

資 料

木材および木質構造接合部の強度試験における変位計測

河村 進*

1. 緒 言

島根県産業技術センター有機材料技術科では木材や木質構造接合部の強度試験を数多く手がけてきた。強度試験においては部材自体や接合部の変形性能を計測する必要があるが、対象物によっては同時に複数部位の変形を計測する必要もある。変位計測には一般的に変位計（伸び計）が用いられるが、計測対象によって求められるスペックは異なるので、計測対象に適した変位計を選定する必要がある。しかしそれら変位計の具体的な取り扱いに関する留意点は多くの場合製品取扱説明書に記載されるのみであるので、複数メーカーにまたがって変位計や計測システムを運用する場合の取り扱いは実験者の経験のみに任されている現状がある。そのため、強度性能評価において変位計を用いずに強度試験機のクロスヘッドストロークを変位の値として扱う事例や、適切でない変位計を用いた議論も見受けられる。

本稿では当科で行っている寸法変化の計測の事例紹介と、実際の実験で利用した際の測定精度に関する考察を行ったので、その結果について報告する。

2. 本 論

2.1 変位計の種類と選択

変位計を選択する際のポイントとして、計測可能な距離（計測レンジ）、接触・非接触の有無、出力方法などが挙げられる。動きが速い事象を計測する場合は応答速度も重要な選択ポイントとなる。長時間にわたる計測や過酷な環境での計測を行う場合は、温度や湿度に対する耐久性や環境変動に関する指示値の特性を確認する必要もある。

変位計の精度の指標として直線性がある。変位計の直線性は多くの機種で最大計測レンジの0.1～0.5%程度であり、たとえば計測レンジが100mmで直線性が0.1%の変位計であれば0.1mm程度の精度で寸法変化を計測することになる。したがって、微小変化の計測において計測レンジが長い変位計を用いると精度が不足するので、計測したい寸法変化に応じた適切な計測レンジの変位計を選定する必要がある。また、接触式の変位計は、計測レンジが同等であれば非接触の変位計より測定精度に優れるとされるが、直接接触させて計測するのが難しい事案、すなわち動きの速い事象や

*有機材料技術科

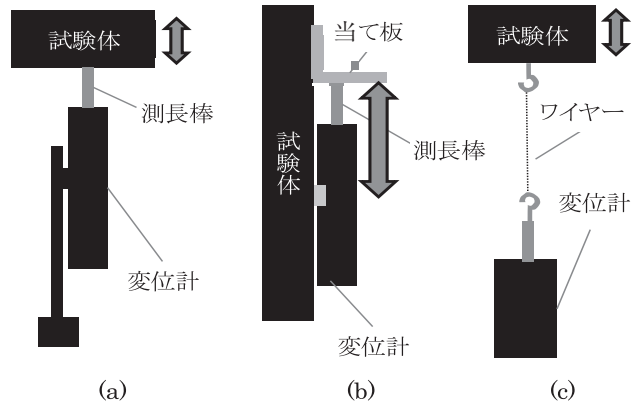


図1 接触式変位計の取り付け方法

柔らかい物体などへの対応が難しい。出力方法の違いについては、アナログ値を出力する変位計を使うには別途データロガーなどのAD変換器を必要とするが、既存の計測システムとの混在利用が容易である。一方、デジタル値を出力する変位計はパソコンに直結して高精度な記録が行える反面、アナログ入力で構築された既存の計測システムとの一体的な運用が難しい。

当科で保有する変位計の仕様を表1に示す。一般的に木材試験や構造物試験においては10～500mm程度の寸法の試験体の変形量を、実験中の変化量の最大値に対して1%の精度で計測することが求められる¹⁾。この仕様を満たす変位計として、木材・建築・土木分野では寸法変化をひずみ量に変換して出力する接触式変位計が広く用いられる。接触式変位計の使い方は、図1(a)に示すように部材に変位計の測長棒を直接押し当てて測定する。測定点の位置が測長棒に対して平行方向に変化する場合は、図1(b)に示すように部材に当て板を取り付け、変位計を当て板に押し当てて測定する。変位計のストロークより離れた位置にある測定点間の寸法変化を計測する場合は、図1(c)のように試験体にフックを取り付け、変位計とフックとをワイヤーなどで接続して計測することもある（ただしワイヤーの伸縮やずれが発生するので計測精度は劣る）。ひずみゲージ式変位計は比較的安価ではあるが、ひずみゲージ出力を電気信号に変換するひずみゲージアンプが必要であり、電圧や温度のみを記録できる安価なタイプのデータロガーには接続できない。

