

## AEを用いたほう化処理鋼のトライボロジー特性評価\*

尾田 雅文\*<sup>1</sup>, 原 利昭\*<sup>2</sup>Tribological Evaluation of Boriding Metal  
by Acoustic Emission Technique

Masafumi ODA and Toshiaki HARA

An acoustic emission technique was developed to study the tribological characteristic of boriding SKD steel using a pin-on-disk type wear testing machine with acoustic emission sensor. AE signal of 300 kHz frequency spectrum generated by crack propagation in the specimens was observed in the wear testing. The R.M.S. value of the emission signal was expressed in terms of wear and friction parameters. The experimental results showed that AE generation from pin contact with a rotating disk indicates the feasibility of utilizing AE in boriding metal wear sensing.

**Key Words:** Measurement, Surface Treatment, Tribology, Friction, Wear, Ceramics, Acoustic Emission, Lubrication, Contact Pressure, SKD Steel

## 1. 緒 言

セラミクス材料は一般に金属材料に比べ硬度及び耐熱性が高く、さらに耐食性が優れていることから寸法精度に対する要求が厳しい摩耗部材に適している<sup>(1)</sup>。しかしながら、摺動面にセラミクス材料とともに金属材料を用いた場合、セラミクス材料の熱伝導率が小さいことから、摩擦熱が十分に拡散されず、金属材料が焼き付き現象を生ずる等の問題点が指摘されている。この点に関して、宇佐美ら<sup>(2)</sup>は各種セラミクスとS45Cとの摩耗試験を行い、接触点がS45Cの融点に達するような条件下で急激に摩耗量が増大する等の摩耗特性を明らかにしている。またその一方で、セラミクス材料と共に金属材料を摺動面に用いた場合、焼き付き現象を回避するためには金属材料の摺動面に表面改質層を設けることが、最も簡便かつ有効であると考えられる。各種の表面硬化法の中で、ほう素を金属材料の表面に拡散浸透させるほう化処理は、近年処理時の環境汚染問題等の解決方法<sup>(3)</sup>が実用化され、耐摩耗

性、耐酸化性及び耐焼き付き性が優れていることから、熱間鍛造金型や各種動力伝達装置等への応用が期待されている。

ところで、塑性変形や破壊時に発生するアコースティックエミッション(AE)<sup>(4)-(11)</sup>は塑性変形の状態や破壊の形態に対応した発生特性を示すことから、切削プロセスの監視等への利用が有望視されている<sup>(4)-(6)</sup>。また、和田ら<sup>(8)(9)</sup>は摩耗試験においてAE信号を測定することにより潤滑膜の状態や摩擦係数の推定を行うことが可能であることを示している。さらに、久門ら<sup>(11)</sup>はセラミクス繊維強化金属とセラミクスの組み合わせを対象とした摩耗試験を行い、その際に発生するAE信号のリングダウン計数率を求めることにより、定性的な比摩耗量の評価、摩耗面の損傷状態及び動的接触状態を検出することが可能であることを明らかにした。これに対して、ほう化処理鋼の摩耗特性を示した例<sup>(12)(13)</sup>も見受けられるが、その多くは相手摺動面が金属材料であり、前述のようなセラミクスを用いた例はあまり見受けられないようである。そこで、本研究では摩耗実験により、ほう化処理鋼のアルミナセラミクスに対するトライボロジー特性を明らかにするとともにAE信号を測定し、さらに試験後の摺動面を観察することにより、ほう化処理層の脱落機構

\* 原稿受付 1994年12月8日。

<sup>1</sup> 正員, 新潟職業能力開発短期大学校(☎954 新潟市新富町1-7-21)。<sup>2</sup> 正員, 新潟大学工学部(☎950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

に関する考察を行った。

## 2. 摩耗実験

本研究において使用したピン-オン-ディスク型摩耗試験機を図1に示す。ピン型試験片(ピン)の押し付け力はエアシリンダー内の空気圧力を圧力調整弁で制御する方式を採用しており、任意の荷重での保持や連続的な荷重の増減が可能である。一方、ディスク型試験片(ディスク)を固定したターンテーブルは、ACサーボモータにより任意の速度で回転可能である。

図2に示すように、直径8mm、長さ30mmのピンをディスクの中心から30mmの位置で摺動した。表1にピンならびにディスクの材質および硬度を示す。ピンはほう化処理したSKD11鋼ならびにS45C鋼、さらにはほう化処理によるトライボロジー特性の変化を明らかにするために同じ材料の調質鋼を用いた。ほう化処理は図3に示す条件で行い、図4に示す様にSKD11鋼で表面から約45 $\mu$ m、S45C鋼で約50 $\mu$ mのほう化物層(Fe<sub>2</sub>B)を得た。なお、ピン及びディスクの初期摺動面は研削加工及びラップ加工し、中心線平均粗さRaで0.7 $\mu$ mの均一な表面を得た。

