

材料の流動解析によるスラグ形状および金型形状の研究開発*

外山 真也^{*1}・佐藤 征亜^{*1}・河野 通成^{*2}・平田 幸次^{*2}
木之下 弘幸^{*3}・海津 浩一^{*4}・池田 清彦^{*3}

Study on Influence of Slug Shape on Metal Flow in Simultaneous
Forward-Backward Extrusion in Forging Process

Masaya TOYAMA, Masatsugu SATOH, Michinari KAWANO, Kouji HIRATA,
Hiroyuki KINOSHITA, Kouichi KAIZU and Kiyohiko IKEDA

従来、自動車のシートベルトなどの機能部品として使用される複合ギアやダブルギアなどは、冷間鍛造により一定の形状に成形された後に、切削加工により製品寸法に成形されていた。しかしながら、近年の製造時間の短縮化、材料コスト削減の要望とともに、冷間鍛造のみによるネットシェイプ成形が強く要求されている。

そこで本研究では、複合ギアやダブルギア成形のモデル実験、ならびに三次元有限要素解析を行い、冷間鍛造成形により製品形状にネットシェイプ成形できる最適スラグ形状について検討し、スラグ形状によって材料の塑性流れをコントロールできることを明らかにした。

キーワード：冷間鍛造，CAE，有限要素法，シミュレーション，ニアネットシェイプ

1 はじめに

研究で対象とする複合ギアは、図1に示すように、ギア部とカム部から構成されている自動車用部品である。材質には、一般に高強度の炭素鋼鋼材が用いられている。この複合ギアを、経験的に決定した形状のスラグを用いて前方後方押し鍛造により成形した場合には、ギア部の先端部がテーパ状となり、カム部ではオーバーフローとなる部分があった¹⁾。そのため、それらの部分を切削加工により除去して製品寸法に仕上げられていた。

そこで本研究では、一工程の押し鍛造で製品形状に近い形状に成形することにより、その後の切削加工を減し、製造時間の短縮、材料コスト削減を目指した。具体的には、素材の初期形状（スラグ形状）に着目し、数種類のスラグ形状につい

て、アルミニウム合金A1070材を用いた複合ギア成形のモデル実験、ならびに塑性流動解析ソフト(Deform)を用いた三次元剛塑性有限要素解析を行い、製品形状にネットシェイプ成形できるスラグ形状について検討した²⁾。

さらに、より複雑な形状であるダブルギアの鍛造成形にも取り組み、二段工程の鍛造成形において、量産化が可能であることを実証した。

2 実験方法および有限要素解析方法

図2は、有限要素解析モデルを示している。また、有限要素解析の条件を表1に示す。有限要素解析は、三次元剛塑性有限要素法により行い、スラグの素材を実材料に相当するAISI-4140とした。

本研究では、当初単純な円筒形状をもとにした一定断面積を持つ9種類のスラグ形状を考案し解析した。その結果をもとに、丸みを帯びた形状の4種類のスラグ形状を考案した。それらを使用して、複合ギアの成形性におよぼすスラグ形状の影響について検討した。具体的には、直径が異なる

* 特定ものづくり基盤技術の高度化事業

*1 機械電子部

*2 株式会社 ニチワ

*3 宮崎大学工学部

*4 兵庫県立大学工学部

単純な円筒3種類、それから試験片の底部に突起を設けた円筒3種類、および変断面と底部に突起を持つ円錐3種類、さらに、丸みを帯びた形状4種類の試験片を用いて、モデル実験ならびに有限要素解析を行った。

アルミニウム合金A1070材を用いたモデル実験は、万能試験機を使って行い、パンチストロークが3mm, 6mm, 9mm, および最終ストロークにおけるスラグの変形した形状を詳細に観察した。

