

平成25年度 厚生労働科学研究費補助金（化学物質リスク研究事業）
総括研究報告書

新規 *in vivo* 遺伝毒性試験である *Pig-a* 遺伝子遺伝毒性試験の胎仔を含めた週齢および性差に関する開発研究（H25-化学-若手-008）

研究代表者 堀端克良 国立医薬品食品衛生研究所 変異遺伝部 主任研究官

研究要旨

幼児や妊婦（胎児）は、化学物質の遺伝毒性に対して脆弱であると考えられるが、それを定量的かつ簡便に評価する研究手法は未だに確立されていない。本研究課題では、近年開発された *Pig-a* 遺伝子遺伝毒性試験（以下、*Pig-a* アッセイ）について、性差および週齢差を踏まえた検討を行い、加えて、妊娠動物に遺伝毒性物質を投与した際の胎仔および新生仔における遺伝毒性影響を *Pig-a* アッセイにより評価することでその有用性を検証することを目的とする。

近年開発された *Pig-a* アッセイは米国において産学官の共同研究が実施され、その成果を基に2012年にOECDガイドライン化に向けたSPSFの作成が同意されているが、日本における研究成果を盛り込むことを目指し、日本国内においても産官での共同研究が進められている。これに加えて、本研究課題の推進により得られる研究成果は、*Pig-a* アッセイのOECDガイドライン化に向けた国内外での取り組みに対して、日本国内の研究成果としてアピールすることができる。

A. 研究目的

近年開発された *Pig-a* アッセイは、内在性遺伝子である *Pig-a* 遺伝子を標的としている。*Pig-a* 遺伝子はマウス、ラットそしてヒトなどのほとんどの哺乳動物でX染色体上に座位しており、その遺伝子産物はGPIアンカー生合成の第一段階で機能する。*Pig-a* 遺伝子上に前進突然変異が生じると、GPIアンカーの生合成が阻害され、結果として細胞膜上にGPIアンカー結合タンパク質が提示されなくなる。この原理を利用し、*Pig-a* アッセイではGPIアンカー結合タンパク質欠損赤血球の頻度をフローサイトメーターで実測値として検出し、*Pig-a* 遺伝子変異体頻度を求める。加えて、*Pig-a* アッセイでは遺伝毒性試験のためにトランスジェニック動物など特別な動物を使用する必要がなく、ヒトにも応用可能であり、解析にはマイクロリットル単位のごく微量の末梢血を使用し、また遺伝毒性の蓄積性を踏まえた解析が可能であると考えられ

ている。その一方、*Pig-a* アッセイの有用性については、その特性から反復投与毒性試験への組み込みを勘案し、国内外において成熟ラットを用いた解析が主流であり、また、*Pig-a* アッセイは開発されてからの時間が浅いこともあり、その検出感度の性差、年齢差などは不明である。

応募者はこれまでに、放射線遺伝毒性について雄マウスを用いた *Pig-a* アッセイにより評価した結果、幼若群は成熟群と比較し、高い *Pig-a* 遺伝子変異体頻度の上昇を示すことを明らかにしている。これらのことは、年齢差に応じた遺伝毒性の差を本アッセイにより評価できる可能性を示唆するものである。

幼児や妊婦（胎児）は、化学物質の遺伝毒性に対して脆弱であると考えられるが、それを定量的かつ簡便に評価する研究手法は未だに確立されていない。本研究課題では、化学物質の子どもおよび胎児への遺伝毒性影響を検出可能な評価手法として *Pig-a* アッセイを

提案し、その有用性を明らかにし、そして幼若動物や胎仔に与える遺伝毒性影響を明らかにすることを研究目的とする。本研究計画は三年間の研究計画とし、*Pig-a* アッセイの有用性について初年度は幼若マウスと成熟マウスでの雌雄差と週齢差の比較、次年度と最終年度はマウス胎仔を用いた解析を実施することを目標とする。

B. 研究方法

1群5匹、雌雄それぞれの幼若C57BL/6マウス(離乳後である4週齢)および成熟C57BL/6マウス(8週齢)に、遺伝毒性物質であるエチルニトロソウレア(40 mg/kg)およびベンツピレン(200 mg/kg)を単回腹腔内投与する。投与前2日、投与後1週、2週および4週目に尾静脈より採血を行ない、得られた血液を用いて*Pig-a* アッセイを実施し、遺伝毒性を評価した(図1)。エチルニトロソウレアは代謝活性化無しで遺伝毒性を発揮するが、ベンツピレンは遺伝毒性発揮のために代謝活性化を必要とする。したがって、薬物代謝活性を勘案した遺伝毒性評価ため、この2種の化合物を選択した。

Pig-a アッセイでは、2 μ Lの末梢血を赤血球特異的蛍光抗体およびGPI アンカー結合タンパク質であるCD24 特異的蛍光抗体により2重染色し、フローサイトメーターを用いて*Pig-a* 変異体頻度を評価した。他方、*Pig-a* アッセイは造血幹細胞に生じた遺伝毒性を反映する研究手法であり、遺伝毒性物質によりこれらの造血幹細胞の増殖・分化能に影響を受けることでその結果に影響が生じる可能性を考察するために、別途、幼若赤血球特異的発現タンパク質であるCD71 特異的蛍光抗体により染色し、フローサイトメーターを用いて造血サイクルの指標である幼若赤血球の頻度を評価した。

各投与群で得られた*Pig-a* 変異体頻度は、Steelの方法により、国立医薬品食品衛生研究所変異遺伝部の背景データ(溶媒投与群、N=95)と比較し、統計学的な解析を実施した。

(倫理面への配慮)

動物を用いた実験は、所属機関における「動物実験の適正な実施に関する規定」わが国に

おける「動物の保護及び管理に関する法律」、「実験動物の飼育及び保管等に関する基準」ならびに厚生労働省の所管する実施機関における動物実験等の実施に関する基本指針に準拠して行った。加えて、試験実施機関による動物実験に関する倫理委員会の承認を得るなど、実験動物に対する動物愛護を配慮の上で実施した。

C. 研究結果

1) 成熟雄マウスにおける*Pig-a* 変異体頻度
成熟雄マウスの*Pig-a* アッセイの結果を図2に示す。成熟雄マウスにおいて、エチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与群では、溶媒投与群と比較した場合、投与後2週目以降に有意な*Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。エチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与群における投与後4週目では、投与後2週目と比較した場合、さらに*Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。

