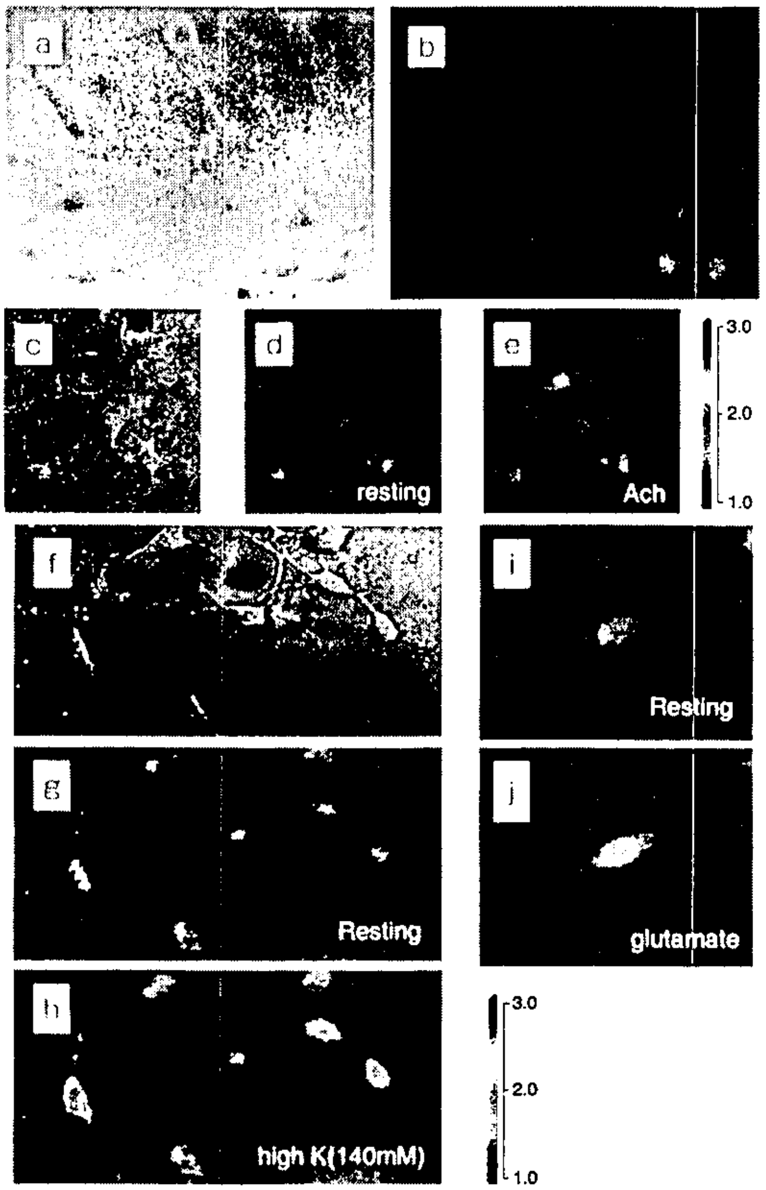

a, b：脱メチル化処理した骨髄間質細胞のうち，ある割合の細胞は，神経特異的転写調節領域を活性化できる。c～e：神経に分化した細胞がアセチルコリン(Ach)に反応して，250%のカルシウム流入を認める(カルシウム・イメージング法)。f～h：ノギンを処理した骨髄間質細胞の神経伝達物質に対する反応。神経に分化した細胞は，高カリウム刺激でカルシウム流入を認める(カルシウム・イメージング法)。i, j：骨髄間質から分化した神経は，グルタミン酸に反応する(カルシウム・イメージング法)。

図５　神経に分化した骨髄間質細胞の神経伝達物質に対する反応
(➜巻頭Color Gravure参照)

経細胞かという問題である。前述したように発生の面から考えると，神経堤の細胞が膜性骨化を生じるのであるから，初期値が神経細胞と考えることも可能と思う。

再生医療における，神経細胞の供給源としての骨髄間質細胞とMAPC

2003年の6月中旬に，フランスのナントで行われた第10回NATといわれる幹細胞に関する小さなミーティングに参加した。会場は一つしかなく，こぢんまりとした学会で，シンポジウム形式を取っていた。最初の演者であるフロリダのSanberg博士は，ヒト胎児の神経移植について言及し，サイクロスポリンを６ヵ月投与することで，ドーパミン産生細胞が生きつづけることを伝えた。また，骨髄間質細胞が神経細胞の供給源になり得ると指摘した。そのミーティングの二番目の演者であるミネソタ大学のLow博士は，MAPCが神経の供給源として有効であり，ドーパミン，セロトニン，γ-アミノ酪酸(GABA)を産生するニューロンとなることに矛盾しない結果を得たと発表した。さらに，MAPCが脳梗塞，パーキンソン病，リソゾーム病の神経症状に効果があるとLow博士は指摘する。そもそも，骨髄由来の間葉細胞が神経に分化すると発表したのは前述のSanberg博士が最初であり，Prockop博士が続く。

骨髄間質細胞 とMAPC が同一種類の細胞か異なる細胞かについての

議論がある。会場において，ミネソタ大学でMAPCを扱い神経系への細胞転換に成功したLow博士に対し，この議論に関して質問したところ，明確な返事があった。「Verfaillie博士のMAPCとProckop博士が発表した骨髄間質細胞について，キーストンで詳細に比較された。両方とも神経の分化を生じるけれども，その表面マーカーやその他の情報から，全く異なる細胞と思われる」。キーストンにおける詳細な議論はわからないが，骨髄間質細胞とMAPCは異なる細胞である。位相差顕微鏡下における細胞の大きさからして異なっている。私どもが培養している骨髄間質細胞のほうが大型であると理解している。もっとも，東京での招待講演においてProckop博士は，神経に分化し得る骨髄間質細胞は小型であり，細胞密度を低くすることで寿命が延長され，神経分化能を保持すると述べた。そして，神経細胞の供給源としての間葉細胞を取得するための元の組織は，骨髄である必要は全くない。臍帯血由来の間葉細胞[9]はその一つである。実験したわけではないけれども，骨芽細胞以外の間葉細胞[10-12]も神経への分化を示す可能性がある。

おわりに

細胞転換にしろ，分化の可塑性にしろ，基礎的なことはかなりわかっていて，この分野が始まっている。そして，間葉系幹細胞にかかわる実験も，発生生物学の知識を思いきり，利用している。研究している人々が現代の錬金術師と揶揄されるのもそういった事情があるからだと推察され，サイエンティストというよりエンジニアと考えられているのも頷ける。それぞれの細胞への分化にかかわるプロトコールは，発生学の積み重ねのお陰である。培養に使用する培地，試薬にしろ，目新しいものはないけれども，さまざまな手法を組み合わせている。一方，核移植[13]やトランスクリプトーム[14]といった手法を用いて，骨髄間質由来の間葉系幹細胞にも新たな情報が追加されつづけている。

余談であるが，私は「間質」という語感が好きである。15年以上も付きあっているので親しみがあるのだろうけれども，隙間を埋めていて，メジャーな感じがないところがよい。細胞の名前としても無名なために，発生学や生物学の本に記載されたことはない。わずかに骨髄の形態学者によって，造血細胞の超微形態の検討が終了した後に，研究対象として，おそらく間質もあるかといった程度で研究が始まったのではないか。しかし，研究者数が少ないこととは裏腹に，誠実に丁寧に研究されてきた。血液学の分野では，造血にかかわるニッチェを形成することでその存在が知られ，サイエンスに貢献してきたが，サイエンスにおけるその存在自体もニッチェ的である。隙間産業というか，隙間研究というか，隙間があいていてその部分で存在感を示す。なんと20世紀末期的な生き方なのだろうか。この骨髄間質が二級市民[15]から脱却する日があるとすれば，そのときのロゴは魅力的とはいえないが，StromaではなくKanshitsuとローマ字で表記したい。しかし，苦労に苦労を重ね，間質が研究対象として二級市民の位置から抜け出せたときは，研究対象としての価値はほとんどなくなっていると思われ，それはそれで残念な気がする。

謝　辞

ヒト骨髄間質細胞に関する発表の機会を与えていただいた医薬品機構に感謝します。また，その研究会においては，多くの質疑が行われ，議論が深まった。時間のある方は，骨髄間質の心筋への分化アニメーションをウェブサイトでご覧ください（http://1985.jukuin.keio.ac.jp/umezawa/HTML）。

●文　献

1) http://www.lib.kobe-u.ac.jp/products/anatomy/hassei/chap1. pdf
2) Sanchez-Ramos J, Song S, Cardozo-Pelaez F, et al : Adult bone marrow stromal cells differentiate into neural cells *in vitro*. Exp Neurol **164** : 247-256, 2000
3) Kohyama J, Abe H, Shimazaki T, et al : Brain from bone ; efficient "meta-differentiation" of marrow stroma-derived mature osteoblasts to neurons with Noggin or a demethylating agent. Differentiation (Special issue on stem cells) **68** : 235-244, 2001
4) Deng W, Obrocka M, Fischer I, et al : *In vitro* differentiation of human marrow stromal cells into early progenitors of neural cells by conditions that increase intracellular cyclic AMP. Biochem

Biophys Res Commun **282** : 148-152, 2001
5) Lee OK, Kuo TK, Chen WM, et al : Isolation of multi-potent mesenchymal stem cells from umbilical cord blood. Blood : 2003 (in press)
6) Umezawa A, Maruyama T, Segawa K, et al : Multipotent marrow stromal cell line is able to induce hematopoiesis *in vivo.* J Cell Physiol **151** : 197-205, 1992
7) Jiang Y, Jahagirdar BN, Reinhardt RL, et al : Pluripotency of mesenchymal stem cells derived from adult marrow. Nature **418** : 41-49, 2002
8) Imabayashi H, Mori T, Gojo S, et al : Redifferentiation of dedifferentiated chondrocytes and chondrogenesis of human bone marrow stromal cells via chondrosphere formation with expression profiling by large-scale cDNA analysis. Exp Cell Res **288** : 51-59, 2003
9) Ochi K, Chen G, Ushida T, et al : The use of isolated mature osteoblasts in abundance acts as desired-shaped bone regeneration in combination with a modified poly DL-lactic- co-glycolic acid (PLGA)-collagen sponge. J Cell Physiol **194** : 45-53, 2003
10) Makino S, Fukuda K, Miyoshi S, et al : Cardiomyocytes can be generated from marrow stromal cells *in vitro.* J Clin Invest **103** : 697-705, 1999
11) Gojo S, Gojo N, Takeda Y, et al : *In vivo* cardiovasculogenesis by direct injection of isolated adult mesenchymal stem cells. Exp Cell Res **288** : 35-50, 2003
12) Takeda Y, Mori T, Imabayashi H, et al : Can the life-span of human marrow stromal cells be prolonged by bmi-1, E6, E7, and/or telomerase without affecting cardiomyogenic differentiation? J Gene Med (in press)
13) Kato Y, Imabayashi H, Mori M, et al : Developmental totipotency of tissue-specific stem cells from an adult mammal ; Nuclear transfer of adult bone marrow mesenchymal stem cells. Biol Reprod (in press)
14) Sharov AA, Piao Y, Matoba R, et al : Transcriptome analysis of mouse stem cells and early embryos. PLoS Biol : 2003 (in press)
15) Gerson SL : Mesenchymal stem cells ; no longer second class marrow citizens. Nat Med **5** : 262-264, 1999

書評 BOOK REVIEW

『絵でわかる　血液のはたらき』
(八幡義人著)

●A5判, 178頁
●定価2,100円
(本体2,000円+税)
●講談社刊

私が中学生の時に大好きだった本に『化学のドレミファ』(米山正信著/黎明書房)がある. この本は化学のお勉強の本なのだが, 物語風になっていて楽しく読んでいくことができる. 最後に, 化学のお勉強をすすめていく博士がいなくなってしまうときには泣いてしまう. これは私だけではなく, 同じように博士がいなくなってしまうときにこの本で泣いてしまった経験を持つ方がいることをウェブサイトで最近知った.

