

硬度測定によるピストンの温度分布推定法

Estimation of Temperature Distribution in Piston by Hardness Measurement

山縣 裕*

Hiroshi Yamagata

要旨

ピストンの運転時の温度分布は硬度の減少を測定することで決める事ができる、よく知られている。この方法は、ピストンが高温にさらされることで時効軟化することに基づいている。しかし、350°C以上の温度では使うのが困難で、それは溶質原子が350°C以上では溶け込むことによりピストン材料の硬度が上昇するためである。本文では、この方法の金属材料学上の背景を簡単に説明し、350°C以上の温度を正確に推定するため、時効を追加する新しい方法を提案する。

Abstracts

It is well-known that the temperature distribution of a piston under engine-operation is determined by a hardness-decrease measurement. This is based on the idea that the age-softening in the piston material takes place under exposure at high temperatures. However, this technique is difficult to use at the temperatures above 350°C, because the hardness of the piston material increases above 350°C due to the dissolution of the solutes. In this paper, the metallurgical background on this technique is briefly explained, and then a new technique using an subsequent aging treatment to accurately determine the temperatures above 350°C is proposed.

1 目的

ピストンおよびシリンダーまわりのトラブルを解消するに当たって、エンジン運転時のピストン温度を正確に知ることは、必須項目の一つである。この方法として、レスポンスの良い細径の熱電対を温度を知りたい部分に埋め込んでおき、エンジン運転時に測定するのは、精度の点で優れている。また、非定常状態の測定も可能である。しかし、高速で運動中のピストンより熱電対の端子をとりまわすのは、リンク機構など⁽¹⁾の手間のいるしかけが必要で、必ずしも汎用性は高くない。このような要請に対し、合金の熱による軟化挙動から運転時の温度を簡便に推定する方法が、広く用いられている。しかし、この方法にも限界があり、高温では合金の溶体化が進み逆に硬化するため、350°C付近以上の温度は、従来、推定できなかった。

本文では、従来行われている過時効軟化から温度推定を行う方法の概略と、考案した高温域での温度推定方法について解説する。

2 温度推定の背景

図1に現在もっとも広く用いられている金型鋳造ピストンの製造工程を示す。小型ガソリンエンジンのピストンには、四サイクルではJIS AC8A合金、二サイクルではJIS AC9Bが主に使用⁽²⁾されている。表1に合金成分を示す。両合金はSi量の差はあるものの、その他の成分は変わらない。Siは熱膨張を押さえるため、Niは高温強度の改善、

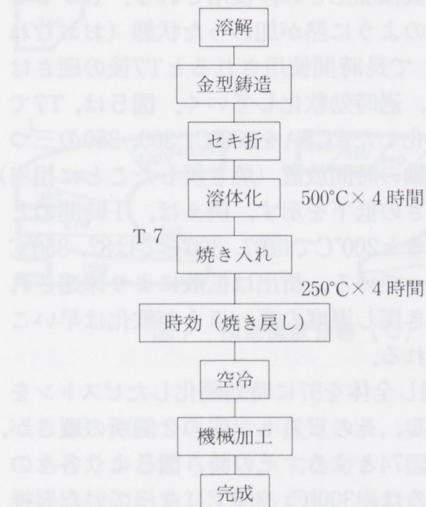


図1 金型鋳造ピストン製造工程

* 技術本部 基盤技術研究センター

1%程度のCuおよびMgはAlマトリクスを時効強化するために添加されている。一例としてAC9B合金の顕微鏡組織を図2に示す。粗大な初晶Siと共に晶出金属間化合物の微細な分散が見られる。AC8A合金は図2から初晶Siを抜き去った組織を呈する。図1において、金型鋳造したピストンには、溶体化・時効のT7と呼ばれる熱処理がされている。ここで、温度推定の原理ともかかわるので、簡単に時効硬化について説明する。

