

[J. Ferment. Technol., Vol. 47, No. 8, p. 478~485, 1969]

酵母による二成分系糖混合物醱酵の動力学的解析

南波 章・松尾 義之

(広島大学工学部醸酵工学科)

Kinetic Studies on the Fermentation of a Binary Sugar Mixture in Yeast

Akira Nanba and Yoshiyuki Matsuo

(Faculty of Engineering, Hiroshima University, Sendamachi, Hiroshima)

Under anaerobic conditions, two fermentable hexoses were added simultaneously to a yeast suspension. A new kinetic model for the sugar transport through the yeast cell membrane was suggested, and an equation about the sugar consumption rate in the mixture was introduced. This equation is based on the assumptions that these sugars are transported by a carrier facilitating diffusion mechanism, combining these sugars with carrier molecules, corresponding to each sugar and that these substrate-carrier complexes are affinitive each other, and the substrate and carrier inside the heterocomplex, so called the allosteric effect.

During the fermentation of a binary sugar mixture in yeast, sugar concentrations in the medium were determined from time to time. The following results supporting the above assumptions were obtained;

1. The linear relations existed between the logarithms of the concentrations of the two sugars at any time.
2. In a glucose-fructose mixture, the experimental results agreed for the most part with the theoretical curves, obtained from above equations.

結 言

醱酵工業における主原料である炭水化物は単一基質が用いられることは少なく、糖の混合物であることが多い、また廃糖蜜を原料とする場合も蔗糖は微生物細胞表面で転化されてのちに細胞内にとり込まれて利用される。従来行なわれて来た理論的考察はグルコースのような一つの明確な制限基質があることに基づいた場合が多く、前述のように工業的立場からの考察とは異なるであろう、このような混合基質の使用についての情報は意外に少ない。

酵母による糖の醱酵過程において、二種以上の醱酵性糖が共存する場合、基質間に競合現象が存在することが広くみとめられている。本実験では市販のパン酵母を用いて二成分からなる醱酵性単糖類の醱酵過程に

ついて、休止細胞における糖消費の面からモデル実験を行なった。酵母において糖の細胞膜透過は担体仮説に基づく促進輸送によるものと考え、二種の糖が同時に酵母懸濁液に加えられた場合の細胞膜透過の機構として、同一担体による単純な競合的相互作用による場合、および両基質はそれぞれ相当する担体により促進輸送され、さらに一方への結合は他方の結合の親和性に相互に影響しあうとする、いわゆるアロステリック効果が存在すると仮定して動力学モデルを考えて解析を行なった。

すでに Changeux ら¹⁾ は生体膜に二次元結晶の格子構造を考へて、基質のとり込みに際して基質の協同性について論じ、吸着等温線がシグモイド状になることを理論的にとり扱っている。Stein²⁾ は赤血球への糖のとり込みが“dimerized” theory にしたがって

るとし, さらにアロステリック効果で膜の能動輸送を説明しようとする試みもある³⁾.

理 論

酵母における酵溶性単糖類の細胞膜透過は, 赤血球における場合と同様に, 膜透過に対する基質特異性, 基質濃度の飽和特性, 競合的阻害などの酵素様諸性質に基づいて一般に担体仮説に基づく促進輸送により, しかも糖消費の速度は糖・担体複合体の膜透過の段階が律速であると考えられ, その速度は Michaelis-Menten の式にしたがうものとされている⁴⁾.

現在, 生体膜の構造モデルとしては単位膜説⁵⁾, Repeating unit 説⁶⁾などが電子顕微鏡的知見などに基いて提出され, その構造と機能の関わりは密接であり, 特に生体膜の最も重要な機能の一つである物質の膜透過を論ずる場合, 構造をも充分考慮されねばならない. 二種の糖が同時に細胞懸濁液に加えられた場合, 細胞膜透過のモデルとして, 従来の酵素反応速度論的立場から, 二基質の間に単純な競合的相互作用に基づくとするモデル⁷⁾, もっと複雑な機構によるとするモデル^{1,2)}, などが提出されている.

筆者らはこれらのことを考慮して, 二成分の基質が共存した場合の各基質のとり込みを総括的に表現する反応速度モデルを考え, 膜の内面および外面における可逆系で構成されるものとして既存のモデルとともに Fig. 1 に示した. 機構 I は単一基質の膜透過モデル^{4,7)}, II-a は競合的相互作用に基づく膜透過の速度モデル⁷⁾である. これらのモデルに一般的な仮定は担体 (Carrier) に関するもので親水性に富む基質 (A) は膜表面に存在する担体 (C) と基質・担体 (CA) 複合体を形成し, 膜中を拡散もしくはなんらかの方法で移動し, 膜の内面において逆反応により A が遊離する. 遊離した C は膜中を逆方向に移動して表面に達し, 再び A の輸送を行ないうる. 酵母細胞においては細胞内にとり込まれた糖は速かに代謝され細胞中にはほとんど遊離の糖はみとめられないので, これら可逆系の逆反応はほとんど無視しうる. また一般に C はきわめて脂溶性であり, C の膜中の移動速度は親水性が高いと考えられる CA 複合体のそれに比しきわめて大きいと考えられる, 結局 CA 複合体の膜透過速度が糖の細胞内へのとり込みの律速段階となる. II-b は二基質とり込みの際にアロステリック効果を想定したモデルで以上の一般的な仮定の他に下記のことを仮定した.

