

ゆらぎ制御を用いた通風乾燥試験

熊林義晃, 清水英樹, 河野慎一, 奥村幸広

Characteristics of Food Drying using Fluctuated Wind

Yoshiteru Kumabayashi, Hideki Shimizu, Shinichi Kono and Yukihiro Okumura

Food drying experiment was conducted using artificially-generated wind at fluctuating velocities and compared with a certain wind value. Spear squid samples were used for the experiment. Different characteristics were observed at different wind velocities. Drying rate in the second half was high, and the dry sample had a soft texture. Adoption of drying equipments with fluctuating control are promising.

食品分野では水産物の干し物に代表されるように、天日乾燥・陰干し・寒干しなど自然の風や太陽光を利用して乾燥させているものが多くあるが、現在では安定生産や衛生面から機械乾燥に置換えるケースが多くなっている。機械乾燥技術の発達により一定品質のものが安定して生産できるようになってきた一方で、乾燥製品において原料の風味を残したい、柔らかく乾燥したいというような他製品との差別化や付加価値向上の要望は尽きておらず、従来とは異なった特徴ある乾燥方法や乾燥技術のさらなる向上が望まれている。

食品の機械乾燥の一つとして通風乾燥機に着目し、その風速制御に新しい手法としてゆらぎ制御の応用を検討した。

ゆらぎは一定の状態からの変化のことで、自然界では川のせせらぎの音の変化、そよ風の風速変化など、自然現象において人間が快いと感じるものの中で多く観測されている¹⁾。ゆらぎ制御技術はこのゆらぎを人工的に作り出し、人間に快適性を付与し、省エネルギー化の目的で扇風機、温風ストーブ、照明器具等の制御技術として実用化されている。扇風機では風に強弱のリズムをつけて自然のそよ風と同様に人間に心地良さを得られるようにしている²⁾。また温風ストーブでは、燃焼に強弱をつけてポカポカ感という体感温度を維持しながら石油の消

費量を抑えて省エネルギーを実現している。このように一部の分野では、ゆらぎ制御が利用されているが、食品の分野での利用例は報告されていない。

本研究では人工的に作り出した自然の風に近い変動を用いて機械で乾燥させるという、従来とは異なった乾燥方法を試みた。従来の通風乾燥機は一般的に所定の一定風速条件で乾燥させることで一定の乾燥品質が得られるという考えに基づいて条件設定を行っているが、本試験では常に変動している送風で乾燥を行い、風速の平均値や変動の幅を変えることで条件設定を行った。一定の風速で乾燥させた場合と比較し、ゆらぎ制御を用いた場合の通風乾燥の特徴について検討した。

実験方法

1. 乾燥装置構成

図1に今回の試験用に組んだ通風乾燥機の構成を示す。通風乾燥機は、恒温室(幅2.8m, 奥行2.2m, 高さ2.3m)内部に送風機(ヤナギヤ CF-80 軸流式 羽根直径0.76m)と風洞(W1.2×D0.9×H0.9m)を置き、構成した。恒温室内部は、加湿(MORITA ML-550MF)及び除湿ユニット(コロナ CD-631)、温湿度計(ティアンドデイ TR-72S)を用いて湿度を所定値に調整した。本試験では、内部環境を温度17℃、湿度は50%RHに設

