

## 高精度鉛直度レーザ測定システムの研究開発

中川秀彦  
(技術研究所)

和田孝史  
(技術開発本部)

### § 1. はじめに

近年、土地の高度利用と付加価値の高い空間提供のため、事務所ビルや集合住宅等の高層化が積極的に進められている。このような超高層ビルの施工に必要な支援技術の一つに高精度測定技術がある。

従来より、超高層建物や鉄骨柱の倒れを知るための鉛直度の測定には、トランシットや光学鉛直器等が用いられてきた。従来方式は、建方工事の進捗に合わせて節ごとに測定の基準点(基準地墨)を移動する方法をとってきたため、鉛直度は相対的倒れ量として求まり、累積誤差の問題を内包していた。また、建物が風などの影響で揺れている場合、従来の鉛直度測定では所定の精度を確保するのが困難であった。

本研究では、測定精度に最も影響する要因である基準点の移動について従来方式を改め、基準階の基準点座標を測定対象の建方階まで、直接、鉛直移動する新たな方式を提案する。この方式は、鉛直方向に射出する回転レーザー光を受光器で検出し、レーザー光スポット群の受光強度を重心計算処理し、求めた重心を移動後の基準点座標とするものである。この原理を応用して、高精度鉛直度レーザ測定システムの開発を行ない、建物が揺れている状態にあっても、基準点を精度±2mm以内で鉛直方向に移動することが可能となった。

本報告では目標となる測定精度を定め、提案方式を実現するに当たっての技術的課題を明らかにする。次に、その課題解決策と検証結果をまとめる。また、本システムを建方工事へ適用するに当たり、既開発の建方測定システムと組み合わせた測定事例を紹介する。最後に、その実績に基づく今後の展開について触れる。

### § 2. 開発の目標

鉛直度の高精度測定を中心に、以下の項目を目標とす

る開発を進めることにした。

(1)基準点の鉛直移動距離は最大500mとする。

(2)鉛直移動の目標精度は以下のように定める。

①高さ200mまでは±2mm以内

②高さ200~500mまでは±5mm以内

(3)建物が風などで揺れている場合でも測定を可能とする。

項目(1)は、将来の超々高層建物といわれる建方工事への適用を考慮して、最大500mと定めた。

項目(2)の目標とする精度は、次のような検討結果により定めた。

適用対象とする超高層建物は、現状では高さ200m(約50階)までの案件が多いため、200mで目標精度を分けた。また、日本建築学会の鉄骨精度検査基準の中で建物の倒れに関し、原則としてこれ以上の建物の倒れは許されない基準許容差が以下のように定まっている。なお、建物の倒れは水平方向の誤差として表わす。

(a)高さ100m以内の場合

$$(\text{建物の倒れ}) \leq (\text{高さ}) / 2500 + 10\text{mm}$$

(b)高さ100mを越える場合

$$(\text{建物の倒れ}) \leq 50\text{mm}$$

この基準許容差をもとに、まずその1/10の値を目標精度とした。しかし、高さ100mを越えても現状行なわれている建方工事では、建物の倒れの目標を±25mm以内としていることが多いことを考慮して、目標精度を±2mmと定めた。これは、超高層建物の鉄骨建方を支援するために十分な値であることが確認されている。

開発は、まず項目(1)~(3)を実現する測定方式の考案から始まり、その技術的検討と実験を行なった。

### § 3. 鉛直度の測定

#### 3.1 測定方式

本システムの基本構成を図-1に示す。本システムは

基準階の基準点座標上に設置するレーザー発振器および回転台とベース，建方階に設置する受光器およびコントローラから構成される。レーザー発振器は市販製品を一部改造し，それ以外の機器は新規に開発した。

本システムの機能は，レーザーの直進性を利用し，基準階の基準点座標を建方階に鉛直移動することである。その移動後の基準点座標は，受光器で受けるレーザースポット群の重心座標として求まる。

レーザー発振器は，そのレーザー光の中心が，基準点座標  $(x_0, y_0)$  となるようにベースを用いて設置する。ベースには  $x$ - $y$  方向に合わせる溝が切られており，その溝と基準地墨を合わせる。設置されたベースに回転台を載せ，さらにその上にレーザー発振器を載せる。回転台とレーザー発振器は，各々円形気泡管を見ながら調整ねじを調整して水平レベルをとる。

