

特集 CO₂エアコンサイクル内のオイル循環率測定*

Oil Circulation Ratio On-line Measurement in CO₂ Cycle

尾崎 幸克

Yukikatsu OZAKI

堀田 忠資

Tadashi HOTTA

平田 敏夫

Toshio HIRATA

Yunho Hwang

This paper presents an on-line measurement method for the oil circulation ratio (OCR) in CO₂ climate control system. This method was used to investigate the effects of the OCR in the system and an oil separator on the system performance.

The capacitance sensor method was investigated as the OCR measurement method in the transcritical CO₂ cycle. The sensor with parallel plate electrodes was developed to measure the capacitance of CO₂/oil mixtures. Test results show that the OCR in the transcritical CO₂ cycle can be determined by three parameters: pressure, temperature and capacitance. Based on this approach, the OCR measurement method was developed by correlating OCR readings and three other parameters. For the entire range of OCR 0 to 8wt.%, the measurement absolute error is within 0.5wt.% for the range of pressures and temperatures tested.

By using this method, the OCR under various system conditions was measured. When the OCR increases from 0.5wt.% to 7wt.%, the coefficient of performance decreases by 8% and 11% for idling and driving conditions, respectively. Without an oil separator, the OCR increases higher than 10wt.%; with an oil separator, it was maintained at 0wt.% and 1.1wt.% for idling and driving conditions, respectively.

Key words : Oil, CO₂ cycle, Capacitance, Refrigeration

1. まえがき

エアコンサイクルにはコンプレッサの潤滑用にオイルが封入されているが、オイルの一部はコンプレッサから冷媒とともに吐出されてサイクル内を流れ、再びコンプレッサに吸入されるというように循環している。このサイクル内を循環するオイルは熱交換器での熱伝達や配管の圧力損失等を変化させるのでエアコンの性能に大きく影響する。このため、フロン冷媒を使用した従来のサイクルにおいては種々のオイル循環率 (Oil Circulation Rate : 以下OCRと略す) 測定方法が検討されてきた。例えば、コンデンサと膨張弁間の配管において、液化した冷媒中のオイルの赤外線吸収¹⁾や紫外線吸収²⁾を利用して測定する方法がある。

近年、脱フロンエアコンとして注目されているCO₂冷媒利用システム (CO₂サイクル) でもOCRの測定が求められているが、CO₂サイクルは超臨界域で作動する非凝縮サイクルであり、さらに超臨界では冷媒とオイルが分離してサイクル中を流動しているので、従来のように液化した冷媒中のオイル濃度からオイル循環率を計測する方法では冷媒とオイルの界面の影響を受けてしまうので適用が難しい。

そこで、冷媒とオイル界面の影響を受けない静電容量式について検討を行った。本方式はコンデンサの電

極間にオイル混じりの冷媒流を流し、CO₂とオイルの誘電率差による静電容量変化からOCRを測定する方法で連続測定が可能である。本報では、静電容量センサの構成と静電容量からOCRを求める方法について述べ、さらに、実際のサイクルへこのセンサを適用し、OCRがサイクル性能に及ぼす影響や運転条件によるOCR変化の測定結果について報告する。

2. 測定原理とセンサ構成

本測定法では配管を流れる流体 (CO₂/オイルの混合流) 中のオイル割合の変化をコンデンサの静電容量変化として検出する。Fig. 1にセンサの模式図を示す。CO₂の比誘電率は1.4 (at 10MPa, 35) に対し今回使用したオイルは5.2 (at 35) と大きいため温度・圧力一定条件においてはオイル割合が増加するほど配管を流れる流体の比誘電率は増加する。このためコンデンサの静電容量によりOCRが測定できる。

Fig. 2に静電容量センサの構成を示す。金属平板 (30×20) を0.5mm間隔で積層して平行平板コンデンサを形成し、オイル混じりの流体は金属平板間の空間を通過する。また、電極平板間へのオイルの滞留を防止するため流体を鉛直方向の上から下へ流している。

