

35. カメラ式鉛直器を利用した逆打ち支柱精度管理技術の高度化

株式会社大林組 技術研究所 ○ 池田 雄一
株式会社大林組 東京本店 平野 裕二
株式会社大林組 東京本店 深谷 茂樹

1. はじめに

逆打ち支柱は、地下鉄骨柱（上部）と場所打ちコンクリート杭の芯材（下部）を結合したような構造であり、長さが 40m 近くなる場合もある。逆打ち支柱が本体鉄骨である場合、建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事の精度管理が適用される場合がある。その際の支柱の倒れの管理許容差は $h/1000$ 、限界許容差は $h/700$ である (h : 支柱長さ)。地下約 10m 付近に設置した従来の傾斜計による計測のみで、この許容差を満足するのは難しい。

そこで、著者らはカメラ式の鉛直器に傾斜計を組合せたカメラユニットを開発した。カメラユニットは、設置した場所が揺れても備え付けの傾斜計の値からカメラ軸を常に鉛直下方に補正できる鉛直器である。そのカメラユニットを利用した逆打ち支柱建入れ自動計測システムを開発し、性能確認実験を行った。さらに、超高層複合施設の逆打ち支柱建込み工事に適用した。本報では、それらの内容および得られた知見について報告する。

2. 従来の計測手法

2.1 逆打ち支柱建込み工事の概要

逆打ち支柱建込み工事の概要を図-1 に示す。同図は先入れ工法を説明したものである。施工手順

を以下に示す（施工手順の○数字は同図に対応）。

- ①ケーシング建込み、掘削
- ②ケーシングを跨いで架台を設置
- ③杭の鉄筋カゴ建込み
- ④逆打ち支柱建込み
- ⑤支柱を架台に固定、ジャッキで建入れ調整
- ⑥トレミー管から杭コンクリート打設
- ⑦ヤットコ取外し、埋戻し、ケーシング撤去

逆打ち支柱の倒れの計測には、通常、傾斜計や水管を利用する。傾斜計を利用する場合、④の段階で傾斜計を取付ける。支柱を通り芯上に再度、吊り込み、支柱が垂直になったところで傾斜計をリセットし、ゼロ点を設定する。その傾斜計の値を確認しながら、⑤の段階で支柱下部に設置したジャッキにて支柱の建入れ調整を行う。⑥の段階で杭コンクリート打設中も傾斜計の値を確認し続けて、可能な限り支柱の建入れを調整する。

2.2 逆打ち支柱の建入れ精度管理の厳格化

地下 4～5 階の大深度地下空間を持つ工事では、逆打ち支柱は 40m を超す長さとなるケースが多い。近年、増々長大化する逆打ち支柱の建入れ精度管理を厳格化するため、ケーシングをより深いレベルまでセットすることにした。これにより、建入れ調整用のジャッキがより深いレベルで反力を取

