

顔面皮膚の histamine 刺激によって活性化する ミクログリアの動態

米 本 久 史

日本大学大学院歯学研究科歯学専攻
(指導: 岩田幸一 教授, 篠田雅路 准教授)

要旨: 顔面皮膚に histamine を皮下注射し, 痒みモデルラットの三叉神経脊髄路核尾側亜核 (Vc) および上部頸髄 (C1/C2) から検出される活性化型ミクログリア (Iba1 陽性細胞) の動態について検索した。その結果, histamine 注射後, Vc および C1/C2 に多くの活性化型ミクログリアの集積を認め, その分布密度は生理的食塩液注射よりも有意に多かった。また, 孤束核 (NTS) においても histamine 刺激と生理的食塩液刺激においても多くの活性化型ミクログリアを認めたが, 吻尾方向の分布の広がりおよび密度に有意差はなかった。顔面皮膚に様々な痒みを引き起こす刺激が加えられると, 無髄の C 線維が興奮し, 活動電位が Vc および C1 の神経細胞へと送られることが報告されていることから, Vc および C1 神経細胞とミクログリアとが物質を介した情報伝達を行い, 結果的にミクログリアの活性化が亢進する可能性がある。活性化型ミクログリアからは様々な分子が放出され, Vc および C1 神経細胞の活動性はさらに亢進し, この興奮性は上位中枢へと送られ, 顔面皮膚に痒みが引き起こされると考えられる。一方, NTS 領域に出現した活性化型ミクログリアはこの領域に存在するニューロン活動を変化させ, 痒みによる自律神経系応答の変調に関与する可能性があると推察される。

キーワード: 搔痒, 三叉神経脊髄路核尾側亜核, histamine, ミクログリア, 上部頸髄

緒 言

痒みは非常に不快な感覚で, 臨床的にも様々な薬物の副作用として引き起こされることが知られている^{1,2)}。しかし, その発症メカニズムが不明であることから, 痒みを取り除くために行われる処置は, 原因療法ではなく対症療法が適応される場合が多い^{3,4)}。従来の研究では, 痒みは痛覚が弱まった時に起こる感覚であり, 痛覚情報伝達に関与する無髄の C 線維と同様の神経線維によって伝えられると考えられていた⁵⁾。しかし, 最近では histamine 刺激によって特異的に活性化する C 線維が同定され, 痛みと痒みが異なる神経機構で引き起こされることが明らかにされた⁶⁾。

脊髄レベルにおいては, ネコ足裏への histamine 投与にのみ応答し, 機械および温度侵害刺激には応答しない視床投射ニューロンが存在することが報告され, 脊髄レベルにおいても histamine に特異的な応答を示すニューロンの存在が確かめられた⁷⁾。このようなニューロンは受容野が不明瞭で, histamine の注入のみに反応することから, 特異的侵害受容ニューロンや広作動域ニューロンと異なり, histamine 特異ニューロンとして分類されている。また, 結合腕傍核に軸索を送る三叉神経脊髄路核ニューロンにおいて, histamine, chloroquine および capsaicin を顔面皮下に注入することによって発現する c-Fos タンパクを調べた研究において, 侵害刺激と痒み

刺激とが同一ニューロンによって活性化する可能性も示されている⁸⁾。以上から, 痒みの情報処理において, 三叉神経脊髄路核ニューロンは痒み特異的な応答を示すものと, 痛覚と痒みの両方の情報処理に関係したものが存在する可能性があると考えられる。

これまでの研究により, 延髄を含む中枢神経系にはミクログリア, アストロサイトおよびオリゴデンドロサイトの三種類が報告されている⁹⁾。これらのグリア細胞はニューロンの構造的な支持細胞として, またニューロンの栄養細胞としての機能を有すると考えられてきた⁹⁾。しかし, 最近の研究で, グリア細胞は直接ニューロンに作用して, ニューロン活動を変調することが明かにされた¹⁰⁾。グリア細胞の中でも, 特にミクログリアとアストロサイトはニューロン活動に対して強い変調作用を示すことが知られている¹¹⁾。末梢神経損傷や組織に炎症が起こると, 一次ニューロンの中枢端から ATP が放出される。ATP はミクログリアの膜上に存在する P2X₄ 受容体に結合しミクログリアの活性化が誘導される。一方, アストロサイトは一次ニューロンの中枢端と二次ニューロン間に存在するシナプス領域において, グルタミンを取り込みグルタミン酸を合成して放出することにより, 二次ニューロン活動を強く亢進させることが報告されている¹¹⁾。また, ミクログリアとアストロサイトは活性時期が異なっている。末梢神経障害や末梢組織に炎症が惹き起こされると, 最初に活性化されるのはミクログリアで

