

離に用いることができるとされている (Melnick & Wallis, 1977)。さらに、ガンマ線照射や電子線照射、UV 照射なども適用できる。ウイルスろ過などの手法やそれ以外の最新のウイルス不活化法も適用可能である。原料の管理には限界があり全てのウイルスを試験することは困難であることから、2 つのウイルス不活化・除去工程を製法の中に組み込むことが推奨される。あるいは十分な説明が必要である。いずれの場合にも、製造工程では、ウイルスクリアランスに影響を与えるクリティカルパラメーターを管理する必要がある。

バッチごとの交差汚染や動物由来原料からの汚染リスクを最小限にするために適切かつバリデーションされたクリーニング対策を実施することが求められる。製造されたトリプシン製品ごとに、そのバッチを特定できるような解析結果を添付すること。トリプシン製品は GMP、ISO あるいは HACCP に適合した品質管理システムにより製造される必要がある。

8. トリプシンの製造工程がウイルスを不活化・除去できることのバリデーション

微生物の不活化や除去はトリプシンの外来性汚染物質に対する安全性確保の重要な要素である。したがって、特定の工程を選択し、その工程がウイルスを不活化／除去できる能力を有していることを慎重にバリデーションすることが求められる。CPMP のウイルスバリデーション試験に関する CPMP の通知を参考にすること；ウイルスの不活化や除去工程をデザインし、試験結果の解釈などについての通知。

トリプシンの酵素活性や他のブタ膀胱由来酵素の活性は、いくつかのウイルスの不活化に貢献すると考えられるが、PPV や PCV などの非エンベロープウイルスのようなこれらの酵素に抵抗性の高いウイルスに関してはほとんど期待できない。したがって、このような抵抗性の高いウイルスに関しては複数の不活化や除去工程の評価が必要であり、あるいはウイルス否定試験のような他のウイルス安全対策が求められる。それ以外のウイルス不活化対策としてガンマ線照射や UV-C 照射、あるいはウイルスろ過などを考慮する必要がある。

ガンマ線や電子線などの照射、ウイルスろ過、低 pH 工程でのバリデーションに関しては、物理的、化学的な処理に対して抵抗性の高い小型の DNA 非エンベロープウイルスとして動物パルボウイルス (PPV) を含めるようにすること。

ガンマ線照射は一般的に凍結したトリプシンに対して実施される。凍結乾燥された検体に対して照射を行う場合にウイルス不活化の検討は慎重に実施する必要がある。ウイルス不活化のバリデーションにおいては、スパイクしたウイルスが均一な分布をとらず、溶液の中に不均一に分布する可能性があることやトリプシン粒の脂溶性部分にのみ分布する可能性がある。したがって、凍結前の溶液にウイルス溶液を添加して凍結し、凍結乾燥後にウイルスタイターを測定することが推奨される；このことにより照射工程にどれだけのウ

ウイルスをロードしたかを知ることができる。

UV-C の照射に関しては、ウイルス不活化は主として UV が直接ゲノムと相互作用する機作に依存しており、主な光化学反応生産物はピリミジンである。しかし、これまでの試験データからは、ウイルスの不活化は遺伝子の構成やゲノム (DNA/RNA) の種類によって単純に不活化の程度を予測することができない。すなわち、ウイルスの感染性を評価するための細胞を用いた *in vitro* 感染試験において細胞のゲノム修復機構によりウイルスのゲノムが修復される可能性も考慮すべきであり、特に 2 本鎖 DNA を持つウイルスの場合には不活化作用を過小評価する可能性がある。一般的にアデノウイルスは HSV-1 と同様に UV-C に比較的抵抗性が高いために UV-C の評価に用いることが推奨される。

トリプシンがタンパク質分解作用を持つことから、トリプシンを含む被検液にスパイクしたウイルスの安定性を考慮する必要があり、また細胞試験において細胞傷害性を持つためにアッセイの実施を妨害する可能性があることも念頭に置くこと。

