

熱起電力測定装置と試験片からなる系の熱伝導解析

Thermal Analysis of system composed of a specimen and a device for thermoelectric power measurement

上坊寺 克郎 (Katsuo Joubouji)*

要約 原子炉容器の監視試験片の熱起電力測定を目的とした熱起電力測定装置を新たに製作した。熱電能の算出には電極と試験片の接触点間の温度が必要となるが、この装置により計測される温度は接触点の温度と一致しない。そこで、計測値の補正方法を検討するため、試験片の長軸と電極軸の関係、電極を接触させる位置、試験片の長さや材質、電極の加熱温度、外気温度の6点に関し、96通りの熱起電力測定時の電極と試験片の温度分布を熱伝導解析により求めた。その結果、計測値の補正においては計測される電極間温度差と真の接触点間温度差の比が重要な因子であり、その値は試験片の長軸と電極軸の関係、試験片の長さおよび試験片の熱伝導度により変動することが分かった。

キーワード 熱起電力, 熱伝導解析, 熱伝導度, 監視試験片

Abstract A new device for measurement of thermoelectric power of Charpy specimens for surveillance program of reactor vessel was manufactured. Difference with the temperatures of hot and cold junction was required to obtain thermoelectric power of a specimen. But temperatures measured by the device did not agree with temperatures of hot and cold junction. In order to investigate the way of correction, temperature distribution in a specimen and electrodes during measurement was calculated by thermal analysis of 96 of cases, which were prepared from combination of the following factors, (1) relation between longer axis of a specimen and center axis of electrodes, (2) positions of hot and cold junction, (3) length and (4) material of a specimen, (5) heating temperature of an electrode and (6) ambient temperature. And it was found that an important factor for the correction was the ratio of difference between measured temperatures of electrodes to difference between temperatures of hot and cold junction. The factor showed the dependency to length of a specimen, thermal conductivity of a specimen and relation between longer axis of a specimen and center axis of electrodes.

Keywords thermoelectric power, thermal analysis, thermal conductivity, charpy specimen

1. はじめに

原子炉容器は、炉心を内包するとともに1次冷却材の圧力バウンダリを構成する重要機器の一つであり、ステンレス鋼を内張りした低合金鋼から成る。低合金鋼については供用期間中に中性子照射により遷移温度の上昇と上部棚エネルギーの低下が生じること(中性子照射脆化)が知られている⁽¹⁾。現在は、運転開始時に炉内に挿入された原子炉容器と同一の材料から製作された監視試験片(シャルピ衝撃試験片や引張試験片)を定期的に取り出して破壊試験を実施することにより中性子照射に伴う脆化程度を実測・監視し^{(2)~(4)}、健全性が維持されていることを確認している^{(5)~(6)}。しかし、当初に予定されて

いた供用期間の延長に伴い、炉内に装備されている監視試験片に不足が生じる可能性があり、その対策として、使用済監視試験片の再生⁽⁷⁾や使用済監視試験片からの小型試験片の製作⁽⁸⁾について研究が進められた。また、監視試験片の脆化の非破壊評価手法の研究^{(9)~(17)}も実施されており、原子力安全システム研究所(以下「INSS」という)では、鑄造2相ステンレス鋼の熱時効の非破壊評価に用いた熱起電力法^{(18)~(23)}の適用を検討している。熱起電力法による照射脆化の非破壊評価に関しては、低合金鋼の熱起電力が照射量に対して敏感に反応し^{(15)~(17)}、照射脆化の要因の一つとされる不純物であるCuの析出を反映した結果⁽¹⁵⁾と報告されている。

INSSでは、原子炉容器の監視試験片(シャルピ

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

衝撃試験片)の熱起電力測定を目的とした熱起電力測定装置を新たに製作した。この熱起電力測定装置により計測される温度と電圧を、2点間の電位差が2点間の温度差に比例する熱電効果の関係に当てはめ、測定対象の熱電能を導出する。しかし、熱起電力測定装置により計測される温度は電極に差し込んだ温度センサにより測定され、その検出端が電極と試験片の接触位置と一致しないため、熱電能の算出に当って計測値を補正することが求められる^{(24)~(26)}。なお、計測値の補正で必要となる因子には装置固有の値が含まれ、また、新たに製作した熱起電力測定装置では電極形状や電極とサンプルの位置関係が従来の装置⁽²¹⁾と異なっており、従来の装置において実施した補正方法をそのまま転用することは適わず、測定装置毎に確認することが必要となる。ここでは、新たに製作した熱起電力測定装置に関する計測値の補正方法の検討のために実施した熱起電力測定装置の電極と試験片からなる系の熱伝導解析の結果を示し、それから導かれる計測値の補正方法に関する知見を示す。なお、熱伝導解析には汎用構造解析コードABAQUS⁽²⁷⁾を使用した。

2. 熱起電力測定装置

2.1 熱起電力測定装置

新たに製作した熱起電力測定装置を図1に示す。電極や試料台等を装備した測定部、シーケンサ等を収納した制御系ラック、計測器を収納した計測系ラック、データ収集・記録用PCから構成される。電極材料にはCuを用い、高温側電極(ホットチップ)ではヒーターによる加熱が可能となっており、低温側電極(コールドタッチ)では図2に示すベルチェ素子を用いた冷却機構をオプションとして用意している。また、どちらの電極にも温度センサと電圧測定用端子が差し込んであり、約10mのケーブルを経由して、温度計と電圧計に接続している。試験片の長軸が電極軸と垂直になるようにして、試験片を試料台に設置した様子が図3である。測定時には2つの電極を試料台の試験片に対して約30Nの荷重で押し当てることにより、試験片内部に温度勾配を発生させ、電極に差し込んだ温度センサと電圧測定用端子から電極間の温度差と電位差を検出する。

