

Fig. 8 トランスクロモマウス作成法の概略
(文献 124 より許可を得て転載)

核膜，細胞膜に包まれたマイクロセルを分離する。単離したマイクロセルと染色体受容細胞（マウス ES 細胞）をポリエチレングリコールで融合する。このような一連の操作はマイクロセル融合法と呼ばれる。融合細胞を 8 細胞期受精卵に注入して，擬似妊娠雌マウスの子宮へ移植する。得られたキメラマウスは ES 細胞由来の体細胞においてヒト染色体断片を保持し，導入したヒト染色体上のヒト遺伝子を組織特異的に発現させることができる。このようにヒト染色体をもつトランスジェニックマウスはトランスクロモマウス（TCマウス）と呼ばれる。更に，ヒト抗体 H 鎖遺伝子を含む 14 番染色体断片を保持する TCマウス，ヒト抗体 L 鎖 κ 遺伝子を含む 2 番染色体断片を保持する TCマウス，内在性マウス抗体重鎖遺伝子を破壊したマウス（KOマウス），内在性マウス抗体軽鎖 κ KOマウスを交配することにより，4つの形質をすべて保持するヒト抗体を作るダブル TC/KOマウスが作成された²⁰⁾ (Fig. 9)。このヒト抗体産生マウスは，ヒト抗原を免疫することにより抗原特異的なヒト抗体（IgG）力価が上昇し，その脾臓から抗原特異的なヒト IgG を産生するハイブリドーマクローンが取得された。しかし，そのハイブリドーマ取得率は，正常マウスの 10%程度

であり，その原因はヒト第 2 染色体の保持率が ES 細胞及び体細胞において低いことによる (Table 3)。

一方，Medarex 社のヒト抗体産生マウス（HuMab）はヒト Ig κ 鎖遺伝子の 50% を含むが，重鎖遺伝子は 10% 程度しか含まないため，抗原に対する応答性が必ずしもよくないという問題点があった²¹⁾ (Table 3)。ヒト Ig κ 鎖遺伝子については，一種の可変領域クラスターが倍化した構造のため，一方のクラスター（50%）を含む HuMab マウスにおいても，100% 含む場合と比較して遜色のない κ 鎖の多様性が生み出されていると考えられる。更に，HuMab マウスにおいては，Ig κ 鎖を含む酵母染色体ベクター（Ig κ -YAC）がマウス染色体 DNA に挿入されているため，安定に保持される。そこで，ダブル TC/KO マウスの不安定な hCF2 の代わりに Ig κ -YAC を導入するという改良がなされた^{22,23)}。実際には，ダブル TC/KO マウスをヒト抗体 L 鎖 κ 領域全域の 50% を含んでいる Medarex 社の HuMab マウスと交配させ，ヒト 14 番染色体断片とヒト軽鎖 κ トランスジーンとを保持する KM マウス（Kirin-Medarex マウス，KM マウスTM）が作成された (Fig. 10)。作成された KM マウスを用いたハイブリドーマの取得率，得られた抗体の特異性

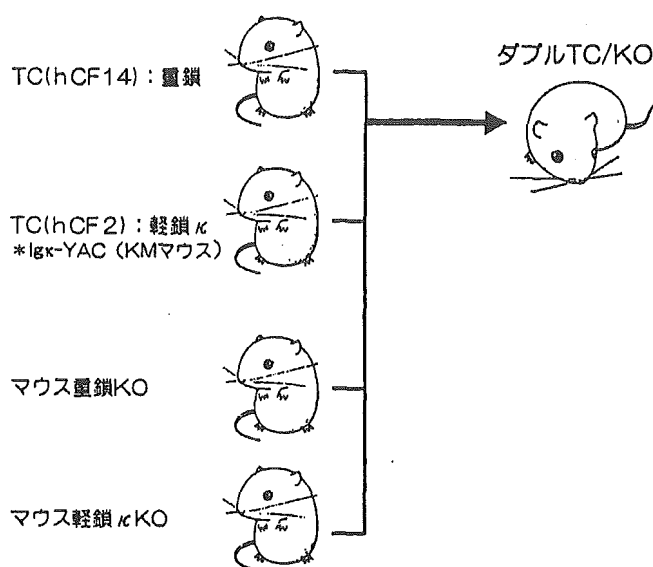


Fig. 9 ヒト抗体産生マウス (ダブル TC/KO) の作製 (文献 124 より許可を得て転載)

Table 3 ヒト抗体マウスの改良

	KM マウス (Kirin/Medarex 社)	TC マウス (Kirin)	HuMab マウス (Medarex 社)	通常マウス
重鎖遺伝子	ヒト V _H (81) 全種類	ヒト V _H (81) 全種類	ヒト V _H (4)	マウス V _H 全種類
軽鎖 κ 遺伝子	ヒト V _κ (38) 全種類	ヒト V _κ (76) 全種類 × 2	ヒト V _κ (38) 全種類	マウス V _κ 全種類
定常領域 サブクラス	IgM, D, G1 ~ G4, A1 ~ A2, E すべて	IgM, D, G1 ~ G4, A1 ~ A2, E すべて	IgM, D, G1	マウス定常領域 すべて
安定性	OK	軽鎖 2 番染色体断片が不安定	OK	OK
ハイブリドーマ 取得効率	よい	ハイブリドーマが不安定なため、取得効率低下	V _H が少数のため、抗原への反応性弱い	よい

(文献 24 より許可を得て転載)

は、通常のマウスを用いた場合と比較して遜色ない結果が得られている (Table 3)。

1.3.3 KM マウスの品種改良

1.3.3.1 KM (FcγRIIb-KO) マウス

免疫するヒト抗原によってはアミノ酸配列あるいは立体構造上、マウスのもとの非常に近い、同一である場合、抗体が得られにくいことがある。そのような場合に対処するため、自己抗体を産生する FcγRIIb-KO マウスの形質を入れた KM (FcγRIIb-KO) マウスも作成されている^{24,25)}。

IgG の Fc 領域と結合する Fc 受容体である FcγRIIb は immuno tyrosine inhibitory motif (ITIM) を細胞質に持つ膜タンパク質である。過剰な抗原・

抗体複合体の IgG Fc 領域が B 細胞上の活性化シグナルを入れる Fc 受容体 (FcγRI) と同時に抑制性シグナルを入れる FcγRIIb と結合すると、B 細胞への活性化シグナルは遮断され、B 細胞にアポトーシスが誘導され、過剰な抗体産生が抑制される (Fig. 11)。そこで、寛容が打破された FcγRIIb-KO マウスの形質を KM マウスへ導入するため、交配を行い、KM (FcγRIIb-KO) マウスが作製された。このマウスをウシコラーゲンタイプ IV で免疫し、ウシとマウスのコラーゲンに共通のエピトープ (抗原決定部位) に反応するヒト抗体の有無が調べられた。通常 KM マウスではマウスコラーゲンに反応するヒト IgG 抗体は血清中に観察されな

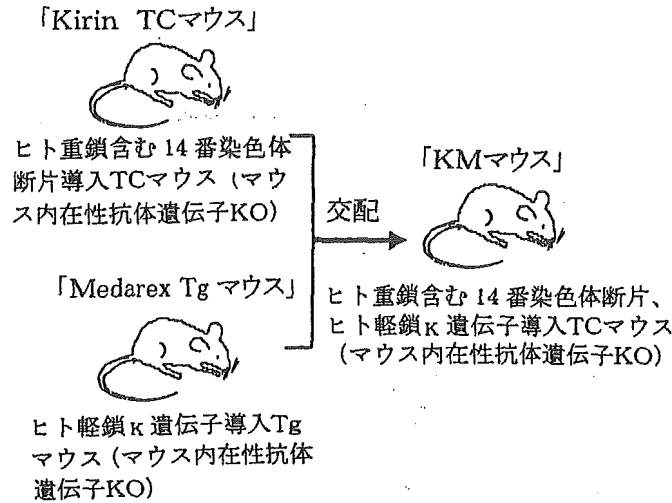


Fig. 10 KM マウスの作製
(文献 128 より許可を得て転載)

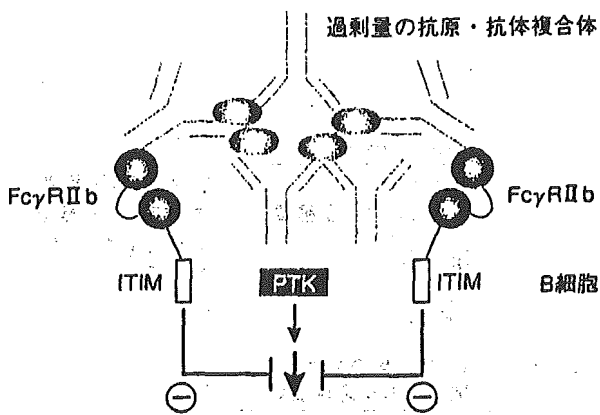


Fig. 11 Fc γ RIIb の機能
(文献 24 より許可を得て転載)

かった。一方、KM (Fc γ RIIb-KO) マウスではマウスコラーゲンに結合する抗体を生産するハイブリドーマが得られた。

1.3.3.2 H-2D 導入 KM マウス

細胞表面の膜タンパク質を認識するモノクローナル抗体を取得する場合に、ヒト組換えマウス細胞を免疫する方法が用いられる。その際マウスに主要組織適合抗原複合体が異なるマウス細胞を注入すると、強い免疫反応が引き起こされる。このような場合には、免疫原となる組換えマウス細胞と KM マウスの遺伝的背景 (バックグラウンド) を一致させることが望ましい。通常の KM マウスは、H-2k (C3H) と H-2b. (C57BL/6) のミックスバックグラウンド

であるが、場合によっては H-2d (Balb/c) のバックグラウンドの入った KM マウスも望まれる。そこで、Balb/c マウスとの交配により、H-2d 形質の入った雑種マウスである KM (H-2d) も作製されている²⁵⁾。

1.3.4 HAC マウス

ヒト 2 番染色体の保持率低下を克服する方法として他のアプローチも試みられている。それは軽鎖遺伝子を安定な 14 番染色体断片上に組み込み、ヒト人工染色体 human artificial chromosome (HAC) を作成する方法である。そこで、テロメア配列を挿入することでヒト染色体を任意の部位で切断する方法を確立し²⁶⁾、更には染色体上に loxP 配列を組み込み、Cre リコンビナーゼを作用させることでヒト 14 番染色体上にヒト 22 番染色体断片を転座させ、ヒト重鎖遺伝子とヒト λ 鎖遺伝子を 1 つの染色体にもつ HAC が作成された^{27,28)} (Fig. 12)。実際には、ヒト 14 番染色体由来 hCF20 を保持する DT40 細胞において、相同組換えにより loxP 配列が SC20 上の RNR2 遺伝子座に導入された (DT40/SC20)。この loxP 部位は様々なヒト染色体を転座させるための、いわばクローニングサイトといえる。クローニングするヒト染色体領域としては、ヒト 22 番染色体上の Ig λ 鎖遺伝子周辺 10Mb が選ばれた。インタクトな 22 番染色体を保持する DT40 細胞において、ヒトテロメアリピート配列を相同組換えにより LIF 遺伝子座に挿入すると、この部位に新たな