受光器は，建方階に設けた取り付け架台に乗せる。この取り付け架台の設置場所は，移動後の基準点が本来あるべき位置とする。架台は，受光器が  $x$ - $y$  方向に数 10 mm の範囲で移動できるような大きさとなっている。この結果，おおむねレーザー光が受光器の中心付近で測定され

ることになる。

### 3.2 技術的課題の抽出

開発の効率を上げるために，現状のレーザー光を用いた測定機器の適用性を検討した。その結果，レーザー発振器は市販品の改造で対処し，受光器およびコントローラを開発すべき項目とした。

開発を進めるに当たり，以下のような技術的課題が明らかになった。

- (1) 受光器における検出精度
- (2) レーザー発振器の鉛直保持
- (3) 建物の揺れに対する測定系の追従性
- (4) レーザ光の実用到達距離と測定範囲
- (5) レーザ光以外の外乱光の処理

項目(1)は，レーザー光のスポット位置を直接二次元座標の値として測定を行なうための方式提案である。受光センサとして適用可能な素子を選択し，その大きさと検出精度について検討する。

項目(2)は，レーザー発振器の機械的誤差とその最小化について検討する。

項目(3)は，施工時の建物の揺れを想定し，本システムの追従性を検討する。

項目(4)および(5)は，レーザー光に関し検討を行なう。

以下，これらの課題解決策と検証した結果について順次述べる。

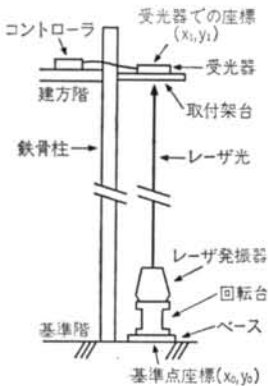


図-1 鉛直レーザー測定システムの基本構成

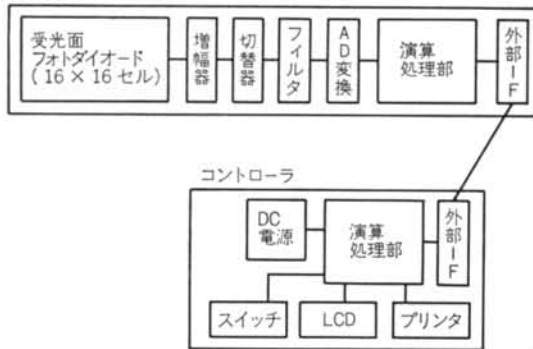


図-2 受光器およびコントローラの機能ブロック

## § 4. 課題の解決策と検証結果

### 4.1 受光器における検出精度

試作した受光器およびコントローラの機能ブロックを図-2に示す。

受光器は，フォトダイオードをマトリックス状に配置した受光面，増幅器・AD変換器，演算処理部および外部IFから構成される。コントローラは操作スイッチ，LCD表示部，プリンタ，演算処理部および外部IFから構成される。なお，受光器の受光面とは反対側の盤上に1mm間隔で基盤目状の格子 ( $x$ - $y$  座標) が印刷されている。この  $x$ - $y$  座標は，コントローラに表示されるレーザーの重心位置を示す座標と一致しており，移動後の基準点に他の測距・測角装置の反射鏡などを置ける構造となっている。

受光素子には，一般的にフォトダイオードとフォトトランジスタが多く利用される。本受光面の素子として，その検出性能のばらつきが小さいという理由でフォトダ

イオードを選択した。ただし、検出出力が小さいため増幅器が必要となる。表-1にその仕様を示す。

受光器における検出精度について検討する。

本開発で用いたレーザ発振器からのレーザ光は、距離150mで直径約20mmのスポット径を有している。距離に比例してスポット径は広がる傾向を示す。このレーザ光と直角にフォトダイオードのマトリックスを置くと、複数のフォトダイオードが光を感知する。受光強度値が広い範囲をもっているため、各フォトダイオードの増幅器には対数増幅回路を採用した。このため、受光強度は対数圧縮され、その値は飽和することなく取り出すことができる。この増幅された受光信号を8ビットAD(256階調アナログ/デジタル)変換した後、逆対数変換の近似処理を用いて受光強度を求める。図-3に受光強度値の実測例を示す。図は、フォトダイオード16×16のマトリックスの一部を示す。なお、セル中表示された値は逆対数変換の近似処理を行なった0~255の範囲にある値である。受光信号にはノイズが混入しているために、求めた受光強度値0~255に対し、しきい値を16に設定し、それ以下の値を切り捨てて重心計算処理を行なう。以上の処理は、1回のサンプリング測定である。これを複数回サンプリングし、求めた重心位置をさらに平均化することにより測定精度を向上させる。演算処理時間などを考慮して、サンプリング回数を128回/分とした。

