

内耳は気圧センサーである

低気圧がマウスの前庭神経節細胞の活性化を誘発する仕組み



Jun Sato (佐藤 純)^{1,2}, Hideaki Inagaki (稲垣 英明)², Mayu Kusui (楠井 真由)², Makoto Yokosuka (横須賀 誠)³, Takahiro Ushida (牛田 享宏)²

¹ 中部大学 生命健康科学部 理学療法学科 ² 愛知医科大学 痛み医学講座 ³ 日本獣医生命科学大学 獣医学部

Scientific Reports. 2025.

「天気痛」の謎：なぜ天気の変化で痛みや不調が起きるのか？

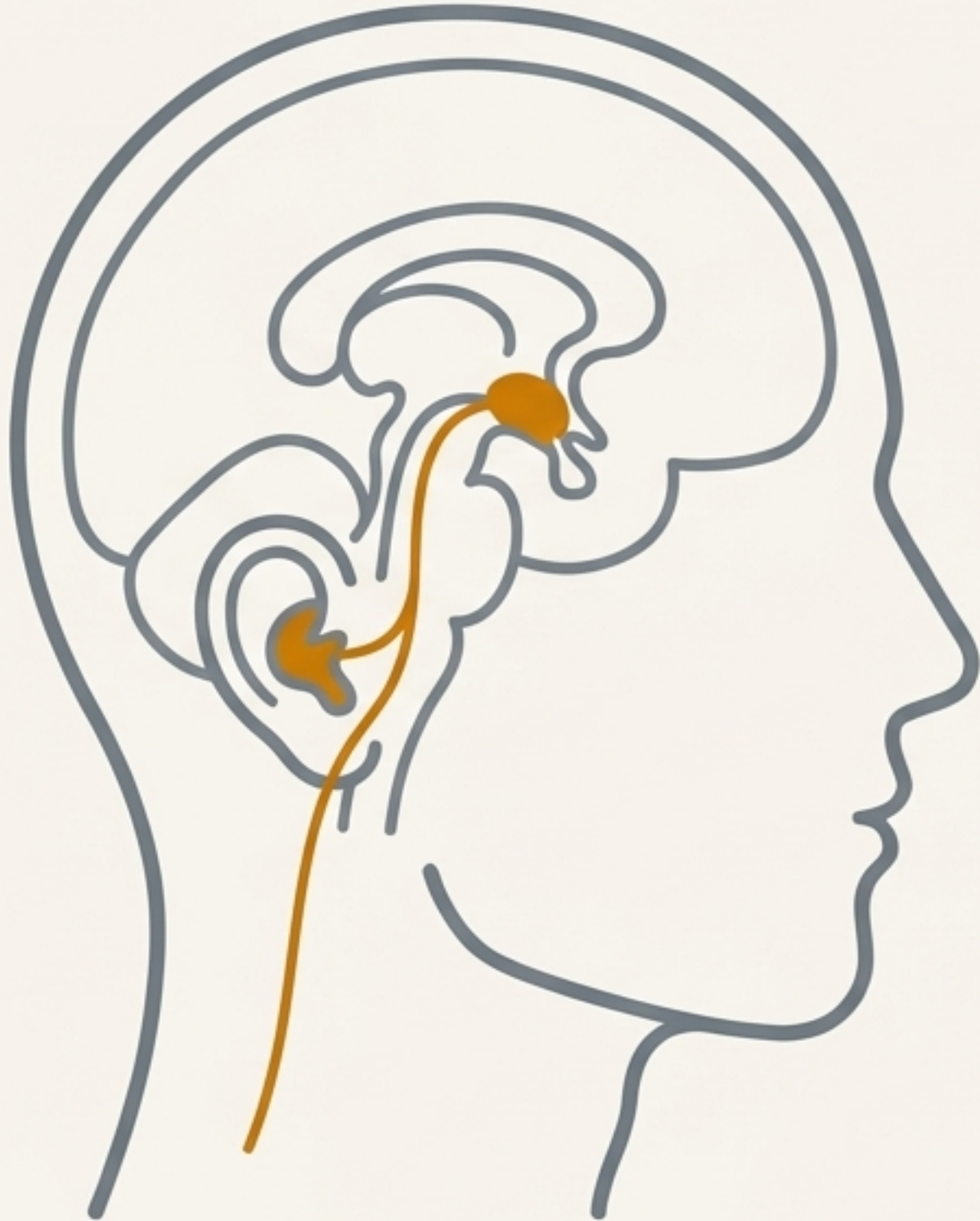
頭痛、古傷の痛み、めまいなど、天気の変化で体調が悪化する現象は「気象病」として知られています。

特に気圧の変化が、これらの症状の引き金になることが多くの研究で示唆されています。

しかし、これまで「気圧の変化」を「身体感覚」に変換する生物学的なメカニズムは、ほとんど解明されていませんでした。これが、本研究が解き明かそうとした中心的な謎です。



