

生物化学工学の基礎

松井 徹

【編著】

上田 誠・黒岩 崇

武田 穰・徳田 宏晴

【共著】

コロナ社

ま え が き

本書は、生物化学工学をこれから専攻しようとする高専学生、大学学部生を対象に、数式が多くなりがちな当該分野を平易に理解していただけるよう執筆・編集したものである。

生物は地球上に発生してから、環境変化に適応し生き残るための進化を経て、さまざまな機能を獲得してきた。人類の歴史では、紀元前よりエジプトでワインの製造がされていたという記録があり、わが国でも鎌倉時代より味噌、醤油、酒などの伝統的な醸造産業が始まったが、製造のための詳細なメカニズムについてはほとんど不明であり経験に依存していた。20世紀初めに、フレミングによって青かびのペニシリン生産が発見され、1940年代にはペニシリンをはじめとする抗生物質の大量生産により、医療分野での生物機能の利用が開始された。このようなさまざまな生物現象を物質レベルで解明するため、生化学、分子生物学が発展してきた。さらに、これらの総合的な成果として遺伝子組換え技術を活用した大腸菌によるヒトタンパク質の生産、クローン動物の育種、万能細胞の創出が可能となってきたことは周知のとおりである。

このように、生物機能の利用が、幅広い産業に確実に拡大されるとともに大学でのバイオサイエンスの専門知識を活用して企業に貢献することが求められるようになってきた。しかし、バイオサイエンスの知識だけでは、企業の研究開発はできないものである。一方、新しい化学反応を利用して化学製品を「効率的に」「大量」生産するために「化学工学」や「工業化学」の分野が発展してきたが、常温、常圧の温和な反応をおもな特徴とする生化学反応はある意味「繊細」であり、化学工学的なアプローチが適用できないことも多い。つまり、生物の特徴を知らずに生化学反応を扱うと、良い製品はできないのである。

生物機能を活用した製品・プロセス・情報およびこれに関連する産業をバイオ産業とよぶことにするとバイオ産業に関わっている企業は、食品、石油化学、医療・健康、建築、環境廃棄物処理の分野へ事業を拡大している。新規事

業としての研究開発を含めればほぼすべての企業がバイオ産業に興味をもって
いるといっても過言ではないであろう。

高校生まで、生物学、化学を学習し、バイオテクノロジーに興味をもつ学生
は少なくないと思うが、バイオ製品をつくり出すためには、生物機能の理解
や、遺伝子工学技術の利用だけでは成り立たず、効率的に生産（あるいは実
施）するための理論的裏づけが必要になってくる。この基本になるのが、生物
化学工学である。本書には、バイオプロセスという言葉が多用されているが、
これは、バイオ製品を社会に送り出すまでのすべてを含んでおり、コストに見
合うように「効率化」「最適化」の観点からバイオ製品のつくり方を見ること
を意味する。特にここ数年は、「バイオ」＝「バイオテクノロジー」と捉えら
れていたものが、バイオテクノロジーを活用して経済活動を活性化し、社会に
大きなインパクトを与える分野として「バイオ」が捉えられるようになってき
た。これが「21世紀はバイオの時代」といわれる所以であり、一般の人にも
バイオが身近に感じられるようになりつつある所以でもある。このような考え
方を最近では「バイオエコノミー」とよんでおり、欧州経済協力開発機構
(OECD)が2009年に「2030年に向けてのバイオエコノミー」と題する報告書
を出して以来、欧米アジアの各国ではそれぞれの国に見合ったバイオエコノ
ミー戦略を策定し、再生可能な生物由来の資源の活用と、それを経済成長に結
びつける方針を打ち出している[†]。また、2015年には第1回グローバルバイオ
エコノミーサミットがベルリンで開催されている。筆者も20年ほど前に企業
研究者としてスイスを訪問した際、微生物工学の著名な教授が、「私の専門は
バイオエコノミーだ」というのを耳にし、この方は経済学も研究しているの
か、と不思議に感じたのを思い出す。

本書において扱う生物化学工学は、バイオサイエンスとバイオ産業をつなぐ
総合的な分野と捉えていただきたい。本書は、生物学、化学の一項目としてバ

[†] 五十嵐圭日子：バイオエコノミーによるゲームチェンジを私たちはどう受けるか：欧
州の動向に対する一考察、バイオサイエンスとインダストリー、75(4), pp.344-
348, バイオインダストリー協会(2017)