以上の検討に基づき受光器を試作した。次に、写真-1に示す精度を検証する治具を製作し、試作機の性能を

開放電圧 V <sub>oc</sub> (V)	短絡電流 I <sub>sc</sub> (μA)	Ev (Lux)	分光感度	
			λ <sub>peak</sub> (nm)	λ <sub>typ</sub> (nm)
0.41	620	1000	900	400~1100

表-1 フォトダイオードの主な電気的特性

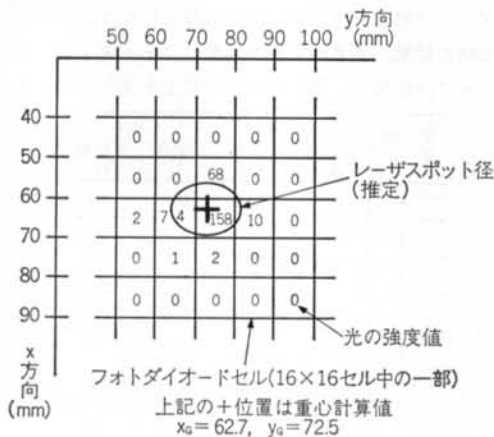


図-3 フォトダイオードマトリックスの受光強度値の実測例

検証した。治具は、受光器を高さ1mに固定し、レーザ発振器をmm単位で移動できる。この結果、受光器で求めた重心座標の移動量は誤差±1mm内に収まり、目標精度±2mmを充分に達成することが確認された。

#### 4.2 レーザ発振器の鉛直保持

使用したレーザ発振器は、自動鉛直保持機構により鉛直精度±2.5mm/50m(振れ角に換算すると±10秒)が保証されている。したがって、100mでは±5mm、500mでは±25mmの最大誤差が生じることが想定される。この機械誤差は本システムの鉛直性の誤差要因の一つであり、これを最小化する方式の検討を行なった。

一般的に上記のような場合、x方向とy方向とを反転(90°ずつ1回転)させて、測定値の平均をとることにより、一定方向に傾きをもつ機械誤差を相殺することが多い。本システムでは、この反転させる方法を自動化することを考え、一定速度で回転する台にレーザ発振器を搭載する方式をとった。この方式により、レーザ光が傾いている場合には受光器上に円を描くことになる。その円の重心座標を計算することで、移動後の基準点の真の座標値の近似値が求まる。

回転台により機械誤差を最小化する方式を検証するために、写真-2に示す回転台を試作し、レーザの軌跡を求める実験を行なった。なお、回転台の回転速度は0~2.0rpmの範囲で変更できる。

実験の結果、レーザ発振器の回転により、その自動鉛直保持機構が地磁気の影響を受けることが分かった。回

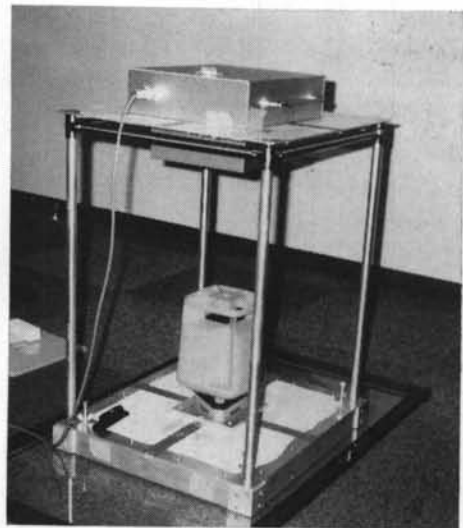


写真-1 精度を検証する治具に載せた受光器(上)とレーザ発振器(下)

