

DDGSハンドブック第4版 - Vol.3

DDGSの栄養分析と新たな発見をまとめたDDGSハンドブック第4版がアメリカ穀物協会から発行されました。こちらでその一部を和訳したものを数回にわたってご紹介いたします。

(前号より続く)

デンプンからエタノールへの変換

米国のエタノール生産ではトウモロコシが主要なデンプン(グルコース)源である。サトウキビを除けば、トウモロコシによるエタノール収量が他の原料すべてを上回る(表1)。しかしながら最近になって、トウモロコシ繊維とその他のセルロース原料をグルコースに変換してエタノール生産に使用する技術が開発された。グルコースをエタノールに変換した場合のエネルギー効率は約51.4パーセントで、二酸化炭素の生成は残る48.6パーセントに起因する。無水デンプンを原料としてエタノールを生産する場合の効率は約56.7パーセントである。エタノール生産に用いられる原料の栄養成分によって、生産されるジスチラーズ併産物の栄養組成が決まることになる。

表1. 各種原料のデンプン含有率とエタノール収量
(出典:Saskatchewan Agriculture and Food, 1993年)

原料	水分 (%)	デンプン (%)	エタノール収量 (L/MT)
デンプン	-	100.0	720
サトウキビ	-	-	654
大麦	9.7	67.1	399
トウモロコシ	13.8	71.8	408
オーツ麦	10.9	44.7	262
小麦	10.9	63.8	375

乾式粉碎エタノール生産

穀粒の微粉化

図10に示すように、乾式粉碎技術を用いたエタノール生産の最初のステップは、ハンマーミルでトウモロコシを粉碎して粒径を

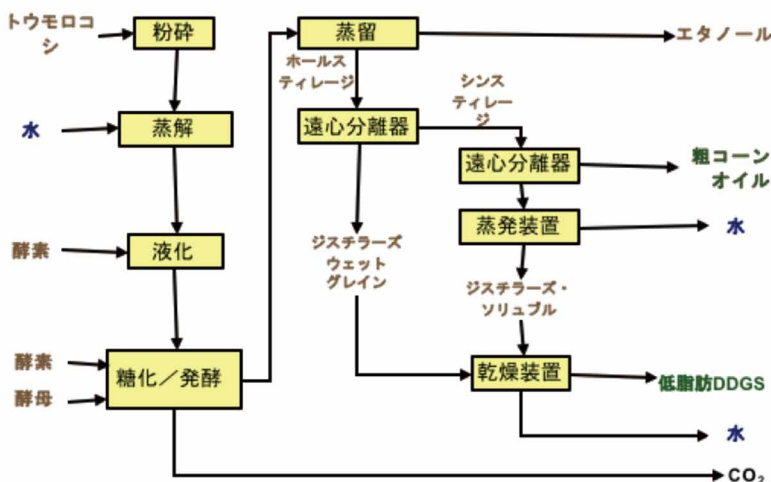


図10. 乾式粉碎エタノールと併産物の生産プロセス

小さくすることである。ハンマーミルは高速で回転するハンマーチップでトウモロコシを粉碎する。粉碎されたトウモロコシの粒度は主にローターの体積、ハンマーチップの速度、ハンマーの数およびスクリーンの目開きで決まる (Dupinら, 1997年)。ハンマーミルで用いられるスクリーンは通常その直径が3mm~5mmの範囲である。穀粒の粒径はエタノール収量に影響を及ぼすことがあるため (KelsallとLyons, 1999年)、エタノール製造業者は非常に細かくトウモロコシを粉碎してエタノールの収量を最大限まで高める傾向にある。表2から分かるように、5mmのスクリーンを通過するように粉碎したトウモロコシ粒の収量は、8mmのスクリーンを通過したものを0.20ガロン(0.85リットル)上回る。

表2. 粉碎トウモロコシ粒径別エタノール収量
(出典:KelsallとLyons, 1999年)