1) 一種の基質に対して少なくとも一個の基質特異性を有する担体が存在するか, もしくは同一担体中にそれぞれの基質に対する結合部位が存在する.

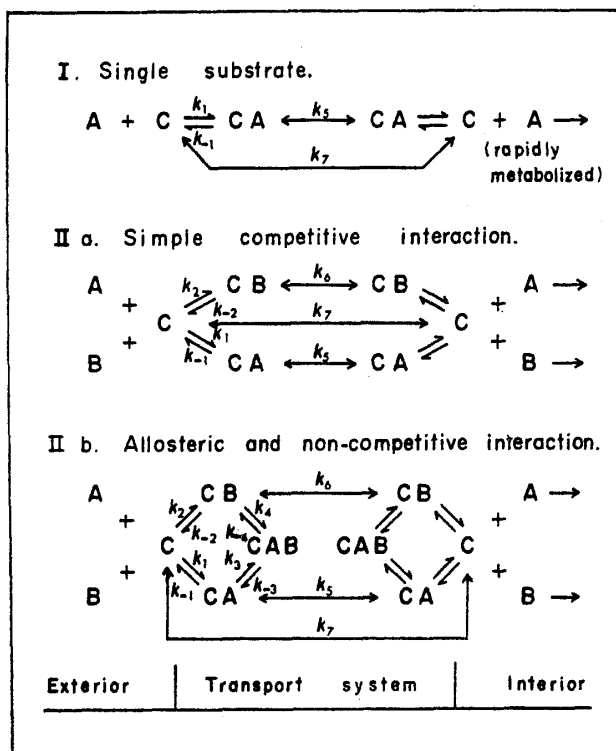
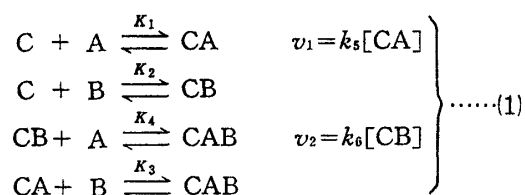


Fig. 1. The proposed transport mechanisms for binary sugar mixture in yeast suspension.

2) ある基質の相当する担体もしくは結合部位への結合は, 他の基質の相当する担体もしくは結合部位への結合の親和性に相互に影響し合う.

ここでアロステリック効果といふ言葉は比較的広い意味に用いたもので “two site hypothesis” と呼ぶ方が適当であるかも知れない.

1. 一般速度式の導入 酵母の休止細胞による A, B 二成分の糖混合液における糖消費速度を機構 II-b のモデルに基づいて, 1) それぞれの素反応速度について $k_3, k_6 < k_7 < k_1, k_{-1}, k_2, \dots, k_i, k_{-i}$. 2) $K_i = k_i/k_{-i}$. 3) 基質担体複合体濃度の変化速度は糖の細胞内へのとり込み速度に比し無視できるほど小さい. すなわち細胞表面において定常状態が存在する. 4) 膜透過に関連した諸活性の増減はない. として問題を簡易化して迅速平衡型の平衡式群(1)で表現しうる.



ただし v_1, v_2 は基質 A, B のとり込み速度である. 二基質と担体より形成される CAB 複合体は CA および CB に比較し, より親水性であると考えて膜中で

の透過速度を無視した。

醗酵開始後ある時間における基質 A, B の濃度を s_1, s_2 , 担体の各存在状態 C, CA, CB, CAB の濃度を c, x, y, z とし, 全担体量 $c_0 = c + x + y + z$ とすれば基質 A, B について他成分が共存する場合のそれぞれの基質の消費速度式(2)および(8)式が得られる。

$$v_{1(2)} = -\frac{ds_1}{dt} = k_s x$$

$$= \frac{V_1 K_1 K_3^2 s_1}{K_3 [K_2 K_4 s_1 + K_2 K_1 s_2 + K_1 K_4 (s_2 + K_2)]}$$

.....(2)

$$v_{2(1)} = -\frac{ds_2}{dt} = k_s y$$

$$= \frac{V_2 K_2 K_3 K_4 s_2}{K_4 [K_2 K_4 s_1 + K_2 K_1 s_2 + K_1 K_4 (s_2 + K_2)]}$$

.....(3)

ここで $V_1 = k_s c_0$, $V_2 = k_s c_0$ すなわちそれぞれ一成分のみをふくむ系の基質消費の最大速度であり, K_1, K_2 は, その場合の基質定数である。

