

人工軽量骨材コンクリートについて

—— 現状と問題点 ——

Lightweight-aggregate Concretes-a Review

小林 一 輔*

Kazusuke KOBAYASHI

最近、わが国でも人工軽量骨材の開発が急速に進められ、これを用いて高強度の軽量コンクリートをつくることが可能となった。すでに高層ビルにはかなり使用されており、長大スパン橋梁への利用も検討されているが、問題点もいくつか残されているので、現状とあわせて解説する。

1. ま え が き

構造物の軽量化によってその性能向上と経済性を図るという思想は、今日ではほとんどあらゆる分野の構造物に浸透している。この点についてはコンクリート構造物の場合も決して例外ではない。たとえばプレストレストコンクリート橋梁や高層ビルなどにおいては、構造物の重量がその機能を決定する際のきわめて重要な因子となるのである。より具体的な例をあげれば、プレストレストコンクリート鉄道橋の場合、スパンが 35 m 程度になると活荷重とケタ自重はほぼ等しくなり、スパンが 60 m 程度になるとケタ自重は活荷重の 2 倍にもなってくる。したがって、スパンが長大化するとともにケタ自重などの死荷重を軽減することが、経済的に橋梁をつくる上においてどうしても必要となってくるのである。

軽量で、しかも構造部材として十分な強度が得られるようなコンクリートをつくるために現在用いられている手段は、コンクリート容積のおよそ 70% 程度を占める骨材を、従来の天然産の重いもの（見掛け比重 2.6~2.7）から、粘土や頁岩などを焼成して人工的につくった多孔質の軽いもの（見掛け比重 1.2~1.5）におきかえることである。これにより、コンクリートの重量を従来のものの約 2/3 程度まで軽くすることができる。

この粘土や頁岩などを焼成してつくる人工軽量骨材がわが国で初めて市場に出たのは昭和 39 年でその歴史はきわめて浅いが、米国ではすでに 1917 年代につくられている。第一次および第二次大戦中は鉄鋼が不足したため、主として米国や英国などで人工軽量骨材を用いた鉄筋コンクリート船が盛んに建造された(写真 1)。第二次大戦前後よりヨーロッパ諸国およびソ連においても盛んに製造されるようになり、これまでに主として建物のスラブや屋根材などに使用されてきたが、橋梁に対する使用例は、ごく最近米国で PC 道路橋に若干の例があるのみできわめて少ない。この傾向は、人工軽量骨材の生産が開始されて以来まだ 2~3 年しか経過していないわが国においても同様で、中・高層ビルのスラブなどに對

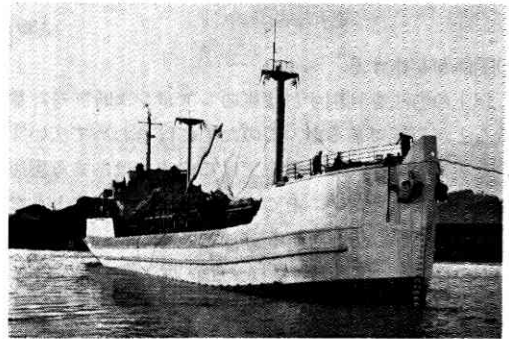


写真 1 人工軽量骨材コンクリート製の
沿岸航行船 (2000 ton)
(Short. A., Kinniburgh. W.: Lightweight
Concrete より)

