

鋼材焼入れ深度の非破壊測定とその検量線の設定方法

Nondestructive Measurement of Case Depth in Steel
Products and Its Conversion Lines

加賀谷 隆 一* 小野 邦 男**
Ryūichi Kagaya Kunio Ono

要 旨

鋼材の磁気特性のうち保磁力が硬度と密接な相関関係にあることを利用して焼入れ深度を非破壊測定する日立 UMQ-20 形鋼材焼入れ深度測定装置が開発され、国内外に普及され始めている。

本装置の測定精度を決定する重要な要素としては、検出器アタッチメントの選定および検量線の設定方法があげられる。

本文は測定装置の簡単な説明とともに、これらの問題点に対する検討結果をまとめたものである。

1. 緒 言

熱処理が施された各種鋼製品の品質管理には従来サンプリングによる分析、あるいは種々の破壊試験がなされているが、これらの作業には多大の労力と設備が必要である。

今回開発された日立 UMQ-20 形鋼材焼入れ深度測定装置は、鋼材の磁気特性のうち保磁力が硬度および組織と非常に密接な相関関係にあることに着目し、この保磁力を電氣的に検出することにより、焼入れ深度を非破壊測定するものである。

本装置は、国内外の自動車メーカー、鉄鋼メーカーなどへ多数納入され生産検査ラインに使用されているが、これら各ユーザーの被測定物は熱処理方法、形状、寸法など複雑多岐にわたっている。これらに対し最も適合した検出器およびアタッチメントを供給するため、標準検出器および標準アタッチメントをどのようにまとめるべきか、またこの種の非破壊測定器には付きものの検量線の設定基準の確立が必要である。以下これらの問題点に対する検討結果を述べる。

なお、本測定装置の外観は図 1 に示すとおり、一般仕様は下記のとおりである。

操 作 電 源	AC 100/110V 50/60 Hz
最大測定能力	20 mm
装置の寸法	300×600×440 mm (30 kg)

2. 測 定 原 理

熱処理された鋼製品の保磁力を測定することにより焼入れ深度や硬度を測る原理については、詳細な理論的解析がなされている⁽¹⁾が以下にその概略を述べる。

鋼材はステンレス鋼など特殊なものを除いては強磁性体であり、一般に図 2 のような磁気特性をもっている。そこで図 3 のように焼入れされた被測定物の上に検出器(電磁石)を置き、まずコイルへ励磁電流 I_m を流し励磁することにより保磁力の大きい焼入れ硬化層部と保磁力の小さい非硬化層部とを含む磁路全体を磁化すれば、 I_m をゼロへ戻しても残留磁束によりこの閉磁路は一つの永久磁石となる。次にこの閉磁路の磁束を磁束計により監視しながら逆励磁電流 I_c を流して磁束計の指示値がゼロになるように操作する。このときの電流 I_c の値を電流計で読み取り、コイルの巻数 N との積、 $F_c = I_c \cdot N$ (A・T) が求める保磁力となる。なお実際には磁束検出素子のドリフトや、被測定物内にあらかじめあるかも知れない残留磁束の影響

