

## 総説特集：伝統食品の科学—ルーツ、おいしさ、機能—3

沖縄の伝統発酵食品—豆腐よう<sup>1</sup>の歴史と機能成分\*

安田 正昭\*\*

(琉球大学・農学部・生物資源科学科)

伝統食品はその地方でとれた農水産物を原料として地域の歴史、食文化とのかかわりの中で発展し、古くから人々に親しまれている。発酵食品は微生物のパワーを利用して農水産物から作り出される食品であり、発酵過程で原料にはもともと存在していなかった風味に、独特の美味しさと香り、そして口当たりの何ともいえない好ましい感覚が付与される。また、発酵食品は発酵過程で単に美味しさのみではなく、われわれの健康保持に役立つ成分も醸成されていることが最近の研究で明らかになっている。沖縄の伝統発酵食品には泡盛、豆腐よう、味噌、塩辛類などがある。ここでは、沖縄のユニークな豆腐発酵食品である豆腐ようについて解説させていただく。

キーワード：豆腐よう、発酵食品、植物チーズ、紅麹菌 (Genus *Monascus*)、機能成分

## はじめに

豆腐よう<sup>1</sup>は、室温で乾燥させた木綿豆腐を麹と泡盛を含むもろみに漬け込んで熟成させたもので、わが国では他に類例をみない沖縄独特の豆腐発酵食品である。豆腐の発酵食品<sup>2</sup>は中国（豆腐乳 (*tou-fu-ru*))、タイ (*tau-hu-yee*)、ベトナムなどにも分布しているが、日本（本土）や韓国にはほとんど存在していない。中国やタイ国産のものは塩辛く、匂いや味にくせがあるのに比べて沖縄の豆腐ようは、マイルドな風味を有し、なかなかの珍味である。豆腐ようは一般に塩味が薄く、甘みがあり、組織がなめらかなソフトチーズのようなテクスチャーを有する嗜好食品で、ウニのような風味をあわせ持つユニークな植物性タンパク質食品である。このものは沖縄では、泡盛の肴として、あるいはご婦人の茶請けとして珍重されている（図1）。豆腐ようは高級グルメ食品として琉球王朝時代の王族や上流社会でのみ珍重・賞味され、庶民にはほとんど伝えられなかった。本発酵食品は今日に至るまで、琉球王朝と関係の深



図1 豆腐ようと琉球泡盛。

い首里や那覇の特定の家庭でのみ門外不出の秘伝として、人知れず細々と継承されてきたのである。

豆腐ようは、琉球王朝時代の食文化をイメージした商品として最近市販され、人々に知られるようになった。そのようなわけで、豆腐ようは沖縄の伝統

\* Recieved June 11, 2007; Accepted July 5, 2007

Tofuyō is an indigenous fermented food in Okinawa, Japan; Its history, chemical characteristics and physiologically functional properties

\*\* Masaaki Yasuda, Department of Bioscience and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa 903-0213, Japan; yasuda@agr.u-ryukyu.ac.jp, Fax+81-98-895-8807

的な発酵食品ではあるもののニューフードといえよう。本稿においては豆腐のような歴史とサイエンス、特に、その発酵、おいしさと機能性について紹介したい。

## 1. 豆腐のような歴史

豆腐のような歴史とその文化に関する報告はきわめて少ない。著者はその原料となる豆腐の伝来、中国の腐乳を手がかりにその伝来と“豆腐よう”の起源について考察した<sup>1)</sup>。

### 1.1 豆腐の伝来

豆腐は豆腐のような重要な原料である。そこで、豆腐の起源とその伝来について調べた。市野と竹井<sup>2)</sup>は東アジアの豆腐の系譜に関する詳しい報告を行っている。それによれば、豆腐の起源に関してこれまでに二つの説が提示されており、一つの説は篠田統氏の説(1968)で、「乳腐説」(南北朝から唐代にかけて北方遊牧民族が乳腐をもたらし、漢民族は乳腐の代用品として豆腐を造ったという説)であり、他の説は阿部孤柳氏の説(1974)で、「調味説」(大豆の食べ方として、豆乳が最も消化率が良いことを経験的に知り、これに粗製の塩を加え調味した。この粗製の塩に含まれるニガリ分で豆乳が凝固し始め、急速に分離していくことを発見したという説)であるが、いずれも根拠があり、両説とも豆腐発生の要因となったとしている。

このようにして作りだされた豆腐はいったい何時頃から出現したのだろうか。明代に李時珍が書いた『本草綱目』(1596)によれば、豆腐は今から約二千年前の中国で「漢の時代に淮南王、劉安によって発明された」ことになっている。しかし、当時、淮南王によって編纂された『淮南子』(漢代)や現存する世界最古の農業生産大百科辞書といわれている賈思勰の『齊民要術』(北魏、535)にも豆腐の記載は見られず、それ以降、唐代に至るまで豆腐の記録が全く見られないことから、それは伝説であるとされている。篠田<sup>4,5)</sup>は、膨大な中国文献の検討により豆腐の歴史を論考している。それによれば、「豆腐」の文字が初めて記録として見られるのは中国で、五代末期一宋初期に陶穀が書いた『清異録』であり、その発明は唐の時代中期〔8～9世紀〕以降であろうと推論されている。宋代においては、それは安価

な肉の代用品としてかなり普及していたらしい。その後、明代、清代と歴史が下るに伴い、豆腐は中国各地に広く普及され、各種の豆腐料理やその加工食品が発明されるようになり当時の人々の食卓を賑わしていたようである。

わが国における豆腐の伝来時期は必ずしも明確ではないが篠田<sup>4)</sup>によれば、豆腐は院政末期に中国から僧侶の手によって持ち込まれ、寺院の食べ物〔奈良春日神社記録(1183年)〕として発達したが、室町時代以降に広く普及されたといわれている。その後、この豆腐は身分階級の区別なく人々に親しまれ全国的な産品として普及され、数多くの豆腐料理やその加工品が創出されるようになった。江戸時代に入るとさらに盛んになり天明3年(1783)には有名な『豆腐百珍』(何必醇)が、天明4年にはその続編も公刊され、豆腐料理が集大成されるようになった。