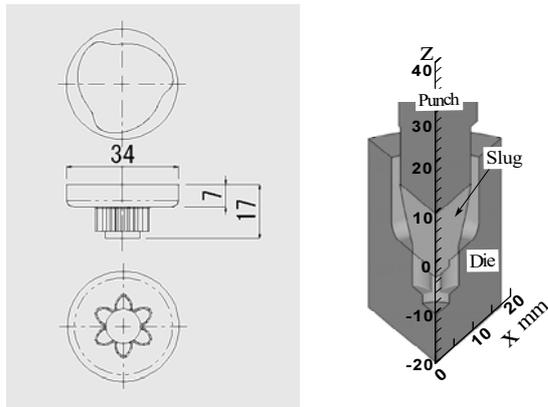


図1 複合ギア概略図 図2 解析モデル

表1 解析条件

Material: AISI-4140	$\sigma=799.83\epsilon^{0.244}$
Flow stress (MPa)	
Total number of elements	30000
Punch speed	0.67mm/s
Punch stroke	19.6mm (In case of T101)
Increment of one step	0.05mm
Frictional coefficient of shear friction law	0.1

3 実験結果および有限要素解析結果

3-1 複合ギアモデル実験の結果

プレス実験の結果から、スラグの断面積が小さい場合には、ギア先端部の成形性は良いが、カム部の成形性は悪い。一方、スラグの断面積が大きい場合には、ギアの先端部がドーム状(テーパ状)

となりギア部の成形性が悪いことがわかった。また、試験片の底部に突起を設けると、ギア部先端が平らな形状になり、ギア部の成形性が良くなることがわかった。そして、変断面を持つ試験片のモデル実験の結果、下側断面が小さく、上側断面が大きい試験片を用いた場合に、ギア部とカム部の両方の成形性が良いことが明らかになった。

さらに、丸みを帯びたスラグ形状のプレス実験を行い、ほぼ製品形状と同等の形状を得ることが可能になった。そのスラグの形状と実験結果の一部を図3に示す。

また、丸みを帯びたスラグ形状に関して金型解析を実施したところ、図4(b)に示すとおり応力が低減され、金型への負荷が小さいことが確認できた。

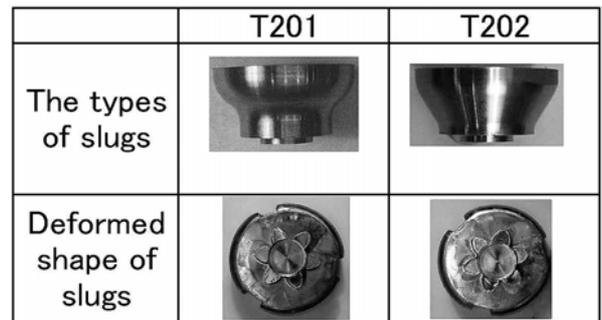
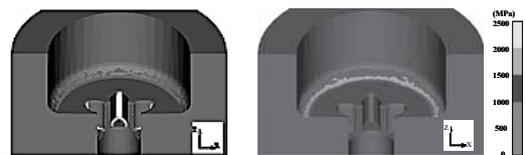


図3 プレス実験の結果



(a) 円筒形状のスラグを使用した場合 (b) 丸みを帯びたスラグを使用した場合

図4 金型応力分布

3-2 ダブルギアモデル実験の結果

図5にダブルギアの製品形状を示す。このダブルギアの成形性の評価においては、複合ギアにおける解析結果をもとに、約20種類のスラグ形状を考案し、解析した。その塑性流動解析の状況を図6および7に示す。図6の解析においては、図8の1)に示す金型モデルを用いて解析した。この

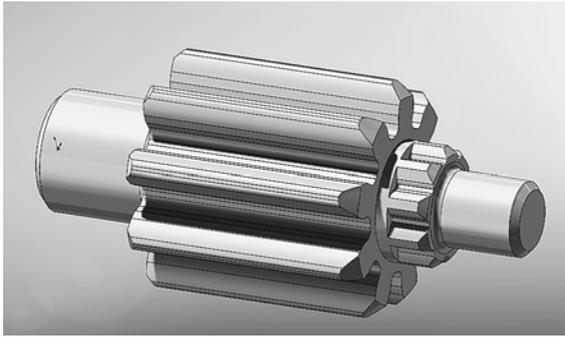


図5 ダブルギアの製品形状

とき、上方から押し出しピンによりスラグが変形し、金型の外側へ流れ出していることがわかった。

そこで、図8の2)に示すように金型の壁面(大ギアの外形に沿った壁面)の長さを伸ばして、スラグが外側へ流出することを防止するようにした。その解析状況を図7に示す。

これらの解析結果をもとに、材料S10Cを使用し、プレス実験を実施した。しかし、取り出し時の荷重が約9 ton程度となり、小ギア部分のシャフトなどが変形した。

そこで、やむなく二段の鍛造工程による成形、すなわち一回目に小ギア部分、二回目に大ギア部分を成形する工程を検討した。このとき、二回目の成形後の取り出しにおいては、小ギア部分を傷めないようにするため、取り出しピンの形状は、外形は大ギアの形状で、内径は小ギアの最大直径の円筒で中空にした形状となった。