これまでの研究で、内耳が重要な役割を担うことが示唆されていた



手がかり①：動物実験

気圧を下げると、慢性的な痛みを持つラットやマウスの痛み関連行動が悪化することが確認されています。

手がかり②：内耳の破壊実験

薬物で内耳を破壊したラットでは、気圧低下による痛みの悪化が見られなくなりました。

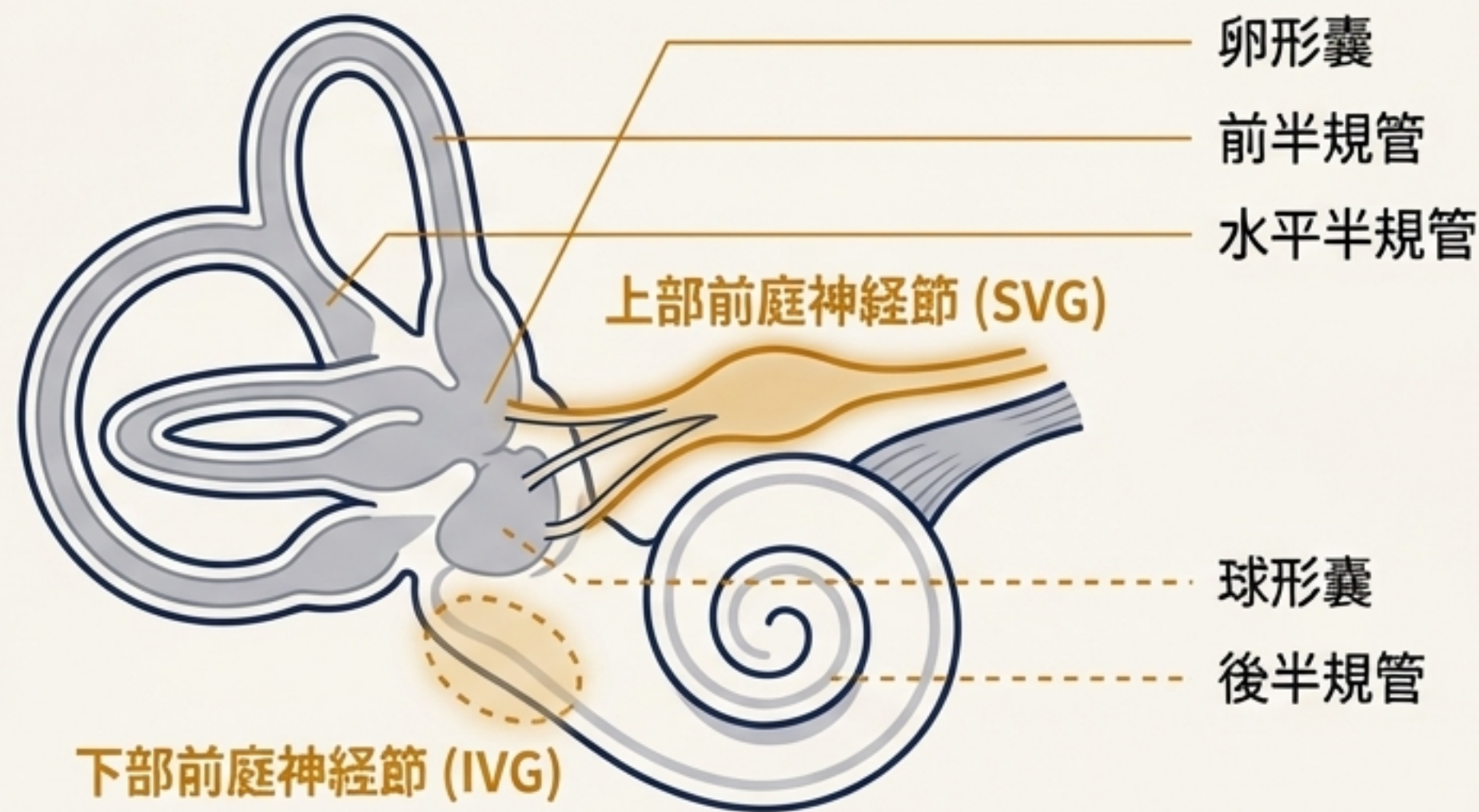
手がかり③：脳活動の観察

気圧を下げると、内耳からの信号を受け取る脳領域（上内側前庭神経核）の活動が活発化することが示されました。

残された疑問：これらの手がかりは内耳の関与を強く示唆しますが、内耳の**どの部分**が気圧を感知しているのかは不明のままでした。

容疑者は2つ：前庭神経節の上部（SVG）と下部（IVG）

内耳からの感覚情報は、主に2つの神経節（神経細胞の集まり）を介して脳へ伝達されます。本研究の目的は、どちらが気圧の変化に反応するかを特定することです。



上部前庭神経節 (SVG - Superior Vestibular Ganglion)

主に卵形嚢、前半規管、水平半規管からの情報を受け取ります。

機能：主に**回転運動**の感知に関与します。

下部前庭神経節 (IVG - Inferior Vestibular Ganglion)