粒径	エタノール収量(ガロン/ブッシェル)
微粉碎トウモロコシ, 5mm スクリーン	2.65
粗粉碎トウモロコシ, 8mm スクリーン	2.45

蒸解と糖化

可溶性タンパク質、糖、非デンプン結合脂質の滲出を開始させるための添加物として、水と回収ステイラージュを粉碎したトウモロコシに加える (Chenら, 1999年)。その後、デンプンをグルコースに加水分解し、酵母 (Saccharomyces cerevisiae) のためにデンプン分解酵素を加えてグルコースをエタノールに変換する蒸解のプロセスを実施する。この蒸解プロセスで用いられる一般的な温度は予備混合タンクでは40~60℃、蒸解では90~165℃、液化は60℃である (KelsallとLyons, 1999年)。デンプンの糊化は50℃~70℃の温度範囲で開始する。デンプンをグルコースに変換するプロセスで重要なステップは、デンプン糊化を完了させることである (LinとTanaka, 2006年)。糊化の進行中、デンプン顆粒に含まれるアミロースのほほすべてが滲出するが (HanとHamaker, 2001年)、可溶化アミロースから成る顆粒とゲルが膨らむため、粘度が高まる (HermanssonとKidry matteran, 1995年)。

デンプン重合体を完全に加水分解するためには複数の酵素を組み合わせる必要がある。アミラーゼ類はデンプン業界で最も広く用いられている熱安定酵素である (Sarikayaら, 2000年)。アミラーゼ類にはαアミラーゼまたはグルコアミラーゼが含まれる (PoonamとDalel, 1995年)。糊化後すぐのデンプンの加水分解に用いる酵素は熱安定

性のあるものでなければならない。酵素の費用はエタノール生産コストの約10～20パーセントを占める(Greggら、1998年)。

エタノールプラントの中にはバッチ蒸解システムを採用しているところがあるが、連続蒸解システムで生産を行っているプラントもある(KelsallとLyons、1999年)。バッチ蒸解システムでは、既知量のトウモロコシ粕を既知量の水と回収ステイレージと混ぜ合わせる。連続蒸解プロセスでは、トウモロコシ粕、水および回収ステイレージを連続的に予備混合タンクに投入する。予備混合タンクでは糊化に必要な温度をわずかに下回る温度に保たれ、マッシュはジェットクッカーを経由して連続的にポンプで送り込まれる。クッカーの設定温度は120℃である。マッシュはクッカーから垂直カラムの最上部に入り、約20分かけて降下し、その後フラッシュチャンパーへと進み、80～90℃で液化する。液化のために高温に耐えるアマラーゼを穀物に対し0.05～0.08パーセントの重量濃度で添加する。液化／フラッシュチャンパーでの保持時間は約30分である。システム内のpHは6.0～6.5の範囲内で管理される。バッチシステムでは使用する酵素の数は連続システムよりも少なく、エネルギー効率も上回る。バッチシステムの主たるデメリットは時間単位の生産性または原料利用率が低下することである。

発酵

発酵は酵母によって糖をアルコールに変換するプロセスである。最も一般的に使用されている酵母はSaccharomyces cerevisiae (Pretorius、2000年)であるが、これはこの酵母を使用すると発酵プロセスのエタノールを18パーセントという高濃度にすることができるからである。Saccharomycesが人間にとって摂取しても安全(GRAS)な食品添加物であると広く認められている酵母(LinとTanaka、2006年)であるという理由もある。理想的な発酵では、約95パーセントの糖がエタノールと二酸化炭素に変換され、1パーセントが酵母細胞の細胞内物質に変換され、4パーセントがグリセロール等その他の生成物に変換される(Boultonetら、1996年)。酵母の費用はエタノール生産コストの約10%を占める(Wingrenら、2003年)。

予備発酵は発酵に望ましい数の酵母細胞を得るために実施するもので、3～5億の細胞/mlになるまで10～12時間攪拌する工程である。発酵は温度約33℃(Thomasら、1996年)、pH約4.0(NeishとBlackwood、1951年)で起こり、48～72時間続く(Ingledew、1998年)。エタノールに加え、二酸化炭素も生成されるが、回収されるか、あるいは大気中に放出される。