*2003年7月23日 原稿受理

この平行平板コンデンサは絶縁体を介して金属製の耐圧容器内に配置され、静電容量をLCRメータで測定する。

静電容量の測定には4端子法に加え、耐圧容器をG(ガード)端子に接続しコンデンサ部をシールドする5端子法で測定した。測定周波数は100kHz、測定電圧は1.0Vである。このセンサの空気中での静電容量は389pFである。

今回の検討に用いたオイルはポリアルキレングリコール(PAG)オイルで粘度は43cSt(at 40)・9.2cSt(at 100)である。また、OCRとしては0~10wt.%の範囲で検討した。

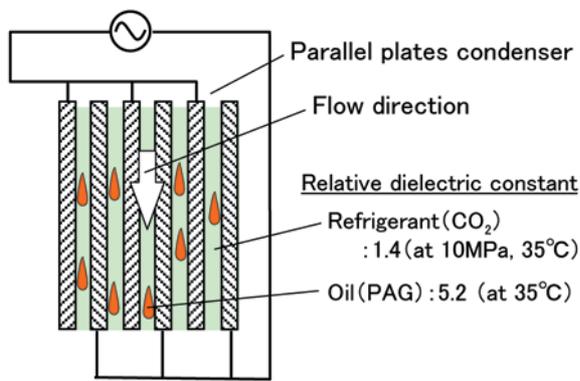


Fig. 1 Rough copy of the capacitance sensor

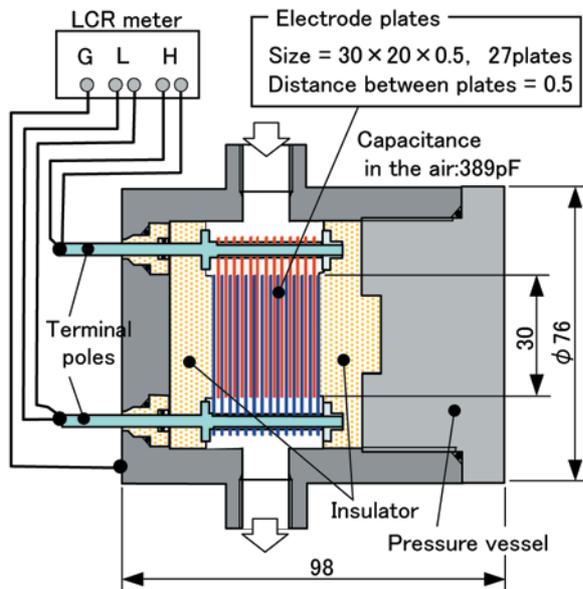
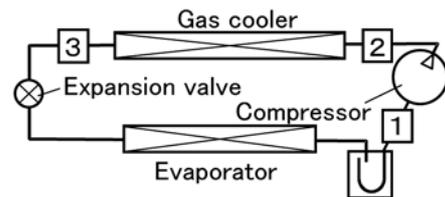


Fig. 2 Structure of the capacitance sensor

3. 測定原理とセンサ構成

測定位置を決めるためサイクル各部でのOCRに対する静電容量変化率を計算した(Fig. 3)。その結果、ガスクーラ出口で最も変化率が大いことが分かった。これは以下の理由による。OCRは質量割合であるため、同じOCRでも単位体積当たりではCO₂密度の大きい方がオイル量も多くなる。従って、同じOCR変化でもCO₂密度の大きなガスクーラ出口の方が他の位置に比べセンサ内のオイル変化量が大きく静電容量変化も大きい。



Position	Conditions		Results
	Press. (MPa)	Temp. (°C)	Change of capacitance per oil rate [%] Capacitance
1.Comp. suction	3	0	0.07%
2.Comp. discharge	10	80	0.18%
3.Gas cooler outlet	10	40	0.5%

Fig. 3 Capacitance change at various locations

4. 実験装置および方法

サイクル中を循環するオイル流量を任意に設定可能な装置を製作し、静電容量センサの出力との関係を測定した。装置構成をFig. 4に示す。コンプレッサ吐出部分では、今回用いたオイルとCO₂は互いにほとんど溶け合わないため、この部分で第1オイル分離器によりオイルを冷媒から分離してタンクにため、センサ上流で再び冷媒と合流させる。オイルの流量は流量調整バルブで調整する。一方、第1オイル分離器で分離しきれない冷媒中のオイルは第2オイル分離器で分離されコンプレッサ吸入側に戻される。また、分離状況確認のため、オイルと合流する前の冷媒配管およびオイル配管の流量調整バルブ上流側にサイトグラスを設け配管内の流れを観察した。

