

厚生労働科学研究委託費（新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業）
委託業務成果報告

分担研究報告書

SF-10アジュバントの免疫増強作用機序の解析に関する研究

研究分担者 木戸 博 （徳島大学疾患酵素学研究センター 特任教授）
研究分担者 亀村 典生 （徳島大学疾患酵素学研究センター 特別学術研究員）
研究協力者 金 恵珍 （徳島大学疾患酵素学研究センター 特別学術研究員）

研究要旨

代謝回転の速い生体成分の肺サーファクタントに粘膜アジュバント活性を見出し、この肺サーファクタントに類似した人工合成肺サーファクタント SSF に増粘剤の Carboxy vinyl polymer を加えて、SF-10 アジュバントができている。SF-10、SSF には樹状細胞を刺激する作用は認められないが、インフルエンザ HA ワクチンとの共存下に鼻腔の分泌型 IgA 抗体と血液の IgG 抗体を著明に誘導して、その誘導効果は世界のトップレベルであるが、炎症性反応等の副作用は全く見られない。これまでに報告されているほとんどのアジュバントでは、アジュバントの Efficacy が上がれば上がるほど、Safety に問題が生じている。これまでのアジュバントとは異なる SF-10、SSF の作用機序に焦点を合わせて解析が行われた。

SF-10、SSF は、樹状細胞に抗原を効率良く運んで、自らは速やかに細胞内で分解されて免疫系への過剰な刺激を引き起こさない仕組みが明らかになってきた。樹状細胞に取り込まれた HA 抗原は、これまでに明らかになっている 3 つの抗体誘導経路の全てを動員して抗体誘導を引き起こしていることが確認された。具体的には、T 細胞非依存性の鼻腔局所での B 細胞の IgA クラススイッチ促進機序の一つとして、BAFF の転写効果が確かめられた。一方、T 細胞依存性の経路では、MHC class II を介する CD4⁺T 細胞依存性の液性免疫系の増強効果と、MHC class I を介する CD8⁺T 細胞依存性の細胞性免疫系の発動効果である。これら 3 つの抗体誘導経路の促進は、アジュバント単独で樹状細胞を強く刺激する Poly(I:C) でも同様に認められている。これらのことから、安全な SF-10 アジュバントの効果は、効果的な抗原の運搬能力と、細胞内での速やかな分解による過剰な免疫系の刺激の無いことに由来し、SF-10 の抗体誘導効果の有効性は、Poly(I:C) と同様に、T 細胞非依存性と T 細胞依存性の両面からの作用に由来すると考えられた。今後さらなる詳細な解析を進める。

A. 研究目的

これまでに開発された主要な粘膜アジュバントは、樹状細胞を直接刺激して免疫誘導効率を増強するアジュバントと、樹状細胞への抗原の運搬効率を増強させるアジュ

バントの 2 種類に分けて考えることができる。多くのアジュバントは前者に属し、抗原が存在しなくても、アジュバント単独で樹状細胞を刺激する。そのためこのようなアジュバントは一般に、アジュバントの有

効性が強くなればなる程、自己免疫等のアジュバント病のリスクが高まって安全性に問題が現れ、安全性と有効性の両者を同時に達成させることは困難であった。この問題は、今回提案する SF-10 アジュバントの出現により、解決の方法が見えてきたと考えている。具体的には、アジュバントを代謝回転の速い（分解され易い）ヒトの生体成分に限定して、過剰な樹状細胞の刺激を回避することで、安全性を確保しながら、細胞内に抗原情報をしっかりと導入する方法である。以上の条件を満足する生体成分粘膜炎アジュバントとして、肺サーファクタントを発見し、その人工合成品の SSF を完成させ、さらに増粘剤の Carboxy vinyl polymer (CVP) を加えて、SF-10 アジュバントが完成した。

B. 研究方法

a . 樹状細胞への抗原の取り込み促進機序の解析

樹状細胞の培養系で、インフルエンザワクチン抗原の SF-10 アジュバント（人工合成肺サーファクタント SSF+ 増粘剤 Carboxy vinyl polymer (CVP)）による取り込み促進機序の解明が実施された。細胞培養系での実験には増粘剤の CVP が不用であることから、SF-10 の代わりにアジュバントとして SSF を、抗原にはインフルエンザ haemagglutinin (HA) を主成分とするスプリットワクチン抗原を用いて作用機序を解析した。

b . 局所免疫での IgA 抗体誘導、全身免疫での IgG 抗体誘導におけるクラススイッチ促進機序の解析

樹状細胞に取り込まれた抗原シグナルが、その後の T 細胞の活性化と B 細胞のクラスス

スイッチの促進にどのように伝達され、抗体誘導の増幅に繋がるかを検討した。今年度の研究では、抗原シグナルの伝達の最初の過程を構成する機序を明らかにするため、マウス骨髄培養細胞から分化させた樹状細胞を用いて、局所免疫と全身免疫へのシグナル伝達を解析した。また、これまで細胞性免疫の作用機序解析には抗原として ovalbumin (OVA) が良く使用されていたことから、HA 抗原以外に OVA を抗原として利用して作用機序解析を実施した。

(倫理面への配慮)

本研究は、徳島大学動物実験委員会の承認を受け、その指針に従い実施した。

C. 研究結果

a . 樹状細胞への抗原の取り込み促進機序の解析

7 週齢の BALB/c マウスの大腿骨より骨髄細胞を採取して、GM-CSF/IL-4 添加培地で 7 日間培養して樹状細胞に分化した細胞を、Anti-CD11c-conjugated magnetic beads を用いて選択的に採取して用いた。この実験系では、培地に添加する HA-SF-10 は CVP の増粘効果で塊となって均一に培地中に分散しないため、HA-SSF の条件で樹状細胞への抗原の取り込み促進機序の解析を実施した。HA の樹状細胞への取り込みは、図 1 に示すように温度依存性で、取り込み促進効果はエネルギー依存性であることが示唆された。37 °C の条件で、HA 単独に比べて HA-SSF は約 10.5 倍の促進効果を示した。

次に、HA を fluorescein isothiocyanate (FITC) で、SSF を ATTO488 でラベルして、細胞内に取り込まれるスピードをモニターした。その結果、図 2 に示すように、添加後 5 分間の Lag の後に HA の細胞内への取り込み

は SSF によって急速に促進され、1 時間内では HA 単独の取り込みに比べて約 10 倍の促進効果を示した。HA 蛍光ラベルと SSF 蛍光ラベルの細胞内取り込み過程で、両者は常に共存していることから、HA-SSF は結合したまま細胞内に取り込まれていることが判明した。さらに細胞内へ取り込まれた後の経過では、図 3 に示すように SSF は HA に比べて速やかに消失するだけでなく、細胞内の局在も両者は異なってくることから、別々のオルガネラで分解されると推定された。HA は最終的には微粒子にまで分解された。