本研究では一定の押し付け荷重でピンを押しつける摩耗実験の他に荷重を一定の変化率で増加させる焼き付き性実験を行った。両実験ともに大気中、室温で行い、60℃に加熱したタービン油(#32)を200cc/minで摺動面に滴下した。また、公称共振周波数が1MHzであるAEセンサーをピンホルダーに設置し、図5に示

すように検出した信号はアンプで70dB増幅した後にFFTアナライザーによってスペクトルを求めた。ま

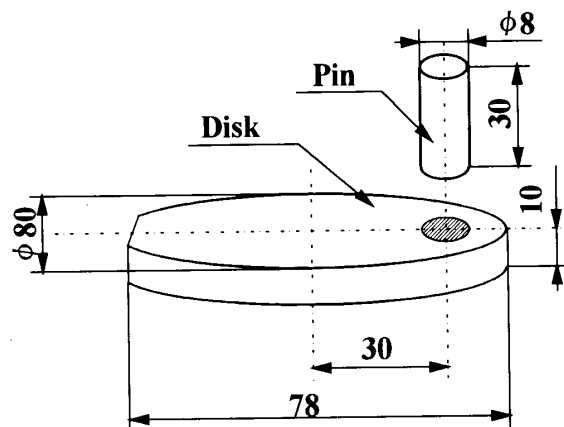


図2 ピン及びディスクの形状

表1 試験片の表面硬度

	No.	Material	Hardness [Hv]
Pin	A	SKD11	802
	B	Boriding SKD11	1532
	C	S45C	703
	D	Boriding S45C	1489
Disk		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1601

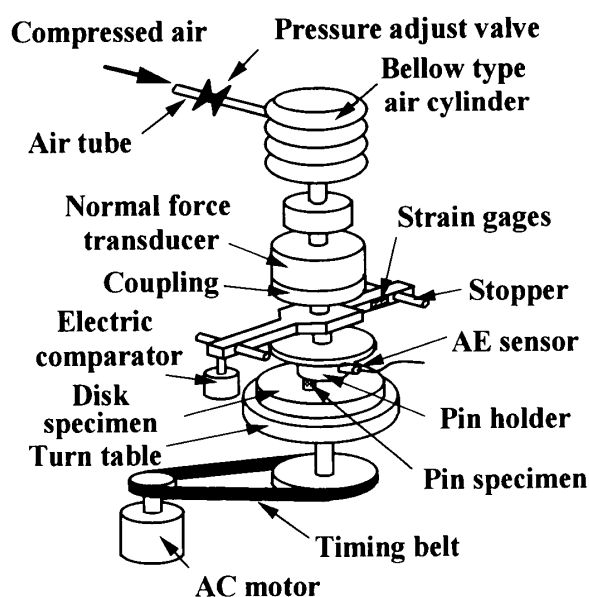
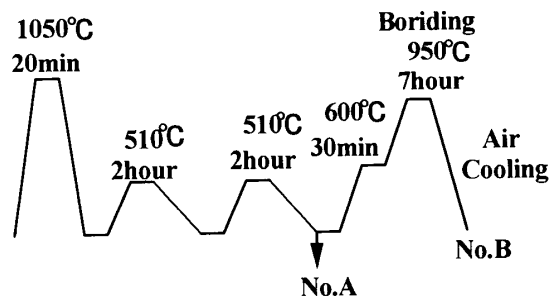
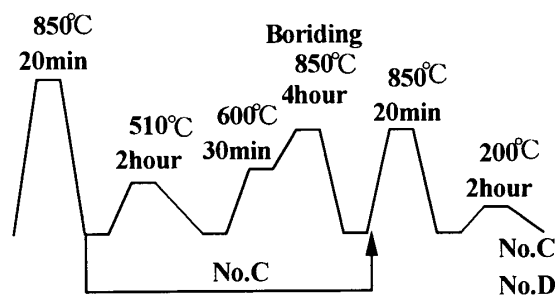


図1 摩耗試験機概略図



(a) SKD11



(b) S45C

図3 ほう化処理ピン作製時の処理条件

た、バンドパスフィルターによって測定する AE 信号の周波数を限定した後に AE コンバータを介してパーソナルコンピュータに入力し、AE 信号が持つエネルギーの相対的な値である Root Mean Square 値 (R.M.S. 値) を利用して、解析を行った。

