研究論文

マテリアルリスク指標とその応用

Materials-Risk-Index and Its Application

芳須弘^{1*}, 藤田充苗², 原田幸明¹, 緒形俊夫¹

Hiroshi YOSHIZU^{1*}, Mitsutane FUJITA², Kohmei HALADA¹ and Toshio OGATA¹

1 (独) 物質・材料研究機構

National Institute for Materials Science

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

E-mail: YOSHIZU.Hiroshi@nims.go.jp

2 総合科学研究機構

Comprehensive Research Organization for Science and Society

〒300-0811 茨城県土浦市上高津 1601 番地 筑波産学協同棟

原子力発電, 化学プラントなどの機器用材料の素材採集時の鉱石採掘などによって環境破壊が生じる。また, それらの材料製造中に発生する CO₂, SO_x, および NO_x による大気汚染が地球環境に影響をおよぼす。地球環境を大きく変えない持続的社會を形成するために, 機器設計時の材料評価にマテリアルリスク指標が提案されている。その指標は, 資源の持続的供給, 製造時の環境変動, そして毒性の 3 種類のリスクから成っており, それぞれのリスクに関係する因子の数値が示されている。

本報告では, これらの指標のデータ構造を決定した後, リスク指標のデータベースを試作し, Web で提供されている耐熱材料の特性との関係を調べた。その結果, 地球環境を考慮した機器設計時における最適材料は容易に入手可能な元素からなる材料を選択すべきとの方向性を示した。その方向の妥当性について各種のステンレス鋼を評価し, ニッケルをマンガンで置き換えたステンレス鋼の環境適合性が良好なことを示した。

Environmental damage and deforestation occur frequently during ore mining to supply the resource of materials used for nuclear power generation and chemical plants. Further, the air pollution by CO₂, SO_x, and NO_x generated in the production of those materials, affects on the global environment. In order to achieve the sustainable society that does not have a significant impact on the global environment, we have already proposed the material risk indexes which show the materials evaluation at the time of the apparatus design. The indexes consist of three kinds of risks, i.e. the sustainable supply of resources, environmental load during production of material, and toxicity of materials, and the numerical values related to the parameters of these risks were also shown.

In this research, the construction of the database to store the information about three risk indexes was tried after the determination of data structure of the indexes. The relation between the risk indexes and the properties in the heat-resistant materials provided in the Web information was investigated. As a result, based on the optimal environmental conformity, it was clarified that the materials selection for the apparatus using at high temperature should be directed toward the use of materials consisted mainly of easily obtainable atomic elements. The validity of the direction was estimated for various stainless steels and it is indicated that the stainless steel replaced Ni with Mn has a good value in the environmental conformity.

キーワード: 持続可能社会, マテリアルリスク指標, 材料特性, 材料特性評価, 材料選択

Sustainable Society, Materials-Risk-Index, Materials Properties, Evaluation of Materials Properties, Materials Selection

1 はじめに

原子力発電, 化学プラントなどの金属系構造物や機器用材料の資源となる鉱石採掘による自然破壊および材料の製造過程で排出される CO₂, SO_x および NO_x による大気汚染が地球環境に影響を及ぼしている. 地球環境を大きく変えない持続的社會を達成するためには, 構造物や機器用材料の選択を, 従来の材料特性や経済性の観点からの他に資源の持続供給可能性, 製造過程での環境変動, 材料の毒性などの環境適合性に対する考慮が要求される. これまで, エコマテリアルの観点から材料設計・選択に関する提案がなされており, さらに, 機器設計時の材料評価, 選択の方向性を示すマテリアル指標 (Materials Risk Index) が (独) 物質・材料研究機構 (以下, 物材機構と略) の原田らにより提案されている[1]. この提案では, 地球環境問題を考慮した持続可能な社會の形成のための環境材料評価基準となる環境適合性を数値化したマテリアルリスク指標として, 資源の持続的供給, 環境変動, そして毒性の 3 種類のリスクについて調査が進め

られており, 合金元素に関して概算されたリスク係数などが示されている[1,2].

マテリアルリスク指標[1]を考慮した材料評価は, 同一の特性を持つならばより地球環境に負荷をかけない, より環境適合性を意識した材料を選択すべきである. 著者らは持続的社會を考慮した材料選択を, 環境適合性と材料特性の両者を連携した材料評価を検討してきた[3,4,5].

本研究では, マテリアルリスク指標の 3 種類のリスクの因子であるデータ項目を検討し, データ構造を決定し, それらを XML での記述を検討し, リスク指標データベース (以下, データベースを DB と略) を試作した. さらに, Web で提供されている耐熱材料の特性との関係を調べた. マテリアルリスク指標を種々の材料について算出し, その数値とそれぞれの材料特性との関係を調べ, 材料資源の持続供給性, 環境変動および毒性を考慮した材料評価, 最適材料選択の方向性を示す.

