

高温切削による作業条件に就いて (其ノ一)

村 中 利 吉

Work Conditions for hot machining

Rikichi MURANAKA

In turning steels by means of the hot machining technique, the machinability varies remarkably with the room temperature, and hence tool material, depth of cut, feed and cutting speed should be changed also with the temperature. The edge temperature of the tool during the ordinary machining is about 550°C, while it reaches even to 1200°C in the hot machining. Therefore, the author carried out the investigation on the work conditions for hot machining with a carbon steel (0.26% C) and a Carbide tool.

The results of the present experiment may be summarised as follows ;—

1. In the hot machining the cutting force becomes very small when the work piece attained the temperatures above 600°C.
2. At constant cutting area, the cutting force is decreased with the feed.
3. For hot machining, a low cutting speed is necessary.
4. The cutting power is decreased below 1/3 as compared with that in the ordinary machining.

緒 論

高温に於ける鋼の被削性は室温に於ける場合とは著しく異り、切削の際の切屑の発生の状態も異つた様相を呈してくる。従つて刃物に作用する切削力、及び機械の切削動力並びに切込、送り、切削面積等の諸因子が加熱温度と密接な関係を有してくる一方、室温に於いて鋼を切削する場合、刃物の刃先に生ずる切削熱は、高速度鋼製刃物による標準切削速度に於いては、凡そ 550°C 位迄であるが、高温切削に於いては刃先の温度は、切削熱の外に加熱温度の影響を受けて著しく高温に達する。従つて刃物の材質及び機械の回転速度には、此の点より必然的に或る制約が出来る事となる。本研究は高温切削に於けるこれらの特性を明かにし、切削能率に及ぼす影響を究めたものである。

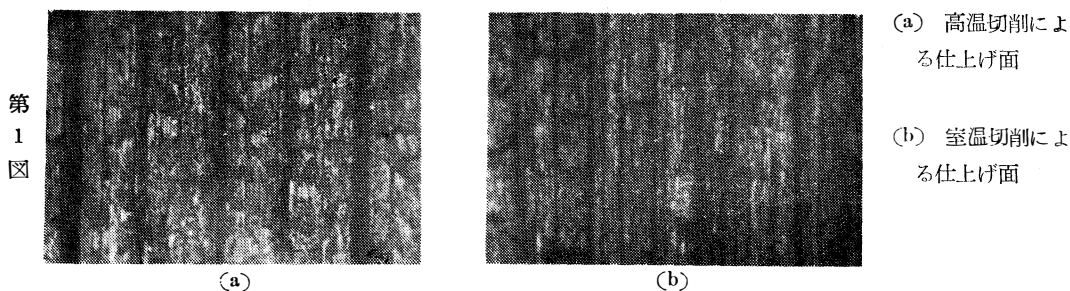
まえがき

鋼の切削作業条件と言へば其の分野は極めて広い。切削作業条件はこれを二つの分野に大別される。即ち、其の一つは加工材料の材質及び切削速度、並びに切込送り、切削面積等で今一つは刃物の材質及び形状である。本研究に於いては、加工材料は体心立方格子型の原子配列の炭素鋼を対象とし、刃物の材質は超硬質合金のタンガロイ S₃を用い、其の形状は一定としたものである。

§ 1. 鋼の被削性

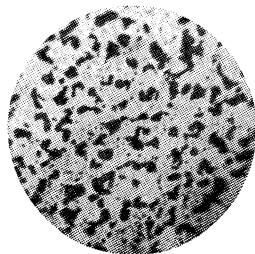
Hans Ernst の説によれば、被削性が良いと言う事は、刃物の一寿命間に於いて良好なる仕上げを以つて最大量の切屑を排除されると言う事である。この事は加工材料の材質回転速度、刃物の性質、形状及び給油等と関連して来るものであつて、刃物材質並びに形状が、刃物の切削圧力及び寿命に大きな影響を与え、これが被削性良否の一要素となる。更に給油は加工材料及び刃物の冷却

