

加工熱処理工程における二酸化炭素排出量の推定と Mn-Si-C鋼の組織制御によるエコスチール材料設計

土田 紀之*・友田 陽*²・長井 寿*³

Estimation of CO₂ Emission during Thermo-mechanical Process and Eco-steel
Design of a Mn-Si-C Steel by Microstructural Control

Noriyuki TSUCHIDA, Yo TOMOTA and Kotobu NAGAI

Synopsis : The amounts of CO₂ emission in the production of several commercial JIS standard steels have been estimated by the MLCA database prepared by Halada *et al.* Although low alloyed steels show smaller amounts of CO₂ emission from their database, the database can not estimate the influence of thermo-mechanical process. Therefore, the change of CO₂ emission during thermo-mechanical process has been estimated by the annual data concerning consumption of energies and materials publicized from Japanese steel makers. As a result, the change of CO₂ emission related to thermo-mechanical process was estimated to share from 5.1% (minimum) to 7.7% (maximum) of the total amount for production. This change is not negligible but much smaller compared with the influence of increasing the content of alloying elements. By combining the prediction of tensile properties of multi-microstructure steels based on micromechanics and the MLCA database, the Mn-Si-C steels are recommended as a candidate of eco-steels from the viewpoints of excellent tensile properties and low CO₂ emission for production.

Key words : microstructure; mechanical properties; MLCA; thermo-mechanical process; eco-steel; material design.

1. 緒言

地球環境問題の認識の深まりとともに、材料が製造され、使用され、廃棄後にリサイクルによって再生されるマテリアルフロー全体において二酸化炭素放出量など環境への負荷量が少ないことが重要であると考えられるようになった。すなわち、今後の材料設計には特性向上と環境負荷低減の両方を考慮する必要がある。さらに資源枯渇化問題も加わり、材料開発は新しい局面を迎えつつある。製品の環境負荷量の変化に関してはライフサイクルアセスメント(LCA)¹⁾の利用をはじめ、多くの試みがなされている。材料は単独で使われることはほとんどないので、製品のライフサイクルの一部として環境負荷量が評価されるべきであり、材料単独での環境負荷評価はリサイクルを含めると極めて困難である。たとえば、高合金化によって製品の長寿命化や軽量化が図れると、材料製造段階で環境負荷が増大したとしても全体では減少するケースが容易に想定される。したがって、製品設計と連結させた材料設計により製品のライフサイクルにおける環境負荷低減化を検討すべきであることは言うまでもない。その意味において材料製造過程を単独で取り上げるのでは最終的評価にはならないが、各製造過程における評価は基本的に不可欠である。そ

こで本研究では、製品製造への材料提供までを対象として材料特性向上と環境負荷を考慮した材料設計のひとつの手法を模索した。ここで設定した問題は、

- (1) 材料を製造する過程での環境負荷量を推定・算出すること、
- (2) 化学成分の選択と組織制御による機械的特性変化を予測すること、
- (3) (1), (2)で得られた結果を組み合わせることによって、材料特性と環境負荷のバランスを考察すること、の3点である。ただし、(1)については様々な制約があり、現状で検討可能なことを実施した。このような特性予測法と環境負荷量の推定法が進歩すると、その手法を製品のLCAに組み込んで新しい材料を開発するといった展望が出てくると期待される。

本研究では、世界の金属総生産量の約95%を占め資源的にも他の金属に比べて比較的余裕があり今後も大量使用が継続すると予想される鉄鋼材料²⁾を取り上げて、簡単のために環境負荷量と引張特性のバランスのみを考察する。環境負荷量評価には、二酸化炭素排出量等に関して原田ら³⁾がデータ収集・解析し集約したMLCAのデータベースがある。このデータベースの利用によって、フェロアロイなどの製鋼材料を用意する段階までに要する二酸化炭素排

平成11年10月8日受付 平成11年12月17日受理 (Received on Oct. 8, 1999; Accepted on Dec. 17, 1999)

* 茨城大学大学院生 (Graduate Student, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho Hitachi 316-8511)

*² 茨城大学工学部 (Faculty of Engineering, Ibaraki University)

*³ 金属材料技術研究所フロンティア構造材料研究センター (Frontier Research Center for Structural Materials, National Research Institute for Metals)

出量等を共通のデータ・算出方法に基づいて見積もることができる。最初に、日本工業規格鋼に関して原田らのデータベースを用いて材料製造までに排出される二酸化炭素排出量を算出した。

