

## 麵の乾燥に伴う応力と割れの予測

誌名	研究報告 / 香川県産業技術センター
ISSN	13465236
著者名	稲津,忠雄 岩崎,賢一 古田,武
発行元	香川県産業技術センター
巻/号	7号
掲載ページ	p. 70-75
発行年月	2007年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# 麺の乾燥に伴う応力と割れの予測

稲津忠雄, 岩崎賢一, 古田 武\*

麺(うどん)の収縮および力学物性変化を数学的にモデル化することにより, 麺乾燥中の応力分布を計算し割れ発生の予測を試みた. 麺の収縮係数は, 水分含量変化に対して各寸法方向ともほぼ同じ値であったが, 温度には依存しなかった. ヤング率, 降伏応力および破壊応力は水分含量の指数関数として表された. 乾燥に伴う応力分布変化は, 有限要素法を用い, 水分移動方程式と構成方程式を連立させることにより推算した. 計算した応力分布は, 急激な乾燥速度が大きな内部引張応力を引き起こすことを示した. 本研究で用いたスキームは, 長さ方向に沿った割れ形成の可能性を評価するのに有効であり, その予測は実際工場で発生する割れのパターンと一致した.

## 1 緒言

乾麺は, 小麦粉と食塩水を混捏し, ドウを帯状に圧延し, 線状に成形した後(生麺), 乾燥した保存食品である. 生麺の乾燥は, 製品品質を左右するものの, その制御は難しい. これは, 生麺が急激な乾燥によって生じる内部応力歪みに耐える強度が小さいことと, 麺線が厚いために乾燥しにくいためである. そのため, 不適切な乾燥条件は, 製造効率の低下, 変形や割れの発生を引き起こす. これは食品内の不均一な水分分布の結果としての, 不均一な体積収縮によるものであり, 水分移動, 力学物性および乾燥操作条件等の影響を受ける. 従って, これらの制御は非常に重要である.

食品の応力-歪み関係は乾燥プロセスの最適化に有用である. 臨界引張応力の測定は, 多くの乾燥食品を含む脆い物質の破壊基準として用いられており, その適用性は実験的にいくつかの食品<sup>1)~7)</sup>で証明されている. しかし, 麺の引張破壊応力についてはほとんど報告されていない.

Peczalski ら<sup>8)</sup>はスパゲッティ内の水分含量と引張応力のモデル化を行い, それらの予測を行った. 同様の報告はパスタ<sup>9)</sup>, 押出セモリナ<sup>10)</sup>でされている. しかし, 乾麺の応力割れに関する研究はほとんど行われていない. 経験的な観点から, 応力分布の予測は, 麺の乾燥最適化にとって大変重要なことである.

本研究では, 実際の乾燥工程で遭遇する水分含量範囲での麺生地(生麺)の収縮および力学物性(ヤング率, 降伏応力および破壊応力)を測定し, 乾燥に伴い発生する応力を非定常水分勾配と収縮を結合させ, 有限要素法を用いて解析した. また, 乾燥空気条件と割れ発生の関係についても検討した.

## 2 実験方法

### 2.1 収縮および力学物性の測定

#### 2.1.1 サンプル調製

市販中力小麦粉, 塩化ナトリウムおよび蒸留水を麺パン機(MK-500U, ナショナル製)で5分間ミキシン

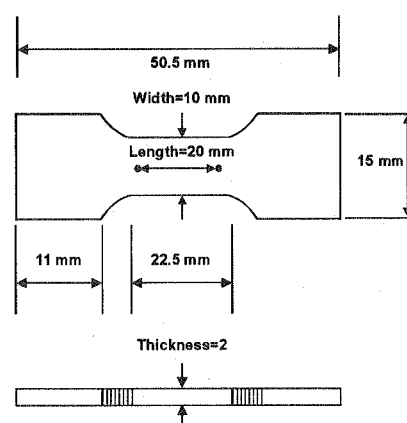


図1 打抜試験片の形状

グを行い, 調製した生地を1時間熟成させた. 生地は製麺機(ATL-150, Marcato製)で往復圧延を行い, 厚さ約2mmの圧延生地を得た. 打抜器具(サン科学製)によってダンベル状の打抜生地を調製し(図1), その生地を収縮および力学物性測定に供した.

