

平成元年度

千葉県非破壊検査研究会 事例発表会

日時 平成2年1月29日(月)

13:30~17:00

会場 千葉県機械金属試験場

目 次

超音波探傷法の複合材料への応用	1
超音波探傷試験による鋼溶接部の欠陥評価	6
放射線管内付着物測定装置	10
CXR TT スキャナ (配管厚さ超音波探傷システム)	15
小径管内目視検査装置	21
AWS (米国溶接協会) の鉄骨溶接の検査について	23
サルファプリントパターン上の線状欠陥についての Hough 変換による定量評価の試み	32
X線による表面残留応力測定事例について	40

超音波探傷法の複合材料への応用

まつ しま まさ みち はやし よう いち
松 嶋 正 道*, 林 洋 一**

科学技術庁航空宇宙技術研究所

*研究員 **主任研究官

近年、複合材料の一つであるFRP（繊維強化プラスチック）が航空、宇宙に限らずスポーツ、レジャー用品をはじめ各方面に使用されている。図1は、縦軸に比強度（強度/比重）、横軸に比剛性（剛性/比重）をとって、各種材料との比較を示している。例えば、チタニウムは比重が4.5で強度が約100kgf/mm²、剛性が約10000kgf/mm²あるが、比重が大きいと比強度や比剛性は比重の商で表すため、値が低くなり図中では左下にプロットされる。つまり、CFRP（炭素繊維強化エポキシ）は鉄（軟鋼）と強度、剛性が等しいので、設計時に安全率を等しくとれば、鉄と同程度の寸法となるが、重さは1/3程度である。また、Al合金（2024ジュラルミン）と比較しても比強度、比剛性ともCFRPの方が高く、したがって同じ安全率をとっても寸法が小さくてすむ。また、繊維強化複合材料は繊維方向に対する強度、剛性が高く直交異方性を持つため、外力の境界条件が決まると、その性質を利用して、それに最も適した繊維の積層方向を決定できる。例えば、航空機では、外板と補強材（ストリンガー、スティフナー）から構成されている図2に示すような構造様式が用いられており、従来はジュラルミン合金で補強板を作り、外板との組立用ファスナー（リベット）孔を開けてリベットで結合していた。しかし、CFRPに置き換えると一体成形でノンファスナー構造であり、設計時に想定される外力に対して構造物の各パーツで別々に繊維の積層構成を最適条件にすることができる。例えば、外板は振り（せん断）に対して±45°方向の繊維が多く、補強材では曲げ（引張り、圧縮）に対して0°方

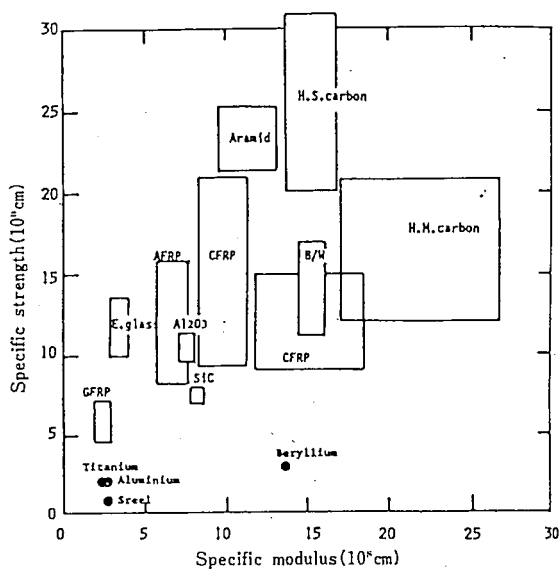


図1 強化繊維とFRPの比強度

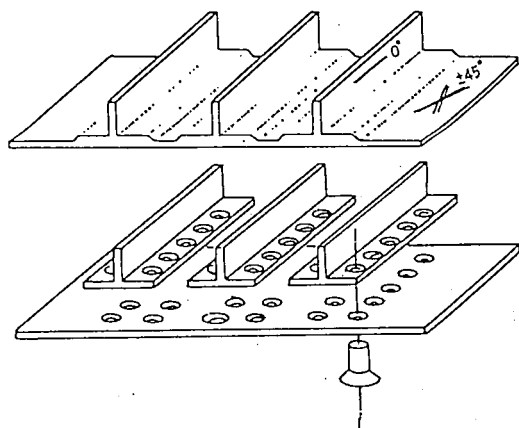


図2 補強板パネルの製作

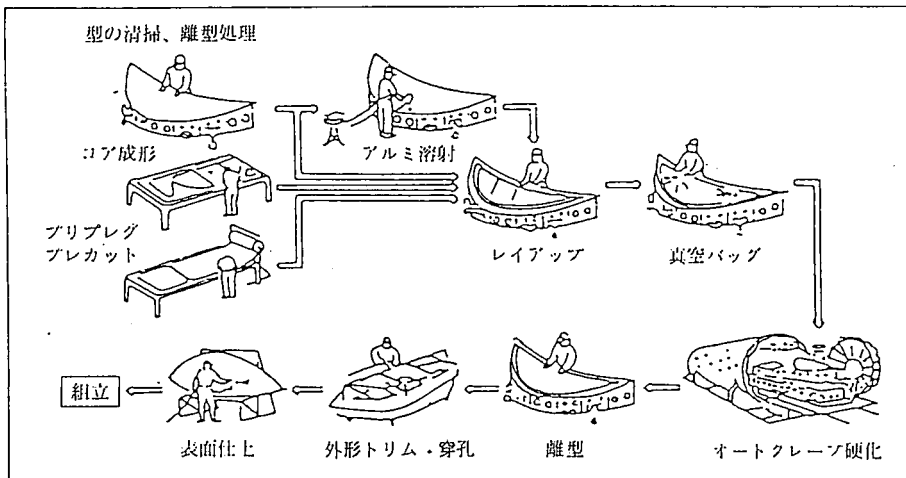


図3 複合材成形工程

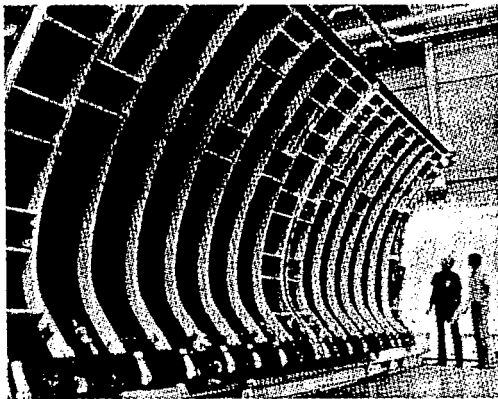


写真1 スペースシャトルオービタ：貨物室ドア

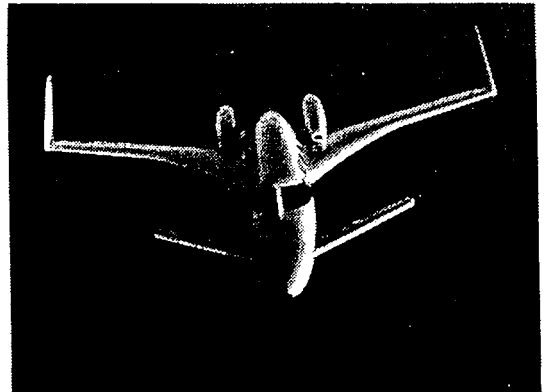


写真2 スターシップ(ビーテックラフト社)

向の繊維が多く積層され、複合材料の異方性を上手に利用している。複合材の成形ではプリプレグシート（繊維を引き揃えてシート状にして、樹脂を含浸させた未硬化の状態）を任意の角度で積層する事が可能であり、オートクレーンで加熱、加圧して一体成形、製作するのでパーツ、工程数を減少させることができる。図3に工程例を示す。

▶ 複合材料と超音波探傷

現在では、写真1に示すような大型構造物も一体成形で作られている。写真2、写真3に実際の機体の代表的な例を示した。これら実際の複合材構造の非破壊検査では、放射線（X線）、超音波等が用いられている。X線は遮蔽、被曝、移動性の問題があり、超音波では水（大型プール）、水噴射ノズル、複雑な

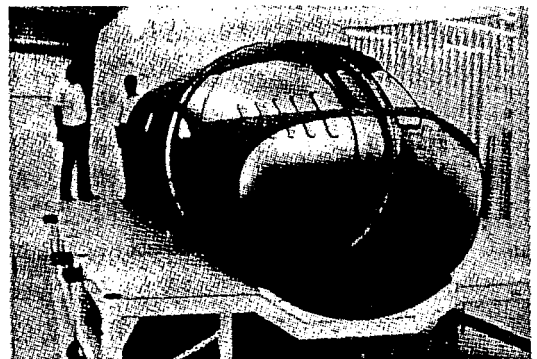


写真3 スターシップの胴体

曲率形状に追随するプローブ移動等の問題が挙げられる。複雑な形状の構造物を探傷するには、長手方向（X）、直角方向（Y）、深さ方向（Z）、プローブ回転（R）、プローブ首振り（ θ ）の5軸の制御が必要であり、図4に大型プールを使用した例を示した。

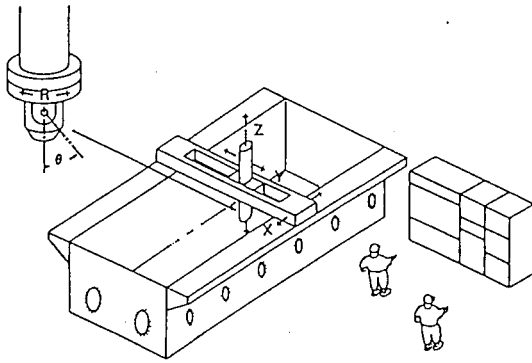


図4 大型超音波探傷装置

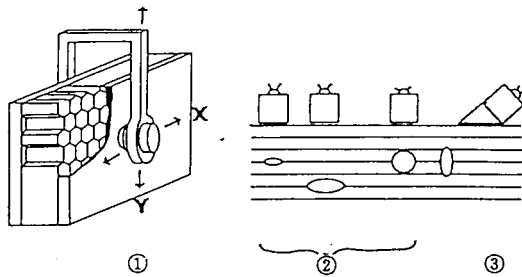


図5 透過法, 反射法, 斜角法

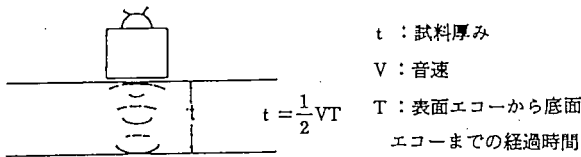


図6 反射法による厚み測定

また、超音波探傷法では、透過法、反射法、斜角法等があり、これらを図5に簡単に示した。①は透過法の一例で、スキャンエリアのX-Yでの位置を確認でき、②は反射法の一例で、スキャンエリアのX-Yでの位置と厚さ方向の位置をC表示でき、また、③は斜角法の一例で、厚さ方向に伸びたクラックの方向が確認できる。特に斜角法は①②のスキャンエリア内で微小な面積しか持たないクラックについて有効である。厚さ(深さ)方向(Tモード)の位置表示は、色による区別で深さの位置を示す方法がよく用いられている。実際の例として反射法でのAスコープ表示を写真4、写真5に示す。写真4は標準的なAスコープであり、表面波のピークから試料の底面エコーのピークまでを確認できる。図6に示すように、底面からのエコーは試料の内部を音波が往復する形となるので、二倍の時間を要する。したが

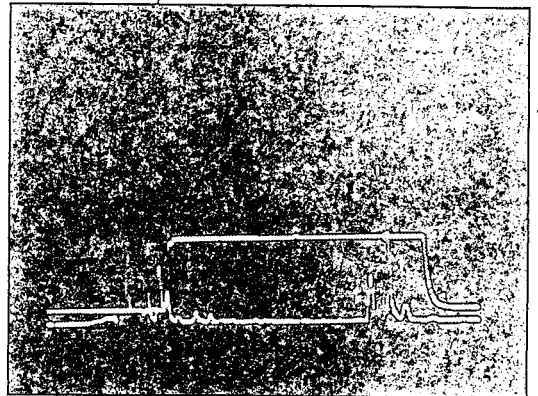


写真4 反射法での表面エコーと裏面エコーのAスコープ

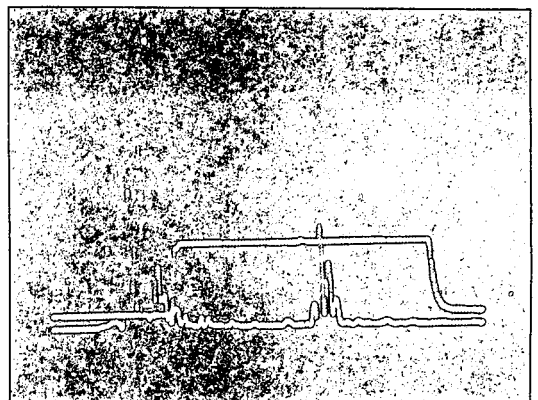


写真5 反射法での表面エコーと裏面手前の反射ピークがあるAスコープ

って、この時間を $\frac{1}{2}$ にすることによって試料の厚さも測定できる。写真5は厚さ(深さ)方向に欠陥(異物)がある場合の一例で、表面エコーと底面エコーの間にピークが確認でき、表面エコーとピークまでの時間を測定する事により欠陥の厚さ方向位置がわかる。しかし、図7に示したように表面に近い位置に大きな欠陥があり、その直下に小さな欠陥があると、直下の小さい欠陥を検出する事は不可能である。このような時には試料を裏返しにして探傷する方法があり、具体的な例を図8に示した。このようなテクニックは、複合材料のように積層面が多数あり、層間にデラミネーションやクラックが発生する場合が多い材料では重要である。

▶ 超音波探傷の実用例

今回は、比較的小型(スキャンエリア150×150mm)

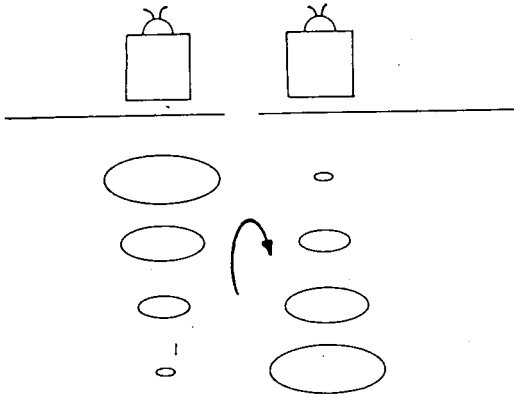


図7 表面近くに大きな欠陥があるとき

図8 裏返しにして探傷

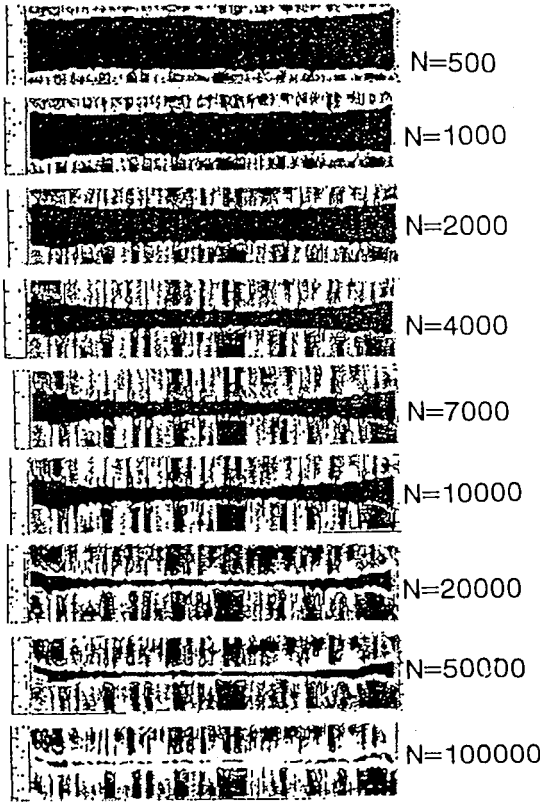
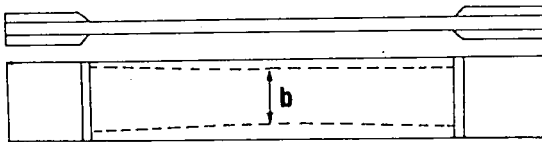


図9 引張り疲労試験、各繰返し数と試験片C-スキャン結果

の超音波探傷装置を使って、引張り疲労試験で繰返し数の増加と共に試験片に生じるダメージの範囲を

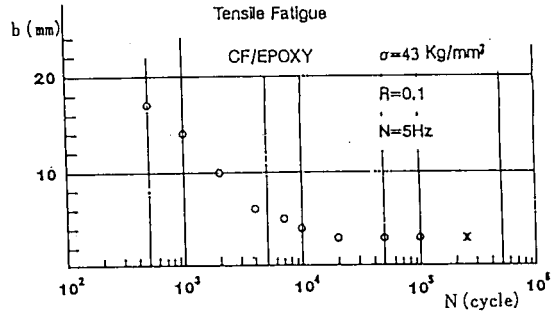


図10 引張り疲労試験での幅bと繰返し数

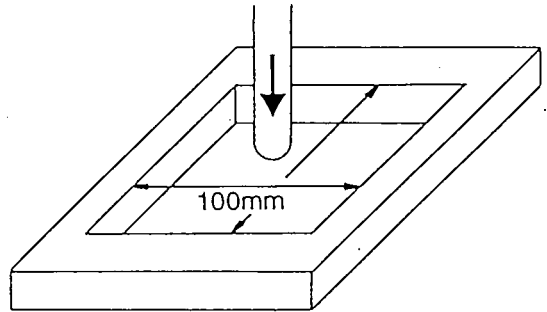


図11 衝撃試験、試験片支持台

探傷した結果、及び、衝撃試験後に板厚に平行な方向に生じた損傷を探傷した結果の例を紹介する。

引張り疲労試験は、定荷重型疲労試験機を使用し、引張り荷重は正弦波による繰返しで行った。試験片はCF/エポキシ(±45°, 0°, 90°), 8 PLYの積層構成で長さ220mm, 幅25.4mm, 厚み1.2mmの短冊形で、両端をチャック部での圧壊を防ぐためにGFRPで補強している。この疲労試験片を用いて行った試験の概要を述べる。応力は43kgf/mm², 応力比は0.1, 繰返し数は5 Hzで行い、任意の各繰返し数に達したところで試験を中断して試験片をはずし、反射法により超音波探傷を行った。探傷結果の一例を図9に示す。繰返し数の増加と共に試験片中央部の非剥離部分の幅bが減少するのが確認される。また、疲労試験中に試験片の左右端が開閉しているのが目視で観察された。図10に試験片中央部の幅bと繰返し数Nの関係を示した。横軸は対数目盛で示しており、繰返し数4×10³回の付近まで直線的に幅bが減少し、短い時間(繰返し数)で損傷が進んでいるのが確認できる。この試験片は繰返し数2.5×10⁵回(図中の×印)で疲労破壊している。