次の問題は加工や熱処理による組織制御の過程における環境負荷量の変化である。化学組成を環境負荷やリサイクル容易性の観点から選んだ場合に、フェロアロイなどの原料の影響は現在のMLCAデータベースによって見積もることが可能である。しかし、組織制御のための加工熱処理工程における評価は現データベースでは一律に見積もっている。熱処理履歴を変化させた場合の環境負荷量への影響は考察できない。すなわち、加熱、圧延、および冷却等の加工熱処理履歴に伴う二酸化炭素排出量を新たに推定する必要がある。そこで本研究では、加熱用の燃料や使用電気量などに関連する諸量を国内の製鉄メーカーから公表されているデータ^{4,5)}と一部国内鉄鋼メーカーからのヒアリングによりデータを収集し、これらのデータを使い加工熱処理段階における環境負荷量ならびに加工熱処理履歴による二酸化炭素量の変化について算出を行った。

引張特性を向上させるためには、化学組成の選択調整のみでなく組織制御が重要な役割を果たす⁶⁾。そこで、化学組成の選択と組織変化に伴う特性変化について、著者らが研究を続けているマイクロメカニクスを用いる手法⁷⁻¹⁰⁾を用いて検討した。ここで化学組成の最終的な選択にあたっては、上述の二酸化炭素排出量のほかに、製鋼工程で取り除くことが困難なためリサイクルの繰り返しによって濃縮する循環性元素や毒性元素および資源的に余裕のない悲観的元素は添加しないことにした。本検討において我々はFe-Mn-Si-C系を選択し、予測計算ならびに実験においては1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼を用いた^{11,12)}。この系は組織制御が比較的容易なために、同じ化学組成の溶鋼を後工程で様々な組織に作り分けることができると予想される。すなわち、マルテンサイトやベイナイトのような単一組織鋼のみでなくフェライト-パーライトなどの様々な組織に変化させることができる。そのような仮想組織に対する引張特性の変化について、上述の手法を用いて化学成分とマイクロ組織を種々に変化させて応力-ひずみ曲線を予測計算した^{13,14)}。

最後に、これらの結果を組み合わせた材料設計の検討例として、低合金鋼の組織制御による多目的利用化について検討を行った。我々は「高性能」と「低環境負荷」の釣り合いのとれた鉄鋼材料を、「エコスティール(Eco-steel)」と呼んでいる。このエコスティールのひとつの候補として、低合金鋼であるFe-Mn-Si-C系を選んだ^{11,12)}。

本検討においては、機械的特性を予測する特性予測法と製造までに排出される環境負荷を算出するMLCAデータベースを組み合わせて、これらふたつの方法を材料設計の手段として用いた。これが材料特性と環境負荷のバランス

を決定する唯一解法とは言い切れないが、それぞれの手法に関して具体的に検討した意義は大きい。

2. MLCAデータベースを用いた各種鋼材の環境負荷量と適用限界

製造までに排出される環境負荷については、原田ら³⁾によるMLCAデータベースを用いた。ここで用いたデータは、金属素材の投入エネルギーと環境負荷に関するものであり、各製造プロセスを詳細に調べることで、各素材のエネルギー消費と環境負荷の重量あたりの原単位を算出した。ここではできるだけ汎用的なデータの算出を目的とし、個別的なデータについては扱っていない。この意味でこのデータベースはLCAの実践の場合とは異なった視点からまとめられている。これは共通の基盤のもとで成分やプロセスを考慮した材料設計への議論を可能とするためである。環境負荷項目については、CO₂、NO_x、SO_xに限定し、算定の際に用いるデータは目的製品単位当たりの原燃料消費等を与える原単位データ、CO₂、NO_x、SO_xの燃料単位当たりの発生量を与える排出係数データ、国内における生産実体の統計データなどである。算定においては、1993年度版の鉄鋼統計年報、1991年度版の資源統計年報などを用いた。

