

# 「公益信託 エスピック地球環境・技術基金」の研究成果報告書

(平成 24 年 8 月～25 年 8 月)

森本哲夫 (愛媛大学農学部)

## 1. はじめに

熱帯や亜熱帯の開発途上国では、貯蔵施設等の不備により、収穫した青果物の大半が商品価値を無くし、たとえばバングラディッシュでは60%ほどが萎れや腐敗等で捨てられており、非常に生産効率が悪い。このため、これらの国で利用可能な低コスト、省電力、簡易な貯蔵庫の開発が必要である。

一方、我国でも生産現場において、青果物の一時的な貯蔵もしくは出荷調整のための簡易な低温貯蔵施設があれば非常に便利であるが、この場合、原発稼働停止に伴う電力供給不足の懸念から、省エネ指向が非常に高まっていることから、このような省電力な農業施設(貯蔵庫)の開発が強く望まれている。

そこで本研究では、新素材および新技術を活用して、電気をほとんど使わないで青果物を低温貯蔵できるゼロ・エネルギー低温貯蔵庫を開発した。新素材としては、水浸透と拡散性の優れた多孔性の溶岩プレートと溶岩石、水分保持力の高い天然ゼオライト、青果物の腐敗抑制のための銀イオン抗菌剤等がある。また、新技術としては、知能的最適化法を用いて、充填材への水供給(操作量)の最適化による庫内温度(制御量)の最小化、鮮度保持のための青果物への熱ストレス処理等がある。

一方、本研究における解析法(モデル化や最適化に関わる解析法)は、新素材等を混合した構造で、熱移動の挙動が非常に複雑なので、システム同定という手法で、すなわち実際の入力(水供給、日射量、外気温等)と出力(庫内温度)に注目し、入力に対する出力の応答の計測データから、システム科学的に入出力間の関係を定量化、モデル化し、さらにモデルのシミュレーションから入出力関係を解析した。

## 2. ゼロ・エネルギー低温貯蔵庫 (Zero Energy Cool Storage Chamber: ZECSC) の試作

### 2.1 構造

図1は、試作したゼロ・エネルギー低温貯蔵庫の写真とその構造である。本貯蔵庫は、1m<sup>3</sup>ほどの貯蔵スペース、青果物を入れる収納ボックス、冷却および断熱のための2重壁と湿った溶岩石を敷き詰めた床、床下からの送風システム、断熱材から成る三角屋根、空気の流れを促すための煙突(アルミニウム製)、太陽エネルギーを削減する遮光カーテン、そして冷却システムから成る。壁は2重とし、内側は多孔性の溶岩プレートを用いて水浸潤と拡散をはかって気化冷却を促進させる、外側は通常のレンガで断熱する。2重壁の間の充填材として砂と天然ゼオライトの混合材を用い、壁の水分保持と浸潤をはかる。設置場所は、外気温の影響を少なくするため、下半分程度を地下に設置した。

### 2.2 冷却法

さて、電気を使わない冷却法として2つの方法を検討した。1つは、水の蒸発を最大限に利用した気化冷却であり、庫内の壁および床を水で湿らせ、自然対流もしくは太陽電池で駆動するファンで床下から風を送って冷却する。自然対流のつくりかたは、庫内の上部と下部で温度差をつくることによって、さらに温度差の作り方は、上部にアルミニウム製の煙突をつくり、ここに日射が当たると高熱となるので、上部空気が暖められ空気の対流が促進される。壁および床には蒸発面が大きく通気性の優れた溶岩プレートを用いて効果的に湿らせ、気化冷却を促進させる。また壁の充填材には砂と天然ゼオライトを用い、効率的な水分の保持と拡散をはかる。さらに壁と床を湿らすための水供給の制御は最適化手法を用いて、気化冷却が最大となるように制御する。

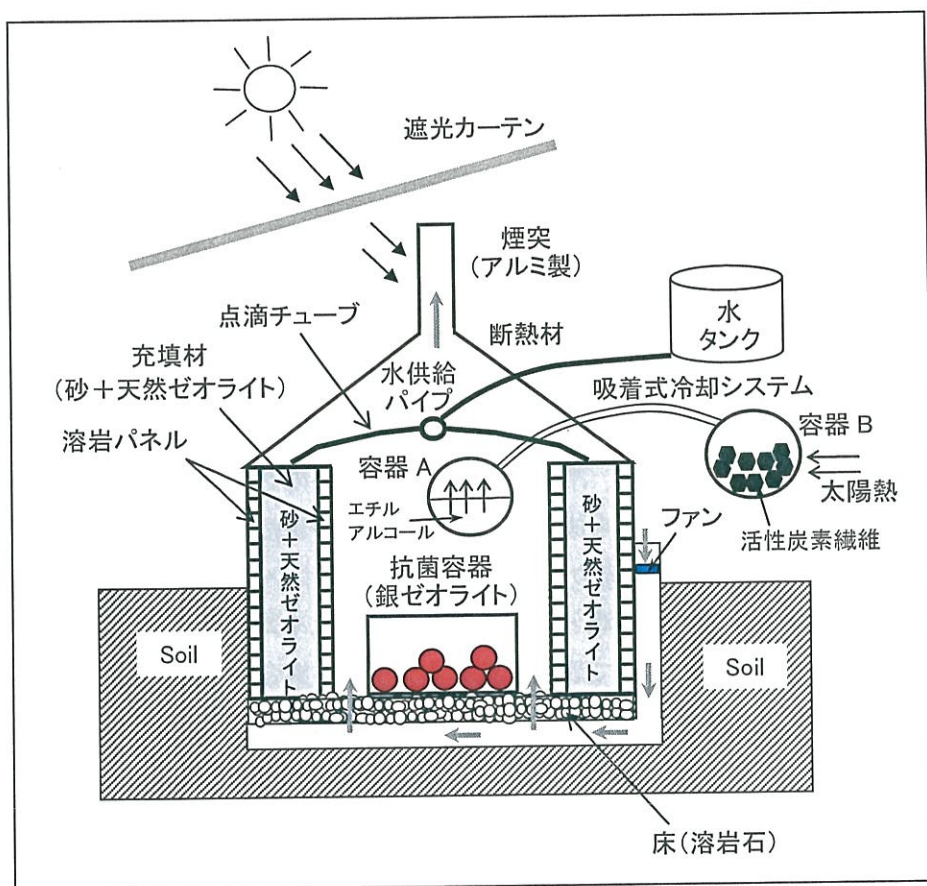
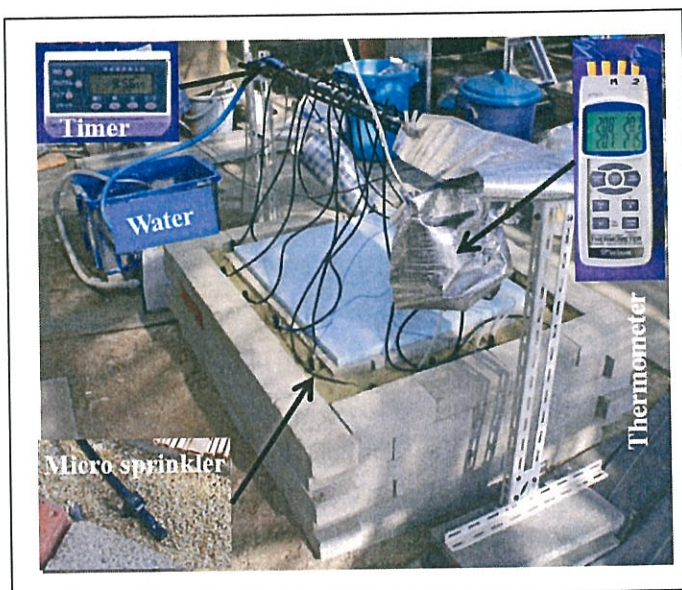


