

Fig. 7. Effect of TM on chemotaxis. (A) MEM containing 1% FCS was used as the basal medium. The data shown are means \pm SD of data obtained in duplicate wells in three experiments (** $p < 0.01$ vs. control). (B) Cells on which thrombin activity was depleted were used in the experiment. MEM containing 0.1% BSA was used as the basal medium. The data shown are means \pm SD of data obtained in duplicate wells in three experiments (** $p < 0.01$ vs. control). The deviation in each experiment was less than 10%.

ina component. Neither TM nor thrombin affected adhesion to fibronectin.

Effect of TM on Chemotaxis—Figure 7 (A and B), shows the effects of TM on chemotaxis by MMT cells in the presence of 1% FCS and in the thrombin-activity-depleted assay system, respectively. Both TM (10 pg/ml) and thrombin (50 ng/ml) significantly stimulated chemotaxis by MMT cells by approximately 1.9–2.3-fold in the former system, but neither TM (10 pg/ml) nor thrombin (1 pg/ml) affected chemotaxis in the latter system; TM plus thrombin, on the other hand, stimulated chemotaxis by approximately 2-fold.

Binding of Thrombin—Figure 8 shows the binding curves for specific [¹²⁵I]-thrombin binding sites on cells in the presence and absence of TM (10 pg/ml). These binding curves show the specific [¹²⁵I]-thrombin binding to be saturable at approximately 40 ng/ml, and that TM has no effect on the specific binding of [¹²⁵I]-thrombin. A similar binding experiment was performed in the [¹²⁵I]-thrombin concentration range of 1–10 pg/ml, but no specific binding was detected independent of the presence or absence of TM, probably because the absolute amount of radioactivity used was too low to be detected as specific binding.

DISCUSSION

In the present study, we show that, at its maximum effective dose, TM stimulates the invasive activity of MMT cells *in vitro* by approximately 3-fold. As far as we know, this is the first time that TM has been shown to stimulate the invasive activity of tumor cells *in vitro*. Similarly, exogenous thrombin causes maximal stimulation of invasion at 50 ng/ml, which is a concentration more than 1,000-fold higher than the maximum effective dose of TM.

Since TM acts as a cofactor for the thrombin-catalyzed activation of protein C and increases the rate of the reaction by >1,000-fold (8), the stimulation by TM may have been due to TM interacting with thrombin, which had been introduced into the assay system, and acting as a cofactor for thrombin-stimulated invasion of MMT cells, thus lowering the effective concentration of thrombin. This possibility seems to be supported by the detection of thrombin activity in the assay systems, the requirement

for thrombin for stimulation by TM in the thrombin-activity-depleted assay system, and the inhibition of stimulation by hirudin. It is noteworthy that the thrombin concentration required for stimulation by TM in the thrombin-activity-depleted assay system is more than 20,000-fold less than the concentration required for thrombin to stimulate invasion. On the other hand, the control level was not inhibited by hirudin in the presence of 1% FCS, probably due to the lower thrombin concentration in the assay system compared with the effective concentration of exogenous thrombin.

There have been two studies examining the effect of TM on the invasive activity of tumor cells. Matsushita *et al.* showed that a subcloned human esophageal squamous cell carcinoma line with low TM expression is more invasive than a high TM-expressing clone (37). In their study, the action of TM does not seem to be due to an acceleration of its thrombin cofactor activity, because the difference between the cell lines with low and high TM expression with respect to their cofactor activity for protein C activation by thrombin was less than 13% and significantly lower than their TM levels and invasive activities. Hosaka *et al.* showed that TM (10–100 ng/ml)

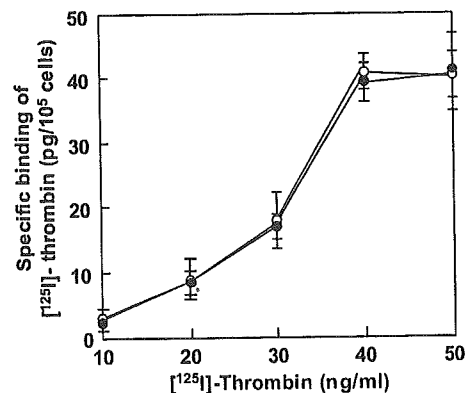


Fig. 8. Binding of [¹²⁵I]-thrombin. Specific binding of [¹²⁵I]-thrombin to cells in the absence (solid circles) and presence of TM (10 pg/ml) (open circles) was measured. The data shown are representative specific binding curves for [¹²⁵I]-thrombin binding sites and are means \pm SD of data obtained in triplicate wells.

inhibits the invasive activity of mouse melanoma cells *in vitro* (38), and TM has also been found to decrease the proliferation of tumor cell lines subcloned from patients with malignant melanomas (39). None of these inhibitory effects were inhibited by hirudin.

In contrast to these studies, the present study shows that TM enhances the invasive activity of MMT cells and indicates that the action of TM is entirely dependent on thrombin as described above. Therefore, the mode and mechanism of action of TM in MMT cells seems to be different from its mode and mechanism of action in the squamous cell carcinoma line and melanoma cells.

It is useful to speculate on the role of TM in tumorigenesis based on the findings of our study, because tumor cell invasion through the basement membrane is a critical step in the process of metastasis (29–30). Several studies have shown that TM levels in serum increase in patients with certain tumors (26–28), as described in the Introduction. Thus, the results of this study suggest that the soluble form of TM may play a positive role in the malignancy of some kinds of tumors, probably by enhancing the metastatic potential of thrombin. On the other hand, TM on the cell surface may act as a negative regulator to thrombin, because thrombin is degraded as the thrombin-TM complex by its internalization after binding to TM on the cell surface (40). This possibility may be supported by the findings that the expression level of TM is negatively correlated with the malignancy of some carcinomas (23–25), as described in the Introduction.

Tumor cell invasion is a complex process that involves adhesion to ECM, degradation of ECM, and chemotaxis (41). Chemotaxis is the essential step in invasion as reviewed by Wells (42). The results of the present study show that both TM and thrombin stimulate chemotaxis in the presence of 1% FCS, and that TM plus thrombin stimulate chemotaxis in the thrombin-activity-depleted assay system. Both of these findings are consistent with previous reports that thrombin stimulates chemotaxis (17, 18), and the presence of specific binding sites for thrombin on cells indicates that these actions are mediated by thrombin receptors.

However, other actions of thrombin may also be involved in the stimulation of tumor cell invasion, because the enhancement of chemotaxis alone is insufficient to account for the increase in tumor cell invasion. One such other possible action of thrombin is the stimulation of the matrix metalloprotease (MMP)-mediated degradation of a variety of ECM proteins, including collagens type IV, V, VII, and X, fibronectin, laminin (43–47), elastin (48–49), proteoglycans (49–51), and entactin (52). Several reports have indicated that thrombin increases the active forms of MMP-2 and MMP-9 (53–59), and plays important roles in the enhancement of tumor cell invasion and metastasis (34, 60–68). There are also reports that thrombin stimulates the release of MMP-2 (69), the expression of MMP-1 and MMP-3 (70), and the expression of MMP-9 mRNA (71). Another possible action is the stimulation of MMP-independent degradation of ECM. This possibility appears to be supported by the finding that thrombin stimulates the expression of urokinase-type plasminogen activator, a factor involved in the degradation of ECM protein (72), and stimulates the heparinase-mediated release of heparan sulfate from ECM (73).

In conclusion, the results of this study show that TM stimulates the invasive activity of MMT cells, probably by acting as a cofactor for the thrombin-stimulated invasion of cells mediated by thrombin receptors, and by lowering the effective concentration of thrombin. Further, the results indicate that the stimulation is mainly caused by an enhancement of chemotaxis.

This study was supported, in part, by a Grant-in-Aid for research on health sciences focusing on drug innovation from the Japan Health Sciences Foundation.