衝撃試験は落垂型衝撃試験装置を使用した。図11に示したような、□100×100mmの試験片支持台中央

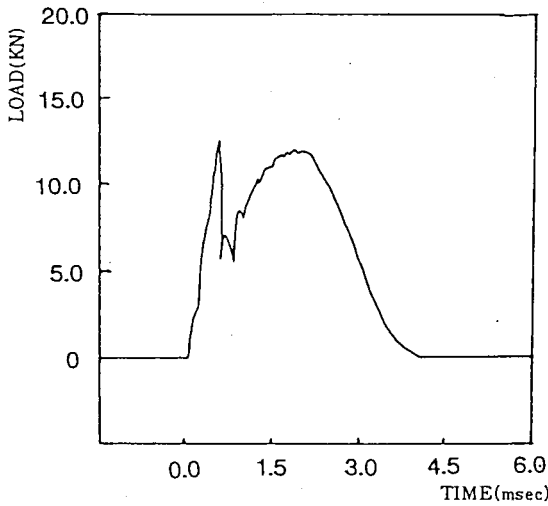


図12 衝撃荷重と時間経過

部に、 $\phi=12.7\text{mm}$ の曲率を持つタップを、高さ52cmより自由落下させて試験片に衝撃を与えた。この時の衝撃荷重と経過時間の関係を図12に示した。試験片はCF/エポキシで積層構成は $\{(+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ)_6\}_s$ で板厚が7.3mm(合計48PLY)である。試験後の目視では、衝撃面にタップのへこみ(打痕)が確認できたが、打痕もタップの直径 $\frac{1}{2}$ 程度(6mm)の大きさである。裏面では、クラック、損傷等の存在は無く外見上で損傷の有無は判断できなかった。このような、衝撃試験後の複合材料内部に生じた損傷の状況を判断するために衝撃面側から反射法により超音波探傷を行った。試験片の打痕跡を中央にセットして、10MHzのプロープで $80 \times 80\text{mm}$ の範囲をスキャンして、超音波探傷(Tモード)を行った結果を図13に示した。この図から判断できるように、衝撃面から底面に向かって損傷が円錐状に広がっているのが確認できる。これは、図8に示したタイプであり、裏返しにすると、図7に示したタイプになり直

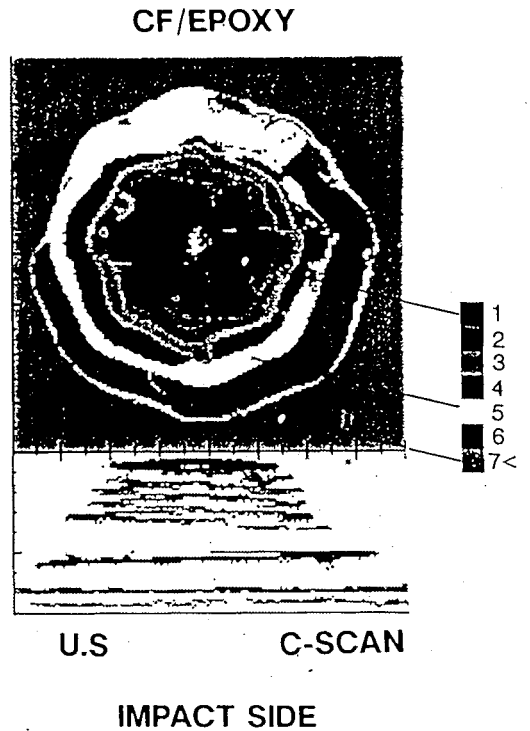


図13 衝撃試験後の衝撃面からのC-スキャン結果

下の損傷を検出することは不可能である。

複合材料は繊維を任意の角度に積層するので、金属等に比べて、均質性、対称性、異方性の特徴を考えながら、独特なクラックのモード、デラミネーション等を判断して超音波探傷試験を実施し、その結果を利用しなければならない。

最後に、複合材料(FRP)製品が各方面で使用されるに至った経緯の背後には、製造メーカーが製品管理に超音波、X線等を利用し、成形工程にフィードバックして信頼性を高めた製品を供給する努力を注いでいることを見逃してはならない。

超音波探傷試験による鋼溶接部の欠陥評価

一回送実験による音響異方性鋼板の探傷一

(協)千葉県鉄骨工業会

富岡雄三

1. はじめに

近年、溶接性の向上を目的としたTMCP鋼に代表される制御圧延鋼板は、従来の鋼板と比べて低い温度で圧延を行うため圧延後結晶粒が一方に揃う異方性を持つことになる。

この様な鋼板において、超音波探傷を行うと圧延方向とそれに直角な方向とでは、音の伝搬速度が異なるいわゆる音響異方性を持つことになり、探傷結果に誤りを生じることになる。

音響異方性材料の超音波探傷方法については、すでにJIS Z 3060-1988「鋼溶接部の超音波探傷試験方法および試験結果の等級分類方法」で規定されており、建築鉄骨の検査に用いられている鋼構造建築溶接部の超音波検査規準・同解説(以下建築学会規準)においても、平成元年春の改訂で規格化された。

(協)千葉県鉄骨工業会では、従来より千葉県機械金属試験場の協力を得て、工業会の超音波探傷技術者に対する教育・指導の一環として溶接部の超音波探傷による欠陥評価を回送実験にて行っている。

昭和63年度の回送実験は、音響異方性鋼板溶接部の超音波探傷をJISZ3060および建築学会規準にて行い、両規格による欠陥評価の相違点を比較検討したので、その結果について報告する。

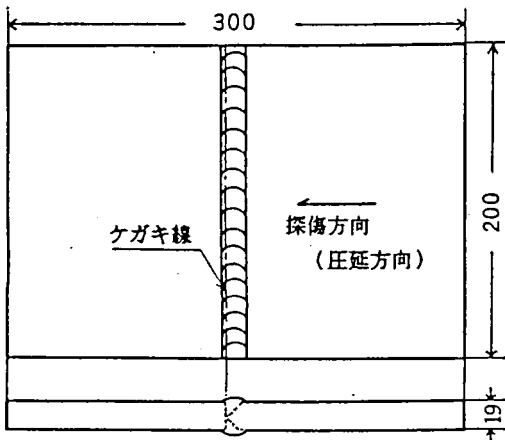


図1 試験体形状

2. 実験方法

2.1 試験片

実験に用いた鋼板は板厚 18.9mm で、圧延方向(L方向)の音速3,330m/s、圧延に直角方向(C方向)の音速3,220m/s、音速比 1.034である。

図1に示すように、K開先の突合せ溶接部に溶込不良の欠陥を含む試験体を作製した。

2.2 実験手順

実験に先立ち参加者は機械金属試験場に集合して探傷装置をJIS Z 2344によりチェックし、JIS Z 3060による音響異方性の検定方法、探傷方法及び測定手順等について打ち合わせを行った。

実験は試験片を表1に示すメンバーで、各社持ち回りの回送実験とした。

表1 実験参加者名

番号	氏名	企業名
1	藤ヶ崎 修	(有)粉口製作所
2	間宮誠治郎	平山鉄工建設(株)
3	仙波 一清	(株)君津鐵構建設
4	永井 勉	〃
5	石渡 昇	(有)秋元鐵構建設
6	小野田尅爾	富二商事(株)
7	飯塚 栄一	(株)飯塚鉄工所
8	山本 幸徳	(株)瀧上工業
9	熊谷 弘	(株)クマガイ
10	稲田 稔	(株)澁工業所
11	椎名 英雄	(株)若柴工業
12	富岡 雄三	〃
13	前田 幸生	〃
14	郷保 英雄	(株)高野鉄工所
15	長江 紀之	米山鉄工(株)

2.3 探傷方法

探傷は日本建築学会規準（1979年）〔回送実験開始時は旧規準〕による屈折角70度の探触子を用いる方法と、JIS Z 3060により音響異方性の検定を行い、図2に示す様に、L方向とC方向で屈折角度差が2度以上となる音響異方性があると判断した場合は、屈折角60度の探触子を用いる二通りの探傷を行った。

なお、日本建築学会規準での探傷は標準試験片に STB-A1 を、JIS Z 3060 の探傷では RB-4を用いた。

3 結果及び考察

回送実験による探傷結果を表2に示す。写真1はエックス線による結果で欠陥指示長さは 41mmであった。

$$\alpha_c(\alpha_t) = \tan^{-1} \frac{Y}{2t}$$

α_t と α_c の測定値の差を屈折角度差とする。

T: 送信探触子
R: 受信探触子

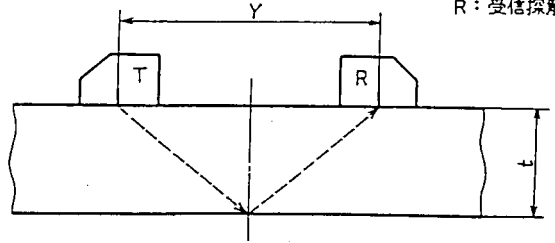


図2 屈折角度差による音響異方性の検定

表2 探傷試験結果

探傷者 記号	日本建築学会規準による探傷結果						JIS Z 3060-1988 による探傷結果						
	X _s	d	z	領域	l	L	X _s	d	z	領域	l	L	角度
A	75	14.7	2.8	Ⅲ	38	38	72	12.9	0.8	Ⅲ	44	44	62.0
B	73	14.8	0.5	Ⅲ	30	38	75	14.0	0.5	Ⅱ	7		62.0
							91	13.0	0.5	Ⅲ	15	31	
C	74	15.0	0.8	Ⅲ	11		72	12.3	0.1	Ⅳ	43	43	62.9
	88	14.7	0.7	Ⅲ	25	38							
D	70	11.0	4.0	Ⅲ	45	45	73	12.4	1.0	Ⅱ	16		62.6
							94	12.7	1.0	Ⅱ	10	32	
E	85	11.9	7.2	Ⅲ	29	29	89	15.6	0.9	Ⅲ	21	21	61.8
							71	13.6	0.5	Ⅲ	35	35	61.9
F	76	14.9	1.1	Ⅲ	11								
	89	14.9	1.1	Ⅲ	15	35							
G	75	14.0	1.5	Ⅲ	35	35	72	13.4	0.3	Ⅲ	33	33	62.3
							78	13.0	4.0	Ⅲ	38	38	60.0
H	78	12.0	6.0	Ⅲ	35	35	72	13.0	0.1	Ⅲ	34	34	62.7
I	76	13.7	2.4	Ⅱ	6								
	89	13.7	2.4	Ⅲ	22	35							
J	76	14.0	-0.5	Ⅱ	6		72	12.0	-2.0	Ⅲ	36	36	
	90	14.0	-0.5	Ⅲ	20	34							
K	73	13.6	0.5	Ⅳ	43	43	72	12.7	1.6	Ⅲ	39	39	62.4
							72	12.9	0.7	Ⅲ	40	40	62.3
L	76	14.4	1.0	Ⅱ	7								
	90	14.5	1.6	Ⅲ	15	29							
M	75	15.0	1.5	Ⅲ	7		70	14.6	2.0	Ⅳ	44	44	62.6
	91	15.0	1.0	Ⅲ	19	43							
N	75	15.8	-0.3	Ⅲ	36	36	74	12.7	0.6	Ⅲ	41	41	63.0
							73	13.0	0.1	Ⅲ	33	33	62.7
O	91	14.6	0.5	Ⅲ	11								

X_s: 欠陥左端、 d: 欠陥深さ、 z: ケガキ線からの距離、 l: 欠陥指示長さ、 L: 欠陥評価長さ

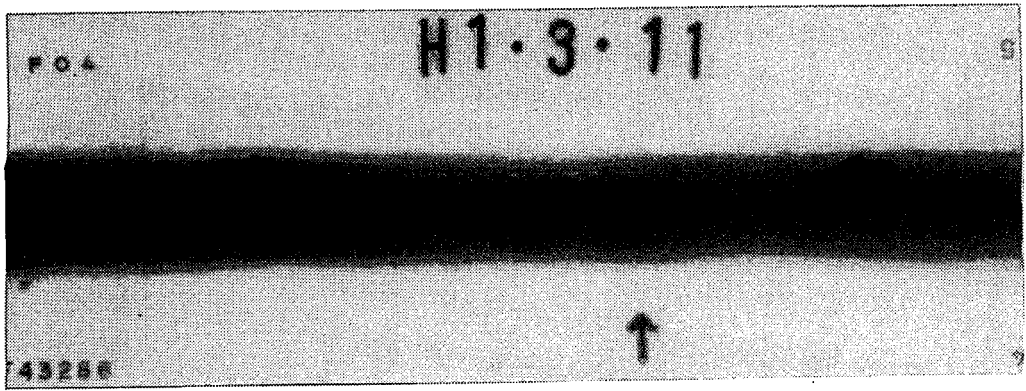


写真1 エックス線透過写真

3.1 建築学会規準による評価

欠陥指示長さを図3に示す。2個の欠陥が近接している時、その欠陥と欠陥の間隔が長い方の欠陥よりも小さい時は、欠陥と欠陥の間を含めた長さを欠陥評価長さとして規格では規定している。

図3より建築学会規準による探傷結果では、評価長さの平均値は34.6mm、 $\sigma_n = 7.83$ である。

しかし、実測屈折角毎に分類し平均を取ると、69度台は38mm、70度台は35mm、70度以上では30mmとなった。

また、図4は屈折角 68~72 度の探触子で探傷を行った走査グラフの図形である。

この図でエコー高さ20% (L線カット) 以上の範囲を欠陥指示長さとする、69度及び70度では欠陥が分離するものの、評価長さは、68度で40mm、69度で30mm、70度で26mmと評価され、71及び72度では欠陥として検出されなかった。

音響異方性鋼板のドリル穴による屈折角とエコー高さの関係は既に報告¹⁾されている。

これらの結果から、音響異方性鋼板の探傷では探触子の屈折角度と欠陥エコー高さの間には、欠陥評価に際して重大な関係が存在する。

3.2 JIS Z 3060 による評価

図5にL方向とC方向の探傷屈折角度差を示した。このうち4名はデータの記入漏れがあった為空欄になっている。しかし、探傷データを見ると多少のばらつきはあるが、全員音響異方性有りとの判断をしている。

JIS Z 3060 による探傷では 評価長さの平均値は36.3mm、 $\sigma_n = 5.88$ で、建築学会規準による探傷に比べてやや長く、ばらつきも小さく、エックス線の結果に近いデータが得られた。

しかし、鉄骨の柱・梁仕口部のようにL、C方向が複雑に交わる処ではJIS Z 3060による探傷は多くの時間が必要とされる。

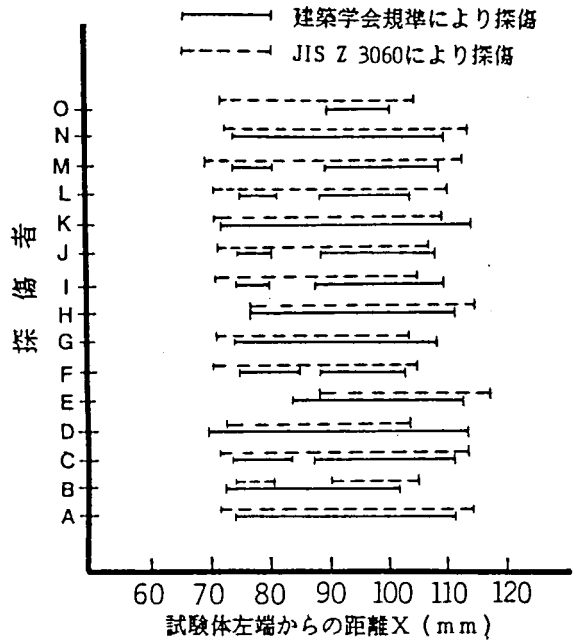


図3 欠陥指示長さ

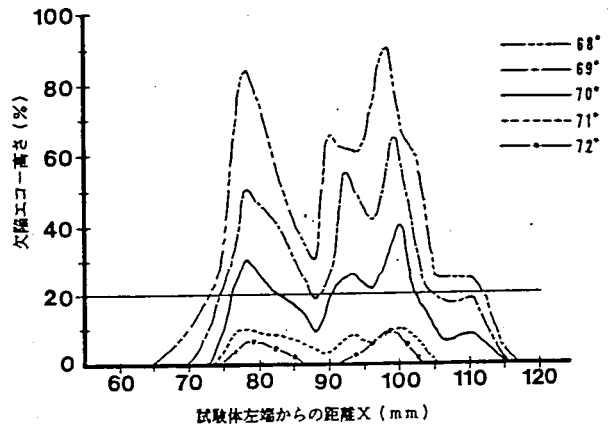


図4 欠陥の走査グラフ

3.3 欠陥位置

図6の欠陥位置から、音響異方性鋼材の探傷を考慮したJISよりも建築学会規準の方が深く且つ手前側に位置している。このことは、裏当金付きレ型開先溶接の溶込不良を実際よりも深い位置に測定して、タレ込みとして判定する恐れがある。

5 まとめ

制御圧延された音響異方性鋼板を建築学会規準で70度の探触子を用いて探傷した結果と、JIS Z 3060-1988により60度の探触子で探傷を行った結果、次のような結果を得た。

- 1、実験参加者は音響異方性鋼板の特異性について理解することができた。
- 2、音響異方性鋼板では、探触子の屈折角が増すに従って欠陥指示長さや欠陥エコー高さは低下し、70度以上の実測屈折角の探触子で探傷を行うと欠陥を極端に過小評価することになる。
- 3、JIS Z 3060ではほぼ欠陥の実寸法に近い値で評価することができた。
- 4、70度の屈折角を用いた建築学会規準では欠陥を深く測定することから妨害エコーとみなし、欠陥を見落とす可能性もある。

以上の結果から音響異方性鋼板の超音波探傷試験に於て、使用する探触子の実測屈折角には十分注意をすると共に、できれば屈折角60度の探触子による探傷を併せて行うほうが、溶接構造物の品質を正しく評価することになる。

