

ある人身過失事故の力学的解析

清水 茂俊*・佐藤 正視**・河野 俊一*

Dynamical Analysis of a Human Accident

Shigetoshi SHIMIZU, Masashi SATO and Shunichi KAWANO

Abstract

A human accident happened in one prison. While in a servitude work "A" and "B" quarreled and suddenly "A" gave "B" a blow by a scraper. At the moment, "B" parried it with his left wrist, but the scraper haft broke and its blade stuck in "C" while in a servitude work in front of "B" at a distance about 1.3 meters, and as the result "C" died.

We made scientific research in following dynamical analysis about this matter.

- 1) Before "B" stopped the scraper with his left wrist, how did the scraper blade stick in "C" to come out by centrifugal force?
- 2) The value of the scraper kinetic energy when the scraper blade would not come out.
- 3) The value of energy expended upon the wrist when "B" stopped the scraper with his left wrist.
- 4) The value of energy when the scraper haft broke.
- 5) The value of kinetic energy when the scraper broke and its blade came out.

1. はじめに

某刑務所で服役作業中の A と B が口論の末、A が手近かにあった突きノミで B を殴打しようとした。この時、Fig. 1 に示すように、B は A に対して前方 0.5m の位置で後ろ向きにしゃがんで作業していたが、撲られるのを察知し、振り向きざま左手首でこれを受け止めた。この時、ノミの柄は刃のつけ根から斜めに破断し (Photo. 1)、刃先が飛んで B から約 1.3m 先で中腰で作業をしていた C の右後窩線上第八肋間に鉄部 23.5cm が刺入し、右側胸から左側胸部に達する刺傷を生じ、C は 8m 歩いて昏倒し死亡した。なお、B はノミを受けとめた時、手首に全治 4 日間の打撲傷を受けたに過ぎなかった。

以上の事故に対して、次に示す事項を力学的に解析を行なった。すなわち

- 1) B がノミを受けとめる以前に、遠心力によってノミの刃先が抜けて飛び出し C に刺さり、A は柄だけで B を殴打し、その結果柄が折れたかどうか。
- 2) 刃先が抜けずに A が B を殴打した時、B が腕

で受けとめる瞬間のノミの運動エネルギーの値。

- 3) B が腕でノミを受けとめた時の B の腕にかかるエネルギーの値。
- 4) ノミが折れるに要するエネルギーの値。
- 5) ノミが B の腕に当たって折れ、更に刃先が飛んで C にささった時の刃先の初速度。

2. 実験および解析

前節の 5 項目を力学的に解析するためには、

- 1) 刃先と柄との間の摩擦力、すなわち刃先を柄から引抜くに要する力。
 - 2) ノミが B の腕にあたる瞬間のノミの軸方向および接線方向の加速度の値。
 - 3) ノミの柄の折損に要するエネルギーの値。
- を実験的に明らかにする必要がある。