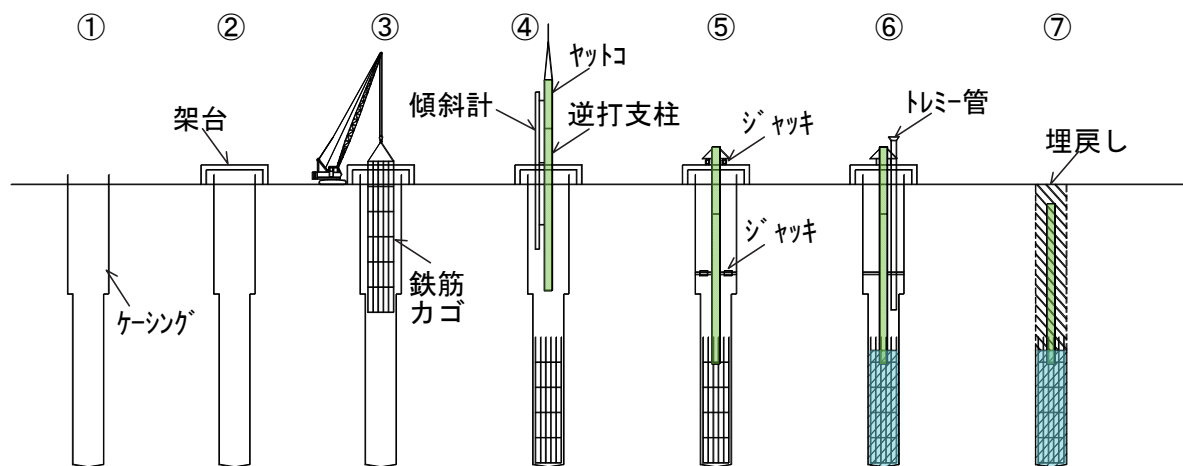


図-1 逆打ち支柱の建込み（先入れ工法）の概要

ることが可能になった。また、杭コンクリート打設時の側圧によって支柱の建入れ精度が悪化するのを防ぐため、杭根入れ部のクロスH部材のウェブに構造的な影響のない範囲で孔を明け、コンクリートの流動性を良くする対策を講じた。

2.3 従来の支柱の建入れ計測の課題

従来計測で利用する傾斜計を図-2に示す。支柱に仮設の鋼管を取付け、その中に挿入して計測する。⑦の段階で埋戻し前に傾斜計を取外して次の支柱の建込みに転用するため、取外しが容易な支柱上部に取付けられることが多い。地下空間では、最終的にCFT構造やSRC構造となることがほとんどのため、鉄骨のみでは支柱の剛性は高くない。また、建込んだ支柱は、製作誤差や地組み誤差などが累積して許容差内の曲がりを生じている。傾斜計は取付けた部分の倒れを支柱先端まで延長した値を出力するため、支柱が剛体のように直線的に倒れた場合は信頼性の高い計測値を得る。しかし、支柱が曲がりを生じていると、支柱が長いほど計測値は現実とは異なる値となってしまう。

支柱が曲がりを生じていても信頼性の高い計測値を出力でき、より深いレベルで建入れ計測が可能な手法の確立が望まれた。そこで、図-3に示す鉛直視準器（計測精度：1/40000）を利用した建入れ計測手法を考案した。⑦の段階でヤットコを取外した後に鋼管タイプの逆打ち支柱のベースプレート部に取付けたターゲットを計測できる。数現場に適用した結果、鉛直視準器によって従来より深いレベルの支柱の建入れ精度を計測することが可能になったが、以下の課題が生じた。

- ・鉛直視準器を水平に設置するのに時間を要す
- ・支柱内部は暗いため、ターゲットへの照射が必要となる
- ・距離が遠いとターゲットを視認し難く、読み値にヒューマンエラーを生じやすい
- ・計測結果は視準者の主観に依存する
- ・ヤットコを取外さないと計測できない

3. カメラユニットを利用した逆打ち支柱建入れ自動計測システムの開発

従来の傾斜計や鉛直視準器による建入れ計測手法に対して、逆打ち支柱の建入れを精度良く計測でき、より手軽に継続して計測できる手法の開発が望まれた。そこで、逆打ち支柱建入れ自動計測システムを開発した。

3.1 カメラユニットの開発

カメラユニットの概要を図-4に示す。剛性の高いベースプレートに鉛直下方を撮影できるカメラとひずみゲージ式変換器タイプの傾斜計を設置した。カメラおよび傾斜計の仕様を表-1に示す。撮影用にカメラの撮影範囲のみベースプレートに孔

