◇◇◇◇ 総説 (2002 年度日本食品工学会奨励賞) ◇◇◇◇

CD 包接フレーバー粉末の作成とその徐放特質

吉 井 英 文

鳥取大学工学部生物応用工学科

Formation of Flavor Encapsulated CD Powder and Its Flavor Release Characteristics

Hidefumi YOSHII

Department of Biotechnology, Tottori University, Tottori 680-8552, Japan

CDs are homogeneous cyclic oligosaccharides which can include various guest molecules in their hydrophobic cavities. The molecular inclusion of flavor compounds into CDs is one of these techniques, and is accepted as the most efficient way for protecting flavor. The minimum number of water molecules required was measured to encapsulate *d*-limonene into α -, β -, and γ -CD by means of a micro-aqueous method. Effect of ethanol on the encapsulation of flavor compounds was also investigated. Ethanol plays the autocatalytic function as water on the formation of the inclusion complex. The formation of the inclusion complex between CD and *d*-limonene was examined with kneading method in low water condition and under a high shear stress of kneading. Menthol retention in CD solution during one-droplet drying was calculated with selective diffusion theory considering the inclusion equilibrium between CD and menthol. The rate constants of flavor release rate, which were obtained by Avrami equation, were correlated with water vapor pressure.

Key words: cyclodextrin, flavor, release, powder

1. は じ め に

食品フレーバーは、食品の風味、嗜好等の品質を評価するうえで非常に重要な因子である。このため、液状食

表 1 各種包括食品粉末。

種類
オイル、香辛料、甘味料の香料粉末
酸、アルカリ等緩衝塩の粉末
脂質
酸化還元剤
酵素・微生物
人工甘味料
酵母
抗酸化剤
安定化剤
色素
縮合剤
消臭剤
アミノ酸、ビタミン剤等栄養剤

粉末化の目的・意義

A_w 、水分活性； T_g 、ガラス転移温度

図 1 粉末化の概念図。

品に含有されるフレーバーの乾燥操作中の保持機構について活発に研究が行われてきた。また、植物等から分離抽出された液体フレーバーを付加しようという試みが行われている。表 1 に、各種粉末の例を示す。液状フレーバーを賦形剤に包括粉末化する目的は、①フレーバー物質の熱、酸素および光に対する安定性の向上、②加工工程におけるフレーバーの散逸防止、③液体フレーバーを

流動性の優れた粉末とし、操作性を向上させる、④乾燥固体食品へのフレーバー添加剤としての使用、等が挙げられる。粉末化の目的をまとめた概念図を、図1に示す。本稿では、シクロデキストリンを用いたフレーバー粉末の作成と徐放特質に関する工学的特質をまとめた。

2. フレーバー包括法

フレーバー包括法は、物理的包括法と化学的包括法に大別できる。

物理的包括法

- a) 噴霧乾燥法 (Spray drying method)
- b) 凍結乾燥法 (Freeze drying merthod)
- c) 押し出し加工法 (Extrusion method)
- d) 結晶法 (Co-crystallization method)

化学的包括法

- a) 分子包括法 (Inclusion method)
- b) 相分離法 (Coacervation method)

噴霧乾燥法による粉末化は、他の方法に比べコストが低いために食品産業でもっとも用いられている。分子包括法は、環状多糖のシクロデキストリンの空孔内に包括させて複合体を形成させる方法である[1-4]。

3. シクロデキストリン (CD) の疎水性フレーバー包括機構

シクロデキストリン (CD) はグルコピラノース単位からなる α -1,4 結合の環状オリゴ糖である。CD は、図2に示すような立体的構造をしており、環状構造に由来する空孔内は疎水の性質のため各種物質と包括複合体を形成する。グルコース分子が6、7、8個結合したものを、それぞれ α -、 β -および γ -CD と呼ぶ。CD の構造特性を表2に示す。CD は、水の存在下に空孔内に疎水性化合物を包括することが知られていたが、包括複合体形成量と水分量の関係、包括複合体形成に及ぼすアルコールの影響等、包括複合体形成における系統的研究はほとんどなされていなかった。そこで、親油性フレーバー *d*-リモネンをモデル物質として、CD との包括複合体形成反応に関して基礎的検討を行なった。

