

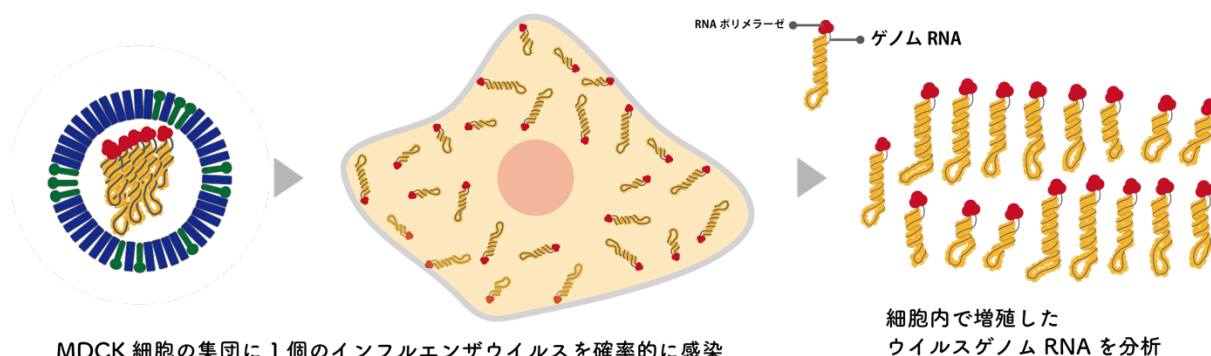
東京大学

インフルエンザウイルスの変異予測・ワクチン設計に道 ——集団内の「潜在変異プール」を単一分子ゲノム解析で可視化——

発表のポイント

- ◆インフルエンザウイルス集団の内部に潜む遺伝子多様性を、単一 RNA 分子レベルで高精度に計測できる新しいゲノム解析法を確立しました。
- ◆ユニーク分子識別子を用いて、シーケンス由来の誤りを劇的に低減し、インフルエンザウイルス集団内の変異分布を測定することに成功しました。
- ◆インフルエンザのみならず、多様な RNA ウイルスの進化メカニズムの理解や、AI を用いた変異予測・ワクチン株選定の高度化に貢献することが期待されます。

定量的に分析できる方法の開発



MDCK 細胞の集団に 1 個のインフルエンザウイルスを確率的に感染

細胞内で増殖した
ウイルスゲノム RNA を分析

感染し増殖したインフルエンザウイルスゲノムにはどこにどれくらい変異が入るのか？

概要

東京大学大学院工学系研究科の玉尾研二大学院生、東京大学大学院工学系研究科（兼）プラネタリーヘルス研究機構 野地博行教授、田端和仁准教授の研究グループは、インフルエンザウイルス集団の内部に潜む遺伝子多様性を、単一 RNA 分子レベルで高精度に計測できる新しいゲノム解析法を確立しました。

本研究では、ウイルス RNA から合成した DNA にユニーク分子識別子 (UMI) (注 1) を用いて、シーケンス由来の誤りを劇的に低減しました。その結果、1 塩基当たり 10^{-5} 程度という極めて低い誤り率で、インフルエンザウイルス集団内の変異分布を測定することに成功しました。

この手法を、1 個のインフルエンザウイルス粒子から増殖させたウイルス集団に適用したところ、同じ株由来であっても、集団中には 1 つの配列を中心として多数の少数変異体が広がって存在していること、その一部はランダム変異では説明できない頻度で蓄積していることが分かりました。さらに、情報理論に基づく解析によって、こうした多様性がウイルスの進化ポテンシャルを定量的に評価できることを示しました。

本成果は、インフルエンザのみならず、多様な RNA ウイルスの進化メカニズムの理解や、AI を用いた変異予測・ワクチン株選定の高度化に貢献することが期待されます。



図 1：本研究の概略図

発表内容

背景

インフルエンザウイルスは、エラー率の高い RNA 依存性 RNA ポリメラーゼを用いて増殖するため、1 人の感染者の体内だけでも非常に多様な変異体が共存していることが知られています。このような「似ているが少しずつ異なる」ゲノムの集合は、準種 (Quasi-species) (注 2) と呼ばれ、ウイルスが免疫や薬剤といった環境変化に素早く適応する源泉と考えられています。準種内のゲノム配列の多様性を定量的に測定し評価する手法の開発は、実験室内での大規模なデータ収集の実現につながると考えられます。

一方で、通常のシーケンス技術では、試料調製やシーケンサーに由来する技術的エラーが避けられず、特に 0.1% 以下といった低頻度変異を真に「生物学的な変異」として見分けることが困難でした。そのため、ウイルス集団内に実際にどのような変異がどの頻度で存在しているのか、またそれが将来の変異株出現とどう関わるのかを、定量的に評価することは大きな課題でした。