接触圧力の影響を調べるために摺動速度が 1.31m/s、接触圧力が 1.86 ~ 7.74MPa の範囲内でトライボロジー特性を評価した。さらに、摺動速度の影響を調べるために接触圧力を 5.78MPa、摺動速度を 0.17 ~ 4.71m/s の条件下で摩耗実験を行った。いずれの場合もピンの摩耗量、摩擦係数及び AE を測定した。摩耗量は差動トランス (分解能 1 μm) の出力よりピンの長さの減少量を求め、さらに 2500m 摺動後のピンの摩耗重量を計測した。なお、ディスクの回転による差動トランスの変動量は 17 μm/rev である。ここで、計測はアセトン中でピンの超音波洗浄を行い、試料表面に付着した油脂及び摩耗粉等を取り除き、充分乾燥した後にを行った。

焼き付き性実験においては摺動速度を 0.47 ~ 4.17 m/s とし、さらに 1.96N/m の割合でピンの押し付け力

を増加した。その際に、摩擦係数及び AE 発生特性が変化する荷重値を臨界荷重値と定義し、摺動速度と臨界荷重値の関係を求めた。

また、摩耗実験及び焼き付き性実験終了後に走査型電子顕微鏡及び超音波顕微鏡により摺動面の観察を行うとともにそれぞれの試験片に対してスクラッチ試験

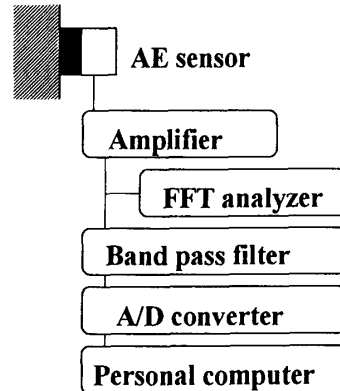
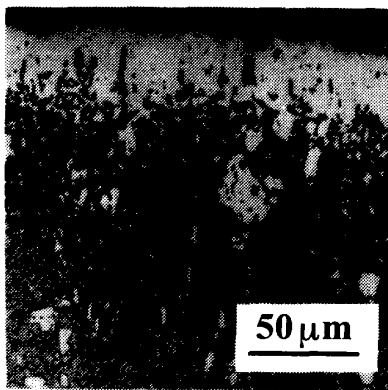
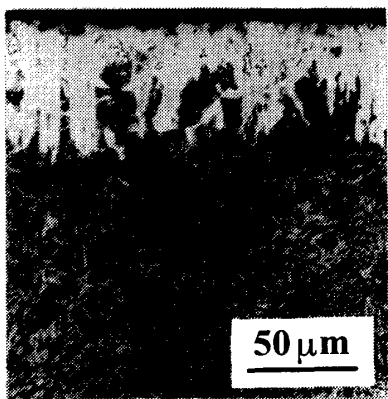


図 5 AE 信号測定システム

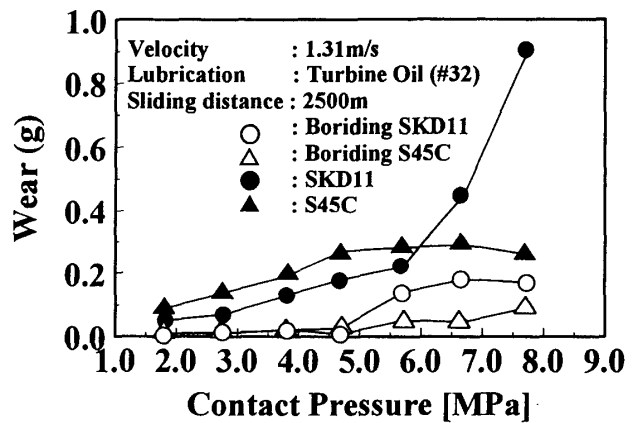


(a) SKD11

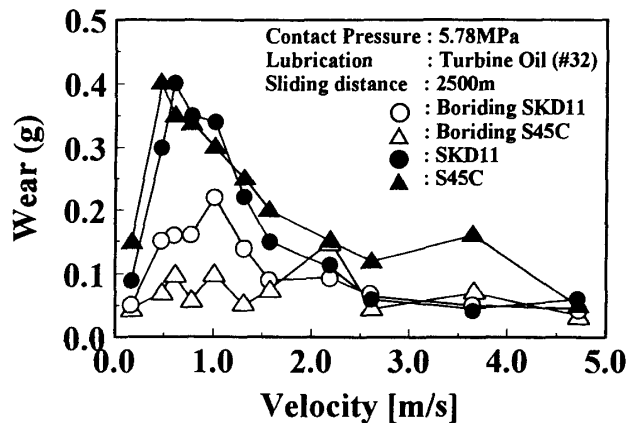


(b) S45C

図 4 ほう化物層の金属顕微鏡写真



(a) 接触圧力と摩耗量の関係



(b) 摺動速度と摩耗量の関係

図 6 摩耗実験結果

を行い、摺動時のAE放出特性を検討した。ここで、スクラッチ試験はノーズ半径  $0.2 \mu\text{m}$  のダイヤモンド圧子を使用し、 $100\text{N}/\text{min}$  で荷重を増加しながら  $10\text{m}/\text{min}$  の速度で圧子を移動するとともにAEを測定した。