次に SSF の HA 取り込み促進効果の作用機序を解析するために、マウス骨髄由来の樹状細胞 (5×10^5 cells) にナトリウムチャンネル阻害を介したエンドサイトーシス阻害剤の Amiloride、クラスリン依存性エンドサイトーシス阻害剤の Chlorpromazine、アクチン重合阻害剤の Cytochalasin B、Cytochalasin D をそれぞれ 1 時間添加して蛍光色素 ATTO488 標識 HA の取り込みをフローサイトメトリーで検証した。阻害剤無添加の HA+SSF の細胞内への取り込みを 1 とした時の、各種条件下の取り込み抑制効果を図 4 に示している。これらの中で、Amiloride が濃度依存性に HA の取り込みを阻害していることから、SSF による HA の取り込み促進効果は、Amiloride で抑制されるマクロピノサイトーシスと推定された。なお Cytochalasin B を添加した実験系では、僅かな阻害傾向が見られたが、統系学的有意差はなかった。

HA 抗原を取り込んだ樹状細胞では、樹状細胞の活性化マーカーの CD86 の発現が増加することを報告している。そこで図 4 と同じ条件下で細胞を処理した時の、樹状細胞表面の活性化マーカー CD86 を指標に各種阻

害剤の効果を検証した結果を図 5 に示す。図に示すように、Amiloride の処理のみで CD86 の発現レベルが有意に減少しており、SSF は HA 抗原をマクロピノサイトーシスで細胞に取り込んで抗原シグナルを発現していることが判明した。

b . 局所免疫での IgA 抗体誘導、全身免疫での IgG 抗体誘導におけるクラススイッチ促進機序の解析

樹状細胞に取り込まれた抗原シグナルが、その後の T 細胞の活性化と B 細胞のクラススイッチの促進にどのように伝達され、抗体誘導の増幅に繋がるかを検討した。これらの中でも、T 細胞非依存性に鼻粘膜局所で樹状細胞から直接 B 細胞に抗原シグナルが伝達されて IgA 産生のクラススイッチが促進される系と、T 細胞依存性のシグナル伝達系が知られている。

図 6 に T 細胞非依存性の抗原シグナル伝達系に關与すると言われる因子群、BAFF、APRIL、TACI、BAFF-R を示している。調べた 4 種に因子の中で、BAFF の転写のみが図 7 に示すように HA+SSF によって増加していた。またこの実験では、HA 抗原以外に食物アレルギーワクチンを想定して、卵の主要な食物抗原である Ovalbumin (OVA) を添加した場合も検証しているが、HA と同様 OVA でも BAFF の発現は増加していた。なお、この実験ではアジュバント単独で樹状細胞を刺激することが報告されている Poly(I:C) を添加して Positive Control としている。Poly(I:C) は、抗原非存在下に単独で著明に樹状細胞を刺激してその効果は長時間持続することを確かめている (データ非表示)。このことは、樹状細胞を刺激する図 2 に示したアジュバント群が、その副作用として自己免疫疾患を誘導することに関係してい

ることを示唆するかもしれない。

抗原を取り込んだ樹状細胞から T 細胞を介して抗原シグナルが伝達されるさいに参与するとされる MHC class I と MHC class II のシグナル伝達系を図 8 に示す。従来の研究で、HA+SSF で MHC class II のシグナル伝達が増強されることを報告していることから、今年度の研究では MHC class I を介する細胞性免疫系への関与を検証した。

図 9 に示すように樹状細胞の小胞体への抗原の取り込みに関与する因子の TAP1 の発現が有意に増加していた。HA+SSF 以外でも OVA+SSF でも同様に増加しており、この TAP1 の増加は Poly(I:C) でも認められた。

TAP1 を介して小胞体に取り込まれた抗原は抗原ペプチドにまで分解され、さらに抗原ペプチドは図 10 に示すように、樹状細胞の MHC class I 上に提示され、CD8⁺ T 細胞に抗原情報は伝達される。このように活性化された CD8⁺ T 細胞は、インターフェロン (IFN) を産生する細胞障害性 CD8T 細胞に分化する。抗原情報によって活性化された CD8T 細胞 (細胞障害性 CD8T 細胞) が産生されているかを次に検証した。BALB/c マウスに生理食塩水、HA 抗原、HA+SF-10、HA+Poly(I:C) のそれぞれを 3 回点鼻した 4 群から鼻腔内細胞を収集して、抗 CD8 陽性、抗 IFN 産生細胞を測定した結果を図 11 に示す。樹状細胞からの抗原情報が CD8T 細胞に伝達され、活性化を受けてインターフェロン (IFN) を産生している細胞障害性 CD8T 細胞の比率が棒で示されている。生理食塩水や HA 単独投与に比べて HA-SF-10 投与群と HA-Poly(I:C) 投与群では細胞障害性 CD8T 細胞が増加していることがわかる。さらに抗原情報を刷り込まれた CD8T 細胞の測定系として汎用されている OVA/MHC Tetramer を用いた測定を同様に実施した。

ここでは、BALB/c マウスに生理食塩水、OVA 抗原、OVA+SF-10、OVA+Poly(I:C) のそれぞれを 3 回点鼻した 4 群から鼻腔内細胞を収集して、図 12 に示すように抗 CD8 陽性 OVA/MHC Tetramer 結合細胞をカウントして棒にしめした。SF-10 は Poly(I:C) と同様に OVA 抗原を認識した細胞障害性 CD8T 細胞の有意な増加を示した。

以上から、SF-10 は抗原情報を T 細胞非依存性に鼻腔局所で B 細胞の情報を伝えると共に、T 細胞依存性の経路を介して MHC class I と MHC class II に抗原シグナルを伝達して、液性免疫と細胞性免疫の両方を活性化していることが示唆された。

D. 考察

本プロジェクトでは、安全性と抗体誘導の有効性を両立させるアジュバントとして、代謝回転の速い生体成分として肺サーファクタントに注目し、肺サーファクタントに類似した大量生産可能な人工合成肺サーファクタント SF-10 を完成させて、免疫系への過剰刺激を抑制した抗原運搬体としてのアジュバントを世界で最初に完成させた。さらにアジュバントの投与を自然感染ルートにすることで、生体が持つ様々な生体防御機能をフル動員することで、極めて有効な抗体誘導効果を実験した。これまでのアジュバントでは、安全性と有効性を両立させることは困難であったが、代謝回転の速い生体成分に着目することで、安全でしかも世界で最も強力な粘膜免疫アジュバントを完成させた。本プロジェクトでは、抗体誘導効果が強力であるのに、炎症反応や自己免疫反応が認められないかについて、その作用機序を解析する目的で実施された。

