

8. 材料

8.1 鉄鋼材料をとりまく環境の変化

8.1.1 最近 10 年間の時代の変化

(1) 経済情勢

鉄鋼業は大規模設備による多量生産により、良質で安価な鉄鋼材料を社会・産業に安定供給しながら人類社会の発展に貢献してきた。直近 10 年間は国際化、価値観の多様化に伴う新しい時代の流れの中で、鉄鋼材料の役割も、経済構造とともに大きく変わろうとしている。

Fig. 8.1 には粗鋼生産量と日本の全製造業の売上高経常利益率の変化を重ねて示す。鋼材の生産量はまさに経済の景気動向と一致している。1985 年のプラザ合意を契機に日本経

済の発展に伴った急激な円高により、1986 年には粗鋼生産量は 9,600 万 t にまで低下した。生産性の向上、省エネルギーの徹底によりこれを克服し、内需拡大による経済の回復は鉄鋼材料の新たな需要をもたらした。

多様化するニーズに対応して、鋼材の高級化、高付加価値化、小ロット多品種生産、短納期化のための設備増強、流通のシステム化が進められた。空前の景気に支えられたバブル時代の到来であった。

1990 年をピークにいっそうの円高と内外価格差が顕著になり、電炉メーカーや発展途上国の低価格一般品の追い上げが加わり、価格破壊ともいべき時代に入ってきた。高級化、小ロット対応から中級量産品を安価に製造する「モノ造り」への対応が迫られている。生産能力と生産量のギャップ、高付加価値製品の少ないコストメリットが大きな負担となって

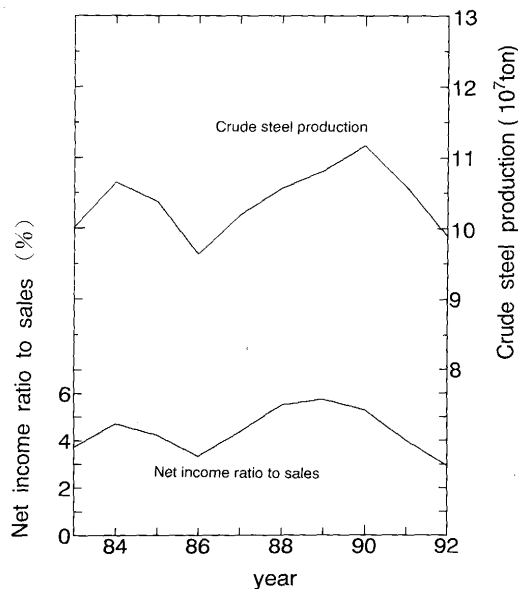


Fig. 8.1. Crude steel production and net income ratio to sales of productive industries in Japan.

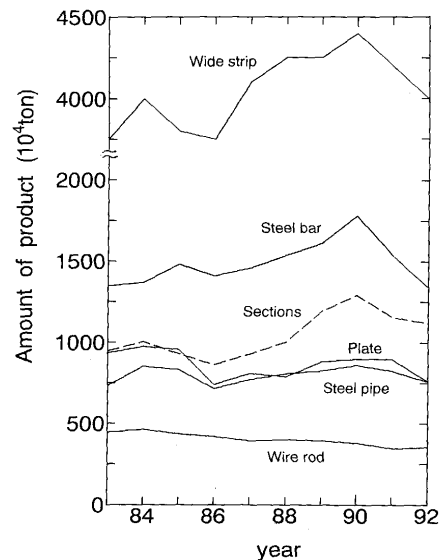


Fig. 8.2.(b) Hot rolled ordinary steel products.

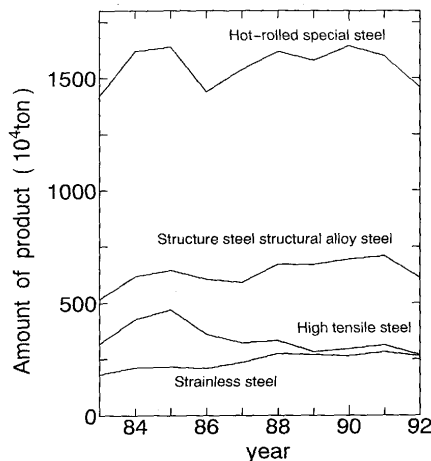


Fig. 8.2.(a) Hot-rolled special steel products.