#### 2.1.2 収縮測定

打抜状生地をプラスチック容器に入れ20, 30および40°Cで保存した. 各容器には湿度を下げるためにシリカゲルをセットした. 幅, 厚さおよび長さの経時変化はノギスを用いて測定した. 同時に, サンプルの水分含量も135°C2時間乾燥法により求めた.

#### 2.1.3 力学物性の測定

力学物性の測定は, 恒温器(CR-32, 日立製)の中にレオメーター(CR-200D, サン科学製)をセットし, 20, 30および40°Cで測定を行った. 生地引張速度は20 mm/min<sup>11)</sup>とした. 破壊応力は, サンプル破断点に近い場所で断面積をノギスで求め算出した. また, サンプルの水分含量は上述の方法と同様に測定した.

### 2.2 乾燥に伴う割れ発生の予測

#### 2.2.1 基本的な仮定

本研究では, 次の仮定を行った:

- ①生麺は巨視的に見ると連続, 均質で等方性材料
- ②麺の水分移動は, Fickの拡散則に従う
- ③熱移動は物質移動に比べ非常に早く, そのため乾燥は等温過程で進行

\*鳥取大学工学部生物応用工学科

④応力-歪み関係は、弾塑性挙動の Hook と Prandtl-Reuss の構成方程式に従う

⑤麺線断面の応力分布は、一般化された平面歪み問題として取り扱える。そのため、生麺は長さ軸方向に収縮がなく、軸応力がない ( $\sigma_z = 0$ ) 半無限スラブとみなせる

⑥生麺は引張応力に比べ圧縮応力に対して抵抗が高い

## 2. 2. 2 水分移動モデル

生麺の水分移動は拡散方程式で表される<sup>12)</sup>：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで  $C$  は水分濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $t$  は時間 (s)、 $x$  は距離 (m)、 $D_a$  は見掛けの水分拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) である。生麺からの水分移動が部分的に乾燥空気湿度に影響を受ける時、蒸発速度と内部拡散速度が釣り合う境界条件を考える必要がある。外部物質移動を考慮した場合、生麺表面からの水分蒸発速度は次のように表せる<sup>13),14)</sup>：

$$-D_a \frac{\partial C}{\partial t} = k(C_i - C_\infty) \quad (2)$$

ここで、 $k$  は見掛けの物質移動係数 (m/s)、 $C_i$  は麺表面の水分濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_\infty$  は雰囲気空気と平衡になる水分濃度 ( $\text{kg/m}^3$ ) を示す。なお、 $k$  と  $D_a$  は文献値<sup>13),14)</sup>を引用した。

## 2. 2. 3 力学モデル

本研究では、材料が非線形特性を持つため、弾塑性の応力-歪み場を計算するために増分法を用いた。一般化された平面歪み下での応力-歪み関係を表す構成方程式は次式で表される<sup>15)</sup>：

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E_y(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x^p \\ d\varepsilon_y^p \\ d\gamma_{xy}^p \end{Bmatrix} \\ &= [D^p] \{d\varepsilon^p\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma$  は応力 (Pa)、 $\sigma_y$  は降伏応力 (Pa)、 $\tau$  はずり応力 (Pa)、 $\varepsilon$  は歪み (-)、 $\varepsilon^p$  は弾塑性歪み (-)、 $E_y$  はヤング率 (Pa)、 $\nu$  はポアソン比 (-)、 $\gamma^p$  は弾塑性ずり歪み (-)、 $[D^p]$  は弾塑性応力-歪みマトリックスである。 $G$  と  $H'$  はずり係数 (Pa) と歪み硬化速度 (Pa) であり、それぞれ次のように表すことができる：

$$G = \frac{E_y}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} \quad (5)$$

ここで式 (3) 中の  $\sigma'_x$  と  $\sigma'_y$  は偏差応力で、次式で示される：

$$\sigma'_x = \frac{2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z}{3} \quad (6)$$

$$\sigma'_y = \frac{2\sigma_y - \sigma_x - \sigma_z}{3} \quad (7)$$

$\bar{\sigma}$  は相当応力 (Pa) で：

$$\bar{\sigma} = \sqrt{0.5\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\} + 6\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

式 (3) において、第 1 項と 2 項はそれぞれ、構成方程式の弾性、塑性項を示す。本研究では von Mises の降伏条件を用いた。この条件により局所的な塑性変形は、局所的な相当応力  $\bar{\sigma}$  が単軸引張試験から得られる降伏応力  $\sigma_y$  を越える時にのみ起こる。一方、局所的な弾性変形は、 $\bar{\sigma}$  が  $\sigma_y$  より低い時に起こる。

