

UDC 669.112:681.3

## 鉄合金の状態図のコンピュータ解析 (2)

西 沢 泰 二\*・長谷部 光 弘\*

## Computer Calculation of Phase Diagrams of Iron Alloys

Taiji NISHIZAWA and Mitsuhiro HASEBE

## 5. 計算状態図の実例

前章までに鉄系状態図のコンピュータ解析について的一般論を述べたので、本章では、その成果の代表例について説明する。

## 5.1 2元系状態図

## 5.1.1 Fe-C および Fe-N 2元系

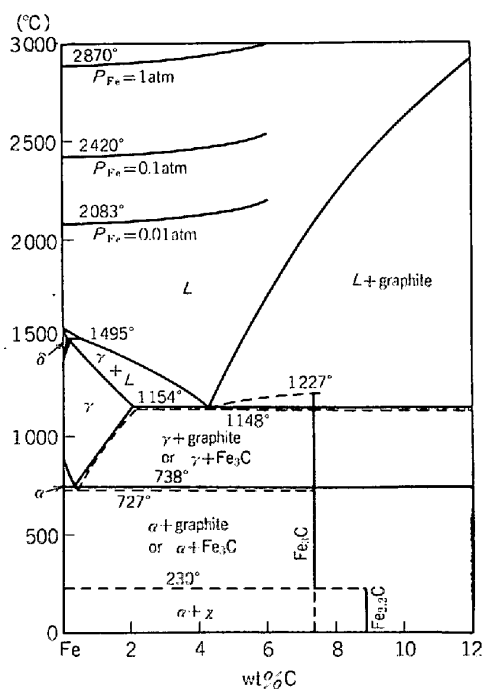
Fe-C 系の状態図は合金状態図の元祖ともいえるべきもので、古くから多くの研究が行われてきた。この系の“実験状態図”については田中による詳しい集録<sup>32)</sup>を参照されたい。一方、熱力学的検討もさかんに行われ、とくに DARKEN, GURRY<sup>33)</sup>や BENZ, ELLIOTT<sup>34)</sup>らによる研究は、本稿でいうところの“計算状態図”の先駆的なものとして特筆に値する。

Fe-C 系状態図の本格的なコンピュータ解析は CHIPMAN<sup>35)</sup>と ÅGREN<sup>36)</sup>によって行われた。図 22 は CHIPMAN による計算状態図の全容であり、また図 23 は  $\alpha$ Fe に対する  $Fe_3C$  と黒鉛の固溶度をアレニウス・プロットの形式で示したものである。 $\alpha$ Fe に対する  $Fe_3C$  の固溶度は、従来は DIJKSTRA<sup>37)</sup>や WERT<sup>38)</sup>らの内耗測定にもとづいた経験式；

$$C\% = 2.55 \exp\left(-\frac{9700 \text{ cal}\cdot\text{mol}^{-1}}{RT}\right) \dots\dots (10)$$

が広く採用されてきた。しかし CHIPMAN の計算値は図

23 に破線で示したように、(10)式よりもはるかに低濃度側にある。この相違について筆者らはつぎのように考える。すなわち Fe-C 系では、C原子が侵入型拡散しさえすれば平衡が成立するのではない。この状態は部分平衡

図22 Fe-C 系計算状態図<sup>35)</sup>

昭和 56 年 3 月 4 日受付 (Received Mar. 4, 1981) (依頼技術資料)

\* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980) 鉄合金の状態図のコンピュータ解析 (1) は鉄と鋼 Vol. 67 No. 11 (9月号) に掲載、目次は以下のとおり

1. はじめに
2. 実験状態図と計算状態図
3. 状態図計算の概要
  - 3.1 自由エネルギーの近似
  - 3.2 パラメータの決定と状態図の計算
4. 磁気変態にもとづく相平衡の異常
  - 4.1 磁気変態にもとづく固溶度線の異常
  - 4.2 磁気変態にもとづく 2 相分離線 (または 2 相分離面) の異常
    - 4.2.1  $\alpha$ Fe-X 2 元系の 2 相分離線
    - 4.2.2  $\alpha$ Fe-X-Y 3 元系の 2 相分離面
    - 4.2.3 Co の添加による磁気変態の影響の助長

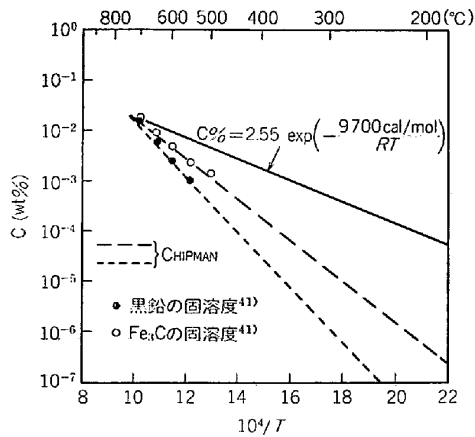


図23  $\alpha\text{Fe}$  に対する  $\text{Fe}_3\text{C}$  (または黒鉛) の固溶度のアレニウス・プロット

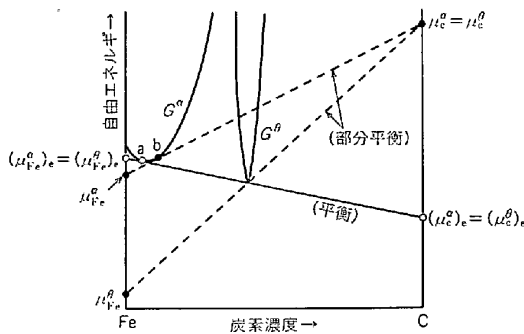


図24 Fe-C系における部分平衡(説明図)  
(C原子については平衡の条件;  $\mu_c = \mu_c^0$  が成立する)が, Fe原子については成立していない

(図24の点線)に相当するのであって, 眞の平衡に達するにはFe原子もある程度移動することが必要である。したがって, 約  $400^\circ\text{C}$  以下の実測値にもとづく WERTらの(10)式は部分平衡の状態における  $\text{Fe}_3\text{C}$  の固溶度を示すものと認識すべきである。 $\alpha\text{Fe-C}$ 系の固溶度についてのこの種の議論はかなり古くから繰り返され, 平衡固溶度の測定がまたれていた<sup>35)39)40)</sup>。図23に示した実験値は最近筆者ら<sup>41)</sup>が平衡法によつて求めたもので, CHIPMANの計算値とよく一致している。

つぎに Fe-N系も, 実用上の重要性等の理由で古くから研究されてきた系である。N<sub>2</sub>は1気圧では鉄中に極めて微量( $\alpha\text{Fe}$ に対してCの約1/10,  $\gamma\text{Fe}$ に対してCの約1/100)しか固溶しない。この場合の状態図の熱力学的解析は McLELLANら<sup>42)</sup>によつてなされている。一般にいうFe-Nの状態図はNH<sub>3</sub>等との反応によつてNをドーピングした場合のものであつて, HILLERTら<sup>43)</sup>や ÅGREN<sup>36)</sup>がコンピュータ解析している。図25に ÅGRENによる計算状態図を示した。

### 5.1.2 Fe-X 2元系

鋼中の合金元素Xの機能を考えるときに, まず問題となるのはXが $\alpha$ 相を安定化するか,  $\gamma$ 相を安定化するか

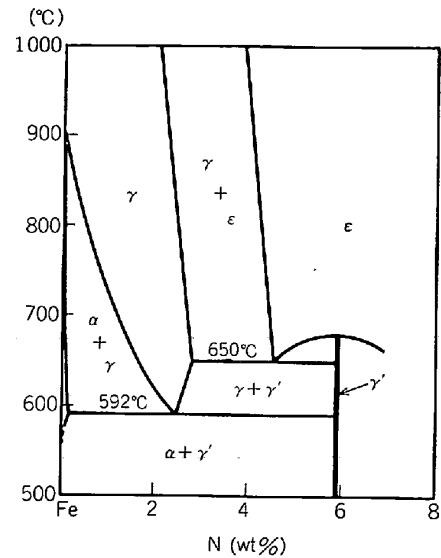


図25 Fe-N系計算状態図<sup>36)</sup>

ということである。この点を定量的に調べるには, Fe-X 2元系の状態図における  $\alpha/\gamma$  平衡を解析することが必要であつて, ZENER<sup>44)</sup>をはじめとして多くの研究<sup>45)~47)</sup>が行われた。本邦では和田<sup>17)48)</sup>による優れた研究がある。