表1 有機材料技術科で保有する変位計の仕様

メーカー	機種名	計測レンジ(mm)	直線性(mm)	計測方式	接触/非接触	出力
ミットヨ	AT715-1600	1600	0.01	光学式	接触	デジタル
ミットヨ	AT715-700	700	0.01			
ミットヨ	ID-H0560	60	0.0025			
ミットヨ	IDC-1012M	12	0.01			
Keyence	AT-010V	10	0.005	電磁誘導式	非接触	電圧/デジタル
東京測器研究所	DP-500E	500	1.5	ひずみゲージ		ひずみゲージ
東京測器研究所	SDP-300D	300	0.9			
東京測器研究所	CDP-100	100	0.1			
東京測器研究所	SDP-100CT	100	0.2			
東京測器研究所	CDP-50	50	0.05			
東京測器研究所	UB-5A	5	0.005			
Keyence	IL-2000	2500	4	レーザ		電圧/デジタル
Keyence	IL-600	800	4		電圧/デジタル	
OMRON	ZS-HLDS60	700	1.4		電圧/デジタル	
Keyence	LK-500	500	0.5		電圧	
Keyence	IL-300	290	0.7		電圧/デジタル	
Panasonic	HG-C1200	160	0.32		電圧	
Panasonic	HG-C1100	70	0.07		電圧	
Keyence	IL-S100	60	0.042		電圧/デジタル	
Keyence	LK-080	30	0.03		電圧	
Keyence	LC-2400	0.2	0.0001		電圧/デジタル	
OMRON	FH-3050	撮影系に依存		カメラ撮影		デジタル

接触式変位計としてはその他デジタル出力タイプの機種がある。デジタル出力タイプの変位計は内部の目盛をカウントする光学方式や電磁誘導方式などがあるが、これらの多くは計測レンジにかかわらず最小読み取り目盛は0.1~10 μ 程度であり、計測レンジが長い変位計でも微小な寸法変化を精度良く計測できる。たとえば強度試験で、接着材料のように大きな荷重で微小な弾性変形を生じた後に、接着層のはく離によりわずかな荷重増加で大きな塑性変形を生じる場合、精度のよい寸法変化が計測可能となる。反面、既存システムとは出力形式の互換性が少なく、強度試験機ソフトウェアや既存の変位計と組み合わせて計測する場合は、個別に計測開始/停止の操作を行うとともに、それぞれのシステムから得られるデータを分けて解析する必要があるため操作性が劣る上、計測開始時刻の同期も難しい。なお、接触式の変位計は試験体の破壊に伴い変位計本体が破損する危険性があり、強度試験機メーカーでは試験体が破壊する前に変位計を取り外すことを推奨している。

一方、非接触の変位計として当科では反射式のレーザ変位計を利用している。反射式のレーザ変位計はセンサヘッドから対象物に向けてレーザ光を発し、反射光をセンサヘッドの受光部で検出して対象物までの距離を計測するので、接触式の変位計とほぼ同様に利用できる。当科におけるレーザ変位計の使用方法については2.2で詳しく述べる。

また、当科ではカメラで対象点を撮影し、対象点の移動

量を画素単位で検出する画像センサ（OMRON製FH-3050）も導入している。画像センサとはカメラと解析用ソフトウェアが組み込まれたコンピュータとで構成され、ソフトウェアの機能設定により撮影画像中のさまざまな形状を認識して、その位置や形状係数などの数値をリアルタイムに出力するものである。寸法精度は撮影系（レンズや画素数など）に依存するものの、撮影画像中の複数箇所の移動量を同時に検出できる利点がある（ただし、処理速度は機能によ

