

JAERI-Tech

JP0350026

2002-082



超音波式伝熱管肉厚測定装置の開発
(受託研究)

2003年1月

大場 敏弘・末次 秀彦*・矢野 昌也*・
加藤 千明・柳原 隆夫

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

超音波式伝熱管肉厚測定装置の開発 (受託研究)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
大場 敏弘⁺・末次 秀彦^{*}・矢野 昌也^{*}・加藤 千明・柳原 隆夫

(2002年 8月30日受理)

日本原子力研究所では、文部科学省からの受託研究として「再処理施設新材料耐食安全性実証試験」を実施した。この試験においては、六ヶ所再処理施設の主要機器の一つである酸回収蒸発缶の小型モックアップ試験体を用いた実証試験を進めてきた。

この実証試験では、モックアップ試験体構造の一部である伝熱管の伝熱面腐食に対する内表面の腐食減肉の状態を知るために、伝熱管の肉厚を非破壊で高精度に測定できる超音波水浸法を利用した肉厚測定装置の開発を行った。

本装置は、小型モックアップ試験体の加熱部を架台に据え付け、その架台の上部に配置した超音波探触子駆動装置と一体をなす、サンプリングアセンブリの先端に取付けた超音波探触子をサンプリングアセンブリごと伝熱管内に挿入して、これらを自動または手動によって軸方向上下移動および周方向旋回を制御し、伝熱管各測定部の肉厚を連続的に測定して、データレコーダ等に収録する装置である。

開発した装置で得られた肉厚測定結果は、伝熱管を短冊に輪切りにして光学系の読み取り顕微鏡で測定した肉厚と非常に良い一致を示し、本装置の測定精度の高いことが確認できた。

報告書は、本装置の仕様および性能等についてまとめたものである。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託研究として日本原子力研究所が実施した「再処理施設新材料耐食安全性実証試験」の成果の一部としてまとめたものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

⁺ 工務技術室

^{*} 住友化学工業（株）

Development of Ultrasonic Heat Transfer Tube Thickness Measurement Apparatus
(Contract Research)

Toshihiro OHBA⁺, Hidehiko SUETUGU^{*}, Masaya YANO^{*}, Chiaki KATOH and
Takao YANAGIHARA

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 30, 2002)

The demonstration test for evaluating reliability of the acid recovery evaporator at Rokkasho Reprocessing Plant has been carried out at JAERI.

For the nondestructive measurement of the thickness of heat transfer tubes of the acid recovery evaporator in corrosion test, we have developed thickness measurement apparatus for heat transfer tubes by ultrasonic immersion method with high resolution. The ultrasonic probe in a heat transfer tube can be moved vertically and radially.

The results obtained by this apparatus coincident well with those obtained by a destructive method using an optical microscope.

Keywords: Ultrasonic Thickness Measurement, Acid Recovery Evaporator,
Reprocessing Plant, Immersion Method, Heat Transfer Tube,
Demonstration Test, Mock-up Test Facility

This research is sponsored by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology under contract of the demonstration tests for evaluating reliability of new materials used in spent fuel reprocessing plant.

+ Division of Engineering Service

* Sumitomo Chemical Co., Ltd

目 次

1. 概 要	1
2. 超音波探触子の選定	1
2. 1 鋼球を使用した探触子の性能試験	1
2. 2 伝熱管仕様材を使用した探触子の性能試験	2
2. 3 肉厚測定精度の確認	2
3. 機器の構成と仕様	2
3. 1 制御駆動部の構造および仕様性能	3
3. 1. 1 昇降・旋回機構	3
3. 1. 2 X-Yテーブル	3
3. 1. 3 制御盤	4
3. 2 超音波肉厚計測部およびデータ収録部	4
4. 肉厚測定試験	5
4. 1 肉厚測定装置の校正	5
4. 2 肉厚測定の準備と方法	6
4. 3 制御装置の操作手順	6
4. 4 操作上の注意事項	7
5. 伝熱管の肉厚測定結果	7
6. まとめ	8
謝 辞	8
参考文献	9

C o n t e n t s

1. Introduction	1
2. Selection of Ultrasonic-probe	1
2.1 Performance Test of Ultrasonic-probe using Steel Balls	1
2.2 Performance Test of Ultrasonic-probe using Heat Transfer Tubes	2
2.3 Confirmation of Measurement Accuracy for Tube Thickness	2
3. Components of Equipment and Specification	2
3.1 Structure and Specification of Control-driving Unit	3
3.1.1 Going Up and Down, and Rotation Mechanism	3
3.1.2 X-Y Table	3
3.1.3 Control Unit	4
3.2 Monitor Unit of Ultrasonic Measurement and Data Collection Unit	4
4. Test of Thickness Measurement	5
4.1 Calibration of Thickness Measurement Equipment	5
4.2 Preparation and Method of Tube Thickness Measurement	6
4.3 Procedure of Controlling Unit	6
4.4 Special Attention for Measurement	7
5. Results of the Heat Transfer Tubes	7
6. Summary	8
Acknowledgement	8
References	9

1. 概 要

本装置は、酸回収蒸発缶の小型モックアップ試験体の加熱部構造の一部である、伝熱管の内部腐食による減肉の状態を知ることを目的として、伝熱管内に水を張り、その中に超音波探触子を挿入する超音波水浸探傷法によって、肉厚を測定する装置として開発を行った。

超音波による肉厚測定の方法は、架台に据え付けられた酸回収蒸発缶加熱部の架台上部に超音波探触子の制御駆動機構を配置して、この駆動機構に組み込まれたサンプリングアセンブリの先端に配備された水浸探傷用超音波探触子を、サンプリングアセンブリごと水張りした伝熱管の垂直上方向から挿入して肉厚を測定する方法である。

装置の特長は、超音波探触子を配置した長尺のサンプリングアセンブリを伝熱管の垂直上部方向から、手動によって軸合わせを行い、その後は測定ポイントの設定を行った後に、周連続測定または軸連続測定ボタンを押すことによって、伝熱管の計測位置を検索して肉厚測定を自動で行える装置である。

さらにサンプリングアセンブリ先端の探触子ホルダの外周には、スペーサを兼ねたゴム製のガイドを配置して伝熱管内壁の損傷と超音波ビームの芯ずれ防止構造を持たせている。また、この測定方法では、探触子の前方に配置した反射鏡によって超音波ビームを 90° 屈折させて方向変換し、伝熱管の内壁に垂直に超音波を入射させる構造を採用したことである。

2. 超音波探触子の選定

伝熱管の減肉を精度良く測定するためには、使用する超音波厚さ計と対をなす超音波探触子（以下では探触子と言う）の選定が重要な要素となる。

一般に水浸法による管の肉厚測定では、受信感度が高い点収束型探触子がよく使用される。この場合、探触子が管壁面に対して傾いたり偏芯した状態では、主ビームの反射波が探触子にもどる確率が低くなり、これに伴って受信感度の低下をまねくことが予想されるほか、受信波形が変化して、測定精度に悪影響を及ぼすことも考えられる。

そこで、使用する超音波厚さ計（パナメトリクス社製）とのマッチングを考慮して、以下に示す同社製の探触子3種類について性能観察を行った。

(1) 2インチ点収束型 (M312A 10/0.25 F2" OLF)

(2) 3インチ点収束型 (M312A 10/0.25 F3" OLF)

(3) フラット型 (M312A 10/0.25)

2.1 鋼球を使用した探触子の性能試験

検討事項として、水槽中における鋼球をターゲットとした各探触子の受信感度、波形状況の観

察を行った。

その結果、フラット型探触子は点収束型探触子に比べて、探触子が鋼球の中心軸に多少偏芯した場合においても、受信感度が高く波形の乱れも少ない良好な結果を示した。

計測方法としては、いずれの探触子についても第1回底面反射(B_1)エコーと、第2回底面反射(B_2)エコーの間にモード変換した底面反射エコーが観察されたために、このモード変換エコーによる計測への悪影響を排除する目的から、表面反射(S)エコーと第1回底面反射(B_1)エコーを使用することとした。

2.2 伝熱管仕様材を使用した探触子の性能試験

実際の探傷方法を模擬して、伝熱管仕様材を用いた管内面からの肉厚測定を行った。

測定の項目は、探触子と伝熱管までの水距離の違いによるエコー高さの変化、波形状況、探触子による妨害エコーの発生状況等についての確認である。

測定の結果、受信感度は2インチ点収束型探触子で最も高く、続いてフラット型、3インチ点収束型の順となり、波形状態は鋼球を使用した場合と同様にフラット型探触子の場合が最も良好であり、妨害エコーも観察されなかった。

以上2項目の測定結果から、伝熱管の肉厚測定に用いる探触子は、フラット型探触子を採用することとした。また、伝熱管と探触子間の設定水距離は、波形の状態が最も良好であった25mmに設定することにした。

2.3 肉厚測定精度の確認

肉厚の測定は、上述の性能観察で最も良好な結果を示したフラット型探触子を使用して、実際の肉厚測定を模擬した方法で、伝熱管仕様材の新管と、腐食試験に使用した短冊の試験管について実施した。

肉厚の測定精度は超音波で測定した肉厚と、測定後にこれらの管材を軸方向に半割りにして、ポイントマイクロメータで測定した同一箇所の肉厚を比較した。表1に肉厚測定結果を示す。

この結果によると、マイクロメータで測定した肉厚の実測値と、超音波による肉厚の測定差は最大値で0.06mmであり、この伝熱管中を伝わる超音波の音速が $5660 \pm 50\text{m/s}$ で $\pm 0.9\%$ の誤差（肉厚測定では0.05mmに対応）が許容されることから判断して、ほぼ良好な測定精度であると考えられる。

3. 機器の構成と仕様

装置の主要構成は、超音波肉厚計測・データ収録部および制御・駆動機構部の2部分から構成されている。

図1に本測定装置の機器構成図を示すとともに、以下では使用した各構成機器と、その仕様性能を記述する。さらに、図2では駆動測定機構部の詳細な構造図を示すとともに、図3ではサンプリングアセンブリの先端に取り付けた探触子ホルダーの伝熱管内における配置概況を示す。

3.1 制御駆動部の構造および仕様性能

3.1.1 昇降・旋回機構

サンプリングアセンブリの伝熱管内での昇降・旋回動作は、自動および手動運転が可能であり通常の伝熱管内へのサンプリングアセンブリの挿入は遠隔手動操作で実施し、挿入後は自動運転で行う。

サンプリングアセンブリの昇降速度は、200mm/s(最大トルク領域で300mm/s)であり、旋回速度は、0.25rps(最大トルク領域で1.3rps)である。昇降および旋回の駆動機構は、それぞれに配置したサーボモータを動力源として精密位置決め運転が行われる。

昇降位置決めは、サンプリングアセンブリの信号ラインの定点通過時に位置データとの比較によって決定される。またサンプリングアセンブリの昇降動作は、昇降旋回装置の上部に配置された昇降機構により駆動され、その上下にはリミットセンサーを配置して、移動範囲を制限する構造となっている。

旋回動作は、 $-45^\circ \sim 405^\circ$ の範囲で行われ、周連続測定時には1つのポイントの周方向測定完了後に、サンプリングアセンブリを軸方向に移動させる際に回転角をもとに戻して($405^\circ \rightarrow -45^\circ$)、次のポイントの測定を行う方法である。また旋回位置の確認は、アブソリュートエンコーダ(12bit)のデータと位置データを比較して行われる。以下に使用している機器とその仕様を示す。

(1) 昇降用モータ : ダイレクトドライブモータ(NSK)

昇降分解能は $0.6 \mu\text{m}$ (計算値) $121.5\pi / 614400$ であり、昇降精度の誤差要因としては駆動チェーンの伸びが考えられる。

(2) 旋回用モータ : ダイレクトドライブモータ(NSK)

旋回分解能は 0.000586° (計算値) $360^\circ / 614400$

(3) 昇降ガイド : スピーディーロール(SKF)

有効ストローク5000mm(ジャバラ無し、保管時に給油)

旋回モータ保持用2本、バランスウェイト用1本

(4) 昇降用チェーン : #40スプロケット30T

(5) ブレーキ : 昇降動作用ブレーキ、旋回用は無し

3.1.2 X-Yテーブル

伝熱管中心へ内挿するサンプリングアセンブリの位置決め時には、エアーチャックでサンプリングアセンブリを保持した後に、遠隔手動操作によってX-Yテーブルを移動させ芯合わせを行う。移動速度は最大11.6mm/sであり、機器の仕様は下記に示す通りである。

(1) 電動機 : ブレーキ付きギヤモートル0.2kW 1/25 (日精工業)

(2) LMガイド : HSR25ジャバラ付き (THK)

(3) ポールネジ : BTK2510-5.3ジャバラ付き (THK)

3.1.3 制御盤

制御盤の操作部には液晶表示のタッチパネルとスイッチおよび押しボタンが配置され、各種表示と自動運転および手動運転の操作が任意に行える機能を保持している。また盤内には動力部として駆動モータのドライバ開閉器があり、制御部のPLC（プログラムロジックコントローラ）がタッチパネルとの通信、昇降・旋回機構のコントロールおよび計測装置の運転制御、記録計への位置情報の提供機能を有している。

- (1) 電 源 : 三相AC 200V
- (2) PLC : オムロン製CPU、DC入力電源、トランジスタ出力、位置制御ユニット、D/Aユニットにより構成されている。
 - a) 位置制御ユニット：サーボモータ2台をデジタル制御
 - b) D/Aユニット：旋回位置に比例したアナログ信号で出力し、原点確認治具を使用して原点校正時に超音波測定データと昇降・旋回駆動の位置ずれが確認できる。
- (3) タッチパネル : オムロン製の液晶タイプ
 - a) 昇降位置制御 : 0.1mm単位で表示
 - b) 旋回位置制御 : 0.1° 単位で表示
 - c) 設定機能 : 昇降・旋回速度の任意変更、測定点の選択、原点位置確認運転の操作を行う。

3.2 超音波肉厚計測部およびデータ収録部

機器の構成は図1に示した通り、肉厚計測のための超音波厚さ計、探触子、超音波の波形観察のためのオシロスコープ、厚みを記録するためのチャートレコーダおよびデータレコーダ、不要なノイズを除くためのノイズカットフィルターから構成されている。以下に使用した構成機器を示すが、その仕様性能については総て既製品であり、本報告書の記載について割愛する。

- (1) 超音波厚さ計 : Model 5215 [DUAL AGC] (パナメトリクス社製)
- (2) 探触子 : M312A(10MHz/0.25) フラット型 (パナメトリクス社製)
: M310A (5MHz/0.25) フラット型 (パナメトリクス社製)

※ 探触子は主にM310A(5MHz/0.25)を使用し、M312Aはバックアップ用として使用する。
- (3) オシロスコープ : TDS-3104 (ソニーテクトロニクス社製)
- (4) チャートレコーダ : RT2108A (日本電気三栄社製)
- (5) データレコーダ : DR-M3a (ティアック社製)
- (6) フィルター : FV664 (NF社製)
- (7) デジタルマルチメータ : (東陽テクニカ社製)

4. 肉厚測定試験

4.1 肉厚測定装置の校正

肉厚測定前の使用機器の接続は、図1の機器構成図に示す通りである。以下に各機器の調整手順と方法を示す。

(1) 探触子の位置調整

図3に示すように探触子をサンプリングアセンブリの先端に配置した探触子ホルダに取り付けて、伝熱管内壁までのビーム距離を25mmに設定する。

(2) 超音波厚さ計の校正

まず最初に超音波厚さ計Model 5215を以下に示したレンジに設定する。

- * CHANNEL : 2
- * パルスエネルギー : Hi
- * ECHO POLARITY INT : +
- * ECHO POLARITY BACK : -
- * 測定モード : モード2

超音波厚さ計の表示部とオシロスコープのCRTの波形を観察しながら以下の校正を行う。

- a) まず、図5に示す肉厚校正用試験管(T-T-TP1)の4.84t部にプローブを設定し、オシロスコープを観察しながら、図6の超音波厚さ計Model 5215のゲート調整方法に示すように、超音波厚さ計のMBB・BAF・ECHOWINDOWつまみで、ゲート範囲の調整を行う。感度の調整は、表面エコー(S)と底面エコー(B)の波形ができるだけ鮮明になるように超音波厚さ計のMain Gain・TDG Gain・TDG Slopeを調整する。

MBBは、送信パルスから表面エコーの前までがゲート範囲に入るよう、BAFは、表面エコー(S)から第一底面エコー(B₁)の前までがゲートにかかるよう、ECHO WINDOWは、表面エコーから第二底面エコー(B₂)の後までがゲートにかかるように調整する。

- b) 以上のゲート調整後、さらに超音波厚さ計の厚さ表示が4.84tとなるようにANALOG基盤内のつまみと前面パネルのVELOCITYつまみを調整する。
- c) 次にT-T-TP1の3.54t部に探触子を設定し、超音波厚さ計の厚み表示が3.54tとなるようにANALOG基板内のつまみと前面パネルのVELOCITYつまみで調整する。この調整で表示値が不安定であったり、値が得られない場合には、BAFつまみの再調整を行う。
- d) 以上の表示値の調整を繰り返し行い、肉厚が真値(マイクロメータによる測定値)に対して±0.00 mmになるように正確に校正を行う。さらに、T-T-TP1の3.84t部、3.54tおよび2.99t部に探触子を設定して、厚み計の表示値が各々の厚みに対して±0.02mm以内となるように校正する。(±0.00mmを目標とする)

(3) FILTERの調整

- a) 電源をONとし、CONTROLのLOCALとLOCKスイッチを同時に押して、キーロックを解除する。
- b) FREQ SETスイッチでCH-Aを選択する。

- c) RANGE スイッチで0.1~159.9Hzを選択する。
 - d) DIGIT スイッチとFREQつまみで周波数を50Hzにする。
 - e) CH-AのFUN スイッチをMFにする。
- (4) チャートレコーダの調整
- a) CHART SPEED は原則として5mm/s とする。
 - b) SAMPLE SPEED/SHOT はCONTとする。
 - c) フルスケールは1/1 とする。
 - d) FORMはWAVEとする。
 - e) 使用チャンネルの割り振りおよび感度の設定は原則として以下のとおりとする。

1 CH : 肉厚測定信号 Position 3 1V(20目盛りで1.0mm に設定)

6 CH : 検査駆動装置からの信号 Position 3 50V

7 CH : LOSS OF SIGNAL Position 0 100V(1V×100)

- (5) データレコーダの接続

1 CH : 肉厚測定データ

2 CH : 探触子の位置信号（周）、レベル位置信号（軸）

4.2 肉厚測定の準備と方法

(1) 準備作業

- a) 機器の校正後、探触子を検査駆動装置のサンプリングアセンブリ先端の探触子ホルダに取り付ける。
- b) 伝熱管の上部まで水を注入する。
- c) 伝熱管内にサンプリングアセンブリを挿入し、駆動装置および肉厚測定系が正常に動作するか確認する。
- d) 周方向および軸方向の肉厚連続測定は伝熱管の下部から上部に向かって行う。
- e) 連続測定の探傷速度は、軸連続測定で20mm/s、周連続測定で30° /sで行う。この測定におけるチャートレコーダの記録速度は軸連続測定、周連続測定共に5mm/sに設定する。

