

特集「豆腐好きが語る豆腐の話」の巻頭には、豆乳・豆腐研究の第一人者として、現在も研究を続ける岩手大学名誉教授の小野伴忠先生にご寄稿をいただきました。半生をかけた大豆・豆乳・豆腐に対する研究成果を、若き日に研究を始めた頃から振り返っていただき、豆乳・豆腐育成のメカニズムを解き明かす一文です。『月刊ソイフードジャーナル』としては久々の科学的エッセイ。どうぞ、お楽しみください。

胸に

豆乳・豆腐研究の顛末

岩手大学名誉教授 小野伴忠

私が大豆関連の研究に興味を持ったのは、農水省から来た同僚で敬愛していた先生が、留学中にトリプシンインヒビター欠失大豆を発見したという報に接した頃からでした。その発見は世界的快挙だと言われ、地方大学でも最先端の地に留学し、やればできると思わせてくれました。修士修了の若輩で、研究教育の何たるかも知らないまま助手となった私は、一人前になるには先ず博士号を得、そして将来は、留学したいと思っていたのです。

昭和40年代の日本では、先端研究のできる施設は少なく、施設の共同利用が推奨されていました。そこで、その研究員制度を利用して大阪大学蛋白質研究所や東京大学の研究室に出かけ、勉強する機会を得ました。私の成長を考えられたのか、教授は快く出して下さいました。昭和52年に博士の学位を得、次は世界へと研究の夢をふくらませたのです。

この当時の私の研究分野は「牛乳タンパク質とそれがリン酸カルシウムと作る巨大会合体、カゼインミセルの構造」でした。世界を見るには、文献を読むだけではだめで、留学も必須であると考え、同じ研究分野で活躍しているカナダ、米国、ニュー

ジーランドの先生のもとに出かけました。先端の地で学んだこともあり、国際学会での発表や国際誌への投稿も行いました。しかし、牛乳を現地ですんだことで、牛乳に関する産業界研究の歴史的深さが、欧米と日本で大きく違うことを悟られました。

自分の立ち位置が分かるにつれ、日本で研究するには何が良いのか考えるようになりました。ちょうどその頃、大豆を研究していた先生は教授となり、私と同世代の活発な助教が大豆タンパク質研究のメッカ、東北大から来ていました。彼は私と同様に農芸化学出身なのですが、リポキシゲナーゼ欠失大豆の育種に興味を持ち、研究していました。同世代でもあり、一緒に飲むなど、友達となり、大豆の面白さや将来を論議し、多くを教えられました。

日本では古くから「豆で元氣」という言葉があります。その当時日本人が食事から摂るタンパク質は60〜70%が米からで、その制限アミノ酸はリジンです。それを補うにはリジンの豊富な大豆が適していて、日本人の健康を支えていたのです。大豆の利用は、納豆、味噌、醤油、豆乳、豆腐、凍り豆腐と古くから日本の産業として成り立ち、研究も当然なさ

れていると思っていました。

私は牛乳を研究していましたが、豆乳も同様に白く濁っていて、良く似ています。そこで豆乳がなぜ濁っているのか調べてみますと、古くから研究されているはずなのに**学術的な研究は見つからなかった**のです。そこで始めは卒業学生と、後には助教、教授となり、大学院の学生や留学生と一緒に研究をすることになりました。

豆乳生成の研究

豆乳は、水で膨潤した大豆を磨砕し、加熱し、オカラを除くことによって調製されます。磨砕してオカラを除いたものでも、それを加熱したのも同様白く濁っています。濁っているものが何かを見るために、遠心機による分離を試みました。

濁り物質のサイズは小さく、超遠心分離機の使用で分画可能でした。加熱前だと大量の沈殿が生じ、沈殿と上澄みに分画され、油はほとんど分離しませんでした。加熱後だと油の層、澄んだ中間層、沈殿の3画分に分けることができました。加熱前では油がタンパク質と結合して一緒に沈殿し、加熱すると油がタンパク質から遊離し、浮上することが

