# 磁気式酸素計

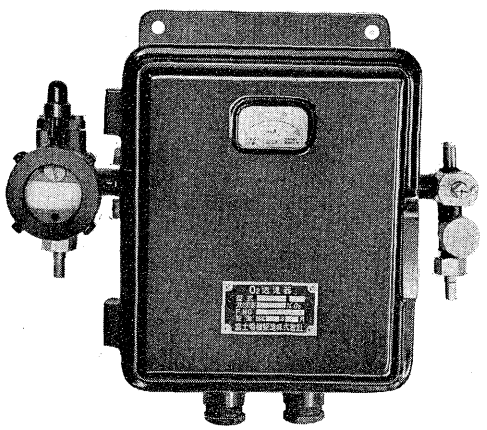
豊田工場設計課　片山　淳

# Magnetic System $O_2$ Analyser

By Jun Katayama
(Designing Div., Toyoda Works)

## I. 緒　　言

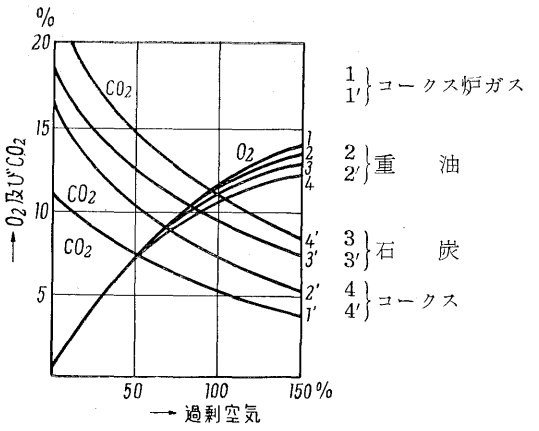
各種工業の燃焼設備において燃焼状態を適確に把握することは，近年ますます関心が払われている熱管理の目的上極めて重要な意義を有している．その結果として燃料および人件費の節減，製品の良化均一化，生産能率の向上，危害防止等が得られることは周知の所である．燃焼状態を適確に指示するガス分析計として，工業的には電気式ガス分析計の方が連続的にして迅速な計測が可能であり，取扱上の手数も簡単で，しかも遠方監視ができて中央管理，自動制御上便利であるから化学式のガス分析計よりも数段優れている．この電気式ガス分析計として従来から熱伝導率方式による当社製の $CO_2$ 計が多数使用され好評を博している．しかしながら $CO_2$ 量の計測は燃焼状態を知る間接的な方法であって，より完全な燃焼管理をおこなうためには未燃焼ガス分析計としての $CO+H_2$ 計を必要とする場合が多い．ここにおいて明瞭に空気過剰率を指示するガス分析計として，さらにより多くの長所を有する磁気式酸素計の必要を感じこれを製品化した。



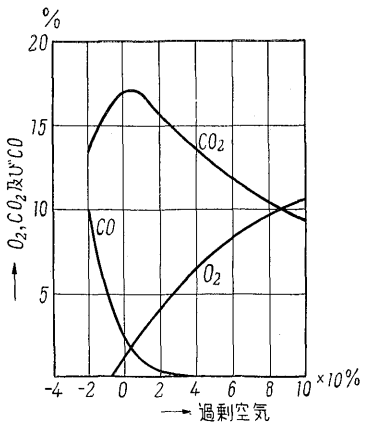
第1図　磁気式酸素計
Fig. 1. Magnetic system $O_2$ analyser

## II. 酸素計の必要性

磁気式酸素計は燃焼管理計器として $CO_2$ 計に優る次の特長を有している．燃焼管理において最も必要なのは過剰空気量を知ることである．所が燃焼管理上，重要な目安となっていた廃ガス中の $CO_2$ 量の計測だけでは，過剰空気の値を明確に知り得ない場合が多い．先ず第1に重要なことは第2図のごとく，$CO_2$ 含有量が同一であっても燃料の組成によって過剰空気量が異なっているが，酸素含有量は通常使用される過剰空気の範囲（50%以下）において，燃料の種類に無関係である．したがって燃料の構成が一定でかつ既知の場合にのみ，$CO_2$ 量から空気過剰量を知ることができるが，最近次第に多くなってきた各種燃料の混焼あるいは併焼等の場合には，明確に過剰空気量を示す酸素計の使用が必須となる．次に一般的な問題として第3図のごとく $CO_2$ 含有量が少いと，空気過剰の場合と不足の場合の2点を表わしているから $CO+H_2$ 計で未燃焼ガスを同時に測定する必要がある．所が酸素含有量を測定すれば一義的に過剰空気量