### 3. 結果・考察

**3-1 摩耗実験結果** 図6(a)に摺動速度を  $1.31\text{m}/\text{s}$  とした場合の接触圧力と摩耗量の関係を示す。接触圧力が大きくなるに従って、摩耗量も増加する。接触圧力が  $5.6\text{MPa}$  以上ではほう化処理層の一部が試験中に脱落することから、摩耗量は大きく増加する。これに対して、図6(b)に示すように、摺動速度が  $0.5 \sim 1.5\text{m}/\text{s}$  の場合に摩耗量は最大値を示し、更に大きな摺動速度領域では摩耗量は小さくなる。

**3-2 摩耗実験におけるAE発生特性** 図7に摩耗実験時に放出されたAEのパワースペクトルを示す。ピーク周波数は  $10\text{kHz}$  および  $300\text{kHz}$  であり、前者は摺動音、後者が試験片の破壊音およびき裂の進展時に放出されるAEである。本研究では  $300\text{kHz}$  におけるAEの測定並びに解析を行った。

図8は摺動速度  $1.57\text{m}/\text{s}$ 、接触圧力  $5.78\text{MPa}$  における摩耗実験時の摩耗量、摩擦係数、AE出力およびそのR.M.S.値の経時変化を示す。摩耗量は摺動距離  $250\text{m}$  程度で初期摩耗から定常摩耗に移行する。これにともない、AE出力は初期摩耗時に  $6 \times 10^{-3}\text{V}$  程度であるが、その後暫時減少する。また、摩擦係数も初期の  $0.05$  より  $0.045$  に減少する。一方、摺動距離  $470\text{m}$  時においてほう化物層が脱落することにより、摩耗量は急激に増加した。同時に摩擦係数は  $0.07$  程度まで増加し、その後  $0.045 \sim 1.2$  の範囲内で変化した。これに対し、AE出力は一時的に増加するが、そ