事業名：一般試験研究

課題名：食品加工機械の制御方法に関する試験研究

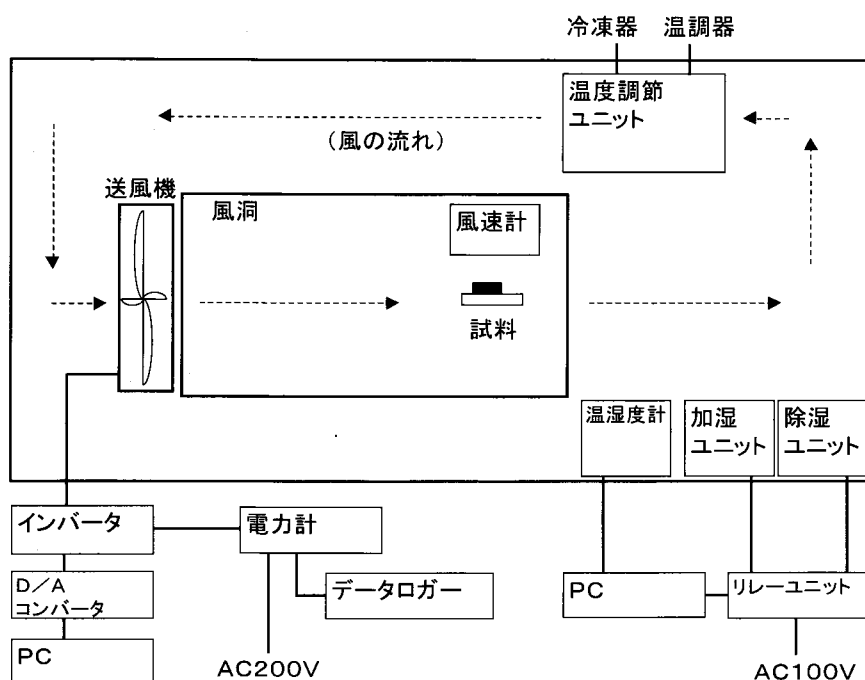


図1 通風乾燥機の構成

定した。

2. 風速制御方法

送風機の回転速度は、インバータ（富士電機製 FVR0.75E11S-2）の周波数を設定することで調整した。周波数はコンピュータを用いて周波数固定（一定風速制御）とゆらぎ制御とを設定した。ゆらぎ制御による変動は、コンピュータに記録している変動データに基づいて発生させることで、繰り返し再現できるようにした。

ゆらぎ制御用の変動データ（4000 データで構成）を図2に示した。本試験では、この変動データをもとに振幅幅、かさ上げ幅、周期を設定して風速を設定した。表1に試験で設定した風速の一覧を示した。上の半分は一定風速制御を表わしている。例えば、インバータの設定周波数を50Hzに設定すると風速が一番大きく3.7m/sとなり、周波数の数値が小さくなるにつれて風速も小さな値となる。表1の下の半分はゆらぎ制御を表わしている。ゆらぎ制御では、二つの周波数の間を変化させており、例えばF52という記号で示したものは50Hzと20Hzとの間を変動させており、風速は3.7m/sから1.1m/sの間を変動することになる。また、ゆらぎ制御では所定の波形データを繰り返し使用し、その繰り返し周期として17分、67分の2種類のものを用いた。17分の周期のものはF52、67分の周期のものは1F52という記号で表わした。

風速は刻々と変わるので平均の風速として表わした。風速は、風速計（カスタム CW-20）で風洞の中心部と

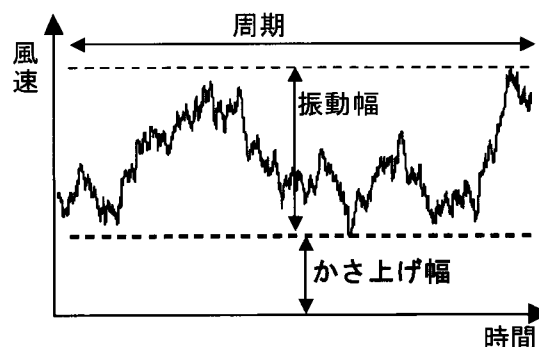


図2 使用した変動データ

周辺部で各々平均風速を測定し、それらの平均値を測定値とした。送風機の電力は電力計（YOKOGAWA 2375A30）を用いてインバータの一次側で測定し、データロガー（ティアンドデイ VR-71）を用いて記録した。

