

## 引張変形されたオーステナイト系不銹鋼薄肉管の渦流検査\*

前川立夫\*\* 水田三千雄\*\* 石原克己\*\*\*

Tatsuo Maekawa, Michio Mizuta and Katsumi Ishihara: Eddy-Current Testing of Tensile Deformed Thin Tube of Some Austenitic Stainless Steels.

Eddy current testing is one of the most effective nondestructive test methods in the fields of thin-tube inspection and the theoretical foundation on its nature is already analysed in detail. However, published practical data on the testing are comparatively few. Therefore, the changes of the current flowing in a annular coil (7 KC) on a tensile-deformed thin tube (initial tube dimension; O.D. 8.56 mm, I.D. 7.50 mm) of AISI-304 type austenitic stainless steels were investigated. The main results obtained were as follows: (1) The current change (the only phase component) caused by tensile deformation of the tube specimen increased in accordance with the increase of unstability of the austenitic phase of the initial tube. (2) The electrical resistivity and the magnetic property can be considered as factors affecting the current change. The measurement showed that the former change is comparatively small and the latter change is predominant. This means that the measured change is caused by a precipitation of ferrite phase in the austenite phase by deformation. (3) The current change is affected by heat-treatment before deformation. Generally speaking, the change of annealed specimen is larger than that of solutionized specimen (in annealed specimen it became to the maximum at the annealing temperature of ca. 650°C). (4) Recovery of the current change takes place at the temperature of 400~650°C. The activation energy of recovery decreases continuously with increasing gross recovery.

(Received May 30, 1960)

### I. 結 言

薄肉管に応用される幾つかの非破壊検査方法の中で渦流検査は管材の成分不均一、熱処理の不適、肉厚不同、亀裂

介在物の存在等を敏感に検出し得るという利点のために最近盛んに利用されようとしており、また将来極めて有力な検査手段となることが予想される。原子力工業の分野においても核燃料被覆用薄肉管などの検査手段として有望である。従つて渦流検査の理論的取扱いについてはすでに詳細な説明<sup>(1)</sup>がなされているが既報告の実測例は少ない。そこ

\*\* 三菱原子力工業株式会社研究所

\*\*\* 三菱電機株式会社研究所

\* 1959年11月本会大阪大会に発表

で我々は渦流検査を実際に応用した場合の資料を得る目的から、第一段階としてオーステナイト系不銹鋼薄肉管を引張変形した場合について渦流検査を行った。その結果引張変形によるフェライト相析出に対応すると考えられる敏感な指示変化を検出したので以下得られた結果について報告する。

## II. 試料の調製と測定方法

### 1. 試料の調製

試料として Table 1 に示すような化学組成を有する AISI

Table 1 Chemical composition of specimens used.

Specimen	Chemical composition (w/o)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Co	Mo
No.1	0.045	0.47	1.55	0.021	0.007	0.07	13.10	18.05	—	—
〃 2	0.039	0.47	1.55	0.021	0.007	0.07	13.10	18.05	0.44	—
〃 3	0.031	0.57	1.69	0.007	0.010	0.01	12.32	19.95	0.03	—
〃 4	0.07	0.59	1.71	0.017	0.012	0.15	9.93	19.10	—	—
〃 5	0.05	0.32	0.85	0.032	0.012	0.18	10.10	17.95	0.26	0.57
〃 6	0.03	0.17	0.65	0.005	—	—	9.26	18.86	—	—

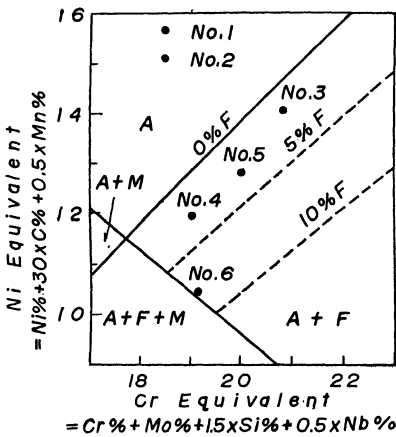


Fig.1 Schaeffler diagram of specimens used. (A: Austenite, F: Ferrite, M: Martensite)