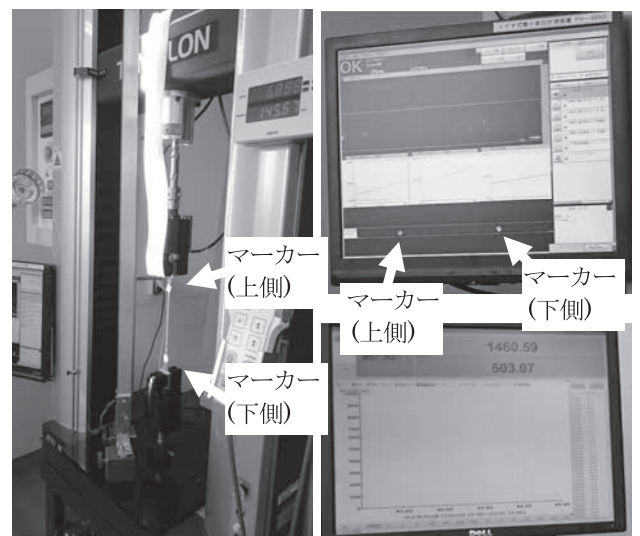


図2 包装用ポリエチレンフィルムの引張試験において、試験体にマーカーを貼付して伸びを計測した事例

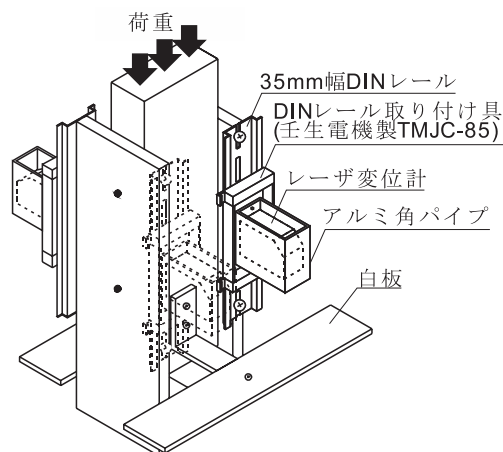


図3 レーザ変位計固定治具の使用例
(合板-釘一面せん断試験)

て変化する)。強度試験に適用すると、試験中に試験体の形状は変化することが多いので、ソフトウェアが対象点を判別できなくなる問題がある。対象点にマーカを貼付すれば誤検出は少なくなるが、柔らかい材料や微小な材料では試験体にマーカを貼付する方法を検討する必要がある。包装用ポリエチレンフィルムの引張試験に際して伸びを計測した例を図2に示す。

なお、非接触式の変位計としてこれ以外には渦電流式変位計、超音波式変位計などが挙げられるが、前者は金属のみを対象とし、最大計測可能距離が比較的短く（～10mm程度）、後者は温度による変動が大きいため当科では利用していない。

2.2 レーザ変位計の使用法

レーザー変位計は多くの機種が電圧出力、すなわち変位を変換式に基づいて電圧値として出力する機能があり、電圧入力に対応したデータロガーに接続して、記録された電圧値から変位に換算する。USBやシリアル通信により直接パソコンに変位を出力できる機種もあり、当科でもシリアル通信ユニットを装着して専用プログラムを作成することで、データロガーを使用しない強度試験も行っている。既存の強度試験機ソフトウェアを利用する場合は、変位計の電圧出力を強度試験機の外部電圧入力端子に接続する。

ひずみゲージ式の変位計と比較して、レーザー変位計はひずみゲージアンプが不要でシステム構築の自由度が高い優位点がある。また接触式の変位計と比較して、接触圧による変位計や当て板の変形を拘束する必要がなく、変位計や当て板の固定方法に自由度が生ずる。

当科で開発したレーザー変位計固定治具を図3に示す。まず変位計を意図せぬ衝突から保護するため、レーザー変位計をアルミ角パイプ内に格納した。角パイプの一端の両端にねじ穴を設けており、角パイプに格納された状態のみでも試験体またはマグネットスタンド等への取り付けは可能であるが、角パイプをDINレール取り付け具に組み込むこと

