

大豆食品を顕微鏡で見る

愛国学園短期大学

非常勤講師 齋尾 恭子

大豆は、良質な蛋白質、油脂および生理的機能性物質を含み、歴史的に日本はもとより、アジアを中心とする国々の食事構成のうえで主要な役割を果たしています。開発途上国においては、畑の肉としての大豆の栄養補強的価値、先進国あるいは経済発展の著しい開発途上国都市部においては、生活習慣に基づく心臓病や脳卒中、癌疾患が増加し、それに影響する大きな要因として食生活を見なおす中で、大豆が新たな脚光を浴びています。日本ではマメに暮らすというように、古くから大豆は健康を維持すると考えられてきました。しかし、大豆は他の菜豆に比べて加工しにくく、煮ただけでは余りおいしくないのが、様々な加工品が生まれました。大豆加工技術は、中国（あるいは朝鮮半島）から飛鳥・奈良時代に仏教の伝来と共に伝えられたものが多いのですが、長い歴史の間に日本に順応し、改善され、今日でも食生活の核のひとつであり、豆腐、油揚げ、味噌、醤油、納豆等々日常に欠かせない食品です。

本誌40号及び44号に、食品利用から見た、大豆を含む豆類の

微細構造やその役割を説明しました。そのシリーズの最後として、いくつかの大豆食品やそれら食品の製造中の変化を光学あるいは電子顕微鏡下で観察した結果を記載いたします。日ごろ親しんでいます食品の持つ構造、それによってもたらされる食味の違いなどを楽しんでいただきたいと思います。

1. 豆腐

豆腐は加熱豆乳を凝固させた約90%の水分をもつ食品です。そのテクスチャーには凝固剤の種類、加熱温度や条件、加水量、水切りの程度、原料の品質など多くの製造条件が関連します。

木綿豆腐と包装（充填）豆腐の製造工程を温度変化から見た違いを下の図1および図2に示します。

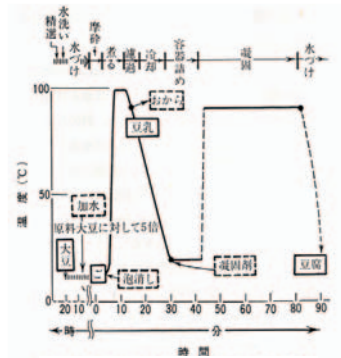
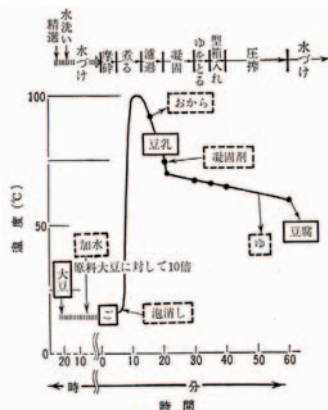
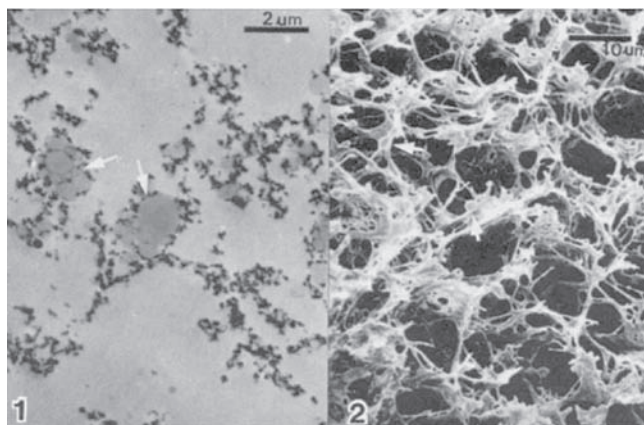


図1 木綿豆腐の標準製造工程図

図2 包装および袋入り豆腐の標準製造工程図

木綿豆腐では、まず大豆を一晩水に浸漬後、水挽きし、最終的に原料に対して10倍量の水を加えて加熱し、濾過しておからを除き熱い豆乳を得ます。その豆乳が70度前後に下がったところで凝固剤（にがり、硫酸カルシウムなど）を添加し、凝固物を余り崩さないように濾布を敷いた型箱に移します。型箱には底、側面に孔があいていますので、上から軽く押しをして放置する間に徐々にゆが流失