回転速度とレーザー光の振れ角は図-4に示すような関係となる。地磁気の影響によるレーザー光の振れ角を抑え、同時にレーザー発振器の機械誤差を小さくするための最適回転速度は、0.6 rpm 以下であることが分かった。



写真-2 回転台上に載せたレーザー発振器

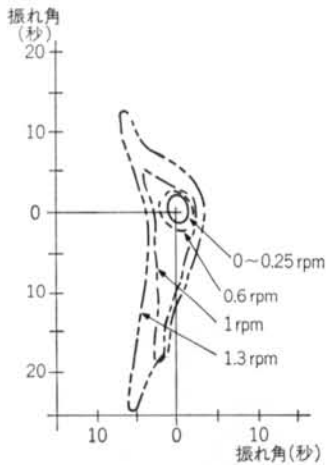


図-4 レーザー発振器の回転速度と振れ角の関係

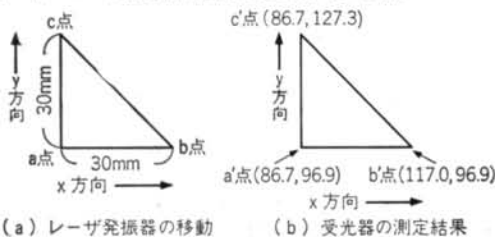


図-5 回転台を用いた実証実験の結果

さらに、施工現場において実証実験を行なった。実験は、高さ17mの位置に受光器を固定し、レーザー発振器を図-5で示したa点からx方向にb点まで、y方向にc点まで各々30mm移動した。

実験の結果、受光器で受けた各座標値はx方向30.3mm、y方向30.4mmだけ各々移動するという測定結果が得られ、目標精度±2mm以内であることが実証された。

### 4.3 建物の揺れに対する追従性

施工時の超高層建物の揺れは、構造設計値をもとに振動数約0.2~0.5 Hz(周期2~5秒)、最大揺れ幅を約±50mmと推定した。

建物の揺れをシミュレートするために、受光器を振動台上に固定し二次元運動させる実験を行なった。表-2に示す条件について、実験結果の代表例を図-6~図-8に示す。なお、図-6のX軸運動は振動台の計測データとVLの時間軸が異なるために、時刻0に両者のゼロクロスポイントを一致させて描いた。

この結果、建物の揺れに対する追従性は良く、振動台の計測データに基づく揺れの中心座標と本システムの出力結果が目標精度内に入ることが確認された。

さらに、追従性の向上のため1回のサンプリング処理時間の短縮について検討した。

その処理の一つとして、128回/分のサンプリング測定(本測定)に入る前に、建物の揺れの傾向を把握するためのサンプリング(予備測定)を行なう方法をとった。予備測定では、数10秒間16×16セルの全フォトダイオードでレーザー光を受けて建物の揺れ幅を捉える(これを全サーチモードと呼ぶ)。この揺れ幅のうち、最大の揺れをカバーする正方形の測定エリア(1辺≤16セル)を設定する。本測定は、設定した測定エリア内だけのサンプリング処理を行ない、重心計算を行なう。

実験の結果、受光面が16×16個のフォトダイオードマトリックスの場合、測定エリアの設定を正方形1×1~

実験番号	x方向		y方向	
	振動数(Hz)	変位量(mm)	振動数(Hz)	変位量(mm)
1	0.5	15	0.0	0
2	0.0	0	0.5	15
3	0.2	50	0.0	0
4	0.0	0	0.2	50
5	0.2	50	0.2	50
6	1.0	50	0.5	50
7	0.5	50	0.5	50

表-2 建物の揺れをシミュレートする実験のパラメータ

16×16セルの16段階に細分化することがサンプリング処理の短縮にはなるが、その反面測定誤差が大きくなることが分かった。主な原因は、全サーチモードによって設定した測定エリアに、本測定中のレーザスポットが収まる比率（ヒット率）が約80%であったためである。以上の理由から、測定エリアを細分化する方法はとらず、建

物の揺れが収斂している場合に限り測定エリアを一つ設定することにした。これは、全サーチモードによる建物の揺れ幅が1～2セル内に収まる場合に限り、揺れの中心を囲む4×4セルの測定エリアとした。その結果、本測定は殆どの場合全サーチモードとなった。