冷媒およびオイルの流量はコリオリ式質量流量計で測定し、OCRは次式で求めた。

$$\text{OCR [wt.\%]} = \frac{\text{オイル流量}}{\text{冷媒流量} + \text{オイル流量}} \times 100 \quad (1)$$

なお、冷媒とオイルの合流点からセンサまでは冷媒にオイルが均一化するように十分な配管長さが設けられている。

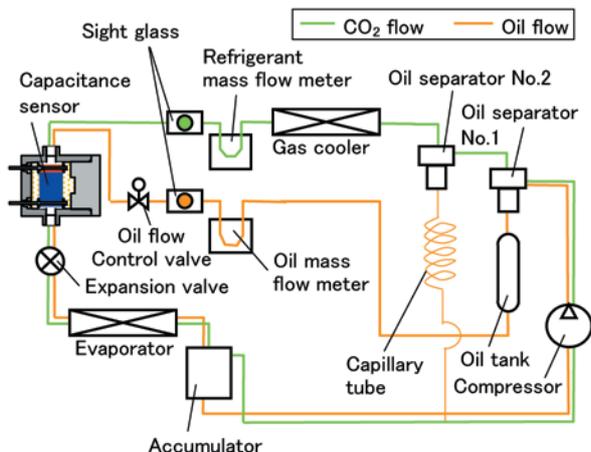


Fig. 4 Schematic diagram of test facility

5. 実験結果および考察

5.1 静電容量測定結果

圧力および温度を変化させ、OCRに対するセンサの静電容量を測定した結果をFig. 5, Fig. 6に示す。

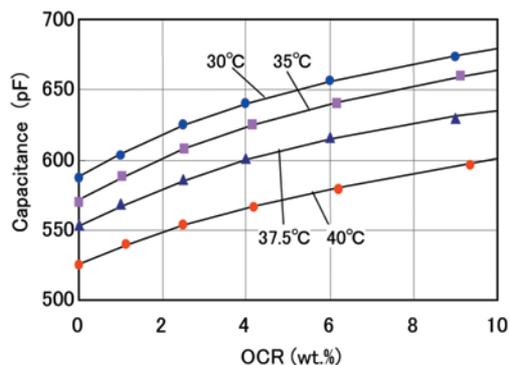


Fig. 5 Capacitance of CO₂/Oil mixture (at 9MPa)

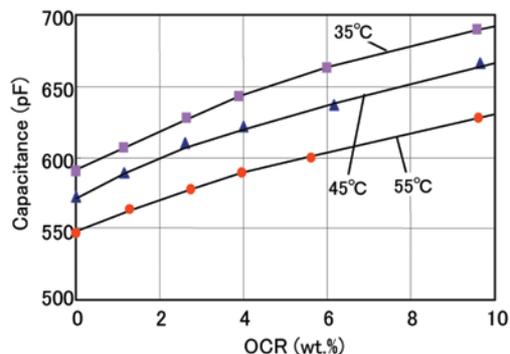


Fig. 6 Capacitance of CO₂/Oil mixture (at 13MPa)

オイルの比誘電率の方がCO₂の比誘電率より大きい
ため、温度・圧力が一定の条件ではOCRの増加に伴って静電容量も増加することを確認した。しかし、温度・圧力が変化するとCO₂およびオイルの比誘電率が変化するので、温度が低いほど、圧力が高いほど静電容量は大きくなっている。OCRを求めるには温度・圧力の影響を考慮する必要がある。

5.2 オイル循環率の算出方法

この影響を考慮するため、あらかじめ複数の温度・圧力条件でOCRと静電容量の関係測定して検量線を作成し、測定条件に近い検量線を用いて内挿補間により静電容量からOCRを求める。補間に際し、静電容量は温度・圧力で複雑に変化しているが、ひとつのパラメータで簡単に補間できないかと考え検討を行った。