2.1 実験結果

- 1) ノミの刃先の引抜き試験
定速引張試験機によって刃先の引抜き試験を行なっ

* 機械工学科

** 北九州工業高等専門学校

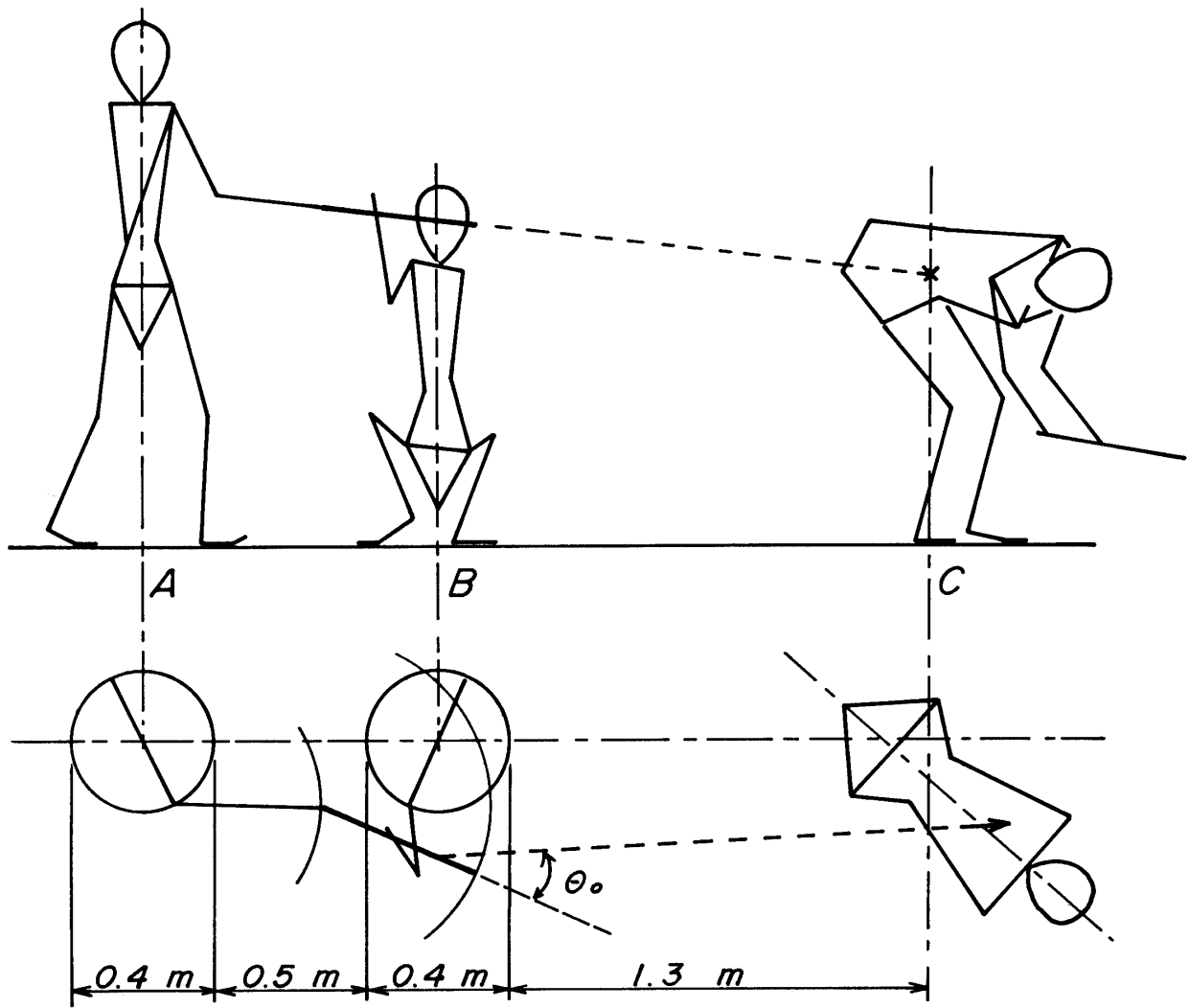


Fig. 1 An arrangement of "A," "B" and "C" based on supposition

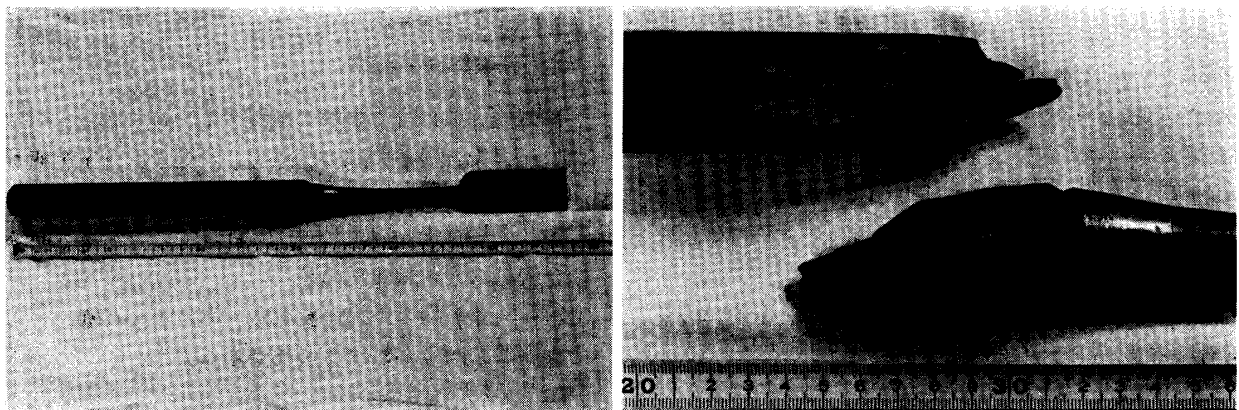


Photo. 1 Scraper used in the matter, and its broken end

た. 引張速度は毎秒 0.017mm , 0.17mm , 1.7mm の3種類について2本のノミの引抜き力を測定した結果 Fig. 2 に示すような値になり約 20kg ~ 70kg の間にあ

り, 引抜き速度の影響は殆んどあらわれていない. 点のばらつきは刃先が柄に入る孔が四角形であるため刃先を取りつけるとき, 4つの組み合わせがあり, それぞ

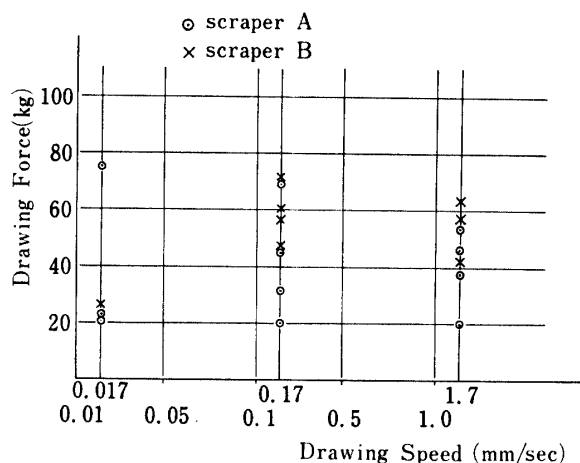


Fig. 2 Drawing force vs. drawing speed

れについてくいこむ力が異なるためである。なお残りの1本のノミには刃の柄にガーゼを巻いて押しこんであるため、引抜き力は250kgに達し特殊な場合であるので除外した。事件当時、ノミはこれ以下の力で抜けたとも考えられるが計算には一応最低値 20kg をとることにした。