測定サンプリング回数は、サンプリング処理時間から全サーチモードは128回/分、測定エリア4×4セルの場合は256回/分と決めた。

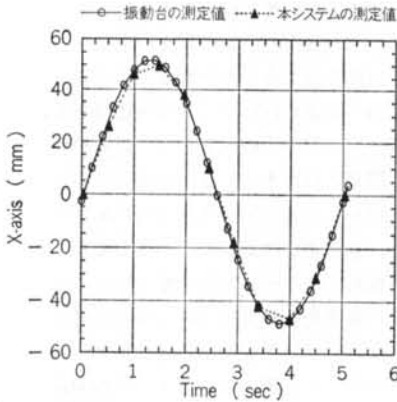


図-6 実験番号1の結果

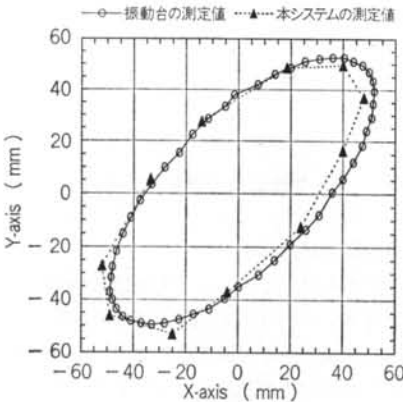


図-7 実験番号5の結果

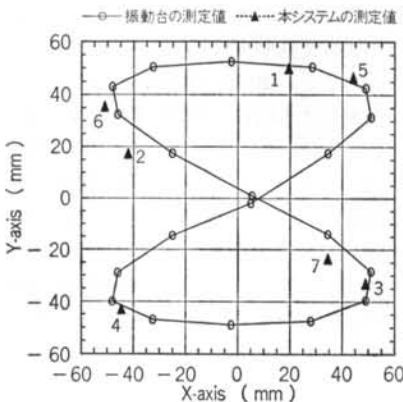


図-8 実験番号6の結果

#### 4.4 レーザ光の実用到達距離と測定範囲

使用したレーザ発振器のレーザ光は、ピーク発振波長780 nmの半導体レーザが用いられており、安定した単一横モードを有している。発光領域のスポットは数 $\mu\text{m}$ の楕円形で射出されるが、光学系レンズにより断面が円に近い平行光線となる。メーカー参考値では、150mの距離で約20mm程度のスポット径となっている。スポットにおける光強度は、スポットの中心を最大としたガウス分布曲線に類似したものである。

大気中の光出力レベルの減衰について、図-9に示す実験を行ない、その結果を図-10に示す。距離変更が容易な地上実験とするため、レーザ発振器のレーザ発振方向をプリズムにより90°曲げ、水平光線とした。プリズムによる光強度の減衰は約20%減となる。縦軸の $I_{\text{max}}$ は、受光器のフォトダイオード16×16セルのうち最大の受光強度値を示したセルの値である。

この結果、距離500mまで、使用したレーザ発振器の性能で十分に測定が可能であると考えられる。ただし、距離250m以上において、さらにノイズマージンを向上することが望まれる。この実現方法として、受光器の感度を上げるか、またはレーザ出力を大きくすることなど

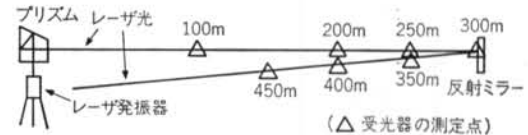


図-9 レーザ光の強度と距離の関係を知るための実験

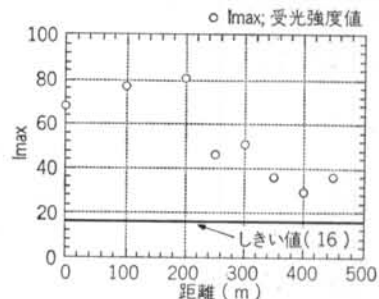
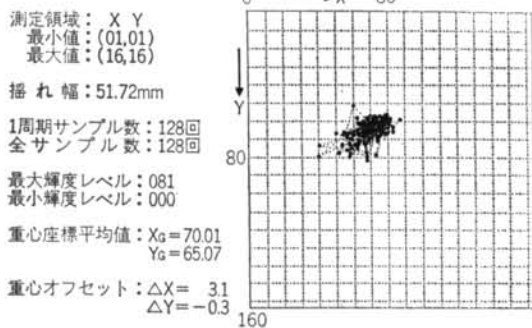
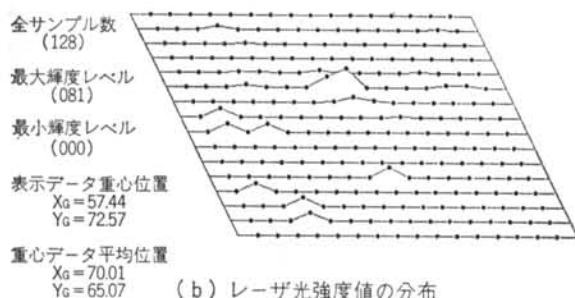