図1 ゼロ・エネルギー低温貯蔵庫 (Zero Energy Cool Storage Chamber: ZECSC) の構造

さらに、気化冷却だけでは限界があるので、吸着式冷凍法による冷却を行う。これは現在開発途中である。この方法は、低温でも気化しやすいエチルアルコールを冷媒とした冷却法で、エチルアルコールを入れた容器Aと活性炭素繊維を入れた容器Bをパイプで繋いで密閉し、内部を低圧（真空）し、そうすると容器Aではエチルアルコールが常温で蒸発し冷却される。蒸発したエチルアルコールは容器Bの

活性炭素繊維で吸着される。次に、熱（太陽熱）を与えて活性炭素繊維からエチルアルコールを脱着させ、水で冷やして液化し、もとの容器Aにもどす。これを繰り返すと、容器Aは冷却部としてはたらく。

### 2.3 抗菌剤を塗布した青果物の収納ボックス

また、本方式では水供給により庫内の湿度が高くなるので、カビの発生等を抑制する必要がある。そこで、抗菌作用のある、ここでは主に銀イオン ( $\text{Ag}^+$ ) 抗菌剤を塗布した収納ボックスに青果物を入れ、カビ等の発生を抑制することを試みた。

### 2.4 熱ストレス処理

青果物自体にも熱ストレス処理を施して、鮮度および品質をできるだけ長く保持する。これは、青果物に  $40\sim 50^\circ\text{C}$  の熱ストレスを 12~24 時間与えるものであり、我々の今までの研究成果により、この方法が青果物の水分損失を低減させ、追熟を抑制させる効果があることを見出している。

生物は、いろいろな環境ストレスを受けつつ、それらに順応しながら進化してきた。ストレス応答は、過酷な環境変化に対する生体の防御機構であり、細胞が正常に機能するようにはたらく。このとき重要な役割を果たすのが、ストレスによって産生される熱ショックタンパク質 (Heat Shock Protein : HSP) である。上記の効果には HSP が何らかの影響を与えていると考えられる。

青果物として主にトマトとレタスを用い、それらの水分含量（重量）、表皮色、クロロフィル含量、カビの発生度合いなどを計測し、本貯蔵庫の貯蔵性を調べた。

## 3. 最適化制御

### 3.1 最適化問題

本研究は、主に壁充填材（砂とゼオライト）への水供給操作（操作量）と自然対流による気化冷却を利用して庫内の温度（制御量）を最低にさせる最適化問題を考える。したがって、庫内の温度を最低にする充填材への最適な水供給量（水供給の ON-OFF 操作パターン、最適値）を求めることが課題となる。図2は求めようとする水供給の基本的な ON-OFF 操作パターン  $W(k)$  ( $k$ : サンプル時間) である。サンプル時間は 1 分毎である。8 ステップから成り、 $T_1, T_3, T_5, T_7, T_9, T_{11}, T_{13}, T_{15}$  は on-時間 (分)、 $T_2, T_4, T_6, T_8, T_{10}, T_{12}, T_{14}$  は off-時間 (分) である。したがって、本研究の最適化問題は、貯蔵庫内の温度  $IT(k)$  を最低にする水供給の ON-OFF 時間  $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}\}$  を求めることである。

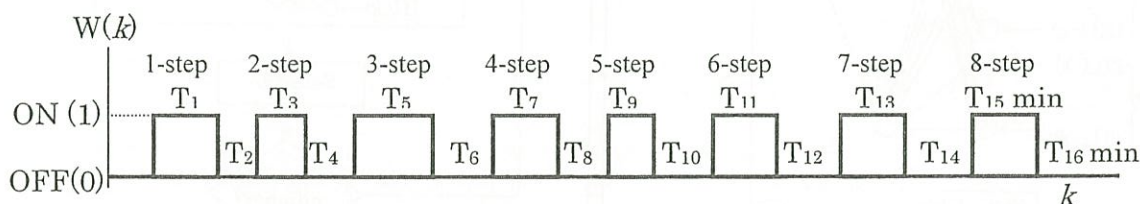


図2 求める 8 ステップの水供給 on-off 操作パターン

### 3.2 知能的最適化法

さて、庫内の温度  $IT(k)$  を最低にする水供給の ON-OFF 時間  $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}\}$  をいかに求めるか。本研究では、筆者が開発したニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを活用した知能的最適化制御システムを用いて水供給の ON-OFF 操作パターンの最適値を求め、それ

に従って制御する。その方法は、まずニューラルネットワークを用いて水供給 ON-OFF 操作（入力）に対する庫内温度の応答（出力）を計測、学習して入出力間のモデルを構築し、次にそのモデルシミュレーションから、遺伝的アルゴリズムを用いて、庫内温度を最低にする水供給 ON-OFF 操作パターンを試行錯誤的に求める。

図3はニューラルネットワークによるモデル化と遺伝的アルゴリズムによる最適値の探索法である。(a)は今回モデル化したブロック線図で、3入力（水供給 ON-OFF 操作  $W(k)$ 、外気温  $OT(k)$ 、庫内湿度  $IH(k)$ ）に対する1出力（庫内温度  $IT(k)$ ）システムを想定した。(b)はこのシステムをモデル化するためのニューラルネットワークである。動的（時間的）な変化をモデル化するため、水供給 ON-OFF 操作の  $n$  時点前までの時系列  $\{W(k), \dots, W(k-n)\}$ 、外気温の  $n$  時点前までの時系列  $\{OT(k), \dots, OT(k-n)\}$ 、庫内湿度の  $n$  時点前までの時系列  $\{IH(k), \dots, IH(k-n)\}$  を入力として与え、庫内温度の現在値  $IT(k)$  を予測するモデルで、 $k=1, 2, \dots, N$  と変えることで庫内温度変化の予測値  $\{IT(1), IT(2), \dots, IT(N)\}$  が得られる。(c)は8ステップの水供給 on-off 操作の最適値を求める遺伝的アルゴリズムのフローチャートである。求める解候補を個体で表す。最初に、 $n$  個の個体から成る初期集団をランダムに形成し、その後、交差と突然変異を繰り返して新しい個体を数多く作り、その中から適応度の高い優秀な個体群を次の世代に残し、これを繰り返すと（世代交代が進むと）、最終的に適応度が最大となる最も優秀な個体が残し、これが最適値となる。