2 マテリアルリスク指標

図 1 は, 金属材料の環境適合性を表すマテ

図1 マテリアルリスク指標の概念図

リアルリスク指標の概念図を示す。この指標は、材料を製造し廃棄するまでの地球環境への影響度合いを示す。指標は資源の持続的供給、環境変動および毒性の3種類のリスクから成り、各リスクは、それぞれに関係する縦軸の因子（データ項目）と横軸の社会的影響などで表される。しかし、社会的影響は物質の生産量／消費量が考えられるが、数値として示すのは容易でないので、ここでは各リスクに関する因子の種々の合金元素についての数値を用いて、金属材料の持続的社会への環境適合性の度合いを示すことにする。また、各リスクの因子は1個ではなく、次節のように複数考えられている。

2.1 マテリアルリスク指標に関する情報

3種類のリスクに関する因子について以下に述べる。これらの因子をデータ項目とし、その数値を格納したマテリアルリスク指標のDB化によって材料の環境適合性の評価が可能になる。

2.1.1 持続的供給リスク

持続的供給リスクは、主な記述項目として、

図2 持続的供給リスクのデータ項目

図2に示したような項目が挙げられる。このリスクでは、物質（資源）をルートとして、その下位に埋蔵量、生産量あるいは年間消費量などの物質に関する項目やその物質の生産に関与するTMRがある。TMRとは、関与物質総量（製造に関与する物質の総量であり、Total Material Requirement、以下、TMRと略）[6]である。TMRは、次節の材料製造時の環境変動リスクの1つの因子でもあり詳細は次節で示す。また、資源消費に関するデータ項目として耐用年数、資源枯渇加速係数

があり，資源の市場価格（平均価格）や年間の生産量や消費量によって，以下の式（抜粋）により導き出される[2,4,7].

資源の耐用年数＝資源の埋蔵量／資源の消費量

年間資源枯渇加速度＝年間生産量×資源枯渇加速度

さらに，価格の安定性と資源の国による遍在性から導かれる供給リスクも提案されている[1]. これらのデータ項目の数値データ（係数）により物質の持続的供給リスクが算出できる.

2.1.2 環境変動リスク

図3は，環境変動リスクの情報に関するデータ項目を示す. ここでは材料をルートとして，各データ項目には材料を構成する成分（合金元素など）を記述し，材料の製造法や製造時に発生するCO₂などの発生量を環境負荷データとして記述し，さらに製造時の水使用量や水質汚染などの環境に関わるデータを記述する. また，材料を構成する成分の採掘から製造，使用そして廃棄までのエネルギーの流れを物量フロー，TMRフローとして記述する. TMRフローとは，式： $M_{TMR} = \sum M_{DI(i)} + \sum M_{II(i)} + \sum M_{HF(i)}$ で定義され， $\sum M_{DI(i)}$ は直接物質投入量を， $\sum M_{II(i)}$ は間接物質投入量を， $\sum M_{HF(i)}$ は隠れた物質フロー量を表す.

直接および間接物質投入量は，人間の経済的行為として直接的にもしくは間接的に投入された物質の量である. 隠れた物質フロー量は，直接的および間接的な経済行為にともなって起こる物質の移動量や採掘などに必要とされる水を含めた水系，さらに土地の再生，景観の保護に必要な物質の総量も含まれる[3]. これらの情報により環境変動リスクを算定する.

図3 環境変動リスクのデータ項目

ここで，材料は，ニッケル，クロム，モリブデンなど様々な合金元素により構成されているが，これらの合金元素はフェロアロイの形で添加され，合金化される. 材料の製造には原材料の溶解から精錬など様々な工程を経て製品となるが，各工程では大気汚染物質や機器から排出される排気ガスなどが発生する[8].

以下の材料の環境負荷算出については，物材機構の環境負荷データベースシステム[9]を用いた. また，同機構のクリープデータシート41鋼種[10]の材料の主要成分から算出した発生量と炭素，硫黄およびリンなどの不純物の成分調整にともなう発生量を算出し，積算した数値をデータとした. 環境負荷の算定式については，合金1トンあたりの材料を電気炉などで溶解，精錬などを行う製造工程の環境負荷値を算定する式が紹介[11]されている.

2.1.3 毒性リスク

毒性リスクは，対象となる物質をルートとして，対象物質が単一の化学物質の場合と製品に含有されている場合に分類して記述する. 図4は毒性リスクに記述するべくデータ

項目を示す。図に示したデータ項目は、MSDS（物質安全データシート，Material Safety Data Sheet）と呼ばれ，国内規格として JIS Z 7250，国際規格として ISO11014-1 にその記載内容が標準化されており，この MSDS の記載内容から参照した[12,13].