図3⁽³⁾はAl-4%Cu合金を500°Cで溶体化後、水焼き入れし、190°Cで横軸の時間、焼き戻した時の硬さの変化を示す。約3から30時間にかけて硬化（時効硬化と呼ぶ）し、長時間では漸次軟化（過時効軟化と呼ぶ）していく。図4にAl-Cu系の状態図を示す。500°Cでの溶体化により α 固溶体としてAl中に溶け込んだCuは、190°Cの焼き戻し（時効）によって安定組織の $\alpha + \theta(\text{Cu}_2\text{Al})$ に分解析出する。その途上、中間析出状態となり、結晶格子内部のひずみが増大し硬化する。図1の溶体化とは鋳造後に晶出していたCuやMgの化合物をマトリクス中に一旦、溶け込ませる処理を言う。

この中間析出状態をうまく得て硬化させるのが時効硬化である。また、長時間加熱により、状態図上の安定組織 $\alpha + \theta$ に分解してしまえば、硬さは再び低下する。これが過時効軟化である。AC8AおよびAC9Bにおいては、 θ やS(Al_5CuMg_2)などの析出相が出るまでの中間析出状態で時効硬化し、これらの析出相が安定に出ると過時効軟化する。時効硬化および過時効軟化は拡散律速により進むことが知られている。

ピストンはT7熱処理（図1）によって時効硬化状態とし、機械加工され、使用される。しかしながら、図3のように熱が加わった状態（おおむね150°C以上）で長時間使用されるとT7後の硬さは維持できず、過時効軟化していく。図5は、T7でHRF97に硬化したAC8Aを200°C、300、350の三つの温度で横軸の時間放置（焼き戻したことに相当）した時の硬さの低下を示す。例えば、1時間のところで比べると200°Cでは97、300°Cでは82、350°Cでは74となっている。析出は拡散により律速されるので、焼き戻し温度の高いほうが軟化は早いことがみてとれる。

T7熱処理し全体を97に時効硬化したピストンを1時間運転し、そのピストン内の2個所の硬さが、それぞれ82、74とする。その時、図5より各々の硬さのところは、300°C、350°Cになっていたと推定される、T7熱処理したピストン素材について図

表1 ピストン合金成分 (wt%)

