとも、粘弾性体の特徴である応力緩和や遅延弾性の傾向が対応のタイムスケールで無視できるかどうかを検討すべきであろう。事実、粘土層のほかにも高分子材料⁸⁾や食品・農産物²⁵⁾など多くの材料の粘弾性が測定されており、木材の曲げ試験の結果よりその粘弾性を示した報告もある³⁷⁾。

固体の粘弾性は、粘性を表すダッシュポットと弾性を表すスプリングを組合せた力学モデルで表現することができる^{8, 9, 13, 25, 33)}。とくに、ダッシュポットとスプリングを直列に配したモデルをMaxwell要素、並列に配したものをKelvin（またはVoigt）要素と呼び、前者は応力緩和をうまく表現し、後者は遅延弾性を表現する。

粘弾性材料に一定のひずみ ϵ_0 を与えておくと、応力 σ は時間 t の経過とともに変化（緩和）し $\sigma(t)$ と表される。このときの応力とひずみの比 $\sigma(t)/\epsilon_0$ を応力緩和係数（または緩和弾性率） $E(t)$ と呼ぶ。また、材料に一定の応力 σ_0 を負荷するとき、時間的に増大するひずみ $\epsilon(t)$ と σ_0 との比 $\epsilon(t)/\sigma_0$ をクリープコンプライアンス $J(t)$ という。材料に与えるひずみ ϵ_0 あるいは応力 σ_0 の大きさを変えても $E(t)$ あるいは $J(t)$ の値に影響をおよぼさないとき、その材料を線形粘弾性体という。

粘弾性材料の応力・ひずみ曲線には負荷速度の影響が顕著に現れる⁹⁾。筆者らは、玄米粒から切り出した直径約1.5 mm、長さ2 mm強の円柱状試片を $1.7 \times 10^{-7} \sim 1.7 \times 10^{-4}$ m/sの範囲で6水準の定変位速度で圧縮し、応力・ひずみ曲線が変位速度によって相互に規則的にずれることを認めた。また、圧縮変位を一定に保つとき、明らかに応力緩和現象を見出し、玄米粒を2個のMaxwell要素からなる線形粘弾性体に近似してその応力緩和係数を温度と含水率の関数として

表した⁴¹⁾。すなわち、玄米の応力・ひずみ関係に対する時間・温度および含水率の依存性を示した。

多くの高分子材料の粘弾性に関する温度依存性と時間依存性との間にある相関関係が見出されており、そのような物質は熱レオロジー的に単純な材料と呼ばれる^{8, 13, 21, 33)}。そのような材料の場合、温度と時間のスケールには等価性があり、温度の下降は時間スケールの拡大で、逆に、温度の上昇は時間スケールの縮小で現象を同一化することができる²¹⁾。収縮性の被乾燥材料について便宜的に上記の温度・時間に含水率を加えて、それら3者のスケールに等価性を仮定しようとする提案がある⁴⁰⁾。そのような材料を熱・水分レオロジー的に単純な材料と呼ぶ。

筆者らは、玄米粒を熱・水分レオロジー的に単純な材料とみなすこととし、応力緩和係数のマスター曲線を求めた⁴¹⁾。マスター曲線とは、基準の温度と含水率における応力緩和係数と時間の関係を表す曲線であり、任意の温度と含水率における応力緩和係数はある換算係数(時間・温度・含水率移動因子と呼ばれ、温度と含水率の関数となる)を乗じることにより、マスター曲線に一致する。応力解析では、刻々変化する温度と含水率における応力緩和係数をマスター曲線に移し、マスター曲線を介して時間的に変化する応力を求めることになる⁴¹⁾。

粘弾性体の弾性率(すなわち応力緩和係数)は時間の関数となるが、そのポアソン比もまた時間の関数となる。線形粘弾性体の場合、縦応力緩和係数、せん断応力緩和係数およびポアソン比にそれぞれラプラス変換をほどこすと、変換された3者の間に比較的単純な関係(それは完全弾性体において一定値を示す縦弾性率、せん断弾性率およびポアソン比の3者間の関係に類似である)が成立する^{27, 28)}。筆者らは、玄米粒のポアソン比を時間に無関係に不変と仮定して、縦応力緩和係数の実験値よりせん断応力緩和係数を推定した⁴¹⁾。