3. 試料

乾燥試料として剥皮したイカ（厚さ約5mm：凍結品を5℃で解凍）を用いた。

4. 測定方法

試料は、羽根から1mの距離で風洞の底部から0.6mの高さにある金網（10mm角格子状）の上に乗せた状態で乾燥させ、途中の重量変化、終了時の含水率、硬さについて調べた。含水率は乾燥法（105℃）で測定した。硬さはレオメータ（サン科学 CR220D 直径1mm針状プランジャー）を用いて測定し、試料に突刺した時と貫

通した時の最大荷重を測定し、硬さとした。乾燥途中の含水率は、乾燥開始と終了時の含水率と乾燥途中の重量変化から算出した。

実験結果および考察

1. 乾燥特性曲線に与える影響

図3に乾燥特性曲線を示した。一定風速制御で風速が大きい50, 40, 30Hzの場合は、乾燥速度の変化勾配の急な減率第一乾燥期となだらかな減率第二乾燥期が現れた。風速が小さい20, 10Hzの場合は、減率第二乾燥期は現れず直線的に変化し、乾燥が進んでも一定の割合で乾燥速度が小さくなっていくという特徴が現れた。ゆらぎ制御では風速が速い場合でも全乾燥期間で乾燥速度は直線的に変化し、含水率60%以降の中間含水率領域では一定風速制御の場合よりも高い値となる傾向があった。勾配は、一定風速制御の10Hz, 20Hzに近い傾きになっており、平均風速が大きくなるに従って上方へ平行移動していく形になっている。一定風速制御、ゆらぎ制御には、以上のような違いが認められるが、乾燥初期の乾燥速度は、制御方法に関係なく平均風速値にほぼ比例していた。

図4に中間含水率領域の拡大図を示した。白抜きの点で示した長い周期を有するゆらぎ制御は、一定風速制御の場合よりも高い乾燥速度になっている。また、30HzとF50, 40HzとF52や50HzとF41, 1F41は、ほぼ同等の乾燥速度を示しているが、表2に示したそれぞれの

平均値を比較するとゆらぎ制御の場合は小さな風速値となっている。

ゆらぎ制御は、平均風速を大きくしても乾燥の進行に伴う乾燥速度の低下を抑えられた。大きな平均風速でも表面の過度の乾燥が起きずに、表面からの水分蒸発と中心から表面への水分移動のバランスがとれている状態と考えられる。

2. 乾燥速度と送風に要する消費電力との関係

図5に試料の含水率が60%の時の送風機が消費した電力と乾燥速度の関係を示した。ゆらぎ制御は、同一の電力でも一定風速制御に比べて高い乾燥速度になる傾向があった。長い周期をもつゆらぎ制御にその傾向が強くみられた。例えば、一定風速制御の40Hzとゆらぎ制御のF52, 1F50とはほぼ同じ乾燥速度が得られている。40Hzのときの電力が217Wで、これに比べて各々約20%, 約40%小さな電力でも同等の乾燥速度が得られていることになる。内部の水分移動が関係してくる中間、低含水率領域では、同じ乾燥速度であれば一定風速制御に比べて低い電力で済む傾向がみられ、ゆらぎ制御には省エネルギー効果があると考えられる。

図6に示した乾燥初期の70%付近の含水率領域では、一定風速、ゆらぎ制御にかかわらず平均電力と乾燥速度とはほぼ比例した関係があった。乾燥初期には表面にある水分が蒸発すると考えられるので、この場合、一定風速制御、ゆらぎ制御に関係なく、投入した電力が大きく平均風速が大きいほど速く乾燥すると考えられる。

