UDC 621.315.612:620.193.5:621.631.5
621.362.002.5:537.84

論文
56-A19

MHD発電ダクト用セラミック製絶縁壁の 熱応力破壊に関する検討

正 員 野 村 修 身 (電総研)

1. ま え が き

日本において研究開発中の MHD-汽力発電システムは、石油の燃焼ガスを作動流体として MHD 発電を行ない、更にその排ガスを在来の汽力発電システムのボイラに導いて、汽力タービン発電を行なうシステムである⁽¹⁾。この作動流体（石油燃焼ガスにカリウム化合物を添加したものであり、温度は約 2,500°C で、流速は約 700 m/s を必要とされている⁽²⁾）を流すために必要な発電ダクトの壁として、研究開発の最初に考案されたのは、作動流体との接触面を厚い耐火断熱れんがで構成した「ホット壁」であった。このような発電ダクト壁は、壁からの熱損失が少なく、更に壁面が高温であるために発電特性が良いので、高い熱効率をもつ発電ダクトではあるが、他方、耐火断熱れんがが作動流体の温度および流れによって極めて短時間に消耗してしまう（実験結果⁽¹⁾によれば数分間）。現在においては、実用の発電機に必要な数千時間の運転を、ホット壁で実現できる見通しは立っていない。

それゆえに、長時間耐久性を満足できるような発電ダクトとして、作動流体との接触面に水冷金属を使ったペグ壁⁽⁴⁾、または作動流体による摩耗や腐食に対して耐えられるように、常温とほぼ同等の機械的強度および化学的安定性をもつ温度（数百°C）に冷却する構造をもち、耐熱セラミックス系材料（ベリリア磁器など）で発電ダクトの壁面を構成したコールド壁⁽³⁾が考案され、それぞれ長時間運転の可能性が示された。

ところが、上記のように低温の壁では壁からの熱損失が極めて大きく（数百 W/cm²）、更に壁の表面上に

生じた冷い境界層により隣接した電極の表面が覆われるので、電極電圧降下が極めて大きくなることも相まって発電特性が悪く、ひいては発電効率も低いので、実用の発電機に必要な性能を満足させるのは極めて困難である。

上記の理由のため、実用の発電ダクト壁としてセミホット壁が必要とされた⁽⁶⁾。この方式は、壁の温度を使用材料によって定まる適当な温度（千数百°C）となるように精密に制御することによって、ホット壁のような壁面の大きな損耗を抑えると同時に、ペグ壁やコールド壁で生ずる冷い境界層による悪影響を防ぐものである。

前論文⁽⁵⁾にて、セミホット壁用材料としては、耐熱性、耐摩耗性および耐食性に優れたちみつ質の耐熱セラミックス系材料が最も有望であるが、この材料は熱応力に対して弱いために、発電ダクト壁は熱応力破壊が生じないように十分の注意をはらって製作する必要があることが示された。更に理論解析により、MHD 発電機の運転時に、発電ダクト壁素子の内部に発生する熱応力が自身の破壊を引き起こさないような限界の条件を求める方法が開発され、その限界条件がセミホット発電ダクト壁に要求される項目の一つであると提案された。

本論文は、上記の研究を進めて、セミホット MHD 発電ダクト壁用の材料として最も一般的なちみつ質のマグネシアセラミックスで製作した発電ダクト壁について、熱応力破壊に対する検討を行なったものである。ここで検討対象としたセミホット発電ダクト壁は、壁面を細かく分割して多くの素子で構成したものである。検討方法は以下の手順で行なった。まず発電ダクト壁のモデルを想定し、上記の方法により限界条件を求めてその特徴を明らかにした。同時に、素子内部の熱応力分布を計算し熱応力破壊状態を予想した。

Thermal Stress Fracture to Ceramic Insulating Wall in an MHD Generation Duct. By Osami Nomura, Member (Energy Conversion Section, Electrotechnical Laboratory, Ministry of International Trade and Industry).