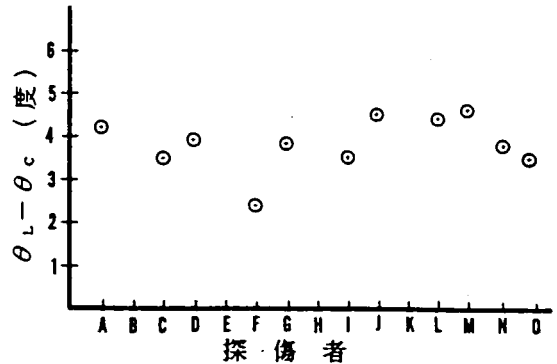


図5 屈折角度差

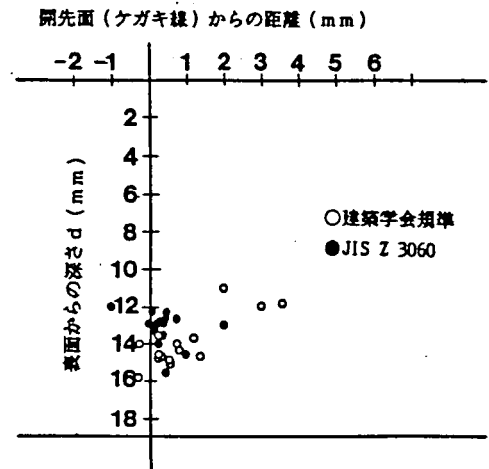


図6 欠陥断面位置

謝辞

本回送実験に当り、種々のご指導を戴いた千葉県機械金属試験場、白井越朗並びに立川克美の両氏に深く謝意を表します。

文献

- 1) 白井越朗、立川克美 昭和61年度千葉県機械金属試験場研究報告

放射線管内付着物測定装置

中国エックス線株式会社 藤原 茂 ◯稲垣 俊三
池田 隆 山本 敏弘

1. まえがき

集合住宅等の配管設備部材のメンテナンスの必要性が近年高まっているが、対象とする配管設備部材は通常狭隘な空間にあること、保温筒／保護筒等が装着されている場合があること、供用中に検査する必要があること等から、簡易的かつ高能率な非破壊的検査法が必要となる。これより各種要素技術を検討し、半自動あるいは全自動の走査治具を用い、検査、診断・判定が容易で客観性のあるデータ処理が行なえる放射線利用の検査方法を開発した。

開発に当っては下記の点に留意した。

- ① 放射線の透過を利用すること。
- ② 使用放射線源は3.7メガベクレル(100 μ Ci)以下の法規制外のもので、放射線管理に係る作業場所、作業時間等の制限が無いこと。
- ③ 保温筒等の撤去復旧作業を必要としないこと。
- ④ 走査治具の使用により検査結果の再現性、信頼性が高いこと。
- ⑤ 検査の判定、診断が容易であること。

なお、本開発は、昭和60年～63年度における「21世紀マンション組合委託研究」のうち、「給湯用配管検査技術の開発」により株式会社 ジェス との共同で行なったものである。

2. RI線源法による厚み測定の原理

2.1 γ 線源による付着物厚みの測定(管軸直交方向走査付着物厚み測定)

γ 放射線源と放射線検出器の間に管を介在させ、管軸に対して直交する方向に放射線源と放射線検出器を順次移動走査して、透過放射線の線量強度を測定する。走査は付着物の無い健全管と付着物付着が想定される対象管のそれぞれに対して行い、その透過線量の違いから以下の式により付着物厚みを算出する。

対象管の検出装置出力は、

$$I = I_0 \cdot \exp \{ - (\mu_1 X + \mu_2 Y) \} \quad (1)$$

I_0 ; 放射線源と検出器の間に管を介在させないときの検出装置の出力

I ; 管を介在させたときの検出装置の出力

X ; 管の厚み (cm)

Y ; 付着物の厚み (cm)

μ_1 ; 管材料の吸収係数 (cm⁻¹)

μ_2 ; 付着物の吸収係数 (cm⁻¹)

健全管の検出装置出力にダッシュを付して表すと、

$$I' = I_0 \cdot \exp(-\mu_1 X) \quad (2)$$

①, ②より、

$$Y = \ln(I'/I) / \mu_2 \quad (3)$$

2. 2 γ 線源による付着物厚みの測定 (管長手方向走査付着物厚み測定)

放射線源と放射線検出器の間に管を介在させ、管長手方向に放射線源と放射線検出器を順次移動走査して、透過放射線の線量強度を測定する。

厚みの算出式は、前項2. 1と同様の式による。

2. 3 γ 線源による付着物厚みの測定 (管周方向回転走査付着物厚み測定)

放射線源と放射線検出器の間に管を介在させ、管中心部を連続的に走査して透過線量強度を測定する。このとき付着物厚みに係る透過線量強度の変化は、透過法のため180°反対側との合計の変化量である。

次に、付着物の付着が予測される管端部を同様に連続的に走査してその透過線量強度を求める。管端部走査では、走査位置の付着物厚さに対応した透過線量強度の変化 (相対変化) が得られるため、管中心部走査で得られた合計の付着物厚さを管端部走査で得られた線量変化に対応させて比例配分し180°反対側に振分ける。

算出式は、前項2. 1と同様の式による。

2. 4 2線源 (γ 線源及び中性子線源) による管厚み及び付着物厚みの測定

管の腐食による減肉、管内の付着物・堆積物による詰り状況を定量的に測定する方法として、異なる放射線源による透過放射線の指数関数的な減弱特性の違いを利用する。2種類の放射線源として、管材及び付着物の吸収係数の比が

大きく異なる中性子線源 Cf-252 及び γ 線源 Cs-137 を用いる。これらの放射線源と放射線検出器の間に測定対象となる管を介在させ、管の中心部を順次走査して各々の透過放射線の線量強度を測定し、以下の式により、透過厚さとして合計の管厚み及び付着物厚みをそれぞれ算出する。

$$I = I_0 \cdot \exp \{ - (\mu_1 X + \mu_2 Y) \} \quad (4)$$

I_0 ; 放射線源と検出器の間に管を介在させないときの検出装置の出力

I ; 管を介在させたときの検出装置の出力

X ; 管の厚み (cm)

Y ; 付着物の厚み (cm)

μ_1 ; 管材料の吸収係数 (cm⁻¹)

μ_2 ; 付着物の吸収係数 (cm⁻¹)

他の種類の線源に対する検出装置出力及び吸収係数にダッシュを付して表すと、

$$I' = I_0' \cdot \exp \{ - (\mu_1' X + \mu_2' Y) \} \quad (5)$$

(4)、(5) 式より

$$X = \{ \mu_2 \cdot \ln(I_0' / I') - \mu_2' \cdot \ln(I_0 / I) \} / (\mu_1' \mu_2 - \mu_1 \mu_2') \quad (6)$$

$$Y = \{ \mu_1' \cdot \ln(I_0 / I) - \mu_1 \cdot \ln(I_0' / I') \} / (\mu_1' \mu_2 - \mu_1 \mu_2') \quad (7)$$

Cs-137、Cf-252 の組合せでは、

$$\mu_2 / \mu_1 \neq \mu_2' / \mu_1' \text{ つまり、 } \mu_1' \mu_2 - \mu_1 \mu_2' \neq 0$$

となり、(6)、(7) 式より X 、 Y すなわち管厚み及び付着物厚みが算出できる。

中性子線源を用いた測定では、水による中性子線の減衰が大きいため、管内には水が無いことが基本条件となる。

3. 装置の構成

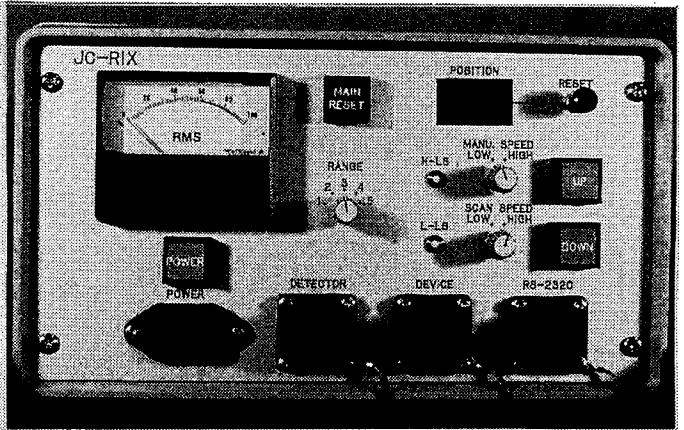
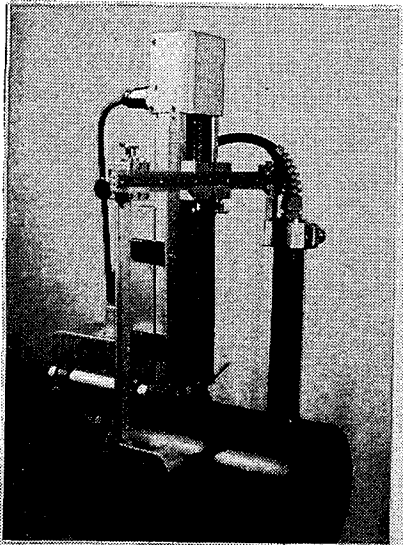
測定装置システムは、検査対象となる管にあらかじめ設置する固定治具及び固定治具に後から装着するスキャナの走査治具部と専用の制御回路、透過放射線を検出するシンチレーションサーバイメータ（中性子サーバイメータ）、サーバイメータ出力を増幅する直流増幅器、アナログ増幅器出力をデジタル出力変換する A/D 変換器、及びデータ取込・処理を行う汎用コンピュータシステム等から構成する。

4. 測定装置

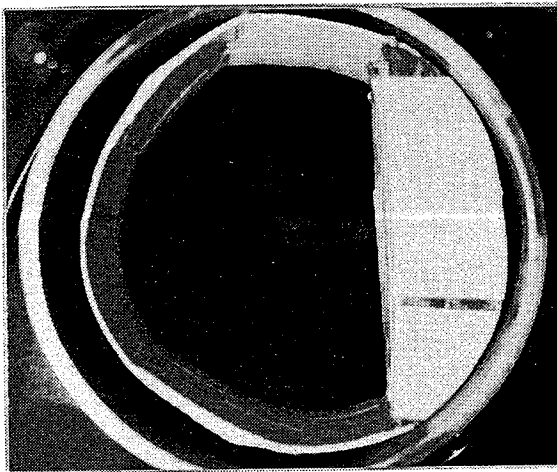
(1) 簡易型管内付着物測定装置 (JC-RIX型)

管の特定位置の簡易的な健全性を確認するもので、管軸に対し直交方向 (X) 走査を行なう簡易測定装置である。

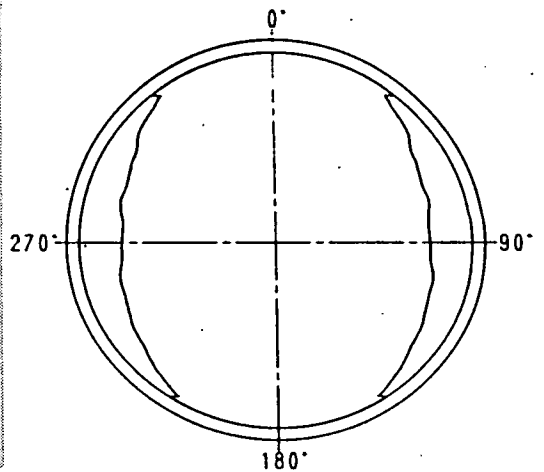
- ① 放射線源は、3.7MBq以下の法規制外の γ 線源セシウム137を使用。
- ② $\phi 50 \sim 220$ mm (保温筒含む)の管径に対し適用可。
- ③ ベルト固定のため装着、取外しが容易、かつ狭隘な場所で使用可能。



JC-RIX型装置外観



サンプル付着物

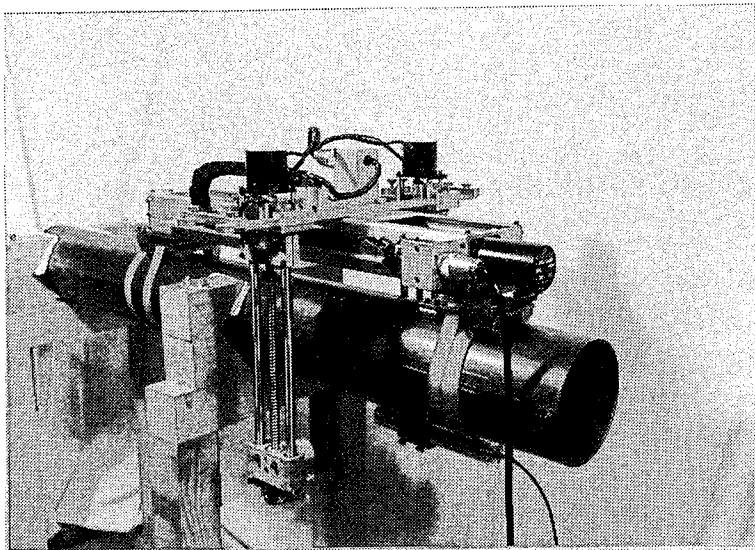


プロッタ出力図 (振分け処理例)

(2) 放射線管内付着物測定装置 (X-Yスキャナ)

配管の設置空間の狭隘部での走査及び異常位置の概略把握に適するもので、管長手方向 (Y) 走査及び管軸直交方向 (X) 走査を行なう測定装置である。

- ① 放射線源は法規制外のもので、 γ 線源、中性子線源とも使用可。
- ② $\phi 80 \sim 250 \text{ mm}$ (3B \sim 9B)の管径に対し、1 治具で適用可。
- ③ X方向、Y方向とも自動走査で、速度、移動量とも任意設定可。
(走査ストローク; X方向280mm, Y方向1,000mm)
- ④ 駆動部の操作、制御は遠隔にて制御パネルより行なえる。



X-Yスキャナ型装置外観

(3) 放射線管内付着物測定装置 (2線源方式 X- θ スキャナ)

開発中であるが、特定異常位置で、中性子線源と γ 線源を用いて管周方向 (θ) の走査を行ない、付着物厚及び管厚を求めて管断面図を作成する測定装置である。

5. 結言

集合住宅等の設備配管の保守の容易化、作業の合理化を計るため、非破壊的な検査方法としてRI放射線を利用した検査方法の確立を積極的に推進している。今後は実用機としてのシステムの充実を更に押し進める計画である。

CXR TT スキャナ
(配管厚さ超音波探傷システム)

中国エックス線株式会社

藤原 茂 稲垣 俊三

金原 了二 山根 一治

1. まえがき

近年、建築物の配管の維持保全において、大きな問題となっている配管の腐食は、その経過年数だけでなく、その材質・水質・流速・維持管理等、多くの因子によっても左右される。

配管の腐食状況を正確に把握するには、現在、放射線、超音波等を利用した非破壊検査手法と配管の一部をサンプルとして抜き取る破壊検査手法とを併用している。

これは、従来の非破壊検査手法が、その機器の特性、使用条件等により精度が低下するなど信頼性に欠けることから内部を直接検査する必要があるためであるが、破壊検査では断水やその復旧に多大な労力を要する。

そこで、配管を損なうことなく、内部の状況を正確で容易に把握できる超音波を使用した非破壊検査機器の開発を行った。

開発に当たっては下記の点を留意した。

- ① 配管を損なうことなく非破壊的に配管内部の状況を正確に把握できるような測定システムの開発。
- ② 配管の狭隘場所で測定操作ができる測定治具として適用管外径範囲のいずれにおいても最小適用管外周より+100mm、軸方向1000mm以下の空間で測定動作するコンパクトなものの開発。
- ③ 配管内部の減肉状況を画像を用いて表示できるような処理システムの開発。
- ④ 深さ1mmのφ1mm平底穴が検出でき、軸方向・周方向各々1mmピッチ、移動速度100mm/s以上で測定可能な測定系の開発。

(目標精度 : ±0.1mm 分解能 : 0.1mm)

2. 測定装置システム

配管の狭あい場所で容易に脱着、スキャン（手動 $360^{\circ} \times 400\text{mm}$ ）できる軽量・コンパクトな測定治具及び管内の腐食状況を容易に把握できるような画像処理システムを開発した。

（1） 測定治具

測定治具は、管軸方向両端に治具固定用のチャッキング部があり、その間でスキャナ部が軸方向に移動（ 400mm ）するとともに、一定方向からの操作で周方向にセンサホルダが 180° 回転できるような構造となっている。測定走査は、 180° 回転するセンサホルダに設けられた2ヶの探触子によって 360° 全周をカバーできるしくみとなっており、配管取付け治具部の全重量は 9kg である。

又、適用管径は、 $15\text{A} \sim 80\text{A}$ （外径 $21.7 \sim 89.1\text{mm}$ ）であり、 $15\text{A} + 100\text{mm}$ 、軸方向 800mm の空間で、 80A まで測定動作できる治具寸法となっている。

15A から 80A 迄の配管に対し、1名にて5分以内で脱着可能で、1方向からの操作で全周スキャンでき、又、いずれの管径に対しても常に配管が中央に保てるチャッキング性能を有する。

（2） 制御部

超音波探傷器、データ採取器、コンピュータ、カラープリンタにより、構成される。

① データ採取部

深さ 0.7mm の $\phi 1\text{mm}$ 平底穴が検出でき、軸方向・周方向各々 1mm ピッチ移動速度 100mm/s で測定できる。

又、板厚測定精度については、各深さ位置の 1ϕ 平底穴（ 0.7mm 、 1.1mm 、 2.1mm ）、 1.5ϕ 平底穴（ 0.7mm 、 $\langle 1.2\text{mm} \rangle$ 、 2.1mm ）のいずれも $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の誤差で検出できる。

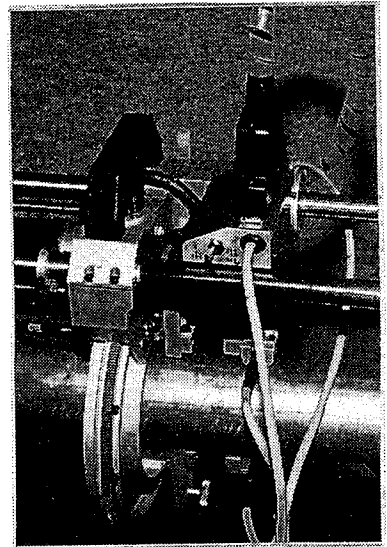
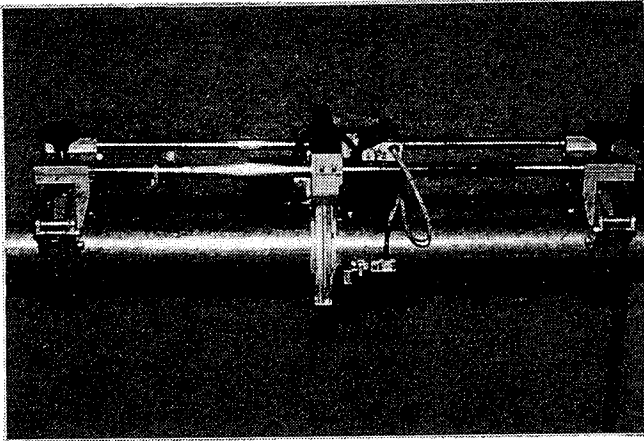
② アウトプット部

