



技術解説

音弾性による残留応力測定

福岡 秀 和*

1. ま え が き

機械部品あるいは構造物に存在する残留応力は、ときには有害であり、また、ときによっては材料を強化するのに役立つ。いずれにしても非破壊測定で残留応力の値を知ることは実用上重要なことである。残留応力とは、負荷を取り除いた後に、なお材料内部に存在している応力であって、これは、一様でない塑性変形や体積変化を受けたために、物体の一部の要素の寸法が自然の場合と異なってしまったために、連続な一つの物体を形作る必要上各部分が互に変形を拘束し合うことにより内部に生じた応力である。この残留応力を測定する確実な方法は物体をばらばらに切断して互に他の部分から受けている拘束を取り除いて自由に変形させることにより残留応力を解放し、ばらばらになった各部分の切断前後の寸法を測ってその差から物体内に存在していた残留応力を求めることである。しかし、これは破壊的な測定法であり製品には使用できない。非破壊の測定法が望まれるところである。その代表的なものはX線回折法があるがこれはごく表面層の応力を測定する方法である。表題の音弾性法は厚さにわたって平均した応力を与えるものであって、その意味ではX線回折法と相補的な方法と云えよう。

音弾性という名称は、すでに標準的な応力測定法として確立されている光弾性にならってつけられたものであり、事実、複屈折の現象を利用して応力を測定するという原理においては両者は同じである。すなわち、平面応力状態にある板を考えたとき、第一の主応力方向に振動しながら板厚方向に伝わるせん断弾性波の速度 V_{T1} と第二の主応力方向に振動しながら板厚

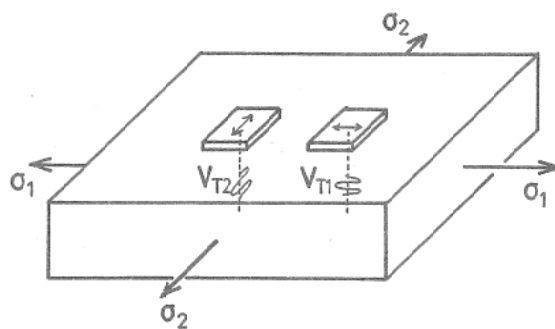


図1 複屈折音弾性応力測定原理

方向に伝わるせん断弾性波の速度 V_{T2} の差 $V_{T1} - V_{T2}$ が主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ に比例することを利用するものである(図1)。光弾性においては、エポキシ樹脂など透明な材料を用い、偏光を利用するのであるが、この偏光は主応力方向に振動する2つの波に分れ、異なる伝播速度を持って材料内を伝わる。この速度の差が主応力差に比例するのであるが、光弾性の場合にはこの2つの光を合成することにより干渉縞を得て、板全面にわたっての応力の有様を一目瞭然と見ることができる。音弾性においては、弾性波の波長が光の波長より数千倍も長いので、干渉縞一本を得るのに必要な応力が極めて大きくなって実用的でないため、各測定点における二つのせん断波の速度差そのものを測定せざるを得ない。

実際には、弾性波の伝播時間を極めて高い精度で測定するのである。その方法としては、位相干渉法、シング・アラウンド法やパルス・エコー重畳法などがある。

音弾性においては、光弾性で用いる透明なモデル試験片を必要とせず、金属のような不透明な材料に対しても実物そのものの応力解析ができる。特に、残留応力の非破壊測定が可能であ

*福岡秀和 (Hidekazu FUKUOKA), 大阪大学, 基礎工学部, 機械工学科, 教授, 工学博士, 材料力学

り、この点が応力測定技術として最も期待されるところである。さらに、弾性体にはせん断波の外に縦波や表面波が存在するため、音弾性には、複屈折現象以外に種々の応力効果の利用が可能である。

ところで、金属材料の製造工程における塑性加工や熱処理により生じた集合組織もまた、せん断弾性波に対して複屈折の現象を生じる。これは組織音響複屈折と呼ばれ、先に述べた応力に依存する応力音響複屈折と分離されなければならない。