『絵でわかる　血液のはたらき』もある意味では読み物として読み進めることができる. 私は1日ですべて読んだ. タイトル通り, 絵が多いことにもよるが, この本は文章が読みやすく, 内容からいえば"文章でわかる　血液のはたらき"であり, 絵は理解に関して補助的である. また, 楽しみで読むことができ, "わかる"ことを目的としなくてもよいと思う. 全部の内容がわからなくても最後まで読めてしまい, なぜか満足させてくれる, 心地よい読後感がある.

著者がどのレベルの読者を想定して書いたのかは不明だが, 今度小学校を卒業する息子に読ませてみようかと思う. もちろん, さっぱり理解できないかもしれないが, 説明してやれば少しはなんとかなるかもしれない. 真の読者としてのターゲットは誰なのだろうか. 臨床医だろうか. 産業界の研究者だろうか. 医学生だろうか. 講談社が出版元であるから, 一般の方々なのだろう. 私がいえることは, 読んで楽しいと思えるのは『医学のあゆみ』の読者層と一致しているだろうということである.

たくさんの話から構成されている. クローン動物, SARS, O-157, ホルモン, ビタミン, 血液型と性格判断, ピロリ菌, 胚性幹細胞, 再生医療, 移植, エイズ, ダイエット, ロシア皇室の難病と, 本当に多くのはなしが満載である. 実は読んでみるとわかるのだが, "血液のはたらき"がわかるために, 細胞のかたちのはなし, 代謝のはなし, 細胞の寿命に関するはなし, 細胞周期のはなし, 転写因子のはなしと基本的な細胞生物学まで踏み込んでいる. このあたりは, 著者の努力がしのばれてしまうところもあり, 大変だっただろうなと推察している. 読者としては, ただ楽しんで読めればよいのではないだろうか.

著者が極めて多くの新しい文献にあたり, どれだけの時間を執筆に費やしたかは, 読めばわかる. 2002年から2003年に大騒ぎしたSARSのはなしもある. また, この本は"ですます"調で書かれている. これは, "絵でわかる"シリーズの特徴なのか, この本における著者の主張なのかは不明だが, "ですます"調で書かれていることは成功していると思う. もうひとつ付け加えなくてはならないのは, 参考文献と索引が充実していることである. 参考文献は一般の読者には手に入りにくい雑誌や書籍だが, 『医学のあゆみ』の読者には便利であり, また索引はこの本が大事な事項を網羅していることからも有効に使用できる.

(国立成育医療センター研究所, 梅澤明弘／うめざわあきひろ)

来週の学会案内

◎第 103 回　東京臨床糖尿病医会　総会
- 4/17(土)　(東京都)
- 会場：日中友好会館
  〒112-0004 東京都文京区後楽 1-5-3
  TEL：03-3811-5317
- 大会長：伊藤眞一(伊藤クリニック)
- 問合せ先：東京臨床糖尿病医会
  〒150-0031 東京都渋谷区桜丘町 9-17 親和ビル 1F
  TEL：03-5458-5035，FAX：03-5458-6242

◎第 50 回　Quality of Life(QOL)研究会　総会
- 4/17(土)　(吹田市)
- 会場：大阪大学医学部銀杏会館
  〒565-0871 吹田市山田丘 2-2
  TEL：06-6879-5111
- 大会長：大橋一友(阪大・大学院・医)
- 問合せ先：大阪大学大学院医学系研究科
  保健学専攻母性小児看護学講座
  〒 565-0871 吹田市山田丘 2-2
  TEL：06-6879-2533，FAX：06-6879-2533

◎第 32 回　日本顎口腔機能学会 学術大会
- 4/17(土)　(福岡市)
- 会場：九州大学歯学部
  〒 812-8582 福岡市東区馬出 3-1-1
  TEL：092-641-1151
- 大会長：寺田善博(九大・大学院・歯)
- 問合せ先：九州大学大学院歯学研究院
  口腔機能修復学講座咀嚼機能制御学分野
  〒 812-8582 福岡市東区馬出 3-1-1
  TEL：092-642-6368

◎第 79 回　日本結核病学会　総会
- 4/20(火)～21(水)　(名古屋市)
- 会場：名古屋国際会議場
  〒 456-0036 名古屋市熱田区熱田西町 1-1
  TEL：052-683-7711
- 会長：下方　薫　(名大・大学院・医)
- 問合せ先：名古屋大学大学院医学系研究科
  病態内科学講座(呼吸器内科)
  〒 466-8550 名古屋市昭和区鶴舞町 65
  TEL：052-744-1918，FAX：052-744-2176

◎第 90 回　日本消化器病学会　総会
- 4/21(水)～23(金)　(仙台市)
- 会場：仙台国際センター
  〒 980-0856 仙台市青葉区青葉山
  TEL：022-265-2211
- 大会長：松野正紀(東北大)
- 問合せ先：東北大学大学院医学系研究科
  外科病態学消化器外科学分野
  〒 980-8574 仙台市青葉区星陵町 1-1
  TEL：022-727-5333，FAX：022-727-5333

◎第 47 回　日本手の外科学会 学術集会
- 4/22(木)～23(金)　(大阪市)
- 会場：大阪国際会議場
  〒 530-0005 大阪市北区中之島 5-3-51
  TEL：06-4803-5555
- 会長：阿部宗昭(阪医大)
- 問合せ先：大阪医科大学整形外科学教室
  〒 569-8686 高槻市大学町 2-7
  TEL：072-683-1221，FAX：072-683-6265

◎第 43 回　日本定位・機能神経外科学会 学術大会
- 4/22(木)～23(金)　(奈良市)
- 会場：奈良県新公会堂
  〒 630-8212 奈良市春日野町 101
  TEL：0742-27-2630
- 大会長：榊　寿右(奈医大)
- 問合せ先：奈良県立医科大学医学部 脳神経外科学教室
  〒 634-8521 橿原市四条町 840
  TEL：0744-29-8867，FAX：0744-24-1466

◎第 38 回　日本保健物理学会 研究発表会
- 4/22(木)～23(金)　(神戸市)
- 会場：神戸大学 深江キャンパス
  〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1
  TEL：078-431-6200
- 大会長：小田啓二(神大・海事科学)
- 問合せ先：近畿大学理工学部情報学科
  〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1
  TEL：06-6730-5880，FAX：06-6723-2721

◎第 23 回　日本法中毒学会 学術集会
- 4/22(木)～23(金)　(秋田市)
- 会場：秋田県総合保健センター
  〒010-0874 秋田市千秋久保田町 6-6
  TEL：018-831-2011
- 大会長：權守邦夫(秋大)
- 問合せ先：秋田大学医学部 社会環境医学講座法医科学分野
  〒010-8543 秋田市本道 1-1-1
  TEL：018-833-1166(3264)，FAX：018-836-2610

◎第 20 回　日本医工学治療学会 学術大会
- 4/22(木)～23(金)　(広島市)
- 会場：リーガロイヤルホテル広島
  〒731-0000 広島市中区基町 6-78

第1部 必要な基礎知識

9. 遺伝子変異

梅澤明弘*

I. 病気の原因としての染色体と遺伝子の異常

染色体や遺伝子の変異を考えることは，ヒトの遺伝学を考えることと同じである．染色体と遺伝子の変異には，大きくわけて，胚細胞突然変異 germ line mutation と体細胞変異 somatic cell mutation がある．胚細胞変異では，胚細胞に変異を生じるために，そこから発生してきた個体の体中の細胞すべてに変異がみられることになる．この場合は生殖系列の細胞も含まれ，その変異は遺伝し，奇形の原因となる．一方，体細胞変異では，どこかの体細胞に変異が生じるだけなので，その細胞由来の限られた細胞のみが変異をもつことになる．体細胞変異の例としては，癌細胞が最も多くわかりやすい．

これらの遺伝子レベルの変異が病気として発症するためには，環境要因に大きく影響を受ける(図1)．環境の要因が大きい疾病と小さい疾病があることを意識することは大事である．例えば，遺伝要因のみによってひき起こされる病気としては，出生前に死に至るような重篤な遺伝病がある．遺伝要因と環境要因の両方が関与する病気があり，大多数はこの範疇に入る．環境要因のみによって起こる病気としては，交通事故をはじめとする外傷や感染力の強い病原体によるもの等があげられる．交通事故や感染症でも，環境要因のみとは完全にいいきれない場合もあり，遺伝的要因もわずかではあるが絡むことがある．病気によっては遺伝要因と環境要因は単一ではなく，複数のこともありえることである．遺伝学でやらねばならないことは，まず病気の原因遺伝子をみつけ，そのうえで，環境要因が何であるのか，両者がそれぞれどの程度発症に関与するのか，環境要因や遺伝要因をコントロールすれば病気の発症を防げるのかを明らかにすることである．

この稿では，まず，染色体レベル，遺伝子レベルの変異が関与する具体的な疾病の例をあげて考えていく．次に，これらの遺伝形質の変異により生じる疾病の表現型に与える影響をみることで，遺伝子型と表現型の連関を考える．遺伝子型と表現型の連関から，ヒト遺伝病の遺伝形式について考える．具体的な遺伝子変異によって生じるライソソーム病を含む先天性代謝性疾患について検討した後に，ヒトの遺伝子診断を進めた場合の現時点での問題点をみていき，最後に進歩が著しい遺伝子データベースを紹介する．

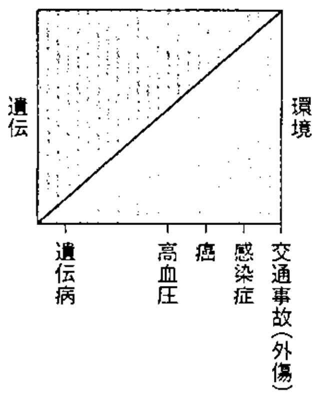

図1　病気の原因としての遺伝要因と環境要因　疾病は，遺伝要因と環境要因によってひき起こされる．大多数の疾病は遺伝要因と環境要因の両方が関与する．遺伝要因と環境要因は一つとは限らず，複数存在することが多い．