2) 幼若雄マウスにおける*Pig-a* 変異体頻度
幼若雄マウスの*Pig-a* アッセイの結果を図3に示す。幼若雄マウスにおいて、エチルニトロソウレア投与群では、他の投与群と比較した場合、投与後1週目に有意な*Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。投与後2週目にはエチルニトロソウレアおよびベンツピレン両投与群で有意な*Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。投与後4週目では、投与後2週目と比較した場合、*Pig-a* 変異体頻度が若干上昇した。投与後4週目ベンツピレン投与群では2週目と比較した場合に平均値では上昇しているような印象を与える結果(図3A)ではあるが、これは外れ値を示す1個体によって平均値が引き上げられた結果によるものであり(図3B)、実際は大幅な上昇は無いと考えられる。

3) 成熟雌マウスにおける*Pig-a* 変異体頻度
成熟雌マウスの*Pig-a* アッセイの結果を図4に示す。成熟雌マウスにおいて、エチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与群では、溶媒投与群と比較した場合、投与後2週目以降に有意な*Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出さ

れた。エチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与群における投与後4週目では、投与後2週目と比較した場合、さらに *Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。興味深いことに、ベンツピレン投与後4週目ではエチルニトロソウレア投与群の投与後4週目でみられた *Pig-a* 変異体頻度の上昇率よりも大きな上昇率が検出された。

4) 幼若雌マウスにおける *Pig-a* 変異体頻度

幼若雌マウスの *Pig-a* アッセイの結果を図5に示す。幼若雌マウスにおいて、エチルニトロソウレア投与群では、他の投与群と比較した場合、投与後1週目に有意な *Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。投与後2週目にはエチルニトロソウレアおよびベンツピレン両投与群で有意な *Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。エチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与群における投与後4週目では、投与後2週目と比較した場合、さらに *Pig-a* 変異体頻度の上昇が検出された。

5) 幼若赤血球出現頻度

成熟マウスにおいては、雌雄共に5%前後の幼若赤血球出現頻度であり、雌雄間の差やエチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与による影響は特に認められなかった。他方、雌雄ともに幼若マウスにおいては投与直前(4週齢に相当)の幼若赤血球出現頻度が20%以上と高い数値を示した。幼若マウスのすべての投与群において、投与後2週および4週目では各投与群で幼若赤血球出現頻度が成熟マウスと同程度にまで減少することが示された(図6)。幼若雄マウスでのエチルニトロソウレア投与群投与後4週目の幼若赤血球出現頻度でのみ、若干の上昇傾向が見られているが、これは当該投与群で1個体のみ異常値を示した結果である。また、幼若マウスにおいては、成熟マウスと同様に雌雄間の差は認められなかった。

D. 考察

1) 成熟マウスの雌雄の比較

エチルニトロソウレア投与群では *Pig-a* 変異体頻度および幼若赤血球出現頻度両者で雌

雄の差は見られないことから、成熟マウスではエチルニトロソウレアの遺伝毒性検出感度において、*Pig-a* アッセイの検出感度の雌雄差はないと考えられる。

ベンツピレン投与群においては、投与後2週目までは *Pig-a* 変異体頻度および幼若赤血球出現頻度両者で雌雄差は認められておらず、幼若赤血球出現頻度においても投与後4週目で雌雄差は認められていない。しかし、投与後4週目でのベンツピレン投与群雌マウスでの *Pig-a* 変異体頻度は、雄マウスと比較して高値を示した。その理由の1つとして、ベンツピレンは遺伝毒性を発揮するためには代謝活性化を受ける必要があることから、ベンツピレン代謝活性化における雌雄差の結果、投与後4週目での *Pig-a* 変異体頻度の差となって現れたと考えられる。しかしながら、投与後2週目での性差が認められていないことから、他の複合要因も影響していることは否定できない。しかし、後述の幼若マウスではこういった違いが認められていないことから、投与後4週目で見られた雌マウスでの *Pig-a* 変異体頻度の上昇は成熟雌マウス特有の現象である可能性が高いと考えられる。

2) 幼若マウスの雌雄の比較

幼若マウスにおいては、エチルニトロソウレアおよびベンツピレン投与群両者で雌雄差は認められない。従って、幼若マウスにおいては *Pig-a* アッセイの検出感度の雌雄差はないと考えられる。成熟雌雄マウスの結果と合わせて考察すると、成熟マウスのみでベンツピレンの遺伝毒性検出感度に性差が認められていること、また、ベンツピレンは遺伝毒性を発揮するために代謝活性化が必要であることから、ベンツピレンの遺伝毒性検出感度については成熟雌マウスで特異的に活性が上昇している代謝活性化能が関与していると考えられる。

3) 週齢差の比較

エチルニトロソウレア投与群において、成熟群では雌雄ともに投与後2週目以降で遺伝毒性を検出したのに対し、幼若群では雌雄ともに投与後1週目で有意な遺伝毒性を検出し

た。その理由として、雌雄共に投与時（4週齢）における幼若赤血球頻度が非常に高いことから、この時期のマウスは高い造血能を持つことが考えられ、それが原因となって幼若群では早期の遺伝毒性検出が可能となっていると考えられる。他方、ベンツピレンにおいても統計学的有意差は認められていないが同様の傾向、すなわち幼若群での早期遺伝毒性検出性が見られている。従って、ベンツピレン投与群幼若群においても投与用量を増加させることで統計学的に有意に早期検出が可能であると考えられる。

E. 結論

今年度得られた研究成果によって、遺伝毒性試験方法としての *Pig-a* アッセイとして見た場合、幼若動物を用いる方が感受性の高い試験を実施できる可能性が高いこと、化学物質の遺伝毒性影響の視点から見た場合、成熟期よりも幼若期の方がより強い遺伝毒性影響を受ける可能性が高いこと、の2点が明らかになった。これにより、上記については、*Pig-a* アッセイを実施する場合には使用動物の開始週齢をそれぞれの試験研究目的に応じて吟味した上で実施すべきであるということをも提案するものであり、今後本アッセイを活用していく上で重要な情報となる。また、上記については、幼若期における化学物質暴露に対する遺伝毒性リスクは成熟期よりも高いことを示唆するものであり、重要なリスク評価情報となる。

