



## A study on the inhibitory mechanism for cholesterol absorption by $\alpha$ -cyclodextrin administration

Furune, Takahiro

---

(Degree)

博士（医学）

(Date of Degree)

2016-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6681号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006681>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 学位論文の内容要旨

### A study on the inhibitory mechanism for cholesterol absorption by $\alpha$ -cyclodextrin administration

$\alpha$ -シクロデキストリン経口摂取による  
コレステロール吸収阻害機構に関する研究

古根 隆広, 生田 直子, 石田 善行, 岡本 陽菜子, 中田 大介,  
寺尾 啓二, 坂本 憲広

神戸大学大学院医学研究科医科学専攻  
医薬食品評価科学  
(指導教員: 坂本 憲広教授)

古根 隆広

### 【背景】

$\alpha$ -シクロデキストリン( $\alpha$ CD)はグルコース6分子が環状に連なった構造をしており、環状構造の外側が親水性を、内側が疎水性を示す。この性質によって $\alpha$ CDは空洞内に疎水性物質を取り込む包接能を持ち、例えば、脂肪酸などを包接することが報告されている。

$\alpha$ CDは水溶性食物繊維として広く利用されており、体重減少、血中コレステロールや中性脂肪低減、食後の血糖値上昇抑制など様々な機能性を有することが報告されている。これらの機能の内、血中コレステロール低減の作用機序については未だ不明のままである。

血中コレステロールはコレステロール摂取量に影響を受けるとされている。摂取されたコレステロールは通常、腸管内で胆汁によって小腸液に溶解もしくは分散することで吸収が促されている。胆汁にはレシチンや胆汁酸が含まれ、これらの分子がコレステロールのミセル形成に重要な役割を果たしている。いくつかの食物繊維は血中コレステロール低減効果を持っているが、その作用機序として食物繊維が胆汁酸に吸着することによってコレステロールのミセル形成を阻害していると推測されている。しかしながら、 $\alpha$ CDはコレステロールや胆汁酸と包接しづらいため、コレステロールや胆汁酸が作用機序に関与しているとは考えづらい。一方、 $\alpha$ CDは赤血球膜からレシチンを放出させることができると報告されている。そこで、我々は、 $\alpha$ CDはレシチンへの相互作用を介してコレステロールのミセル形成に影響する可能性があると考え、食後人工腸液(Fed State Simulated Intestinal Fluids: FeSSIF)を用いた *in vitro* の系において、 $\alpha$ CDとレシチンとの相互作用やコレステロール溶解性に及ぼす $\alpha$ CDの影響を調べた。

### 【方法】

#### 1. $\alpha$ CDとレシチンとの相互作用の検討

37°CでFeSSIFに $\alpha$ CDを加えて攪拌した後に、フィルターろ過を行い、ろ液中のレシチン、タウロコール酸(胆汁酸の一種)、そして $\alpha$ CD含量を分光光度計やHPLCを用いて定量し、評価した。

#### 2. コレステロール溶解性試験

37°CでFeSSIFに $\alpha$ CDとコレステロールを加えて攪拌した後に、フィルターろ過を行い、ろ液中のコレステロール含量をHPLCにて定量し、評価した。

#### 3. コレステロール溶解性に関する各種の水溶性食物繊維の比較

上記 2.と同じ試験系を利用して  $\alpha$  CD と以下の 4 種の水溶性食物繊維のコレステロール溶解性に及ぼす影響について比較を行なった。

- ① 難消化性デキストリン
- ② グアーガム分解物
- ③ イヌリン
- ④ ポリデキストロース

なお、ポジティブコントロールとしてコレステラミンを用いた。この薬剤は胆汁酸に対する結合能を有し、血中コレステロールを下げる働きを持つと考えられている。

#### 4. FeSSIF の調製

FeSSIF は Vertzoni らが提案したものを用いた。ヒトの小腸液組成をベースに胆汁の成分であるレシチンやタウロコール酸がそれぞれ 3.75 mM、15 mM 加えられたものであり、調製したものは透明であった。

