

技術報告

UDC 669.162.214.6 : 669.162.212.9

高炉炉底部温度分布の電導紙による相似実験とその応用*

松永省吾**・川崎守夫**

Experimental Simulation of Heat Conduction in the Bottom of Blast Furnace with Electric Conducting Sheet

Syōgo MATSUNAGA and Morio KAWASAKI

Synopsis:

The temperature distribution in the blast furnace bottom which is constructed by bricks of different materials has been studied by the electric conducting sheet analogy.

The electric resistance of the parts of the electric conducting sheet is so adjusted by spraying a dilute solution of silver paint, that the electric resistance inversely proportions to the thermal conductivity of the furnace bottom brick.

The temperature distributions in the blast furnace bottom are estimated by the equi-electric-potential curves on the electric conducting sheet. These electric conducting sheet analogy experiments are performed for different eroded depths of the hearth bottom. The temperature in the hearth bottom of an operating furnace is measured by a few thermocouples located there. The eroded depth is assumed 1 050 mm by the electric conducting sheet analogy with these measured temperatures in the hearth bottom.

On the other hand, the actual eroded depth of the hearth in the reconstruction of the furnace is found to be 1 100 mm. By this result, the electric conducting sheet analogy experiment is useful for estimating the eroded depth of the hearth bottom when the erosion goes along the equi-temperature curves of the hearth bottom.

This experiment is applied to other blast furnaces, and it is found that the eroded depth is proportional to the integrated pig iron production per unit hearth area.

(Received Jan. 30, 1973)

1. 緒 言

高炉の炉底には温度管理用の熱電対が挿入されている。

高炉の炉底の保護と、熱電対の劣化防止という目的のために、これらの監視用熱電対はその数も少なく、また炉底の深い位置に設けられている。一方において、炉底の浸食深さの監視の面からこの少ない測温値の有効な利用方法を考案する必要があつた。

本報告は、炉底内部の測温値を用い、電導紙による相似実験を行なうことによつて、炉底の浸食深さを予測し炉底の監視に役立てようとするものである。

2. 電導紙実験の大要と高炉炉底部の伝熱解析への応用

高炉炉底部の垂直断面内の伝熱解析を行なう。この相似モデルとしては、電導紙を使用する。この電導紙上に

高低熱源に相当する部分にシルバー・ペイントを塗布して電極を作る。また炉底煉瓦の材質に応じて、電導紙上にシルバー・ペイントの希薄溶液を噴霧して、その部分の電気伝導度を調整しておく（これらの操作法については付録の項を参照されたい）。

高炉炉底の電導紙実験装置の大要を Fig. 1 に示す。図において(1)はシルバー・ペイントで作成された電極であり、溶銑部分に相当する。(2)はシャモット煉瓦部であり、この部分は電導紙の炭素微粒子の被膜をそのまま使用する。(3)はカーボン煉瓦部であり、この部分には煉瓦の熱伝導率の比に応じて、シルバー・ペイントの溶液を吹きつけることによつて電気抵抗値を調整してある。(4)は鉄皮に相当する部分であり、シルバー・ペイントで電極が作成されている。(5)は炉底の水冷床部分

* 昭和47年4月本会講演大会にて発表
昭和48年1月30日受付

** 住友金属工業(株)中央技術研究所

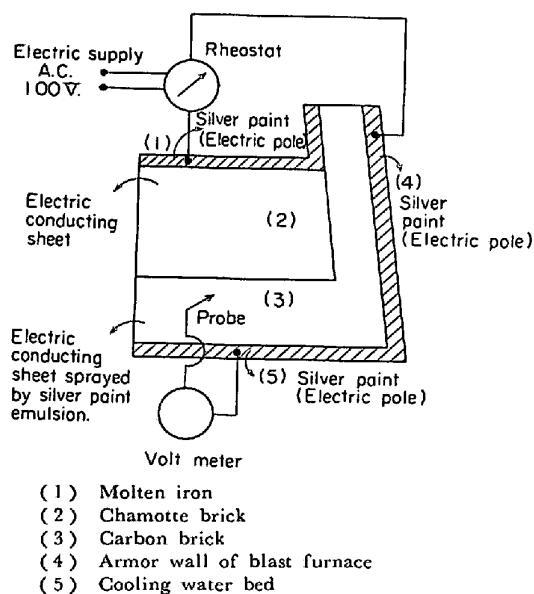


Fig. 1. Schematic model of electric conducting sheet experiment simulating heat conduction mechanism in blast furnace bottom.