第2図　各種燃料における $CO_2$ および $O_2$ 含有量
Fig. 2. Containing quantity of $CO_2$ and $O_2$ in every kind fuel




第3図　ある特定の燃料における $CO_2$, $O_2$ および CO 含有量

Fig. 3. Containing quantity of $CO_2$, $O_2$ and CO in a special fuel

を知ることができる．この酸素含有量の最適値は燃焼設備の構造によって一定であり，酸素含有量がこの値に達しない時は空気量が不足していることを明確に表わしている．なお石灰炉やセメント炉のように製造工程中の化学反応等による $CO_2$ が，廃ガス中の $CO_2$ 以外に発生する場合にも，酸素計を使用すれば完全な燃焼管理をおこなうことができる．上記の理由によって磁気式酸素計は燃焼状態の適確な計測およびその自動制御上今後ますます必要となってくるであろう。

## III. 酸素の特性

すべてのガスは必ず正あるいは負の帯磁率（Susceptibility）を持ち磁界によって吸引，あるいは反撥される．第1表のごとく酸素と酸化窒素のみは著るしく強い正磁性体であって磁界に強く吸引される．他のガスはすべて反磁性体である．酸化窒素の工業上の出現は極めて稀有であるから，磁気式酸素計は酸素によってのみ応動し他のガスの影響は全然なく，したがって種々のガス中の酸素含有量だけを測定できる。

第1表　各種ガスの相対的帯磁率

Table 1. Relative susceptibility of every kind gas

| ガス種類 | 相対的帯磁率 | ガス種類 | 相対的帯磁率 |
|---|---|---|---|
| 酸　素 | +100 | 窒　素 | −0.42 |
| 空　気 | + 21.6 | 塩　素 | −0.13 |
| 炭酸ガス | −0.61 | 水　素 | −0.12 |
| アルゴン | −0.58 | アセチレン | −0.38 |
| アンモニヤ | −0.58 | 亜酸化窒素 | −0.58 |
| エタン | −0.83 | 酸化窒素 | +43.8 |
| メタン | −0.37 | 二酸化窒素 | +6.2 |

酸素の帯磁率 $+141.3\times10^{-9}$(760mmHg.20°C) を 100 とす。

今磁界の強さを $H$, 磁気感応を $B$, 磁化の強さを $I$ で表わすと，透磁率 $\mu$ および帯磁率 $\kappa$ はそれぞれ次のごとく表わされる。

$$\mu=\frac{B}{H} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\kappa=\frac{I}{H} \quad \cdots\cdots(2)$$

しかるに　$B=H+4\pi I$ ……(3)

なる関係より $\mu=1+4\pi\kappa$ ……(4)

この透磁率 $\mu$ およびこれに関係ある帯磁率 $\kappa$ によって，物質の磁気的性質が定量的に表わされる．真空中では $\mu=1$ で透磁率が1より僅かに大きい物質を正磁性体といい，1より僅かに小さい物質を反磁性体という．(4)式より真空中の帯磁率は零である．何故なら真空中では物質がなく磁気能率を生じないからである．正磁性体の帯磁率は零より大きく，その磁気能率は励磁々束に同一向きに重畳されこれを増加する．反磁性体の帯磁率は零より小さく，その磁気能率は励磁々束に逆向きに重畳されこれを減少する．このことは，正磁性原子は初めから永久磁気能率を持つが，反磁性原子は持たないことに基因している．したがって磁気的極性分子と無極性分子との考察から，Curie-Langevin の法則が成立つ．すなわち正磁性体では帯磁率は絶対温度に逆比例して

$$\kappa=\frac{K}{T} \quad (K\text{は常数}) \quad \cdots\cdots(5)$$

であり，反磁性体では，帯磁率は温度に無関係である。

かかる磁気的な特性を利用した酸素計としては直接式と熱線式ともいうべき2種があるが，本計器においては後者を採用する．すなわち屋根状永久磁石の漏洩磁束による強力な不均一磁界と，熱線の周りの不均一な温度分布とが存在している場に，正磁性ガスとしての酸素が入ると，丁度重力場における自然対流のごとく磁気風（magnetic wind）なる1種の対流を生ずるので，この流速を加熱線を兼ねた熱線風速計で測定して，酸素含有量を知るのである。