REFERENCES

1. Esmon, C.T. and Owen, W.G. (1981) Identification of an endothelial cell cofactor for thrombin-catalyzed activation of protein C. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **78**, 2249–2252
2. Esmon, C.T. (1989) The roles of protein C and thrombomodulin in the regulation of blood coagulation. *J. Biol. Chem.* **264**, 4743–4746
3. Ishii, H. and Majerus, P.W. (1985) Thrombomodulin is present in human plasma and urine. *J. Clin. Invest.* **76**, 2178–2181
4. Molinari, A., Giorgetti, C., Lansen, J., Vaghi, F., Orsini, G., Faioni, E.M., and Mannucci, P.M. (1992) Thrombomodulin is a cofactor for thrombin degradation of recombinant single-chain urokinase plasminogen activator "in vitro" and in a perfused rabbit heart model. *Thromb. Haemost.* **67**, 226–232
5. Bajzar, L., Morser, J., and Neshelm, M. (1996) TAFI, or plasma procarboxypeptidase B, couples the coagulation and fibrinolytic cascades through the thrombin-thrombomodulin complex. *J. Biol. Chem.* **271**, 16603–16608
6. Pekovich, S.R., Bock, P.E., and Hoover, R.L. (2001) Thrombin-thrombomodulin activation of protein C facilitates the activation of progelatinase A. *FEBS Lett.* **494**, 129–132
7. Esmon, N.L., Carroll, R.C., and Esmon, C.T. (1986) Thrombomodulin blocks the ability of thrombin to activate platelets. *J. Biol. Chem.* **258**, 12238–12242
8. Esmon, C.T., Esmon, N.L., and Harris, K.W. (1983) Complex formation between thrombin and thrombomodulin inhibits both thrombin-catalyzed fibrin formation and factor V activation. *J. Biol. Chem.* **257**, 7944–7947
9. Parkinson, J.F., Bang, N.U., and Garcia, J.G. (1993) Recombinant human thrombomodulin attenuates human endothelial cell activation by human thrombin. *Arterioscler. Thromb.* **13**, 1119–1123
10. Li, J., Garnette, C.S., Cahn, M., Claytor, R.B., Rohrer, M.J., Dobson, J.G. Jr., Gerlitz, B., and Cutler, B.S. (2000) Recombinant thrombomodulin inhibits arterial smooth muscle cell proliferation induced by thrombin. *J. Vasc. Surg.* **32**, 804–813
11. Lafay, M., Laguna, R., Le Bonniec, B.F., Lasne, D., Aiach, M., and Rendu, F. (1998) Thrombomodulin modulates the mitogenic response to thrombin of human umbilical vein endothelial cells. *Thromb. Haemost.* **79**, 848–852
12. Nierodzik, M.L., Plotkin, A., Kajumo, F., and Karpatkin, S. (1991) Thrombin stimulates tumor-platelet adhesion *in vitro* and metastasis *in vivo*. *J. Clin. Invest.* **87**, 229–236
13. Nierodzik, M.L., Kajumo, F., and Karpatkin, S. (1992) Effect of thrombin treatment of tumor cells on adhesion of tumor cells to platelets *in vitro* and tumor metastasis *in vivo*. *Cancer Res.* **52**, 3267–3272
14. Esumi, N., Fan, D., and Fidler, J.I. (1991) Inhibition of murine melanoma experimental metastasis by recombinant desulfatohirudin, a highly specific thrombin inhibitor. *Cancer Res.* **51**, 4549–4556
15. Wojtukiewicz, M.Z., Tang, D.G., Ben-Josef, E., Renaud, C., Walz, D.A., and Honn, K.V. (1995) Solid tumor cells express functional 'tethered ligand' thrombin receptor. *Cancer Res.* **55**, 698–704
16. Even-Ram, S., Uziely, B., Cohen, P., Grisaru-Granovsky, S., Maoz, M., Ginzburg, Y., Reich, R., Vlodaysky, I., and Bar-

- Shavit, R. (1998) Thrombin receptor overexpression in malignant and physiological invasion processes. *Nat. Med.* **4**, 909-914
17. Hernandez-Rodriguez, N.A., Correa, E., Contreras-Paredes, A., and Green, L. (1999) Evidence that thrombin present in lungs of patients with pulmonary metastasis may contribute to the development of the disease. *Lung Cancer* **26**, 157-167
 18. Henrikson, K.P., Salazar, S.L., Fenton, J.W. II., and Pentecost, B.T. (1999) Role of thrombin receptor in breast cancer invasiveness. *Br. J. Cancer* **79**, 401-406
 19. Ogawa, H., Yonezawa, S., Maruyama, I., Matsushita, Y., Tezuka, Y., Toyoyama, H., Yanagi, M., Matsumoto, H., Nishijima, H., Shimotakahara, T., Aikou, T., and Sato, E. (2000) Expression of thrombomodulin in squamous cell carcinoma of the lungs: its relationship to lymph node metastasis and prognosis of the patients. *Cancer Lett.* **149**, 95-103
 20. Takebayashi, Y., Yamada, K., Maruyama, I., Fujii, R., Akiyama, S., and Aikou, T. (1995) The expression of thymidine phosphorylase and thrombomodulin in human colorectal carcinomas. *Cancer Lett.* **92**, 1-7
 21. Ordonez, N.G. (1997) Value of thrombomodulin immunostaining in the diagnosis of transitional cell carcinoma: a comparative study with carcinoembryonic antigen. *Histopathology* **31**, 517-524
 22. Ordonez, N.G. (1998) Thrombomodulin expression in transitional cell carcinoma. *Am. J. Clin. Pathol.* **110**, 385-390
 23. Matsumoto, M., Natsugoe, S., Nakashima, S., Shimada, M., Nakano, S., Kusano, C., Baba, M., Takao, S., Matsushita, Y., and Aikou, T. (2000) Biological evaluation of undifferentiated carcinoma of the esophagus. *Ann. Surg. Oncol.* **7**, 204-209
 24. Suehiro, T., Shimada, M., Matsumata, T., Taketomi, A., Yamamoto, K., and Sugimachi, K. (1995) Thrombomodulin inhibits intrahepatic spread in human hepatocellular carcinoma. *Hepatology* **21**, 1285-1290
 25. Wilhelm, S., Schmitt, M., Parkinson, J., Kuhn, W., Graeff, H., and Wilhelm O.G. (1998) Thrombomodulin, a receptor for the serine protease thrombin, is decreased in primary tumors and metastases but increased in ascitic fluids of patients with advanced ovarian cancer FIGO IIIc. *Int. J. Oncol.* **13**, 645-651
 26. Lindahl, A.K., Boffa, M.C., and Abildgaard, U. (1993) Increased plasma thrombomodulin in cancer patients. *Thromb. Haemost.* **69**, 112-114
 27. Boffa, M.C., Lapeyriere, C., Berard, M., Lindahl, A.K., Flageul, B., Chemaly, P., Abildgaard, U., and Dubertret, L. (1994) Plasma thrombomodulin level in malignancy varies according to the tumor type. *Nouv. Rev. Fr. Hematol.* **36**, S87-88
 28. Salmaggi, A., Eoli, M., Frigerio, S., Ciusani, E., Silvani, A., and Boiardi, A. (1999) Circulating intercellular adhesion molecule-1 (ICAM-1), vascular cell adhesion molecule-1 (VCAM-1) and plasma thrombomodulin levels in glioblastoma patients. *Cancer Lett.* **146**, 169-172
 29. Liotta, L.A. (1986) Tumor invasion and metastases-role of the extracellular matrix: Rhoads Memorial Award lecture. *Cancer Res.* **46**, 1-7
 30. Terranova, V.P., Hujanen, E.S., and Martin, G.R. (1986) Basement membrane and the invasive activity of metastatic tumor cells. *J. Natl. Cancer Inst.* **77**, 311-316
 31. Gomi, K., Zushi, M., Honda, G., Kawahara, S., Matsuzaki, O., Jr., Kanabayashi, T., Yamamoto, S., Maruyama, I., and Suzuki, K. (1990) Antithrombotic effect of recombinant human thrombomodulin on thrombin-induced thromboembolism in mice. *Blood* **75**, 1396-1399
 32. Niimi, S., Oshizawa, T., Naotsuka, M., Ohba, S., Yokozawa, A., Murata, T., and Hayakawa, T. (2002) Establishment of a standard assay method for human thrombomodulin and determination of the activity of the Japanese reference standard. *Biologicals* **30**, 69-76
 33. Kawabata, S., Miura, T., Morita, T., Kato, H., Fujikawa, K., Iwanaga, S., Takada, K., Kimura, T., and Sakakibara, S. (1988) Highly sensitive peptide-4-methylcoumaryl-7-amide substrates for blood-clotting proteases and trypsin. *Eur. J. Biochem.* **172**, 17-25
 34. Deryugina, E.I., Luo, G.X., Reisfeld, R.A., Bourdon, M.A., and Strongin, A. (1997) Tumor cell invasion through matrigel is regulated by activated matrix metalloproteinase-2. *Anticancer Res.* **17**, 3201-3210
 35. Greenwood, F.C., Hunter, W.M., Glover, J.S. (1963) The preparation of ¹³¹I-labelled human growth hormone of high specific radioactivity. *Biochem. J.* **89**, 114-123
 36. Haeuptle, M.T., Aubert, M.L., Djiane J., Kraehenbuhl, J.P. (1983) Binding sites for lactogenic and somatogenic hormones from rabbit mammary gland and liver. *J. Biol. Chem.* **258**, 305-314
 37. Matsushita, Y., Yoshiie, K., Imamura, Y., Ogawa, H., Imamura, H., Takao, S., Yonezawa, S., Aikou, T., Maruyama, I., and Sato, E. (1998) A subcloned human esophageal squamous cell carcinoma cell line with low thrombomodulin expression showed increased invasiveness compared with a high thrombomodulin-expressing clone—thrombomodulin as a possible candidate for an adhesion molecule of squamous cell carcinoma. *Cancer Lett.* **127**, 195-201
 38. Hosaka, Y., Higuchi, T., Tsumagari, M., and Ishii, H. (2000) Inhibition of invasion and experimental metastasis of murine melanoma cells by human soluble thrombomodulin. *Cancer Lett.* **161**, 231-240
 39. Zhang, Y., Weiler-Guettler, H., Chen, J., Wilhelm, O., Deng, Y., Qiu, F., Nakagawa, K., Klevesath, M., Wilhelm, S., Bohrer, H., Nakagawa, M., Graeff, H., Martin, E., Stern, D.M., Rosenberg, R.D., Ziegler, R., and Nawroth, P.P. (1998) Thrombomodulin modulates growth of tumor cells independent of its anticoagulant activity. *J. Clin. Invest.* **101**, 1301-1309
 40. Maruyama, I. and Majerus, P.W. (1985) The turnover of thrombin-thrombomodulin complex in cultured human umbilical vein endothelial cells and A549 lung cancer cells. Endocytosis and degradation of thrombin. *J. Biol. Chem.* **260**, 15432-15438
 41. Hart, I.R., Goode, N.T., and Wilson, R.E. (1989) Molecular aspects of the metastatic cascade. *Biochim. Biophys. Acta* **989**, 65-84
 42. Wells, A. (2000) Tumor invasion: role of growth factor-induced cell motility. *Adv. Cancer Res.* **78**, 31-101
 43. Matrisian, L.M. (1990) Metalloproteinases and their inhibitors in matrix remodeling. *Trends Genet.* **6**, 121-125
 44. Collier, I.E., Wilhelm, S.M., Eisen, A.Z., Marmer, B.L., Grant, G.A., Seltzer, J.L., Kronberger, A., He, C.S., Bauer, E.A., and Goldberg, G.I. (1988) H-ras oncogene-transformed human bronchial epithelial cells (TBE-1) secrete a single metalloprotease capable of degrading basement membrane collagen. *J. Biol. Chem.* **263**, 6579-6587
 45. Wilhelm, S.M., Collier, I.E., Marmer, B.L., Eisen, A.Z., Grant, G.A., and Goldberg, G.I. (1989) SV40-transformed human lung fibroblasts secrete a 92-kDa type IV collagenase which is identical to that secreted by normal human macrophages. *J. Biol. Chem.* **264**, 17213-17221
 46. Fessler, L.I., Duncan, K.G., Fessler, J.H., Salo, T., and Tryggvason, K. (1984) Identification of the procollagen IV cleavage products produced by a specific tumor collagenase. *J. Biol. Chem.* **259**, 9783-9789
 47. Woessner, J.F. Jr. (1991) Matrix metalloproteinases and their inhibitors in connective tissue remodeling. *FASEB J.* **5**, 2145-2154
 48. Senior, R.M., Griffin, G.L., Fliszar, C.J., Shapiro, S.D., Goldberg, G.I., and Welgus, H.G. (1991) Human 92- and 72-kilodalton type IV collagenases are elastases. *J. Biol. Chem.* **266**, 7870-7875
 49. Murphy, G., Cockett, M.I., Ward, R.V., and Docherty, A.J. (1991) Matrix metalloproteinase degradation of elastin, type IV collagen and proteoglycan. A quantitative comparison of the activities of 95 kDa and 72 kDa gelatinases, stromelysins-1 and -2 and punctuated metalloproteinase (PUMP). *Biochem. J.* **277**, 277-279
 50. Nguyen, Q., Murphy, G., Hughes, C.E., Mort, J.S., and Roughley, P.J. (1993) Matrix metalloproteinases cleave at two distinct sites on human cartilage link protein. *Biochem. J.* **295**, 595-598