SF-10 アジュバントの作用機序の解析の結果、抗体誘導については粘膜局所の樹状

細胞で観察される T 細胞非依存性の B 細胞の IgA クラススイッチ促進機序が関与していることが明らかになった。さらに抗原提示された樹状細胞から、MHC class I と MHC class II を介する抗原シグナル伝達系が共に作用して、液性免疫と細胞性免疫の両方を誘導している実態が明らかになった。このような作用を示す SF-10 アジュバントであるが、抗原の非存在下では樹状細胞の刺激作用は全くなく、抗原との共存下に樹状細胞の抗原の取り込みを促進していることが判明した。

E. 結論

安全で有効な生体成分粘膜アジュバント SF-10 の作用機序の一端が明らかになってきた。今後さらなる詳細な解析を通じて、SF-10 の安全性が代謝以外の点にもあるのか、強力な抗体誘導効果が、何に由来するかをさらに絞り込んで解析を進める。

F. 健康危険情報

なし。

G. 研究発表

<論文発表>

- 1) Horimukai K, Morita K, Narita M, Kondo M, Kitazawa H, Nozaki M, Shigematsu Y, Yoshida K, Niizeki H, Motomura K, Sago H, Takimoto T, Inoue E, Kamemura N, Kido H, Hisatsune J, Sugai M, Murota H, Katayama I, Sasaki T, Amagai M, Motita H, Matsuda A, Matsumoto K, Saito H, Ohya Y. Application of moisturizer to neonates prevents development of atopic dermatitis. *J Allergy Clin Immunol* 134(4): 824-830, (2014)

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定も含

む)

