

骨穿孔用ドリルの最適形状ならびに材質

金枝 敏明・寺野 元規*・平野 博之**

岡山理科大学フロンティア理工学研究所

*岡山理科大学工学部機械システム工学科

**岡山理科大学工学部バイオ・応用化学科

2020年12月15日受理

1. はじめに

整形外科手術の分野で主流である人工関節置換手術や骨折治療術では、骨切り過程や骨にボルトを埋める工程が多く、後者ではドリルで骨を穿孔する必要が生じるのは言うまでもない。工具であるドリルの硬さは、穿孔される骨の硬さよりも相当硬いことは容易に理解されるが、工具より硬さが小さい骨ではあるが、湿気を含んだ木材のように靱性が高い上に異方性を有するので、決して硬さからだけでは推測される穿孔しやすい材料ではない。

したがって、穿孔する担当する医師からドリルの食いつきが不良、耐摩耗性が低いといった不満が出ているのも事実である。その結果手術時間が予想以上に長期化することもあり、患者の負担も大きくなる。

食いつきの不良に関しては、一般金属における穿孔と異なり、骨表面に垂直にドリルを貫入させることは少なく、ガイドを使用しても表面に対して90°以下の穿孔になる。したがって幾何学的関係から食いつきは不良にならざるを得ない面もある。

次いで、摩耗しやすい指摘のあるドリルは、材質がステンレス鋼SUS630が主流である。上記のような骨の機械的性質に対しては、高速度鋼や工具鋼などの適用も考えられるが、手術用器具の材料として厚生労働省の認可が下りてないこと、さらにオートクレーブでの滅菌過程での耐食性に問題があり使用できない。SUS630は、クロム系のマルテンサイト組織を有し、17Cr-4Ni-4Cu-Nbが主体で、ロックウエル硬さHrc: 40~44のものである¹⁾。当然、630系より硬いステンレス鋼410、420も存在するが、これらも耐食性が前者より劣るといって使用できない状況にある。

このような現状を踏まえ、骨用ドリルの最適形状を求めるために、刃先形状と切削抵抗の関係を求めた。

2. 実験方法

2.1 試験用骨試料

本来なら人体の骨を使用すべきであるが、種々の制

約があり、対象となり得ない。そこで多くの研究では豚や牛の骨、それも一番硬いと言われている大腿骨の部分を選択している。この場合も生体ではなく、いわゆる屍を使用している。したがって実験用試料として死亡後実験開始時までの保存方法や機械的・生物学的性質を一定に収めることは、困難と言わざるを得ない。

そこで着目したのが模擬骨である。2017年に、医療機器の力学評価に使用する生体組織のモデルの国際標準化にむけ、世界が動き出し、骨ネジなどの医療機器の力学評価には、骨モデル（模擬骨とも言う）を用いて行われている²⁾。骨は、表面の皮質骨と内部の海綿骨からなり、それらに対応して模擬骨が市販されている。

人骨は外側の皮質骨と呼ばれる硬い部分と内側の海綿骨と呼ばれる多孔質化した軟らかい部分から成り立つ³⁾。この構造を再現するためにSawbones社の人骨代替試験材料、模擬骨を使う。Table 1にその特性を示す。皮質骨相当部の試験材料はエポキシ樹脂とガラス短繊維との混合物を加圧成形したものである。海綿骨相当

Table 1 Mechanical properties of workpiece

	Density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)
Short fiber filled epoxy sheet	1.64	125
Solid rigid polyurethane foam	0.8	44

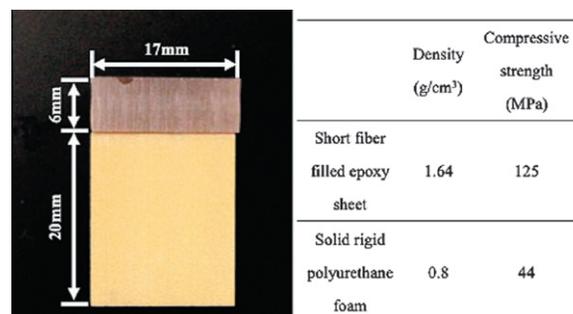


Fig. 1 Synthetic bone

部の試験材料は、ポリウレタンを発泡させたものである。前者(厚さ6 mm)と後者(厚さ20 mm)を接着剤(アロンアルファEXTRA4020, 東亜合成)で接着したものを試験片とする。人骨の皮質骨厚さも約5~6 mmとなっており、それに準拠する⁴⁾。

Fig. 1に試験に供した皮質骨と海綿骨に相当する模擬骨を示す。

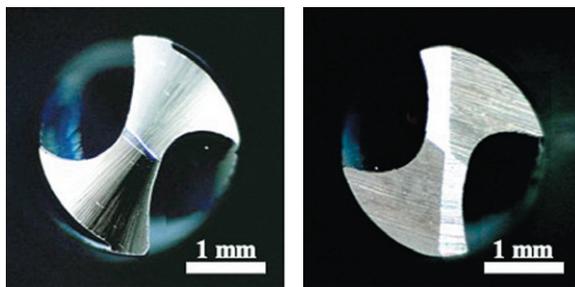
なお、皮質骨は海綿骨よりも密度で約2倍、引張り強度で5倍で、比切削抵抗が4~5倍高い⁵⁾。