51. Fosang, A.J., Last, K., Knauper, V., Neame, P.J., Murphy, G., Hardingham, T.E., Tschesche, H., and Hamilton, J.A. (1993) Fibroblast and neutrophil collagenases cleave at two sites in the cartilage aggrecan interglobular domain. *Biochem. J.* **295**, 273–276
52. Sires, U.I., Griffin, G.L., Broekelmann, T.J., Mecham, R.P., Murphy, G., Chung, A.E., Welgus, H.G., and Senior, R.M. (1993) Degradation of entactin by matrix metalloproteinases. Susceptibility to matrilysin and identification of cleavage sites. *J. Biol. Chem.* **268**, 2069–2074
53. Zucker, S., Conner, C., DiMassmo, B.I., Ende, H., Drews, M., Seiki, M., and Bahou, W.F. (1995) Thrombin induces the activation of progelatinase A in vascular endothelial cells. Physiologic regulation of angiogenesis. *J. Biol. Chem.* **270**, 23730–23738
54. Galis, Z.S., Kranzhofer, R., Fenton, J.W. II., and Libby, P. (1997) Thrombin promotes activation of matrix metalloproteinase-2 produced by cultured vascular smooth muscle cells. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* **17**, 483–489
55. Nguyen, M., Arkell, J., and Jackson, C.J. (1999) Thrombin rapidly and efficiently activates gelatinase A in human microvascular endothelial cells via a mechanism independent of active MT1 matrix metalloproteinase. *Lab. Invest.* **79**, 467–475
56. Pekovich, S.R., Bock, P.E., and Hoover, R.L. (2001) Thrombin-thrombomodulin activation of protein C facilitates the activation of progelatinase A. *FEBS Lett.* **694**, 129–132
57. Lafleur, M.A., Hollenberg, M.D., Atkinson, S.J., Knauper, V., Murphy, G., and Edwards, D.R. (2001) Activation of pro-matrix metalloproteinase-2 (pro-MMP-2) by thrombin is membrane-type-MMP-dependent in human umbilical vein endothelial cells and generates a distinct 63 kDa active species. *Biochem. J.* **357**, 107–115
58. Maragoudakis, M.E., Kraniti, N., Giannopoulou, E., Alexopoulos, K., and Matsuokas, J. (2001) Modulation of angiogenesis and progelatinase A by thrombin receptor mimetics and antagonists. *Endothelium* **8**, 195–205
59. Liu, Y., Gilcrease, M.Z., Henderson, Y., Yuan, X.H., Clayman, G.L., and Chen, Z. (2001) Expression of protease-activated receptor 1 in oral squamous cell carcinoma. *Cancer Lett.* **169**, 173–180
60. Stetler-Stevenson, W.G., Aznavoorian, S., and Liotta, L.A. (1993) Tumor cell interactions with the extracellular matrix during invasion and metastasis. *Annu. Rev. Cell. Biol.* **9**, 541–573
61. Himelstein, B.P., Canete-Soler, R., Bernhard, E.J., Dilks, D.W., and Muschel, R.J. (1994) Metalloproteinases in tumor progression: the contribution of MMP-9. *Invasion Metastasis.* **14**, 246–258
62. Bernhard, E.J., Gruber, S.B., and Muschel, R.J. (1994) Direct evidence linking expression of matrix metalloproteinase 9 (92-kDa gelatinase/collagenase) to the metastatic phenotype in transformed rat embryo cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **91**, 4293–4297
63. MacDougall, J.R., and Matrisian, L.M. (1995) Contribution of tumor and stromal matrix metalloproteinases to tumor progression, invasion and metastasis. *Cancer Metastasis Rev.* **14**, 351–362
64. Hua, J. and Muschel, R.J. (1996) Inhibition of matrix metalloproteinase 9 expression by a ribozyme blocks metastasis in a rat sarcoma model system. *Cancer Res.* **56**, 5279–5284
65. Kim, J., Yu, W., Kovalski, K., and Ossowski, L. (1998) Requirement for specific proteases in cancer cell intravasation as revealed by a novel semiquantitative PCR-based assay. *Cell* **94**, 353–362
66. Hahn-Dantona, E., Ramos-DeSimone, N., Siple, J., Nagase, H., French, D.L., and Quigley, J.P. (1999) Activation of proMMP-9 by a plasmin/MMP-3 cascade in a tumor cell model. Regulation by tissue inhibitors of metalloproteinases. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **878**, 372–387
67. John, A. and Tuszynski, G. (2001) The role of matrix metalloproteinases in tumor angiogenesis and tumor metastasis. *Pathol. Oncol. Res.* **7**, 14–23
68. Giannelli, G. and Antonaci, S. (2002) Gelatinases and their inhibitors in tumor metastasis: from biological research to medical applications. *Histol. Histopathol.* **17**, 339–345
69. Fernandez-Patron, C., Zhang, Y., Radomski, M.W., Hollenberg, M.D., and Davidge, S.T. (1999) Rapid release of matrix metalloproteinase (MMP)-2 by thrombin in the rat aorta: modulation by protein tyrosine kinase/phosphatase. *Thromb. Haemost.* **82**, 1353–1357
70. Duhamel-Clérin, E., Orvain, C., Lanza, F., Cazenave, J.P., and Klein-Soyer, C. (1997) Thrombin receptor-mediated increase of two matrix metalloproteinases, MMP-1 and MMP-3, in human endothelial cells. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* **17**, 1931–1938
71. Liu, W.H., Chen, X.M., and Fu, B. (2000) Thrombin stimulates MMP-9 mRNA expression through AP-1 pathway in human mesangial cells. *Acta. Pharmacol. Sin.* **21**, 641–645
72. Yoshida, E., Verrusio, E.N., Mihara, H., Oh, D., and Kwaan, H.C. (1994) Enhancement of the expression of urokinase-type plasminogen activator from PC-3 human prostate cancer cells by thrombin. *Cancer Res.* **54**, 3300–3304
73. Benezra, M., Vlodaysky, I., and Bar-Shavit, R. (1992) Thrombin enhances degradation of heparan sulfate in the extracellular matrix by tumor cell heparanase. *Exp. Cell Res.* **201**, 208–215

バイオロジクスのトランスレーショナルリサーチ (その1)

最近医薬品を含めた医療技術開発におけるトランスレーショナルリサーチ (TR) の重要性が叫ばれ、様々な学会等でトピックとして取り上げられている。我が国の医薬品開発環境の最も大きな問題点の一つは、臨床研究環境の未整備であることは衆目の一致するところであるが、取り上げられる機会が多い割には、TRの要点についての理解は必ずしも深まっではないように思われる。そこで本稿ではバイオロジクス、特に筆者の専門とするバイオテクノロジー応用医薬品 (バイオ医薬品) の開発を目指してTRを実施する上で考慮すべき点を、規制ガイドラインを参考に、2回に分けて考えてみる。

TRの本来の意味は、「探索的臨床研究=基礎的研究成果を臨床へ導入するための臨床開発の初期段階のプロセス」であるが、今現在本来の意味のTRを行う上での条件等を定めた公的なガイドラインはない。しかしTRの対象を治験レベルまで広げると、その実施の条件、および注意点は既存の各種ガイドライン等から浮かび上がる。