負荷荷重による応力の測定に当っては、まず無応力状態における測定より組織音響複屈折を求めておいて、後に荷重負荷時に測定値からそれを差し引くことにより応力音響複屈折を分離して得ることができる。しかし、残留応力の非破壊測定においては、一般には無応力状態における測定を行うことなしに組織音響複屈折を応力音響複屈折より分離しなければならず、これが最も困難な点である。

2. 残留応力測定例

最も基本的な負荷応力の測定例として、0.45% C 鋼引張試験片の単軸引張試験における応力と音響複屈折量の関係を図2に示す。図において無応力状態における音響複屈折量が組織音響複屈折である。この場合、直線関係が得られているからこの材料に対しては音弾性応力測定が利用できることを示している。この場合の音弾性係数すなわち単位応力当りの音響複屈折量は $-7.6 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ であることがわかる。

伝播時間の測定にはシング・アラウンド法を用いた。その音速測定のプロック図を図3に示す。超音波発生器より発生した電気パルスは送信振動子を励振し、試料内に弾性波が入射される。試料内を伝播し、反射をくり返した後、この弾性波は受信振動子によって再び電気パルスに変換されてシング・アラウンド・ユニットには入る。この際、ゲート・ユニットを経由させることにより、特定のエコーを選択することができる。シング・アラウンド・ユニットに入力された信号は、自動利得コントローラにより一定振幅まで増幅され、あらかじめ設定したレベ

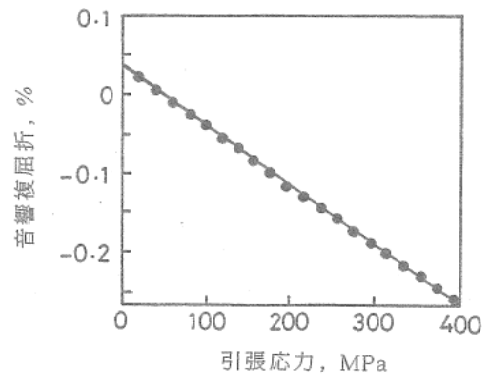


図2 単軸引張りにおける応力—音響複屈折関係

ルでトリガ信号が出される。このトリガ信号は、一定の遅延時間をおいて次の電気パルスを発信する。このようにしてシング・アラウンド・サイクルが形成される。計測は、たとえば、シング・アラウンド・サイクルを 10^4 回として、このサイクルの間に経過した時間を基準周波数10 MHzのカウンタを用いて測定することにより行われる。

1) 圧延H形鋼¹⁾

熱間圧延により製造されたH形鋼の残留応力は長手方向の応力が支配的である。残留応力を測定した試料の主要寸法を図4に示す。斜線をつけたA～Eの各領域の中心線上で音弾性測定を行った。音響複屈折における組織効果と応力効果の分離については、次のような仮定にもとづいて行った。両自由端である図のA、E部では長手方向の残留応力は解放されているものとみなすことができる。そこで、組織音響複屈折の量が同一圧延線上で一定であると仮定すると、両端A、E部の音響複屈折の幅方向の分布を測定して、それをH形鋼全体にわたっての組織音響複屈折の幅方向の分布とみなすことができる。そこで、中間のB、CおよびD部における音響複屈折の値から、このようにして得られた組織音響複屈折の値を差し引くことにより、応力音響複屈折の値を求めることができる。このようにして求めたフランジC部、およびウェブC部における残留応力の幅方向の分布を、それぞれ図5および図6の白丸印で示す。比較のために、図4のA～E部の長さ100mmの斜線部を切り出して長手方向の残留応力を解放し、切断