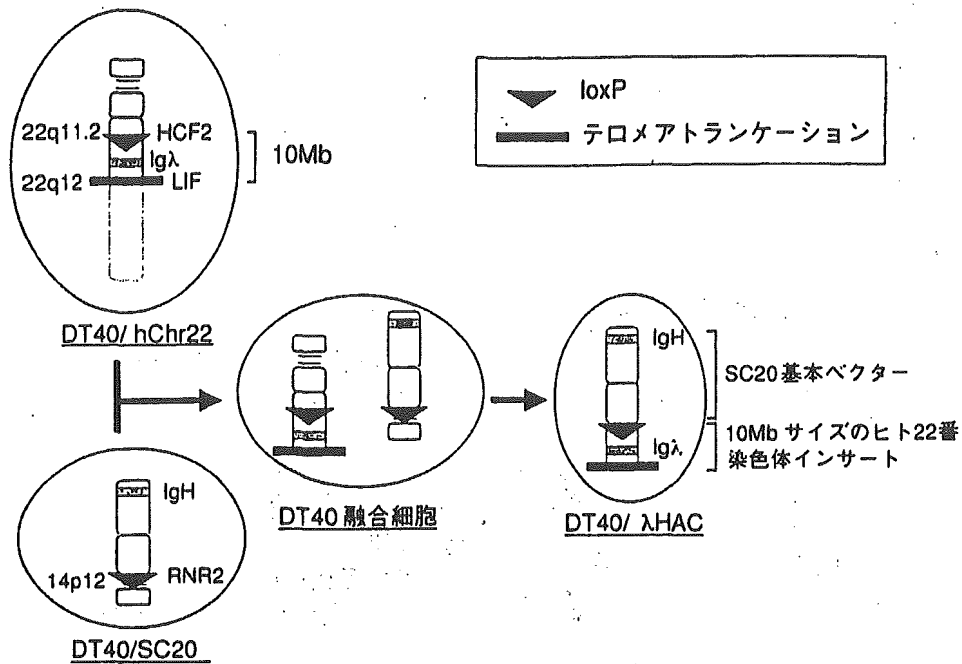


Fig. 12 ヒト人工染色体 (HAC) 構築法の概略
(文献 124 より許可を得て転載)

テロメアが生成した短い染色体が得られる。続いて loxP 配列を相同組換えにより HCF2 遺伝子座に挿入した (DT40/hChr22)。次に SC20 保持 DT40 細胞と 22 番染色体保持 DT40 細胞とを融合して 2 本のヒト染色体断片を保持する DT40 融合細胞が作製された。この DT40 細胞に Cre 組換え酵素発現ベクターを導入すると、2 種の染色体断片の組換えによる転座が起こる。こうして得られた HAC (λ HAC) は前述の TC マウス作成と同様にしてマウス ES 細胞に導入され、HAC を持つキメラマウスが作成された。同じ染色体断片由来の 10 Mb 領域を含む λ HAC は 1 分裂あたり 99.8% という非常に高い安定性を示した。この安定性は基本ベクター SC20 と同等であり、染色体クローニングにより不安定な hCF 由来の染色体領域を安定化できることが示された。更に、キメラマウス血清においては、ヒト Ig 重鎖、 λ 鎖タンパク質が共に検出されただけでなく、免疫したキメラマウスから抗原特異的なヒトモノクローナル抗体 (ヒト IgG 及びヒト Ig λ からなる) を分泌するハイブリドーマも取得されている。

1.3.5 HAC ウシ

以下のようにして λ HAC 保持クローンウシ (ヒ

トポリクローナル抗体産生ウシ) も作製されている^{29,30)} (Fig. 13)。

λ HAC 含有 CHO 細胞から前述のマイクロセル融合法により、 λ HAC をウシ繊維芽細胞に導入する。この λ HAC 含有ウシ細胞の核をあらかじめ除核したウシ未受精卵へ核移植し、この再構築胚を発生させ、 λ HAC ウシ胎児を作製する。ある程度成長させた後、この胎児から繊維芽細胞を大量に調製し、 λ HAC ウシ細胞バンクを作製する。この細胞バンクから再度、未受精卵に核移植する作業を大規模に繰り返し、HAC 保持クローン牛を作製する。

このようにして作製されたクローンウシ胎児において HAC ベクター上のヒト抗体遺伝子の発現を調べた結果、内在性ウシ抗体遺伝子と同調して、脾臓などのリンパ組織特異的にヒト抗体 H 鎖 (IgH)・ λ L 鎖 (Ig λ) 遺伝子の発現が確認された。更に、生まれたクローン仔ウシを詳細に調べた結果、 λ HAC ベクターは 8 割以上のウシ体細胞 (繊維芽細胞及び末梢血リンパ球) において安定に維持され、末梢血リンパ球においては、多種多様なヒト抗体 H 鎖 (IgH)・ λ L 鎖 (Ig λ) 遺伝子が機能的な組換えを起こし、発現していることが明らかになった。

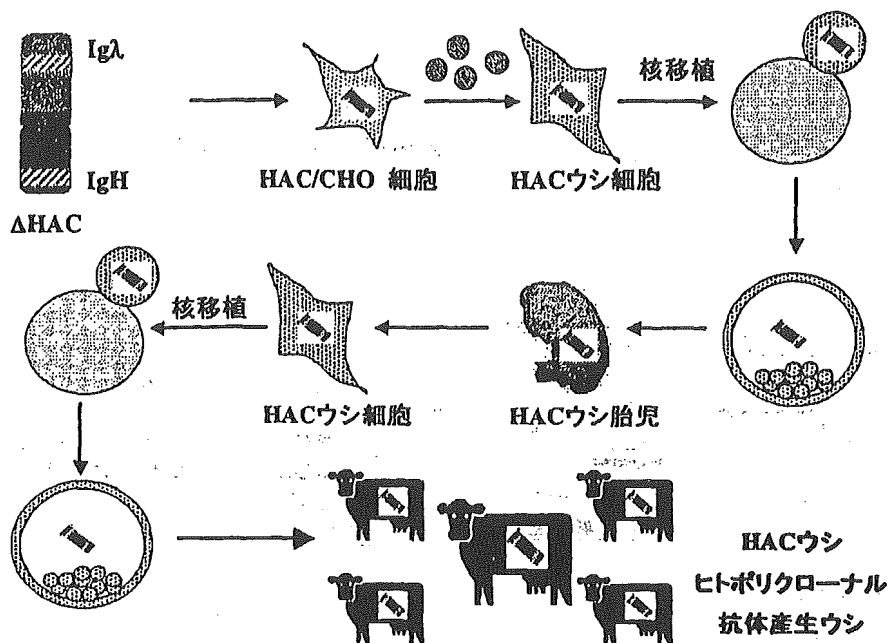


Fig. 13 ヒトポリクローナル抗体産生 (HAC) ウシの作成法
(文献 129 より許可を得て転載)

1.4 糖鎖改変抗体

この技術は CHO 細胞で抗体を生産する時に、糖鎖にフコースが結合するための触媒として必要な Fut8 という酵素遺伝子をノックアウトして発現させなくすることで、フコースのついてない抗体を作成するものである。協発酵で開発され、バイオワ社のコア技術となっている。

医薬品として開発されている抗体のほとんどは約 150 kDa の IgG 型であり、H 鎖 L 鎖それぞれの二量体より構成され、Fc 部分の C_H2 領域にアパラギン結合型のコンプレックス型糖鎖を持つ糖タンパク質である。抗体の糖鎖は共通のコア部分をもつが、末端の修飾が異なる 30 種類以上のオリゴ糖の混合物である。彼等と Genetic のグループはこの糖鎖の付け根に付いているフコースがなくなると後述する抗体依存性細胞障害活性 antibody dependent cell-mediated cytotoxicity (ADCC) 活性が動物レベルで 100 倍上昇することを見出した^{31,32)} (Fig. 14)。糖タンパク質において糖鎖は、フォールディングしたタンパク質の回りをゆるやかに包み込むように修飾していると一般的には考えられている。しかしながら、抗体の Fc 領域に結合している糖鎖は Fc 領域のタンパク質の内部に埋め込まれて存在し³³⁾、

Fc レセプターとの結合には直接関与しないが³⁴⁾、Fc 領域のタンパク質の構造には影響を与えていることが推定されている^{35,36)}。抗体の Fc 領域に結合している糖鎖からフコース残基を除去すると、エフェクター細胞膜上の Fc レセプタータイプ III a との結合に適するように Fc 領域の立体構造が変化し、その結果として高い ADCC 活性が誘導されると考えられる。

1.5 その他

ヤギや植物にヒト抗体を生産する技術^{37,38)}、ニワトリの卵白中にヒト抗体を蓄積する技術³⁹⁾なども開発されている (Table 4)。

2. 抗体医薬品の特徴

2.1 キメラ抗体、ヒト化抗体

キメラ抗体、ヒト化抗体においてはマウス由来のアミノ酸配列の減少により、抗原性は著しく減弱し、実用的な抗体医薬品の開発が可能となった。キメラ抗体、ヒト化抗体は現在開発中の抗体の約 50% 強を占めている。しかしながら、依然抗原性の問題は残されている。キメラ抗体においてフレームワークを含む可変領域は、抗原性を残しており、多くの場合投与した患者の 2 割以上に human anti-chimera

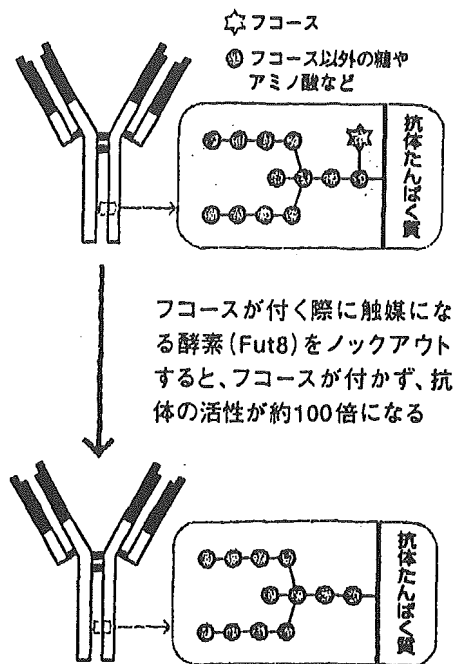


Fig. 14 フコースの低減技術
 (文献 123 より許可を得て転載)

antibody (HACA) が出現する^{40,41)}。ヒト化抗体においても、キメラ抗体ほどではないにしてもによっては human anti-human antibody (HAHA) が患者に出現する⁴²⁻⁴⁴⁾。この HAHA はマウス由来の CDR 配列に対するものであり、C 領域の多型性 (アロタイプ) や糖鎖によるものではない (Fig. 15)。このような HACA 及び HAHA 反応が強く起こる