インフルエンザ A ウイルス PR8 株を MDCK 細胞 (注 3) に極低濃度で感染させ、1 個のウイルス粒子から増殖したと考えられる 4 つの独立集団を取得し、それぞれからウイルス RNA を抽出しました。これらのウイルス RNA に逆転写 (RT) 反応による UMI の付与と PCR を施し、シーケンシング結果から上記と同様に単一分子レベルのゲノム配列を復元しました。

同時に、ウイルスゲノム様配列を持つプラスミドから T7 RNA ポリメラーゼで試験管内転写した RNA についても、同じ方法でシーケンスし、技術的エラーの実測値を取得しました。

結果

(1) UMI 付き単一分子シーケンスによるエラー率の大幅低減

研究グループはまず、クローン化プラスミド DNA に UMI を結合し、PacBio Revio プラットフォームでシーケンスした後、同じ UMI を持つリードをまとめてコンセンサス配列を作成する手法を検証しました。その結果、UMI グループサイズ（同じ UMI を持つリード数）のしきい値を 3 以上に設定すると、エラー率は 3.81×10^{-5} まで低下することを示しました。

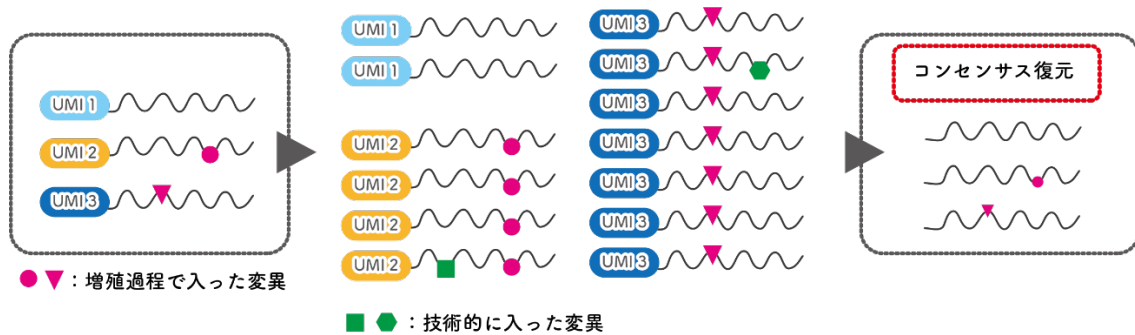


図 2 : UMI 分子を用いて、細胞内増加でウイルス RNA に入る本来の変異（生物学的変異）と実験操作で入る変異を区別し、加えて増幅数の偏りを元の分布に復元することができる。

(2) 技術的エラーと生物学的変異の切り分け

たとえば PB2 遺伝子では、ウイルス RNA で観測された変異率 1.19×10^{-4} に対し、試験管内転写 RNA での変異率は 2.22×10^{-6} にとどまり、検出された変異の約 98% がウイルス増殖過程で生じた「生物学的変異」と推定されました。また、この高い配列決定精度から本手法が 10,000 分の 1 (0.1%) レベルの頻度で存在する変異体を高い確率で検出できることを確認しました。

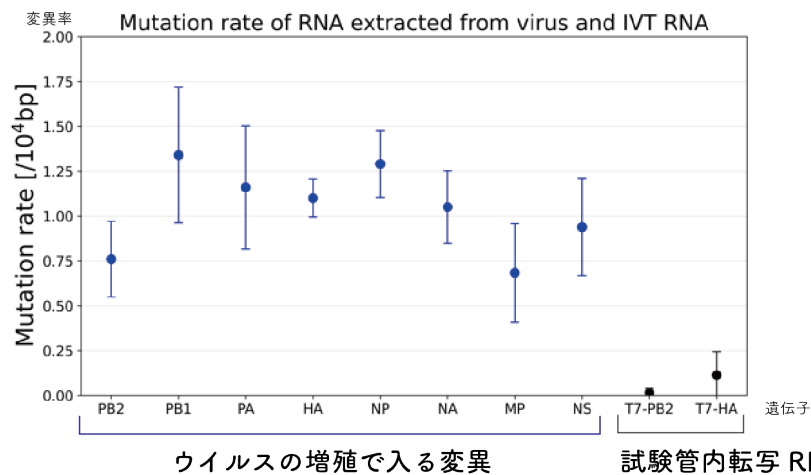


図 3 : 変異率の比較。試験管内転写に比較するとウイルス増殖過程で生じた変異が顕著に高いことがわかる。

(3) 準種構造と選択の痕跡の可視化-1

UMI 補正後のデータから、アミノ酸配列の多様性を Shannon エントロピー（注 4）を用いて評価したところ、全ての遺伝子で試験管内転写 RNA よりもウイルス RNA の方が高いエントロピーを示し、単一粒子由来の集団内であっても多様なアミノ酸変異が蓄積している、すなわち高い進化ポテンシャルを秘めた変異プールが形成されていることが明らかになりました。特に、HA の抗原部位近傍では平均的な変異率よりも高い値が観測され、免疫応答との関わりが示唆されました。

