木材・木質材料と鋼棒先端の摩擦面温度

奥村　正悟・石井　徹・野口　昌巳

Temperature of Rubbing Surfaces between a Steel Rod and Wood and Wood Composites

Shogo OKUMURA, Tohru ISHII and Masami NOGUCHI

要　　約

木材切削工具の温度上昇についての基礎資料を得るため，ヒノキ，ブナ，ホワイトセラヤ，合板，パーティクルボードから作製した回転円板に直径3㎜の軟鋼棒を押し付けて種々の条件で摩擦させ，そのときの棒の軸方向4個所の温度を熱電対で測定し，摩擦面の温度上昇と摩擦条件などについて検討した。どの摩擦条件においても，定常状態における棒の軸方向温度分布は片対数グラフ上で直線となり，この直線の外挿値として先端温度を求めた。円板の種類や摩擦条件（垂直荷重と速度）によらず，先端温度は摩擦仕事率とともに上昇し，両者は上に凸の曲線関係を示した。軸方向温度分布から求めた棒先端への流入熱量は，摩擦仕事の50％以下であり，摩擦仕事率が大きくなるとこの割合は低下した。棒の先端部における温度分布を，実際の接触面積を考慮した数値計算で求めたところ，外挿による先端温度よりも10～15％高い接触面温度が得られた。

1．は　じ　め　に

木材と金属を比較的高速で摩擦したときの温度上昇，とくにその界面の温度は，木材切削工具の刃先摩耗などに密接に関係している。とりわけ，Stewart[1]が，超硬チップソーで中密度繊維板（MDF）を切削したときの刃先摩耗の主因は超硬合金の高温劣化であることを指摘してから，木材切削においてもその重要性が再認識されつつある。摩擦面の温度は古くから解析が試みられ，異種金属間などでは熱電対法による実測も行われている[2]。しかし，木材と金属の摩擦による温度上昇を検討した例はきわめて少なく[3,4]，摩擦面の温度については，実験上の困難さもあって，摩擦面から離れた場所の温度の実測値からの推定[3]，切削の前後における工具表面の組成[1]や硬さ[5]の変化からの推定，数値解析[6]などに頼らざるを得ないのが現状である。そこで本研究では，木材切削における刃先温度を解析するための基礎資料とするため，軟鋼製の細い丸棒の先端をいくつかの木材および木質材料で摩擦したときの，棒の長さ方向の定常温度分布を測定し，その温度分布から推定した棒の先端における温度上昇と摩擦条件の関係，摩擦仕事率と棒に流入する熱量の関係などについて検討した。さらに，棒先端部に二次元定常熱伝導理論を適用して温度分布の数値計算を行い，推定した先端温度と実際の接触面の温度の関係についても考察した。

なお，本研究の概要は第40回日本木材学会大会（平成2年4月，つくば）において口頭発表した。

2．実　　験

2.1 装置と試料

摩擦実験は，円板状の試料を無段変速モータ（日立 PCF-0.4。速度制御範囲140～1400rpm）の主軸に取り付けて水平に回転させ，この表面に軟鋼製の棒を垂直に押し付けることによって行った（Fig.1）。軟鋼棒は，直交する二つの回転軸（鉛直および円板の接線に平行な軸）で支えられたアームの先端に固定し，アームに吊るした分銅によって垂直荷重を負荷した。

試料円板は，ヒノキ（気乾比重0.52）とブナ（0.67）の柾目板，ホワイトセラヤ（0.46）の木口板，7プライのラワン合板（0.54），3層構造のパーティクルボード（0.75）から作製した。厚さはすべて20㎜で，直径は200～300㎜である。これらの円板は旋盤を用いてできるだけ真円に仕上げ，表面を＃80の研磨布で研削してから実験に供した。

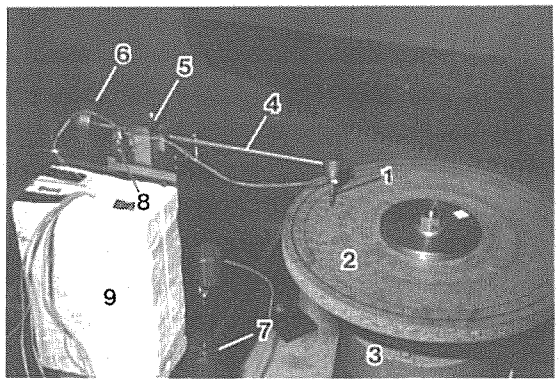

Fig. 1　Experimental setup.
1, steel rod; 2, sample disc; 3, variable speed induction motor; 4, arm; 5, gimbal; 6, counter weight; 7, weight for vertical force; 8, force transducer; 9, polystyrene container for reference junction.