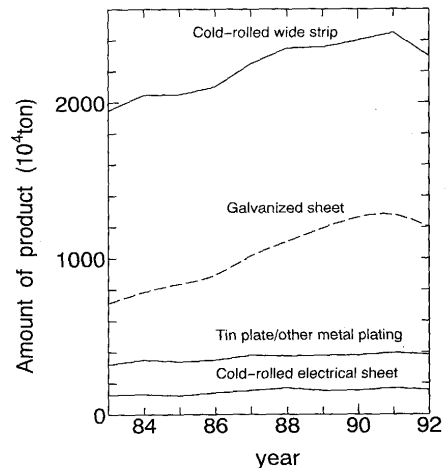


Fig. 8.2.(c) Cold-rolled coated ordinary steel sheet.

いる。高級化路線から一転して低価格製品のニーズが高まる中、日本の鉄鋼業として高品質・高性能を維持しつつ、再生をかけた技術開発、新製品開発に向けて試練を迎えている。

一方、国際化の中で、輸入鋼材の増加、海外企業への技術指導・協力、経営参画も活発化している。企業の海外進出は、国内の空洞化が懸念される中、我が国独自技術の重要性はますます高まっている。

(2) 生産量と製品開発

鉄鋼材料の需要は①民需用（自動車、家電、住宅など）、②社会資本の整備（都市開発、公共土木）、③産業設備、④エネルギー関連設備、に大別される。Fig. 8.2 に各種鋼材の生産量を示す。

普通鋼圧延鋼材は建設、自動車、造船、一般機械向けに70%以上を占める。なかでも広幅帯鋼は次工程の冷延、鋼管、めっき、電気鋼帯向けが主な用途である。特に、冷延、亜鉛めっき鋼板は自動車向けが主であるので、自動車産業の動向が生産量を大きく左右させている。冷延電気帯鋼は少量ながら安定した生産量である。

特殊鋼熱間圧延鋼材は、自動車、産業機械、エネルギー関連設備が主用途である。なかでもステンレス鋼は家庭用および業務用厨房機器、事務用品、建築物の内外装用に着実に量が増えている。

最近10年間の各分野における材料開発の例を Table 8.1 に示す。これらの材料開発、高品質化に大きなインパクトを与えたのは、高纯净鋼・高純度鋼の溶製技術、TMCP技術、

組織制御技術、連続化技術、高寸法精度製造技術の著しい進歩である。

8.1.2 鉄鋼材料をとりまく環境

鉄鋼材料は安価で多量生産が可能であり、多くの特性を具備している、他に例のない素材であり、永くその地位と使命を果たしてきた。構造材としてのみならず、高機能・高級材としてますます必要となってきた。

(1) ライフスタイルと高級材料

ゆとりや快適性の追求、余暇の活用などライフスタイルの変化とともに、自動車、家電製品、住宅に高級材料の適用が拡大した。

なかでも車は住宅環境、余暇の利用の面から不可欠なものとなってきた。我国における自動車の生産額は全製造業生産額の1割以上を占め、鉄鋼業をはじめ、非鉄、プラスチック、繊維、無機材料など多種の素材に影響をもつ幅広い基幹産業の一つとして日本経済を支えてきた。外部規制があったにせよ、燃費低減・排ガス規制は車体の軽量化を促し、薄肉化・高張力化が進められた。軽量材として鉄鋼材料にとって脅威であったアルミニウム、プラスチックは剛性、表面処理性、加工性の点から、その使用量の増加は7%に過ぎず、依然として鉄鋼材料は75%を占めている。エンジン効率向上の点から排ガス温度の高温化に対して高温強度の優れたフェライト系ステンレス鋼、触媒担体材料の開発が進んだ。

北米を中心に車体、足廻りの防錆対策が強く要請され、表

Table 8.1. Typical examples for materials developed.