ウイルスの不活化・除去工程がトリプシンの品質に悪影響を及ぼすことも評価する必要がある。

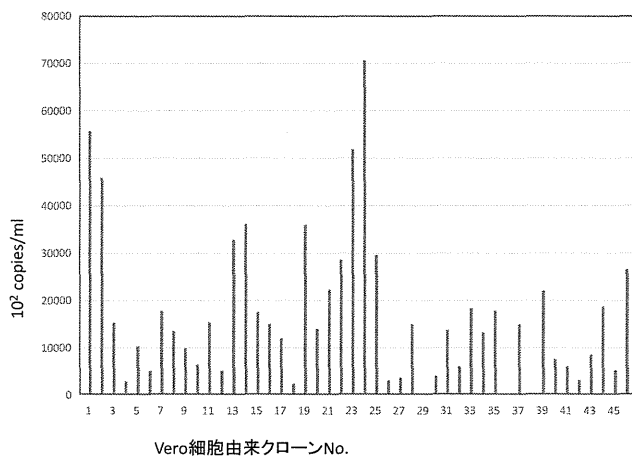


図1. 長期に培養を行っているVero細胞(ATCC由来)をクローニングしてHSV-1の増幅能の違いを解析

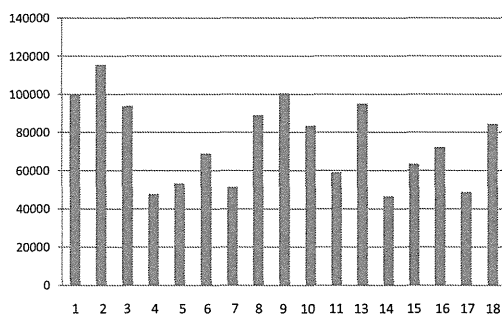
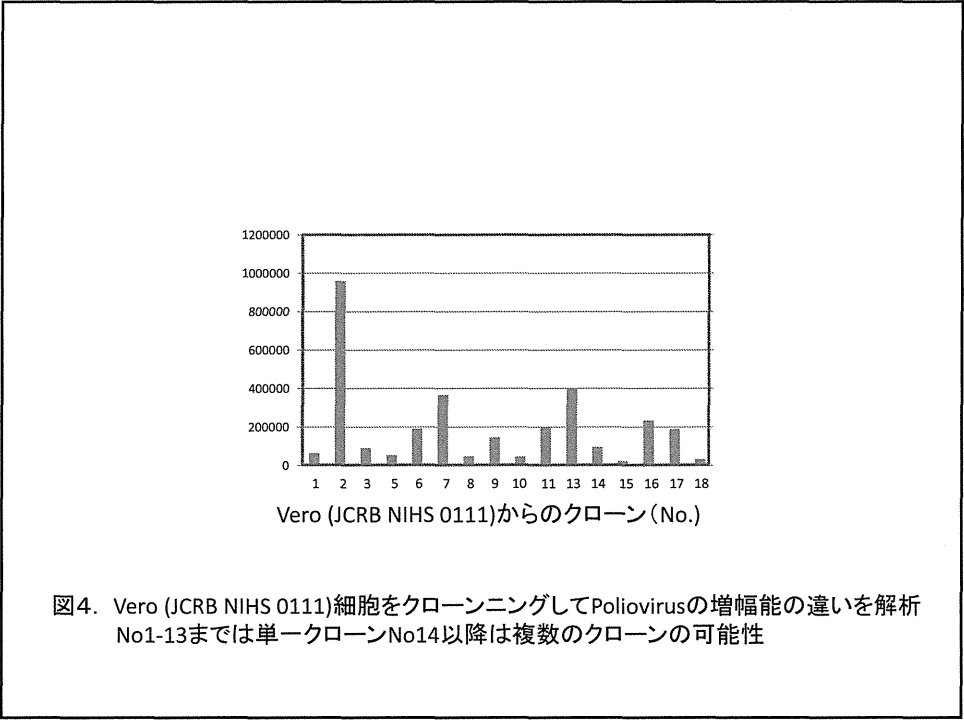
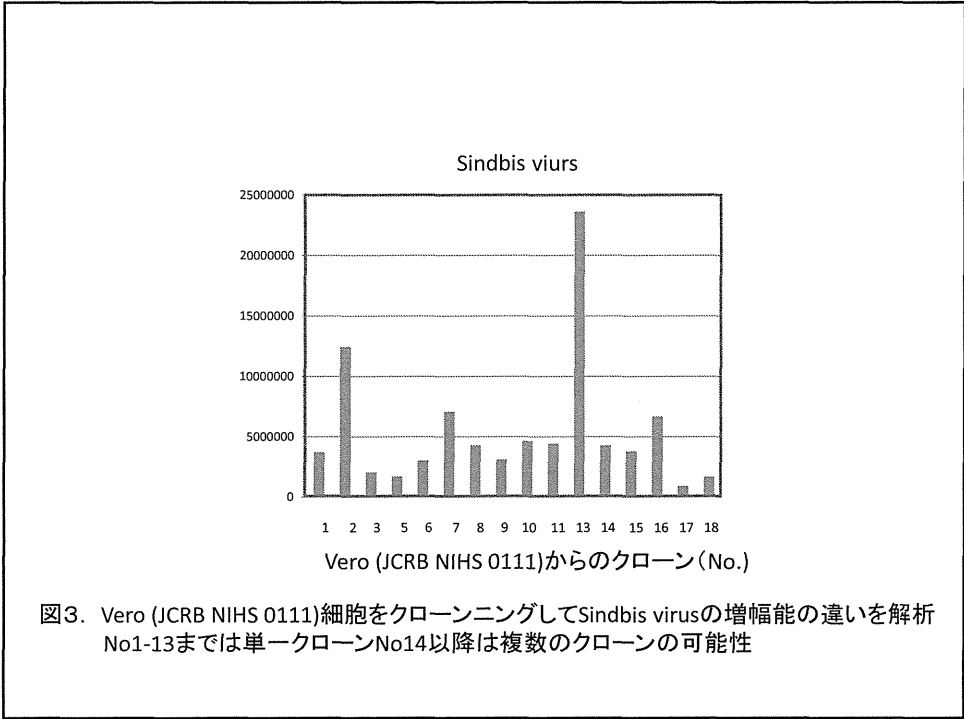


図2. Vero (JCRB NIHS 0111)細胞をクローニングしてHSV-1の増幅能の違いを解析
No1-13までは単一クローンNo14以降は複数のクローンの可能性



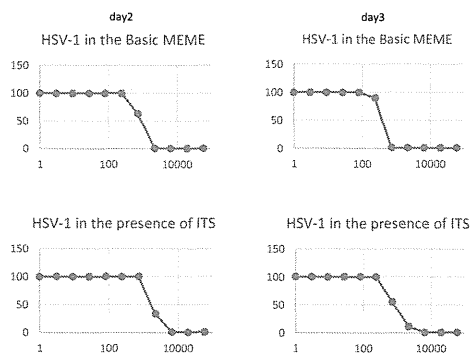


図5. HSV-1のTCID50測定条件の検討

Vero (JCRB NIH8 0111)細胞を96ウェルマイクロプレートに播種し、コンフルエントになって時点でHSV-1を感染させ、CPEの変化を測定した。
ウイルス感染後、ITS(Insulin/Transferrin/Selenium)やビルビン酸を添加。

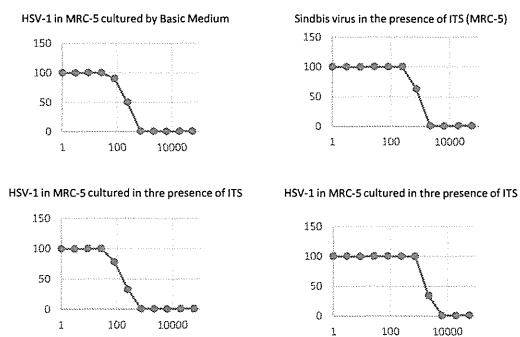
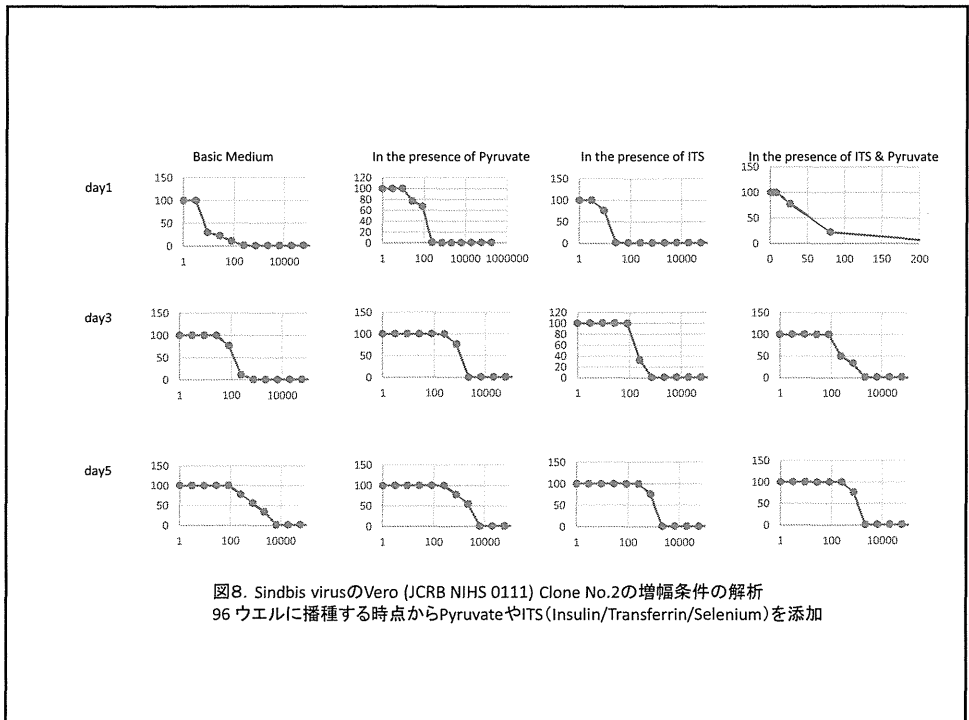
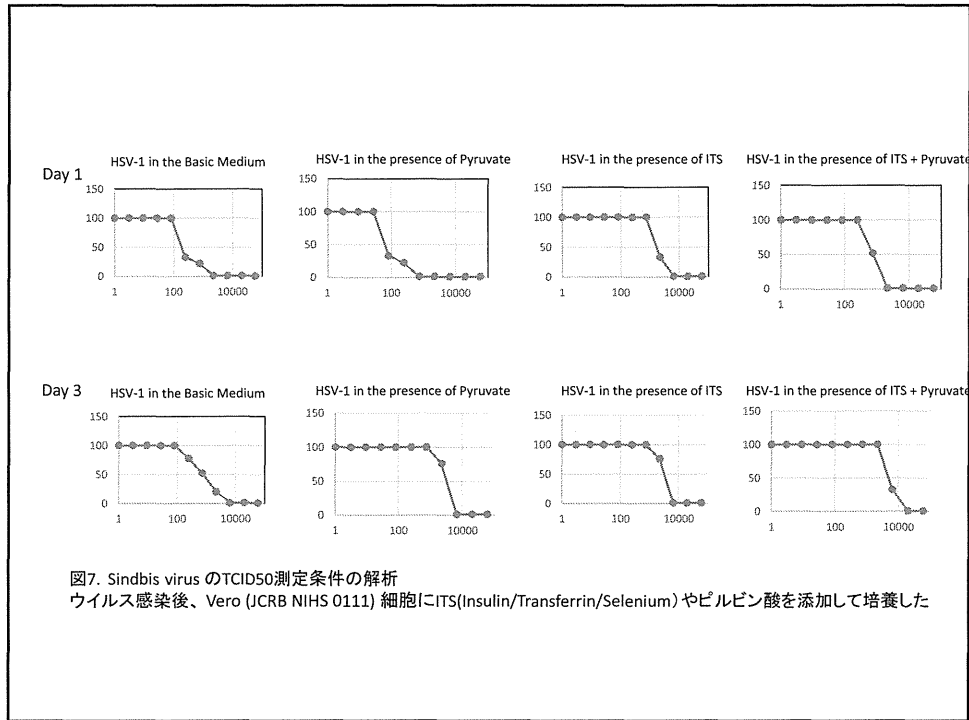


