蒸熱による茶葉の物理的性質の変化

上 辻 久 利*・堀 内 久 弥**・西 成 勝 好**

Changes in Physical Properties of Tea Leaves by Steaming

Hisatoshi KAMITSUJI*, Hisaya HORIUCHI**
and Katsuyoshi NISHINARI**

* Kyoto Prefectural Tea Research Institute, Shirakawa Nakanosono 1, Uji-shi, Kyoto, 611

** National Food Research Institute, Ministry of Agriculture, Forestry
and Fisheries, Yatabe-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki, 305

The mechanical properties and electric impedance of tea leaves were measured for various steaming durations in order to obtain the basic informations for the automation of steaming process in the manufacture of tea. Dynamic elastic modulus at 10 Hz and the initial apparent elasticity in extension measurement decreased remarkably with increasing the steaming duration. The breaking strain increased by 40% caused by steaming only for a short time (30 s) with comparison to raw leaves. Steamed leaves elongated at initial stage of extension, while raw leaves stretched only a little until just before the breaking. Both the magnitude and the frequency dependence of electric impedance were more eminent for raw leaves than steamed leaves. The large air chambers of intercellular spaces in spongy parenchyma of raw leaves were observed but shrunk rapidly by steaming. The differences of physical properties between the leaves of various positions on the stem were also examined: larger firmness, higher electric impedance and lower moisture content were found at the lower positions on the stem than at the upper positions for the raw leaves.

(Received Jul. 6, 1984)

緑茶の製造過程は摘採した生葉を蒸熱し、数段階の揉ねん・乾燥工程を経て荒茶とするのが一般的である。最初の蒸熱工程は短時間であるが、酵素を失活させ、緑色の保存とともに、葉を柔らかくして揉み易くする作用があり、その良否が緑茶品質に与える影響は大きい。ところが、茶葉に対する蒸熱効果を数量的に判定する方法がないため、蒸熱した葉の色、香り、温度、表面に出た粘りなどの感覚評価に基づいて蒸熱機の操作を行っているのが現状である。しかし、製造現場では熟練者の不足や、工程の自動化を促進する面からも、蒸熱の客観的評価と工程の制御が望まれている。

生葉および蒸熱した茶葉の物理的性質については、色差計による測色¹⁾、果実硬度計あるいは針の貫入によるかたさの測定²⁾、蒸熱した葉の引張り特性³⁾、電気抵抗の測定⁴⁾など数件の報告がある。ここでは青果物に用いられている引張り破断特性値、およびフィルム状試料に

ついて測定されている伸縮による動的粘弾性、そして細胞組織の健全性の目安とされている交流インピーダンス、水分含量、組織構造などが、蒸熱によってどのように変化するものか、測定した結果を報告する。

試料および実験方法

1. 試料

供試した茶葉（品種：やぶきた）は主として、二番茶期以降の1983年6月16日、28日と8月22日に茨城県谷田部町かすみ茶園において採取した。生葉はやや硬化し、不揃いであったため、葉位別と茎の測定では芽長と葉数を、蒸熱時の変化では第3位葉で葉長と葉幅を揃えて使用した。茎は第2茎のみを用いた。

2. 蒸熱方法

蒸熱処理は茎からはずした葉柄、葉脈を含んだ生葉を小さな金網かごに入れ、沸とうしている電気炊飯器の蒸

* 京都府立茶業研究所（〒611 京都府宇治市白川中ノ園1番地）

** 農林水産省食品総合研究所（〒305 茨城県筑波郡谷田部町観音台 2-1-2）

Fig. 1 A clip for dynamic viscoelastic measurement

(a) top view (b) side view

気に短時間当てた。蒸熱後は直ちに水中に入れて冷却し、水分の蒸発を防止した。

動的粘弾性測定用試料については、中心部の葉脈を避けて幅5mm、長さ3cmの短冊形に切り取り、Fig. 1に示した補助固定器具に補強用のポリプロピレンフィルムと、たるませた試料を重ねて締付け、器具ごと蒸熱した。

