

タイトル	プラナリアの超重力応答：高い生存能と再生過程の脆弱性
著者	松本，里緒菜； MATSUMOTO, Riona； 高橋，考太； TAKAHASHI, Kohta
引用	北海学園大学工学部研究報告(53)： 51-61
発行日	2026-01-09

プラナリアの超重力応答：高い生存能と再生過程の脆弱性

松 本 里緒菜*・高 橋 考 太**

Planarian Responses to Extreme Hypergravity : Robust Survival and Vulnerable Regeneration

Riona MATSUMOTO* and Kohta TAKAHASHI**

要 旨

プラナリアは高度な再生能力を持つ淡水性の扁形動物であり、組織再生や幹細胞機能の研究に広く利用されてきたモデル生物である。高等動物と共通する遺伝子機能を多く保持し、単純な体の構造と外的環境への高い適応力を併せ持つことから、極限環境下における多細胞生物の応答を評価するモデルとして有用である。本研究では、多細胞無脊椎動物であるプラナリアの過重力に対する耐性と再生能力に及ぼす影響を調べた。プラナリアは極めて高い過重力耐性を示し、24時間の曝露では $18,800\times g$ でも半数以上が生存し、 $8,400\times g$ では一時的な行動異常を示すものの、全個体が回復可能であった。さらに、 $2,100\times g$ では行動上の異常も認められなかった。一方で、再生過程は過重力に対してより高い感受性を示し、 $2,100\times g$ でも再生の遅延が観察された。重要なことに、こうした遅延が生じていても断片が致死の損傷を免れていれば、通常重力下では再生が進行し、最終的に正常な形態を回復できた。これらの結果は、完成された個体は高い過重力耐性を有する一方で、分裂細胞や組織再構築を伴う再生過程は過重力に対して脆弱であること、さらに多細胞体としての調整機構によって攪乱された再生も修復され得ることを示唆する。本研究は極限環境下における多細胞生物の耐性に関する基礎的知見を提供するとともに、宇宙生物学における生物資源輸送や生体機能維持の評価に対する示唆を与えるものである。

Planarians are freshwater flatworms with remarkable regenerative ability and have long been used as model organisms for studies of tissue regeneration and stem cell function. They retain numerous gene functions conserved with higher animals and, due to their simple body structure

* 北海学園大学工学部生命工学科，2025年度卒業

* Graduated in 2025, Department of Life Science and technology, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

** 教授，北海学園大学工学部生命工学科

** Professor, Department of Life Science and technology, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

and high adaptability to external environments, serve as a valuable model for evaluating multicellular responses under extreme conditions. In this study, we investigated the tolerance of planarians, as multicellular invertebrates, to hypergravity and its effects on regeneration. Planarians exhibited extremely high hypergravity tolerance : after 24 hours of exposure to $18,800\times g$, more than half of the individuals survived, and all animals exposed to $8,400\times g$ recovered from transient behavioral abnormalities. Moreover, no behavioral changes were detected at $2,100\times g$. In contrast, the regenerative process was more sensitive to hypergravity, with noticeable delays even at $2,100\times g$. Importantly, when fragments avoided lethal damage, regeneration proceeded under normal gravity and ultimately restored normal morphology despite the prior delay. These results indicate that while fully formed individuals possess strong resistance to hypergravity, regenerative processes involving dividing cells and tissue reconstruction are more fragile. Furthermore, the multicellular body appears to have an intrinsic regulatory capacity that enables disrupted regeneration to recover once normal gravity is restored. Overall, this study provides fundamental insights into the tolerance of multicellular organisms under extreme gravitational environments and offers implications for assessing biological resource transport and maintenance of physiological functions in astrobiological contexts.