する使用例はすでに 200 件をこえているが、橋梁に対する使用例は床板コンクリートの場合を除けばほとんどなく、現在のところでは国鉄東北本線の金山架道橋（スパン 15.8 m のポストテンション PC ケタ）のみである。このように人工軽量骨材コンクリートを橋梁に使用することに対してとくに慎重なのは、つぎのような事情に基づくものである。たとえば軽量コンクリートによってケタ重量の軽減を図りスパンを長大化しようとする場合、橋ケタの構造としては当然 PC ケタとなってくるが、PC ケタのコンクリートは、一般の鉄筋コンクリートに用いられるものよりもはるかに高い圧縮強度を必要とする。とくに部材端部の緊張材定着装置下のコンクリートは、きわめて大きい局部的支圧応力を受ける。さらにその近傍のコンクリートにはプレストレスの方向とはほぼ直角方向の引張応力を生ずる。軽量骨材コンクリートがこのような局部的応力に対して十分に抵抗できるかどうかは、実験によってこれをたしかめなければならない。また、プレストレス導入後の PC 鋼材の応力損失量を見積るためには、軽量コンクリートの弾性変形、クリープおよび乾燥収縮などのデータがぜひとも必要となる。なお、とくに鉄道橋においては、くり返し荷重によるケタの疲労強度も調べておかなければならないが、このためには相当の時間を要する。さらに橋梁のコンクリートは、建物

* 東京大学生産技術研究所第 5 部

のスラブコンクリートと異なり、気象作用の影響を直接受けるので、耐候性についても慎重な検討が要求される。

このように人工軽量骨材コンクリートを橋梁などに使用するには検討を要する点が多い。これらの問題についてはこの数年来内外において研究が進められているが、これまでに得られた結果は、コンクリートの構成材料の一つである骨材を、天然の比較的ち密な組織を有するものから人工焼成の多孔質のものにおきかえることによって、コンクリートの性質は相当に複雑化してきたことを示している。本文ではこのような観点から人工軽量骨材コンクリートの性質を検討し、問題点を明らかにすることにした。

2. 人工軽量骨材の製造法について

一般に構造用軽量コンクリートに用いられる人工軽量骨材としては、膨張頁岩 (Expanded Shale)、膨張粘土 (Expanded Clay) および焼成フライアッシュ (Sintered Fly Ash) などがあり、それぞれ、頁岩、粘土、フライアッシュを原料としている。以上のうち膨張頁岩は、その焼成方法によって非造粒型と造粒型の2種に分類される。前者は原石を破砕して所定の粒径の骨材が得られるようにスクリーニングを行なったのち、ロータリーキルンで $1000^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ で焼成して得られるもので、碎石にやや丸味を与えたような形状となる (写真2)。後者は原石を微粉砕したのち水を加えて造粒し、乾燥させた

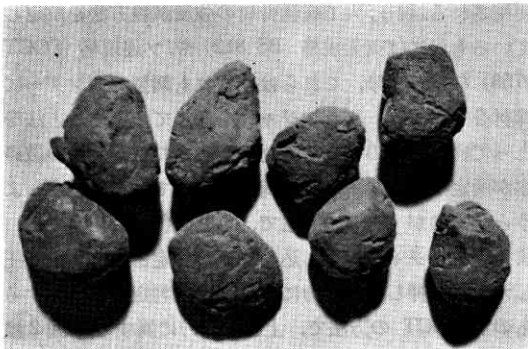


写真2 非造粒型膨張頁岩の外観



写真3 造粒型膨張頁岩の外観

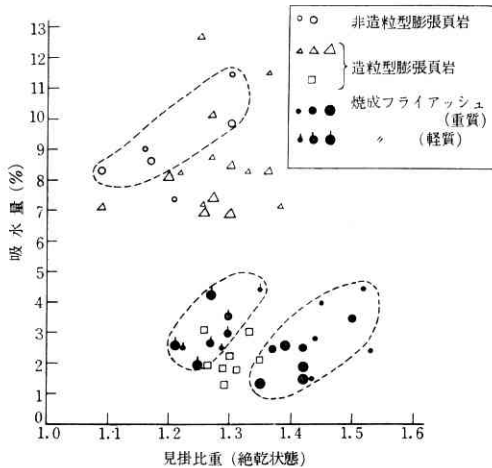
ものをロータリーキルンで焼成する。焼成温度はメーカーによって多少異なり $1050^{\circ}\text{C}\sim 1300^{\circ}\text{C}$ である。でき上がったものの形状はほぼ球形である (写真3)。なおこれらの方法のいずれをとるかは、原石の性質によって決定される場合が多く、一般に前者の方法で焼成した場合によく膨張しないときは、後者の方法により製造されるが、後者の方法は前者に比べて手間がかかる反面、原料成分の管理が容易であることが利点とされている。現在わが国で生産されている人工軽量骨材はその大半が膨張頁岩で、非造粒型、造粒型の両方が市販されている。米国ではもともとこの骨材の開発国であるので、相当量が使用されている。