バイオ医薬品の中で既に最も実用化が実現している医薬品は、遺伝子組換え技術や細胞培養技術を用いて製造されたタンパク質性医薬品 (エリスロポエチン、インスリン類、成長ホルモン、インターフェロン、ヒトモノクローナル抗体等) であるが、我が国においてこれら医薬品開発にあたってまず参照すべきガイドラインは、(1)薬審第243号通知 (昭和59年3月30日) 「組換えDNA技術応用医薬品ガイドライン」；(2)薬審第1第10号通知 (昭和63年6月6日) 「細胞培養技術応用医薬品ガイドライン」；(3)都道府県衛生主管部 (局) 業務主管課宛事務連絡 (平成元年5月) 「薬審第1第10号通知に関する質疑応答」である。しかしその後、医薬品の開発段階で考慮することが必要な技術的要件に関するICH国際調和ガイドラインが作成され、国内ガイドラインとして公表されている。これらは企業による新薬開発を対象としたものであるが、生体内タンパク質の医薬品への応用をめざしたトランスジェニックリサーチの実施の条件を考える上での参考となる。以下がこれらのガイドラインである：(1)「遺伝子発現構成体ガイドライン (厚生省医薬安全局審査管理課長通知 医薬審第3号 平成10年1月6日)」：主として遺伝子組換え技術を用いて医薬品製造用細胞を作製する場合の遺伝子発現構成体の設計、作製、細胞への導入、導入後の安定性チェックに関する注意点；(2)「細胞基材ガイドライン (厚生省医薬安全局審査管理課長通知 医薬審第873号 平成12年7月14日)」：バイオ医薬品の製造に使用する細胞基材の由来、調整、特性

解析、管理に関する注意点；(3)「安定性ガイドライン (厚生省医薬安全局審査管理課長通知 医薬審第6号 平成10年1月6日)」：タンパク質性医薬品の安定性試験に関する注意点；(4)「ウイルス安全性ガイドライン (厚生省医薬安全局審査管理課長通知 医薬審第329号 平成12年2月22日)」：製品のウイルス汚染に関する配慮、試験に関する注意点；(5)「タンパク質性医薬品の特性解析・品質規格ガイドライン (厚生省医薬安全局審査管理課長通知 医薬審第571号 平成13年5月1日)」：医薬品の特性解析および品質規格設定にあたっての注意点；(6)「同等性・同質性ガイドライン (厚生労働省医薬食品局審査管理課長通知 薬食審発第0426001号 平成17年4月26日)」：製造工程の変更にとまなう医薬品の同等性/同質性評価にあたっての注意点；(7)「非臨床安全性評価ガイドライン (厚生省医薬安全局審査管理課長通知 医薬審第326号 平成12年2月22日)」：臨床試験に先立つ非臨床安全性試験に関する注意点。

これらタンパク質性医薬品を低分子化学合成医薬品と比較すると、(1)タンパク質の高次構造解析に限界があるため、構造の完全な同定、確認がしばしば困難であり、生物活性に基づく評価が重要；(2)製造の一定性を確保することが困難な細胞を利用して製造し、また翻訳後修飾等により分子多様性がある物質が多いので、物質の一定性の確保が重要；(3)常温で不安定な物質が多く、実時間で安定性の確認および保存条件の確保が重要；(4)製造に生体由来原料を使用するので、感染症に対する配慮が重要；(5)品質確保のために遺伝子発現構成体、細胞基材、宿主由来不純物など製造工程管理が重要；(6)物質としては天然のタンパク質に近いので、薬理作用および作用メカニズムの予測は容易であるが、種差により動物を用いた非臨床試験が不適切な場合もある；(7)体内動態試験は方法論に限界がある場合がある；(8)ヒトタンパク質の場合、種差、抗原性等により、げっ歯類動物を用いた非臨床安全性試験の予測性に限界がある、といった特徴がある。とりわけバイオロジクスの場合は被験物質の一定性の確保は、いかなるTRにおいてもデータの信頼性をはかる上で極めて重要であり、大学等での研究では見逃されがちな点である。(次号に続く)

国立医薬品食品衛生研究所 生物薬品部
川西 徹 Toru Kawanishi
e-mail: kawanish@nihs.go.jp

キーワード：トランスレーショナルリサーチ、
バイオロジクス、創薬

抗体医薬の現状と展望

新見 伸吾*, 原島 瑞*, 川西 徹*, 早川 堯夫**

(受付:平成17年1月21日, 受理:平成17年3月9日)

State and Perspective of Antibody Therapeutics

Shingo NIIMI*, Mizuho HARASHIMA*,
Toru KAWANISHI* and Takao HAYAKAWA**

はじめに

抗体医薬の始まりは19世紀終わりのエミール・ペーリングと北里柴三郎による血清療法にさかのぼる。彼等は加熱変性させたジフテリア菌毒素をウサギに注射することにより、ジフテリアに対する抵抗性を獲得させた。更に、そのウサギの血清を他のウサギに注射すると、ジフテリアに対する抵抗性をワクチンの接種されていないウサギに移せることを発見し、これをヒトに応用した¹⁾。その後、ヒト血液から精製したガンマーグロブリン製剤が開発され老人や術後の患者の日和見感染症、川崎病の自己免疫病に多用されている。

1975年にモノクローナル抗体作成技術がケラーとミルシュタインにより²⁾開発されてから、対象となるターゲットに対して高親和性と特異性の高いマウスモノクローナル抗体については基礎研究だけでなく治療薬を目指した膨大な研究が行われてきた。実際、モノクローナル抗体治療薬は①分子化合物に比較して基本的に細胞毒性が低いもしくは無い、②比較的長期にわたり血中濃度の維持が容易である、③結合対象となるリガンド選択性・特異性に優れている、④抗原の捕捉だけでなく生体内からの排除が

可能であるといったメリットがある。しかしながら、マウスモノクローナル抗体の治療薬としての利用はヒトへの免疫原性により繰り返し投与時の効果の減弱、アナフィラキシーショックの危険性のために、非常に限られたものであった。そこで今日までに、免疫原性、アナフィラキシーショックの危険性を低減し、繰り返し投与を可能にするヒト型モノクローナル抗体を作成する様々な技術が生み出された。このようにして作成されたヒト型モノクローナル抗体の一部は医薬品として承認され臨床で用いられており、現在臨床応用を目指して開発中のものも多い (Table 1, Table 2)。そこで本稿においては抗体医薬の基礎と臨床応用、問題点等について概説する。

1. 抗体医薬の作成

1.1 キメラ抗体, ヒト化抗体

キメラ抗体は遺伝子組換え技術を用いてマウスモノクローナル抗体の定常 constant (C) 領域をヒト抗体の C 領域に置き換えたものである³⁾ (Fig. 1)。更にヒト化抗体は抗体タンパク質の三次元構造をもとに、抗原が実際に結合する相補性決定領域 complementarity determining region (CDR) の1から3を残して、それ以外の部分であるフレーム領域

* 国立医薬品食品衛生研究所生物薬品部 東京都世田谷区上用賀 1-18-1 (〒158-8501)
Division of Biological Chemistry and Biologocals, National Institute of Health Sciences, 1-18-1
Kamiyoga, Setagaya-ku, Tokyo 158-8501, Japan

** 国立医薬品食品衛生研究所 東京都世田谷区上用賀 1-18-1 (〒158-8501)
National Institute of Health Sciences, 1-18-1 Kamiyoga, Setagaya-ku, Tokyo 158-8501, Japan

Table 1 認可された抗体医薬

商品名 (抗体名)	企業	日本での 販売元	タイプ (抗原)	適応症	認可 (年)
Repro [®] (Abciximab)	Centocor社/ Eli Lilly社		キメラ (gp II b III a)	PTCA 後再狭窄	1994
Rituxan [®] (Rituximab)	IDEC社/Roche 社/Genentech社	全薬工業(株)	キメラ (CD20)	ノンホジキン リンホーマ	1997
Zenepax [®] (Daclizumab)	Roche社		ヒト化 (IL-2R)	腎移植	1997
Remicade [®] (Avakine)	Centocor社		キメラ (TNF- α)	クローン病 慢性関節リウマチ	1998
Synagis [®] (Palivizumab)	MedImmune社/ Abott社		ヒト化 (RSV)	RSV 小児感染	1998
Simulect [®] (Basilicimab)	Novartis社		ヒト化 (IL-2)	腎移植	1998
Herceptin [®] (Trastuzumab)	Genentech社/ Roche社	日本ロシュ(株)	ヒト化 (HER2)	乳癌	1998
Mylotarg [®] (Gemtuzumab)	Celltech社/ AHP社		抗癌剤-コンジュゲート (CD33)	急性骨髄性白血病	2000
Zevalin [®] (Iritumomab)	IDEC社/ Schering AG社		⁹⁰ Y-コンジュゲート (CD20)	ノンホジキン リンホーマ	2002
Bexxar [®] (Tositumomab)	Coulter社/ SKB社		¹³¹ I-コンジュゲート (CD20)	ノンホジキン リンホーマ	2002

(文献 122 より許可を得て転載)

Table 2 開発中の抗体医薬

段階	数					
	合計	キメラ抗体	ヒト化抗体	完全ヒト抗体	マウス抗体	その他
発売中	11	4	5	0	2	0
申請中	3	0	1	1	1	0
フェーズⅢ	20	1	9	2	8	0
フェーズⅡ	60	7	25	15	4	9
フェーズⅠ	35	5	13	6	6	5
合計	129	17	53	24	21	14

(2003年1月時点) (文献 123 より許可を得て転載)

frame region (FR) をすべてヒト抗体に置き換えたものである⁴⁾ (Fig. 1). 以下に、マウスハイブリドーマ細胞から、遺伝子としてcDNAを用い遺伝子組換え法によるキメラ抗体、ヒト化抗体の作製法を紹介する。