4章の冒頭でも述べたように, 鉄のA<sub>3</sub>変態は $\alpha\text{Fe}$ の強磁性によつて引き起こされた異端者的な変態である。したがつて Fe-X系の $\alpha/\gamma$ 平衡についても強磁性の効果を無視するわけにはいかない。そこで, 強磁性を考慮した自由エネルギーの近似式(5)~(7)を使つて解析してみた<sup>49)</sup>。図26は $\alpha$ 安定化型の元素を添加した場合の, いわゆる $\gamma$ ループである。図中で Fe-Be系と Fe-Cr系の $\gamma$ ループは下ぶくれが著しく, とくに Fe-Cr系はよく知られた極小点をもつが, これらは強磁性の効果にもとづくものである。一方, 図27は $\gamma$ 安定化型元素を添加した場合の状態図で, Fe-Co系の $\alpha/\gamma$ 平衡線が異様に曲りくねっているのも, やはり強磁性の効果であつて,  $\alpha\text{Fe}$ とfcc Coの両者の磁気変態を考慮した計算の結果は実測値とよく一致した。

Fe-X 2元系のうちで相平衡が熱力学的に解析され, 状態図が計算されたものを前節の Fe-C, Fe-N系も含めて表4に掲げた。また, これらの中の代表的なものを図28, 29に図示した。

## 5.2 3元系状態図

### 5.2.1 Fe-C-X 3元系

Fe-C-X 3元系は鉄鋼材料の基本系であつて, 本邦においても村上, 佐藤, 武田, 武井らによつて卓越した研究が行われた。しかし“計算状態図”は表5に見られるように, ほとんどがスウェーデンのHILLERT, UHRENIUSらのグループによつて行われたものである。代表例として Fe-C-B<sup>82)</sup>, Fe-C-Cr<sup>83)</sup>, Fe-C-Mo<sup>83)</sup>, Fe-C-W<sup>81)</sup>の各3元系の等温状態図と $\gamma$ 単相域の温度変化を図30~

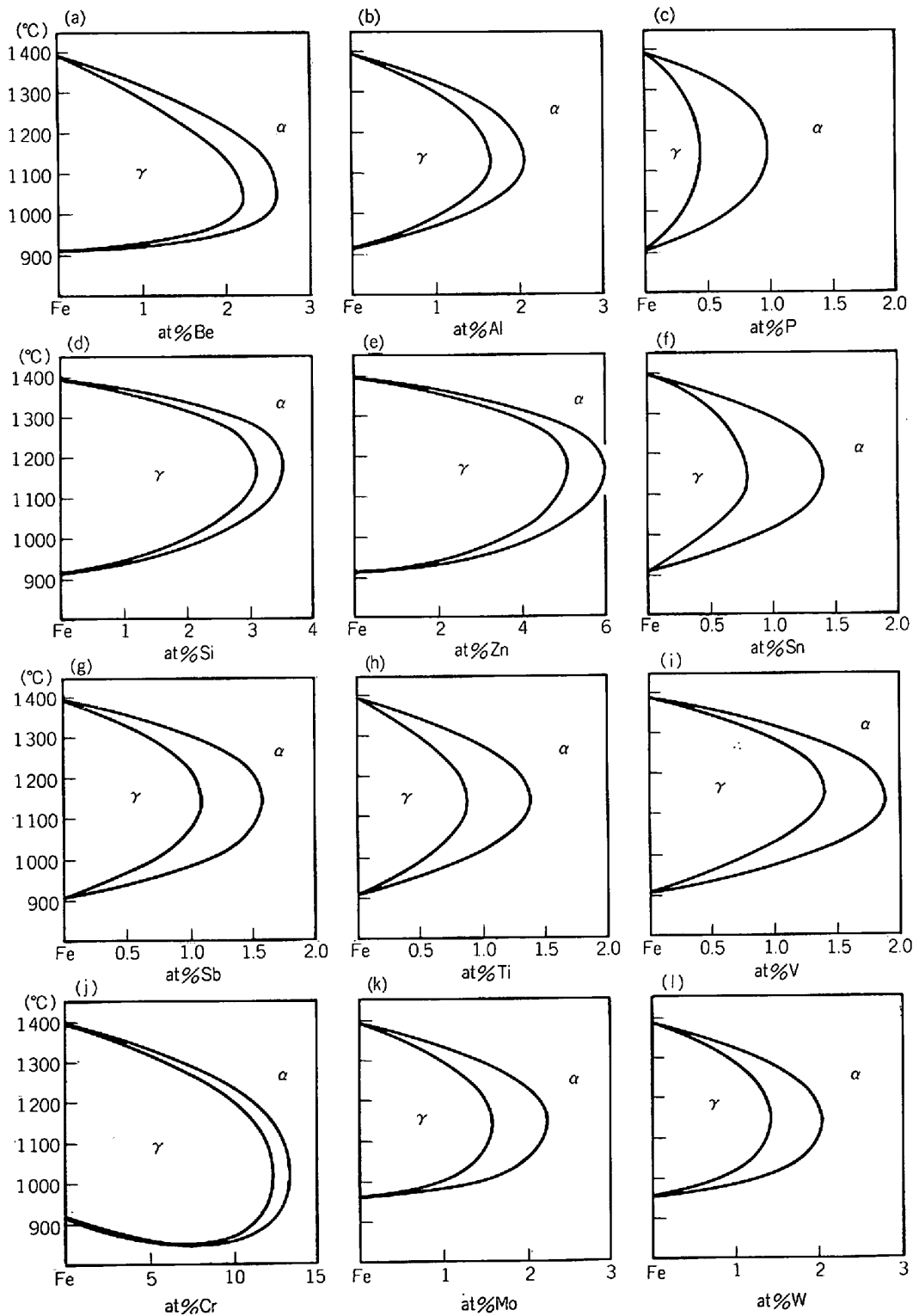


図26 Fe-X 系の  $\alpha/\gamma$  平衡の計算例(I) :  $\gamma$  ループ

33 に示した。

Fe-C-X 3 元系の共析点, すなわち  $\gamma$  単相域の最低点は合金鋼の熱処理を考える際の最もたいせつな要点である。図 34 (a) は 1939 年に BAIN<sup>96)</sup> が実験状態図を集約して描いたもの, 図 34 (b) は UHRENIUS<sup>93)</sup> が計算に

よつて求めたもので, 両者にわずかながら不一致が見られる。実験と計算の両面からさらに検討を要すると思われる。なお図 34 (b) の図中の・印は,  $\gamma$  相と平衡する炭化物相の種類が変わる境界組成を意味している。

