



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 英国ケンブリッジ大学への留学体験

Research in The University of Cambridge, UK

古庄千紘

Chihiro Furusho

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所  
耐食・耐熱材料研究室

副主任研究員(係長)

## 1 はじめに

筆者は2012年に大同特殊鋼株式会社に入社以来、約10年間ステンレス鋼(SUS)やNi基合金の開発、製造技術支援に従事しておりますが、都度発生する開発/支援案件に機動的に対応してきた経緯から、一つのテーマを長く追求するというよりは、広範な合金を扱ってきた技術屋であると自覚しています。そうした中で2016年から社内の留学制度により、英国・ケンブリッジ大学のH. K. D. H. Bhadeshia教授のもと1年間Visiting Scholarとして留学させて頂く機会がございました。今回恐れ多くも「躍動」に執筆させていただく事となりましたので、筆者が留学先で取組んだソフトマルテンサイトSUSの組織変化に関する調査結果についてご紹介させていただきます。

## 2 ソフトマルテンサイトSUSについて

一般的なマルテンサイト系SUSとしてよく知られるSUS410, SUS420J2, SUS440CなどはFe-Cr-Cを主元素としており、高強度と高耐食を特徴とすることから軸受や刃物が代表的な用途として挙げられます。一方でEN1.4418に代表されるソフトマルテンサイトSUSは、低C, NのFe-Cr-Niを主元素に構成されており、Fe-Cr-C系のマルテンサイトSUS対比で強度は劣るものの、靱性や耐食性に優れるため、自動車の燃料噴射部材や水中ポンプ部材などに用いられています。このソフトマルテンサイトSUSは、固溶化熱処理後の急冷処理によってマルテンサイト変態させた後に、適切な焼戻しによって焼戻しマルテンサイト+逆変態オーステナイトの組織にすることで必要とされる強度-靱性バランスに調整するというのが一般的な熱処理です。なお炭素鋼と異なり焼入れや焼戻しの過程でフェライトが生成することがほぼ無いことも特徴的な要素です。代表的な材料特性課題として腐食疲

労や溶接割れなどが挙げられますが、これらは構成相だけでなく旧オーステナイト粒径にも影響するため、マイクロ組織に及ぼす組成や熱処理の影響理解が大変重要になります。

## 3 ケンブリッジ大学

ロンドンから北へおよそ80km、電車で1時間ほどのケンブリッジ市は、街の中に研究部門やカレッジが点在した大学都市であり、またケンブリッジ大学はキリスト教の全寮制修道士養成学校を起源としたカレッジ制を現在でも採用している名門大学です。所属していたDepartment of Materials Science & Metallurgyは街の西部に位置し、ほんの数年前までAlan Cottrellが時々来訪されていたと聞き衝撃でありました。筆者が師事していたBhadeshia教授は、鉄鋼材料研究者の中では大変著名な先生で、もはや説明不要とも思いますが、相変態をキーワードにFe基に限らずあらゆる金属材料を対象に研究されてきた実績がございます。研究室のウェブサイト“Phase Transformation & Complex Properties Research Group”には多数の研究成果が公開されており一見の



Fig.1 Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge. (Online version in color.)

価値があるかと存じます。特にベイナイト鋼に関する研究報告は大変有名で、英仏海峡トンネルの鉄道レール材はBhadeshia教授の考案された炭化物フリーのベイナイト鋼です。

## 4 留学先での研究内容

ソフトマルテンサイトSUSにおける旧オーステナイト組織の微細化は先に述べた腐食疲労特性の向上など工業的観点から重要です。特に熱処理による組織変化は先行研究事例が多く、例えば岡部らの17-4PHの逆変態に関する報告<sup>1)</sup>や、中田らの13Cr-6Ni鋼の逆変態オーステナイトとマルテンサイトとの結晶方位関係の報告<sup>2)</sup>など多数挙げられます。筆者は逆変態オーステナイト生成挙動の昇温速度による影響をDilatometryによる体積膨張率変化と電子線後方散乱回折(Electron Backscatter Diffraction : EBSD)による結晶方位解析から調査しました。

供試材にはTable 1に示すFe-Cr-Niを主元素とするステンレス鋼を熱間鍛造により丸棒加工し、1040℃の固溶化熱処理によってマルテンサイト単一組織(旧オーステナイト粒径: 50~100 μm)にした材料を使用しました。種々の昇温速度における熱膨張曲線から $A_s$ と $A_f$ を評価した結果をFig.2に示します。昇温速度10℃/s以下では、昇温速度の上昇に伴い $A_s$ は単調上昇し収束、 $A_f$ は一旦上昇した後に低下する傾向が認められる一方で、昇温速度10℃/s以上では $A_s$ 、 $A_f$ いずれも一定の値を示し、その温度は計算状態図の $A_s$ 、 $A_f$ 対比で100℃以上も高く、オーステナイト→マルテンサイトの無拡散形成に類する兆候が認められます。昇温速度0.1℃/s、50℃/s

