

## 隕石衝突の極限状態を「高圧ねじり」手法によって再現

～生命誕生の謎を解く RNA 前生物化学への示唆～

### ポイント

- ① 隕石衝突の極限環境を再現する「高圧ねじり (HPT), ※1」手法を用い、生命の起源物質である RNA 前駆体 (アデノシンーリン酸 (AMP, ※2) の振る舞いを世界で初めて解明。
- ② 高圧・高せん断の極限環境下では、AMP はリボ核酸 (RNA, ※3) 鎖へと繋がる「重合 (※4)」を起こさず、アデニンやリン酸リボースなどの多様な有機断片へと分解・再編成 (※5) されることを、X線回折・ラマン分光・核磁気共鳴 (NMR) ・質量分析などの包括的分析で確認。
- ③ 本研究は、隕石衝突が RNA の化学進化において「合成」だけでなく「分解」と「再編成」という複雑な役割を果たした可能性を示唆し、生命の起源を考える上での新たな視点を提供する。

### 概要

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (WPI-I2CNER) の Edalati Kaveh 准教授、Hidalgo-Jimenez Jacqueline テクニカルスタッフ、Nguyen Thanh Tam 学術研究員らの研究チームは、隕石や彗星などの小天体衝突が初期地球にもたらした極限環境が、生命の起源物質である RNA の前生物化学 (※6) に与える影響を調査しました。高圧ねじり (HPT) という革新的な手法を用いて衝突時の高圧・高せん断環境を再現し、RNA の主要な構成要素であるアデノシンーリン酸 (AMP) の安定性と反応性を、乾燥状態および含水状態 (10 wt% 水)、常温および沸点温度 (300K, 373K) といった多様な条件下で評価しました。

従来、隕石衝突は生命の材料を合成する役割が強調されてきました。しかし本研究では、X線回折、ラマン分光、赤外分光、核磁気共鳴 (NMR)、走査型電子顕微鏡、質量分析などによる包括的分析により、AMP が RNA 鎖へと繋がる重合反応を起こす証拠は見つかりませんでした。代わりに AMP は、核酸塩基に由来するアデニン断片 ( $C_5H_5N_5$ )、リン酸リボース断片 ( $C_5H_5O_5P$ )、脱水アデノシン ( $C_{10}H_{11}N_5O_3$ )、プロトン化アデノシン ( $C_{10}H_{14}N_5O_4^+$ )、酸化アデノシン ( $C_{10}H_{13}N_5O_5$ ) といった、多様な有機化合物へと分解・再編成されることを発見しました。HPT 処理中のトルク測定 (※7) からは、AMP の極限環境下での特異な力学的挙動も明らかになりました。

本成果の意義は、初期地球における RNA の前生物化学進化において、隕石衝突が「合成」だけでなく「分解」と「再編成」という複雑な化学プロセスを駆動した可能性を実験的に示した点にあります。また、重合が進行しなかったという結果から、RNA のような複雑な生体高分子の出現には、高圧・高せん断の力学的ストレスに加えて、鉱物触媒や紫外線照射などの環境的・触媒的因子の関与が不可欠であったことが示唆されます。本研究は、地球外物質衝突という極端な物理環境が前生物化学に果たした役割を、新しい手法で検証するための重要な基盤を提供するものです。生命の起源という科学的な謎を解き明かす上で、力学的作用と化学反応の相互作用を考慮した新たな視点を切り開きます。