さて、豆腐の製造法は、いつ頃、どこから沖縄に伝わったのであろうか?豆腐伝来の時期やその伝来ルートに関しては、琉球王府が1713年に編纂した『琉球国由来記』によっても不明としている。そこで、著者<sup>1,6)</sup>はその手がかりを得るために冊封使録関係資料を調べた。「冊封使」(さっぽうし)とは、琉球国王の即位に際して中国皇帝から派遣され、勅刺を持参した使者のことをいい、帰国後皇帝に提出した報告書が「冊封使録」である。現存する最古の冊封使録といわれる陳侃の『使琉球録』(1534年)に豆腐の記述は見られない。豆腐の原料に用いる大豆については「菽」としてその存在が記録されていることから、その当時大豆の栽培が行われていたことが示される。それ以降の冊封使録には「黄豆」あるいは「大豆」とも書かれ、ごく普通に見られる農産物の一つであったことがわかる。沖縄の豆腐が記録に登場するのは17世紀以降のことである。汪楫の『使琉球雜録』(1683)によれば、豆腐は当時首里や那覇の市場に出回っており、その製造法はかなり普及していたことがわかる。それ以降の冊封使録や18世紀頃の祭祀の記録書などを調べると豆腐や豆腐料理に関する記述が多く見られるようになる。このように、豆腐はその当時の人々の行事食として、あるいは貴重な食料であるばかりでなく冊封使の食料としても重要な役割を担っていたようである。

豆腐の伝来ルートを検証するには、その製造法を

## 沖縄の伝統発酵食品

比較することも一つの考え方である。中国（東北、北京、天津、上海、福建、雲南、その他）および沖縄における豆腐の伝統的な製造法は、今日に至るまで「生しぼり法」（大豆を浸漬、磨砕したのち呉汁にし、それを濾過して生の豆乳を得る。この生の豆乳を加熱し、ニガリを加えて豆腐をつくる方法）である<sup>1)</sup>。それに対して日本本土で一般的に行われている豆腐の製造法は「煮とり法」（呉汁を加熱した後に豆乳を得る。この豆乳をさらに加熱し、ニガリを加えて豆腐をつくる方法）である。古文献〔人見必大『本朝食鑑』（1695）、寺島良安『和漢三才図会』（1713）〕によれば、17～18世紀にはすでに「煮とり法」が採用されていたことがわかる。従って、製造技術の類似性から見れば、沖縄の豆腐づくりは中国から直接伝来した可能性が極めて高い<sup>16)</sup>。当時は、中国からの冊封使の来琉、琉球王府と中国との交易および人、物の往来も盛んであって、しかも、中国側の窓口が福建であったことなどから、この「生しぼり法」による豆腐製造法は福建から沖縄にもたらされ、現在に至ったものと推定される。また、その伝来時期については次のように考えられる。すなわち、1534年の『使琉球録』に豆腐の記載が見られず、『使琉球雑録』（1683）の頃になるとそれが市場で販売される程に広く普及されていた状況を考えて合わせると、沖縄における豆腐伝来の時期は、17世紀初頭には導入されたものと推定される。なお、豆腐製造の技術は琉球王府の「お料理座」や久米村（クニンダ、中国の帰化人町で、当時の沖縄の政治・経済・文化に大きく貢献した地域）に導入されたのであろう。

## 1.2 腐乳の起源

豆腐のようなルーツは中国の腐乳であると考えられる。そこで、腐乳の起源について調べた<sup>1)</sup>。現在では腐乳、乳腐、豆腐乳と呼ばれている食品は、いずれも豆腐の発酵食品で同じものを指しているが、もともとの乳腐は乳製品を指していたらしい。篠田<sup>5)</sup>によれば、唐の時代には北方民族との交流が大きかったために乳製品がのび、その中の「乳腐」も唐の人々の間に広まっていたようである。また、明の時代においても乳腐は乳製品を指していたらしく、李時珍が書いた『本草綱目』（1596年）によれば、この乳腐は獣乳を酢で固めたカード状のもの（乳餅）

としており、豆腐を発酵させた現在の乳腐とは異なっていたことがわかる。腐乳または乳腐とも呼ばれる豆腐の発酵食品が何時頃から出現するようになったか定かではない。中国で、農耕文化が栄え、いろいろな大豆加工食品が生み出され、その中に豆腐も発明された。この豆腐が広く普及されるに従い、豆腐の保存性を高める工夫も行われたに違いない。その一つに豆腐の水分含量を少なくする（豆腐乾）とかあるいは塩を利用する方法がとられたのであろう。当時は、食酢、味噌の類など発酵食品の製造技術がすでに完成されており、その技術レベルも相当に高かったことから、この塩を利用した豆腐保存方法の中で、微生物による発酵法も取り入れられ、“腐乳”と呼ばれる食品がつくり出されたものと思われる。この腐乳製造に関する初めての記録は明代に李日華が書いた「蓬樵夜話」とされ<sup>7)</sup>、それには、カビ付け操作の行われた腐乳製造法が記載されている。一方、明代、李時珍の『本草綱目拾遺』（1596）による腐乳の記載はカビ付け操作を行わない製造法（「醃製腐乳」）である。このように、当時の腐乳の製造法は豆腐のカビ付けの有無により二通りの方法があったことがわかる。清代に入ると、腐乳に関する記録は数多く見られるようになり、カビ付け操作を行う製造法が主流をなしてきた。王子禎が書いた「食憲鴻秘」（清代、康熙中期頃）に腐乳の製造法が詳しく書かれている。その中の「建豆腐」もカビ付け操作が行われており、もろみには紅麴が用いられている。これが沖縄の“豆腐よう”の原形にあたるものではないかと著者は考えている<sup>1)</sup>。『江南通志』（1736）の頃には「乳腐」と「乳餅」は全く別の製品であつたらしい。この乳腐は18世紀の後半になるとさらに普及され、ごく一般的な食べ物として人々の間で親しまれるようになった。その頃の様子は袁枚の『随園食單』（1782）によりうかがい知ることが出来、「白乳腐」や「エビの卵入り乳腐」などが記載されている。その後、李石亭が書いた『醒園録』（乾隆中期頃）にある腐乳製造に関する記載は現代のそれとほとんど同様である。各種の文献を調べてみると腐乳の普及、発展の時期は清代以降のようである。この豆腐発酵食品は腐乳、乳腐、豆腐乳、醬豆腐（乳）とも書かれるようになり、中国大陸や台湾では今日に至るまで人々の食生活に広く取り入れられているのである。