(2)および(3)式から, 二種の基質のそれぞれの消費速度について, 相対的基質減少率の比をとるとつぎのような関係式をうる。

$$\left(\frac{1}{s_1} \cdot \frac{ds_1}{dt} \right) / \left(\frac{1}{s_2} \cdot \frac{ds_2}{dt} \right) = \frac{V_1 K_1}{V_2 K_2} \left(\frac{K_4}{K_3} \right)^2 \dots (4)$$

この右辺は定常状態においては一定であり, 二基質の濃度および消費速度の関係を示す式となる。いま(4)式について基質 A, B の初濃度を a_1, a_2 とおいて解くと,

$$\ln s_1 = \frac{V_1 K_1}{V_2 K_2} \left(\frac{K_4}{K_3} \right)^2 \ln s_2 - \frac{V_1 K_1}{V_2 K_2} \left(\frac{K_4}{K_3} \right)^2$$

$$\times \ln a_2 + \ln a_1 \dots (5)$$

二成分混合物の醗酵過程中任意の時間における A, B 両基質の濃度関係を示す式が得られる。

ここで $(V_2 K_2 / V_1 K_1) (K_3 / K_4)^2 = k$ とおけば,

$$s_2 = a_2 \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k \dots (6)$$

(6)式の関係(2)式に代入して, $K_3 / K_4 = r$ とおけば, 基質 B が共存する場合の基質 A の消費に関して次のような速度式が得られる。

$$\frac{ds_1}{dt} = \frac{V_1}{r \left[\frac{K_2}{K_1} + \frac{K_2}{s_1} + \frac{a_2}{s_1} \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k + \frac{K_2 a_2}{K_1 K_4} \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k \right]}$$

.....(7)

このような二基質が同時に消費される系においては

微分形で示された速度式よりも積分形速度式の方が理論的厳密さは欠くであろうが, より便利であり, 基質量の時間的変化の状態を明瞭に把握できる。 $t=0$ において $s_1 = a_1$ であることを考慮して(7)式を積分すると, つぎのような積分形速度式が得られる。

$$t = \frac{K_2 r}{V_1 K_1} (a_1 - s_1) + \frac{K_2 r}{V_1} \ln \left(\frac{a_1}{s_1} \right) + \frac{a_2 K_1}{V_2 K_2 r}$$

$$\times \left[1 - \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k \right] + \frac{K_2 a_2 r}{V_1 K_1 K_4 (k+1)} \left[a_1 - \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k s_1 \right]$$

.....(8)

ここで得られた速度式は基質 B が存在する場合の基質 A の消費経過を表わす一般式である。

同様にして基質 A が共存する場合の基質 B の消費に関する速度式はつぎのごとくなる,

$$t = \frac{K_1}{V_2 K_2 r} (a_2 - s_2) + \frac{K_1}{V_2 r} \ln \left(\frac{a_2}{s_2} \right) + \frac{K_2 a_1 r}{V_1 K_1}$$

$$\times \left[1 - \left(\frac{s_2}{a_2} \right)^{k^{-1}} \right] + \frac{a_1}{V_2 K_4 r (k^{-1} + 1)} \left[a_2 - \left(\frac{s_2}{a_2} \right)^{k^{-1}} s_2 \right]$$

.....(9)

(8)および(9)式を比較すると, r および k はそれぞれ逆数関係にあり式そのものは対称的であるといえる。

2. 特別な場合の速度式 さらにとり込み機構を簡単にした特別の場合について考え, 積分形の速度式で表現してみよう。以下は酵素反応速度論的概念に基づいて分類したものである。

1. 非拮抗(混合)型相互作用 ここにのべる型の相互作用は基本的には Fig. 1 の II-b 型モデルで示されるもので, つぎの二つの場合が考えられる。

(a) $K_2 / K_1 = K_4 / K_3$, ただし $K_1 \neq K_3, K_2 \neq K_4$. この場合, 酵素反応速度論的には混合型抑制とよばれる型に相当するもので, 概念としては前述のアロステリック効果を考慮した相互作用に近いものである。

$K_2 / K_1 = 1/r$ となるので $k = V_2 K_1 / V_1 K_2$ となり(8)式はつぎのように改められる。

$$t = \frac{a_1 - s_1}{V_1} + \frac{K_1}{V_1} \ln \left(\frac{a_1}{s_1} \right) + \frac{a_2}{V_2} \left[1 - \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k \right]$$

$$+ \frac{a_2}{K_3 (V_2 + V_1 K_2 / K_1)} \left[a_1 - \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k s_1 \right] \dots (10)$$

(b) $K_1 = K_3, K_2 = K_4$. 一方の基質が担体と結合しても他の基質の結合部位もしくは担体には全く影響がない場合。したがってそれだけ両基質ともとり込みが阻害される型で非拮抗型とよばれるものである。速度式は次の通りになる。

$$t = \frac{a_1 - s_1}{V_1} + \frac{K_1}{V_1} \ln \left(\frac{a_1}{s_1} \right) + \frac{a_2}{V_2} \left[1 - \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k \right]$$

$$+ \frac{a_2}{V_2 K_1 + V_1 K_2} \left[a_1 - \left(\frac{s_1}{a_1} \right)^k s_1 \right] \dots (11)$$

k は前と同様 $V_2 K_1 / V_1 K_2$ である。(10)および(11)式は Michaelis-Menten の積分式に相互作用に基づく第 2, 3 項が加えられた式で表現される。