F. 研究発表

1. 論文発表

K. Horibata, A. Ukai, T. Kimoto, T. Suzuki, N. Kamoshita, K. Masumura, T. Nohmi, M. Honma, Evaluation of in vivo genotoxicity induced by N-ethyl-N-nitrosourea, benzo[a]pyrene, and 4-nitroquinoline-1-oxide in the *Pig-a* and gpt assays, *Environmental and*

Molecular Mutagenesis, 54(9), 747-54 (2013)

T. Kimoto, K. Horibata, S. Chikura, K. Hashimoto, S. Itoh, H. Sanada, S. Muto, Y. Uno, M. Yamada, M. Honma, Interlaboratory trial of the rat *Pig-a* mutation assay using an erythroid marker HIS49 antibody, *Mutation Research*, 755(2), 126-34 (2013)

2. 学会発表

堀端克良, 共同研究報告 II: *Pig-a*, MMS 研究会第 62 回定例会, 諏訪 (2013.5)

堀端克良, 第 6 回 IWGT 報告および共同研究進捗報告: *Pig-a* アッセイ, MMS 研究会第 63 回定例会, 岡山 (2013.11)

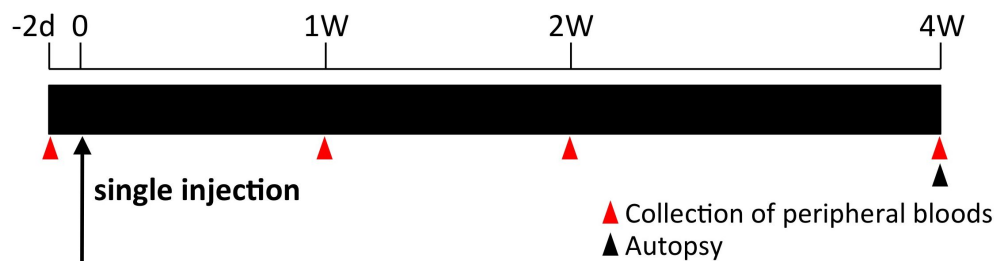
K. Horibata, S. Ishikawa, A. Ukai, A. Sugano, M. Honma, ESTABLISHMENT OF HUMAN PIG-A ASSAY AND APPLICATION TO GENOTOXICITY MONITORING OF CANCER CHEMOTHERAPEUTIC PATIENTS, 11th International Conference on Environmental Mutagens, Brazil (2013.11)

堀端克良, 鷓飼明子, 木本崇文, 鴨下渚, 本間正充, ラットを用いた *Pig-a* アッセイとトランスジェニック突然変異試験の組合せに関する研究, 日本環境変異原学会第 42 回大会, 岡山 (2013.11)

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

- C57BL/6 8 weeks of age, male x5
- C57BL/6 8 weeks of age, female x5
- C57BL/6 4 weeks of age, male x5
- C57BL/6 4 weeks of age, female x5



#1; PBS (i.p.)
 #2; ENU 40 mg/kg (i.p.)
 #3; BP 200 mg/kg (i.p.)

