

一般論文

# CFD による微細孔フィルムの ヒートシール温度解析

石川 豊\*、北澤 裕明\*、阿部 真\*、胡 耀華\*、鈴木 芳孝\*\*

## Analysis of Heat Sealing Temperature of Polymeric Film with a Perforation by Computational Fluid Dynamics (CFD)

Yutaka ISHIKAWA\*, Hiroaki KITAZAWA\*, Makoto ABE\*, Yaohua HU\* and Yoshitaka SUZUKI\*\*

簡易な MA (Modified Atmosphere) 包装として、青果物をフィルム包装する際にシール部に一定間隔で非溶着の微細空隙を作り、この部分でガス透過性を調節する「パーシャルシール包装」が提案され、実用化されている。しかし、設定温度などのヒートシール条件は現場においてトライアンドエラーで決めていることが多い。本報では、CFD (数値流体力学) を利用してヒートシールローラーとフィルムが接触する瞬間における微小空間の温度変化をシミュレーションした。パーシャルシール包装として実際に運転しているシールローラーの回転速度、加熱温度、フィルムとの接触面積などの条件を入力すると溶着面温度は約 125 と計算され、フィルムのヒートシール温度と引張り強度の関係から求めた適温範囲内にあることが確認された。このように、CFD によるフィルム内温度変化シミュレーションがパーシャルシール包装のヒートシール温度解析に適用可能であることが確認できた。

We proposed "Partial Seal Packaging" as a simple MAP (Modified Atmosphere Packaging) using conventional films and changing rolls of sealing machine. The bags, 600mm long and 85mm wide, were made of polypropylene (OPP) sealed partially with 0.4mm of fused part width and 0.6mm of non-fused part width. Heat sealing conditions such as temperature were decided by trial and error. In this study, we attempted to simulate temperature change in minute space inside films in the moment when a film touches a roller by Computational Fluid Dynamics (CFD). Heat sealing temperature was simulated to 125 by inputting initial conditions such as rotating speed, roller temperature and contact area of film and roller. This temperature was in suitable temperature range for heat sealing intensity. Temperature change simulation inside films by CFD can also be applied to evaluation of heat sealing temperature analysis of Partial Seal Packaging

キーワード: CFD、ヒートシール、微細孔フィルム、温度分布

Keywords : CFD, Heat seal, Polymeric film with a perforation, Temperature distribution

\*独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所(〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12), National Food

Research Institute, National Agriculture and Food Research Organization, 2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan

\*\*高知県農業技術センター(〒783-0023 高知県南国市廿枝 1100), Kochi Agricultural Research Center, 1100 Hataeda, Nankoku, Kochi 783-0023, Japan

著者連絡先: TEL:029-838-8037, FAX:029-838-7996, Email:yishi@affrc.go.jp

## 1. 緒言

MA (Modified Atmosphere) 包装は、青果物の鮮度保持手法の一つとして広く利用されている。プラスチックフィルムで青果物を密封包装した場合、青果物自身が行う呼吸作用により袋内が低酸素、高二酸化炭素雰囲気になると、青果物自身の呼吸が抑制され、シェルフライフの延長がはかれるというものである<sup>1,2)</sup>。

しかし、青果物用包装材料として使われることが多い延伸ポリプロピレン (OPP) フィルムなどに比較的呼吸量の高い青果物を入れて密封した場合、袋内の酸素濃度が低下しすぎることで、ガス障害が発生するような事例も指摘されている<sup>1)</sup>。そこで青果物の鮮度保持用フィルムとして、直径 20-100  $\mu\text{m}$  の微小ピンホールによりガス透過量を調節する微細孔フィルムが開発され、ハウレンソウ<sup>3)</sup>、ブロッコリー<sup>4)</sup>、ウメ<sup>5)</sup>などを使った貯蔵試験では、鮮度保持効果があることが報告されている。しかし、この方法もあらかじめフィルム表面に加工しておくことが必要なことからどうしても価格が高くなってしまふなどの問題が指摘され<sup>6)</sup>、実際に使用できる対象作物は、呼吸量が高く鮮度低下が早い、さらに高価な作物に限定されてしまっているというのが現状である。