軟鋼棒は直径が3㎜で，先端に曲率半径2.5㎜の丸みがあり，アーム先端の保持部（直径20㎜，高さ20㎜のしんちゅう製穴あき円柱）から40㎜突き出るように固定した。

垂直荷重は0.1～0.5kgfの3または5段階に設定し，それぞれの荷重について摩擦速度を1.1～14.0 m／sの5～10段階に変えた。なお，円板は棒を接触させてから回転させ，棒の各部の温度（後述）がほぼ定常状態になるまで続けた。また，棒の位置は垂直荷重を変更するごとに円板の新しい面と摩擦するように移動したが，表面の状態によっては同一荷重でも適宜移動した。

2.2 摩擦力と温度の測定

摩擦力は，アームの鉛直軸回りの回転を拘束するのに必要な力を，片持ちはり式の荷重変換器で測定することによって求めた（Fig.1）。

棒の温度は，先端から2，4，8，16㎜の4個所に直径0.5㎜，深さ1.5㎜の軸に垂直な穴をあけ，これらの穴に熱電対を挿入して測定した。熱電対には直径0.1㎜のクロメル線とアルメル線を用い，測温接点はエポキシ樹脂によって穴の底部に固定した。基準接点は発泡スチロール製の容器に入れて室温（15～23℃）に放置し，容器内の温度を常に監視した。各熱電対の起電力は，荷重変換器の出力およびモータに内蔵されている速度検出器の出力とともに6ペン位相同期レコーダで記録した。

3．結果と考察

3.1 温度上昇経過と棒の軸方向温度分布

摩擦開始からの棒の各点における室温からの温度上昇，摩擦力，モータの回転速度を記録したチャートの例をFig.2に示す。図のブナの場合は，棒の各点の温度は摩擦開始直後から上昇し始め，摩擦開始から80秒程度でほぼ定常状態に達し，円板の回転が停止するとともに急速に低下している。摩擦力は細かい変動は示すものの，摩擦開始から温度が定常に達するまでほぼ一定である。一方，同図のパーティクルボードの場合は，摩擦力が途中でかなり変動し，それに応じて温度も変動している。Fig.2のようなチャートから，定常状態における棒の各点の温度と摩擦力を読み取ったが，摩擦力と温度が変動する場合は，定常に達したと判断できる範囲の平均値を求めて測定値とした。

Fig.3は，定常状態における棒の各点の温度上昇と先端からの距離の関係を，ホワイトセラヤの木口板と合板について，片対数グラフ上にプロットした例である。図からも分かるように，両者はどのような摩擦条件においても，片対数グラフ上で極めて良好な直線関係を示した。そこで，この直線を距離0に外挿して求められる温度を，それぞれの摩擦条件での定常状態における棒先端の温度上昇とした。

3.2 棒先端の温度上昇と摩擦条件の関係

3種類の垂直荷重における棒先端の温度上昇および摩擦係数と摩擦速度の関係を，パーティクルボードとブナの場合についてFig.4に示す。先端の温度上昇は，どの垂直荷重においても摩擦速度とともに高くなる傾向を示すが，荷重0.5kgf

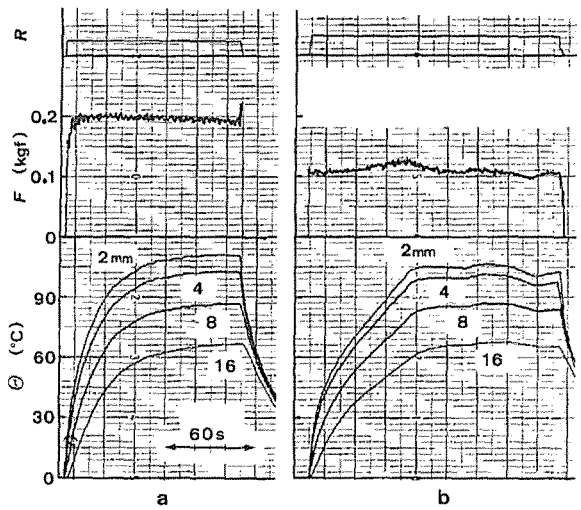

Fig. 2 Examples of the recording of rotation speed of disc, R, frictional force, F, and temperature rise above ambient, Θ, at four distances from the top of the rod durning rubbing. (a) buna at a vertical force of 0.5 kgf and a sliding speed of 3.2m／s and (b) particleboard at 0.3 kgf and 3.6 m／s.