野村修身：正員，電子技術総合研究所エネルギー変換研究室

更に、以上の理論解析結果を発電ダクトモデルの実験結果と比較検討した。

2. 理論解析方法

セミホット発電ダクトを構成する素子においては、作動流体（温度約 2,500℃）と接触する面は千数百℃程度に加熱され、反対面は水冷された支持体に接するので素子の内部の温度こう配は極めて大きい。

この素子の熱応力破壊を防ぐためには、素子内部に生ずる熱応力が可能な限り小さくなるように発電ダクト壁を構成する必要がある。その基本的な要件は、素子の温度変化に伴って生ずる熱変形を機械的に拘束しないことである⁽⁹⁾。その方法には、素子とその支持体との間に極めて柔軟な介在物を介して接着する方法⁽⁵⁾あるいは両者を緩いかん合方法により接続し、少々の熱変形を許容できるようにした方法⁽⁶⁾などが考案されている。このような取り付け方法によれば、素子の物性値が均一でしかも温度依存性がなければ、定常状態においては素子に温度こう配をいかに生じさせようとも素子内部に熱応力は発生しない⁽⁹⁾。しかし、本論文で検討対象のマグネシアセラミックスは、第2図に示すように極めて物性値の温度依存性が大きいので、上記のような支持方法でも大きな熱応力が発生して素子が破壊する恐れがある。

理論解析方法としては、上記の取り付け状態にある発電ダクト壁素子に、定常状態で生じる熱応力を数値計算により見積って素子材料の破壊強度と比較し、素子内のすべての部分で熱応力の値が破壊強度より小さければ、長時間運転が可能な発電ダクトであると判定した。この考察基準に基づき、発電ダクト壁素子の限界条件の計算方法が開発され、更に計算精度が検討された⁽⁵⁾。理論解析方法は前論文⁽⁵⁾に詳しく述べられているので、本論文では理論解析の主要部分である熱応力計算方法の概要を述べるにとどめる。

理論解析に必要な熱応力計算を行なうためには、数値計算モデルを考案して、まずその温度分布を計算し、そのうえで計算された温度分布に基づいて熱応力計算を行なう。

〈2・1〉 温度分布計算方法 温度分布計算方法の概要は下記のとおりである。温度分布計算モデルは、第1図に示すように素子の形状は直方体（幅：2A、厚さ：B）で、作動流体に接触する面（ $y=0$ ）は一定温度 T_w であり、反対面（ $y=B$ ）は一定温度 T_b の支持体に相対して次式で示す熱放散条件が成り立つ。

$$q = \left[\frac{\partial \theta}{\partial y} \right]_{y=B} = -h(\theta_0 - \theta_b) \dots \dots \dots (1)$$

$$T: \text{温度}, q: \text{熱流束}, \theta = \int_{T_s}^T \lambda dT$$

$$\theta_0 = [\theta]T = T_0, \theta_b = [\theta]T = T_b$$

第1図 発電ダクト壁素子の計算モデル

Fig. 1. Calculation model for insulating wall element of MHD generation duct.

ここで、 q は放散熱流束であり、 θ は次式で定義される。 θ_0 および θ_b はそれぞれ $y=0$ および $y=B$ での θ の値である。

$$\theta = \int_{T_s}^T \lambda dT \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 λ : 素子材料の熱伝導率、 T : 温度、 T_s : 基準温度

素子の側面（ $x=A$ ）では、他の素子の側面と接しているため断熱状態であるとみなした。それゆえに温度分布は一次元となり、熱関数 θ によって間接的に次式で表わされる。

$$\theta = \theta_w - \frac{N}{1+N} \xi(\theta_w - \theta_b) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\theta_w = [\theta]T = T_w$, $\theta_b = [\theta]T = T_b$, $N = h \cdot B$, $\xi = y/B$

素子の底部（ $y=B$ ）における温度を T_0 とし、 T_0 に相当する熱関数の値を θ_0 とすれば次式で示される。

$$\theta_0 = \frac{\theta_w + N \theta_b}{1+N} \dots \dots \dots (4)$$

〈2・2〉 熱応力計算方法 熱応力計算には有限要素法⁽⁷⁾を応用した。本論文の検討対象であるマグネシアセラミックスにおいては、すべての物性値の温度依存性が極めて大きいためである。物性値の温度依存性を考慮した熱応力計算方法は数件発表されているが⁽¹²⁾、いずれもごく一部分の物性値が温度依存性を示すのみに適用できる方法であって、本論文の検討には適用できない。本論文の目的に対しては、有限要素法