- 1.特許取得
なし
- 2.実用新案登録
なし
- 3.その他
なし

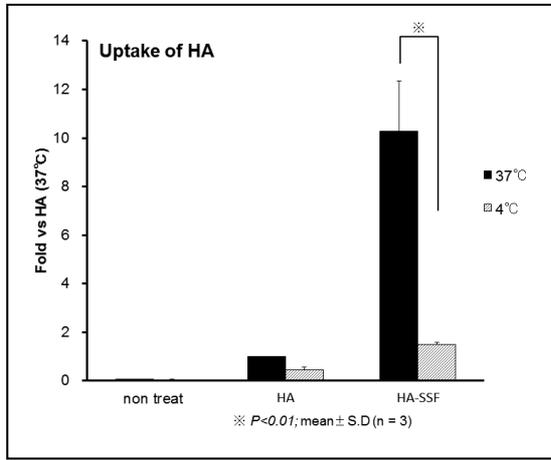


図 1 . HA-SSF による樹状細胞への温度依存性取り込み促進効果

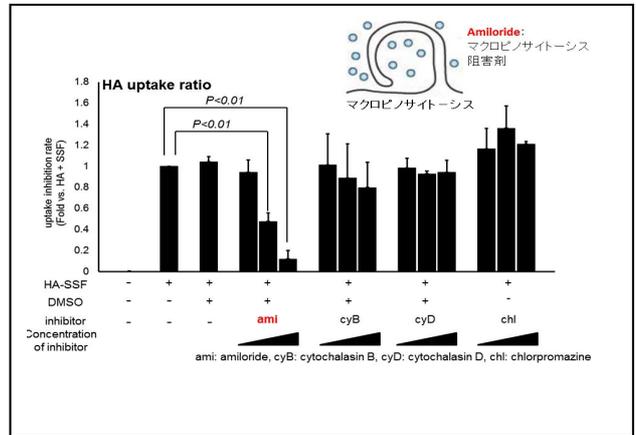


図 4. マクロピノサイトーシスによる HA-SSF の取り込み促進効果

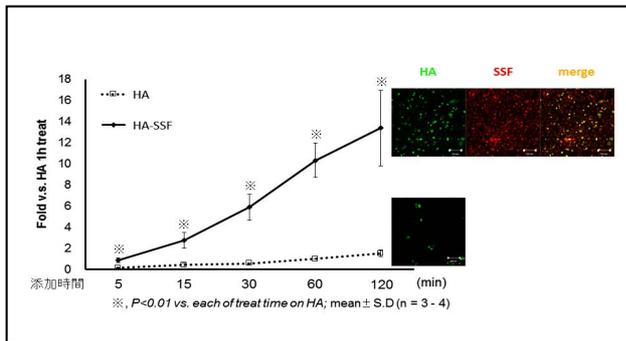


図 2 . SSF による樹状細胞への HA 抗原の取り込み促進機序

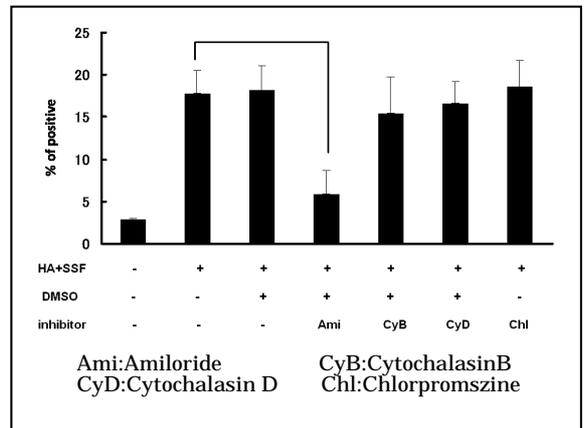


図 5. CD86 陽性細胞の割合で表示した各種エンドサイトーシス阻害剤の影響

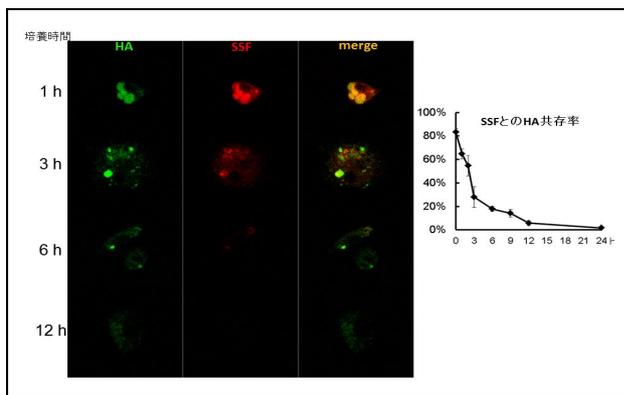


図 3 . 細胞内での HA-SSF の共存性の継続的变化

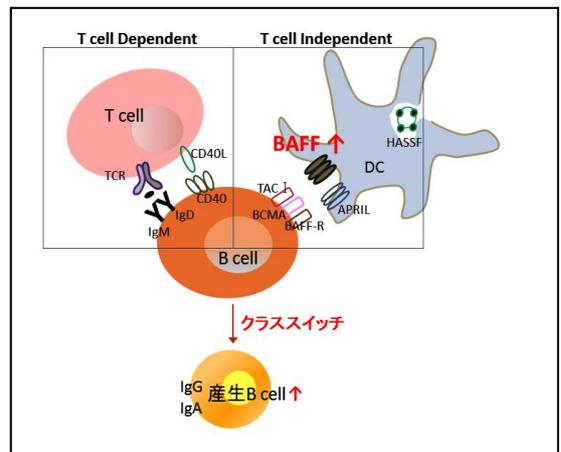


図 6. T 細胞非依存性経路を経由した粘膜局所の IgA 産生のクラススイッチ促進機序

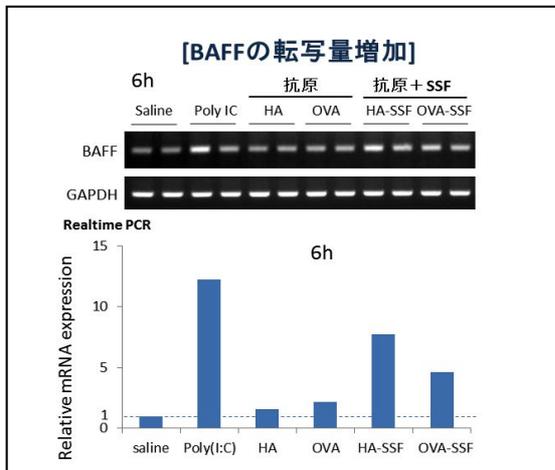


図 7. 鼻腔粘膜局所の樹状細胞の BAFF の転写促進効果

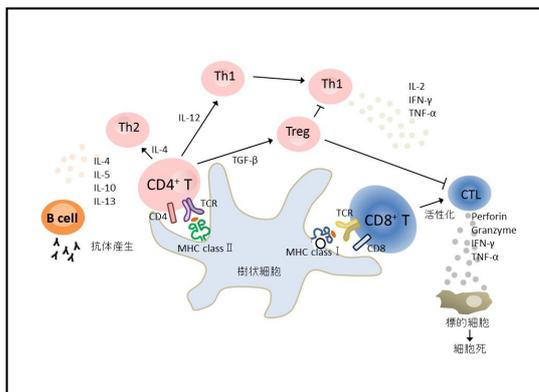


図 8. CD4+, CD8+T 細胞を経由する抗原のシグナル伝達系

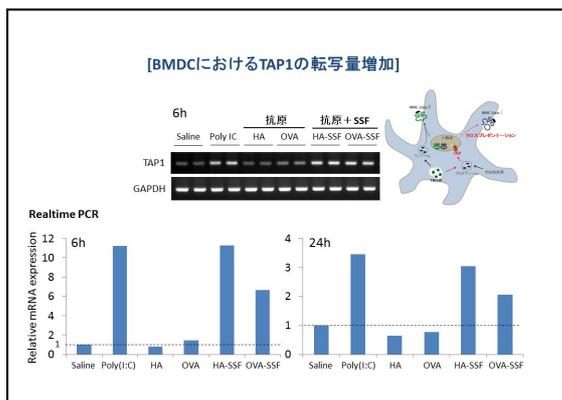


図 9. HA-SSF、OVA-SSF を処理した樹状細胞の TAP1 の発現増加

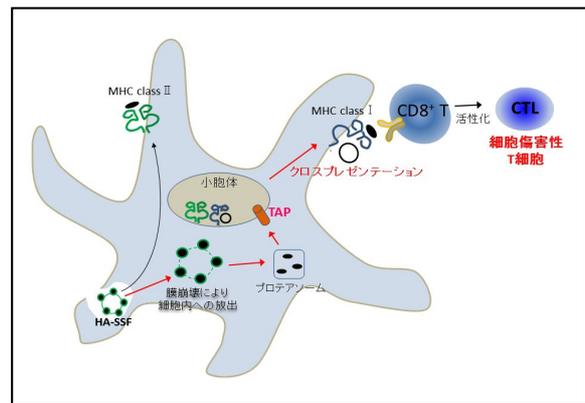


図 10. HA-SSF による MHC class I を介する CD8⁺T 細胞の活性化

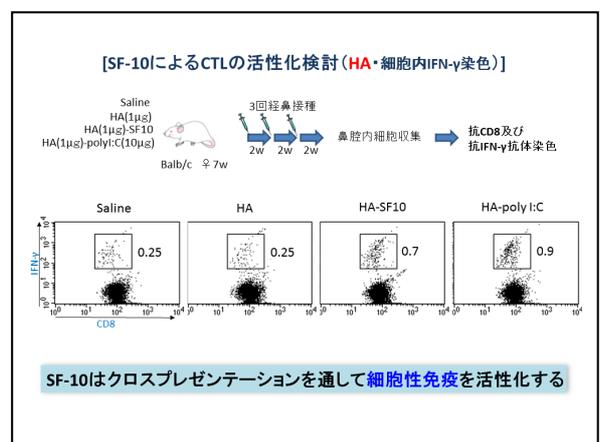


図 11. HA-SF-10 の経鼻投与による細胞性免疫の活性化の確認

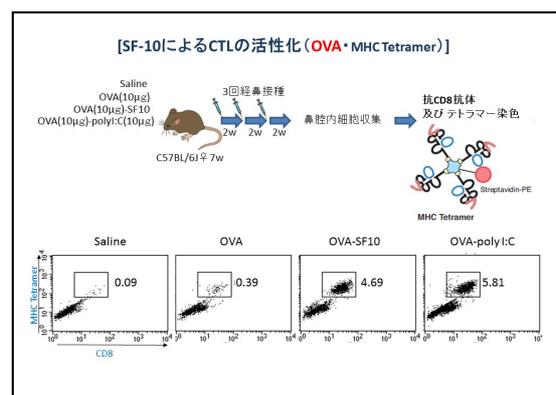


図 12. OVA-SF-10 の経鼻投与による細胞性免疫の HA-SF-10 による抗体活性化と細胞障害性 T 細胞、CTL の出現

厚生労働科学研究委託費（新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業）
委託業務成果報告

分担研究報告書
SF-10アジュバントの安全性に関する研究

研究分担者 遠藤 淳（第一三共株式会社・ワクチン事業本部 主任研究員）
篠田 香織（第一三共株式会社・ワクチン事業本部 副主任研究員）
井上 和恵（第一三共株式会社・ワクチン事業本部 副主任研究員）

研究要旨

アジュバント添加ワクチンは、一般にアジュバントによるワクチン効果の増強に伴って安全性が問題になることが多く、本研究における生体成分類似のアジュバント SF-10 についてもこの視点から安全性についての検討を行っている。SF-10 を構成する人工合成肺サーファクタント製剤の SSF は、主な GLP 試験を既に実施して安全性の確認が取れており、これに医薬品添加物として承認されている Carboxy vinyl polymer (CVP) を既定の濃度加えて、SF-10 ができている。しかし、SSF と SF-10 (SSF+CVP) のアジュバント効果が、鼻腔の IgA 抗体誘導効果において SF-10 で約 10 倍程度増強されることから、安全性に対する評価をこれらの視点から詳細に実施する必要がある。