中国人留学生の話によれば、腐乳は、朝食の粥に入れたり、マントウにはさんで食べたり、昼食の漬物として食すると食欲をそそるらしい。また、料理の味付けや香り付けに良好な効果を与えるらしい。地方ではたいてい家庭で自家用につくっているとのお話である。腐乳は製造法により数多くの種類があり、後述するように、沖縄に伝来したものはその中の紅麴を使用した紅腐乳であったと考えられる。このものは、*Mucor* 属や *Rhizopus* 属などのカビを豆腐表面に生育させ、塩漬した後、紅麴 (*Monascus* 属カビを蒸米に生育させた米麴) 使用したもろみに漬け込んで熟成させたものである<sup>8,9)</sup>。

### 1.3 豆腐ようの発明

沖縄における豆腐ようの起源に関して、これまでほとんど知られていなかった。著者<sup>1,6)</sup>は中国の腐乳を手がかりにその伝来と、豆腐ようの起源について考察した。

豆腐の発酵食品である腐乳は上記 (1.2) で述べたように、中国の明の時代に登場し、清代に広く普及されるようになり、やがて我が国にも伝来した。何必醇が書いた『豆腐百珍続編』(1784年)の中に「紅とうふ」や「腐乳」が記述されている。それには、「紅とうふ其の制、一家の秘にして世に伝へず」、「腐乳、乳酒に麴を入れ、磨にてよくひき、さて、紅麴(からものなり)と山椒の末を入れ…」と書かれており、当時すでに「紅腐乳」が日本本土に伝わっていたことがわかる。しかし、これらの食品は、何故か日本本土では定着するに至らなかった。

一方、この(豆)腐乳は琉球王朝時代の18世紀頃に各種の交流の中で、沖縄にも伝えられた<sup>6)</sup>。(豆)腐乳は、豆腐の発酵食品であり、北京で *toufuru*、*furu*、福建地方で *toufuyu*、*fuyu* とも呼ばれるもので、ごく一般的な名称である<sup>1,6)</sup>。腐乳は、製造法により数多くの種類があり、沖縄に伝来したものは紅麴を使用する“紅腐乳”であったと思われる。(豆)腐乳の伝来については、沖縄の *tofuyo* と福建地方の *toufuyu* との外観および両者の呼び方がきわめて類似していること<sup>1,6)</sup>、前述のように、豆腐が福建から伝来したという推定ならびに当時は沖縄と福建地方とは人的、物的交流が激しく、歴史的にも極めて密接な関係にあったという事実から、腐乳製造技術も彼の地から琉球王府の「お料理座」や久米村に導

入されたものと推定される。伝来したばかりの腐乳は、紅麴を使用して熟成させたものであり<sup>1,8,9)</sup>、色が赤く、匂いにクセがあり、塩辛く、味も非常に濃厚であったためにそのままでは受け入れられなかった。琉球王家の料理人達は、この中国生まれの腐乳製造法でカビ付けや、塩漬工程を省略し、沖縄特産の泡盛を用いることで製品の防腐効果を高めると同時に減塩化に成功したのである。また、われわれの嗜好に馴染み易い、マイルドな風味に改良を加えるなど、いろいろと工夫を凝らす中で、沖縄独自のエレガントな食品に仕立て上げ、“豆腐よう”と命名したのである。この新製品のネーミングにあたっては、福建地方の豆腐乳 (*tofuyu*) から派生した言葉として、豆腐乳 (→*tofuyo*) が採用されたと考えられている<sup>1)</sup>。

沖縄における紅腐乳、腐乳、豆腐乳および豆腐ように関する記録は極めて少ない。豆腐ようらしきものが史料に初めて登場するのは英国人 Basil Hall の『Account of a Voyage of Discovery to the West Coast of Corea, and the Great Loo-choo Island』(1818, London) である。原文では、Korea ではなく Corea と書かれている。同書によれば、1816年に Hall らは朝鮮西沿岸と大琉球島を探検している。当時の地図によれば、琉球は Great Loo Choo Island と呼ばれていたらしい。彼らは那覇港に寄港し、琉球王府から琉球料理でもてなしを受けた。その当時出された多くの料理の中に「サキ」、「チーズに似た物」、「赤く染めたゆで卵」等があった。「チーズに似た物」についての詳細な記述は見られないが、恐らく“豆腐よう”であったと思われる。しかし、豆腐ようが史料に明記されるのは、それより後の『御膳本草』(渡嘉敷通寛、1832) であり、「豆腐乳(タウフニウ)は“とうふよう”也」と記載されている。

『御膳本草』(1832)によれば、豆腐ようは「香ばしく美にして胃氣を開き、食を甘美ならせむ。諸病によし」とされている。この食べ物は特異なテクスチャー(チーズに似た舌ざわり)を有すること、貴重なタンパク質源であること、泡盛のアルコール作用により体内の血行をよくし、食欲を増進させる効果があるとともに人々の嗜好によく合っている。このような理由により、琉球王朝時代の上流社会の一部で広まり、とりわけ病後の滋養食、副食物として珍重されたようである。このように、中国生まれの

「豆腐乳」はその頃までには沖縄の「豆腐よう」として生まれ変わっていたのである。

その後、豆腐ようは琉球王朝と関係の深い特定の地域（首里や那覇）および特定の家庭でのみ長い間門外不出の「秘伝」として継承されてきた。この食品製造には高価な泡盛を多量に使用せねばならず、また、手間、暇のかかることなどから、ごく一部の人の珍味として食されていたに過ぎず、今日に至るまで庶民一般の日常的な食品として普及するには至らなかった。

## 2. 伝統的な豆腐ようづくり

豆腐よりの製造工程を図2に示した。その製造工程は、豆腐の製造、豆腐の乾燥、麴の製造および仕込み・熟成から成る。古老の話によれば、豆腐ようづくりはなかなか難しいものとされている。

豆腐ようを実際につくっているAさんの方法は次のとおりである。豆腐ようは通常、冬につくる。まず、きめがこまかくて堅めの豆腐を特別に注文し、それを約3cm角に切りそろえる。これを蒸した後で、目の荒いミージョーキー（ざる）に広げて陰干しする。清潔な箸で2時間おきに裏返して均一に乾燥させる。2～3日経過すると表面は褐色となりネトが生じる。この乾燥豆腐の表面を泡盛でよく洗ったのち、次の仕込みに用いる。一方、米麴（紅麴や黄麴）とアルコール濃度が40%以上の泡盛を同量