第一のステップは、マウス抗体産生ハイブリドーマからのマウス抗体をコードする遺伝子(以下マウス抗体遺伝子)のクローニングである。ハイブリド

ーマ細胞よりRNAを抽出し、①cDNAを作製後、ブランクハイブリダイゼーション法あるいはPCR法により抗体遺伝子をクローニングするか、②RNAより直接PCR法により抗体遺伝子をクローニングする方法が用いられている。ハイブリドーマ細胞は、目的の抗体遺伝子以外に、融合パートナーのミエローマ由来の抗体遺伝子、タンパク質に翻訳されない偽抗体遺伝子が含まれていることもある。

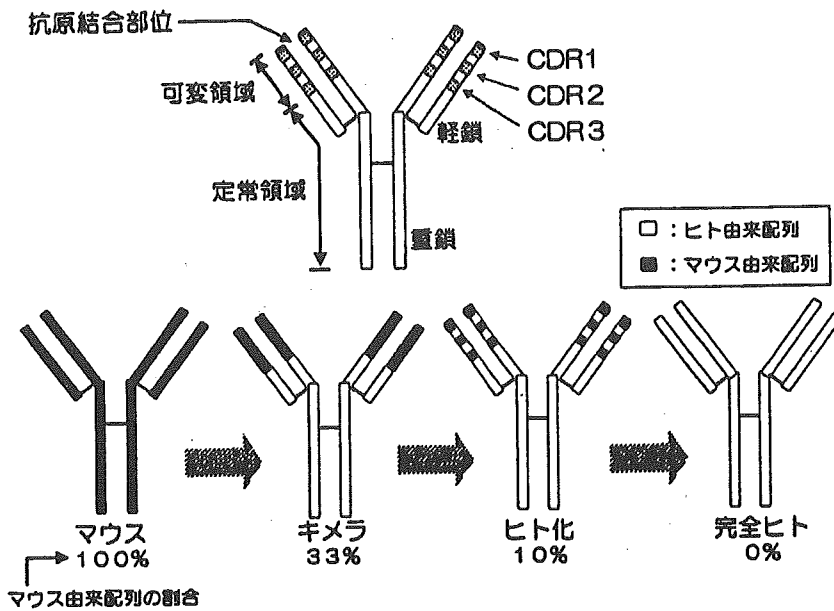


Fig.1 抗体の構造（上段）及びマウスモノクローナル抗体のヒトに対する抗原性低減技術の進展（下段）
（文献 124 より許可を得て転載）

したがって、精製したモノクローナル抗体 V 領域のアミノ酸配列を一部決定し、クローニングした抗体遺伝子と一致しているか確認することが重要である。

キメラ抗体は、クローニングしたマウス抗体の variable (V) 領域遺伝子にヒトの C 領域遺伝子を連結し、適当な発現ベクターに挿入して培養細胞で生産する。また、抗体産生ハイブリドーマのマウス Ig C 領域をヒト Ig C 領域に組換える相同組換え法やトランスジェニックマウスによっても作成される。

ヒト化抗体遺伝子の作製は以下の複雑なステップからなる。ヒト化抗体作製の第一ステップでは、クローニングしたマウス抗体可変 (V) 領域における抗原との結合に寄与する超可変領域 (CDR) 配列とヒト抗体 V 領域におけるアイソタイプ固有のアミノ酸配列をもつフレームワーク領域 (FR) からなる V 領域をコードする遺伝子を構築する。ヒト化抗体作製における最も重要な点は、CDR を移植するヒト FR 領域のデザインである。マウス抗体の CDR を単純にヒト FR へ移植した抗体では、結合活性の低下、消失がみられる。これはマウス FR 領域中のいくつかのアミノ酸が CDR の高次構造維持に大きな影響を与えており、それらのアミノ酸残基を

CDR とともに移植しなければいけないことを示している。CDR の高次構造に影響を与えるアミノ酸残基がいくつか同定されているが⁶⁾、その法則は確立されておらず、コンピューターモデリングなどを組み合わせて個々の抗体で試行錯誤しているのが現状である⁹⁾。また、この方策として目的のマウス抗体 V 領域と最も高いホモロジーを示すヒト抗体 V 領域を選択し、その FR 領域を用いている場合もある。

最終的に、構築された抗体 heavy (H) 鎖及び light (L) 鎖遺伝子が挿入された発現ベクターを動物細胞に導入し、遺伝子組換え抗体を発現する。現在、上市されている抗体の製造細胞で実績があるのは、チェーンズハムスター卵巣由来の CHO 細胞、マウスミエローマ由来の NS0 細胞及び SP2/0 細胞である⁷⁾。動物細胞が産生に用いられるのは以下の理由による。まず、抗体は H 鎖及び L 鎖各 2 本が複数の S-S 結合を介して結合しており、正確な立体構造の構築には動物細胞での発現が最適である。また、抗体の Fc 領域には N 型糖鎖が結合しており、糖鎖は C_H2 ドメインの立体構造の維持、後述する複数のエフェクター活性に必須である。したがって、動物細胞で発現しないと糖鎖が付加されないため、抗体のエフェクター活性が損なわれてしまうからで

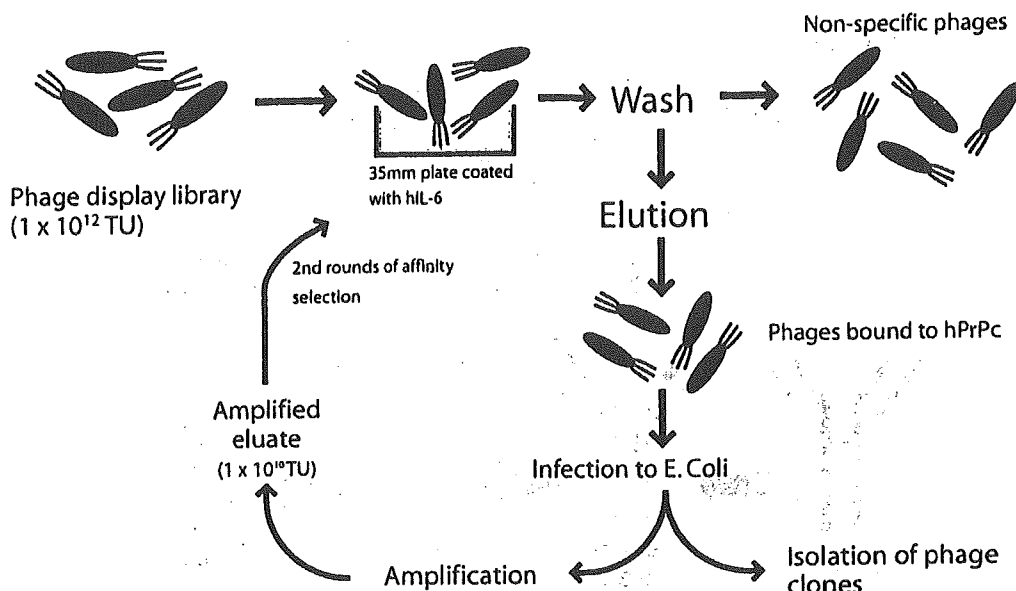


Fig. 2 ファージディスプレイライブラリーを用いたパンニング方法
(文献125より許可を得て転載)

ある。

1.2 ファージディスプレイヒト抗体

ファージディスプレイ法は大腸菌ウイルスの一つである M13 や T7 などの繊維状ファージのコートタンパク質 (g3p や g10p など) の N 末端側にファージの感染性を失わないよう外来遺伝子を融合タンパク質として発現させるシステムである⁹⁾。一度に 10⁷ 種類以上の多種類の分子種を呈示したライブラリーを構築でき、また粒子ごとに目的の機能や性質をもった分子種を選択できる。その技術を用いて外来遺伝子として抗体の結合部位である 2 つのポリペプチド鎖 V_H と V_L を短いリンカーで直列につないだ一本鎖 Fv single-chain Fv (scFv) をファージにディスプレイさせたものが抗体ファージライブラリーである^{19,10)}。そしてファージライブラリーからパンニングと呼ばれる固相化された抗原分子上で特異的抗体ファージを濃縮する操作を繰り返して特異的抗体ファージをスクリーニングする¹¹⁾ (Fig. 2)。それを最終的にファージから切り離したものがファージディスプレイ抗体である。

1.2.1 抗体ファージライブラリーの種類

現在、世界中で様々な抗体ライブラリーが作製・報告されているが、その抗体遺伝子ソースの性質の違いに応じて、以下の 3 つに分類される (Fig. 3)。

1.2.1.1 免疫ライブラリー

感染症回復者や対象抗原をワクチン接種して血中抗体価を上昇させたヒト、自己抗体を保有する患者、担癌患者などのリンパ球を出発材料として RT-PCR により増幅した V 遺伝子より構築したライブラリーである。中和抗体を有する各種感染症に対する抗体の創出に有効と考えられる。

最初から目的抗体遺伝子がライブラリー中に多く含まれていることから、比較的小さなサイズのライブラリーからでもかなり高い確率で特異性、親和性の高いヒト抗体を単離することが可能である。一方、対象抗原によっては、リンパ球ソースの入手方法の点など倫理的な面で問題となることもある。更に対象抗原ごとにあるいは患者ごとにライブラリーを構築しなければならないため、手間がかかるという欠点がある。本法により、ヒト血液凝固第 VIII 因子 (FVIII) に対するインヒビター抗体を有する患者より FVIII に高い親和性 (K_d=10⁻¹¹M) を有し、FVIII の活性を阻害する scFv クローンが得られている¹²⁾。