イオサイエンスを学んできた方だけでなく、石油化学産業の基盤として長い歴史を有する化学工学、工業化学に関する十分な知識のある中堅の企業研究者の方々にも入門書としてご利用いただけるように構成したため、従来の生物化学工学とは異なる部分があることをご容赦願いたい。つまり、高校レベルの生物学、基礎的な生物化学・分子生物学を復習するための「基礎」の項目を設け、ほかの生物学や化学の専門書に頼らずとも生物化学工学の考え方に自然に入っていけるよう工夫した。また、先に紹介した「バイオエコノミー」は、単なる生産効率だけでなく、持続可能な技術構築 (sustainable technology)、情報処理 (bioinformatics)、人材育成 (human resource development) を含んでいる。本書においても生物化学工学に関連する部分は積極的に取り入れるようにした。

本書の執筆は、微生物反応工学、生物化学工学、応用微生物学を専門とする教員、企業開発経験のある方をお願いした。学部講義としての「生物化学工学」は、数式が多くて難しそう、と敬遠しがちな学生の見方がある一方で、固定化生体触媒によるアミノ酸生産、グルタミン酸ソーダ生産、洗剤用酵素の開発など、日本から発信されたバイオ製品の技術紹介については、もっと知りたいという積極的な感想が寄せられている。特に、2015年大村智博士による抗寄生虫物質生産微生物に関する成果に対してのノーベル生理学・医学賞受賞は、バイオ製品を完成させることの重要性を強く感じさせたであろう。本書では、バイオ製品についてさらに興味をもっていただくことを目的に、実用化例を紹介する項目を0章、15章に設けた。なお、生物現象の定量的な把握を目的とした動力学などは、必要最小限にとどめ、さらに学習してほしい計算演習に関しては日本生物工学会編集の『基礎から学ぶ生物化学工学演習』（コロナ社）とあわせて利用することをお勧めしたい。当然のことであるが、扱う生物種の拡大に伴いバイオプロセスの検討項目は細分化されつつある。これに関しては、個別に学術論文を調査してほしい。

なお、各章演習問題の略解は、コロナ社のWebページ <http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339067569/> (URLは2018年6月現在) に掲載した。

読者対象としては、バイオテクノロジーに興味ある高校生、応用生物関連の

学部 に在籍する大学 1, 2 年生, 新規事業としてバイオ機能を利用することになったが, どこから取り組んでよいかわからない企業研究者, 生物工学関連の講義を考えている教員などが考えられる。われわれの生活にはさまざまな分野に (意外と) バイオ技術が入り込んでおり, それぞれにサクセスストーリー, エピソードがあることも興味深い。本書のコラムをきっかけに知識を深めていただければ幸甚である。

最後に, 本書のイメージをとりまとめ, カバーのイラストを作成してくださった松井彩也子さん (芝浦工業大学デザイン工学部), 読みやすい生物化学工学の教科書をつくりたい, という想いを現実のものにくださった, コロナ社の皆さんに感謝いたします。

2018 年 6 月

松 井 徹

執筆分担

松井 徹	3, 11, 12 章
上田 誠	0, 7, 13, 15 章
黒岩 崇	5, 6, 9 章
武田 穰	1, 2, 14 章
徳田宏晴	4, 8, 10 章

目 次

第 0 部：社会に役立つ生物化学工学

0 章 社会に役立つ生物化学工学

0.1 社会のニーズと生物化学工学	2
0.2 私たちの身のまわりのバイオテクノロジーの利用	3
0.3 バイオプロセスの特徴と利用分野	5
0.4 バイオ法アクリルアミドの生産	7
コラム グリーンケミストリー	9
演 習 問 題	10

第 1 部：生命科学の基礎

1 章 微生物学の基礎

1.1 真核微生物と原核微生物	12
1.2 栄 養 形 式	13
1.3 生 育 環 境	14
1.3.1 温 度	14
1.3.2 水 分 量	15
1.3.3 酸 素 濃 度	15
1.3.4 pH	16
1.3.5 塩濃度, 光, 放射線, 圧力	16
1.4 細 菌 の 分 類	17
1.4.1 分 類 体 系	17