2) 加速度の測定

Aがノミで殴打した瞬間の加速度を測定するためにPhoto. 2に示すような加速度計を柄の軸方向およびこれに直角方向に2個取りつけ、測定は動歪計を用い電磁オシログラフに自記させた。5人によっていろいろ

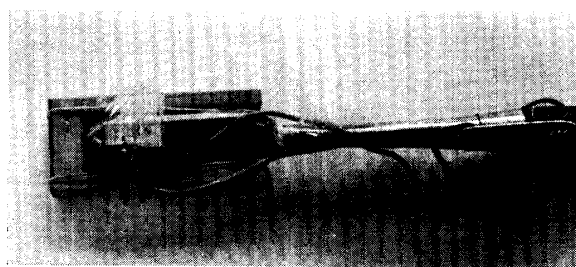


Photo. 2 Arrangement of accelerometers

んな角度から右手でノミの柄の先端に近い部分を握って空振りをして最大加速度値を測定した。平均値は半径方向の加速度が35g、接線方向の加速度が10gであった。

加速度が35gの場合、ノミの刃先に作用する遠心力 F_r は

$$F_r = \frac{W_B}{g} \cdot \alpha_r$$

ここに W_B は刃の重量、 α_r は半径方向の加速度

$$W_B = 0.34kg, \quad \alpha_r = 35g$$

とすれば、 $F_r = 11.9kg$ となる。

一方、刃先の引抜き試験の結果によれば、引抜き力の最低値は20kgであるから、ノミがBの腕に当たる前に刃先が抜けて飛ぶことはなかったといえる。しかし凶器に使ったノミの刃先が抜け易い状態であれば、途中で抜けなくても、Bの腕に当たる瞬間、抜けかけていたという状態も充分あり得る。

3) ノミの静的な折損試験

Fig. 3に示すようにノミを2点M,Nで自由支持し、P点に静荷重を作用させて3本のノミの柄の折損試験を行なった(Photo. 3参照)。M点はAが握った位置、

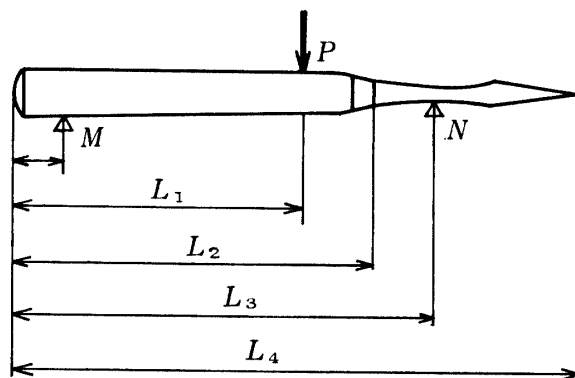


Fig. 3

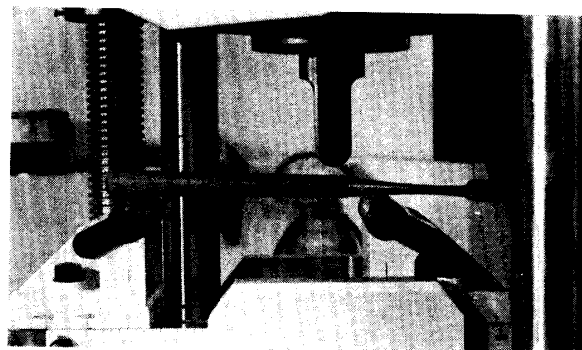


Photo. 3 Static bending test of scraper haft

P点はBが腕で受けとめたと思われる位置、N点はノミの重心であってこの点に慣性力が作用したと仮定した。実験は次の3通りについて行なった。ただし P_F は折損荷重、 δ_F はこのときの荷重点の変位。

(i) ノミは刃と柄が一体でノミ全体の重心がN点にある場合。

$$L_1 = 288mm, \quad L_2 = 335mm$$

$$L_3 = 348mm, \quad L_4 = 565mm$$

$$P_F = 255kg, \quad \delta_F = 6mm$$

(ii) 慣性力がノミの刃の重心に作用した場合、

$$L_1 = 288mm, \quad L_2 = 338mm$$

$$L_3 = 488\text{mm}, L_4 = 570\text{mm}$$

$$P_F = 145\text{kg}, \delta_F = 16\text{mm}$$

(iii) (ii)と同じ条件であるが、柄のキャップを除去した場合（殴打の瞬間、刃およびキャップが柄から完全に抜けていると仮定する）。

$$L_1 = 288\text{mm}, L_2 = 335\text{mm}$$

$$L_3 = 450\text{mm}, L_4 = 560\text{mm}$$

$$P_F = 45\text{kg}, \delta_F = 20\text{mm}$$

以上、3つの場合に対する折損に要する仕事はそれぞれ、 $1.53\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $2.32\text{kg}\cdot\text{m}$ 、および $0.9\text{kg}\cdot\text{m}$ になる。この場合(iii)が最もエネルギーが小さいが、破損はほぼ柄の軸に平行に縦断されており、一方凶器に使用したノミは斜めに折れているから、柄の折損に要したエネルギーはこれより更に小さいと思われる。試験後のノミを Photo. 4 に示す。なお、山口県商工指導セン