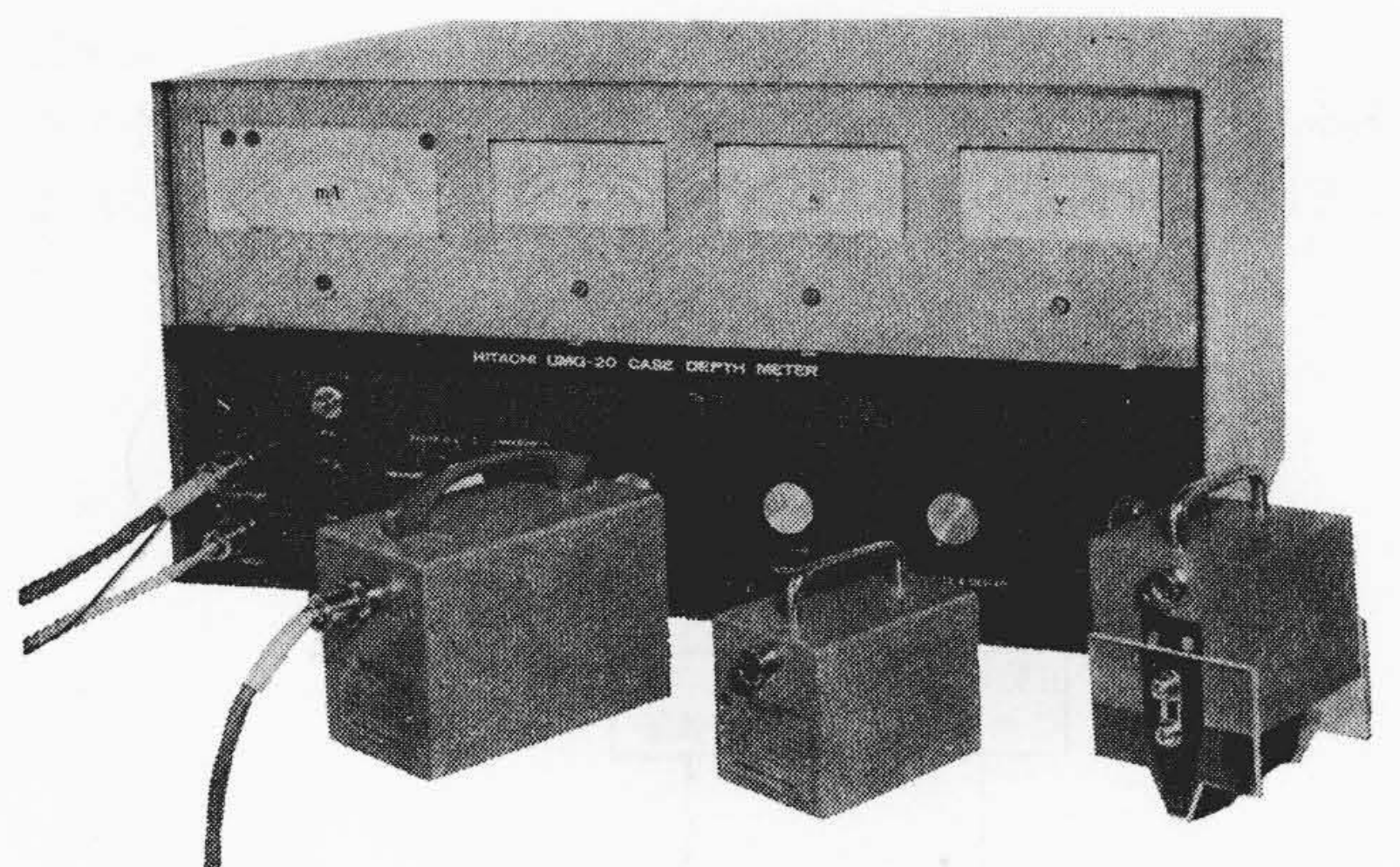


図 1 日立 UMQ-20 形鋼材焼入れ深度測定装置

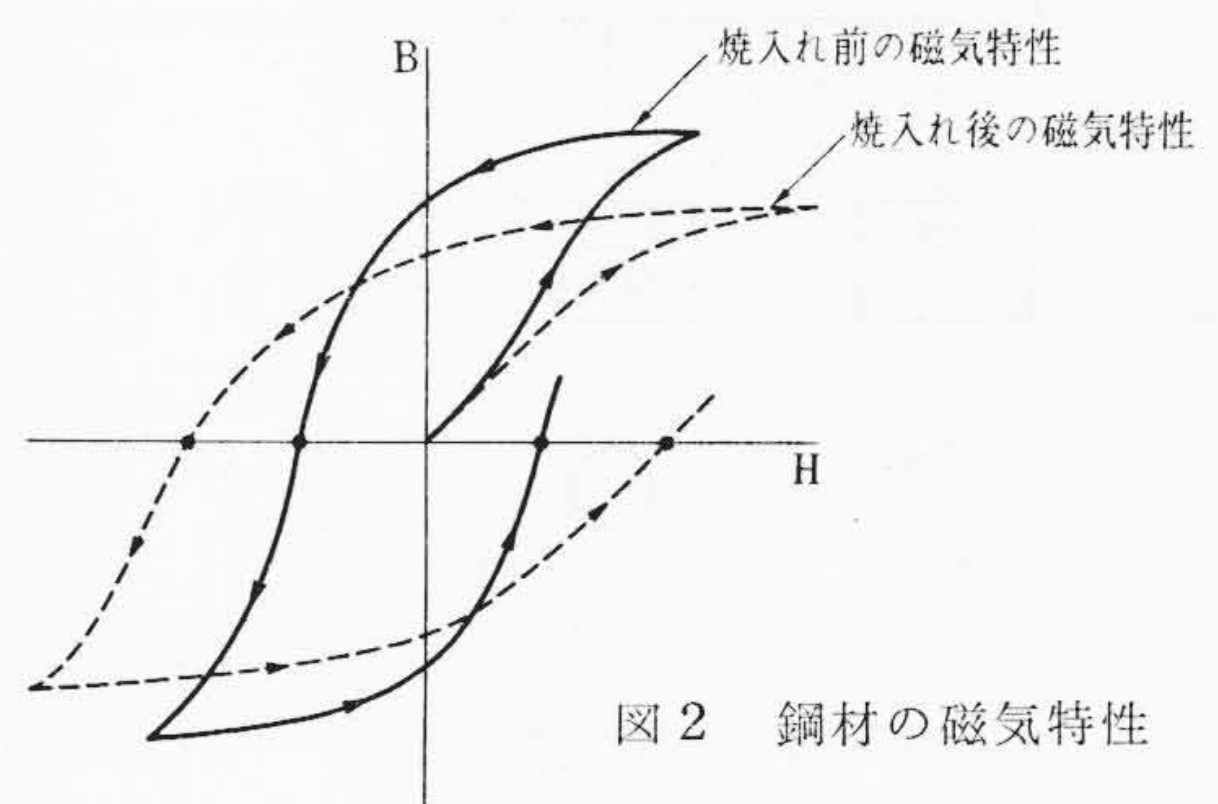


図 2 鋼材の磁気特性

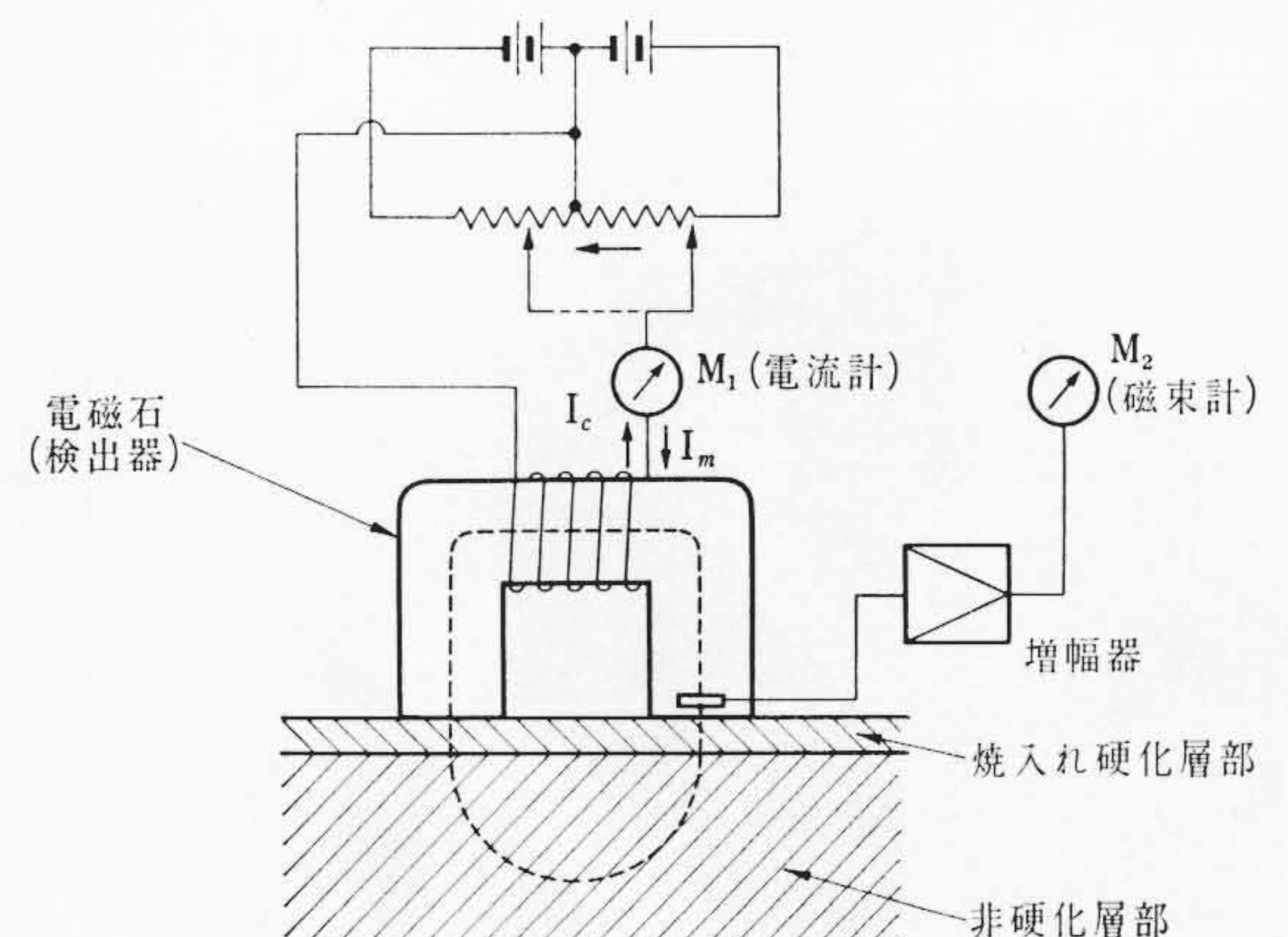


図 3 測 定 原 理

を防ぐため以上の操作を正逆両方向に行ない、両者の F_c 測定値の平均をとる。

* 日立製作所那珂工場

** 日立製作所日立研究所

3. 装置の構成

図4に示すように装置の構成としては、強力に被測定物を励磁する励磁機構と励磁電流計 M_3 、磁束がゼロになったことを確認する直流増幅器と磁束計 M_2 、測定電流を供給する電源盤、またこの測定電流をなめらかに流す測定電流制御機構および測定電流を正確に読み取るための自動レンジ切換装置と電流計 M_1 とからなる。これらは測定順序に従ってロータリスイッチを回せば、リレー盤に設置された小形リレーが制御され選択された状態が作りだされる。

4. 標準検出器

検出器としては、低保磁力で飽和磁束密度の大きい安定した磁性材料を経済的最小寸法で使用し、測定能力を最大限に発揮できるものでなければならない。まず一般の被測定物を焼入れ深度の程度によって分類してみると、10~20 mm、5 mm 前後および2 mm 以下の3段階に区別される。すなわちシャワー焼入れされる大形圧延ロール、ブルドーザ部品など大形のものは10 mm 以上の高深度であるが、高周波焼入れの自動車用シャフトや火炎焼入れの中形歯車などは5 mm 前後の焼入れ深度である。さらに浸炭焼入れされる一

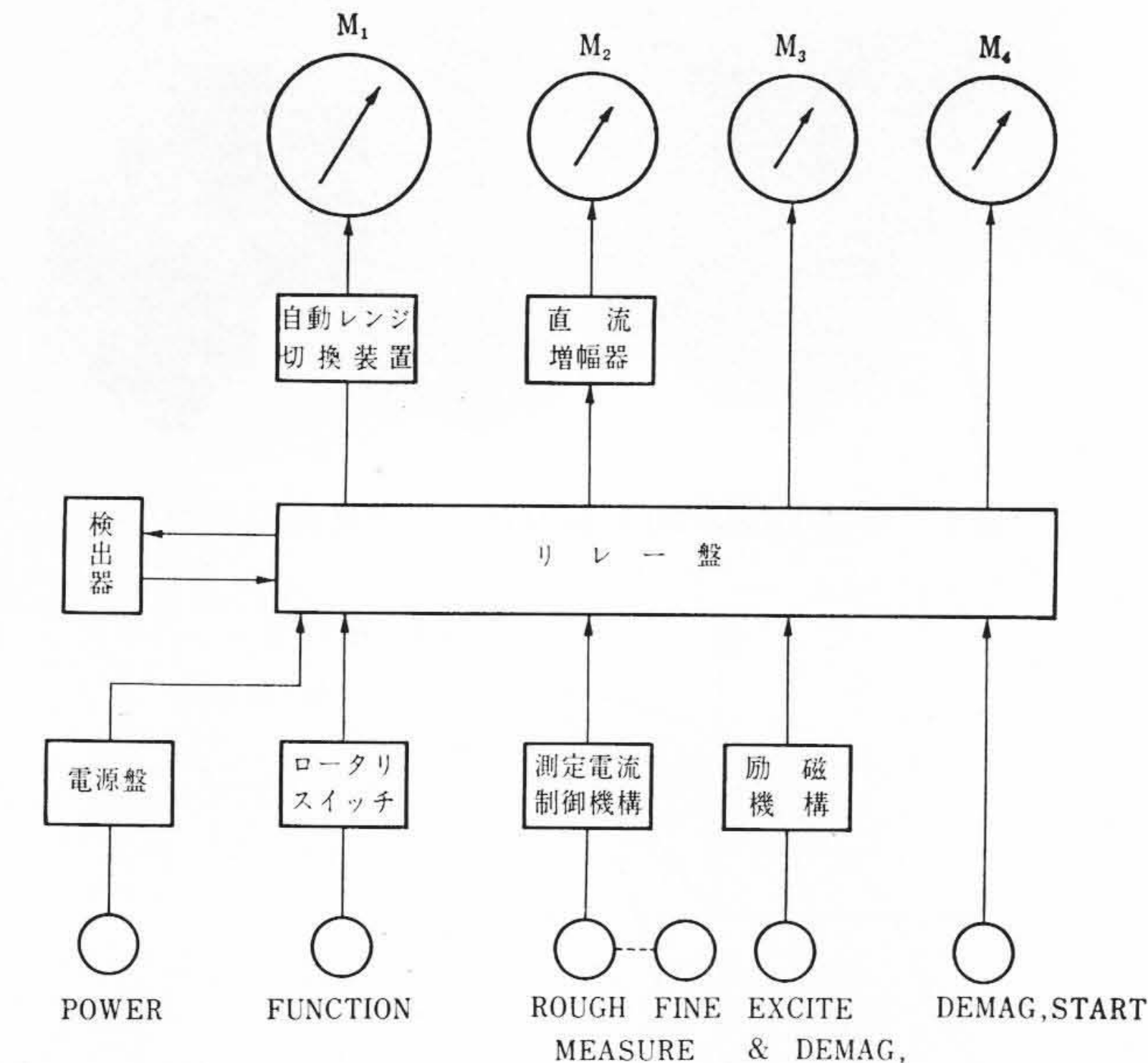


図4 測定装置の構成

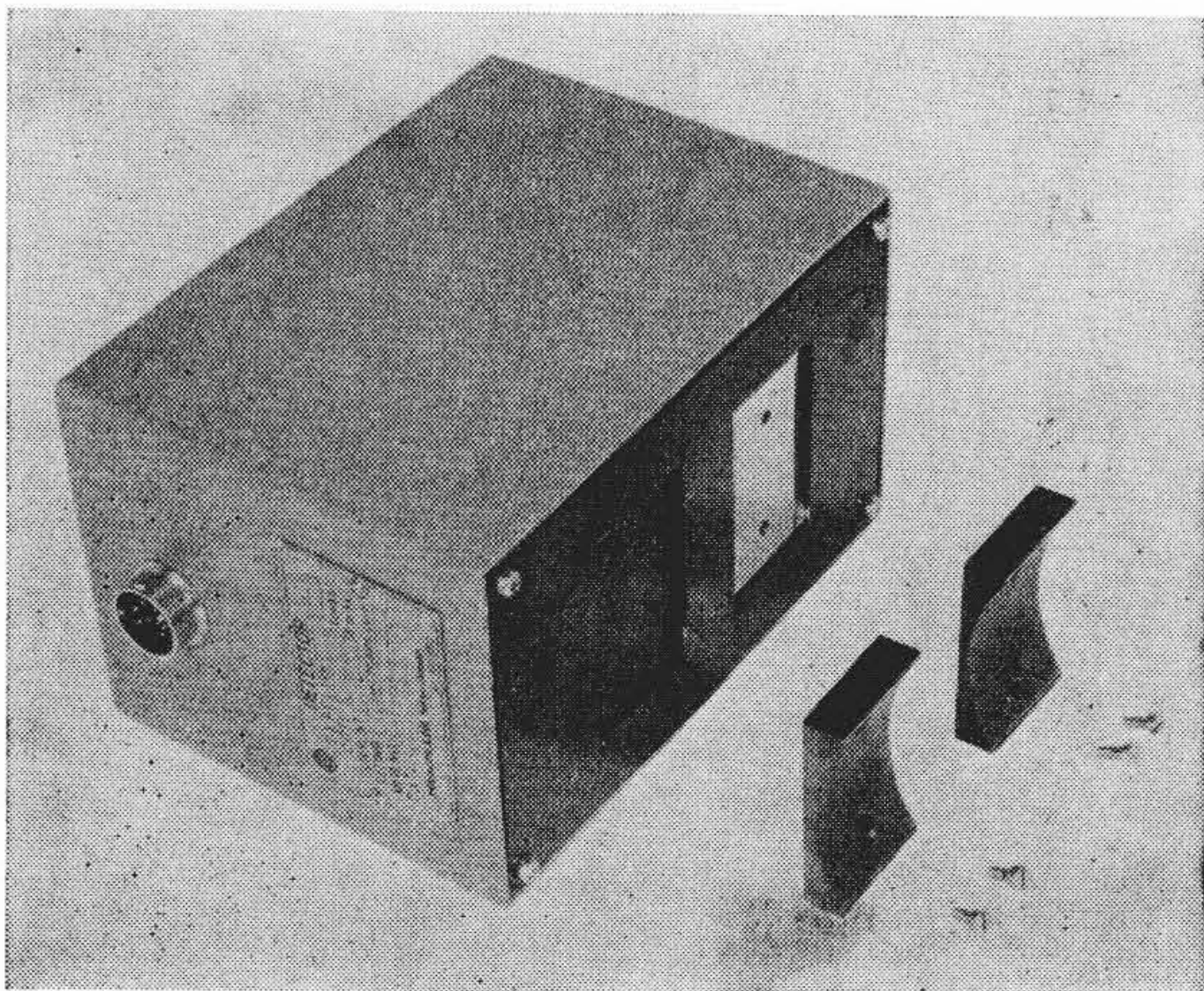


図5 検出器とアタッチメント

般小形部品は一般に2 mm 以下である。

焼入れ深度の大きい被測定物に対してはその深度が測定しうる深さまで磁束を透入させなければならないので大形の検出器を使用することになるが、焼入れ深度の小さいものに対しては必要以上に深い透入磁束は必要なく、また測定精度にも影響がある。したがって標準検出器としては、焼入れ深度の測定能力によって20 mm 以下、10 mm 以下および5 mm 以下の3種類にまとめ、このほかに大形歯車測定専用のXUM-C形を設けた。これらの仕様は表1に示すとおりである。