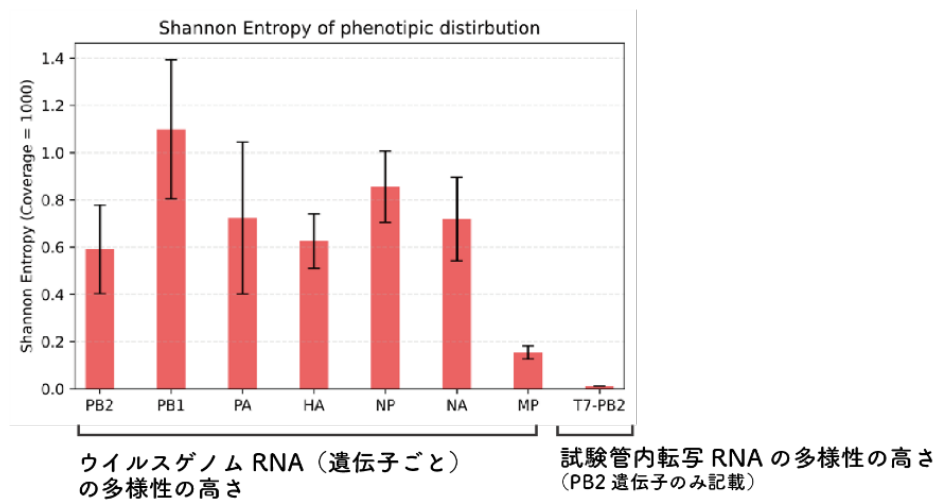


図 4：遺伝子ごとの多様性の高さの比較。試験管内転写 RNA に比較するとウイルスゲノム RNA の多様性が顕著に高いことがわかる。

(4) 準種構造と選択の痕跡の可視化-2

さらに、各遺伝子について「各塩基位置で何回変異が観測されたか」の分布 $P(k)$ を作成し、平均変異回数から導かれるポアソン分布 $Q(k)$ と比較しました。もし変異導入が完全にランダムであれば、 $P(k)$ は $Q(k)$ に近い形になりますが、実際にはウイルス RNA ではポアソン分布からの有意な逸脱が観測されました。この差を Jensen-Shannon Divergence (注 5) で定量化したところ、試験管内転写 RNA に比べてウイルス RNA の方が大きな値を示し、一部の塩基位置では変異が選択的に蓄積していることが示唆されました。

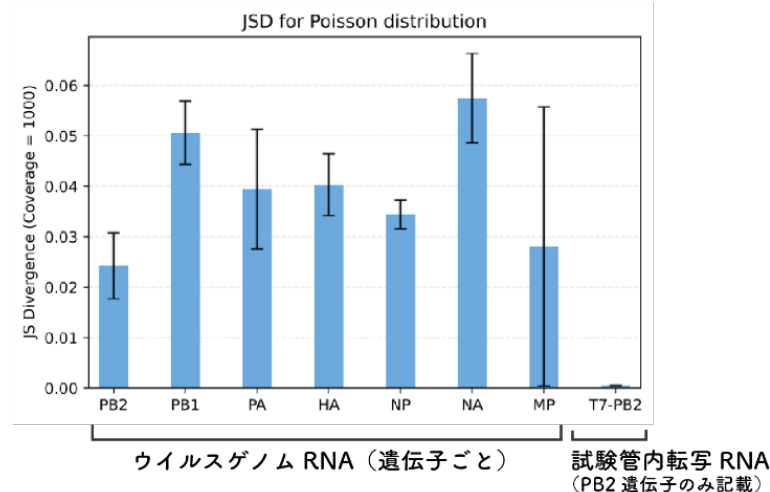


図 5：遺伝子に入る変異は偏りがあるのかを分析したグラフ。ウイルスゲノムは試験管内転写 RNA と比較して顕著に高い値を示しており、ポアソン分布から有意に逸脱している、つまりランダムでない形での変異の蓄積が行われていることがわかる。

