Banded Structure の原因について*

古 沢 浩 一**

Koichi Furusawa: On the Cause of Banded Structure (Role of P, Mn, Cr and Ni). It has been suggested that the cause of banded structure in steel is the segregation of phosphorous. But no direct evidence has been offered nor the effect of the other elements cleared out. We prepared the thin segregated region by means of stump welding, and after various heat-treatments examined the change of microstructure. The results obtained were as follows: (1) By slow cooling, the ferrite band appeared in the region where phosphorous was rich and the pearlite band in the region rich in manganese, chromium and nickel. (2) By air cooling, these bands did not appear, or appeared only indistinctly. (3) These were the same as the actual banded structure of steel. The mechanism of these phenomena may be described as follows: If cooling takes place slowly, a small number of ferrites are first deposited in the region with a high phosphorous content, because Ar_3 is higher in the region rich in phosphorous content than in P-poor one. This results in the concentration of carbon in the remaining austenite, and in the migration of carbon atoms away from the P-rich region into P-poor one. Thus ferrite band appears in the region with high phosphorous. If rapid cooling (as air cooling) is applied, a large number of ferrites nucleate, because of the large value of N/G at low temperature, in all regions, and the migration of carbon above mentioned does not take place. On account of these, the ferrite band does not appear or appears indistinctly. In the case of pearlite band caused by manganese, chromium or nickel, the same reasoning may be adduced.

(Received August 24, 1960)

I. 緒 言

熱間圧延鋼材の繊維状組織(banded structure)は P 元素がその原因であると考えられてきた^{(1)~(3)}。しかしフェライトバンドあるいはパーライトバンドの幅は 0.03~0.1 mm であるため化学分析に頼ることが出来ないで、多くの疑問が残されている。その疑問の二三を上げてみると、

- (a) P 元素のみがその原因で他の元素は無関係かどうか。
- (b) 非金属介在物は関係しないか。
- (c) 焼入れた組織に見られる縞状の腐食(etch)むら⁽⁴⁾と、偏析元素との関係はどうか。

以上の疑問を解明するために次の実験を行つた。すなわち P の多い薄い層を人為的に鋼材中に作り、この試料に対して種々の熱処理を施して、もしその組織の変化が熱間圧延鋼材の繊維状組織と同様であるならば、P は繊維状組織の原因をなすものと判断してよいであろうと考えたのである。P 以外の Ni, Cr および Mn についても同様な実験を行い、Ni, Cr, Mn が繊維状組織に対して行う挙動も検討した。

II. 試 料 お よ び 実 験 方 法

** 名古屋工業大学

* 1960 年 4 月東京大会に発表

- (1) A. Sauveur: *The Metallography and Heat Treatment of Iron and Steel*, (1918), 153.
- (2) 陸路: 鉄と鋼, **23**(1937), 533.
- (3) 新制金属講座, 鉄鋼 I, (日本金属学会) p. 56.
- (4) 古沢, 児島: 本誌, **18**(1954), 599.

試料の作製方法を Fig. 1 に示す。A 部分は Table 1 の材料から削り出した 6 mm の角棒で、B 部分は A 部分と

Fig. 1 Specimen.

Table 1 Chemical composition of specimens(%).

Mark	C	Si	Mn	P	S	Cu
2 C	0.49	0.28	0.61	0.015	0.020	0.26
4 C	0.22	0.22	0.45	0.012	0.012	0.23

同一材料を再溶解して Si と Al とで脱酸後 P, Ni, Cr あるいは Mn を Table 2 に示す量添加した薄い(厚さ 2mm と 0.1 mm) 層である。この B 部分は A 部分より P, Ni, Cr

Table 2 Mark and additional element of sandwichted part.

Mark	Remelted steel	Additional element
4 PA	4 C	0.15% P
2 PA	2 C	0.15% P
2 CA	〃	2 % Cr
2 MA	〃	2 % Mn
2 NA	〃	2 % Ni

あるいは Mn の含有量が多く、したがって実際の圧延鋼材中に存在する細い縞状偏析と同程度の巾の偏析層を人工的

に作ったことになる。この層を本論文では人工偏析層と呼ぶこととする。人工偏析層(B部)を接合して Fig.1 の如き試片を作る作業は突合抵抗溶接機によった。接合温度は溶融点以下である。接合試片に対して Fig.2 の熱処理を

Fig.2 Heat-treatment cycle of specimens.
S.C.: Slow cooled 5°C/min.
A.C.: Air cooled 500°C/min(at 900~600°).
W.Q.: Water quenched.
*: Take photomicrographs.