Fig. 7にCO₂およびオイル単体の温度・圧力による比誘電率変化を示す。比誘電率変化は30・10MPaでの値に対する比として表した。オイルは圧力の影響をほとんど受けず、温度変化に対しても10で2%程度の変化と影響が小さい。また、OCR10wt.%以下と存在割合が小さいため、オイルの比誘電率変化が静電容量変化に及ぼす影響度合いはCO₂の1/270程度となり、温度・圧力による静電容量変化はCO₂の比誘電率変化が支配的である。

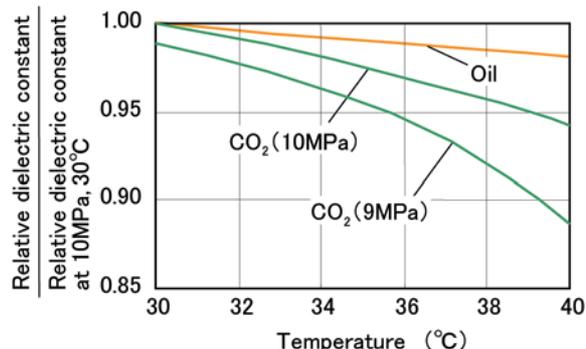


Fig. 7 Change of dielectric constant

CO₂の比誘電率はクラジウス - モソッティの式から(2)式のように表され、Dは(3)式のように物性値により決まる定数のため比誘電率はCO₂密度の関数となる。

$$C_{CO_2} = \frac{D + 2 C_{CO_2}}{D - C_{CO_2}} \quad (2)$$

$$D = \frac{3 \epsilon_0 M}{N_A} \quad (3)$$

- C_{CO_2} : CO₂の比誘電率
- ρ_{CO_2} : CO₂の密度 [kg/m³]
- ϵ_0 : 真空中の比誘電率
- M : 分子量 [kg/mol]
- ϵ_0 : 分極率 [F・m²]
- N_A : アボガドロ数 [mol⁻¹]

温度が低いほど、圧力が高いほどCO₂密度が大きくなりCO₂の比誘電率が大きくなるため、Fig. 5, Fig. 6に示したような温度・圧力による変化の傾向を示す。

そこで、検量線を用いた補間には温度・圧力に代わりCO₂密度を用いる。また(2)式の微分を行うとCO₂の比誘電率は密度に対しほぼ線形であるので、線形補間する。

オイル循環率の算出にはFig. 8に示すような4本の検量線を用いる。静電容量センサに流入する冷媒の圧力をP₀、温度をT₀とすると、選定する検量線の圧力はP₀を挟んでP₁およびP₂を、温度はT₀を挟んでP₁においてT₁₁とT₁₂を、P₂においてT₂₁とT₂₂を選ぶ。そして、各OCRにおいてFig. 9に示すようにT₀・P₀におけるCO₂密度 ρ_0 と各検量線におけるCO₂密度と静電容量の値から線形補間によりT₀・P₀におけるC₀を推算し検量線を作成する。そして、静電容量センサの測定値とこの検量線からOCRを求める。