に役立つと共に、切屑と刃物との間の粘着性を軽減せしめ、これが加工面の仕上げ程度を左右する一要素となる。今一つの仕上げに関係してくるものに、構成刃先成生の問題がある。構成刃先の成生及び妨止の問題に就いては、既に多くの研究が発表されていて、本実験に使用する炭素量の低い鋼を切削する様な場合には臨界速度以下に於いては可也、その成生は顕著である故に、仕上げ面を良好ならしめる為めには、構成刃先を極力阻止する様に対策を立てる可きである。次に刃物の一寿命間に於ける切屑量の大小は、加工材料の機械的及び金属組織学的諸性質によつて左右されるものである。即ち、鋼は其の含有元素の種類並びに量によつて、被削性は著しく異なり、又其の組織に就いて見ると、高炭素鋼や合金鋼等はセメントイを微細球状化することによつて、被削性は著しく向上するものである。一方機械的諸性質即ち、抗張力、伸び、断面縮衝撃値及び硬度等が被削性を大いに左右する。一般に被削性の良好なる鋼としては、抗張力が比較的lowく、伸びが大で硬度の低い材料であつて、切屑が滑り破損によつて塑性的流れ現象を起す所謂流れ型切屑を成生せしめる様な材料を挙げられる。高温切屑に於いては、加工材料の昇温と共に、其の機械的性質に大きな変化を来し、切屑の成生は漸次流れ型に移行し、此の際材料の軟化に伴い刃先の切込圧力が著しく軽減され、切屑が刃先の空隙に堆積することなく、容易に排除される為めに刃物と加工材料との間の粘着力が低下して来、従つて構成刃先の成生は極めて少なく、仕上げ面は頗る美麗となるのである。更に材料は、其の加熱によつて或る温度以上に於いては急激に軟化し、之れが為め切削力の急激なる減退を来し、被削性が著しく改良されてくるのである。一例として炭素量0.26%の鋼をタンガロイ刃物を以つて室温に於いて切削した場合と700°Cに加熱して切削した場合との仕上げ面を比較すると第1図の通りである。



§ 2. 高温に於ける鋼の機械的諸性質

高温切削を論ずるには先ず其の基礎条件となる、高温に於ける鋼の抗張力、伸び、衝撃値並びに硬度を究明しておく事が肝要である。勿論加工材料の成分組織も大きな要素であるが、これらに就いては総べて第2図の顕微鏡写真の様な組織と次の様な成分を有するものとする。



C 0.26%, P 0.021%, S 0.138%

Mn 0.91%, Si 0.23%

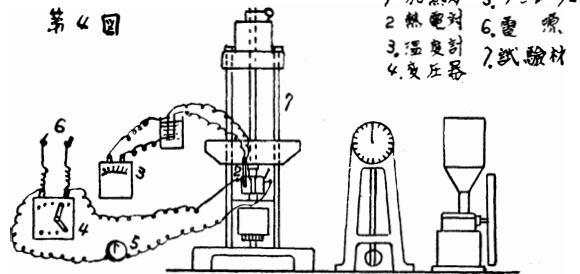
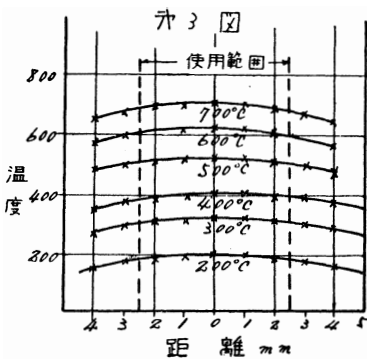
(a) 抗張力及び伸び

高温に於ける鋼の抗張力の變化の状態は、一般の体心立方格子型の原子配列の炭素鋼や、合金鋼と面心立方格子型の原子配列のオーステナイト鋼とは異つた状態を示す。一般の炭素鋼の如き体

心立方格子型の原子配列の鋼に於いては 200°C~400°C 附近で抗張力の上昇を来し、その後は温度の上昇と共に急激に降下して来る反面、伸びは之れと逆の現象を呈する。此の不連続点は炭素量の増加又は合金元素の種類及び量によつて、漸次高温側に移行するものである。然れ共面心立方格子型の原子配列のオーステナイト鋼に於いては、今迄の様な不連続性の特性は比較的少なく、昇温と共に漸次軟化作用が起り、抗張力は減退して行くものである。筆者は炭素量 0.26% の炭素鋼に就いて、次の方法によつて抗張力試験を行つた。

実験の概要

使用装置はアムスラー50噸万能試験機と 1kw 抵抗式電気炉で、炉内温度の特性曲線は第3図の通りである。実験装置の略図は第4図に示してある。試験片は直径 14mm, 標点距離 50mm, 全長 52cm であつて材質は炭素量 0.26% の鋼である。



実験結果

実験結果は第5図に示した通りであつて、200°C~300°C附近で抗張力は多少上昇し、500°Cを超えると、急激に降下して 700°C に於いては室温に於ける強度の約 27% に低下する。即ち青熱脆性の現象は 200°C より 300°C 附近で現われている。

(b) 衝撃値

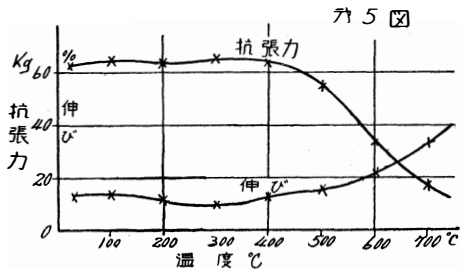
一般の体心立方格子型の原子配列の炭素鋼や、合金鋼に於いては昇温と共に、漸次其の衝撃値を減じ 400°C~500°C に於いて極小に達する。これは青熱脆性の為めであつて、抗張力試験の 300°C 附近の不連続点に相当するものである。衝撃試験に於いては衝撃速度が極めて迅速であるため、抗張力試験の此の異常点が 400°C~500°C の高温側に移動したものである。此の極小値は炭素の含有量或は合金元素の種類と量によつて異なるものである。面心立方格子型の原子配列のオーステナイト鋼には、此の現象は比較的少ないと云われる。筆者は炭素量 0.26% の鋼に就いて実験した結果は次の通りである。