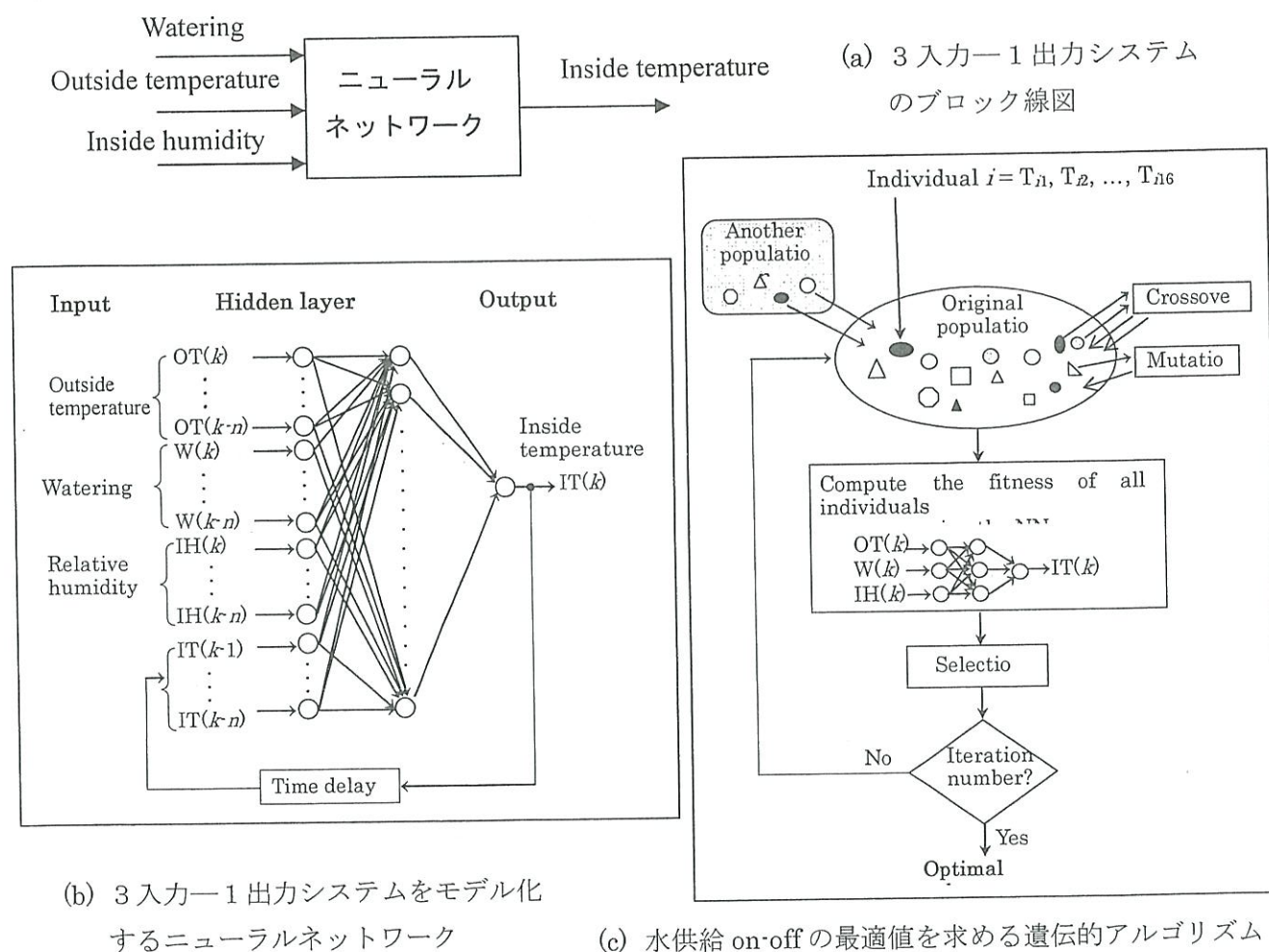


図3 ニューラルネットワークの学習によるモデル化と遺伝的アルゴリズムによるモデルシミュレーションからの最適値の探索から成る知能的最適化法

## 4. 結果及び考察

### 4.1 気温及び庫内温度の日変化データ

図4は、図1の実際のゼロ・エネルギー低温貯蔵庫における各環境要因の日変化である。時間帯は0～1440分(0時～24時に対応)である。上から日射量、温度(外気温、充填材への水供給を行った場合と行わない場合の庫内温度)、庫内の相対湿度、水供給 on-off 操作の1例である。(a)が晴天日、(b)が雨天日の場合である。日射量の増大に伴って、外気温はすぐに増大するが、庫内温度は2時間ほど遅れて増大しはじめ、その最高温度は外気温より10℃ほど低い。また、日射量が低下する場合をみると、外気温は直ちに低下するが、庫内温度はあまり低下せず、午後から夜中にわたって長時間高い状態を維持しているのが分かる。

次に、充填材への水供給(水供給の on-off 操作)が庫内温度へ与える影響をみると、晴天日では、水供給する毎に庫内温度は約2～3℃ほど低下し、これにより庫内温度は水供給した方がしない場合と比べ5～7℃低くなっているのが分かる。また、庫内の相対湿度は、水供給した方が約80%RH、しない方が約68%RHで、水供給した方が約12%RHほど高い。これら温度低下、湿度上昇の効果は、貯蔵青果物の鮮度保持に有効に働くと考えられる。一方、雨天日では、庫内温度は、晴天日の場合と比べて、外気温と差は少なく、水供給による庫内温度の低下効果も少ないのが分かる。また、庫内の相対湿度も水供給による庫内湿度の上昇効果も少なく、両者ほとんど同様な湿度を示している。

このような入力(日射量、外気温、庫内湿度、水供給 on-off 操作)と出力(庫内温度)に関わる日変化データを25パターン取得し、システム同定法、ここではニューラルネットワークによる学習法により、入出力関係(もしくは入力に対する出力に応答)を表すモデルを構築した。23パターンは学習用によるモデル化に、3パターンはそのモデルの検証用に用いた。なお、制御のための操作量は水供給 on-off 操作、制御量は庫内温度である。

