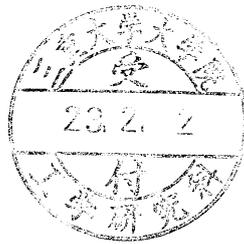


平成 22 年度 修士論文

特殊レーザーピーニングによる
ステンレス鋼板への
ディンプル生成技術および
残留応力付加技術の検討



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
園田 泰章

目次

第1章 緒言	・・・1
第2章 実験方法	
2-1 特殊レーザーピーニング概要	・・・3
2-2 レーザピーニング装置	・・・4
2-3 試験片およびレーザーピーニング施工方法	・・・4
2-4 試験片および特殊レーザーピーニング施工方法	・・・5
第3章 ディンプル形状測定	
3-1 試験片	・・・6
3-2 ピーニング条件	・・・6
3-3 測定方法	・・・7
3-4 実験結果	
3-4-1 ディンプル直径の比較	・・・8
3-4-2 ディンプル深さの比較	・・・11
3-4-3 ディンプル体積の比較	・・・14
3-4-4 表面観察	・・・18
3-4-5 考察	・・・19
第4章 残留応力測定	
4-1 X線回折による残留応力測定の原理・理論	・・・22
4-2 X線回折装置	・・・26
4-3 試験片とピーニング条件	・・・27
4-4 測定方法	・・・29

4-5 電解研磨	
4-5-1 電解研磨装置	・・・30
4-5-2 電解液作製	・・・31
4-5-3 電解研磨条件および電解研磨手順	・・・32
4-6 X線回折	
4-6-1 解析条件	・・・33
4-6-2 X線回折装置による測定手順	・・・34
4-7 結果	
4-7-1 シート破れ孔数	・・・36
4-7-2 試験片受け入れ状態の残留応力分布	・・・36
4-7-3 パルスエネルギーの影響	・・・37
第5章 有限要素法シミュレーション	
5-1 特殊レーザーピーニングにおけるシミュレーションの役割	・・・39
5-2 有限要素法の原理	・・・39
5-3 シミュレーション装置の構成	・・・40
5-4 押し込み実験	
5-4-1 押し込み実験装置および試験片	・・・42
5-4-2 押し込み実験方法	・・・43
5-5 シミュレーションモデルおよび解析設定	・・・43
5-6 実験結果およびシミュレーション結果と比較・検討	・・・45
第6章 結言	・・・46
参考資料	
謝辞	

第1章 緒言

レーザピーニング(Laser Peening ; LP)は材料表面に水膜のある状態で数 ns~数十 ns のパルス幅を持つレーザパルスで材料の表面に照射することによって材料の表面層がプラズマ化し、その衝撃を利用し材料にピーニング加工を行ない、残留応力を付加する技術である(Fig1-1 参照)^{[1]-[3]}。

従来のピーニングは砂などのメディアを材料表面に吹きつけ、その際に発生する衝撃を利用してピーニング処理を行うショットピーニングや、水中でキャビテーション噴流を吹き付けキャビテーションによる衝撃を利用するキャビテーションピーニングなどにより、材料の強化や疲労強度の向上を図っていた。しかし、衝撃を与えるプロセスが統計的である為、目的の残留応力を付加するには職人的な技術を必要とし品質のばらつきを生んでいた。また、ショットピーニングはその性格上、板厚が 1mm を下回るような薄板に処理することは困難であった。

それに対し、レーザピーニングではパルス毎の照射条件を厳密に制御できるため目的の残留応力を付加させやすく、製品間のばらつきが少ない高品質なピーニングを行うことができる。レーザピーニングでは従来のピーニングに比べ、深い領域まで残留応力を付加することができるのでピーニングの効果がより期待できる。薄板に処理しても材料の表面にピーニング痕を残す以外、材料の変形は見られないのでピーニングの適応範囲が広がる。その為、圧力容器、燃料電池セパレーター、自動車用鋼板など多岐にわたる分野における種々の製品の小型化・軽量化に貢献することができると期待されている。また、ディンプル形状の制御や照射パターンの制御により処理後の表面形状を制御することができるため、ピストンなどの摺動部への適応も同時に期待されている^{[4],[5]}。

さらに、レーザピーニングを応用した技術として特殊レーザピーニング(Indirect Laser Peening ; ILP)がある。特殊レーザピーニングはレーザを照射する前に予め試験片表面に厚さが数十 μm の金属シートを貼り付けておく。その後、金属シート上にレーザパルスを照射しピーニングを行なう(Fig.1-2 参照)。特殊レーザピーニングは材料に直接プラズ

マが触れない為、熱の影響を受けない綺麗なレーザーピーニングができると期待されている。また、レーザーピーニング時にシートを使用するため、材料表面に粒子を塗布しその上にシートは被せ圧力を加える事により粒子を材料表面上に押し込み、定着させる粒子押し込み技術を利用した、粒子打ち込み技術への発展も期待されている^{[5],[6]}。

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼板(SUS304)をレーザーショットピーニングした際の影響について検討する。解析には、レーザー顕微鏡を用いたディンプル観察、X線回折装置による残留応力の測定と併せて、有限要素法シミュレーションソフトを使用した静的押し込みモデルのシミュレーションをおこない、多角的な検討を行った(Fig.1-3 参照)。

そして、将来的には有限要素法シミュレーションソフトによる能動的な解析を行い、必要に応じた材料のデザインを行う事を目標とする。

そこで本論文では以下のことを行なった。

- (1) ピーニング条件を変化させてステンレス鋼板へレーザーピーニング・特殊レーザーピーニング双方を行ない、その際に生成するディンプルをレーザー顕微鏡により測定する事によりディンプル形成へおよぼすピーニング条件の影響についての検討および考察。
- (2) 金属材料への適応を想定したレーザーパルス照射条件による特殊レーザーピーニングを行い残留応力分布の測定を行なうことにより、特殊レーザーピーニングの適正条件の検討、応力の改善および付加される圧縮残留におよぼすパルスエネルギーの影響についての検討。
- (3) 静的荷重による押し込み実験の有限要素シミュレーションを行い比較・検討を行なった。

第2章 実験方法

2-1 特殊レーザーピーニング概要

ナノ秒レーザー(パルス幅が数ナノ秒から 100 ナノ秒)照射による材料への衝撃波(応力波)の付与および利用が 1960 年後半より研究、検討されてきた^[7]。レーザーピーニングはその応用技術の 1 つであり、従来からあるピーニング加工と同様に材料表層に圧縮残留応力を与えることで疲労寿命を改善するものである。

材料表面にレーザーパルスが照射されるとアブレーションが発生しプラズマが発生する。レーザーピーニングでは材料表面の周囲は水で覆われているか満たされているため、プラズマの膨張が抑制される。このプラズマの噴出および膨張抑制の反作用力として材料に圧縮衝撃波が生じることが知られている^{[8],[9]}。この際のプラズマ圧力は数 GPa に到達すると考えられており、これを利用してレーザーピーニングではディンプル生成(塑性加工)および圧縮残留応力の付与が結果として生じる。

従来から行なわれているレーザーピーニング加工ではコーティングされた材料表面にレーザー照射を行なうが、特殊レーザーピーニングでは材料表面は厚さ数十 μm の金属シートによって保護される。レーザー照射により発生するアブレーションおよびプラズマは金属シート表面で起きるため、金属シートに生じた衝撃波を直下の材料表面に伝播することにより、ディンプル生成および圧縮残留応力の付与が可能となる。このため、ピーニング加工後の材料表面は熱変色(酸化)のない面となる。その他、保護用金属シートにナノ粒子等の機能性粒子を塗布して、粒子を材料表面に固定する技術も検討されている^[4]。

2-2 レーザピーニング装置

レーザショットピーニング装置の概略図を Fig.2-1 に、装置写真を Fig.2-2 に示す。中央に水槽が置かれた。水槽には常時流水が供給され、特にピーニング個所の清浄な状態を維持するために水をピーニング面に向けて噴出させる。その脇に 2 軸可動テーブルが置かれ、水槽上までアームが伸びている。試験片は治具により水中でアームに固定される。可動テーブルの制御ユニットにはシグマ光機製 STAGE CONTROLLER SHOF-204 MS を使用し、照射パターンプログラムにより動作する。使用したレーザ発振器は波長 532nm のパルスフラッシュランプ励起の Nd:YAG レーザ(THALES 社製 SAGA 2-230-20-SH)である。レーザ発振器より射出されたレーザパルスは光路上にある 2 つのミラーにより焦点距離 150mm の集光レンズ(シグマ光機製 NADL-30-150PY2)に導かれその後、集光レンズで集光され試験片表面へ照射される。本研究では、焦点外し距離は 0mm とし、試験片表面でのレーザスポット径は 470 μ m であった。

2-3 試験片およびレーザピーニング施工方法

供試材としてオーステナイト系ステンレス鋼板 SUS304 を用いた。その組成表を Table2-1 に示す。試験片はシャーによって切断され作られる。端部にバリがある為、鉄ヤスリで整えた。試験片形状とピーニング領域を Fig.2-3 に示す。ピーニング領域は試験片のちょうど中心である。

試験片はアセトンで脱脂・洗浄後使用する。第 3 章で行なうレーザピーニング実験には共にこの試験片を使用した。

試験片は治具にクリップで固定する。使用する試験片の厚みに応じて、試験片表面でジャストフォーカスとなるように、予めアームに取り付けられた目盛りを利用して治具を固定する。レーザピーニング中は常にポンプで水を循環している。

レーザピーニング終了後は水槽から取り出し、試験片の水分を拭き取った。

2-4 試験片および特殊レーザピーニング施工方法

供試材としてオーステナイト系ステンレス鋼板 SUS304 を用いた。試験片はシャーによって切断され作られる。端部にバリがある為、鉄ヤスリで整えた。試験片形状とピーニング領域は Fig.2-3 に記した通常のレーザピーニングと同じ物を使用した。

特殊レーザピーニングを行なう場合は、下準備としてシートを貼り付けられる。通常のレーザピーニングと同様に試験片をアセトンで脱脂後、ピーニング領域に真空グリスを薄く塗布し、シートを貼り付ける。貼り付けるシート形状を Fig.2-4、シート貼り付け後の試験片を Fig.2-5 に示す。長手方向の辺はビニールテープで、その他の辺は両面テープで固定される。貼り代は全ての辺とも 3mm である。第 3 章、第 4 章で行なうレーザピーニング実験には共にこの試験片を使用した。

特殊レーザピーニング施工方法は通常のレーザピーニング施工と同様の手順で行なう。試験片は治具にクリップで固定する。使用する試験片・シートの厚みに応じて、試験片表面でジャストフォーカスとなるように、予めアームに取り付けられた目盛りを利用して治具を固定する。レーザピーニング中は常にポンプで水を循環している。レーザピーニング終了後は水槽から取り出し、試験片の水分を拭き取った。

第3章 ディンプル形状測定

3-1 試験片

供試材には第2章の2-3項, 2-4項に記載の試験片を使用した。照射パターンを Fig.3-1 に示す。ピーニングは試験片の中央 16×16mm の範囲に、4mm 間隔の格子状に行なう。ピーニングの順番は左上より右へレーザーパルスを照射していき、1列終わると順次下の列へレーザーパルスを照射していった。

特殊レーザーピーニングの際に使用するシートにもオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304)製のシートを用いた。

3-2 ピーニング条件

ピーニング条件を以下に示す。

パルスエネルギー：25mJ, 50mJ, 100mJ, 200mJ, 300mJ

ショット数：1～5回

試験片板厚：0.3mm, 0.6mm, 1.0mm

シート厚：無し, 20 μ m, 40 μ m

照射パターン：4mm 間隔・5×5

実験回数：3回

3-3 測定方法

ディンプル観察にはレーザ顕微鏡 (KEYENCE 製, VK-9700) により顕微鏡画像を得た。その際の顕微鏡倍率は 200 倍以上、測定ピッチは $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ に設定した。得られた顕微鏡画像より本レーザ顕微鏡付属のソフトウェアである、VK Analyzer を使用しディンプル形状の測定を行なった。ディンプル直径、ディンプル深さの具体的な操作手順は以下の通りである。

1. プロファイルツールの 2 点指定によりディンプル中心を通り、サンプル面がなるべく傾かない場所でできるだけ距離が長くなるよう 2 点を指定する。
2. ノイズが大きいため、高さスムージングを ± 8 に設定しなめらかにする。
3. 表面の傾きが酷い場合は傾き補正を加える。
4. 見やすいように縦軸範囲を設定し直す。
5. Fig.3-2 を参考に凹み部の端部をマーキングし、ディンプル径を読み込む。ディンプル周辺が盛り上がっている場合、その盛り上がり部はディンプル径に含めない。
6. サンプリング面上で一番低い部分をディンプルの底部とする。手順 5 においてマーキングしたポイントとディンプル底部をマーキングし、高低差を読む。それをディンプル深さとする。Fig.3-2 へ示すディンプルでは下表の楕円部よりディンプル直径は $484.668\mu\text{m}$ 、ディンプル深さは $19.830\mu\text{m}$ であることが分かる。

ディンプル体積の測定手順は以下の通りである。

1. 「計測解析」内の「体積・面積」を選択する。
2. デフォルトでは「体積」モードになっているので、「摩耗量」モードにする。変更は右下のプルダウンメニューから行なう。
3. 2 点円指定よりディンプル部を指定し、摩耗量の項目を読む。(ディンプルの凹部

の体積を計測するので多少ディンプルより大きめに指定しても構わない)

3-4 実験結果

3-4-1 ディンプル直径の比較

本研究ではレーザーピーニング・特殊レーザーピーニングにより生じるディンプルの直径において、レーザーのパルスエネルギー・ショット数・シート有無若しくはシート厚さの影響があると考えられるため、パルスエネルギーを 25mJ, 50mJ, 100mJ, 200mJ および 300mJ、ショット数を 1~5 回、シートに関してはシートを使用しないレーザーピーニングと、シートを使用する特殊レーザーピーニング両者について行い、特殊レーザーピーニングについては 20 μ m, および 40 μ m のものを使用し、試験片板厚については 1.0mm, 0.6mm および 0.3mm として各々の板厚についてパルスエネルギー・ショット数・シート厚さの影響について個別に検討を行なった。

Fig.3-3~Fig.3-5 は板厚が 1.0mm においてディンプル径とパルスエネルギーの関係を示したグラフである。いずれの条件においてもディンプルを生成する事ができた。

Fig.3-3 はシートを使用しない通常のレーザーピーニングによるものである。この図よりパルスエネルギーを増加させるほど直径の大きなディンプルが得られる結果が得られた。Fig.3-4 および Fig.3-5 はシートを使用する特殊レーザーピーニングによるものである。全てのシート厚において、25mJ~100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加と共にディンプル径も大きくなる結果が得られたが、パルスエネルギー 50~100mJ でピークを示し、100mJ 以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル径は増加せずほぼ横ばいとなる結果が得られた。100mJ 近傍でピークを迎えた理由については 3-4-5 で検討する。

レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 700 μ m、特殊レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル径はシート厚さに依らず約 500 μ m という結果に

なった。通常のレーザピーニングではレーザパルスが試験片に直接照射され、試験片その物が溶融・プラズマ化する。そのため投入エネルギー量を増やすほどディンプル径が大きくなっていったと考えられる。一方、特殊レーザピーニングはレーザパルスが試験片に直接照射されない。表面に貼り付けられたシートがレーザパルスにより溶融・プラズマ化され、試験片にはその際に発生する衝撃波のみが伝わる。そのため通常のレーザピーニングと比べ特殊レーザピーニングにより生成されたディンプルの方が小さくなったと考えられる。また、得られた最大ディンプル径 $500\mu\text{m}$ はレーザスポット径が $470\mu\text{m}$ である事に起因すると考えられる。シート厚さの影響は見られなかった。

ショット数に注目すると通常のレーザピーニングではショット数による影響がまったく見られず、1shot~5shot までほぼデータが重なる結果を得た。特殊レーザピーニングについてもショット数による傾向は見られなかったが、 $100\mu\text{m}$ 程度のばらつきが確認された。これは試験片とプラズマの間にシート・真空グリスが存在するために生じたばらつきだと考えられる。

Fig.3-6~Fig.3-8 は板厚が 0.6mm においてディンプル径とパルスエネルギーの関係を示したグラフである。板厚が 1.0mm の結果と同様に、 0.6mm においても全ての条件でディンプルを生成する結果が確認できた。

Fig.3-6 はシートを使用しない通常のレーザピーニングによるものである。この図よりパルスエネルギーを増加させるほど直径の大きなディンプルが得られる結果が得られた。Fig.3-7 および Fig.3-8 はシートを使用する特殊レーザピーニングによるものである。全てのシート厚において、 25mJ ~ 100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加と共にディンプル径も大きくなる結果が得られたが、パルスエネルギー 100mJ でピークを示し、 100mJ 以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル径は増加せずほぼ横ばいとなる結果が得られた。板厚 1.0mm の時と同様に、 100mJ 近傍でピークを迎えた理由については 3-4-5 項で検討する。

レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 $700\mu\text{m}$ 、特殊レーザピーニ

ングにおいて得られた最大ディンプル径はシート厚さに依らず約 500 μm となり、板厚が 1.0mm の時と同様の結果を得た。シート厚さの影響は見られなかった。

ショット数についても、通常のレーザピーニングではショット数による影響がまったく見られず 1shot~5shot までほぼデータが重なる結果を得、特殊レーザピーニングではショット数による傾向は見られなかったが、100 μm 程度のばらつきが確認され、通常のレーザピーニング・特殊レーザピーニングにおいて両者とも板厚 1.0mm と同様の結果を得た。

Fig.3-9~Fig.3-11 は板厚が 0.3mm においてディンプル径とパルスエネルギーの関係を示したグラフである。板厚が 1.0mm および 0.6mm の結果と同様に、0.3mm においても全ての条件でディンプルを生成する結果が確認できた。

Fig.3-9 はシートを使用しない通常のレーザピーニングによるものである。この図よりパルスエネルギーを増加させるほど直径の大きなディンプルが得られる結果が得られた。Fig.3-10 および Fig.3-11 はシートを使用する特殊レーザピーニングによるものである。全てのシート厚において、25mJ~100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加と共にディンプル径も大きくなる結果が得られたが、パルスエネルギー100mJ でピークを示し、100mJ 以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル径は増加せずほぼ横ばいとなる結果が得られた。板厚 1.0mm および 0.6mm の時と同様に、100mJ 近傍でピークを迎えた理由については 3-4-5 項で検討する。

レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 700 μm 、特殊レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル径はシート厚さに依らず約 550 μm という結果を得た。シート厚さの影響は見られなかった。

ショット数については、通常のレーザピーニング・特殊レーザピーニング双方でショット数による傾向は見られなかったが、100 μm 程度のばらつきが確認された。

Fig.3-12～Fig.3-16 は直接レーザーピーニング、Fig.3-17～Fig.3-21 はシート厚さが 20 μm 、Fig.3-22～Fig.3-26 はシート厚さが 40 μm で特殊レーザーピーニングを行なった際の、板厚とディンプル直径の関係について示したグラフである。直接レーザーピーニングで生成されたディンプルの直径において板厚の傾向を得ることはできなかった。一方、特殊レーザーピーニングにより得られたディンプルの直径では板厚が薄い物ほど大きい直径が得られる傾向が分かった。しかし、一部のデータにおいてばらつきが大きく今後の検討課題となる。

3-4-2 ディンプル深さの比較

レーザーピーニング・特殊レーザーピーニングにより生じるディンプルの深さにおいて、レーザーのパルスエネルギー・ショット数・シート有無若しくはシート厚さの影響があると考えられる。そのため、3-4-1 項と同様にパルスエネルギーを 25mJ , 50mJ , 100mJ , 200mJ および 300mJ、ショット数を 1～5 回、シートに関してはシートを使用しないレーザーピーニングと、シートを使用する特殊レーザーピーニング両者について行い、特殊レーザーピーニングについては 20 μm 、および 40 μm のものを使用し、試験片板厚については 1.0mm , 0.6mm および 0.3mm として各々の板厚についてパルスエネルギー・ショット数・シート厚さの影響について個別に検討を行なった。

Fig.3-27～Fig.3-29 は板厚が 1.0mm においてディンプル深さとパルスエネルギーの関係を示したグラフである。

Fig.3-27 はシートを使用しない通常のレーザーピーニング、Fig.3-28 および Fig.3-29 はシートを使用する特殊レーザーピーニングによるものである。これらの図において、レーザーピーニング・特殊レーザーピーニング共に 25mJ～100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加にしたがいディンプル深さも深くなる結果が得られたが、パルスエネルギー 100mJ でピークを示し、100mJ 以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル深さは

増加せずほぼ横ばいもしくは減少する結果が得られた。3-4-1 項でのディンプル径では通常のレーザピーニングと特殊レーザピーニングでは違う傾向が見られたが、ディンプル深さについてはレーザピーニング・特殊レーザピーニング共に同じ傾向が見られた。通常のレーザピーニングにおいてパルスエネルギーを増加させていくと、直径はパルスエネルギーの増加と共に大きくなっていくが、深さは 100mJ で頭打ちとなる。これは発生するプラズマによりレーザパルスが減衰し、深さ方向へはパルスエネルギー増加の影響が出にくいためではないかと考えられる。また、100mJ 近傍でピークを迎えた理由については 3-4-5 項で検討する。

レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル深さは約 20 μ m、特殊レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 25 μ m という結果になった。同じエネルギー投入量で比較した場合、特殊レーザピーニングを使用することにより通常のレーザピーニングよりもより深いディンプルが形成することができ、効率的なピーニングをできることが分かった。

ショット数に注目するとレーザピーニング・特殊レーザピーニング共に、ショット数が増えるに従いディンプル深さも大きくなっていく結果が得られた。

シート厚さの影響について、Fig.3-30～Fig.3-34 は特殊レーザピーニングした際に生成するディンプルの深さとシート厚さの関係を示したグラフである。これより特殊レーザピーニングを行なった際、シート厚さが薄い方がより深いディンプルを得ることができることが分かった。これはプラズマによる衝撃波をシートが吸収・分散させるせいだと考えられる。

Fig.3-35～Fig.3-37 は板厚が 0.6mm においてディンプル深さとパルスエネルギーの関係を示したグラフである。

Fig.3-35 はシートを使用しない通常のレーザピーニング、Fig.3-36 および Fig.3-37 はシートを使用する特殊レーザピーニングによるものである。これらの図においても、25mJ～100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加と共にディンプル深さが深くなる結

果が得られたが、パルスエネルギー100mJでピークを示し、100mJ以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル深さは増加せずほぼ横ばいもしくは減少する結果が得られた。板厚 1.0mm の時と同様にディンプル深さについてレーザーピーニング・特殊レーザーピーニング共に同じ傾向が見られた。100mJ 近傍でピークを迎えた理由については3-4-5項で検討する。

レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル深さは約 20 μ m、特殊レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル深さは約 30 μ m となり、板厚が 1.0mm の時と同様の傾向を得、同じエネルギー投入量で比較した場合、特殊レーザーピーニングを使用することにより通常のレーザーピーニングよりもより深いディンプルが形成することができ、効率的なピーニングをできることが分かった。

ショット数についても板厚 1.0mm の時と同様、レーザーピーニング・特殊レーザーピーニング共に、ショット数が増えるに従いディンプル深さも大きくなっていく結果が得られた。

シート厚さの影響について、Fig.3-38～Fig.3-42 は特殊レーザーピーニングした際に生成するディンプルの深さとシート厚さの関係を示したグラフである。これより板厚 1.0mm の時と同様に、特殊レーザーピーニングを行なった際シート厚さが薄い方がより深いディンプルを得る結果となった。

Fig.3-43～Fig.3-45 は板厚が 0.3mm においてディンプル深さとパルスエネルギーの関係を示したグラフである。

Fig.3-43 はシートを使用しない通常のレーザーピーニングに、Fig.3-44 および Fig.3-45 はシートを使用する特殊レーザーピーニングによるものである。全てのシート厚において、25mJ～100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加と共にディンプル深さも深くなる結果が得られたが、パルスエネルギー100mJでピークを示し、100mJ以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル深さは増加せずほぼ横ばいもしくは減少する結果が得られた。板厚 1.0mm および 0.6mm の時と同様に、100mJ 近傍でピークを迎えた理由につ

いては3-4-5項で検討する。

レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル深さは約25 μm 、特殊レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル深さは約40 μm という結果を得、板厚が1.0mmの時と同様の傾向を得、同じエネルギー投入量で比較した場合、特殊レーザーピーニングを使用することにより通常のレーザーピーニングよりもより深いディンプルが形成することができ、効率的なピーニングをできることが分かった。

ショット数についても板厚1.0mmおよび0.6mmの時と同様、レーザーピーニング・特殊レーザーピーニング共に、ショット数が増えるに従いディンプル深さも大きくなっていく結果が得られた。

シート厚さの影響について、Fig.3-46～Fig.3-50は特殊レーザーピーニングした際に生成するディンプルの深さとシート厚さの関係を示したグラフである。これより板厚1.0mmおよび0.6mmの時と同様に、特殊レーザーピーニングを行なった際シート厚さが薄い方がより深いディンプルを得ることが分かった。

Fig.3-51～Fig.3-55は直接レーザーピーニング、Fig.3-56～Fig.3-60はシート厚さが20 μm 、Fig.3-61～Fig.3-65はシート厚さが40 μm で特殊レーザーピーニングを行なった際の、板厚とディンプル深さの関係について示したグラフである。得られたディンプルの直径では板厚が薄い物ほど大きい深さが得られる傾向が分かった。しかし、板厚とディンプル直径の関係を示すグラフと同様に、一部のデータにおいてばらつきが大きく今後の検討課題となる。

3-4-3 ディンプル体積の比較

3-4-1項、3-4-2項では生成したディンプルの直径と深さについて個別に評価した。しかし、ディンプル径とディンプル深さについて別々の傾向が見えた。オイル溜まりとして摺動部に使用する際にはオイルを保持するスペースの指針としてディンプル体積が

目安となる。ここではレーザーピーニング・特殊レーザーピーニングにより生じるディンプルの体積において3-4-1項および3-4-2項と同様に、パルスエネルギーを25mJ, 50mJ, 100mJ, 200mJ および300mJ、ショット数を1~5回、シートは20 μ m, および40 μ mのものを使用し、試験片板厚については1.0mm, 0.6mm および0.3mmとして各々の板厚についてパルスエネルギー・ショット数・シート厚さの影響について個別に検討を行なった。

Fig.3-66~Fig.3-68は板厚が1.0mmにおいてディンプル体積とパルスエネルギーの関係を示したグラフである。

Fig.3-66はシートを使用しない通常のレーザーピーニング、Fig.3-67およびFig.3-68はシートを使用する特殊レーザーピーニングによるものである。これらの図において、レーザーピーニング・特殊レーザーピーニング共に25mJ~100mJの範囲ではパルスエネルギーの増加にしたがいディンプル体積も深くなる結果が得られたが、パルスエネルギー100mJでピークを示し、100mJ以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル体積は増加せずにFig.3-66では微減、Fig.3-67およびFig.3-68では急激に減少する結果が得られた。

通常のレーザーピーニングではパルスエネルギーが増加するほどディンプル径は大きくなり、ディンプル深さは100mJを境に横ばいもしくは減少する傾向が見られたが、ディンプル体積ではディンプル深さと同様に100mJでピークを取り、それ以上パルスエネルギーを増加させても減少していく傾向となった。

特殊レーザーピーニングではパルスエネルギーを増加させていくとディンプル径・ディンプル深さ共に100mJでピークを迎え、それ以上パルスエネルギーを増加させても横ばいもしくは減少する傾向が見られたが、ディンプル体積ではその傾向がより顕著となり、100mJ以上パルスエネルギー増加させていくとディンプル体積は急激に減少していく結果が得られた。この現象については3-4-5項で検討する。

レーザーピーニングにおいて得られた最大ディンプル体積は約 $2.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ 、特殊レーザー

ピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 $1.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ という結果になった。同じエネルギー投入量で比較した場合、ディンプル径は通常のレーザピーニングの方が、ディンプル深さは特殊レーザピーニングの方がより大きい値を得ることが分かったが、ディンプル体積では通常のレーザピーニングの方が大きい値を得ることができた。

ショット数に注目するとレーザピーニング・特殊レーザピーニング共に、ショット数が増えるに従いディンプル深さも大きくなっていく結果が得られた。

Fig.3-69～Fig.3-71 は板厚が 0.6mm においてディンプル体積とパルスエネルギーの関係を示したグラフである。

Fig.3-69 はシートを使用しない通常のレーザピーニング、Fig.3-70 および Fig.3-71 はシートを使用する特殊レーザピーニングによるものである。これらの図において、レーザピーニング・特殊レーザピーニング共に 25mJ～100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加にしたがいディンプル体積も深くなる結果が得られたが、パルスエネルギー 100mJ でピークを示し、100mJ 以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル体積は増加せずに Fig.3-69 では微減、Fig.3-70 および Fig.3-71 では急激に減少する結果が得られた。

板厚 0.6mm についても 1.0mm の時と同様に、通常のレーザピーニングではパルスエネルギーが増加するほどディンプル径は大きくなり、ディンプル深さは 100mJ を境に横ばいもしくは減少する傾向が見られたが、ディンプル体積ではディンプル深さと同様に 100mJ でピークを取り、それ以上パルスエネルギーを増加させても減少していく傾向となった。特殊レーザピーニングでもパルスエネルギーを増加させていくとディンプル径・ディンプル深さ共に 100mJ でピークを迎え、それ以上パルスエネルギーを増加させても横ばいもしくは減少する傾向が見られたが、ディンプル体積ではその傾向がより顕著となり、100mJ 以上パルスエネルギー増加させていくとディンプル体積は急激に減少していく結果が得られた。この現象については 3-4-5 項で検討する。

レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル体積は約 $2.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ 、特殊レーザ

ピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 $2.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ という結果になった。板厚 0.6mm でも、ディンプル体積では通常のレーザピーニングの方が大きい値を得る結果となった。

ショット数に注目するとレーザピーニング・特殊レーザピーニング共に、ショット数が増えるに従いディンプル深さも大きくなっていく結果が得られた。

Fig.3-72～Fig.3-74 は板厚が 0.3mm においてディンプル体積とパルスエネルギーの関係を示したグラフである。

Fig.3-72 はシートを使用しない通常のレーザピーニング、Fig.3-73 および Fig.3-74 はシートを使用する特殊レーザピーニングによるものである。これらの図においても、レーザピーニング・特殊レーザピーニング共に 25mJ～100mJ の範囲ではパルスエネルギーの増加にしたがいディンプル体積も深くなる結果が得られたが、パルスエネルギー 100mJ でピークを示し、100mJ 以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル体積は増加せずに Fig.3-72 では微減、Fig.3-73 および Fig.3-74 では急激に減少する結果が得られた。

板厚 0.3mm についても 1.0mm および 0.6mm の時と同様に、通常のレーザピーニングではパルスエネルギーが増加するほどディンプル径は大きくなり、ディンプル深さは 100mJ を境に横ばいもしくは減少する傾向が見られたが、ディンプル体積ではディンプル深さと同様に 100mJ でピークを取り、それ以上パルスエネルギーを増加させても減少していく傾向となった。特殊レーザピーニングでもパルスエネルギーを増加させていくとディンプル径・ディンプル深さ共に 100mJ でピークを迎え、それ以上パルスエネルギーを増加させても横ばいもしくは減少する傾向が見られたが、ディンプル体積ではその傾向がより顕著となり、100mJ 以上パルスエネルギー増加させていくとディンプル体積は急激に減少していく結果が得られた。この現象については 3-4-5 項で検討する。

レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル体積は約 $3.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ 、特殊レーザピーニングにおいて得られた最大ディンプル径は約 $2.5 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ という結果になり、板

厚 0.3mm でもディンプル体積では通常のレーザーピーニングの方が大きい値を得る結果となった。

ショット数に注目するとレーザーピーニング・特殊レーザーピーニング共に、ショット数が増えるに従いディンプル深さも大きくなっていく結果が得られた。

3-4-4 表面観察

特殊レーザーピーニングは試験片に直接レーザーパルス照射されないため、綺麗なディンプルを生成できると期待されている。そこで本研究では通常のレーザーピーニングと特殊レーザーピーニングにより生成したディンプルの外観および表面形状の比較・検討を行なった。

板厚 1.0mm、パルスエネルギー300mJ、ショット数 1 回の共通の条件で Fig.3-75(a)にシート厚さが 40 μ m の特殊レーザーピーニング、Fig.3-75(b)にシート無しのレーザーピーニングによって生成したディンプルの表面外観と、中心部のディンプル形状を示す。ディンプル形状より両者ともディンプルが形成されているのが確認できる。特殊レーザーピーニングではディンプル径約 500 μ m、ディンプル深さ約 6 μ m。通常のレーザーピーニングではディンプル径約 650 μ m、ディンプル深さは特殊レーザーピーニングと同等の約 6 μ m の大きさのディンプルである。Fig.3-75 のディンプル形状の比較より、通常のレーザーピーニングは凹凸の激しいディンプルが生成していることが確認でき、表面荒さが大きいことが分かる。一方、特殊レーザーピーニングにより生成したディンプルの形状はなめらかであることが確認された。

表面外観を比較すると特殊レーザーピーニングの方はピーニング痕の確認できない綺麗なディンプルを生成できたことが確認された。一方、通常のレーザーピーニングでは熱による変色が顕微鏡写真および肉眼でもはっきり確認された。

3-4-5 考察

現在、レーザピーニング加工は対象の材料表面を水膜環境下においてレーザパルスを照射する事により行われている。水膜環境下に置かずにレーザパルスを照射してもプラズマ圧力が上昇せず、レーザピーニングを行なうのは難しい^{[1],[3]}。これは水がプラズマの膨張を妨害するため、狭い領域にレーザのエネルギーが集中するのを利用するためである。レーザピーニングにおいてパルスエネルギーを増加させていくと通常プラズマ圧力も上昇していく。しかし、プラズマ圧力がある一定値を超えると水膜によるプラズマの拘束を押し破る現象が起き、そのしきい値以上にパルスエネルギーを増加させてもプラズマ圧力は増加せず、ほぼ一定もしくは減少する現象が報告されている。オーステナイト系ステンレス鋼においてそのしきい値はパワー密度 $10\text{GW}/\text{cm}^2$ であった^[10]。

Fig.3-4 , Fig.3-5 , Fig.3-7, Fig.3-8 , Fig.3-10 , Fig.3-11 , Fig.3-27~Fig3-29 , Fig.3-35~Fig.3-37 , Fig.3-43~Fig.3-45 , Fig.3-66~Fig.3-74 より特殊レーザピーニングで生成したディンプルの直径およびレーザピーニング・特殊レーザピーニングにより生成したディンプルの深さ・体積とパルスエネルギーの関係を示した図において、パルスエネルギー 100mJ でピークを取り、それ以上パルスエネルギーを増加させても直径、深さおよび体積は横ばいまたは減少したのはこの現象が確認された。本研究において、しきい値となったパルスエネルギー 100mJ 時のパワー密度は $9.6\text{GW}/\text{cm}^2$ となった。そのため 100mJ 以上パルスエネルギーを投入しても膜がプラズマ圧力を押さえきれずにプラズマ圧力が不安定になり、それ以上パルスエネルギーを増加させても生じたプラズマ圧力にしたがって直径および深さは横ばいまたは減少する結果になったものと考えられる。

Fig.3-3 , Fig.3-6 , Fig.3-9 より通常のレーザピーニングにより生成したディンプルの直径とパルスエネルギーの関係を示したグラフにおいて 100mJ でピークを迎えずに、パルスエネルギーを増加させるに従いディンプル直径も大きくなる結果を得たのは、熱伝導により熱が伝わり試験片が溶融・プラズマ化したためだと考えられる。

Fig.3-27～Fig.3-29 , Fig.3-35～Fig.3-37 , Fig.3-43～Fig.3-45 に示したディンプル深さにおけるパルスエネルギーの影響を表すグラフおよび、Fig.3-66～Fig.3-74 に示したディンプル体積におけるパルスエネルギーの影響を示す実験結果から、パルスエネルギーが100mJ でピークを示しそれ以上パルスエネルギーを増加させてもディンプル深さおよびディンプル体積は横ばいもしくは減少することが分かった。両者のディンプル直径が不変であるにも関わらず、その減少傾向はディンプル深さに比べディンプル体積の変化においてより顕著に出ていることが確認された。そこで板厚 1.0mm、シート厚さ 20 μ m、ショット数 2 回の共通の条件で、パルスエネルギー100mJ で特殊レーザーピーニングしたディンプル形状を Fig.3-76(a)に、パルスエネルギー300mJ で特殊レーザーピーニングしたディンプル形状を Fig.3-76(b)に示し比較した。これより両者ディンプル形状に違いが出ていることが確認された。パルスエネルギー300mJ で特殊レーザーピーニングして生成されたディンプル形状は、パルスエネルギー100mJ で特殊レーザーピーニングして生成されたディンプル形状に比べ、底が狭く斜面も急になっているのが分かる。このため、ディンプル径およびディンプル深さが等しいにも関わらずディンプル体積が減少したものと考えられる。

パルスエネルギーによりディンプル形状に差が出たのは先述したプラズマが水膜による拘束を押し破る現象が起き、プラズマが過大に膨張しプラズマ圧力が低下すると同時に、レーザーパルスがプラズマ中を通過する際に屈折・発散したためだと考えられる^[11]。

本研究において得られたディンプル深さと特殊レーザーピーニング条件との関係について実験式を求めた。特殊レーザーピーニング条件、すなわちパルスエネルギー E [mJ]、ショット数 n 、板厚 t [mm]、シート厚さ s [μ m]とした時、ディンプル深さ d [μ m]を表す式(1)を次のように示す。

$$d = a \ln E - b \quad \dots (1)$$

ここで、

$$a = (2.2n+0.4)+(0.8n-1.1)(1-t)/0.4+(1.3-0.6n)(s-20)/20$$

$$b = (5.0n+1.0)+(2.5n-4.6)(1-t)/0.4+(4.4-0.7n)(s-20)/20$$

$$[25 \leq E \leq 100, 1 \leq n \leq 5, 0.6 \leq t \leq 1.0, 20 \leq s \leq 40]$$

式(1)を実験結果と上の実験式で求めたディンプル深さとを比較した物を Fig.3-77～Fig.3-80 に示す。両者はほぼ一致することが分かった。

第4章 残留応力測定

4-1 X線による残留応力測定の原理・理論

金属表面へ X 線を照射すると、その反射波には回折現象が見られる。これはブラッグの回折として広く知られており、その概念図を Fig.4-1 に示す。表面で反射した X 線と、1つ下の格子面で反射した X 線の光路差より X 線の干渉現象が見られ、光路差が波長の整数倍の時に X 線のピークを観測することができる。その式はブラッグの法則として下記の式(2)として表される。ここで、入射角、格子面間隔、X 線波長をそれぞれ θ, d および λ とする。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad [n=1,2,3,\dots] \quad \dots (2)$$

X 線回折装置はこの現象を利用して、金属表面の格子間隔（回折面間隔）を測定することができる。格子間隔 d は式(3)で与えられる。 n は通常 1 として問題ない。

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad \dots (3)$$

本研究では残留応力を求めるために $\sin^2\psi$ 法と呼ばれる X 線応力測定法を採用した。ここで、残留応力導出に必要な理論式を導いておく。

多結晶構造の材料に圧縮残留応力が付加された時の、材料表面に垂直な断面で見た格子面間距離の変化を Fig.4-2 に示す。このとき、格子間隔 d は、格子面の法線が圧縮応力の方向と平行に近くなるほど狭くなり、逆に格子面の法線が圧縮方向に鉛直になるほど広がる。

Fig.4-3 に実際の材料がブラッグ回折をする時の状態を示す。ここで考える材料は、結晶方位が無秩序に配向された多結晶で、結晶粒径が十分小さい試料を考える。この図では試料面の法線と格子面の法線の角度を ψ 、ブラッグ角を θ 、回折角を 2θ と表して

いる。このような材料は X 線照射域内に式(2)を満たす結晶粒が多く存在し X 線を照射すると回折する。そこで、X 線回折装置を用い回折 X 線の強度分布曲線を測定すれば、角度 ψ の結晶粒における θ を求めることができる。

材料に応力が作用し格子面間距離 d が Δd だけ変化すると、式(3)における θ も変化する。式(3)を波長 λ について全微分すると式(4)が得られる。

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \cdot \Delta \theta \quad \dots (4)$$

式(4)は格子間隔（回折面間隔）の変化率（左辺）がブラッグ角の変化量 $\Delta \theta$ より求められることを示している。そこで式(4)において、無ひずみ状態の試料の格子間隔 d_0 に対するブラッグ角 θ_0 とすると、格子面の法線が試料表面の法線より角度 ψ だけ傾いた格子面の法線方向の垂直ひずみ ε_ψ は、近似的に式(5)のように表すことができる。

$$\varepsilon_\psi = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)_\psi = \left(\frac{d_\psi - d_0}{d_0} \right)_\psi = -\cot \theta_0 \cdot (\theta_\psi - \theta_0) \quad \dots (5)$$

Fig.4-4 に示すように xy 平面を試料表面として、式(5)のひずみ ε_ψ と応力の関係について考える。O 点における主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 、主ひずみを $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ と仮定する。X 線の侵入深さは数 $10\mu\text{m}$ 程度である為、試料表面の法線方向の応力成分 σ_3 は通常零に近似して平面応力状態と考えると、応力とひずみの関係は下記の式(6)~(8)となる。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \nu \sigma_2) \quad \dots (6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu \sigma_1) \quad \dots (7)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \dots (8)$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

一方、 σ_1 と σ_2 を含む面上で、点 O を通り互いに直交する 2 方向の応力 σ_x, σ_y , ひずみを $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ とすると、これらの間にも式(6)~(8)と同様に、

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \dots (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \dots (10)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \dots (11)$$

が成立する。

ここで、求めたい応力を σ_x として、Fig.4-4 の OP 方向のひずみ $\varepsilon_{\phi\psi}$ を求めると、以下の式(12)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi\psi} &= \varepsilon_1 \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi \\ &= (\varepsilon_1 \cos^2 \phi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \psi) \end{aligned} \quad \dots (12)$$

この時、ひずみ成分 ε_x と主ひずみの関係は、

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \cos^2 \phi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi \quad \dots (13)$$

となるので、式(12)は下の式(14)となる。

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \varepsilon_x \sin^2 \psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \psi) \quad \dots (14)$$

この式(14)に、式(9)および(11)を代入、整理すると以下の式となる。

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_x \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \dots (15)$$

この式(15)を X 線応力測定の基礎式という。

式(15)は試料が等方均質弾性体であり、X線侵入深さ内で平面応力状態が成立仮定のもとで、ひずみ $\varepsilon_{\phi\psi}$ が $\sin^2\psi$ に対して直線的に変化することを示している。

ひずみ $\varepsilon_{\phi\psi}$ は式(5)で示したようにブラッグ角 θ の変化量から求めることができる。しかし、実際の X 線応力測定では直接ブラッグ角を求めるのではなく、入射 X 線と回折 X 線との角度 2θ を測定するのが一般的である。そこで式(15)を $\sin^2\psi$ で偏微分し、式(5)を代入し回折角 $2\theta_{\phi\psi}$ (deg.)になおすと以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1+\nu} \frac{\partial(\varepsilon_{\phi\psi})}{\partial(\sin^2\psi)} \\ &= -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180} \cot\theta_0 \frac{\partial(2\theta_{\phi\psi})}{\partial(\sin^2\psi)} \\ &= K \cdot M \quad (\text{MPa}) \quad \dots (16)\end{aligned}$$

ただし、

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot\theta_0 \frac{\pi}{180} \quad [\text{MPa/deg.}] \quad \dots (17)$$

$$M = \frac{\partial(2\theta_{\phi\psi})}{\partial(\sin^2\psi)} \quad [\text{deg.}] \quad \dots (18)$$

である。

K は応力定数と呼ばれ、M は Fig.4-5 に示す $2\theta_{\phi\psi}-\sin^2\psi$ 線図の直線勾配である。この $\sin^2\psi$ 法は以下の特徴をすべて持つ材料に適用することができる。

1. 結晶粒が小さい。(およそ $30\mu\text{m}$ 以下)
2. 材料が強い優先方位を有していない。
3. X線侵入深さ内が平面応力状態である。
4. X線侵入深さ内に応力勾配がない。

なお、本研究において使用するオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)はこの特徴をすべて有し、 $\sin^2\psi$ 法を適用することができる。

オーステナイト系鋼鉄材料に関して、Cr-K β 特性 X 線による 311 回折の利用が推奨さ

れているので、本実験においても採用した。この時の回折角は $2\theta_0=148.5^\circ$ 、X 線の弾性係数は $E/(1+\nu)=149\text{GPa}$ 、応力定数は $K=-366\text{MPa/deg}$ となる^{[12]-[14]}。

4-2 X 線回折装置

本研究で使用する X 線回折装置は Fig.4-6、Fig.4-7 に示す Rigaku 製 Geigerflex を使用した。Fig.4-7 はゴニオメータ一部である。ゴニオメータの円状になった場所の中心に試料台がある。また、X 線回折装置の概念図を Fig.4-8 に示す。Fig.4-8 で表す位置に試験片をセットし X 線を照射する。X 線照射時に X 線検出装置が試料台の周りを 2θ [deg./min] で、試験片台が θ [deg./min] で回転し、格子面に対する入射角=反射角の関係を維持しながら 2θ を変化させ、X 線が回折し強め合うピークの角度を検出する。本研究では回折角 2θ を求めるにあたって並傾法を用いた。その概略図を Fig.4-9 に示す。本方法では角 ψ は次式で与えられる。

$$\psi = \psi_0 + \eta \quad \dots (19)$$

ここで、 ψ_0 は X 線入射角、 η はブラッグ角の全角 ($90^\circ - \theta_0$) である。

本 X 線回折装置には ψ 角をセットする為の目盛りが無い。そのため、Fig.4-10 に示す、目盛りを自作し試験片台の周りに装着した。 ψ 角を合わせるにはまず、Fig.4-11 に示す A のネジをゆるめる。すると、試験片台がフリーになる。Fig.4-11 の B 部を持ち試験片台を回転させ、 ψ 角を任意の値にセットする。この時、試験片にさわらないように気を付ける。

2θ と X 線強度の測定には別途外付けのロガー装置 (Graphtec Corporation 製 midi Logger TYPE GL800) を使用する。

これにより、 0.5° 刻みでゴニオメータから発振される角度信号パルスと X 線強度を記録しピーク角を検出し回折強度曲線を得た。

4-3 試験片とピーニング条件

供試材には第2章の2-3項,2-4項に記載の試験片を使用した。特殊レーザピーニングの際に使用するシートにもオーステナイト系ステンレス(SUS304)製のシートを用いた。

照射パターンを Fig.4-12 に示す。ピーニングは試験片の中央 20×30mm の範囲に、1mm 間隔の格子状に行ない、ピーニング後は縦に 30 行、横に 20 列のディンプルが形成される。Fig.4-12 中の番号は、左上を(1,1)として、順番に縦横に番号を付けたものである。レーザピーニングは熱の影響、シートの浮きの問題を考慮しつつ、試験片の中心である 15 番の行から順番に行なわれる。レーザピーニング順序の概略を Fig.4-13 に示す。(15,1) を起点として Fig.4-13 のようにディンプルに名称を付け、A1,A2,A3,⋯,A20、B1,B2,B3,⋯,B20、C1,C2,C3,⋯,C20、D1,D2,D3,⋯,D20 の順序でレーザピーニングを行なった。

このように本実験で行なったピーニングパターンはピーニング領域が縦方向に関して中心から外へ拡大するように意図したものである。

その他のピーニング条件は第3章の結果を参考に以下のように設定した。パルスエネルギーは増加傾向を示した 25~100mJ の範囲としている。シート厚に関しては、第2章で取り扱った 20、40 μ m のシートを使用し、上記照射パターンで特殊レーザピーニングを行なうと、シートの浮きや破損が確認された。そのためここではシート厚 30 μ m のシートを使用しシートの浮きを防いだ。

なお、シート破れ数の測定はレーザピーニング処理後のシートを試験片より剥がし、裏から光を当て光の透過が目で確認できた場合においてシートが破れているとした。各ピーニングポイントにおいて評価し、破れている数を測定した。

パルスエネルギー：50mJ, 75mJ, 100mJ

ショット数：2回

試験片板厚：1mm

シート厚：30 μ m

照射パターン：上記照射パターン

この条件により、残留応力分布におけるパルスエネルギーの影響と、シート破れ数におけるパルスエネルギーの影響について評価・検討を行なった。また、参考として受け入れ状態の試験片についても残留応力分布を測定した。

試験片は Fig.4-14(a)に示す通りとなる。第2章記載の方法で特殊レーザピーニングを行なった後、ピーニング範囲が中心に来るようにリファインカッターで切断した。また、本実験では最大で 100 μ m まで電解研磨を行なった。

試験片を電解研磨する際、試験片全面を均等に除去すると応力解放による変形が起きるため、層除去法によりこの変形(曲率)を測定することで残留応力を求めるのが一般的である。表面あらかの大きいピーニング面では、その凹凸形状から測定に関する統一性、再現性の確保が難しいと予想される。そのため、本研究では $\sin^2\psi$ 法とピーニング部の残留応力測定によく用いられているウインドウ法を利用した。ウインドウ法とは試験片表面の一部だけを除去し、周囲の拘束により除去部の変形を防止することで、除去部の X 線回折強度を測定し残留応力を測定する方法である。本研究ではウインドウサイズを決定するため、予備実験としてウインドウサイズが 2mm,3mm,4mm 四方の 3 条件について行い、比較した。Fig.4-15~Fig.4-17 は受け入れ状態の試験片について ψ 角 0° 、X 線出力 30kV および 20mA、ゴニオメーター回転速度が $1^\circ/\text{min}$ 、ダイバージェンススリットが 1° 、レシービングスリットが 0.3° 、スキヤッタスリットが 1° のスリットで行なった X 線回折強度曲線を示す。これらの図より 2mm および 3mm 四方のウインドウサイズでは、測定ノイズに対して十分な回折強度が得られていないことが分かった。一方、4mm の条件ではピーク角の測定に十分な X 線回折強度が得られた。本実験ではウインドウサイズを $4\times 4\text{mm}$ とし、それ以外の部分は絶縁テープで覆いマスクした(Fig.4-14(b)参照)。なお、ウインドウ部は試験片表面全体の 1.3%に相当する^{[15],[16]}。測定する残留応力はウインドウ部の平均値となる。

4-4 測定方法

残留応力の具体的な導出手順は以下の通りである。

1. 対象材料に対して応力測定に適切な特性の X 線と回折面の組み合わせを選択する。
2. 入射・受光スリットの選択。
3. 複数の X 線入射角度 (Fig.4-3 における ψ) を順次設定し、実際に装置を使い回折強度曲線を測定する。
4. 各 ψ 角における回折角 $2\theta_{\psi}$ を半価幅法で決定し、それらの $\sin^2\psi$ に対してプロットし $\sin^2\psi$ 線図を作成する。
5. $\sin^2\psi$ 線図の直進性を確認し、 $\sin^2\psi$ 法を適応できるか判断する。
6. $\sin^2\psi$ 法が適応できる場合、 $\sin^2\psi$ 線図を直線回帰し、その勾配を求める。
7. 式(16)を用いて $\sin^2\psi$ 線図のあらかじめ設定した勾配 M と応力定数 K から残留応力 σ_x を求める (Fig.4-9 参照)。

回折強度曲線よりピーク位置 2θ を決定する方法は半価幅法、重心法、放物線近似法など、いくつかの方法がある。日本材料学会標準では半価幅法が推奨されていることから本研究では半価幅法を使用する。

Fig.4-18 に半価幅法によるピーク位置決定の概念図を示す。バックグラウンド AC を差し引いた強度曲線から、PB の半分の高さとなる山の中腹点 QR を求め、その中間点 M における回折角 X_0 をピーク位置として用いる手法である。また、 $X_{-1/2}$ と $X_{1/2}$ の幅を半価幅 (半値半幅) といい、回折強度の曲線の広がりの指標に用いる。

本研究ではこの方法に加え、電解研磨装置を使用することにより試験片表面を除去し内部に付加された残留応力を計測する。一度の除去量は $5\sim 10\mu\text{m}$ 刻みで、残留応力が圧縮から引張に転じるまで X 線解析と電解研磨を繰り返した。

4-5 電解研磨

金属の残留応力は X 線回折装置によって測定することができるが、この方法では付加されている残留応力のごく表面層に分布した残留応力しか測定することができない。金属内部に分布する残留応力を測定するには、測定したい深さよりも表面側にある金属を除去しなければいけない。しかし、一般的に行なわれる切削加工や研削加工を利用するとその加工により更なる残留応力が付加され、正確な残留応力の評価が困難となる。そこで、加工時に力が発生しない電解研磨法を利用し化学的に金属表面を除去することにより、正確な残留応力の測定が可能となる^[12]。本研究では X 線回折装置による残留応力測定と電解研磨を、残留応力が圧縮から引張に転じるまで繰り返した。

4-5-1 電解研磨装置

電解研磨には自作の装置を使用した。電解研磨装置の概略図を Fig.4-19 に、全体図を Fig.4-20 に示す。使用する電源は直流電源供給装置(CEC 社製:TYPE 505BN)である。本電源は 0~40V、0~3A を無段階に調整して出力することができる。配線には 1.25sq の被覆ハーネスを使用した。