5. 標準アタッチメント

アタッチメントは図5のように検出器の脚部へネジ締め固定され、被測定部へ有効な磁束を通すための磁路を形成するものである。一般の被測定物は、熱処理方法および形状寸法の違いがあり千差万別である。しかし焼入れ深度は熱処理方法によりほぼ決定されるので測定能力により区分された標準検出器のいずれを使用すべきかがまず決定される。

したがって標準アタッチメントは被測定物の形状および寸法によって区分すればよい。被測定物の形状は基本的には、①角棒、丸棒状のもの、②板状のもの、③歯車、スプライン状のもの、④そのほかに分類される。これらのうち①~③に対応できるように、標準アタッチメントは設定される。図6に示したのがそれである。したがって

表1 標準検出器の仕様

形式	測定能力	電磁石の形状、寸法	コイル巻数	励磁電流	用途
XUM-A	20mm以下		1,000	5A	高深度焼入れ大形部品 異材鑑別、硬度測定 熱処理条件の判別など
XUM-B	10mm以下		1,000	3A	中深度焼入れ一般部品
XUM-C	5mm以下		1,000	3A	モジュール10以上の 大形平歯車、歯底、 ファイレット部
XUM-D	5mm以下		1,000	1A	低深度焼入れ 一般小物部品

形式	アタッチメントの形状	形式	アタッチメントの形状
0形シリーズ [用途] 平板測定		4形シリーズ [用途] 簡易万能タイプ 20mmφ~∞	
1形シリーズ [用途] 50mmφ以下 丸棒測定		6形シリーズ [用途] 低深度測定	
2形シリーズ [用途] 50mmφ以下 異材鑑別		8形シリーズ [用途] 高深度測定 曲率Rは顧客 の指定による	
3形シリーズ [用途] 高深度測定 曲率Rは顧客 の指定による		C形シリーズ [用途] 大形平歯車 測定	

図6 標準アタッチメント

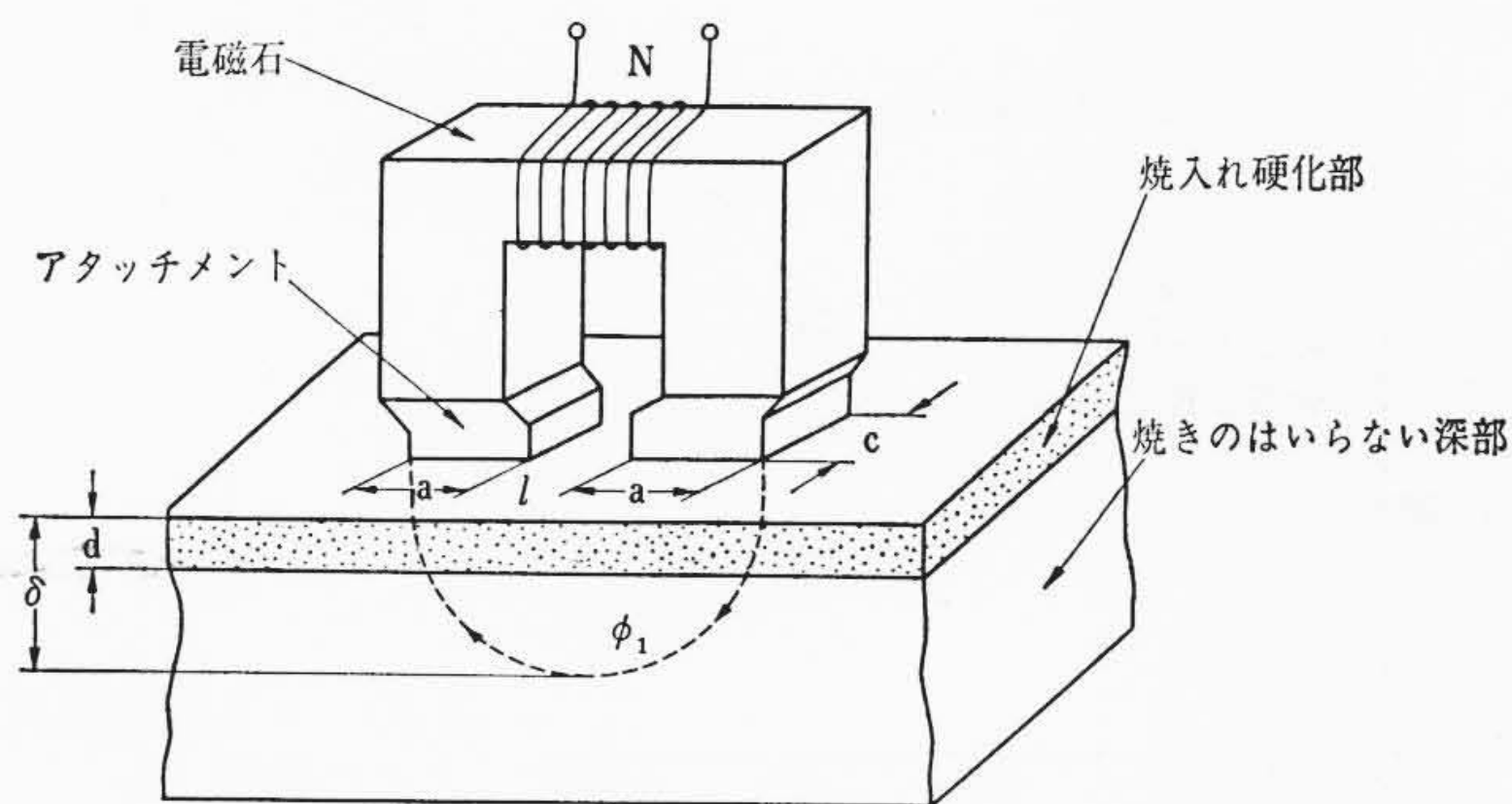


図7 検出器定数の説明

て特殊形状のものを除いては、ほとんどの被測定物について標準検出器と標準アタッチメントを適当に選択することにより測定が可能である。なお、標準アタッチメントが適用できない特殊形状のものは、そのつど検討すればよい。

6. 検量線の設定方法

本測定装置を使用するには、検量線が必要である。すなわち被測定物の保磁力は、鋼種および熱処理などにより異なるものであり、あらかじめ測定対象物の真値と本測定装置の測定値との関係を示す検量線を設定しておかなければならない。検量線の設定方法には大別して、理論的な計算による方法と実験的な方法が考えられる。

6.1 理論的な計算による検量線の設定方法

この方法について述べるには若干の予備説明が必要である。

図7のように被測定物の表面に適当なアタッチメントを取り付けた検出器を置き、検出器コイルへ I_m を流して励磁し、逆励磁電流を流した後の測定値 F_c は被測定部の全磁路の〔保磁力〕×〔磁路長〕の合成値を表わしており次の近似式⁽¹⁾で示される。

$$F_c = \frac{10m\phi_1}{4\pi} \left[\frac{d}{a} + \frac{a+l}{n \left(\frac{a+l}{\delta-d} + \frac{\delta-d}{a} \right) + m \left(\frac{d}{a} + \frac{a+l}{d} \right)} \right] + F_{co} \quad [\text{A} \cdot \text{T}] \quad (1)$$

ここに、 a : アタッチメントの脚の幅 (cm)

l : アタッチメントの脚の間隔 (cm)

δ : 被測定物中に透入される磁束の深さ (cm)

d : 焼入れ硬化層深度 (全硬化層深さ) (cm)

ϕ_1 : 検出器よりアタッチメントを通して被測定物中にはいる磁束の最大値 ($\text{kG} \cdot \text{cm}^2$)

F_{co} : 検出器とアタッチメントを含む〔保磁力〕×〔磁路長〕 ($\text{A} \cdot \text{T}$)

m および n は、図8のように焼入れ硬化部または焼きのはいらない深部にての最大磁束密度と保磁力との関係によって決定される。

ここで、たとえば高周波焼入れのように焼入れ硬化層深度が数ミリメートルで、焼入れ硬化部と焼きのはいらない深部の硬度差が大きい場合、つまり

$$d \ll a+l, \quad d \ll \delta, \quad n \ll m$$

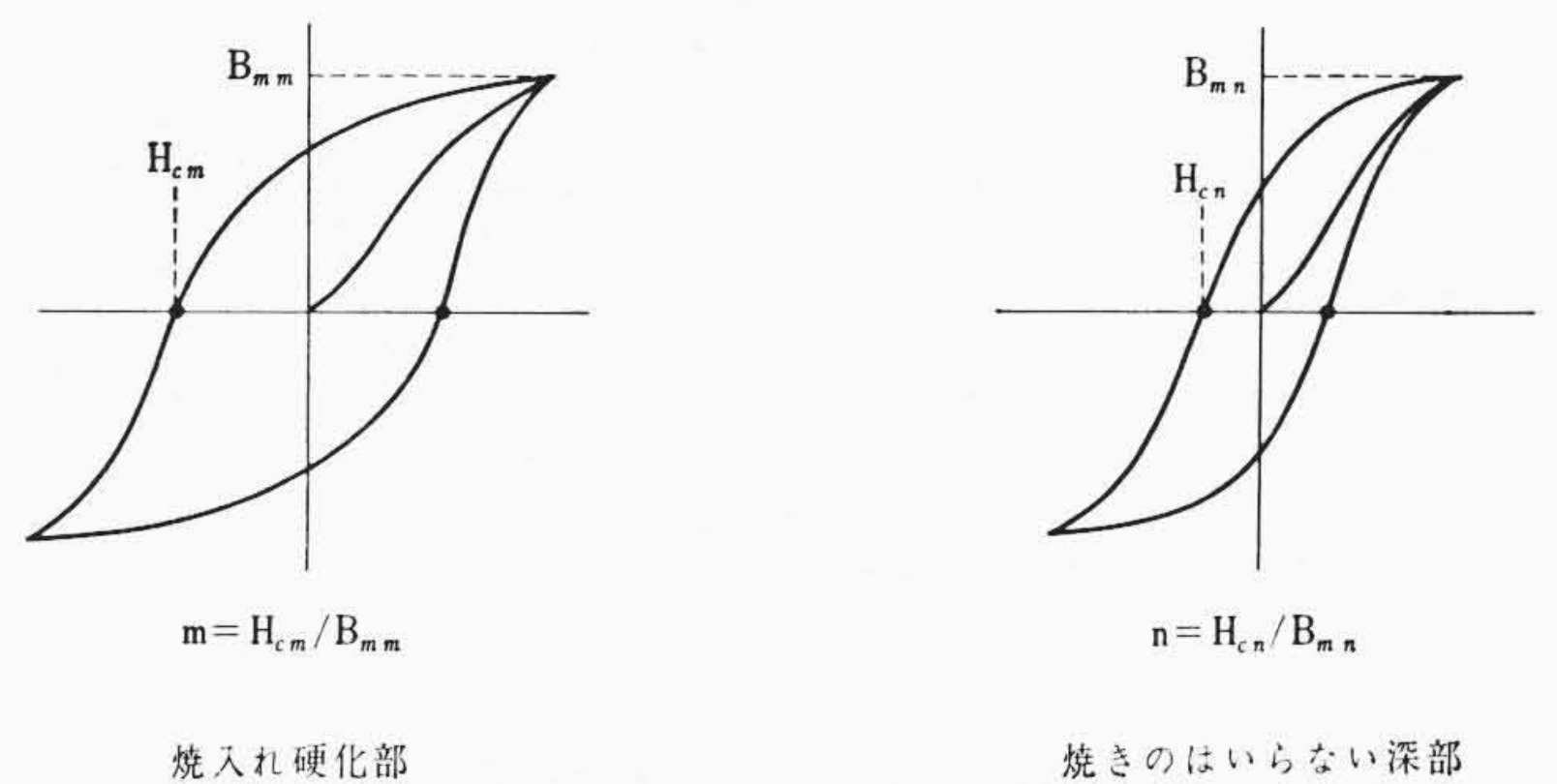
このような関係が成立する場合には、(1)式は次のように簡略化される。

$$F_c \doteq \frac{10\phi_1}{4\pi} \left\{ \frac{2m}{a} d + n \left(\frac{a+l}{\delta} + \frac{\delta}{a} \right) \right\} + F_{co} [\text{A} \cdot \text{T}] \quad (2)$$

