

ショットピーニングによる丸鋸の新しい腰入れ法の開発

京都大学 農学部 林産工学科

教授 野口昌巳

(平成4年度研究開発助成 AF - 92010)

1. 研究の背景と目的

最も大量に行われる木材の機械加工は丸鋸による切断である。丸鋸にはその歯先を広げて鋸身に対して「逃げ」をとり、摩擦抵抗を減らすための対策が施されているが、このような断面をもつ厚さ2mm前後、直径305または355mmの円盤状工具を2500~500rpmで回転させて木材を切断するのであるから、平衡がとれていて横振れが小さくても、切断のための切削熱や摩擦熱によって丸鋸の、特に外縁部の温度は上昇する。一方、丸鋸の中央部の温度は上昇しないので、丸鋸の半径方向には不均一な温度分布が生じ熱応力が発生する。切断作業に重大な影響を及ぼす丸鋸の接線方向の熱応力を考えると、熱膨張のために丸鋸の外縁部は外周に沿って伸びようとするが、中央部の温度は殆ど上がらないので伸びは拘束される。そのため外縁部には接線方向圧縮応力が、これに対して中央部には接線方向引張応力が発生する。切断作業が続き、外縁部と中央部との温度差が大きくなり熱応力がある限界を超えると、丸鋸はもはや平面状を保てなくなる。熱座屈の到来である。

丸鋸の熱座屈を防ぐために、腰入れと呼ばれる巧妙な鋸身調整が行われてきた。その腰入れを施す方法には物理的方法と機械的方法とがある。物理的腰入れは抜本的な対策であり、熱応力の原因である温度差を丸鋸の外縁部と中央部との間に発生させないという方針に基づく。一つは切断中の丸鋸の外縁部に注水して冷却する方法であり、他は反対に中央部を加熱する方法である。両者とも実施する際に困難を伴うので、殆どの腰入れは次善の策である機械的方法によって行われている。

すなわち、丸鋸の外縁部に発生する接線方向圧縮応力の効果を打ち消すように、予め丸鋸の外縁部に接線方向引張残留応力を機械的に与えておく。現在、機械的腰入れは二通りの方法で実施されている。その一つは百年以上前から行われている、丸鋸のやや外側寄りの部分をハンマで叩く方法である。他は丸鋸を1対の回転する金属製ロールで挟み、同一円周に沿ってその表裏面に圧縮荷重を加えて圧延し、円輪領域を塑性加工する方法である。

わが国においては、のこ目立技能士(通称目立士)が腰入れ処理を施しているが、その工程は手仕事で経験と勘に頼る部分が多い、いわゆる名人芸であり、この技術を習得す

るためには短くない年月を必要とする。また、たとえ熟練者であっても丸鋸の全周にわたって残留応力を一定にするようなハンマ打ちは現実には不可能であり、作業効率も低く良質の丸鋸を安く量産できない。ロール法はハンマ打ち法ほどには勘や経験を必要とせず、アメリカとドイツではロール法が大勢を占めている。わが国ではロール法はあまり普及せずハンマ打ち法が広く採用されているのは、わが国の丸鋸は欧米の丸鋸ほど大径ではないこともあるが、目立士の腕前が良すぎて機械の入り込む余地がないのであろう。しかし最近では目立士の後継者の養成が難しくなってきた。このような社会的背景から勘や熟練を必要としない、腰入れ処理の自動化を真剣に考えなければならない時期に、今や立ち至っている。

手仕事のハンマ打ちに代わるべき経験と熟練を必要としない、丸鋸の新しい自動腰入れ法の実現が業界から要請されている。この要請に応じて筆者らは新しい物理的¹⁾および機械的²⁾腰入れ法の開発を試みた。この研究の目的は丸鋸の新しい機械的自動腰入れ処理システムの構築である。

2. 腰入れ工程の自動制御

腰入れに限らず自動化を行うには、工程の制御が容易であることが必要である。ハンマによる打撃や金属製ロールによる加圧の代わりに、制御するのが比較的容易である流体を、高速で丸鋸の表面に衝突させるのも一つの方法であろう。しかしウォータ・ジェットを丸鋸に激突させようとしても、水は軽すぎて鋼板の限定された領域を塑性変形させるに足る衝撃力を得ることは困難である。筆者らは流体に似た挙動を示す物体として粉体を考えた。粉体に鋼を塑性変形させるだけのエネルギーを賦与するのは、やはり困難であるから、粉体に近い性質をもつものとして微細鋼粒を採用し、ショットピーニングによる丸鋸の腰入れを行った。

3. ショットピーニングによる丸鋸の腰入れ

腰入れの目的は、丸鋸の外縁部に接線方向引張残留応力を賦与することである。したがって、この論文の中では接線方向残留応力だけを論じ、半径方向残留応力には言及しない。

丸鋸の中心部と外縁部との間において、1対の狭い同心円

に沿って全周にわたり帯状に伸びる円輪領域、あるいは所定の外縁部を除く丸鋸の内側の全領域にショットを投射することにより、ショット投射領域に圧縮残留応力を賦与し、これに対応して当該領域より外側には引張残留応力を賦与しようとするのが、ショットピーニングによる丸鋸の腰入れの基本的な考え方である³⁾。

加工機械として遠心投射式を選んだ。この機械から工作物である丸鋸に向けて発射されたショットは、約60度の中心角をもって広がり丸鋸の全面に衝突する。丸鋸の塑性変形させるべき領域にショットを集中的に衝突させる代わりに、当該領域だけを残して丸鋸の全面を大小2対の鋼鉄製マスクで覆うことにした。