## IV. 作動原理

磁気風発生の理論は次のごとく説明できる．磁気能率 $M$ なる正磁性ガスが，磁界傾度 $\frac{dH}{dx}$ なる不均一磁界中で強磁界区域に吸引される力 $P$ は

$$P=M\cdot\frac{dH}{dx} \quad \cdots\cdots(6)$$

ガスの単位体積の磁気能率は体積帯磁率と励磁々束密度との積に等しい．すなわち

$$M=\kappa_0\mu_0 H \cdots\cdots(7)$$

$\kappa_0$: 標準状態の体積帯磁率

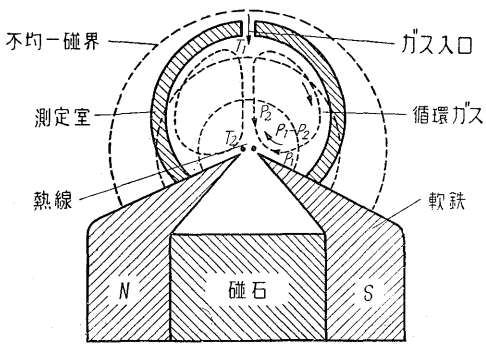
単位体質の原子の数は圧力に比例し温度に逆比例するから

$$M=\kappa_0\mu_0 H\frac{p}{T} \cdots\cdots(8)$$

酸素においては正磁性体の磁気能率と熱的擾乱との関係(5)式が成立するから

$$M=\kappa_0\mu_0 H\frac{p}{T^2} \cdots\cdots(9)$$

したがって(6)式は $P=\kappa_0\mu_0 H\frac{dH}{dx}p\frac{1}{T^2}$ ……(10)




第4図　磁気風発生原理図

Fig. 4. Generating principle diagram of magnetic wind

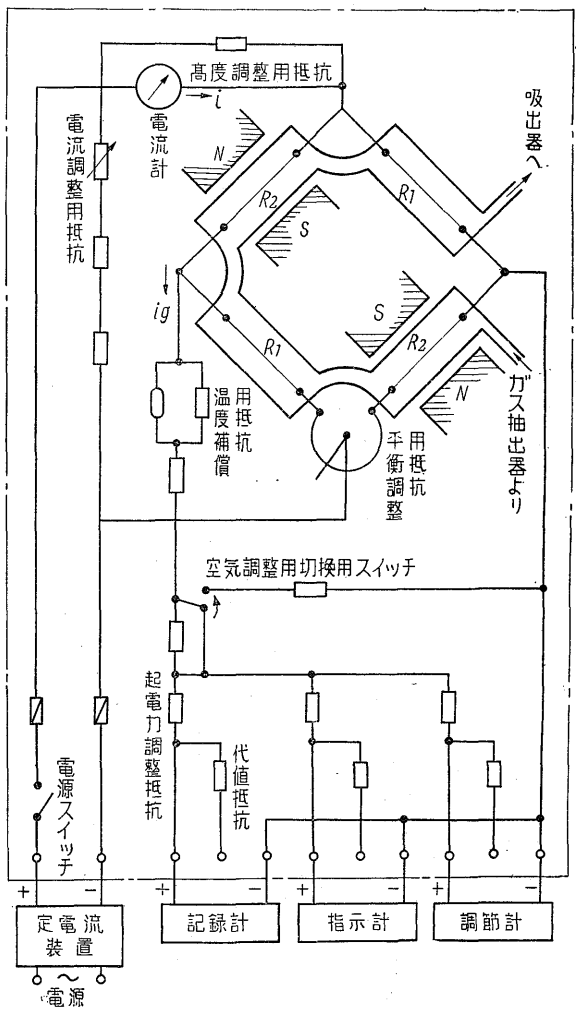
それゆえ第4図のごとく，冷い体積要素は上方から強磁界区域に吸引され，熱い体積要素もより小さい力によって同様にその区域に吸引され，その結果二つの磁気作用は差引かれ

$$P_1-P_2=\kappa_0\mu_0 p H\frac{dH}{dx}\left(\frac{1}{T_1^2}-\frac{1}{T_2^2}\right) \cdots\cdots(11)$$