図6. MRC-5細胞を用いたTCID50測定条件の検討

ウイルス感染後、ITS(Insulin/Transferrin/Selenium)やビルビン酸を添加して培養した



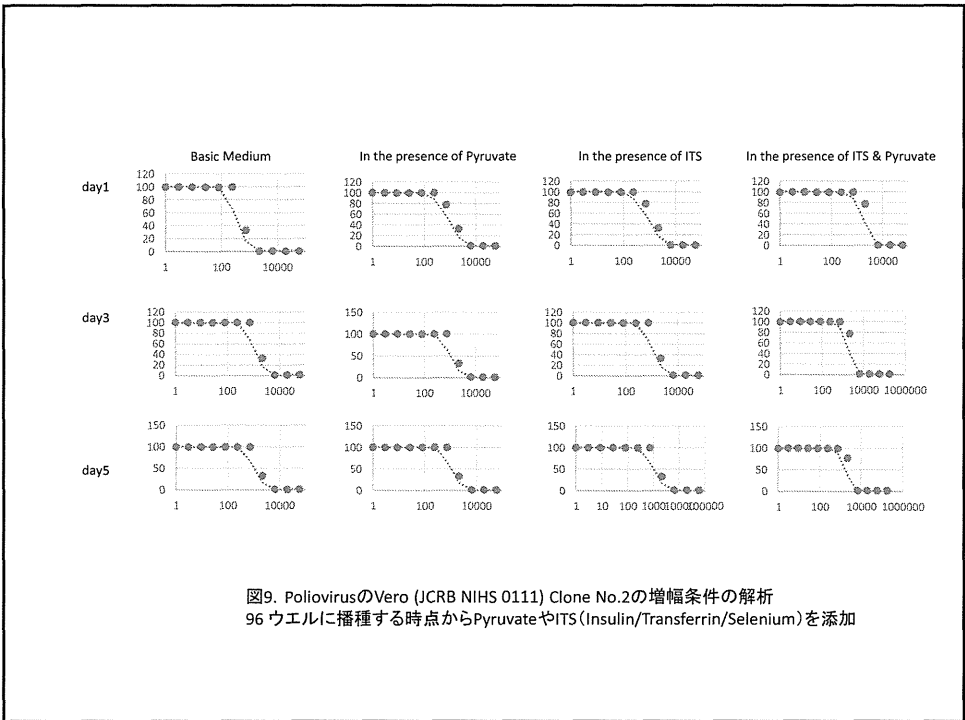


図9. PoliovirusのVero (JCRB NIHS 0111) Clone No.2の増幅条件の解析
96 ウェルに播種する時点からPyruvateやITS (Insulin/Transferrin/Selenium)を添加