### 4.2 水供給量と庫内温度の関係

図5は、模型を用いた基礎実験による水供給量と温度低下の関係である。この実験は、密閉した長方形ボックス(20×20×80 cm)の底に砂を2 cm厚で敷き、そこに水供給するとともに一定の送風(4m/s)で気化冷却を促進させ、ボックス出口での温度がどの程度低下するかをみた結果である。ボックス出口温度は水供給量が多くなるに従って低下するが、ある量で最低となり、それ以上多くすると、逆に上昇しているのが分かる。これは、水供給を多くし過ぎると、砂が水に浸漬して蒸発面積が少なくなり、その分気化冷却が少なくなるためと考えられる。

図6は、実際のゼロ・エネルギー低温貯蔵庫を使ったときの充填材への水供給量と庫内温度の関係である。水供給量が30、45、60 l/dayの3つの場合における庫内温度を示しているが、45 l/dayのときに庫内温度を最も低下させているのが分かる。すなわち、この水供給量が、砂と天然ゼオライトの充填材および溶岩プレートの蒸発面をほぼ最大とし、気化冷却を最大にさせたと思われる。

これらの結果より、充填材への水供給は、多いほど良い(庫内温度が下がる)のではなく、庫内温度を最低にする水供給量が存在するとわかる。したがって、最適化手法で、庫内温度を最低にする水供給量(水供給 on-off 操作)を求めればよいことになる。本研究では、これを求めて、庫内温度の最小化をはかった。