また F_c の d に対するこう配は

$$F'_c = \frac{\partial F_c}{\partial d} = \frac{20m\phi_1}{4\pi a} [\text{AT/cm}] \quad (3)$$

ここで、 a, l, δ, ϕ_1 (図7の c 寸法が関係する) および F_{co} は被

図8 m および n の説明

測定物にかかわらずほとんど検出器とアタッチメントの材質と寸法により次定されるが、 m と n の値は被測定物の鋼種および熱処理条件により異なるもので厳密には個々の場合で実測により求める必要がある。ここで(3)式について検討してみると、検量線のこう配は焼入れ硬化部の磁気特性 m のみによって決定されることになる。しかし実際にはたとえば低合金鋼で前処理として調質されたものは焼きのはいらない深部の磁気特性 n の値が大きくなるので、この影響を無視することはできない。そこでもっとも一般的に使用されるXUM-B形検出器について検討の結果、(3)式を補正するものとして n の値を加味した実験式を次のように求めた。

$$F'_c = 20(m-n) [\text{A} \cdot \text{T/cm}] \quad (4)$$

以上の予備説明を基に、この方法による検量線の設定について述べる。

6.1.1 計算のみによって検量線を設定する方法

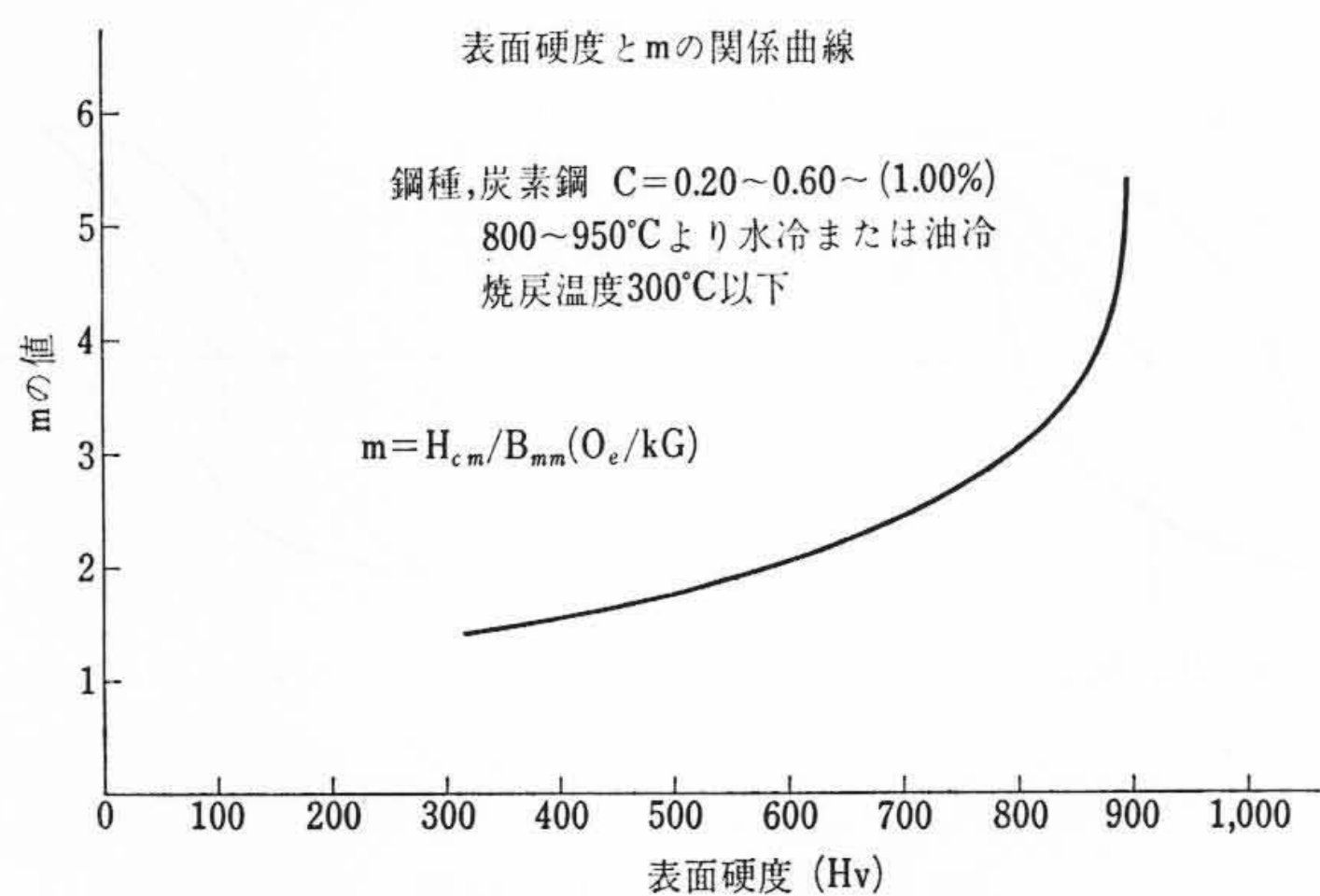
m および n を実測により求めて、(1)式または(2)式により計算のみによって、テストピースを破壊することなしに検量線を設定する方法である。これは被測定物が非常に大形高価なので破壊試験ができないため、大まかに焼入れ深度の程度を知りたいときなどには有効な設定方法である。しかしいろいろな条件に支配される焼入れ深度を計算のみによって求めようとするものであるから、ほかに類似品の検量線があってそれと比較対応しながら適用するというような方法が望ましい。

6.1.2 実測と計算を併用する方法

検量線上の一点を実測により求め、こう配は計算により求める方法である。すなわち標準的条件下で熱処理された実物1個を選定し、面接触アタッチメントにより F_c 値を実測する。これを切断して焼入れ深度の真値を確認し、表面および深部の硬度を実測する。あわせて金属組織の観察も行ない、このものが被測定物を代表するものであることを確かめておく。ここで(3)式または(4)式により計算で検量線を設定する方法である。この方法は熱処理装置の運転条件を変えて、標準より深いもの浅いものをつくりだすことができないような場合に適している。また F_c 値がある一点に集中して、全体的な検量線の傾向を知りたいときなどにも有効である。

以上の方法では m および n をどのように求めるかが最大の問題である。カーボン量0.2~0.6%の炭素鋼について実験的に m および n を求めビッカース硬度との対応を調べた結果、図9、図10のようになった。図9の m の値は合金鋼の場合でも合金成分が1%以下ではほとんど影響がないことを実験で確認した。以下これらを基に設定した検量線の数例を紹介する。

図11は炭素鋼の高周波焼入れ25φ丸棒について(2)式により計算した結果である。このとき使用した検出器とアタッチメントについては実験的に次の定数が成立する。 $a=1.5\text{ cm}$, $l=1\text{ cm}$, $\phi_1=16.5(\text{kG} \cdot \text{cm}^2)$, $\delta=2.5\text{ cm}$, $F_{co}=5\text{ A} \cdot \text{T}$, これらを(2)式に

図9 m と表面硬度との関係

代入すると

$$F_c = 17.5md + 34.2n + 5 \quad [\text{A} \cdot \text{T}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。 m と n は図9と図10より求められるので図11の検量線が設定される。

図12は高炭素クロム鋼の高周波焼入れ丸棒について(3)式により検量線のこう配を計算によって求めたものである。このとき使用したXUM-A形検出器およびA80(80φ)アタッチメントについては、 $a=3\text{ cm}$, $\phi_1=36\text{ (kG-cm}^2\text{)}$ である。またテストピースの実測値は $F_c=126.3\text{ (A} \cdot \text{T)}$, $d=0.6\text{ cm}$ であった。したがって(3)式により、こう配は $F'_c=19.2\text{ m (A} \cdot \text{T/cm)}$ となる。

図13は炭素鋼の高周波焼入れ30φ丸棒について一点の実測値を求めて、計算によりこう配を設定した検量線である。ここでは計算定数は図11の場合と同じであり、(5)式右辺の第一項をとって $F'_c=17.5\text{ m}$ とした。

図14はSNC2の高周波焼入れ丸棒について図13と同じく、こう配を計算により求めた検量線である。ここでは表面硬度と深部硬度の差が比較的小さいので(4)式を使用した。なおこの場合、 m および n の値は図9と図10より決定されたが、正確を期するためには鋼種を考慮して、実測により求めるのが良い。

6.2 実験的方法による検量線の設定

前述の理論的な計算による方法はかなり適用上の制限があって、実際の生産現場においては必ずしも有効な方法とはいえない。特に被測定物が非常に複雑な形状をしており、この形状に合わせた特殊