1. 序論

重力は地球上のすべての生命に作用する基本的な物理因子であり、その生体への影響を理解することは生命科学および宇宙生物学における重要な課題である¹⁾。実際、宇宙環境における重力変動はヒトの生理機能に多大な影響を及ぼすことが示されている²⁾。また、運動能力を持たない植物では、重力方向の検出に基づいて根や茎の成長方向を調整する重力屈性が、環境への適応や効率的な資源獲得に不可欠である³⁾。

細胞レベルでは、重力などの機械的刺激がメカノセンシング経路によって感知され、生化学的シグナルに変換されることが示されている⁴⁾。近年、分裂酵母を用いた研究では、極端な過重力条件がオルガネラの配置や細胞分裂様式に影響を与えることが報告されている^{5), 6)}。しかし、多細胞動物において長時間の高重力曝露が個体の生存や組織再生に及ぼす影響は、依然として十分に解明されていない。

プラナリアは扁形動物門に属する淡水性無脊椎動物で、数ミリメートルから数センチメートルのサイズを持ち、行動や再生過程を肉眼あるいは実体顕微鏡で容易に観察できる利点を有する⁷⁾。日本では阿形清和らの研究グループにより、固有種ナミウズムシ (*Dugesia japonica*) を用いた先駆的研究が行われてきたが⁸⁾、近年では飼育の容易さと入手性の高さから、本研究で用いたアメリカツノウズムシ (*Girardia dorocephala*) やアメリカナミウズムシ (*Girardia tigrina*) などの外来種も教育・研究の現場で広く利用されている。プラナリアは、ヒトを始めとした高等動物と多くの遺伝子機能を共有し、単純な体構造と明瞭な行動様式、さらに顕著な

再生能力を併せ持つことから、神経系や再生の機能解析、環境応答の研究に適したモデル生物である^{7),8)}。

我々はこれまでに、単細胞真核生物である分裂酵母を用い、数千×gを超える極端な過重力（超重力）環境下でも細胞増殖が可能であることを示してきた⁶⁾。また、原核生物は極めて高い遠心加速度下でも生存・増殖し得ることが報告されており^{9),10)}、これは分子間相互作用と比較して重力の影響が細胞内スケールでは相対的に小さいためと考えられる¹¹⁾。一方で、オルガネラを有する真核細胞では、一定の過重力によって核やミトコンドリアが偏在し、細胞分裂に影響を及ぼすことが示されている^{5),6)}。単細胞生物を用いた研究により、過重力や重力変化に対する基本的な細胞応答が明らかになりつつある一方で、複数の細胞が統合的に振る舞うことで行動や再生を制御する多細胞動物における応答は、まだ十分に解明されていない。

そこで本研究では、プラナリアに対して24時間または96時間の過重力刺激を与え、個体の生存性、遊泳行動、および体軸切断後の再生過程への影響を評価することで、多細胞動物における過重力耐性および極限環境下の再生特性を明らかにすることを試みた。

2. 材料と方法

2.1 プラナリアの入手と飼育

実験に用いたプラナリア（*Girardia*属）は市販ペットショップ（charm楽天市場店）から入手した。種の同定は完全には確定できないが、体表模様と頭部形態を参考に同一種とみなした個体を用いた。飼育水には市販のミネラル天然水を用い、20℃のインキュベータで維持した。餌は鶏レバーを用い、実験には最後の給餌から10日以上経過した体長約1 cmの個体を使用した。飼育方法の詳細は先行報告¹²⁾を参照。

2.2 切断（再生実験）

再生能評価のため、遠心処理直前に剃刀で個体を頭部片と尾部片に二分した。切断は冷却したアルミブロック上で、個体が伸展して動きが鈍い時に行った¹²⁾。

2.3 過重力曝露

個体または切断片をそれぞれ1.5 mLチューブに1個体ずつ入れ、飼育水1 mLで満たして蓋を閉めた。高速遠心機（日立CF15RXII、アングルローターT15AP31）を用い、20℃で指定した回転数および時間で連続遠心を実施した。コントロールは同条件下でローター内に静置（1×g）とした。各rpmと換算×gは以下の通り⁶⁾：15,000rpm = 18,800×g、10,000rpm = 8,400×g、5,000rpm = 2,100×g、2,500rpm = 520×g、1,000rpm = 80×g。