(受付: 令和2年1月17日)

〒101-8310 東京都千代田区神田駿河台1-8-13

あり、それに引き続いてアストロサイトが活性化される。さらに、最近の研究では、活性型ミクログリア細胞から transforming growth factor alpha や vascular endothelial growth factor が放出され、これらの分子がアストロサイトの活性化に影響を与えることが報告されており、これら二種類のグリア細胞は異なるメカニズムで活性化し、ニューロン活動の変調に関与するにもかかわらず、お互いに機能連絡を有することが明らかになった¹²⁾。このようなミクログリアやアストロサイトによる二次ニューロンの活動性変調は疼痛に関係するニューロンだけでなく痒み情報処理に関与する二次ニューロンにも変調をかける可能性が考えられる。しかし、活性型グリア細胞がいかなるメカニズムで、痒み情報処理に関与する二次ニューロン活動の変調に関与するかについては不明な点が多く残されている。

そこで、本研究では痒みを誘発することが知られている histamine を顔面皮下に投与することによって発現する Iba1 陽性細胞の延髄における分布様式を検索し、痒み感覚情報処理機構に対するミクログリアの役割の一端を明らかにすることを目的とした。

材料および方法

本研究は、日本大学歯学部動物実験委員会の許可(承認番号: AP17 D038)を得、同委員会の指針および国際疼痛学会の基準に従って行われた¹³⁾。実験には Sprague-Dawley 系雄性ラット 10 頭を用いた。

1. Histamine 投与

2% isoflurane にて麻酔し、さらに sodium pentobarbital (80 mg/kg, i.p.) で深く麻酔したラットを保温パッド上に仰臥位にした状態で、0.9% 生理的食塩液に溶解した histamine 溶液 (10 μ l, 5 μ g/ μ l) を左側口ひげ部皮下に静かに注入した。また、vehicle として 0.9% 生理的食塩液を同量、同部位に注入し、コントロールとした。Histamine 溶液あるいは vehicle 溶液を注入してから 5 分後に 500 ml 生理的食塩液にて脱血後、0.1 M phosphate buffer にて希釈した 4% paraformaldehyde 溶液 (pH7.4, 4 $^{\circ}$ C) 500 ml を用いて灌流固定を行った。灌流固定終了後に延髄を含む全脳部位を摘出し、同様の固定液で 4 $^{\circ}$ C にて 2 日間、後固定を行った。

2. 抗 Iba1 抗体による免疫染色

取り出した三叉神経脊髄路核尾側亜核 (Vc) および上部頸髄 (C1) 領域を含む脳脊髄標本を 0.01 M phosphate buffered saline (PBS) にて希釈した 20% スクロース溶液 (w/v, 4 $^{\circ}$ C) に 2 日間浸漬した。その後、脳脊髄標本を O.C.T. compound (Sakura Finetek USA, Torrance, CA, USA) で包埋してドライアイスで凍結し、三叉神経脊髄路核を含む延髄の連続切片標本 (厚さ 50 μ m) を作製して 3 切片毎に 1 切片を取り出し、以下の方法によって