4.3 制御装置の操作手順

a) 制御電源の投入

制御盤の漏電ブレーカ [ELB1] とノーヒューズブレーカ[NFB1]をONとする。

b) 原点出し

①制御盤内のコントロールスイッチを「手動」にする。

②「原点出し完了」スイッチを押し、サンプリングアセンブリの原点合わせを行う。ここで原点出し完了ランプが点灯すれば原点調整が完了する。

c) 原点位置の確認

①原点確認用治具を取り付け、遠隔手動操作盤の東西南北ボタンを押して、超音波探触子が原点確認用治具の中心に来るようX-Yテーブルを移動調整する。

②遠隔手動操作により、探触子を取付けた探触子ホルダーを原点確認用治具の中に挿入する。

ウ)制御盤内の液晶モニタを原点確認画面にして、原点位置確認ボタンを押す。

原点補正が必要な場合は、昇降、旋回原点補正画面を呼出して補正を行う。

d) 測定手順

- ア)遠隔手動操作ボックスの[東西南北／上下]スイッチで、探触子をセットしたサンプリングアセンブリを伝熱管位置の指示プレートを使用して、測定対象の伝熱管の真上に移動させる。
- イ)次に上述のスイッチの[下]ボタンを押して、サンプリングアセンブリを手でガイドしながらレベル0位置まで下降させる。

e) 軸連続測定の操作手順

- ア)[手動／切／自動]スイッチを自動に設定する。
- イ)ステップツイスト正転・逆転ボタンを押して、測定角度を合わせる。
- ウ)コントロールパネルの上下方向自動計測運転ボタンを押す。
- エ)測定角度位置の肉厚を測定する。この後は、この操作を繰り返し行い、それぞれの肉厚を測定する。

f) 周連続測定の操作手順

- ア)[手動／切／自動]スイッチを自動に設定する。
- イ)液晶モニタ画面の円周フル測定ボタンを押す。
- ウ)肉厚計測終了後には、[手動／切／自動]スイッチを手動にして、遠隔手動操作ボックスの[東西南北／上下]スイッチの上ボタンを押して、サンプリングアセンブリを伝熱管から引き抜く。

4.4 操作上の注意事項

- ア)サンプリングアセンブリの伝熱管への挿入は、伝熱管の軸中心に探触子が合致していることを確認しながら低速度で下降させる。
- イ)伝熱管に注入される水は、肉厚測定に悪影響を及ぼす気泡やごみが無いように注意する。
- ウ)連続測定中は、S エコーおよび B₁ エコーをよく観察して、S エコーが校正時と比較してゲート検出レベル限界近くまで低下した場合は、S エコーが充分な高さとなる感度で再校正を行ってから再び測定を行う。

5. 伝熱管の肉厚測定結果

小型モックアップ試験において、硝酸環境で腐食試験を行った実機規模の伝熱管7本について本肉厚測定装置による肉厚測定を実施した。伝熱管の肉厚測定実施箇所については、図7に示す通り、軸連続測定では90°間隔で4軸の測定を行い。周連続測定では、上部管板面を基点として、200mm間隔に23周の測定を行った。図8にはそれぞれの伝熱管の周測定チャートを示すとともに、図9には軸測定チャートを示す。

上記の肉厚測定後に、伝熱管の腐食減肉の状態を顕微鏡で観察するために、伝熱管を実証試験体から引き抜き、超音波で肉厚測定を実施した箇所を短冊に切断して、顕微鏡観察を行った試料

について光学系の読み取り顕微鏡による肉厚測定を行った。

これらの異なる測定法による肉厚測定結果を図10に示す。図から判るように本測定装置による肉厚測定結果は、光学系の読み取り顕微鏡による測定値と非常に良く一致することが確認された。

6. まとめ

内面が硝酸溶液で腐食浸食された、実機の構造を模擬した小型モデル試験体の一部である長尺伝熱管の肉厚を管の内面から非破壊で測定するために、超音波水浸法を利用した肉厚測定装置を開発した。そして、本装置の制御精度を確認するとともに、肉厚測定精度については光学系の読み取り顕微鏡による測定方法と比較し、以下のようにまとめられた。

- (1) 本装置の軸方向および周方向の制御精度は、所期の研究目的に十分適合できる精度である。
- (2) サンプリングセンブリの先端に取り付けた探触子ホルダは、伝熱管の内面を傷付けること無く、精密な上下移動、旋回動作が可能である。また、ホルダに組み込まれた探触子から発信された超音波ビームについては伝熱管に正確に入射されることが確認された。
- (3) 伝熱管内面からの超音波水浸法による肉厚測定では、点収束型探触子よりもフラット型探触子のほうが受信感度および波形状況ともに良好である。
- (4) 本肉厚測定装置で測定した肉厚は、腐食浸食された伝熱管の内表面の状態により部分的に過大な値を示すことも稀にあるが、全体的に非常に良い測定精度である。

謝　　辞

本報告書の作成にあたり、落合政昭エネルギーシステム研究部長ならびに奥武雄工務・技術室長より励ましとご指導を賜った。また報告書の内容については、木内清耐食材料研究グループリーダーおよび武山友憲工作技術グループリーダーから、有益なご意見と多くのご配慮を頂いた。さらに、肉厚測定装置の開発に当たっては、関係者各位に多大なご協力を頂いた。ここに記して謹んで感謝の意を表します。

参考文献

(1) 平成9年度「再処理施設新材料耐食安全性実証試験」に関する成果報告

(2) (社)日本非破壊検査協会、新非破壊検査便覧 (1992)

(3) 大場、柳原、加藤、濱田: JAERI-Tech 2001-059 超音波式肉厚自動測定装置の製作
(2001)

表1 超音波肉厚測定精度の検討結果

測定精度の検討対象箇所	設計値 [mm]	測定差 [mm]				探触子	
		最大	最小	平均	標準偏差		
加熱部伝熱管	4.5	新管 A	0.02	-0.04	0.00	0.02	M312A 10/0.25
		新管 B	0.01	-0.04	-0.01	0.01	
		腐食管 A-1 腐食の著しい部位	0.06 0.04	0.00 -0.02	0.02 0.01	0.01 0.02	
		腐食管 A-2 上記以外の部位	0.04 0.03	0.00 -0.02	0.02 0.00	0.01 0.01	