#### 【結果及び考察】

##### 1. $\alpha$ CD によるレシチン析出作用

$\alpha$  CD を 5% になるよう FeSSIF に加えて攪拌すると白色の析出物が観察された。一方、FeSSIF からレシチンを除いた溶液に  $\alpha$  CD を 5% 添加した際には析出物は生じなかった。これらの結果から、 $\alpha$  CD 添加による析出現象はレシチンが関与していることが推察された。次に、析出物を解析するためにろ液中の各成分を分析した。その結果、レシチン含量は  $\alpha$  CD の添加量に応じて減少することが判明した。2%以下の  $\alpha$  CD 添加ではレシチン含量は低減しなかったが、3%の  $\alpha$  CD 添加によって半減した。 $\alpha$  CD を 4% 添加した時、レシチンは元の FeSSIF の含量に対して 5%程度になり、5%以上の  $\alpha$  CD 添加でレシチンは検出されなかった。一方、タウロコール酸含量は  $\alpha$  CD の添加によって影響を受けなかった。 $\alpha$  CD 含量について分析したところ、析出物が生じる  $\alpha$  CD の添加条件ではその添加量に比べて低値を示し、その傾向はレシチン析出と相関が認められた。一方、FeSSIF からレシチンを除いた溶液では  $\alpha$  CD の添加量に関わらず、 $\alpha$  CD 含量は減少しなかった。これらのことから、 $\alpha$  CD の析出はレシチンに起因していると推察された。

$\alpha$  CD がレシチンを包接して析出している場合、 $\alpha$  CD とレシチン析出には相関があると予想される。そこで、 $\alpha$  CD 添加による析出現象について、ろ液中のレシチン含量と  $\alpha$  CD 含量の経時変化について調べたところ、レシチン含量と  $\alpha$  CD 含量は同時に低減し、この結果からレシチンと  $\alpha$  CD は共析出していることが示唆された。3%の  $\alpha$  CD を添加した際、レシチン含量は添加後 30 分までは直線的に減少し、その後は減少しなかった。6%の  $\alpha$  CD 添加では添

加後 5 分後にはレシチンは検出されなかった。 $\alpha$  CD 含量の減少とレシチン含量の減少には相関関係が見られ、3%の  $\alpha$  CD を添加した際、 $\alpha$  CD 含量は添加後 30 分までは直線的に減少し、その後は減少しなかった。6%の  $\alpha$  CD 添加では添加後 5 分後に  $\alpha$  CD 濃度は大きく低下し、その後は変化しなかった。これらの結果はレシチンと  $\alpha$  CD が包接複合体を形成して析出している可能性を示唆している。

そこで、析出物のモル比を求めるために、それぞれの減少量から析出物中のレシチンと  $\alpha$  CD の割合を算出した。レシチン析出量と  $\alpha$  CD 析出量は、いずれも  $\alpha$  CD 添加量依存的に増加し、5%以上の  $\alpha$  CD 添加量では変化せず、析出物中のレシチンと  $\alpha$  CD のモル比は 1:4.4 に相当することが判明した(それぞれレシチンと  $\alpha$  CD のモル比として 1:4.3 (3%  $\alpha$  CD)、1:4.5 (4%  $\alpha$  CD)、1:4.4(5%  $\alpha$  CD)、1:4.4(6%  $\alpha$  CD))。これらの結果から、レシチン 1 分子に対して  $\alpha$  CD が 4 分子もしくは 5 分子包接している可能性が考えられた。Schlenk らは脂肪酸の一種であるパルミチン酸 1 分子に対して 3 分子の  $\alpha$  CD が包接することを報告していることから、脂肪酸 2 分子を持つレシチン 1 分子に対して 5 分子の  $\alpha$  CD が包接することは十分あり得ると考えられる。

##### 2. $\alpha$ CD のコレステロール溶解度低減効果

FeSSIF にコレステロールを添加し、37°Cで攪拌するとコレステロールの溶解度が上昇したが、 $\alpha$  CD を加えた場合はその添加量依存的にコレステロールの溶解度を低減させる結果が得られた。2%以下の  $\alpha$  CD 添加ではコレステロールの溶解度は影響を受けなかったが、3%の  $\alpha$  CD 添加によって、コレステロールの溶解度は  $\alpha$  CD を加えていないサンプルの 30%程度であった。さらに 4%以上の  $\alpha$  CD 添加によってコレステロールの溶解性は  $\alpha$  CD を加えていないサンプルの 10%以下となった。 $\alpha$  CD 添加によるコレステロール溶解度低減は、レシチン析出と傾向が一致しており、FeSSIF における  $\alpha$  CD によるコレステロール溶解度低減効果はレシチンの析出効果が大きく関与していると考えられた。

