

## 送 電 線 へ の 落 雷

藤 高 周 平 ・ 麻 生 忠 雄

## 1. 緒 言

わが国は全国的に見ても、かなり雷が多い。欧州諸国に比べると年間雷雨日数ははるかに多い。架空電力線をもつ電力施設では雷は大敵である。

国内の主要送電線の事故統計では、その総数の大半が雷である。送電線の絶縁が破壊するのみならず、発電所や変電所までおびやかす。送電線で絶縁碍子が落雷で閃絡することはやむを得ないとしても、雷電圧が電線を伝わってきて、発電所の機器の絶縁を傷めると被害は大きくなる。

発電所やその近傍で落雷しても、その電圧が直接電気回路にはいり込まないように、充分な雷遮蔽をほどこす。送電線にも上部に架空地線を架設し、これで雷を受けとめて、導体が直撃を受けないようにつとめる。しかしこれらの対雷施設に努力しても、激雷に見舞われると、送電線での直撃閃絡や逆閃絡を完全に避けることはなかなか難しい。

このように、架空送電線に対する雷は宿命的な問題であるから、長距離にわたる山野のどこかで、雷による碍子閃絡は避けたいとしても、大切なことは、事故の拡大防止にある。

雷電圧の波及によって他の機器のうける災害の防止はもちろんであり、閃絡地点を含む送電線の局部だけは、短時間送電不能になっても、その送電不能区域と、送電不能時間をできるだけ縮小するための技術的努力が肝要である。

わが国の送電線の現状は、このような閃絡事故に対して楽観できない状態である。安定送電の限度に近いものもあり、一か所の局部事故から、大停電を惹起しかねない。また雷電圧の波及の問題でも、遠方雷でうんと弱まった電圧が侵入して発電所で絶縁事故を発生した実例(雷電圧実測記録)もある。

“雷は天災だ、”という一言で片付けるのは暴言である。また雷による機器や施設の損傷だけを考へて、雷害を過少視することは許されない。電力が、すべての生産、生活の基底となっている今日、停電の被害はなかなか評価し得ない程大きいと考えるべきであろう。

送電線への落雷で碍子閃絡を発生した場合、その閃絡点を速かに検知したい問題がある。碍子は一度閃絡しても、その区間送電線がうまく遮断分離された場合、直後

に強行送電を行って成功する場合が多い。強行送電が成功しない場合は、事故点を早急に発見することが、復旧上の最大急務であることはいふ迄もない。強行送電に成功しても、事故点の碍子が一部破損していると再び事故の原因になりかねない。全区間の線路を見廻る代りに、閃絡位置を標定するロケータが試みられるようになった。種々の型式のものが実用化されつつある。標定装置から事故点迄の進行波伝播時間によって、閃絡点迄の距離を検知する方式である。不意打に発生する雷撃閃絡に対して、遮断器が開路する迄の地絡電弧発生中に、瞬時的に測定器を動作させる。この種ロケータの開発に先立って、著者等は過去の雷電圧実測で、閃絡点と変電所間の雷電圧波の往復反射現象を明確に把握し、閃絡点検知に成功した場合もあった。<sup>(1)</sup>

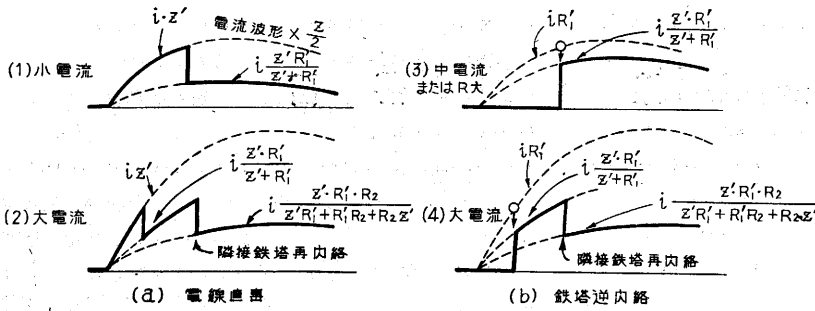
昨年夏期には、富山県新愛本変電所で、27万ボルト超高圧送電線での雷実測を行ったが、後述のように種々の点で有意義な大きな雷電圧の3相完全な記録を得た。上記の閃絡点検知に対しても、閃絡点からの伝播による波形変歪の観察から推算し得る距離が、碍子事故発見箇所にはほぼ該当することも実証された。以下この雷電圧記録に関連して、送電線における雷電圧伝播に関する概説と、この記録に基く著者の考察を述べる。

