# もやしの食感向上技術の開発(第1報)

赤塚久修、横山慎一郎

Improving the texture of bean sprouts(I)

Hisanobu AKATSUKA and Shin-ichiro YOKOYAMA

もやしの食感向上のため、稲の倒伏抑止用肥料として用いられるケイ酸塩(ケイ酸カリウム)を応用した栽培法の開発を推進するにあたり、もやしのケイ素含有量の定量法及びもやしの食感に関わる物性評価法の確立を試みた。ケイ酸塩添加栽培もやしのケイ素含有量は、アルカリ溶融法により試料調製した後、原子吸光分光法で定量評価が可能であることを確認した。また、もやしの食感に関わる物性特性は、レオメータの感圧軸をもやし軸中央部へ突刺し、その応力変化を測定することにより評価可能であることを確認した。

## 1. はじめに

岐阜県は上質な地下水が豊富であること、日本の中心に位置し物流の要衝となることから、もやし(野菜の新芽あるいはスプラウトとも呼ばれる)の生産が盛んであり、メーカーが集積している。もやしは屋内で栽培生産されることから天候の影響を受けず、栽培期間も10日程度と短期であり、安価に安定的に提供可能なことから消費者に人気があるが、価格競争が激しく、こうした生産企業の収益を圧迫している。特にもやし全体(緑豆もやし、大豆もやし、小豆もやしの合計)の85%の市場規模を占めている緑豆もやしは、付加価値向上による競争力強化が切望されている。そこで、緑豆もやしの魅力について再検討したところ、他のもやしに比べ癖のない味覚、シャキシャキとした食感が嗜好されているとの結論に至った。この食感向上のためには、稲の倒伏抑止(茎を丈夫にする)用肥料として用いられるケイ酸塩(ケイ酸カリウム)を用いた栽培法の開発が有効ではないかと推定した。本研究では、この仮説を立証する為に必要な技術として、緑豆もやしのケイ素含有量の定量法、およびもやしの食感に関わる物性評価法の確立を行うことを試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験材料

ケイ素含有量の測定に供する緑豆もやしは、市販のスプラウト用緑豆種子(中原採種場)40 gを35℃の水道水で2時間膨潤化した後、もやし栽培機(BelleLife)の栽培床へ移したものを、図1のとおり栽培機ごとインキュベータ内に設置し、24℃にて栽培した。

栽培中、1日1回もやし栽培機をインキュベータより取り出し、散水用水を交換後、栽培を継続した。また、もやしの肥大化のため、栽培開始2日経過後より、栽培機の水交換と同時に100 ppmエチレンガス混合ガスをインキュベータへ一定時間導入後、インキュベータ内部をファンで撹拌し、微量のエチレンガス雰囲気下とした。なお予備実験では、当該混合ガスをインキュベータへ一定時間導入し、内部をファンで撹拌後の庫内の空気をシリンジで採取し、ガスクロマトグラフ(Agilent 7890B GC システム)により測定したところ、混合ガス導入直後のエチレン濃度は7～9 ppmとなり、24時間後でも同濃度を維持することを確認した。

ケイ素添加栽培では、市販のケイ酸カリウム水溶液(ナカライテスク、濃度約20%)を水道水で400倍に薄め、濃度を約500 ppmに調整したものを、播種前の膨潤化時の侵漬水および栽培用散水に使用した。一方、コントロール栽培は膨潤化時と栽培中の散水を水道水のみとし、両者をインキュベータ内で同時に栽培した。

