

表23-3 臨床使用されているアジュバント

アジュバント名	主要な成分	使用されているワクチン	自然免疫受容体・シグナル分子	誘導される獲得免疫
Alum	アルミニウム塩 (水酸化アルミニウムなど)	B型肝炎ワクチン, 破傷風, DT, DTP	NLRP3インフラマソーム(?) Syk → MAPK → PGE ₂ (?)	抗体, Th2
AS04	Alum + MPL (3-O-デスアシル-4'- モノホスホリルリピド A)	子宮頸がんワクチン (サーバリックス®; GSK)	MPL → TLR4 → TRIF NLRP3インフラマソーム(?)	抗体, Th1
MF59	スクアレン (Oil-in-water emulsion)	H1N1インフルエンザワクチン (CELTURA; ノバルティス) *特例承認	ASC(?)	抗体, Th2/Th1
AS03	スクアレン + DL-α-トコ フェロール (Oil-in-water emulsion)	H1N1インフルエンザワクチン (アレバンリックス; GSK) *特例承認	不明	抗体, Th2/Th1

表できない。現行のアルミニウム塩が添加されている不活化ワクチンの有効性は明らかであるが、将来的には Th1タイプの免疫応答を惹起でき、かつ同時に安全なアジュバントを添加した不活化ワクチンの開発が必要と考えられる。最近、子宮頸がんワクチンとして認可されたサーバリックス® (GSK社)には、水酸化アルミニウムに加えて毒性を軽減した TLR4リガンドであるモノホスホリルリピド A (MPL)が添加されており Th1タイプの免疫応答が報告されている(表23-3)¹³⁾。

23-5 アジュバント

これまでみてきたようにワクチンの有効性と安全性をより高めていくためには、有望なアジュバントの探索・開発とその作用メカニズムの理解が必須である。アジュバントとは免疫応答を増強させる物質の総称であるが、その機能的役割は大きく2つに分けて考えることができる。樹状細胞をはじめとする抗原提示細胞にワクチン抗原を効率よく取り込ませるための輸送媒体としての役割と、細胞膜あるいは細胞質内に存在するさまざまな自然免疫受容体を刺激して、免疫系細胞のシグナルカスケードの活性化を介して抗原提示細胞を活性化させ、さらに I 型インターフェロンや炎症性サイトカインの産生を促進することで獲得免疫応答を促進させるなどの免疫モジュレーターとしての役割に分けて考えることができる。またいくつか

のアジュバントはその両方の機能をあわせもっていると考えられている(図23-2)。現行のワクチンで広く使用されている水酸化アルミニウムをはじめとしたアルミニウム塩によるアジュバント効果は、ワクチン抗原の取り込み促進と自然免疫受容体に対する刺激の両方によるものと考えられている。現在日本国内で臨床使用されているアジュバント(表23-3)と、研究開発中のアジュバント(表23-4)をそれぞれ示す。これらの各アジュバントはそれぞれ異なった自然免疫受容体を刺激することで、各アジュバントに固有のシグナル伝達経路を介して特徴的なサイトカイン産生やそれに伴う特徴的な Th 応答を誘導する傾向がみられ、その意味でアジュバントは単に免疫応答を増強するだけではなく、その質(Th1, Th2, Th17など)にも影響を与えていると考えられる(図23-3)。Th1はおもに細菌やウイルスによる感染防御に対して、Th2は液性免疫を主としながら腸管寄生虫に対する防御やアレルギー反応に、Th17は真菌感染に対する防御や関節リウマチや乾癬などの自己免疫疾患病態への関与がそれぞれ示唆されており、個々のワクチンが標的とする疾患や病態に対して適切な Th 反応応答を促進するアジュバントを選択する必要がある。その意味で、今後は個々の疾患や病態に適切な抗原とアジュバントを組み合わせたワクチンを開発していくことが、安全性と有効性をともに兼ね備えたワクチンを実現するためには必要である。

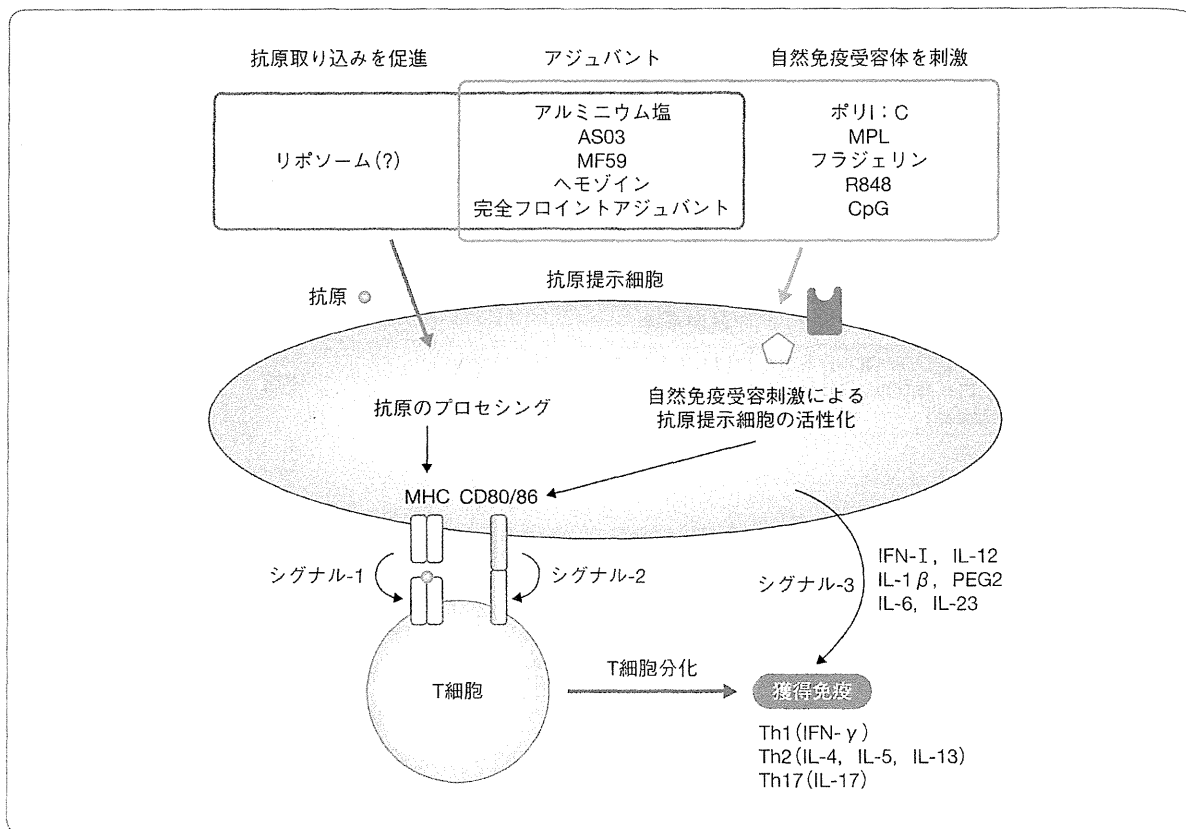


図23-2 アジュバントと抗原提示

表23-4 代表的な研究開発中のアジュバント

アジュバント	成分	自然免疫受容体・シグナル分子	誘導される獲得免疫
ポリI:C	合成 dsRNA アナログ	TLR3 MDA5	抗体, Th1, CD8
フラジェリン	フラジェリン	TLR5	抗体, Th1 / Th2
イミキモド	合成 ssRNA アナログ	TLR7, TLR8	抗体, Th1, CD8
CpG	合成 CpG-ODNs	TLR9	抗体, Th1, CD8
QS-21	サポニン	不明	抗体, Th1, Th2, CD8
TDM	トレハロースジミロール酸	Mincle	抗体, Th1, Th17
カードラン	β 1,3-グルカン	Dectin-1	抗体, Th1, Th17, CD8
ヘモジン	β -ヘマチン結晶	MyD88	抗体, Th1 / Th2

23-6 樹状細胞と免疫応答

獲得免疫応答を誘導するためには、多くの場合、樹状細胞などの抗原提示細胞の自然免疫受容体が発動によって刺激され、細胞内のシグナルカスケードによって樹状細胞が活性化することが必要である(図23-2, 図23-3)。アルミニウム

塩や Oil アジュバントは抗原と複合体を形成して抗原タンパク質の取り込みを促進していると考えられている。それによって MHC 上に提示される抗原由来ペプチドが増加し、結果として T 細胞への抗原提示(シグナル-1)が増加する(図23-2)。またアルミニウム塩は直接、抗原提示細胞膜を活性化するだけでなく¹⁴⁾、DAMP の1つとして作用

