

研究資料

グリーンプロセスによるエネルギー・化学品生産への将来展望

Production of Energy and Chemicals through Green Process

湯川 英明

HIDEAKI YUKAWA

財団法人地球環境産業技術研究機構微生物研究グループ 〒619-0292 京都府相楽郡木津町木津川台9-2

TEL: 0774-75-2308 FAX: 0774-75-2321

E-mail: mmg-lab@rite.or.jp

Research Institute of Innovative Technology for the Earth, Microbiology Research Group, 9-2 Kizugawadai,
Kizu-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0292

キーワード: グリーンプロダクト, グリーンプロセス, バイオマス, バイオプロセス

Key words: Green products, Green process, Biomass, Bioprocess

(原稿受付 2004年4月19日/原稿受理 2004年7月10日)

1. はじめに

21世紀は環境の世紀と言われている。環境への負荷の少ない製品やプロセス(グリーンプロダクト・グリーンプロセス)を追求していかない企業は消費者にそっぽを向かれ企業間競争に脱落していく時代である。グリーンプロセス研究の一環として再生可能資源バイオマスからの化学品・エネルギー製造研究は1999年のクリントン声明を契機として各国において活発に行われている。(財)地球環境産業技術研究機構においても、かねてよりバイオマス利用に注目し研究開発を実施している。本稿ではバイオマス利用研究の一環として実施してきた新規バイオプロセスによるコハク酸製造研究および燃料エタノール製造研究を紹介する。

2. 研究の背景: バイオプロセスへの期待と“現実”

バイオテクノロジーのこれまでの経緯を振り返ってみると、1970年代後半に大きな期待と共に登場し、確かに医薬医療分野を中心に大きな展開が見られている。しかしながら、化学品製造プロセスの分野(以下バイオプロセス)においてはどうかであろうか。人により評価の違いがあるものの、総じて『期待ほどは・・・』ではないであろうか。

この“原因”として、既存のバイオプロセスに対するバイオテクノロジー効果の限界が挙げられる。すなわち、個々の微生物の能力、機能をバイオテクノロジーで向上させることに成功しても、既存のバイオプロセスの持つ本質的なコスト低減限界を超えられなかったのである。

既存のバイオプロセスは微生物の増殖に依存し物質生産を行うため、(1)増殖の“場”が必要であり、増殖に“多大の時間”を要すること、(2)生産物濃度に限界があること、以上の2つの要因により生産性 STY (Space/

Time/Yield: 反応容器の時間あたりの生産量)が化学反応と比較し桁違いに低く、設備費が大変高くなり固定費負担が極めて大きくなる。さらに増殖にともなう副生物が多く、そのため精製コストが増大し、経済性あるプロセス確立が困難であった。

バイオテクノロジー〔遺伝子組換え等〕は、たしかに1個の微生物細胞当たりの生産性向上に“ある程度”成功したものの、増殖に依存した既存バイオプロセスにおいては根本的な生産性向上に限界があった(図1a)。

3. 新規バイオプロセスの確立

近年我々は、従来のバイオプロセスのとはまったく異なる技術コンセプトに基づく新規なバイオプロセスを基礎的に確立した。図1bに示すように微生物細胞の生育を人為的に停止した状態で化合物を製造させるのである。これにより微生物細胞はあたかも化学反応における触媒のように用いることが可能となる。既存技術と異なり増殖(細胞分裂)する“場”が不要となり、反応器に高密度で“触媒(微生物細胞)”を充填し、連続反応様式にて化合物製造が可能なることから、既存技術と比較し大幅な高効率化プロセスとなり、既存の化学プロセスと同等の生産性を達成した。

増殖を停止した状態での物質生産を可能とした微生物は、コリネ型細菌に属する微生物である。この微生物種は現在、アミノ酸、核酸、ビタミン等の発酵生産に世界各国で広く用いられているが、すべて培養装置内で微生物細胞は増殖を繰り返しながら生産物を分泌していく『従来型』のバイオプロセスとして用いられている。このプロセスにおいては、コリネ型細菌は酸素を取り込み、栄養源の酸化反応によりエネルギーを産生し各種の生体成分(アミノ酸、核酸、ビタミン等)を生成している。