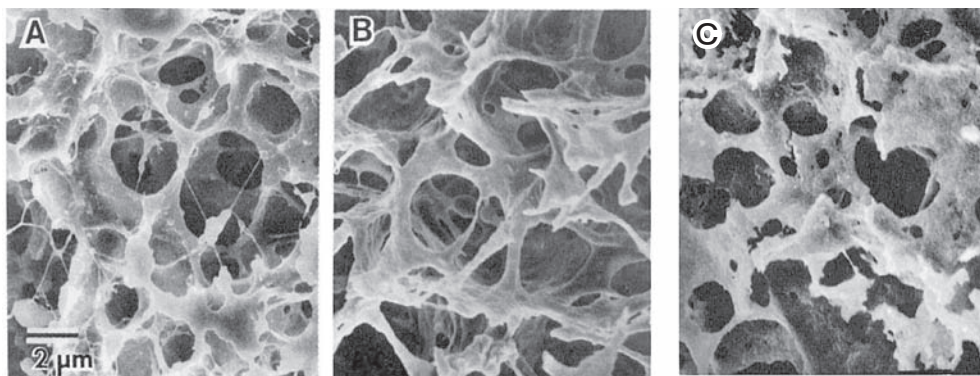
して保形性のゲルになります。この圧搾程度の低い、やや柔らかい食感の豆腐をソフト豆腐として売られた時期もありました。一方、絹ごし豆腐や包装豆腐では、加水量を約5倍（5～6倍の場合が多い）の濃い豆乳をとり、ゆを抜かずにそのまま固めます。包装（充填、袋入り）豆腐では、絹ごし豆腐と同じ濃い豆乳を一旦冷却してから凝固剤を加え、凝固剤の反応速度を低下させた状態で容器に分注・充填して、その容器を約90度の熱湯浴に40～50分つけて加熱



木綿豆腐の透過型電顕像 (1)、走査型電顕像 (2)
 写真1 カルシウム凝固木綿豆腐の微細構造
 クライオスタットという冷却したままの撮影技術なので、油滴も観察が可能である

し、再び冷却して商品とします。凝固剤添加後人の手に触れるなど汚染の少ない状態で再加熱していますので保存期間が長くなります。包装豆腐の凝固には、グルコノデルタラクトン（加熱によりグルコン酸となる、GDLと略称される）を用いることもあります。この場合カルシウムあるいはマグネシウム塩凝固ではなく、酸凝固となります。

さて、そのようにして造られた木綿豆腐を電子顕微鏡で観察しますと、写真1のよ



カルシウム凝固豆腐、(A) 88%水分 (B) 90%水分 グルコノデルタラクトン凝固豆腐、(C)

写真2 堅い豆腐と柔らかい豆腐の微細構造

うになります。木綿豆腐は他の豆腐に比べて堅いといっても86~91%の水分をゲルの中に包み込んでいますので水が占めていたおおきな空隙があり、走査型電子顕微鏡(2)では蜂の巣状の構造に見えます。透過型電顕(1)において、白い矢印で示したのは油滴で、細胞中の脂肪顆粒にあった貯蔵油はこの製造中に細かい油滴となって、豆乳に移行し、タンパク質微粒子のつくる網目構造の所々に固まって付着しています。走査電顕の写真でも倍率をあげると油滴がはっきりと見えます。

硫酸カルシウムを凝固剤として固めた堅い豆腐 (A) と普通の堅さの豆腐 (B) を、電顕下で観察しますと (写真2)、堅い方がタンパク質微粒子のつくる網目がやや細かく、網目をつくる糸がやや太く感じられます。一方、水分91%のグルコノデルタラクトンのみで凝固した豆腐 (C) はカルシウム橋によって結ばれた前記 A, B の豆腐構造とは全く異なり、凝固物がフワッ