実験の概要

実験に使用した装置はシャルピー式衝撃試験機と、1kw 抵抗式電気炉が主であつて、炉内温度の特性曲線は第3図で示されたものと同じである。試験片は 10mm×10mm×58mm, 切欠 2mm である。装置の概略図は第6図の通りである。

実験結果

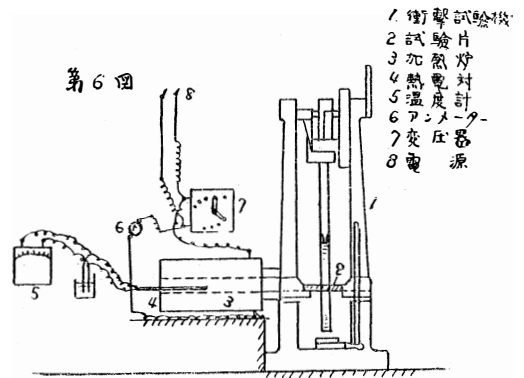
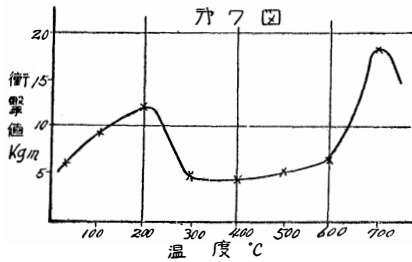
実験結果は第7図に示した通りであつて、衝撃値の極小は 400°C~500°C に現われる。それ以後



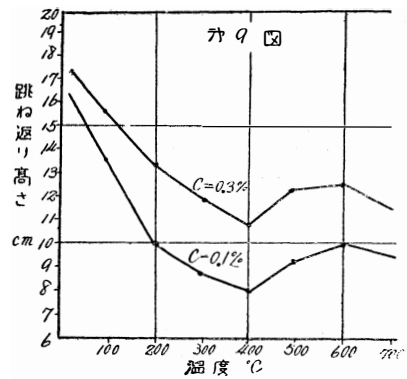
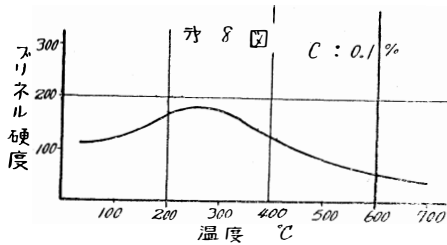
は又急激に上昇して 700°C に於いて最高に達し、其の後は漸次降下するものである。即ち青熱脆性は 400°C~500°C に存する。

(c) 硬 度

鋼の硬度と温度との関係に就いては、概ね抗



張力と温度との関係に相似する。温度と静的硬度との関係に就いては、第8図又温度と衝撃の硬度との関係に就いては第9図に示した通りであつて、



両者の間には試験速度が影響を及ぼすため、青熱脆性のおこる温度には可也のずれが生じている。即ち静的硬度試験によれば 300°C 附近に於いて硬度の著しい増大を見るが、衝撃の硬度試験によると、硬度は温度の上昇と共に逐次減少し 600°C 附近で再び増大し、以後は温度の上昇に伴つて急激に減少して行く。

総 括

炭素量 0.26% の炭素鋼の機械的性質に対する各種の実験の結果に就いては、次の事が結論付けられる。今迄既に発表された種々の文献に見る通り、此の種の鋼の機械的性質と加熱温度との間には、何等指数函数的関係はなく、不連続曲線によつて表わされ、その不連続点は試験速度が比較的緩慢な場合には 300°C 附近に於いて現われ、試験速度が迅速なるにつれ次第に高温側に移行するものである。

§ 2. 高温に於ける切削力

鋼の丸棒を旋盤にて旋削する場合、刃物に作用する切削力は三つの分力よりなり、其中材料の回転方向の分力が最も大きくて、其の値は切削合成力の 90% 程度に達するもので、これを主切削力と呼ばれるのである。切削力の問題を論ずる場合には、此の主切削力を以つて切削力に代えても大した間違いはないから、今後の切削力に就いては主切削力を対象として論ずることとする。切削力

に関しては従来幾多の実験式があるが、海老原敬吉博士の研究された公式が、最も興味のある式であつて、次の通りである。

$$P_s = 230 \left(\frac{\sigma_z}{60} \right)^{0.495} \left(\frac{\delta}{76} \right)^{0.66} \left(\frac{60}{\alpha} \right)^{0.2} \left(\frac{n}{5} \right)^{0.12} \frac{1}{F^{0.1}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで P_s =比切削力 kg/mm^2 , σ_z =鋼の抗張力 kg/mm^2 ,