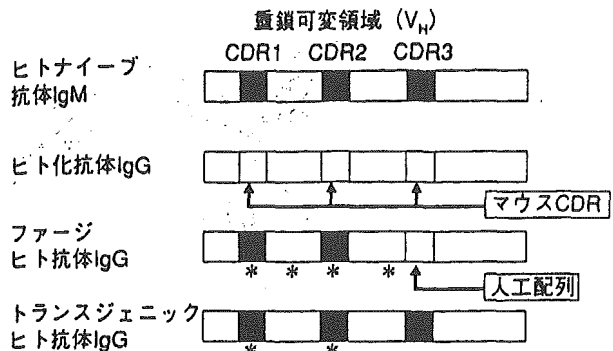


Fig. 15 HAHA の問題

ヒト由来のナイーブ抗体 IgM 重鎖可変領域 (V_H) とヒト化抗体、模式的に点変異箇所 (ポイントミューテーション) を * で示した。
 (文献 131 より許可を得て転載)

と、投与された抗体医薬品の効果が減弱されるばかりではなく、アナフィラキシーショックが起こる可能性がある。また、ヒト化抗体技術は、それぞれのマウスモノクローナル抗体に対して個別にデザインし、遺伝子組換え体を作成する必要があると共に、そのデザインによってはマウスモノクローナル抗体に比べて親和性が低下する場合がある。

2.2 ファージディスプレイヒト抗体

ファージディスプレイヒト抗体はヒト抗体の V 遺伝子をランダムに組み合わせて結合させ、それがそのまま *in vitro* での免疫系を再現するため、免疫学的な自己と非自己の選別過程を経ることがない。

Table 4 抗体医薬の製造技術

システム	抗体の型	回収源
トランスジェニック動物		
マウス	IgG	乳汁
ヤギ	IgG	乳汁
ニワトリ	IgG	卵
植物		
タバコ	sIgA, IgG	葉
メイズ (トウモロコシ)	IgG	種子
大豆	IgG	さや, 種子, 幹, 葉
米	scFv	種子
小麦	scFv	種子

(文献 130 より許可を得て転載)

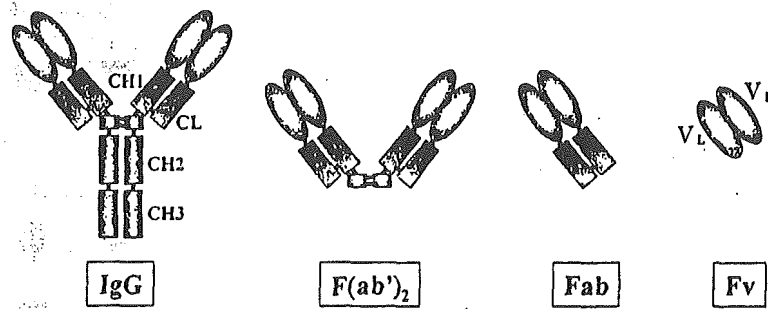


Fig. 16 各種抗体断片
(文献 132 より許可を得て転載)

すなわち、いわゆる免疫学的に禁止クローンとよばれる自己抗体はもちろん、これまで血清抗体中やハイブリドーマ作製では見出すことのできなかった特異性を示す抗体が取得できる可能性がある。抗体は scFv あるいは Fab の形態で得られることから (Fig. 16)、医薬への応用を考えた場合、完全抗体分子型への変換が必要となる場合がある。しかし、scFv の完全抗体への転換は、ADCC 活性などの抗体の Fc エフェクター機能を期待する場合には必須であるが、単にアンタゴニストとしての抗体の機能には、異なる 2 種の scFv において V_H 及び V_L ドメインを相互に連結した二量体である Diabody や scFv でも十分である。更にこれらの分子種は、分子量が小さいため組織浸潤性が高く、特に Diabody は体内での安定性が比較的高いといったメリットもある。

得られた抗体はファージ上で g3p や g10p との融合タンパク質として発現していることから、可溶性でかつ機能を有して発現できるとは限らない。特に scFv の場合には、不溶性粒子 (封入体) を形成したり、分泌発現しても scFv 単独で安定な構造を取らず、重合体を形成するなど、また Fab の場合には発現量が極めて少ない場合がある。医薬品への応用に際しては、ADCC などの抗体の Fc エフェクターを期待するなど、より機能を高める必要がある場合、完全抗体分子型への変換が必要となる。scFv から Fab あるいは完全分子型の変換では、70% 以上の確率で同様の特異性をもつ抗体分子が得られ、Kd 値は数倍～数十倍向上することが報告されているが⁴⁵⁾、報告例は少ない。その原因として宿主発現系も大腸菌から CHO などの動物細胞へと大きく変化することも考えられる。フェーズ III 臨床段階にある

ファージディスプレイ抗体として D2E7 (TNF 抗体) がある。2001 年 12 月に行われた IBC 国際抗体会議で、リウマチ患者への臨床試験結果が発表されたが⁴⁶⁾、そのなかで免疫抑制剤のメトトレキサートとの併用でも、三人の患者に HAHA の出現が報告された。これは CDR3 の部分に人工の配列を入れていることに加えて、PCR による変異が CDR 以外の部分にも入ることが原因かもしれない (Fig. 15)。また、抗体によっては、Fab 化することにより、活性が消失するものもある。これらの scFv 抗体は、Diabody によって抗体活性が保持されており、単量体では活性が保持できず、Fab 化あるいは完全抗体への変換は困難である。

2.3 トランスジェニックヒト抗体

ヒト抗体産生マウスを用いたヒトモノクローナル抗体の利点として、完全なヒト抗体分子が細胞融合法という比較的簡便な方法で得られることが一番の特徴である。目的の抗原で自由自在に強力な免疫をすることができ、目的のクローンに当たる確立は高く、親和性についても十分に高い抗体を選別できることが推定される。細胞融合後に、通常は抗原に結合する抗体を選択するが、適当なアッセイ系があれば、多数のハイブリドーマクローンから目的とするクローンを直接選び出すことができる。また、ヒト抗体の特徴として強い結合性が得られやすいということも特徴である。例えば、細胞膜上に存在するレセプターやウイルスなどに存在する、繰り返し構造をもつ抗原に対して強い結合性を獲得するには抗体が 2 価で結合することが望ましい。抗体の 2 つの部位が同じ抗原分子と反応できると、最初の部位が抗原と結合した場合、抗原分子が非常に近くにきているため、2 番目の部位は最初の部位よりはるかに速く反

応し、見かけの親和力は Fab に比べて、2 価の IgG 分子では 10^4 倍になると試算されている。また、ヒトに対して抗原性がより低い可能性もある。トランスジェニックヒト抗体はヒト由来のナイーブ抗体 IgM の V 領域と比べて同様な V 遺伝子の使われ方^{19,21)}、同様な CDR 3 領域のヌクレオチドの欠失、挿入の入り方が見られる²¹⁾。また、トランスジェニックヒト抗体 IgG の体細胞変異は、主に CDR あるいはその境界にみられ (Fig. 15)、アミノ酸レベルでは 0~7 箇所程度 (重鎖 V 領域) である²¹⁾。したがって、トランスジェニックヒト抗体はマウス-ヒトキメラ抗体、ヒト化抗体、ファージディスプレイヒト抗体に比べてよりヒト由来抗体に似ており、理論上はヒトに対して抗原性がより低いと考えられる。従来型ベクターによる第一世代のヒト抗体産生マウス^{18,21)}を用いて作成されたトランスジェニックヒト抗体の幾つかは、現在臨床試験段階 (フェーズ I, II) にある。未だ臨床例数が少ないこともあるが、現在のところ HAMA は報告されていない。本法について、前述したように、次々と技術的改良が加えられ、多様性の高いヒト抗体をより高い作成効率で得られるようになった。

まだ基礎的な段階であるが、今後注目されるのは、ポリクローナルなヒト抗体を産生できる λ HAC 牛である^{29,30)}。特に、細菌ウイルス感染症などの治療においてはモノクローナル抗体では限界があるため、ポリクローナル抗体医薬の必要性は高まる可能性がある (Fig. 17)。1 種類のモノクローナル抗体に比べて、ポリクローナル抗体には多種の抗体が含まれるため、1 つの抗原に結合できる抗体の数が多く、

効果が大きくなる。抗原が特定できない場合に多種の抗体を投与すれば、何らかの抗体が抗原に結合する可能性もある。実際多くの病院では、感染症にかかった患者がすぐに何の感染症にかかったかわからない場合が多い。感染源の細菌やウイルスが特定できない場合、多種の抗体を含むポリクローナル抗体のほうが医師には使いやすい。現在は、ヒト血液から分離した γ グロブリン製剤が感染症の治療に使われているが、この製剤は過去の病歴も様々な不特定多数の献血者に由来するため、抗原に結合する力にもばらつきが大きく、総じて効果は低い。したがって、特定の有害な病原菌に対する力価の高いポリクローナル抗体は有用と考えられる。もう一点はウシの場合乳に IgG が分泌されることから、製造に必要なコストを低くできる可能性があることである。HAC 導入ウシでは内在性のウシ抗体遺伝子が圧倒的優位に発現しており、ヒト抗体量はいまだわずかである。そこで、商業化のためにウシ抗体遺伝子を不活化した牛、並びに昨今の状況からウシ海綿状脳症 (BSE) の問題を回避するため、プリオンをノックアウトしたウシも製造されている⁴⁷⁾。

3. 抗体の生理活性機序

抗体は様々な作用機構を介して生理活性を発現する。そこで癌治療に応用されている抗体を例として代表的な作用機序をまとめた。

3.1 腫瘍の生物活性に対する抗体の直接作用

アポトーシス誘導や成長因子に代表されるレセプター/リガンドを介したシグナル伝達に対する抑制作用などを指し、現在臨床に応用されている抗

モノクローナル抗体 ポリクローナル抗体

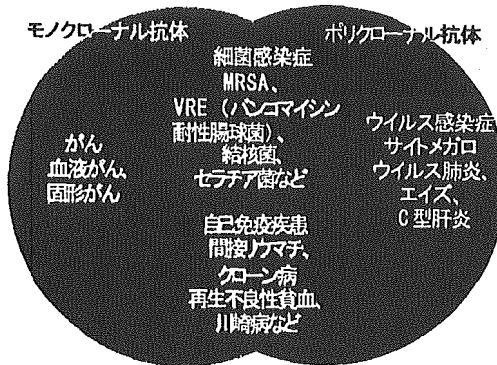
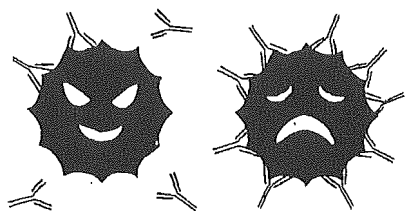


Fig. 17 モノクローナル抗体とポリクローナル抗体における効力の比較 (文献 123 より許可を得て転載)