実際のプレス実験による結果を図9から10に示す。図9は小ギア部分のみを成形した結果で、成形荷重は3ton程度である。図10は大ギア部分の成形結果で、成形荷重は27ton程度である。

3-3 背圧制御による成形実験

これまでの研究により、ダブルギアの成形は二段工程により、成形可能であることがわかった。このダブルギアのプレス実験に使用した金型には、大ギア部分の入り口においてテーパ部分を設け、材料の流れ込みを容易にしようとしている。そのため、大ギアの先端部分は、少し斜めに傾いている。

そこで、より大ギア部分の成形性を向上させようと背圧制御を付加したプレス実験を実施した。その結果を図11に示す。大ギア部分の成形時に背

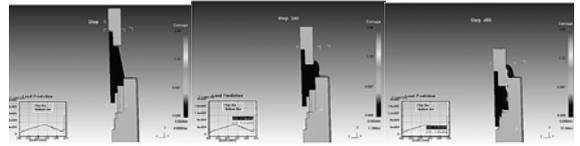


図6 ダブルギアの塑性流動解析状況(1)

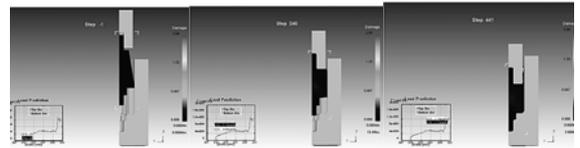
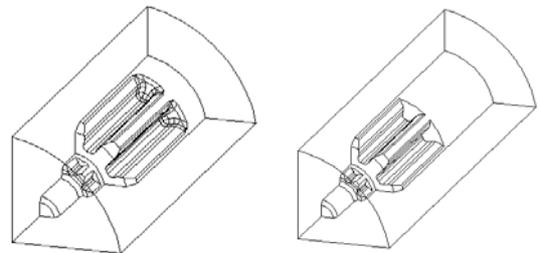


図7 ダブルギアの塑性流動解析状況(2)



1) 壁面長さ 4 mm 2) 壁面長さ12mm

図8 解析モデルにおける金型の変更



図9 小ギア部分の成形実験結果

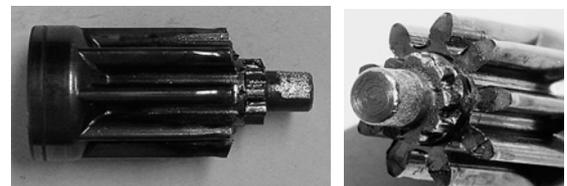


図10 大ギア部分の成形実験(背圧なし)

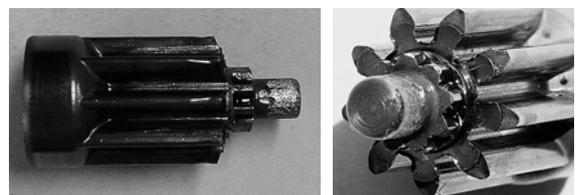


図11 大ギア部分の成形実験(背圧あり)

圧 (0.3ton程度) をかけることにより, 大ギアの先端形状が改善されていることがわかった。

4 おわりに

本研究では, スラグ形状に着目し, 複合ギア成形のモデル実験, ならびに三次元剛塑性有限要素解析を行い, ネットシェイプ成形が可能な最適スラグ形状について検討した。さらに, それらの結果をもとに, ダブルギアの成形性についても同様に実験及び解析を行い, 製品化の目途を立てた。

得られた結果は以下のとおりである。

複合ギアについて

- (1) 下側断面が小さく, 上側断面が大きい変断面を持つスラグを用いると, ギア部とカム部の両方の成形性が良好であることがわかった。
- (2) 上記の結果をもとに, 前方後方押出しによる複合ギアを成形するための最適なスラグ形状を明らかにすることができた。

