

Title	外傷後敗血症病態に関与する好中球フェノタイプの研究
Author(s)	水柿,明日美
Citation	北海道大学. 博士(医学) 甲第15650号
Issue Date	2023-09-25
DOI	10.14943/doctoral.k15650
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/90975
Туре	theses (doctoral)
Note	配架番号:
File Information	MIZUGAKI_Asumi.pdf



学位論文

外傷後敗血症病態に関与する好中球フェノタイプの研究 (Neutrophil phenotypes implicated in the pathophysiology of post-traumatic sepsis)

 2023年9月

 北海道大学

 水柿明日美

学位論文

外傷後敗血症病態に関与する好中球フェノタイプの研究 (Neutrophil phenotypes implicated in the pathophysiology of post-traumatic sepsis)

 2023年9月

 北海道大学

 水柿明日美

						E								沙						
発表詞	△ ¬ 冊 /	攵	目	録	お	よ	び	学	슻	発	表	目	録	•	•	•	•	•	•1頁	
要旨	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・2 頁	
略語表	長	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・4 頁	
緒言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・6 頁	
方法,	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・9頁	
結果	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・21 頁	
考察	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・36頁	
結論	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・39頁	
謝辞	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・41 頁	
利益柞	泪乃	、	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・41 頁	
引用つ	文 南	肰	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	・42 頁	

発表論文目録および学会発表目録

本研究の一部は以下の論文に発表した。

 Asumi Mizugaki, Takeshi Wada, Takumi Tsuchida, Yoshitaka Oda, Katsuhide Kayano, Kazuma Yamakawa, Shinya Tanaka Neutrophil phenotypes implicated in the pathophysiology of post-traumatic sepsis, Frontiers in medicine 9. 982399, (2022)

本研究の一部は以下の学会に発表した。

 水柿明日美,和田剛志,土田拓見,小田義崇,茅野勝英,山川一馬,田中 伸哉
 外傷後二次性敗血症病態における好中球フェノタイプが関与する免疫応答 の研究
 第 36 回日本外傷学会総会・学術学会,2022 年 6 月 30 日・大阪国際会議場

【背景と目的】重症外傷による死亡は、受傷後からの時期によって 3 つに分け ることができる。すなわち、治療介入の余地がない超急性期の死と、医学・医 療の進歩によって死亡率が改善してきた急性期の死、そして現時点では支持的 療法が中心で根本的治療方法が確立されていない亜急性期~慢性期の死である。 救命率の比較的低い外傷急性期を乗り越えたにもかかわらずその後の亜急性期 ~慢性期に命を落とす原因としては、手術侵襲や二次性に発症する感染症・敗 血症による臓器不全が考えられているが、その機序としては免疫恒常性の破綻 が知られている。好中球は、自然免疫の中核を担い、感染症の最前線で病原体 を排除する役割を持つことで広く知られてきた。しかし近年、炎症性好中球だ けではなく、抗炎症作用を持つ好中球など様々な機能を有する好中球フェノタ イプの存在が指摘されている。腫瘍性疾患や自己免疫性疾患、アレルギー性疾 患を中心としてさまざまな病態に好中球フェノタイプが関与している可能性が 示唆されている。外傷後敗血症病態にも好中球フェノタイプの偏在が関与して いることが報告されているが、その全容は依然として明らかにされていない。 外傷後敗血症病態における好中球フェノタイプの関与を明らかにし予後と関連 する因子について検討する目的で本研究を行った。本研究では外傷後敗血症モ デルマウスを用い、生存率や腹水生菌数の検討、病理組織学的解析を行った。 さらに、同モデルマウスの血液および腹水中サイトカイン測定や好中球フェノ タイプの解明を目的としたマスサイトメトリーによる免疫学的解析を行った。 【材料と方法】週齢 7-8 の雄の ICR マウスを用いて外傷後敗血症マウスモデル を作製した。外傷として 25%3 度熱傷もしくはコントロールとして Sham を施 し、受傷 24 時間後に盲腸結紮穿孔 (cecal ligation and puncture: CLP) を行うこと によって敗血症を引き起こし、熱傷を施した Burn/CLP モデルと、Sham を施し た Sham/CLP モデルを作製した。CLP 後 14 日間生存率、CLP 翌日の腹水生菌数、 CLP 翌日の脾臓、肝臓、腎臓、肺組織の病理組織学的所見を両群間で比較した。 さらに両群の血清および腹水のサイトカイン測定と、血液中および腹水中の好 中球、単球・マクロファージに的を絞ったマスサイトメトリーによって免疫学 的解析を行った。

【結果】Burn/CLP 群は Sham/CLP 群と比較し有意に生存率が低かった。腹水生 菌数測定においては Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の間に有意な差を見出すことが できなかったが、病理組織学的検査では Sham/CLP 群と比較して Burn/CLP 群で は脾臓組織中のマクロファージが少なく、肝臓、腎臓、肺の組織では Burn/CLP 群で Sham/CLP 群よりも進行した臓器障害が見られた。Burn/CLP 群では、血清 中の transforming growth factor-beta 1 (TGF-β1) のレベルが Sham/CLP 群と比し て高く、その他のサイトカイレベルは血清、腹水中ともに概して Burn/CLP 群 で低下していた。血液、腹水それぞれについて行ったマスサイトメトリーでは、 clusters of differentiation (CD) 11b と CD172a が血液、腹水中の好中球、単球・ マクロファージいずれにおいても Burn/CLP 群で高い傾向にあり、sialic acidbinding Ig-like lectin-F (Siglec-F) 陽性好中球が Burn/CLP 群の腹水中で多く見ら れた。また、腹水中の CD68 陽性好中球群が Burn/CLP 群で著減していた。

【考察】本研究では、外傷後敗血症病態における好中球フェノタイプの関与を 検討した。細胞死や細胞分化に関与しサイトカイン放出を抑制する働きも持つ とされる TGF-β1 が、Sham/CLP 群と比して Burn/CLP 群の血清中から高く検出 されたが、これによって Burn/CLP 群では炎症性サイトカイン・抗炎症性サイ トカインいずれの放出も抑制された可能性が考えられた。マスサイトメトリー では、好中球の接着や遊走に関与するとされる CD11b と貪食細胞の貪食能に関 与するとされる CD172a が、血液および腹水中の好中球、単球・マクロファー ジいずれにおいても Burn/CLP 群で高く発現する傾向にあり、炎症組織での組 織修復に関与している可能性のある Siglec-F 陽性好中球が Burn/CLP 群の腹水中 で多く見られた。これらの好中球フェノタイプの局在が Burn/CLP 群の免疫抑 制状態に関与している可能性があるが、本研究では因果関係の証明には至って いない。また、Sham/CLP 群で認められた CD68 高発現好中球が Burn/CLP 群で は欠損していることがわかった。CD68 高発現好中球は炎症性腸疾患患者の腸 管組織から検出されたという報告はあるがその存在意義は明らかにされておら ず、外傷後敗血症病態における CD68 高発現好中球の役割についても明らかに することはできなかった。腹水生菌数は Burn/CLP 群と Sham/CLP 群で違いが指 摘できなかったが、病理組織学的解析からは Burn/CLP 群において脾臓のマク ロファージの減少が反映する免疫応答の抑制と肝臓・腎臓・肺の臓器虚血の進 行が示された。マスサイトメトリーの結果 Burn/CLP 群において見られた好中 球フェノタイプの偏在は血液中の TGF-β1 をはじめとするサイトカインによっ て引き起こされ、免疫恒常性の破綻を招き、病理組織学的検査によって得られ た臓器障害や生存率の低下に関与している可能性が考えられた。腹水生菌数に Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の間で有意差がなかったことについては、腹水採取 の時期などが原因として考えられた。

【結論】Burn/CLP 群と Sham/CLP 群において、血清中 TGF-β1 レベルの違いと いくつかの好中球フェノタイプの偏在を認めた。これらの結果が、生存率の低 下や病理組織学的検査で認められた臓器障害の進行など、Sham/CLP 群と比較 した際の Burn/CLP 群の悪い予後に寄与している可能性が考えられた。ノック アウトマウスや抗体を用いたさらなる検討により、両群で違いが見られた因子 が予後に寄与していることを証明することが今後の課題である。

略語表

本文中および図中で使用した略語は以下の通りである。

CARS	compensatory anti-inflammatory response syndrome
CCR2	C-C chemokine receptor type 2
CD	clusters of differentiation
CLP	cecal ligation and puncture
CT	computed tomography
CX3CR1	C-X-3C chemokine receptor 1
CyTOF	cytometry by time-of-flight
EDTA	ethylenediaminetetraacetic acid
FCS	foetal calf serum
FlowSOM	Flow self-organizing map
FoxP3	forkhead box P3
FSI	fecal suspension intraperitoneal injection
GM-CSF	granulocyte-macrophage colony-stimulating factor
H&E	hematoxylin and eosin
HEPES	4-(2-hydroxyethl)-1-piperazineethanesulfonic acid
ICR	Institute of Cancer Research
IFNγ	interferon-gamma
ILT3	immunoglobulin-like transcript 3
JATEC	Japan advanced trauma evaluation and care
JETEC	Japan expert trauma evaluation and care
JPTEC	Japan prehospital trauma evaluation and care
Ly6	lymphocyte antigen 6
MC	metacluster
MSR	macrophage scavenger receptor
NETs	neutrophil extracellular traps
NKG2D	natural killer group 2D
opt-SNE	optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding
PD-1	programmed cell death-1
PD-L1	programmed cell death-ligand 1
RORγT	retinoic acid receptor-related orphan receptor gamma t
Sca-1	stem cell antigen-1
Siglec-F	sialic acid-binding Ig-like lectin F

SIRPa	signal-regulatory protein alpha
SIRS	systemic inflammatory response syndrome
SR-AI	scavenger receptors AI
T-bet	T-box expressed in T cells
ΤϹℝγδ	T cell receptor gamma delta
TGF-β1	transforming growth factor-beta 1
TLR	Toll-like receptor
VEGF_R1	vascular endothelial growth factor receptor 1