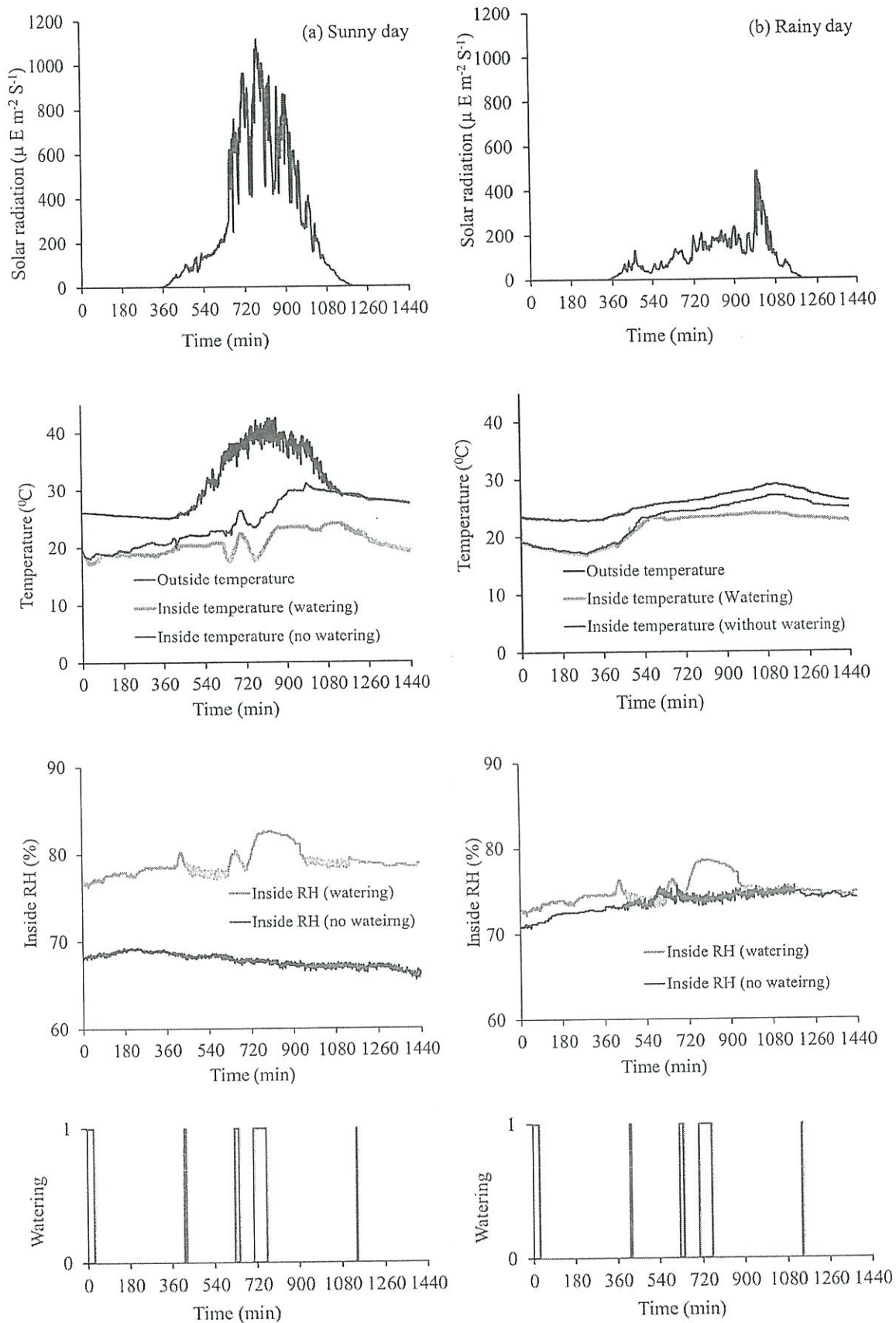


図4 日射量、温度（外気温、水供給の違いによる庫内温度）、庫内湿度、水供給 on-off 操作の日変化（24 時間）の一例

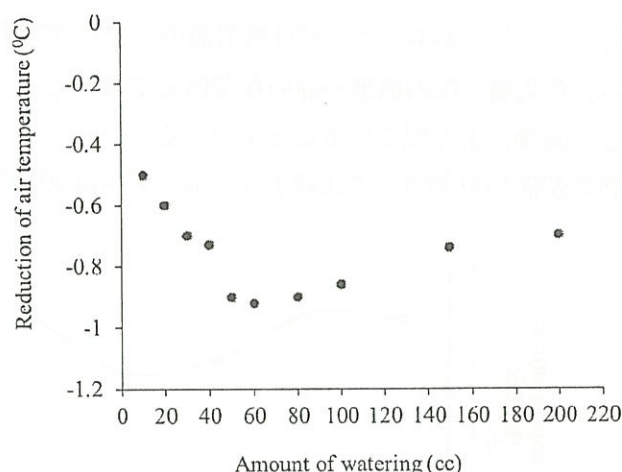


図5 模型を用いた基礎実験による水供給量と温度低下の関係

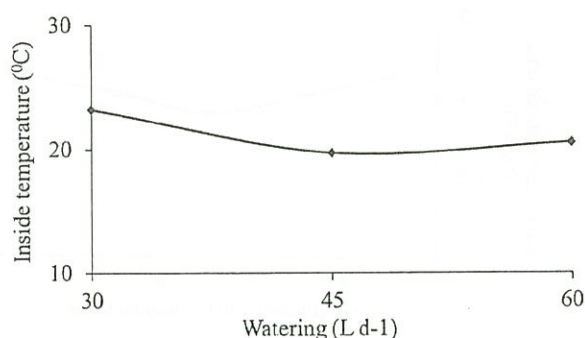


図6 実際のゼロ・エネルギー低温貯蔵庫を使ったときの水供給量と庫内温度の関係

#### 4.3 ニューラルネットワークの学習によるモデル化

次に、計測データに基づいて、3層のニューラルネットワークを用い、4入力（日射量、外気温、水供給 on-off 操作、庫内の相対湿度）に対する1出力（庫内温度）のモデル化を行った。この場合、モデルの次数とニューラルネットワークの中間層ニューロン数を決めてやる必要がある。なお、次数とはシステムパラメータの数を表すもので、具体的には、入力と出力の時系列（日変化）データにおいて、モデル化のために何個前までのデータを使うかを表す。

図7は、この場合の、モデル次数とモデル誤差の関係である。モデル次数が60ほどでモデル誤差が最小となり、これは実測値とモデル推定値が最も近似していることを表している。したがって、次数=60分とした。

図8は、ニューラルネットワークの中間層ニューロン数とモデル誤差の関係である。モデル誤差は、中間層ニューロン数が5のとき最小となったので、中間層ニューロン数=5個とした。

図9は、構築したニューラルネットワークモデルを用いて、水供給 on-off 操作に対する庫内温度の応答の推定結果である（動的変化の推定）。実線がモデルによる推定結果、点線が実測値である。庫内温度は、水供給すれば比較的素早く1～2℃低下し、供給停止すれば、これもまた比較的素早く元の温度まで上昇する。モデルによる推定値は多少の誤差はあるが、実測値とある程度一致している。実際の水供給に対する庫内温度は非常に複雑なプロセスであるが、ニューラルネットワークを用いれば、容易

にモデル化できた。

図10は、モデルのシミュレーションから、ここでは外気温のステップ入力に対する庫内温度のステップ応答の両者のゲインから、外気温と庫内温度の静的な関係を求めたものである。(a)が実測値、(b)がモデルによる推定値である。両者、よく似ていることが分かる。

図9と10の動的变化と静的関係の実測値との比較より、本モデルは実際の応答をよく推定できることが分かる。

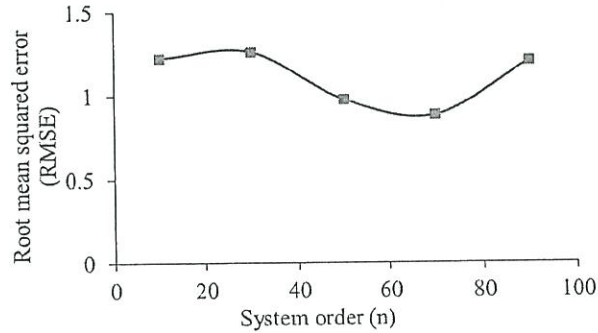


図7 ニューラルネットワークモデルの次数とモデル誤差の関係

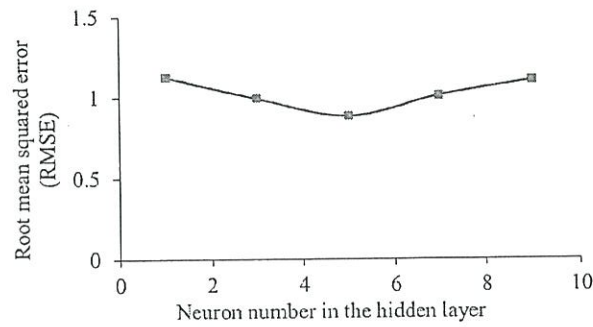


図8 ニューラルネットワークの中間層ニューロン数とモデル誤差の関係

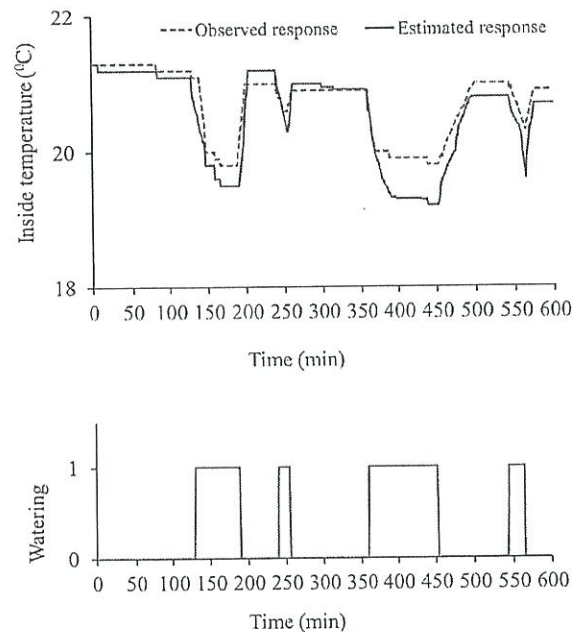
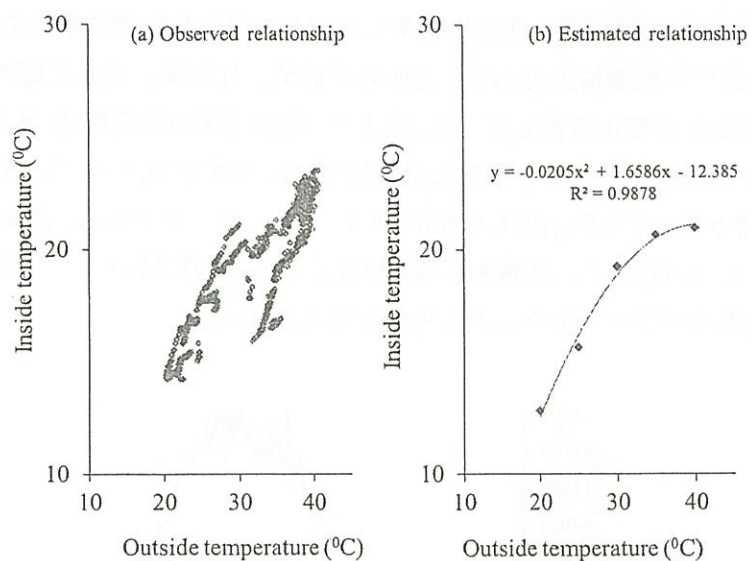