ダブルギアについて

- (3) 二段の成形工程によりダブルギアの成形が可能であることを実証した。
- (4) 背圧制御を実施することでギア部の成形性を向上させることが可能である。

本研究は, 「特定ものづくり基盤技術の高度化」事業において実施されたものである。記して謝意を表す。

5 参考文献

- 1) Jiro Saga and Hiroto Nojima: *Journal of the JSTP*, 12-127, 611-621 (1971)
- 2) 河野通成 他: 日本機械学会第21回計算力学講演会論文集, 8-33, 750-751 (2008)
- 3) 佐藤征亜 他: 日本機械学会第21回計算力学講演会論文集, 8-33, 748-749 (2008)
- 4) Masaya Toyama etc, ICTP 2008, WE 2-6, 602-603 (2008)

干したくあんの下漬け中における成分変化*

長友 絵美^{*1}・福山 明子^{*1}・柚木崎 千鶴子^{*1}・児玉 浩子^{*1}

Change of Ingredients on Hoshitakuan in Storing with Rice Bran and Salt

Emi NAGATOMO, Akiko FUKUYAMA, Chizuko YUKIZAKI and Hiroko KODAMA

干したくあんの下漬け中の成分変化を把握するため、製造方法の異なる工場より定期的にサンプリングを行い、各成分を測定した。本県産干したくあんの特徴である γ -アミノ酪酸 (GABA) は、下漬け初期の4月の時点で136~187mg/100g含まれており、漬け込み期間中に大きな変動はないことがわかった。また、乳酸菌数は漬け込み期間中に変動し、地下タンクにて漬け込みを行う方法では、7月から8月の間に増加傾向であった。

キーワード：干したくあん, γ -アミノ酪酸 (GABA)

1 はじめに

干したくあんは本県の伝統的な農産加工食品であり、大根を干す工程である「大根やぐら」は県内の冬の風物詩として知られている。

漬物生産の中で、干したくあんを含むたくあん漬は最大の生産量を誇っていたが、年々減少傾向にある。かつては本州、九州で生産されていた干したくあんは現在、本県と鹿児島県のみとなっており、本県が干したくあんの有数の産地であることもあまり知られていない。このような状況の中、干したくあんの成分特性を明らかにし、価値を高めることで認知向上を図ることが望まれており、県内の製造企業とともに干したくあんの地域ブランド化に向け取り組んでいる。

これまでの研究において、県産干したくあんの特徴として、下漬け中の干したくあんにアミノ酸の一種である γ -アミノ酪酸 (GABA) が含まれていることを確認した¹⁾。

本研究では、県内の干したくあん製造企業から下漬け中のたくあんを定期的にサンプリングし、下漬け期間中における成分特性とその変化について調査した。

2 実験方法

2-1 試料

干したくあんの製造方法は、下漬けを冷蔵庫で行う方法と地下タンクで行う方法に分けられる。これらの方法で製造する2工場で、平成20年1月に漬け込んだたくあんを平成20年11月までの8か月間、1か月ごとにサンプリングし分析に供した。原料は約2週間天日干して結べる程度まで乾燥した干し大根を使用した。

以下、冷蔵庫で漬け込む工場からサンプリングした試料をA、地下タンクで漬け込む工場からサンプリングした試料をBとした。

2-3 試料の調製

サンプリングしたたくあんは既報¹⁾の方法に従い分析に供した。すなわち、サンプリングした4本のうち、1本は乳酸菌測定に使用し、残り3本はそれぞれフードプロセッサーにて粉碎し1本ずつ分析した。また、採取したタンク内の液をサンプリングし乳酸菌試験に用いた。粉碎した一部はナイロンろ布にて搾汁後、Brix示度、pHの測定に供した。また、粉碎したたくあんを一定量秤り取り、適量の蒸留水を加え、ま碎し、ろ紙にてろ過しながら定容した。このろ液を用いて塩分濃度を測定し、さらに、0.45 μ mのフィルターでろ過した液を適宜希釈し、アミノ酸含量、有機酸含量、

* 干したくあんの地域ブランド化に関する研究

*1 食品開発部

糖含量の分析に供した。

2-4 成分分析

1) 水分, Brix示度, pH, 塩分濃度の測定

水分は, 粉碎したたくあんを減圧乾燥機にて, 70℃, 5時間乾燥し測定した。Brix示度は搾汁液を手持ち式糖用屈折計 (ATAGO製P-1), pHはpHメーター (HORIBA製 pH/ION METER F-24) を用いて測定した。塩分濃度は, ろ液を用いてモール法²⁾にて測定した。