本研究は、2026年1月10日(土)付で学術誌『Astrobiology』に掲載されました。

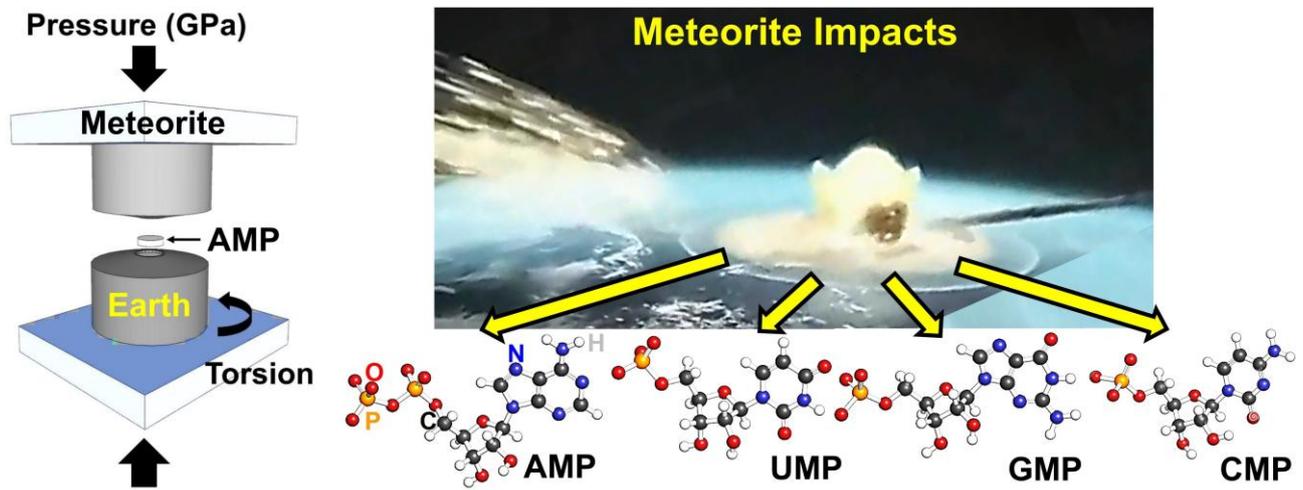


図 1. 高圧ねじり (HPT) 法による隕石衝突模擬実験の概念図

彗星や隕石などの小天体衝突が初期地球にもたらす高圧・高せん断の極限環境を、HPT 装置で再現し、RNA の構成単位となるヌクレオチド (AMP、UMP、GMP、CMP) の化学反応と安定性を調査する。本手法により、天文イベントが前生物化学、特に生命の起源に不可欠な分子である RNA の形成にどのような影響を与えたかを解明する。

### 【研究の背景と手法】

リボ核酸 (RNA) は、生命の起源において自己複製と触媒機能を兼ね備えた最初の分子であったとする「RNA ワールド仮説」の中心的存在です。しかし、RNA のような複雑な生体高分子が、初期地球の環境下でどのようにしてより単純な有機分子 (ヌクレオチド) から形成されたのかは、未だ大きな科学的謎です。一方、隕石や彗星などの小天体衝突は、初期地球に高圧・高温・高せん断という極限環境をもたらし、前生物学的な化学進化を促進した可能性が指摘されてきました。実際、隕石からアミノ酸や核酸塩基が見つかり、宇宙が生命の材料を供給したことが示唆されています。

従来の研究では、衝撃波実験などにより、こうした衝突環境が有機分子を「合成」する役割が注目されてきました。しかし、衝突時に生じる巨大な「せん断力」(材料を歪ませる力) の影響はほとんど考慮されてきませんでした。せん断力を含む極限環境では、分子の分解や、合成とは異なる経路での化学変換が起こる可能性があります。RNA の直接の前駆体であるアデノシンリン酸 (AMP) が、衝突のような極限環境下でどのように振る舞うか (安定に存在できるか、分解するか、あるいは重合して RNA 鎖の形成につながるか) は、生命の起源シナリオを考える上で極めて重要な問いですが、実験的な検証はこれまでありませんでした。

本研究では、図 1 に示すように、高圧とせん断変形を同時に印加できる独自の実験手法「高圧ねじり (HPT)」を用いて、隕石衝突の極限条件を模擬し、AMP の運命を初めて詳細に追跡しました。初期地球の多様な環境を反映させるため、乾燥状態と含水状態、常温と沸点温度という条件を設定し、AMP が RNA 形成に向かうのか、それとも別の化学的運命をたどるのかを包括的に調査しました。