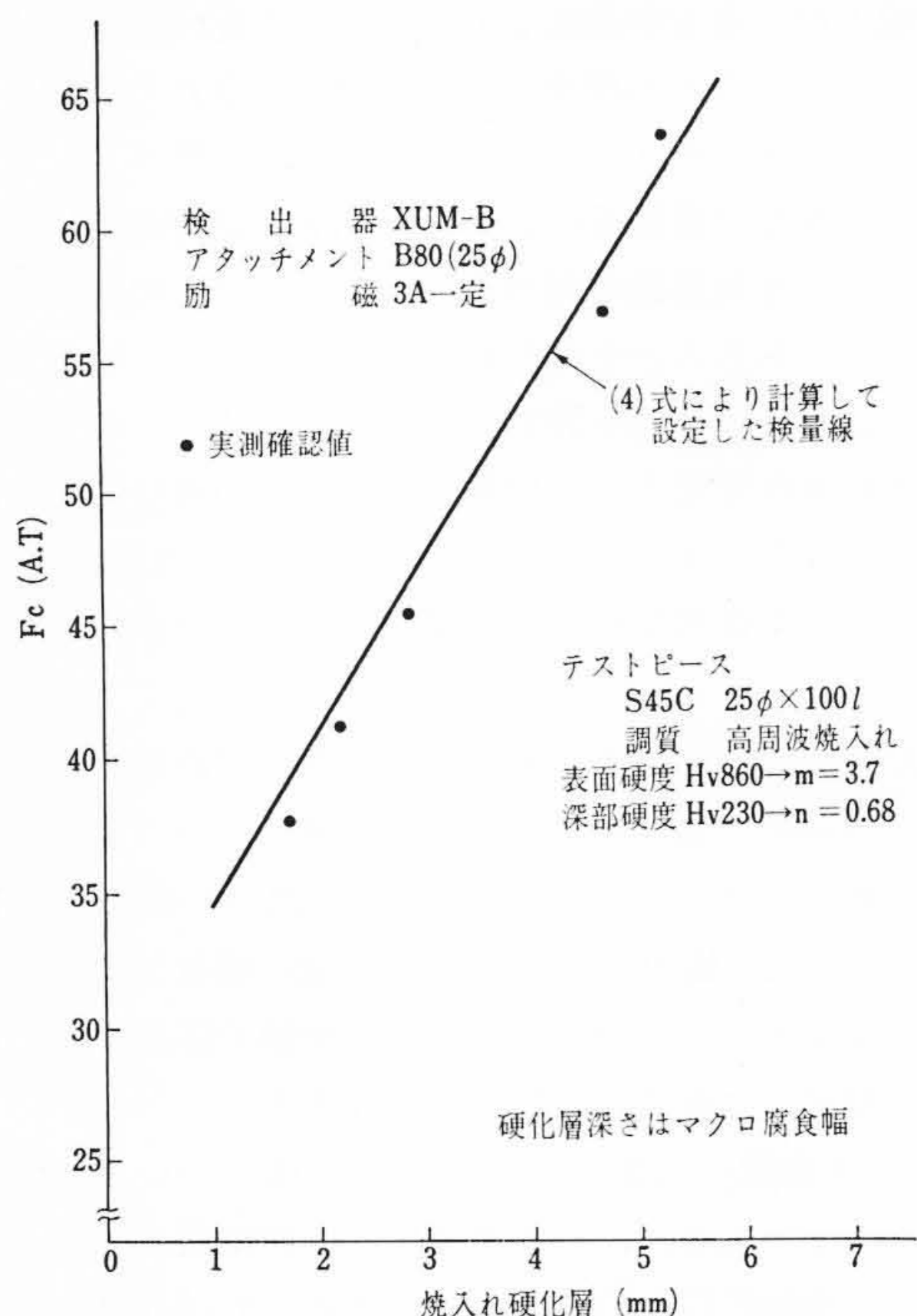
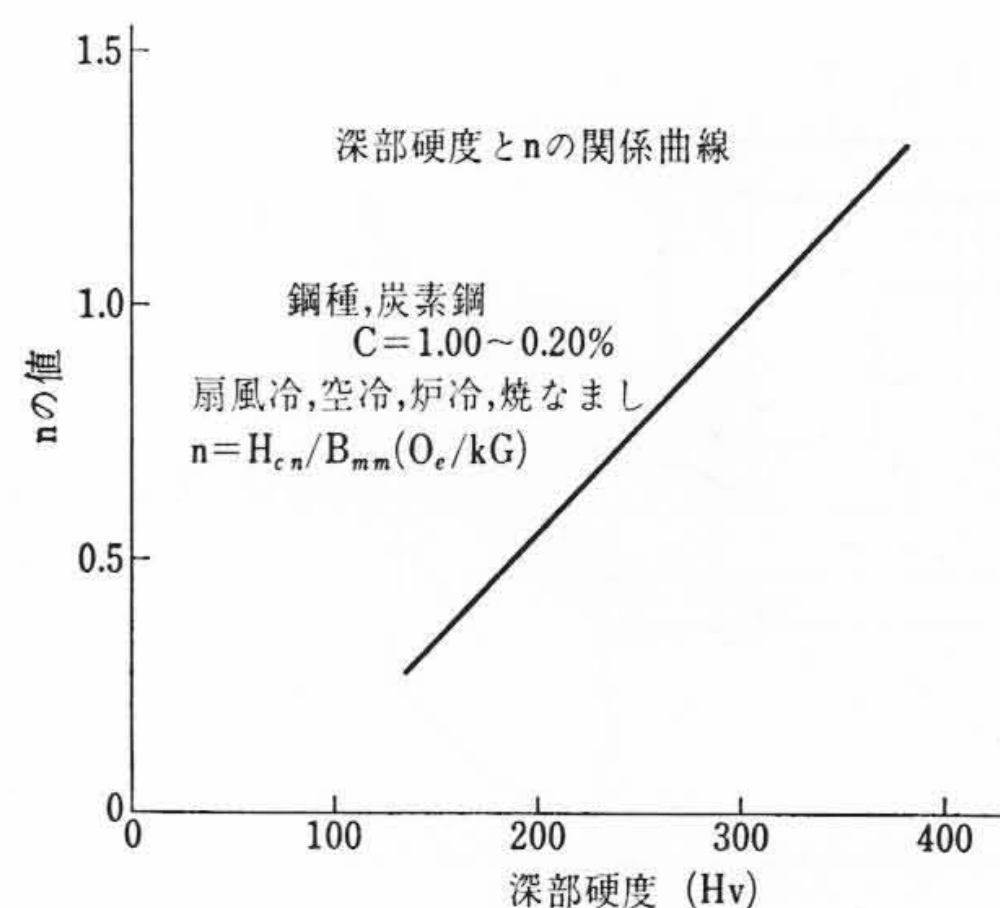


図11 理論的計算により設定した検量線(1)

図10 n と深部硬度との関係

アタッチメントの場合は個々に計算定数を求めるのは容易でない。そこで、もっとも現実的でしかも確実な方法は、被測定物そのものを実測して実験的に検量線を設定することである。すなわち検量線設定のためのテストピースとして、実際の量産品を対象とし標準どおりの焼入れ深度のものおよび標準より深いもの、浅いものを選択する。この範囲としては標準の焼入れ深度を D として、 $1/2 D \sim 2D$

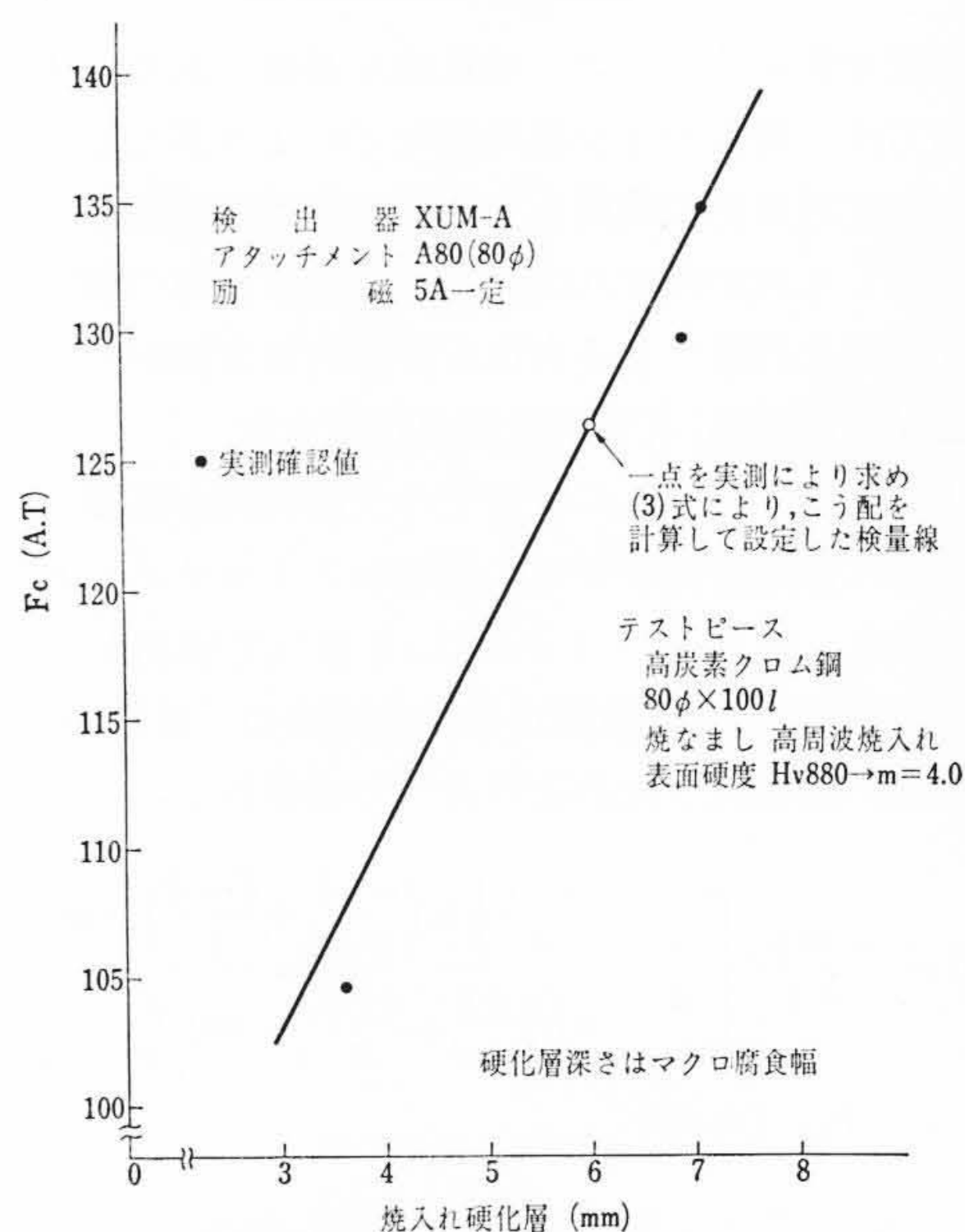


図12 理論的計算により設定した検量線(2)

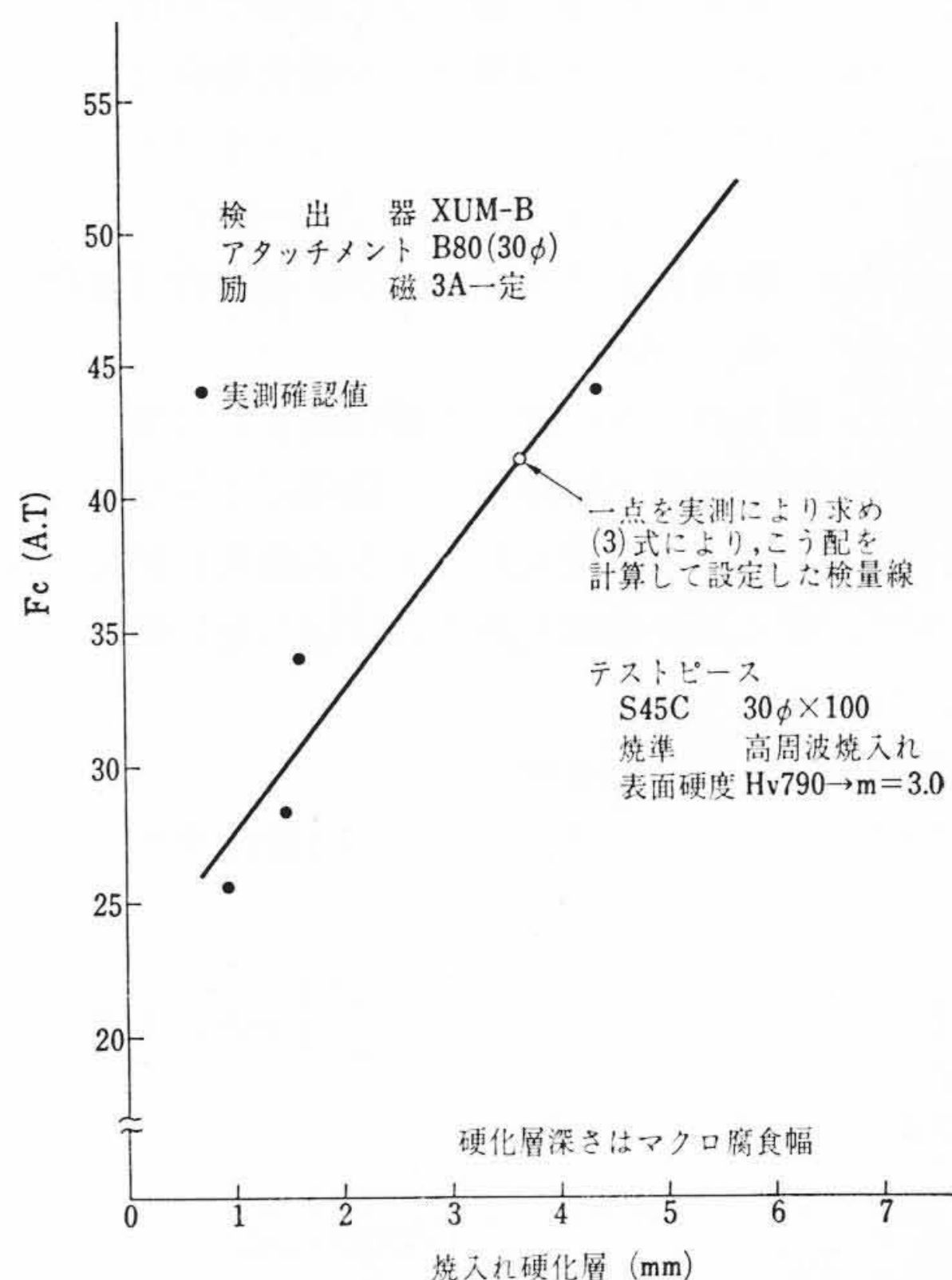


図13 理論的計算により設定した検量線(3)

