

6-4. ウイルスベクターを用いた遺伝子導入	- 24
6-4-1. 野生型ウイルスの生物学的特徴及びヒトに対する影響	- 24
6-4-2. ウイルスベクターの作製方法	- 25
6-4-3. ウイルスベクターDNA の構造	- 27
6-4-4. ウイルスベクターの生物学的特徴	- 27
7. 安全性についての評価	
7-1. 遺伝子導入方法の安全性	- 29
7-1-1. 遺伝子導入に用いられるウイルスベクターの純度	- 29
7-1-2. 患者に投与される物質の純度及び安全性	- 33
7-1-3. 増殖性ウイルス出現の可能性	- 33
7-1-4. 遺伝子導入に用いるウイルスベクターの細胞傷害性	- 34
7-1-5. 体内の標的細胞以外の細胞への遺伝子導入の可能性	- 34
7-1-6. 患者以外の人への遺伝子導入の可能性	- 34
7-1-7. 染色体へ遺伝子が組み込まれる場合の問題点	- 35
7-1-8. 癌原性の問題	- 35
7-2. 遺伝子産物の安全性	- 36
7-3. 細胞の安全性	- 36
7-3-1. 培養細胞の純度	- 36
7-3-2. 細胞の遺伝子型、表現型の安全性	- 36
7-3-3. 被験者に投与する細胞の安全性	- 37
8. 遺伝子治療臨床研究の実施が可能であると判断する根拠	- 38
9. 遺伝子治療臨床研究の計画	
9-1. 遺伝子治療臨床研究を含む全体の治療計画	- 40
9-2. 被験者の選定基準及び除外基準	- 40
9-2-1. 被験者の選定基準	- 41
9-2-2. 被験者の除外基準	- 41
9-3. 本遺伝子治療臨床研究に関連する各委員会	- 41
9-3-1. 遺伝子治療臨床研究適応・評価判定委員会	- 42
9-3-2. 遺伝子治療臨床研究審査委員会	- 42
9-4. 被験者の同意の取得法	- 42
9-4-1. 被験者と家族への心理的支援	- 43

9-5. 実施期間及び目標症例数	- 44
9-6. 遺伝子治療臨床研究の実施方法	- 44
9-6-1. 対照群の設定	- 44
9-6-2. 遺伝子導入方法（安全性及び有効性に関する事項は除く）	- 44
9-6-2-1. 無菌性の確保	- 44
9-6-2-2. ベクターの入手先及び保存法	- 44
9-6-2-3. 被験者からの末梢血 CD34 陽性細胞の採取	- 45
9-6-2-4. 標的細胞への遺伝子導入	- 45
9-6-2-5. 遺伝子導入細胞の患者への投与	- 46
9-6-3. 前処置及び併用療法の有無	- 46
9-6-4. 治療中の観察項目及び臨床研究項目	- 47
9-6-5. 有害事象ならびにその対処方法	- 48
9-6-5-1. 有害事象の定義	- 48
9-6-5-2. 有害事象発症時の対応	- 49
9-6-5-3. 予想される有害事象とその対処法	- 49
9-6-6. 遺伝子治療臨床研究の評価方法、評価基準及び中止判定基準	- 52
9-6-6-1. 遺伝子治療臨床研究の評価方法と評価基準	- 52
9-6-6-2. 中止判定基準	- 52
9-6-6-2-1. 症例の中止判定基準	- 52
9-6-6-2-2. 遺伝子治療臨床研究の中止判定基準	- 53
9-6-7. 症例記録に関する記録用紙の様式	- 53
9-6-8. 記録の保存及び成績の公表方法	- 53
10. 本遺伝子治療臨床研究における個人情報について	
10-1-1. 個人情報の定義	- 54
10-1-2. 個人情報の利用目的の特定及び利用目的の通知	- 54
10-2. 本遺伝子治療臨床研究における個人情報保護に関する取り組み	- 54
10-2-1. 個人情報の正確性の確保	- 54
10-2-2. 安全管理処置	- 54
10-2-3. 第三者への提供の制限	- 55
10-2-4. 開示	- 55
10-2-5. 訂正について	- 55
10-2-6. 利用停止について	- 55
10-2-7. 開示、訂正、利用停止等ができない場合の理由説明	- 56

10-2-8. 参照、質問	- 56
11. 利益相反に関して	- 56
12. 参考文献	- 57

別添 1	同意取得の際に用いられる説明及び同意書
別添 2	個人情報関係
別添 3	本遺伝子治療臨床研究に対する Malech 博士の同意書
別添 4	略号一覧
別添 5	pMFGSgp91 ベクターの全塩基配列
別添 6	Performance Status
別添 7	本遺伝子治療臨床研究の安全性、有効性の判定基準
別添 8	慢性肉芽腫症に対する造血幹細胞移植の現状
別添 9	薬物有害判定基準
別添 10	Malech HL. et al. Prolonged production of NADPH oxidase-corrected granulocytes after gene therapy of chronic granulomatous disease. Proc Natl Acad Sci U S A 94: 12133-12138, 1997.
別添 11	Ott MG. et al. Correction of X-linked chronic granulomatous disease by gene therapy, augmented by insertional activation of MDS1-EV11, PRDM16 or SETBP1. Nat Med 12: 401-409, 2006.
別添 12	Seger RA. et al. Treatment of chronic granulomatous disease with myeloablative conditioning and an unmodified hemopoietic allograft: a survey of the European experience, 1985-2000. Blood 100: 4344-4350, 2002.
別添 13	Kobayashi S. et al. Clinical features and prognoses of 23 patients with chronic granulomatous disease followed for 21 years by a single hospital in Japan. Eur J Pediatr 167: 1389-1394, 2008.
別添 14	Kang EM. et al. Retrovirus gene therapy for X-linked chronic granulomatous disease can achieve stable long-term correction of oxidase activity in peripheral blood neutrophils. Blood 115: 783-791, 2010.
別添 15	Stein S, et al: Genomic instability and myelodysplasia with monosomy 7 consequent to EV11 activation after gene therapy for chronic granulomatous disease. Nat Med 16: 198-204, 2010.