図1は前述の考え方により丸鋸に腰入れを施すためのショットピーニング装置の概要を示すものである。この装置は丸鋸を被覆する外側マスク(外径316mm、内径232mm)

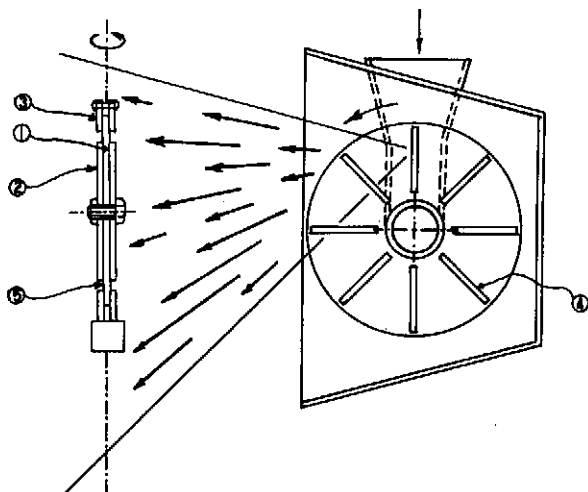


図1 ショットピーニングによる腰入れの概念図
①丸鋸 ②内側マスク ③外側マスク
④インバー ⑤衝撃領域

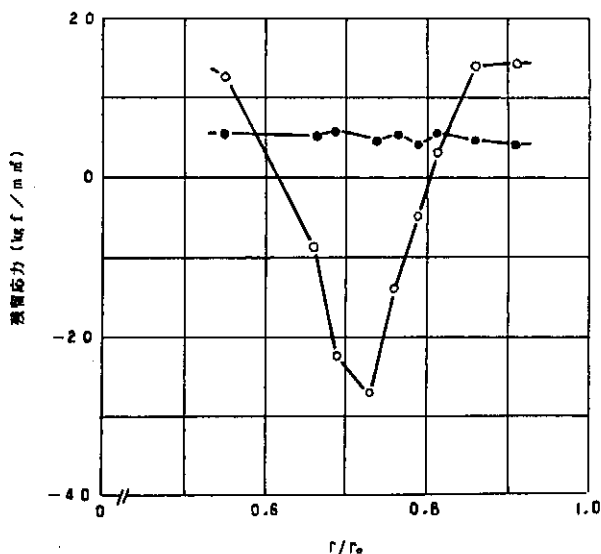


図2 接線方向残留応力の半径方向における分布
(大小マスク使用)
●ショットピーニング前、○ショットピーニング後

および内側マスク(外径212mm、内径25.4mm、ただし内径マスクは使用しないこともある)各1対、丸鋸の表面と裏面にショットを平等に衝突させるためにマスクを回転させる駆動機構、ショット投射機構などから成っている。マスクの形状は図2および図3に示してある。

腰入れの実施手順は次とおりである。熱処理(焼入れおよび焼戻し)を施した丸鋸(材質SKS5、直径305mm、厚さ2mm)を、前述の2対のマスクで挟み、回転駆動機構に固定する。次いでマスクで挟んだ丸鋸を回転させながらこれに向かって、次のような処理条件でショットを投射した。

前述の手順に従いショットピーニングを施した丸鋸の同一半径上に並ぶ9点において、X線応力測定装置により測定

表1 ショットの投射条件

ショットの材質	鑄鉄
ショットの硬さ	HRC58
ショットの直径	0.8mm
ショットの初速	毎秒50m
ショットの投射時間	5分間
ショットの衝撃距離	1m
アークハイト	1.5mm
丸鋸の回転数	100rpm

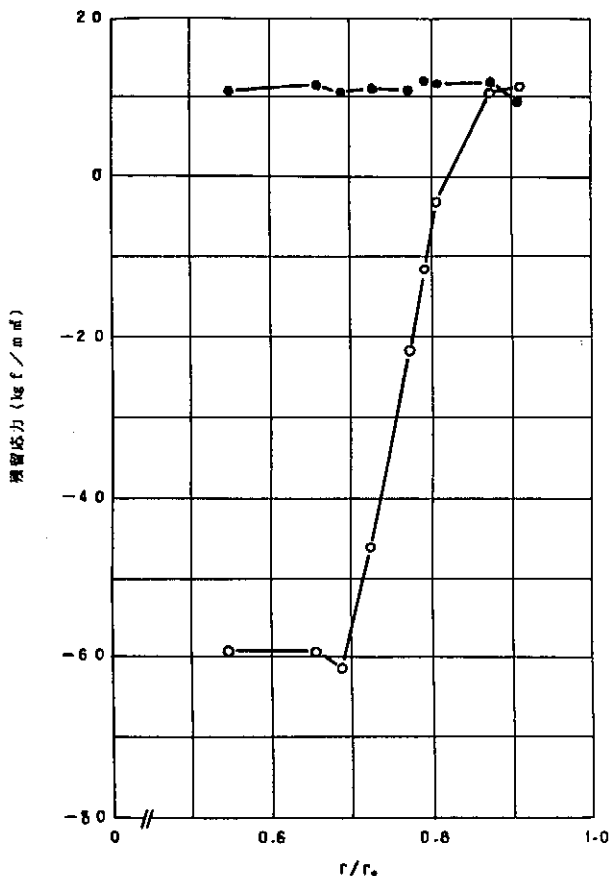


図3 接線方向残留応力の半径方向における分布
(大小マスク使用)
●ショットピーニング前、○ショットピーニング後

した残留応力を図4に示す。同図における r_0 は丸鋸の半径、 r は丸鋸の中心から測定点までの距離を意味する。

第3章において予測したとおり、ショットを投射した円輪領域には十分な圧縮残留応力が賦与され、その円輪領域の外側および内側には共に引張残留応力が賦与されていることが確認された。