大豆研究で世界に、志を



小野伴忠先生
プロフィール

1944年、秋田県に生まれる。1969年、岩手大学大学院農学研究科農芸化学専攻修了。同年、岩手大学農学部助手。1970～75年、大阪大学蛋白質研究所共同研究員、東京大学農学部学振流動研究員を経て、1977年、農学博士（東京大学）。1982～83年、プリティッシュコロンビア大学（カナダ）、ロマリダ大学（米国）、酪農研究所（ニュージーランド）に留学。1990年、岩手大学農学部及び連合大学院助教授、1998年、教授。2010年、定年退職、同年、岩手大学名誉教授。2004年、日本酪農科学会賞、2007年、日本食品科学工学会賞。

分かりました。加熱による変化を理解するため、この当時の大豆タンパク質についての知見を先ず解説します。

大豆タンパク質のほとんどは水可溶性で、その約70%は7Sと11Sタンパク質です。7Sは3種（ α 、 α' 、 β ）のサブユニット、11Sは数種のサブユニットからなります。加熱によりいずれも変性し、11Sはアシディックとベーシックのペプチドに解離します。そこで、加熱前後で分画したそれぞれの成分を電気泳動などで測定したところ、加熱前では沈殿に11Sが多く、上澄みに7Sが多いことが

ら、11Sが油に結合していることが分かりました。加熱後では、沈殿に11Sのベーシックと7Sの β サブユニットが多く、変性したタンパク質が新たな巨大体会を形成していることが分かりました。我々はこれをタンパク質粒子と命名しました。上澄みには7Sの α 、 α' サブユニットや11Sのアシディックペプチドが多く、溶解した状態で存在します。浮上した油画分には2個の未知タンパク質が見つかりました。これらはその後油滴球を覆うタンパク質、オレオシンであることが分かり、油滴球はオイルボディであることが明らか

となりました。豆乳生成の概略を図1（次頁）に示します。

「豆乳生成の論文を世に出すと、研究費を援助してくれる企業や研究したいという留学生候補が現れました。中国の豆乳製造会社の社員で中国某有名大学修士課程を出た英才でした。私は助教教授でしたので、博士課程学生の指導教員にはなれませんが、近い分野の先生を指導教員に

