

有限要素法解析および実験によるスマートダイア工法の耐力評価

Flexural Strength Analysis of “Smart Dia” Using the Finite Element Method and Experimentation

高橋 秀明*
Hideaki Takahashi

新飯田 匠*
Takumi Niida

伊藤 倫夫*
Michio Itoh

田中 秀宣*
Hidenori Tanaka

鉄骨造建築物において、上下階の柱サイズが異なる柱はり接合部に用いる新しい通しダイアフラム工法「スマートダイア工法」を開発した。これにより、建築物のトータルコスト削減と自由度の高い設計が実現し、また構造設計の簡便化を図った。

本報では、製品の形状決定には3次元CADによるモデル化および有限要素法解析を用いた最適化設計を行い、製品の設計を行った。実際の性能を確認するために実大実験を実施した。また、実験結果と同一なモデルを作成し有限要素法解析を行うことにより、有限要素法解析結果の妥当性について検証を行った。これらの検証により、スマートダイア工法は、建築物の柱はり接合部に要求される剛性・耐力を満足することを確認した。

New through diaphragm “Smart Dia” used for the column-to-H beam connections with unequal column width of upper and lower stories was developed for steel structures. This makes it possible to reduce the total cost and provides a high degree of design freedom for buildings as well as simplifying the structural design. For this paper, we used 3D CAD modeling and the finite element method (FEM) analysis to determine the product shape and optimize the design. An actual-size test was conducted to confirm the actual performance. Moreover, the validity of the FEM analytical results was verified by creating the same model as for the test results and subjecting it to FEM analysis. This verification confirmed that “Smart Dia” has the rigidity and strength required for the column-to-H beam connections in buildings.

● Key Word : 通しダイアフラム, 異幅柱接合, 角形鋼管
● Production Code : スマートダイア

● R&D Stage : Development

1. 緒 言

鉄骨造建築物では、建築物全体のトータルコストを削減する目的で、上下階の柱サイズを変えて、使用する鋼材量を削減することがしばしば行われる。また、内部空間を広げる目的で前述のような設計が行われることもある。

これらを実現するために2011年現在行われている対処方法として、柱はり接合部に図1に示す (a) テーパー管を用いる方法¹⁾, (b) 上側のダイアフラムに厚肉のダイアフラムを用いる方法がある。(a)の方法では上階柱からの力を滑らかに下側に伝達することが可能であるが、テーパー管は設計および製作に時間を要し、また高度な製造技術も必要である。(b)の方法では、製作が容易であり施工性に優れているが、ダイアフラムの上下に取り付く鋼管の外面位置がずれることによりダイアフラムに面外曲げが発生する。

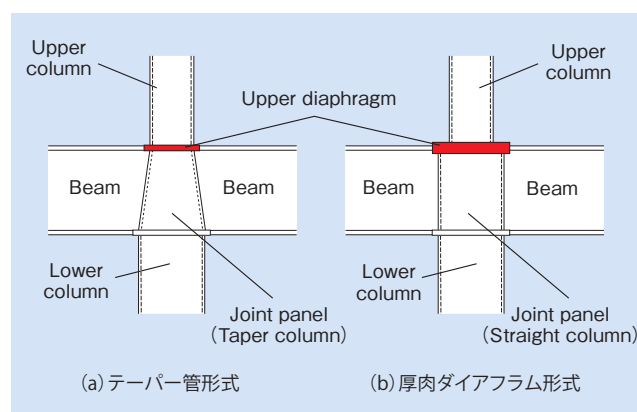


図1 異幅柱接合通しダイアフラム

Fig. 1 Through diaphragms with unequal width columns

この面外曲げを考慮して柱はり接合部の塑性耐力および剛性を詳細に検討しダイアフラムの板厚を決定する必要がある。

* 日立機材株式会社

* Hitachi Metals Techno, Ltd.