なる合成磁気力が熱による上昇力に付加されて対流を生ずる．すなわち上部の特殊案内板のスリットから拡散によって入ってくる混合ガスの中，酸素分子は温度が低くしたがって帯磁率が高いことと密度が大なることによって，磁界の最も強い区域に吸引される．この分子はそこにある熱線によって加熱され密度が小となり温度が高くなって磁化の強さが減少する．したがって温められた分子は後から流入する冷い分子のために押出されて上向熱風とともに上方に移動する．ここで再び冷却されすなわち高い磁化を得て室壁に沿い下降し，かくて上記の循還運動の過程を繰返し磁気風を発生する．(11)式の $\kappa_0 H\frac{dH}{dx}$ に関係する値はあたかも自然対流場における重力 $g$ のごとく作用し，$\kappa_0$ の大なる程すなわち酸素の濃度が増加する程磁気風は強くなる．磁気風が強くなるにしたがって熱線は強く冷却され，その分だけ熱線の電気抵抗が減少する．したがって第5図のごとく4本の熱線をホイートストンブリッジに組めばその抵抗変化分 $\Delta R(=R_1-R_2)$ より，ガルバ回路に流れる電流 $ig$ は

$$ig=\frac{\Delta R}{2Rg+R_1+R_2}\cdot i \cdots\cdots(12)$$

となるからこの $ig$ を検出することによって酸素含有量を測定することができる．(ただしガルバ回路の抵抗を $Rg$ とす)。



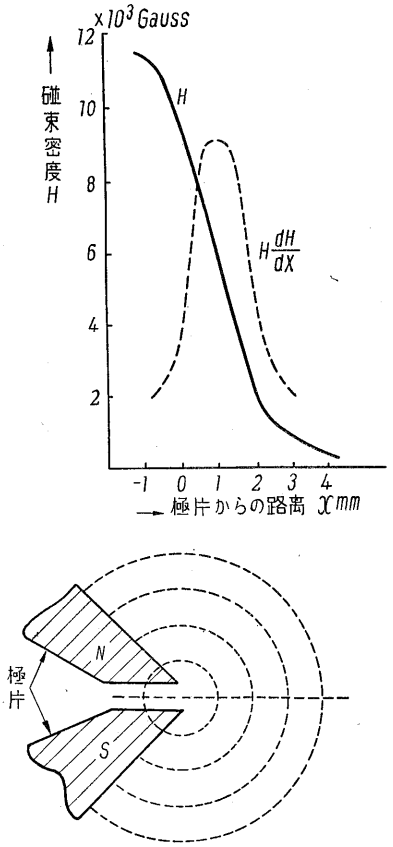

第5図　原理接続図とガスの流れ

Fig. 5. Fundamental connection diagram and flow of gas

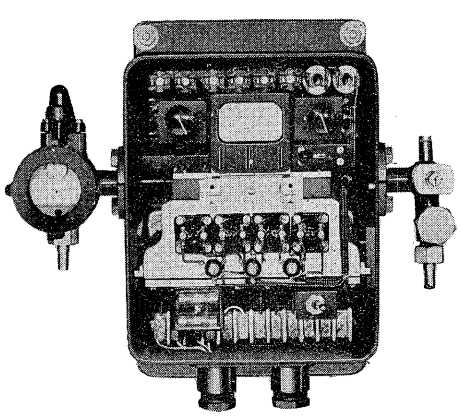
感度を大ならしめるには熱線は $H\frac{dH}{dx}$ が最大になるような位置にあることが必要である。

$$\int_{x1}^{x2} H\frac{dH}{dx}\cdot dx=\frac{1}{2}(H_{x2}^2-H_{x1}^2) \cdots\cdots(13)$$

