

ドリル加工時の切削温度に関する基礎実験

青 山 英 樹*・菊 地 千 之**

A Basic Experiment on the Cutting Temperature in Drilling

Hideki AOYAMA and Kazuyuki KIKUCHI

要 旨

本実験はドリル加工時に発生する切削温度を、ドリル逃げ面にアルメル・クロメル熱電対を埋め込む方法により測定した。炭素鋼、球状黒鉛鋳鉄、アルミニウム合金を切削した時のドリル切刃の温度分布の相違、切削条件（切削速度、送り）の影響、切削深さとドリル切刃温度の関係について考察した。

また、被削材中にアルメル・クロメル熱電対を埋め込み、ドリル加工時の被削材温度を測定し、ドリル切刃温度との比較を行なった。

Synopsis

In this experiment, the cutting temperature generated in drilling was measured by burring the alumel-chromel thermocouple in the drill flank. The difference of the drill cutting edge temperature distribution in drilling the carbon steel, the nodular cast iron and the aluminum alloy, the influence of the cutting condition (cutting speed, feed), and the relation between the drill penetration distance and the drill cutting edge temperature were considered.

The work temperature in drilling was also measured by burring the alumel-chromel thermocouple in the work, and was compared with the drill cutting edge temperature.

1. ま え が き

穴あけ加工は最も古い切削加工法の1つであり、機械加工の中でも占める比重はかなり大きく重要な加工法である。穴あけ加工に使用される工具の中で最も代表的な工具はツイストドリルである。しかし、ドリル加工は他の旋削やフライス加工と大きく異なり、工具自身が工作物中に切削しながら進んでゆき、穴の底における切削となるため、現場において手軽に広く使用されている反面むずかしい加工法である。

近年、加工の自動化や無人化が進み、トランスファマシニングやマシニングセンタの普及がめざましいが、これらの作業の多くが穴加工であるため、穴加工用工具の改善・開発が要請されている。特

に無人化を進めるにつれ、工具の寿命が大きな問題となる。

バイトに関する寿命の研究は数多くなされ、寿命を決定する大きな因子は切削温度であるということが、理論的・実験的に明らかにされている。従って、切削問題を理解するためには切削機構、切削抵抗の解析とともに切削温度を考慮しなければならない。

これに対し、ドリルの切削温度に関する研究は少なく、その中のほとんどが工具-被削材熱電対法を用いている。工具-被削材熱電対法では、工具と被削材が接している部分の平均温度が測定されるため、切刃に沿った温度分布は得られない。

本実験では、ドリル逃げ面に切刃に沿ってCA熱電対を3ヶ所に埋め込み切削温度を測定した。

* 助 手 機械工学科

** 教 授 室蘭工業大学 産業機械工学科

2. 測定方法

ドリル加工時に発生する切削温度の測定方法として、ドリルー被削材熱電対法⁽¹⁾、被削材中に熱電対を埋め込む方法⁽²⁾、ドリルに熱電対を埋め込む方法⁽³⁾、逃げ面に示温塗料を塗る方法⁽⁴⁾、被削材に金属はくをはさみ金属はくとドリルの熱電対法⁽⁵⁾などが考えられる。本実験では切削温度を切削部分の平均温度としてではなく、切刃に沿った温度分布および切削深さと切刃温度の関係について特に注目するため、ドリルに熱電対を埋め込む方法により切削温度を測定する。

また、ドリル切刃温度と被削材温度の比較をするため被削材温度を測定するが、その方法は被削材中に熱電対を埋め込む方法とする。

3. 実験方法

3-1 ドリル

本実験に使用したドリルは市販のテーパシャンクドリルで材質は高速度工具鋼 (SKH9) である。直径 15 mm, 全長 225 mm, みぞ長さ 125 mm, ねじれ角 30°, 先端角 118°, 逃げ角 11°, 心厚 1.95 mm, マージン幅 1.4 mm である。シンニングは手を加えず市販されている状態で使用した。その形状を図 1 および図 2 において斜線で表わす。