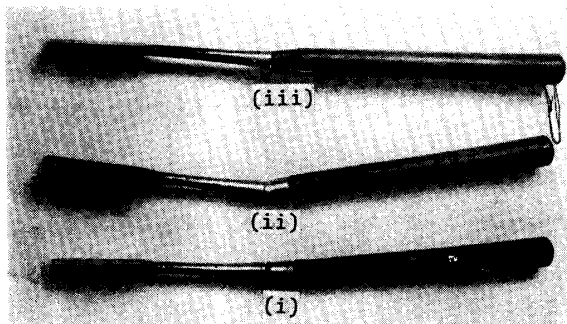


Photo. 4 Broken scrapers after the bending test

ターで行なったカシ材の衝撃試験の結果では $2.5\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $3.2\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $5.6\text{kg}\cdot\text{m}$ の値が出ているが、柄の折損に要するエネルギーは一応 $1.0\text{kg}\cdot\text{m}$ と仮定することにした。

3. 計算による解析

A が B を殴った瞬間、ノミの刃が飛んで C に当たった過程を動力学的に解析し、ノミの運動エネルギー、B の腕が受けたエネルギーおよび刃部の飛び出し速度等を推定することを試みた。

3.1 計算上の仮定

当時の諸状況を参考にして、さらに計算の簡易化を考慮しながら、ノミの運動に関して次のような仮定を行う。

1) A, B, C の位置関係の相定図は Fig. 1 に示すとおりである。

Vol. 26 No. 1 (1975)

2) ノミは、B の腕で受けられる（以下衝突という）前後とも、地面とある角度をなす平面上で平面運動を行う。

3) その平面運動は、ある一点まわりの等速度円運動とノミの長さ方向の等速度直線運動との合成運動とする。

4) ノミの刃部および柄部はそれぞれ一様な直棒とする。

5) B の腕と衝突したのは刃部と柄部の接合点であり、ちょうどその接合点が折損した。

6) 衝突の際 B の腕は動かなかった。

7) 衝突した瞬間、ノミは折損し柄部は B の腕と A のグリップによりその運動を止められ、刃部は飛んで B の前方にいた C に刃先を前にして刺入した。

8) B と C との距離は 1.3m と非常に近いため、その間の刃部の運動に対する空気の抵抗や重力による加速度の影響は無視できる。

9) 柄の折損に関係する力はあらかじめこの力学系から除外しておく。すなわち、接合部は衝突時の折損に対して抵抗しない。言いかえれば、解析は円運動成分の運動エネルギーから柄の折損に要するエネルギーを差し引いた系で行い、必要に応じてその折損エネルギーを導入するということである。

3.2 記号 (Fig. 4 参照)

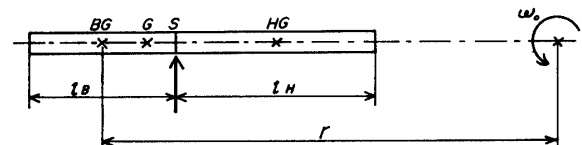


Fig. 4

M : ノミの全質量

I_G : ノミの重心まわりの慣性モーメント

v_G : ノミの重心の衝突前の接線速度

v_r : ノミの r 方向の速度

r : 円運動の中心から刃部の重心までの距離

ω_0 : 衝突前の角速度、(折損エネルギーを除外した場合)

ω : 衝突前の角速度、(折損エネルギーを含めた場合)

M_B, M_H : 刃部および柄部の質量

I_{BG}, I_{HG} : 刃部および柄部の各重心まわりの慣性モーメント

l_B, l_H : 刃部および柄部の長さ

v_{BG}, v_{HG} : 刃部および柄部の衝突前における各重心の接線速度

v'_{BG}, v'_{HG} : 刃部および柄部の衝突後における各重心の接線速度

ω_B, ω_H : 刃部および柄部の角速度

T_T : ノミの衝突前の全運動エネルギー (折損エネルギーを含む)

E_F : ノミの折損エネルギー

$T_1 = T_T - E_F$: 折損エネルギーを除いたときのノミの全運動エネルギー

T_2 : ノミの衝突後の全運動エネルギー

T_M : Bの腕が受けたエネルギー

ただし, ここで接線速度とはノミの長さ方向に対して直角方向の速度をいい, r 方向の速度とはノミの長さ方向の速度をいう.

3.3 数値の設定

実験, 仮定および実物の突きノミ等から, 本計算に使用する数値を次のように定めることにする.