➤ *Pig-a* mutant phenotype frequency
 ➤ %RET

図1. *Pig-a*アッセイ投与群構成とスケジュール

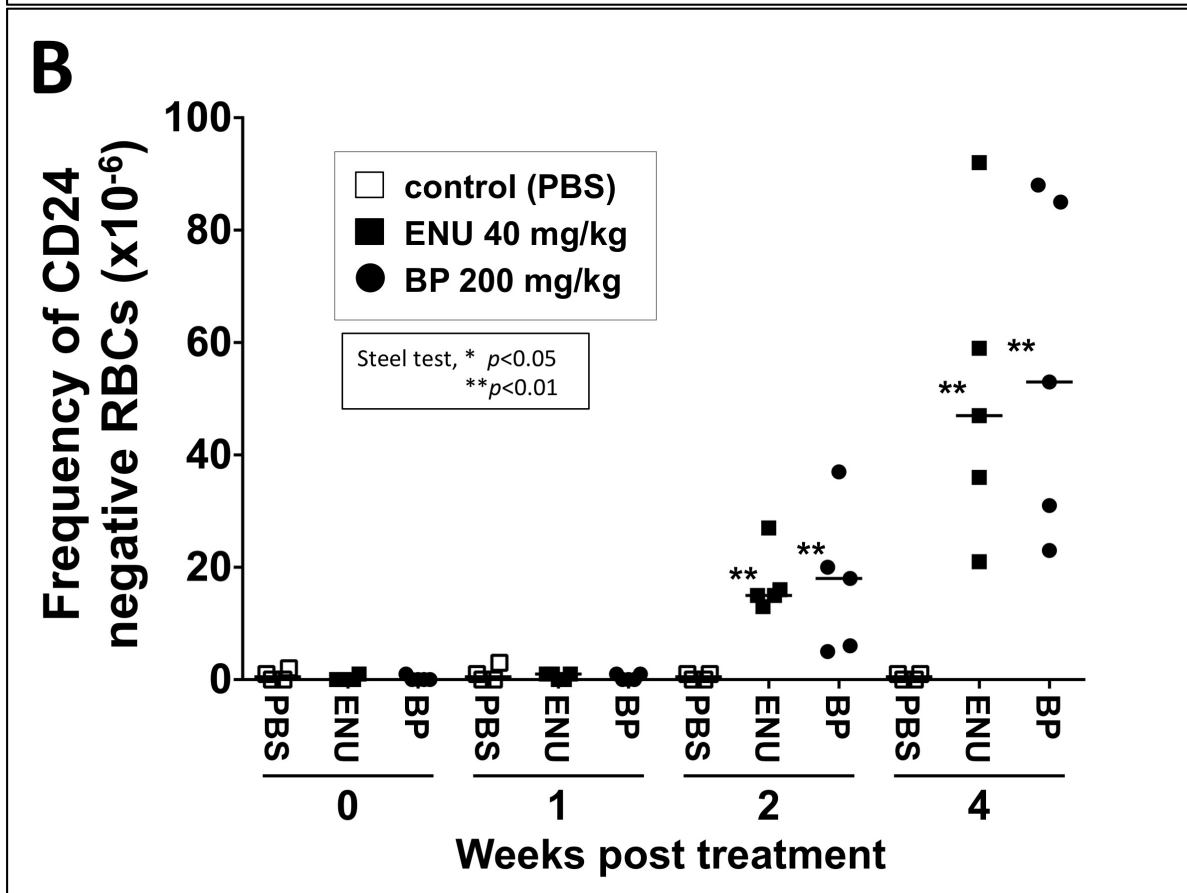
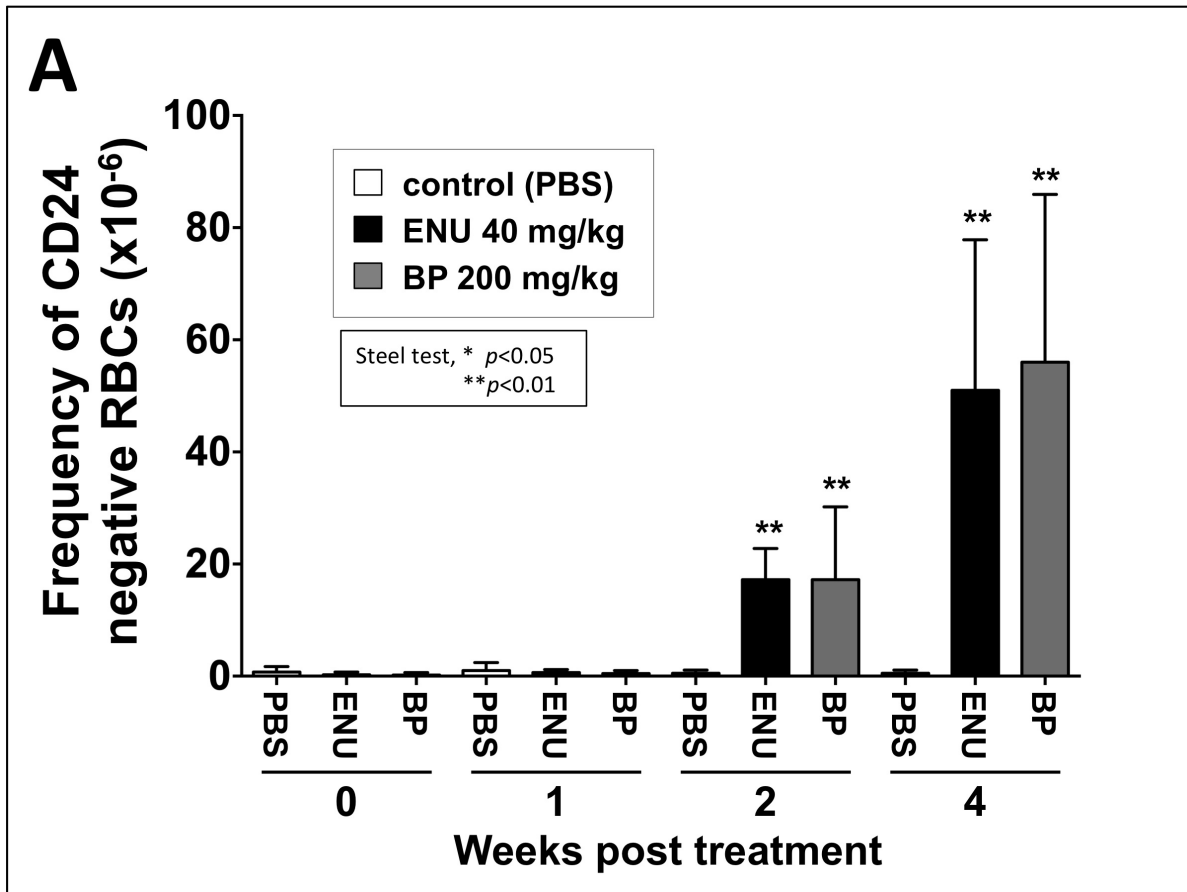


図2.成熟雄マウスにおけるPig-a変異体頻度 (A, 平均値と標準偏差; B, 各個体の散布図)