図-10 受光器が検出した受光強度と距離の関係

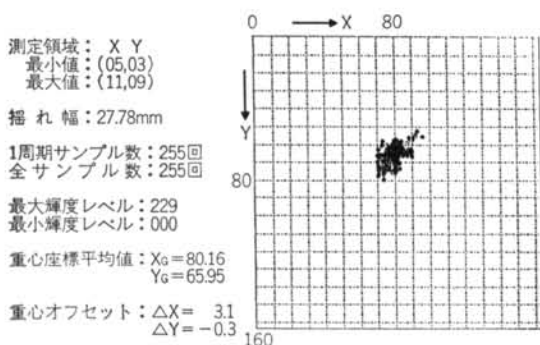


(a) 測定座標値の分布

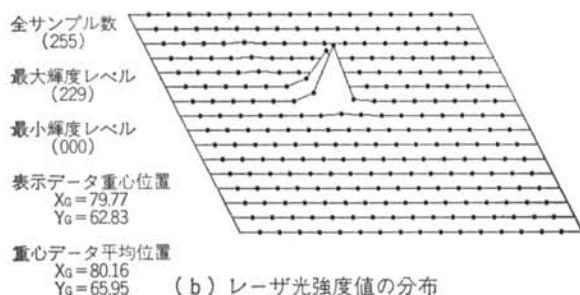


(b) レーザ光強度値の分布

図-11 レーザ経路に遮蔽物の有る場合



(a) 測定座標値の分布



(b) レーザ光強度値の分布

図-12 レーザ経路に遮蔽物の無い場合

が考えられる。

なお、使用したレーザ出力 0.8mW は、レーザ製品の放射安全基準 (JIS C 6802) に規定されたクラス 1 レーザに当たる。これは、作業上特別な保護手段を講じなくても済むことから、本システムとして最適な光源である。

次に、レーザの屈折現象について検討する。これは、大気中の空気密度や水蒸気によりレーザの屈折が起こるものである。この現象に対する定量的な実験を行なうことは困難である。レーザ測量は、大気の比較的安定している早朝、夕方等の時間帯に行なうことや、溶接等で温まっている鉄骨柱からなるべく遠ざける等の配慮を行なうことで、屈折事象に対応することとした。前述の 4.2 で検討したレーザ光を回転させることは、この屈折の現象を改善する方向にあると考えられる。

次に、レーザ光を落下防止用ネットが遮った場合のデータを図-11 に示す。比較対象とするため遮っていない場合を図-12 に示す。図-11 ではレーザ光が散乱してしまい、測定結果に大きな誤差を含むことになる。これにより、レーザの経路上ではネット程度以上の遮蔽となるものを取り除かなければならない。

#### 4.5 レーザ光以外の外乱光の処理

受光器には、太陽光やその他溶接火花等、多くの外乱光が入力する。

ところで、このレーザ発振器に使用されている半導体レーザは、光出力レベルを変化させても常に基準モードで発振している。また、発振させるための注入電流の変化により、発振周波数を数 GHz の範囲で直接変調することが可能である。外乱光の影響を軽減するために、レーザ光をパルス周波数変調 (PFM) した信号とすることが有効であることが知られている。

実際には 50 kHz でレーザのパルス周波数変調し、受光信号から太陽光などの外乱を取り除いている。また、太陽光のモニタを行ない、計測した光の強度からモニタの値を引く差分処理や、物理的な可視光フィルタを併用して殆ど外乱光の影響を無くすことができた。この処理の有効性は、特に外乱光の影響と思われるデータが一度も観測されなかったことで確認できた。