MSDS をもとにした毒性リスクに記述するデータ項目は，単一，製品に共通する項目として物質の名称，政令上の号番号，そして物質の種類を記述し，製品の場合はその物質の含有率を記述する。これらの情報から潜在有害物質強度とともに毒性リスクを算出する。表 1 は，参考文献[14]より引用した各合金元素の CO₂，TMR そして毒性に関するリスク係数（cell toxicity）を示す。

表 1 の毒性リスク係数は，金属イオンの細胞毒性を示す IC₅₀ により算出された数値である。ここで，IC₅₀ とは金属イオンが MC3T3-E1（マウス頭蓋骨から樹立された骨

図 4 毒性リスクのデータ項目

芽細胞）や L929（マウスの線維芽細胞）などの細胞に対して 50%の阻害率（生体の活性を 50%に低下させる）を示すものであり，毒性の強さを表す指標として用いられている[15]。また，毒性リスクの単位は mg/L（重量/容量）であり，水中に含まれる物質の濃度を示すものである。

表 1 各合金元素の毒性リスク係数

No.	Element	CO ₂ tCO ₂ /tMetal	TMR -/-	cell toxicity (mg/L)
3	Li	1.90E+01	1.50E+03	9.50E+04
4	Be	7.40E+01	2.50E+03	1.30E+02
13	Al	9.20E+00	4.80E+01	9.40E+04
22	Ti	6.90E+00	3.60E+01	4.70E+04
23	V	2.50E+01	1.50E+03	1.30E+02
24	Cr	7.90E+00	2.60E+01	2.00E+02
25	Mn	2.80E+00	1.40E+01	2.30E+03
26	Fe	8.40E-01	8.20E+00	7.40E+04
27	Co	1.50E+01	6.10E+02	1.80E+03
28	Ni	8.20E+00	2.60E+02	4.40E+03
29	Cu	3.50E+00	3.60E+02	1.60E+03
30	Zn	2.80E+00	3.60E+01	6.00E+03
31	Ga	2.60E+01	7.30E+03	2.10E+03
37	Rb	1.90E+00	1.30E+02	3.00E+05
38	Sr	7.90E+00	5.20E+02	3.10E+05
39	Y	1.10E+01	2.70E+03	5.30E+03
40	Zr	2.50E+00	5.50E+02	2.00E+05
41	Nb	2.40E+01	6.40E+02	2.10E+05
42	Mo	1.50E+01	7.50E+02	2.00E+05
44	Ru	1.60E+02	7.90E+04	2.40E+05
45	Rh	1.10E+03	2.30E+06	2.50E+03
46	Pd	3.30E+02	8.10E+05	3.30E+04
47	Ag	4.50E+00	4.80E+03	3.70E+02
48	Cd	4.10E+00	6.80E+01	2.10E+02
49	In	2.30E+00	1.20E+04	2.00E+02
50	Sn	5.10E+00	2.50E+03	7.00E+03
51	Sb	5.20E-01	5.60E+01	7.90E+02
56	Ba	4.60E+00	5.10E+02	2.20E+05
72	Hf	1.30E+01	6.80E+03	2.20E+05
73	Ta	1.60E+01	1.90E+02	3.60E+05
74	W	1.90E+00	1.80E+04	8.50E+04
77	Ir	3.90E+02	4.00E+05	3.30E+03
81	Tl	1.30E+01	4.30E+02	5.90E+03
82	Pb	3.40E+00	2.80E+01	2.70E+04
83	Bi	5.30E-01	2.20E+02	2.00E+04

主要合金元素の抜粋

No.	Element	CO ₂ tCO ₂ /tMetal	TMR -/-	cell toxicity (mg/L)
13	Al	9.20E+00	4.80E+01	9.40E+04
22	Ti	6.90E+00	3.60E+01	4.70E+04
23	V	2.50E+01	1.50E+03	1.30E+02
24	Cr	7.90E+00	2.60E+01	2.00E+02
25	Mn	2.80E+00	1.40E+01	2.30E+03
26	Fe	8.40E-01	8.20E+00	7.40E+04
27	Co	1.50E+01	6.10E+02	1.80E+03
28	Ni	8.20E+00	2.60E+02	4.40E+03
41	Nb	2.40E+01	6.40E+02	2.10E+05
42	Mo	1.50E+01	7.50E+02	2.00E+05
73	Ta	1.60E+01	1.90E+02	3.60E+05
74	W	1.90E+00	1.80E+04	8.50E+04

本研究ではこの表から材料の主要合金元素（表 1 右）を抜粋してその添加量と毒性リスク係数により算出し、持続的供給リスクなどと同様に材料の高温特性との関係を調べた。ここで、毒性リスクは、IC50 と同一ではなく、IC50 をもとにして算出されたリスク係数（表 1 左右とも一番右側）により算出した数値を毒性リスクとした。これを係数として材料 1 トンに対して主要合金元素を基に算出したが、以下の結果等については、合金元素の添加量をリスク係数によりノーマライズし、積算したものであり、本来は各合金元素が金属イオンあるいは金属塩状態にあるときの毒性に注目すべきであることを記しておく。