図2 シクロデキストリンの化学構造。

表2 α -、 β -および γ -CD の構造特性。

	Glucose no. (-)	Cavity diameter (Å)	Water solubility at 25°C (g/100cm ³)
α -CD	6	4.5	14.5
β -CD	7	7.0	1.85
γ -CD	8	8.5	23.2

* CD 環の深さは、7.0Å である。

3.1 包括最小必要水量

CD にゲスト物質を包括させる場合の水の役割について検討するために、CD 粉末をあらかじめリモネンに懸濁させておき、そのスラリーに微量の水を添加することにより包括複合体形成量を測定した。CD 水溶液中でゲスト物質が CD 空孔内に包括されるときには、空孔内にあらかじめ存在する水分子がゲスト物質と置換すると考えられる。(反応式(1)、(2))

$CD + nH_2O \rightarrow CD \cdot nH_2O$ (1)

$CD \cdot nH_2O + Guest \rightarrow CD \cdot Guest + nH_2O$ (2)

$dR = kR (R_{max} - R) dw$ (3)

微水環境下で、ゲスト物質 CD 包括複合体形成量は、式(3)の自己触媒型反応の式で表される。ここで、 dR は、水添加量 dw のときの包括複合体増加量、 R は、CD 1mol 当りのゲスト物質包括量、 R_{max} はゲスト物質最大 CD 包括量、 w は CD 1 mol 当りの水添加量、 k は定数である。式(3)を、 $w = 0$ のとき、 $R = R_0$ の初期条件で積分して、次式が得られる。

$R/R_{max} = 1 / (1 + a \exp(-bw))$ (4)

$a = (R_{max} - R_0) / R_0$ $b = kR_{max}$ (5)

図3は、リモネンと α -、 β -および γ -CD との包括複合体形成量 R に及ぼす水分量 w の影響を検討したもので、縦軸に無次元包括量 (R/R_{max})、横軸に水添加量 w をプロットした図である。包括複合体は水分量0ではまったく形成されていないが、水分量の増加量の増加につれシグモイド状に変化する。すなわち、ここの CD に特有の水分量に対して急激に包括複合体量形成量が増大し、高水分量域で一定値に漸近する。図中の実線は、式(3)によるプロットした図である。これより、包括反応は水

図3 CD 包括複合体形成量に与える水分量の影響。

表3 α -、 β -または γ -CD と *d*-limonene 間の包接化合物を生成するのに必要な最小必要水量.

	Inclusion water molecules/cavity (molar ratio)	$W_{\min}$ calculated by Fig. 3 (molar ratio)	Released water molecules/ <i>d</i> -limonene (molar ratio)
α -CD	2	4.45	4
β -CD	7	7.43	7
γ -CD	12	9.93	8

分量に関して自己触媒型であると考えられる. 式(3)の $R/R_{\max} = 0.5$ の接線と横軸との交点を, 包接複合体形成に必要な最小必要水分量と定義すると, $w_{\min} = (\ln a - 2)/b$ が得られる[5]. 相関式の定数をもとに, α -、 β -および, γ -CD の最小必要水分量を計算した結果を表3に示す. α -、 β -および γ -CD に対して, それぞれ4.5, 7.4, 9.9 mol-H₂O/mol-CD を得た. この値は, 結晶状態のCD が包接している水がリモネンの包接により放出されたとした求めた水の量, 4, 7, 8 mol-H₂O/mol-CD に近い値であった.

3.2 包接複合体形成量に与えるアルコール添加の影響

疎水性ゲスト物質をCD に包接させる場合において, ゲスト物質を水溶性有機溶媒に溶解させたのちCD 水溶液に添加する方法が用いられている. リモネンをゲスト物質としたときの包接複合体形成量に与えるアルコール添加の影響について検討した. 包接複合体形成量の増加はアルコールの極性が高いほど大きく, アルコールが水の役割を果たしていることが判明した. γ -CD とリモネン系に関しても β -CD と同様な結果が得られたが, α -CD

に関してはメタノールを除く他のアルコールはリモネンの包接を阻害する結果を得た.

3.3 無水エタノール, メタノール存在下での包接複合体の形成

「疎水性物質のCD への包接のためには水の存在が不可欠である」と考えられているが, エタノール等の極性溶媒を用いた場合も包接複合体を作成できる. 約20種類の非水有機溶媒を対象に包接複合体形成に関して検討したところ, メタノール, エタノールが優れた溶媒であった[6].