体の多くは何らかのアポトーシス効果が確認されている。

3.2 抗イデオタイプ反応を利用した腫瘍関連抗原に対する宿主免疫への感作

イデオタイプとはB細胞クローンが産生するIgに発現するクローン特異的抗原性の総称である。腫瘍の治療の立場からは既に1980年の当初より、MillerやLevyらによるB細胞リンパ腫においてリンパ腫表面の免疫グロブリンに対する抗イデオタイプ (Id) 抗体は最も腫瘍特異性の高い治療法として脚光を浴びた。抗体療法による最初の寛解例が、濾胞性リンパ腫に対するマウス抗Id抗体で1981年に報告されている。現在B細胞性腫瘍を産生する患者さん自身の抗Idタンパク質をワクチンとして投与し、患者にId特異的な免疫反応を惹起させ寛解を維持する治療法の開発が進んでいる。

CDC活性とは、抗体が細胞膜表面上の抗原決定基に特異的に結合して、補体の介助のもとで、その細胞に傷害を与えることを指す。近年、腫瘍細胞表面における補体制御因子 (CD55, CD59) の発現状態や、シグナル伝達にかかわるタンパク質群が集積する、糖脂質とコレステロールに富む細胞膜ドメイン構造であるraftに対する標的抗原の集積性がCDC効果に重要な役割を担っていることが報告され、再び注目を集めている。

3.3 ADCC活性

IgG, IgE, IgAクラスの抗体のFc領域はそれぞれに特異的なFc受容体に結合し、Fc受容体を持つ細胞を活性化したり、抗体の細胞間トランスポートに働く。特に、IgGクラス抗体がT細胞、NK細胞、好中球、マクロファージ上のFc受容体を介して、これらエフェクター細胞を活性化し、抗体の可変領域が結合した細胞を殺すことをADCCとよぶ。現在、ADCCは抗体の腫瘍細胞傷害性で最も重要視されている。

抗体のFc部分における糖鎖 (フコース) のADCC活性における重要性については前述したとおりである。また、患者の免疫グロブリンFcに対するレセプターサブファミリー (FcγRIIa) 遺伝子多型によりエフェクター細胞と抗CD20キメラ抗体の結合親和性に大差がみられ治療効果とADCCに密接な関係があることが報告された⁴⁹⁾。エフェクター機能の重要性については、Fcレセプターのノックアウト

マウスを用いた研究より、エフェクター機能の一つであるADCCが抗腫瘍効果のキーとなるメカニズムであることが明らかになった⁴⁹⁾。

3.4 抗体と毒素あるいはアイソトープとの conjugate による細胞殺傷作用 (ミサイル療法)

ガン治療の開発過程で考案された手法である。ガンに特異的な結合活性を有するモノクローナル抗体にガン細胞を殺す抗ガン剤、毒素及びアイソトープを結合させて投与し、抗体がミサイルのようにガン細胞を集中的に攻撃し、ガンに特異的かつ効果的に治療する。細胞膜上分子と結合後インターナリゼーション (細胞内取り込み) されやすい抗体は毒素や抗癌剤を標識し、immunotoxin療法に用いることができる (Fig. 18)。反対にインターナリゼーションされにくい抗体は、強力な放射化合物をradio-immunoconjugateとして用いることができる。なお、インターナリゼーションされにくい抗原の代表であるガングリオシドに対するヒト化抗体の抗腫瘍活性が調べられているが、CDC及びADCC活性による強い抗癌作用が観察されている^{50,51)}。

4. 抗体療法の現状

現在、ヒト型抗体のいくつかは欧米に続き日本でも認可され、その有用性が確立されつつある。また、欧米を中心として様々な腫瘍関連抗原に対するモノクローナル抗体やその改変体の臨床試験が進行中であり、その結果が期待される。以下に、欧米で認可され、一部は日本でも認可された代表的な抗体医薬品を紹介する。

4.1 リツキシマブ

1991年米国IDEC社はBリンパ球表面の分化抗原CD20に対するマウス型モノクローナル抗体 (IDEC-2B8) を作製した⁵²⁾。その後、IDEC-2B8の可変部領域とヒトIgG1 κ のC領域とをマウス-ヒトキメラ型CD20モノクローナル抗体として遺伝子組換えで合成したのがリツキシマブである⁵²⁾。

1993年B型細胞性非ホジキンリンパ腫治療薬の治療を開始し、1997年米国FDAの承認、1998年欧州医薬品審査庁の承認を得た。現在57箇国で承認されている。日本では1998年希少疾病医薬品の指定を受け、2001年6月「CD20陽性の低悪性度又は濾胞性B型細胞性非ホジキンリンパ腫」と「マ

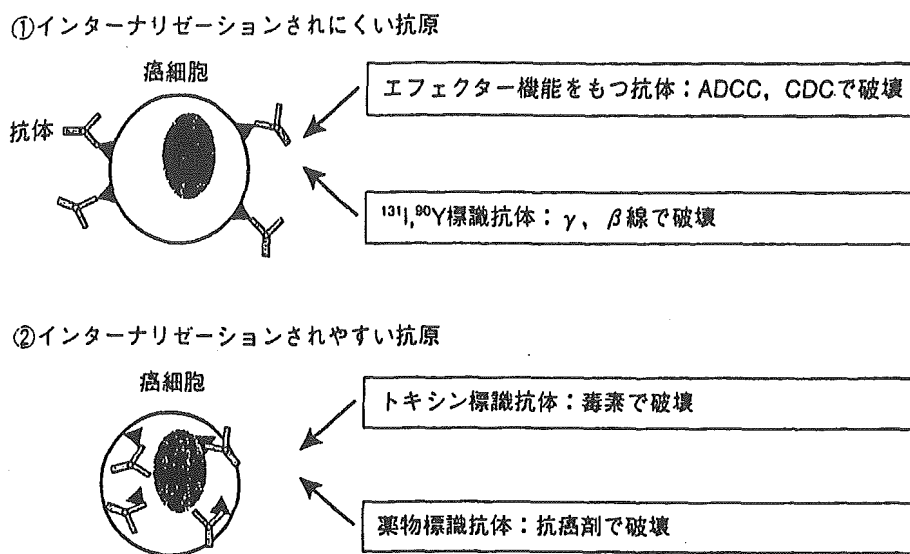


Fig. 18 抗体を用いたミサイル療法
(文献 122 より許可を得て転載)

ントル細胞リンパ腫」の治療薬として承認され、発売となった。

4.1.1 作用機序

悪性リンパ腫は、リンパ節もしくは臓器に腫瘤を形成し、組織学的にはホジキン病と非ホジキンリンパ腫 (NHL) に分類される。頻度は、ホジキン病が 10%, NHL が 90% で、NHL は 50~60 歳代に多い。NHL の発症メカニズムとしては、抗原刺激によって増殖した B 細胞が、何らかの要因によって癌化

して、B 細胞癌になると考えられている。癌化要因として、染色体の転座による Bcl-2 (細胞死誘導抑制) の活性化が挙げられる。

CD20 は Ca チャンネルとして B 細胞の活性化や分化、増殖にかかわっている⁵³⁾。また、様々なチロシンキナーゼと結合しており、細胞内のタンパク質のリン酸化による細胞増殖を調整する経路への関与が考えられている⁵⁴⁾。CD20 は正常 B 細胞及び B 細胞腫瘍の細胞膜に発現している約 35kDa の親水

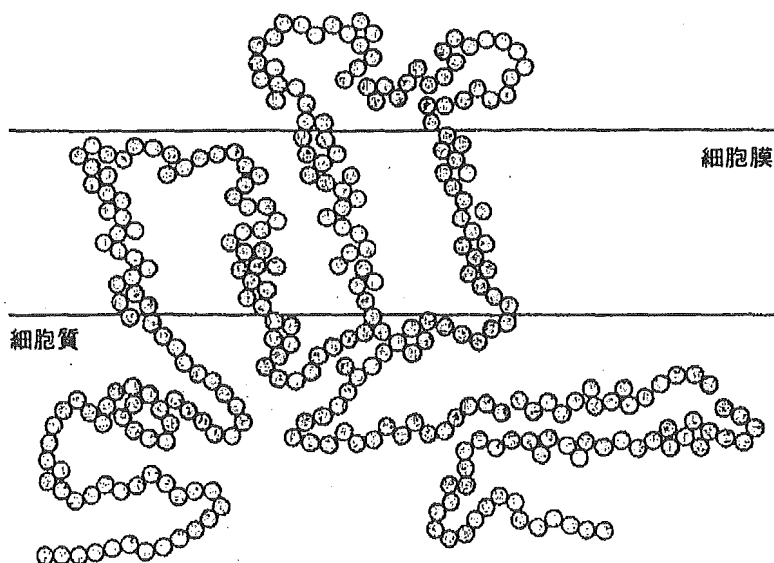


Fig. 19 CD20 抗原の模式図
(文献 133 より許可を得て転載)

性リタンパク質であり、多数の細胞膜貫通ドメインを有する (Fig. 19). 静止期の B 細胞に比べ、活性化された B 細胞では発現量が約 4 倍に増加する。リツキシマブの作用機序として CD20 に結合し、シグナルを入れることにより、これらの経路の阻害作用による細胞周期の停止や Bcl-2 活性の抑制によるアポトーシスの誘導の他、CDC, ADCC を介した経路が考えられている⁵⁵⁾。

4.1.2 腫瘍抑制効果

日本国内における臨床試験において、低悪性度又は濾胞性 B 型細胞性リンパ腫とマントル細胞リンパ腫への単独投与の結果は、奏効率は各々 60.7% と 46.2% と良好な結果である⁵⁶⁾。本剤を再投与した症例の奏効率は、初回より低い、40% 弱で time to progression (TTP) も少し短縮した⁵⁷⁾。海外における臨床試験において Cyclophosphamide, Doxorubicin, Vincristine, Predonisone (CHOP) 療法との併用では、低悪性度及び濾胞性 B 細胞リンパ腫を対象とした第 II 相試験で奏効率 95% (完全寛解 55%)⁵⁸⁾、進行期中悪性度 B 細胞リンパ腫でも、奏効率 94% (完全寛解 61%) と高い有効性を示した⁵⁹⁾。現在、CHOP 単独 vs CHOP+リツキシマブ併用の複数の第 III 相試験が進行中であり、奏効率、event-free survival, overall survival いずれも優位に併用群が良好であるとの結果も得られている⁶⁰⁾。この最終結果によっては、近い将来 NHL の標準的治療が、現在の CHOP 療法から CHOP+リツキシ

マブ併用療法に変更される可能性もある。また、リツキシマブは悪性リンパ腫のみならず、慢性関節リウマチ (rheumatoid arthritis: RA), 全身性エリテマトーデス (SLE) などの疾患に対しても臨床試験が行われている。

4.1.3 副作用

初回投与時を中心に点滴中の発熱・悪寒・気管支攣縮などのアナフィラキシー様症状がみられることが多いが、一般に軽微である。

4.1.4 その他

前述のミサイル療法として、抗 CD20 抗体にアイソトープ (それぞれ ⁹⁰Y, ¹³¹I) を結合させた薬剤である ibritumomab, tositumomab (国内未発売) も開発されている⁶¹⁻⁶⁵⁾。抗 CD20 抗体により、これらのアイソトープが腫瘍細胞に集中的に運ばれ、近傍に β 線による抗腫瘍効果をもたらすことが示されている (Fig. 20)。