高分子材料の粘弾性の場合、温度と時間のスケールの等価性には理論的根拠があるので、温度の高い実験によって粘弾性測定の時間を短縮することが可能である。これに対し、収縮性材料の温度・含水率・時間のスケールの等価性は便宜的な仮定にすぎず、そこには理論的根拠があるわけではない。したがって、たとえば含水率の高い試片を用いることにより測定時間の短縮を計ることは危険であり、材料の粘弾性測定には乾燥所要時間のオーダーの時間を要する。その測定においては、長時間におよぶ試験中、試片の温度と含水率が変化しないように工夫しなければならない。

一般に固体は圧縮負荷によるよりも引張り負荷によって破壊されやすいので、乾燥応力の正(+)値(普通引張り応力を正とする)が材料の引張り強度を越えるとき割れが生ずると考えるのは自然である。しかるに、固体の強度は外力の負荷速度によって異なることが知られている³⁸⁾。すなわち、タイムスケールが問題となる。なお、固体の破壊は本質的に確率的現象であり、強度の測定値にはばらつきが大きい^{12, 38)}。また、荷重をかけてから割れ目が発生するまでに時間のおくれがあり、そのおくれ時間のばらつきもまた大きい。乾燥割れ機構の考察にあたり、破壊という現象は顕著な時間依存性を示す動的な現象であり、空間的のみならず時間的にも統計的な現象であること^{12, 38)}を念頭に留めておくといよい。

5. 乾燥応力の推定

応力解析では、応力の平衡方程式、変位・ひずみ関係式および構成方程式(応力とひずみの関係を記述する式)を、適切な初期および境界条件のもとで解かなければならない。粘弾性材料の場合、構成方程式は履歴積分を含む積分方程式となる。これに対し、完全弾性体や弾塑性体は、応力・ひずみ関係に時間が一切関与しない理想体であるため、構成方程式に積分項を含まない。

粘弾性論における応力緩和や塑性論における降伏条件を展開する際には、実際の応力から静水圧応力(Hydrostatic stress: 立体座標系における3軸方向法線応力の算術平均値)を減じ、その剰余の偏差応力を求めるのが普通である。材料が等方性であれば、静水圧応力は材料に膨張(Dilatation: 収縮は負の膨張とみなす)を生じさせ、偏差応力は形の変化(せん断変形)をもたらすと考える⁹⁾。現在知られている限りでは、静水圧だけでは固体に認めうるような永久変形を引き起こしていない¹⁴⁾。この経験に基づいて粘弾性論では、静水圧応力による膨張を完全弾性的とみなし、形状変化に関わる偏差応力だけが応力緩和を呈するものと仮定する⁹⁾。

解析が比較的容易な弾塑性モデルによる乾燥応力の解析例は多く^{2, 26, 36)}、なかには弾性モデルに基づくもの²²⁾もある。様々な材料の粘弾性を測定した報告は枚挙にいとまがないが、それを用いて乾燥応力を求めた研究は少ない。わずかに、木材を等方性の粘弾性体とみなし、板材の両面から乾燥するときの応力を求めた研究³⁷⁾が見られる。

線形粘弾性材料の内部に生じる熱応力について、温

度と時間のスケールの等価性を組込んだ、すぐれた解析法が示されている^{27,28)}。ただし、それによって解析的に解が得られるのは特殊な条件下に限られる。この方法に倣って、温度・含水率・時間のスケールの等価性を考慮した、乾燥応力解析法がある³⁴⁾。しかし、その解析法には容認し難い理論の飛躍がある。

筆者らは上記の熱応力解析法^{27,28)}を参照して乾燥過程における玄米粒（均質な球状の線形粘弾性体と仮定）内の乾燥応力の数値解法を提出し、それによって粒内部応力を求めた⁴¹⁾。その結果より、玄米粒の乾燥割れに関するいくつかの特徴的傾向が合理的に説明されることを示した。

6. む す び

玄米粒のように比較的緻密で変形し難いように見え

るものでも応力緩和を呈する粘弾性体であることを見出し、また、粘土や小麦粉を水で練った塊の特性も粘弾性モデルで表現できることを知り、筆者は、収縮性の被乾燥材料は一般に粘弾性体とみなすべきではないかと考えるようになった。弾塑性論に基づく応力解析法は比較的容易であるが、材料を弾塑性体と表すときは乾燥に相応したタイムスケールでその性質を確認すべきであると重ねて主張したい。

本稿では、乾燥応力の推定に用いる目的で収縮性材料の物性値を測定する際の問題点に触れ、乾燥応力解析に関する概況を述べるに留めた。詳細については文献などを参照していただきたい。視野のせまい筆者の記述に偏見があるかも知れないが、本稿がこの分野の進展に些かなりと役立てば幸いである。