II. 染色体異常と遺伝子変異

1. 染色体の異常

染色体を観察する際には，まずリンパ球をとってきて，それを培養し，分裂させて，染色する．G バンド染色法が用いられ，染色体標本を十分乾燥し，0.1% SDS で2分間前処理をしてから 0.02% トリプシン含生食液で 10〜15 秒処理後，2% ギムザ液で染色する．分裂中期にある細胞の染色体の写真をとってきて，一番から並べて行く．大きい染色体順となっていく．このような染色体の構成を，核型 karyotype という．ヒトの体細胞には 23 組，46 本の染色体がある．この

*国立成育医療センター研究所

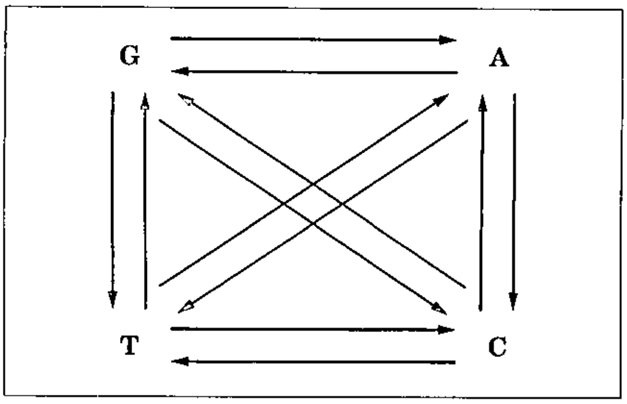

図2　一塩基変異である transition と transversion　一塩基変異には，transition(黒矢印)と transversion(赤矢印)がある．CpG の配列が CpA または TpG となる transition の変異が多い．癌抑制遺伝子である *p53* における変異の半分はこの変異である．

うち，22 組は同じ染色体が 2 本ずつある常染色体であり，残り 2 本が性染色体となり，女性では XX，男性では XY となっている．染色体の異常を観察する場合には，こうして並べられた染色体数の異常や形の異常を調べる．

欠失は DNA の一重鎖上にできた何らかの傷が修復されずに細胞分裂が起こり生じたもので，染色体の一部が失われる．また，同一染色体内で 2 ヵ所に切断が起こり，それにより生じた中間の染色体部分が逆転して再結合したものを逆位 inversion という．逆位染色体では遺伝子の量的均衡が保たれるため，表現型の異常を伴わないのが通例である．また，染色体の 2 ヵ所以上の切断により生じた染色体断片が，他の染色体に結合転座する現象で，2 本の非相同染色体間に生じた転座を相互転座という．数の異常は後に述べる．

2. 遺伝子の組換え

1 対の染色体上に連鎖 linkage して並んでいる遺伝子が，染色体の一部が入れ替わることによって遺伝子の組み合わせが変わる現象であり，DNA 鎖の二重らせん構造の 1 本の鎖に損傷による切断が起こると相対する鎖にも切断が起こり，再結合するときに入れ替わって組換え recombination が起こることをいう．このとき，不均等な組換え(不等位交差)が発生しやすく，遺伝子の欠失，重複，再配列等が起こる．

遺伝子配列から，ある長さの塩基配列が失われた場合を欠失 deletion という．遺伝子配列にある長さの塩基配列が挿入された場合を挿入 insertion という．ある塩基配列が遺伝子配列内で逆に配列してもとの位置に入った場合を逆位という．また，ある対立遺伝子が DNA 上に近接して存在する場合，不等位の交換により同じ遺伝子同志が 1 対 pair になることがある．さらに，遺伝子の一部または全部が重複して染色体に組み込まれた場合を重複 duplication という．この特殊な型として相同性の高い遺伝子間で癒合して新しい遺伝子を形成する融合遺伝子 fusion gene を形成することがある．

3. 点突然変異

DNA 複製や組換えのときに間違った塩基が挿入されて塩基対の異常をきたす．突然変異は点突然変異 point mutation とよばれる一塩基置換がよく知られているが，次のような変異の種類がある．

a. ミスセンス missense 変異

違う塩基に変換することでその部分のアミノ酸が変わるものである．プリン同士 A↔G またはピリミジン同士 T↔C の変換は transition とよばれ，プリン A/G↔ピリミジン T/C の変換は transversion とよばれる．transition の方が起きやすい(図 2)．

b. ナンセンス nonsense 変異

違う塩基に変換することでその部分が stop codon となり，そこで蛋白質の合成が終了するものである．

c. フレームシフト frameshift 変異

3 の倍数以外の塩基が欠失・挿入することによって，それ以降の 3 塩基ずつの読み枠がずれるものである．実際にはすぐに stop codon ができる．

III. 遺伝子変異と表現型の連関

1. 量的異常 dose effect

変異の結果，遺伝子産物の量が減少または増大するような変異が生じることを量的変異という．このような変異を考える際に重要となるのが，遺伝子量 dose effect である．正常な遺伝子の産物の量がどれほどあるのかというのが，発症を規定する要因となる．

a. 染色体数の異常

染色体の分離がうまくいかず，通常 2 本のはずが 1 本であったり 3 本以上であったりすることによる異常である．通常 46 本ある染色体が 45 本しかなかったり，あるいは 47 本あったりするような変異が，染色体を並べる方法ではまずすぐにわかる．何番目かの染色体が 3 本あるものをトリソミー，1 本しかないもの

をモノソミーという．前者の例としては第21染色体が3本あるダウン症候群，後者の例としては，性染色体(X染色体)が1本しかない，ターナー症候群が有名である．

以下ダウン症候群，ターナー症候群について細かくみていくが，その前に注意しておきたいのは，どちらの症候群でも，体中のすべての細胞がトリソミーあるいはモノソミーになっているのではないということである．100%の細胞がモノソミー(トリソミー)になっていると，その個体は生きることができず，生まれる前になくなると考えられている．よって，通常このような病気の患者の細胞はモザイクとなっている．モザイクとは，1つの生殖系から由来して，異なる遺伝子をもつような個体のことをいい，これと似た言葉ではあるが，キメラとは，2つの生殖細胞系から由来する個体のことをいう．すなわち，ダウン症候群，あるいはターナー症候群の患者では，人によってその割合に個人差はあるが，体内の細胞の一部のみがトリソミー(モノソミー)になっているのである．

1) ダウン症候群 Down's syndrome

ダウン症候群の患者は47XX/46XXのように表記され，この症候群は，第21染色体が3本あることによって起こる．患者の特徴としては，顔が扁平，首が太い，知能発達が低下，性格が温厚，急性リンパ球性白血病になりやすい，先天性心奇形，筋緊張低下，手の猿線(掌に1本の横線が入っている)，消化管奇形，首のわきがぶよぶよしている，30～40歳で亡くなる，ということがあげられる．

21トリソミーで起こり(通常2本の染色体が21番だけ3本になっている)，新生児800人に1人の割合でみられる．母親の年齢が高いほどトリソミーが起こりやすく，21トリソミー以外はほぼ流産してしまう．正確にいうと3種類あり，21トリソミーtype(すべての染色体が47，XX，+21となっている)，モザイクtype(46，XX/47，XX，+21と書きあらわし，トリソミーの細胞と正常な細胞が混じっている状態)，転座type(ほとんどが第14染色体の長腕の1つが第21染色体の長腕に置き換わっているタイプで，46，XX，−14，+t(14q,21q)と書きあらわす)である(核型は女性の場合で，男性ならXXをXYと書く)．

2) ターナー症候群

ターナー症候群の患者の場合は，45XO/46XXすなわち，性染色体がモノソミーになった細胞と正常細胞のモザイクとなっている．この場合の症状としては，背が低い，翼状頸 webbing of neck，大動脈狭窄症 coarctation of aorta，外反肘 cubitus valgus [伸ばした前腕が上肢軸の外側(橈骨側)に傾いていること]，卵巣の低形成があげられる．

Xモノソミー45，XOが原因であるが，モザイクtypeの45，X/46，XXもある．

表現型は女性．特徴としてみられるのは，低身長，索状性腺 streak ovaries(ひも状の卵巣)のため不妊 infertility，翼状頸，外反肘，大動脈狭窄症がある．

女性では正常人においても片方のX染色体が不活性化されているのに，何故ターナー症候群にならないのか．理由には2つある．①X染色体にも常染色体領域が存在し，本来ならば常に2本とも発現していなければならない．②不活性化するのにも時期があり，2本とも必要な時期が発生上ある．

3) クラインフェルター症候群 Klinefelter's syndrome

核型は47，XXYである．表現型は男性で，背が高く凶暴で外性器が小さいのが特徴である．

b. 劣性ホモ型

変異遺伝子を2つもつ状態(ホモ)で発症するもの．酵素欠損症の多くがこのタイプに入る．正常遺伝子の産物の活性が50%以下になることによって，正常な機能を維持できなくなるため発症する．このような変異は劣性遺伝病となる．

c. 半数不全 haploinsufficiency

変異遺伝子が1つだけで発症するもの．発現量が半分になるだけで機能が維持できなくなるということである．例えば，巨大結腸症 Hirschsprung's disease では c-ret の変異があり，腸筋神経叢の神経節細胞が減少・欠損する．

d. ヘテロ接合性の喪失 loss of heterozygosity (LOH)

受精した時点では一方の遺伝子にしか変異を有さないが，個体発生の途中で偶然に正常な遺伝子に変異が起こり，結果的に遺伝子産物の量が50%以下の不足状態となり発症する．発症原因は劣性ホモ型の遺伝子病と同じであるが，1つ壊れるだけで発症するため見た目は優性の遺伝型を示す．網膜芽細胞腫をもたらす *Rb* 遺伝子の変異がよく知られている．例えば，変異を有する *Rb* 遺伝子を父からのみもらっただけでは発症しないが，母由来の *Rb* も壊れたり欠損したり(=LOH)するとはじめて網膜芽細胞腫となる．このように，癌抑制遺伝子の変異にみられる．

e. 刷り込み(インプリンティング imprinting)

遺伝子によっては，父由来しか発現しないもの，逆

に母由来しか発現しないものがあり，この現象を刷り込み imprinting という．生殖子形成中に遺伝子がメチル化するせいで発現しなくなる．したがって，不活性化している遺伝子に変異が起きても何も起こらないが，活性化している方に変異があると機能的には両方壊れたことを意味する．例えば，*H19* 遺伝子は父由来が不活性化しているので，母由来に変異が生じると Beckwith-Wiedemann syndrome となる．症状は巨舌，半身巨大，臍ヘルニアである（どれも育ち過ぎといえる）．このような発症機序のため，家系図をみると発症者の分布がメンデル遺伝と一致しない．Angelman syndrome は遺伝していく様子から imprinting だとわかり，母由来の第 15 染色体にある遺伝子に point mutation があることが発見された．また，Prader-Willi 症候群は，変異遺伝子が母から受け継がれた子供は病気にはならず，父から受け継いだ子供は病気になることが知られている．

f. 遺伝子重複型変異

今までは量が減る方だったが，今度は増える方である．トリソミーや特定の遺伝子だけが数を増やすことによって発現量が上がり，異常が生じる．癌遺伝子 oncogene の変異にみられる．例えば，神経芽腫 neuroblastoma では N-*myc* の数が増えているためその発現量が増加している．N-*myc* の数が多いほど予後が悪いことが知られている．ちなみに，バーキットリンパ腫は c-myc の発現量は増えているが遺伝子の数は増えていないのでここには含まない．