Table 1 に示した化学組成に対応する Schaeffler 組織図上の位置を各試料について求めると Fig.1 のようになる。すなわち No.1, 2 試料はオーステナイト領域にあり常温でオーステナイトは安定であり、No.3 試料は 98% オーステナイト + 2% フェライト (A+2% F) が安定組織である。同様に No.4, 5, 6 試料は A+3% F, A+3% F, A+8% F が安定組織である。また不銹鋼管の寸法は外、内径、管厚がそれぞれ 8.56, 7.50, 0.53 mm で長さは目

的に応じ適当な寸法に切断して測定に供した。なお試料の熱処理は溶体化処理 (1050°-1/2 hr, 以下 Q 処理と略記) と敏感化処理 (675°-1 hr, 以下 S 処理と略記) の両方を行った。Q 処理試料は典型的なオーステナイト組織を示し結晶粒界には炭化物の存在は認められないのに対して S 処理試料では炭化物が結晶粒界に析出しており、その量は含有 C 量の多いもの程多くなって一般に予想されるような基本的組織となっている。Photo.1 に顕微鏡組織の一例を示す。

### 2. 測定方法

渦流検査器として原電子測器製 Eddiograph FE-1 型を用いた。Fig.2 にその構成図を示すように本測定の場合には 2 個のソレノイドコイル (7KC) があり両コイルのインピーダンスは試料挿入前はバランス回路でバランスしている。そして一方のコイルに標準試料を、他方のコイルに測定試料を挿入すると両者の寸法、形状や材質的違いによってインピーダンスのバランス

304 型の 6 種類のオーステナイト系不銹鋼の薄肉細管を用いた。オーステナイトの安定性を示す基準については多くの報告があるが、Schaeffler 組織図<sup>(3)</sup> が一般に広く用いられている。そこで

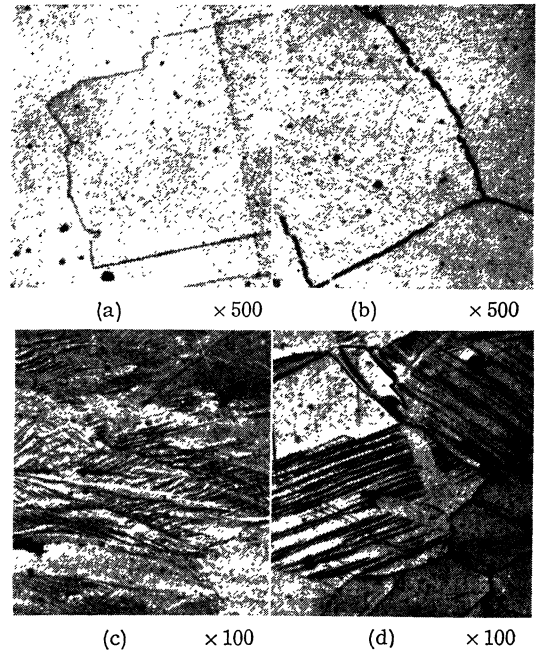


Photo.1 Microscopical structures of No.4 specimen.

- (a) 1050°, 1/2hr solutionized
- (b) 675°, 1hr sensitized
- (c) solutionized and 56% elongated
- (d) sensitized and 52% elongated

は破れ、コイル中を流れる電流の大きさや位相が変化する。この変化は増巾して電流計で読み取り (必要に応じて自記させる)、またブラウン管上の波形から検出することができる。なお実際の測定時にはコイル電流変化量に応じて適当な感度数を選択する。

## III. 測定結果と考察

### 1. 引張変形中のコイル電流の変化

- (1) 例えば *Symposium on Nondestructive Tests in the Field of Nuclear Energy*, ASTM Special Tech. Pub. No.223 (1957); *R.Hochshield Progress in Non-Destructive Testing Vol. 1* London, Heywood & Co. (1958), 59; G.O. McClurg: *Control Engineering*, 6(1959), 107; U.S.A.E.C.Report NYO-3576(1953).
- (2) 例えば Binder, Broom & Franks: *Trans.ASM*, 41(1949), 1302; H.Thielsh: *Weld. J.*, 29(1950), 577.
- (3) A.L.Schaeffler: *Weld. J.*, 26(1947), 601.