緒言

救急医が対応すべき代表的疾病の一つに重症外傷がある。外傷は世界的に見 ても若年者の死因の上位に挙げられ(Centers of Disease Control and Prevention, 2021)、日本国内でも小児から 30 代までの死因上位に「不慮の事故」が挙がり、 これには外傷が含まれる(Ministry of Health, Labour and Welfare, 2009)。外傷に よる死亡は社会的にも大きな損失であり、医学・医療の発展によってその救命 率の向上が期待されてきた。輸血療法や外科的止血療法、血管内治療の普及、 computed tomography(CT)スキャンや超音波検査診断装置などの導入は、外 傷急性期の治療成績の改善に貢献してきたと言える。日本では 2002 年に外傷 初期診療ガイドラインが作成され、"防ぎ得た外傷死"を減らすことを目標と して、Japan prehospital trauma evaluation and care (JPTEC) コース・Japan advanced trauma evaluation and care (JATEC) コース・Japan evaluation and care (JATEC) コース・Japan expert trauma evaluation and care (JATEC) コース・Japan expert trauma evaluation and care (JATEC) コース・Japan expert trauma evaluation and care (JATEC) コース・Japan expert trauma

外傷による死亡は、その時期によって大きく 3 つにわけることができる:① 超急性期死亡(受傷後 0~1 時間)、②急性期死亡(受傷後数時間~24 時間前 後)、③亜急性期~慢性期死亡(数日~数週間以降)。大血管損傷や高度脳損傷 などによってほぼ即死状態となる超急性期の死亡は、ほとんどの場合で医療の 介入の余地がないが、病院前・病院到着後に介入の可能性が残るいわゆる外傷 急性期の死亡は、上記のような医療の発展により大幅に減少した(Jaunoo and Harji, 2009; Roberts et al, 2013; CRASH-3 trial collaborators, 2019)。しかし、命を 落とす危険の高い外傷急性期を乗り越えた患者の中には、外傷後亜急性期~慢 性期の時期に再び命の危機に直面し、実際に命を落とす者がいる(Guo et al, 2003; Shelley et al, 2003)。外傷亜急性期~慢性期の死亡原因の多くは手術侵襲 や二次性感染症による臓器障害であると考えられているが、それらに対する治 療は支持的療法がほとんどで根本的な治療方法が確立されていないのが現状で ある。

外傷後には自然免疫系による炎症反応とそれを代償する形で起こる獲得免疫 系の抗炎症反応が起こるが、それらの不均衡が生じたときに、全身性炎症反応 症候群(systemic inflammatory response syndrome: SIRS)あるいは代償性抗炎症 反応症候群(compensatory anti-inflammatory response syndrome: CARS)を来たし、 ひいてはサイトカインストームや敗血症などによる臓器障害を引き起こすと考 えられている(Shelley et al, 2003; Stoecklein et al, 2012)。この臓器障害を引き起 こす「免疫恒常性の破綻」に介入することで外傷亜急性期~慢性期の患者予後 の改善につながる可能性があると考える。

自然免疫系は、主に好中球と単球・マクロファージなどが感染の初期段階で 病原体の侵入を阻止し排除したりその後の獲得免疫を誘導したりするなど重要 な役割を担っているが(Leliefeld et al, 2016; Park et al 2020; Janicova and Relja, 2021)、近年、好中球には機能が異なるいくつかのフェノタイプがあり、向炎 症性のものだけではなく抗炎症性の好中球も存在し、そのバランスが免疫恒常 性の維持に大きな役割を果たしていることが知られるようになってきた(Tsuda et al, 2004; Silvestre-Roig, 2016; Silvestre-Roig et al, 2019; Yang et al, 2019)。抗炎症 性の好中球は特に、CARS やそれに引き続いて起こる二次性感染症に関与して いると考えられている(Janicova and Relja, 2021; Silvestre-Roig et al, 2016)。 Th1/Th2 型サイトカインによって活性化される炎症性/抗炎症性マクロファージ

(M1/M2) と同様に、好中球もサイトカインの誘導によって炎症性/抗炎症性好 中球 (N1/N2) に極分化することがわかってきた (Fridlender et al, 2009)。悪性 腫瘍領域では、細胞死や細胞分化に関与することが知られる transforming growth factor-beta 1 (TGF- β 1) のシグナルを阻害することで、N1 好中球が増加 することが示された (Fridlender et al, 2009)。また、循環器領域における Puhl ら の研究では、N1 および N2 好中球のバランスが、心筋梗塞後の心筋の炎症にお ける心室リモデリング過程に関与している可能性が示唆されている (Puhl and Steffens, 2019)。さらに、中枢神経領域における研究では、Toll 様受容体 (Tolllike receptor: TLR) 4 の欠損によって N2 好中球の割合が増え、脳卒中後の脳組 織損傷修復に寄与することが示されている (Garcia-Culebras et al, 2019)。

外傷後の免疫不全については、様々な観点からすでに研究が進んでおり (O'Sullivan et al, 1995; Guo et al, 2003; Shelley et al, 2003; Ni Choileain et al, 2006; Hanschen et al, 2011; Stoecklein et al, 2012; Wanke-Jellinek et al, 2016; Seshadri et al, 2017; Yamakawa et al, 2021)、外傷後の免疫抑制状態に関わる好中球フェノタイ プについての既報も散見されている。外傷症例の好中球の CD11b 高発現は予後 不良に関連していることが示唆され (Botha et al, 1997)、外傷後の好中球の細胞 マーカーの発現の違いが、好中球の生存期間や neutrophil extracellular traps (NETs) 形成、活性酸素産生などの能力に反映されている可能性も示唆されて いる (Hazeldine et al, 2014; Leliefeld et al, 2016; Mortaz et al, 2019)。しかし、い ずれの報告も外傷後敗血症の病態形成における好中球の関与を明らかにするま でには至らず、外傷後敗血症病態への治療介入につなげるためにはさらなる研 究の蓄積が必要である。

本研究では、外傷後敗血症病態への好中球の関与を調べるために、すでに多 くの外傷後免疫不全の研究(O'Sullivan et al, 1995; Guo et al, 2003; Shelley et al, 2003; Ni Choileain et al, 2006; Hanschen et al, 2011; Wanke-Jellinek et al, 2016; Yamakawa et al, 2021) で使用されている熱傷モデルを外傷モデルとして研究を 行った。熱傷モデルは、循環血液減少と組織損傷を引き起こし、また、特定の 免疫反応を引き起こす頭部外傷(Yang et al, 2014; Hsieh et al, 2016)を回避でき るという利点がある。さらに、3 度熱傷であるがため他の外傷モデルとは異な り受傷後の痛みがなく、動物愛護の観点からも好ましいと言える。敗血症モデ ルには、標準的に使用されている盲腸結紮穿孔(cecal ligation and puncture: CLP) モデルを採用した。外傷モデルと敗血症モデルを組み合わせることで外傷後敗 血症モデルを作製し、生存率評価や腹水生菌数測定、組織学的検査、血清およ び腹水中のサイトカイン測定、マスサイトメトリー (cytometry by time-of-flight: CyTOF)を用いた免疫学的評価を行った。サイトカイン測定には、 LUMINEX[®]100/200[™]システム(ルミネックス・ジャパン株式会社、東京都港区) を採用した。LUMINEX®は、ターゲットタンパク質に特異的に結合する抗体と 結合した LUMINEX®ビーズを液相でターゲット抗原に反応させ測定を行うこと で、わずか 25-50 µlの検体量で最大 80項目のサイトカインを同時検出する多項 目同時測定プロファイリング技術である。CyTOF は金属同位体標識抗体を用い て細胞内外のタンパク質を検出する多次元サイトメトリー技術であり、蛍光標 識抗体を用いる従来のフローサイトメトリーで問題となる色素の漏れ込みによ る評価精度の低下が解決されていることから、40種を超える抗体を同一細胞で 同時に評価することが可能である。従来検出が困難であった希少な細胞集団の 同定や細胞内外のタンパク質の解析が可能となるメリットがあり、研究室の先 行研究ですでに使用経験もあったことから、大学内外の協力を得てこれらの技 術を用い、外傷後敗血症患者の予後に影響を与えうる好中球フェノタイプにつ いて検討した。

本研究の概要

本研究では day0 に外傷を施し、その 24 時間後(day1) に敗血症を誘導する ことで外傷後敗血症マウスモデルを作製し、検体採取、各種解析を施行した (図1)。



図1. 外傷後敗血症モデル作製と評価項目の概要

2. 外傷後敗血症マウスモデルの作製

2.1. 実験動物

本研究に用いた実験動物は株式会社三協ラボサービス(東京都江戸川区)から購入した週齢7~8・雄の Institute of Cancer Research (ICR)マウスである。マウスは適切な温度(22~26℃)と湿度(0~20%)に維持され、6時から18時までを照明時間として12時間ごとに自動で明暗が切り替わるように設定された環境で飼育された。マウスケージの底はペーパーマット(Paperclean®、日本エスエルシー株式会社、静岡県浜松市)を敷き、数日ごとにケージは洗浄して交換し衛生状態を維持するように配慮した。マウスには実験動物用飼料(固形飼料ラボ MR ストック®、日本農産工業株式会社、神奈川県横浜市)および水を自由に摂取させた。

2.2. 外傷モデルについて

外傷モデル作製にあたり、外傷の種類としては研究室の先行研究ですでに経 験がありこれまでも多く報告されている熱傷モデルを採用した。モデルは、既 報(O'Sullivan et al, 1995; Ni Choileain et al 2006; Hanschen et al, 2011; Abdullahi et al, 2014; Wanke-Jellinek et al, 2016)を参考に次に示すように作製した。

