冷媒の溶解した冷凍機油の流動特性の研究*

柳 沢 正**, 清 水 孝**

A Study on the Flow Characteristics of Refrigerating Oil
Dissolved with Refrigerant

by Tadashi YANAGISAWA and Takashi SHIMIZU

In a refrigerating compressor, refrigerating oil lubricates moving parts and seals clearances. But its characteristics are much affected by the presence of the refrigerant. This study analysed the channel flow characteristics of refrigerating oil dissolved with refrigerant 22. In theoretical analyses the apparent properties of the flow were estimated; and using them, the flow was modelled as a single phase flow. The pressure and temperature profiles at the channel and the flow rate were calculated theoretically and compared with experimental results which were measured using a model channel (height: 62 μm , length: 40 mm). The falling gradient of the pressure in the channel became large as the flow progressed because of the dissociation of refrigerant vapor from the refrigerating oil. The heat needed to dissociate the refrigerant was about 105 kJ/kg. The dissociation of the refrigerant increased the viscosity of the refrigerating oil, which caused the decrease of the flow rate.

Key Words: Multiphase Flow, Flow Measurement, Refrigerating Oil, Refrigerant, Solubility, Viscous Flow, Flow Characteristics

1. 緒 言

冷凍システムやヒートポンプ用の圧縮機, ランキンサイクル用の膨張機では, 機械部品の潤滑のために冷凍機油が使用されている。しかし, その冷凍機油には, サイクルの作動流体として使われているフロン系冷媒が溶解しやすく, 溶解によって潤滑性能を始めとする冷凍機油の特性が変化し, 機器の性能も大いに影響を受ける。特に近年多用されている回転式の圧縮機や膨張機の場合には, 潤滑油たる冷凍機油のすきまシール性がそれらの機器の性能に大きく関与している⁽¹⁾ので, 冷媒の溶解による冷凍機油の流動特性の変化の解明が重要となってくる。

冷媒の溶解した冷凍機油のすきま流れは, 流れの途中で溶解冷媒が解離して二相流となる点に特徴があるが, そのような流れに対する従来の研究はほとんど見当たらない⁽¹⁾。そこで本研究では, 冷媒の溶解した冷凍機油が微小なすきま流路を流れるときの流動特性, すなわち, 流量, 圧力および温度の変化特性を, 冷媒の溶解度と関連させて理論的ならびに実験的に検討し

ていく。

2. 記 号

- a : 冷媒の溶解度 (質量濃度)
- c : 比熱
- f_g : ボイド率
- h : すきまの高さ
- l : 流路の長さ
- p : 圧力 (ゲージ圧)
- q_m : 質量流量
- r : 解離熱
- t : 温度
- u : 流速
- w : 流路の幅
- x : 上流からの距離
- y : 壁面からの距離
- μ : 粘性係数
- ν : 動粘性係数
- ρ : 密度
- χ : クオリティ

添 字

- g : 気相
- l : 液相

* 昭和61年3月15日 東海支部第35期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年9月30日。

** 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

- o : 冷凍機油
 r : 冷媒
 s : 飽和状態
 1 : 上流
 2 : 下流
 $*$: みかけの値

3. 理論解析

3.1 流れの性質 冷凍機油に対する冷媒の溶解量は圧力および温度の関数となって変化し、圧力が低くまた温度が高くなるにつれて溶解する割合が減少する。それゆえ、冷媒の溶解した冷凍機油が微小なすきま流路を流れる場合について考えると、流れの進行に伴い圧力が降下すると、冷凍機油中の溶解冷媒が解離され、流れは液体冷凍機油の単相流から気体冷媒と液体冷凍機油の二相流へと変化していく。しかも、その過程で液体冷凍機油の粘性係数が冷媒の溶解度および温度に応じて変化していくので、流れの解析は複雑となる。いま、図1に示すように、高さ h の微小なすきま流路(長さ l , 幅 w)の上流が圧力 p_1 , 温度 t_1 の冷媒の溶解した冷凍機油(質量溶解度 a_1)で満たされており、圧力 p_2 の下流に向かって質量流量 q_m で定常的に流れている場合を想定する。上流から距離 x のすきま流路途中で圧力が p , 温度が t となりそれに対応して冷媒の溶解度が a となった状態では、溶解度の差に相当する量の冷媒が気体として放出されてくるものと考えられる。それゆえ、この位置における液相冷凍機油の質量流量を q_{ml} , 気相冷媒の質量流量を q_{mg} とし、気相と液相の相対的なすべりのない流れを仮定すれば、流れ中の冷媒の質量流量について次式が成り立つ。