主に球形嚢、後半規管からの情報を受け取ります。

機能：主に**直線加速度や重力**の感知に関与します。

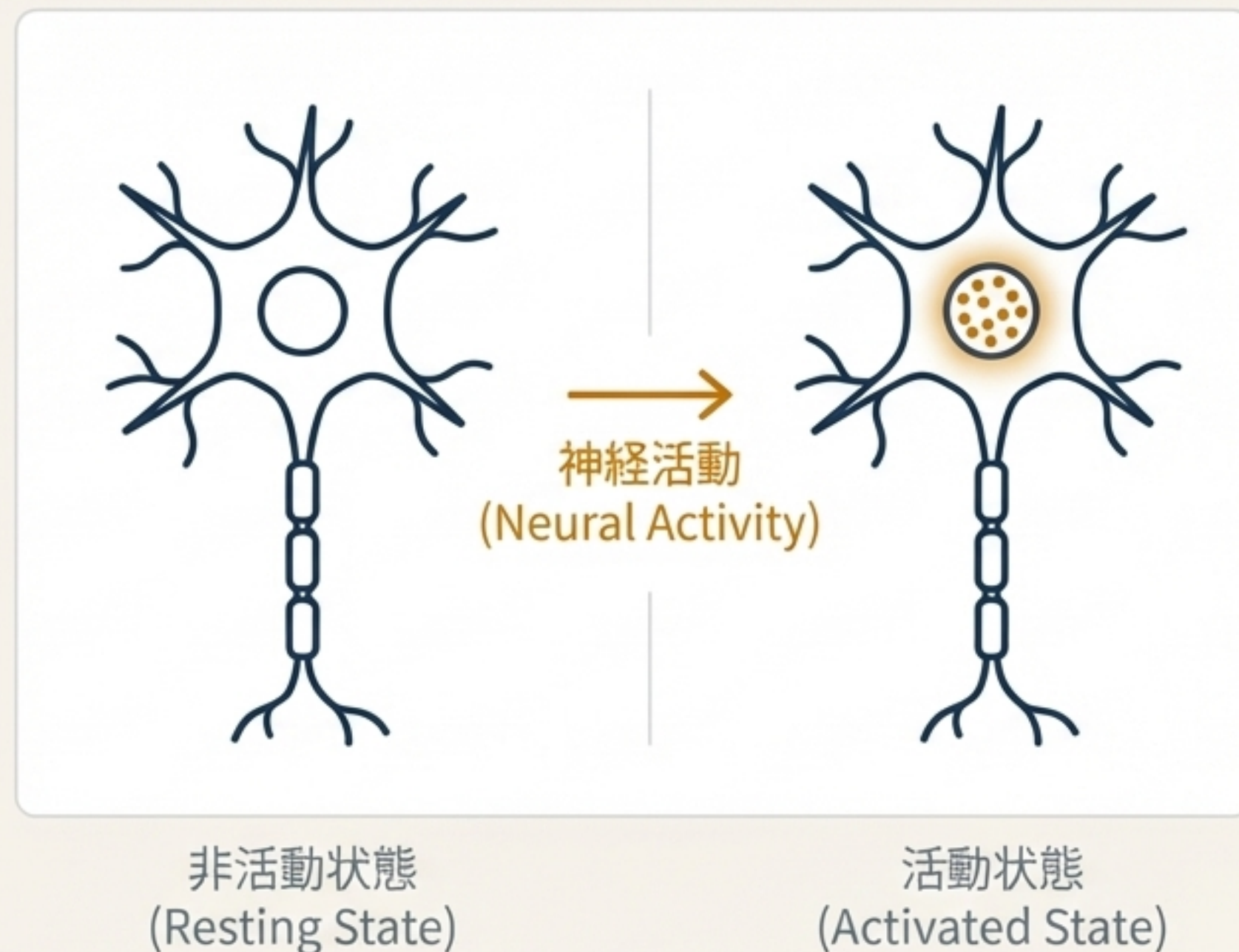
Arcタンパク質をマーカーに、神経細胞の「活動」を可視化する

神経細胞は、活動（興奮）した直後に

「Arc」という特殊なタンパク質を核内に生成します。

このArcタンパク質を免疫染色法で検出することで、どの神経細胞が「活動したか」を視覚的に特定し、その数を数えることができます。

この手法により、SVGとIVGのどちらが気圧の変化に反応したかを、客観的なデータとして捉えることが可能になります。



まずは検証実験：回転刺激でSVGが正しく反応するか？

目的

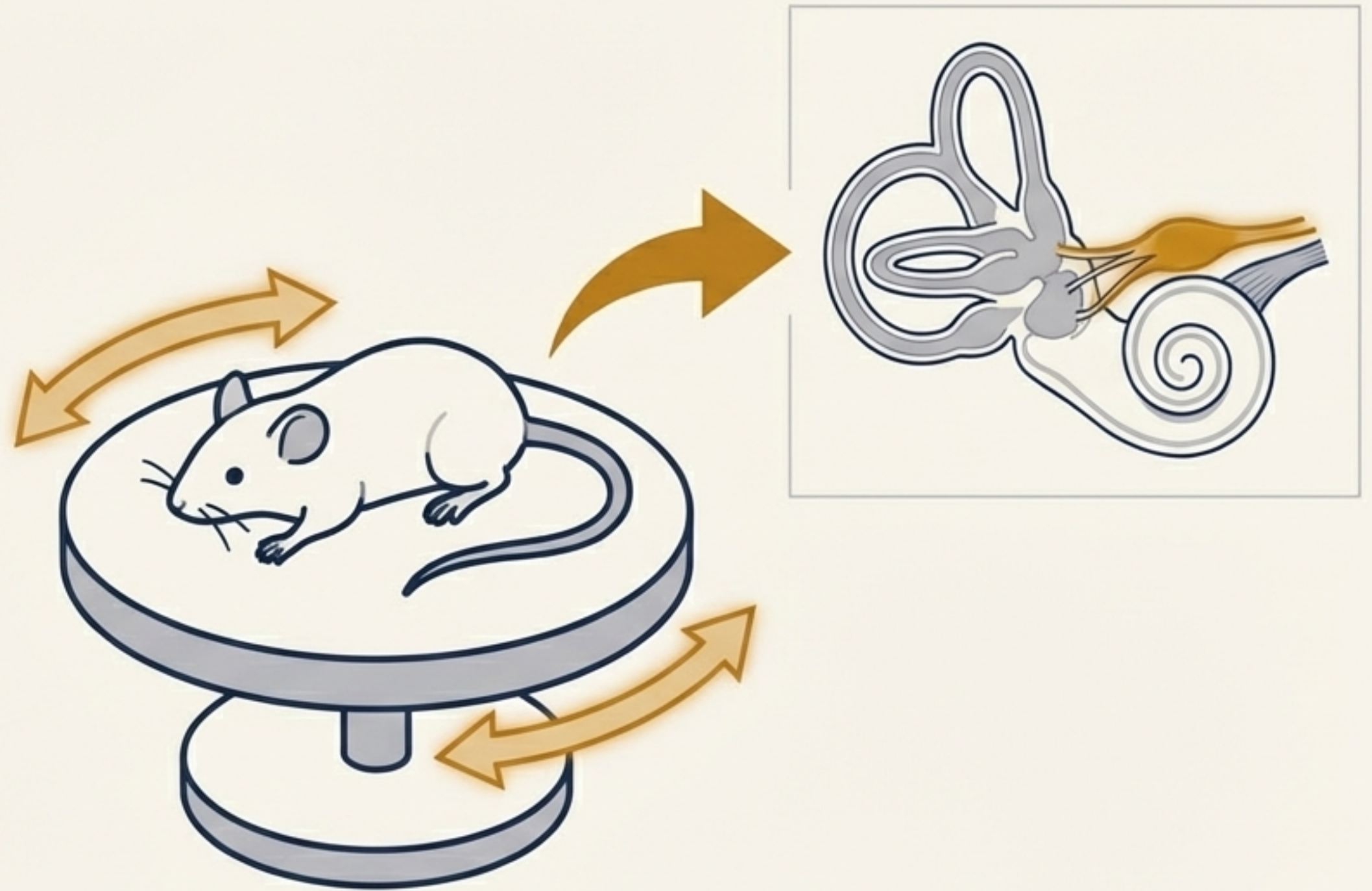
Arc染色法が、期待される神経活動を正確に検出できるかを確認する。

方法

麻酔下のマウスに回転運動（RM）刺激を与えました。回転運動は主に半規管を刺激するため、SVGの神経細胞が活性化すると予測されます。

仮説

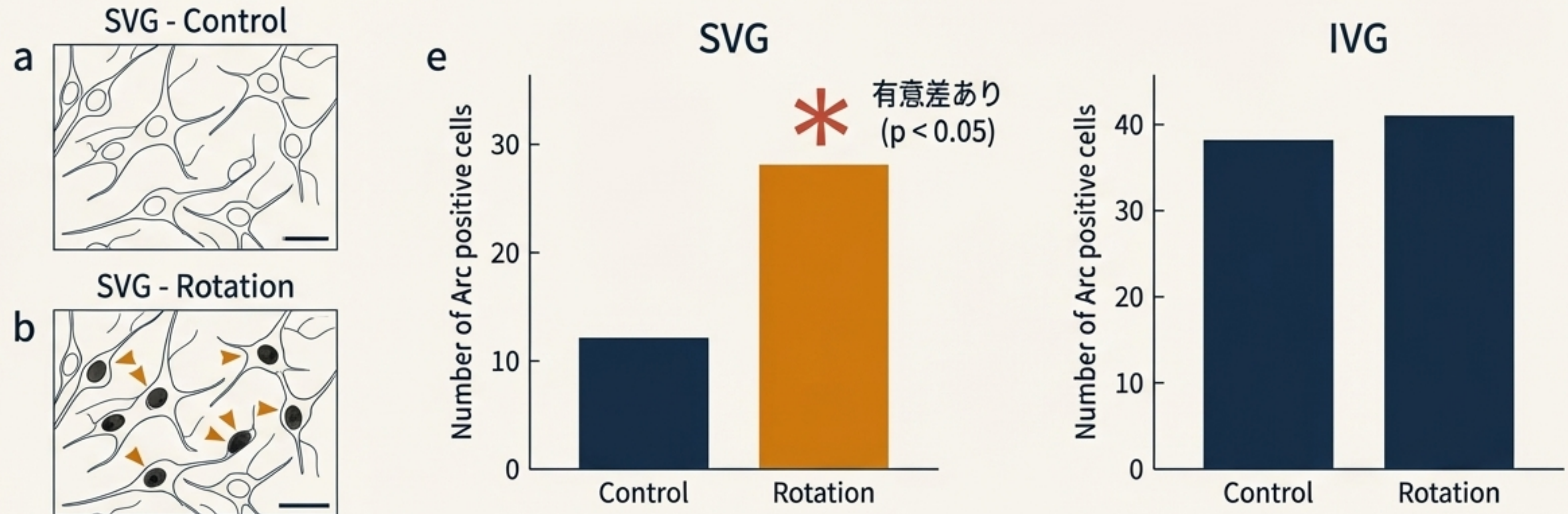