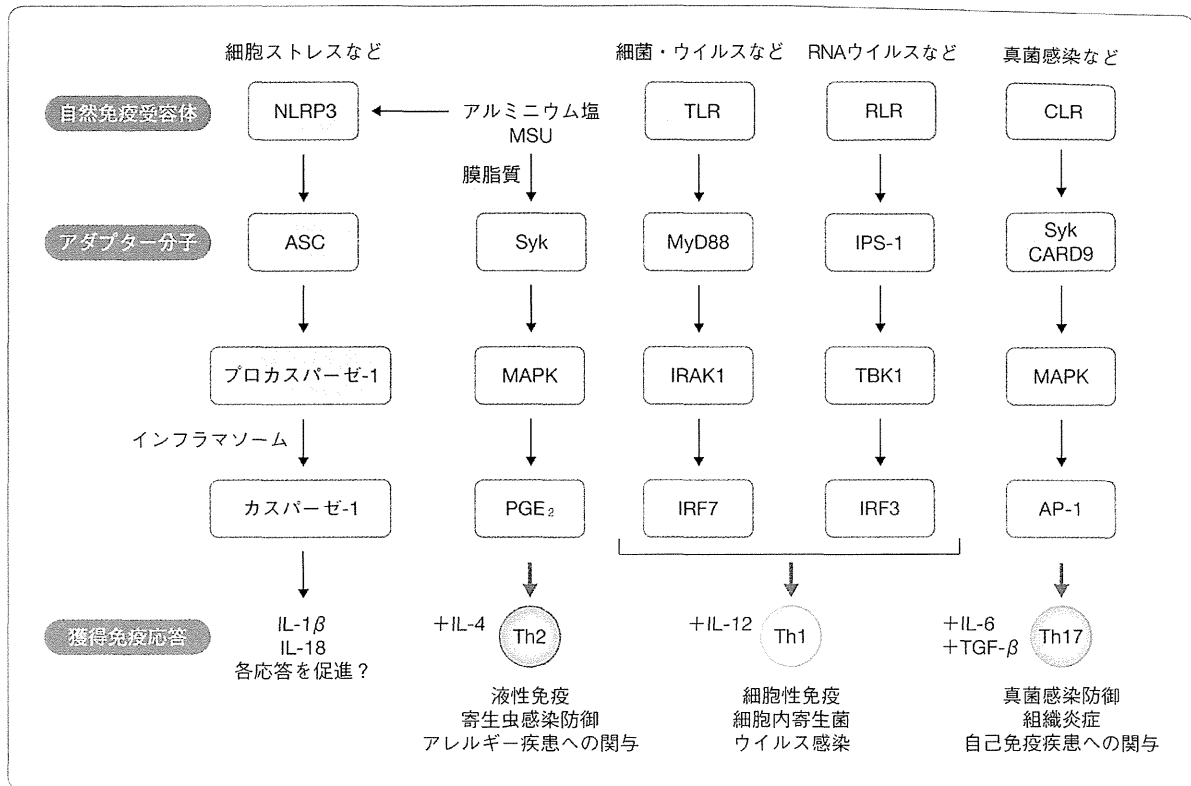


図23-3 自然免疫応答とTh細胞応答

する尿酸を介して自然免疫受容体を活性化し、抗原提示細胞そのものの活性化や細胞膜上の CD80 や CD86 からなる補助刺激分子を増加させ T 細胞への抗原提示の際に副次的な刺激(シグナル-2)を与えることで T 細胞応答を促進している。CpG などのアジュバントは抗原取り込みを直接的に増加させることはないと考えられるが、自然免疫受容体刺激によって樹状細胞を活性化することで、MHC 分子や補助刺激分子の発現を増大させて T 細胞への抗原提示を促進する。さらに樹状細胞に加わった自然免疫刺激の種類や組み合わせによってさまざまなサイトカインが産生され(シグナル-3. 図23-2, 図23-3)誘導される免疫応答の種類や質にも影響を与えている。また樹状細胞の活性化を伴わない状態でシグナル-1のみを T 細胞に与えると、逆に T 細胞はアナジーとよばれる不応答状態になることも知られている^{15), 16)}。実際に LPS などの TLR リガンドを含まない非常に精製度が高いタンパク質抗原をマウスに免疫しても、その抗

原に対する抗体産生や T 細胞応答はほぼ認めない。このことを図示すると、図23-4のようになる。そのような意味で、樹状細胞は自然免疫と獲得免疫を橋渡しするのに重要な細胞集団で、自然免疫反応は獲得免疫応答を誘導するためにほぼ必須であるといえ、アジュバントは免疫応答に“GO”サインを出していると考えられる。また樹状細胞はアジュバント刺激を自然免疫シグナルに変換して、ワクチンなどで誘導される免疫応答の量と質を制御する役割を果たしていると考えられる。またメモリー T 細胞の活性化にはここに述べたような自然免疫の活性化は必要ないと考えられ、メモリー T 細胞を再活性化するワクチンにはアジュバントの添加は必ずしも必要ではない²⁾。

23-7 樹状細胞サブセット

さらに重要な事実として、樹状細胞には複数のサブセットが存在しており、おもにマウスでの知

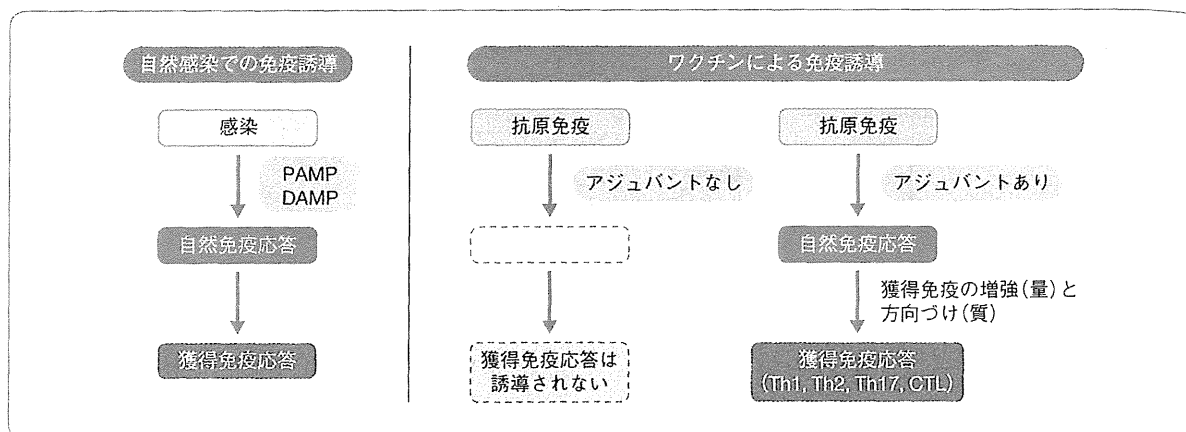


図 23-4 ワクチンによる免疫誘導

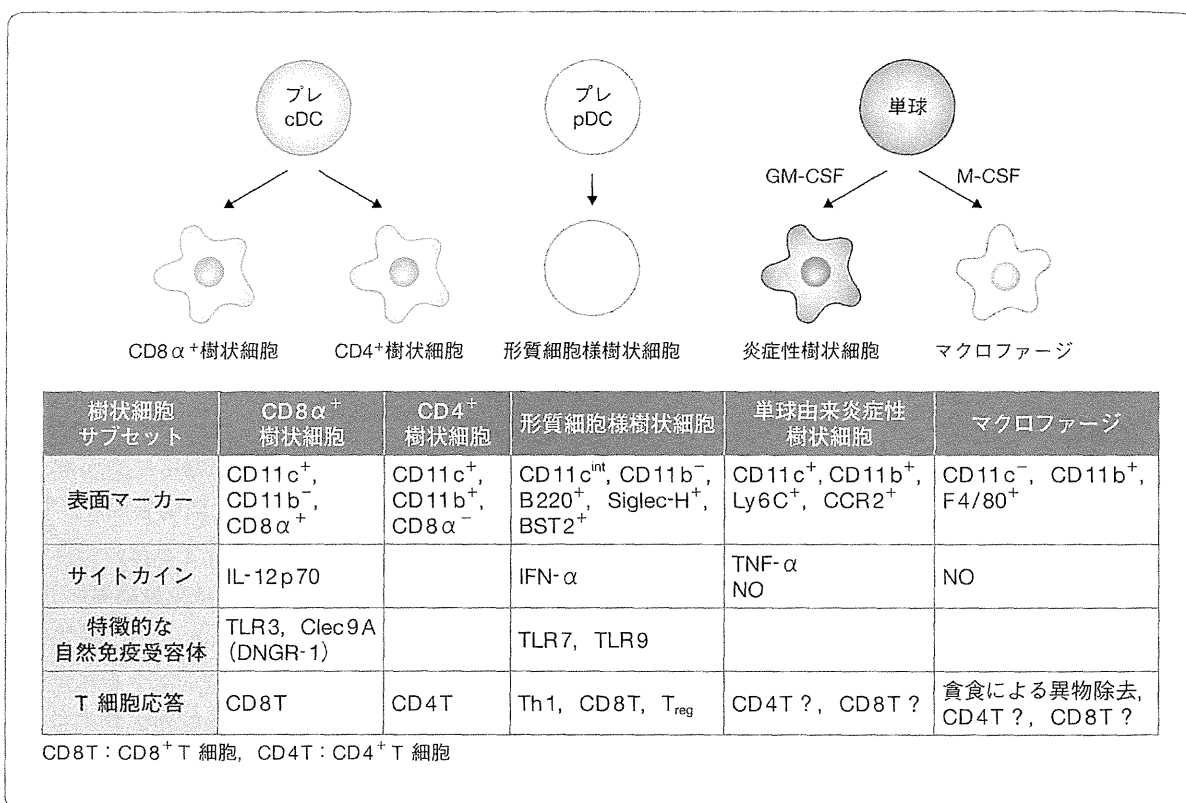


図 23-5 樹状細胞サブセットと免疫応答

見を基に古典的樹状細胞 conventional dendritic cell (cDC)と形質細胞様樹状細胞 plasmacytoid DC (pDC)の2つに大きく分類され、cDCはさらに細胞表面にCD8 α を発現するCD8 α^+ 樹状細胞とCD8 α を発現せずCD4やDCIR2を発現する樹状細胞に分けられている(図23-5)。また、従来の骨

髄細胞からGM-CSFによって分化誘導された樹状細胞は、現在ではinflammatory DCとよばれる単球 monocyte に由来する炎症性樹状細胞に相当すると考えられている。このような樹状細胞サブセットは単に細胞表面の発現マーカーが異なるだけでなく、機能的にもそれぞれの特徴をもっている