## 2. 3 相送電線における雷電圧伝播

送電線の雷害保護には充分な遮蔽角をもつ架空地線を設置し、鉄塔々脚接地抵抗が充分低いように施工される。たまたま接地抵抗の若干高い場合とか、雷電流が予想を絶する大きさである時には、鉄塔または架空地線直撃によって鉄塔電位が碍子耐圧をこえて上昇し、逆閃絡を惹起することになる。万一電線直撃があった場合には、線路のサージインピーダンスが500Ω程度であるために、比較的小電流の雷撃であっても碍子閃絡はまぬがれがたい。

碍子閃絡後線路に残留した雷電圧は更に光に近い速度で線路を伝播し、終端の発電所重要機器の絶縁に脅威を与える。伝播途上に劣化碍子等絶縁の弱点があれば、再閃絡、再々閃絡が当然予想されるところであり、その結果送電線を進行する雷電圧の代表的波形としては近似的に第1図の如きものを想定することができる。

これらの進行波は線路伝播途上において種々の原因から減衰と変歪を受ける。波頭部または遮断部分など急峻



i: 雷電流, z: 線路サージインピーダンス,  $R_1, R_2$ : 鉄塔接地抵抗,  $z' = z/2$ ,  
 $R_1' = R_1 / (1 + \frac{2R_1}{z_g})$ , ただし  $z_g$  は架空地線のサージインピーダンス

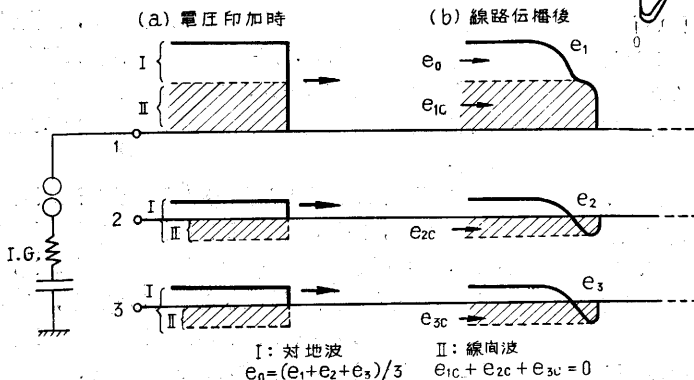
第1図 落雷による送電線進行波の近似原波形

な変化分に対しては、電線と大地の表皮効果が大きく作用して波形に丸味をおびようになる。ことに大地の影響が著しく、そのために後述の大地を帰路とする波は変歪が顕著になり、見掛けの伝播速度が若干低下する。また雷のように線路のコロナ開始電圧をはるかに超過するようになると、上記の表皮作用よりもコロナ損に基く波頭部のコロナ変歪が大きく作用するに至る。電圧の高い雷電圧の近距離伝播においてはもっぱらこの減衰変歪が根幹となる。

更に一般の送電線のように多導線系になると、他線の存在によって極めて特異な影響を蒙ることが知られている。すなわち多導線系の1線に電圧を印加した場合、進行波は線路伝播途上で大地を帰路とする成分と他線を帰路とする成分とが、それぞれの伝播特性にしたがって線路を進行する。この結果相当距離を伝播した波では、大地帰路波と線間波の二つの性質の異なるものが重畳された波形であることが明確になってくる。