を明けた。鉛直下方にある反射シート状の円形ターゲットを撮影し、得られた画像を2値化する。



図-2 従来計測で利用する傾斜計

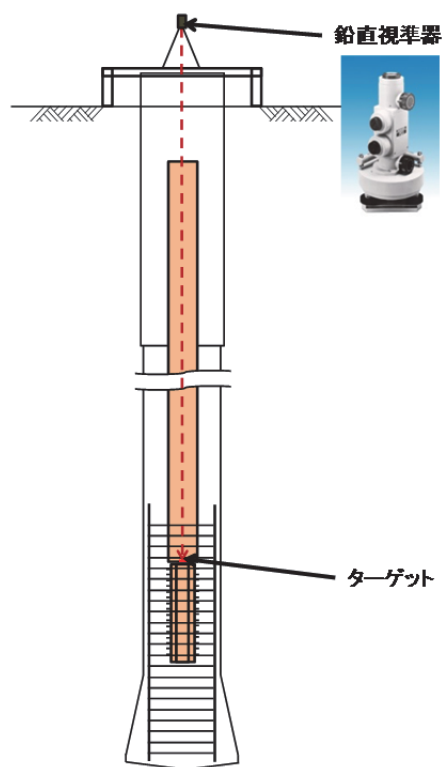


図-3 鉛直視準器による建入れ計測の概要

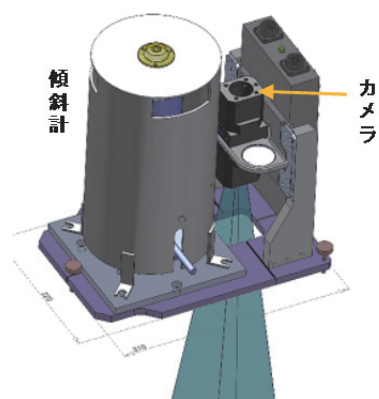


図-4 カメラユニットの概要

2 値化によってターゲットが抽出でき、その重心位置の鉛直軸に対するずれ（＝誤差値）を出力する。カメラ軸が鉛直軸と一致するときの傾斜計の値を事前に把握することで、装置の傾き（傾斜計の値）に応じてカメラ軸を鉛直軸方向に補正できる。この他に無線通信ユニットを搭載して信号・映像を堅牢型タブレット P C に無線転送し、ケーブルの省配線化を図った。

3.2 自動計測プログラムの開発

(1) 主な機能

上記のカメラユニットを制御し、映像や計測結果を表示する自動計測システムを開発した。同システムの機能を以下に示す。また、システムの画面例を図-5 に示す。

- ・計測諸条件の設定
- ・画像処理の詳細設定
- ・画像および傾斜計の計測値の表示
- ・傾斜計の値に応じたカメラ軸の鉛直補正
- ・画像の 2 値化、重心位置の計測
- ・3 種類の計測モード（1 回計測、10 回計測、連続計測）を搭載
- ・設置誤差の入力

ターゲットは円形の反射シート（ $\phi 20 \sim 40 \text{mm}$ ）であり、撮影環境に応じて最適な径を選択できる。照明効果や周囲の振動環境に応じて、画像処理パラメータを詳細に設定できる。3 つの計測モードを搭載し、状況に応じて選択できるようにした。通常は 1 回計測を行うが、最終値など精密さを要求される場合に 10 回計測を行う。万が一、所定の場所に設置できない場合、ずらして設置しても正しい計測値を出力できるように、設置誤差を入力できる機能を付与した。

(2) その他の機能

カメラユニットを設置した環境（特に気温や直射日光）によって、同装置のベースプレートが伸縮したり、歪みが発生することが考えられた。また、使用中に傾斜計の取付け角度がずれる可能性も考えられた。このため、鉛直軸を微調整する機能を付加した。鉛直軸を微調整するには、同一環境下において、カメラユニットで正と反による 2 回計測を行う。正と反の計測値の平均が真値である。この機能により、正のみの計測で真値が得られるように鉛直軸をソフト的に微調整できる。

3.3 システムの性能確認実験

(1) 計測実験

開発したカメラユニットおよび自動計測プログラムを組合せた逆打ち支柱建入れ自動計測システムの全体に関して、以下に示す項目を確認するための計測実験を行った。

- ・システム全体の計測精度
- ・傾斜計の線形性

・照明の配置、個数

実験には図-6 に示す高さ約 27m の高層ステージを利用した。ステージ床に孔を明け、鉛直視準器を利用してステージ上と地上を結ぶ鉛直軸を設定した。ステージ上にカメラユニットと地上にターゲットを設置して、傾斜計の値が $0 \sim \pm 2^\circ$ になるようカメラユニットの傾きを変化させて計測した。

(2) カメラユニットの性能

実験の結果、傾斜計の線形性は 0.3° 以内で高く、 $0.3 \sim 0.5^\circ$ の範囲で若干低下した。 0.5° を超えるとともに低下することがわかった。その結果、システム全体として表-2 に示す性能が得られた。装置を 0.3° 以内に設置すれば、計測精度は $1/20000$ （距離 20m で 1mm の誤差）である。同装置の傾きが $0.3 \sim 0.5^\circ$ では、計測精度は $1/10000$ である。