JIS	Cu	Si	Mg	Ni	Al
AC8A	1	12	1	1	残り
AC9B	1	19	1	1	残り

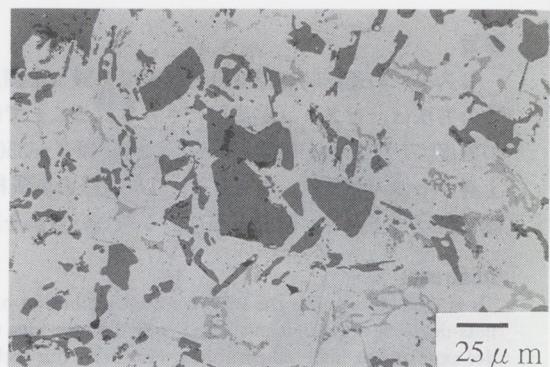


図2 AC9B合金の組織

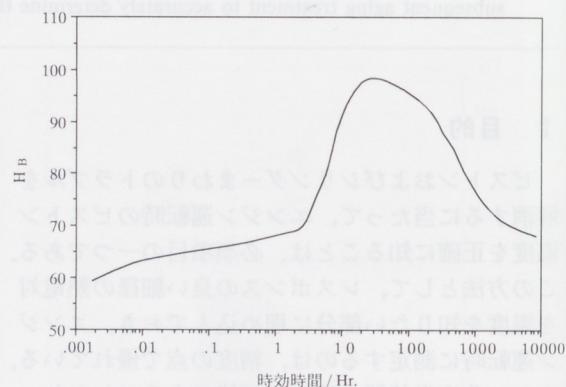


図3 Al-4wt%Cu合金の190°C時効による硬度変化

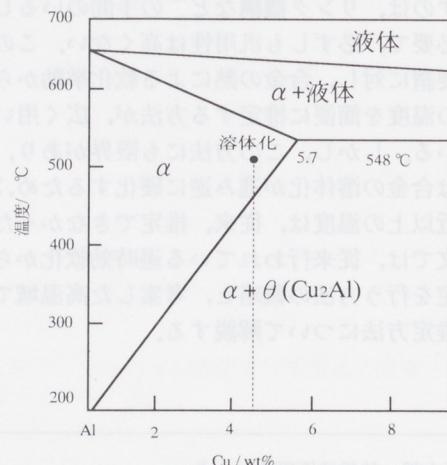


図4 Al-Cu系状態図の低Cu側

5のようなマスターカーブを各温度毎に作成しておき、運転時間のわかったピストンの硬さを測り、その硬さに対応する温度をカーブより読み取る。このようにして運転時の温度が推定される。但し、全運転時間中、測定したい各部の温度は各々、一定になっていた事が、正確に温度を推定する前提である。また、できるだけこののような状態になるよう運転パターンを選ぶ必要がある。

3 低温(<350°C)のピストンの温度推定

四サイクルピストン（径67mm, 8500rpmで1時間運転）の吸気(IN)-排気(EX)および左(L)-右(R)方向のヘッド切断面の硬さの実測値を図6に示す。図7は図6をもとにマスターカーブを用い、推定した温度分布である。排気側に高温部分が片寄っている事が見て取れる。このようにして推定した温度は、熱電対により測った温度と、約10°C程度の差で正確であった。この方法によれば、テスト中にばらばらに壊れたピストンからでも、原理的には温度推定できる。

4 高温(<350°C)のピストンの温度推定

前節で説明したのは一般に行われている温度推定である。ところで、図8はある二サイクルピストン（径56mm, 86時間運転）の運転後の硬度分布を示したものである。このデータをよくみると、図8(a)の○印で囲んだ値は、それより上側の熱がかかり、もっと温度が高いと考えられる所より1から5ポイントほど値が低くなっている。図5のカーブからは、高温に暴露されるほど硬さは低下するはずであるが、図8(a)ではヘッドの上面より下面の方が軟らかく、異常な値を示している。従来、高温にさらされるピストンでは正確な温度推定ができないといわれてきた挙動である。実は、加熱温度が高いと過時効による軟化ではなく、溶体化が進み（図4の α が安定な温度域に入るため）、再び硬化してしまうのである。図9はこのあたりの事情を説明するデータである。T7後の素材を各温度で1時間焼き戻した時の硬さの変化（実線）を示す。約400°C付近までは硬度が低下するが、極小を示し、さらに高温では再び硬化する。図9は図5のデータの1時間焼き戻し時の硬さをピックアップしてプロットしたものに相当する。