エタノール中でのゲスト物質とCD との包接複合体形成反応式は, 以下の式で表されると仮定した.

CD の水酸基にエタノールが吸着し, その吸着がゲスト物質の包接反応を阻害すると考えた場合, ゲスト物質のCD 包接量は次式で表される.

$$R = \frac{a}{\left(1 + K_m/S + \frac{S/K_i (1 - (S/K_i)^n)}{(1 - S/K_i)}\right)} \quad (11)$$

ここで, R : ゲスト物質包接量 (mol-guest/mol-CD), S : EtOH/CD (モル比), a : 包接反応定数, K_m : 包接

図4 エタノールによる各種ゲストCD 包接複合体作成.
(◆, *d*-limonene; ■, acetophenone; ▲, 1-phenylethanol; ●, menthol)

平衡定数, K_i : EtOH 吸着平衡定数である. 上式を用いて, エタノール中のゲスト物質包接量を, a , K_m , K_i をパラメーターとして推算した. n は, α -, β -および γ -CD に対して 18, 21, 24 と仮定した. 図 4 にエタノールを溶媒とした場合の各種ゲスト物質の包接複合体量を CD に対するエタノール添加モル比に対してプロットして示す. 図 4 中の実線は, 式 (11) で求めた計算線である. 最大包接量を得るためのエタノール添加量は, 式 (11) を微分して次式を得た.

$$S_{\text{opt}} = -\frac{K_i}{6} + \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{K_i^2}{9} + \frac{1}{9g} + \frac{g}{9}} + \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{2K_i^2}{9} - \frac{1}{9g} - \frac{g}{9} + (4K_i^3 / (27 \sqrt{-\frac{K_i^2}{9} + \frac{1}{9g} + \frac{g}{9}}))} \quad (12)$$

$$g(K_m, K_i) = (54K_mK_i^5 + K_i^6 + 6\sqrt{3} \sqrt{K_mK_i^9/2} \sqrt{432K_m^2 - 9K_mK_i + 2K_i^2})^{1/3} \quad (13)$$

$$1(K_m, K_i) = -36K_mK_i^3 + K_i^4 \quad (14)$$

エタノールおよびゲスト物質の包接反応は, 競争包接反応であるとともに, 包接に対して最適エタノール添加量までは触媒的に働いていることを示している.

4. CD の包接機能を利用したフレーバー粉末の実験

CD 包接複合体制成には, CD の飽和溶液中で包接複合体を作成する飽和溶液法, CD に水を加えてスラリーにしたのち, ゲスト物質を添加, 混練し包接複合体粉末を得る混練法, CD または CD を含む多糖水溶液とゲスト物質を高速ホモゲナイザーで攪拌し, これを噴霧乾燥して包接複合体を含む粉末を得る噴霧乾燥法[7]などがある. 包接複合体粉末を飽和水溶液法で作成する場合, CD の水への溶解度がきわめて低いいため, 包接複合体粉末の分離の負荷が過大となる. 筆者らは, 最小包接水分量に近い低含水率に調整した CD スラリーとリモネンを 2 軸混練機で包接複合体制成を行った[8]. また, 噴霧乾燥時のフレーバー散失を防ぐ目的で, CD により液状フレーバーを包接する場合の工学的手法を検討した.

4.1 湿式混練法

2 軸混練法で CD スラリーとゲスト物質を混練した場合, 混練せん断力の効果が包接量の増加となって表れる. 図 5 に低水分量域 (0 から 25 mole-water/mole-CD) での湿式混練法と微水系手法でリモネンと β -CD の包接量を示した. 図中の実線は微水系手法を用いた場合の包接量を示したものである. 水分量が 10 以下で, 混練法 (○) の場合と微水系手法の場合で著しい相違がある. 混練試料に糖脂肪酸エステル (界面活性剤) を添加して, 混練せん断力をほぼ 0 とした場合, ●で示すように微水系手法の値と一致した. このことから, 図 5

図 5 リモネン包接に与える混練せん断力の影響.