##### 3. コレステロール溶解性に関する各種の水溶性食物繊維の比較

一般に市販されており、血中脂質低減効果を持つ以下の水溶性食物繊維と  $\alpha$  CD の FeSSIF におけるコレステロール溶解性に及ぼす影響について比較した。

まず、FeSSIF に及ぼす水溶性食物繊維の影響を調べるために、水溶性食物繊維をそれぞれ 5%となるよう FeSSIF に添加し、37°Cにて攪拌したところ、前述の通り  $\alpha$  CD は析出物を生じさせたが、他の水溶性食物繊維(難消化性デキストリン、グアーガム分解物、イヌリン、ポリデキストロース)はいずれも溶解した。なお、コレステラミンは元々不溶性である。

次に各水溶性食物繊維を 3%または 5%添加してコレステロール溶解性試験を行なったところ、水溶性食物繊維を加えていないサンプルと比べ、 $\alpha$  CD やグアーガム分解物、コレステ

ラミンのみコレステロール溶解度が低減する結果が得られた。 $\alpha$  CD 添加によるコレステロール溶解性への影響は前項と同様であったが、グーガムでは3%の添加では効果が見られなかったが、5%の添加で水溶性食物繊維を加えていないサンプルに対して80%の溶解率となった。コレステラミンでは3%、5%いずれの添加量でも水溶性食物繊維を加えていないサンプルに対して40%の溶解率となった。これらの結果から同一添加量あたりの比較においては $\alpha$  CDが最も高いコレステロール溶解性低減効果を持つことが示された。グーガム分解物の結果に関しては、Minekusらがグーガム分解物はコレステロールの bioaccessibility (消化液中の溶解性などに関する性質)を下げる報告しており、本研究結果と一致している。他の水溶性食物繊維については別の作用機序によって血中脂質を低減させていることが推測された。難消化性デキストリンは水溶性食物繊維を加えていないサンプルよりもコレステロールの溶解性を微増させたが、難消化性デキストリンの脂質吸収阻害効果の作用機序についてはミセル安定化が寄与していると考察されているため、その効果によって溶解性がわずかに増加した可能性が考えられた。イヌリン及びポリデキストロースもコレステロール溶解度を低減させなかった。

#### 【結論】

本研究により、 $\alpha$  CDは添加量5%という実用的な範囲内で、FeSSIFからレシチンを析出させ、その作用に伴ってコレステロールの溶解度を最大約90%低減させることができた。この結果は、経口摂取した $\alpha$  CDが小腸管腔の胆汁酸ミセルからレシチンを析出させ、小腸液が本来持つコレステロールの溶解性を間接的に下げることによって、摂取したコレステロールの吸収量を下げている可能性を示唆している。

また、FeSSIFに及ぼす影響やコレステロール溶解性に対する影響について $\alpha$  CDと他のいくつかの水溶性食物繊維を比較したところ、 $\alpha$  CDのみレシチン析出効果を示し、同じ添加量において最も高いコレステロール溶解度低減効果を示したことから、他の水溶性食物繊維に対する $\alpha$  CDの特徴的な機能性が明確となった。

論文審査の結果の要旨			
受付番号	甲 第 2583 号	氏名	古根 隆広
論文題目 Title of Dissertation	<p>α-シクロデキストリン経口摂取によるコレステロール吸収阻害機構に関する研究</p> <p>A study on the inhibitory mechanism for cholesterol absorption by α-cyclodextrin administration</p>		
審査委員 Examiner	<p>主査 Chief Examiner 古根 隆広</p> <p>副査 Vice-examiner 平井 みどり</p> <p>副査 Vice-examiner 平田 俊一</p>		
(要旨は1,000字~2,000字程度)			

(要旨は1,000字~2,000字程度)

### 【目的】

α-シクロデキストリン(αCD)はグルコースが6分子環状に連なった構造をしており、外側が親水性を、内側が疎水性を示し、その空洞内に疎水性物質を取り込む包接能を持つ。αCDは水溶性食物繊維として利用されており、体重減少、血中の総コレステロールやLDL-コレステロール低減など様々な機能性を有することが報告されているが、血中コレステロール低減の作用機序については未だ明らかにされていない。そこで、αCD摂取による血中コレステロール低減効果メカニズムの解明を目的として本研究を行った。

αCDは食物繊維であり、体内に吸収されないため、小腸管腔で機能を発揮していると考えられた。摂取されたコレステロールは通常、腸管内で胆汁酸ミセルによって小腸液に溶解することで吸収が促されている。胆汁酸ミセルはレシチンや胆汁酸などによって形成されており、コレステロールの可溶化に重要な役割を果たしている。