であり、冷却水によつて鉄皮と同様の温度に冷却されているものと仮定して鉄皮のシルバー・ペイントの電極が延長されている。

上記の電導紙実験においては次のような仮定を用いている。すなわち、

(1) 高炉の垂直断面内の2次元熱伝導を考える。これは電導紙実験ではやむをえない(電解溶質液を用いる電気槽実験では、容器を傾けることによつて、円柱の垂直断面内の温度分布を求めることができるが、電導紙実験よりも実験は面倒であり、さらに煉瓦に相当する部分の電気抵抗の調整も困難であるという欠点をもつ)。

(2) 鉄皮表面および水冷炉床の温度は冷却水の温度と同じであると考え。

水冷炉床の水平断面を均一に冷却水温度にとることについては、その近似実験法として問題があるが、このような仮定を用いて行なつた電導紙実験結果が、かなりよく実測された炉底浸食深さに一致していたので、今後ともこの仮定を用いることにした。

このような2つの仮定を用いて炉底内部の温度分布を等電位線によつて求めることができる。等電位線は電圧計によつて容易に決定しうる。

高炉の初期において、炉底煉瓦が損耗していない時点における電導紙実験結果を Fig. 2 に示す。図においては、等電位線上に温度の計算値を記入してある。

高炉の炉底の浸食については、等温線にそつて浸食す

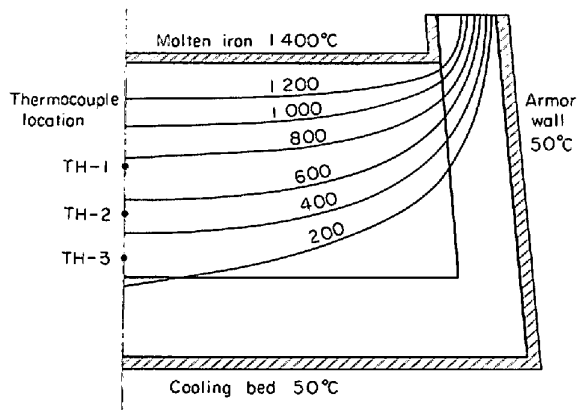


Fig. 2. Estimated temperature distributions of blast furnace bottom in the early stage of campaign.

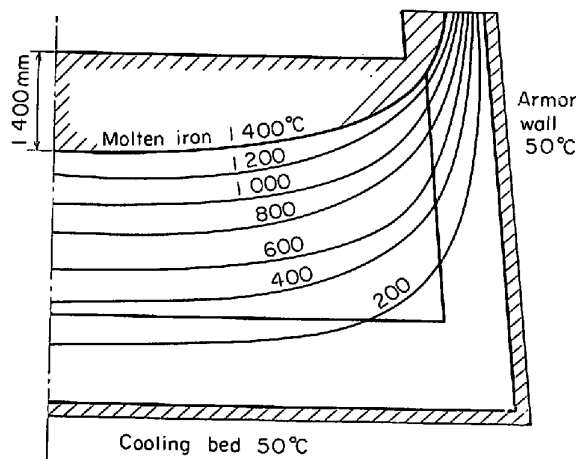


Fig. 3. Estimated temperature distributions of blast furnace bottom when the refractories at the center part of hearth are eroded by 1400mm depth.