効率よくエタノールを生産する上で、通常の酵母増殖の管理が重要なファクターとなる。酵母の活性は発酵装置の温度に大きく依存している。Torijaら(2003年)の報告によれば、酵母の増殖と発酵に最適な温度はそれぞれ28℃と32℃である。S. cerevisiaeの高温(35℃超)での発酵効率は低い(Banatら、1998年)。そのため、発酵装置には冷却システムが必要とされる。

エタノールプラントで発酵槽を管理する上での課題のひとつは、他の微生物による汚染を避けることである。微生物汚染はエタノール収量およびエタノールプラントの生産性を低下させる原因となる(BarbourとPriest、1988年)。微生物汚染に関係する最も代表的な有機体は乳酸杆菌と野生酵母である。これらの微

生物はSaccharomyces cerevisiaeと栄養素(微量ミネラル、ビタミン類、グルコースおよび遊離アミノ酸窒素)を競い合い、酢酸または乳酸といった阻害最終生成物を産生する。野生酵母であるDekkera/Brettanomycesは燃料アルコールの生産で問題となる(AbbottとIngledew、2005年)。現在、燃料エタノールプラントでは抗生物質を使用することで乳酸バクテリア汚染を低減している(NarendranathとPower、2005年)。

エタノールの蒸留

発酵後、蒸留塔でエタノールを回収する。発酵槽から回収したエタノールには水が混入しているため、分子篩装置を用いて水分を除去し、純粋なエタノールを生産する。

コーンオイルの抽出

米国のエタノールプラントの大半(90パーセント以上)が様々な油分抽出技術を用いて、DDGSの生産に先立ち様々な量の油を抜き取っているが、現在はコーンオイル抽出を行っていない残りのエタノールプラントもこの技術を採用する可能性があり、また、すでにコーンオイルの抽出を実施しているエタノールプラントでも、新しい技術が開発され、さらに多くの油が抽出されていることから、将来的にジスチラーズコーンオイルの抽出が増加することが考えられる。粗コーンオイルの生産はトウモロコシを使用するエタノールプラントで行われており、コーンオイルはDDGS生産プロセスのシステイレージ部分から抽出されている(CEPA、2011年)。システイレージからコーンオイルを抽出するのは、発酵と蒸留の後であり、DDGS生産のために乾燥する前である。コーンオイル抽出システムを既存のエタノールプラントに追加することで、プラントのエネルギー効率が向上するとともに、処理トウモロコシのメートルトン当たりの総燃料生産量が増加する。既存エタノールプラントにコーンオイル抽出設備を設置することで、エタノール生産量に影響を及ぼすことなく、バイオディーゼルの原料生産が促進される。

エタノール業界では様々なコーンオイル抽出技術が商業的に利用可能となっている。エタノール蒸留後にシステイレージからコーンオイルを抽出するために、複数の独自開発プロセスが用いられている。エタノール業界の大半は、遠心分離を用いてホールステイレージからシステイレージを取り出し、このシステイレージからコーンオイルを抽出するプロセスを使用している(CEPA、2011年)。システイレージにはトウモロコシに含まれる利用可能な油分の約30パーセントが含まれており、結果として得られる部分濃縮システイレージを加熱し、第2の遠心分離装置によってコーンオイルを抽出する。熱交換器では蒸気でシステイレージの温度を上げて抽出を促進し、コーンオイルの抽出後に熱エネルギーはシステイレージから熱交換器に回収され、新たに投入されるステイレージの加熱に用いられる。一般に、こうしたプロセスでは、様々な構成したデカンタ、遠心分離装置、および熱を用いて、併産物処理の工程から物理的に30～70パーセントの油分を分離する。こうしたプロセスから生産されるジスチラーズコーンオイルはすべて食用には適していない。しかし、コーンジャームからコーンオイルを抽出して食用に適した品質の高いコーンオイル