の後は、暫時減少する。すなわち、ほう化物層が脱落することによってAE出力が僅かではあるが変化し、

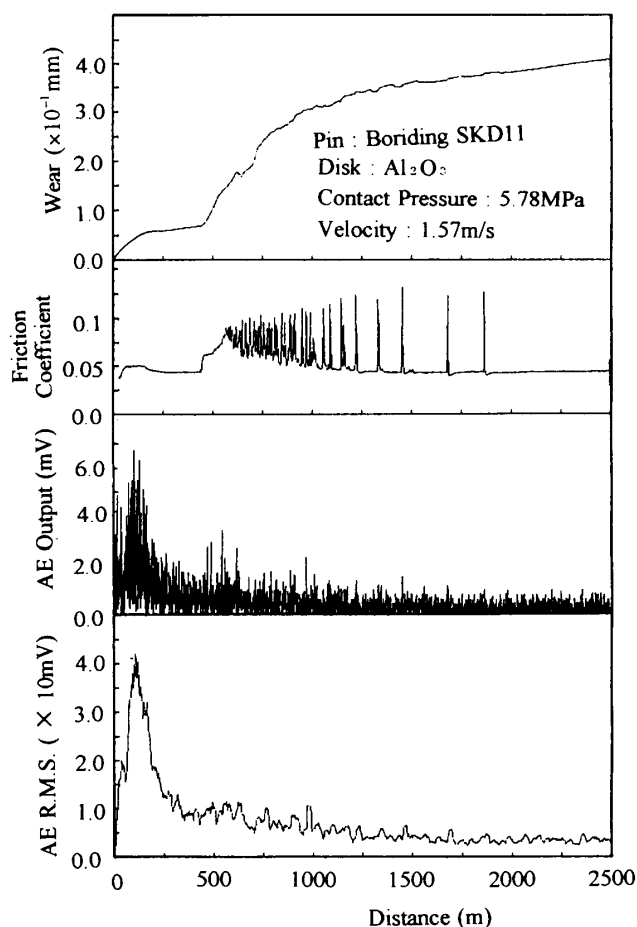


図8 摩耗実験時の摩耗量、摩擦係数およびAE

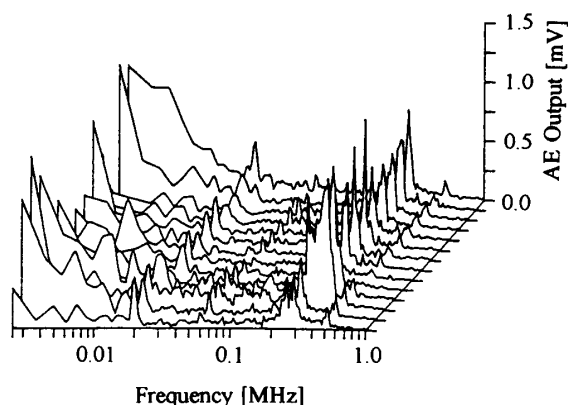


図7 摩耗実験時のAE信号のパワースペクトル

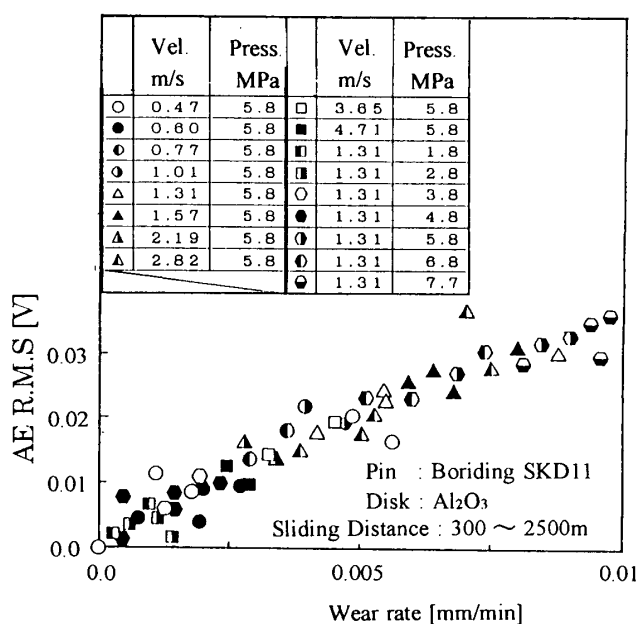


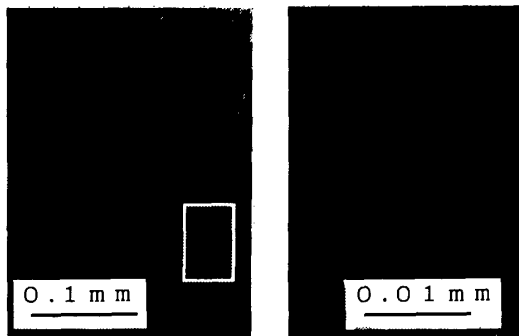
図9 摩耗量とAE発生特性の関係

ついで摩擦係数が変化する。従って、この特性を利用すれば、異常摩耗の予知が可能と考えられる。

図9にほう化処理したSKD11鋼の摩耗率とAEの関係を示す。縦軸にはAEのR.M.S.値を、横軸にはピンの摩耗率をそれぞれ示した。両者の関係は摺動速度や接触圧力等の条件に依存せず、AEの放出特性は摩耗量により決定されることがわかる。

図10及び図11はほう化処理したSKD11鋼の摩耗実験後における摺動面の顕微鏡写真である。摺動速度1.57m/s、接触圧力4.8MPaの条件下で摩耗実験を行っており、摺動距離は2500mである。いずれの図も同一箇所の観察結果を示しており、前者は走査型電子顕微鏡写真、後者は40 $\mu$ m内部の超音波顕微鏡写真である。特に図10において、同図(a)の白枠長方形部の拡大写真を同図(b)に示した。摺動面には摺動方向に対して垂直方向の直線状のき裂が観察される。また、図10の摺動面を超音波顕微鏡で観察した場合には図11に示す様に表面より40 $\mu$ m内部でき裂の近傍に楕円形状の内部き裂が存在し、図10では見られなかった多数の直線状のき裂が観察された。

図10及び図11の観察結果より、ほう化物層の脱落過程を図12のように推測した。すなわち、図12(a)のようにほう化物層の厚さは均一でなく、同図(b)のように摺動中にほう化物層の薄い部分で母材との界面に直線状のき裂を生ずると考えられる。その後、このき裂が生長して、摺動面まで進展し、さらに、同図(c)のようにほう化物層と母材の境界に内部き裂が進展する。この内部き裂が図11の楕円形状のき裂であり、このき裂が成長することによって同図(d)のようにほう化物層が脱落すると予想される。このような母材とほう化物層の境界部でのき裂発生や進展は、両者の熱膨張係数の差異やほう化物層生成時の残留応力等に起因するものと考えられる。なお、ここで示した表面および内部でき裂進展時に放出されたAEを検出する