近年我々は、コリネ型細菌は酸素(空気)供給を断つ

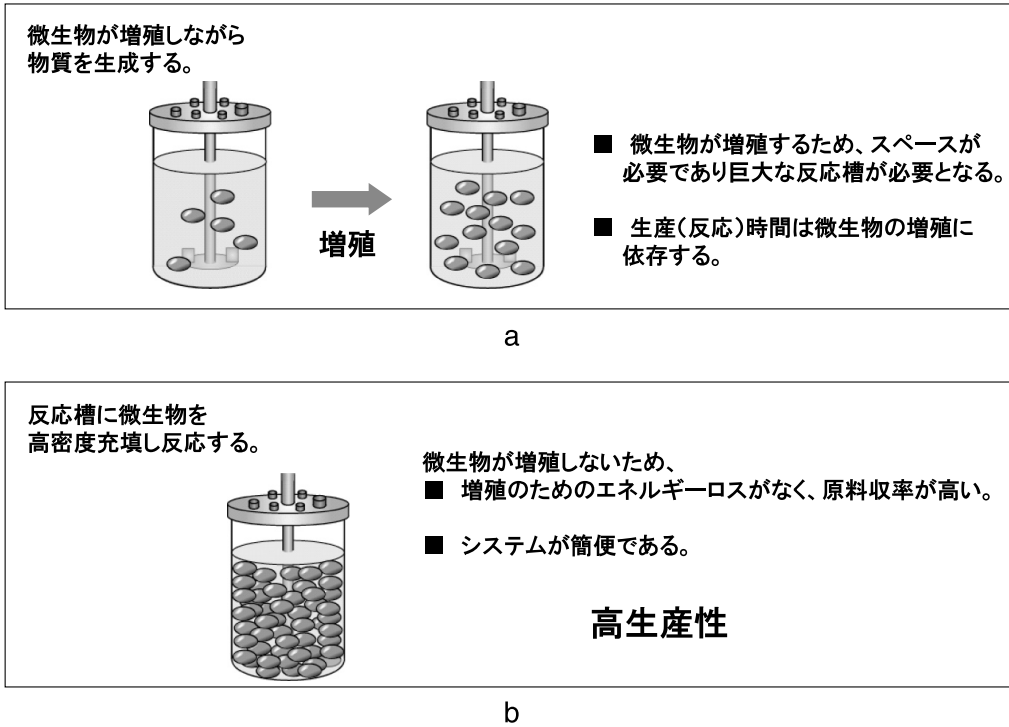


図1. a 従来バイオプロセス. b 新規バイオプロセス。

と増殖は停止するものの、主要な代謝は維持され機能するという特異な性質を発見し、新規のバイオプロセス創成を図っている。

このプロセスの応用として我々は各種の化学品製造を計画しており、まずコハク酸製造への応用を紹介する。

4. コハク酸製造への応用

再生可能資源からの乳酸ポリマー大規模生産が米国において開始されている。乳酸菌を用いたバイオプロセスにより、バイオマス資源由来の糖類を原料に乳酸を製造し、化学的にポリマーとする製造法である。乳酸系ポリマーとコハク酸系ポリマーは図2に示すように物性及び