SF-10 の安全性検討について本年度は、マウスを用いた病理学的リスク因子の解析を実施しており、病理標本作製して解析を進めている。結果が出次第、本プロジェクトの全体計画に反映させる。

A. 研究目的

これまでに世界で開発された主要な粘膜アジュバントは、図 1 に示すように Poly(I:C)、CpG、Cholera Toxin (CT) 等のように、アジュバント自体で樹状細胞を直接刺激して免疫系を活性化するアジュバント群と、樹状細胞への抗原の運搬効率を増強させる抗原運搬体としてのアジュバントの 2 グループに分類できる。これまでは一般に、前者のグループでは、アジュバントの有効性が強くなればなる程、自己免疫疾患等のアジュバント病のリスクが高まって安全性に問題が現れ、安全性と有効性を同時に達成させることは困難であった。この問題を解決するために、本プロジェクトで

はアジュバントを代謝回転の速いヒトの生体成分に限定して検索し、過剰な樹状細胞の刺激を回避することで、安全性を確保する方法を探索してきた。このような条件を満足する生体成分粘膜アジュバントは、図 1 に示す抗原運搬体としての肺サーファクタントのみである。

SF-10 は、アジュバント単独では細胞への刺激性が無いことから、アジュバント自体による投与局所の炎症性反応は認められていない。しかし鼻腔内投与であることから、臭神経を介した中枢神経系への影響を詳細に調査する必要がある。また経鼻投与法は、極めて効果的に全身の免疫系に影響して、生体防御機能を総動員することから、全身

の免疫系をも視野に入れて安全性を評価して行く必要がある。

B. 研究方法

SF-10の安全性の検討は、マウスを用いた病理学的リスク因子の解析を計画している。本年度は、高用量経鼻接種時の鼻腔組織の病理学的解析の予備検討を、マウスを用いて検討した。詳細を図2に示した。

(倫理面への配慮)

本研究は、第一三共株式会社の実験動物委員会の承認を受け、その指針に従い実施した。

C. 研究結果

SF-10の安全性の検討は、マウスを用いた病理組織学的なリスク因子の解析を実施中である。具体的には、図2に記載した実験計画に基づいて病理組織学的解析を進めている。ここで記載している Level 1, 2, 3 については、図3に示す部位に相当する。現在実験は進行中で、病理標本の解析過程にある。計画に基づいて病理組織学的解析計画に基づいて病理組織学的解析を進めている。ここで記載している Level 1, 2, 3 については、図3に示す部位に相当する。現在実験は進行中で、病理標本の解析過程にある。

D. 考察

代謝回転の速い生体成分に類似した粘膜アジュバント SF-10 の安全性の評価を進めている。世界トップレベルの抗体誘導効果を示すアジュバントでありながら、単独では樹状細胞の刺激効果を示さず、炎症性反応も示さないことから、安全性情報と作用

機序解析の全容解明が待たれる。これらの情報は、今後世界における安全で有用なアジュバント開発に極めて有用な情報を提供することが期待される。

E. 結論

生体成分粘膜アジュバント SF-10 の安全性検討として、マウスを用いた病理学的リスク因子の解析が進行中である。

F. 健康危険情報 なし。

G. 研究発表

<論文発表>
該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況(予定も含む)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

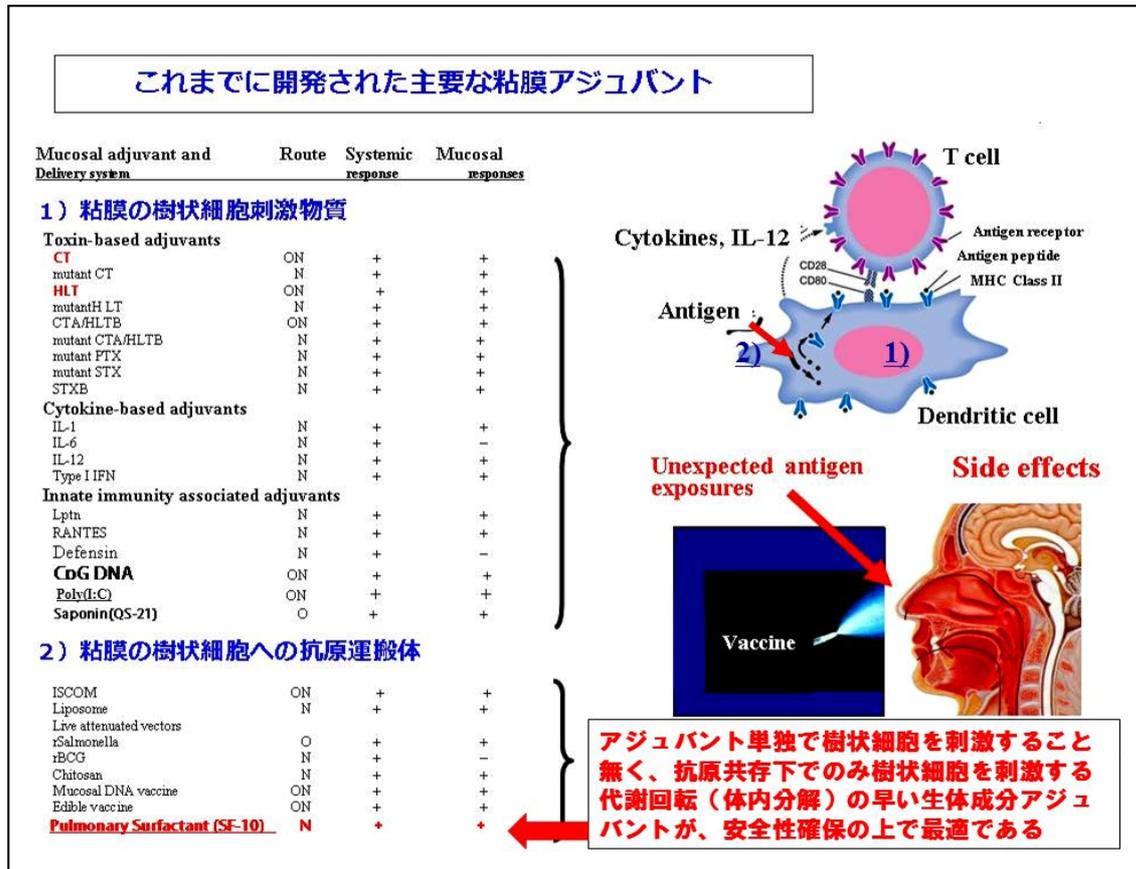


図 1. これまでに開発された主要な粘膜アジュバント

高用量頻回投与後の病理学的所見
 被検動物: Balb/C mouse female 6-week-old
 N = 3
 vaccine conc.: PBS cont, ugHA/μL
 接種法: 3 μL x 2 (each cavity) を1週間隔で3回経鼻投与