## 1. 遺伝子治療臨床研究の名称

慢性肉芽腫症に対する造血幹細胞を標的とした遺伝子治療臨床研究

## 2. 研究者の氏名、所属部局、役職、役割

### 2-1 総括責任者の氏名及びその担当する役割

小野寺 雅史

国立成育医療研究センター研究所・成育遺伝研究部・部長

遺伝子治療臨床研究に関する資料・情報の収集、遺伝子治療臨床研究の科学的妥当性及び倫理性の検討、実施計画書の作成及び実施施設長への提出、遺伝子治療臨床研究の適正実施の確認、遺伝子治療臨床研究の進行状況及び研究結果の実施施設長及び審査委員会への報告

### 2-2 副総括責任者の氏名及びその担当する役割

奥山 虎之

国立成育医療研究センター病院・臨床検査部・部長

総括責任者の補佐、遺伝子治療臨床研究に関する資料・情報の収集、遺伝子治療臨床研究の科学的妥当性及び倫理性の検討、患者の選定基準の作成、遺伝カウンセリング

### 2-3 総括責任者、副総括責任者以外の研究者の氏名及びその担当する役割

氏名	所属	役職	役割
藤本 純一郎	国立成育医療研究センター・臨床研究センター	センター長	遺伝子治療臨床研究環境整備
河合 俊尚	国立成育医療研究センター・研究所・成育遺伝研究部	室長	遺伝子治療臨床研究に必要な病棟体制の整備・患者診察
熊谷 昌明	国立成育医療研究センター・病院・血液腫瘍科	医長	患者造血幹細胞の採取と遺伝子導入細胞の投与
森 鉄也	国立成育医療研究センター・病院・血液腫瘍科	医長	患者造血幹細胞の採取と遺伝子導入細胞の投与
清河 信敬	国立成育医療研究センター・研究所・小児血液腫瘍研究部	部長	治療遺伝子導入法の検討
利井 康	国立成育医療研究センター・研究所・RI管理室	室長	遺伝子導入細胞の解析、遺伝子導入効率及び挿入部位の検討
瀧本 哲也	国立成育医療研究センター・臨床研究センター・臨床研究推進室	室長	臨床データの管理

掛井 直子	国立成育医療研究センター・研究所・成育保険政策科学研究室	室長	遺伝子治療臨床研究の倫理性と個人情報保護の管理及び評価の実施
土田 尚	国立成育医療研究センター・病院・総合診療部	医師	遺伝子治療臨床研究に関する文書作成と情報収集
加藤 俊一	東海大医学部・基盤診療学系・再生医療科学	教授	患者選定、造血幹細胞の指導
有賀 正	北海道大学大学院医学研究科・小児科分野	教授	患者選定、免疫学的検査の管理と指導
布井 博幸	宮崎大学医学部・生殖発達医学講座・小児科分野	教授	患者選定、免疫学的検査の管理と指導
水上 智之	宮崎大学医学部・生殖発達医学講座・小児科分野	助教	患者管理
久米 晃啓	自治医科大学・分子病態治療研究センター・遺伝子治療研究部	准教授	遺伝子治療の検査体制の構築
大津 真	東京大学医科学研究所・幹細胞治療センター	准教授	造血幹細胞への遺伝子導入と培養
岡田 真由美	都立東大和療育センター	医師	臨床データの管理

## 2-4 海外共同研究者

本遺伝子治療臨床研究は、米国国立衛生研究所・国立アレルギー・感染症部門・宿主防御研究室 (Laboratory of Host Defenses, National Institute of Allergy and Infectious Diseases, National Institutes of Health) の Malech 博士 (Dr. Harry L. Malech)、Kang 博士 (Dr. Elizabeth Kang)、及び過去に同様の遺伝子治療臨床研究を行った実績のあるドイツ Georg-Speyer-Haus 生物研究所の Grez 博士 (Dr. Manuel Grez)、スイス Zurich 大学小児病院の Seger 博士 (Dr. Reinhard Seger)、英国小児保健研究所の Thrasher 博士 (Dr. Adrian J. Thrasher) より多くの有益な情報を得て行うものである。なお、本研究で使用されるレトロウイルスベクターは、NIH の Malech 博士より供与されるため、同博士の本研究に対する同意書を添付する (同意書を別添 3 に示す)。

### 3 遺伝子治療臨床研究実施施設の名称及びその所在地

名称：国立成育医療研究センター病院及び研究所

所在地：東京都世田谷区大蔵 2-10-1 〒157-8535

電話：03-3416-0181 FAX：03-3416-2222



## 4 遺伝子治療臨床研究の目的

本遺伝子治療臨床研究の目的は、造血幹細胞移植の実施が困難な重症の慢性肉芽腫症（chronic granulomatous disease: CGD）のうち、特にCGDとしては最も症例数が多いNADPH オキシダーゼ酵素複合体の構成タンパク質 gp91<sup>phox</sup>に変異にあるX連鎖慢性肉芽腫症（X-CGD）に対して有効な治療法を確立することにある。