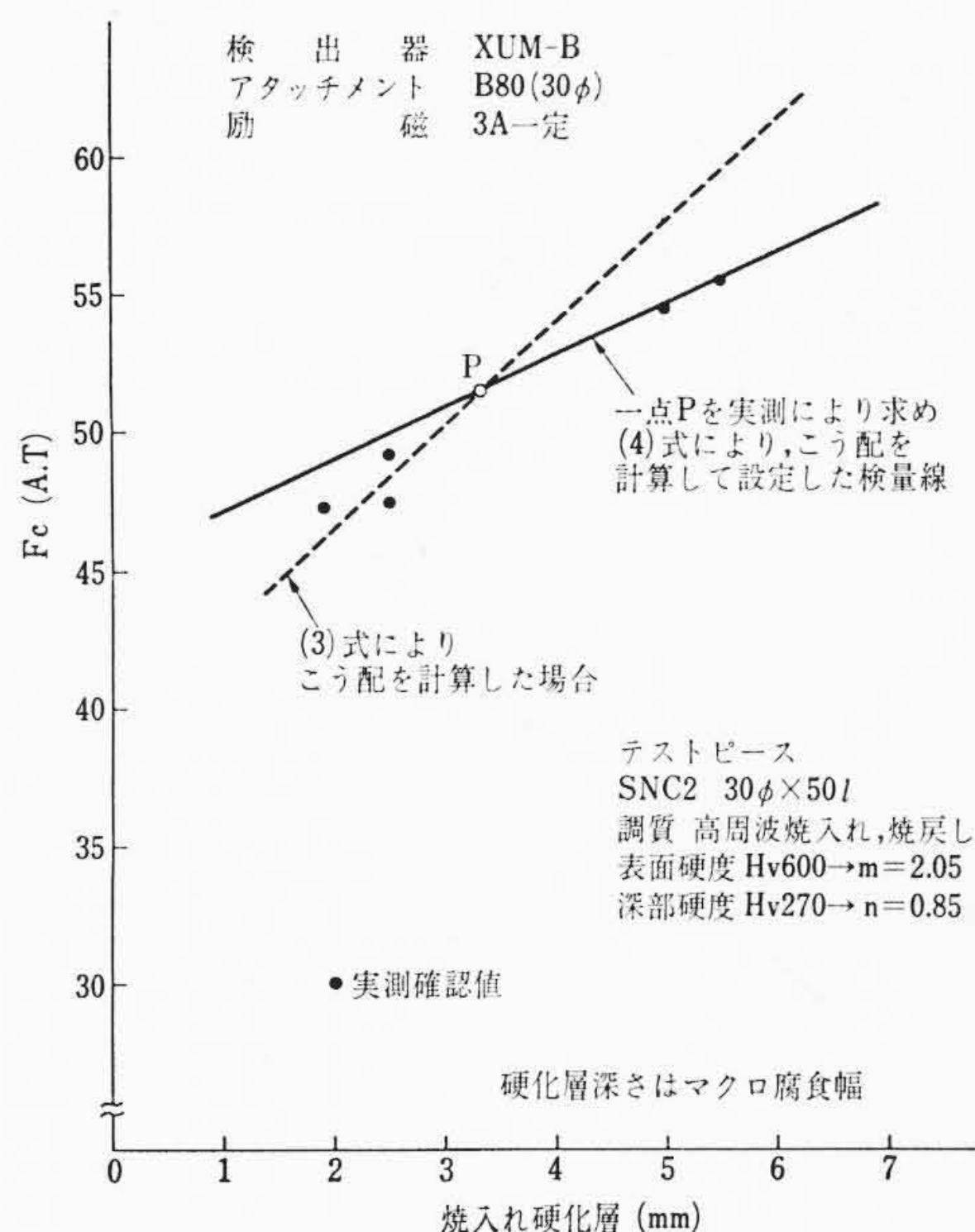


図14 理論的計算により設定した検量線(4)

にとるのが望ましい。これらのおのおのについて破壊試験にて焼入れ深度の実測をし、本測定装置による測定値との対応をみるわけである。次にこの方法により設定した検量線を紹介する。

図15～17は低炭素鋼の高周波焼入れした丸軸関係の検量線であり、これらはたとえば自動車用シャフトや一般機械部品シャフトなどに相当するものである。これらの焼入れ深度の定義は規定の硬度を有する深さ、すなわち有効硬度深さで表わしてある。図16では、同一寸法で鋼種がやや異なるものを同一条件で高周波焼入れした場合、検量線上ではどの程度の差となって現われるか検討するのを目的とした。図17は同一鋼種、同一焼入れされた20φと40φとのもを、線接触タイプのアタッチメントで測定したもので、被測定物とアタッチメントの接触個所により、透入磁束の経路が異なることにより F_c 値に差異があることがわかる。一般に高周波焼入れの場合は、表面と深部との硬度差が大きくまた深部硬度および組織は前処理によってほぼ一定に押えられ、ばらつきも小さいので本測定装置では非常に精度の高い測定ができる。

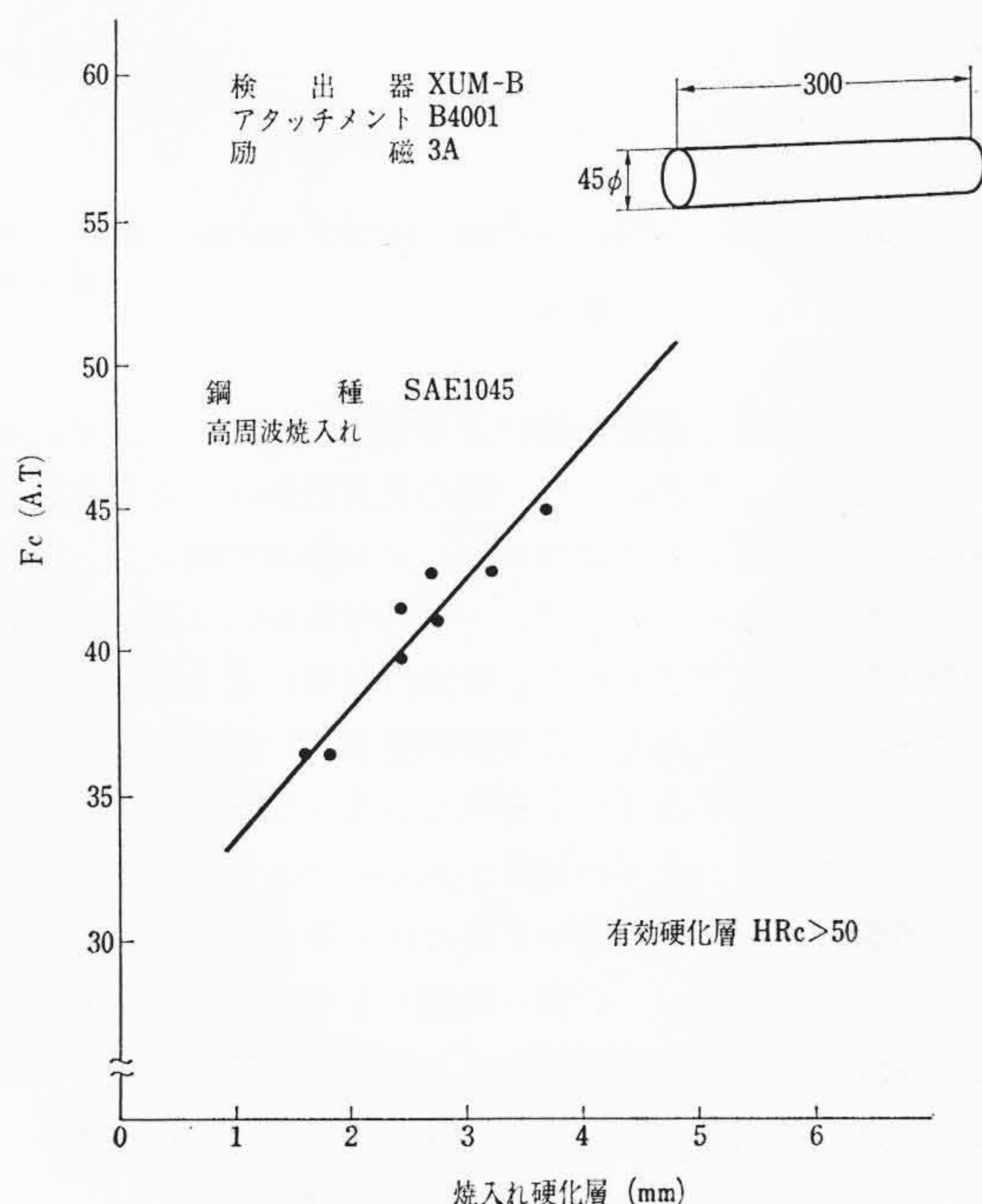


図15 高周波焼入れ炭素鋼の検量線(1)

図18、図19は浸炭焼入れ品の測定用として設定された検量線の例である。一般に低合金はだ焼鋼の場合には浸炭条件と焼入れ条件が重なり、金属組織のばらつきが生じやすいので本測定装置による測定には注意が必要である。すなわち冷却油の温度管理と、かくはんをより以上に厳重に行ない被測定物の冷却速度をなるべく一定にして組織のばらつきをなくすることである。保磁力に影響あるおもな要因としては、残留オーステナイト、マルテンサイト混在するベイナイト、ガス浸炭の場合の高温直接焼入れによる結晶粒度の粗大化などがあげられる。浸炭焼入れ品の検量線設定には、必要以上の深い透入磁束とならないように6形シリーズのアタッチメントを使用することおよび被測定物の金属組織の観察もあわせて行なうのが望ましい。

