

いった問いは考えて答えの出る代物ではなさそうだが、私たち人類の未来とも無縁ではない菌根共生の未来を考える事は、単なる無駄にはならないだろう。

文献

- Allen MF (1991) The ecology of mycorrhizae. Cambridge University Press.
- Bidartondo MI *et al.* (2002) Epiparasitic plants specialized on arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 419: 389-392.
- Bidartondo MI (2005) The evolutionary ecology of myco-heterotrophy. *New Phytologist* 167: 335-352.
- Cullings KW *et al.* (1996) Evolution of extreme specialization within a lineage of ectomycorrhizal epiparasites. *Nature* 379: 63-66.
- Hamada M (1939) Studien über die Mykorrhiza von *Galeola septentrionalis* Reichb. f. Ein neuer Fall der Mykorrhiza-Bildung durch intraradicale Rhizomorpha. *Japan J. Bot.* 10: 151-211.
- Hibbett DS *et al.* (2000) Evolutionary instability of ectomycorrhizal symbioses in basidiomycetes. *Nature* 407: 506-508.
- Högberg P *et al.* (2001) Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* 411: 749-751.
- James T *et al.* (2006) Reconstructing the early evolution

of fungi using a six-gene phylogeny. *Nature* 443: 818-822.

Martin F *et al.* (2008) The genome of *Laccaria bicolor* provides insights into mycorrhizal symbiosis. *Nature* 452: 88-92.

Melin E, Nilsson H (1953) Transfer of labeled nitrogen from glutamic acid to pine seedlings through the mycelium of *Boletus variegatus*. *Nature* 171: 134.

Nara K, Hogetsu T (2004) Ectomycorrhizal fungi on established shrubs facilitate subsequent seedling establishment of successional plant species. *Ecology* 85: 1700-1707.

Odum EP (1959) Fundamentals of ecology. W. B. Saunders and Co.

Schüßler A *et al.* (2001) A new fungal phylum, Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105: 1413-1421.

Simard SW *et al.* (1997) Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388: 579-582.

Smith SE, Read DJ (1996) Mycorrhizal symbiosis, 2nd ed. Academic Press.

van der Heijden MGA, Sanders IR (2002) Mycorrhizal ecology. Springer.

van der Heijden MGA *et al.* (1998) Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396: 69-72.

3章 人間の食生活と菌類

3.1 菌類を使った発酵食品 ————— 高田正樹

人類は発酵作用が微生物によるものであることを知らない有史以前から微生物が持つ作用を巧みに利用して酒類やチーズ、発酵乳、味噌、しょう油などの多様な発酵食品を造り、食生活をより豊かにするのに役立ててきた。

発酵食品の製造には細菌や酵母、カビが利用される。しかし、細菌や酵母は世界中のあらゆる地域で発酵食品の製造に利用されているのに対し、カビの利用の程度は地域により大きく異なっている。すなわち、カビを積極的に利用する東アジアの地域と利用が少ないあるいはほとんど利用しないその他の地域に分かれる。ヨーロッパではある種のチーズの製造、ベーコンやサラミの風味改良のためのカビ付けを例外として、カビを利用した伝統的発酵食品は少ない。また、アメリカ大陸やアフリカ、中東でも利用例は非常に少ない。一方、東アジアにおいては実に様々な発酵食品の製造にカビが利用されている。この違いの1つの理由として気候的なものが考えられる。湿度の少ないヨーロッパでは日常の生活環境でカビを見かけることがほとんどないというが、日本や東アジアの諸地域は高温多湿のため、色々な物質にカビが生育しているのを見かけることがある。このために食物などが腐り被害を受けることが多いが、同時に自然発生的にカビの作用により発酵食品ができる機会も多いため、これらを利用する技術も東アジアにおいて発達したと推定できる。興味深いことに同じ東アジア地域でも日本と日本以外の国々では使うカビの種類が異なっている。日本は麹の製造に *Aspergillus* (コウジカビ属) を使うのに対して、中国や韓国および東南アジアの諸国では *Aspergillus* を使う場合もあるがあまり多くはなく、ほとんどが接合菌類の *Rhizopus* (クモノスカビ属) や *Mucor* (ケカビ属) を用いている。さら

に同じ日本でも九州北部より北の地域と九州中部より南の地域では酒類醸造に必要な麹の製造に用いる *Aspergillus* の種類が異なっている。伝統的に清酒製造が多い九州北部と本州以北の地域では *A. oryzae* (アスベルギルズ・オリゼー、コウジカビ) を用いるのに対し、焼酎や泡盛が主な九州中部以南では *A. kawachii* (A. カワチイ、*A. niger* (A. ニガー) の変異株) や *A. awamori* (A. アワモリ) が使われている。日本の南西部地域は高温で細菌類のような雑菌による被害を受けやすいため、クエン酸などの酸を多く産生する *A. niger* 系が経験的に使われるようになったと推測されている。