の○と実線の違いは混練せん断力に起因するものでないかと考えられる[9]. 低水分量条件での包接複合体制成を考えた場合, 混練トルクが大きいため混練機への負担が大きくなる. そこで, 3.2 で記載したアルコール添加による包接量促進効果を利用して, リモネン, β -CD 系にエタノールを添加して, 混練せん断力が著しく低い条件での包接量を測定した. この 3 成分系での包接量は, 混練せん断力量とともに減少したが, 微水系手法の場合に比較して高い値となった. この場合の包接量は, せん断力に起因する包接量と水, エタノール添加量に起因する包接量の和で推算できることがわかった.

精製された CD は食品素材としては高価であるが, CD 飴のような CD とマルトデキストリン (MD) 混合物は安価である. そこで, CD と MD の混合粉末を用いて, 湿式混練法でリモネンを包接することを試みた[10]. 混合粉末を用いた場合, 真に CD に包接された量は, 粉末 X 線ディフラクトグラムにより包接体の結晶量を測定することにより, MD 中にトラップされたりリモネン量と分離測定することが可能であった[11].

4.2 噴霧乾燥法[12]

噴霧乾燥は, 粉末食品を作成する手段として多用されている. この乾燥操作中のフレーバー等の保持は, 製品品質の評価のうえから重要である. 乾燥中のフレーバー散失防止の一手法として, CD によるフレーバー包接能を用いた. 図 6 は, メントールを含むマルトデキストリン水溶液の単一液滴乾燥における CD 添加効果を示したものである. 図の縦軸は液滴中の初期メントール量と乾燥後のメントール量の比 (残留率) を表し, この値が大きいほど乾燥中の散失が阻止されていることを示している. β -CD を添加した場合, メントールの散失が著しく阻止されていることがわかる. しかしながら, α -や γ -CD ではほとんど効果がない. このように, CD によるフレーバーの散失阻止効果は, フレーバーの種類と CD の組み合わせによって著しく異なる. さらに, 筆者らは, メントールと CD との包接平衡を仮定し, 選択拡散理論を用いることにより, 乾燥後のメントールの残留率が推

図6 CD 包接メントールの乾燥中の保持効果。
(ρ , α -CD; $\circ$, β -CD; $\square$, γ -CD; θ , MD のみ、
乾燥温度: 70°C, MD: 10wt%)

算可能であることを示した。

メントール残留率の簡易計算法[12]

液滴中のメントールが次のような過程で散失するものと考え、メントール最終残留率の簡易計算を行った。

乾燥前の液滴中では遊離メントールと包接メントールとは式(11)の平衡状態にある。ここで、Me, β -CD, $\text{Me} \cdot \beta\text{-CD}$ は、それぞれメントール、 β -CD および両者の複合体を表す。乾燥の進行とともに、遊離メントールのみが液滴表面に分子拡散し蒸発する。液滴内では、遊離メントールの減少に伴い式(12)の平衡がくずれ、非平衡的に包接メントールは遊離メントールに解離する。包接メントールが遊離メントールに解離する速度は、包接メントール濃度の1次式に比例すると仮定する。遊離メントールが液滴内を分子拡散によって移動すると考えると式(13)が成立する。

$$\frac{\partial C_M}{\partial t} = D_{\text{app}} \left(\frac{\partial^2 C_M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_M}{\partial r} \right) + k C_{\beta M} \quad (16)$$

$$\frac{C_M}{C_{M0}} = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \exp \left(- \frac{\pi^2 D_{\text{app}} t_c}{R^2} \right) \quad (17)$$

ここで、 C_M , $C_{\beta M}$, D_{app} および k はそれぞれ遊離メントール濃度、メントール複合体濃度、遊離メントールの拡散係数および解離速度定数である。 D_{app} は、CD を含有しない場合の時間 t におけるメントール残留率から式(14)によって算出できる。ここで、 C_{M0} , t_c , R はそれぞれ遊離メントール初期濃度、表面蒸発期間の時間および液滴半径である。以上の式を用いて、メントール最終残留率を以下の手順で計算した。

- 1) 表面蒸発時間 t_c と最終残留率のデータから、メントールの見掛けの拡散係数 D_{app} を式(14)で計算する。
- 2) 包接メントールの解離が式(13)に従って起こると考え、平衡定数をヘッドスペース実験結果より求め、包接メントール濃度および遊離メントール濃度の初期値を計算する。
- 3) 遊離メントールの液滴内濃度分布は式(13)を差分化して計算し、表面蒸発期間が終了する t_c における遊離