本実験では電解研磨環境を安定させる為に恒温槽(AS ONE 社製:TM-2)を使用した。本恒温槽は噴流攪拌方式を採用し、恒温槽内を室温+5~80°Cまでの温度管理をすることができる。この恒温槽を使用することにより電解液温を一定に保つ。棒状温度計(AS ONE 社製)を使用して電解研磨中は電解液温をモニタした。

電解研磨中は攪拌機(AS ONE 社製:CP-2)と付属の攪拌プロペラを使用して常に電解液を攪拌した。本攪拌プロペラの材質はステンレス製である。

また電解研磨の準備として電解液を作成する時、無水シュウ酸は電子秤(SHIMADZA 社製:UX2200H)を使用して計量し、電解液を作製した^[17]。

4-5-2 電解液作製

電解研磨で使用する電解液は 9.09mass%のシュウ酸水溶液、1500cc を使用する。蒸留水 1500cc に無水シュウ酸 $[(\text{COOH})_2]$ 150g を加えて溶解させる。その作成手順は次の通りである。

1. 蒸留水で洗浄し乾燥しておいた電解液浴槽、1000cc ビーカー、200cc ビーカー薬さじを準備する。
2. 1000cc ビーカーで 1300cc 分の蒸留水を量り電解液槽へ投入する。
3. 電子秤に 200cc ビーカーを置き、電源を入れゼロ点合わせをした後、無水シュウ酸 150g を量りとる。
4. 計測した無水シュウ酸 150g を電解浴へ投入する。
5. 無水シュウ酸を計測した 200cc ビーカーに蒸留水 100cc を投入し、ビーカー内に残った無水シュウ酸を溶かし、その水を電解液槽へ投入する。
6. 5 と同じ手順でもう一度繰り返し、無水シュウ酸の損失を最小限に減らす。
7. 電解液槽をあらかじめ 40°C に設定しておいた恒温槽へ入れる。
8. 攪拌機をセットし、500rpm で無水シュウ酸が溶けきるまで攪拌する。

なお、無水シュウ酸は医療用途外毒物指定薬品なので廃液など取り扱いには十分気を付ける。電解液作成時は刺激臭がし、電解研磨中は水素が発生するので電解液作成から電解研磨、後片付けを通して部屋の換気には特に気を付ける。

4-5-3 電解研磨条件および電解研磨手順

本研究では深さ方向に約 5 μm 刻みで測定したい。一回あたりの研磨量が 5 μm 前後になるように、次の条件で電解研磨を行った。

電流	・・・1A
電流密度	・・・62.5mA/mm ²
電圧	・・・2V
電極間距離	・・・1mm
電解液温	・・・40°C
攪拌プロペラ回転数	・・・300rpm
研磨時間	・・・10分

以下に実験手順を記す。

1. 4-5-2 に記す通りに電解液を作製し恒温槽で 40°C に保持する。以後、恒温槽は常に 40°C を保持するように設定しておく。
2. 攪拌プロペラを蓋部の空気穴に通す。
3. 陽極の凹部に試験片を設置する。その際、陰極凸部と試験片がずれないように気を付ける。
4. 設置した試験片がずれないように慎重に電極を電解液槽へ沈める。
5. 攪拌プロペラを攪拌機へセットし攪拌を開始する。
6. 温度計をセットし、電解液温が 40°C で安定するまで待つ。
7. 電解研磨開始の約 1 分前に直流電源供給装置の電源を入れておく。
8. 直流電源供給装置により電極間に電圧をかけ電解研磨を開始する。その際、素早く電圧・電流値を実験条件の値に調整する。
9. 電解研磨終了後素早く直流電源供給装置の電源を落とす。
10. セットした時と逆の手順で、温度計、攪拌機を外し、電極を電解液層より取り出す。

11. 試験片を陽極より取り出し水道水で洗浄する。その際に試験片に貼り付けたマスクが剥がれないように気を付けて洗浄する。

板厚測定にはポイントマイクロメーター(ミットヨ製 CPM15-25)を使用しウインドウ部のディンプル痕を避けて四隅と中心を計測し、その平均値を板厚とした。

4-6 X線回折

4-6-1 解析条件

オーステナイト系鋼鉄材料に関して、日本材料学会標準では Cr-K β 特性 X 線による 311 回折の利用が推奨されているので、本実験においても採用した。この時の回折角は $2\theta_0=148.5^\circ$ 、X 線の弾性係数 $E/(1+\nu)=149\text{GPa}$ 、応力定数 $K=-366\text{MPa/deg}$ である。

X 線出力は 30kV、20mA で使用した。ゴニオメーターの回転速度は 2θ が $1^\circ/\text{min}$ である。ログアーの電圧レンジは角度信号パルスが 20V、X 線強度が 10V で使用した。

使用するスリットは、ダイバージェンススリットが 1° 、レシービングスリットが 0.3° 、スキヤッタスリットが 1° のスリットを選択し、また K β 線を使用する為にバナジウムフィルターは使用していない。

日本材料学会標準では、精度の高い傾き M を求める為に $\sin^2\psi$ は $0\sim 0.6$ の範囲で等間隔に 5 点以上測定することを推奨している。本研究では測定効率も考え、 ψ は $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ の 6 点計測し、残留応力を計算した。

4-6-2 X線回折装置による測定手順

以下の手順で実験を行った。

1. X線回折装置のメイン電源を入れる前に、冷却水用の水道の蛇口を適当に開け、冷却水循環用ポンプのスイッチを入れる。
2. X線のシャッターが閉じていることを確認してから装置のメイン電源を入れる。正しく冷却水が循環していない状態でメイン電源を入れるとアラームが鳴る。アラームが鳴った際には直ちにメイン電源を落とし、循環ポンプをチェックする。ロガーにUSBメモリを差し、電源を入れる。記録装置の電源も入れ、スタートボタンを押しておく。
3. X線発生器の電源およびX線シャッターが閉じていることを確認してから資料台上部の蓋を開け試験片をセットする。試験片を資料台のベースに当たるまで押し込み固定すると、マスクをしていない測定面に正しくX線が照射されない。そのため Fig.4-21 に示す治具を使用する。試験片を治具に重ね、治具が資料台のベースに当たるまで押し込みクリップで固定する(Fig.4-22 参照)。試験片の浮き等が無いか適宜チェックし、浮いている場合はクリップなどで押さえつける。
4. 自作の目盛りにより ψ 角を任意の角度に合わせ、上部の蓋を元に戻す。
5. 防X線カバーを閉める。防X線カバーには開閉センサーがついており、FS RELEASE ボタンを押さずに、カバーが開くのを検出するとX線発生装置の電源が落ちるので注意する。
6. X線発生装置の出力調整つまみが電圧・電流ともに最小値になっていることを確認してから、X線発生装置の電源を入れる。電流値より徐々に出力を上げ、条件の値にセットする。
7. 出力が条件値で安定したら FS RELEASE ボタンを押し、防X線カバーを開けゴニオメーターを回転させメモリを 152° より少し右にセットする。

その後、左回りで回転させ、素早く確実に防 X 線カバーを閉める。

8. ロガーの収録を始める。
9. X 線シャッターを 1, 2 の順番で開け、X 線を試験片に照射する。
10. ロガーにて最初のパルスを確認し、その時のゴニオメーターの角度が 152° であることを確認する。
11. X 線強度が徐々に上昇する。その後、下がり始め、最初と同程度になり暫くしたら X 線シャッターを 2, 1 の順番で閉め、ロガーの収録を停止する。

この時、X 線強度が下がってすぐ切ると、半値幅法適用の際に精度が出ない可能性があるため気を付ける。本論文では目安として、 144° 程度までデータを取った。

12. X 線発生装置の出力を最小までゆっくり落とし、X 線発生装置の電源を落とす。この後、同じ試験片で別の ψ の値のデータを取る場合は手順 3 より、試験片を交換する際は手順 2 より繰り返す。その際、もう一度 X 線発生装置の電源および X 線シャッターが閉じられている事を確認する。測定を終了する時は X 線発生装置を停止した後、試験片を取り出す。この装置は冷却の為にアフターアイドルが必要なので実験後約 15 分はメイン電源と冷却水循環用ポンプの電源を落とさずに冷却水を循環させる。なお、ロガーの電源はすぐに落として良い。アフターアイドル後、メイン電源を落とし冷却水循環用ポンプの電源を落とした後、冷却水用の蛇口を閉めて終了となる。

この実験は X 線を使用する為に、被爆しないように細心の注意が必要である。試験片を取り出す際の X 線発生装置電源 off の確認など、各種確認を怠らないようにし事故を未然に防がなければならない。また、間違いなく解析が行われた場合にも少量ながら被爆を受ける。実験者の健康を守るため、被爆量を正確に管理しなくてはならない。本論文では専用のパッチを使い被爆量の測定、管理を行う。

4-7 結果

4-7-1 シート破れ孔数

特殊レーザピーニング実験後の破れたシートの写真を Fig4-23 へ、シートの破れ孔を測定したグラフを Fig.4-24 へ示す。これより、75mJ まではほとんどシートの破れは観察されなかった。しかし、100mJ では破れ孔の数は激増し 600 個中 41 個もの破れ孔が確認された。第 3 章では最も効率が良い最適値であったにも関わらず、この結果となったのはレーザパルス照射密度が急激に高くなったために 周りのレーザパルスによる熱影響が無視できなくなったためだと考えられる。特殊レーザピーニング加工においてシートに穴が開いた場合、試験片にレーザパルスが照射されてしまい本来の特殊レーザピーニングを行なうことができなくなる。シート破損の条件はパルスエネルギーやシート厚だけでなく照射パターンの影響も大きく、新しい照射パターンが試される都度シートに穴の開かない正しい特殊レーザピーニングができるか検証せねばならず、今後の課題となる。有限要素法シミュレーションによる特殊レーザピーニングシミュレーションはこの点において実際に施工する前にあらかじめ予測を立てられるので実現が期待されている。本実験では本来失敗とされるシートに穴の開いた 100mJ の試験片についても残留応力分布の測定を行ない、その影響について検討した。

4-7-2 試験片受け入れ状態の残留応力分布

Fig.4-25 に試験片の受け入れ状態の深さ方向の残留応力分を示す。表面近傍では引張方向の残留応力が測定された。これは試験片が圧延により作られているため引張残留応力が残っているためだと考えられる。その後、圧縮残留応力に転じ、55 μ m の深さまで約-30~20MPa までの残留応力が測定された。4-7-3 項では、表面に観測で見られた引張残留応力を特殊レーザピーニングにより改善を目的とした試みと、その際のパルスエネ

ルギーの影響について検討した。

4-7-3 パルスエネルギーの影響

Fig.4-26～Fig.4-28 にパルスエネルギー50～100mJ における特殊レーザピーニング実験後の深さ方向の残留応力分布を示す。Fig.4-26 および Fig.4-27 より表面に圧縮の残留応力を形成することでき、50mJ では深さ 40 μ m まで付加でき最大圧縮残留応力は約-90MPa、75mJ では深さ 80 μ m を超える深さにわたり付加でき最大圧縮残留応力は約-130MPa という結果を得た。これより、パルスエネルギーが適正条件内ではパルスエネルギーを増やす程、より深い部位まで圧縮残留応力を与えることができ、より大きい圧縮残留応力を付加できることが分かった。

また、50mJ では4 μ m 付近に、75mJ では7 μ m 付近で圧縮残留応力の値が減少しているポイントがあることがわかった。パルスエネルギー50mJ の残留応力分布では表面直下で圧縮残留応力約-90MPa を示し、その直後深さ 4 μ m で約-35MPa まで減少した。その後なだらかに残留応力は圧縮方向に増加し 36 μ m で最大値である-91.4MPa を記録し、深さ約 45 μ m で引張残留応力に転じた。パルスエネルギー75mJ の残留応力分布でも表面直下で圧縮残留応力約-110MPa を示し、その直後深さ約 7 μ m で約-23MPa まで減少した。その後なだらかに残留応力が増加し深さ約 44 μ m で最大値の-125MPa を得た。

一方、シート破損が顕著であったパルスエネルギー100mJ の残留応力分布においても同様の傾向を示し、2つのピークを得た。しかし、1つめと2つめのピークの間である深さ 9 μ m の場所で圧縮残留応力とはならず、残留応力は \pm 0MPa となった。受け入れ材でこの付近は引張残留応力であったため、特殊レーザピーニングによって圧縮残留応力を与え、多少の改善は見られるが見かけ上、圧縮残留応力を付加する事はできなかったことになった。

1つめのピークは深さ約 6 μ m の深さで約-60MPa、2つめのピークは深さ約 37 μ m で最大値-168MPa となり、深さ 55 μ m を超えて圧縮残留応力を付与できたことが分かった。

しかしながら、パルスエネルギー50mJ および 75mJ の残留応力分布と比較すると、パルスエネルギーの増加による最大圧縮残留応力値や残留応力が圧縮である深さがパルスエネルギー100mJ では減少する結果となった。これは試験片表面に直接レーザパルスが照射され、試験片表面が溶融・凝固したことから加熱による応力緩和が生じたため、圧縮残留応力が減少したものと考えられる。

3-4-5 項で得た式(1)より 50mJ 時のディンプル深さは 6.5 μm 、75mJ 時は 8.4 μm 、100mJ 時は 9.8 μm と推測される。この値とそれぞれの残留応力分布で一度圧縮残留応力が減少した深さがほぼ一致しており、本照射条件においてディンプル底辺付近では圧縮残留応力の付加が不十分であることが分かった。

衝撃圧力によりディンプルを生成する FEM シミュレーションによるディンプル近傍の残留応力分布が過去の研究により得られている^[18]。これより、表面においてディンプル外縁部とディンプル中心部に強い圧縮残留応力が付加されているが、ディンプル斜面部では材料が引き延ばされるため残留応力が少なくなることが分かった。また、ディンプル中心部の深さ方向に着目すると、強い圧縮残応力が 2 個所で確認され、その間では圧縮残留応力が減少している事がわかった。本実験における特殊レーザピーニングではディンプル間隔が 1mm とピーニング密度が小さい条件で行なった。そのためディンプルを 1 つだけ生成した時に得られる残留応力分布と同じ傾向を示し、本実験結果においても深さ方向の残留応力分布において二つのピークを得たと推測される。

第5章 有限要素法シミュレーション

5-1 特殊レーザーピーニングにおけるシミュレーションの役割

レーザーピーニングはレーザーのビーム径、パルス幅、イオン化過程、プラズマ加熱およびプラズマ周波数など複数の関係がバランスするため非常に複雑なプロセスである^[11]。また、特殊レーザーピーニングにおいてはシート厚さや照射パターン等、より考慮すべきパラメータが増えその理解を妨げており、その動的な機構・仕組みがほとんど解明されていないのが現状である^[4]。そこで本研究では有限要素法シミュレーションソフトを使用し特殊レーザーピーニングシミュレーションを行い、特殊レーザーピーニング時にシートおよび材料表面で起きている現象の解明、適正特殊レーザーピーニング条件の同定、効率の良い特殊レーザーピーニング条件の予測などを行ない、実際の特殊レーザーピーニング実験へのフィードバックを通じて、能動的な材料素材のデザインをしていく事を最終目標としている。

そこで本論文ではその前段階として、静的荷重による圧子の押し込みシミュレーションを行ない、形成されるディンプル観察や、実際に押し込み実験を行なった時のディンプル形状・必要荷重等の比較・検討を行なった。

5-2 有限要素法の原理

有限要素法(Finite Element Method)とはコンピュータ上にて物質の挙動をシミュレーションする際に使用される手法の一つである。今日の技術開発分野では、この有限要素法を利用したソフトウェアを使用し、線形構造解析、非線形構造解析、構造動解析、電熱解析、音響解析、圧電解析、電磁場解析、流体解析など幅広い分野のシミュレーションを行い、今までできなかった高度な設計を可能としている。

有限要素法はマトリックス法の考え方を発展させたものである。マトリックス法の解

説をする為に、簡単な例題を考える。その例題を Fig.5-2-1 に示す。これは正方形の 2 次元モデルを上下から引っ張る問題である。2 次元の物体の挙動をいきなり計算することはできない。マトリックス法ではまず物体をメッシュにより分割する。Fig.5-2-2 に 4 要素にメッシュを切った物体を示す。そして、切ったメッシュに従い物体を 1 本ずつの棒に分解する。その状態を Fig.5-2-3 に示す。ここで得られた 1 本の棒の挙動については代数式を利用してかなり正確に数式化することができる。1 本ずつの棒の挙動が数式化されたら、これを元の正方形の物体に戻してゆき、近似等を用いてうまく数式を解くことで物体全体の挙動を知る事ができる。このような手法を用いて計算する方法をマトリックス法と言い、有限要素法ではこの手法を応用して物体の挙動のシミュレーションを行っている^[19]。

5-3 装置の構成

本研究では ANSYS 社製 FEM ソフトウェアである、Workbench を使用する。このソフトウェアは線形構造解析、非線形構造解析、構造動解析、電熱解析、音響解析、圧電解析、電磁場解析、流体解析まで幅広い解析を行う事のできるソフトウェアである。本論文では ANSYS Workbench の ver.12.0 を使用している。

このソフトウェアをインストールするハードウェアは PC/AT 互換機である、Hewlett Packard 社製ワークステーション xw4600、Z200 を使用する。主要な諸元を下記に記す。

・ xw4600 ワークステーション

製造メーカー：Hewlett Packard

機種：PC/AT 互換機

モデル名：HP xw4600 Workstation Base Unit

OS：Windows XP x64 Edition Service Pack 2

BIOS : HP 社内製 786 v01.13

M/B : HP 社内製 0AA0h

CPU : intel 社製 Core 2 Duo プロセッサ (E8600 3.33GHz)

メモリ : DDR2 メモリ ECC 機能付き 8GB

G/B : NVIDIA 社製 Quadro FX1700

GPU : NVIDIA 社製 G84

・ Z200 ワークステーション

製造メーカー : Hewlett Packard

機種 : PC/AT 互換機

モデル名 : HP z200 Workstation Base Unit

OS : Windows XP x64 Edition Service Pack 2

BIOS : HP 社内製 786H3 v01.09

M/B : HP 社内製 0B40h

CPU : intel 社製 i3 プロセッサ (540 3.07GHz)

メモリ : DDR2 メモリ ECC 機能付き 8GB

G/B : NVIDIA 社製 Quadro FX380

GPU : NVIDIA 社製 G96

・ モニタ : HP 社製 LP2065

5-4 押し込み実験

5-4-1 押し込み実験装置および試験片

有限要素法シミュレーションとの比較のために押し込み実験についても実際に行なった。供試材にはレーザーピーニング実験と同様に SUS304 を使用した。試験片を Fig.5-4 に示す。板厚 1.0mm の SUS304 鋼板を 40×50mm に切断し押し込み実験に使用した。特殊レーザーピーニングと同様に、試験片上にあらかじめシートを貼り付けて押し込みを行なった。シート厚さは 10 μ m、シートサイズは 20×30mm、材質は試験片と同様 SUS304 とした。試験片上のシート貼り付け領域に真空グリスを塗り、その上にシートを貼り合わせる。シートは 4 辺を絶縁テープで固定され、貼りしろは各辺 5mm とした。

使用する押し込み装置を Fig.5-5 に示す。押し込み動力には油圧ポンプ(TAIYO 製 HYDRAULIC UNIT -MAX 3.5MPa)により発生している。押し込みに使用する圧子の形状を Fig.5-6 に示す。圧子は先端がダイヤモンド製で円錐状になっている。圧子は油圧シリンダーより伸びるロッドにアダプタで固定される。アダプタ部にはロードセル(KYOWA 製 LUX-A-500N)および CMOS イメージセンサ投影方式の変位計(KEYENCE 製 GT2-H12K)が備え付けられており、荷重および変位はロガーソフトウェア(EDS400A 制御ソフトウェア)により同期してサンプリングされる。変位計とロガーソフトの間には専用の制御器(KEYENCE 社製 GT2-71MCN)が設置され、これにより任意の変位量で油圧ポンプの動作を停止する仕組みになっている。その配線図を Fig.5-7 に示す。ロガー装置へアナログ信号を送るためのアンプは ASAHI KEIKI 社製 TZ-5XA-A3H、直流電流供給装置は OMRON 社製 S82K-10024、ソリッドステートリレー(SOLID STATE RELAY)は OMRON 社製 G3B-205S 使用した。

5-4-2 押し込み実験方法

押し込み量を正確に測定するためには試験片表面上でのゼロ点の決定が重要になる。本実験では押し込み実験前にゼロ点決定するために Fig.5-8 に示す 8 点に 50N 程度の荷重で押し込みを行なった。その際に得た荷重—変位曲線より 4N を記録した変位の平均値をゼロ点と決定した。

圧子の押し込みには油圧シリンダーを使用している。油圧バルブの開閉にはソリッドステートリレーを使用しているが、これは 60Hz 交流により動作しているために発生するリレーの動作タイミングのずれが発生する。また、油圧シリンダーは油圧のみでロッドを制御し機械的機構が無いため指定の位置を超えて空走してしまう。これらの影響により押し込み指定量と実際にロッドが停止した位置に誤差が生じてしまう。本実験ではあらかじめその誤差を計測しておき、以下の式(20)より押し込み設定量の決定に利用した。

$$\text{押し込み設定量} = \text{ゼロ点} + \text{押し込み量} - \text{空走距離} \quad \dots (20)$$

ここで空走距離は 30 μm とした。試験片への押し込み量は 20 μm 、押し込み速度 350 $\mu\text{m/s}$ で押し込み実験を行なった。生成されたディンプルはレーザ顕微鏡 (KEYENCE 製, VK-9700) および VK Analyzer を使用し 3-3 項と同様の方法で計測した。

5-5 シミュレーションモデルおよび解析設定

本論文では 5-4 項で行なった静的荷重による圧子押し込みを利用したディンプル生成実験のシミュレーションを行なう。圧子、試験片およびシート厚さは 5-4-1 項で使用した物と同じ寸法の物についてシミュレーションを行なう (Fig.5-4 および Fig.5-6 参照)。そこで Fig.5-9 および Fig.5-10 に示す有限要素モデル作製した。2 次元シミュレーション

による軸対称プログラムを使用することにより、一様な平面を再現した。シミュレーションモデルではシミュレーション中のエラーを回避するために試験片・シート間に $10\mu\text{m}$ の隙間を設けた。シミュレーション開始直後にシートは試験片に密着し、実際の押し込み試験と同じ密着した状態になるように解析設定した。シミュレーションでは圧子の変位を制御した。押し込み量を1step、1s毎に $1\mu\text{m}$ ずつ押し込み、 $30\mu\text{m}$ (試験片表面より $20\mu\text{m}$)押し込んだ後に初期位置まで圧子を戻す設定とした。

解析設定をTable 5-1～Table 5-9に示す。この設定によりメッシングされた有限要素モデルをFig.5-10に示す。ダイヤモンドの物性は文献値^[20]より密度： $3.515\times 10^{-6}\text{kg/mm}^3$ 、ヤング率： 1050GPa 、ポアソン比： 0.1 とした。メッシュングはシート全体のメッシュサイズを 0.01mm 、試験片全体のメッシュサイズを 0.1mm 、圧子先端部より半径 0.1mm の範囲、シート左下端より半径 0.1mm の範囲、試験片左上端より半径 0.1mm の範囲内のメッシュサイズをそれぞれ 0.001mm とし、押し込み部周辺のメッシュを重点的に細かくしその他の部分を荒くすることにより、要素数を削減し計算コストを下げつつ精度の高い計算を目指した。要素数はそれぞれ、圧子： 13418 、シート： 993 、試験片： 132981 となった。接触面定義では、圧子—シート上部およびシート下部—試験片上部をそれぞれコンタクト面—ターゲット面に指定し、摩擦係数 0.15 の接触とし、ペナルティ法により定式化し、垂直剛性係数はサブステップ毎に更新し 0.1 とした。拘束条件として、軸対称部分の辺を垂直軸のみ自由度を与えて拘束、試験片底辺を拘束し、圧子上辺に変位を与えた。シートと試験片の間に $10\mu\text{m}$ の隙間を設けたモデルを使用するため、変位設定はTable5-9のように最初のステップで圧子・シートを同時に $10\mu\text{m}$ 変位させ、その後 $1\mu\text{m}$ ずつ押し込みを行なった。

5-6 実験結果およびシミュレーション結果と比較・検討

Fig.5-11 に 30 μm 時点でのシミュレーション結果を示す。圧子がシートおよび試験片をすり抜けるエラーが多発したが、2D モデル化によるメッシュの細分化、圧子モデル先端部を R2 μm で丸める、垂直剛性をはじめとする接触面定義の見直しにより、最終的には上記境界条件により圧子、シート、試験片が互いにすり抜けない押し込みシミュレーションに成功した。Fig.5-12(a)にシミュレーションにより生成されたディンプル形状を、Fig.5-12(b)に実際の実験により生成されたディンプル形状を示す。シミュレーションではディンプル深さが 21 μm 、ディンプル径が 150 μm のディンプルが得られ、実験ではディンプル深さが 22 μm 、ディンプル径が 128 μm のディンプルが得られる結果となった。ディンプル深さについては実験値と非常に近いシミュレーション結果が得られたが、直径に関しては約 20 μm の誤差が出た。また、押し込み時荷重は実験値が 26.3N に対しシミュレーションでは 31.5N となり誤差が生じているため、今後の課題となる。

Fig.5-13 はシミュレーションにより得られたディンプル部近傍の接点の変位を示す。各接点が図中に書き込まれた矢印の方向にしているのが分かった。表面近傍ではディンプルの中心方向に引きずられるように押し込まれている様子が観察される。ディンプル中心部では真下に圧縮される。ディンプル中心が離れていくに従い引きずり量は増えていき、ディンプルの縁の部分で最も大きくなった。その後次第に引きずり量は少なくなっていった。しかし、ディンプル中心から離れて行くにしたがい押し込み量も少なくなるために変位の方向は材料表面に鉛直な方向ではなく水平な方向に変化していった。Fig.5-14 にディンプルから離れた場所の表面における接点の変位の方向について示した。ディンプル中心から 135 μm の位置まではディンプル中心へ向かう方向に接点の変位しているのが分かる。しかし 135 μm を超えて離れていくと変位は右上の方に方向が変わり微量ながら盛り上がるのが分かった。これはディンプル形成により押しやられた金属が寄ってきている為だと考えられる。ディンプルからの距離が 520 μm を超えると変位は右下の方向へと徐々に変化していく結果が得られた。

第6章 結言

本実験条件においてレーザピーニングおよび特殊レーザピーニング実験を行いディンプル観察した結果、以下の結論を得た。

- (1) 特殊レーザピーニングでは直接レーザピーニングに比べ表面あらかの小さいなめらかなディンプルが得られ、熱影響の少ない綺麗な加工に成功した。
- (2) 直接レーザピーニングではパルスエネルギーの増加に伴いディンプル直径も大きくなる傾向を示し、本実験条件では最大ディンプル直径約 700 μm を得た。一方、ディンプル深さ・ディンプル体積は 100mJ で最大値となり、100mJ 以上では横ばいもしくは減少する傾向を示し、最大ディンプル深さ約 25 μm を得た。
- (3) 特殊レーザピーニングではディンプル直径・深さ・体積共に 100mJ で最大値をとり、100mJ 以上は横ばいもしくは減少する傾向を示し、最大ディンプル径は約 550 μm 、最大ディンプル深さは約 40 μm を得た。パルスエネルギーを増加させるほどディンプル形状はおわん型から底の狭いV字型に変化し体積が減少していく事が分かった。
- (4) 特殊レーザピーニングではディンプル直径におよぼすシート厚さの影響は確認できなかった。一方、ディンプル深さにおいてはシート厚さが薄いほどより深いディンプルが得られた。また、過大な実験条件ではシートに破れが見られた。
- (5) ディンプル直径およびディンプル深さにおよぼす板厚の影響はデータにばらつきが多く今後の課題となる。ただし、特殊レーザピーニングにおいて、板厚が薄いほど大きいディンプルが生成できるような傾向が見られた。

- (6) 本研究における全条件において、特殊レーザーピーニングで得られたディンプル深さ $d(\mu\text{m})$ をパルスエネルギー $E(\text{mJ})$ 、ショット数 n 、板厚 $t(\text{mm})$ 、シート厚さ $s(\mu\text{m})$ を用いた以下の実験式で表すことができた。

$$d = a \ln E - b$$

ただし、

$$a = (2.2n + 0.4) + (0.8n - 1.1)(1 - t)/0.4 + (1.3 - 0.6n)(s - 20)/20$$

$$b = (5.0n + 1.0) + (2.5n - 4.6)(1 - t)/0.4 + (4.4 - 0.7n)(s - 20)/20$$

本実験条件において特殊レーザーピーニング実験を行い X 線回折により測定した結果、以下の結論を得た。

- (1) 特殊レーザーピーニングにより圧縮残留応力を生成する事が確認できた。得られた圧縮残留応力は 2 つのピークをもち、ディンプル底辺近傍では一時的に圧縮残留応力が低下する結果が得られた。
- (2) ディンプル計測実験と同様に課題な条件ではシートに破れがみられ、本実験条件では 100mJ で急激にシート破れ孔数が増加した。
- (3) 適正条件内で行なった特殊レーザーピーニングではパルスエネルギーを増加させるほど得られる最大圧縮残留応力は増加し、圧縮の残留応力を付加できる領域が深くなる結果を得た。

本実験条件において静的荷重による押し込み実験と静的押し込みシミュレーションを行なった結果、以下の結論を得た。

- (1) 静的押し込み実験により深さ $22\mu\text{m}$ 、直径 $128\mu\text{m}$ のディンプルが生成されることが確認された。
- (2) 圧子、シートおよび試験片間ですり抜けの見られない静的押し込みシミュレーションに成功した。
- (3) 静的押し込みシミュレーションにより深さ $21\mu\text{m}$ 、直径 $150\mu\text{m}$ のディンプルを生成することができた。深さについては誤差のないシミュレーション結果を得ることができた。最大荷重および直径については誤差が大きく出、今後の課題となる。

参考文献

- [1] 佐野雄二：高出力レーザーの水中照射による金属材料表面の残留応力改善
レーザー加工学会 Vol.9, No.2 (2002) 163-170
- [2] 佐野雄二：レーザーピーニングによる構造材料の寿命延長
軽金属溶接(軽金属溶接構造協会誌) Vol.46-No.11 (2008) 523-526
- [3] 電気学会編：レーザーアブレーションとその応用
コロナ社 (1999)
- [4] 小原實・荒井恒憲・緑川克美：レーザー応用工学
コロナ社 (1998)
- [5] M.Kutsuna , H.Inoue , K.Saito , K.Amano : Improvementt of fatigue Strength and Friction Energy Loss of Machinery Parts by Indirect Laser Peening
Proceedings of IIW International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies, (2009) 89-94
- [6] 井上裕喜 沓名宗春 水谷春樹：特殊レーザーピーニングによるアルミニウム合金の表面改質
溶接学会全国大会講演概要 第 83 集 (2008-9)
- [7] N. C. Andenholm : Laser-generated stress waves
Applied Physics letters, Vol.16, No.3(1970). 113-115
- [8] 吉田正典：レーザー誘起衝撃波の発生とその特徴
プラズマ・核融合学会誌 第 80 巻 6 号 (2004) 427-431
- [9] Yuji Sano, Naruhiko Mukai, Koki Okazaki, Minoru Obata : Residual stress improvement in metal surface by under water laser irradiation,
Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B121 (1997) 432-436

- [10] L.Benthe, R.Fabbro, P.Peyre, L.Tolier, E.Bartnicki : Shock wave from a water-confined laser-generated plasma,
Journal of Applied Physics. Vol.82, No.6 (1997) 2826-2832
- [11] 小原實・神成文彦・佐藤俊一 : レーザ応用光学 共立出版 (1998)
- [12] 田中啓介・鈴木賢治・秋庭義明 : 残留応力の X 線評価 —基礎と応用—
養賢堂 (2006)
- [13] 後藤徹・大谷眞一 : X 線応力測定法の基礎
材料(日本材料学会誌) Vol47, No.11 (1998) 1188-1194
- [14] B.D.CULLITY (訳 松村源太郎) : X 線回折要論 アグネ社 (1980)
- [15] ショットピーニング技術協会 : 金属疲労とショットピーニング
現代工学社 (2004)
- [16] ショットピーニング技術協会 : ショットピーニングの方法と効果
日刊工業新聞社 (1997)
- [17] 日本金属学会編 : 材料開発のための顕微鏡法と応用写真集
透過電子顕微鏡用薄膜試料作成手法一覧
- [18] Yajun Fan, Youneng Wang, Sinisa Vukelic, Y. Lawrence Yao : Wave-solid interactions in shock induced deformation processes,
Laser Materials Processing Conference. (2005) 479-487
- [19] 菊池文雄 : 有限要素法概説 —理工学における基礎と応用—
サイエンス社 (1999)
- [20] H.B.ノビコフ(共訳 細見暁・久下修平) : ダイヤモンドの物性 オーム社 (1993)

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切な指導をして頂いた三重大学工学部の鈴木実平教授、川上博士准教授、尾崎仁志助教に深く感謝いたします。特に多忙の中、LP,ILP 実験、ディンプル計測、装置制作、実験手法、参考文献調査等、研究全般にわたり惜しみない協力と援助をして頂いた川上博士准教授には改めて深く感謝を致します。

また、本研究は(株)最新レーザ技術研究センターの沓名宗春氏、井上裕喜氏との共同研究によるものです。本研究を進めるにあたり惜しみない協力と援助を頂きました両氏に深く感謝いたします。

なお、本研究で用いたデータは三重大学工学部平成 22 年度卒業の松島尚平君との共同研究によるものと、三重大学工学部平成 22 年度卒業の表宏樹君に提供して頂いたものです。ここに記して、深く感謝致します。最後に本研究を遂行するにあたりご協力頂きながらここに御氏名を掲載できなかった方々に対し、その非礼をお詫びすると共に謹んでお礼申し上げます。

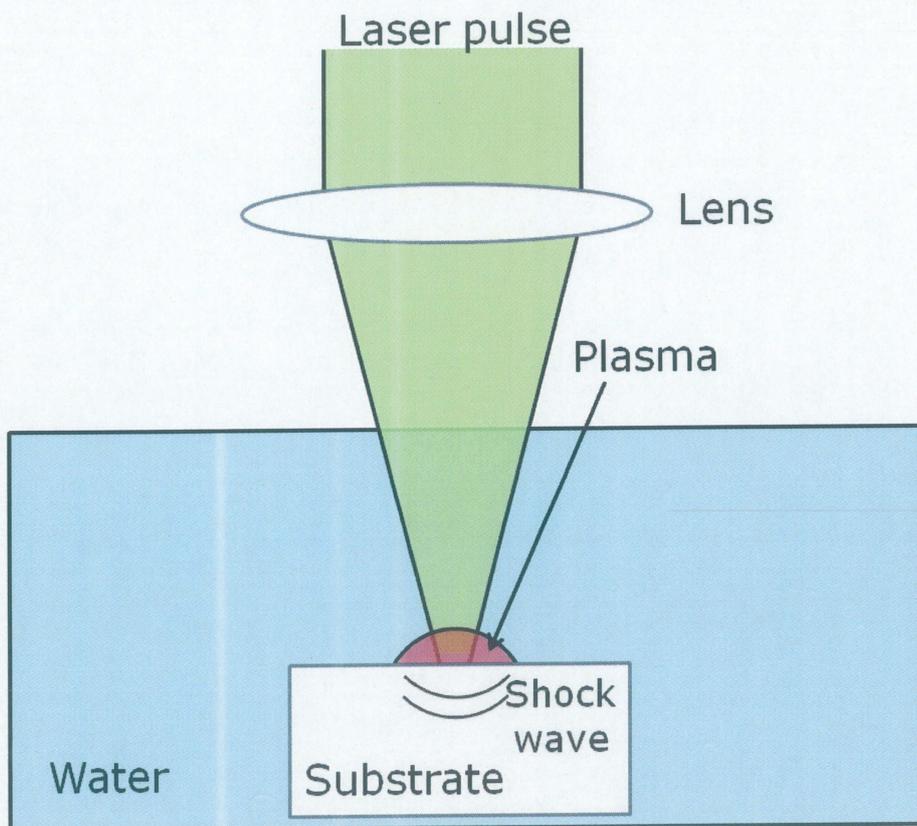


Fig.1-1 Fundamental process of laser peening during irradiation.

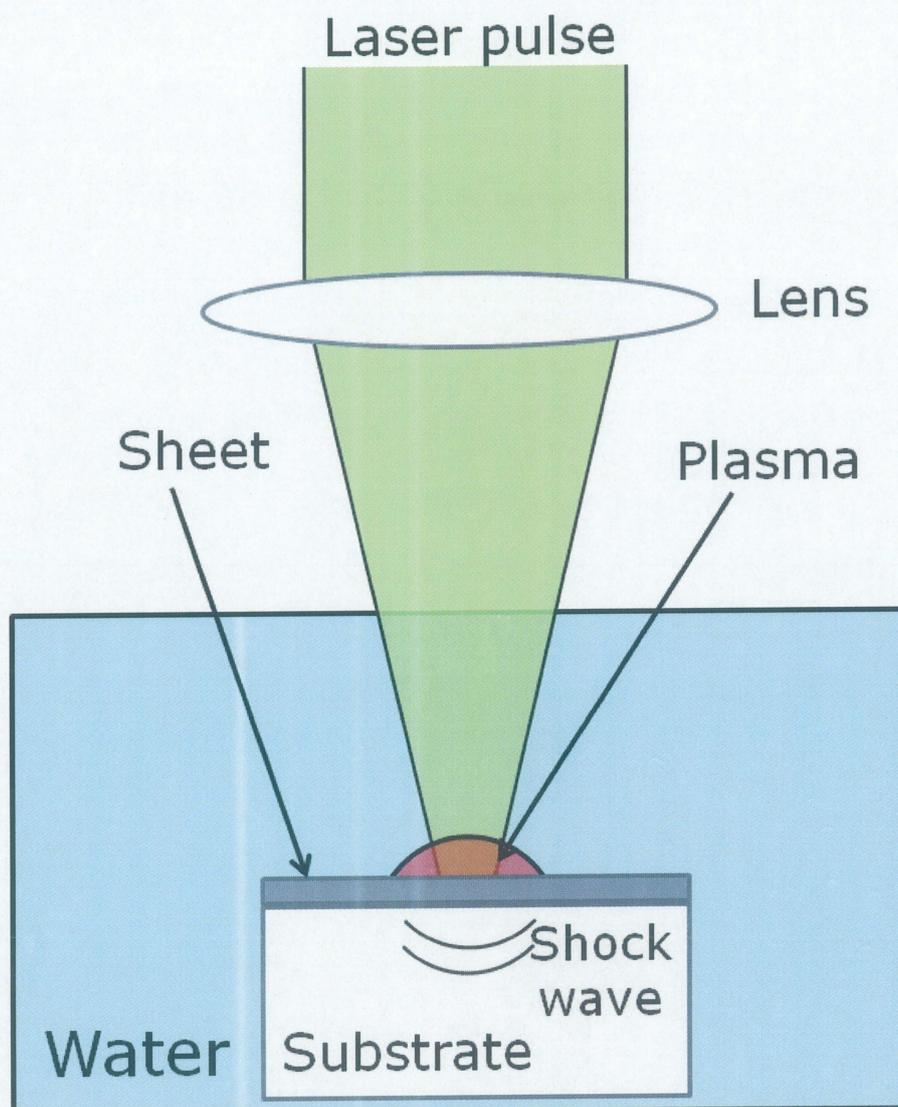


Fig.1-2 Fundamental process of indirect laser peening during irradiation.

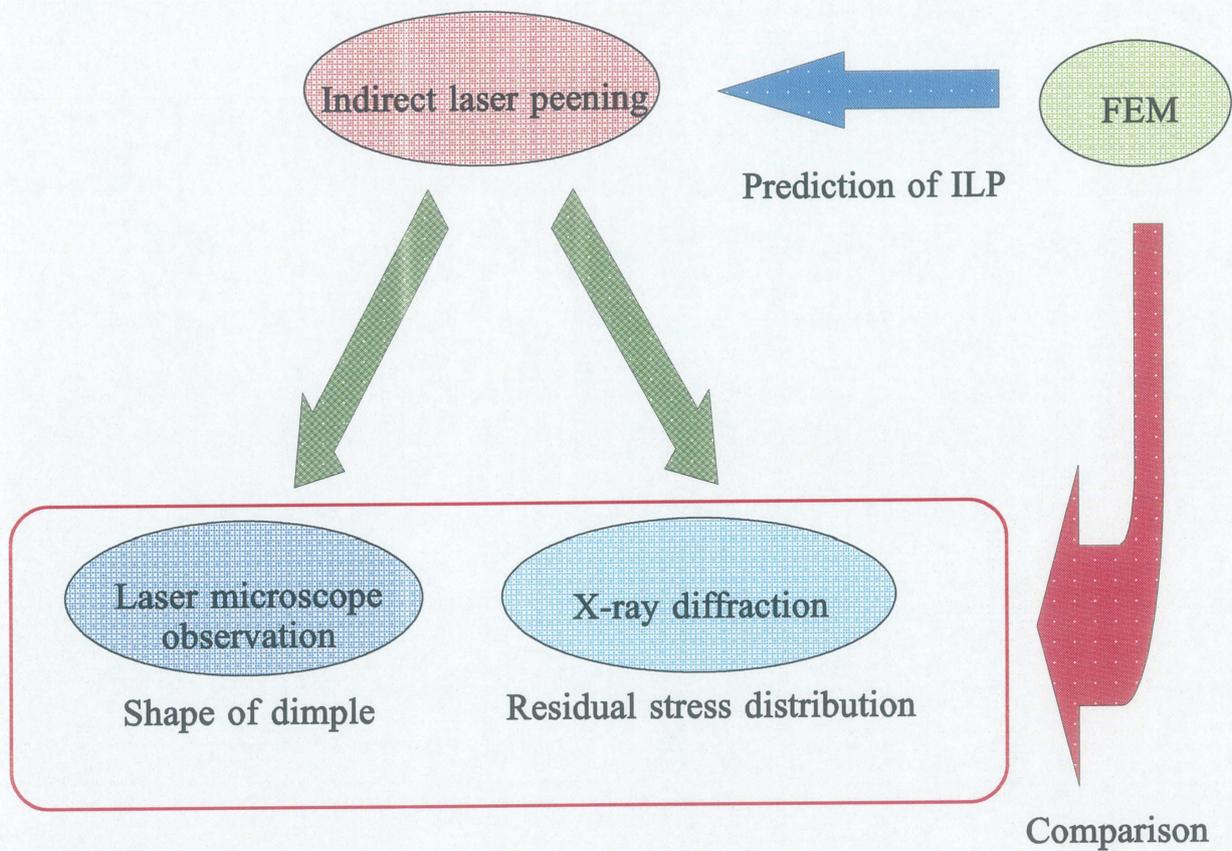


Fig.1-3 Outline of this study.

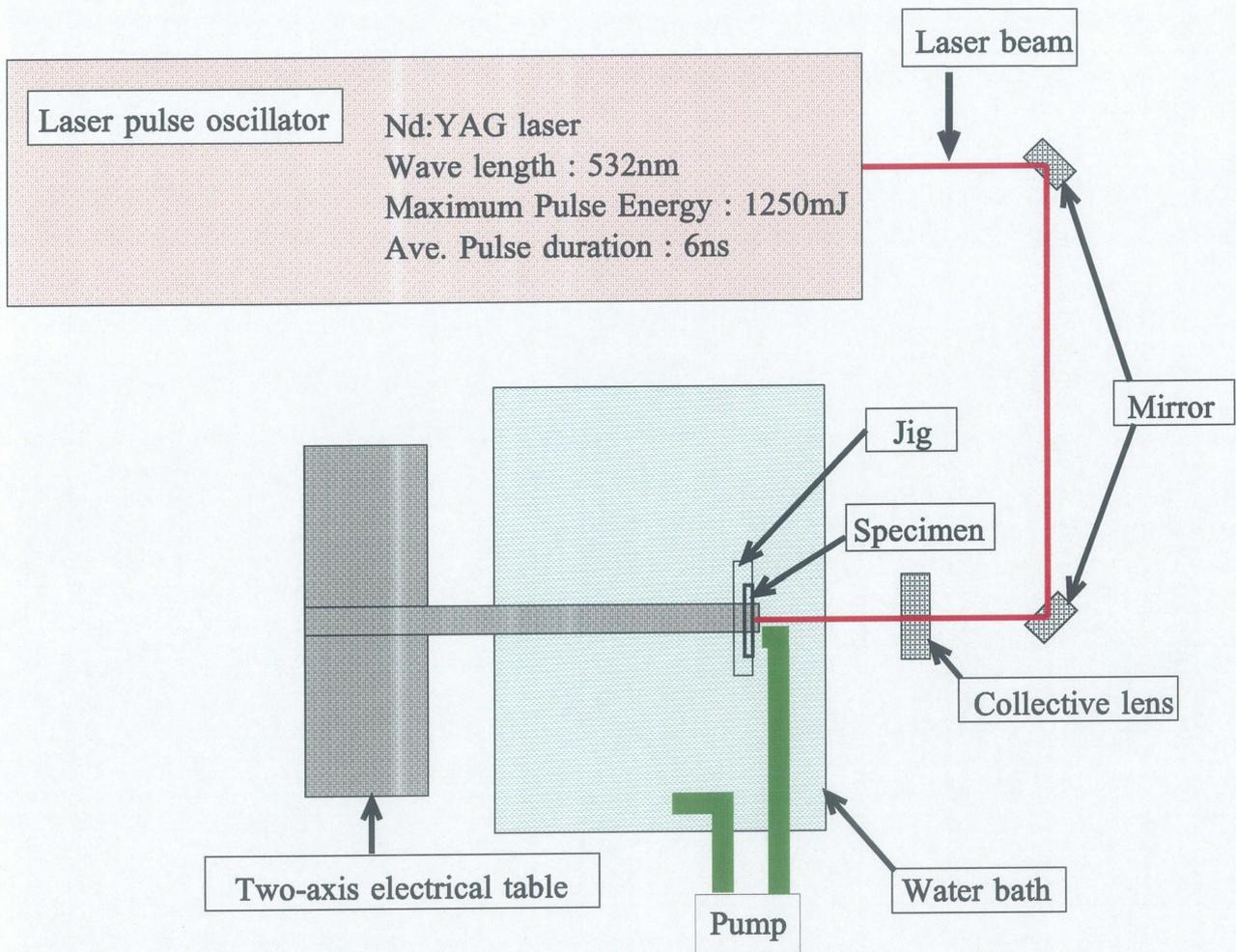


Fig.2-1 Schematic diagram of laser peening equipment.

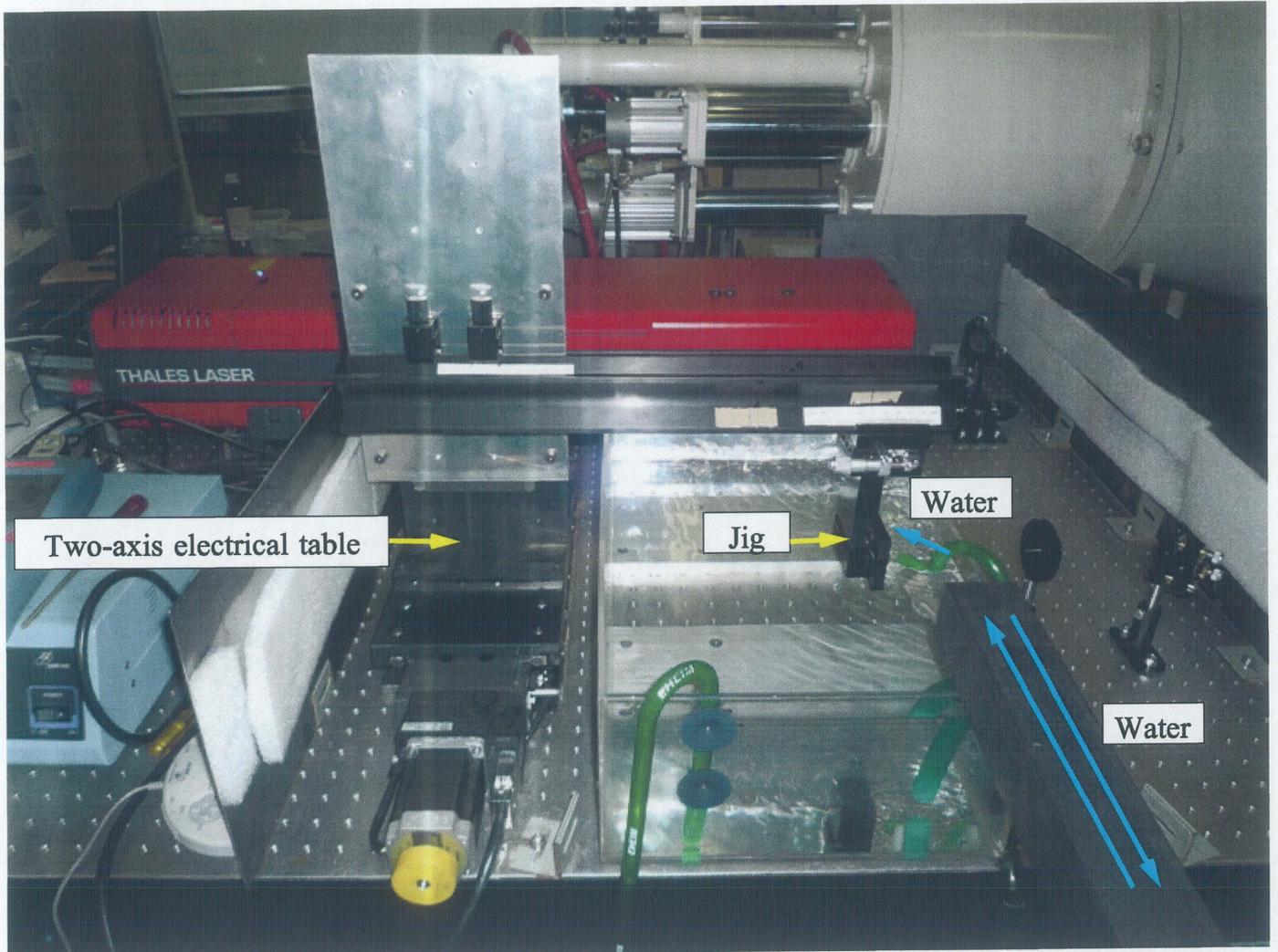
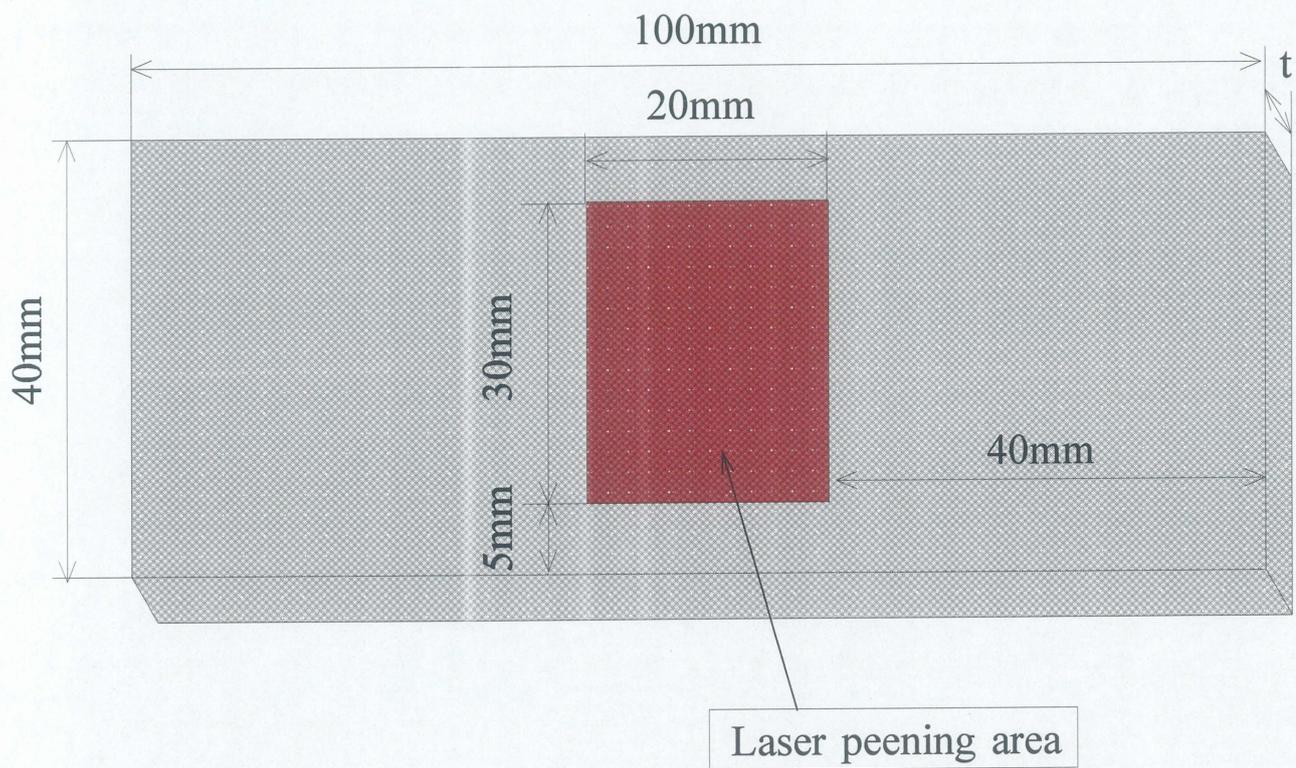
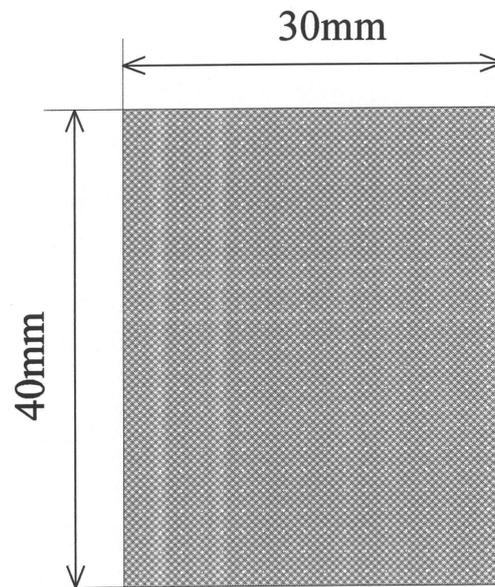


Fig.2-2 Photograph of laser peening equipment.