本節では菌類の中でも主にカビを用いた発酵食品について述べるが、カビのみで1つの発酵食品ができることは少なく、ほとんどの製品が細菌、酵母とカビの共同作用で作られていることを忘れてはならない。

鯉節

鯉節はカビを利用した日本独特の優れた発酵食品である。鯉節に類似した食品はインド洋上のモルジブにもあるが、日本の鯉節のようにカビを使うことはない。鯉節の原形となるものは室町時代からあるが、現在の製造工程に近い方法が確立されたのは江戸時代に入ってからで、カビ付けによる製法が始まったのは江戸時代中期からである。当初は蔵に生息しているカビ (いわゆる蔵付きカビ) を自然付着させていたが、昭和40年代から現在のように純粋培養した *Eurotium herbariorum* (ユーロチウム・ヘルバリオールム) (図1) の胞子液を接種する方法になった。

製造工程は複雑で手間がかかる。3枚におろし煮熟したカツオ肉を焙乾室で木を燃やして煙と熱で燻し、水分を飛ばした後にカビの種菌を接種し、

菌類のふし玉 形と味と色の驚異の対比
国立科学博物館編
国立科学博物館叢書⑨
2008年 東海大学出版会
ISBN 978-4-486-01793-6

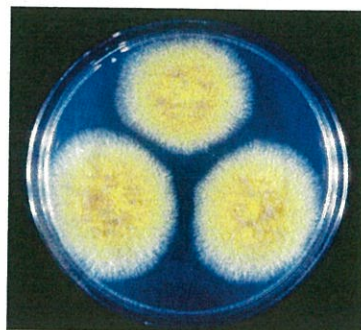


図1 *Eurotium herbariorum* のコロニー



図2 カビが生育した鰹節 [写真提供: 伊沢正名]



図3 鰹節の製品 (本枯節)



図4 豆腐よう [写真提供: 正木照久]



図5 *Monascus purpureus* のコロニー



図6 浜納豆



図7 テンペ



図8 テンペを使ったインドネシアの定食

湿度の高い室に入れカビを生育させる (図2)。表面に生育したカビを落とし天日乾燥させた後に再び室に入れカビを生育させる。この工程を4～6回繰返すことによりカツオ組織内部の水分が次第に外部へ排出され乾燥が進み、世界で一番硬い食品といわれる製品ができあがる (図3)。カビの生育につれてタンパク質や核酸、脂肪が分解され5'-イノシン酸など独特のうま味成分と香味が生成される。さらにカビが産生するコウジ酸により酸化が防止される。

カビ付けに用いる *Eurotium* は *Aspergillus* をア

ナモルフに持つ子囊菌で、輝光色で閉鎖型の子囊果の中に子囊胞子を形成する。乾燥状態を好み、穀類、乾燥コンブや燻製などの乾燥食品、塩蔵食品、発酵食品、靴やハンドバックなどの皮製品や土壌などから分離され、広く世界的に分布している。

豆腐よう

豆腐ようは沖縄特有のカビを用いたダイズ発酵食品である (図4)。味噌や納豆のようにダイズを直接微生物で発酵させたものではなく、島豆腐



図9 テンペのラギ (ハイビスカス)



図10 オンチヨム



図11 カマンベールチーズ



図12 *Penicillium camemberti* のコロニー [写真提供: 正木照久]



図13 ブルーチーズ



図14 *Penicillium roqueforti* のコロニー [写真提供: 正木照久]

とよばれる沖縄独特の硬い豆腐を作り、子囊菌の一種である *Monascus purpureus* (モナスカス・パープレウス, 図5) (*M. anka* (M. アンカ)) を用いた麴と *Aspergillus oryzae* を用いた麴に泡盛と塩を加えて調整したモロミに漬け込んで製造する。

豆腐ようの原形は18世紀頃に中国から伝来した紅腐乳 (ホンフルー) で、次第に沖縄の風土に合ったものに改良され、琉球王朝と関係の深い地域や家庭で秘伝として利用されてきた。二十数年前に安田正昭博士が豆腐ようの製造メカニズムを科学的に解明し、近代的な製法を完成させ商品化に成功し現在に至っている。

Monascus purpureus の持つ酵素作用によりタンパク質が分解し、うま味成分のアミノ酸や有機酸、脂肪酸エステルが生成する。クリームチーズのようななめらかさと独特の風味を持つことから東洋のチーズと表現する人もいる。

Monascus purpureus が産生する赤色系の色素は毒性の少ない天然物色素として食品の色付けなどに利用されている。また培養物はコレステロール生合成の抑制や血圧低下作用、抗酸化作用がある