Table1 Chemical compositions (mass %)

C	Si	Mn	Ni	Cr	N
0.042	0.30	0.78	4.49	15.49	0.041

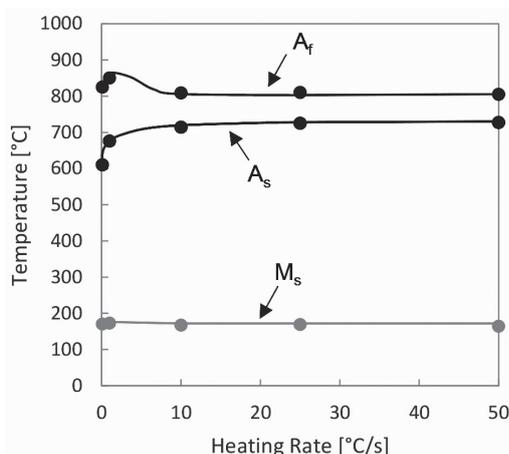


Fig.2 Heating rate dependence of  $A_s$ ,  $A_f$  and  $M_s$  temperature<sup>9)</sup>.

それぞれについて逆変態中および $A_f$ 到達直後に急冷したサンプルのField Emission Electron Probe Micro Analyzer : FE-EPMAによる元素濃度マッピングの結果 (Fig.3) を参照すると、低速昇温の場合にはラス間のNi濃度ゆらぎが確認される一方で、高速昇温の場合はNiの濃度は一様であることから、昇温速度によって逆変態機構の拡散型→無拡散型への遷移を示唆するものと考えられます。

続いて、 $A_f$ 到達直後のマイクロ組織の昇温速度依存性を調査するためにEBSDによるIPF mapならびにIQ mapにマルテンサイト下部組織のKurdjumov-Sachsの関係から逆解析した旧オーステナイト粒界(赤線)を重ねたものをFig.4に示します。試験に供する前の組織と比較すると、昇温速度に関係なく組織の微細化が確認されました。また昇温速度0.1℃/sのオーステナイト粒は粒径50 μm以上の比較的大きな結晶粒と30 μm以下の微細な結晶粒の混粒組織である一方、昇温速度50℃/sのオーステナイト粒は一部粗大な粒が認められるものの全体的に粒径30 μm以下であり、逆変態完了直後の平均オーステナイト粒径は昇温速度50℃/sの方が微細とな

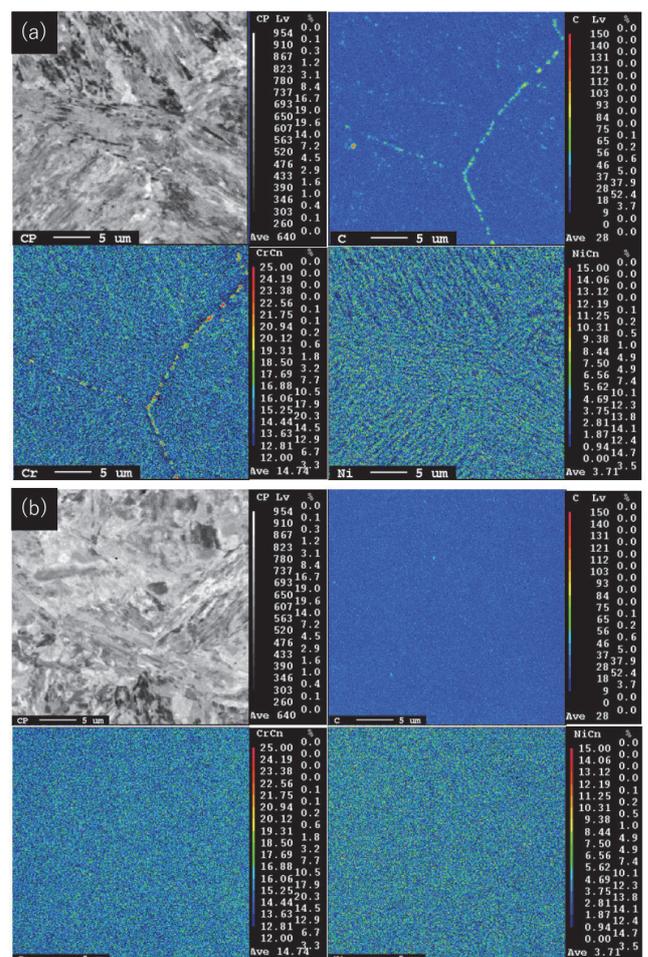


Fig.3 Elemental concentration mapping by FE-EPMA of 15.5Cr-4.5Ni steel quenched after heating to 710℃ at a heating rate of (a) 0.1℃/s and (b) 830℃ at a heating rate of 50℃/s<sup>9)</sup>. (Online version in color.)