Material : SUS304
Thickness t : 0.3, 0.6, 1.0 [mm]

Fig.2-3 Dimension of specimen and laser peening area.



Material : SUS304

Thickness s : 10, 20, 30, 40 [μm]

Fig.2-4 Dimension of metal sheet.

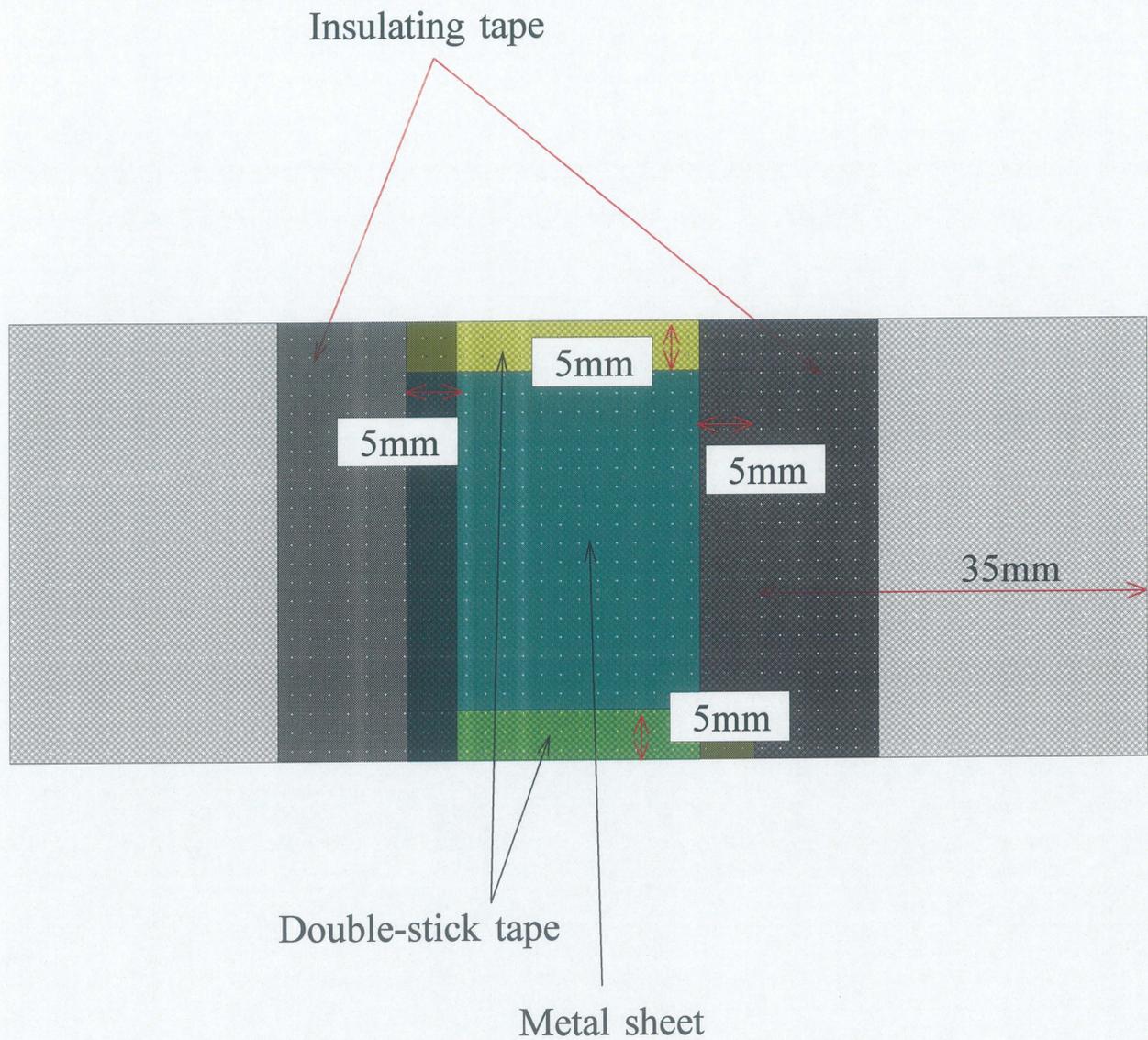


Fig.2-5 Shape of specimen with metal sheet.

Table 2-1 Chemical compositions of SUS304 stainless steel.

(unit mass%)

Type	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
SUS304	~0.04	0.50	0.92	0.033	0.004	8.13	18.08	Bal

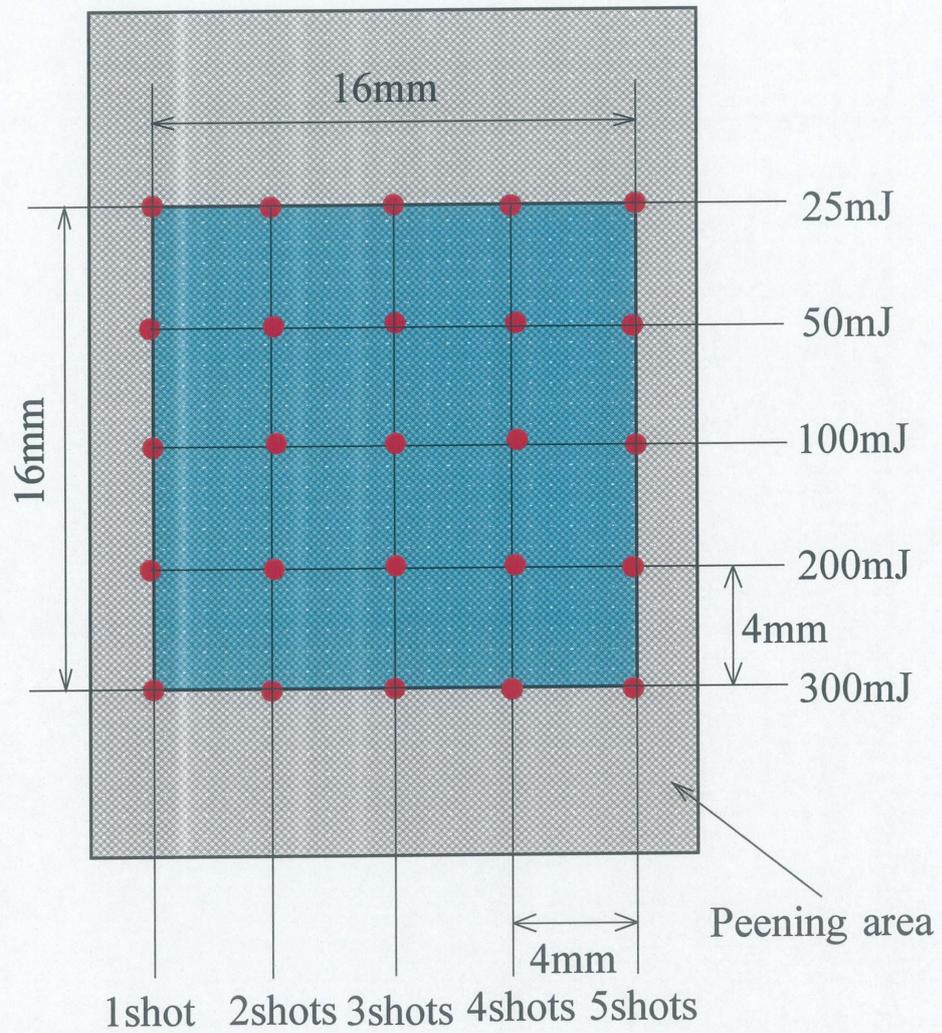
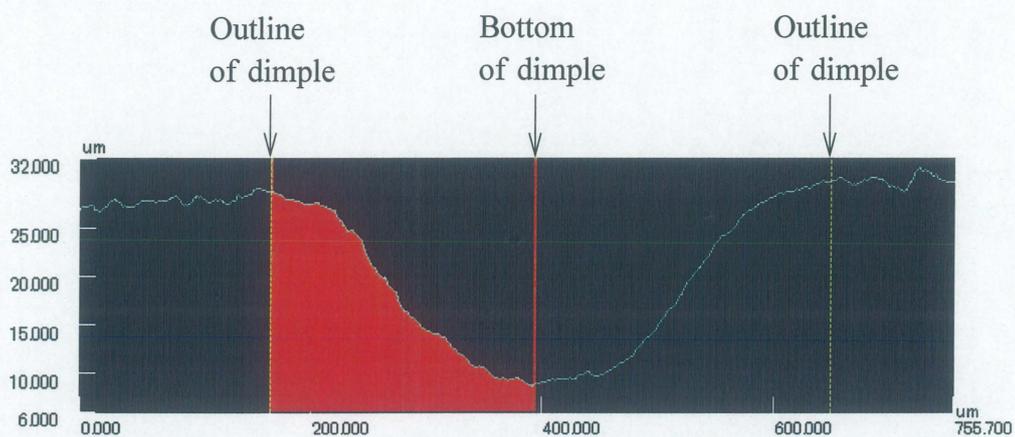


Fig.3-1 Laser irradiation points and pattern.



プロフィール1	水平距離	高度差	高さ平均	角度	断面長さ	断面積	R	コメント
全体	755.700um	2.689um	22.220um	0.204°	761.547um	16807.21...		
区分1	484.668um	0.968um	18.651um	0.114°	488.850um	9046.291...		
区分2	227.454um	19.830um	18.471um	4.982°	229.775um	4212.923...		
区分3								
区分4								
区分5								
区分6								
区分7								
区分8								
区分9								
区分10								
合計	712.122um	20.798um	37.122um	5.097°	718.625um	13259.21...		
最大	484.668um	19.830um	18.651um	4.982°	488.850um	9046.291...		
最小	227.454um	0.968um	18.471um	0.114°	229.775um	4212.923...		
平均	356.061um	10.399um	18.561um	2.548°	359.312um	6629.607...		
標準偏差	128.607um	9.431um	0.090um	2.434°	129.537um	2416.684...		
3σ	385.822um	28.292um	0.271um	7.302°	388.612um	7250.052...		

プロフィール1
 補正処理：光量スムージング無し、DCL/BCL無し、高さスムージング ±8 単純平均、傾き補正 直線(自動)
 基準値1：41.353um
 基準値2：0.000um
 段差：41.353um

Fig.3-2 One of results for shape of dimple by laser microscope.

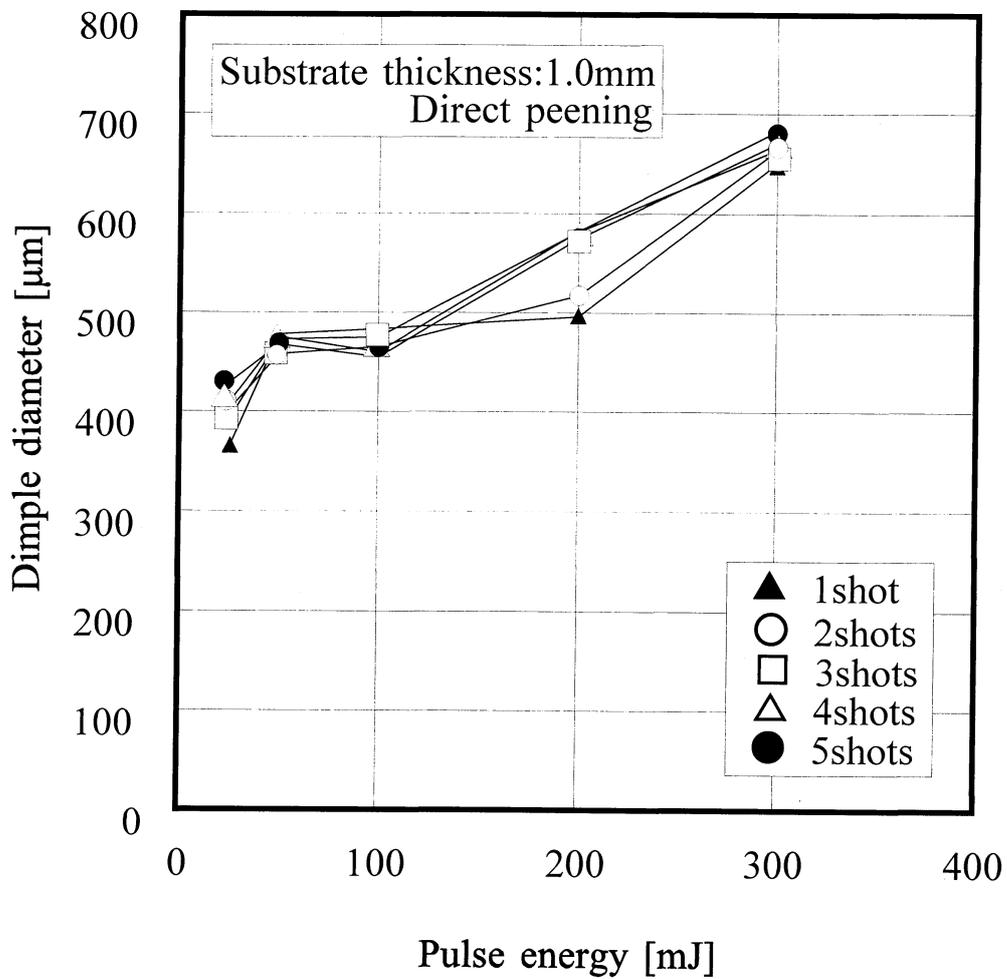


Fig.3-3 Relation between dimple diameter and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 1.0mm.

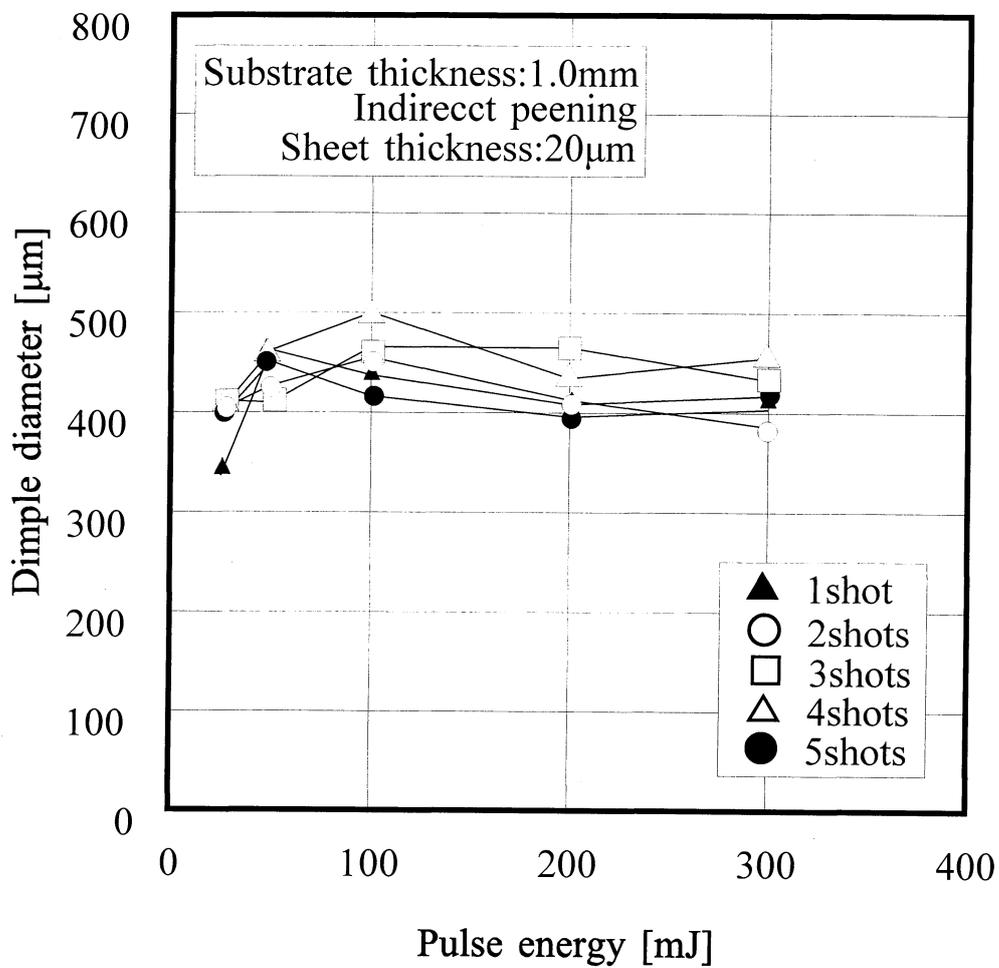


Fig.3-4 Relation between dimple diameter and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 20 μ m.

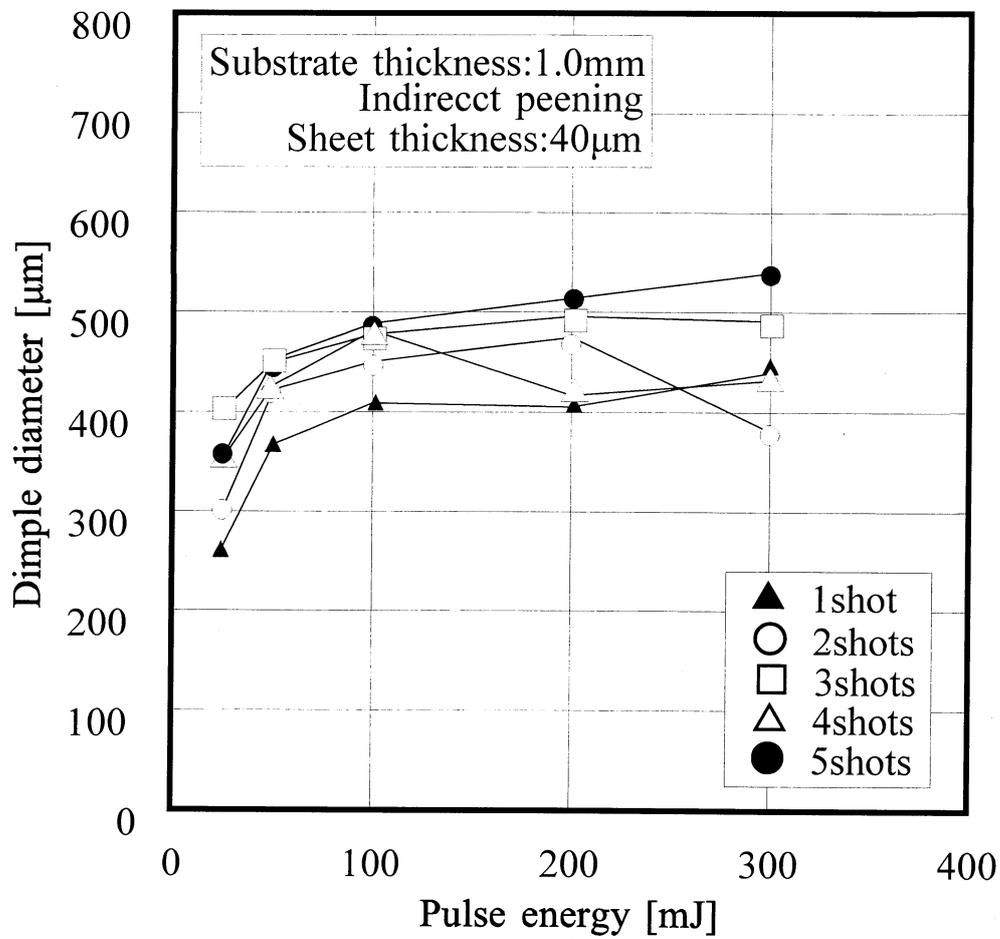


Fig.3-5 Relation between dimple diameter and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 40 μ m.

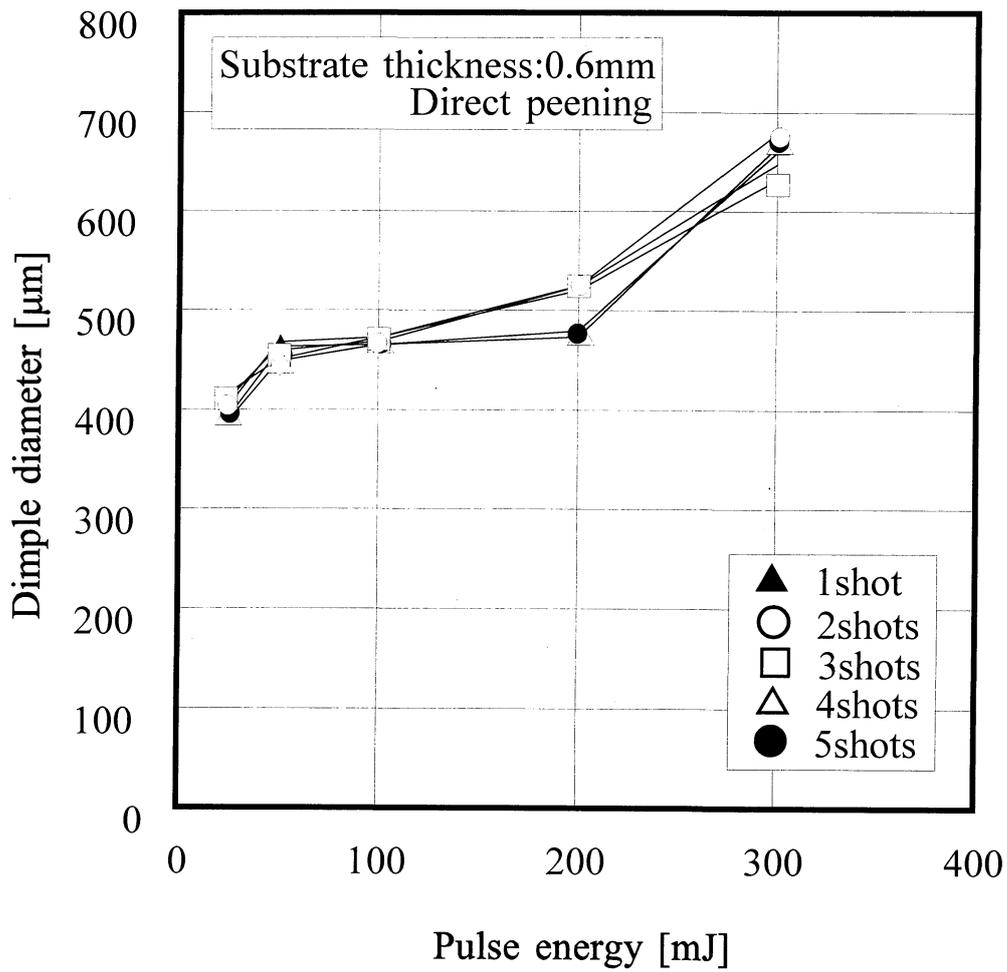


Fig.3-6 Relation between dimple diameter and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 0.6mm.

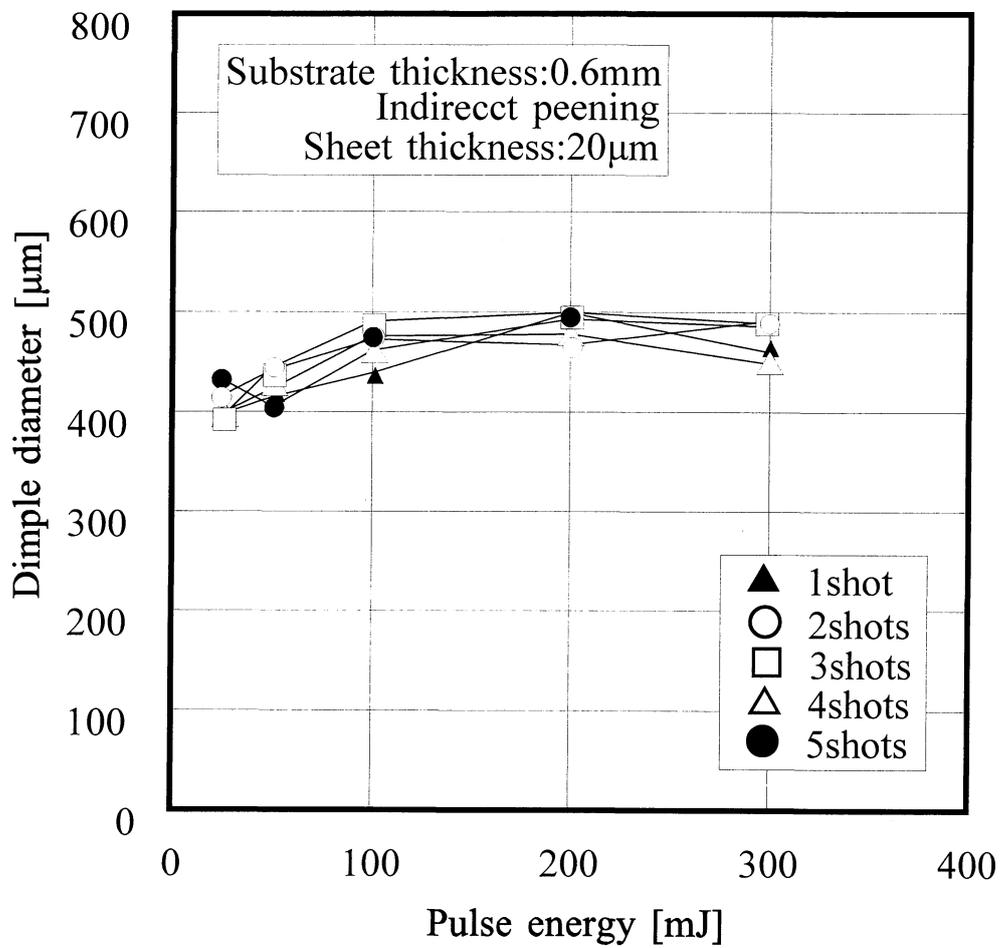


Fig.3-7 Relation between dimple diameter and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 20 μ m.

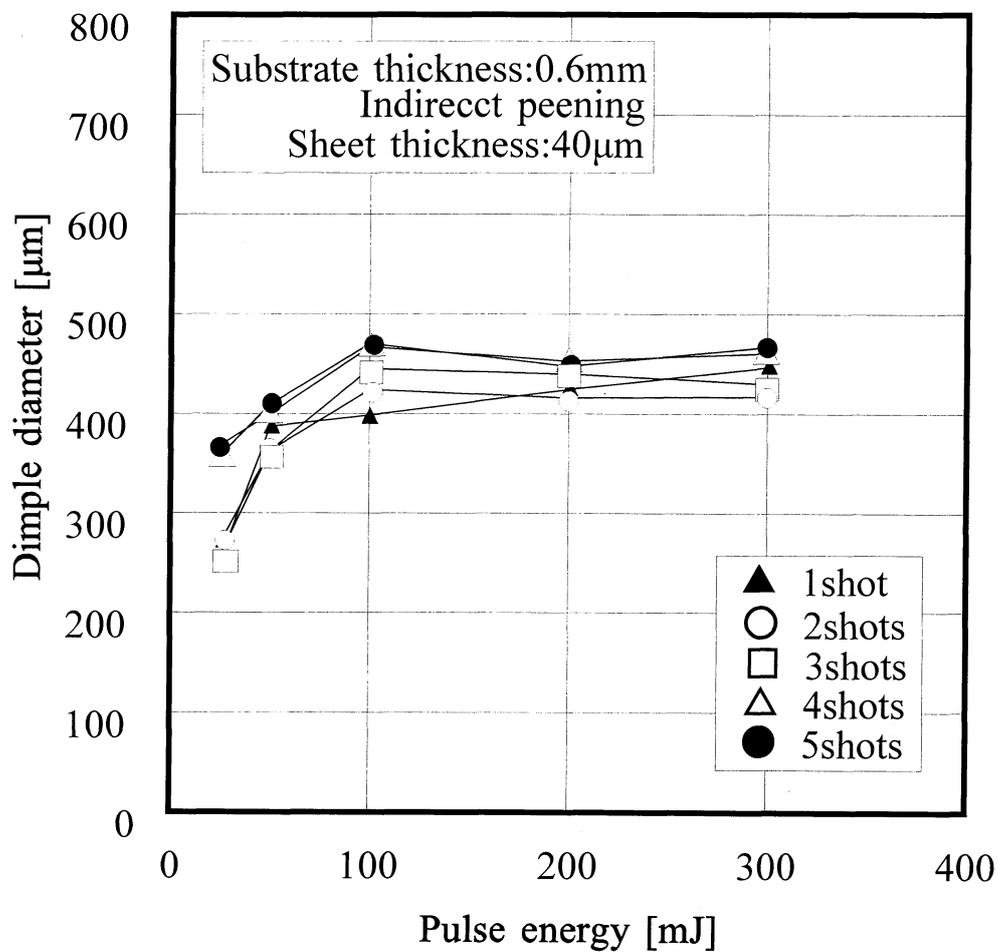


Fig.3-8 Relation between dimple diameter and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 40 μ m.

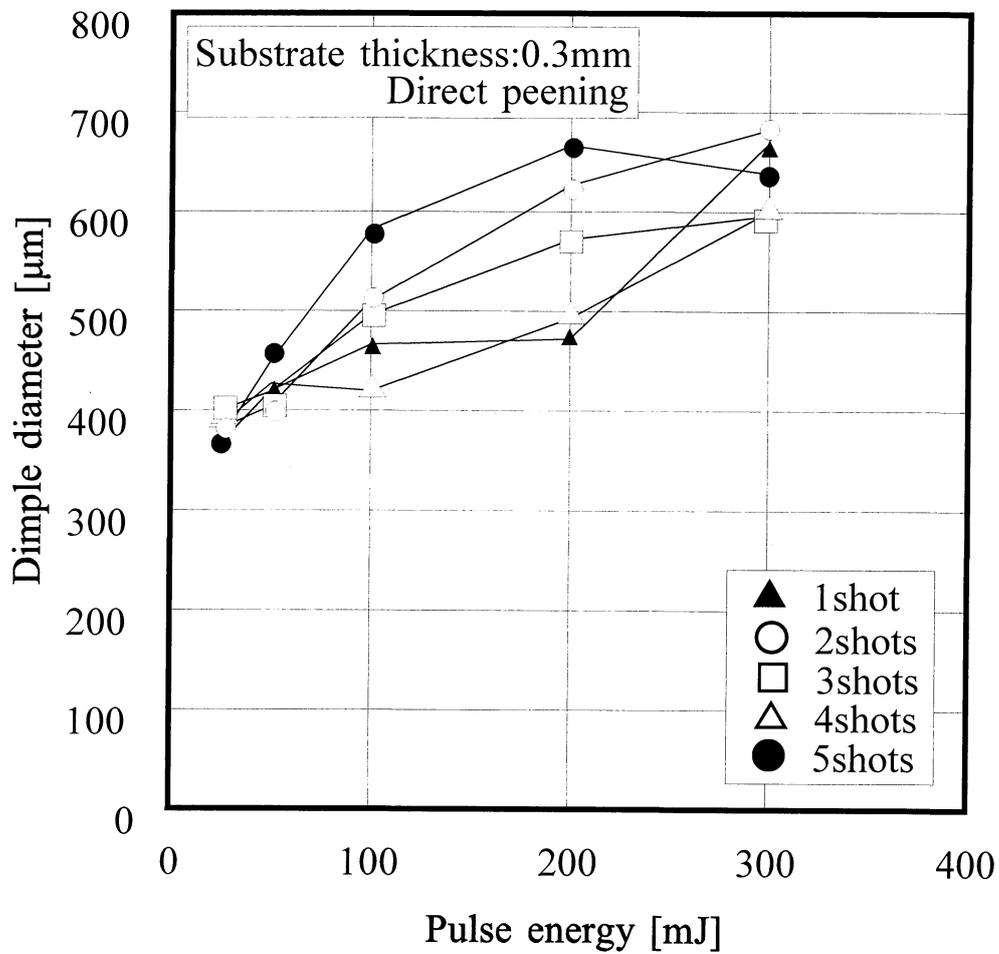


Fig.3-9 Relation between dimple diameter and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 0.3mm.

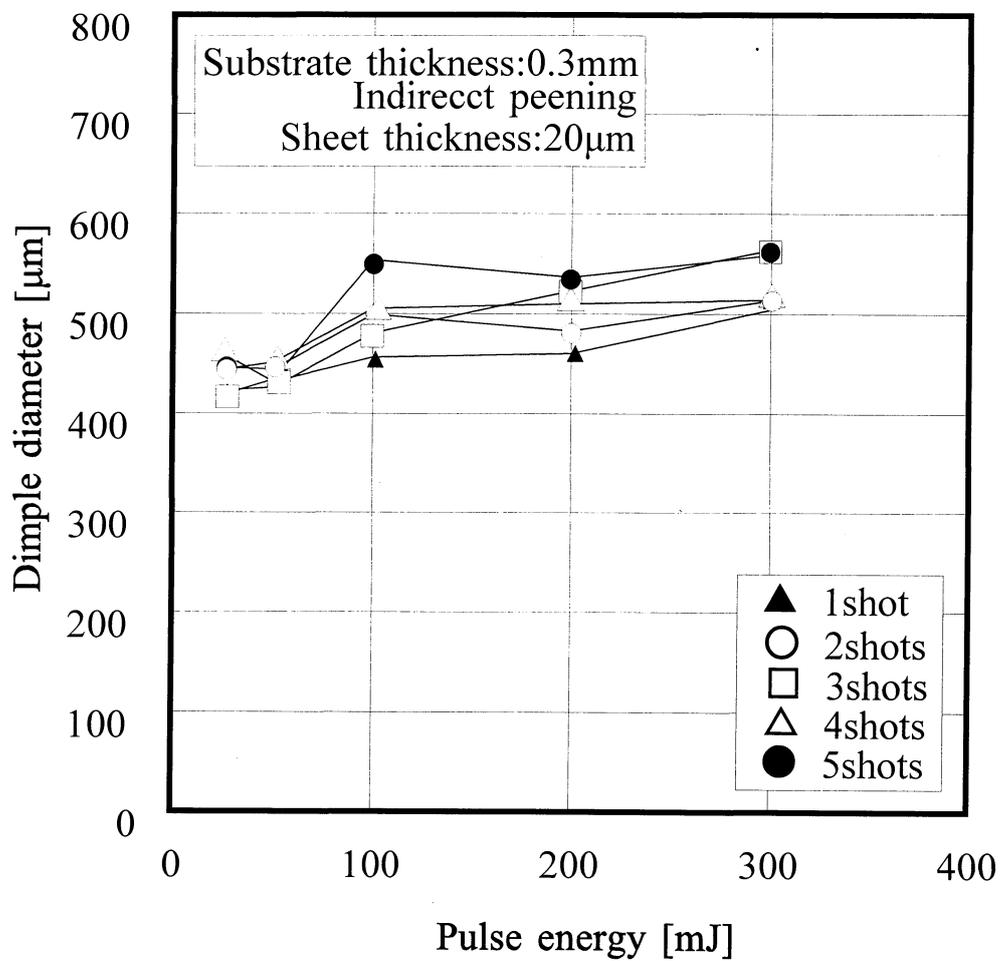


Fig.3-10 Relation between dimple diameter and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, sheet thickness : 20 μ m.

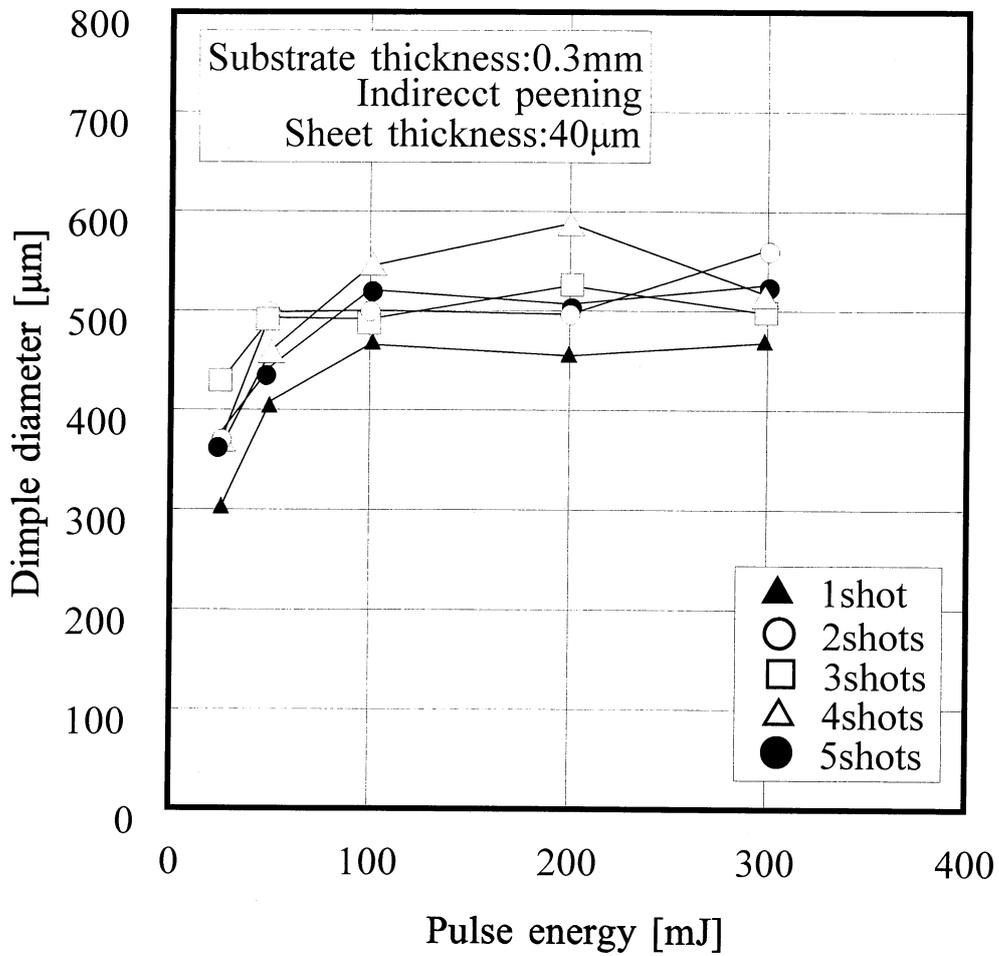


Fig.3-11 Relation between dimple diameter and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, sheet thickness : 40 μ m.

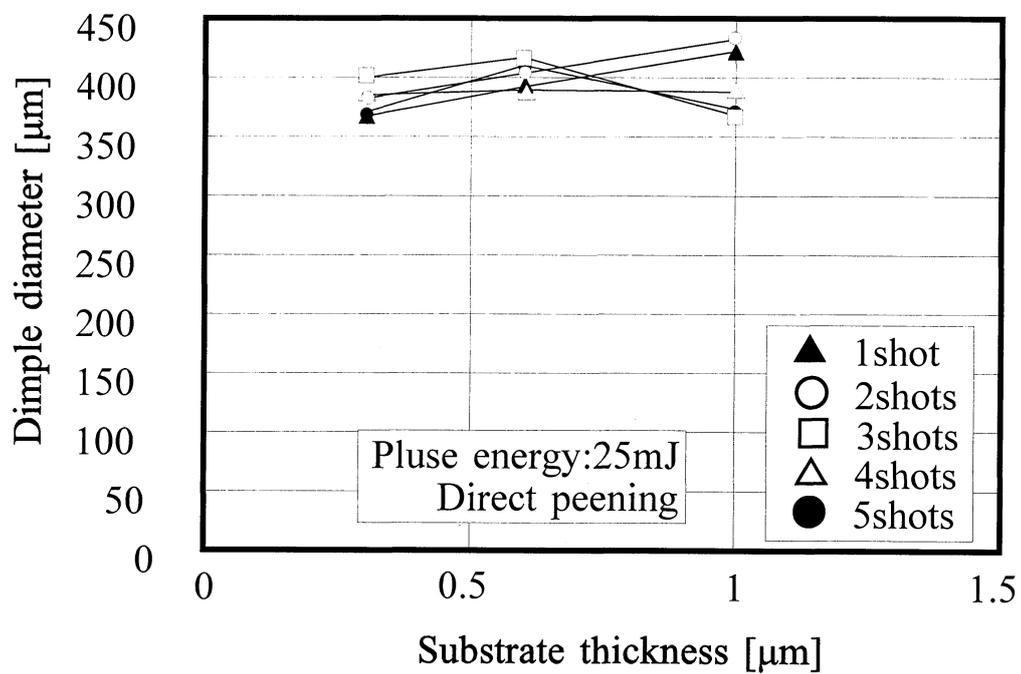


Fig.3-12 Relation between dimple diameter and substrate thickness at direct laser peening; Pulse energy : 25mJ.

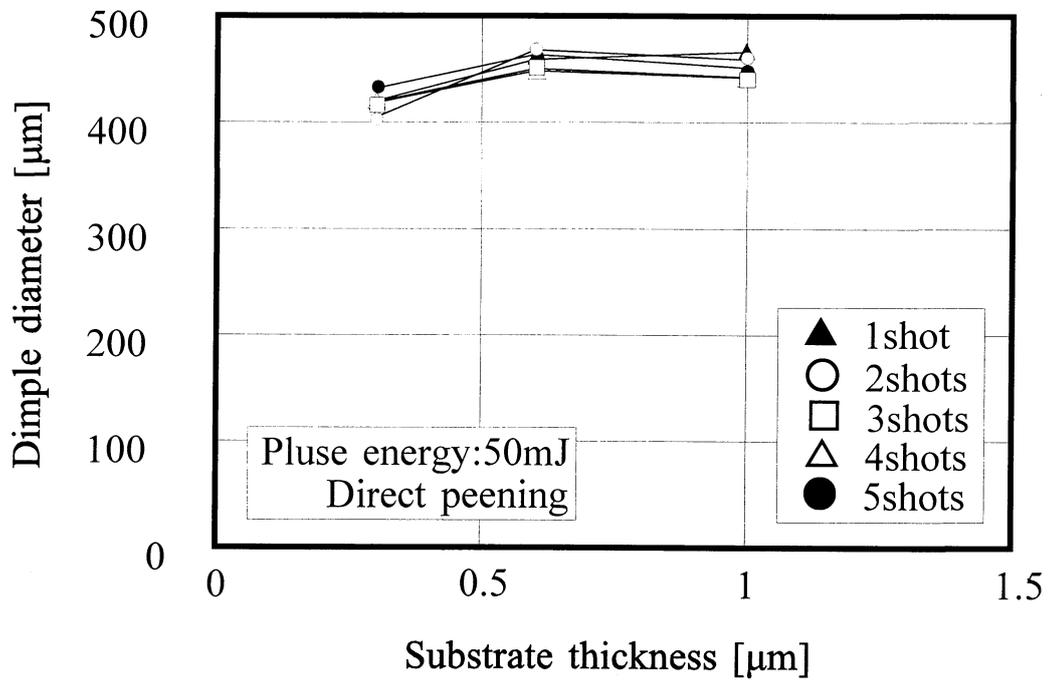


Fig.3-13 Relation between dimple diameter and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 50mJ.

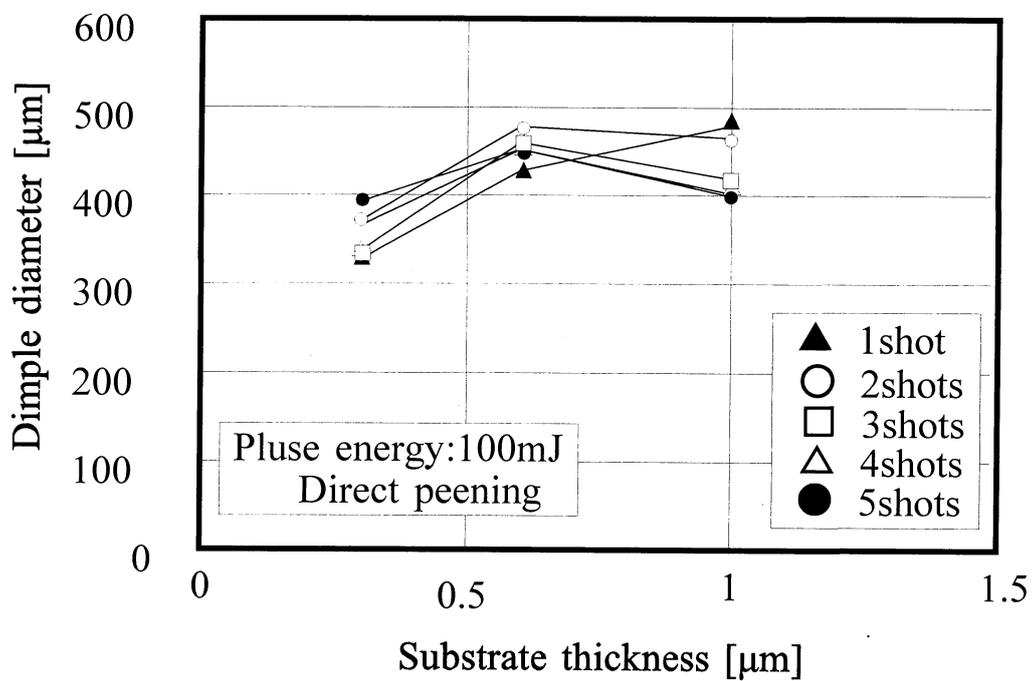


Fig.3-14 Relation between dimple diameter and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 100mJ.

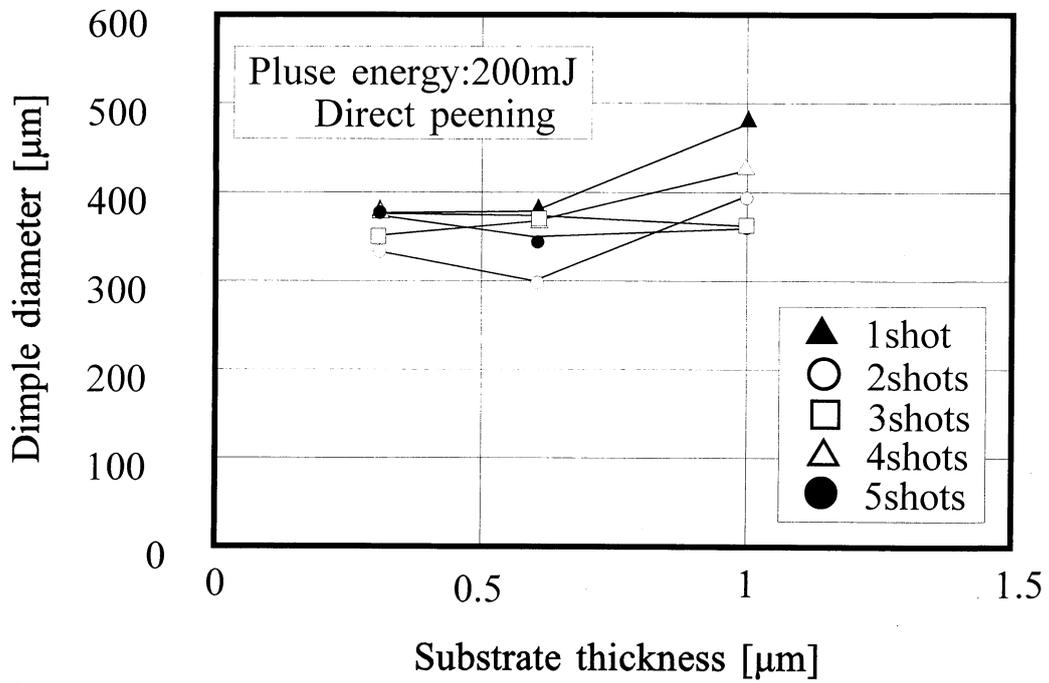


Fig.3-15 Relation between dimple diameter and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 200mJ.

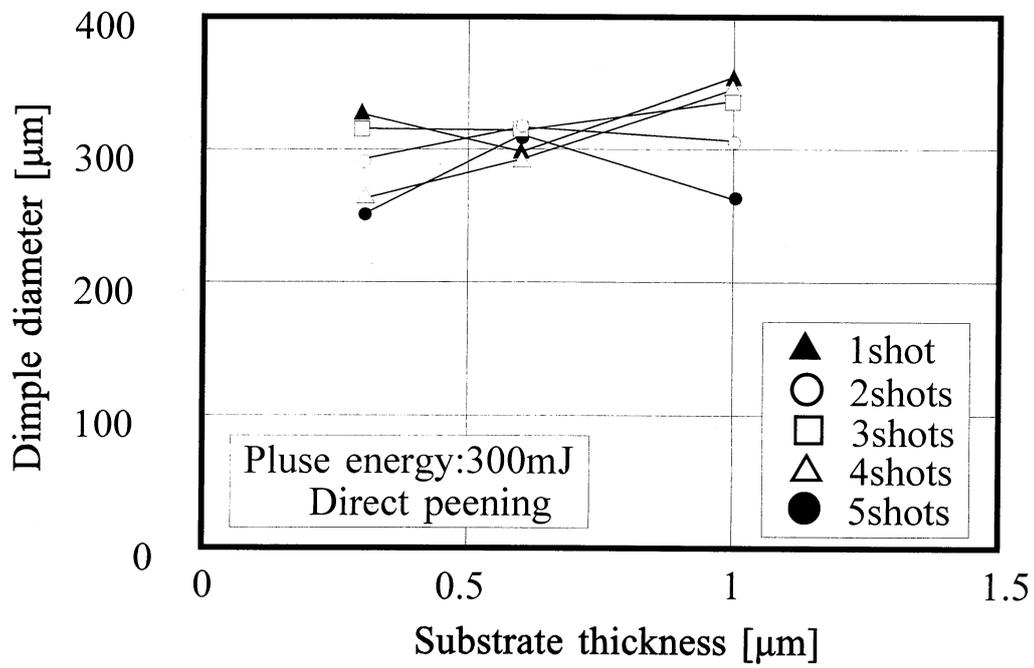


Fig.3-16 Relation between dimple diameter and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 300mJ.

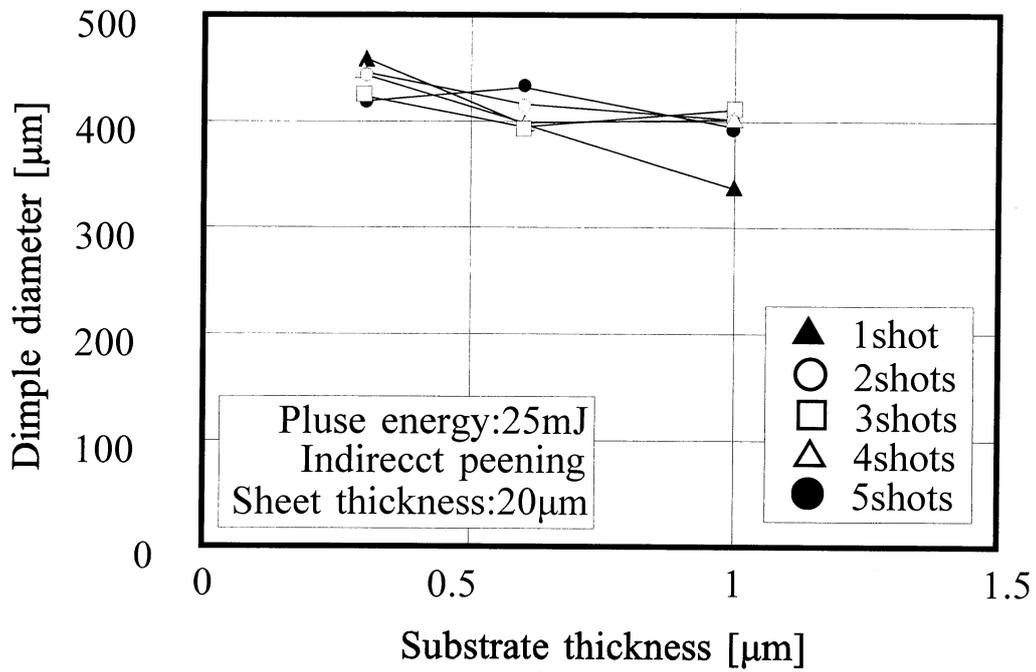


Fig.3-17 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 25mJ, sheet thickness : 20μm.