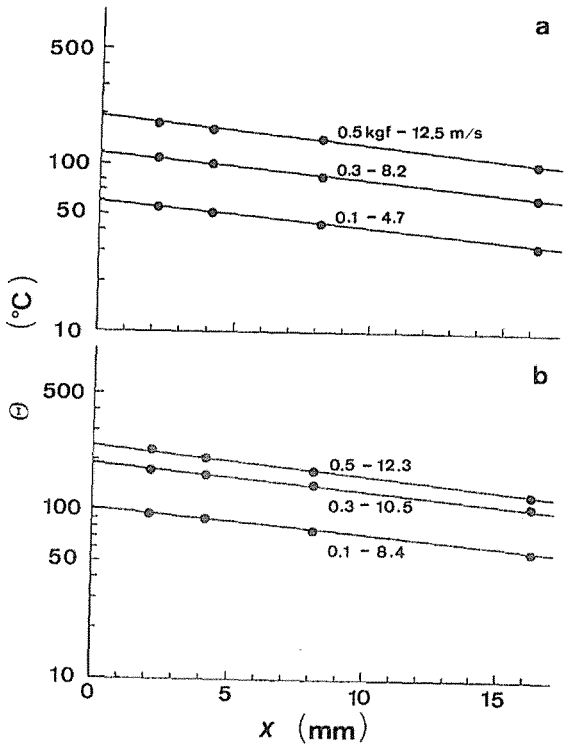

Fig. 3 Temperature distributions along the rod axis for (a) white seraya and (b) plywood. x, distance from the top of the rod.

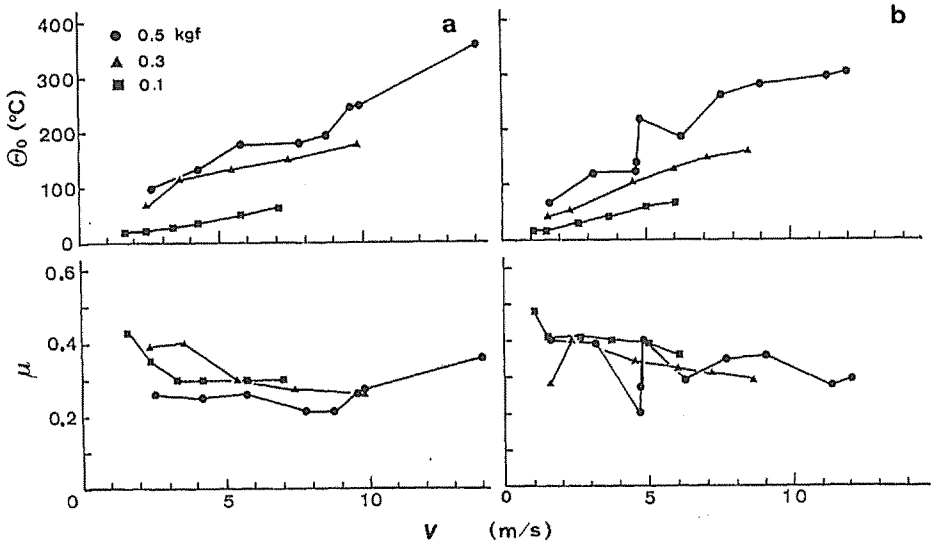

Fig. 4 Relationships of temperature rise of the top surface of the rod, Θ_0, and friction coefficient, μ, to sliding speed, V, at three vertical forces for (a) particleboard and (b) buna.

では必ずしも単調な増加を示していない。これは，ブナの場合に見られるように，荷重0.5kgfでは摩擦係数が摩擦速度に対してかなり大きく変動するところがあり，それに対応して温度も変動した結果であると考えられる。既往の研究[7,8]によると，木材と鋼の摩擦係数は，すべり距離が同じであればかなり広い速度範囲でほぼ一定であるとされている。本実験では，摩擦係数が速度とともに低下する傾向を示す場合もあるが，変動が大きく，両者の明確な関係は得られなかった。なお，円板ごとの摩擦係数の平均値はホワイトセラヤ0.170 (0.047)，合板0.333 (0.073)，ブナ0.347 (0.063)，パーティクルボード0.299 (0.060)，ヒノキ0.378 (0.065)であった（括弧内は標準偏差）。