Field	Products
Plate & Shape	<ul style="list-style-type: none"> • TMCP steel • Direct quench HT60-HT100 • Oxide metallurgy • Low YR steel • Refractory steel • Clad steel • Corrosion fatigue resistant steel • Fixed outer dimension H shape
Line pipe	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-sour ×60-×70 • High toughness ×80-×100 • Coated pipe • Cladding pipe • Anti-CO₂ corrosion steel (2Cr, 13Cr, and duplex stainless steel)
Oil country tubular goods	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-SSCC alloys (low alloy steel, 13Cr, duplex stainless steel, and high Ni alloy) • ERW OCTG
Hot rolled sheet	<ul style="list-style-type: none"> • High formability HT (retained austenite type, multi-phase structure, and high Si) • Ultra-low carbon steel • Graphite steel • Cu-P added steel
Cold rolled sheet	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra-low carbon steel • Bake-hardenable steel • Graphite steel • Phosphorized HT
Electrical sheet	<ul style="list-style-type: none"> • Oriented electrical sheet (1.5%Si-6.5%Si) • Non-oriented electrical sheet
Surface treated sheet	<ul style="list-style-type: none"> • Fe-Zn alloy coated • Ni-Zn, Zn-Al, Zn-Co, Zn-Cr, and Al-Mn electro-plated • Organic composit-coated • Al coated • Vapor deposited • Pre-coated • Lubricative thin organic coated
Stainless steel sheet	<ul style="list-style-type: none"> • Stainless for exhaust pipe, nuclear power plant and spent fuel reprocessing • TMCP type stainless steel
Heat resistance steel	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-hydrogen-attack Cr-Mo steel • High-strength 2.1/4-3Cr steel • High-strength 9-12Cr steel • Nickel base alloy • Intermetallic compound • Chromized steel • Ultra-fine grained SUS321 and 347 • ODS alloys
Steel bar Wire rod Forging steel Others	<ul style="list-style-type: none"> • Free-cutting steel • High strength spring • Code wire • Microalloyed steel • HT bolt • TMCP steel bar • Ultra-high strength fiber • Cables for suspension bridge • Highly purified ball bearing steel • Door-impact bar

- ① Kushiro Fisherman's Worf
- ② Hachinohe Intelligent Plaza
- ③ Seibi Shin-Kansen
- ④ Tokyo Waterfront Subcenter
- ⑤ Minato Mirai 21
- ⑥ Chyuo Linear Express
- ⑦ Kansai Science City
- ⑧ Techno-port Osaka
- ⑨ New Kansai International Airport
- ⑩ Honshi Transport Brides
- ⑪ Kita-Kyusu Techno Center
- ⑫ Phenix Resort Seagaia Ocean Dome

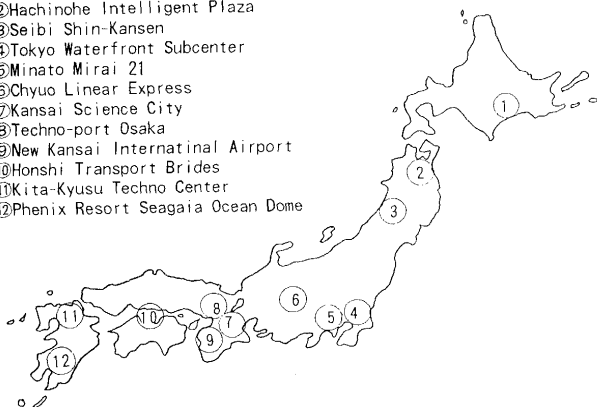


Fig. 8.3 Big projects under construction or planning.