nickel-cobalt 加 3,3'-diaminobenzidine tetrahydrochloride (DAB, Sigma Aldrich, St Louis, MO, USA) 染色を施した。まず、厚さ 50 μ m の切片を 0.3% H₂O₂ 加 0.01 M PBS に 30 分間浸漬し、内因性ペルオキシダーゼを不活性化した後、0.01 M PBS にて 5 分間の洗浄を 3 回行った。洗浄終了後、0.3% TritonX-100 diluted in 0.01 M PBS with 5% normal goat serum (NGS) に 1 時間浸漬し、ブロッキングを行った。その後、一次抗体である rabbit anti-rat Iba1 antibody (1:1000, Wako, 大阪) に 4 $^{\circ}$ C で 3 日間浸漬し、0.01 M PBS にて 10 分間の洗浄を 3 回行った。次いで切片を二次抗体である biotinylated goat anti-rabbit IgG (H+L) (1:500, Vector Labs, Burlingame, CA, USA) に室温で 2 時間浸漬した。その後 ABC kit (Vector Labs, Burlingame, CA, USA) を用いて室温で 1 時間、反応させた。0.01 M PBS による 10 分間の洗浄を 3 回繰り返した後、0.01% hydrogen peroxide 加 DAB を用いて反応産物を可視化した。次いで、切片を 0.01 M PBS にて洗浄し、MAS-GP (Matsunami, 東京) でコートしたスライドガラスに貼り付け、室温にて乾燥させた後、アルコールとキシレンにより脱水および透徹を行い、封入した。また、Iba1 陽性細胞を DAB 反応させた切片を光学顕微鏡下で観察し、Vc および C1 領域の表層部および深層部の顕微鏡写真を撮影し、Image J software (Research Services Branch, NIH, Bethesda, MD, USA) を用いて Iba1 陽性細胞密度の解析を行った。

3. 統計学的解析

データは平均 \pm 標準誤差で表し、有意差検定には Mann-Whitney U test を用いた。また、有意水準は $\alpha = 0.05$ とした。

結 果

1. 延髄および C1 領域における Iba1 陽性細胞の形態と分布

Fig. 1 は口ひげ部への histamine 注入後 Vc で検出された Iba1 陽性細胞の強拡大組織標本写真を示している。赤の矢印で示したように、Iba1 陽性細胞は、錐体型の細胞体を有する像として観察された。また、細胞体からは周囲に複数の突起を出している。Fig. 2 には、histamine の口ひげ部への注入 5 分後、延髄および上部頸髄領域で認められた Iba1 陽性細胞の組織標本写真を示した。Histamine および生理的食塩液を口ひげ部へ注入したラットにおいて、多くの Iba1 陽性細胞が延髄の三叉神経脊髄路核中間亜核 (Vi), Vc および上部頸髄の C1 において検出された。また、Iba1 陽性細胞は刺激と対側においても観察された。特に histamine 刺激と同側の Vc 表層では高い分布密度で Iba1 陽性細胞が検出された。また、この Iba1 陽性細胞の分布は Vc および C1 領域の背

側から腹側にかけてほぼ均一な密度を示しており、分布密度に偏りは認められなかった。

2. VcおよびC1の表層におけるIba1陽性細胞の吻尾的広がり

Fig. 3はVcおよびC1領域の表層におけるIba1陽性細胞の吻尾側方向の広がりを示している。Fig. 3Aに示したように、histamine刺激と同側表層部で、obexから720~1,440 μ m尾側部において、生理的食塩液注入群に比べ有意に高密度のIba1陽性細胞発現を認めた。また、それよりさらに尾側のobexから2,160 μ m尾側部ではhistamine注入群の方がやや高い発現を認めたが、有意差はなかった。一方、histamine注入および生理的食塩液刺激と対側においては、obexから720~2,160 μ m尾側部の範囲においてIba1陽性細胞発現密度に有意差は認められなかった(Fig. 3B)。