と固まったような印象を受けます。実際に GDL 豆腐をテクスチュロメーターという物性測定器にかけますと、硫酸カルシウムで固めたものとプランジャーが侵入するまでに必要な力 (硬さ) は、侵入当初はほぼ同じでもプランジャーは急速に内部に入り、マイナスになる力 (粘り) が全くなく、第2咀嚼の硬さは急激に落ちる (凝固力低下) というパターンを示します。箸で割れてつかみにくいという表現によく当たるわけです。しかし、GDL のプリンに似た甘みと舌触りを好む人もいます。

2. 凍豆腐

凍豆腐は古くは一夜凍りといって、寒い山間地域において、自然の夜間の寒気による凍結、日中の解凍を繰り返すことにより、自然脱水と乾燥を行った食品です (高野豆腐、シミ豆腐など)。明治後期から大正にかけて人工冷凍機を利用しての凍豆腐造りが長野県を中心に新興し、工場規模で製品がつくられるようになりました。図3

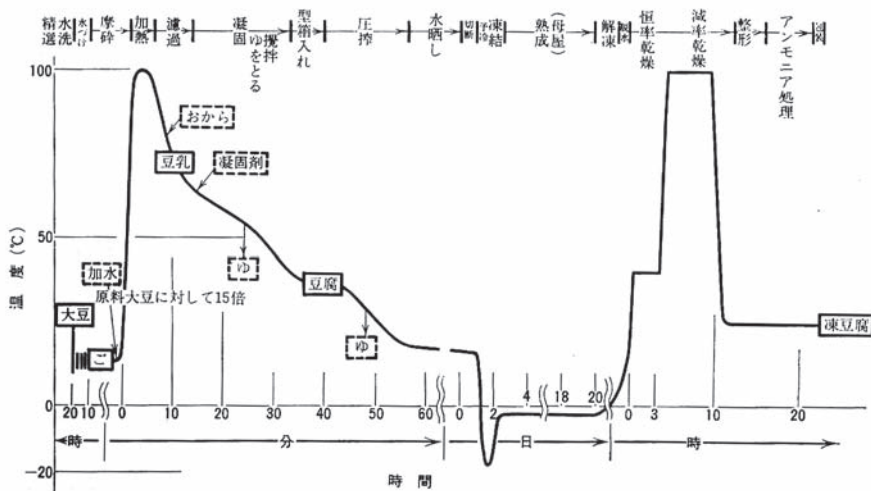
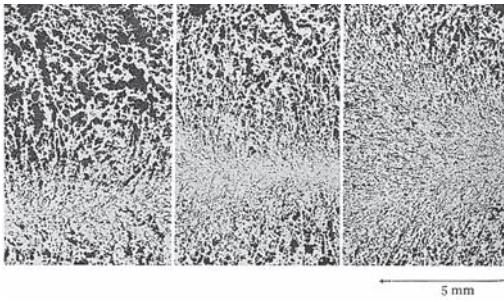


図3 凍豆腐の標準製造工程図



-5度凍結 -10度凍結 -15度凍結
 写真3 凍結温度の違いによる凍り豆腐の組織の差異（凍結直後）
 白い部分が豆腐で、黒い部分が氷結晶の痕跡、四角い豆腐の中心部が凍結が遅れ濃度が増加

の製造工程図に示すように、凍豆腐の場合は、15倍の比較的薄い豆乳を攪拌し続けながら塩化カルシウム（反応性が速い）を用いて凝固します。凝固してきた凝集浮遊粒子は、他の豆腐のような全体が大きく固まるのとは違い、型箱に入れて圧搾するうちに寄り集まり付着して、水分の少ない堅い

生地になります。それを水さらし後、切断し、冷風を吹き付けて急速凍結させます。氷結晶生成帯である-1~-5度の温度をどの程度の時間で通過するかによって最終製品の肌目が決まります（写真3）。早く氷結晶が出来れば氷結晶は細かく、後で抜ける空隙が小さくなるので、肌目が細かく、口当たりが柔らかくなります。凍結後、-1~-5度の冷蔵庫の中で約20日放置します（母屋）。その間にタンパク質は変性して解冻後容易に脱水できる組織をつくります。凍結熟成後、アルカリ性の塩類（かん水など）につけてから、51~53%まで脱水後、湿度と温度を調節しながら10時間程度かけて乾燥します。