以外に適当な熱応力計算方法は見いだせなかった⁽⁵⁾。

素子内部に発生する熱応力は、平面ひずみ状態⁽⁹⁾にある平面熱応力と仮定した。平面ひずみとは、長手方向端面の影響のない応力状態であるが、熱応力計算の結果により、限界条件の決定に関係する最大引張熱応力は素子の中央付近に生ずることがわかったので、本論文の目的のためには素子の長手方向端面の影響を無視しても、最大引張応力の計算にはさしつかえないとみなされた。計算結果によれば、長手方向の縦横比が 0.5 より小さければ端面の影響はないものとみなされた。また、熱応力は素子の中心線に対して左右対称であるため、第 1 図に示された素子の断面の左半分を計算範囲とした。

数値計算精度を検討した結果⁽⁵⁾、この計算範囲の要素分割数は、 x 方向に 5 等分割および y 方向に 13 等分割とした。それゆえに、要素数は 65 および節点数は 232 となった。ただし、要素は 8 節点長方形要素(不完全二次要素⁽⁷⁾)を使用した。

3. 理論計算の結果および検討

第 2 図のマグネシアセラミックスの物性値を使って計算した限界条件を第 3 図の実線で示す。ここで加熱面温度 T_w を 1,400 K とした。この温度以上ではマグネシアセラミックスにクリープが生ずるため⁽⁸⁾、加熱面温度が 1,400 K 以上の場合には、素子内部で 1,400 K 以上の部分には定常熱応力が生じないとみなされるので、実効的に縦横比 $\gamma (=B/2A)$ が変わったとみなされる。

第 3 図の実線によれば、 γ が 0.5 以下の場合には限界条件が γ にはほとんど無関係であって、更に素子の冷却面の温度を 650 K 以上に保つ必要がある。他方、

第 2 図 マグネシアセラミックスの物性値
Fig. 2. Physical properties of magnesia ceramics.

第 3 図 定常運転中の発電ダクト壁素子の条件
Fig. 3. Conditions of wall element of MHD generation duct model in steady state.

γ が 3.0 以上では限界条件として T_0 が 350 K 以下であることがわかる。すなわち、冷却体温度 T_0 を 350 K と仮定すれば、素子と冷却体の間に温度差をもたせる必要がないことを意味する。言い替えれば、素子を支持体に取り付ける場合に、素子の熱変形を拘束しない方法でありさえすれば良く、両者の間に熱抵抗を付ける必要がないので、取り付けに対する制限は少なくなると考えられる。しかし、そのためには素子の縦横比を 3.0 以上と、かなり細長くしなければならない。

以上の結果を更に詳細に検討するために、熱応力の分布図を求めた。縦横比 γ が 1.0 および 0.5 の場合の例を第 4 図および第 5 図に示す。両図ともに限界条件に近い状態である。同図内の矢印の方向および長さは、それぞれ矢印の交点における主応力⁽⁹⁾の方向および大きさの相対値を示し、更に外向きの矢印は引張応力および内向きの矢印は圧縮応力を表わす。

熱応力分布図(第 4 図および第 5 図)によれば、素子の周辺では圧縮応力が主であって、中央付近は引張応力が主であるが、最大圧縮応力は最大引張応力の 3 倍は越えないことがわかる。ところで、本論文で検討したマグネシアセラミックスでは、圧縮強度が引張強度の 10 倍程度⁽⁸⁾であるから、限界条件は最大引張熱応力と引張強度を比較すれば定まる。また素子の中央部分では、 $\gamma=1.0$ においては最大引張応力が x 方向と y 方向ともにほとんど同じ大きさであるが、 $\gamma=0.5$ においては y 方向の応力は極めて小さく、 x 方向のみであるので、言い替えれば $\gamma=0.5$ 以下であると中央部の熱応力に対して x 方向端面の影響はほとんどないものと考えられる。限界条件図(第 2 図)においても γ が 0.5 以下では限界値がほぼ一定となっており、上記の考察を裏付けている。

第4図 熱応力分布図(縦横比=1.0)

Fig. 4. An example of thermal stress distribution when aspect ratio is 1.0.

第5図 熱応力分布図(縦横比=0.5)

Fig. 5. An example of thermal stress distribution when aspect ratio is 0.5.