(図23-5). $CD8\alpha^+$ 樹状細胞は TLR3や Clec9A を発現しており, 抗原由来ペプチドを MHC クラス I に提示するための TAP などの分子を他の樹状細胞よりも多く発現しており, 実際に $CD4^+$ T 細胞よりも $CD8^+$ T 細胞に抗原を提示しやすいことが知られている¹⁷⁾. 逆に $CD4^+$ 樹状細胞は MHC クラス II による抗原提示に優れ $CD4^+$ T 細胞の活性化をより誘導する¹⁷⁾. pDC は TLR7や TLR9 を発現し, これらの刺激に対して大量の IFN- α を産生する. IFN- α は強力な抗ウイルス作用をもつ サイトカインでウイルス増殖を抑制する. pDC が cDC のような抗原提示を行うかどうかはさまざまな報告があるが, 少なくとも *in vitro* ではあまり T 細胞に対する抗原提示には優れていないとの報告が多い¹⁸⁾. 炎症性 DC は, 炎症に伴って二次的に遊走し集積する単核球がさまざまな炎症に伴うサイトカインによって樹状細胞に分化した細胞と考えられ, cDC によって引き起こされた $CD4^+$ および $CD8^+$ T 細胞応答をさらに増強していると考えられている¹⁹⁾. これまで述べてきたこれらの樹状細胞サブセットには, マウスだけでなくヒトにもほぼ同様の樹状細胞サブセットが存在することが明らかになっている. しかしながら, これら樹状細胞が発現する TLR などの自然免疫受容体はヒトとマウスでやや異なることが知られており, さまざまなアジュバントの効果をマウスからヒトへと適応使用する際には注意が必要である. また, マクロファージによる T 細胞への抗原提示は一般に樹状細胞よりも弱いと考えられているが, マクロファージが腫瘍や糖尿病などさまざまな疾患病態に影響を与えている可能性が示唆されていることから今後の研究が待たれる²⁰⁾.

23-8 次世代ワクチンの開発にむけて

本章では, 基礎免疫学の視点から, 自然免疫, 獲得免疫, アジュバントによる獲得免疫の増強および方向づけ, それらにおける樹状細胞の役割などを概説してきたが, 現在もいまだその全容は明らかになっていないとはいえがたく, 今後さらなる

表23-5 次世代ワクチンの開発に求められること

- 優れたワクチン抗原の探索・選択
- 適切なアジュバントの探索・選択
- 適切な組織や樹状細胞への抗原/アジュバントのデリバリー

研究が必要と考えられる.

現在日本国内で臨床使用されているアジュバントはアルミニウム塩あるいはスクアレンを主体とした水中油滴型(Oil-in-water)アジュバントであり(表23-3), アルミニウム塩や Oil アジュバントは単独では Th2タイプの免疫応答を誘導しやすいことが知られている. Th1/Th2/Th17などの概念はおもにマウスでの実験をもとに構築されており, ヒトにおいても同様の免疫応答がさまざまな疾患で論じられているが, マウスでの知見がそのままヒトに当てはまるとはいいがたい. その意味ではヒトにおいてワクチンで誘導される免疫応答が Th1になっているのか Th2になっているのか厳密に判断することは難しいものの, 現在実際に使用されているワクチンアジュバントによる免疫応答は Th2反応あるいは Th2と Th1の混合反応となっていると類推されている. これまでみてきたように, 病態によっては Th2反応よりも Th1反応の方が望ましいと考えられるものも数多く存在し, 現在使用可能なワクチンアジュバントはそれらの要請には十分に応えているとはいえない. 対して, 代表的な研究開発中のアジュバントであるポリ I:C, イミキモド, CpG は, TLR を刺激することで Th1 応答を誘導可能なものが多い(表23-4). しかしながら, TLR 刺激は SLE などの自己免疫疾患病態にも密接な関連が指摘され, TLR 刺激作用をもつアジュバントは潜在的に自己免疫疾患を誘発する可能性をもっており, その臨床応用については, 慎重に安全性を見極める必要がある.

副反応を極力抑えながらも十分ワクチン効果をもつ次世代ワクチンの開発の1つの鍵は, 優れたワクチン抗原や新しいアジュバントの探索はもとより, 分子・細胞レベルでの免疫作用機序に基づいて, ワクチン抗原およびアジュバントを適切な樹

Ⅲ. 免疫病態の解明と疾患治療の展開

状細胞サブセットにより選択的にデリバリーし、その対象疾患・病態に適した Th タイプの獲得免疫応答を誘導することにあると考えられる(表23-5)。今後の免疫学知識に裏づけられた安全性と有効性をともに兼ね備えた次世代ワクチンの開発が期待される。

文 献

- 1) Rappuoli R, et al.: *Nat Rev Immunol*, 11: 865-872, 2011.
- 2) Koyama S, et al.: *Sci Transl Med*, 2: 25-24, 2010.
- 3) Aoshi T, et al.: *Curr Opin Virol*, 1: 226-232, 2011.
- 4) Kawai T and Akira S: *Nat Immunol*, 11: 373-384, 2010.
- 5) Imai Y, et al.: *Cell*, 133: 235-249, 2008.
- 6) Ahrens S, et al.: *Immunity*, 36: 635-645, 2012.
- 7) Zhang JG, et al.: *Immunity*, 36: 646-657, 2012.
- 8) Yamasaki S, et al.: *Nat Immunol*, 9: 1179-1188, 2008.
- 9) Karikó K, et al.: *J Biol Chem*, 279: 12542-12550, 2004.
- 10) Hornung V, et al.: *Nat Med*, 11: 263-270, 2005.
- 11) Marichal T, et al.: *Nat Med*, 17: 996-1002, 2011.
- 12) Kuroda E, et al.: *Immunity*, 34: 514-526, 2011.
- 13) Didierlaurent AM, et al.: *J Immunol*, 183: 6186-6197, 2009.
- 14) Flach TL, et al.: *Nat Med*, 17: 479-487, 2011.
- 15) Chappert P and Schwartz RH: *Curr Opin Immunol*, 22: 552-559, 2010.
- 16) Powell JD and Delgoffe GM: *Immunity*, 33: 301-311, 2010.
- 17) Dudziak D, et al.: *Science*, 315: 107-111, 2007.
- 18) Colonna M, et al.: *Nat Immunol*, 5: 1219-1226, 2004.
- 19) Domínguez PM and Ardavin C: *Immunol Rev*, 234: 90-104, 2010.
- 20) Biswas SK and Mantovani A: *Nat Immunol*, 11: 889-896, 2010.

5. 粒子アジュバントのメカニズム

黒田悦史

ワクチンアジュバントとして臨床の場で用いられているアラムアジュバントをはじめ、粒子状物質の多くは免疫応答を増強させるアジュバント活性を有している。しかしながら、その有用性に反して免疫学的なメカニズムに関しては不明な点が多く残されている。最近になり、アラムアジュバントを中心に粒子アジュバントの免疫学的メカニズムが精力的に解析されており、これまで考えられていた理論に加え、さまざまな細胞内シグナル、液性因子、さらに DAMPs とよばれる内因性分子が関与していることが明らかになってきた。

はじめに

アジュバントとは抗原とともに投与することで、抗原に対する免疫原性を増強、加速、延長する免疫増強製剤の呼称である。現在もさまざまなアジュバントが臨床の場で用いられているが、最もよく用いられているアジュバントとして、粒子アジュバントであるアラム（水酸化アルミニウム）があげられる。アラムは三種混合ワクチンやB型肝炎ワクチンに使用されており、

われわれの健康維持にはなくてはならない粒子アジュバントである。しかしながら一方で、大気中に拡散するさまざまな微小粒子状物質もアジュバント活性を有しており、呼吸器系におけるアレルギー性炎症などへの関与が示唆されている。このように粒子状物質がもつアジュバント活性はわれわれの生活にさまざまな影響を与えているが、アラムを含めた粒子アジュバントがどのような機序で免疫応答を誘導するかについては長らく明らかにされていなかった。最近になり、アラムを中心に粒子アジュバントのメカニズムが注目され、さまざまな報告がなされている。本稿ではこれまで提唱されてきた粒子アジュバントの免疫学的メカニズムについて最新の知見を含めながら解説したい。

【キーワード&略語】

粒子アジュバント, アラム, 脂質メディエーター

DAMPs : damage-associated molecular patterns (ダメージ関連分子パターン)

MSU : mono-sodium urate crystal (尿酸塩結晶)

PAMPs : pathogen-associated molecular patterns (病原体関連分子パターン)

PGE₂ : prostaglandin E2 (プロスタグランジンE2)

PLG : poly (lactide-co-glycolide) (乳酸・グリコール酸重合体)

PRRs : pattern recognition receptors (パターン認識受容体)

■ アジュバント活性をもつ粒子状物質とその特性

多くの粒子状物質がアジュバント活性を有することが知られている。最も有名で古くから臨床応用されているものとしてアラムがあげられるが、その他の粒子状物質も同様なアジュバント活性を有することが報告されている。結晶シリカはけい肺症を引き起こすこと

Particulates work as adjuvant

Etsushi Kuroda : Laboratory of Vaccine Science, Immunology Frontier Research Center, Osaka University (大阪大学免疫学フロンティア研究センターワクチン学)

が知られている粒子状物質であるが、アラムと同様に抗原とともに投与することで特異的な抗体産生を誘導する効果がある¹⁾。尿酸塩結晶 (mono-sodium urate crystal : MSU) は生体内で生成される粒子状物質であり、傷害を受けた細胞から放出されるダメージ関連分子パターン (damage-associated molecular patterns : DAMPs)^{※1}の1つである。MSUも強い炎症反応を誘導することが知られており、強力なアジュバント活性を有している²⁾。またマラリア原虫が産生する代謝産物で、遊離ヘムのポリマーであるヘモゾインもアジュバントとして使用することで液性免疫を活性化することが報告されている³⁾。化学的に合成された粒子状物質である乳酸・グリコール酸重合体 [poly (lactide-co-glycolide) : PLG] やポリスチレン粒子もマウスを用いた基礎的研究において抗原特異的なIgGを誘導することが報告された⁴⁾。酸化ニッケル粒子も強い炎症反応と抗原特異的な抗体産生を誘導する⁵⁾。無脊椎動物の主要な構造体であるキチンも粒子アジュバントとして免疫系を刺激し、好酸球の誘導を引き起こすことが報告されている⁶⁾。