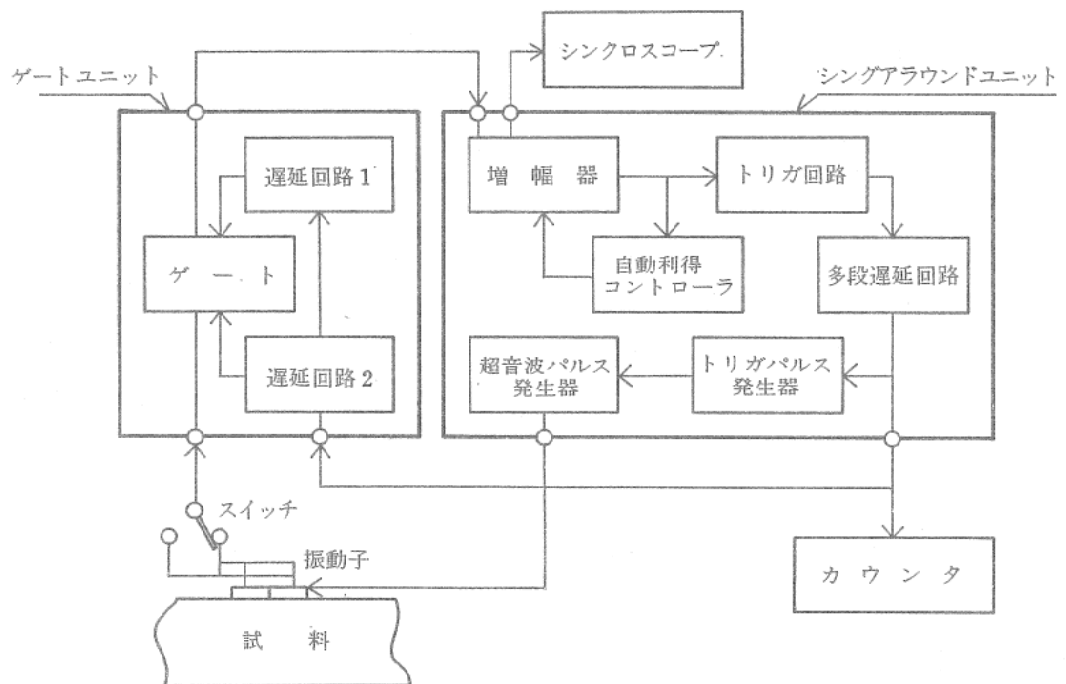


図3 シング・アラウンド法のブロック図

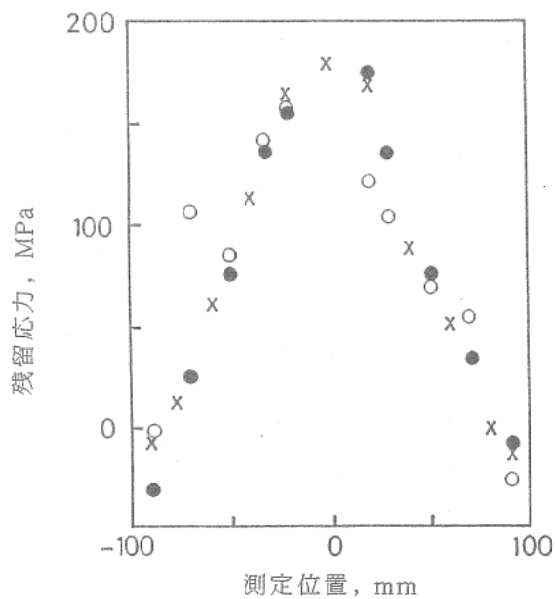


図5 フランジC部の残留応力分布

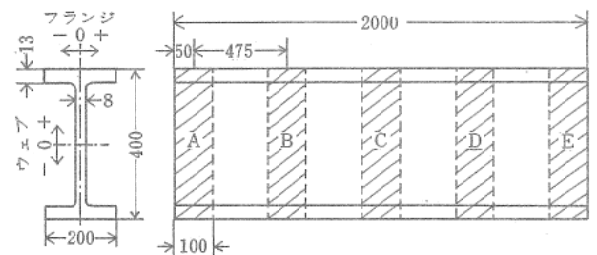


図4 圧延H形鋼の主要寸法

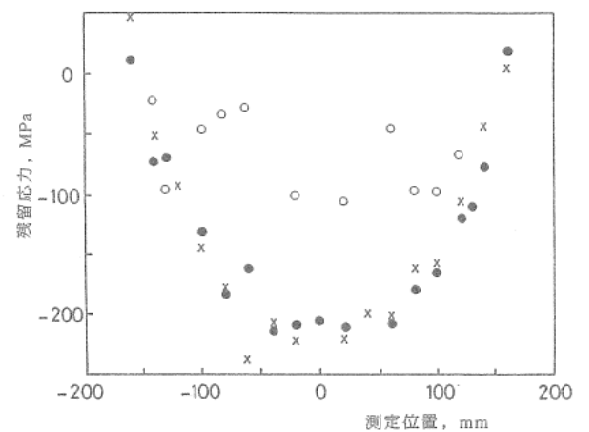


図6 ウェブC部の残留応力分布

前後の標点間長さを測定することにより残留応力を求めた。この慣用の破壊法による値を図5および図6にクロス印に示す。これらの図より、フランジ部では音弾性による非破壊的な測定は、慣用の破壊法によるものとかなりよく合っ

ているが、ウェブ部では両者の違いが大きいことがわかる。その原因としてまず確めなければならないのは、分離の問題で用いた仮定の可否である。そのために、切断して残留応力を解放したブロックA～Eの音弾性測定を行って組織音響複屈折の真の値を求めた。その結果は、フランジ部に対して図7、ウェブ部に対して図8のように得られた。フランジ部では組織音響複屈折の分布は同一圧延線上ではほぼ一定であり、またその値自身も小さい。しかし、ウェブ部では同一圧延線に沿って組織音響複屈折は著しく変動し、また値そのものも応力音響複屈折よりもはるかに大きい。このように、ウェブ部では分離の仮定は実際とかなりかけ離れていたことがわかった。そこで図7および図8で得た真の組織音響複屈折の値を、残留応力が存在する

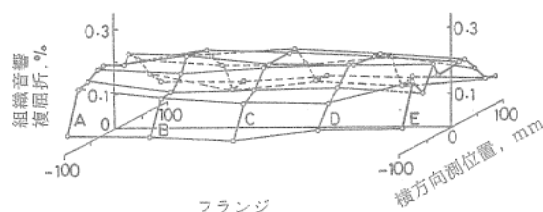