3. 測定方法

(1) 伸縮振動による動的粘弾性

上記の試料を補助固定器具ごと東洋精機製作所製ビエソトロン-Uの試料クランプに取付けた後、ポリプロピレンフィルムを細いハンダゴテで焼切り、試料を伸ばして10Hzの正弦振動における動的粘弾性を測定した。温度制御は行わなかったが、試料室内の温度は室温と同じ27°Cで、変動は±1°C以下であった。葉面からの水分蒸散を最小限に抑えるために、周波数依存性は測定しなかった。

測定法の概略は次の通りである。加振器により試料の一端に加えられた正弦的ひずみを、他端のロードセルで応力として検出し、複素弾性率 E^* が得られる。これが位相検波回路を通して動的弾性率 E' と動的損失 E'' として読取られる⁵⁾⁶⁾。

(2) 引張り破断特性

測定用試料は処理した葉から、Fig. 2のように中央部の幅5mmのJIS準拠のダンベル状に切出し、上村ら⁷⁾がトマト果皮の測定に用いた治具に準じた補助固定用のチャックで締付けた。測定はインストロン型万能引張り圧縮試験機(新興通信工業製 TOM-500)を用い、変形速度10mm/minで破断するまで伸張した。変位を20倍に拡大してXYレコーダーに自記させた破断曲線から、ピークを示す破断応力 $(F/S, S$ —試料断面積)、破断ひずみ $(D/l, l$ —試料の長さ)、変位 D までの曲線

Fig. 2 A clip for extension measurement

(a) top view, (b) side view, (c) a dumb-bell shaped specimen cut from a tea leaf

の囲む面積から破断エネルギー (A/S) 、そして初期の直線的増加率から見かけの弾性率 $(E_{app}=14F/S4D)$ などを算出した。

(3) 交流インピーダンス

ベクトルインピーダンスメーター(横河・ヒューレット・パッカード製4800A)を用いて、100Hzから500KHzにおけるインピーダンスの絶対値 $|Z|$ を測定した。測定試料は動的粘弾性と同様に、幅5mm、長さ3cmに切出し、1×1cmの真ちゅう板を電極としたワニ口クリップで挟んだ。周波数を15段階に変えた時の $|Z|$ の変化をXYレコーダーに記録した。

(4) 水分含量

蒸熱した試料は表面の水滴を拭取って大型アルミニウム秤量缶に2gを取り、常圧135°Cで恒量になるまで測定した。また、アルミフォイルの袋に10gを取り、60°C減圧乾燥法による測定も合わせて行った。

(5) 細胞組織観察

生葉および蒸熱試料の凍結横断切片について、50, 100倍の光学顕微鏡下に、無染色で観察した。

結果および考察

1. 生葉の葉位による力学的性質の差異

動的粘弾性の測定は10~20枚の平均値をFig. 3に示した。測定値の変動係数 $(C=s/\bar{x})$ は各葉位を通じて、 E' , 22~37%; 損失正接 $(\tan \delta=E''/E')$, 16~25%であった。動的弾性率は葉位の大きいものほど大きく、損失正接は逆に小さくなった。これは上位葉ほど生育が遅れて、感覚的にも軟らかいことと一致する。各葉位間の E' の差はかなり大きく、第5葉は第2葉のほぼ2倍であった。 E' の大きさは 10^8 dyn/cm^2 の数値で、他の農産物、果実・根菜類の動的弾性率⁸⁾とほぼ同じオーダーであった。

Fig. 3 Dynamic Young's modulus E' (○) and mechanical loss tangent $\tan \delta$ (Δ) of tea leaves at various positions on the stem

Fig. 4 Breaking strain D/l (○), breaking force F/S (□) and apparent elasticity E_{app} (Δ) of tea leaves at various positions on the stem