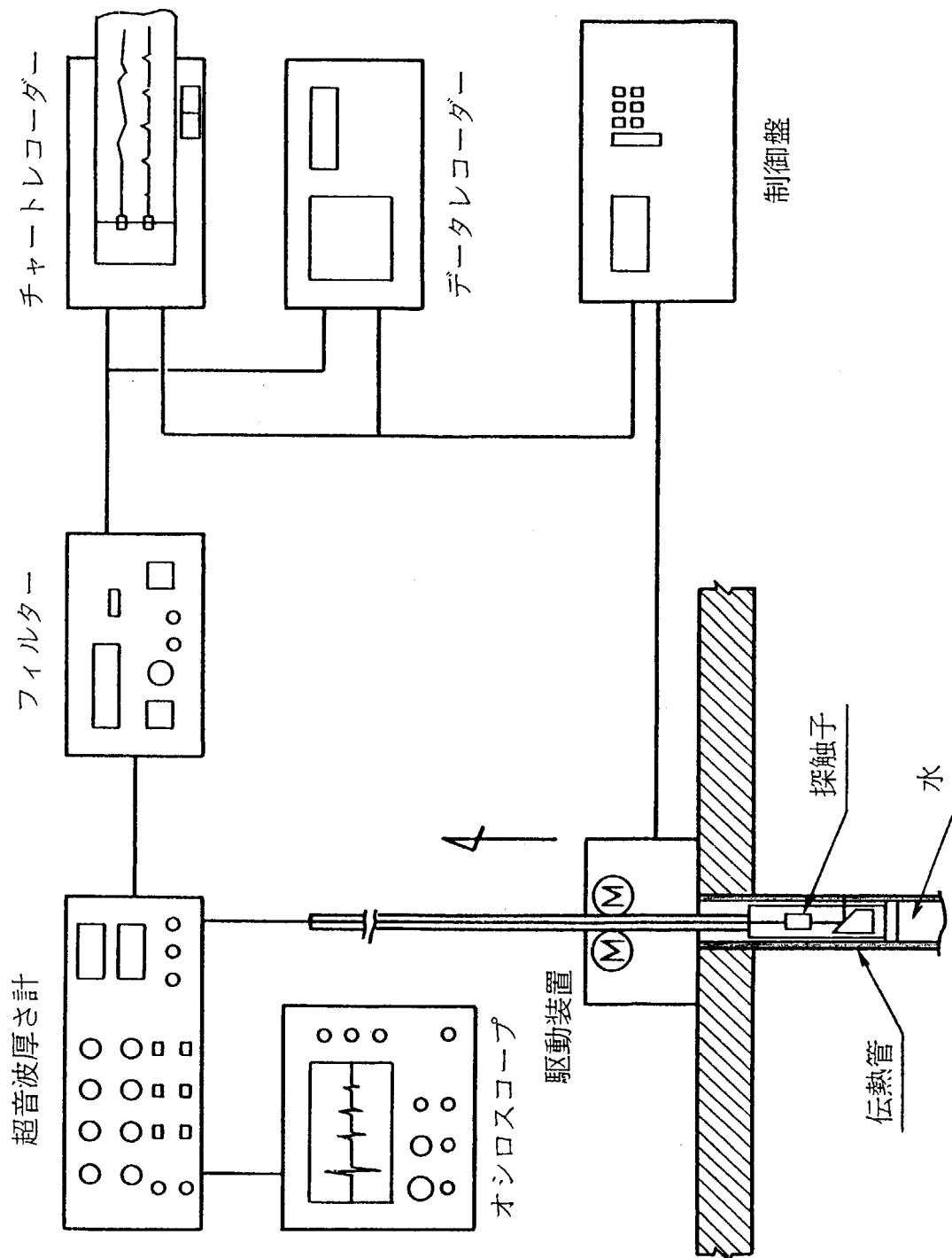


図1 伝熱管肉厚測定装置の機器構成図

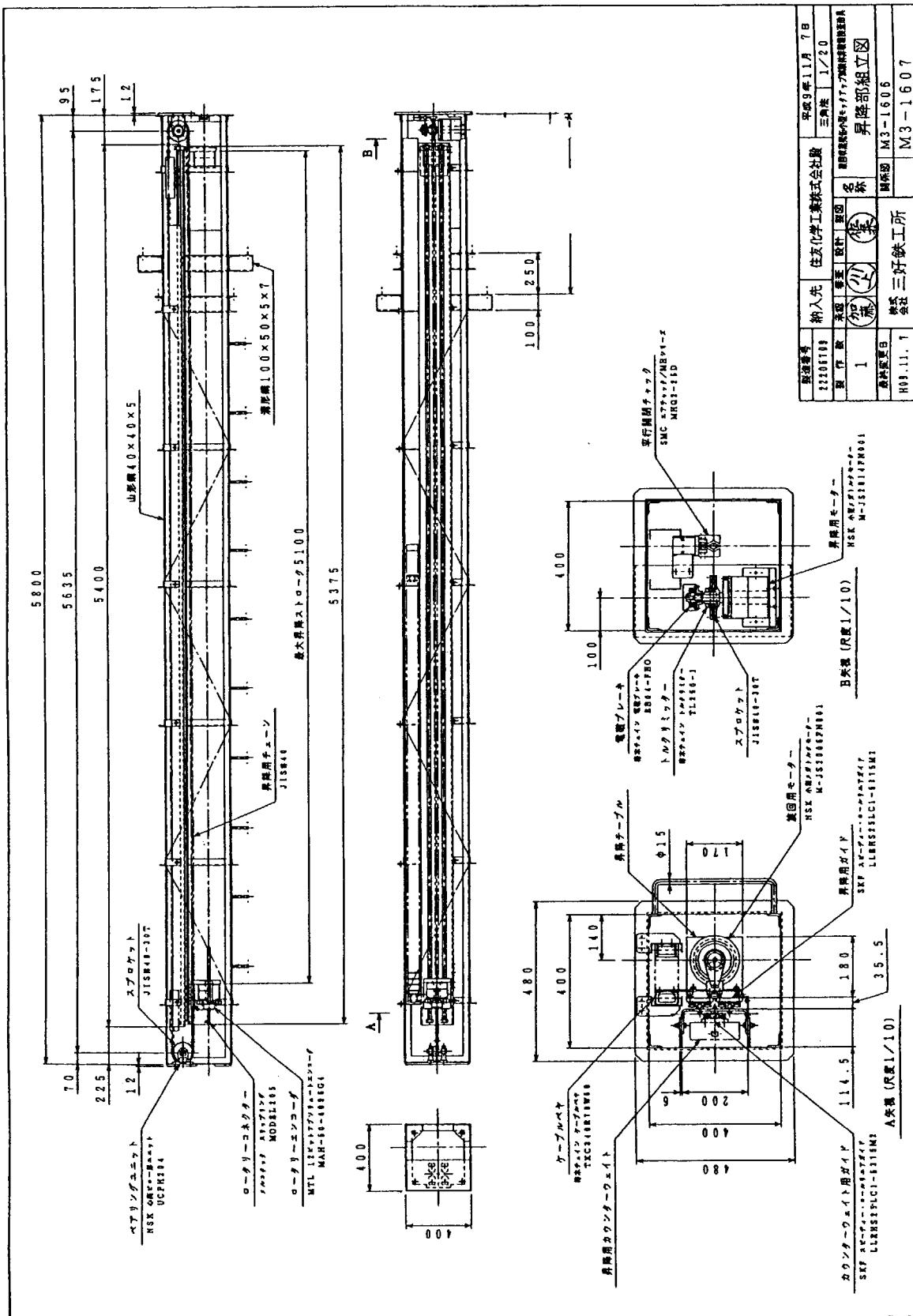


図2-1 驚動測定機構の組立

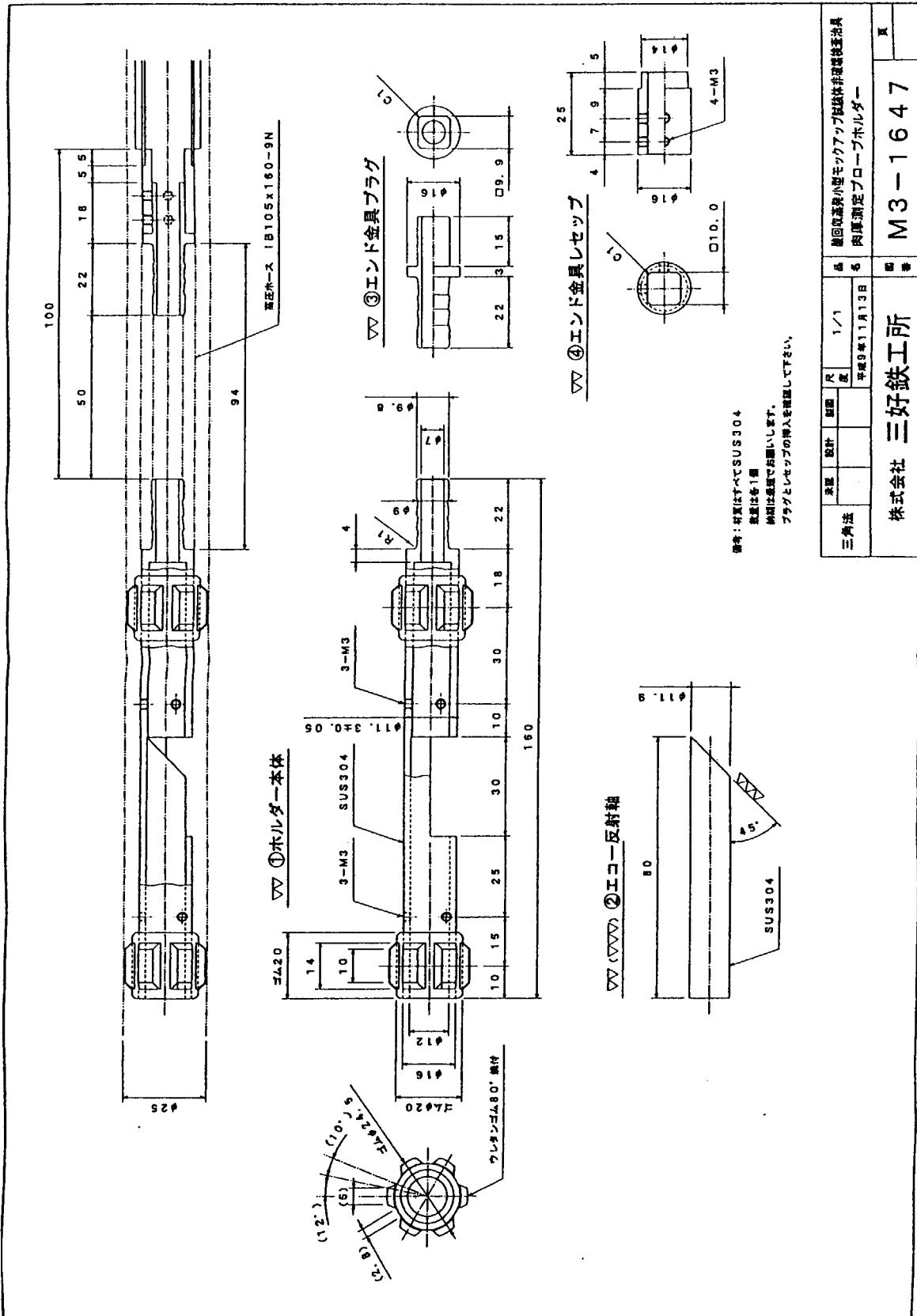


図2-2 探触子ホルダ一詳細図

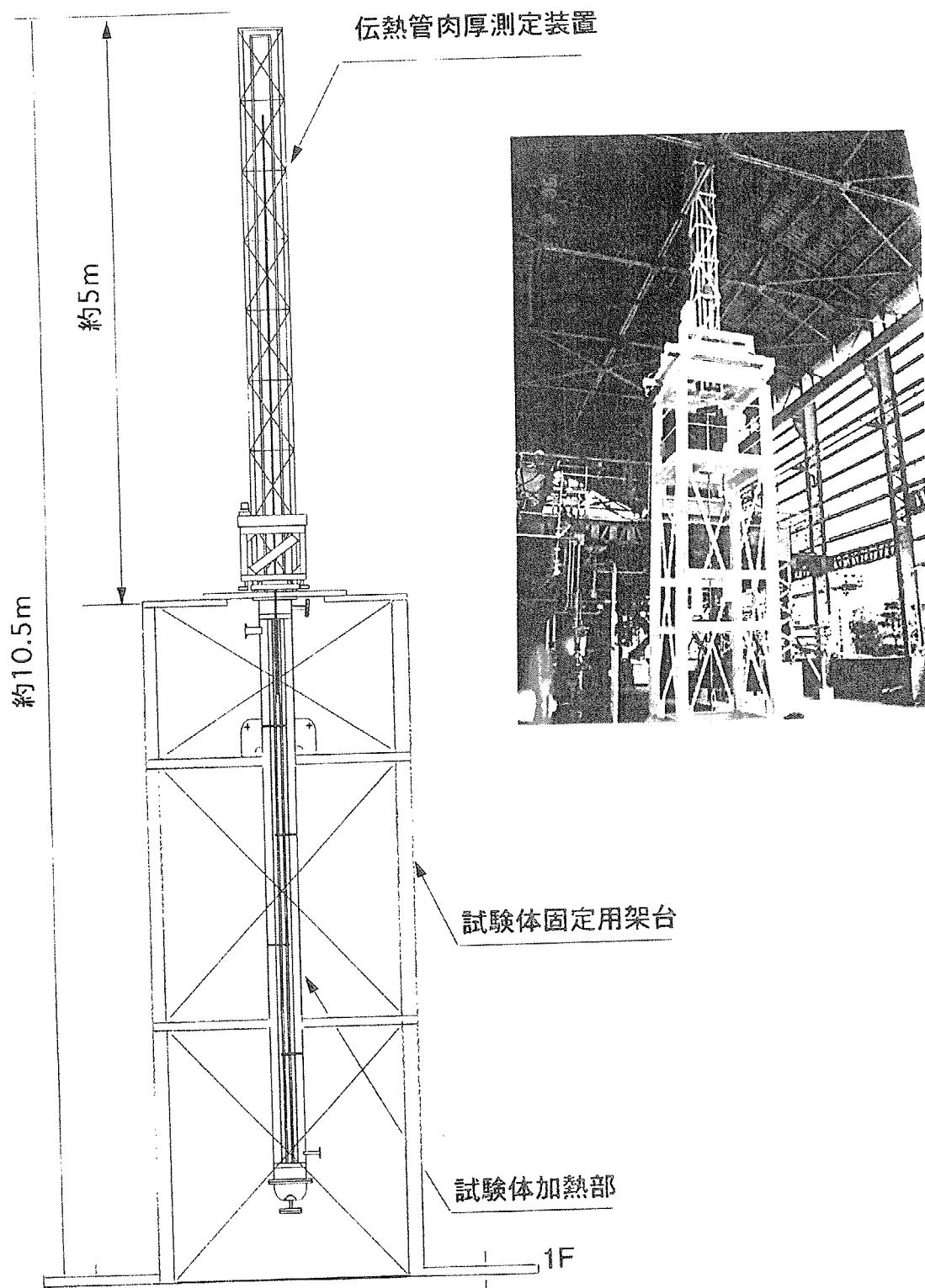
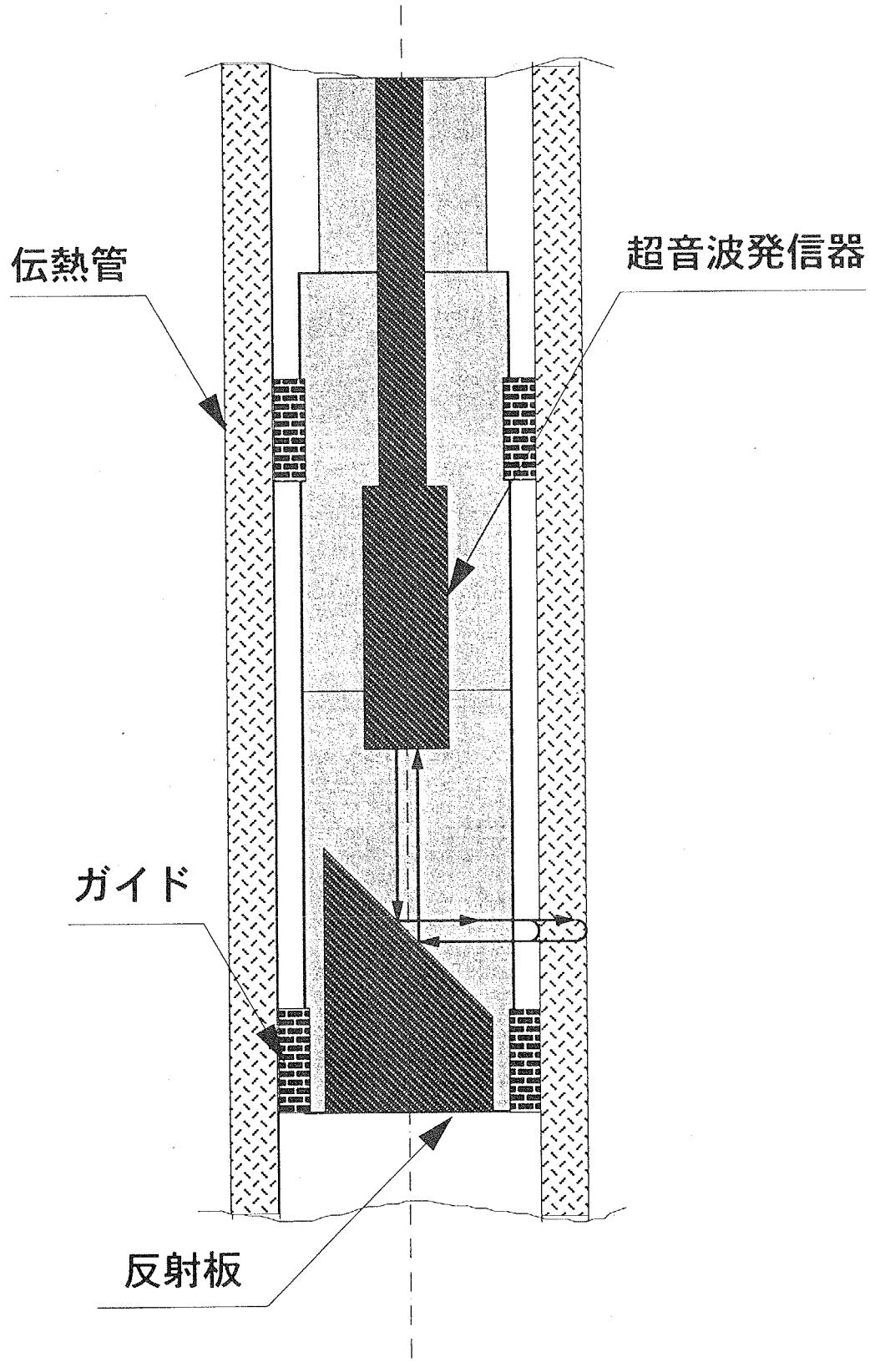


図2-3 駆動測定機構の立面図

This is a blank page.



※伝熱管内は水で満たされる

図3 伝熱管肉厚測定原理概略図

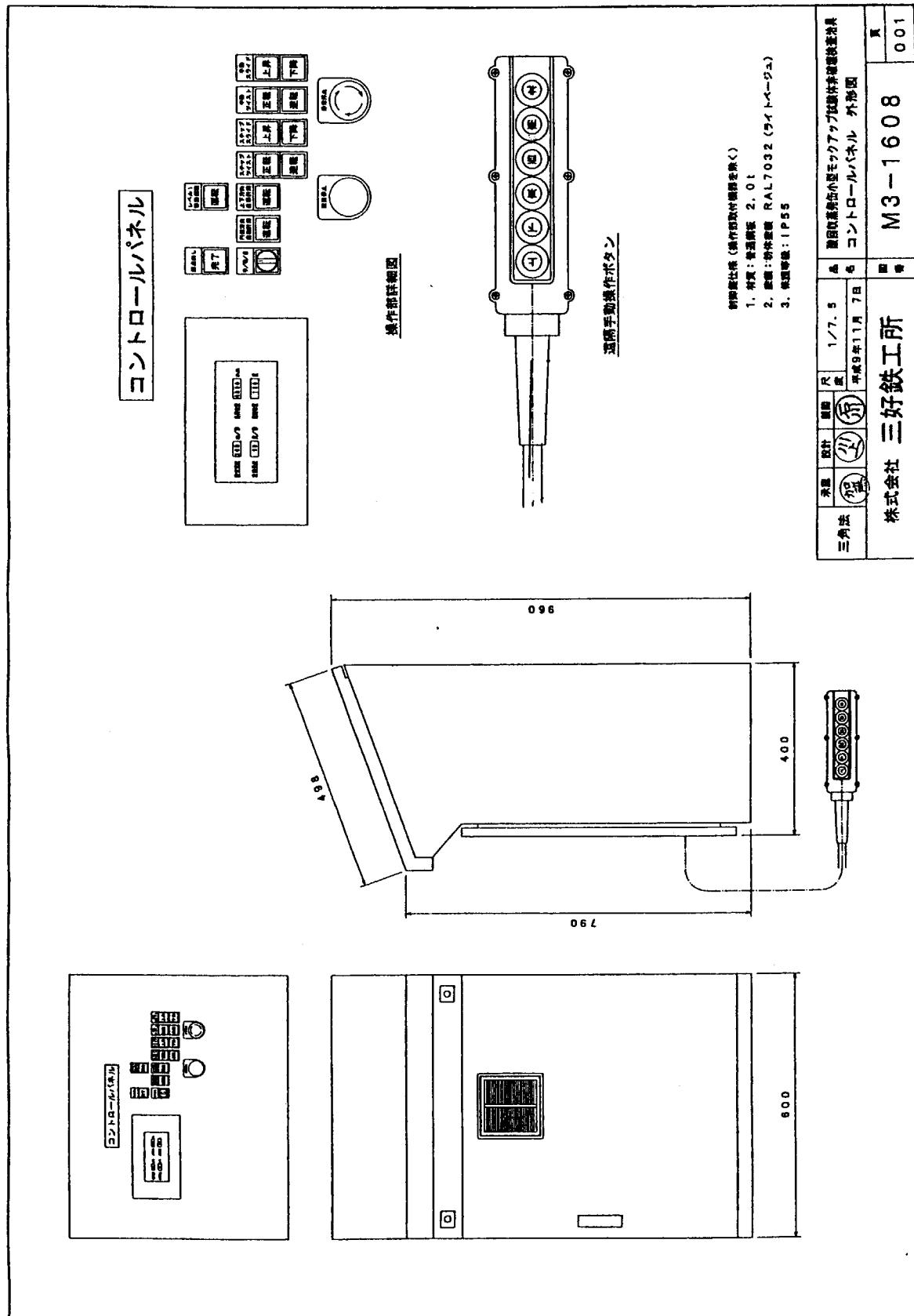


図4 肉厚測定装置コントロールパネル外観図

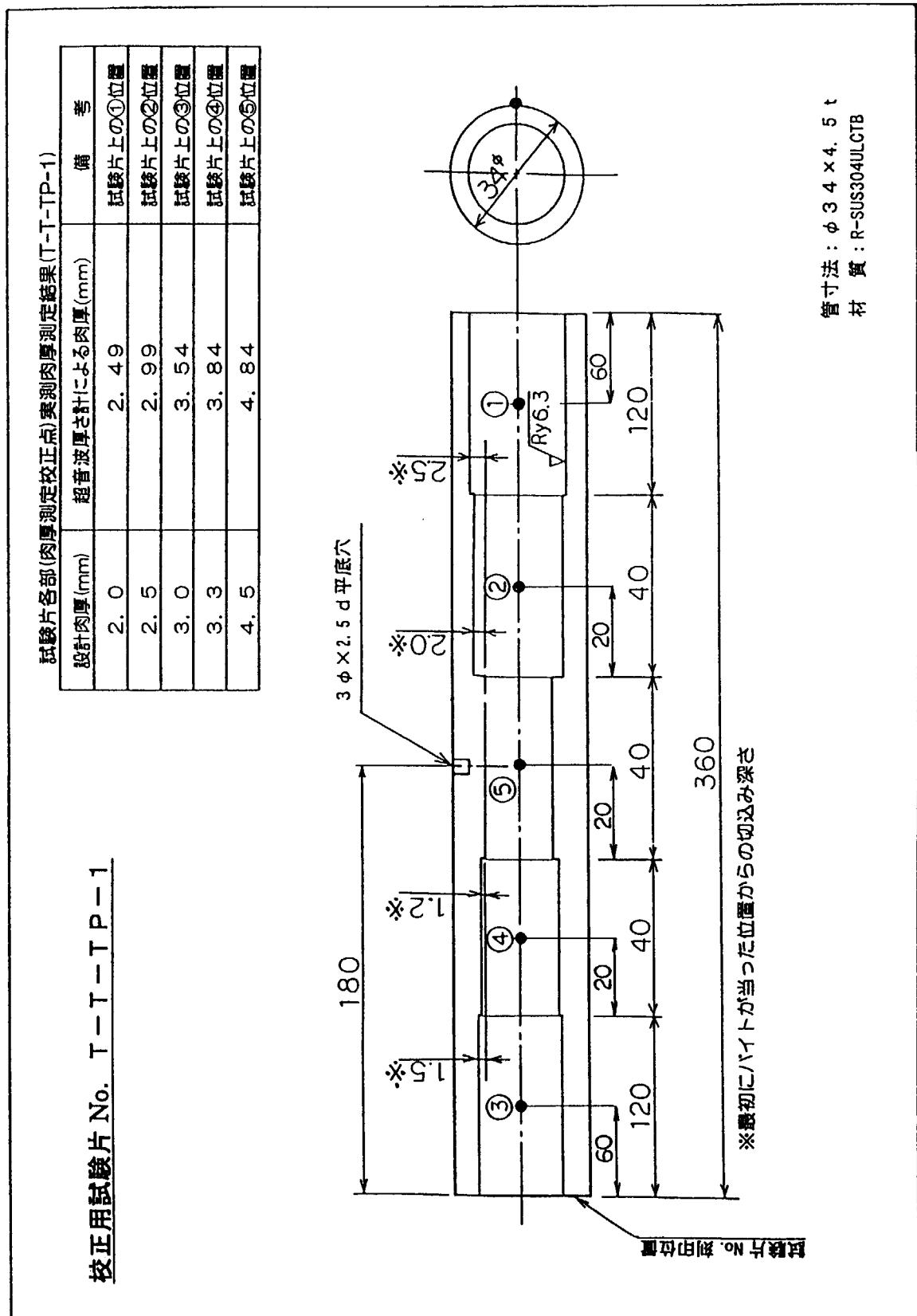
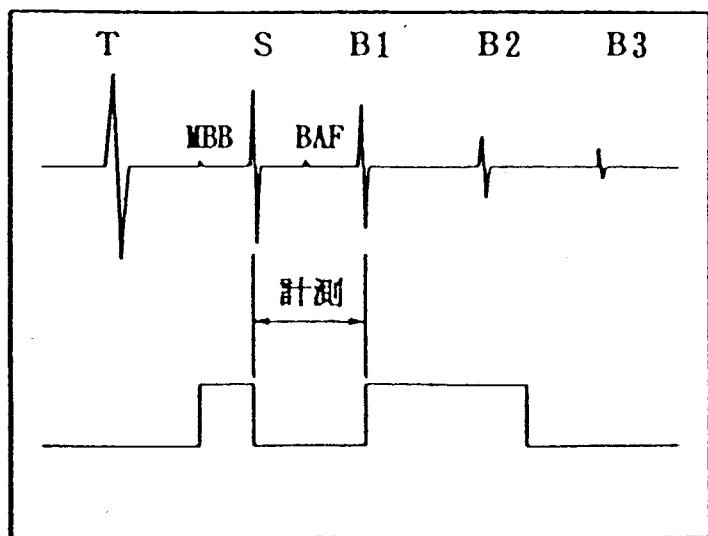


図5 肉厚校正用試験管



T : 送信波
S : 表面波
B : 底面波 (第1～…)
M B B : これ以後のパルスを
計測
B A F : S波とこれより後の
パルス間を計測

図6 超音波厚さ計のゲート調整方法

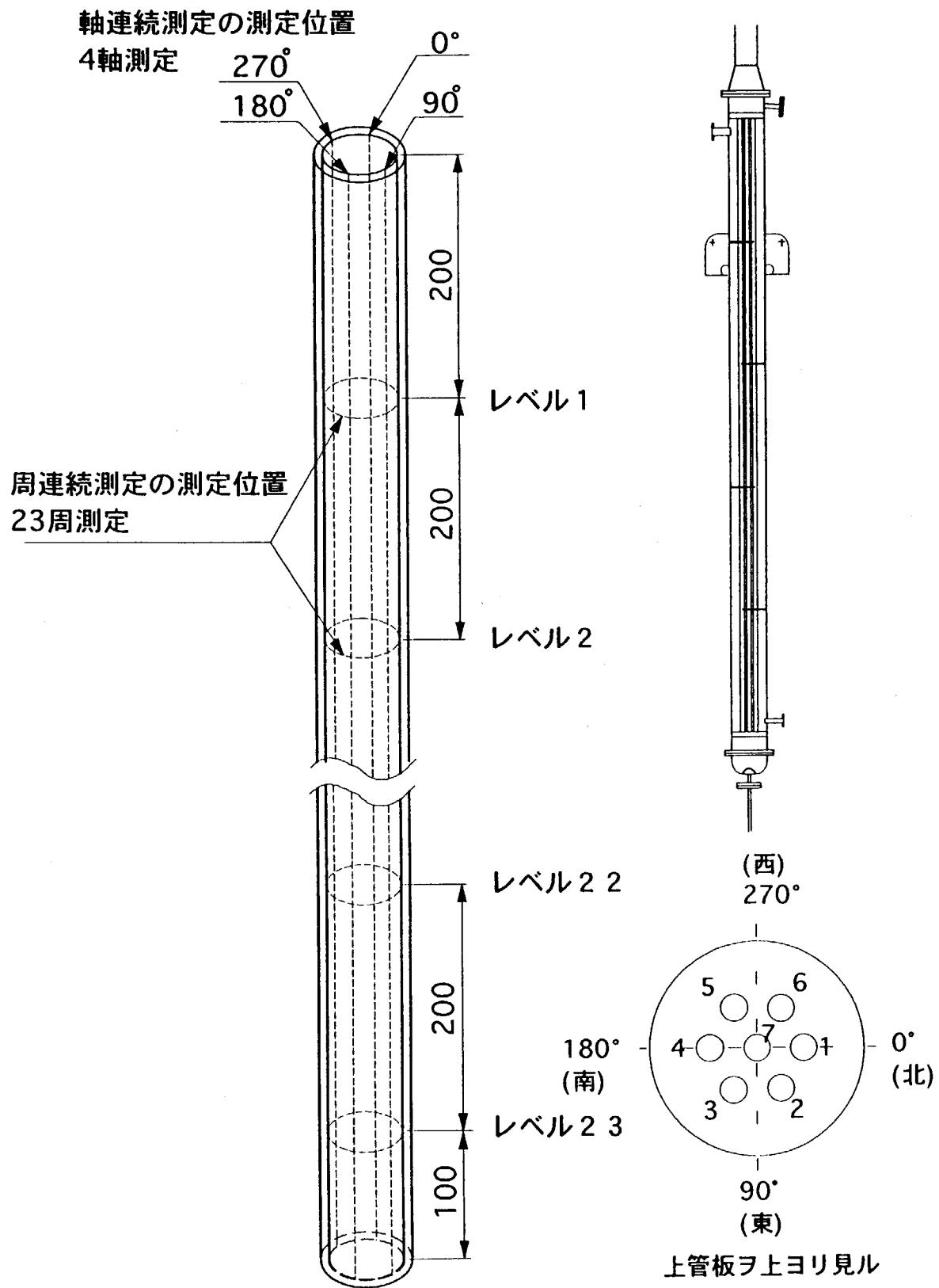


図7 伝熱管の超音波肉厚測定実施箇所

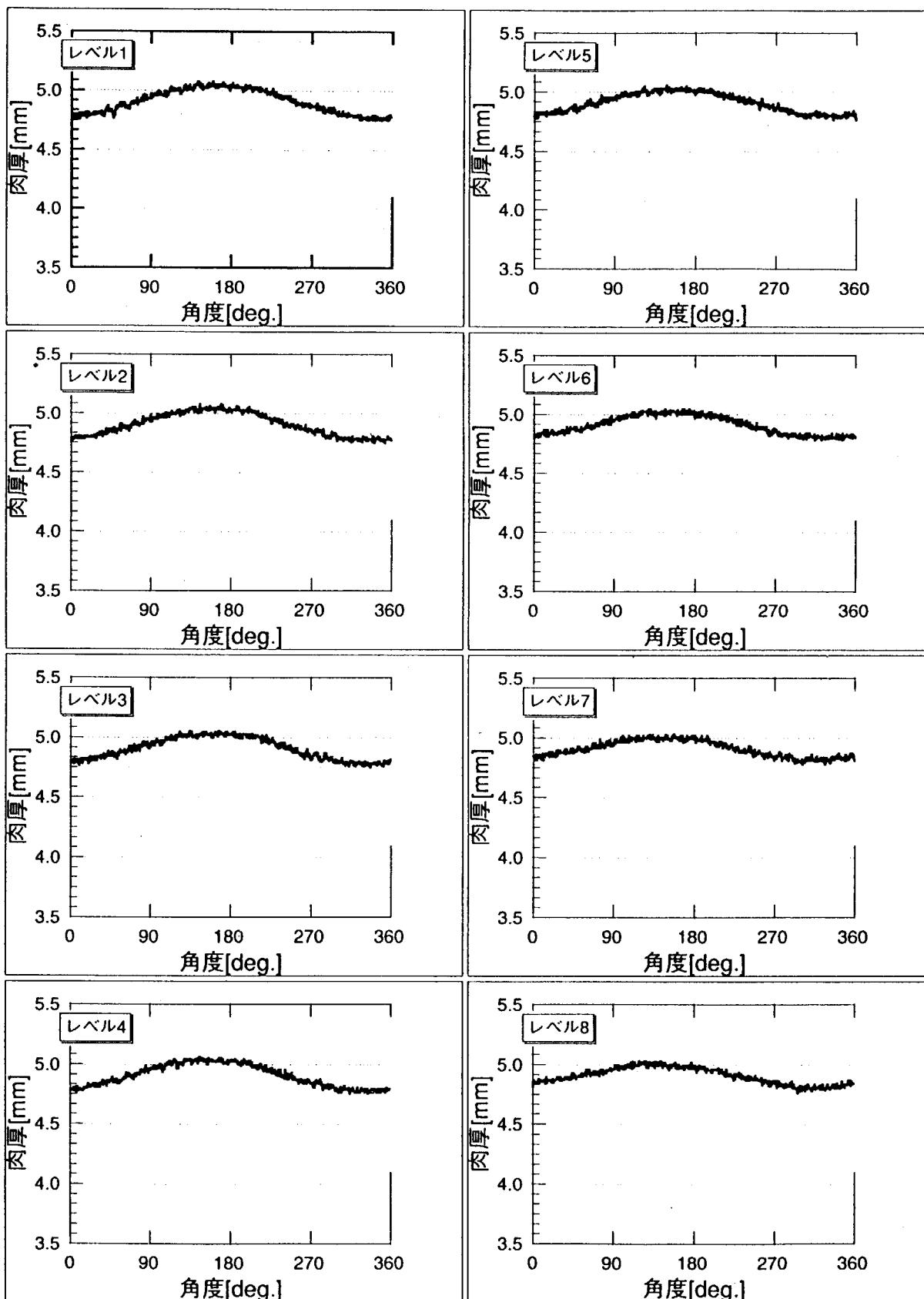


図8-1-1 伝熱管No. 1周測定チャート(1)