1.4.2	分類指標	18
1.4.3	形態学的分類指標	18
1.4.4	生理・生態学的分類指標	20
1.4.5	化学的分類指標	20
1.4.6	系統分類	21
1.5	培養	22
1.5.1	培地	22
1.5.2	培養形式	22
コラム	微生物との同居の心得	23
	演習問題	24

2章 生化学の基礎

2.1	生体物質の構造と性質	26
2.1.1	生体物質	26
2.1.2	タンパク質	26
2.1.3	脂質	28
2.1.4	糖質	31
2.1.5	核酸	33
2.2	代表的な代謝経路	35
2.2.1	代謝と栄養	35
2.2.2	発酵（基質レベルのリン酸化）	36
2.2.3	呼吸（酸化的リン酸化）	37
2.2.4	光合成（光リン酸化）	40
コラム	砂糖はおとなしいからこそ甘い	41
	演習問題	41

3章 分子生物学の基礎

3.1	セントラルドグマと遺伝子構造	44
-----	----------------	----

3.2 遺伝子工学による異種遺伝子の発現	45
3.2.1 組換えベクターの構築	45
3.2.2 形質転換	47
3.2.3 目的組換え菌の増殖と選択	48
3.2.4 目的遺伝子の形質発現	48
3.3 遺伝子組換え技術	49
3.3.1 電気泳動	49
3.3.2 PCR	49
3.3.3 DNA シーケンス解析技術	51
3.4 遺伝子工学的育種のために重要な技術	51
3.4.1 突然変異	51
3.4.2 バイオインフォマティクス	51
コラム 省エネ微生物（遺伝子組換えで酸素供給を改善）	52
演習問題	53

第2部：生物化学工学の基礎

4章 生物化学工学とは

4.1 生物化学工学の位置づけ	55
4.2 生物産業への生物化学工学の適用	56
4.2.1 使用微生物の選定	58
4.2.2 種菌の培養	60
4.2.3 主発酵	61
4.2.4 生産物の分離精製と製品化	62
4.3 生物化学工学を学ぶにあたって	63
コラム 数学は嫌い、化学や物理も苦手	64
演習問題	64

5章 単位計算の基礎

5.1 単位はなぜ大切か	66
5.2 SI 単位系 — 世界標準の単位 —	66
5.3 単位計算の基本	69
5.3.1 物理量の表し方と計算の考え方	69
5.3.2 単位の換算	70
5.3.3 マスターしておきたい単位	72
コラム 意外に使える「ざっくり計算」	78
演習問題	79

6章 物質・エネルギー収支計算の基礎

6.1 収支とはなにか	81
6.2 保存則と収支式の考え方	82
6.2.1 保存則	82
6.2.2 収支式のつくり方	83
6.3 エネルギー収支	84
6.4 物質収支	88
6.5 物質収支・エネルギー収支と生物化学量論	92
コラム 微生物の化学式？	94
演習問題	94

7章 生体触媒の特性

7.1 生体触媒とは	97
7.2 酵素反応の特性	97
7.2.1 活性化エネルギーと酵素	97
7.2.2 酵素反応の特徴：温和な条件（温度, pH）	98

7.2.3	酵素反応の特徴：特異性（反応，基質，立体）	99
7.2.4	酵素反応の仕組み	100
7.2.5	酵素の構造	101
7.3	モノづくりににおける酵素	103
7.3.1	化学反応との比較	103
7.3.2	酵素の多様性	104
コラム	遺伝子工学に欠かせない耐熱性 DNA ポリメラーゼ	106
	演習問題	107

8章 バイオプロセスとバイオリアクター

8.1	バイオプロセスの特性	109
8.2	各種バイオリアクターとその特性	110
8.2.1	運転操作法によるバイオリアクターの分類	111
8.2.2	型式によるバイオリアクターの分類	113
コラム	相反するニーズを満たす—王冠についているギザギザの数はいくつ?—	118
	演習問題	118