この凍豆腐を電顕で観察し、写真4に示しました。

左2行はクライオ走査型電顕使用

3行目は凍結乾燥後走査型電顕 右行は透過型電顕

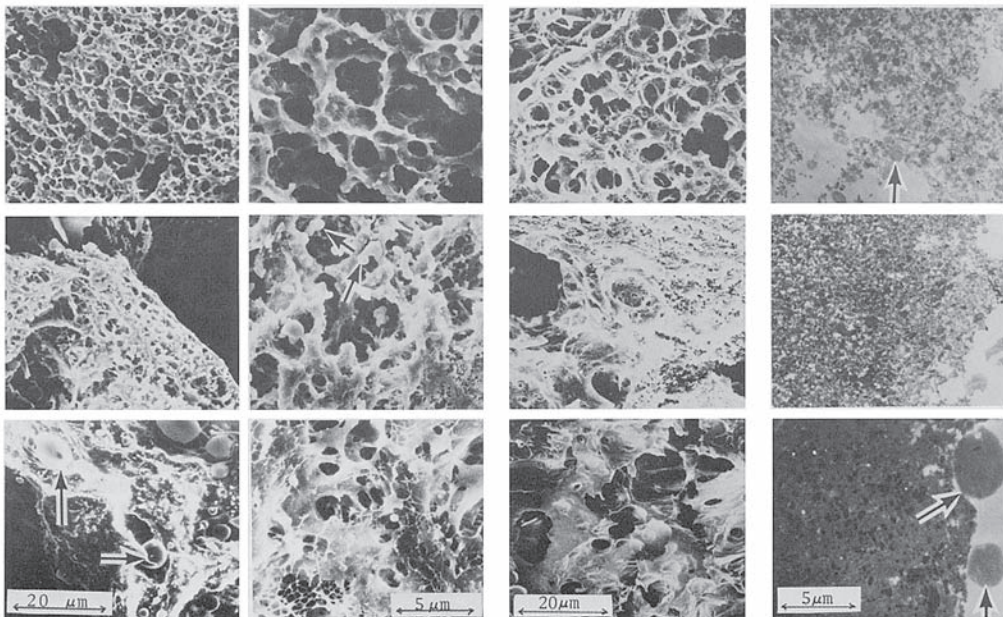


写真4 凍豆腐製造中の微細構造変化（倍率に注意）
 上段1行目は凍結前、中段は凍結直後、下段は母屋終了後の豆腐組織

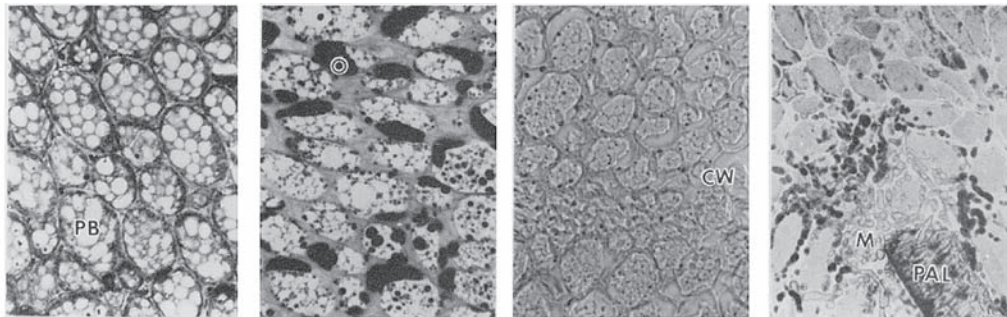
凍豆腐は凍結前には網目が木綿豆腐とは比べて粗いながら、全体に広がっていますが、凍結してゲル中に氷結晶が生成されると、ゲル部分が濃縮し、大きな油滴（黒い矢印、ゲル中の黒い点は油）は空隙に押し出されます。クライオ走査型電顕では油滴が明瞭に観察されますが、凍結乾燥した試料を観察しますと、油は前処理中に溶媒に溶け、観察が出来ず、組織もやや変形しています。