であるから本計器の磁石部分に適合する特別な装置で $H_{x1}$, $H_{x2}$ を測定することによって $\int H\frac{dH}{dx}$ を求めその位置を決定することができる。



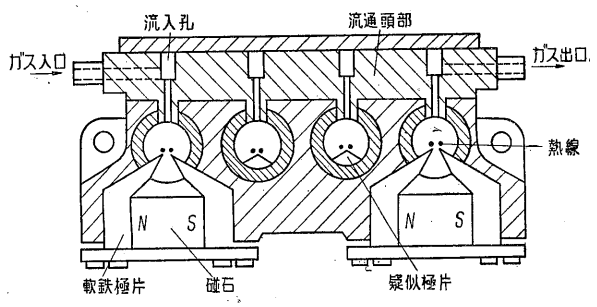

第6図　磁束密度の分布状態
Fig. 6. Distribution of magnetic flux density



第7図　内部構造（正面）
Fig. 7. Inner construction (front view)

## V. 測定部の構造

測定部は完全気密，耐腐蝕性であって磁石部分，熱線素子および測定房がその主な部分である．磁石は国産で最も強力にして方向性のある小型の永久磁石であり，それに屋根状の極片がついており，磁石部分は厚く銀めっきして耐腐蝕性としている．一つの測定部にはかような磁石部分が2個取付けられる．磁石は基板に取付け外部

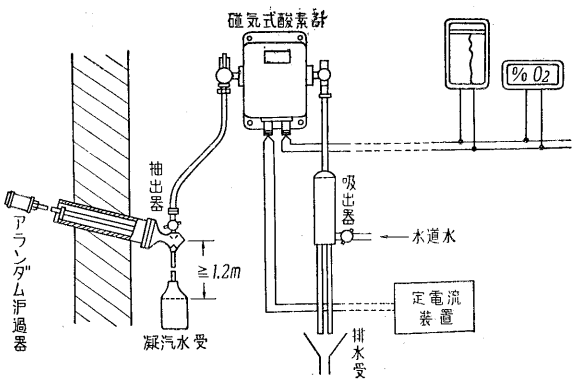



第8図　測定部断面図
Fig. 8. Sectional view of measuring part

から測定房中に挿入する．熱線素子は直径 40μ の物理的に純粋な白金線からなり，その素子は白金イリジウムのスプリングによって張られた絶縁リングに支持されて曲げられ，その平行の2本の線は磁製の7個の小ささな間隔板で互に止められている．磁界内の線に電流が通過する際に生ずる力は，この平行の2本の白金線を1回転捻ることによって打消しているので，素子は極めて強力な磁界内でも完全に静止している．本計器の零点が非常に安定なのはこのためである．測定素子は一つにまとまって組立てられていて測定房の孔に外部から簡単に挿入できるので，現場でも容易に交換できる互換性を有していて，極めて便利である．これがまた四つの室の熱線構造の完全な熱的な等価性を持たせ，外部条件に影響されない一つの条件となっている．なお熱線は極片の尖った刃状の近くに取付けられている．したがってその形状によって強い磁界傾度を与えるとともに，その場所によって強く磁束を集中させているので(11)式の $H\frac{dH}{dx}$ を大ならしめ強力な磁気風を発生することができるわけである．測定房は非磁性材料で作られ円筒形の四つの孔が並んでおり，測定ガスがこの中を流通する．その外側の2個の室は外部から挿入された磁石によって磁界が与えられて磁気風による熱線の冷却を生ぜしめ，内側の2個の室には磁界がなく，これが比較量を与えている．この比較室には疑似の極片が取付けられ4個の室の構造を幾何学的に同一にしてある．したがって4本の熱線は幾何学的に全く同一の条件の下で作用しこれが性能上の大きな長所となっている．測定房は鉛めっきを施し完全な耐腐性を与えている．白金線の温度は約250°Cから300°Cまで上昇する．裸のままの白金線は測定すべき混合ガス中に酸素および水素が存在する場合には，この2成分気体に対して触媒作用を起し水素が燃焼する．これは熱線の温度測定に基く本方式にとって不都合であるので，熱線は触媒作用を阻止する気密な薄い保護被膜で被覆さ