各リスクのデータ構造を検討することより、指標に関係する情報を網羅的に収集・整

理が可能になる。

2.2 材料の各リスクの算出

ここでは前述した情報をもとに、各材料について各リスクの数値を算出し、その結果を示す。

2.2.1 持続的供給リスク

図 5 は各材料について持続的供給リスクの社会的影響度の指標となる TMR、価格および供給について算出した結果を合金系に分類して示す。数値算出には参考文献[2,6]より各合金元素について算出されている数値を係数として引用し、各材料の主要合金元素について計算し、その数値を積算して示した。図 5 は、本報告で用いた材料 41 鋼種を示しているが、各材料は規格（例えば、JIS 規格）が同じでも規格の範囲内で成分調整さ

図 5 材料の持続的供給リスク

れているため複数のヒート(ロット)があり、その数は 300 を超える。また、この図は各材料(41 鋼種)を合金系別に分類して各材料の各リスクを概観することを目的とした。**TMR**

図 5(a)は各材料 1 トン当りについて算出した TMR を示す。縦軸に TMR, 横軸に合金系により分類した各材料を示す。シンボルは、○:炭素鋼, △:低合金鋼, □:高合金鋼, ◇:ステンレス鋼, そして*:超合金である。図 5(a)の結果から各合金系の TMR は、鉄が多くを占める炭素鋼や低合金鋼は TMR が少ないが、ニッケルやモリブデンなどの添加合金元素の種類の数やその添加量が多い超合金ほど多くなっている。超合金については材料のベースとなる金属により TMR 量の差が大きくなってばらついている。

価格

図 5(b)は各材料の 1 トン当りの価格を示す。価格については安価な鉄が多くを占める炭素鋼や低合金鋼は積算した総価格が安くなっているが、超合金のようにニッケルやモリブデンなどの添加合金元素の種類の数やその添加量により高価なものになっている。また、超合金の中でも特に高価な値を示している材料はベースとなる金属が高価なコバルトであることが起因する。

供給リスク

図 5(c)は材料 1 トン当りの供給リスクを示す。材料の供給リスクについてもその傾向として炭素鋼は低く、超合金では炭素鋼に比べて供給リスクが著しく高くなっていることがわかる。これは炭素鋼や低合金鋼などはベースが鉄であり、鉄は埋蔵量も多く、またリサイクルなどで再利用されることも起因してリスクが低くなっている。これに対して埋蔵量が少ない合金元素を多く

含有する材料は供給リスクも高くなる。

2.2.2 環境変動リスク

各合金元素の環境負荷

主要合金元素の製造工程において使用するエネルギーを含めて、各工程で排出される環境負荷についてその発生量が関係サイト [16]で紹介されている。また、合金元素を製造する際の環境負荷については物材機構の原田らにより求められ、DB として公開されている [9]。また、各合金元素の環境負荷も公開されており、その結果では環境負荷の発生量はいずれもニッケルが他の合金元素に比べて多い結果となっている。これはニッケル抽出のための精錬工程が大きく影響している。

各種の合金元素について環境負荷が概算されているが、材料はこれらの合金元素により構成されており、図 6 は各材料を合金系により分類してそれぞれの環境負荷(CO₂のみ抜粋)を示す。SO_x 及び NO_x についても同様な傾向を示したので省略する。図 6 は 41 種類の材料を同じく合金系により分類してその環境負荷を示したが、炭素鋼、低合金鋼は低く、やはり合金元素の種類や添加量の多さにより高合金鋼、ステンレス鋼、そして超

図 6 材料の環境負荷 (CO₂ のみ抜粋)

合金はかなりの負荷を与えていることがわかる。これは炭素鋼を構成する添加合金元素のほとんどが環境負荷の低い鉄であり、合金元素の種類も少なく、低合金鋼以下、添加する合金元素の種類が多くなり、同時に公表されている各合金元素の環境負荷が加算されることに起因する。また、超合金のばらつきは環境負荷の発生量が多いニッケルやモリブデンなどの量が影響している。

2.2.3 毒性リスク

図 7 は合金系により分類した材料の毒性リスクを示す。他のリスクと同様な傾向を示しているが、これは他のリスクでも述べたように合金元素の数の多さ、添加量が起因する。さらに、六価クロムに代表されるような毒性を持ち、リスク係数も小さい（係数が小さいほど合金元素の添加量が影響する）クロムもリスクを高くする要因のひとつである。