9章 バイオプロセスの操作要素

9.1	バイオリアクター内の物理現象—移動現象の基礎—	120
9.1.1	流動と粘度	120
9.1.2	熱移動と熱伝導度	122
9.1.3	物質移動と拡散係数	123
9.1.4	移動現象の相似性（アナロジー）	125
9.2	バイオリアクター内の物質移動—培養槽への酸素供給—	125
9.2.1	境界層と境膜説	125
9.2.2	二重境膜モデルと酸素移動容量係数 $k_L a$	127
9.2.3	$k_L a$ に影響を及ぼす因子	129
9.3	滅菌操作	130

9.3.1	微生物死滅の速度論	130
9.3.2	殺菌と加熱操作	133
コラム	培養液の流動特性とレオロジー	134
	演習問題	135

10章 酵素反応速度論

10.1	酵 素 と は	137
10.2	酵素反応の速度論	138
10.2.1	律速段階法による v_p の算出	139
10.2.2	定常状態法による v_p の算出	141
10.3	酵素反応の阻害	143
10.3.1	拮抗阻害型の酵素反応	143
10.3.2	非拮抗阻害型の酵素反応	145
10.3.3	不拮抗阻害型の酵素反応	146
10.4	酵素反応における定数値の算出	148
10.4.1	Lineweaver-Burk プロット	148
10.4.2	各動酵素反応の動力学定数	149
コラム	「トリアエズ・ビール」は何社のどんな種類のビールですか？	151
	演習問題	151

11章 微生物反応速度論

11.1	微生物量の測定法	154
11.1.1	重 量 法	154
11.1.2	濁 度 法	154
11.1.3	細胞数計数法	155
11.1.4	間 接 的 測 定 法	155
11.1.5	そ の 他	155
11.2	増 殖 曲 線	155

11.3 単細胞微生物の増殖	156
11.3.1 基質濃度と増殖速度の関係	158
11.3.2 基質消費速度	159
11.3.3 基質消費速度の計算法（連続培養）	160
コラム 微生物の故郷 — 土壌 —	161
演習問題	162

第3部：バイオプロセスの実際

12章 微生物（動物・植物細胞）のバイオプロセス

12.1 微生物培養による有用物質生産	164
12.1.1 化学生産への応用	164
12.1.2 医薬品（生理活性物質）への応用	165
12.2 微生物の培養方法	166
12.3 植物細胞培養による有用物質生産	167
12.3.1 植物培養細胞の大きさと工業生産に用いる利点	167
12.3.2 植物培養細胞の今後の課題	168
12.4 動物細胞の培養	169
12.4.1 工業生産に用いられる培養動物細胞	169
12.4.2 動物細胞の増殖速度	171
コラム 醤油やお酒をつくる人は納豆を食べてはいけない？	172
演習問題	173

13章 酵素バイオリクター

13.1 モノづくりでの酵素反応の利用	175
13.2 食品分野	176
13.2.1 異性化糖	176

13.2.2	トレハロース	177
13.2.3	機能性油脂	178
13.2.4	核酸系うまみ調味料	178
13.3	化学品, ビタミン分野	179
13.3.1	ニコチン酸アミド	179
13.3.2	配糖体	180
13.4	医薬分野	181
13.4.1	光学活性アミノ酸	181
13.4.2	光学活性アミン	182
13.4.3	β -ラクタム系抗生物質	183
コラム	アミノ酸系甘味料アスパルテームの製法開発	184
	演習問題	185

14章 排水処理プロセス

14.1	排水処理の概要	187
14.1.1	排水処理の目的	187
14.1.2	水質の指標	188
14.1.3	好気処理と嫌気処理	189
14.2	浮遊生物法	190
14.2.1	活性汚泥法	190
14.2.2	嫌気性接触法(嫌氣的活性汚泥法)	192
14.3	固着生物法(生物膜法)	193
14.3.1	生物膜法の特徴	193
14.3.2	回転円盤法	194
14.3.3	浸漬ろ床法	195
14.4	余剰汚泥の減容化と活用	196
コラム	小型浄化槽の小さな歴史	197
	演習問題	197

第4部：これからの生物化学工学

15章 これからの生物化学工学

15.1	バイオテクノロジーを飛躍的に発展させる技術革新	200
15.2	合成生物学による生物的モノづくりの革新	202
15.3	医療の変革	206
コラム	健康とバイオテクノロジーの進歩	208
	演習問題	208
	引用・参考文献	209
	索引	212