生命誕生の謎を解く鍵は、40 億年前の地球に隕石が衝突した「その瞬間」にあります。私たちは、その瞬間を実験室で再現するため、超高圧とかつてない「ねじれ」の力を同時にかけられる魔法のような装置「高圧ねじり (HPT)」を使いました。これは、隕石が大地に激突する時に起こる、あらゆるものを押しつぶし、かき混ぜる力を再現する世界でも類を見ない装置です。この装置に、生命の設計図「RNA」を作る材料「アデノシンリン酸 (AMP)」の白い粉をセットしました。乾いた状態 (乾燥状態) と、ほんの少し水を含んだ状態 (含水状態) の両方で実験し、また常温と沸点温度という、原始地球の多様な環境を再現しました。深海の底よりもはるかに高い圧力 (6 万気圧) をかけながら試料をねじり、隕石衝突の「衝撃」をシミュレーション。この衝撃の前後で AMP に何が起きたのかを、図 2 および 3 に示

すように、科学の“名探偵”たちが総力を挙げて調べ上げました。X線が結晶の中を透視し、レーザーが分子の“声”（振動）を聞き分け、磁気（NMR）が原子同士のつながり方を解き明かし、超高感度の質量分析計が、ほんの少しの分子の変化すら見逃しませんでした。まるで、ひとつの小さな物質の「運命」を、あらゆる角度から追いかける大型科学捜査のようなプロジェクトです。これにより、私たちは、隕石衝突という極限環境が AMP に具体的に何をしたのか、そのすべての痕跡を、世界で初めて捉えることに成功したのです。

### 【研究の成果と意義】

実験の結果、私たちの眼前には驚くべき光景が広がっていました。隕石衝突の極限環境を再現した後、RNA のレンガである AMP の白い粉は、黒っぽく変色していました。これは、何か劇的な化学変化が起きたことを示す最初のサインでした。そして、あらゆる科学の目で詳細に調べた結果、ある重要な「事実」と、それに続く数々の「発見」が明らかになりました。最も重要な事実は、AMP が RNA へとつながる「鎖」を一切形成（重合）しなかったことです。私たちが期待した「生命の材料がつながる瞬間」は、この実験条件下では起こりませんでした。しかし、その代わりに、AMP は全く別の道を選んだのです。それは「分解」と「再編成」への道でした。AMP は、衝突の衝撃によってばらばらに分解され、「アデニン」（DNA や RNA の塩基の一つ）や、「リボースリン酸」（RNA の骨格材料）といった、よりシンプルな有機物のパーツに変換されていました。さらに、水が奪われた「脱水アデノシン」や、酸素と結びついた「酸化アデノシン」など、多様な新しい分子が生み出されていることも確認されました。つまり、隕石衝突のエネルギーは、AMP を「壊し（分解）」、そして「組み替える（再編）」化学工場として働いたのです。

この発見は、生命の起源を考える上で、まったく新しい視点を提供します。これまで、宇宙からの衝突は、生命の材料を「運んでくる」か「合成する」ポジティブな役割だけが強調されてきました。しかし、私たちの実験は、その衝突によって、せっきくの材料を「分解」してしまうという、複雑で逆説的な側面も持っていたことを示しました。これは、初期地球の海や地表で起こった化学進化が、私たちが考えていたよりもはるかにダイナミックで、試行錯誤に満ちたプロセスであった可能性を意味します。RNA のような複雑な分子が誕生するためには、単に材料がそろっただけでなく、それらが「壊されずに」「正しい条件で」「ゆっくりと」つながっていくための特別な環境——たとえば鉱物の表面や、特定の温度が保たれた場所——が必要だったのかもしれません。本研究は、生命誕生という壮大な物語の、これまで光の当たらなかった「分解と再生」の一章に、初めて実験的な証拠をもって光を当てた、画期的な成果と言えるでしょう。

### 【今後の展開】

今回の研究は、「隕石衝突という極限環境下では、RNA の材料は壊されてしまう」という、一見すると生命誕生にとって「ネガティブ」な結果をもたらしました。しかし科学において、予想外の結果こそが、新たな探究の始まりです。私たちはこの発見を、生命の起源を考える「終点」ではなく、次の大きな問いへの「起点」と捉えています。今後は、「では、どうやって壊されずに、RNA は誕生したのか？」という新たな謎を解明していく予定です。単純な AMP だけではなく、初期地球に存在したかもしれない、より多様な有機分子の混合物や、粘土などの「鉱物」の表面で何が起こるかを調べていきます。鉱物は、有機分子を守り、特定の形に整列させる「分子の足場」として働く可能性があります。また、深海熱水孔のような「ゆるやかな熱」や、紫外線などの「光のエネルギー」が、高圧・高せん断の衝撃とどう組み合わせるのかにも着目します。さらに、今回威力を発揮した「高圧ねじり（HPT）」手法は、隕