面処理鋼板製造設備能力は一気に増大した。調質鋼に代替する非調質鋼、高寿命を可能にした高纯净軸受鋼、高成形性を有する極低炭素鋼、電動ミラーを初め各種の小型モータの搭載、安全性の観点からドアインパクトバー、ナイロンに代わってタイヤには高強度スチールコードワイヤの使用などユーザの要請に対応して材料の高級化は一段と進んだ。

現在、車の販売量は低下したとは言え、潜在需要は確実にあり、新たな価値観（ライフスタイルや実用性）から安価小型車の台頭、リクリエショナル・ヴィークルの伸びは期待される。

今後、排ガス規制がいっそう進めば、やがて電気自動車や水素自動車の関心が高まり、米国カリフォルニア州での法規制の動きが全世界に広がるであろう。さらにガソリン代替燃料と適合材料も検討されている。ナビゲーションシステム、衝突回避システム、衝突安全性、大型トラックの過積載に対応した動き、ディーゼルエンジンの排ガス規制なども今後進められよう。これらの動きは新素材や新機能の鉄鋼新製品の開発を促進させるであろう。

家電、住宅用には高加工性や接着性など製造上の点や、多様な色調、耐劣化、耐汚染、高硬度など、ユーザの要望に対して、意匠性表面処理鋼板やステンレス鋼の需要が増加した。

(2) 社会基盤の整備

土地と資源のない我が国にとって空間、地下、海洋の利用は必然的方向である。都市開発、海峡大橋、大深度地下開発、高速道路、高速鉄道、港湾・ダムを整備、海上空港建設、造船、ウォーターフロント開発、海洋開発などの開発 (Fig. 8.3) が活発に行われている。

建築物の高さ規制の撤廃を契機に高層建築物の建設が活況を呈している。急激な都市開発需要に伴い、建築用鉄骨・鉄筋の生産が増大している。ビル建設において鉄骨・鉄筋構造の建築着工面積は、最近 10 年間で約 50% の伸びを示している。日本では設計基準上、部材に対して諸外国より大きな耐力が要求されており、溶接性の優れた TMCP 型高張力鋼

が使用され始めている。空間の確保や防災の点から外法一定 H 形鋼や耐火鋼、意匠性やメンテナンス・フリーの点から塗装鋼板、ステンレス鋼や木材との複合材料などが多く使用されるようになった。高層ビル内では先端技術を駆使した通信網の整備や防震技術の向上が進んだ。

河川、港湾の護岸壁や水門に景観と防錆から石積調の重防食鋼矢板やステンレスクラッド鋼が用いられている。

大都市でトンネル建設が活発であり、トンネルの大深度化に伴い、自動化、省力化のための建設機械の開発、施工技術と一体となった製品開発が進められた。

本四連絡橋をはじめ海峡大橋の建設には溶接性の良い TMCP 鋼板、吊り橋用高強度ワイヤが用いられている。

海上空港建設には大規模沈埋セルが多量に使用され、耐塩屋根材として高 Cr フェライト系ステンレス鋼板が採用された。今後、耐食材料を用いた鉄鋼工法の空港建設の可能性も検討され始めた。

これらに使用される材料は特別高級材料ではないが、機能や形状、利用技術との組み合わせにより付加価値を高めている。

地上では、高速道路網の拡大と併行して、新幹線および在来線の高速化が進められている。快適な乗り心地をめざして、動揺防止・車体傾斜制御技術や台車、輪軸の軽量化、騒音対策などの構造と材質に工夫がなされている。また、東京-大阪間を 1 時間で結ぶ超電導磁気浮上列車の実用化を初め、未来交通システムの開発が着々と進められている。

(3) 海洋開発

世界の海上荷動量の 1/3 は原油であり、船殻別の船腹量でもタンカーがほぼ半分を占める。我が国で建造されるタンカーは大型化の一途をたどり、世界最大の 50 万トン級タンカーを建造するまでになった。船殻の鋼板は高張力鋼を使用することによって板厚と船体重量の低減を図っている。鋼板の溶接性を向上させるための TMCP 鋼板、安全性の点から二重船殻構造化、耐腐食疲労性の優れた鋼板などが開発された。

海洋は生物、鉱物など多種多様の資源を包含する広大な空間と水資源を有している。海水揚水発電、金属資源の採取、超高速艇建造など将来の実用化に向けて耐海水高強度鋼が必要である。