採取されたデータをもとに厚さによる色彩区分を行い、展開図、断面図、ヒストグラム、最大・最小板厚がプリントアウトでき、残肉状況が把握できる。

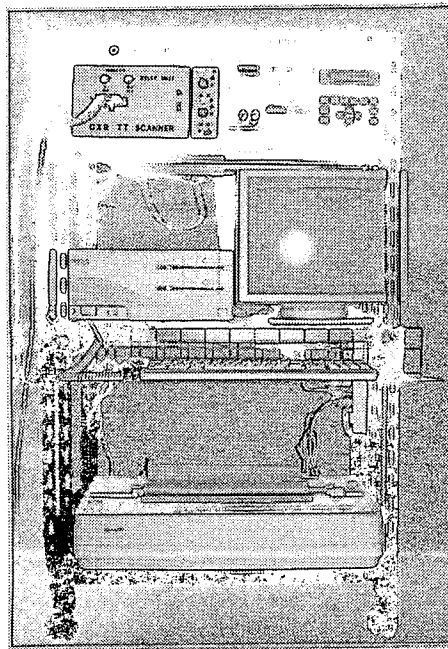
3. 仕様

項 目		仕 様
測定原理及び方法		パルス反射式
適用管径及び管材		15A～80A (外径21.7～89.1mm) 適用管材 ① 配管用炭素鋼管 ② 水道用亜鉛メッキ鋼管 ③ 圧力配管用炭素鋼管
出力	画像出力	CRT及びカラープリンタで配管厚みの平面展開図、配管の任意断面図を出力 1回の出力範囲：360°×400mm 5階調表示範囲：残厚み範囲0.5～1mm黒色、1～2mm赤色、2～3mm黄色、3～4mm緑色、4～5mm青色
	数値出力	最大肉厚、最小肉厚、及び肉厚分布（ヒストグラム）表示
精度	測定精度	±0.1mm
	移動性能	配管直管部の長さ400mmのサンプルに対し、周方向1°ピッチ、軸方向1mmピッチで測定 移動：マニュアル操作 移動速度：100mm/sec
作業性	機器構成	測定治具（スキャナ）（管装着固定治具、センサホルダ、ホルダ駆動機構）、超音波探傷器、データ採取器、32ビットコンピュータ、カラープリンタ
	機材重量	配管取付部：9kg
	測定スペース	最小適用管径外周より+100mmの空間で測定動作
	着脱時間	1名にて5分以内

別添資料-1 測定装置システムの外観



測定治具外観

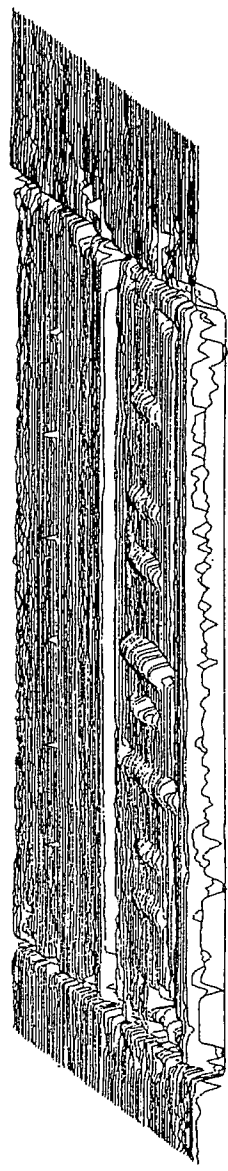
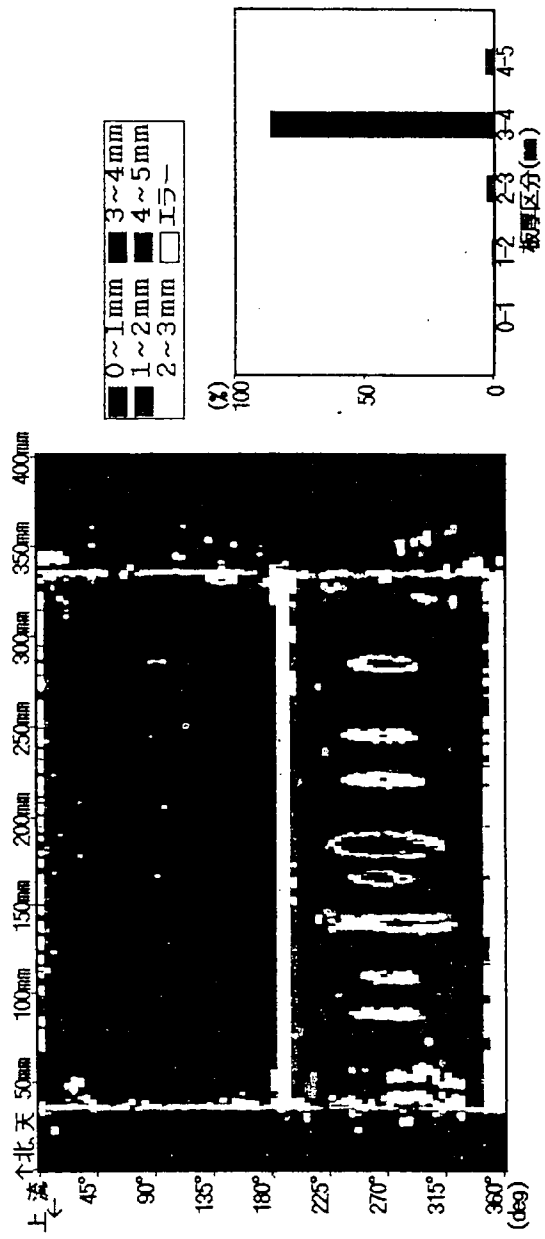


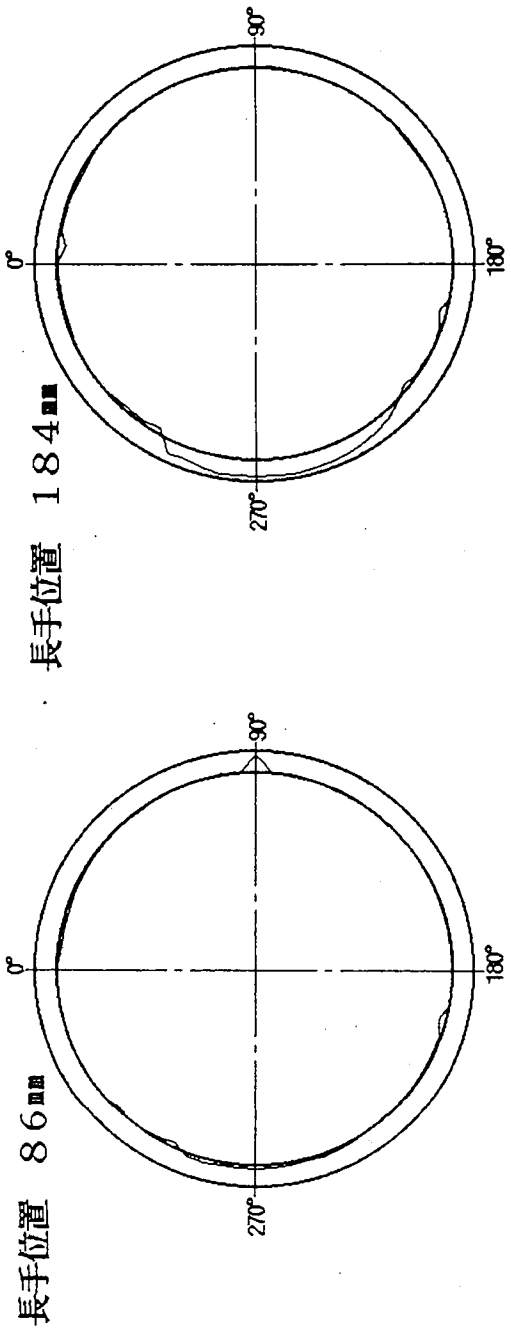
制御部外観

配管腐食分布図

データ番号 : 001

試験場所	: 中国エックス線株式会社 内
試験箇所	: SF 東園 A-3
試験年月日	: 平成 元年 8月10日
試験技術者	: CXR 技術員
配管名称	: 水道用鉛めっき銅管
配管寸法	: 25A (φ34×3.2t 綱)
試験周波数	: 10MHz
測定範囲	: 360° × 400mm
周測定ピッチ	: 5°
軸測定ピッチ	: 1mm



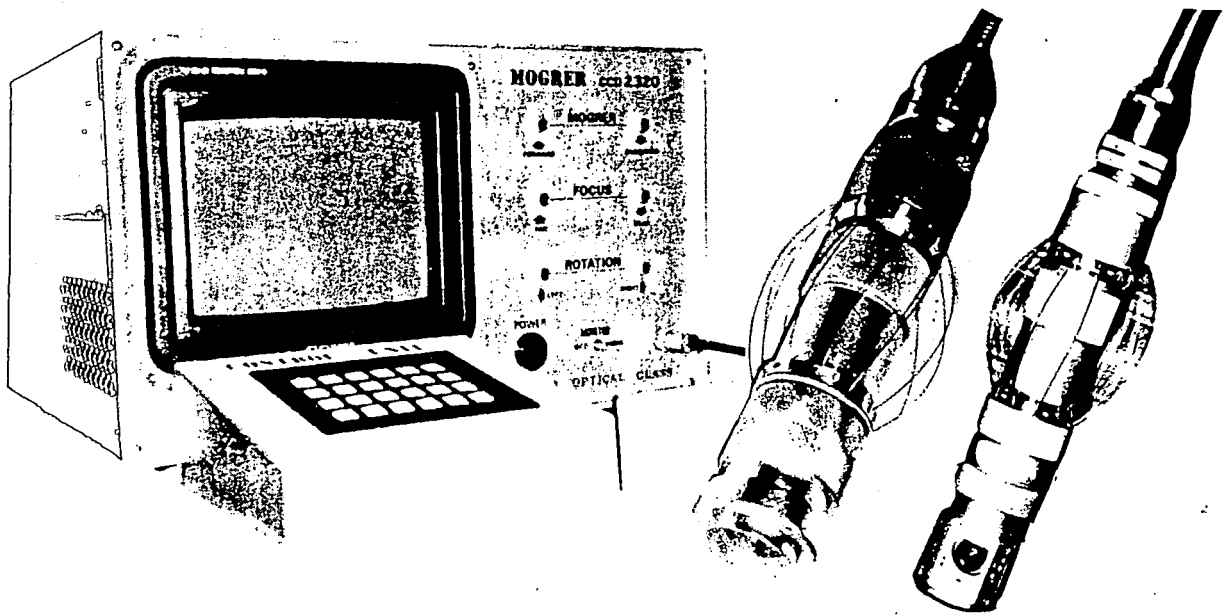


長手位置 : 86mm		長手位置 : 184mm	
位置 (deg)	厚度 (mm)	位置 (deg)	厚度 (mm)
0	200	0	20
15	205	15	25
30	210	30	30
45	215	45	35
60	220	60	40
75	225	75	45
90	230	90	50
105	235	105	55
120	240	120	60
135	245	135	65
150	250	150	70
165	255	165	75
180	260	180	80
195	265	195	85
210	270	210	90
225	275	225	95
240	280	240	100
255	285	255	105
270	290	270	110
285	295	285	115
300	300	300	120
315	305	315	125
330	310	330	130
345	315	345	135
360	320	360	140
	325		145
	330		150
	335		155
	340		160
	345		165
	350		170
	355		175
	360		180
			185
			190
			195
			200
			205
			210
			215
			220
			225
			230
			235
			240
			245
			250
			255
			260
			265
			270
			275
			280
			285
			290
			295
			300
			305
			310
			315
			320
			325
			330
			335
			340
			345
			350
			355
			360

板厚 (mm) 位置 (deg) 軸 (mm)
 最小値 0.6 90 206
 最大値 4.95

小径管内目視検査装置

MOGREER²³²⁰ CCD-LG



装置の概要

愛称“モグラー”と呼びます。

超小型CCDカメラとライトガイド照明をドッキングし、呼び径2B～3Bの小径パイプ内に挿入して管内を目視検査する装置です。

一般的に、小径パイプの内部を観察する手段として、ファイバースコープやボアスコープが用いられている。しかし、スコープヘッドの管内センタリングや長尺挿入・長尺用ファイバーのコスト高等使用上の条件が必ずしも使用しやすい状況にありません。住田光学ガラスと中国エックス線が共同で高精度で、使用しやすく、しかも低価格で提供できるMOGREER CCD LG0203型を開発しました。

小径管内で、TVカラーカメラの照明にハロゲンランプ等高熱を発生する照明源の使用ができない。これを、グラスファイバーによるライトガイドでクール照明することによって小型化し、小径管内で長時間の検査を行うことを可能にしました。

TVカラーカメラヘッドは、超広角レンズ付前方視用と、直角プリズムを通して側視・回転視用の2種類を用意しました。いずれもリモートコントロールでピント合わせ・カメラ回転して20mmの至近距離までピントが合わせられ管径や管内面の色調に合わせて照明の照度調整ができる構造となっています。

コントローラーに組み込まれたTVカラーモニターで管内撮影映像を観察すると同時に、キャラクターディスプレイユニットで、カメラヘッドの挿入距離やカメラ回転角度が同一画面に合成表示されますので、同時にVTRに録画することができます。又、オプションで検査データやコメントを表示すると同時に磁気カードに記録する機能を付加できます。

品 名		特 長
カ メ ラ ヘ ッ ド	前方視用カメラヘッド	前方視専用 超広角レンズF=4mm アイリス手動 フォーカスはリモコン 20mmまで近接撮影可能
	側方視用カメラヘッド	側方視専用 標準レンズF=7.5mm アイリス手動 プリズムにより側方視 フォーカス及び回転360° 往復はリモコン 20mmまで近接撮影可
	前方視・側方視両用 カメラヘッド	ヘッドキャップ交換により前方視、側方視両用 標準レンズF=7.5mm アイリス手動 フォーカス及び回転360° 往復はリモコン 20mmまで近接撮影可
ケ ー ブ ル	ケーブル	TVカメラ用ケーブル、コントロールケーブル、 ライトガイドが一体化され、押し込み可能な剛性被 覆した複合ケーブル(10m)
コ ン ト ロ ー ラ ー	コントローラー簡易型	TVカメラアンプ、フォーカス・回転コントローラー TVカラーモニター(9インチ)、キャラクターデ ィスプレイ、照明光源、同コントローラーで構成さ れ、カメラヘッド挿入距離及び回転角度がTV映像 と合成表示される同時録画可
	コントローラー 自動送り型	同上コントローラー機能に検査データ及び検査コメ ントを入力し、表示すると同時にカードレコーダー に記録される。 カメラヘッドの自動送り戻し、コントローラー付
自 動 送 り	自動送り装置	管入口にセットし、モーター駆動ローラーでケーブ ルを圧接し、リモコンにより挿入、引出しを行う。 挿入距離計付き
記 録 計	距離計	管入口にセットし、ケーブルに圧接したローラー回 転によりカメラヘッドの挿入距離を計測する。

東京都千代田区岩本町3-1-5
 スミト-神田岩本町ビル
 〒101 TEL 03-862-6721

中国エックス線株式会社
 東京本社 開発事業部

東京都千代田区神田須田町1-28
 タイムビル6階
 〒101 TEL 03-252-8261

株式会社住田光学ガラス
 ニューガラス事業部

AWS (米国溶接協会) の 「鉄骨溶接の検査」について

ESI 技術本部 三浦邦敏

1. 緒言

AWSのStructural Welding Code/Steel(構造用鋼材の溶接規格)は、(1) 総則、(2) 溶接継手の設計、(3) 精度と品質(Workmanship)、(4) 溶接法、(5) 技能(資格)認定(Qualification:格付け)、(6) 検査、(7) スタッド溶接、(8) 新設鉄骨建築物の設計、(9) 新設鉄骨橋梁の設計、(10) 管構造物、(11) 既存構造物の補強・補修、および「付録」から成っており、米国の多くの建築用鉄骨の設計・製作・施工はこの規格を基礎としておこなわれているようである。

日本においてこの規格に相当するもののひとつは日本建築学会の「JASS 6」や「鉄骨工事技術指針」などであり、彼我の基準の相違点などを比較するとかなり興味深いと思われる。

本報は、AWS規格の(1)~(11)の内、とくに(6)の「検査」のPART A:一般要求事項(General Requirements)について翻訳して紹介するものであり、当該溶接構造物の検査の考え方が日本の建築鉄骨の設計・製作・施工・検査等にたずさわる諸賢の参考となれば幸いである。

2. 本文

6. 検査

PART A 一般要求事項

6.1 一般事項

6.1.1 この規格では、製作・施工上の試験・検査(以下ここでは自主検査と呼ぶことにする)と立会検査と呼ぶことにする)を別個の機能として定義する。

自主検査は、必要に応じて組立前、組立中、溶接中および溶接後において、使用材料と品質・精度が契約仕様書の要求に適合していることを確認するためにおこなわなければならない。

立会検査は製作作業が遅延しないように時宜を得ておこない、その結果はタイムリーにオーナーおよびファブリケータに報告されなければならない。

契約仕様書に明記なければ、自主検査は製作・施工受注者(以下ファブリケータという)の責任でおこなわなければならない。

一方、立会検査はそれを実行できるオーナーの特権であるが、仕様によっては独自の立会検査が省略されたり、あるいは「自主検査と立会検査の両方をファブリケータがおこなうこと」と規定されることがある。

6.1.2 立会検査員とはオーナーまたは構造設計者(Engineer)によって指名された者で、正に彼等の代理として仕様上の品質に関連する事柄のすべてを検査する者である。

自主検査員とはファブリケータが決める者で、ファブリケータ側において仕様上の品質に関連する事柄のすべてを検査する者である。

特別な資格認定なしで検査員という用語が使われる場合は、前項 6.1.1に規定した責任の範囲内において適用すること。

6.1.3 検査員の技量認定

6.1.3.1 材料あるいは品質・精度の合否を決定する検査員はその技量が認定されなければならない。検査員の技量認定基準は審判によりまとめられなければならない。構造設計者が当該認定基準を規定する場合は、契約書類中にそのように記載される必要がある。

検査員技量認定の基準は以下のいずれかとする。

- (1) AWS公認溶接検査員(CWI)。これはAWS QC1、「溶接検査員の技量認定基準およびガイド」による。
- (2) CWB(カナダ溶接局)のCAS(カナダ規格協会)規格W178.2の「溶接検査員認定基準」による。
- (3) 教育訓練または経験、あるいはその両方により、鉄鋼製品の製品の製作、試験・検査について精通している者。

6.1.3.2 溶接構造物に対する検査の技量に特段の疑義がなければ、検査員の技量認定に有効期限を規定しない。

6.1.3.3 検査員はその監督下で、特定の検査業務がおこなえる補助検査員を動員することができる。補助検査員は特定の検査業務について経験を有し、教育されて認定されなければならない。補助検査員の業務は検査員によって定常的に監視されなければならない(毎日)。