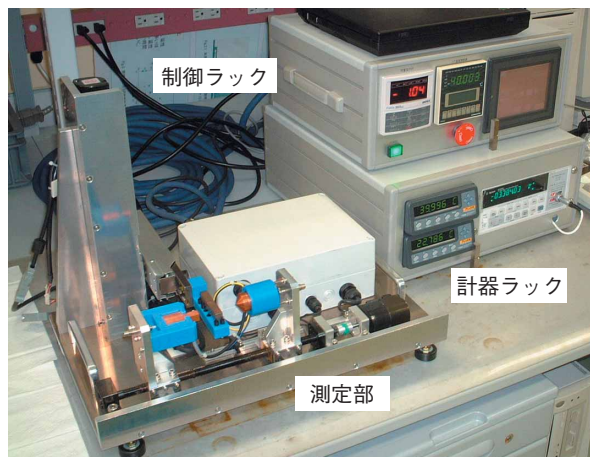


図1 熱起電力測定装置



図2 コールドタッチの冷却機構

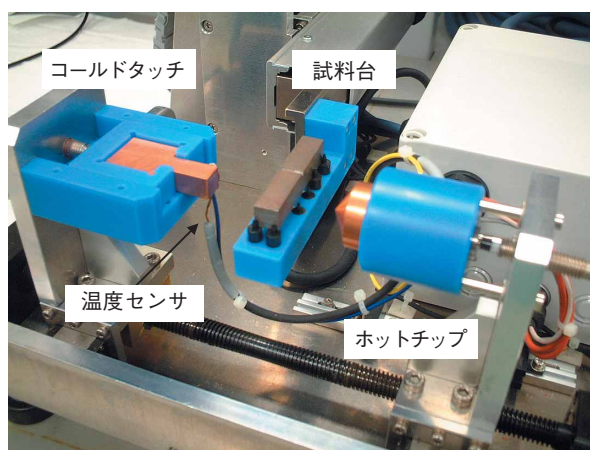


図3 測定部に試験片を設置した状態

2.2 熱電能の算出式

温度の異なる2つの電極を異種金属の材料表面に押し当てると、熱電効果により2点間に温度差 ΔT

が生じることに伴い、電位差 ΔV が発生するが、この両者を測定することにより熱電能を算出する。ところで、測定時の熱電回路は図4に示すように、ホットチップ、試験片、コールドタッチ、導線等の中継部、電圧計から構成される。

ここで、試験片の熱電能 (TEP) を、試験片と電極の接触点間の電位差 ΔV をその温度差 ΔT で割った値と定義すると、2点間の電位差が熱電能と2点間の温度差の積となることから、

$$\begin{aligned}\Delta V &= TEP \times (T_{hs} - T_{cs}) \\ &= V_{hs} - V_{cs} \\ &= V_h + Q_a(T_{hs} - T_h) - \{V_c + Q_a(T_{cs} - T_c)\} \\ &= V_h - V_c + Q_a(T_{hs} - T_{cs} - T_h + T_c) \\ &= V_1 + Q_b(T_h - T_{vm}) - \{V_2 + Q_b(T_c - T_{vm})\} \\ &\quad + Q_a(T_{hs} - T_{cs} - T_h + T_c) \\ &= V_1 - V_2 + Q_b(T_h - T_c) + Q_a(T_{hs} - T_{cs} - T_h + T_c)\end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}(\text{接触点間の温度差}) \quad \Delta T &= T_{hs} - T_{cs} \\ (\text{2つの電極の温度差}) \quad \Delta T_m &= T_h - T_c \\ (\text{電圧計の指示}) \quad \Delta V_m &= V_1 - V_2\end{aligned}$$

とすると、

$$TEP = \frac{\Delta V}{\Delta T} = Q_a + \frac{\Delta T_m}{\Delta T} \left(\frac{\Delta V_m}{\Delta T_m} + Q_b - Q_a \right)$$

となる。なお、式中の各記号は図4に示す通りである。ゆえに、電極 (Cu) に対する相対熱電能 (TEPCu) は、

$$TEPCu = TEP - Q_a = \frac{\Delta T_m}{\Delta T} \left(\frac{\Delta V_m}{\Delta T_m} + Q_b - Q_a \right)$$

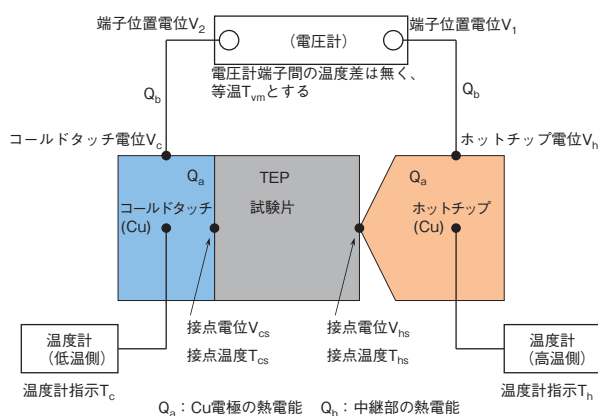


図4 測定時の熱電回路

となり、基準温度 (T_{ref}) における値は、

$$TEPCu|_{T_{ref}} = \frac{\Delta T_m}{\Delta T}|_{T_{ref}} \left\{ \frac{\Delta V_m}{\Delta T_m}|_{T_{ref}} + (Q_b - Q_a)|_{T_{ref}} \right\}$$

ここで、 $\Delta V_m / \Delta T_m$ の温度特性が傾き α の直線⁽¹⁾で示されるとすると、測定時の試験片の温度を T_{av} として

$$\frac{\Delta V_m}{\Delta T_m}|_{T_{av}} = \frac{\Delta V_m}{\Delta T_m}|_{T_{ref}} + \alpha(T_{av} - T_{ref}) \quad (2)$$

従って、基準温度における試験片の相対熱電能は、以下の式から算出される。

$$\begin{aligned}TEPCu|_{T_{ref}} &= \frac{\Delta T_m}{\Delta T}|_{T_{ref}} \left\{ \frac{\Delta V_m}{\Delta T_m}|_{T_{av}} \right. \\ &\quad \left. - \alpha(T_{av} - T_{ref}) + (Q_a - Q_b)|_{T_{ref}} \right\} \quad (3)\end{aligned}$$