回転刺激後、SVGにおいてのみArc陽性細胞（活動した細胞）の数が有意に増加するはずである。



結果：回転刺激はSVGのみを選択的に活性化させた

予測通り、回転刺激を与えたマウスでは、SVGのArc陽性細胞数が対照群と比較して有意に増加しました ($p < 0.05$)。一方、IVGでは有意な変化は見られませんでした。

結論: この結果は、我々の実験手法が前庭神経節の活動を正確に評価できることを証明しています。これにより、本題である低気圧刺激の影響を自信をもって検証できます。



本実験：低気圧（LBP）をマウスに与え、神経活動を観察

目的

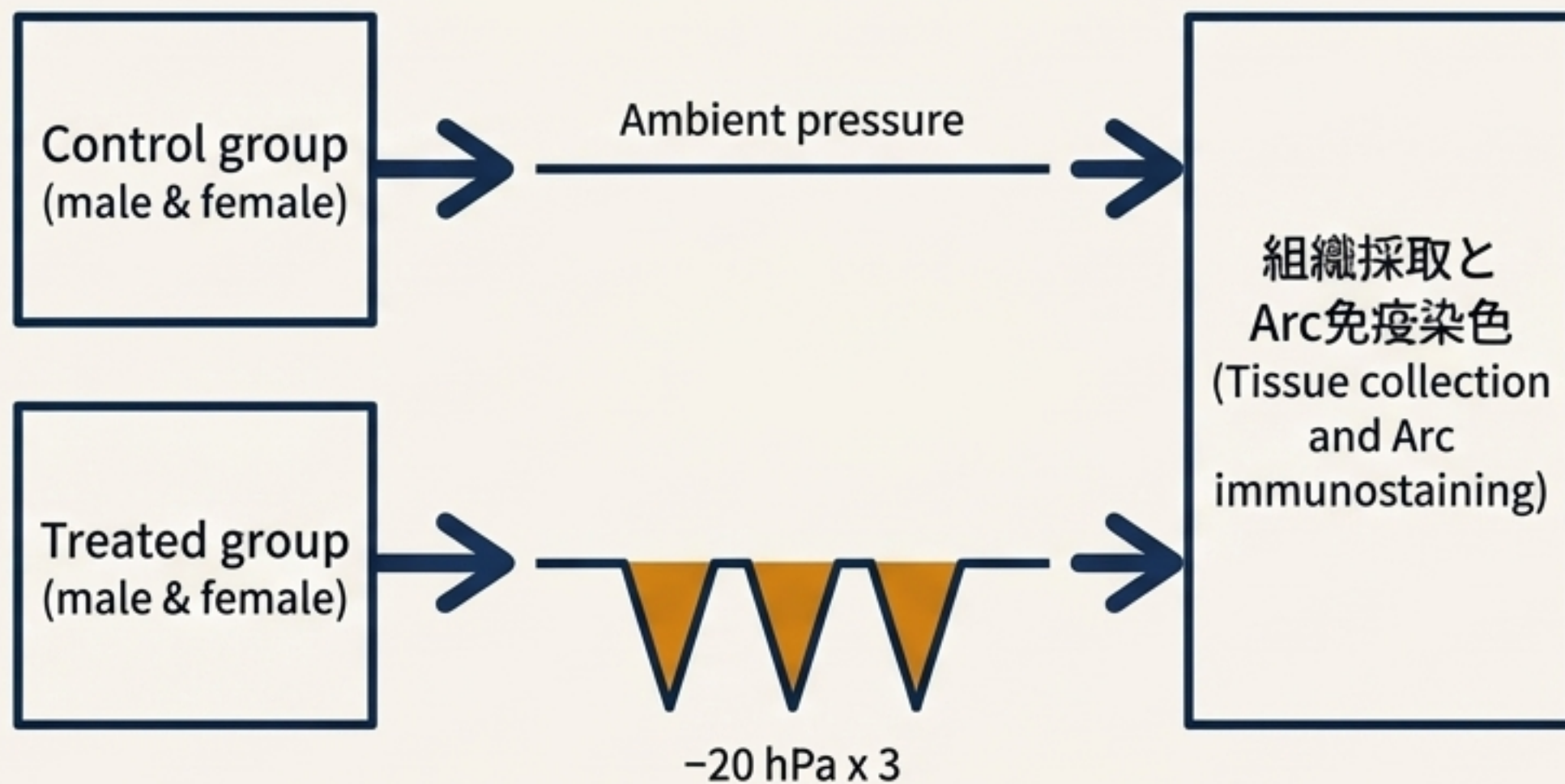
低気圧がSVGまたはIVGの神経細胞を活性化させるかを明らかにする。

方法

1. 麻酔下のマウス（雄・雌）を特殊な気圧制御チャンバーに入れる。
2. 自然界の天候変化を模倣し、気圧を5分かけて20hPa低下させ、5分で元に戻す操作を3回繰り返す。
3. 刺激の1時間後、脳組織を採取し、Arcタンパク質の免疫染色を行う。