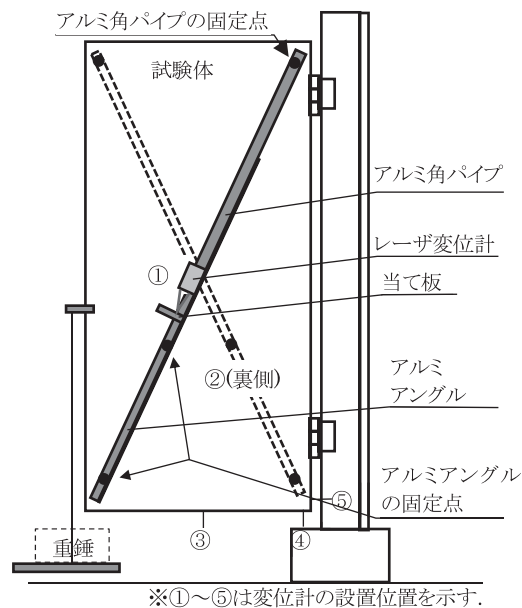


図4 測定点間の距離が長く、かつ寸法変化が微小な場合のレーザー変位計の使用例（ドアのせん断変形の計測）

で、DINレールをねじ止めた試験体に対してレーザー変位計の着脱と、変位計の位置合わせにかかる作業時間が飛躍的に短縮された。当科ではこの方式を採用するまで、変位計の着脱時間を短縮するため交換用の接触式変位計を用意して試験体とともに取り替えており、交換用の変位計を用意するコストが生じていた。ただし、DINレール取り付け具を利用する場合の問題点として、DINレール取り付け具とDINレールとのすべりや、樹脂製の取り付け具（本体：ABS製、爪：6-ナイロン製）の寸法変化を考慮する必要がある。すべりの問題については、アルミ製DINレールと試験体(木材)とを皿タッピングねじで取り付けたらDINレールにゆがみが発生してすべりやすくなることが判明したので、トラスタッピングねじに変更することで解決された。取り付け具の寸法変化については2.4で検討を行った。

接触式変位計と同様、レーザー変位計においても当て板が必要な場合がある。先にも述べたように接触式変位計では測長棒が接触すると当て板が変形する可能性もあるため、当て板には剛性を有するL字金具が用いられる。しかしレーザー変位計を利用する場合は当て板に接触圧がかからないので、アルミ製のDINレールあるいは合板の薄板などの利用も可能であり、軽量であることから当て板を鋼製の試験機治具にマグネットで貼り付けて固定することも可能となった。他方、スポット径が小さなレーザー変位計では当て板には平滑さが求められる。さらに、色むらのある対象物の計測で誤差を生ずる場合もあり、当て板を必要としない場合も試験体に白いラベル用紙などを貼付するのが望ましいと考えられる。例えば、図3に示す事例では色むらの影響を除外するため、荷重載荷部材に当て板として白板を取り付け、変位を計測した。

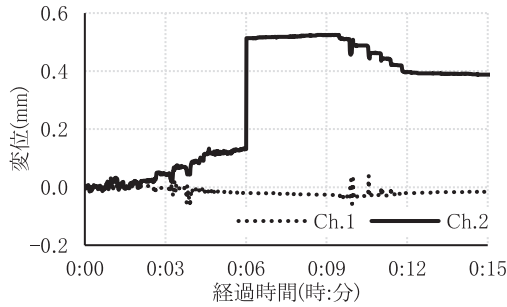


図5 ドアのせん断変形の計測事例

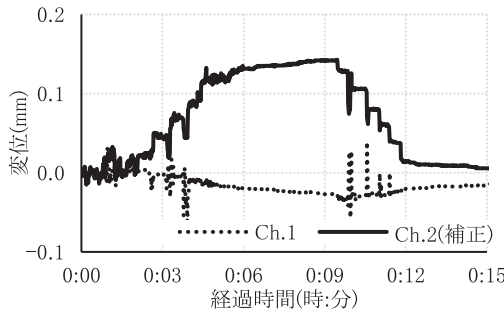


図6 変位データの補正事例

接触式の変位計を用いて、測定点までの距離が長く、かつ微小な寸法変化を計測する場合は、図1(c)にも示したように変位計と測定点間をワイヤーで接続する方法がある。レーザ変位計を用いる場合も、レーザ変位計と当て板の距離が適切な位置関係となる治具を考案する必要がある。一例としてドアに垂直荷重をかけたときのせん断変形を計測した事例を図4に示す。この事例ではドアに錘を載せて荷重を加え、その後錘を取り除いたときのドアの対角線方向の変形量を計測した。なおドアの表側と裏側で対称方向の計測を行い、それぞれCh 1, Ch 2として記録した。計測にあたっては上下の測定点からアルミ製のアングルと角パイプを伸ばしている。すなわちテフロンシートを貼ったアルミアングルを対角線上にドア下方2点で固定して、レーザ変位計を取り付けたアルミ角パイプ(アングルとの摺動面にテフロンシートを貼った)をドア上端1点でボルト止めして、角パイプが回転可能、かつアングル上をなめらかに動くようにした。荷重を加えたときの変形により生ずるアルミアングルと角パイプのずれをレーザ変位計により計測したところ、図5に示すようにCh.1では錘の載荷、除去に応じて変形量が徐々に変化したが、Ch.2では数値が大きく変化する現象が発生した。これはアルミアングルと角パイプの摺動が不十分であったことが理由として考えられる。