式3の右辺の波括弧内において、第1項は熱起電力測定装置の計測値より得られ、第2項は材料毎の実測値を式2に適用することより得られる。第3項は電圧測定におけるゼロ点補正に相当する項で測定装置固有の値となるが、電極と同じCuを試験片として測定すると式3の左辺がゼロになることから決定できる。従って、電極の温度差と接触点間の温度差の比 β ($=\Delta T_m / \Delta T$) を決定すれば、熱電能算出に必要な補正式が完成する。しかし、電極と試験片の接触点の温度を実測することは不可能であるため、測定時における試験片と電極の熱伝導解析から接触点の温度を推測し、 β に関する情報を採取する。

3. 熱伝導解析

材料中における定常時の熱伝導は、温度を T 、熱伝導度を k 、比熱を c 、密度 ρ として、

$$\frac{k}{c\rho} \nabla^2 T = 0$$

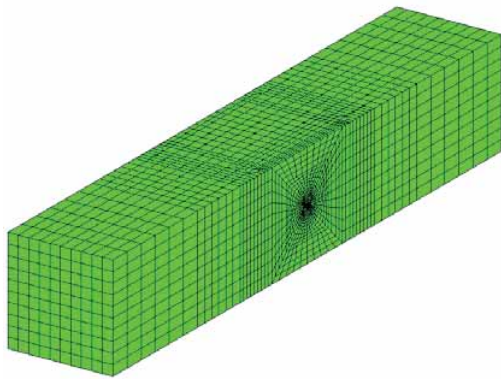
と表される。ここでは上式を基にして、電極と試験片を接触させた場合の系の温度分布を求める。対象とする系は2つの電極 (ホットチップ、コールドタッチ) と試験片から構成されており、それらを3次元ソリッド要素により要素分割した。

3.1 系の要素分割

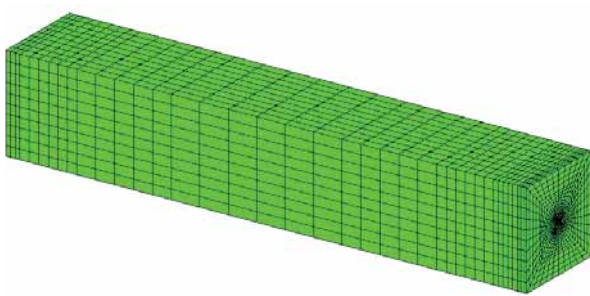
試験片の形状は $10 \times 10 \times 55$ (mm) と $10 \times 10 \times 25$ (mm) の2種類の直方体であり、熱起電力測

表1 解析に用いる材料特性

	単位	Cu	Fe	Ni	Ti	2相ステンレス鋼	低合金鋼
熱伝導度	W/m・K	397	78.2	88.5	21.6	13.4	40.3
平均比熱	J/kg・K	386	456	452	528	469	445
密度	kg/m ³	8.93	7.87	8.9	4.5	7.9	7.8



(a) 試験片の長軸を電極軸と垂直にする場合



(b) 試験片の長軸を電極軸と平行にする場合

図5 試験片の要素分割

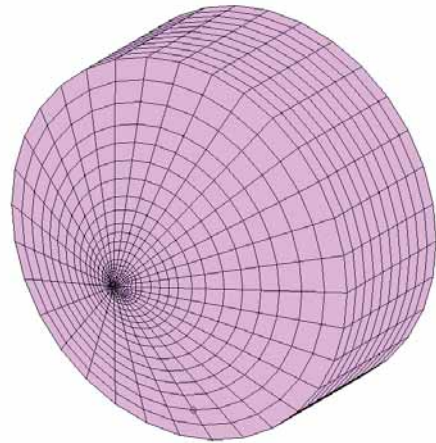


図6 ホットチップの要素分割

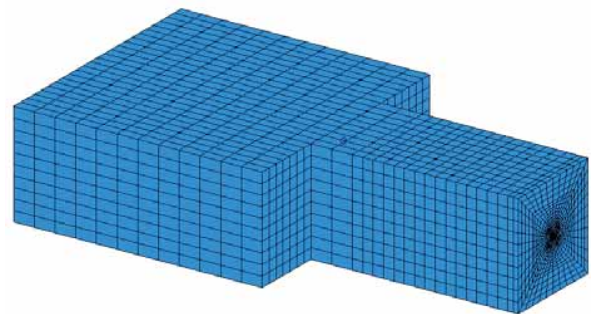


図7 コールドタッチの要素分割

定時の試験片と電極の位置関係に応じて要素分割の方法を変えているため、試験片の要素分割には6種類あり、節点数は14,641~28,413、要素数は13,192~26,880である。例として、長さ55mmの試験片の長軸を電極軸と垂直にする場合と試験片の長軸を電極軸と平行にする場合を図5に示す。試験片材料には、Fe、Ni、Ti、2相ステンレス鋼、低合金鋼を想定し、解析に用いる材料特性は表1に示す通りである。純金属である前3者については文献値を採用し⁽²⁸⁾、合金材である後2者については実際に測定された値を採用した。解析においては、材料特性は試験片全体で均一とし、電極との接触面を除く全表面を外気との熱伝達境界と設定した。

ホットチップは図6に示すように、加熱用ヒー

ターを取り付けている電極の（試験片から見て）後ろ側を省略して手前側だけを要素分割した。節点数は17,177、要素数は16,320であり、すべての解析で要素分割の方法を統一している。電極素材はCuであり、解析に用いる材料特性は表1の通りである⁽²⁸⁾。解析においては、材料特性はホットチップ全体で均一とし、電極突端面を試験片との接触面、電極側面部を空気との熱伝達境界とした。後背部は要素分割から除外した領域との界面とそれ以外の筐体内で滞留する加熱された空気との界面に区分し、前者をホットチップの設定温度による温度固定面、後者を断熱境界とした。

コールドタッチは図7に示すように電極全体を要

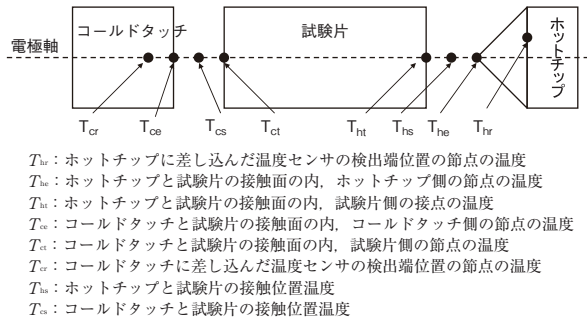


図8 β の算出に使用する節点の温度

要素分割し、節点数は24,178、要素数は22,512であり、すべての解析で要素分割の方法を統一している。電極素材はCuであり、解析に用いる材料特性は表1の通りである⁽²⁸⁾。解析においては、材料特性はコールドタッチ全体で均一とし、全表面を試験片との接触面、空気との熱伝達境界、電極を収納する筐体との熱伝達境界の3つに区分しており、測定の際に冷却機構を使用しない場合の系となっている。