仮説

もし内耳が気圧センサーとして機能しているなら、SVGまたはIVGのどちらかでArc陽性細胞の増加が観察されるはずである。

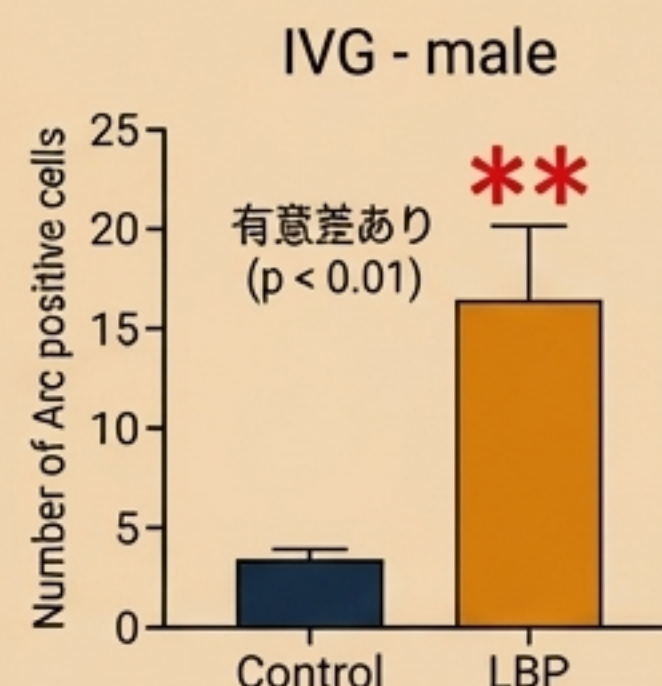
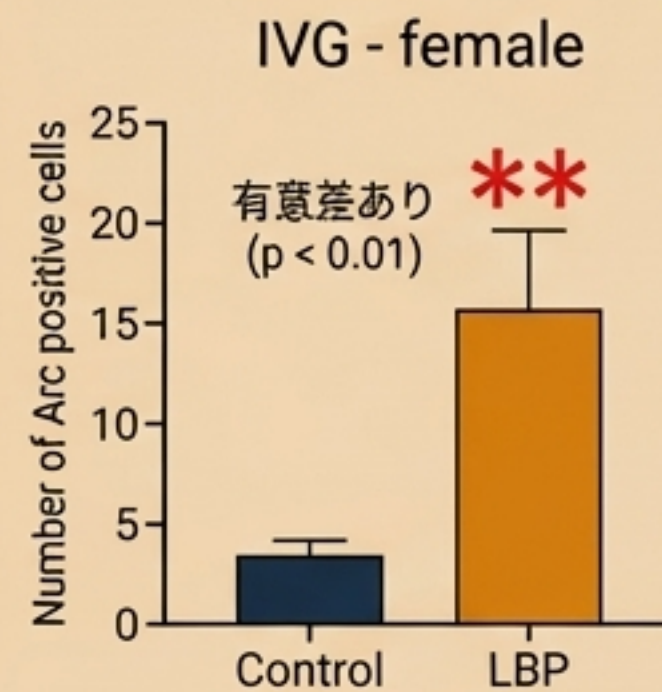
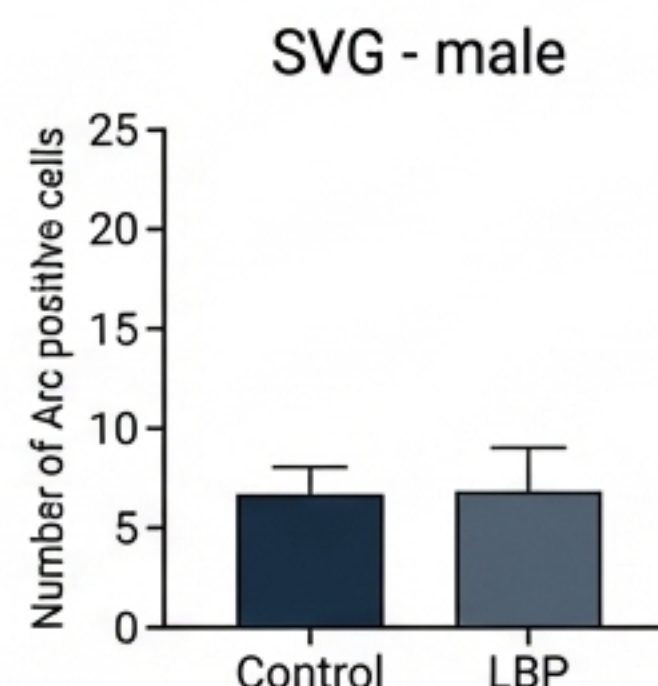
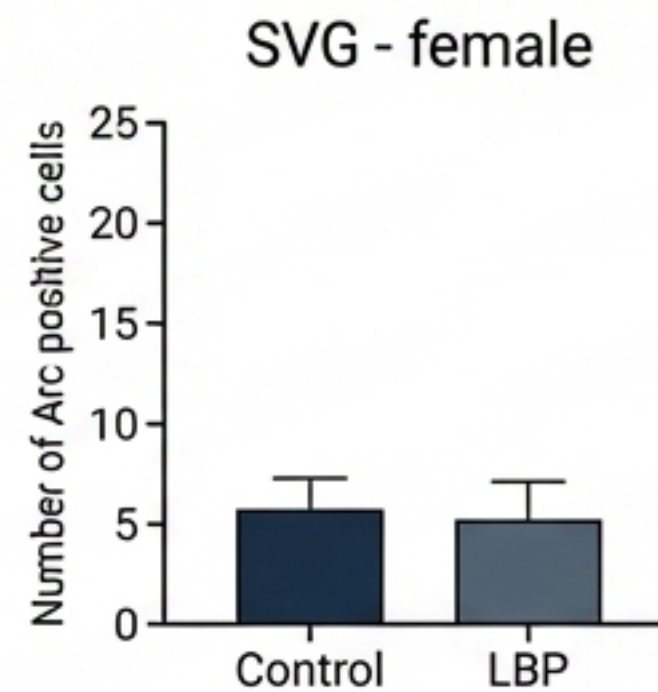
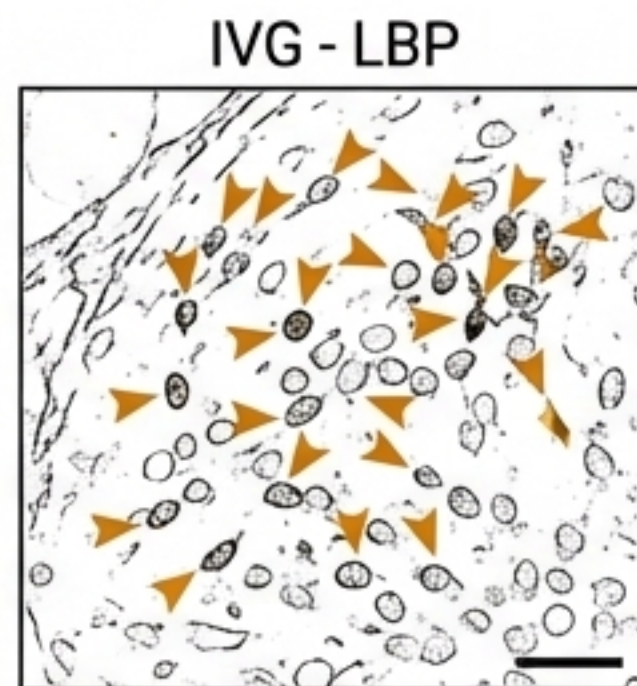
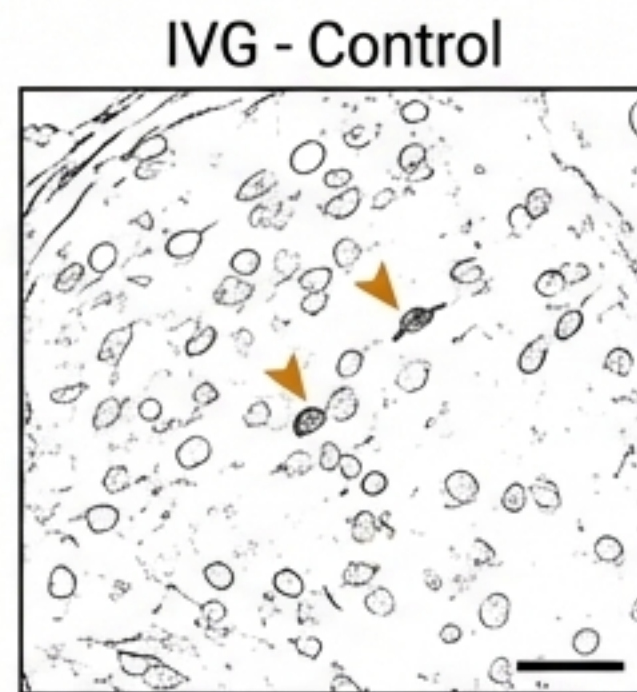