具体的には、レトロウイルスベクターを用いて gp91<sup>phox</sup> をコードするヒト cytochrome b245 beta polypeptide (CYBB) 遺伝子 (NM\_000397) を患者由来造血幹細胞に導入し、これら細胞を再び患者に投与する「造血幹細胞遺伝子治療」を行い、その安全性（遺伝子導入操作及び遺伝子導入細胞の安全性）と有効性（臨床検査的有効性と症状改善等の臨床的有効性）を別添7に基づいて評価する。なお、PCR法やフローサイトメトリ法を用いた患者体内での遺伝子導入細胞の動態やクロナリティーの変動なども同時に解析する。

## 5 対象疾患及び対象疾患として選定した理由

### 5-1 対象疾患

CYBB 遺伝子 (gp91<sup>phox</sup>) に変異を持つ X 連鎖慢性肉芽腫症 (X-CGD)

### 5-2 対象疾患に関する現時点での知見

#### 5-2-1 慢性肉芽腫症の病因と頻度

CGD は、乳幼児期より重篤な細菌性あるいは真菌性感染症を反復罹患し、諸臓器に肉芽腫を形成する先天性免疫不全症候群の一疾患である<sup>1-4</sup>。

好中球をはじめとする食細胞は、活性酸素種 ( $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 、 $ClO^-$  など) を産生し、体外から侵入してきた細菌や異物を殺菌する機構を有している。この活性酸素産生を担う主要な分子が NADPH オキシダーゼ酵素複合体であり、本酵素は細胞膜上の gp91<sup>phox</sup>、p22<sup>phox</sup> のヘテロ 2 量体と、細胞質内の p67<sup>phox</sup>、p47<sup>phox</sup>、p40<sup>phox</sup>、Rac p21 より構成されている<sup>5-7</sup>。

CGD はこれらのうち gp91<sup>phox</sup>、p22<sup>phox</sup>、p67<sup>phox</sup>、p47<sup>phox</sup> の 4 分子のいずれかが先天的に機能していないため、活性酸素を産生できず、体内に侵入した微生物を殺菌することができないことにより発症する<sup>8,9</sup>。特に、ブドウ球菌、クレブシエラ菌、大腸菌、カンジダ、アスペルギルスなどの過酸化水素非産生・カタラーゼ陽性菌を殺菌することができないため、乳幼児期から細菌や真菌による全身性難治性感染症を反復し、しばしば致命的経過をとる<sup>6</sup>。

わが国の先天性免疫不全症の患者数は、CGD が最も多く、約 18% を占める (平成 18 年度厚生労働省原発性免疫不全症候群研究班)。CGD の発症頻度は 22.5 万出生に 1 人程度であり<sup>10</sup>、国内では 2006 年 12 月現在、200 家系以上、270 名以上が登録されている。男女比はおよそ 6.9:1 で、国内の分布には地域による偏りはない。日本人の病型別の患者割合を見ると X 連鎖遺伝の gp91<sup>phox</sup> 欠損型 (X-CGD) が 79.7% と最も多く、常染色体劣性遺伝の 3 病型は p22<sup>phox</sup> 欠損型 (8.3%)、p67<sup>phox</sup> 欠損型 (6.3%)、p47<sup>phox</sup> 欠損型 (5.7%) であり、諸外国に比べて p47<sup>phox</sup> 欠損型が少ない。病型の違いによって重症度が異なることが報告されており<sup>11,12</sup>、米国では gp91<sup>phox</sup> 欠損型が常染色体劣性遺伝型の 3 病型に比べて死亡率が高かったとの報告がある<sup>10,13</sup>。また、国内でも、gp91<sup>phox</sup> 欠損型が最も重症のようである。

gp91<sup>phox</sup> 欠損型は X 連鎖遺伝のため患者の大部分は男性である。多くはその

母親がヘテロ接合体の保因者であるが、両親とも変異を持たず子に新規変異が生じる場合もある。保因者の末梢血食細胞は、正常食細胞と異常食細胞が混在するモザイクを呈するが、その程度はX染色体の不活化の程度により個人差がある。ただ、正常食細胞が全体の5%以上存在すれば、感染症が重症化しにくいことが明らかにされている<sup>14</sup>。また、これまでに行われた国内のX-CGDの遺伝子変異の解析結果によると、ナンセンス変異24例、ミスセンス変異12例、スプライス部位変異17例、欠失10例、挿入7例であり、特に変異が集積するhot spotは存在せず、変異は翻訳領域全体に散在している。なお、同一変異であっても生活環境により重症度は異なる<sup>15</sup>。

### 5-2-2 慢性肉芽腫症の症状と経過

CGDの一般的な症状として、乳幼児期より繰り返す全身諸臓器の難治性細菌・真菌感染症が上げられている。細菌性感染症としては、化膿性皮膚炎、リンパ節炎、肺炎、中耳炎、肛門周囲膿瘍などがよくみられ、感染症が重症化・遷延化し、抗生物質の多剤併用療法により入院期間が長期化する<sup>16</sup>。一方、真菌による感染症としては肺アスペルギルス感染症が最も多く、多種の抗真菌剤を用いても改善しない場合は致死的経過をとる<sup>6</sup>。一方、軽症例では、10歳を越えてから肝膿瘍などを契機に初めてCGDと診断される場合がある。