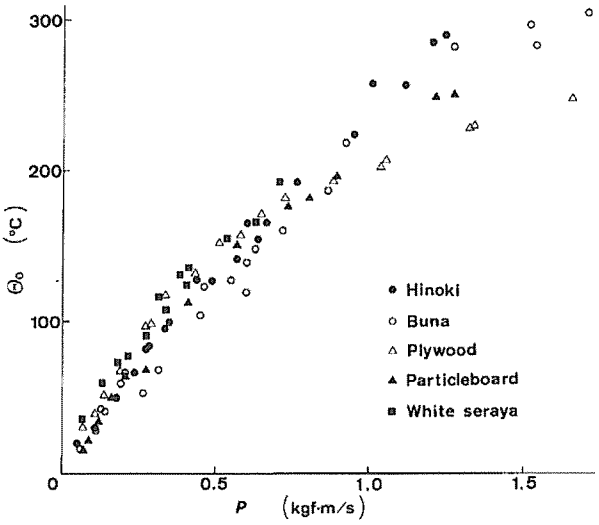

Fig. 5 Relationship between temperature rise of the top surface of the rod, Θ_0, and frictional power, P.

Fig.5は，摩擦仕事率（摩擦力と摩擦速度の積）と先端の温度上昇の関係を，全ての場合について示したものである。ただし，パーティクルボードにおける仕事率2.55kgf・m／s，温度上昇362℃のプロット（このときの摩擦条件は垂直荷重0.5kgf，速度14.0m／s）は省略した。合板の場合を除くと，円板の

材質，摩擦速度，垂直荷重の組み合わせに関係なく，全てのプロットは上に凸の一つの曲線に乗り，1.5kgf・m／sの仕事率で棒の先端は300℃程度の温度上昇を示すことが分かる。同様の結果は，村瀬[3]がパーティクルボードと高速度工具鋼の組み合わせで得ているが，同じ仕事率に対する温度上昇は本実験の半分程度である。なお，合板の場合は，仕事率が大きくなると，棒の先端が合板表面を削り取る現象が現れたため，その仕事の分だけ温度上昇が低くなったものと考えられる。

3.3 棒先端からの流入熱量

定常状態における棒の温度は先端から供給される熱量に支配されるが，その熱量について以下に考察する。いま，棒の断面積が長さに比べて小さく，軸に垂直な断面における温度が一様で，定常状態に達していると仮定すると，棒の長さ方向の温度分布は一次元定常熱伝導理論から求められ，棒が無限に長い場合は，先端から x の距離にある面の室温からの温度上昇 Θ は，次式で表すことができる[9]。

$$\text{式 (1)} \quad \begin{cases} \Theta = \Theta_0 e^{-mx} \\ m^2 = \dfrac{2\alpha}{\lambda r} \end{cases} \qquad (1)$$

ここで，Θ_0 は棒先端の温度上昇，α は棒表面の熱伝達率，λ と r は棒の熱伝導率と半径である。すなわち，Θ と x は片対数グラフ上で直線関係を示すことが分かる。棒が有限の長さをもつ場合は別の式になるが，本実験では Θ と x が片対数グラフ上で良好な直線関係を示した（Fig.3）ことから，式（1）を用いても大きな間違いはないと考えられる。したがって，単位時間に棒の先端から流入する熱量 Q は

$$\text{式 (2)} \quad \begin{cases} Q = -\lambda \pi r^2 \left(\dfrac{d\Theta}{dx}\right)_{x=0} \\ \quad = \Theta_0 \lambda \pi r^2 m \end{cases} \qquad (2)$$

となり，片対数グラフでの直線の傾きと切片から求められる。なお，以下の計算には棒の熱伝導率（λ）として46kcal／mh℃[10]を用いた。

単位時間に棒に流入する熱量を摩擦仕事率（流入熱量の最大値）に対する比で表し，それと摩擦仕事率の関係をプロットしたものをFig.6に示した。流入熱量と仕事率の比は，仕事率が小さいときを除いて50％以下であり，仕事率の増加と共に減少する傾向が認められる。これは，仕事率とくに摩擦速度が大きくなると，円板表面による冷却効果（室温に近い材に熱が逃げる効果）[2]が増すためと考えられ，その結果棒の温度上昇はFig.5のような上に凸の形になるものと考えられる。いずれにしても，定常状態では摩擦に消費される仕事の20～50％が熱として棒に流入することになる。