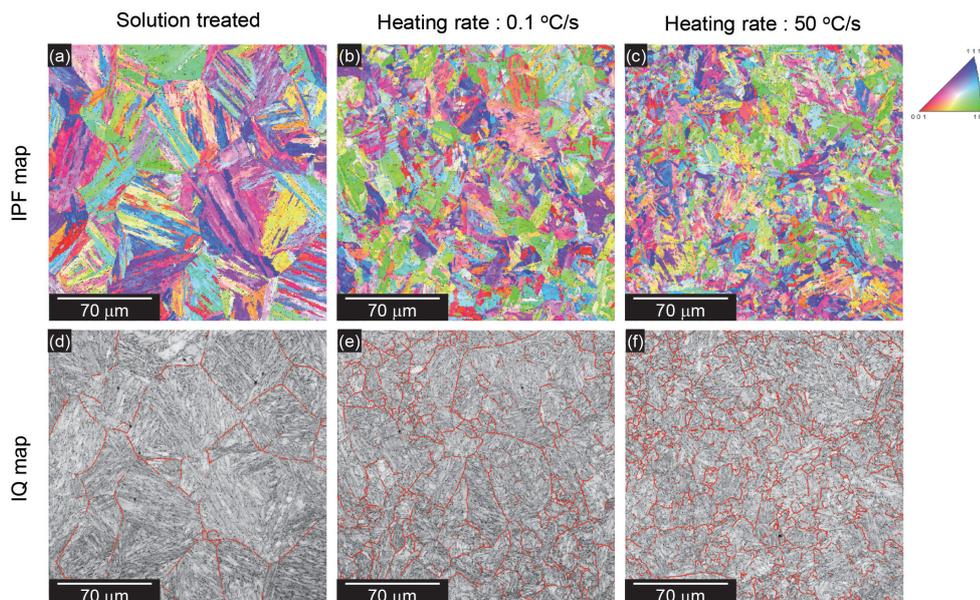


Fig.4 Crystallographic orientation (IPF) maps (a) (b) (c) and image quality (IQ) maps (d) (e) (f) of 14.5Cr-4.5Ni steel reversion treated at 830 °C for 60 s with heating rate of (b) (e) 0.1 °C/s and (c) (f) 50 °C/s. The prior austenite grain boundaries inverse analyzed from the crystallographic orientation are shown as red lines on the IQ maps<sup>8)</sup>. (Online version in color.)

る傾向が確認されました。

昇温過程の組織変化を詳細に調査したところ、低速昇温の場合、まずマルテンサイト下部組織のラス間でNiの拡散を伴う逆変態が生じ、針状のオーステナイトがブロックの長手方向に生成、成長します。さらに温度が上がると旧オーステナイト粒界上に塊状のオーステナイトが生成し、 $A_1$ まで到達すると塊状のオーステナイトも成長しますが、旧オーステナイトの一部は中田らの提唱するバリエーションの制約<sup>2,3)</sup>によってオーステナイトメモリーが達成され方位関係を維持する形で残存します。そのため逆変態完了直後は混粒組織を呈すると考察しました。高速昇温の場合、旧オーステナイト粒の形にそのまま無拡散変態し、無拡散の逆変態が完了した後に、さらにオーステナイトの再結晶が生じたと考えるのが合理的と思われる。18Niマルエージ鋼の逆変態に関する報告<sup>4,7)</sup>によると、無拡散せん断型変態したオーステナイトには高密度の転位を含んでおり、それを駆動力として再結晶することが知られています。今回の実験では保持時間が60 sと短いため、完全に再結晶が完了せず、若干粗大な結晶粒が残ったと考えられます。

## 5 おわりに

帰国してからは留学前と同様、種々のSUS、Ni基等の開発、製造技術支援に従事しておりますが、変わった点として後輩育成の立場になってきている点が挙げられます。英国で強く感じたところとして、日本に比べ各人の仕事のテリトリーがはっきり区切られており、各々の責任範囲外のことは引き受けず、押し付けず、という文化があるように思います。

その良し悪しは明言しかねますが、仕事の割振りを曖昧にしないことは仕事を受ける側の無用なストレスを避ける上で重要だと思いますので、上手く英国的な考え方を取り入れつつ後輩育成に活かせたらと考えます。(実際にはそんなに上手くいかないのですが…)