(a) き裂全体 (b) 白枠長方形部の拡大  
図10 ほう化処理鋼の摺動面の電子顕微鏡写真

ため、前述の図8における摩擦係数の変化がAE放出後に生じたものと考えられる。

図13にSKD11、S45Cのほう化処理鋼ならびに両者の調質鋼の摩耗率とAE放出量の関係を示す。縦軸にはAE放出量のR.M.S.値を、横軸には摩耗率をそれぞれ示した。両者の関係は全て上に凸の曲線として得られ、かつ、この曲線は材質及びそのほう化処理の有



図11 ほう化処理鋼の超音波顕微鏡写真

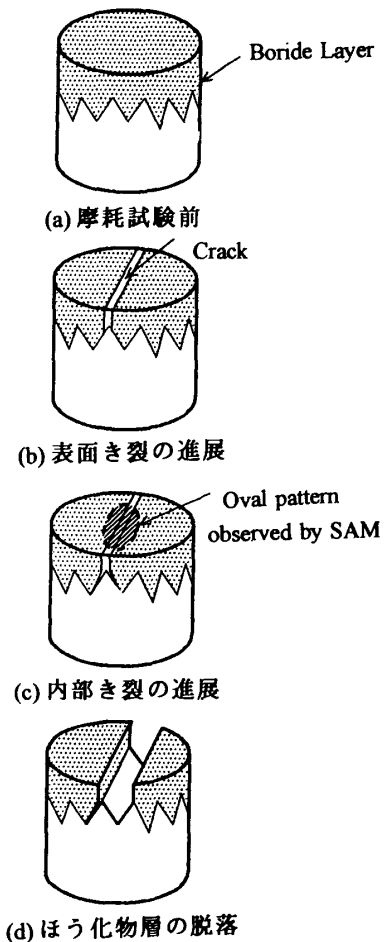


図12 ほう化物層の剥離過程

無によりそれぞれ異なる特性を示す。すなわち、同一のAE放出量に対してSKD11のほう化処理鋼、S45Cのほう化処理鋼、SKD11の調質鋼、S45Cの調質鋼の順で摩耗率が大きくなる。

図14にスクラッチ試験時のAE発生特性を示す。ほう化処理したSKD11鋼は20N程度の押し付け荷重でAE信号の放出量が増加した。また、S45Cのほう化処理鋼は15N程度でAE信号を放出するが、その放出量はSKD11鋼の場合よりも小さい。これに対して、調質処理したSKD11鋼及びS45C鋼のAEは、ほとんど検出されなかった。このようにスクラッチ試験におけるAE信号は図13に示す摩耗率とAE放出量の関係と同様な傾向を示しており、摩耗実験時のAEはアブレッシブ摩耗によりき裂が進展したり接触表面の損傷によって放出されるものと思われる。