図 1 において点線で表わすように、放電加工機 (三菱電機, DK 280) によりドリル逃げ面に幅 1 mm, 深さ 0.8 mm のみぞを 3 本つけ、切刃から 0.8 mm 後ろに CA 熱電対の測温接点をスポット溶接する。熱電対の素線はみぞに沿って埋め込みランド部まで導く。ランド部についてもシャンクまでみぞを掘り、素線を逃げ面からランド部のみぞに沿って埋め込みシャンクまで導く。これらのみぞに埋め込んだ素線が切りくずなどにより傷つけられたりみぞからはみ出すのを防ぐために、耐熱性無機接着剤 (耐熱温度 1300°C) を充てんした。

図 1 からわかるように、本実験で測定される切刃温度は切刃から 0.8 mm 離れた点の温度であるため、切刃の温度を推定する必要がある。そのため、図 2 に示すように、ドリル逃げ面上の切刃に垂直な 3 ケ所に CA 熱電対を埋め込んで温度を測定し、これより切刃の温度を外挿する。熱電対の接点や素線の処理の方法は前述のとおりである。

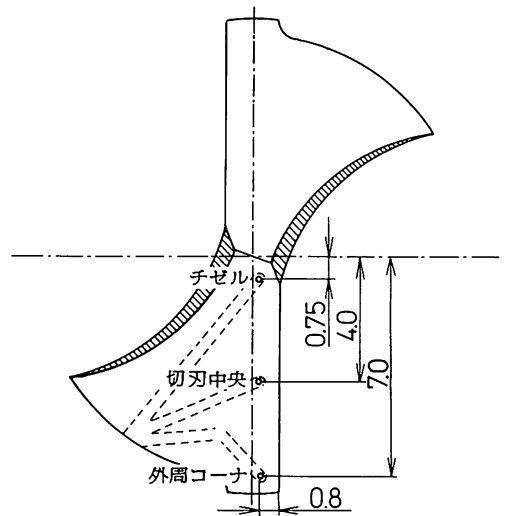


図1 熱電対埋め込み位置 (切刃に平行)

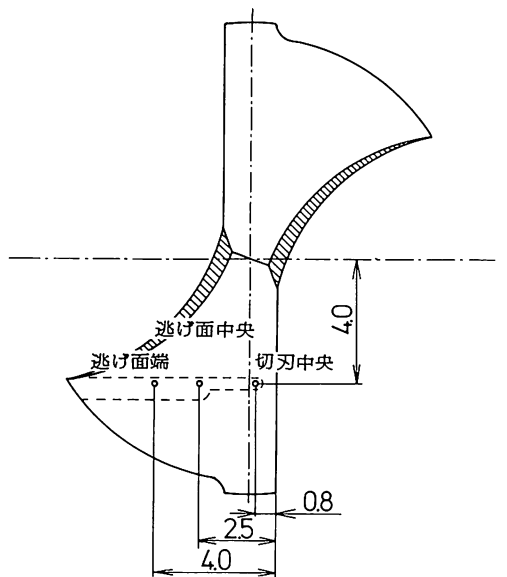


図2 熱電対埋め込み位置 (切刃に垂直)

3-2 被削材

被削材として、機械構造用炭素鋼鋼材 S 45 C (焼鈍材), 球状黒鉛鑄鉄 FCD 70 相当 (鑄放し材), アルミニウム合金 2014 (焼鈍材) を用いた。それぞれの化学成分を表 1 ~ 3 に示す。

ドリル切刃温度と被削材温度の比較をするため、被削材中に熱電対を埋め込んで切削する。その被削材中の熱電対位置と被削材の形状を図 3 に示す。切削深さが 45 mm に達した時の被削材温度を測定する。熱電対の埋め込み方法は、直径 45 mm, 長さ 60 mm の被削材を縦に半分に切断す

表 1 炭素鋼の化学成分

Work	Chemical Composition %				
炭 素 鋼	C	Si	Mn	P	S
S45C	0.43	0.17	0.70	0.021	0.019

表2 球状黒鉛鑄鉄の化学成分

Work	Chemical Composition %							
球状黑鉛鑄鉄 FCD70相当	C	Si	Mg	Mn	P	S	Cu	Ni
	3.82	2.33	0.035	0.95	0.018	0.0098	0.87	0.58

表3 アルミニウム合金の化学成分

Work	Chemical Composition %								
アルミニウム合金	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
2014	4.14	0.72	0.24	0.72	0.55	0.04	0.01以下	0.01以下	残部