0章

社会に役立つ生物化学工学

◆本章のテーマ

本章では、生物化学工学による生物の機能を利用したモノづくりなどの技術が社会に役立っていることを学ぶ。歴史的にもヒトは微生物や酵素の存在を知る前からこれらを利用して来た。現在では、バイオテクノロジーの進展に伴い、生物機能を利用してさまざまな物質がつくられ、多くの産業分野で活用されている。バイオ製品はエタノールやアクリルアミドのような低分子の基礎化学品から、タンパク質からなる高分子のバイオ医薬品まで多様である。

◆本章の構成（キーワード）

- 0.1 社会のニーズと生物化学工学
持続可能な社会，食糧・医療・環境・エネルギー
- 0.2 私たちの身のまわりのバイオテクノロジーの利用
発酵食品，バイオプロセス，遺伝子組換え酵素
- 0.3 バイオプロセスの特徴と利用分野
バイオプロセスによる生産物，バイオ製品の多様性
- 0.4 バイオ法アクリルアミドの生産
バイオ法アクリルアミド，ニトリルヒドラーターゼ

◆本章で知ってほしいこと（チェックポイント）

- 生物化学工学が広く世の中に役立っていること。
- バイオテクノロジーは身近な技術であること。
- 食品加工の分野でも最新のバイオテクノロジーが活用されていること。
- 多くの産業分野でバイオプロセスによるモノづくりが行われていること。
- バイオ製品は医薬から汎用化学品まで多様性があること。

0.1 社会のニーズと生物化学工学

バイオマスからの**バイオエタノール**の生産や、**iPS細胞**（人工多能性幹細胞，induced pluripotent stem cell）による**再生医療**や医薬の開発など，環境・エネルギー分野や医療分野など生物の機能を利用した技術は私たちの身近にたくさんある。バイオテクノロジーは，ヒトが地球上でさまざまな生物と折り合いをつけ，快適な生活を送るうえで重要な技術である。

なぜならば，近年，人口の増加やエネルギー多消費型の生活により，ヒトの生命活動による地球環境への影響は無視できない状態となっている。環境との調和をとりながら，太陽光を含む資源や素材を効率的に活用して豊かな生活を実現することが理想である。そのためには環境負荷が少なく持続可能な社会を実現する技術の開発が必要だからである。

生物化学工学は生物機能を工学的に捉え，微生物や酵素，動物，植物，**ゲノム**（genome）情報などを素材として生物学，生化学，細胞学，分子生物学などから得られる生物機能の理解を人類の課題である食糧，医療，環境，エネルギー問題の解決に適用する技術である。**表0.1**には，人々が求める社会のニーズとそれらに応える生物化学工学の代表的な実例を示した。生物化学工学はおもにモノづくりの分野で社会に役立っていることがわかる。

表0.1 社会のニーズと生物化学工学

社会のニーズ	生物化学工学の適用例
環境負荷の少ない化学工業	バイオリクターによる化学品の生産
健康な生活	動物細胞によるバイオ医薬の開発と生産 酵素反応による機能性食品の生産
安全で美味しい食品	食品加工での酵素の利用 植物工場での野菜生産
エネルギー問題	バイオ燃料の開発と生産

0.2 私たちの身のまわりのバイオテクノロジーの利用

ヒトは何千年も昔からお酒や醤油やヨーグルトなどの発酵食品をつくってきた。微生物や酵素の存在を知らずにこれらの技術はその作用を巧みに利用して生活を豊かにしてきた。

その後、微生物の発見や酵素の働きが見い出され、微生物の機能を積極的に利用したエタノール生産や有機酸、アミノ酸、抗生物質などの大量生産が可能となってきた。生物の機能発現は酵素反応が集積した結果であり、有用な微生物をモノづくりのための反応触媒として利用する技術は生物化学工学によって構築されるバイオプロセスという。現在では生物化学工学により生物機能を利用した多くの工業化技術でさまざまな物質が生産されている。湿潤で温暖な気候にある日本はこれらの技術、特に微生物をうまく使いこなす発酵技術を得意としており、食品、化粧品や医薬などの分野で多くの製品を生み出している(表0.2)。