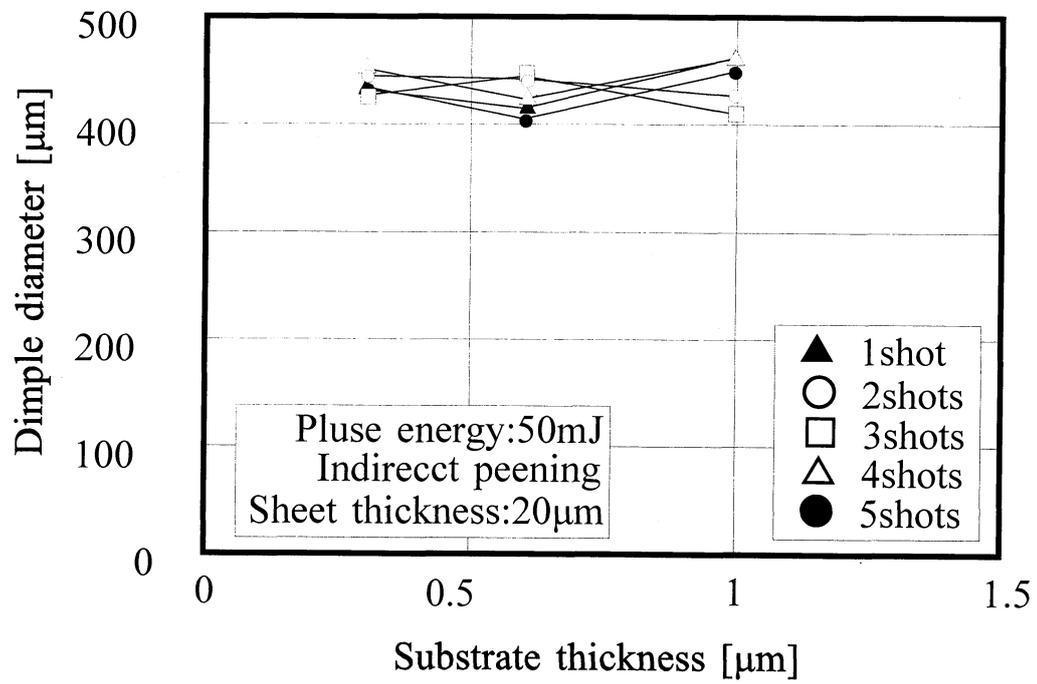


Fig.3-18 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 50mJ, sheet thickness : 20μm.

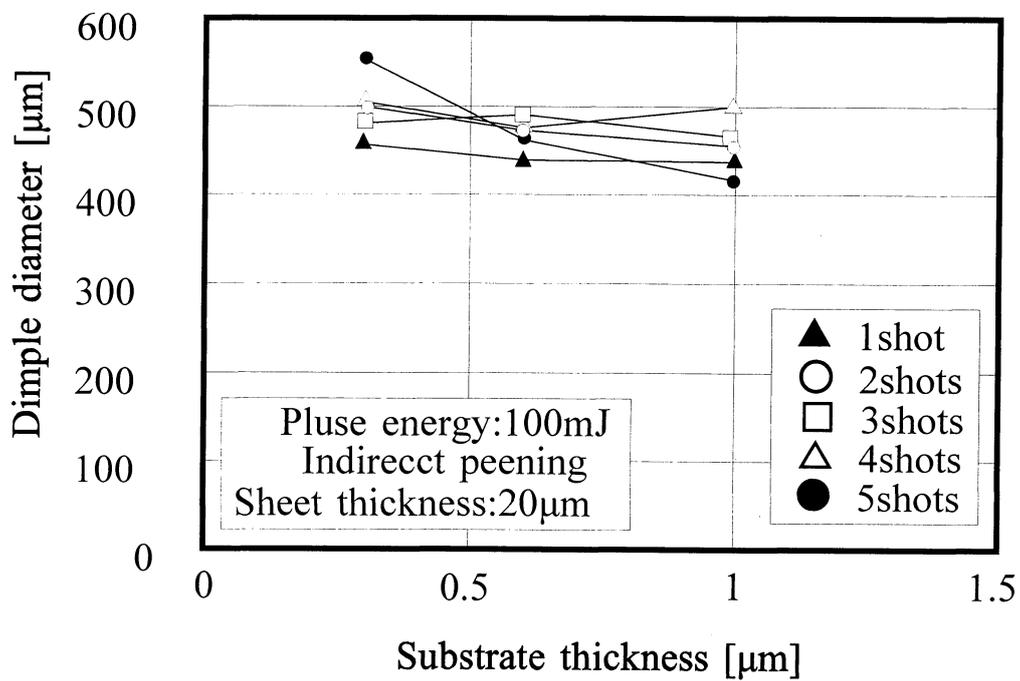


Fig.3-19 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 25mJ, sheet thickness : 20μm.

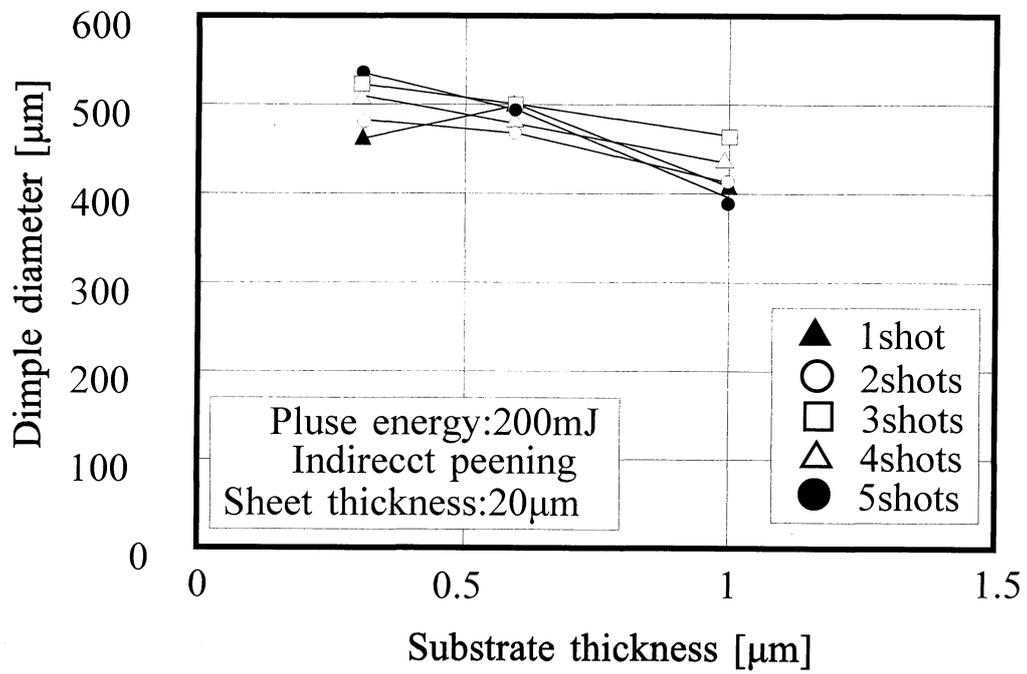


Fig.3-20 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 200mJ, sheet thickness : 20μm.

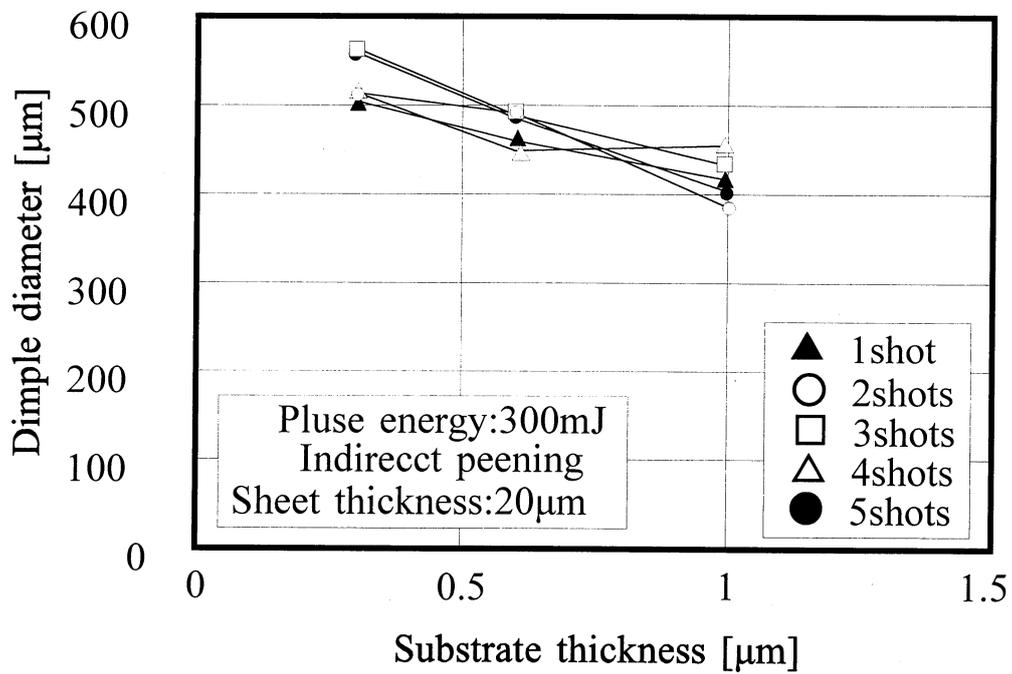


Fig.3-21 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 300mJ, sheet thickness : 20μm.

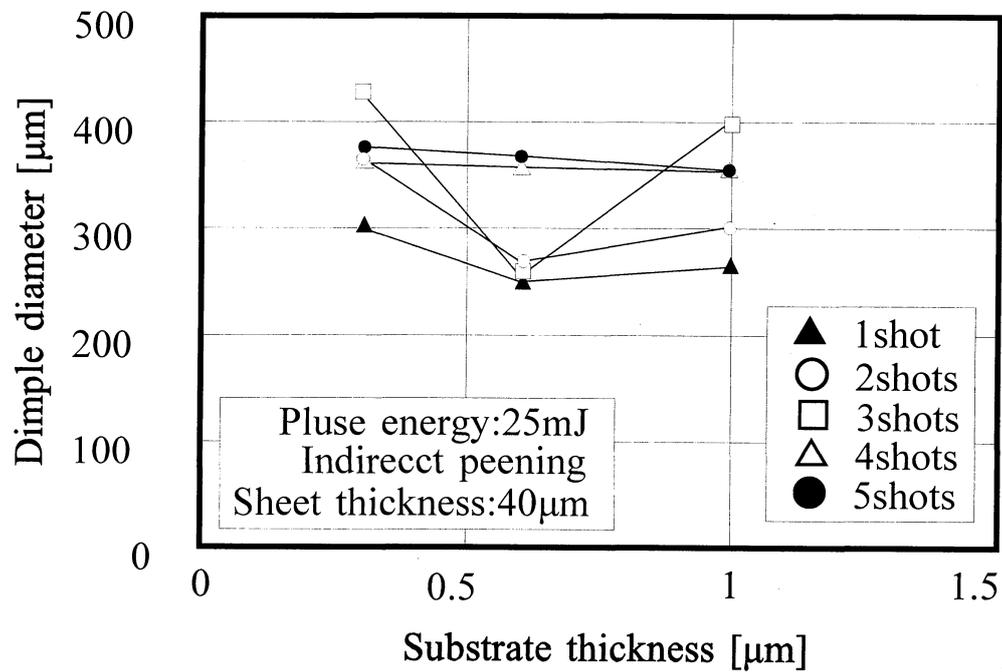


Fig.3-22 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 25mJ, sheet thickness : 40μm.

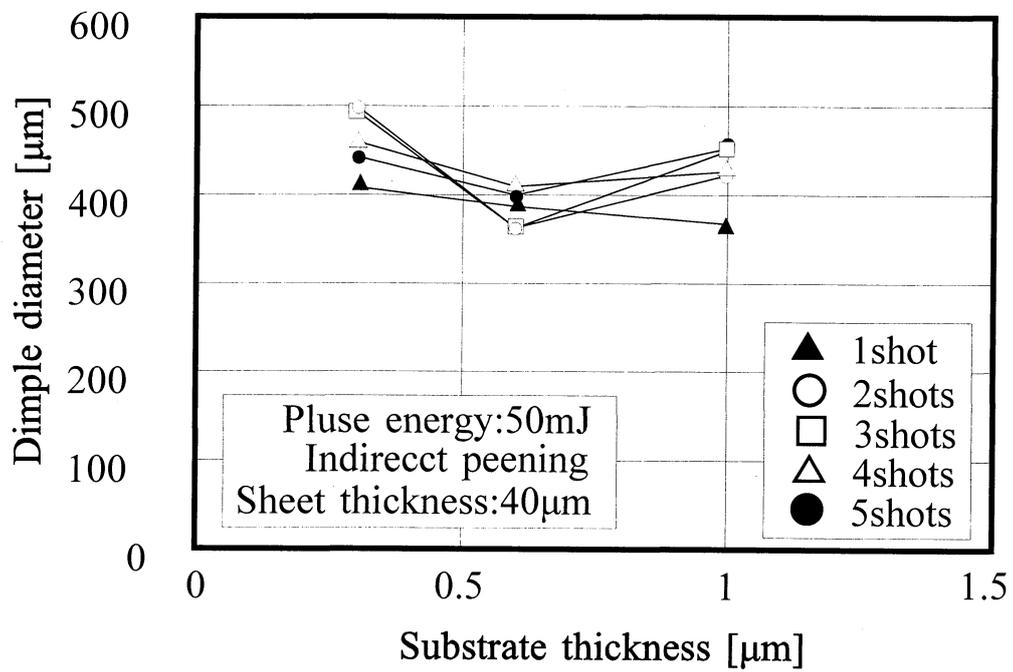


Fig.3-23 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 50mJ, sheet thickness : 40μm.

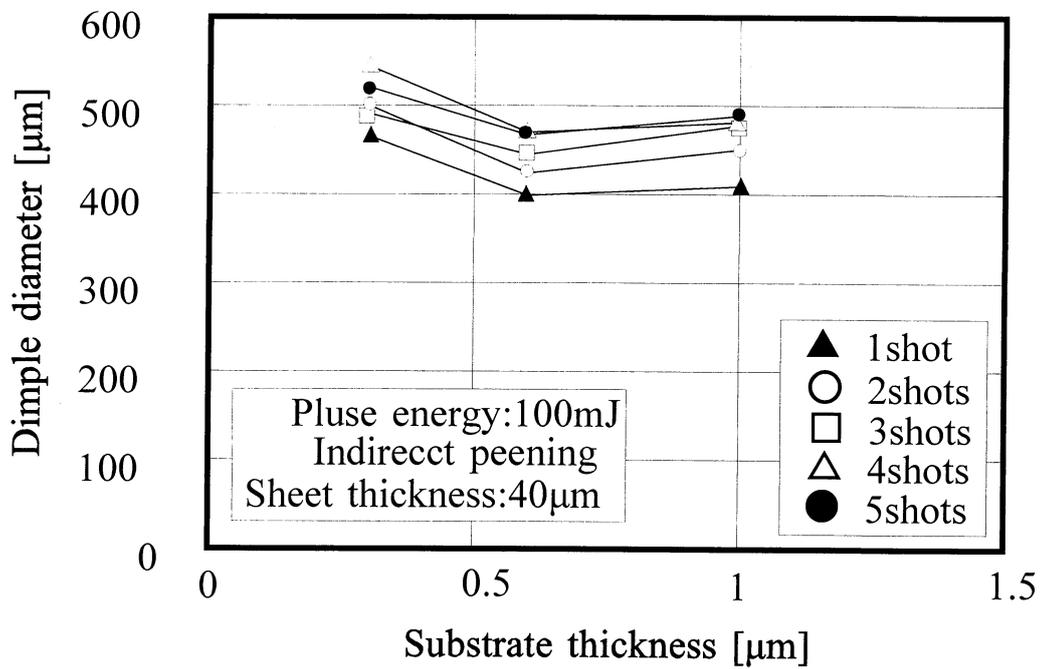


Fig.3-24 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 100mJ, sheet thickness : 40μm.

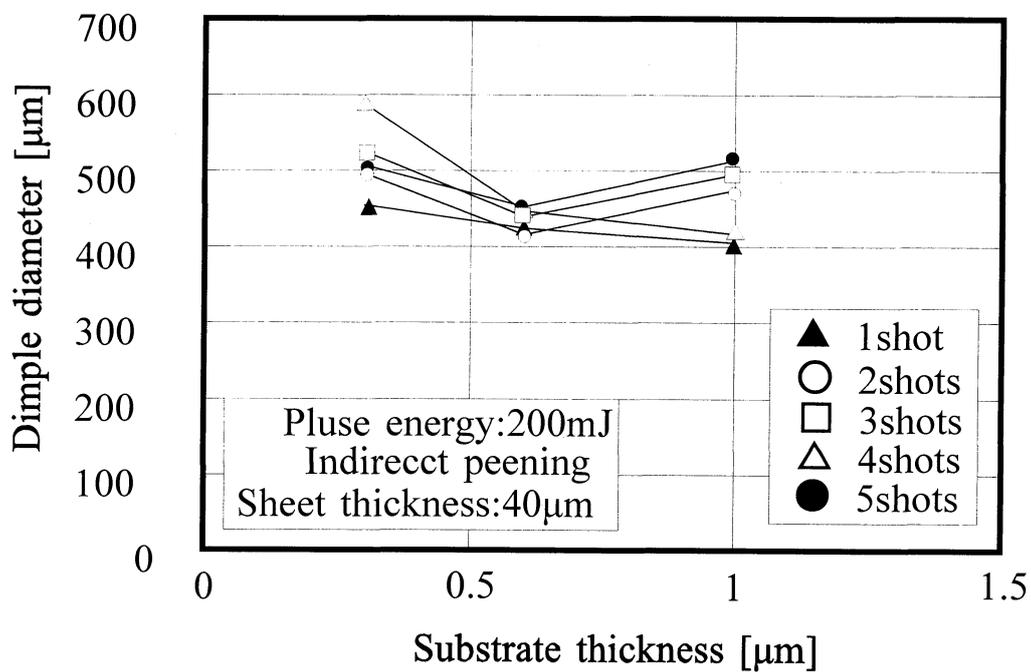


Fig.3-25 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 200mJ, sheet thickness : 40μm.

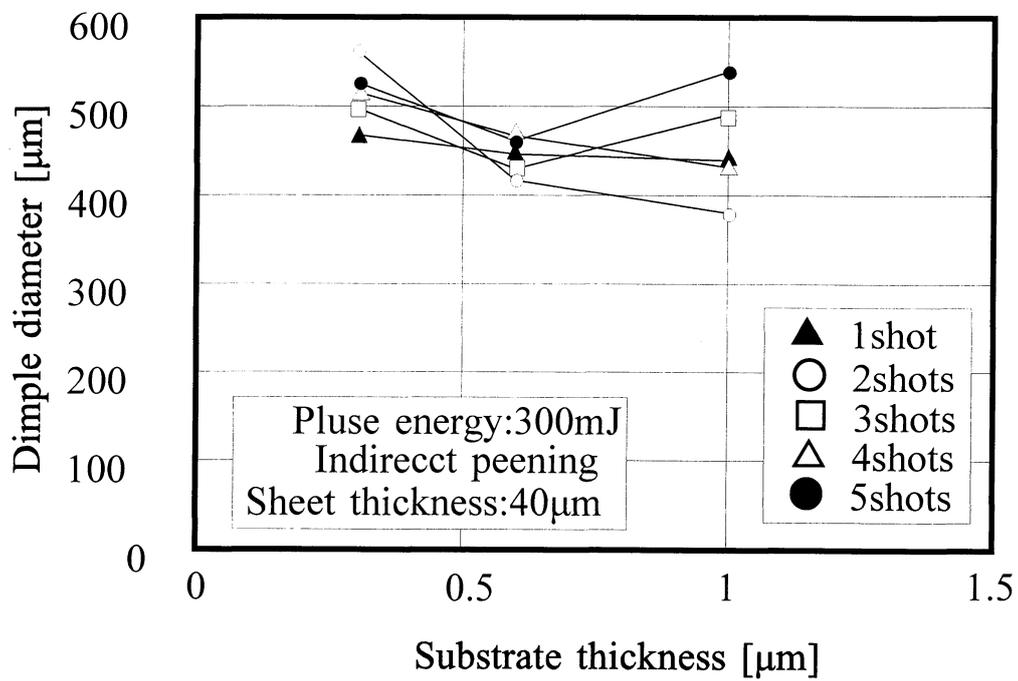


Fig.3-26 Relation between dimple diameter and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 300mJ, sheet thickness : 40μm.

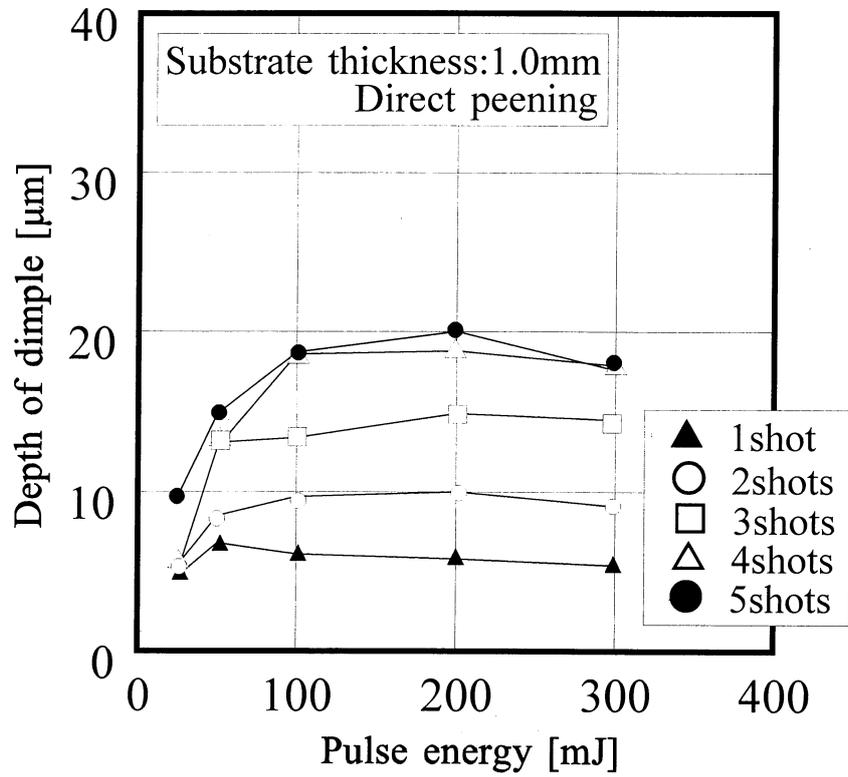


Fig.3-27 Relation between depth of dimple and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 1.0mm.

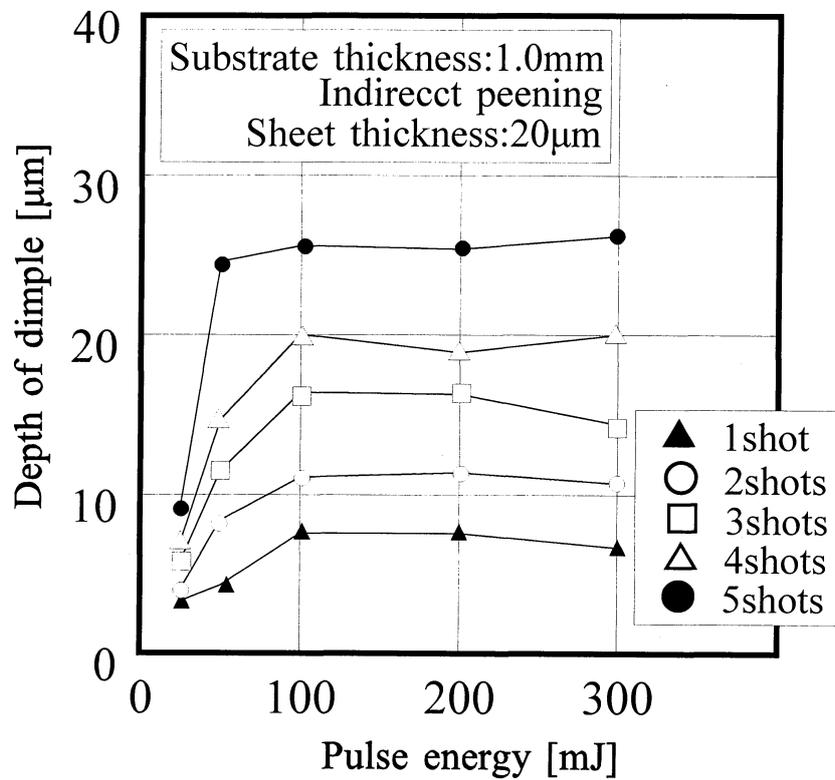


Fig.3-28 Relation between depth of dimple and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 20 μ m.

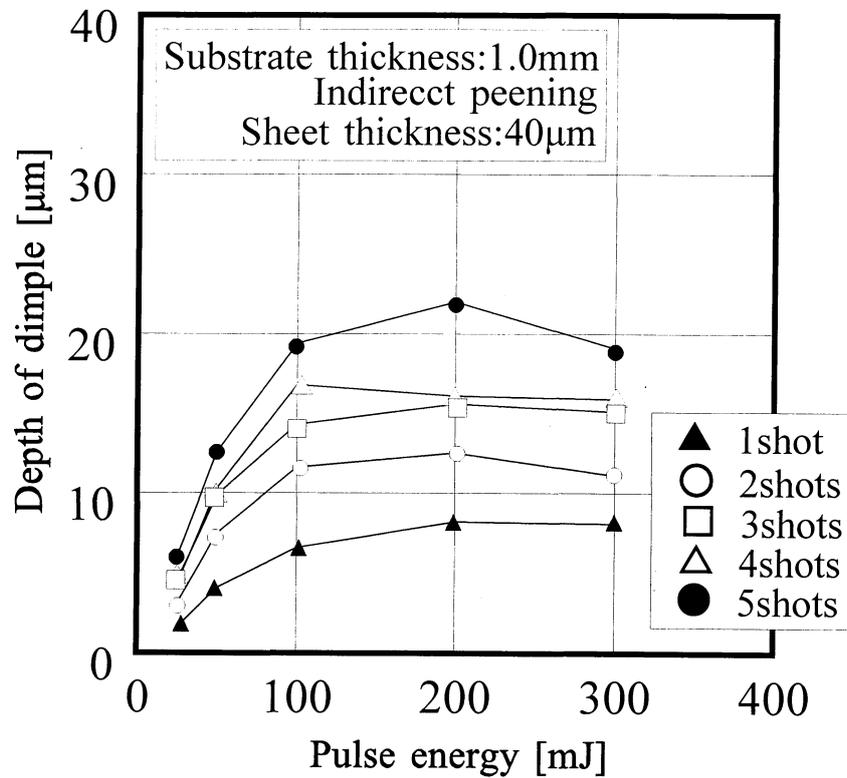


Fig.3-29 Relation between depth of dimple and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 40 μ m.

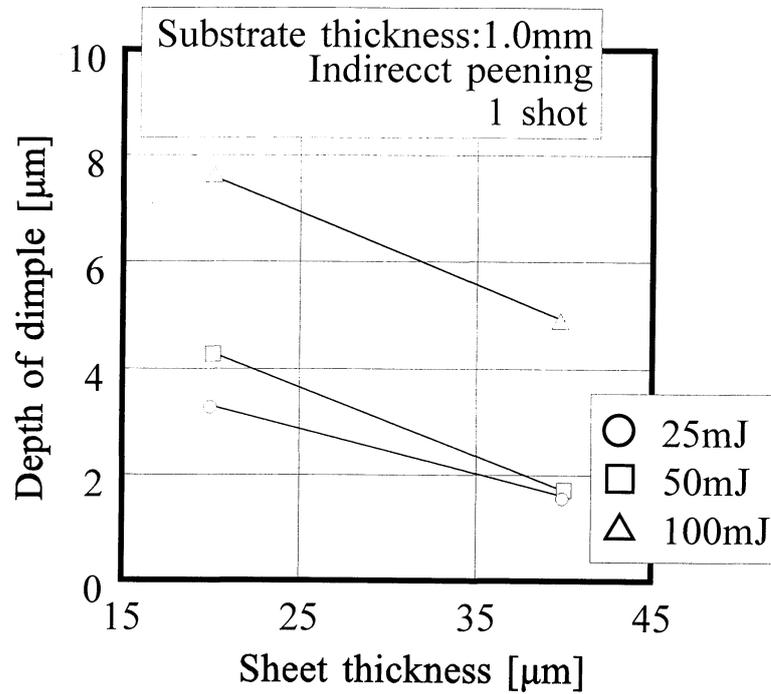


Fig.3-30 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, 1 shot.

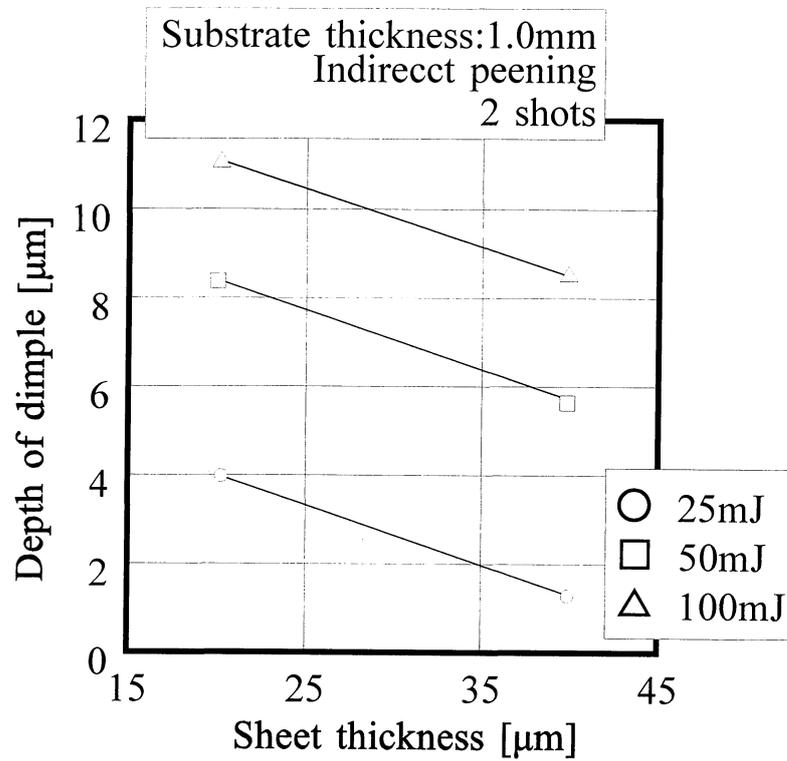


Fig.3-31 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, 2 shots.

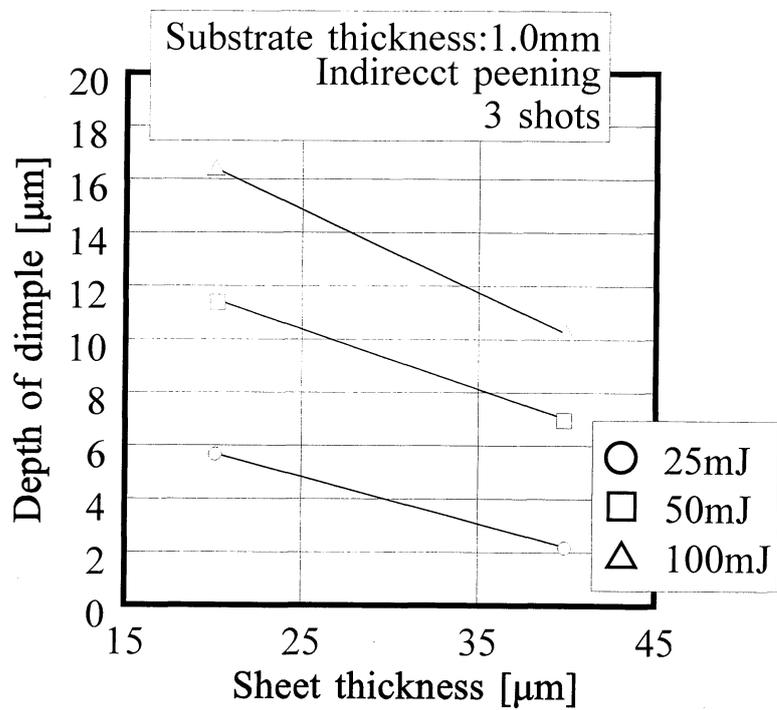


Fig.3-32 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, 3 shots.

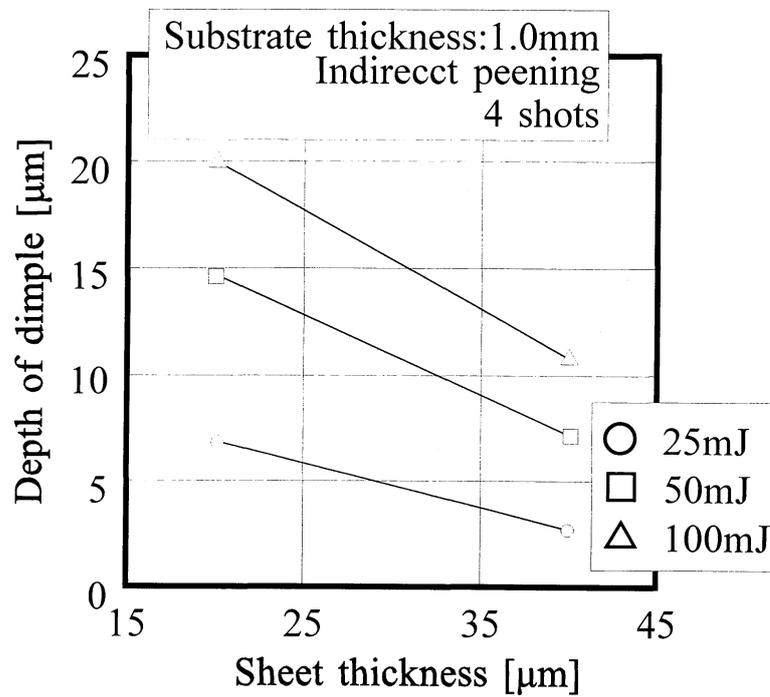


Fig.3-33 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, 4 shots.

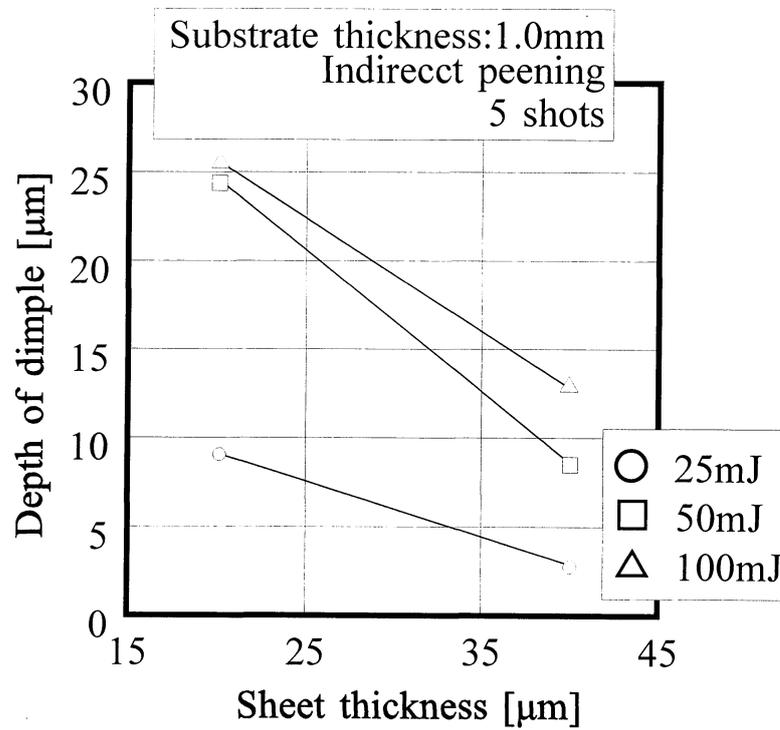


Fig.3-34 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 1mm, 5 shots.

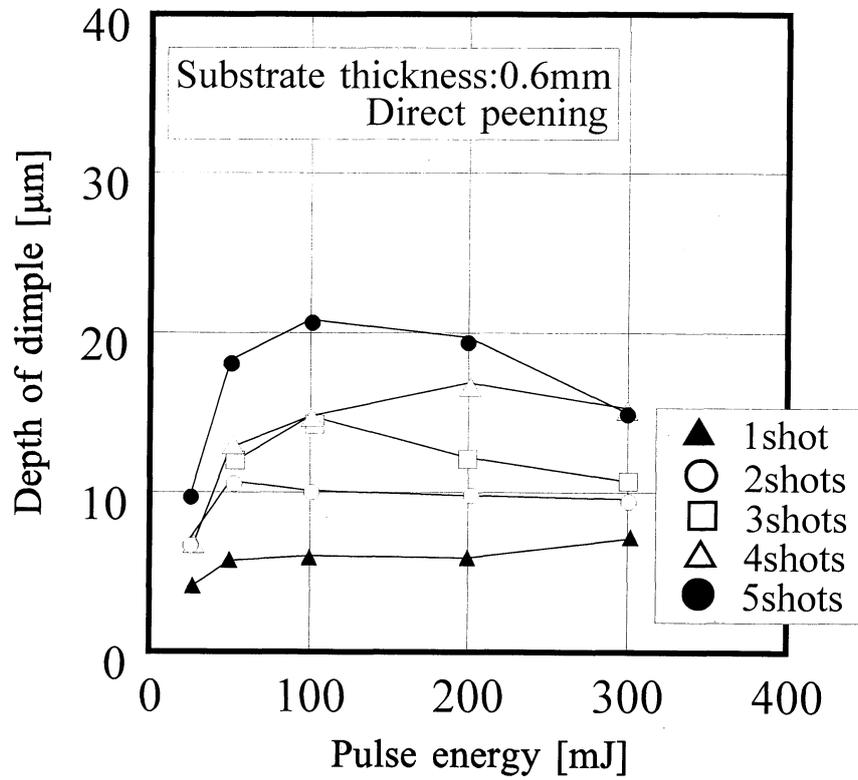


Fig.3-35 Relation between depth of dimple and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 0.6mm.

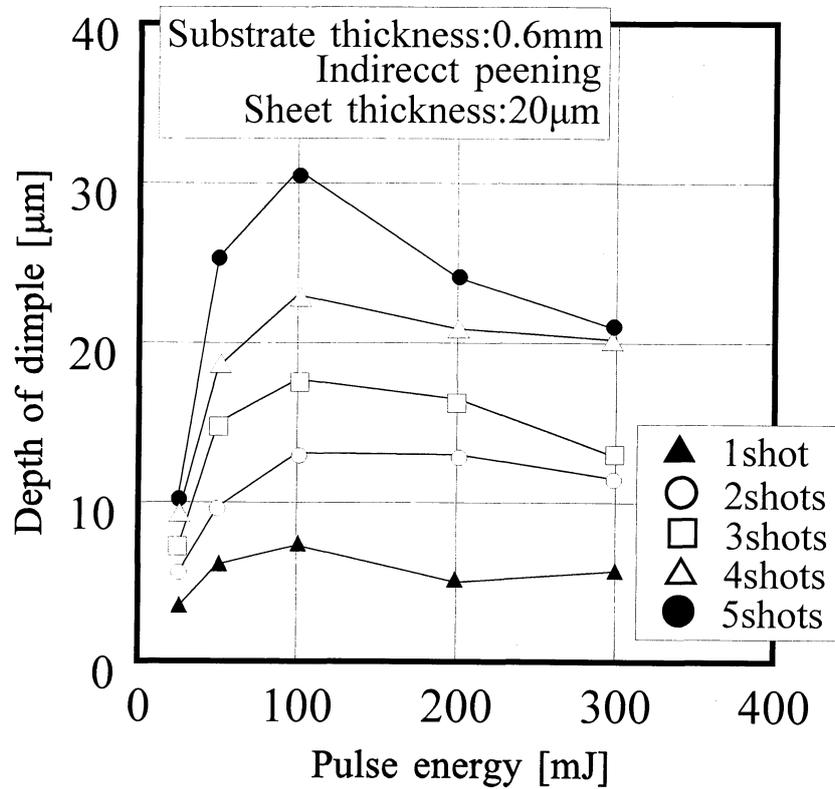


Fig.3-36 Relation between depth of dimple and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 20μm.

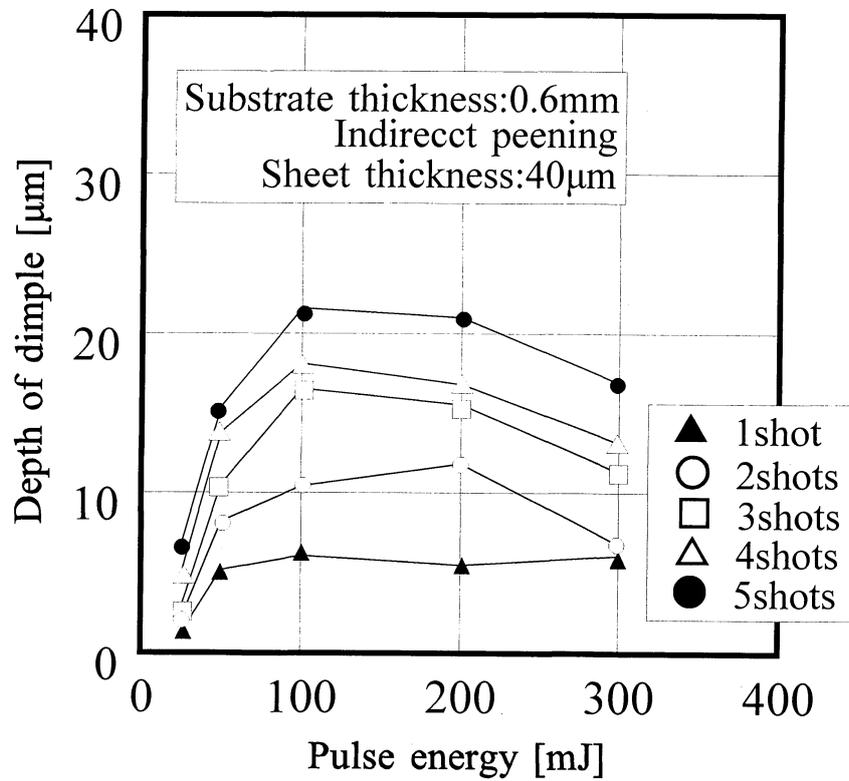


Fig.3-37 Relation between depth of dimple and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 40 μ m.

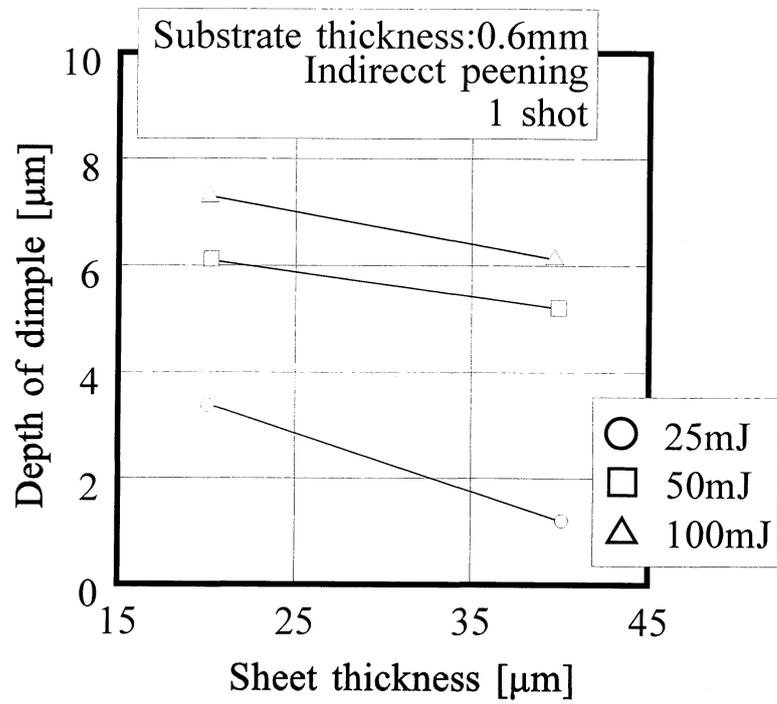


Fig.3-38 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, 1 shot.

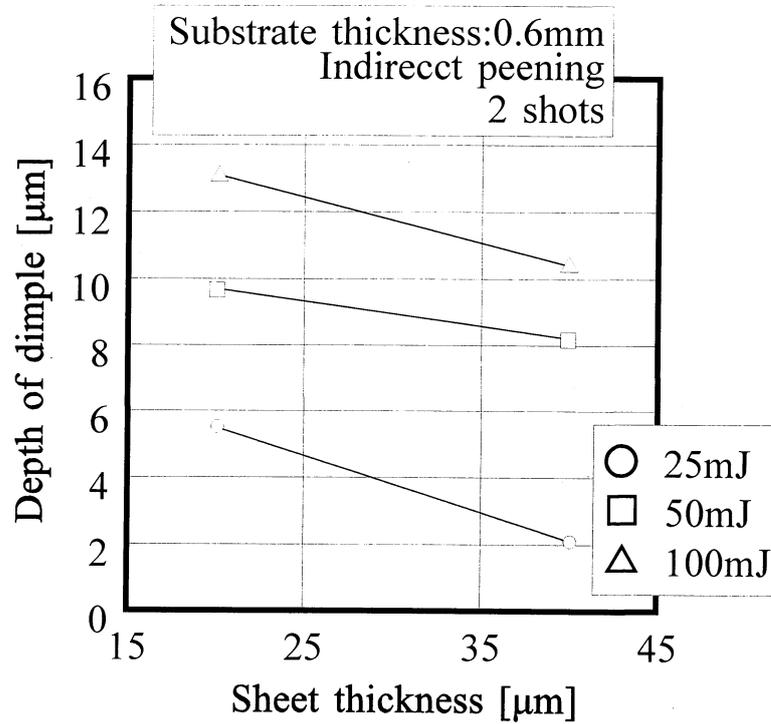


Fig.3-39 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, 2 shots.

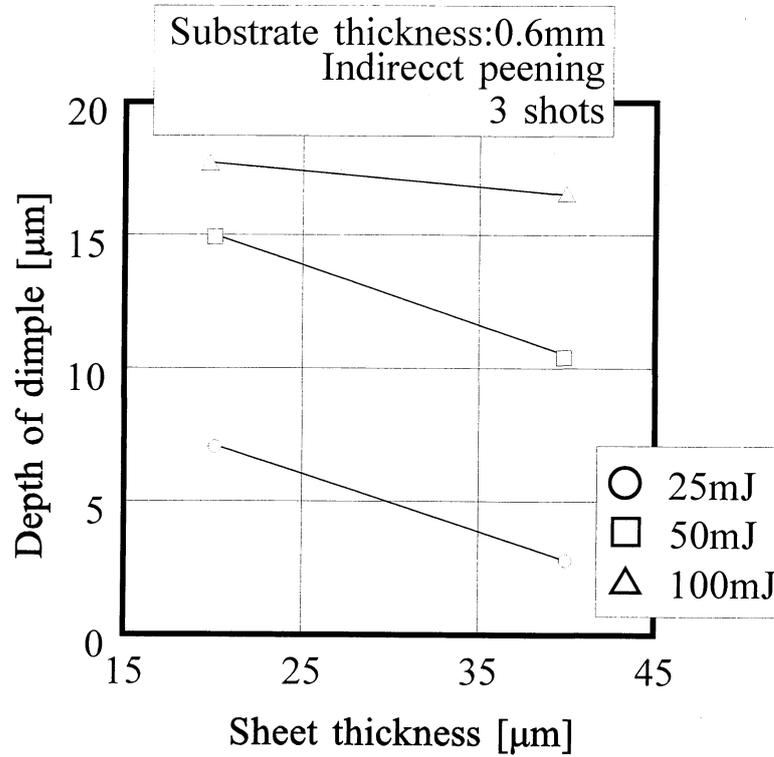


Fig.3-40 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, 3 shots.

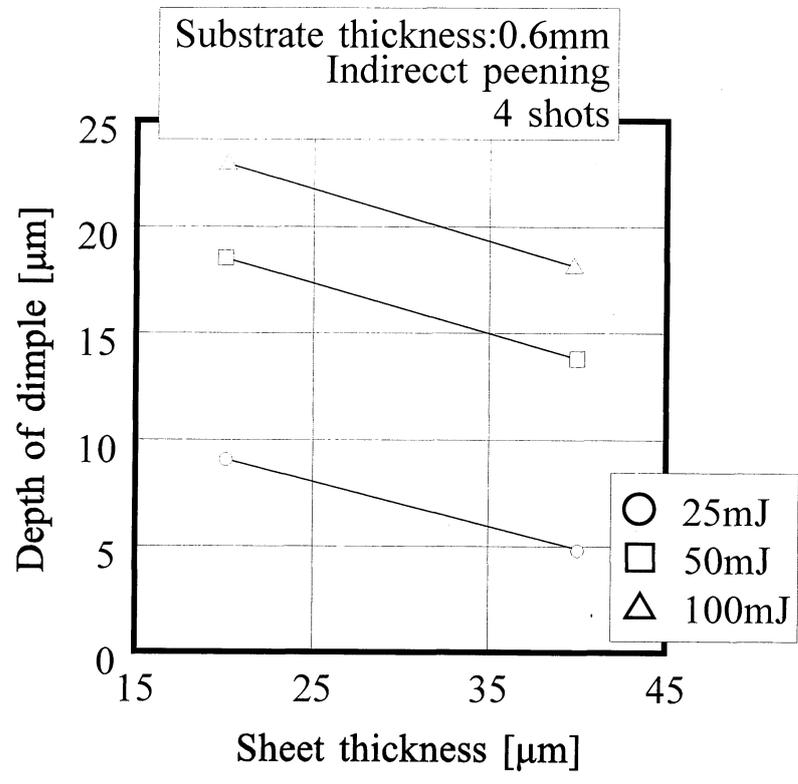


Fig.3-41 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, 4 shots.

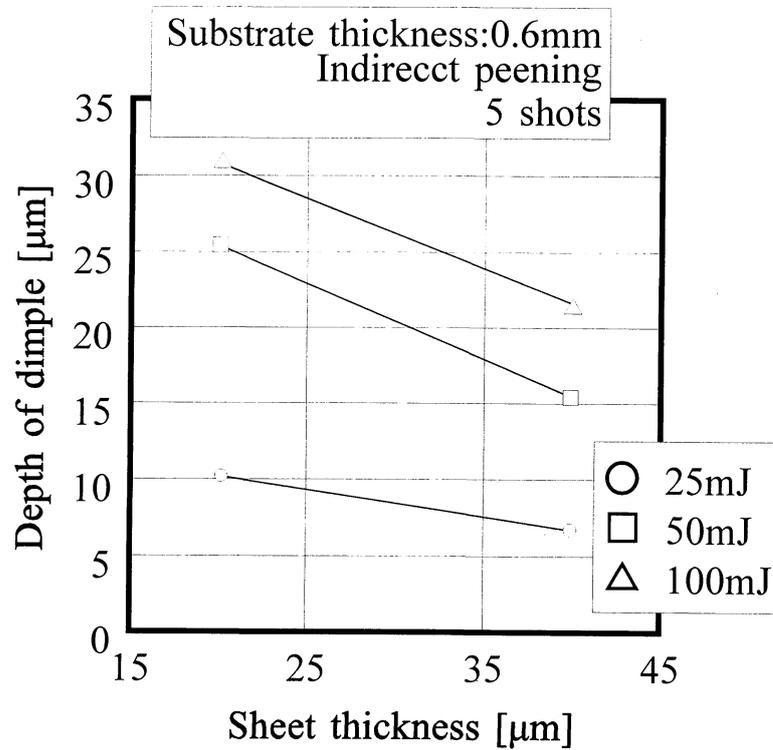


Fig.3-42 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, 5 shots.

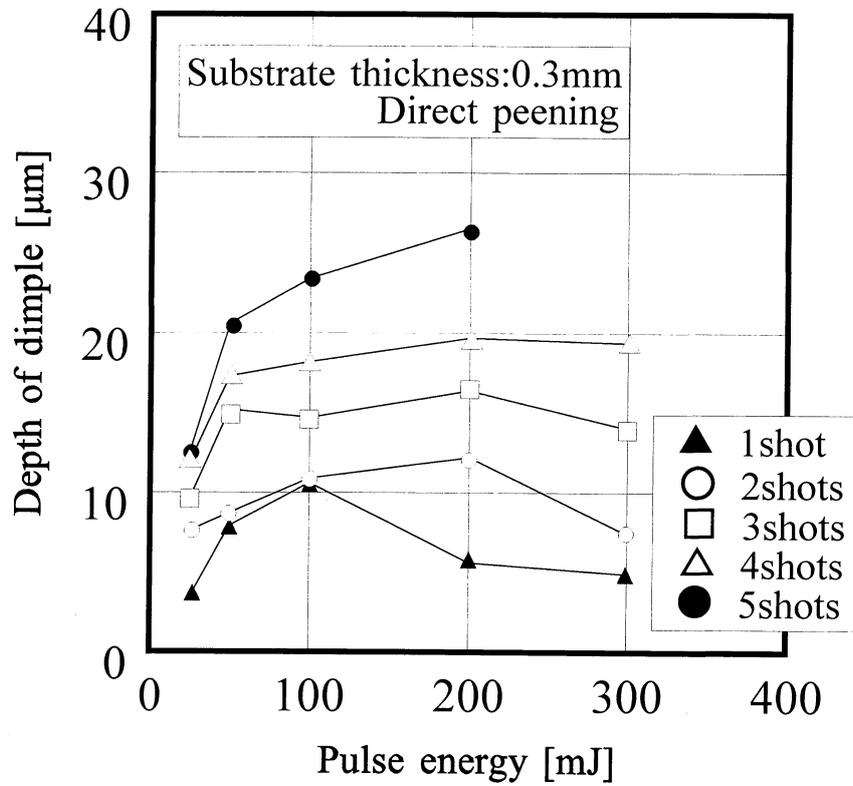


Fig.3-43 Relation between depth of dimple and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 0.3mm.