算出方法としては、原単位数に排出係数をかける手法に統一した。合金1tあたりの製造時の環境負荷 Z_k を算出する場合には、以下の式を用いる。

$$Z_k = \sum e_i \cdot y_{i,k} + g_{e,k} + \left[1 - 0.01 \sum e_i / F_{i,k} \right] \cdot g_{p,k} + \left(\sum e_i \cdot C_i - e_c \right) \cdot g_{o,k} + g_{j,k} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\sum e_i \cdot y_{i,k}$ はフェロアロイの製造に要する環境負荷、 $g_{e,k}$: 電気炉の操業による環境負荷、 $[1 - 0.01 \sum (e_i / F_{i,k})] \cdot g_{p,k}$: 鉄の製造に要する環境負荷からフェロアロイとして供給される鉄分を差し引いたもの、 $(\sum e_i \cdot C_i - e_c) \cdot g_{o,k}$: フェロアロイから持ち込まれるカーボンの脱炭に関する環境負荷、 $g_{j,k}$: 素材の仕上げとして加工プロセス j を選択したことによる環境負荷である。ここでは、溶解、加工などで使用するエネルギーや発生する環境負荷は鋼種による依存性がないと仮定している。このデータベースは電気炉を対象としたものであるが、高炉・転炉を対象としたデータにより推定を行ってもその算出結果の結論は変わらない。

Fig. 1に日本工業規格鋼と本検討でエコスティールの候補として挙げた1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼の製造までの二酸化炭素排出量の比較結果を示す。ここでFig. 1における各日本工業規格鋼の化学組成をTable 1に示す。この図において、黒で示した部分はフェロアロイ製造における二酸化炭素排出量であり、オーステナイトステンレス鋼(SUS316: 18Cr-14Ni鋼)とMn-Si-C鋼(1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼)に

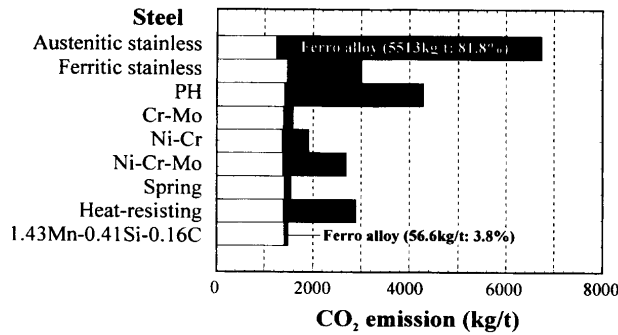


Fig. 1. The amounts of CO₂ emission in material productions and the ratio of ferro alloy to show the influence of alloying elements for various commercial steels. The numerals inserted for austenitic stainless steel and a 1.43Mn-0.41Si-0.16C steel are the CO₂ emissions discharged in the productions of ferro alloys.

Table 1. Chemical compositions of JIS standard steels investigated (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	V	W
Austenitic stainless (SUS316)	0.08	1	2	0.045	0.03	14	18	3	0	0	0	0
Ferritic stainless (SUS430)	0.12	0.75	1	0.04	0.03	0	18	0	0	0	0	0
PH (SUS630)	0.07	1	1	0.04	0.03	5	17.5	0	3	0.2	0	0
Heat-resisting (SUH616)	0.25	0.5	1	0.04	0.03	1	13	1.25	0	0	0.3	1.25
Spring (SUP10)	0.55	0.35	0.95	0.035	0.04	0	1.1	0	0	0	0.25	0
Cr-Mo (SCM1)	0.37	0.35	0.6	0.03	0.03	0	1.5	0.3	0	0	0	0
Ni-Cr (SNC2)	0.4	0.35	0.8	0.03	0.03	1.5	0.9	0	0	0	0	0
Ni-Cr-Mo (SNCM5)	0.35	0.35	0.6	0.03	0.03	3.5	3.5	0.7	0	0	0	0
1.43Mn-0.41Si-0.16C (Mn-Si-C)	0.16	0.41	1.43	0.014	0	0	0	0	0	0	0	0

についてはその数量と全体における割合を図中に示した。ステンレス鋼や析出硬化鋼は他の材料よりも1tあたりの排出量が多く、1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼のそれは他の日本工業規格鋼と比べて小さいことがわかる。Fig. 2にオーステナイトステンレス鋼と1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼それぞれの内訳を示す。図において、円グラフの大きさは全排出量の違いを表している。同じ製造プロセスを選択した場合には、低合金鋼であるほど添加元素量が少ないため、内訳ではフェロアロイ製造における二酸化炭素排出量が少なくなる。オーステナイトステンレス鋼と1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼とを比較すると、フェロアロイの製造に要する二酸化炭素排出量は約100倍違い、全体に占める割合もオーステナイトステンレス鋼が81.8%であるのに対してMn-Si-C鋼は3.8%であった。同じ製造プロセスが選択された場合には、添加される合金元素量が多いほど二酸化炭素排出量が増加することが明らかである。合金元素による環境負荷増加量はNiの影響がいちばん大きく、その他Cr, B, Si...といった順である。このような高合金化による環境負荷増加の傾向は、二酸化炭素排出量だけでなくNO_x, SO_x排出量についても同様であった。