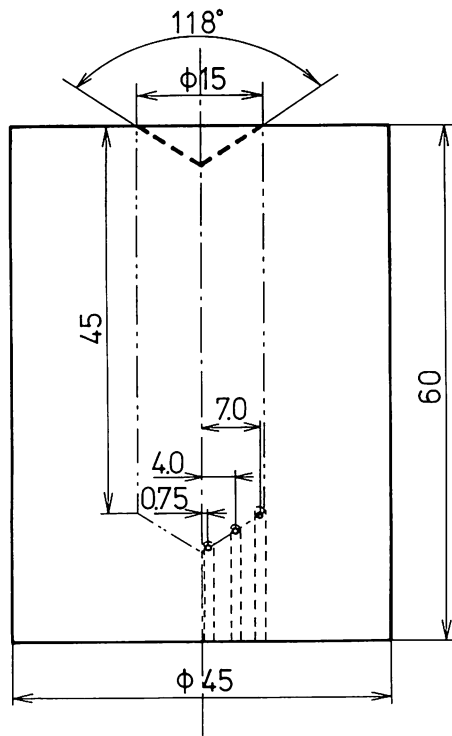


図3 被削材中の熱電対埋め込み位置

る。片方の切断面に放電加工機により幅 1 mm、深さ 0.8 mm のぞみをつける（図 3 において点線で表わされている。）。図 3 に示される位置に CA 熱電対をスポット溶接し、みぞに沿って素線を導き、もう一方を合わせて試験片とする。

3-3 実験方法および実験条件

実験は NC 旋盤（瀧澤鉄工，NX-II）により行なった。切削条件は，被削材が炭素鋼の場合，回転数を 240，360，480，600 rpm の 4 種に，送りを 0.10，0.15，0.20，0.25 mm/rev と変化させた。また，被削材が球状黒鉛鋳鉄，アルミニウム合金の場合は，回転数 480 rpm，送り 0.20 mm/rev とし，この条件における各被削材の切刃温度の比較を行なった。

被削材温度測定の切削条件も、回転数 480 rpm, 送り 0.20 mm/rev とした。

切削はすべて乾式切削とし、熱起電力は3ヶ所同時にペンレコーダにより記録した。切削深さは3D(D:直径)=45mmとした。切削開始部分の形状は、チゼルから外周コーナまで切刃各点での切削深さを同じにするため、すべての実験において図3に示してあるような形状とした。

4. 実験結果および考察

4-1 刃先温度の推定

図1に示されているドリルにより測定される温度は切刃から0.8 mm離れた点の温度であるため、図2に示すドリルにより切刃に垂直な温度分布を求め刃先温度を外挿する。結果を図4に示す。この結果より、半径4.0 mmにおける刃先温度は切刃より0.8 mm後ろの点の温度よりも10℃弱程度高い温度となっている。

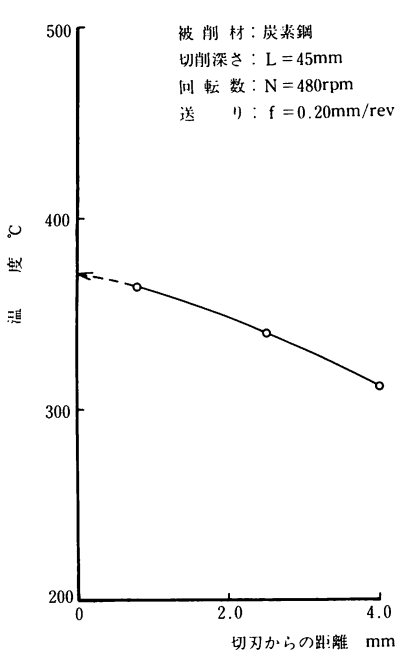


図4 切刃に垂直な温度分布(刃先温度の推定)