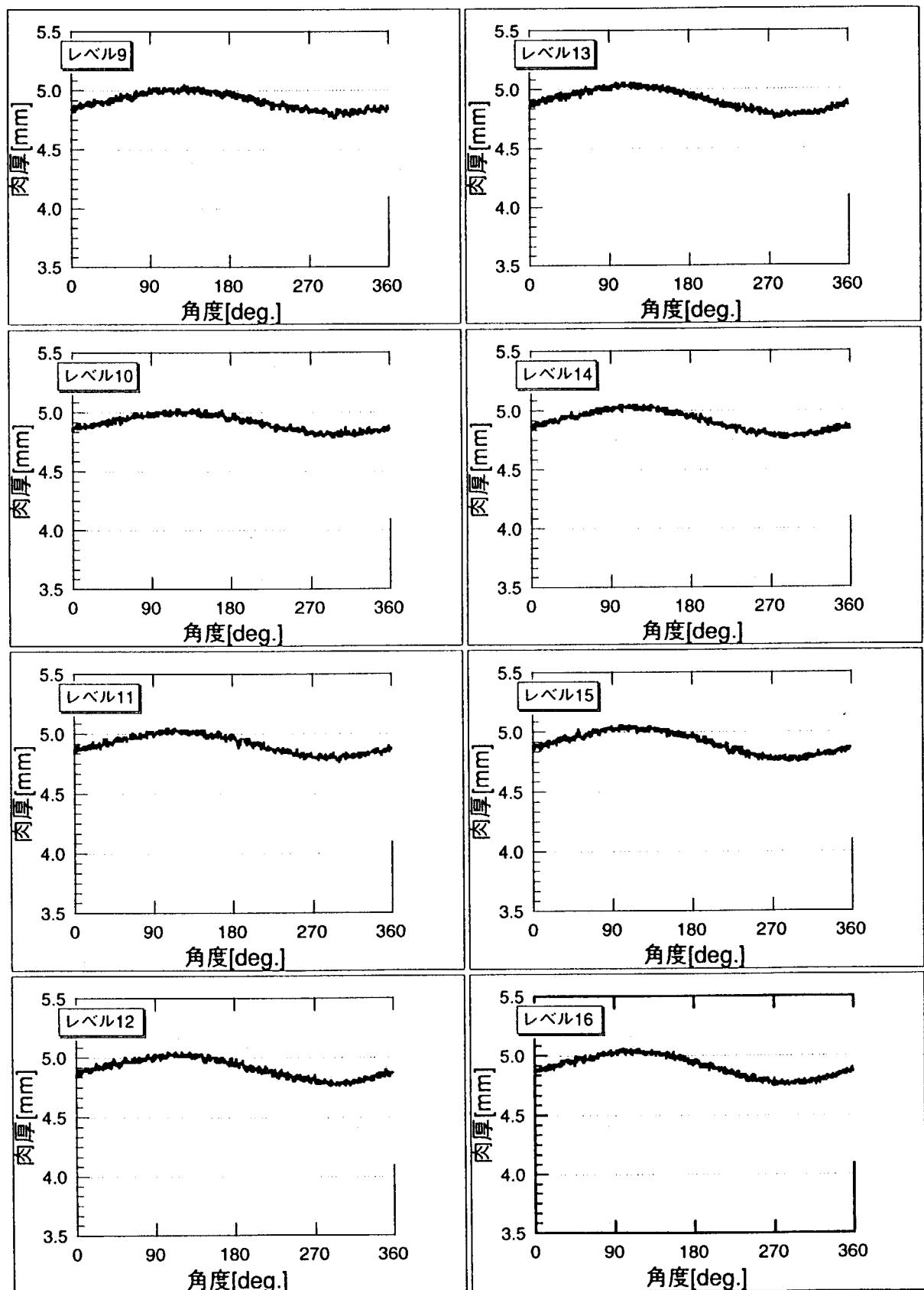


図8-1-2 伝熱管No. 1周測定チャート(2)

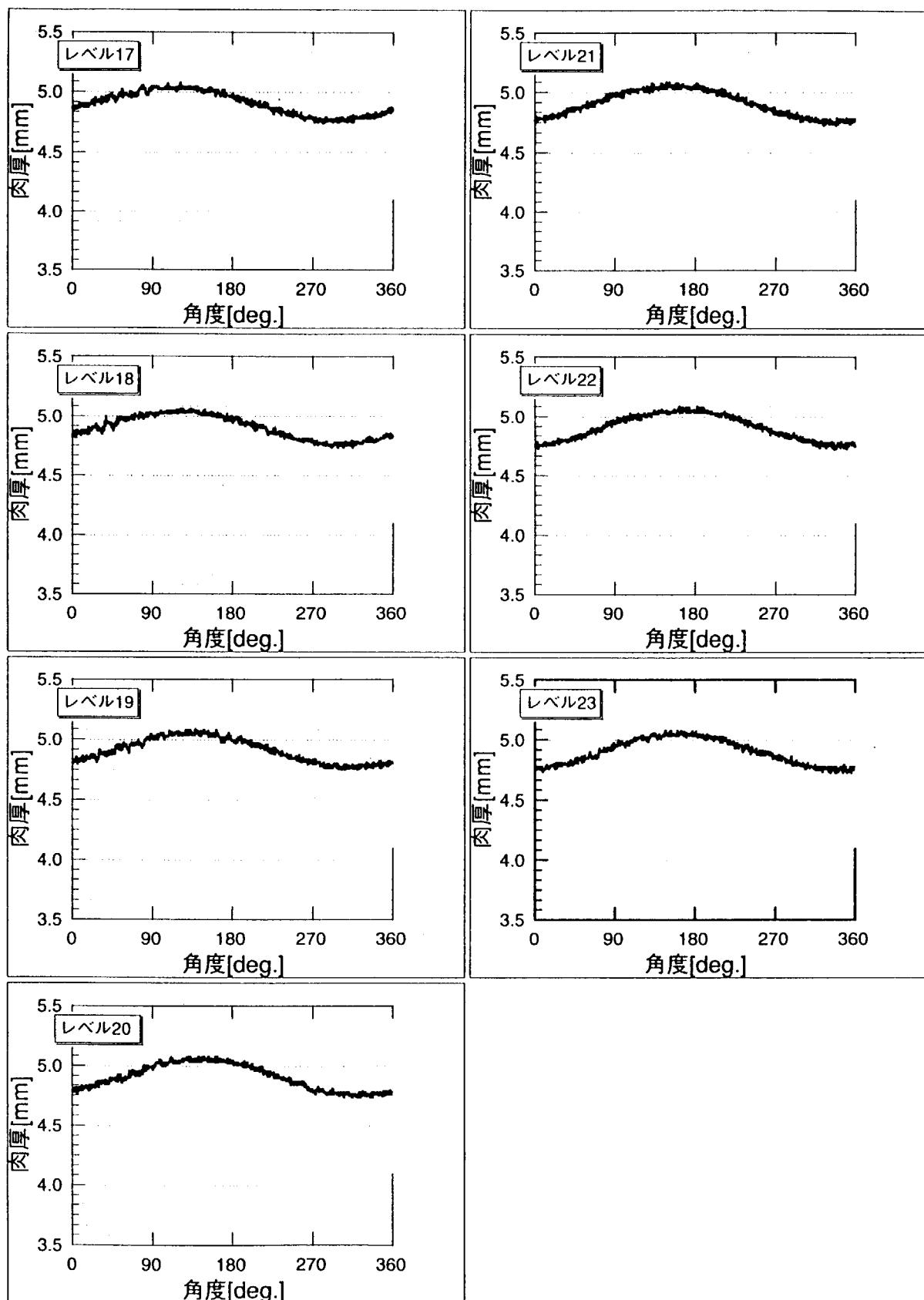


図8-1-3 伝熱管No. 1周測定チャート(3)

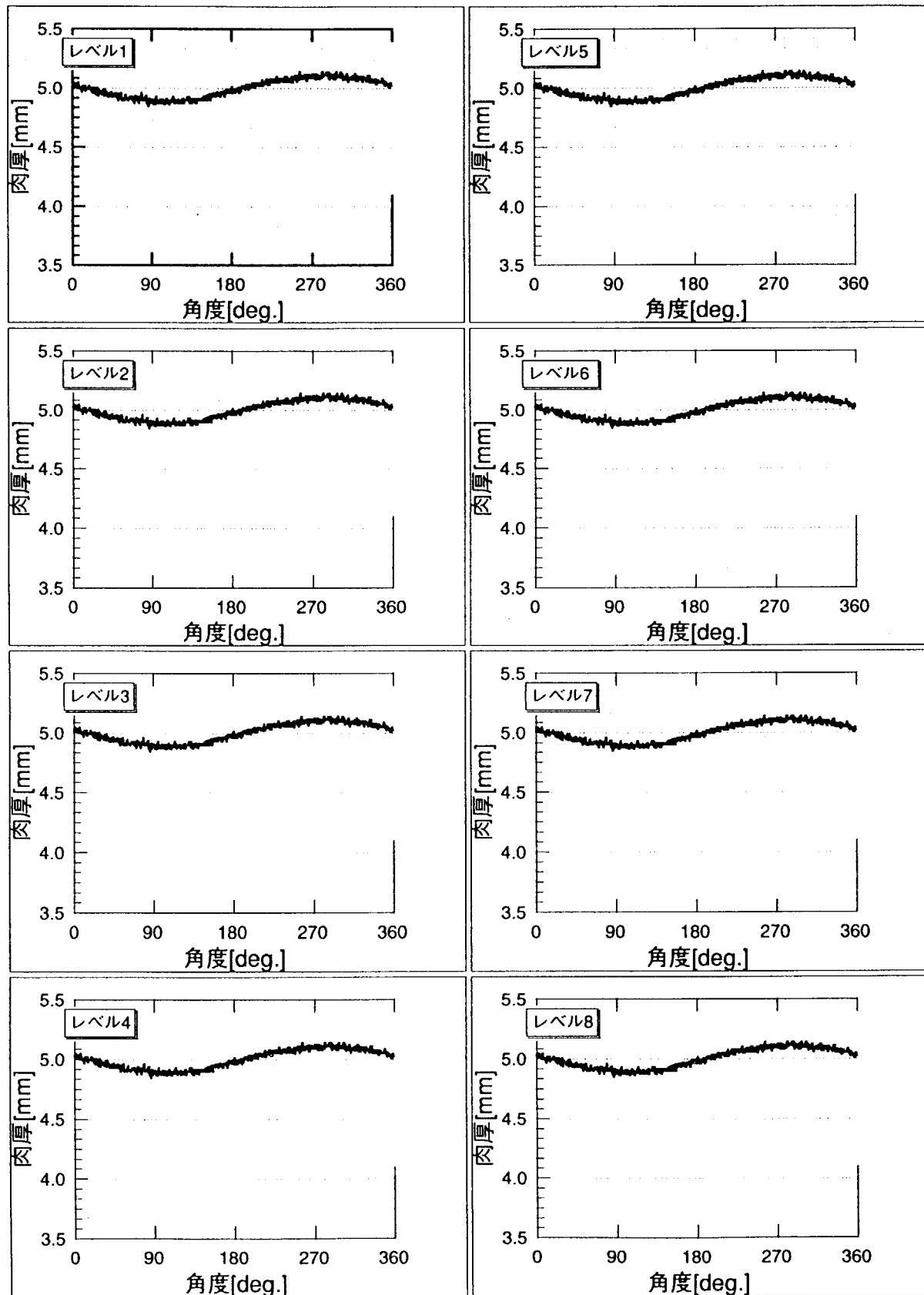


図8-2-1 伝熱管No. 2周測定チャート(1)

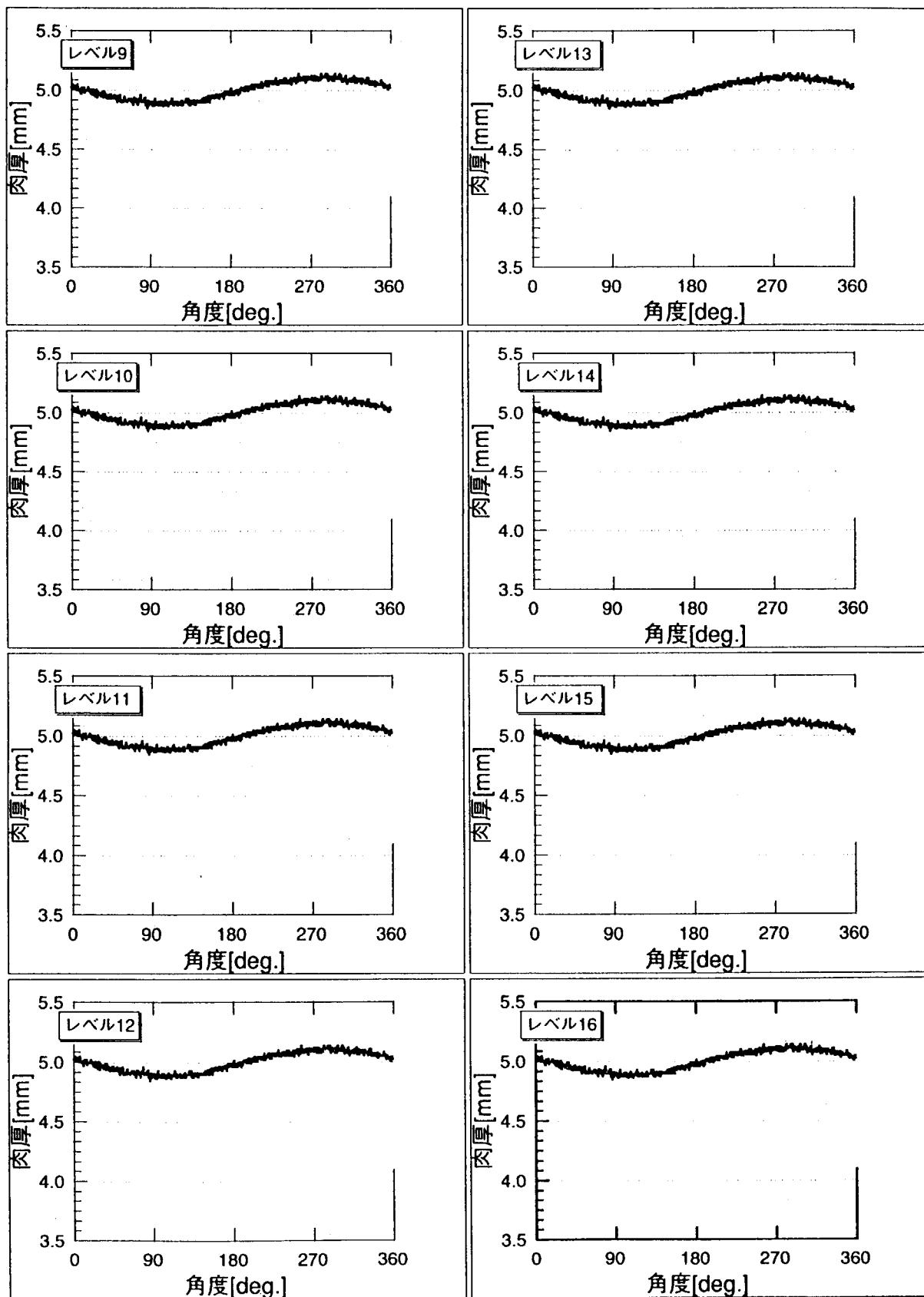


図8-2-2 伝熱管No. 2周測定チャート(2)

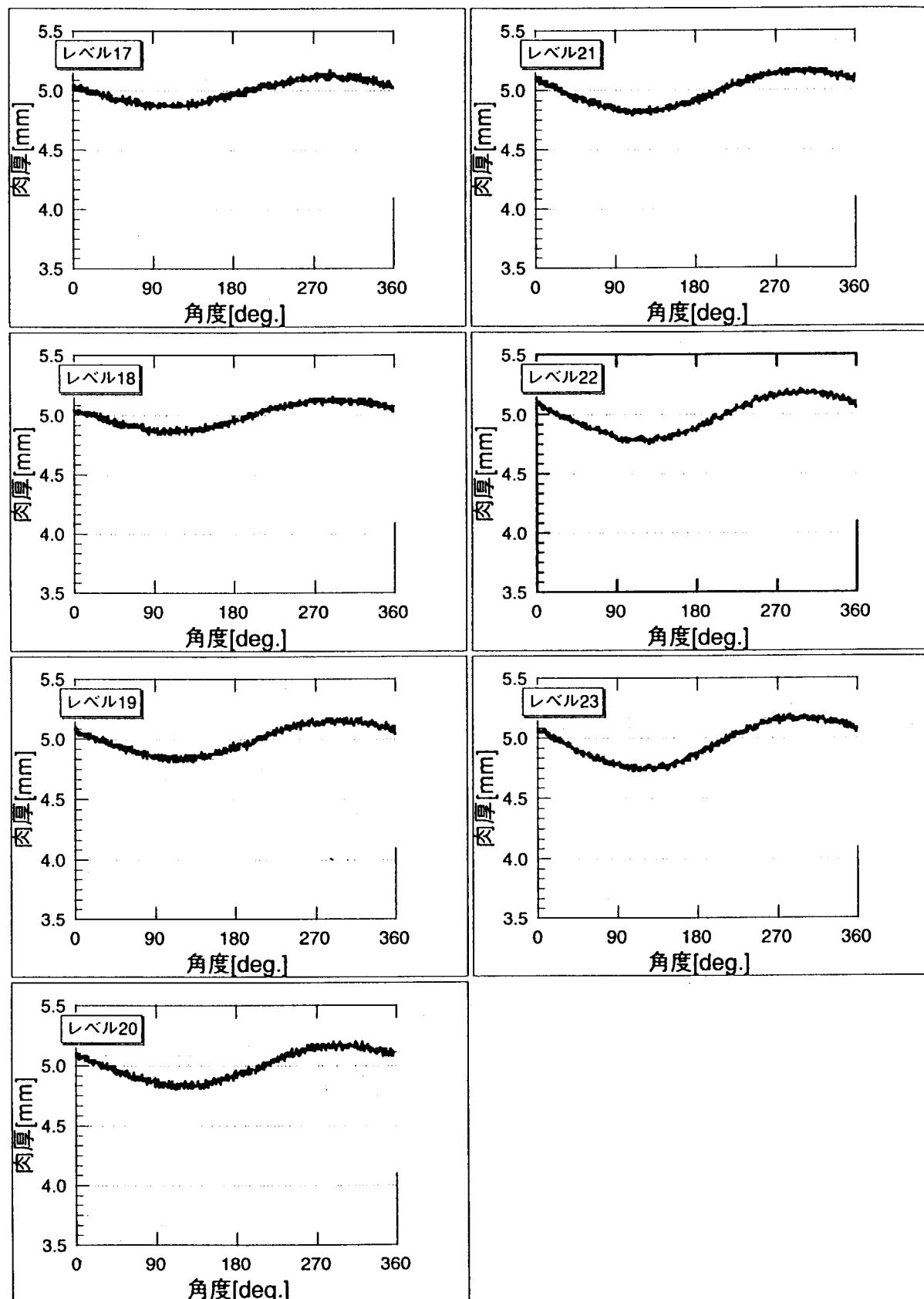


図8-2-3 伝熱管No. 2周測定チャート(3)