図7 フランジの組織音響複屈折の分布

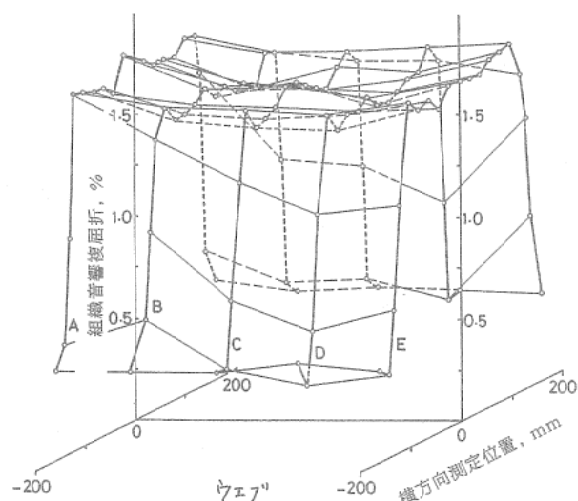


図8 ウェブの組織音響複屈折の分布

状態で測定した音響複屈折の値より差し引くことにより求めた残留応力の値を図5および図6に黒丸印で示す。これらの図からわかるように、組織音響複屈折の値を正しく評価しさえすれば、ウェブ部に対しても音弾性測定は慣用の破壊法による結果とよく一致する値を与えることがわかった。

2) 鉄道車輛用一体圧延車輪のリム部²⁾

鉄道車輛の運転に際して、長い下り坂で長時間抑速ブレーキが作用して車輪踏面が高温に加熱されると、車輪リム部に圧縮の熱応力を生じる。この際、リム部の材料は高温のもとで降伏応力が低下しているため塑性変形をとまなっている。このような経過を経た後、ブレーキを離してリム部の温度が常温に下がると、円周方向の引張り残留応力が発生する。このような状態のもとでは、踏面に生じた小さなき裂の進展が促進され、まれには車輪の割損事故に至ることさえある。したがって、リム部に発生した残留応力を非破壊的に評価することは安全上重要な問題である。現在のところ、高温による塗料の変色をリム部への過大な入熱の目安として、変色層の幅が4インチになれば車輪を破棄するという、いわゆる、4インチルールに従って処理されているが、これでは、はなはだ不経済であって、定量的な測定が望まれている。ここでは、ブレーキ試験機により過大な抑速ブレーキをかけた車輪リム部に発生した残留応力を音弾性法により測定した。図9に供試車輪の主要寸法とブレーキ試験中の温度変化を測定するための熱電対の位置を示す。音弾性測定は図10に示すよ