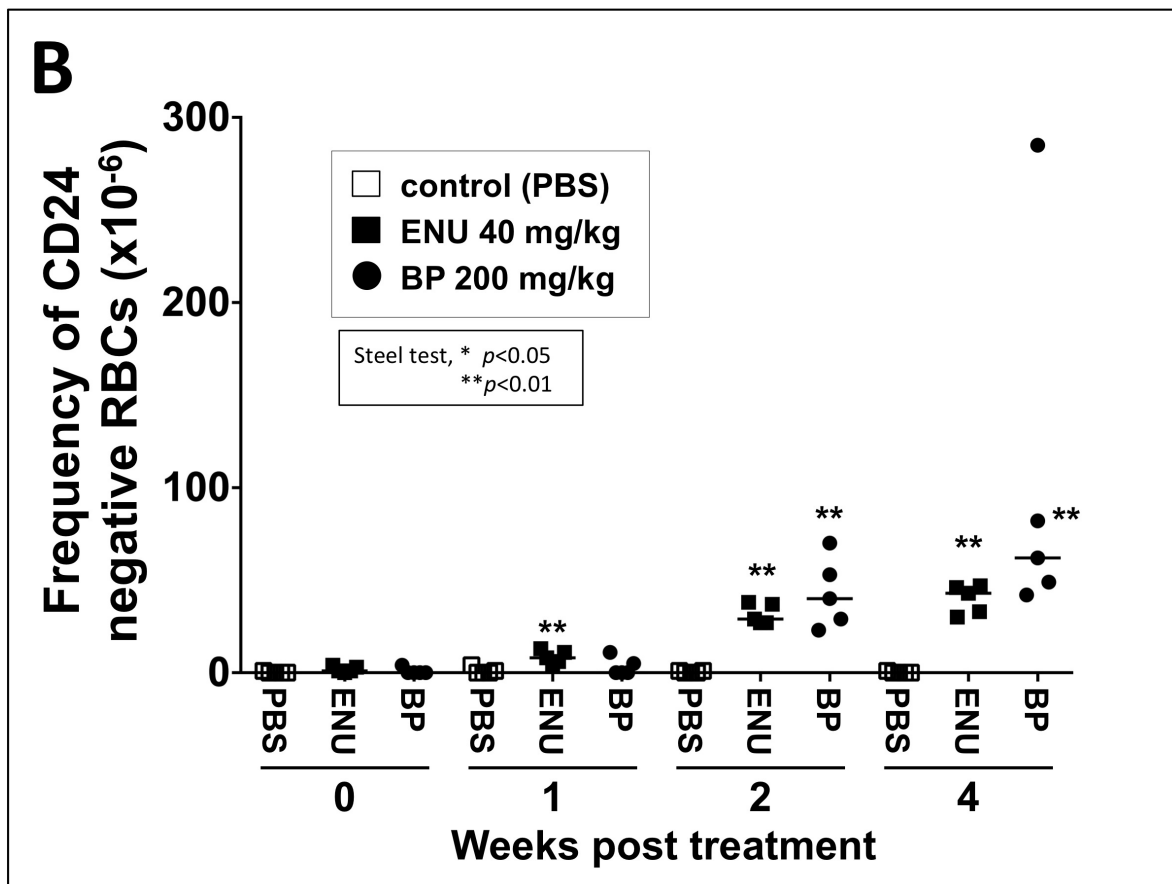
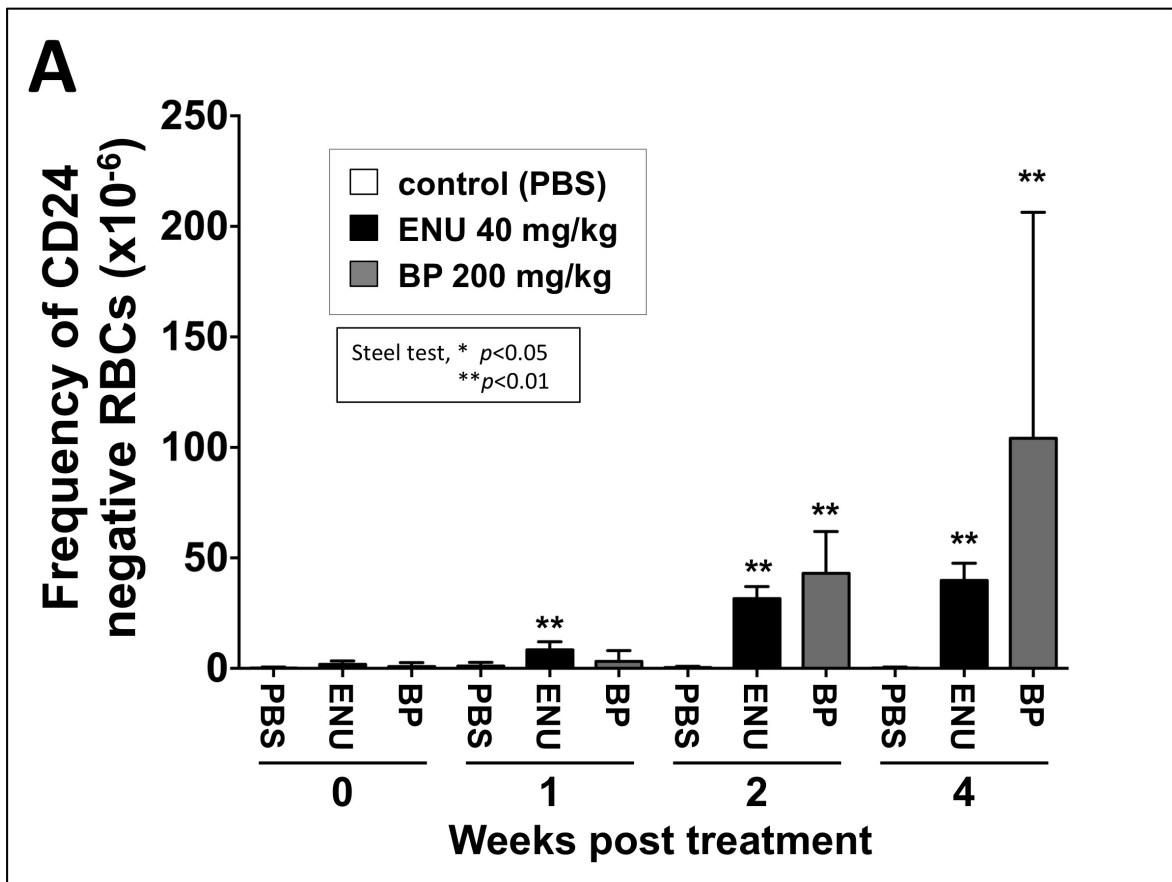


図3. 幼若雄マウスにおけるPig-a変異体頻度 (A, 平均値と標準偏差; B, 各個体の散布図)