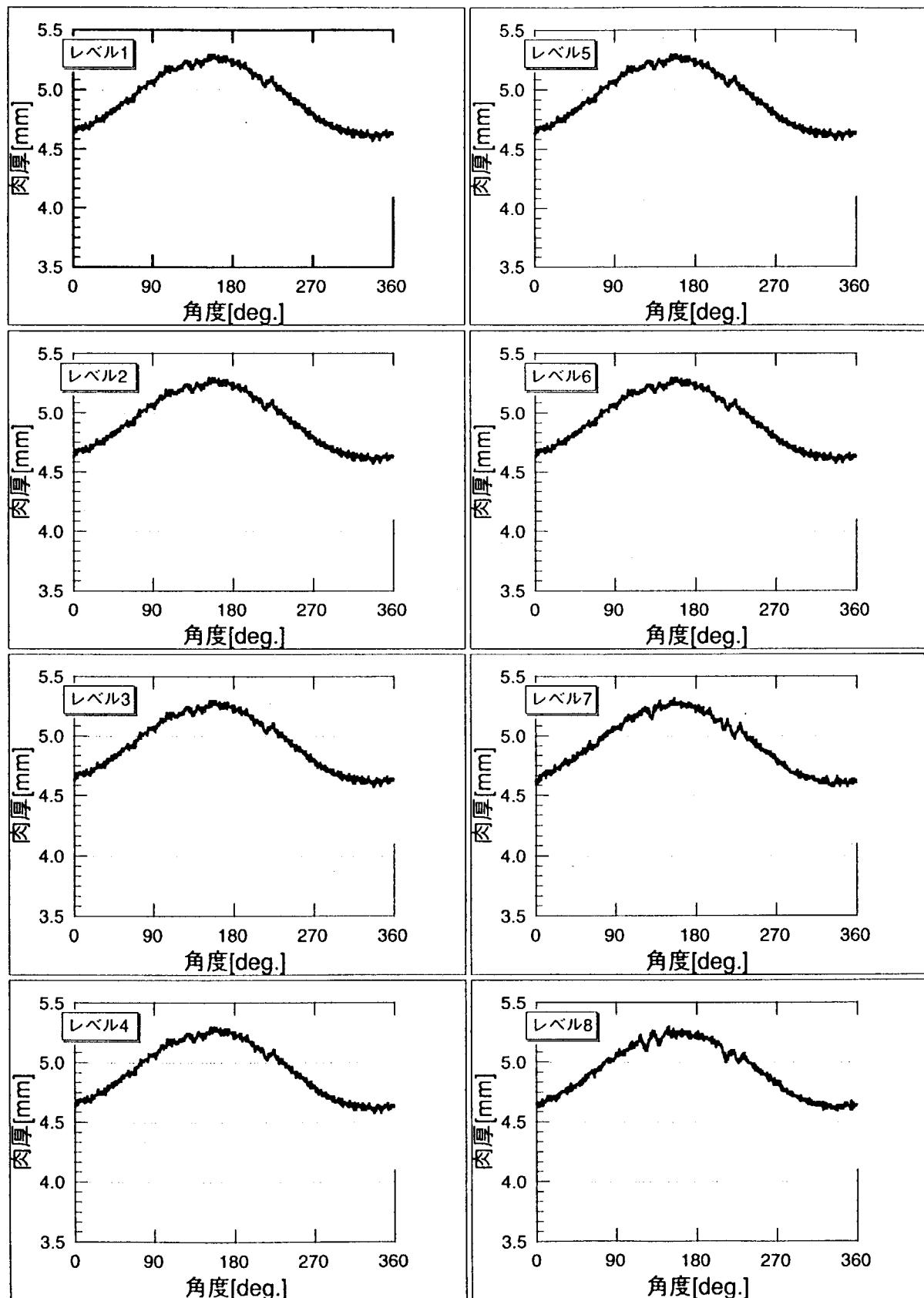


図8-3-1 伝熱管No.3周測定チャート(1)

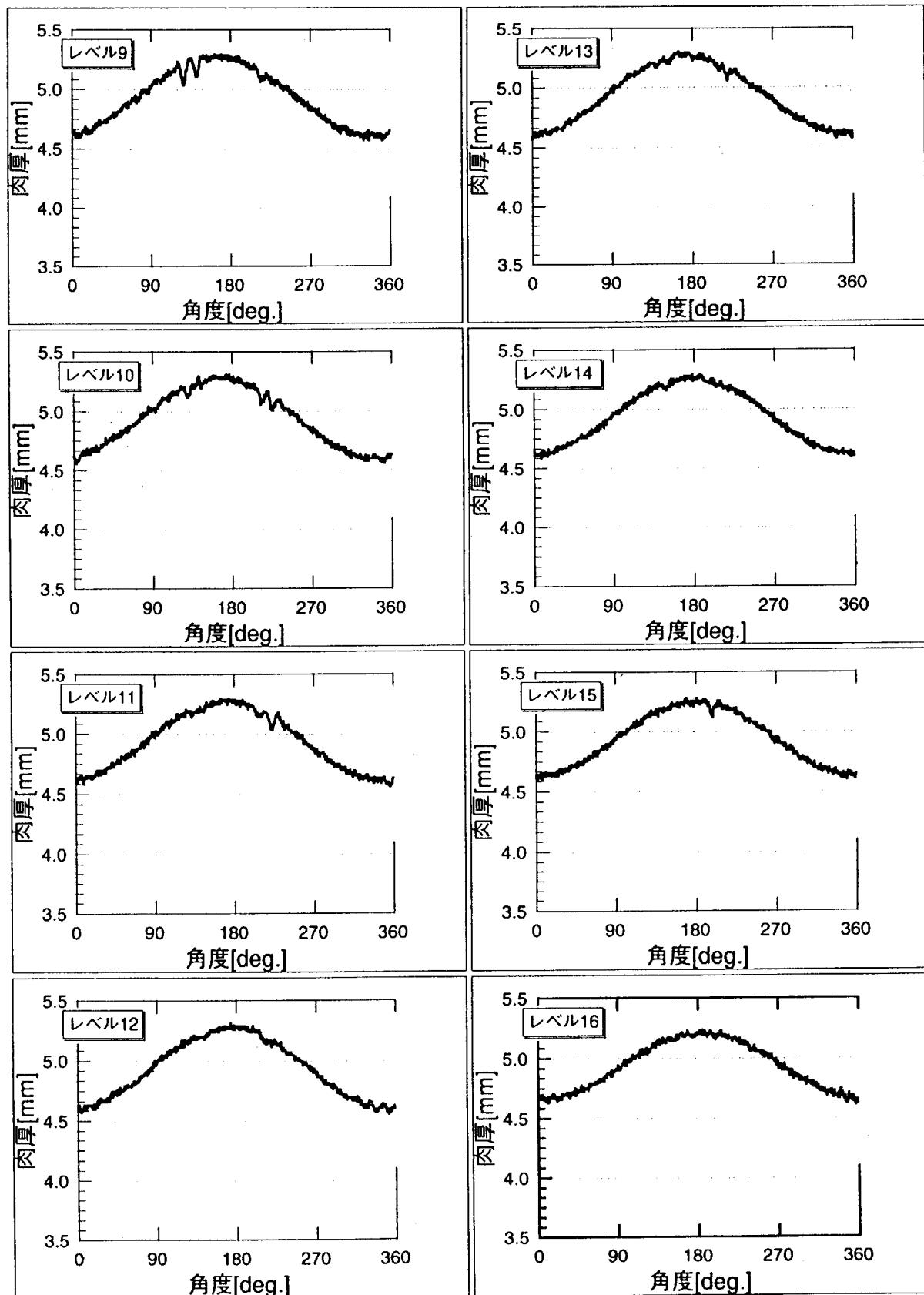


図8-3-2 伝熱管No.3周測定チャート(2)

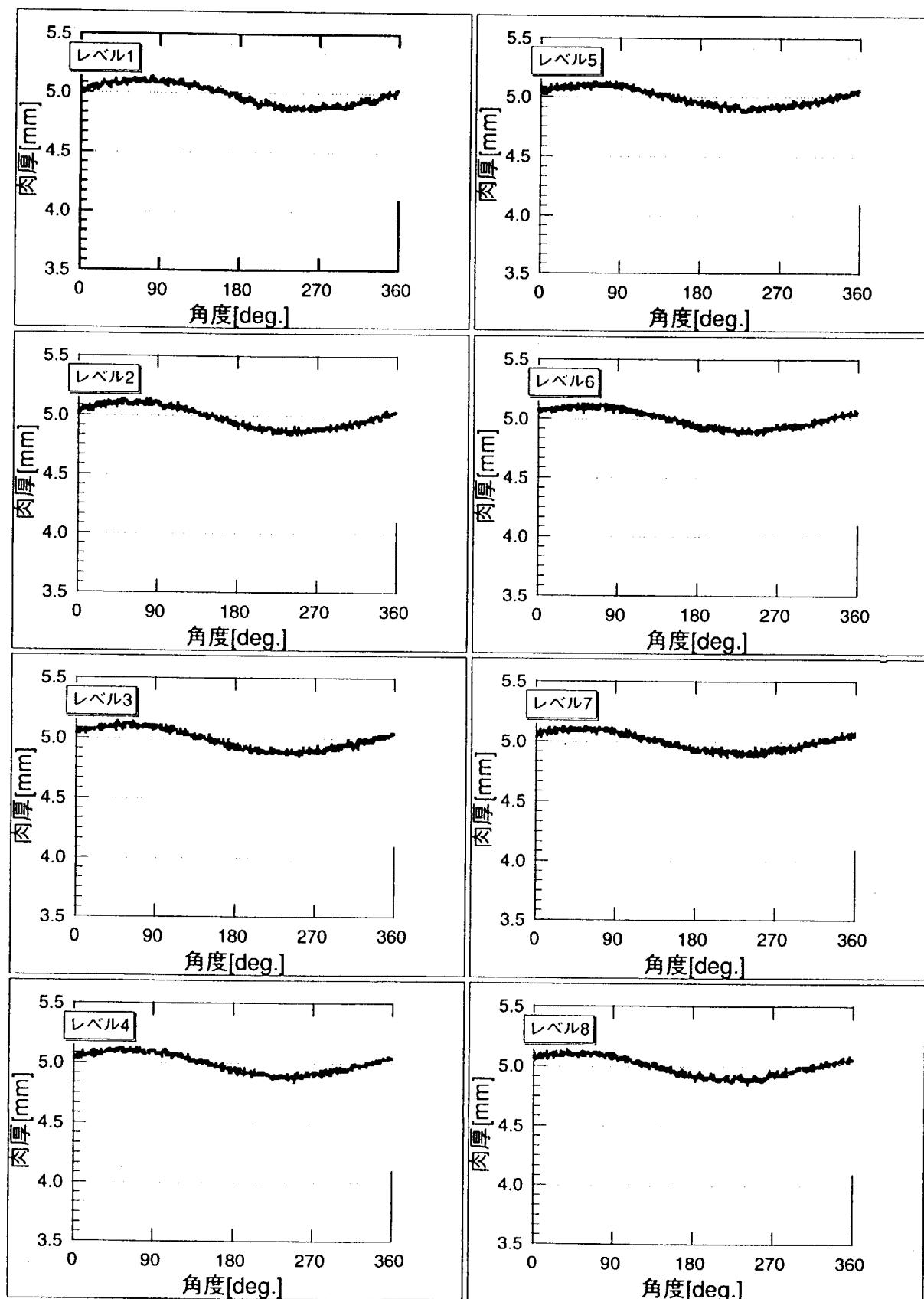


図8-4-1 伝熱管No. 4周測定チャート(1)

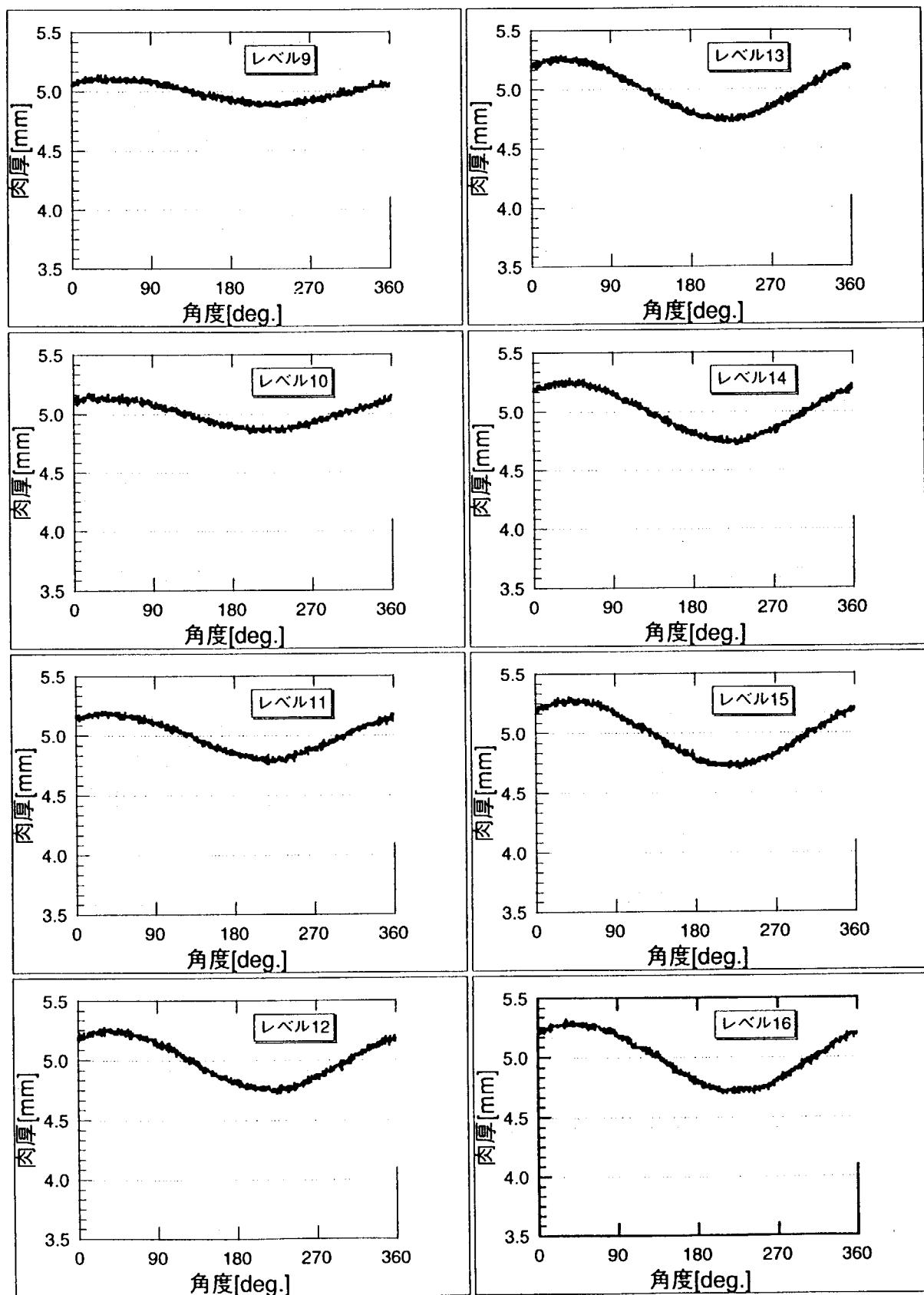


図8-4-2 伝熱管No. 4周測定チャート(2)

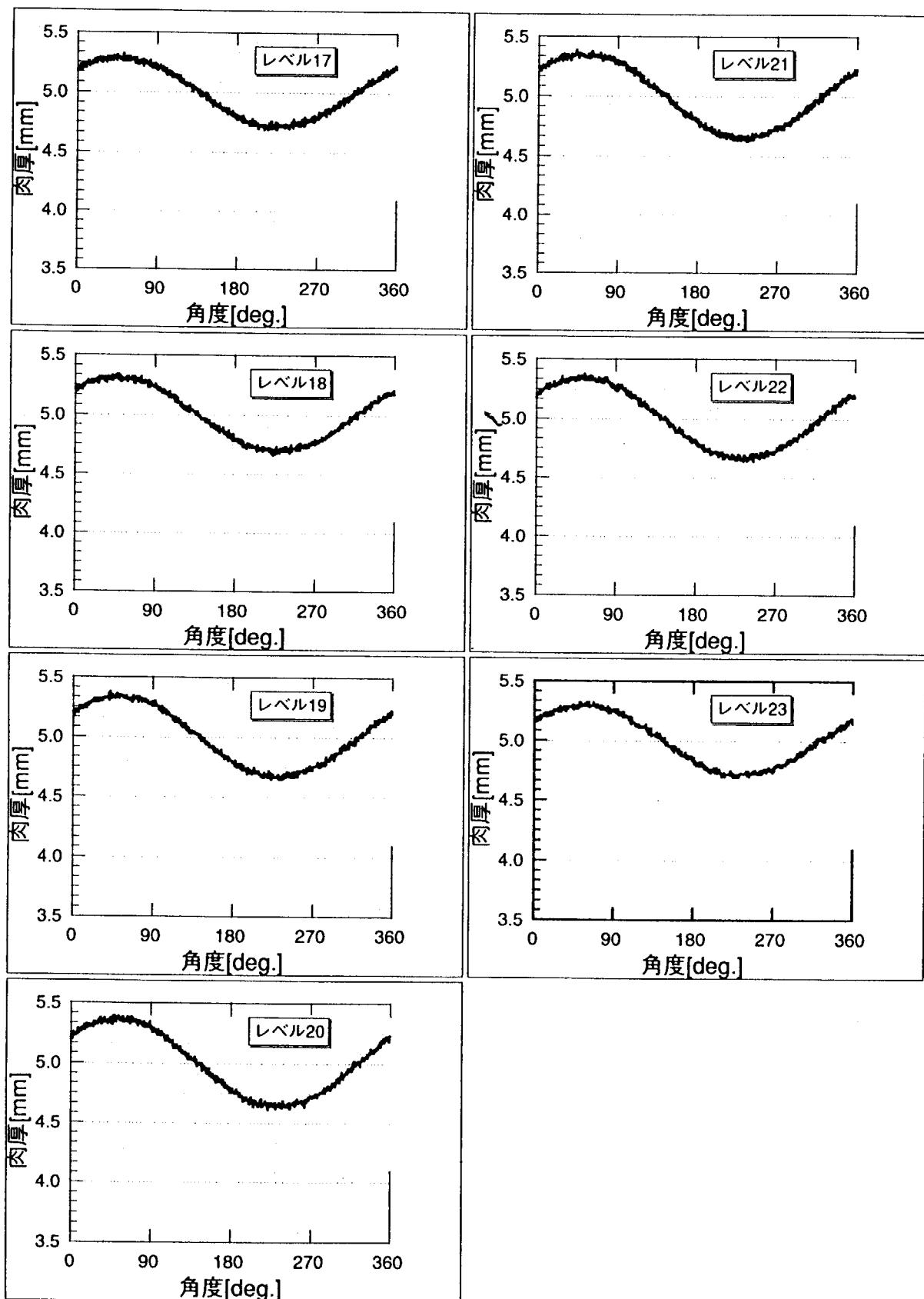


図8-4-3 伝熱管No.4周測定チャート(3)