ノミの全重量 = 560g

刃部の全重量 = 340g

柄部の全重量 = 220g

ノミの長さ = 57cm

刃部の長さ = 24cm

柄部の長さ = 33cm

柄の折損エネルギー = 1.0kg-m

円運動の加速度 $\alpha_r = 35g$

刃部の重心と被害者 C との距離 = 1.5m

3.4 計 算

衝突によってノミの運動に不連続的变化が生ずるのは円運動成分のみであり, r 方向の運動は衝突後においても変化はないと考えられる. それで, r 方向の運動については後述することにして, まず円運動に関する式を展開してゆくことにする. さて, Fig. 4 に示すように半径 r , 角速度 ω_0 で回転しているノミの接合点 S に撃力が加わり, その瞬間ノミは刃部と柄部とに分離して飛んだとすれば, 刃部および柄部に対して次に示すような方程式が導かれる. まず, 刃部と B の腕とが及ぼし合う力 F_B の力積を \bar{F}_B とすれば,

$$\left. \begin{aligned} M_B(v_{BG} - v'_{BG}) &= \bar{F}_B \\ I_{BG}(\omega_0 - \omega_B) &= -\bar{F}_B l_B / 2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし

$$\bar{F}_B = \int F_B dt \quad (2)$$

$$v_{BG} = r\omega_0 \quad (3)$$

B の腕と刃部との反発係数 e_B をゼロとすれば

$$v'_{BG} - l_B \omega_B / 2 = e_B (v_{BG} - l_B \omega_0 / 2) = 0 \quad (4)$$

(1), (3)および(4)式より

$$v'_{BG} = \frac{6r + l_B}{8} \omega_0 \quad (5)$$

$$\omega_B = \frac{6r + l_B}{4l_B} \omega_0 \quad (6)$$

(5)および(6)式に l_B の値を代入すれば, 刃の衝突後の速度と角速度はそれぞれ次式であらわされる.

$$v'_{BG} = (0.75r + 0.03) \omega_0 \quad (5)'$$

$$\omega_B = (6.25r + 0.25) \omega_0 \quad (6)'$$

同様にして, 柄部と B の腕とが及ぼしあう力 F_H の力積を \bar{F}_H とすれば,

$$\left. \begin{aligned} M_H(v_G - v'_{HG}) &= \bar{F}_H \\ I_{BG}(\omega_0 + \omega_H) &= \bar{F}_H l_H / 2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし

$$\bar{F}_H = \int F_H dt \quad (8)$$

$$v_{HG} = (r + (l_B + l_H) / 2) \omega_0 \quad (9)$$

B の腕と柄部との反発係数 e_H をゼロとすれば

$$v'_{HG} = e_H (v_{HG} + l_H \omega_0 / 2) = 0 \quad (10)$$

(7), (9)および(10)式より

$$v'_{HG} = \frac{6r - 3l_B - 4l_H}{8} \omega_0 \quad (11)$$

$$\omega_H = \frac{6r - 3l_B - 4l_H}{4l_H} \omega_0 \quad (12)$$

(11)および(12)式に l_B, l_H の値を代入すれば, 柄の衝突後の速度と加速度は次式のようなになる.

$$v'_{HG} = (0.75r - 0.255) \omega_0 \quad (11)'$$

$$\omega_H = (4.54r - 1.54) \omega_0 \quad (12)'$$

次にFig. 5 に示すように衝突後, 刃部はその運動面

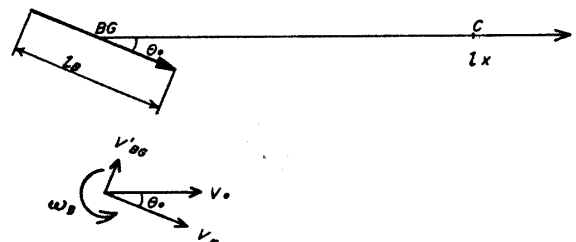


Fig. 5

上において、飛行方向と刃先の方向とが θ_0 をなす位置から v_0 の速度と ω_B の角速度で飛出して、刃部の重心 BG から l_x 離れた C に刺さったとすれば運動方程式は次式であらわされ

$$M_B \ddot{x} = 0, \quad I_{BG} \ddot{\theta} = 0 \quad (13)$$

初期条件は、 $t=0$ で

$$x=0, \quad \dot{x}=v_0, \quad \theta = -\theta_0, \quad \dot{\theta} = \omega_B \quad (14)$$

である。(13)および(14)式から x および θ に関する解を求めそれから t を消去すれば次式が求まる。

$$\theta = \frac{\omega_B}{v_0} x - \theta_0 \quad (15)$$

さらに、刃部は C に刺入するとき刃先を運動方向に向けていることから

$$x=l_x \text{ で } \theta = 2n\pi \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (16)$$

(13)式を(15)式に代入して整理すれば

$$\frac{\omega_B}{v_0} = \frac{\theta_0 + 2n\pi}{l_x} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (17)$$