なお、もやしの食感に関わる物性評価に供するもやしには、市販の緑豆もやしを用いることとし、形状ができる限り揃ったものを選抜し、評価対象とした。

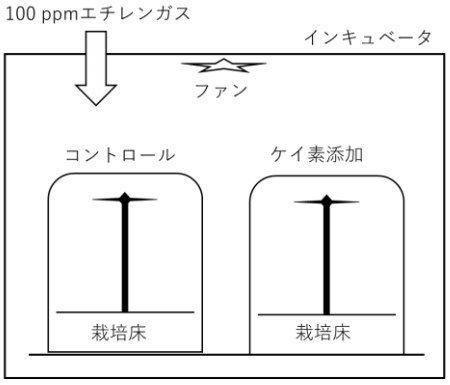


図1 もやし栽培法

### 2.2 もやしのケイ素含有量の測定

#### 2.2.1 試料調製法

後藤ら[1)]の方法により、アルカリ溶融法でケイ素標準液および試料溶液を調製した。すなわち、ケイ素標準液は、二酸化ケイ素(純度 99.99%)0.107 gを白金るつぼに秤取し、メタホウ酸リチウム(純度 99.9% trace metal basis)1.0 gを加え混合したものを900℃で溶融後、室温まで冷却し、次に1 M硝酸で溶融物を溶解し、100 mlに定容したものを500 ppmケイ素標準液とした。希釈液および検量線作成に

使用するブランク液は、メタホウ酸リチウム10 gを1 M硝酸で1 Lに定容したものとし、各濃度の標準液は、ブランク液で適宜希釈したものを使用した。硝酸は精密分析用のものを使用した。分析に供するもやしは、65℃で24時間乾燥後、粉砕した粉末0.5 gを白金るつぼに秤取し、350℃まで昇温し炭化させた。さらに消煙後、500℃で炭化物がなくなるまで灰化した後、メタホウ酸リチウムを添加混合し、標準液と同じ処理を行い、試料溶液とした。標準液およびもやし試料溶液はマトリックスマッチングを行い、主成分濃度を揃えた。

2．2．2 原子吸光分光法(フレーム法)によるケイ素定量

本研究では偏向ゼーマン原子吸光分光光度計(Z-2010、日立ハイテクサイエンス)を用い、フレーム法でケイ素定量を行った。調製したケイ素標準液を原子吸光分光光度計に供し、フレーム法によるケイ素の検量線を作成し、検出限界並びに定量下限値を求めた。

2．2．3 もやしのケイ素含有量の評価

コントロール栽培およびケイ素添加栽培もやしを評価対象とし、栽培日数と、ケイ素含有量の変化を測定した。もやしのケイ素含有量の評価を行う栽培日数は栽培開始7日から16日経過後とし、各栽培日数のもやし3検体より試料溶液を作成し、測定した。

2．3 もやしの物性評価法

2．3．1 レオメータによるもやしの物性測定

きゅうりや柿の果肉のサクサク感を、円柱状のプランジャーが果肉を貫入する力の変化を荷重の二次微分値の総和で算出したCrispness index(CI)を用いて評価する方法が提案されている[2,3]。一方、もやしのシャキシャキ感を伴う食感に関して、提案されている評価方法はない。収穫後の生もやしは、加熱調理することにより特有のシャキシャキ感が得られる。しかし、過度に加熱すると特有のシャキシャキ感が失われてしまう。 そこで今回は、市販の緑豆もやしを用い、もやしの食感に関わる物性評価を行うこととした。

太陽化学株式会社おいしさ科学館のクリープメーターによる炒めもやしの破断測定の方法[4]を参考に、レオメータ(SUN RHEO METER CR-3000EX、サン科学)に0.8 mm円柱アダプタ(感圧軸)を用いて、図2のように、もやし軸中央部への突刺し試験を行い、応力変化を測定した。

検体のもやし軸径が、サンプルごとにばらつくことから、もやし軸径の太さを100%とする、もやし軸径によらない突刺し度を定義した。そしてもやし表皮から突刺し度95%までを突刺した。ここでもやしへの突刺し速度は、60 mm/minとし、評価検体数は測定条件ごとに20検体とした。

2．3．2 もやしの物性評価

はじめに生もやしを検体として、もやし軸中央部への突刺し試験を行い、応力変化を測定した。次に十分な量の沸騰水中で茹でたもやしを検体として、突刺し試験で応力変化を測定した。そして茹で時間ともやし表皮が破断する際の強さ関係を求め、もやし表皮の破断が一番強くなる茹で時間を検討した。次にもやし表皮の破断が一番強い、至適な茹で時間条件において、食感に関係すると考えられるもやし表皮の弾性、破断応力と、表皮が破断した後のもやし内部への侵入最小応力を求めた。