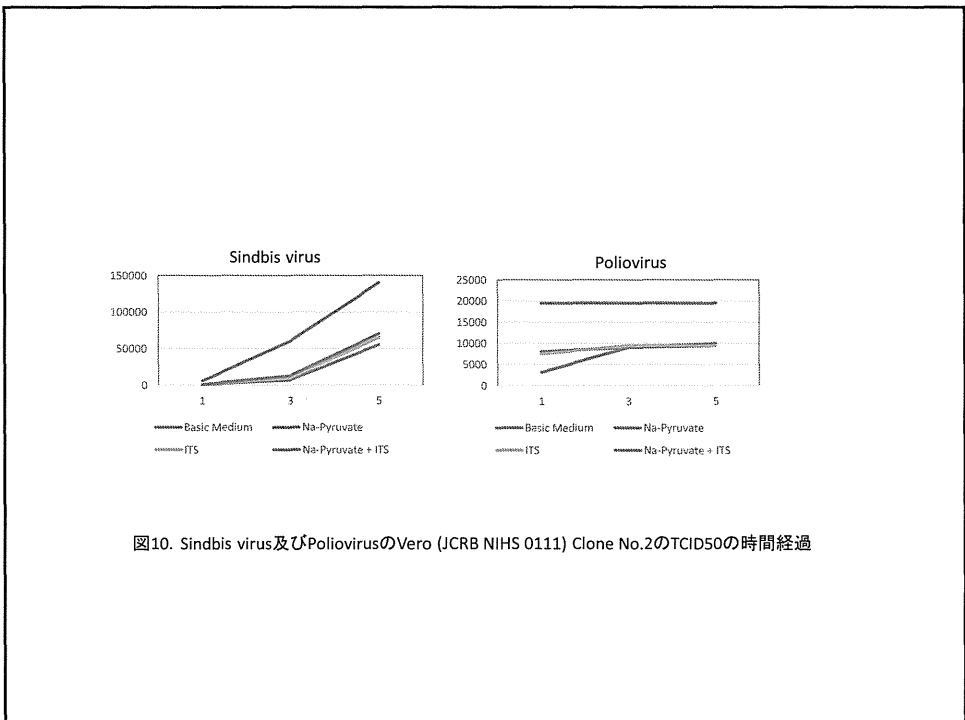


図10. Sindbis virus及びPoliovirusのVero (JCRB NIHS 0111) Clone No.2のTCID50の時間経過

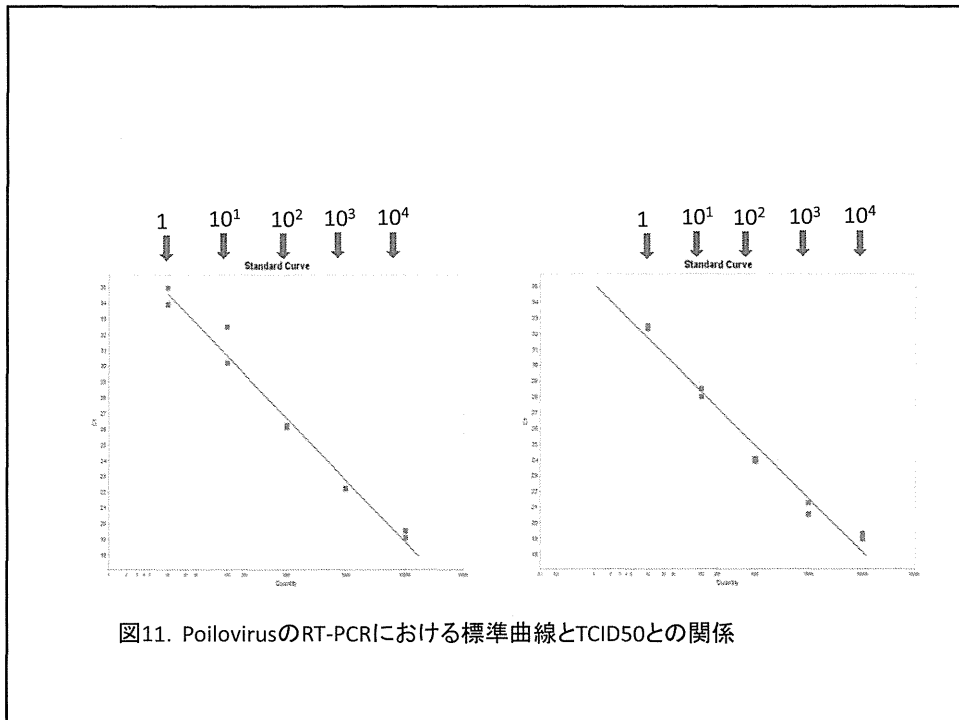


図11. PoilovirusのRT-PCRにおける標準曲線とTCID50との関係

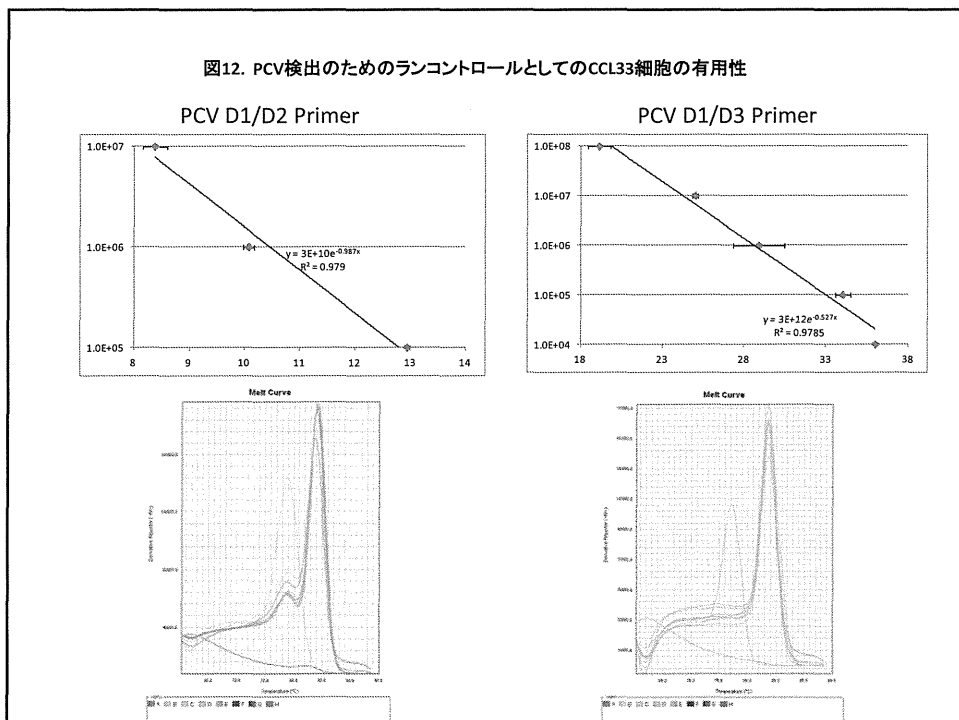


図12. PCV検出のためのランコントロールとしてのCCL33細胞の有用性

平成 26 年度厚生労働科学研究委託事業（再生医療実用化研究事業）
委託業務成果報告（業務項目）

ウイルスクリアランス値を提案するための基礎検討

担当責任者（独）医薬基盤研究所 難病・疾患資源研究部 松山晃文

研究要旨

再生医療製品に用いられる幹細胞のウイルス安全性を確保するためには多面的な方策が必要である。外来性ウイルス試験として ICH Q5A ガイドラインが示されているが、具体的な試験法についての提示はない。本研究分担では、原材料の具体例としてトリプシンを取り上げ、モジュール方式を含めて利用可能なクリアランス値を提案するための基礎検討を試みた。

A. 研究目的

再生医療等製品の原材料のウイルスクリアランスに関し、モジュール方式を含めて利用可能なクリアランスを提案するための基礎検討を試みる。

B. 研究方法

再生医療等製品の原材料にかかるウイルスクリアランス値を提案するため、具体例としてブタ膵臓由来トリプシンでのウイルスクリアランスにかかる予備検討を行う。

（倫理面への配慮）

1. 非臨床試験（研究）において遺伝子改変動物、プラスミドDNA あるいは遺伝子導入ウイルス等を用いる場合は、使用に際して遺伝子組み換え生物などの使用等

の規制による生物多様性の確保に関する法律、カルタヘナ条約等各種法令・告示・通知に基づき研究を実施する。

2. 動物操作に当たっては、（独）医薬基盤研究所の動物実験規定に従って行なう。
3. 臨床試験の実施にあつては、計画書（プロトコール）に関して医学倫理委員会での承認を受け、本人の書面による informed consent を取得した患者のみを対象とする。

C. 研究結果

ブタトリプシンは、これまで多くの biologics の製造工程にて利用され、多くの患者さんを救ってきた。特に遺伝子組み換えインスリンの製造工程で C-peptide を切り出して成熟させるために用いられている。しかしながら、ブタトリプシンに残存していたウイルスによる感染事故が発生、医薬品の欠品のリスクが表出した。そのため、

インスリンの製造工程では遺伝子組み換えブタトリプシンへの変更か、あるいはウイルスクリアランスの徹底が施行されている。

遺伝子組み換えトリプシンは高コストであるため、医薬費の安価な提供にとってはリスク因子となる。EUでは、ブタ膵臓由来精製トリプシンも活用できるよう、試験開発が進められ、その結果EMAによる、「ブタ膵臓への50kGyでの γ 線照射」の推奨ガイドラインが発出された。牛胎児血清への γ 線照射では概ね25-35kGyが推奨されているため、線量が高い理由は議論すべきであろう。EMAガイドラインの根拠設定において、特に議論されたのがPERVである。マウスにおけるレトロウイルスと同様に内因性ウイルスであるため、動物あるいは製造工程の管理で解決できる問題ではない。加えて、低線量の γ 線照射ではむしろ賦活化される可能性も指摘されている。

一方、たんぱく質は γ 線照射によりその生物学的活性が低下することは広く知られている。牛胎児血清でのウイルスクリアランスに推奨されている25-35kGyの γ 線照射でも、実際は30kGyを超えると細胞培養活性（生物活性）は低下することが知られている。一方、25-30kGyではウイルスクリアランス係数が5に届かない場合も想定されるため、そもそもウイルス感染が否定されている牛胎児血清に γ 線照射によるリスクヘッジをかけているということなのである。

ブタトリプシンにおけるウイルス感染をほぼ否定するため、原材料であるブタ膵臓に50kGyの γ 線照射が求められるが、トリプシン活性の低下が否めない。一方で、トリプシン活性を低減させない条件では γ 線照射の有効性が示せない。