3. 味噌

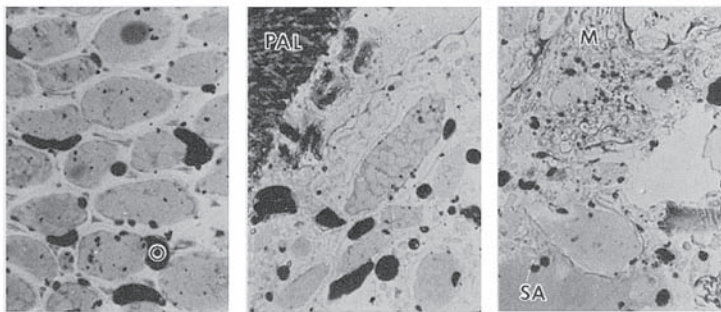
味噌には豆味噌、米味噌、麦味噌があり、豆味噌は大豆を蒸してからみそ玉をつくり、それに別に作った種麴と香煎を加え、豆麴とし、そこに塩と水を加え、熟成して

造ります。一方、米味噌と麦味噌は米あるいは小麦を蒸してから種麴を植え、米麴あるいは麦麴をつくり、それに蒸した大豆を加え、水と塩を加えて、発酵、熟成させて造ります。米味噌が全国消費量の80%近くを占めます。しかし味噌の種類には地域性が根強く残っていて、手前味噌という言葉があるように製法は地域により微妙に異なり、また発酵に関与する菌が土地により変化しますので、製品の味、色など様々です。この写真5に示しましたものは信州の会社との共同研究で造られた豆味噌製造中の変化を光学顕微鏡で観察しました。

蒸煮後に大豆の細胞中の油は大量に細胞



蒸煮前大豆 蒸煮後（細胞間隙の黒いのは油滴） 種麴を摂取直後 大豆麴



熟成1ヵ月後 熟成2ヵ月後 熟成3ヶ月後

写真5 豆味噌の製造中の微細構造変化の光学顕微鏡による観察

の外に大きな凝集油滴となり押し出されま
す一方、細胞内のタンパク質顆粒などは加
熱変性しつつも元の場所に残っているよう
に見えます。種菌を摂取、麴菌、酵母やそ
の他の菌の共同作用で熟成中に内部の成分
は徐々に見分けがつきにくくなります。凝
集油滴（油はオスミウム染色で黒色）は、
高倍率によって部分的に観察しますと、多
くは変質し、写真6のように、鱗片状か羽
毛状に見え、元の油とは異なることがわか
ります。

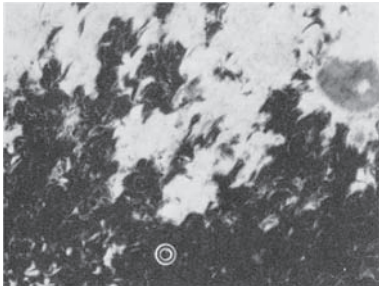


写真6 油滴部分の熟成3ヵ月後の変化

4. 組織化タンパク食品（TVP）

日本では約500万トンの大豆を消費し、
それから65万トンの大豆油と370万トンの
脱脂大豆が生産されます。大豆油の75%は
食用となり、日本人が消費する植物性油の
29%を占めています。脱脂大豆は89%が動
物用飼料となり、食品や他の用途には僅か
11%しか用いられていません。植物性タン
パクは、日本農林規格ではコムギタンパク
も含み、粉状、粒状、繊維状に大別されま
すが、大豆の場合には粉状には、脱脂大豆
粉、分離大豆タンパク、濃縮大豆タンパク
があり、粒状は組織化した挽肉状の製品
で、繊維状はさらに繊維性をもつように加