リスク指標 DB を試作することによって、材料組成と連携すると、合金の種類別のグラフが容易に描くことができる。

図 7 材料の毒性リスク

2.3 耐熱材料の特性

材料特性に関するデータ項目は、第 3 章で後述する（図 9）。地球環境を考慮した評価、あるいは前述したマテリアルリスク指標の応用については、高温機器用材料の選択に必要な高温特性とし、これまでにマテリアルリスク指標を加えた評価を行っている[17]。

材料特性の情報として、物材機構クリープデータシート 41 鋼種の高温引張データと 10 万時間を超えるクリープ破断データを参照、

図 8 材料の高温特性を示す回帰曲線群（設計線図）

解析し、解析データとして評価に用いた。図 8 は、高温引張、クリープ破断データを解析した例（設計線図）を示す。この例は、材料の許容応力算出に必要な高温強度の温度依存性をみる曲線群を示す。短時間強度である 0.2%耐力および引張強さは、温度の多項式回帰により解析した結果を回帰曲線で示す。太線が平均値、細線（淡色）が 95%予測区間（95%予測区間とは、最小二乗法などの統計的手続きにより回帰式を求めたものと同じ母集団から新しく 1 個のサンプルを採ったときに、実現値がこの値の範囲に収まる確率 95%以上であることを保証できる限界値である）の上下限値を示す。

長時間強度（以下、10 万時間強度）は Larson-Miller パラメータ法により内外挿（推定）した結果をもとに 100 時間から 10 万時間までの回帰曲線（等時クリープ破断曲線）を示す。この曲線群から例として、650℃、10 万時間の破断強度は約 70MPa であることがわかる。これらの回帰曲線群は、材料の許容応力算出のための尺度となる。また、解析データとして条件を指定（応力：100MPa、破断時間：10 万時間としたときの推定温度（℃）である）したデータもこの図から算出した。さらに、各材料の 10 万時間強度の温度依存性をみる等時クリープ破断曲線群（図 8 の 10 万時間の破断強度を各材料について抜粋して曲線群としたもの）を描き、その結果、材料は実機の使用環境により低温域の炭素鋼から高温域の超合金まで幅広く分布する。これらの結果は材料選択のためのひとつの目安となる。

3 マテリアルリスク指標の応用

マテリアルリスク指標と材料特性を結び付ける手順について XML 記述法を用いて指

標 DB のデータ構造の検討と試作について以下に述べる。

3.1 各リスクと材料特性のデータ項目

3.1.1 各リスクのデータ項目

マテリアルリスク指標の持続供給、環境変動および毒性の各リスクのルートとなる項目は、物質（対象物質）、材料である。物質は単体あるいは製品であり、単体では材料を構成する鉄やニッケルなどの合金元素も含まれるので結び付ける項目となる。

3.1.2 材料特性のデータ項目

材料特性のデータ項目は、図 9 に示したようにデータ共有に関する汎用的な材料 DB 記述のための枠組みである MatML（図左）[18] をもとにし、その MatML のデータ項目から両者の情報を結びつけるための必要な情報を抜粋して図に示した。この枠組みでは、材料情報（Name など）の記述する項目があり、同レベルに Characterization という項目があり、この項目に材料の化学組成などを記述する。さらに、同じレベルに PropertyData（材料特性）があり、ここに材料の各特性を記述する。例えば、クリープ破断特性であれば、材料特性のクリープ以下に試験応力、破断時間、破断延性などを記述する。

第 2 章と合わせて両者の主なデータ項目について述べたが、ここで両者を結びつける項目として材料特性では材料を構成する化学成分であり、マテリアルリスク指標では、ルート項目となる物質、材料である。図 9 で示したように、この化学成分は材料を構成する合金元素を記述する項目であり、一方のマテリアルリスク指標では物質、材料以下の元素記号、あるいは成分が該当し、情報連携、共有を前提とした DB 化では材料特性の化学成分（鉄やニッケルなど）に鉄などの単体の

図9 MatML をもとにした材料, 材料特性に関する主なデータ項目とリスク (持続的供給リスク) のデータ項目との繋がり (情報連携の共通項目)

マテリアルリスク情報を組み込めば両者の情報共有が可能になる。

3.2 各リスクと材料特性を連携するデータ記述

マテリアルリスク指標に関する情報や材料特性情報などの共有, データ交換を容易にするためのデータ記述 (DB 化) が必要である。その記述法として, 例えば, インターネット上の汎用的なデータ記述形式である XML をベースとした材料特性情報を記述する MatML や MatML を基準とした MatDB[19] などを利用することで連携が可能となる。その例として, MatML では, ルートの Material 以下の BulkDetails に先に述べたような材料名や材料の化学成分 (Characterization) を記述する項目があり, 前述したように, この化