一方、Fig. 5 に示すように v_0 は v'_{BG} と v_r との合成速度であるから次式が成立する。

$$v_0 = v_r \cos \theta_0 + v'_{BG} \sin \theta_0 \quad (18)$$

$$\frac{v'_{BG}}{v_r} = \tan \theta_0 \quad (19)$$

(17)(18)および(19)式から次に示すような l_x, θ_0 および n の関係式が導かれる。

$$l_x = \frac{3(\theta_0 + 2n\pi)}{25 \sin \theta_0} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (20)$$

(20)式において l_x が $1.5m$ 前後の値になるためには、 $n=1$ でなければならないから(20)式は次のようになる。

$$l_x = \frac{3(\theta_0 + 2\pi)}{25 \sin \theta_0} \quad (21)$$

(21)式の l_x と θ_0 との関係を示す Fig. 6 に示す。この図より、 $l_x=1.5m$ のとき、 $\theta_0=0.582$ (約 33°) となり、この θ_0 の値は状況から判断して妥当な値であると思われる。これらの値を(17)および(19)式に代入すれば、 v_0 および v_r はそれぞれ次式のように求まる。

$$v_0 = (1.36r + 0.0546) \omega_0 \quad (22)$$

$$v_r = (1.14r + 0.0456) \omega_0 \quad (23)$$

刃先が飛び出すときの初速度 v_0 を、 r をパラメータにして横軸に角速度 ω_0 をとって図示すると Fig. 7 の

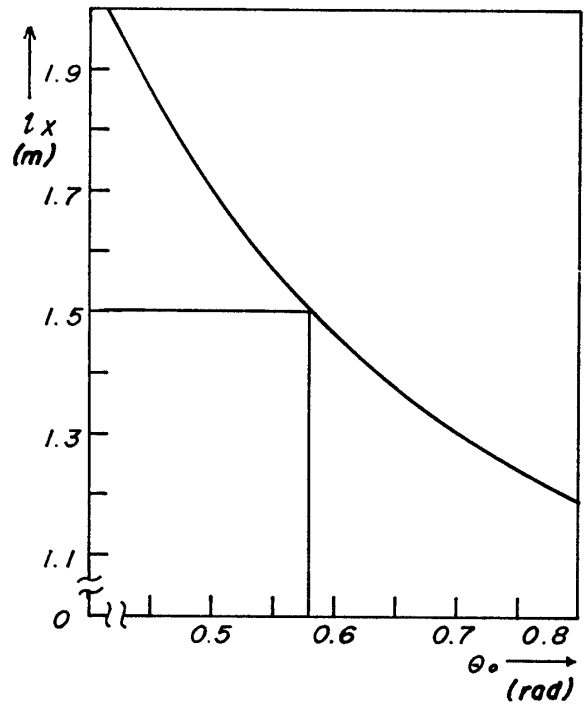


Fig. 6 The relation between l_x and θ_0

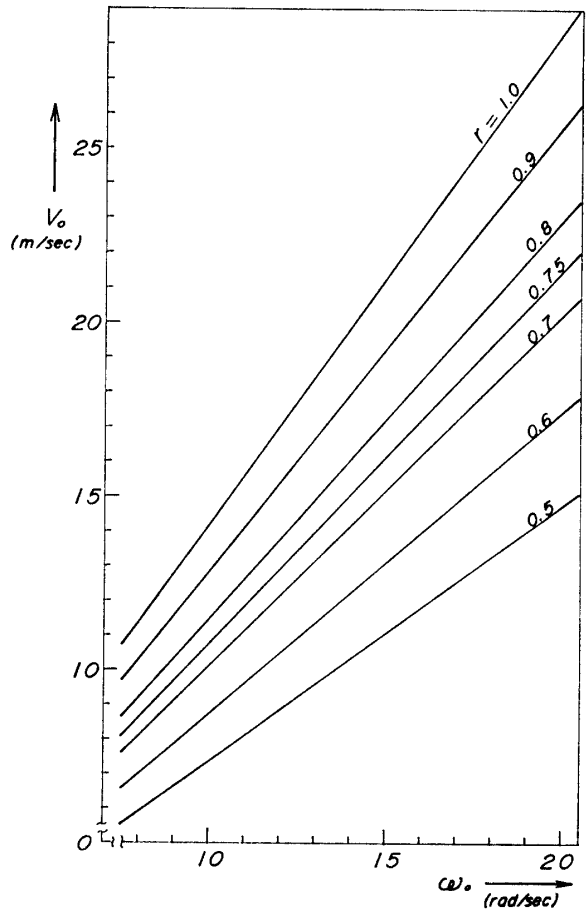


Fig. 7 The relation between the velocity v_0 when the blade flew toward "C" and the angular velocity ω_0