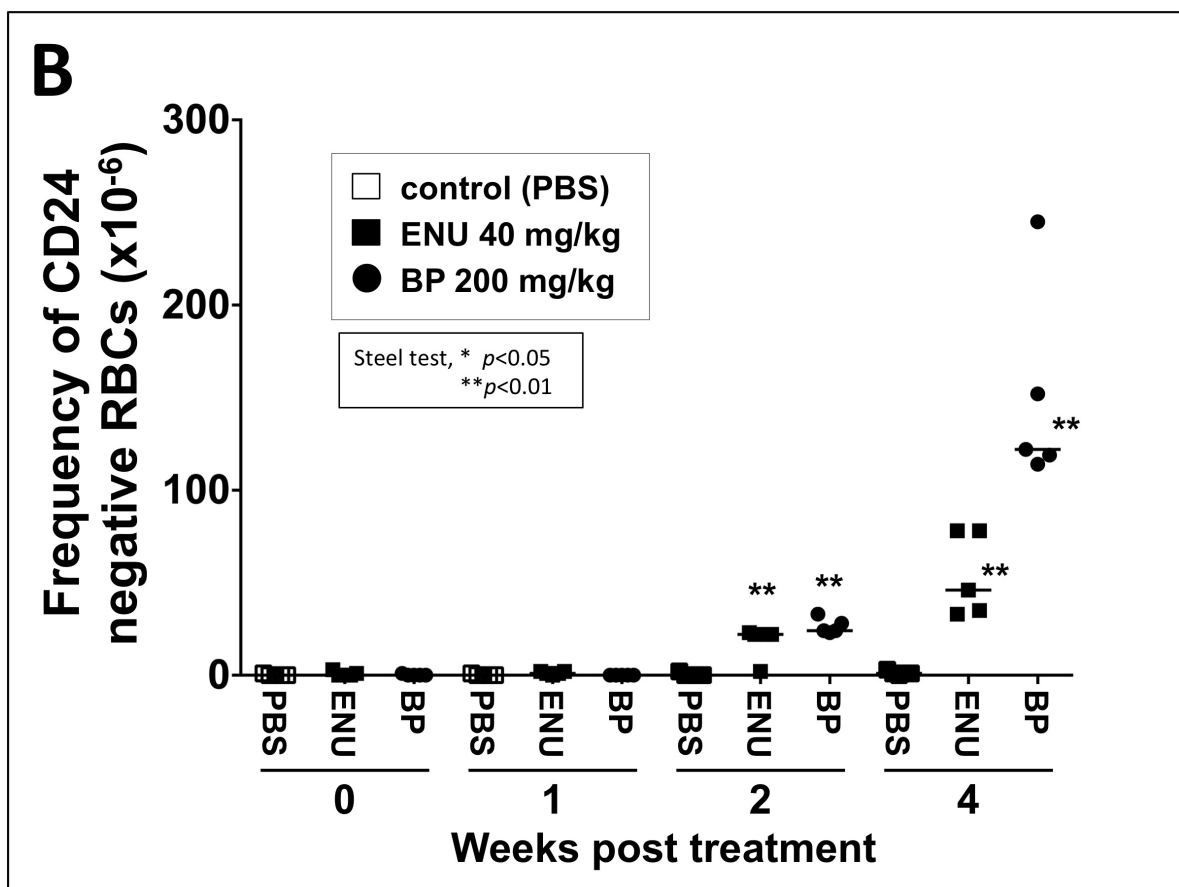
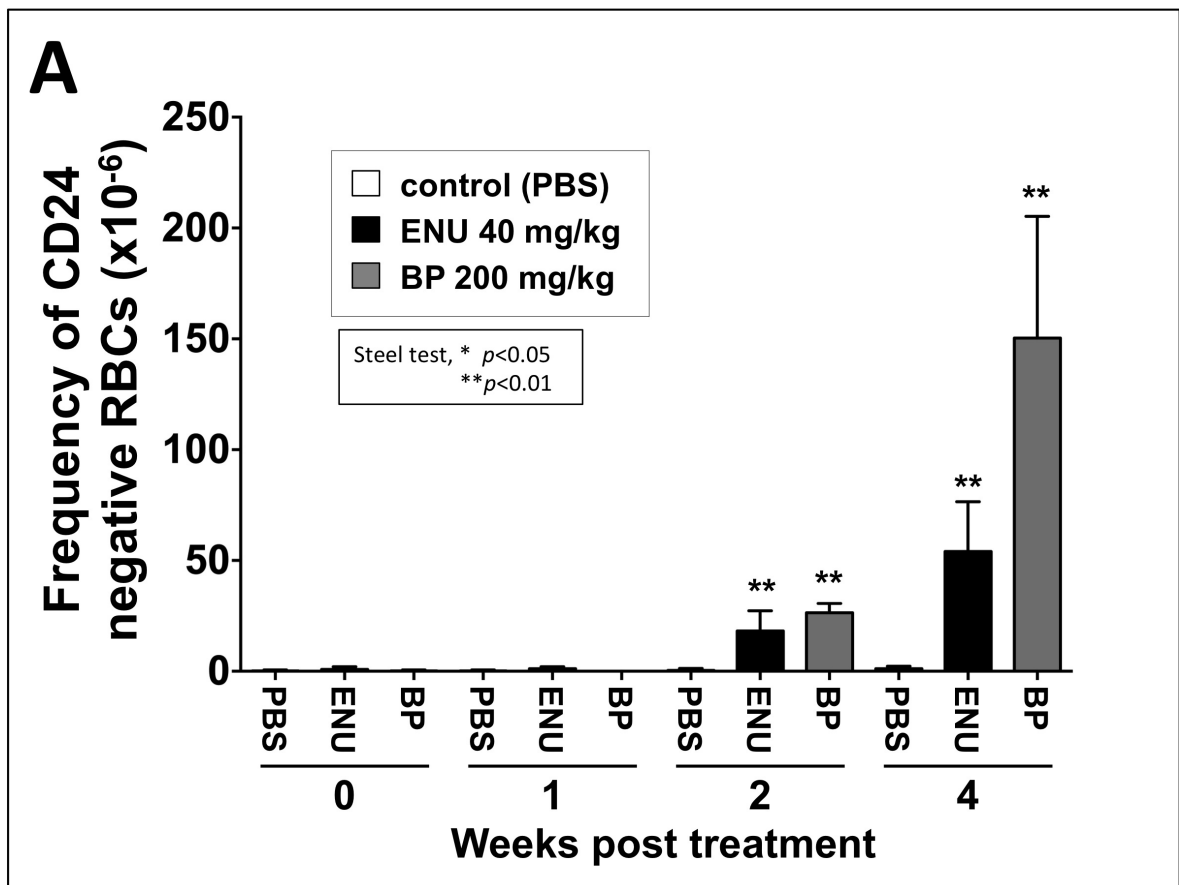


図4.成熟雌マウスにおけるPig-a変異体頻度 (A, 平均値と標準偏差; B, 各個体の散布図)