また、粒子のサイズもアジュバント活性に深く関与すると考えられている。PLGが樹状細胞を活性化するサイズについて検討した報告があり、430 nm～1 μmのサイズが効率よく貪食されることを示している⁴⁾。ヘモゾインのサイズとアジュバント活性について検討した報告では、50～200 nmのサイズで強いアジュバント活性を示すことが示されている³⁾。同様にアジュバント活性をもつ結晶シリカ粒子についても、1～2 μmのサイズが効率よく貪食され、細胞を刺激することが報告されており⁷⁾、これらの報告から貪食に適した数百nm～2 μm程度の大きさが免疫反応を強く刺激するサイズであると考えられる。

興味深い点は、これら粒子アジュバントが有する特性である。粒子アジュバントの多くが好酸球の活性化やIgE産生を誘導するTh2型免疫反応を活性化する特

性を有している。このようなアジュバントは特にTh2アジュバントとよばれる。粒子アジュバントがどのような機序で免疫系を活性化し、Th2型免疫反応を誘導するのかについては明らかにされていないが、多くの粒子アジュバントがTh2アジュバント活性を有していることが報告されていることから、粒子アジュバントに共通する免疫活性化機構が存在することが示唆される。

② アジュバントと自然免疫

近年の自然免疫研究の成果により、効果的な獲得免疫の誘導には自然免疫の活性化が重要であることが明らかにされ、アジュバントの多くが自然免疫を活性化する能力を有していると考えられている。一般に、自然免疫はTLRをはじめとするパターン認識受容体 (pattern recognition receptors : PRRs) を介して活性化され、獲得免疫反応を誘導する。このことから、LPS (リポ多糖) をはじめとするPRRsのリガンド、すなわち病原体関連分子パターン (pathogen-associated molecular patterns : PAMPs) は、アジュバントとして機能すると考えられる。一方、アラムを含めた粒子アジュバントはその強力なアジュバント活性に反して作用機序に関しては不明な点が多い。特に粒子アジュバントはLPSのような病原体由来のアジュバントとは異なり、好酸球の活性化やIgEを誘導するTh2アジュバント活性を有している。多くの粒子アジュバントがマクロファージや樹状細胞のような貪食細胞によって細胞内に取り込まれるという点からも、粒子アジュバントも何らかの形で自然免疫を活性化していることが示唆される (図1)。

③ 粒子アジュバントによる免疫活性化のメカニズム

1) 徐放効果

粒子状アジュバントの多くがタンパク質を吸着もしくは粒子内に取り込む性質をもっている。特にアラムの作用機序としてアラムに吸着した抗原が徐々に体内に放出されることにより、免疫担当細胞を長期間刺激し、結果として強い免疫応答が誘導される「徐放 (depot) 効果」が長年提唱されてきた。しかしながら最近、アラムにおいて徐放効果が重要でないとの報告

※1 DAMPs

Alarminともよばれる。死細胞やダメージを受けた細胞から遊離する分子で、PAMPs (病原体関連分子パターン) と同様に自然免疫を活性化する。代表的な物として、HMGB1、S100タンパク質、熱ショックタンパク質 (HSP) などがあげられる。

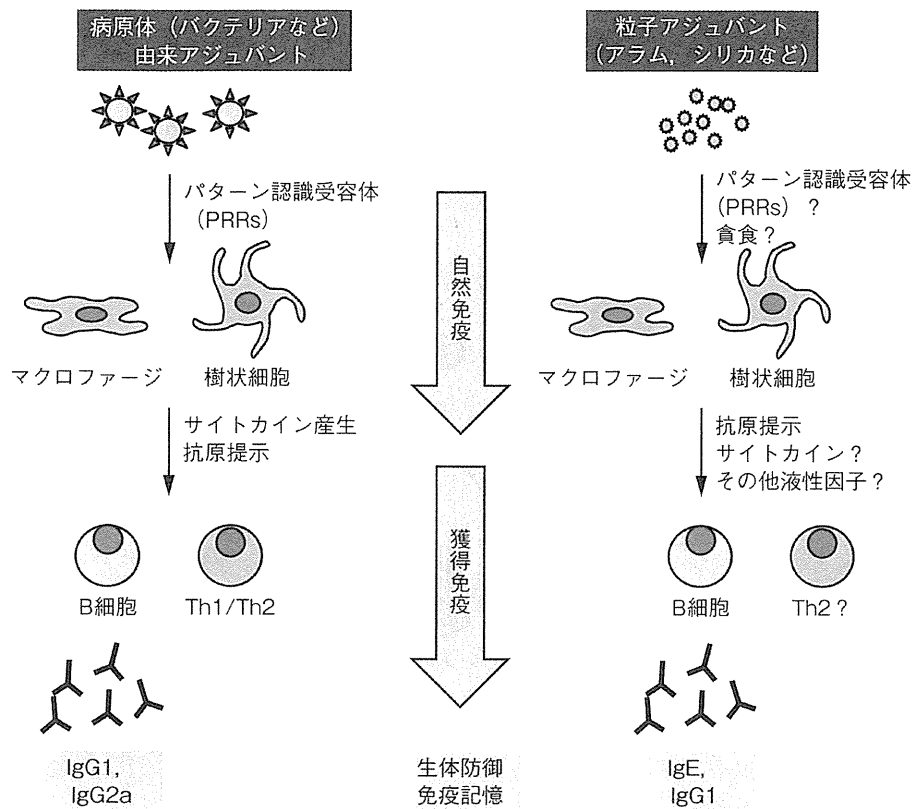


図1 免疫応答における病原体由来アジュバントと粒子アジュバントの違い

LPSをはじめとする病原体由来アジュバントはパターン認識受容体を介して自然免疫を活性化し、抗原提示やサイトカイン産生を介して獲得免疫を誘導する。それに対して粒子アジュバントがどのようなメカニズムで自然免疫に認識され、どのような因子によって獲得免疫が活性化されるのかについては明らかにされていない

もなされており⁸⁾、アラムをはじめとする粒子アジュバントの作用機序が単純な徐放効果ではないことが示唆されている。

2) TLR-MyD88経路の関与

前述したようにアジュバントの多くが自然免疫の活性化能を有していることから、粒子アジュバントによるアジュバント効果にもPRRsの関与が考えられる。アラムに関しては代表的なPRRsであるTLRの関与について解析がなされており、MyD88の欠損やMyD88とTRIFの二重欠損はアラムのアジュバント効果には影響しないことが示された^{9) 10)}。また、興味深いことに、MyD88欠損マウスではIgEの過剰産生が認められている。これらの結果より、粒子アジュバントのうち少なくともアラムに関してはそのアジュバント活性はTLRやMyD88に依存しないことが明らかにされている。

3) インフラマソームの関与

2008年にアラムやシリカの貪食が細胞内に存在するインフラマソームとよばれる炎症シグナル複合体を活性化することが報告された^{11) ~13)}。インフラマソームは細胞内のPRRの1つであり、センサータンパク質の種類によりNALP1 (NLRP1)、NALP3 (NLRP3)、IPAF、AIM2インフラマソームなどが存在する(第4章-2)。そのなかで粒子アジュバントにより活性化されるのはNALP3インフラマソームであると考えられている。NALP3インフラマソームはセンサータンパク質のNALP3、アダプタータンパク質のASC、システインプロテアーゼであるカスパーゼ1から構成されている。粒子状物質によりNALP3インフラマソームが活性化されるとカスパーゼ1が活性化型になり、その結果、成熟型のIL-1 β やIL-18が産生される。特にIL-1