3.2 解析手順

実際の測定では、ホットチップを設定温度まで加熱して温度が安定した後、コールドタッチとホットチップを試験片に接触させて測定に入るが、解析でも測定と同様な手順を取る。最初に、外気と等温になっているホットチップをホットチップ設定温度になるように加熱した状態を定常解析し、その解析結果をホットチップの初期温度分布と規定した。なお、試験片とコールドタッチの初期温度分布は共に25℃で全体一様で、外気温度は測定の全期間に渡って不変として、定常解析を実施した。

解析は表2に示す通り、計96通りについて実施した。注目点は、(1)試験片の長軸と電極軸の関係、(2)電極の接触位置、(3)試験片の長さ、(4)ホットチップの設定温度、(5)外気温度、(6)試験片の材質の6点である。解析終了後、電極軸上の節点の温度分布から、それぞれの場合について、電極の温度差と接触点間の温度差の比 β を式4で計算した。

$$\begin{cases} T_{hs} = \frac{T_{he} + T_{ht}}{2} \\ T_{cs} = \frac{T_{ce} + T_{ct}}{2} \\ \beta = \frac{T_{hr} - T_{cr}}{T_{hs} - T_{cs}} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、式中の記号は図8の通りであり、電極と試験片の接触温度を接触点の節点の温度の平均と設定した。

ところで、解析に用いる4つの熱伝達係数、すなわち、外気との熱伝達係数、コールドタッチと筐体との熱伝達係数、ホットチップと試験片の熱伝達係数、コールドタッチと試験片の熱伝達係数は、それぞれ、 2.5×10^{-5} 、 2.5×10^{-6} 、1.0、0.003と仮定した(いずれも単位は、 $W/mm^2 \cdot K$)。これらは実際の測定結果と比較して検証した値ではないため正確とは言えないが、定性的な検討をする上では十分であると考えている。

3.3 解析結果

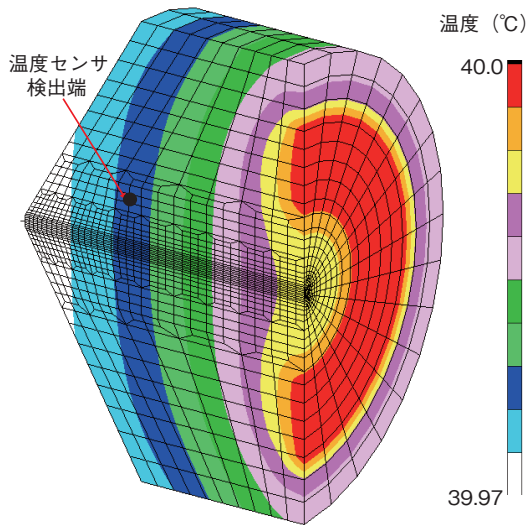
3.3.1 定常時の温度分布

ホットチップ単体の定常解析により得られた測定開始時の初期温度分布を図9に示す。最高温度と最低温度の差は0.032℃となっており、ホットチップを試験片に接触させる時点では、ホットチップ全体が設定温度でほぼ均一となっていることが分かる。

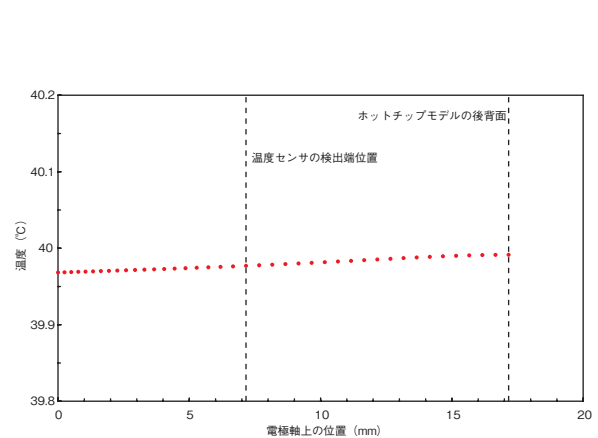
図10では、ホットチップ設定温度40℃、外気温度25℃として、材質がFeで長さ55mmの試験片の中央部に電極を接触させた場合の定常解析の結果を示す。図10(a)では系全体の温度分布を示すが、温度勾配が発生しているのは試験片のホットチップとの接触点近傍だけである。ホットチップは設定温度でほぼ一様であり、コールドタッチと試験片のコールドタッチ近傍もほぼ一様な温度となっている。図10(b)ではホットチップの突端付近の温度分布を示すが、試験片との接触点近傍において温度の急勾配が見られ、突端から距離が約1mmの地点で約1.1℃の温度差が生じている。図9(a)の初期温度分布との比較から、ホットチップ突端の温度と温度センサの検出端位置の温度の差が拡大していることが分かるが、これが熱起電力測定における計測値補正を要する理由の一つである。図10(c)では試験片内部の温度分布を示すが、ホットチップとの接触点を中心として半球状の温度分布が形成されることが見てとれる。図10(d)では試験片のコールドタッチ側表面の温度分布を示すが、電極との接触面(10×10mm)内の節点の最高温度と最低温度の差は0.02℃未満であり、この接触面内では一様といえる。これより、コールドタッチと試験片の接触位置温度を接触面の