表-1 カメラ（左）と傾斜計（右）の仕様

大きさ	165×220×115mm	測定軸数	2軸
センサー	300万画素COMS	測定レンジ	$\pm 2^\circ$
計測範囲	4～40m	非線形性	0.5%R0
計測精度	$\pm 1 \text{mm}$	許容温度	$-20 \sim +60^\circ \text{C}$
ターゲット	$\phi 20 \sim 40 \text{mm}$ 反射板	重量	5kg

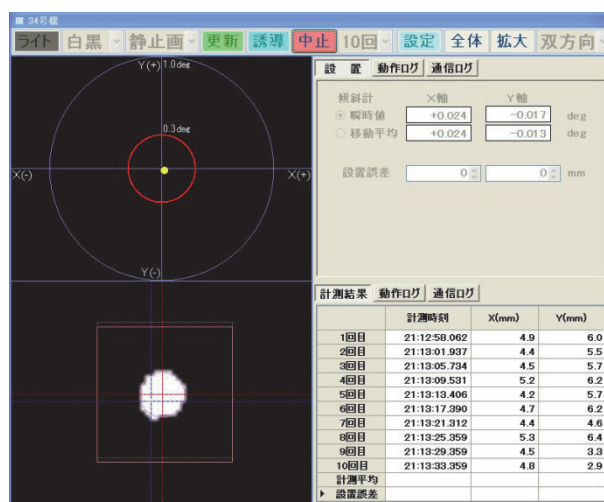


図-5 計測システム画面



図-6 計測実験

精密な計測の場合、 0.3° 以内にカメラユニットを設置するのが望ましい。照明については、画像処理に悪影響を及ぼさないよう2個を対照に設置し、集中光より拡散光が適していることがわかった。

(3) 鉛直視準器との各種性能比較

鉛直視準器とカメラユニットの各種性能を比較した結果を表-3に示す。カメラ軸の鉛直補正機能による計測精度の安定性、画像処理で算出した計測値の客観性、設置の簡便性などが鉛直器に対して優れていた。また、振動環境下でも計測でき、計測値をPC画面に表示するといった鉛直視準器にはない機能も備えている。以上から、カメラユニットの方が総合的に優位であると判断できた。

4. システム適用

4.1 システム適用計画

(1) 適用工事概要

適用工事概要を表-4に示す。最高高さが180mの超高層複合施設新築工事である。地下40m近くまで地下4階の大深度地下空間が敷地一杯に広がる建築条件のため、工期短縮効果が得られる逆打ち工法が採用された。逆打ち支柱は全部で94本あり、大きく2タイプに分類された。一方は、地下1階までボックス柱、それ以下はクロスH柱である。もう一方は、すべてクロスH柱である。地下37.5mに基礎底があり、杭根入れ部を合すると長さ50mを超える逆打ち支柱が多数あった。本工事の逆打ち支柱の精度管理は、建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事が適用された。すなわち、支柱の倒れの管理許容差は $h/1000$ 、限界許容差は $h/700$ (h : 支柱長さ) であり、非常に厳しい条件であった。

(2) 計測計画

上記の厳しい精度管理を要求されたため、精度管理手法を2つに分類した。高層棟の荷重を受ける54本の逆打ち支柱は、万が一、倒れが大きい場合、躯体補強が必要となる。設計監理との協議に時間が掛かると地下躯体工事だけでなく、地上工事がストップするリスクを抱えている。そのため、高層棟の荷重を受ける支柱は新手法による厳しい精度管理を行い、それ以外の支柱は従来手法による厳しい精度管理を行う計画とした。新手法の概要を図-7に示す。同図のように逆打ち支柱に沿って仮設のガイド管を取付け、その最下部にターゲットをセットした。ガイド管の上方にカメラユニットを設置して、最下部のターゲットを計測する。最下部のターゲットはジャッキの設置レベル(N値の高い孔壁部分)にできるだけ近い基礎底レベルに設定した。これにより、地下1階と2階の間付近に取付けた傾斜計および基礎底レベルに設置したカメラユニットのターゲットの二通りの計測手法によるダブルチェックが可能になった。