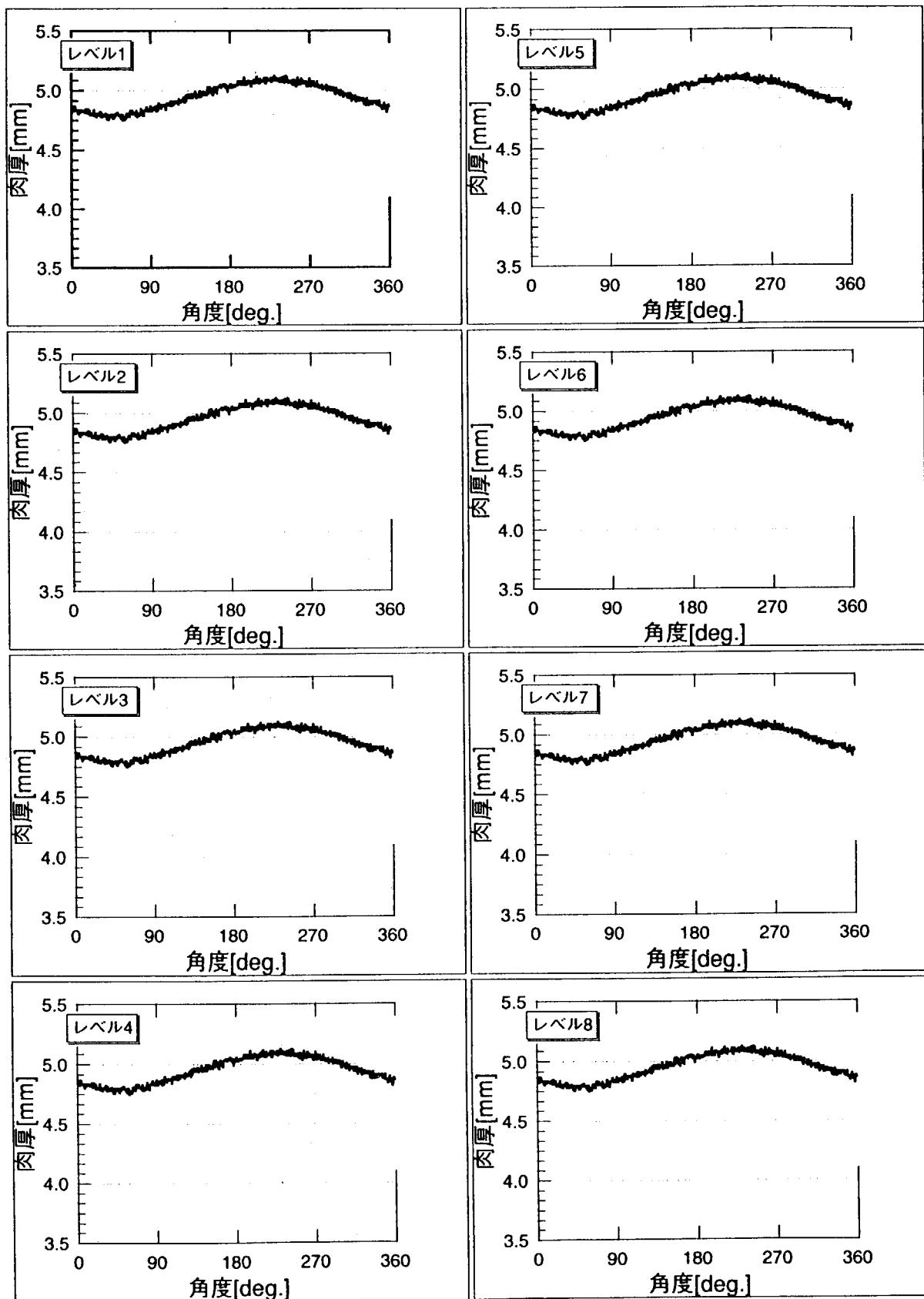


図8-5-1 伝熱管No. 5周測定チャート(1)

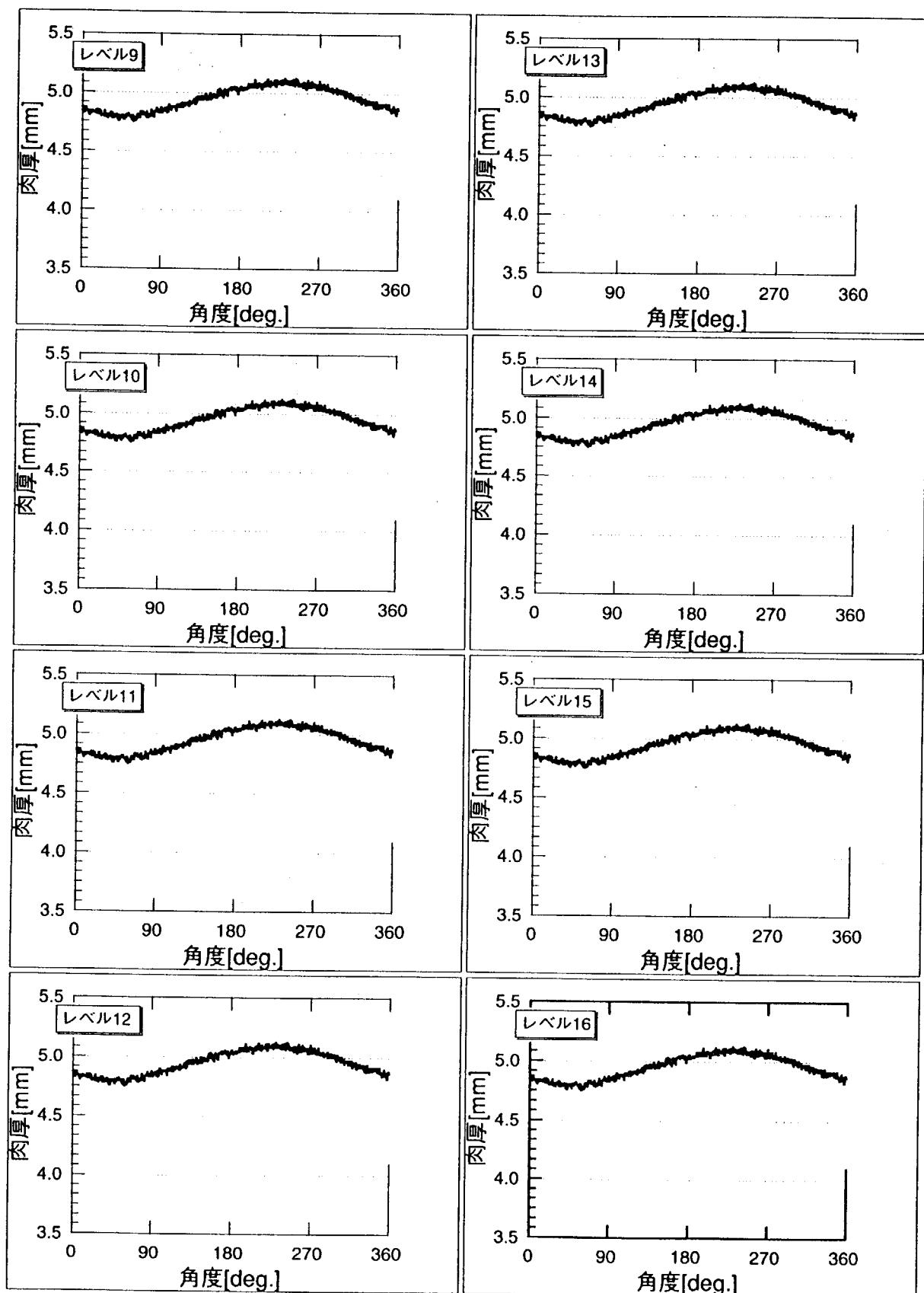


図8-5-2 伝熱管No. 5周測定チャート(2)

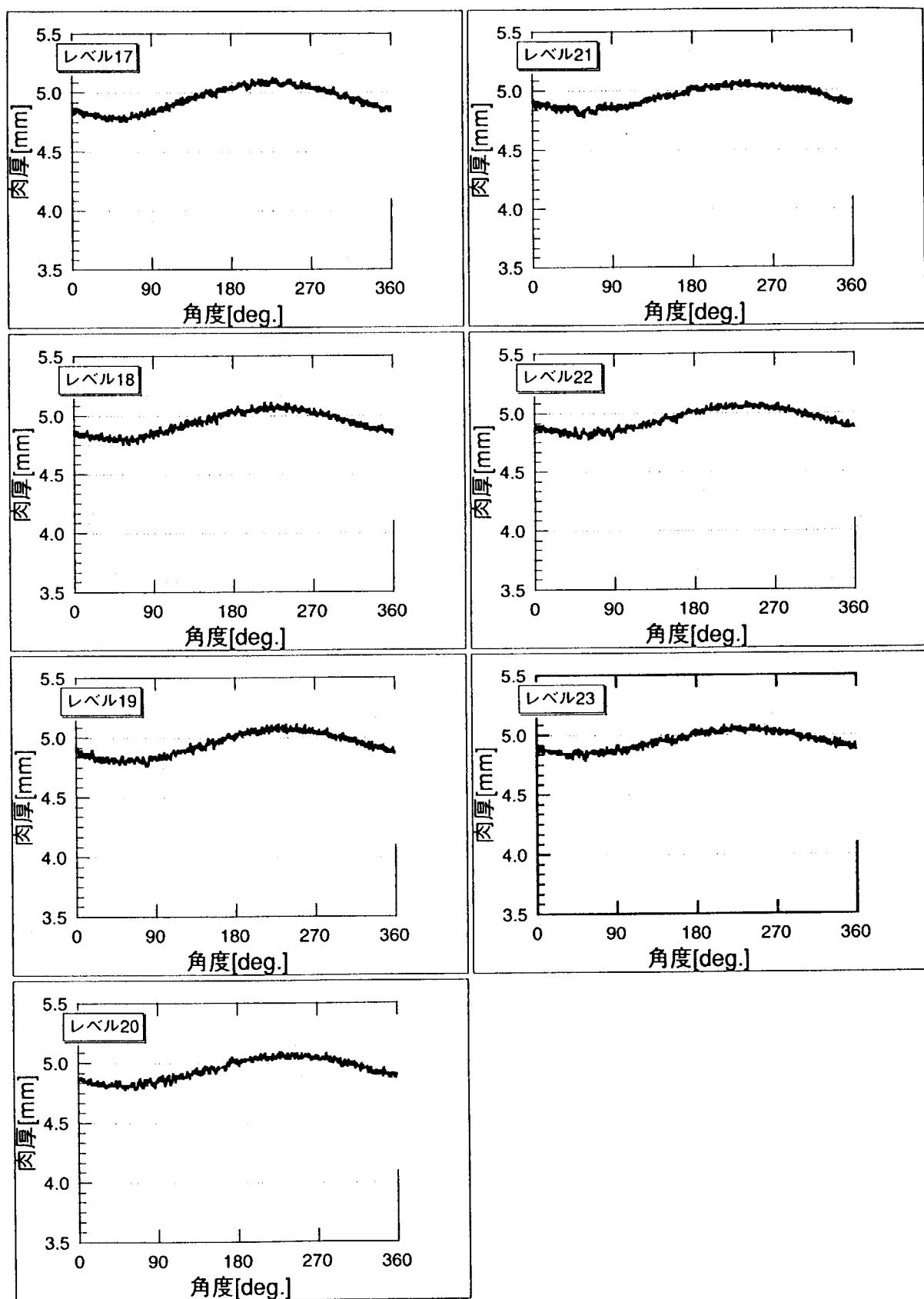


図8-5-3 伝熱管No. 5周測定チャート(3)

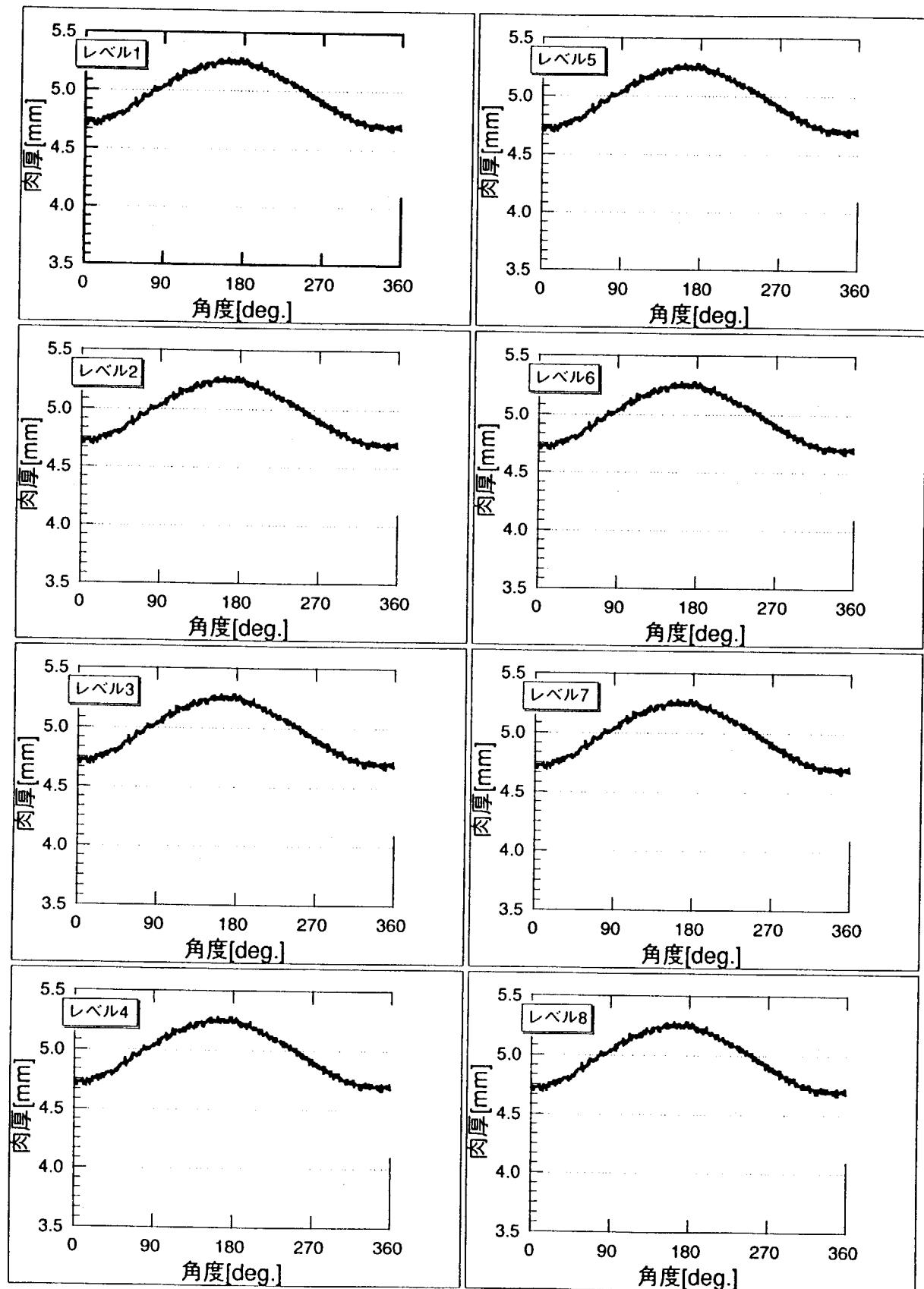


図8-6-1 伝熱管No. 6周測定チャート(1)

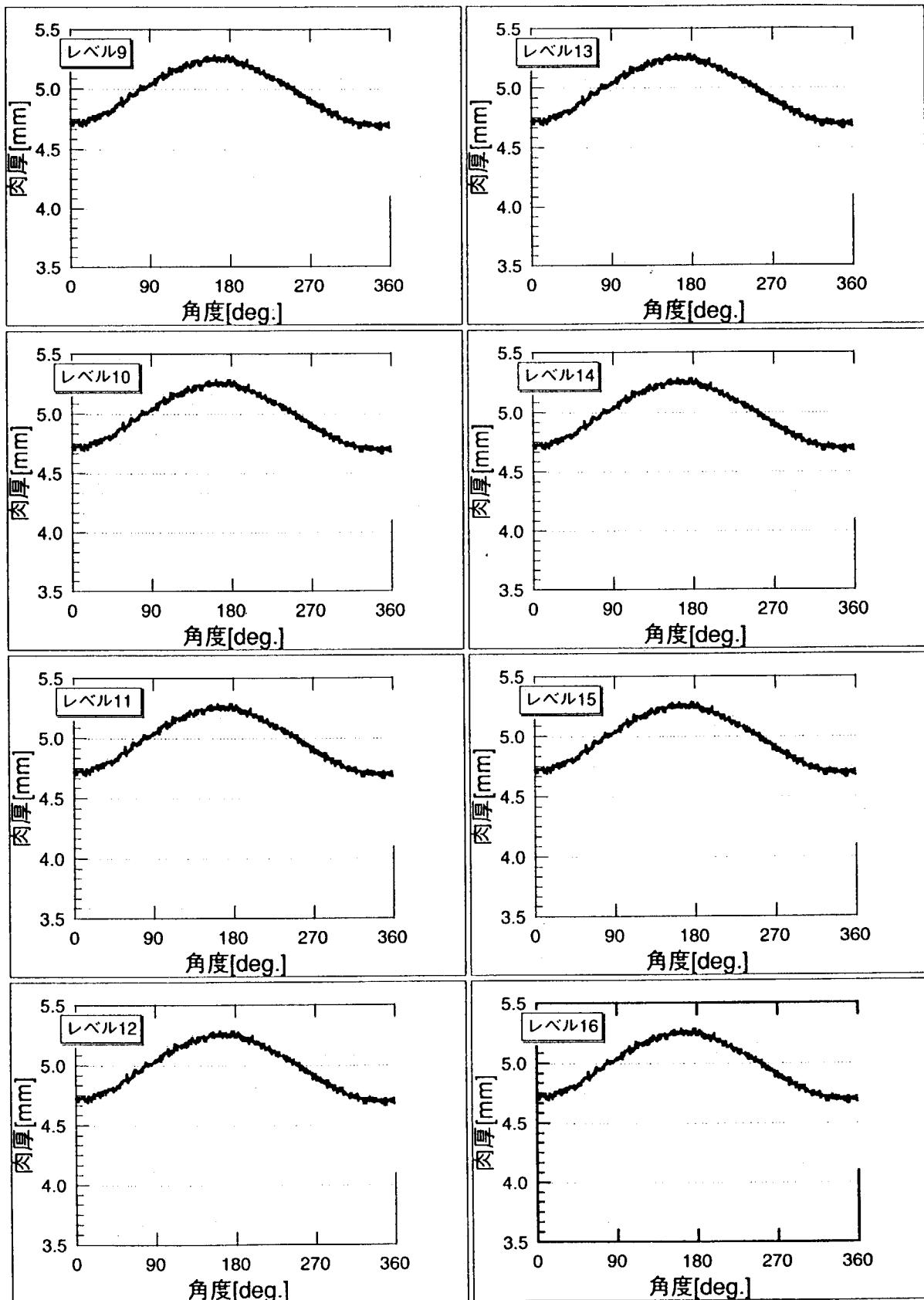


図8-6-2 伝熱管No. 6周測定チャート(2)

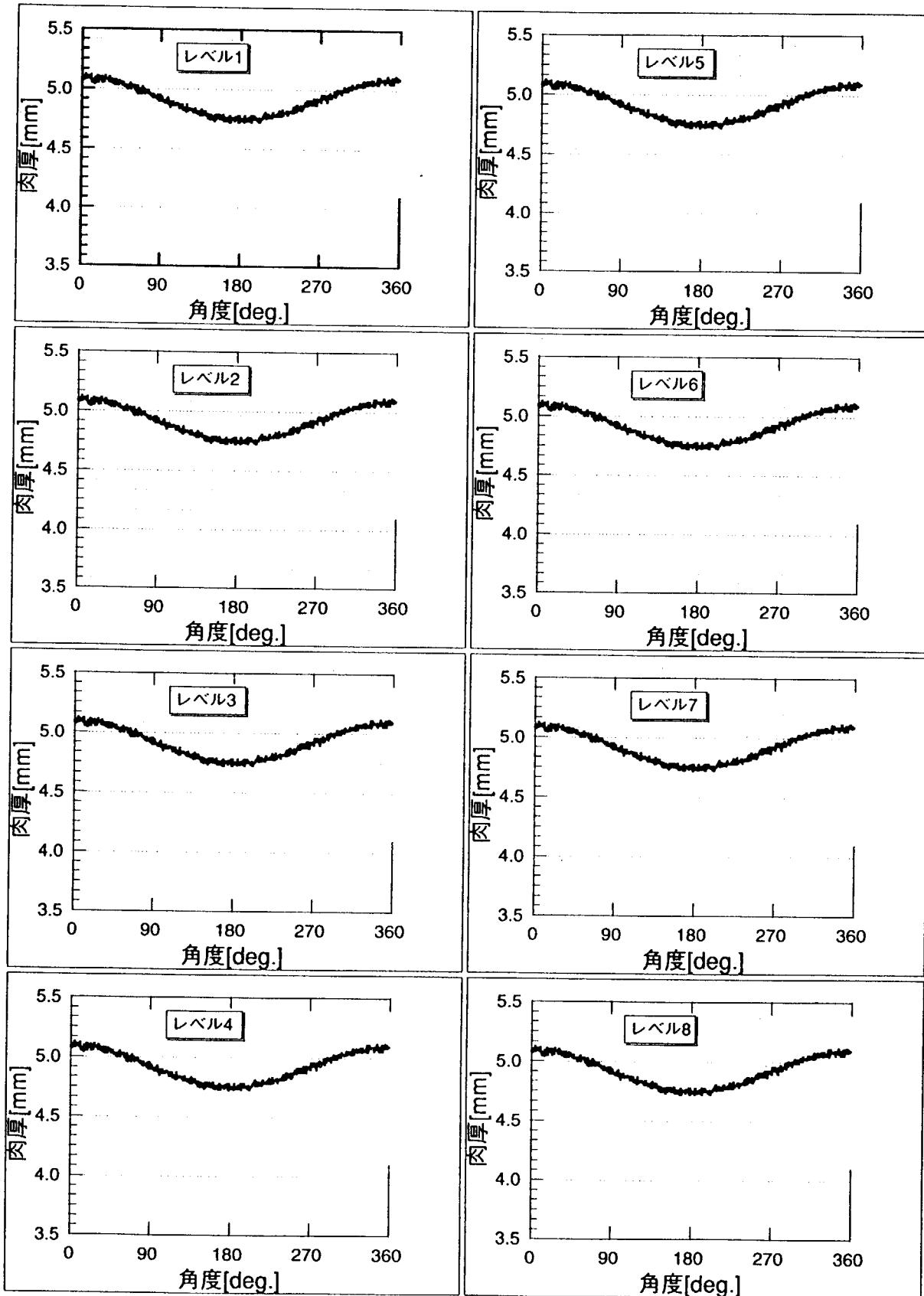


図8-7-1 伝熱管No. 7周測定チャート(1)