## § 5. 導入事例

実際の建方工事への適用に当たり、本システムと既開発の建方測定システムを組み合わせた。この組み合わせた測定システムを、円筒形をした地上42階の超高層ビルの建方工事に適用した。

建方測定システムは、従来のトランシットを用いた測定作業に代わるものである。機器構成は、測距・測角装置（トータルステーション）およびパソコンを組み合わせたものである。鉄骨柱等の所定位置にミラーをセット

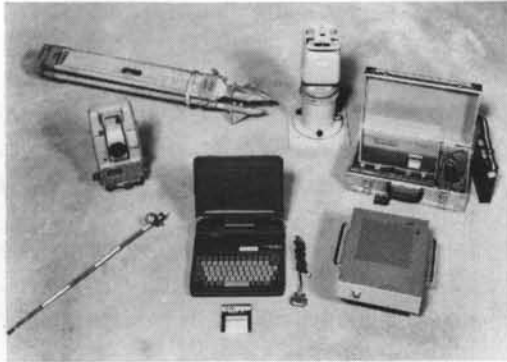


写真-3 鉛直度レーザ測定システムと建方測定システムを構成する機器群（後列左より、トータルステーション、三脚、回転台とレーザ発振器、コントローラ。前列左より、ミラー、パソコン、受光器）

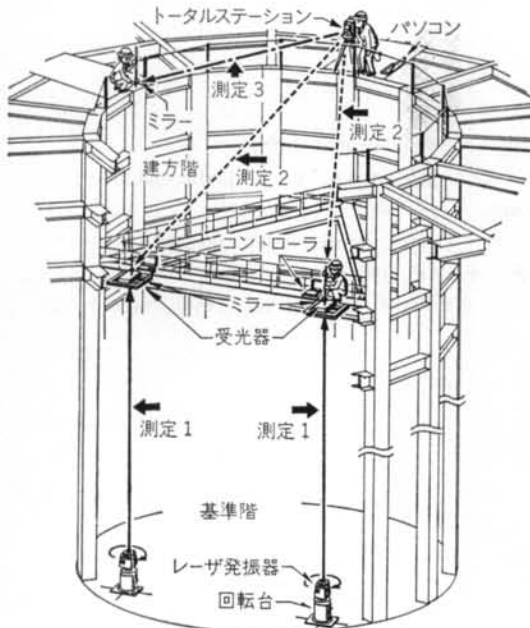


図-13 実証実験の測定状況

し、トータルステーションでそのミラーを視準することにより、距離や角度データがパソコンに自動入力する。あらかじめパソコンに入力してあった設計座標とのずれ量を計算し、パソコン画面上に表示出力する等の機能がある。実証実験で使用した、本システムと建方測定システムの構成機器群を写真-3に示す。

測定手順を、実証実験の事例（図-13）に従って述べる。

### (1)測定1

レーザ発振器を基準階の二つの基準点に設置し、受光器を建方階の所定位置に据え付け、測定を開始する。

### (2)測定2

コントローラの出力結果（表-3）により、受光器上のエ-y座標にミラーをセットし、トータルステーションでミラー2点を視準する。その結果、トータルステーション自身の二次元座標が算出される。

### (3)測定3

トータルステーションで建て込まれた鉄骨柱のミラーを順次視準すると、各柱の測定座標値がパソコンに自動入力する。あらかじめパソコンに入力してあった設計座標値と、測定座標値のずれ量（倒れの量）がパソコンの画面上（表-4）に表示される。

以上の測定手順に従い、高さ135mの建方階において実証実験を行なった。この測定による鉛直度の測定精度について述べる。なお、実証実験では比較対象となる従来法による測定が困難であったため、以下のような本システムと建方測定システムを組み合わせた測定システムの総合精度を推定する。

測定1の誤差は本システム単独の計測誤差であり、前述の実験などから目標精度 $\pm 2$ mmを満足していることが確認されている。また、高さ135mで本システムによる計測を3回繰り返したところ、測定値のばらつきは $\pm 1$ mmの範囲内に収まっていることが確認されている。