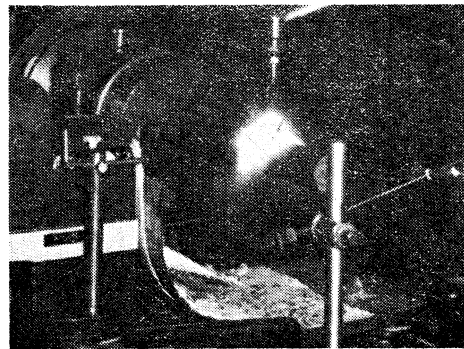
δ =刃物の切削角, α =刃物の取付角,

n =断面係数= $\frac{\text{切込}}{\text{送り}}$, F =切削面積 mm^2

従つて切削力 $P = F \cdot P_s$ で表わされる。(1)の公式は刃物材質は、第三種高速度鋼で而も直線刃の場合である。(1)で明かな様に、刃物が与えられた場合、切削力は加工材料の材質、就中抗張力と切削面積並びに刃物の切込と送りに関係し、これらの間には或る指数函数的関係が存在するものである。これらの幾つかの関係因子の中、抗張力による影響が最も顕著である。実際現場作業に於いては材料の種類と刃物並びに使用する機械が与えられる場合が多い。斯様な限られた条件のもとで、然も尙作業能率の劃期的向上が要求されるのである。これには切削力の観点に就いて考えられることは、高温加熱によつて材料の機械的性質を変化せしめ、(1)項に述べた材料の諸性質の特性を捕え、比切削力の低減を計ることである。此の意味に於いて筆者は炭素量 0.26%の軟鋼に就いて、高温に於ける切削力の変化並びに切込、送り等の作業条件に関する実験を行つた。

実験の概要

実験に使用した機械は 6 呎英式旋盤であつて、加熱方法はアセチレンガス焰を使用し、吹管は旋盤サドル上に固定して、刃物の縦送りに先行し乍ら旋盤の回転につれて漸次加熱し乍ら切削作業を行う様に装置した。此の場合加工材料の加熱に伴い、心押軸には可也の温度と推力が負荷される故特別の活心を用い刃物の先端部と共に十分の冷却を施した。切削作業中は加工材料の温度を直接測定することが困難であるから、予備実験によつて其の温度を測定した。切削力測定装置としては、弾性環及液柱測微計を応用した刃物切味試験機を用い、刃物はタンガロイ S_3 とし、加工材料は直径 33mm、長さ 350mm の炭素量 0.26%の軟鋼であつた。加工材料の温度測定の予備実験は次の要領によつた。即ち加工材料と同質同寸法の丸棒に、外側より 6mm の距離に熱電対挿入用の小孔を軸方向に穿孔し、之を旋盤に取付け一方加熱用吹管及び加工材料の小孔に挿入された熱電対の先端が吹管と 15mm の距離を隔てて旋盤の回転に伴い、同時に順次軸方向に送られ、加熱し乍らその部分の温度を測定する様に装置した。装置の略図は第 10 図に示す。予備実験の結果は第 1 表の通りとなる。



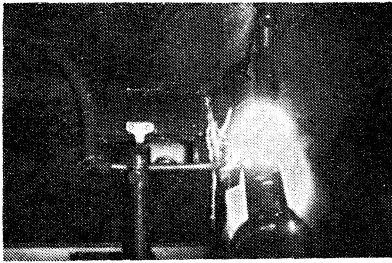
第 10 図

以上の予備実験を基礎として、温度と切削力との関係に就いて、各種の実験を行つた結果は次の通りである。尙本実験の要領は第 11 図の写真に示す通りである。

送	リ	温	火	火	熱	備
り	速	度	口	口	電	考
		℃	番	距	圧	
			号	離	力	
			井	mm	kg/cm ²	
一 表	0.38	700	25	7	2	ガス発生器 容量 8kg
		600	25	10	2.5	
		500	16	7	1.5	
		400	13	7	1	
		300	5	7	1	
	0.44	700	25	7	3.5	使用カバ レ 280 g/s
		600	25	9	3.5	
		500	20	7	2	
		400	16	7	1.5	
		300	10	8	1.5	
0.57	700	25	7	3.5	柱径	
	600	25	7	2.5		
	500	25	7	3.5		
	400	20	7	2		
	300	16	7	1		