6.1.3.4 検査員および補助検査員は裸眼視力または矯正視力のいずれかの視力検査に合格しなければならない。

要求される視力は以下のとおり。

- (1) Snellen Englishまたは同等材による 305mm至近視力
- (2) 遠隔視力20/40以上

検査員等の視力検査は、3年以内毎におこなわれなければならない。

6.1.3.5 構造設計者は検査員の技量認定について責任をもたなければならない。

6.1.4 検査員は、溶接による製作・施工のすべてが契約仕様書の要求にしたがっておこなわれていることを確認しなければならない。

6.1.5 検査員にはすべての溶接部位、溶接部形状、溶接長などが明示された、最終承認後の詳細図が配布されなければならない。

また、製作・施工される製品の材料仕様および品質・精度仕様について規定した契約文書についても配布されなければならない。

6.1.6 検査員は、検査業務の詳細について事前に知らされていなければならない。

6.2 材料検査

検査員は AWS規格の要求事項に適合した材料のみが使用されることを確認しなければならない。

6.3 溶接施工要領および溶接機器の検査

6.3.1 検査員は、採用されるすべての溶接施工法が溶接施工仕様準拠に準拠して事前に承認されているかどうか、あるいはAWS規定の5.2項にしたがって試験認定されたかどうかを確認しなければならない(5.2項は溶接施工法認定のうちの“その他の施工法”)。

- 6.3.2 検査員は、溶接作業に使用される機器がAWS規定の3.1.2項の要求に適合しているかどうかを検査しなければならない(3.1.2項は品質・精度基準のうち“溶接機器等に対する要求”)。
- 6.4 溶接工、自動溶接オペレータおよび仮付溶接工の技量認定に対する検査
- 6.4.1 検査員は、AWS規定の5.3項の要求にしたがって技量認定された溶接工、自動溶接オペレータおよび仮付溶接工による溶接のみを許可すること(5.3項は“溶接工技量認定”)。あるいは、彼等がしかるべき監督者の下でこういった技量認定試験に事前に合格していることを確認すること。
- 6.4.2 当該技量認定がおこなわれている溶接工などの場合であっても、その技量がAWSの規定の要求を下回ると思われる場合は、検査員は、簡便な試験方法または5.3項にもとづく完全な技量認定試験により、彼等の技量確認をおこなってよい。簡便な試験方法とは隅肉溶接破断試験などをいう。
- 6.4.3 検査員は、溶接工または自動溶接オペレータがその認定されている施工法について6ヶ月を超えて従事していない場合は、再試験を要求しなければならない。
- 6.5 作業および記録の検査
- 6.5.1 検査員は、すべての溶接部の部位、サイズ、長さがAWS規定および詳細図の要求に適合しているかどうか、規定されていない溶接が未承認でおこなわれていないかどうかを確認しなければならない。
- 6.5.2 検査員は、5.1項の規定に合致した溶接施工要領、または5.2項と5.5項にしたがって認定された溶接施工要領のみが実施されているかどうかを確認しなければならない(5.1項は“承認済施工要領”5.5項は“溶接施工条件の制約”)。
- 6.5.3 検査員は、各種の溶接棒がそれぞれ限定された溶接姿勢、電流種別、極性の組合せで使用されているかどうかを確認しなければならない。
- 6.5.4 検査員は適切な頻度で、開先加工、組立作業、溶接法および溶接工・自動溶接オペレータ・仮付溶接工の技量を観察し、本規格の要求事項に適合しているかどうかを確認すること。
- 6.5.5 検査員は溶接作業が3項と8.15項、9.25項または10.17項のいずれかの要求にしたがったものであるかどうかをチェックすること(8.15項は新設鉄骨建築物の“溶接部の品質”、9.25項は新設鉄骨橋梁の“溶接部の品質”、10.17項は管構造物の“溶接部の品質”)。この規格に規定のない合否基準は構造設計者が承認すれば使用することができる。溶接部のサイズと断面形状は適切なゲージによって計測すること。溶接部の外観検査では補助器具としてスポットライト、拡大鏡その他を使用すること。
- 6.5.6 検査員(複数)は、自らが検査して合格した部材または継手に対してはマーキングを施すか記録をとり、他部材と区別すること。記録方法は検査者と被検査者間の合意があればいかなる方法でもよい。繰返し荷重の負荷される部材のボンチ打ちは構造設計者の承認を必要とする。
- 6.5.7 検査員は溶接施工法の認定資料、溶接工の技量認定資料、その他の試験に関する資料等の記録を管理すること。

6.6 ファブリケーターの責任／義務

- 6.6.1 ファブリケーターは外観検査をおこなうことに対して、および材料と品質・精度上の不具合の補修に対して責任を有する。補修は、3項と 8.15.1項、9.25.1項、10.17.1項あるいはその他の項のいずれかにしたがっておこなわなければならない。
- 6.6.2 ファブリケーターは、契約仕様書に規定される如く、材料と品質・精度上の不具合については検査員の指示通り補修をおこなわなければならない。
- 6.6.3 欠陥を有する溶接部や、その再溶接のための手直し行為が母材にダメージを与える場合で、構造設計者がそれらを契約仕様上容認できないと判断した場合は、ファブリケーターは当該部材を交換するか構造設計者が承認する方法によって不具合を排除しなければならない。
- 6.6.4 外観検査を除いて、あらかじめ NDTが契約仕様書で要求されている場合は、ファブリケーターは8.15項、9.25項または 10.17項のいずれかの品質要求に合致する溶接部を生産すること。
- 6.6.5 外観検査を除いて、契約仕様書上にもともと NDTの規定がないにも拘らず、のちにオーナーから NDTを要求された場合は、ファブリケーターは要求のあったいかなる種別の NDTをも実施しなければならない。あるいは、次項 6.7にもとづいておこなわれるいかなるNDTをも受入れなければならない。
この場合オーナーは、当該行為に伴う管理費、前処理費用、NDT実費、8.15.1項、9.25.1項または 10.17.1項のいずれかで不合格とされない欠陥の補修費用など、すべての費用を負担しなければならない。当該費用はオーナーとファブリケーター間で合意される相場であること。
ただし、当該試験検査によってきわめて重大な欠陥が発見されたり、あるいはゴマカシが発見された場合は、ファブリケーターの費用によってすべての補修がおこなわれなければならない。

6.7 非破壊試験

AWSに述べられているような各種のNDT試験要領は長年使用されており溶接部の合理的な品質保証に寄与してきているが、AWSの利用者によっては「各試験方法とも有害な欠陥のすべてを検出できる」と誤解されている向きがある。

AWSの利用者は適用される NDTのあらゆる限界について、とくに特定の傾きを有する板状欠陥の検出とその種別の判定が著しく困難であることを熟知していなければならない。(NDTの限界と補足的な利用方法については ANSI/AWS B1.10 [溶接部NDTのガイド] の最新版に説明されている。)

- 6.7.1 外観検査を除いて、NDTが要求される場合は入札者に対してそれを文書により通知しなければならない。また、NDT対象の溶接部、試験範囲およびNDTの種別についてその通知に明示しなければならない。
- 6.7.2 NDTの結果で不合格と判定された場合、当該溶接部は3.7項に規定された方法により補修されなければならない(3.7項は精度と品質のうちの“補修”)。
- 6.7.3 RTが適用される場合は、PART B(RT)に規定する試験要領に準拠すること。
- 6.7.4 UTが適用される場合は、PART C(UT)に規定する試験要領に準拠すること。
- 6.7.5 MTが適用される場合は、試験要領はASTM(米国材料試験規格)のE709に準拠し、合否の判定はAWS 8.15、9.25または10.17のいずれかによる。

6.7.6 表面に開口した欠陥に対してはPTを適用することができる。PTの試験要領はASTM E165に準拠し、合否の判定はAWS 8.15、9.25または10.17のいずれかによる。

6.7.7 NDT要員の技量認定

6.7.7.1 NDTの担当者はASNT(米国非破壊検査協会)のSNT-TC1Aによって技量認定された者とする。

NDT LEVEL Iの者は同LEVEL IIの者の監督下で、また、NDT LEVEL IIの者は自らがNDT作業をおこなうことができる。

6.7.7.2 LEVEL IおよびLEVEL IIの者の技量認定はLEVEL IIIの者によりおこなわれなければならない。LEVEL IIIの者はASNTにより認定された者か、または必要とされる学歴、教育訓練および経験を具備した者でSNT-TC1Aに示される筆記試験に合格した者でなければならない。

6.7.7.3 6.7.7の規定に従ってNDTをおこなう者はAWS QC1の規定による資格者(CWI)でなくともよい。

6.8 NDTの範囲

入札者に配布される書類にはNDTのおこなわれる溶接部の範囲(継手種類、位置)が明らかにされていなければならない。

6.8.1 仕様でNDTの要求されている溶接部は、部分的な検査や抜取検査が規定されていないかぎり、全数・全長検査とする。

6.8.2 部分的な検査が規定される場合にあつては、溶接継手の種類、検査長さ、位置が契約書類上に明記されなければならない。

6.8.3 抜取検査が規定される場合にあつては、溶接継手種類毎の溶接長当りかまたは溶接継手ロット当りの抜取率が入札者に配布される書類上に明記されなければならない。各抜取検査にあつては、1被検査溶接長は102mm以上でなければならない。抜取検査により不合格欠陥が検出された場合は当該欠陥の範囲を調査すること。そして、同一ロットの別の継手から2ヶ所を追加で抜取検査すること。追加抜取の部位についてはファブリケータと立会検査員間で合意されなければならない。

追加抜取の2ヶ所のいずれかに不合格欠陥が検出された場合は、当該ロットは全数検査とする。最初の抜取りがおこなわれた溶接部位が1ロット以上にまたがる場合は、該当するロット当り各2ヶ所の追加検査とする。当該2ヶ所の抜取位置についてはファブリケータと立会検査員の合意に基づくこと。

6.8.4 NDT検査員には溶接部の幾何学的形状、母材厚、溶接施工法に関する情報が事前に開陳されること。また、補修溶接がおこなわれた場合にもすべてNDT検査員に報告すること。

3. あとがき

日本の規格・基準等にはあまり見受けられない事柄について整理すると以下のようである。

- (1) 検査員の立場が明確である。
- (2) 溶接検査員(Welding Inspector)とNDT検査員が別個に扱われている。
- (3) 公認溶接検査員に対する信頼性がとくに高いように思われる。

- (4) NDTの限界について明示してある。
- (5) 外観検査は必須の検査項目である。
- (6) 契約行為にかかわる事項に対しての表現が多い。
- (7) 溶接検査員の職務範囲が明確であり、それによって求められる資質がわかりやすい。

日本には現在、NDI資格、WES溶接技術者資格、CIW検査員資格、全構連検査員資格などがあり、建築鉄骨の製作・施工・検査の現場で活用されているが、今後においては、Structural SteelのFabricationに焦点を絞って、より活用性の高い資格制度が整備されるべきと思われる。それにより、建築鉄骨業界もさらに合理的発展をとげられると思う。

* 参考文献 P.103~105, 6. Inspection-ANSI/AWS D 1.1-88,
An American National Standard, 1988 Structural Welding
Code/Steel, AMERICAN WELDING SOCIETY

6. Inspection

Part A *General Requirements*

6.1 General

6.1.1 For the purpose of this Code, fabrication/erection inspection and testing and verification inspection and testing are separate functions. Fabrication/erection inspection and tests shall be performed as necessary prior to assembly, during assembly, during welding, and after welding to ensure that materials and workmanship meet the requirements of the contract documents. Verification inspection and testing shall be performed and their results reported to the owner and contractor in a timely manner to avoid delays in the work.

Fabrication/erection inspection and testing are the responsibilities of the contractor unless otherwise provided in the contract documents. Verification inspection and testing are the prerogatives of the owner who may perform this function or, when provided in the contract, waive independent verification, or stipulate that both inspection and verification shall be performed by the contractor.

6.1.2 The verification Inspector is the duly designated person who acts for and in behalf of the owner or Engineer on all inspection and quality matters within the scope of the contract documents. The fabrication/erection Inspector is the duly designated person who acts for and in behalf of the contractor on all inspection and quality matters within the scope of the contract documents. When the term Inspector(s) is used without further qualification, it applies equally to inspection and verification within the limits of responsibility designated in 6.1.1.

6.1.3 Inspector Qualification.

6.1.3.1 Inspectors responsible for acceptance or rejection of material and workmanship shall be qualified. The basis of Inspector qualification shall be documented. If the Engineer elects to specify the basis of inspector qualification, it shall be so stated in contract documents.

Acceptable qualification basis are the following:

(1) Current or previous certification as an AWS

Certified Welding Inspector (CWI) in accordance with the provisions of AWS QC1, *Standard and Guide for Qualification and Certification of Welding Inspectors*, or

(2) Current or previous qualification by the Canadian Welding Bureau (CWB) to the requirements of the Canadian Standard Association (CSA) Standard W178.2, *Certification of Welding Inspectors*, or

(3) An Engineer or technician who, by training or experience, or both, in metals fabrication, inspection and testing, is competent to perform inspection of the work.

6.1.3.2 The qualification of an Inspector shall remain in effect indefinitely provided the Inspector remains active in inspection of welded steel fabrication, unless there is specific reason to question the Inspector's ability.

6.1.3.3 The Inspector may be supported by Assistant Inspectors who may perform specific inspection functions under the supervision of the Inspector. Assistant Inspectors shall be qualified by training and experience to perform the specific functions to which they are assigned. The work of Assistant Inspectors shall be regularly monitored by the Inspector, generally on a daily basis.

6.1.3.4 Inspectors and Assistant Inspectors shall have passed an eye examination with or without corrective lenses to prove: (1) near vision acuity of Snellen English, or equivalent, at 12 in. (305 mm); and (2) far vision acuity of 20/40, or better. Eye examination of all inspection personnel is required every three years or less if necessary to demonstrate adequacy.

6.1.3.5 The Engineer shall have authority to verify the qualification of Inspectors.

6.1.4 The Inspector shall ascertain that all fabrication and erection by welding is performed in accordance with the requirements of the contract documents.

6.1.5 The Inspector shall be furnished complete detailed drawings showing the size, length, type, and location of all welds to be made. He shall be furnished the portion of the contract documents that describes material and quality requirements for the products to be fabricated or erected, or both.

6.1.6 The Inspector shall be notified in advance of the start of operations subject to inspection and verification.

6.2 Inspection of Materials

The Inspector shall make certain that only materials conforming to the requirements of this Code are used.

6.3 Inspection of Welding Procedure Qualification and Equipment

6.3.1 The Inspector shall make certain that all welding procedures are prequalified and covered by a welding procedure specification or are qualified in accordance with 5.2 of this Code.

6.3.2 The Inspector shall inspect the welding equipment to be used for the work to make certain that it conforms to the requirements of 3.1.2.

6.4 Inspection of Welder, Welding Operator, and Tack Welder Qualifications

6.4.1 The Inspector shall permit welding to be performed only by welders, welding operators, and tack welders who are qualified in accordance with the requirements of 5.3, or shall make certain that each welder, welding operator, or tack welder has previously demonstrated such qualification under other acceptable supervision.

6.4.2 When the quality of a welder's, welding operator's, or tack welder's work appears to be below the requirements of this Code, the Inspector may require that welder, welding operator, or tack welder demonstrate an ability to produce sound welds by means of a simple test, such as the fillet-weld-break test, or by requiring complete requalification in accordance with 5.3.

6.4.3 The Inspector shall require requalification of any welder or welding operator who has for a period exceeding six months not used the process for which the welder or welding operator was qualified.

6.5 Inspection of Work and Records

6.5.1 The Inspector shall make certain that the size, length, and location of all welds conform to the requirements of this Code and to the detail drawings and that no unspecified welds have been added without approval.

6.5.2 The Inspector shall make certain that only welding procedures are employed which meet the provisions of 5.1 or are qualified in accordance with 5.2 and 5.5.

6.5.3 The Inspector shall make certain that electrodes are used only in the positions and with the type of welding current and polarity for which they are classified.

6.5.4 The Inspector shall, at suitable intervals, observe joint preparation, assembly practice, the welding techniques, and performance of each welder, welding operator, and tack welder to make certain that the applicable requirements of this Code are met.

6.5.5 The Inspector shall examine the work to make certain that it meets the requirements of section 3 and 8.15, 9.25, or 10.17, as applicable. Other acceptance criteria, different from those specified in the Code, may be used when approved by the Engineer. Size and contour of welds shall be measured with suitable gages. Visual inspection for cracks in welds and base metal and other discontinuities should be aided by a strong light, magnifiers, or such other devices as may be found helpful.

6.5.6 Inspectors shall identify with a distinguishing mark or other recording methods all parts or joints that they have inspected and accepted. Any recording method which is mutually agreeable may be used. Die stamping of dynamically loaded members is not permitted without the approval of the Engineer.

6.5.7 The Inspector shall keep a record of qualifications of all welders, welding operators, and tack welders; all procedure qualifications or other tests that are made; and such other information as may be required.

6.6 Obligations of the Contractor

6.6.1 The contractor shall be responsible for visual inspection and necessary correction of all deficiencies in materials and workmanship in accordance with the requirements of section 3 and 8.15.1, 9.25.1, 10.17.1 or other parts of the Code, as applicable.

6.6.2 The contractor shall comply with all requests of the Inspector(s) to correct deficiencies in materials and workmanship as provided in the contract documents.

6.6.3 In the event that faulty welding or its removal for rewelding damages the base metal so that in the judgment of the Engineer its retention is not in accordance with the intent of the contract documents, the contractor shall remove and replace the damaged base metal or shall compensate for the deficiency in a manner approved by the Engineer.

6.6.4 When nondestructive testing other than visual inspection is specified in the information furnished to bidders, it shall be the contractor's responsibility to ensure that all specified welds meet the quality requirements of 8.15, 9.25, or 10.17, whichever is applicable.

6.6.5 If nondestructive testing other than visual inspection is not specified in the original contract agreement but is subsequently requested by the owner, the contractor shall perform any requested testing or shall permit any testing to be performed in accordance with 6.7. The

owner shall be responsible for all associated costs including handling, surface preparation, nondestructive testing, and repair of discontinuities other than those listed in 8.15.1, 9.25.1, or 10.17.1, whichever is applicable, at rates mutually agreeable between owner and contractor. However, if such testing should disclose an attempt to defraud or gross nonconformance to this Code, repair work shall be done at the contractor's expense.

6.7 Nondestructive Testing

The nondestructive testing procedures as described in this Code have been in use for many years and provide reasonable assurance of weld integrity; however, it appears that some users of the Code incorrectly consider each method capable of detecting all injurious defects. Users of the Code should become familiar with all the limitations of nondestructive testing methods to be used, particularly the inability to detect and characterize planar defects with specific flaw orientations. (The limitations and complementary use of each method are explained in the latest edition of ANSI/AWS B1.10, *Guide for the Nondestructive Inspection of Welds*.)