るといふ考え方と、等温線に無関係に、溶銑の対流によつて浸食するといふ考え方がある。炉底の中央部は炉壁からの冷却をあまり受けないと考えられるから、その部分の対流による溶銑の速度は小さい。したがつて炉底の中央部分は、近似的に等温線にそつて損耗してゆくと考える。しかし炉底の側壁部分と、炉底の周辺部では、炉壁からの冷却をうけて溶銑の対流速度は大きいために、対流による損耗が大きくなる。このような部分では、本報告の仮定は成立しないことはいふまでもない。いずれにしても、炉底の浸食条件を電導紙上に反映することは困難なので、多くの仮定を必要とすることはやむをえない。

高炉の炉底が1400mm深さまで損耗した場合の等温線を、電導紙実験から求めた結果を Fig. 3 に示す。この等温線は Fig. 2 の等温線の中で、炉底の中央部の深

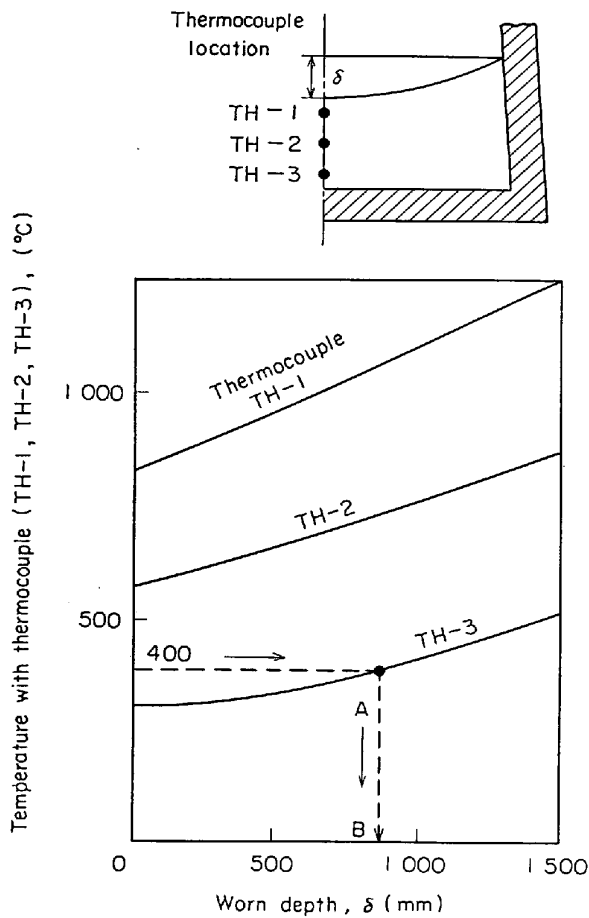


Fig. 4. The relationship between the temperature of furnace bottom with thermocouples and the estimated worn depth (δ) of refractories at the center part of hearth.

さが1400 mm の点を通る等温線を浸食曲線とすればよい。このような条件を用い Fig. 2 の等電圧線の電圧を温度に換算することにより、Fig. 3 を容易に求めることができる。

これらの図をまとめることにより Fig. 4 を得る。これは炉底中心の深さの異なる各位置 (TH-1, TH-2, TH-3) に設けた熱電対の指示温度を用い、炉底中心の浸食量を求めるための図表である。いま TH-3 なる位置の熱電対が 400°C を示しているときは、Fig. 4 の点線を A B の方向に進むことによつて、炉底の中央部の損耗量は $\delta = 900$ mm であることがわかる。

各高炉について電導紙実験を行ない、Fig. 4 のような線図を作成しておく。この場合に、熱電対 TH-1, TH-2, TH-3 は必ずしも炉の中心軸上になくてもよく、各熱電対の位置における指示温度と炉の中心軸上の浸食深さとの関係を Fig. 4 の形式にまとめておけばよい。