2. 質的変異

遺伝子に変異が入り，その結果産生された産物が正常とは異なった作用を有し，何らかの悪影響を発揮し病気に至る場合を質的変異という．gain of function, dominant negative, triplet repeat disorder, position effect がある．

a. 機能獲得型変異 gain of function

遺伝子が新たな機能を獲得したり，機能が極端に上がったりするもの．変異遺伝子産物が単独で悪作用を及ぼす場合がこの変異である．正常産物の有無に関わらず，変異蛋白の存在が病気と直結するので，優性遺伝病となる．具体例は家族性大腸ポリポーシス（FAP）の原因遺伝子である *APC* があげられる．

b. ドミナントネガティブ型変異 dominant negative (inactive)

変異遺伝子による機能不全型蛋白質が，別の正常な蛋白質を抑制することで異常が生じるもの．例えば，II 型骨形成不全症 osteogenesis imperfecta では異常 I 型プロコラーゲンの $\alpha1$(I) 鎖が産生される．I 型コラーゲンは $\alpha1$(I) 鎖 2 本と $\alpha2$ 鎖 1 本とで 3 本鎖らせん構造 triple helix をとるが，この異常な $\alpha1$(I) 鎖を 1 本でも取り込んだものはらせんが不完全となり，分解される．したがって，異常な $\alpha1$(I) 鎖を全体の半分しか産生しなくとも，及ぼす影響は半分以上となってしまう．遺伝子導入は治療法に適していないが，骨髄移植では治ると考えられている．遺伝子に対して，細胞で治すというスタンスである．

＜補足＞I 型骨形成不全症は単に正常な $\alpha1$(I) 鎖が半分しか産生されない［半数不全（量的変異）の仕組み］．

c. トリプレットリピートの増大 triplet repeat disorder

ハンチントン Huntington 病や筋緊張性ジストロフィー myotonic dystrophy，脆弱 X 症候群では，遺伝子の中にトリプレットリピート（3 塩基反復）がみられ，リピートの数と病気との間に相関がある．すなわち，正常ではリピートが 20 くらいであるが，患者では 50 以上になっている．例えば，ハンチントン病では翻訳領域に CAG の反復が増える機能獲得型の変異と考えられている．一方，脆弱 X 症候群では，非翻訳領域であるプロモーター領域に CCG の反復が増大しているが，この場合は正常遺伝子産物量が反復の結果減少することが発症の原因と考えられている．筋緊張性ジストロフィーでは 3′ 非翻訳領域で CTG 反復数が増大する．

d. 位置効果 position effect

転座や挿入によって遺伝子の場所が変わり，キメラ遺伝子が形成され異常な機能を得るもの．Burkitt lymphoma は，転座による position effect によって，c-myc の発現量が変異した例である．

遺伝子型と表現型に関する，興味深い例

＜具体例＞ *WT1* は癌抑制遺伝子である．体細胞では 2 つともに exon の変異が生じて腎芽腫（Wilms' tumor）を形成する．しかし，胚細胞系列において intron に変異が生じ，*WT1* のスプライシングに異常が起き通常より短くなると染色体が XY でも外性器が女性化してしまう．内性器は索状（ぺらぺら）である．ここから *WT1* の下流には性決定因子 *SOX* があり，外・内性器の形成に関わっているとわかった．

IV. 遺伝形式

遺伝子異常はこれまで述べてきた先天奇形，染色体異常にも関与が認められるが，さらに単一遺伝子の異常に基づく疾患もある．この疾患は，家族系に追跡が可能で明確に優性，劣性，伴性遺伝の遺伝様式に分けることができる．現在知られている重い遺伝性疾患はほとんどすべて常染色体性劣性遺伝様式である．親が発病し，その子供の半数が発病する常染色体性優性遺伝様式の疾患は，重篤であれば遺伝する前に死亡することが多く事実上遺伝しないため，新しい突然変異による患者が大多数である．したがって遺伝する常染色体性優性遺伝病は一般に軽症であり，重症となるのは成人後に発病するハンチントン病などに限られる．

1. 常染色体優性遺伝 autosomal dominant inheritance

ある形質を支配する常染色体上の遺伝子座の対立遺伝子 A，a があるとすると，3 種類の遺伝子型 AA，Aa，aa が生ずるが，AA と Aa 型の表現型が同じで aa の表現型が異なっていれば，A 遺伝子が 1 つあれば形質が発現することになり，A 遺伝子は優性遺伝することになる．完全優性であれば，両親の少なくとも一方はこの形質をもち，この形質は毎世代あらわれる．

この疾患は，非常に多くのものが知られ，器官発生別にみると血液系(異常ヘモグロビン症，遺伝性球状赤血球症，楕円赤血球症等)，神経系(筋緊張性ジストロフィー，ハンチントン病，神経線維腫症，結節性硬化症等)，筋肉系(進行性筋ジストロフィー，化骨性筋炎，中心筋線維性ミオパチー等)，骨格系(Marfan 症候群，Ehlers-Danlos 症候群，軟骨異栄養症，骨形成不全症等)，視聴覚器系(網膜芽細胞腫，先天性夜盲症，先天性白内障，幼児聾，耳硬化症等)，消化管(家族性大腸腺腫症等)があげられ，この他代謝疾患としてポルフィリン症，アンチトリプシン欠損症等も含まれる．

2. 常染色体劣性遺伝 autosomal recessive inheritance

劣性遺伝子を 2 個有することで劣性遺伝形質はあらわれる．この場合，劣性遺伝子を 1 個だけ有するヘテロ個体は表現型は正常であるが，劣性遺伝子を次世代に残す可能性があるので保因者 carrier という．同胞以外の血縁に患者が出現することは少なく，近親結婚である場合に多くみられる．疾病としては神経系(脊髄筋萎縮症，フリードリッヒ運動失調症)，血液系(血小板無力症)，視聴覚器系(先天性緑内障)がある．疾病の多くは酵素異常による代謝疾患であり，フェニルケトン尿症，シスチン尿症，ムコ多糖類症，ガラクトース血症，異染性白質ジストロフィーがあり，ライソソーム病の項に記載したゴーシェ病も含まれる．

ヒトの塩基対の数はおよそ 3×10^9 個であり，遺伝子の数は約 3 万と予想されている．今，正常遺伝子を A，異常遺伝子を a とし，その遺伝子頻度をそれぞれ p および q とする．劣性遺伝病では，aa となったときに病気が発症するので，36 万分の 1 で発症する遺伝病だった場合，$q^2=1/360,000$ であり，$q=1/600$ となる．$p+q=1$ であるので，$p=1-q$ となる．すると，異常遺伝子をヘテロ，Aa でもつヒトの割合は $2pq=1/300$ となり，意外にも，36 万分の 1 で発症する遺伝病だった場合，300 人に 1 人と多くの人が異常遺伝子をもっていることになる．また，患者が 4 万人に 1 人なら保因者は 100 人に 1 人存在し，多数の遺伝病について合計すれば誰でも 10 個くらいの遺伝子に変異があることになる．

3. 伴性遺伝 X-linked inheritance

伴性という言葉は X 染色体上の遺伝子の遺伝様式に普通は使われる．伴性優性遺伝 X-linked dominant inheritance とは X 染色体上の優性遺伝子 1 つのみで，ある形質が発現する遺伝である．父親のみが X 染色体に該当遺伝子をもつ場合，娘はすべて患者となる．母親のみの場合は息子，娘ともに半数が患者となる．伴性劣性遺伝 X-linked recessive inheritance の場合，男子が対立遺伝子を 1 個だけもつヘミ接合となるので，常染色体遺伝とはまったく異なる遺伝形式を示すことになる．女子の場合は劣性遺伝子がヘテロの場合は保因者となり，ホモの場合には形質があらわれる．したがって，例外を除き男子の患者は保因者の母親から生まれ，患者は男子に集中することになる．

X 染色体連鎖の遺伝子病は同じく優性および劣性遺伝をするが，疾患としては男性のみに出現する異常である．しかし，生存率からすれば，患者のほとんどが生殖年齢以前に死亡するため，無症状の母親から娘へと遺伝形質は伝達される．この疾患は筋肉系の Duchenne 型筋ジストロフィー，血液系の血友病が有名

表1　主なライソソーム病

名　称	欠損酵素	主な蓄積脂質	主な蓄積臓器
Gaucher 病	glucocerebroside β-glucosidase	glucocerebroside	脾，肝，リンパ節，骨髄
Fabry 病	α-galactosidase A	trihexosylceramide	皮膚，腎，心
異染性ロイコジストロフィー	arylsulfatase A	sulfatide	脳，肝，脾
Niemann-Pick 病	sphingomyelinase	sphingomyelin	脾，骨髄，肝

である．

Duchenne 型筋ジストロフィー症はヒトの遺伝性疾患の中で最も数の多い伴性劣性遺伝病であり，欧米では約 3,500 人の出産例に 1 例の割合で発症し，その約 1/3 は新たな突然変異であると考えられている．dystrophin の異常のために起こる疾患で，原因遺伝子は X 染色体短腕(Xp21.2)に存在し，*DMD* 遺伝子とよばれている．dystrophin をコードする遺伝子は全長 200 万塩基対(2×10^6bp)にも及ぶ大きさで，その中に少なくとも 70 ものエクソンがあるとされている．*DMD* 遺伝子をプローブとして多くの患者を解析した結果，患者の 60% にエクソンの領域に欠損のあることが判明した．

V．ライソソーム病

ライソソームは，脂質やムコ多糖を分解する機能を営むので，ライソソーム酵素遺伝子の変異によってこれらの酵素活性が損なわれると，分解されなかった物質の蓄積が起こり，蓄積症となる．これをライソソーム病とよぶ．ライソソームは主に細胞外に由来する物質の消化にあたるので，蓄積は主に貪食能の盛んな網内系細胞に起こる．その結果，網内系の機能がブロックされて感染症が起きやすくなり，脾や肝，ときに中枢神経にも機能障害が進行する．

ライソソーム病(表 1)の中では最も頻度が高く，ユダヤ人では十数人に 1 人の保因者が存在するというゴーシェ(Gaucher)病は，ライソソームのグルコセレブロシダーゼ活性が低下するために起こる，グルコセレブロシドの蓄積症である．グルコセレブロシドは，ほとんどすべての細胞膜に含まれる脂質であるが，特に赤血球膜に多い．そのため，老化赤血球を貪食する脾のマクロファージに多く蓄積し，小児の巨脾症となる．病理学的には脾の洞内皮やマクロファージが空胞状に腫大し，これらの細胞に PAS 染色陽性の封入体が認められる．電顕的に，層板状の蓄積物を入れた数 μm の巨大なライソソームが確認できれば，Gaucher 細胞として診断の決め手になる．第 1 染色体 1q21 に局在するグルコセレブロシダーゼ遺伝子の点突然変異が主体である．