いくつかの食物繊維は血中コレステロール低減効果を持っていると報告されているが、その作用機序としては食物繊維が胆汁酸に吸着することによってコレステロールの可溶化が阻害されているのではないかと推測されている。しかしながら、αCDはその空洞がコレステロールや胆汁酸の構造に対して小さいため、これらの分子を包接しづらい。そのため、αCDにおいては胆汁酸やコレステロールが作用機序に関与しているとは考えにくい。一方、αCDは赤血球膜からレシチンを放出させることが報告されている。

そこで、古根らはαCDが胆汁酸ミセル中のレシチンを包接することによって胆汁酸ミセルの形成を阻害し、コレステロールの溶解度を下げるのではないかとの仮説を立て、ヒトの食後の小腸液を模した人工腸液(Fed State Simulated Intestinal Fluids: FeSSIF)を用いて、αCDとレシチンとの相互作用やコレステロール溶解性に及ぼすαCDの影響、他の水溶性食物繊維との違いについて調べた。

### 【方法】

FeSSIFはVertzoniらの報告に従って調製した。αCDとレシチンの相互作用に関する検討については、FeSSIFにαCDを加えて37°Cで攪拌し、攪拌後に目視やろ過後のろ液に含まれる各成分を分析することによって評価した。FeSSIFへのコレステロール溶解性に及ぼすαCDの影響については、37°CでFeSSIFにαCDとコレステロールを加えて攪拌した後に、フィルターろ過を行い、ろ液中のコレステロール含量を定量し評価した。また、コレステロール溶解性に関して、4種の水溶性食物繊維(難消化性デキストリン、グーガム分解物、イヌリン、ポリデキストロース)とαCDを比較した。その際、胆汁酸結合能を有するコレステラミンをポジティブコントロールとした。

### 【結果】

1. αCDは添加量依存的にFeSSIFに溶解しているレシチンを析出させた。
2. レシチンとαCDは共析出したことから、これらの分子が包接体を形成する可能性が示唆された。そのレシチンとαCDのモル比は1:4もしくは1:5であった。
3. αCDは添加量依存的にFeSSIFにおけるコレステロールの溶解度を低減させた。
4. αCD添加によるコレステロール溶解度の低減は、レシチン析出と傾向が一致していたことから、本現象にはレシチンの析出が大きく関与していると考えられた。

5. 4種の水溶性食物繊維のFeSSIFに対する影響について調べた結果、いずれも析出物を生じなかった。
6. 各水溶性食物繊維を用いてコレステロール溶解性試験を行なったところ、水溶性食物繊維を加えていない実験系に比べ、 $\alpha$ CDやグーガム分解物、コレステラミン添加した系においてコレステロール溶解度が低減し、5種の水溶性食物繊維の中で $\alpha$ CDが最も高い低減効果(5%添加時にPHGGの約5.9倍、CSAの約1.7倍)を示した。

#### 【結論】

本研究により、 $\alpha$ CDは胆汁酸ミセルのレシチンを析出させることによって、コレステロールの溶解度を間接的に低減させる機構を持つことが明らかになった。このことは、経口摂取した $\alpha$ CDが小腸管腔の胆汁酸ミセルからレシチンを析出させ、小腸液が本来持つコレステロールの溶解性を間接的に下げるこによって、摂取したコレステロールの吸収量を下げる可能性を示唆している。

また、FeSSIFに及ぼす影響やコレステロール溶解性に対する影響について $\alpha$ CDと他のいくつかの水溶性食物繊維を比較したところ、 $\alpha$ CDのみがレシチン析出効果を示し、同じ添加量において最も優れたコレステロール溶解度低減効果を示したことから、他の水溶性食物繊維に対する $\alpha$ CDの特徴的な機能性が明確となった。

以上、本研究は、水溶性食物繊維である $\alpha$ CDについて、胆汁酸ミセルとの相互作用やコレステロール溶解性低減効果について検討し、 $\alpha$ CDが有する血中コレステロール低減効果の作用機序並びに他の水溶性食物繊維との相違点を明らかにしたものであり、ヒトの腸管内で $\alpha$ CDがどのようにコレステロールの吸収を阻害し、それによって血中コレステロールを低減するかを理解する上で重要な貢献をしたものとして価値ある集積であると認める。よって、本研究者は、博士(医学)の学位を得る資格があると認める。