表2 解析の条件設定

	Y5C	Y5E	Y2C	Y2E	N5	N2
試験片の配置						
試験片の節点数	17,061	16,093	14,883	14,641	28,413	20,097
試験片の要素数	15,192	14,392	13,392	13,192	26,880	18,816
1 試験片の長軸と電極軸の関係	垂直	垂直	垂直	垂直	平行	平行
2 電極の接触位置	試験片中央部	試験片端部	試験片中央部	試験片端部	試験片端面	試験片端面
3 試験片の長さ	55mm	55mm	25mm	25mm	55mm	25mm
4 試験片の材質	Fe	Fe	Fe	Fe	Fe	Fe
ホットチップ設定温度 (°C)	4通り (30, 35, 40, 45)	4通り (30, 35, 40, 45)	4通り (30, 35, 40, 45)	4通り (30, 35, 40, 45)	4通り (30, 35, 40, 45)	4通り (30, 35, 40, 45)
外気温度 (°C)	3通り (22, 25, 28)	3通り (22, 25, 28)	3通り (22, 25, 28)	3通り (22, 25, 28)	3通り (22, 25, 28)	3通り (22, 25, 28)
5 ホットチップ設定温度及び外気温度	ホットチップ：40°C 外気：25°C	ホットチップ：40°C 外気：25°C	ホットチップ：40°C 外気：25°C	ホットチップ：40°C 外気：25°C	ホットチップ：40°C 外気：25°C	ホットチップ：40°C 外気：25°C
試験片の材質	4通り (Ni, Ti, 低合金鋼, 2相ステンレス鋼)	4通り (Ni, Ti, 低合金鋼, 2相ステンレス鋼)	4通り (Ni, Ti, 低合金鋼, 2相ステンレス鋼)	4通り (Ni, Ti, 低合金鋼, 2相ステンレス鋼)	4通り (Ni, Ti, 低合金鋼, 2相ステンレス鋼)	4通り (Ni, Ti, 低合金鋼, 2相ステンレス鋼)



(a) ホットチップの初期温度分布



(b) ホットチップの電極軸上の初期温度分布 (X=0が突端)

図9 ホットチップの初期温度分布

電極軸上の1点で代表しても問題にはならないと判断した。

図11では、ホットチップ、試験片、コールドタッチの電極軸上での温度変化を示す。ホットチップと試験片の接触点近傍での温度変化が全体の温度変化の大半を占めていることが分かる。温度差のない所では熱起電力は生じないことから、計測される電圧の大半がこの範囲に起因することになり、試験片の