2. 単純拮抗(競合)型相互作用 Fig. 1-II b において, $K_3, K_4 = \infty$ すなわち CAB 複合体が全く生成しないと考えられる系で II-a のモデルで表現しうるもの, 換言すれば同一担体に基質 A, B が競合的に結合してとり込まれる型で, 消費速度式は(10)式から第 4 項を除いた式で示されるはずである。Fig. 1. II-a の関係から, 基質 A, B について, (5)式に対応する式としてつぎの関係が得られる⁷⁾。

$$\ln s_1 = \frac{V_1 K_2}{V_2 K_1} \ln s_1 - \frac{V_1 K_2}{V_2 K_1} \ln a_2 + \ln a_1 \dots\dots(12)$$

この関係は前の非拮抗(混合)型の相互作用を示す場合においてもみとめられる。積分形速度式として次式⁸⁾が得られ, (10)式から導びかれる速度式と同一である。

$$t = \frac{a_1 - s_1}{V_1} + \frac{K_1}{V_1} \ln\left(\frac{a_1}{s_1}\right) + \frac{a_2}{V_2} \left[1 - \left(\frac{s_1}{a_1}\right)^k\right] \dots\dots(13)$$

3. 単一基質のみの場合 Michaelis-Menten 型の速度式にしたがうことがみられており, $a_2 = 0$ の条件で, (10), (11)および(13)式から関係のある項をのぞいてつぎの速度式が得られる。

$$t = \frac{a_1 - s_1}{V_1} + \frac{K_1}{V_1} \ln\left(\frac{a_1}{s_1}\right) \dots\dots(14)$$

実験方法

1. 醗酵条件 市販パン酵母を10倍量の生理的食塩水に懸濁, 遠心分離(3000 rpm 5分間)を3回くりかえして洗滌し, 適当な緩衝液(MacIlvaine 緩衝液および炭酸, 重炭酸塩緩衝液)に懸濁して, 醗酵開始時にその一定量を培地に加えた。酵母濃度は2.0%(洗滌前重量)を基準とした。基質濃度は全還元糖として1%以下に制限した。28°Cの恒温槽中で, ゆるく窒素ガスを通すか, ゆるく攪拌しながら醗酵を行なわせた。一定時間ごとに少量の試料を採取し, 氷水中で急冷, なるべく速やかに菌体を遠心分離して除去し, 上澄液を分析に供した。

2. 分析方法 還元糖の分析は Somogyi 新法⁹⁾により転化糖として算出, フラクトースの個別定量はレゾルシン・

チオ尿素法¹⁰⁾で基準物質として蔗糖を用いた。アルドース相互の分別定量にはグルコース・オキシダーゼでグルコースを酸化後, 残糖量を Somogyi 法で定量, 他方の糖は全糖からの差として求めた。

3. 醗酵速度パラメーター K_s, V_m の測定 休止細胞に基質を急激に加えると細胞内部の様相はきわめて不安定で暫時の非定常期を経て定常状態に達するので, 醗酵の初速度を測定することは好ましくない。そこで種々濃度の単独基質液について同一条件で基質の消費の状態を測定し, ある状態から基質量が $\frac{1}{2}$ または $\frac{3}{4}$ になるに必要な時間を測定して, Michaelis-Menten の積分形速度式から直線関係を用いる, いわゆる基質の半減期法¹¹⁾を改変して, 使用した細胞懸濁液の糖消費に対する醗酵速度パラメーター K_s および V_m を求めた。