図7 メントール最終残留率に及ぼす β -CD 添加効果。
(実線は、11-13 式によって算出した計算値である)

メントール濃度を計算する。

- 4) t_c における遊離メントール量と包接メントールの和を初期メントール量で割った値を最終残留率とする。

図7は、乾燥温度 70°C, MD 濃度 10 ~ 30 wt%, β -CD 添加量 0 ~ 5 モル倍の場合のメントール残留率の測定結果と簡易計算結果の比較したものである。両者はよく一致しており、本手法の有用性を示唆している。

4.3 分子包接フレーバーの徐放特性

抗菌物質、香気物質などシクロデキストリン (CD) の包接機能を利用して固体粉末化し、昇華、酸化等に関する保存安定性を高める研究がなされている。しかし、包接化されたゲスト物質の徐放特性や安定性については、その応用上の重要性に関わらず研究例は少ない。抗菌物質であるイソチアン酸アリル (AITC)、ヒノキチオールおよびリモネンを包接した各種 CD 粉末からのフレーバー徐放過程を測定した。AITC を例として包接フレーバーの徐放速度に与える CD の種類、関係湿度と温度の影響を詳細に検討した[13]。図8に示すように、AITC の徐放速度は $\gamma \approx \beta > \alpha$ -CD の順に高くなった。とくに α -CD の徐放速度はきわめて低い。これは α -CD の分子空洞直径が AITC の分子サイズにフィットしているた

図8 AITC 分子包接フレーバーの徐放特性。

図9 分子包接フレーバーの徐放特性に与える湿度の影響。

めと考えられるが、定量的な検討は行っていない。図9は、温度60℃におけるβ-CDに包接されたAITCの徐放速度に与える関係湿度の影響を検討したものである。徐放速度は関係湿度に顕著に依存し、とくに60%以下の低湿度域における変化が大きいことがわかる。CDへゲスト分子が包接されるのに水の存在が不可欠であることは前述したが、包接されたゲスト分子の脱離（徐放）にもまた水の存在が深くかかわっていることがわかる。これに関する分子論的な検討は行っていないが、包接されたゲスト分子と水分子との交換が起こるのではないかと考えられる。CDとゲスト物質の組み合わせ、温度、関係湿度によって複雑に変化する徐放速度を解析するため、固気・固液系の反応速度解析に用いられるAvrami-Erofeev式を用いた。

$$R = \exp[-(kt)^n] \quad (18)$$

式(18)中の R は粉末中のAITCの残存率、 t は時間、 k は徐放速度定数、 n は徐放機構を表すパラメーターである。式(18)から、 $\ln(-\ln R)$ を $\ln t$ に対して点綴すると直線の傾きと切片から n と徐放速度定数 k が得られる。種々の温度および関係湿度条件下における徐放速度定数 k を、空気中の水蒸気濃度に対して点綴した結果を図10に示す。 k は水蒸気濃度によって良好に相関されている。また、βおよびγ-CDの k はα-CDの k に比べてきわめて低い値であるが、水蒸気濃度依存性はほとんど同じである。

図10 水蒸気濃度による徐放速度定数の相関。

5. おわりに

CDの包接機能を利用したフレーバーの保持、粉末化に関して、筆者らの研究を中心に解説した。CDを用いたフレーバー粉末作成に関して、多成分系フレーバーの包接挙動および徐放特質の検討が切望されている。また、CD含有噴霧乾燥フレーバー粉末の作成条件とフレーバーCD包接率の関係、フレーバー粉末の吸湿性、溶解性とフレーバー徐放挙動の関係等検討すべき課題は多い。環状オリゴ糖シクロデキストリン以外にも、クラスターデキストリン(CCD)や環状四炭糖といった機能性糖質や各種修飾デキストリンが開発され、新規なフレーバー徐放制御可能な賦形剤の応用が可能となっている。CDへのフレーバー包接、フレーバー包接CD粉体からのフレーバー徐放は、水分子とCDの相互作用、反応により包接、徐放反応が決まっており、今後、各種賦形剤に包接されたフレーバー徐放に関しても同様の基本的現象を明らかにしたいと考えている。