まず、ケタミン 125 mg/kg・キシラジン 20 mg/kg の腹腔内投与によってマウスに麻酔を施し、鎮痛のためにブプレノルフィン 0.05 mg/kg を皮下投与した。 背部を剃毛した後、体表面積の約 25%が露出するように設計された 50 ml シリンジ型(図 2)に、露出部が背部となるようにマウスを収納しスポンジで固定 した。この際、背部と型に隙間が生まれないように確実にかつ愛護的に固定す るように注意した。予め 90℃に設定しておいた恒温水槽に露出した背部を 9 秒 間浸した。9 秒間浸した後は、熱傷範囲が広がることを防ぐために外表の熱湯 を良くふき取った上で速やかに固定を外し、0.9%生理食塩水 1 mlの皮下投与に よって蘇生し、覚醒が得られるまで伏臥位にしてケージに安置した。覚醒する までの間の低体温を防ぐためにあらかじめ温めておいた KN-475 ヒーターマッ ト(夏目製作所、東京都文京区)をケージの下に敷き保温に努めた。この手技 (図 3)により 25%3 度熱傷モデルが作製された。作製された熱傷は、神経の 深さまで損傷され痛みを感じることがない 3 度熱傷であるため、受傷後の定期 的な鎮痛薬の投与は行っていない。Sham モデル作製の際には、恒温水槽を 24℃に設定したが、その他は熱傷モデル同様に作製した。既報(O'Sullivan et al, 1995; Ni Choileain et al 2006; Hanschen et al, 2011; Abdullahi et al, 2014; Wanke-Jellinek et al, 2016)ではこの工程で作成された 25%3 度熱傷マウスモデルの生存 率は 95%以上であったが、当研究室の予備実験では、15 匹のマウスモデルで行 った検討で生存率は 100%であった(図 4)。



図 2. Institute of Cancer Research マウス用の 25%熱傷作製プラスチック型



図 3. 25%3 度熱傷マウスモデル作製手順



図 4. 25%3 度熱傷マウスモデルの 14 日間生存率

2.3. 敗血症モデルについて

敗血症モデルには、CLP モデルを採用した。CLP モデルマウスの作製は、既 報(Wichterman et al, 1980; Hubbard et al, 2005; Rittirsch et al, 2009)を参考に行っ た。CLP は、敗血症モデルを作製するにあたって代表的な手法であるが、術者 の手技の熟練度やマウスの個体差、結紮位置や穿刺針の太さなど様々な要因に より結果にバラつきが出ることが指摘される。当研究室では、3 人の術者の手 技の統一を図り安定させた上で、本研究に適切な生存率を生み出すモデルを探 った。予備実験(図 5)においてヒトの敗血症生存率 65-80% (Angus and van der Poll, 2013; Vincent et al, 2014; Cecconi et al, 2018)とほぼ同等の生存率を得た 「50%結紮 2 回穿刺」CLPモデルを採用し本研究に用いることとした。



図 5. 結紮位置と穿刺回数による CLP マウスモデルの生存率の検討 CLP; cecal ligation and puncture.

当研究で用いた「50%結紮 2 回穿刺」CLP モデルの具体的作製方法を次に示 す。ケタミン 125 mg/kg・キシラジン 20 mg/kg の腹腔内投与によってマウスに 麻酔を施し、鎮痛のためにブプレノルフィン 0.05 mg/kg を皮下投与した。CLP 手技だけではなく翌日の検体摘出のために腹部を広範囲に注意深く剃毛し、腹 部正中縦 1 cm の皮膚切開を行い、十分に皮下を剥離した後、腹部正中縦 1 cm の腹膜切開を行った。脂肪組織で被覆されることによって腹腔内の感染が限局 してしまうことを防ぐ目的で Niiyama らの手順(Niiyama et al, 2016)に従って 両側の脂肪組織を切除した後、盲腸を露出させた。2-0 絹糸を用いて盲腸の全 長の 50%の位置で結紮し、盲端から 5 mm の部位を 21 ゲージ針で穿刺・貫通さ せることで 2 穿刺し、その後愛護的に盲腸を還納した。4-0 ナイロン糸を用い て腹膜 5 針、皮膚 3 針ずつ縫合して閉創した。蘇生のために 0.9%生理食塩水 1 ml を皮下投与し手術を終了した。術後創部感染の予防のため、麻酔から覚醒す るまではマウスは仰臥位でケージ内に安置した。手術時および術後の低体温を 防ぐために手術台とケージはあらかじめ温めておいた KN-475 ヒーターマット

(夏目製作所、東京都文京区)の上に置き保温に努めた(Kirihara et al, 2013)。 術後抗生剤として、イミペネム・シラスタチン 25 mg/kg を 1 日 2 回 3 日間

(Iskander et al, 2016) 投与した。初回抗生剤投与は術後2時間後に投与し以後 12時間ごとに投与した。

2.4. 外傷後敗血症モデル

外傷後の免疫状態を検討する当研究の目的のために、外傷モデルと敗血症モデルを組み合わせることで外傷後敗血症モデルマウスを作製した。施した外傷によって、熱傷を施したものを Burn/CLP モデル、Sham を施したものを Sham/CLPモデルとした。

本研究におけるすべての動物実験は、動物実験計画書を作成の上、北海道大 学動物実験委員会および北海道大学機関倫理審査委員会の承認を得た上で(承 認番号:19-0167)、「研究機関等における動物実験等の実施に関する基本指針」

(平成 18 年 6 月 1 日、文部科学省告示第 71 号)および「実験動物の飼養及び 保管並びに苦痛の軽減に関する基準」(平成 18 年 4 月 28 日、環境省告示第 88 号)を遵守し、「国立大学法人北海道大学動物実験に関する規定」(平成 19 年 4 月 1 日、海大達第 61 号)に則り行っている。

3. 評価項目と解析方法

3.1. 生存期間観察

各モデル 15 匹ずつマウスを使用し、CLP 施行後 14 日間生存率を検討した。 外傷を施した 24 時間後に CLP により敗血症を誘発し、その後は 1 日 2 回の観 察を行い、外観や行動に変化が確認された場合に人道的エンドポイントとして 安楽死処置を行った。

3.2. 腹水生菌数測定

腹水生菌数測定のために各モデル 10 匹ずつマウスを使用した。生菌数測定 のための寒天培地をシャーレに準備した。また、96 ウェルマイクロプレートの 10 列×6 (60 個)のウェル (図 6A) に予めリン酸緩衝生理食塩水 (gibco PBS pH 7.4 (1×), Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) を 180 μ l ずつ入れ 準備した。CLP 施行 24 時間後に麻酔および安楽死の目的で外傷や CLP 施行前 に使用する量の2倍量に当たるケタミン250 mg/kg・キシラジン40 mg/kgを腹腔内投与し、麻酔の効果が表れたところで仰臥位にした。CLPの創部とは異なる腹部の皮膚に切開を加え、皮下を十分に剥離し露出した腹膜を穿刺し0.9%生理食塩水5mlを腹腔内に注入した。腹部を愛護的に揺すり生理食塩水を腹腔内に十分に行きわたらせてから5mmほどの腹膜切開を置き、2.5mlシリンジを用いて腹水を採取した。採取した腹水を濾過して均一にした上でそのうち20µlを採取し、上述の96ウェルマイクロプレートを用いて、10~10⁶倍希釈まで順に作製した。寒天培地は、マウス1匹当たりシャーレを1つ使用し、図6Bのように6区画に分け、各希釈率のウェルから50µlずつ取って寒天培地に蒔いた。寒天培地に蒔いた腹水が完全に乾いた後、シャーレに蓋をして上下反転し、37-40℃の培養容器に入れ培養した。24時間後に生菌数測定を行った。



図 6. 腹水生菌数測定に使用した器具と準備

A: 96 ウェルマイクロプレート、B: シャーレ上の寒天培地(表から見た図、青い矢印の順番にそれぞれの希釈濃度の腹水検体を撒く)

3.3. 病理組織学的評価

病理組織学的評価では、Burn/CLP モデルと Sham/CLP モデルのほかに外傷も 敗血症も施されていないマウスをコントロールモデルとし、各モデル 5 匹ずつ 使用し検討した。Burn/CLP 群と Sham/CLP 群では、CLP 施行 24 時間後に、麻 酔および安楽死の目的で生菌数測定の際と同様にケタミン 250 mg/kg・キシラ ジン 40 mg/kgを腹腔内投与し、麻酔の効果が表れたところで仰臥位にした。脾 臓、肝臓、腎臓、および肺の 4 臓器摘出後に 10%中性緩衝ホルマリン液で固定 し、モルフォテクノロジー株式会社(北海道札幌市)に依頼し切片を作製、ヘ マトキシリン・エオジン(Hematoxylin and eosin: H&E) 染色を行った。各臓器 の病理組織学的評価は北海道大学腫瘍病理学教室に依頼した。Burn/CLP・ Sham/CLP 各群において脾臓、肝臓、腎臓、肺の組織に表れている変化をコン トロール群と比較して評価した。脾臓については、CLP モデルと Fecal suspension injection model を比較した当研究室での先行研究(Tsuchida et al, 2022) において、ヒトの敗血症の脾炎に見られるような脾臓への好中球浸潤は明らか でないものの、敗血症による炎症の強さに比例して脾臓への Tingible body macrophage(巨大マクロファージ)の出現が顕著になることが指摘されていた (図 7)。



図 7. 敗血症モデルにおける脾臓の巨大マクロファージ(Tsuchida et al, 2022) CLP: cecal ligation and puncture, FSI: fecal suspension intraperitoneal injection

このことから、敗血症モデルマウスでは脾臓のマクロファージが免疫応答を 良好に反映していると考えられ、本研究での脾臓の評価には図8の表を用いた。 マクロファージ・リンパ球比が1%未満の場合はスコア0、1%以上5%未満の 場合はスコア1、5%以上20%未満の場合はスコア2、20%以上の場合はスコア 3とした。また、マクロファージ・リンパ球比に関わらず巨大マクロファージ が20%以上の場合はスコア3とした。



図 8. 脾臓組織中マクロファージのスコアリング方法

3.4. サイトカイン測定

血清中および腹水中のサイトカインの評価には、Burn/CLP モデル、 Sham/CLPモデルともに5匹ずつ使用し、腹水と血液はCLP施行24時間後に採 取した。生菌数測定や病理組織学的評価の臓器摘出時と同様の要領で安楽死も 兼ねて麻酔し、仰臥位で安置した。CLPの創部を避けて腹部の皮膚に切開を加 え、露出した腹膜を穿刺し0.9%生理食塩水5mlを腹腔内に注入した。腹部を 愛護的に揺することで生理食塩水を腹腔内に十分に行きわたらせてから5mm ほどの腹膜切開を置き、2.5mlシリンジを用いて腹水を採取した。採取された 腹水は概ね3-4mlのうち2mlを予め169mM ethylenediaminetetraacetic acid