をウェットミリングで生産する場合には、通常溶媒(ヘキサン)抽出が用いられる(Moreau, 2005年)。ヘキサン抽出は非常に効果的で、DDGS中のコーンオイルの90パーセントを抽出することができるが、ヘキサン抽出施設を建設するための設備投資の高コストがエタノール業界でのこの技術を採用するうえでの足かせとなっている。現在、ヘキサンによる抽出を使用してDDGSからコーンオイルを除去している施設は1件だけ(Novita社、サウスダコタ州ブルッキングズ所在)である。この施設では飼料グレードのコーンオイルと低脂肪(粗脂肪3.5パーセント)DDGSを生産している。

コーンオイル抽出をしない場合には、生産されるエタノール3.8リットル当たりのDDGS生産量は2.4kgで(CEPA, 2011年)、一方コーンオイル抽出を行ったDDGSの収量は、生産されるエタノール1リットル当たり約0.06kg減少し、これは9.4パーセントの低下となる。コーンオイルの除去はDDGSの栄養組成に影響を及ぼし、主として粗脂肪含有率が低下するが、エネルギー価およびタンパク質の含有量への影響には幅がある。低脂肪DDGSを各種の動物に給与する場合の影響についての詳細な情報は、第13、15、17、18、20、21、24および25の各章を参照されたい。

併産物の生産

エタノールの蒸留後に残る水分と固形物はホールステイレージと呼ばれる。ホールステイレージは主として水分や繊維、タンパク質、油分から構成される。混合物であるこのホールステイレージは遠心分離で粗固形物と液体とに分離させる。シンスティレージと呼ばれる液体は更に遠心分離器にかけて油分を抽出し、その後蒸発装置で処理して余分な水分を除去し、乾物が約30パーセントの濃縮ジスチラーズ・ソリュブル(シロップ)を生産する。濃縮ジスチラーズ・ソリュブル(CDS)は地元の家畜生産者に販売するか、粗固形物と混合して乾燥させ、ドライド・ジスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル(DDGS)にすることができる。ウェットケーキとも呼ばれる粗固形物には乾物が約35パーセント含まれており、乾燥させることなく地元の家畜生産者に販売するか、乾燥させてドライド・ジスチラーズ・グレインを生産するか、あるいは濃縮ジスチラーズ・ソリュブルと混ぜ合わせて乾燥させ、DDGS(乾物88パーセント)にすることができる。乾式粉碎エタノールプラントで生産される各種併産物の割合を図11に示している。

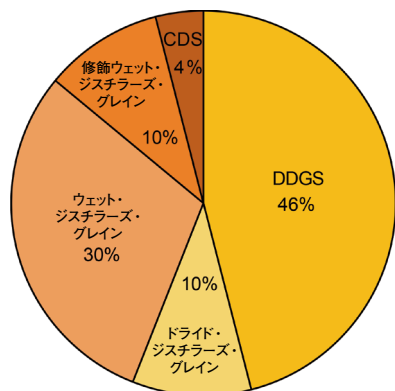


図11. 乾式粉碎エタノールプラントで生産される各種併産物の割合 (RFA, 2017年)