2) アミノ酸含量の測定

アミノ酸含量はアミノ酸分析計により測定した。2-3で示す方法で抽出したろ過液を0.02N HClにて適宜希釈し, 下記の測定条件によりアミノ酸分析計で定量した。

装置: アミノ酸分析計 (株日立製作所製 L-8800
あるいはL-8900形)

検出: ニンヒドリン発色法

3) 糖含量の測定

糖含量は, 下記の測定条件により高速クロマトグラフィー (HPLC) で定量した。

装置: HPLC (株島津製作所製 LC-10AD)

検出器: 示差屈折率

カラム: COSMIL Suger-D (4.6mm×250mm)

カラム温度: 40

移動相: 80%アセトニトリル溶液

流量: 1 mL/min

4) 有機酸の測定

有機酸含量は下記の測定条件により高速液体クロマトグラフィー (HPLC) で定量した。

装置: HPLC (株島津製作所製 LC-10AD)

検出器: 電気伝導度

カラム: Shim-pack SCR-102H (8mm×300mm)

カラム温度: 40

移動相: p-トルエンスルホン酸水溶液 (分離用),
5 mM p-トルエンスルホン酸および100
μM EDTAを含む20mM Bis-tris水溶液
(検出用)

流量: 0.8mL/min

5) 乳酸菌数の測定

干したくあんは縮分し細かく刻んだものを一定量秤り取り, 0.05%トリトンXを添加し, かくはんした。また, 漬け込みタンク内の液はそのまま

使用した。MRS培地 (Difco MRS 5.5%, Bacto Ager2.0%) をオートクレーブ滅菌後, 寒天平板培地を作成し, 0.05%トリトン-100Xで適宜希釈した液を100 μLづつ塗抹し, 嫌気ジャー (三菱ガス化学株式会社, Anero Pack・ケンキ, Anero Pack・角形ジャー) を用いて, 30℃で3日間培養を行った。培養後, 出現したコロニーを計測した。

3 結果および考察

3-1 成分分析

1) 水分, Brix示度, pH, 塩分

水分の平均はAが75%, Bが72%で概ねAのほうがBより高く推移した (図1)。水分は漬け込み時の原料大根の乾燥程度, 添加する塩の量による脱水の程度が影響する。B社のほうが漬け込み時の塩分濃度が高いため脱水が進んで水分が低いのではないかと推察された。

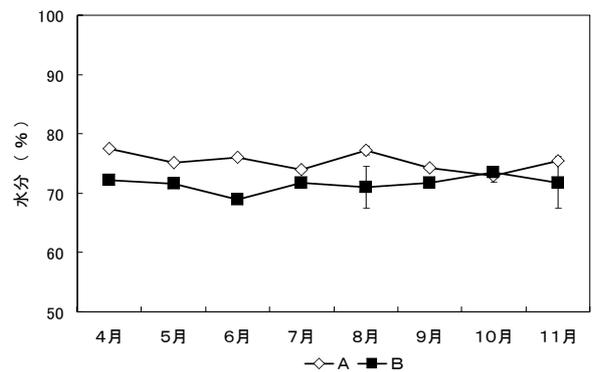


図1 水分含量

Brix示度は平均でAが21%, Bが25%と分析期間を通してBのほうが高い傾向を示した。Brix示度には塩分が含まれるため, Bが高い値を示したと考えられる。

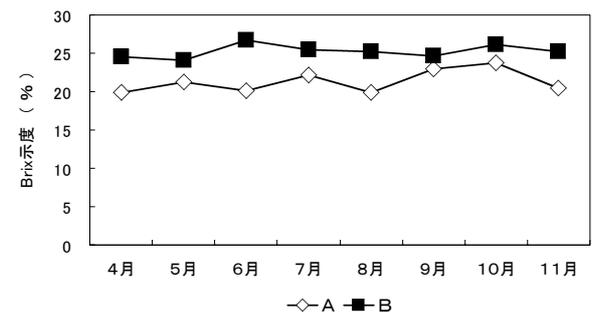


図2 Brix示度

pHは平均でAが5.1, Bが5.2と差はなく, 漬込み期間中は大きな変動はなかった(図3).