(EDTA) 0.5 mlを入れておいた遠心チューブに注入した。その後、心停止前に 169 mM EDTA 0.1 mlをあらかじめ充填した 1 ml シリンジで心窩部を穿刺する ことにより、心臓血を採取した。採取した腹水検体は 200×g、25℃、5 分間遠 心分離し、血液検体は 700×g、25℃、20 分間遠心分離した。マウス一匹あた り腹水上澄み 250 µl×4本、血清 50 µl×4本分の検体を回収し、-20℃のフリー ザーで保存した。

大阪医科薬科大学救急医学教室で、MILLIPLEX[®] MAP キット(Merck Millipore Corporation, Darmstadt, Germany)を用いて LUMINEX[®] 100/200[™](ル ミネックス・ジャパン株式会社、東京都港区)によるマルチプレックス解析を 行った。

3.5. マスサイトメトリー

Burn/CLP モデルおよび Sham/CLP モデルをそれぞれ 5 匹ずつ使用し、サイト カイン測定のための検体採取と全く同様の手順で血液および腹水検体を採取し た。採取した腹水と血液の検体処理には、RPMI 1640 培地、5%熱非動化ウシ胎 児血清 (foetal calf serum: FCS)、1 mM グルタミン、10 mM 4-(2-hydroxyethl)-1piperazineethanesulfonic acid (HEPES)、2 mM 非必須アミノ酸、ペニシリン/スト レプトマイシン/ファンギゾン、2.5×10⁵ M 2-メルカプトエタノールを含む培養 液 (C5) を用いた。C5 培養液に含まれる上記の製品はすべて、Life Technologies Corporation (Carlsbad, CA, USA) から購入した。血液検体は、15 ml 遠心チューブに入れ、ハーバード大学医学部の Lederer 研究室が開発した塩 化アンモニウムベースの赤血球溶解緩衝液 (JL-buffer) (Wanke-Jellinek et al, 2016) 5 ml を添加し密閉後に転倒混和し 5 分静置して赤血球溶解処置が完了し た後、C5 を 5ml 注入し 400×g、25°C、10 分間の遠心分離を行った。その後上 澄みを破棄し残ったペレットに C5 を 5ml 注入し 100×g、25°C、5 分間の遠心 分離を行った。上澄みを破棄し残ったペレットに再び C5 を 5ml 注入し 400×g、 25°C、10 分、10 分間の遠心分離を行った。上澄みを破棄し、遠心チューブの底 にあるペレットを、0.5 ml の細胞凍結培地 CryoStor[®] (Biolife Solutions, Inc. Bothell, WA, USA) で回収し、保存用チューブに入れた。急速冷却を避けるた め、CryoStor[®]と細胞が入ったチューブは、4℃の冷蔵庫であらかじめ冷やして おいた Mr. Frosty[®] (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) にセットし、 はじめに 4℃の冷蔵庫に 20 分間入れ、その後-80℃冷凍庫に一晩(12~24 時間) 保管した後、チューブを Mr. Frosty[®]から取り出し、液体窒素タンク(-196℃) で保存した。腹水サンプルは、JL-buffer を用いた工程は行わずその後の洗浄と 遠心分離の工程は血液サンプルと同様に行った。

CyTOF の染色は大阪医科薬科大学で、測定は聖路加エスアールエル先端医療 研究センターで行った。CyTOF による染色はすべて室温で行った。細胞はまず シスプラチン生存率染色試薬(Fluidigm Sciences, South San Francisco, CA, USA) で5分間染色し、遠心分離で洗浄した。Fc ブロッキング剤を10分間添加した 後、CyTOF 抗体染色カクテルを添加した。細胞を 30 分間染色した後に、 CyTOF 染色バッファー (カルシウム/マグネシウムフリーリン酸緩衝生理食塩 水、0.05%アジ化ナトリウム、0.2%ウシ血清アルブミン)で洗浄した。 Maxpar® Fix I Buffer/Maxpar 10X Barcode Perm Buffer (Fluidigm Sciences) を用 い、パラジウムベースのバーコード試薬と 30 分間インキュベートした。バー コード試薬を洗い落とした後、サンプルを1つのチューブにプールした。 Maxpar Nuclear Antigen Staining Buffer Set (Fluidigm Sciences) を用いて細胞を固 定・透化させ、細胞内抗体カクテルとインキュベートした。細胞内抗体カクテ ルを 30 分間添加した後、細胞を洗浄し、1.6%パラホルムアルデヒドで固定し た。細胞とイリジウムインターカレーター溶液(Max-Par Intercalator-Ir 500 mM; Fluidigm Sciences)を20分間一緒に添加し、その後最終洗浄を行った。EQキャ リブレーションビーズ (EQ Four Element Calibration Beads; Fluidigm Sciences) を含む 1×10⁶細胞/mL の濃度の MilliQ ろ過蒸留水(EMD Millipore, Billerica, MA, USA) と共に細胞を培養した。Nolan Lab (Stanford, Palo Alto, CA, USA) で開発 された Normalizer and Single Cell Debarcoder ソフトウェアを用いて、プールした シングルサンプルについて Helios mass cytometer (Fluidigm Sciences) で解析し た。次にノーマライゼーションとデコンボリューションを行った。本研究で使 用した CyTOF 染色パネルは、表1および表2に示す。マスサイトメトリー解析 には OMIQ (Omiq, Inc.、Santa Clara, CA, USA) を使用した。OMIQ では、次元 圧縮アルゴリズムに optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding (opt-SNE)、クラスタリングと可視化アルゴリズムに Flow selforganizing maps (FlowSOM)の自動最適化パラメータを使用した。

Marker	Clone	Isotope Label	Marker	Clone	Isotope Label
CD45	30-F11	⁸⁹ Y	CD206	C068C2	¹⁵⁹ Tb
CD4	RM4-5	¹¹⁵ In	Ly6A/E	E13-161.7	160 Gd
CD44	IM7	141 Pr	CD83	Michel-19	¹⁶¹ Dy
CD8a	53-6.7	142Nd	FoxP3	FJK-16s	¹⁶² Dy
CD49b	DX5	¹⁴³ Nd	NK1.1	PK136	¹⁶³ Dy
CD184	L276F12	¹⁴⁴ Nd	Ki-67	8D5	¹⁶⁴ Dy
NKG2D	REA1175	¹⁴⁵ Nd	CD115	REA827	¹⁶⁵ Ho
CD11c	N418	¹⁴⁶ Nd	CD86	GL-1	¹⁶⁶ Er
PU.1	phpu13	147 Sm	CD25	3C7	¹⁶⁷ Er
Ly6G	1A8	¹⁴⁸ Nd	CD64	x54-5/7.1	¹⁶⁸ Er
CD19	6D5	¹⁴⁹ Sm	CD11b	M1/70	¹⁶⁹ Tm
TLR4	MTS510	¹⁵⁰ Nd	RORyt	REA278	¹⁷⁰ Er
Ly6C	HK1.4	¹⁵¹ Eu	CD279	29F.1A12	¹⁷¹ Yb
CD3e	145-2C11	152 Sm	ΤϹℝγδ	GL3	¹⁷² Yb
CD172a	P84	¹⁵³ Eu	CD69	310106	¹⁷³ Yb
CD274	10F.9G2	154 Sm	CCR2	475301R	¹⁷⁴ Yb
CD68	FA-11	¹⁵⁵ Gd	F4/80	T45-2342	¹⁷⁵ Lu
CD14	Sa14-2	¹⁵⁶ Gd	TLR2	T2.5	¹⁷⁶ Yb
T-bet	4B10	¹⁵⁸ Gd	I-A/I-E	M5/114.15.2	²⁰⁹ Bi

<u>表 1. CyTOF パネル(血液)</u>

CCR2: C-C chemokine receptor type 2; CD: clusters of differentiation, CyTOF: cytometry by time-of-flight, FoxP3: forkhead box P3, Ly6: lymphocyte antigen 6, NKG2D: natural killer group 2D, RORγT: retinoic acid receptor-related orphan receptor gamma t, T-bet: T-box expressed in T cells, TCRγδ: T cell receptor gamma delta, TLR4: Toll-like receptor 4.

Marker	Clone	Isotope Label	Marker	Clone	Isotope Label
CD45	30-F11	⁸⁹ Y	CD206	C068C2	¹⁵⁹ Tb
CD326	G8.8	¹¹³ In	Ly6A/E	E13-161.7	¹⁶⁰ Gd
CD4	RM4-5	¹¹⁵ In	Arginase I	Polyclonal	¹⁶¹ Dy
CD44	IM7	¹⁴¹ Pr	CD85k	H1.1	¹⁶² Dy
CD8a	53-6.7	142Nd	NK1.1	PK136	¹⁶³ Dy
CD49b	DX5	¹⁴³ Nd	Ki-67	8D5	¹⁶⁴ Dy
VEGF R1	141522	¹⁴⁴ Nd	CD115	REA827	¹⁶⁵ Ho
NKG2D	REA1175	¹⁴⁵ Nd	CD103	2E7	¹⁶⁶ Er
CD11c	N418	¹⁴⁶ Nd	SR-AI	268318	¹⁶⁷ Er
PU.1	phpu13	¹⁴⁷ Sm	CD64	x54-5/7.1	¹⁶⁸ Er
Ly6G	1A8	¹⁴⁸ Nd	CD11b	M1/70	¹⁶⁹ Tm
CD19	6D5	¹⁴⁹ Sm	Siglec F	E50-2440	¹⁷⁰ Er
CX3CR1	SA011F11	¹⁵⁰ Nd	CD279	29F.1A12	171 Yb
Ly6C	HK1.4	¹⁵¹ Eu	ΤϹℝγδ	GL3	¹⁷² Yb
CD3e	145-2C11	¹⁵² Sm	CD69	310106	¹⁷³ Yb
CD172a	P84	¹⁵³ Eu	CCR2	475301R	¹⁷⁴ Yb
CD274	10F.9G2	¹⁵⁴ Sm	F4/80	T45-2342	¹⁷⁵ Lu
CD68	FA-11	¹⁵⁵ Gd	CD197	REA685	¹⁷⁶ Yb
CD14	Sa14-2	¹⁵⁶ Gd	I-A/I-E	M5/114.15.2	²⁰⁹ Bi
CD205	NLDC-145	¹⁵⁸ Tb			

表 2. CyTOF パネル (腹水)

CCR2: C-C chemokine receptor type 2, CD: clusters of differentiation, CyTOF: cytometry by time-of-flight, CX3CR1: C-X-3C chemokine receptor 1, Ly6: lymphocyte antigen 6, NKG2D: natural killer group 2D, ROR γ T: retinoic acid receptor-related orphan receptor gamma t, Siglec F: sialic acid-binding Ig-like lectin F, SR-AI: scavenger receptor-AI, T-bet: T-box expressed in T cells, TCR $\gamma\delta$: T cell receptor gamma delta, TLR4: Toll-like receptor 4, VEGF R1: vascular endothelial growth factor receptor 1.