(1) 対称3線系の分波

1回線3線の送電線は送電系統基本型の一つであって、完全に燃架されている状態ではこれを対称3線系として、下記のようにその分波現象を処理することができる。第2図において1線の自己サージインピーダンスを



第2図 対称3線系の分波現象

$Z_0$ , 相互サージインピーダンスを  $Z_m$  とすれば、1線印加の場合他線の誘導電圧は

$$e_2, e_3 = (Z_m / Z_0) e_1 \quad (1)$$

これら3線の電圧波を対地波および線間波に分離して考えれば、

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_0 + e_{1c}, \\ e_2 &= e_0 + e_{2c}, \\ e_3 &= e_0 + e_{3c}, \\ e_{1c} + e_{2c} + e_{3c} &= 0, \\ e_0 &= (e_1 + e_2 + e_3) / 3, \\ e_2 &= e_3, \quad e_{2c} = e_{3c} \end{aligned} \right\} (2)$$

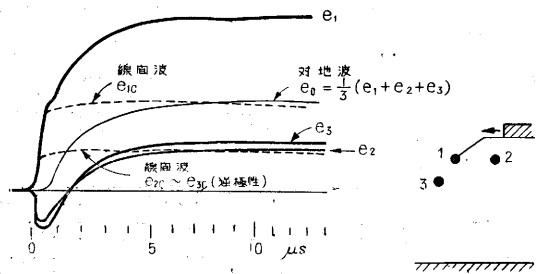
ただし  $e_1, e_2, e_3$  = 各線電圧;  $e_{1c}, e_{2c}, e_{3c}$  = 各線の線間波成分;  $e_0$  = 各線共通の対地波成分。

この中他線を帰路とする線間波成分は、減衰が僅少であって伝播速度はほぼ光速に近い。これに対して対地波成分は減衰変歪が大きく、伝播速度はその線路条件特に大地の電気的特性に応じて若干異なるが、大体線間波成分の速度の85~95%程度となる。したがって線路伝播途上において両成分は漸次分離して第2図(b)のような波形変歪を呈するに至る。

線間波および対地波の数値的な目安としては、一般送電線では大略  $Z_0 = 500 \Omega, Z_m = 100 \Omega$ , 程度であるから

(1) 及び(2)式より1線印加の場合

$$\left. \begin{aligned} e_2 = e_3 &= 0.2 e_1 \quad (\text{結合率 } 0.2) \\ e_{1c} &= 0.534 e_1, \quad e_{2c} = e_{3c} = -0.267 e_1 \\ e_0 &= 0.466 e_1 \end{aligned} \right\}$$



第3図 模型送電線(3線, 2067 m)の伝播波形

となる。

(2) 模型送電線3線系の実験例

研究所構内に設置されている西東京幹線1/10スケールの模型送電線(亘長2067 m)において、上記分波現象の明瞭な諸例が得られる。架線状態は第3図のように不平衡でありまた燃架も施していないが、これらの幾何的寸法はインピーダンスに対数値で影響するものであるために、前項の定性的

検討を行うには対称線路と看做してもそれ程大きな差異を生ずることはない。

第 3 図左  $e_1, e_2, e_3$  は 3 線の伝播波形を高速度ブラウン管で記録したものであり、第 2 図右に示したものと完全な類似がみられる。これを分析すると、図中附記の点線のような線間波  $e_{1c}, e_{2c}, e_{3c}$  および対地波成分  $e_0$  となる。対地波  $e_0$  は別途行われた 3 線 1 括試験の場合の伝播波形と全く類似して、その伝播速度は線間波の約 90% であった。

(3) 新北陸幹線 (1 回線) の実験例

本送電線は水平配置 3 線系 (架空地線 2 条) であるが、概略前述の解析が有効である。過渡現象直視装置 (1000 V インパルス) を使用し、第 4 図の如く 32 km の地点で 3 線接地した場合の反射波形からこの種の特性を検討したものである。1 線印加の場合は同図 (a) のように伝播到来波形に分波現象がいちじるしく、これを 3 線 1 括 (b) に比較すれば、対地波伝播速度は線間波の約