混ぜ、麴が十分にやわらかくなった後ですり鉢にてすりつぶし、食塩で味を整えて壺に入れる。このようにして得られたもろみに先ほどの乾燥豆腐を漬け込み密栓し、室温で熟成させる。漬け込み後、4～6ヶ月ごろが食べ頃といわれている。ここで、紅麴が使用されるが、その製麴技術は沖縄では確立されておらず、中国や台湾産の紅麴が用いられてきたのである。紅麴とはモナスクス属のカビ (*Monascus purpureus* はその代表例) を蒸した米に生育させた麴のことで、深紅色を呈する。彼の国では、この紅麴は酒類や食品の製造に使用されている。第二次世界大戦後は紅麴が手に入らず、その代わりに食紅を使用したことがあるが、今一度風味に欠けていたらしい。したがって、色づけをせずに黄麴で豆腐ようを造る場合もあるが、紅麴を使用することで一段と風味が向上するという。

この仕事は、経験と勘に頼る名人芸であり、良好な品質の製品はまさに芸術作品と呼ぶにふさわしい風格を有している。しかしながら、このような素晴らしい製品を造り得る技法保持者はきわめて限定されており、この食品製造の若い世代への伝承に関しては幾多の困難が横たわっているようである。

“豆腐よう”製造の振興・発展を図るためには、これらの経験と勘に基づいた製造技法を科学的に解析し、製造のプロセスを人為的に制御し得る基礎技術を確立することが重要である。そこで、著者らは原料の調製法と製品の品質との関係を調査し、酵素活性や色素生産性の高い紅麴及び黄麴の製麴法、物性面から見た豆腐ゲルの調製法を明らかにするとともに、製品の仕込み、熟成条件についても種々検討を加えてきた。その結果、これまで門外不出の秘伝として継承されてきた豆腐よう製造の技術的特徴を解明することが出来た<sup>10)</sup>。また、その食品科学的特性<sup>11)</sup>や微生物科学的特性<sup>12)</sup>等についても明らかにしてきた。豆腐よりの製造技術は研究室の卒業生を通して地場産業に技術移転され、紅麴を用いた赤い豆腐ようが市販されるようになった。豆腐ようは今では沖縄のオリジナル特産品として発展している。

## 3. 豆腐よりの発酵・熟成

発酵にかかわる主な微生物は、*Bacillus* 属細菌、紅麴菌 (*Monascus purpureus* 等)、*Aspergillus oryzae* である。*Bacillus* 属菌は豆腐の乾燥工程でその表面

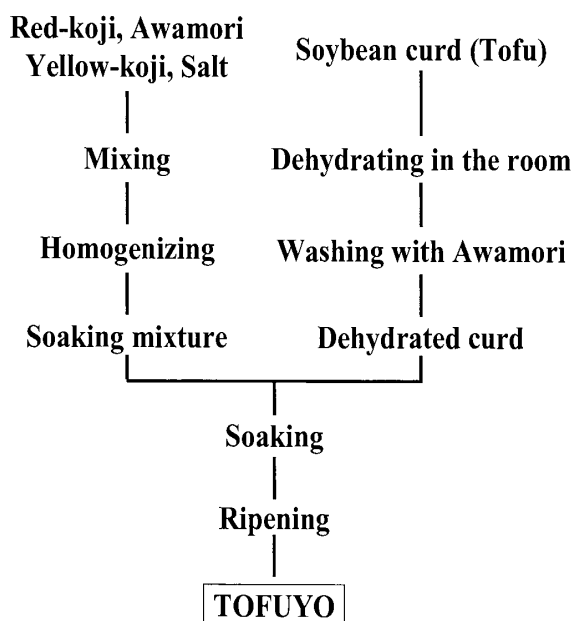
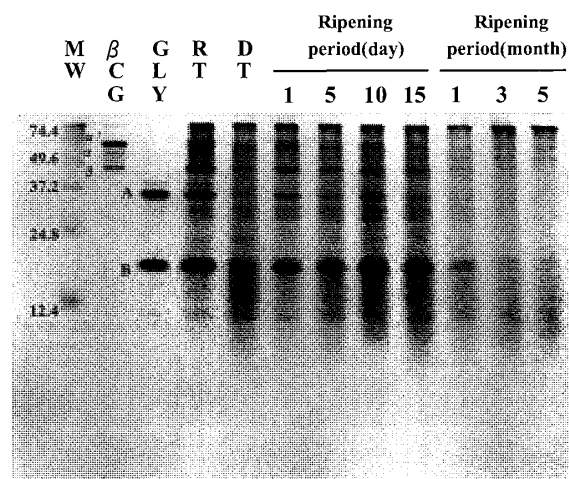


図2 豆腐よりの製造工程。

に成育し、前発酵としてその役割を担っている。主発酵にかかわる微生物は麹菌である。紅麹菌は中国で紅酒や紅腐乳の製造に用いるカビである。*M. purpureus* は食用天然色素であるモナスカスカラー（紅色）の生産菌としても知られている。本菌は豆腐のような熟成、色調や独特のフレーバー生成に寄与する。なお、近年、*Monascus* 属菌の培養物にコレステロール生合成抑制作用<sup>13)</sup>や血圧降下作用<sup>14)</sup>および抗酸化作用<sup>15)</sup>などの存在が明らかにされ、医薬品や生理機能を付与した健康食品開発への期待が高まっている。*A. oryzae* は、清酒や味噌等の製造に用いられる麹菌である。*M. purpureus* や *A. oryzae* などの微生物の産生する各種酵素群が協調して豆腐のような熟成や香味形成などに大きく貢献している。

豆腐よう熟成過程における一般成分の変化<sup>16)</sup>を表1に示した。熟成中製品の粗タンパク質および粗脂肪含量は減少したが、還元糖量は逆に増大した。食塩含量は一定の値を示した。

豆腐よりの熟成で最も重要な役割を演じている酵素はプロテアーゼ<sup>12,17,21)</sup>である。もろみ中のプロテアーゼ活性は泡盛に由来するアルコール濃度（約20%）の影響を受けて抑制されるため、大豆タンパク質は限定的に分解される。その結果、なめらかさや粘弾性などの豆腐ようらしい物性が形成され、同時に好ましい呈味性（アミノ酸）も形成される。



MW : Standard proteins (MW-marker, kDa)  
 β CG : β -Conglycinin, GLY : Glycinin  
 RT : Raw Tofu, DT : Dehydrated Tofu  
 α', α, β : α' and β -subunits in β -Conglycinin  
 A, B : Acidic and Basic subunits in Glycinin