3.6. 統計解析

統計解析は、GraphPad Prism for Windows version 9.3.1 (Graph Pad Software, San Diego, CA, USA)を用いて行った。生存曲線は Kaplan-Meier 法で推定し、 生存率の差は log-rank test で評価した。OMIQの数値データをエクスポートし、 有意性を評価するために、ノンパラメトリックの Mann-Whitney *U* テストを使 ってグループ間で比較した。統計学的有意性は、p <0.05 とした。

結果

1. Burn/CLP 群における生存率の変化

Burn/CLP モデルおよび Sham/CLP モデル各 15 匹ずつ使用して算出した CLP 後 14 日間生存率は、Sham/CLP 群 (66.7%、生存期間中央値 14 日〔3-14 日〕) と比較して Burn/CLP 群 (13.3%、生存期間中央値 6 日〔2-14 日〕) で有意に低かった(図 9、log-rank、p=0.006)。



図 9. Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の CLP 後生存率 CLP: cecal ligation and puncture.

2. Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の腹水生菌数の検討

Sham/CLP 群および Burn/CLP 群から当初 5 匹ずつマウスを用いて生菌数を算 出したが有意差は出ず、10 匹ずつに増やして検討したが、両群間に有意差は認 められなかった(図 10A、B)。



В



図 10. Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の腹水生菌数 A: 24 時間後の培地(左: Burn/CLP 群、右: Sham/CLP 群) B: Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の生菌数比較 CFU: colony forming unit, CLP: cecal ligation and puncture.

3. Burn/CLP 群における主要臓器の病理組織学的変化

脾臓、肝臓、腎臓、肺の組織の H&E 染色を用いて、病理組織学的評価を行った(図11)。脾臓組織におけるマクロファージが、Sham/CLP 群ではコントロール群と比して多い一方で、Burn/CLP 群ではコントロールよりは多いもののSham/CLP 群より少なかった。肝臓組織は、Sham/CLP 群では類洞の拡張が見られ、Burn/CLP 群で類洞の拡張に加えて中心静脈周囲の肝細胞の変性が見られた。 腎臓組織は、Burn/CLP モデル 5 例中 3 例で被膜下の尿細管壊死が見られたが、Sham/CLP 群やコントロールでは 1 例もそのような変化は見られなかった。肺 組織では、Sham/CLP 群やコントロール群と比較して Burn/CLP 群でうっ血の程 度が強く表れていた。脾臓組織のマクロファージ・リンパ球比を図 8 に示した スコアリング表を使用し点数化したところ、平均スコアは、コントロール群 0 点、Sham/CLP 群 1.4 点、Burn/CLP 群 0.4 点であった(図 12-14)。



図 11. 脾臓・肝臓・腎臓・肺の各群の代表的な病理組織像 CLP: cecal ligation and puncture.



図 12. コントロール群の脾臓組織のマクロファージ



図 13. Sham/CLP 群の脾臓組織のマクロファージ CLP: cecal ligation and puncture.



図 14. Burn/CLP 群の脾臓組織のマクロファージ CLP: cecal ligation and puncture.

4. Burn/CLP 群のサイトカイン濃度の変化

サイトカインごとに最も濃度が低い検体を 0、最も濃度が高いものを 100 と して正規化したヒートマップを作成した (図 15)。Burn/CLP 群では TGF- β 1 以 外の interferon-gamma (IFN γ) を含むサイトカイン濃度は、Sham/CLP 群と比較 して低く、TGF- β 1 は Burn/CLP 群の血清中で Sham/CLP 群と比較して高値であ った (図 16)。



図 15. Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の血清および腹水中サイトカイン濃度 CLP: cecal ligation and puncture, GM-CSF: granulocyte-macrophage colonystimulating factor, IFN γ : interferon-gamma, IL: interleukin, IP: interferon gammainduced protein, KC: keratinocyte-derived chemokines, MCP: monocyte chemotactic protein, MIG: monokine induced by interferon-gamma, MIP: macrophage inflammatory protein, RANTES: regulated on activation, normal T cell expressed and secreted, TNF: tumor necrosis factor, TGF- β 1: transforming growth factor-beta 1.



図 16. Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の血清および腹水中の TGF-β1・IFNγの濃度 ** p<0.01. CLP: cecal ligation and puncture, IFNγ: interferon gamma, TGF-β1: transforming growth factor-beta 1.

5. マスサイトメトリーによる検討

5.1. 次元圧縮アルゴリズムによる好中球、単球・マクロファージの同定

OMIQ での解析を始めるにあたり、Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の比較のため event 数を揃えるようにサブサンプリングを行い調整した。次に、次元圧縮アル ゴリズム opt-SNE によって作成した散布図を用いて、好中球、単球・マクロフ ァージの同定を試みた。好中球の同定には lymphocyte antigen 6 (Ly6) Gを、単 球・マクロファージの同定には clusters of differentiation (CD) 68 を用いた (図 17A)。次に、血液と腹水それぞれについて、Sham/CLP 群と Burn/CLP 群ごとに ファイルを連結し、CD45 でフィルターをかけ、opt-SNE による等高線図を作成 し比較した (図 17B)。CD45 陽性細胞の局在は血液および腹水のいずれにおい ても両群間で異なっており、Burn/CLP 群では Sham/CLP 群と比較して単球・マ クロファージの割合が増加し、相対的に好中球の割合が減少している傾向にあ った。



図 17. 好中球、単球・マクロファージの同定と両群間の CD45 陽性細胞の局在
 A. Ly6G を用いた好中球の同定と CD68 を用いた単球・マクロファージの同定
 B. Sham/CLP 群と Burn/CLP 群の CD45 陽性細胞の分布の違い

CD: clusters of differentiation, CLP: cecal ligation and puncture, Ly6: lymphocyte antigen 6, opt-SNE: optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding.

5.2. Burn/CLP 群の好中球上の CD11b、SIRPa、Siglec-F の発現変化

次に、Burn/CLP モデルと Sham/CLP モデルにおける好中球や単球・マクロフ アージ上のマーカーの発現の違いを全体的に把握するために、血液と腹水それ ぞれでマーカーごとに最も発現の低い検体を 0、発現の高い検体を 100 として 正規化したヒートマップを作成した(図 18・19)。そしてヒートマップにおい て両群で発現に差があるように見受けられたマーカーにチャネルを合わせ、モ デルごとにファイルを連結して作成した次元圧縮アルゴリズム opt-SNE の散布 図で視覚的に両群を比較し、OMIQ データを外部の統計ソフトにエクスポート することでボックスプロットを作成しさらに比較検討した。腹水中の好中球の CD11b 発現は Sham/CLP 群と比較して Burn/CLP 群で高く、血液中の好中球の CD11b 発現も Burn/CLP 群で高い傾向にあった(図 20A)。CD172a (signalregulatory protein alpha: SIRPα)は、血液および腹水いずれにおいても Sham/CLP 群と比較して Burn/CLP 群の好中球での発現が高い傾向が観察された(図 20B)。 好酸球の細胞表面マーカーとして知られる sialic acid-binding Ig-like lectin F

(Siglec-F) が、腹水サンプル中の好中球の一部に発現が見られ、その発現は Burn/CLP 群で高く見られた(図 20C)。この Siglec-F 陽性好中球が、好酸球で はなく好中球であることを証明するために、Siglec-F 陽性細胞について詳細を 検討した。opt-SNE によって作成した散布図において、チャネルを Siglec-F に 設定すると、Siglec-F が高く発現する島が好中球やマクロファージの島とは距 離を持つ部位に認められていることが確認され、これを好酸球と同定した(図 21A)。クラスタリングアルゴリズム FlowSOM を用いてクラスタリングを行い 図 21B のように metacluster (MC) を作成した。好酸球と同定した MC-Iと、好 中球上の Siglec-F 陽性となるメタクラスターMC-F と MC-T、Siglec-F 陰性の MC-C における Siglec-F の発現を比較した。好中球上の Siglec-F 陽性となるメ タクラスターMC-F と MC-T は比較的距離が離れていたため、それぞれ別のメ タクラスターとして区別した。opt-SNEの散布図では、MC-Iの Siglec-F 発現が MC-F や MC-T より高いことが視覚的に予測されたが、ヒストグラムでも MC-I は MC-F や MC-T よりも Siglec-F の発現が高いことが示された(図 21C)。また、 この4つのメタクラスターについて、Ly6Gの発現をヒストグラムで検討したと ころ、MC-C, MC-F, MC-T の 3 つのメタクラスターでは同様の発現が見られた 一方で、好酸球と同定したメタクラスターMC-Iではそれらに比べて Ly6Gの発 現が低いことが示された(図 21D)。ヒストグラムでの検討の際には、メタク ラスターによって event数が大きく異なることからヒストグラムの高さを揃え るように調整した上で比較している。なお、Siglec-F 陽性好中球は一般に炎症 が起こっている局所で観察されることが知られており、末梢循環血液中の好中 球では見られないことから、今回の血液パネルには含まれておらず、腹水パネ ルのみで検討した。





図 18. 血液中の好中球、単球のマーカー発現

CCR2: C-C chemokine receptor type 2, CD: clusters of differentiation, CLP: cecal ligation and puncture, CXCR4: C-X-C chemokine receptor type 4, FoxP3: forkhead box P3, Ly6: lymphocyte antigen 6, NKG2D: natural killer group 2D, PD-1: programmed cell death-1, PD-L1: programmed cell death-ligand 1, ROR γ T: retinoic acid receptor-related orphan receptor gamma t, Sca-1: stem cell antigen-1, SIRP α : signal-regulatory protein alpha, T-bet: T-box expressed in T cells, TCR $\gamma\delta$: T cell receptor gamma delta, TLR4: Toll-like receptor 4.