同様に、ある円周より内側の全域にショットを投射した場合の残留応力の分布は図5に示すとおりである。ショットの投射を受けた領域には圧縮残留応力が、ショットの投射を受けなかった領域には引張残留応力が賦与されている。

前述のように、ショットピーニングは丸鋸に腰入れを施す手段として有効であることは証明されたが、一方向からだけショットの投射が行われたことに起因する不都合の有無を検討しなければならない。すなわち、一定方向から飛来するショットの前で、丸鋸を垂直軸の回りに回転させたが、丸鋸の表裏はほぼ同様な応力状態になっているか否かを吟味する必要がある。同一半径に沿いショット投射領域

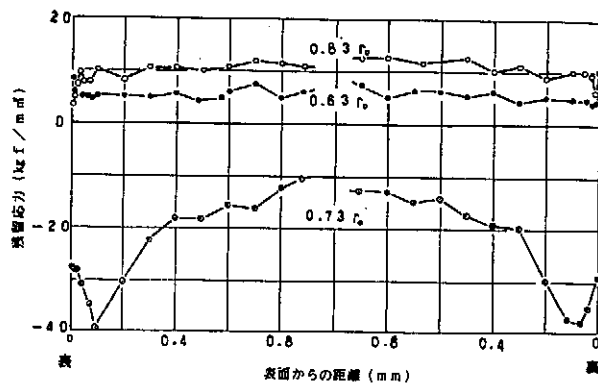


図4 丸鋸の厚さ方向における接線方向残留応力

内 ($r/r_0 = 0.73$)、その内側 ($r/r_0 = 0.63$)、および外側 ($r/r_0 = 0.83$) に各1点を選び、これら3点において丸鋸の表裏両面からそれぞれ0.9mmの深さまで電解研磨して、厚さ方向に沿う残留応力の分布を測定した。

図6に示された残留応力の値は左右対称に分布していることみなせるので、丸鋸の表面および裏面はショットピーニングによりほぼ同等に腰入れ処理を施されたと考えてよい。従って、ショットピーニングによる腰入れには特に不都合な点は見あたらない。

一般に材料が厚い場合にはショットのエネルギーをよく吸収するが、これが薄い場合にはエネルギー損失が大であることが知られている³⁾。ところが本研究の供試丸鋸のようになりに薄い板材でも、ショットのエネルギーを比較的よく吸収しているが、これは丸鋸の表裏面をマスクで強固に保持したこと、および丸鋸の厚さが2mmであるのに対して、ショットの衝撃領域の幅が10mmと比較的狭かったことが、良好なエネルギー効率をもたらした原因としてあげられよう。

4. ショットピーニング用マスクの設計

前章において、ショットピーニングは丸鋸の腰入れに適用が可能であることを実証した。次の課題はいかに効率よく腰入れを実施するかということである。まず考えられるのはマスクの形状効果である。前掲の図2および図3に示した2種類のマスクに加えて、さらに2種類のマスクを設計した。各マスクのショットの衝撃面積(片面)は表2にまとめられている。