引 用 文 献

- 1) Arora, V. K., S. M. Henderson and T. H. Burkhardt: *Trans. ASAE*, **16**, 320 (1973)
- 2) Ashworth, J. C.: "Drying '80 (Proc 2nd Int. Drying Symp.)", 431 (1980)
- 3) Barron, L. F.: *J. Fd Technol.*, **12**, 73 (1977)
- 4) Bushuk, W. et al.: *Cereal Chem.*, **37**, 390 (1960)
- 5) Chen, H. C. C. S. Chen: *J. Agric. Engng. Res.*, **19**, 97 (1944)
- 6) Earle, P. L.: *Cereal Chem.*, **26**, 267 (1949)
- 7) Ekstrom, G. A., J. B. Liljedahl and R. M. Peart: *Trans. ASAE*, **9**, 556 (1966)
- 8) Ferry, J. D.: "Viscoelastic Properties of Polymers (2nd Ed.)", John Wiley & Sons, Inc. (1961)
- 9) Flügge, W. (堀幸夫訳): "粘弾性学", 培風館(1973)
- 10) Hammerle, J. R. and N. N. Mohsenin: *Trans. ASAE*, **13**, 372 (1970)
- 11) Henderson, S. M.: *Rice J.*, **57**, 16 (1954)
- 12) 堀幸夫: 応用物理, **36**, 147 (1967)
- 13) 井本立也: "概説レオロジー", 東京化学同人(1963)
- 14) Jaeger, J. C. (飯田汲事訳): "弾性・破壊・流動論", 共立出版(1968)
- 15) Jones, C. R. and J. D. Cambell: *Cereal Chem.*, **30**, 177 (1953)
- 16) 亀井三郎, 水野成二, 塩見四郎: 工業化学雑誌, **38**, 1074 (1935)
- 17) 亀井三郎, 桐栄良三: 化学機械, **16**, 372 (1952)
- 18) 川村登: 農業機械学会誌, **12**, 43 (1951)
- 19) 北原覚一: "木材物理", 森北出版(1967)
- 20) 近藤万太郎, 岡村保: 農学研究, **19**, 143 (1932)
- 21) 国尾武, M. L. Williams: 日本機械学会誌, **68**, 83 (1965)
- 22) Lee, K.: Ph. D. Thesis (Texas Univ.) (1972)
- 23) 満久嵩麿: "木材の乾燥", 森北出版(1962)
- 24) 益田森治, 室田忠雄: "工業塑性力学", 養養堂(1968)
- 25) Mohsenin, N. N.: "Physical Properties of Plant and Animal Materials, Vol.1", Gordon and Breach Sci. Pub. (1970)
- 26) Morgan, K., R. W. Lewis and H. R. Thomas: "Drying '80 (Proc. 2nd Int. Drying Symp.)", 451 (1980)
- 27) 牟岐鹿楼: 日本機械学会誌, **64**, 1392 (1961)
- 28) Muki, R. and E. Sternberg: *Trans. ASME, Series E*, **28**, 2 (1961-6), 193 (1961)
- 29) 中山淳: 旭硝子研究報告, **10**, 1 (1960)
- 30) Newitt, D. M. and M. Coleman: *Trans. Inst. Chem. Engrs*, **30**, 28 (1952)
- 31) 日本機械学会編: "機械工学便覧"(第4版), 日本機械学会(1960)
- 32) 日本粘土学会編: "粘土ハンドブック", 技報堂(1967)
- 33) 小野木重治: "レオロジー要論", 槇書店(1957)
- 34) Rao, V. N. M. and J. R. Hammerle: *J. Agric. Engng. Res.*, **18**, 253 (1973), **20**, 283 (1975)
- 35) 素木洋一: 窯業協会誌, **63**, 9 (1955)
- 36) 穴戸郁郎, 丸山俊郎, 船木稔, 大谷茂盛: 化学工学論文集, **13**, 78 (1987)
- 37) 竹村富男: 木材学会誌, **16**, 108 (1970); **16**, 115 (1970); **18**, 1 (1972); **18**, 105 (1972)
- 38) 寺尾宣三: "破壊の秘密", 法政大学出版局(1968)
- 39) 若林喜一郎, 山口信吉, 松本利達, 三田哲郎: 化学工学論文集, **3**, 189 (1977)
- 40) 山口信吉, 若林喜一郎, 細野八郎: 農業機械学会誌, **39**, 179 (1977)
- 41) 山口信吉, 山沢新吾, 若林喜一郎: 農業機械学会誌, **43**, 83 (1981); **43**, 239 (1981); **43**, 451 (1981); **43**, 581 (1982); **44**, 61 (1982)