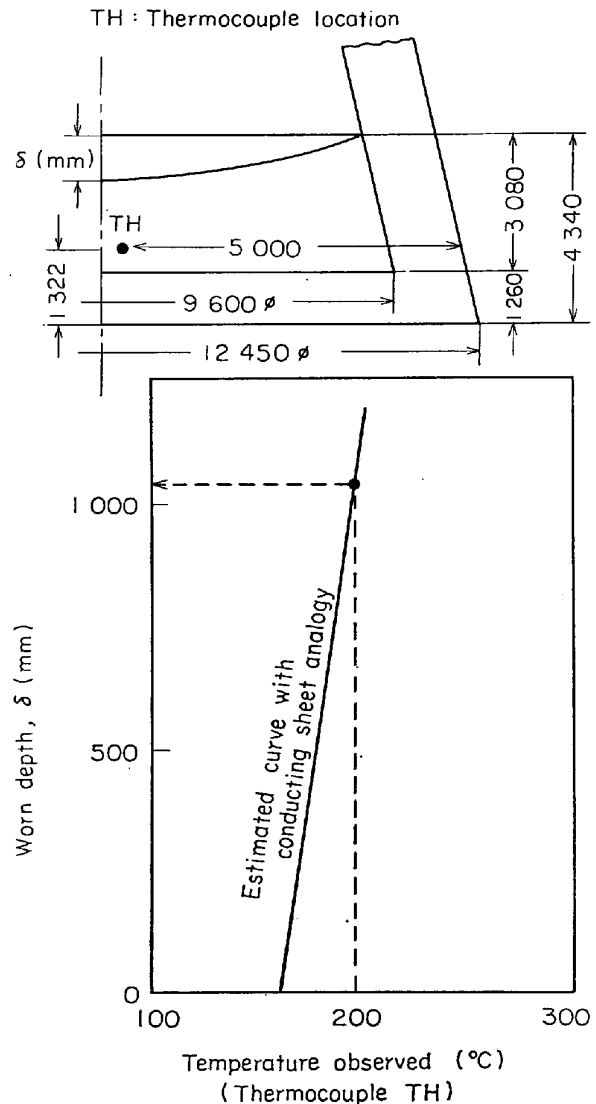
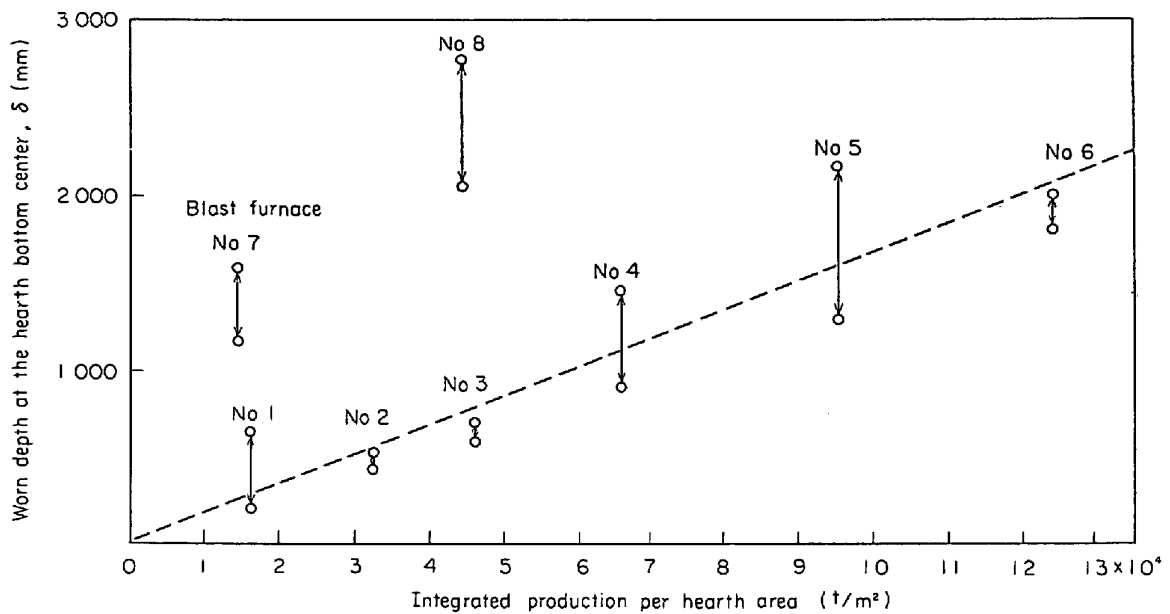


Fig. 5. Dimension of a blast furnace hearth and a diagram for estimating the worn depth by using the results of electric conducting sheet experiment.