他の特徴として、諸臓器に形成される肉芽腫性病変がある。肺や消化管、肝臓などに多くみられ、ときに頭蓋内にもみられる<sup>17</sup>。肉芽腫形成の詳細な機序は不明だが、一般には細菌などを貪食した好中球を周囲の単球が処理できず、単球の活性化状態が持続し、多種のサイトカインが放出されることで周囲の炎症細胞が集結し、結果、肉芽腫を形成していくと考えられる。肉芽腫性病変は内科的治療だけでは改善しないことが多く、外科的切除の対象になることもある。消化管に肉芽腫が形成されると通過障害をきたす。また、CGD腸炎では腸管の粘膜下組織に非乾酪性肉芽腫を形成し、クローン病様症状を呈する<sup>18</sup>。McLeod症候群は、gp91<sup>phox</sup>遺伝子と隣接遺伝子のXKやRP3を共に欠失しており、有棘赤血球症や網膜色素変性症を合併する<sup>19</sup>。

X-CGD患者に抗生物質の予防投与を行わない場合、患者一人あたりの重症感染症罹患回数は平均年2回であり<sup>20</sup>、こうした罹患頻度の高さからこれまでの国内X-CGD患者の多くは敗血症やアスペルギルス感染症により30歳までに死亡していた<sup>21</sup>。しかし、最近新たな抗生物質や抗真菌剤が開発され、30歳を越え延命する患者もみられている<sup>21</sup>。

### 5-2-3 従来の治療法

CGD 治療の基本的方針として、合併する感染症のコントロールが上げられる。その治療方針としては、抗生物質や抗真菌剤といった抗菌療法が主体となり、大きく対処療法と予防投薬に分けられる。対処療法に関しては、近年、効力のある抗生物質や抗真菌剤（ミカファンギンやボリコナゾール）が開発され、従来は治療困難であった感染症も軽快する例が増えてきた。ただ、X-CGD の場合、一旦、感染症に罹患すると重症化し多剤併用療法を必要とすることが多く、入院期間も長期化しやすい。このため CGD では、日常の感染予防が重要であり、現在はトリメトプリム/スルファメトキサゾール（ST 合剤）やイトラコナゾールなどの予防投薬を行う場合が多い<sup>22-24</sup>。抗菌剤投与以外の感染症予防としては、インターフェロン・ガンマ（IFN- $\gamma$ ）投与が上げられる<sup>25-27</sup>。IFN- $\gamma$  は、約 3 分の 1 の症例で重症感染症に対する予防効果があると報告され<sup>23,28</sup>、国内患者の約 4 割に投与されている。ただ、これら抗菌剤や IFN- $\gamma$  の投与を行っても、重症感染症や合併症による年間死亡率は 2~5%<sup>10</sup>であり、国内でも毎年死亡例が報告されている<sup>21</sup>。

CGD は造血幹細胞を起源とする食細胞の機能異常であるため、造血幹細胞移植により根治が可能である。ただ、CGD の場合、患者 T 細胞機能が正常であるため強力な前処置が必要で、たとえ HLA 一致幹細胞移植を行っても、移植関連合併症が発症しやすく、治療成績は他の重症複合免疫不全症（SCID）と比べて不良である<sup>29,30</sup>。また、移植医療を受ける患者の多くは活動性の感染症を罹患しており、前処置を含む移植治療によりその感染症が増悪する危険性もある。欧州、米国、我が国の CGD に対する造血幹細胞移植のまとめを別添 8 に示すが、スイスの Segar らは、欧州において CGD 患者 27 名に対し、主にブスルファン（Bu）とシクロフォスファミド（Cy）を前処置とした造血幹細胞移植を行い、移植関連の死亡が 4 名で、特に、移植時に活動性感染症を罹患している症例では危険度が高いと報告している（別添 12）<sup>31</sup>。また、米国では 10 名の CGD 患者に対し、Cy、フルダラビン（Flu）、抗胸腺細胞グロブリン（ATG）を前処置とした T 細胞除去 HLA 一致ドナーからの末梢血幹細胞移植が行われ、10 名中 3 名の死亡例が確認され、1 名は生着不全をきたしている<sup>32</sup>。

我が国では 2008 年までに、34 名の患者に対し 38 回の幹細胞移植が行われた。その内訳は、下記の表に示すように骨髄由来の造血幹細胞移植が 27 例、臍帯血由来の移植が 7 例、末梢血由来が 4 例で、HLA 完全一致例が 24 例、5/6 一致例が 8 例、4/6 一致以下で 6 例であった。治療成績（無イベント生存率）は、移植時の感染症の有無や前処置の違いにより大きく左右されるが、血縁、非血縁を問わず HLA が完全一致した骨髄幹細胞を用いた移植では、20 例中 19 例で移植が成功している。一方、HLA が

一遺伝子異なる場合（5/6一致例）、治療成績は60%と低下し、この値は小児非腫瘍性疾患に対する臍帯血移植の成績（51±8%）と大方一致する（日本さい帯血バンクネットワーク・移植データ管理小委員会 2007年度解析結果）。

HLA	血縁									非血縁									計
	6/6			5/6			4/6以下			6/6			5/6			4/6以下			
ソース	BM	CB	PB	BM	CB	PB	BM	CB	PB	BM	CB	PB	BM	CB	PB	BM	CB	PB	
症例数	12	1	2	2	0	1	4	0	1	8	1	0	1	4	0	0	1	0	
死亡例	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
拒絶例	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
生着 (%)	92	0	50	50	0	0	25	0	0	100	0	0	100	75	0	0	100	0	

HLA	6/6			5/6			4/6以下			計
ソース	BM	CB	PB	BM	CB	PB	BM	CB	PB	
症例数	20	2	2	3	4	1	4	1	1	38
死亡例	1	1	1	1	1	0	1	0	1	7
拒絶例	0	1	0	0	0	1	2	0	0	4
生着 (%)	95	0	50	67	75	0	25	100	0	71