一般化された平面歪み条件を適用しているため、全体の歪み  $\{dU\}$  は  $x, y$  方向の歪み  $\{du\}$  と  $\{dv\}$  によって次のように表される：

$$\{dU\} = \begin{Bmatrix} du \\ dv \end{Bmatrix} \quad (9)$$

全体の歪み  $\{d\varepsilon\}$  と全体の歪み  $\{dU\}$  の関係は：

$$\{d\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du \\ dv \end{Bmatrix} = [B] \{dU\} \quad (10)$$

ここで  $[B]$  は歪み-接点変位マトリックスである。

応力解析には、平衡方程式と力学境界条件が必要である。本研究では、平衡方程式を得るために仮想仕事原理を適用した。体積力および表面力がないと仮定すると、次の平衡方程式が得られる：

$$\int_V \delta \{d\varepsilon^p\}^T \{d\sigma\} dV = 0 \quad (11)$$

ここで、 $V$  は全体の体積 ( $\text{m}^3$ )、上付文字の  $T$  は  $\{d\varepsilon^p\}$  の転置を示す。局所の全体歪み  $\{d\varepsilon\}$  は力学応力歪みと乾燥収縮歪み ( $\varepsilon^d$ ) (歪みによって応力を生成しない) の和として示される：

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^d\} \quad (12)$$

そして、要素の構成方程式は次式で与えられる：

$$\int_V [B]^T [D^p] [B] dV \{dn\} = \int_V [B]^T [D^p] \{d\varepsilon^d\} dV \quad (13)$$

ここで、 $\{dn\}$  は節点変位ベクトルである。本研究では材料が等方性であると仮定しているため、 $\{d\varepsilon^d\}$  は次のように表される：

$$\{d\varepsilon^d\} = \begin{Bmatrix} \phi \\ \phi \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ここで  $\phi$  は収縮係数 (-) で収縮測定から算出される。 $\{d\varepsilon^d\}$  は長さ軸方向に沿った収縮がないという仮定から計算しなかった。

## 2. 2. 4 計算方法

応力解析は、有限要素法解析プログラム ANSYS/ED<sup>®</sup>5.6 (サイバネットシステム製) の連成解析手法を用いて、まず麺線内の水分移動から水分分布を計算し、次に一定時間毎の水分分布の差からひずみを求め、最終的に応力分布を求めた。なお本研究では非線形の弾塑性挙動を考えているため、応力問題は目的時間まで繰り返し計算を行った。

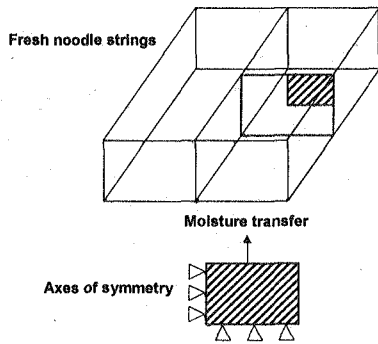


図2 麺線断面の1/4モデル

水分拡散係数, 物質移動係数および平衡水分含量は, 既報<sup>13,16)</sup>の値を採用した. ポアソン比( $\nu$ )は押出セモリナの値 $0.35^{17)}$ を用いた. 式(13)は図2に示すように, その対称性から麺の1/4断面での解析を行った. メッシュは $10 \times 9$ の正方形要素で区切った.

### 3 結果及び考察

#### 3.1 収縮特性

図3に生麺の乾燥過程における水分含量( $W$ , kg-water / kg-solid, 以下 d.b.と略す)と温度の関数としての収縮歪み( $\epsilon^d$ )を示す. 収縮歪みは水分含量の増加とともに直線的に減少し, その収縮の程度は温度に依存しないことが明らかとなった. さらに, 乾燥収縮歪みと水分含量の回帰直線の傾きは, 各方向ともほぼ同じ約0.25を示した. 同様の結果は, 大豆<sup>18)</sup>, 緑豆<sup>19)</sup>の乾燥でも報告されている. それゆえ, 生麺は等方性材料であると結論づけられ, 収縮係数 $\phi = 0.25$ を応力解析に適用した.