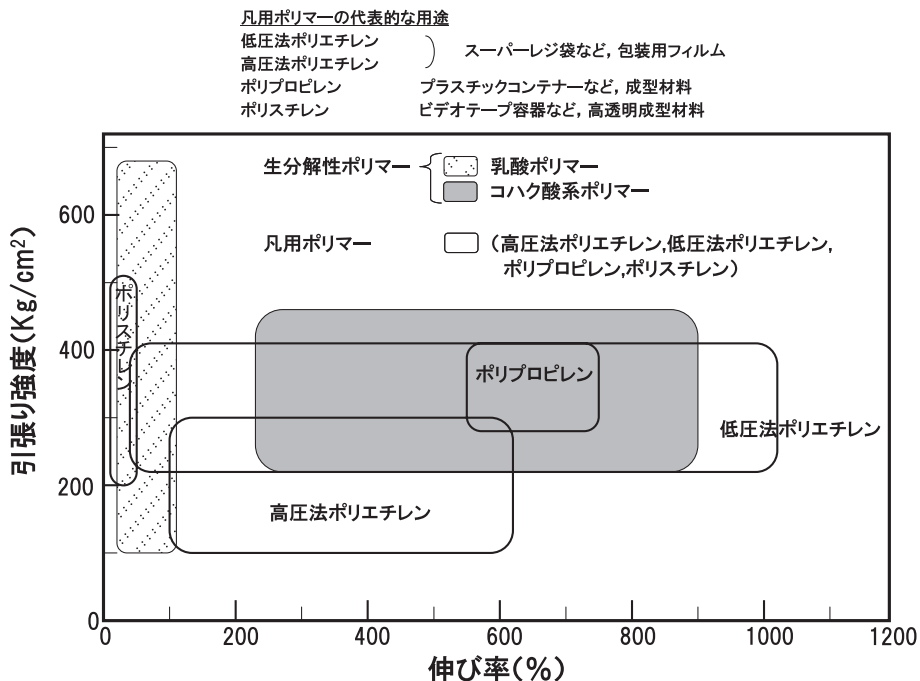


図2. 各種ポリマーの物性と用途。

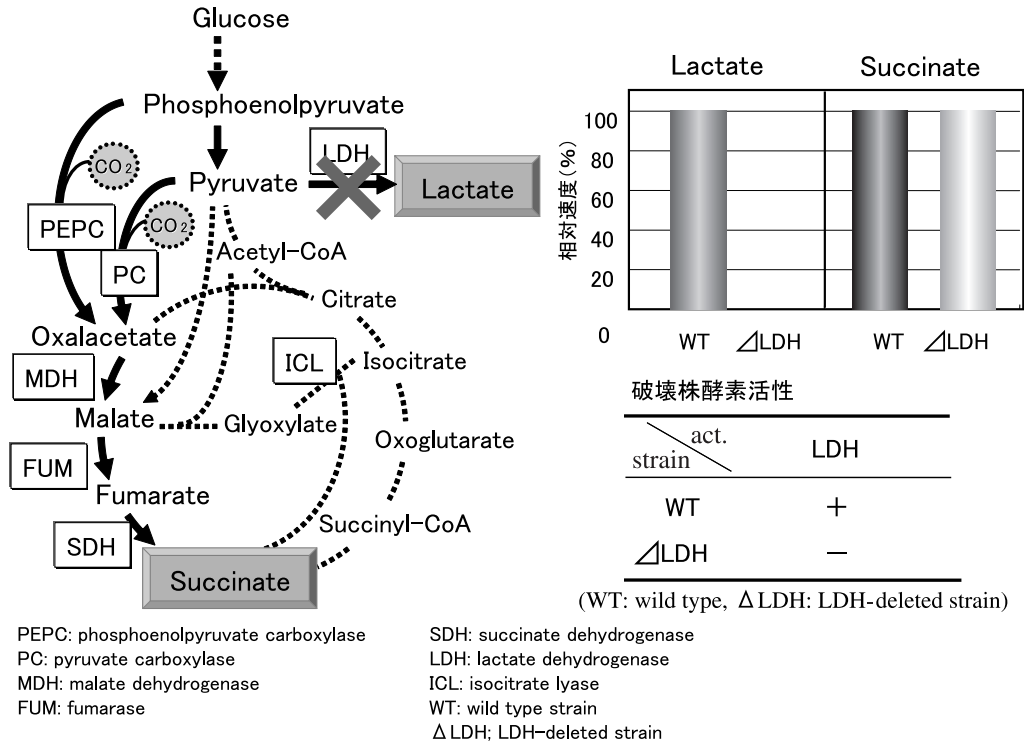


図3. コハク酸生産触媒の創製。

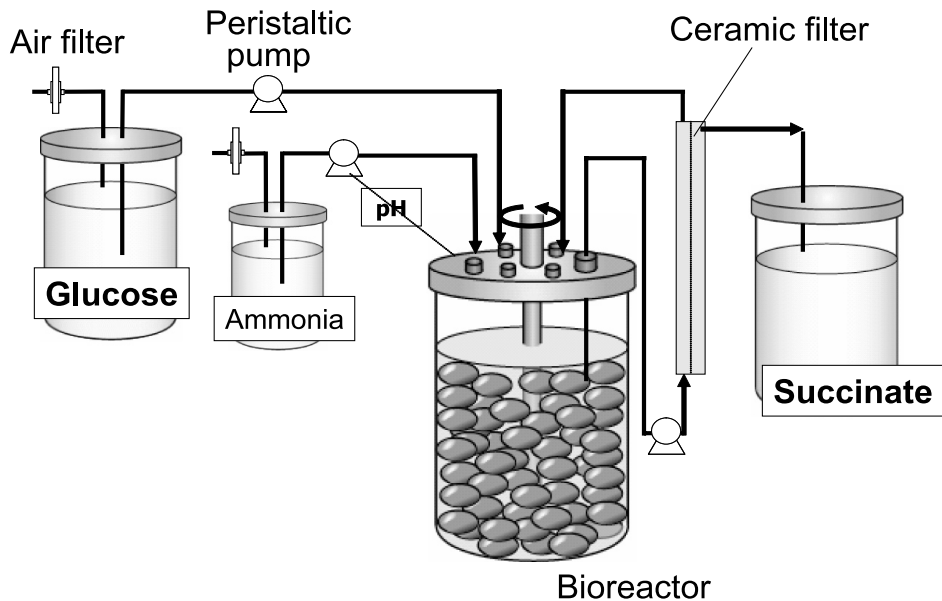


図4. コハク酸連続生産装置。

用途分野においてかなりの相違があり、市場においては補完的な用途が期待されている。コハク酸モノマーは、現在、石油化学製法により製造されコストも高く、また再生可能資源からの製造という観点からも経済性あるバイオプロセス確立が強く望まれていた（現在、我々の開発した技術は民間企業〔昭和高分子（株）等〕との共同研究開発により早期実用化を計画している）。

我々のバイオプロセスによるコハク酸製造は原料としてバイオマス由来の糖類、副原料としてCO₂を用いる（図3）。プロセスの概略は、コハク酸製造用に創製した

コリネ型細菌をバイオ触媒として用いる連続生産方式である。なおバイオ触媒自体は酸素を供給する通常の通気攪拌培養法で工業的な大量調製が可能である。バイオ触媒は反応装置に高密度に充填し、原料の糖類およびCO₂を連続的に供給しコハク酸を生成させる。生成されたコハク酸は連続的に抜き出して回収工程へ供給する（図4）。本プロセスにおいて炭素鎖の付与反応の原料としてCO₂を用いるが、バイオプロセスの直接の原料としてCO₂を用いる事例は初めての報告であり、生物工学的にも大変興味深い反応である。

5. 燃料エタノール製造への応用

5.1. 燃料エタノール生産の現状

燃料用エタノールは既に醸造法を改良した製法を基本として相当の規模で生産されている。以下に現状を紹介する。