巻頭寄稿 豆腐好きが語る 豆腐の話

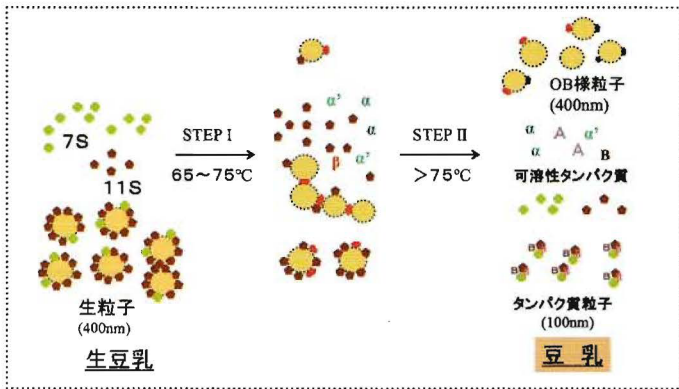


図1 生豆乳から加熱により豆乳ができる概念図

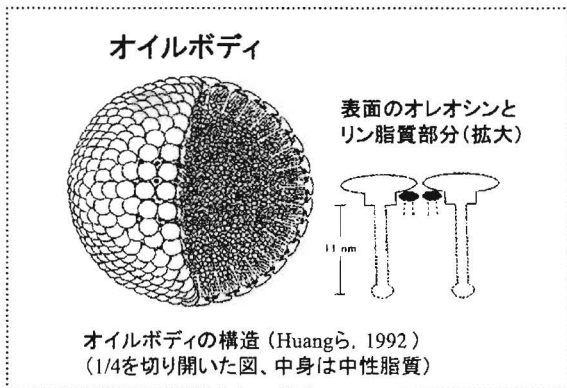


図2 油滴球、オイルボディの構造

お願いし、博士課程に国費留学生として迎えることができました。彼は日本語が上手で驚きました。この頃、中国と日本は良好な関係で、彼は大学で第一外国語に日本語を取ったそうです。最後には博士論文も日本語で書いています。彼が留学生として来たことで、油滴球がどのような役割を演じているのか研究を進めました。大豆は油糧作物であり、油をたくさん含んでいます。にもかかわらず、豆腐、きな粉、味噌、納豆で油を感じることはありません。研究を始めた豆乳は、確かに油を含んでいます。その豆乳からできる豆腐は煮ても焼いても油が出てくることはあ

りません。なぜなのでしょう？油滴球が何でできているかを分離・分析し、多くの論文と対比した結果、オイルボディであることが明らかとなりました。図2にオイルボディの模型を示します。オイルボディは油滴球表面をリン脂質が覆い、その上から量針のようなオレオシンタンパク質が全面をさらに覆った構造を取り、あたかも巨大なタンパク質球のような形をしています。ですから性質上は巨大タンパク質なのです。

豆乳から豆腐は どのようにできるのか

次に、豆乳から豆腐がどのようにできるのか、このオイルボディも含めて研究しました。この研究のいきさつを詳しく述べると複雑で長くなりますので、結論を図3に示し、解説します。豆乳にはリン酸基を持つ糖、フィチンが含まれていて、凝固剤(ニガリ(Mg²⁺)やスマシコ(Ca²⁺))を添加すると、先ずこのフィチンに結合し、H⁺イオンが放出されPH低下が起こり、オイルボディ表面の負

電荷が他の物質よりも早く中性に近づきます。すると、オイルボディ表面にタンパク質粒子が結合し、この

タンパク質粒子に覆われたオイルボディは互いに結合するようになり、水の塊を囲んで結合しボールの皮状の壁を作り、それらが多数繋がってスポンジ状になります。さらに可溶性タンパク質もその上に沈着し、スポンジ状のしつかりとした豆腐になります。

そのため、豆腐中の油滴球はリン脂質、オレオシンタンパク質、タンパク質粒子、さらに可溶性タンパク質に覆われます。物理的にタンパク質で三重に覆われるので、煮ても焼いても豆腐からは油が出てこないわけです。退職間際に撮った電顕写真(2010年)ですが、この豆腐を瞬間凍結、凍結乾燥し、走査型電子顕微鏡で観察したものを図4に示します。油滴球をタンパク質が覆った粒状物質が互いに結合し壁を作っていることが分かります。

オイルボディは大豆自体に含まれる油ですが、タンパク質粒子は豆乳調製過程の加熱で生成したものです。これがどのように生成し、豆腐にどのようにかわっているのか、さらに検討しました。

この粒子形成には前述のように7Sタンパク質のβサブユニットと11Sタンパク質のβーシツクペプチド

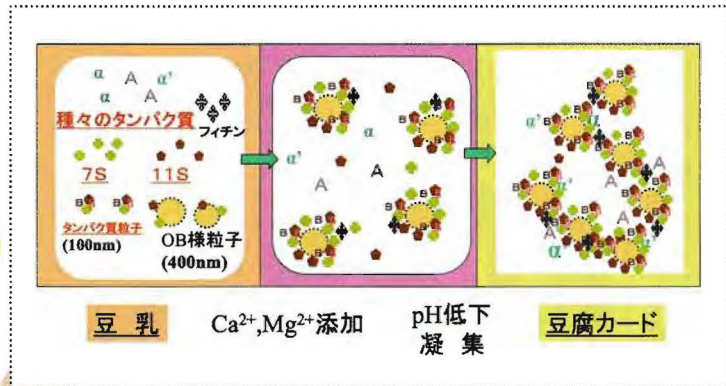
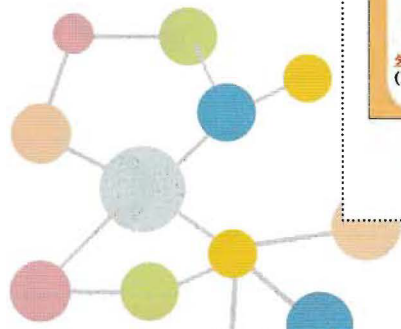