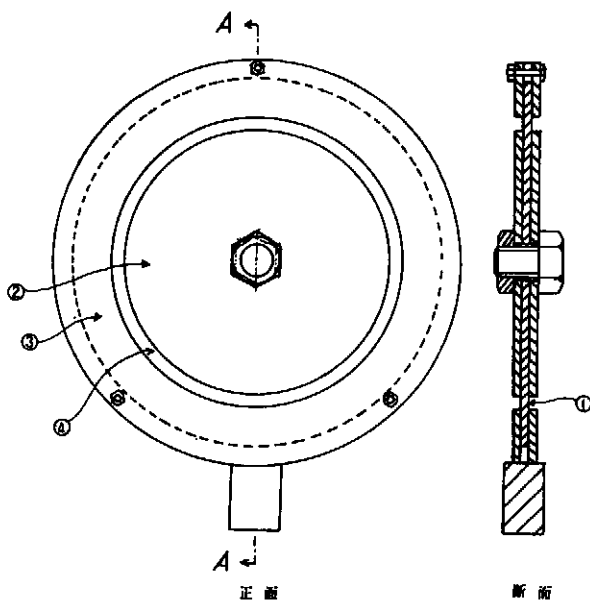


図5 マスクIの形状

①丸鋸 ②内側マスク ③外側マスク ④衝撃領域

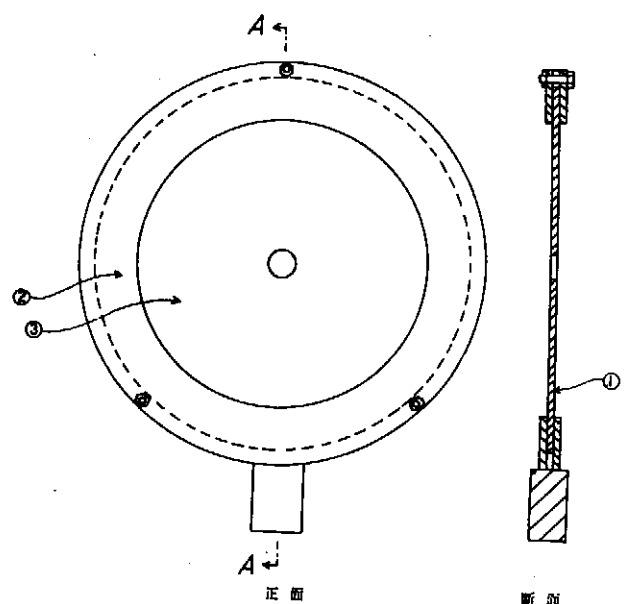


図6 マスクIIの形状

①丸鋸 ②外側マスク ③衝撃領域

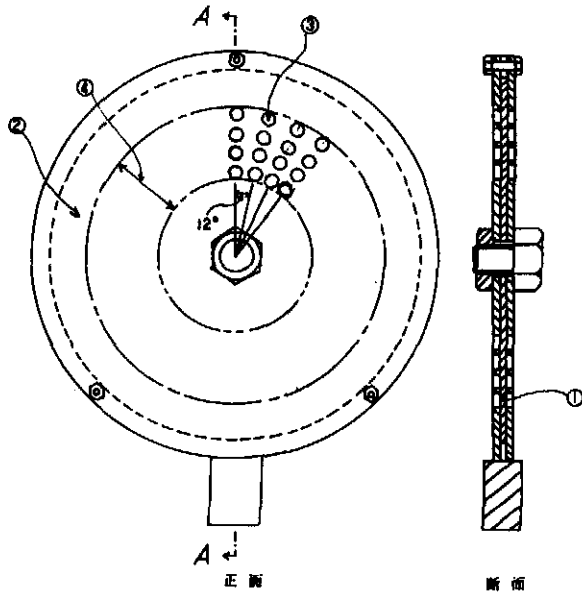


図7 マスクⅢの形状

①丸鋸 ②マスク ③スポット ④ショット衝撃範囲

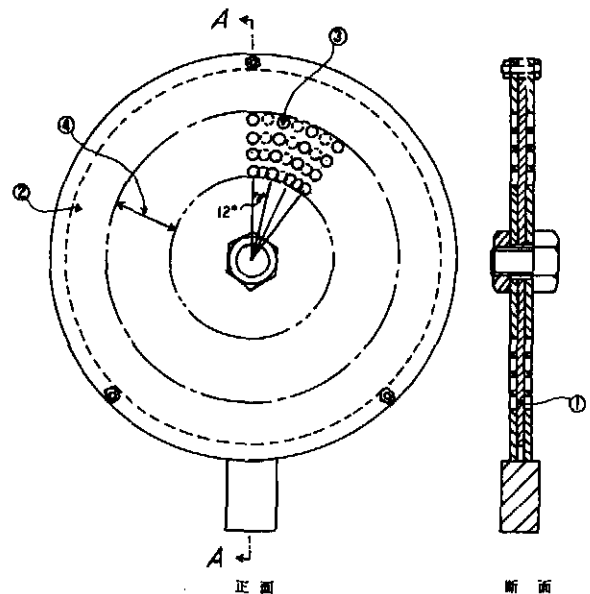


図8 マスクⅣの形状

①丸鋸 ②マスク ③スポット ④ショット衝撃範囲

表2 マスクの衝撃面積 (片面)

マスク	I	II	III	IV
衝撃面積 (mm ²)	6970	41700	9420	9420

マスクⅠ(図2)は大小2対の円輪から構成されており、丸鋸の表面裏面ともに直径212mmおよび232mmの二つの同心円に挟まれた円輪領域だけが露出し、その他の部分は被覆される。

マスクⅡ(図3)は外径316mm、内径232mmの1対の円輪から構成され、これにより丸鋸の中心から116mm以上離れた領域がマスクによって被覆され、それより内側は露出するように設計されている。

マスクⅢ(図7)は丸鋸を完全に被覆する1対の円盤(中心部に穴を有する)から構成される。この円盤上において直径127mmおよび235mmの二つの同心円に挟まれた円輪領域(ショット衝撃範囲)内には、等角度(12度)間隔に配列する30本の半径上にそれぞれの中心を有する直径10mmの円形開口を4個等間隔に設けてある。円形開口部が同位相になるようにして、丸鋸の表裏面に1対のマスクを固定すると、円形開口に面した丸鋸の部分だけが露出し、他の部分は被覆されるように設計されている。

マスクⅣ(図8)はマスクⅢと同形のものであるが、表面と裏面において円形開口部の角位置が半位相(6度)異なっている。

新しく作製したマスクⅢおよびマスクⅣはショット衝撃後の丸鋸の平坦性を高めるために放射状にスポット衝撃ができる構造にした。マスクⅡによりショット衝撃を行った

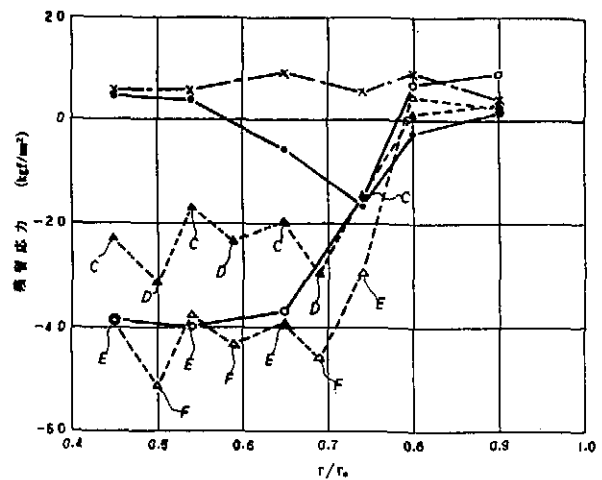


図9 4種類のマスクによりショット衝撃された丸鋸の残留応力

- マスクⅠ ○マスクⅡ ▲マスクⅢ △マスクⅣ
- ×焼き入れ焼戻し
- C ショット衝撃領域(マスクⅢ)
- D ショット非衝撃領域(マスクⅢ)
- E ショット衝撃領域(マスクⅣ)
- F ショット非衝撃領域(マスクⅣ)