VI．遺伝子診断に関する問題

ヒトゲノム解析が始まる前から，遺伝子診断の技術は開発が進められ，一部実施もされていた．それに伴う倫理的な問題として一番有名な例は，1983 年に発表されたハンチントン病の遺伝子の発見である．ハンチントン病はハンチントン舞踏病ともよばれる遺伝病であり，常染色体性優性遺伝疾患であるから，親の一方が患者であれば子供の 1/2 に伝わり発病する．この病気は 40 歳を過ぎるころまでは発病しないが，その遺伝子を有する人はその後必ず発病し，激しい痙攣を伴う症状が進行して，50 歳代に亡くなることが多い．現在，この病気には治療法も予防法もない．したがって発病前の若い人が遺伝子診断によって，確実に将来発病，死亡することが予告されることになる．このことの深刻な意味について悩んだのは，母がハンチントン病で死亡したことからこの分野の研究者となった Wexler である．ハンチントン病遺伝子の発見の結果，Wexler は自分の遺伝子を調べれば，自分が悲惨な死に方をした母と同じ運命かがわかる，と知って愕然としたのである．悩んだ Wexler の結論は，「知らない権利，あるいは知らされない権利」であった．

ハンチントン病の例からも明らかなように，科学的に事実を明らかにすることが，ときにはそのような遺伝子診断を受ける人にとってプラスとはいえず，むし

ろマイナスになるおそれがあることは，遺伝子診断の重要な倫理的側面である．遺伝子診断には，他の診断法と比較して，次のような特有な問題点がある．

①診断時には未発症であるが，将来必ず発症するか，あるいは発症するかもしれない遺伝性疾患を確定的に診断できる．

②ある人に疾患と関係した遺伝子が見つかった場合には，その人のすべての血縁者に，その遺伝子がある確率で保有されていると推定できる．

③ある疾患の遺伝子を保有している人の生命保険加入が拒否されるおそれがある．また血縁者に遺伝性疾患の人があった場合に，その遺伝子の検査を保険加入に際して求められるおそれがある．この問題に関して，クリントン大統領時代に原則として保険加入に際しての遺伝子検査が禁止された．

④胎児の遺伝子診断によって，ある病気がわかった場合に，人工妊娠中絶が行われるおそれがある．あるいは体外受精と卵割初期の遺伝子診断を組み合わせた受精卵選別すらなされうる．

⑤遺伝的に欠陥のない人しか生まれるべきでない，という新しい優生思想が広まるおそれがある．

VII．遺伝病データベース

遺伝病に関係したデータベースとして最もポピュラーなものは，米国ジョンズホプキンス大学のMcKusickを中心としたグループによって構築・運営されているOMIM(Online Mendelian Inheritance in Man)である．このデータベースには，各種の遺伝病やその原因となる遺伝子の変異などについての情報が，疾病および遺伝子を1つの単位(エントリー)として格納されている．遺伝病に関する原因遺伝子は次々と発見されている．そこで，遺伝病と遺伝子の関係をデータベース化したのが，このOMIMである．これは，もとはMcKusickが冊子としてはじめたものであったが，現在ではオンライン化し，インターネット上で，病気の名前を入力するとその原因遺伝子としてわかっているものがリストアップされてくる，世界中の医者，科学者が自由にアクセスできるページとなっている．遺伝病については現在日々原因遺伝子が解明されているので，最新の情報を知りたい場合は，このページを調べるのが現実的である．このデータベースを利用するには，例えば，米国のNIHのNCBI (http://www.ncbi.nlm.nih.gov)や，ジョンズホプキンス大学のヒトゲノムマッピングデータベースGDB (http://gdbwww.gdb.org)などのWWWサイトにアクセスすればよい．

文　献

1) 山村研一：病気の遺伝学．病理と臨床 2000，18(4)：373-377
2) 武部　啓：遺伝子診断の光と影．予防時報 2001，206：36-41
3) 高木利久，金久　実編：ゲノムネットのデータベース利用法，共立出版，1996
4) 森　道夫，澤田典均：ライソソーム．病理と臨床 2000，18(4)：379-384

再生医療の現状と化学工学への期待

梅澤明弘・槌谷宏平・牛田多加志・陳　国平

1. はじめに

再生医療は，主に発生学・材料工学・細胞生物学の発展に伴って生じた細胞を薬と見なして行う新たな試みである。新たな試みとしたが，実際には骨髄移植，末梢血幹細胞移植は造血組織の再生を自己血液細胞ないしは他家の血液細胞を利用して成功している。骨髄移植は，再生医療の中では最も成功していると筆者は理解している。最近の再生医療として紹介されている部分は，骨髄移植に関わるような技術に加え，造血細胞以外の細胞を含め，増殖因子・分化誘導因子，マトリックス，生分解性ポリマーならびに幹細胞に関する情報を上手に統合することで新たに組織を再生するところである。「臓器，組織，細胞を造る」という課題を掲げた再生医療の主要な登場人物像をひとつひとつ紹介したい。

2. 再生とは？

もともと再生とは，生体の失われた細胞・組織が残りの細胞の増殖によって補われることをいう。再生という生命現象がかなり古くから認識されていたという事実は，紀元前8世紀頃のギリシャの詩人であるHesiodosの神話からも理解できる（図1）。プロメテウスは人間を作り，地を耕し作物を作ること，道具を使うこと，羊や牛を飼い慣らすこと，言葉で話すことなどたくさんのことを人間に教えた。最期に火を使うことを教えるため，ヘリオスの太陽の馬車

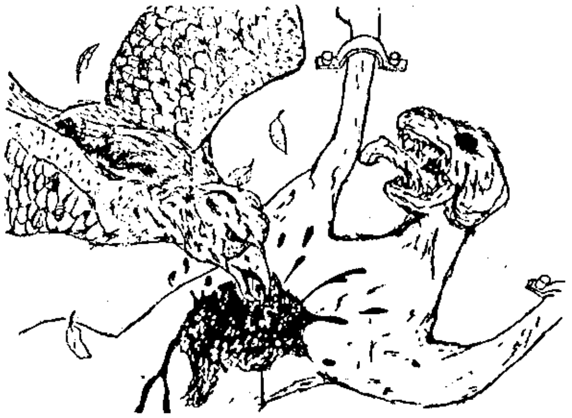

図 1　倉持由氏による「コーカサス山で罰を受けるプロメテウス」
本来の意味での組織再生を示唆するギリシャ神話。「痛みに苦しむプロメテウス（ビーグル）と，大神ゼウスの使いの大鷲」が描かれている。プロメテウスは自ら生みだした人間にさまざまのことを教え込んだが，火（知恵と技の象徴）だけは許さなかった。しかし，プロメテウスはヘリオス（太陽神）の燃え盛る戦車から，「ういきょう」の茎を使って火を盗み人間に与えた。その罰で，プロメテウスは刑期3万年，コーカサス山に磔にされ，毎夕やってくる大鷲に肝臓をついばまれる刑に落とされた。肝臓はその夜のうちに再生し，次の夕にまたついばまれる。

Regenerative Medicine
Akihiro Umezawa
1990年　慶應義塾大学大学院医学研究科博士課程修了
現　在　国立成育医療センター研究所生殖医療研究部　部長
連絡先；〒154-8567　世田谷区太子堂3-35-31
E-mail　umezawa@1985.jukuin.keio.ac.jp
URL　http://1985.jukuin.keio.ac.jp/umezawa/HTML

Kohei Tsuchiya
2004年　旭川医科大学大学院医学系研究科博士課程修了
現　在　東京大学大学院医学系研究科附属疾患生命工学センター医療材料・機器工学部門　助手
連絡先；〒113-0033　文京区本郷7-3-1
E-mail　k-tsuchi@m.u-tokyo.ac.jp

Takashi Ushida
1985年　東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
現　在　同大学院医学系研究科附属疾患生命工学センター　教授
連絡先；〒113-0033　文京区本郷7-3-1
E-mail　ushida@m.u-tokyo.ac.jp
URL　http://tissue.t.u-tokyo.ac.jp/

Guoping Chen
1997年　京都大学大学院工学研究科博士課程修了，工学博士
現　在　物質・材料研究機構生体材料研究センター　主幹研究員
連絡先；〒305-0044　つくば市並木1-1
E-mail　Guoping.CHEN@nims.go.jp
URL　http://www.nims.go.jp/bmc/bmc04/bmtg.html

2004年5月6日受理

から火を盗んだ。罰としてゼウスによって岩に縛られ，ゼウスの放った大鷲に襲われ，肝臓を食べられたが，翌日も肝臓は再生し，来る日も来る日も肝臓をついばまれた。すなわち，このギリシャ神話の時代から，肝臓が再生することは知られていた訳である。

このように肝臓は再生しやすい。肝細胞が障害されても新たに再生して結節をつくり，肝硬変の時の再生結節となる。皮膚も欠損しても，表皮も真皮もきちっと創傷治癒が行われることは経験的にも理解しやすい。造血細胞の寿命が短いことから考えても分かるように，次から次へと造血細胞はつくりだされ，再生していると言える。消化管の上皮も潰瘍として欠損しても，その部分はやがて再生して治癒する。一方，脳神経組織，心筋組織，骨格筋組織，靭帯，腎は，ほとんど再生しない。心筋組織が梗塞に陥れば，新たに心筋細胞が再生してくることはなく，胼胝ともいうが線維性組織によって置換される。脳組織が梗塞に陥れば，組織が欠損し，脳軟化となり，神経組織が再生されることはないと考えられてきた。

3. 再生医療における細胞の役割とは？

再生医療においては，再生しやすい組織，再生しない組織についてのいずれにおいても，細胞を導入することによって組織の機能を目指す。導入する細胞は，さまざまなレベルの幹細胞が考えられるが，大きく胎児性幹細胞と成体幹細胞に分類される[1-3]。胎児性幹細胞は胚盤胞の内部細胞塊より樹立する細胞株であるが，驚くべきことに全身の組織や細胞に分化する能力を維持しており，全能性を有している。一方，成体幹細胞は，各臓器，組織に存在する幹細胞であり，血液幹細胞に代表されるように顆粒球系，赤芽球系，巨核球系の造血にかかわる全ての系列に分化可能である。すなわち，成体幹細胞は限られた範囲の中で多分化能を示し，部分全能性を有している。

マスコミ紙上を賑わしているのは，この幹細胞の可塑性である。細胞の可塑性とは，細胞が別の細胞に変身することである。「幹細胞の可塑性」は10年以上前から知られており，胎児性幹細胞や様々なレベルの成体幹細胞は，発生を模倣する過程を試験管内で再現できる極めて重要な位置を占め，発生にかかわる分子機構の解明に多大なる貢献をし，サイエンスを押し進める上で，確固たる地位を得てきた。再生医療はこの細胞の可塑性を利用する。現実に生体内で細胞が別の細胞に変身することはほとんどなく，化生として知られるごくわずかな現象のみである。胃粘膜が腸上皮に変身する腸上皮化生，気管支上皮が表皮や食道粘膜に変身する扁平上皮化生がある。このような変身が移植した細胞で確認されたり，試験管内で再現できたりしている。特に骨髄移植により導入された血液幹細胞が全身の組織の細胞に分化するという報告は，驚きであった。