中での被測定領域となる範囲が限定されることを示している。なお、図11と式4から、この場合の定常時の β は1.345と計算される。

3.3.2 β の比較

以降では、表2に示した96通りの場合の熱伝導解析の結果から、 β の判定に関連する知見を導く。表

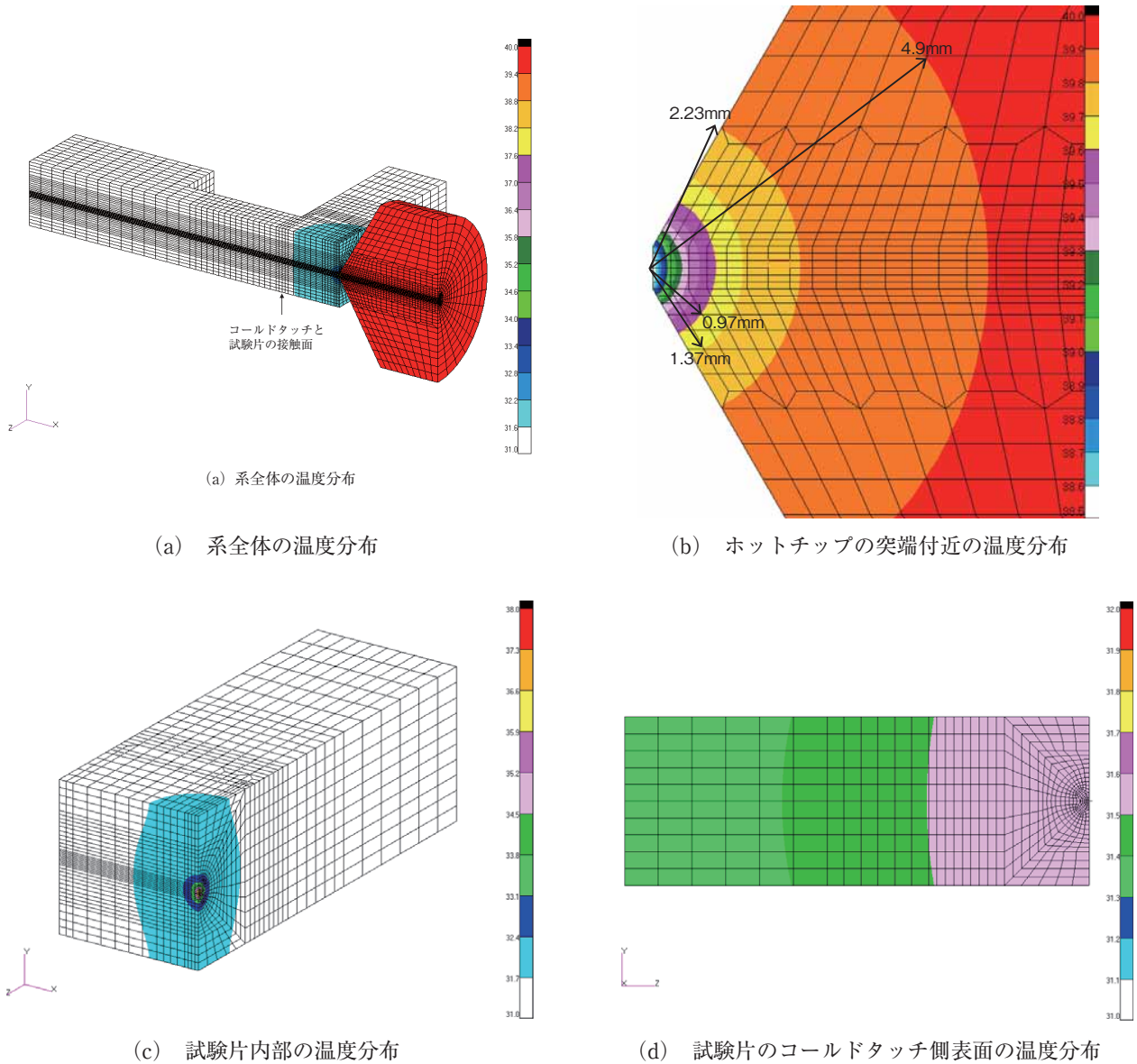


図 10 定常解析の結果例：Y5C（ホットチップ設定温度 40℃，外気温度 25℃）

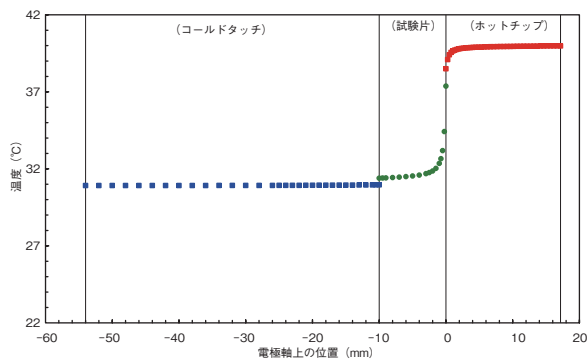
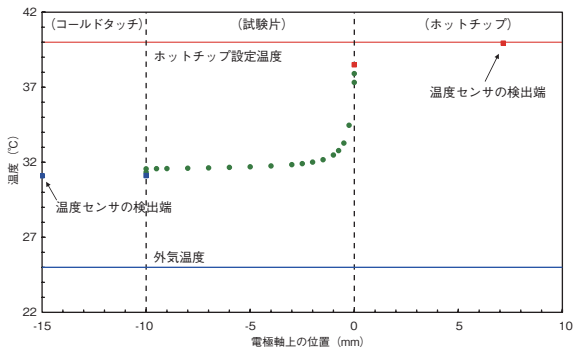


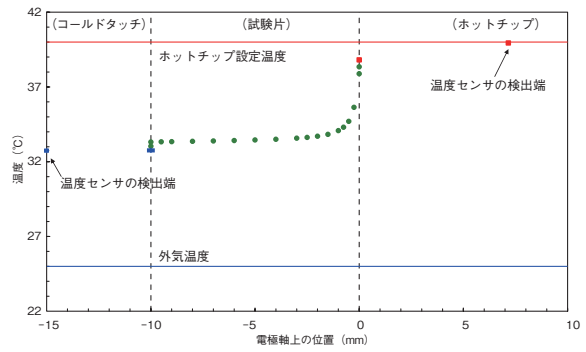
図 11 ホットチップ，試験片，コールドタッチの電極軸上の温度分布：Y5C（ホットチップ設定温度 40℃，外気温度 25℃）

2に示す6通りの試験片配置について，ホットチップの設定温度（40℃），外気温度（25℃），試験片の材質（Fe）を共通として定常解析から得られた試験片の電極軸上の温度分布と電極に差し込んだ温度センサの検出端の温度を図12に示す．いずれの場合も3.3.1で示したのと同様に，ホットチップと試験片の接点近傍で温度変化の大半が生じ，ホットチップに差し込んだ温度センサの検出端位置の温度とホットチップ先端の温度に差が発生している．これらを式4に適用して得られた β は図13の通りである．

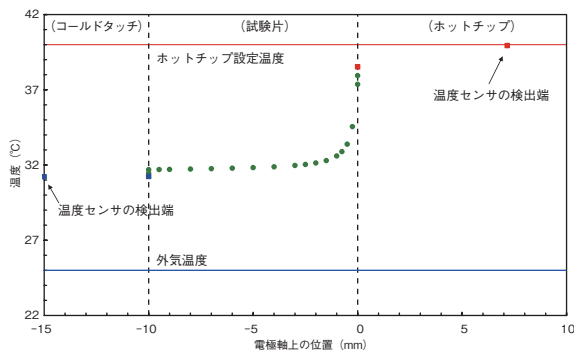
得られた β を，5通りの観点（試験片の配置，電極の接触位置，試験片の長さ，ホットチップ設定温度と外気温度，試験片の材質）から比較する．



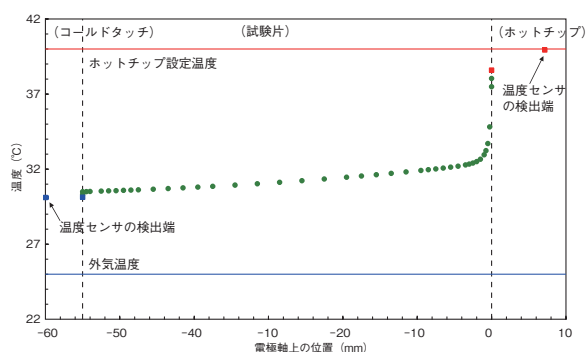
(a) Y5C の場合



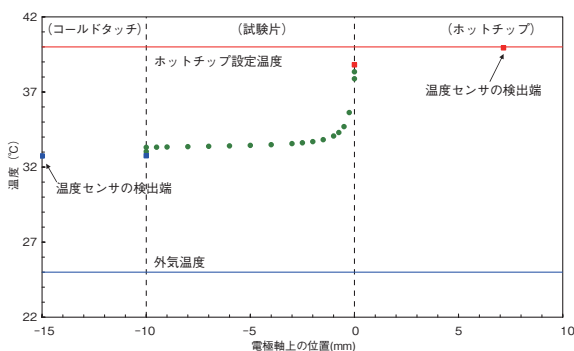
(d) Y2E の場合



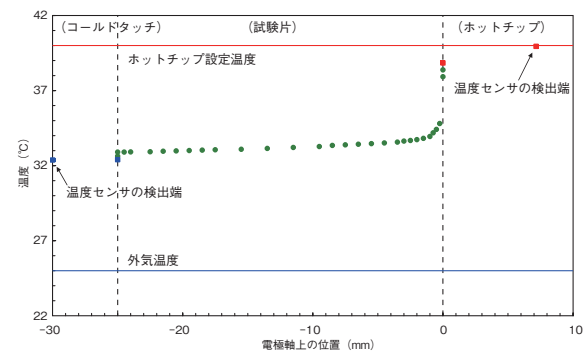
(b) Y5E の場合



(e) N5 の場合



(c) Y2C の場合



(f) N2 の場合

図 12 定常時の電極軸上の温度分布 (ホットチップ設定温度 40°C, 外気温度 25°C)