このように、慢性肉芽腫症に対して造血幹細胞移植を考慮する場合、少なくとも HLA が 5/6 以上一致するドナーからの移植が望ましい。さらに、慢性肉芽腫症の場合、他の免疫不全症とは異なり、患者 T 細胞機能が正常であることから移植に際して強力な前処置が必要である。ただ、移植時に重症感染症を罹患していることも多いため、移植関連合併症を併発しやすく、移植成績は他の重症複合免疫不全症と比較して不良である。

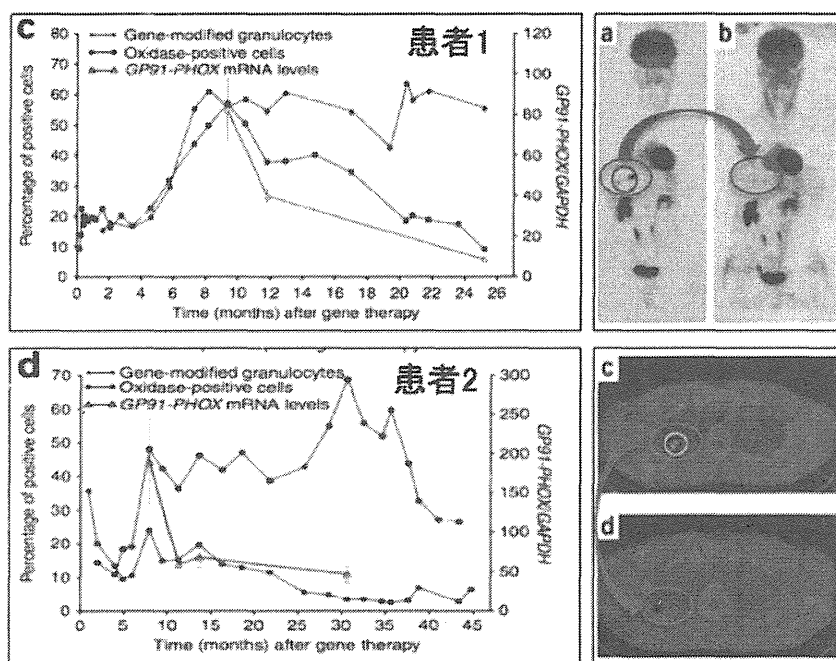
### 5-3 本遺伝子治療臨床研究の背景と概要

前述のように CGD に対する根治療法は、HLA が一致した造血幹細胞移植のみであるが、ドナーの関係からこの移植医療を受けられない症例は全体の3割で、また、たとえ適当なドナーが存在したとしても、移植のための前処置に耐えられない程の重篤な感染症に罹患している患者も多く、幹細胞移植が、現時点で CGD に対する最適な治療法とは言い難い。このようなことから、CGD は遺伝子治療開始当初より造血幹細胞遺伝子治療の最適な対象疾患と考えられていた。

1995 年、世界初の CGD に対する遺伝子治療臨床研究が、米国国立衛生研究所の Malech 博士らによって報告された（別添 10）。対象は、NADPH オキシダーゼ酵素の p47<sup>phox</sup> が欠損した症例で、遺伝子導入細胞として患者末梢血造血幹細胞が使用された。その後も、本研究の対象疾患である gp91<sup>phox</sup> 欠損型 CGD (X-CGD) に対しても行われた

が、その治療効果は短期間（6ヶ月以下）であり、長期的な治療効果を示すには至らなかった。これは、これは、患者骨髓腔がもともと存在する患者骨髓細胞で満たされているため、投与された遺伝子導入細胞の生着する空間が確保されていないことが原因と考えられた。

このことを実証したのが、2003年、ドイツの Grez 博士らが行った造血幹細胞遺伝子治療であり、この中で、同博士は難治性感染症があり、適当な移植ドナーのみつからない2名の X-CGD 患者に対して、体重 1kg あたり 8mg のブスルファンを投与を前処置として投与し、その後に遺伝子導入細胞を投与した（別添 11）<sup>33</sup>。その結果、下図のように骨髓への生着率が増加し、患者体内で活性酸素産生好中球（正常遺伝子が機能している好中球）が全好中球の 10～57%を占め、臨床的にも肝膿瘍や肺アスペルギルス症が軽快した。



また、スイスで行われた同一の遺伝子治療においても、肉芽腫による脊髄圧迫が軽減し、患者が歩行可能になったと報告されている（Segeer 博士 私信）。同様に 2006 年から 2007 年にかけて、Malech 博士（米国）や Kim 博士（韓国）らもブスルファンを前処置とする遺伝子治療臨床研究を行った。Grez 博士のような高い活性酸素産生好中球数は得られなかったものの、臨床的にはブドウ球菌による肝膿瘍の縮小など一定の治療効果が確認された（両博士からの私信）。

これら結果を受け、本遺伝子治療臨床研究でも、レトロウイルスベクターを用いた患者造血幹細胞への CYBB 遺伝子導入と、前処置としてのブスルファン投与を遺

伝子導入細胞投与前に患者に対して行う。なお、投与量は同一レトロウイルスベクターにより遺伝子治療臨床研究を行った NIH 例に従い、体重あたり 10mg とする。詳細は後述するが、本研究では、顆粒球コロニー刺激因子 (G-CSF) にて末梢血中に誘導した造血幹細胞を患者から回収し、生体外でレトロウイルスベクターを用いて CYBB 遺伝子を造血幹細胞に導入して、あらかじめブスルファン投与された患者に対し、これら遺伝子導入細胞を静脈内より輸注する。