現在、燃料用エタノールはブラジルと米国でかなりの規模で生産されている。ブラジルでは特産の砂糖キビ由来の砂糖、米国ではコーン澱粉由来のグルコースを原料として生産されている。

ブラジルの状況

ブラジルの最近10年間の自動車燃料用エタノール生産量は年間1,200万KL(キロリッター)~1,400万KLである。ブラジルのエタノール燃料発展の歴史は、1970年代初頭の第一次石油危機勃発のときに始まる。石油燃料を輸入に大きく依存していた同国は石油価格の急激な上昇により貿易収支が大幅に悪化した。このため、砂糖の国際価格安定の目標も兼ねて砂糖原料エタノール生産が国策として開始された(エタノール・ガソリン混合燃料使用を国策として行うアルコール推進計画 Pro-alcohol Program を1975年スタート)。しかしながら、当時予測されたほどの石油価格の上昇はなく、このためエタノール使用への国の財政援助は大きな負担となり、現在、補助削減など政策転換が進行中である。

ブラジルでは2種類の燃料としてエタノールが使用されている。すなわち(a)エタノール(エタノール成分96%、水分4%)のみで走る自動車用の“含水エタノール燃料”(E96)と、(b)無水エタノールとガソリンが24:76で混合されている“ガソリン燃料”(E24)とである。

ブラジルでは(a)のE96燃料を使用する車は“エタノール車”,(b)の無水エタノール/ガソリン混合燃料で走る車を“ガソリン車”と称している。

ブラジルでのE96とE24を合わせた2002年のエタノール生産量は1,200万KL強であるが、E96の2002年の生産量は約500万KLで、ピーク時(1989年の約1,100万KL)に比し相当の落ち込みとなっている。一方、E24の