場合、ショットの衝撃効果が高い条件でショット衝撃を加えると、丸鋸の茶托状に変形しやすく平坦性が低下するため、強いショット衝撃を加えても丸鋸の表面にスポット衝撃を加えることによりショット衝撃に強弱が付き、その結果平坦性が維持されることを意図して設計した⁵⁾。

5. 残留応力に及ぼすマスクの形状効果

同一の熱処理(焼入れ、焼戻し)を施した丸鋸を、前述の4種類のマスクを用いてショットピーニング加工した後、それぞれの丸鋸に賦与された残留応力を測定した(図9)。

外側マスクと内側マスクを併用するマスク I の場合には、ショットが衝撃した丸鋸の円輪領域 (半径位置 $r/r_0 = 0.70$ から 0.76 まで) を中心にして圧縮残留応力の発生がみとめられ、一方当該円輪領域の外側および内側には引張残留応力が賦与されている。外側マスクだけを使うマスク II による場合には、ショット衝撃の境界線 (半径位置 $r/r_0 = 0.76$) 付近より内側の全領域にわたって大きい圧縮残留応力が賦与され、かつ外縁側には大きな引張残留応力が賦与されている。

円形開口を有するマスク III の場合には、ショットが直撃した円形開口 (それぞれの中心の半径位置 $r = r_0 = 0.45, 0.54, 0.65, 0.74$) に、記号 C で示すような圧縮残留応力が観測される。一方、同一半径上にある四つの円形開口の中間点およびその延長線上において、圧縮残留応力の存在が確認された (記号 D で示してある)。これらの圧縮残留応力は、記号 C で示したショットが直撃した円形開口部に賦与された圧縮残留応力より大であることが認められる。

円形開口の角位置が丸鋸の表面と裏面とで異なるマスク IV の場合には、マスク III による処理効果とほぼ同様の応力発生パターンを示すが、その圧縮残留応力の絶対値はマスク III に比べて著しく大である。図 8 において一点鎖線で示される応力は、ショットピーニング加工前の残留応力である。前述のように、いずれのマスクを用いても、ショットピーニングにより十分な応力レベルで丸鋸の外縁部に引張残留応力を賦与できることが実証された。

図 9 に示されたマスク I およびマスク II を用いて賦与した残留応力値にみられる差の原因を、両マスクの円形開口を介して丸鋸に与えられたエネルギーの差にあるとすれば、前者の片面の衝撃面積は 6970mm^2 であるが、これに対して後者のそれは 41700mm^2 であり、後者は前者の約 6 倍の衝撃面積をもつ。従って、丸鋸の塑性加工量の差から賦与された応力値に差が生じるのは当然であると考えられる。ショットの衝撃面積について、マスク II とマスク III および IV を比較すると、マスク II (衝撃面積 41700mm^2) はマスク III および IV (ともに衝撃面積 9420mm^2) の約 4.4 倍の衝撃面積をもつ。しかしながらマスク II とマスク IV とは同程度の圧縮応力値を丸鋸に賦与し、マスク III はマスク II より低い応力値を賦与している。さらに、等しい衝撃面積を有するマスク III および IV が賦与した応力値を比較すると、後者は前者の約 1.6~1.8 倍の圧縮応力を発生させている。これらの結果は単にショットの衝撃面積を大にすれば、効果的な腰入れ処理を施せるとは限らないことを示唆している。すなわち、ショットピーニングにより賦与される圧縮応力は、マスキングパターンに大きく依存するものと考えられる。

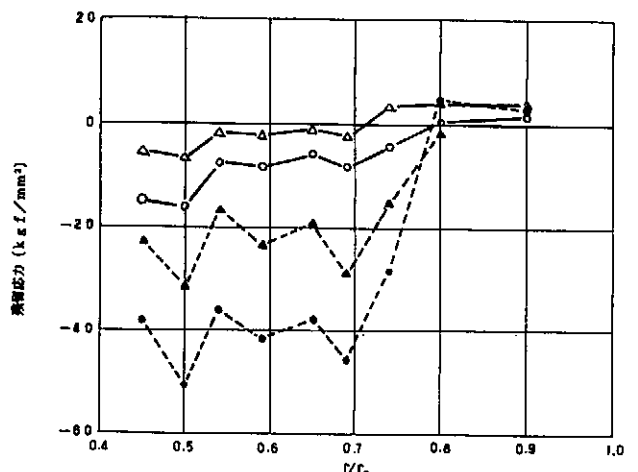


図 10 マスク III、IV によりスポット衝撃した場合の残留応力

- ▲円形開口を有する半径に沿う (マスク III)
- 円形開口を有する半径に沿う (マスク IV)
- △円形開口を有する半径に沿う (マスク III)
- 円形開口を有する半径に沿う (マスク IV)

6. 非衝撃領域における圧縮応力の発生

マスク III およびマスク IV を用いてショットピーニングを施した丸鋸の残留応力の測定結果を図 10 に示す。ショットが丸鋸を直撃できるように、両マスクには 30 本の半径上にそれぞれ 4 個の円形開口が設けられているが、円形開口をもつ隣接した 2 本の半径の間にある半径 (この付近はショットによる衝撃を直接には受けていない) に沿って残留応力を測定した結果を、実線で結び同図に示してある。破線で結んだ測定値は図 9 に示した値と同一のものである⁷⁾。