工されています。その消費は1980年代から
生産量が増え、大豆タンパクは、惣菜類の
製造に、あるいはその栄養的効果などから
保健用食品に採用されて、生産量が年間4
～5万トンを維持しています。

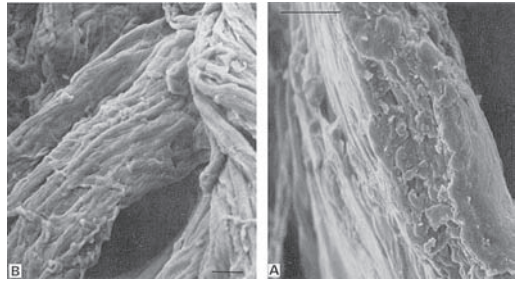
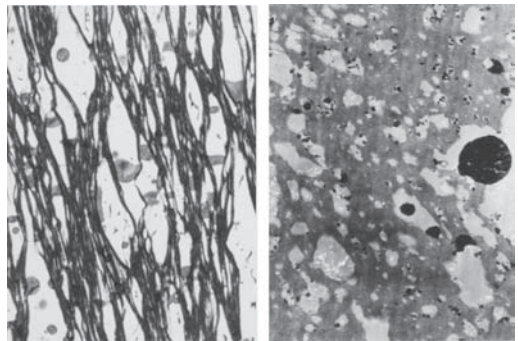


写真7 繊維状大豆タンパク食品



押し出し物の光顕観察 左一部の透過電顕観察
写真8 油を10%添加した二軸エクストルダ―押し出
物の構造

挽肉状食品を脱脂大豆から製造するの
に、一般には一軸エクストルダ―が使用さ
れます。しかし、より組織化性の強い、し
かもある程度の油（油性の食材）を混合し
た場合は、二軸エクストルダ―を用いるの
が有利です。写真7、8は脱脂大豆に10%
大豆油を混合して押し出したものの微細構
造で、凝集油滴は繊維間隙に散在し（写真8
左光顕写真）、各繊維部分にも黒い細かい
油滴が見えます（写真8右光顕高倍率写

真)。

最後に

現役で大豆研究に明け暮れる頃、東北大学教授故市川収著の〈食品組織学〉という本を目にしました。この本の中では様々な食品や食材を光学顕微鏡下で観察し、本中の美しい画像は、全てまぜこぜにしてしまう化学分析とは異なり、動・植物の可食部の器官が、保蔵や加工中にどのように変わるかをまさに目の辺りに示していました。市川先生は病理学、家畜形態学の専門家で、扱う材料や興味の方向は異なっていましたものの、このような研究手法に強く惹かれ、その後の研究の中で並列的に食品の微細構造を見る努力をしてきました。幸いなことに、市川先生の研究時期以後、電子顕微鏡などが目覚ましい技術開発により比較的容易に取り扱うことが可能になりましたので、より微細な現象を観察することも可能でした。しかし、私の専門はあくまで加工化学であり、食品組織研究はそれを補うための手段でしたので、研究の目的により必ずしも手法が統一していません。その意味で本誌に取り上げた写真類にもその欠点がある

事をおわびいたします。退職時ダンボール一杯の使用・未使用の電顕、光顕などのフィルムや試し焼き写真などを捨てきれず、いまだ整理できない状態にいる私です。

参考にした、あるいは引用した主な文献

- 1) 渡辺篤二、齋尾恭子：化学と生物、11(10), 631, 1973 豆腐を考える
- 2) 渡辺篤二、齋尾恭子、橋詰和宗：大豆とその加工 I, 建社 1987
- 3) K.Saio: Scanning Electron Microscopy III, 553, 1981, Microstructure of Traditional Soybean Foods
- 4) K.Saio: Food Microstructure, 3, 65, 1984, Microstructural Changes in Winged Bean and Soybean during Fermentation into Miso
- 5) K.Saio, S. Gwiazda and A. Noguchi: Food Microstructure, 6, 57, 1987, Microstructural Studies of Textured Vegetable Products
- 6) 市川収：食品組織学（組織化学的食品構造論）、光生館、1966