る。しかしながら、この板厚を決定するための設計式は確立されておらず、実際の建築物の設計では実施されていないのが現状である。また、これに用いる厚肉の鋼板は市場で入手するのが困難である。

そこで、筆者らは前述の課題を改良した新しい柱はり接合部の工法「スマートダイア工法」を開発した。

本報では、まずはじめにスマートダイア工法の概要および設計法について述べる。次にその設計法に基づき製作したスマートダイアを用いて柱はり接合部の実大実験を行い、建築物の構造設計に必要な塑性耐力および剛性を有することを確認した。最後に、有限要素法解析を用いたスマートダイアの設計方法の妥当性を検証するため、実験結果と有限要素法解析の比較を行い本設計方法の有効性について確認した。

2. スマートダイア工法の概要

2.1 スマートダイア工法の特長

スマートダイア工法では、上ダイアフラムに特殊な形状をしたダイアフラム「スマートダイア」を用いる。これによりパネル部には下階柱と同じストレート形状の鋼管を使用することが可能となり、テーパ管のような設計・製作の困難さを解消した。

スマートダイアの外観を図2に示す。スマートダイアの中心部は上下柱からの荷重に対し影響が少ない部分であるため薄肉化している。また下面にはスマートダイアの面外曲げを抑止するためリブ状の補強が施されている。これらの形状は、スマートダイアに発生するあらゆる荷重に対し最も効率の良い形状を有限要素法解析を用いた最適化設計を行って決定したものである。

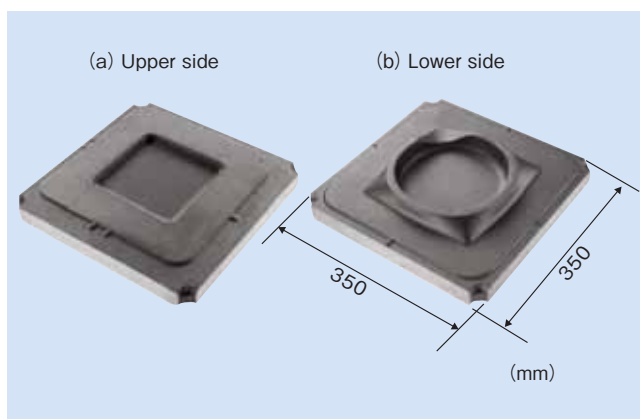


図2 スマートダイアの外観 (a) 上側、(b) 下側
Fig. 2 Outward of "Smart Dia" (a) upper side, (b) lower side

スマートダイア工法の構造概要を図3に示す。本工法では、柱はり接合部の上ダイアフラムに特殊な形状をしたスマートダイアを用いる。上階柱が下階柱に対して柱芯が一致した中柱形式、一方向に偏心した側柱形式、二方向に偏心した隅柱形式すべてに兼用できるよう設計されている。

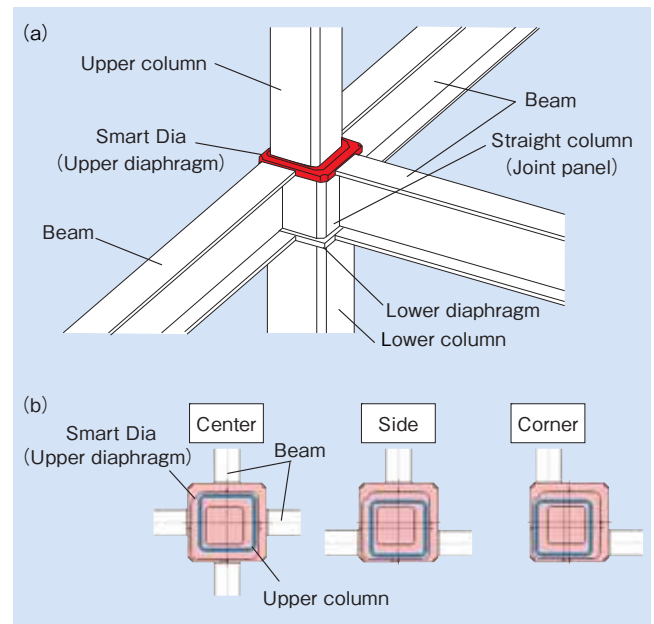


図3 スマートダイア工法の構造概要 (a) 構成、(b) 接合形式
Fig. 3 Skelton framework of "Smart Dia" (a) component, (b) joint type

2.2 スマートダイアの設計法

テーパ管形式の柱はり接合部の設計は、柱よりも先に接合部が塑性化しないよう設計を行う。スマートダイアの場合も同様に柱よりも大きな耐力を有するよう設計を行った。

スマートダイアの設計法を以下に示す。上階柱からの荷重（水平力および軸力）によりスマートダイアには面外曲げが発生する。その荷重に対し、スマートダイアは十分な塑性耐力および剛性を有するよう必要な部分のみを厚くかつ不要な部分を薄く形状を変更させ、十分な塑性耐力および剛性を有するまで繰返し有限要素法解析を行った。上記のような手順による最適化設計を行い応力伝達効率の優れたスマートダイアの形状が決定した。