3. 電導紙実験による高炉炉底浸食深さの推定値と実測浸食深さとの比較

実炉について、炉底に設置された熱電対の指示温度から、炉底浸食深さを推定した例を Fig. 5 に示す。これは高炉の巻替え直前の指示温度の例であつて、電導紙実験から求めた炉底浸食深さ (δ mm) は約 1050 mm であつた。この推測値に対して、高炉を吹止めた後に実測した炉底の浸食深さは約 1100 mm であつた。このような推測値および実測値には、ともに誤差をとまなうことはいうまでもない。したがつて、この程度の推測値と実測値の差であるならば、電導紙実験によつて炉底浸食深さの概略値を推定しようと考えてよいであろう。



The arrows show the range of eroded depth estimated by conducting sheet analogy experiments using the temperatures at different thermocouples

Fig. 6. Relationship between the eroded depth of refractories at the center part of the hearth and the integrated production.

4. 電導紙実験にて推定された各種高炉の炉底浸食深さと出鉄量との関係

電導紙実験を、当社の各高炉について実施し、その炉底の熱電対の指示温度を用いて、その浸食深さを推定した結果を Fig. 6 に示す。これらの電導紙実験においては、その炉底の煉瓦の使い分けに応じて、電導紙上にシルバー・ペイントで電気抵抗を調整したことはない。

Fig. 6 からわかるように、炉底の損耗量は累計出鉄量に比例していることが理解される。

Fig. 6 に示されている矢印の範囲はバラツキの範囲を示す。すなわち、炉底中心付近の東西南北の位置にある熱電対の指示温度にバラツキがあるために、これらの測温値を用いた炉底の推定浸食深さにバラツキを生ずるためである。Fig. 6 は実測によりたしかめることは困難であるが、炉底浸食の進行状況の概要を推定しようと思われる。

5. 炉底浸食量推定のための電導紙実験の問題点

電導紙実験は、高炉炉底に設けられた熱電対が少数であり、しかもその指示温度が低いような場所に設置されているという条件の下で、炉底の浸食状況の概要を知るために有効である。しかし、上記の条件は浸食深さの推定値の精度をおとすことになり、さらに浸食は等温線に

そつて進行するという仮定を用いているから、本報告の方法を実用化するには、まず、このような仮定を満足するような高炉の炉底構造を経験によつて理解する必要がある。幸いに従来の多くの高炉に用いられてきた炉底の煉瓦積みの構造では、一応、本報告の方法は使用しうるものと思われる。この一例は Fig. 1~5 のような炉底煉瓦積の場合である。

さらに、本方法は炉底中央部の浸食量の推定には有効であつても、炉底側壁のような、溶銑の対流による浸食を考慮しなければならない部分には、適用することはできないようである。このような炉底側壁の損耗量の推定のためには、別法を考える必要がある。

6. 結 言

高炉炉底に設けられている数少ない熱電対の指示温度を用いて、炉底の浸食状況の概要を知る方法として、電導紙実験を紹介し、その応用例について考察した。

炉底の損耗深さと煉瓦の材質、対流の効果などの諸関係については不明な部分が多く、したがつて本方法で必ずしも、炉底の浸食量を正確に推定しようとは限らない。

しかし、炉底部の測温位置が多い場合には、試行錯誤法により炉底形状を試作し、電導紙実験を行ない測温値と電導紙実験による温度の値とが一致するような炉底形状をもつて、高炉の実際の炉底浸食曲線であると決定することもできる。

このように本方法の電導紙実験を広く応用することによつて、有用な結果を得ることができる。

なお、Fig. 6の結果は一応常識的であろうと考えられたので、ここに紹介した次第である。

付 録

(1) 電導紙モデルの作成方法(新しく工夫した方法)