$$a_1 q_m = a q_{ml} + q_{mg} \quad (1)$$

このとき、流れのクオリティを χ とすると、 q_{mg} および q_{ml} はそれぞれ次のように表される。

$$q_{mg} = \chi q_m \quad (2)$$

$$q_{ml} = (1 - \chi) q_m \quad (3)$$

式(2), (3)を式(1)に代入して整理すると、クオリ

ティ χ と溶解度 a , a との関係式(4)が得られる。

$$\chi = (a_1 - a) / (1 - a) \quad (4)$$

一方、流れのボイド率を f_g とすると、すべりのない流れの場合、気相および液相の密度をそれぞれ ρ_g, ρ_l として次のように表される⁽²⁾。

$$f_g = 1 / \{1 + (1/\chi - 1)\rho_g/\rho_l\} \quad (5)$$

ここで、流れのみかけの物性値について考えると、まず、みかけの密度 ρ_* は気相および液相の全質量に対する全体積の比で定義されボイド率 f_g を用いて次式で表される⁽²⁾。

$$\rho_* = f_g \rho_g + (1 - f_g) \rho_l \quad (6)$$

次に、みかけの粘性係数 μ_* については、統一的な取扱いが確立されていない⁽³⁾が、ここでは、簡単に気相の粘性係数 μ_g と液相の粘性係数 μ_l のボイド率あん分比例で表すことにする。

$$\mu_* = f_g \mu_g + (1 - f_g) \mu_l \quad (7)$$

このとき、流れのみかけの粘性係数 μ_* とみかけの密度 ρ_* の比で表されるみかけの動粘性係数 ν_* は、式(5)~(7)の関係をを用いて次式で表される。

$$\nu_* = \mu_*/\rho_* = \chi \nu_g + (1 - \chi) \nu_l \quad (8)$$

ここに、 ν_g, ν_l は、それぞれ気相および液相の動粘性係数である。

3.2 温度の解析 ある圧力および温度のもとで冷媒の溶解している冷凍機油を減圧すると気体冷媒が発生し冷凍機油の温度が降下することは、経験的によく知られている。それゆえ、前述した流れにおいても、流路の途中で気体冷媒が分離されてくるにつれて、温度の低下していくことが予想される。いま、流路の途中で、液相から微量の冷媒 $dq_{mg} (= -dq_{ml})$ が解離されて気体冷媒となり、その解離に必要な熱量が液相および気相の dt の温度降下により供給されるものと仮定すると次の熱つりあい式が成り立つ。

$$c_l q_{ml} dt + c_g q_{mg} dt = r dq_{mg} \quad (9)$$

ここに、 c_l は液相の比熱、 c_g は気相の定圧比熱、また、 r は単位質量当たりの冷媒の解離に必要な熱量である。上式に、式(2), (3)の関係を適用すると温度降下 dt が以下のように表される。

$$dt = r d\chi / \{c_l(1 - \chi) + c_g \chi\} \quad (10)$$

ただし、以上の解析において、流路は断熱されており、圧力変化および速度変化に伴うエネルギーの変化は小さいものとして無視している。

3.3 流量および圧力の解析 図1に示したすきま流路における冷媒の溶解した冷凍機油の流量および圧力の解析にあたり、解析の厳密さよりも取扱いの容易さに重きをおいて、流れはそれぞれの断面において均一なみかけの物性値を有した単相の状態にあり、そ

図1 流動モデル

のみかけの物性値は流れとともに式(6)～(8)に従って変化していくものと仮定して解析を行う。このとき、流れには平行平板間の粘性単相流の関係式が適用でき、断面上での流速 u の分布は高さ y 方向に放物線状となり式(11)で表される⁽⁴⁾。

$$u = -\frac{1}{2\mu_*} \frac{dp}{dx} (h-y)y \quad \dots\dots\dots (11)$$

したがって、質量流量 q_m は次式で与えられる。

$$q_m = \int_0^h \rho_* u w dy = -\frac{wh^3}{12\nu_*} \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots\dots (12)$$