発見：低気圧はIVGのみを選択的に活性化させた

明確な結果：低気圧（LBP）に曝露されたマウスでは、IVGのArc陽性細胞数が対照群と比較して、性別に関わらず有意に増加しました ($p < 0.01$)。

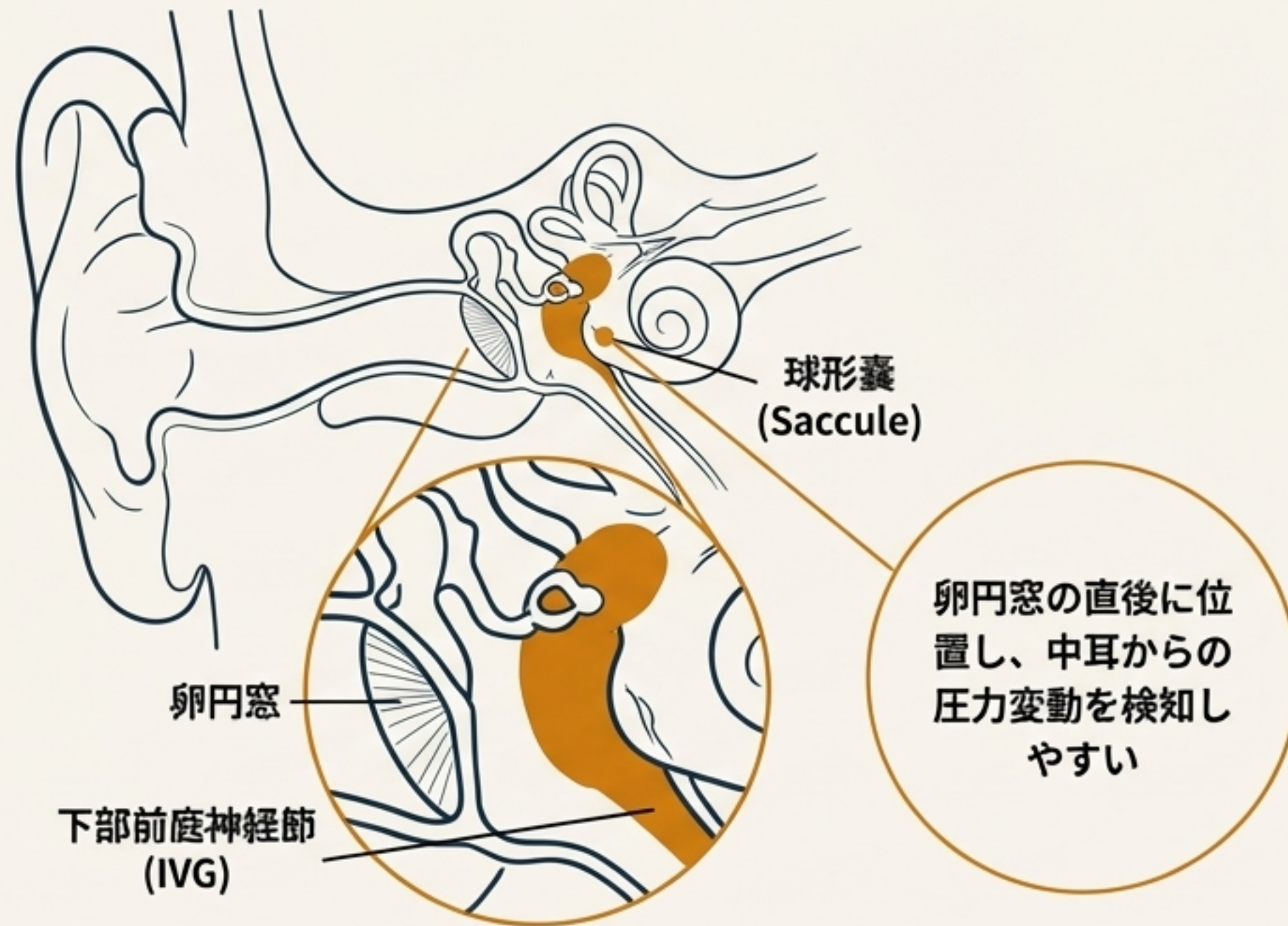
対照的な結果：一方、SVGでは、LBPによる有意な変化は全く観察されませんでした。