なお、本設計の基準となる塑性耐力および剛性は以下に示す各評価式により評価を行う。スマートダイアの塑性耐力の評価式を (1) 式に示す。

$$\frac{{}_dM_p}{{}_cM_p} \geq 1.3 \quad (1)$$

${}_dM_p$: スマートダイアの塑性耐力
 ${}_cM_p$: 上階柱の全塑性耐力

また、接合部の剛性がテーパ管形式の柱はり接合部より低下すれば、建築物の全体の構造設計に影響があるため、剛性が低下しないことを確認する必要がある。スマートダイアの剛性の評価式を (2) 式に示す。

$${}_dK \geq {}_tK \quad (2)$$

${}_dK$: スマートダイアを用いた接合部の剛性
 ${}_tK$: テーパーコラムを用いた接合部の剛性

したがって、スマートダイアはテーパ管形式と同等以上の性能を有することから、スマートダイアを用いた柱はり接合部全体の構造設計は、テーパ管形式の柱はり接合部と同様に行うことが可能である。

3. 実大実験による性能確認

有限要素法解析により形状設計を行ったスマートダイアの性能（塑性耐力および剛性）の妥当性を確認するため、表1に示す2種類の実大実験を行った。なお、本章では実験結果について述べ、上記の妥当性については4章で述べる。

表1 試験体一覧
Table 1 List of specimens

	試験体No.	柱はり接合部形式	柱の組合せ (mm)	柱接合形式
面外曲げ実験	S2530-A-00	スマートダイア	□250-□300	中柱
	S2530-A-01		□250-□300	側柱
	S2530-A-02		□250-□300	隅柱
	S5055-A-02		□500-□550	隅柱
柱はり接合部実験	S2530-B-00	スマートダイア	□250-□300	中柱
	S2530-B-01		□250-□300	側柱
	T2530-B-00	テーパ管	□250-□300	中柱

面外曲げ実験は、スマートダイアの面外曲げに対する性能について確認することを目的とする。スマートダイアの下にサイズが異なる鋼管を溶接にて接合した試験体を4体製作し、実験パラメータを上下柱のサイズ・柱接合形式とし、柱サイズの違いおよび接合形式の違いの比較を行った。

柱はり接合部実験は、実際の建築物の柱はり接合部におけるスマートダイアの性能を確認することを目的とする。柱はり接合部にスマートダイアを用いた試験体（中柱・側柱）、テーパ管を用いた試験体（中柱）の計3体を製作し、スマートダイアとテーパ管との性能比較を行った。また中柱形式と側柱形式における性能の違いについても確認を行った。

3.1 面外曲げ実験

3.1.1 実験方法

面外曲げ実験は、スマートダイアの面外曲げに対する性能について確認することを目的とした。試験体の概要を図4に示す。

スマートダイア上面に上階柱を模擬した鋼管を、下面にパネル部を模擬した鋼管を溶接にて接合した試験体を製作し、パネル部下端を固定、柱頭に軸力および水平力を作用させ、スマートダイアに曲げモーメントとせん断力を作用させた。

実験パラメータは、3つの柱接合形式（中柱、側柱、隅柱）の違いおよび柱サイズの違いによる性能の差異について検証を行った。

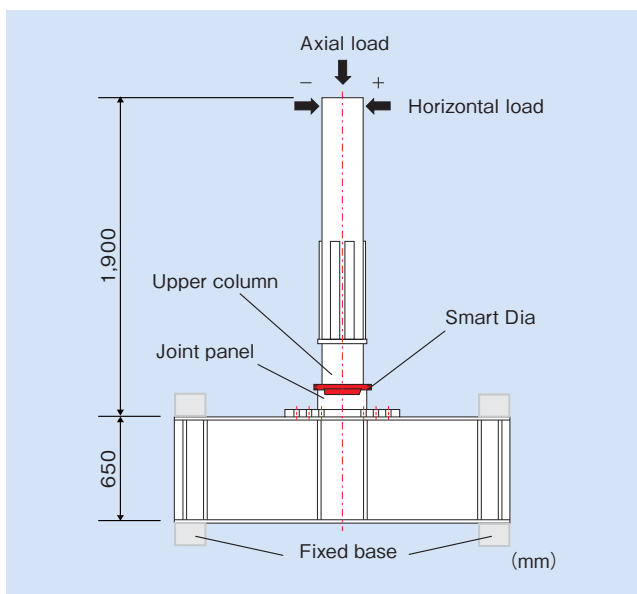


図4 試験体（面外曲げ実験）
Fig. 4 Specimen (out-of bending experiment)