図 19. 腹水中の好中球、マクロファージのマーカー発現

CCR2: C-C chemokine receptor type 2, CD: clusters of differentiation, CLP: cecal ligation and puncture, CX3CR1: C-X-3C chemokine receptor type 1, FoxP3: forkhead box P3, ILT3: immunoglobulin-like transcript 3, Ly6: lymphocyte antigen 6, NKG2D: natural killer group 2D, PD-1: programmed cell death-1, PD-L1: programmed cell death-ligand 1, ROR γ T: retinoic acid receptor-related orphan receptor gamma t, Sca-1: stem cell antigen-1, Siglec-F: sialic acid-binding Ig-like lectin F, SIRP α : signal-regulatory protein alpha, SR-AI_MSR: scavenger receptors AI_macrophage scavenger receptor, T-bet: T-box expressed in T cells, TCR $\gamma\delta$: T cell receptor gamma delta, TLR4: Toll-like receptor 4, VEGF_R1: vascular endothelial growth factor receptor 1.



図 20. Burn/CLP 群と Sham/CLP 群における好中球上の CD11b、SIRPa、Siglec-F発現の違い

A: CD11b、B: SIRPa、C: Siglec-F

* p<0.05. CD: clusters of differentiation, CLP: cecal ligation and puncture, opt-SNE: optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding, Siglec-F: sialic acid-binding Ig-like lectin F, SIRP α : signal-regulatory protein alpha.





図 21. 好酸球と Siglec-F 陽性/陰性好中球の Siglec-F・Ly6G 発現の違い A: 好酸球の同定、B: Siglec-F 陽性細胞のメタクラスタリング、C: 各メタクラス ターの Siglec-F 発現の違いを示すヒストグラム、D: 各メタクラスターの Ly6G 発現の違いを示すヒストグラム

CD: cluster of differentiation, Ly6: lymphocyte antigen 6, MC: metacluster, opt-SNE: optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding, Siglec-F: sialic acid-binding Ig-like lectin F.

5.3. Burn/CLP 群における CD68 高発現好中球の欠損

Burn/CLP モデルと Sham/CLP モデルのさらなる違いを見出すために、それぞれの群の等高線図を作成した上でそれらを重ね、重複しないところに 2 群間の 違いがある可能性を考えた。血液検体では 2 群間に大きな違いを指摘すること はできなかったが、腹水検体では好中球の島に 2 群間で重複しない部位が見ら れた(図 22A 矢印)。FlowSOM によってクラスタリングしたところ、等高線図 が重複しない部分である MC-14 は、Sham/CLP 群では認められるが Burn/CLP 群では欠損していた。さらに、MC-14 に加えて、もう一つ Sham/CLP 群では認 められ Burn/CLP 群では欠損しているメタクラスター(MC-15) が存在するこ とが判明した(図 22B)。この Burn/CLP で欠損するメタクラスターの性質を把 握するために、好中球の島で最も面積の広いメタクラスターである MC-03 と MC-14, MC-15 についてヒストグラムを用いて検討したところ、MC-14 と MC-15 は MC-03 と比較して CD68 の発現が高く、逆に Ly6G や CD11b の発現がやや 低いことがわかった。また MC-14 と MC-15 は次元圧縮マップで距離が取られ ているため、別の性質を持つメタクラスターと考え、その性質の違いを検討し、 MC-15 は MC-14 と比較して C-X-3C chemokine receptor 1 (CX3CR1), CD 205, Ly6A の発現がやや高いことがわかった(図 22C)。



Contour plot (overlay)

В



Scatterplot (overlayed by metaclusters)



図 22. Burn/CLP 群における CD68 高発現好中球の欠損

A: 次元圧縮マップ opt-SNE の等高線図を重複させることによって明らかになった Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の相違(矢印で示された点線部が非重複部)

B: FlowSOM による Burn/CLP 群と Sham/CLP 群それぞれのクラスタリング

C: MC-03、MC-14、MC-15 のマーカー発現を示したヒストグラム(比較可能となるよう高さ調整後)

CD: clusters of differentiation, CLP: cecal ligation and puncture, CX3CR1: C-X-3C chemokine receptor 1, Ly6: lymphocyte antigen 6, MC: metacluster, Sca-1: stem cell antigen-1.

CD68 は通常はマクロファージや単球で陽性となるマーカーであり、CD68 高 発現であった MC-14 や MC-15 がマクロファージではないこと証明するために CD68 の発現についてマクロファージ (MC-mac) と MC-14, MC-15, MC-03 の CD68 発現を比較したところ、図 23A のヒストグラムのようになり、MC-14, MC-15 の CD68 発現は、MC-mac ともことなることがわかった。macrophage scavenger receptor (MSR) の発現を検討したところ、MC-mac のみで発現が認め られ、MC-14 や MC-15 は MC-03 と同様に MSR の発現が見られなかった(図 23B)。



- 図 23. CD68 高発現 / 低発現好中球の CD68 ・ MSR 発現の違い
- A. MC-03、MC-14,15、MC-macの CD68 発現の違い
- B. MC-03、MC-14,15、MC-macの MSR 発現の違い

CD: clusters of differentiation, MC: metacluster, MSR: macrophage scavenger receptor, opt-SNE: optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding.

本研究で我々は、外傷後敗血症病態における好中球フェノタイプの関与について検討した。

病理組織学的検査の結果、Burn/CLP 群の脾臓組織中のマクロファージが Sham/CLP 群と比較して減少していることから、Burn/CLP 群では免疫応答が減 衰していることが示唆された。また Burn/CLP 群では、中心肝静脈周囲の肝細 胞変性、腎臓の急性尿細管壊死、肺うっ血など、臓器虚血が Sham/CLP に比し て進行し組織損傷がより強く表れていることが示されており、Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の生存率の乖離と矛盾しない結果であった。

各群 5 匹ずつのモデルマウスを作製し検討した腹水生菌数は Burn/CLP 群と Sham/CLP 群の間に有意差が認められなかったため、各群 10 匹ずつ用いて再検 討したが同様の結果であった。CLP 後 2 日目からは死亡する個体が見られたた め、検体採取は CLP 後 24 時間の時点で行ったが、腹水生菌数に有意差が出な かった原因として、CLP 後 24 時間の腹水には Burn/CLP 群の免疫抑制状態が十 分に反映されていなかった可能性を考えた。また、本研究では CLP によって敗 血症を誘発しており、術者による手技のばらつきは最小限に抑えられていたと しても、盲腸の大きさや便の含有量には個体差があるため、腹水中の生菌数へ のバラつきの影響が強く表れた可能性も考えられた。本研究では臨床的に有用 なエビデンスを得るためアウトブレッドマウスを使用しており、血液中、腹水 中のサイトカインをヒートマップで示した図 14 にもバラつきが見られる通り、 マウスの免疫応答の個体差があり、統計学的解析を行う段階でそれらの影響を 受けた可能性も考えられる。

血清および腹水中のサイトカイン測定の結果、Sham/CLP 群と比較して唯一 Burn/CLP 群の血清中で高値を示した TGF-β1 は、創傷治癒に貢献することが示 されているが (Lichtman et al, 2016)、細胞増殖の抑制やサイトカイン放出の抑 制によって免疫応答を制御する役割を持つことも知られている (Batlle and Massague, 2019)。Burn/CLP 群では IFNγ に代表される炎症性サイトカインおよ び TGF-β1 以外の抗炎症性サイトカインのいずれにおいても全体的に産生が抑 制されていることが示されたが、外傷後敗血症モデルマウスである Burn/CLP 群では、外傷によって TGF-β1 が過剰に産生されることで他のサイトカイン産 生が抑制され、本来感染に対して起こるべき免疫応答が十分に発揮できていな かった可能性が考えられる。

本研究では、自然免疫を担う細胞の中でも特に血液中および腹水中の好中球、 単球・マクロファージに絞りマスサイトメトリーを行った。好中球は感染症の 初期段階で動員され、貪食、活性酸素の生成、NETs の生成、アポトーシスな どを通じて標的微生物を直接排除する(Janicova and Relja, 2021; Balamayooran et al, 2010)。さらに好中球は、サイトカインの産生を通じてその後の獲得免疫に も大きな影響を与えることが知られている(Hazeldine et al, 2014; Leliefeld et al, 2016)。本研究では、血液および腹水中の好中球上の CD11b 発現は Burn/CLP 群 で高いことが示されたが、これは既報(Janicova and Relja, 2021; Hazeldine et al, 2017)と同様の結果であった。CD11b は、CD18 とともにインテグリンを形成 し、好中球の接着と遊走に重要な役割を果たしている(Janicova and Relja, 2021; Hazeldine et al, 2017; Anderson et al, 2000)。インテグリン作動薬によって CD11b/CD18 を活性化させると、好中球の接着を促進し、組織への好中球遊走 を抑制することにより、炎症性腎炎が改善することが、Maiguel らによって報 告されているが(Maiguel et al, 2011)、当研究で見られた Burn/CLP 群の好中球 における CD11b 発現の増加の意義については明らかにすることができていない。

悪性腫瘍分野において新しい免疫チェックポイント阻害剤が次々に臨床応用 され、次なる候補として注目されているターゲットのひとつに SIRPα があるが

(Yanagita et al, 2017; Feng et al, 2019; Logtenberg et al, 2020; Zhang et al, 2020)、 本研究では血液中、腹水中の好中球、単球・マクロファージいずれにおいても この SIRPα が Burn/CLP 群で高く発現していた。SIRPα は、貪食細胞の表面に 発現する膜貫通型タンパク質で、貪食対象となる標的細胞上の CD47 が貪食細 胞上の SIRPα と結合すると、"do not eat me signal"を発し、貪食細胞の貪食活 性が抑制されると言われている(Zhang et al, 2020)。以上から本研究の Burn/CLP 群における SIRPα の高発現は、好中球やマクロファージなどの貪食能 力の低下を示唆し、免疫反応の低下を反映している可能性がある。

一般に好酸球の鑑別マーカーとして使用される Siglec-F は、近年好中球の細 胞表面にも発現されることが認識されているが、本研究の Burn/CLP 群の腹水 中の好中球において Sham/CLP 群と比較して高く発現していることが示された。 既報では、Siglec-F 陽性好中球は、アレルギー性鼻炎マウスモデルの鼻腔洗浄 液や(Matsui et al, 2020)、急性心筋梗塞後の心筋組織(Vafadrnejad et al, 2020) などの炎症局所の組織中で認められた他、肺腫瘍組織(Engblom et al, 2017; Pfirschke et al, 2020)で検出され腫瘍形成促進に働くと考えられている