#### 5-4 他の治療法との比較及び遺伝子治療臨床研究を実施する適応があると判断した理由

CGD は、重篤な細菌・真菌感染症を反復罹患し、青年期までにその多くの患者が死亡する予後不良な疾患である。患者の一部には軽症例も見受けられるが、特に本遺伝子治療臨床研究が対象とする gp91<sup>phox</sup> 欠損型の X-CGD は、幼児期より重症感染症を反復するため、早期に根治療法を実施することが望ましい<sup>4</sup>。

近年は、治療効果が増強した抗生物質や抗真菌剤が開発され、重症感染症に対しても一定の治療成績を上げつつあるが、完全に感染症を沈静化することは困難である。また、IFN- $\gamma$ や顆粒球輸血も限定的な治療効果しかもたしていないこともあり、現時点で確立された根治療法は同種造血幹細胞移植のみである<sup>34</sup>。

しかし、同種造血幹細胞移植であっても、適当な移植ドナーの不足により全症例へ移植医療を実施することは困難であり、さらに、移植に関連した原因で死亡する例も少なくなく、いまだ移植医療が安全な治療法とは言い難い。特に、CGD の場合、移植時に難治性感染症に罹患している場合が多く、また、肝、腎、肺機能に障害のある症例も多いことから、同種造血幹細胞移植のリスクは他の疾患と比べて大きい<sup>35</sup>。

一方、遺伝子治療でも遺伝子導入細胞の生着のためにブスルファンなどの前処置を必要とするが、その量は、同種造血幹細胞移植に比べて少量であり、また、移植後に免疫抑制剤を使用しないため、造血能回復までの日数の短縮が期待できる。さらに、患者自身の造血幹細胞を用いるため、移植片対宿主病 (GVHD) 発症の危険性も回避できる。このようなことから、ドナー不在あるいは全身状態不良など、なんからの理由で移植の実施が困難であり、かつ、重篤な感染症のため生命の危機にある CGD 患者にとって、本遺伝子治療臨床研究における造血幹細胞遺伝子治療は意義のある治療法と言える。ただ、過去の遺伝子治療において発症した造血系異常などの有害事象を考えると、その実施は患者の利益と危険を十分に検討した上で慎重に決定されなければならない。たとえ、今回使用するベクターではそのような有害事象が報告されていなくとも、実施に際しては注意深い経過観察が求められる。

以上の点をふまえ、下記の理由により X-CGD に対する遺伝子治療は実施するに値すると判断した。

- X-CGD は単一遺伝性疾患であり、その病態が分子レベルで十分に解明されていること。
- 現時点で確立されている根治療法は同種幹細胞移植であるが、実施困難な症例も多く、また、適応になったとしてもその危険性は小さくないこと。
- 治療遺伝子を導入するヒト造血幹細胞の採取法、ならびにこれら細胞へのレトロウイルスベクターを用いた遺伝子導入法はすでに確立していること。
- 治療遺伝子 (CYBB 遺伝子) 導入により機能が回復した患者食細胞が、全好中球の 10%程度あれば、重症感染症に対する治療効果が見込まれること。
- 本遺伝子治療臨床研究で使用されるベクターの過去の事例 (トレーサビリティ) を勘案したとき、有害事象である白血病の発症の危険性は決して高くないこと。



## 6 遺伝子の種類及び遺伝子導入方法

### 6-1. ヒトに導入する遺伝子の構造と性質

本遺伝子治療臨床研究においてヒトに導入する遺伝子は、ヒト CYBB 遺伝子である。この導入遺伝子は gp91<sup>phox</sup> タンパク質をコードしている。

なお、導入されるが発現しないベクターDNAなどの構造と性質は、6-4の「ウイルスベクターを用いた遺伝子導入」の項で述べられる。

#### 6-1-1. ヒトに導入する遺伝子の構造

##### 6-1-1-1. ヒト CYBB 遺伝子

ヒト CYBB 遺伝子は、1986年、Orkinらによって初めて単離された遺伝子であり、この遺伝子は、4339塩基対 (bp) の糖タンパク質である gp91<sup>phox</sup> をコードしており<sup>36</sup>、翻訳開始コドン ATG の上流にある 61 bp の非翻訳領域のほか、570 アミノ酸をコードする 1710 bp と TAA を終止コドンとする 1713 bp によりなっている。その位置は X 染色体短腕 (Xp21.1) にあり、大きさは 33.5kb である (GenBank NM\_000397)。

本遺伝子治療臨床研究において、ベクターに組込まれるのは gp91<sup>phox</sup> の open reading frame (ORF) の 1713 bp とベクター挿入の際に加えられた人工的な配列の合計 1723 bp である。次頁に CYBB 遺伝子の塩基配列ならびにベクターに挿入される CYBB 遺伝子の模式図を示す。なお、ベクターの全 DNA 塩基配列上 (別添 5)、2278~3990 bp に相当する塩基対がヒト CYBB 遺伝子の領域である。

CYBB がコードする gp91<sup>phox</sup> のアミノ酸配列

ATGGGGAAGCTGGGCTGTGAATGAGGGGCTCCATTTTTGTCATTCTGGTTGGCTGGGGTTGAACGTCTTCCTCTTTGCTGGTATTACCGGGTTTATG 100  
MetGlyAsnTrpAlaValAsnGluGlyLeuSerIlePheValIleLeuValTrpLeuGlyLeuAsnValPheLeuPheValTrpTyrTyrArgValTyr

ATATTCCACCTAAGTTCTTTACACAAGAAAACCTTCTGGGTCAGCACTGGCACTGGCCAGGGCCCTGCAGCCTGCCTGAATTTCAACTGCATGCTGAT 200  
AspIleProProLysPhePheTyrThrArgLysLeuLeuGlySerAlaLeuAlaLeuAlaArgAlaProAlaAlaCysLeuAsnPheAsnCysMetLeuIle