1.2.1.2 ナイーブ/非免疫ライブラリー

正常なヒトが保有する V_H, V_L 遺伝子を RT-PCR により分離し、ランダムに組み合わせた抗体可変領域ドメインを提示したライブラリーである。ヒトがもともと生体内に有し、産生している抗体可変領域を組み合わせるため、ヒト抗原に対する治療用のヒト抗体作製に、最もよく利用されて

ライブラリーの種類	合成	ナイーブ	非免疫	immune
使用組織	ヒト組織	末梢血, 骨髄, 扁桃腺などのリンパ球		感染症回復者や対象抗原をワクチン接種したあるいは自己抗体を保有する患者のリンパ球
V遺伝子の由来	再構成されていないV遺伝子断片	IgM mRNA 由来 再構成されたV遺伝子		IgG mRNA 由来 再構成されたV遺伝子
V遺伝子の組成	コントロール可能	← コントロールは困難		→
CDRの由来	合成・混合	← 天然型		→
ライブラリーの構築	←	基本的に1回	→	抗原ごとに作製
得られる抗体の親和性	←	ライブラリーのサイズと多様性に依存?	→	ライブラリーサイズは小さくても、(10 ⁸ 程度) 目的の抗原に対して比較的高い親和性を有するクローン分離可能
特異性	←	ほとんどの抗原	→	主に標的抗原

Fig. 3 合成, ナイーブ, 非免疫, immune 各ライブラリーの比較：ファージディスプレイヒト抗体ライブラリーの作成法による分類
(文献 126 より許可を得て転載)

いる。通常、正常人の末梢血、骨髄、扁桃腺などのリンパ球を出発材料とし、複数のドナーを用いることでより多くの多様性を有するライブラリーを構築する。このライブラリーでは用いるドナーがどのような疾病歴、抗体価、遺伝系などのバックグラウンドを有するかなどの選択が難しく、V 遺伝子の組成や由来のコントロールに課題がある。厳密に言えば抗原感作によるクラススイッチが起こっていないという観点から、IgM クラスの mRNA のみを V_H 遺伝子の増幅に用いているものが特にナイーブライブラリーと呼ばれる¹³⁾。以下にヒト抗体ライブラリーの構築 (B 細胞を出発材料としたナイーブ/非免疫ライブラリーの場合) 法の概略を示す¹⁴⁾ (Fig. 4)。

ヒトリンパ球由来 mRNA から、イムノグロブリンの γ , μ , κ , λ 鎖の C 領域に特異的なプライマーを用いて、V 遺伝子の cDNA を作製する。次に、各遺伝子 (γ , μ 鎖由来の V_H 並びに κ , λ 由来の V_L) を V 遺伝子ファミリーに特異的な DNA プライマーのセットを用いて V 遺伝子の cDNA を作製する。次に、各遺伝子 (γ , μ 鎖由来の V_H 並びに κ , λ 由来の V_L) を V 遺伝子ファミリーに特異的な DNA プライマーのセットを用いて合成し、それらリンカー DNA を用いて PCR により連結し、

scFv 遺伝子を作製する。それをファージタンパク質 g3p の N 末端に融合タンパク質遺伝子としてファージミドベクター上で連結させ (Fig. 4)、大腸菌に形質転換後、ヘルパーファージを用いて、ファージディスプレイ抗体ライブラリーを調製する。

1.2.1.3 合成ライブラリー

ヒト B 細胞内で実際に抗体産生に用いられている遺伝子を選び、V 遺伝子断片と CDR 3 領域に相当する適当な長さのランダムなアミノ酸配列をもつ合成 DNA を用いて抗体可変領域遺伝子を構築したライブラリーである^{15,16)}。最初から機能的な scFv を産生する V_H と V_L 遺伝子の組み合わせでライブラリーを構築することができるため、得られる抗体の発現効率や安定性が高いとされる。人工的なランダムオリゴ DNA を用いているため、ゲノム中の抗体遺伝子のみを利用した抗体ライブラリーより高い多様性が得られる。逆に特定の CDR 領域のみの多様性であるため、他の CDR 領域が多様性に寄与するような抗体は得られない。

1.3 トランスジェニックヒト抗体

完全なヒトモノクローナル抗体取得のもう一つの戦略は、ヒト抗体を産生するトランスジェニック動物の利用である。内因性 Ig をノックアウト (KO)

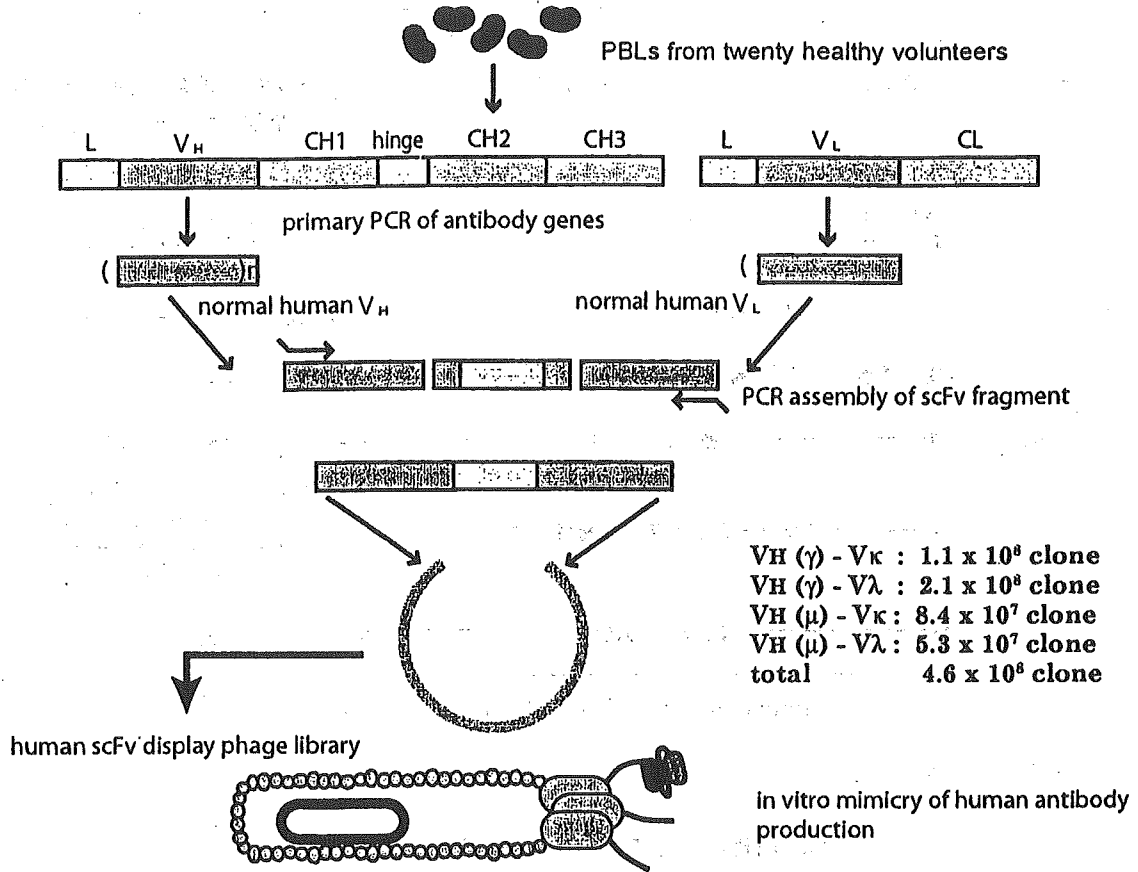


Fig. 4 ナイーブヒト抗体ファージライブラリー構築の概略
(文献 125 より許可を得て転載)

したマウスに機能的なヒトの Ig 遺伝子を導入すれば、マウス抗体の代わりに多様な抗原結合能を持つヒト抗体が産生されると考えられる。更に、このマウスを免疫すればヒトモノクローナル抗体を従来のハイブリドーマ法で容易に得ることが可能と考えられる。

1.3.1 ヒト抗体重鎖，軽鎖ミニ遺伝子を導入したヒト抗体産生マウス

ヒト抗体 H 鎖，L 鎖ミニ遺伝子を導入したトランスジェニックマウスとマウス内在性抗体遺伝子を破壊したノックアウトマウスを掛け合わせてヒト抗体産生マウスを作成する^{17,18)} (Fig. 5)。抗原を接種

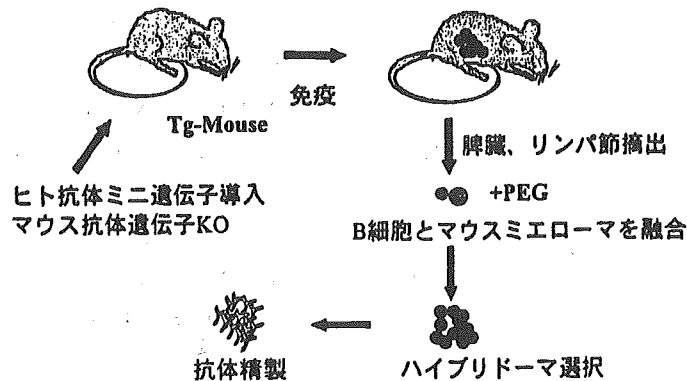


Fig. 5 トランスジェニックヒト抗体技術
(文献 127 より許可を得て転載)