図20、図21は焼入れ深度測定以外の応用測定として、炭素含有量の測定と異材鑑別の測定例である。これらの応用測定の場合に

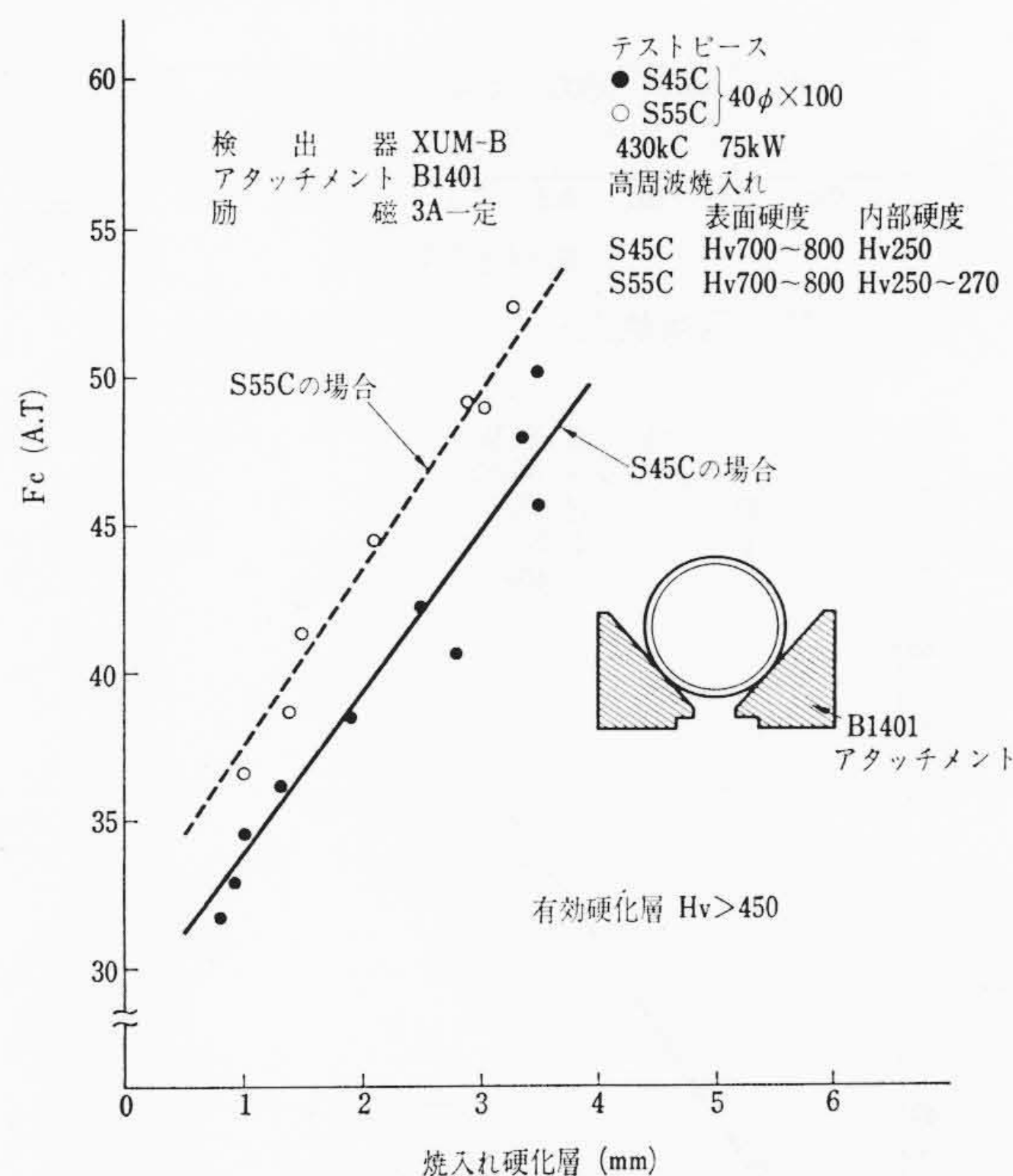


図16 高周波焼入れ炭素鋼の検量線(2)

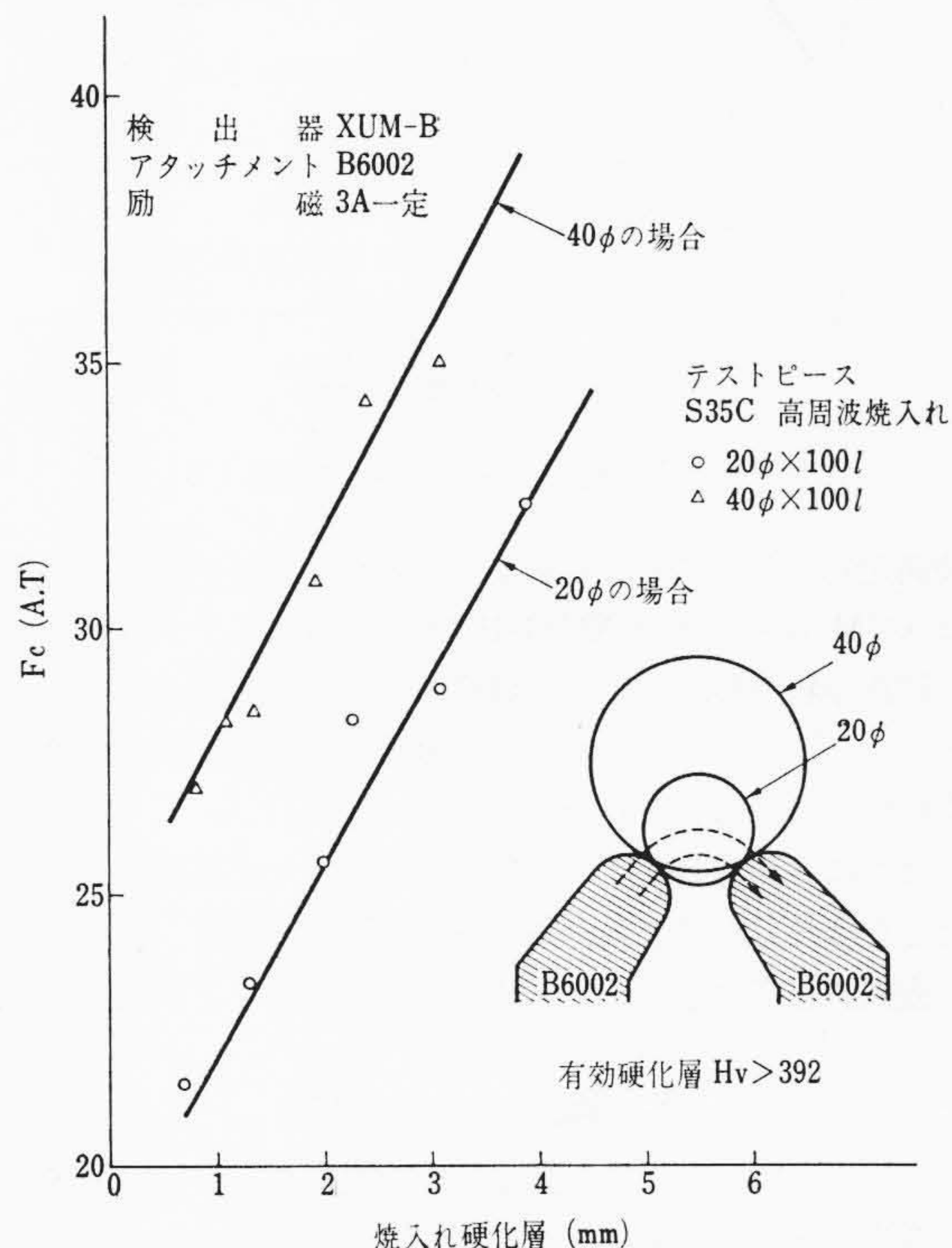


図17 高周波焼入れ炭素鋼の検量線(3)

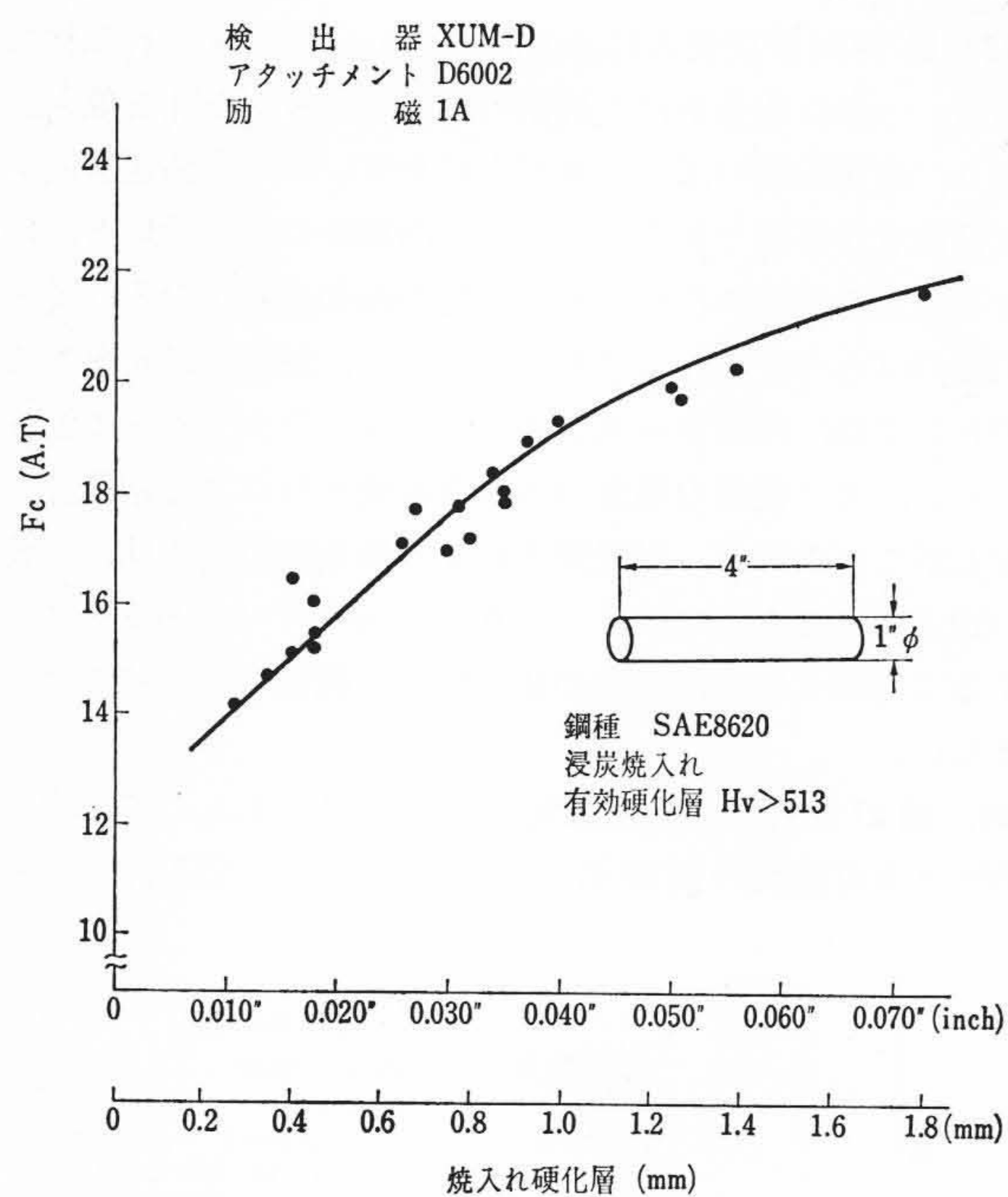


図 18 浸炭焼入れ合金鋼の検量線 (1)