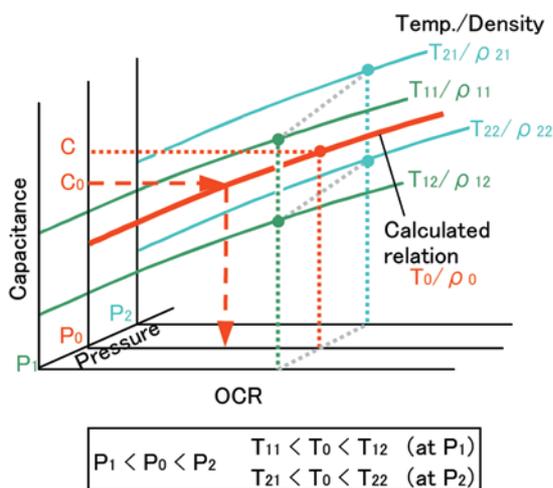


Fig. 8 Compensation method, 1st step

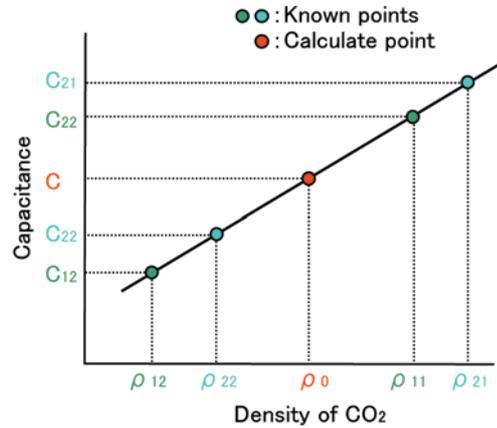


Fig. 9 Compensation method, 2nd step

5.3 OCR測定結果

検量線について、圧力を1MPa間隔、温度を5 間隔で作成しOCRの測定を行い、流量計で測定したオイル流量および冷媒流量から計算したOCRと比較した。Fig. 10に結果を示す。このグラフの測定の温度・圧力条件はCO₂サイクルのCOPを極大にする最適制御線³⁾にほぼ一致するように選んでいる。静電容量センサの測定値と流量計より求めた値は±0.1%以内で一致しており補間が良好であることを確認した。

Fig. 11は今回検量線を作りOCRを測定可能なことを確認した範囲である。この範囲において、Fig. 10と同じ方法で測定誤差を確認したところ、オイル循環率0から4wt%において±0.25wt%、0から8wt%においては±0.5wt%以内に収まっていた。