実験結果および考察

蔗糖を加えたパン生地の酵母による醗酵において蔗糖はきわめて短時間に転化され, つづいてグルコース

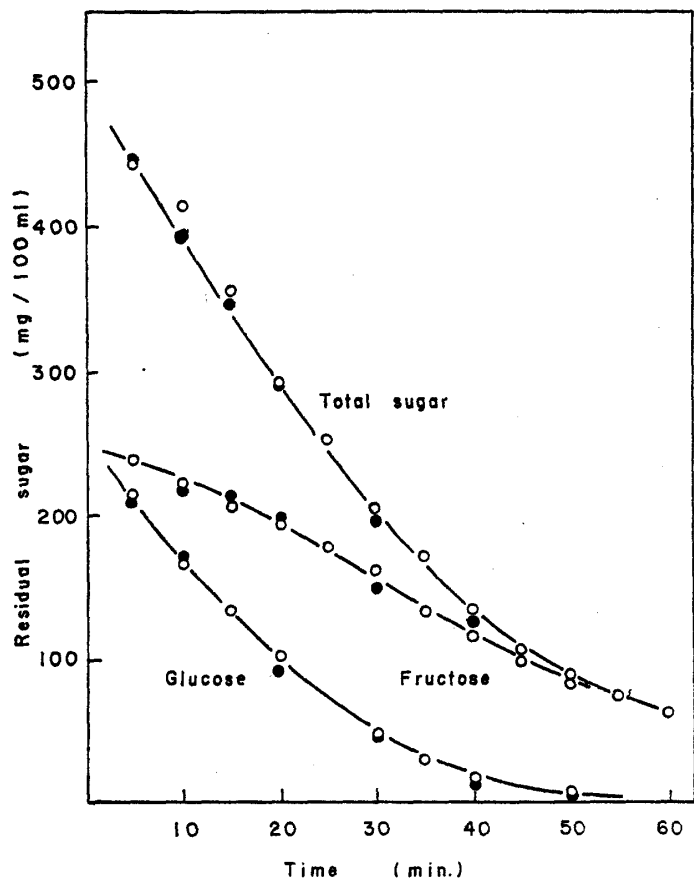


Fig. 2. Time course of glucose and fructose consumption (fermentation) in mixture by yeast suspension. pH 4.8, 28 °C, 2.0% yeast suspension.
○ : Bubbled with nitrogen gas.
● : Shaked slowly.

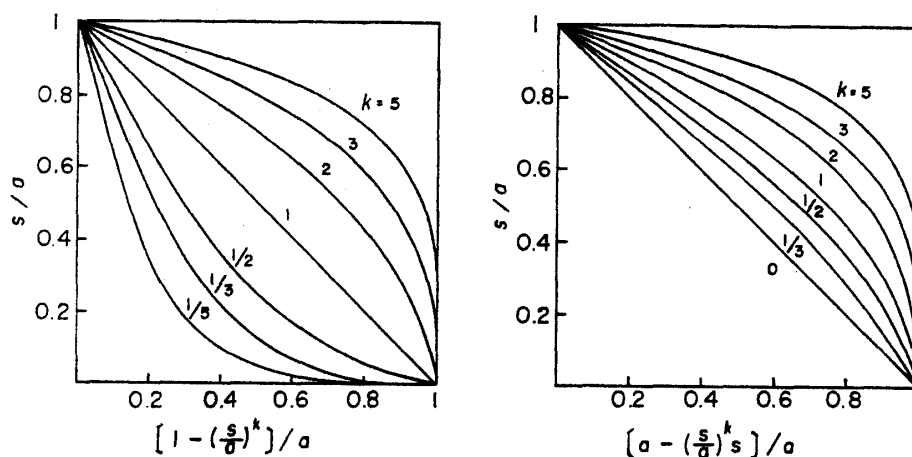


Fig. 3. Graphic representation for the rate equation (8), (9), (10), (11) and (13).

Left; 3rd term. Right; 4th term.

の消失がおこり、フラクトースは醸酵のかなり後期まで残留することがみとめられている。Fig. 2 は転化糖 0.5% をふくむ糖液のパン酵母による醸酵の経過を示すものである。フラクトースはグルコースの消失後もかなりの量が残存し、その消費速度は始めゆっくりと、グルコースの消費が進むにつれて次第に早くなり最高値に達して後に徐々に速度は低下しはじめる、いわゆる逆S字状の経過をたどり、明らかに混在するグルコースの影響をうけているが、一方のグルコースは他成分にあまり大きな影響をおよぼされていない。

理論式(8)(9)(10)(11)および(13)において第一項は零次第二項は一次反応の項として特徴づけられ、Michaelis-Menten 型の速度式である。これに反して第三、四項はともに共存する基質の相互作用に基づくものと考えられ、これらの項を一般化して図示すると Fig. 3 のようになる。第三項は k が大であればあるほど、醸酵の初期においてきわめて大きく影響し、逆に k が小であればあるほど共存物質の影響が小であることを示している。第四項は一般に k の大小にかかわらず反応の初期に影響を与えるが、本実験の例では係数が小さく共存物質が極端に多くない限りあまり大きな影響を与えない。さらにこれに係数 γ が関係して、混合基質のうち k が1より大となる基質の醸酵過程が逆S字状を示し、醸酵開始時よりおくれで醸酵速度が最大になる現象を説明するものである。

1. パラメーター k および γ について
(5)および(7)式にしたがって醸酵経過中任

意の時間において基質 A および B の濃度の対数プロットは直線関係を示し、その傾斜から k が得られる。

Fig. 4 は転化糖 1%, 菌体濃度 2.0, 1.0 および 0.5% の三種の醸酵過程についてグルコース、フラクトースを測定してその関係を対数プロットしたものである。醸酵速度は菌体量にはほぼ比例するが、残存する両糖の関係からは、 k の値は菌体濃度には無関係に一定である。

同様の実験を種々の pH の培地について行なった。(Fig. 5) アルカリ性領域においては醸酵速度はかなりおそく、また誘導時間をもっているが、両基質の量的バランスはくずれないままで醸酵は進行し、実験した pH 範囲内では、この関係は保たれ、すべての実験で同一傾斜を示した。