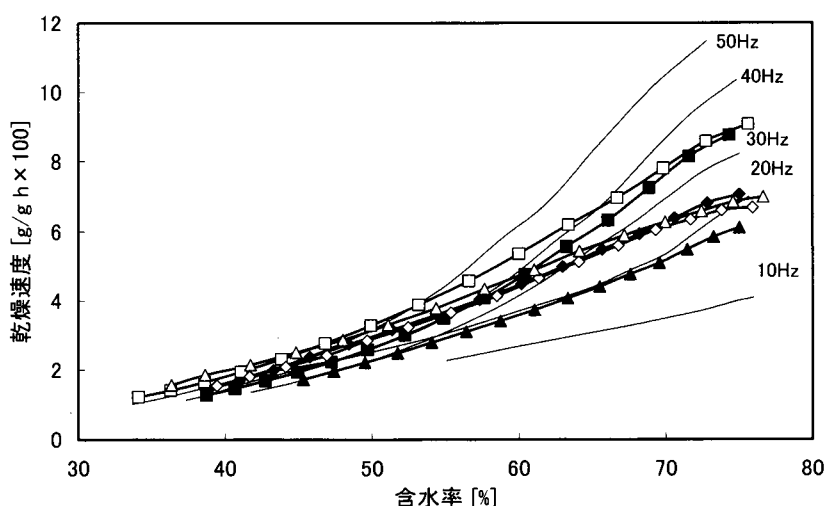


図3 乾燥特性曲線

-■- F52 -◆- F41 -▲- F50 -□- 1F52 -◇- 1F41 -△- 1F50

例：記号 F52 はインバータ周波数を 50Hz から 20Hz の間で変動させていることを表す。

所定の波形データの繰返し周期が 17分の場合は記号 F52, 67分の場合は記号 1F52 で表す。

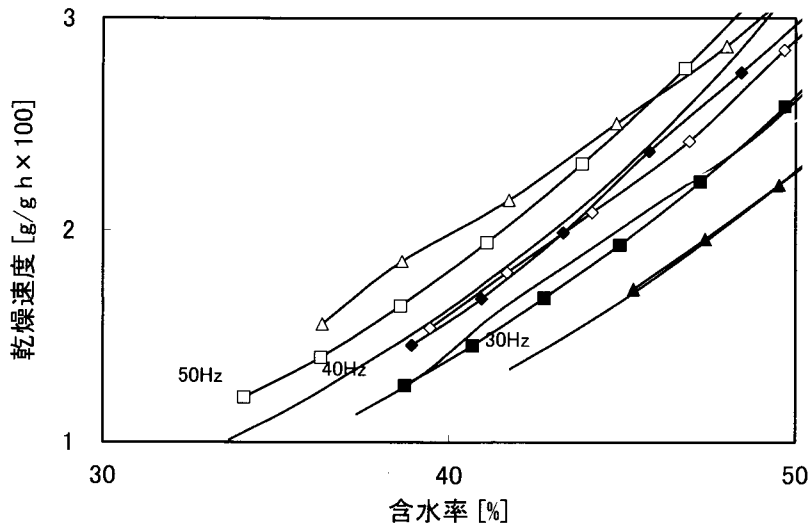


図4 乾燥特性曲線

■ - F52 ◆ - F41 ▲ - F50 □ - 1F52 ◇ - 1F41 △ - 1F50

例：記号 F52 はインバータ周波数を 50Hz から 20Hz の間で変動させていることを表す。

所定の波形データの繰返し周期が 17分の場合は記号 F52, 67分の場合は記号 1F52 で表す。

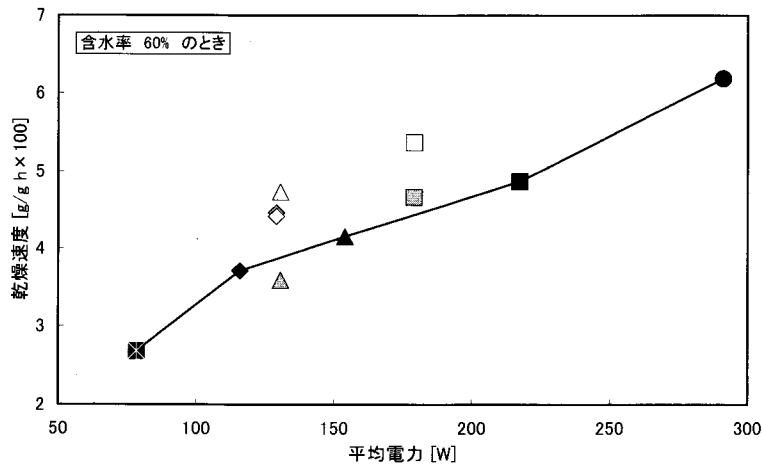


図5 乾燥速度と平均電力との関係

● - 50Hz ■ - 40Hz ▲ - 30Hz ◆ - 20Hz ⊠ - 10Hz
 ■ - F52 ◇ - F41 △ - F50 □ - 1F52 ◇ - 1F41 △ - 1F50

例：記号 F52 はインバータ周波数を 50Hz から 20Hz の間で変動させていることを表す。

所定の波形データの繰返し周期が 17分の場合は記号 F52, 67分の場合は記号 1F52 で表す。

3. 乾燥試料の硬さに与える影響