3.3 焼き付き性実験におけるAE発生特性 図15は焼き付き性実験において発生したAEの一例である。

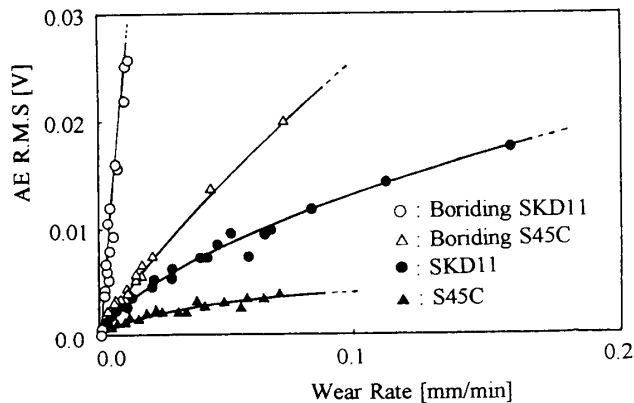


図13 材質による摩耗量とAE発生特性の関係

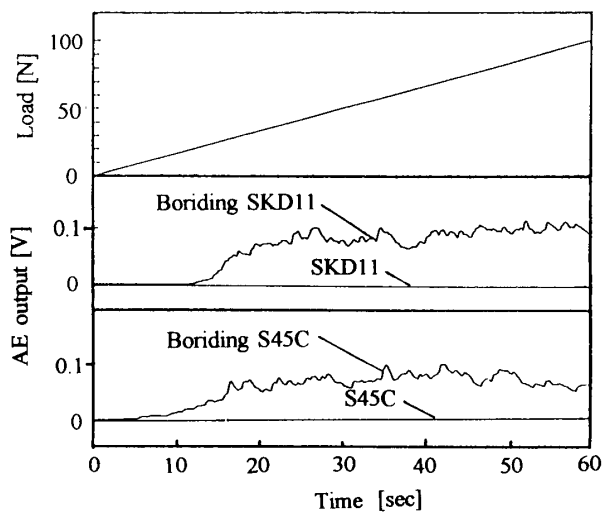


図14 スクラッチ試験におけるAE発生特性

横軸は摺動距離を縦軸にはAEの放出量、押し付け荷重、ピンの長さの減少量および摩擦係数をそれぞれ示している。なお、この場合の荷重増加率は1.96N/m、摺動速度は0.79m/sであり、潤滑剤としてタービン油(#32)を使用した。試験初期においてAE放出量は押し付け荷重と共に増加する。一方、荷重および摩耗量が共に単調に増加するが試験開始6分後でAE放出量は減少する。これは図16に示すようにほう化物層の一部が欠落し、同一摩耗量に対するAE放出量の小さいSKD11鋼が接触表面に現れたためである。一方、摩擦係数はほう化物層が完全に脱落する試験開始11分後から急激に増加する他は、ほとんど変化が見受けられなかった。

押し付け荷重の増加過程において、摩擦係数が急激

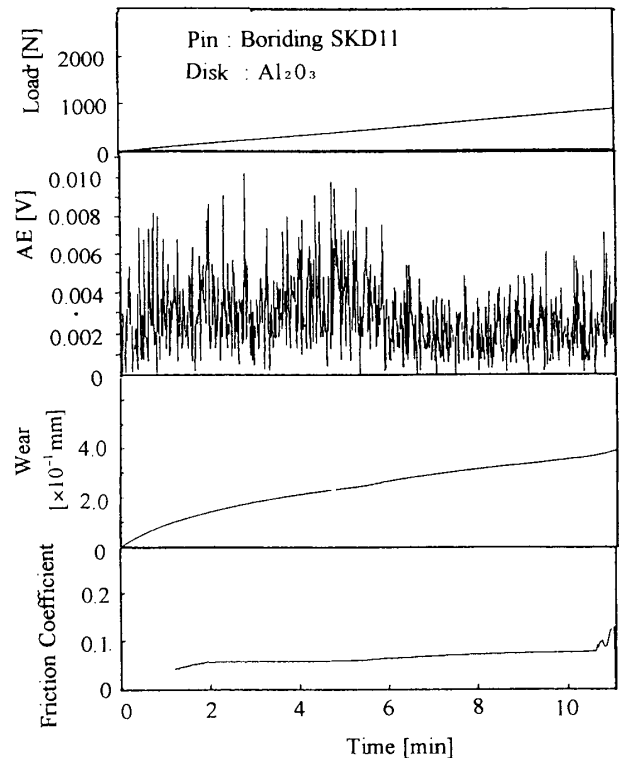


図15 焼き付き性実験時のAE発生特性の一例

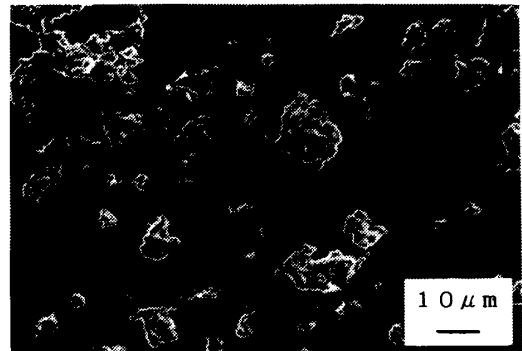


図16 焼き付き性実験時における接触表面

に増加する臨界荷重値および AE 信号放出量が減少する臨界荷重値と摺動速度の関係を図 17 及び図 18 に示す。図 17 は SKD11, 図 18 は S45C の結果であり, 横軸と縦軸は摺動速度および臨界荷重値をそれぞれ示している。いずれの場合も摺動速度の増加にともない臨界荷重は小さくなり, 摩耗量が増加していることを示している。これは, 摩耗実験の場合より接触圧力が大きいこと, さらには遠心力により滴下された潤滑油が速やかに摺動面から排除され, 摺動面は乾燥面の状態に近いとと考えられる。このことから, 焼き付き性実験では境界潤滑等, 過酷な条件下での評価を行っているものと考えられる。一方, 摩擦係数の変化より求めた臨界荷重値は AE 信号の発生特性より求めた値よりも大きい。これは, 接触表面にほう化物層が局部的に存在すれば低摩擦係数値が保持されるためである。

以上より, 摩耗実験及び焼き付き性実験時の AE 信号測定は単にほう化物層が存在するか否かを把握するのみならず, ほう化物層のき裂進展状態や脱落過程を摩擦係数の変化を利用する場合よりも感度良く調べることが可能であり, さらには早期に異常摩耗を予知する上でも極めて有効である。