醸酵性単糖類の二成分を組合わせた混合系での実験結果を Fig. 6 に示す。醸酵条件は pH 4.8, 菌体濃

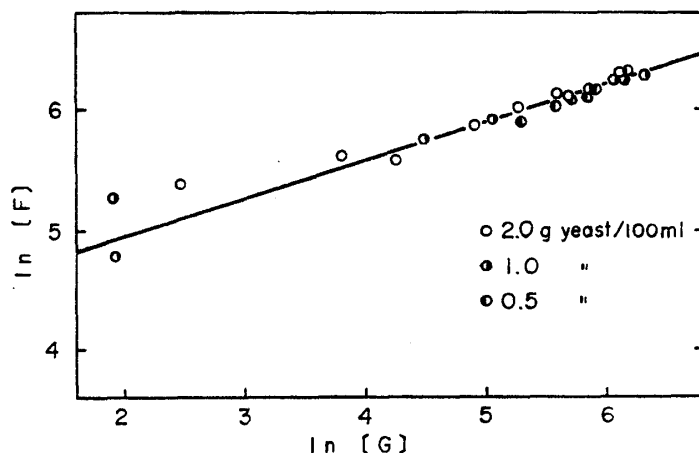


Fig. 4. The relationship of the concentration of glucose and fructose in various concentration of yeast suspension. Initial sugar concentration; 500mg/100ml each sugar.

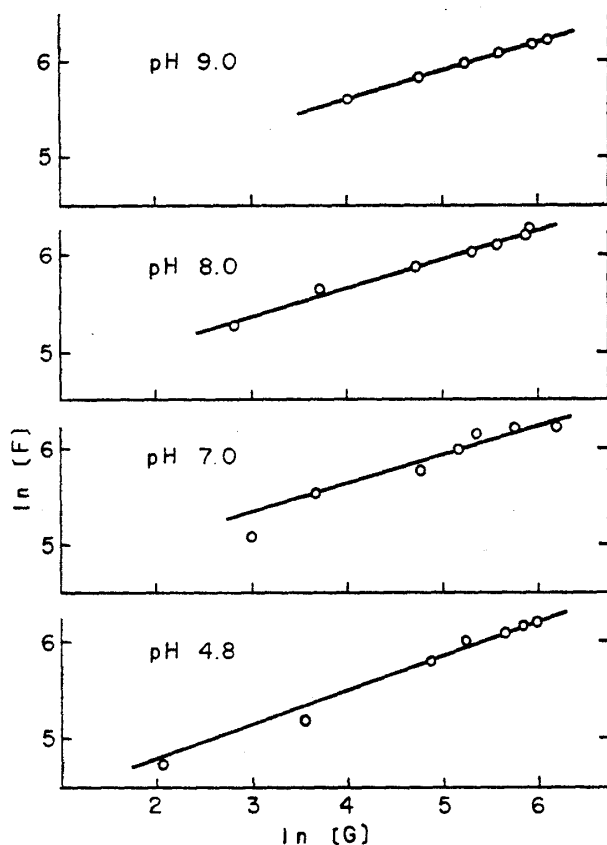


Fig. 5. Effect of pH values on the relationship of glucose and fructose during the fermentation of mixture in yeast suspension.

度 2.0%である。いずれの場合も直線関係が得られた。グルコース・マンノース系, フラクトース・マンノース系はそれぞれ初濃度を 500mg/100ml とした。k の値としてそれぞれ 0.22 および 0.52 が得られた。グルコース・フラクトース系において、初濃度が異なっているが k の値は 0.25 でありただ切片のみが異なることは関係式(5)および(7)から推察される通りである。

これら直線関係はいずれの型の相互作用を仮定しても成立するはずであるが、k のもつ内容が異なることは注意しなければならない。単純競合型および非拮抗型相互作用による場合、k はそれぞれ単一基質の醱酵速度パラメーター K_s および V_m のみを内容とし V_2K_1/V_1K_2 で表現されるに反し、アロステリック効果をもつと仮定するとこれら以外に混合基質の醱酵過程から実測された k から算出される r すなわち K_4/K_3 をも内容にふくむことになる。

グルコース・フラクトース系醱酵において測定および計算された醱酵速度に関する特性値を Table 1 に示す。混合基質による醱酵過程の実験値から $k=0.25$ したがって $r=0.35$ と計算された。ちなみに単一基質醱酵から得られた V_m および K_s を用いて競合型