熱応力分布図により素子が熱応力により破壊する状況を想定すれば、以下になる。

第4図および第5図に示すように、素子の破壊が生ずる直前の状態においても最大圧縮応力が最大引張応力の3倍は越えないことがわかる。ところが、本論文の検討対象であるマグネシアセラミックスは、圧縮強度が引張強度の10倍以上はある⁽⁶⁾。すなわち、素子の破壊は引張応力に生ずると考えられる。ところが、引張応力の最大値は素子の中央付近に生ずる。それゆえに、素子の耐力が全体に均一であるならば素子の破壊は中央付近より生じ始めるものと考えられ、その結果、中央部分より大きく分割する形態となると想定される。次章に示すモデル実験において破壊した素子の状態を見ると、上記に想定されたような中央より2分割状態となっており、上記の考察の妥当性を証明している。

4. モデル実験

前章までにおいては、マグネシアセラミック製の発電ダクト壁素子の熱応力破壊状況が理論的に解析された。本章においては、この結果を実験的に検証する。

前章で示された熱応力破壊を生じない条件を実験的

に検証するためには、素子と支持体の熱伝達係数が正確に規定でき、しかも素子の熱変形を拘束しないような取り付け方法により、発電ダクトモデルを作製しなければならない。ところが筆者の調査によれば、上記の条件を満たし、しかも作動流体の流れなどによる力に耐えるような機械強度が十分にある取り付け方法はまだ開発されていない。それゆえに、素子と支持体の間が接触状態にあるような発電ダクト壁（この場合、熱変形に対する拘束はないとみなされる）の破壊状態を検討することにより、理論解析結果を検証する。しかし、このような発電ダクト壁においては、素子と支持体の間の熱伝達特性が不安定であるので、素子の破壊状態は統計的に検討した。

〈4・1〉 モデル発電ダクトの構造 実験用のMHD発電ダクトのモデル絶縁壁を第6図に示す。同図に示された素子の間の水冷金属片は、その表面に生ずる冷い境界層により素子の表面を覆い、作動流体の主流がもつ高い温度より素子を保護する働きをもつ。素子はその突起部分を水冷金属片のくぼみに引っ掛けて脱落をしないように支持しており、水冷基盤との接着はしていない。それゆえに、素子の熱変形に対しては少しの拘束もないものとみなした。素子の裏面においては

1: 素子, 2: 水冷金属片, 3: 基盤, 4: 熱電対

第 6 図 MHD 発電ダクトモデル
絶縁壁 (実験前)

Fig. 6. Model insulating wall of MHD generation duct (pre-test).

1: MHD 発電ダクトモデル, 2: 燃焼器

第 7 図 試験装置全景

Fig. 7. Test equipment all over.

ステンレス鋼製の基盤に密着させられており、側面と金属片の間は約 0.5mm のすきまがある。それゆえに素子のダクト壁断面方向の熱流に比べて素子の側面方向の熱流は無視し、素子の温度分布は一次元であるとみなした。

試験された素子は、ちみつ質のマグネシアセラミックスで製作されており、厚さ 15mm、幅 10mm および長さ 20mm である。裏面より 7mm と 11mm の位置で素子の中心線上に達する穴をあけ、白金熱電対接点をそうし素子内部の温度分布を測定した。

このモデル壁で構成される作動流体の流路は、長さ 195mm、幅 40mm および高さ 10mm となった。実験装置の全景を第 7 図に示す。

〈4・2〉 実験条件 作動流体はプロパンとメチルアルコールを純酸素で燃焼したガスに、水酸化ナトリウムを重量で 1.7% 添加したものであり、定常流量は 17.1g/s である。作動流体の諸物性値を理論計算⁽¹¹⁾より求め、流速を推定した結果約 400m/s であった。この値では作動流体の流れによる摩擦は小さいとみなされる。

実験時間としては、流量の上昇に 2 時間、定常運転

に 6 時間半および下降に 45 分をかけた。なお、流量を変化するときは、流量の変化割合が一定となるように調節した。

定常運転中に、左右壁に設けた電極を通じて外部電源より 3A の電流を流し電流の影響を調べた。

〈4・3〉 実験結果 モデル発電ダクトの運転中に、素子に取り付けた熱電対により素子の温度分布を測定したが、その最高温度における状態を第 3 図中の ●印で示す。運転中における表面温度の最高値は、素子材料にそ性が表われる温度 (1,400K) を超えているので、同図の ●印が示す縦横比は、前章で既に述べたように素子の実効縦横比である。素子のなかには温度測定を行っていない素子もあるが、運転中の最高温度状態における全素子は、大略、同図の鎖線で囲んだ範囲にあるものとみなされる。それゆえに、発電ダクトモデルの素子のなかには破壊が生じているものもあると考えられる。破壊の生じる条件をもった素子は、第 3 図の鎖線の中で限界条件を示す線 (実線) で区切られた下部の状態にある素子と考えられるので、鎖線で囲まれた面積に対する実線下部の面積の割合が、素子の延べ総数に対する破壊を生じた素子の数の割合と同等であると考えた。この考察に従って破壊割合を推定すると約 20% となった。