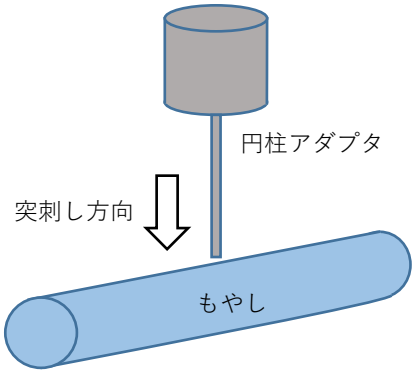


図2 もやしの突刺し試験法

## 3． 結果と考察

3．1 原子吸光分光法によるケイ素の定量

後藤ら[1]は、ICP発光分光分析法により、植物試料のケイ素や他の元素含有量を測定している。ICP発光分光分析法は、試料溶液を霧状にしてArプラズマ(6000～10000 K)に導入し、励起された元素が基底状態に戻る際に放出される光を分光して、その波長より元素の定性、強度より定量を行う。プラズマの温度が高いため、化学炎を使用する原子吸光分光法と比較すると干渉の影響を受けにくく、多くの元素に対してppb前後の検出限界を有する特徴がある。

一方、原子吸光分光法は、測定試料をフレーム中に噴霧するなどして、測定元素を原子蒸気化し、これに元素特有の波長の光を透過させることにより基底状態の原子が光を吸収して励起状態に遷移する。この光の吸収から元素濃度を測定する。フレーム法とファーネス法があるが、フレーム法の場合、多くの金属元素に対してppm前後の検出限界を有する。

前処理にアルカリ溶融法を適用したケイ素標準液を含む試料溶液は、調製時に高濃度のホウ酸リチウムを含有することとなり、ICP発光分光分析法では問題がなくとも、原子吸光分光法(フレーム法)では干渉等が生ずる可能性がある。また、原子吸光分光法(フレーム法)のケイ素検出限界と定量下限が本研究の評価に適切であるかどうか判断する必要がある。

作成したケイ素標準液を用いた原子吸光分光法(フレーム法)では、濃度50 ppmまでの範囲において、図3に示すような検量線が得られ、前処理にアルカリ溶融法を適用した高濃度のホウ酸リチウムを含む試料溶液でも、ケイ素の定量が可能であることを確認した。

原子吸光分光法(フレーム法)によるケイ素の検出限界および定量下限は、ケイ素標準液5 ppmの吸光度とブランク時の吸光度に係るベースラインノイズから計算をした。すなわち、ケイ素標準液5 ppmの吸光度は0.014となり、この条件におけるベースラインノイズは0.0006であった。S/N=3を検出限界として計算すると、原子吸光分光法(フレーム法)のケイ素の検出限界濃度は0.64 ppmとなり、同元素の定量下限は1.92 ppmと考えられた。

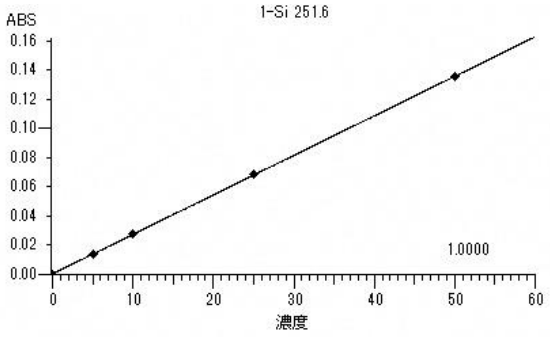


図3　原子吸光分光法(フレーム法)によるケイ素検量線

3．2　もやし中のケイ素含有量の評価

前項の実験材料のとおり栽培したコントロール栽培およびケイ素添加栽培もやしで、栽培開始日から7日、10日、13日、16日経過した検体より調製した試料溶液のケイ素濃度を、原子吸光分光法(フレーム法)により測定した結果を表1に示す。