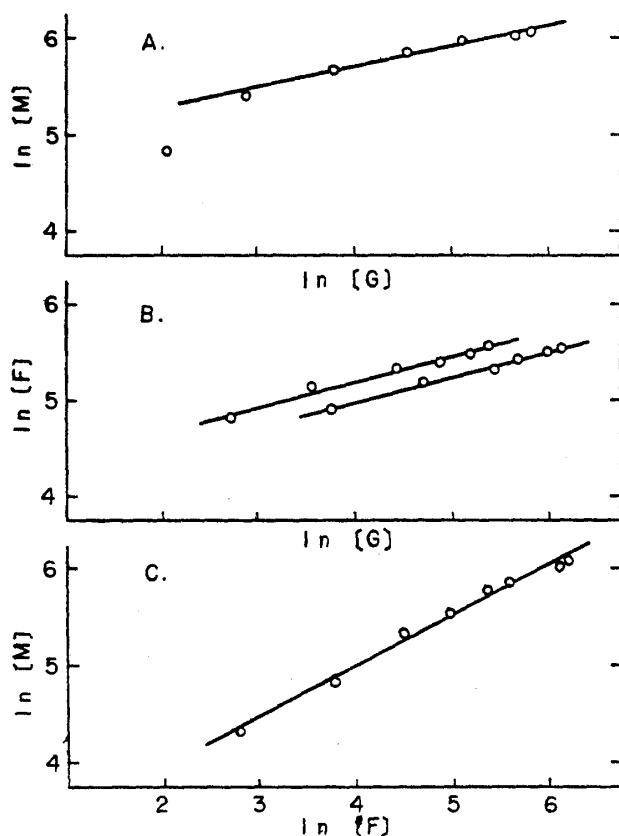


Fig. 6. The relationship of concentration of sugars in binary mixture during the fermentation by yeast. Concentration of sugar expressed in mg/100ml.

Curves; A, glucose-mannose; B, glucose-fructose (a, b, representing different initial concentration); C, fructose-mannose.

相互作用の場合の k を試算すると 0.54 となり実験結果とかなりの差を生ずる。

2. 二成分系糖混合液の醱酵過程について 醱酵性単糖類の二成分系混合物の酵母による醱酵において各成分濃度は対数プロットで直線関係を示し、二成分のうちよりおくれて醱酵する成分、換言すれば $k>1$ となる成分は醱酵過程が逆 S 字状になることを示したが、基質の細胞内とり込み機構が競合的相互作用に

Table 1. Kinetic parameters for binary sugar mixture fermentation by yeast.

	K_s (mg/100ml)	V_m (mg/100ml min)	k^*	r^{**}
A. Glucose	124	15.8	0.25	0.35
B. Fructose	216	15.0		

* Observed from the mixed sugar fermentation.

** Calculated from K_s , V_m and k .

(cf. $V_2K_1/V_1K_2=0.54$ for competitive k .)

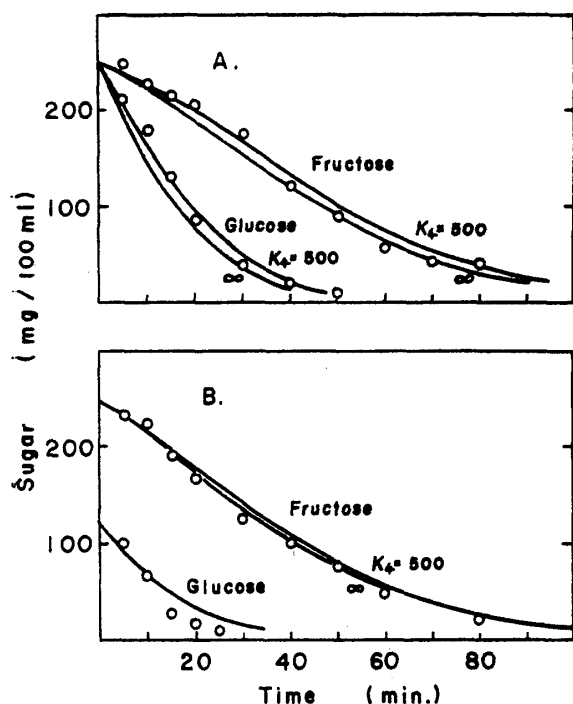


Fig. 7. Comparison of the experimental results with the calculated curves, according to eq. (7) and (8) in glucose-fructose mixture fermentation by yeast.

よるか、またはアロステリック効果に基づくものかを確かめることは困難である。Fig. 7 はグルコース・フラクトース混合醗酵において、それぞれの糖の醗酵過程の実験値とアロステリック効果をもつと仮定して(7)および(8)式にしたがって $K_4=500$ および無限大と仮定して計算した結果を示したものである。等量混合物 (Fig. 7-A) とグルコースが半量混在する場合 (Fig. 7-B) のいずれの実験も K_4 をこの程度に見つめれば、この実験範囲ではほぼアロステリック仮説にしたがうことを示すものである。

次にグルコースがフラクトースの倍量存在する場合の実験結果および計算値を Fig. 8 に示す。計算はアロステリック効果を仮定して(7)および(8)式、ただし $K_4=500$ と仮定した、および競合型相互作用を仮定した場合(13)式を用いて行なった。Fig. 8 上図はフラクトース単独の場合 ($a_2=0$) およびグルコースが混在する場合のフラクトースの消費過程を示し、下図は同一実験のグルコースの醗酵経過を示したものである。フラクトース単独の醗酵経過は(14)式とほぼ一致した。この系ではフラクトースを基準にした場合、 $k>1$ となり、Fig. 7-A, B および Fig. 8 に示すごとく混合糖醗酵におけるフラクトースの醗酵はフラクトース単独の場合に比較して非常におくれて逆 S 字状の挙動を