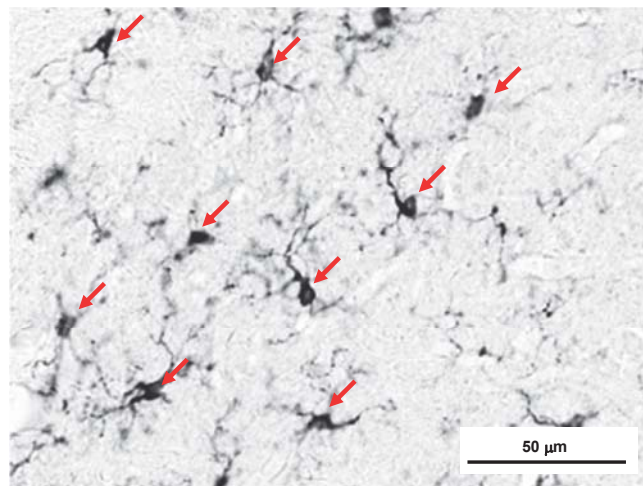


Fig. 1 Vc表層部に多くのIba1陽性細胞が出現した。赤矢印：典型的なIba1陽性細胞

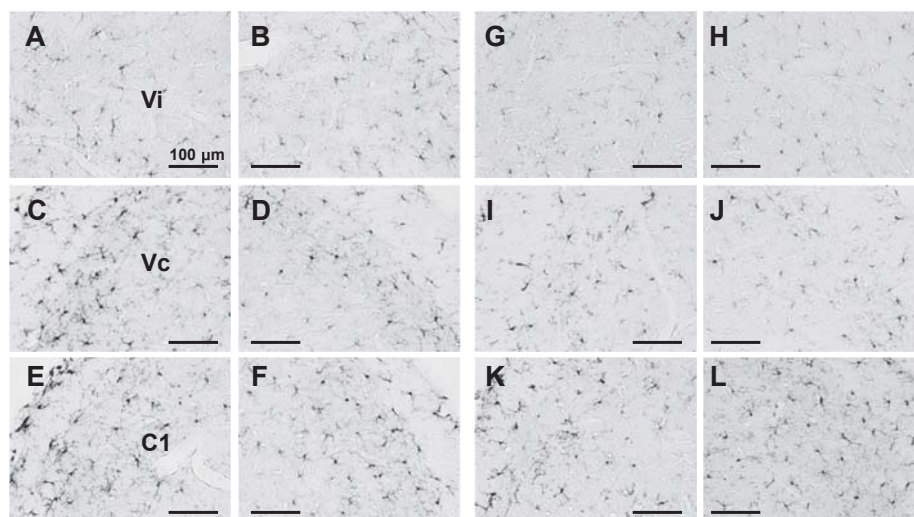


Fig. 2 Histamine投与群：同側Vi(A)，対側Vi(B)，同側Vc(C)，対側Vc(D)，同側C1(E)，対側C1(F)，Saline投与群：同側Vi(G)，対側Vi(H)，同側Vc(I)，対側Vc(J)，同側C1(K)，対側C1(L)

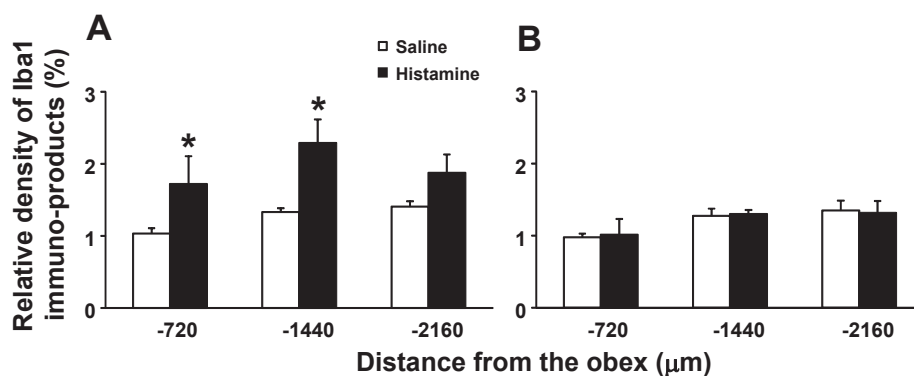


Fig. 3 A: 刺激と同側の行ける陽性細胞密度，B: 刺激と反対側における陽性細胞密度
刺激と同側のVc表層において有意に多くのIba1陽性細胞を認めた。

* $p < 0.05$

3. Vc および C1 の深層における Iba1 陽性細胞の吻尾的広がり

本研究では obex から 720 ~ 2,160 μm 尾側部の範囲において、深層部に発現した Iba1 陽性細胞密度に関して解析を行った。深層部においては、histamine 刺激と同側において、どのレベルにおいてもやや発現密度が高い傾向を認めたものの、有意差はなかった (Fig. 4 A)。また、対側においても分布密度に有意差は認められなかった (Fig. 4 B)。