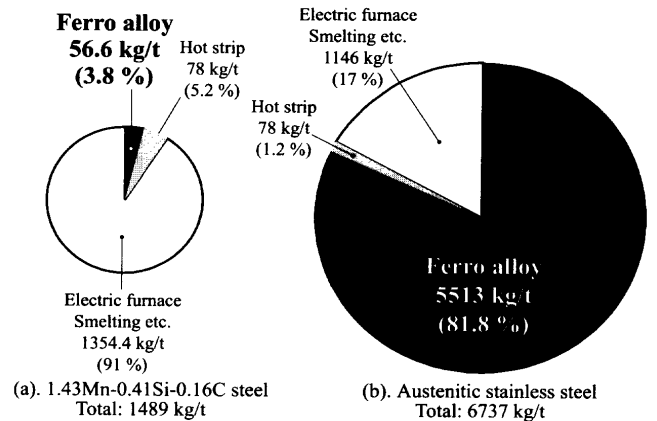


Fig. 2. Comparison of estimated CO₂ emission by the MLCA database between 1.43Mn-0.41Si-0.16C steel and austenitic stainless steel.

3. MLCAデータベースの拡充とMn-Si-C鋼への適用

同じ鉄鋼材料でも目的の組織により加工熱処理工程に違いがあり、それによって排出される環境負荷にも違いが生じることが予想される。しかし、原田らによるMLCAデータベースにおいては溶解・加工などで使用するエネルギーや発生する環境負荷は鋼種に依存しないと仮定しているため、組織の作り込みによる環境負荷の違いは考慮できない。そこで、現在公表されている日本の製鉄工場のホットストリップにおける燃料と電力原単位量のデータ^{4,5)}をもとに、加工熱処理工程を仮定しその時の二酸化炭素排出量を算出し、熱処理工程を変化させた場合の排出量の変化について調べた。先程も述べたように、原田らのデータベースは電気炉が対象となっている。加工熱処理においては電気炉メーカーの資料が入手しにくかったため、高炉メーカーの熱間圧延工程のデータを利用して算出を試みた。

1970年代から1980年代半ばまでの日本全国のホットストリップミルにおける燃料原単位・電力原単位の推移^{4,5)}をFig. 3に示す。年とともに各原単位量は減少し、1970年代前半と1980年代半ばを比較するとその燃料原単位量は約半分に減少している。特に、1974~1976年のオイルショック後の省エネルギー対策による減少が著しい。Fig. 4に日本の製鉄工場におけるスラブの炉装入温度に対する燃料原単位のデータ^{4,5)}を示す。このデータを用いて、スラブの炉装入温度より燃料原単位を見積もることを可能とした。工場は24時間操業と仮定し、燃料・電力原単位は熱処理時間には依存しないとした。最近では燃料原単位減少対策により、スラブ温度が773K付近から炉に装入されることが多い^{4,5)}が、今回の算出では燃料原単位を最大に見積もった場合を想定しスラブを室温から加熱した場合を考え、Fig. 4のデータをもとにホットストリップミルにお

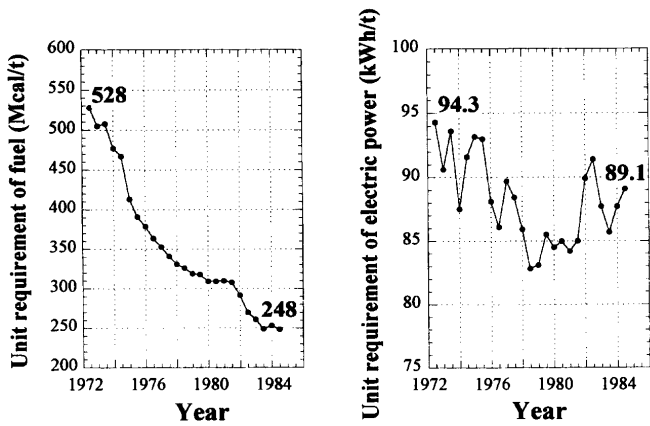


Fig. 3. Changes of unit requirement of fuel and electric power from 1972 to 1984 based on the data publicized from Japanese steel makers^{4,5)}.