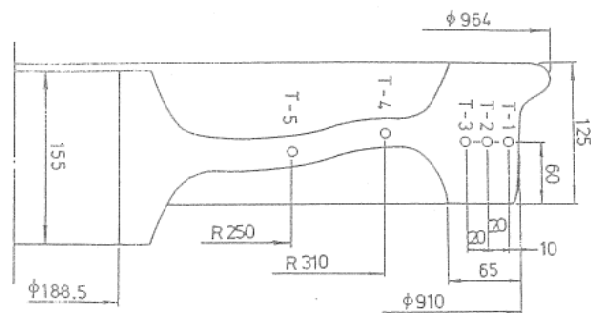


図9 圧延一体車輪の主要寸法

うに一つの車輪についてⅠ～Ⅳの4つの領域に対して行った。各領域における測定点としては、リム部内周より15, 40, 50および60mmの半径位置を選び、それぞれ、A, B, CおよびDの記号で示す。同一半径位置に対しては図のa, bおよびcの3ヶ所の測定点の値の平均値をデータとした。音弾性測定は、ブレーキ試験を行う前の新製時、ブレーキ試験後の残留応力が発生した状態、および図10の領域ⅠからⅣまでを円周方向の長さおよそ150mmのブロックとして切り出して残留応力を解放した後の3回にわたって行った。供試車輪はNo.1からNo.7までで、そのうちNo.1, No.2, No.3, およびNo.7にブレーキ試験を行ったが、その際の入熱量はそれぞれ、65.3kW, 32.7kW, 54.4kWおよび43.6kWであった。音響複屈折量は $(Tr - T_0) / T_0$ で与えられる。ここで Tr と T_0 は、それぞれ、車輪の半径方向および円周方向に振動しながら軸方向に伝播するせん断波の伝播時間であり、 T_0 はそれら

の平均値である。

新製時、ブレーキ試験後、およびリム・ブロック切断後の音響複屈折のデータを図11～13に示す。応力解放後の値(図13)が新製時(図11)と異なるのは、新製車輪に初期残留応力が存在していたことを意味する。これは、両測定値、すなわち、図11と図13の差より求められるが、図14にその値を示す。これより新製時には円周方向に圧縮の残留応力が存在していたことがわかるが、これはリム部を強化するために、あらかじめ熱処理により意図的に与えたものである。ブレーキ試験後の残留応力は図12と図13のデータの差として得られるが、その結果を図15に示す。なお、図11と図12の右側の縦座標の応力の値は組織音響複屈折を考慮せずにデータを直接応力に換算したものである。図13の右側の縦座標は組織音響複屈折の値をパーセントで表したものである。

ブレーキ試験後の残留応力について、領域Ⅰ～Ⅳ(図10)の値の平均値を図16に示す。比較のために抜取法による値および弾塑性有限要素法による値を図16に加えた。抜取法は、現在のところ最も信頼できる破壊的な残留応力測定法

