

550 kV 大容量壁ぬきブッシング

550 kV Large Current Capacity Oil-impregnated
Paper Condenser Wall Bushing

池本 徳郎* 栗田 健太郎* 加藤 寧**
Norio Ikemoto Kentarō Kurita Yasushi Katō

要 旨

このたび、東京電力株式会社との共同研究により、550 kV、12 kA 大容量壁ぬきブッシングの開発に成功した。本器は、超々高圧、大容量電力送電用として、インパルス 1,800 kV、AC 840 kV のほか屋外側に 8 m、屋内側に 6.5 m のがい管を使用し、水平加速度 0.3 G、正弦 3 波擬共振にて安全率 2 以上の耐震特性をもたせるなど、過酷な仕様を満たすものである。全長約 20 m、総重量約 30 t に達するもので、水平配置として、建屋壁に取り付ける方式である。実規模試作器による各種試験の結果、耐電圧特性、温度上昇値などはもとより、耐震強度の点でも開発目標値をはるかに上回る良好な特性を有することを確認した。これにより超々高圧大容量コンデンサブッシングの製作技術を確立するとともに、超大形品の耐震試験について等価試験方法の確立、コロ式振動台の製作など多くの成果を得た。

1. 緒 言

東京電力株式会社では、用地の高度利用と投資効率の向上を図るため、大容量送電の技術開発をすすめているが、その一環として、変電機器の大容量化が採り上げられた。これは送電線と直列に接続する変電機器の通電容量を大容量送電線と同じ 8 kA ないし 12 kA に増大させるためのものであり、このうち、壁ぬきブッシングについては、東京電力株式会社と日立製作所との共同研究により、550 kV、12 kA 用までの開発に成功した。このブッシングは、わが国はもちろん世界でも例のない大容量のものであり、寸法、重量の面でも記録的なものである。このため、開発にあたっては、耐電圧、コロナ開始電圧、耐塩害特性および通電温度上昇などの電気的特性はもちろん、耐震強度などの機械的特性ならびに運搬、据付などの工事方法についても、じゅうぶんな検討と実器による検証を行なった。以下にその概要を紹介する。特に、大形耐塩害がい管も水平に使用しているため、その耐震設計について詳しく述べる。

2. 開発目標

- (1) 定格電圧：550 kV
- (2) 定格電流：8 kA および 12 kA
- (3) 過電流強度：交流分実効値，50 kA，2 秒間
- (4) 商用周波耐電圧：840 kV，1 分間
- (5) インパルス耐電圧：±1,800 kV (1×40 μs)
- (6) 開閉インパルス耐電圧：±1,200 kV (注水時)
- (7) 注水時コロナ発生電圧：525/√3 kV 以上で NEMA 法にて 80 dB 以下
- (8) 部分放電特性：600 kV まで確認し、部分放電開始電圧 (525/√3 kV)×1.5 以上
- (9) 長時間耐圧：図 1 に示す条件で課電後、異常のないことを確認する。
- (10) 塩害設計：屋外側汚損度 0.03 mg/cm²，屋内側汚損度 0.02 mg/cm²，目標値は常規大地電圧の 1.2 倍 (364 kV) 以上、ただし、屋内の汚損耐電圧は同一塩分付着密度の屋外の場合の 1.3 倍とする。
- (11) 耐震強度：0.3G (水平加速度) 正弦 3 波擬共振時、破壊強度に対して 2 倍の裕度を有すること。ただし、事故

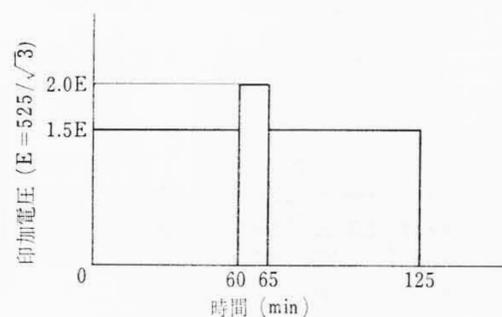


図 1 長時間課電条件

電流による電磁力との重量を考える。

- (12) 耐風圧強度：40 m/s、ただし、事故電流による電磁力の重量を考える。

以上の開発目的に対して、種々の形式のものについての特長比較検討を行なったが、最終的には水平方式を選定した。そのおもなる理由は、次のようなものである。

- (a) 活線洗浄が容易になり、設備費も経済的であり、しかも、しや風壁付高水圧洗浄方式などの採用により汚損耐電圧の向上と洗浄水量が少なく維持費が安くなることなどの利点がある。
- (b) 壁の剛性の高い方向に取付け、建屋の機械強度を有効に利用できる。
- (c) 水平方式ができれば、垂直方式は技術的にじゅうぶん製作可能となる。

また、通電容量増大に対しては、次章のような構造を採用した。

3. ブッシングの構造

図 2 はブッシングの寸法図である。屋外側には 8 m がい管を、屋内側には 6.5 m がい管を使用し、全長約 20 m のものを水平に配置したものであり、耐振強度を高めるため、屋内外とも、3 方向に長幹がいしのステーで補強し、さらに、それぞれのステーの壁側にダンパーを取り付けて減衰率を大きくしている。中心管は通電路としての銅管と機械的強度をもたせるステンレス鋼管とから成っており、センタークランプ方式に中心管で軸方向に締め付けられている。

中心銅管から接地体に対しては、半径方向、軸方向ともにコンデンサ、コアによって電圧分布を均一化している。なおこのコンデンサ分圧を利用し電圧比 550 kV/110 V、容量 200 VA、誤差階級 1.0 の電圧測定端子を取り付けることができ、スリーブに試験用端子と

* 日立製作所国分工場

** 日立製作所電力事業本部

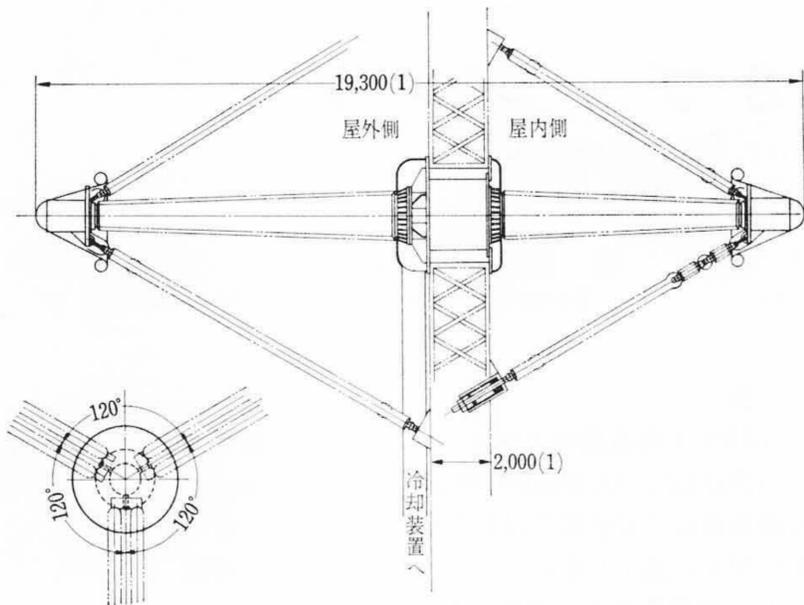


図2 ブッシング概略

表1 がい管諸元

項目	図#	GP-91800 (8mがい管)	GP-91601 (6.5mがい管)	CA-43608A (長幹がい子)
1 全長 (mm)		8,000±160	6,500±130	1,295±24
2 有効長 (mm)		7,420	5,920	1,000
3 水切り笠		5枚 (他はすべて下ひだあり)	0枚 (他はすべて下ひだあり)	0枚
4 表面もれ距離 (mm)		22,050	17,300	2,470
5 平均直径 (mm)		675	675	166
6 笠ピッチ (mm)		70mm×106	70mm×84	42.5
7 内径 (胴) (mm)		350φ±8/700φ±23	350φ±8/700φ±23	—
8 外径 (胴) (mm)		423φ±9/803φ±23	423φ±9/803φ±23	125φ
9 最大外径 (mm)		560φ/940φ	560φ/940φ	210φ
10 中心線の振れ (mm)		50以下	40以下	—
11 端面の平行度 (mm)		1.5以下	1.5以下	—
12 サンド幅の傾き (mm)		40以下	40以下	—
13 水切り笠の傾き (mm)		60以下	—	—
14 等価霧中耐汚損度 (mg/cm ²)		0.03	0.02	0.03
15 使用場所		屋外	屋内	屋外

ともに設けることができる。電流が12kAのため、磁性材料の閉回路をなくし、場所に応じて非磁性材を使用し、局部過熱を防いでいる。壁取付部のスリーブはステンレス鋼材からなり、しかも二重管方式にしてあり、内外管の間は油量調整室、ブッシング変流器の収納室になっている。なお、使用がい管諸元は表1に示すとおりである。

4. ブッシングの耐震検討

4.1 はりの曲げ振動

水平形ブッシングの耐震試験を検討するにあたり、ブッシングをはりとみたときの共振周波数、変位、たわみ、モーメント、せん断力などについて計算値を求めた。

はり振動方程式は、 $y=Y \sin \omega t$ とおいて

$$\frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} - \frac{\omega^2 m \cdot Y}{E \cdot I \cdot g} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 EI : はりの曲げこわさ

g : 重力の加速度

ω : $2\pi f$

m : 単位長あたりの重量

Y : ブッシングの長さ方向 x の関数

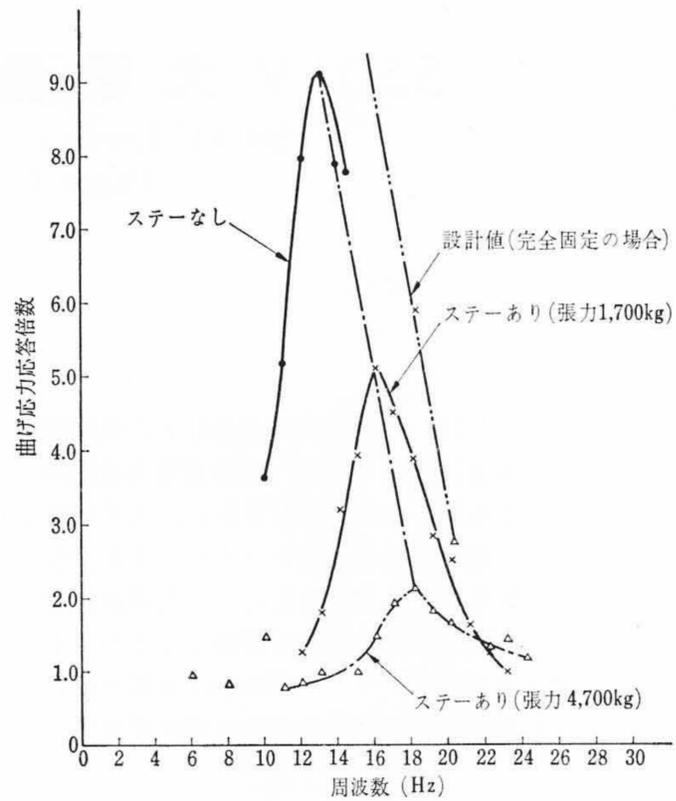
積分定数を C_1, C_2, C_3, C_4 とすると

$$Y = C_1 \cosh \lambda x + C_2 \sinh \lambda x + C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x \dots (2)$$

ここで、

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 m}{E \cdot I \cdot g}} \dots\dots\dots (3)$$

次に境界条件を考えて、積分定数を決め、変位、たわみ、モーメント、せん断力を算出する。またその途中で一次共振周波数、二次共振周波数などを次式で求める。



(275 kV 壁ぬきブッシングによる)

図3 周波数-曲げ応力応答倍数特性

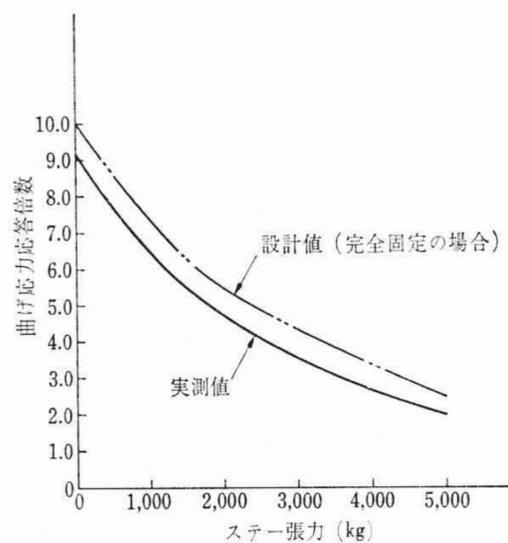


図4 ステータ張力と曲げ応力応答倍数

メント、せん断力を算出する。またその途中で一次共振周波数、二次共振周波数などを次式で求める。

$$f_1 = \frac{\lambda_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{m}}, \quad f_2 = \frac{\lambda_2^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{m}} \dots\dots\dots (4)$$

4.2 モデルによる振動試験

275 kV 壁ぬきブッシングのモデルによって次のような検討をした。

- (1) はりの振動方程式の計算結果と実測値の比較。
- (2) 振動モードの確認。
- (3) ステータがい子の張力の大きさと共振周波数。
- (4) 油圧加振機とアンバランス加振機との等価性。
- (5) 自由振動による減衰定数の確認。

これらの検討において、最も問題になるのは、ブッシング取付用壁のこわさが実際と異なると、得られる結果に差が出ることである(完全固定にするには、壁の重量が非常に重くなって、実質的に試験不能となる)。しかし現象の傾向が把握(はあく)できるので、実験結果よりどのような大きさの振動になるかがわかる。

図3は周波数-曲げ応力応答倍数特性を示したものであるが、これから次のことがわかる。

- (a) 応答倍数は、ステータが有ると小さく、しかもステータの初期張力を増すほど、小さくなる方向にゆく。図4はその様子を示したものである。

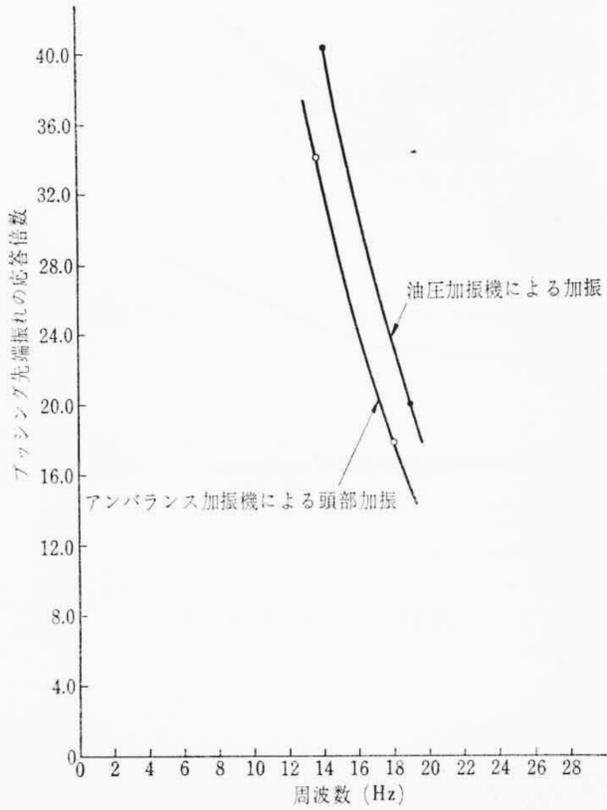


図5 油圧加振機とアンバランス加振機との等価性

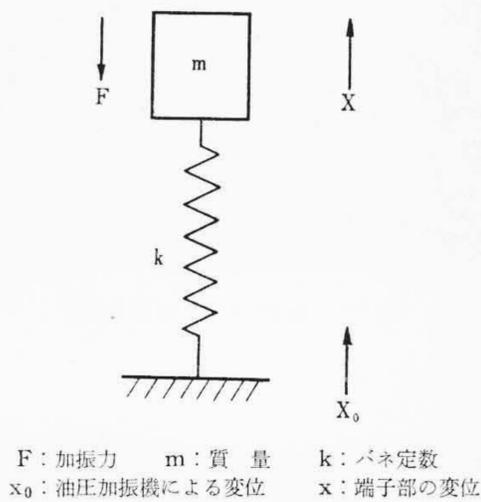


図6 振動系

(b) ステアの初期張力を増すほど、共振周波数が高くなる。また自由振動させた場合、減衰定数はステアが有ると、無い場合の約5倍の大きさとなり、約0.02の値を得た。

図5は油圧加振法とアンバランス加振法との等価性を示したものである。油圧加振機法は、試料全体を加振台に載せて振動させる方式である。一方、アンバランス加振機法とは、ブッシングの先端に加振機を取り付け、振動を起こさせるものである。この起振力は次の式で計算される。

$$F = (2\pi)^2 \frac{W}{g} r \cdot n^2 \dots\dots\dots (5)$$

- ここで、 g : 重力の加速度 9.8 (m/s²)
- W : 偏 心 荷 重 (kg)
- r : 偏 心 荷 重 の 回 転 半 径 (m)
- n : モーターの回転数 (rpm)

図5より両加振法の差は小さく、じゅうぶんに等価性があることを意味している。実器の試験結果は後述するが、非常によく合っており等価性を確認することができた。

ここでアンバランス加振機法によるとどのような利点があるかを説明する。図6の振動系で、単位の変位を与える力(p)を比較すると油圧加振機法が

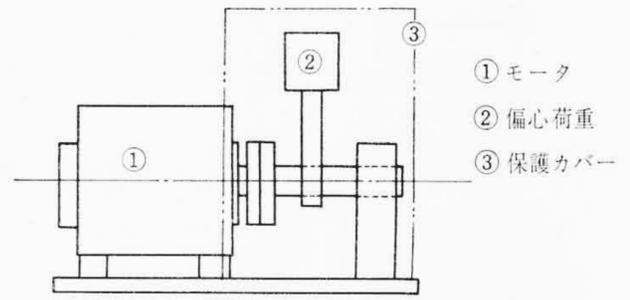


図7 アンバランス加振機概略図

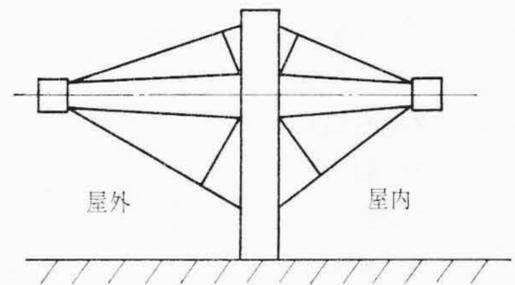


図8 ブッシング概略

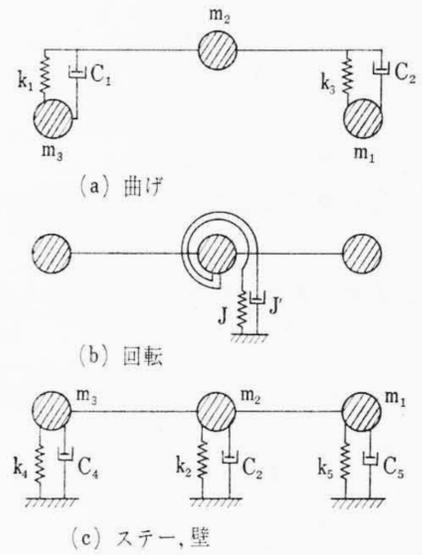


図9 振動系の近似

$$p = \frac{k(x-x_0)}{x_0} = \frac{\omega^2 \cdot m}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

アンバランス加振機法は

$$p = \frac{F}{x} = \omega_0^2 m \left\{ 1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \right\} \dots\dots\dots (7)$$

となる。

ここで、 $\omega = 2\pi f$

$\omega_0^2 = k/m$

f_0 : 共振周波数

上式より周波数 f が共振周波数 f_0 に近い点では油圧加振機法は非常に大きい加振力を必要とするが、アンバランス加振機法では、その数十分の一の加振力でよくきわめて経済的な設備となり、小形、軽量のため取り扱いが簡便である。特にフィールドでの実器加振試験が簡単に実施できるほか、この方式でブッシングのみならず、変流器、しゃ断器、断路器、避雷器、結合コンデンサなど、がい管類を使用している機器の耐振特性試験に適用できる便利なものである。

4.3 計算機による振動解析

油圧加振機とアンバランス加振機(図7)で得られた資料をもとに、壁ぬきブッシングのアナログコンピュータによる振動解析について検討した。図8のようなブッシング概略図を考え、図9のような振動系で近似する。ここで図9の記号の説明をする。

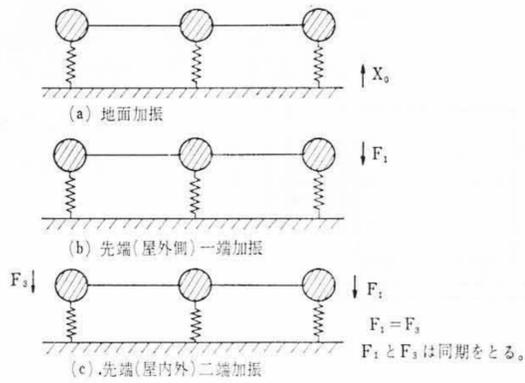


図10 加振方法

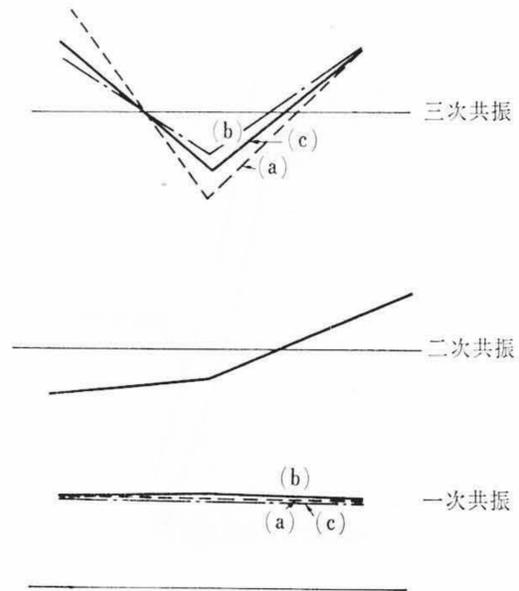


図11 共振モード

- m_1 : ブッシング屋外側等価質量
- m_2 : 壁の等価質量
- m_3 : ブッシング屋内側等価質量
- k_1, k_3 : ブッシングの曲げのバネ定数
- c_1, c_3 : ブッシングの曲げの減衰定数
- k_2 : 壁の曲げのバネ定数
- c_2 : 壁の曲げの減衰定数
- k_4 : 屋外側ステーのバネ定数
- k_5 : 屋内側ステーのバネ定数
- c_4 : 屋外側ステーの減衰定数
- c_5 : 屋内側ステーの減衰定数
- J : フランジ部の壁の回転バネ定数
- J' : フランジ部の壁の減衰定数

以上の系において図10の加振方法を考える場合、運動方程式は次のようになる。

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 \frac{l_2 x_1 + l_1 x_3 - l_0 x_2}{x_0} + c_1 \frac{l_2 \dot{x}_1 + l_1 \dot{x}_3 - l_0 \dot{x}_2}{l_0} + k_4(x_1 - x_0) + c_4(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + \frac{J}{l_1 l_0}(x_1 - x_3) + \frac{J'}{l_1 l_0}(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) = F_1 \dots (8)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - (k_1 + k_3) \frac{l_2 x_1 + l_1 x_3 - l_0 x_2}{l_0} - (c_1 + c_3) \frac{l_2 \dot{x}_1 + l_1 \dot{x}_3 - l_0 \dot{x}_2}{l_0} + k_2(x_2 - x_0) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_0) = 0 \dots (9)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + k_3 \frac{l_2 x_1 + l_1 x_3 - l_0 x_2}{l_0} + c_3 \frac{l_2 \dot{x}_1 + l_1 \dot{x}_3 - l_0 \dot{x}_2}{l_0} + k_5(x_3 - x_0) + c_5(\dot{x}_3 - \dot{x}_0) + \frac{J}{l_2 l_0}(x_3 - x_1) + \frac{J'}{l_2 l_0}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) = F_3 \dots (10)$$

- ここで、 l_1 : 屋外側ブッシングの長さ
- l_2 : 屋内側ブッシングの長さ
- l_0 : 壁の厚さ
- x_1 : 質量 m_1 の変位
- x_2 : 質量 m_2 の変位
- x_3 : 質量 m_3 の変位

これをアナログコンピュータにより計算すると、その共振モードは図11のようになり、一次共振は図10の(a), (b), (c)の加振法とも同じになり、二次共振は(b)のみよく現われ、三次共振は(a), (b), (c)ともよく現われる。そのときの振動波形は図12, 13, 14のようになる。

4.4 実器の振動試験結果

耐震強度の確認には、油圧加振機法とアンバランス加振機法の両法について検討した。結果はブッシング共振周波数は7 Hz、壁の共振周波数は3 Hzとなり、両法による共振モードも、その大きさも

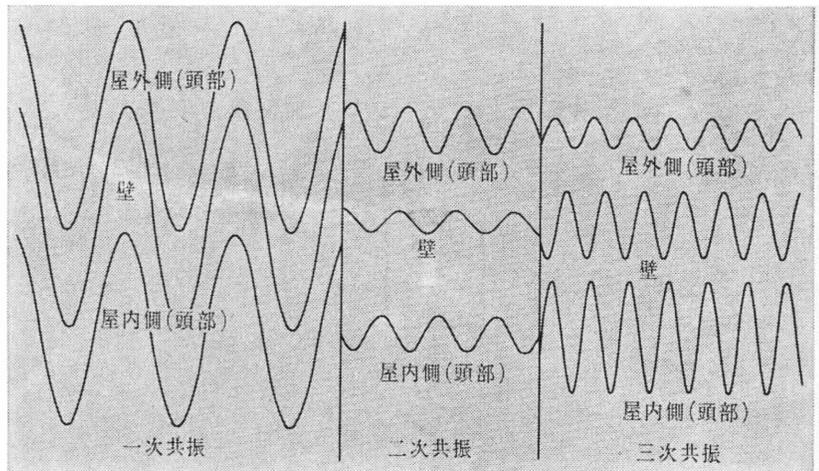


図12 振動波形(地面加振)

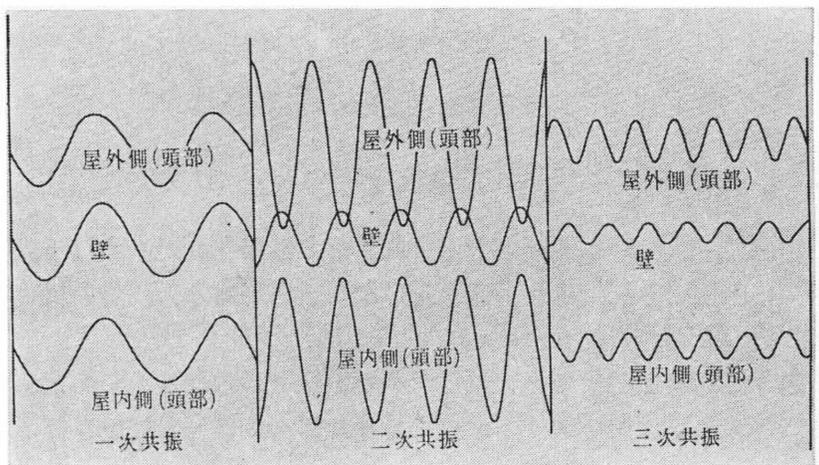


図13 振動波形(頭部一端加振)

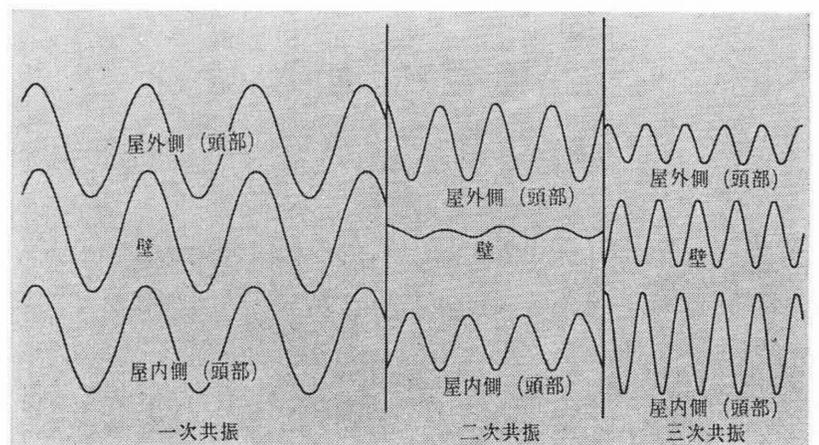


図14 振動波形(頭部二端加振)

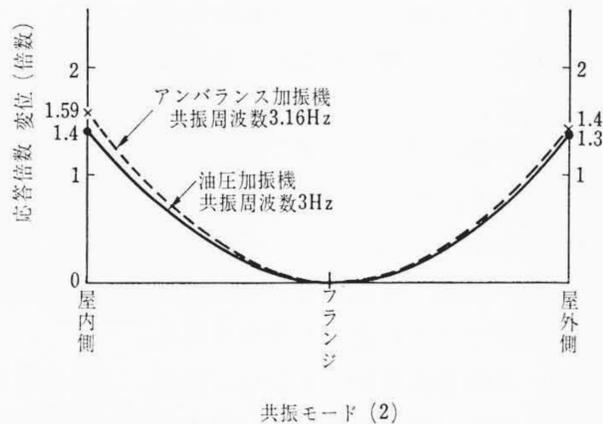
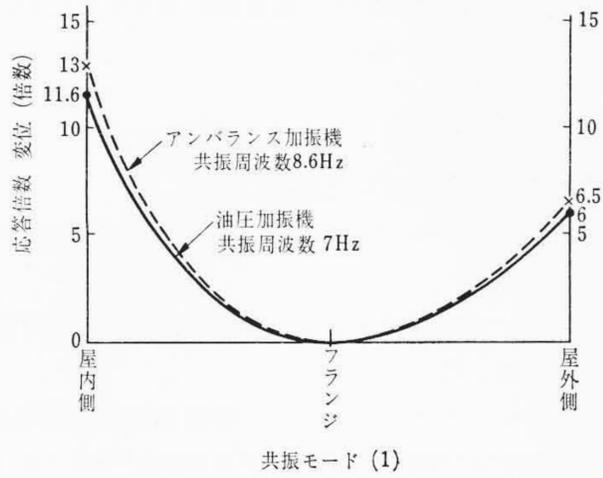


図15 油圧加振機とアンバランス加振機との等価性 (実器データ)

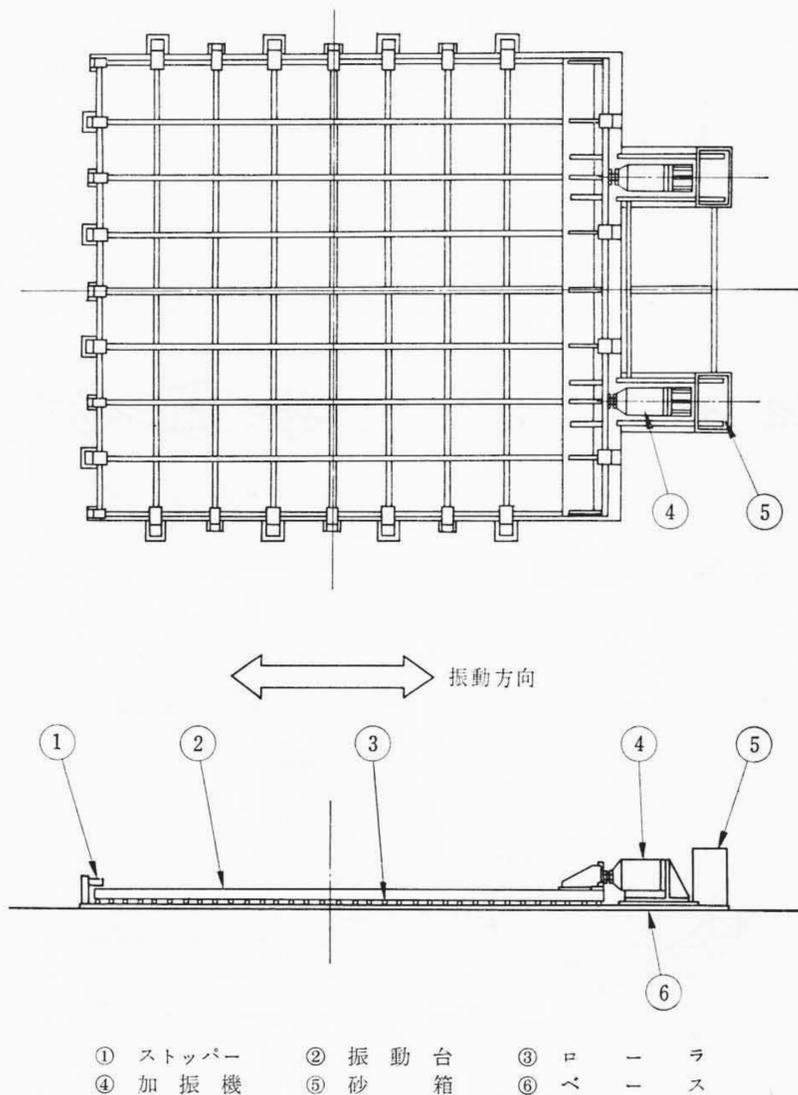


図16 振動台

じゅうぶん等価性のあることが図15のように示される。なお実器の油圧加振機法にはコロ式加振台を製作して使用した。図16は振動台を示すものである。また各部の応力測定結果から0, 3G, 3波擬共振で、安全率2以上あることがわかった。

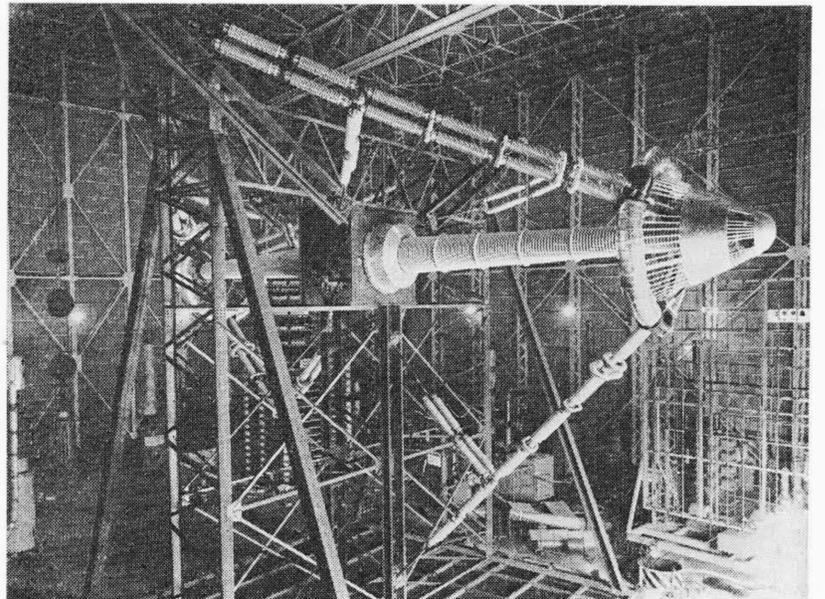


図17 ブッシング組立完成姿 (シールド付き)

5. 電気特性

検証試験結果は次のとおりである。図17は試験時の完成姿である。

(1) 油密試験

ブッシング完成状態で 1.4 kg/cm^2 の油圧を加え、常温にて24時間加圧し、各部とも油漏れおよび気漏れのないことを確認した。

(2) 誘電正接測定

商用周波電圧 500 kV まで印加し、 $\tan \delta$ 値 0.35% で変化が認められず一定値で、履歴現象がなかった。

(3) 静電容量測定

商用周波電圧 500 kV まで印加し、履歴現象がないことを確認した。

(4) 商用周波耐電圧, コロナノイズ-電圧特性

商用周波電圧 840 kV, 1分間印加し異常のないことを確認した。耐圧前後のコロナノイズ-電圧特性測定において履歴現象はなく、内部絶縁に変化は認められず、コロナ開始電圧は 600 kV 以上であることが確認された。

(5) インパルス耐電圧

インパルス $\pm 1,800 \text{ kV}$, $1 \times 40 \mu\text{s}$ にて各3回印加したが異常なかった。測定時の気象条件は気圧 759 mm Hg, 温度 15°C , 湿度 53%, 密度 8 g/m^3 。

(6) 注水開閉インパルス耐圧

開閉インパルス耐圧 $\pm 1,200 \text{ kV}$, $120 \times 4,000 \mu\text{s}$ にて各2回, 同一波形にて $\pm 1,500 \text{ kV}$, 各1回印加したが異常は認められなかった。測定時の注水条件は水温 10°C , 注水量 6.8 mm/1分間 (垂直分) である。

(7) 注水コロナ測定

前項と同一注水条件で行ない、商用周波電圧 300 kV で、29.5 dB, 600 kV で 75 dB であり、運転上、じゅうぶんであることを確認した。

(8) 長時間耐電圧試験

開発目標に定められた長時間耐圧のスケジュールに従って商用周波電圧を印加し、いずれも暗騒音レベルで異常は認められなかった。

(9) 過電圧試験

全波のインパルス電圧にて行なわれ、1,800 kV, 1,980 kV, 2,160 kV, 2,350 kV, 2,520 kV, 2,620 kV と正負極性, それぞれ1回ずつ印加しながら上昇させたが異常はなかった。図18はイ

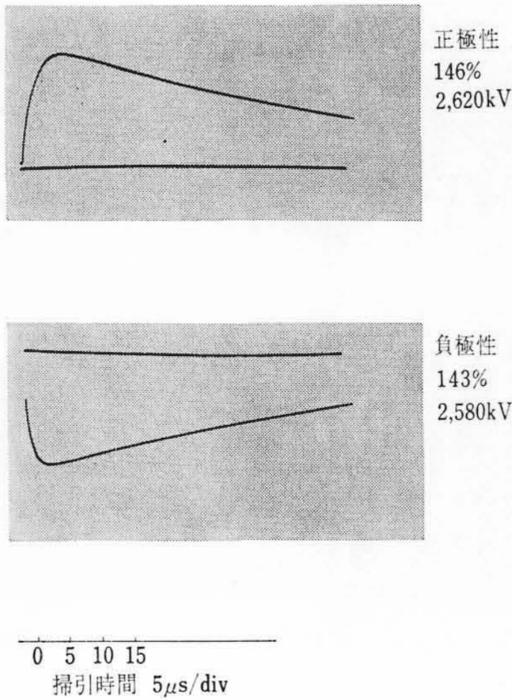


図18 インパルス電圧波形

ンパルス電圧波形を示したものである。

(10) 温度上昇試験

8 kA, 12 kA の両方の値について自冷式と送油風冷式の条件で試験し、自冷式で12 kA 使用可能であることを確認した。温度上昇値はいずれも規格値を満足した。

(11) 過電流強度試験

過電流値を交流分実効値で50 kA、相間距離を8 m、リード線の長さを10 mとして計算したが、がい管の最大発生応力は12.6 kg/cm²で、運転上、じゅうぶんであることを確認した。

(12) 風圧による強度

風速40 m/sとして、がい管の最大発生応力は、17.7 kg/cm²であり、運転上、じゅうぶんであることを確認した。

(11), (12)項ともその応力は、地震時に発生する応力に比べ、いずれも20%以下の値である。

6. 結 言

以上を要約すると次のとおりである。

- (a) 大容量コンデンサブッシングの高信頼度製造技術を確立した。
- (b) 大容量コンデンサブッシングの壁取付け、取はずし、運搬技術を確立した。
- (c) 大容量コンデンサブッシングの耐震性能が確認された。
- (d) コロ式油圧加振機で、実器の耐震試験が可能であることが確認された。
- (e) フィールドや工場内での簡易試験法としてのアンバランス加振機法について検討を加え、油圧加振機法との等価性が確認できた。
- (f) 将来、この種、ブッシングの納入には取付壁も同時納入することになる。そのための、取付壁の構造についての基礎資料がえられた。

これらの成果は、現在、実施を検討されている500 kV 臨海直接昇圧のための開閉所などへの適用が期待される。

終わりに臨み、本研究に終始、有益なご討議、ご指導を賜わった東京電力株式会社開発計画課三井課長、藤本副長ほか関係各位に厚く御礼申し上げます。また研究推進にご協力を得た日立製作所・日立研究所、国分工場の関係者に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 藤本ほか：昭和46年電気学会全国大会，586
- (2) 池本ほか：日立評論 52, 215 (昭45-3)
- (3) P. J. マッケン, A. A. スミス：アルミ・ブロンズ
- (4) 大築, 金井：耐振設計 (コロナ社)
- (5) 電気協同研究：第26巻, 第6号
- (6) 日碍レビュー：No. 28 (1969-8)



特 許 の 紹 介

特許第577576号 (特公昭44-30927号)

内海昭夫・高田嘉和

自動車タイヤの空気取出装置

特殊な自動車たとえば重量物運搬車などにおいては、軟弱地を通過するときタイヤが地面に食い込むのを防止するため、タイヤの空気圧力を減少させて接地面積を大きくする場合がある。このような場合、タイヤと車体に取り付けられた圧力空気給排装置とを連結させてタイヤ内空気の出し入れを行なう必要があるが、走行中タイヤは回転しており車体は静止しているため、タイヤと車体とを直接ホースなどで連結することはできない。

この発明は、このような点を考慮してなされたもので、遊星歯車式終減速装置を有する自動車の車輪において、車輪1の回転中心に設けた空気取出部18をタイヤ16内部と連通させて、空気取出部18の先端に回転可能に空気取出用のキャップ3を取り付け、キャップ3の一端に小内歯車13を形成し、車輪1の駆動軸5先端に結合された小太陽歯車12と小内歯車13との間に小遊星歯車14をかみ合わせ、小太陽歯車12と小内歯車13の歯数比を車輪1を駆動する遊星歯車装置の太陽歯車6と内歯車8の歯数比と等しくしてキャップ3を車体に対して静止させるようにしたものである。

これにより、キャップと車体とを直接ホースなどで連結することができ、自由にタイヤ内空気の出し入れを行なうことができる。

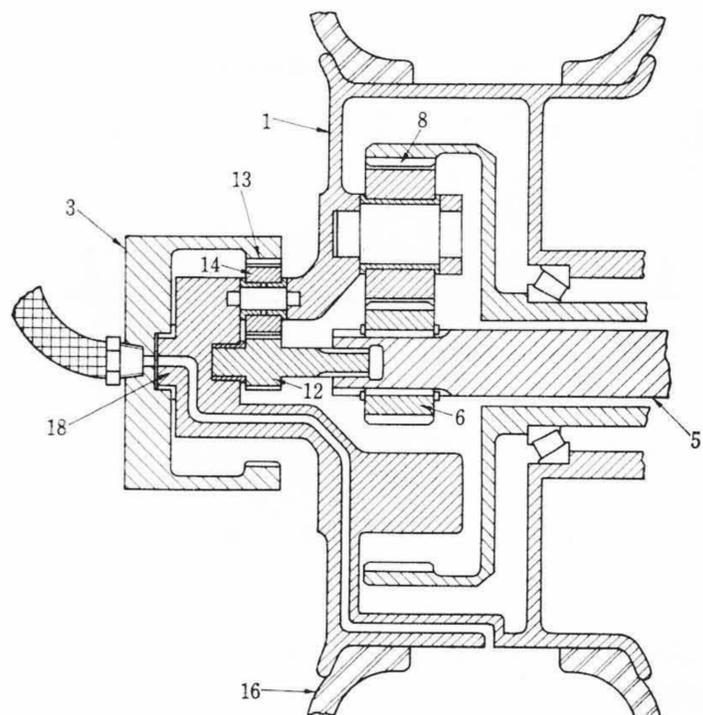


図 1