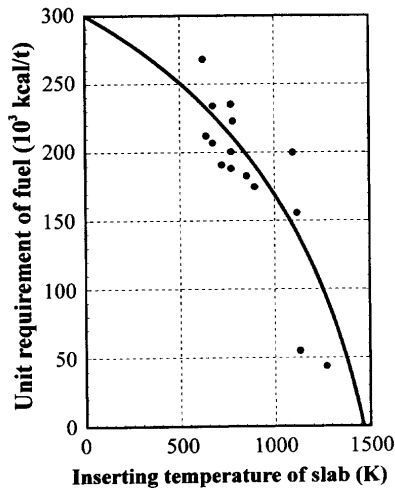


Fig. 4. Unit requirement of fuel vs. inserting temperature of slab summarized by the data publicized from Japanese steel makers^{4,5)}.

ける基本燃料・電力原単位量をそれぞれ 340×10^3 kcal/t, 90 kWh/t と仮定した。

上のデータを元に算出した、1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼における熱間圧延鋼製造までに排出される二酸化炭素排出量と原田らのデータベースによる算出結果の加工熱処理工程での排出量の違いは40 kg/tであり、全体における加工熱処理工程の割合は原田らのデータベースによる算出結果(78 kg/t: 5.2%)よりも多少大きい(90 kg/t: 6%)ことがわかった。これは我々のデータベースを用いた算出での仮定がスラブを室温から加熱した場合を想定したためであり、その分燃料原単位を高く見積もったためであると考えられる。

次に、熱処理方法を変化させた場合の二酸化炭素排出量の変化について算出を行った。ここでは焼戻し処理有無の影響と、加工熱処理工程においてエネルギー原単位が最大・最小の場合を仮定し二酸化炭素排出量の変化を算出した。熱処理方法の変化によりエネルギー原単位の変化が見込まれるのは、加熱炉における γ 化温度と焼戻し処理の有

Table 2. Assumptions for the maximum and the minimum cases in the estimation of CO₂ emission.

	Austenization temperature (K)	Tempering (K)	Remark
Max	1473	773	Slab is heated from room temperature.
Min	1173	—	Slab is inserted to furnace at 773 K.

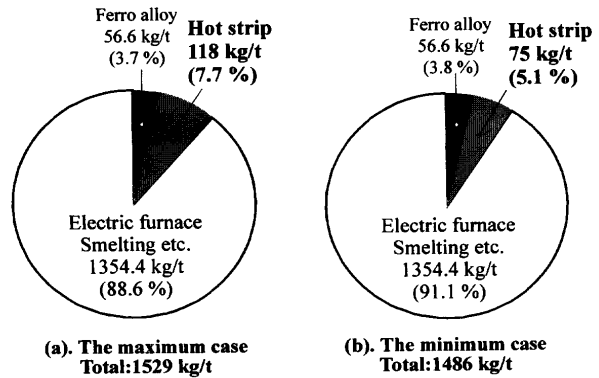


Fig. 5. Comparison of estimated CO₂ emission between the maximum case and the minimum one by the revised database for 1.43Mn-0.41Si-0.16C steel.

無であり、熱処理時間にはほとんど影響されない。また、巻取温度によるエネルギー原単位は差が無い。焼戻し処理を施した場合の二酸化炭素排出量の増加量を算出したところ、773Kの焼戻し処理で1tあたり28 kgの二酸化炭素排出量の増加が見積もられた。

次に、加工熱処理工程における二酸化炭素排出量が最大・最小になる場合について算出を行った。ここでは、それぞれの場合をTable 2に示すように仮定した。ただし、最大の場合にはスラブを室温から加熱し、最小の場合にはスラブを通常の773Kの温度から炉に装入したと仮定した。その算出結果をFig. 5に示す。ここでは加工熱処理工程による二酸化炭素排出量の変化を調べるために、Fig. 2同様に円グラフの大きさは全排出量の違いを表している。最大の場合が118 kg/t、割合にして7.7%であり、最小の場合が75 kg/t、割合5.1%であった。両者の違いは全体の量から考えると43 kg/tで割合としては2.6%の変化であった。この変化はFig. 2で示したような高合金化による二酸化炭素排出量の変化と比べると小さい。

以上より日本のホットストリップ工場のデータをもとに加工熱処理工程における加熱温度や焼戻しの影響について算出することを目的にデータベースを再構築した。その算出結果から組織制御工程による二酸化炭素排出量の変化は製造までに排出される排出量全体を考えるとわずかであり、合金元素添加による排出量変化と比べると小さいことがわかった。