なお表 5 に掲げなかつたものの中で重要と思われるも

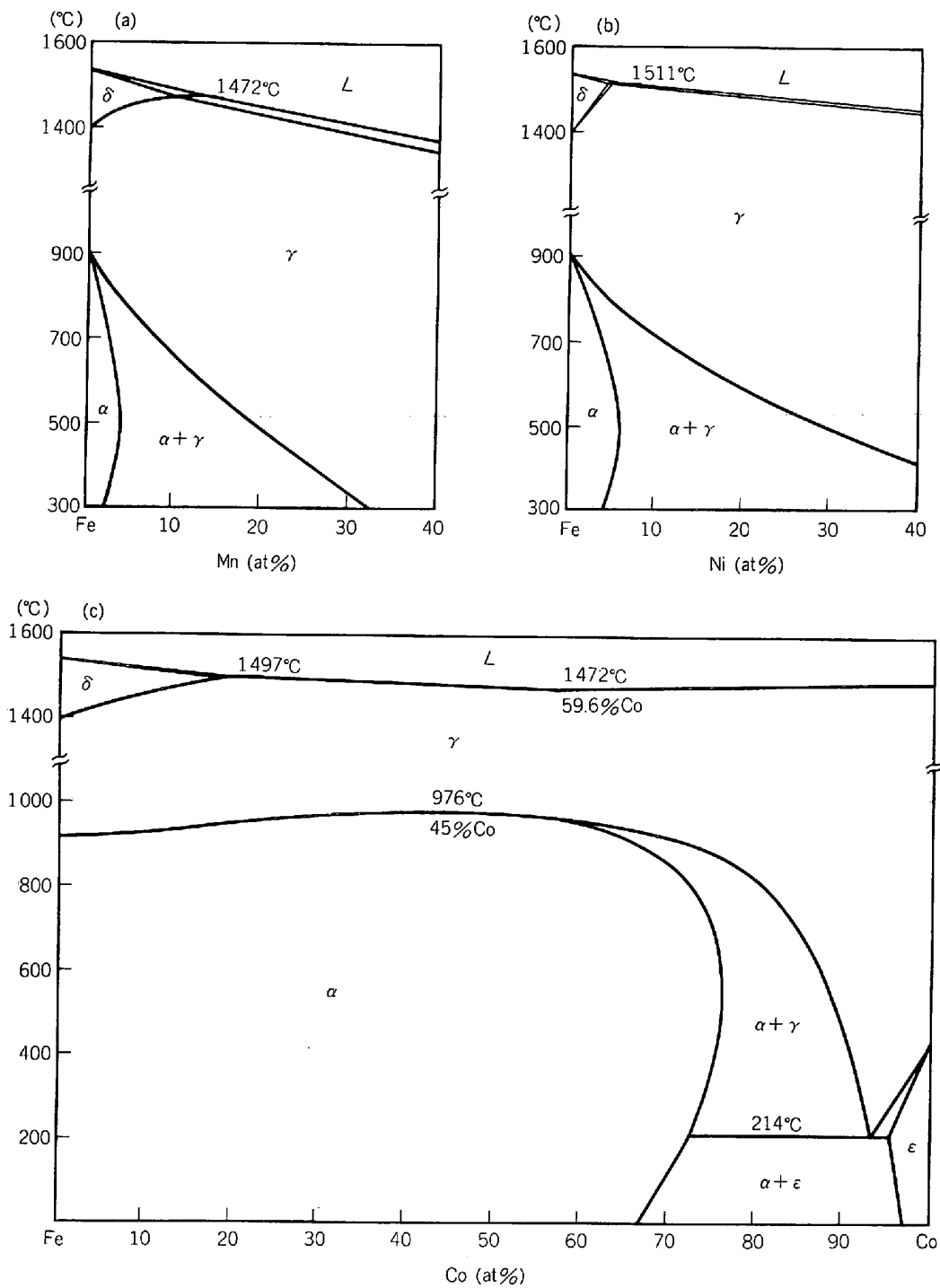


図27 Fe-X系の $\alpha/\gamma$ 平衡の計算例(II)  
(液相ならびにFe-Co系の $\epsilon$ 相(hcp)に関する平衡関係も記載してある)

のに KIRKALDY らの研究がある<sup>97)98)</sup>. 彼らは Fe-C 系 (2 wt% 以下) の状態図が, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, Cu, V, Nb, W, Co の 10 種の合金元素の添加によつてどのように変化するかを熱力学的に計算した. 彼らの計算は希薄溶体 (Mn < 3 wt%, Si < 1 wt%, Cr < 2.5 wt%, Mo < 2 wt%, Cu < 3 wt%, その他 < 1 wt% でかつ全体では < 5 wt%) の仮定で行われたので合金組成に制限は

あるが, そのため逆に, 計算が簡明であるという利点があるので参照していただきたい.

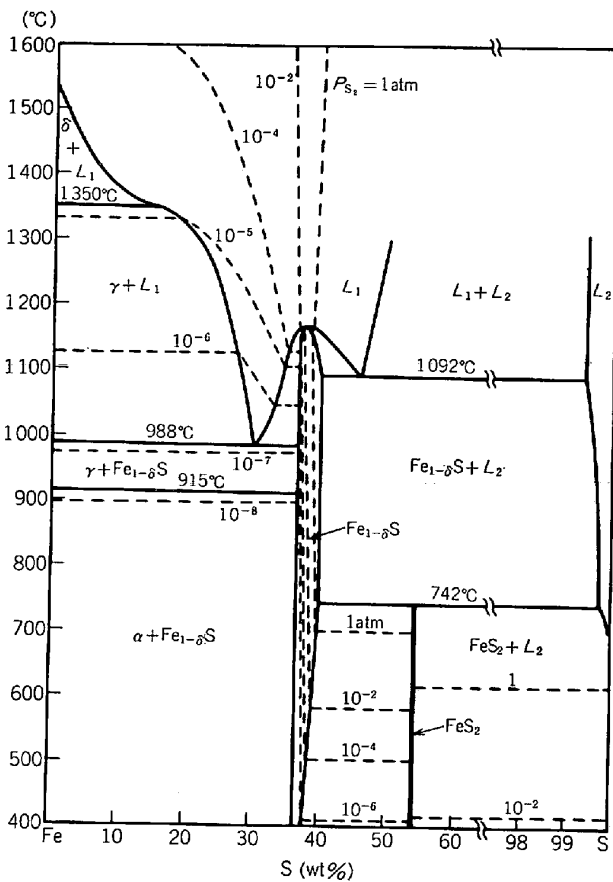
#### 5.2.2 Fe-X-Y 3元系

表6に Fe-X-Y 3元系に関する“計算状態図”のこれまでの成果をまとめた. また代表例として Fe-S-Mn<sup>100)</sup>, Fe-Cr-Si<sup>99)</sup>, Fe-Cr-Co<sup>104)</sup>, Fe-Cu-Mn<sup>4)</sup>, Fe-Cu-Ni<sup>4)</sup> の各系の等温切断図を図 35~39 に示した.

表 4 鉄合金の計算状態図一覽

系	相または平衡系	温度範囲	文献
Fe-Be	Solubility in $\alpha$ $\gamma$ ループ	500~1180°C 910~1390°C	14) 図9, 図13, 49) 図26参照
Fe-C	$\alpha$ , $\gamma$ , Fe <sub>3</sub> C, 黒鉛, L $\alpha$ , $\gamma$ , Fe <sub>3</sub> C, 黒鉛 Solubility in $\alpha$	500~1700°C 500~1150°C 910°C以下	34) 35) 36) 50) 33) 51) 52) 図22 41) 図23参照
Fe-N	$\alpha$ , $\gamma$ , $\epsilon$ , $\gamma'$ (Fe <sub>2</sub> N)	300~750°C	36) 43) 図25参照
Fe-O	$\alpha$ , $\gamma$ , L, FeO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Vapor	200~2100°C	53)
Fe-Al	$\alpha$ , $\gamma$ , L, Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> , FeAl <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> , FeAl <sub>3</sub> $\gamma$ ループ	200~1700°C 910~1390°C	54) 55) 図26参照 49)
Fe-Si	$\alpha$ , $\gamma$ , L, Fe <sub>2</sub> Si, FeSi, Fe <sub>3</sub> Si <sub>7</sub> , Si $\alpha$ , L, Fe <sub>2</sub> Si, FeSi, Si(液相線) $\gamma$ ループ	200~1600°C 1180~1600°C 910~1390°C	56) 57) 49) 図26参照
Fe-P	$\alpha$ , $\gamma$ , L, Fe <sub>3</sub> P, Fe <sub>2</sub> P, FeP Solubility in $\alpha$ $\gamma$ ループ	200~1600°C 500~1100°C 910~1390°C	58) 14) 図13, 図26 49) 参照
Fe-S	$\alpha$ , $\gamma$ , L, Fe <sub>1-3</sub> S $\alpha$ , $\gamma$ , L, FeS : <50 at%	300~1600°C 870~1600°C	59) 図28参照 60)
Fe-Ti	$\alpha$ , $\gamma$ , $\epsilon$ , L, Fe <sub>2</sub> Ti, FeTi Solubility in $\alpha$ $\gamma$ ループ	200~2200°C 500~1310°C 910~1390°C	61) 62) 14) 49) 図26参照
Fe-V	$\alpha$ , $\sigma$ $\gamma$ ループ	200~1200°C 910~1390°C	63) 64) 49) 図26参照
Fe-Cr	$\alpha$ , $\gamma$ , L, $\sigma$ $\alpha$ , L, $\sigma$ 液相線, 固相線 $\gamma$ ループ	200~1900°C 300~1800°C 1520~1900°C 840~1390°C	4) 65) 66) 図16, 26, 29 67) 参照 49) 68)
Fe-Mn	$\alpha$ , $\gamma$ , L, $\alpha$ Mn, $\beta$ Mn $\alpha$ , $\gamma$ , L $\gamma$ , L(液相線, 固相線) $\alpha$ , $\gamma$	200~1600°C 200~1600°C 1250~1500°C 910°C以下	69) 4) 図27参照 70) 17) 68)
Fe-Co	$\alpha$ , $\gamma$ , $\epsilon$ , L	200~1600°C	49) 62) 65) 71) 図27参照
Fe-Ni	$\alpha$ , $\gamma$ , L, FeNi <sub>3</sub> $\alpha$ , $\gamma$ , L $\gamma$ , L(液相線, 固相線) $\alpha$ , $\gamma$	200~1700°C 200~1600°C 1400~1600°C 910°C以下	65) 4) 図27参照 67) 17)
Fe-Cu	$\alpha$ , $\gamma$ , L $\gamma$ , L $\alpha$ , $\gamma$	500~1600°C 850~1580°C 200~1100°C	13) 72) 図13, 29参照 73) 11)
Fe-Zn	$\alpha$ , $\gamma$ , L $\gamma$ ループ	300~1400°C 910~1400°C	74) 49) 図26参照
Fe-Nb	$\alpha$ , $\gamma$ , L, $\sigma$ , Fe <sub>2</sub> Nb, Fe <sub>2</sub> Nb <sub>3</sub>	200~2500°C	62) 75)
Fe-Mo	$\alpha$ , $\gamma$ , L, $\sigma$ , $\mu$ (Fe <sub>3</sub> Mo) $\alpha$ , $\gamma$ , $\sigma$ , $\mu$ (Fe <sub>3</sub> Mo), R(Fe <sub>1.7</sub> Mo) Solubility in $\alpha$ $\gamma$ ループ	200~2700°C 900~1500°C 500~1500°C 910~1390°C	62) 75) 76) 14) 49) 図26参照
Fe-Ru	$\alpha$ , $\gamma$ , $\epsilon$ , L	200~2300°C	77) 78) 図29参照
Fe-Sn	$\gamma$ , L, Fe <sub>3</sub> Sn, Fe <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> , Fe <sub>0.565</sub> Sn <sub>0.435</sub> FeSn, FeSn <sub>2</sub> $\gamma$ ループ	300~1600°C 910~1390°C	79) 図26, 29参照 17) 49)
Fe-Sb	Solubility in $\alpha$ $\gamma$ ループ	500~1000°C 910~1390°C	14) 17) 49) 図26参照
Fe-W	$\alpha$ , $\gamma$ , L, $\mu$ (Fe <sub>3</sub> W <sub>2</sub> ) $\alpha$ , $\gamma$ , $\mu$ (Fe <sub>3</sub> W <sub>2</sub> ) Solubility in $\alpha$ $\gamma$ ループ	200~3700°C 930~1550°C 500~1500°C 910~1300°C	62) 75) 80) 81) 図26参照 14) 49)