コントロール栽培のもやし試料溶液のケイ素含有量は、いずれも原子吸光分光法(フレーム法)により検出されたが、定量下限未満を示し、ケイ素添加栽培のもやし試料溶液は、いずれも原子吸光分光法(フレーム法)のケイ素定量下限を超える値を示した。

次にもやしの栽培日数と、65℃24時間乾燥後のもやしの重量減少率と、重量減少率を割り戻した乾燥前の生もやし1 g wet weight当たりのケイ素含有量を表2と表3に示す。また、ケイ素添加栽培もやしについては、栽培日数からみたケイ素含有量の変化を図4に示す。

コントロール栽培もやしのケイ素含有量は、原子吸光分光法(フレーム法)のケイ素定量下限を考慮すると、重量減少率を加味しても25.3 μg/g wet weightを超えることはなかった。一方、ケイ素添加栽培もやしのケイ素含有量は、栽培7日経過後で135.0 μg/g wet weightとなり、コントロール栽培もやしの5倍以上含有していた。また、栽培日数依存的にもやしのケイ素含有量が増え、栽培16日経過後では475.2 μg/g wet weightに達し、コントロール栽培もやしの18倍以上のケイ素含有量となった。

以上より、原子吸光分光法(フレーム法)で、もやしのケイ素含有量の定量分析が可能であることを確認した。

表1　もやし試料溶液のケイ素濃度

| 栽培日数 | コントロール栽培(ppm) | ケイ素添加栽培(ppm) |
|---|---|---|
| 7日 | <1.92 | 10.28±0.76 |
| 10日 | <1.92 | 21.53±0.44 |
| 13日 | <1.92 | 44.86±0.96 |
| 16日 | <1.92 | 61.24±1.61 |

※ n=3

※ ケイ素添加栽培に示す±は標準偏差

表2　重量減少率とケイ素含有量(コントロール栽培)

| | コントロール栽培 | |
|---|---|---|
| 栽培日数 | 重量減少率(%) | 生もやし1g wet weight当たりのSi量(μg/g wet weight) |
| 7日 | 93.09 | <25.3 |
| 10日 | 94.69 | <20.2 |
| 13日 | 95.85 | <16.6 |
| 16日 | 96.38 | <14.9 |

表3　重量減少率とケイ素含有量(ケイ素添加栽培)

| | ケイ素添加栽培 | |
|---|---|---|
| 栽培日数 | 重量減少率(%) | 生もやし1g wet weight当たりのSi量(μg/g wet weight) |
| 7日 | 93.43 | 135.0±9.9 |
| 10日 | 94.74 | 226.5±4.6 |
| 13日 | 95.68 | 387.6±8.3 |
| 16日 | 96.12 | 475.2±12.5 |

※ Si量に示す±は標準偏差

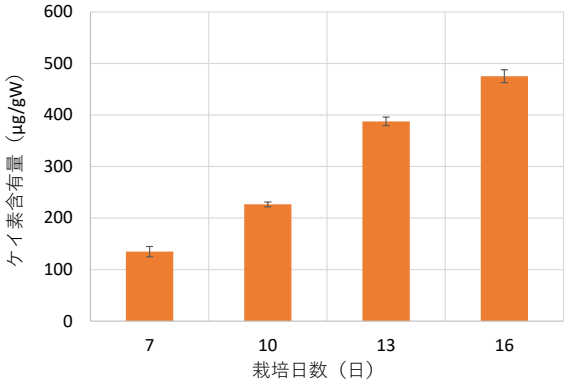


図4　ケイ素添加栽培もやしのケイ素含有量変化

3．3　もやしの物性評価

市販の生もやしの軸中央部への突刺し試験を行った時の突刺し度からみた応力の変化を図5に示す。

生もやしでは、表皮に関係する弾性と応力は後に述べる茹でもやしと比べると大きくなく、表皮の破断応力は、もやし内部へ侵入する際に観察されるもやし内部組織に由

来する応力と同程度であった。

次に、市販のもやしを15秒から300秒間茹でたものを検体として、もやし軸中央部への突刺し試験を行った時の応力の変化を図6から図12に示す。

茹でもやしの突刺し試験では、表皮破断に由来する応力ピークが、15秒から300秒間茹でたもやしのいずれでも観察された。つまり、茹でたことにより表皮に弾性が生じ、表皮の破断応力も増大した。表皮破断後は侵入に伴うもやしの内部組織に由来する応力変化が観察された。