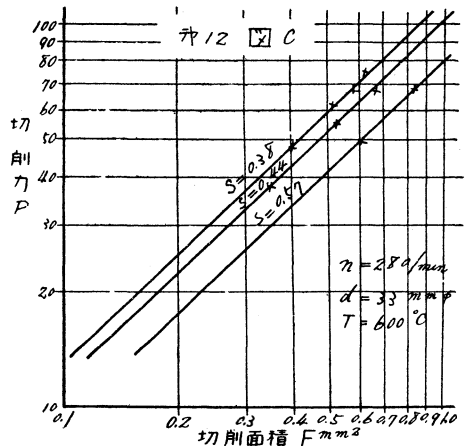
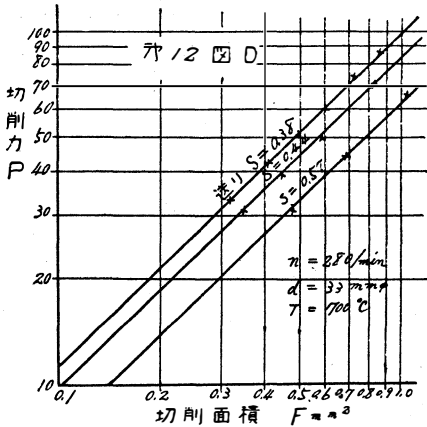
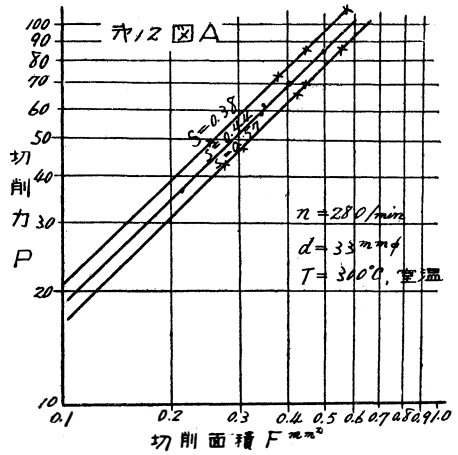
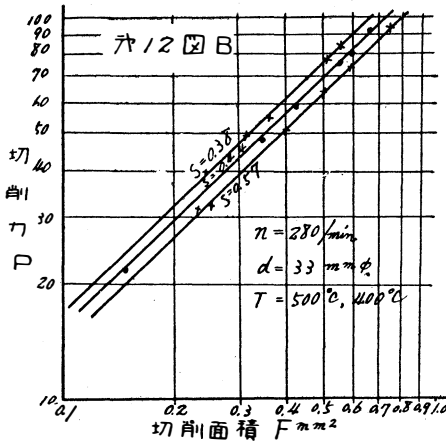
実験結果

(a) 切削力と切削面積との関係



第 11 図

送りは 0.38mm, 0.44mm, 0.57mm の三種を選び、切削速度を毎分 280回転 (29.3m/min) として切込を逐次変化せしめることによつて、室温より 700°C の温度範囲に於ける切削力と切削面積との関係を測定した。此の場合使用したタンガロイ刃物の上斜角は、12°、側斜角は 2°、前逃角5°、取付角は 45°とした。刃物の先端部は加熱焰に曝される故、白絞油を以つて充分の冷却を行つた。斯様にして測定された結果は第12図に示してある。



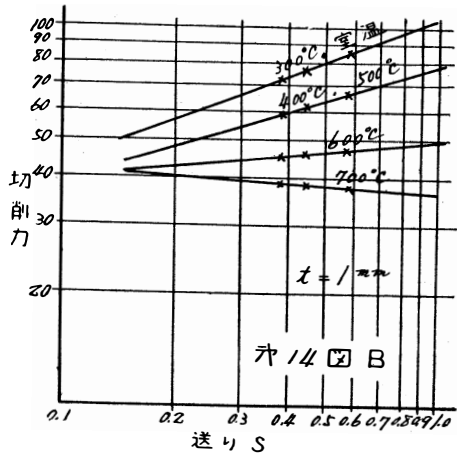
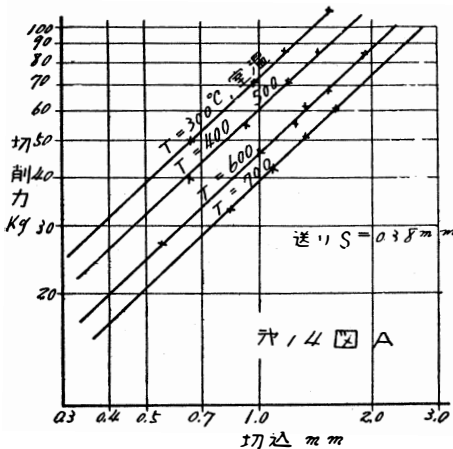
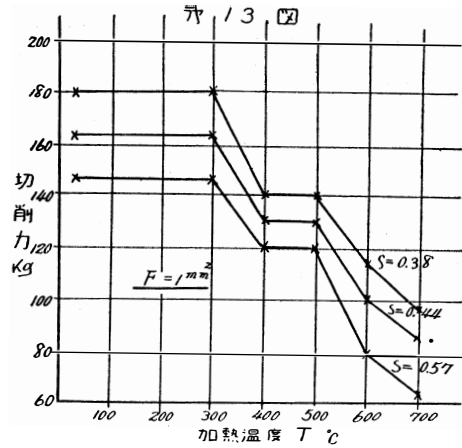
一般に室温切削に於いては、切削力と切削面積との間には一つの指数函数的関係があることは、既に明かである。高温に於いても此の関係が矢張り存在するもので、同一の材料に於いては加熱温度の如何に係わらず、其の指数は同一である。第 12図より曲線の数式を求めると次の通りである。即ち一般式 $ks = C_f F^{\epsilon_f}$ (2)