我々は、ブタ膵臓からのトリプシン精製工程でクリアランスが十分である工程へと

変更する、あるいはクリアランス係数が5以上 (10^5 以上の低減) の工程をはさむことで、より安価で安定したウイルスクリアランスが可能でないかと考えた。

ブタ膵臓からのトリプシン精製は、ゲルろ過などでの粗精製ののち、イオン交換クロマトグラフィーによる精製が行われている。イオン交換でpH3.5では乖離せず、pH5で乖離するとトリプシンのタンパク特性を利用している。一般にイオン交換クロマトグラフィーによるタンパククリアランスは係数3とみなす（プリオンの場合も同様）ため、クリアランス係数5は不十分である。

ブタ膵臓からのトリプシン精製において、ウイルスを滅失とするリスク係数5の低減を目指すのは、①イオン交換クロマトグラフィー工程の改善、あるいは②ウイルスクリアランス工程の追加、のいずれかが研究開発戦略となる。本年度の研究開発では、①での工夫の余地を主体に検討した。

イオン交換クロマトグラフィーの溶媒に工夫をするというのがひとつの戦略である。有機溶媒を加えてカラムに吸着させたトリプシンを溶出・回収するのが、精製の工程である。であれば、このどの段階でウイルスクリアランスが可能であろうか。まず、a. カラムにトリプシンは吸着するが、ウイルスはまったく吸着させない。b. 非特異的に吸着するウイルスを洗浄する。c. 非特異的に吸着したウイルスを破壊させる。のいずれかであろう。多くの特許や公開情報を渉猟したところ、aでの課題解決の試みが多い。ただし、カラム（交換樹脂）が特殊で、一般化しにくいと想定される。Bは良好な戦略と考えられるが、ウイルスのみを特異的に流出排除する流路液の検討を要する。具体的には、cの考えもいれ、detergentを流路液に加え、capsidの破壊も含めてウイル

スクリアランスを試みるという手法である。本年度の検討では、detergentの濃度が高いとカラム消耗が早いという難点を除けば、有効な研究開発方向である可能性が提示されている。精製ブタトリプシンを、再度イオン交換（陰イオン交換樹脂が至適であると思われる）クロマトグラフィーにて精製するという手法である。人畜共通感染ウイルスではなく、かつ感染力が弱ければこの手法は有用であるかもしれない。

D. 考察

幹細胞の培養工程や加工で用いられる添加剤等の原材料のウイルス安全性に関連して、ウイルススクリアランスが期待できる工程として陰イオン交換クロマトグラフィー工程のウイルススクリアランス能を解析することで、共通して使える LRF を明らかにすることができると思われる。

E. 結論

再生医療等製品の製造工程で用いられることが多いブタトリプシンに関し、そのウイルススクリアランスに関して検討を開始した。具体的には、もっともクリアランス効率が悪いとされる PERV ウイルスのクリアランス手法に関して検索を行った。EMA では 50kGy の X 線で照射したブタ膵臓を原材料として製造したトリプシンは、ATMP で使用が許される。一方わが国では、トリプシン溶液としてしか入手できないため、トリプシン溶液に対しての適切なクリアランス条件を検討するため、陰イオン交換クロマトグラフィーなどを活用できないか、検討を開始した。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- A) Kono K, Takada N, Yasuda S, Sawada R, Niimi S, **Matsuyama A**, Sato Y. Characterization of the cell growth analysis for detection of immortal cellular impurities in human mesenchymal stem cells. *Biologicals*. 2014 Dec 16.
- B) Okura H, Soeda M, Morita M, Fujita M, Naba K, Ito C, Ichinose A, **Matsuyama A**. Therapeutic potential of human adipose tissue-derived multi-lineage progenitor cells in liver fibrosis. *Biochem Biophys Res Commun*. 2014 Dec 6
- C) Moriyama H, Moriyama M, Isshi H, Ishihara S, Okura H, Ichinose A, Ozawa T, **Matsuyama A**, Hayakawa T. Role of notch signaling in the maintenance of human mesenchymal stem cells under hypoxic conditions. *Stem Cells Dev*. 2014 Sep 15;23(18):2211-24.
- D) Ozasa M, Sawada K, Iwayama T, Yamamoto S, Morimoto C, Okura H, **Matsuyama A**, Komoda H, Lee CM, Sawa Y, Kitamura M, Hashikawa T, Takedachi M and Murakami S. Periodontal tissue regeneration by transplantation of adipose tissue-derived multi-lineage progenitor cells. *Inflammation and Regeneration*, 2014, in press
- E) 大倉華雪・**松山晃文** 細胞医療での申請にあたっての注意点—品質の観点から— 先進医療 NAVIGATOR II 再生医療・がん領域の実用化への TOPICS 2014. pp5-8
- F) 内田恵理子, 古田美玲, 菊池裕, 窪崎敦隆, 遊佐精一, 宮原美知子, 佐々木裕子, 小原有弘, 大谷梓, **松山晃文**, 大倉華雪, 山口照英: 日本薬局方参考情報収載マイコプラズマ否定試験のPCR法改正のための共同研究、マイコプラズマ学会雑誌 (印刷中)
- G) 内田恵理子, 古田美玲, 菊池裕, 窪崎敦隆, 遊佐精一, 宮原美知子, 佐々木裕子, 小原有弘, 大谷梓, **松山晃文**, 大倉華雪, 山口照英: 細胞基材に対するマイコプラズマ否定試験のPCR法の見直しに関する

る研究、医薬品医療機器レギュラトリーサイエンス 45 (5), 442-451 (2014)

- H) ○内田恵理子, 古田美玲, 菊池裕, 窪崎敦隆, 遊佐精一, 宮原美知子, 佐々木裕子, 小原有弘, 大谷梓, **松山晃文**, 大倉華雪, 山口照英: 細胞基材に対するマイコプラズマ否定試験のPCR法の見直しに関する研究. 医薬品医療機器レギュラトリーサイエンス、印刷中

2. 学会発表

該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

平成 26 年度厚生労働科学研究委託事業（再生医療実用化研究事業）

委託業務成果報告（業務項目）

インビトロウイルス試験及び研究・ウイルス検出手法に関する研究

担当責任者 内田恵理子 国立医薬品食品衛生研究所 遺伝子医薬部 第一室長

再生医療・細胞治療の安全性確保においてウイルスリスクをできる限り低減化することが重要とされている。特に同種細胞を用いる幹細胞由来製品では一つのロット細胞を多くの患者に投与することになり、適切な試験と細胞加工に使用する原料等の安全性を確保することが重要である。本年度は、幹細胞を用いる再生医療等製品のバンク細胞や複数のレシピエントに使用される細胞ストックのウイルス安全性試験として *in vitro* ウイルス試験に用いられる細胞基材の評価について検討した。

Vero (JCRB NIHS0111 株) をクローニングしウイルス感受性の高い細胞を分離した。クローン化された Vero 細胞は、HSV-1、Sindbis virus、Poiavirus に高い感受性を示した。次に *in vitro* ウイルス試験条件の検討を行い、ピルビン酸や Insulin/Transferrin/selenium (ITS) を添加することにより TCID50 試験の感度が上昇することが分かった。ただ全てのウイルスに共通する条件は設定できず、ピルビン酸ないしはピルビン酸/ITS を含む 2 つの条件に培養した細胞を用いることにより感度よくウイルスを検出できると考えられる。

ウイルス検出のための陽性ランコントロールとして Poiavirus の検討を行った。ブタトリプシンのウイルス安全性評価のためにブタサーコウイルス (PCV) 検出のためのプライマーセットの選択と PCV 標準品として PCV 抗原発現株として CCL33 の評価を行った。