膨張粘土は粘土を焼成したもので、わが国ではまだ生産されていないが、欧州諸国およびソ連では比較的多く使用されている。製造方法は膨張頁岩の造粒型とはほぼ同様である。焼成フライアッシュは火力発電所で微粉炭を燃焼させるときに得られる灰、すなわちフライアッシュを主原料とし、これに少量の添加材 (たとえば粘土、パルプ廃液など) を混合して造粒し、乾燥したものをロータリーキルンで焼成して得られる。英国で早くから開発されたもので、わが国でも生産されている。

以上の人工軽量骨材の製造過程において、頁岩や粘土などを焼成した場合にこれらが膨張して多孔質となる過程は、造粒方法の場合を例にとるとつぎのように説明されている¹⁾。すなわち焼成の初期には焼成温度の上昇とともに造粒された原料は焼き締まり、組織が非通気性となってこれより高温で発生する気体は全部骨材内部に包含される。この場合、組織の粘度がまだ相当に大きい間は発生した気体は微小気泡内にとちこめられているが、焼成の進行とともに組織の粘土が低下すると、とちこめられた気体の圧力によって微小気泡は大気泡に成長し、骨材は膨張する。以上の焼成過程において骨材を膨張させる要因となる発生気体は、原料中の Fe_2O_3 が FeO に還元されるときに生ずる酸素ガスがおもなものとされている^{1), 2)}。

3. 人工軽量骨材の性質

図1はわが国で生産されている代表的な人工軽量骨材 (粒径 5mm 以上) 4種類について、その見掛け比重と吸水量の関係を示したものである。この図より人工軽量骨材には、吸水量が非常に大きいもの (7~12%) と、比較的小さいもの (1~5%) があり、その見掛け比重は前者の場合 1.05~1.35、後者の場合 1.2~1.5 の範囲にあることがわかる。また同一メーカーの骨材でも、ロットや粒径によって吸水量、見掛け比重にバラツキを生じているが、おおよその傾向としては、比重の大きいものは吸水量も大きい結果となっている。写真4および5はそれぞれ造粒型膨張頁岩および焼成フライアッシュの粒の断面を示したものであるが、前者では内部に大きい空



注 1) 印の大小は粒径の大小を示す。
 { 大……20~15mm
 { 中……15~10mm
 { 小……10~5mm
 □印のみは 15~10 mm のもの一種である
 注 2) 吸水量は 24 時間吸水

図 1 国産人工軽量骨材の見掛け比重と吸水量



写真 4 造粒型膨張頁岩粒の断面



写真 5 焼成フライアッシュ粒の断面

げき(すきま)が存在し、後者では中心部に比較的大きい空孔が集中していることがわかる。これらの骨材粒子の空げき率を真比重と見掛け比重の測定値より算出すると、前者の骨材の場合、48~56% である。また、ある非造粒型膨張頁岩について同様にして得られた値は 46~54% であったので、人工軽量骨材粒の空げき率はざいたいにおいて 50% 前後とみなされる。このように人工軽量骨材は多孔質であるから、その強度は全般的に河川骨材に比して小さく、さらに製造方法や粒径によっても強度が異なることが予想される。

一般に骨材の強度を試験する方法としては、つぎの 4 種類があげられる。

- (a) 大きい粒から切り取った小立方体による圧縮強度試験。
- (b) 粒子群に落下衝撃を与え、その破砕率により判定する方法。
- (c) 粒子群に一定の静的圧縮荷重を加え、破砕率により判定する方法。
- (d) 粒子群に静的圧縮荷重を加えてゆき、見掛けの圧縮変形量が所定値に達したときの荷重により判定する方法。