2.4 水中環境における実効加速度の考慮

本研究の遠心処理はすべて、プラナリアを飼育水中に浸した状態で行った。流体中では浮力が働くため、生体が受ける実効加速度は遠心機設定上の名目加速度よりも小さくなる。実際の力学的負荷は、プラナリア体の密度と媒質密度の差、ならびに加速中の粘性抵抗に依存する。プラナリアの体密度が水とほぼ等しい場合、本研究で用いた数千×gの名目加速度は、実質的には数百×g程度に相当する可能性がある。したがって、本研究におけるg値は「試料に外部から加えられる力の指標」として解釈すべきであり、細胞・組織レベルで実際に作用した力の大きさを厳密に表すものではない。

2.5 観察と評価項目

遠心処理後、実体顕微鏡（Leica S8 APO）にデジタルカメラ（HDCE-X3N）を装着して動画・静止画を記録した¹²⁾。観察項目は処理直後および通常重力に戻してから24時間後および48時間後の生存、遊泳能、行動異常、体形異常である。再生実験では切断後10日間にわたり、創傷閉鎖、再生芽（blastema）の隆起、眼点形成（黒色の色素細胞の集積とその周囲における白色視細胞層の形成）、および遊泳能を毎日記録した。ピペットからの水流に反応しない個体の生存確認は、ピペット先端で軽く物理的刺激を与えた際の反応の有無により判定した。

3. 結果

3.1 プラナリア個体の超重力耐性

プラナリアの超重力耐性を評価するため、15,000rpm（18,800×g）、10,000rpm（8,400×g）、5,000rpm（2,100×g）の各条件（n=18）で24時間遠心処理を行った。コントロール群はローター内静置とした。観察項目は、遠心処理から通常重力下（1×g）に戻した後の各個体の生存、遊泳能、形態および行動異常の有無である（表1）。

表1. 遠心処理がプラナリア個体の生存および行動に与える影響

回転数 (rpm)	遠心力 (×g)	遠心時間 (h)	総数 (匹)	生存数 (匹)	異常行動個体数（匹）		
					直後	24h後	48h後
15,000	18,800	24	18	13(9*)	9*	7*	0*
15,000	18,800	6	18	18	18	3	0
15,000	18,800	1	18	18	0	0	0
10,000	8,400	24	18	18	18	0	0
5,000	2,100	24	18	18	0	0	0
0	1	24	18	18	0	0	0

各遠心条件における生存個体数および1×gに戻した直後、24時間および48時間後の異常行動個体数（ねじれ運動や尾部の反り返りなど、特徴的な異常運動を繰り返した個体の総数）を示す。*生存個体のうち体の断裂が認められなかった9個体について集計した。残り4個体は尾部断片のみが再生して正常個体となった。最下段はコントロール群。



図1. 高速遠心処理直後のプラナリア個体の異常行動と外形変化

18,800×gで24時間遠心処理した直後に、個体を培養シャーレへ移し、撮影ライト下で観察した。遠心処理を行っていないコントロール個体は光を避けて遊泳しようとする（A）。遠心処理後の個体は遊泳不能となり、らせん状に体をねじる「ねじれ運動」(B)を繰り返した。また、運動を停止した個体の多くは、頭部で底面に付着し尾部を反らせて浮かせる特徴的な姿勢（C）を示した。

1×gのコントロール群は全個体が頭部を左右に揺らしながら正常に遊泳し、光回避性を示した（図1A）。

18,800×g（24h）の群では18個体中5個体が致死となり、白色粘液に包まれ、外見上も体が破損していた。残り13個体は生存していたが、うち4個体は頭尾軸方向に断裂して2～3片に分離していた。外見上は形を保っていた9個体も、処理直後は多くが丸まり自発運動を示さず、刺激後もねじれ運動（図1B）や尾部の反り返り（図1C）を繰り返した。いずれの個体も遊泳はできず、シャーレ底面への固着が弱く浮遊しやすかった。これらの異常はリリース後3時間以上持続したが、24時間後には9個体中7個体がほぼ正常運動を回復し、48時間後には全生存個体が通常の遊泳運動を示した。断裂片のうち尾部断片は生存して再生を開始し最終的に正常個体へと回復したが、その他の断片は消失した。処理時間を6時間に短縮すると致死個体は生じず、48時間以内に全個体が回復した。1時間処理では一部の個体で軽度の一過性異常が見られたものの速やかに回復した。