3回投与翌日に採材、頭部を10%中性ホルマリンにて固定
 (鼻腔内に10%中性ホルマリンを還流後)

脱灰処理後にパラフィンブロックを作成し、切片作成、HE染色し鼻腔内の病理学的解析を行う

| 解剖学的検査 | 採材 | 組織学的検査 |
|----------------------|---|------------------------|
| 鼻腔 (Nasal cavity) | 頭部(鼻腔含む) (Head [including nasal cavity]) | Nasal cavity (level 1) |
| | | Nasal cavity (level 2) |
| | | Nasal cavity (level 3) |
| | | Nasopharynx |

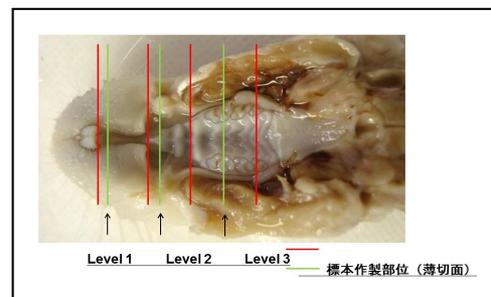


図 2. マウスを用いた病理学的リスク因子の把握実験計画

図 3. 標本切り出し部位と薄切面 (ラットの例)

厚生労働科学研究委託費（新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業）
委託業務成果報告

分担研究報告書

SF-10アジュバントの抗体誘導臓器の調査に関する研究

研究分担者 高橋 悦久 （徳島大学疾患酵素学研究センター 特任助教）
研究協力者 堺 聡子 （徳島大学疾患酵素学研究センター 研究員）

研究要旨

経鼻接種ワクチンは、気道感染症と同じルートで抗原提示され、免疫系が作動することから、接種部位である鼻腔のみならず、気道全体の粘膜、さらに腔粘膜、消化管粘膜にも分泌型 IgA 抗体を誘導すると言われていた。しかし、その抗体誘導効果の程度、詳細についてはこれまで不明な点が多かった。本年度のプロジェクトでは、鼻腔接種用に最適化された SF-10 とインフルエンザ抗原を混合して鼻腔に噴霧することで、血液中の抗インフルエンザ HA 抗体、気管支肺胞洗浄液、腔液、腸管粘膜の抗インフルエンザ HA 分泌型 IgA 抗体の分泌量を測定した。その結果、ワクチン接種部位の鼻腔とほぼ同等の濃度の IgA 抗体が腔分泌液中に含まれており、また腸管分泌液中には鼻汁濃度の約 60% であるが抗体総量では、便に含まれる量を入れると鼻汁の約 10 倍量の大量の抗体が分泌されていることが判明した。以上のことから、今後腸管感染症、腔感染症のみならず、腸管免疫を標的にした食物アレルギーワクチンや、腔粘膜免疫を標的にした HIV ワクチン、避妊用ワクチン等の開発へ、経鼻接種が有用と推定された。

A. 研究目的

インフルエンザワクチンを始めとした各種ワクチンの多くは、通常の感染ルートでは無く、皮下注射か筋肉注射型のワクチンが多く、この場合抗体誘導は TH2 タイプの液性免疫系のみが発動され、TH1 タイプの細胞性免疫系の作用は極めて弱い。さらに、初感染部位の気道粘膜の IgA 抗体の誘導は全く期待されない。次世代型のワクチン開発には、より予防効果の強いワクチンが望まれており、そのためには自然感染ルートの経鼻接種ワクチンである必要がある。経鼻接種ワクチンの場合、気道粘膜の分泌型 IgA を誘導して感染予防効果を誘導するだけでなく、血液中の IgG 抗体を誘導して肺

炎防止効果を発現する。絶えず異物にさらされて異物排除機能の優れた鼻腔粘膜の免疫系を刺激して抗体誘導を導くためには、抗原単独では不十分で免疫増強作用を示すアジュバントが不可欠である。

本プロジェクトでは、以上を背景として経鼻接種ワクチンに最適化した SF-10 を使用して、接種部位以外の全身の粘膜、具体的には気管支肺胞洗浄液、腸管粘膜洗浄液、腔洗浄液に含まれる抗体濃度を測定して、SF-10 アジュバントの抗体誘導臓器の調査に関する研究を実施した。

B. 研究方法

SF-10 アジュバントは、図 1 に示す肺サー

ファクタントの成分の中から、粘膜アジュバント作用に必要な成分として、dipalmytoyl phosphatidylcholine (DPPC)、Phosphatidyl glycerol (PG)、Phosphatidic acid (PA)、Surfactant protein C (SP-C) を同定し、強い疎水性のために工業生産が困難な SP-C に代わって K6L16 ペプチドが発明されて、肺サーファクタントに類似した人工合成アジュバント (SSF) が完成した。さらに噴霧された抗原と SSF の鼻腔内での滞留効果を増強させるための増粘剤として Carboxy vinyl polymer (CVP) を加え、SF-10 が完成した。図 2 は肺サーファクタントと HA 抗原を混合した電子顕微鏡写真(A)と、HA 抗原と SF-10 を混合した電子顕微鏡写真(B)を示す。SF-10+HA 抗原の場合、CVP のポリマー鎖に HA 抗原が絡め取られて、樹状細胞に HA 抗原が効果的に運搬されて抗原提示されると期待される。このように SF-10 アジュバントと抗原との効果的な結合が重要で、そのための各製造工程でのパラメーターが検討され、再現性の良い抗原と SF-10 の安定結合が得られるようになった。

この検体を使用して鼻汁以外の気管支肺胞洗浄液、腸管粘膜洗浄液、膣洗浄液に含まれる抗原特異的抗体量を測定した。

(倫理面への配慮)

本研究は、徳島大学動物実験委員会の承認を受け、その指針に従い実施した。

C. 研究結果

本実験で使用したインフルエンザ haemagglutinin (HA)の抗体誘導効果を図 3 に示す。8 週齢の Balb/C マウス(雌) 各群 5 匹に、生理食塩水投与群、Influenza A California/07/2009(H1N1) HA (0.4 $\mu\text{g}/\text{匹}$) 群、HA (0.4 $\mu\text{g}/\text{匹}$)+SSF(4 $\mu\text{g}/\text{匹}$)+0.5%CVP