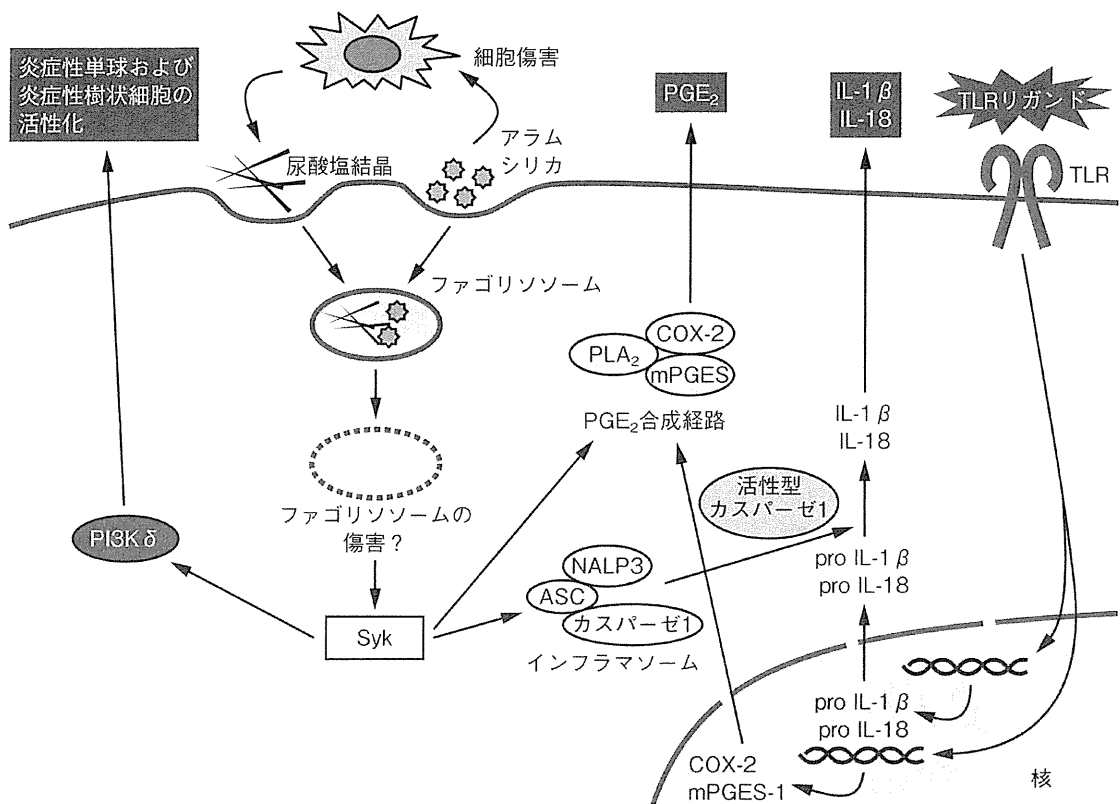


図2 粒子アジュバントにより活性化されるシグナル伝達経路

粒子アジュバントが食され、細胞内に取り込まれると Syk が活性化される。Syk はインフラマソームを活性化し、IL-1 β の産生を制御するとともに、プロスタグランジン合成経路も活性化する。Syk はさらに PI3 キナーゼ δ の活性化を介して、炎症性単球や樹状細胞の遊走に関与する (PLA₂: ホスホリパーゼ A₂, COX-2: シクロオキシゲナーゼ-2, mPGES: 膜結合型 PGE 合成酵素, PI3K: PI3 キナーゼ)

β の誘導はインフラマソーム活性化の指標になっている。興味深いことに、アジュバント活性を有する多くの粒子アジュバントはインフラマソームを活性化し、IL-1 β や IL-18 などの炎症性サイトカインを誘導することが報告されており、そのためアジュバント活性もインフラマソーム依存性であると考えられた (図2)。実際に、インフラマソームの構成成分である NALP3, ASC, カスパーゼ1 の欠損マウスではアラムにより誘導される抗原特異的な抗体産生が低下することが報告された^{12) 13)}。しかしながら、インフラマソームは抗原特異的な IgG の産生には関与しないという報告やインフラマソームの欠損は IgE 産生のみに影響を与えるとの報告もあり^{14) 15)}、インフラマソームのアジュバント活性への関与については完全には明らかにされていない。

4) 尿酸および尿酸塩結晶の関与

尿酸は核酸の異化代謝物であり、細胞内に存在する。細胞がダメージを受けると細胞外へ放出され、局所的に尿酸が高濃度になることで尿酸塩結晶が形成されることが考えられている。2003年に尿酸および尿酸塩結晶が DAMPs として働き、樹状細胞の成熟や活性化を誘導することが報告された¹⁶⁾。興味深いことに、尿酸塩結晶は Th2 アジュバント活性をもつことが示されており、アラムを腹腔内に投与することで腹腔内に尿酸が増加すること、さらに尿酸分解酵素 (uricase) を投与することで、抗原特異的 T 細胞の活性化が抑えられることが報告された¹⁷⁾。アラムは細胞死を誘導することが知られているが、この結果はアラムによる細胞障害により遊離した尿酸および尿酸塩結晶がアジュバント効果に関与すること示している。興味深いことに尿酸塩結

晶によるアジュバント活性にはMyD88, IL-1 β シグナル, NALP3インフラマソームのいずれも関与せず, 炎症性単球および樹状細胞のSyk^{※2}およびPI3キナーゼが重要であることが報告されている(図2)¹⁸⁾.

5) 脂質メディエーターの関与

われわれはアラムを始めとする粒子アジュバントが共通してTh2アジュバント活性を有することに注目し, アラムやシリカを貪食した細胞の活性化機構について解析を行い, 粒子アジュバントが脂質メディエーターであるプロスタグランジンを誘導することを見出した⁵⁾. プロスタグランジンはアラキドン酸カスケードによって生成されるアラキドン酸代謝物の1つであり, そのなかでもプロスタグランジンE₂(PGE₂)はよく解析されているプロスタグランジンの1つである. ささまざまな薬理作用を有しており, 炎症性サイトカインとともに炎症部位において認められる. 免疫系に対しては活性化と抑制の両方の作用をもつ多彩な液性因子である. マクロファージや樹状細胞をアラムやシリカで刺激するとPGE₂産生が認められ, その産生はインフラマソーム非依存的であった. またPGE₂産生誘導シグナルの1つとしてSykが重要な分子の1つであることを認めた. PGE₂生成経路の最終酵素であるmPGES-1欠損マウスでは, アラムやシリカをアジュバントとしたときに誘導される抗原特異的IgE産生の低下が認められた. これらの結果から粒子アジュバントによって誘導されたPGE₂がIgE産生に関与することが明らかになった(図2).

興味深いことに, われわれはアラムやシリカ以外にも, MSU, PLG, キチン粒子, および酸化ニッケル粒子も脂質メディエーターの産生誘導を示すことを認めており, アジュバント活性を有する粒子アジュバントのスクリーニングの際の重要なバイオマーカーの1つになると考えている.

6) 核酸の関与

前述したようにアラムは細胞死を誘導するが, アラムを投与することにより貪食細胞が傷害を受け, その

結果DNAが放出されること, さらにこの宿主由来のDNAが抗原特異的なIgGやIgEの誘導に関与することが報告されている¹⁹⁾. また, アラムのかわりにDNAをアジュバントとして抗原とともに投与することで抗原特異的な抗体が誘導されることや, DNA分解酵素の処理によりアジュバント活性が消失することも明らかとなった. この結果は宿主由来の核酸がDAMPsとしてアジュバント活性の誘導に重要な因子であることを示している. また, DNAによる自然免疫活性化の重要なシグナル伝達体としてTBK1 (TANK binding kinase 1) やIRF3 (interferon regulatory factor 3) があげられるが, いずれの欠損マウスでも野生型マウスに比してアラムによるアジュバント効果の低下が認められており, 特にIgEの誘導が顕著に減弱していることが示された. さらに, 炎症性樹状細胞が所属リンパ節へ移動するときにはIRF3依存性に誘導されるサイトカインであるIL-12p40およびそのホモ二量体であるIL-12p80が重要であり, IL-12p40の中和抗体の投与により抗原特異的なIgEが低下することも示された. シリカをはじめとする多くの粒子アジュバントが細胞死を誘導することが知られていることから, アジュバント活性と細胞死さらに宿主の核酸の放出が密にかかわっていることが示唆される.

おわりに

これまで報告されている粒子アジュバントの作用機序を表1にまとめた. 粒子アジュバントの代表格はアラムアジュバントである. アラムは安全なアジュバントとして臨床の場において用いられているが, 接種部位における肉芽腫形成やIgEの誘導などの副反応も認められている. このような副反応が改善されないのはそのメカニズムが明らかにされていないのが最大の理由である. 粒子アジュバントの免疫学的メカニズムの全貌明らかにすることは, 従来のアジュバントの改良, アジュバント修飾剤の開発, さらに新規アジュバントの探索において重要な課題であると思われる. 日本発の次世代ワクチンアジュバントの開発のためにもこの分野の研究が活発になることを期待したい.

※2 Syk (spleen tyrosine kinase)

非受容体型チロシンキナーゼの1つ. 自然免疫の活性化においては, Dectin-1のような細胞質ドメインに免疫受容体チロシン活性化モチーフ(ITAM)をもつ受容体などによって活性化され, 下流にシグナルを伝える役割をもつ.

表1 粒子アジュバントによるアジュバント活性についてのまとめ

	メカニズム	アジュバント活性	文献
depot効果	吸着した抗原が徐々に放出	・depot効果は必要ない?	8
MyD88経路	アラムによる自然免疫系の活性化	・MyD88はアラムのアジュバント活性に関与しない	9, 10
NALP3 インフラマソーム	粒子アジュバントによるNALP3インフラマソームの活性化とIL-1 β , IL-18誘導	・IgEの産生に関与? ・アジュバント活性には関与しないとの報告もあり	12~15
尿酸, 尿酸塩結晶	アラムによってダメージを受けた細胞から遊離, DAMPsとして働く	・炎症性単球, 炎症性樹状細胞のSykおよびPI3キナーゼの活性化によりTh2が誘導	17, 18
脂質メディエーター	アラム, シリカによってマクロファージや樹状細胞から誘導	・PGE ₂ はSyk依存性に誘導され, IgEの産生に関与	5
核酸	アラムによってダメージを受けた細胞から遊離, DAMPsとして働く	・炎症性単球, 炎症性樹状細胞によりTh2が誘導 ・IRF3やIL-12p80はIgEの産生に関与	19

文献

- 1) Mancino, D. et al. : Int. Arch. Allergy Appl. Immunol., 71 : 279-281, 1983
- 2) Ng, G. et al. : Arch. Immunol. Ther. Exp. (Warsz.), 58 : 273-277, 2010
- 3) Coban, C. et al. : Cell Host Microbe, 7 : 50-61, 2010
- 4) Sharp, F. A. et al. : Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 106 : 870-875, 2009
- 5) Kuroda, E. et al. : Immunity, 34 : 514-526, 2011
- 6) Reese, T. A. et al. : Nature, 447 : 92-96, 2007
- 7) Hornung, V. et al. : Nat. Immunol., 9 : 847-856, 2008
- 8) Hutchison, S. et al. : FASEB J., 26 : 1272-1279, 2012
- 9) Schnare, M. et al. : Nat. Immunol., 2 : 947-950, 2001
- 10) Gavin, A. L. et al. : Science, 314 : 1936-1938, 2006
- 11) Dostert, C. et al. : Science, 320 : 674-677, 2008
- 12) Eisenbarth, S. C. et al. : Nature, 453 : 1122-1126, 2008
- 13) Li, H. et al. : J. Immunol., 181 : 17-21, 2008