生産量は、近年、一貫して増大しており、2002年の生産量は約700万KLに達し、95年の生産量(約300万KL)に比し顕著な伸びである。E96燃料消費量の低下は1999年からアルコール車への補助が全廃され魅力がなくなったことが要因である。このような国内市場向けとは別途の動きとして、市場が急拡大中の米国をターゲットとして、政府・民間企業連携にて生産量の大幅増大を図る積極的な対応を計画している。

米国の状況

中部コーンベルト地域におけるコーン澱粉原料よりの生産が最近急増し、2003年末には約1,060万KLに達している。燃料用エタノールは主にE10(ガソリンに10%混合)として用いられ、一部E85(ガソリンに85%混合)も使用されている。

今後は政府等の手厚い補助策の継続、高生産性トウモロコシ(遺伝子組み換え種)栽培の普及とともに、さらに生産が急増するものと予測されている(図5)。

5.2. 新規エタノール生産技術の概要

エタノール生産は3つの工程に大別される。①糖類の生成 ②糖類からのバイオコンバージョンによるエタノール生成 ③分離回収・濃縮(99.5%以上)工程

ブラジル、米国の現在の生産は、原料として食料である“砂糖”,“澱粉由来の糖”を用いていること、さらにバイオコンバージョン工程は醸造技術と基本的に同様の「酵母」を用いているため生産性が極めて低いことから、政府等の手厚い支援が必須となっている。このような構造を変革し経済性ある製造法の確立へ向けて米国は大きく踏み出したと言える。

技術革新によるコスト低下予測

石油危機時代に大規模で実施されたエタノール製造研究は、石油危機の認識が薄くなると共に日本も含め各国の研究は急速に縮小あるいは中断された。しかしながら、米国はDOE(エネルギー省)を中心としてその後も“かなりの研究規模”を維持してきたのである。