石衝突だけでなく、巨大氷天体の衝突や、原始地球の深部マントルにおけるダイナミックな環境など、これまで実験室で再現が難しかった極限環境を模擬する強力なツールとして、生命起源研究に新風を吹き込むでしょう。生命がどのようにして無機質な世界から生まれたのか。その道筋は、一つではなく、多くの「失敗」と「偶然」と「条件」が積み重なった複雑なプロセスだったに違いありません。本研究成果は、その壮大なプロセスのほんの一片、しかし確かな一片を明らかにし、次の探検者たちへとバトンを渡すものです。究極の謎に挑む、この小さくも果てしない旅は、まだ始まったばかりです。

【参考図】

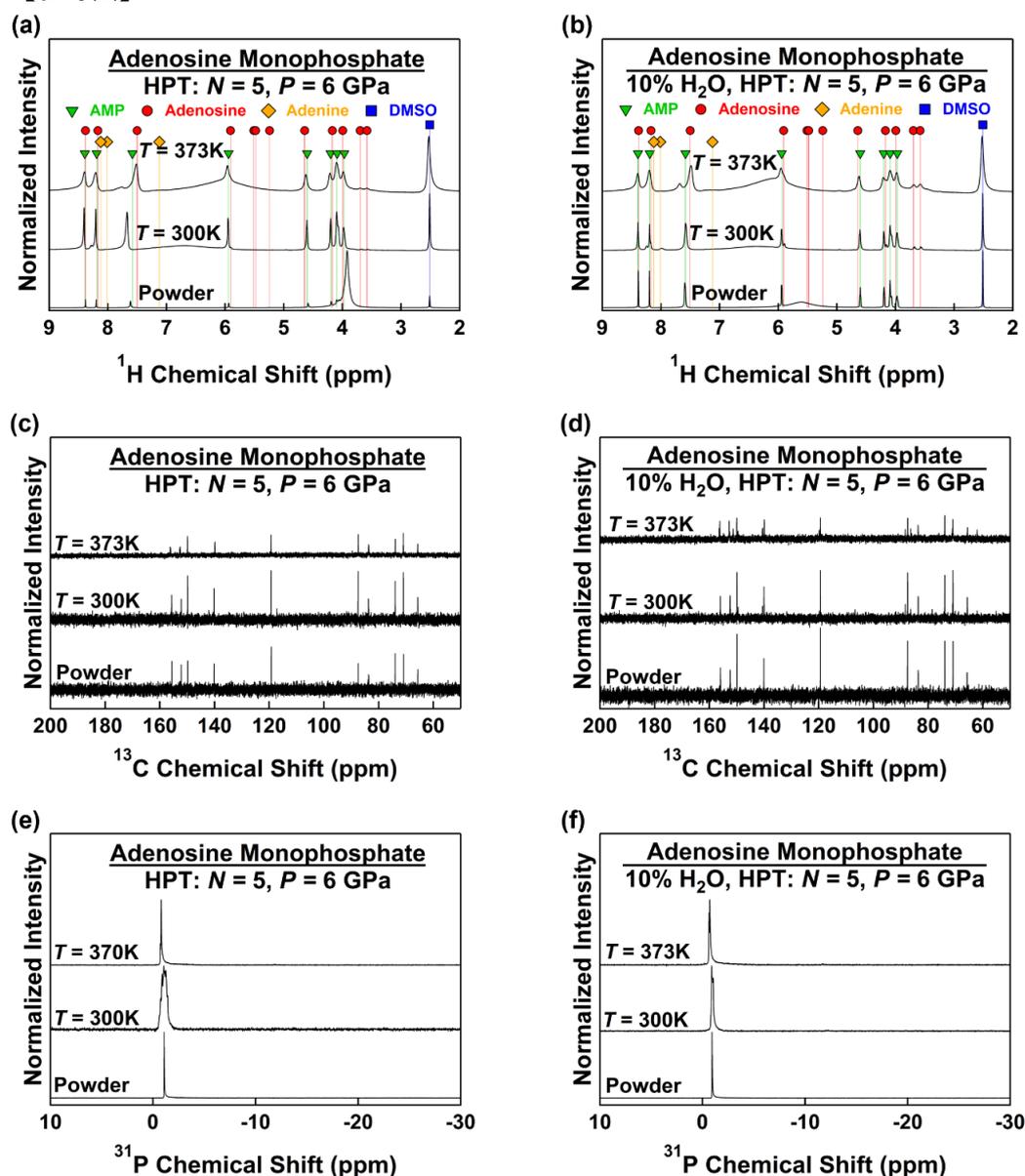


図2. アデノシンリン酸の核磁気共鳴スペクトル

(a, b) プロトン ( $^1\text{H}$ )、(c, d) 炭素 ( $^{13}\text{C}$ )、(e, f) リン ( $^{31}\text{P}$ ) のスペクトルを示す。