測定は、上階柱の柱頭に作用させた水平力、柱頭変位について測定を行った。また、水平力は漸増交番荷重とし、繰返载荷における性能について確認を行った。

スマートダイアには、国土交通大臣認定を取得した材料（HFW490およびHCW490）を用いた。これらは建築構造用圧延鋼材（SN490）と同等の性質を有する材料である。また、本実験では剛性だけでなく塑性耐力の検証も行うため、スマートダイアを塑性化させる必要がある。したがって上下に接合した鋼管はスマートダイアよりも先に塑性化しないよう高強度な材料を用いた（表2）。

表2 材料特性
Table 2 Material characteristics

部品	材質	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)
ダイアフラム (S2530)	HFW490	400	556
ダイアフラム (S5055)	HCW490	412	540

3.1.2 実験結果・考察

本実験結果の一覧を表3に示す。また、スマートダイアに発生する曲げモーメント (M) と柱頭変位 (δ) の関係の一例として、試験体S2530-A-02の結果を図5に示す。図中の実線は実験結果、点線は剛性の計算値、一点鎖線は上階

表3 実験結果一覧（面外曲げ実験）
Table 3 List of experimental results (out-of bending experiment)

	剛性 (kN・m/mm)		スマートダイア 塑性耐力 [cM_p] (kN・m)	上階柱 全塑性耐力 [cM_p] (kN・m)	cM_p/cM_o (≥ 1.3)
	実験値	計算値			
S2530-A-00	18.8	14.7	729	338	2.16
S2530-A-01	15.1	14.7	636	338	1.88
S2530-A-02	17.4	16.1	592	325	1.82
S5055-A-02	103.5	102.2	2,769	1,904	1.45

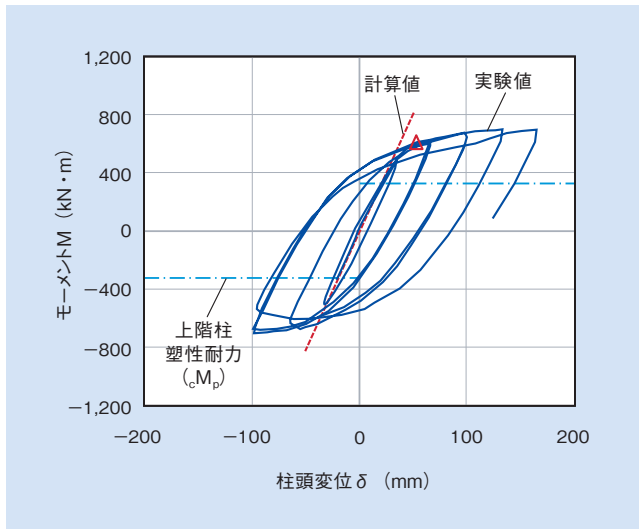


図5 曲げモーメント-柱頭変位 (S2530-A-02)
Fig. 5 Bending moment - displacement of the capital (S2530-A-02)

柱の全塑性耐力 (cM_p) を示す。なお計算値は上階柱の弾性剛性を計算した値である。

M- δ 関係は、一般的に建築物に用いられる柱はり接合部と同様に紡錘型の履歴特性を示している。

剛性の実験値 (実線) と計算値 (点線) はよく一致している。また、塑性耐力 (dM_p : $\triangle$ 印) は (1) 式を満足している。

その他の試験体についても M- δ 関係は同様な傾向を示している。各試験体の試験結果を表 3 に示す。剛性の実験値は計算値と同等以上の結果を示しており、また塑性耐力もすべての試験体において (1) 式の関係を満足している。