他方、実験後の分解点検の結果によれば、破壊を生じた素子の延べ個数は 6 個であった。この実験に使用した素子は延べ 28 個であるから、すなわち破壊割合は 21.4% であった。この結果は上記の推定破壊割合にはほぼ一致を見ており、理論解析結果の妥当性を示していると言える。

実験後の素子の破壊状態はほとんどの素子において中央付近より割れており、前章の熱応力分布の計算結果 (第 4 図および第 5 図) より推定した破壊形態と一致している。

運転中に測定された素子の温度分布より、素子と基盤との間の熱伝達係数を求め、その熱伝達係数を使って素子の表面温度が 1,400K になったときの裏面温度を計算すると第 3 図の矢印で示される範囲となった。この矢印の位置が示す縦横比 (1.5) は、素子の短い側の長さの厚さの比である。さきに述べたように、素子の縦横比が小さくなると限界条件は縦横比と無関係となるので、素子の限界条件は縦横比の大きな側の値でほぼ決定されるとみなした。第 3 図の矢印の位置より作動流体を上昇する途中においても、素子のうちの幾つかは既に破壊を生じていたものと推定できる。

第 8 図に実験後の壁の外観を示す。実験中において、作動流体を通じて流した電流による影響と見られ

第 8 図 実験後の発電ダクトモデル壁
Fig. 8. Model insulating wall of MHD generation duct at after-test.

るものは、電流を流した電極付近に生じた局所的な溶融のみであった。この事実は以下の理由によると考えられる。

この発電ダクトモデルでは、壁表面が耐熱セラミックス製であるため、壁表面温度は極めて高い（表面状態より見て千数百℃程度はあったとみられた）。それゆえに、セラミックスの表面では電流集中は生じなかった。ただし、電流を流し込んだ電極は水冷ステンレス鋼製であるので、温度は数百℃とみられ、電極付近には電流集中が生じたものと考えられる。電流集中がなければ、作動流体中を流れる電流による作動流体の温度の上昇は無視できる程度である⁽¹⁰⁾。それゆえに、壁素子の表面に対して電流による熱応力破壊への影響は実質的にないものとみなされる。

本実験においては、素子と支持体の間が接触状態であるから、両者間の熱伝達係数は大きなばらつきを生じていると思われる。素子の間における破壊状態に大きな差異があるのは、この理由によるものと考えられる。第 3 図の実線で示されるように、水冷金属の支持体が保たれる通常の温度（約 350 K）よりも、素子の裏面温度は高い温度を保つ必要があるため、この両者間には適当な熱抵抗を持ち、しかもその値は正確に調節できなければならない。それゆえに、素子の熱変形を拘束しない方法であって、しかも両者間の熱抵抗の値を正確に保つことのでき、そのうえに十分に機械的強度のある支持方法を開発し、更にその熱的特性を明確にはおく必要がある。

5. ま と め

本論文では、火力発電所において在来の汽力発電プラントの前段機に使われる MHD 発電機の発電ダクト壁を検討対象とした。この MHD-汽力複合発電システムはベースロード用に使われるものであるため、発電ダクト壁はカリウムを含んだ高温（2 千数百℃）、高速（約 1,000 m/s）の燃焼ガスにさらされながら、数千

時間にわたり安定した発電性能を維持しなければならない。このように厳しい条件を満たすものとして、ガスとの接触面に耐熱セラミックス系材料（マグネシアなど）を使った発電ダクト壁の開発が進められている。しかし、このような材料は熱応力破壊に対して弱いので、この面からの考慮をはらって発電ダクト壁を構成する必要がある。そのためには発電ダクト壁面を小さな素子に分割し、それぞれの素子の熱変形が拘束されないような支持方法が考案されている。

本論文では、上記の構造を持ち、壁の材料としてマグネシアセラミックスを使った発電ダクト壁の熱応力破壊について、理論的および実験的な検討を行ない、以下の結論を得た。

(1) 発電ダクト壁素子が熱応力破壊を生じないようにするためには、素子の冷却面温度を所定の値以上に保つ必要がある。理論解析により、この冷却面温度の下限値が求められ、素子の縦横比（高さ／幅）が小さくなるほど高くなることがわかった。その様子は下記のとおりである。