ことが知られており、保健機能食品としての期待が持たれる。

Monascus purpureus は不整子囊菌類ユーロチウム目に属する。閉子囊殻を柄状菌糸の上に単生する。子囊は子囊膜が早期に消失する。子囊胞子は楕円形となる。土壌や食品中に生息し、日本、中国、マレーシア、パプア・ニューギニアおよびヨーロッパに分布する。

寺納豆 (浜納豆、大徳寺納豆)

寺納豆あるいは塩辛納豆は、平安時代に中国へ渡航した留学僧が製法を持ち帰り広まったといわれている (図6)。寺院内で僧により製造されたことから寺納豆とよばれるようになった。寺納豆の系統は、現在京都の大徳寺納豆および浜松の浜納豆として知られ市販されている。塩辛く豆味噌に近い風味がある。

日本で多く利用されている糸引き納豆が細菌の *Bacillus subtilis* (バチルス・スプチリス, 枯草菌) (*B. natto* (B. ナットー)) を用いるのに対し、寺納豆は *Aspergillus oryzae* の麴を利用して製造される。

蒸したダイズに麴を加え2～3日発酵させ、2～3カ月塩水に漬け熟成させた後に乾燥して保存する。栄養価が高く保存性もあるため、徳川家康が愛用し戦国武将たちが保存食あるいは行動食として利用していたと伝えられている。

テンペ

テンペはダイズを原料としてカビを利用して製造するインドネシアを代表する伝統的発酵食品の1つで、インドネシアにおいては国民的発酵食品といえる位置づけにある。ほとんどの食料品店で売られていて、作り方も簡単のため一般家庭で自家用に作る場合も多い(図7, 8)。発酵に関与する菌はクモノスカビ属 *Rhizopus* で *R. oryzae* (R. オリゼー) や *R. oligosporus* (R. オリゴスポルス) が中心的な働きをしている。種皮を取り除いたダイズを蒸煮し、*Rhizopus* が付着しているバナナの葉やハイビスカスの葉(図9)などを粉末にしたものを混ぜ¹、バナナの葉に包み発酵させる。近年では改良法が考案され、純粋培養した粉末状の種菌をスタータとして用い、ポリエチレンで包むかプラスチックの容器に入れて製造する場合が多い。ただし、*Rhizopus* は好気性なので、菌の繁殖をよくするために通気が必要である。20時間程培養すると白色の菌糸が全面に生育する。2日以上すぎると孢子形成が始まり、暗灰色から黒色に変色し製品としては劣るようになる。

菌の作用によりダイズの脂肪が加水分解され、パルミチン酸やステアリン酸その他の遊離脂肪酸が生成する。成分組成は納豆と大差ないが、納豆よりも消化性が良く良質なタンパク質が豊富に含まれている。1980年代に動物性タンパク質や脂肪の取りすぎにより心臓疾患や肥満患者の多いアメリカやヨーロッパで注目され、次第にインドネシア以外の国々へも普及するようになった。日本にはダイズを原料とした良質な発酵食品として納豆や味噌・醤油があるためアメリカやヨーロッパに比べて普及が遅れたが、近年の健康志向の高まりにより注目を集めるようになり、各地のスーパーマーケットでも入手可能となってきた。

オンチョム

インドネシアにはカビを使った発酵食品としてテンペの他にオンチョム (oncom) がある(図10)。オンチョムはピーナッツとダイズの絞り粕、いわゆるオカラを原料に用い、発酵のスタータとして子囊菌類のアカパンカビ属 *Neurospora* の *N. intermedia* (ネウロスボラ・インターメディア) や *N. sitophila* (N. シトフィラ) を用いるユニークな発酵食品である。発酵食品の製造に *Neurospora* を利用する国はインドネシアのみである。蒸した原料にスタータを加え、レンガ状に固めて4, 5日培養するとアナモルフ世代の *Chrysonilia* (クリソニリア) (元の学名 *Monilia* (モリニア) のほうがなじみ深い) が蔓延し分生子の形成によりオレンジ色となる。菌の作用により原料の澱粉質や繊維質が分解を受け消化性がよくなる。テンペはインドネシアにおいて国民的な発酵食品として位置づけられているのに対し、オンチョムの重要性はテンペに比べるとはるかに小さく、利用されている地域はジャワ島の西部に限られている。

Neurospora はパンによく生えることことからアカパンカビあるいは焼け跡に生えることからヤケアトカビともよばれている。山火事などで熱刺激を受けることにより休眠していた子嚢孢子が一斉に発芽し、あたり一面がオレンジ色になる景色は壮観である。

チーズ

現在は日本を含め多くの国々で製造販売されているが、元来はヨーロッパの伝統的発酵食品である。チーズの多くは細菌および酵母の発酵作用により作られるが、カビを利用したチーズがいくつかある。カビを使った発酵食品があまりないヨーロッパにおいて数少ない例の1つである。またアオカビ属 *Penicillium* を使うことも特異的で、不思議なことにカビを多く使う東アジアにおいて発酵食品の製造に *Penicillium* を使う例は見られない。