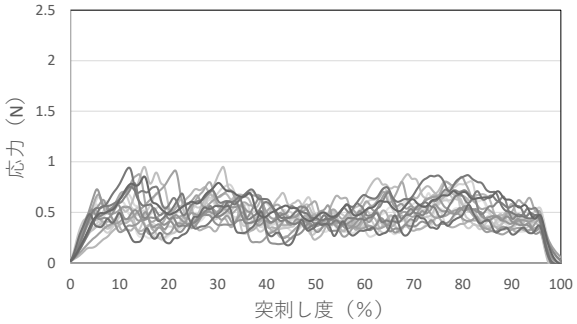

図5 突刺し応力変化（生もやし）

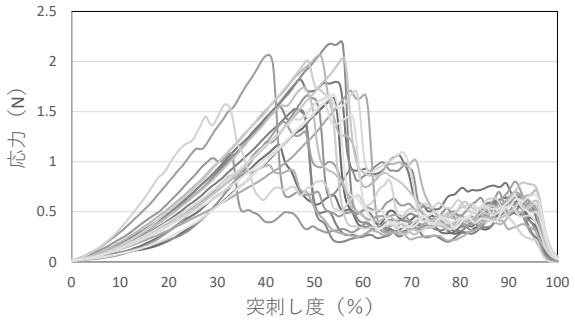

図6 突刺し応力変化（茹で時間15秒）

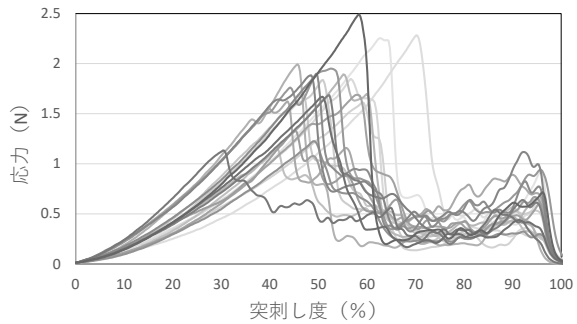

図7 突刺し応力変化（茹で時間30秒）

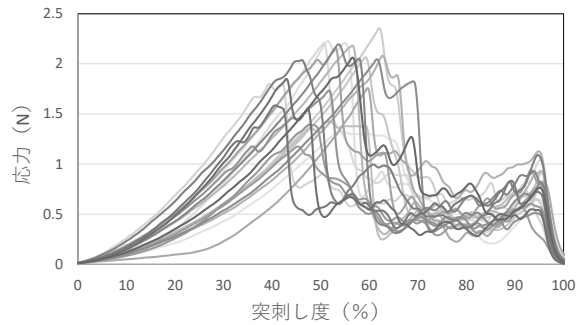

図8 突刺し応力変化（茹で時間60秒）

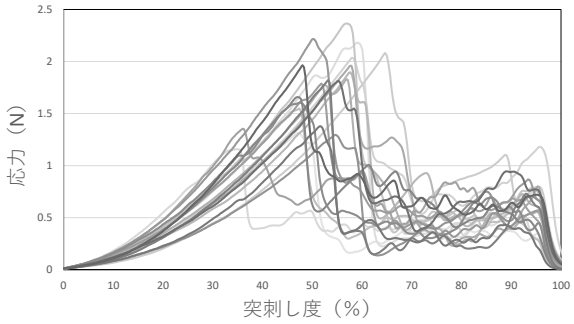

図9 突刺し応力変化（茹で時間90秒）

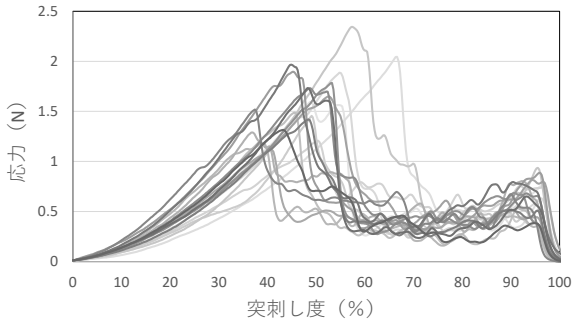

図10 突刺し応力変化（茹で時間120秒）

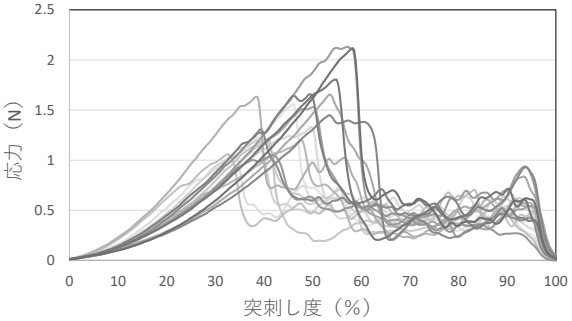

図11 突刺し応力変化（茹で時間180秒）

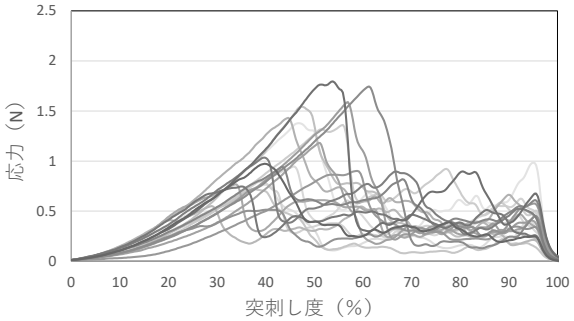

図12 突刺し応力変化（茹で時間300秒）

もやし茹で時間からみた、もやし表皮の平均破断応力の変化を図13に示す。

茹でもやしの表皮の破断応力は、60秒間茹でた時が最大となり、それ以上茹でると少しずつ低下していく傾向がみられ、茹でもやしの表皮の劣化が激しくなることが分かった。突刺し試験でみられる表皮の破断応力が、もやしの食感と相関するならば、至適な茹で時間は60秒間であり、その前後30秒から90秒間の茹で時間において良好な食感が得られると考えられる。