れ、変歪および伝播速度の差をうかがうことが出来る。

送電線に雷撃事故が発生して雷電圧進行波を生じた場合には、第 1 図のような電圧波が線路伝播途上で上述の各因子による変歪をこうむることになる。著者等は先に雷電圧の往復反射波形から閃絡点を検知し得た実例を発表<sup>(4)</sup>したが、これら多導線系における伝播波形の変歪度を検討することによっても、概略ではあるが同様に雷電圧の伝播距離、したがって碍子閃絡点を察知することが可能である。

3. 超高压送電線で実測した雷電圧

本邦屈指の重要送電線であり、また本邦ではじめて超高压 275 kV の採用された関西電力新北陸幹線において、昭和 29 年夏期、再度にわたって雷閃絡事故が発生した。いずれも雷の直撃による逆閃絡と判断される。そのうち一つについては、高速度ブラウン管オシログラムによる 3 相雷電圧の完全記録を得ることができた。ブラウン管記録としては本邦最大の電圧値を示しており、また前節で述べた 3 線系進行波として、波形解析の有効な点などこの種記録として意義あるものと思われる。

(1) 新北陸幹線の雷電圧記録 (昭和 29 年 8 月 2 日 16 時 31 分、新愛本変電所)

記録オシログラムを第 6 図に示す。そのいちじるしい特徴は、C 相雷電圧が波高値 (-) 700 kV に達する単極性であるのに対して、A および B 相電圧は正極性先行波を有する約 300 kV の振動波形であることで、直観的にもかなり減衰変歪の進んだ状態であることが認められる。

線路巡回の結果、新愛本変電所より 74 km 離れた地点 227 号鉄塔 C 相の碍子事故が確認された。

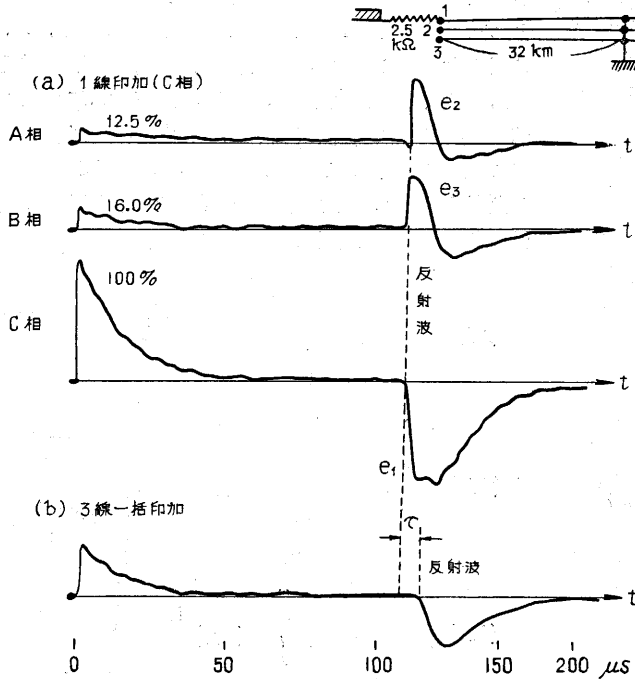
(2) 雷電圧の波形解析

3 線系の完全記録であるために、記録波形から雷電圧の線間波および対地波成分を分離して、その減衰変歪の程度、伝播速度の差異等を検討することができる。すなわち C 相の対地波成分を  $e_c$ 、線間波成分を  $e_{0c}$  とすれば、各相電圧  $e_a, e_b, e_c$  より、(3) 式にしたがって

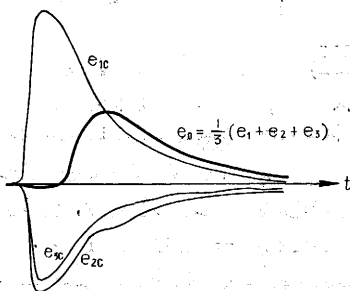
$$e_0 = (e_a + e_b + e_c) / 3, \quad e_{0c} = e_c - e_0$$