そこで開発されたのが、微細孔を開けて袋のガス透過性を調節するといった基本的な機能はそのままにして、従来とは全く異なる安価で取り扱い易い微細孔包装 (パーシャルシール包装) である<sup>7)</sup>。この新しい微細孔フィルムを使うことにより、ニラ<sup>7)</sup>や葉ネギ<sup>8)</sup>、ナバナ<sup>9)</sup>などで鮮度保持効果が確認されてい

る<sup>10)</sup>。

パーシャルシール包装では、センターシールローラーで連続的にヒートシールを施しながら一部に非溶着部の通気孔を残すといった技術的に難しい作業を行わなければならない。この時に最も重要なことはヒートシール温度の管理である。ヒートシール温度が低すぎる場合には十分な強度が保てず、輸送・販売時に破袋してしまう危険がある。逆にヒートシール温度が高すぎる場合には、通気孔になるはずの非溶着部の一部にまで熱が伝わることで通気部が溶着してしまい、十分なガス透過性が確保できないといったことが考えられる。パーシャルシール包装は、高知県においてすでにニラ、小ネギ、青ネギなどで実用化されている技術ではあるが、現場におけるヒートシール温度の設定は、試行錯誤により経験的に決めていているというのが現状である。従って、ヒートシールの最適温度の設定や精度管理などを理論的な裏付けをもった上で定量的に行うことが求められている。

CFD (数値流体力学) は、さまざまなタイプの流れや熱伝達および物質移動のモデル化が可能であり、化学プロセスやバイオメディカル、建築・空調などこれまでもさまざまな分野で適用されてきた。農業分野においても、施設栽培における温室内の温度分布解析<sup>11)</sup>や人工漁礁周りの流れの解析<sup>12)</sup>などの分野で利用されている。本報では、この CFD ソフトウエアを利用してパーシャルシール包装のヒートシール時におけるフィルム内の温度分布解析を行った。フィルムがローラーで挟まれ加熱される瞬間の溶着部および非溶着部の温度変化を微小範囲においてシミュレーションし、可視化再現することによって、表面に

凹凸をもったセンターシールローラーにより生成されるフィルム内熱環境について総合的に検討を行った。

## 2. 材料及び方法

### 2.1 パーシャルシール包装

本研究で使用したパーシャルシール包装は、ニラや小ネギ、青ネギなどをフィルムで連続して包装する際に使われる横型ピロー包装機のセンターシールローラーを表面加工することにより、背貼り部分に非シール部分を残し、これを微細な通気孔とすることで袋全体のガス透過性を調整する方法である。

包装機は、茨木精機社製 FP3200 を使用し、直径 100mm、幅 4mm のセンターシールローラーを設置した。Fig.1 に示すように、一方のローラーは表面に凹凸をつけた歯車状（凸部 0.4mm 幅、凹部 0.6mm 幅、凹凸の段差 0.4mm）とし、もう一方は表面を平らにした。

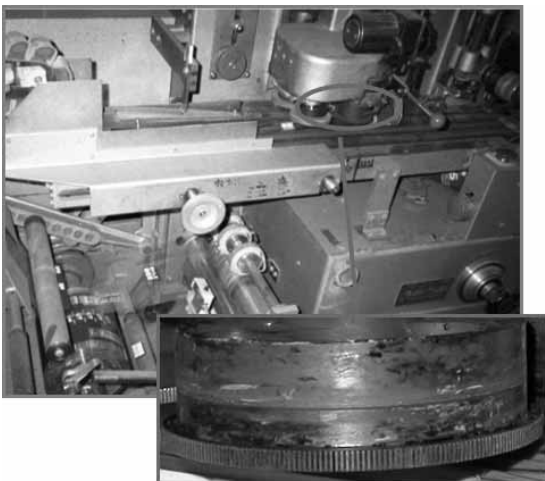


Fig.1 Center seal roller of Partial Seal Packaging

フィルムが両ローラー間を通過する瞬間、凸部では加熱したローラーとフィルムが接触することによりフィルム温度が上昇し、ヒートシールされる。しかし、凹部ではローラーとフィルムの接触がないためフィルムに十分に熱が伝わらず、シールされずに通過する。ローラーが回転することによりこれが連続的に繰り返され、シール部幅 4mm、溶着部幅 0.4mm、非溶着部幅 0.6mm のパーシャルシール包装を製造した。袋の大きさは、85mm × 600mm とし、この袋の背貼り部分には 0.6mm 幅の通気部分が 600 個作られていることになる (Fig.2)。なお、袋の上下は完全なシールとしている。使用したフィルムは、片面ヒートシールグレードの延伸ポリプロピレン (OPP) フィルムである。