引張り破断特性値も 10 回の平均値を Fig. 4 に示した。この場合の変動係数は D/l , 12~26%; F/S , 13~17%; E_{app} , 20~28% となった。破断ひずみは上位葉ほど大きく、破断応力は逆に小さくて、 $\tan \delta$ と同様に上位葉が柔らかいことを表わしている。変形初期の見かけの弾性率は動的弾性率、破断応力と同じく下位葉の方が大きい、葉位順には比例せず、第 3 葉と第 4 葉の差が著しい。なお破断応力、見かけの弾性率とも、第 3 葉を用いた鈴木らの報告³⁾ とほぼ同じ 10^7dyn/cm^2 の数値を示した。

2. 生葉のインピーダンスと水分含量の葉位別変異

交流インピーダンスの周波数依存性を Fig. 5 に示した。各葉位別の測定値はそれぞれ 7 枚の試料の平均値であるが、再現性はかなりよく、各測定周波数ごとに計算した変動係数は、2 葉 2.5~9%; 3 葉 3.1~11.7%;

Fig. 5 Frequency dependences of electric impedance for tea leaves at various positions on the stem

Figures beside the curves represent the leaf positions on the stem and the ratio $Z_{100\text{Hz}}/Z_{500\text{KHz}}$

Fig. 6 Moisture contents of tea leaves at various positions on the stem

Marks show the collected date

□—June 18, Δ—June 20, ○—June 30, ⊙—Aug. 24

4 葉 2.6~12.8%; 5 葉 3.7~18.4% であった。周波数が低いものは、やはり変動が大きい。周波数が高くなるに従って急激に低下している。100 Hz から 100 KHz にかけては下位葉ほど大きく、500 KHz では葉位による差異は見られなかったが、100 Hz と 500 KHz とのインピーダンスの比 ($Z_{100\text{Hz}}/Z_{500\text{KHz}}$)⁹⁾ をとると、図中に示したように下位葉ほど大きく、周波数依存性が著しい。これは後記のように、下位葉ほど水分含量が低いことと、生育に伴って細胞組織が発達し、細胞壁の肥厚と細胞間の空隙の増大に基づくものと考えられる。

各葉位の含有水分は Fig. 6 に示したが、一見して数値のばらつきが大きい。これは図中の各印をたどてみると、試料採取日ごとに大きく変動していることが分かるが、この原因については今のところ理由は不明である。この変動がないものとみなすと、葉位順に下位葉ほど水分量が少ないといえることができる。

3. 蒸熱による茶葉の力学的性質の変化

複素弾性率の蒸熱による変化について 12~14 回の平均値を Fig. 7 に示した。各処理を通じた測定値の変動係数は、 E' , 16~45%; $\tan \delta$, 9~28% で、蒸熱葉の変動はやや大きい。 E' および図には示していないが、 E'' は短時間の蒸熱によって半減した。そして蒸熱時間を延ばすと、さらに徐々に低下した。これに対して $\tan \delta$ は蒸熱によって増加し、蒸熱時間にかかわらず、ほぼ一定値

Fig. 7 Dynamic Young's modulus E' (O) and mechanical loss tangent $\tan \delta$ (Δ) of tea leaves for various steaming durations

Fig. 8 Breaking strain D/l (O), breaking force F/S (□) and apparent elasticity E_{app} (Δ), of tea leaves for various steaming durations

Fig. 9 Typical force-deformation curves for tea leaves

(a) raw leaf, (b) leaf steamed for 30 and 120 s, (c) leaf steamed for 300 s

を示すものとみなされる。動的特性値には生葉と蒸熱処理との差が明白に表われるものと考えられる。

引張り破断試験の結果は 7 回の平均値であるが、Fig. 8 に見られるように、見かけの弾性率 ($C=21\sim53\%$) は蒸熱により急激に低下し、蒸熱時間に伴ってさらに低下している。この挙動は鈴木らの報告⁸⁾とよく似たもので、さらに、その変化の傾向は前記の E' の挙動とも非常によく一致しており、またオーダーも測定時間領域による変化を考慮に入れば、極めて近い数値と考えられ、引張り、動的測定とも正確に測定されたものといえよう。