本結果より、スマートダイアは十分な剛性および塑性耐力を有することが確認できた。

3.2 柱はり接合部実験

3.2.1 実験方法

柱はり接合部実験は、実際の建築物の柱はり接合部におけるスマートダイアの性能を確認することを目的とする。試験体の概要を図 6 に示す。上下階の柱および左右のはり

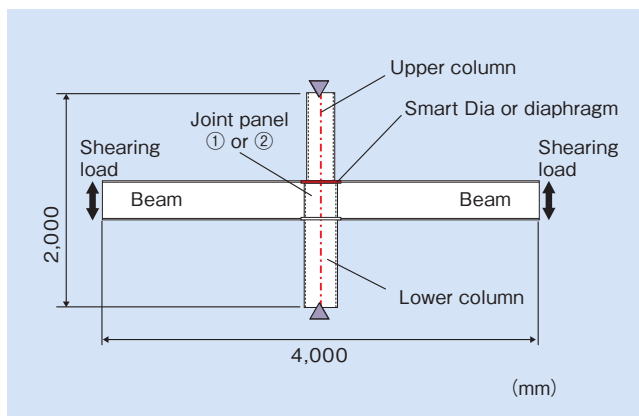


図6 試験体 (柱はり接合部実験)
Fig. 6 Specimen (column-to-beam connection experiment)

をパネル部で接合した十字架構の試験体を製作し、上下柱端をピン拘束、左右はり端にせん断力を作用させ、柱はり接合部の実大実験を行った。

実験パラメータは、パネル部に①スマートダイア+角形鋼管 (S2530-B-00)、②鋼板ダイアフラム+テーパ管 (T2530-B-00) を用いた試験体とし、パネル部形式の違いが柱はり接合部に与える影響を確認した。また、柱接合形式の違いについても検証するため、接合形式を中柱 (S2530-B-00) と側柱 (S2530-B-01) の場合について比較を行った。

測定は、はり端部に作用させたせん断力、はりの変位について測定を行った。せん断力は漸増交番荷重とし、繰返載荷における性能について確認を行った。

スマートダイアの材質は、表 2 に示す面外曲げ実験と同じ材質を用いた。また本実験ではパネル部の耐力を評価するために、はりを通常の建築物に使われる H 形鋼よりも断面積の大きいものを用い、パネル部より先にはりが降伏しないよう試験体を設計した。

3.2.2 実験結果・考察

本実験結果の一覧を表 4 に示す。また図 7 は各試験体における荷重 (P) とはりの変位 (δ) の関係を骨格曲線で表わした図である。なお図に示す計算値は本試験に用いたパネル部の材料試験結果を用いて、鋼構造接合部設計指針に示されるパネル部の全塑性耐力および剛性を計算した値である。

表 4 実験結果一覧 (柱はり接合部実験)

Table 4 List of experimental results (column-to-beam connection experiment)

試験体	パネル部塑性耐力 (kN·m)		
	実験値	計算値	実験値/計算値
S2530-B-00	177	163	1.09
S2530-B-01	183	163	1.12
T2530-B-00	169	128	1.32

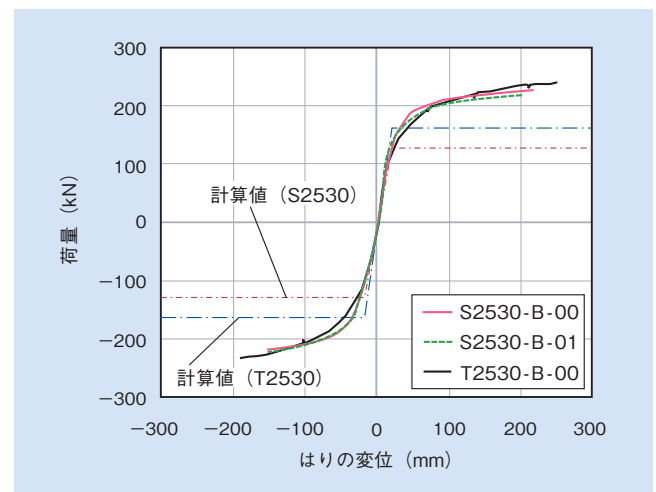


図7 荷重-はりの変位 (柱はり接合部実験)
Fig. 7 Shearing load - displacement (column-to-beam connection experiment)