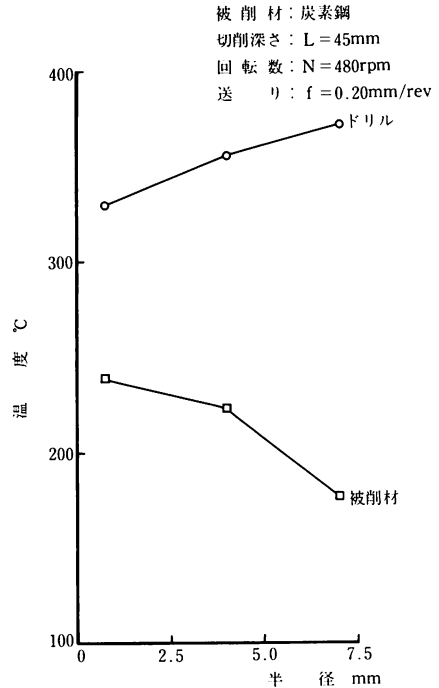


図5 ドリル温度と被削材温度の比較

4-2 ドリル切刃温度と被削材温度の比較

図5に切削深さが45mmに達した時のドリル切刃温度と被削材温度を示す。ドリル切刃と被削材とはかなりの温度差があることがわかる。また、その傾向も大きく異なり、ドリルでは中心から外周にかけて温度が上昇しているが、被削材では逆に中心より外周の方が低くなっている。

この原因として考えられることは、ドリルの切削状態は中心では切削速度が0であり、中心から離れるにつれ切削速度が大きくなり、同時に切削距離も長くなる。また、すくい角は中心から離れるほど大きくなり、中心のチゼルでは大きな負のすくい角になっている。このことから、切削速度の面から考えると外周の方が温度が高くなるだろうと考えられ、すくい角の面から考えると中心の方が高くなるだろうと考えられる。これら2つの要因とともに熱の蓄積体積の相違が考えられる。つまり、被削材はドリルの直径よりも大きいのでドリル径の外側部分には多くの熱が蓄積できる場所がある。そほに比べてドリルの場合、外周ほどすくい角が大きくなっているため、刃先の先端部分の体積としては外周の方が小さく、当然先端部分の熱の蓄積体積も外周の方が小さくなる。これらが総合的に作用し図5のような結果になるものと考えられる。

4-3 切削速度(回転数)と送りの影響

図6-1~4に切削速度と切削温度の関係を示す。いずれの条件の場合も、チゼル、切刃中央、外周コーナの順に温度が高くなっている。また切削速度(回転数)が増すにつれて温度も上昇し、送りの増大によっても温度が高くなっている。

回転数(切削速度)をパラメータとして外周コーナ温度と送りの関係を図7-1に、送りをパラメータとして外周コーナ温度と切削速度との関係を図7-2に示す。図7-1より回転数(切削速度)が高いほど送りの影響が大きく表われ、図7-2より送りが大きいほど切削速度(回転数)の影響が大きく表われている。

4-4 被削材種による切削温度の比較

図8に各被削材を切削し深さが45mmに達した時のドリル切刃温度分布を表わす。炭素鋼とアルミニウム合金の場合、半径が大きくなるにつれて温度も上昇しているが、球状黒鉛鋳鉄では、切刃中央から外周にかけて温度差は少なくチゼル部で少し温度が高くなっている。

図9-1は炭素鋼、図9-2は球状黒鉛鋳鉄、図9-3はアルミニウム合金の切りくずである。炭素鋼の場合、最初は切りくずとして良好な円錐らせん形切りくずとなって出てくるが、間もなく