図3 豆腐よう水不溶性画分の熟成過程における SDS-ゲル電気泳動パターン。

豆腐よう熟成過程における大豆タンパク質の変化を電気泳動法 (SDS-PAGE) により観察した<sup>16,18-20)</sup>。まず、熟成中水不溶性画分における大豆タンパク質の電気泳動パターンを調べ、その結果を図3に示した。大豆タンパク質の主要成分であるβ-コングリシニンの各サブユニット、グリシニンの酸性サブユニットおよびその他の高分子成分に対応するポリペプチドバンドは熟成時間の経過にともない消失した。一方、グリシニンの塩基性サブユニットは、分解を受けながらも薄いバンドとして残存した。製品（熟成3カ月）には塩基性サブユニットの他にも生成した低分子量のポリペプチド (Mr. 10,000-15,000) の存在が確認され、これらのものが豆腐よりのボディ構成成分である。この塩基性サブユニットは豆腐よりのテクスチャー形成に寄与していると考えられる。同様に、熟成過程における水溶性画分のタンパク質分解の様子を SDS-PAGE 法で調べた結果、熟成0日目では多数のバンドが検出されたのに対し、熟成3カ月ではほとんど残存していないことがわかった。豆腐よりの水溶化率及びトリクロロ酢酸可溶性窒素量は熟成時間の変化にともない増大した。水溶性タンパク質は熟成過程でプロテアーゼ<sup>17,21)</sup>やペプチダーゼ<sup>22,23)</sup>などの酵素作用により低分子化され、ペプチドやアミノ酸に変換された。

豆腐よりの物性、特にその破断応力、粘弾性係数、硬さおよび凝集性は熟成初期に大きく減少するが、熟成中期以降後期に至るまでほぼ一定の値を示し、なめらかさを形成した。さらに、熟成中豆腐よう組織の微細構造変化を走査型電子顕微鏡で調べたところ、熟成初期には網目構造を形成するタンパク質の

表1 紅麹による豆腐よりの熟成過程における一般成分の変化。

Ripening period (month)	Crude Protein (%)	Crude fat (%)	Crude ash (%)	Crude fiber (%)	Reducing sugars (%)	NaCl (%)
Raw tofu	49.0	30.6	5.5	0	14.2	0
Dehydrated tofu	47.3	31.9	6.7	0	13.9	0
Tofuyo						
0.5	32.4	23.1	7.9	0	19.8	3.7
1	30.1	21.8	7.3	0	22.3	3.5
2	29.5	21.5	7.4	0	22.9	3.4
3	29.2	21.2	7.4	0	24.2	3.2
5	28.7	21.7	7.4	0	26.3	3.0

## 沖縄の伝統発酵食品

太い繊維が観察されるが、熟成時間の経過にともない小さな粒状のタンパク質が連なった構造に変化する<sup>24)</sup>。最終製品においても大豆タンパク質の粒状ネットワーク構造が構成されており、このことが豆腐のような保形成や独特のテクスチャー形成に寄与していると考えられる。

麴由来  $\alpha$ -アミラーゼおよびグルコアミラーゼはプロテアーゼの場合とは異なり熟成後期にいたるまで比較的高い酵素活性が維持され、もろみ中の米デンプンに作用してグルコースを生成する<sup>25)</sup>。この糖はもろみから製品に移行し、豆腐よう独特の呈味形成に寄与している。

## 4. 豆腐よりの機能成分

現在、食品の機能には一次機能（栄養機能）、二次機能（感覚機能）、三次機能（生体調節機能）と三つに分類されている。一次機能は栄養素が生体に対して果たす機能であり、二次機能は香味成分などが嗅覚、味覚の器官などに対して示す調節機能である。そして三次機能は生体防御、内分泌系、神経系、循環器系、消化器系等を調節し、健康の維持や健康の回復に直接寄与する機能である。二次機能については、これまで食品化学や食品加工の立場からも数多く解析がなされてきた。三次機能については食品生化学、食品機能科学、食品開発学および医科学などの立場からその研究開発が活発に実施されており、数多くの「特定保健用食品」が市販されている。

## 4.1 豆腐よりの一般成分

熟成3ヶ月後における紅麴を用いた豆腐よりの一般成分の分析結果（無水物換算値）<sup>16)</sup>は、粗タンパク質 29.2%、粗脂肪 21.2%、粗灰分 7.4%、粗繊維 0%、還元糖 24.2%、食塩 3.2%であった（表1）。本発酵食品は、タンパク質、脂質、糖質に富む低塩大豆発酵食品といえる。

## 4.2 豆腐よりの香味成分

アミノ酸は発酵食品の呈味性に大きく貢献している。そこで、熟成過程における豆腐よりの遊離アミノ酸の変化を調べ、その結果を表2に示した。総遊離アミノ酸量は熟成時間の経過にともない、増大した。熟成3ヶ月目における豆腐よりの最も多い遊離アミノ酸はグルタミン酸であった。次に、アラ

ニン、アスパラギン酸、グリシン、セリンの順であった。全遊離アミノ酸量に対するこれらアミノ酸の和で占める割合は約65%であった。グルタミン酸やアスパラギン酸はうま味に、アラニン、グリシン、セリンなどは甘味を示すアミノ酸として知られ、これらのものは呈味性アミノ酸とも呼ばれている。豆腐よりの全遊離アミノ酸中グルタミン酸及びアスパラギン酸の両方で占める割合は33%であり、うま味を示すアミノ酸量が多いのが豆腐よりの特徴である。豆腐ようにおけるこれら遊離の呈味性アミノ酸、特にうま味アミノ酸量は発酵に用いる麴菌の種類により異なるが、グルタミン酸やアスパラギン酸量が多い傾向を示した<sup>18)</sup>。また、その遊離アミノ酸には、ロイシン、フェニルアラニンおよびチロシン含量も高い値を示した。最近、Lioeら<sup>26-28)</sup>は化学成分分析と官能評価を併用する実験を行い、醤油の低分子うま味フラクションに食塩、グルタミン酸とともにL-フェニルアラニンの存在を認め、芳香族アミノ酸（L-フェニルアラニンやL-チロシン）は食塩存在下でL-グルタミン酸のうま味増強に大きく寄与することを明らかにし、モデル実験系で確認している。豆腐よりのうま味形成においても、醤油の場合と同様にグルタミン酸やアスパラギン酸とともにL-フェニルアラニンが重要な役割を演じていると思われる。

豆腐よりの呈味成分はアミノ酸以外に糖（グルコース）が主要成分であり、その他に有機酸（リンゴ酸、クエン酸、乳酸、酢酸など）、ヌクレオチド類および食塩があり、それら成分間相互作用により