結論：この結果は、気圧の変化を感知するセンサーが、IVGによって支配される**球形鞅囊**および/または**後半規管**に存在することを強く示唆します。



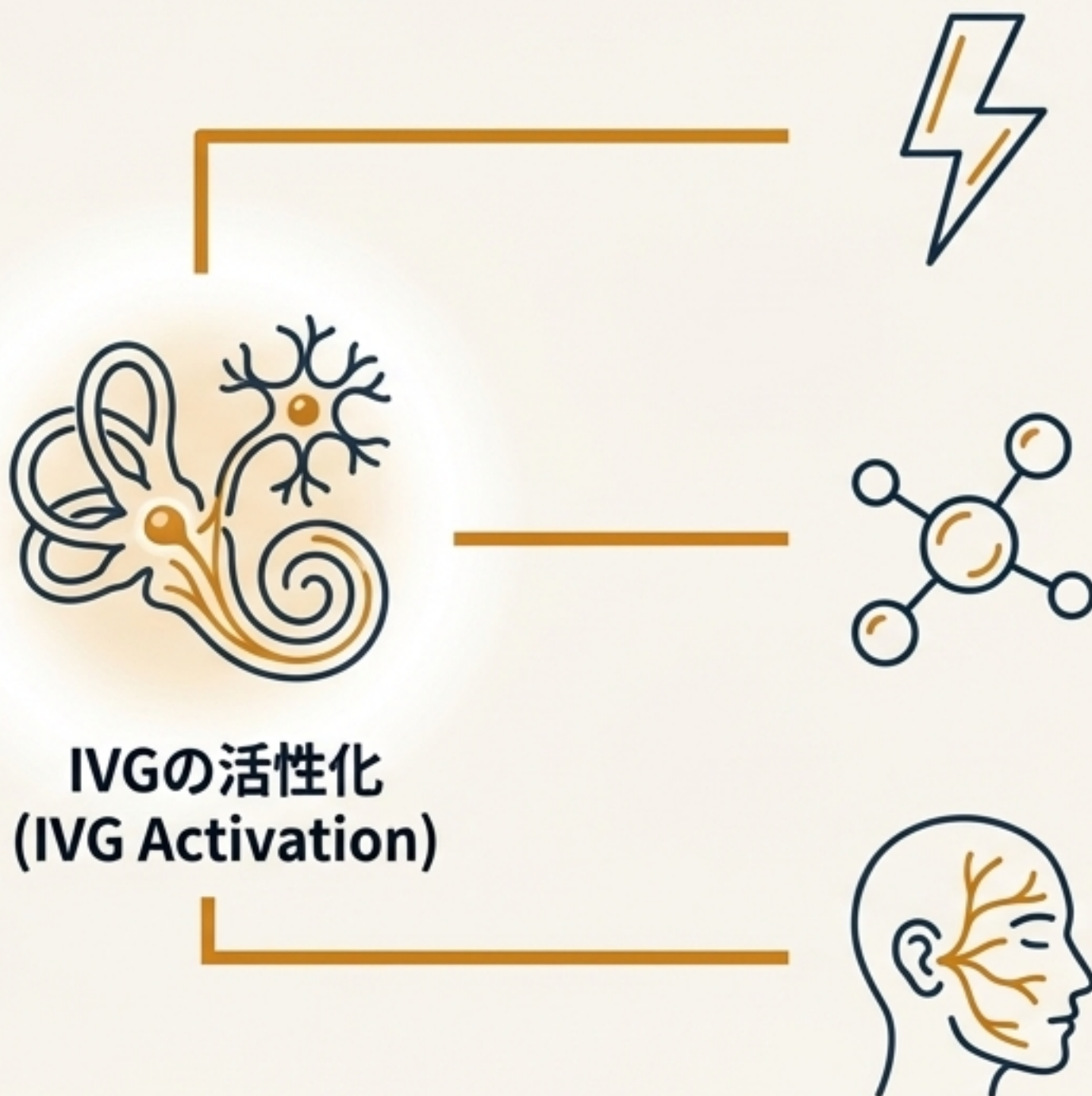
なぜIVGなのか？

センサーは「球形囊 (sacculle)」である可能性が高い



- IVGが受け取る感覚情報の大部分は、球形囊 (sacculle) からのものです。
- 球形囊は、外部の気圧変動が中耳を介して伝わりやすい**卵円窓のすぐ後ろ**に位置しています。
- この解剖学的な位置関係により、球形囊はわずかな気圧の変動にも敏感に反応できる、理想的な圧力センサーであると考えられます。
- 実際に、天気痛を持つ人々は、大きな天候の変化そのものよりも、その前に起こるわずかな気圧のゆらぎで症状が悪化することが報告されており、この仮説と一致します。

センサーの活性化が「天気痛」につながる3つの有力な仮説



1. 交感神経系の活性化

前庭神経の興奮は、脳幹の自律神経中枢を介して交感神経を活性化させます。これにより心拍数や血圧が上昇し、痛覚過敏を引き起こす可能性があります。

2. ホルモン変動

前庭神経核は、ストレス応答に関わる視床下部-下垂体-副腎系（HPA軸）を活性化させることが知られています。これによりコルチコステロンなどのストレスホルモンが放出され、痛みを増強する可能性があります。