2.3 変位データの補正

先にも述べたように、接触式の変位計は試験体が破壊する前に変位計を取り外すことがあるが、この場合は試験途中から変形量の生データは取得できない。また試験体に大きな損傷が生じなくても、表面の化粧板がはく離して浮き

上がった瞬間に大きな寸法変化を記録したり、あるいは変位計の計測範囲を超過することがある。このような試験結果に対して、試験をやり直せない場合、あるいは表面の浮き上がりを見逃した解析を行いたい場合など何らかの方法でデータ解析が必要な場合は、工学的に妥当と判断される方法により変位データを補正する。

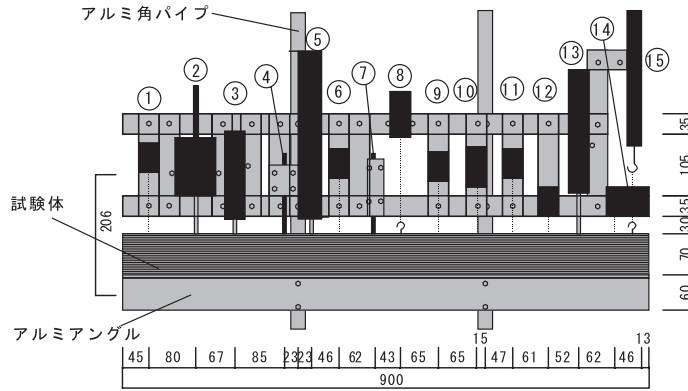
たとえば強度試験機付属のソフトによっては、変位計を取り外した後は変位計の値に代えて強度試験機のストローク(モーターのパルスカウントにより計算したクロスヘッドの移動量)を自動記録する機能がある²⁾。強度試験においては、試験開始直後は治具のゆるみが生じていることや、試験体と治具とのすき間の平行度が十分でない状態で試験を開始すると、変位計による試験体の変形量とクロスヘッドの移動量とは差が生じやすいが、試験体に荷重がある程度加わった後は治具間のゆるみや治具とのすき間が消失してクロスヘッドの移動量が変位計の変形量と一致するようになるので、この補正方法は妥当と考えられる。また、測定レンジが異なる変位計を2台並べて試験開始し、変形が小さいときは測定レンジが短い(精度の高い)変位計の値のみを記録し、測定レンジを超える直前に測定レンジの長い変位計の値に自動的に切り替えて記録する機能を有するものもある。

一方、図5のようにデータが瞬時に大きく変化するような場合について、変化前後における変位量の変化はほぼゼロであるとみなして、変化前後の変位が一致するように補正することも考えられる。この方法に基づくと、図5の事例についても図6のような補正により、計測系の不具合と考えられる現象を取り除いた結果を得ることができる。

この考え方を拡張したのが、木材試験における変位計の盛り替えというテクニックである。すなわち測定レンジが短い変位計を用いて大きな変位を計測するもので、変位計が測定レンジを超える直前に強度試験機のクロスヘッドを一時停止させ、変位計を計測レンジ内に移動させた後に試験機の動きを再開させる方法である。しかしながらクロスヘッドを一時停止している間にも試験体は徐々に変形するので、盛り替えた後の計測精度は不明である。変位計の盛り替えを前提とした変位計の利用を検討するより、たとえ微小変位の計測精度は低くても測定レンジが長い変位計を用いて、盛り替えを行わずに計測する方が望ましいと考えられる。また、試験中にクロスヘッドを一時停止して変位計を移動させる必要があることから試験機ソフトウェアにこの機能が組み込まれている必要もあるが、盛り替えに対応する試験機ソフトウェアは少ない。