表0.2 私たちの身のまわりのバイオプロセス例

分野	製品
食品	ビール、日本酒、ワイン、パン、ヨーグルト、チーズ
調味料	アミノ酸、クエン酸
有機酸	クエン酸、イタコン酸
化学品	エタノール、ビタミン類
医療分野	抗生物質類
酵素	洗剤用酵素(プロテアーゼ、アミラーゼ、リパーゼ、セルラーゼ)

さらに遺伝子組換え技術の進歩により、微生物や植物、あるいは動物から有用な酵素の遺伝子を取り出し、遺伝子組換えにより酵素を大量生産し、食品加工や医薬や化学品の製造に用いることが日常的になってきた。遺伝子組換え技術の普及例として、表0.3にわが国で認可されている遺伝子組換え技術を利用した食品用酵素を示す。原料を有効に利用したり、食品の風味を高めるため

4 0. 社会に役立つ生物化学工学

表 0.3 わが国で安全審査を手続きを経た組換え DNA 技術応用食品添加物（酵素）¹⁾

対象品目	名称/申請者/開発者	性質	官報掲載
α-アミラーゼ	TS-25/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2001
	BSG-アミラーゼ/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2001
	TMG-アミラーゼ/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2001
	SP961/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2002
	LE399/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2005
	SPEZYME FRED™/ジェネンコア/Genencor Inc.	耐熱性向上	2007
	α-アミラーゼ/ノボザイムズ/Novozymes A/S	耐熱性向上 スクロース 耐性向上	2014
キモシン	α-アミラーゼ/ノボザイムズ/Novozymes A/S	耐熱性向上	2015
	マキシレン/ロビン/DSM	生産性向上	2001
プルラナーゼ	カイマックス キモシン/野澤組/CHR. HANSEN A/S	生産性	2003
	Optimax/ジェネンコア/Genencor Inc.	生産性向上	2001
リパーゼ	SP962/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2002
	SP388/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2001
グルコアミラーゼ	NOVOZYM677/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2003
	AMG-E/ノボザイムズ/Novozymes A/S	生産性向上	2002
α-グルコシルトランスフェラーゼ	6-α-グルカノトランスフェラーゼ/江崎グリコ/江崎グリコ	生産性向上 性質改変	2012
	4-α-グルカノトランスフェラーゼ/江崎グリコ/江崎グリコ	生産性向上	2012
シクロデキストリングルカノトランスフェラーゼ	シクロデキストリングルカノトランスフェラーゼ/日本食品化工/日本食品化工	生産性向上 性質改変	2014

平成 27 年 6 月 1 日現在

食品の製造工程で酵素を添加することは多い。安価で美味しい食品をつくるうえで、デンプンや油脂、タンパク質に作用する酵素として遺伝子組換え品を用いることが多くなっている。

より最近では、生命現象をより深く包括的に解析・解明する**オミックス**

(omics) 技術 (**ゲノミクス** (genomics, ゲノム学), **プロテオミクス** (proteomics, プロテオーム解析), **メタボロミクス** (metabolomics, 代謝物の網羅的解析)) の進展により, 生物の成り立ちと機能に関する理解が進み, 生物機能の産業への利用は単一の酵素反応だけでなく, 微生物, 動物, 植物の細胞や個体による医薬品, 食品, 工業素材などの生産プロセスの構築へと発展している。遺伝子, 酵素, 細胞などを容易に取り扱い, 各種の技術を統合して生物やその生産物を産業に役立てるのがバイオテクノロジーであり, 化学工業, 農林水産業, 医薬品工業など多くの産業分野の基盤となっている。

0.3 バイオプロセスの特徴と利用分野

微生物や酵素を用いたモノづくりをバイオプロセスといい, 生物化学工学を主とする各種バイオテクノロジーの技術による環境負荷の少ないモノづくり技術として注目されている。バイオプロセスの特徴と利用分野について説明する。

まず, バイオプロセスによる生産物の特徴について述べる。バイオプロセスによる生産物は生体の代謝や酵素反応の生成物であるため, その生産物は生体成分であることが多く, 生分解性をもつ環境負荷の低い化合物となる。また, 有機合成反応では合成困難な生物ならではの複雑性も有する。例えば, 糖質やタンパク質, 核酸などの高分子である。

バイオプロセスによる生産物の特徴

- ・ 生体成分や類似成分である
- ・ 不斉炭素をもつ場合は光学活性体である
- ・ 水溶性化合物である
- ・ エタノールのような低分子からタンパク質や核酸のような高分子である