カビ (*Penicillium*) を使うチーズは、白カビ系の菌を使うカマンベール系と青カビ系の菌を使うブルーチーズ系の2つに分けられる。

1) カマンベールチーズ (白カビチーズ)

熟成ソフトタイプに属し、牛乳を原料とし乳酸菌とともにカビのスタータとして *P. camemberti* (*P. カマンベルティ*) を用いる(図11, 12)。チーズ表面が灰白色の菌糸で覆われるが分生子は形成されない。熟成するにしたがって次第に柔らかいクリーム状になる。ブルーチーズよりも癖が少なく女性にも好まれ、日本のスーパーマーケットでもごくふつうに売られている。類似のチーズとしてブリーチーズなどがある。

2) ブルーチーズ (青カビチーズ)

ロックホールチーズ、ゴルゴンゾラチーズとスティルトンチーズが世界3大ブルーチーズといわれている。ロックホールとゴルゴンゾラはセミソフトタイプ、またスティルトンはハードタイプに属する(図13, 14)。

ロックホールチーズはフランスのロックホール地方で羊飼いが置き忘れたチーズに洞窟内に生息していたカビ (*P. roqueforti* *P. ロックフォルティ*) が自然付着してできたのが発祥であるとの伝説がある。発酵途中のチーズに針で穴を開けると発酵により生成した炭酸ガスが出て酸素が入り、チーズ内部で菌が良好に繁殖する。塩味が強いが独特の風味とドライな切れ味がある。

イタリアのゴルゴンゾラチーズはロックホールチーズに類似するが、製造に使われる菌は *P. glaucum* (*P. グラウカム*) とされている。しかし、アオカビ属の分類の大家ピット Dr. J. I. Pitt はゴルゴンゾラチーズ由来株が *P. roqueforti* と十分な識別ができないと述べている。

イギリスのスティルトンチーズはロックホールやゴルゴンゾラとは異なりハードタイプであるが、ロックホールチーズと同じ *P. roqueforti* が使われる。

3) チーズの製造 (キモシン)

従来チーズ原料の乳の凝固には子牛の第四胃に由来する凝乳酵素 (キモシン) が利用されていた。しかし、20世紀後半になりチーズの消費量が増加し、キモシンの供給量も不足気味になり価格も高騰してきた。そこで有馬啓博士らは微生物からス

クリーニングをして接合菌類に属する *Rhizomucor pusillus* (リゾムコール・プシルス) (発見当時の学名は *Mucor pusillus* ムコール・プシルス) から子牛由来のキモシンとほぼ同等の作用を持つ酵素を発見した。1967年に製品化に成功し製造価格を大幅に低下させることができた。その後、*Rhizomucor miehei* (リゾムコール・ミーエイ) や子囊菌類の *Endothia parasitica* (エンドチア・パラシティカ) 由来の酵素も製品化されている。現在市販されているチーズの大半がこれらのカビの酵素を用いて製造されたものである。

さらに進んで遺伝子組換え技術を応用し、子牛のキモシンに関与する遺伝子を大腸菌などに挿入し目的の酵素を大量に製造する方法も完成し、アメリカその他の国々では商品化されている。わが国の遺伝子組換え食品に対する審査基準は厳しいが、すでに厚生労働省の安全性審査を通過している。

文献

- 文藝春秋編 (1993) チーズ図鑑。文芸春秋。
Hesseltine CW (1983) Microbiology of Oriental fermented foods. Ann. Rev. Microbiol. 37: 575-601.
伊藤 寛 (1988) テンペ。『醸造の事典』。(野白喜久雄他編)。pp. 539-549. 朝倉書店。
小泉武夫 (1999) 発酵食品礼讃。文藝春秋。
Leistner L (1990) Mould-fermented foods: Recent developments. Food Biotechnol. 4: 433-441.
宮下 章 (2000) 鯉節。法政大学出版局。
中野政弘 (1967) 発酵食品。光琳。
Pitt JI (1979) The Genus *Penicillium*. Academic Press.
ローズ AH (1982) 微生物による食料生産。サイエンス 11: 63-73。
高田正樹 (1995) カビ類の食品工業への応用。日菌報 36: 170-179。
高田正樹 (2004) インドネシアのカビ利用発酵食品見聞記。菌学会ニュースレター 2: 5-8。
高田正樹 (2005) カビを利用した日本とインドネシアの発酵食品について。きのこ研だより 26: 21-27。
Veen AG s (1968) Fermented peanut press cake. Cereal Sci. Today 13: 96-99。
安田正昭 (1990) とうふよう: ユニークな豆腐発酵食品。食生活研究 11: 10-18。

1 発酵のスタータとして用いられるもので、ラギとよばれている。