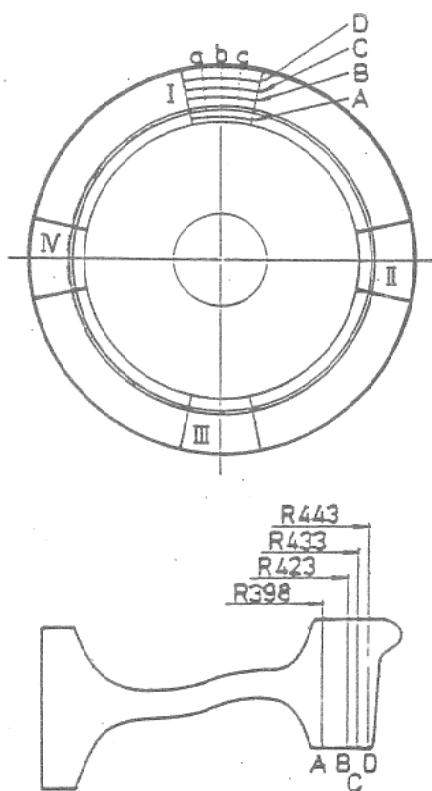


図10 リムの音弾性測定点

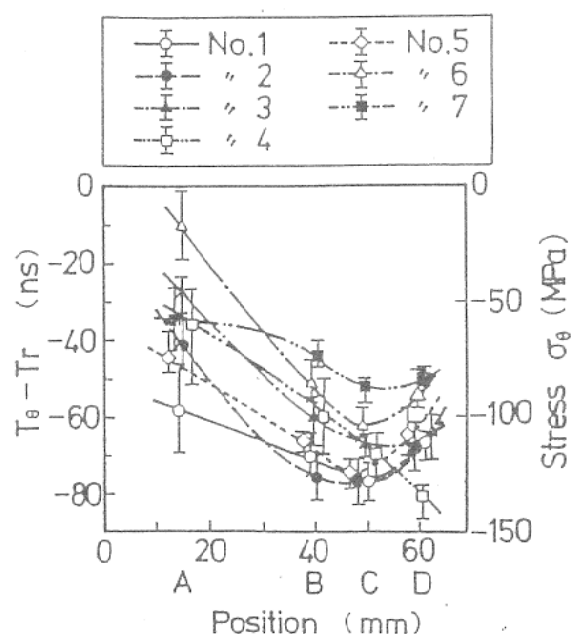


図11 新製車輪の音響複屈折

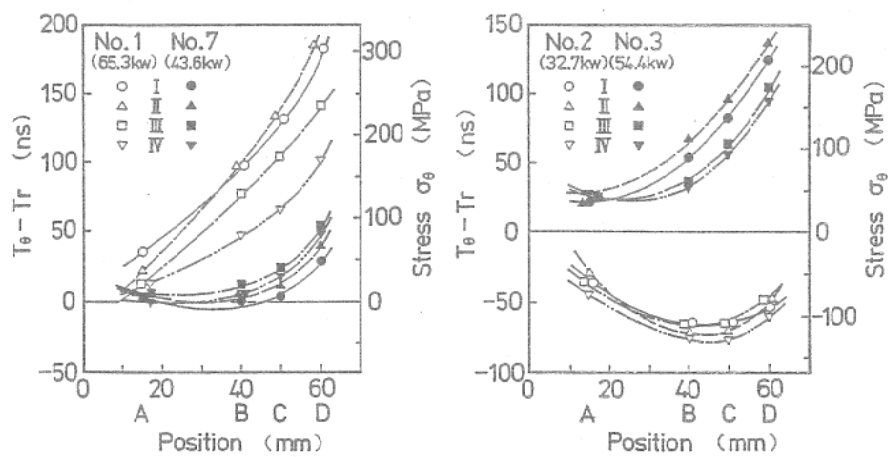


図12 ブレーキ試験後の音響複屈折

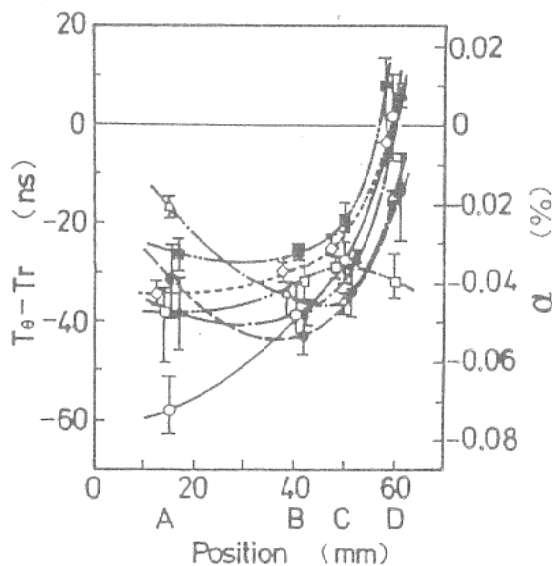


図13 リム・ブロックの音響複屈折

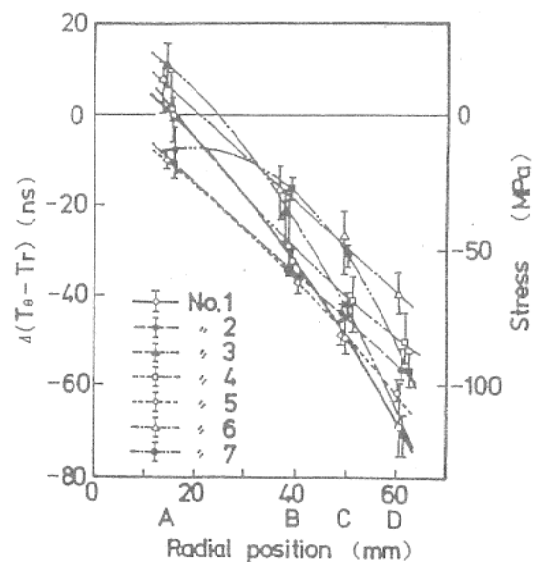


図14 新製車輪の初期残留応力

とみなされており、この図より、音弾性応力測定は実用的に満足し得る結果を与えるといつてよいであろう。

3. おわりに

応力効果と組織効果の分離は、音弾性による非破壊的残留応力測定の成否の鍵となる問題であつて、いくつかの方法が提案されているが^{3)~5)}、未だ定石的な方法は見出されていない。これに関連して、集合組織異方性の超音波による

評価の問題も研究されている⁶⁾。技術的には、せん断モードの振動子を用いる場合、振動子と試料面の間の確実な音響結合を保つことが最も苦心を要する点である。電磁音響振動子(EMAT)による非接触測定はこの難点を避けることができはなは魅力的であるが、効率が極めて低いという欠点がある。しかし、非接触測定は音弾性応力測定の適用範囲を拡大することは間違いのないであろう。