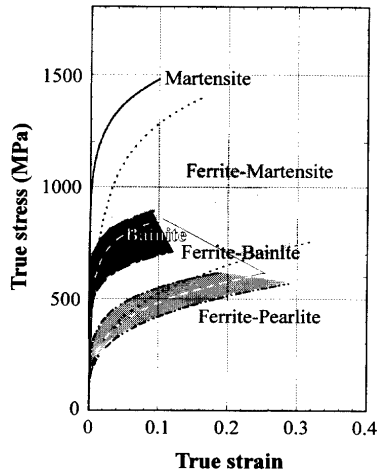


Fig. 6. Predicted true stress-true strain curves of single and multi-microstructure steels obtained by microstructural control in 1.43Mn-0.41Si-0.16C steel.

4. エコステール化のための材料設計の試み

4.1 引張特性予測法の利用と組織制御

1980年代より、厚鋼板や熱延鋼板の製造において鉄鋼材料の材質予測に関する研究が行われている。この材質予測は、大きく分けて組織予測と特性予測のふたつに分かれ、組織予測については鉄鋼に関して熱力学データの整備が進み、このコンピュータプログラムの信頼性はかなり高くなっている。一方特性予測に関しては未発達であり、現場の製造ラインと直結させて使う段階には至っていない。そこで我々は特性予測を発展させるために、ひとつの手法としてマイクロメカニックスの手法⁷⁻⁹⁾によって単一組織鋼のデータベース¹⁰⁾から、単一ならびに複合組織鋼の応力-ひずみ曲線について以下に述べる工夫を行い予測計算¹³⁻¹⁵⁾を可能にした。

複合組織鋼の応力-ひずみ関係の計算において重要なのは、応力とひずみの分配の計算である。これについては、Eshelbyの等価介在物法⁷⁾とMori-Tanakaの平均場の理論⁸⁾を基本に数理塑性学的手法であるWengのsecant法⁹⁾を用いて計算を行った。複合組織鋼の変形においては、各組織間の塑性変形差に起因して内部応力が生じるときに付加的塑性変形による応力緩和を伴う。この内部応力緩和を一般的に推算できる物理モデルはまだ作られていない。そこでWengは、塑性変形におけるある点を弾性係数が刻々と変化する弾性体に置き換えて考え、その時の弾性定数はその点におけるsecant係数を用いることで推算可能とした。このとき内部応力緩和した各組織鋼の応力・ひずみ状態は、単一組織鋼の応力-ひずみ曲線に従うとし、変形特性の予測と制御部会（日本鉄鋼協会）によるデータベース¹⁰⁾を用いて計算を行った。

一種類の化学組成からなる材料を組織制御したときに得られる、単一ならびに複合組織鋼の応力-ひずみ曲線につ

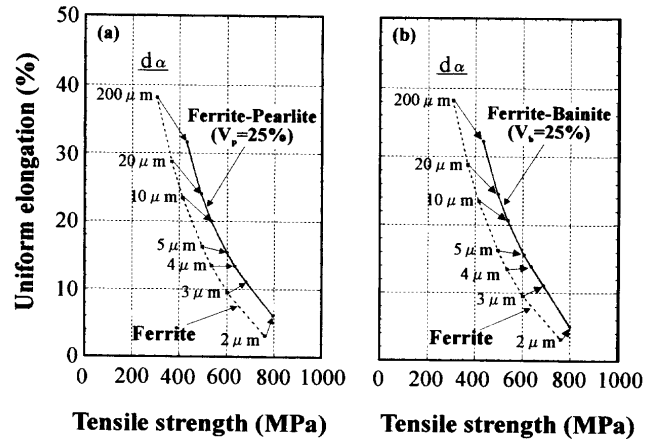


Fig. 7. Calculated tensile strength-uniform elongation balance by changing ferrite grain size in (a) ferrite-pearlite steel¹⁴⁾ and (b) ferrite-bainite steel, where $d\alpha$ means ferrite grain size, V_p and V_b volume fraction of pearlite and bainite, respectively.