また、海洋構造物の技術動向としては極寒海域など使用環境の悪化に対する安全・信頼性の向上、さらに大水深用としての大型化に対応した材料開発が必要となる。

(4) エネルギー

エネルギーは人間生活に必需であり、ニーズが増大することはあっても決して無くなることはない。需要増に対して効率化、安全性確保の点から技術の進歩は欠かせない。我が国の電力需給計画を Fig. 8.4 に示す。

原子力発電は立地条件の制約はあるが、長期的にはエネルギー供給のベースとなる。加圧水型および沸騰水型原子炉の

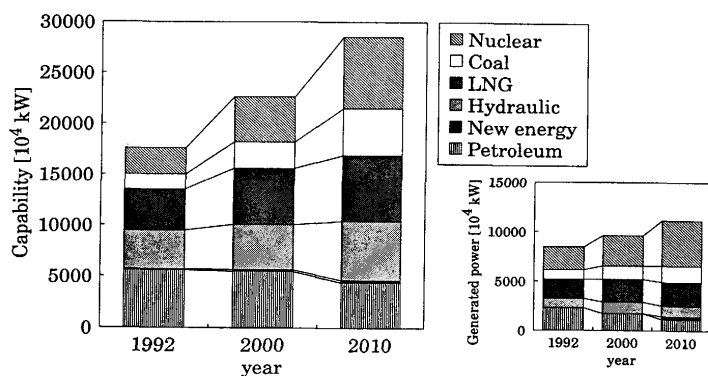


Fig. 8.4. Forecast of energy supply and usage.

格納容器には高強度・高靱性極厚鋼板が、配管・蒸気発生器・周辺機器には耐食性の優れたステンレス鋼や高合金が開発された。高温水による金属の溶出低減のための表面改質、高度燃焼技術に必要な高温での強度、耐食性の優れた新材料、次世代高速増殖炉用材料、再処理設備用材料などの開発が進められた。

石油・天然ガスの油井環境の過酷化から、油井管用に高温での CO_2 , H_2S , Cl^- の存在下の耐食性、耐 SSCC 性の優れた鋼管として低合金高強度鋼、13Cr 鋼、二相ステンレス鋼、Ni 基合金が実用化された。

ラインパイプ用としては、低温靱性と耐サワー性に優れた X-70 級の厚肉高強度耐サワー用溶接大径鋼管の開発や、より過酷な腐食性条件下では 13Cr 鋼、二相ステンレス鋼、高合金の二重管の適用も進み、X-80~X-100 級の材料の実用化も近いものと思われる。

クリーンエネルギーとして電力用、都市ガス用に LNG の使用が増大している。輸送船、輸送管、貯蔵タンク、気化装置用に 9%Ni 鋼、ステンレス鋼、Al が用いられている。熱膨張変化の小さいインバー合金も検討されている。全国的規模でのラインパイプ網用配管材料や天然ガス燃焼排ガス用耐腐食鋼の新たな選定も必要となろう。

今後石炭火力は増加する予想であり、高効率化、環境問題から蒸気温度を高め、圧力を増した超々臨界圧操業や、加圧流動床ボイラー用に高強度フェライト系やオーステナイト系ステンレス鋼が開発された。

揚水発電はクリーンエネルギーの代表的なものであり、発電能力の長期計画では 1992 年には 1,850 万 kW、2000 年には 2,470 万 kW、2010 年には 3,200 万 kW にも達する。設備の大型化に伴い、極厚 HT80 について HT100 が使用されようとしている。

新エネルギーとして太陽光、風力、燃料電池、メタノールなどに加えて、ゴミ焼却発電は重要な位置づけになろう。廃棄物焼却炉は全国に約 2,000 カ所ほどあるが、発電能力を有するものは数%にしか満たない。発電量はまだ 36 万 kW 程度であるが、今後建設が加速されるであろう。

一方、エネルギー効率を高めるための高圧送電鉄塔、省エネルギーのホープとしてコ・ジェネレーション、燃料電池な

どが期待される。

(5) 環境問題

地球人口の増大、資源エネルギーの消費、廃棄物問題、 CO_2 濃度の上昇と気候温暖化、 NO_x や SO_x による酸性雨に起因する森林破壊や砂漠化など世界規模での環境問題が生じ、ともすれば生産効率偏重ぎみであった産業科学技術の発展は転機を迎えている。人間と自然との調和や人間らしい生活などを可能とするような、人と環境に優しい新しい技術体系を新たに構築していくことが地球的な課題となってきている。