4.2 トラスツズマブ

この抗体の開発は 1990 年に HER2 (human epidermal growth factor receptor type 2) 受容体の細胞外領域に親和性を持つマウスモノクローナル抗体 (4D5) 作成が発端となっている。その後、4D5 の抗原結合部位 (約 5%) のアミノ酸配列を、ヒト IgG1 骨格の抗原結合部位に遺伝子組換えで置き換えたヒト化モノクローナル抗体がトラスツズマブであり、アメリカの Genetech 社により開発された⁶⁶⁾。したがって、約 95% はヒト IgG1 が残っているの

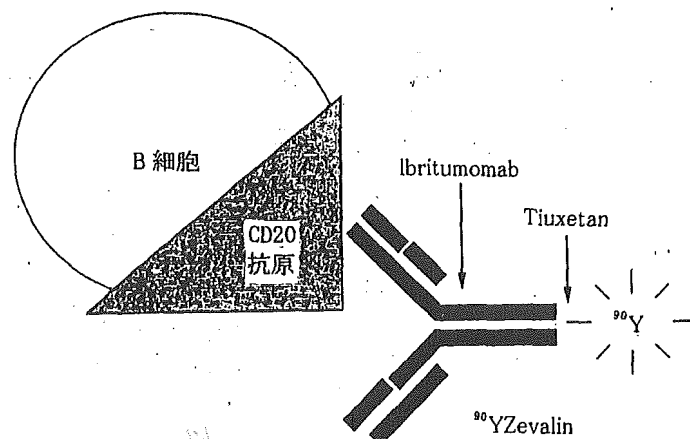


Fig. 20 ⁹⁰Y を抱合した抗 CD20 放射性元素標識抗体である ibritumomab の模式図

(文献 133 より許可を得て転載)

抗原特異性を保ちながら抗体自体の抗原性を低下させ半減期の延長を意図しているのが本剤の特徴である。1992年より臨床治験を開始して、1998年に米国FDAで乳癌治療薬として認可された。日本では、オーファンドラッグ（希少疾病医薬品）指定を1999年に取り、2001年発売され、抗癌剤との併用で抗癌剤単独の成績と比べて優れた成績をあげており、従来の抗癌剤との併用投与がなされている⁶⁷⁾。

4.2.1 作用機序

Her2 遺伝子は細胞質側にチロシンキナーゼ活性領域を有する膜貫通型タンパク質 (MW: 180 kDa) であり、epidermal growth factor receptor (EGFR), ErbB-3, ErbB-4 とともに EGFR ファミリーを形成する。乳癌、卵巣癌、子宮癌など様々な癌において約 30% に Her2 遺伝子の増幅、あるいは mRNA 及びタンパクの発現を認め (Fig. 21), 乳癌患者では Her2/neu 遺伝子の増幅あるいはタンパクの過剰発現を認める患者の予後は不良であると報告されている⁶⁸⁻⁷¹⁾。EGFR ファミリーのうち Erb-1, Erb-3, Erb-4 は New-activating factor (NAF), TGF- α , amphiregulin (AR) などのリガンドと結合してヘテロないしホモ二量体を形成し、ErbB-2 の活性化を促進することが知られている⁷²⁾。Her2 自身には特異的なリガンドは存在せず、その活性化機序として、①過剰発現、②ホモ二量体の形成、③他の ErbB ファミリーとヘテロ二量体を形成し、

それらが複合して多量体化する、などの機構が明らかにされている^{73,74)}。Her2 の活性化によって誘導される細胞内シグナル伝達に関しては、これまでに Grb-2-Shc を介して下流の Ras-Raf-MEK1/2-ERK 経路の活性化を促進すること、phosphatidylinositol 3-kinase (PI3K)-Akt 経路の活性化を誘導することが知られている^{73,75)}。トラスツズマブは、Her2 に結合して Her2 のダウンレギュレーションを引き起こし、PI3k-Akt-RSK に代表される生存シグナル経路が抑制され、抗腫瘍効果を発揮することが明らかにされている⁷⁶⁾。また、トラスツズマブは、Ras-Raf-MEK1/2-ERK に代表される細胞増殖シグナル伝達を阻害し、細胞増殖抑制に作用することが報告されている^{77,78)}。NK 細胞や単球を作用細胞として ADCC, CDC 活性により癌細胞を殺す活性をもつ。これにより効率的に癌細胞を除去できる。また、*in vitro* の検討ではトラスツズマブ処理により CDKI である p27^{KIP1} と Rb 関連タンパクである p130 の発現を誘導し、S 期細胞を減少させるとの報告がある⁷⁹⁾。最近、Her2 ヒト化抗体が癌の周囲にできる血管新生も阻害することが明らかにされた⁸⁰⁾。

4.2.2 腫瘍抑制効果

海外における治験第 II 相では、単独使用で 11.6% の腫瘍抑制効果を示し、シスプラチン併用では 24.3% に上昇した⁸¹⁾。第 III 相で、パクリタキセルの

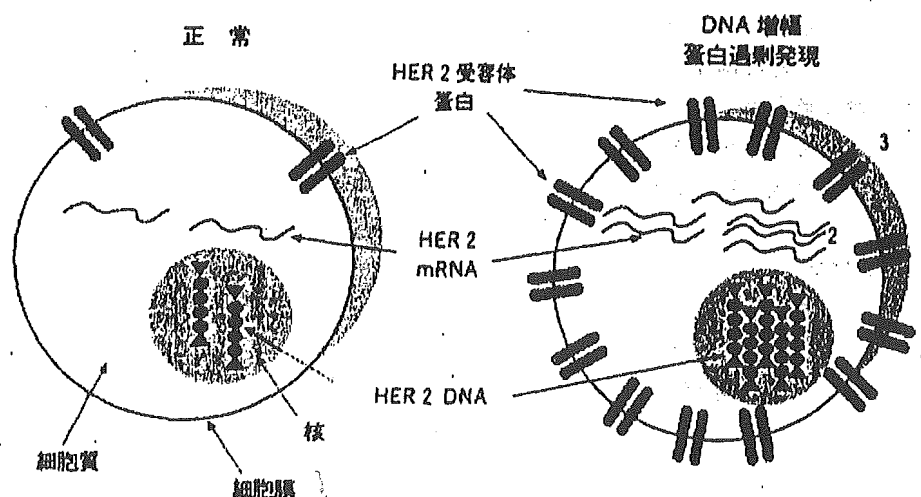


Fig. 21 正常範囲と HER2 過剰発現ガン細胞

1: ↑ gene copy number 2: ↑ mRNA transcription 3: ↑ cell surface receptor expression 4: ↑ release of receptor extracellular domain (文献 134 より許可を得て転載)

併用で41.3%，アントラサイクロン/シクロホスファミド併用で55.9%とそれぞれ抗腫瘍効果が上昇した⁸¹⁾。3種類の効果判定方法で比較したところ、パクリタキセル単独やアントラサイクリンとシクロホスファミドに対しトラスツズマブとの併用と比較すると、本抗体の併用により病勢進行までの期間は、それぞれ2.4倍及び1.3倍以上延長した⁸²⁾。奏効期間では、同様に期間延長効果が2.3倍及び1.4倍以上であった。生存期間と生存率では、1年生存率は1.2倍及び1.1倍であり、生存期間は両者とも1.2倍延長した。また、他の海外における治験第II相においてタキソールとの併用療法で35人中3人が完全寛解、26人が部分寛解で、83%に効果があった⁸³⁾。

なお、トラスツズマブはErbB-2の過剰発現がみられる症例においてのみ有効であり、抗体投与前に責任癌遺伝子であるErbB-2のプロファイリングを行い、治療適応を決定している。

4.2.3 副作用

①うっ血性心不全が発症し、その多くは一般的な心不全に対する治療に反応しているが、死亡例も報告されている。②投与中や投与開始後24時間にinfusion reaction (発熱、悪寒、嘔気、嘔吐、疼痛、頭痛、咳、めまい、発疹、無気力などの反応)が約40%に起きるが⁸⁴⁾、程度は軽度～中等度のものが多い。また、制癌剤との併用により白血球の減少、貧血、下痢、感染などの発現頻度が増加する傾向にあった。特にアントラサイクロン/シクロホスファミドとの併用でそれらの発現頻度が高いが、単独投与でも認められている。更に最近、トラスツズマブ投与に伴う有害事象として、呼吸困難、低血圧、喘鳴、気管支攣縮、頻脈、酸素飽和度の低下、呼吸窮迫が報告された。まれではあるが、死亡例もでており、特に肺転移による安静時呼吸困難を認める患者では注意が必要である。

4.3 インフリキシマブ

インフリキシマブは米国セントコア社により開発された遺伝子組換え型抗TNF- α マウス-ヒトキメラ抗体(cA2)であり、マウス由来25% (抗原認識領域)とヒト由来75% (定常部領域)から構成されている。近年、RAやクローン病などの慢性炎症疾患の炎症病変形成において、TNF- α が中心的な役割を演じていることがわかってきた⁸⁵⁾。そこで、TNF- α の作用を阻害する治療戦略が考えられるよ

うになった(抗TNF- α 療法)。1998年インフリキシマブは米国でクローン病とRA治療薬としてFDAにより承認され、現在欧米など50箇国以上で承認されている。わが国においては2002年クローン病治療薬として承認され、2003年RAについても効能・効果が追加承認された。

4.3.1 作用機序

クローン病は小腸、大腸を中心に原因不明の炎症が持続し、腸管の潰瘍から始まり、狭窄・膿瘍、瘻孔をきたす疾患である。炎症に関与する物質にはTNF- α 、IL-1、IL-6、IL-8など十数種類が知られている。

また、RAは関節組織での滑膜細胞の異常増殖や滑液の貯留を伴い、最終的には関節における骨破壊を引き起こす関節炎である。その病態形成には、単球・マクロファージや滑膜組織から分泌されたIL-1、TNF- α 、IL-6などの炎症性サイトカインやIL-8、MIP-1 α 、RANTESのようなケモカイン、プロテアーゼなどが関与している (Fig. 22)。

近年、炎症組織でマクロファージなどから産生されるTNF- α がIL-1 β 、IL-6、IL-8などの炎症性サイトカインを産生して「急性期免疫カスケード」を惹起することから、TNF- α を抑えることで下流のサイトカインを抑制できることが明らかになった。

一方、臨床的にはクローン病患者の便中TNF- α の量と疾患活動性が相関しているという報告や腸管局所においてTNF- α を含めた炎症性サイトカインの産生が亢進している等の報告から、クローン病とTNF- α の関連性が示唆された。また、TNF- α はRAを引き起こす炎症性サイトカインのなかで上流に位置すると考えられている。

インフリキシマブは可溶性のTNF- α 、膜結合型細胞表面TNF- α のいずれにも結合能を有し、TNF- α 受容体に結合したTNF- α にも結合することが確認されている (Fig. 23)。したがって可溶性TNF- α の中和による血管内皮細胞の接着分子 (E-selectin, VCAM-1, ICAM-1) 発現のdown-regulateによる、炎症病変形成抑制が考えられる⁸⁶⁾。また、TNF- α 産生細胞の細胞膜上に存在する膜型TNF- α 分子への作用による炎症性サイトカイン産生を抑制する機序も考えられている。またこれら以外にADCC活性及びCDC活性などにより、TNF- α 産生細胞を傷害し、TNF- α の産生自体の低下作