上式を式(13)のように変数分離形で表し、圧力 p_1 の流路上流 ($x=0$) から圧力 p_2 の流路下流 ($x=l$) まで積分して整理すると q_m が式(14)の形で求められる。

$$dx = -\frac{wh^3}{12\nu_* q_m} dp \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$q_m = \frac{wh^3}{12l} \int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\nu_*} \quad \dots\dots\dots (14)$$

また、式(13)を、上流から任意の圧力 p となる位置 x まで積分して整理すると、 x と p の関係が式(15)の形で与えられる。

$$x = \frac{wh^3}{12q_m} \int_p^{p_1} \frac{dp}{\nu_*} = \int_p^{p_1} \frac{dp}{\nu_*} / \int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\nu_*} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(14)および(15)において、みかけの動粘性係数 ν_* を圧力の関数で表して積分する必要があるが、 ν_* は式(8)にみられるように、クオリティ x の関数であり、その x は式(4)のごとく溶解度 a_1 , a の関数となっているので、圧力と溶解度の関係が与えられれば p の関数として x を求めることができ、さらに ν_* および ν_1 が p の関数として知られていれば、 ν_* を p の関数として計算することができる。

流路における流量、圧力および温度の計算方法としては、まず、上流の圧力 p_1 、温度 t_1 を与えて、圧力を p_1 から微小圧力 Δp ずつ降下させ、その都度、温度降下 Δt ならびにそれに対応した物性値を求めながら下流圧力 p_2 となるまで計算していく。このようにして圧力と温度さらには物性値の関係が求まり、最後にその数値積分値として流量および各々の圧力に対応した流路上での位置が求められる。

4. 実験

4.1 実験装置および実験方法 図2に冷媒の溶解した冷凍機油のすきま流路における流動特性を調べるための実験装置を示す。同図(a)は、すきま流路部の詳細であり、流路は鋼材研摩面と板ガラス面により構成されている。流路の長さ l および幅 w はともに40 mm であり、すきま h はスペーサにより62 μm に設定されている。流路の途中には圧力測定用の直径1

mm の小孔が、上流から8, 20, 32 mm の各位置に設けられており、各々の圧力が上流および下流の圧力とともにブルドン管圧力計により測定される。また上流および下流の温度が内部に挿入したC-C熱電対により測定される。

一方、同図(b)は、実験装置全体の概略であり、冷媒の溶解した冷凍機油が圧縮機の底部から流路へ供給され、そのときの圧力、温度および流量が測定される。実験では、まず、吸込管と吐出し管を短絡した状態の回転圧縮機に試料冷凍機油を封入して真空引き後、冷媒 R22 のポンペに接続し、圧縮機を運転して圧縮機内の冷凍機油に冷媒を溶解させる。溶解冷媒の圧力は冷媒ポンペの水浴温水温度により、また冷凍機油の温度は圧縮機周囲への送風量により調整される。冷媒が飽和状態となるまで十分に溶解したら、流路の止め弁を開き、流れが定常となつてから、流路の圧力および温度を測定する。また流路の下流では、液体冷凍機油の流量を重量法により測定し、続いて、気体冷媒の流量を水上置換法により測定する。なお、すきま流路は水浴により圧縮機内の冷凍機油の温度と同一に保たれている。

実験では、流路の上流ゲージ圧力 p_1 を約100～900 kPa {1～9 kgf/cm²}、上流温度 t_1 を30～80°Cの範囲で変化させ、下流は大気圧に解放状態 ($p_2=0$) とした。

4.2 供試冷凍機油の性状 実験に使用した冷凍

(a)

(b)

図2 実験装置

機油は、空調機用回転圧縮機に使用されている鉱油である。冷凍機油メーカより入手した冷媒 R 22 の溶解度および冷媒溶解時の動粘性係数の測定データをもとに、図 3 のような温度 t をパラメータとした飽和溶解度 a_s と圧力 p の関係線図、および図 4 のような冷媒溶解度 a をパラメータとした動粘性係数 ν_t と温度 t の ASTM 関係線図を得た。理論計算では、 a_s を p と t の適当な関数で、また ν_t を t と a の適当な関数で近似して用いた。