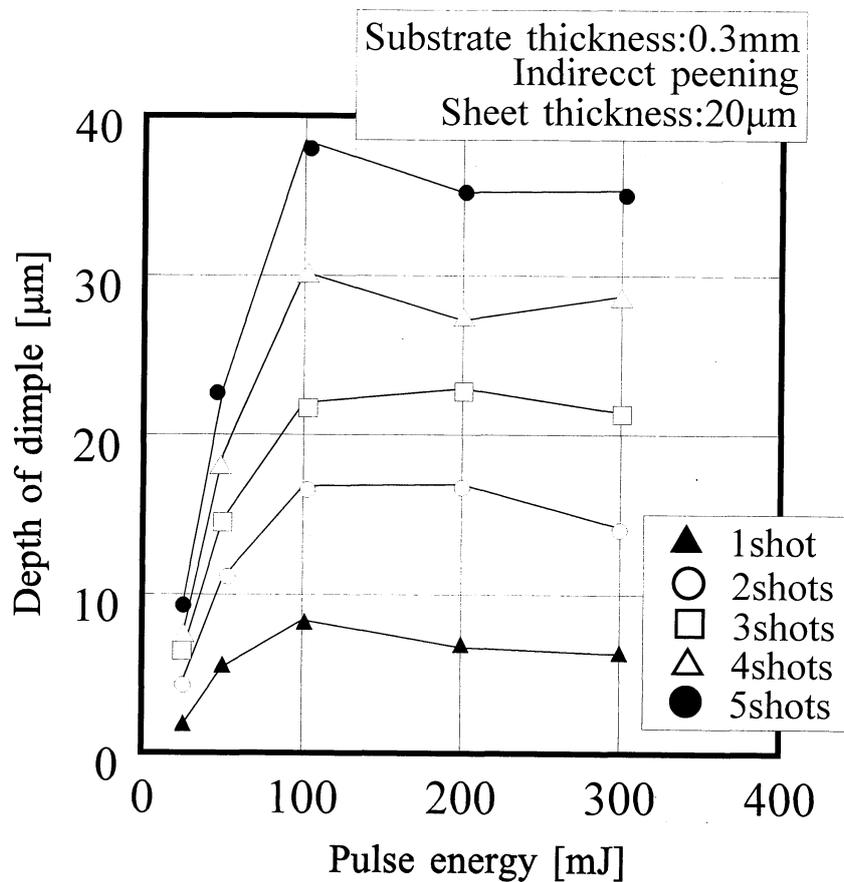


Fig.3-44 Relation between depth of dimple and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, sheet thickness : 20 μ m.

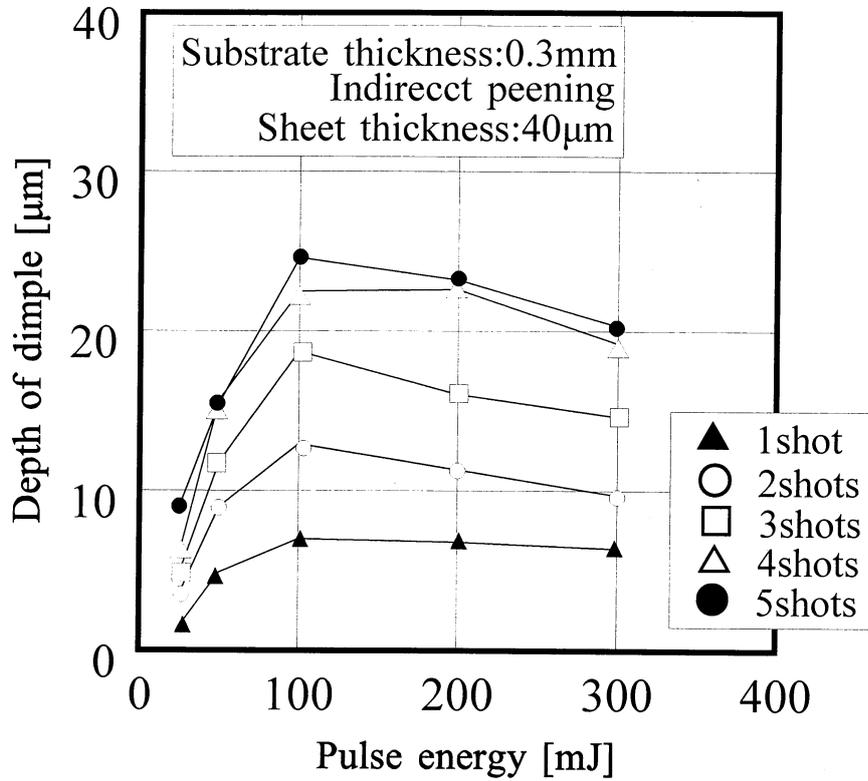


Fig.3-45 Relation between depth of dimple and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, sheet thickness : 40 μ m.

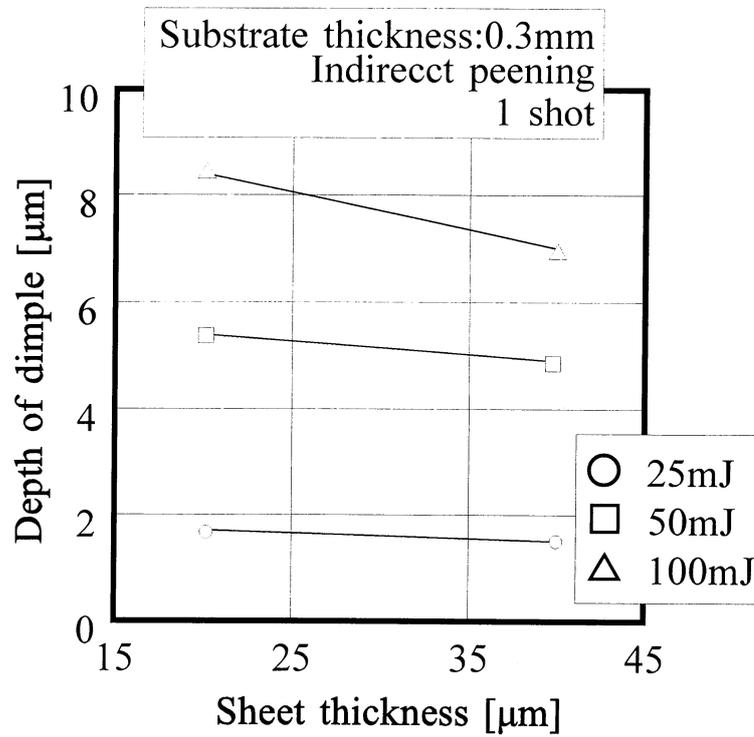


Fig.3-46 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, 1 shot.

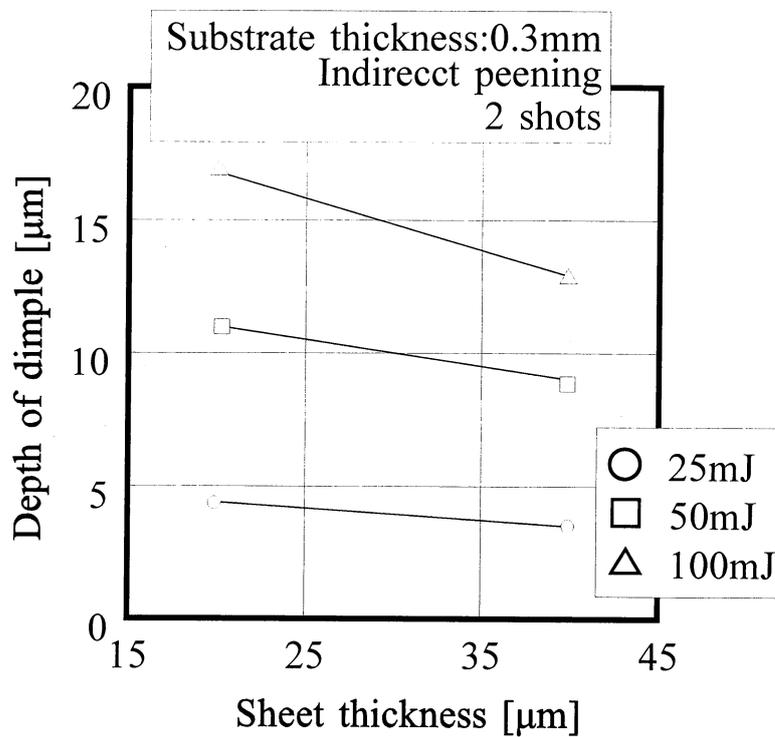


Fig.3-47 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, 2 shots.

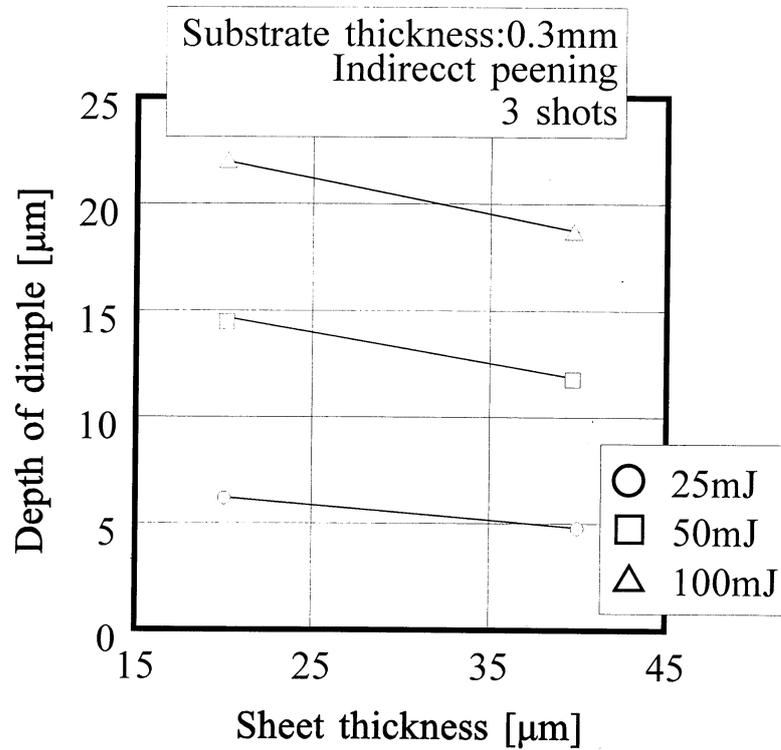


Fig.3-48 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, 3 shots.

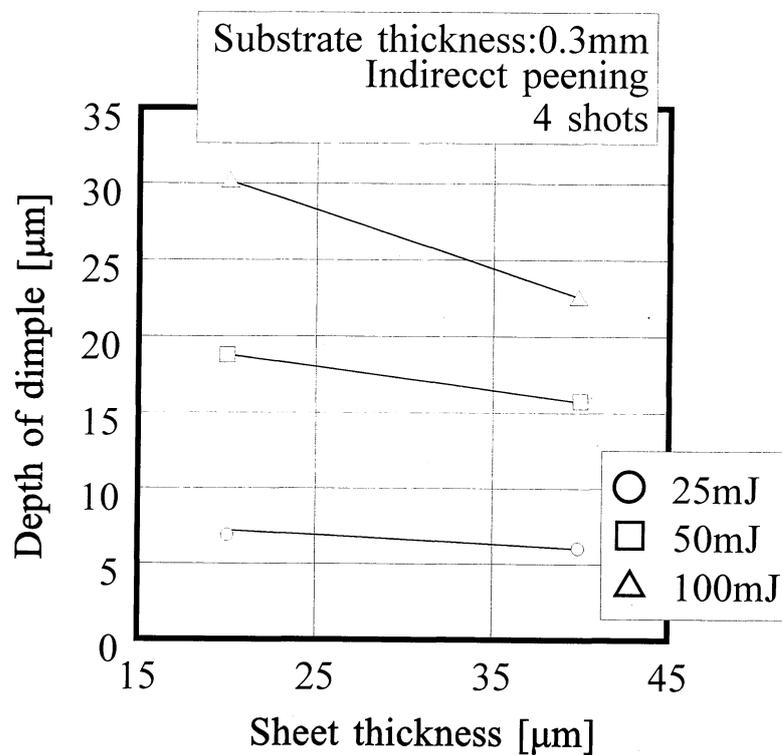


Fig.3-49 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, 4 shots.

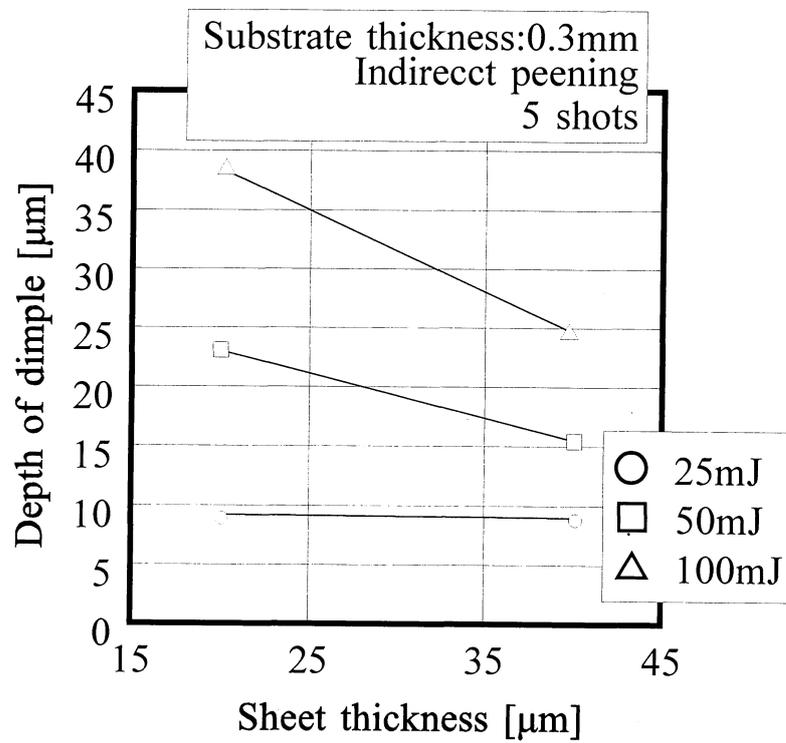


Fig.3-50 Relation between depth of dimple and sheet thickness at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, 5 shots.

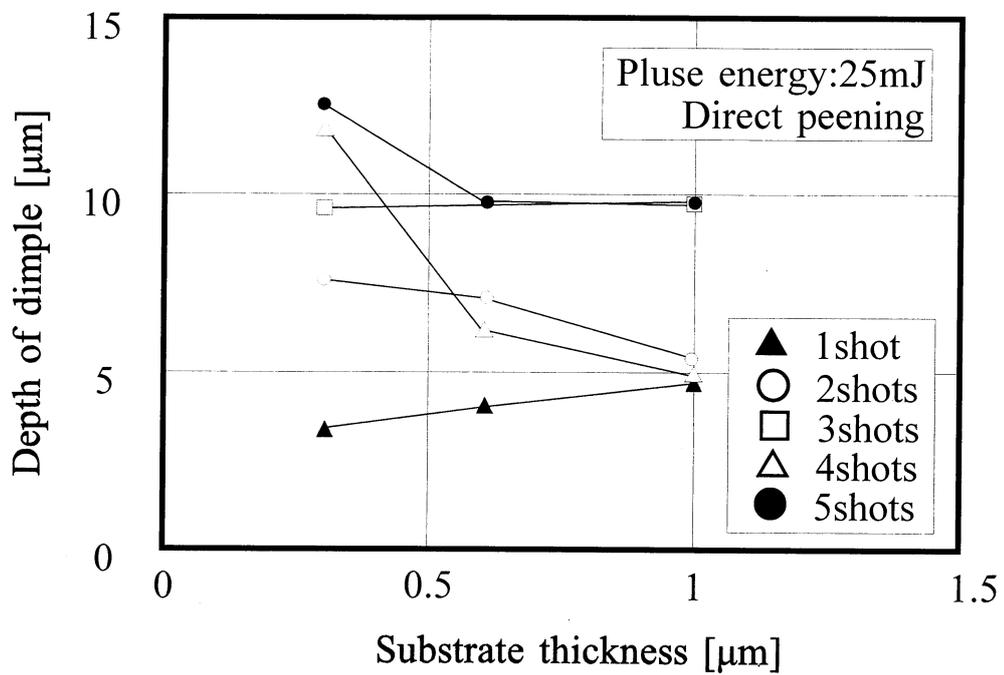


Fig.3-51 Relation between depth of dimple and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 25mJ.

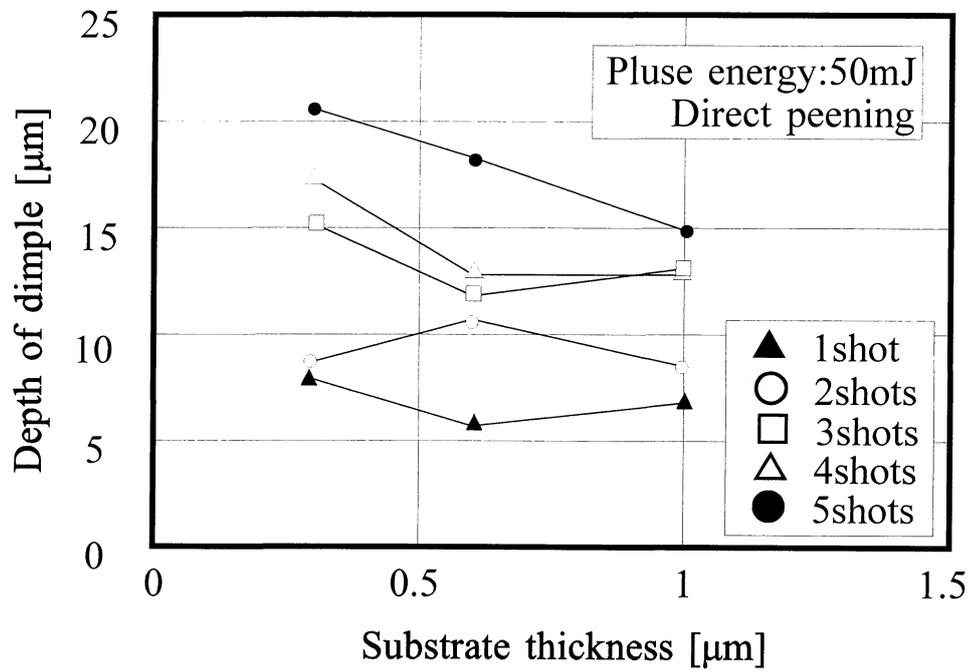


Fig.3-52 Relation between depth of dimple and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 50mJ.

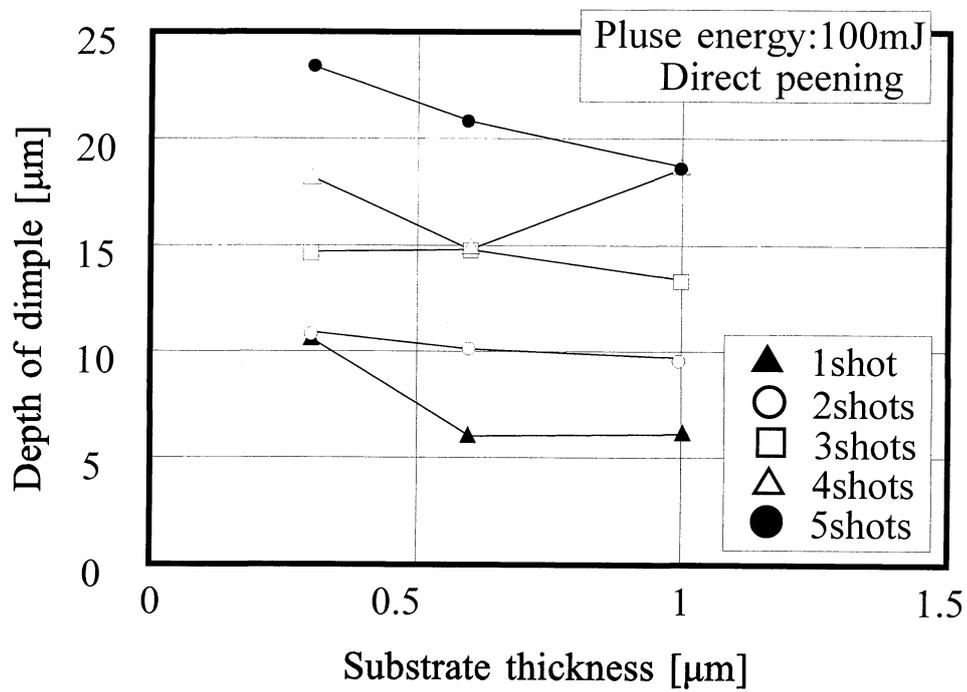


Fig.3-53 Relation between depth of dimple and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 100mJ.

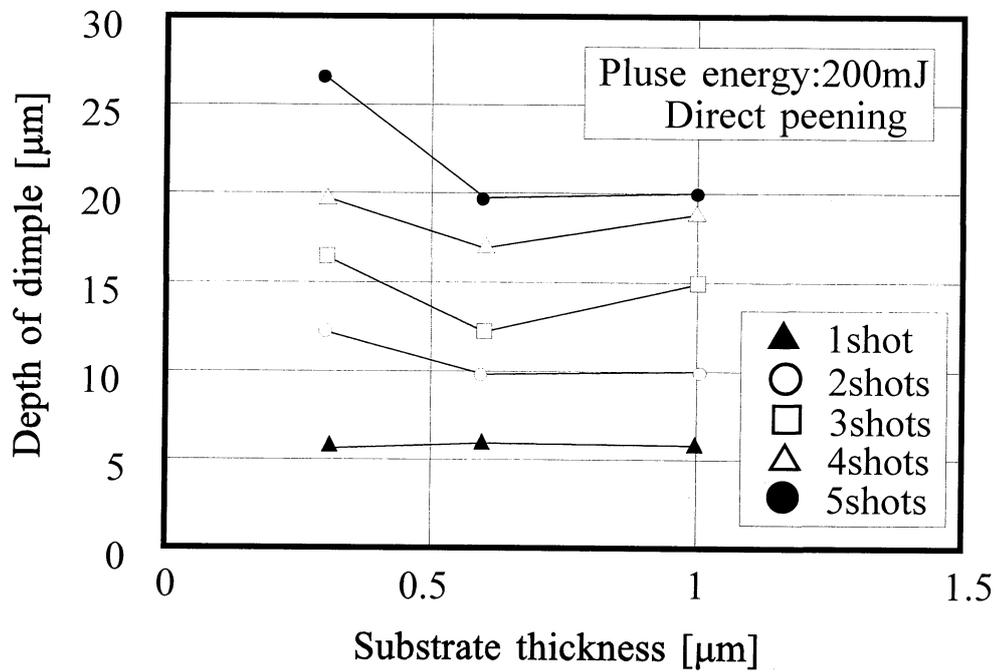


Fig.3-54 Relation between depth of dimple and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 200mJ.

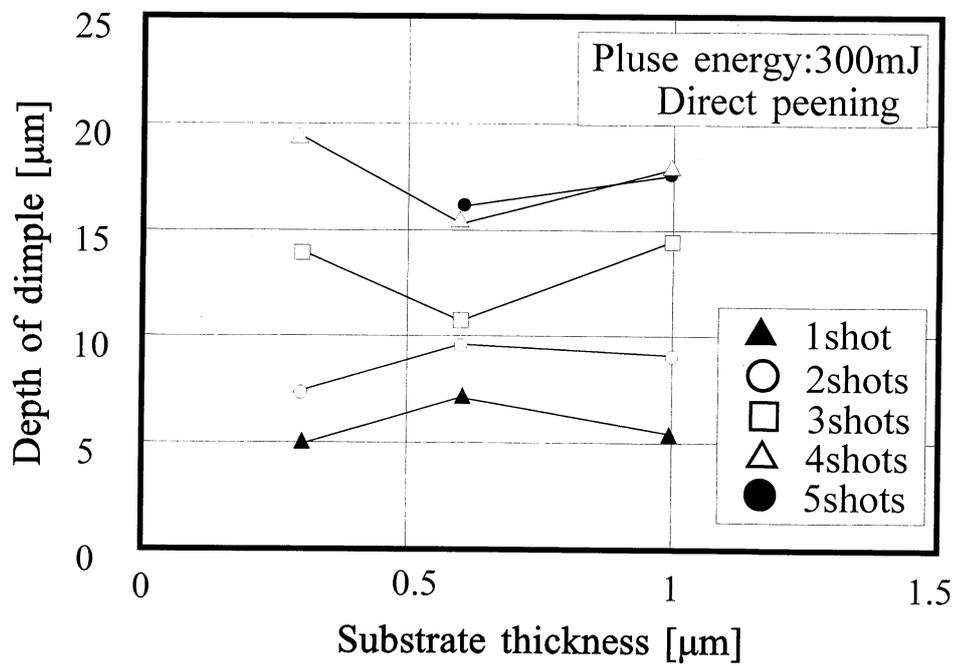


Fig.3-55 Relation between depth of dimple and substrate thickness at direct laser peening; Pluse energy : 300mJ.

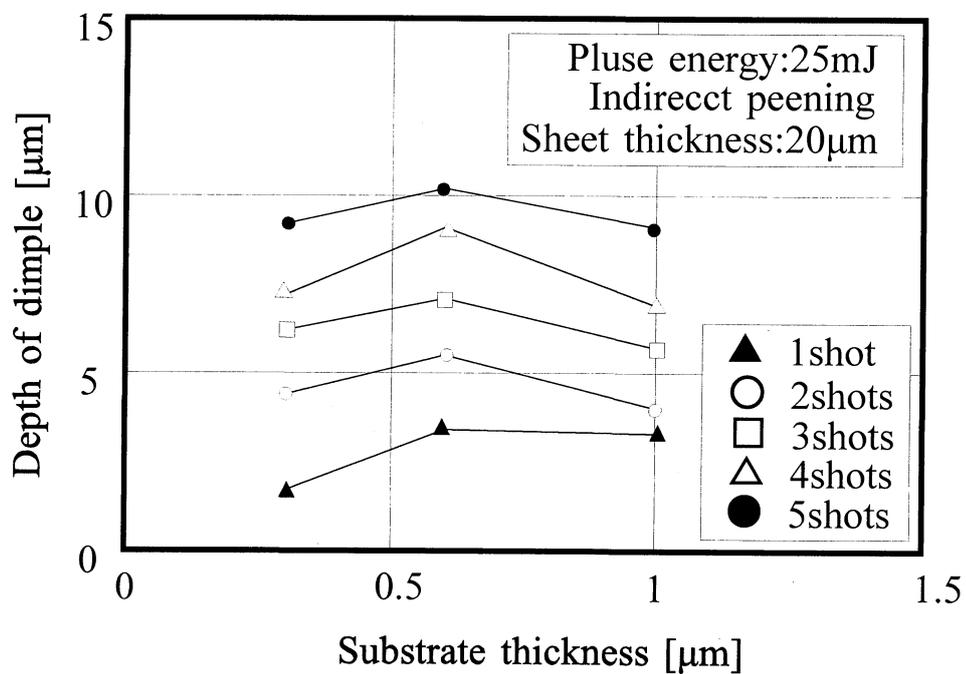


Fig.3-56 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 25mJ, sheet thickness : 20μm.

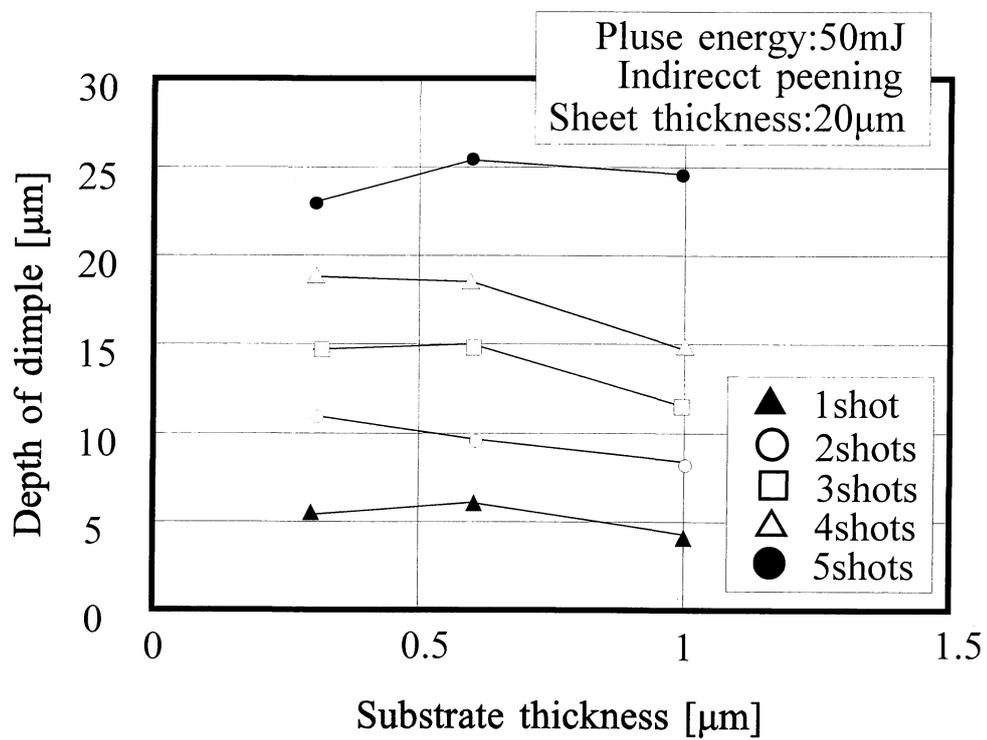


Fig.3-57 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 50mJ, sheet thickness : 20μm.

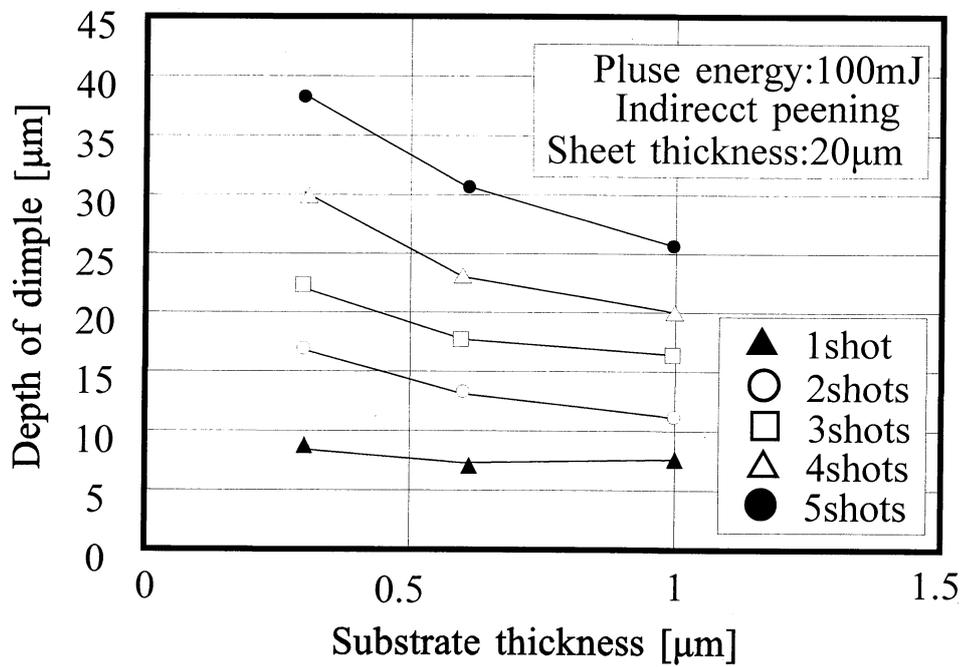


Fig.3-58 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 100mJ, sheet thickness : 20μm.

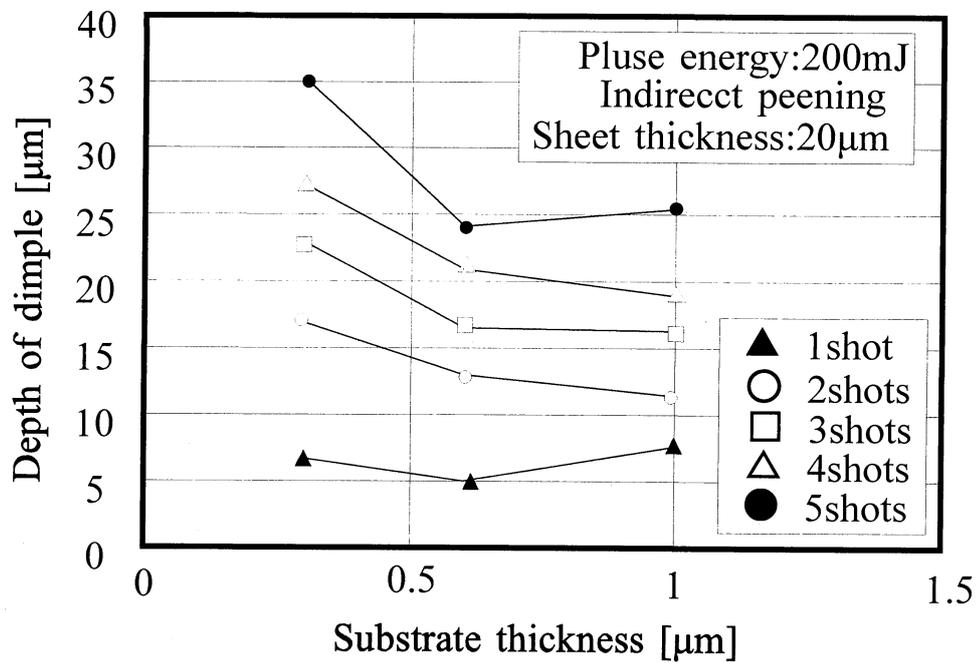


Fig.3-59 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 200mJ, sheet thickness : 20 μm .

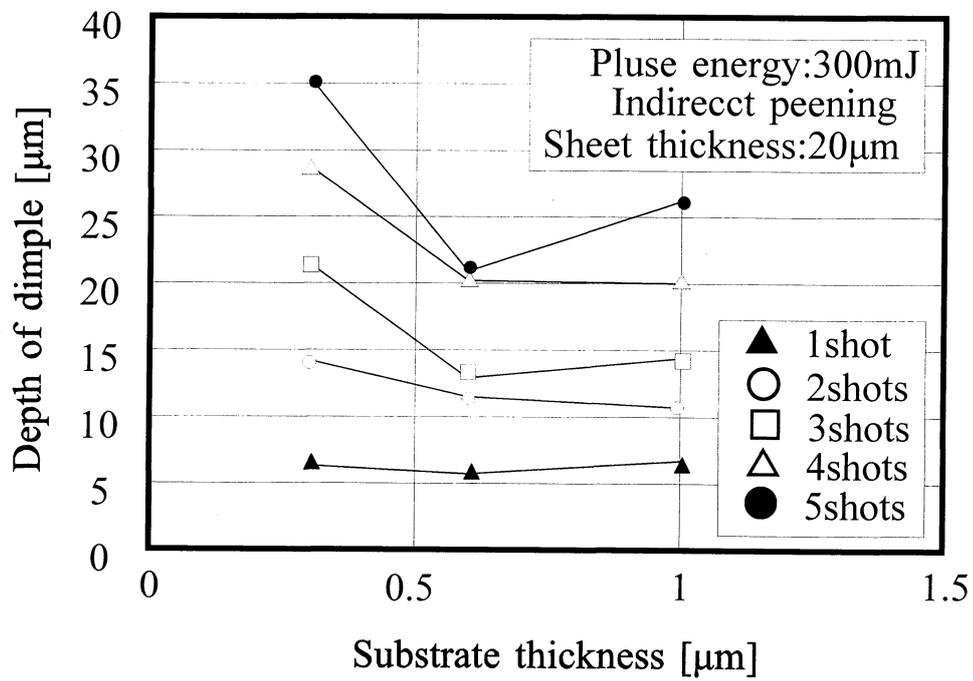


Fig.3-60 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 300mJ, sheet thickness : 20μm.

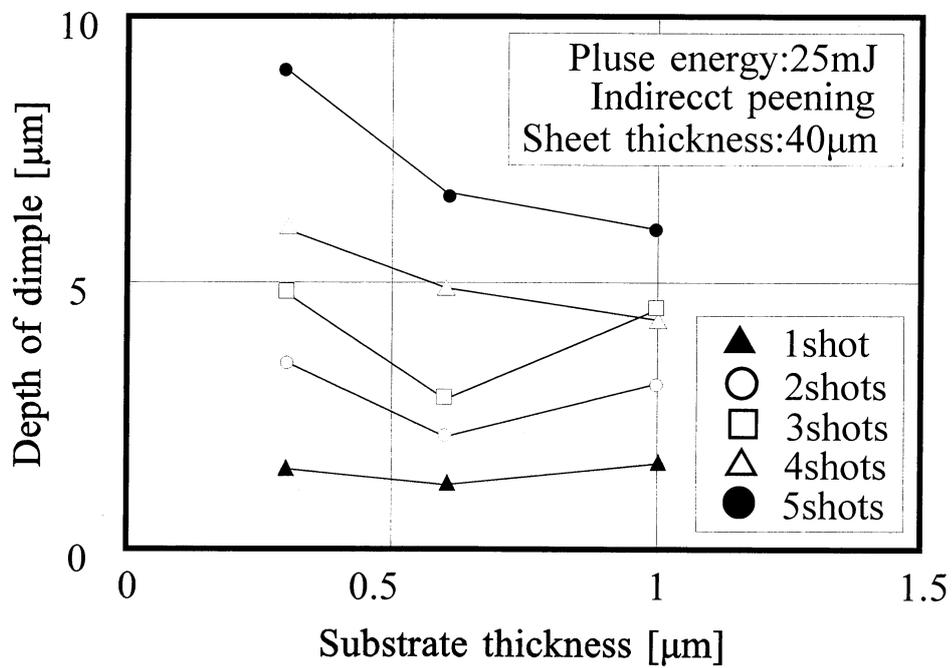


Fig.3-61 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 25mJ, sheet thickness : 40μm.

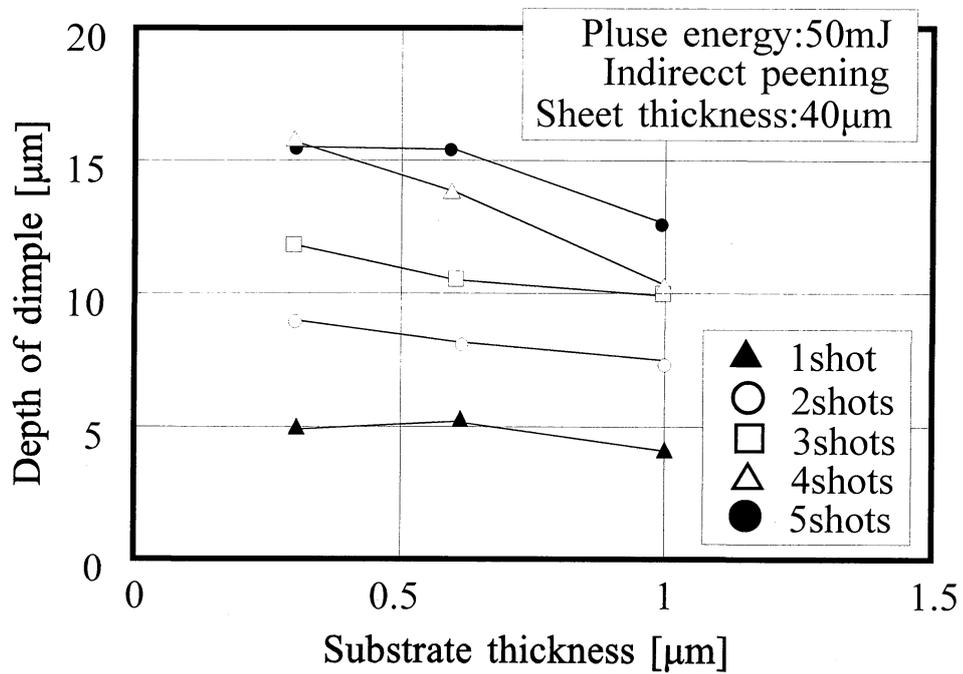


Fig.3-62 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 50mJ, sheet thickness : 40μm.

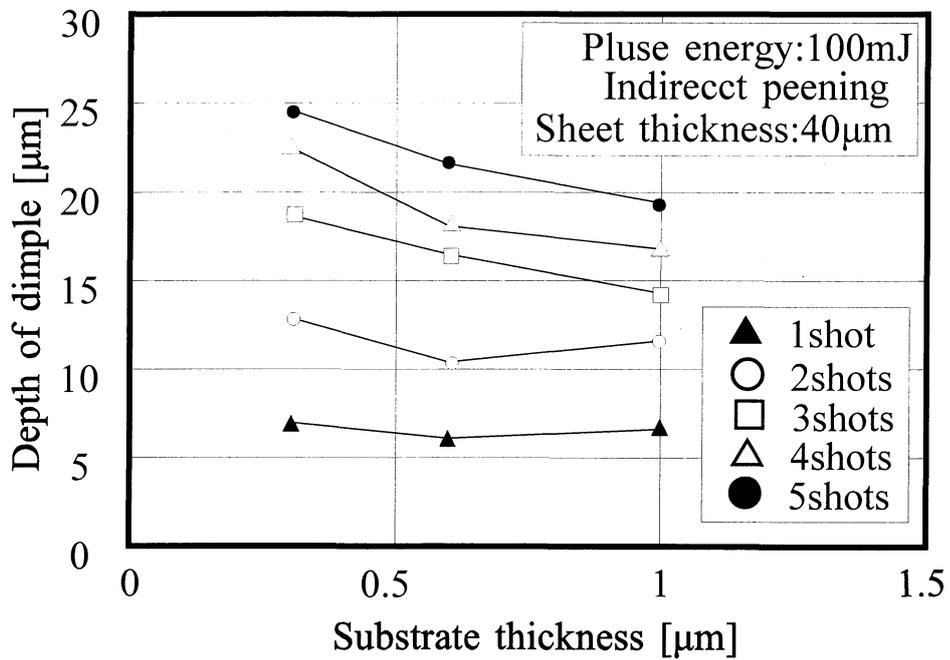


Fig.3-63 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 100mJ, sheet thickness : 40μm.

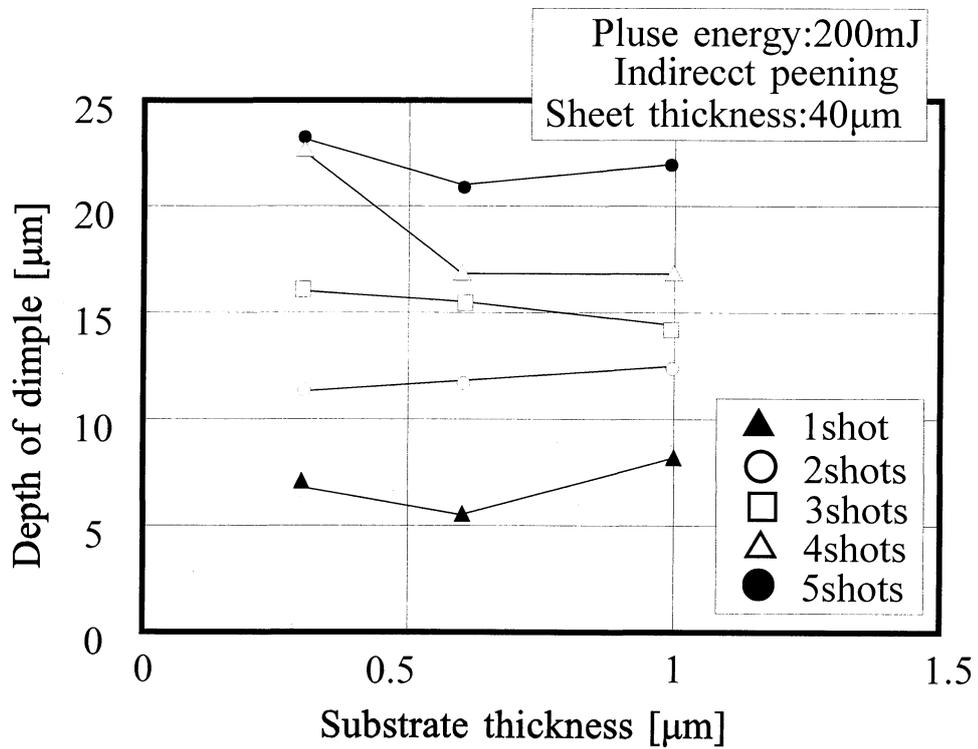


Fig.3-64 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pulse energy : 200mJ, sheet thickness : 40 μ m.

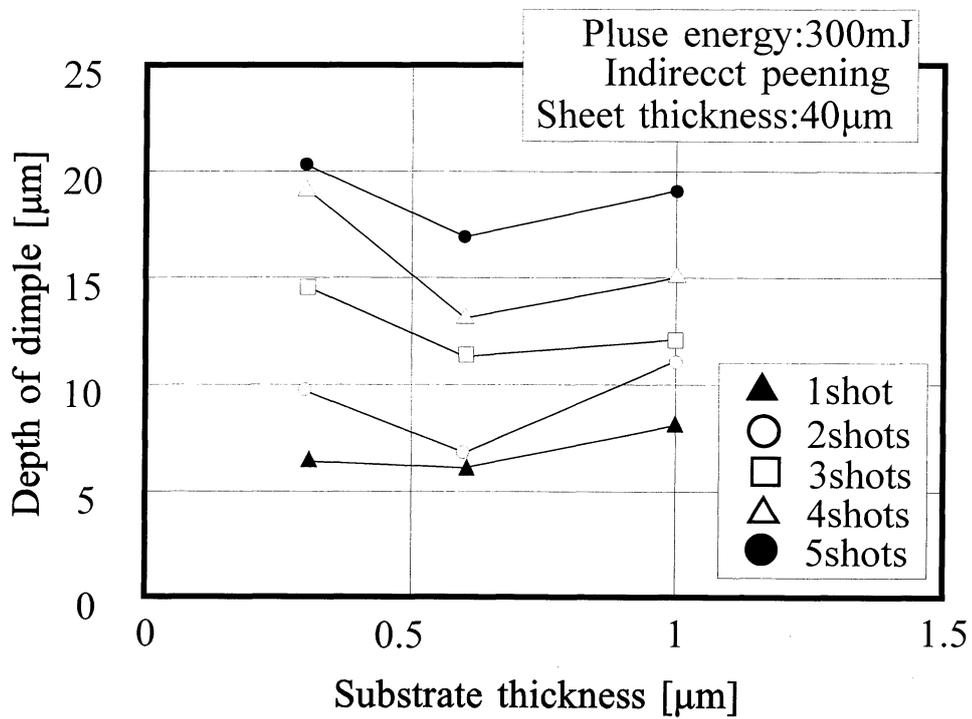


Fig.3-65 Relation between depth of dimple and substrate thickness at indirect laser peening; Pluse energy : 300mJ, sheet thickness : 40μm.

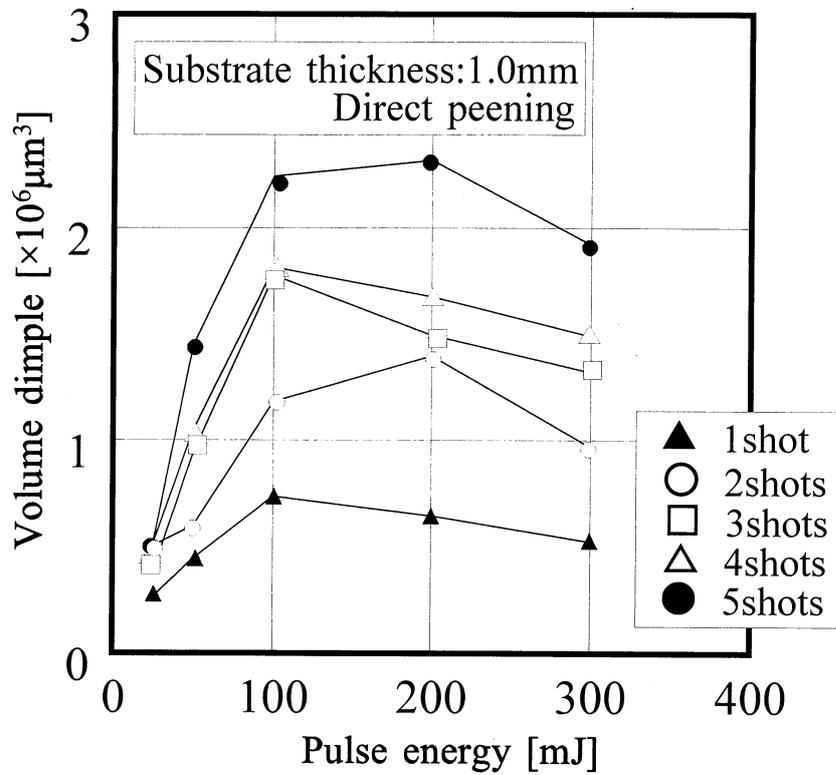


Fig.3-66 Relation between dimple volume and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 1.0mm.

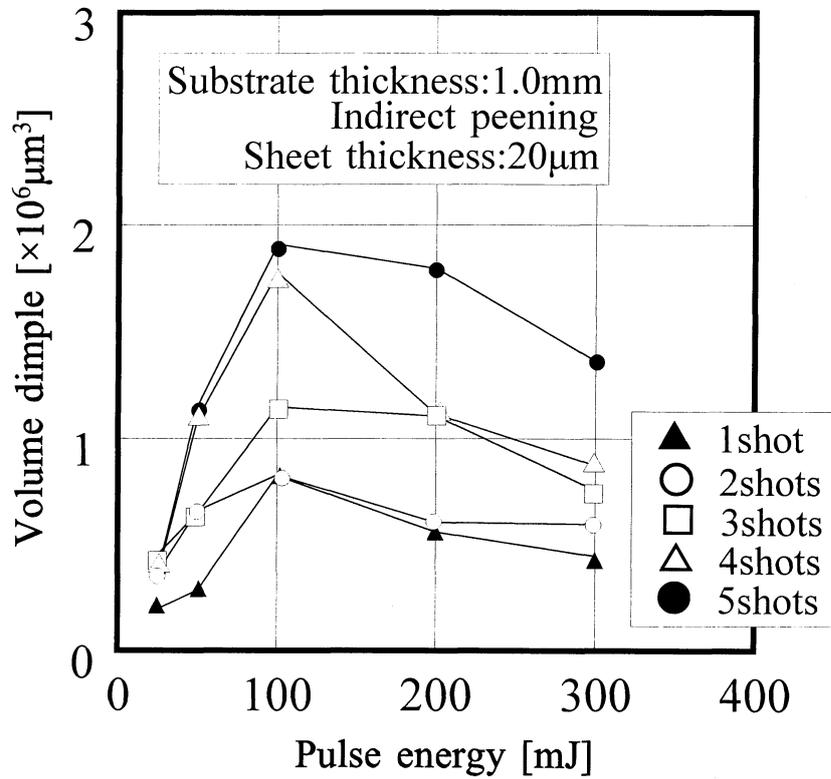


Fig.3-67 Relation between dimple volume and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 20 μ m.

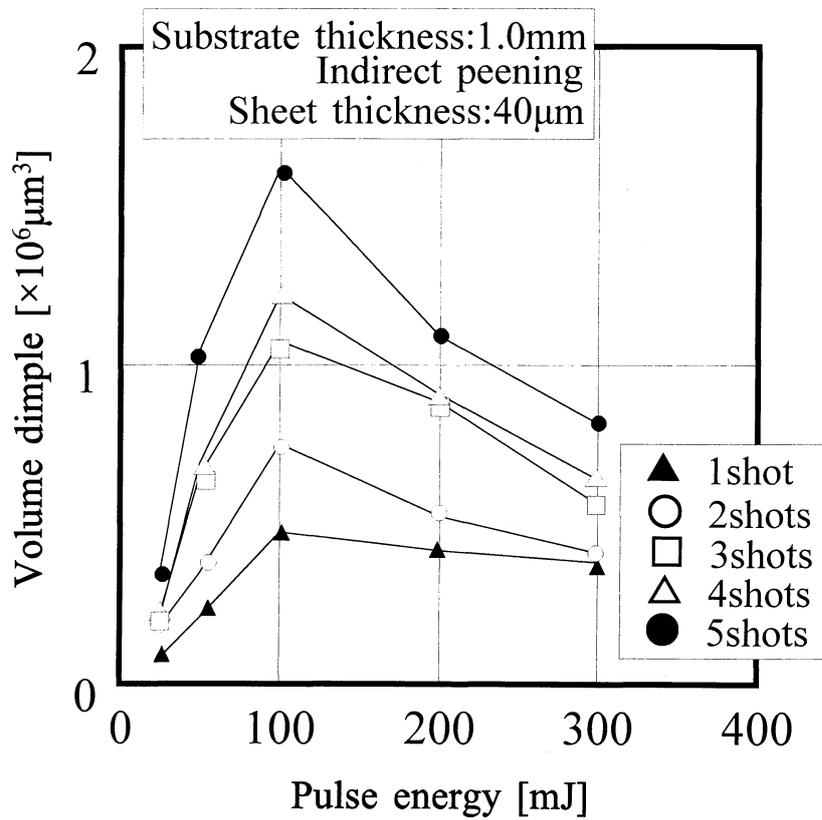


Fig.3-68 Relation between dimple volume and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 40 μ m.