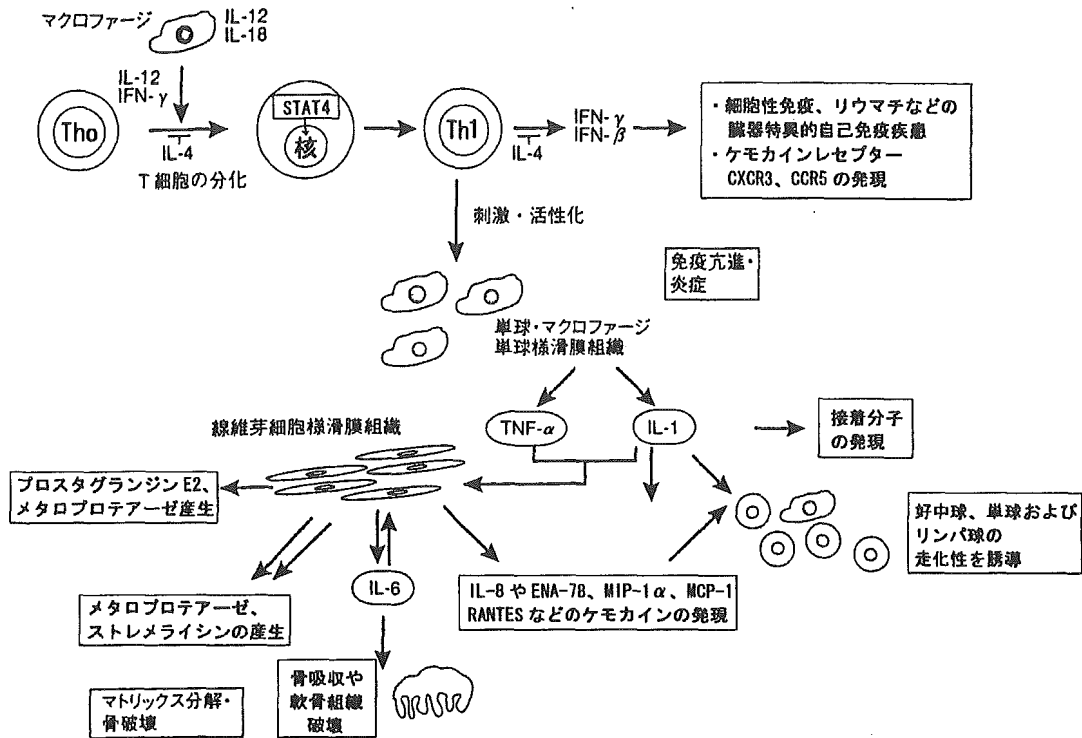


Fig. 22 慢性関節リウマチ発生の機序
(文献 135 より許可を得て転載)

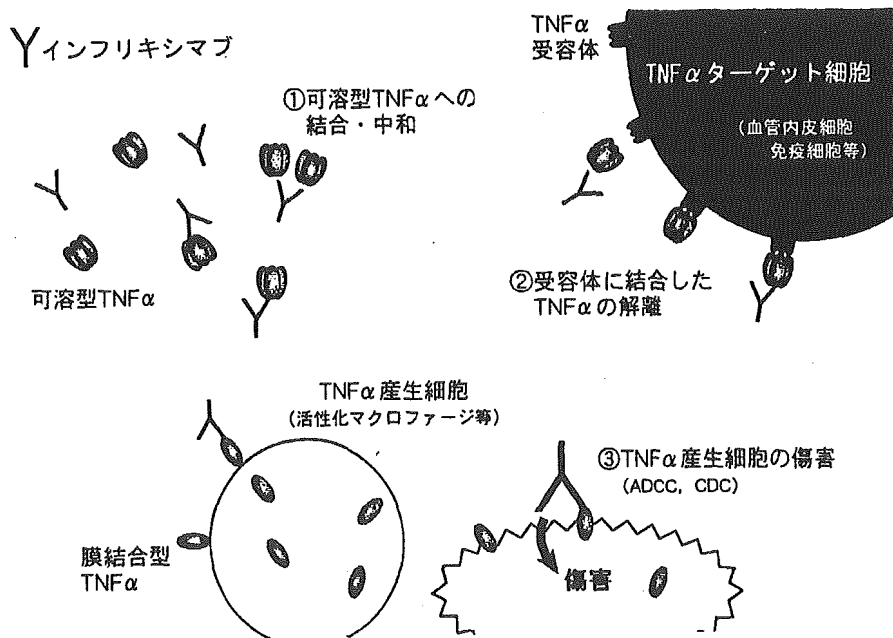


Fig. 23 インフリキシマブの作用機序
(文献 136 より許可を得て転載)

用も考えられる⁸⁷⁾。

4.3.2 治療効果

4.3.2.1 クロウン病への治療効果

クロウン病の三つの評価項目 (CDAI, IBDQ, CRP) で、本剤とプラセボを比較した⁸⁸⁾。①クロウン病活性指数 (CDAI) では、有意の差でプラセボを凌駕したが、量の増加や投与期間による大きな差はあまりなかった。②炎症の指数 (IBDQ) でも、有意の差で効果を示した。③C-反応性タンパク (CRP) でも、充分の効果を示すが、後では少し「戻り現象」が見られた。クロウン病の瘻孔数と瘻孔の閉鎖数で比較しても、充分の効果が得られた。

4.3.2.2 RA への単独治療効果

前化学療法として1~2レジメン施行後に再燃した Her2 過剰発現を認める転移性乳癌患者を対象とした臨床第二相試験において、抗腫瘍効果は完全寛解 (CR) 4%, 部分寛解 (PR) 12%, 奏効率は 15% であった。奏効期間の中央値は 9.1 箇月、生存期間の中央値は 13 箇月であった⁸⁹⁾。欧州で抗リウマチ薬に抵抗性の難治性慢性関節リウマチを対象とし、単回投与が行われた。インフリキシマブ投与群はプラセボ投与群と比較して Paulus 基準 20% 改善率等に関して非常に速やかで有意な改善が認められた^{89,90)}。投与翌日より朝のこわばりと関節痛が軽減し、一週後には CRP の低下と腫脹関節数の減少がみられた。しかし、効果は一過性で、四週後には赤沈、CRP が上昇し、八週目には自覚症状も投与前と同等か、それ以上に悪化する例もみられた。反復投与においては、臨床効果は投与毎に認められ、その効果の減弱は見られなかった⁹¹⁾。また、重篤な副作用も観察されなかったが、再燃までの効果持続時間が、回を重ねる度に短くなっていった。これは反復投与によって生成された抗キメラ抗体によって生成されたキメラ型抗 TNF- α 抗体活性が減弱し、その血中からの消失も早まったためと考えられる。

4.3.4 メトトレキサート併用療法

メトトレキサート (MTX) 療法で効果不十分な症例を対象に、インフリキシマブの併用効果をみる臨床試験が欧米で行われた^{92,93)}。臨床効果の判定にはアメリカリウマチ学会の基準 ACR20% 改善率が用いられ、MTX 単独のプラセボ群に比べインフリキシマブ併用群では有意な改善率の向上を示した。日本における臨床試験においても、ほぼ同等な効果

が報告されている⁹⁴⁾。また、1年間後の X 線所見による骨破壊の進行阻止効果でも、ほとんど骨破壊が進行しないことが確認された⁹³⁾。このような効果は MTX による免疫抑制効果によって、中和抗体の産生が抑制されたと解釈されている^{92,93)}。

4.3.5 副作用

投与後 1~2 時間で起こる急性反応には搔痒感、蕁麻疹などの皮膚症状、胸痛、呼吸困難などの心肺症状があり、それぞれ 1% 程度ほど報告されている。しかしながら、急性反応の多くは軽微な頭痛・発熱などであり、大部分は投与速度を遅らせるか、投与を一時的に中断することにより、あるいは、抗ヒスタミン薬投与により軽快・回復するため、管理可能であるとされている⁹⁵⁾。2~4 年後の再投与反応は、より重篤で、10% ほどに発熱、筋肉痛、関節痛などが出現したと報告されている。これ以外に、重篤な感染症、自己抗体の誘導や SLE 様症状の出現、悪性腫瘍/リンパ増殖性疾患、カリニ肺炎、真菌症などの細胞内寄生感染症が報告されている。特に結核は肺外結核などの重症型も多く、一般人口の 6 倍程度の発生頻度とされる⁹⁶⁾。これは新たな結核の感染ではなく、既感染、不顕性感染の再活性化による可能性が高い。その理由としては、TNF- α が肉芽腫形成に重要であることが明らかにされていることから、TNF- α 活性を中和することで結核菌の封じ込みができなくなることが結核症の多発に関係していると思われる⁹⁷⁾。既往歴のある患者への投与には注意を要する。

4.4 バシリキシマブ

1986 年英国ロイヤルフリーホスピタルにおいて活性化 T 細胞に発現する IL-2 レセプター α 鎖 (CD25) に対するモノクローナル抗体 (RFT-5) 分泌細胞株が樹立された。その後、ノバルティスファーマ社は遺伝子組換え技術を応用して抗体の変換部位のみにマウス由来の抗体を使用しそれ以外の抗体の基本部分はヒト由来としたマウス-ヒトキメラ型 CD25 モノクローナル抗体を作成した。1998 年米国及び欧州にて急性免疫拒絶剤として承認された。日本においては 2002 年承認された。

4.4.1 作用機序

IL-2 は T 細胞及び B 細胞の細胞傷害性を増強し、LAK 細胞を誘導する。腎移植時における免疫拒絶には IL-2 によるこれら細胞の活性化が関与してい

る。バシリキシマブは IL-2 レセプター α 鎖に特異的に結合し、IL-2 の IL-2 レセプターへの結合を阻止し、シグナル伝達をブロックする。実際、2 回投与 (0, 4 日) のみで、IL-2 レセプターの発現率を 1 箇月以上 3% 以下にブロックする⁹⁸⁾。その結果、免疫細胞の活性化が抑制され、急性拒絶反応の発現率が低下する。

4.4.2 急性拒絶反応抑制効果

成人腎移植患者を対象とし、シクロスポリン及びステロイドに加え、本剤又はプラセボを投与した二重盲検試験において、移植後 0~6 箇月間に急性拒絶反応 (死亡、腎機能廃絶を含む) が認められなかった患者の割合 (無発現率) は、本剤投与群で有意に高く ($P < 0.01$, Kaplan-Meier (K-M) 法推定量の差)、また移植 12 箇月でも同様に本剤投与群が有意に高かった ($P < 0.01$, K-M 推定量の差)^{99~101)}。成人腎移植患者を対象とし、シクロスポリン及びステロイド及びアザチオプリンに加え、本剤又はプラセボを投与した二重盲検試験において、移植後 6 箇月までに急性拒絶反応が認められなかった患者の割合 (無発現率) は、本剤投与群で有意に高かった ($P < 0.02$, K-M 推定量の差)¹⁰²⁾。