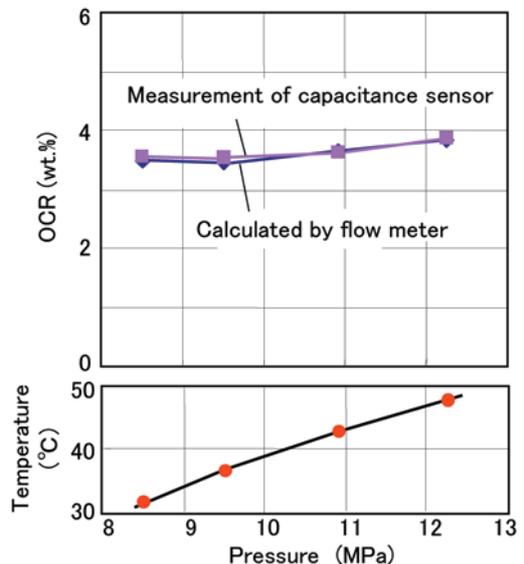


Fig. 10 Measurement result of OCR

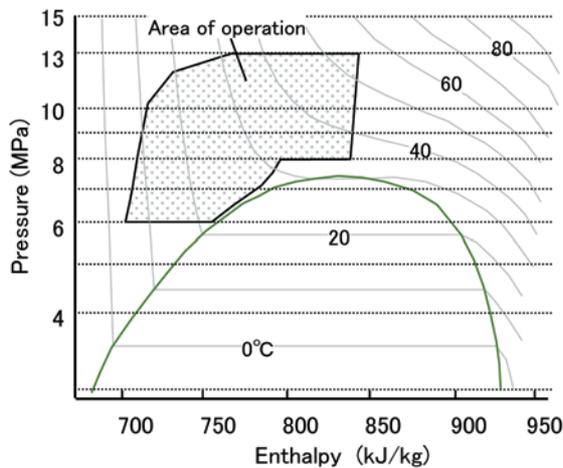


Fig. 11 Area of operation

6. 実際のサイクルへの適用

自動車用空調装置として試作した冷房能力5kWのCO₂サイクルにおいて、様々な条件で評価を行った。

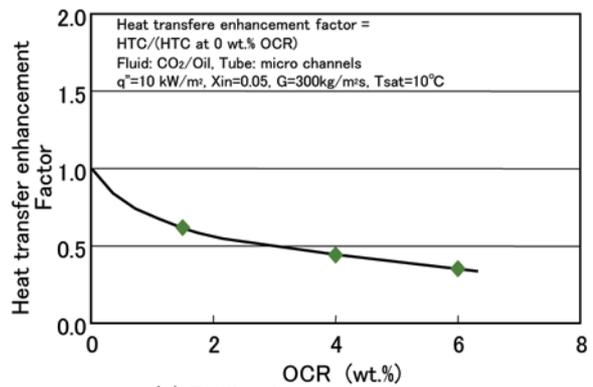
6.1 OCRがCOPに及ぼす影響

6.1.1 熱伝達への影響

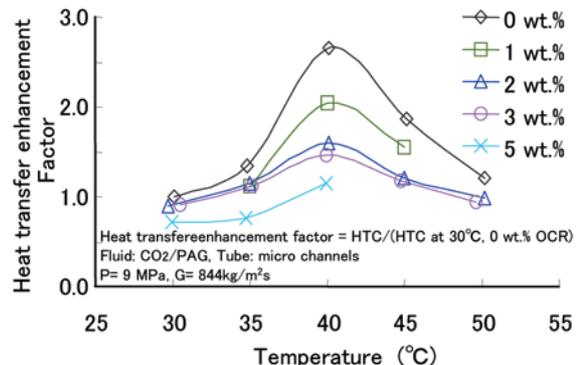
Fig. 12は水力直径0.8mmのマイクロチャンネルの内側をCO₂とオイルの混合流が流れ、蒸発および放熱するときの熱伝達促進係数を示している。熱伝達促進係数はOCRが0%のときの熱伝達係数に対する比として定義した。Fig. 12(a)では、OCRが0wt.%から2wt.%に増加すると蒸発時の熱伝達がほぼ50%に低下する。Fig. 12(b)は圧力9MPa・擬臨界温度付近においてOCRが熱伝達促進係数に及ぼす影響を示している。ここで、熱伝達促進係数の基準は30、OCRが0wt.%での値である。この図から、オイルを含んでいない場合、温度が30 から擬臨界温度に変化すると熱伝達促進係数は2.7倍に増加することがわかる。そして、OCRが0wt.%から5wt.%に増加すると、熱伝達促進係数は30 において約30%低下し、擬臨界温度で15%の向上しか得ることができない。

6.1.2 熱交換器の圧力損失への影響

Fig. 13はアイドリング（1000rpm）と走行時（1800rpm）の条件において、OCRが増加するに従いエバポレータとガスクーラの圧力損失が増加することを示している。圧力損失はアイドリング時・OCRが0wt.%のときを基準とした比で示している。エバポレータ・ガスクーラともに、アイドリングからコンプレッサ回転数が増加するのにもとない、圧力損失が75%



(a) Boiling heat transfer



(b) Gas cooling heat transfer

Fig. 12 Effects of OCR on heat transfer enhancement factors

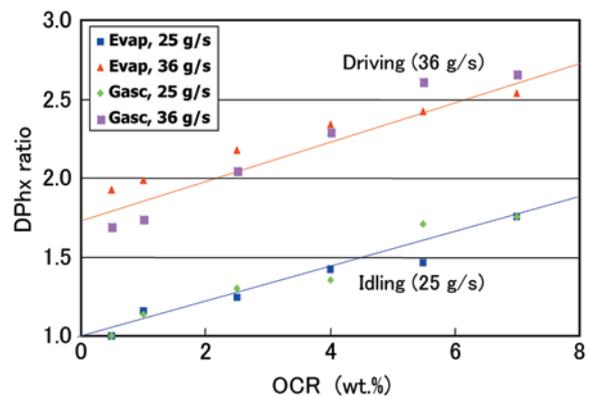


Fig. 13 Effects of OCR on pressure drop

増加している。さらに、OCRの増加によっても圧力損失が増加し、OCRが0wt.%から7wt.%になると、アイドリング時で80%、走行時で50%増加する。

6.1.3 COPへの影響

Fig. 14は外気温度35において、アイドリング時および走行時でのCOPを測定した結果である。COPはアイドリング時・OCRが0.5wt.%のときを基準とした比で示している。なお、各評価条件において、膨張弁の制御によりCOPが極大となるようにガスクーラ側圧力を調整した。OCRが0.5wt.%におけるCOPは、アイドリング時2.7、走行時2.2である。Fig.14から、OCRが0.5wt.%から7wt.%に増加すると、COPはアイドリング時で8%、走行時で11%低下することが分かる。