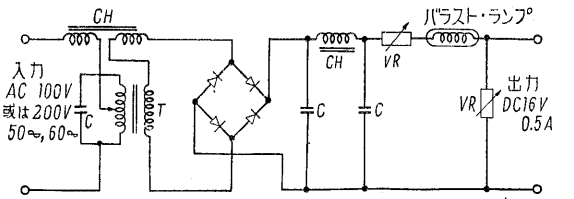
れている．測定ガス中の水素の量が 10% 以下の場合には，かような熱線素子を使用すれば感度変動および零点移動の影響は現われない．水素量がさらに多くなった特殊の場合については後述する。

## VI. 装 置 の 概 要




第9図　酸 素 分 析 装 置 配 置 図
Fig. 9. Arrangement of $O_2$ analysing device

酸素ガス分析装置としては，先ず測定ガスが凝汽水受を取付けた抽出器によって抽出される．濾過装置は 150°C～600°C まではアランダム管製濾過器を，それ以上の温度の場合には特別の水冷装置をこれに取付け，150°C 以下の時には綿濾過器を使用する．ダストが非常に多い場合には特別の抽出器および濾過器を取付ける．酸素計の左側のガス取入口には監視濾過器があり，その中に綿毛または硝子綿を充塡する．これが2次的の清浄作用をなしその汚れよりダスト濾過の状態が分る．なおその上部にはガス流量を知るローターメーターが取付けられている．ガス吸出器としては水または圧縮空気によるインジェクター型のものを使用しガス流量 1l/min までの吸引が可能である．定電流装置は鉄共振型定電圧装置，セレン整流器およびバラストランプを内蔵した良好な性能のものを使用し交流電源に接続する．なお酸素計本体が抽出器より低温になる温度分布の場合にのみ冷却器を取付ける．本計器には必要に応じて指示計，記録計および調節計のうち1個または全部を接続することができる．本計器の零点の調整は窒素を通しておこなわれるが測定点の調整は 0～30% $O_2$ 以上の目盛範囲の場合には空気を流しておこない得る．また 21% $O_2$ 以下の目盛範囲の場合でも回路切換によって計器の感度を変更し，それにより空気を流した場合に接続した指示計の赤線に指針が合うように調整する．かように調整が簡単なことも本計器の特長である。

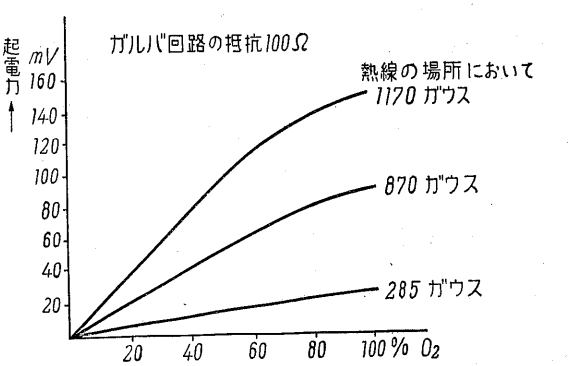



第10図　定 電 流 装 置 結 線 図
Fig. 10. Connection diagram of constant-current device

## VII. 性　　能

### 1. 使 用 範 囲

本計器の測定範囲は最小 0～5% $O_2$ 最大 0～100% $O_2$ まで可能である．ガス燃焼装置，セメント炉，ガラス溶解炉等の通常の測定範囲は 0～5% $O_2$ である．製鉄用の多くの平炉，加熱炉等の炉，最近の自動制御装置に使用している微粉炭燃焼の蒸汽缶に対しては普通 0～10% $O_2$ であり，旧式の小型汽缶等では 0～15% $O_2$ あるいは 0～20% $O_2$ の測定範囲が必要である．その他種々の化学工業等においてもそれに適した測定範囲を選定する．例えば冷凍装置や冷蔵装置等のように，空気中の酸素量からの偏差を測定する必要のある場合は 0～25% $O_2$ の測定範囲が適当である。




第11図　磁 界 の 強 さ と 起 電 力 特 性
Fig. 11. Intensity of magnetic field and electromotive force characteristic