測定2の誤差は、建方測定システム単独の計測誤差 $\pm 2$ mmとなる。これは、トータルステーションから2箇所受光器上のミラーを各々視準した斜距離と角度の測定から、自分自身の座標位置を求める際の誤差が最大 $\pm 2$ mmとなることが確認されている。この誤差は、トータルステーション自体がもつ測定誤差、ミラー設置誤差および測定者の視準誤差が累積されたものである。

測定3の誤差は、測定2と同様に $\pm 2$ mmとなる。

以上の検討から、測定1、測定2および測定3による誤差を累積し、本システムと建方測定システムを組み合わせた測定システムの総合誤差は、最大 $\pm 6$ mmとなるものと推定される。

<pre> * 0 3 . 1 2 1 3 : 3 0 0 1 * == SWING == SMP-AREA : X Y min : ( 0 4 , 0 2 ) max : ( 0 7 , 1 2 ) SWING : dx 1 5 . 4 mm        dy 1 1 . 3 mm SMPNO (A) : 1 2 8 INTVL (P) : 4 6 8 m S imax : 2 4 0 imin : 0 == AVE (T) mm ==           X G          Y G 1 : 8 0 . 5          8 2 . 5 2 : 7 8 . 2          8 1 . 7 . . . 1 2 8 : 1 2 0 . 8    1 0 0 . 6 ----- AVE : 9 1 . 3        8 9 . 9 ERR : 0 </pre>	<p>データ識別No 月.日 時:分 データNo</p> <p>測定領域 (x,y) min (x,y) max</p> <p>揺れ幅</p> <p>全サンプル数 1周期でのサンプルポイントインターバル 最大精度レベル 最小精度レベル</p> <p>レーザ光の重心位置</p> <p>平均値 エラー回数</p>
--	---

表-3 コントローラの印字出力例

X,Yを円周放射に分散 (構造座標系)		保存データ数 : 0
円周中心座標	X <sub>0</sub> = (m) Y <sub>0</sub> = (m)	半径 r= (m)
目標点	X <sub>g</sub> = (m) Y <sub>g</sub> = (m)	θ座標 θ= (m)
測定点	X <sub>s</sub> = (m) Y <sub>s</sub> = (m)	測定点からの補正値
<input type="checkbox"/> 測定 <input type="checkbox"/> 終了		内側に (m) 時計回りに (m)

表-4 建方測定システムのパソコン画面表示例

## § 6. まとめ

本研究開発により次のような実験結果が得られ、新しい鉛直度レーザ測定システムが開発できた。

(1)出力0.8mWのレーザ発振器を用いて最大500mまで測定が可能であることが確認できた。

(2)回転するレーザ光と検出した光強度の重心計算処理による新たな方式により、基準階の基準点座標を測定対象の建方階まで、精度±2mmで鉛直移動することが確認できた。

(3)揺れている建物の鉛直度が測定可能である。これは建物の揺れをシミュレートした実験および高さ135mの建方工事の実証実験により確認できた。

以上のことから、本システムは超高層建物を対象とした鉛直度測定システムとして、所期の性能目標を十分に満たしていることが確認できた。現在、実用機として複数の現場で運用されている。

今後は、さらに測定の自動化・小型化を目指した改善・改良を行なっていく予定である。また、用途開発として、本システム単独使用による鉄骨柱のねじれ測定などへの応用を検討中である。

**謝辞** 本測量システムの開発は、新横浜プリンスホテル建設事務所、㈱NSI、㈱トプコンおよび㈱コラムの多大なる協力があつて達成されたものである。ここに、感謝の意を表します。

## <参考文献>

- 1) 計量協会光応用計測技術調査研究委員会編：“光計測のニーズとシーズ” コロナ社(1960年)
- 2) 和田孝史，中川秀彦：“「超高層施設の測量システム」EXSUS-VL” 測量 第41巻，第5号(1991年) pp.87~91
- 3) 和田孝史：“3次元測量計算システム EXSUS” 測量 第40巻，第10号(1990年) pp.53~59
- 4) ベンタックス測量機図書編集委員会編：“よくわかるトータルステーション” 山海堂(1990年) pp.100~116
- 5) 電子情報通信学会編：“電子情報通信ハンドブック 第1分冊” オーム社(1988年) pp.977~1049
- 6) シャープ㈱電子部品事業本部編：“シャープ半導体データブック 光半導体編” 誠文堂新光社(1984年) pp.526~529