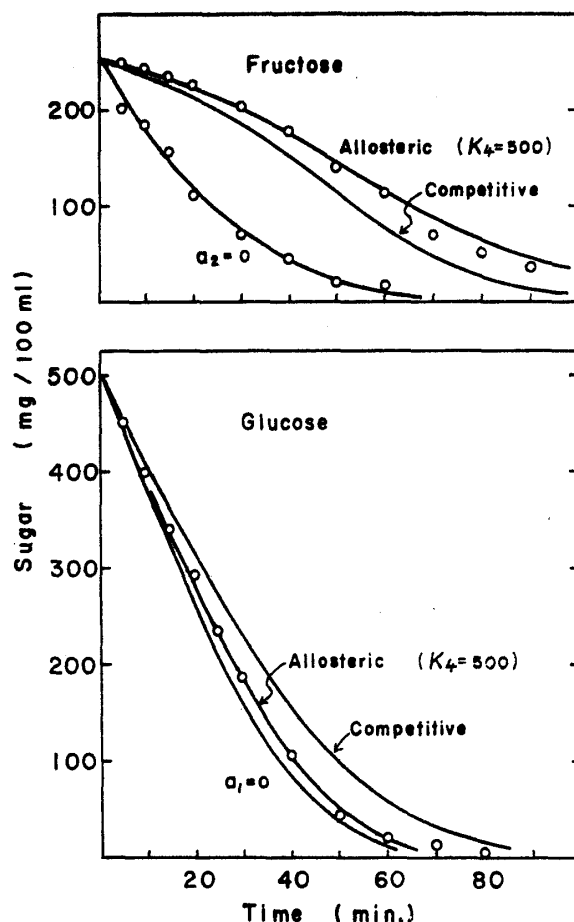


Fig. 8. Comparison of the experimental results with the calculated curves, according to allosteric kinetics, eq. (7), (8), and simple competitive interaction, eq. (13). Upper graph; time course of fructose in mixture, and fructose only ($a_2=0$). lower graph; glucose in mixture (same experiment).

示す、一方 $k<1$ となるグルコースはフラクトースの影響をほとんど受けず、あたかもグルコース単独の場合のごとく速やかに醗酵される、なおグルコース単独醗酵の実験値はほぼ $a_1=0$ の(14)式による理論曲線と一致する。

この実験の範囲内では、混合糖醗酵における両者の挙動は、両糖の細胞内へのとり込み機構として競合的相互作用を仮定するよりも、むしろアロステリック効果を考慮した動力学モデルを用いる方が実験値とよく一致した。

総 括

醗酵性単糖類の二成分系混合物のパン酵母による醗酵過程において、糖の細胞膜透過に関して動力学モデルを考え、両基質の濃度関係および醗酵過程を示す理

論式を導き、実際の系へ適用して次のような結果を得た。

1. 両基質の醗酵過程において、よりおくれて醗酵する基質はそれ単独の場合よりおくれて醗酵され、逆S字状の醗酵過程を示し、より速やかに醗酵する基質はあたかも競合する基質がない場合のような挙動を示す。

2. 醗酵中の任意の時間における両基質の濃度を両対数グラフにプロットして直線関係を得た。

3. グルコース・フラクトース混合醗酵において、各成分の消費過程について得られた実験値は、それぞれの糖は細胞膜表面において相当する担体と結合して促進輸送され、さらに一方の基質が担体に結合すると他の基質の親和性に相互に影響し合う、いわゆるアロステリック効果を考慮した動力学モデルに基づく醗酵速度式とほぼ一致した。

本研究は昭和43年度日本醗酵工学会大会生物化学工学シンポジウムにおいて発表した。

文 献

- 1) Changeue, J-P., Thiery, J., Tung, Y., Kittel, C.: *Proc. Natl. Acad. Sci*, **57**, 335 (1967).
- 2) Stein, W. D.: *Biochim. Biophys. Acta*, **59**, 35, 47, 66, (1962).
- 3) Jardetzky, O.: *Nature*, **211**, 969 (1966).
- 4) Cirillo, V. P.: *Ann. Rev. of Microbiol.*, **15**, 197 (1961).
- 5) Robertson, J. D.: *J. Biophys. Biochem. Cytol.*, **4**, 349 (1958).
- 6) Green, D. E., Perdue, J. E.: *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **55**, 1295 (1966).
- 7) Scharff, T.G., Kremer, E.H.: *Arch. Biochem. Biophys.*, **97**, 192 (1962).
- 8) Haldane, J. B. S.: "Enzymes", M. J. T. Press (1955).
- 9) Somogyi, M.: *J. Biol. Chem.*, **161**, 61 (1945).
- 10) 松尾, 南波: 本誌, **36**, 342 (1958).
- 11) Terui, G., Konno, N.: *Technol. Rept. Osaka Univ.*, **10** (1960).

(昭 44. 3. 18 受付)