電導紙は通信紙として市販されているものであつて、これは厚紙の片面に炭素の微粉を塗料にて塗布し固めたものであり、電気抵抗値は均一に分布しているという特性をもつ。一方において、電導紙上に電極を作成するために用いられるシルバー・ペイントは、プリント配線に用いられるものであつて、これは銀の微粉を溶剤で溶かしてある。このシルバー・ペイントを任意の濃度までシンナーで溶かして筆で塗布して電極を作成するとよい。つぎに、電導紙上のカーボン煉瓦に相当する部分には、シルバー・ペイントを薄く塗布して、電気抵抗を減少せしめる。この場合に、シルバー・ペイントを多量のシンナーで溶かした溶液を、約1~2mの距離から噴霧器を利用して吹きつけるとよい。この場合に、吹きつけ作業は数回に分け、毎回シンナーが蒸発し、一様に銀粉が分布固定されたことをたしかめたうえで、再度吹きつけ作業を行なうことが望ましい(一度に多量の溶液を吹きつけると銀粉は波状をなして沈殿し固化するので望ましくない)。

所期の電気抵抗に応じて、吹きつけの回数を決定するとよい。また電導紙は直立させておき、その正面の紙面から1~2m離れた位置より、スプレーを吹きつけるとよい。このようにすると、大きな液滴は落下するから、電導紙に付着することはなく、したがつて、シルバー・ペイントを一様に電導紙表面に吹きつけることができる。

(2) 温度分布と煉瓦浸食状態の対応について

本報告においては、炉底の浸食は初期の等温線に沿つて進行するものと仮定して、浸食深さを推定した。一般に炉底の浸食は、等温線に沿つて進行するという考え方と、対流によつて浸食が遂行するという考え方があり、このいずれの考え方が正しいかということは結論できない。すなわち、炉底の煉瓦の張り分け、材質、などによつて浸食状況は異なるものと考えなければならない。

したがつて、各高炉について、その炉底煉瓦の張り分け状況に応じて、いかなる浸食曲線になるかということを経験により理解しておき、その中で等温線にそつて浸食する特性をもつ高炉について、本方法を適用することが望ましい。すなわち、炉底が平面状に浸食されてゆく特性をもつ炉底構造の高炉については、とくにその側壁

部については、溶銑の対流による浸食理論を適用すべきであろう。

炉底の側壁部煉瓦の浸食状況については、赤外線カメラによる測定技術が開発されている²⁾。炉底の側壁部の浸食状況を本報告の電導紙実験で推定するためには、その部分に熱電対を埋め込んでおき、測温する必要があることはいうまでもない。この部分の浸食は、等温線にそつて進行するとは限らないから、電導紙実験で浸食状況を予測することは困難であつて、測温結果によつて、その時点における炉底側壁部の浸食状況を推定するのに止まることになる。

大野の論文³⁾にて紹介されているようにPASHKISSの予測計算による炉底の浸食曲線は、炉底部分の等温線と相似になつている。このような浸食状態においては本報告の研究による電導紙実験は役に立つものと思われる。したがつて、炉底の中心部分の浸食状況は電導紙実験により推定し、一方において、炉底の側壁部分の浸食状況は赤外線カメラによる測定または溶銑の対流を考慮した浸食理論によつて推定することが望ましいであろう。

(3) 電子計算機による炉底伝熱計算の問題点

電子計算機を用いて熱伝導問題を解く方法としては、差分式による方法、有限要素法などがあり、これらのものであつても定常伝熱解法、非定常伝熱解法がある。しかしながら、上記のいずれの方法も、煉瓦が張り分けられている炉底の伝熱解析を行なうには大きな困難をとらなう。

この理由は、煉瓦の張り分け面における伝熱条件を与えなければならないからである。すなわち、張り分け面を通過する熱量が、各煉瓦の側で同一値になるように温度勾配を決定しなければならないからである。このような条件を満足する温度分布を決定するための伝熱計算は困難であり、まだ電子計算機でも行なわれていないようである。

したがつて、本報告の研究では、電子計算機による伝熱解析を中止し、簡便な電導紙実験を行なうことにした。

(4) 鉄鋼業における電導紙実験の他の応用例とその成果(参考)