第 7 図の分波結果によれば C 相線間波は波高値 630 kV、波頭長約 20  $\mu s$ 、波尾長約 35  $\mu s$  である。これに対し対地波は、15-20  $\mu s$  遅れて到達し、波高値 290 kV で、波頭長約 30  $\mu s$ 、波尾長約 60  $\mu s$  のゆるやかな波形になっている。

(3) 線間波に対する対地波遅れ時間と閃絡点距離  
前節で述べたように、線間波と対地波両成分の伝播速

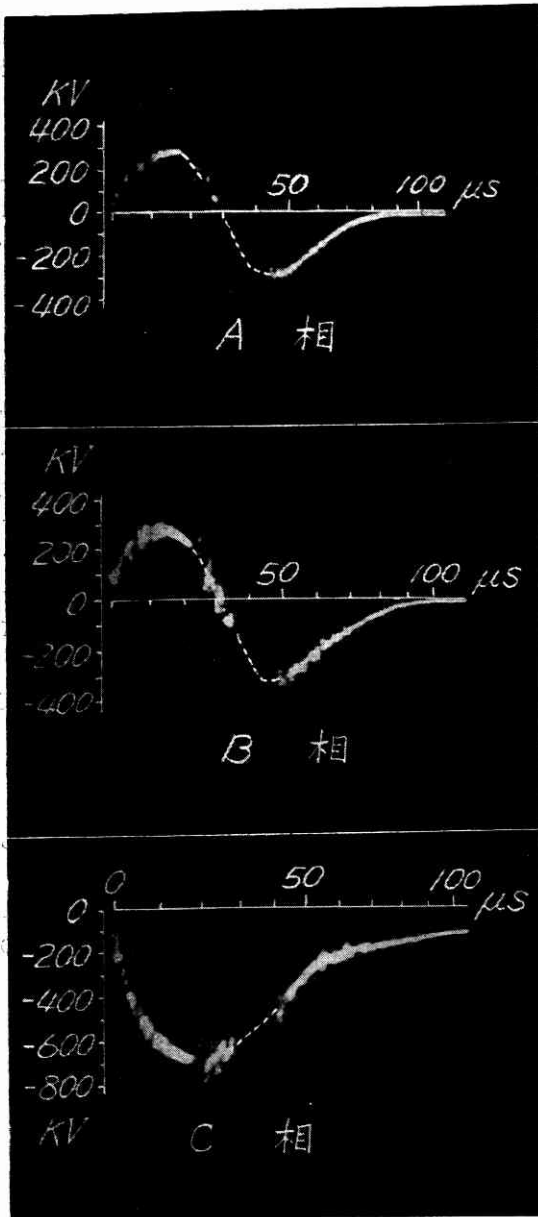


第 4 図 新北陸幹線の衝撃波伝播特性

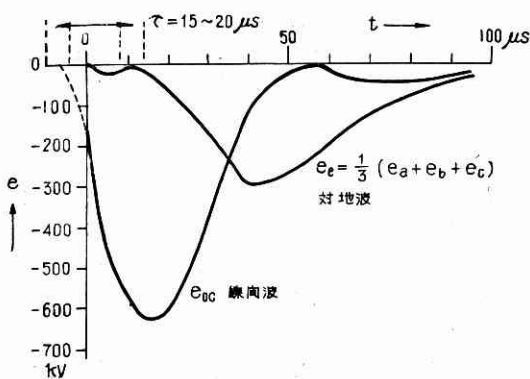


第 5 図 線間波と対地波

94% となって従来の実測値より若干大きい値が得られた。反射波形を (3) 式によって合成分解すれば第 5 図の線間波、対地波両成分が得ら



第6図 新北陸幹線の雷電圧記録  
(昭29.8.2-1631, 227号鉄塔C相碍子閃絡)