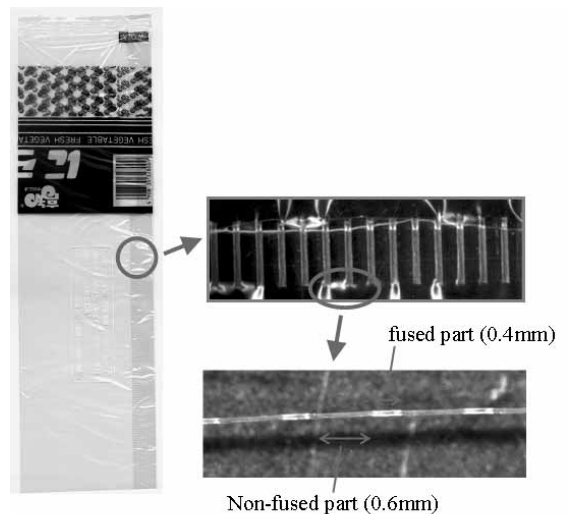


Fig.2 Center seal of Partial Seal Packaging

### 2.2 CFD 解析手法

ヒートシール時におけるフィルム内温度分布の経時的变化をシミュレーションした。CFD (数値流体力学) ソルバーで計算するた

めの形状作成・メッシュ生成を行うプリプロセッサとして、流体解析プリプロセッサ GAMBIT (アンシス・ジャパン株式会社) を使用し、CFD 解析を行うために、熱流体解析ソフトウェア FLUENT (アンシス・ジャパン株式会社) を使用した。

解析の対象としたパーシャルシール包装は、凹凸形状のヒートバーと平面形状のヒートバーの間に厚さ  $50\mu\text{m}$  のポリプロピレンフィルム ( $25\mu\text{m}$  のフィルム 2 枚) を挟んだ形状とし (ヒートシール層は十分薄いものとして考慮しなかった) 長さを  $14.1\text{mm}$  とした。凹凸形状のヒートバーは、接触部 (凸部) が幅  $0.4\text{mm}$  で 10 個、非接触部 (凹部) が幅  $0.6\text{mm}$  で 9 個とし、凹凸の高さは  $0.4\text{mm}$  とした (Fig.3)。計算格子は、接触面付近が密になるように不等間隔に配置し、8900 に分割した。また、歯形は初期温度を設定し、その後一定とした。さらに、フィルム密度、比熱、熱伝導率などを初期値として入力した。

### 2.3 ローラー間の圧力計測

ローラー間の圧力計測には富士フィルム社

製圧力測定フィルム・プレスケールを使用した。本シートは圧力領域によって超極低圧用 (圧力測定範囲  $0.2\text{--}0.6\text{MPa}$ ) から超高压用 (圧力測定範囲  $130\text{--}300\text{MPa}$ ) まで 6 種類に分かれている。本実験には低圧用 (圧力測定範囲  $2.5\text{--}10\text{MPa}$ ) を使用した。本シートは、支持体 (PET ベース) に発色剤 (マイクロカプセル) が塗布されている A フィルムと、支支持体 (PET ベース) に顕色剤が塗布されている C フィルムの 2 種類のフィルムからなる。使用する際には、A フィルムの発色剤面と C フィルムの顕色剤面を合わせ、圧力によって発色剤層のマイクロカプセルが破壊されることで、その中の発色剤が顕色剤に吸収され、赤く発色する。この色の変化を圧力画像解析システム (富士フィルム社製: FPD-9210) で定量する。

### 2.4 ヒートシール強度の測定

溶着面温度を正確に設定したヒートシール試験片の作成には、溶着面温度の直接測定法 [“MTMS”] を利用した<sup>13,14,15)</sup>。加熱プレスユニットを一定温度で加熱しておく。試料フィル