担当協力者

古田 美玲 国立医薬品食品衛生研究所

豊田 淑江 国立医薬品食品衛生研究所

A. 目的

医薬品のウイルス安全性確保には単一の方策によって担保されるものではなく、多面的なアプローチを組み合わせることが重要である。しかし幹細胞を用いる再生医療製品は生きている細胞をその本質としており、ウイルスの不活性化工程などを採

用することができず、ウイルス検査や安全な原料や原材料の使用に重点が置かざるを得ない。ウイルス検査としては、血清学的検査や核酸増幅検査は特定のウイルスをターゲットとする場合にはよいが、迷入ウイルスなどの場合には広範なウイルスに対するスペクトルを有する検査法を組み合わせることを有用である。特に同種細胞を用いる場合や自己由来幹細胞でも脳内への投与などのより高度な安全性を担保しなければならない製品では、*in vitro* ウイルス試験の役割が大きいと考えられ

る。培養により増幅が可能で多数の患者に投与されるような同種細胞製品の場合には、細胞のバンク化やバンク化に類する保管がされる可能性があり、その場合にはICH Q5Aに沿ったウイルス検査の実施が望ましいとされる。特に迷入ウイルス試験としては *in vitro* ウイルス試験が推奨されている。

一方で、*in vitro* ウイルス試験を受託している機関ではウイルス検出のために最適な試験条件を設定しており、多くの企業がこういった受託機関を利用している。最終的なバリデーションデータを撮るための試験であればこういった受託機関を利用することが合理的と考えられるが、開発途上では必ずしも全ての条件が固まっているわけではなく、また製品の開発と共に使用する基材等も異なってくる。したがって、開発初期からウイルス安全性を考慮した製造設計や安全対策を立てることが重要であるが、その場合にすべて受託機関に試験を依頼するのは合理的ではない。本研究では、最適化した *in vitro* 細胞培養条件を設定し外来性ウイルス否定試験を迅速に実施できる体制を整備する。また試験に用いるウイルス陽性ランコントロールを広く使用できるようにすることにより、幹細胞等を用いた再生医療の推進を図ることを目的とする。さらにインビトロウイルス試験の迅速化を図るための技術を確認することが独創的な点である。

本年度は *in vitro* ウイルス試験に用いられる Vero 細胞のクローニングを行い最適な細胞株を樹立することをこころみた。また Vero 細胞等の細胞培養系での外来ウ

イルス試験の最適化を目指してピルビン酸や ITS 等の添加剤の影響を検討した。*In vitro* ウイルス試験における陽性ランコントロールの設定を試みた。

細胞培養に汎用されているブタトリプシンのウイルス安全性確保の一つとしてブタ由来製品で汚染が起こったことが知られているブタサーコウイルス (PCV) の検出系の設定の一環として PCV 抗原を発現している CCL33 細胞を陽性コントロールとして使用するための条件整備についての検討も行った。

B. 方法

B. 細胞培養

JCRBで維持管理しているVero (0111) 及び研究室で維持管理しているVero (ATCC) を10%ウシ胎児血清含有イーグル最小必須培地 (MEME) に、 $3\sim 4 \times 10^5/\text{ml}$ となるように懸濁し37°C、5%CO₂下で培養した。コンフルエントになる直前にトリプシンを用いて細胞を回収し、再び同様の細胞濃度になるように懸濁して培養を継続した。培養開始から3か月以上経過した場合には、再度保存してある細胞ストックを解凍し、培養を開始した。

ATCCより入手したESK細胞ストックを解凍し、10%ウシ胎児血清を含むMEMEに懸濁し、 $3\sim 4 \times 10^5/\text{ml}$ の濃度で37°C、5%CO₂下で培養した。コンフルエントになる直前にトリプシンを用いて細胞を回収し、再び同様の細胞濃度になるように懸濁して培養を継続した。2継代後に細胞をトリプシン処理して回収し、セルバンカーに $4\sim 5 \times 10^6$ 細胞/mlの濃度に懸濁し液体窒素の中に凍結保存した。残った細胞は培養を継続して、ウイルス感染性試験に用いるが、3か月以上経過した場合には、凍

結した細胞ストックを解凍し新たに培養を開始した。

ヒトMCR-5細胞は、JCRB1から入手した細胞ストックを解凍し、Vero細胞と同様の条件下に培養を開始した。2継代後に細胞をトリプシン処理により回収し、セルバンカーに4~5 x 10⁶細胞/mlの濃度に懸濁し液体窒素の中に凍結保存した。MRC5細胞の場合には2か月以上経過した場合には、新たに凍結してある細胞ストックを解凍し、新たに細胞培養を開始した。

HEK293細胞はATCCより入手し (293 [HEK-293] ATCC ® CRL-1573™)、10ウシ胎児血清を含むMEMEに3~4 x 10⁵/mlとなるように懸濁し、37°C、5%CO₂下で培養した。2継代後、トリプシンを用いて細胞を回収し、セルバンカーに約5 x 10⁶細胞/mlとなるように懸濁して液体窒素内で保存した。

培養開始後3か月経過したら凍結ストック細胞を解凍して再度同様の操作にて培養を開始する。

Vero細胞のクローニング : JCRB0111及び我々が維持しているVero細胞の両方を限界希釈法によりクローニングを行った。それぞれの細胞を、x1インスリン/トランスフェリン/亜セレン酸ナトリウム、ピルビン酸サナトリウム添加10%ウシ胎児血清MEMEに懸濁し、10³/ml、10²/ml、10/mlとなるように細胞を希釈し、96ウエルマイクロプレートに播種した。10-15日ほど培養を行い、途中のクローンの出現状況から単一クローンと想定されるウエルを選択し、増幅したクローンについてさらに拡大培養を行った。得られたクローン細胞に、HSV-1、Poliiovirus、Sindbis virusを感染させ、ウイルスの最も増幅の多いクロー

ーンを選択した。

ブタサーコウウイルスの陽性コントロールとして、ブタサーコウウイルスを安定発現株 (Gilles C. Dulac, G. C. AfsharCan, A. : Porcine Circovirus Antigens in PK-15 Cell Line (ATCC CCL-33) and Evidence of Antibodies to Circovirus in Canadian Pigs J Vet Res 1989; 53: 431-433) であるCCL33細胞をATCCから入手し、10%ウシ胎児牛血清を含むMEMEで培養した。細胞からExR&Dを用いてDNAを抽出した。得られたDNAを用いて標準検体として用いることが可能か以下の2つのプライマーの組み合わせを用いて、Syber-Green による定量的PCRによる測定を行った。

PCV1

Primer D1: TTACCGGCGCACTTCGGCAG

Peimer D2: TTCAAACCTTCTCTCCGC

PCV2

Primer D1: TTACCGGCGCACTTCGGCAG

Peimer D3: ACTCCGTTGTCCTGAGAT

B. 2. 細胞へのウイルス感染とTCID50の測定

10%ウシ胎児血清を含むMEMEで培養したVero細胞、MRC-5細胞をトリプシンで回収し、4x10⁵細胞/mlとなるように10%ウシ胎児血清を含むMEMEに懸濁し、96ウエルプレートに播種した。1日目、ないしは2目に細胞がコンフルエントなっていることを確認したのち培地を除去する。200 µlのOptiMEMを添加し、すぐに培地を除去する。3倍希釈系列のウイルス液を各ウエルに50µlずつ添加する。1時間、37°Cでインキュベート後、上清を除去し、1%ウシ胎児血清を含むMEMEを添加して培養を行う。継時的なウイルスのCPEを解析す