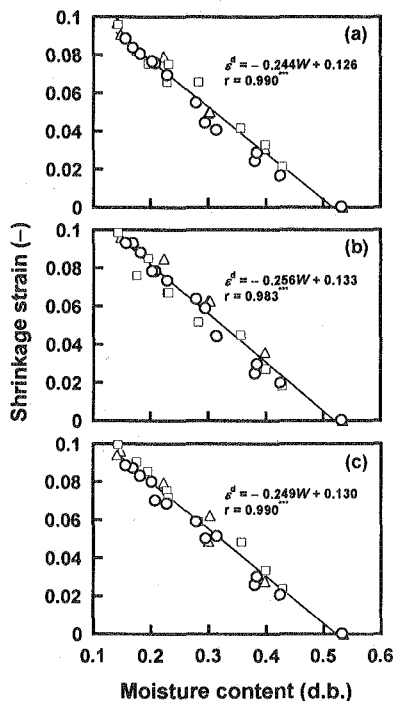


図3 収縮歪みと水分含量の関係

(a): 幅, (b): 厚さ, (c): 長さ  
○: 20°C, □: 30°C, △: 40°C

#### 3.2 力学特性

図4に典型的な引張応力-歪み曲線( $W: 0.3$ (d.b.), 20°C)を示す. ヤング率( $E_y$ )は材料が弾性と仮定さ

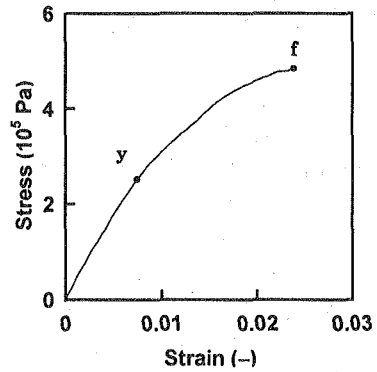


図4 典型的な引張応力-歪み曲線

れる曲線の初期の線形領域から計算した. 線形領域の終点(点y)が降伏応力( $\sigma_y$ )であり, 点fが破壊応力( $\sigma_f$ )となる. 図5は各温度におけるヤング率と水分含量の関係を示している. ヤング率は水分含量の

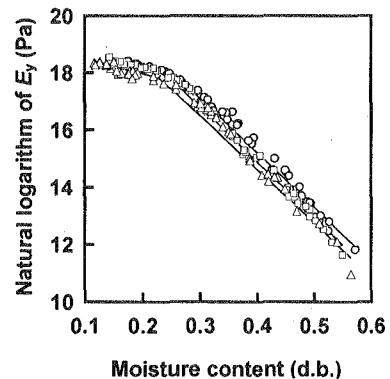


図5 ヤング率( $E_y$ )と水分含量の関係

記号は図3と同じ

減少とともに増加し, 水分含量の影響が2直線で近似できた. それゆえ, 式(15)を用いて, 各水分含量範囲でそれぞれカーブフィット<sup>20)</sup>を行った.

$$E_y = A_1 \exp(-A_2 W) \quad (15)$$

図6, 7および8は, 降伏応力 $\sigma_y$ , 歪み硬化速度 $H'$ および臨界破壊応力 $\sigma_b$ をそれぞれ示している. これらの値も同様に次の非線形方程式を適合させた:

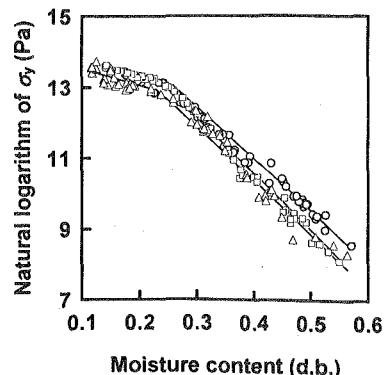


図6 降伏応力( $\sigma_y$ )と水分含量の関係

記号は図3と同じ

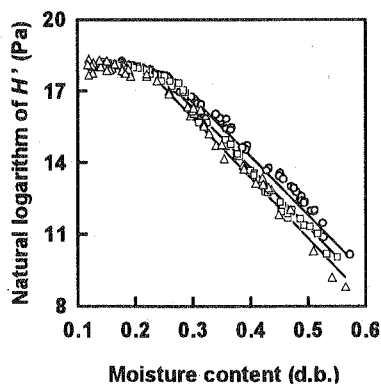


図7 歪み硬化速度 ( $H'$ ) と水分含量の関係  
記号は図3と同じ

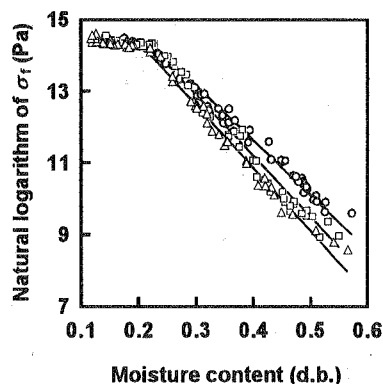


図8 破壊応力 ( $\sigma_f$ ) と水分含量の関係  
記号は図3と同じ

表1 生麺の力学特性

Temperature (°C)	20		30		40	
$E_y (=A_1 \exp(-A_2 W))$	$W > 0.26$	$A_1$ $7.98 \times 10^9$	$A_2$ 19.0	$W > 0.24$	$A_1$ $6.53 \times 10^9$	$A_2$ 19.3
	$W \leq 0.26$	$2.66 \times 10^8$	5.79	$W \leq 0.24$	$1.97 \times 10^8$	4.82
$\sigma_f (=A_3 \exp(-A_4 W))$	$W > 0.26$	$A_3$ $1.98 \times 10^7$	$A_4$ 14.6	$W > 0.24$	$A_3$ $1.98 \times 10^7$	$A_4$ 15.7
	$W \leq 0.26$	$1.47 \times 10^6$	4.62	$W \leq 0.24$	$1.47 \times 10^6$	4.70
$H' (=A_5 \exp(-A_6 W))$	$W > 0.26$	$A_5$ $2.93 \times 10^{10}$	$A_6$ 24.6	$W > 0.24$	$A_5$ $2.17 \times 10^{10}$	$A_6$ 25.0
	$W \leq 0.26$	$1.78 \times 10^8$	4.88	$W \leq 0.24$	$1.32 \times 10^8$	3.65
$\alpha_f (=A_7 \exp(-A_8 W))$	$W > 0.23$	$A_7$ $5.11 \times 10^7$	$A_8$ 15.3	$W > 0.22$	$A_7$ $6.57 \times 10^7$	$A_8$ 17.0
	$W \leq 0.23$	$2.81 \times 10^6$	2.71	$W \leq 0.22$	$2.68 \times 10^6$	2.40

$$\sigma_y = A_3 \exp(-A_4 W) \quad (16)$$

$$H' = A_5 \exp(-A_6 W) \quad (17)$$

$$\sigma_f = A_7 \exp(-A_8 W) \quad (18)$$

表1に式(15)から式(18)中の係数( $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ および $A_8$ )のカーブフィット結果をまとめた。 $E_y, \sigma_y, H'$ 、および $\sigma_f$ は乾燥温度の上昇とともに減少した。この結果は、パスタでの報告<sup>9),21)</sup>と同様であった。式(15)から式(18)における水分含量の境界値は、乾燥温度の上昇に伴い減少した。これらの値は、20, 30 および 40°Cにおける小麦デンプンのガラス転移点の水分含量 0.234, 0.207 および 0.187 (d.b.)<sup>22)</sup>とほぼ同じであった。 $E_y, \sigma_y, H'$ 、および $\sigma_f$ に対する2領域の水分含量の影響は、サンプルのガラス転移に関連があることが示唆された。これらの回帰式は、応力割れ防止のための乾燥過程の最適化計算に役立てた。

### 3.3 応力分布の計算

コンピューターシミュレーションの妥当性を確認するために、2つの生麺の乾燥条件、(a) 20°C RH60%と(b) 40°C RH80%での実測値と計算結果の比較を図9に示す。乾燥条件(a)は、一般的に採用されている麺乾燥条件(b)より厳しく、破壊が起こりやすい条件であり、実際実験でも割れが生じた条件である。