学成分の項に, 例えば, 持続的供給リスクであれば物質 (合金元素単体として) 以下の項目の組み込み, あるいは BulkDetails 以下の項目をリスク情報 (データ項目を構造化したひとつのモジュール (雛型)) に置き換えることにより, 一つの材料に関する特性とリスクに関する情報の結びつけ, さらに, 情報共有が可能となる。

このような情報連携, DB 化が進めば以下に述べるような異種領域を結びつけた新たな材料評価ができる。

以上, マテリアルリスク指標の応用として異種領域の情報に関するデータ構造を示し, それらの情報を連携するための共通項目, データ記述について述べてきた。これらは, ひとつの共通項目をキーワードとして必要な情報を検索できる DB (共通形式で記述され

た複数の DB (併合) 構築へと寄与するものである。このような DB をもとに、ひとつのキーワードを繋がりとして異種領域の情報を組み合わせ、新たな材料評価法、材料選択の指針を示すことができると考える。本報告は、合金元素をキーワードとして、材料の高温特性とマテリアルリスク指標の関係を調べ、材料選択の方向性を示すとともに、新たな評価法とすべく、以下に、その結果を述べる。

4 各リスクと材料特性による材料評価

材料の特性とマテリアルリスク指標である持続的供給リスク, 環境変動リスクおよび毒性リスクと材料の特性との関係について調べた. これはある材料に対して目的の特性を得るためにはどの位のリスクがともなう

かを調べたものである。材料特性については第2章(2.3節)で述べた解析データ(引張強度, 10万時間強度, 推定温度)を用いた。

4.1 持続的供給リスクとの関係

TMR と特性

TMR と材料の特性との関係を図 10(a)に示す。両者の関係は、超合金の TMR の数値が特出しているが、これは採掘から製品化するまでの過程において合金元素の種類の多さ、埋蔵量あるいは採掘等による物質の移動などが要因と考える。また、超合金についてはばらつきがみられるが、材料のベース金属が TMR の少ない鉄であり、対して TMR の多いニッケルが起因する。さらに、温度域についてもばらつきがあり、これは耐食性の重視あるいは高温環境下の強度の重視などその使

図 10 持続的供給リスクと材料特性（推定温度）との関係

図 11 環境変動リスクと材料特性（10 万時間強度）との関係

用目的による。

価格と特性

材料を構成する合金元素の鉄、ニッケルなどの主要合金元素についてここ数年の価格推移（算出には表 1 の平均価格を適用）をもとに材料の価格を算出し、特性との関係を調べ、その結果を図 10(b)に示す。両者の関係は TMR と同様な傾向を示したが、価格については安価な鉄がベースの炭素鋼や低合金鋼は低温、安価に位置し、高合金鋼やステンレス鋼は中間域に、ニッケルをベースとして合金元素の数が多い超合金は高温、高価に位置する。

供給リスクと特性

特性と供給リスクとの関係についても他の 2 項目と同様な傾向を示す。その結果を図 10(c)に示す。材料別ではやはり合金元素の数が少ない炭素鋼は供給リスクが低く、高合金

鋼、超合金など合金元素の数や添加量が多くなるほどその埋蔵量や資源確保により供給リスクが高くなる。

4.2 環境変動リスクとの関係

図 11 は 10 万時間強度と環境負荷 ((a)CO₂, (b)SO_x, (c)NO_x) との関係を示す。この結果から環境負荷との関係はどれも同様の傾向を示しているが、これは合金元素の数や製造法などが影響し、合金元素の数が少ない炭素鋼や添加量が少ない低合金鋼などは環境負荷が少なく環境への影響も少ない。一方、鉄ベースと異なりニッケルやコバルトをベースとする超合金は合金元素の数や合金元素の製造過程（採掘から製品まで）が影響し環境負荷が多くなっている。

4.3 毒性リスクとの関係

図 12 は毒性リスクと高温特性との関係を示す。ここでの高温特性は、前述したようにある材料に 100MPa の応力を負荷した時に 10 万時間耐えることができる温度である。左下に位置する炭素鋼は 400 から 500℃を示し、右側の高温域に位置する材料は超合金である。この図から推定温度が 700℃を超える材料であっても毒性の強い合金元素が多く含まれていれば、使用後の廃棄の形態（不法投棄、野ざらし等）によっては決して望ましいものではない。また、高合金鋼あるいはステンレス鋼は、超合金に比べて温度が低いにもかかわらず毒性リスクが同程度となっている要因としてやはりクロム量が多いことがあげられる。

以上、各種材料の特性と 3 種類のリスクとの関係を調べた。その結果、両者の DB 情報を連携することにより従来の材料特性主体の材料評価に加え、マテリアルリスクの視点からの情報も考慮した材料設計、選択への指標を示すことができた。