いて、本検討で用いた1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼を例にした計算結果をFig. 6に示す。各組織鋼においては、フェライト粒径やパーライトラメラ間隔などの組織因子、オーステナイト化温度や変態温度のようなプロセスパラメータ、複合組織鋼においては各構成組織の体積率が変化することによりその応力-ひずみ曲線に変化が見られ、図のような広範囲な特性範囲が計算結果より期待できる。また、Fig. 7にフェライト-パーライト鋼とフェライト-ベイナイト鋼において、フェライト粒径を微細域まで外挿して変化させた場合の強度-延性バランス変化の計算結果¹⁴⁾を示す。計算においては、化学組成をFe-1.5Mn-0.3Si-0.15C (mass%)、パーライト体積率、ベイナイト体積率は25%、パーライトラメラ間隔は $0.1\mu\text{m}$ とそれぞれ設定した。フェライト粒径が $4\mu\text{m}$ までは、複合組織化においてフェライト単一組織鋼と比べて強度は上がるが伸びは小さくなる傾向にある。しかし、フェライト粒径を $4\mu\text{m}$ よりも更に微細化した場合には、複合組織化により強度、伸びどちらも向上することがわかり、組織微細化による特性向上の可能性を示すことができた。これは、フェライト粒径が微細になるほどフェライトの加工硬化能が小さくなるため、この場合にはパーライトやベイナイトとの複合組織化が均一伸びの確保に好ましいことを示している。

4.2 引張特性と環境負荷量のバランス

Fig. 1, 2, 5での環境負荷の算出結果ならびにFig. 6の予測計算結果より、Fe-Mn-Si-C系の材料は他の工業用鋼と比べて環境負荷量が少なく、合金元素の添加量を増やすことなく組織制御によって広範囲な特性範囲の発現が期待できることがわかった。MLCAデータベースと特性予測法を組み合わせた結果として、Fig. 8に引張強さ、伸び、製造までに排出される二酸化炭素排出量の逆数を1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼と一般工業用鋼についてまとめた結果を示す。これは材料の機械的特性に加えて材料製造における環境への

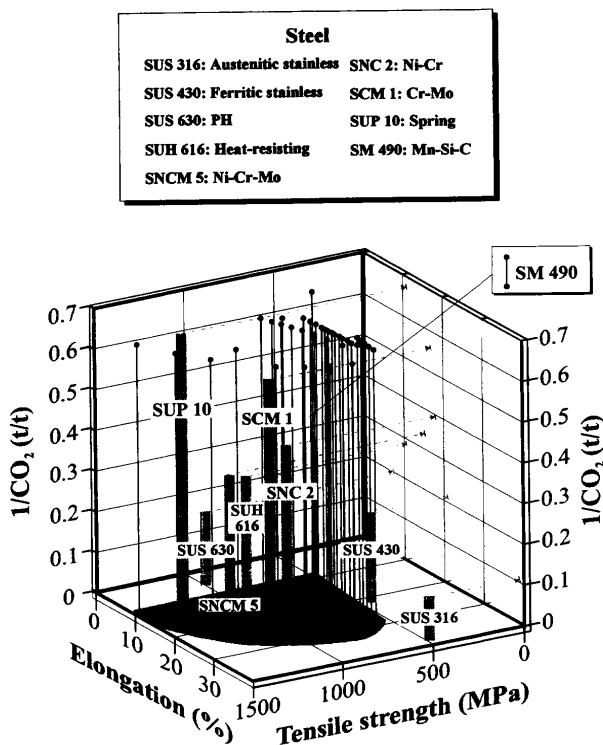


Fig. 8. Balance among tensile strength, elongation and the reciprocal of CO_2 emission in the production for steels; the Mn-Si-C steel (1.43Mn-0.41Si-0.16C: SM490), austenitic stainless steel (18Cr-14Ni-3Mo: SUS316), ferritic stainless steel (18Cr: SUS430), PH steel (17.5Cr-5Ni: SUS630), heat-resisting steel (13Cr-1.25Mo-Ni: SUH616), Ni-Cr-Mo steel (3.5Ni-3.5Cr-0.7Mo: SNCM5), Ni-Cr steel (1.5Ni-0.9Cr: SNC2), Cr-Mo steel (1.5Cr-0.3Mo: SCM1) and spring steel (1.1Cr-0.95Mn-0.35Si: SUP10).