例えば、運転後の硬さが72であったとする。この硬度だけからは、図9より370°C（A点）と470°C

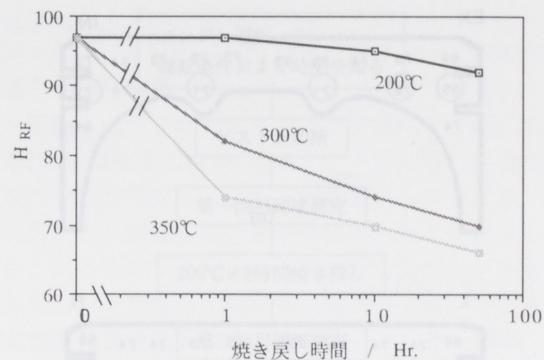


図5 AC8A焼き戻しによる硬度低下

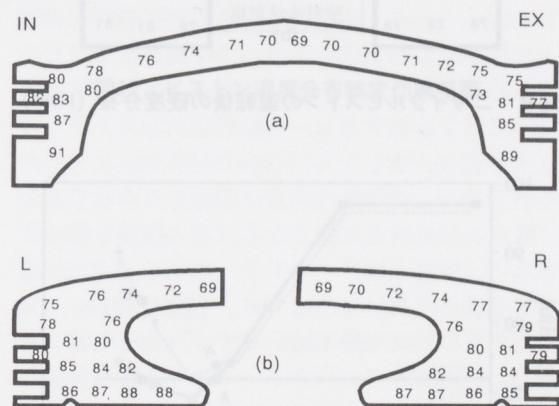


図6 四サイクルピストンの運転後硬度分布 (HRF)

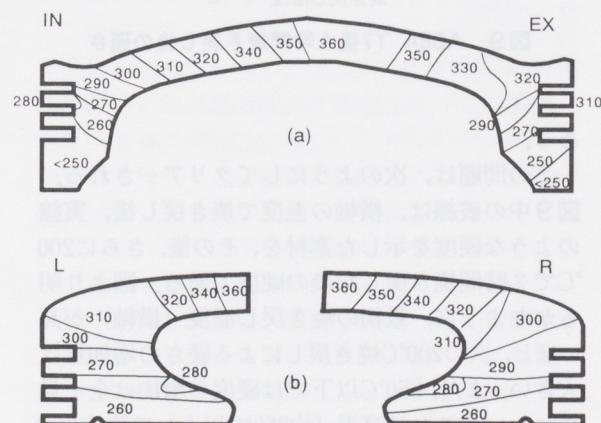


図7 推定温度分布 (°C)

(B点)の二つの温度が推定され、実際はどちらであったかわからない。すなわち、図9のカーブが鍋底状の形をしているため、場合によっては、高温部分のほうが低温部分より硬い値を示す事が

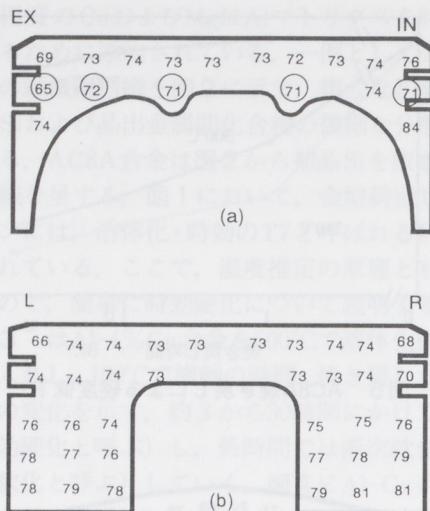


図8 ニサイクルピストンの運動後の硬度分布 (HRF)

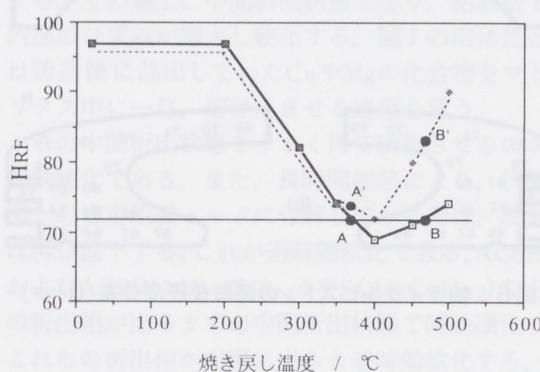


図9 AC8A T7後1時間焼き戻し後の硬さ

ある。

この問題は、次のようにしてクリアーザれる。図9中の破線は、横軸の温度で焼き戻し後、実線のような硬度を示した素材を、その後、さらに200°Cで2時間焼き戻した後の硬度である。図より明らかに、最初の焼き戻し温度（横軸）が高いほど、次の200°C焼き戻しによる硬度の増加量は大きい。また、350°C以下では硬度の増加は全く見られない。これは高温（約350°C以上）で溶体化の進んだ時には、次の200°C焼き戻して時効硬化が再び生じるためである。350°C以下の焼き戻して溶体化しない時には、安定析出状態で変化が少ないことによる。場合によっては350°C以下の時、さらに過時効が進み、やや軟化することもある。硬さが図9で72と測定された時でも、そのものをさらに