4.4.3 副作用

国内臨床試験における主な副作用は、発熱、サイトメガロウイルス感染、鼻咽頭炎であった。外国における第 III 相臨床試験 (シクロスポリン及び副腎皮質ホルモン剤に加え本剤又はプラセボを投与した二重盲検試験) において認められた主な副作用は、尿路感染、ウイルス感染、単純疱疹、肺炎、高カリウム、便秘、発熱であった。

4.5 パリビズマブ

米国メディムン社で開発された抗 RS ウイルスポリクローナル抗体 RSV-IGIV は、RS ウイルス Respiratory Syncytial Virus (RSV) 感染による重篤な下気道疾患の予防効果が認められ、1996 年に米国 FDA より承認を取得した。なお、RSV とはパラミクソウイルス科に属する RNA ウイルスで、主に 1 歳未満の乳児における肺炎や細気管支炎等の下気道疾患の主要な原因ウイルスである。しかしながら、血液製剤であるため感染病原体による汚染の可能性があること、また原料供給不安定による製品不足の可能性があること、点滴静注のため輸液量が多くなること等の問題点があり、使用においては

種々の制限があることが指摘されていた。そこでメディムン社ではこれらの問題点を解決するため、新しい抗体の開発に着手し、その結果開発されたのが、マウス抗 RS ウイルスモノクローナル抗体の CDR¹⁰³⁾、並びにヒト IgG1C 領域及び FR 領域^{104~106)} からなる抗 RS ヒトモノクローナル抗体シナジス (一般名: パリビズマブ) である。米国において「RSV 感染がハイリスクとなる患児における RSV による重症な下気道疾患の予防」を適応症として 1998 年に承認された。これまでに、米国及び欧州を含む 46 箇国で承認を取得し、日本においては 2002 年に承認された。

4.5.1 作用機序

シナジスは RSV の F タンパクの抗原部位 A 領域に特異的に結合するヒトモノクローナル抗体である。本剤は RSV が宿主細胞に侵入する際に重要な役割を果たす F タンパクに結合してウイルスの感染力を中和し、ウイルスの複製及び増殖を抑制する¹⁰⁷⁾。

4.5.2 RSV 感染予防効果

シナジスは海外で実施された第 III 相二重盲検比較試験において、ハイリスク患児 (早産児、気管支異形成症 (BPD を有する児)) の RSV 感染による入院率をプラセボ群に比べて有意に低下させることが認められた¹⁰⁸⁾。

4.5.3 副作用

海外の第 II 相及び第 III 相臨床試験では、主な副作用として注射部位反応、発熱、神経過敏等が認められたが、多くは軽度であり、本剤投与群とプラセボ群との副作用発現率はほぼ同等であった。国内における早産又は BPD の新生児、乳児及び幼児を対象にした第 I/II 相試験においては、副作用は認められなかった。

4.6 アダリムマブ

アダリムマブは、アボット社により開発されたファージディスプレイライブラリー法を用いて作られた完全ヒト型 TNF- α モノクローナル抗体である。抗体クラスは IgG1 である^{109,110)}。具体的には、ヒト型抗 TNF- α モノクローナル抗体の H 鎖及び L 鎖の遺伝子を組み込んだ発現ベクターを CHO 細胞に遺伝子導入し、無血清培地で培養することにより本抗体を得ている。RA に対して 2002 年 12 月に米国で認可された。現在、わが国では臨床第 II 相試験

が行われている。作用機序、効能、副作用については抗ヒト TNF- α ヒト化抗体であるインフリキシマブと同様である^{111,112)}。しかし、本抗体が完全ヒト型であり、しかも皮下注射であることから、インフリキシマブと比較すると、アナフィラキシーをはじめとする投与時反応 (infusion reaction) が起こる頻度はきわめて低い。

4.7 マイロターゲット

マイロターゲットはセロテック社により開発されたヒト化抗 CD33 抗体 (IgG4, κ) に N-acetyl-gamma calicheamicin demethyl hydrazide (Nac- γ calicheamicin DMH) をリンカーを介して結合させた抗体療法剤である。2000 年に米国において急性骨髄性リンパ性白血病を適応症として認可された。現在日本では承認申請中である。

4.7.1 作用機序

CD33 抗原は 67 kDa の糖タンパク質である。シアル酸依存性の接着タンパク質としての機能を有していると考えられるが、詳細な機能は解明されていない。顆粒球系、単球系と巨核球前駆細胞に発現を認めるが、正常な多機能性幹細胞、リンパ系細胞及び非造血組織には発現が認められない。AML 症

例の 90% 以上に発現しており、発現量は 10,000~20,000 コピー/細胞である。また、CD33 には、抗体が結合すると速やかに細胞内にインターナライズされるという特徴がある¹¹³⁻¹¹⁵⁾。ヒト化抗 CD33 抗体に結合させる calicheamicin は米国 Lederle 社により土壌菌である *Micromonospora echinospora* ssp. *calichensis* から単離された抗腫瘍性抗生物質である。したがって、マイロターゲットの抗体部分が白血病細胞の CD33 と結合すると、細胞内に取り込まれ、白血病細胞のライソゾームの消化酵素によって抗癌効果を持った calicheamicin 部分が遊離される (Fig. 24)。その際 calicheamicin は活性なラジカル体となって DNA と結合し、これを切断し、ADCC 活性を発揮する。また、ヒト化抗 CD33 抗体においても細胞傷害作用が認められ、それは CDC や ADCC 活性によることが明らかになっている¹¹⁶⁾。

4.7.2 急性白血病治療効果

CD33 陽性急性骨髄性白血病の初回再燃症例について、マイロターゲットは 2 回投与され、2 回目投与の後 28 日間経過観察が行われた¹¹⁷⁾。なお、投与前に副作用を軽減する目的でアセトアミノフェンとジフェンヒドラミンが内服された。末梢血から白血病細

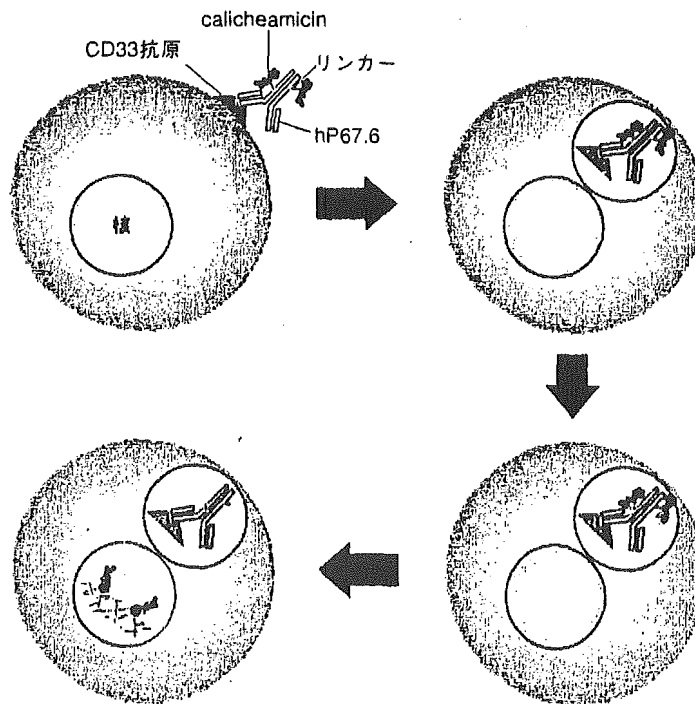


Fig. 24 マイロターゲットの細胞傷害活性発現機序 (ワイス社より提供)

胞（プラスト）が消失する完全寛解したのは約30%で、再燃までの平均期間は60日であった。平均生存期間は5.9箇月で、約40%は臨床試験の期間中生存した。

4.7.3 副作用

急性の副作用として悪寒、発熱、吐気、頭痛、血圧低下、血圧上昇、低酸素血症、呼吸困難、血糖上昇が発症した。骨髄抑制としてGrade 3-4の好中球減少、Grade 3-4の血小板減少、Grade 3-4の貧血が発症した。日和見感染を含めてGrade 3-4の感染症が発症した。また、口内炎や胃炎、Grade 3-4の出血が発症した。肝機能障害も認められたが、多くの場合一過性で回復した。

5. 抗体医薬品の今後の課題

以上述べてきたように、抗体療法は大きな発展をとげ、幾つかについては承認され、開発中のものは多数存在する。しかしながら、今後克服すべき点として以下のような問題が残されている。

5.1 組織移行

抗体は静脈内投与後の血中半減期が通常1~2週間と長く、持続性薬剤として使える利点がある。しかし、抗体は分子量10万を超える巨大タンパク質であるため、血中から組織への移行性が非常に悪い。これが患者に大量投与しなければいけない原因となっている。その解決策としてファージディスプレイなどの方法を用いて分子のサイズを小さくし、移行性を増大することが考えられ現在盛んに試みがなされている。しかしながら、低分子化により、エフェクター機能は失われ、抗体本来の長所である長い血中半減期やシンプルな代謝・排出の機構は失われる可能性がある。両者の特徴をどのように両立させていくか、ケースバイケースの対応も含め今後検討していく必要がある。

5.2 細胞内移行

現状の抗体医薬の標的分子は、血清中の可溶性タンパク質若しくは細胞表面のタンパク質である。しかし、ゲノム解析によって明らかになっている疾患関連標的遺伝子産物には、むしろシグナル伝達タンパク質や転写因子など、細胞内タンパク質が多く含まれる。その意味では細胞内抗体も、新しい抗体医薬品の開発領域として今後重要になってくると考えられる。遺伝子治療に使われるウイルスベクターや

リポソームを用いれば、細胞内タンパク質に対する抗体遺伝子あるいは抗体そのものを細胞内に送り込み、関連する遺伝子を機能的にノックアウトすることでガンやエイズなどの感染症の治療にも応用できる。

5.3 他の治療法と併用

前述のように、いくつかの抗体の臨床的有用性が確実に確かめられつつある。今後の大きな臨床的課題は、抗体と他の治療法との併用において、抗体利用の効果を最も高めうる治療法の開発であり、またそれによって特に癌患者においては生存率及び生存期間が本当に改善されるのかを検証することである。

5.4 抗原分子の機能性

キメラ抗体やヒト化抗体の臨床試験が欧米を中心として進むにつれて、認識する抗原の重要性がクローズアップされてきた。癌治療を例にとると、抗原それ自身が癌細胞の増殖に関与する機能性分子（HER2, EGF-R, VEGF など）と機能を持たない分子（17-1A, CEA, CD52, CD33, CD20 など）に分類される。抗体医薬の歴史を振り返ると非機能性分子から機能性分子にトレンドが移りつつあるのがわかる。これは抗HER-2抗体や抗EGFレセプター抗体などの機能性分子を認識する抗体の治療効果が注目されていることと密接に関連している。レセプターとリガンドの結合を阻害する抗体は、レセプターが伝えるシグナルを阻害し、結果的に癌細胞の増殖を抑制する効果が期待できる。前述したように、抗機能性分子抗体と抗癌剤化学療法において、顕著な相乗的効果が出ているものがある。しかし、このような機能性分子が正常細胞でも重要な働きをしている場合は副作用にもつながるので注意が必要である。例えば正常血管内皮細胞に働く成長因子の場合は、出血などの副作用の危険性がある。やや注目度が落ちた非機能性抗原ではあるが、昨今のゲノムプロジェクトとポストゲノム研究から見出される新規遺伝子に非機能性抗原が多く含まれている。これらを抗体医薬の標的としてどう役立てるかも今後の課題になるであろう。