(HA-SF-10 群)、HA (0.4 $\mu\text{g}/\text{匹}$)+Poly(I:C)(4 $\mu\text{g}/\text{匹}$)(HA-Poly(I:C)群)を、2 週間間隔で 3 回経鼻投与(片鼻に 3 μL づつ)して、最終投与から 2 週後に、血液と鼻腔洗浄液を採取して、抗インフルエンザ HA 抗体の濃度を ELISA で測定して平均値と中央値で示している。その結果、生理食塩水のバックグラウンド値で、鼻汁、血液の抗 HA 抗体は、それぞれ 2-3 ng/mL、10-20 ng/mL を示したのに対して、HA 単独の 3 回投与で鼻汁、血液の抗 HA 抗体はそれぞれ 5-10 ng/mL、30-40 ng/mL 程度の増加は見られたが、SF-10 アジュバント添加の 1/1000 程度で、図に表示した $\mu\text{g}/\text{mL}$ のスケールではほぼ 0 に近い値として表示されている。これに対して、HA-SF-10 群では鼻腔の IgA 値(中央値)で 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ を、血液 IgG 値で 2765 $\mu\text{g}/\text{mL}$ を示した。この抗体誘導効果は、文献上世界で最も効果的な抗体誘導効果と言える。この抗体誘導効果は、樹状細胞を直接刺激する SSF と同量の Poly(I:C)の添加よりも、中央値で 1.6 倍(鼻汁) 2.6 倍(血液)の抗体誘導効果を示した。HA+SSF に比べると、15 倍(鼻汁) 8.5 倍(血液)を示し、鼻腔内投与の場合、CVP+SSF(SF-10)の著明な抗体誘導増幅効果を示している。CVP は単に増粘剤としてではなく、図 4 に示すように SSF との共存下に HA 抗原を効率よく樹状細胞に運搬しているためと推定される。

以上のように経鼻接種用の SF-10 に最適化したアジュバントを用いて、鼻汁の IgA と血液の IgG 以外の全身粘膜の分泌型 IgA の分泌量を測定した。具体的には、マウスの鼻腔洗浄液、気管支肺胞洗浄液、膣液、消化管洗浄液、便中の抗 HA 分泌型 IgA の定量を実施した。

8 週齢の Balb/C マウス(雌) 各群 5 匹に、生理食塩水投与群、Influenza A

California/07/2009(H1N1) HA (0.4 µg/匹)群、HA (0.4 µg/匹)+SSF(4 µg/匹)+0.5%CVP (HA-SF-10 群)、HA (0.4 µg/匹)+Poly(I:C)(4 µg/匹)(HA-Poly(I:C)群)を、2週間間隔で3回経鼻投与(片鼻に3 µL づつ)して、最終投与から2週後に、血液と鼻腔洗浄液(0.1% BSA/saline, 1mL)、肺洗浄液(0.1% BSA/saline, 2mL)、膣洗浄液(0.1% BSA/saline, 1mL)、腸管洗浄液(0.1% BSA/saline, 2mL)、糞便(盲腸内の糞便100 mgを500 µLのプロテアーゼインヒビターカクテルを含むPBS)を採取した。なお糞便を溶解する溶液に含まれるプロテアーゼインヒビターを含む各試薬の最終濃度は、10 mM phenylmethylsulfonyl fluoride (PMSF)、0.1 mM leupeptin、0.1 mM bestatin、0.1 mM E-64c、0.3 M KCl、15% dimethyl sulfoxide、0.05% Tween 20である。

図5に経鼻接種したインフルエンザHA抗原特異的分泌型IgAの鼻汁液、気管支肺胞洗浄液、腸管粘膜洗浄液、便、膣洗浄液中の濃度を示している。マウス1匹当たりの分泌総量を図6に示す。各臓器のHA抗原特異的分泌型IgA総量は、いずれの臓器においてもPoly(I:C)に比べてSF-10の誘導効果は高かった。膣液中に分泌される量は、鼻腔に分泌される総量の約半分を、さらに腸管洗浄液中には鼻腔洗浄液とほぼ同量のインフルエンザHA抗原特異的分泌型IgAが検出された。なお、糞便中には比較的大量の抗体が含まれており、生体内で最も大量の特異抗体が含まれることが判明した。これらの事は、腸管感染症、膣感染症ワクチンに経鼻接種ワクチンが有効であることを示唆している。

D. 考察

アジュバントの投与を自然感染ルートに

することで、生体が持つ様々な生体防御機能をフル動員することで、極めて有効な抗体誘導効果を実験した。

その結果、ワクチン接種部位の鼻腔とほぼ同等の濃度のIgA抗体が膣分泌液中に含まれており、腸管分泌液の抗体総量は最高で、鼻汁の抗体総量の約10倍をしめした。このことから、今後気道感染症以外に、膣感染症、腸管感染症、さらには食物アレルギーワクチンや、膣粘膜免疫を標的にしたHIVワクチン、避妊用ワクチン開発への応用が期待される。

E. 結論

SF-10アジュバントの抗体誘導臓器の調査では経鼻接種の条件下で、血液中のIgG以外に気道粘膜のIgA、膣粘膜のIgA、腸管粘膜のIgAを多量の産生していることが判明したことから、腸管粘膜ワクチン、膣粘膜ワクチンの開発に応用できることが判明した。

F. 健康危険情報

なし。

G. 研究発表

<論文発表>

- 2) Maekawa T, Kimoto T, Mizuno D, Furukawa Y, Ida M, Takahashi E, Izumo T, Ono Y, Shibata H, Kido H. Oral administration of *Lactobacillus pentosus* strain S-PT84 enhances anti-influenza virus-specific IgG production in plasma after limited doses of influenza virus vaccination in mice. *J Vaccine Immunotechnology* (2015) 2(1):5.
- 3) Hiyoshi M, Indalao IL, Yano M, Takahashi E, Kido H. Influenza A virus infection of vascular endothelial

cells induces GSK-3 -mediated
-catenin degradation in adherens
junctions, with a resultant increase
in membrane permeability. Arch Virol
(2015) 160(1): 225-234.