4. 網様体および孤束核に発現した Iba1 陽性細胞

Fig. 5 は網様体 (RF) および孤束核 (NTS) において検出された Iba1 陽性細胞の吻尾側方向の分布密度を示している。Fig. 5 A ~ D で示した RF においては histamine 刺激および生理的食塩液刺激共に同側および対側で、まばらな Iba1 陽性細胞発現を認めた。吻尾方向の分布密

度をみると、同側と対側、histamine と生理的食塩液刺激共に有意な差は認められなかった。また、NTS においては非常に高密度な Iba1 陽性細胞発現が左右対称的に認められた (Fig. 5 E および F)。また、NTS においても histamine 刺激と生理的食塩液刺激において、吻尾方向の分布密度の広がり有意差は認められなかった (Fig. 5 I)。

考 察

本研究は顔面皮膚に引き起こされる痒みの神経機構を解明するため、発痒物質である histamine を口ひげ部皮膚に注入することによって早期に活性化するミクログリアの発痒に対する役割を明らかにすることを目的に、免疫組織学的手法を用いて、延髄および上部頸髄における活性型ミクログリアの発現様式の解析を行った。その結

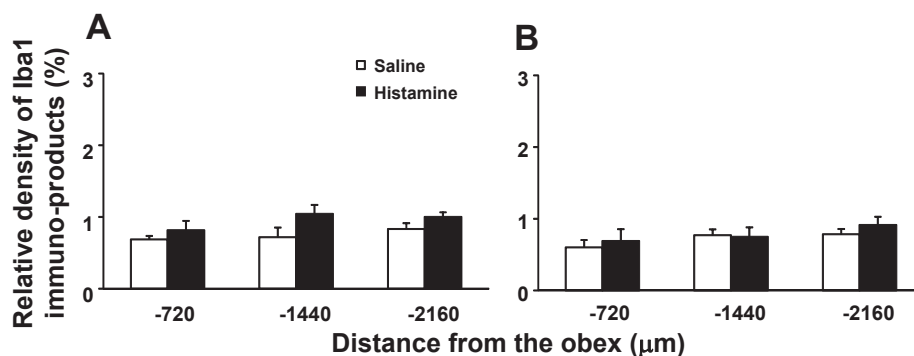


Fig. 4

A: 刺激と同側における Iba1 陽性細胞密度, B: 刺激と対側における Iba1 陽性細胞密度

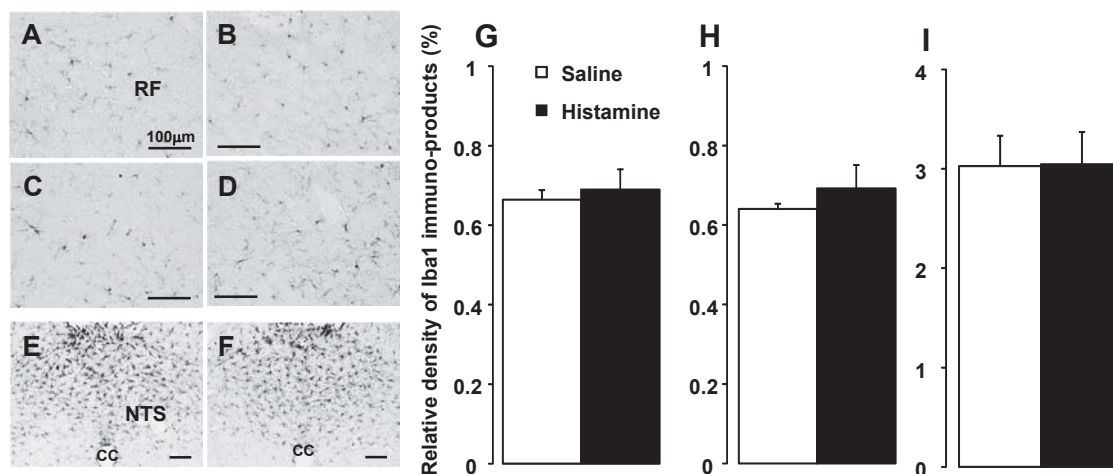


Fig. 5

Histamine 投与群:同側 RF (A), 対側 RF (B), NTS (E), Saline 投与群:同側 RF (C), 対側 RF (D), NTS (F), G: histamine 刺激と同側の RF における Iba1 陽性細胞の分布密度, H: histamine 刺激と対側の RF における Iba1 陽性細胞の分布密度, I: NTS における Iba1 陽性細胞の分布密度, RF および NTS ともに Iba1 陽性細胞密度に有意な違いは認められなかった。

cc: 中心管

果, Vi, Vc および C1 領域に多くの Iba1 陽性細胞発現を認めた。また, RF および NTS においても Iba1 陽性細胞が検出された。

1. ミクログリアの活性化