左列 (a, c, e) は乾燥条件、右列 (b, d, f) は含水条件における、高圧ねじり (HPT) 処理前後のデータであり、常温 (300 K) と沸点温度 (373 K) で処理が行われた。NMR スペクトルの分析により、HPT 処理後の AMP から、アデノシンおよび核酸塩基であるアデニンの存在が確認された。これは、AMP がより小さな分子へと分解したことを示す決定的な証拠である。一方、スペクトル中にアデノシン二リン酸 (ADP) やアデノシン三リン酸 (ATP) の形成を示すピークは検出されなかった。これは、HPT 処理によってリン酸基が追加されるような、エネルギー蓄積型の反応 (重合への第一歩) は進行しなかったことを意味する。これらの結果は、今回の実験条件下では、AMP が RNA 鎖の形成につながる「重合」を起こさず、逆に「分解」する化学経路を優先したことを、原子レベルで明らかにしている。

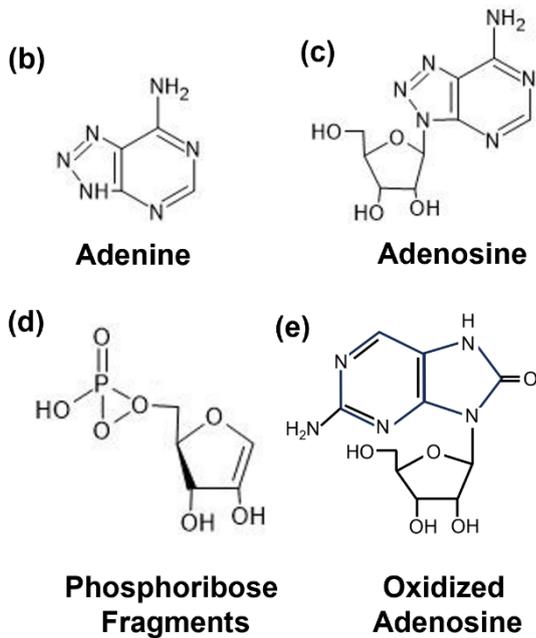
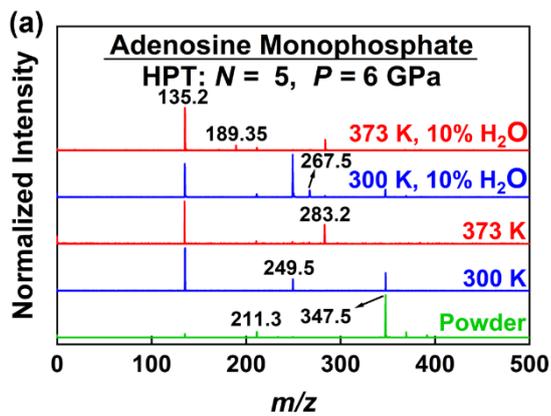