茹で時間を60秒間とした茹でもやしを検体とし、表皮の破断応力と表皮が破断後、もやし内部を侵入していく際の侵入最小応力の関係を図14に示す。

茹でもやしの表皮が破断する際の突刺し度は40～60%、もやし内部の最小応力を示す突刺し度は60～90%であった。これは、茹でることによりもやしの表皮に弾性が生じるとともに強度が上がり、図15のように表皮が破断することなく、茹でもやしが圧縮され、表皮の破断後は、軸中心部付近の柔らかい組織を侵入していく際の応力変化を反映していると考えられる。

太陽化学株式会社おいしさ科学館では、油で炒めたもやしは、内部が柔らかいために、破断するまでの変形が大きく、破断した後はより小さいエネルギーで咀嚼が進む[4]、つまり、もやし表皮はもやし内部に比べて強く、破断後は応力が小さいという結果を得ていたが、茹でもやしでも同様であった。

以上より、茹でもやしの食感は、生もやしでは得られない、もやし表皮に生じた弾性の向上に加え、表皮の破断応力ともやし内部の柔らかい組織を反映する応力の差がもやし特有のシャキシャキ感を生じさせ、両者の差が大きいほど、食感が向上すると考える。

## 4.　まとめ

もやしのケイ素含有量の定量法、およびもやしの食感に関わる物性評価法の確立を行った。前者のもやしのケイ素含有量は、メタホウ酸リチウムによるアルカリ溶解法で試料調製した検体溶液を、原子吸光分光法(フレーム法)により定量可能であり、その際の検出限界と定量下限から本研究の目的とする、もやしのケイ素含有量の違いによる評価が比較可能であることを確認できた。