表2 紅麴による豆腐よりの熟成過程における遊離アミノ酸の変化。

Amino acids (mg/100g)	Raw tofu	Dehydrated tofu	Ripening period ( month )			
			0.5	1	3	5
Aspartic acid	15	29	317	511	673	773
Threonine	23	26	33	78	143	148
Serine	10	53	78	209	410	481
Glutamic acid	20	56	283	609	864	881
Proline	9	49	85	83	86	147
Glycine	14	67	73	302	422	543
Alanine	24	90	219	414	676	702
Cysteine	0	0	3	5	6	9
Valine	15	19	38	88	145	124
Methionine	0	4	23	60	51	45
Isoleucine	3	15	40	85	126	137
Leucine	11	65	117	246	403	477
Tyrosine	0	10	51	114	153	150
Phenylalanine	14	50	65	128	200	173
Histidine	7	5	17	29	34	39
Lysine	8	4	13	78	152	216
Arginine	1	2	44	137	176	109
Total amino acids	174	544	1499	3176	4720	5154

良好な味を形成すると考えられる。

豆腐のような香気濃縮物を GC または GC-MS 分析を行ったところ、アルコール類（エタノール、プロパノール、ブタノール、フェネチルアルコールなど）、脂肪酸のエチルエステル類（パルミチン酸エチル、ステアリン酸エチルなど）、有機酸のエステル類（コハク酸ジエチル、酢酸イソアミル、酢酸フェニルエチル、酢酸フェニルプロピルなど）が検出された。熟成中に大豆油が麩のリパーゼにより分解を受け、生成した遊離脂肪酸あるいは麩由来の各種有機酸が共存する泡盛のアルコールとの間でエステル化が起こり、それぞれのエチルエステルが形成されたと考えられる。一般にエステル類は果物の主要な香り成分として特徴づけられているように、上記エステル類が豆腐のような好ましい香り形成に関与していると考えられる。なお、豆腐ようにも大豆臭の原因物質とされているヘキサナールやヘキサノールなどの存在がガスクロマトグラフィにより認められたが、これらのオフフレーバーは実際には感覚的にほとんど感じられない。このとは、上記エステル類により大豆由来オフフレーバーがマスクされていると考えられる。

豆腐のような香味はこれら各種成分が調和のとれた総体として発現している<sup>11)</sup>と考えられる。

#### 4.3 豆腐のような生理機能

現代人は、食生活、運動不足、ストレスなどの原因によりガン、糖尿病、高血圧症、脳卒中、骨粗しょう症などの生活習慣病にかかりやすいといわれている。最近では、食生活の洋風化にともない、生活習慣病が大きな社会問題となり、高額治療から低額保健機能食品への関心が高まっている。

高血圧症は正常者の平均値よりも常に血圧が高い状態（1999年世界保健機関の基準では、140/90 mm Hg 以上の値）を指している。高血圧の状態が持続すると、各臓器の血管が脆くなり、動脈硬化の進行が促され、その結果、虚血性心疾患、脳卒中、腎不全の発症リスクが高くなることが知られている。高血圧症は脳心肺機能異常、感染症とともに罹病率の高い疾患である。

高血圧症発症の原因として多くの要因が挙げられている。食品成分との関連では、レニン-アンギオテンシン系が重要である。腎臓で分泌されたレニン

（酸性プロテアーゼ）はアンギオテンシノーゲンに作用してアンギオテンシン I（10個のアミノ酸から成るペプチド）を生成する。このものはアンギオテンシン I 変換酵素（Angiotensin I-Converting Enzyme: ACE）の作用を受けてアンギオテンシン II（8個のアミノ酸から成るペプチド）となる。アンギオテンシン II はいわゆる昇圧ホルモンである。ACE はジペプチジルカルボキシペプチダーゼであり、生体内で昇圧系の昂進と降圧系の抑制を同時に引き起こす、いわゆる昇圧系の鍵酵素としての役割を演じている。この ACE 活性を抑制することが出来れば、アンギオテンシン II の生成が抑制され、血圧上昇が抑制されることになる。

近年、血圧上昇抑制の立場から各種食品における ACE 阻害能に関する研究の成果が蓄積されつつあり、発酵食品における ACE 阻害ペプチドが着目されている。発酵乳<sup>29)</sup>から VPP、IPP などのペプチドが、また、プロテアーゼによる魚肉タンパク質加水分解物中から VY がそれぞれ単離<sup>30)</sup>されている。これらのペプチドは特定保健用食品として認可され、すでに市販されている。

Kuba ら<sup>31)</sup>は、豆腐のような機能性を明らかにするために、水溶性画分における ACE 阻害活性を調べた。その結果、ACE の高い阻害活性を確認した。そこで、この水溶性画分に存在する ACE 阻害物質を吸着カラムクロマトグラフィーおよび逆相 HPLC により精製を行い、2 個の均一精製標品を得た。両者は、各種機器分析の結果、IFL 及び WL と同定された。SWISS-PROT のタンパク質データベースをもとにコンピュータ解析を行ったところ、前者のアミノ酸配列は大豆タンパク質の  $\beta$ -コングリシニンの  $\alpha$ -および  $\beta$ -サブユニットに、後者のそれはグリシニンの塩基性サブユニットにそれぞれ存在することが判明した。したがって、これらの ACE 阻害ペプチドは豆腐のような熟成過程で、プロテアーゼによる豆腐タンパク質の加水分解物であると考えられた。豆腐よう由来ペプチドが生体内に取り込まれた後、どのような消長をたどるかは ACE 阻害効果を知る上できわめて重要である。そこで、両ペプチドの消化酵素耐性試験を行った。消化酵素には、豚胃粘膜由来ペプシン、牛脾臓由来のキモトリプシンおよびトリプシンを使用した。これらの消化酵素で両ペプチドをそれぞれ 37°C で 6 時間処理した後