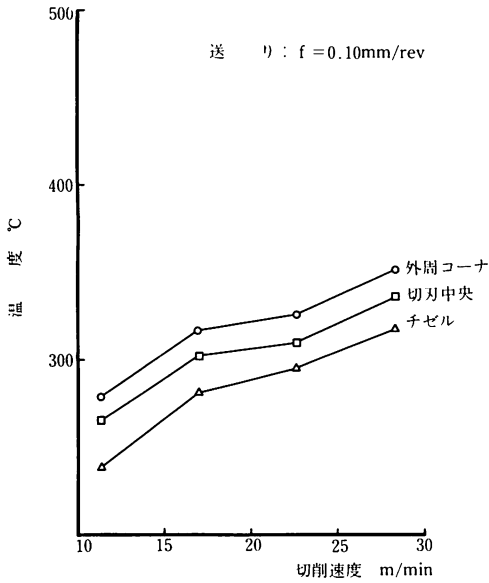


図 6-1 切削速度と切削温度の関係

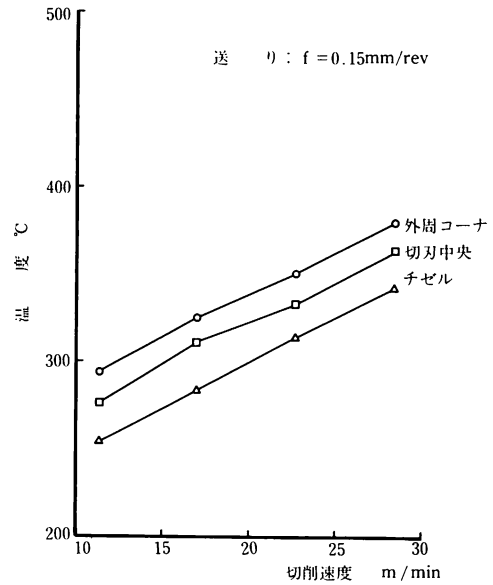


図 6-2 切削速度と切削温度の関係

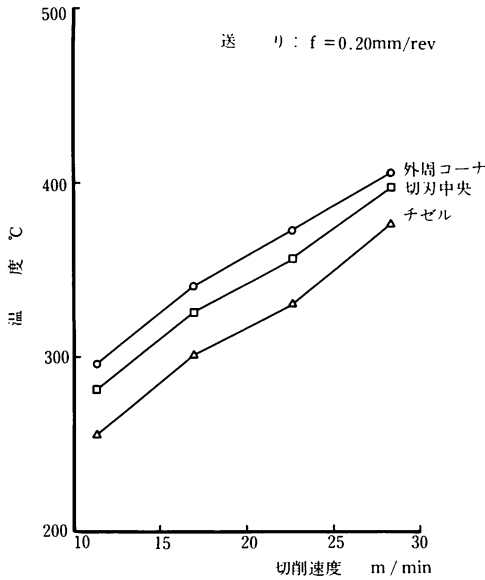


図 6-3 切削速度と切削温度の関係

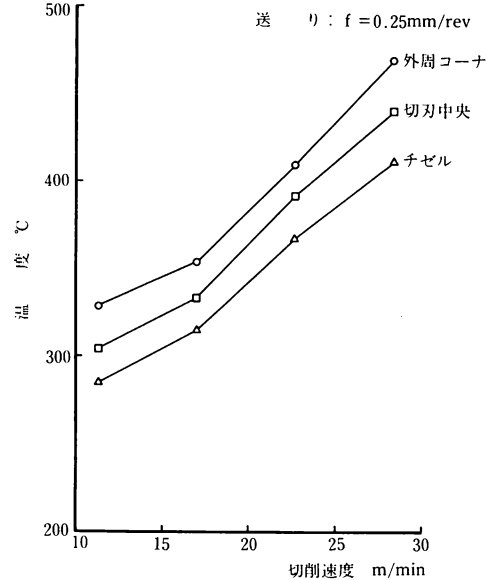


図 6-4 切削速度と切削温度の関係

長ピッチ形切りくずへと変わり、切削深さが深くなってくると扇形切りくずや遷移折断形切りくずとなる。切削深さがおよそ 35 mm を過ぎてくると切りくずの排出がかなり困難となり、折り重なって押し出されながら排出される。球状黒鉛鑄鉄の場合は、本実験の切削条件では図 9-2 にみられるように終始針状切りくずであり、切りくずの排出はかなり良い状態であった。アルミニウム合金の場合、炭素鋼よりも少し深いところまで円錐形

切りくずとなって排出されるが、切りくずの剛性が小さいため長ピッチ形の切りくずはほとんど排出されずに扇形切りくずへと変わる。切削深さが深くなってくると炭素鋼よりも切りくずの排出が悪くなり、扇形切りくずが固まりとなって押し出されてくる。

4-5 切削深さと切削温度の関係

各被削材について回転数が 480 rpm、送りが 0.