- 14) Franchi, L. & Núñez, G. : Eur. J. Immunol., 38 : 2085-2089, 2008
- 15) Kool, M. et al. : J. Immunol., 181 : 3755-3759, 2008
- 16) Shi, Y. et al. : Nature, 425 : 516-521, 2003
- 17) Kool, M. et al. : J. Exp. Med., 205 : 869-882, 2008
- 18) Kool, M. et al. : Immunity, 34 : 527-540, 2011
- 19) Marichal, T. et al. : Nat. Med., 17 : 996-1002, 2011

<著者プロフィール>

黒田悦史：2001年産業医科大学大学院医学研究科修了，同年産業医科大学医学部免疫学教室助手。'07年カナダブリティッシュコロンビアがん研究所研究員，'09年産業医科大学医学部免疫学寄生虫学（旧免疫学教室）講師，'12年より大阪大学免疫学フロンティア研究センターワクチン学研究室特任准教授。研究テーマ：自然免疫を介した免疫制御機構の解析。現在は主にアジュバント，特に粒子アジュバントによる自然免疫の活性化機構の解析。

トップランナーに聞く

26

最先端の医療に挑む若手研究者への直撃インタビュー

核酸による自然免疫および獲得免疫の 制御機構の研究と核酸アジュバントの ワクチンへの応用研究

石井 健

独立行政法人 医薬基盤研究所 アジュバント開発プロジェクトリーダー
大阪大学 免疫学フロンティア研究センター ワクチン学 特任教授

—最先端の医療に挑む若手研究者への直撃インタビュー「トップランナーに聞く」の今月のゲストは、独立行政法人 医薬基盤研究所 アジュバント開発プロジェクトリーダーの石井 健先生です。石井先生は核酸アジュバントのワクチンへの応用研究を活発に行い、実用化に向けた基礎から臨床への橋渡し研究をされています。先生のご略歴を拝見すると、もともとは麻酔科をご専門とされていますが、どのような経緯で免疫やワクチンに関する研究を始められたのですか。

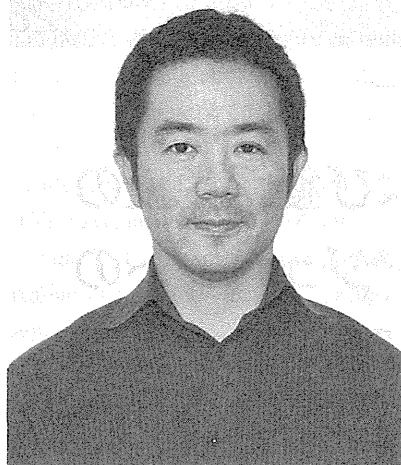
石井 研修医時代は全身管理や救命救急といった ICU で臨床をしていたのですが、研究をしたかったので大学院に入りました。横浜市立大学では、2年間ですが、学内、国内外を問わず留学して研修できるシステムがあったので、それを利用しポスドクのような形で海外のラボに留学しました。留学先は FDA でしたが、生物製剤センターは研究者を置いているユニークなラボであり、そこで大学院生としてトレーニングを受けました。そもそも免疫に興味を持っ

たのは ICU にいた頃、循環器や呼吸器疾患で ICU に来て、感染症で多くの患者さんが亡くなっており、いくら全身管理をしても防ぐことができなかったのがきっかけです。留学に際しても、免疫に興味があったので免疫の研究をしているラボを希望したところ、そのポストからワクチンのプロジェクトをやりなさいと言われました。そんなわけでワクチンを題材にして免疫の研究をすることになりました。

—FDA には大分長くおられました、そのときから DNA ワクチンの研究を始めたのですか。

石井 留学先で FDA の正式な職員にプロモートするという話があったので、留学の途中でも構わないかどうか、恩師である横浜市立大学医学部麻酔科の奥村教授（当時）と工藤助教授（当時）に相談したところ、プロモートしてくれるのならそこにいなさいと助言を頂き、長期にわたり留学しました。実際米国でワクチンの研究をしていた頃は、まさに自然免疫研究の始

1968年 東京生まれ。1993年 横浜市立大学医学部卒業、1993年 横浜市立大学医学部附属病院研修医、1995年 横浜市立市民病院麻酔科常勤医を経て、1996年より米国保健省食品医薬品局（FDA）生物学的製剤評価研究センター（CBER）ワクチン部門 客員研究員および臨床試験審査官となる。2003年 JST/ERATO 審良自然免疫プロジェクトグループリーダー、2006年 大阪大学微生物病研究所 分子原虫学分野 准教授、2010年（独）医薬基盤研究所 アジュバント開発プロジェクト プロジェクトリーダー、2010年より大阪大学免疫学フロンティア研究センター ワクチン学 主任研究者（招へい教授）。



石井先生

核酸 (DNA, RNA) の免疫学的生理活性, 核酸による自然免疫および獲得免疫の制御機構の研究, および核酸を利用したワクチン, アジュバント, 代替免疫療法開発を行っています。1996年より7年間, 米国保健省食品医薬品局 (FDA) の生物製剤ワクチン部門にて審査官としてかわりました。2003年 大阪大学微生物病研究所, 2010年4月より (独) 医薬基盤研究所のアジュバント開発プロジェクトリーダーとして上記研究を行っております。

まりの時でしたが, そのとき DNA が免疫活性を持つという仕事をしました。その DNA 受容体をセンセーショナルに発表したのが大阪大学の審良静男先生でした。その後審良先生と学会でお会いし, 先生が行っていた JST ERATO という大きなプロジェクトに呼んでいただいたのが縁で, 一緒に自然免疫の仕事をするようになりました。

—自然免疫と獲得免疫について教えていただけますか。

石井 分かりやすい言葉で言うと, ワクチンが獲得免疫を作り出す薬と言えます。ワクチンが効くようにするには, 自然免疫をしっかりと活性化しなければいけません。至極単純ですが, これが自然免疫と獲得免疫の関係です (図1)。ワクチンは, 自然免疫のスイッチを押さないとう効果は上がりません。その自然免疫のスイッチを自然免疫受容体と言っており, その1つが

Toll-like receptor (TLR) であり, それ以外にもたくさん見つかっています。

—DNA が免疫活性を持つという点について教えてくださいいただけますか。

石井 DNA は核かミトコンドリアに存在し遺伝情報を伝えるものですので, それ以外の機能があるとは思われていませんでしたが, DNA の構造や配列によってはエンドトキシンと同じくらい免疫活性があります。それが自然免疫の研究が盛んになった引き金でもあります。一番分かりやすいのは, 感染症で病原体の DNA が体に入ってくるとそれを感知して免疫を活性化するシステムです。ただそれが行きすぎると自分の DNA でも反応するようになり, いわゆる自己免疫疾患になります。DNA は遺伝情報の暗号のようなものと思われていましたが, 免疫反応などいろいろなところに DNA が関与していることも分かってきたので, DNA の概念が変わったと思います。

—免疫活性を上げるような DNA の塩基配列があるのですか。

石井 あります。米国で研究していたときに, ヒトの免疫活性を上げる DNA 配列を決めました。特許も取り, 創薬のネタになるかどうか考え, やってみたのがアジュバントで, DNA が良いアジュバントになることを見いだしました。免疫やアジュバントの研究をしている人にとっては驚きでした。

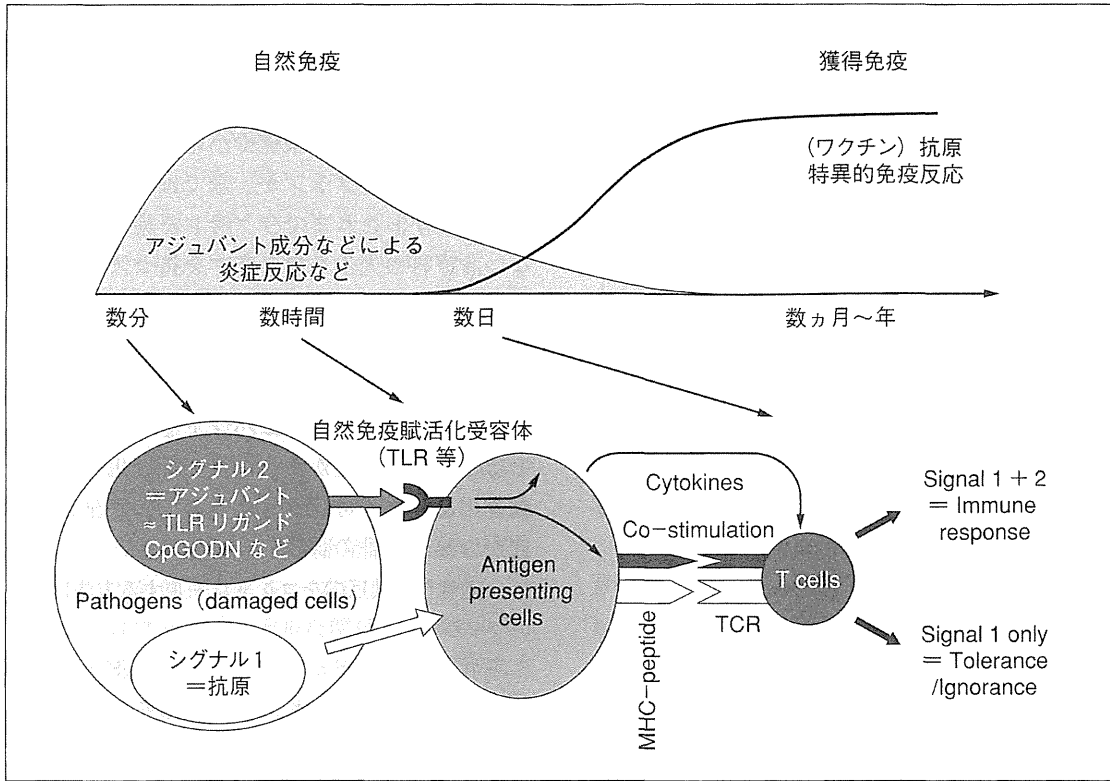
—アジュバントと言えば, 完全フロイントアジュバントというのが思い浮かぶのですが。