図3 豆乳から豆腐ができる概念図

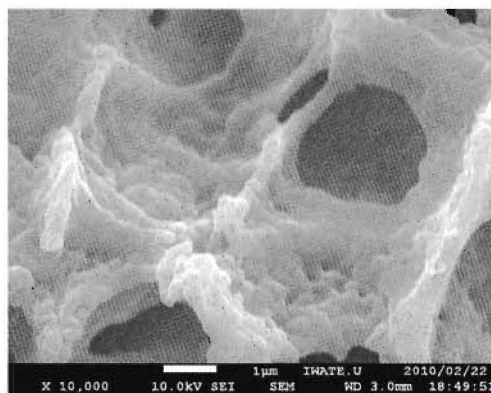


図4 豆腐の走査型電子顕微鏡写真

が関係しています。これらのタンパク質を単離し合わせたのでは自然の豆乳とは異なってしまいます。そこで、11S欠および7S欠の大豆を適当な割合で混合できれば、豆乳中での各タンパク質とタンパク質粒子の関係が見えてくるはずなんです。この頃、大豆研究室の友人は農水省の作物研究所に転任していて、これら欠失大豆の情報を教えてくれました。彼はリポキシゲナーゼ欠失大豆の品種固定に成功し、話題の人となっていました。11S欠の大豆は長野県の農業試験場、7S欠の大豆は東北大学の農業試験場で作られています。それぞれの試験場を訪ね開

発者と会い、種子をいただき共同研究の形で研究が続けられました。11S欠失大豆と7S欠大豆を混合し、図5に示すように11S対7Sが2対7から7対2までの豆乳を作り、タンパク質粒子量を測定しました。すると11Sが多いほど粒子タンパク質が多くなりました。

次に、それらの豆乳で豆腐を作り、硬さを測ったところ、11Sが多いものほど硬くなるのが分かりました。豆腐の生成は前述したように、オイルボダイの表面に先ず粒子タンパク質が結合することから始まります。この表面に沈着する粒子量が多いほど油滴球の皮部分がしっかりしたものとなり、それらが結合しできる豆腐は硬くなるものと考えられました。

この頃、大豆研究のメッカであった東北大では、大豆の健康機能性に注目し、大豆を世界にアピールしようと、世界大豆研究会議の日本開催を目指していました。学会の東北支部立ち上げにも協力していたこともあり、国際会議(2000年)への参加を要請され、大豆から豆乳・豆腐の形成について発表することができました。

この1年前に中国からの留学生は

無事博士号を得て、中国に帰国していました。彼は現在、中国農業大学の教授であり、大豆研究の世界的研究者の1人となっています。

この会議の後、農水省作物研究所の部長になっていた友人から、大豆利用の面から育種をサポートして欲しいとプロジェクトへの勧誘を受け、参加することになりました。この頃、私は教授になったばかりで、研