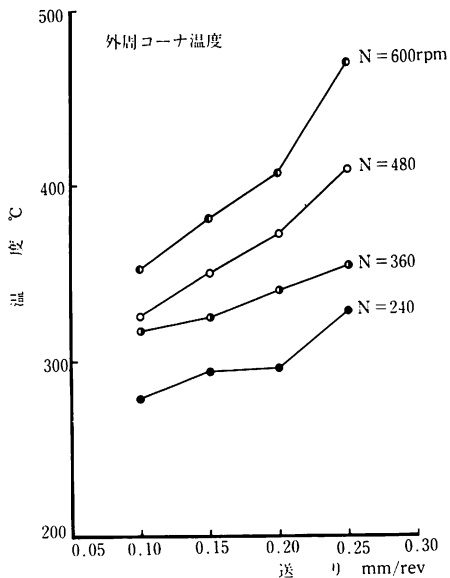


図7-1 切削速度(回転数)と送りの影響

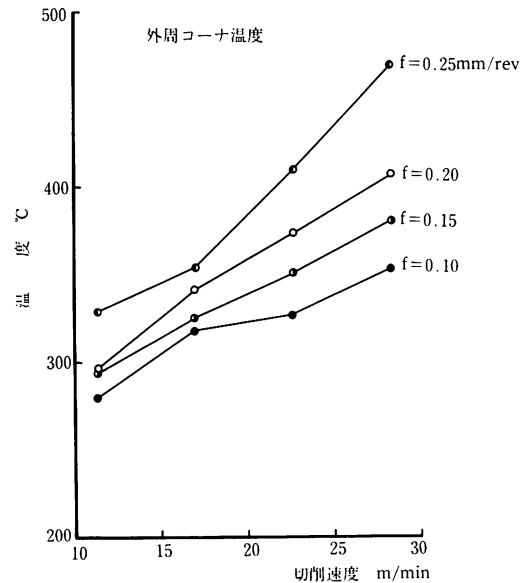


図7-2 切削速度(回転数)と送りの影響

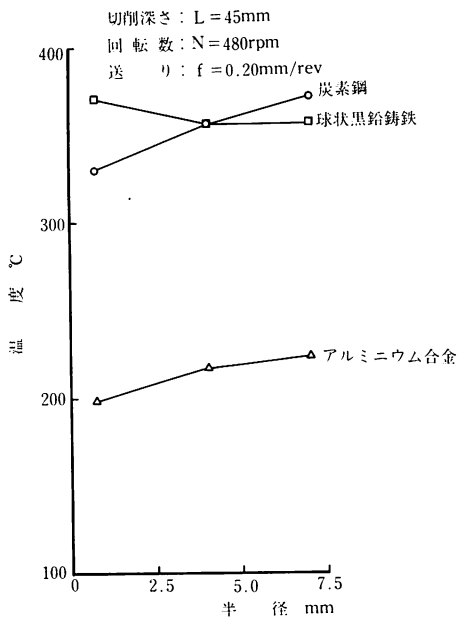


図8 被削材種による切削温度の比較

図10-1, 2より炭素鋼と球状黒鉛鋳鉄の場合は切削深さが $1/2 D = 7.5 \text{ mm}$ (D : 直径)に達するまで急激な温度上昇となり、その後は緩慢ながらも温度上昇を続ける。本実験の切削範囲内では定常状態には達していない。

図10-3よりアルミニウム合金の場合も、初め急激に温度上昇しその後も緩やかに上昇を続ける。しかし、切削深さが 35 mm を過ぎると再び上昇率が高くなる。この原因として、アルミニウム合金は切削深さが深くなってくるとかなり切りくずの排出が悪くなること。炭素鋼や球状黒鉛鋳鉄に比べて熱伝導率が4倍程度高いこと。また、単位体積当りの熱の蓄積能力が低いことなどが考えられる。

図11-1, 2より切削深さと切削温度は両対数グラフ上で直線で表わされ、

$$\theta = e^c \times L^n$$

θ : 切削温度

L : 切削深さ

c, n : 定数

$$e = 2.718281828 \dots$$

の関係を満足する。但しアルミニウム合金については切削深さが 35 mm 程度までである。各切削条件におけるチゼル、切刃中央、外周コーナ温度について最小二乗法により求めた定数 c, n を表4-1, 2に示す。

20 mm/rev の場合の切削深さと切削温度の関係を図10-1～3に示す。図11-1は炭素鋼を切削した場合の外周コーナ温度について回転数が 480 rpm における切削深さと切削温度の関係を送りをパラメータとして両対数で表わしたものである。また、図11-2は3種の被削材を切削した時の外周コーナ温度について両対数で表わしたものである。