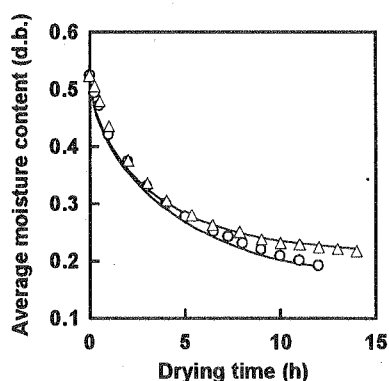


図9 生麺水分含量の経時変化

乾燥条件: (a) O, 20°C RH60%; (b) Δ, 40°C RH80%  
実線は計算結果を示す

図9から、計算結果は実験値にほぼ良好に一致していることが分かる。これは、麺内部の水分分布計算が妥当であり、麺内部の応力計算に適用可能であることを示している。

図10および図11は、乾燥条件(a) 20°C RH60%と(b) 40°C RH80%での乾燥時間1および8時間後の主応力分布シミュレーション結果をそれぞれ示している。乾燥1時間後、圧縮応力は無視できるほど小さいが引張応力が発生し、その最大値を示す領域(臨界領域)は上部表面の乾燥にさらされている部分であり(図10(a)および図11(a))、表面から一番初めの要素であった。乾燥条件(a)の最大応力は( $1.2 \times 10^6$  Pa),

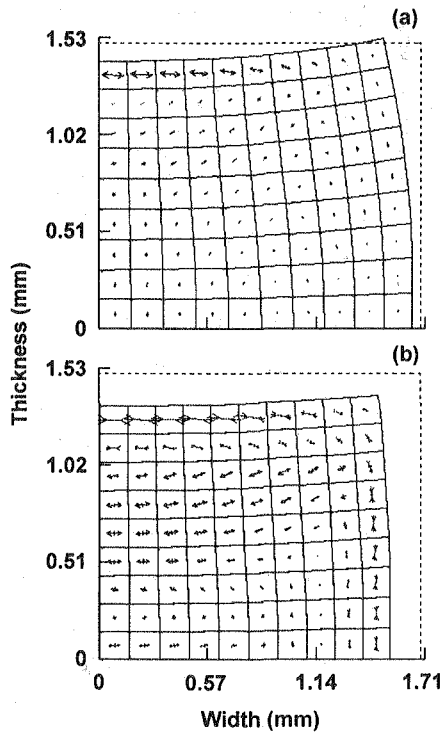


図 10 20°C RH60%下での生麺の 1/4 断面の主応力分布図

乾燥時間：(a) 1h; (b) 8h

主応力：↔引張応力; →←圧縮応力

(b) ( $4.0 \times 10^5$  Pa) の約 3 倍高い値であった。この領域の応力方向は、上部表面に平行であった。一般に割れは引張応力に対して直角に生成する。それゆえ、厚さ方向に応力割れが形成される可能性が高い。乾燥 8 時間後には (図 10 (b) および 図 11 (b)), 臨界領域は内部へ移動し、その応力も小さくなった (乾燥条件 (a) で表面から 4 番目の要素:  $5.6 \times 10^5$  Pa, 条件 (b) で表面から 6 番目の要素:  $2.6 \times 10^5$  Pa)。これらの結果は、応力割れが乾燥初期に生成し、時間とともに内部へ進行することを示している。乾燥条件 (a) と (b) の引張応力値の差は水分勾配の差に起因するかも知れない。乾燥条件 (b) は製品の破損を減少させる点において、明確な利点を持つ。これらの予測は、実際の割れのパターンや条件<sup>23)</sup>に一致した。引張応力が割れ形成に対して最も危険であり、特に急激な水分勾配を引き起こす低 RH において、2 期間の重要なリスク: (1) 乾燥初期の麺表面、(2) 乾燥が進行した際の麺中心部、が予想された。

#### 4 結言

麺の力学物性 ( $E_y$ ,  $\sigma_y$ ,  $H'$  および  $\sigma_f$ ) と収縮歪みに及ぼす水分含量の影響を測定し、次の結論を得た:

- 1) 収縮歪みは水分含量の減少に伴い直線的に増加した。
- 2) 生麺は収縮係数が各寸法方向ともに同じ値をとったため、等方性材料であるとみなせた。
- 3) 力学物性は水分含量の減少に伴い増加し、2つの水分含量範囲に対して異なる力学挙動を示した。この2領域の境界値はガラス転移点との相関が示唆された。