巻頭寄稿 豆腐好きが語る 豆腐の話

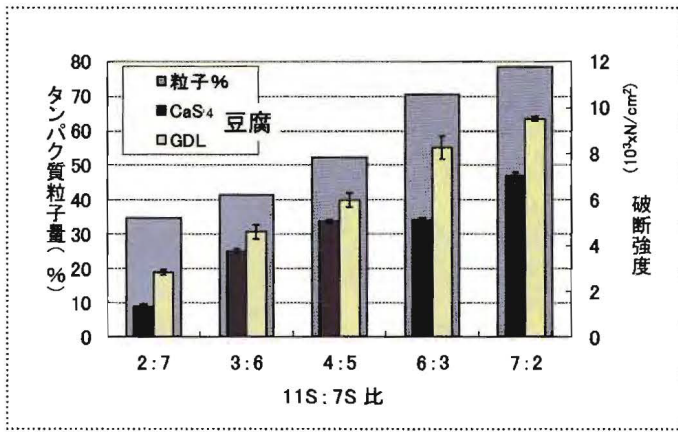


図5 11S/7S タンパク質比の異なる豆乳のタンパク質粒子量と豆腐の硬さとの関係

究費集めに苦勞していましたが、国際会議の効果もあったのか、複数の企業から研究生や奨励金の申し出がありました。また、日本人の博士課程進学希望者も現れ、次の段階へと進むこととなります。

豆腐に適した大豆とは

農水プロジェクトへの参加で種々の大豆が使用可能となり、豆腐に適した大豆とはいかなる大豆なのか、研究を進めました。豆乳から豆腐への凝固は、凝固剤添加によるPH低下が引き金となっています。

PH低下はフィチンへ凝固剤(Mg^{2+} や Ca^{2+})が結合し、 H_2O が放出されることにより起こります。大豆中のフィチン含量は品種や栽培土壌により変化することが知られていますが、フィチンの定量はこの当時複雑で手間のかかるものでした。そこで、赤外線吸収を用いた方法を考案し、多数の試料を簡便に扱えるようにしました。

畑地と水田転換畑で収穫された27種の大豆のフィチン含量を測定したところ、畑の影響

を受けにくい品種と大きく影響を受ける品種がありました。影響を受けない品種は古くから豆腐用大豆として使用されているもので、影響を受ける品種は豆腐に適さないとされている大豆でした。これらのことは、豆腐用大豆の育種上重要な点を指摘できたと思います。

豆腐の硬さと味

豆腐にとって硬さは味覚上、用途上重要なポイントとなります。豆腐は豆乳中の巨大粒子が水塊と水塊の間で壁状に結合して水を抱き込みスポンジ状に固まることから、牛乳から作られるカードと同様の構造をとっています。そのため圧縮すると水を排出し様々な硬さのカードを形成することができます。圧縮せず凝固剤濃度一定での豆腐の硬さは、豆乳中の粒子タンパク質量に比例します。そして粒子タンパク質量は11Sタンパク質含量に比例します(図5)。

一方、凝固剤濃度を上げれば硬さはある一定量まで増加し、それ以上で一定となります。11S含量が少なくても凝固剤濃度を上げれば、硬い豆腐は作れます。

では、11S含量が異なる豆乳から同様の硬さの豆腐を凝固剤濃度を

えて作った場合、豆腐の何が違うのでしょうか。

凝固剤はフィチンに結合し、PH低下を起こし、添加量が増えるとPHもさらに下がります。そのため、11S含量の多い豆乳ではPHがあまり下がらずに凝固し、11S含量の低い豆乳ではPHがさらに下がってから凝固することになります。

かつての豆腐では余剰な凝固剤を抜くために水さらしをしました。この場合、凝固剤量およびPHはそれほど問題にならなくなります。しかし、現在の豆腐作りでは水さらしは行いません(編集部注、現在でも水さらしを行う豆腐もあります)。豆腐を料理に使うのではなくそのまま食べた場合、凝固剤量が多いほど、またPHが低いほど美味しくないとが分かりました。

これらの実験は私の退職直前となり、農水省には報告書としてまとめましたが論文にはなっておりません。今回は紹介しませんが、タンパク質粒子がどのように形成されるか、脱脂大豆にいろいろな油を入れて豆腐を造ったらどうなるかなど、もしまた機会があれば紹介したいと思います。(了)