3. 三叉神経への影響

前庭神経と三叉神経は相互に神経接続があります。前庭神経の興奮が三叉神経を興奮させ、片頭痛に似た炎症や痛みを引き起こす可能性があります。

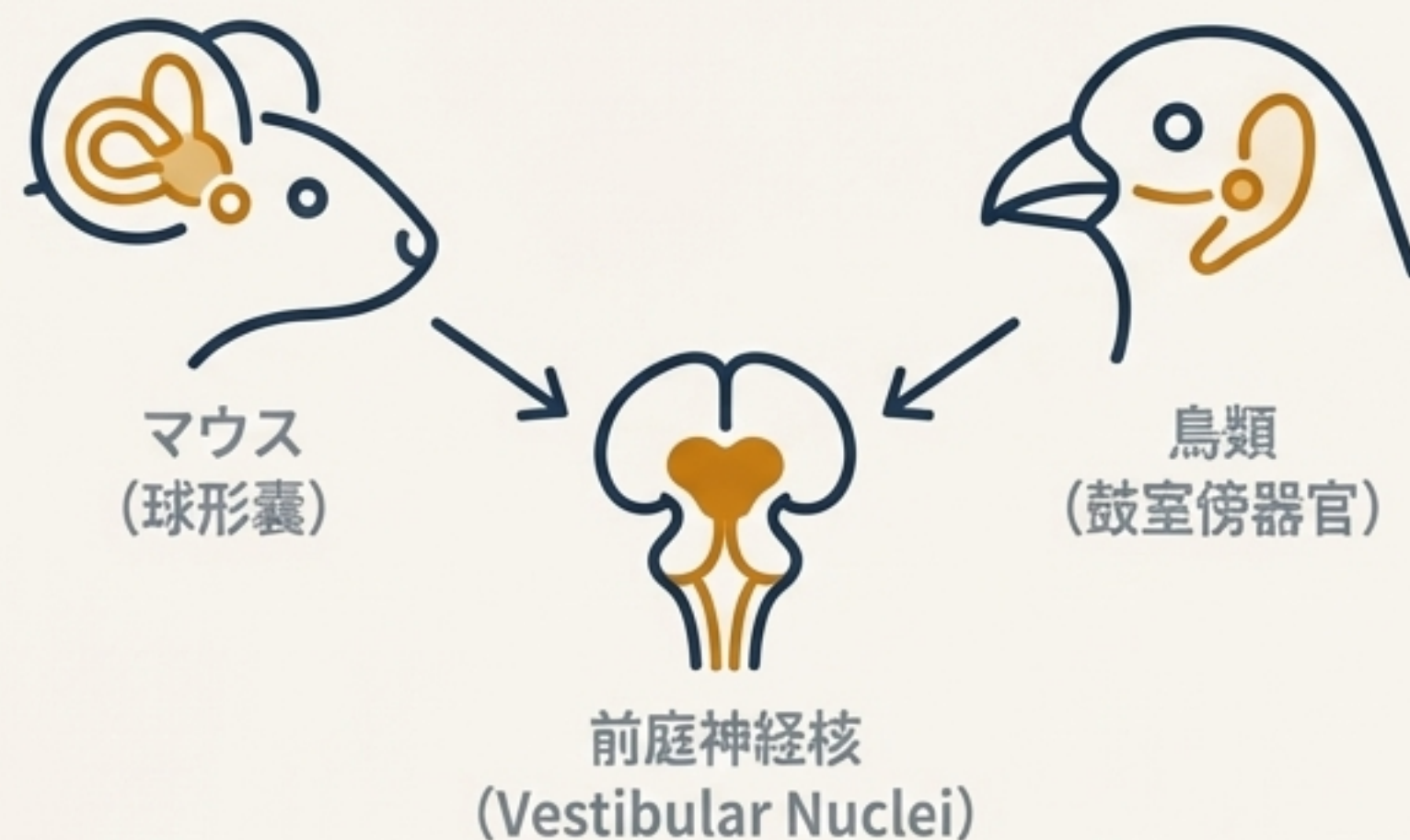
鳥類にも存在する気圧センサー：収斂進化の可能性

生物界では、気圧を感知する能力は珍しくありません。特に鳥類は、渡りや天候予測のために「鼓室傍器官（PTO）」と呼ばれる特殊な器官で気圧を感知します。

マウス（哺乳類）と鳥類では、気圧を感知する器官（球形囊 vs. PTO）や神経（前庭神経 vs. 顔面神経）は異なります。

しかし、その情報が最終的に脳の**前庭神経核**に集約されるという点で、機能と神経回路の類似性は驚くべきものです。

これは、異なる種が同様の課題（気圧感知）に適応するために、独立して似たような解決策を進化させた「収斂進化」の一例である可能性を示唆しています。



今後の課題と研究の展望

本研究の限界点



実験は麻酔下で行われており、
覚醒状態の生理機能とは異なる
可能性があります。



Arcの発現は神経活動の相関
マーカーであり、電気生理学的
な直接記録ではありません。

今後の研究



気圧を感知している具体的な細胞
（機械受容細胞）や分子チャネル
を特定する必要があります。



今回提示した3つの仮説（交感
神経、ホルモン、三叉神経）を
直接的に検証し、天気痛のメカニ
ズムの全容解明を目指します。

結論：内耳のIVGが気圧の変化を検知するセンサーとして機能する



要点

- 本研究は、低気圧がマウスの内耳にある下部前庭神経節（IVG）を選択的に活性化させることを初めて明らかにしました。
- この発見は、気圧センサーがIVGに支配される球形嚢に存在する可能性を強く示唆するものです。
- これは、「天気痛（気象病）」の根底にある生物学的メカニズムを解明する上で、極めて重要な一歩となります。

ご清聴ありがとうございました

引用文献

Sato J, et al. The inner ear is a barometric pressure sensor—change in barometric pressure induces vestibular ganglion cell activation in mice. *Sci Rep* **X**, Y (2025). doi:10.1038/s41598-025-28093-4.

謝辞 (Acknowledgements)

This study was supported by a grant from the Chubu University (K).
We would like to thank Editage (www.editage.jp) for the English language editing.

連絡先 (Contact Information)

Jun Sato (佐藤 純),
jsato0310@aichi-med-u.ac.jp