一方、冷媒の溶解した状態での密度 ρ_t は入手できなかったため、冷媒の溶解していない状態での密度 ρ_o と液冷媒の密度 ρ_r を用いて、冷媒溶解度 a の冷凍機油の密度 ρ_t を次式で近似することにした。

$$\rho_t = a\rho_r + (1-a)\rho_o \quad \cdots\cdots(16)$$

$$\text{ただし } a_o = 1 / \{1 + (1/a - 1)\rho_r/\rho_o\}$$

ここに、 $t^\circ\text{C}$ における密度 ρ_o は冷凍機油の基準密度を $\rho_{o\text{base}} (= 0.865 \text{ g/cm}^3 \text{ at } 15^\circ\text{C})$ として次式で表される⁽⁵⁾。

図 3 冷凍機油の冷媒溶解特性

図 4 冷凍機油の粘度特性

$$\rho_o = \rho_{o\text{base}} \{1 - 0.00065(t - 15)\} \quad \cdots\cdots(17)$$

さらに、冷媒の溶解した冷凍機油の比熱 c_t については、冷凍機油の比熱 c_o と液冷媒の比熱 c_r を用いて、冷媒溶解度 a のときの値を次式で近似することにした。

$$c_t = ac_r + (1-a)c_o \quad \cdots\cdots(18)$$

ここに、 $t^\circ\text{C}$ における冷凍機油の比熱 c_o kJ/(kg·K) は $\rho_{o\text{base}}$ (単位 g/cm³) を用いて次式で近似される⁽⁶⁾。

$$c_o = \frac{4.187}{\sqrt{\rho_{o\text{base}}}} (0.403 + 0.00081t) \quad \cdots\cdots(19)$$

なお、以上の計算に必要な冷媒 R 22 の物性値は、冷媒物性値表⁽⁷⁾の値を圧力と温度の適当な関数で近似して⁽⁸⁾⁽⁹⁾計算に用いられる。

5. 結果とその考察

5.1 圧力変化特性 図 5 は冷媒の溶解した冷凍機油の流路途中の圧力変化の測定結果を示したものであり、縦軸の流路途中の圧力 p および横軸の流路上流からの距離 x は、それぞれ上流の圧力 p_1 および流路の全長 l で無次元化されている。冷媒の溶解していない冷凍機油を用いた予備的な実験では圧力が直線的に降下していたのに対し、冷媒の溶解した冷凍機油を用いた本実験の結果では、上方に凸となる傾向がみられ、その程度は、一定の上流圧力 p_1 に対し上流温度 t_1 が低い場合ほど大きくなっている。一方、同図中には理論計算による圧力降下曲線も示されており、実験値と類似した傾向となっているが、流路途中での冷凍機油中の冷媒の溶解度 a の見積もり方によって圧力降下の様子が異なっている。例えば、 a が上流の飽和溶解度 a_1 に常に等しく冷媒が解離されないと仮定した場合には、直線的な圧力降下となっているが、 a が

図 5 流路における圧力変化

流路途中の圧力および温度に対応した飽和溶解度 a_s に等しく a_1 と a_s の溶解度差に応じた気体冷媒が解離されてくると仮定した場合には、上方への凸度がかかなり大きくなっている。しかし、実験値は両者の中間に位置しているので、流路途中での冷媒の解離が表面張力などの影響により遅れ過飽和の状態で流れていると仮定して、簡単に a が a_1 と a_s の平均値に等しいものと見積もって計算すると、いずれの温度の場合にも測定値とのおよその一致がみられる。今後、流路途中のボイド率を測定するなどして正確な解離冷媒量を見積もる必要があるが、以後の理論計算では、流路途中での溶解度は $a = (a_1 + a_s)/2$ として見積もり、流路下流にて、下流での圧力および温度に相当する飽和溶解度 a_2 になるまで冷媒が解離されてくると仮定して解析を進める。

なお、実験においては、流路上面のガラス板を通して、流路の上流近くではほとんど単相流のままであるが、下流近くでは液相と気相が混じりあった流れとなっている様子が観察された。