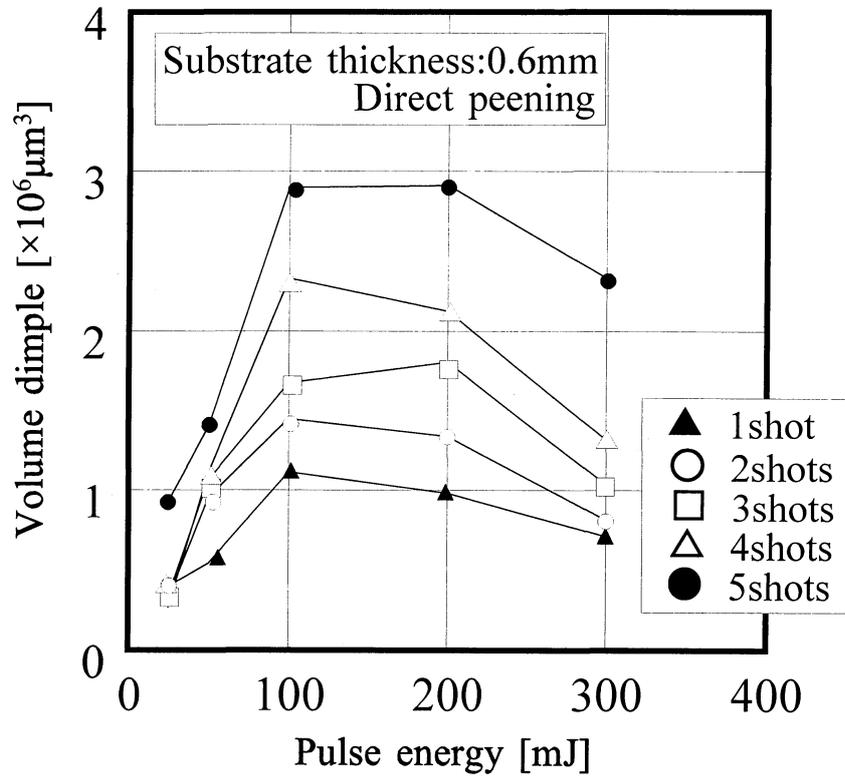


Fig.3-69 Relation between dimple volume and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 0.6mm.

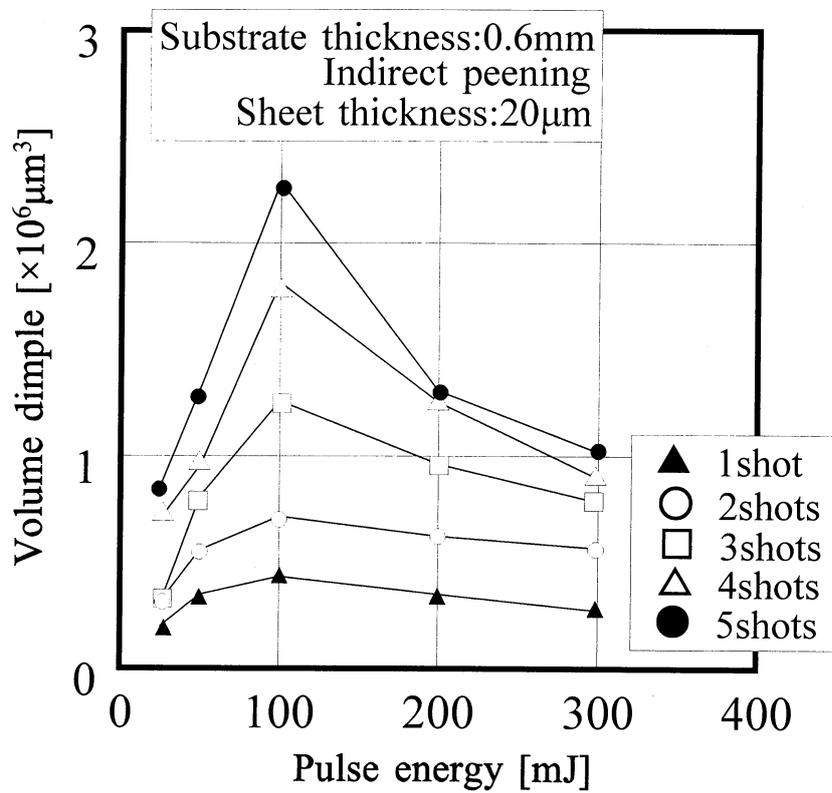


Fig.3-70 Relation between dimple volume and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 20 μ m.

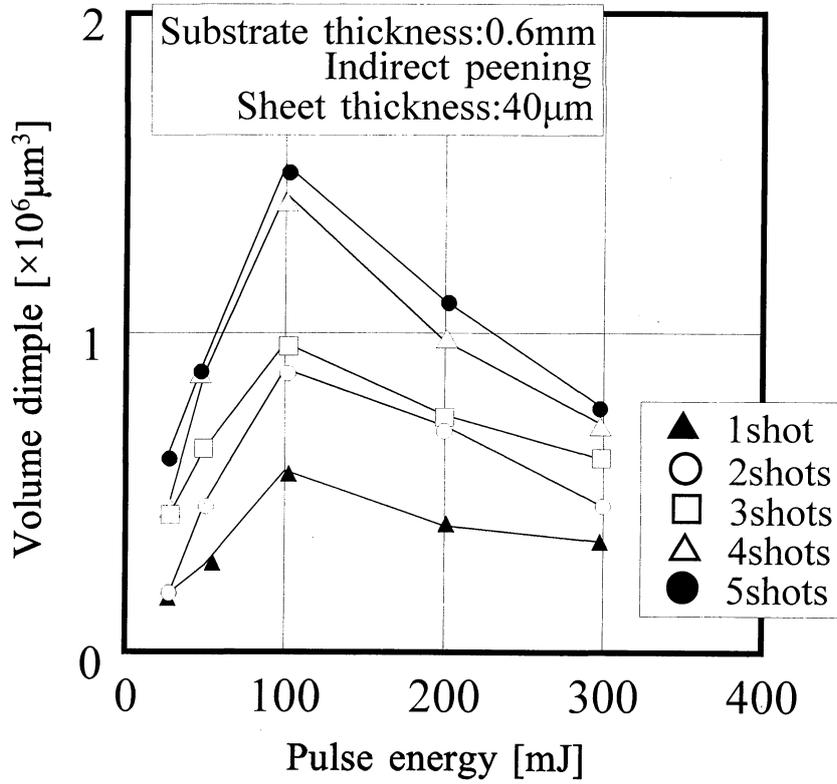


Fig.3-71 Relation between dimple volume and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 40μm.

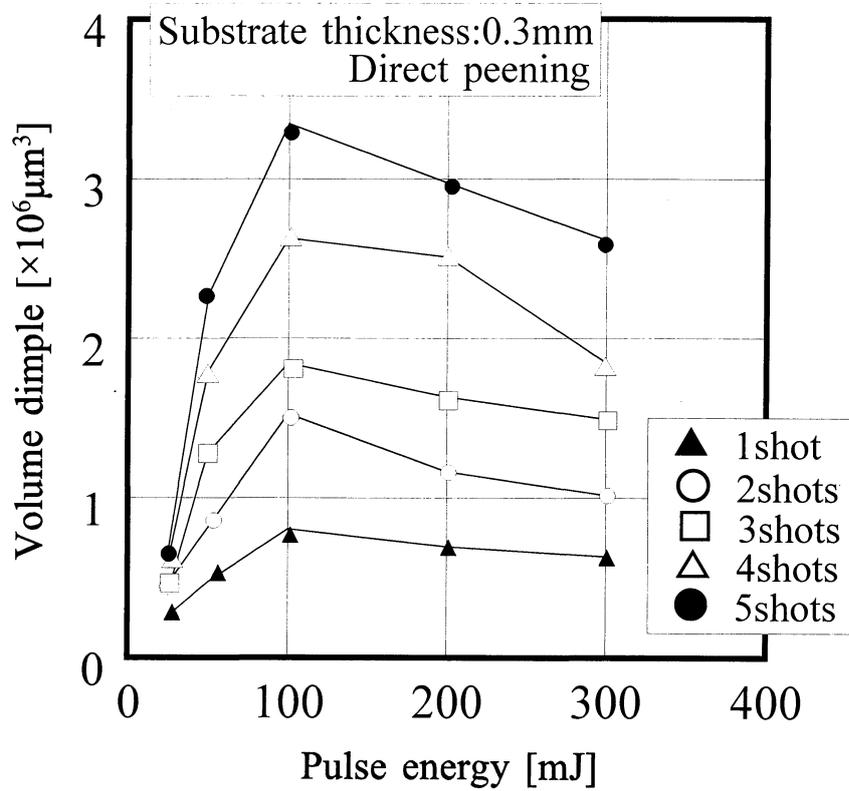


Fig.3-72 Relation between dimple volume and pulse energy at direct laser peening; Substrate thickness : 0.3mm.

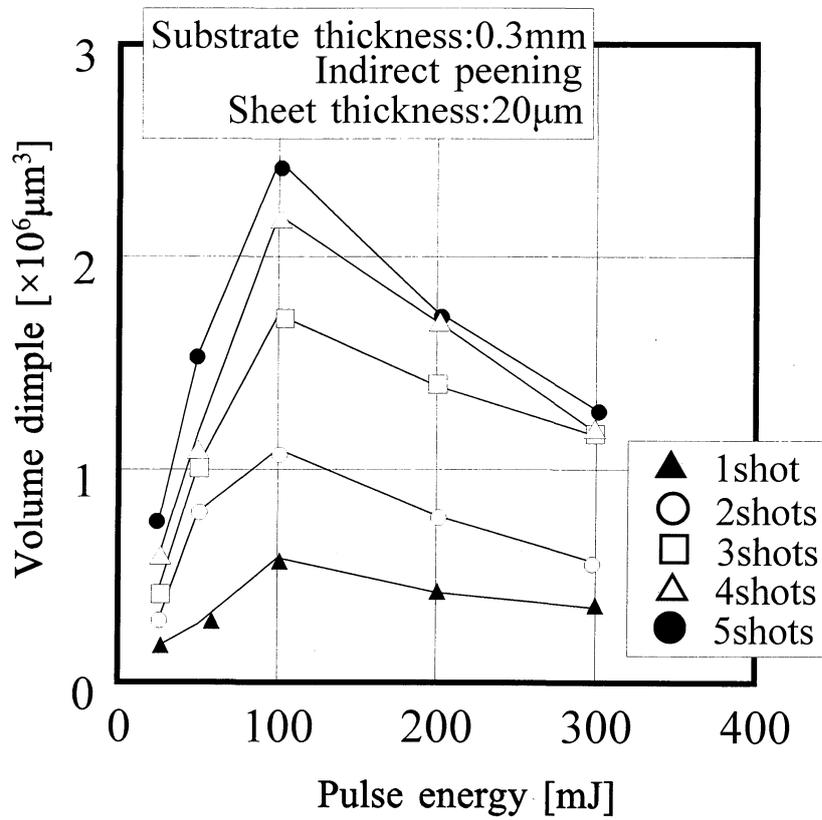


Fig.3-73 Relation between dimple volume and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, sheet thickness : 20 μ m.

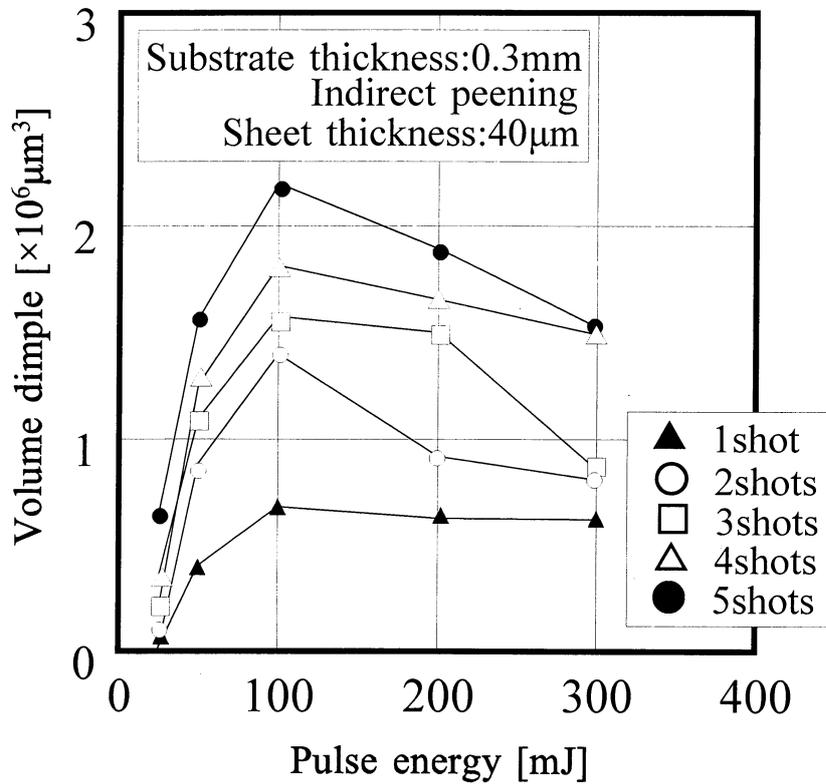


Fig.3-74 Relation between dimple volume and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 0.3mm, sheet thickness : 40 μm.

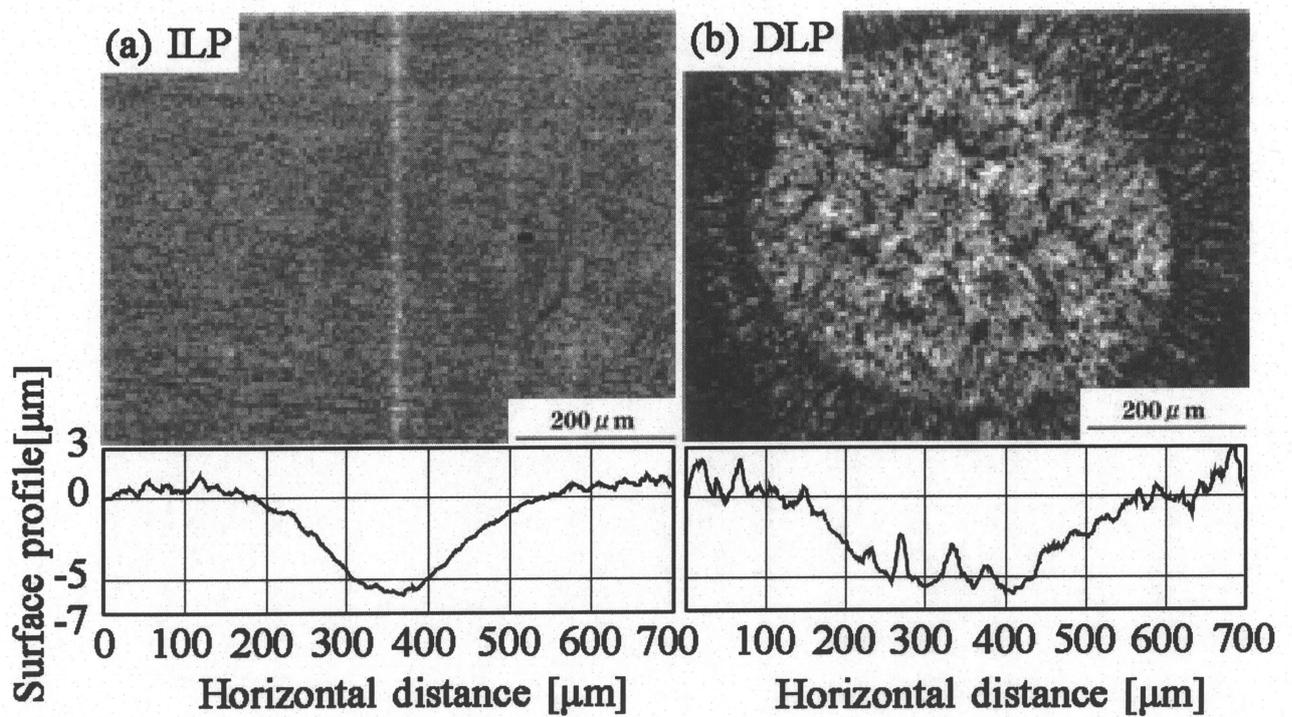


Fig.3-75 Photographs and surface profiles of dimple on substrate
 (a) indirect laser peening;
 Pulse energy : 300mJ, 1 shot,
 substrate thickness : 1mm, sheet thickness : 40μm,
 (b)direct laser peening;
 Pulse energy : 300mJ, 1 shot,
 substrate thickness : 1mm.

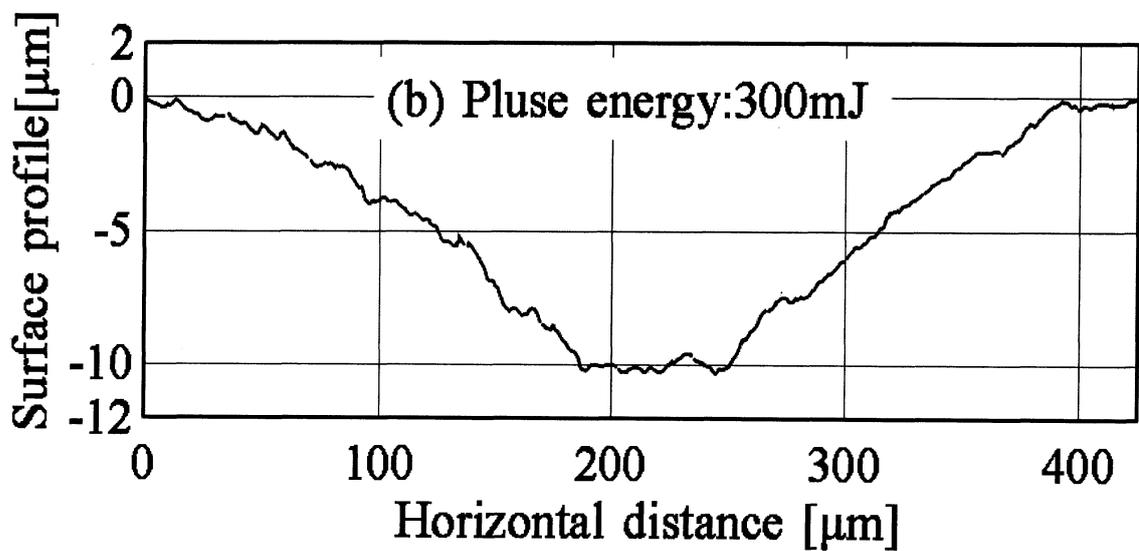
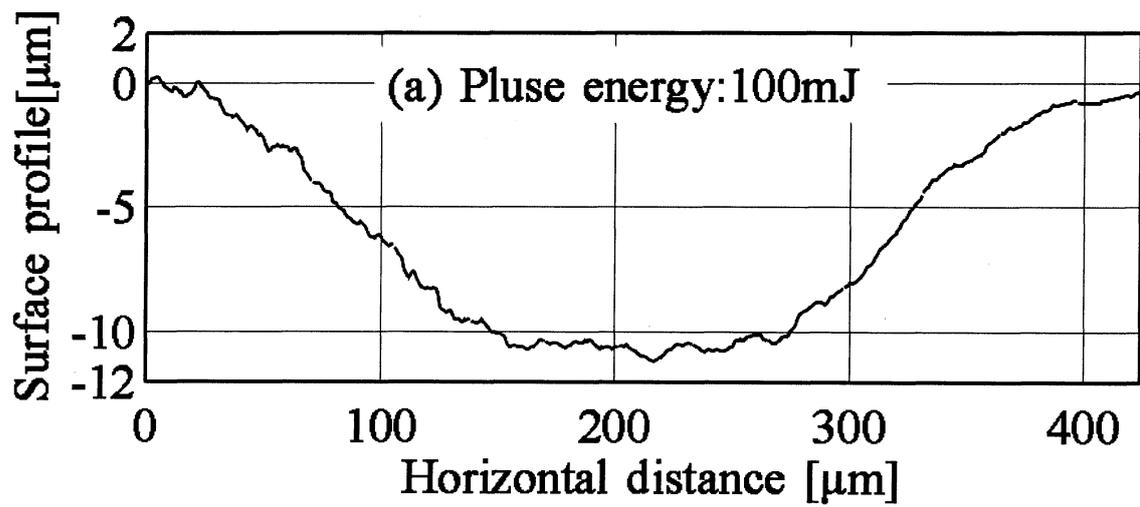


Fig.3-76 Surface profile of dimple on substrate;
 2 shots, sheet thickness: 20μm,
 substrate thickness: 1.0mm.

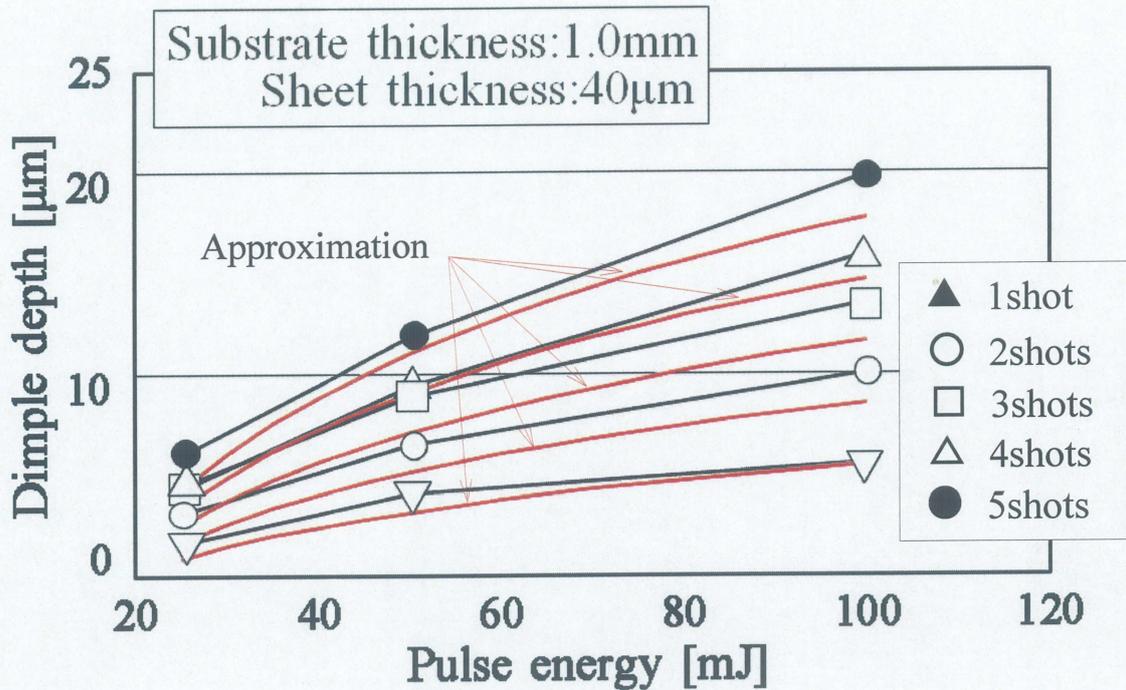


Fig.3-77 Comparison between approximation and experimental results for dimple depth by indirect laser peening; substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 40 μ m.

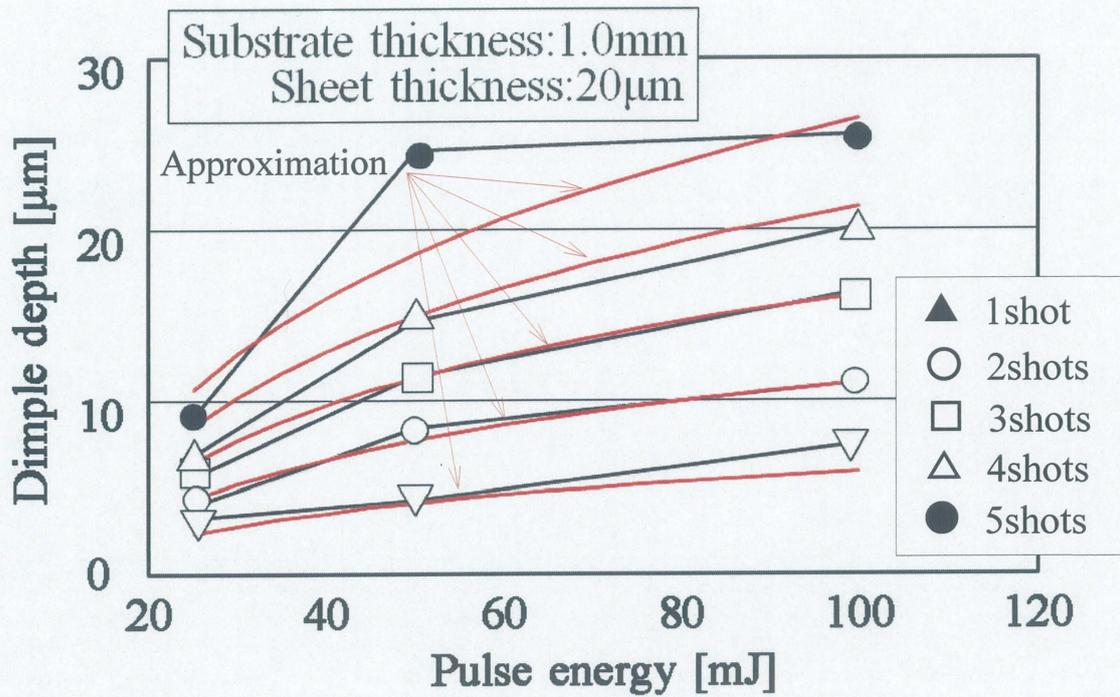


Fig.3-78 Comparison between approximation and experimental results for dimple depth by indirect laser peening; substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 20 μ m.

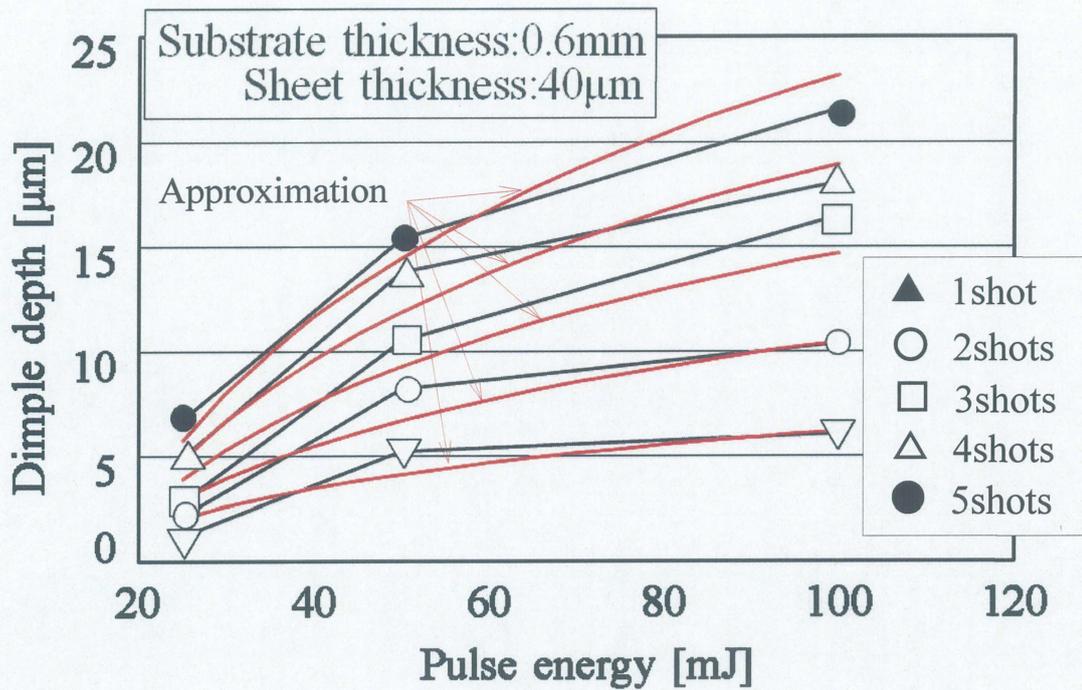


Fig.3-79 Comparison between approximation and experimental results for dimple depth by indirect laser peening; substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 40μm.

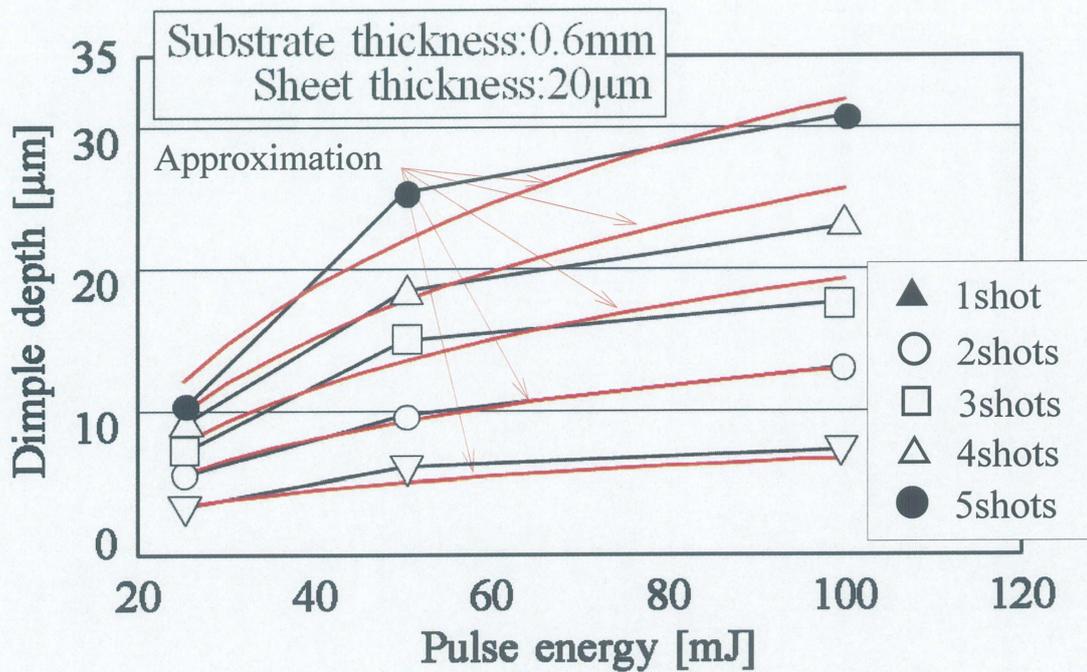


Fig.3-80 Comparison between approximation and experimental results for dimple depth by indirect laser peening; substrate thickness : 0.6mm, sheet thickness : 20 μ m.

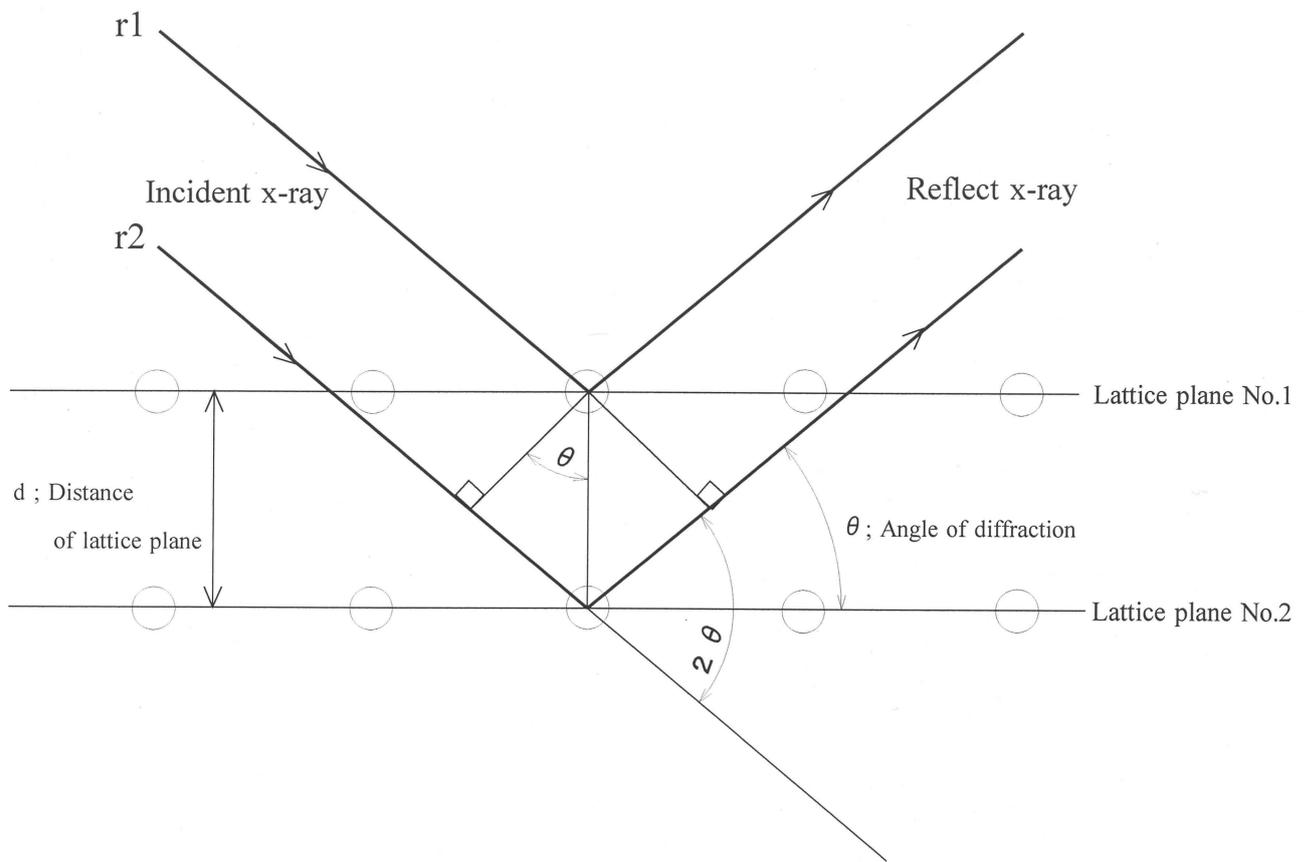


Fig.4-1 Schematic diagram of Bragg diffraction.

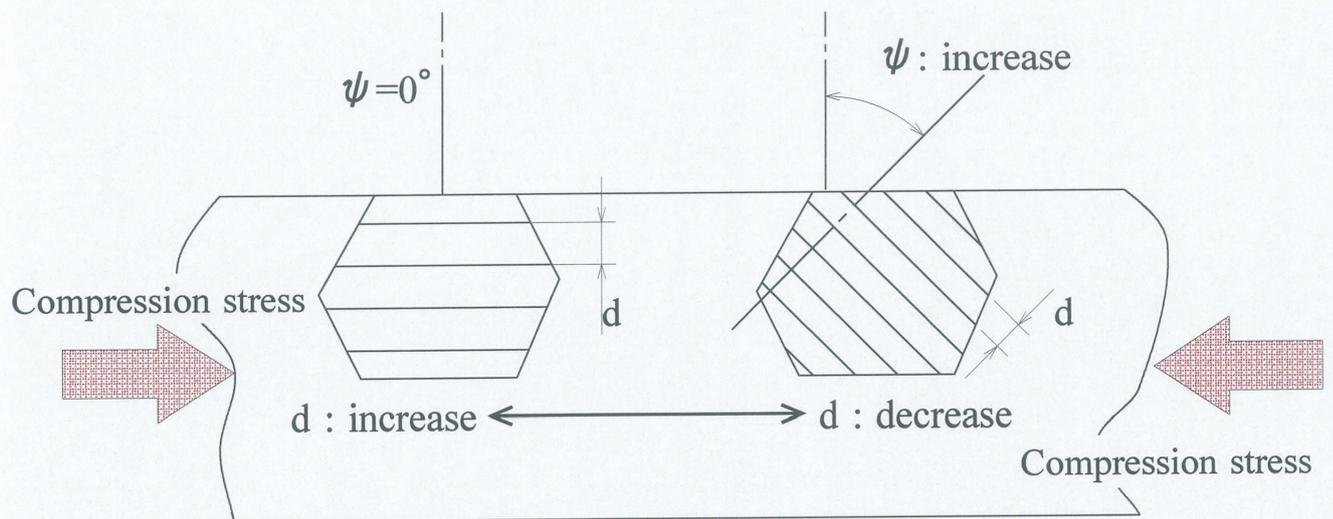


Fig.4-2 Change of diffractive surface distance in compression stress state.

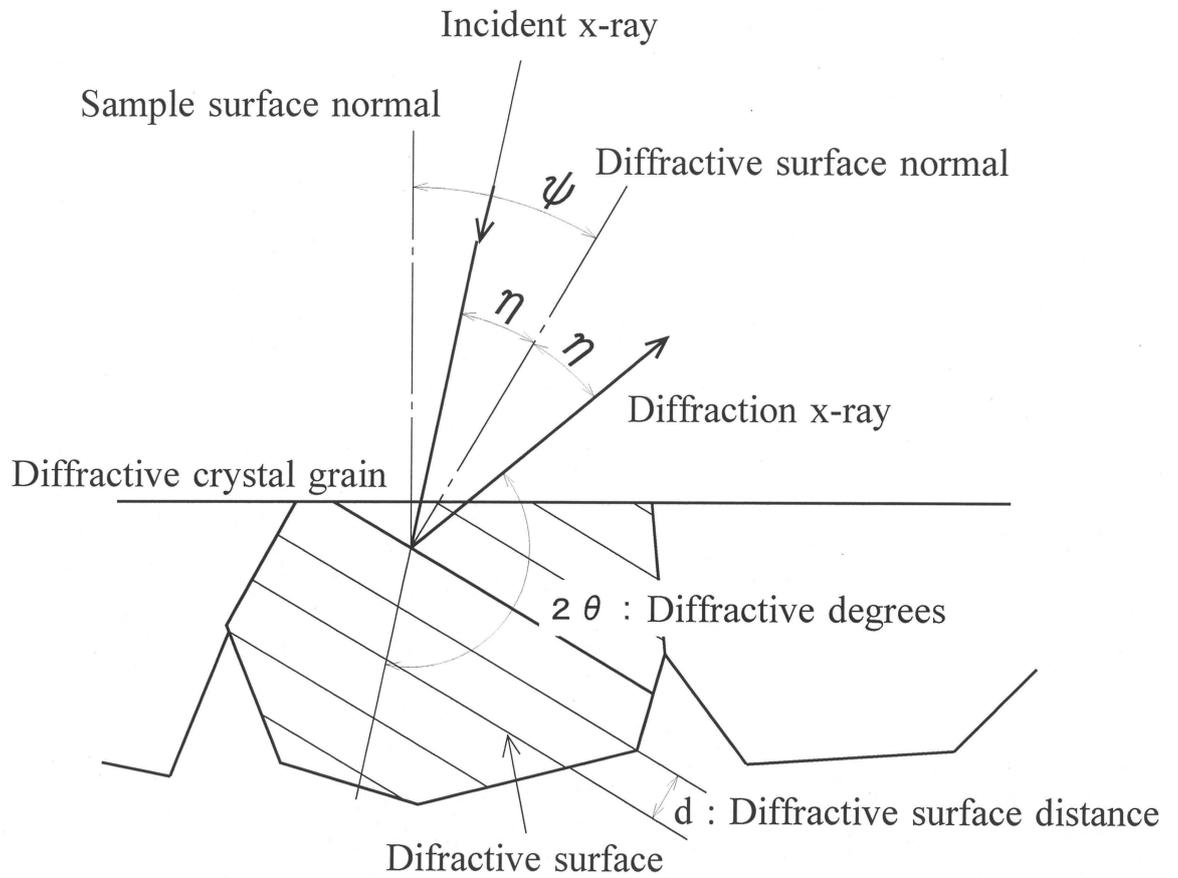


Fig.4-3 Schematic diagram of diffractive crystal grain.

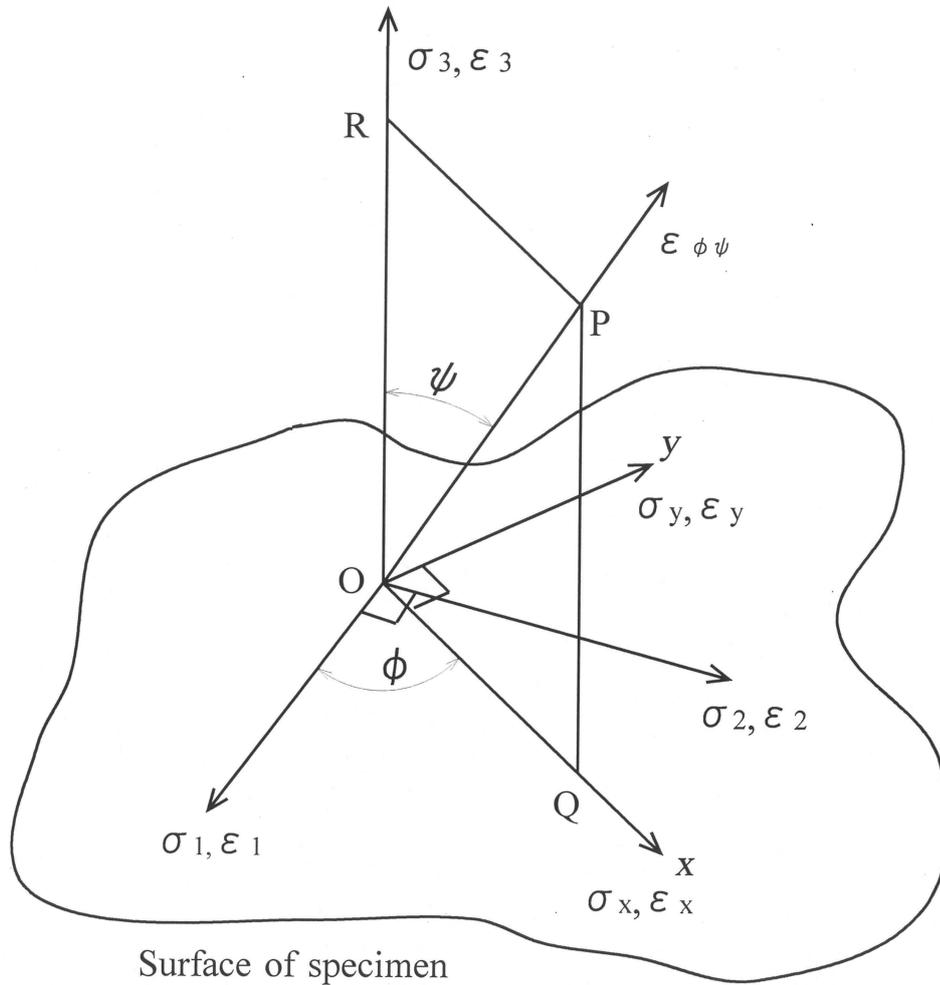


Fig.4-4 Direction of stress and strain on surface.

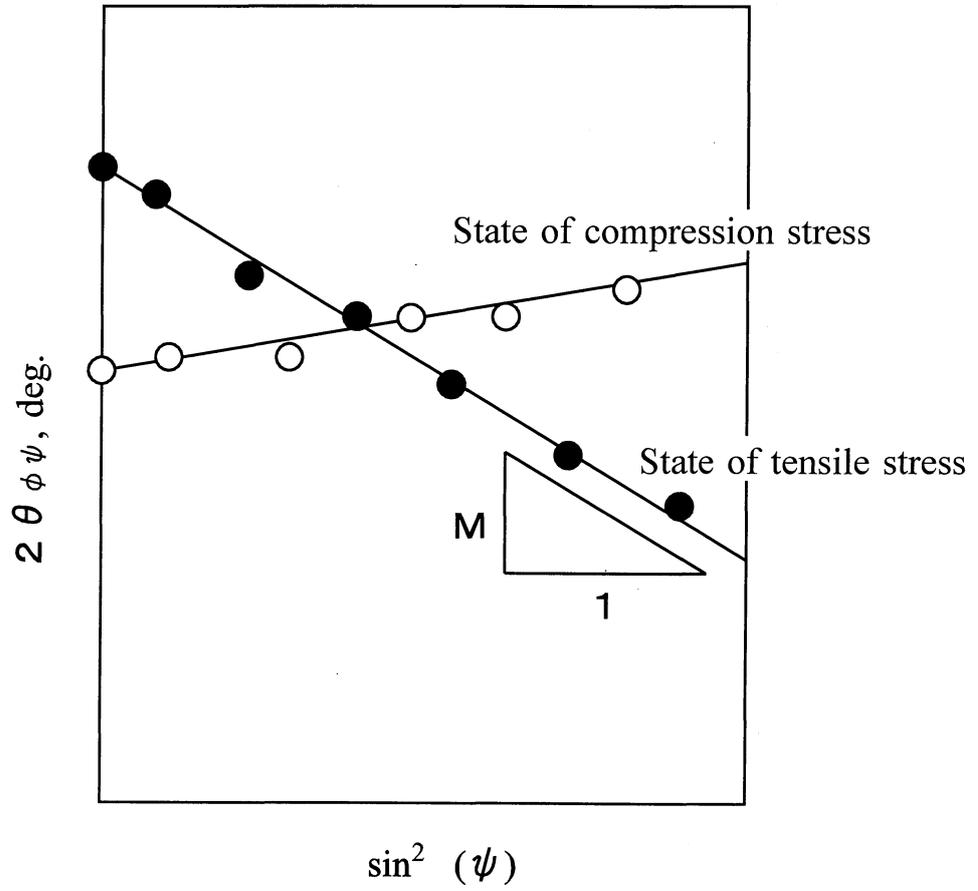


Fig.4-5 $2\theta\phi\psi - \sin^2\psi$ diagram.



Fig.4-6 Panoramic view of x-ray diffractometer.

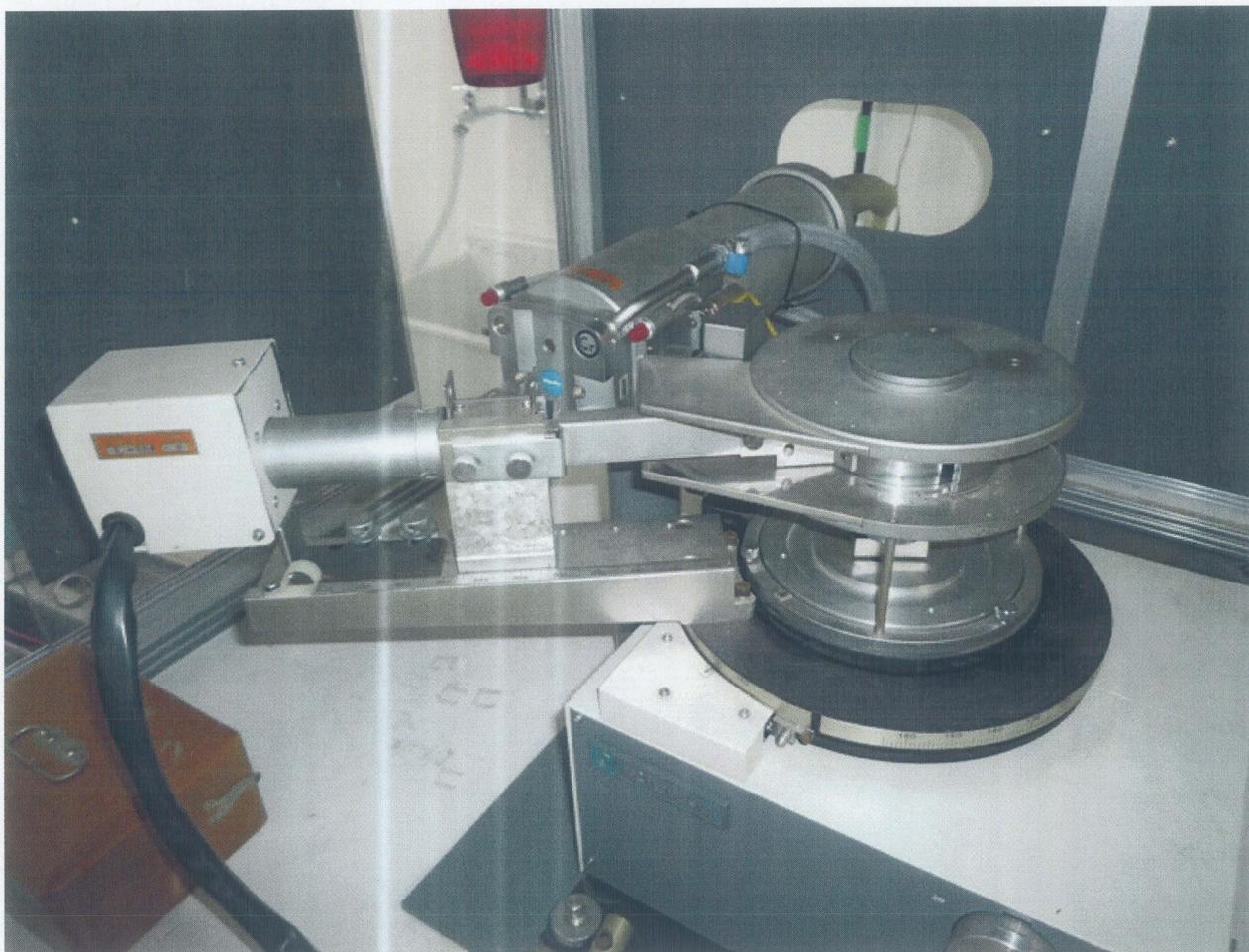


Fig.4-7 Photograph of goniometer.

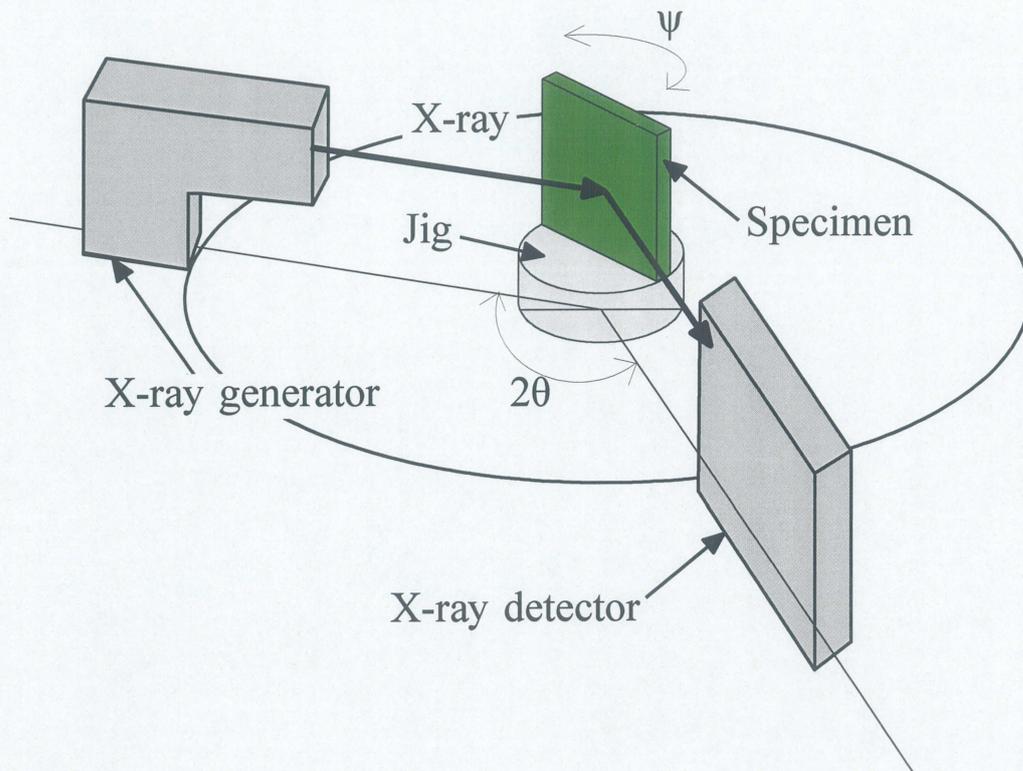


Fig.4-8 Schematic diagram of x-ray diffractometer.

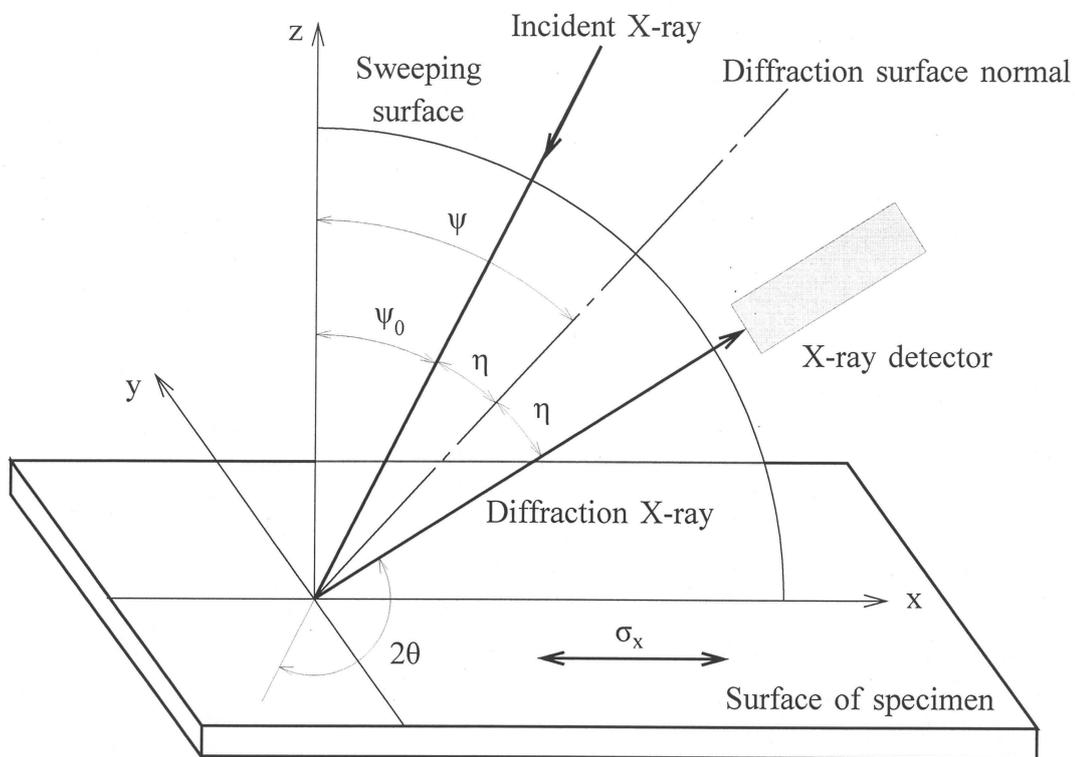


Fig.4-9 Scan technique with iso-inclination method.