5.5 作用機序の解明

前述した抗体医薬品においてはその作用機序がかなり明らかになっているが、その詳細な作用機序が不明の抗体も多い。抗体の作用機序としてはCDC及びADCC活性などの可能性が示唆されているが、

当然のことながら、抗体ごとで作用機序が異なることも考えられる。更に、抗体がこのような宿主の免疫機序によって細胞傷害性を発揮する可能性とともに、標的細胞表面分子に抗体が結合した結果、標的分子の下流に存在している分子群の機能的変化が起これ、その結果、癌細胞においては細胞周期の変化、増殖の変化、またアポトーシスなどが誘導される可能性も示唆されている。このような点は今後更なる新しい抗体を模索するうえで考慮すべき点である。

5.6 第二世代の抗体医薬品の開発

第二世代の抗体医薬品として抗体自身に変化や修飾を加え治療効果を高めた抗体があげられる。前述のように、抗 CD20 抗体に放射性分子を、抗 CD33 抗体に抗癌剤をコンジュゲートしたものは第二世代抗体といえる。前者については放射性分子の取り扱いに難点がある。後者については、同様の発想で、これに続いた複数の薬剤コンジュゲート抗体の臨床試験も進められているが、問題点としては抗体の単独療法に比べて強い副作用の懸念があることである。今後の課題としては薬剤の選択と抗体と薬剤を結合するリンカーの設計がポイントとなるであろう。新しい流れとしては、抗体のもつエフェクター機能を高めるためにマクロファージ、NK 細胞、T 細胞などを活性化させるサイトカインやケモカインを結合させた融合抗体が注目されている。実際、IL-2、IL-12、GM-CSF、TNF、などとの融合抗体が研究されている¹¹⁸⁻¹²¹⁾。抗体単独に比べ、少量で効果が得られることが期待されるが、投与量を増やしたときの副作用や血中半減期などにも注意して開発する必要があるだろう。

5.7 コスト

経済面の観点では抗体の生産をより安価にすることも重要な課題である。一般に抗体医薬品の投与量は数 mg～数百 mg にまで及んでいる。そして年間使用にかかるコストは膨大なものとなっている。細胞株の改変など工夫がなされているが、現在の細胞培養系で大幅なコストダウンを図ることは限界にきているといっても過言ではない。このような問題点を解決するため、前述のように HAC 牛、ヤギや植物にヒト抗体を生産する技術^{37,38)}、ニワトリの卵白中にヒト抗体を蓄積する技術³⁹⁾なども開発されている (Table 4)。そのほか、様々な企業が腸菌、酵母、タバコやトウモロコシなど植物を利用した抗

体産生技術を開発している。今後適応すべき抗体の種類を見極めて応用を図ることが重要である。また、植物や動物を生産系として用いる場合は安全性、信頼性の観点に留意して可否を判断することはいうまでもない。

5.8 トランスレーショナルリサーチ

現在臨床応用がなされている抗体医薬の成功には抗体改良、*in vitro* あるいは動物実験という莫大な基礎研究の取り組みが不可欠であった。一方では基礎研究で興味深い研究であっても、ヒトへの応用を通じて治療に応用できなければ、あくまで基礎研究で終わってしまう。臨床応用につながるシーズを基礎研究から得て、それを臨床応用につなげるトランスレーショナルリサーチが特に抗体治療薬の開発には不可欠であり、今後そのあり方を模索していく必要がある。

おわりに

ハイブリドーマによるモノクローナル抗体作成技術が開発された後四半世紀を経た現在、遺伝子工学的手法の発展により、ようやくモノクローナル抗体を用いた抗体療法の有用性は確立しつつある。特にガンにおいては抗体療法がきわめて有用な治療法の一つとして確立されることは間違いないと考えられる。

ヒトゲノム配列がすべて明らかになり、新規な遺伝子の機能が続々と解明される時代になり、抗体のターゲットとなる遺伝子も急速に増加しつつある。また、抗体医薬の標的として既知の抗原も含めより有効性の高い治療のターゲットとなりうるものを見つけ出す手法として、マイクロアレイなどを用いた遺伝子発現プロファイルの解析やプロテオーム解析などが発展してきており、従来に比べより大規模に網羅することが可能となっている。今後更に進化するであろう免疫学、分子生物学、遺伝子工学的手法を用いた創薬研究により、標的細胞に対する高い生物学的活性と特異性を持つ治療薬としての抗体が得られることを期待する。

謝 辞

本研究の一部は厚生科学研究費補助金医薬品医療技術リスク評価研究事業 (H 15-リスク-039) として実施されたものである。

文 献

- 1) 子安重夫：免疫学はおもしろい，羊土社刊，1997.
- 2) Kohler, G., Milstein.: *Nature*, **256**(5517), 495-497 (1975).
- 3) Morrison, S. L., Oi, V. T.: Chimeric immunoglobulin genes, "Immunoglobulin genes", Honjo, T. *et al.*, p.260 Academic Press, London (1989).
- 4) Roguska, M. A., Pederson, J. T., Keddy, C. A., Henry, A. H., Searle, S. J., Lambert, J. M., Goldmacher, V. S., Blattler, W. A., Rees, A. R., Guild, B. C.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **91**(3), 969-973 (1994).
- 5) Foote, J., Winter, G.: *J. Mol. Biol.*, **224**(2), 487-499 (1992).
- 6) Martin, A. C., Cheetham, J. C., Rees, A. R.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **86**(23), 9268-9272 (1989).
- 7) Chu, L., Robinson D. K.: *Curr. Opin. Biotechnol.*, **12**(2), 180-187 (2001).
- 8) Smith, G. P.: *Science*, **228**(4705), 1315-1317 (1985).
- 9) Winter, G., Griffiths, A. D., Hawkins, R. E., Hoogenboom, H. R.: *Ann. Rev. Immunol.*, **12**, 433-455 (1994).
- 10) Burton, D. R., Barbas, C. F. 3rd.: *Adv. Immunol.*, **57**, 191-280 (1994).
- 11) Hoogenboom, H. R., Chames, P.: *Immunol. Today*, **21**(8), 371-378 (2000).
- 12) Arai, M., Imai, T., Yuguchi, M., Nakashima, T.: *Thromb. Haemost.*, **82**, 238a (1999).
- 13) Marks, J. D., Hoogenboom, H. R., Bonnert, T. P., McCafferty, J., Griffiths, A. D., Winter, G.: *J. Mol. Biol.*, **222**(3), 581-597 (1991).
- 14) Hashiguchi, S., Nakashima, T., Nitani, A., Yoshihara, T., Yoshinaga, K., Ito, Y., Maeda, Y., Sugimura, K.: *J. Biochem.*, **133**(1), 43-49 (2003).
- 15) Griffiths, A. D., Williams, S. C., Hartley, O., Tomlinson, I. M., Waterhouse, P., Crosby, W. L., Kontermann, R. E., Jones, P. T., Low, N. M., Allison, T. J. *et al.*: *EMBO J.*, **13**(14), 3245-3260 (1990).
- 16) Knappik, A., Ge, L., Honegger, A., Pack, P., Fischer, M., Wellenhofer, G., Hoess, A., Wolle, J., Pluckthun, A., Virnekas, B.: *J. Mol. Biol.*, **296**(1), 57-86 (2000).
- 17) Bruggemann, M., Neuberger, M. S.: *Immunol. Today*, **17**(8), 391-397 (1996).
- 18) Fishwild, D. M., O'Donnel, S. L., Bengoechea, T., Hudson, D. V., Harding, F., Bernhard, S. L., Jones, D., Kay, R. M., Higgins, K. M., Schramm, S. R., Lonberg, N.: *Nat. Biotechnol.*, **14**(7), 845-851 (1996).
- 19) Tomizuka, K., Yoshida, H., Uejima, H., Kugoh, H., Sato, K., Ohguma, A., Hayasaka, M., Hanaoka, K., Oshimura, M., Ishida, I.: *Nature Genet.*, **16**(2), 133-143 (1997).
- 20) Tomizuka, K., Shinohara, T., Yoshida, H., Uejima, H., Ohguma, A., Tanaka, S., Sato, K., Oshimura, M., Ishida, I.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **97**(2), 722-727 (2000).
- 21) Mendez, M. J., Green, L. L., Corvalan, J. R., Jia, X. C., Maynard-Currie, C. E., Yang, X. D., Gallo, M. L., Louie, D. M., Lee, D. V., Erickson, K. L., Luna, J., Roy, C.M., Abderahim, H., Kirschenbaum, F., Noguchi, M., Smith, D. H., Fukushima, A., Hales, J. F., Klapholz, S., Finer, M. H., Davis, C.G., Zsebo, K. M., Jakobovits, A.: *Nature Genet.*, **15**(2), 146-156 (1997).
- 22) Ishida, I., Tomizuka, K., Yoshida, H., Tahara, T., Takahashi, N., Ohguma, A., Tanaka, S., Umehashi, M., Maeda, H., Nozaki, C., Halk, E., Lonberg, N.: *Cloning Stem Cells*, **4**(1), 91-102 (2002).
- 23) Ishida, I., Tomizuka, K., Yoshida, H., Kuroiwa, Y.: *Biotechnol. Genet. Eng. Rev.*, **19**, 73-82 (2002).
- 24) 石田 功：実験医学，**20**(6)，846-851 (2002).
- 25) Ishida, I.: 12th Annual International Conference on Antibody Engineering. 2001 (San Diego)
- 26) Kuroiwa, Y., Shinohara, T., Notsu, T., Tomizuka, K., Yoshida, H., Takeda, S., Oshimura, M., Ishida, I.: *Nucleic Acids Res.*, **26**(14), 3447-3448 (1998).
- 27) Kuroiwa, Y., Tomizuka, K., Shinohara, T., Kazuki, Y., Yoshida, H., Ohguma, A., Yamamoto, T., Tanaka, S., Oshimura, M., Ishida, I.: *Nat. Biotechnol.*, **18**(10), 1086-1090 (2000).
- 28) Kuroiwa, Y., Yoshida, H., Ohshima, T., Shinohara, T., Ohguma, A., Kazuki, Y., Oshimura, M., Ishida, I., Tomizuka, K.: *Gene Ther.*, **9**(11), 708-712 (2002).
- 29) Kuroiwa, Y., Kasinathan, P., Choi, Y. J., Naeem, R., Tomizuka, K., Sullivan, E. J., Knott, J. G., Duteau, A., Goldsby, R. A.,