4. 再生医療の手順

再生医療の中心となる細胞移植についての手順を次に紹介する。患者さんないしはドナーの方の組織から細胞を一部採取する。血液幹細胞は試験管の中で培養することは難しいが，神経幹細胞，間葉系幹細胞は容易に増殖させることができる。増殖させた細胞の中から成体幹細胞に相当する細胞を細胞膜抗原，細胞特異的転写調節領域を利用して単離する。その細胞を分化誘導ないし転換プロトコールによって目的の細胞とし，心筋組織や神経組織などの各組織に移植する。移植に関しては，静脈に注射することも考えられるが，対象組織内に直接注射することが多い。

分化プロトコールは細かい話になるが，簡単に概要を示す。発生学の知識を利用して，増殖因子を利用したり，マトリックスを培養器の底にひいたり，丸く塊をつくったり，細胞培養の密度を変化させることによって，できあがる細胞を全く異なるものとする。ES細胞からドーパミン産生細胞やインスリン産生細胞を作製する際には，ES細胞の下にフィーダー細胞として特別な骨髄間質細胞をおく。完全な分化プロトコールができあがっているわけではなく，ある割合で分化したり，同時に別の細胞に分化したりする。たとえば，骨髄間質細胞を心筋細胞[4]にする際には，周辺に脂肪細胞が同時に出現しているし，目的とする細胞の割合は決して高くはないのが現状である。そこで分化誘導因子を利用したり，細胞内に転写因子を導入したり，マトリックスを利用したり，工夫を凝らしている。

5. 化学工学への期待

再生医療において，材料は極めて重要な要素である。細胞を足場と組み合わせることによって，欠損部に再生誘導を起こすための適切な環境を与え，自己修復への自然の流れをつくってやることによって，再生が得られる。この場の構築のための技術は，化学工学の進歩によるところが大きい。陳国平と牛田多加志は，生分解性のポリマーを縫い合わせ，シート状とすること[5,6]で，再生医療における足場としての妥当性を持たせた（図2A～C)。細胞との親和性を持たせるために，生分解性のポリマー上に，コラーゲンのマイクロスポンジをまぶした（図2D, E)。

この足場を利用することで，骨芽細胞を載せることにより，筒状の骨を作成することが可能となった（図3)。この足場の素晴らしい点のひとつは，その整形性である。どんな形でも作成することが可能であり，複雑な形の骨をつく

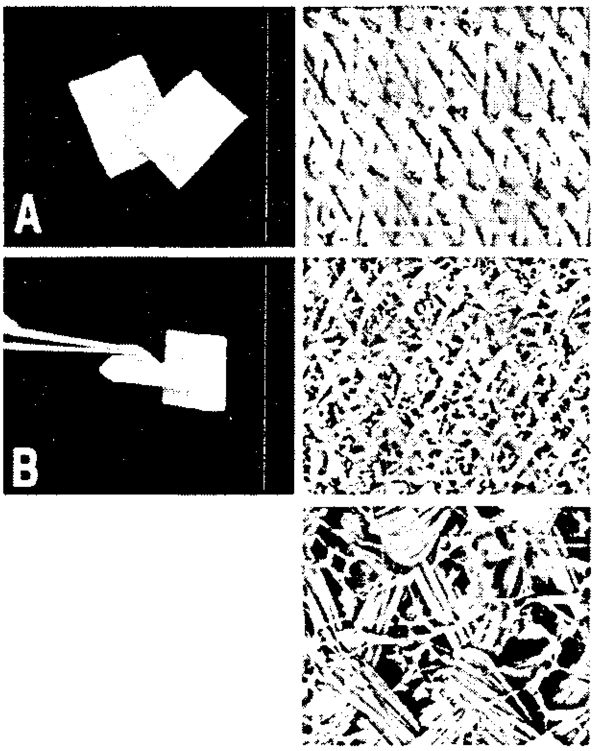

図 2　細胞の足場

足場の一つであるPoly（DL-lactic-co-glycolic acid）（PLGA）とコラーゲンのハイブリッド・シートを示す。AとBに，シートの肉眼像を示す。Cには，コラーゲンのマイクロスポンジを載せていない状態のシートの走査型電子顕微鏡像を示す。D（低倍）とE（高倍）には，PLGAにマイクロスポンジを載せた走査型顕微鏡像を示す。

りだすことに成功した。結んだ骨（Bone knot）は，その例のひとつである（図4A～D）。できあがった骨を結んだ訳ではなく，結んだ足場に骨をつくり出したという訳である。実用的なところでは，指の骨をつくった（図4E～H）。この足場のもう一つの良い点は，生体内で水と二酸化炭素に分解され，消失する。細胞と一緒に移植すれば，異物反応もなくなる。これは，単に骨の足場材料の例を示すだけであるけれども，他の臓器でもそれぞれに相性の良い材料があるはずであり，化学工学によって明らかにされてくるはずである。他の臓器の例としては，脳，眼球，軟骨，皮膚，心筋，横紋筋，血管，平滑筋，肝臓，腎臓，胆管，尿管，膀胱など数えあげれば切りがないが，申し上げたいことはそれぞれに重要または適切な材料があるということであり，それらの材料を開発し，緻密にかつ効率よく製造する化学工学者への役割に大きく期待するということである。

6. 対象となる疾病

対象とする疾病は，骨欠損，骨折，虚血性心疾患，代謝性疾患，筋疾患，パーキンソン病，脊髄損傷，糖尿病，熱傷である。骨髄移植や皮膚移植では，細胞や生分解性材料を用いて成功していることは前述したが，パーキンソン病では中絶胎児の神経組織を利用して有効であったという報告がなされている。さらに心筋内に骨髄細胞を注入することは日本，欧州で行われている。骨髄間質細胞も造血亢進作用を期待され，治験が進んでいる。

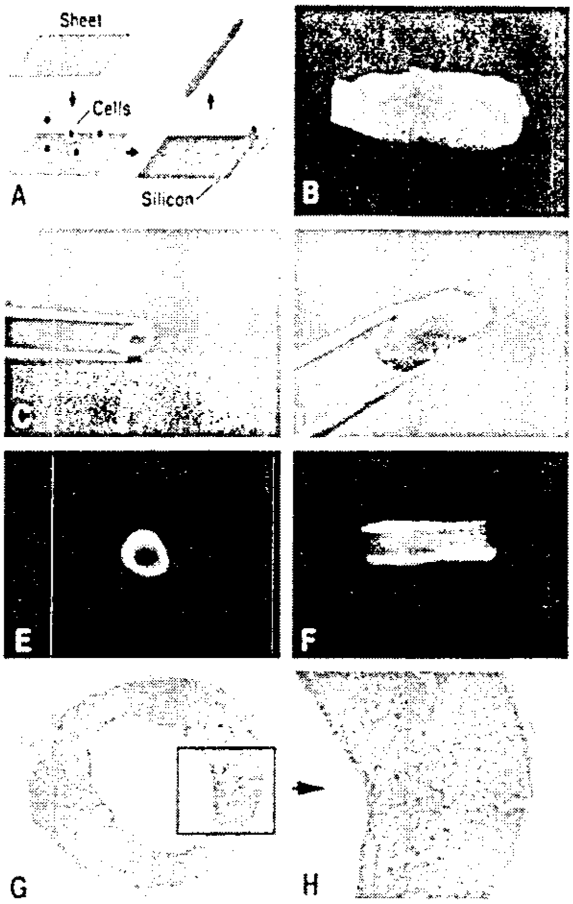

図 3　足場による整形性

足場と細胞を使用することにより，筒状の骨を作る。A：方法。B-D：作成した骨の肉眼像。E-F：作成した骨のエックス線像。G（低倍）とH（高倍）：出来上がった骨の組織像。みごとな骨梁が形成されている。細胞だけでは，このような筒状の形態の骨ができることはない。

再生医療に対し，積極的な企業に，胎児性幹細胞のゲロン社，間葉系幹細胞のオシリス社がある。多くの特許が取得され，実現に向けて，Cell processing centerも設立されつつある。ゲロン社，オシリス社は米国の企業であるが，日本の製薬会社ならびに商社もこの新しい医療に対し，興味を示し出資している。この2年の間に，具体的なメド，すなわちこの医療価値が認められるのかどうか，採算がとれるのかどうかについての回答がでると予想される。

7. おわりに

再生医療に関する問題点はいくつか指摘されている。最も根本的な問題が細胞移植することによって症状の改善が見込まれるかどうかである。目的の細胞に生体内で分化したか，目的の細胞とは異なる分化形質を示していないかどうか。病気の症状を軽減するに十分な細胞数を注入できたかどうか。十分な細胞数を試験管内で，すなわち生体外で

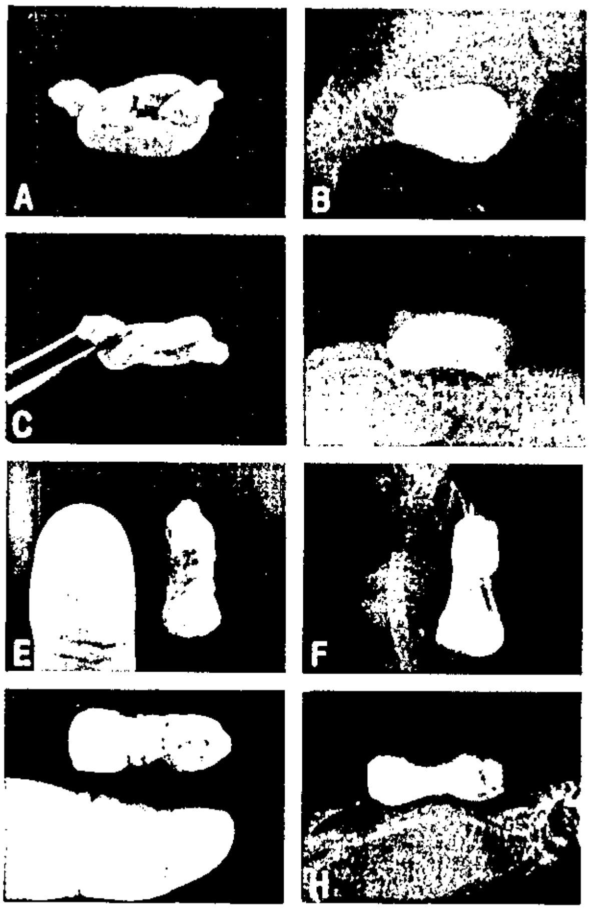

図 4　複雑な形の骨
足場を利用することにより，複雑な形の骨を作成できる。A-D：結んだ骨（Bone knot）。E-H：指の骨（Phalanges）。肉眼像（A, C, E, G）とX線像（B, D, F, H）。