図7に24時間乾燥した試料の硬さを、表2に含水率を示した。貫通時の荷重値から、50, 40Hzが一番硬く、1F52, F52, 30Hzの順番に柔らかいことが示された。

表2 乾燥品の含水率

標記	30Hz	F52	1F52	40Hz	50Hz
含水率(%) (平均値)	29.4	27.4	23.3	25.8	24.9

突刺し時の荷重値は、30Hzの場合が最も大きく、他のものはほぼ同じ値となった。貫通時の荷重は、試料の厚み方向全体の硬さを表わし、突刺し時の荷重は、試料の表面部分の硬さを表わしていると考えられる。

含水率は、30Hzが一番高い値で、F52, 40Hz, 50Hz, 1F52の順番に低い値となった。

30Hzの場合、貫通時の荷重は小さいが、突刺し時の荷重が大きいことから、表面にやや硬い層があり内部は水分が多く柔らかいという不均一な構造になっていると

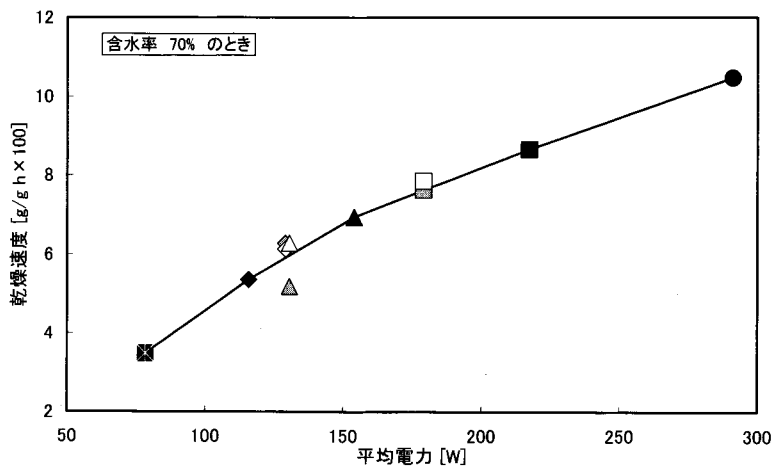


図6 乾燥速度と平均電力との関係

-●- 50Hz -■- 40Hz -▲- 30Hz -◆- 20Hz -◼- 10Hz
 -▣- F52 -◇- F41 -△- F50 -□- 1F52 -◇- 1F41 -△- 1F50

例：記号 50Hz はインバータ周波数が 50Hz であることを表す。
 記号 F52 はインバータ周波数を 50Hz から 20Hz の間で変動させていることを表す。
 所定の波形データの繰返し周期が 17 分の場合は記号 F52、67 分の場合は記号 1F52 で表す。