石井 おっしゃるとおりです。完全フロイントアジュバントは試薬としても数十年使われてきましたが, その古いアジュバントの概念が, 現在は全く新しいサイエンスになっており, 特にワクチンに関しては基礎研究から創薬研究まで盛んに行われています。

—核酸アジュバントについて, ご説明いただけますか。

石井 1本鎖 DNA の断片で 20 塩基ほどのプライマーと同じような構造で, C, G を含む特殊な配列のものをアジュバントとして開発し

図1 自然免疫が変えたワクチンおよびアジュバントの概念



ました。DNA という生体成分ですので、アルミニウムなどと異なり扱いやすいです。最も重要なのは、DNA には基礎研究の積み重ねがあるので、核酸アジュバントの効果についても研究が進めやすいという利点があります。

—DNA や核酸の研究をしている人であれば、同じように扱えるわけですね。

石井 そうですね。オリゴ核酸と言われる小さい核酸の部類に入るので核酸医薬と言っても良いかもしれません。核酸医薬は抗体医薬の次に来るものと言われており、免疫の核酸医薬として、いま研究が進んでいる分野です。

—核酸ワクチンアジュバントは従来からあるワクチンに比べてどのような利点があるのでしょうか。

石井 一番の利点と言うか臨床開発するうえで有利なのは、メカニズムがはっきりしている点です。今までのアジュバントは、なぜ効くかといったメカニズムが分かりませんでした。それに比べ核酸は、受容体とシグナルの関係とい

う、生体で何が起るかということがこれまでの基礎研究の結果からよく分かっています。核酸だから扱いやすいという以上のものがあると思います。もちろん効果が強すぎて副作用が出るようであれば利点にはなりません。今までのアジュバントがアルミニウムゲルや完全フロイントアジュバントのように何をやっているのか分からないようなものでしたから、そういう点から比較しても非常にシンプルで扱いやすいアジュバントであり、薬事法も含め臨床開発上でも非常に有利です。これまで経験則に基づいて作られてきたワクチンを、少し上のレベルに上げられると思っています。

—臨床応用についてはどのような状況ですか。

石井 現在、大阪大学微生物病研究所の堀井俊宏先生と一緒にマラリアワクチンのアジュバントとして臨床開発を進めています。実際には阪大微生物病研究会と株式会社ジーンデザインと一緒に、阪大病院で未来医療開発部とアレ

ギー内科の先生方が中心になり、医師主導型の治験を2012年度中に開始しようと思っています。まだ薬にはなっていませんが、少なくとも日本初の免疫核酸医薬になります。なお、マラリアですので将来の治験は東南アジアやアフリカで行うことになります。

—マラリアには耐性の問題がありますが、その辺はどのようにお考えですか。

石井 ワクチンはマラリア原虫の生活環に基づいて、赤血球期に発現しているタンパク質をターゲットにしています。今までワクチンがなかった領域ですので、いろいろなワクチンができると思います。今は日本の蚊帳がマラリア対策で役に立っているようですが、いずれこのワクチンが蚊帳に取って代わるものと期待しています。

—ワクチンと言えば感染症の予防、治療というイメージですが、免疫反応がかかわるような自己免疫疾患などにも使えるのでしょうか。

石井 自己免疫疾患に対してという縛りはないと思います。私のやっているのはアジュバント研究なので、体からなくしたいと思う疾患のターゲット分子の原因物質あるいは病態悪化物質が分かれば、それに対するワクチン療法は可能と考えます。つまり抗原とアジュバントを入れればワクチン療法で体からそういった物質を除去、もしくは機能を阻害できます。感染症という箍が外れて、ありとあらゆる疾患に対してワクチン療法が使用可能な時代に突入しました。実際、がんワクチンはすでに実用化に近いとされていますし、それ以外にもアルツハイマー病、高血圧、アレルギー、ニコチン中毒、避妊、肥満に対するワクチンの臨床開発が進んでおり、抗体医薬のようになってきました。今後も単純に進むとは思いませんが、抗体医薬で治るような病気はワクチンで抗体を作らせることで治る時代が来るかもしれません。いずれの疾患でも治療コンセプトは同じなので、一番の鍵となる分子はアジュバントです。つまりターゲット物質は疾患で変わりますが、アジュバントは横糸で一緒です。核酸アジュバントはモノがはつき

りしていて、誘導できる免疫もほかのアジュバントと違うのでいろいろ使えます。現在マラリアワクチンの治験を進めているところですが、がんワクチンやほかのワクチンでも共同研究が始まっています。感染症や小児科の先生しか興味なかったワクチンが、今では子宮頸がんワクチンとか、これまでワクチンを使ったことのない診療科の先生もワクチンを打つようになっていきます。このように広がりある分野なので、製薬企業も含めて盛り上がっていますが、副作用としての自己免疫が起こることも考えられます。強いワクチンアジュバントを入れれば入れるほど、自己免疫から自己炎症性疾患といった副作用を起こす可能性もあるので、安全性の研究が今後の一番の課題になりますね。

—過剰な免疫反応をコントロールする方法はないのですか。

石井 核酸アジュバントでもエンドトキシンでも、体に大量に入れば副作用を起こしますが、ワクチン効果を出す細胞だけにきちんと輸送する、アジュバントとドラッグデリバリーシステムを組み合わせることによって、特異性を上げ副作用を下げる方法が考えられます。樹状細胞だけをねらうといったことも進められ、技術的に競争の盛んな分野です。経験則のワクチン開発から、分子生物学や免疫学といった最先端の技術でワクチンを作れる時代になりました。

—2011年のノーベル生理学・医学賞は自然免疫に関する研究でした。審良先生が取れなかったのは残念ですが、自然免疫はいま非常に注目されている分野ですね。

石井 我々にとっては一番大事なノーベル賞であり、それが世に役立つとすればワクチンやアジュバントになります。その研究成果を還元していくのが我々の役目と思っています。そういった創薬をするために、阪大からここに移動してきました。まさに基礎研究と医学の結び付くトランスレーショナルリサーチをしています。

—研究を進めるうえで一番大切にしていることはどのようなことでしょうか。

石井 実験をするうえで以外に面白いと思っ

たキーワードはコントロールです。私は PhD のトレーニングを米国で受けたので、米国式の研究手法を学んだつもりですが、そのときにボスにしつこく言われたのが、コントロールをきちんと取れということでした。コントロールを取って、取って、取りまくると、本当に見たいところは実験の1割くらいになりますが、それで物の本質が見えてきます。したがって、コントロールをきちんと取ることが研究を進めていくうえで一番大事にしていることです。もう1つは、独りよがりにならないことです。米国でも研究室にいる人たちとよくディスカッションしました。ディスカッションして人に批判してもらうことが自分のためになります。もう1点はチームワークです。今の研究は一人ではできません。でも仲良しグループではだめです。研究ではプロフェッショナルな関係が大事であり、けんかするくらいディスカッションして、あとはきれいさっぱりといった関係が必要だと思います。

—これまで研究を進めていくうえで大変だったことや面白かったことはどんなことでしょうか。

石井 大変だったことと面白かったことはいつもペアでした。実験結果が予想と逆のときはボスの意向に反することになるわけですが、私の研究で面白かったのはすべてそういう案件でした。ボスに「そんなつまらない逆のことなんかやめろ」と言われたことが現在のライフワークになっています。ボスの意向と反対のデータが出たときは大変でしたが、いま考えるとそれが一番面白かったことでした。

—最近、臨床研究の必要性が言われていますが、先生のお考えは。

石井 クリニカルサンプルを使った臨床研究は必須です。免疫学は米国も日本も今はヒト免疫学一色です。裏返せば、マウス免疫学は免疫とは何かということにすごく貢献しましたが、免疫にかかわる病気の診断や治療には、マウスで得られた知識はあまり役に立ちません。マウスとヒトでは免疫システムが全く違うというこ

とを考えた場合、ヒトのサンプルで研究しないと全く役に立たないということを、免疫学から学びました。

—話は変わりますが、趣味や休日はどのようにお過ごしですか。

石井 休日は家族サービスです。キャンプのようなアウトドアアクティビティーも好きです。趣味は読書で、いろいろな分野の本を雑多に読んでいます。

—今後、どのようなことにチャレンジしたいですか。

石井 他人のやらない、流行らないけれども、個人的に重要だと思うことを見つけて、それに専念し、チャレンジしたいと思っています。流行っている研究をしないと研究費が取れませんが、私が運が良かったのは、ワクチンの研究を始めた頃はつまらない研究だったのが、今は流行のど真ん中で研究費も頂いています。今後も人のやらない、流行らないことでも、重要なところにチャレンジしたいと思っています。

—最後に若い人たちに伝えたいことをお願いします。

石井 最近、意外なキャリアが将来役に立つということを感じています。私の場合は、麻酔科の医師なのにワクチンの研究をしなければならなかったのが本当は嫌でした。また、留学先もハーバードやケンブリッジなどに行って箔を付けて帰りたいかかったのですが、FDA で医薬品の審査でした。でも今となってはその2つが私をオンリーワンのキャリアにしてくれています。初めは嫌と思っていることでも、いつか役に立つことがあります。私の知っている後輩も含めて臨床の先生は忙しくてつらいと思います。研究費で苦労され、臨床研究など日々の業務にも追われています。でも一生懸命やっていたら、いつかどこかで花が咲くと思います。人間万事塞翁が馬ということですね。