比較 1 試験片の配置 (Y5C, N5), (Y2C, N2)

試験片の長軸と電極軸が平行の場合と垂直な場合の比較から、同一試験片を同一の外部環境で測定するとしても、試験片の配置によって計測値の補正式が異なることが確認される。

比較 2 電極の接触位置 (Y5C, Y5E), (Y2C, Y2E)

電極を試験片の中央部に接触させる場合と端部に接触させる場合を比較すると両者の β は小数点以下

3桁目まで一致し、同一試験片を同一の外部環境で測定する場合、電極を接触させる位置を変えても計測値の補正式はほとんど変化しないことが確認される。

比較 3 試験片の長さ (Y5C, Y2C), (Y5E, Y2E), (N5, N2)

試験片の長さが 55mm の場合と 25mm の場合の比較から、同一の外部環境で測定するとしても試験片の長さにより計測値の補正式が変化し、試験片の長

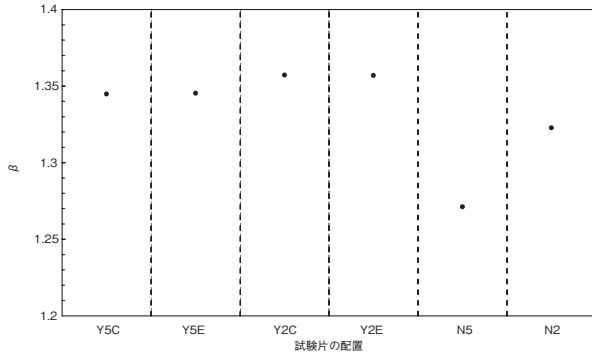


図13 算出された定常時の β

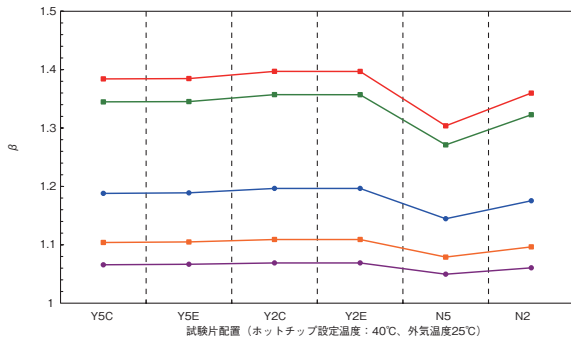


図14 試験片の材質を変化させた場合の定常時の β

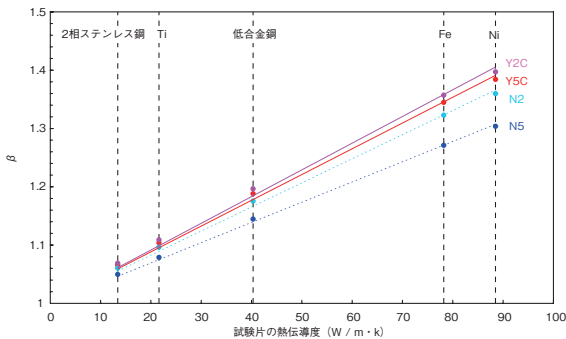


図15 試験片の熱伝導率と定常時の β

軸を電極軸と平行になるように配置した場合には違いがより顕著になることが確認できる。

以上の3通りの比較から β に関して、電極に対する試験片の配置と試験片の長さが影響し、電極接触位置が影響しないと判断される。以降の比較は、試験片の配置毎に行う。

比較4 ホットチップ設定温度と外気温度

試験片の材質はFeとして、ホットチップ設定温度は30, 35, 40, 45°Cの4通り、外気温度は22,

表3 ホットチップ設定温度と外気温度を変化させた場合に得られた定常時の β

試験片の配置	12通りの 平均値	標準偏差	最大値と 最小値の差
Y5C	1.345	1.0E-06	0.4E-05
Y5E	1.345	0.6E-06	0.2E-05
Y2C	1.357	0.7E-06	0.3E-05
Y2E	1.357	0.8E-06	0.3E-05
N5	1.271	0.5E-06	0.2E-05
N2	1.323	0.7E-06	0.3E-05

25, 28°Cの3通りとし、計12通りの組合せについて定常時の β を計算すると表3のようになった。これより、いずれの試験片配置であっても、 β がホットチップ設定温度や外気温度に影響されることはなく、ホットチップ温度が30~45°C、外気温度が22~28°Cの場合には、 β は温度に依存しない変数とおくことが可能と考える。

比較5 試験片の材質

ホットチップ設定温度を40°C、外気温度を25°Cとし、試験片の材質を変化させた場合の β を計算した。材質はFe, Ni, Ti, 2相ステンレス鋼, 低合金鋼の5種類であり、 β は図14のようになった。これより、図13により材質がFeの場合に示したことが、他の4種類の材料にも該当するが、低合金鋼, Ti, 2相ステンレス鋼の順に、試験片の配置による β の違いが小さくなることが分かる。

材質が変わると試験片の熱伝導率も変化するので、横軸に熱伝導率をとって整理すると図15のようになった。なお、Y2EとY5Eの場合はそれぞれY2CとY5Cに重なるため、図15にはプロットしていない。これより、 β が定数ではなく、試験片の熱伝導率に比例して変化することが確認できる。従って、熱起電力測定を実施する場合は少なくとも対象物の熱伝導率を測定あるいは推定できることが望ましいと結論できる。

4. まとめ

新たに、原子炉容器の監視試験片の熱起電力測定を目的とした熱起電力測定装置を製作した。この熱起電力測定装置により計測される温度と電圧から測定対象の熱電能が得られるが、計測される温度は電極と試験片の接触温度とは一致しない。そこで、新

たに製作した熱起電力測定装置に関する計測値の補正方法の検討のため、熱起電力測定時の電極と試験片からなる系の熱伝導解析を実施し、解析結果に対する考察から、計測値の補正方法に関して、以下に示す知見を得た。