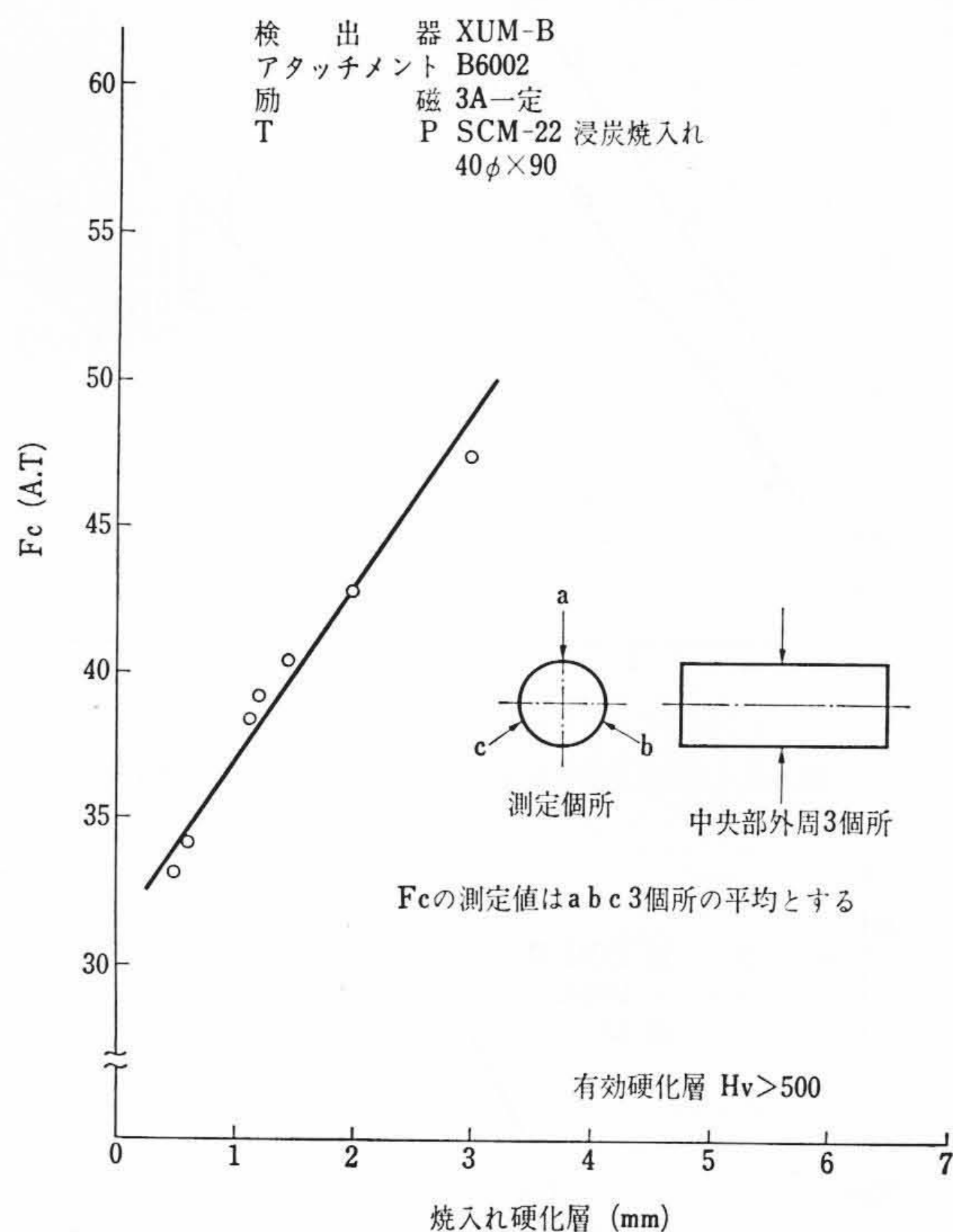


図 19 浸炭焼入れ合金鋼の検量線 (2)

は、被測定物へなるべく深く磁束を透入させるのが良く、検出器としてはXUM-A形またはXUM-B形を使用し、アタッチメントとしては被測定物の形状に応じてO形シリーズ、1形シリーズ、2形シリーズより選定する。なおこれらの場合の検量線設定には実験的方法を用いる以外に方法はない。

このように本測定装置は、さらにいろいろな応用測定が可能である。たとえば熱処理品の表面硬度や内部硬度の測定、熱処理程度の判別、機械的強度の推定、金属被膜の厚さ測定などがあげられる。

7. 結 言

鋼材焼入れ深度測定装置の測定精度を支配する検出器、アタッチメントの選定および検量線の設定方法について述べた。

検出器は測定能力によって4種類に区分され、アタッチメントは

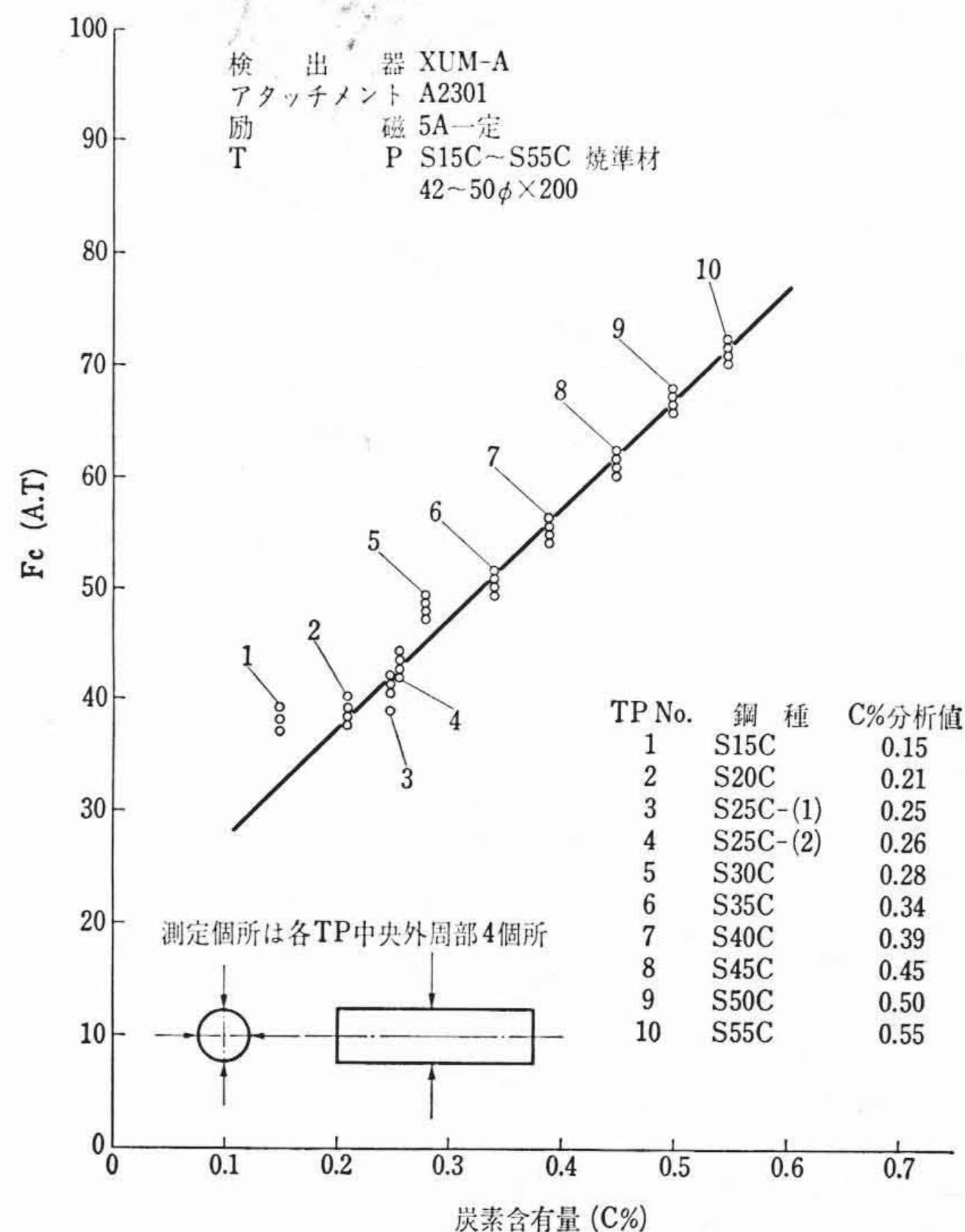
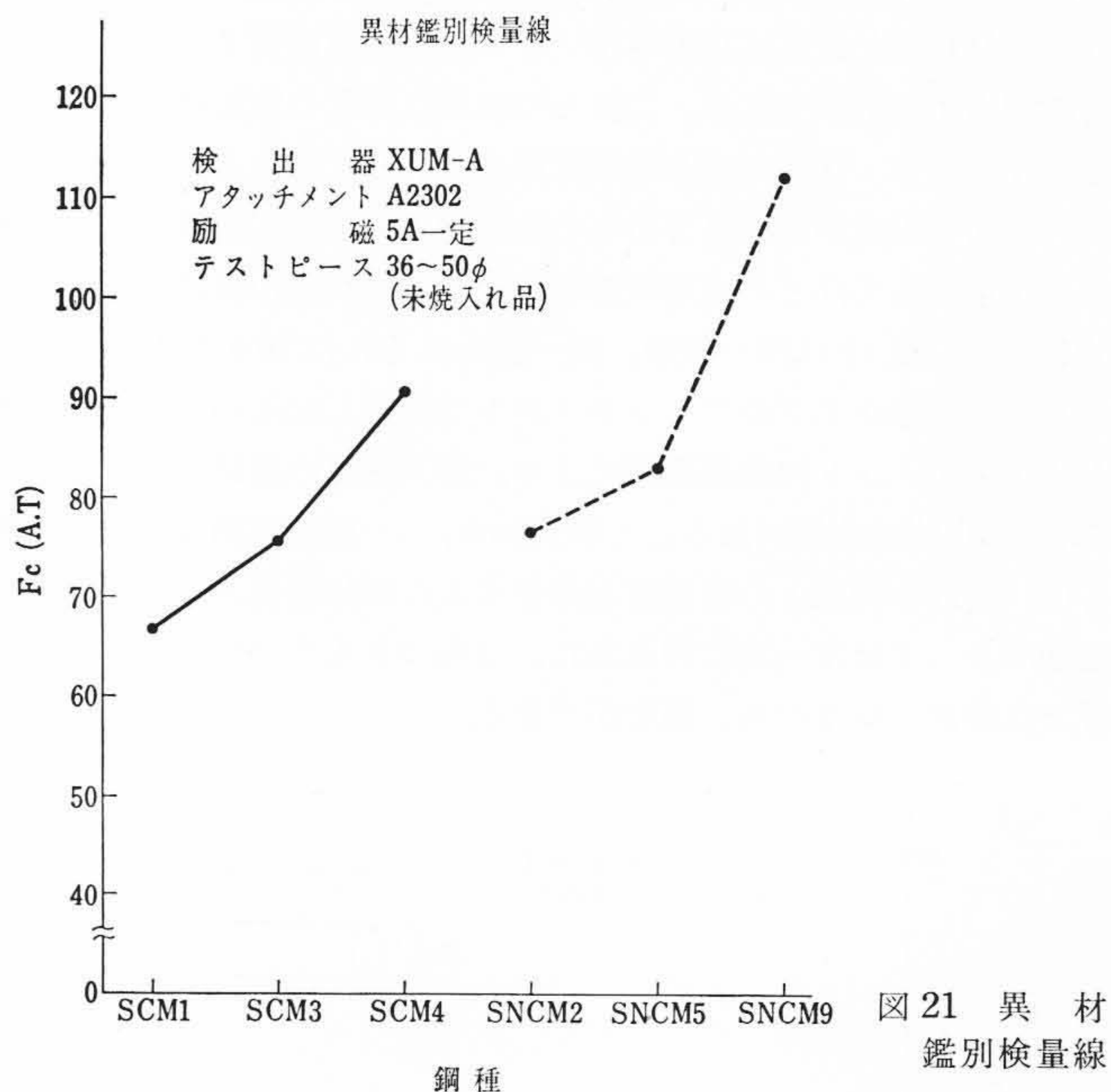


図 20 炭素含有量測定の検量線

図 21 異 材
鑑別検量線

被測定物の形状寸法と測定目的により分類されるので、それぞれの標準品を設定した。これにより一般の被測定物は、これら標準品のいずれかを選択することによりほとんどが測定可能となった。

検量線の設定方法については、一般的な実験による方法のほかに理論的な計算による方法もある。理論的計算による方法は正確な m および n を求めるのにかなりの実験的要素がいり、また適用上の制約があることなどより必ずしも有効な方法ではないが実験的方法と併用することによりかなりの効果があるものと期待される。

本測定装置は鉄鋼生産設備の発展に伴いその検査機器の一環として普及され始めているが、今後の問題としては焼入れ深度以外の応用測定分野をより広範囲に広げることおよび特殊形状品でも安定した測定ができるアタッチメントの開発に努力することである。

参 考 文 献

- (1) 小野, 神田: 非破壊検査 15巻2号 p.45~50 (昭42-2)