—本日はありがとうございました。

(とき：平成24年11月7日 ところ：医薬基盤研究所)

特集 最新の免疫学 ~自然免疫・獲得免疫~

7. ワクチン (アジュバント) デザインの新展開

大西元康*¹⁾・石井 健*²⁾

感染症ワクチン、がんワクチンの分野において、アジュバントの有用性が注目され、さまざまな角度からアジュバント研究が行われるようになった。さらに自然免疫の解明に伴い、アジュバントの作用機序を分子レベルで理解できるようになり、得られた知見をベースにプロトタイプのアジュバントが改良され、効果および安全性がより一層高いアジュバントの創製が展開されてきた。本稿では獲得免疫におけるアジュバントの役割を概説するとともに、近年明らかにされつつあるアジュバントのメカニズムや合成アジュバント開発の取り組みについて、自然免疫の受容体、細胞内および細胞外のシグナル伝達の観点から述べる。

1. アジュバント開発における最近の動向

2009年の新型インフルエンザ (A [H1N1] pdm09 ウイルス) のパンデミック問題から、Arepanrix¹⁾ (アジュバント: AS03) および Celtura²⁾ (アジュバント: MF59) といった、アジュバント含有のインフルエンザワクチンが特例承認された。(表1)。また、同年にヒトパピローマウイルス (HPV) による子宮頸がん予防のワクチンとして、Cervarix³⁾ (アジュバント: AS04) が国内で販売された。一方、がんワクチンの分野では、アジュバントを含有するさまざまなワクチンが国内外で開発され、アジュバントの有効性が重要視されるようになってきた。(表2)。このように、新しいアジュバントを含んだワクチンが次々と導入、開発され、その効果や安全性について注目が高まってきている。

2. 獲得免疫におけるアジュバントの役割

アジュバントとは、ワクチン抗原とともに投与して抗原に対する免疫原性を増強させることを目的に使用される製剤の呼称であり、接種回数の軽減や抗体産生の誘導、さらには細胞傷害性 T 細胞の誘導など、さまざまな効果を発揮するものである。一方、自然免疫とは病原体などの外来異物に対して早期に作用する免疫応答反応のことであり、これまでの研究から病原体由来の核酸や細胞外成分などが Toll-like receptors (TLRs), Retinoic acid-inducible gene (RIG)-like receptors (RLRs), Nucleotide-binding oligomerization domain protein (NOD)-like receptors (NLRs) および C-type lectin receptors (CLRs) などの自然免疫受容体により特異的に認識され、アゴニスト作用として細胞内の複雑なシグナル伝達を活性

*独立行政法人 医薬基盤研究所 アジュバント開発プロジェクト

¹⁾ (おおにし・もとやす)

²⁾ プロジェクトリーダー (いしい・けん) [大阪大学免疫学フロンティア研究センターワクチン学・特任教授]

■特集・最新の免疫学～自然免疫・獲得免疫～

表1 近年国内に導入された感染症ワクチンに含まれるアジュバント

各アジュバントの主成分と、それを含有するワクチンを示している。

アジュバント	主成分	ワクチン (販売元)
AS03	スクワレン+ DL- α トコフェロール+ポリソルベート 80	Arepanrix (GSK)
AS04	アルミニウム塩+ Monophosphoryl lipid A (MPL)	Cervarix (GSK)
MF59	スクワレン+ポリソルベート 80, トリオレイン酸ソルビタン, クエン酸ナトリウム二水和物, クエン酸一水和物	Celtura (Novartis)

(筆者ら作成)

表2 開発中のがんワクチンに含まれるアジュバント

各企業がどのようなアジュバントを用いてがんワクチンを開発しているのかを示している。

開発企業	開発品	アジュバント	適応	臨床 ステージ
Aphera	NeuVax	GM-CSF	乳がん	III
GSK	MAGE-A3	AS15 (QS-21, MPL, CpG)	皮膚がん	III
Immatics Biotechnologies	IMA901	GM-CSF, Imiquimod	腎細胞がん	III
Oncothyreon	Stimuvax	MPL	非小細胞がん	III
Pharmexa	GV1001	GM-CSF, Imiquimod	膵臓がん	III
Cytos Biotechnology	CYT004-MelQbG10	QbG10	皮膚がん	II
塩野義製薬	S-288310, S-488410	Montanide	膀胱がん, 食道がん	II

(Nature biotechnology 27: 129-139, 2009 より一部改変)

化させることが明らかとなった^{41,5)}。そして、シグナル伝達が活性化された結果、樹状細胞を主とした抗原提示細胞が活性化され、Major histocompatibility complex (MHC) 上に抗原由来のペプチドを提示し、それを T 細胞が T cell receptor (TCR) を介してシグナルを認識することで、T 細胞が活性化される。T 細胞の活性化には MHC-ペプチドによるシグナル1と、CD86/CD28 によるシグナル2の両方が必要であると考えられている。また、これらのような抗原提示細胞の補助刺激因子群だけでなく、周囲の細胞や抗原提示細胞自身から産生されるサイトカインも重要であり、強度や種類が T 細胞応答の方向性 (Th1, Th2, Th17 および細胞傷害性 T 細胞の誘導など) や、獲得免

疫に影響を及ぼすと考えられている⁶¹⁻⁶⁾。このように、ワクチンの抗原に由来するシグナル1、アジュバントに由来するシグナル2および抗原提示細胞から産生されるサイトカインが獲得免疫に重要であると言える。(図1)。

3. Alum のメカニズム

アジュバントは臨床で長年使用されているにも関わらず、メカニズムが十分に解明されていないものが多い。その中の一つが1920年代から世界中で広く使用され続けている Aluminum-based adjuvant (Alum) である。Alum はアルミニウムに吸着された抗原が徐々に体内に放出されること(徐放作用)でアジュバント効果を示していると長

TLRs : Toll-like receptors, RIG : Retinoic acid-inducible gene

RLRs : Retinoic acid-inducible gene (RIG) -like receptors

NOD : Nucleotide-binding oligomerization domain protein

NLRs : Nucleotide-binding oligomerization domain protein (NOD) -like receptors

CLRs : C-type lectin receptors, MHC : Major histocompatibility complex, TCR : T cell receptor

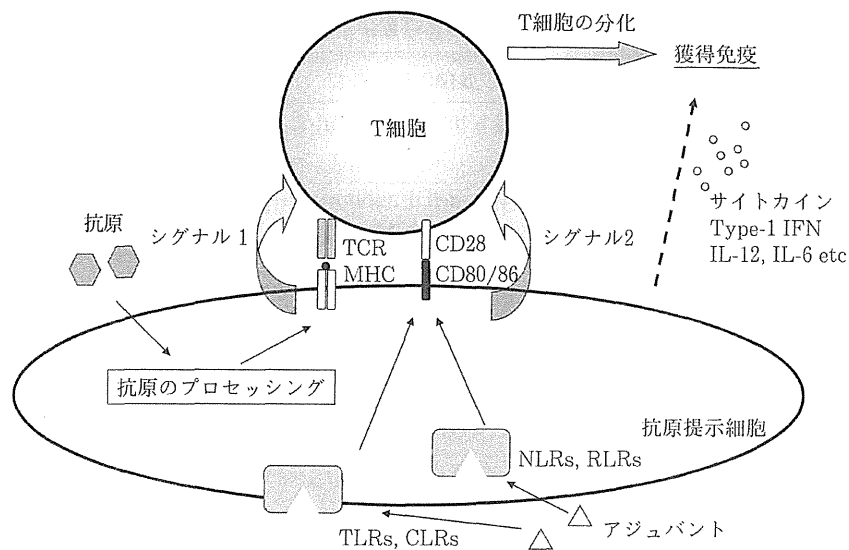


図1 ワクチン・アジュバントによる獲得免疫誘導

抗原由来のシグナル1, アジュバント由来のシグナル2, そしてアジュバントの刺激により抗原提示細胞から分泌されるサイトカインがT細胞の分化や獲得免疫に影響を与える。

TCR : T cell receptor, MHC : Major histocompatibility complex

IFN : Interferon, IL : Interleukin, TLRs : Toll-like receptors

CLRs : C-type lectin receptors

NLRs : NOD (Nucleotide-binding oligomerization domain protein)-like receptors

RLRs : RIG (Retinoic acid-inducible gene)-like receptors

(筆者ら作成)

年考えられていた。しかし、近年の研究から、Alumは①可溶性抗原と数 μm の結晶体を形成することで抗原提示細胞に取り込まれやすくなり、抗原取り込み率が上昇することや⁹⁾②抗原提示細胞において自然免疫受容体であるNACHT, LRR and PYD domains-containing protein 3 (NALP3)を介してインフラマゾームと呼ばれる炎症反応を活性化させることが分かってきた¹⁰⁾。またAlumはTh2応答を強く誘導し、Immunoglobulin E (IgE)産生も誘導することが知られている。Th2応答の誘導メカニズムに関しては、①Alum作用後に非受容体型チロシンキナーゼであるSykを介してプロスタグランジンE2などが誘導され、結果としてTh2の誘導が起こることや¹¹⁾、

②Alum接種による組織障害により宿主由来のDeoxyribonucleic acid (DNA)が放出されTANK-Binding Kinase 1 (TBK1), Interferon regulatory factor 3 (IRF3)を介してIgE産生が誘導されることなどが分かっている¹²⁾。このように、アジュバント作用に関してさまざまなメカニズムが明らかになりつつある。そのため、解析から得られた知見を基盤に効果と安全性がより一層高い次世代のアジュバントが創製されることを期待したい。

4. 合成アジュバントの開発

近年、病原体由来のさまざまな天然物が自然免疫の受容体のアジュバントであることが分かり、