鉄鋼業において電導紙実験を応用し、成果をあげた例を紹介したい。いずれも著者らによつて、当社中央技術研究所において行なわれた例である。

(その1) 鋼管端部の誘導加熱による偏熱状況の解析

鋼管のアップセット部の偏熱を防止しなければならないことがあつた。操業上から、鋼管の端部が誘導コイル内の一定位置にくるようにすることは困難であつた。こ

の研究においては、電磁コイルで発生する電磁場を電導紙実験により決定し、この結果から判断して、コイルの内部に水冷したダミーの鋼管を配置し、これをコイル内を前後に自由に移動させるようにする方法が有効であることを見出した。

(その2) 先端厚肉の高炉冷却箱および先端厚肉の高炉羽口の伝熱解析

高炉の冷却箱、および羽口の先端部の厚みを増した場合の伝熱量の変化を推定するために、電導紙実験を行なった。この場合に冷却箱本体・羽口本体とそれを支えている炉壁煉瓦の伝熱的な相互効果を知ることが電導紙実験の主目的であった。そして煉瓦部と冷却箱または羽口の熱伝導率の差異を電導紙上に表現する方法としては本報告で紹介したシルバー・ペイントの溶液をスプレーする方式を応用した。その結果として、先端を少し厚くしても、伝熱的には大きな差異は生じないことがわかった。このような先端厚肉構造は摩耗に対して有効であると判断され、実用化試験が考えられている。

このように、電導紙実験は、とくに熱伝導率の異なる材料により構成された物体内の定常熱伝導問題の解法として有効であり、その実験法が容易であることもあつて鉄鋼業においては応用面も広いものと考えられる。

上記の各例は、温度実測も行ない、電導紙実験結果と比較して、実用上問題はないと結論されたものである。したがつて、熱伝導が主体をなす伝熱問題を解析する場合には、電導紙実験結果は十分に信頼できると考えてよい。

(5) 異なる熱伝導率をもつ物体を組み合わせた構造体内の熱伝導問題の電気槽実験による解析例 (参考)

一般に熱伝導率の異なる物体が組み合わされている構造物内の伝熱問題を解析的に解くことは困難である。したがつて、電導紙実験が普及するまでは、電解質溶液を満たした水槽内に、カーボンブラックを混入してその電気抵抗を調節した澱粉ノリを所期の形状をもたせて配置した方法が用いられた⁴⁾。さらに、パラフィンにカーボンブラックを混入した固体と電解質溶液とを用いた例もある。銅板上に凝結した水滴の伝熱抵抗を検討した例⁵⁾、また軸心に異金属を封入した内燃機関用排気弁の熱伝導⁶⁾、保温した蒸気配管のフランジ部を管内より保温した効果の検討⁷⁾、直交重ね合わせ異質壁の伝熱抵抗⁸⁾、建屋の壁と大地の合成伝熱抵抗⁹⁾などの問題も解かれている。

伝熱プラントの伝熱解析については、電子計算機の応用とともに、電導紙実験の応用分野は広いと考えられる。

文 献

- 1) J. F. ELLIOT and J. POPPER: A Masstransport Model of Erosion of the Carbon Hearth of the Iron Blast Furnace.
J. SZEKELY: Blast Furnace Technology Science and Practice, (1972), p. 171~200, Marcel Dekker, Inc.
- 2) 大野: 鉄と鋼, 58 (1972) 12, p. 1705~1717
- 3) 同上: p. 1712, Fig. 14
- 4) 松永: 科学(岩波), 23 (1953) 2, p. 88
- 5) 松永: 熱工学演習, p. 337 (日刊工業新聞社)
- 6) 松永: (5)に同じ, p. 339
- 7) 松永: 熱管理資料, No 32~33 (1954), p. 39~43
- 8) 松永: 衛生工業協会誌, 27 (1953), 6, p. 197~199
- 9) 松永: (8)に同じ, 27 (1953), 4, p. 131~133