また破断ひずみ ($C=18\sim28\%$) は蒸熱 30 秒区で一時的に生葉より 40% も増加し、それ以後は蒸熱時間が長くなるに従って生葉より小さな数値を示した。これは非常に特徴的な現象であるが、鈴木ら⁸⁾も同様の事例を報告している。一方、破断応力 ($C=10\sim48\%$) は蒸熱時間に従って急激に小さくなっているが、30 秒区ではあまり低下していない。これは前記のように伸びひずみが大きいために破断が遅れ、大きな破断強度を示すに至ったものと考えられる。さらにもう一つの特性値である破断エネルギーは、図示していないが破断ひずみと同じ傾向を示した。

蒸熱処理による変形-応力曲線は Fig. 9 のように変化した。すなわち、生葉は金属の引張り試験のように、上方に凸形の曲線を示し、破断前に応力集中が起り、部分的に伸長が始まって破断に至ることを表わしている。30 秒および 120 秒蒸熱区では変形量に比例して応力が増加し、突然、破断する。300 秒蒸熱したものは引張り初期に容易に伸張し、柔軟ゴムのように下方に彎曲した曲線¹⁰⁾を示した。

4. 蒸熱による茶葉のインピーダンスの低下

Fig. 10 に交流インピーダンスの周波数依存性を示し

Fig. 10 Frequency dependences of electric impedance of tea leaves for various steaming durations

Figures beside the curves represent steaming duration(s)

た。これらは葉位別の実験と同様に5回の実験の平均値であるが、各周波数ごとの変動係数は生葉で4.5～14.3%であった。蒸熱したものは意外に再現性がよく、5.1～12.6%であった。300秒蒸熱したものは、16.5～18.3%とやや変動が大きかった。生葉の周波数依存性が大きいことはFig. 5でも示したが、植物組織は抵抗とコンデンサーの電気回路で表わすことができ、健全な細胞膜はコンデンサーの働きをすると考えられている¹³⁾～¹⁴⁾。一般にコンデンサーのインピーダンスは低周波で大きく、高周波になるほど小さくなる¹⁵⁾。従って、健全な植物組織におけるインピーダンスの周波数依存性は容易にうなずけるものであり、生葉の測定結果はこの説明に従うものと考えられる。

しかし、蒸熱した茶葉ではいずれも生葉の約1/20(100 Hz)に減少し、周波数依存性も生葉よりはるかに小さく、ほとんどフラットである。そして蒸熱時間が増すとインピーダンスはさらに低下する。つまり、蒸熱によって細胞は生命を失い、インタクトな状態での細胞膜のコンデンサーとしての機能は低下し、インピーダンスの周波数依存性が小さくなったものと考えられる。

5. 蒸熱による茶葉細胞組織の変化

一方、複雑な植物組織の電気抵抗は細胞間隙も大きな要因となる¹⁶⁾のではなかろうかと推察される。そこで、生葉と蒸熱した葉の横断面を顕微鏡下で比較した。Fig. 11に見られるように、生葉では表面の柵状細胞に続いて、裏面の気孔につながる海綿状組織が発達し、大きな空隙の存在が認められるが、この空気層が生葉の大きなインピーダンスの一因ではなかろうかと考えられる。ちなみに、この切片で計測すると、生葉の厚さはほぼ0.25

Fig. 11 Microscopic observation of the cross section of tea leaf ($\times 100$)

(a) raw leaf, (b) leaf steamed for 120 s.