る。場合によっては、WST-1培地で、一定時間培養後、細胞の残存性を計測した。

培養条件によるCPEの差異を解析するために、96ウェルに播種した後、10%ウシ胎児血清を含むMEMEを基本培地とし、これに1mM ピルビン酸ナトリウムを添加した培地、x1インスリン／トランスフェリン／亜セレン酸ナトリウムを添加した培地、1mM ピルビン酸ナトリウム及びx1インスリン／トランスフェリン／亜セレン酸ナトリウムの両方を添加した培地で培養した。

さらにウイルス感染後、1%ウシ胎児血清を含むMEMEを基本培地とし、これに1mM ピルビン酸ナトリウムを添加した培地、x1インスリン／トランスフェリン／亜セレン酸ナトリウムを添加した培地、1mM ピルビン酸ナトリウム及びx1インスリン／トランスフェリン／亜セレン酸ナトリウムの両方を添加した培地で培養を継続しCPEを計測した。

B. 3. ウイルス増幅の定量的PCR/RT-PCRによる解析

クローニングしたVero細胞を約 4×10^5 細胞/mlになるように10%ウシ胎児血清を含むMEME培地に懸濁し、24ウェルマイクロプレートに播種した。1-2日後、細胞がコンフルエントになっていることを確認し、培地を除去するOptiMEMで細胞を洗浄後、 10^4 コピー/mlウイルス濃度となるようにウイルスを含むOptiMEMを各ウェルに100 μ l添加した。37°Cで1時間培養した後に培地を除去し、1%ウシ胎児血清を含むMEME培地を添加し、培養を継続する。2-3日後にCPEが起こっていることを確認した後、培養液を100 μ l分取する。

分取したウイルス液を、Ex R&Dにてウイルスゲノムを抽出する。100 μ lのウイルス液に、

SDSを含むカオトロピックイオン液で可溶化し、次いでプロテアーゼ液を加えて反応を継続する。その後、イソプロパノール沈殿とアルコール沈殿によりウイルスゲノムを回収する。

得られたウイルスゲノムを40 μ lのDNase/RNaseフリー水に可溶化しリアルタイムPCRでウイルスゲノムの定量を行った。

<定量的PCR/RT-PCRに用いるプライマー／プローブ>

定量的PCR/RT-PCRに用いたプライマー／プローブを表1に示す。PCRの増幅は次のような条件で行った。

50°C	2 min
↓	
95°C	10min
↓	
95°C	15sec
60°C	60sec x50 cycle

RT-PCRによる増幅は次のような条件で行った

50°C	30 min
↓	
95°C	15min
↓	
94°C	15sec
60°C	60sec X50 cycle

B. 4. Poliovirusの希釈によるウイルス感染価の測定

Poliovirusをin vitroウイルス試験の陽性ランコントロールとして用いるために、その特性解析を行った。定量的RT-PCRによるゲノム量の推定と、希釈法による定量を行った。

ウイルスの希釈系列を作製し、検出限界近くの希釈では各濃度を10本ずつ作製した。前述同様にウイルスゲノムを抽出し、次のプライマーを用いてRT-PCRを行い、陽性率を解析した。

Polio2310 ATAGTTTCACCGAAGGCGGA

Polio2419 ATTACACGCTGACACAAAACCAAG

C. 結果

C. 1. Vero細胞のクローニング

Vero細胞は例えばブタ由来ウイルスの60%に感受性を示すが培養の経過と共にウイルスへの感受性が低下するとされている。VERO細胞はCHO細胞やMDCKと同様に不均一な細胞集団からなっており、培養経過と共に細胞集団の不均一性が大きく異なってくるために、ウイルスに対する感受性が変化してくると考えられる。

そこでJCRBがもつ比較的樹立から継代数の比較的経過していないVERO細胞 (NIHS-T) と長期にわたって培養を継続してきているVERO細胞から限界希釈によりクローニングを行い、得られた複数のクローンにウイルスを感染させて感受性の高い細胞を検索した。さらに限界希釈を行う際、単1のコロニーを形成しているウエルだけを選択するようにした。

まず研究室で長期にわたって維持されているVero細胞を限界希釈によりクローニングを行い、46個のクローンを選択した。これらの細胞にHSV-1を感染させ、2日目のウイルスの増幅を定量PRCで解析した。その結果図1に示すように、ウイルス増幅はクローンによってかなりばらつきがあることがわかる。このVERO細胞は入手後10数回の継代を行ったあと、凍結した細胞を3か月ごとに解

凍して実験に使用している。

次に、JCRBに保存されている樹立後比較的継代数の少ないVERO細胞 (JCRB NIHS0111) を限界希釈により複数のクローンを分離した。これらのHSV-1の増幅能について比較したところ、増幅能にある程度のばらつきがあるもののそのバラつきはVERO細胞 (NIHS-T) よりはるかに少ないものであった。

同様にSindbis virus及びPoliovirusについても増幅能を解析したところ、これらのウイルスに関しては増幅能に大きな差異が認められた。必ずしもすべてのウイルスに共通してウイルス増幅能の高いクローンはないが、クローン2と13を選択し複数の条件でのウイルス増幅の差異から最終的にはクローン2を選択した。

C. 2. Vero細胞を用いたウイルス試験の最適化

細胞でのCPEや赤血球凝集反応性を指標とするin vitro ウイルス試験では用いる細胞によってウイルス検出の感度がことなる。またアッセイ条件によってもウイルス検出感度が異なる。本年度は、ウイルスに感受性の高い細胞の選択と並行してウイルス感染試験を行う際の、培養条件の最適化を行うこととした。

Vero (NIHS0111) 細胞を用いてHSV-1のTCID50を測定するときに条件を検討した。HuH7細胞を用いた肝炎ウイルスのin vitro感染実験系で細胞の増殖因子であるInsulin/Transferrin/Selenium (ITS) やピルビン酸を添加することによりウイルスの増幅が促進されること知られていることから、まずITS存在下でのHSV-1の増幅を検討した。ウイルス感染後、細胞の過剰増殖による細胞変性

を避けるために低血清化（1%FCSを含むEagle MEM）での培養条件にITSを添加した。ITS添加の方が2日目でわずかにCPEが起こりやすいと言える程度で殆ど差異は認められなかった（図5）。

一方、MRC-5細胞を用いたin vitro細胞アッセイ系でも同様にHSV-1による感染を検討したが大きな差異は認められなかった（図6）。

次に、ITSやピルビン酸の存在下にHSV-1のTCID50を解析した。図7に示すように、ITSやピルビン酸存在下に培養し、HSV-1の感染後も血清濃度を低くしたままこれらの因子を添加してその影響を解析した。基本培地の時よりもITS存在下やピルビン酸存在下の方がHSV-1のTCID50は高く評価された。

次にクローニングしたVero細胞（クローン2）を用いて、Sindbis virusのTCID50を次培養の時間経過を追って解析した。

培養1日目ではTCID50は高くないが、ピルビン酸を添加するとTCID50が高く検出された。これはウイルスの増幅がピルビン酸添加により早く起こることを意味している。一方、HSV-1と異なり、ITSを添加してもそれほどTCID50は早く起こらないといえる。いずれの系でも時間経過と共にTCID50が高く検出されてくるようになる。