以上の方法のうち(a)と(b)は、天然産の砕石や砂利のような、巨視的には等質とみなされるような比較的強度の高い骨材に対して適用されるが、(c)および(d)の方法は人工軽量骨材のような多孔性骨材の強度判定に使用される。現在、人工軽量骨材の強度試験方法を規定しているものには英国規格 (BS 812) や、ソ連規格 (ГОСТ 9758) などがあり、これらはいずれも鋼製シリンダーに骨材をてん充し、プランジャーを通じて加圧する方法をとっている。この場合、骨材は破砕されるが、その破砕率が所定の値となるような荷重を求めて強度を判定しようとするのが B. S. の方法で、上記の(c)に相当する。またプランジャーの押し込み深さが一定となるまで加圧したときの押し込み圧力により強度を判定しようとするものが ГОСТ の方法で、上記の(d)に属する。図 2 は ГОСТ の方法^{注)}によって求めた骨材の強度と、その単位容積重量および粒径との関係を示したものである。これをみると骨材の種類を問わず、人工軽量骨材の強度と単位容積重量との間にはかなり高い相関関係が認められ、同じ骨材間では両者の間にほぼ直線的な関係が成立することがわかる。図 2 はなお、粒径および見掛け比重と単位容積重量との関係も示している。以上のようにして求めた骨材の強度と、これを用いてつくったコンクリートの強度との関連については、まだはっきりした結果が得られていないが、少なくとも圧縮強度が 400 kg/cm² 以下のコンクリートでは骨材の強度の影響があらわれていないようである。

注) 装置は BS のものを転用した。これは BS の装置が ГОСТ の装置と形状・寸法とも大差がないからである。

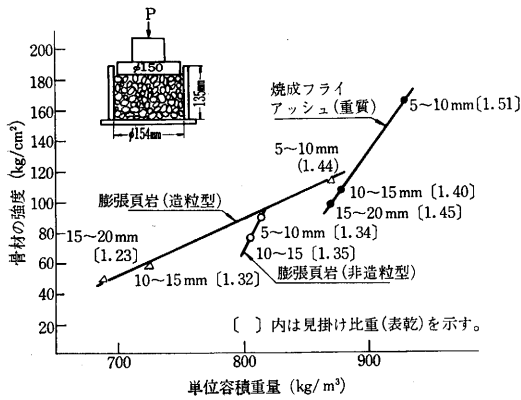


図 2 人工軽量骨材の強度と単位容積重量

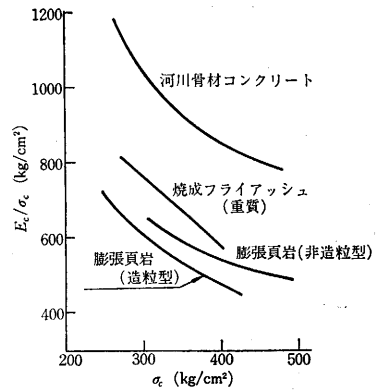


図 3 $E_c/\sigma_c \sim \sigma_c$

4. 人工軽量骨材コンクリートの二、三の問題点

1) ヤング係数について

図 3 は人工軽量骨材コンクリートのヤング係数に関する実験結果を示したものである。この図より、人工軽量骨材コンクリートのヤング係数は、同一圧縮強度の河川骨材コンクリートの値の約 60~80% と低下しており、その程度は骨材の種類によって異なるがだいたいにおいてコンクリートの単位容積重量の大きいものがヤング係数も大きくなっている。このように人工軽量骨材コンクリートのヤング係数は、その圧縮強度のほか単位容積重量と密接な関係がある。これら二つの値からヤング係数を推定するために、ACI の Building Code ではつぎのような式を示している。

$$E_c = 33 f_c^{1/2} \cdot w^{3/2}$$

ただし、 E_c …ヤング係数 (psi), f_c …圧縮強度 (psi), w …単位重量 (lb/ft³)