 $\alpha$  : bcc,  $\gamma$  : fcc,  $\epsilon$  : hcp, L : liquid

図28 Fe-S系計算状態図<sup>59)</sup>

## 6. おわりに

KAUFMAN, HILLERT, ANSARA らによつて“計算状態図”を主題とする国際会議 CALPHAD (Calculation of Phase Diagram) が組織されてから約 10 年が経過した<sup>10)</sup>。表 4, 5, 6 に総括した文献のほとんどはこの CALPHAD に心を寄せる人たちによるものである。これまでの CALPHAD の主力は土台づくり——計算方式の確立——に注がれてきたのであつて、状態図づくりはむしろこれからである。本邦においてもこの方面への関心が高まることを期待したい。

### 文 献

- 32) 田中良平: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 1586
- 33) L. S. DARKEN and R. W. GURRY: Trans. Met. Soc. AIME, 191 (1951), p. 1015
- 34) M. G. BENZ and J. F. ELLIOTT: Trans. Met. Soc. AIME, 221 (1961), p. 323
- 35) J. CHIPMAN: Met. Trans., 3 (1972), p. 55
- 36) J. ÅGREN: Met. Trans., 10A (1979), p. 1847
- 37) L. J. DIJKSTRA: Trans. AIME, 185 (1949), p. 252
- 38) C. WERT: Trans. AIME, 188 (1950), p. 1242
- 39) L. S. DARKEN and R. W. GURRY: Physical Chemistry of Metals, (1953), p. 418 [McGraw-Hill Book]
- 40) J. C. SWARTZ: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), p. 68; 245 (1969), p. 1083
- 41) 長谷部光弘, 西沢泰二: 日本金属学会講演会 (1980年4月) に発表
- 42) R. B. McLELLAN and R. J. FARRARO: Acta Met., 28 (1980), p. 417
- 43) M. HILLERT and M. JARL: Met. Trans., 6A (1975), p. 553
- 44) C. ZENER: Trans. AIME, 167 (1946), p. 513
- 45) W. OELSEN: Stahl Eisen, 69 (1949), p. 468
- 46) K. W. ANDREWS: JISI, 184 (1956), p. 414
- 47) R. A. BUCKLEY and W. HUME-ROTHERY: JISI, 201 (1963), p. 227
- 48) 和田次康: 日本金属学会誌, 25 (1961), p. 707
- 49) 大谷博司, 長谷部光弘, 西沢泰二: 日本金属学会講演会 (1980年10月) に発表
- 50) L. KAUFMAN and H. NESOR: Calphad, 2 (1978), p. 295
- 51) H. HARVIG: Jernkont. Ann., 155 (1971), p. 157
- 52) H. GAYE and C. H. P. LUPIS: Met. Trans., 6A (1975), p. 1049
- 53) L. KAUFMAN and H. NESOR: Calphad, 2 (1978), p. 35
- 54) L. KAUFMAN and H. NESOR: Met. Trans., 5 (1974), p. 1623
- 55) L. KAUFMAN and H. NESOR: Calphad, 2 (1978), p. 325
- 56) L. KAUFMAN: Calphad, 3 (1979), p. 45
- 57) R. SCHMID: Calphad, 4 (1980), p. 101
- 58) P. J. SPENCER and O. KUBASCHEWSKI: Arch. Eisenhüttenw., 49 (1978), p. 225
- 59) R. C. SHARMA and Y. A. CHANG: Met. Trans., 10B (1979), p. 103
- 60) M. HILLERT and L. -I. STAFFANSSON: Met. Trans., 6B (1975), p. 37
- 61) L. KAUFMAN and H. NESOR: Treatise on Solid State Chemistry, ed. by N. R. HANNAY, NY, (1975), p. 179 [Plenum Press]
- 62) L. KAUFMAN and H. NESOR: Calphad, 2 (1978), p. 55
- 63) P. J. SPENCER and F. H. PUTLAND: JISI, 211 (1973), p. 293
- 64) P. J. SPENCER and J. F. COUNSELL: Z. Metallk., 64 (1973), p. 662
- 65) L. KAUFMAN and H. NESOR: Z. Metallk., 64 (1973), p. 249
- 66) F. MÜLLER and O. KUBASCHEWSKI: High Temp. -High Press., 1 (1969), p. 543
- 67) M. V. RAO and W. A. TILLER: Mater. Sci. Eng., 14 (1974), p. 47
- 68) G. KIRCHNER, T. NISHIZAWA, and B. UHRENIUS: Met. Trans., 4 (1973), p. 167
- 69) L. KAUFMAN: Calphad, 2 (1978), p. 117
- 70) M. V. RAO and W. A. TILLER: Mater. Sci. Eng., 15 (1974), p. 87
- 71) L. KAUFMAN and H. NESOR: Ann. Rev.