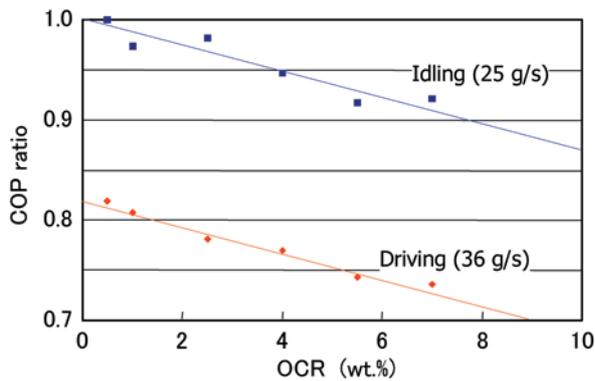


Fig. 14 Effects of OCR on COP

6.2 過渡時のオイル循環挙動

運転開始時やコンプレッサ回転数がアイドリングから走行まで変化するような過渡時について、OCRを連続的に測定し、オイル循環挙動を評価した。評価はコンプレッサの吐出部分にオイル分離器を付けた場合と付けない場合とで行った。なお、サイクルへのオイル封入量は250ml、オイル分離器の内容積は250mlである。オイル分離器からコンプレッサ吸入配管へのオイル戻し量の調整はコンプレッサの吸入温度増加が2K以下となるように行った。

Fig. 15とFig. 16はオイル分離器が有・無の条件におけるサイクルのOCR評価結果である。コンプレッサの回転数は0から1000rpmの間で4回変化し、さらに1000rpmから1800rpmの間で4回変化している。両図において、Fig. (a)は全評価時間でのOCRを示し、Fig. (b)はFig. (a)に印を付けた部分の時間軸を拡大したものである。

6.2.1 オイル分離器があるとき

コンプレッサ回転数が0と1000rpmの間で変化している間では、Fig. 15に示すようにOCRは検出下限以下で、オイル分離器の効率はほぼ100%である。また、1000rpmから1800rpmに変化すると、冷媒の質量流量が約28%増加するとともに、OCRは約1分で0から1.0wt.%に増加し、3分後には定常値1.1wt.%になる。

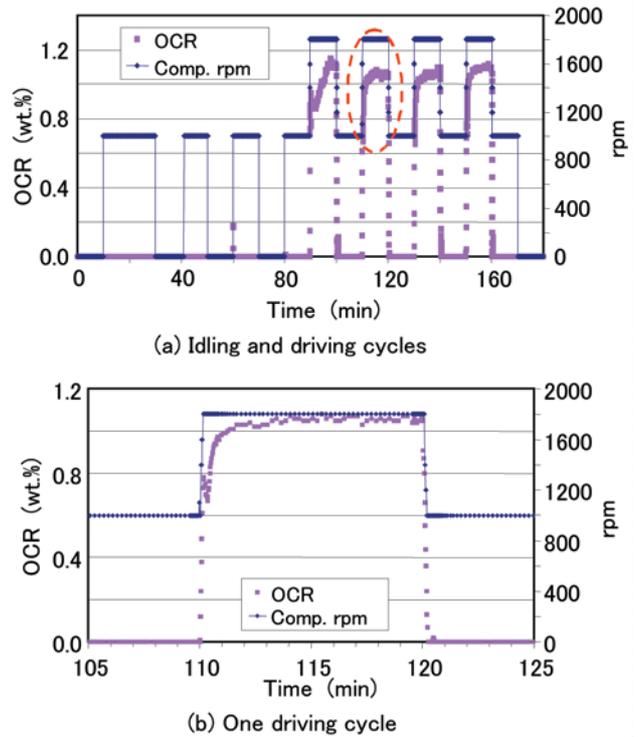


Fig. 15 OCR changes with oil separator

6.2.2 オイル分離器がないとき

Fig. 16はオイル分離器がないときの測定結果である。ここで、OCRメータの測定範囲は0から10wt.%に設定してあるので、OCRが10wt.%以上の測定値は10wt.%にプロットしてある。測定結果から、オイル分離器なし時のOCRは1000rpm・1800rpmのほとんどの場合で10wt.%以上になっており、1800rpmから1000rpmに回転数が変化するとき10wt.%から6wt.%に変化する。このコンプレッサ回転数減少時には、冷媒の質量流量が減少するため高圧サイドから低圧サイドへ冷媒の移動がおり、この冷媒移動によりOCRが一時的に減少し、やがて圧力バランスが定常状態になるとオイルの移動も定常状態に戻る。