従来の多くの研究により, 神経損傷や組織における炎症により, 脊髄後角において, 強いミクログリアの活性化が誘導されることが報告されている^{11,14)}。現在, ミクログリアの活性化に関しては, ほとんどの研究者は形態学的な変化の有無によって判断している¹⁵⁾。すなわち, ミクログリアは活性化すると, 細胞体が膨化し細胞体から突出している突起が短くなる。本研究においても, 顔面皮膚に histamine を注射して Vc および C1 領域で検出された Iba1 陽性細胞は Fig. 1 に示したように, 比較的大型の細胞体と, 細胞体から突出する複数の短縮した突起を認めた。過去の研究と本研究結果から, 顔面皮膚の histamine 刺激によって Vc および C1 領域から検出された Iba1 陽性細胞は活性化型ミクログリアであると判断できる。

2. Vc および C1 領域におけるミクログリア活性化とニューロン活動

ミクログリアは非常に数が多く, 神経細胞と神経細胞の間に隙間なく存在し, 神経細胞に対して様々な作用を及ぼすことが知られている¹⁶⁾。また, 活性化したミクログリアは複数の突起を伸ばしたり, 締めたりと活発に動くことが知られており, これによって神経組織に対する作用を発揮している¹⁴⁾。ミクログリアの働きとして, 神経細胞の構造的な維持, 神経細胞の栄養, あるいは老廃物の処理などが知られているが, 最近の研究で, 神経細胞の活動性変調にも重要な働きを有することが明かにされてきた¹⁴⁾。末梢神経が損傷を受けると, 損傷神経の興奮が異常に亢進し, 損傷神経の中枢端から ATP を初めとする様々な物質が放出され 2 次ニューロンに作用することが知られている¹¹⁾。特に ATP はミクログリア細胞に発現している P2X₁ あるいは P2X₇ 受容体に結合し, ミクログリア細胞の活性化を促す。活性化したミクログリアには形態学的な変化が誘導され, それに引き続き, 活性化型ミクログリアから様々な物質が放出される。このことから, 顔面皮膚への histamine 注射によって活性化されたミクログリアは, 顔面の皮膚を支配する神経の中枢端から ATP が放出されたことによって誘導されたものと想像される。さらに, histamine 注入によって活性化したミクログリアからは様々な物質が放出される可能性が考えられる。これまでの報告では, 活性化型ミクログリアからは Brain Derived Neurotrophic Factor (BDNF) や Tumor Necrosis Factor alpha (TNF α) が放出され, 直接的に神経細胞の活動性を変調することが知られている¹¹⁾。おそらく, 本研究で histamine 注射によって活性化したミクログリアからも, BDNF や TNF α が放出さ