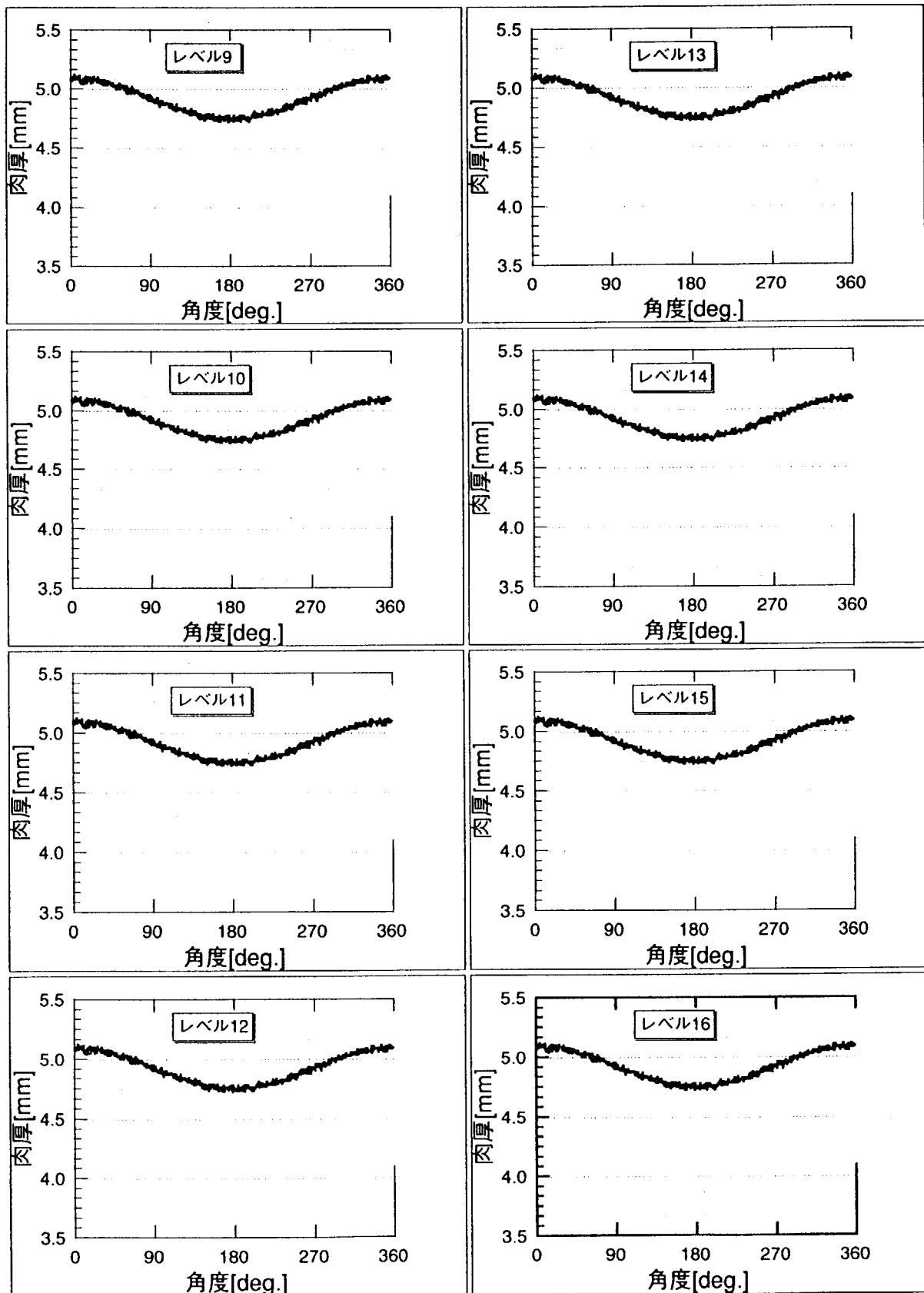


図8-7-2 伝熱管No. 7周測定チャート(2)

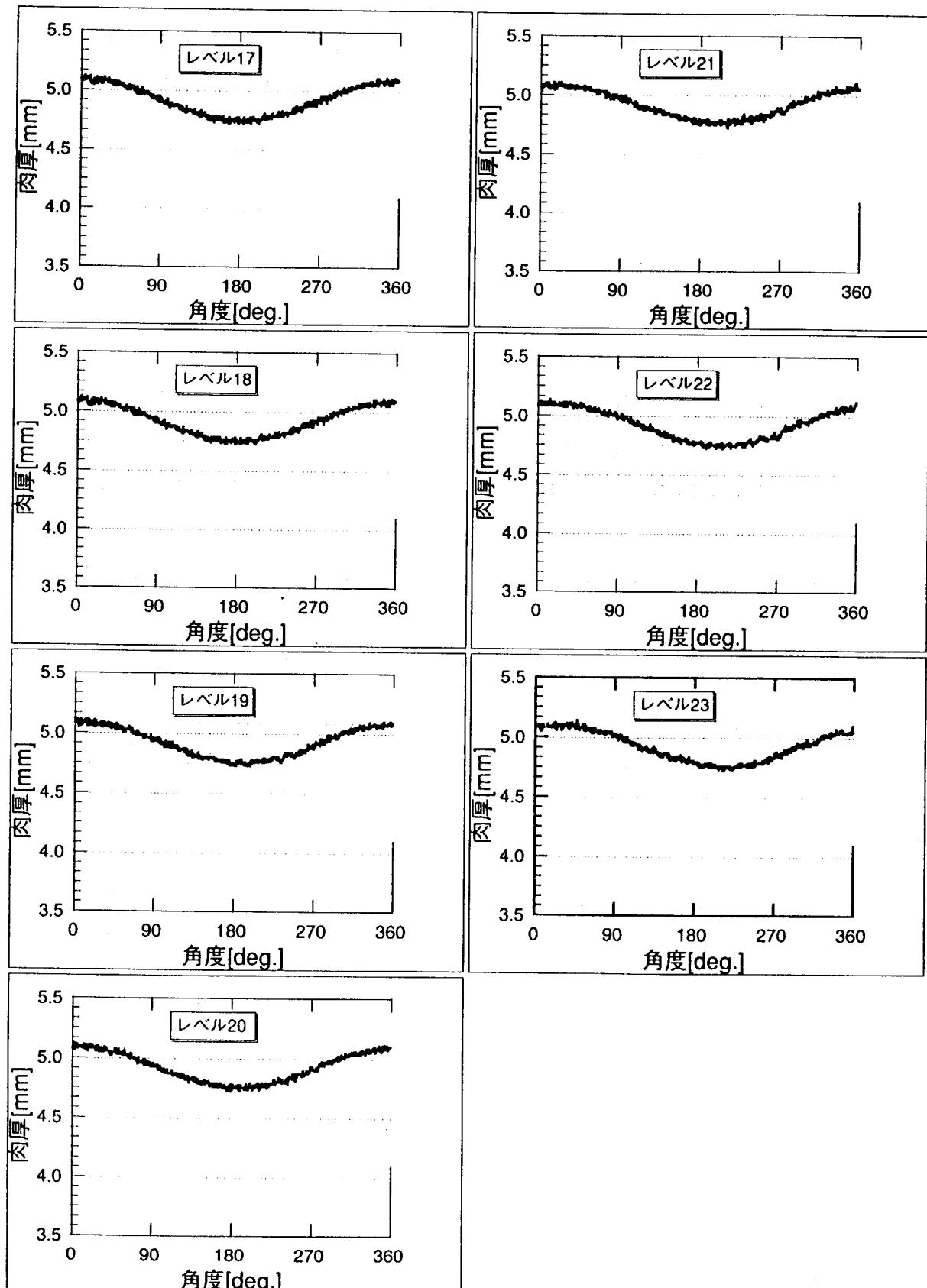


図8-7-3 伝熱管No. 7周測定チャート(3)