5 マテリアルリスク指標による材料選択

3 種類のリスクと材料の高温特性との関係を調べた結果をもとに最適な材料選択のための指針を模式図として図 13 に示す。図 13 は、図 10 から図 12 の結果（3 種類とも炭素鋼から、低合金鋼、高合金鋼およびステンレス鋼、そして超合金の順に並べている）を模式化したもので、いずれも右肩上がりの傾向を示している。ここで、図 13 の特性は、持続的供給リスクおよび毒性リスクについては推定温度であり、環境変動リスクについては 10 万時間強度であることを付け加えるが、3 種類の図の傾向は総じて各材料を構成する合金元素の数、添加量が影響している。その

図 12 毒性リスクと材料特性（推定温度）との関係

例として、添加合金元素の数、量とも多い超合金は他の材料に比べ高温特性が優れているが、リスクも高い。また、各材料の特性については右側に位置する材料が優れているが、一方、リスクに注目すると右上に位置する材料は、その材料に対して必要な長時間強度あるいは耐高温を得るためには地球環境にこれだけの影響を与えていることを示しており、材料製造の際にはこのような結果を考慮する必要がある。さらに、図 13 の縦軸の各リスクについては上側に位置する材料はリスクが高いことを示すものであり、総合的な判断として右下の領域に位置する材料の選択、開発が望まれる。言い換えれば、図 13 は、耐熱材料が、より過酷な環境で使用されるのに必要な材料特性を得るために、より高合金の材料が使用されてきた。すなわち、炭素鋼から低合金鋼、高合金鋼、ステンレス鋼そして高合金へと、多くの入手困難で高価な合金元素で構成する材料が開発されてきた。資源の持続的供給、環境変動、毒性リスクの種々の因子の値が低い合金元素で構成される材料が、地球環境を大きく変えない環境適合性の高い材料である。

図 13 マテリアルリスク指標と材料特性からの材料評価・選択の方向性

評価例

ステンレス鋼は、高合金で広範囲に使用されている。使用される環境によって主要合金元素であるニッケルやクロムの合金元素を増減したり、微量合金元素を添加して改良されてきた。各種のステンレス鋼を環境適合性と高温強度との関係性を評価、検討した。環境適合性は、3種類のリスクのいずれの因子でも、安価で容易に入手可能な合金元素の量に大きく影響される。ここでは、TMR と高温強度の関係を図 14 に示す。高温強度は 600℃1000 時間のクリープ破断強度を使用した。代表的なステンレス鋼である 18Cr-8Ni (SUS304H TB) は鉄にクロム 18%、ニッケル 8%が加えられている。この材料より TMR が高い 18Cr-12Ni-Mo (SUS316H TB) はニッ

ケル量が多くモリブデンも添加されているので、TMR が高くなっている。18Cr-10Ni-Ti (SUS321H TB) や 18Cr-12Ni-Nb (SUS347H TB)

図 14 各種ステンレス鋼のクリープ破断強度 (600℃, 1000 時間) と TMR との関係

TB) は、チタンあるいはニオブなどが少量添加され TMR はそれほど変わらないが、高温強度が増加している。12Cr (SUS403-B) は、クロム 12%のみを加えたステンレス鋼である。したがって、TMR は 18Cr-8Ni より少なく、強度も低い。図には、5 種類の低誘導放射能ステンレス鋼も評価している。このステンレス鋼は、中性子が照射される環境ではステンレス鋼に含まれるニッケルがコバルト 60 に核変換し誘導放射能を高めるので、ニッケルをマンガンすなわち入手が容易な合金元素に置き換え、低誘導放射能のステンレス鋼として検討、開発された材料である [20]。5 種類のステンレス鋼の TMR と高温強度との関係は、ニッケルをマンガンを置き換えることによって、TMR は 12Cr と同じ値で、炭素やタングステン、バナジウムあるいはチタンなどを少量添加することによって、TMR を大きく増加させることなく、高温強度を高めている。このように、機器設計で要求される材料の特性と各種のリスク指標との関係を調べることによって、持続的社会を考慮した材料評価の第 1 歩となろう。すなわち、マテリアルリスク指標の多くの因子について、数値化することによって、より詳細な材料の環境適合性の評価が可能になる。

6 おわりに

持続的社会を考慮した材料選択や材料開発の指針得るために、これまで提唱されている資源の持続的供給、材料製造時の環境変動、材料使用や廃棄時の毒性の 3 種類のリスクからなるマテリアルリスク指標と耐熱材料の高温特性の関係を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

1) マテリアルリスク指標 DB を試作するために必要な 3 種類のリスクのデータ構造や

データ項目を明らかにし、それらを XML 記述を行うことによって、3 種類のリスクに係るデータ項目の情報と耐熱材料の高温特性との関係を容易に示すことができた。

2) 持続的供給リスクについては、TMR、価格、そして供給リスクの 3 項目について材料の特性との関係を調べたが、どの関係も炭素鋼から低合金鋼、高合金鋼およびステンレス鋼、そして超合金へと右肩上がりの傾向を示した。これは合金元素の種類の数、添加量の多少が起因する。