表-2 カメラユニットの仕様および性能

傾斜範囲	$\pm 2.0^{\circ}$		
計測距離	40m以内 / $\phi 20$ mm反射板		
計測方法	画像処理 (重心計算処理方法)		
計測精度	傾斜 0.3° 以内	傾斜 $0.3 \sim 0.5^{\circ}$	傾斜 $0.5 \sim 2.0^{\circ}$
	1/20000 (10")	1/10000 (20")	1/2000 (103")
本体寸法	W340mm×D360mm×H350mm		
本体質量	17kg		
電源	AC100V		
使用温度	$0 \sim 50^{\circ}\text{C}$		

表-3 各種性能比較

	鉛直視準器	カメラユニット
運用時の計測精度	$\triangle$	$\bigcirc$
計測値の客観性	$\triangle$	$\bigcirc$
設置の簡便性	$\triangle$	$\bigcirc$
耐振動環境性	$\times$	$\bigcirc$
計測値の共有	$\times$	$\bigcirc$

表-4 適用工事概要

建物用途	事務所他
建物規模	地下4階、地上35階、塔屋2階
敷地面積	約 7,000 m^2
建築面積	約 4,500 m^2
延床面積	約134,000 m^2
構造	S造他
最高高さ	SGL+180 m
基礎底深さ	SGL- 37.5m

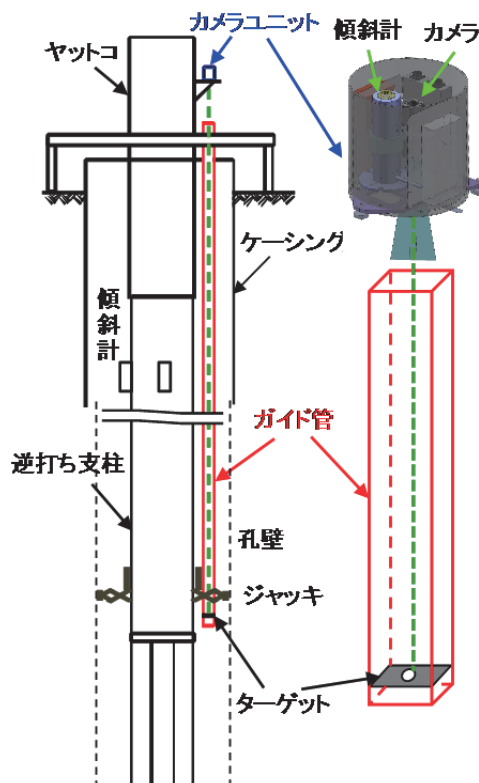


図-7 カメラユニットによる建入れ計測

逆打ち支柱の建入れを調整するジャッキは支柱の東西南北の四面に設置した。また、支柱によって異なるが、杭コンクリート打設用のトレミー管は北東・南西の対角または北西・南東の対角に2本配置した。したがって、ガイド管はトレミー管の配置されない対角に設置できる。ガイド管は真っ直ぐ取付ける必要があるため、通しダイヤフラムなどとの干渉を避けて、支柱から跳ね出して取付けた。ガイド管は□-125×125の鋼管とし、支柱とは約3mピッチで溶接にて固定した。逆打ち支柱は柱頭が作業地盤から出ないように計画されることが多いため、通常、柱頭レベルは地上1階と地下1階の中間付近であることが多い。建込み時に支柱上部が作業地盤より上に出ないと建入れ調整できないため、仮設支柱であるヤットコを支柱の最上部にボルト接合にて取付ける。そのヤットコの横にカメラユニットを設置する計画とした。

4.2 システム適用

(1) ガイド管等の取付け

逆打ち支柱は非常に長いため、1本の状態では道路上を運搬できない。そのため、3～5本程度に分割して搬入され、現場内の地組みヤードにて溶

接接合する。溶接接合が終了した後、図-8に示すように地組みヤードにてガイド管を取付けた。取付けにはアングル材を利用した。図-9に示すように、ターゲットはガイド管の最下部にはめ込む形式とした。支柱芯からの寸法が所定の値となるようにターゲットを貼付し、溶接で固定した。なお、ガイド管内に孔壁保護用の安定液が浸入するのを防ぐため、ジョイント部の止水対策を確実に行った。また、ガイド管内に結露水が貯まることを想定して、ターゲット設置レベルを嵩上げした。