省エネルギー、高効率化、回収技術、代替エネルギー開発、クリーンエネルギー開発のためのシステムや装置開発に新たな材料が必要となっている。

製鉄業は典型的なエネルギー多消費型産業であり、我が国のエネルギー消費全体の約 13% を消費している (1990 年)。しかし、オイルショック以降、我が国製鉄業は省エネルギーに積極的に取り組み、現在では、消費エネルギー原単位やエネルギー回収率では主要製鉄国中世界トップである。

廃棄物は数千万トン/年の規模まで増大しており、その処理とエネルギーへの転換や素材としての再利用は深刻な問題である。高効率ゴミ焼却技術、ゴミ焼却発電、スクラップの分離・再生・利用技術、再生容易な構造設計などが進められている。

(6) インテリジェント化

豊かさ、ゆとりの追求の時代になり、ライフスタイルの変化に対応した素材の需要は今後ますます増加するものと考えられる。

鉄鋼材料は他の素材 (Ti, Al, プラスチックなどなど) に比較しながら新たな性能を追求し、特に情報・エレクトロニクス、ライフサイエンスなど知識集約的先端技術分野には新しい高性能材料が求められている。鉄鋼材料の極限性能を追求することにより、これらの用途に応じた「メゾスコピックな材料開発」や「ファインスチール化」の努力が払われている。

半導体の集積度の向上とともに、よりクリーンな環境で微細加工が要求される。そのために、配管系に用いられるステンレス鋼も発塵の少ない清浄鋼や腐食性ガスに対する高耐食性材料への転換が著しい。これら先端材料は食品産業や医療産業のより高度化にも適用されていくであろう。

8.1.3 今後の展望と課題

鉄は産業装置用材料としてのみならず人間生活に必需な材料であることには変わりがない。日本の鉄鋼業は先端技術向上と高付加価値でその地位を高めてきた。今後は、ポードレス経済の進展に伴い、素材面での国際競争も激化し、グローバルな視野での対応が要求される。

一般品を安価に供給するだけでは国際競争力を失うであろうし、高付加価値製品の追求だけでは量的に望めない環境下において、鉄鋼業は成熟産業としての強みを活かす必要があ

る。鉄鋼業に蓄積された多くの中核的保有技術を活用した高機能製品開発と利用技術の開拓、品位安定製造技術、フレキシブル製造設備開発と対応した材料設計技術開発を進め、新たな鉄鋼材料の市場創出を図らねばならない。そのためには、機能、限界性能を飛躍的に変える指導原理の追求が必要であり、設備開発や材料開発にはすでに欧米で先行している共同研究、共同開発が我が国でもより活発化することが期待される。

90年代から21世紀にかけ、人類の最大課題は地球環境対策になろう。産業革命以来、人類が獲得してきた豊かさのツケともいうべき地球環境破壊が表面化したわけである。自然分解しないプラスチック公害が地球に蔓延し、二酸化炭素などによる地球温暖化が大きく立ちはだかってきた。そのため、産業廃棄物のリサイクル技術や石油の代替エネルギー技

術、省エネルギー技術が、再び脚光を浴びようとしている。

環境問題に対して、材料の面からはエコマテリアルとして、材料選定、合金設計、製造プロセスの高度化、材料の高寿命化などの面から新たな取り組みが始まっており、従来の材料の利用法の高度化が期待される。特に、スクラップは貴重な鉄源であり、不純物元素の除去技術の開発、除去不可能な元素の材料特性や使用可能限界を明確にし、利用法を開発することは高純度鋼の価値を見直すことにもつながるであろう。

情報・電子、ライフサイエンス、宇宙などの先端科学技術分野においては、未踏分野を切り開く革新的な研究開発の多くは新たな材料にシーズを求めており独創的な研究開発、特に物質・材料系科学技術の重要性がより高まっている。