TCTCTTGCCAGTCTGTGAAATCTGCTGTCCTTCTCAGGGTTCCAGTGCCTGCTCAACAAGAGTTCAAGACAACCTGGACAGGAATCTCACCTTT 300  
LeuLeuProValCysArgAsnLeuLeuSerPheLeuArgGlySerSerAlaCysCysSerThrArgValArgArgGlnLeuAspArgAsnLeuThrPhe

CATAAAATGGTGGCATGGATGATTGCACCTCACTCTGCGATTACACCATTGCACATCTATTTAATGGAAATGGTGTGAATGCCCGAGTCAATAAT 400  
HisLysMetValAlaTrpMetIleAlaLeuHisSerAlaIleHisThrIleAlaHisLeuPheAsnValGluTrpCysValAsnAlaArgValAsnAsn

CTGATCCTTATTAGTAGCACTCTCTGAACTTGGAGACAGGCAAAATGAAAGTTATCTCAATTTTGGCTCGAAAGAGAATAAAGAACCTGAAGGAGGCT 500  
SerAspProTyrSerValAlaLeuSerGluLeuGlyAspArgGlnAsnGluSerTyrLeuAsnPheAlaArgLysArgIleLysAsnProGluGlyGlyLeu

GTACCTGGCTGTGACCCTGTGGCAGGCATCACTGGAGTTGTATCAGCTGTGCCTCATATTAATTACTTCTCCACCAAAAACCTCCGGAGGCT 600  
TyrLeuAlaValThrLeuLeuAlaGlyIleThrGlyValValIleThrLeuCysLeuIleLeuIleIleThrSerSerThrLysThrIleArgArgSer

TACTTTGAAGTCTTTTGGTACACATCATCTCTTTGTGATCTTCTTATTGGCCTTGCCATCCATGGAGCTGAACGAATGTACGTGGGCAGACCGCAG 700  
TyrPheGluValPheTrpTyrThrHisHisLeuPheValIlePhePheIleGlyLeuAlaIleHisGlyAlaGluArgIleValArgGlyGlnThrAla

AGAGTTTGGCTGTGCAATAATAACAGTTTGTGAACAAAAATCTCAGAATGGGAAAAATAAAGGAATGCCAATCCCTCAGTTTGGTGGAAACCTCC 800  
GluSerLeuAlaValHisAsnIleThrValCysGluGlnLysIleSerGluTrpGlyLysIleLysGluCysProIleProGlnPheAlaGlyAsnProPro

TATGACTTGGAAATGGATAGTGGGTCCTCATGTTCTGTATCTCTGTGAGAGTTGGTGGGTTTTGGCGATCTCAACAGAAGGTGGTCATCACCAAGGTG 900  
MetThrTrpLysTrpIleValGlyProMetPheLeuTyrLeuCysGluArgLeuValArgPheTrpArgSerGlnGlnLysValValIleThrLysVal

GTCACCTACCCCTTTCAAACCATCGAGCTACAGATGAAGAAGAAGGGTTCAAATGGAAGTGGACAATACATTTTGTCAAGTGCCCAAAGGTGTCCA 100  
ValThrHisProPheLysThrIleGluLeuGlnMetLysLysLysGlyPheLysMetGluValGlyGlnTyrIlePheValLysCysProLysValSer

AGCTGGAGTGGCACCCCTTTTACTGACATCCGCCCTGAGGAAGACTTCTTTAGTATCCATATCCGCATCGTTGGGACTGGACAGAGGGGCTGTCAA 110  
LysLeuGluTrpHisProPheThrLeuThrSerAlaProGluGluAspPhePheSerIleHisIleArgIleValGlyAspTrpThrGluGlyLeuPheAsn

TGCTTGTGGCTGTGATAAGCAGGAGTTTCAAGATGCGTGGAACTACCTAAGATAGCGTTGATGGGCCCTTTGGCACTGCCAGTGAAGATGTGTTGAGC 120  
AlaCysGlyCysAspLysGlnGluPheGlnAspAlaTrpLysLeuProLysIleAlaValAspGlyProPheGlyThrAlaSerGluAspValPheSer

TATGAGTGGTGTGTTAGTGGGAGCAGGATTGGGTCACACCTTCGCATCCATTCTCAAGTCACTGGTACAAATATTGCAATAACGCCCAATC 130  
TyrGluValValMetLeuValGlyAlaGlyIleGlyValThrProPheAlaSerIleLeuLysSerValTrpTyrLysTyrCysAsnAsnAlaThrAsn

TGAAGCTCAAAAAGATCTACTTCTACTGGCTGTGCCGGACACATGCCTTTGAGTGGTTGCGAGATCTGCTGCAACTGCTGGAGAGCCAGATGCAGGA 140  
LeuLysLeuLysLysIleTyrPheTyrTrpLeuCysArgAspThrHisAlaPheGluTrpPheAlaAspLeuLeuGlnLeuLeuGluSerGlnMetGlnGlu