順次行い、冷却速度の相違、拡散焼鈍によつてどのように接合部附近の組織が変わるかを逐次顕微鏡写真におさめた。

III. 実験結果

1. 徐熱, 徐冷

圧接した試料を 1000°×2 hr 加熱後徐冷した組織を Photo.1 に示す。これは 4C と 4PA (Table 2) を接合した部分で、厚さ約 0.1~0.15 mm のフェライト層が 4PA 部分に、また同程度巾のパーライト層が 4C 部分に相接して出現している。

実用鋼のフェライトバンドの巾は 0.05~0.1 mm であるが、この程度の巾の完全にフェライトのみのバンドを人工的に作ることも可能である。約 0.1 mm 厚さの 2PA を 2C の間に挟み、これを 900°×2 hr 加熱後徐冷(5°C/min)した試料は Photo.8 (説明は後述) と全く同様な組織とな

Photo.1 Effect of P. ×480

Photo.2 Effect of Cr. ×150

Photo.1~2 Microstructure of slow cooled specimens from 1000°.

り、人工的に P 元素を偏析させた層内にはパーライトを全く認めることが出来なかつた。

Cr, Mn, Ni を 2% 添加した 2 RA, 2 MA, 2 NA の薄片

を 2C で挟んだ試料では Photo.2 のごとく偏析層はパーライトバンドとなり、隣接部にはパーライトをほとんど認めることが出来ない。このような現象は圧接の際に接合面が酸化され、その酸化膜が作用して生じたとも一応考えられるので、圧接の影響を確かめてみた。Photo.3 は 4C の

Photo.3 Microstructure of slow cooled specimen sandwiched 4C with 4C. ×150

Photo.3 Microstructure of slow cooled specimen sandwiched 4C with 4C.

薄片を 4C で挟み 1000°×2 hr 加熱後徐冷した組織であるが圧接面を識別することが出来ない。したがって上述の如きフェライトバンドあるいはパーライトバンドの出現は圧接の影響ではないと考えられる。

2. 空冷

前述の徐冷の後にさらに引き続いて 1000°×2 hr 加熱後空冷した組織を Photo.4~7 に示す。徐熱試料と比較してみると、空冷試料はすべて圧接層が徐熱試料よりは不明瞭となつている。

3. 焼入

Photo.4 Effect of P. ×480

Photo.5 Effect of Cr. ×150

さらに引き続いて 1000°×2 hr 加熱後水冷した場合、P の偏析層は濃く腐食(5% Nital)され、Cr の偏析層は淡く腐食され Mn, Ni の偏析層は偏析層の内外で腐食の差を識別出来なかつた。

Banded structure を呈する素質をもった実用鋼の焼入組織中に腐食され易い層とされ難い層が交互に圧延方向に

Photo.4~7 Microstructure of air cooled specimen from 1000°.

縞状を呈し並んでいるのを屢々観察する⁽⁴⁾が、これは上記の腐食むらと相対応している。また焼入した実用鋼に腐食むらが見られるということは成分元素の不均一がかなり著

Fig.3 Micro-hardness across the sandwiched part of water quenched specimen.

が、縞状偏析している元素の種類によつてはたとえ腐食むらがなくても、硬度むらが存在する場合があることをこ

の実験結果は示している。

4. 再加熱徐冷

上述の焼入試料を再加熱 (900° $\times$ 2 hr) 後徐冷した組織は、最初の加熱徐冷後の組織と少しも変らない。

5. 焼鈍

1100° $\times$ 5 hr 加熱後徐冷した試料 (Photo.8~11) も第1

Photo.8~11 Microstructure of annealed (1100° $\times$ 5 hr) and slow cooled specimen.

回の加熱徐冷の組織 (Photo.1, 2) と変らない。この程度の焼鈍温度、時間では偏析元素の拡散は殆んどおこらないのであろう。実用鋼の Banded structure はこれを完全に

除去することが困難であるといわれている⁽⁵⁾が、この点も本実験結果と一致している。

IV. 考 察

空冷した試料(Photo.4)ではパーライトとフェライトはほぼ均一に分布している。したがって γ 状態におけるC濃度はPの濃度とは無関係に大体均一に分布していたと考えられる。C原子がほぼ均一に分布した γ が徐冷されてPhoto.1のごとき組織となるためには、冷却過程にC原子の移動を生じたと考える他ない。