図 3 の結果は、粗骨材だけ軽量骨材を使用し、細骨材には川砂を用いたコンクリートについて得られたもので、その単位重量は 1.9 ton/m³ 前後である。細粗骨材ともに軽量骨材を使用すれば、その単位重量は約 1.6 ton/m³ 前後となるので、ヤング係数はさらに小さくなり、河川骨材コンクリートのおよそ 1/2、もしくはそれ以下の値となる。これらのことから PC 部材に軽量骨材コンクリートを用いると、プレテンション方式および分散式 PC ケーブルのポストテンション方式におけるプレストレス導入時の弾性変形による鋼材の応力損失、載荷時のたわみ、およびプレストレス導入時のソリは、河川骨材コンクリートの場合に比べ著しく大きくなる。

2) 曲げ、引張および圧縮強度におよぼす乾燥の影響

人工軽量骨材コンクリートを乾燥状態におくと、その曲げおよび引張強度は著しく低下することが明らかにされている^{3), 4), 5)}。図 4 は引張強度におよぼす乾燥の影響を示したもので、乾燥状態のコンクリートの引張強度を、同時に製作し水中養生を継続して行なったコンクリート

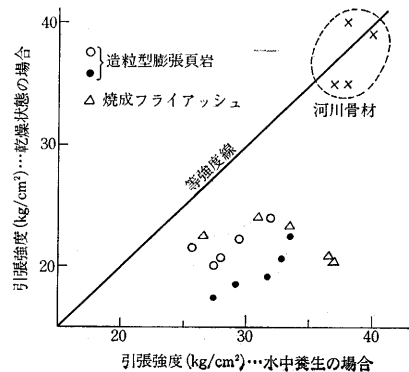


図 4 乾燥時の引張強度 (材令 4 週)

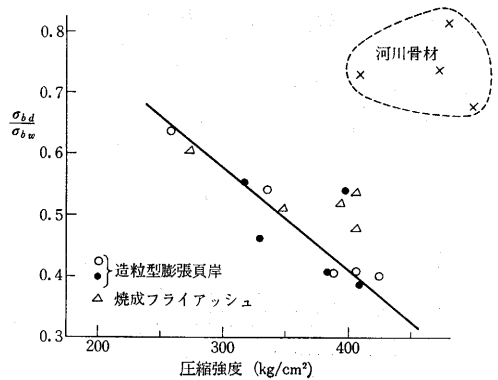


図 5 乾燥による曲げ強度の低下と圧縮強度 (材令 4 週)

の引張強度の関数としてプロットしたものである。乾燥状態のコンクリートは水中養生を 1 週間行なったのち、46% R.H., 20°C の室内で 3 週間乾燥させたものである。この図より、河川骨材コンクリートでは乾燥による強度低下がほとんど認められないのに対して、軽量骨材コンクリートでは、乾燥によりその引張強度が湿潤状態の場合の 60~80% に低下することがわかる。また図 5 は曲げ強度におよぼす乾燥の影響を調べた結果で、湿潤状態に対する乾燥状態の曲げ強度の比と圧縮強度との関

係が示してある。乾燥の条件は図4の場合と同様である。この結果をみると、河川骨材を用いたコンクリートも乾燥によりその曲げ強度は湿潤状態の場合の 70~80 % 程度に低下するが、人工軽量骨材を用いたコンクリートでは 40~60% まで低下し、乾燥が曲げ強度に与える影響はきわめて大きいことを示している。またその低下の度合は圧縮強度が高い場合ほど顕著であることがわかる。

以上で明らかにしたような、人工軽量骨材コンクリートを乾燥状態においた場合の曲げおよび引張強度の著しい低下は、これまでに製造されたいずれの人工軽量骨材を用いた場合にも認められ、人工軽量骨材コンクリートに一般的な現象と考えられる。このような強度低下の原因について、いまのところ明確な説明は与えられていない。いずれにせよ乾燥によって曲げおよび引張強度が著しく低下することは、部材のひびわれ耐力やせん断耐力を低下させるものと考えられるので、設計施工上十分の注意が必要である。