に於いて ks = 比切削力 kg/mm^2 , F = 切削面積 mm^2 $C_f = F$ が $1mm^2$ の場合の切削力, ϵ_f = 指数 室温で $S=0.38mm$ の場合に就いて ϵ_f の値を求めると $\epsilon_f=0.935$, $C_f=180$ となる。(2) 式より比切削力を求めると $ks = C_f F^{\epsilon_f - 1} = \frac{180}{F^{0.065}}$ (3)

C_f の値は加熱温度及び送りの大小によつて異なるものである。同じ送りで 700°C の場合の C_f の値を求めると $C_f=96$ となる第 12 図より各温度に対する切削力の変化の状態を示すと第 13 図の如くである。第 13 図で明かな様に高温切削に於いては、青熱脆性の影響の為に室温より 300°C 迄は切削力の低下無く $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ に於いて稍其の特性が現れ 600°C 以上に於いて急激に切削力の低下を来たすものである。

(b) 切削力と切込送りとの関係

第 12 図より切削力と切込との関係、及び切削力と送りとの関係を見出すと第 14 図の如くに示される。切込と切削力との関係に就いては、一つの指数函数で表わされ、然も各加熱温度に対しては同一の指数を有する。各温度に於ける切削力は次式で表わされる。即ち



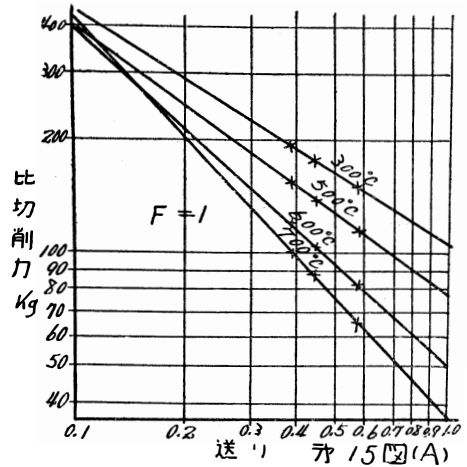
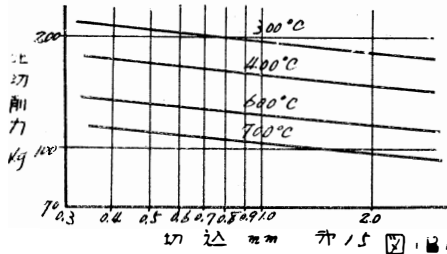
$$\left. \begin{aligned} \text{室温より } 300^{\circ}\text{C 迄} & P=72t^{0.935} \\ 400^{\circ}\text{C 及び } 500^{\circ}\text{C 迄} & P=60t^{0.935} \\ 600^{\circ}\text{C} & P=46t^{0.935} \\ 700^{\circ}\text{C} & Pp=39t^{0.935} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

次に切削力と送りとの関係に就いては、矢張り一つの指数函数で表わされるが、加熱温度の上昇に伴い、その指数は異つて来ることは図によつて明かである。即ち 600°C 以上に於いては、送りの増大に対する切削力の増加は極めて微少で、温度が高温になると切削力は逆に減少してゆく。各温度に対する送りと切削力との関係を数式にて示すと次の通りとなる。

$$\left. \begin{aligned} \text{室温及び } 300^{\circ}\text{C 迄} & P=105s^{0.36} \\ 400^{\circ}\text{C 及び } 500^{\circ}\text{C 迄} & P=98s^{0.305} \\ 600^{\circ}\text{C} & P=50s^{0.106} \\ 700^{\circ}\text{C} & P=36s^{-0.075} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

更に送りに対する各温度に於ける比切削力を求めると、第 15 図の如くなる。これを見ると、高

温切削に於いては送りが増大すると、比切削力の減少の割合が著しくなることがわかる。今例を以つて示すと、送りが 0.38mm の場合は室温と 700°C とでは比切削力は室温の場合の約 51%であるが、送りが 0.66mm になると約40%に低下する。