末筆ですが、本制度を持って留学に送り出していただいた社内関係者には大変貴重な経験をさせていただいたことに感謝申し上げますとともに、留学を受け入れていただいたBhadeshia教授、ラボのメンバー、そして家族にはこの場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 磯部晋, 岡部道生: 電気製鋼, 54 (1983), 253.
- 2) N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki and S. Hashizume: ISIJ Int., 47 (2007) 10, 1527.
- 3) N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki and N. Miyano: ISIJ Int., 51 (2011) 2, 299.
- 4) 細見広次, 芦田喜郎, 波戸浩, 安宅龍, 石原和範, 中村均: 鉄と鋼, 64 (1978) 5, 595.
- 5) 栗林一彦, 堀内良: 鉄と鋼, 73 (1987) 16, 2251.
- 6) 栗林一彦, 堀内良: 鉄と鋼, 72 (1986) 15, 2109.
- 7) 牧正志, 森本啓之, 田村今男: 鉄と鋼, 65 (1979) 10, 1598.
- 8) 古庄千紘, 小柳禎彦, D. Dziejczak and H. K. D. H. Bhadeshia: 電気製鋼, 92 (2021), 71.

(2021年12月20日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

University of Cambridge, Prof. Sir.

Harry Bhadeshia

Chihiro Furusho joined the University of Cambridge as a visiting scientist during 2016 when his employer, Daido Steel, recognised his skills with the award of an opportunity to study abroad. He came with an extensive background on heat and corrosion-resistant alloys, stainless steels, soft-magnetic alloys, and structure-property relationships that accelerate alloy design.

His goal in Cambridge was to undertake a detailed investigation of solid-state phase transformations in Fe-Cr-Ni martensitic stainless steel, including phenomena such as austenite reversion that occur during heating. It is very difficult to prove the mechanism of the transformation to austenite, whether it involves long-range diffusion or is accomplished by displacements. Ideally, it is necessary to establish any shape deformation associated with the phase change, but in the absence of such evidence, a combination of other observations can help.

Chihiro systematically demonstrated a variety of austenite morphologies observed during heating. The greatest heating rates led to particles that are plate-shaped in three dimensions, whereas slower rates were associated with “globular” morphologies. Furthermore, the large heat rates led to an austenite memory effect. Based on this and other observations including microanalysis, he was able to establish the different domains for the transformation mechanisms.

I am proud of the work that Chihiro did in Cambridge including the development of difficult experimental methods. I am also impressed with his continuing contributions since returning to Daido Steel. I wholeheartedly recommend him as a young person who already has made an impact on the subject of steel metallurgy.

(株)デンソー 材料技術部 先進材料開発2室 室長

妹尾 剛士

日頃から自動車部品業界を支えていただいている特殊鋼メーカーの先鋭的な技術者である古庄さんへのエールということで喜んでお贈りしようとお受けしました。が、あらためて過去を拝見すると、ユーザーという立場で専門家とは程遠い私とははるかに異なるお立場の方々が寄稿されており、大変恐縮する次第です。

まずもって、入社4年目に海外の名門大学へ留学できる制度が整備されていることに驚きます。さらにそのようなチャンスに対し勇気をもって掴み取られた古庄さんを尊敬しますし、うらやましくさえ思います。私の入社4年目を思い出すと、日々の目先の業務に追われ、まだまだ“研究開発”をしているといった姿ではなかったですし、ましてや海外に身を置くなど現実として考えることができなかつたと記憶しています。

ケンブリッジ大学でのご研究内容ですが、金属の相変態、組織微細化、またそれを工業的な付加価値として活用する、これらは古くから研究・開発・利活用が進められてきておりますが、まだまだ奥深く、さらなる可能性を感じるものと強く感じさせられました。特に進化する分析・解析技術を駆使して細かく組織を観察・分析され、状態図、昇温速度との関係を丁寧に考察していくといった中身を拝読し、新しい技術を活用しながらも材料学の基本に立ち返った研究をなされており、我々ユーザーの

若手技術者にもぜひ勉強させたい内容であると感じしました。

自動車部品においては製品の高精度化、使用環境の多様化にとまない、高強度で腐食に強く、さらには溶接や鍛造、切削といった加工にも適した材料をと様々なニーズが拡大・高度化してきました。これらに応えるには、成分・熱処理条件・硬さといった比較的制御しやすく、結果がわかりやすい領域を超え、ミクロな組織の作りこみ、工程の細かな条件制御を取り込んだ高度なモノづくりが必要となってきました。これからも水素など社会のエネルギーの変化とともにニーズの多様化が進み、さらに細やかで高精度な組織づくりへの期待が高まっていくものと思います。

これから、先が読みづらく不連続な変化を続けていく社会を支える鋼材、それを使いこなした製品を世に生み出していくには、これまでの材料メーカーとユーザーの関係にとどまらず、より密に、さらには各研究機関の方々と交えた広範な関係を築き、総智総力でことに当たる必要があると思います。古庄さんにはぜひこれらをリーディングする気概を持って更なる研究開発を進めていただけることを期待して私からのエールとしたいと思います。