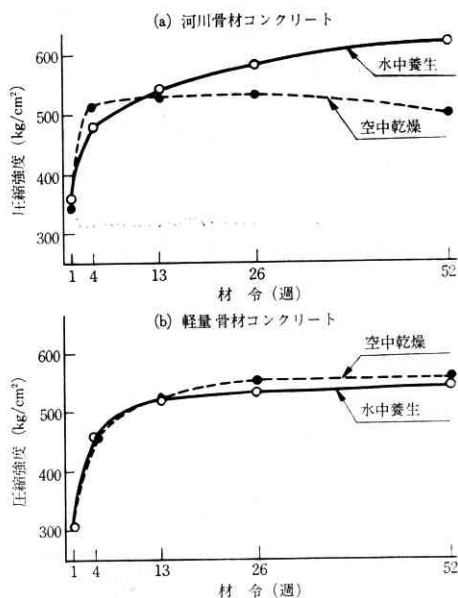


図 6 乾燥が圧縮強度におよぼす影響と材令の関係⁶⁾。

図 6 は、人工軽量骨材コンクリートの圧縮強度が乾燥によってどのように変化するかを河川骨材コンクリートと比較して示したものである。使用した人工軽量骨材は非造粒型膨張頁岩で、吸水率が 12.5% と非常に大きいものである。コンクリートの乾燥条件は、水中養生を1週間行なったのち、50% R. H. 20°C の室内に試験材令までおいたものである。図 6 をみると、河川骨材コンクリートを乾燥させた場合の圧縮強度は、材令4週（乾燥開始後3週）では水中養生を継続したものの強度よりもやや高い値を示しているが、その後強度の増加はほとんど停止し、材令1カ年では水中養生を継続して行なったもの

強度に比べて 100 kg/cm² をこえる強度差を生じている。このような傾向は河川骨材コンクリートの一般的性質としてすでに明らかにされていることである。一方、軽量骨材を用いたコンクリートでは、乾燥させた場合でもその強度は各材令を通じて水中養生を行なった場合とほぼ同様な割合で増加しており、材令1カ年に至っても乾燥の影響はほとんど認められない。このような傾向はすべての人工軽量骨材コンクリートに共通してみられるものではなく、吸水率が著しく大きい骨材を用いた場合に限られるものようで、骨材中に含まれる含水量がコンクリートの性質に大きな影響を与える一例と考えられる。

3) 凍結融解作用に対する抵抗性

人工軽量骨材コンクリートのもう一つの問題点は、凍結融解作用に対する抵抗性が著しく小さいことである。この点についてもすでに多くの実験結果があるが、図 7

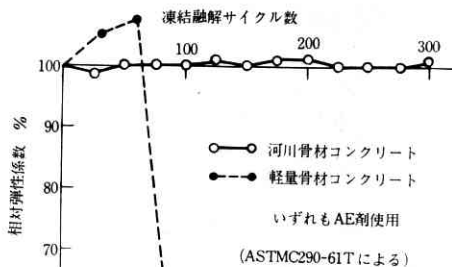


図 7 凍結融解試験結果

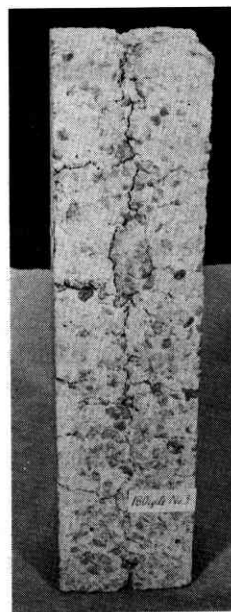


写真 6

は細粗骨材ともに非造粒型膨張頁岩を用いた軽量骨材コンクリートについての実験結果を示したものである。これをみると河川骨材コンクリートでは 300 サイクルの凍結融解のくり返しを受けてもほとんど健全であるが、軽量骨材コンクリートではすでに 100 サイクル程度のくり返しによって、著しく損傷を受けることが示されている。写真 6 は、凍結融解 180 サイクルによって崩壊寸前の状態となった人工軽量骨材コンクリートを示したものである。このように人工軽量骨材コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性が著しく小さいのは、人工軽