塩分は平均でAが4.1%, Bが7.0%とBのほうが分析期間を通して高く推移した(図4). Aは冷蔵庫で貯蔵を行うため, 低塩での漬込みが可能であり脱塩を行わずに製品となる. Bは地下タンクで温度が冷蔵庫に比べ上昇するため, 塩分濃度を高くして保存性を保っており, 調味前に脱塩を行い塩分濃度を調整し, 製品となる. そのため, AよりBが塩分を高く設定し, 漬け込んでおり, 測定結果にも反映されていた.

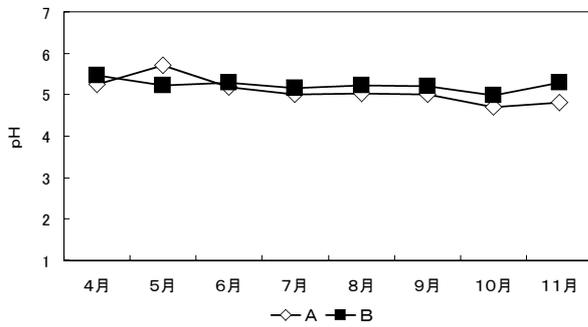


図3 pH

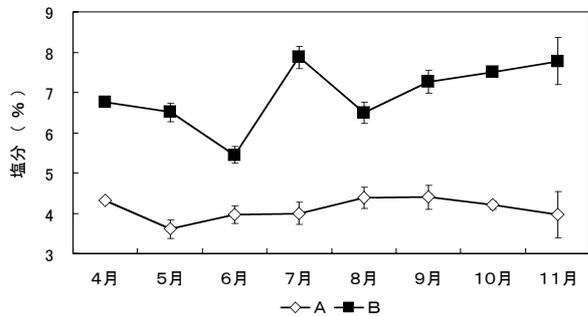


図4 塩分

2) アミノ酸含量

下漬け中の干したくあんの主要なアミノ酸は, グルタミン, GABA, プロリンであり, GABAは4月の時点でAが184mg/100g, Bが136mg/100g含まれており, 下漬け期間中の6月以降にわずかに増加する傾向が見られた(図5, 6). GABAは発芽玄米, 茶葉, 発酵食品, 漬物等に含まれており³⁾, 近年ではGABAを強化した醤油や菓子類も市販され, 機能性が消費者にも認知されつつある. Aにおいては, 漬込み期間が長くなるほどプロリン含量が増加した. GABA生成経路において, グルタミン酸からGABAが生じ, グルタミン

もグルタミン酸を経てGABAに変化すると報告⁴⁾があるが, 今回の結果からはGABAとグルタミン酸およびグルタミン含量との相関は得られなかった. 茶のGABA生成では, 嫌気的条件下において, アスパラギン酸とグルタミン酸からGABAとアラニンが生じると報告があるが⁴⁾, 干したくあんのアミノ酸含量の結果においては, アスパラギン酸の減少およびアラニンの増加はなく, 茶の結果とは異なった.

また, 下漬け中の干したくあんの味に影響すると思われるアミノ酸については, 苦味を示すと言われるアルギニン, ロイシン, フェニルアラニン, ヒスチジンが検出され, 7月以降に増加する傾向

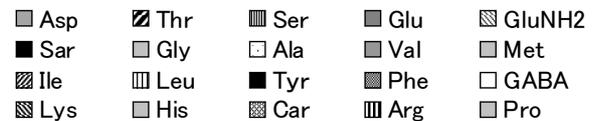
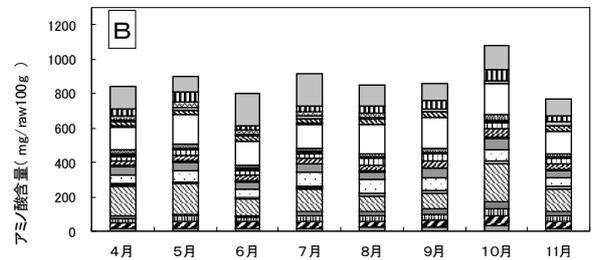
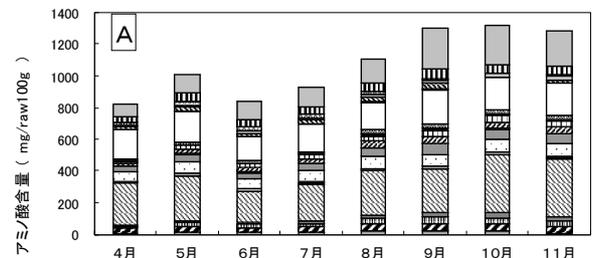