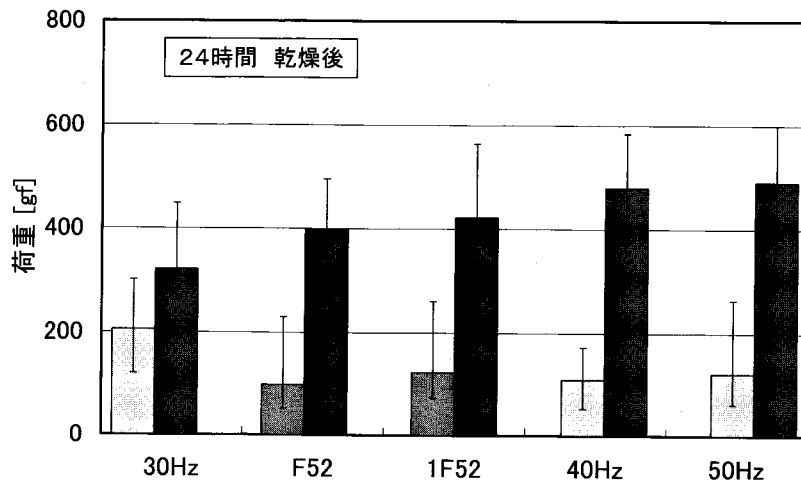


図7 乾燥物の硬さ

□ 突刺し時 ■ 貫通時

例：記号 50Hz はインバータ周波数が 50Hz であることを表す。
 記号 F52 はインバータ周波数を 50Hz から 20Hz の間で変動させていることを表す。
 所定の波形データの繰返し周期が 17 分の場合は記号 F52、67 分の場合は記号 1F52 で表す。

考えられる。その他のものは突刺し時の荷重は小さいので、表面部分に硬い層は形成されておらず、厚み方向全体に均一な状態になっていると考えられる。40、50Hz の場合、突刺し時の荷重は小さく、貫通時の荷重は大きな数値となり、硬く乾燥したことを示した。ゆらぎ制御の 1F52、F52 の場合、突刺し時の荷重は小さく、また貫通時の荷重もやや小さな数値になり、比較的柔らかく乾燥したことを示した。

水産物等の乾燥では、乾燥が進み試料内部から表面への水分移動が乾燥律速となった時、水分分布を均一化し乾燥効率を上げる目的で「あん蒸」が行われている。ゆらぎ制御では風速値の大小が時間的に変動するので、あん蒸の効果に相当するものが現れて乾燥速度の低下が抑えられると考えられる。また、急激な乾燥が起こりにくく、乾燥品は柔らかく仕上がると考えられる。

ゆらぎ制御は、一定風速制御の場合に比べて高い乾燥

速度にも拘らず柔らかく乾燥できる傾向がみられ、一定風速制御の場合とは異なった乾燥の特徴を有していると考えられる。ゆらぎ制御の導入により機械乾燥の特性改善の可能性があることが示唆された。

要 約

イカを用いた乾燥試験からゆらぎ制御は一定風速制御に比べて以下の特徴が明らかとなった。

- ・平均風速を高めにしても乾燥の進行に伴う乾燥速度の低下を抑えられる。
- ・中間、低含水率領域では一定風速制御に比べて同じ消費電力でも高い乾燥速度が得られる。
- ・高い乾燥速度にも拘らず一定風速制御の場合に比べて

柔らかく乾燥できる

以上のように、ゆらぎ制御は、一定風速制御の場合とは異なった乾燥の特徴を有しており、ゆらぎ制御の導入は機械乾燥の特性改善の可能性があることが示唆された。

文 献

- 1) 武者利光, 1/f 雑音 生体へのなじみのよさ, 数理科学, 188, 32-36 (1979).
- 2) 福田 昭, 1/f のスペクトルで風速を変動させる扇風機 さらに快適な風を目指す, 日経エレクトロニクス, 447, 104-105 (1988).