図9 水供給 on-off 操作（下段）に対する庫内温度応答（上段）のニューラルネットワークモデルによる推定値と実測値との比較。



(a) Observed relationship

(b) Estimated relationship

図10 モデルのシミュレーションから求めた外気温と庫内温度の関係（静的な関係）

#### 4.4 遺伝的アルゴリズムによる最適値の探索と短期的な最適制御結果

次に、同定したニューラルネットワークモデルを用いてそのシミュレーションから、庫内温度を最小にする最適値（8ステップの水供給on-off操作）を遺伝的アルゴリズムを利用して見出した。図11は遺伝的アルゴリズムにより最適値（最も進化した個体）を求める個体の進化プロセスである。横軸は世代交代数、縦軸は各世代で最も優れた個体の適応度である。適応度は庫内温度の平均値を表す。この場合は、適応度が最小となる個体が最も進化した個体（最適値）となる。適応度は世代交代数が35に至ると最小となり、これ以上低下しない（進化しない）ことがわかる。この適応度を持つ個体が求める最適値となる。ここで得られた8ステップの水供給on-off操作の最適値は $T_1=35\text{min ON}$ ,  $T_2=55\text{min OFF}$ ,  $T_3=35\text{min ON}$ ,  $T_4=55\text{min OFF}$ ,  $T_5=35\text{min ON}$ ,  $T_6=55\text{min OFF}$ ,  $T_7=35\text{min ON}$ ,  $T_8=55\text{min OFF}$ ,  $T_9=35\text{min ON}$ ,  $T_{10}=55\text{min OFF}$ ,  $T_{11}=35\text{min ON}$ ,  $T_{12}=55\text{min OFF}$ ,  $T_{13}=35\text{min ON}$ ,  $T_{14}=55\text{min OFF}$ ,  $T_{15}=35\text{min ON}$ ,  $T_{16}=55\text{min OFF}$ となった（35分間ONの後に55分間OFFの繰り返し）。

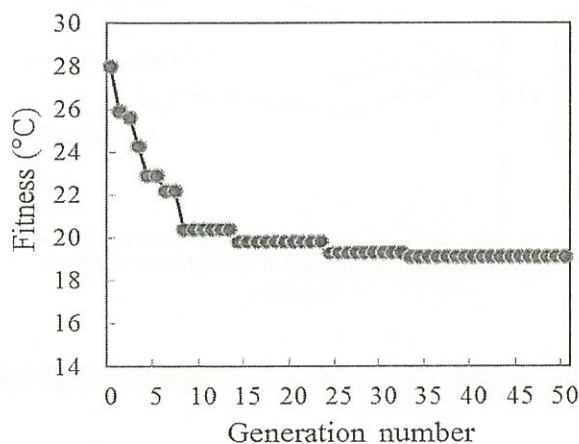


図11 遺伝的アルゴリズムによる最適値探索を示す進化プロセス

#### 4.5 短期的な最適化制御結果

図12は、得られた水供給の最適値を実際に適用した場合の最適化制御結果である。午前6時～午後6時までの12時間における制御結果である。上から日射量、外気温、そして庫内温度（水供給無し、連続水供給、最適な水供給）の変化を表している。図より、庫内温度の最高値は、水供給無しでは約29℃まで上がるが、連続水供給では約25℃、最適な水供給では約20℃に止まっている。平平均温度でみると、最適な水供給、連続水供給、水供給無しの順に18.7、22.6、26.2℃である。最適な水供給制御では、水供給無しの場合よりも7.5℃低く、連続水供給の場合よりも3.9℃低い。これは最適制御が、盛んな蒸発に適した液相と気相のバランスを与えたためだと考えられる。

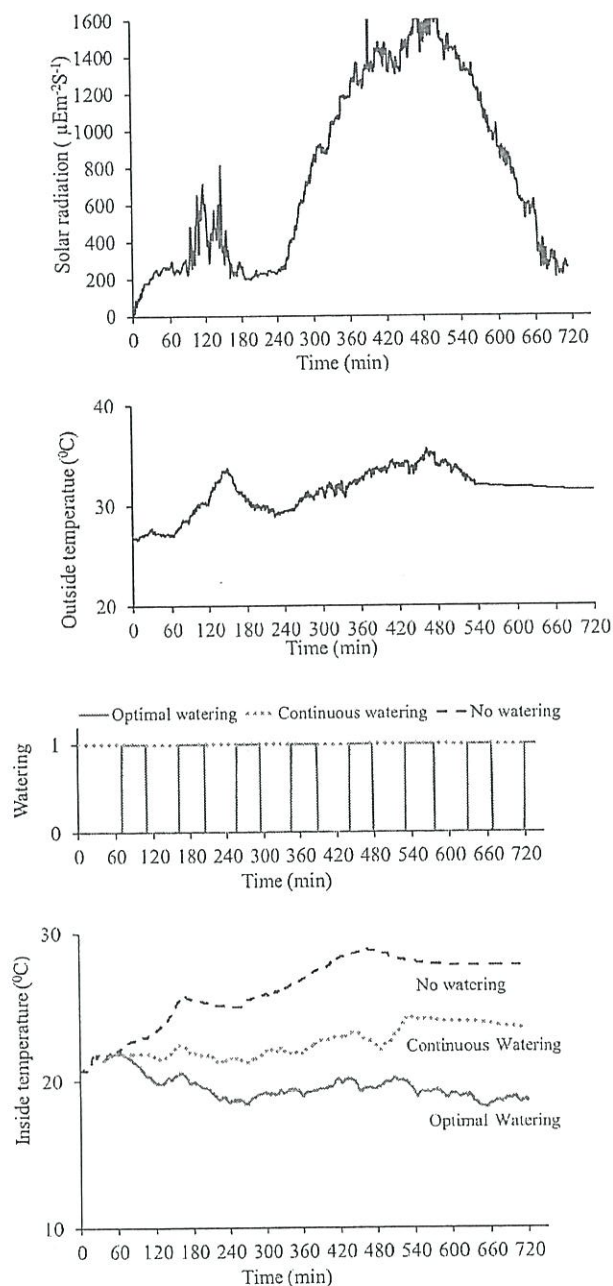
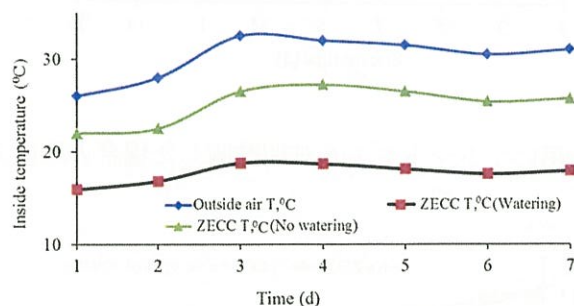