(5) 将来出現し得る変異株の「予備軍」の検出可能性

競合型ロジスティック成長モデル (注 6) を用いたシミュレーションから、増殖後期に集団内で発生した変異であっても、野生株より 5 倍以上高い増殖能を持てば最終的に 0.1% 以上に達して検出可能となることが示されました。これは、薬剤投与や免疫圧などの環境

変化が加わった際に、どのような変異体が台頭し得るかを、実験的に予測するための基盤となります。

さらに、既知の薬剤耐性変異である PA 遺伝子 I38X 変異もプール内に出現していることが確認され、ウイルス集団の適応力の広がり大きさがうかがわれました。

今後の展開と意義

本研究で確立した単一分子シーケンス法は、インフルエンザウイルスに限らず、エラー率の高い RNA ウイルス全般の準種解析に適用可能です。特に、薬剤耐性や免疫逃避、宿主域拡大に関わる変異がどの程度の頻度で自然に生じ、そのうちどれが実際に選択されるのかを、実験室内でリアルタイムに追跡できる手法として期待されます。さらに、本研究の手法で得られる高精度な変異分布データを、機械学習や AI モデルに入力することで、パンデミックを引き起こし得る変異パターンの早期予測などの社会的な貢献が期待されます。

感染症の流行は、地球環境や生態系の影響、人の都市社会の問題までもが複雑に絡み合っており起こっています。

本成果は感染症の流行を理解する基礎的な成果であり、上記のようなプラネタリーヘルスに資する成果です。

○関連情報：

プラネタリーヘルス研究機構

<https://riph.adm.u-tokyo.ac.jp/>

発表者・研究者等情報

東京大学 大学院工学系研究科

玉尾 研二 博士課程

東京大学 大学院工学系研究科（兼）プラネタリーヘルス研究機構

野地 博行 教授

田端 和仁 准教授

論文情報

雑誌名：eLife

題 名：Heterogeneity of Genetic Sequence within Quasi-species of Influenza Virus Revealed by Single-Molecule Sequencing

著者名：Kenji Tamao, Hiroyuki Noji, Kazuhito V Tabata

DOI：https://doi.org/10.7554/eLife.108882.1

URL：<https://elifesciences.org/reviewed-preprints/108882>

研究助成

本研究は科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「AI が先導するオートメーションタンパク質工学の創出」（No. JPMJCR22N2）、日本医療研究開発機構（AMED）2024-2025 年度 UTOPIA AI 研究発掘プログラム（No. JP223fa627001）の支援を受けて行われました。

用語解説

(注 1) ユニーク分子識別子 (UMI : Unique Molecular Identifier) : 数塩基～十数塩基程度の短い DNA 配列からなる分子バーコード。ライブラリ調製の増幅前の段階で各 RNA/DNA 分子に一対一対応で付加することで、PCR で生じたコピーを区別し、元の分子数の正確なカウントやシーケンスエラー補正を可能にする。

(注 2) 準種 (Quasi-species) : 高い変異率で増殖する RNA ウイルスなどで見られる、ある配列を中心に少しずつ配列の異なる多数のゲノム変異体が集団として共存している状態。免疫回避や薬剤耐性獲得など高速な進化の源になると考えられている。

(注 3) MDCK 細胞 : Madin-Darby Canine Kidney の略で、イヌ腎臓由来の上皮様培養細胞株。インフルエンザウイルスをはじめとする多くのヒトインフルエンザウイルスの分離・増殖に広く用いられており、ワクチン製造用の細胞基材としても利用されている。

(注 4) Shannon エントロピー : 情報理論で導入された量で、ある確率分布の「不確実さ」や「多様性」の大きさを数値化したもの。取り得る状態の種類が多く、かつそれぞれが均等な確率で現れるほどエントロピーは高くなる。

(注 5) Jensen-Shannon Divergence (JSD) : 2 つの確率分布がどれだけ異なっているかを測る統計量。0 に近いほど分布が似ており、1 に近いほど違いが大きい。非対称で値が発散し得る KL ダイバージェンスと比べ、JSD は常に有限で対称な「距離」として扱える。

(注 6) ロジスティック成長モデル : 初期には指数関数的に増えるが、資源が限られると成長が頭打ちになる個体群の増殖を記述する数理モデル。初期条件として初期個体数、増殖率、環境収容力を与えることで、個体数の時間変化をシミュレーションすることができる。競合型モデルでは野生型と変異型で共通の資源を奪い合う形でシミュレーションを行う。

問合せ先

〈研究内容について〉

東京大学 大学院工学系研究科 (兼) プラネタリーヘルス研究機構

准教授 田端 和仁 (たばた かずひと)

〈機関窓口〉

東京大学プラネタリーヘルス研究機構事務室

東京大学 大学院工学系研究科 広報室