8,400×g（24h）の群では全個体生存であったが、処理直後に自発遊泳を示したのは18個体中5個体のみで、他は一過性の尾部反り返りやねじれ運動を示した。24時間後に14個体が正常運動を回復し、48時間後には全個体が復帰した。

2,100×g（24h）の群では処理直後からコントロールと同様に滑らかな遊泳を示し、観察期間を通じて異常は認められなかった。

以上より、プラナリア個体は24時間の超重力曝露に対して高い生存性を示し、最大18,800×gでも半数以上が生存した。高遠心力の条件では一過性の運動異常が観察されるが、多くは24～48時間で回復し、その後の追跡（7日間）でも致死や異常行動は確認されなかった。

3.2 プラナリア再生過程に与える過重力の影響

プラナリアは頭部または尾部の断片から完全個体を再生する。これは多能性幹細胞である新生細胞（neoblast）の活動に加え、神経系や筋系、腸など多様な組織が統合的に働くことで成

立している¹³⁾。すなわち再生過程は、単細胞レベルの応答を超えた多細胞体としての機能統合を反映する指標となる。そこで次に、切断直後の断片に対し24時間あるいは96時間の遠心処理を加え、 $1 \times g$ で再生させたコントロール群と比較して、再生の進行や形態形成が過重力によりどの程度影響を受けるかを観察した(表2, $n = 9$)。

表2. 遠心処理がプラナリア断片の再生過程に与える影響

回転数 (rpm)	遠心力 ($\times g$)	遠心時間 (h)	総数 (匹)	頭部の 生存数	2日後 再生芽 形成個体	3日後 再生完了 個体	4日後 再生完了 個体	尾部の 生存数	2日後 再生芽 形成個体	4日後 色素細胞 形成個体	5日後 色素細胞 形成個体	5日後 再生完了 個体	6日後 再生完了 個体	7日後 再生完了 個体
15,000	18,800	24	9	6	0	0	5	7	0	0	1	0	1	5
10,000	8,400	24	9	9	0	6	9	9	0	1	6	0	6	8
5,000	2,100	24	9	9	5	9	9	9	3	6	9	7	8	9
5,000	2,100	96	9	9	N.A.	9	9	9	N.A.	6	8	5	8	8
2,500	520	96	9	9	N.A.	9	9	9	N.A.	9	9	9	9	9
1,000	80	96	9	9	N.A.	9	9	9	N.A.	9	9	9	9	9
0	1	0	9	9	9	9	9	9	5	9	9	9	9	9

頭部再生完了個体数は尾部の形状が回復した個体数、尾部の色素細胞形成個体数は黒色色素細胞の集積が両眼で認められた個体数、尾部再生完了個体数は色素細胞の集積に加え、その周囲に視細胞層が形成され眼点構造が明瞭化し、光回避行動を示した個体数とした。最下段はコントロール群。N.A.: Not Applicable.

プラナリアの再生は、飼育温度などの環境条件にも依存するが、通常の重力下では数日をかけて以下の3段階で進行する⁷⁾(図2)。(1)創傷閉鎖・初期応答(0～1日目):切断直後(図2A, 2B)から創傷面が速やかに閉じ始め、表皮細胞の移動による創傷被覆が起こる(図2C)。これに伴い、傷害応答関連遺伝子の発現や新生細胞の活性化が始まる。創傷閉鎖の有無は、このステップの進行状況を判断する指標となる。(2)再生芽形成・初期増殖(1～3日目):創傷部位に未分化細胞が集まり、再生芽が形成される(図2D)。幹細胞の増殖と移動が活発になり、眼点の前駆構造(眼点原基)の形成が始まる(図2E)。再生芽の膨隆、眼点の出現兆候などが、この段階の主要な形態指標となる。(3)分化・形態再構築(3～7日目):再生芽内の細胞が分化し、眼点や頭部・尾部の形態が明瞭になる(図2F)。最終的な形態の回復が進み、光回避行動(負の走光性)や遊泳行動の復帰などが、機能的な再生の指標として用いられる。