2.4 一般環境下における寸法変化の実測例

多くの強度試験は短時間で終了するので試験中の温湿度変化の影響をあまり考慮する必要はないが、長期間にわたる試験体の寸法変化を計測する場合は温湿度変化に対する計測系の挙動を確認する必要がある。試験場所の標準状態



(注)丸数字は変位計 No.を示す。アングルのみの状態を計測する場合は、変位計の位置が適切な計測可能距離になるよう、変位計とアングルの距離を70mm 短くなるよう調整した。

図7 計測に用いた変位計、治具および試験体との位置関係

表2 計測に用いた変位計と固定方法

No.	型番	変位計の固定方法
①	IL-S100 #1	DIN レールにボルト留め
②	ID-H0560	DIN レールにボルト留め
③	CDP-50	DIN レールにボルト留め
④	AT-010V #1	アルミブロックに固定して DIN レールにボルト留め
⑤	CDP-100	DIN レールにボルト留め
⑥	IL-S100 #2	DIN レールにボルト留め
⑦	AT-010V #2	木製ブロックで固定
⑧	DP-500E	DIN レールにボルト留め、試験体にはフックをねじ留めして引っ掛けた。
⑨	IL-S100 #3	DIN レール留め具を使用
⑩	LK-080	DIN レールにボルト留め
⑪	IL-S100 #4	DIN レール留め具を使用
⑫	IA-030 #1	DIN レール留め具を使用
⑬	SDP-100CT #1	DIN レールにボルト留め
⑭	IA-030 #2	DIN レールにボルト留め
⑮	SDP-100CT #2	DIN レールにボルト留め、試験体にはフックを取り付け、φ0.6×96mm のステンレス製ワイヤーで引っ掛けた。

(注1)IA-030: Keyence 製レーザ変位計(レンタル品), 計測レンジ25mm, 直線性0.025mm

についてはJIS Z8703³⁾で規定するように一定温湿度で行うことになっており、当科が保有するほとんどの変位計も変動環境下において精度保証するものは存在しないが、木材試験においては試験体大きいこともあって外気環境で試験を行ったり、建築物の経年変化を想定して温湿度変化における評価を行うこともある。

温湿度変化による材料の寸法変化を計測する場合は変位計が直接温湿度変化にさらされるので、計測された変位計の数値には材料の寸法変化と計測系の温湿度依存性が含まれることになる。そこで温湿度変化に対する木材の寸法変化を計測する場合を想定した実験を行い、計測系の違いによる計測値の変動を考察した。

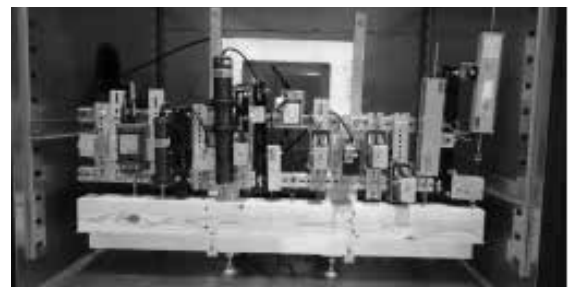


図8 試験体や変位計を恒温恒湿機内に設置した状況

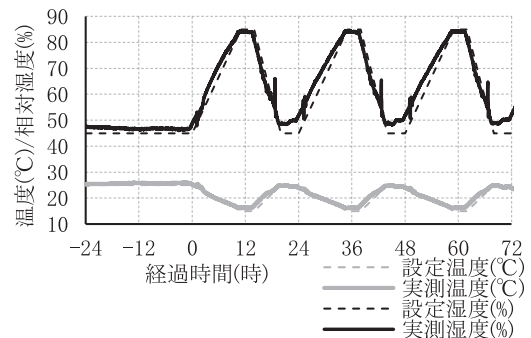


図9 設定した温湿度変化

変位計の試験体への取り付け方法や位置関係については、表2および図7～8に示すように変位計を2本のDINレール上に横に並べて取り付けました。DINレールへの変位計の取り付けに際しては、測定点までの距離が各変位計の計測レンジに合致するように、変位計ごとに上下位置を調整して取り付けました。試験体設置用の台座として60×60×5mm厚さのアルミ製アングルを用いた。これらの変位計を取り付けたDINレールおよび台座アングルを、図7に示す位置で2本の25mm角のアルミ製角パイプに固定した。アングルの上にスギ(寸法:高さ70×奥行き60×長さ900mm, 気乾密度0.42g/cm³, 含水率9.7%)を載せ、恒温恒湿機(エスベック製PL-3 KP)内に設置し、設定した温湿度変化を与えたときの計測値を記録した。なお、計測系の温湿度依存性を確認するため、スギ材を支持する台座のアングルのみを計測した値の変化についても計測した(アングルのみを計測す