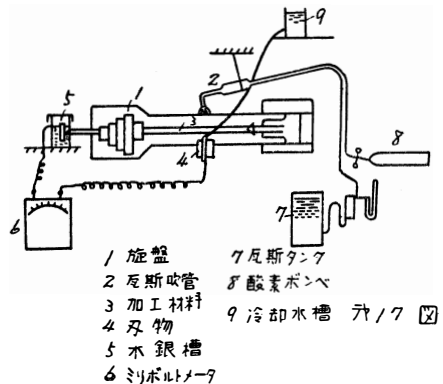
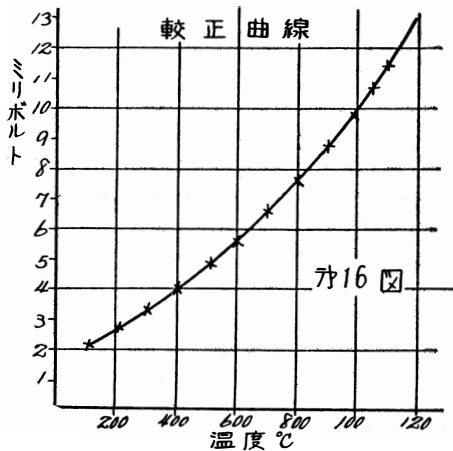


§ 3. 高温に於ける切削温度と速度

室温に於いて旋削作業を行う場合、刃物刃先の温度は加工材料の材質、切削速度並びに刃物の材質によつて異なるものであるが、高速度鋼刃物を用い、炭素鋼を旋削する様な場合には、刃先の温度は経済的の最高切削速度に於いても 550°C以上には達することが稀れである。従つて高速度鋼刃物は十分その性能を発揮し得るのである。高温切削に於いては、加工材料それ自体が可也高温に加熱されるので、刃先の温度は室温の場合と異つて極めて高温となる。それ故に高速度鋼刃物を以つてしては、到底切削作業が出来ず超硬質合金刃物に俟たねばならないのである。前にも述べた様に刃先の温度は、切削速度によつて変化するもので、此の点より推察すれば、刃物の経済的寿命に対しては各加熱温度に適応する切削速度が自から決定させられる訳である。筆者は炭素量 0.26%の鋼をタンガロイ刃物を以つて各種の温度に加熱して、切削した場合、切削速度と刃先の温度との関係を実験した。

実験の概要

前の切削力の実験に使用したと同質の鋼を旋盤に取付け、一方刃物台には試験バイトを充分絶縁して締付け、バイトの他端をミリボルトメーターの一極に接続し、一面加工材料の一端は旋盤の主軸を貫通せしめ、その先端に銅板を鑲着し、水銀槽を経てミリボルトメーターの他端に接続し、旋盤を回転し乍ら刃物に切削作業を行わせしめ、此の時刃先に生ずる起電力を測定した。此の際刃先の鑲着け部には充分の冷却水を注水する様に注意すべきである。起電力と温度との関係は予じめ予備

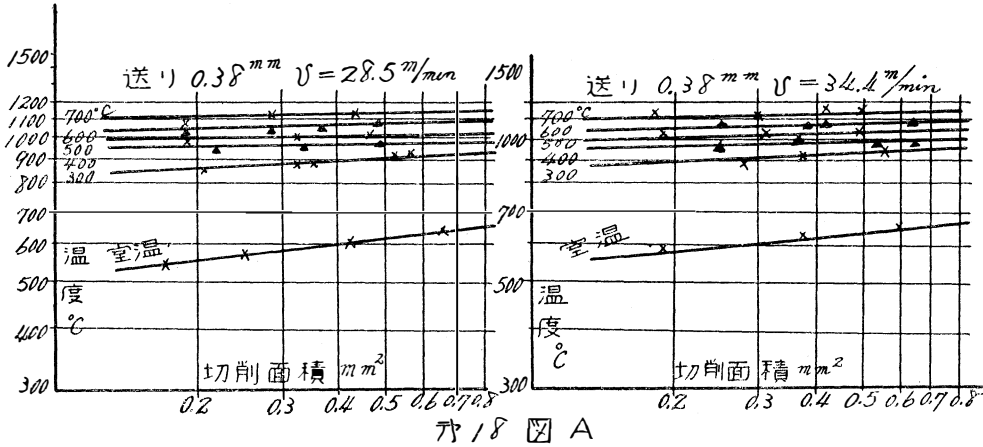


実験によつて得た校正曲線より読みとる。速度は 28.5m/分 34.4m/分 43.5m/分 53m/分の四段とした。本実験に使用した実験装置の要領及び校正曲線は、第16図及び第17図の通りである。