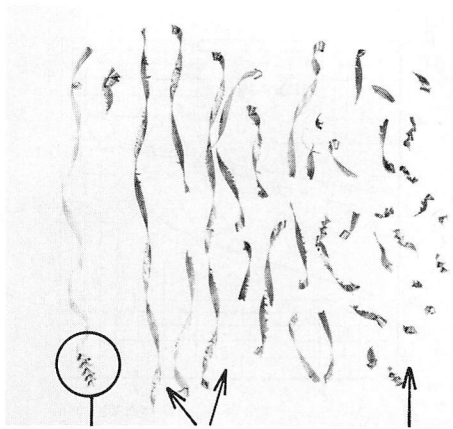


図9-1 炭素鋼 切りくず
円錐らせん形切りくず 長ピッチ形切りくず 扇形切りくず 遷移折断形

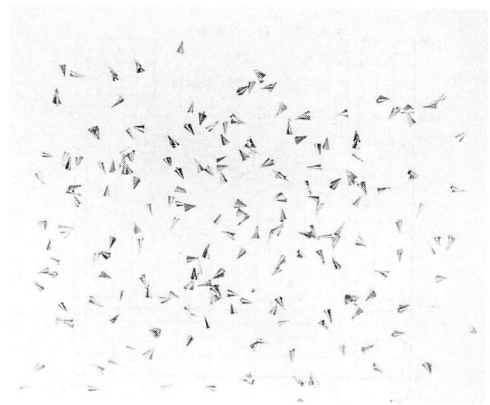


図9-2 球状黒鉛鑄鉄切りくず
針状切りくず

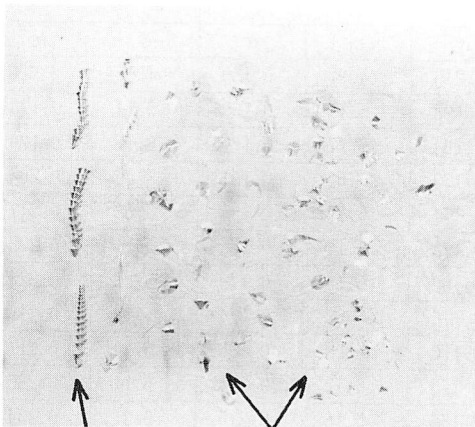


図9-3 アルミニウム合金切りくず
円錐らせん形切りくず 扇形切りくず 遷移折断形

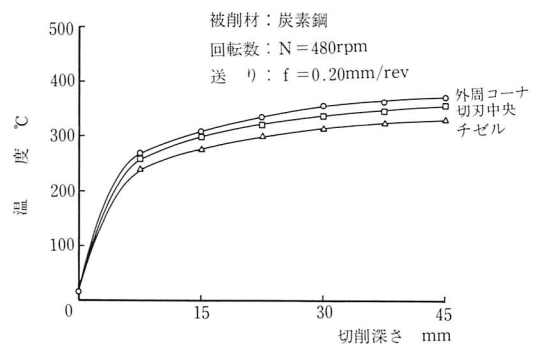


図10-1 切削深さと切削温度の関係

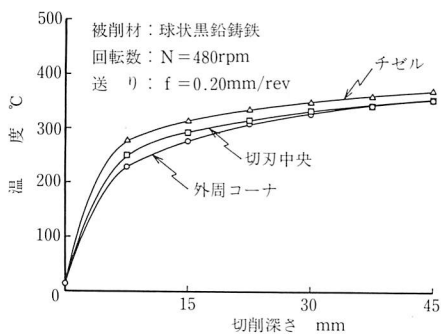


図10-2 切削深さと切削温度の関係

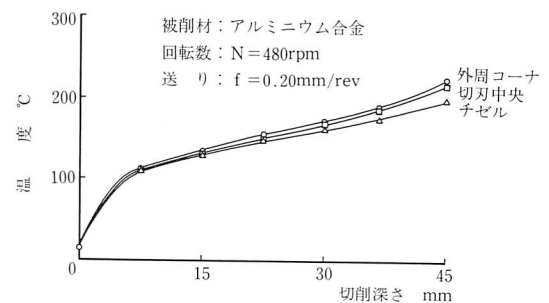


図10-3 切削深さと切削温度の関係

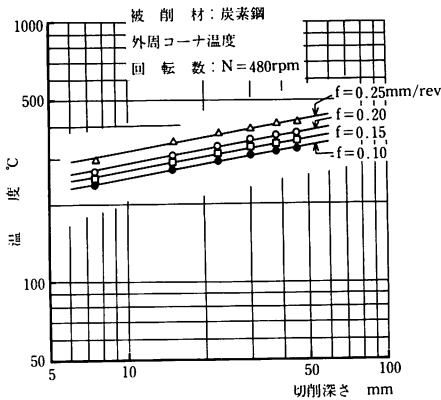


図11-1 切削深さと切削温度の関係

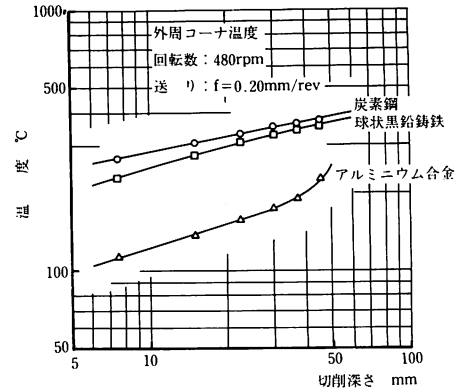


図11-2 切削深さと切削温度の関係

表4-1 cとnの定数

送り mm/rev		回転数 rpm	240		360		480		600	
			c	n	c	n	c	n	c	n
0.10	チゼル		4.12	0.366	4.82	0.215	4.97	0.189	4.97	0.206
	切刃中央		4.85	0.187	4.97	0.198	5.14	0.160	5.14	0.175
	外周		4.91	0.188	4.99	0.204	5.12	0.177	5.11	0.199
0.15	チゼル		4.90	0.166	5.00	0.172	5.03	0.191	5.06	0.204
	切刃中央		5.20	0.162	5.08	0.174	5.12	0.185	5.08	0.217
	外周		5.04	0.170	5.13	0.173	5.17	0.185	5.11	0.223
0.20	チゼル		5.00	0.143	5.09	0.160	5.13	0.179	5.06	0.228
	切刃中央		5.11	0.139	5.12	0.176	5.22	0.174	5.18	0.213
	外周		5.17	0.135	5.19	0.170	5.23	0.186	5.20	0.217