図12 最適な水供給 on-off 制御でゼロエネルギー貯蔵庫内の温度を最小にする最適化制御結果

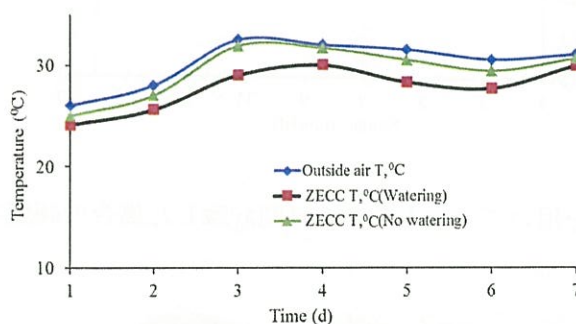
#### 4.5 長期的な最適化制御結果とトマトの貯蔵結果

図13は実際のゼロエネルギー貯蔵庫における1週間の長期的な最適化制御結果である。(a)は遮光カーテン有りの場合の庫内温度(水供給有り無し)、(b)は遮光カーテン無しの場合の庫内温度(水供給有り無し)、(c)は遮光カーテン有りの場合の庫内湿度(水供給有り無し)である。(a)より、遮光カーテンがあると、庫内温度は、水供給無しで最高温度約25℃となるが、水供給があれば18℃ほどに止まっている。(b)より、遮光カーテンがないと、水供給有り無しで、庫内温度の違いは小さい。(c)より、庫内の相対湿度は、水供給があれば約90%RHであるが、水供給がなければ約65%RHで外気の相対湿度とあまり変わらないのが分かる。

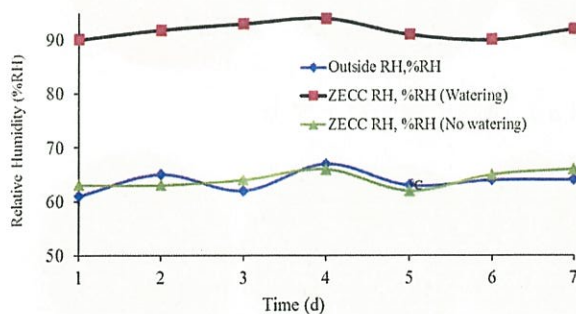
このように、気化冷却のための水供給は、庫内をやや低温にするだけでなく、高湿度にすることも可能で、これらの条件は、鮮度保持の観点から、貯蔵青果物の貯蔵に有効であると言える。



(a) Inside temperature with shading



(b) Inside temperature without shading



(c) Inside relative humidity with shading

図13 ゼロエネルギー貯蔵庫における1週間の長期的な最適化制御結果

図14、15、16は、ゼロエネルギー貯蔵庫を用いて、その中にトマトを16日間貯蔵し、その貯蔵性をみたものである。図14は腐敗の程度、図15は硬さ、図16はこのときのトマトの16日後の写真である。いずれも比較のため、トマトをゼロエネルギー貯蔵庫の外に置いた場合の実験結果も一緒に示している。庫外に置いたトマトは約7日目で腐敗したが、庫内に置いたトマトは約16日目で腐敗した。貯蔵期間は約8日間延長できた。

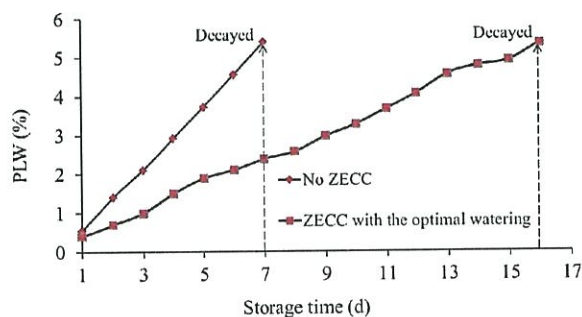


図14 ゼロエネルギー貯蔵庫を用いてトマトを16日間貯蔵した場合の腐敗の状況

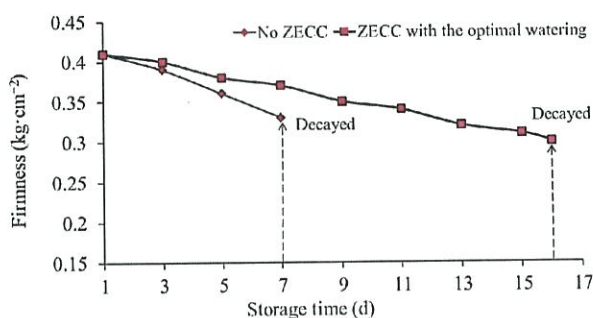


図15 ゼロエネルギー貯蔵庫を用いてトマトを16日間貯蔵した場合の硬度の変化

7-1

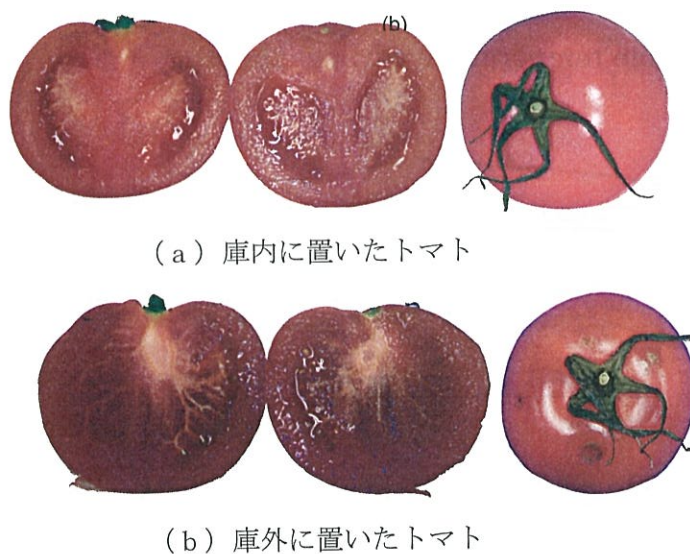


図16 ゼロエネルギー貯蔵庫を用いて16日間貯蔵した後のトマトの様子

## 5. 結論（研究成果）

本研究では、新技術および新素材、そして最適化手法を駆使して、電気をほとんど使わないで青果物を低温貯蔵できるゼロエネルギー低温貯蔵庫（Zero Energy Cool Storage Chamber: ZECSC）を開発した。