で、ACE 阻害活性を測定した。さらに、これら消化酵素で両ペプチドを連続処理した後で ACE 阻害活性を測定した (表 3)。その結果、WL の ACE 阻害活性は、これら消化酵素処理により全く影響を受けておらず、IFL についてはペプシンにより全く影響を受けないもののキモトリプシンやトリプシンでは若干影響を受けることがわかった。さらに WL の ACE 阻害活性は、これら消化酵素の連続処理 (過酷な酵素処理) を行った後でさえも、もとの活性に比べて約 30% の値を示すなどきわめて安定であった<sup>31)</sup>。ペプチド輸送系とその吸収機構に関する研究において、ジおよびトリペプチドの吸収速度は、同一組成のアミノ酸混合物よりも速いことが知られている<sup>32,33)</sup>。また、Chun ら<sup>33)</sup>はラット反転小腸囊を用いて大豆加水分解物の吸収速度を調べ、長鎖ペプチド (平均アミノ酸残基数 5.2) よりも短鎖ペプチド (平均アミノ酸残基数 3.2) の方がより速く吸収されることを報告している。IFL および WL のペプチド輸送あるいはその吸収速度に関する解析は未だなされていないものの、両ペプチドは生体内における消化、吸収という関門を通過して、血圧上昇抑制作用を示す可能性が示唆されることから、高血圧モデル動物による実証試験が必要とされる。

そこで、豆腐ようを食餌に与えたラットの血圧上昇抑制作用に関する動物実験を行った<sup>34)</sup>。実験動物には 8 週齢の雄性高血圧自然発症ラット用い、豆腐よう凍結乾燥粉末を含む食餌で 14 週齢まで飼育することにした (飼育環境: 室温 25°C、湿度 70%、12 時間明暗のサイクルで飼育)。その結果、ラットの成長曲線及び心拍数は豆腐よう投与群とコントロール群との間でほとんど差異は認められなかった。しかしながら、豆腐よう投与群はコントロール

群に比べて有意にラットの血圧上昇抑制効果を認めるとともに各臓器の中でも腎臓の ACE 活性は有意に低下する<sup>34)</sup>ことがわかった。以上の動物実験結果から、豆腐ようには生体内における血圧上昇抑制効果があると期待される。豆腐ようのヒトへの影響については、今後の検討課題である。

大豆発酵食品である豆腐ようの発酵過程で ACE 阻害ペプチド (IFL、WL) が単離されたことから、麹菌プロテアーゼが機能性ペプチド生成に有効であるかどうかは酵素利用の視点で興味を持たれる。そこで、その可能性を探るために大豆タンパク質 ( $\beta$ -コングリシニンおよびグリシニン) に *M. purpureus* の産生する酸性プロテイナーゼをそれぞれ作用させた。その結果、タンパク質の加水分解率の上昇にとともに、ACE 阻害活性はいずれの場合にも増大した。 $\beta$ -コングリシニンから LAIPVNKP 及び LPHF、グリシニンから SPYP 及び WL などの ACE 阻害ペプチドがそれぞれ単離された。WP は豆腐ようから単離されたものと同一のペプチドである。興味深いことには、SPYP の ACE 阻害活性はペプシン、キモトリプシンおよびトリプシンによる連続処理後に著しく増大することが判明した<sup>35)</sup>。この事実は、ペプチドの構造と ACE 阻害活性との関係で興味を持たれる。本酵素の食品分野への利用については、さらに検討が必要である。

井上ら<sup>36)</sup>は、ICR マウスを高脂肪食で飼育し、豆腐ようペーストの希釈物を反復経口投与し、3 週間後に赤血球の変形能を調べた。その際、コントロールには「高脂肪食+生理食塩水」群および「普通食+生理食塩水」群を使用した。動物実験の結果から、豆腐よう投与群は「高脂肪食+生理食塩水」投与群に比べて有意に赤血球変形能が改善されていることおよびそのレベルは「普通食+生理食塩水」投与群とほぼ同等の値を示すことを明らかになった。さらに、豆腐よう投与群はコントロール群に比べて血漿 TG 値を有意に低下させるとともに HDL 値を有意に増大させる現象が見いだされるなど、豆腐ようには興味ある生理学的作用物質の存在が示唆された。

著者らは、豆腐ようの水溶性画分にリノール酸に対する抗酸化性や DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) ラジカル消去能があることを見出した。今後、抗酸化物質の同定と *in vivo* における豆腐ようの生理作用の解析が必要とされる。

表 3 ACE 阻害活性に対する IFL 及び WL の消化耐性。

Digestion	IC <sub>50</sub> ( $\mu$ g/ml)	
	IFL	WL
None	18	10
Pepsin	18	10
Chymotrypsin	29	11
Trypsin	24	10
Pepsin $\rightarrow$ chymotrypsin and trypsin	47	35

豆腐ようには、その他にもいくつかの生理機能物質の存在が期待される。豆腐よう発酵過程で生成する微生物の代謝産物あるいは大豆由来の生理活性物質についてもさらに注目したい。

### おわりに

沖縄の豆腐ようは、中国の紅腐乳をルーツにもつが、われわれの先人達はその製造法で、沖縄特産の泡盛（アルコール）を用いることにより、本場の腐乳とは異なった新しい発酵食品を生み出してきた。これが豆腐ようである。この食品は長い間、上流階級の一部でのみ細々と継承されてきたが、最近では、市販されるようになった。豆腐ようが広く普及され、発展するためには、消費者ニーズに対応した製品の品質改良を初め、大量生産に対応した製造システムの確立を図ることが必要である。さらに、豆腐ようのユニークなフレーバーや生理機能を活かした新しい用途開発とその需要拡大を図る努力も必要とされる。