測定特性は磁石の最強磁場を用いる時には 40% $O_2$ まで直線でありそれ以上で彎曲する．この特性は飽和現象ではなく高酸素含有量の範囲で磁気風は非常に早い流速を有し，流れているガス体が熱線と完全に同一温度にならないことに基いている．その場合には磁界の強さをある種の方法で減少せしむれば，その測定特性を全範囲に亘って直線化することができる．かかる作用はガス速度の減少により熱線からガスへの熱伝導を充分良好にできるからである．したがって測定範囲

が小さい時は最強磁界で動作させ 0～40% $O_2$ まで直線性を得る．測定範囲が大きく受信計器の電流感度が充分な時には，例えば 0～100% $O_2$ の場合，磁界の強さを 285 Gauss に減少すれば完全な直線指示が可能である．0～10% $O_2$ 以上の標準の測定範囲で指示計および記録計を使用して連続計測する時の測定確度は最大値の 2.5% である。

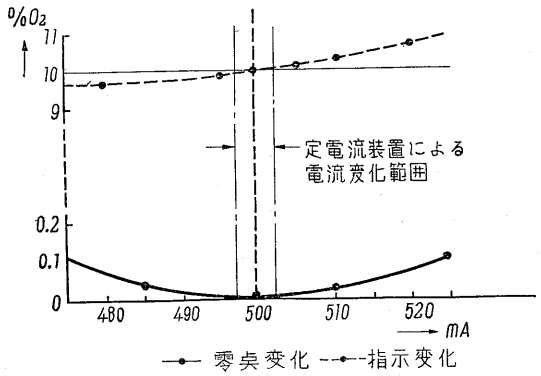
## 2. 測　定　誤　差

優秀な測定計器ほど，他の影響に無関係に測定検出量のみを正確に指示，記録しまたそれにより調節するものである．本計器の誤差はこの種の工業計器の中では僅小である．何故なら本計器の測定方法の物理的な原理は III で述べたごとく，工業的に使用される混合ガス中，酸素のみが正磁性体であり他のガスがすべて反磁性体であって他のガスの影響が全くないからである．それ故室温，粘性，圧力，熱伝導，電源電圧，流量の変化が測定精度におよぼす影響を考えればよい．これらの影響は測定室および熱線素子の特殊構造によって充分に除去されている．すなわち 4 個の測定室および熱線素子は同一の幾何学的構造であって，全測定室で同様な対流を生じ，熱伝導および輻射によっても同一の熱量を消費する．また 4 個の熱線素子に対して同一の測定ガスを与えているため，各ガスの熱伝導，圧力，粘性，流量の変化による各熱線素子の熱変化は全く同一である．なお 4 本の熱線素子は総て各温度において小なる許容値内で電気抵抗が同一であるか，少くともその抵抗—温度特性が平行である．かかる 4 本の熱線素子でブリッジを組むと動作温度が相当変化しても平衡を保つことは明確である．また熱線素子は平行な 2 本の特殊構造であって強力な磁界中でも完全に静止しているので精密な特性を保持している．かように測定室および熱線素子が特殊の構造であるため，周囲の各量の変化が熱線に同様に作用し，それ故熱線の作動温度も同様に変化してブリッジのバランスが保たれ周囲の影響は指示に作用しない．すなわち誤差は僅小である。

## 3. 測　定　結　果

i） 測定回路の加熱電流変動は前述の定電流装置を使用して 0.5% に押え，これによってブリッジ回路の起電力変化を 1 %以内に収める．また加熱電流を大きく 5 % 変化させても熱線素子の温度は約 40°C 変化しこの時のブリッジ零点は 1 %変動するだけである。

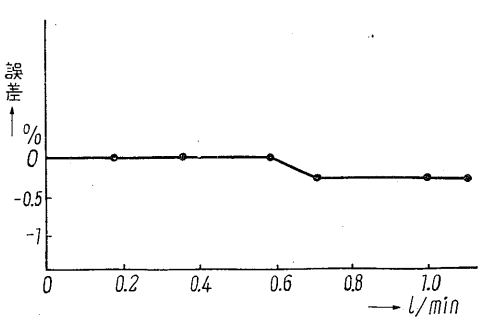
ii） 温度変化の影響は温度上昇とともに単位体積中の分子数は減少し，(11)式の合成磁気力は絶対温度の 2 乗に逆比例して起電力が減少する．したがって温度上昇に伴い電気的な回路の感度を変更すればそれによって補正できる．すなわちブリッジのガルバ回路に負性抵抗としての半導体（thermister）を挿入接続して，測定値のすべてに対し有効完全に温度補償している。