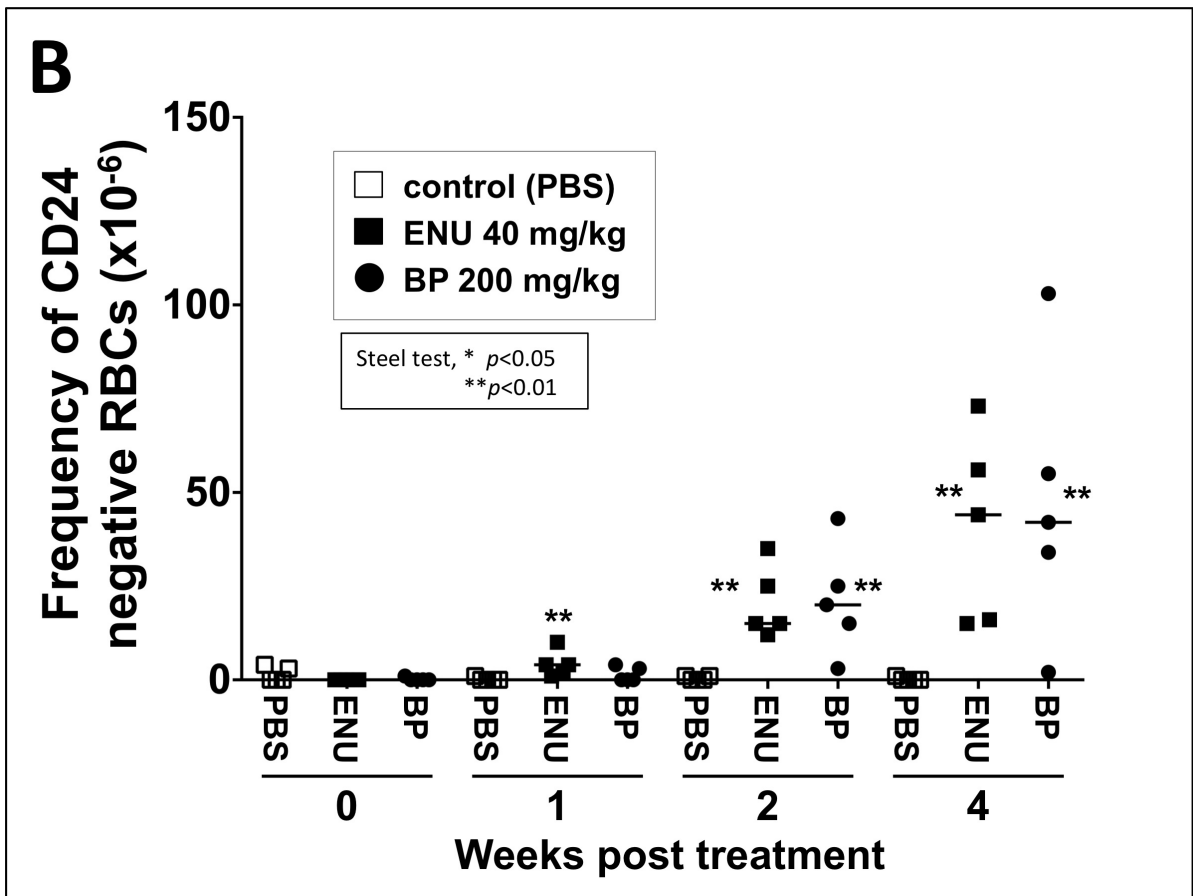
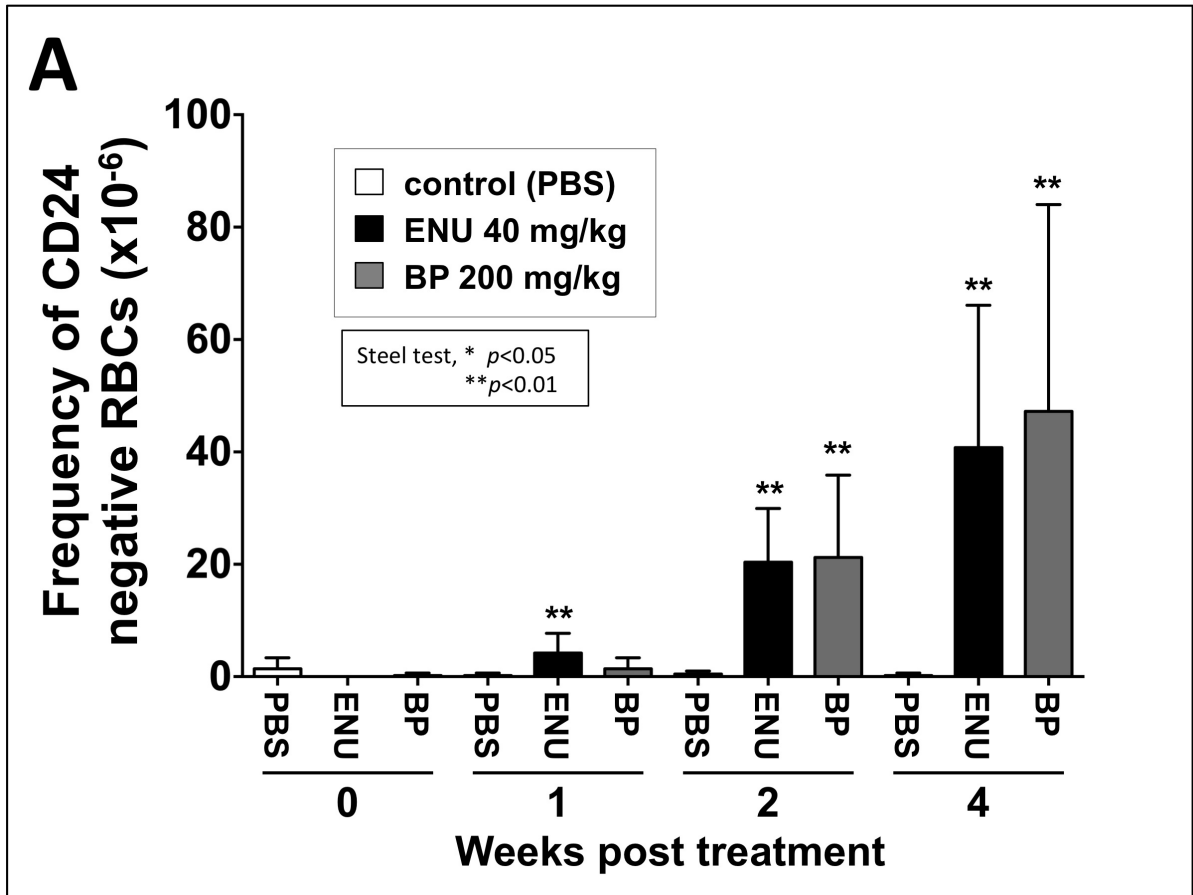


図5. 幼若雌マウスにおけるPig-a変異体頻度 (A, 平均値と標準偏差; B, 各個体の散布図)