謝 辞

本研究は、鳥取大学工学部古田教授の指導の下、多くの学生とともに行った研究の一部をまとめたものである。ここに、感謝致します。また、食品工学の研究を勧められ、終始御激励いただきました故桐栄良三先生に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Rish, S.J. and Reineccius, G.A.; "Flavor Encapsulation", ACS Symposium Series 370, Washington, D.C. (1988).
- 2) Rish, S.J. and Reineccius, G.A.; "Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients", ACS Symposium Series 590, Washington, D.C. (1995).
- 3) Szejtli, J.; Cyclodextrin Technology, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands (1988).
- 4) 戸田不二緒、上野昭彦; 「シクロデキストリン」、産業図書(1995).
- 5) Yoshii, H., Furuta, T., Yasunishi, A., and Hirano, H.; Minimum number of water molecules required for inclusion of d-limonene in the cyclodextrin cavity, J. Biochemistry, **115**, 1035-1037 (1994).
- 6) Yoshii, H., Kometani, K., Furuta, T., Watanabe, Y., Linko, Y.-Y. and Linko, P.; Formation of inclusion complexes of cyclodextrin with ethanol under anhydrous conditions. Biosci. Biotechnol. Biochem., **62**, 2166-2170 (1998).
- 7) Goubet I., LeQuere, J.-L. and Voilley, A.J., Retention of aroma compounds by carbohydrates: influence of their physicochemical characteristics and of their physical

- state. A review. J. Agric. Food Chem., **46**, 1981–1990 (1998).
- 8) Furuta, T., Yoshii, H., Miyamoto, A., Nakamura, T., Yasunishi, A., and Hirano, H.; Enhancement and inhibition by linear alcohol of the formation of inclusion complexes between d-limonene and cyclodextrins at low water content, Biosci. Biotech. Biochem., **58**, 1381–1385 (1994).
- 9) Yoshii, H., Furuta, T., Okita, E., Toyomi, A., Linko, Y.-Y., and Linko P.; The increased effect of kneading on the formation of inclusion complexes between d-limonene and β -cyclodextrin at low water content, Biosci. Biotech. Biochem., **62**, 464–468 (1998).
- 10) Furuta, T., Yoshii, H., Kobayashi, T., Nishitarumi, T., and Yasunishi, A.; Powdery Encapsulation of d-Limonene by Kneading with Mixed Powders of β -Cyclodextrin and Maltodextrin at Low Water Content, Biosci. Biotech. Biochem., **58**, 847–850 (1994).
- 11) Yoshii, H., Furuta, T., Asada, M., and Sugisawa, H.; Quantitative Analysis by X-Ray Diffraction of the Inclusion Complex Formed by d-Limonene in a β -Cyclodextrin/Maltodextrin Mixed Powder, Biosci. Biotech. Biochem., **56**, 384–387 (1992).
- 12) Liu, X.D., Furuta, T., Yoshii, H., Linko, P., Coumans, W. J.; Cyclodextrin encapsulation to prevent the loss of l-menthol and its retention during drying. Biosci Biotechnol Biochem, **64**, 1608–13 (2000).
- 13) Shiga, H.; *et al.*: Release characteristics of allyl isothiocyanate encapsulated in cyclodextrins, Proc. 10th International Cyclodextrin Symposium, pp. 553–558 (2000).

要 旨

シクロデキストリン (CD) は、デンプンを原料として酵素 (CGTase) により合成されたマルトオリゴ糖であり、グルコース分子が α -1, 4 結合した環状構造を形成している。CD は、環状構造をした分子空洞内が疎水性の性質を有している。シクロデキストリンによる疎水性食品成分の分子的包接は、フレーバー、ビタミン、色素と不飽和脂肪酸含有オイル等の食品成分を物理的と化学的に保蔵安定性を著しく改善する。シクロデキストリンへ疎水性物質を包接させるのに必要な最小加水量が存在すること、直鎖アルコールが包接促進効果をもつことを明らかにした。湿式混練法による包接複合体の作成法を提案し、香気物質の散失防止に包接法が有用であることを明らかにした。メントール包接 CD 溶液の単一液滴乾燥におけるメントール残留率の推算手法を、選択拡散理論を用いた簡易計算法を提案した。フレーバー包接 CD 粉体からのフレーバー徐放挙動に及ぼす水蒸気の影響について、Avrami-Erofeev の式から求めた徐放速度定数と水蒸気分圧の相関関係を得た。