(Engblom et al, 2017)。Siglec-F 陽性好中球は損傷した組織から放出される TGF-β1 か顆粒球マクロファージコロニー刺激因子(Granulocyte-macrophage colony stimulation factor: GM-CSF)もしくはその両方から影響を受けて Siglec-F 陰性好中球から生じると報告されている(Ryu et al, 2022)。また、Siglec-F 陽性 好中球は、骨髄、脾臓、末梢血中ではほとんど検出されず、炎症組織中に存在 することが多く、通常の好中球が数時間しか生存しない一方で Siglec-F 陽性好 中球は数日間生存することができる過分葉好中球であるとの報告もある (Pfirschke et al, 2020)。さらに、Siglec-F 陽性好中球は Siglec-F 陰性好中球と比較して活性酸素の産生能力や NETs 形成能力が高いことも示されている (Matsui et al, 2020; Ryu et al, 2022)。本研究で外傷後敗血症モデルである Burn/CLP 群の腹水中において Siglec-F 陽性好中球が多く見られた意義や予後との因果関係は明らかではないが、Burn/CLP 群の血液中に見られた TGF-β1 がよ り多くの Siglec-F 陽性好中球を誘導した可能性が示唆される。

CD68 は単球やマクロファージの鑑別マーカーとして使用されるが、好中球 など他の細胞にも CD68 が発現し得ることが報告されている(Chistiakov et al, 2017)。炎症性腸疾患患者の腸管粘膜組織に CD68 陽性好中球の浸潤が見られた 報告があるものの(Amanzada et al, 2013)、CD68 陽性好中球についての既報は 少ない。CD68 は炎症刺激によりマクロファージ上で高く発現することが報告 され(Rabinowitz and Gordon, 1991)、マクロファージが貪食細胞であることか ら貪食に関わる因子である可能性も予想されたが、CD68 遺伝子をノックアウ トしてもマクロファージの貪食能力は維持されることが報告されている(Song et al, 2011)。CD68 がマクロファージや単球の免疫機能において果たす役割の詳 細は明らかにされておらず、CD68 陽性好中球についてはさらに未解明である。 本研究の Burn/CLP 群において CD68 高発現好中球が Sham/CLP 群と比較した際 に著しく減少していることを示したが、その意義は現時点ではわかっていない。 【新知見】

本研究により下記の新知見が得られた。

・外傷後敗血症マウスモデルとして作製した Burn/CLP モデルは、コントロールの非外傷後敗血症マウスモデルとして作製した Sham/CLP モデルと比較して、 14 日間生存率が低下し、脾臓のマクロファージの減少が反映する免疫応答の低下と、肝臓、腎臓、肺の臓器障害が進行していることが示された。

・Burn/CLP モデルでは Sham/CLP モデルと比較して、血清中の TGF-β1 の上昇 と他のサイトカインの全般的な産生低下が認められた。

・マスサイトメトリーの結果、Burn/CLP モデルの血液および腹水検体の好中球、 単球・マクロファージの細胞表面上で CD11b および SIRPα が Sham/CLP モデル と比較して高く発現し、Burn/CLP モデルの腹水検体では Sham/CLP モデルと比 較して Siglec-F 陽性好中球が多く見られた。

・CD68 高発現好中球が、Burn/CLP モデルの腹水中で著しく減少していることがわかった。

【新知見の意義】

Wanke-Jellinek らの研究では CpG-オリゴデオキシヌクレオチドの投与が、炎症性サイトカインの誘導やそれによる獲得免疫の調整にも寄与し、免疫恒常性が維持され外傷後二次性肺炎の予後が改善されることが示されている(Wanke-Jellinek et al, 2016)。当研究では外傷後敗血症モデルにおいて血清中の TGF-β1 が上昇していたが、この TGF-β1 の上昇に介入することでその後のサイトカイン放出や好中球フェノタイプの偏在にも影響を与え、外傷後の免疫不均衡が是正される可能性があると考える。

SIRPα-CD47 については、多剤との併用ではあるもののすでに悪性腫瘍領域 で臨床試験が行われている(Zhang et al, 2020)。SIRPαが外傷後敗血症マウスモ デルの好中球、単球・マクロファージにおいて発現が上昇していたことと、予 後との因果関係が証明されれば、今後外傷後敗血症患者への適応拡大も検討さ れる可能性がある。

CD11b、Siglec-F、CD68 陽性好中球の分布の違いについても、予後との因果 関係を明かにすることで、外傷後免疫抑制状態への根本的介入の一助になる可 能性がある。 【新知見から今後の展開】

外傷後敗血症の血中 TGF-β1 の濃度や好中球フェノタイプの局在に介入する ことで、本来起こるべき免疫反応が回復し生存率や臓器損傷に改善が見られる かどうか、因果関係を明らかにすることが今後の研究課題である。

【今後の課題】

介入のタイミングを検討するため、本研究の外傷後敗血症モデルにおいて変 化の見られた TGF-β1 や細胞マーカー発現の経時的変化について把握し、TGFβ1 や細胞マーカーの発現をノックアウトマウスや抗体を用いて検討する。

損傷組織から分泌されることが知られている TGF-β1 は、今回外傷後敗血症 モデルとして作製した Burn/CLP モデルの血液中で上昇していたが、本熱傷モ デルでは体表面積 25%におよぶ組織損傷ができあがるため、TGF-β1 の血中濃 度の著しい上昇を招いた可能性が否定できない。そのため、熱傷モデル以外の 外傷モデルでの血中濃度も測定する。

また、本研究はマウスモデルのみから得られた結果を元に解析、検討した研 究であり、外傷患者の血液検体から同様の傾向が得られるか否か確認されてい ないため、臨床検体を使用した解析も意義があると考える。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費 (18K16504 および 20K09260)の助成 を受け行ったものです。

本研究の機会を与えていただきご指導を賜りました北海道大学大学院医学研 究院・医学院 侵襲制御医学講座救急医学教室助教 和田剛志先生に深謝いたし ます。当実験にご協力・ご助言いただいた同教室医師 土田拓見先生、実験補助 員 柏原志保様に御礼申し上げます。病理組織学的評価にあたり丁寧なご指導と ご助言をいただきました北海道大学大学院医学研究院・医学院 病理学講座腫瘍 病理学教室教授 田中伸哉先生、同教室助教 小田義崇先生に心より感謝申し上 げます。また、免疫学的評価において多大なご協力・ご指導を賜りました大阪 医科薬科大学救急医学教室准教授 山川一馬先生、同教室研究補助員 茅野勝英 様に深く感謝致します。

利益相反

開示すべき利益相反状態はありません。

引用文献

【雑誌】

Abdullahi A, Amini-Nik S, and Jeschke MG (2014) Animal models in burn research. Cell Mol Life Sci 71, 3241–3255.

Adams JM, Hauser CJ, Livingston DH, Lavery RF, Fakete Z, and Deitch EA (2001) Early trauma polymorphonuclear neutrophil responses to chemokines are associated with development of sepsis, pneumonia, and organ failure. J Trauma 51, 452-456.

Amanzada A, Malik IA, Blaschke M, Khan S, Rahman H, Ramadori G, and Moriconi F (2013) Identification of CD68⁺ neutrophil granulocytes in in vitro model of acute inflammation and inflammatory bowel disease. Int J Clin Exp Pathol 6, 561–570.

Anderson SI, Hotchin NA, and Nash GB (2000) Role of the cytoskeleton in rapid activation of CD11b/CD18 function and its subsequent downregulation in neutrophils. J Cell Sci 113, 2737–2745.

Angus DC and van der Poll T (2013) Severe sepsis and septic shock. N Engl J Med 369, 840–851.

Batlle E and Massagué J (2019) Transforming growth factor- β signaling in immunity and cancer. Immunity 50, 924–940.

Balamayooran G, Batra S, Fessler MB, Happel KI, and Jeyaseelan S (2010) Mechanisms of neutrophil accumulation in the lungs against bacteria. Am J Respir Cell Mol Biol 43, 5–16.

Botha AJ, Moore FA, Moore EE, Peterson VM, and Goode AW (1997) Base deficit after major trauma directly relates to neutrophil CD11b expression: a proposed mechanism of shock-induced organ injury. Intensive Care Med 23, 504–509.

Cecconi M, Evans L, Levy M, and Rhodes A (2018) Sepsis and septic shock. Lancet 392, 75–87.

Chistiakov DA, Killingsworth MC, Myasoedova VA, Orekhov AN, and Bobryshev YV (2017) CD68/macrosialin: not just a histochemical marker. Lab Invest 97, 4–13.

CRASH-3 trial collaborators (2019) Effects of tranexamic acid on death, disability, vascular occlusive events and other morbidities in patients with acute traumatic brain injury (CRASH-3): a randomised, placebo-controlled trial. Lancet 394, 1713–1723.

Engblom C, Pfirschke C, Zilionis R, Da Silva Martins J, Bos SA, Courties G, Rickelt S, Severe N, Baryawno N, Faget J, et al (2017) Osteoblasts remotely supply lung tumors with cancer-promoting SiglecF^{high} neutrophils. Science 358, eaal5081.

Feng M, Jiang W, Kim BYS, Zhang CC, Fu YX, and Weissman IL (2019) Phagocytosis checkpoints as new targets for cancer immunotherapy. Nat Rev Cancer 19, 568–586.

Fridlender ZG, Sun J, Kim S, Kapoor V, Cheng G, Ling L, Worthen GS, and Albelda SM (2009) Polarization of tumor-associated neutrophil phenotype by TGF-beta: "N1" versus "N2" TAN. Cancer Cell 16, 183–194.

García-Culebras A, Durán-Laforet V, Peña-Martínez C, Moraga A, Ballesteros I, Cuartero MI, de la Parra J, Palma-Tortosa S, Hidalgo A, Corbi AL et al (2019) Role of TLR4 (toll-like receptor 4) in N1/N2 neutrophil programming after stroke. Stroke 50, 2922–2932.

Guo Z, Kavanagh E, Zang Y, Dolan SM, Kriynovich SJ, Mannick JA, and Lederer JA (2003) Burn injury promotes antigen-driven Th2-type responses in vivo. J Immunol 171, 3983–3990.