影響も考慮されており、材料設計におけるひとつの目安となる。この図を見ると、強度または延性の優れた材料ほど製造時の二酸化炭素排出量が大きくなる傾向にあることがわかる。Fig. 9に示すような矢印の方向に位置している材料ほど、高性能と低環境負荷に優れた材料である考えられる。1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼については、Fig. 6の結果をもとに組織制御により得られる特性範囲をFig. 8に併せて示した。その結果、1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼は他の工業用鋼よりも機械的特性と二酸化炭素排出量のバランスの優れた材料であり、組織制御により広範囲な特性範囲の発現が期待でき、しかも組織制御による二酸化炭素排出量の変化は少ないことがその算出結果より明らかとなった。

5. 結言

本検討内容をまとめると、以下のようなものである。

(1) 原田らによるMLCAデータベースを用いて、低合金鋼1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼と日本工業規格鋼の熱延鋼板の製造までに排出される二酸化炭素排出量を算出したところ、1.43Mn-0.41Si-0.16C鋼の二酸化炭素排出量は他の工

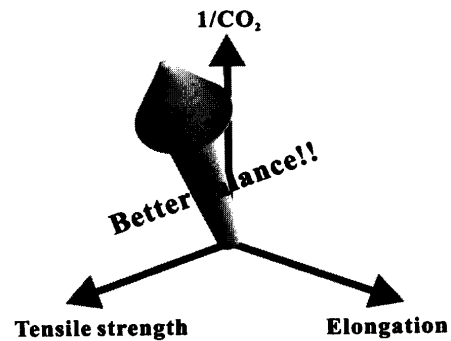


Fig. 9. Better balance of tensile strength, elongation and the reciprocal of CO_2 emission in the production of steels.

業用鋼と比べて少ないことがわかった。これは、高合金鋼ではフェロアロイ製造までの過程における二酸化炭素排出量が大きいためである。

(2) 原田らの手法には加工熱処理工程の変化による環境負荷の変化の算出は含まれていないため、新たに日本の製鉄工場のデータをもとにMLCAデータベースを拡張し加工熱処理による二酸化炭素排出量の違いについて算出を行った。その結果Mn-Si-C鋼の加工熱処理履歴による二酸化炭素排出量の変化は小さく、全体の排出量の5.1%から7.7%で変化すると見積もられた。

(3) MLCAデータベースと特性予測法を組み合わせた「エコスティール材料設計」を提案し、Fe-Mn-Si-C系鋼は、組織制御により環境負荷を増加させることなくその機械的特性を向上させることが可能であることを示した。

本研究を進めるにあたって、貴重な御助言をいただいた金属材料技術研究所の原田幸明博士、井島清博士および梅澤修博士、ホットストリップに関して貴重なご意見をいただいた国内鉄鋼メーカー各社の方々に心より感謝する。本研究に対して、科学技術庁振興調整費による支援を受けた。関係者各位に感謝する。

文 献

- 1) 原田幸明：エコマテリアル辞典，エコマテリアル研究会編，サイエンスフォーラム，東京，(1996)，633.
- 2) 西山 孝：資源経済学のすすめ，中公新書，中央公論社，東京，(1993).
- 3) 環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究調査報告書，未踏科学技術協会環境負担性評価調査委員会編，未踏科学技術協会，東京，(1995).
- 4) 第2版わが国における最近のホットストリップ製造技術，日本鉄鋼協会，東京，(1987).
- 5) 第2版わが国における最近の厚板製造技術の進歩，日本鉄鋼協会，東京，(1984).
- 6) 友田 陽：エコマテリアル辞典，エコマテリアル研究会編，サイエンスフォーラム，東京，(1996)，33.
- 7) J.D.Eshelby: *Proc. R. Soc. (London) A*, **A241** (1957), 376.
- 8) T.Mori and K.Tanaka: *Acta Metall.*, **21** (1973), 571.
- 9) G.J.Weng: *J. Mech. Phys. Solids*, **38** (1990), 419.
- 10) 変形特性の予測と制御，特基研究会変形特性の予測と制御部会編，日本鉄鋼協会，東京，(1994)，239.
- 11) N.Tsuchida, Y.Tomota and K.Nagai : *Proc. 3rd Int. Conf. on EcoMa-*

- materials, The Society of Non-traditional Technology, Tokyo, (1997), 95.
- 12) N.Tsuchida, S.Kotani and Y.Tomota: Proc. Int. Conf. on EcoBalance, The Society of Non-traditional Technology, Tokyo, (1996), 459.
- 13) S.Kotani, N.Tsuchida and Y.Tomota: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 827.
- 14) N.Tsuchida, Y.Tomota, S.Torizuka, K.Tsuzaki and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1462.
- 15) N.Tsuchida and Y.Tomota: *Mater. Sci. Eng.*, in press.