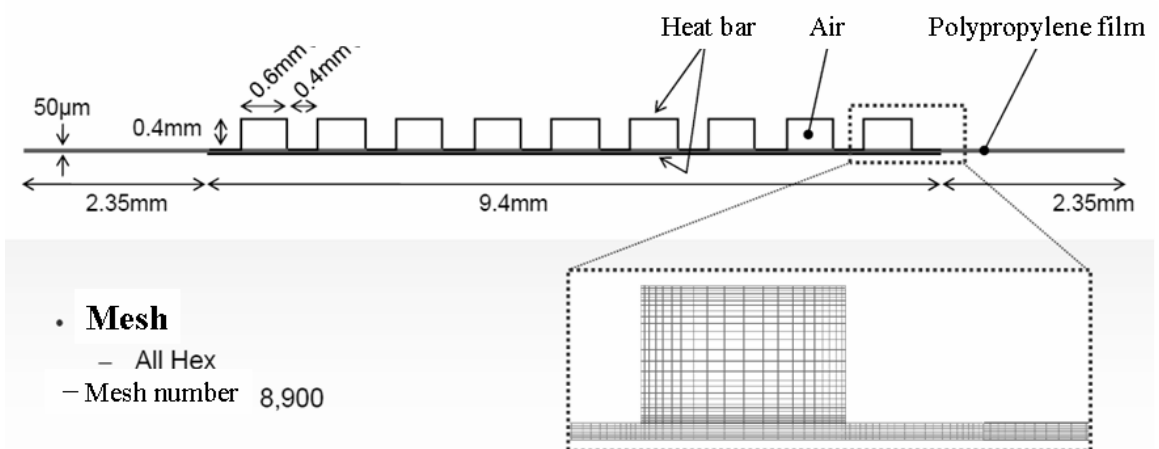


Fig.3 CFD condition

ムは、溶着層を内側にして向かい合わせ、その間に微細センサー（熱電対クロメル/アルメル(CA="K") $45\mu\text{m}$  )を挿入し設置する。これをプレスユニット間に挟んで、溶着面温度が一定になるまで（数秒間）圧着加熱を行う。熱電対で測定したデータは、日置電気(株)社製デジタル記録計（8855 メモリハイコダ）に転送し、A/D変換：16bit、温度分解能：0.1、時間分解能：(サンプリング周期)最小 4kS/sec の条件で温度測定を行った。溶着面温度を 110-145 まで 1-5 刻みになるようにサンプルを作成した。

ヒートシールを行った試料は、溶着面の引き裂きテスト<sup>16)</sup>によりヒートシール強さの計測を行った。ヒートシール部分に対して直角の方向に幅 15mm、展開長さ 100-150mm になるように試験片を採取し、ヒートシール部を中央にして 180° に開く。試験片の両端をインストロン社製万能物性試験器( Model 5542 )のつかみ治具に取り付け、300mm/min の速度でヒートシール部が破断するまで引っ張り加重を加え、その間の最大荷重 (N{kgf}/15mm) を求め、ヒートシール強さとした。各測定は 5 反復行った。

### 3. 結果

#### 3.1 CFD によるフィルム内温度変化シミュレーション

CFD による温度変化シミュレーション結果を Fig.4 に示した。設定条件は実際に現場での運転条件を考慮して、フィルムの初期温度 20、上面ローラー150、下面ローラー130とした。この温度設定は、実際のパーシャルシールにおいて十分なシール強度がありかつ一定以上の通気性を持つ理想的なフィルムを

作ることができる条件である。フィルムの温度変化を見ると、上面ローラー凸部と下面ローラーで挟まれた部分と上面ローラー凹部と下面ローラーで挟まれた部分では明らかな違いが見られた。前者では、フィルムの上下両面がローラーに接しているため温度上昇が急であったが、後者は、ローラー凹部がフィルムと接触していないため、フィルム上下で温度差が見られ、下面より温度が徐々に高くなるのがわかった。