6.7.1 When nondestructive testing other than visual is to be required, it shall be so stated in the information furnished to the bidders. This information shall designate the categories of welds to be examined, the extent of examination of each category, and the method or methods of testing.

6.7.2 Welds tested nondestructively that do not meet the requirements of this Code shall be repaired by the methods permitted by 3.7.

6.7.3 When radiographic testing is used, the procedure and technique shall be in accordance with Part B of this section.

6.7.4 When ultrasonic testing is used, the procedure and technique shall be in accordance with Part C of this section.

6.7.5 When magnetic particle testing is used, the procedure and technique shall be in accordance with ASTM E709, and the standard of acceptance shall be in accordance with 8.15, 9.25, or 10.17 of this Code, whichever is applicable.

6.7.6 For detecting discontinuities that are open to the surface, dye penetrant inspection may be used. The standard methods set forth in ASTM E165 shall be used for dye penetrant inspection, and the standards of acceptance shall be in accordance with 8.15, 9.25, or 10.17 of this Code, whichever is applicable.

6.7.7 Personnel Qualification

6.7.7.1 Personnel performing nondestructive testing other than visual shall be qualified in accordance with the current edition of the American Society for Nonde-

structive Testing Recommended Practice No. SNT-TC-1A.²¹ Only individuals qualified for NDT LEVEL I and working under the NDT LEVEL II or individuals qualified for NDT LEVEL II may perform nondestructive testing.

6.7.7.2 Certification of Level I and Level II individuals shall be performed by a Level III individual who has been certified by (1) The American Society for Nondestructive Testing, or (2) has the education, training, experience, and has successfully passed the written examination prescribed in SNT-TC-1A.

6.7.7.3 Personnel performing nondestructive tests under the provisions of 6.7.7 need not be qualified and certified under the provisions of AWS QC1.

6.8 Extent of Testing

Information furnished to the bidders shall clearly identify the extent of nondestructive testing (types, categories, or location) of welds to be tested.

6.8.1 Weld joints requiring testing by specification shall be tested for their full length, unless partial or spot testing is specified.

6.8.2 When partial testing is specified, the location and lengths of welds or categories of weld to be tested shall be clearly designated in the contract documents.

6.8.3 When spot testing is specified, the number of spots in each designated category of welded joint to be tested in a stated length of weld or a designated segment of weld shall be included in the information furnished to the bidders. Each spot test shall cover at least 4 in. (102 mm) of the weld length. When spot testing reveals indications of rejectable discontinuities that require repair, the extent of those discontinuities shall be explored. Two additional spots in the same segment of weld joint shall be taken at locations away from the original spot. The location of the additional spots shall be agreed upon between the contractor and the verification Inspector.

When either of the two additional spots show defects that require repair, the entire segment of weld represented by the original spot shall be completely tested. If the weld involves more than one segment, two additional spots in each segment shall be tested at locations agreed upon by the contractor and the verification Inspector, subject to the foregoing interpretation.

6.8.4 Nondestructive test personnel shall, prior to testing, be furnished or have access to relevant information regarding weld joint geometries, material thicknesses, and welding processes used in making the weldment. NDT personnel shall be apprised of any subsequent repairs to the weld.

21. Available from the American Society for Nondestructive Testing, 4153 Arlingate Plaza, Columbus, OH 43228.

山田 博章

島山 由紀子

日本大学 生産工学部

日本大学大学院

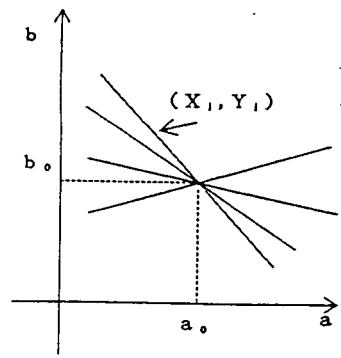
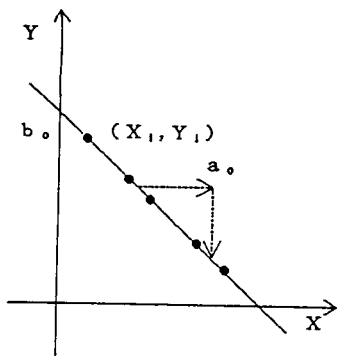
1. はじめに

鋼板におけるラミネーションや溶接部のクラック、溶け込み不良欠陥等のような線状や広がりをもつ面状欠陥と材料強度との関係は、その形状や分布状態に大きく依存する。鋼板に対する欠陥の”有害度”を、評価判断基準が容易で、かつ、客観性も有する一つの特徴(的)な量で記述することは重要である。欠陥の有害度を評価する方法は従来より多くの研究報告にみられるが、有害度を適切に表す特徴量を記述する手段がなく、指示長さによる評価がなされているに過ぎない。

そこで、ここでは任意形状にも拡張されている⁽¹⁾ H o u g h 変換理論を適用し、パラメータ変換することにより、線状欠陥の場合について特徴量を記述することを提案する。以後、2節では H o u g h 変換の有用性について触れ、3節では新しく提案する特徴量とそのデータ処理アルゴリズムについて述べ、4節でその結果に対する考察を行い、5節に実際にサルファプリントパターンに適用した例を示すことにする。

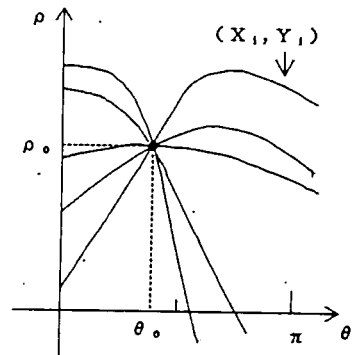
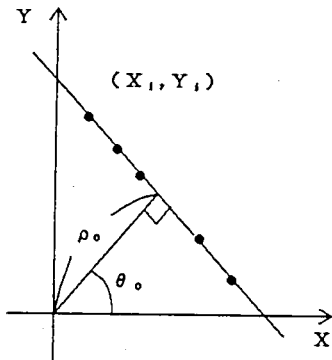
2. H o u g h 変換の有用性

ここで用いる H o u g h 変換は直線形状についてのパラメータ変換で、図1の記号に従えば、一般には(1)式に示されるように (x, y) 変数を (a, b) 変数へ変換することとなる。但し、 (a, b) 空間への変換ではその自由度が大きすぎ取りあつかいが容易でないため、D u d a & H a r t⁽²⁾により提案された図2のように、 (θ, ρ) 空間へ変換するための(2)式がよく用いられる。すなわち、 (θ, ρ) 空間への変換では変数 θ に $(0 \sim \pi)$ の制約がありその取りあつかいが容易となる。



(a) 画像 (x , y) 空間 (b) パラメータ (a , b) 空間

図 1 . 画像空間とパラメータ空間



(a) 画像 (x , y) 空間 (b) パラメータ (θ , ρ) 空間

図 2 . D u d a & H a r t の用いた直線パラメータ空間

$$y = a \cdot x + b \tag{1}$$

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \tag{2}$$

一般のパターン認識や形状の辺縁部の欠落を補間するための、Hough変換では2次への拡張から更に一般形状、高次の関数への拡張もなされている。一次関数型では高次のもの比べるとパラメータ数が少ないため計算コストが低く利用価値が大きい。従って、ここではクラックや割れのような線状(面状を含めた)欠陥の特徴量として一次関数型を利用することを提案する。この特徴量を用いる利点は、欠陥形状寸法(長さと同幅方向)とその2次元平面内の分布状態を含めた特徴量が記述されることにある。

3. 特徴量を使用したデータ処理アルゴリズム

3. 1 特徴量について

ラミネーション欠陥のような数多く長さをもって分布した欠陥を想定し特徴をこのパラメータ空間の広がりと指示長さで記述することを試みる。

一つの線状欠陥を直線に近似し、その直線を H o u g h 変換によりパラメータ空間上の一点に投影する。線状欠陥が n 個 ($n \geq 3$) 分布している場合には、パラメータ空間上にも n 個の点 t_1, t_2, \dots, t_n が存在する。これらの点 t_k ($1 \leq k \leq n$) で形作られる n 角形の図形の面積 $f_{(area)}$ を求める。パラメータ空間上の点は (x, y) 空間での直線の絶対的な位置を表し、図形の面積は間接的に、これら直線の相対的位置を示している。求めた面積を欠陥の長さ l_1, l_2, \dots, l_n の総和で基準化する。これにより、相対的位置関係に欠陥の分布状態の粗密が加わった特徴量として、一次元量 (k 値) が求まる。この k 値が大きい程 $x - y$ 平面での複数の線状欠陥が離れて存在していることとなる。

$$k = \frac{f_{(area)}}{\pi \times l} \quad (3)$$

但し、 $f_{(area)}$; θ, ρ 平面に投影された点 t_k
($1 \leq t_k \leq n$) で囲まれる面積

$$l \quad ; \quad \text{全欠陥長さの和} \quad l = \sum_{k=1}^n l_k$$

また、同一直線分布でかつ指示長さの総和が同じ場合は目視での粗密が異なるにも関わらず k 値が同じ値を示す。この場合の補助量として (x, y) 空間での最小分布面積 S に対する線状欠陥の総個数 n の割合 d を考え、 k を d で基準化し、その値を p とする。この p 値が大きい程 $x - y$ 平面での欠陥の分布状態は粗ということとなる。

$$p = \frac{k}{d} \quad (4)$$

但し、 d ; $d = n / S$
 n ; 線状欠陥の総個数
 S ; 線状欠陥の最小分布面積

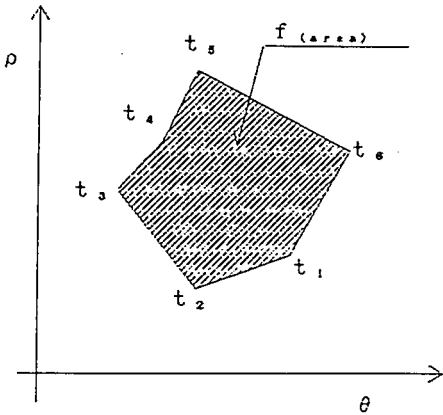


図 3. $f(\text{area})$
 (パラメータ空間)

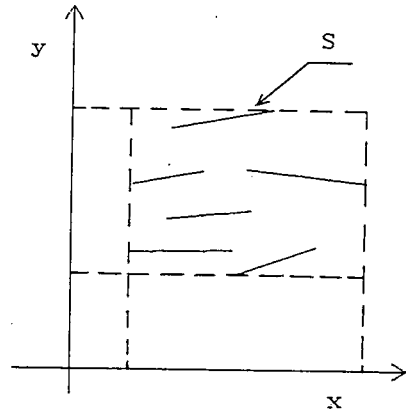


図 4. 最小分布面積
 (x, y 空間)

これらの値を用いたデータ処理アルゴリズムを次に示す。

3. 2 データ処理アルゴリズム

3. 1 節で提案した特徴量を用いたデータ処理の流れを図 5 の流れ図に添って説明する。まず、欠陥パターンを入力する。同時に、基準の長さも入力される。その線上の両端点をカーソル(○)で指示する。複数点で指示した場合には、最小自乗近似で最適化した直線を求めるようになっている。続いて、異なる欠陥について同様の処理を繰り返す。すべての x, y 平面(画像平面)内の欠陥が入力

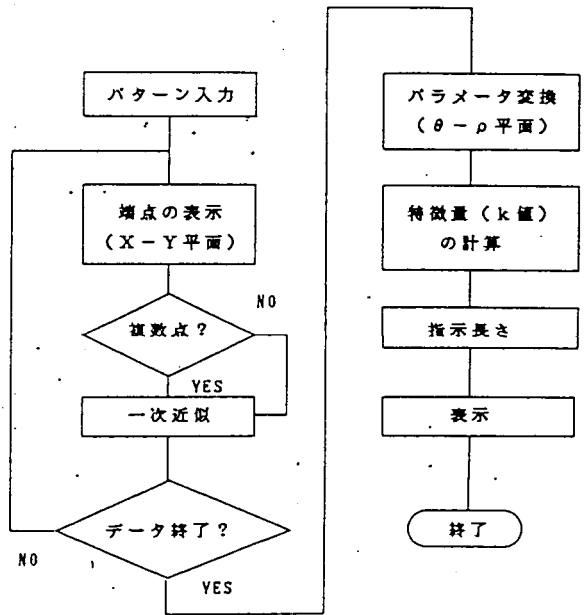


図 5 データ処理アルゴリズム

されると (θ, ρ) 平面への変換が行われ、分布状態を表す指標として一次元の量 (k) と p がその特徴量として表示される。

4. シミュレーション結果

3. 2の方法で行ったシミュレーション結果を図6に示す。図6(a)は x, y 平面(画像平面)での線状欠陥のモデル、(b)は (θ, ρ) 平面での k 値、 p 値とその長さの指示例である。ここでの ρ についての制限は x, y 平面での直線指示長さの最大値となっている。グラフィック表示上では120%まで表示してある。

この一次関数系 Hough 変換によるパラメータ空間での k 値を定義した場合の特異点として x, y 平面での完全な平行欠陥が存在する場合には、パラメータ空間 (θ, ρ) 平面での k 値が求まらない。すなわち、面積が零となり一直線上に並ぶこととなる。このときの処理としては k 値、 p 値のかわりに全欠陥長 l_1, l_2, \dots, l_n の長さを表示し、 $x-y$ 平面での各直線の間隔も計算されるようになっている。平行な場合の理論値として $x-y$ 平面での座標値を与えたときシミュレーション結果を図7に示した。しかし、実際には複数の欠陥が平行に並ぶ場合はきわめてまれである。

また、16bit パーソナル・コンピュータレベルでの処理時間は3つの欠陥が存在する場合について、表示を含めて約5秒位であり実用上十分であると考えられる。

5. サルファプリントパターンへの適用例

これらの特徴量を実際に鉄鋼中の硫黄の分布状態を調べるために使われるサルファプリントパターンへ適用した例を図8に示す。ここではプリント中央からV字形に分布している偏析である、V流動に適用し、評価を試みた。

6. 結論

2次元平面内の分布した線状欠陥(面状を含める)の特徴量を記述する手段として、一次関数系 Hough 変換によりパラメータ変換し、その特徴量を記述することの有用性を述べ、サルファプリントパター

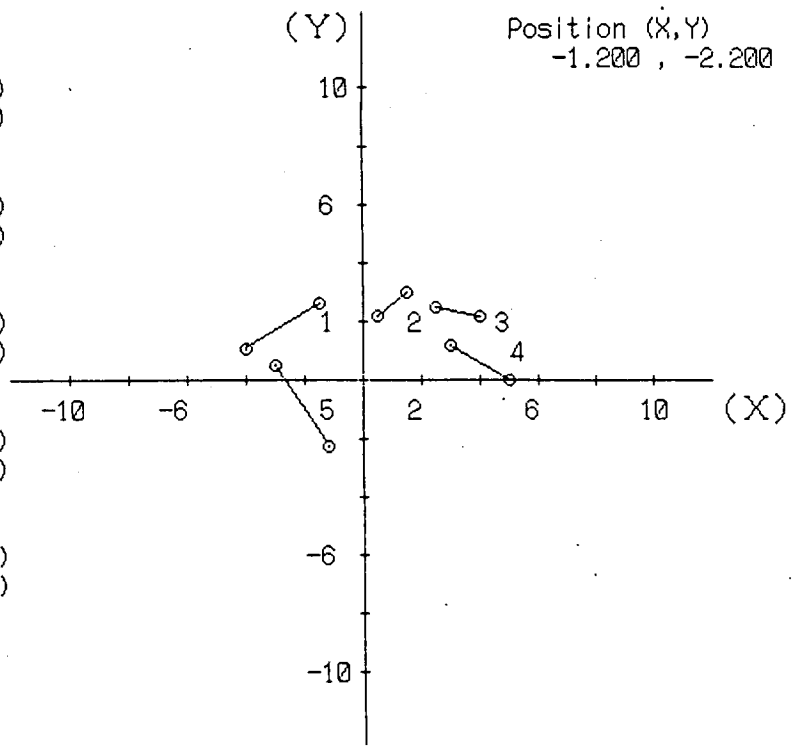
欠陥 1 上の座標
 1点目 (-4.000, 1.100)
 2点目 (-1.500, 2.600)

欠陥 2 上の座標
 1点目 (0.500, 2.200)
 2点目 (1.500, 3.000)

欠陥 3 上の座標
 1点目 (2.500, 2.500)
 2点目 (4.000, 2.200)

欠陥 4 上の座標
 1点目 (3.000, 1.200)
 2点目 (5.000, 0.000)

欠陥 5 上の座標
 1点目 (-3.000, 0.500)
 2点目 (-1.200, -2.200)



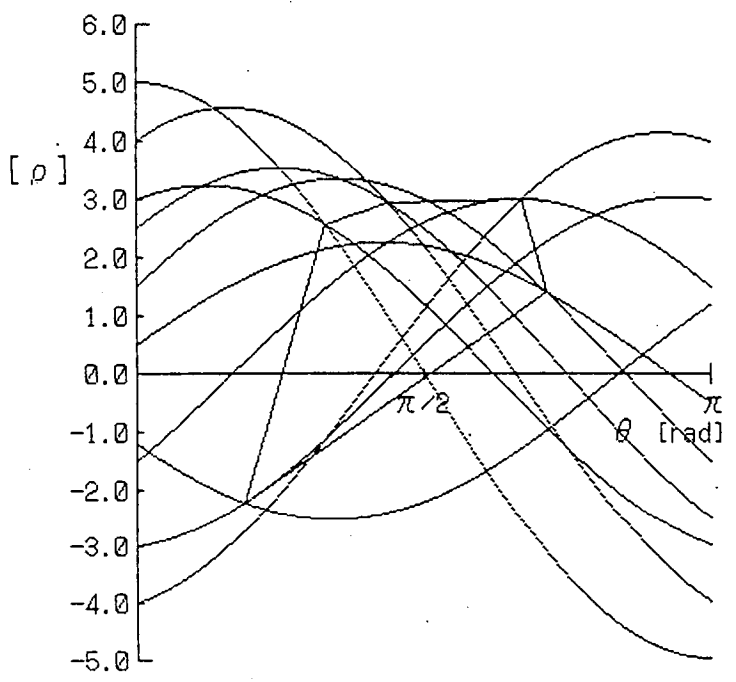
Position (X,Y)
 -1.200, -2.200

座標は正しいですか (Y/N)?