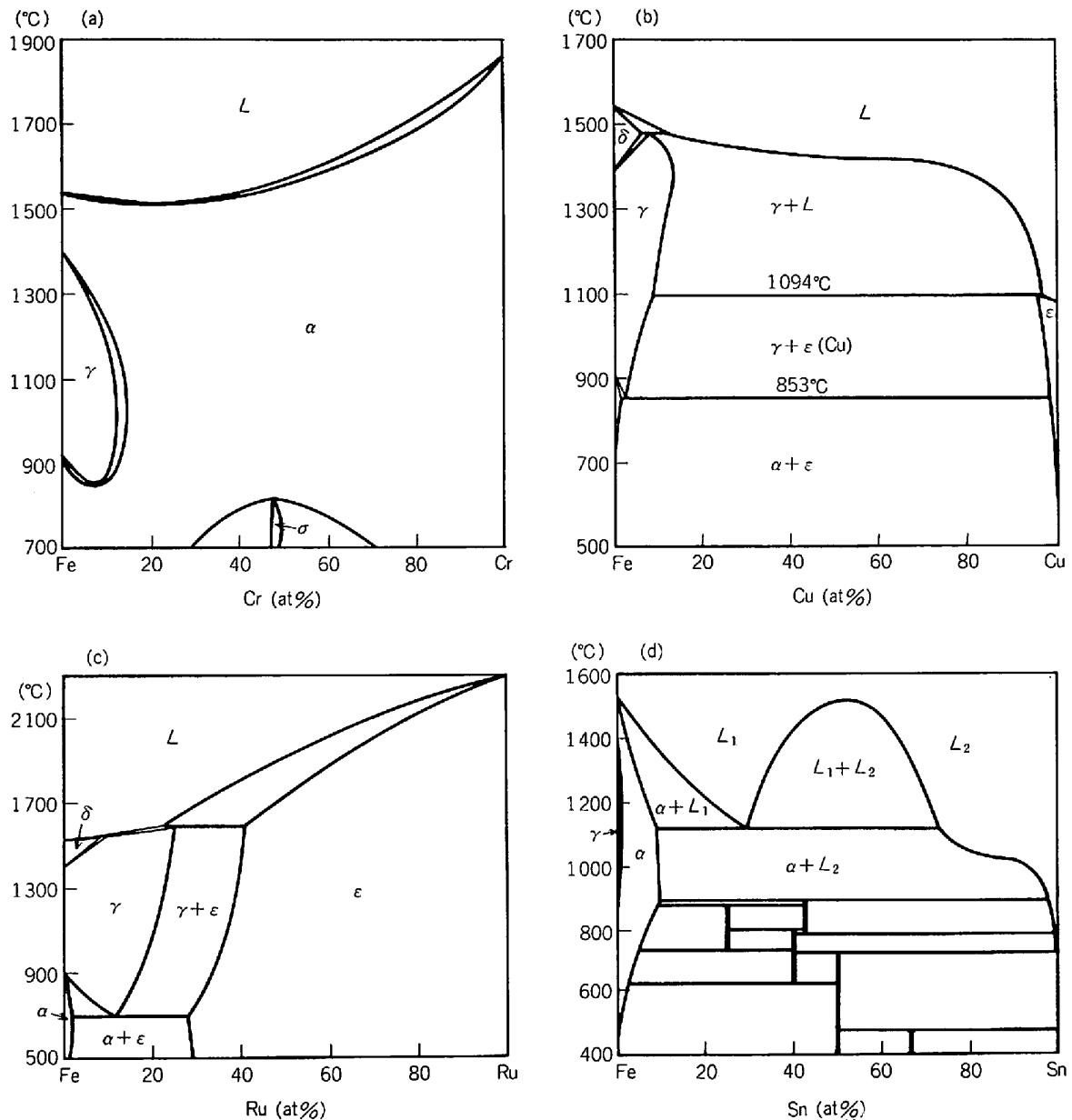


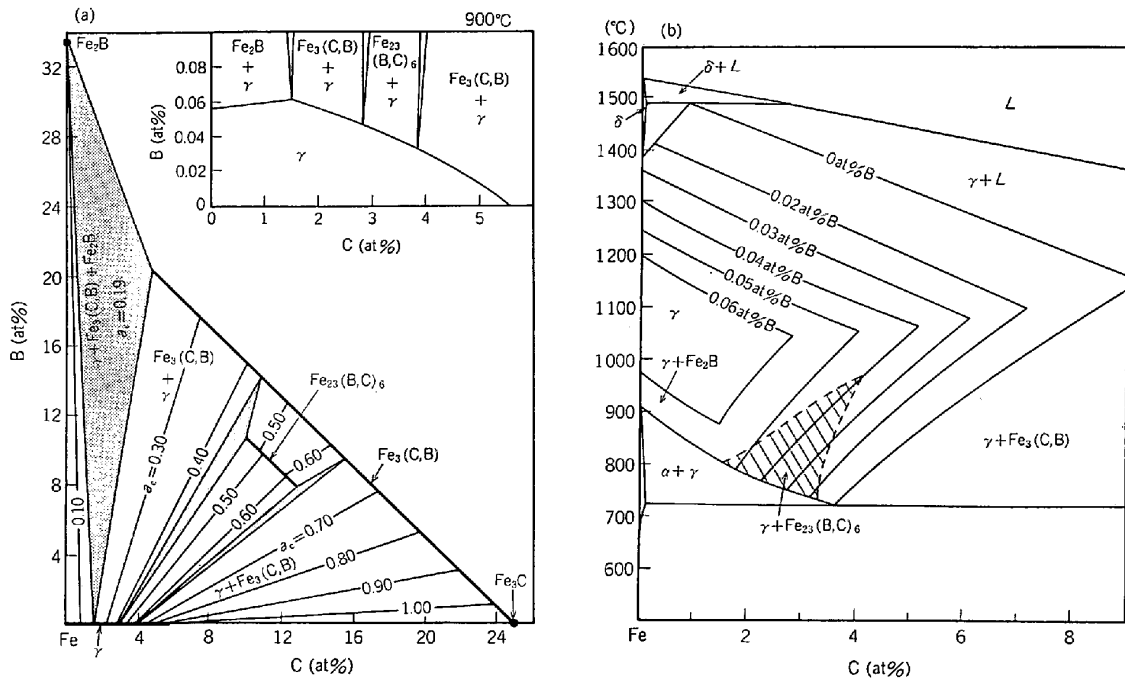
図29 Fe-Cr, Fe-Cu, Fe-Ru ならびに Fe-Sn 系の計算状態図  
(Fe-Cr 系については図 16 参照)

- Mater. Sci., ed R. HUGGINS, Palo Alto, USA, 3, (1973), p. 1
- 72) O. KUBASCHEWSKI, J. F. SMITH, and D. M. BAILEY: Z. Metallk., 68(1979), p. 495
- 73) P.-A. LINDQVIST and B. UHRENIUS: Calphad, 4 (1980), p. 193
- 74) G. KIRCHNER, H. HARVIG, K.-R. MOQUIST, and M. HILLERT: Arch. Eisenhüttenw., 44 (1973), p. 227
- 75) L. KAUFMAN and H. NESOR: Met. Trans., 6A (1975), p. 2123
- 76) G. KIRCHNER, H. HARVIG, and B. UHRENIUS: Met. Trans., 4(1973), p. 1059
- 77) L. KAUFMAN: Physical Metallurgy of Martensite and Bainite, Report No. 93, (1965), p. 48[BISRA and Institute of Metals]
- 78) L. KAMUFAN and H. BERNSTEIN: Computer Calculation of Phase Diagrams, (1970), [Academic Press]
- 79) H. D. NUSSLER, O. GOLDBECK, and P. J. SPENCER: Calphad, 3(1979), p. 19
- 80) B. UHRENIUS and L. KAUFMAN: Calphad, 3 (1979), p. 223
- 81) B. UHRENIUS: Calphad, 4(1980), p. 173
- 82) 長谷部光弘, 西沢泰二: 日本金属学会誌, 38 (1974), p. 46
- 83) B. UHRENIUS: Hardenability Concepts with Applications to Steel, ed, by D. V. DOANE and J. S. KIRKALDY, (1978), p. 5[AIME]
- 84) J. AGREN: Report Royal Inst. Technology,

表 5 鉄合金の計算状態図一覧 (Fe-C基 3 元系および 4 元系)