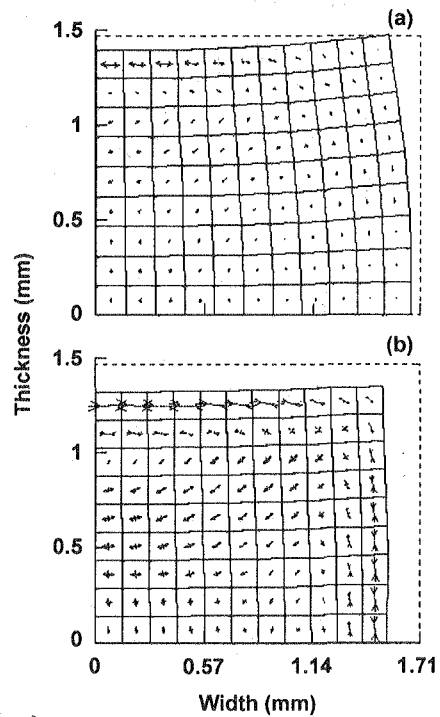


図 11 40°C RH80%下での生麺の 1/4 断面の主応力分布図

記号は図 10 と同じである

さらに、有限要素法を用いた応力割れ予測では次の結論を得た:

- 1) 応力分布の変化は、得られた力学物性を用い、水分移動方程式と構成方程式を連立させることにより推算できた。
- 2) 低 RH の乾燥空気条件下では、比較的大きな引張応力が生麺の中心軸付近の表面で予測された。
- 3) 実際の割れのパターンと一致する中心軸 (長さ方向) に沿った割れ形成の可能性が示された。

(*Int. J. Food Sci. Technol.* 40 巻 6 号に掲載)

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、応力解析についてご助言頂きました高松工業高等専門学校 岩田 弘 教授 (前 香川県産業技術センター 主席研究員) に深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Haghghi, K. and Segerlind, L. J.: *Trans. ASAE*, **31**, 938-946 (1988)
- 2) Litchfield, L. B. & Okos, M. R.: *Trans. ASAE*, **31**, 585-594 (1988)
- 3) Tsukada, K., Sakai, N. and Hayakawa, K.: *J. Food Sci.*, **56**, 1438-1445 (1991)
- 4) Itaya, Y., Kobayashi, T. and Hayakawa, K.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **38**, 1173-1185 (1995)
- 5) Izumi, M. and Hayakawa, K.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **38**, 1033-1041 (1995)
- 6) Akiyama, T., Liu, H. and Hayakawa, K.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **40**, 1601-1609 (1997)

- 7) Akiyama, T. and Hayakawa, K.: *J. Food Sci.*, **65**, 315-323 (2000)
- 8) Peczalski, R., Laurent, P., Andrieu, J. and Boyer, J. C.: In: Proceedings of the 10th International Drying Symposium, Kraków, Poland. B, pp.805-816 (1996)
- 9) Andrieu, J., Boivin, M. & Stamatopoulos, A. A.: In: Preconcentration and Drying of Food Materials (edited by S. Bruin). pp. 183-192. Amsterdam: Elsevier Science Publishers (1988)
- 10) Cummings, D. A., Litchfield, J. B. and Okos, M. R.: *Drying Technol.*, **11**, 1809-1836 (1993)
- 11) 柴田茂久, 今井 徹, 豊島英親, 梅田圭司, 石間紀男.: 日食工誌, **21**, 161-167 (1974)
- 12) Inazu, T. and Iwasaki, K.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **63**, 638-641 (1999)
- 13) Inazu, T., Iwasaki, K. and Furuta, T.: *Lebensm- Wiss. u.-Technol.*, **35**, 649-655 (2002)
- 14) Inazu, T., Iwasaki, K. and Furuta, T.: *Lebensm- Wiss. u.-Technol.*, **36**, 277-280 (2003)
- 15) 村田雅人: 弾・塑性材料の力学入門, pp. 193-197. 日刊工業新聞社 (1993)
- 16) Inazu, T., Iwasaki, K. and Furuta, T.: *Drying Technol.*, **19**, 1375-1384 (2001)
- 17) Cummings, D. A. and Okos, M. R.: *Trans. ASAE*, **26**, 1888-1893 (1983)
- 18) Misra, R. N. and Young, J. H.: *Trans. ASAE*, **23**, 1277-1282 (1980)
- 19) Rosselló, C., Simal, S., SanJuan, N. & Mulet, A.: *J. Agric. Food Chem.*, **45**, 337-342 (1997)
- 20) Yang, H. and Sakai, N.: *Japan J. Food Eng.*, **2**, 67-71 (2001)
- 21) Andrieu, J. and Stamatopoulos, A. A.: In: Proceedings of the 5th International Drying Symposium, **2**, 492-498 (1986)
- 22) Zeleznak, K. J. and Hoseneey, R. C.: *Cereal Chem.*, **64**, 121-124 (1987)
- 23) 鈴木政之: 食品と科学, 増刊号, 25-30 (1983)