れ, 2 次ニューロン活動が増強され, これによって上位中枢に痒みを引き起こすための情報が伝えられると考えられる。

3. RF および NTS におけるミクログリアの機能

本研究では histamine 刺激により RF において弱いミクログリアの活性化, NTS には強いミクログリアの活性化が観察された。RF および NTS の両領域とも, 自律神経系応答に対して重要な役割を担う領域として知られている¹⁷⁻¹⁹⁾。特に histamine 刺激に対して強いミクログリア活性を示した NTS は, 口腔顔面領域からの侵害入力を受けて, これによって自律神経系の反応を変化させることが知られている¹⁸⁾。このことから, NTS 領域において活性化したミクログリアはこの領域に存在するニューロン活動を変調させ, 痒みによる自律神経系応答の変調に関与する可能性があると考えられる。一方で, 自律神経系調節に関与すると考えられている RF 領域において活性化が認められたミクログリアは, 活性化の程度が低いこと, また histamine と生理食塩水刺激に対して活性化にほとんど違いが見いだせなかったことなどから, RF 領域の神経活動の変調に関与する可能性は低いと考えられる。しかし, これら両領域から検出された活性化型ミクログリアが histamine 投与により惹き起こされる痒み感覚と, これに関連する自律系応答に対してはほとんど明らかにされていない。この点を解明するためにはさらなる詳細な研究がなされる必要があると考えられる。

結 論

Fig. 6 には本研究とこれまでの研究結果から想定される痒みの発症機構を示した。本研究では発痒物質として histamine を用いたが, 顔面皮膚に様々な痒みを引き起こす刺激が加えられると, 無髄の C 線維が興奮し, 活動電位が Vc および C1 の神経細胞へと送られる。これによって, Vc および C1 神経細胞とミクログリアとが様々な物質を介した情報伝達を行い, 結果的にミクログリアの活性化が促進する。活性化型ミクログリアからは幾つかの分子が放出され, Vc および C1 神経細胞の活動性はさらに亢進し, この神経興奮は上位中枢へと送られ, 顔面皮膚に痒みが引き起こされると考えられる。しかし, 本研究では顔面皮膚の histamine 刺激によるミクログリアと神経細胞との情報のやり取りに関する直接的な証拠をつかんでいない。痒みの神経機構の全貌を明らかにするためには, この点についてより詳細な研究がなされる必要があると考えられる。

本論文の作成にあたり, 日本大学歯学部生理学講座岩田幸一教授および篠田雅路准教授にご指導をいただきましたことに対して深く感謝いたします。また, 実際実験を推進するにあたって,