系	相または平衡関係	温度範囲	文献
Fe-C-B	$\alpha, \gamma, L, \theta, G, M_{23}C_6, Fe_2B$	400~1100°C	82) 図30参照
Fe-C-Si	$\alpha, \gamma, \theta, G$	700~1100°C	83) 84) 図34参照
Fe-C-Ti	$\alpha, \gamma, L, \lambda(Fe_2Ti), TiC_{0.78}$ 液相線	1300~3000°C	61)
Fe-C-V	$\alpha, \gamma, \theta, VC_{0.75}$	800~1100°C	83) 図34参照
Fe-C-Cr	$\alpha, \gamma, \theta, M_{23}C_6, M_7C_3$ $\alpha, \gamma, \theta, M_{23}C_5, M_7C_3$ $\alpha, \gamma, \theta$	600~1100°C 1000°C 700~770°C	83) 85) 86) 87) 図31, 34参照 88)
Fe-C-Mn	$\alpha, \gamma, \theta, M_{23}C_6$ $\alpha, \gamma$	600~1100°C 700~770°C	83) 89) 図34参照 90)
Fe-C-Ni	$\alpha, \gamma, \theta$ $\alpha, \gamma$	700~1100°C 730°C	83) 91)
Fe-C-Cu	$\alpha, \gamma, \theta$	750~1100°C	83) 図34参照
Fe-C-Mo	$\alpha, \gamma, \theta, M_2C, M_6C, \xi(M_3C), M_{23}C_6$ $\alpha, \gamma, \theta, M_2C, M_6C, \xi(M_3C)$	700~1000°C 1000°C	83) 92) 図32, 34参照 93) 94)
Fe-C-W	$\alpha, \gamma, \theta, Fe_3W_2, WC, M_6C, L, G$ $\alpha, \gamma, \theta, WC$ $\alpha, \gamma, \theta, WC, M_6C, Fe_2W$	1000~1500°C 700~1100°C 1000°C	81) 図33, 34参照 83) 94)
Fe-C-Cr-W	$\gamma, \theta, M_6C, M_{23}C_5$	900~1100°C	95)
Fe-C-Mo-W	$\alpha, \gamma, \theta, WC, M_2C, M_6C, \xi(M_3C)$ $Fe_2W$	1000°C	94)

$\alpha$ : bcc,  $\gamma$ : fcc,  $L$ : 液相,  $\theta$ : セメントライト,  $G$ : 黒鉛



(a) 等温断面図 (b) オーステナイト相へのBの固溶度  
図30 Fe-C-B系の計算状態図

TRITA-MAC-0125, Stockholm, (1977), [quoted in (83)]

85) R. LUNDBERG, M. WALDENSTRÖM, and B. UHRENIUS: Calphad, 1(1977), p. 159

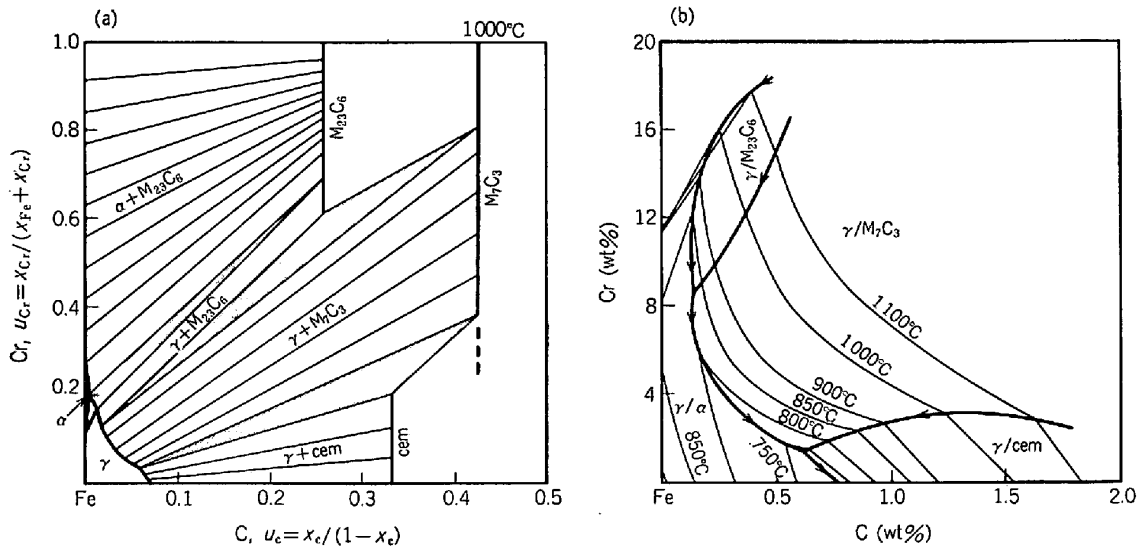
86) M. WALDENSTRÖM and B. UHRENIUS: Scand. J. Met., 6(1977), p. 202

87) T. NISHIZAWA and B. UHRENIUS: Scand. J. Met., 6(1977), p. 67

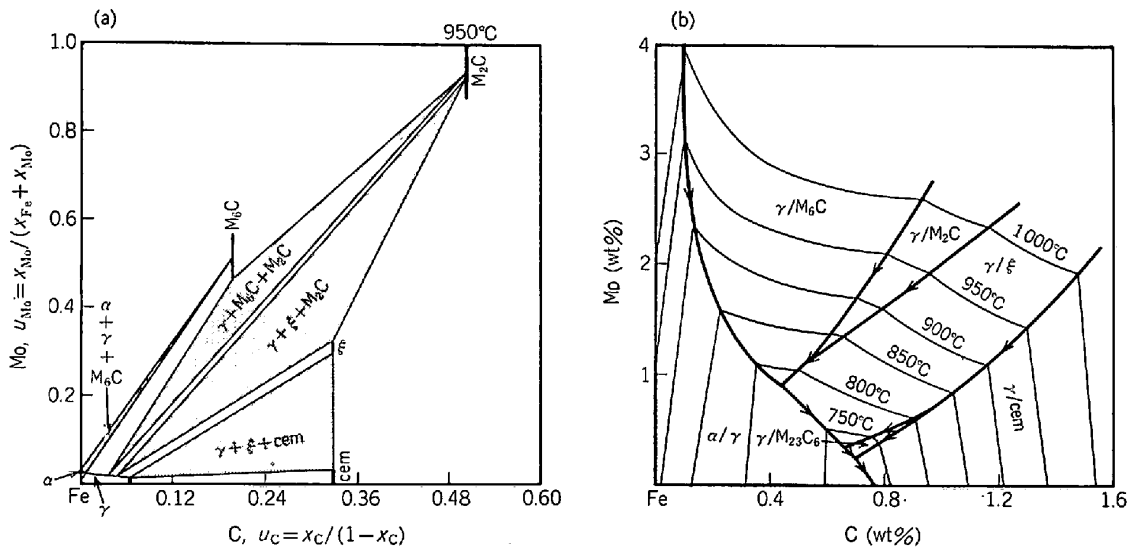
88) R. C. SHARMA, G. R. PURDY, and J. S. KIRKALDY: Met. Trans., 10A(1979), p. 1119

89) M. HILLERT and M. WALDENSTRÖM: Calphad, 1 (1977), p. 97; Met. Trans., 8A(1977), p. 5