0.25	チゼル		5.06	0.155	5.09	0.176	5.12	0.208	5.14	0.236
	切刃中央		5.20	0.140	5.20	0.166	5.16	0.215	5.21	0.234
	外周		5.24	0.147	5.24	0.169	5.34	0.183	5.42	0.192

表4-2 cとnの定数

		回転数: 480rpm 送り: 0.20mm/rev	
		c	n
球状黒鉛 鋳鉄	チゼル	5.30	0.163
	切刃中央	5.13	0.196
	外周	4.93	0.251
アルミニウム 合金	チゼル	4.03	0.319
	切刃中央	3.85	0.383
	外周	3.94	0.368

5. あ と が き

以上、本実験結果をまとめる。

- ドリルと被削材とはドリル切刃のほうがかなり温度が高い。ドリルではチゼルから外周

コーナへと温度が上昇するが、被削材ではチゼルから外周コーナへと温度が低くなる。

- 切削速度または送りが増大するとともに切削温度も高くなる。また、切削速度が大きいほど送りの影響が強く表われ、送りが大きいほど切削速度の影響が強く表われる。
- 炭素鋼とアルミニウム合金の切削ではチゼルから外周コーナにかけて温度が高くなるが、球状黒鉛鋳鉄の場合は切刃中央から外周コーナにかけて温度差は少なく、チゼル部で少し高くなっている。
- 切削深さと切削温度は両対数グラフ上で直線で表わされるため、 $\theta = c \times L^n$ の関係を満足する。

参 考 文 献

- (1) たとえば, 佐藤淳一: ドリルの切削温度について, 不二越技報, 12-4, 49.
- (2) 津枝・長谷川・石田: きりもみにおける被削材の温度上昇の研究(第1報, 切削条件の影響), 日本機械学会論文集, 28-187 (昭37-3), 384.
- (3) De Vries, M.F., Saxena, U. K. and Wu, S. M., "Temperature Distributions in Drilling", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B, vol. 90, No. 2, May 1968, pp. 231-238.
- (4) 津枝・長谷川・仁科: ドリル刃先温度の研究, 日本機械学会論文集, 27-181 (昭36-9), 1423.
- (5) 笠原・木下: 穴あけ加工における切削温度の測定, 理化学研究所報告, 37-3, 1961, 177.
(昭和57年11月30日受理)