2.2 ドリル

ドリルの直径は、手術時に多いとされている ϕ 2.8 mmとする。Table 2にその諸元を示す。ドリルA(先端角 $\varepsilon=118^\circ$, ねじれ角 $\theta=30^\circ$, SUS630)を基準にB~Eは刃先形状, Fは材質を変えた6種類のドリルを用いる。ドリルA~DおよびFの刃先形状は円錐形状, ドリルEはツーレーキ形状である。Fig. 2にドリルAとFの刃先形状の違いを示す。ドリルAとCで先端角, AとBでねじれ角, AとEで逃げ面の形状は円錐形状, ドリルEはツーレーキ形状である。ドリルAとCで先端角, AとBでねじれ角, AとEで逃げ面の形状, AとFで材質の影響を比較した。

Table 2 Cutting edge shape and material of drill

Drill	Diameter	Material	Point angle ε	Helix angle θ	Flank face
A	2.8 mm	SUS630	118°	30°	Conical
B	"	"	"	18°	"
C	"	"	90°	30°	"
D	"	"	"	18°	"
E	"	"	118°	30°	Two rake
F	"	SKH51	"	"	Conical



1) Conical tool edge 2) Double rake edge

Fig. 2 Top view of drill edge

2.3 穿孔試験用装置

Fig. 3に試験装置を示す。試験試料の穿孔には、コンパクトで精度が高い小型切削加工機(FANUC ROBODRILL α -D14LiB5, FANUC)を使用する。

穿孔時の切削抵抗は、ドリルの場合トルクとスラスト方向に分け、ドリルの切削抵抗専用のAST式回転工

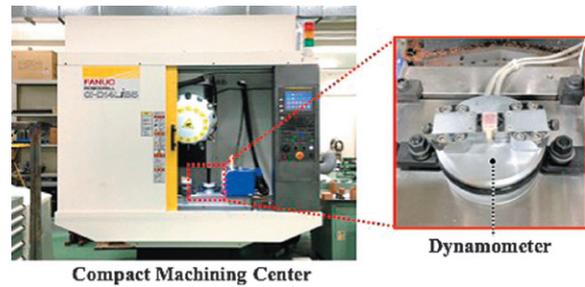


Fig. 3 Drilling test machine

具動力計(ひずみゲージ方式, AST-BL, 三保電機製作所)を用いる。この動力計を小型切削加工機のテーブルに固定する。

2.4 穿孔試験条件

穿孔条件は、医師が骨の穿孔を行う際の値を基に回転数 $r=1188$ rpm, 送り速度 $f=60$ mm/min, 穿孔深さ $d=12$ mmとする。皮質骨部分を貫通し、海綿骨内部に達するまでドリルを貫入させ終了する。

3. 試験結果および考察

3.1 先端角の影響

Fig. 4に各種ドリルのトルク・スラストと穿孔深さの関係を示す。図からわかるように、トルクは穿孔開始直後から急激に増大し、貫入深さ2 mm以後は深さにほぼ比例するかごとく増加する。皮質骨層に達してもドリルF以外貫入深さに比例するかごとく、増加し続ける。

これらの傾向を考察するために、切れ刃の長さとのトルクの関係について着目した。

先端角から切れ刃(のみ部)の長さを以下の計算式で算出する。

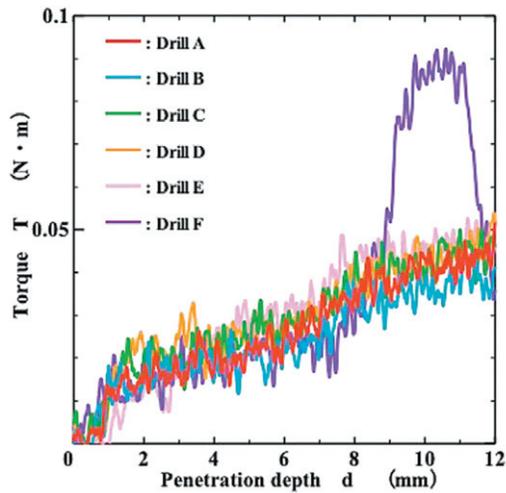
$$l = r / \cos(\varepsilon / 2) \quad (1)$$

ここで、 l : 切れ刃の長さ (mm)
 r : ドリルの半径 (mm)
 ε : 先端角 ($^\circ$)