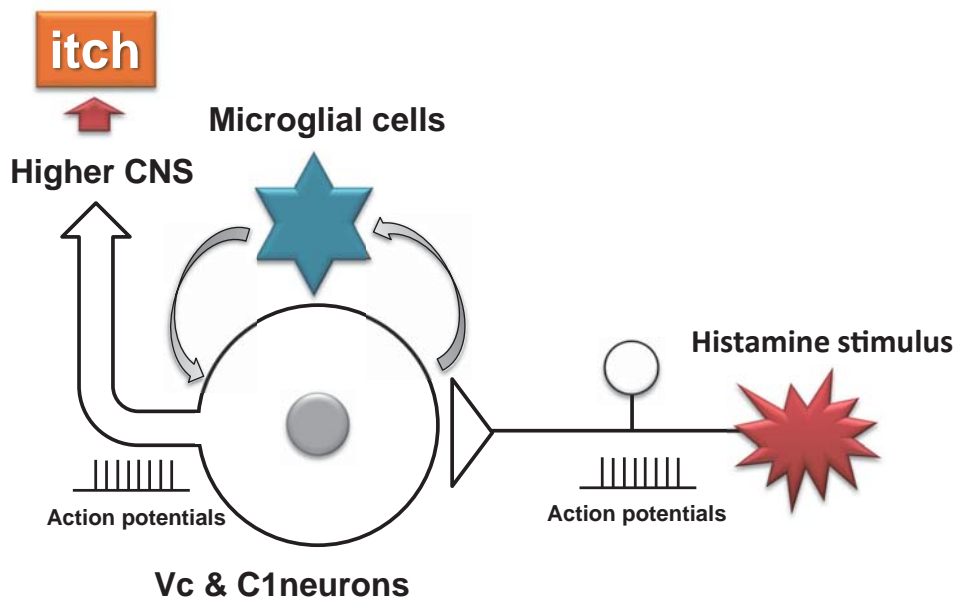


Fig. 6

本研究と過去の研究結果をまとめて、痒みの中枢神経メカニズムを表した模式図として示した。

多くのご助言とご指導をいただきました生理学講座の諸先生方および渋谷郁子専修研究員に心から感謝の意を表します。

本研究に関して、開示すべき利益相反はありません。

文 献

- 1) Ebata T (2016) Drug-induced itch management. *Curr Probl Dermatol* 50, 155-163.
- 2) Wong LS, Wu T, Lee CH (2017) Inflammatory and noninflammatory itch: implications in pathophysiology-directed treatments. *Int J Mol Sci* 18, pii: E1485.
- 3) Faubion SS, Sood R, Kapoor E (2017) Genitourinary syndrome of menopause: management strategies for the clinician. *Mayo Clin Proc* 92, 1842-1849.
- 4) Rajagopalan M, Saraswat A, Godse K, Shankar DS, Kandhari S, Shenoi SD, Tahiliani S, Zawar VV (2017) Diagnosis and management of chronic pruritus: an expert consensus review. *Indian J Dermatol* 62, 7-17.
- 5) Schmelz M (2015) Itch and pain differences and commonalities. *Handb Exp Pharmacol* 227, 285-301.
- 6) Chuquilin M, Alghalith Y, Fernandez KH (2016) Neurocutaneous disease: cutaneous neuroanatomy and mechanisms of itch and pain. *J Am Acad Dermatol* 74, 197-212.
- 7) Andrew D, Craig AD (2001) Spinothalamic lamina I neurons selectively sensitive to histamine: a central neural pathway for itch. *Nat Neurosci* 4, 72-77.
- 8) Jinks SL, Simons CT, Dessirier JM, Carstens MI, Antognini JF, Carstens E (2002) C-fos induction in rat superficial dorsal horn following cutaneous application of noxious chemical or mechanical stimuli. *Exp Brain Res* 145, 261-269.
- 9) Allen NJ, Lyons DA (2018) Glia as architects of central nervous system formation and function. *Science* 362, 181-185.
- 10) Vecino E, Rodriguez FD, Ruzafa N, Pereiro X, Sharma SC (2016) Glia-neuron interactions in the mammalian retina. *Prog Retin Eye Res* 51, 1-40.
- 11) Inoue K, Tsuda M (2018) Microglia in neuropathic pain: cellular and molecular mechanisms and therapeutic potential. *Nat Rev Neurosci* 19, 138-152.
- 12) Rothhammer V, Borucki DM, Tjon EC, Takenaka MC, Chao CC, Ardura-Fabregat A, de Lima KA, Gutierrez-Vazquez C, Hewson P, Staszewski O, Blain M, Healy L, Neziraj T, Borio M, Wheeler M, Dragin LL, Laplaud DA, Antel J, Alvarez JI, Prinz M, Quintana FJ (2018) Microglial control of astrocytes in response to microbial metabolites. *Nature* 557, 724-728.
- 13) Zimmermann M (1983) Ethical guidelines for investigations of experimental pain in conscious animals. *Pain* 16, 109-110.
- 14) Tsuda M, Beggs S, Salter MW, Inoue K (2013) Microglia and intractable chronic pain. *Glia* 61, 55-61.
- 15) Salter MW, Stevens B (2017) Microglia emerge as central players in brain disease. *Nat Med* 23, 1018-1027.
- 16) Salter MW, Beggs S (2014) Sublime microglia: expanding roles for the guardians of the CNS. *Cell* 158, 15-24.
- 17) Liu RH, Tang JS, Hou ZL (1989) Electrophysiological identification of spinally projecting neurons in the lateral reticular nucleus of the rat. *Brain Res* 481, 350-355.
- 18) Tsujimura T, Kondo M, Kitagawa J, Tsuboi Y, Saito K, Tohara H, Ueda K, Sessle BJ, Iwata K (2009) Involvement of ERK phosphorylation in brainstem neurons in modulation of swallowing reflex in rats. *J Physiol* 587, 805-817.
- 19) Sevoz-Couche C, Brouillard C (2017) Key role of 5-HT3 receptors in the nucleus tractus solitarius in cardiovascular stress reactivity. *Neurosci Biobehav Rev* 74, 423-432.