(2) 建入れ調整

支柱を2台のクレーンで建て起こした後、1台のクレーンで吊り上げ、一旦、杭孔へ支柱を挿入しながら、図-10のように傾斜計を支柱に取付けた。再び、支柱を吊り上げ、通り芯上に垂直に吊った状態で傾斜計をリセットし、ゼロ点を設定した。ジャッキを取付け、建て込んだ後、支柱は上部を架台に固定され、荷重を架台に預ける。この状態で図-11に示すようにカメラユニットをヤットコの横に設置する。その後、傾斜計とカメラユニットの計測値を確認しながら、図-12に示すように東西南北面に設置したジャッキにて建入れ調整を行



図-8 ガイド管の取付け



図-10 傾斜計のセット



図-9 ガイド管最下部のターゲット



図-11 カメラユニットの設置



図-12 ジャッキによる建入れ調整



図-13 コンクリート打設中の建入れ計測

った。傾斜計とカメラユニットの計測値は異なる値を示しても変化量はほぼ同等であった。

(3) コンクリート打設中の計測

杭コンクリート打設時の側圧により、支柱の下部が押され、支柱の建入れ精度が悪化するケースがあった。カメラユニットは図-13に示すようにコンクリート打設中も計測を継続した。振動により画像がブレない限り、計測値を出力できた。コンクリート打設中は、カメラユニットの計測値が高い応答性を示したのに対して、傾斜計はゆっくり変化する傾向が見られた。双方の値を確認しながら、建入れ調整を継続した。コンクリート打設量が多い支柱では打設後半において、ジャッキでの調整ができなくなった。それ以降も支柱の建入れ精度を保持するため、2本のトレミー管からの打設量や打設速度を微調整した。

4.3 適用結果と考察

(1) ダブルチェックによる運用手法の確立

傾斜計およびカメラユニットの計測結果から、両者は必ずしも同じ値を示さないが、コンクリート打設中に支柱が動いたときの変化量はほぼ同等であり、変化した方向も同一であった。これは、

支柱が必ずしも真っ直ぐな状態で建て込まれていないことが理由である。そこで、傾斜計とカメラユニットが異なる計測値を示したときは両者の値を振り分ける方針とした。この方針に従えば、支柱全体の誤差を最小に収めることができる。支柱上部の延長線上の仮想誤差を最小にする従来の精度管理手法より優れている。

(2) 支柱のねじれに対する対応

支柱の芯からオフセットした位置にカメラユニットを設置したため、支柱がねじれると正確な計測値を示さなくなる。そこで、ねじれ量がわかっている場合、その数値を設置誤差として入力することによって、支柱のねじれをキャンセルした計測値を出力できた。

(3) 建入れ精度

逆打ち支柱の建込み工事は全数が終了した。その結果、すべての逆打ち支柱の建入れ精度は、管理許容差である $h/1000$ 以内となった。カメラユニットによる計測作業はクリティカルパスから外れた工程で行ったため、工程遅延を招くことなく、逆打ち支柱を高精度に建込むことができた。

5. おわりに

設置場所が水平でなくても、その傾きに応じてカメラ軸を鉛直軸方向へ動的に補正し、鉛直軸に対する誤差を計測できるカメラ式の鉛直器（カメラユニット）を開発した。そのカメラユニットを逆打ち支柱の精度管理として建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事（支柱の倒れの管理許容差： $h/1000$ 、同限界許容差： $h/700$ （ h ：支柱長さ））が適用された超高層複合施設新築工事に適用した。逆打ち支柱に沿って仮設のガイド管を取付け、最下部のターゲットをガイド管の最上部に設置したカメラユニットで計測する建入れ計測手法を採用した。その結果、以下の知見を得た。

- ・開発したカメラユニットの計測精度は、装置の傾斜が $\pm 0.3^\circ$ 以内のとき $1/20000$ （距離 20 m で誤差 1mm）を確保できた
- ・カメラユニットはカメラ軸の鉛直補正機能により振動環境下でも安定して計測できるため、杭コンクリート打設中も設置したままの状態而建入れ精度の計測を継続できた
- ・カメラユニットの建入れ計測は、従来の傾斜計より深い場所で行ったため、計測値の応答性や信頼性が向上した
- ・従来の傾斜計とカメラユニットの計測値が異なった場合、振り分ける建入れ調整を行い、すべての逆打ち支柱の建入れ精度を $h/1000$

（ h ：支柱長さ）以内に収めることができた
本開発に際して、株式会社ソーキ殿にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。