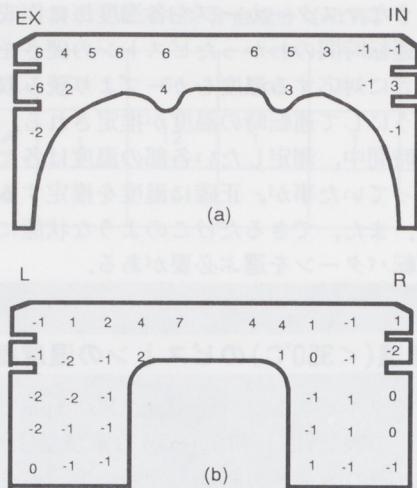


図10 200°C焼き戻し後の硬度分布 (HRF)

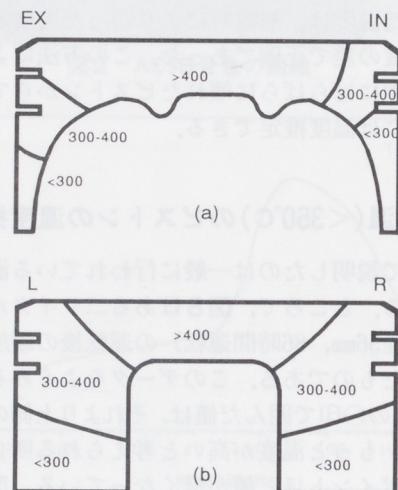


図11 推定温度分布 (°C)

200°Cで2時間焼き戻せば、A点の場合はA'まで、B点の場合はB'まで硬くなる。そして、硬さの増加が大きかった方がB点（高温側）であったことがわかるのである。

実際上、一回目の測定で図8のような異常が見られたピストンについて、200°Cで2時間焼き戻した後、二回目の測定を行い、その際の硬さの増加分を示したのが、図10(a)である。ヘッドの上面側の硬さの増加は下面側より大きく、図8(a)で見られた硬さの異常な逆転は、ヘッドが溶体化するほどの高温になっていたことを示す。このような方法で推定した温度分布はこの場合、図11であった。

以上の温度推定の手順を図12にまとめた。参考にされたい。

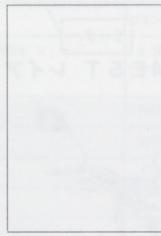
5 おわりに

エンジンの水冷化で、一時減少したピストンにかかる熱負荷は、高出力化、排ガス問題などで、最近ますます増加する傾向にある。本文で解説した方法は、簡便で実用的であり、おおいに活用されることをすすめる。

■ 参考文献

- (1) 古浜 庄一: 内燃機関, 22 (1983) 61.
 (2) 塩田 巨: 軽金属, 21 (1971) 670.
 (3) 須藤 一他: 金属組織学, 丸善, (1972) 154.

■著者



山縣 裕

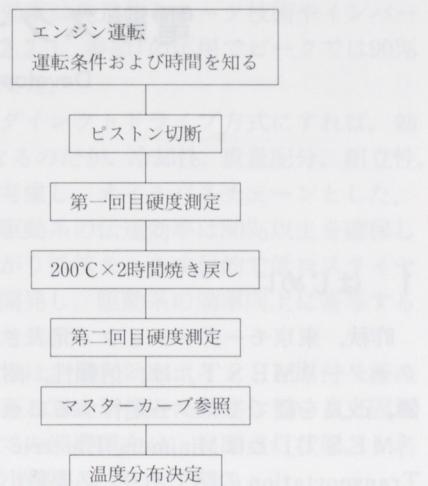


図12 ピストン温度分布推定作業手順