(a)

欠陥	θ	ρ	L
1	0.588	-2.219	2.915
2	2.246	1.406	1.281
3	2.111	3.001	1.530
4	1.373	2.942	2.332
5	1.030	2.572	3.245

k	p
0.11789	1.10346



(b)

図 6. 5 個の欠陥を想定した場合のシミュレーション結果

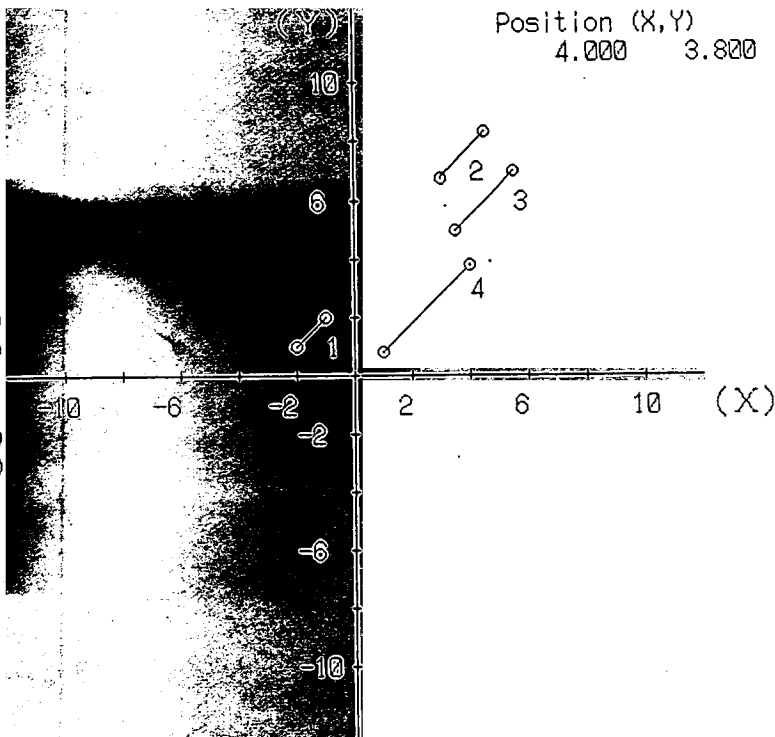
欠陥 1 上の座標
 1点目 (-2.000, 1.000)
 2点目 (-1.000, 2.000)

欠陥 2 上の座標
 1点目 (3.000, 6.800)
 2点目 (4.500, 8.300)

欠陥 3 上の座標
 1点目 (3.500, 5.000)
 2点目 (5.500, 7.000)

欠陥 4 上の座標
 1点目 (1.000, 0.800)
 2点目 (4.000, 3.800)

Position (X,Y)
 4.000 3.800



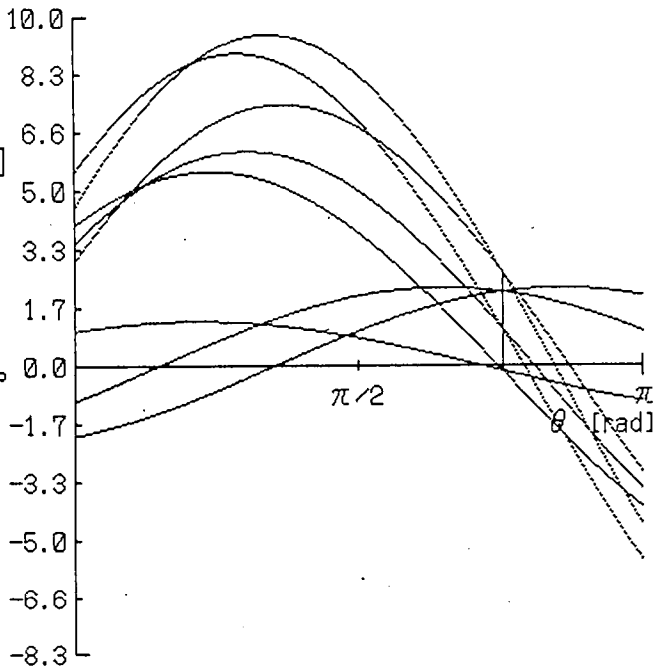
座標は正しいですか (Y/N)?

(a)

欠陥	θ	ρ	L
1	2.356	2.121	1.414
2	2.356	2.687	2.121
3	2.356	1.061	2.828
4	2.356	-0.141	4.243

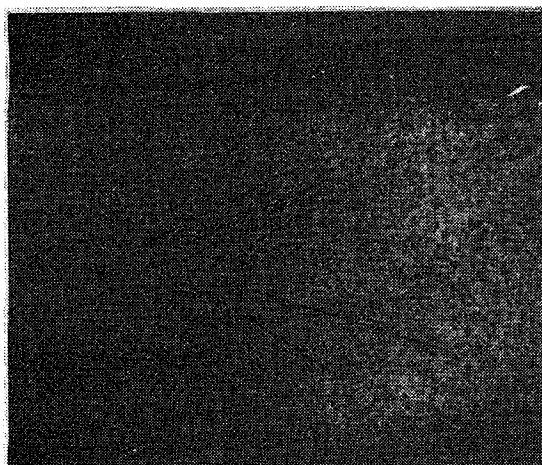
各交点は一直線上に並んでいるので、面積は存在せず、 k の値もありえない。
 各欠陥間の垂直距離を算出する。

欠陥 1, 2 間の距離	0.566
欠陥 2, 3 間の距離	1.626
欠陥 3, 4 間の距離	1.202
欠陥 4, 1 間の距離	2.263



(b)

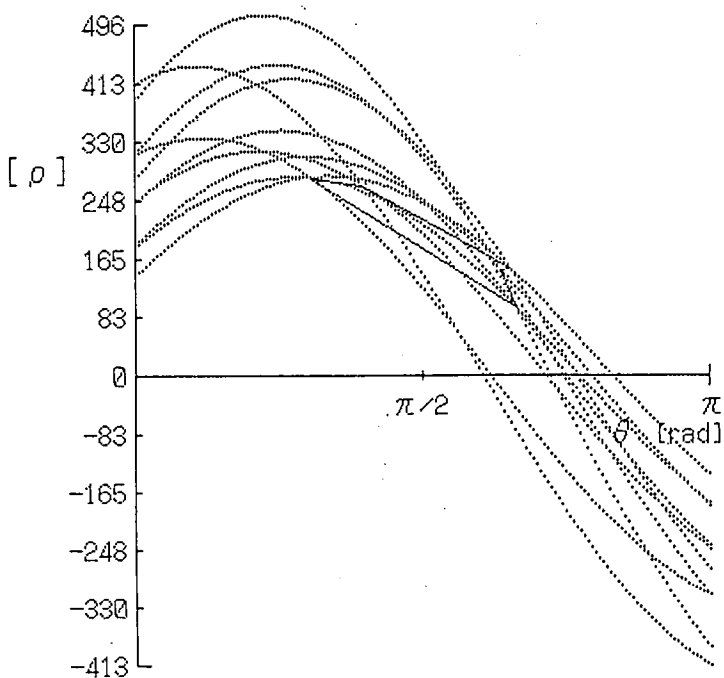
図 7. 平行欠陥が存在する場合の例



(a)

欠陥	θ	ρ	L
1	2.085	96.3	168.58
2	2.003	148.7	175.51
3	2.052	151.9	153.42
4	1.240	269.4	159.51
5	0.964	279.6	140.94

k	p
0.017	195.91



(b)

図 8 サルファプリントパターンへの適用例

への適用例を示した。

今後の課題としては、面積を有する欠陥についての検討や欠陥先端の形状を評価することを試みる予定である。

7. 参考文献

- [1] D.H.Ballard. "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes.", Pattern Recognition, Vol.13, No.2, pp.111-122, 1981.
- [2] P.E.Hart R.O.Duda, "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures", Communication of the ACM, Vol.15, No.1, pp.11-15, 1972.

X線による表面残留応力測定事例について

千葉県機械金属試験場

中村 哲朗

1. はじめに

機械や構造物の各部分には、外力が作用していない状態でも、最初から応力が残存しており、物体の内部でそれ自体でつり合いを保っている場合がある。このような応力を一般に残留応力と呼んでいる。

残留応力は冷間加工、焼入れ、溶接など、材料に急激な変化を与えたときにおこり、不均一な塑性変形を与えたときに発生しやすいものである。そして、残留応力のある部材を機械加工すると変形して、直線に仕上げたいものが曲がる。引張りの残留応力があると、疲れ強さが低下し、応力腐食割れを生じ、大型の圧延ロールなどでは、置き割れを生ずる。また、繰返し応力を受ける部材では、圧縮の残留応力は破面の成長を妨げ、引張りの残留応力は、き裂の拡大を容易にする。このように残留応力は、変形や強さに各種の影響を与えることが、経験的に知られている。

残留応力測定の方法を大別すると、非破壊的な測定法と破壊的な測定法によるものがある。非破壊測定とは材料を破壊せず、そのままの状態での測定する方法であり、現在実用されている方法はX線応力測定法として知られている方法だけである。材料が応力を受けていると、結晶内の原子の格子間隔が変化するので、その変化を特性X線を用い回折現象を利用して測定するものである。

破壊測定とは部材を細かく分割したり、層状に切削したりして、その部材が使用できないように破壊して残留応力を求める方法である。

ここでは、材料の局所の表面残留応力を非破壊的に迅速に測定できる唯一の方法であると考えられるX線応力測定法の概要と、いくつかの測定試験の事例を報告する。

2. X線応力測定法の原理

金属材料は方位の異なる結晶粒の集合した多結晶体で、各結晶粒は原子が規則正しく配列した原子面、いわゆる格子面で構成されている。X線は電磁波の一種で、 1 \AA (0.1 nm)

程度の波長を有する。X線は原子に当たるとあらゆる方向に散乱される。ところが金属などのように原子が規則的に並んでいる結晶にX線が入射すると、各原子によって散乱されたX線が相互に干渉し特定の方向にだけX線が強められて放射される。この現象を回折という。図1はX線の回折を示したものである。

いま、多結晶体に波長 λ の特性X線を照射すると、次式に示したブラッグ (Bragg) の回折条件式

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

を満足する回折面 (格子面) を有する結晶粒を選んで回折する。ここで、 d は回折面間隔で、 θ は結晶格子面と入射X線 (または回折X線) のなす角 (回折角) でブラッグ角と呼ばれる。 n は回折次数を表す正の整数で、通常1である。なお、図1に示したように回折X線は山の形をした曲線状のプロフィールをしている。

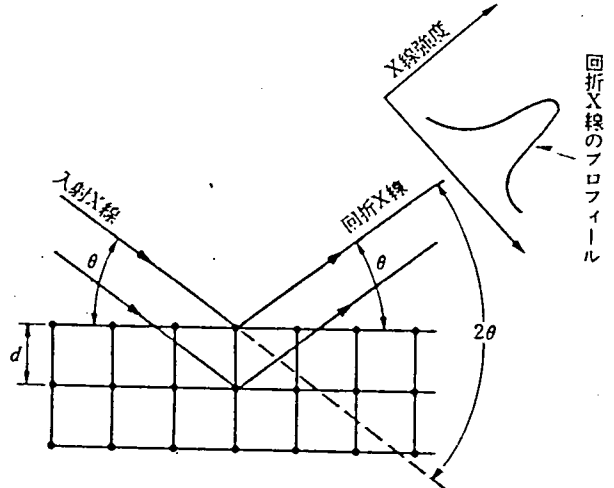


図1 X線の回折

次に、 $2 d \sin \theta = n \lambda$ を微分すると、

$$\Delta (2 \theta) = -2 \tan \theta \cdot \Delta d / d$$

の関係式が得られる。これは図2に示すように、材料に均一歪み加わり、結晶の格子面間隔 d が Δd だけ大きくなれば、上式に従ってプロフィールは全体に $-\Delta 2 \theta$ だけずれる。均一歪みは残留応力など弾性歪みに伴って生じるが、この“ずれ”を検出して応力を測定する。これに対し、塑性変形の際に生じる不均一歪みの場合は、格子面間隔の歪み Δd は正の場合も負の場合もあるため、プロフィールのずれも正負双方が生じ、プロフィールの広がり具合には対応がある。

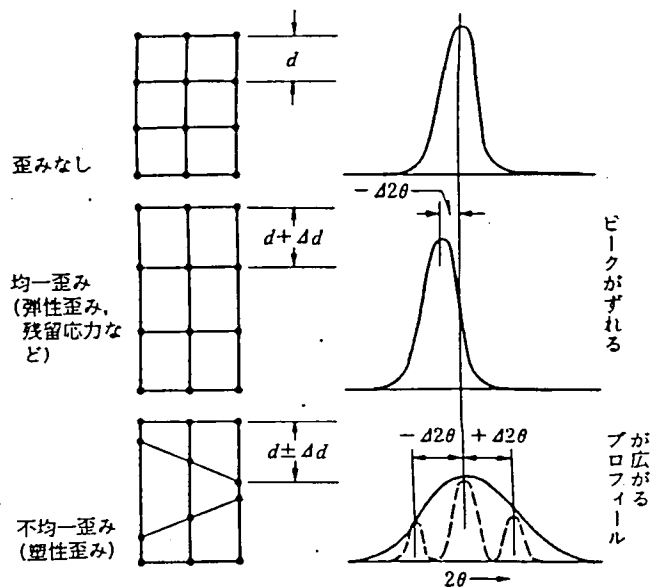


図2 均一歪みおよび不均一歪みによるX線回折プロフィールの変化

測定された回折角度の変化から、応力値 σ を求める計算式は、

$$\sigma = \frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \cdot \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi} = K \cdot M$$

ただし、

$$K = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi \cdot \cot \theta_0}{180} \quad (\text{kgf/m}^2 \cdot \text{deg})$$

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi} \quad (\text{deg})$$

である。ここで、 K は応力定数と呼ばれ、 M は図3に示すように $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図の直線の勾配である。即ち、回折角度の変化を見るとき基準となる絶対無応力状態における回折角 $2\theta_0$ は測定できないので、いくつかの入射角 ψ について、回折角 2θ を求め、それを $\sin^2 \psi$ に対してプロットし、その勾配 M を求めることにより、応力値を計算する。

3. 測定の方法

X線応力測定法については、現在、社団法人日本材料学会 材料強度部門委員会が共同研究の成果に基づき、X線応力測定法標準(以下、「測定法標準」)を制定している。この標準では、最も広く応用されているフェライト系およびオーステナイト系鉄鋼材料のX線応力測定の標準的方法が示されている。

残留応力の測定において、歪みは回折角の変化を測定することにより求められる。回折角の測定方法は回折X線の検出方法から、X線の強度を電気信号に換えて検出する計数管

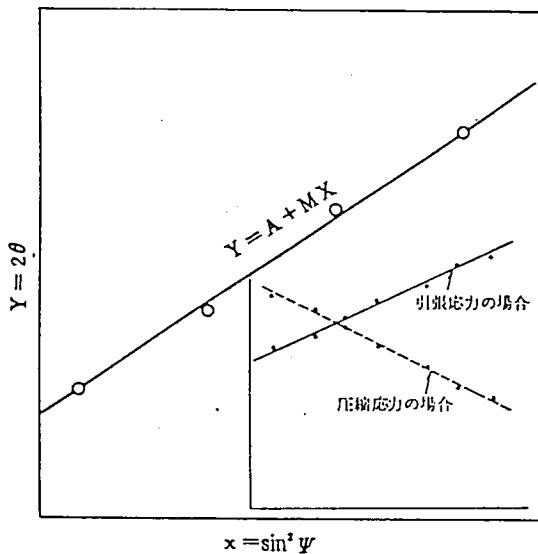


図3 $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図

法と、フィルムの感光作用を利用する写真法がある。

計数管法は写真法に比較して、測定時間が短い、測定精度がよい、測定が容易である、測定の自動化が図れるなど利点が多い。測定法標準では、計数管法が推奨されている。

図4は計数管法の原理を示したものである。なお、この報告での測定事例はすべて計数管法によるX線応力測定装置により測定試験したものである。図5は計数管法の装置と構成を示したものである。

X線応力測定ではX線入射角の変化に伴う回折角の相対的な移動量のみを測定すればよいので、回折強度曲線のある代表点の回折角を求めればよい。この代表点の決め方をピーク位置決定法といい、測定法標準では種々の方法が提案されているが、半価幅法が他の方法に比べてばらつきが少ないことから推奨されている。この方法は図6に示すよう

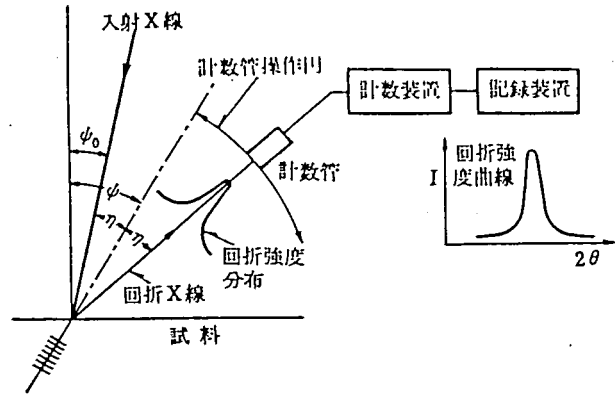


図4 計数管法の原理

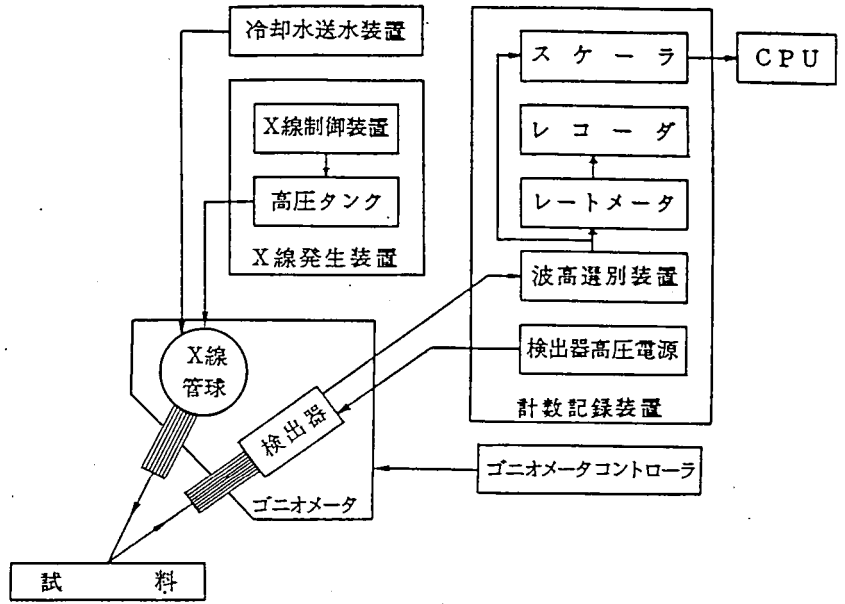


図5 計数管法の装置の構成

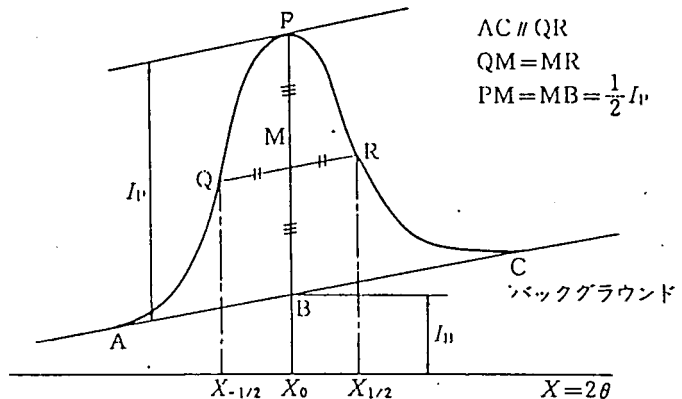


図6 半価幅法によるピーク位置の決定法

に、記録紙上に描かせた回折強度曲線よりバックグラウンドを差し引き、残りの回折強度曲線の半分の高さの位置で、その幅の中心を回折角 X 。とするものである。

応力値の算出には、図2より求めた M と応力定数 K の値が必要である。 K の値は弾性定数 E 、ポアソン比 ν 、材料の無歪み状態における、回折角 θ 。を知らば計算により求めることができる。そのため、測定法標準に定める以外の種々の材料についても、表1に示す特性 X 線と応力定数によって、応力値の測定が可能である。