#### 4. 結 言

本研究ではほう化処理鋼の摩耗実験及び焼き付き性実験を行うとともに, その時に発生する AE 信号を測定し, 以下の知見を得た。

- (1) 摩耗実験時の AE 発生特性を利用してほう化物層の欠落状態等が把握できる。さらに, 摩耗率と AE 発生特性の間に, 相関性が見られることから, AE 法により摩耗状態の評価が可能である。
- (2) 摩耗率と AE 放出量の関係は摺動速度や接触圧力に依存しないが, 摺動部材の材質に強く影響される。すなわち, 同一の AE 放出量に対する摩耗率は SKD11 のほう化処理鋼, S45C のほう化処理鋼, SKD11 の調質鋼および S45C の調質鋼の順に大きくなることを確認された。
- (3) 焼き付き性実験においては, 負荷の増加とともに AE 発生特性が変化した後には摩擦係数が変化することから, この様な AE 特性を測定することによって異常摩耗の早期予知が可能である。

#### 参 考 文 献

- (1) 金石三, 他 2 名, 潤滑, 31-5(1986), 329-335.
- (2) 宇佐美初彦, 他 3 名, 潤滑, 34-6(1989), 458-464.
- (3) 堀江皓, 他 4 名, 鋳物, 62-3(1990), 208-213.
- (4) 小島浩二, 他 2 名, 機論, 52-474,C(1986), 799-805.
- (5) 相田収平, 他 2 名, 機論, 52-481,C(1986), 2563.
- (6) Kannatey-Asibu Elijah, Dornfeld David, Trans.A.S.M.E, J.Eng.Ind., 103(1981), 330-340.
- (7) Chung Jin-Bork, Kannatey-Asibu Elijah, J.Appl.Phys, 72-5(1992), 1812-1820.
- (8) 和田正毅, 水野萬亀雄, 精密工学会誌, 52-10(1986), 1719-1724.
- (9) 和田正毅, 水野萬亀雄, 精密工学会誌, 55-4(1989), 673-678.
- (10) 尾田雅文, 他 4 名, トライボロジー会議予稿集 (東京 1991-5), (1991), 241-244.
- (11) 久門輝正, 他 2 名, トライボロジスト, 37-8 (1992), 660-666.
- (12) 竹内栄一, 他 2 名, 熱処理, 22-3, (1982), 156-162.
- (13) 山本久, 他 2 名, 金属表面技術, 22-10, (1971), 508-521.

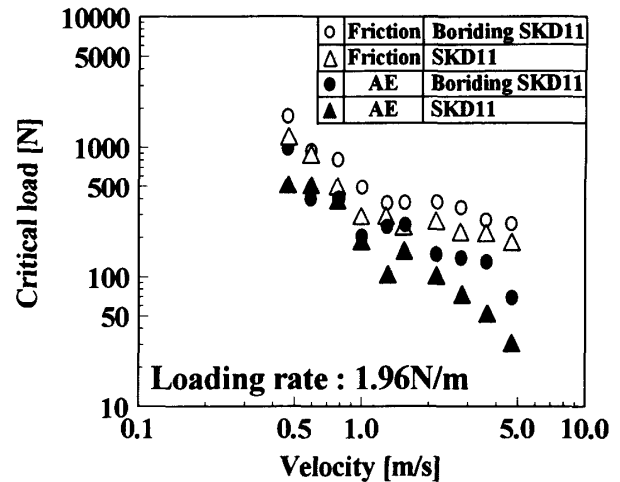


図 17 焼き付き性実験結果 (SKD11)

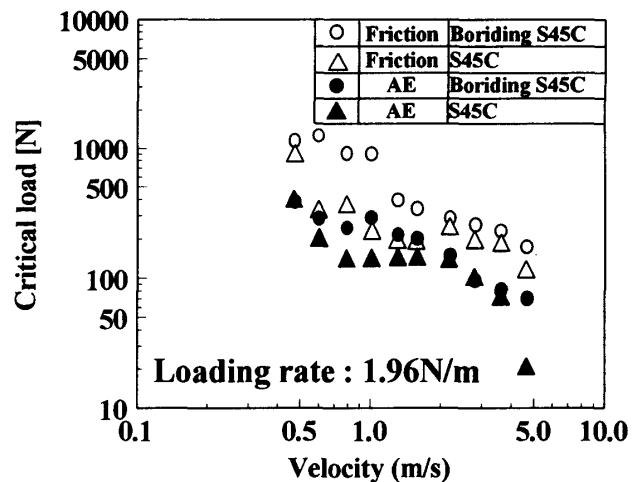


図 18 焼き付き性実験結果 (S45C)