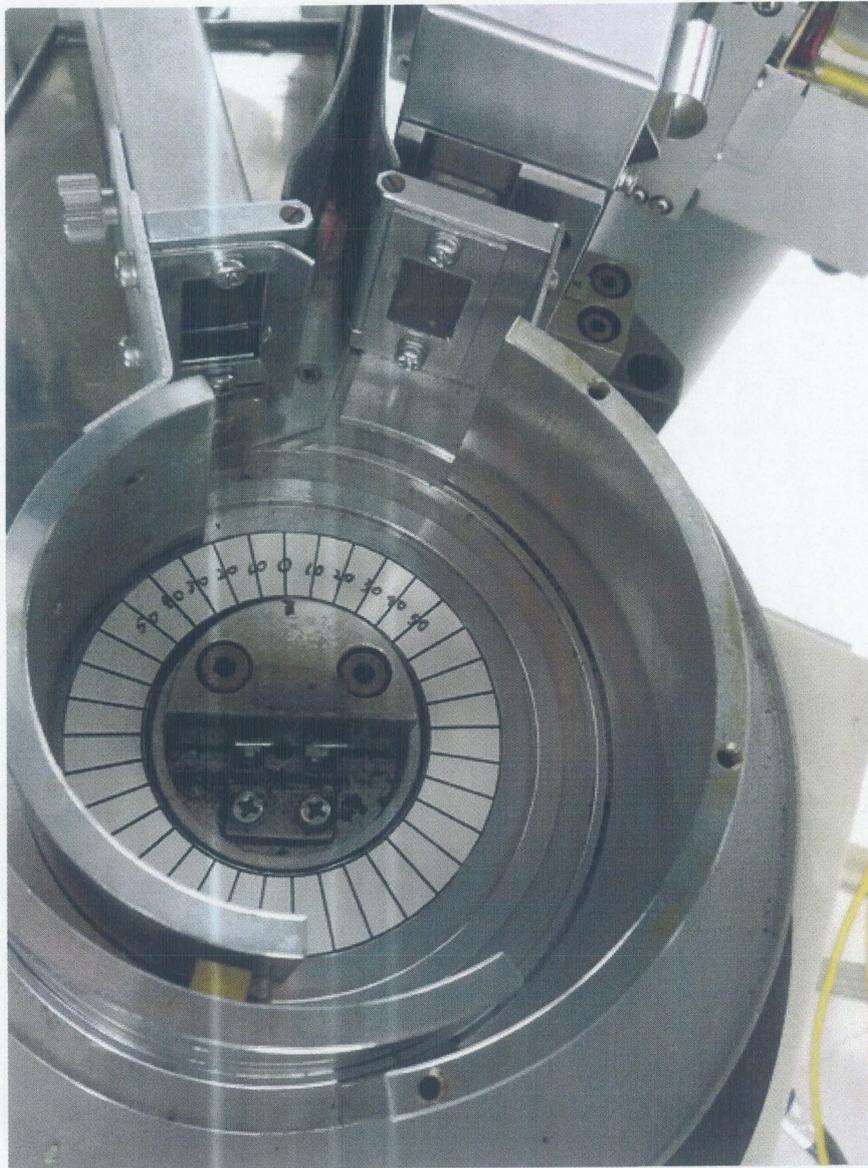


Fig.4-10 Scale of ψ -degrees.

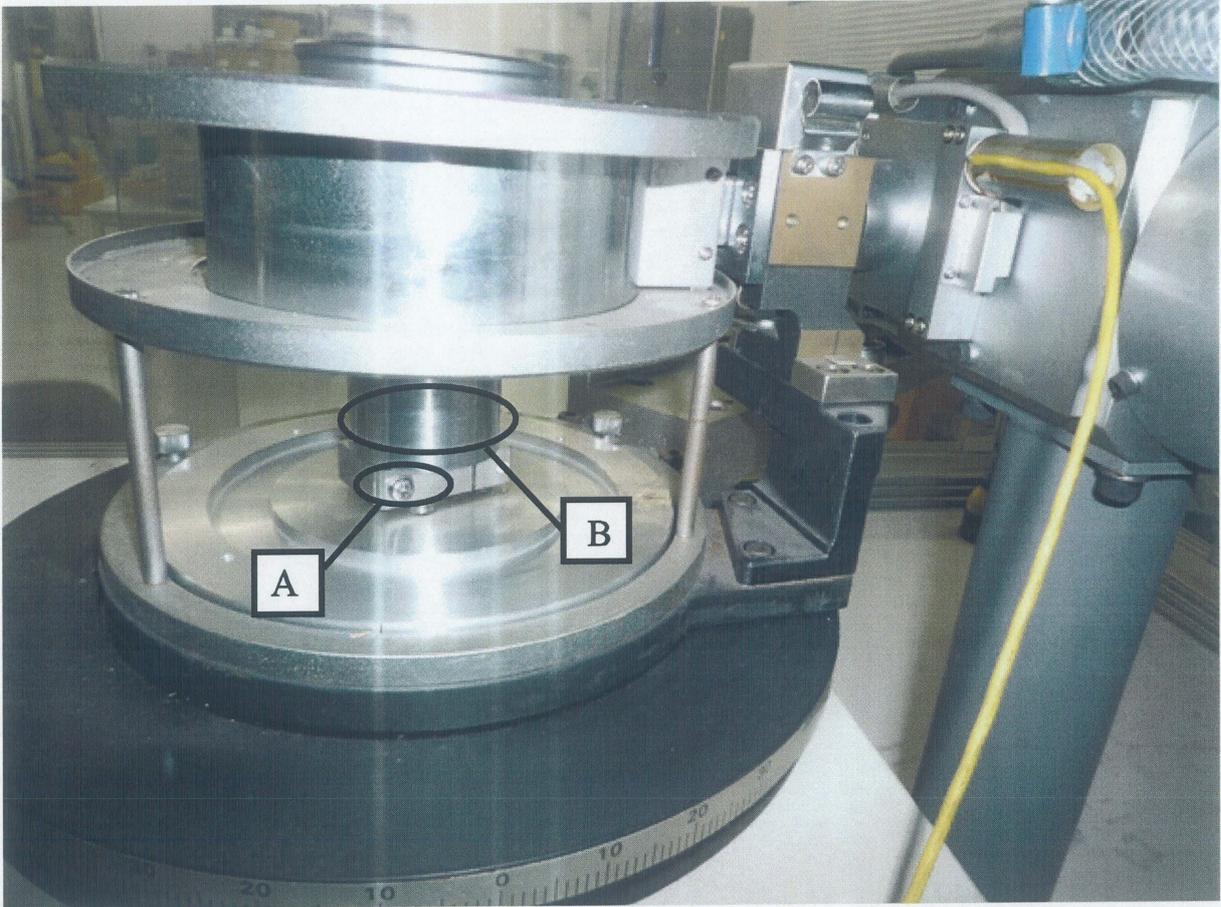


Fig.4-11 Back view of goniometer.

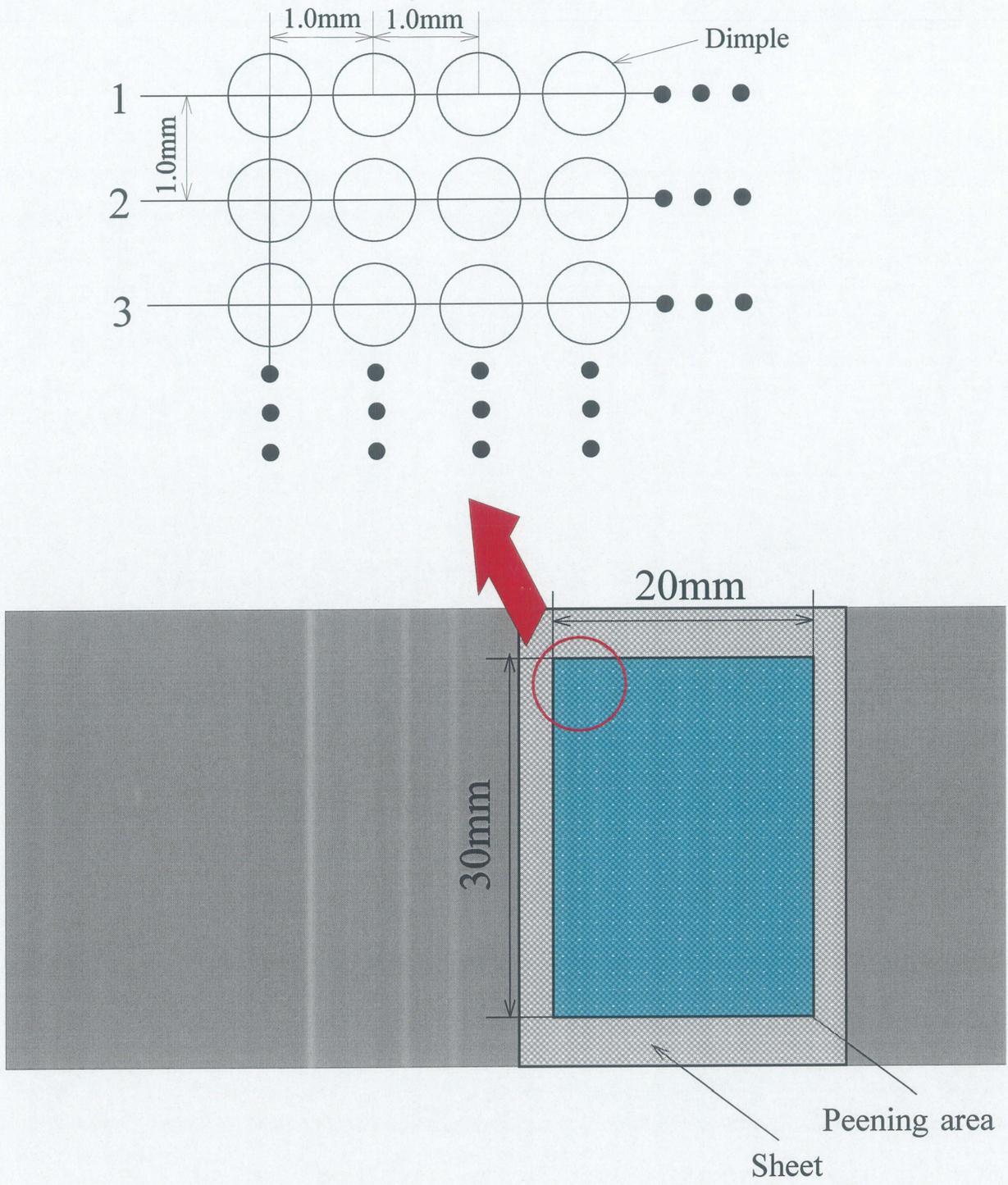


Fig.4-12 Detail of dimple array by indirect laser peening.

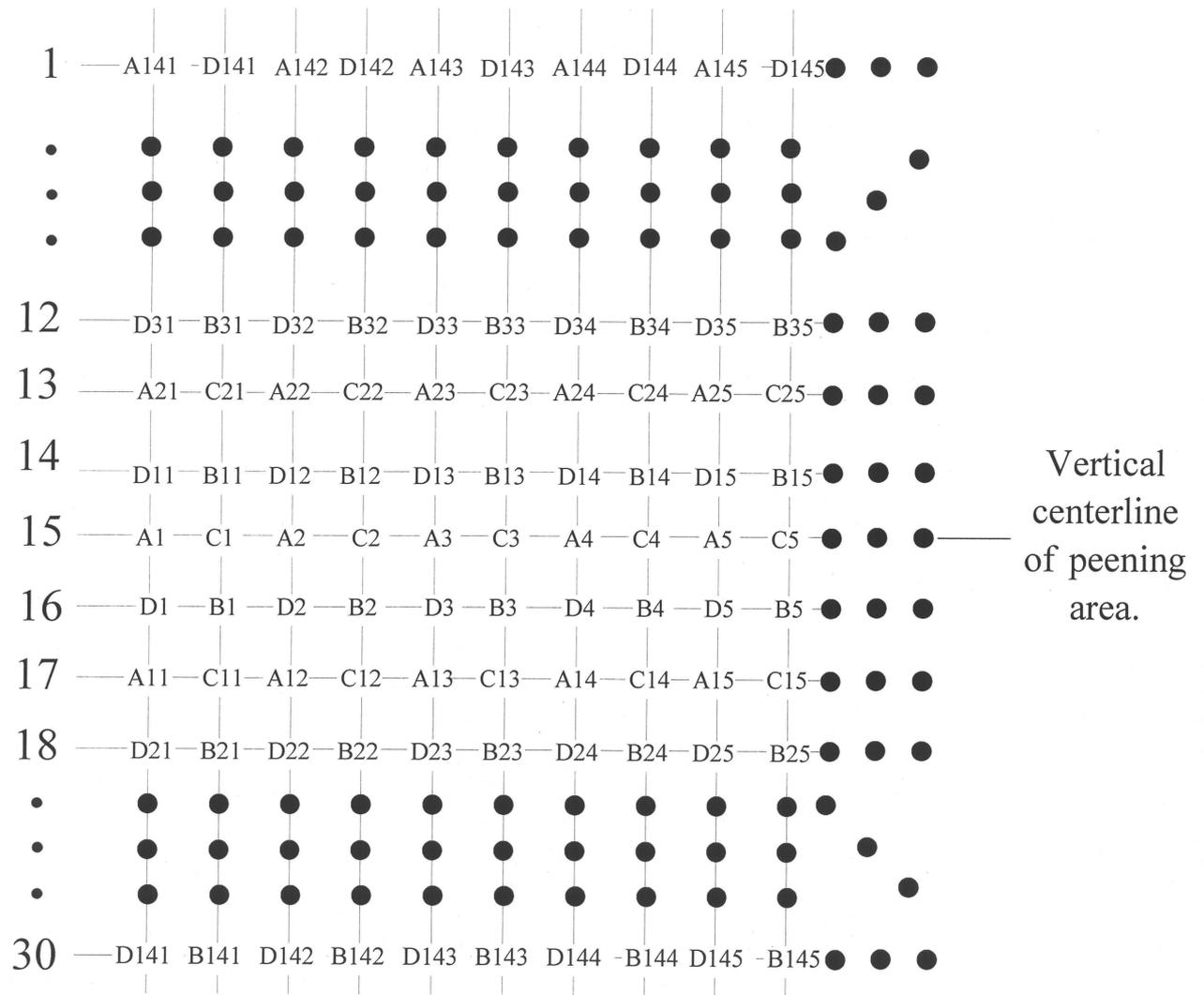
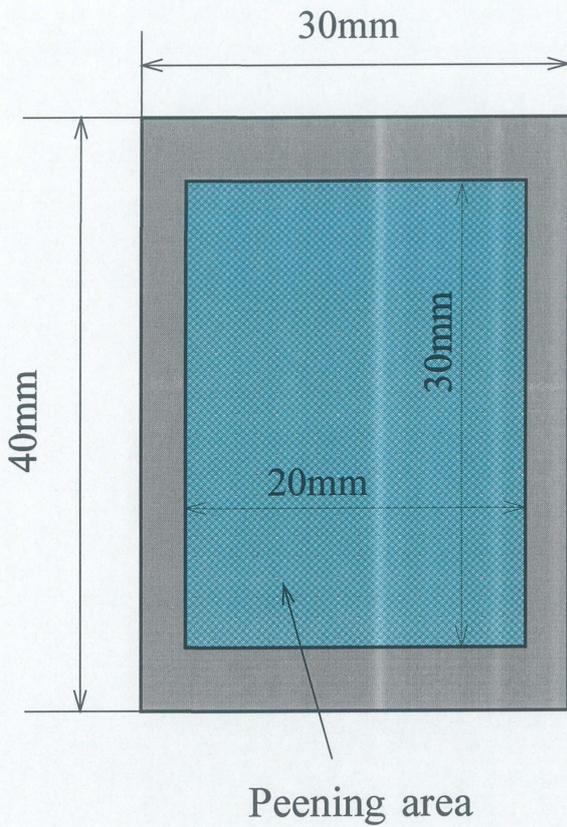
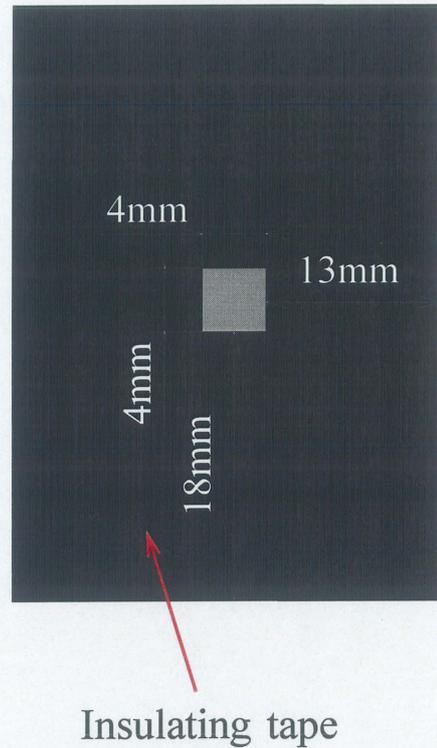


Fig.4-13 Sequence of laser peening.



(a) Dimension of peened specimen.



(b) Dimension of masked specimen.

Fig.4-14 Specimens for residual stress measurement by X-ray diffraction.

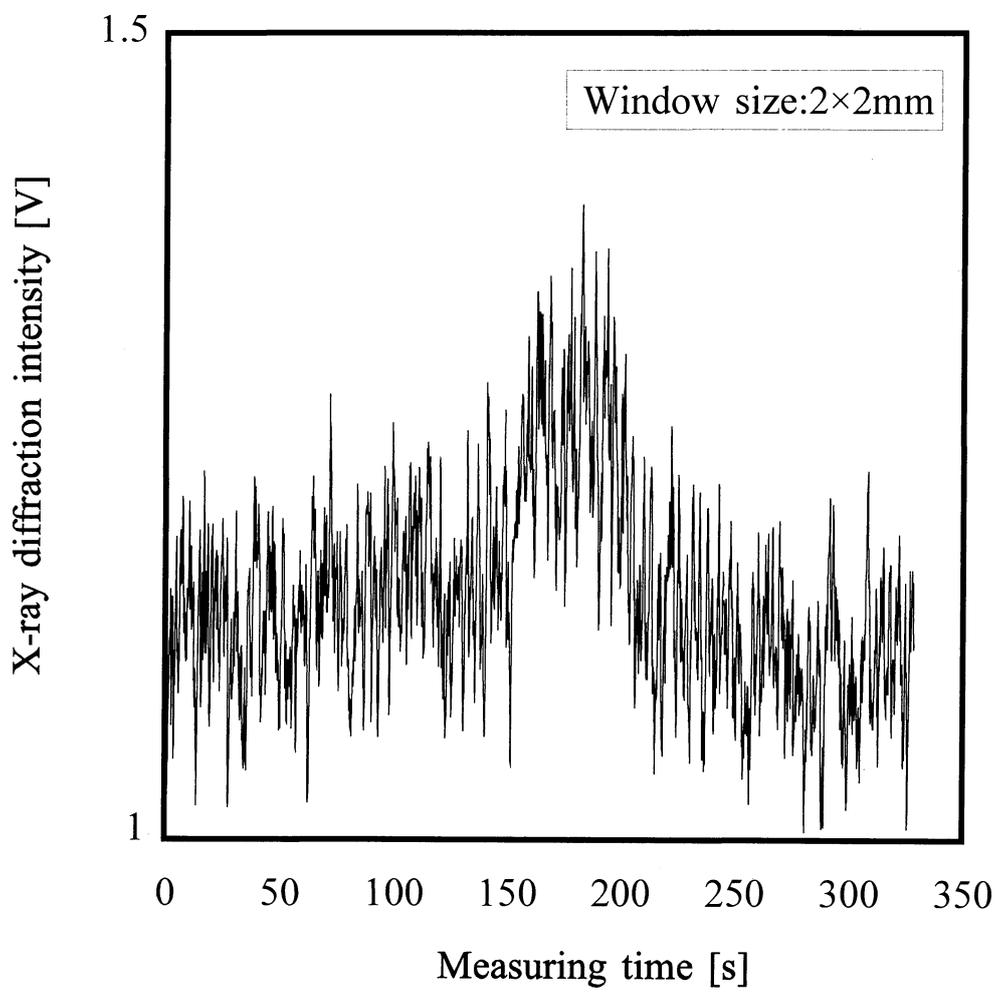


Fig.4-15 X-ray diffraction intensity curve;
Windows size:2 × 2mm.

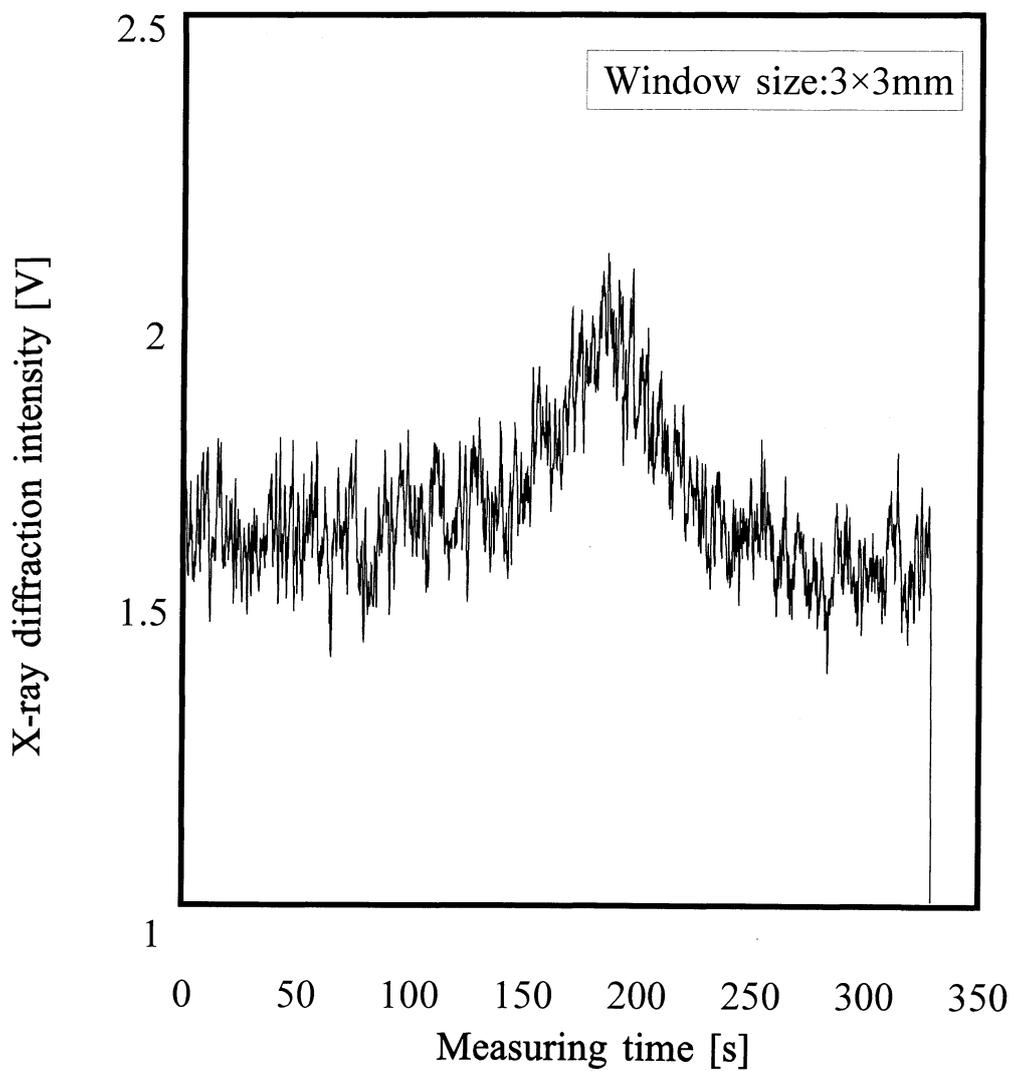


Fig.4-16 X-ray diffraction intensity curve;
Windows size:3 × 3mm.

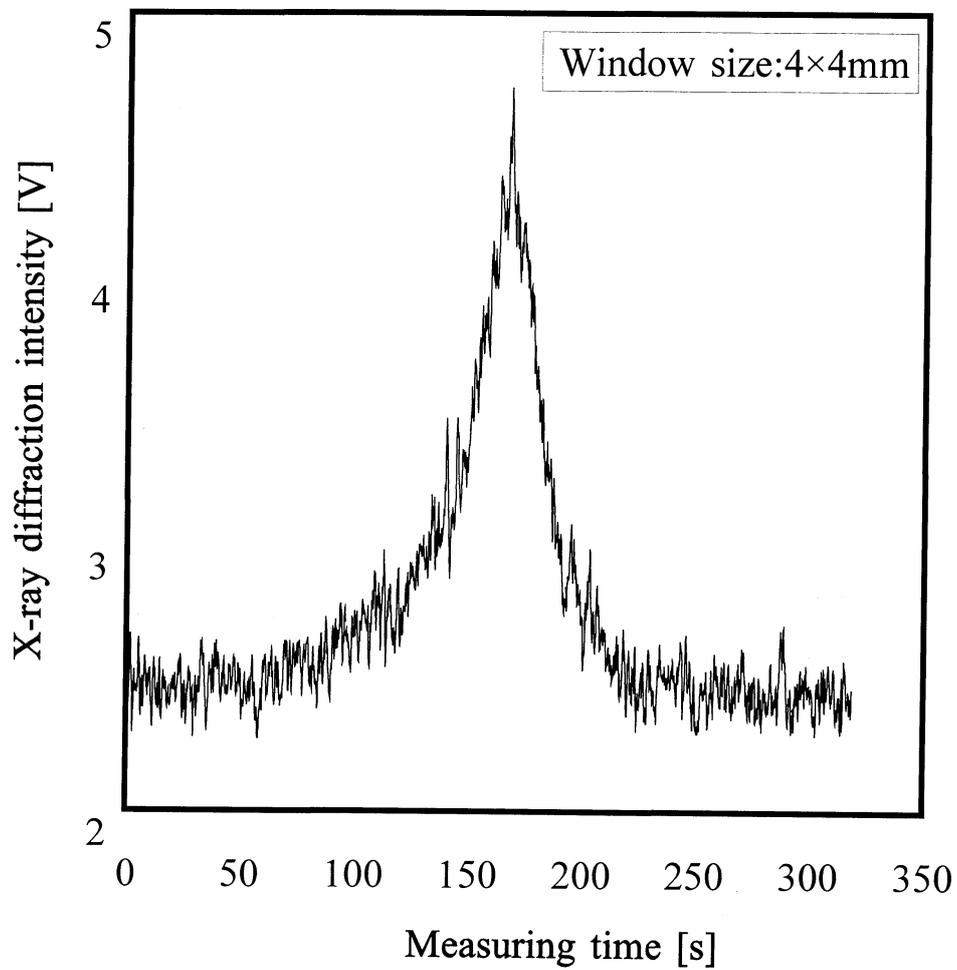


Fig.4-17 X-ray diffraction intensity curve;
Windows size:4 × 4mm.

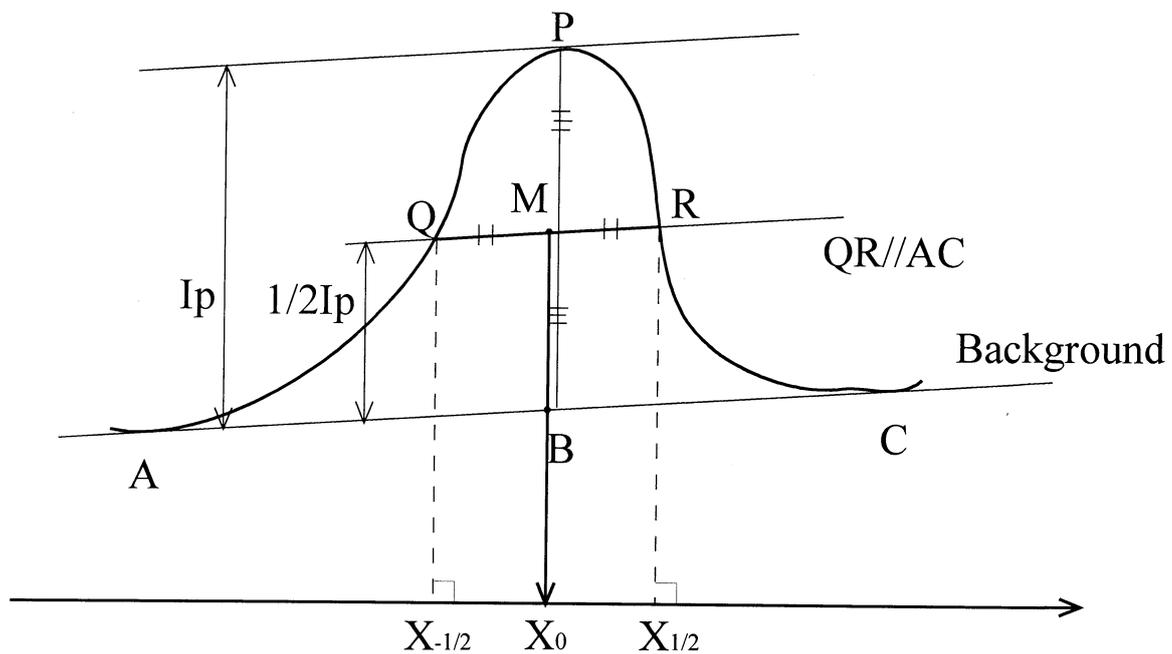


Fig.4-18 Schematic diagram of half-width method.

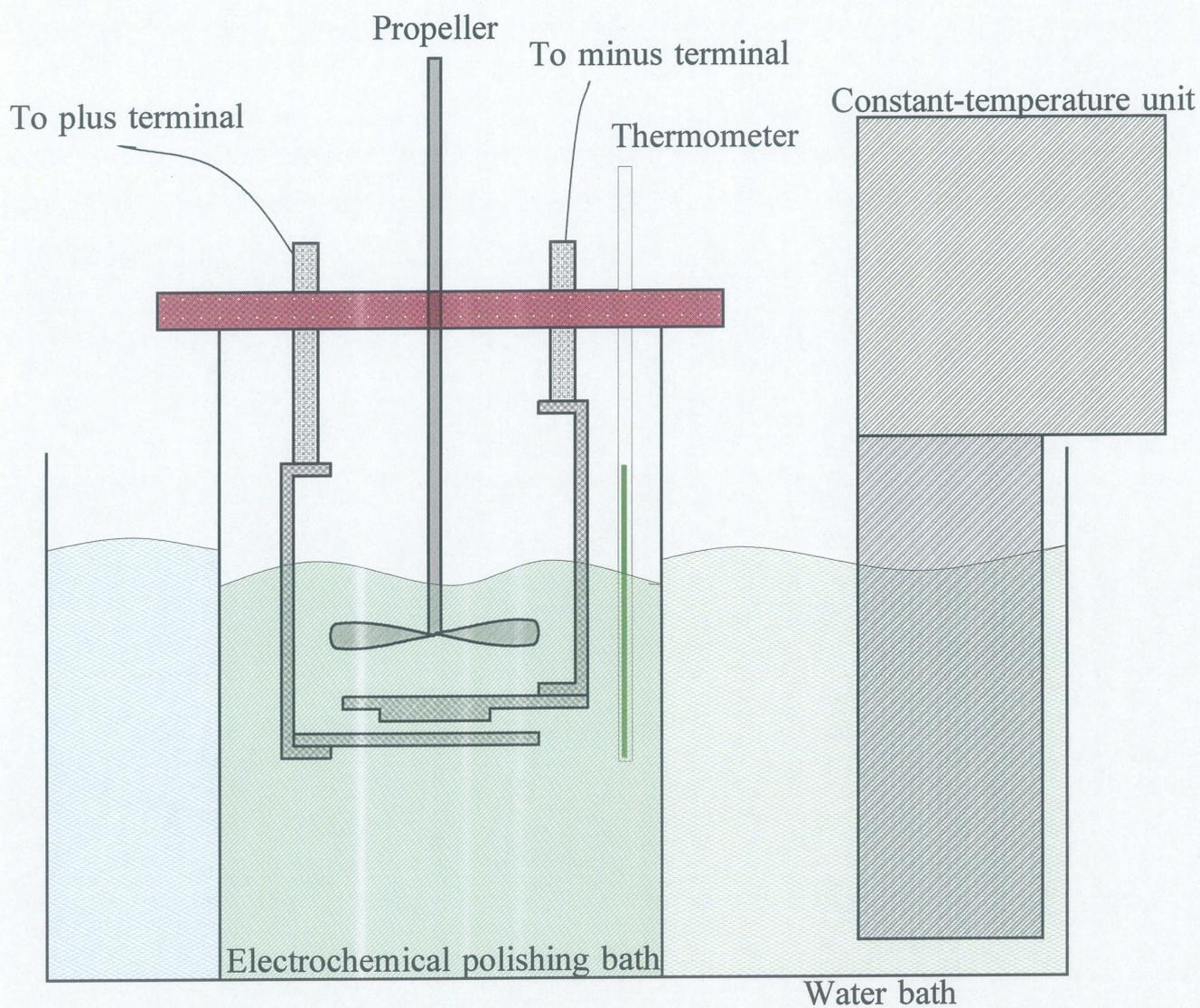


Fig.4-19 Schematic diagram of electrochemical polishing machine.



Fig.4-20 Panoramic view
of electrochemical polishing apparatus.

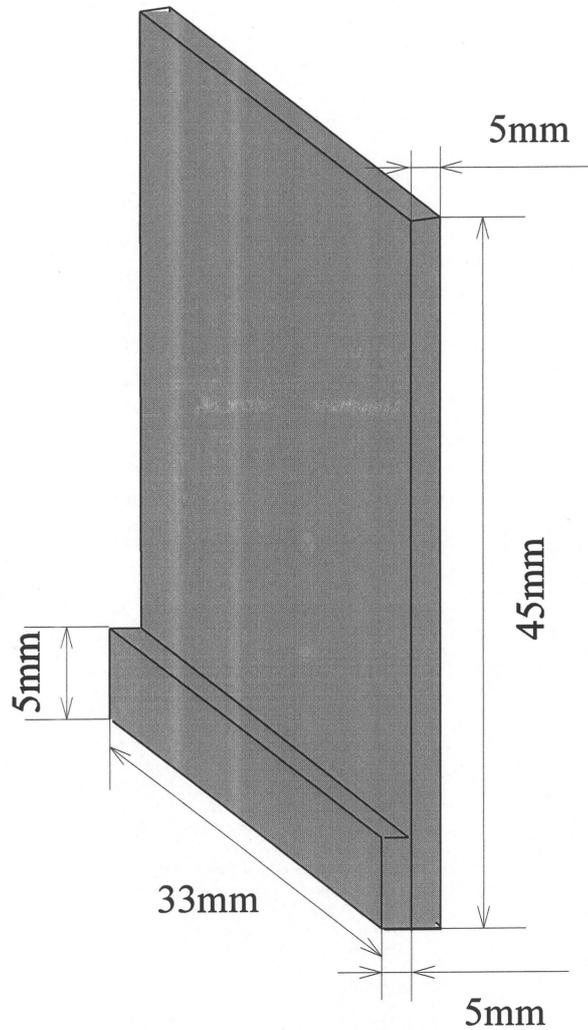


Fig.4-21 Dimension of jig for support of specimen in goniometer.

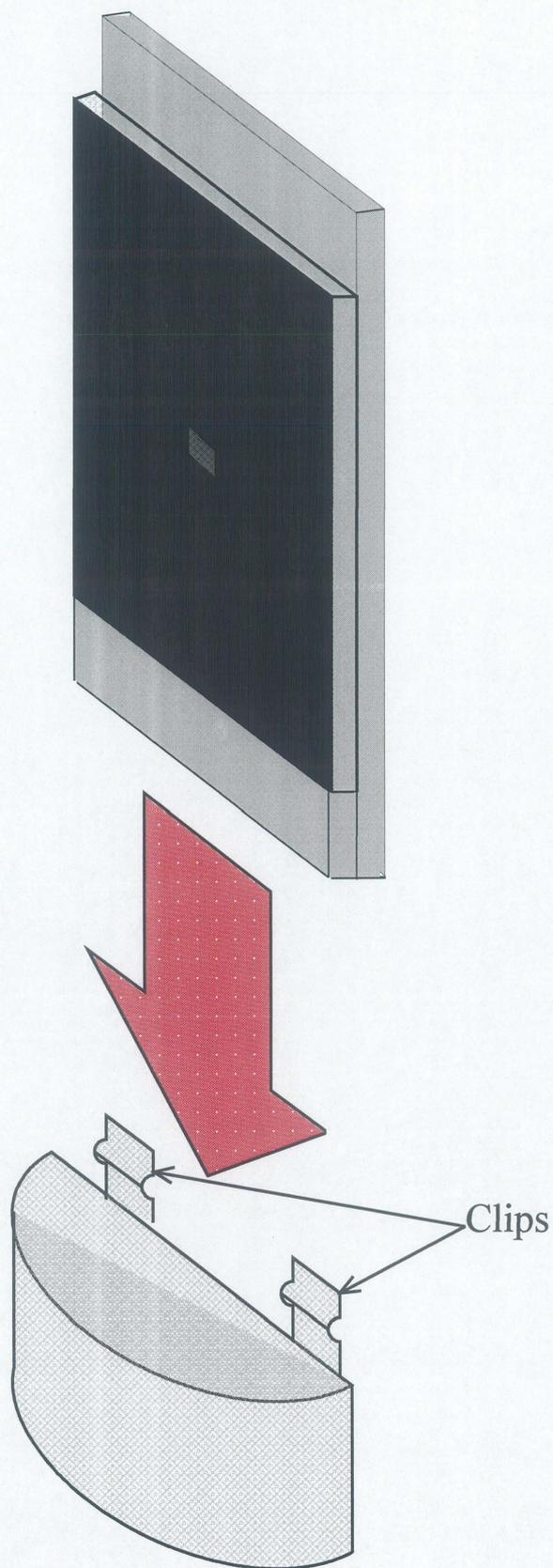


Fig.4-22 Assembly of specimen in goniometer.

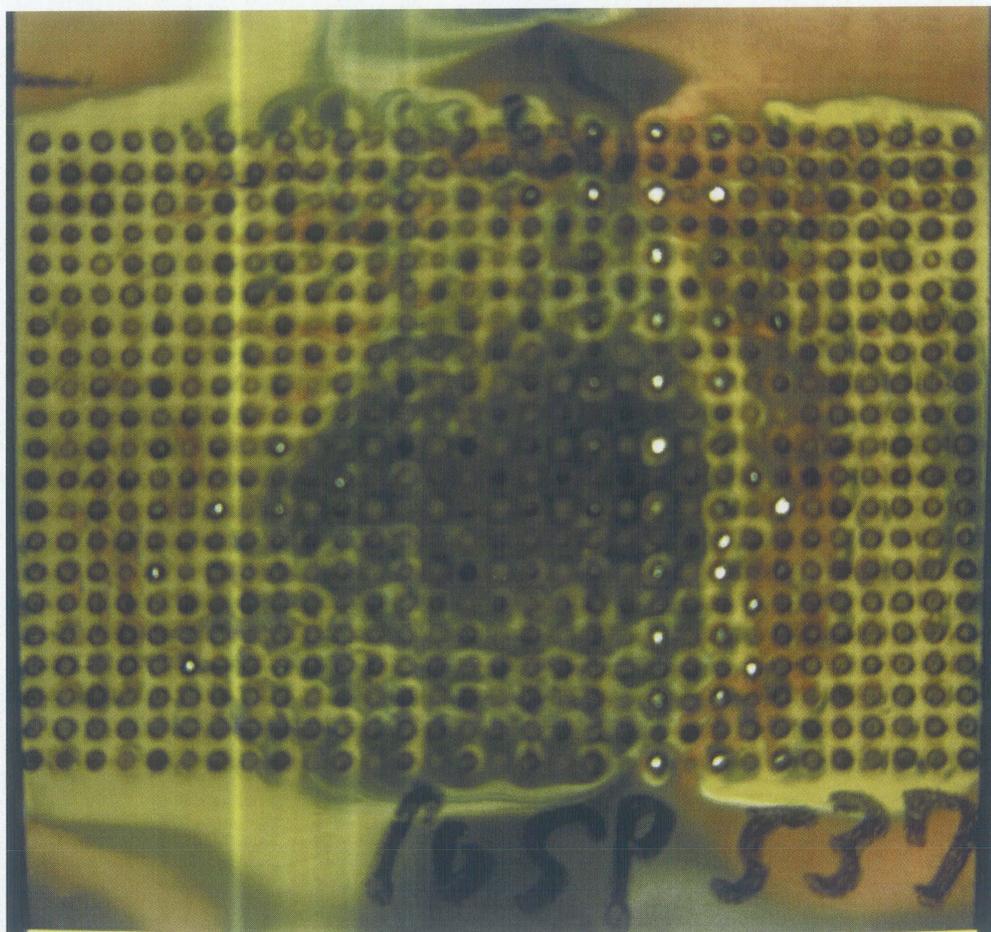


Fig.4-23 Photograph of sheet after indirect laser peening;
substrate thickness:1.0mm,
sheet thickness:30 μ m,
pulse energy:100mJ,2 shots.

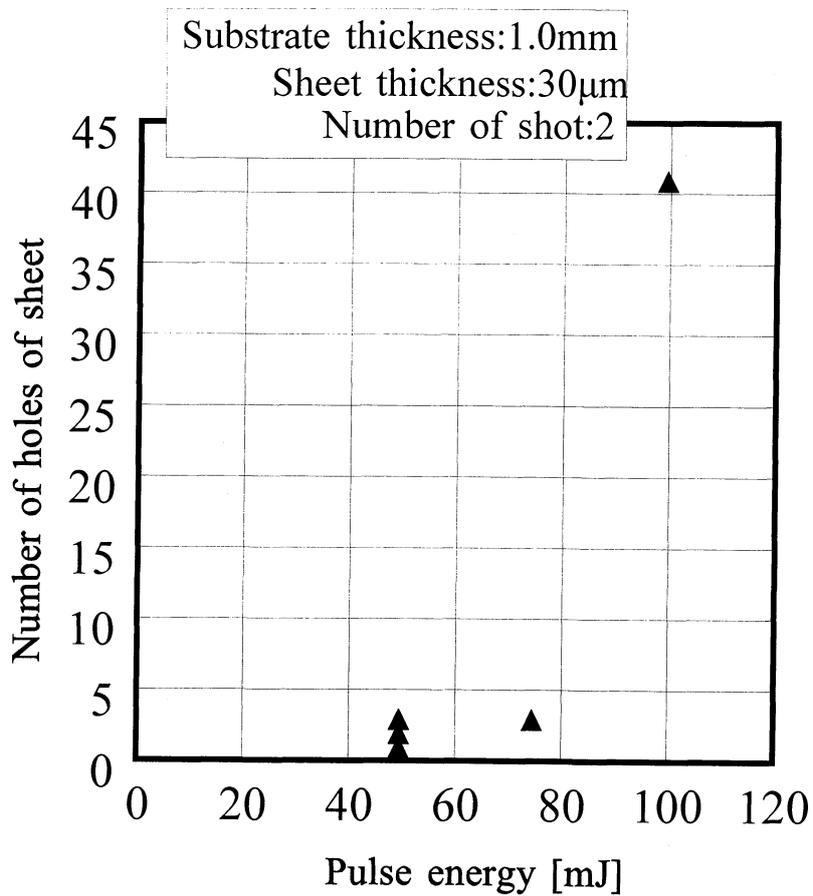


Fig.4-24 Relation between number of holes of sheet and pulse energy at indirect laser peening; Substrate thickness : 1.0mm, sheet thickness : 30 μ m, 2 shots.

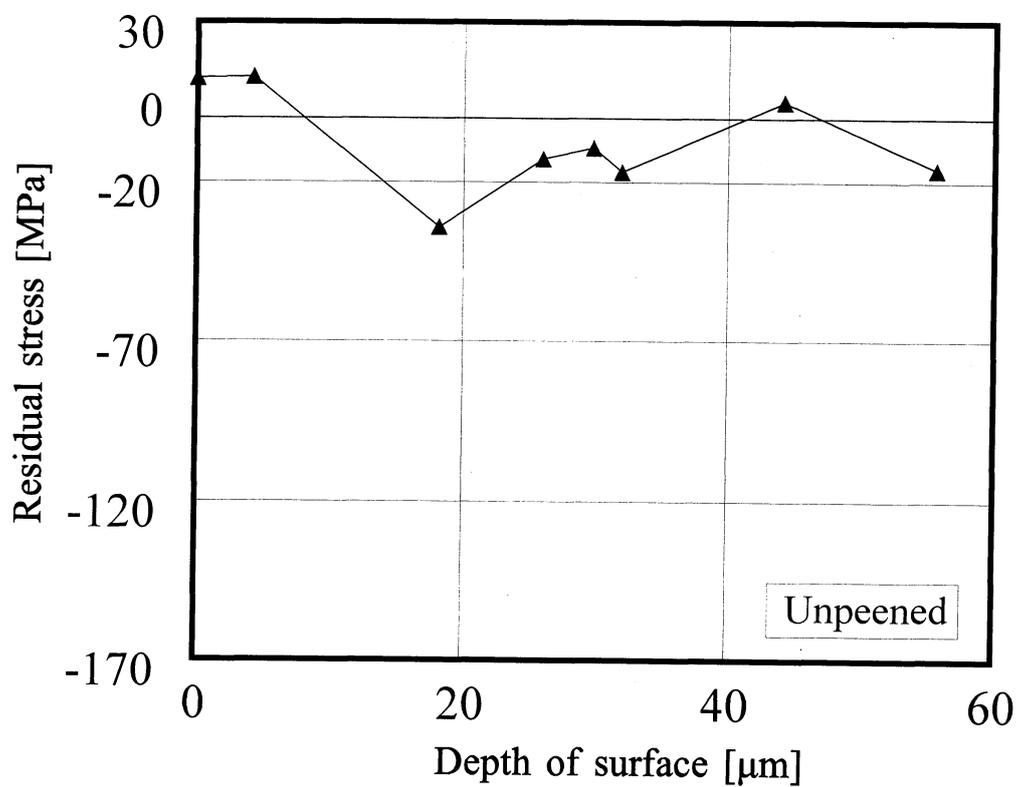


Fig.4-25 Residual stress distribution; unpeened.

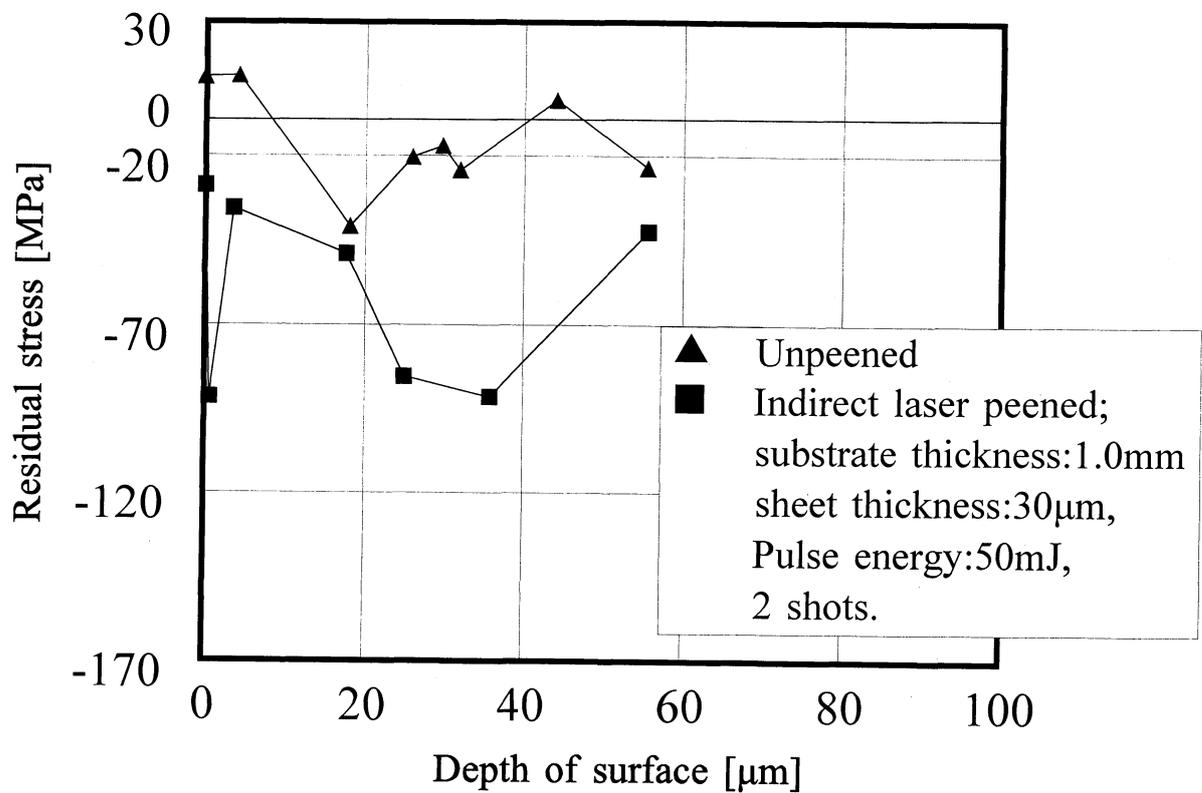


Fig.4-26 Comparison Residual stress distribution between Unpeened and indirect laser peened; substrate thickness:1.0mm, sheet thickness:30 μm , pulse energy:50mJ, 2 shots.

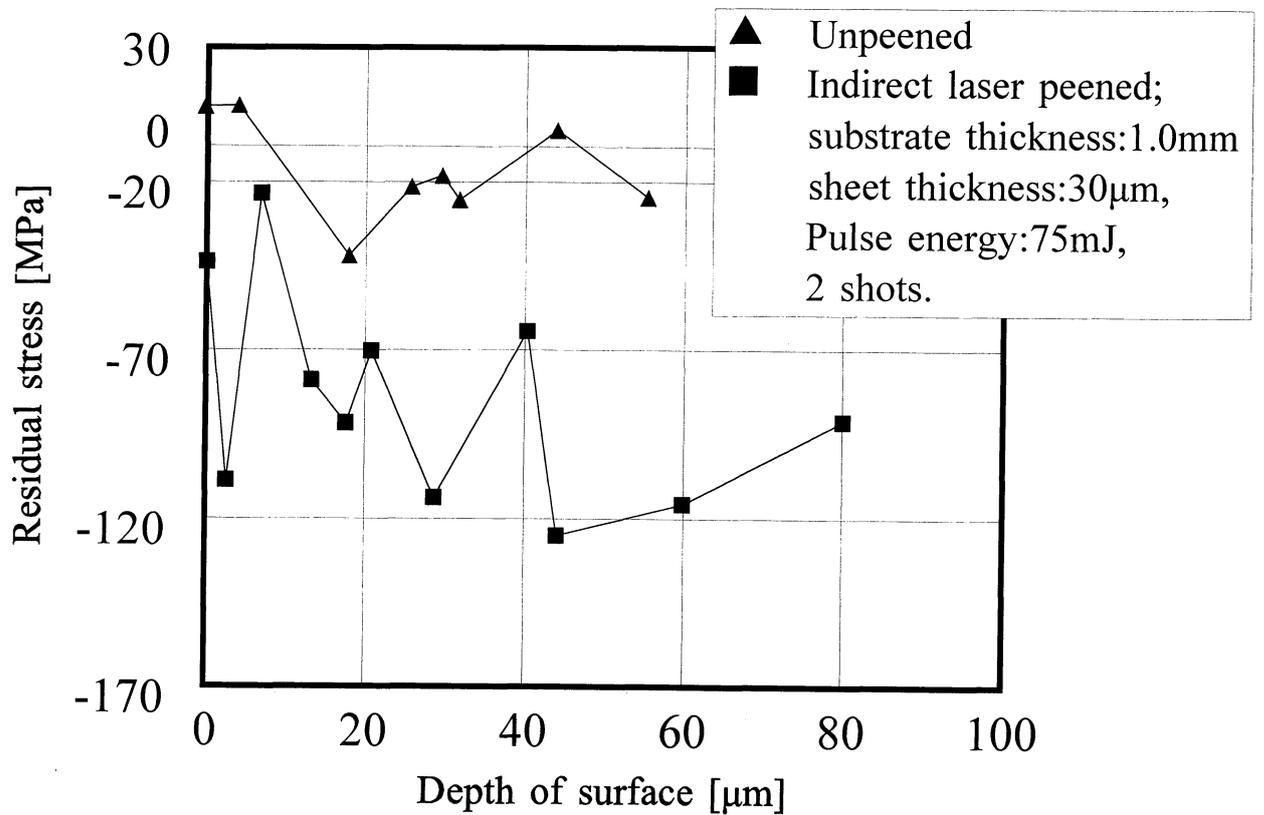


Fig.4-27 Comparison Residual stress distribution between Unpeened and indirect laser peened; substrate thickness:1.0mm, sheet thickness:30 μ m, pulse energy:75mJ, 2 shots.