これらの測定結果から明らかなように、直接ショットの衝撃を受けていない領域にも、両隣にあるショットの衝撃を直接受けた領域ほど大ではないが、やはり圧縮応力が残留し、かつその外縁部には引張応力が賦与されている。本章および前章において指摘した、ショットが直撃しなかった領域にも圧縮応力が発生した現象は興味のあることである。さきに発表した速報⁵⁾中で筆者らがわずかに言及している以外には、この点に関する報告は不勉強にして見あたらない。この現象の解明は今後の重要な研究課題になりそうである。

7. まとめ

腰入れ作業の経験のない筆者らが市販のショットピーニング装置を用いて、丸鋸に良好な腰入れ処理を施すことができた。これらの成果は、経験を必要としない丸鋸の自動腰入れ処理システムの構築というこの研究の目的に十分応えたものである。

謝 辞

この研究の実施にあたりご協力くださった職業能力開発
大学校教授梅津二郎氏、電気興業株式会社熱処理テクニカ
ルセンター長松本勲氏、京都大学農学部助教授藤井義久氏
に謝意を表する。

参考文献

- 1) 野口昌巳；梅津二郎：材料、37 (413),240 (1988)
- 2) 野口昌巳；梅津二郎：サイエンス、17 (9). 42 (1987)
- 3) Umetsu, J. ; Noguchi, M. ; Matsumoto, I. : Mokuzai
Gakkaishi 33 (10), 818 (1987)
- 4) 飯田喜介、当舎勝次：精密工学会誌、53 (3), 535
(1986)

投稿論文

- 5) Noguchi, M. ; Yano, M. ; Umetsu, J. ; Matsumoto,
I. : Mokuzai Gakkaishi 39 (11), 132 (1993)
- 6) 梅津二郎；野口昌巳；松本勲：木材学会誌、40 (1)、14
(1994)
- 7) 松本勲、梅津二郎、野口昌巳：「丸鋸の残留応力に及ぼ
すショットピーニング用マスクの形状効果」、木材学会
誌投稿中
- 8) 松本勲、梅津二郎、野口昌巳：「ショットピーニング腰
入れを施した丸鋸の表面粗さ、硬さおよび金属組織」、
木材学会誌投稿中

(補遺) 有限要素法による丸鋸の静的および動的特性の解析

丸鋸に施された腰入れの状態を評価する方法には、本研
究で行ったX線応力測定法やその他の方法による非破壊あ
るいは破壊試験方法によって、腰入れによる残留応力の分
布を測定することが直接的で最も正確であると考えられる。
しかし、これらの方法は、測定に要する時間と装置や経費
の点からみて、実際の丸鋸の生産現場や目立て作業で用い
るには難点が多い。また最近ではショットピーニングによ
って生じる塑性変形や残留応力を有限要素法によって解析
し、それらの3次元的分布まで評価する試みもみられる¹⁾。

一方、丸鋸の腰入れ処理をその目的である切削時の鋸身
の動的安定性の向上という観点から見れば、鋸身の残留応
力分布を測定できない場合には、間接的ではあるが、丸鋸
の静的あるいは動的安定性をもって腰入れ状態の評価を行
うことも可能であると考えられ、またその方が実際の現場
での測定方法としてより適しているといえる。

丸鋸の動的安定性に関する既往の研究では、主に切削力
などの丸鋸に作用する外力の周波数と鋸の固有振動数とに
よる鋸身の共振現象の観点から、臨界の丸鋸回転数をとり
あげ、それを腰入れなどによって高め、いかに鋸の安定回
転数領域を広く確保するかという点に一つの重点がおかれ
ていた。鋸の臨界回転数を高めるには、鋸の各振動モード
での固有振動数をあげればよいといえるが、さらにこの固
有振動数は鋸の質量と剛性との比によって決定する量であ
ることと併せて考えれば、いくつかの他の研究にもみられ
るように、丸鋸の剛性や固有振動数の腰入れによる変化が
腰入れ処理評価の一つの目安になると考えられる。しかし、
そのために腰入れによる残留応力分布と剛性、固有振動数
との関連が明らかになっている必要がある。

本研究では丸鋸の剛性や固有振動数と振動モードを実験

的に検討するとともに、有限要素法を導入し、これらを解
析的にも検討した。さらに腰入れによる残留応力と静的あ
るいは動的安定性との関係の解明を目的とした有限要素解
析の方法についても検討した。以下にはそのうち丸鋸の静
的剛性や固有振動数と振動モードを有限要素法で解析した
結果を述べる。