培養できたかどうか。試験管内で細胞は十分増えたが腫瘍化していないか。そして移植後，細胞が腫瘍とならないか。培養している過程で細胞の分化能が低下しないかどうか。培養過程でウシ血清を使用しなくてはならず，狂牛病の心配はどうか。細胞培養の過程でばらつき，すなわち毎回同じように細胞を処置できたか。きりがないように感じるかもしれないが，だいたいこんなところである。これらの問題を解決するセンシング技術，高度培養技術などの開発においては，化学工学技術者の活躍を大いに期待するところである。

また，このような問題点があるとしても，それを上回る利益が期待できるのであれば再生医療を試みるかどうかの検討をするべきである。不利益にしても，個々の疾病で意味が異なるであろうし，問題点が解決してしまっている場合もある。利益と不利益を意識した上で一定の手続きを踏み，それらの過程が公開されながらこの再生医療が進行することにより，この新しい治療法が社会から祝福される形で世に送り出してあげたい。

引用文献

1) 梅澤明弘：再生医療，**3**(1)，61-68，(2004)
2) 梅澤明弘，五條理志：*Molecular Medicine*，**40**(12)，1432-1439 (2004)
3) 梅澤明弘，竹田征治：実験医学，**22**(1)，12-16 (2004)
4) http://1985.jukuin.keio.ac.jp/umezawa/HTML
5) Chen, G., T. Sato, T. Ushida, R. Hirochika, Y. Shirasaki, N. Ochiai and T. Tateishi : *J biomed Mater Res*, **67A**, 1170-1180 (2003)
6) Chen, G., T. Ushida and T. Tateishi : *J Biomed Mater Res*, **51**, 273-279, (2000)

書　評

科学者・技術者のための英語論文の書き方
—国際的に通用する論文を書く秘訣—

R. Lewis, N. Whitby, E. Whitby 著，東京化学同人，219頁，2004年1月発行，定価2600円＋税

英語論文の書き方を述べた書籍は，書店で容易に何冊か見つけることができ，書棚にお持ちの会員諸氏も多いことと思われる。そんな中でこのようなタイトルを持つ本書はどんな特徴を持つのかと思い読み始めたが，予想に反して内容はTechnical Writingの基本をていねいに解説したものであった。

「はじめに」で述べられているように，本書は全5部33章からなり，月刊誌「現代化学」に連載された内容に加筆を行ってまとめられた本である。

第1部の基本編はいわば本書の中心をなす部分で，全10章を使って，IMRAD方式にのっとったTechnical Writingを解説している。IMRAD方式とはIntroduction（序論），Methods（実験方法），Results（結果），and Discussion（考察）の頭文字をとったもので，現代の科学論文の基本構成である。第1部ではまず科学論文の基本構成をどのように論理的に構築していくか，各パラグラフに落とし込んでいくかが述べられる。これに続く各章ではIMRADの各部分を独立した章として，論文全体に対する各部分の役割，書く時の考え方や論理立てについて簡潔な文章で説明している。Technical Writingの基礎をまとめた日本語で読める本が少ない中，本書の第1部は実際の論文執筆にそくして簡潔に解説されている。各章におかれているKey Pointsにその章での要点をまとめてあり，各章ごとの説明の整理や読後の備忘録として機能している。また要所にQ&Aが入れてあり，読者の一般的な疑問に答えている。

第2部の実践英語用法活用編は，冠詞の使い方など執筆の時に日本人が悩みがちな部分の解説をしており，科学論文用文法書に近い。第3部のVisual作成とコンピューターの活用編は，グラフや表などのVisualを作成する時の「考え方」を解説している。ただし著者らも述べているように，個々のソフトウェアの操作法などについては，別に専門の書籍を探していただきたい。第4部の執筆作業編では，論文の執筆と投稿から出版にいたるまでプロセスを解説してあり，これから論文を書き始める人にとって，論文投稿後の作業の流れがわかる。また論文原稿に添える添え状の書き方も，ていねいに示されている。

第5部はサバイバル編として，日本人が書いた英語科学論文などの添削経験が豊富な著者らが，第1部基本編で述べたことをどう具体的に英語で論文にしていくかを解説している。例文を出して添削していく解説方法をとっており，誤用の多い言葉や誤解を生みやすい言葉についても章を立てて細かく言及している。その他にも，明快な文章を書くにはとか，能動態と受動態，人称の使い方などの章が並んでおり，英語論文を書く際の実際的な手引き書になると思われる。

本書は，英語論文を書き慣れた人には基本を思い出す際の手引きとして，英語論文をこれから書き始める人には，Technical Writingの基礎を学ぶ良い独習書となるであろう。

（T・F）

特集　心筋研究の最前線

単離間葉系幹細胞の心筋細胞への分化

梅澤明弘　竹田征治

「間葉系幹細胞を用いた,心疾患への細胞治療に関する議論」がある。この議論は,いくつかの方向から検討されている。最も重要な論点のひとつは,細胞を移植することによって,虚血などで死滅した心臓に対し,機能的な心筋細胞を回復することができるかどうかである。造血系が主である骨髄細胞を注入することによって心筋が形成されるという報告があるが,その頻度は極めて低く,臨床的意義はない。虚血性心疾患に対し骨髄細胞の局所注入が有効であるという報告は,主に血管形成によるという考えがコンセンサスになりつつある。生体内での心筋形成は疑わしいという研究報告が続く一方,骨髄由来の間葉系幹細胞が心筋細胞へ試験管内において分化することが示されて久しい。試験管内における間葉系細胞を用いた心筋細胞への分化効率は実験系が洗練されるとともに向上している。まとめると,(1)心筋細胞に分化させることが,臨床的な価値をもって可能となるのか。(2)虚血心に対して,血管誘導する治療プロトコールが標準となるのではないか,を明らかにする必要がある。このような課題はあるものの,ここでは「単離間葉系幹細胞の心筋細胞への分化過程」における細胞の形質,分化誘導を生じさせる方法および間葉系細胞の供給源について考えてみる。

1 間葉系細胞の供給源

間葉系細胞とは骨,軟骨,脂肪,骨格筋,真皮,靭帯,腱といった結合織細胞を総称しており,発生学的に沿軸中胚葉(paraxial mesoderm)由来の細胞である。1999年,ヒト骨髄間質細胞から骨,軟骨,脂肪に分化する多分化能を有する間葉系幹細胞を同定したという報告をPittengerらが行った[1]。また,この沿軸中胚葉の他に,心筋,平滑筋,血管内皮といった発生学的に臓側中胚葉(visceral mesoderm)由来の細胞があり,骨髄間質細胞のなかに臓側中胚葉にも分化できる幹細胞が見出された。Verfaillieらのグループは骨,軟骨,脂肪,骨格筋,血管内皮細胞に分化するmultipotent adult progenitor cells(MAPC)の存在を提唱している[2]。間葉系幹細胞は,分化能に応じて階層構造を形成しているものと考えられている。このような間葉系細胞の供給源として,実際に検討が加えられているものをひとつひとつ挙げる。

1. 骨髄

再生医療を念頭に置いた場合,もっとも有名な間葉系細胞の由来は骨髄である。造血細胞を支持する細胞として造血微小環境そのものを構成する細胞である[3]。骨髄中に存在する幹細胞として注目されている細胞のひとつにMAPCがある[2]。「MAPCなんて有名だけど,誰もみたことないぞ」という意見もあるけれども,骨髄由来の寿命の長い多分化能細胞は魅力的である。マウス骨髄の初期培養をすると,小型で接着性が極めて強く,お互いが接着していないMAPC様細胞を認めているが,筆者(梅澤)は増殖させることに成功したことはない。

Cardiomyogenic differentiation of mesenchymal stem cells
Akihiro Umezawa, Yukiji Takeda [著者連絡先] 国立成育医療センター研究所 生殖医療研究部(〒157-8535 東京都世田谷区大蔵2-10-1)

2．臍帯血

臍帯血から間葉系細胞が単離できるという発表が次々となされている。いくつかの論文を渉猟してみると，4検体に1検体くらいから間葉系細胞が単離できる頻度である。得られた間葉系細胞は胎児由来であり，極めて増殖能力が高い。また，骨髄由来の間葉系細胞に比較しても寿命が長いと思われ，分裂回数が多い。臍帯血バンクに使うことができない血液を今後は研究用に使用することが可能になる手続きが進められており，臍帯血は間葉系細胞の重要な供給源のひとつとなりえる。臍帯血をとるときに臍帯中にふくまれるWharton jellyに存在する間葉系細胞が採取されてしまっている可能性は否定できず，本当に臍帯血中に含まれているのかどうかは疑問が残る。

3．胎盤

胎盤の魅力は，その大きな組織量である。組織内には，母親由来の脱落膜組織がみられるであろうし，さらに胎児由来の絨毛組織がある。脱落膜は母親の子宮内膜の間質細胞が上皮様になったものである。絨毛組織でも，間葉系細胞がみられる。得られた間葉系細胞は，母親由来の細胞か胎児由来の細胞かで寿命の面で大きく異なると予想される。医療廃棄物として扱われてきた胎盤を有効活用できることになり，それ自体素晴らしいことである。もし胎盤を利用できるのであれば，HLAを全て揃えることができるばかりでなく，自分自身の細胞を保管されることになり費用のことを度外視すればたいへん便利である。

4．月経血

月経血には大量の間葉系細胞が含まれる。月経血には，月経期に剥離した子宮内膜細胞が組織量として多いために大量の間葉系細胞が得られると考えている。ゆえに月経血中の間葉系細胞は大部分は子宮内膜に由来する。月経血由来の間葉系細胞には，子供の遺伝病に対し間葉系細胞を用いる際に免疫学的に有利な点がある。たとえば，先天性代謝異常の患者に間葉系細胞を移植する際には，母親の月経血由来の細胞は免疫学的に拒絶されにくいことが骨髄移植における研究から知られている。子宮内で胎盤を介して，胎児の中に母親の細胞が混じり合うこと(microchimerism)によって，母親の細胞は免疫寛容になっていると理解されている。

5．子宮内膜

ここでいう子宮内膜とは，手術検体から採取する場合，生検・掻爬によって採取する場合を指す。月経血が子宮内膜に由来する考えからすると，子宮内膜と月経血は同じ組織に由来する間葉系細胞ということになる。しかし，ここでは採取方法が異なることより，別組織として考えた。子宮内膜は，増殖期，分泌期，月経期では異なる間葉系細胞が存在する可能性がある。

6．胎児由来の心筋と線維芽細胞

胎児心筋と胎児由来の線維芽細胞は，全く別の細胞である。胎児由来線維芽細胞は一般に皮下に存在する未熟な間葉系細胞由来と考えられる。胎児心筋が細胞治療の供給源となる可能性は決して高くはないと思われるが，具体的にわれわれが行う可能性のある細胞は列挙していく。2003年に仏国ナントで開かれた研究会で，メナーシュ博士は「心臓移植で一番いいのは，胎児心筋に決まっている。でも(倫理的に)現実的ではなく，なんと胎児心筋細胞は，虚血に弱い」と指摘している。