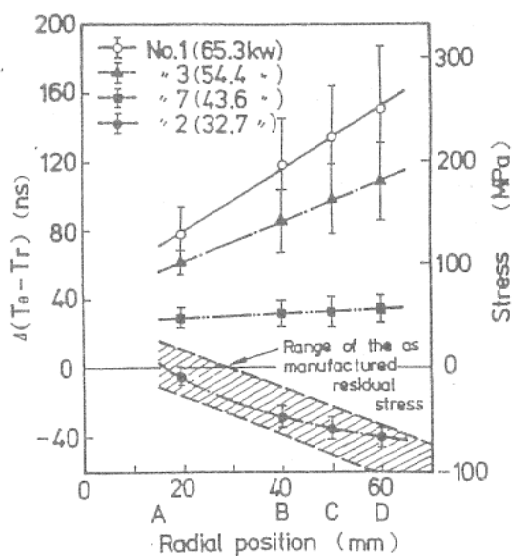


図15 ブレーキ試験の残留応力

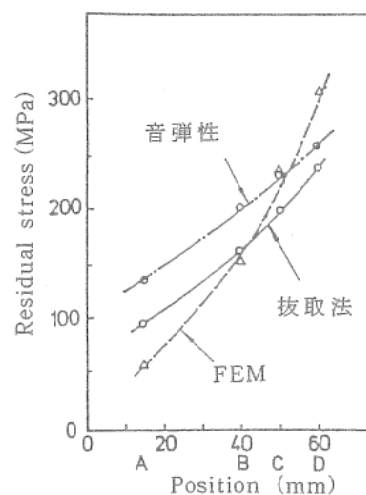


図16 車輪リム部の残留応力

文 献

- 1) 福岡・戸田・中; 材料, 30巻330号 (昭56), 261.
- 2) 福岡ほか4名; 日本機械学会論文集 (A編), 50巻453号 (昭59) 945.

- 3) R. King and C. Fortunko; J. Appl. Phys., 54 (1983), 3027.
- 4) D. R. Allen and C. M. Sayers; Ultrasonics, (1984), 179.
- 5) R. B. Thompson, J. F. Smith and S. S. Lee; Rev. Progress in QNDE, Vol. 2B (1983), 1339.
- 6) M. Hirao, N. Hara and H. Fukuoka; Ultrasonics, in press.