$1 \times g$ のコントロール断片は、切断後24時間以内に創傷閉鎖が完了し(図2C)、全断片が生存していた。48時間後には全断片で再生芽形成が確認された(図2D)。頭部断片は、切断直後から滑らかに遊泳することができるが、尾部は多くが動きを止め、3～4日目の眼点形成とともに徐々に遊泳を始める。尾部からの眼点形成は全断片でほぼ同じタイミングで進行し、切断後3～4日目に色素細胞の集積が黒色斑として現れ(図2E)、5～6日目にはその周囲に視細胞が分化・配置されて眼点構造が明瞭化した(図2F)。これに伴い、眼点の位置に対応

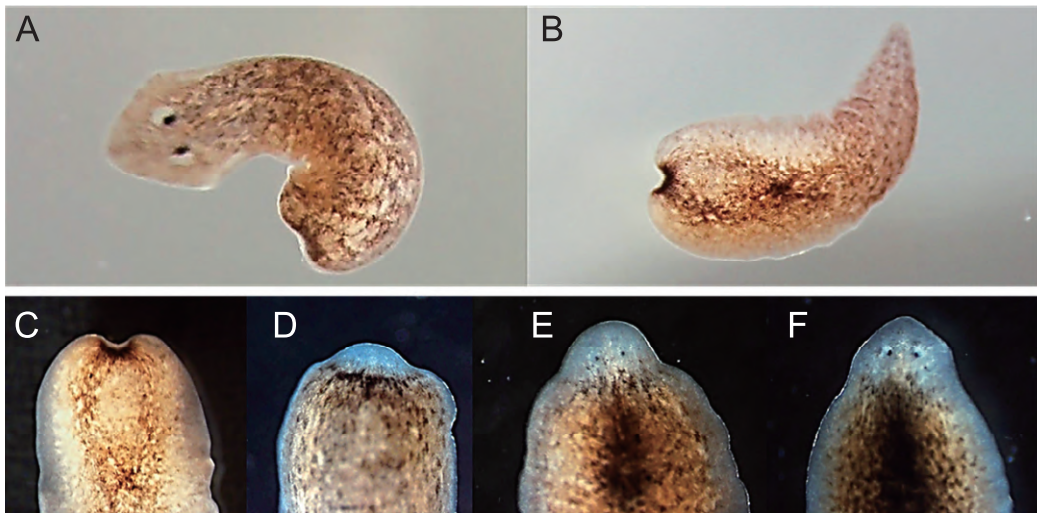


図2. プラナリア断片の再生過程の典型例

1×gにおける頭部断片および尾部断片の再生過程を示す。(A) 切断直後(0日目)の頭部断片。活発に遊泳する。(B) 切断直後(0日目)の尾部断片。刺激を与えないと動かない場合が多い。(C-F) 尾部断片の再生段階を示す。C: 切断面が閉じているが再生芽形成は見られない。D: 白色の再生芽が隆起し始める。E: 黒色の色素細胞が2点に集積する。F: 色素細胞の周囲に白色の視細胞層が形成される。図3では、Cをスコア0、CとDの中間段階を1、Dを2、Eを3、Fを4として再生スコアを算出した。