スマートダイヤを用いた試験体（S2530-B-00：太実線）とテーパー管を用いた試験体（T2530-B-00：細実線）の両試験体ともパネル部塑性耐力（計算値）の近傍で剛性が低下する傾向が見られる。スマートダイヤ工法とテーパー管形式の違いによる剛性および塑性耐力を比較すると、各試験体とも剛性の値はほぼ一致し違いは見られない。また塑性耐力は表4に示すとおり塑性耐力はほぼ同等の値を示している。

次に柱の接合形式が違う場合について比較を行う。中柱形式の試験体（S2530-B-00：太実線）と側柱形式の試験体（S2530-B-01：点線）を比較すると、剛性・塑性耐力ともほぼ同じ値を示しており、柱はり接合部において柱接合形式の影響は少ないことが確認できた。

4. スマートダイヤの設計法の妥当性検証

面外曲げ実験にて行った各試験体（計4体）と実験と同じ形状を再現したモデルにおける有限要素法解析による解析結果を比較し差異が無いことを確認することにより、スマートダイヤの設計法の妥当性を確認した。

実験結果と解析結果の比較の一例を図8に示す。図中の実線は実験値を、破線は解析値を示す。また、△印および▲印は各結果における塑性耐力をプロットしたものである。

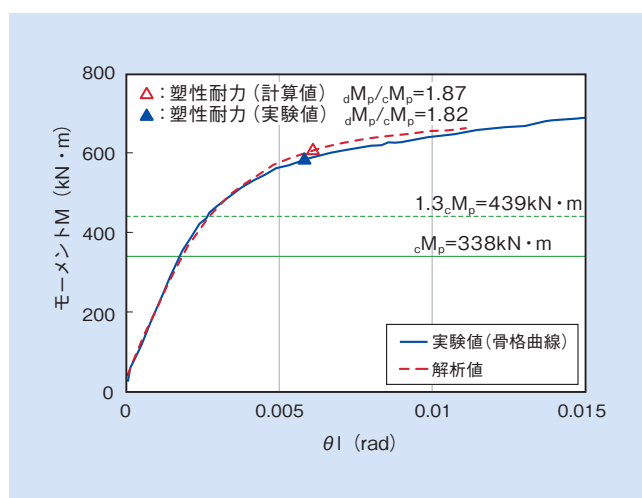


図8 モーメントー回転角（S2530-A-02）
Fig. 8 Moment-Angle of rotation (S2530-A-02)

スマートダイヤが塑性化するまで両者の剛性はよく一致している。しかし塑性化後は実験値が解析値よりも低い値を示している。これは実験では上階柱が塑性化し局部的に座屈が発生したが、有限要素法解析ではこのような座屈を考慮していないため耐力の低下が発生していないためであると考えられる。

また、塑性耐力に関しても両者の差異は小さく、かつ（1）式を十分満足した結果となっている。局部座屈の影響を除けばおおむね実験値と解析値はよく一致していることを確認した。

以上のことより、有限要素法解析を用いたスマートダイヤの設計方法が有効であることを確認した。

5. 結 言

本報において、実験および有限要素法解析により、建築物の柱はり接合部に要求される剛性・耐力を満足する新しい工法「スマートダイア」の開発を行い、次に示す知見を得た。

- (1) 有限要素法解析にて設計したスマートダイアを用いた柱はり接合部の塑性耐力は、適用する上階柱の塑性耐力よりも大きいことを面外曲げ実験にて確認した。
- (2) 柱はり接合部実験の結果より、テーパ管形式と同等の剛性および塑性耐力を有することを確認した。
- (3) 有限要素法解析を用いたスマートダイアの設計方法の妥当性を検証し、スマートダイアの設計方法が有効であることを確認した。

6. 謝 辞

本報の一部は、大手前大学 田渕基嗣教授、ならびに神戸大学 田中剛教授をはじめ研究室の方々の指導および協力を受け行われたものである。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 鋼構造接合部設計指針，日本建築学会



高橋 秀明
Hideaki Takahashi
日立機材株式会社
テクニカルセンター



新飯田 匠
Takumi Niida
日立機材株式会社
テクニカルセンター



伊藤 倫夫
Michio Itoh
日立機材株式会社
テクニカルセンター
博士（人間環境学）



田中 秀宣
Hidenori Tanaka
日立機材株式会社
テクニカルセンター
博士（工学）