てよい。

### 3. 引張変形による電気抵抗および磁氣的性質の変化

材質的原因によるコイル電流の変化に影響する因子として電気抵抗と磁氣的性質が考えられる。そこで引張変形による管試料の電気抵抗の変化を測定した（電位差計を用いる方法）ものが Fig.7 である。金属に歪を与えると電気抵抗が変化することは当然考えられるが、実測の結果では電気抵抗の変化は僅かであることが認められた。次に引張変形による管試料の磁氣的性質の変化を測定した。Fig. 8 は最も大きいコイル電流変化を示した No.6 試料を 75 および 150 Oe の磁場中に置いた時の感応磁気と伸び率の関係を

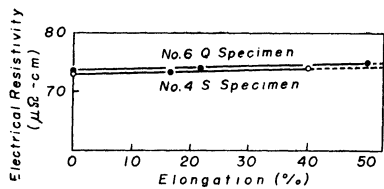


Fig.7 Relation between the electrical resistivity and the elongation of No.4,6 specimen.

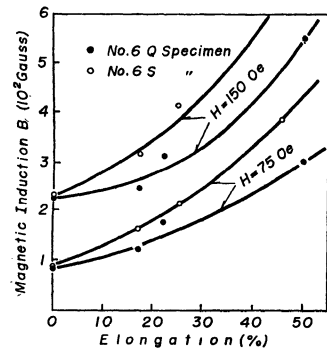


Fig.8 Relation between the magnetic induction and the elongation of No.6 specimen.

示したものである。Q,S 両処理試料共に伸び率の増加につれて感応磁気の増加することが認められ、この増加の割合は Q 処理試料よりも S 処理試料の方が大であった。この結果は一般に認められている<sup>(4)</sup>ように非磁性的のオーステナイト相が加工により一部強磁性のフェライト相に変態することを示しているものと考えられ、このフェライト相析出に対応して敏感なコイル電流の指示変化が検出されたものと判断される。

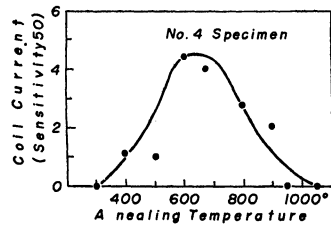


Fig.9 Effect of annealing temperature before deformation on the current change.

### 4. コイル電流変化におよぼす引張前熱処理の影響

コイル電流変化が引張前の熱処理の影響を受けることを示したものが Fig.9 である。大体 650° 附近の焼なまし温度の場合に引張変形時のコイル電流変化は最大となり、より低いか或いはより高い温度では電流変化は減少している。

(4) 例えば B.Cina: J.Iron and Steel Inst., 179 (1955), 230; H.C.Fiedler, B.L.Averbach and M.Cohen: Trans. ASM, 47 (1955), 267; 川崎, 篠田: 本誌, 22 (1958), 489; 篠田, 佐野, 川崎: 本誌, 22 (1958), 500.

この最大変化を示す温度は既報告の敏感化処理温度と一致している。また Fig.10 は焼なまし温度 675° の場合 (S 処理温度) について焼なまし時間とコイル電流変化の関係を調べたものであつて、最初焼なまし時間の増すにつれて電流変化は大きく増加し、時間経過に応じて電流変化は飽和値に近づくことが示されている。これらの結果は焼なましにより粒界に炭化物が析出して粒界近辺の C 量が減少する結果、オーステナイト相の不安定化が増大し、その後の加工によるフェライト相析出を容易にするために起るとして理解することが出来る。

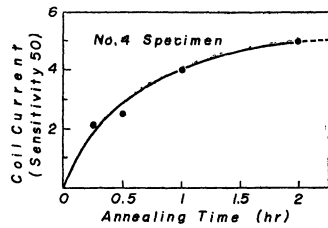


Fig.10 Effect of the annealing time at 675° before deformation on the current change.