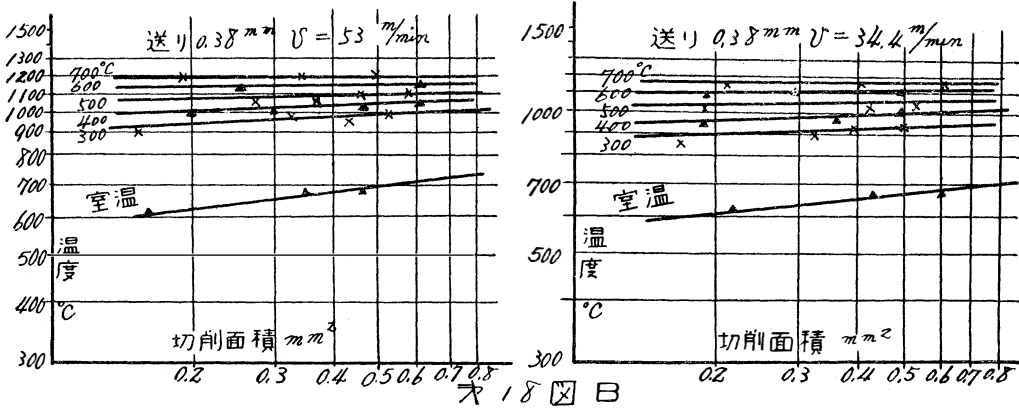
実験結果

(a) 切削面積と刃先温度との関係

送りを一定とした場合、切削面積の増大に伴つて、何れも刃先の温度は上昇するが、その増加の



第18図 A



第18図 B

割合は高温になるに従つて比較的緩慢となることは、第18図に示す通りである。然も温度と切削面積との関係は何れも一つの指数関数で表わされる。

(b) 切削速度と刃先温度との関係

切削速度と刃先の温度の間には、第19図に見られる様に、一つの指数関数的関係があり、各温度に於ける傾向は略々室温の場合と同様である。今此の曲線を数式で表わすと次の如くなる。

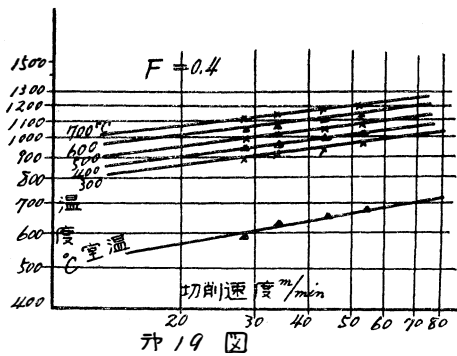
$$T' = cv^{0.177} \dots \dots \dots (6)$$

ここで T' = 刃先の温度 $^{\circ}\text{C}$

c = 或る係数

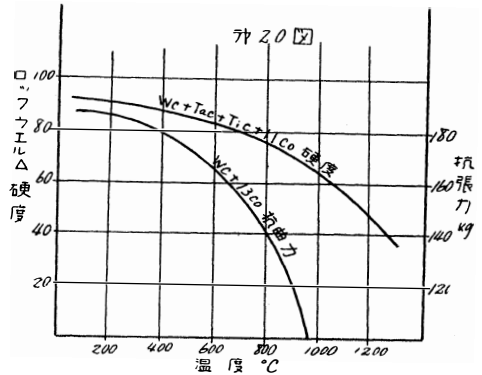
v = 切削速度 m/min

一般に超硬質合金刃物を以つて旋削加工を行う場



第19図

合は、第 20 図に示す様に此の種の合金の特性に照して、刃先の温度が 900°C 程度に迄なる様な切削速度は決して刃物の経済的寿命を損はないと云われている。然れ共高温に於いて旋削加工を行う場合には室温の場合と趣きを異にし、加工材料の加熱温度が 600°C~700°C に達すると、刃先の温度は 1100°C~1200°C に及ぶものであるから、刃物の経済的寿命の点より考えると、必然的に切削速度に或る制限が生じて来る訳である。これらの問題に就いては次回に発表の予定である。



結 論

以上各種の実験を総合すれば、次の通りに要約される。

- 1) 高温切削に於いて刃物の材質、形状を一定とした場合は、刃物の受ける切削力は加熱温度及び加工材料の材質によつて異なるが、軟鋼切削の場合に於いては概ね 600°C 以上に於いて其の低下が顕著である。
- 2) 切削面積が一定の場合に於いては送りを大きくする方が切削力の低下が大である。
- 3) 切削速度は比較的低速側に限定される。
- 4) 被削性は極めて良好である。
- 5) 切削動力は室温加工に比して 2/3 以下に低下される。
- 6) 機械は特に強力且つ高速度を必要とせず、普通一般のもので充分所期の能率を挙げ得る。

本研究は文部省科学研究費による研究の一部であつて、研究に際して御指導下さつた石原寅次郎博士に対して深く感謝すると共に、研究協力者 高辻雄三氏の絶大な御協力に対して厚く御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- マシナリー 臨時増刊 No.7 海老原敬吉著
 日本機械学会論文集 第17巻 第63号
 切削学要綱 クローネンベルグ著
 powder Metallurgy John Wulff
 工業用鋼鉄 三橋鉄太郎訳
 金属材料の機械的性質 山田良之助
 金属の切削 中崎正夫 訳
 Machinery April 1950
 Materials Methods January 1951.