豆腐ようが伝統食品として根強く定着することを願うとともに、著者らも本研究を通して地場産業の技術振興、発展のために微力ながらも貢献出来れば幸いである。

### 文 献

- 1) 安田正昭：豆腐の文化—沖縄の豆腐づくりと豆腐よう。民俗のこころを探る（原泰根編集），初芝文庫，大阪，pp. 295-337 (1994)
- 2) 安田正昭：豆腐の発酵食品。大豆月報 134, 1-9 (1986)
- 3) 市野尚子，竹井美恵子：東アジアの豆腐づくり。論集東アジアの食事文化（石毛直道編），平凡社，東京，pp.117-147 (1985)
- 4) 篠田統：豆腐考。風俗 8, 30-37 (1968)
- 5) 篠田統：中国食物史，柴田書店，東京，pp.110 (1982)
- 6) 安田正昭：豆腐ようと紅麴。醸協誌 78, 839-842, 912-915 (1983)
- 7) 洪光住：腐乳考。中国醸造 4, 44-45 (1985)
- 8) 太田輝夫：乳腐。醸協誌 60, 588-591, 695-699 (1965)
- 9) 蘇遠志：台湾の発酵食品。発酵と工業 37, 102-112 (1979)
- 10) 安田正昭：とうふよう製造に関する研究—製造秘伝の科学的解析と技術展開。日食工誌 37, 403-409 (1990)
- 11) 安田正昭：大豆タンパク質発酵食品とその機能性。大豆タンパク質の加工特性と生理機能（日本栄養・食糧学会監修，菅野道廣・尚弘子編集）建帛社，東京，pp. 65-103 (1999)
- 12) 安田正昭：豆腐ようの熟成と紅麴菌のプロテアーゼ。食品酵素化学の最新技術と応用—フードプロテオミクスへの展望—（井上國世監修）シーエムシー出版，東京，pp. 123-133 (2004)
- 13) Endo A: Biological and pharmacological activity of inhibitors of 3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme A reductase. *Trend Biochem. Sci.* 6, 10-13 (1981)
- 14) 辻啓介：紅麴の血圧調節作用。醸協誌 89, 207-211 (1994)
- 15) Aniya Y, Yokomakura T, Yonamine M, Shimada K, Nagamine T, Shimabukuro M and Gibo H: Screening of antioxidant action of various molds and protection of *Monascus anka* against experimentally induced liver injuries of rats. *Gen. Pharmacol.* 32, 225-231 (1999)
- 16) 安田正昭，松本哲也，坂口真樹，小波本直忠：Moascus 属菌を用いたとうふようの熟成過程における化学成分の変化。日食工誌 40, 331-338 (1993)
- 17) Yasuda M, Soeishi K and Miyahira M: Purification and properties of acid protease from *Monascus* sp. No.3403. *Agric. Biol. Chem.* 48, 1637-1639 (1984)
- 18) 安田正昭，松本哲也，坂口真樹，金城さきえ：Aspergillus oryzae を用いたとうふようの熟成過程におけるタンパク質及び窒素成分の変化。日食工誌 41, 184-190 (1994)
- 19) 安田正昭，松本哲也，坂口真樹，金城さきえ：紅麴と黄麴の併用によとうふようの製造。日食工誌 42, 38-43 (1995)
- 20) 桂正子：豆腐よう。日本調理科学誌 29, 314-322 (1996)
- 21) Yasuda M and Sakaguchi M: Degradation of soybean protein by an acid proteinase from *Monascus anka*. *Food Sci. Technol. Int. Tokyo* 4, 6-8, (1998)

## 沖縄の伝統発酵食品

- 22) Liu F, Tachibana S, Taira T, Ishihara M and Yasuda M: Purification and characterization of a new type of serine carboxypeptidase from *Monascus purpureus*. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 31, 23-28 (2004)
- 23) Liu F and Yasuda M: Debittering effect of *Monascus* carboxypeptidase during the hydrolysis of soybean protein. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 32, 487-489 (2005)
- 24) 安田正昭, 金城さきえ, 三木英三: とうふよの熟成過程における破断特性, クリープ挙動及び微細構造の変化. *食科工* 43, 322-327 (1996)
- 25) Yasuda M, Kuwae M and Matsushita H: Purification and properties of two forms of glucoamylase from *Monascus* sp. No.3403. *Agric. Biol. Chem.* 53, 247-249 (1989)
- 26) Lioe HN, Apriyantono A, Takara K, Wada K, Naoki H and Yasuda M: Low molecular weight compounds responsible for savory taste of Indonesian soy sauce. *J. Agric. Food Chem.* 52, 5950-5956 (2004)
- 27) Lioe HN, Apriyantono A, Takara K, Wada K and Yasuda M: Umami taste enhancement of MSG/-NaCl mixtures by subthreshold L- $\alpha$ -aromatic amino acids. *J. Food Sci.* 70, S 401-S405 (2005)
- 28) Lioe HN, Wada K, Aoki T and Yasuda M: Chemical and sensory characteristics of low molecular weight fractions obtained from three types of Japanese soy sauce (shoyu)-Koikuchi, tamari and shiro shoyu. *Food Chem.* 100, 1669-1677 (2007)
- 29) Takano T: Milk derived peptides and hypertension reduction. *Int. Dairy J.* 8, 375-381 (1998)
- 30) Kawasaki K, Seki E, Osajima K, Yoshida M, Asada K, Matsui T and Osajima Y: Antihypertensive effect of Valyl-Tyrosine, a short chain peptide derived from sardine muscle hydrolyzate, on mild hypertensive subjects. *J. Human Hyperten.* 14, 519-523 (2000)
- 31) Kuba M, Tanaka K, Tawata S, Takeda Y and Yasuda M: Angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides isolated from Tofuyo fermented tofu. *Biosci. Biotech. Biochem.* 67, 1278-1283 (2003)
- 32) Craft IL, Geddes D, Hyde CW, Wise IJ and Matthews DM: Absorption and malabsorption of glycine and glycine peptides in man. *Gut* 9, 425-437 (1968)
- 33) Chun H, Sasaki M, Fujiyama Y and Bamba T: Effect of peptide chain length on absorption and intact transport of hydrolyzed soybean peptide in rat intestinal everted sac. *J. Clin. Biochem. Nutr.* 21, 131-140 (1996)
- 34) Kuba M, Shinjo S and Yasuda M: Antihypertensive and hypocholesterolemic effects of Tofuyo in spontaneously hypertensive rats. *J. Health Sci.* 50, 670-673 (2004)
- 35) Kuba M, Tana C, Tawata S and Yasuda M: Production of angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides from soybean protein with *Monascus purpureus* acid proteinase. *Proc. Biochem.* 40, 2191-2196 (2005)
- 36) 井上文英, 上田智之, 安田正昭, 松山鈴子: 「唐芙蓉」投与による高脂肪食摂取マウスの赤血球変形能の向上. *医学と生物* 150, 438-442 (2006)

<著者紹介>

安田 正昭 (やすだ まさあき) 氏略歴

- 1971年3月 香川大学大学院農学研究科農芸化学専攻修了
- 1972年5月 琉球大学農学部助手
- 1980年3月 農学博士 (京都大学)
- 1981年8月 琉球大学農学部助教授
- 1989年5月 (社)日本食品工業学会奨励賞
- 1990年1月 (財)沖縄研究奨励賞 (自然科学部門)
- 1992年11月 琉球大学農学部教授
- 1993年4月 鹿児島大学大学院連合農学研究科教授 (博士課程、併任)
- 1994年度 文部省在外研究員 (オランダ、デルフト工科大学)
- 2005年4月 琉球大学農学部 副学部長 (2007年3月まで、2007年4月より  
2009年3月まで)
- 2006年4月 琉球大学留学生センター長 (2008年3月まで)