H. 知的所有権の出願・登録状況（予定を含む）

<特許取得>

- 1 . 特許番号:特許第 5473899 号
登録日：平成 26 年 2 月 14 日
出願番号：特願 2010-505901
出願日：平成 21 年 3 月 30 日
発明の名称：合成ペプチドを含有する
抗原薬物ビークルとこれを用いる粘膜
ワクチン
発明者：木戸博、武井恒知、水野大

<特許出願>

なし

<実用新案登録>

なし

厚生労働科学研究委託費（新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業）
委託業務成果報告

分担研究報告書
SF-10アジュバントが適用可能な抗原の解明

研究分担者 木戸 博 （徳島大学疾患酵素学研究センター 特任教授）
研究協力者 堺 聡子 （徳島大学疾患酵素学研究センター 研究員）

研究要旨

SF-10 アジュバントは抗原運搬体として作用して、抗原を樹状細胞に効率良く運搬して免疫増強機能を発揮する。そのために、SF-10 アジュバントを構成する人工合成肺サーファクタント SSF の脂質膜に、抗原蛋白が結合する必要がある。結合できない抗原には、全くアジュバント効果を示さないため、如何に SSF と抗原蛋白を安定に結合させるかが重要である。本研究では、SSF と抗原との結合の可能性を検証する方法として、カロリメーターを用いた熱力学的分子間相互作用から、結合性を評価できることを明らかにした。典型的実施例として、肺炎球菌と SSF との結合性の検証データを示す。

A. 研究目的

本プロジェクトで用いる SF-10 アジュバントの主要な構成成分である人工合成アジュバント (SSF) は、ヒト肺サーファクタントの中からアジュバント活性に必要な成分として、dipalmytoyl phosphatidylcholine (DPPC)、Phosphatidyl glycerol (PG)、Phosphatidic acid (PA)、Surfactant protein C (SP-C) を同定し、強い疎水性のために工業生産が困難な SP-C に代わって K6L16 ペプチドを発明して、肺サーファクタントに類似した人工合成アジュバント SSF が完成している。さらに、SSF の鼻腔内の滞留効果を増強させるための増粘剤として Carboxy vinyl polymer (CVP) を加え、SF-10 が完成している。抗原は、図 1 に示すように SSF と結合して、樹状細胞に運ばれなければ抗原情報は免疫系に伝えることはできない。

本研究では、SSF と抗原との結合性を評価

するシステムとして、分子間相互作用を熱力学的パラメータで測定する方法を検討した。

B. 研究方法

分子間相互作用を熱力学的パラメータで測定する測定機として、GE Healthcare の MicroCal iTC₂₀₀ (等温滴定型カロリメーター) を用いて検討した。SSF は、これまでの報告した方法に順じて、dipalmytoyl phosphatidylcholine (DPPC)、Phosphatidyl glycerol (PG)、Phosphatidic acid (PA)、K6L16 ペプチドを混合して作成した。肺炎球菌は、ワクチン用に市販されている薬剤を購入して用いた。

(倫理面への配慮)

本研究においては、倫理的配慮は該当しない。

C. 研究結果

SF-10 アジュバントによる抗体誘導の増強効果は、SSF の脂質膜に抗原が結合して樹状細胞に運ばれて、粘膜 IgA と血液 IgG 誘導を引き起こすことから、SSF の脂質膜に抗原が結合しなくてはならない。SSF の脂質膜と抗原との結合をモニターする方法の検索と、今後に向けた SSF 結合抗原の検索を実施した。

これまでに SSF と結合して、抗体誘導を導くことがわかっている抗原に、RSV ウイルス膜たんぱく質抗原、食物アレルギーワクチン抗原として OVA を明らかにしている。ここでは新たに、肺炎球菌ワクチンの開発に使用できないかを検討した。結合条件の検索には、市販の肺炎球菌ポリサッカライド抗原を溶解し、SSF を加え相互作用をカロリメーターで測定した。図 2 に示す結果から、結合定数 (K_d)、結合熱力学量 (H , S , G)、結合サイト数が計算できるため、最も結合し易い条件を検索できると推定している。

D. 考察

今回の実験では、分子間相互作用を熱力学的に解析することで結合性を検証したが、この結果が抗体誘導効果にどのように反映されるかについては未だ検証されていない。今後、動物実験による抗体誘導効果と熱力学的分子間相互作用の結果の摺り合わせを実施して、その有効性を検証する。

E. 結論

SF-10 アジュバントが適用可能な抗原のスクリーニングとその条件を、カロリメーターで検索できることを明らかにした。

F. 健康危険情報

なし。

G. 研究発表

<論文発表>

- 4) Maekawa T, Kimoto T, Mizuno D, Furukawa Y, Ida M, Takahashi E, Izumo T, Ono Y, Shibata H, Kido H. Oral administration of *Lactobacillus pentosus* strain S-PT84 enhances anti-influenza virus-specific IgG production in plasma after limited doses of influenza virus vaccination in mice. *J Vaccine Immunotechnology* (2015) 2(1):5.
- 5) Hiyoshi M, Indalao IL, Yano M, Takahashi E, Kido H. Influenza A virus infection of vascular endothelial cells induces GSK-3 β -mediated β -catenin degradation in adherens junctions, with a resultant increase in membrane permeability. *Arch Virol* (2015) 160(1): 225-234.
- 6) Pan HY, Sun HM, Xue LJ, pan M, Wang YP, Kido H, Zhu JH. Ectopic trypsin in the myocardium promotes dilated cardiomyopathy after influenza A virus infection. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 307(6): H922-932, (2014)
- 7) Yamane K, Indalao IL, Chida J, Yamamoto Y, Hanawa M, Kido H. Diisopropylamine dichloroacetate, a novel pyruvate dehydrogenase kinase 4 inhibitor, as a potential therapeutic agent for metabolic disorders and multiorgan failure in severe influenza. *PLoS ONE* 9(5): e98032. (2014)
- 8) Horimukai K, Morita K, Narita M, Kondo M, Kitazawa H, Nozaki M, Shigematsu Y, Yoshida K, Niizeki H, Motomura K, Sago H, Takimoto T, Inoue E, Kamemura N, Kido H, Hisatsune J,

Sugai M, Murota H, Katayama I, Sasaki T, Amagai M, Motita H, Matsuda A, Matsumoto K, Saito H, Ohya Y.

なし

Application of moisturizer to neonates prevents development of atopic dermatitis. *J Allergy Clin Immunol* 134(4): 824-830, (2014)

<実用新案登録>

なし

- 9) Yano M, Endo H, Okumura Y, Kido H. Ibuprofen enhances the anti-cancer activity of cisplatin in lung cancer cells by inhibiting the heat shock protein 70. *Cell Death Dis.* 5:e1027, (2014)
- 10) 木戸博: 肺サーファクタントの新たな医学応用の可能性、粘膜アジュバントへの応用とワクチン開発 分子呼吸器病 (2014)18(1):171-175.
- 11) 木戸博: インフルエンザ感染症における粘膜免疫の重要性 Annual Review 呼吸器 (2014) 24-29.

<学会発表>

1) 木戸博: インフルエンザ粘膜ワクチン開発の現状. 第88回日本感染症学会学術講演会、第62回日本化学療法学会総会 合同学会 福岡 2014.6.18-20.

H. 知的所有権の出願・登録状況 (予定を含む)

<特許取得>

1. 特許番号: 特許第 5473899 号
登録日: 平成 26 年 2 月 14 日
出願番号: 特願 2010-505901
出願日: 平成 21 年 3 月 30 日
発明の名称: 合成ペプチドを含有する抗原薬物ビークルとこれを用いる粘膜ワクチン
発明者: 木戸博、武井恒知、水野大

<特許出願>