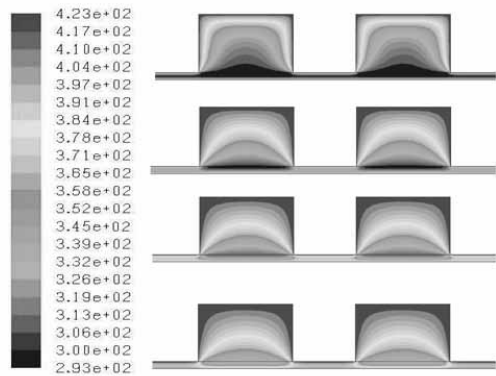


Fig.4 Temperature change simulation by CFD

上下ローラーに挟まれたフィルムの熱流方向の断面の温度分布の経時変化を Fig.5 に示した。

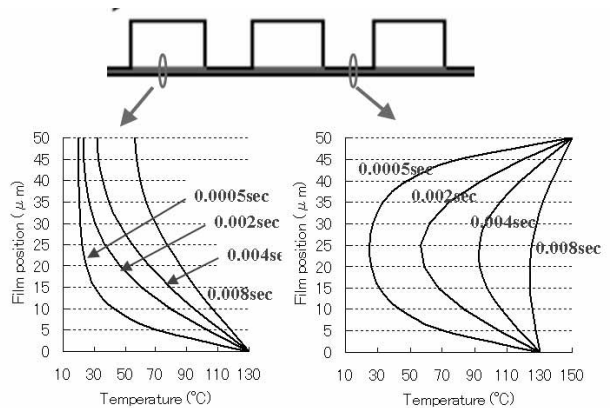


Fig.5 Temperature change simulation in film  
Film initial temperature: 20°C, Upper heat bar: 150°C,  
Lower heat bar: 130°C

歯車状ローラー凸部と平面ローラーに挟まれたフィルム縦方向断面では、上端 150、下端 130 は固定されており、両端から徐々に内部に熱が伝わり、0.008sec 後には溶着面が約 125 に達した。歯車状ローラー凹部と平面ローラーに挟まれたフィルム縦方向断面では、上端はローラーに接しておらず、下面および横方向からの熱伝導のみで温度が高くなるため温度上昇は遅く、0.008sec 後ではまだ 80 にも達していなかった。

50  $\mu\text{m}$  厚フィルムの中心部（溶着面）の横方向温度分布の経時変化を Fig.6 に示した。

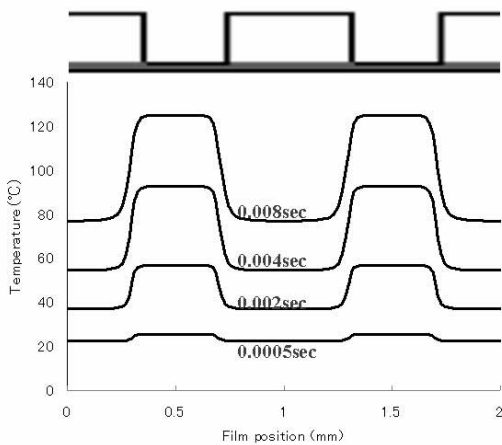


Fig.6 Temperature change simulation in film  
Film initial temperature: 20°C, Upper heat bar: 150°C,  
Lower heat bar: 130°C

凸部ローラー下の温度上昇が早いのは当然であるが、凹部ローラー下でも比較的大きな温度上昇は見られた。パーシャルシール包装では、ローラー凸部下部分ではフィルムが溶着し、凹部下部分では溶着することなく微細孔を形成すると考えられるが、凹部下にあるフィルムでも凸部との境界域では一部溶着温度以上になることがわかった。

歯車状ローラー凸部と平面ローラーに挟ま

れた溶着面（2枚のフィルムの溶着面）の温度変化シミュレーションを Fig.7 に示した。0.002sec 後には 51、0.004sec 後で 93、0.006sec 後で 113、0.008sec 後には 125 に達することがわかった。また、0.02sec 後にはほぼ平衡温度に達し、上面ローラーの温度 150 と下面のローラー温度 130 の中間温度である約 140 となった。

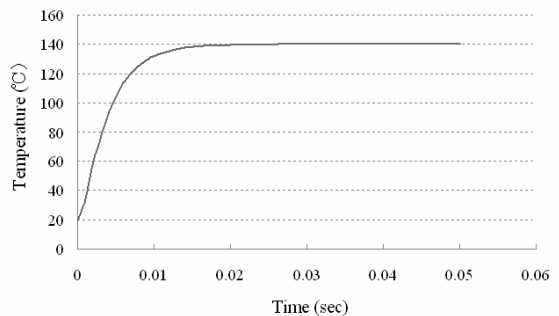


Fig.7 Temperature change of film center  
Film initial temperature :20 °C, uneven roller: 150 °C, flat roller: 130 °C