また、ケイ素添加栽培もやしのケイ素含有量は、栽培日数に比例して増加し、栽培16日経過後にはコントロール栽培もやしの18倍以上となることが確認できた。

もやしの食感に関わる物性評価法としては、十分な量の沸騰水中で60秒間茹でたもやしを検体として、0.8 mm円柱アダプタ(感圧軸)をもやし軸中央部へ突刺す際の応力変化を測定することにより評価可能であり、もやし表皮に生じた弾性に加え、表皮の破断応力と軸中心部付近の柔らかい組織を反映する応力の差が大きいものほど、もやし特有のシャキシャキ感が得られると考えられた。

今回はレオメータによる突刺し試験を行ったのみで、食感に係る官能評価は行っておらず、本検討にて得られたもやしの食感に関する物性評価と官能評価を合わせて実施し、両者が一致するかどうか確認する必要があると考える。

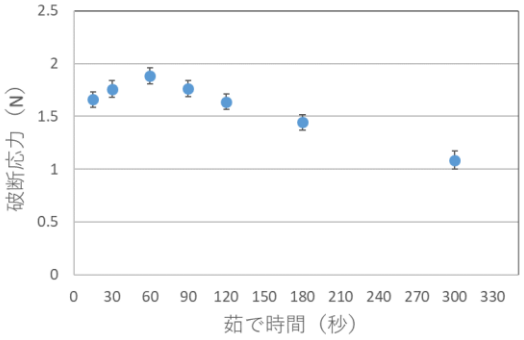


図13　茹で時間と表皮の破断応力の変化

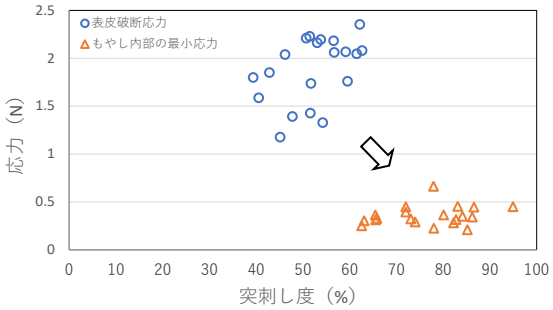


図14　突刺し度からみた表皮破断応力ともやし内部の最小応力

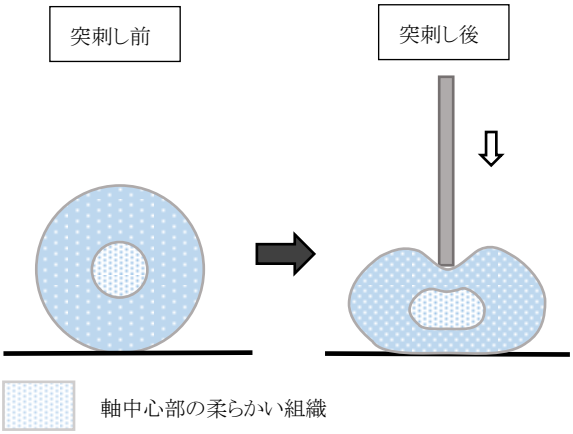


図15　突刺しにより圧縮されるもやしの断面

**【参考文献】**

1) 後藤逸男ら，日本土壌肥料科学雑誌，第62巻，第4号，pp. 628-633, 1991
2) 増本憲考，福岡県農林業総合試験場研究報告，4号，pp. 109-113, 2018-03
3) 堀江秀樹ら，園芸学研究，第3巻，第4号，pp425-428, 2004
4) 太陽化学株式会社おいしさ科学館，“Vol.20 野菜の「シャキシャキ感」～炒めもやしの物性測定と電子顕微鏡画像～”，太陽化学株式会社，2019.1，https://www.taiyokagaku.com/museum/column/20/，(参照 2021.4.1)