図5 遊離アミノ酸含量

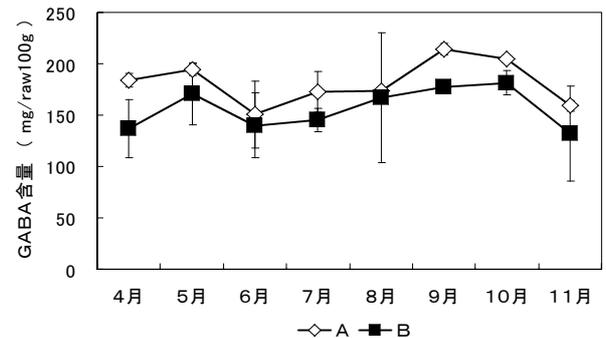


図6 GABA含量

にあった。甘味を呈するアミノ酸については、Aにおいてプロリンが7月以降に増加した。

3) 糖含量

下漬け中の干したくあんの糖は果糖、ブドウ糖で構成されており、平均でAが果糖3.6g/100g、ブドウ糖4.6g/100g、Bが果糖3.8g/100g、ブドウ糖4.9g/100gと分析期間を通して、ブドウ糖が高く推移した。また、Aでは漬け込み期間が長くなるほど糖含量が増加する傾向が見られた(図7)。

Brix示度の値から、糖以外の可溶性固形分であるアミノ酸、塩分を差し引くとそれぞれ、7.0および9.2となり、糖含量の結果と同様にBのほうが高い値となった。

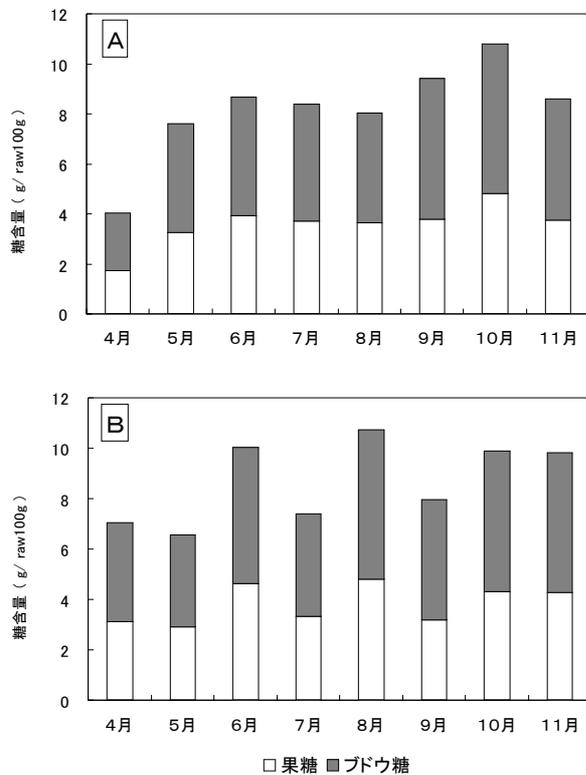


図7 糖含量

4) 有機酸含量

有機酸は、クエン酸、リンゴ酸、コハク酸、乳酸、ギ酸、酢酸で構成されており、リンゴ酸が主要な有機酸であった。リンゴ酸は大根由来の有機酸であると思われ、有機酸含量はAでは漬け込み期間中の7~9月に増加傾向が見られた。また、クエン酸、リンゴ酸が7~9月に増加した。Bでは、有機酸含量は9~11月に低く推移し、6~8月に乳酸が増加した(図8)。