References

- Abbott, D.A., and W.M. Ingledeu. 2005. The importance of aeration strategy in fuel alcohol fermentations contaminated with Dekkera/Brettanomyces yeasts. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 69: 16-21.
- Banat, I.M., P. Nigam, D. Singh, R. Merchant, and A.P. McHale. 1998. Ethanol production at elevated temperatures and alcohol concentrations: A review; Part-I Yeast In General. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 14: 809-821.
- Barbour, E.A., and F.G. Priest. 1988. Some effects of Lactobacillus contamination in scotch whisky fermentations. *J. Inst. Brew.* 94: 89-92.
- Boulton, B., V.L. Singleton, L.F. Bisson, and R.E. Kunkee. 1996. Yeast and biochemistry of ethanol fermentation. In: *Principles and Practices of Winemaking*, Boulton B, Singleton VL, Bisson LF, Kunkee RE (eds). Chapman and Hall, New York, pp. 139-172.
- California Environmental Protection Agency. 2012. California-Modified GREET Pathway for the Production of Biodiesel from Corn Oil at Dry Mill Ethanol Plants. Stationary Source Division, Release Date: November 3, 2011, Version 2.0. 40 pp.
- Chen, J.J., S. Lu, and C.Y. Lii. 1999. Effect of milling on physicochemical characteristics of waxy rice in Taiwan. *Cereal Chemistry* 76: 796-799.
- Dupin, I.V.S., B.M. McKinnon, C. Ryan, M. Boulay, A.J. Markides, P.J. Graham, P. Fang, I. Boloni, E. Haque, and C.K. Spillman. 1997. Comparison of energy efficiency between roller mill and a hammer mill. *Appl. Engineering in Agric.* 13: 631-635.
- Goering, C.E., M.D. Schrock, K.R. Kaufman, M.A. Hanna, F.D. Harris, and S.J. Marley. 1987. Evaluation of vegetable oil fuels in engines. *Proc. Int'l. Winter Meeting of ASAE*, Paper No.87-1586. St. Joseph, MO.
- Gregg, D.J., A. Boussaid, and J.N. Saddler. 1998. Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresour. Technol.* 63: 7-12.
- Han, X.Z., and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. *J. Cereal Sci.* 34: 279-284.
- Hermansson, A.M., and S. Kidry matteran. 1995. Starch-A phase-separated biopolymer system. In: S.E. Harding, S.E. Hill and J.R. Mitchell, Editors, *Biopolymer Mixtures*, Nottingham University Press, UK. pp. 225-245.
- International Energy Agency (IEA). 2015. *World Energy Outlook 2015*. Paris, 200 pp.
- Ingledeu, W.M. 1998. Alcohol production by *Saccharomyces cerevisiae*: A yeast primer. Chapter 5 In: *The alcohol textbook*. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press, Nottingham, UK.
- Kelsall, D.R., and T.P. Lyons. 1999. Grain dry milling and cooking for alcohol production: designing for 23 percent ethanol and maximum yield. Chapter 2. In: *The alcohol textbook*. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press, Nottingham, UK.
- Licht, F.O. 2013. *World Ethanol and Biofuels Report*, London, Agra Inf.
- Lin, Y., and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 69: 627-642.
- Moreau, R.A. 2005. Corn oil in edible oil and fat products. In: *Baileys Industrial Oil and Fat Products*, Vol.2: Edible Oil and Fat Products: Edible Oils, ed. F. Shahidi, pp. 149-172. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Narendranath, N.V., and R. Power. 2005. Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of Lactobacilli and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 2239-2243.
- Neish, A.C., and A.C. Blackwood. 1951. Dissimilation of glucose by yeast at poised hydrogen ion concentrations.

Can. J. Technol. 29 : 123-129.
 Poonam, N. and S. Dalel. 1995. Enzyme and microbial systems involved in starch processing. Enzyme Microb. Technol. 17 : 770-778.
 Pretorius, I.S. 2000. Tailoring wine yeast for the new millennium : Novel approaches to the ancient art of winemaking. Yeast 16 : 675-729.
 Renewable Fuels Association. 2017. Annual Industry Outlook. <http://www.ethanolrfa.org/pages/annual-industry-outlook>
 Sarikaya, E., T. Higassa, M. Adachi, and B. Mikami. 2000. Comparison of degradation abilities of α - and β -amylases on raw starch granules. Proc. Biochem. 35 : 711-715.
 Saskatchewan Agriculture and Food. 1993. Establishing an Ethanol Business.
 Thomas, K.C., S.H. Hynes, and W.M. Ingledew. 1996. Practical and theoretical considerations in the production of high concentrations of alcohol by fermentation. Proc. Biochem. 31 : 321-331.

Torija, M.J., N. Rozès, M. Poblet, J.M. Guillaumon, and A. Mas. 2003. Effects of fermentation temperature on the strain population of *Saccharomyces cerevisiae*. International J. Food Microbiol. 80 : 47-53.
 Wingren, A.M., Galbe, and G. Zacchi. 2003. Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. Biotechnol. Prog. 19:1109-1117.
 Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986a. Comparative analysis of the long-term performance of a diesel engine on vegetable oil-based alternative fuels. SAE Technical Paper Series, No. 860301. Warrendale, PA.
 Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986b. Influence of vegetable oil based alternative fuels on residue deposits and components wear in a diesel engine. SAE Technical Paper Series, No.860302. Warrendale, PA.