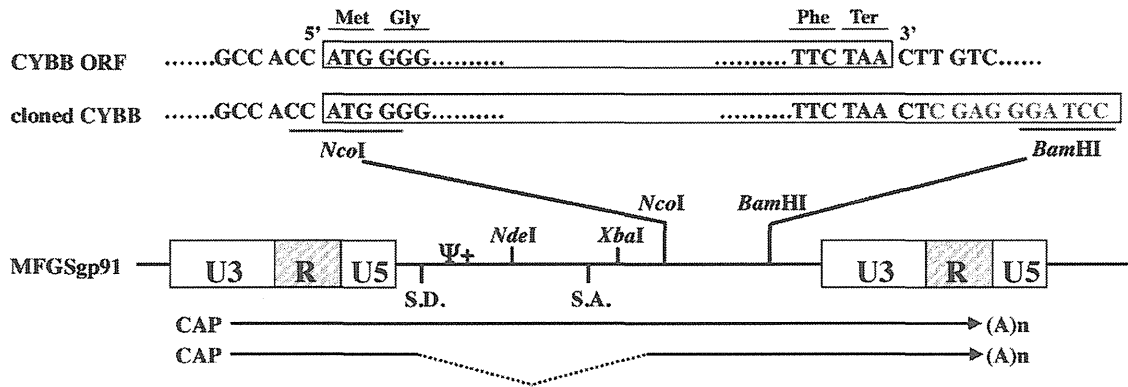
AAGGAACAATGCCGCTTCTCAGCTACAACATCTACCTCACTGGCTGGGATGAGTCTCAGCCAATCACTTGTCTGTCACCATGATGAGGAGAAGAT 150  
ArgAsnAsnAlaGlyPheLeuSerTyrAsnIleTyrLeuThrGlyTrpAspGluSerGlnAlaAsnHisPheAlaValHisHisAspGluGluLysAsp

GTGATCACAGGCTGAACAAAAGACTTTGTATGGACGGCCCACTGGGATAATGAATCAAGACAATTGAAGTCAACACCTTAATACCAGAATAGGAG 160  
ValIleThrGlyLeuLysGlnLysThrLeuTyrGlyArgProAsnTrpAspAsnGluPheLysThrIleAlaSerGlnHisProAsnThrArgIleGly

TTTTCTCTGTGGACCTGAAGCCTTGGCTGAAACCTGAGTAAACAAGCATCTCCAACCTGAGTCTGGCCCTCGGGAGTGCATTTTCATTTTCAACAA 170  
ValPheLeuCysGlyProGluAlaLeuAlaGluThrLeuSerLysGlnSerIleSerAsnSerGluSerGlyProArgGlyValHisPheIlePheAsnLys

GGAAAACCTCTAA 1713  
GluAsnPheter

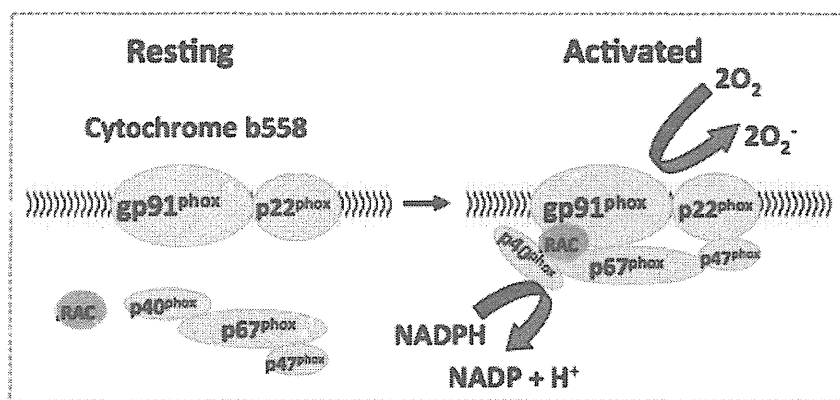
## CYBB 遺伝子の末端配列と MFGSgp91 の構造



CYBB のアミノ酸をコードする領域 (open reading frame; ORF) をレトロウイルスベクター-MFGS にクローニングするため、3' 側に *Bam*HI 認識配列を含む人工配列 (CGAGGGATCC) を挿入し、*Nco*I-*Bam*HI fragment として CYBB 遺伝子をレトロウイルスベクターに挿入し、MFGSgp91 を作製した。

## 6-1-2. 導入する遺伝子の性質ならびに導入遺伝子からの生成物の構造及び生物活性

導入された遺伝子 (CYBB) により発現される gp91<sup>phox</sup> は、p22<sup>phox</sup> と会合することで膜タンパク質のシトクロム b558 を構成し、また、菌体成分などの刺激により細胞質内タンパク質の p47<sup>phox</sup>、p67<sup>phox</sup>、p40<sup>phox</sup>、rac と会合して、superoxide anion の産生に関わる酵素の NADPH oxidase を生成する<sup>37</sup>。一般に休止状態では細胞質因子はシトクロム b558 と乖離しているため NADPH の活性は起こらないが、刺激により細胞内因子が細胞膜へと移行し、シトクロム b558 と会合することで、活性型 NADPH oxidase が産生される。本酵素は酸素分子を直接還元することで superoxide anion (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) を生成し、食胞内へと放出して、さらに強力な活性酸素種 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、ClO<sup>-</sup>) が生成され、強力な殺菌作用を発揮する<sup>6</sup>。



## 6-2. 標的細胞の由来ならびに生物学的特徴及び標的細胞とした理由

本遺伝子治療臨床研究における標的細胞は、患者由来の末梢血 CD34 陽性細胞である。これは、自己複製能と多分化能（血球系全ての細胞に分化する能力）を有する細胞で、前処置にて骨髄破壊を行った患者の骨髄造血能を再構築することができる<sup>33</sup>。

本遺伝子治療臨床研究で末梢血 CD34 陽性細胞を標的細胞とする理由は、CYBB 遺伝子を導入した患者 CD34 陽性細胞が、移植により患者骨髄造血を再構築し、結果、正常な顆粒球の末梢血出現を期待するためである。

## 6-3. 遺伝子導入方法の概略及び当導入法を選択した理由