

熱流体トレーニング (6)

刑部真弘*¹

OSAKABE Masahiro

熱機関および熱力学の基礎となったサチ・カルノーの唯一の著作である「火の動力、および、この動力を発生させるに適した機関の考察」は、出版後約半世紀の間注目されなかった。難解だが噛めば噛むほど味が出る。

カルノーは図1に示したようなシリンダピストン機構を考えた。ここで、シリンダは底面のみが熱の良導体であり、側面およびピストンは断熱体であると考えた。シリンダ内には適当な気体が入っている。まず、シリンダを高温 T_H で一定のブロックに載せ、平衡に達した状態から始める。高温ブロック上に載せたままで、内圧によりゆっくりと（準静的に）気体を等温膨張させる。気体を断熱膨張させると温度が下がるから、等温膨張の過程で気体は Q_H なる熱を吸収する。次いで、シリンダを断熱ブロック上に移し、ゆっくり断熱膨張させて、温度が低温ブロックの温度 T_L になるまで至らせる。次に、シリンダを低温ブロック上に移し、ゆっくり等温圧縮させる。この過程で、気体は Q_L なる熱を低温ブロックに放出する。さらに、シリンダを断熱ブロック上に再び移して、ゆっくり断熱圧縮を行わせて最初の状態に戻し、上記過程を繰り返す。

結局、カルノーサイクルでは、温度 T_H なる高温ブロックから Q_H なる熱を吸収し、温度 T_L なる低温ブロックに Q_L なる熱を捨てて、その差 $W=Q_H-Q_L$ の仕事をするようになる。サイクル効率を以下のように定義される。

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (1)$$

これまでは温度について正しく定義することなく、いわば経験温度に頼ってきた。カルノーサイクルの効率は、高温ブロック温度 T_H および低温ブロック温度 T_L が同じであれば一意に決まることは自明である。このことから、逆に温度 T_H および T_L を次式によって定義する。

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \text{すなわち} \quad \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} \quad (2)$$

この式だけでは、温度の比率しか定まらないので、数値を定めるためには、標準大気圧における水の氷点と沸点の温度差を 100 と定める。このように定義された温度を、熱力学的絶対温度(thermodynamic temperature scale)と呼び、単位は K である。なお、カルノーサイクルの作動流体が理想気体とすると、状態方程式等を用いて式(2)が導かれる。また、カルノーサイクルは、この世の中で最高効率の理想的な熱機関として認められている。

ゆっくりとした（準静的な）変化過程は可逆であるから、上述したサイクルをまったく逆向きに進めることが

できる。この逆回りのサイクルでは、外部から仕事を与えることにより、低温熱源から Q_L の熱を吸収し、それに仕事相当分の熱 W を加えた Q_H の熱を高温熱源に捨てることになる。この逆回りのサイクルはヒートポンプに相当し逆カルノーサイクルと呼ばれる。この効率は以下で定義され、ヒートポンプの成績係数(COP, coefficient of performance)と呼ばれる。暖房の場合には

$$\eta = \frac{Q_H}{W} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (3)$$

冷房の場合には

$$\eta = \frac{Q_L}{W} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (4)$$

で定義される。おなじ温度で作動するヒートポンプを考えた場合、 $T_H > T_L$ であるので、一般的には暖房の COP が冷房のそれよりも大きい。

高温熱源温度を 1500 (1773K)、低温熱源温度を 27 (300K)としたカルノーサイクルの効率は、式(2)より 0.83 となる。燃焼ガス温度 1500 級ガスタービンを用いた最新鋭複合サイクルの熱効率は 0.5 強であり、理想状態の半分を超えている。一方、外気温度 35、室内温度 27 の間で冷房する電気式ヒートポンプの COP は 3 近くのものが増え、家庭用では 6 を越えるものも増えてきた。この場合、高温熱源温度が 308K、低温熱源温度が 300K であるので、逆カルノーサイクルの冷房 COP は式(4)より 37.5 である。排熱利用の分散電源と、ヒートポンプ利用の集中電源の効率比較を考えた場合⁽¹⁾、現状の COP は理想状態の半分まで至っておらず、今後の技術革新により更に大きくなる余地がある。ただし、この値は熱源間の温度差に大きく依存し、暖房温度の上昇や冷房温度の低下により大きく低下することを忘れてはいけない。

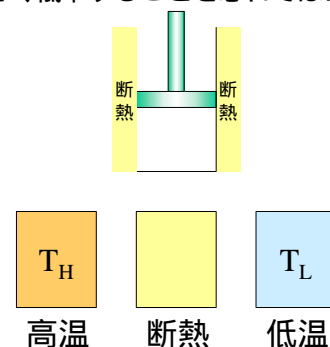


図1 カルノーサイクル

参考文献

- (1) SMART 研究会編, 地域分散エネルギー技術, 海文堂, (2004)

*1 東京海洋大学海洋工学部 海洋電子機械工学科
(江東区越中島2-1-6)。