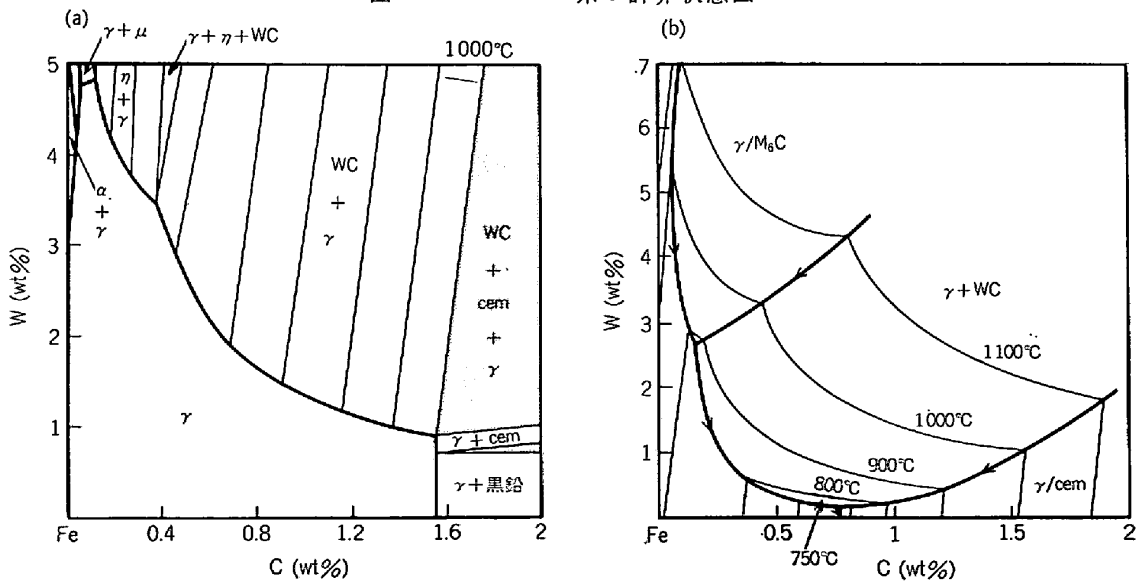




(a) 等温状態図 (b)  $\gamma$  単相域の温度変化  
 図31 Fe-C-Cr 系の計算状態図<sup>83)</sup>



(a) 等温状態図 (b)  $\gamma$  単相域の温度変化  
 図32 Fe-C-Mo 系の計算状態図<sup>83)</sup>



(a) 等温状態図 (b)  $\gamma$  単相域の温度変化  
 図33 Fe-C-W 系の計算状態図<sup>81)83)</sup>

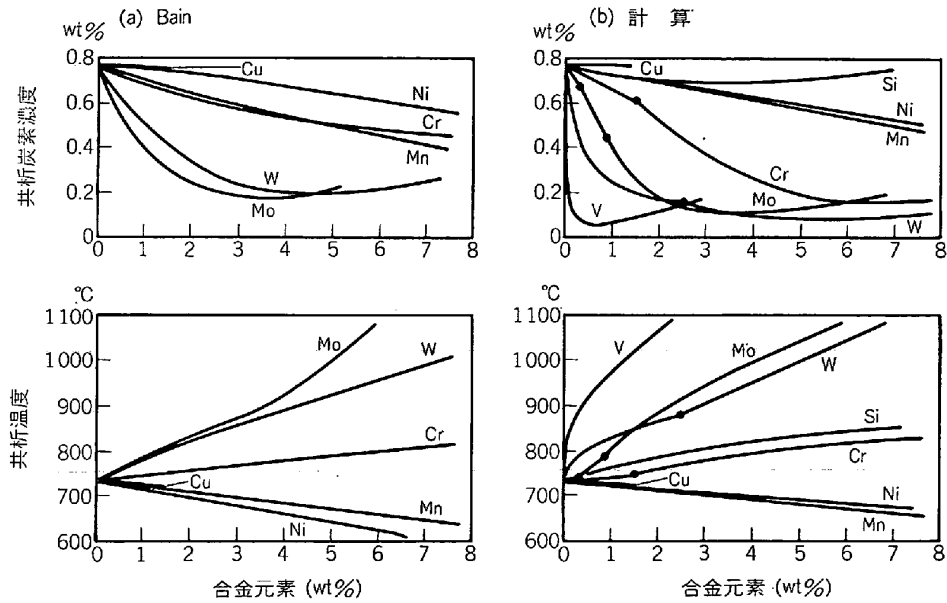
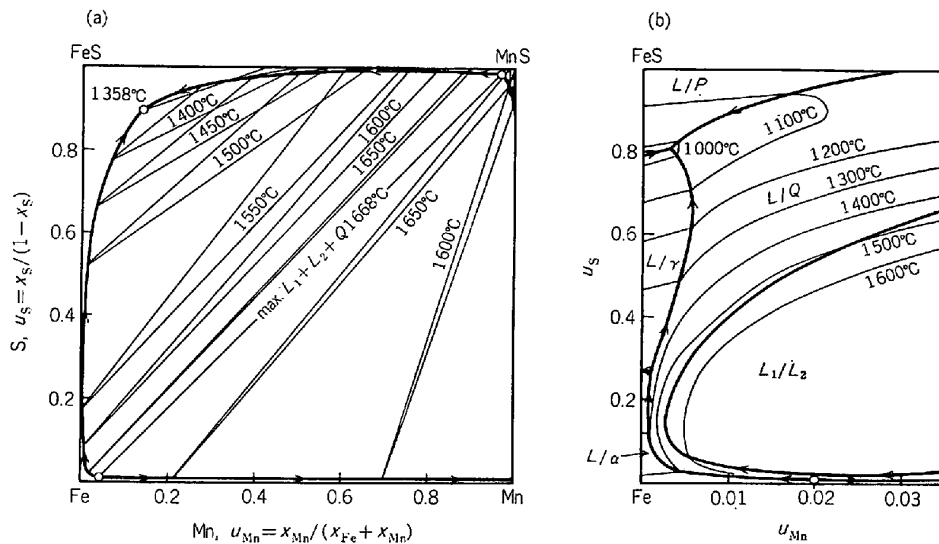


図34 Fe-C系の共析点に対する合金元素の影響<sup>83)</sup>



(a) Fe-Mn-FeS-MnS系の2液相分離面とL<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>+MnS 3相3角形  
(b) Fe-FeS側の拡大図 (P: FeS, Q: MnS)

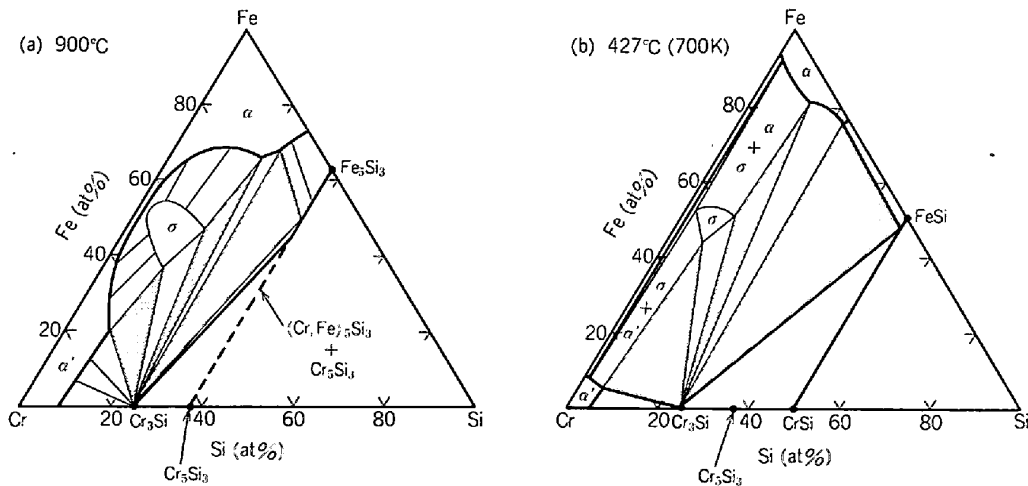
図35 Fe-S-Mn系の計算状態図<sup>100)</sup>

- 90) J. B. GILMOUR, G. R. PURDY, and J. S. KIRKALDY: Met. Trans., 3(1972), p. 1455
- 91) R. C. SHARMA and J. S. KIRKALDY: Canad. Met. Quart., 12(1973), p. 391
- 92) C. CHATFIELD and M. HILLERT: Calphad, 1 (1977), p. 201
- 93) T. NISHIZAWA: Scand. J. Met., 1(1972), p. 41
- 94) B. UHRENIUS and H. HARVIG: Metal Sci., 9(1975), p. 67
- 95) B. UHRENIUS and S. GRONDELL: Metal Sci., 11(1977), p. 73
- 96) E. C. BAIN: Function of Alloying Elements in Steel, (1939), [ASM]
- 97) J. S. KIRKALDY and E. A. BAGANIS: Met. Trans., 9A(1978), p. 495
- 98) J. S. KIRKALDY, B. A. THOMSON, and E. A. BAGANIS: Hardenability Concepts with Applications to Steel, ed. by D. V. DOANE, and J. S. KIRKALDY (1978), p. 82 [AIME]
- 99) T. CHART, F. PUTLAND, and A. DINSDALE: Calphad, 4(1980), p. 27
- 100) M. HILLERT and L. -I. STAFFANSON: Met. Trans., 7B(1976), p. 203
- 101) L. KAUFMAN and H. NESOR: Met. Trans., 6A (1975), p. 2115
- 102) I. ANSARA, C. BERNARD, L. KAUFMAN, and P. J. SPENCER: Calphad, 2(1978), p. 1
- 103) G. KIRCHNER and B. UHRENIUS: Acta Met.,

表 6 鉄合金の計算状態図 (3元系および4元系)