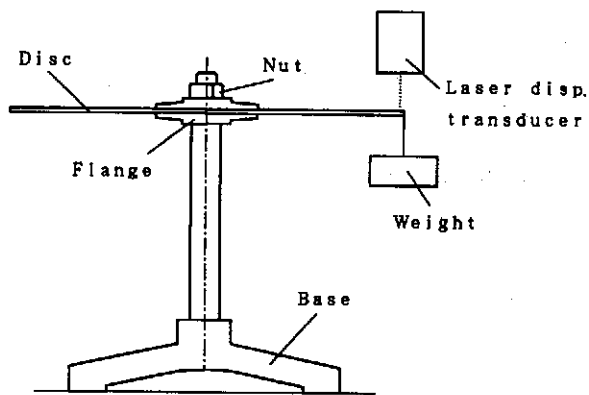
1. 丸鋸の静的剛性

丸鋸の静的剛性として、今回は歯先近くの一点に鋸厚方
向(横方向)に外力が作用した時の鋸のたわみを検討した。
有限要素解析にはEMRC社製、有限要素プログラム
NISA IIを用いた。また有限要素モデルの生成にはNISA II
のプリ・ポストプロセッサであるDISPLAY IIIを用いた。
まず本研究で供試した丸鋸の幾何モデル(内径25.4mm、外
径292.6mm、厚さ2.3mmの円板)を生成し、これに四角
形シェル要素(次数1)を割り付け、要素数1800、節点数
1920の有限要素モデルを生成した。その際、簡単化のため
に鋸歯形の部分および丸鋸の回転軸に固定するためのフラ
ンジ(直径80mm)によって固定されている部分には要素
を割り付けなかった。モデルの縦弾性定数を21,000kgf/
mm²、ポアソン比を0.3とし、フランジによって固定され
る円板の内周縁上の節点を固定し、外周縁上の一点に鋸厚
方向に荷重をかけた時のたわみおよび応力の分布をNISA
IIの線形静解析の機能を用いて求めた。なお解析条件の内、
要素の種類については数種類のシェル要素やソリッド要素
を用いて、要素数については24から4608まで変化させて、
さらに要素次数については1から3次まで変化させて、あ
らかじめモデル計算を行い、それらの結果から適当と思われ
る条件として上述のような有限要素モデルを選んで解析を

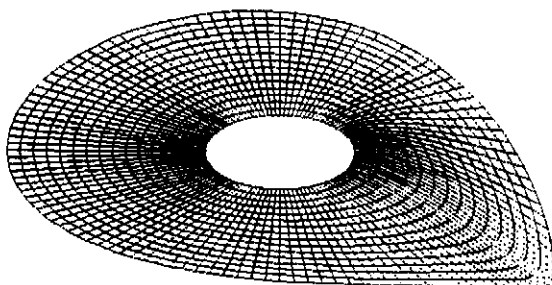
行うこととした。

また計算結果の妥当性を検討するために、補遺図1のような固定スタンドの軸にフランジで丸鋸を固定し、板厚方向に静荷重をかけたときの円板のたわみを測定した。たわみの測定にはダイヤルゲージ式変位変換器およびレーザー変位計（アンリツ社製KL132A, KL133A）を使用し、たわみは荷重点を含む円板外周の4等分点およびそれらの位置での半径方向の6カ所で測定した。測定に先立ち、円板の表裏、フランジと円板との位置関係、フランジの締め付け方法や荷重点の位置等の荷重方法などのたわみ測定値への影響を検討した結果、これらの条件によるたわみの変動量は最大0.02mm程度であることが明らかとなった。