3.4 棒先端温度の数値解析

ところで，本実験で求めた先端温度は，式（1）からも分かるように，棒の先端は平面で，温度は一様と仮定して求めた仮想摩擦面の温度である。しかし，実際の棒は先端に丸みをもち，しかも棒の断面に比べてかなり狭い面積で円板

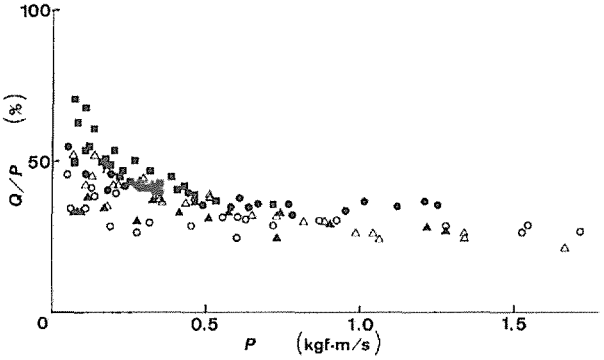

Fig. 6 Relationship between the ratio of heat flow into the rod to frictional power, Q/P, and frictional power, P. Symbols are the same as in Fig.5.

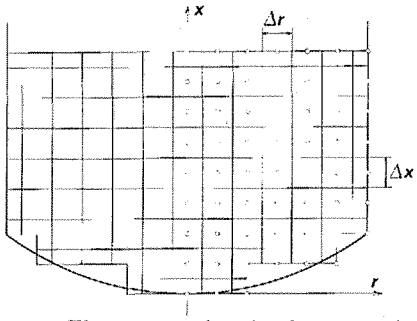

Fig. 7 Elements and nodes for numerical calculation of temperature distribution near the top of the rod. $\Delta x = \Delta r = 0.25$ mm.

と接触していることから，求めた温度が実際の摩擦面の温度でないことは容易に分かる。そこで，実際の先端形状および接触状態を考慮した場合の先端部の定常温度分布を数値計算によって求め，仮想摩擦面として求めた温度との関係について考察した。

解析では，棒先端から2㎜までの領域を対象にし，(1)棒は軸を中心とする直径1㎜の範囲で円板と接触し，この接触面から一定の熱量が一様に流入する，(2)先端から2㎜の断面の温度は一様かつ一定である，(3)棒の側面および円板と接触しない先端の面では周囲との熱伝達があることを前提にした。この前提から，領域内の任意の点の温度は中心からの距離（r）と先端からの距離（x）のみに依存することが無理なく仮定でき，この領域の温度分布を求めることは円柱座標系における二次元定常熱伝導問題を解くことに帰着される。本実験ではこの問題を数値計算で解くことにし，領域を高さΔz，幅Δrのドーナツ状の要素に分割し，各要素の断面の中央または境界面に節点を配置した（Fig.7）。それぞれの節点へ流入する熱量の総和が定常状態では0であることから各節点温度の関係式（連立方程式）を得，これを繰り返し法によって解いた。

実際の計算では，$\Delta x = \Delta r = 0.25$㎜として領域を58の要素に分割し（Fig.7），円板に残った摩擦痕から接触幅がほぼ1㎜と判断できる摩擦条件についての定常状態における流入熱量，先端から2㎜の点の実測温度，熱伝達率を用いた。なお，熱伝達率は式（1）を使って求め，35～50 kcal／㎡h℃であった。また，要素分割に伴う先端部の表面積の増大は係数によって補正した。

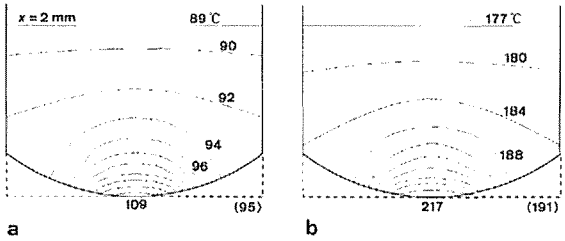

Fig. 8 Examples of temperature distribution near the top of the rod. Extraporated temperatures are shown in parentheses. (a) hinoki at a vertical force of 0.1 kgf and a sliding speed of 9.0 m／s and (b) white seraya at 0.5 kgf and 12.5 m／s.