7．骨格筋

骨格筋細胞の心臓への移植は，メナーシュ博士により成功例が報告されている。対象は人工心臓の装着が必要な重度の心筋梗塞患者であり，患者の下肢から骨格筋の一部を採取し，骨格筋のもとになる細胞を抽出，培養し，患者の心臓に移植する。その場合，メナーシュ博士は骨格筋が心筋に分化転換することはないと発表している。メナーシュ博士の主張は明確であり，「私は，骨格筋を心筋に移植しているけれども，骨格筋は骨格筋であり，心筋になることはない。骨髄幹細胞の可塑性なんて言うけれども，細胞転換の割合はとても小さく，臨床には使えない」「骨格筋を心臓に移植すると，骨格筋のままでの形態を示し，その活動電位は骨格筋のそれである」と指摘している。さらに，「心筋移植の供給源は骨格筋しかない。移植したとしても骨格筋は骨格筋であり，心筋細胞との間にギャップ結合は生じなかった。移植した後に不整脈を生じたけれどもそれが細胞移植によるものか，心筋梗塞によるものかどうかはわからない。

おそらく細胞移植によるものだとは思うが，わからない」細胞移植による不整脈を多少認めた上で，骨格筋が心筋収縮力増強に対し有効であることを強調した。

8．真皮由来の間葉系細胞

真皮由来の間葉系細胞または線維芽細胞に関する研究も進んでいる。試験管内において増殖が速いことが知られる。陰茎包皮をその供給源とする。

9．脂肪細胞

美容目的に行っている，吸引した脂肪や乳癌の手術材料に付着する脂肪組織に由来する間葉系細胞に対しても注目が集まっている。細胞治療を行うために脂肪組織を採取すると，脂肪を切除することにより肥満解消にもなるという一挙両得といったニュアンスである。

10．末梢血

末梢血より間葉系細胞を単離しようとする試みをよく聞く。もちろん，末梢血は患者より採取する際も痛みが軽微であり，採取は容易であり，意義はよくわかる。分化能は他の組織由来と何ら変わることはないと考えられる。細胞の分裂能は乏しく，寿命は短いのではないか。末梢血由来の間葉系細胞が増殖する研究成果を聴くことがあるけれども，臍帯血同様，採血時に皮下織の間葉系細胞が採取されている可能性も否定できない。

2 ヒト骨髄由来の間葉系細胞から心筋細胞への分化[4)]

ヒト骨髄間質細胞を心筋細胞に分化させるには，胎仔心筋細胞との共培養が必須である（図1）。また，低分子脱メチル化剤である5-azacytidineが必須である（図2）。この5-azacytidineの使用に対し，前述したメナーシュ博士は「分化誘導剤としての5-azacytidine？　現実的である訳がない（処理することで癌化してしまうことだってあるじゃないか）」と指摘する。この低分子脱メチル化剤のみならず，分化誘導に際してはサイトカインは大事である。心筋細胞に誘導するサイトカインを同定できれば，間

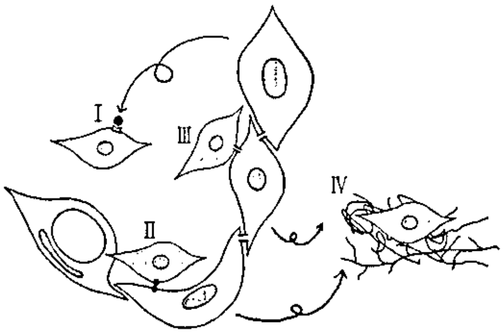

図1　移植する間葉系細胞に対するフィーダーとしての胎仔心筋との共培養による四つの影響

胎仔心筋をフィーダーとすることにより，間葉系由来の細胞を心筋細胞に分化させることが可能である。そのフィーダーとしての胎児心筋が，間葉系細胞に対する影響は，液性因子（I），膜上の分子（II），ギャップ結合（III），マトリックス（IV）を介して行われる。これらの胎仔心筋の分化誘導能に関わる具体的な分子を同定することが極めて重要となる。

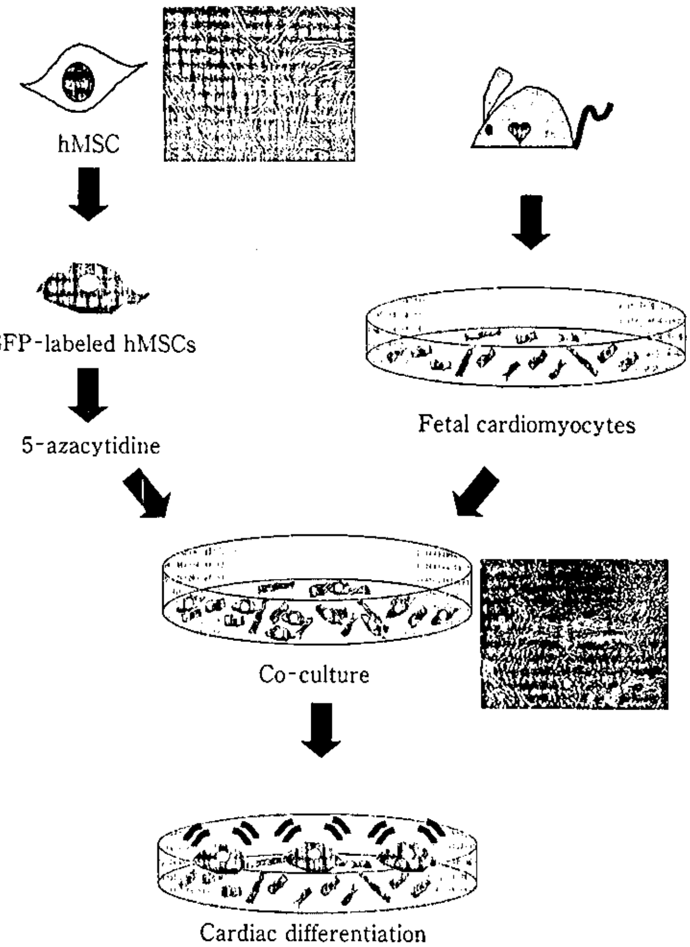

図2　ヒト骨髄間質細胞の心筋分化プロトコール

ヒト骨髄間質細胞を心筋細胞へ分化誘導するには，脱メチル化剤処理後に胎仔心筋細胞との共培養が必要となる。脱メチル化剤単独では心筋分化は全くみられず，胎仔心筋細胞との共培養により初めて心筋分化誘導が可能となる。

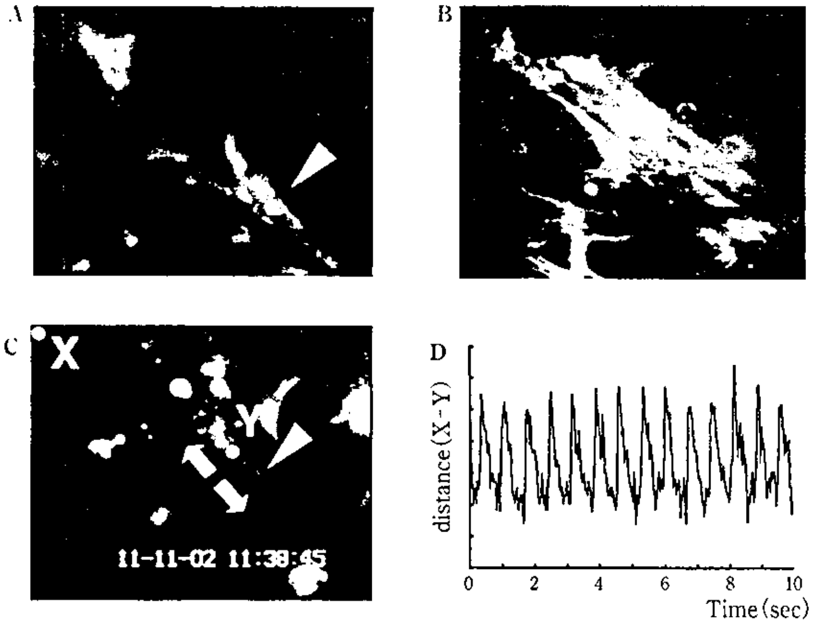

図3 試験管内共培養系による骨髄由来間葉系細胞の拍動
A. 5-azacytidine 処理した GFP 陽性の骨髄由来間葉系細胞(UBET-7)を胎仔心筋と共培養する。矢じりは拍動する UBET-7 細胞を示す。B. クラスター(塊)となった部の方が拍動がよく見られる。C. 拍動する UBET-7 細胞を毎秒 30 フレームでビデオテープに撮り，収縮を解析した。ポイント X を固定し，ポイント Y の動きを測定した。矢じりは実際に拍動する UBET-7 を示す。矢印は実際に拍動する方向を示す。D. X と Y のポイントの距離を 10 秒間測定し，プロットした。

質細胞の分化を制御できる。逆に分化させることができるサイトカインではなくて，特定の系統(骨など)に分化するのを防いでくれる場合もサイトカインは有効ということになる。ヒト骨髄間質細胞を心筋細胞に分化誘導させる場合には，試験管内における心臓環境のシミュレーションが必要となってくる。胎仔心筋細胞をフィーダーとすることは，たいへん有効である(図1，図2)。このことについてもメナーシュ博士は「ヒトの胎児組織を心筋細胞のフィーダーに使うなんて現実的でない」と指摘する。続けて，「骨髄間質が心臓になるといってもごく一部ではないか[5,6]？ 一番いいところを見せているだけではないか」と話は続く。脱メチル化剤と共培養系を組み合わせることによって，現在では，極めて効率に間葉系細胞を心筋細胞へ分化させる(図3)ことが研究室の肥田直子によって可能となっている。拍動する心筋細胞からは，心筋型の活動電位を得ている(図4)。

おわりに

間葉系細胞の役割として，血管形成と心筋細胞形成をあげた。もうひとつ，楽観的なアイデアかもしれないが，陳旧性心筋梗塞で形成された線維化巣または胼胝に存在する膠原線維を溶かし，そこに新たな心筋形成の場を作る可能性があることを指摘したい。病理解剖をしていて，常々思っていたことのひとつに，移植する細胞が血管や心筋を形成するにしても膠原線維の塊があっては収縮力を保持した心筋再生を生じさせる場になりえないということがある。さらには，拡張性心筋症においても弱々しい心筋線維の間にはやはり密な膠原線維が存在し，これらの膠原線維を排除しない限り，患者の心筋細胞と移植した心筋細胞が同期して収縮力増強に働くことはありえない。移植する間葉系細胞が産生する，コラゲナーゼを初めとじた蛋白分解酵素によって，これらの膠原線維を分解することができる[7]。肝硬変において，骨髄細胞を移植すると線維化が消失することと同じことが期待できるかもしれない。

謝辞 多くの方々から学問上の指導および援助を受け，現在も受け続けていることに心よりお礼申し上げます。これからもご指導を請うことは間違いなく，それぞれの方々に対し，そして同時にサイエンスに対し，恩返しをできれば嬉しく思っております。著者の一人