ところで、図5のように上方に凸形の圧力降下となる理由は、溶解度を变化させた理論計算結果からもわかるように、流れの進行とともに気体冷媒が解離してくることと関連しており、流路途中の物性値の理論計算変化を示した図6を参照して説明される。すなわち、流れの進行とともに圧力が降下し、冷媒溶解度 a が低下してくると、気体冷媒が解離されクオリティ x はほぼ直線的に増加し、それに伴い温度 t も少しずつ低下していく。一方、流体の動粘性係数についてみると、冷凍機油中の冷媒溶解度の低下につれて液相の動粘性係数 ν_l は漸増していき、気相冷媒の動粘性係数 ν_g も圧力および温度の低下を反映して微増していく。それ

ゆえ、 ν_l と ν_g を勘案したみかけの動粘性係数 ν も下流へいくほど増加し、摩擦抵抗が増大することになるので、下流側ほど圧力降下率が大きくなり、図5に示したような傾向が現れることになる。

5.2 温度変化特性 図7には、実験により得られた、上流温度 t_1 と流れの温度降下すなわち上下流の温度差 $(t_1 - t_2)$ の関係が、上流圧力 p_1 をパラメータとして示されている。全体として、上流温度が低く上流圧力の高い場合ほど温度降下が大きくなる傾向となっており、これらの場合は上流での冷媒溶解度が大きい場合に相当している。この温度降下は、冷媒の溶解している冷凍機油が圧力降下して気体冷媒を解離する場合には、解離熱が必要であることに対応している。一方、同図中には、式(10)に従って計算された温度降下曲線も示されている。式(10)中の冷媒の解離熱 r の値の選び方によってさまざまな曲線が描けるが、いずれの実験値とも比較的良好に一致する場合として、 $r = 105 \text{ kJ/kg}$ (25 kcal/kg) のときの曲線を示した。この値は、およそ 78°C の飽和冷媒の蒸発潜熱に相当している。

なお、上記の計算において、圧力降下の計算のところで述べた流路途中での冷媒溶解度の見積もり方の影響について検討したところ、流路途中での温度分布には変化がみられたが、上下流間の合計の温度降下 $(t_1 - t_2)$ にはたいして変化がみられなかった。

さて、図7の温度降下の様子を、下流で解離している気体冷媒の質量流量 q_{mg2} と全質量流量 q_m との比の関係に整理し直して示すと図8が得られる。このように整理すると、すべての実験点が、圧力によらず、だいたい一定の関係にまとめられ、解離冷媒量におよそ比例して温度降下の起こっていることがわかる。同

図6 流路における物性値の変化

図7 温度降下と上流温度の関係

図中の理論計算線には、前述の解離熱 $r=105 \text{ kJ/kg}$ [25 kcal/kg] の場合に加えて、 $r=84, 126 \text{ kJ/kg}$ [20, 30 kcal/kg] の場合も示されており、実験値と比較すると、供試冷凍機油における R 22 の解離熱としては $r=105 \text{ kJ/kg}$ がおおむね妥当であることがわかる。

5.3 流量特性 図 9 には、上流温度 t_1 を 60°C の一定に保ち、上流圧力 p_1 を変化させた場合の質量流量の変化が示されている。実験結果と計算結果の間には、全質量流量 q_m のみならず、下流での液相質量流量 q_{mL2} および気相質量流量 q_{mG2} についてもよい一致がみられる。また、同図中には、冷媒の溶解していない場合の同温度の冷凍機油の質量流量 $q_{m\text{oil}}$ の測定結果ならびに計算結果も参考として示されており、それらは圧力に比例して直線的に増加している。冷媒の溶解した冷凍機油の流量 q_m の値は、 $q_{m\text{oil}}$ よりもかなり大きく、しかも高圧になるほど大きな割合で増加する傾向となっている。これは、冷凍機油中への冷媒の溶解に伴う粘度低下によるためであり、そしてその量が高圧になるほど多くなるためである。さらに、図 9 中には、流路途中の流体からは冷媒が解離されず、その粘度が上流流体の粘度のままの単相流であると仮定した場合の計算結果も示されているが、そのときの流量 $q_m(a=a_1)$ は、冷媒を解離する実際の実験結果の値よりもいくぶん大きくなっている。

以上のことを総合すると、冷媒の溶解している冷凍機油のすきまの流れの場合、冷媒の溶解によって粘度低下することにより流量は増加するが、流路途中での冷媒の解離による粘度増加のために、解離を伴わない単相流の場合よりも流量が制限されていることになる。