(i) 素子の縦横比が 0.5 以下では、この下限値は縦横比にかかわらず約 650 K である。素子内部の最大引張応力が引張強度を超えない条件により、下限値が決められるが、後述するように素子の中央付近に最大引張応力が生ずるので、縦横比が 0.5 以下では中央付近の応力に対する端子の影響がほとんどないことを示している。

(ii) 素子の縦横比が 3.0 以上では、この下限値が 350 K 以下となる。もし、素子の支持体の温度が 350 K であるならば、素子と支持体の間に熱抵抗が不要であり、発電ダクト壁の製作条件が少なくなる。

(2) 上記の理論解析に用いた熱応力計算方法を使って熱応力分布を求めた。その結果、最大引張応力が中央付近におよび最大圧縮応力が周辺に生じ、しかも後者は前者の 3 倍は越えないことがわかった。それゆえに、素子の熱応力破壊は中央付近より割れる形であると推定された。発電ダクトモデルの実験により生じた破壊状態は、上記の理論計算により推定した状態と良く一致した。

(3) 実験中に測定したダクトモデルの壁素子の温度分布と、上記の理論解析結果より得られた素子の冷却面温度の下限値を比較検討して、実験により破壊を生じる素子の割合は約 20% であると推定した。実験後の観察により、素子の 21.4% に破壊が生じていることがわかり、さきの推定値と良く一致した。

(4) 発電ダクトモデルの実験中に、ダクト壁に設

けたステンレス鋼製の電極を通じて、外部電源より内部の作動流体に電流を流し、電流による熱応力破壊に対する影響を調べた。その結果、電極の表面温度が低かったため電極付近には電流が集中して生じたと見られる損傷が認められたが、その他の部分には電流による影響は認められなかった。

(5) 熱応力破壊を生じない発電ダクトを作るためには、発電ダクト壁素子の冷却面温度を正確に保つことが必要である。そのためには、熱伝達特性が安定した素子の支持構造を開発する必要性が示された。

終りに、本研究は通商産業省工業技術院で計画した大形省エネルギー技術の研究開発の一項目である電磁流体発電の研究開発の一部であり、研究の機会を与えられ、更に有益な助言をいただいた電子技術総合研究所等々力 達エネルギー部長(現、当所次長)、本間琢也エネルギー変換研究室長(現、筑波大学教授)を始め、エネルギー変換研究室の各位に感謝いたします。

(昭和54年5月21日受付, 同55年7月2日再受付)

文 献

- (1) 伏見, 他: 「MHD 発電機電試 2 号機の実験」, 32, 477 (昭 43-5)
- (2) 電気学会編: 電気工学ハンドブック, p.1210 (昭 53)
- (3) Okuo, et al.: "Development of Ceramic Insulating Walls for Long Duration Channels", Bull. Electrotech. Lab., 39, 133, 213 (1975)
- (4) Fushimi, et al.: "Construction of MHD Generator with a Large Scale Superconducting Magnet (ETL Mark V)", 13th. Symp. MHD, IV. 2 (1972)
- (5) 野村: 「MHD 発電機セミホット発電ダクト壁の熱応力」, 窯業協会誌, 87, 346 (昭 52-7)
- (6) 野村: 「MHD 発電機の表面冷却型セミホット発電チャンネル壁設計に関する一考察」, 電絶研集報, 38, 29 (昭 49-1,2)
- (7) ツイーキウィッツ・チューン, 吉識 訳: マトリクス有限要素法, p.12 (昭 48) 培風館
- (8) 功刀編: 無機材料科学, p.310 (昭 47) 誠文堂新光社
- (9) 竹内: 熱応力, p.13 (昭 46) 日新出版
- (10) 奥尾・永田: 「MHD 発電用耐熱材料のアークスポットによる損傷」, 応用物理, 46, 1082 (昭 43)
- (11) 曾田・本多: 「燃焼ガスの物性値および電気伝導度の理論計算」, 電気試験所集報, 32, 98 (昭 43)
- (12) 例えば, Minardi: "Effect of Variations in the Coefficient of Thermal Expansion upon Thermal Stress", AIAA J., 4, 542 (1966)