バイオプロセスの反応の特徴は, 生体反応なので反応の選択性が高く, またバイオマスを原料にでき温和な条件で反応できるため, 製法としても環境負荷が低くなる。

呼 吸	35	植物工場	6	単純タンパク質	28
古細菌	12	食物連鎖	187	担 体	116
固着生物法	193	植 菌	22	タンパク質	26
固体培養	22	真核生物	12		
固定化酵素	175	浸漬ろ床法	195	【ち、つ】	
固定床	195	真正細菌	12	中温菌	15
混合培養	22			通気攪拌型バイオリアクター	113
コンポスト化	196	【す】		通性嫌気性菌	15
【さ】		水素呼吸	39		
再生医療	2, 206	スクリーニング	58	【て】	
最大反応速度	140	スケールアップ	62	定常期	156
細胞融合	56	ステロール	30	電気泳動	49
サブユニット	27	スパージャー	113	電子伝達系	37
サンガー法	51	【せ】		転 写	44
三次構造	27	制限酵素	46		
散ろろ床法	194	静止期	156	【と】	
酸素移動容量係数	129	生態系	189	同 化	35
酸素呼吸	38	生体触媒	97, 137	糖脂質	30
酸素発生型光合成	40	生物学的酸素要求量	188	糖 質	31
酸素非発生型光合成	40	生物膜	193	独立栄養	13
【し】		生物膜法	193	ドメイン	17
脂 質	28	生命情報学	52	ドラフトチューブ	115
湿菌体量	154	生理活性物質	165	トリプレット	44
質量パーセント濃度	76	世代時間	158	トレハロース	177
質量保存則	83	接頭語	67	【に、ぬ】	
質量モル濃度	75	選択マーカー遺伝子	46	二次構造	27
至適 pH	98	せん断応力	121	二重境膜モデル	128
至適温度	98	セントラルドグマ	44	二名法	17
脂肪酸	20, 29	【そ】		ニュートンの粘性の法則	121
死滅期	156	増殖収率	159	スクレオチド	33
死滅速度	131	増殖速度	157		
邪魔板	114	阻害剤	143	【ね】	
種	17	属	17	熱拡散率	123
収 支	81	組織培養	56	熱伝導度	122
収支式	82	【た】		熱流束	86, 122
集積培養	59	代 謝	35	粘 度	121
従属栄養	13	対数増殖期	156	【は】	
充填層型バイオリアクター	116	ダイデオキシ法	51	バイオ医薬品	6
集 落	18	ダウンストリーム	63	バイオイソフォマティクス	52
樹立細胞系	170	濁 度	154	バイオエタノール	2
純粋培養	22	脱 窒	38	バイオハザード	104
硝 化	39	単位操作	56	バイオリファイナリー	165
触 媒	137	炭酸固定	13		

倍加時間	158	ペプチド	26	流加操作	111
培地	22	ペプチドグリカン	19	流加培養	23
ハイブリドーマ	171	ペプチド結合	26	硫酸呼吸	39
培養	22	ヘマトサイトメーター	155	流動層型バイオリアクター	116
パイロットスケール	61	ヘミアセタル	180	流動床	195
発現	45	変性	28	リン酸ジエステル結合	34
発酵	35	ベンチスケール	61	リン脂質	30
半回分操作	111	ヘンリー定数	128		
反応速度	77	ヘンリーの法則	128	【れ, ろ】	
				連続操作	112
【ひ】		【ほ】		連続培養	23
光従属栄養生物	13	放射線耐性菌	16	ろ過除菌	22
光独立栄養生物	13	飽和脂肪酸	29		
非拮抗阻害	145	補助単位	67	【英語】	
嗜好気性菌	15	保存則	82	<i>D</i> 値	131
微生物	12	ポリヌクレオチド	33	EC 番号	99
比増殖速度	158	ポリメラーゼ連鎖反応法	49	GC 含量	20
ヒトゲノム計画	200	翻訳	44	iPS 細胞	2
ピリドキサルリン酸	182			K-12	17
		【む, め】		L-B プロット	148
【ふ】		無機呼吸	39	Lineweaver-Burk プロット	148
フィックの(第一)法則	124	無菌シール	113	Michaelis-Menten の式	141
フィードバック制御	112	メタボロミクス	5	Michaelis 定数	141
富栄養化	187			PCR	106
不拮抗阻害	146	【も】		PCR 法	49
複合タンパク質	28	目	17	SI 単位系	67
複製	44	モル濃度	74		
物質移動係数	128	門	17	【数字】	
物質移動流束	123			16S リボソーム RNA 遺伝子	21
物質収支	82	【ゆ, よ】		18S リボソーム RNA 遺伝子	21
物質流束	89	誘導期	156	3 ドメイン説	12
不飽和脂肪酸	29	誘導適合説	101	【ギリシャ文字】	
浮遊物質	188	溶存酸素濃度	114	α -アミノ酸	26
プライマー	49	溶存酸素量	188	α -アミラーゼ	105
フーリエの法則	122	四次構造	27	α ヘリックス	102
プロテアーゼ	99	余剰汚泥	196	β -酸化系	38
プロテオミクス	5	読み取り枠	44	β シート	102
分子拡散	123				
分類階級	17	【ら, り】			
分類群	18	ラボスケール	61		
分類指標	18	リガーゼ	46		
		立体特異性	100		
【へ】		リパーゼ	178		
ペニシリン	183	リボザイム	97		