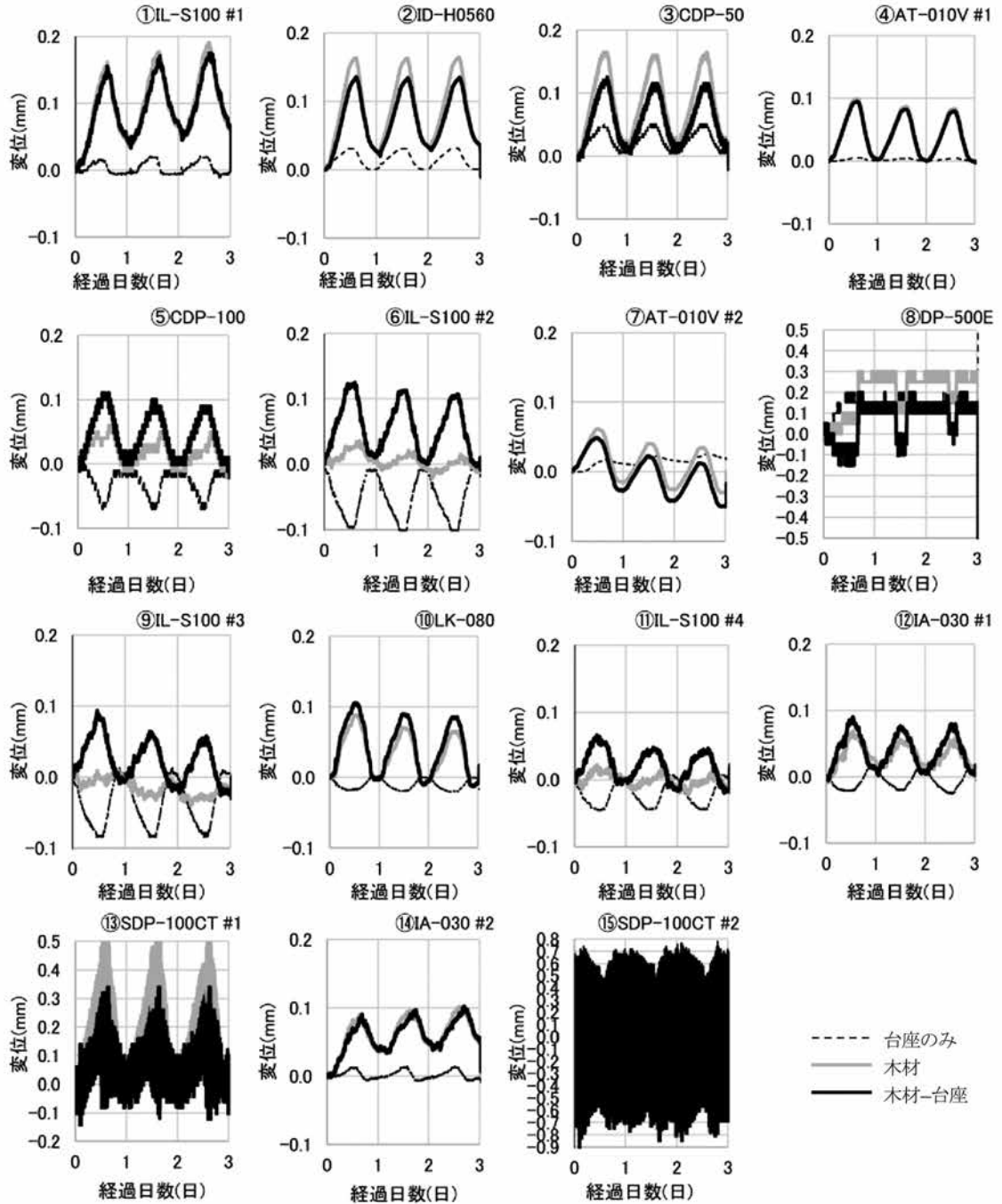


図10 温湿度変化を与えたときの計測値の変化

る場合は各変位計の計測値がレンジ内に収まるよう、変位計とアングル間の距離を70mm接近させた。今回の計測値は、変位計と試験体上面あるいは台座アングル表面の距離を計測していることになるが、台座アングルはもとより、試験体についても横方向の位置の相違による距離の相違は無く、各変位計が試験体の横方向の異なる位置に設置されていても、その影響は無視でき、計測値には変位計型番と取り付け方法の相違が反映されると考えた。