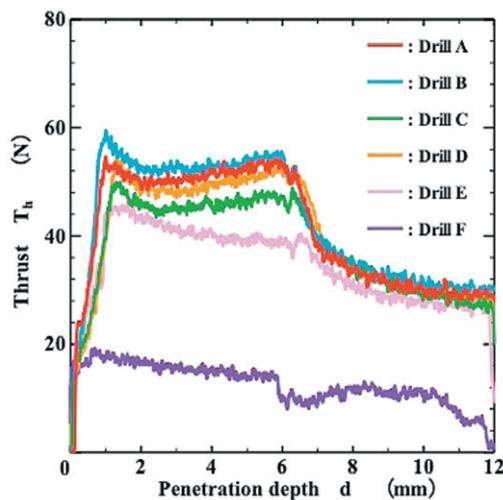
そうすると、 $\varepsilon=90^\circ$ の場合, 1.98mm, $\varepsilon=118^\circ$ の場合, 1.13mm となり先端角 ε が小さい場合刃先で切削する長さが大きくなり、トルクが大きくなる上記の関係が理解できる。また明石らも同様な傾向を金属で表明している⁶⁾。

3.2 ねじれ角の影響

先端角 $\varepsilon=90^\circ$ でねじれ角 $\theta=18^\circ$ のDと $\theta=30^\circ$ のCで比較すると、トルクでは差はほとんどないが、スラス



a) Torque curve



b) Thrust curve

Fig. 4 Relationship between force and penetration depth

トではDがわずかばかり大きい。他方、 $\varepsilon=118^\circ$ と比較すると θ の大小に影響は認めがたいものとなった。先端角が小さいとトルク成分が垂直成分であるスラストに影響する度合いが大きくなったものと思われる。また θ 大の 30° の方がすくい角も大きくなり、すくい面での摩擦も小さくなり、切りくず排出も容易になったことが影響したとも考えられる。

3.3 逃げ角の影響

逃げ角の影響を刃先が円錐形状のドリルAとツーレーキ形状のEの比較で調査した。トルクでは、Aに比べ、ツーレーキ形状のEの方が大きい。一方、スラストは、ドリルEの方が小さい。つまり、円錐形状よりもツーレーキ形状の方が値は小さくなる。ツーレーキを施したドリルでは、逃げ面で接触面積が減少する可能性が大きく、また切りくず排出も良好になり、スラストが小さくなり穿孔時のドリルの振れ回りも小さくなったことが影響したと推測される。ツーレーキが皮質骨層部分ではかなり小さな値を示した。

トルクについては、両者間で大きな差がない。

4. おわりに

本研究では、図らずも硬さに優位がある機械加工用の高速度鋼製のドリルが、概ね最小の切削抵抗を示した。特にスラストではその傾向が顕著であった。しかし、1.はじめに記述したようにおいては、手術用器具には用いることができない。刃先形状の最適値は把握できたので、医師から発せられている2つの要請である食いつきについてはチゼルエッジ部のシンニングが関与している可能性が高いので、シンニング形状について最適値を次に求めたい。次いで材質についてステンレス鋼を外せないの、硬さ向上法の一つとしてDLCコーティングを考慮しているので、これを試していきたい。

参考文献

- 1) 田中良平編, JISステンレス鋼の選び方・使い方, 日本規格協会, 27 (2004).
- 2) 日本機械学会誌機械工学年鑑2018, <https://www.jsme.or.jp/kikainenkan2018/chap04.html#4-31>.
- 3) 森田真史ら: 海綿骨の機械的性質とその骨梁構造依存性について, 材料, 33, 373, 1323-1329 (1984).
- 4) 中山敏ら: インプラント植立骨としての肩甲骨・腸骨および腓骨骨質がリムーバルトルクに及ぼす影響についての比較研究, 日本口腔インプラント学会誌, 10, 2, 138-143 (1997).
- 5) M. Mitsuishi, S. Warisawa and N. Sugita: Determination of the machining characteristics of a biomedical using a machine tool designed for total knee arthroplasty, Annals of the CIRP, 53/1, 107-112(2004).
- 6) 明石剛二: ドリルの形と穴加工, 精密工学会誌, 85, 10, 839 (2019).

Optimum edge shape and material for bone drill

Toshiaki KANEEDA, Motoki TERANO* and Hiroyuki HIRANO*

Institute of Frontier Science and Technology

**Faculty of Engineering, Okayama University of Science,*

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-City, Okayama 700-0005, Japan

In orthopedic surgeries osteosynthesis and artificial joint replacement are operated to treat broken bones or disease of joint. In the osteosynthesis, the metal plates and screw are used to firmly fix to broken bones. In the artificial joint replacement, components such as plate, cup, tray, etc. are fixed to the bones with the screws. In these surgical operation procedures, the bones are drilled by using bone drill to make the holes. In the operation, the doctors often complain about lower performances in the drilling operations, which present higher cutting forces at the tool engagement and wear rates. Judging from an engineering viewpoint, the cutting edge of the drill doesn't have an optimum geometry and adequate anti-wear resistances. In this report, the drilling test of synthetic bone instead of human ones is carried out to investigate the effects of the cutting edge shape of bone drill and drill material on the cutting forces which means torque and thrust force.

Keywords: bone drill; tool edge; cutting force; tool wear; torque; thrust; point angle; helical angle