—— 編著者略歴 ——

松井 徹 (まつい とおる)

- 1985年 筑波大学第二学群農林学類生物応用化学専攻卒業
1990年 筑波大学大学院バイオテクノロジー学際カリキュラム修了
学術博士
1990年 株式会社日本鉱業 (現, JXTG エネルギー) 生物科学研究所勤務
2002年 株式会社ジャパンエナジー (現, JXTG エネルギー) バイオ研究センター勤務
2003年 琉球大学助教授
2007年 琉球大学准教授
2017年 東京工科大学教授
現在に至る

—— 著者略歴 ——

上田 誠 (うへだ まこと)

- 1983年 筑波大学第二学群農林学類生物応用化学専攻卒業
1985年 筑波大学大学院農学研究科博士課程前期修了 (応用生物化学専攻)
1985年 三菱化成工業株式会社 (現, 三菱ケミカル) 横浜総合研究所勤務
1995年 博士 (農学) (筑波大学)
2012年 小山工業高等専門学校教授
2018年 京都大学客員教授 (兼任)
現在に至る

武田 穰 (たけだみのる)

- 1987年 鳥根大学農学部農芸化学科卒業
1992年 筑波大学大学院農学研究科博士課程修了 (応用生物化学専攻)
博士 (農学)
1992年 西東京科学大学 (現, 帝京科学大学) 助手
1995年 横浜国立大学助手
1998年 横浜国立大学講師
2005年 横浜国立大学准教授
2017年 横浜国立大学教授
現在に至る

黒岩 崇 (くろいわ たかし)

- 2000年 筑波大学第二学群生物資源学類卒業
2005年 筑波大学大学院生命環境科学研究科博士課程修了 (生物機能科学専攻)
博士 (生物工学)
2005年 筑波大学博士研究員
2008年 独立行政法人 (現, 国立研究開発法人) 農業・食品産業技術総合研究機構博士研究員
2009年 東京都市大学准教授
現在に至る

徳田 宏晴 (とくだ ひろはる)

- 1988年 筑波大学第二学群農林学類生物応用化学専攻卒業
1991年 筑波大学大学院農学研究科博士課程単位取得中退 (応用生物化学専攻)
1991年 東京農業大学助手
1998年 東京農業大学講師
2007年 博士 (生物工学) (筑波大学)
2007年 東京農業大学准教授
2013年 東京農業大学教授
現在に至る

生物化学工学の基礎

Basics of Biochemical Engineering

© Toru Matsui, Makoto Ueda, Takashi Kuroiwa, Minoru Takeda, Hiroharu Tokuda 2018

2018年8月20日 初版第1刷発行



検印省略

編著者	松井徹
著者	上田誠
	黒岩崇
	武田穰
	徳田宏晴
発行者	株式会社 コロナ社
	代表者 牛来真也
印刷所	萩原印刷株式会社
製本所	有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06756-9 C3045 Printed in Japan

(松岡)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。