ようになる。

以上の計算で得られたノミとその刃部および柄部の速度 v_G, v_{BG} , および v_{HG} と角速度 ω_0, ω_{BG} , および ω_{HG} を用いて衝突前後における運動エネルギーを計算すれば

$$T_1 = \frac{1}{2} M(v_G^2 + v_r^2) + \frac{1}{2} I_G \omega_0^2$$

$$= (0.0657r^2 - 0.00343r + 0.00116)\omega_0^2 \quad (24)$$

$$T_T = T_1 + E_F \quad (25)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} M_B v_0^2 + \frac{1}{2} I_{BG} \omega_B^2 + \frac{1}{2} M_H (v_{HB}^2 + v_r^2)$$

$$+ \frac{1}{2} I_{HG} \omega_H^2$$

$$= (0.0586r^2 - 0.00171r + 0.00103)\omega_0^2 \quad (26)$$

のようになる。また衝突によって損失したエネルギーはすべて B の腕の衝突部分の変形に費やされたと考えれば、衝突の際 B の腕が受ける全エネルギーはこの損失エネルギーと柄の折損エネルギーおよび柄部の円運動を止めるためのエネルギーの3つの和であると考えられる。すなわち

$$T_M = (T_1 - T_2) + \left(\frac{1}{2} M_H v_{HG}^2 + \frac{1}{2} I_{HG} \omega_H^2 \right) + E_F$$

$$= (0.0155r^2 - 0.00744r + 0.00110)\omega_0^2 + E_F \quad (27)$$

(24)および(27)式を、 r をパラメータとして横軸に角速度 ω_0 , 縦軸にエネルギーをとり, Fig. 8 および Fig. 9 に示す。一方, (25)式において E_F は r 方向の運動エネルギー $\frac{Mv_r^2}{2}$ には無関係であるから, 両辺からこれを差し引くと次式が成りたつ。

$$T_T^* = T_1^* + E_F \quad (28)$$

ただし

$$T_T^* = T_T - Mv_r^2/2$$

$$T_1^* = T_1 - Mv_r^2/2$$

$$= (0.0286r^2 - 0.00831r + 0.000358)\omega_0^2 \quad (29)$$

さらに, (28)式において E_F は円運動の角速度を減ずるだけで, 円運動の中心から刃部の重心までの距離 r には無関係と考えられるから

$$T_T^* = R(r)\omega^2 \quad (30)$$

とおけば, この式と(28)および(29)から

$$R(r)\omega^2 = R(r)\omega_0^2 + E_F$$

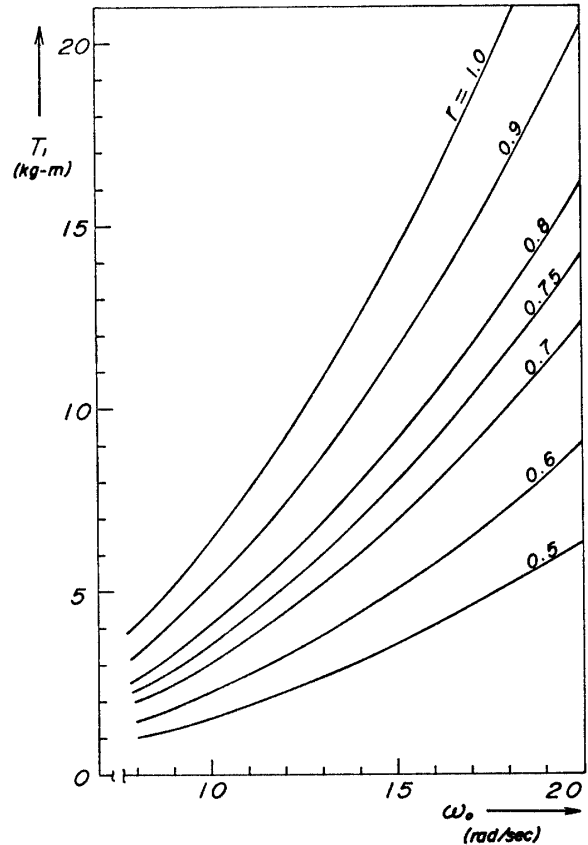


Fig. 8 The total kinetic energy T_1 before impact, except the energy required to break the haft

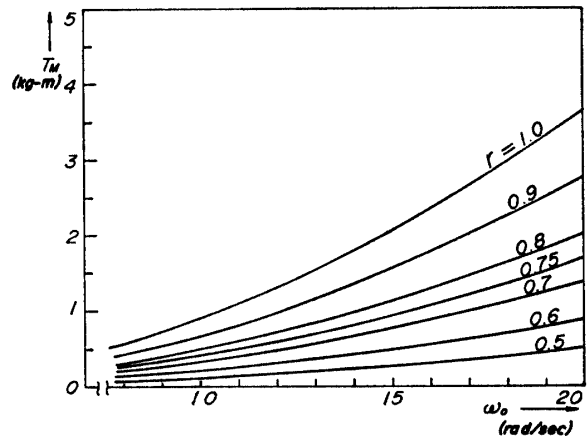


Fig. 9 The stored kinetic energy in "B" wrist, except the energy required to break the haft

が導かれる。あるいは $\omega^2 = \alpha/r$ を代入して整理すれば

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha}{r} - \frac{E_F}{R(r)}} \quad (31)$$