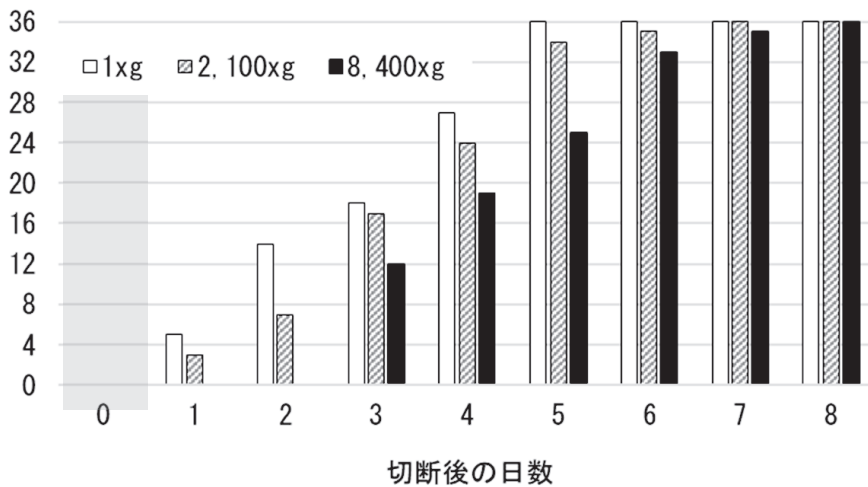


図3. 尾部断片からの頭部再生過程における形態形成(再生芽および眼点形成)の変化

コントロール(1×g)および各遠心条件下での尾部断片における再生状態を、以下の4段階で評価した。1: 白色の再生芽が出現, 2: 再生芽の隆起, 3: 黒色の色素細胞集積, 4: 周囲に白色の視細胞層が形成。各断片のスコアを9個体分集計して縦軸に示した。横軸は切断からの経過日数を示す。9断片すべてで眼点が形成された場合の総スコアは36となる。コントロールを除き、いずれの条件下でも切断処理後24時間(切断後の日数0日; 灰色網掛け部)に遠心処理を実施した。

して頭部膨隆が形成され、光回避性を示して遊泳できるようになった。

24時間遠心処理：切断直後に24時間の遠心処理を行った結果、 $18,800\times g$ では9断片のうち頭部3断片と尾部2断片が修復に失敗し致死となったが、残りの断片は生存し再生を開始した。一方、 $8,400\times g$ および $2,100\times g$ の条件では全断片が生存し再生を開始した。再生の進行はいずれの過重力条件でもコントロール群に比べて遅延し、尾部断片で再生芽および眼点形成の遅れが顕著であった（表2）。とくに $18,800\times g$ および $8,400\times g$ では、切断2日後に再生芽形成が強く阻害される断片が多く観察された（図3）。 $18,800\times g$ で生存した尾部7断片のうち5断片では、左右の眼点形成のタイミングにずれが生じ、眼の大きさが不均一な個体として再生したが、眼点の構造自体は正常であった。いずれの過重力条件でも、再生の遅延が生じた断片は最終的に形態を回復し、遊泳能を取り戻した。

96時間遠心処理：さらに遠心時間を4日間（96時間）に延長して再生過程への影響を観察した（表2）。 $1\times g$ では、切断後4日以内にほとんどの再生の主要ステップ（傷口の修復、再生芽の隆起、眼点の形成）が完了するので、この実験ではその期間に継続的な過重力を与え続けることになる。96時間連続遠心では、回転数を $5,000\text{rpm}$ ($2,100\times g$)、 $2,500\text{rpm}$ ($520\times g$)、 $1,000\text{rpm}$ ($80\times g$) の3条件で評価した。いずれの条件でも96時間終了時点で断片はすべて生存していた。注目すべきことに、 $520\times g$ および $80\times g$ の条件では再生の主要ステップがほぼ正常に進行し、96時間後に取り出した断片はコントロールと同等に眼点形成を含む再生が進行していた。とくに $80\times g$ 群では尾部断片も撮影光を避ける反応を示し活発に遊泳した。 $520\times g$ 群では一部の尾部断片に運動低下が観察されたが、リリース後24時間で回復した。これに対して $2,100\times g$ の96時間処理では、24時間処理と同様に尾部からの頭部再生に遅延が見られた（詳細データは表2参照）。

総じて、再生過程は個体そのものの短期的な生存性に比べて過重力の影響を受けやすく、 $2,100\times g$ 条件でも再生の進行が遅延することがわかった。一方で、 $18,800\times g$ の超重力に曝露しても、断片が処理中に致命的な物理損傷を受けず生存していた場合には、通常重力下に戻すことで再生は進行し最終的に正常形態へ回復した。

4. 考察

本研究により、多細胞動物であるプラナリアは、極端な過重力条件下で顕著な生存耐性を示すことが明らかとなった。 $18,800\times g$ に24時間曝露しても半数以上が生存し、 $8,400\times g$ では一過性の行動異常を示したものの、全個体が回復した。さらに $2,100\times g$ 以下では外見上の損傷や異常行動は見られず、遊泳行動もほぼ正常であった。分裂酵母では、 $8,400\times g$ の遠心処理により核やミトコンドリアの偏在とそれに伴う細胞周期の乱れが誘起されることが報告されている⁶⁾。この条件でもプラナリア成体が致死とならなかったことは、細胞レベルで一時的な障害