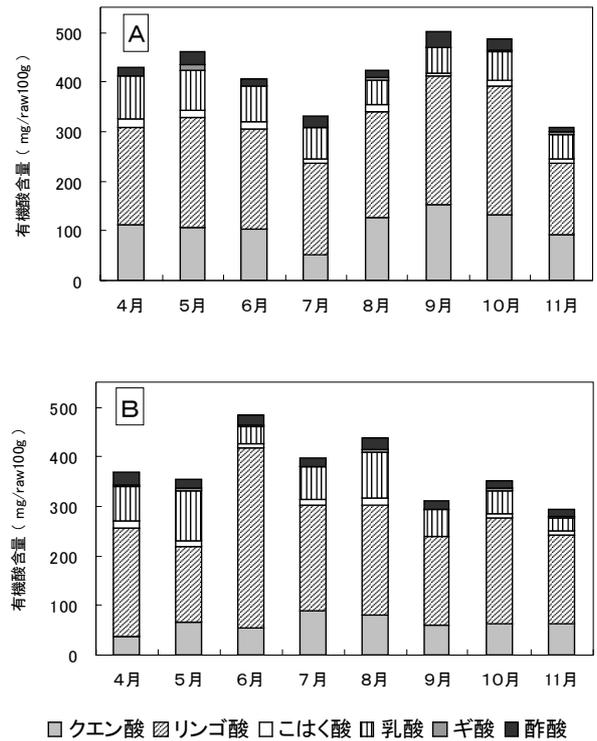


図8 有機酸含量

5) 乳酸菌

下漬け中の干したくあんの乳酸菌数はBでは4月から7月の間、 10^3 CFU/gで推移し、Aでは分析期間中0から 10^3 CFU/gで推移した(図9)。乳酸菌は温度の影響を受けるため、AとBではBのほうが生育しやすい環境であると思われた。また、一般的に乳酸菌がグルタミン酸からGABAを生成することが知られているが、GABAと乳酸菌数の相関は今回の結果では得られておらず、干したくあんにて、乳酸菌によるGABA生成の可能性は低いと考えられた。

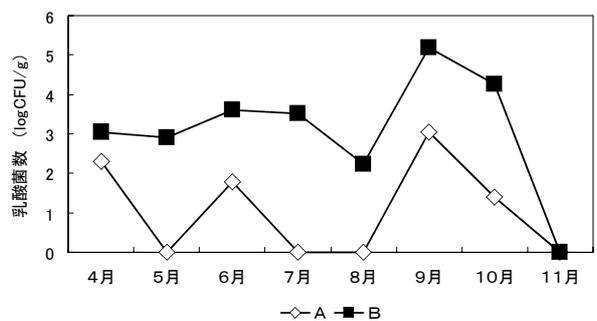


図9 乳酸菌数

4 まとめ

県内で製造される冷蔵庫漬け込みと地下タンク漬け込み中の干したくあんの成分を比較し、以下のことがわかった。

下漬け中の干したくあんの水分、Brix示度、塩分濃度は漬け込み中において大きな変動はなく、漬け込み開始からほぼ一定の値で推移した。干したくあんの主要なアミノ酸である γ -アミノ酪酸 (GABA) は4月の時点で冷蔵庫で漬け込む方法では184mg/100g、地下タンクで漬け込む方法では136mg/100g含まれていることがわかり、6月以降にもわずかに増加する傾向が見られた。

糖は果糖、ブドウ糖で構成され、その含量は冷蔵庫で漬け込む方法では漬け込み期間が長くなるほど増加した。

主要な有機酸はリンゴ酸であり、その含量は冷蔵庫で漬け込む方法において7～9月に増加した。コハク酸、ギ酸、酢酸は分析期間中、大きな変動は見られなかった。

乳酸菌は地下タンクで漬け込む方法のほうに多く、4月から7月まで 10^3 CFU/g台で推移し、その後、変動が見られた。

5 謝辞

本研究を行うに際して、分析試料の提供および情報提供等多大なご協力を頂きました宮崎県干したくあん研究会会員企業の皆様に対して深く感謝いたします。

6 参考文献

- 1) 宮崎県工業技術センター・宮崎県食品開発センター研究報告：52, 69-72 (2007)
- 2) 日本食品工業学会：食品分析法，372-373.
- 3) 山元一弘：ギャバの機能特性と健康志向食品への展開，食品加工技術，26, 34-39. (2006)
- 4) 澤井祐典：茶生葉中 γ -アミノ酪酸 (GABA) の生成経路，平成14年度野菜茶業研究成果情報，131-132 (2002)