したヒト抗体産生マウスから通常のハイブリドーマ法によりヒトモノクローナル抗体を作成する。また、抗原を接種したヒト抗体産生マウスの抗体産生細胞を胸腺から分離し、抽出した遺伝子を CHO 細胞に導入しヒト抗体を産生させる技術も開発されている (Fig. 6)。本法により IL-8, EGFR, TNF- α , CD4 などに対するヒト抗体が得られている。しかしながら、本法では用いるベクターにクローン可能な DNA 長は通常数 kb から数百 kb であり、ヒト抗体遺伝子の全長 (H 鎖 1.5 Mb, L 鎖 \times 2 Mb, L 鎖 λ 1 Mb) を入れることはできない。また、ヒト抗体の一部 (IgG の C 領域) はコスミド, BAC (バクテリアの人工染色体), YAC (酵母の人工染色体) にはクローン化できない。

一方、ヒト Ig 遺伝子において例えば、H 鎖の場合、14 番染色体上の約 1Mb にわたってクラスターを形成している約 80 種の V 断片, 約 30 種の D 断片, 6 種の J 断片が様々に組み合わせられた VDJ エクソンが抗原結合部位をコードするが、この過程 (VDJ 組換え) が抗体の多様性に大きな役割を果たしている (Fig. 7)。L 鎖 \times (2 番染色体, 約 2 Mb), L 鎖 λ (22 番染色体, 約 1 Mb) 遺伝子についても同様である。したがって、本法ではヒトで観察されるものと同様に多様な抗体レパートリーをマウスで再現するには限界があった。

1.3.2 KM マウス

このような問題を解決するためキリンビール社は以下のようにしてヒト抗体重鎖及び軽鎖 \times 遺伝子の全種類を導入したヒト抗体産生マウスを作製、ヒト抗体を産生することに成功した¹⁹⁾ (Fig. 8)。ま

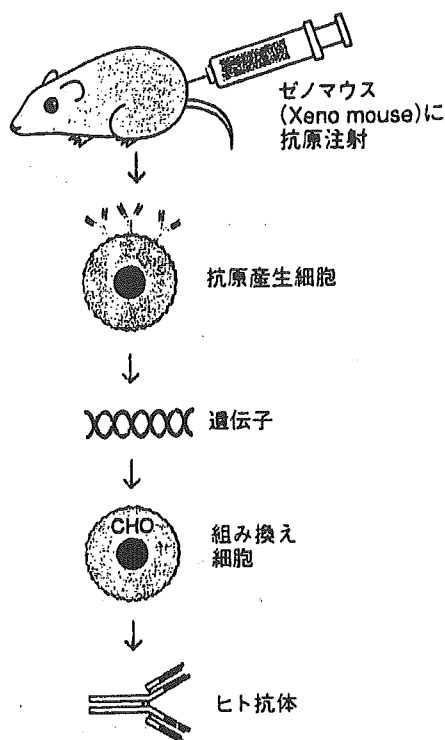


Fig. 6 アブジェニックス社のヒト抗体作製技術 (文献 123 より許可を得て転載)

ず、ヒト-マウスハイブリッド細胞の独立クローンからなるライブラリーをスクリーニングし、Ig 遺伝子を含むヒト染色体自然断片 (human chromosome fragment; hCF) のなかで H 鎖: 14 番染色体由来と L 鎖 \times : 2 番染色体由来を選抜する。選択細胞を 48 時間程度コルセミド処理することにより 1~数本の染色体が取り込まれた核膜構造体であるマイクロセルを形成させた。マイクロセルにサイトカラシン B を加えて遠心分離して脱核させ、染色体が 1 つ 1 つ

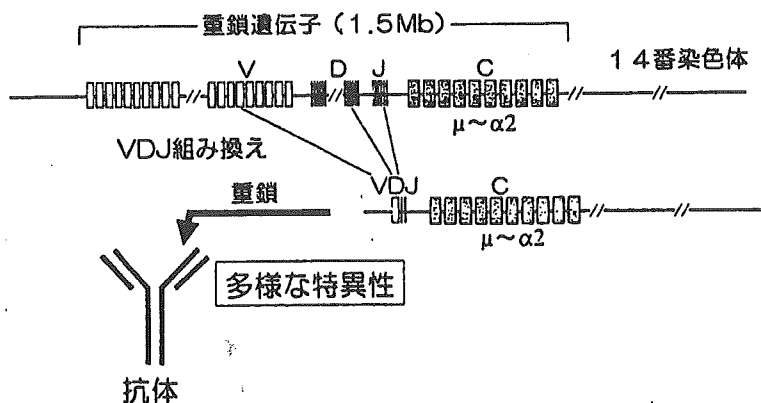


Fig. 7 ヒト抗体重鎖遺伝子の構造と VDJ 組換えによる多様性生成 (文献 124 より許可を得て転載)

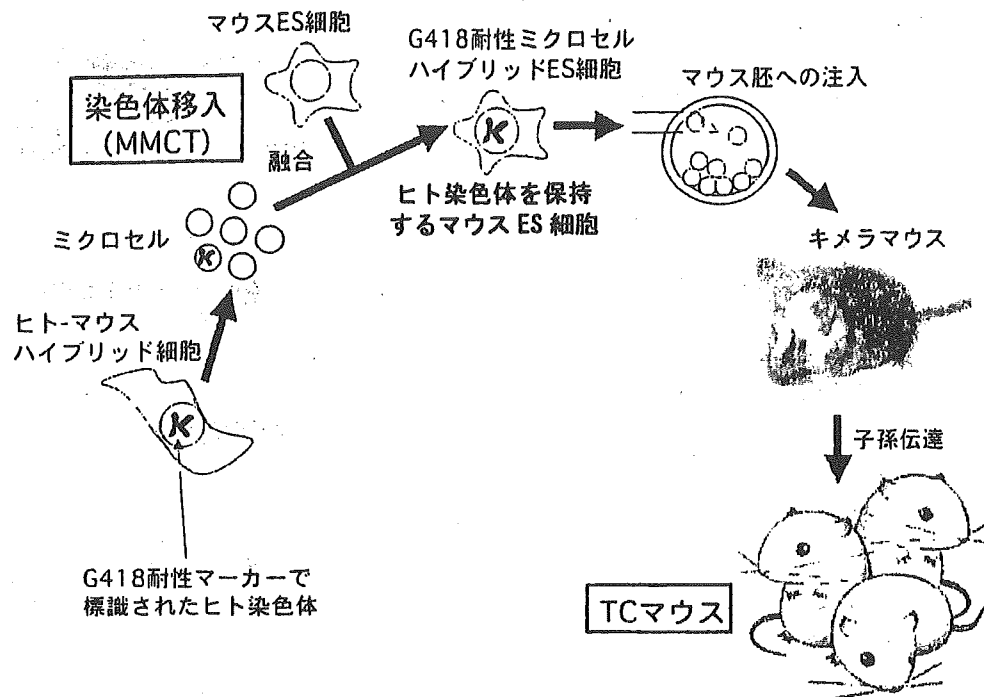


Fig. 8 トランスクロモマウス作成法の概略
(文献 124 より許可を得て転載)

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マクローンが取得された。しかし，そのハイブリドマ取得率は，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

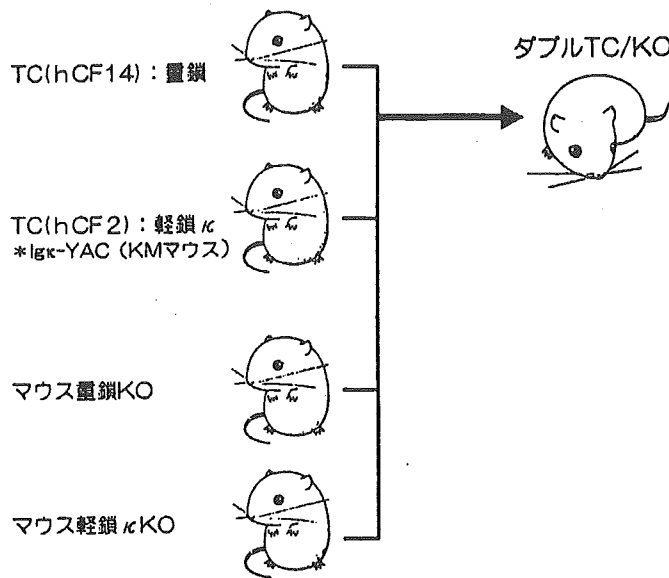


Fig. 9 ヒト抗体産生マウス (ダブル TC/KO) の作製
(文献 124 より許可を得て転載)

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。通常の 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

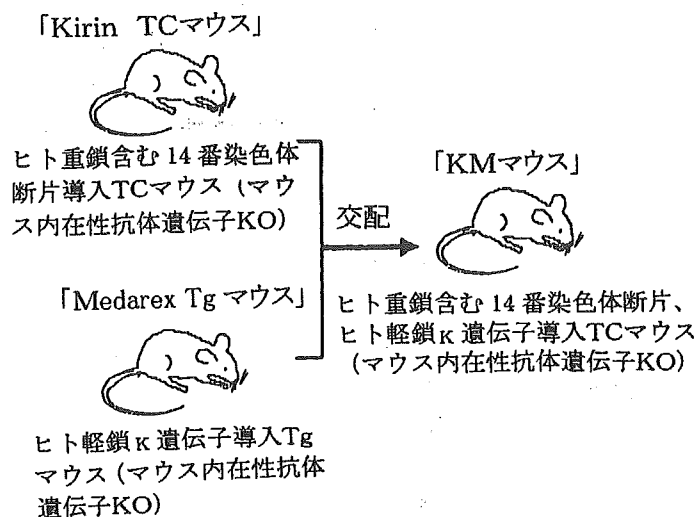


Fig. 10 KM マウスの作製
(文献 128 より許可を得て転載)