DOEはバイオマス資源からの燃料エタノール製造コ

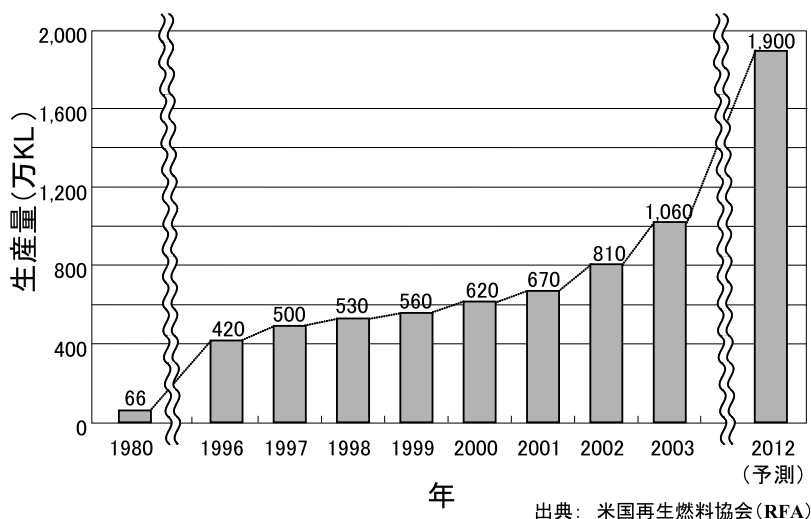


図5. 米国におけるバイオエタノール市場。

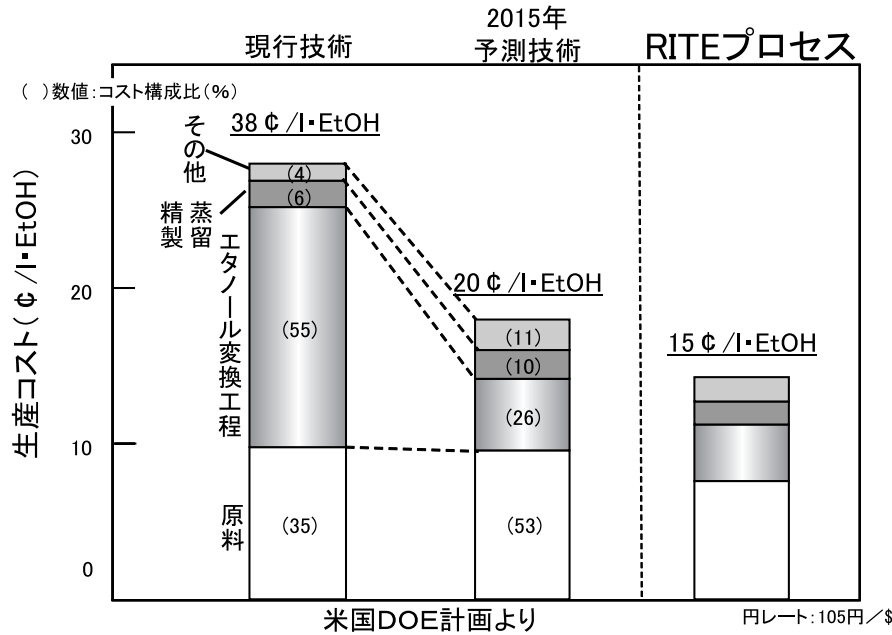


図6. バイオマスエタノール生産コスト比較。

ストに関し、現状技術の最適組み合わせによるコスト推定と将来の技術革新によるコストダウン目標を明らかにしている (図6)。これによると2015年までには 20 ¢/L 以下のコストまで低下させ、エタノールの熱量エネルギー換算においてもガソリンとの競争が可能になるとしている。図から明らかのように、バイオプロセス工程が最も技術革新による「挑戦対象」であることが分かる。

バイオテクノロジーの応用による工業微生物を用いた研究状況を、米国の動向とともに、我々 RITE で開発中の新規技術を以下に紹介する。

米国の試み

DOE では、醸造用微生物を用いるのではなく工業的製造プロセスに適した微生物を選定してバイオテクノロジー (遺伝子組換え技術) を応用し「エタノール製造微生物」を創製することを基本研究計画としている。

工業的微生物の最有力候補が「大腸菌」である。読者の中には「大腸菌?」と思われる方もあろう。今から20年以上前、遺伝子組換え技術が誕生した時に用いられた微生物が大腸菌であった。その後、医薬用途の蛋白質生産には不向きなことなどから、動物細胞などが取り上げられ、大腸菌はバイオテクノロジーの舞台で脇役へと追いやられていた感があった。

ところが現在のバイオマス利用によるエタノールや多くの化学品製造プロセスにおいて、大腸菌は〈使いやすい〉ことから主役に踊り出てきたのである。〈使いやすい〉という意味は、膨大な研究蓄積が存在しそれを自由に利用できることである。生化学や分子遺伝学の教科書に出ている代謝経路やその制御機構などの知見は、その多くが大腸菌で研究が行われたのである。大腸菌はエタノール生成の代謝経路を持っていない。しかし糖類からの代謝経路は明確に判明していることから、エタノール生成に関与するたった二つの遺伝子を入れ込むことにより立

派な〈エタノール生成菌〉へ変身したのである。今後は図6で示した2015年のコスト目標達成へ向けて、種々の改良が研究の中心となっていくと考えられる。

RITE プロセス

米国が目標としている新規バイオコンバージョンは、確かに既存の醸造法と比較し飛躍的に生産性が向上されるが、では、これは本当に理想プロセスであろうか?

米国目標のプロセスでは、エタノールは微生物が分裂成育していく際の“分泌物”としてエタノールが生成される。このため、前項で説明したごとく、生産性指標である STY は化学反応と比較し格段に低い基本的な課題が存在するのである。すなわち、生産設備 (培養設備) が大規模となり固定費が上昇してしまう。

これに対し我々は RITE プロセスによるエタノール製造を提唱している。前項で説明のごとく、このプロセスでは微生物細胞の生育を人為的に停止した状態でエタノール製造を行う。これにより微生物細胞はあたかも化学反応における触媒のように用いることが可能となる。既存技術と異なり生育 (細胞分裂) する“場”が不要となり、反応器に高密度で“触媒 (微生物細胞)”を充填し、連続反応様式にてエタノール製造を行う。このように RITE プロセスでは高 STY のエタノール生産が可能のため、バイオ変換反応槽廻りの設備を合理化できる。RITE プロセスの製造コストの試算結果を図6に示す。

6. おわりに

RITE 新規バイオプロセスにより、再生可能資源から化学品や燃料エタノールの経済性ある製造の可能性を見出した。このプロセスは、今後バイリファイナリー展開の革新技術の基盤となると考えている。