4. 測定事例

4. 1 高周波焼入れした中炭素鋼丸棒の表面残留応力測定

高周波焼入れは、高周波誘導電流の表皮効果を利用して、部材の表層だけに2次電流を流して加熱し、表面を急熱急冷して硬化させる焼入法で、表面の硬さの増加と、圧縮

表1 試料に適した特性 X 線と応力定数

被測定材料	格子定数 a (Å)	弾性定数 E (kg/mm ²), ν	特性 X 線対陰極, 波長 ¹⁾ λ (Å)	被測定材料 (hkl) Bragg 角	応力定数 K (kg/mm ² / deg)
鉄 Fe	2.8664 ¹⁾	22,600 ^{*3)} 0.27	Cr K_{α} 2.28962	(211) 78.20°	-32.44
		18,300 ^{*3)} 0.32	Co K_{α} 1.78892	(310) 80.68°	-19.88
銅 Cu	3.6153 ¹⁾	12,770 ²⁾ 0.364	Co K_{α} 1.78892	(400) 81.74°	-11.86
アルミニウム Al	4.0490 ¹⁾	6,890 ²⁾ 0.33	Cu K_{α} 1.54051	(333) 81.30°	- 6.92
アルミニウム Al	4.0490 ¹⁾	6,890 ²⁾ 0.33	Co K_{α} 1.78892	(420) 81.09°	- 7.09
黄銅	3.6930 ²⁾	10,300 ²⁾ 0.35	Co K_{α} 1.78892	(400) 75.65°	-17.03
ジュラルミン (17S)	4.0439 ¹⁾	7,100 ²⁾ 0.34	Cu K_{α} 1.54051	(333) 81.78°	- 6.68
オーステナイト系 ステンレス鋼	3.6000 ⁵⁾	19,700 ²⁾ 0.30	Cr K_{β} 2.0848	(311) 74.26°	-37.26

- 註 1) W.A. Wood, "Structure of Metal" (1950).
 2) 日本鉄鋼協会編, 鉄鋼便覧 (1973).
 3) 材料, 20, 1251~1257 (1971) (X線の測定による弾性定数).
 4) カリテイ著, "X線回折要論" (1960).
 5) A.S.T.M. カード (1970).

残留応力により耐摩耗性、耐疲労性の向上に大きく寄与する。

図7は高周波焼入れ面の位置と残留応力の関係を示したものである。

なお、試験条件は

- 供試材：機械構造用炭素鋼 (S33C)
- 高周波焼入れ条件：
 - 加熱時間 - 3 sec
 - 出力 - 8.0 KV, 2.9 A
 - 定置、回転焼入 - 6 r.p.m
 - コイル内径 - $\phi 25.5$
 - クリアランス - 4.25 mm
- 測定試験装置：比例計数管
検出器付平行ビーム型X線
応力測定装置（理学電機製
CAT. NO. 2902）
- X線測定条件：

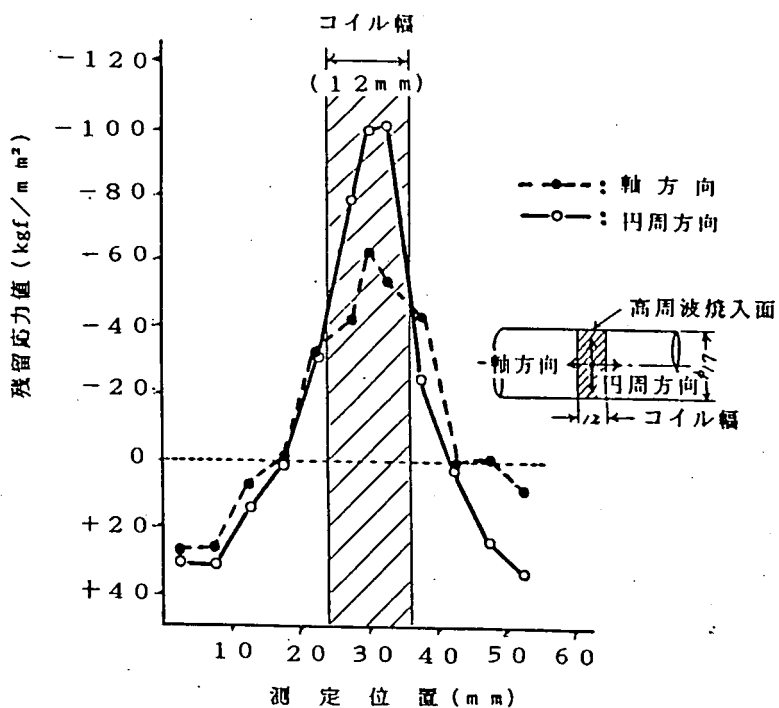


図7 高周波焼入れ面の残留応力

X線	Cr-K α	走査速度	2°/min
フィルター	V箔	チャート速度	2cm/min
管電圧, 管電流	30KV, 8mA	スリット発散角	0.7°
計数率範囲	1,000c/s	照射面積	2×4mm ²
時定数	5 sec	検出器	比例計数管
回折面	{211}	入射角	4点(ψ : 0°, 15°, 30°, 45°)

4.2 板ばねのショットピーニング面の残留応力測定

ショットピーニングは材料の表面に小さな鋼球を吹きつけて硬化させる表面硬化法で、表面に圧縮残留応力を与える処理である。図8は自動車用板ばねに条件（ショットのかたさ、大きさ、速度、ピーニング回数など）を変えたショットピーニング処理面の板厚方向（深さ方向）における残留応力の分布状態を示す。材料の表面を強く硬くすると、内部が軟らかくとも、繰返し荷重がかかるために起きる疲労に対して、非常に有効である。

なお、試験条件は

- 供試材：ばね鋼（SUP9）
- 熱処理：950°C油焼入⇒520°C焼戻（H_v400）。
- 測定試験装置及びX線測定条件は前に同じ

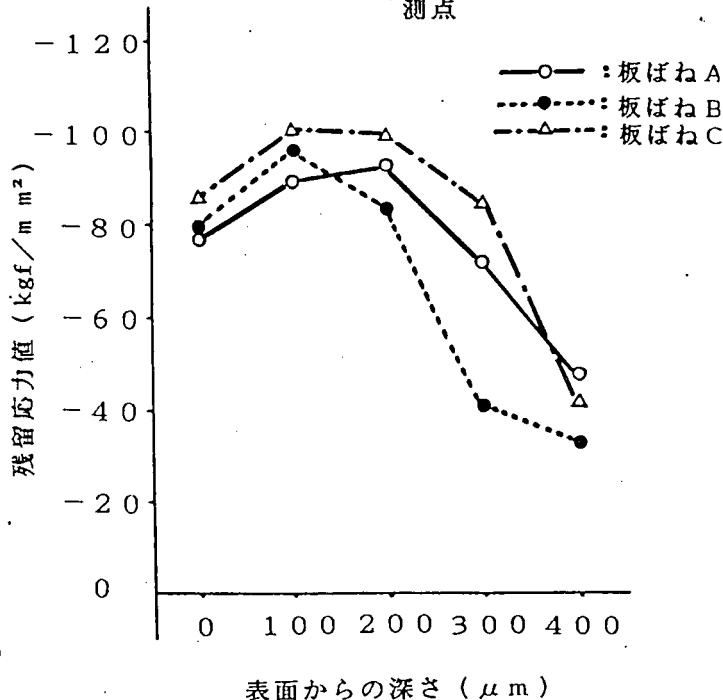
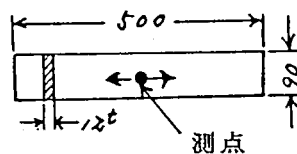


図8 ショットピーニングによる残留応力

4.3 切削加工面の残留応力測定

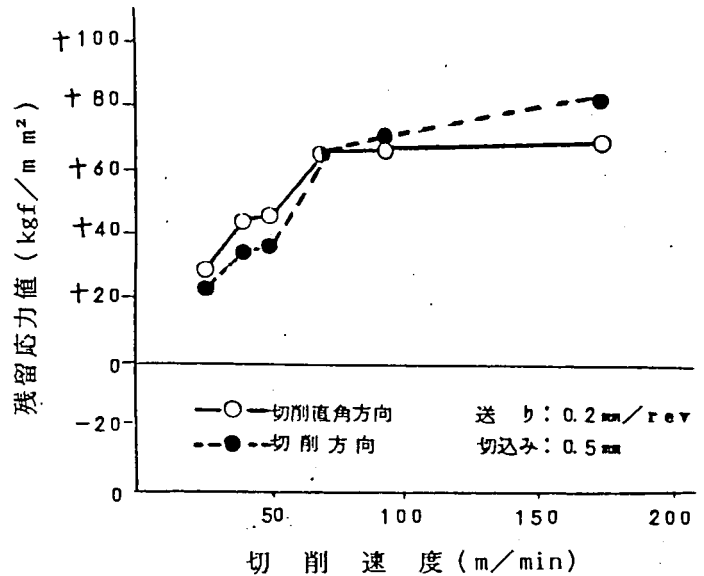
金属材料を切削すると、加工時の塑性変形や温度上昇などに原因されて、表面層に加工変質層ができることが多い。そのため加工面に残留応力が生じ、加工された部材が繰返し応力を受けた場合には、残留応力の種類によって疲労強度にさまざまな影響を及ぼす。したがって、切削加工後の残留応力の状態を知ることは、仕上げ精度および疲労強度などを向上させる点からも重要なことである。

ここでは、旋削加工における切削の諸条件、すなわち切削速度、送りおよび切込みな

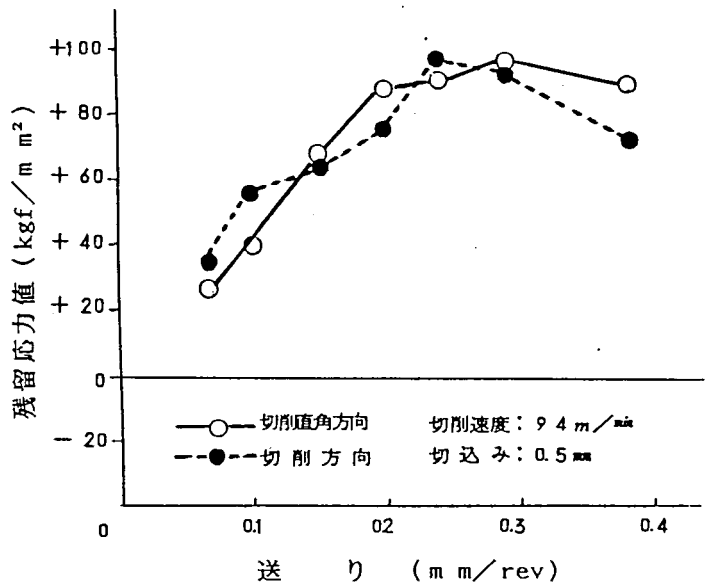
どを系統的に変えた加工面の残留応力状態を測定した。図9にその結果を示す。

なお、試験条件は

- 供試材：クロムモリブデン
鋼 (SCM440)
- $\phi 31\text{mm}$
- 切削試験：* 旋盤 - 実用高速旋盤 (大隈鉄工所製 LS型)
* バイト - スローア
ウェイチップ構造
形式 (超硬合金 P
20)
- 切削条件：* 切削速度 - 28 ~
175 (m/min)
* 送り - 0.07 ~
0.38 (mm/rev)
* 切込み - 0.2 ~
0.8 (mm)
- 測定試験条件及び X線測定条件
は前に同じ

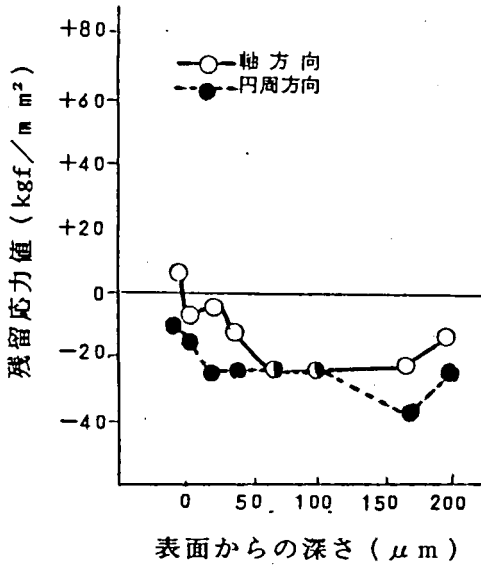


(1) 切削速度による表面残留応力の変化

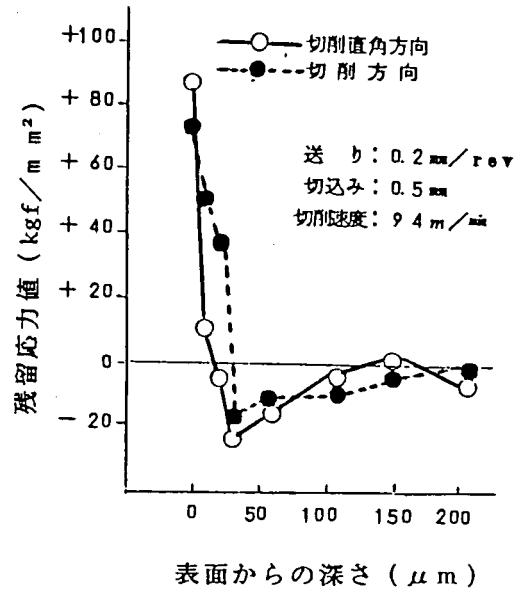


(2) 送りによる表面残留応力の変化

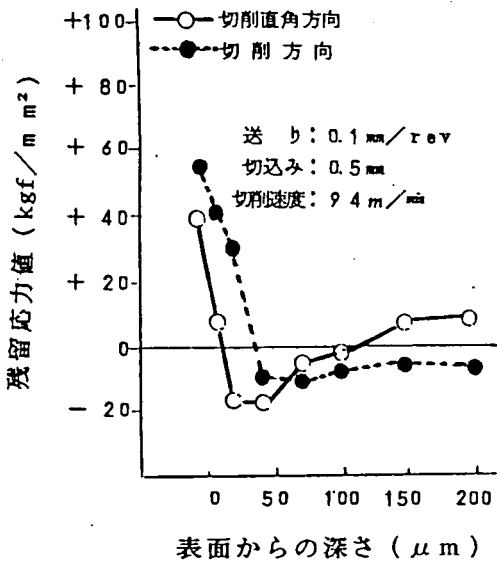
図9-1 切削加工による残留応力



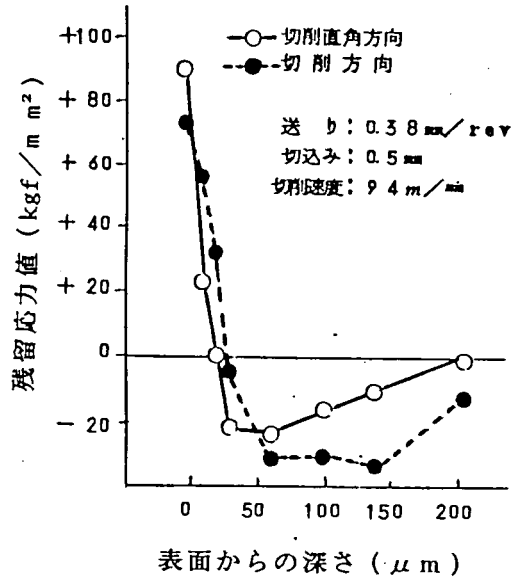
(3) 深さ方向残留応力分布 [黒皮部]



(5) 深さ方向残留応力分布 [2]

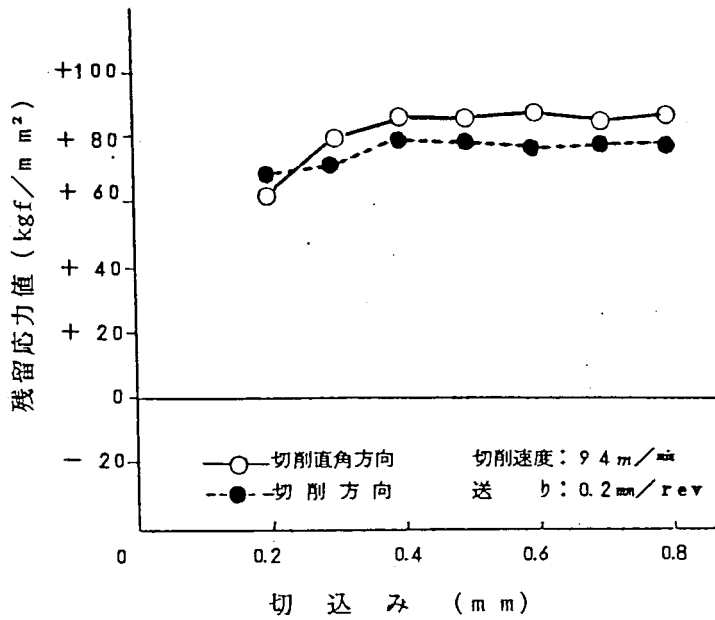


(4) 深さ方向残留応力分布 [1]



(6) 深さ方向残留応力分布 [3]

図9-2 切削加工による残留応力



(7) 切込みによる表面残留応力の変化

図9-3 切削加工による残留応力

《参考文献》

- (1) カリティ: X線回折要論, アグネ (1961)
- (2) 日本材料学会: X線応力測定法 [改著], 養賢堂 (1981)
- (3) 日本材料学会: X線材料強度学 (基礎編・実験法編), 養賢堂 (1973)
- (4) 日本材料学会: X線応力測定法標準, 日本材料学会 (1973)
- (5) 日本熱処理技術協会: 残留応力, 共立出版 (1963)