P-Palisaden parenchyma, S-Spongy parenchyma, I-Intercellular spaces

mmであった。

これに対して、蒸熱した葉では海綿状組織がほとんど潰れ、細胞間の空隙が消失していることが観察された。このような状態では細胞相互の接触が増加して、インピーダンスが低下するものと考えられる。

なお、茶葉の蒸熱により細胞内顆粒が凝集するといわれている¹⁷⁾が、観察でも柵状組織および海綿状組織の細胞内顆粒が中央部に集まっているのが認められた。細胞内での顆粒の凝集は細胞内圧一膨圧の減少を表わし、細胞壁の弾性の低下につながるものと考えられる。

6. 蒸熱による茶葉水分の変化一軟化要因

水分の多い青果物のかたさについては、一般的に萎凋による膨圧の低下が組織の軟化を招く⁸⁾¹⁸⁾とされており、試料の表面積が大きいハウレンソウでは、萎凋に際して水分含量と弾性率がほぼ比例関係にあることが認められている¹⁹⁾。これに対して、青果物を加熱した時の軟化は、細胞壁あるいは細胞間のプロトペクチンの分解または溶解による²⁰⁾といわれ、長時間の煮熱では水分含量が10%内外増加するとされている。茶葉の蒸熱に際した弾性率の低下、インピーダンスの減少などの物理的性質の変化が、上記のいずれに基因するものか興味のある

Fig. 12 Relation between the moisture content of tea leaves and the steaming duration
Tea leaves were collected on the date shown in the figure

Fig. 13 Dynamic Young's modulus E' (O) and mechanical loss tangent $\tan \delta$ (Δ) of tea stems of various steaming durations

ところである。ここでは化学的成分の変化は測定していないので、変化の一面にしか触れることはできないが、蒸熱時の水分を測定してみると、Fig. 12に見られるように、測定値のばらつきが非常に大きい。Fig. 6と同様に、これも試料採取日による変動と考えて図を見直すと、最終的にはやや増加するものの、短時間の加熱ではむしろ生葉より減少しているものと考えられた。力学的性質の急激な変化がこの点に表われたことは興味深い、この時の弾性率の低下はかなり急激なため、蒸熱初期の茶葉の軟化はFig. 11で観察された、細胞内顆粒の凝集に表われる膨圧の低下に基因する部分の大きいのではなかろうかと考えられる。しかし他方では蒸熱によ

る化学的成分の変化を研究し、水溶性ペクチンの増加を認めた報告²¹⁾もあるので、いずれか一方の原因と断定することはできないであろう。茶葉の水分含量の変化を精密に把握することが、これを明らかにする一つの方途ではなかろうかと考えられる。

7. 蒸熱による茎の力学的性質の変化

茎については動的測定のみを行ったが、 E' ($C=13\sim 42\%$) および $\tan \delta$ ($C=5\sim 16\%$) の挙動は葉の場合とほとんど同じであった。また E' , $\tan \delta$ の数値も葉とほとんど変わらないことが注目される。一般に茎は葉よりかたいと考えられるが、茶の新らしい茎は木質化が進んでいないためであろう。

なお、茎の水分含量は生のものも、蒸熱した後も83%を示した。生葉の平均値、77%に比べると約6%も高いことは興味深いことである。

要 約

製茶における蒸熱工程の合理化を目的として、蒸熱による茶葉の力学的性質、交流インピーダンス、水分含量、および細胞組織などの変化を測定した。

まず、生葉の物理的性質は葉位順に変異していることが認められた。すなわち、下位葉ほどかたく、交流インピーダンスが大きく、その周波数依存性も大きい。水分含量は試料採取日による変動はあるが、下位葉のほうが少なかった。

蒸熱により10 Hzの動的弾性率、および引張り初期の見かけの弾性率とも急激に低下したが、蒸熱時間にはあまり依存しなかった。破断ひずみは蒸熱30秒後に生葉より40%も増加し、その後、生葉よりやや小さくなった。破断応力は初めわずかに低下し、蒸熱時間が長くなるに従って減少した。交流インピーダンスは蒸熱によりその大きさが生葉の1/20ぐらいに低下し、周波数依存性も小さくなった。