を受けても、多細胞体として全体の恒常性を維持する統合的な仕組みを備えていることを示唆する。これは、個体内における分裂細胞の割合が低く、各細胞の不調が全体機能を致死的に阻害しないことを反映していると考えられる。

一方、切断後の再生過程は過重力に対してより高い感受性を示した。24時間の $2,100\times g$ 処理でも再生遅延が見られ、とくに $8,400\times g$ では再生芽の形成が明瞭に阻害された。完全個体では同条件で異常を示さないことから、再生過程特有の脆弱性が存在すると考えられる。プラナリアでは、個体の25～30%を幹細胞である新生細胞が占め、切断後6時間および48時間に分裂ピークを示すことが知られている¹⁴⁾。再生過程では細胞分裂と細胞移動が活発に進行するため、過重力負荷による機械的ストレスの影響を受けやすいと考えられる。先行研究では、わずか $10\times g$ 程度の過重力条件でも再生遅延や阻害の起こることが報告されている¹⁵⁾。本研究では同程度の条件下で再生への影響がほとんど認められなかったが、この差異は、使用したプラナリア種や切断部位、遠心条件、観察項目などの実験方法の違い、あるいは水中での有効加速度の差（材料と方法2.4参照）に起因する可能性がある。したがって、再生過程の過重力に対する感受性の閾値は実験系に依存して変動する可能性があり、今後より精密な比較が必要である。さらに、高い増殖・移動活性を示す細胞群が過重力に対して感受性を示す点は、対数増殖期にある分裂酵母細胞で、細胞周期の分裂期（M期）が数千 $\times g$ の遠心処理に対してとくに脆弱であるという報告⁶⁾とも一致する。加えて、哺乳類においても、腸上皮や造血系などの分裂活性の高い組織は、放射線や抗がん剤といった細胞増殖を阻害するストレスに対して感受性が高いことが知られている^{16), 17)}。したがって、過重力に対する感受性が分裂期細胞に集中する傾向は、種を超えて観察され得る細胞生理学的特徴を示唆する。

本研究では、プラナリアが飼育水中に存在するため、細胞やオルガネラが実際に受ける加速度は名目値より小さい可能性がある（材料と方法2.4参照）。それにもかかわらず、再生過程において明瞭な遅延や阻害が観察されたことは、数百 $\times g$ 程度の持続的な外力でも細胞分裂や細胞内構造に影響を与え得ることを示唆している。分裂酵母で報告されているオルガネラ偏在や分裂異常⁶⁾が、プラナリアの幹細胞群でも生じ、その微小な乱れが再生遅延として現れる可能性も考えられる。ただし、本研究ではプラナリアの細胞レベルでの直接観察を行っていないため、この点は今後の重要な検証課題である。

さらに注目すべきは、過重力により再生過程が一時的に阻害されても、通常重力に戻すことで完全な個体に再生した点である。これは、多細胞体が局所的な分裂異常や組織攪乱を自己修復的に補償する「形態形成の堅牢性（robustness of morphogenesis）」を備えていることを示している。実際、植物や動物の発生過程においても、個々の細胞の挙動が不均一であっても、それらが相互作用しながら最終的に一定の形態を形成することが知られており^{18), 19)}、プラナリア再生もこのような自己組織化的な調整メカニズムに基づいている可能性がある。今後、過重力

曝露のタイミングや持続時間を精密に制御した再生実験を行うことにより、再生遅延や修復能力のメカニズムを明らかにできると考えられる。

最後に、本研究で明らかになったプラナリアの極端な過重力耐性は、宇宙生物学における応用的意義を持つ。プラナリアは多細胞動物でありながら卓越した再生能力と環境耐性を備えており、極端な重力環境下で生存した個体を用いて、重力変化が神経系や組織再構築に及ぼす影響を解析できる稀有なモデル生物である。このような極限環境で生存可能な多細胞動物の存在は、将来的な宇宙空間での生体実験や閉鎖生態系構築を想定した、高速宇宙輸送技術²⁰⁾による効率的な生物試料打ち上げの可能性を検討する上でも示唆的である。