Hanschen M, Tajima G, O'Leary F, Ikeda K, and Lederer JA (2011) Injury induces early activation of T cell receptor signaling pathways in CD4⁺ regulatory T cells. Shock 35, 252–257.

Hazeldine J, Hampson P, and Lord JM (2014) The impact of trauma on neutrophil function. Injury 45, 1824–1833.

Hazeldine J, Naumann DN, Toman E, Davies D, Bishop JRB, Su Z, Hampson P, Dinsdale RJ, Crombie N, Duggal NA, et al (2017) Prehospital immune responses and development of multiple organ dysfunction syndrome following traumatic injury: A prospective cohort study. PLOS Med 14, e1002338.

Hsieh T, Vaickus MH, Stein TD, Lussier BL, Kim J, Stepien DM, Duffy ER, Chiswich EL, and Remick DG (2016) The role of substance P in pulmonary clearance of bacteria in comparative injury models. Am J Pathol 186, 3236–3245.

Hubbard WJ, Choudhry M, Schwacha MG, Kerby JD, Rue LW, Bland KI, and Chaudry IH (2005) Cecal ligation and puncture. Shock 24 Suppl 1, 52–57.

Iskander KN, Vaickus M, Duffy ER, and Remick DG (2016) Shorter duration of postoperative antibiotics for cecal ligation and puncture does not increase inflammation or mortality. PLOS ONE 11, e0163005.

Janicova A and Relja B (2021) Neutrophil phenotypes and functions in trauma and trauma-related sepsis. Shock 56, 16–29.

Jaunoo SS and Harji DP (2009) Damage control surgery. Int J Surg 7, 110–113.

Kirihara Y, Takechi M, Kurosaki K, Kobayashi Y, and Kurosawa T (2013) Anesthetic effects of a mixture of medetomidine, midazolam and butorphanol in two strains of mice. Exp Anim 62, 173–180.

Leliefeld PH, Wessels CM, Leenen LP, Koenderman L, and Pillay J (2016) The role of neutrophils in immune dysfunction during severe inflammation. Crit Care 20, 73.

Lichtman MK, Otero-Vinas M, and Falanga V (2016) Transforming growth factor beta

(TGF- β) isoforms in wound healing and fibrosis. Wound Repair Regen 24, 215–222.

Logtenberg MEW, Scheeren FA, and Schumacher TN (2020) The CD47-SIRPα immune checkpoint. Immunity 52, 742–752.

Maiguel D, Faridi MH, Wei C, Kuwano Y, Balla KM, Hernandez D, Barth CJ, Lugo G, Donnelly M, Nayer A, et al (2011) Small molecule-mediated activation of the integrin CD11b/CD18 reduces inflammatory disease. Sci Signal 4, ra57.

Matsui M, Nagakubo D, Satooka H, and Hirata T (2020) A novel Siglec- F^+ neutrophil subset in the mouse nasal mucosa exhibits an activated phenotype and is increased in an allergic rhinitis model. Biochem Biophys Res Commun 526, 599–606.

Mortaz E, Zadian SS, Shahir M, Folkerts G, Garssen J, Mumby S, and Adcock IM (2019) Does neutrophil phenotype predict the survival of trauma patients? Front Immunol 10, 2122.

Ni Choileain N, MacConmara M, Zang Y, Murphy TJ, Mannick JA, and Lederer JA (2006) Enhanced regulatory T cell activity is an element of the host response to injury. J Immunol 176, 225–236.

Niiyama S, Takasu O, Sakamoto T, and Ushijima K (2016) Intraperitoneal adipose tissue is strongly related to survival rate in a mouse cecal ligation and puncture model. Clin Transl Immunology 5, e64.

O'Sullivan ST, Lederer JA, Horgan AF, Chin DH, Mannick JA, and Rodrick ML (1995) Major injury leads to predominance of the T helper-2 lymphocyte phenotype and diminished interleukin-12 production associated with decreased resistance to infection. Ann Surg 222, 482–490.

Park MY, Kim HS, Lee HY, Zabel BA, and Bae YS (2020) Novel CD11b⁺ Gr-1⁺ Sca-1⁺ myeloid cells drive mortality in bacterial infection. Sci Adv 6, eaax8820.

Pfirschke C, Engblom C, Gungabeesoon J, Lin Y, Rickelt S, Zilionis R, Messemaker M, Siwicki M, Gerhard GM, Kohl A, et al (2020) Tumor-promoting Ly-6G⁺ SiglecF^{high} cells are mature and long-lived neutrophils. Cell Rep 32, 108164.

Puhl SL and Steffens S (2019) Neutrophils in post-myocardial Infarction Inflammation: damage vs. resolution? Front Cardiovasc Med 6, 25.

Rabinowitz SS and Gordon S (1991) Macrosialin, a macrophage-restricted membrane sialoprotein differentially glycosylated in response to inflammatory stimuli. J Exp Med 174, 827–836.

Rittirsch D, Huber-Lang MS, Flierl MA, and Ward PA (2009) Immunodesign of experimental sepsis by cecal ligation and puncture. Nat Protoc 4, 31–36.

Roberts I, Shakur H, Coats T, Hunt B, Balogun E, Barnetson L, Cook L, Kawahara T, Perel P, Prieto-Merino D, et al (2013) The CRASH-2 trial: a randomised controlled trial

and economic evaluation of the effects of tranexamic acid on death, vascular occlusive events and transfusion requirement in bleeding trauma patients. Health Technol Assess 17, 1–79.

Ryu S, Shin JW, Kwon S, Lee J, Kim YC, Bae YS, Bae YS, Kim DK, Kim YS, Yang SH, et al (2022) Siglec-F-expressing neutrophils are essential for creating a profibrotic microenvironment in the renal fibrosis. J Clin Invest 132, e156876.

Seshadri A, Brat GA, Yorkgitis BK, Keegan J, Dolan J, Salim A, Askari R, and Lederer JA (2017) Phenotyping the immune response to trauma: A multiparametric systems immunology approach. Crit Care Med 45, 1523–1530.

Shelley O, Murphy T, Paterson H, Mannick JA, and Lederer JA (2003) Interaction between the innate and adaptive immune systems is required to survive sepsis and control inflammation after injury. Shock 20, 123–129.

Silvestre-Roig C, Fridlender ZG, Glogauer M, and Scapini P (2019) Neutrophil diversity in health and disease. Trends Immunol 40, 565–583.

Silvestre-Roig C, Hidalgo A, and Soehnlein O (2016) Neutrophil heterogeneity: implications for homeostasis and pathogenesis. Blood 127, 2173–2181.

Song L, Lee C, and Schindler C (2011) Deletion of the murine scavenger receptor CD68. J Lipid Res 52, 1542–1550.

Stoecklein VM, Osuka A, and Lederer JA (2012) Trauma equals danger—damage control by the immune system. J Leukoc Biol 92, 539–551.

Tsuchida T, Wada T, Mizugaki A, Oda Y, Kayano K, Yamakawa K, and Tanaka S (2021) Protocol for a Sepsis Model Utilizing Fecal Suspension in Mice: Fecal Suspension Intraperitoneal Injection Model. Frontiers in Medicine 9, 765805.

Tsuda Y, Takahashi H, Kobayashi M, Hanafusa T, Herndon DN, and Suzuki F (2004) Three different neutrophil subsets exhibited in mice with different susceptibilities to infection by methicillin-resistant Staphylococcus aureus. Immunity 21, 215–226.

Vafadarnejad E, Rizzo G, Krampert L, Arampatzi P, Arias-Loza AP, Nazzal Y, Rizakou A, Knochenhauer T, Bandi SR, Nugroho VA, et al (2020) Dynamics of cardiac neutrophil diversity in murine myocardial infarction. Circ Res 127, e232–249.

Vincent JL, Marshall JC, Namendys-Silva SA, François B, Martin-Loeches I, Lipman J, Reinhart K, Antonelli M, Pickkers P, Njimi H, et al (2014) Assessment of the worldwide burden of critical illness: the intensive care over nations (ICON) audit. Lancet Respir Med 2, 380–386.

Wanke-Jellinek L, Keegan JW, Dolan JW, Guo F, Chen J, and Lederer JA (2016) Beneficial effects of CpG-oligodeoxynucleotide treatment on trauma and secondary lung infection. J Immunol 196, 767–777.

Wichterman KA, Baue AE, and Chaudry IH (1980) Sepsis and septic shock-a review of laboratory models and a proposal. J Surg Res 29, 189–201.

Yamakawa K, Tajima G, Keegan JW, Nakahori Y, Guo F, Seshadri AJ, Cahill LA, and Lederer JA (2021) Trauma induces expansion and activation of a memory-like Treg population. J Leukoc Biol 109:645–656.

Yanagita T, Murata Y, Tanaka D, Motegi SI, Arai E, Daniwijaya EW, Hazama D, Washio K, Saito Y, Kotani T, et al (2017) Anti-SIRPα antibodies as a potential new tool for cancer immunotherapy. JCI Insight 2, e89140.

Yang P, Li Y, Xie Y, and Liu Y (2019) Different faces for different places: heterogeneity of neutrophil phenotype and function. J Immunol Res 2019, 8016254.

Yang S, Stepien D, Hanseman D, Robinson B, Goodman MD, Pritts TA, Caldwell CC, Remick DG, and Lentsch AB (2014) Substance P mediates reduced pneumonia rates after traumatic brain injury. Crit Care Med 42, 2092–2100.

Zhang W, Huang Q, Xiao W, Zhao Y, Pi J, Xu H, Zhao H, Xu J, Evans CE, and Jin H (2020) Advances in anti-tumor treatments targeting the CD47/SIRPα axis. Front Immunol 11, 18.

【Webサイト】

Centers for Disease Control and Prevention (2021) Injury prevention and control. Data and statistics. In CDC, https://www.cdc.gov/injury/wisqars/?CDC AA refVal=https%3A%2F%2Fwww.cdc.go

<u>v%2Finjury%2Fwisqars%2Foverview%2Fkey_data.html</u> (2022 年 5 月 3 日参照)

Ministry of Health, Labour and Welfare (2009) Statistics information and white paper.InMinistryofHealth,LabourandWelfare,

<u>https://www.mhlw.go.jp/toukei_hakusho/index.html</u> (2022年5月3日参照)