- (1) 本貯蔵庫では、電気を使わないで冷却する方法が最大の課題である。まず、遮光カーテンで遮光するとともに、外気温の影響をできるだけ少なくするため、そして出し入れの作業性を考慮して、地下約 50 cm に設置した。遮光カーテンにより、晴天日中で外気温より約 10℃下げることができた。地下設置の効果については検討中である。
- (2) 次に、電気を使わない庫内の冷却法であるが、本研究では 2 つの方法を検討した。1 つは自然換気による気化冷却であり、通常はこれが主体となって冷却する。もう 1 つは、気化冷却だけでは限界があるので、必要に応じて使用する冷却器、ここではエチルアルコールの気化冷却と活性炭素繊維のアルコール吸着作用を利用した吸着式冷却システムである。
  - (2-1) 自然換気による気化冷却の方法は、2 重壁（外側はレンガ、内側は 溶岩プレート）とその間の充填材（砂＋天然ゼオライト）に水を供給して湿らせ、この場合、蒸発面が最大となるように最適に湿らせ、自然換気による気化冷却を最大限に促進させて庫内温度を最小にする。内壁面に多孔性の溶岩プレートを用いることで水浸潤がよくなり、また充填材に天然ゼオライトを混合することで水分保持がよくなり、庫内温度を効率的に下げることができた（具体的な数値は解析中）。
  - (2-2) また、最適化手法を使用して、充填材への水供給を最適に（蒸発面が最大となるように）して庫内温度を最小にする水供給の最適制御が実現できた。操作量は水供給の on-off 操作、制御量は庫内温度である。まず、ニューラルネットワークを用いて、4 入力（水供給の on-off 操作、日射量、外気温、庫内湿度）に対する 1 出力（庫内温度）の動的モデルを構築して、次にそのモデルのシミュレーションから遺伝的アルゴリズムを用いて、庫内温度を最小にする水供給の on-off 操作を求めた。3 層のニューラルネットワークを用いて、最適な次数と中間層ニューロン数を求めてそれらも値を用いて学習すると、精度の良いモデルが構築できた。次に、モデルシミュレーションからいろいろな入力（8 ステップ水供給の on-off 操作）に対する膨大な出力（庫内温度）が得られるが、遺伝的アルゴリズムを用いることで、効率的に最適値が得られた。得られた最適値（8 ステップ水供給 on-off 操作）は  $T_1=35\text{minON}$ ,  $T_2=55\text{minOFF}$ ,  $T_3=35\text{min ON}$ ,  $T_4=55\text{min OFF}$ ,  $T_5=35\text{minON}$ ,  $T_6=55\text{min OFF}$ ,  $T_7=35\text{min ON}$ ,  $T_8=55\text{min OFF}$ ,  $T_9=35\text{min ON}$ ,  $T_{10}=55\text{min OFF}$ ,  $T_{11}=35\text{min ON}$ ,  $T_{12}=55\text{min OFF}$ ,  $T_{13}=35\text{min ON}$ ,  $T_{14}=55\text{min OFF}$ ,  $T_{15}=35\text{min ON}$ ,  $T_{16}=55\text{min OFF}$  であった。最適な給水制御、常時給水、給水無しにおける庫内温度は、それぞれ 18.7、22.6、26.2℃であった。最適な給水制御では、給水しない場合よりも 7.5℃低く、常時給水する場合も 3.9℃低かった。これらの結果により、最適化手法を利用することで、電気を使わないで効率的に気化冷却を行う低温貯蔵庫が構築できたと考えられる。
  - (2-3) さらに、太陽電池稼働のファンにより、湿った床面（溶岩石）を通しての強制換気（送風）による気化冷却の促進で、庫内温度をもう少し下げる方法を検討している。（現在開発中）
  - (2-4) 一方、もう 1 つの冷却法である吸着式冷却システムについては、図 1 より、エチルアルコールを入れた容器 A と活性炭素繊維を入れた容器 B をパイプで繋いで密閉し、内部を低圧（真空）にする。そうすると、容器 A ではエチルアルコールが常温で蒸発し冷却される。このとき、蒸発したエチルアルコールは容器 B の活性炭素繊維で能動的に吸着されるので、蒸発が促進され

る。次に、吸着されエチルアルコールは、太陽熱により活性炭素繊維から脱着させ、それを水で冷やして液化し、もとの容器Aにもどす。このプロセスを繰り返すと、容器Aは冷却部としてはたらく。この方法だと電気をほとんど必要としないですむ。(現在開発中)

- (3) 青果物の収納ボックスについては、銀イオン抗菌剤とゼオライトの混合剤を塗布した収納容器を用いることにより、カビ等の発生や腐敗をある程度抑制することができた。(データは掲載してない)
- (4) 青果物(トマト)への熱ストレス処理については、収穫直後のトマトを40℃の気温下に24時間置く、もしくは45℃の温水に5分間浸漬させることで、トマトの水分損失を低減させ、追熟を抑制させることができた。(データは掲載してない)
- (5) 全体的な結論として、新素材を活用した貯蔵庫を用いて、そして水供給の最適化、熱ストレス処理を施すことで、結果的に、トマトの貯蔵において、貯蔵期間を7から16日に延長できた。
- (6) 本貯蔵庫の特徴は、低コスト、省電力、簡易なつくりである。このため、電気の無い生産現場で使用できるとともに、収穫物が腐敗しやすい熱帯や亜熱帯などの開発途上国で非常に役立つと思われる。なお、もし電気を必要とする場合でも小電力ですむので、太陽電池等で対応が十分である。また、先進国においても、電気をほとんど使わないので、低コスト・省エネな貯蔵庫として役立つ。
- (7) 今回は、水供給と自然対流による気化冷却で温度を下げたが、今後は、強制送風によってもっと効率的に気化冷却させて温度を下げるとともに、さらに吸着式冷凍機を開発して、絶対的に温度を下げるたい。

## 6. 謝辞

本研究は、「公益信託 エスペック地球環境・技術基金」の研究助成を受けて実施されました。この助成を受けることにより、研究がスムーズに進行するとともに、多くの成果を得ることができました。エスペック株式会社および研究助成事務局の方々に厚くお礼申し上げます。

## 7. 学術論文(査読有り、国際学会の Proceedings 含む)

本研究の成果は、以下のような国際誌(1つは投稿中)と国際学会のプロシーディングに受理され掲載されました。

- (1) Islam, M.P., Morimoto, T., Hatou, K. : Optimization of watering for minimizing the inside temperature of Zero Energy Cool Chamber for storing fruits and vegetables. *Preprints of the 2013 IFAC Bio-Robotics Conference on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Controls used in Bio-production Systems*, Sakai, Japan, March, pp.1-6, 2013.
- (2) Islam, M.P., Morimoto, T., Hatou, K. : Dynamic optimization of inside temperature of Zero Energy Cool Chamber for storing fruits and vegetables using neural networks and genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* (Elsevier), 95, 98-107, 2013.
- (3) M. P. Islam, T. Morimoto. Neural networks modeling for an indirect evaporative fruits storage system. *Computers and Electronics in Agriculture*, (submitted).