8.2 鉄鋼材料開発を支えた学術・技術の進歩

8.2.1 基礎理論

材料技術の領域における基礎理論は、一昔前の転位論やトランジスター理論などのように、技術を先導する役割を演じることもあるが、一般的には地味で、脇役あるいは補佐役に終る場合が多い。しかし、「目からうろこが落ちる」ような新しい理念は、たとえ些細なことではあっても、技術の若返りと未来への方向づけに不可欠である。ここでは過去10年間を顧みて、「目からうろこ」的な四つの項目について解説する。なお、四つ目の「オキサイド・メタラジー」は別項でも採り上げられるが、本邦で芽生えた新しい技術の大成を願って、本項でも敢えて採択した。

(1) 計算状態図

状態図を実験だけでなく、熱力学的解析とコンピュータ計算によって構成することを目的として「計算状態図国際学会; CALPHAD」が結成されてから約20年が経過した。発足当初は、それまでの実験データの解析に主力が注がれたため

に、材料開発に役立つような成果は少なかったが、Thermo-Calc (スウェーデン) や Chem-Sage (ドイツ) などの計算ソフトがしだいに整備され、実用的な多元系の状態図が瞬時に作図されるようになり、近年では材料設計や組織制御の基礎資料として盛んに活用されている。

計算状態図の第1の利点は Fig. 8.5 に例示したように、0.001~0.01% 程度のマイクロ・アロイング成分の影響を明確に把握できること。第2の利点は Fig. 8.6 のように、多種類の元素を複合添加した鋼の相平衡をかなりの精度で推定できることである。さらに最近では、平衡状態だけでなく、拡散に基づく相変態や組織変化の様相を推測する DICTRA (スウェーデン) が計画され、凝固過程や析出現象の定量的解析に利用されている。

本邦では、状態図計算の基礎理論、特に規則相-不規則相の平衡についてのクラスター変分法による解析や、強磁性材料に関する状態図の解明などに優れた成果が得られた。しかし、「成熟した材料=鉄鋼材料」のさらなる進展には、状態図

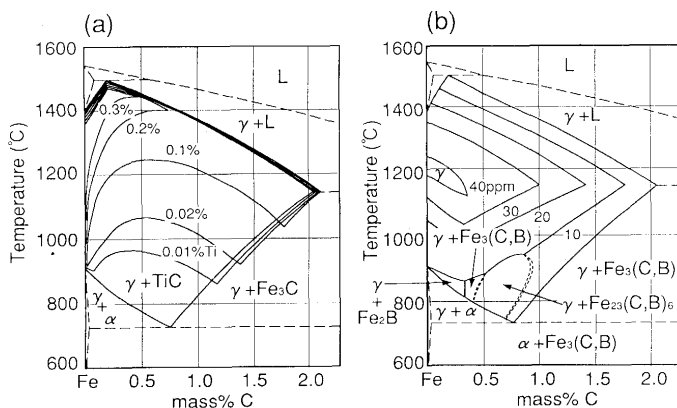


Fig. 8.5. Effect of micro-alloying of Ti and B on the austenite region in Fe-C system.

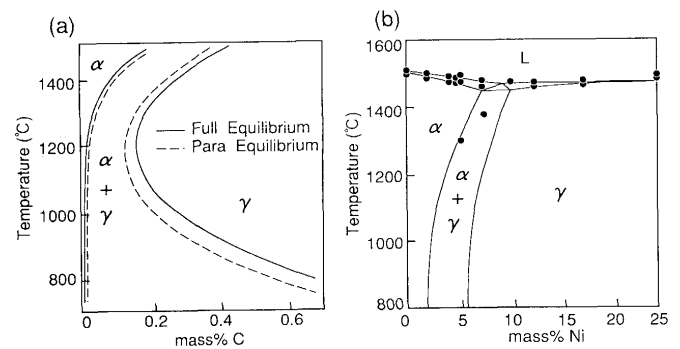


Fig. 8.6. Equilibrium between α and γ phases in multi-component iron alloys. (a) Fe-2% Si, 1% Al, 0.5% Mn, 0.5% Ni, 0.5% Cr, and C system, (b) 75% Fe-Cr-Ni system.