計算結果の一例を，ヒノキ（0.1kgf，8.98m／s）とホワイトセラヤ（0.5kgf，12.5m／s）についてFig.8に示した。当然の結果であるが，計算で求めた温度分布は接触部の近くで急な傾斜を示し，接触面の最高温度は外挿によって求めた先端温度よりも10～15％高い値であった。$\Delta x = \Delta r = 0.1$㎜とした同様のモデルについても計算したが，温度分布の形が若干変化するものの接触面の温度については同程度の値が得られた。したがって，実際の接触面では摩擦応力すなわち流入熱量に分布があることを考慮すると，それぞれの摩擦条件における接触面の温度は，本実験で外挿によって求めた温度よりも，少なくとも10～15％高い温度であると推定できる。

4. おわりに

切削工具の温度解析で常に問題になるのは，工具に供給される熱量をいくらに見積もるかということである。木材の穴あけでは穴あけ仕事の40％程度がドリルに流入する[11]とされているが，本研究では摩擦速度が高い場合は摩擦仕事の20～30％が棒に流入するという結果が得られた。この値の妥当性については現段階では評価できないが，今後の温度解析の一つの参考にはなり得る。このことにも関連して，本実験を含めた通常の摩擦実験では同一面を繰り返しこすり合うことが多いのに対して，切削では常に被削材の新生面と工具が摩擦し合うことに注意する必要がある。

切削工具の摩耗を考える場合に見のがしてならないのは真実接触面における局部的な温度である。見かけの接触面積に比べて真実接触面積はかなり小さいことから，摩擦面の平均的温度が低い場合でも実際の接触点では相当の高温にまで上昇している[2]。木材切削工具の緩やかに進行する摩耗についてはこの観点からの考察も今後必要であろう。

引用文献

1) Stewart, H. A., Shatynski, S. K., Harbinson, B. and Rabin, B. (1986) High-temperature corrosion of tungsten carbide from machining medium-density fiberboard. The Carbide and Tool J. 18(1／2). 2～7.
2) Bowden, F. P. and Tabor, D. (1954) "The Friction and Lubrication of Solids". Oxford. p.33～57.
3) 村瀬安英 (1982) 高速域における木材と金属間の摩擦特性. 木工機械. No.113. 5～9.
4) 奥村正悟・杉原彦一 (1981) 木材による逃げ面摩擦時の鋸歯尖端温度. 京大農演報. No.53. 241～247
5) 林　和男・大野雅俊・伊藤昌明 (1986) 木材の周刃フライス削りにおける刃先近傍の工具温度の推定. 木材学会誌. 32(8). 603～607.
6) 奥村正悟 (1987) 摩擦熱による工具刃先の温度上昇 ― 数値解析の試み. 第37回日本木材学会大会研究発表要旨集. p.146.
7) 村瀬安英 (1980) 高速域における木材の摩擦特性. 木材学会誌. 26(2). 61～65.
8) 村瀬安英 (1980) 木材の摩擦の速度依存性と摩擦面温度について. 木材学会誌. 26(8). 571～575.
9) 西川兼康・藤田恭伸 (1982)「機械工学基礎講座　伝熱学」. 理工学社. p.26～28.
10) 日本機械学会 (1975)「伝熱工学資料　改訂第3版」. 日本機械学会. p.293.
11) 奥村正悟・藏津　洋・杉原彦一 (1987) 木材の穴あけ加工におけるドリルの温度. 木材学会誌. 33(4). 274～280.

Résumé

This paper describes an experiment to examine the surface temperature of a steel rod of 3 mm diameter rubbed with a rotating disc of white seraya, buna, hinoki, plywood and particle-board at a vertical force of 0.1-0.5kgf and a speed of 1.1-14.0m／s (Fig.1). The temperature of the steel rod was measured with thermocouples of 0.1mm diameter embedded in the rod at distances of 2, 4, 8 and 16mm from the top.

Temperatures of the rod rapidly increaesed and soon reached steady states (Fig.2).The relation of the temperature in steady state to the distance from the top was always linear on a semi-logarithmic graph, and temperatures of the top surface were extrapolated (Fig.3). The top temperature increased with sliding speed (Fig.4) and showed a good relationship with frictional power, the product of frictional force and sliding speed (Fig.5). The heat flow into the rod per unit time, which was estimated using Eq.1, was less than 50% of the frictional

power and decreased with the increase of the frictional power (Fig.6). The temperatures of the top surface, which were numerically calculated on the assumption that the rod and the disc contact over an area of 1mm diameter, were 10-15% higher than the extrapolated ones (Figs.7 and 8).