Poliovirusについても同様に検討を行った。ポリオウイルスは感染初期では基本培地よりこれらの因子を添加する方が早くTCID50が検出できた。

図8と図9のTCID50の結果を継時的に整理すると、図10に示すように、Sindbis virusではピルビン酸を添加した方がTCID50が高

く検出され、培養経過と共にそれが顕著になった。一方、PoliovirusではITSとピルビン酸の両方を添加した方がTCID50は高いという結果であった。

C.3. ポリオウイルスのランコントロールとしての設定

Poliovirus (Sabin株)はワクチン株であり、安全性は比較的高いと考えられる。そこでin vitroウイルス試験のランコントロールとしての設定を考え、そのTCID50とコピー数の関係を整理した。図11に示すように、Poliovirusの定量的RT-PCRとTCID50の結果が得られている。さらに次年度デジタルRT-PCRによる結果と合わせてランコントロールとして添加すべきウイルス量を設定する。

C.4. ブタサーコウイルスのランコントロールの設定

再生医療において培養や細胞の加工に用いる材料のウイルス汚染のないものを用いることが安全性確保において重要である。EMAはバイオ医薬品の製造に用いられるブタトリプシンの安全性評価のためのガイドラインを発表している。このガイドラインでは、ブタ由来製品をバイオ医薬品の生産に用いる場合にウイルス安全性を中心として感染性因子をどのように排除していくかが述べられている。バイオ医薬品を対象としたガイドラインであるので細胞治療／再生医療に特化してものではないが、再生医療において動物原料を用いる場合のウイルス安全性の考え方としては非常に参考になる。

特にブタ由来原料を用いる場合にどのようなウイルスに注目すべきか、また検討対象

とするウイルスやウイルスクリアランスを評価する際に関連ウイルスとして想定すべきウイルスが提案されている（参考資料 1）。

このガイドラインの中で、ワクチンにおいてサーコウイルスの汚染が起きた事例を挙げ、注意すべきウイルスとしてブタパルボウイルス（PPV）とブタサーコウイルス（PCV）を挙げている。ブタ原料に対してPPVを検査することはモデルウイルスとして用いられてきた経緯もあり、比較的検出手法は容易に設定されるであろう。一方、PCVに関してはそれほど検討がされてきておらず、PCVの標準株もない。一方ATCCの細胞ラインであるCCL33細胞はPCV抗原を発現しており、おそらくPCVが感染してそのゲノムが染色体に組み込まれていると考えられる。このCCL33をランコントロールとして設定できればPCVウイルス試験の設定が容易になると考えられる。

本ガイドラインでブタトリプシンのウイルス安全性に関する記載について以下に示す：

上記のように再生医療等の製造に汎用されるブタトリプシンについてのEMAが指摘するような安全性について検討しておくことが有用と考えられる。そこで本年度は、特に汚染が起きたことが知られているPCVの評価系としてPCRによる検出が必要になってくる可能性がある。そのために2つのプライマーセットを用いてCCL33細胞をPCVのランコントロールとして設定できるか解析した。

図12に示すように、2つのプライマーセットでPCVに由来するシグナルをとらえようとしたが、PCV D1/PCV D2のプライマーセットでは高感度に検出できるものの、そのダイナ

ミックレンジは高濃度のサンプルを用いた時にのみ検出非常にわずかな範囲しかシグナルを捉えられないという結果になった。一方、PCV D1/D3のプライマーセットでは4log以上にわたってシグナルが検出できた。したがって、PCV D1/D3プライマーを用いることによりCCL33由来ゲノムを標準ランコントロールとして使用可能と考えられる。

D. 考察

in vitroウイルス試験は、迷入する可能性あるウイルスを広範に検出することを目的としており、血清学的試験やウイルス抗原試験、あるいはPCRを含む核酸増幅試験（NAT）のように迷入するウイルスを想定した試験と試験の考え方が異なっている。本年度は、比較的広範なウイルスに対応可能であり外来性ウイルス試験として推奨されているインビトロウイルス試験に用いられる細胞の中でも、ヒトウイルスまたはヒトに感染することがよく知られているウイルスに対する広い感受性を示す細胞として、Vero細胞、MRC-5細胞、HEK293細胞、さらに非エンベロープウイルスに対して感受性がある324K細胞等を取り上げ、最適な試験条件やクローニングによる選択を行うことを目指している。

本年度は、Vero細胞のJCRB NIHS0111株これらの細胞をクローニングし、ウイルス感受性の高い細胞株を選択した。JCRB NIHS0111株は樹立後比較的継代数のすかない株であり、ウイルスの感受性が高いことが予測される。別に長期にわたって継代しているVero細胞（ATCC由来）についてもクローニングを行いウイルスに対する感受性を解析した。ATCC由来Vero細胞のクローン細胞ではHSV-1への感受性がクローンごとに大きく異なっていた。

一方JCRB NIHS0111株は、HSV-1を用いた際にもクローンごとに感受性が異なっていたがATCC由来Vero細胞クローンほどそのバラつきは大きくなかった。おそらくATCC由来Vero細胞はJCRB NIHS0111株と異なり長期の継代の中で不均一性が拡大しており、そのためにクローンごとの感受性の差異が拡大していると考えられる。また、JCRB NIHS0111株を用いてVero細胞に指向性あるPoliovirusやSindbis virusに対する感受性についても解析してみたところ、感受性の差異が見出された。

この中で2つのクローンを選択して、増殖能などを含めて評価を行い、クローン2を最終的に選択した。今後本細胞クローンについて今回検討していないウイルスに関する感受性についても検討を進める予定である。

一方、in vitroウイルス試験では培養条件や感染条件、あるいはウイルス感染後の培養条件などがウイルス検出能に大きく影響すると考えられる。例えばHEVのin vitro感染条件では、ピルビン酸 (Emerson et al; J Virol. 2004, 78(9): 4838-4846) や Insulin/Transferrin/selenium (ITS) (Kanai et al. BMC Research Notes 2012, 5:4) の添加が重要との報告がある。本年度は、培養条件に関していくつかの因子の影響を検討し、最適な感染条件を探ることにした。その結果、Vero細胞をピルビン酸やITSを添加・非添加で培養し、HSV-1、Sindbis virus、PoliovirusのTCID50を測定した。その結果最適なウイルス増幅条件はウイルスの種類によって異なるが、これらの因子を適切に組み合わせることにより高感度にウイルスの増幅を取られることができることが明らかになった。ピルビン酸やITSに対する感受性の

違いから、ピルビン酸のみを添加した系とピルビン酸/ITSの両方を添加した2つの条件を設定することによりウイルス検出の感度を高感度にとらえることが可能と判断した。

また、培養後にこれらの因子を添加しただけでは、ウイルスの増幅性にはあまり影響を与えないことが分かった。おそらくピルビン酸やITSを添加して培養することによりウイルスに対する感受性が増加するのではないかと考えられる。

MRC-5についても検討を行ったが、ITSに関してはそれほど優位な感度上昇は認められなかった。これはVero細胞と異なり、MRC-5が正常2倍体細胞であることが要因かもしれない。

これ以外にHEK293細胞、324K細胞に関してもVero細胞と同様の検討を開始しており、27年度にかけてその詳細を得る予定である。

一方、外来性ウイルス試験（迷入ウイルス試験）としてはin vitro細胞培養系が広く用いられているが、試験に際しては適切な感度やウイルスに対する感受性を有していることを陽性ランコントロールとして用いることが有用である。本研究ではバイオセーフティーの観点からin vitroに用いる細胞に指向性のあるワクチン株を用いることを想定している。本年度はVero細胞で増幅可能なPoliovirus（生ワクチンSabin株）を陽性コントロールとして用いるための評価を行った。PoliovirusのTCID50と定量的RT-PCRの相関性までを評価した。さらに、デジタルPCRによりコピー数とこれらの関連について検討している。

再生医療/細胞治療では接着細胞の培養