### 3.2 CFD シミュレーションとフィルム特性の比較

本包装機では、フィルムが2つのローラーの間を通過する瞬間において、2つのローラーは一定の力でフィルムを挟み込むように設計されている。挟み込む力がまったくなければ、フィルムとローラーは一点でのみ接触することになるが、実際には一定の力で挟み込んでいるためフィルムの弾性との関係から常に一定の面積をもってローラーとフィルムが接触することになる。これを圧力シートで計測した結果、ほぼ2～3個の凸部が接触していることがわかった。今、ローラーの回転速度は 18m/min (300mm/sec)、ローラーの直径は 10mm、凹凸のピッチは 1mm である。ローラーとフィルムの接触時間を凹凸のピッチ 2

個分とすると、 $2/300=0.0067\text{sec}$ 、3個分とすると、 $3/300=0.0100\text{sec}$ となる。その平均的な値として、ローラーとフィルムは約  $0.008\text{sec}$  間接触しているものと仮定して以下のシミュレーションを行った。

フィルムの溶着面温度が 110 から 145 になるようにヒートバー温度を設定してヒートシールを行い、それぞれのフィルムについて引張り試験を行った。溶着面温度と引張り強度の関係を Fig.8 に示した。

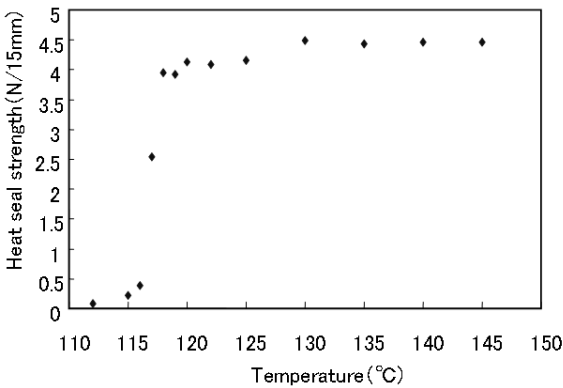


Fig.8 Heat seal strength of film

116 以下では引張り強さは  $0.4\text{N}$  以下ときわめて低く、117 で  $2.5\text{N}$  を超え、118 以上では  $4\text{N}$  以上の強度を示した。118 以上で溶着した試料で引張り試験を行った場合、通常は2枚のフィルムが剥がれることにより引張り強度を示したが、130 以上の温度になるとフィルムの加熱と非加熱のライン上でちぎれるような形で引張り強度を示した。このことから、130 以上ではいわゆる“破れシール”<sup>17)</sup> となると考えられる。従って、ここではヒートシール適温範囲を 118-130 と設定した。

フィルムの初期温度  $20$ 、上面のローラー  $150$ 、下面ローラー  $130$  とした場合のフィ

ルム中心部である溶着面温度は、ローラーとフィルムが接触している  $0.008\text{sec}$  間に  $125$  まで上昇することが Fig.7 より明らかとなった。これはヒートシール適温範囲 118-130 に入っており、良好なヒートシールが行える条件であることを示唆している。実際にこの条件で作成したパーシャルシール包装は、シール強度も十分でガス透過性も良好であるといった結果となり、CFD の結果を裏付けるものとなった。同様の試験を上面のローラー温度を  $150$  に固定し、下面のローラー温度を  $110-190$  の範囲で変化させた場合の溶着面温度シミュレーションを行い、Fig.9 に示した。

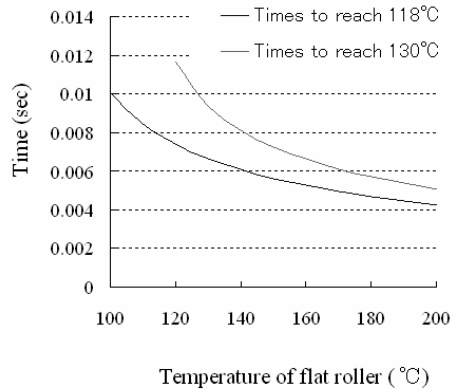


Fig.9 Times to reach the optimum sealing temperature  
Film initial temperature :  $20$  °C, uneven roller:  $150$  °C

下面ローラー温度が  $110$  の場合、 $0.008\text{sec}$  後の温度は  $118$  ぎりぎりであり、 $120, 130$  では  $118-130$  の範囲内に十分入っており、 $140$  では  $130$  ぎりぎりの温度であった。実際に包装機でパーシャルシールを作った結果、 $110$  のものはシール強度が不足しており、 $140$  のものは通気性が不十分であることを確認している。適正に作成できたのは  $120, 130$  のものであった。このことから CFD を