茶葉の水分含量は蒸熱初期にやや乾燥するように見受けられたが、供試生葉の数値が変動するために断定しえない。生葉には裏面の気孔につながる海綿状組織の大きな空隙が顕微鏡下に認められるが、蒸熱によりほとんど消滅した。茎の水分は葉より多いが、動的弾性率および蒸熱によるその変化も葉とほとんど同じであった。

終りに試料をご恵与下さった、谷田部町かすみ茶園倉持嘉一郎氏に御礼申し上げる。

本報告の概要は本学会第31回大会(1984年3月)において発表した。

文 献

- 1) 京都府立茶業研究所試験成績書, 昭和52年度 (1977)~昭和55年度 (1980), 各 p. 1.
- 2) 三重県農業試験場茶業分場昭和38年度業務報告, p. 58 (1963); 桑原穆夫・新倉光雄: 茶業技術研究, No. 5, 34 (1951).
- 3) 鈴木勝弘・滝谷 洋・吉富 均・中野不二雄: 昭和57年度茶業技術研究発表会講演要旨集, p. 91, 金谷 (1983).
- 4) 埼玉県茶業試験場 昭和56年度製茶に関する試験成績, p. 50 (1981).
- 5) 深田栄一: レオロジー測定法, 高分子学会編 (共立出版, 東京), p. 178 (1965).
- 6) NISHINARI, K., HORIUCHI, H. and FUKADA, E.: *Rep. Prog. Polymer Phys. Japan*, **23**, 759 (1980).
- 7) 上村昭二・吉川宏昭・伊藤喜三男: 園試報, **C7**, 73 (1972).
- 8) HAMANN, D.D. and DIEHL, K.C.: *Food Tech.* **32**, 57 (1978).
- 9) HAYASHI, T., IWAMOTO, M. and KAWASHIMA, K.: *Agric. Biol. Chem.*, **46**, 905 (1982).
- 10) ジョン・ウルフ編, 永宮健夫監訳: 材料科学入門Ⅲ, 機械的性質 (岩波書店, 東京), p. 1 (1967).
- 11) SVEJDA, F.: *Can. J. Plant Sci.*, **46**, 441 (1967).
- 12) GREENHAM, C.G., RANDALL, P.J. and WARD, M.M.: *J. Exp. Botany*, **23**, 197 (1972).
- 13) 渡辺 昭: 生物物理学講座 9, 膜の生物物理, 生物物理学会編 (吉岡書店, 京都), p. 75 (1966).
- 14) de PLATER, C.V. and GREENHAM, C.G.: *Plant Physiol.*, **34**, 661 (1959).
- 15) 霜田光一: 物理学選書 1, エレクトロニクスの基礎 (裳華房, 東京), p. 91 (1963).
- 16) FENSON, D.S.: *Can. J. Plant Sci.*, **46**, 169 (1966).
- 17) 桑原穆夫・中山 仰: 茶業技術研究, No. 3, 30 (1950).
- 18) 宮脇長人・矢野俊正: 食品の物性 6, 農産物の力学物性, 山野善正編 (食品資材研究会, 東京), p. 115 (1980).
- 19) 黒田佐俊・秋元浩一・杉本俊一・川幅保弘: 農機誌, **39**, 199 (1977).
- 20) 堀越フサエ: 新調理科学講座 5, 穀物・野菜の調理, 下田吉三・松元文子・元山 正・福場博保編 (朝倉書店, 東京), p. 150 (1972).
- 21) 高柳博次・阿南豊正・池ヶ谷賢次郎: 昭和58年度茶業技術研究発表会講演要旨集, p. 9, 金谷 (1984).

(昭和59年7月6日受理)