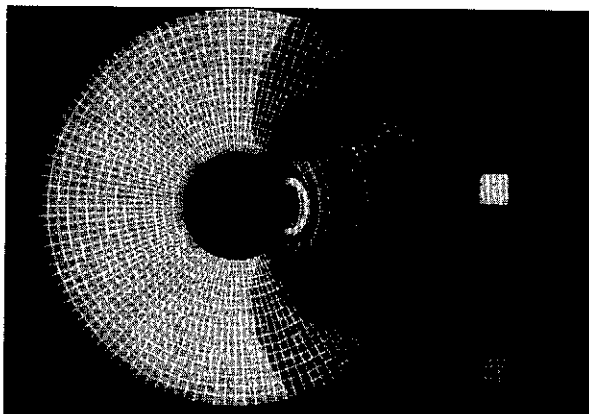
補遺図2はNISA IIで解析した円板のたわみの状態を示



補遺図1 円板の静的たわみの測定装置



補遺図2 横荷重による円板の変形状態の有限要素解析結果



補遺図3 横荷重作用時の円板内の応力分布

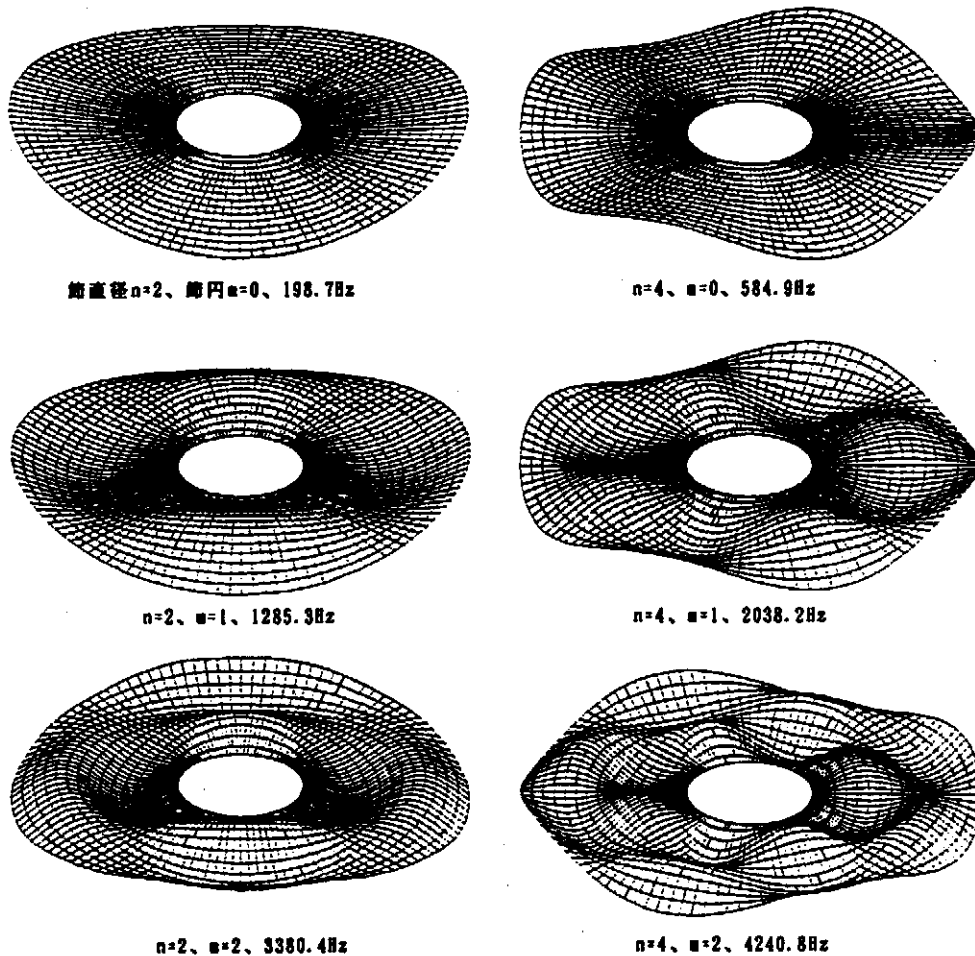
す。円板は荷重点付近で大きくたわんでいることは当然であるが、固定軸に対して荷重点の反対の部分ではたわみはわずかではあるが、荷重方向と反対側に発生している。これらのたわみの発生傾向は実測結果と一致し、さらに今回の荷重範囲（最大5kgf）では荷重とたわみとは比例関係にあったが、その割合は実測値と有限要素法とで異なった。すなわち、円板の境界条件について、内周縁上の節点の変位および回転を拘束した場合には計算結果は実測値よりも小さく、約0.80倍となり、回転を拘束しない場合には逆に1.69倍と大きくなった。これはフランジで固定された部分が完全な固定状態にないことを意味していると考えられ、今後フランジで固定されている部分のモデル化をふくめた解析方法の検討が必要であるといえる。ちなみに本研究で採用した高周波加熱熱処理あるいはショットピーニング処理による丸鋸のたわみは、通常の処理の丸鋸のたわみとほとんど差はなかった。

補遺図3に荷重負荷時の円板内の応力（ミゼスの相当応力）分布を示す。荷重点付近に、集中荷重による弱い応力の集中が見られるが、概ねフランジによる固定部分のうち荷重点側の固定部分を頂点とする応力の分布がみられる。

補遺表1 有限要素法による固有値解析によって求めた円板の振動モードと固有振動数

節直径数	節 円 数		
	0	1	2
0	165.1 (165.2)	1058.7 (1050.7)	3119.9 (3048.7)
1	160.6 (160.5)	1113.0 (1106.0)	3183.3 (3385.7)
2	198.7 (199.2)	1285.3 (1281.5)	3380.4 (3320.8)
3	346.2 (347.1)	1592.5 (1592.8)	3727.8 (3680.7)
4	584.9 (585.0)	2038.2 (2040.6)	4240.8 (4207.8)
5	893.8 (892.0)	2607.6 (2607.9)	* (4900.5)
6	1265.6 (1260.6)	3278.8 (3272.8)	* (5743.3)
7	1699.7 (1688.1)	4034.4 (4019.1)	* (6712.8)
8	2195.4 (2173.5)	* (4837.0)	* (7785.6)
9	2753.7 (2716.4)	* (5722.6)	* (8943.8)
10	3376.0 (3316.1)	* (6673.7)	* (10178)
11	4063.8 (3972.4)	* (7688.9)	* (11483)
12	4818.7 (4685.1)	* (8767.1)	* (12856)

単位：Hz、()内は理論値、*印は解析を省略した条件



補遺図4 円板の振動モードと固有振動数の解析結果

2. 丸鋸の固有振動数と振動モード

前節で生成した有限要素モデルについてNISA IIの固有値解析の手法を用いて、円板の固有振動数と振動モードを求めた。その際、円板の密度は 7800kg/m^3 とし、円板内周縁上の節点についてはその変位および回転をすべて拘束した。

補遺表1にNISA IIで計算した円板の各振動モードに対応する固有振動数を示す。また表には理論解として、内周固定外周自由円板の固有振動数の値を()内に添えた。さらに補遺図4に、例として節直径が2、4、節円0、1、2の各組み合わせでの円板の振動モードを図示する。計算の都合上、解析するモードの次数に上限を設けたために一部の条件での解析結果が欠けているが、節円および節直径の数が増加するにつれて、有限要素解析結果と理論値との差が大きくなる傾向にあることがわかる。これは振動モードの次数が大きくなると、円板の振動波形として現れる円板の凹凸のピッチが細くなり、要素の大きさがこれらの凹凸に対して相対的に大きくなるために計算精度が低下するため

と考えられる。しかし、補遺表1からNISA IIで得られた計算結果は理論値と概ね一致しているといえる。

今回は有限要素法による円板の固有振動数解析の手始めとして、解析解の得られている円板の固定条件で固有値解析を行い、その結果を検討した。今後、今回の結果と実際の丸鋸の振動モードや固有振動数との比較検討をはじめ、前節で検討した内周縁部での円板の支持条件や鋸歯部分、その他の解析条件の固有値解析への影響を明らかにし、丸鋸の基本的な振動特性を知る必要がある。さらに腰入れによる残留応力分布と剛性や固有振動数への影響をモデル化を含めて検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 森謙一郎、小坂田 宏造、塩見誠規、岡田達夫：「ショットピーニング加工における塑性加工および残留応力の三次元有限要素シミュレーション(単一ショットによる変形)」、日本機械学会論文集 A編 59 (566), 208 (1993)