(第3章終わり)

米国農務省「世界農業需給予測(WASDE)」による 飼料穀物 (トウモロコシ、ソルガム、大麦) 需給概要の抜粋

2018年11月8日米国農務省発表の世界農業需給予測の米国産飼料穀物に関する部分の抜粋の参考和訳を以下に掲載いたします。WASDE のフルレポートについては(<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/>)よりご確認ください。また、数値や内容については、原文のレポートのものが優先いたします。各項目の詳細、注釈についても原文をご参照ください。

今月の2018/19年度の米国産トウモロコシの見通しは、生産の縮小、飼料そのほかへの利用と輸出の減少と期末在庫の減少となっています。トウモロコシの生産は、単収予測の引き下げにより、先月より1億5,200万ブッシェル下方修正されて146億2600万ブッシェルと予測されています。飼料そのほかへの利用は、収穫量の減少と価格の上昇に基づいて5,000万ブッシェル下方修正されています。輸出量は、ウクライナとの競争が増すと予測されていることから、5,000万ブッシェル引き下げられています。供給量の引き下げが利用料の引き下げを上回るため、トウモロコシの期末在庫は先月より7,700万ブッシェル下方修正されています。トウモロコシの年間平均農家出荷価格の予測は、中央値で10セント引き上げられて1ブッシェル当たり\$3.60となっています。

中国のトウモロコシの生産量、国内利用量、期末在庫は、2007/08市場年度以降のものについて、見直されています。トウモロコシに関するバランスシートの修正結果は、米国農務省海外農務局の生産需給ウェブサイトとWASDE過去修正ウェブページにてご覧になれます。

中国の国家統計局(NBS)はトウモロコシの在庫と消費に関する予測は発表していません。米国農務省のトウモロコシ在庫予測は、NBSの公式生産予測、中国税関の貿易データとそのほかの関連する利用に関するデータに基づいています。2007/08から2017/18市場年度までの期間について、NBSはトウモロコシの総生産量について、これまでにない2億6,600万メートルトンの引き上げを行っています。米国農務省は国内消費量を引き上げ、その結果、2018/19市場年度の期末在庫に総計で1億4,900万トンの追加を行い、在庫レベルを引き上げています。飼料そのほかへの利用についての変更によって、ほかの条件とも併せ、大豆相当量のタンパク質の消費、トウモロコシ価格、ほかのエネルギー

源の利用やそのほかの統計的誤差に影響が及ぶと考えられます。重要なことは、米国農務省による中国の粗粒穀物輸入の予測に、この修正による変化はなく、粗粒穀物をはじめとするエネルギー源の輸入量が、中国国内に大量のトウモロコシ在庫が積みあがっていた期間に急上昇した事実を、まだ反映しているということです。

世界の2018/19年度の粗粒穀物生産見通しは、中国でのトウモロコシ生産の増大が主に寄与して、2,990万トン引き上げられて13億7,330万トンとなっています。中国以外では、トウモロコシ生産量は、ウクライナ、アルゼンチン、ケニア、モルドバとロシアで増加が予測されています。EUでのトウモロコシ生産量は、主にハンガリー、ポーランドとドイツでの減少を反映して引き下げられています。

トウモロコシの輸出は、ウクライナ、アルゼンチンとモルドバで引き上げられています。輸入はEU、ベトナムとイランで引き上げられています。大麦の輸入はサウジアラビアで引き上げられているとともに、ロシアとウクライナからの輸出が増加予測となっています。中国を除いて、米国外のトウモロコシ期末在庫は、主にアルゼンチン、イラン、パラグアイとベトナムでの増大を反映して、先月より高くなっています。

ネットワークに関するご意見、
ご感想をお寄せ下さい。



U.S. GRAINS COUNCIL アメリカ穀物協会

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目2番20号
第3虎の門電気ビル11階

Tel: 03-6206-1041 Fax: 03-6205-4960

E-mail: grainsjp@gol.com

本部ホームページ (英語) :<http://www.grains.org>
日本事務所ホームページ (日本語) :<http://grainsjp.org/>