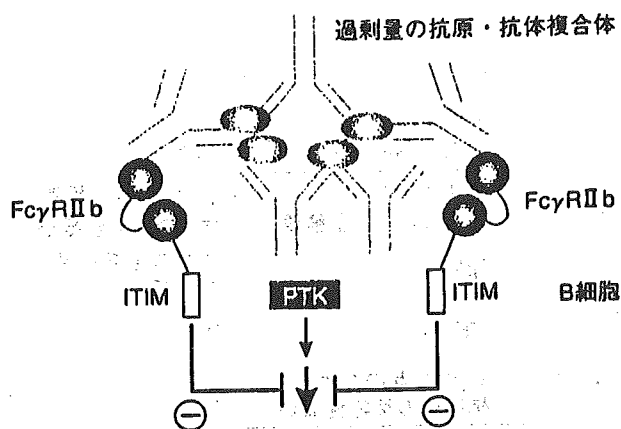


Fig. 11 FcγRIIb の機能
(文献 24 より許可を得て転載)

かった。一方、KM (FcγRIIb-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 Igl 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

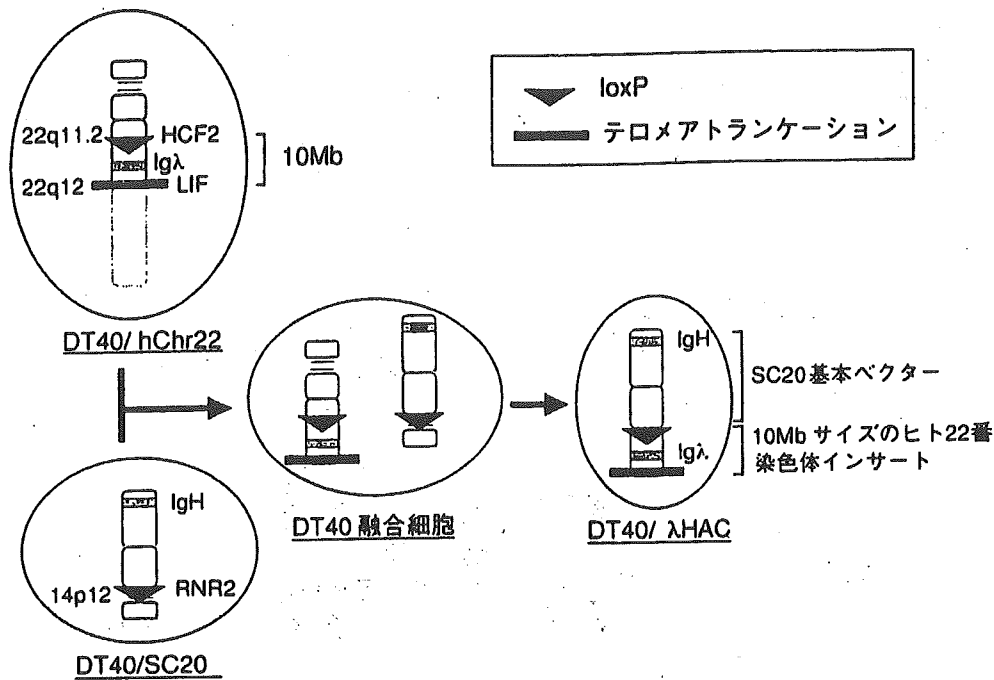


Fig. 12 ヒト人工染色体 (HAC) 構築法の概略
(文献 124 より許可を得て転載)

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。

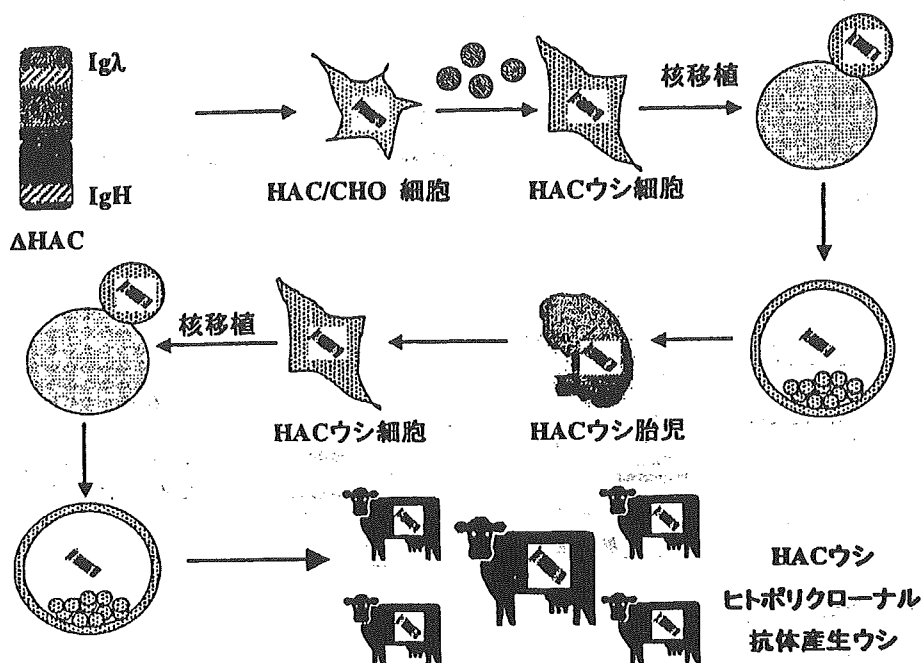


Fig. 13 ヒトポリクローナル抗体産生 (HAC) ウシの作成法
(文献 129 より許可を得て転載)

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。協和発酵で開発され、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

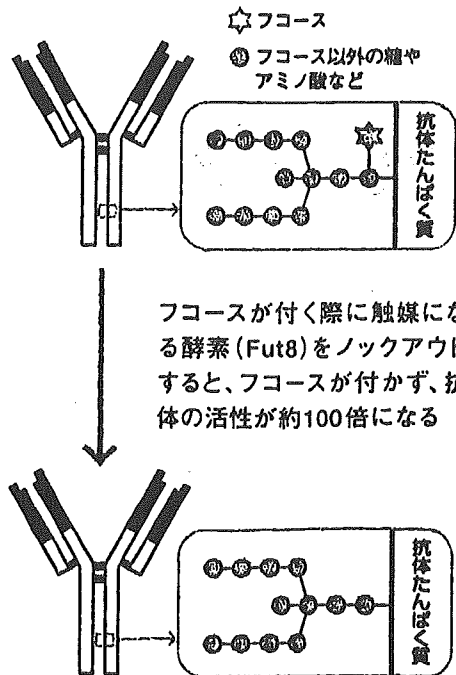


Fig. 14 フコスの低減技術
(文献 123 より許可を得て転載)

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場合には 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

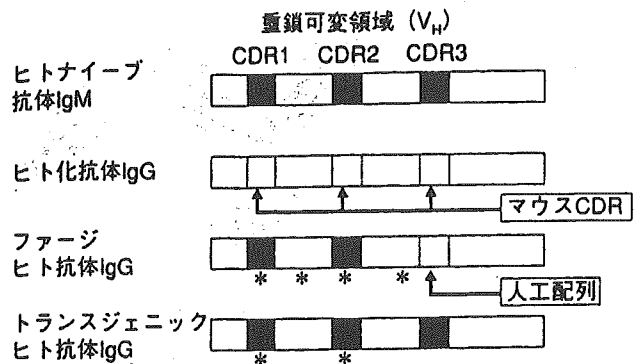


Fig. 15 HAHA の問題

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させて結合させ、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)

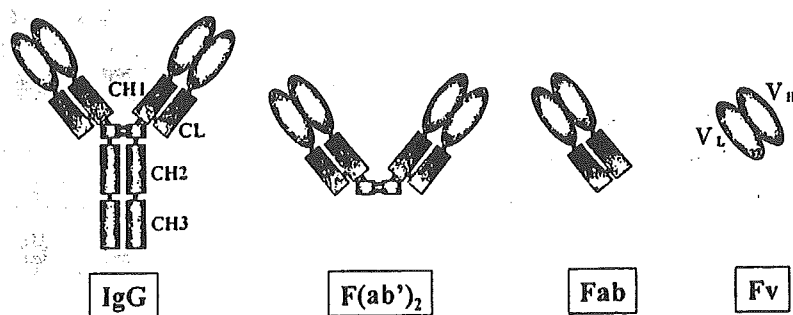


Fig. 16 各種抗体断片
(文献 132 より許可を得て転載)

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得るには抗体が 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^{19,21)}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 HAHA 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⁾。

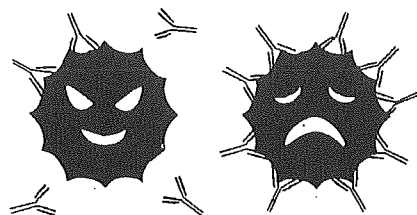
3. 抗体の生理活性機序

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



モノクローナル抗体

ポリクローナル抗体

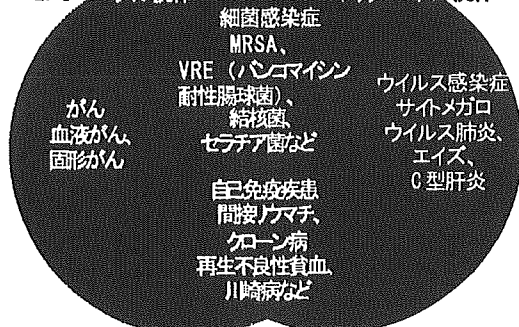


Fig. 17 モノクローナル抗体とポリクローナル抗体における効力の比較 (文献 123 より許可を得て転載)