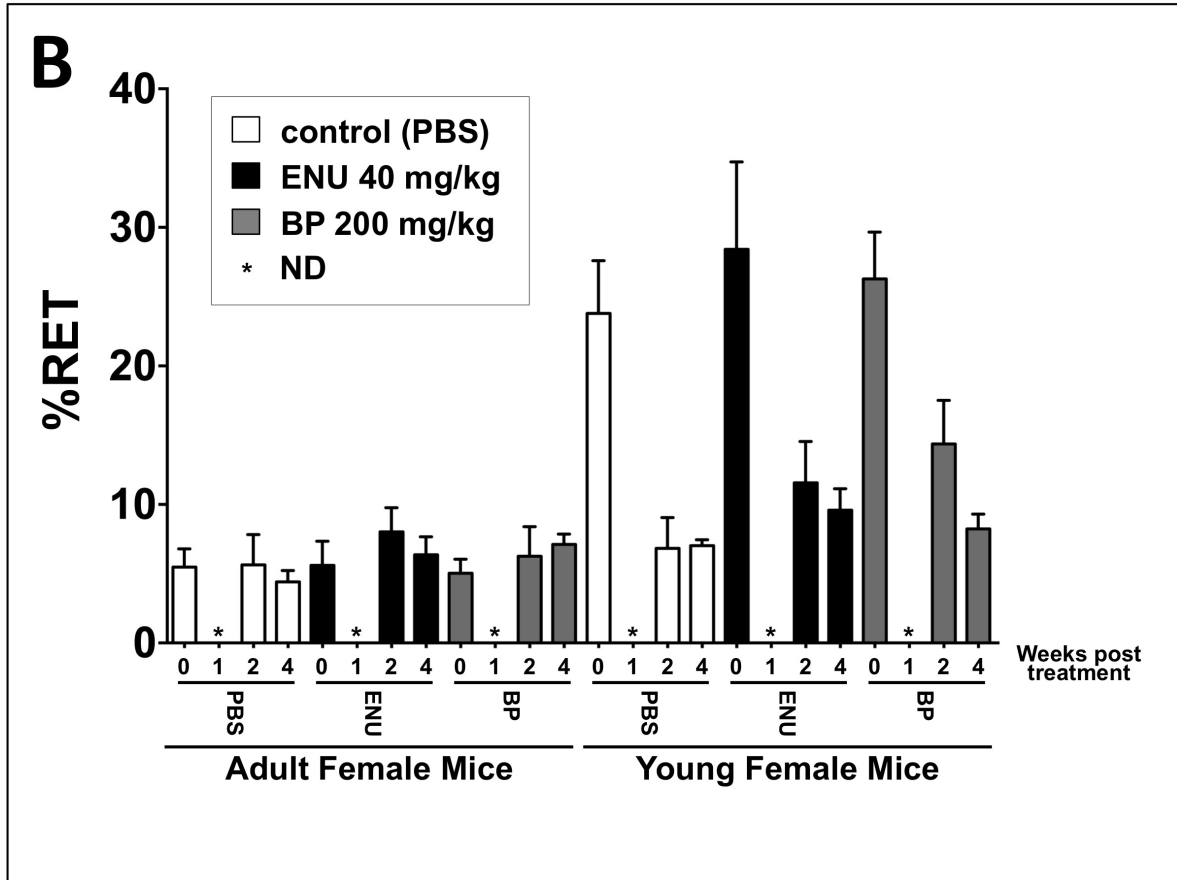
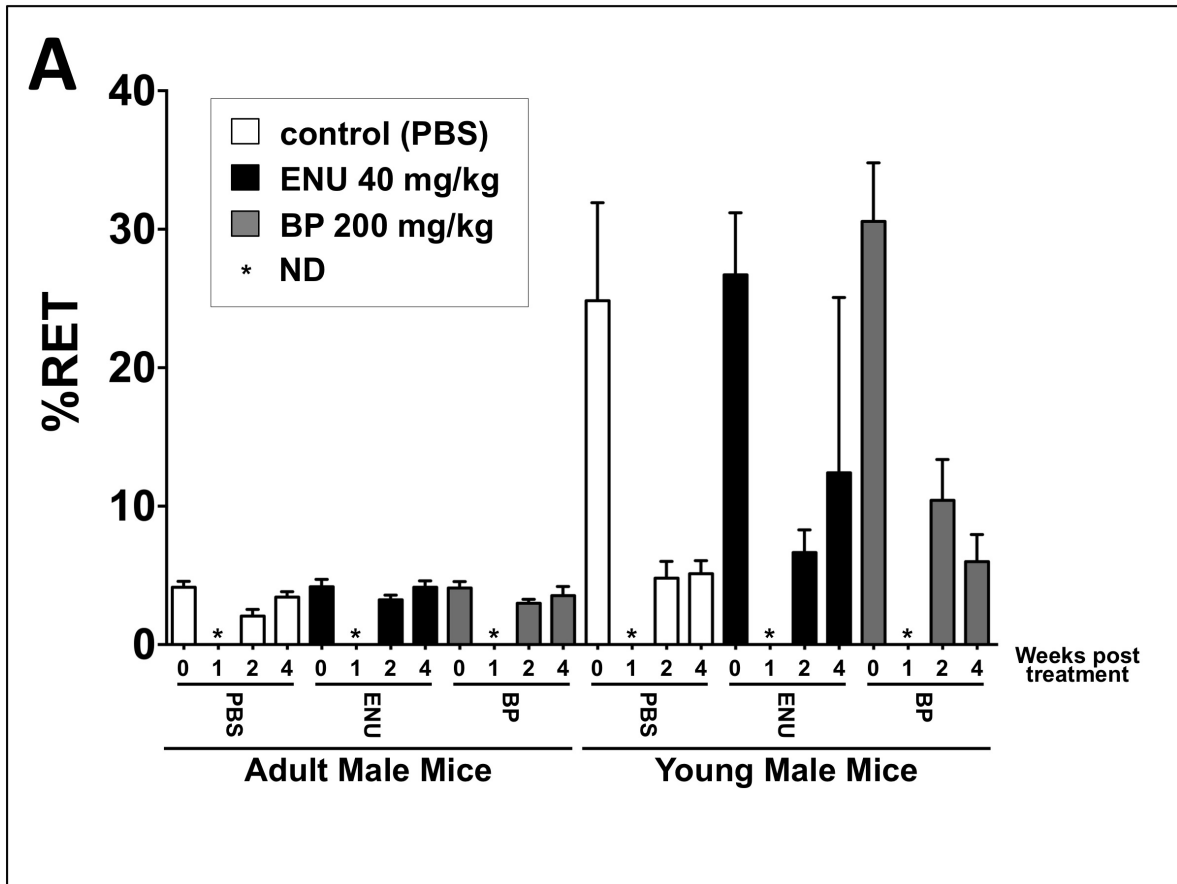


圖 6 . 幼若赤血球出現頻度 (A, 雄; B, 雌)