第7図 C相雷電圧の線間波と対地波

度の僅少な差から生ずる対地波遅れ時間から、雷電圧の伝播距離すなわち閃絡点までの距離を概算することができる。

線間波伝播速度  $v_0 = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ 、対地波伝播速度  $v_e = 0.93 v_0$  と仮定し、上記対地波の遅れ時間として  $\tau = 18 \mu\text{s}$  をとれば、閃絡点距離  $x$  は次式より求められる。

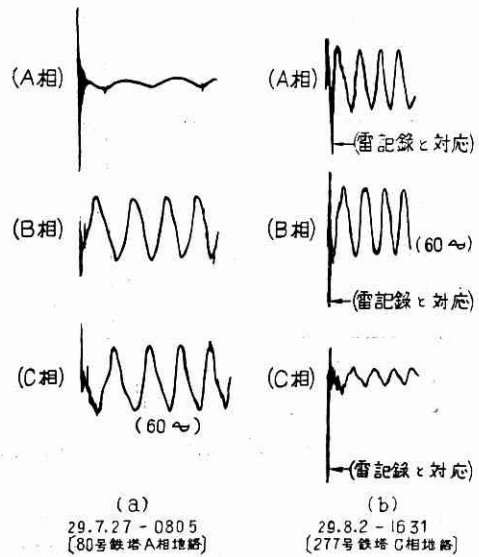
$$\tau = x/v_e - x/v_0 \quad (4)$$

$$x \approx 70 \text{ km}$$

閃絡点までの実距離は前述の 74 km である。ただしこの距離算出に当っては  $v_e/v_0$  の大きさが微妙な関聯をもつものであって、その値如何によってかなりの差異を生ずる場合がある。上述区間の部分的な実験値として  $v_e \approx 0.94 v_0$  が得られている。

(4) 碍子閃絡機構に関する考察

a. 導體電圧位相と鉄塔逆閃絡 本例の雷電流が如何なる経路からC相導體に侵入したかについては、以下の考察から鉄塔逆閃絡によるものと判断した。閃絡瞬時からの交流数サイクルの3線対地電圧記録第8図(b)によれば閃絡発生時のC相機圧位相は正極性であり、A、B相は共に負位相にある。鉄塔もしくは架空地線に落雷があつて鉄塔電位が上昇し、導線へ逆閃絡する場合には、導線の機圧の位相に關係するが、超高压送電に於ては特にこの影響が強くなると考えられる。この例では雷電流が負極性であり、鉄塔の負電位に対し交流瞬時値が正極性のC相だけに逆閃絡を発生している。



(a) 29.7.27-0805 [80号鉄塔A相地絡]  
(b) 29.8.2-1631 [277号鉄塔C相地絡]

第8図 新北陸幹線閃絡瞬時の長時間記録(約 1/10 秒)

他の雷事故長時間記録(同年7月27日8時5分)についても、閃絡発生時の導體電圧位相の關係は、第8図(a)の如くで、上記と全く同一の推論が成立する。

227号鉄塔は1回線垂直配置で中線C相に閃絡を生じているので、他の閃絡機構としての架空地線からの徑間

逆閃絡は考え難い。

b. 雷電圧の短波尾化と碍子再閃絡 観測雷電圧波形は長距離電播にもかかわらず、第7図の如く波尾長がいたって短いで、閃絡点では殆んど截断波に近かったものとも想像される。単一鉄塔の逆閃絡の見地からは波尾截断を考え難いが、逆閃絡によって侵入した雷進行波が、接地抵抗の十分に低い近接鉄塔において再閃絡（または更に再々閃絡）を行った場合には、極めて波頭長および波尾長の短い進行波が観測されることになる。この場合には機流による碍子事故は接地抵抗の低い方の鉄塔で発生するものとする。これは本例の碍子事故が発見された227号鉄塔が接地のよい鉄塔であることから著者の立てた推論であって、以上の波形観察と相まって、第6図は碍子の再閃絡または再々閃絡を伴った雷電圧と考えられる。

4. 結 言

超高圧送電線ではじめて観測された雷電圧について本文中若干の検討を加えた。この3相記録の波形解析結果から、閃絡点距離との対応を確認することができたことは、先に著者等が明確にした雷電圧の往復反射波形による閃絡点検知例（昭和23年、茨城幹線）<sup>(1)</sup>と共に大いに興味あることがらである。これらは雷電圧解析に当っての有力な方向の一つであることを明示し得たと考えられるが、雷観測の重要な主題であり、発電所主変圧器および避雷器にとって最も苛酷な応動を要求すべき近距離伝播の雷電圧乃至は雷電流そのものについては、未だ資

料が充分であるとはいえない。今後ともこの目的に副って雷観測による資料を集積し、送電系統絶縁設計の合理化の基礎を確立したい。

今次2回の雷事故によって、新北陸幹線の耐雷度如何も一つの問題であろうが、本文に述べたように鉄塔逆閃絡の可能性を導體機位相との関連より解析する見地に立つならば、これら雷事故2例共に、最も条件の悪い位相の導線碍子に閃絡を生じ、事故は1相地絡だけに止まり、いずれの場合にも2線或は3線の逆閃絡を起していない。これが得られた2例の共通事情であることは、超高圧送電においては、機位の影響が顕著であるという結論でもあり、また超高圧送電線の耐雷度として新北陸幹線の状態は相当程度に期待できるものであり、更に若干の接地施工法の強化により、一段と耐雷度の向上が期待できるものといえるであろう。

新愛本での雷実測は、雷害防止委員会の仕事の一端として実施したものであり、関西電力技術研究所ならびに新愛本変電所々員の多大の御支援を受け、三菱研究所および電力中央研究所測定班の御協力を得た。末尾において関係者各位に謝意を表する次第である。

なお測定器の整備その他について、昭和29年文部省科学研究費の補助を受けた。(1955. 5. 31)

文 献

- (1) 藤高, 麻生: 送電線における直撃雷の記録とその閃絡点の検知, 三学会連大予(昭24-4月); 茨城班の雷実測, 電力気象連絡会彙報, 第9号, 11頁(昭24-7月)

次 号 予 告 (8月号)

ペンシルロケット特集号

ア ー ト

ペンシルロケット飛翔実験  
同上高速度写真記録

巻頭言.....星合正治

特 集

- A V S A 研究計画について.....糸川英夫
- 国際地球観測年について.....永田 武
- ペンシルロケットの計画と  
飛翔試験結果総合報告.....糸川英夫
- ペンシルロケット  
国分寺飛翔実験全体記録.....山口文二
- ペンシルロケットエンジンの実験.....戸田康明
- 性能計算.....銭 福 星
- 高速度カメラによる.....植村恒義
- ペンシルロケット飛翔特性.....山本芳孝
- 電気標的と電磁オシログラフ.....吉山 巖
- 観測ロケット研究連絡会の概要.....下村潤二郎

東京大学生産技術研究所報告

第 4 卷 第 7 号 予 告

安藤良夫, 山口勇夫, 飯田国広, 今井保穂著

「Effect of Welding (When superposed upon Prestrained Steel (鋼材におよぼす熔接と冷間加工の重畳効果)」

熔接船の建造に当っては冷間加工によって塑性歪を与えられた板に熔接を行わなければならない場合が多々ある。そのうちMargin Plate と Gusset Plate の熔接を考えてみるのに、船級協会によっては工作上困難であるが、Margin Plate のR止りの間は熔接しないで、その上または下に避けることを指示しているところもある。これは冷間加工を行うとその部分が歪硬化するので、機械的性質特に衝撃値が低下し、また腐蝕に対する性質等も劣化するし、一方熔接を行うと通常熔接部の近くには悪い影響が与えられるわけで、これら両者の悪影響が重畳するものと考えられているからである。

この問題を究明するために塑性歪と熔接との重畳効果を受けた鋼材について引張り、曲げ、切欠脆性、疲労および腐蝕に関する実験を行ったが、本報告はこれらの結果を取まとめたものである。