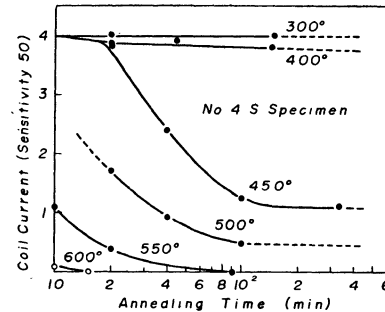


Fig.11 Recovery of the current change of No.4 specimen by annealing.

### 5. 焼なましによるコイル電流変化の回復

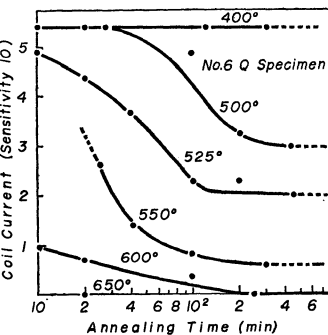


Fig.12 Recovery of the current change of No.6 specimen by annealing.

ここでいま一定割合の回復をするに要する時間の対数を絶対温度の逆数 1/T に対して描くと Fig.13, 14 のようになる。次に Fig.15 はこの両図の直線の勾配から求めたコイル電流値回復の活性化エネルギーを回復率との関係で示したもので、回復が進むほど少い活性化エネルギーで回復が起ることを示している。

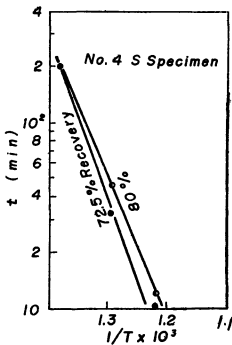


Fig. 13 Relation between  $\log t$  and  $1/T$  of No. 4 specimen.  $t$ : the time required for reaching a given degree of recovered state,  $T$ : annealing temperature.

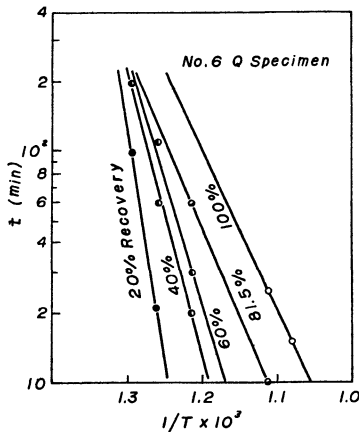


Fig. 14 Relation between  $\log t$  and  $1/T$  of No. 6 specimen.  $t$ : the time required for reaching a given degree of recovered state.  $T$ : annealing temperature.

実測資料を得る目的からオーステナイト系不銹鋼 (AISI 304 型) の薄肉細管 (外, 内径, 管厚がそれぞれ 8.56, 7.50, 0.53 mm) を引張変形した場合について渦流検査 (7 KC) を行つたところ主として次のような結果が得られた。

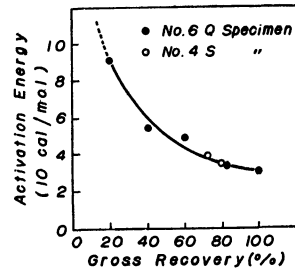


Fig. 15 Relation between the activation energy and gross recovery.

定であると考えられるもの程大きい。

(2) 材質的原因に基づくコイル電流変化に影響すると考えられる因子の中, 引張変形による電気抵抗の変化はごく僅かで磁氣的性質がかなり変化することが認められた。これは非磁性的のオーステナイト相が加工により一部強磁性のフェライト相に変態することを示しているものと考えられ, このフェライト相析出に対応して敏感なコイル電流の指示変化が検出されたものと判断される。

(3) 引張前の熱処理によりコイル電流の変化は影響される。すなわち引張変形によりコイル電流に変化が起るような化学組成の試料では溶体化処理 (1050°, 1/2 hr) したものより引張前に焼なましを行つたものの方が一般に変化が大きく, 焼なまし温度 650° 附近で変化は最大となつた。

(4) 引張変形後の焼なましによつてコイル電流変化は約 400~650° の温度範囲で回復する。また回復が進む程少ない活性化エネルギーで回復が起ることが認められた。

終りに本論文の発表を許可された三菱原子力工業株式会社研究所大井上博所長, 横須賀正寿副所長並びに実験に際し色々の援助を与えられた同社機械研究室長望月四郎氏に対して感謝の意を表します。