加熱して γ 状態となつた試料が徐冷されると、Fe-Fe₃C-P 3元系の α 析出開始面の温度は高磷部分の方が高いために、高磷部においてまず α が析出を開始する。 α の析出にともなつてC原子は α 粒周辺の γ 中に移動してゆく。温度降下とともに高磷部分中の α 粒はその数も大きさも増してゆくが、偏析層の両側の低磷部分はまだ大部分 γ であるために、C原子はこの部分にも移動してゆく。偏析層が極く薄く、冷却速度も小さい場合にはC原子は偏析層外に押し出されて、偏析層内はフェライトのみとなる。Photo.8でフェライトバンドに近い部分は遠い部分よりもパーライトが多くなっているが、これは明らかに高磷部分からC原子が押し出されてきたことを示すものである。

Ni, Mnは α 析出開始面を下降させる元素であり、Crも含有量が少い場合には α 析出開始面を下げるためにNi, Mn, CrはPの場合とは逆の現象をおこすものと考えられる。すなわち γ 状態から徐冷されると、まず低合金部分(偏析層外)が α 析出開始面に達し、フェライトの析出を開始する。フェライト粒の析出成長に伴いその部分のC原子はフェライト粒の周辺の γ 中に押しやられるが、偏析層に接する部分のみではC原子が偏析層内にも移動することが可能であるために偏析層内ではC濃度が高くなり、また偏析層に接した部分ではC濃度が低くなる。したがって偏析層内はパーライトとなり、その周辺部はフェライトのみとなる(Photo.2, 9~11)。実験の結果によれば、偏析元素の種類とは無関係に徐冷すれば境界が明瞭にあらわれ、空冷すれば不明瞭となる。

一方恒温析出するフェライトの形状を観察した結果によれば、高温度において析出するフェライトはその数が少く粒は大きい、低温で析出するフェライトはその数が多く粒は小さい⁽⁵⁾。Mehlも同様なことを認め⁽⁶⁾、これはフェライト核発生速度 N とフェライト粒の生長速度 G との相関関係によると述べている。以上の立場からすれば、徐冷

すれば前述の如き過程によつてフェライトバンドあるいはパーライトバンドを作るが、空冷した場合にはフェライト核が数多く発生するだけでなく、偏析層の内外間のC原子のやりとりを充分に行う時間を与えられないために、明瞭なバンドを作り得ないのであろう。

本実験では非金属介在物の量を測定してはいないが、すべて同一の条件で溶解、脱酸および圧延したのであるから各々に著しい差があるとは考えられない。しかるにPはフェライトバンドを作り、一方Cr, MnおよびNiはパーライトバンドを作っている。したがって非金属介在物は本実験結果には殆んど無関係であると考えてよからう。また、実用鋼のbanded structureに関しても非金属介在物はほとんど関与しないのではなからうか。

V. 結 論

実用鋼のフェライトバンドと同程度の太さの人工偏析層を作り、これに種々の熱処理を行うことによつて、banded structureの現滅に対するP, Ni, CrおよびMnなどの影響を検討し次の結果を得た。

(1) Pはフェライトバンドを作り、Ni, Cr, Mnはパーライトバンドを作る。Pはフェライト析出開始面を上昇させる元素であり、Ni, Cr, Mnは下降させる元素であることがこの原因と考えられる。

(2) 偏析元素の種類とは無関係に γ 状態から徐冷すればフェライト(パーライト)バンドは明瞭に現われ、空冷すれば不明瞭となる。これは γ からフェライト粒が析出する際の核生成速度 N と生長速度 G との相関関係および、Cの拡散が充分に行われるか否かによる。

(4) 焼入れた試料ではPの多い部分は濃く、Crの多い部分は淡くetchされる。また、Pの多い部分は硬度低く、Ni, Cr, Mnの多い部分の硬度は高い。

(4) 1100°×5 hrのsoakingによつても上記のバンドは失われない。

(5) 実用鋼のBanded structureは徐冷すると明瞭に現われ、空冷すると不明瞭となり、焼入れると圧延方向に腐食のむらを作るが、この挙動は人工偏析層による本実験結果と全く同様である。したがって実用鋼のBanded structureも考察で述べた機構によつて現滅するものと考えられる。また本実験の結果はPのみでなく、Ni, Cr, Mnもbanded structureの原因となり得ることを実証している。

終りに臨み終始御懇篤なる御指導を戴いた矢島悦次郎教授ならびに御討議いただいた佐藤知雄学長、名木関口春次郎教授、八幡製鉄関野昌蔵氏、研究に協力下さった日本ビストンリング株式会社井上克己工学士に対し心から感謝いたします。

(5) 矢島、古沢：本誌，20(1956)，614。

(6) Mehl: *Phase Transformation in Solids*, (1951)。