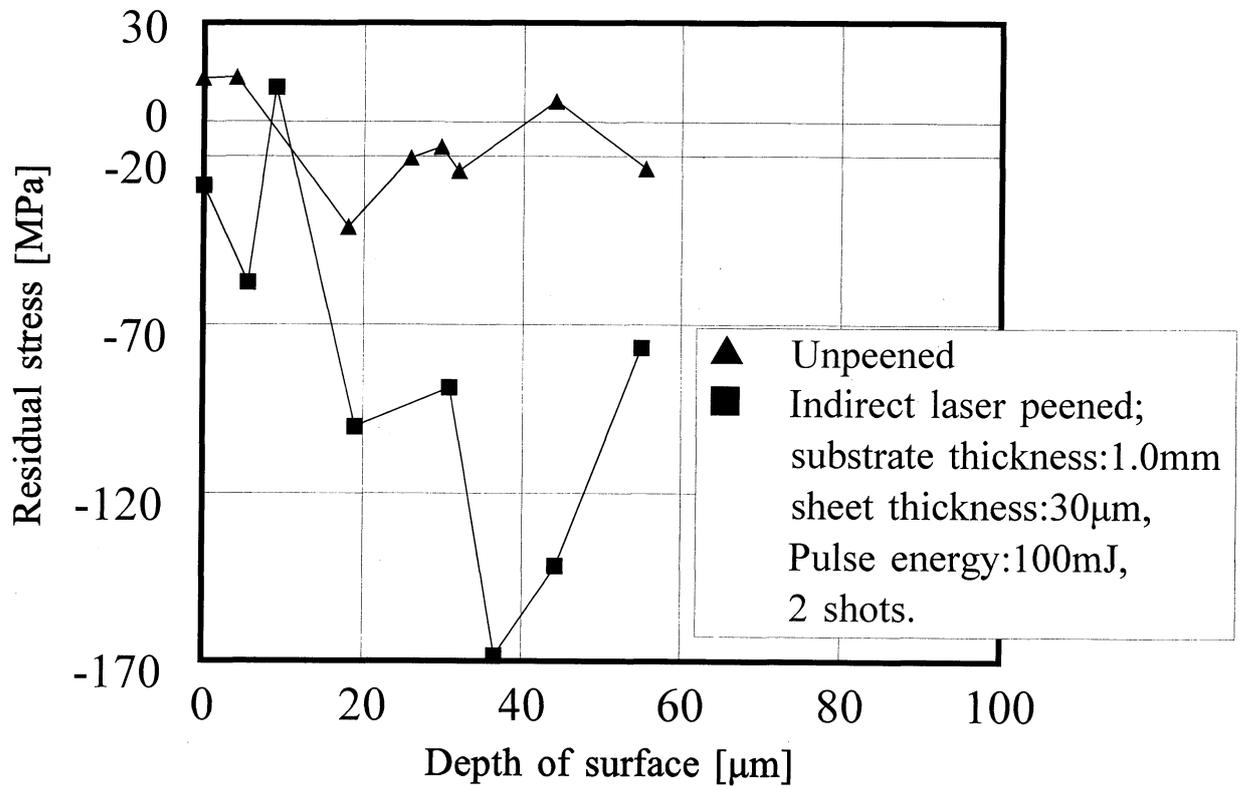


Fig.4-28 Comparison Residual stress distribution between Unpeened and indirect laser peened; substrate thickness:1.0mm, sheet thickness:30 μm , pulse energy:100mJ, 2 shots.

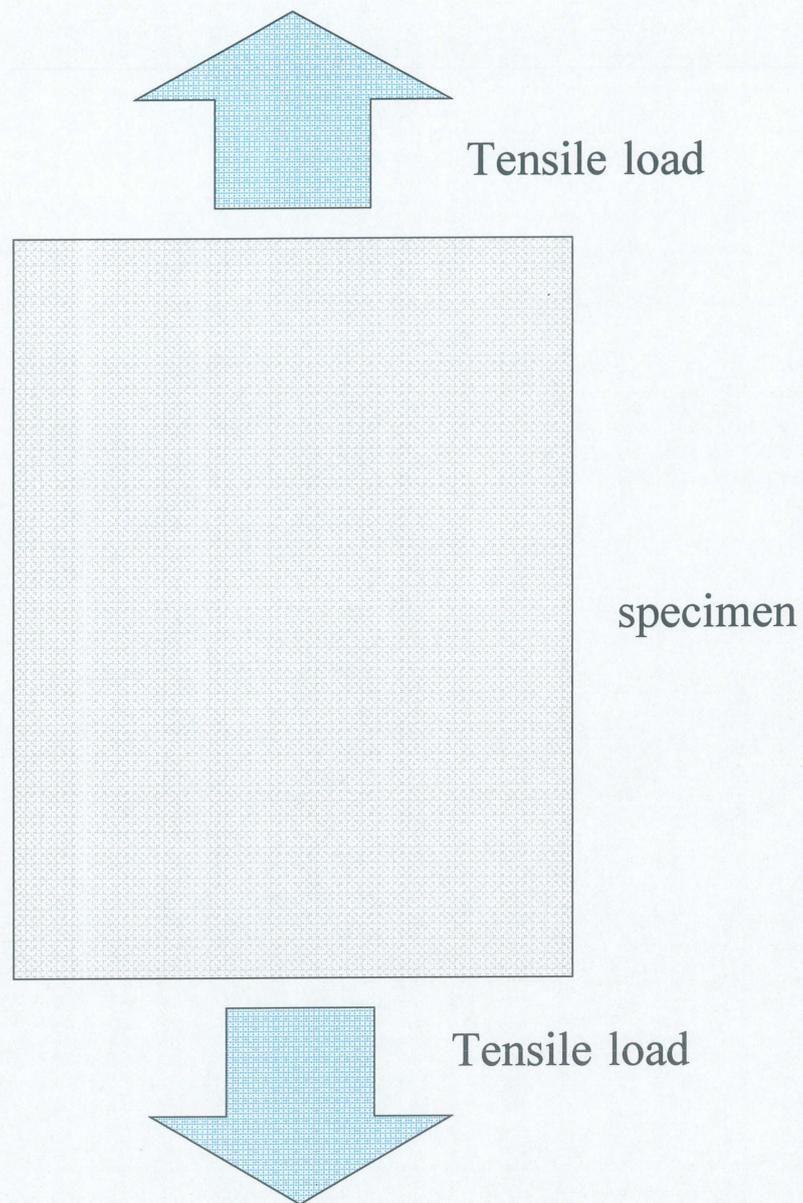
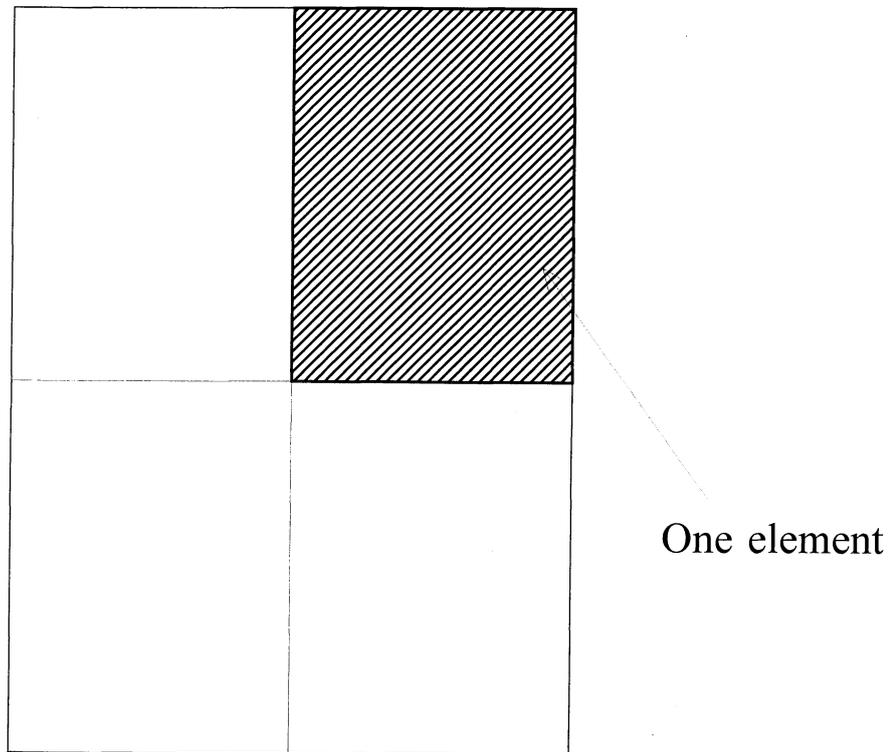
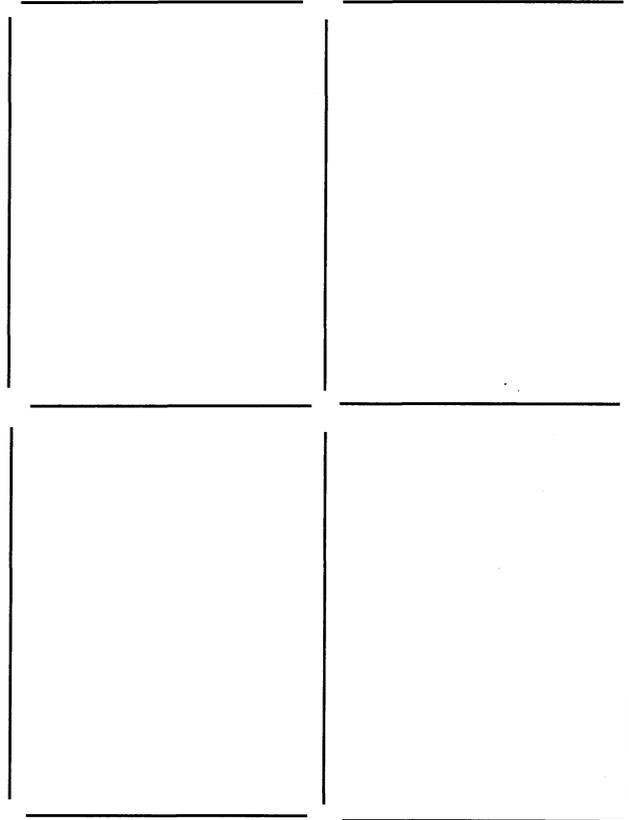


Fig.5-1 Example;
simulation of two-dimension model
crimped both ends.



Two-dimension element model

Fig.5-2 Meshing two-dimension model
crimped both ends;
node number = 9
element number = 4.



Two-dimension model

Fig.5-3 Dissolution element model.

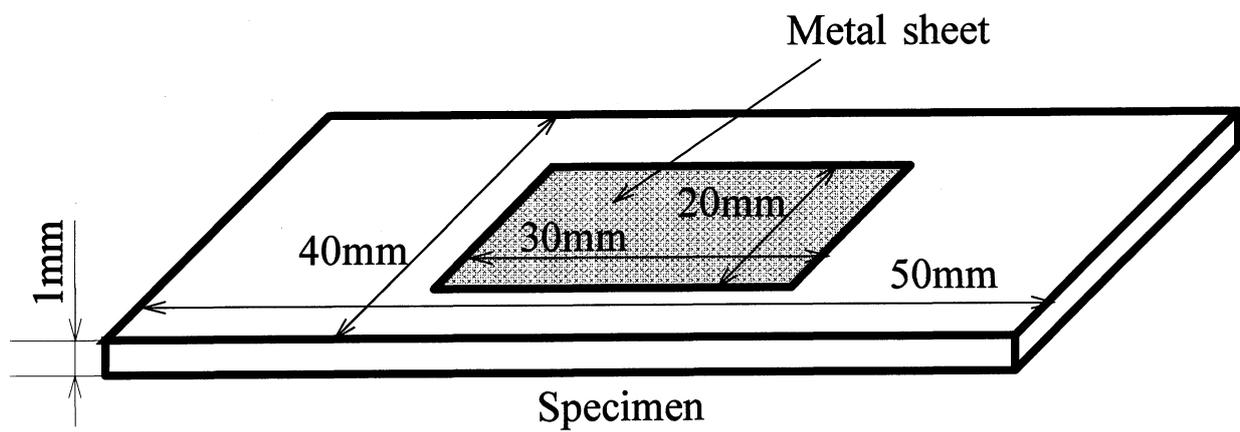


Fig.5-4 Dimension of specimen for pressing.

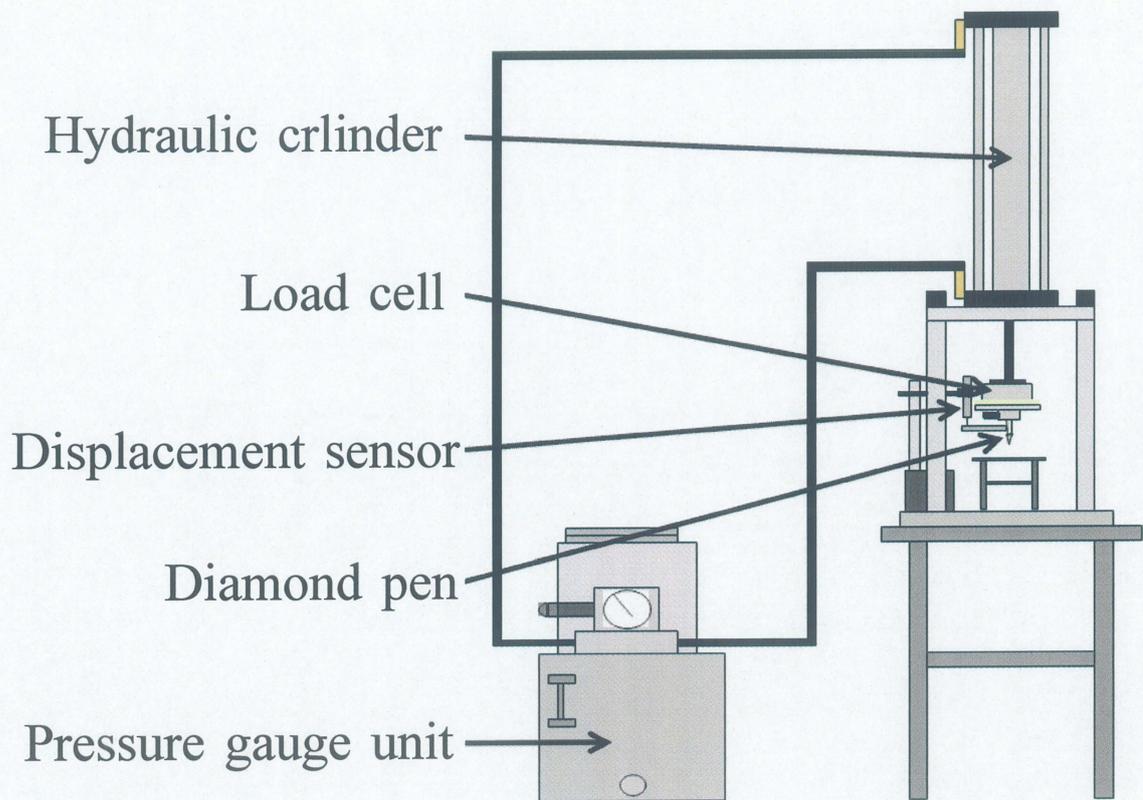


Fig.5-5 Schematic diagram of press machine.

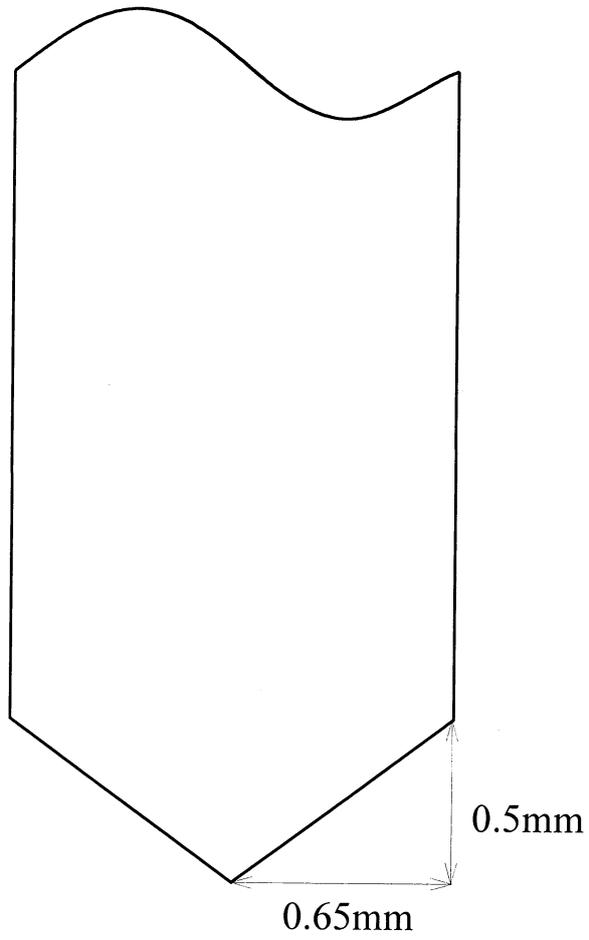
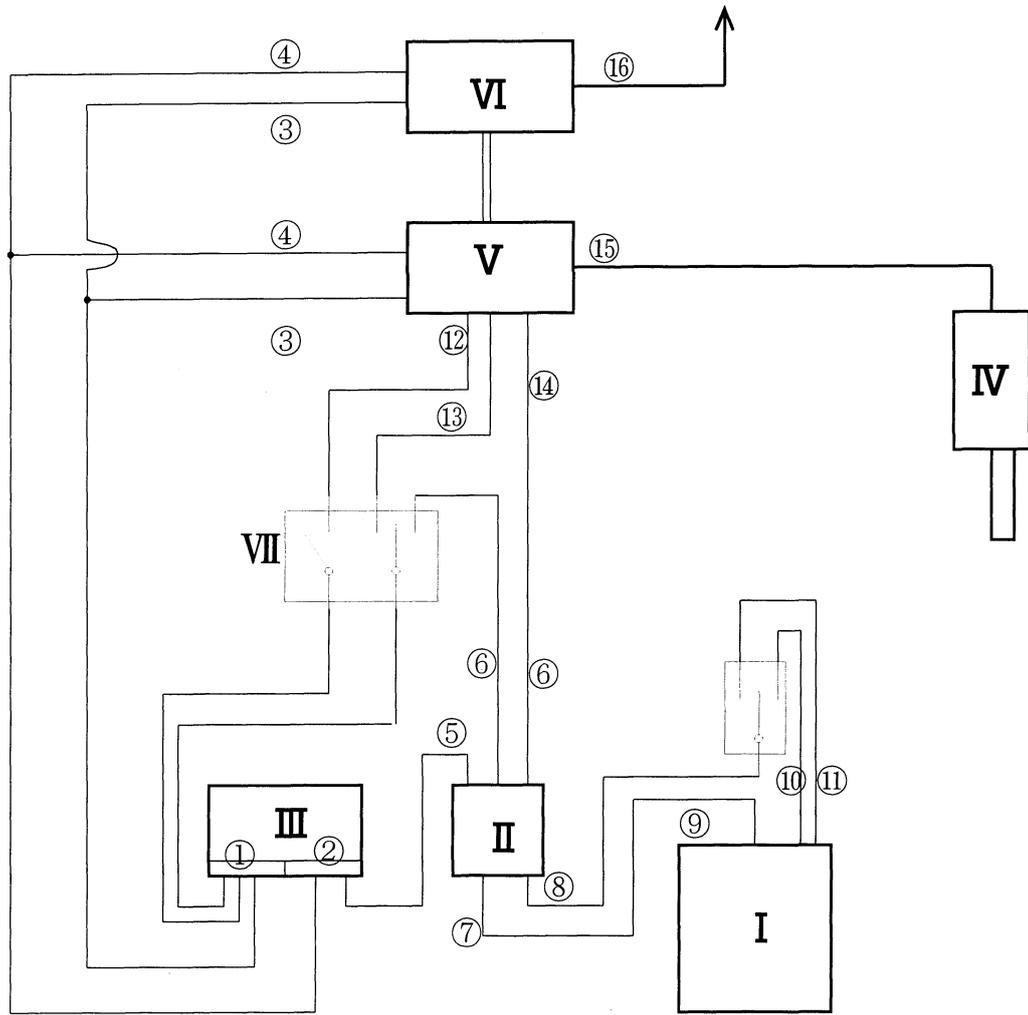


Fig.5-6 Shape of diamond pen's apex.



I	Hydraulic unit	①	Plus DC out	⑧	Plus lord	⑮	Displacement signal in
II	SSR	②	Minus DC out	⑨	Signal in	⑯	To EDS
III	DC Power Supply	③	Plus DC in	⑩	Upper SW signal in		
IV	Displacement sensor	④	Minus DC in	⑪	Lower SW signal in		
V	Sensor controller	⑤	Minus input	⑫	Reset signal in		
VI	Amplifier	⑥	Plus input	⑬	Signal in		
VII	SW unit	⑦	Minus lord	⑭	Signal out		

Fig.5-7 Connection diagram of press machine.

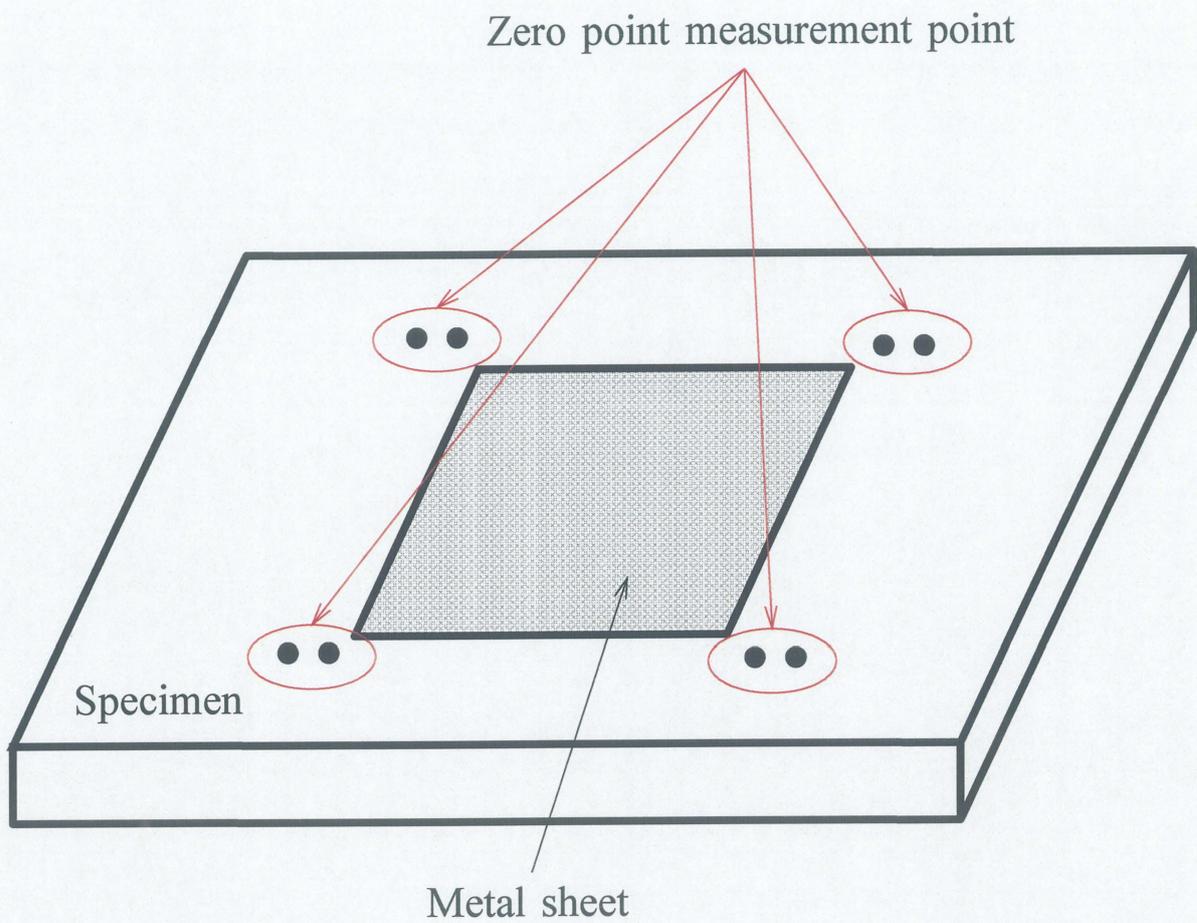


Fig.5-8 Point of zeropoint measurement.

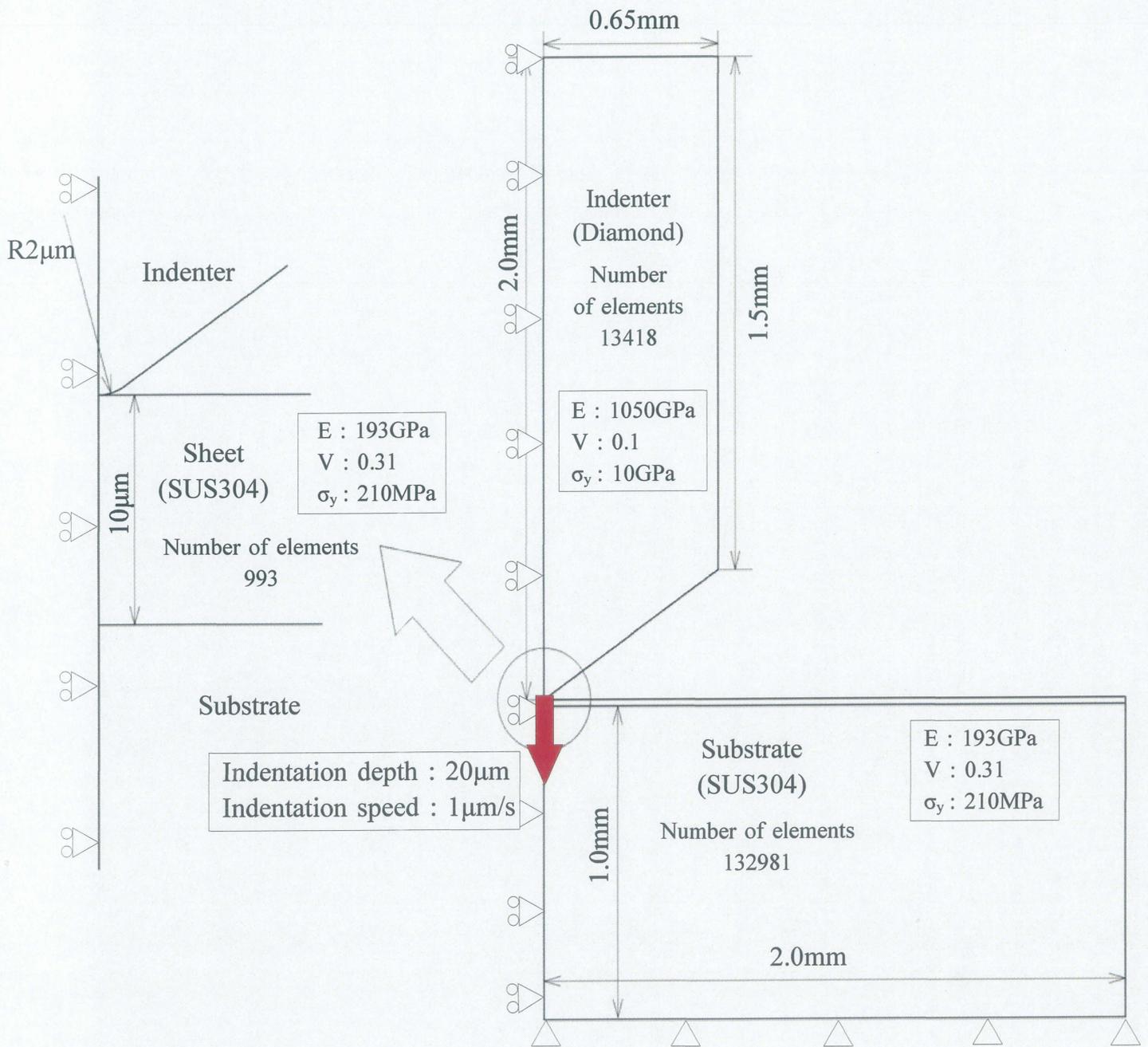


Fig.5-9 Schematic diagram of FEM analysis model.

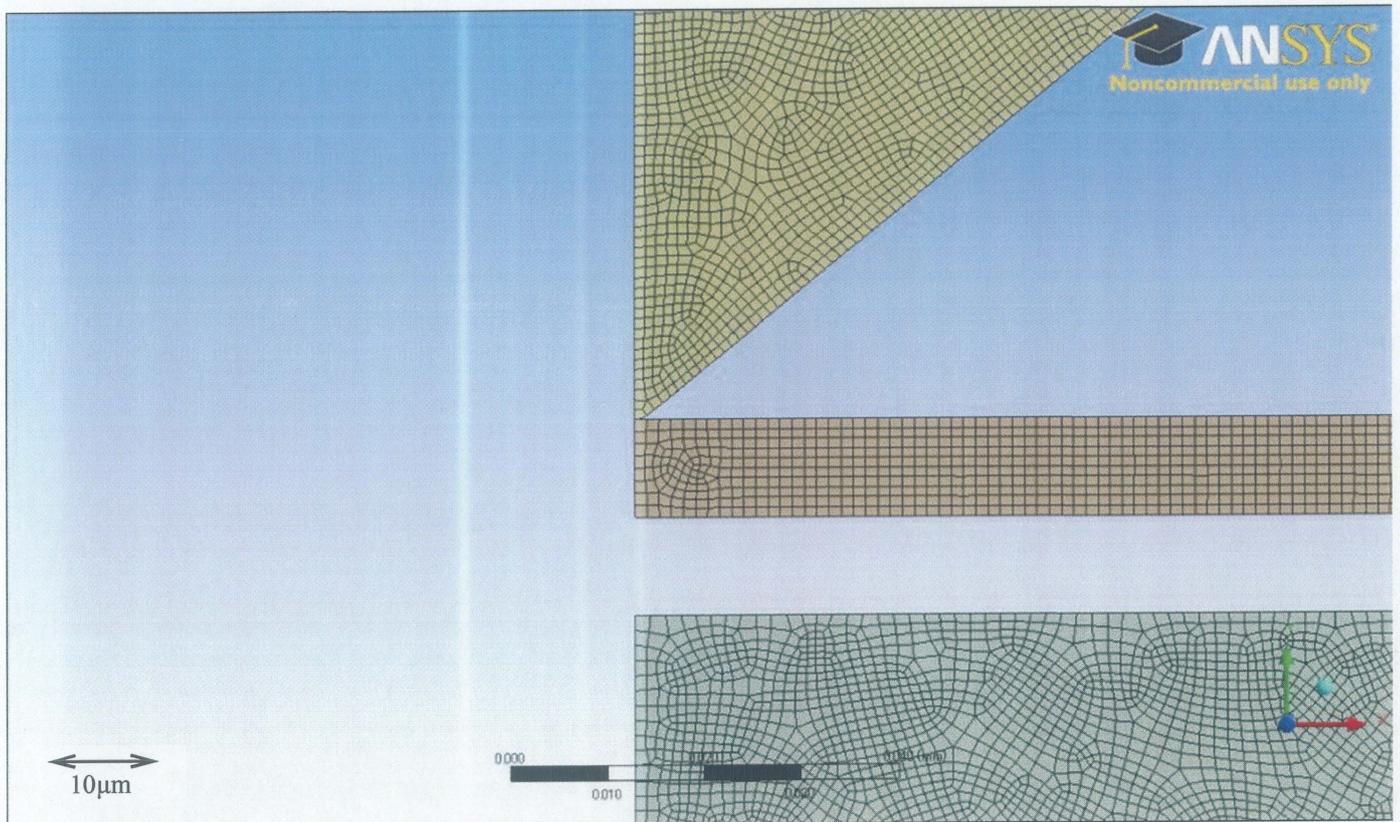


Fig.5-10 Panoramic view of meshing model before FEM analysis.

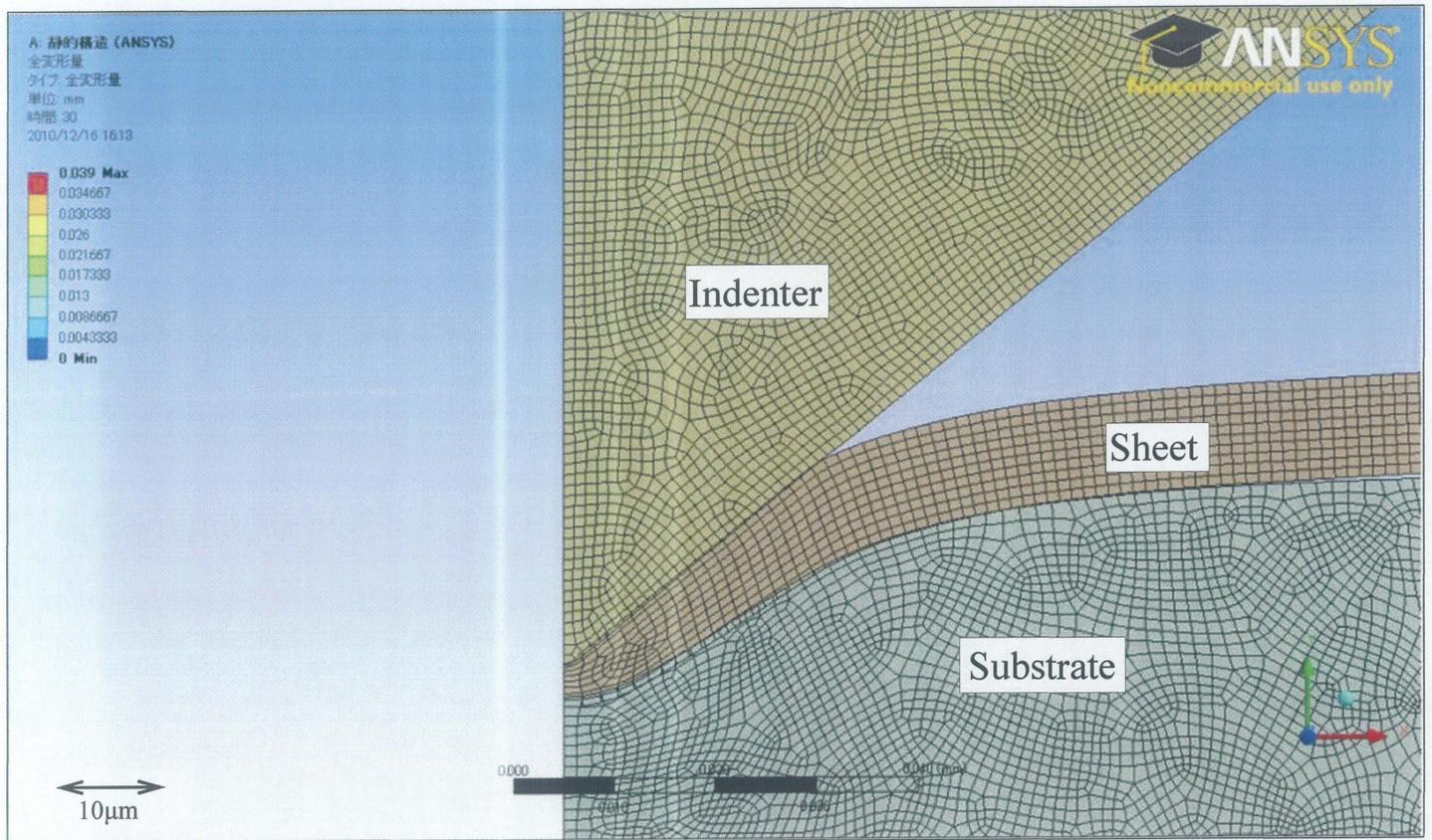


Fig.5-11 Panoramic view of mesh of FEM model after indentation of 30 μm .

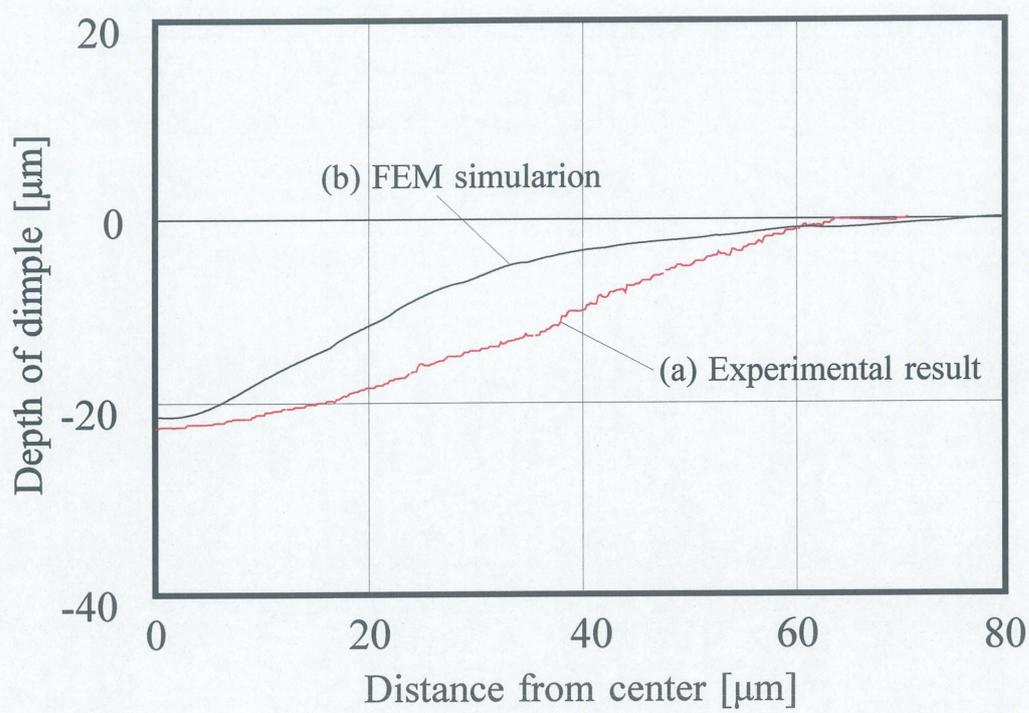


Fig.5-12 Comparison between experimental result and FEM simulation.

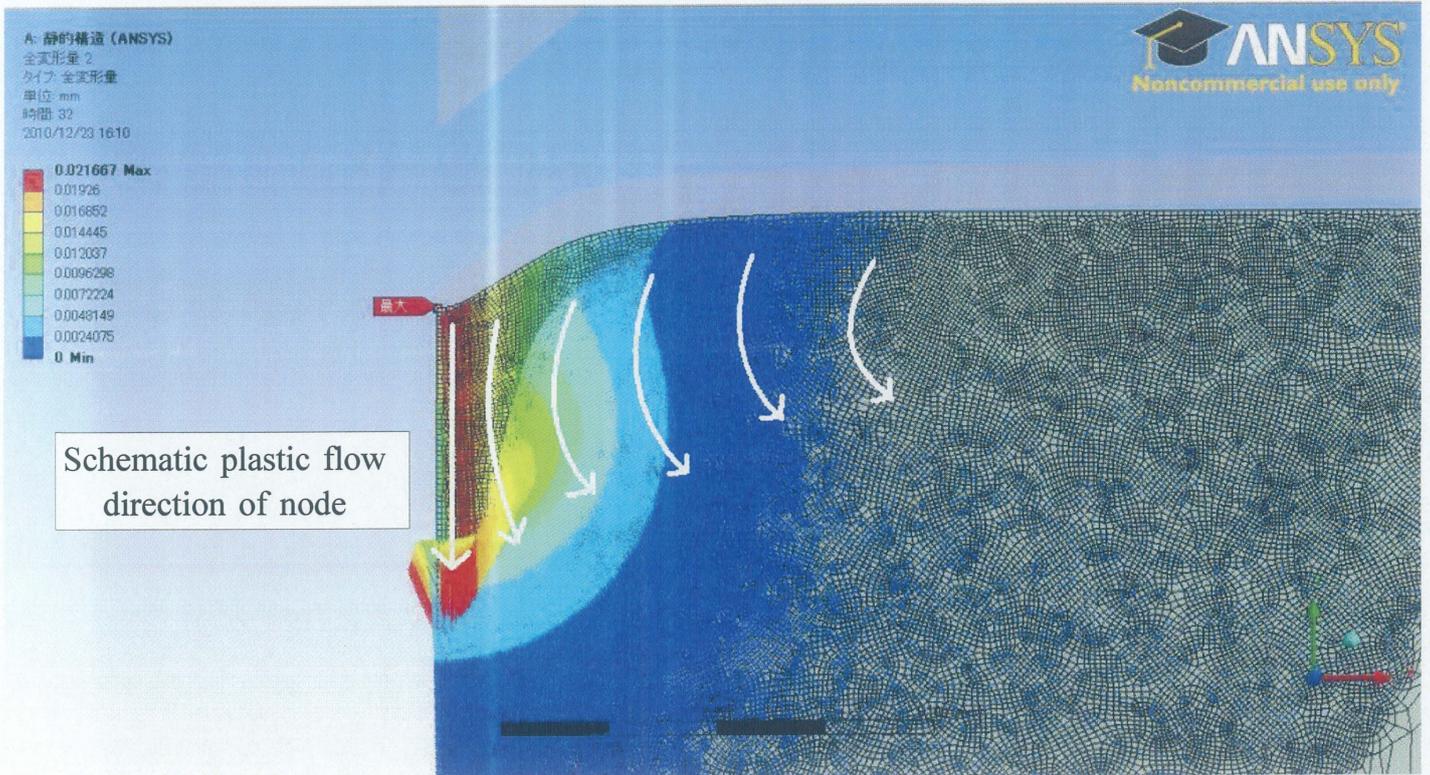


Fig.5-13 Distribution map of displacement around dimple.

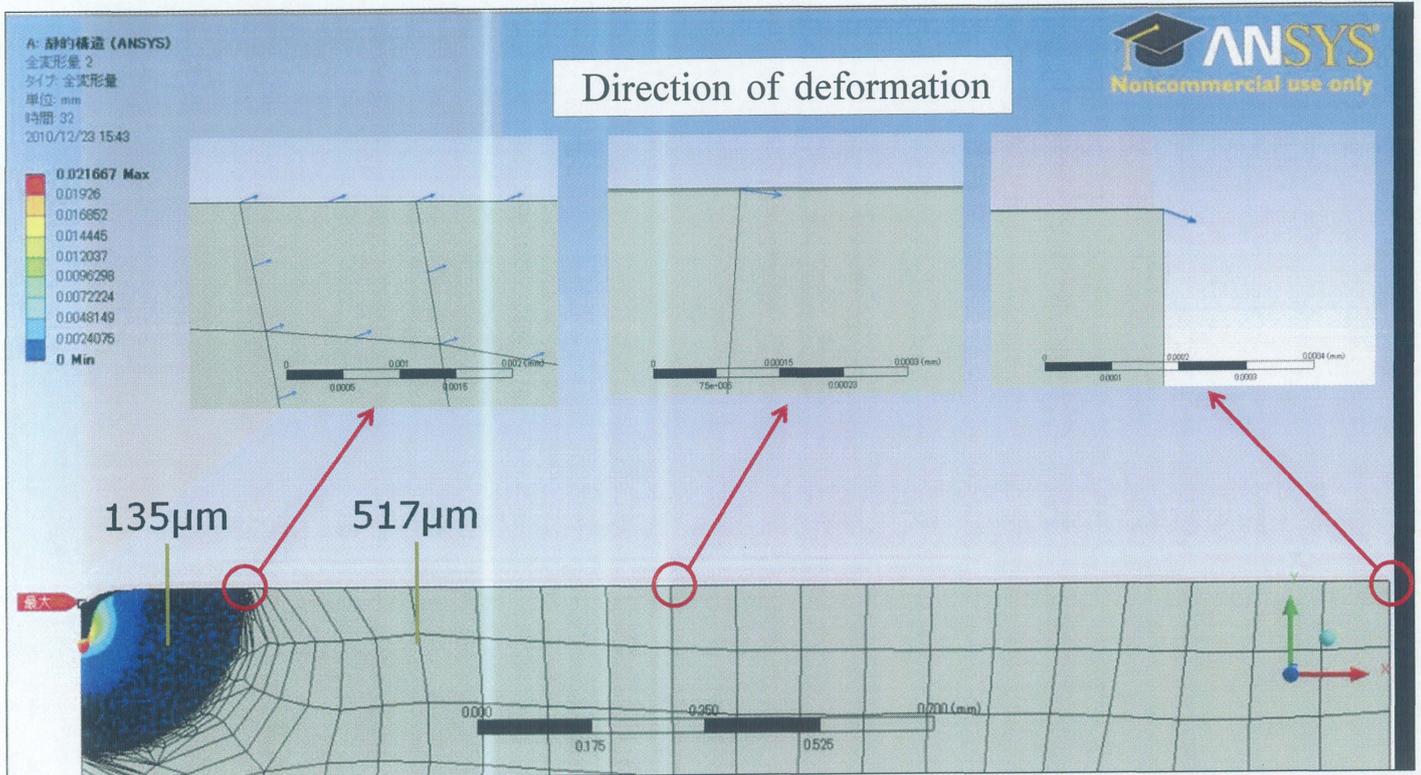


Fig.5-14 Direction of deformation of surefaceat horizontal direction.

Table 5-1 Configuration of simulation;
property.

ステンレス鋼 NL > Constants

Density	7.75e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat	4.8e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

ステンレス鋼 NL > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	1.93e+005	0.31

ステンレス鋼 NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa
210	1800

ダイヤモンド > Constants

Density	3.515e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat	4.8e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

ダイヤモンド > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	1.05e+006	0.1

ダイヤモンド > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa
10000	1800

Table 5-2 Configuration of simulation;
geometry 1.

モデル (A4) > ジオメトリ	
オブジェクト名	ジオメトリ
状態	すべて定義済み
定義	
ソース	C:\Documents and Settings\Administrator\My Documents\sansys処理用一時データ置き場.10.12.15.agdb
タイプ	DesignModeler
長さの単位	ミリメートル
要素コントロール	プログラムによるコントロール
2D 挙動	平面応力
表示スタイル	パーツ色
バウンディングボックス	
X 方向長さ	2 mm
Y 方向長さ	3.01 mm
プロパティ	
体積	3.1161 mm ³
質量	1.9423e-005 kg
表面積(概算)	3.1161 mm ²
スケールファクター値	1
情報	
ボディ	3
アクティブなボディ	3
節点	36873
要素	11936
メッシュ指標	なし
設定	
ソリッドボディのインポート	Yes
サーフェスボディのインポート	Yes
ラインボディのインポート	No
パラメータ処理	Yes
パーソナルパラメータキー	DS
CAD 属性転送	No
名前選択処理	No
材料物性の転送	No
CAD との連携	Yes
座標系をインポート	No
CAD ファイルの保存	No
インスタンスを使用してインポート	Yes
スマートアップデートの実行	No
一時ファイルからファイルのアップロード	Yes
一時ディレクトリ	C:\Documents and Settings\Administrator\Local Settings\Temp
解析タイプ	2D
混在ジオメトリのインポート	なし
囲い込みと対称の処理	Yes

Table 5-3 Configuration of simulation;
geometry 2.

モデル (A4) > ジオメトリ > パーツ			
オブジェクト名	サーフェスボディ	サーフェスボディ	サーフェスボディ
状態	メッシュ分割済み		
グラフィックプロパティ			
表示	Yes		
Transparency	1		
Color	10605055	15398865	10220799
定義			
抑制	No		
剛性挙動	弾性体		
座標系	デフォルト座標系		
参照温度	環境指定		
厚さ	1 mm		
厚さモード	アップデート時にリフレッシュ		
材料			
割り当て	ステンレス鋼 NL		ステンレス鋼 NL 2
非線形効果	Yes		
熱ひずみ効果	Yes		
バウンディングボックス			
X 方向長さ	2 mm		0.64148 mm
Y 方向長さ	1 e-002 mm	0.99 mm	2 mm
プロパティ			
体積	2 e-002 mm ³	1.98 mm ³	1.1161 mm ³
質量	1.55e-007 kg	1.5345e-005 kg	3.9233e-006 kg
重心 X	1 mm		0.30473 mm
重心 Y	-5 e-003 mm	-0.515 mm	1.1235 mm
重心 Z	0 mm		
慣性モーメント Ip1	1.2917e-012 kg·mm ²	1.2533e-006 kg·mm ²	1.0373e-006 kg·mm ²
慣性モーメント Ip2	5.1667e-008 kg·mm ²	5.115e-006 kg·mm ²	1.3027e-007 kg·mm ²
慣性モーメント Ip3	5.1668e-008 kg·mm ²	6.3683e-006 kg·mm ²	1.1676e-006 kg·mm ²
表面積(概算)	2 e-002 mm ²	1.98 mm ²	1.1161 mm ²
情報			
節点	3534	19921	13418
要素	993	6588	4355
メッシュ指標	なし		

Table 5-4 Configuration of simulation;
unit.

単位系	メートル (mm, kg, N, ° C, s, mV, mA)
角度	度
回転速度	rad/s

Table 5-5 Configuration of simulation;
contact.

モデル (A4) > 接続

オブジェクト名	接続
状態	すべて定義済み
自動検出	
更新時に接触を生成	Yes
トランスタイプ	スライダ
トランススライダ	0
トランス値	9.0347e-003 mm
面辺	No
辺辺	Yes
優先順位	優先順位なし
グループ化方法	ボディ
検出対象	ボディ
透明度	
利用	Yes

Table 5-6 Configuration of simulation;
contact domain.

モデル (A4) > 接続 > 接触領域	
オブジェクト名 状態	摩擦あり・サーフェスボディTo サーフェスボディ 摩擦あり・サーフェスボディTo サーフェスボディ 摩擦あり・サーフェスボディTo サーフェスボディ すべて定義済み
スコープ	
スコープ方法	ジオメトリ選択
コンタクト ターゲット	1辺 1辺
コンタクトボディ ターゲットボディ	サーフェスボディ サーフェスボディ
定義	
タイプ	摩擦あり
摩擦係数	0.15
スコープモード	手動
筆動	自動非対称
抑制	No
アドバンス	
定式化	ペナルティ法
接触調整	オフセットの追加 (ランプ効果なし)
オフセット	0 mm
垂直剛性	手動
垂直剛性係数	0.1
接触剛性の更新	サブステップ毎
ピンボール領域	プログラムによるコントロール
時間ステップコントロール	なし

Table 5-7 Configuration of simulation;
mesh and mesh control.

モデル (A4) > メッシュ	
オブジェクト名	メッシュ
状態	解析済み
デフォルト	
物理環境設定	メカニカル
適合度	0
サイズコントロール	
拡張サイズコントロール機能の使用	Off
適合度設定	疎
要素サイズ	デフォルト
初期サイズシード	アクティブなアセンブリ
スムーズ	中間
移行	速い
スパン角中心	疎
最小辺長さ	1.3647e-003 mm
インフレーション	
自動四面体インフレーションを使用	なし
インフレーションオプション	スムーズな移行
移行比	0.272
最大層数	2
成長率	1.2
インフレーションアルゴリズム	プリ
拡張オプションを表示	No
アドバンスト	
形状チェック	メカニカル (アグレッシブ)
要素中間節点	プログラムによるコントロール
再試行回数	Default (4)
剛体挙動	次元的に低減
メッシュモーフィング	使用不可
ピンチ	
シート厚さを使用	No
ピンチトランス	定義してください
リフレッシュ時に生成	No
情報	
節点	36873
要素	11936
メッシュ指標	なし

モデル (A4) > メッシュ > メッシュコントロール

オブジェクト名	サイズコントロール - 頂点 3
状態	すべて定義済み
スコープ	
スコープ方法	ジオメトリ選択
ジオメトリ	1 頂点
定義	
抑制	No
タイプ	影響範囲 (球)
球半径	0.1 mm
要素サイズ	1.e-003 mm
球	
原点 X	1.2612e-003 mm
原点 Y	4.4782e-004 mm
原点 Z	0 mm

Table 5-8 Configuration of simulation; analysis and analysis config.

表 10
モデル (A4) > 解析

オブジェクト名	静的構造 (A5)
状態	解析済み
定義	
物理現象タイプ	構造
解析タイプ	静的構造
ソルバーのターゲット	ANSYS Mechanical
オプション	
環境温度	22 °C
入力のみ生成	No

モデル (A4) > 静的構造 (A5) > 解析設定

オブジェクト名	解析設定
状態	すべて定義済み
ステップコントロール	
ステップ数	32
現在のステップ番号	1
ステップの終了時間	1. s
自動時間ステップ	プログラムによるコントロール
ソルバーコントロール	
ソルバーのタイプ	プログラムによるコントロール
弱いバネ	プログラムによるコントロール
大変形	On
イナーシャリリース	Off
非線形コントロール	
力の収束	プログラムによるコントロール
モーメントの収束	プログラムによるコントロール
変位の収束	プログラムによるコントロール
回転の収束	プログラムによるコントロール
ラインサーチ	プログラムによるコントロール
出力コントロール	
応力の計算	Yes
ひずみの計算	Yes
結果の計算点	すべての時間点
解析データ管理	
ソルバーファイルディレクトリ	C:\Documents and Settings\Administrator\My Documents\ansys\処理用一時データ置き場\10.12.15-1_files\dp0\SYS\MECH\
後続の解析	なし
スクラッチソルバーファイルディレクトリ	
ANSYS db の保存	No
不要なファイルの削除	Yes
非線形解析	Yes
ソルバー単位	アクティブなシステム
ソルバー単位系	mm

Table 5-9 Configuration of simulation;
load.

モデル (A4) > 静的構造 (A5) > 荷重

オブジェクト名	変位	固定	摩擦なし支持	変位 2
状態	すべて定義済み			
スコープ				
スコープ方法	ジオメトリ選択			
ジオメトリ	1 辺	3 辺	1 辺	
定義				
タイプ	変位	固定	摩擦なし支持	変位
定義方法	成分			成分
座標系	全体座標系		全体座標系	
X 成分	0 mm (ランプ状で適用)		0 mm (ランプ状で適用)	
Y 成分	テーブルデータ		テーブルデータ	
抑制	No			
テーブルデータ				
独立変数	時間			時間