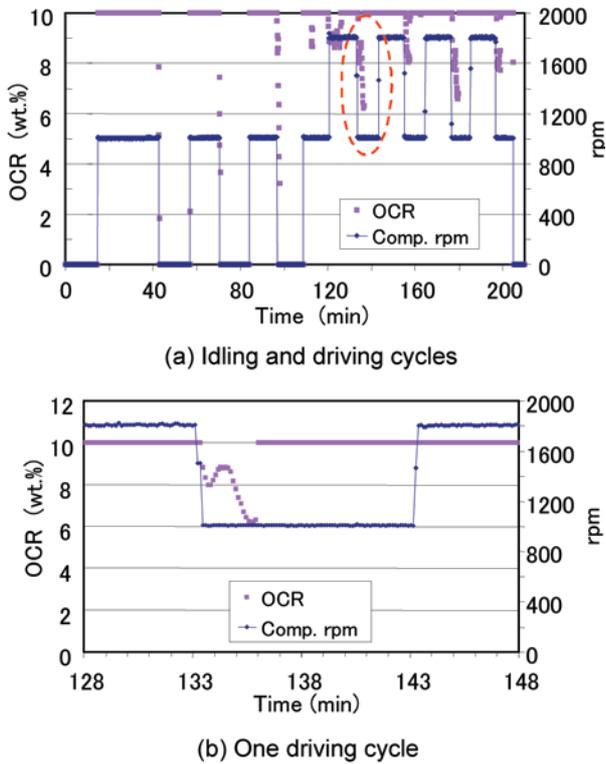


Fig. 16 OCR changes without oil separator

7. 結論

CO₂サイクル内のOCRを静電容量センサにより測定する方法を検討した。平行平板コンデンサの電極板間にオイル混じりのCO₂を流して静電容量を測定するセンサを開発し、サイクルのガスクーラ出口にこのセンサを設けた。また、静電容量から温度・圧力の影響を考慮してOCRを求める方法を立案し、OCRを測定可能にした。このセンサは、OCRが0から8wt.%の範囲において測定誤差が0.5wt.%以下であることを確認した。

このOCRメータを使い、熱伝達係数・圧力損失およびCOPに及ぼすOCRの影響を評価し、OCRが0.5wt.%から7wt.%に増加するとCOPは8から11%減少することが分かった。さらに、オイル分離器の有無によるOCRの違いについて評価を行い、オイル分離器なしではOCRが10wt.%以上なのに対し、オイル分離器ありでは1.1wt.%以下であることが分かった。

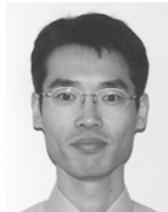
<参考文献>

- 1) 鈴木, 他: 平成元年度日本冷凍協会学術講演会論文集, p.105.
- 2) 井上, 他: 自動車技術会学術講演会前刷集, 902235
- 3) 藤原, 他: 冷凍, Vol.73, No.853 (1998), p.1009.

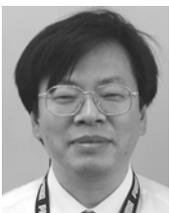
<著者>



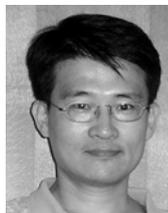
尾崎 幸克
(おざき ゆきかつ)
(株)日本自動車部品総合研究所
第6研究室
空調・熱機器分野のシステムおよび
コンポーネント開発に従事



堀田 忠資
(ほった ただし)
(株)日本自動車部品総合研究所
第6研究室
空調・熱機器分野のシステムおよび
コンポーネント開発に従事



平田 敏夫
(ひらた としお)
冷暖房開発1部
国内外業界活動および開発企画に従
事



Yunho Hwang
University of Maryland
Center for Environmental Energy
Engineering Department of
Mechanical Engineering
Assistant Research Scientist, Ph.D.
Vapor Compression, Heat Pump and
Refrigeration Cycles, Advanced
Energy Conversion Systems
Cooling, Heating and Power (CHP)
Systems の研究に従事