設定した温湿度変化を図9に示す。この周期的な温湿度変化は2017年5月下旬に観測された松江市の1日の温湿度

変化の平均値を模したものであるが、計測系を安定させるため、試験開始前に試験体を設置した状態で25℃45%で24時間定値運転してから計測を開始した。よって、以下の議論では周期的な温湿度変化の開始時刻を経過日数0とした寸法変化を示す。

計測値の変化を図10に示す。木材を計測した指示値から台座アングルのみを計測した指示値を差し引くと木材の寸法変化が求められると考えたが、台座アングルのみを計測した指示値も変位計によってかなり異なる結果を示した。すなわち、周辺温度の下降によって指示値が増加するもの

(たとえば①～④, ⑭), および逆の変化を示したもの(⑤⑥, ⑨～⑫)があった。指示値のドリフトが生じた⑦については、変位計の固定に使用した木製ブロックが吸放湿することによる寸法変化が計測されたと考えられる。一方変位計をボルト留めにより固定したものに対するDINレール留め具を用いた場合(①⑥に対する⑨⑪, あるいは⑭に対する⑫)を比較した結果では、指示値の変動に大きな差はなく、指示値の顕著なドリフトも観測されなかった。逆に同一変位計を同一固定方法により設置した場合(①と⑥)でも異なる結果が得られたことや、計測系を支持する2本のアルミ角パイプの外側(①～④, ⑪～⑮)と内側(⑤～⑩)では台座のみの指示値が逆の増減を示すものも多く見られたことから、横方向の位置の相違は生じないとした当初の仮定に問題があり、台座アングルや変位計の固定方法による影響も考えられる。ただし、多くの変位計はその直線性の精度が指示値の高々数分の1程度であり、誤差が大きく相対的な寸法変化についても十分計測できているとは言いがたい。また、同一メーカー製のともにひずみケージ式変位計である⑤と⑬を比較すると、計測レンジは同一の100mmで直線性が0.1mmと0.2mmで相違しているだけであるが、⑬の方にノイズが多く生じており、⑬の変位計の方が周辺環境の温湿度変化により大きく影響を受け易いとも考えられる。さらにワイヤーを引っ掛けて計測する方法(⑧や⑮)は、1%の精度で計測することが求められる¹⁾木材試験において、今回の実験への使用にはふさわしくないといえる。

最も直線性が優れた②を用いて台座のみを計測した結果では最大0.031mmの変化が観測されたが、20℃におけるアルミニウムの線膨張率⁴⁾は $23.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、周辺の温

度変化は10℃であるから、変位計や台座を固定するアルミ角パイプが温度変化により伸縮したと考えると変位計を固定するねじ穴の位置とアルミアングル間距離は134mmと計算されるが、実測距離は136mm(図7に示すように70mm厚さの木材を設置した状態では206mmであったが、台座のみを計測する場合は70mm接近させて136mmとした)とほぼ一致した。すなわち今回作成したような試験装置により温度変動のある環境で長期計測を行う場合は、変位計固定治具などの寸法変化の影響も考慮する必要があるといえる。また木材の計測においては治具の加工精度や剛性は軽視されがちであるが、微小な寸法変化の計測においては治具の設計にも十分な配慮が必要であるといえる。

3. ま と め

当科で行っている変位計の使用方法やデータのとりまとめ方法などについて、その概略を紹介した。誌面の都合で十分な紹介ができなかったため、その他の変位計の使用に関する案件については個別にお問い合わせいただければ幸いである。

文 献

- 1) 日本住宅・木材技術センター. 構造用木材の強度試験マニュアル. 2011, p.7.
- 2) 島津製作所. TRAPEZIUM Xソフトウェアリファレンスマニュアル. p.125.
- 3) JIS Z 8703-1983. 試験場所の標準状態. p.1.
- 4) 国立天文台. 平成20年理科年表. p.401.