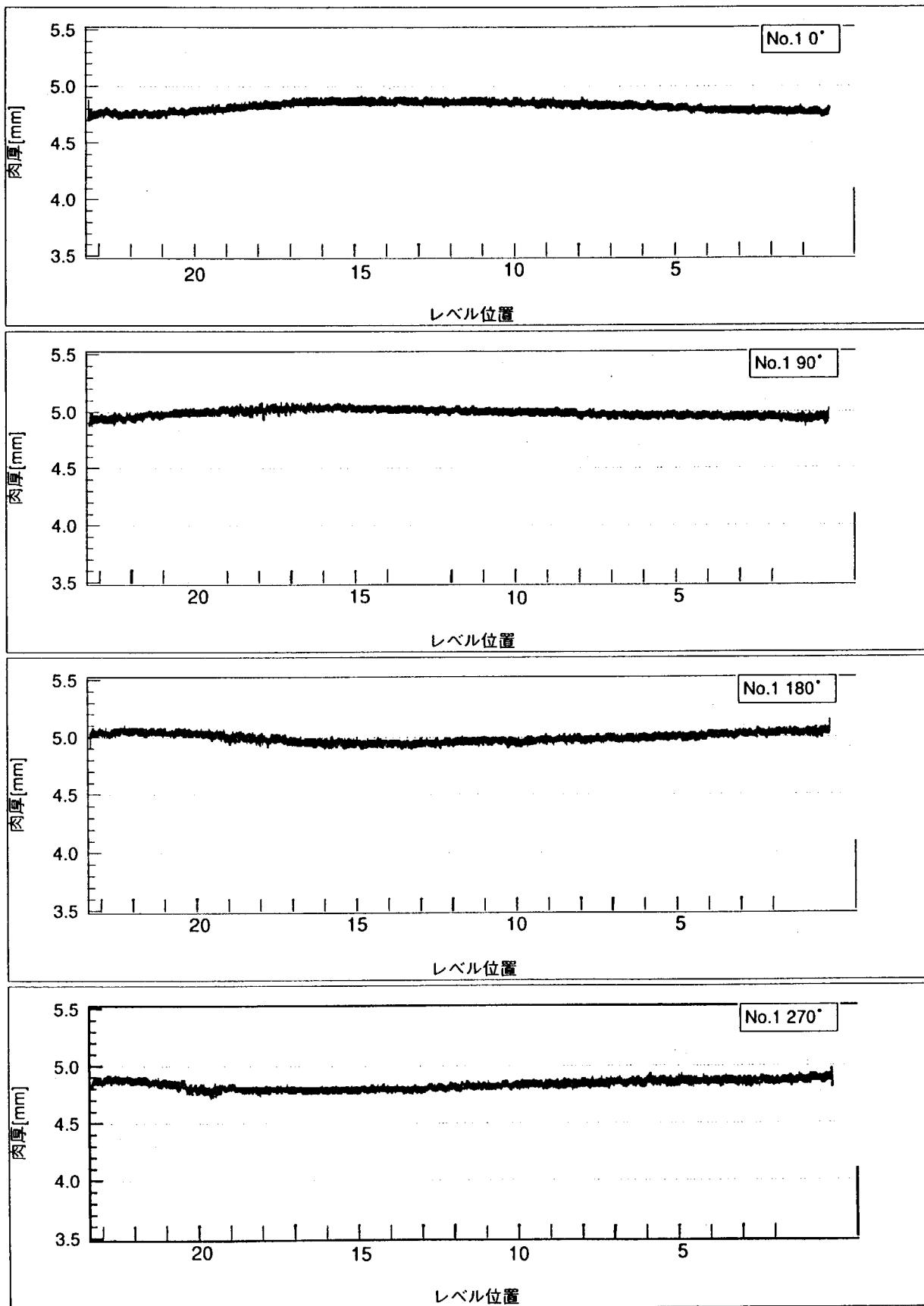


図9-1 伝熱管No.1軸測定チャート

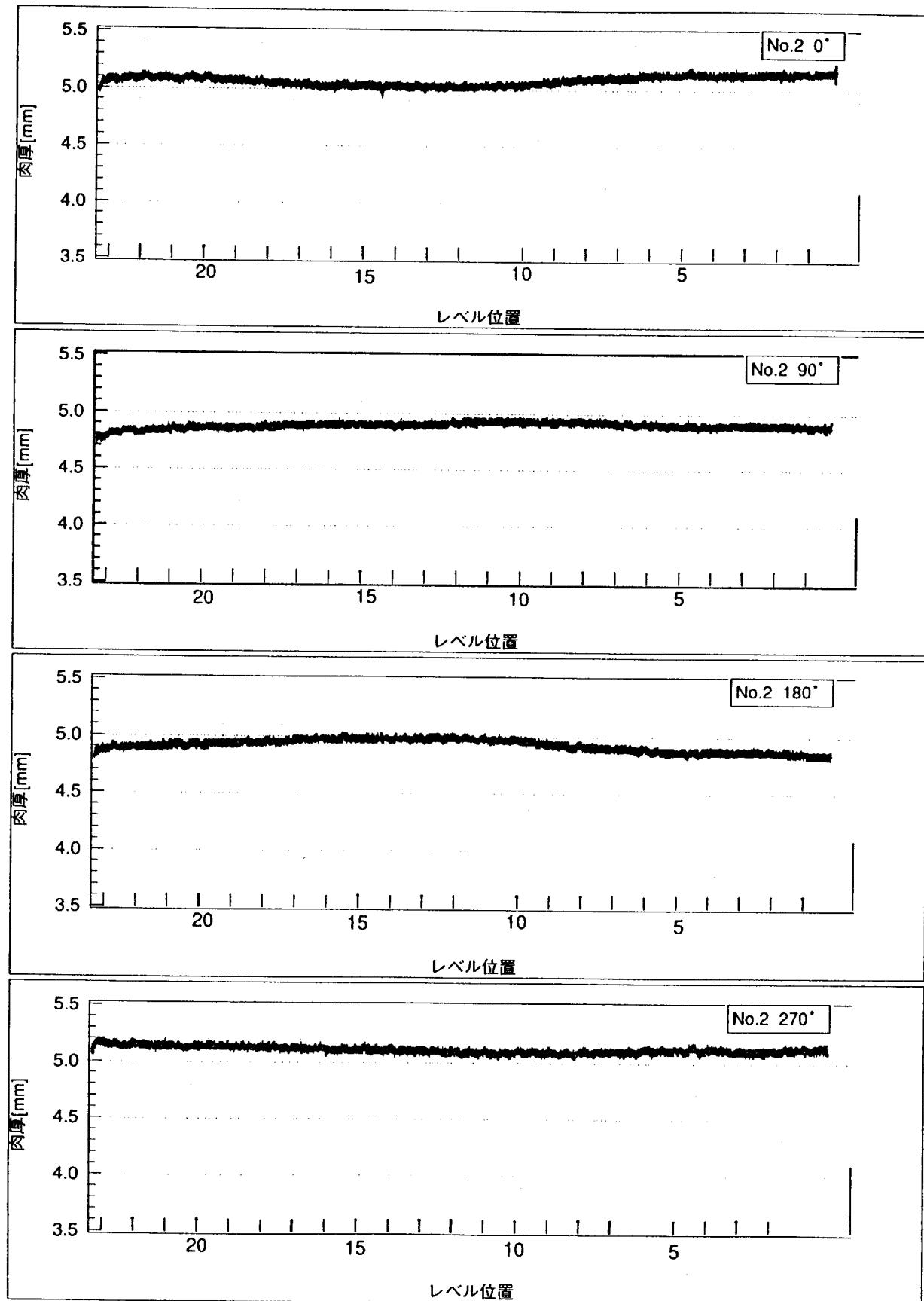


図9-2 伝熱管No.2軸測定チャート

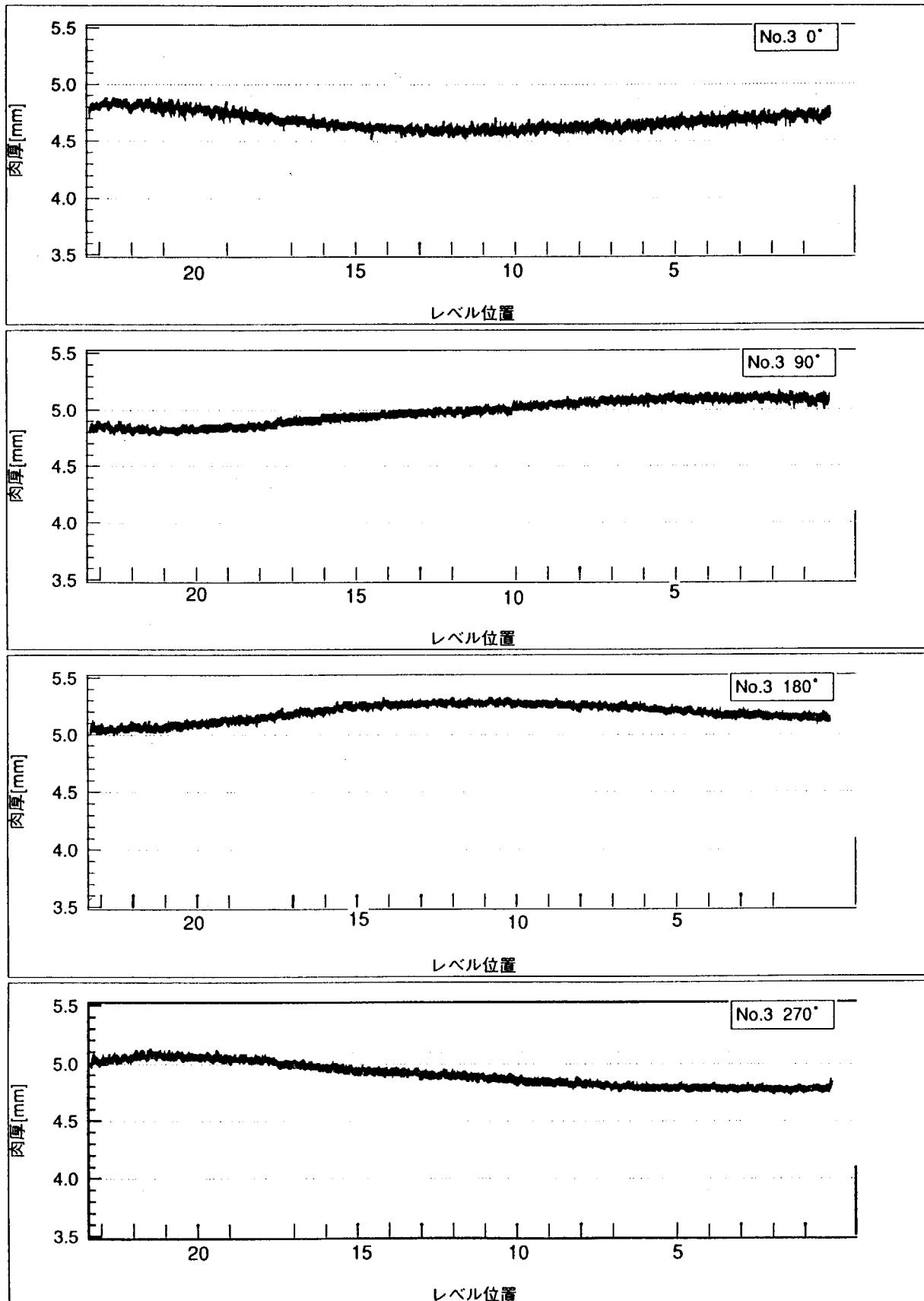


図9-3 伝熱管No. 3軸測定チャート

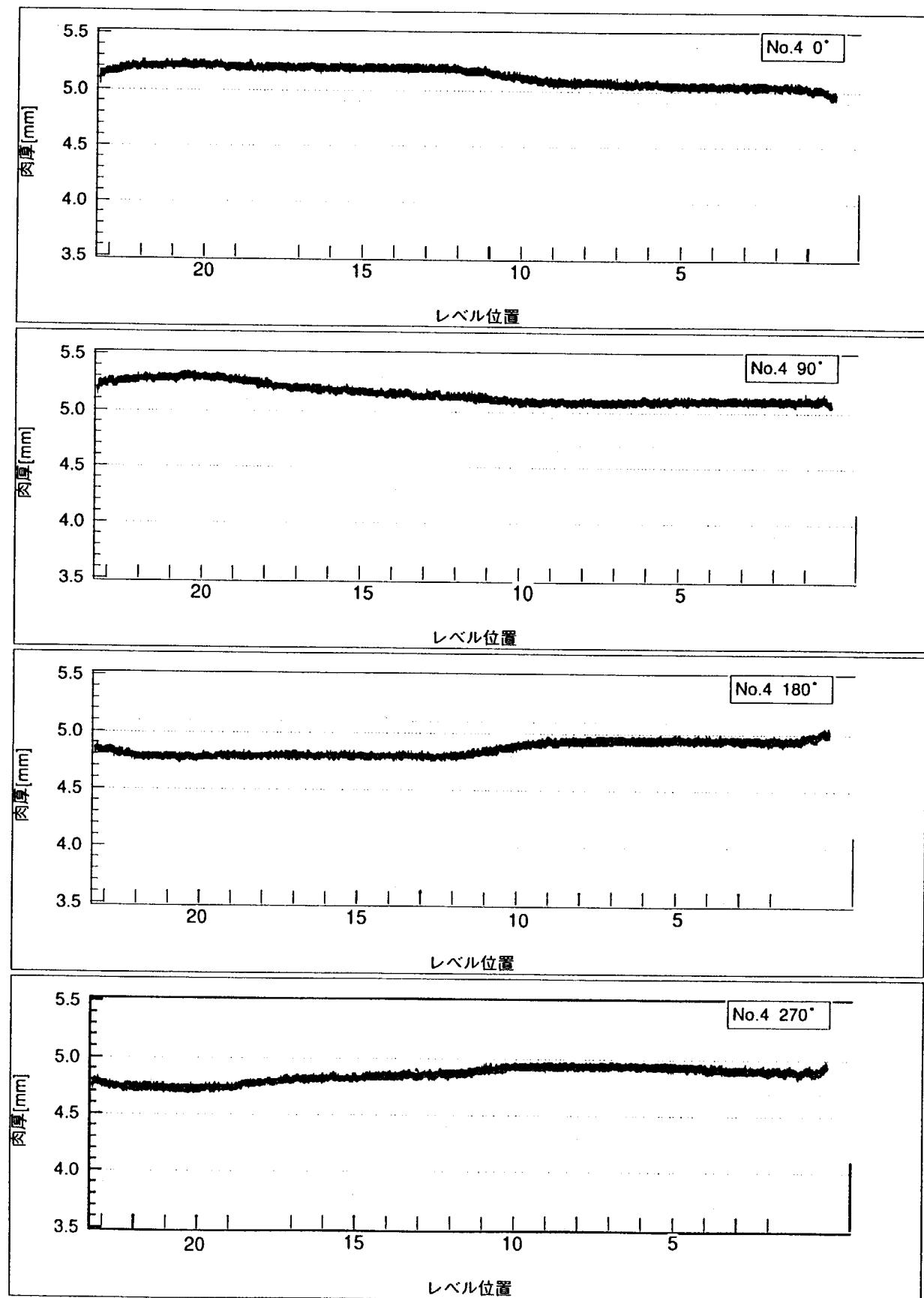


図9-4 伝熱管No.4軸測定チャート

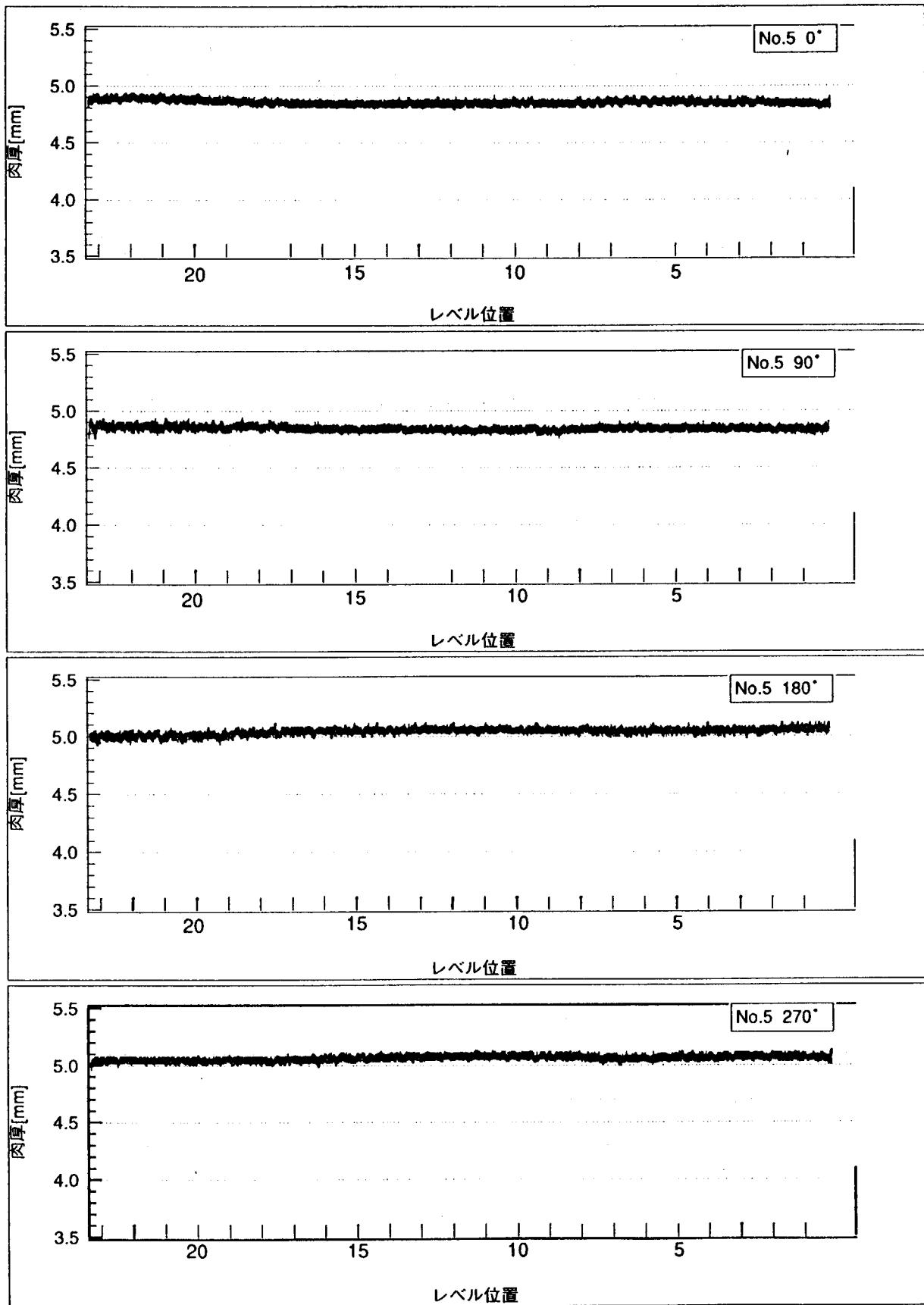


図9-5 伝熱管No. 5軸測定チャート

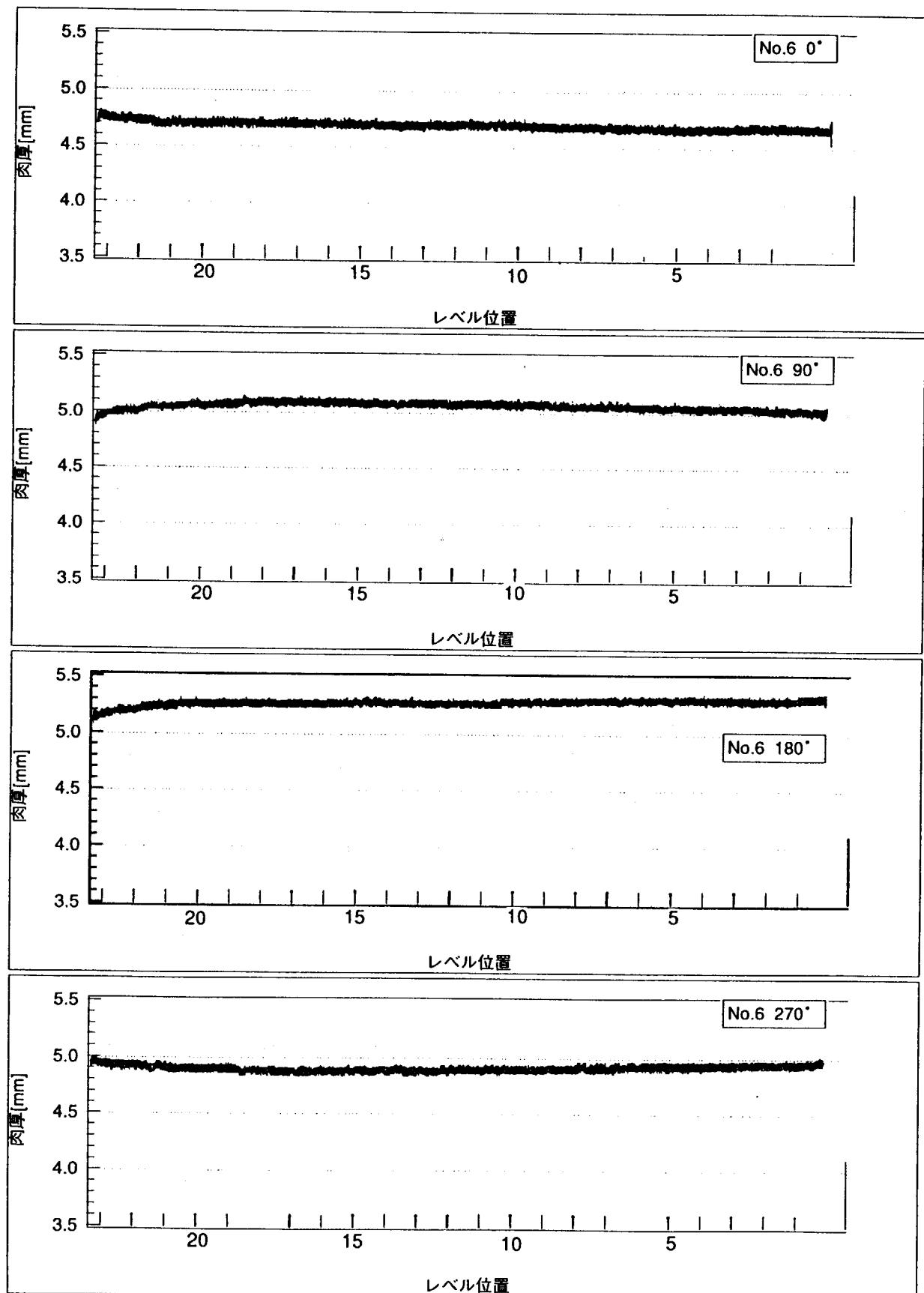


図9-6 伝熱管No. 6軸測定チャート

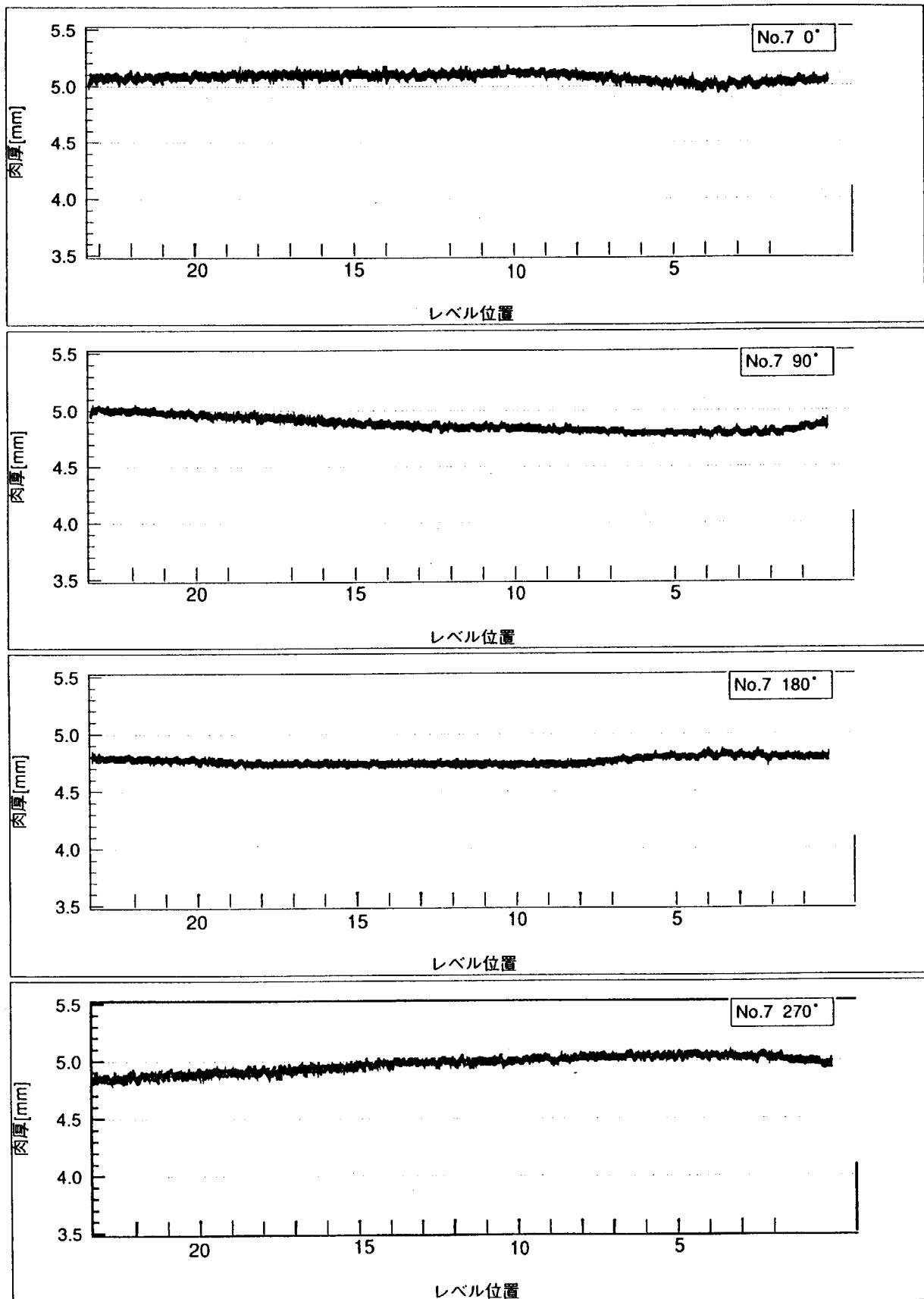


図9-7 伝熱管No.7軸測定チャート

This is a blank page.

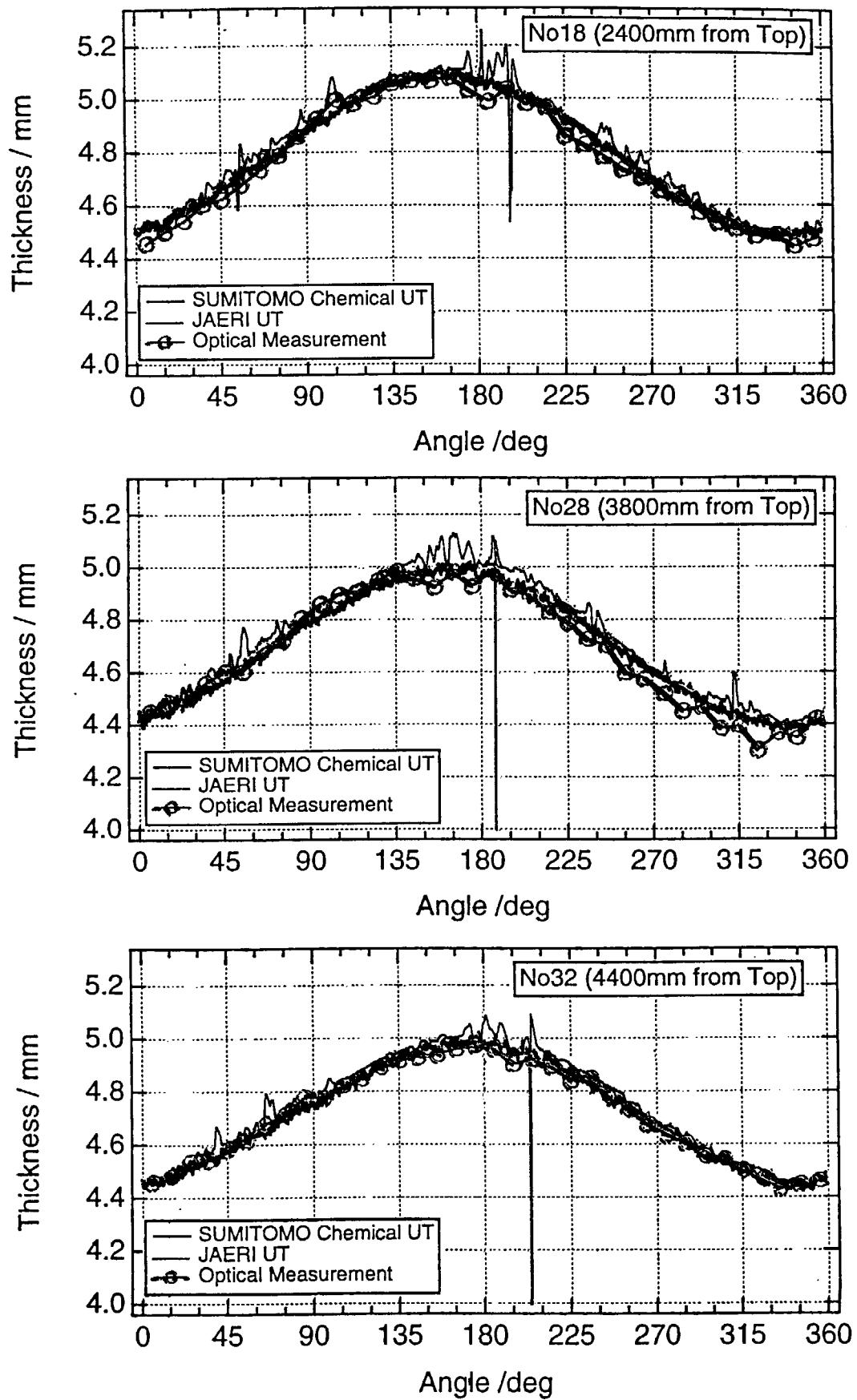


図10 肉厚測定結果

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m ²
吸収線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.4822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038	
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸			
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹			
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)		
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 75 kgf·m/s		
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	Gy	rad		
					1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1		

照射線量	C/kg	R	Sv	rem
			1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		

(86年12月26日現在)