系	相または平衡関係	温度範囲	文献
Fe-Al-Cr	$\alpha, L$	1 500~1 700°C	75)
Fe-Al-Ni	$\alpha, \gamma, L, Fe_3Al_2, FeAl_2, Fe_2Al_5, Ni_3Al, Ni_2Al_3$	900~1 400°C	54)
Fe-Si-Cr	$\alpha, \gamma, \sigma, FeSi, Cr_3Si, CrSi$	400~900°C	99) 図36参照
Fe-Si-Ni	$\alpha, \gamma, FeNi_3, Ni_3Si, Ni_5Si$	400~500°C	99)
Fe-S-Mn	$\alpha, \gamma, L, FeS, MnS$	1 000~1 700°C	100) 図35参照
Fe-Ti-Cr	$\alpha, \gamma, L, TiX_2, TiX$	1 000~1 400°C	101)
Fe-V-Cr	$\alpha, \sigma$	500~900°C	64) 102)
Fe-Cr-Mn	$\alpha, \gamma : <10\%Mn$	750~950°C	103)
Fe-Cr-Co	$\alpha, \gamma, \epsilon, L, \sigma$ $\alpha, \gamma, \sigma$	400~1 500°C 1 200°C	104) 105) 図37参照 65) 71) 106)
Fe-Cr-Ni	$\alpha, \gamma, L, \sigma, FeNi_3$ $\alpha, \gamma, L, \sigma$ $\alpha, \gamma, \sigma$ $\alpha, \gamma$	400~1 600°C 800~1 500°C 400~600°C 1 100~1 200K	105) 107) 図7, 8参照 4) 99) 108) 109)
Fe-Cr-Mo	$\alpha, \gamma, L, \sigma, \mu(Fe_3Mo_2)$	650~1 700°C	75)
Fe-Cr-W	" $\mu(Fe_3W_2)$	1 100~1 700°C	75)
Fe-Mn-Cu	$\gamma, L$	600~1 300°C	4) 図38参照
Fe-Co-Ni	$\alpha, \gamma$	600~800°C	65) 71) 105)
Fe-Ni-Cu	$\gamma, L$ $\gamma : Msibility\ gap$	400~1 400°C 850~1 400°C	4) 図39参照 109)
Fe-Mo-W	$\alpha, \gamma, \mu(Fe_3X_2), R(Fe_{1.7}X)$	1 100~1 300°C	76)
Fe-Si-Cr-Ni	$\alpha, \gamma, \sigma : \sigma\ の\ 安定\ 領域$	527°C	99)

$\alpha$  : bcc,  $\gamma$  : fcd,  $\epsilon$  : hcp,  $\sigma$  : シグマ,  $L$  : 液相

図36 Fe-Cr-Si 系計算状態図<sup>99)</sup>

22 (1974), p. 523

104) 長谷部光弘, 西沢泰二: 日本金属学会講演会 (1977年10月) に発表

105) L. KAUFMAN and H. NESOR: Met. Trans., 5 (1974), p. 1617

106) T. G. CHART, J. F. COUNSELL, G. P. JONES, W. SLOUGH, and P. J. SPENCER: Intern. Met. Rev., 20(1975), p. 57

107) L. KAUFMAN, J. S. WATKIN, and A. P. MIO-DOWNIK: Calphad, 1(1977), p. 281

108) M. HILLERT and M. WALDENSTRÖM: Scand. J. Met., 6(1977), p. 211

109) J. F. COUNSELL, E. B. LEES, and J. SPENCER: Metallurgical Chemistry, ed. by O. KUBASCHWESKI, (1972), p. 451 [HMSO]

110) 西沢泰二: 日本金属学会会報, 18(1979), p. 706

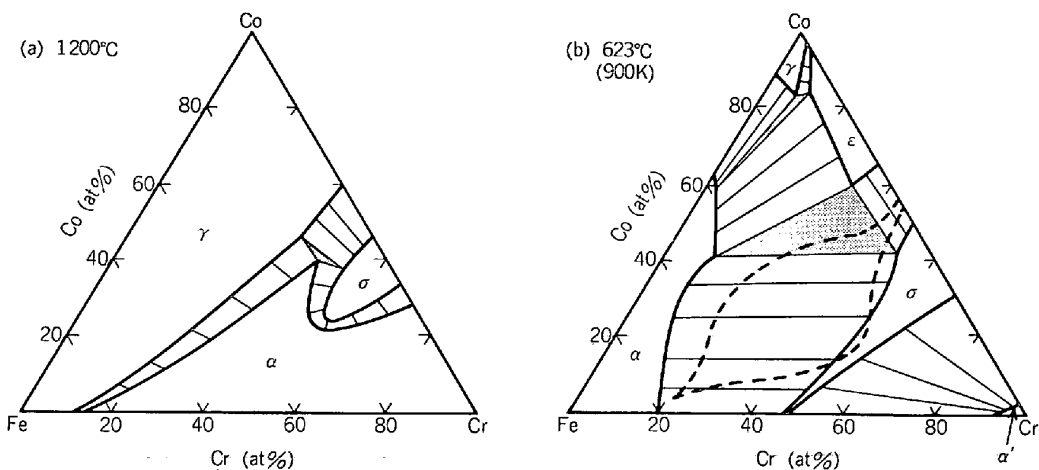
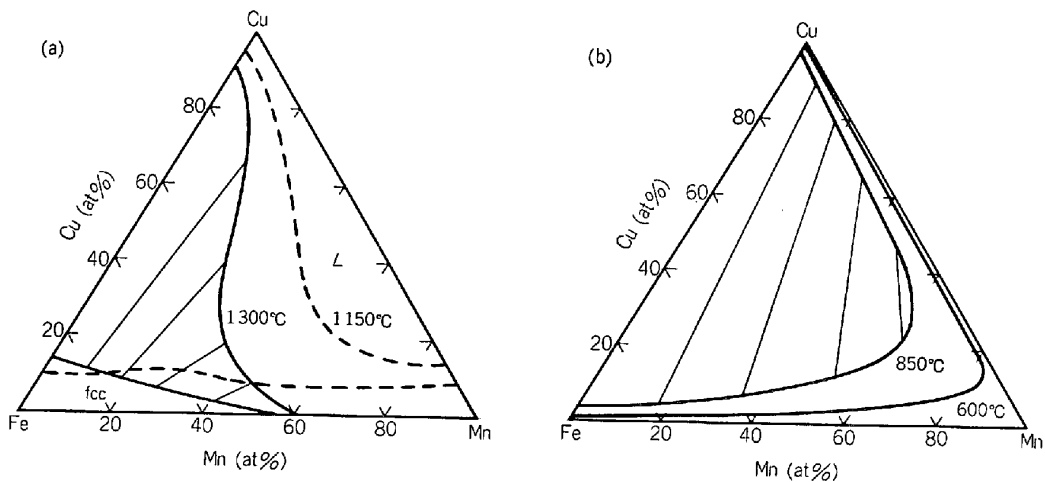
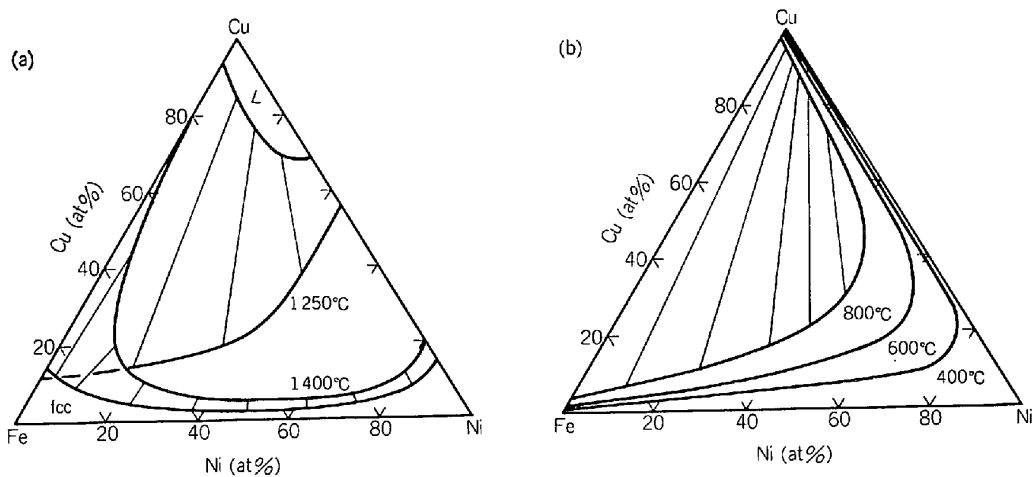


図37 Fe-Cr-Co 系の計算状態図 (準安定 2 相分離面(点線)については図 20, 21 参照)



(a) fcc/液相平衡 (b) fcc 相の 2 相分離面の等温断面図

図38 Fe-Cu-Mn 系の計算状態図



(a) fcc/液相平衡 (b) fcc 相の 2 相分離面の等温断面図

図39 Fe-Cu-Ni 系の計算状態図