第 12 図　電流変動による特性変化
Fig. 12. Variation of characteristic with current variation

iii） 測定ガスの熱伝導率や粘性の変化については，それらによる感度および零点の変動はない．例えば 0～10 % $O_2$ の測定範囲にて他のガスとして 90 % $O_2$，または 90 % $CO_2$ が含まれていても何らの影響はない．ただし水素は熱伝導率が特別に高いため，水素量が 10 % 以上の場合，熱線が余計に冷却され幾分感度が落ちるがこれは加熱電流を増加して補償できる。

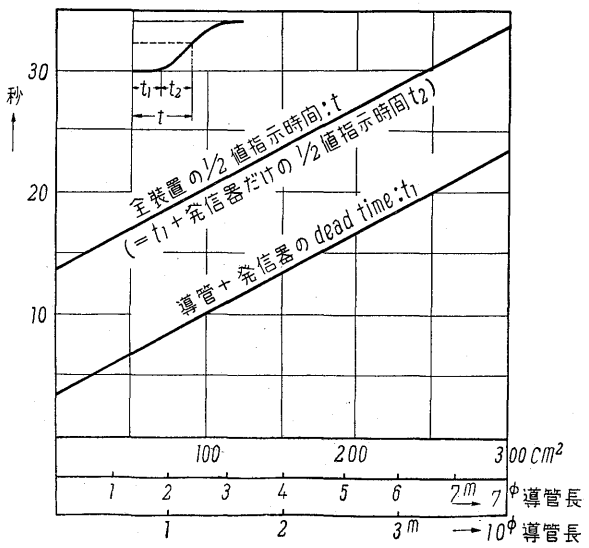
iv） 圧力が高くなると単位体積中の極性分子の数が増加し，したがって(11)式の磁気効果が増加する．しかしながら気圧の気候的な変化は少ないため圧力の影響も僅小である．また取付場所の高度による気圧変化は計器内の調整抵抗により補正できる。




第 13 図　流　量　特　性
Fig. 13. Flow characteristic

v) 流量の影響は 0~1 l/min まで変化しても指示誤差は ±0.25% 以内であり極めて僅小である．ガス吸出器の吸引能力を大きくしてあるのでガス導管中および計器内の流通時間は短かくなり，分析装置全体のタイムラッグは従来の $CO_2$ に比べて僅小である。

vi) 本計器の全測定室の構造が完全に均一であるため4個の測定室中における磁気風の偏差が等しく，したがってその測定結果は位置に無関係であり，すべての方向に 20° 傾いても感度および零点に影響しない．すなわち船舶用にも適している。




第 14 図　導管長とタイムラッグの関係

Fig. 14. Relation between length of leading pipe and time lag

## VIII. 結　　言

本計器の特長の主要な点を要約すれば

(1) 酸素の磁気的特性を利用するから指示は酸素含有量のみに比例している．それゆえ従来の多くの電気式ガス分析計のごとく他のガスに影響されることが全然ない。

(2) 酸素含有量と過剰空気量との関係が全く一義的であり，燃料の構成にも無関係であるので熱管理上極めて有利である。

(3) その構造上，電気的，熱的および幾何学的に完全に対称な条件で動作するから，測定ガスの粘性および熱伝導率の影響はなく，室温および圧力の影響も極めて小である。

(4) 可動部分なく構造的に堅牢であり耐蝕処理も充分施されている。

(5) 指示は平等目盛であり，装置のタイムラッグも少くまた計器の傾斜にも影響されない。

以上の諸点より各種燃焼設備，化学プラント等の自動制御の目的に合致する熱管理計器として，今後ますます発展する自動制御装置に大いに活用されるとともに，一般の熱管理計測上にも極めて有利な計器としてますます使用されるものと考えられる。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。