参考文献

- 1) S. A. Narayanan. Gravity's effect on biology. *Front Physiol.*, 14, 1199175, 2023.
- 2) K. Adamopoulos, D. Koutsouris, A. Zaravinos, G. I. Lambrou. Gravitational influence on human living systems and the evolution of species on Earth. *Molecules*, 26, 9, 2784, 2021.
- 3) J. P. Vandenbrink, J. Z. Kiss. Plant responses to gravity. *Semin Cell Dev Biol.*, 92, pp.122–125, 2019.
- 4) K. Takahashi, H. Takahashi, T. Furuichi, M. Toyota, M. Furutani-Seiki, T. Kobayashi, H. Watanabe-Takano, M. Shinohara, T. Numaga-Tomita, A. Sakaue-Sawano, A. Miyawaki, K. Naruse. Gravity sensing in plant and animal cells. *NPJ Microgravity*, 7, 2, 2021.
- 5) R. R. Daga, F. Chang. Dynamic positioning of the fission yeast cell division plane, *Proc Natl Acad Sci U S A.*, 102, 23, pp.8228–8232, 2005.
- 6) 中山椋太, 高橋考太. 超重力環境下における分裂酵母の細胞分裂とオルガネラ分布. *工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要*, 第24号, pp.31–48, 2024.
- 7) 手代木渉. プラナリアの生物学 基礎と応用と実験, 共立出版株式会社, 1987.
- 8) Y. Umesono, J. Tasaki, Y. Nishimura, M. Hroudá, E. Kawaguchi, S. Yazawa, O. Nishimura, K. Hosoda, T. Inoue, K. Agata. The molecular logic for planarian regeneration along the anterior–posterior axis. *Nature*, 500, 7460, pp.73–76, 2013.
- 9) R. M. E. Mastrapa, H. Glanzberg, J. N. Head, H. J. Melosh, W. L. Nicholson. Survival of bacteria exposed to extreme acceleration : implications for panspermia. *Earth Planet Sci Lett.*, 189, 1–2, pp.1–8, 2001.
- 10) S. Deguchi, H. Shimoshige, M. Tsudome, S. A. Mukai, R. W. Corkery, S. Ito, K. Horikoshi. Microbial growth at hyperaccelerations up to 403,627×g. *Proc Natl Acad Sci U S A.*, 108, 19, pp.7997–8002, 2011.
- 11) S. Scott, M. Weiss, C. Selhuber-Unkel, Y. F. Barooji, A. Sabri, J. T. Erler, R. Metzler, L. B. Oddershede. Extracting, quantifying, and comparing dynamical and biomechanical properties of living matter through single particle tracking. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25, 3, pp.1513–1537, 2023.
- 12) 板垣航平, 高橋考太. 水棲環境中のカルシウムはプラナリアの生育と再生に必要な金属元素である. *北海学園大学工学部研究報告*, 第52号, pp.27–53, 2025.
- 13) P. W. Reddien. The Cellular and molecular basis for planarian regeneration. *Cell*, 175, 2, pp.327–345, 2018.
- 14) D. Wenemoser, P. W. Reddien. Planarian regeneration involves distinct stem cell responses to wounds and tissue absence. *Dev Biol.*, 344, 2, pp.979–991, 2010.
- 15) T. Adell, E. Saló, J. J. van Loon, G. Auletta. Planarians sense simulated microgravity and hypergravity. *Biomed Res Int.*, 2014, 679672, 2014.
- 16) E. J. Hall, A. J. Giaccia. Radiobiology for the Radiologist (8th ed.). *WOLTERS KLUWER*, 2019.

- 17) K. Cheung-Ong, G. Giaever, C. Nislow. DNA-damaging agents in cancer chemotherapy : serendipity and chemical biology. *Chemistry & Biology*, 20, 5, pp.648–659, 2013.
- 18) S. F. Gilbert, M. J. F. Barres. Developmental Biology (11th ed.). *Sinauer Associates Inc.*, 2016.
- 19) A. Wagner. Robustness and Evolvability in Living Systems. *Princeton University Press*, 2005.
- 20) M. R. Wright, S. B. Kuznetsov, K. J. Kloesel. A lunar electromagnetic launch system for in-situ resource utilization. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39, 1, pp.521–528, 2010.