3) 環境変動リスクについては、合金元素の数や製造法などが影響し、合金元素の数が少ない炭素鋼や添加量が少ない低合金鋼などは環境負荷が少なく環境への影響が少ない。一方、鉄ベースと異なりニッケルやコバルトをベースとする超合金は合金元素の数や合金元素の製造過程（採掘から製品まで）が影響し環境負荷が多くなっている。

4) 毒性リスクについては、700℃の温度環境で 10 万時間耐える強度がある材料でも低合金鋼などに比べるとリスクが大きい。また、高合金鋼あるいはステンレス鋼は超合金に比べて低温度側に位置しているがリスクが高い要因としてクロムの添加量が影響している。これは表 1 のクロムの毒性リスク係数が小さいことが要因である。

5) いずれのリスクにおいても、超合金のように高温特性の良好な材料ほど合金元素の種類の数と添加量が多く、持続的供給リスクにおいては TMR、価格、そして供給リスクの数値がいずれも大きくなる。これは添加する合金元素が要因であり、強度的には優れているが各リスクも高いことから、地球環境を考慮し、さらに持続的社会を目指すためには容易に入手可能で安価な合金元素を基にした合金で高性能な材料開発を考える必要が

ある。

6) 機器設計で要求される材料の特性と各種のリスク指標との関係を調べることによって、持続的社会を考慮した材料評価の第1歩となろう。すなわち、マテリアルリスク指標の多くの因子について、数値化することによって、より詳細な材料の環境適合性の評価が可能である。

謝辞

最後に、本研究は平成20年度の日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究B：課題番号208538）の支援を受けたことを報告する。

参考文献

[1] 日本学術振興会：科学研究費補助金（基盤研究B 課題番号208538），環境材料設計基準に資するマテリアルリスク指標，2008。
 [2] 中島謙一他：関与物質総量（TMR）の算定，*Journal of Life Cycle Assessment, Japan*, Vol.2, No.2, pp.152-158, 2006。
 [3] 原田幸明：希少資源・元素の現状，*まてりあ*, vol.46, No.8, pp.543-548, 2007。
 [4] 芳須 弘他：マテリアルリスク指標データベースの設計と活用，*情報知識学会第17回年次大会*，Vol.19, No. 2, pp.112-119, 2009。
 [5] 芳須 弘他：資源供給情報を利用した材料の選択指針，*情報知識学会第18回年次大会* Vol.20, No. 2, pp.163-170, 2010。
 [6] 芳須 弘他：マテリアルリスク情報の統合と応用，*情報知識学会第19回年次大会* Vol.20, No. 2, pp.163-170, 2011。
 [7] 製品環境情報提供システム事務局：資源枯渇性特性化係数について，2005。
 [8] 芳須 弘他：材料の環境適合性からの評価，*日本材料学会，材料*，Vol.59, No.5, pp.354-359, 2010。

[9] （独）物質・材料研究機構元素戦略センター（旧エコマテリアル研究センター）：
<http://www.nims.go.jp/ecomaterial/ecosheet/ecosheet.htm>.
 [10] （独）物質・材料研究機構クリープデータシート：No.1～No.41。
 [11] （社）未踏科学技術協会：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，（1994-1996）。
 [12] 経済産業省化学物質管理課：
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/msds/index.html（2009年3月参照）。
 [13] （独）製品評価技術基盤機構：
<http://www.prtr.nite.go.jp/msds/msds.html>（2009年3月参照）。
 [14] Kohmei HALADA and Nozomu KATAGIRI：Sustainability Index of Metals, EcoBalance 2010, 2010。
 [15] 山本玲子他：生体為害性合金元素と材料，*まてりあ*，Vol.43, No.8, pp.639-642, 2004。
 [16] 物質・材料研究機構元素戦略センター：
<http://www.nims.go.jp/ecomaterial/SMAND/database/top.html>（2010年2月参照）。
 [17] 芳須 弘他：環境適合性からみた材料の評価・選択指針，*配管技術*，vol.53, No.4, pp.32-36, 2011。
 [18] MatML：
<http://www.matml.org/downloads/matml31v5.xsd>（2011年2月参照）。
 [19] MatDB，インターネット版先進金属材料の各種材料特性ファクトデータベース：
http://www.nims.go.jp/mat_info/AMM_DB/index.html（2011年3月参照）。
 [20] F. Abe, T. Nod, H. Araki, S. Nakazawa：High temperature strength of simple and solute-modified 10Cr-30Mn austenitic steels, *JOURNAL of NUCLEAR MATERIALS*, 191-194(1992)668-671。

（2011年11月1日受付）

（2012年7月28日採択）