となる。ただし

$$R(r) = 0.0286r^2 - 0.00831r + 0.000358$$

である。(31)式の α に3.3節の数値を代入して図示すれば Fig. 10 のようになる。

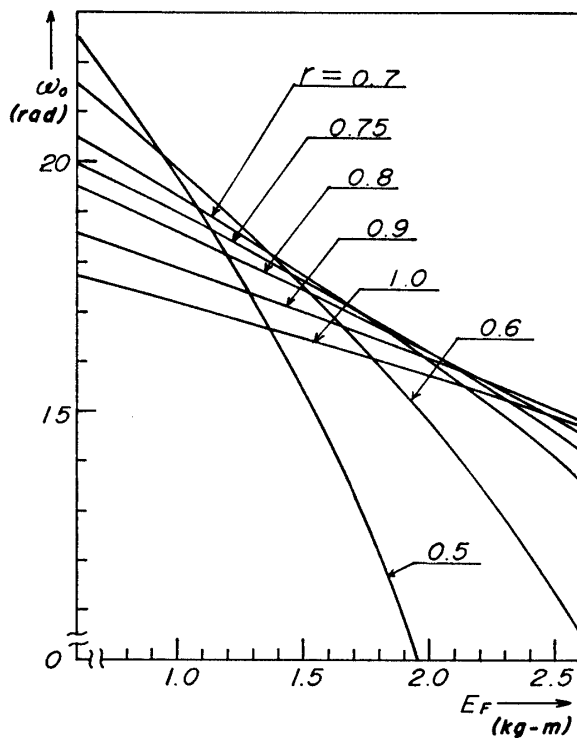


Fig. 10 The relation between the energy E_F required to break the haft and the angular velocity ω_0

4. 考察および結論

以上の計算よりノミの円運動の中心から刃の重心までの距離 r を $0.5 \sim 1.0m$, 柄の折損エネルギー E_F を $0.8 \sim 2.5kg-m$ の範囲内でノミの角速度 ω_0 を求めると $17.2 \sim 19.7rad/sec$ の値となる。これらの値を用いてノミの全エネルギー $T=1 \sim 20kg-m$, 腕が受けるエネルギー $T_M=1 \sim 5kg-m$ およびノミの刃が飛び出す時の初速度 $v_0=5 \sim 27m/sec$ の値を得た。

当時の状況には不確定な要素が極めて多く含まれているので、その結果計算値に巾をもち確定的な結論をだすことは不可能である。そこで r を $0.5, 0.75$ および $1.0m$ の3つに限り、柄の折損エネルギーを $E_F=1.0kg-m$ と仮定すると次の結果が得られる。

$$r=0.5m: \quad \omega_0=19.7rad/sec, \quad v_0=14.5m/sec,$$

$$T=6.1kg-m, \quad T_M=1.5kg-m$$

$$r=0.75m: \quad \omega_0=19.0rad/sec, \quad v_0=20.4m/sec,$$

$$T=12.8kg-m, \quad T_M=2.5kg-m$$

$$r=1.0m: \quad \omega_0=17.2rad/sec, \quad v_0=24.4m/sec,$$

$$T=18.7kg-m, \quad T_M=3.2kg-m$$

一方20才~30才の日本人男子の尺骨および橈骨の機械的性質は、圧縮強さ 12.3 および $12.1kg/mm^2$, 引張り強さ $15.1 (\pm 0.15)$ および $15.2 (\pm 0.14)kg/mm^2$ の場合の伸び率 1.49% および 1.43% である。骨の断面積を $100mm^2$, 長さを $300mm$ として尺骨あるいは橈骨に貯えられる曲げエネルギーを概算すると約 $1.12kg-m$ になる。一方計算より求めた腕が受けるエネルギーは $1.5 \sim 3.2kg-m$ であってかなり大きい。これは B の腕がノミを受けとめるときに変位しなかったと仮定した為であって、この状態では当然 B の腕は折れることになる。しかし B の腕の被害は全治4日間程度の軽傷であったことを考えると、B はノミを受けとめるときノミの運動方向にかなり腕を動かしたと推察される。

以上の考察から一応 $r=0.75m$ と仮定すれば次の結論が得られる。

(1) A が B をノミで殴打した瞬間、ノミの刃先に作用する遠心力は約 $11.9kg$ である。一方、刃先の引抜き試験の結果、引抜き力の最低値は $20kg$ であるから B が腕でノミを受け止める以前には刃先は抜けなかったと思われる。しかし極めて抜け易い状態であったと推察することができる。

(2) A が B をノミで殴打した時、刃先が抜けなかった場合、B が腕で受けとめる瞬間のノミの運動エネルギーの値は $12.8kg-m$ である。

(3) B が腕でノミを受けた時の B の腕にかかるエネルギーの値は $2.5kg-m$ である。

(4) ノミが腕に当たって折れる際のエネルギーの値は $1.0kg-m$ である。

(5) ノミが B の腕に当たって折れ、更に刃先が飛んで C にささった時、刃先の初速度は $20.4m/sec$ であって、ささる時の速度も距離が $1.3m$ であるから殆んど初速度と同じと考えられる。なお、計算結果によれば刃先は1回転してささったことになる。

終りに、本解析に対する資料を賜った山口刑務所の関係者に対し謝意を表すると共に、医学的な見地から御教示をいただいた本学医学部高橋学教授に感謝する次第である。