- (1) 熱起電力測定装置より得られる計測値の補正では、計測される電極間温度差と真の接触面間温度差の比 β が重要な因子となる。
- (2) 熱起電力測定時の温度計測値と真の温度の違いの大半は、ホットチップと試験片の接触点から約1mmの範囲内で発生する。
- (3) 試験片の長軸を電極軸に対して平行にする場合と垂直にする場合では、 β が異なる。
- (4) 電極を接触させる位置が試験片の中央部でも端部でも、 β は一致すると見なせる。
- (5) 試験片の長さにより β は変化するが、試験片の長軸を電極軸に対して平行にした場合は変化が顕著になる。
- (6) ホットチップ設定温度を30~45℃、外気温度を22~28℃に変化させても、 β は変化せず、この温度範囲では定数と見なすことが可能である。
- (7) 試験片の材質により β が変化するため、異種材料間で計測結果を比較する場合には注意が必要である。

謝辞

熱伝導解析モデルの作成について、協力していただいた伊藤忠テクノソリューションズ(株)の太田垣良氏に感謝申し上げます。また、ABAQUSの使用法等を指導して頂いた(株)原子力安全システム研究所の三上雅生氏に謝意を表します。

文献

- (1) 福谷耕司, 大野勝巳, 中田早人, 原子炉容器鋼の照射組織変化, 原子力安全システム研究所, モノグラフ, Vol.1, p.1 (2001).
- (2) (社)日本電気協会, 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2004 (2005).
- (3) (社)日本電気協会, 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法, JEAC4206-2004 (2005).
- (4) ASTM E 185-98, "Standard Practice for

Conducting Surveillance Tests for Light Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels, E706 (IF)," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 12. 02., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

- (5) (独)原子力安全基盤機構, 高経年化技術評価審査マニュアル 原子炉压力容器の中性子照射脆化, JNES-SS-0507-01 (2006).
- (6) 例えば, (独)原子力安全基盤機構, 高経年化技術評価等報告書に対する技術審査報告書(関西電力株式会社美浜発電所3号機) (2006).
- (7) (独)原子力安全基盤機構, 原子炉压力容器監視試験片の再生に関する調査報告書, JNES-SS-0601 (2006).
- (8) 土肥謙次, "軽水炉压力容器鋼の小型シャルピー衝撃試験技術の開発," 電力中央研究所研究年報2000年版, 2-3 (2000).
- (9) 大岡紀一, 石井敏満, "原子炉容器用鋼材の中性子照射脆化の評価," 非破壊検査, 52 [5], 235-239 (2003).
- (10) 鎌田康寛, 高橋正氣, 荒克之, 菊池弘明, 小林悟, "圧延及び熱時効したFeCuモデル合金の脆化と磁気特性," 日本保全学会第2回学術講演会要旨集, 173-174 (2005).
- (11) 中東重雄, 程衛英, 志波光晴, 古村一朗, 高橋則雄, 藤原耕二, "電磁気的手法による压力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価," 技術レビュー, 2, 34-40 (2006).
- (12) M. Delnondedieu, J.F. Coste, H. Hegeman, et al., "GRETE project-Evaluation of non-destructive testing techniques for monitoring of material degradation," FISA2003 EU Research in Reactor Safety, Luxembourg, 10-13 November, (2003).
- (13) G. Dobmann, I. Altpeter, M. Kopp, "Nondestructive materials characterization of irradiated nuclear pressure-vessel steel samples by the use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties," Rus. J. Nondestr. Testing, 42 [4], 272-277 (2006).
- (14) M. Delnondedieu, M. Houze, "Non destructive characterisation of RPV steel ageing parameters by thermoelectric power measurement," Сборник докладов седьмой Российской конференции по реакторному материаловедению

- ю, 8-12 September, (2003).
- (15) B. Acosta, L. Debarberis, A. Rito, "Advances in the development of the "STEAM" thermoelectric method for radiation embrittlement assessment," *4th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components*, London, December, (2004).
- (16) B. Acosta, F. Sevini, "Evaluation of irradiation damage effect by applying electric properties based techniques," *Nucl. Eng. Des.*, **229**, 165-173 (2004).
- (17) M. Niffenegger, K. Reichlin, D. Kalkhof, "The change of the seebeck coefficient due to neutron irradiation and thermal fatigue of nuclear reactor pressure vessel steel and its application to the monitoring of material degradation," *PSI Ber.*, **02-11** (2002).
- (18) 河口恭寛, 岡野行光, "非破壊手法による鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効評価," 日本機械学会論文集, **67A**[655], 462-469 (2001).
- (19) 河口恭寛, 山中伸介, "熱起電力法を用いた鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効による材料劣化の非破壊評価," 日本金属学会誌, **66** [4], 377-383 (2002).
- (20) 河口恭寛, 山中伸介, "鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効に伴うフェライト相の Cr 濃度変調による熱起電力の変化," 日本金属学会誌, **66** [8], 840-848 (2002).
- (21) Y. Kawaguchi, S. Yamanaka, "Applications of TEP measurement to deterioration diagnosis of nuclear material and its principle," *J. Non-destruct. Eval.*, **23**[2], 65-76 (2004).
- (22) 石田仁志, 河口恭寛, "熱起電力法を用いた鑄造 2 相ステンレス鋼熱時効材のシャルピ衝撃値の評価," *INSS JOURNAL*, Vol. 10, p.210 (2003).
- (23) 上坊寺克郎, "熱起電力法による鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効評価手法の原子力発電所実機適用性の検討," *INSS JOURNAL*, Vol. 13, p.225 (2006).
- (24) J.F. Coste, J.M. Leborgne, J.P. Massoud, et al., "Application of thermoelectricity to NDE of thermally aged cast duplex stainless steels and neutron irradiated ferrite steels," *Proc. EPRI workshop on NDE of damage assessment*, La Jolla, USA, (1997).
- (25) J.F. Coste, J.M. Leborgne, J.P. Massoud, et al., "Development of a portable device for thermoelectric power measurement: Application to the testing of duplex stainless steel components," *Mater. Eval.*, **59**[3], 401-405 (2001).
- (26) 山本淳, 熱電材料の熱物性値を測定する方法および熱電材料測定装置, JP Patent 2008-51744 (2008).
- (27) ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL VOLUME II Version 6.6, ABAQUS (2007).
- (28) 日本金属学会編, 金属データブック 改訂第 4 版, 丸善, pp.10-13 (2004).