使ったフィルム内温度変化シミュレーションがパーシャルシール包装作成の適否を判断するための有効な方法になり得ることが示唆された。

#### 4. 考察

パーシャルシール包装は、溶着部分が0.4mm、非溶着部分が0.6mmと微小な領域での加工であり、ヒートシールローラーとフィルムが接触している時間が数ミリ秒という極めて短時間での現象であるため、加工部分の温度変化を実測することは非常に難しい。そのため、これまでは試行錯誤で設定温度を決めて実際に加工を行い、引張り試験や青果物を入れての実証試験でその良否を検証することができなかつた。本研究では、フィルム内の温度変化を0.5msec刻みでシミュレーションすることができ、Fig.5のように縦方向の分布、Fig.6のように横方向の分布いずれも解析することが可能となった。今後は、CFDによるシミュレーションにより最適なシール温度の設定やローラーの運転速度を変えた場合の温度設定などこれまで経験に頼ってきた操作の理論的な裏づけデータとして活用できるものと考えられる。

しかし、本研究のモデルは凹凸の単純な形状を2次元で再現し、同時に全ての歯形に温度がかかるといったものであった。実際には歯車が回転しながら順に歯型が当たるといった複雑な動きをしているため、今後はより現実に近づけたモデルを作成し、より精度の高いシミュレーションを行っていく必要があると考えられる。

#### 5. 結論

簡易なMA( Modified Atmosphere )包装として利用されている「パーシャルシール包装」であるが、設定温度などのヒートシール条件は現場においてトライアンドエラーで決めていることが多い。本報では、CFD( 数値流体力学 )を利用してヒートシールローラーとフィルムが接触する瞬間における微小空間の温度変化をシミュレーションした。

シールローラーの回転速度を300mm/sec、歯形形状のローラー温度150、平面ローラー温度130、フィルム初期温度20、ローラーとフィルムとの接触を非接触0.6mm・接触0.4mmと入力するとローラーの接触時間に溶着面温度は約125に達すると計算され、フィルムのヒートシール温度と引張り強度の関係から求めた適温である118-130範囲内にあることが確認された。このように、CFDによるフィルム内温度変化シミュレーションがパーシャルシール包装のヒートシール温度解析に適用可能であることが確認できた。

#### 6. 謝辞

本研究は農林水産省農林水産技術会議の競争的資金「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」により実施したものである。ここに関係各位に感謝申し上げます。

#### < 参考文献 >

- 1) A. A. Kader, D. Zagory and E. L. Kerbel, Critical review in Food Sci. and Nutrition, 28(1), 1-30(1989)
- 2) D. Zagory and A. A. Kader, Food technol., 42, 70-77(1988)



- 3) 永井耕介、羽淵維子、小河拓也、中川勝也、日食保蔵誌、23、133-138(1997)
- 4) P. M. A. Toivonen, Postharvest Biol. Technol., 10, 59-65(1997)
- 5) 浅見逸夫、青柳光昭、愛知農総試研報、29、231-237(1997)
- 6) 堀田博、名和義彦、佐藤和憲、石谷孝佑、竹下耕二、高橋麻子、中川義博、日本包装学会誌、7、185-194(1998)
- 7) 鈴木芳孝、岡林秀典、石川豊、今堀義洋、上田悦範、日食保蔵誌、29(3)、141-146(2003)
- 8) 鈴木芳孝、今堀義洋、上田悦範、日食保蔵誌、31(1)、25-30(2005)
- 9) 鈴木芳孝、宮崎清宏、石川豊、今堀義洋、上田悦範、日食保蔵誌、32(1)、23-27(2006)
- 10) 鈴木芳孝、日食保蔵誌、33(3)、135-141(2007)
- 11) 趙淑梅、山口智治、星典宏、畔柳武司、李保明、農業施設、36(1)、17-26(2005)
- 12) 畑山純、光永靖、山根猛、近畿大学農学部紀要、39、83-98(2006)
- 13) 菱沼一夫、日本包装学会誌、14(2)、119-130(2005)
- 14) 菱沼一夫、日本包装学会誌、14(3)、171-179(2005)
- 15) 菱沼一夫、日本包装学会誌、14(4)、233-247(2005)
- 16) JIS : Z 0238 (1998)
- 17) 菱沼一夫、日本包装学会誌、14(6)、401-409(2005)

(原稿受付 2009年3月4日)

(審査受理 2009年6月18日)