なお、冷媒を解離する冷凍機油流れの全流量が冷媒を解離しない単相流の場合の流量よりも少なくなってくるとはいうものの、下流側では気体冷媒が発生してくるので、圧縮機などの機器において発生するこのようなすきま流れの機器の性能への影響は、好ましくないことのほうが多いと思われる。

次に、全質量流量 q_m の測定結果を、上流温度 t_1 に対応させて上流圧力 p_1 をパラメータとして図 10 に示す。温度の変化に対する流量の変化は、圧力によって異なり、圧力の高い場合には極小値がみられる。これは、例えば、温度が上昇していく場合、温度上昇による冷凍機油自身の粘度低下の影響と温度上昇に伴う冷媒溶解度の減少による粘度増加の影響の相乗作用によって流体の粘度が増加あるいは減少するためであると考えられる。同図には、全質量流量 q_m の理論計算結果も示されており、実験値と比べると多少小さい部分もあるが、全体として良好な一致がみられる。

なお、今回の理論計算では、みかけの動粘性係数 ν_* を式(8)のようにクオリティ χ で比例あん分して見積もったが、ほかにもさまざまな評価式が考えられる。その一例として、次式のように気相および液相の動粘性係数 ν_g および ν_L の対数をクオリティ χ で比例あん分した形で ν_* を見積もったときの流量の計算結果を図 10 中に破線で示す。

$$\log \nu_* = \chi \log \nu_g + (1 - \chi) \log \nu_L \quad \cdots \cdots (20)$$

この場合の流量を前者の場合の流量と比べると、温度が高くて圧力が低い範囲すなわち冷媒溶解度の小さい範囲ではほとんど差がみられないが、温度が低くて圧力の高い範囲すなわち冷媒溶解度の大きい範囲では流量が増加し、実験値とも近づく傾向となっている。冷媒の溶解している冷凍機油のすきま流れの実用的な流

図 8 温度降下と気体冷媒流量比の関係

図 9 流量と上流圧力の関係

図 10 流量と上流温度の関係

量の計算には式(8)や式(20)を用いれば十分であると思われるが、流れの厳密な解析という点からは、今後の検討が必要であろう。

6. 結 言

冷媒の溶解した冷凍機油のすきま流路における流動特性、すなわち、圧力および温度変化特性ならびに流量特性について、理論的ならびに実験的な検討を行い、以下のまとめを得た。

文 献

- (1) 柳沢・ほか2名, 機論, 48-431, B (昭57), 1256.
- (2) 赤川, 気液二相流, (昭52), 36, コロナ社.
- (3) 日向・大木, 機論, 37-239 (昭46), 97.
- (4) 市川, 水力学・流体力学, (昭44), 37, 朝倉書店.
- (5) 本会編, 機械工学便覧(改定第6版), (昭52), 8-2, 本会.
- (6) 市川・日比, 油圧工学, (昭54), 6, 朝倉書店.
- (7) 日本冷凍協会編, 冷媒物性値表(R22蒸気表), (昭50), 日本冷凍協会.
- (8) 菅原, 機論, 12-42 (昭21), 147.
- (9) 油屋・ほか2名, 機講論, No.803-5 (昭55-7), 1.

討 論

〔質問〕 日向 滋〔信州大学繊維学部〕

冷媒溶解度の流量、圧力への影響を説明できたことは非常に有意義なことと考える。流路内のボイド率測定がなされれば、理論的な裏づけもさらにしっかりしたものとなるのではないかと、今後の研究の発展を期待する。

実験では、すきま流路は水浴の温度に保たれているとある。一方理論の条件では流路壁断熱と考えておられるようであるが、定常状態での熱平衡の観点からは矛盾しないか。

〔回答〕 冷凍用回転圧縮機において冷凍機油中に浸っているシリンダ部内で発生するすきま流れを想定して、実験ではすきま流路部を供給冷凍機油と同温度の温水中に保持した。この場合、流れの進行とともに温度低下する流体には流路壁から熱が伝わるが、その伝熱過程の解析は容易ではなく、また伝熱量もあまり大きくないと考えられるので、理論解析では近似的に断熱状態と仮定した。この仮定により解離熱の値はいくらか小さめに見積もられているであろうが、定性的な結果には変化がないものと考えている。