図3. (a) アデノシンリン酸のマトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析 (MALDI-TOF MS) プロファイル。乾燥状態および含水状態の試料について、常温と沸点温度での高圧ねじり (HPT) 処理前後のデータを示す。(b) アデニン、(c) アデノシン、(d) リン酸リボース断片、(e) 酸化アデノシンの分子構造。質量分析の結果、未処理の AMP は質量電荷比  $m/z = 347.5$  に明確なピークとして検出された。しかし、HPT 処理後、特に 373K での処理後では、この AMP のピーク強度は著しく減少、または消失した。その代わりに、新たな複数のピークが出現し、これらは AMP の分解・変換によって生成した分子 (アデニン断片  $m/z = 135.1$ 、リン酸リボース断片  $m/z = 189.3/211.3$ 、脱水アデノシン  $m/z = 249.5$ 、プロトン化アデノシン  $m/z = 267.5$ 、酸化アデノシン  $m/z = 283.2$ ) に対応していることが確認された。この質量分析データは、AMP が HPT 処理によって RNA ポリマーへと成長するのではなく、多様な低分子有機化合物の「混合物」へと変換されたことを直接的に証明する決定的な証拠となった。

## 【用語解説】

### (※1) 高圧ねじり (HPT)

超高圧（数万気圧）と、強い「ねじれ」の力を同時に材料にかけることができる特殊な加工・実験手法。隕石衝突時に発生する、圧縮だけでなく地層をかき混ぜるようなせん断力を再現するために用いた。金属の強化など材料工学で開発された技術を、生命起源研究に初めて応用した点が新しい。

### (※2) アデノシン一リン酸 (AMP)

生命の設計図である RNA（リボ核酸）を構成する、基本的な「レンガ」の一つ。細胞内ではエネルギーの通貨「ATP」の関連物質でもある。今回の研究では、RNA ができる前の「前生物化学」の段階で、この AMP が宇宙の衝撃にどう反応するかを調べた。

### (※3) RNA（リボ核酸）

DNA と並ぶ生命の基本分子。遺伝情報を運ぶだけでなく、自分で化学反応を進める「触媒」としても働くことができる。生命が最初に持っていた分子は RNA だったとする「RNA ワールド仮説」の主役であり、その起源の解明は生命誕生の核心に迫る手がかりとなる。

### (※4) 重合

同じ種類の小さな分子（モノマー）が次々とつながり、鎖状や網目状の大きな分子（ポリマー）になる化学反応。今回の研究では、AMP という「レンガ」がつながって RNA の「鎖」になる反応を指す。実験ではこの反応は確認されなかった。

### (※5) 分解／再編成

大きな分子が壊れて小さな部分に分かれること（分解）、そしてそれらの部分が別の新しい分子に組み替わること（再編成）。本研究では、隕石衝突の模擬環境下で、AMP が RNA 鎖を作る代わりに、さまざまな有機分子へと分解・再編成されることが明らかになった。

### (※6) 前生物化学

生命が誕生する「前」の段階で、有機分子がどのように形成され、複雑化していったのかを研究する分野。地球初期や宇宙空間といった環境を想定し、無機物から生命の材料ができる過程を探求する。

### (※7) トルク測定

回転軸に作用する力の大きさ（モーメント）を定量的に評価する測定。

## 【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（挑戦的研究(萌芽)）（【課題番号 22K18737】）の助成を受けたものです。

## 【論文情報】

論文名：High-Pressure Torsion-Induced Transformation of Adenosine Monophosphate: Insights into Prebiotic Chemistry of RNA by Astronomical Impacts

著者名：Kaveh Edalati\*, Jacqueline Hidalgo-Jimenez, Thanh Tam Nguyen(九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (WPI-I2CNER))

雑誌名：Astrobiology

オープンアクセス：<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/15311074251412318>

DOI：10.1177/15311074251412318

オンライン公開日：2026年1月10日(土)(『Astrobiology』, Vol. 26, No. 1, pp. 1-9 に掲載)

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (WPI-I<sup>2</sup>CNER)

准教授 エダラティ・カベール (Edalati Kaveh) (\*責任著者)

TEL/FAX：092-802-6695

Mail：kaveh.edalati@kyudai.jp

テクニカルスタッフ イダルゴ=ヒメネス・ジャクリーン (Hidalgo-Jimenez Jacqueline)

Tel/Fax：092-802-6744

Mail：jacquelinehidalgo93@gmail.com

学術研究員 グエン・タン・タム (Nguyen Thanh Tam)

TEL/FAX：092-802-6744

Mail：nguyen.thanh.tam.959@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp