

J A E R I - M

92-127

大型超電導磁石模擬巻線の機械試験

1992年9月

樋上 久彰^{*1} 杉本 誠・中嶋 秀夫・長谷川 満^{*2}
保川 幸雄・吉田 清・伊藤 郁夫^{*3} 今野 雅行^{*3}

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

大型超電導磁石模擬巻線の機械試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

樋上 久彰^{*1}・杉本 誠・中嶋 秀夫・長谷川 満^{*2}
保川 幸雄・吉田 清・伊藤 郁夫^{*3}・今野 雅行^{*3}

(1992年8月5日受理)

核融合装置に用いられる超電導磁石は、プラズマを閉じ込める為、大型でかつ高磁界の発生が要求される。その磁界発生のために電磁石に発生する電磁力は大きくなる。巻線部を構成している導体と絶縁物の間で力の伝達が不足すると、巻線部の剛性が低下することにより、変位が大きくなり応力は高くなる。そのため巻線部の剛性を向上させるためには、巻線部を構成している導体と絶縁物間の接着強度を向上させる必要があり、さらに巻線内の応力分布を検討する必要がある。

まず、導体と絶縁物間の接着強度の向上のために、導体表面の処理を各種行なった金属角棒を用い、接着部の純せん断力を評価できる試験体を製作した。その試験体を液体窒素温度(77K)に冷却して接着強度を測定した。次に、その接着法を用いた巻線部を部分的に模擬した直線状の試験体を作製し、常温にて三点曲げ試験を行った。この試験結果と解析結果を比較することにより、曲げ剛性に対する絶縁物の剛性による影響を調べた。また、パンケーキ巻線方式の縮小モデルを用いて軸方向に圧縮荷重が働く場合の圧縮剛性に対する絶縁物の剛性による影響を調べた。

せん断強度試験の結果、サンドブラストによる表面処理が最も強い接着強度を得られることが判明した。曲げ剛性試験の結果、曲げに対しては絶縁物によって巻線の剛性が低下するが、軸方向圧縮に対しては巻線の剛性に影響を与えないことがわかった。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

*1 外来研究員、富士電機（株）

*2 三菱電機（株）

*3 富士電機（株）

Mechanical Test of the Model Coil Wound with Large Conductor

Hisao HIUE^{*1}, Makoto SUGIMOTO, Hideo NAKAJIMA
Mitsuru HASEGAWA^{*2}, Yukio YASUKAWA, Kiyoshi YOSHIDA
Ikuo ITO^{*3} and Masayuki KONNO^{*3}

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 5, 1992)

The high rigidity and strength of the winding pack are required to realize the large superconducting magnet for the fusion reactor. This paper describes mechanical tests concerning the rigidity of the winding pack. Samples were prepared to evaluate the adhesive strength between conductors and insulators. Epoxy and Bismaleimide-Triazine resin (BT resin) were used as the conductor insulator. The stainless steel (SS) 304 bars, whose surface was treated mechanically and chemically, was applied to the modeled conductor. The model coil was wound with the model conductors covered with the insulator by ground insulator. A winding model combining 3×3 conductors was produced for measuring shearing rigidity. The sample was loaded with pure shearing force at the LN₂ temperature. The bar winding sample, by 8×6 conductors, was measured the bending rigidity. These three point bending tests were carried out at room temperature. The pancake winding sample was loaded with compressive forces to measure compressive rigidity of winding.

Keywords: Fusion Reactor, Superconducting Magnet, Epoxy, BT Resin,
Mechanical Test

*1 On leave from Fuji Electric Co., Ltd.

*2 Mitsubishi Electric Co.

*3 Fuji Electric Co., Ltd.

目 次

1.はじめ	1
2.せん断強度	2
2.1 目的	2
2.2 実験方法	2
2.3 測定結果と考察	2
3.曲げ剛性解析	3
3.1 目的	3
3.2 実験方法	3
3.3 測定結果	4
3.4 応力解析	5
4.軸方向剛性	5
4.1 目的	5
4.2 実験方法	6
4.3 測定結果	6
4.4 応力解析と考察	6
5.まとめ	7
謝辞	8
参考文献	8
付録	21

Contents

1. Introduction	1
2. Adhesive Strength	2
2.1 Concept	2
2.2 Test Method	2
2.3 Results and Discussion	2
3. Bending Rigidity of Winding	3
3.1 Concept	3
3.2 Test Method	3
3.3 Results	4
3.4 Stress Analysis	5
4. Axial Rigidity of Winding Pack	5
4.1 Concept	5
4.2 Test Method	6
4.3 Results	6
4.4 Stress Analysis and Discussion	6
5. Conclusion	7
Acknowledgements	8
References	8
Appendix	21

1. はじめに

原研は国際熱核融合実験炉（I T E R : International Thermonuclear Experimental Reactor）の概念設計活動に参加した。その中で有限要素法（F E M : Finite Element Method）を用いて、各超電導磁石の機械的挙動や安全マージンを解析した^[2]。これらの応力解析は超電導磁石を構成している物質の剛性値を入力としている。超電導磁石は、電流密度の向上が必須であるため作用する電磁力の大きさから応力が高くなり変位も大きくなる。従って正しい応力解析結果を得るために、真の剛性値が必要である。

中心ソレノイド・コイル（C S コイル）は巨大な電磁力（圧縮力）を受ける。しかし、C S コイルの外側にはトロイダル・コイル（T F コイル）のウェッジ部がおかれ、C S コイルの占有面積はトカマク装置の大きさに影響を与えるため、設計上コンパクトな構造を要求される。また、T F コイルはC S コイルにて発生する磁場により転倒力が生じる。一方、外周リング・コイル（O R コイル）に働く磁場は最大7 テスラ程度とC S コイルより小さく、空間の裕度は大きい。しかし、O R コイルは大口径であるため支持点からの距離が長い。さらに、O R コイルの位置においてT F コイルの発生する磁場が波打ちしているためO R コイルは曲げの力を受ける^[2]。

高い応力を受ける核融合装置用の超電導磁石は、金属からなる導体と樹脂等の絶縁物で構成されている。導体は導体絶縁として絶縁テープがまかれた後、対地絶縁が施され、それぞれ樹脂により含浸されている。このように導体と絶縁物が組合わさった場合の機械的強度が、超電導磁石の剛性や強度に大きく影響を与えると考えられるがその特性については不明である。超電導磁石に転倒力あるいは曲げ荷重が働く場合、導体と絶縁物の間でせん断力によりすべりが発生しようとするので、接着強度が磁石の剛性に影響すると思われる。そこで絶縁物の接着強度を改良するため導体の表面をいくつかの方法で処理した。次に最も良い表面処理を用いて、O R コイルを部分的に模擬した曲げ試験体を3点曲げにより実験した。併せて試験体をモデル化して行ったF E Mの計算結果と比較し曲げ荷重が作用した場合の絶縁物による剛性の影響を調べた。また、C S コイルを模擬したパンケーキ巻線モデルを圧縮実験すると同時にF E Mによる解析計算を行い、計算結果と実験結果を比較することにより圧縮荷重が作用した場合の絶縁物による剛性の影響を調べた。

2. せん断強度

2. 1 目的

ITERではFig. 2. 1に示すように超電導磁石が配置されている。TFコイルはCSコイルより発生する磁場により転倒力が生じ、導体と絶縁物の間にせん断力が働く。ORコイルは平均直径23mで16箇所のTFコイル位置により支持されている。このため支持点間の距離が長くなる。さらに、支持点の間においてTFコイルから発生する磁場が波打ちしているためORコイルに対し曲げの力が作用し、導体とターン間絶縁にせん断力が発生する。巻線の強度以上のせん断力が発生するとすべりが生じ巻線の変位が大きくなり絶縁破壊に至る。そこで巻線のせん断強度を向上させるためには、導体とターン間絶縁の接着強度を向上させなければならない。そこで、巻線状態をできるだけ模擬した状態でせん断力が作用した場合、最も強い接着強度を得られるよう、導体に表面処理を施し純せん断による最適化を図った。

2. 2 実験方法

Fig. 2. 2に示すように、試験体はダミー導体、導体絶縁及び対地絶縁から構成される。ダミー導体は 20×20 mmの断面の直状のステンレス鋼(SUS304)である。このダミー導体に表面処理を施し縦方向に3本、横方向に3本、計9本導体絶縁をとりながら束ねた試験体を製作した。樹脂はTable 2. 1に示すようにエポキシ樹脂とビスマレイミド・トリアジン(BT)樹脂を用いた。エポキシ樹脂は一般産業用として実績が高く安定した強度を期待でき耐放射線性の要求が小さい場所(CSコイルなど)で使用できる。また、BT樹脂は核融合実験炉で要求される耐放射線性が高い場所(約200MGy)で使用できる。金属表面処理は導体製作上可能な方法としてローレット、サンドブラスト及び化学処理を行った。試験体はそれらの組合せで製作した。

負荷装置として油圧式の200tonプレス機を用い、導体絶縁がせん断破壊に至るまで試験体のFig. 2. 2の中央部の導体に荷重を加える。負荷された中央の模擬導体に対するせん断面積は周囲の模擬導体との接触面積に等しい。従って、接着強度は導体絶縁破壊時の荷重をせん断面積で除したものである。また、試験体は液体窒素で冷却し、この温度における接着強度として評価する。

2. 3 測定結果と考察

実験の結果をFig. 2. 3に示す。サンドブラスト処理が最も高い接着強度を示した。エポキシ樹脂を用いた場合の接着強度は 66.5 MPa で、表面処理を行わない場合の2.4倍である。また、BT樹脂を用いた場合の接着強度は 47.5 MPa で、表面処理を行わない場合の1.6倍である。サンドブラスト処理が最も高い接着強度を得られたのは、ローレット処理より金属表面をより細かく粗することが出来たため、単位面積当たりの投錨効果が向上したことによるものと考えられる。また、ステンレス鋼の表面酸化膜を、化学処理で除去することにより樹脂との接着強度が向上することを期待したが効果は無かった。

ITERの応力解析から巻線部の最大せん断応力は16 MPa発生すると予想されているため、どちらの樹脂を用いても試験体の接着強度は、ITERで使用できる可能性が高い。エポキシ樹脂は、CSコイルのように耐放射線性の要求が小さい環境(2 MGy)では利用できるが、TFコイルへの適用は困難である。BT樹脂は、耐放射線性の観点からはTFコイルへの適用は期待できるが、安全率を3倍とする設計を実現させるためには変性の最適化等により接着強度を増すことが必要である。

3. 曲げ剛性解析

3.1 目的

ORコイルにはコイル外側方向(半径方向)にフープ力が作用する。また、ORコイルが組み込まれる位置のTFコイルによる磁場が波打つ為上下方向(コイル軸方向)へ作用する電磁力が働く。そのため支持構造との間に導体に対し曲げ応力として作用する。さらにORコイルは支持点の距離が大きいため、電磁力のわりに導体のたわみは大きくなる。従って、より高い曲げ剛性を得る為には、導体と絶縁物の接着強度を強化し、すべりを防止する必要があると思われる。曲げ荷重が働いた場合の絶縁物の影響を調べるために、2章の実験より、接着強度を高くするため導体表面をサンドブラスト処理し、エポキシ樹脂を真空含浸した試験体と、耐放射線性が良いBT樹脂を用いた試験体を用いて評価した。

3.2 実験方法

Fig. 3. 1に示すように、試験体はダミー導体、導体絶縁及び対地絶縁から構成される。ダミー導体は 20×20 mmの断面の直状のSUS304(ヤング率: 180 GPa、ポアソン比: 0.3)である。このダミー導体を高さ方向に6本、幅方向に8本、計48本導体絶縁をとりながら積み重ね試験体を製作した。ITERにおいて、ORコイルは内径が約20 mとなるので試験体は直線状にした。試験体は絶縁物に合わせ各1個製作した。

Fig. 3. 2に示すように、負荷装置として油圧式の200 tonプレス機を用い、常温にて試験体の三点曲げ試験を行った。せん断力により導体絶縁が破壊するまで直状試験体に荷重を加える。この時の、導体表面のひずみ、荷重点の変位をパーソナルコンピュータにて計測した。

尚、x-y平面において測定したひずみより以下の平面応力問題として各応力を求めた。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ITERの応力解析から巻線部の最大せん断応力は 16 MPa 発生すると予想されているため、どちらの樹脂を用いても試験体の接着強度は、ITERで使用できる可能性が高い。エポキシ樹脂は、CSコイルのように耐放射線性の要求が小さい環境(2 MGy)では利用できるが、TFコイルへの適用は困難である。BT樹脂は、耐放射線性の観点からはTFコイルへの適用は期待できるが、安全率を3倍とする設計を実現させるためには変性の最適化等により接着強度を増すことが必要である。

3. 曲げ剛性解析

3.1 目的

ORコイルにはコイル外側方向(半径方向)にフープ力が作用する。また、ORコイルが組み込まれる位置のTFコイルによる磁場が波打つ為上下方向(コイル軸方向)へ作用する電磁力が働く。そのため支持構造との間に導体に対し曲げ応力として作用する。さらにORコイルは支持点の距離が大きいため、電磁力のわりに導体のたわみは大きくなる。従って、より高い曲げ剛性を得る為には、導体と絶縁物の接着強度を強化し、すべりを防止する必要があると思われる。曲げ荷重が働いた場合の絶縁物の影響を調べるために、2章の実験より、接着強度を高くするため導体表面をサンドブラスト処理し、エポキシ樹脂を真空含浸した試験体と、耐放射線性が良いBT樹脂を用いた試験体を用いて評価した。

3.2 実験方法

Fig. 3. 1 に示すように、試験体はダミー導体、導体絶縁及び対地絶縁から構成される。ダミー導体は $20 \times 20 \text{ mm}$ の断面の直状の SUS 304 (ヤング率: 180 GPa、ボアソン比: 0.3) である。このダミー導体を高さ方向に 6 本、幅方向に 8 本、計 48 本導体絶縁をとりながら積み重ね試験体を製作した。ITERにおいて、ORコイルは内径が約 20 m となるので試験体は直線状にした。試験体は絶縁物に合わせ各 1 個製作した。

Fig. 3. 2 に示すように、負荷装置として油圧式の 200 ton プレス機を用い、常温にて試験体の三点曲げ試験を行った。せん断力により導体絶縁が破壊するまで直状試験体に荷重を加える。この時の、導体表面のひずみ、荷重点の変位をパーソナルコンピュータにて計測した。

尚、x-y 平面において測定したひずみより以下の平面応力問題として各応力を求めた。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ただし、 σ_x : x 方向の応力 ε_x : x 方向の歪
 σ_y : y 方向の応力 ε_y : y 方向の歪
 τ_{xy} : x 軸に垂直な面上で y 方向に作用するせん断応力
 γ_{xy} : τ_{xy} によるせん断歪
 E : ヤング率 ν : ポアソン比

計測点一ヶ所についてFig. 3. 3 に示す 3 方向のひずみゲージによりひずみを計測する。ひずみゲージにより計測された値を ε_a 、 ε_b 、 ε_c とすると x y 平面におけるひずみ ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} は次式により求められる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_a & \sin^2 \theta_a & \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \cos^2 \theta_b & \sin^2 \theta_b & \sin \theta_b \cos \theta_b \\ \cos^2 \theta_c & \sin^2 \theta_c & \sin \theta_c \cos \theta_c \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

ここで $\theta_a = 0$ 、 $\theta_b = -\pi/4$ 、 $\theta_c = -\pi/2$ を代入すると

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_c \\ \varepsilon_a - 2\varepsilon_b + \varepsilon_c \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

3. 3 測定結果

Fig. 3. 4 に BT樹脂を導体絶縁に用いた試験体の荷重 - 軸方向ひずみ曲線を示す。計測点は荷重点近傍の試験体側面である。荷重 500 kN 付近迄は線形でひずみが増加している。500 kN を越えるとひずみが非線形に変化し塑性している。これは、Fig. 3. 5 に示すように使用したSUSの弾性領域は 1, 300 ppm (応力値: 250 MPa) 遠で、それを越えた為急速に剛性が劣化したことによるものと考えられる。エポキシ樹脂を用いた試験体についても同様に弾性領域を越えるひずみを観測した。

Fig. 3. 6 に BT樹脂を用いた試験体の中立面（最大せん断応力が発生し、実験においてもこの面にてせん断破壊が発生）付近に於ける荷重 - せん断応力曲線を示す。測定されたせん断応力は、荷重 500 kN 付近迄は傾きは解析結果と一致している。また、歪と同様に 500 kN を越えるとせん断応力は急速に増加している。最大せん断応力は中立面にて発生し、エポキシ樹脂を用いた試験体では、最大せん断応力が 56.4 MPa に達した

時せん断破壊が発生した。この値は2章で得られた接着強度にはほぼ等しい。よって接着強度は曲げ剛性に影響を与えていることがわかる。

3. 4 応力解析

FEM構造解析コードMSC/NASTRANを用いて解析計算を行った。解析モデルは実験に用いた試験体の半分をモデル化した^[5]。Fig. 3. 7に示すようにモデルの拘束条件としては、モデルの底面の端から200mmの支持部分をZ方向、X軸回転方向、Y軸回転方向について、又その部分のY=0.0の点についてはY方向を拘束する。境界面については、X方向、X軸回転方向、Y軸回転方向、Z軸回転方向を拘束する。

ステンレス鋼の塑性を考慮した解析を行う為、Fig. 3. 5に示すように、応力250MPa以下ではステンレス鋼のヤング率は190GPaとし、250MPaを越えた場合にはヤング率を120GPaと剛性の変化を近似して以下の計算手法を用いた。

(a) Fig. 3. 8に示すように、マトリックス構造となっているFEMモデルのある要素Ni,jに生じる応力σi,j(主応力の内絶対値が最大なもの)の値が250MPaに達するまでは、SUSの要素のヤング率をすべて190GPaとする。ここでポアソン比は0.3とする。

(b) σi,jが250MPaに達したら、Ni,jのヤング率Ei,jを120GPaとする。

(c) 次に別の要素Nk,lの応力値が250MPaに到達するまで荷重を増加させながら、すべての要素の解析計算を行う。

(d) その時点でヤング率Ek,lを190GPaから120GPaに変更する。

(e) 要素荷重の合計が1.2MNを越えるまでc項からd項の計算を繰り返す。

実験結果とFEM解析による荷重-荷重方向変位曲線をFig. 3. 9に示す。解析では絶縁物のヤング率を1GPa、10GPaと2種類設定しポアソン比は0.3とした。ヤング率を1GPaとして計算した場合より実験値の変位は大きく、絶縁物により模擬コイルの曲げ剛性が大幅に低下していることが判明した。これは絶縁テープが導体に対し螺旋状に巻かれている為、軸方向に対し纖維が連続にならないので、せん断力に対し抵抗としての効果が小さいものと考えられる。

4. 軸方向剛性

4. 1 目的

CSコイルにはその発生する電磁力により巨大な圧縮力が軸方向に発生し、コイルの内径側に近づくほど強くなる。上下の巻線から受ける平均圧縮応力は100MPa程度となる。CSコイルへの適用を考えた場合、応力に対し機械的に保持するためには、あらかじめ発生する応力に対応した肉厚を持つ外側コンジットに、超電導体を内包する内側コンジットを組み合わせる二重コンジット方式によるグレーディング構造が必要となる。巻線にはパンケーキ巻線とレヤー巻線があるが、この二重コンジット方式においてはパンケーキ巻線はレヤー巻線に比べて有利である。

時せん断破壊が発生した。この値は2章で得られた接着強度にはほぼ等しい。よって接着強度は曲げ剛性に影響を与えていることがわかる。

3. 4 応力解析

FEM構造解析コードM S C / N A S T R A N を用いて解析計算を行った。解析モデルは実験に用いた試験体の半分をモデル化した^[5]。Fig. 3. 7 に示すようにモデルの拘束条件としては、モデルの底面の端から 200 mm の支持部分を Z 方向、X 軸回転方向、Y 軸回転方向について、又その部分の Y = 0. 0 の点については Y 方向を拘束する。境界面については、X 方向、X 軸回転方向、Y 軸回転方向、Z 軸回転方向を拘束する。

ステンレス鋼の塑性を考慮した解析を行う為、Fig. 3. 5 に示すように、応力 250 MPa 以下ではステンレス鋼のヤング率は 190 GPa とし、250 MPa を越えた場合にはヤング率を 120 GPa と剛性の変化を近似して以下の計算手法を用いた。

(a) Fig. 3. 8 に示すように、マトリックス構造となっている FEM モデルのある要素 $N_{i,j}$ に生じる応力 $\sigma_{i,j}$ (主応力の内絶対値が最大なもの) の値が 250 MPa に達するまでは、SUS の要素のヤング率をすべて 190 GPa とする。ここでポアソン比は 0.3 とする。

(b) $\sigma_{i,j}$ が 250 MPa に達したら、 $N_{i,j}$ のヤング率 $E_{i,j}$ を 120 GPa とする。

(c) 次に別の要素 $N_{k,l}$ の応力値が 250 MPa に到達するまで荷重を増加させながら、すべての要素の解析計算を行う。

(d) その時点でヤング率 $E_{k,l}$ を 190 GPa から 120 GPa に変更する。

(e) 要素荷重の合計が 1.2 MN を越えるまで c 項から d 項の計算を繰り返す。

実験結果と FEM 解析による荷重 - 荷重方向変位曲線を Fig. 3. 9 に示す。解析では絶縁物のヤング率を 1 GPa、10 GPa と 2 種類設定しポアソン比は 0.3 とした。ヤング率を 1 GPa として計算した場合より実験値の変位は大きく、絶縁物により模擬コイルの曲げ剛性が大幅に低下していることが判明した。これは絶縁テープが導体に対し螺旋状に巻かれている為、軸方向に対し纖維が連続にならないので、せん断力に対し抵抗としての効果が小さいものと考えられる。

4. 軸 方 向 剛 性

4. 1 目 的

CS コイルにはその発生する電磁力により巨大な圧縮力が軸方向に発生し、コイルの内径側に近づくほど強くなる。上下の巻線から受ける平均圧縮応力は 100 MPa 程度となる。CS コイルへの適用を考えた場合、応力に対し機械的に保持するためには、あらかじめ発生する応力に対応した肉厚を持つ外側コンジットに、超電導体を内包する内側コンジットを組み合わせる二重コンジット方式によるグレーディング構造が必要となる。巻線にはパンケーキ巻線とレヤー巻線があるが、この二重コンジット方式においてはパンケーキ巻線はレヤー巻線に比べて有利である。

そこで、パンケーキ巻線方式によってダミー導体を用いた縮小モデルを製作し、これに圧縮力を加え軸方向圧縮における絶縁物の剛性による影響を評価した。

4. 2 実験方法

Fig. 4. 1 に示すように、試験体はダミー導体、導体絶縁、パンケーキコイル間絶縁（ヤング率：7.6 GPa）及び対地絶縁からなる。ダミー導体は 10×10 mmの断面のSUS304（ヤング率：180 GPa）である。軸方向圧縮であるため接着面に発生するせん断力は小さいのでダミー導体には表面処理を行わない。このダミー導体を導体絶縁をとりながらターン方向に9ターン巻したダブルパンケーキ巻コイルを6段、パンケーキコイル間絶縁をとりながら積み重ね試験体を製作した。試験体個数は導体絶縁に合わせ2個とした。

圧縮応力100 MPaを実現するためには試験体の荷重方向断面積より1500 ton以上の負荷装置が必要となる。Fig. 4. 2 に示すように負荷装置として3000 tonプレス機を用い、試験体に軸方向の圧縮荷重を負荷させる。このときの導体表面の歪、および各点の変位をパーソナル・コンピュータにて計測した。使用したソフトウェアを付録に添付する。

4. 3 測定結果

Fig. 4. 3 にBT樹脂を用いた試験体の荷重-軸方向変位曲線を示す。荷重約5 MN以下の領域では変位が急速に変化している。これは、この領域にてSUS、絶縁物間にある微小な隙間がスプリングのように押し縮められ、その後SUS、絶縁物が一体となって圧縮されることによりコイル本来のヤング率に到達したものと考えられる。従って、この時点（荷重5 MN時）を原点として、実験と解析における荷重-軸方向変位の関係をFig. 4. 4 に示す。エポキシ樹脂を用いた試験体と、BT樹脂を用いた試験体の傾きはほぼ等しい。さらに、両樹脂の試験体において荷重と軸方向変位の関係は線形である。

4. 4 応力解析と考察

FEM構造解析コードMSC/NASTRANを用いて解析計算を行った。解析では絶縁物のヤング率を2.5 GPa、10 GPaと2種類設定し、ポアソン比を0.3とした。

モデルの断面における拘束条件をFig. 4. 5 に示す。拘束条件としては、モデルの底面の部分をZ方向について拘束し、上部より荷重を印加する。

Fig. 4. 3 に荷重と軸方向変位の解析結果を示す。解析計算においてヤング率を2.5 GPaとして計算した場合より実験値の変位は小さく、ヤング率は約3 GPaと予想される。

また、本コイルの断面を簡略化した場合、SUSと絶縁物を同じ力で圧縮した複合則と考えられる。従って、SUSのヤング率を決定すると、以下の方法により絶縁物のヤング率を求める事が出来る。

$$E_{INS} = \frac{L_{INS} \cdot \sigma}{\lambda_{TOTAL} - \frac{L_{SUS}}{E_{SUS}} \sigma - \frac{L_{FRP}}{E_{FRP}} \sigma} \quad (4.1)$$

ただし、 λ_{SUS} : S U S の荷重方向変位

λ_{INS} : 導体絶縁（対地絶縁を含む）の荷重方向変位

λ_{FRP} : パンケーキコイル間絶縁の荷重方向変位

λ_{TOTAL} : 全体変位

E_{INS} : 導体絶縁全体のヤング率

E_{SUS} : 導体絶縁全体の歪

L_{INS} : 絶縁物の長さ

σ : 圧縮応力

L_{SUS} : S U S の長さ

E_{SUS} : S U S のヤング率

L_{FRP} : F R P の長さ

E_{FRP} : F R P のヤング率

上式より荷重 5 M N 時の絶縁物のヤング率を求めるときエポキシ樹脂では 3. 02 GPa、B T 樹脂では 3. 13 GPa になる。複合則の計算結果は実験の結果及び F E M 計算の結果によく一致している。

パンケーキコイルに均一の荷重を加えた場合、接着強度はコイルの剛性にはほとんど影響を与えない。実験では圧縮応力が 170 MPa に達したがコイルは弾性領域内であった。従って、核融合装置にパンケーキ巻線を適用することができる。

一方、加圧後の試験体を観察すると、巻線のまわりに接着した対地絶縁がコイル側面で座屈状態から剥離した。コイルの剛性にはほとんど影響は無いが、コイルの対地絶縁を確保するために、対地絶縁の剥離を防止する技術の開発が必要である。

5. まとめ

以上の実験と考察をまとめると以下のようない結論に達した。

(1) せん断剛性

導体表面をサンドブラスト処理し、エポキシ樹脂を真空含浸した物がせん断力に対し最も強く 67 MPa である。放射線に強い絶縁物である B T 樹脂を用いた場合では、導体表面をサンドブラスト処理したものが最も強く 48 MPa である。両樹脂とも接着強度は I T E R で発生する最大せん断応力 (17 MPa) を越えている。

(2) 曲げ剛性

実験値と解析結果を比較すると、ボアソン比を 0.3 とした場合曲げに対し絶縁物のヤ

$$E_{INS} = \frac{L_{INS} \cdot \sigma}{\lambda_{TOTAL} - \frac{L_{SUS}}{E_{SUS}} \sigma - \frac{L_{FRP}}{E_{FRP}} \sigma} \quad (4.1)$$

ただし、 λ_{SUS} : S U S の荷重方向変位

λ_{INS} : 導体絶縁（対地絶縁を含む）の荷重方向変位

λ_{FRP} : パンケーキコイル間絶縁の荷重方向変位

λ_{TOTAL} : 全体変位

E_{INS} : 導体絶縁全体のヤング率

ε_{INS} : 導体絶縁全体の歪

L_{INS} : 絶縁物の長さ

σ : 圧縮応力

L_{SUS} : S U S の長さ

E_{SUS} : S U S のヤング率

L_{FRP} : F R P の長さ

E_{FRP} : F R P のヤング率

上式より荷重 5 M N 時の絶縁物のヤング率を求めるときエポキシ樹脂では 3. 02 GPa、B T 樹脂では 3. 13 GPa になる。複合則の計算結果は実験の結果及び F E M 計算の結果によく一致している。

パンケーキコイルに均一の荷重を加えた場合、接着強度はコイルの剛性にほとんど影響を与えない。実験では圧縮応力が 170 MPa に達したがコイルは弾性領域内であった。従って、核融合装置にパンケーキ巻線を適用することができる。

一方、加圧後の試験体を観察すると、巻線のまわりに接着した対地絶縁がコイル側面で座屈状態から剥離した。コイルの剛性にはほとんど影響は無いが、コイルの対地絶縁を確保するために、対地絶縁の剥離を防止する技術の開発が必要である。

5. まとめ

以上の実験と考察をまとめると以下のようない結論に達した。

(1) せん断剛性

導体表面をサンドブラスト処理し、エポキシ樹脂を真空含浸した物がせん断力に対し最も強く 67 MPa である。放射線に強い絶縁物である B T 樹脂を用いた場合では、導体表面をサンドブラスト処理したものが最も強く 48 MPa である。両樹脂とも接着強度は I T E R で発生する最大せん断応力 (17 MPa) を越えている。

(2) 曲げ剛性

実験値と解析結果を比較すると、ボアソン比を 0.3 とした場合曲げに対し絶縁物のヤ

ング率は1 GPa以下としてコイルは変形する。また、せん断応力が導体絶縁物の接着強度に達した場合にはせん断破壊が発生する。これらのことから、曲げに対しては絶縁物によって巻線の剛性が低下していることが判明した。

(3) 軸方向剛性

パンケーキ巻線においては圧縮実験の結果と単純な複合則による計算結果は一致し、ボアン比を0.3とした場合絶縁物のヤング率は3.5 GPaとなる。しかし、曲げ剛性試験の結果と比較した場合、コイルを設計する際絶縁物の剛性に異方性があることを考慮しなければならない。また、巻線そのものは弾性領域であるが、圧縮力により対地絶縁が試験体側面で座屈状態から破壊した。巻線の剛性には影響は無いが、コイルの絶縁上解決しなければならない。

謝 詞

本研究に終始ご指導ご鞭撻いただきました、核融合工学部 島本 進部長、核融合実験炉特別チーム 松田 慎三郎チームリーダ、超電導磁石研究室 辻 博史室長及び室員の皆様に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] K. Yoshida, M. Hasegawa, K. Okuno, et al: "CONCEPTUAL DESIGN OF SC MAGNET FOR ITER (I) -OVER VIEW-", JAERI-M 91-120, 1991.
- [2] K. Koizumi, M. Hasegawa, K. Yoshida: "CONCEPTUAL DESIGN OF SC MAGNET FOR ITER (II) -STRESS ANALYSIS-", JAERI-M 91-121, 1991.
- [3] M. Sugimoto, K. Yoshida, et al.: "MECHANICAL TEST OF SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR FUSION EXPERIMENTAL REACTOR", presented at 16th Symposium on Fusion Technology, London, September 3-7, 1990.
- [4] Burning Plasma Experiment: "SYSTEMS DESIGN DESCRIPTION", F-910311-PPL-04, Princeton University, March, 1991.
- [5] "MSC/NASTRAN USER'S MANUAL", The MacNeal-Schwendler Corporation, November, 1985.
- [6] H. Hiue, M. Sugimoto, et al., "WINDING RIGIDITY OF IMPREGNATED COIL WITH LARGE CONDUCTOR." presented at 14th Symposium on Fusion Engineering, San Diego, September 30 - October 3, 1991.

ング率は1 GPa以下としてコイルは変形する。また、せん断応力が導体絶縁物の接着強度に達した場合にはせん断破壊が発生する。これらのことから、曲げに対しては絶縁物によって巻線の剛性が低下していることが判明した。

(3) 軸方向剛性

パンケーキ巻線においては圧縮実験の結果と単純な複合則による計算結果は一致し、ボアン比を0.3とした場合絶縁物のヤング率は3.5 GPaとなる。しかし、曲げ剛性試験の結果と比較した場合、コイルを設計する際絶縁物の剛性に異方性があることを考慮しなければならない。また、巻線そのものは弾性領域であるが、圧縮力により対地絶縁が試験体側面で座屈状態から破壊した。巻線の剛性には影響は無いが、コイルの絶縁上解決しなければならない。

謝 詞

本研究に終始ご指導ご鞭撻いただきました、核融合工学部 島本 進部長、核融合実験炉特別チーム 松田 慎三郎チームリーダ、超電導磁石研究室 辻 博史室長及び室員の皆様に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] K. Yoshida, M. Hasegawa, K. Okuno, et al: "CONCEPTUAL DESIGN OF SC MAGNET FOR ITER (I) -OVER VIEW-", JAERI-M 91-120, 1991.
- [2] K. Koizumi, M. Hasegawa, K. Yoshida: "CONCEPTUAL DESIGN OF SC MAGNET FOR ITER (II) -STRESS ANALYSIS-", JAERI-M 91-121, 1991.
- [3] M. Sugimoto, K. Yoshida, et al.: "MECHANICAL TEST OF SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR FUSION EXPERIMENTAL REACTOR", presented at 16th Symposium on Fusion Technology, London, September 3-7, 1990.
- [4] Burning Plasma Experiment: "SYSTEMS DESIGN DESCRIPTION", F-910311-PPL-04, Princeton University, March, 1991.
- [5] "MSC/NASTRAN USER'S MANUAL", The MacNeal-Schwendler Corporation, November, 1985.
- [6] H. Hiue, M. Sugimoto, et al., "WINDING RIGIDITY OF IMPREGNATED COIL WITH LARGE CONDUCTOR." presented at 14th Symposium on Fusion Engineering, San Diego, September 30 - October 3, 1991.

ング率は1 GPa以下としてコイルは変形する。また、せん断応力が導体絶縁物の接着強度に達した場合にはせん断破壊が発生する。これらのことから、曲げに対しては絶縁物によって巻線の剛性が低下していることが判明した。

(3) 軸方向剛性

パンケーキ巻線においては圧縮実験の結果と単純な複合則による計算結果は一致し、ポアソン比を0.3とした場合絶縁物のヤング率は3.5 GPaとなる。しかし、曲げ剛性試験の結果と比較した場合、コイルを設計する際絶縁物の剛性に異方性があることを考慮しなければならない。また、巻線そのものは弾性領域であるが、圧縮力により対地絶縁が試験体側面で座屈状態から破壊した。巻線の剛性には影響は無いが、コイルの絶縁上解決しなければならない。

謝 詞

本研究に終始ご指導ご鞭撻いただきました、核融合工学部 島本 進部長、核融合実験炉特別チーム 松田 慎三郎チームリーダ、超電導磁石研究室 辻 博史室長及び室員の皆様に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] K. Yoshida, M. Hasegawa, K. Okuno, et al: "CONCEPTUAL DESIGN OF SC MAGNET FOR ITER (I) -OVER VIEW-", JAERI-M 91-120, 1991.
- [2] K. Koizumi, M. Hasegawa, K. Yoshida: "CONCEPTUAL DESIGN OF SC MAGNET FOR ITER (II) -STRESS ANALYSIS-", JAERI-M 91-121, 1991.
- [3] M. Sugimoto, K. Yoshida, et al.: "MECHANICAL TEST OF SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR FUSION EXPERIMENTAL REACTOR", presented at 16th Symposium on Fusion Technology, London, September 3-7, 1990.
- [4] Burning Plasma Experiment: "SYSTEMS DESIGN DESCRIPTION", F-910311-PPL-04, Princeton University, March, 1991.
- [5] "MSC/NASTRAN USER'S MANUAL", The MacNeal-Schwendler Corporation, November, 1985.
- [6] H. Hiue, M. Sugimoto, et al., "WINDING RIGIDITY OF IMPREGNATED COIL WITH LARGE CONDUCTOR." presented at 14th Symposium on Fusion Engineering, San Diego, September 30 - October 3, 1991.

Table 2.1 The constitution of insulator

	Epoxy	BT resin
Resin Harder	Bisphenol A type Amine	Bismaleimide-Triazine
Glasscross glass fiber weave	T-glass Satin	

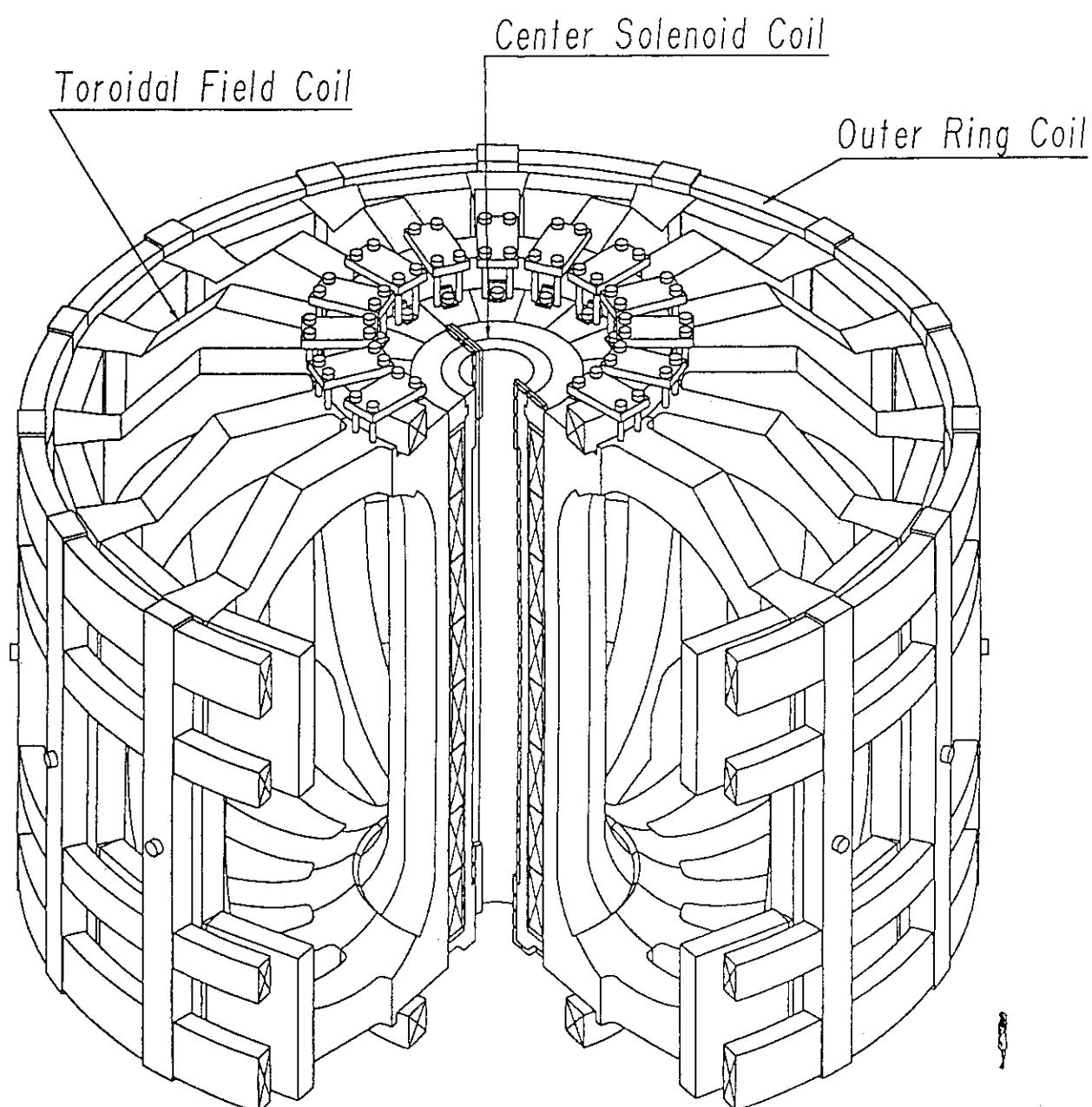


Fig. 2.1 Overview of the superconducting magnet system

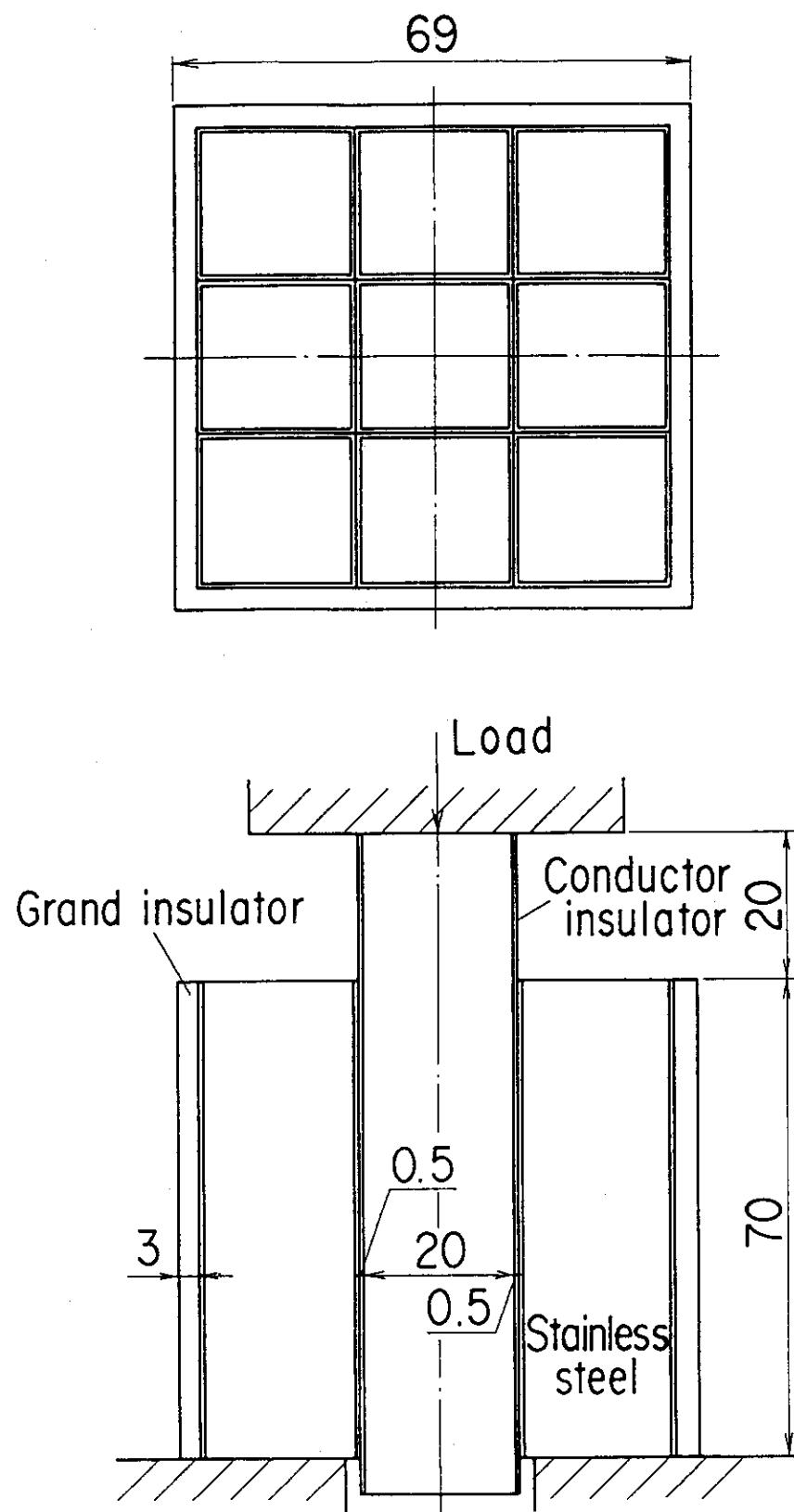


Fig. 2.2 Schematic diagram of the adhesive strength measurement

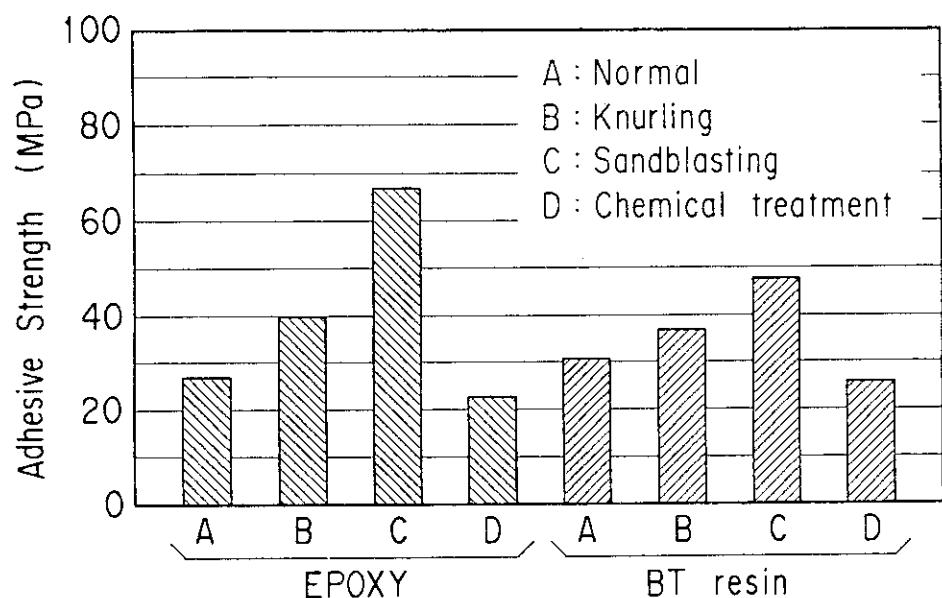


Fig. 2.3 Results for the adhesive strength measurement

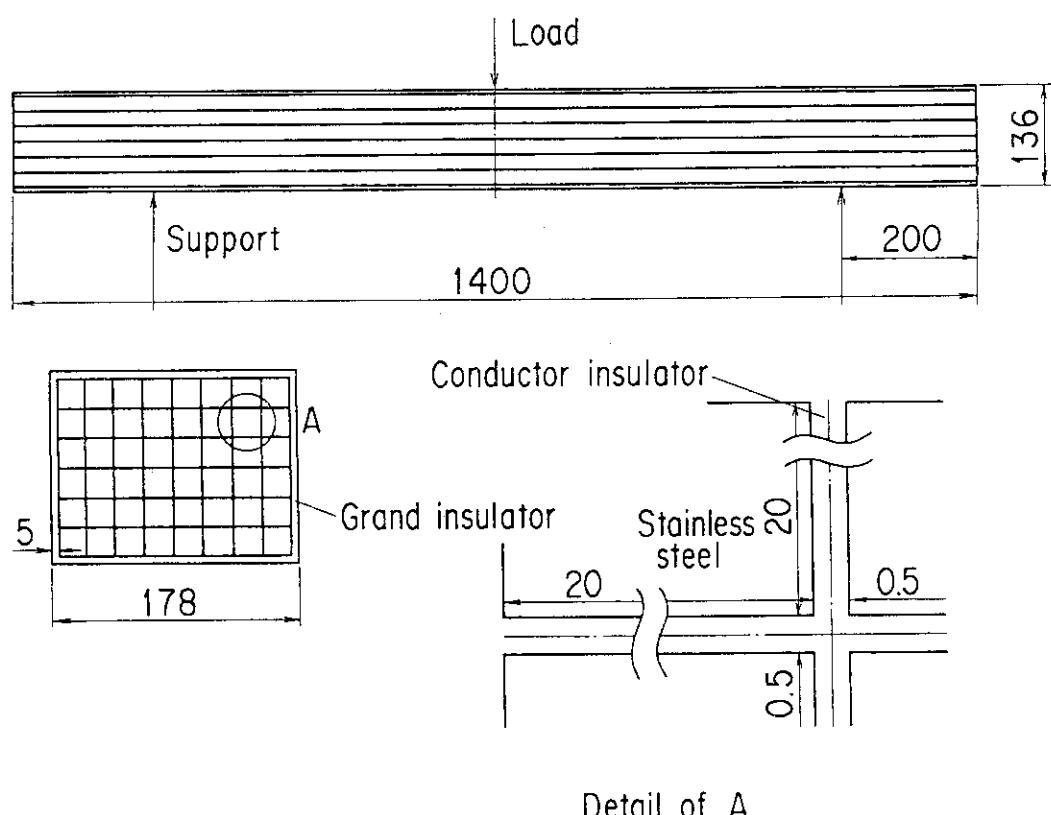


Fig. 3.1 Schematic diagram of the bending rigidity measurement

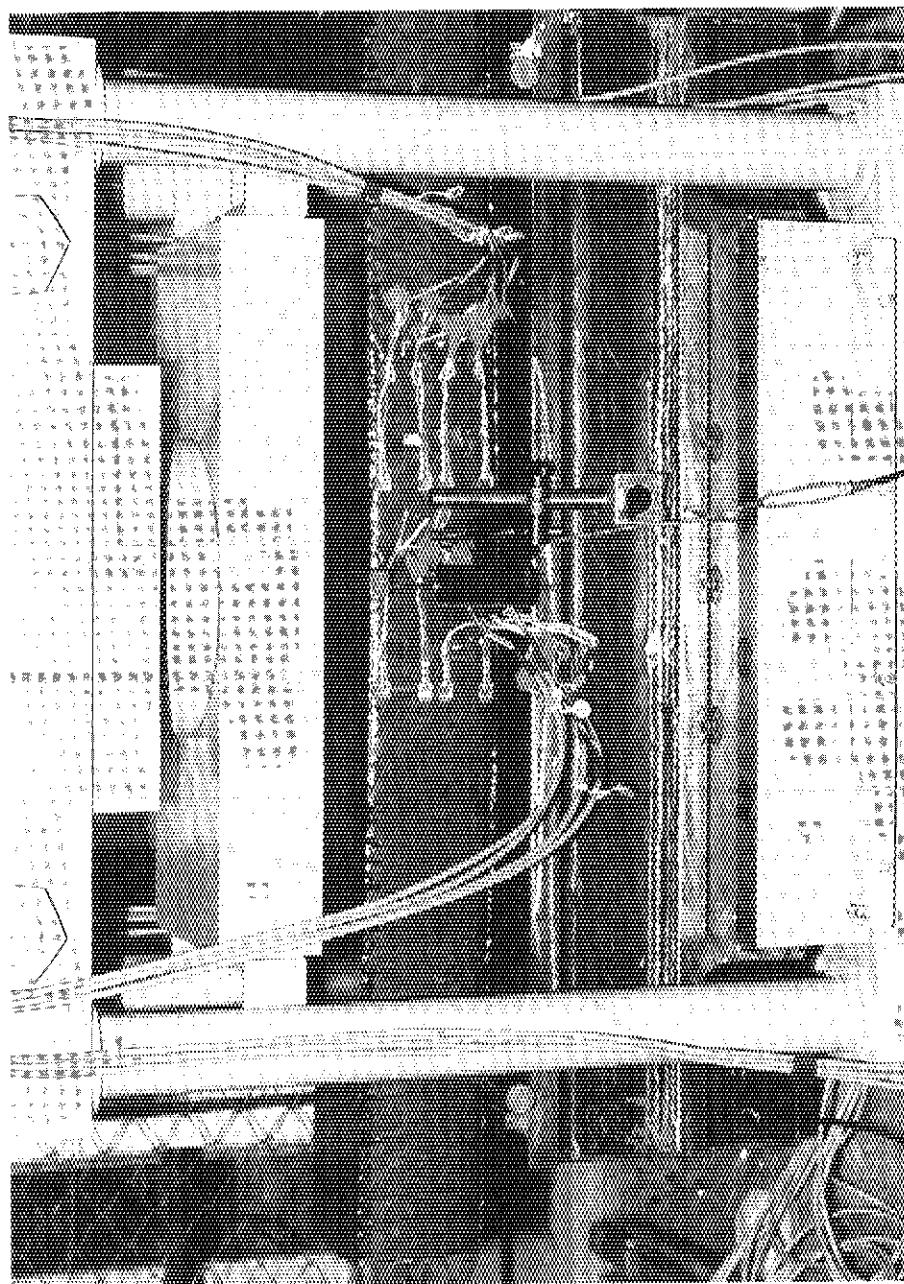


Fig. 3.2 The three point bending test loaded by 2 MN press

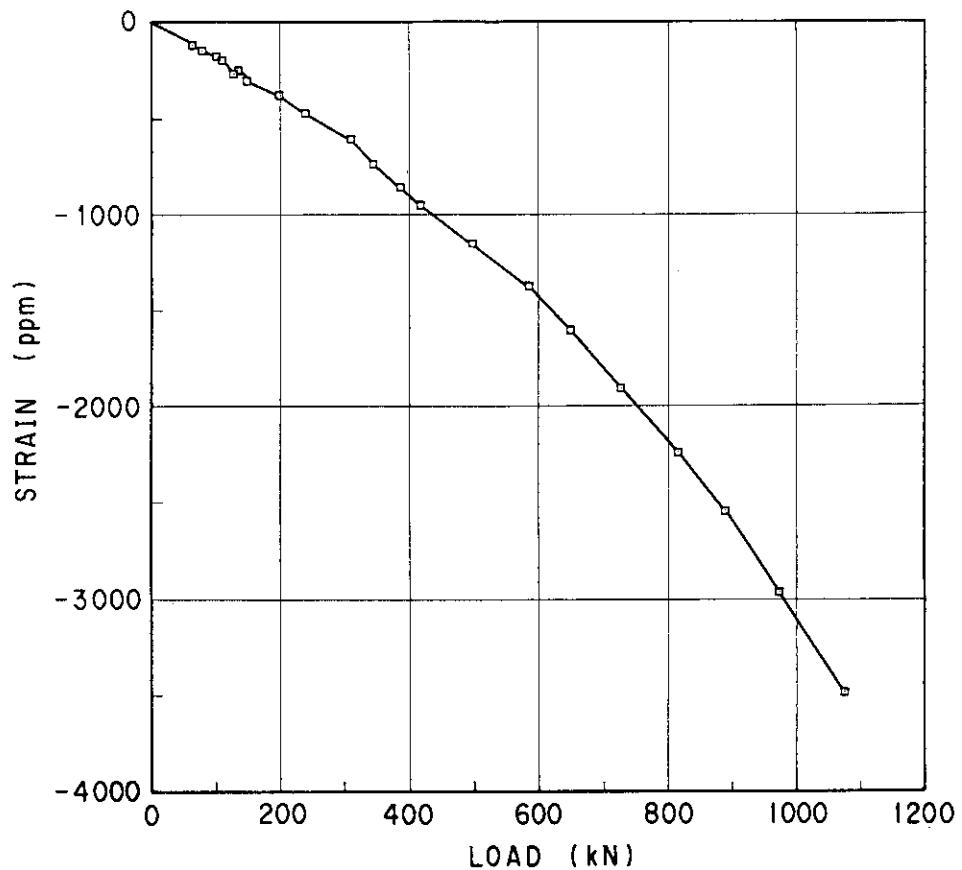


Fig. 3.3 Load-axial strain curve for the bending rigidity measurement

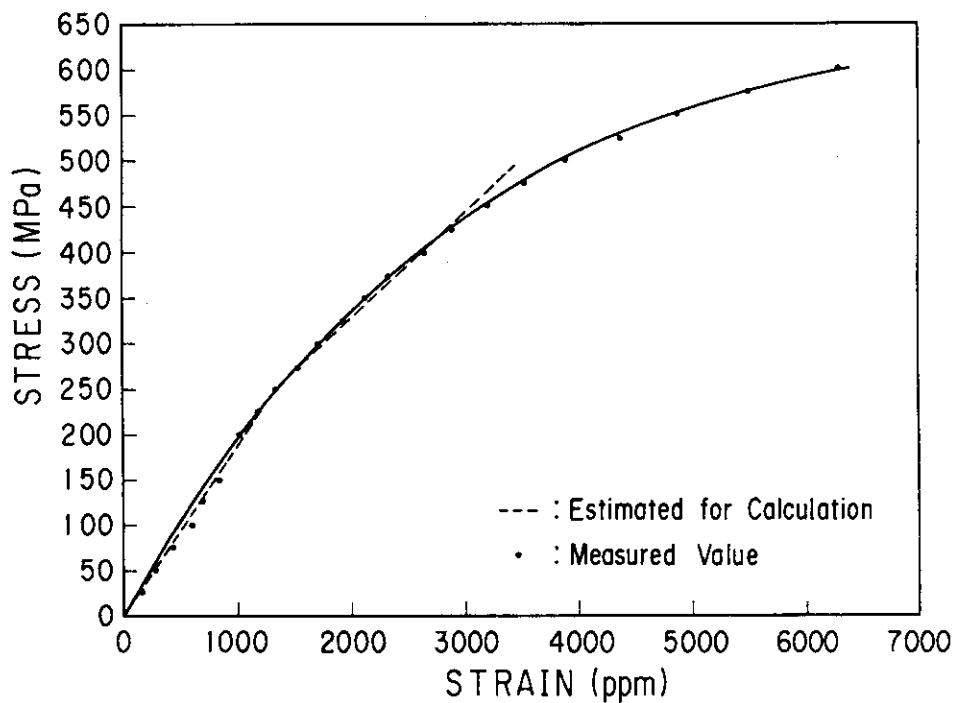


Fig. 3.4 Strain-stress curve for the stainless steel

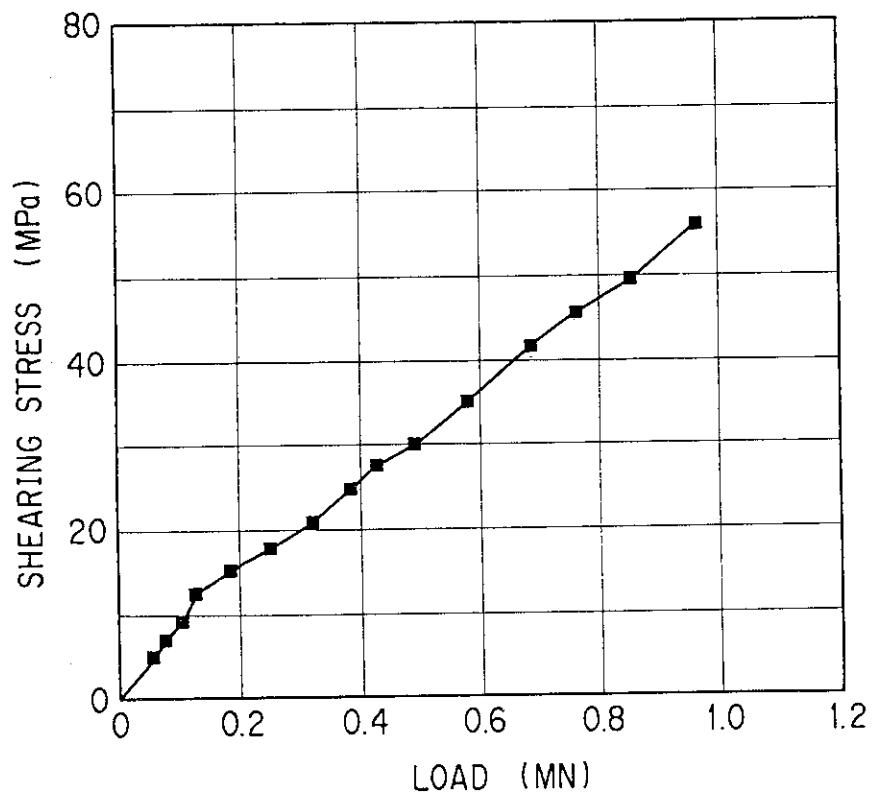


Fig. 3.5 Load-shearing stress curve for the bending rigidity measurement

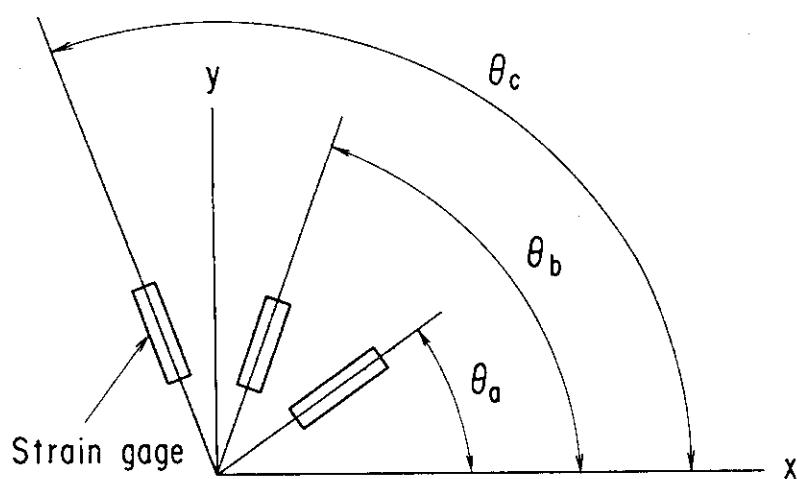


Fig. 3.6 Measurement by the strain rosette

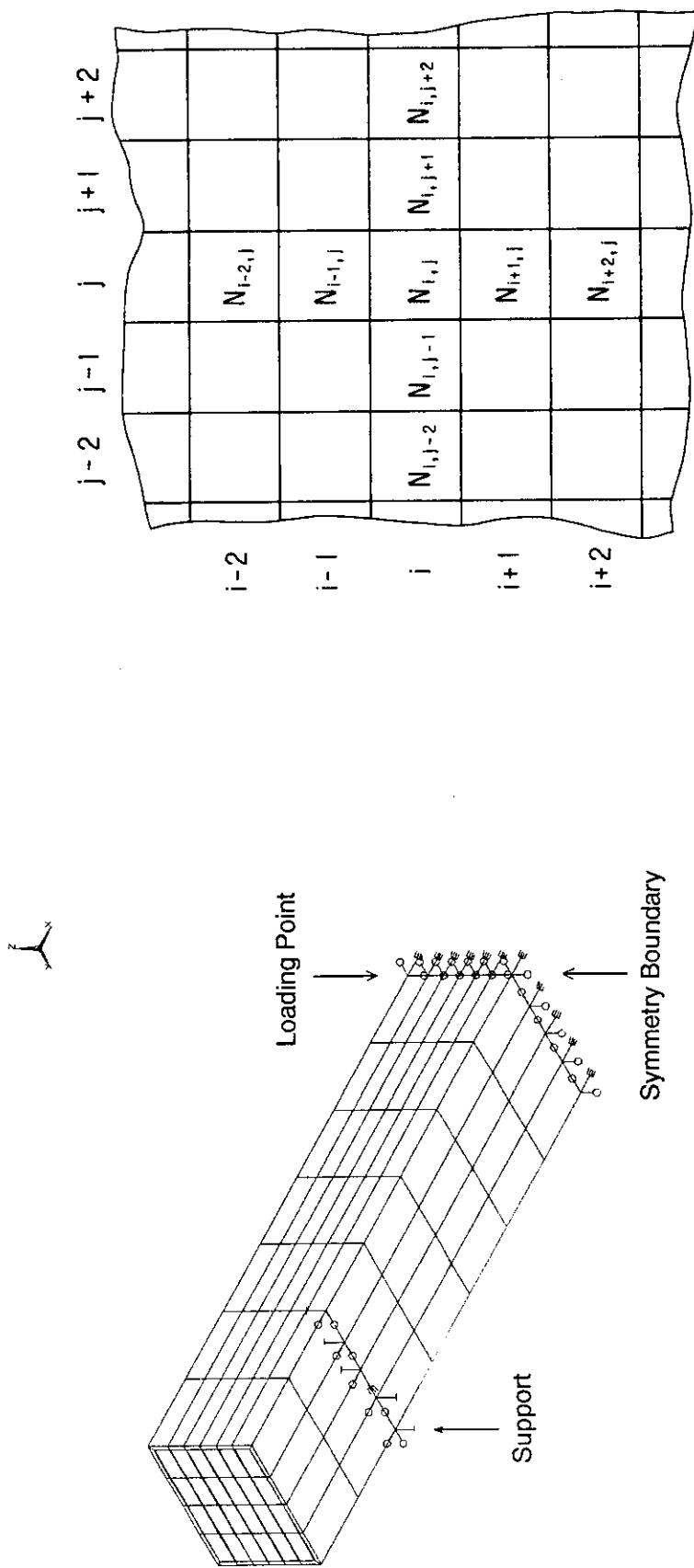


Fig. 3.7 Restricted FEM model of the bar winding sample

Fig. 3.8 Elements of FEM model

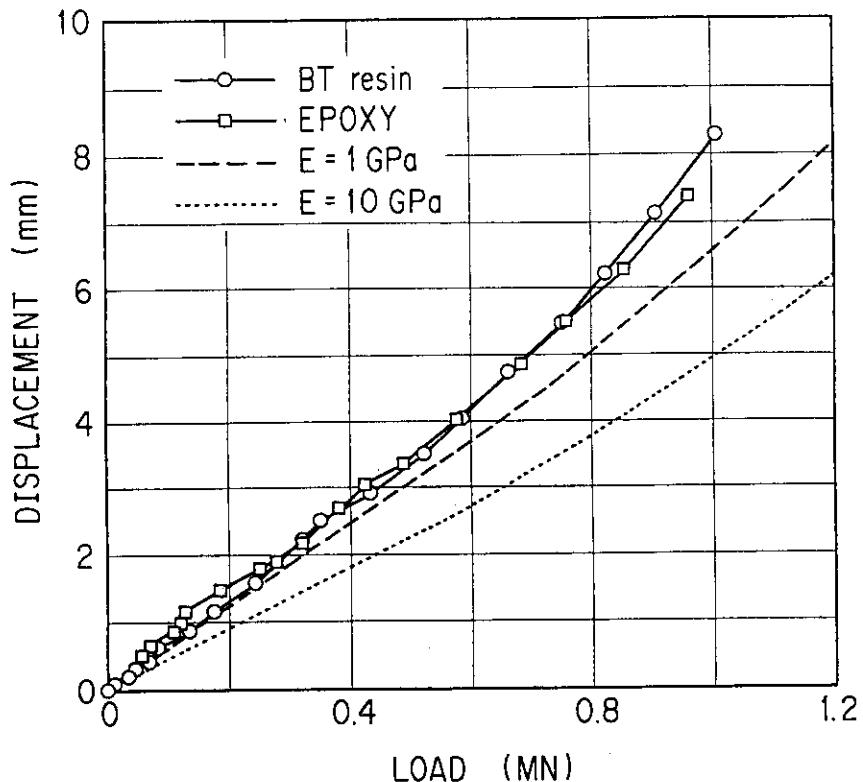


Fig. 3.9 Load-displacement curve for the bending rigidity measurement

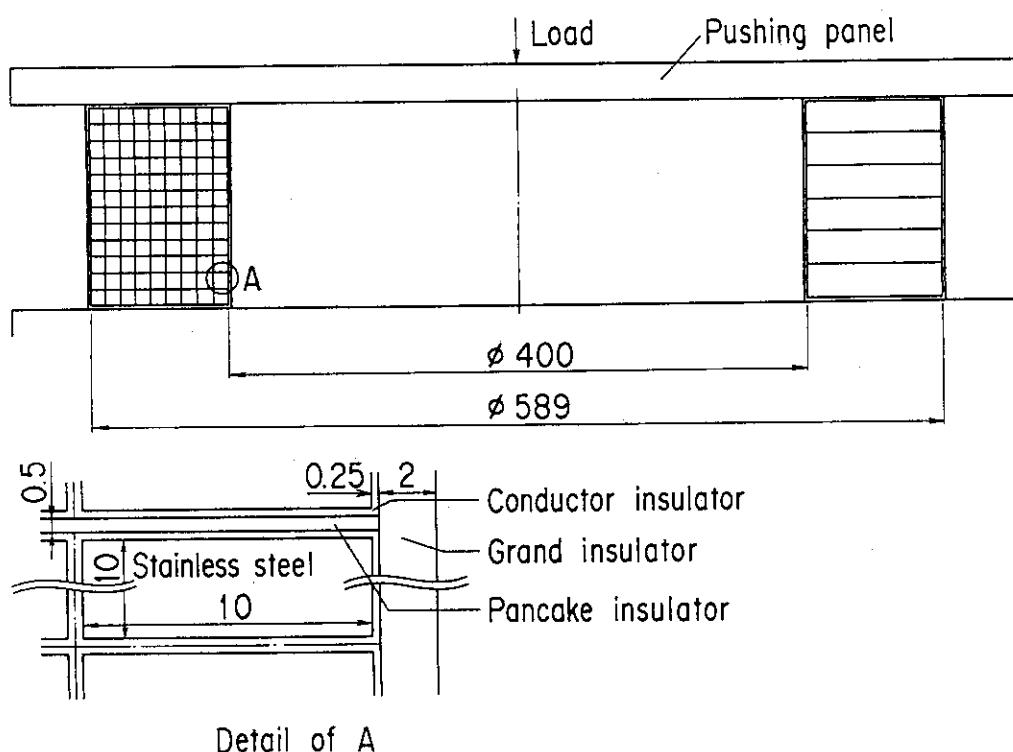


Fig. 4.1 Schematic diagram of the axial rigidity measurement

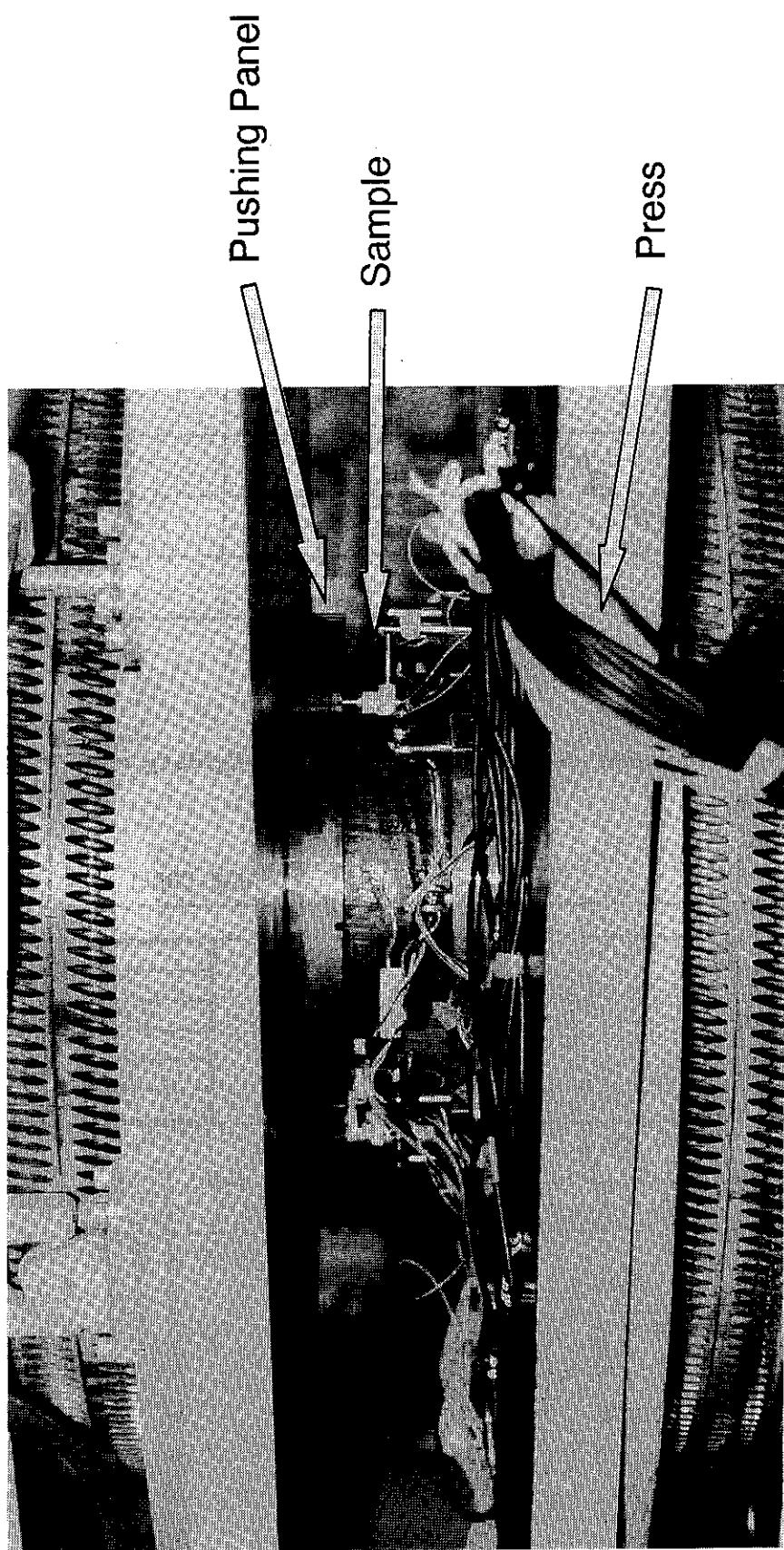


Fig. 4.2 The pancake winding sample compressed by 30 MN press

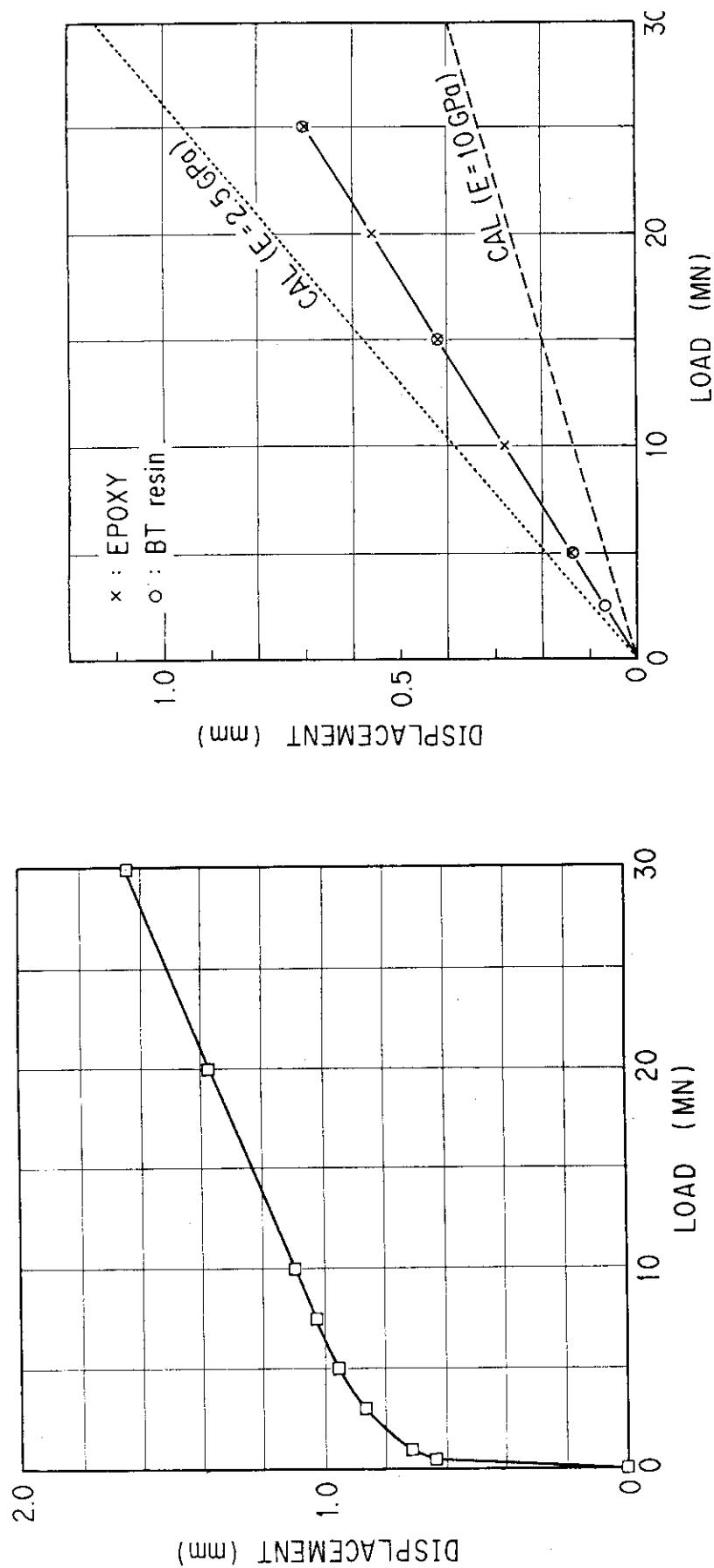


Fig. 4.3 Original load-displacement curve at the compressed pancake winding sample

Fig. 4.4 Modified load-displacement curve at the compressed pancake winding sample

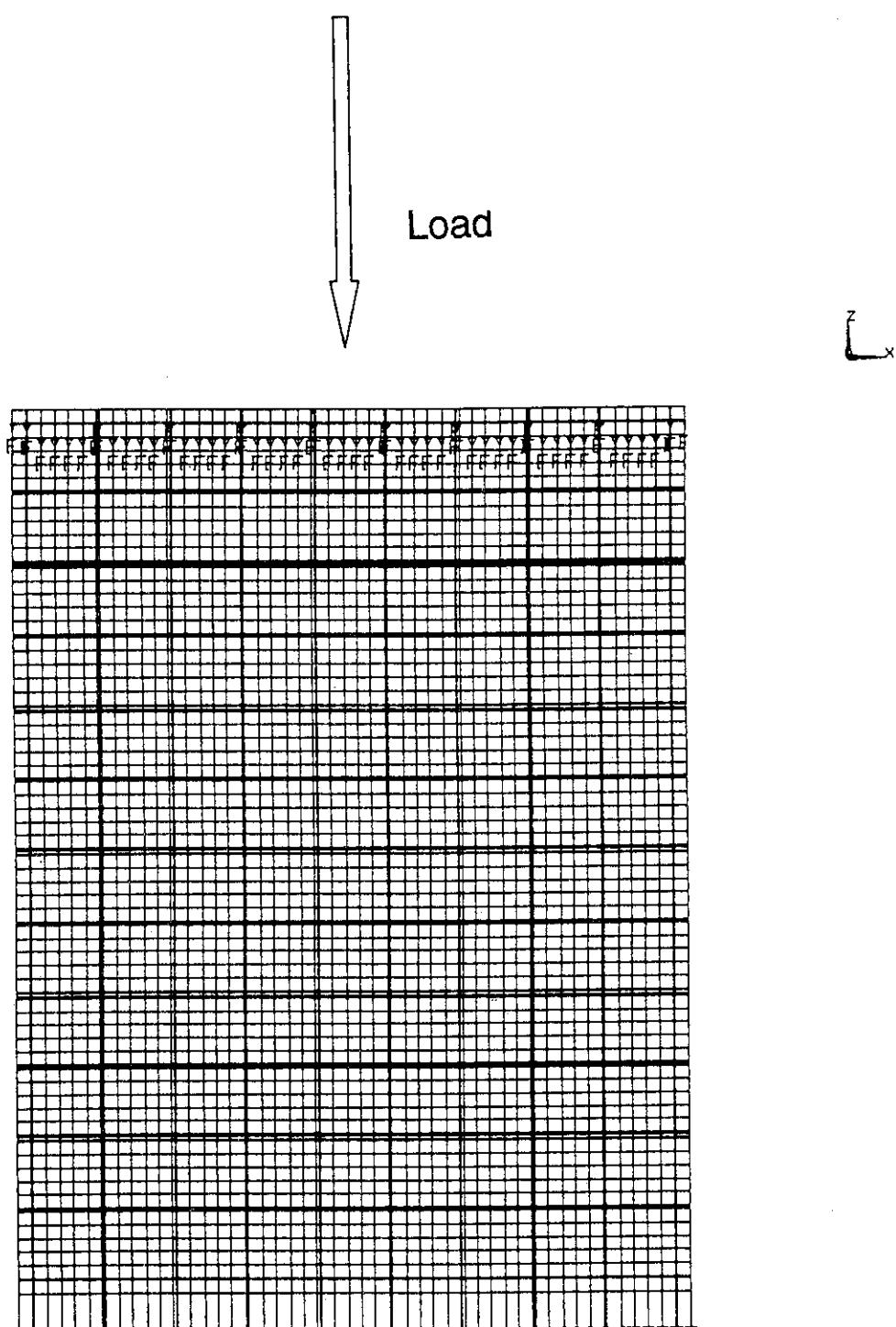


Fig. 4.5 Restricted FEM model of the compressed pancake winding sample

付 錄

計測プログラムの取扱い方法およびプログラムリストを以下に示す。

U C A M リモートソフトの取扱方法

本ソフトは R S 2 3 2 C インターフェースを用いて、 P C 9 8 0 1 より U C A M の制御、データの集録を行うものである。

1、 U C A M を使う前に

- (1) U C A M のディップスイッチの設定が合っているか確認して下さい。
- (2) データ用フロッピディスク (F D) を準備して下さい。但し、データ用 F D にファイルが無いとソフトが動作しないので、新品 F D 等の場合何かファイルを作成下さい。

2、 U C A M リモートソフトの立ち上げ

- (1) データ用 F D のセット
ドライブ " B : " にデータ用 F D をセットする。
- (2) 実行コマンドの入力

3、 U C A M リモートソフトの流れ

- (1) ファイル名の設定
- (2) メニュー選択

[1=UCAM Init]

UCAMにて計測する時、最初のゼロ点を設定する場合に"1"を選択する。

[2=FD Set]

UCAMにて計測したデータを書き込むファイル名を変更する場合に"2"を選択する。

[3=Modify]

UCAMにて計測する時のパラメータ (run No. 等) を変更する場合に"3"を選択する。

[9=End]

UCAMの計測を終了した時、"9"を選択する。最後のデータを破壊しないように終了時は必ず"9"を入力すること。

[CR=Measure]

計測時にリターンキーを押す。

注意点

a、 1、 2、 3、 9 キー以外すべて計測モードとなる。

b、 1回目のデータを計測する場合、"UCAM Init"モードを実行し、その後"FD Set"モードにてファイル名を変更すること。

c、 REV516を使用している場合、計測する毎に"FD Set"モードにてファイル名を変更すること。

4、 メニュー画面の詳細

- (1) [1=UCAM Init]
- (2) [3=Modify]

a、 "1:RUN No."

RUN No. は変更されない限り不变である。デフォルトは"000"。

b、 "2:TEST No."

TEST No. は " UCAM Init" または " Measure" を行う毎にインクリメントされる。従って、次回の " UCAM Init" または " Measure" 時の TEST No. は、表示されている値に + 1 した値となる。但し、変更した時は、新たに入力した値が次回の " UCAM Init" または " Measure" 時の TEST No. となる。デフォルトは " 0 0 0" 。

c、 " 3:CHANNEL"

6 桁の数字を入力する。上 3 けたは計測開始チャンネルを表し、下 3 けたは計測終了チャンネルを表す。

d、 " 4:SET1"

0 0 0 チャンネルから 0 0 9 チャンネルまでの測定点モードの設定を行う。従って、1 0 0 チャンネル以降を使用する場合は設定不要。

e、 " 5:CONSTANT"

定数の設定。ON の場合 " ON" を入力し、OFF の場合は " OFF" を入力する。

f、 " 6:PRINTER"

プリントの設定。ON の場合 " ON" を入力し、OFF の場合は " OFF" を入力する。

g、 " 7:INTERVAL"

インターバルの設定。ON の場合 " ON" を入力し、OFF の場合は " OFF" を入力する。

h、 " 8:TIMES"

" UCAM Init" または " Measure" を実行時何回繰り返すかを設定する。デフォルトは " 0 1" 。

i、 " 12:Rest Floppy"

FD の空き領域がこれ以下になると交換を指示する容量を設定する。

j、 " 14:measure Mode"

" UCAM Init" または " Measure" をワンショット実行するか、一定周期で実行するかを選択する。

k、 " 15:Printer Mode"

" UCAM Init" または " Measure" を実行後、データのプリンター出力方法を設定する。

0 : プリンターへの出力は無し。

1 : データを常にプリンターへ出力する。

2 : プリンターへ出力するかどうか尋ねる。

(3) [CR=Measure]

リターンキーを押すと計測が開始され、計測終了時に画面にデータが表示される。

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 1

```

1: ' file name = rev516.bas '92-1-13
2:
3: DECLARE SUB FDchange ()
4: DECLARE SUB ComOpen ()
5: DECLARE SUB SampleTime ()
6: DECLARE SUB Cmdset ()
7: DECLARE SUB Pause ()
8: DECLARE SUB UcamInit ()
9: DECLARE SUB Measure (c$)
10: DECLARE SUB CmdOut (c$)
11: DECLARE SUB Ending ()
12: DECLARE SUB Swait (t)
13: DECLARE FUNCTION DSKF! (fd$)
14: DECLARE SUB FDSet (c$)
15: DECLARE SUB CmdIn (c$)
16: DECLARE SUB CRTOut ()
17: DECLARE SUB FDWrite ()
18: DECLARE SUB LPOut ()
19: DECLARE SUB PortOpen ()
20: DECLARE SUB Modify ()
21: DECLARE SUB Title ()
22: DECLARE SUB SETSAMP ()
23: DECLARE SUB ClearCRT ()
24: DECLARE SUB CCHKW (chk!)
25:
26: ' QREV.BAS:
27: ' Quick Basic version for UCAM controll
28: ' 11/3/90 K. Yoshida
29:
30: '----Array-----
31: DIM ch(300) : chnnel
32: DIM dat(300) : data
33: DIM er(300) : err
34: DIM d$(300) : UCUM out pout data ASCII
35: DIM dechk$(300) : data check
36: DIM ch$(300) : channel
37: DIM dat$(300) : data
38: DIM er$(300) : err
39: DIM cmd$(15) : UCAM command
40: DIM ki$(15) : initial command set
41: DIM ks$(15) : UCAM initial Command
42: DIM us$(15) : user seting data
43: DIM icnt(15) AS INTEGER : user control data
44:
45: icnt(0): debug 0:no, 1:debug (not used:'92-1)
46: icnt(1): rest of volume of floppy disk
47: icnt(2): CRT Mode: 0:one page, 1:all display (not used:'92-1)
48: icnt(3): measurement mode 0:single, 1:auto measure
49: icnt(4): Printer Mode; 0:No print, 1:All Print, 2:Ask
50: icnt(5): Multi Plan Mode 0:No ,1:Yes (not used:'92-1)
51:
52: DIM konst(10) AS INTEGER
53:
54: konst(0): Total number of data input
55: konst(1): sample time interbal
56: konst(2): flag of Ucam unit
57:
58:
59: DIM strcnst$(10)
60:
61: strcnst$(0): head
62: strcnst$(1): head1
63: strcnst$(2): dnum
64: strcnst$(3): memo
65: strcnst$(4): Data file name

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 2

```

66: strcnst$(5): Multi Plan file name
67:
68: TYPE RegType
69:   AX AS INTEGER
70:   BX AS INTEGER
71:   CX AS INTEGER
72:   DX AS INTEGER
73:   BP AS INTEGER
74:   SI AS INTEGER
75:   DI AS INTEGER
76:   FLAGS AS INTEGER
77:   DS AS INTEGER
78:   ES AS INTEGER
79: END TYPE
80:
81: ---- initial set ---
82:
83:  icnt(0) = 0           : debug      :not used
84:  icnt(1) = 10          : rest of volume of floppy disk (kB)
85:  icnt(2) = 1           : CRT mode    :not used
86:  icnt(3) = 0           : measurement mode :single
87:  icnt(4) = 2           : printer mode :Ask
88:  konst(2) = 0
89:
90: ---- UCAM INITIAL SET -----
91:
92:  ki$(1) = "MEM0000000"   : Remote message: memo
93:  ki$(2) = "X"            : Remote message: exc
94:  ki$(3) = "TN00"         : Remote message: test No. 0
95:  ki$(4) = "CHR"          : Remote message: channel, repeate
96:  ki$(5) = "01"
97:  ki$(6) = "SET1"         : Remote message: set
98:  ki$(7) = "XD009X"
99:  ki$(8) = "C"
100:  ki$(9) = "P"
101:  ki$(10) = "I"
102:  ki$(11) = "O"
103:
104:  us$(1) = "000"          : RUN No.     :000
105:  us$(2) = "000"          : TEST No.    :000
106:  us$(3) = "100120"       : SAMPLING CHANNEL :100-120
107:  us$(4) = "07"
108:  us$(5) = "ON"
109:  us$(6) = "OF"
110:  us$(7) = "OF"
111:  us$(8) = ki$(5)
112:
113:
114: ---- Main flow control --
115:
116: WIDTH 80, 25
117: WIDTH LPRINT 124
118: COLOR 7
119: CALL Cmdset
120: CALL Title
121: CALL FDSet(cond$)
122: IF cond$ = "n" THEN STOP
123:
124: CALL UcamInit
125:
126: -- Mode selection Menu
127:
128:
129:
130: DO

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 3

```

131:      CALL ClearCRT
132:      LOCATE 21, 1
133:      PRINT " [MENU]1=UCAM Init, 2=FD Set, 3=Modify, 9=End, CR=Measure "
134:      modified '92-1-16
135:      LOCATE 23, 55: PRINT " FILE NAME: "; strenst$(4)
136:      LOCATE 23, 35: PRINT " DISK AREA: "; DSKF("B:"); "KB"
137:
138:      LOCATE 22, 1: INPUT " => "; menu
139:      SELECT CASE menu
140:          CASE 1
141:              CALL Measure("INT,STA")      ' initial start
142:          CASE 2
143:              CALL FDSet(cond$)
144:              IF cond$ = "n" THEN LOCATE 24, 1: PRINT "FD No Change!"
145:          CASE 3
146:              CALL Modify
147:              IF konst(2) = 1 THEN
148:                  CALL Cmdset
149:                  CALL UcamInit
150:                  konst(2) = 0
151:              END IF
152:          CASE 9
153:              CALL Ending
154:          CASE ELSE
155:              CALL Measure("MES,STA")      ' measure start
156:      END SELECT
157:  LOOP
158: END
159:
160:
161: ----
162: ' Clear Command line
163:
164: SUB ClearCRT
165:     LOCATE 21, 1: PRINT "
166:     LOCATE 22, 1: PRINT "
167:     LOCATE 23, 1: PRINT "
168:     LOCATE 24, 1: PRINT "
169: END SUB
170:
171:
172: ' read data from UCAM
173:
174: SUB CmdIn (cnt$)
175:     SHARED ch$(), dat$(), dechk$(), us$(), d$(), er$(), er(), ch(), dat()
176:     SHARED konst() AS INTEGER, strenst$()
177:     OUT &H32, &H17
178:     idn = 0
179:     LINE INPUT #1, head$           ' reading header
180:     strenst$(1) = MID$(head$, 1, 16)    ' head data: year, month, day, hour, min
181:     strenst$(2) = MID$(head$, 22, 3)    ' head data: TEST No.
182:     strenst$(3) = MID$(head$, 33, 3)    ' head data: RUN No.
183:     strenst$(0) = head$
184:     strenst$(1) = head1$
185:     strenst$(2) = dnum$
186:     strenst$(3) = memo$
187:     nuc = VAL(MID$(us$(3), 4, 3)) - VAL(MID$(us$(3), 1, 3)) + 1 ' Channel No.
188: DO
189:     idn = idn + 1
190:     LINE INPUT #1, d$(idn)
191:     CALL ClearCRT

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 4

```

192:   er(idn) = VAL(MID$(d$(idn), 1, 2))      ' Read error code
193:   ch(idn) = VAL(MID$(d$(idn), 4, 3))      ' Read CH No.
194:   dat(idn) = VAL(MID$(d$(idn), 8, 8))      ' Read measured data
195:   er$(idn) = MID$(d$(idn), 1, 2)
196:   ch$(idn) = MID$(d$(idn), 4, 3)
197:   dat$(idn) = MID$(d$(idn), 8, 8)
198:   dechk$(idn) = MID$(d$(idn), 20, 1)        ' Read end code
199: LOCATE 22, 1: PRINT " Check :"; er(idn), idn
200: IF dechk$(idn) = "1" THEN EXIT DO
201: IF dechk$(idn) = "2" THEN CALL CmdIn(cnt$)
202: LOOP WHILE idn < nuc AND dechk$(idn) = "0"
203:   cnt$ = dechk$(idn)
204:   konst(0) = idn
205:   LOCATE 21, 1: PRINT " End of data sampling. Number : "; idn
206:
207: ' modified '92-1-14
208:   us$(1) = strcnst$(3)
209:   us$(2) = strcnst$(2)
210:
211: END SUB
212:
213:
214: ' write to UCAM
215:
216: SUB CmdOut (ot$)
217:   OUT &H32, &H37
218:   FOR i = 1 TO 2000: NEXT i
219:   PRINT #1, ot$
220:   FOR i = 1 TO 2000: NEXT i
221:   OUT &H32, &H17
222: END SUB
223:
224: SUB Cmdset
225:   SHARED ki$(), us$(), ks$()
226:   ks$(1) = ki$(1) + us$(1) + ki$(2)          ' Remote message: MEM+Run No.+X
227:   ks$(2) = ki$(3) + us$(2) + ki$(2)          ' Remote message: TNO+Test No.+X
228:   ks$(3) = ki$(4) + us$(3) + us$(8) + ki$(2) ' Remote message: CHR+(First CH+Last C
H)+times+X
229:   ks$(4) = ki$(6) + us$(4) + ki$(7)          ' Remote message: SET+mode 1+CH
230:   ks$(5) = ki$(8) + us$(5)          ' Remote message: const ON or OFF
231:   ks$(6) = ki$(9) + us$(6)          ' Remote message: print ON or OFF
232:   ks$(7) = ki$(10) + us$(7)         ' Remote message: interval ON or OFF
233: END SUB
234:
235:
236: ' COM1: PORT OPEN
237:
238: SUB ComOpen
239:   SHARED konst() AS INTEGER
240:   CLOSE #1
241:   OPEN "COM1:1200,N,8,1,DS0,CS0" FOR RANDOM AS #1
242:   DO
243:     IF LOC(1) = 0 THEN EXIT DO
244:     X$ = INPUT$(1, #1)
245:   LOOP
246:   konst(2) = 0
247: END SUB
248:
249:
250: ' Wite data to CRT
251:
252: SUB CRTOut
253:   SHARED ch$(), dat$(), dechk$(), konst() AS INTEGER, strcnst$()
254:   page = 1
255:   j0 = 1

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 5

```

256: DO
257:   offset = 6
258:   jn = 50 * page
259:   LOCATE 1, 10: PRINT "***** UCAM SAMPLING DATA LIST *****"
260:   LOCATE 3, 48: PRINT " Date,Time: "; strcnst$(1)
261:   LOCATE 3, 26: PRINT " TEST No. : "; strcnst$(2)
262:   LOCATE 2, 26: PRINT " RUN No. : "; strcnst$(3)
263:   LOCATE 4, 1: PRINT "-----"
264:   LOCATE 5, 1: PRINT "      CH.     VALUE      CH.     VALUE      CH.     VALUE      CH
265:   .       VALUE      : COLOR 7
266:   FOR i = j0 TO jn STEP 4
267:     LOCATE , 1: PRINT USING "    & & &      &"; ch$(i); dat$(i)
268:     IF dechk$(i) = "1" THEN EXIT FOR
269:     LOCATE offset, 21: PRINT USING "    & & &      &"; ch$(i + 1); dat$(i + 1)
270:     IF dechk$(i + 1) = "1" THEN EXIT FOR
271:     LOCATE offset, 39: PRINT USING "    & & &      &"; ch$(i + 2); dat$(i + 2)
272:     IF dechk$(i + 2) = "1" THEN EXIT FOR
273:     LOCATE offset, 57: PRINT USING "    & & &      &"; ch$(i + 3); dat$(i + 3)
274:     IF dechk$(i + 3) = "1" THEN EXIT FOR
275:     offset = offset + 1
276:   NEXT i
277:   LOCATE 19, 1: PRINT "-----"
278:   IF konst(0) <= 50 OR konst(0) <= jn THEN
279:     EXIT SUB
280:   END IF
281:   LOCATE 23, 1: INPUT " Continue ? <y>"; i$
282:   IF i$ <> "y" THEN
283:     CALL ClearCRT
284:     EXIT SUB
285:   END IF
286:   page = page + 1
287:   j0 = jn
288:   CLS
289:   LOOP
290: END SUB
291:
292: FUNCTION DSKF (fd$)
293:
294:   DIM inregs AS RegType, outregs AS RegType
295:   inregs.AX = &H3600
296:   inregs.DX = &H2
297:
298:   CALL DOSCALL(inregs, outregs)
299:   DSKF = outregs.BX
300: END FUNCTION
301:
302: SUB Ending
303:   CLOSE #1
304:   CLOSE #2
305:   PRINT " End of REV"
306:   PRINT " Bye Bye, Good bye! "
307:
308:   STOP
309: END SUB
310:
311:
312:   CHANGE DISK
313:
314: SUB FDchange
315:   DO
316:     CLS
317:     PRINT " "

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 6

```

318: PRINT " NO Space in Floppy. Change FD "
319: PRINT " Set Formatted Floppy Disk ON B: DRIVE "
320: PRINT "
321: LOCATE 21, 1: INPUT " OK? [y/n] > "; i$
322: LOOP UNTIL i$ = "y"
323: END SUB
324:
325: ' Floppy Disk Seting
326:
327:
328: SUB FDSet (cond$)
329:   SHARED icnt() AS INTEGER, strcnst }()
330:   IF DSKF("B:") <= icnt(1) THEN
331:     CALL FDchange
332:   END IF
333:   CLS
334:   LOCATE 1, 1
335:   PRINT " ---- FILE LIST ----- "
336:   PRINT
337:   PRINT
338:   FILES "B:"
339: DO
340:   CALL ClearCRT
341:   LOCATE 21, 1: PRINT " File name < 8 cha."
342:   LOCATE 22, 1: INPUT " ==>"; fd$
343:   DO
344:     LOCATE 21, 1: INPUT " Are you sure [y/n] > "; i$
345:     IF i$ = "y" OR i$ = "n" THEN EXIT DO
346:     BEEP
347:   LOOP
348:   LOOP WHILE fd$ = strcnst$(4)
349:   IF i$ = "n" THEN
350:     cond$ = "n"
351:     EXIT SUB
352:   END IF
353:   strcnst$(4) = fd$
354:   CLOSE #2
355:   OPEN "B:" + fd$ FOR OUTPUT AS #2
356:   cond$ = "y"
357:   CLS
358: END SUB
359:
360:
361: ' Write data to Flopy Disk (B:)
362:
363: SUB FDWrite
364:   SHARED d$(), strcnst$(), konst() AS INTEGER
365:   IF DSKF("B:") <= restvol THEN
366:     LOCATE 21, 1: PRINT "**ERROR: NO Space in FD"
367:     CALL FDchange
368:   END IF
369:   CLOSE #2
370:   OPEN "B:" + strcnst$(4) FOR OUTPUT AS #2
371:   WRITE #2, strcnst$(0)
372:   FOR i = 1 TO konst(0)
373:     WRITE #2, d$(i)
374:   NEXT i
375:   LOCATE 21, 50: PRINT " FILE NAME : "; strcnst$(4)
376:   LOCATE 22, 50: PRINT " DISK AREA : "; DSKF("B:"); "KB"
377: END SUB
378:
379:
380: ' LPOUT
381:
382: SUB LPOut

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 7

```

383:      SHARED ch(), dat(), dechk$(), icnt() AS INTEGER, konst() AS INTEGER
384:      SHARED strenst$()
385:
386:      SELECT CASE icnt(4)
387:      CASE 0
388:          EXIT SUB
389:      CASE 2
390:          DO
391:              CALL ClearCRT
392:              LOCATE 21, 1: PRINT " Print out ? <y/n> "
393:              LOCATE 22, 1: INPUT " ==>"; i$
394:              IF i$ = "y" THEN EXIT DO
395:              IF i$ = "n" THEN EXIT SUB
396:              BEEP
397:          LOOP
398:      CASE ELSE
399:      END SELECT
400:
401:
402:      LPRINT "***** UCAM SAMPLING DATA LIST *****"
403:      LPRINT " Date,Time:"; strenst$(1)
404:      LPRINT " Test No. :" ; strenst$(2)
405:      LPRINT " Run No. :" ; strenst$(3)
406:      LPRINT " -----"
407:      LPRINT "     CH.      VALUE    ERR      CH.      VALUE    ERR      CH.      VALUE
408:      ERR      CH.      VALUE    ERR
409:      FOR i = 1 TO konst(0) STEP 4
410:          LPRINT USING "     (###) #####.## [& &]" ; ch(i); dat(i); dechk$(i);
411:          IF dechk$(i) = "1" THEN EXIT FOR
412:          LPRINT USING "     (###) #####.## [& &]" ; ch(i + 1); dat(i + 1); dechk$(i +
1);
413:          IF dechk$(i + 1) = "1" THEN EXIT FOR
414:          LPRINT USING "     (###) #####.## [& &]" ; ch(i + 2); dat(i + 2); dechk$(i +
2);
415:          IF dechk$(i + 2) = "1" THEN EXIT FOR
416:          LPRINT USING "     (###) #####.## [& &]" ; ch(i + 3); dat(i + 3); dechk$(i +
3);
417:          IF dechk$(i + 3) = "1" THEN EXIT FOR
418:          NEXT i
419:          LPRINT "-----"
420:          LPRINT
421:      END SUB
422:
423:
424:      ' Mesurement routine
425:
426:      SUB Measure (ot$)
427:          SHARED ch(), dat(), ks$()
428:          SHARED icnt() AS INTEGER
429:
430:          -- Waiting Next hours
431:
432:          IF icnt(3) = 1 THEN CALL SampleTime
433:
434:          ***** PC ==> UCAM < COMMAND SEND >*****
435:
436:          CALL CmdOut(ot$)
437:          CALL ClearCRT
438:          LOCATE 21, 1: PRINT "* Please wait a minute !! "
439:          LOCATE 22, 1: PRINT "Command :"; ot$
440:
441:

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 8

```

442: ***** UCAM =====> PC < DATA INPUT > *****
443:
444:      DO
445:          CALL CmdIn(cnt$)
446:          CALL FDWrite
447:          LOOP WHILE cnt$ = "2"
448:          CLOSE #2
449:          CALL CRTOut
450:          CALL LPOut
451:
452: END SUB
453:
454: ' FModify Constant
455:
456:
457: SUB Modify
458:     SHARED us$(), konst() AS INTEGER, icnt() AS INTEGER
459:     DO
460:         CLS
461:         PRINT " Modify Condition "
462:         PRINT " UCAM           User Set"
463:         PRINT ""
464:         PRINT "   1: RUN No. : "; us$(1), " 11: Debug      : "; icnt(0), "(Not us
ed)"
465:         PRINT "   2: TEST No. : "; us$(2), " 12: Rest of Floppy: "; icnt(1); "kB"
466:         PRINT "   3: CHANNEL : "; us$(3), " 13: CRT mode    : "; icnt(2), "(Not us
ed)"
467:         PRINT "   4: SET1      : "; us$(4), " 14: measure Mode : "; icnt(3)
468:         PRINT "   5: CONSTANT  : "; us$(5), " (0:Single, 1:Auto measure)"
469:         PRINT "   6: PRINTER   : "; us$(6), " 15: Printer Mode : "; icnt(4)
470:         PRINT "   7: INTERVAL  : "; us$(7), " (0:No print, 1:All print, 2:Ask)"
471:         PRINT "   8: TIMES     : "; us$(8)
472:         PRINT "                   99:end "
473:
474:         CALL ClearCRT
475:         LOCATE 21, 1: INPUT " PLEASE SELECT NUMBER  "; n
476:         SELECT CASE n
477:             CASE 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
478:                 konst(2) = 1
479:                 LOCATE 22, 1: INPUT "Charcter > "; ans$
480:                 us$(n) = ans$
481:             CASE 11, 12, 13, 14, 15
482:                 LOCATE 22, 1: INPUT "Integer > "; i
483:                 icnt(n - 11) = i
484:             CASE 99
485:                 EXIT DO
486:             CASE ELSE
487:                 PRINT "**ERROR"
488:         END SELECT
489:     LOOP
490:
491:     IF icnt(3) = 1 THEN CALL SampleTime
492:
493:     DO
494:         CALL ClearCRT
495:         LOCATE 21, 1: INPUT "Are you OK? [y/n] > "; i$
496:         IF i$ = "y" OR i$ = "n" THEN EXIT DO
497:         BEEP
498:     LOOP
499:     IF i$ = "y" OR i$ = "Y" THEN
500:         CLS
501:         EXIT SUB
502:     END IF
503:     CALL Modify
504: END SUB

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 9

```

505:
506: ' Pause
507: SUB Pause
508:
509:   LOCATE 23, 1
510:   PRINT "Pause: Hit Any Key";
511:   DO
512:   LOOP WHILE INKEY$ = ""
513: END SUB
514:
515: ' Set Sample Time
516:
517: SUB SampleTime
518:   SHARED konst() AS INTEGER
519:   CALL ClearCRT
520:   LOCATE 21, 1: PRINT " Sampling Time (hour)"
521:   LOCATE 22, 1: INPUT "====>"; spt
522:   DO
523:     LOCATE 21, 1: PRINT "Sampling Time:"; spt; " hr "
524:     LOCATE 22, 1: INPUT "[y] or [n] "; i$
525:     IF i$ <> "y" AND i$ <> "n" THEN EXIT DO
526:   LOOP
527:   IF i$ = "n" THEN CALL SampleTime
528:   konst(1) = spt
529: END SUB
530:
531: ' Smpling Waiting
532:
533: SUB SampleWait
534:   SHARED konst() AS INTEGER
535:   STATIC oldhh
536:   COLOR 7: LOCATE 21, 1: PRINT " sampling;" ; konst(1); " hour"
537:   DO
538:     t$ = TIME$
539:     hh = VAL(LEFT$(t$, 2))
540:     mm = VAL(MIDS$(t$, 4, 2))
541:     LOCATE 22, 1: PRINT " Sampling waite !!    "; t$
542:     IF hh = oldhh THEN mm = 1
543:   LOOP UNTIL hh MOD konst(1) = 0 AND mm = 0
544:   oldhh = hh
545:   LOCATE 23, 1: PRINT " Sampling time ;"; t$
546: END SUB
547:
548:
549: ' Swait(): second wait
550:
551: SUB Swait (t)
552:   FOR i = 1 TO t
553:     FOR j = 1 TO 5000
554:       FOR j = 1 TO 50      '98n
555:         A = 1.23 * 1.23
556:       NEXT j
557:     NEXT i
558: END SUB
559:
560: ' Title of Ucam system
561:
562:
563: SUB Title
564:   CLS
565:   LOCATE 5, 15: PRINT "*****"
566:   LOCATE 6, 15: PRINT "*          *"
567:   LOCATE 7, 15: PRINT "*          UCAM Data Sampling Program      *"
568:   LOCATE 8, 15: PRINT "*          *          *"
569:   LOCATE 9, 15: PRINT "*          Rev. Q.1.0          *"

```

Jun 29 1992 19:14 filename : D:\UCAM\REV516.BAS

Page 10

```
570: LOCATE 10, 15: PRINT "*"
571: LOCATE 11, 15: PRINT "*      Produced by M. Sato (1989.3.7)      *"
572: LOCATE 12, 15: PRINT "*      Revised by K. Yoshida (1990.11.4)      *"
573: LOCATE 13, 15: PRINT "*****"
574: CALL Swait(3)
575: END SUB
576:
577: SUB UcamInit
578:   SHARED ks$()
579:
580:   -- PORT INITIAL
581:
582:   CALL ComOpen
583:
584:   -- SEND SETTING DATA
585:
586:   LOCATE 21, 1: PRINT "* Please wait a minute !! ": COLOR 7
587:   LOCATE 22, 1: PRINT "* SEND SETTING DATA ": COLOR 7
588:   FOR j = 1 TO 7
589:     CALL CmdOut(ks$(j))
590:     LOCATE 23, 1: PRINT "Command :"; ks$(j)
591:   NEXT j
592: END SUB
593:
```