量骨材が多孔質であることに帰因するものと考えられ、人工軽量骨材コンクリートにとっては宿命のような感が

ある。この問題については現在各国で研究が進められており、その対策が検討されている。

外ともにきわめて活発に進められている。上記の問題点が解決される日も遠くないものと確信している。

(1967年3月6日受理)

5. む す び

以上で明らかにしてきたように、人工軽量骨材コンクリートが一般的に使用されるためには、まだ解決を要する大きい問題点がいくつか残されている。しかしコンクリートにとって軽量化は、これが今後構造材料としての機能を十分に発揮して行くためにとらざるを得ない決定的な方向であり、軽量コンクリートに関する研究は内

参考文献

- 1) 爾見・吉村: セメント技術年報 XIX (1965).
- 2) Rudnai, G.: Lightweight Concretes pp. 116 (1963).
- 3) Shiedeler, J.J.: Proc. ACI Vol. 54, pp. 299~328.
- 4) Hanson, J.A.: Proc. ACI Vol. 58, pp. 1~37.
- 5) 丸安・小林・伊藤: 土木学会コンクリートライブラリー 第 10 号, (1964).
- 6) 小林・伊藤: セメント・コンクリート, No. 227 (1966).

次 号 予 告 (6 月 号)

研究解説

| | | | |
|---------------------------------|----------|---------|---------|
| 芳香族ジアゾニウム塩の電子状態と光分解..... | 菊本 池 真 一 | 本 多 健 一 | 鋤 柄 光 則 |
| 有機求核置換反応における溶媒効果..... | 浅 原 照 | 妹 尾 三 | 新 井 学 |
| ——ラウリルクロライドと水硫化ナトリウムの反応を中心として—— | | | |
| 分子ふるいゼオライトの合成..... | 高 橋 浩 | | |

研究速報

| | | | | |
|------------------------------------|---------|---------|-------|-----|
| 高膨張比におけるラジアルタービン用ノズルの特性..... | 水 町 長 生 | 山 下 雄 康 | | |
| テトラクロルアルカン (TCA) のポーラログラフィ..... | 早 野 茂 夫 | 新 井 五 郎 | | |
| 3,3-ビス(ベンゾキシメチル)オキセタンの合成とその反応..... | 金 中 島 正 | 亀 山 利 | 後 藤 宣 | 行 男 |
| 3-ヨードペリレンの合成とその Ullmann 反応..... | 後 藤 信 | 古 賀 悦 | | 之 |

(p. 11よりつづく)

9. 結 言

急しゅん波測定においては耐電圧、電力容量などを保証するため装置そのものを大型にせざるを得ないにもかかわらず、ns の応答特性を要求されるため種々の難点が存在する。しかしここで高気圧ガスの技術を導入することによってこのうちのいくつかを解決しうることがわかった。分圧器のレスポンス時間については筆者らが行った方式により真のレスポンス時間を ns の精度で決定することができた。かような計算方法はきわめて速いパルスに対する電気回路の応答の解析一般に適用することもできよう。さらに高い電圧の急しゅん波測定においてはコロナによる影響など固有の問題がいくつかあり、これらについてはさらに研究が必要と思われる。

(1967年3月7日受理)

文 献

- 1) M. Christoffel, Paper No. 333 Appendix V, CIGRE (June 1966)
- 2) S. Fujitaka et. al, CIGRE Study Committee No. 8 (June 1965).
- 3) J.H. Park, H.N. Cones, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 66C pp. 197-207 (July-September 1962).
- 4) F.C. Creed, Paper No. 320, CIGRE (June 1958)
- 5) T. Harada, T. Itami, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems 85, pp. 511-523 (May 1966)
- 6) P.R. Howard, P.I.E.E. 99, pp. 371-383 (August 1952).
- 7) 河野, 電気学会雑誌 81, pp. 423-429 (昭 36-3).
- 8) F.C. Creed, T. Kawamura, G. Newi, Winter Power Meeting of the IEEE 31 PP 67-90 (February 1967).
- 9) F.C. Creed, M.M.C. Collins, IEEE Trans. on Communication and Electronics 82, pp. 621-629 (November 1963).