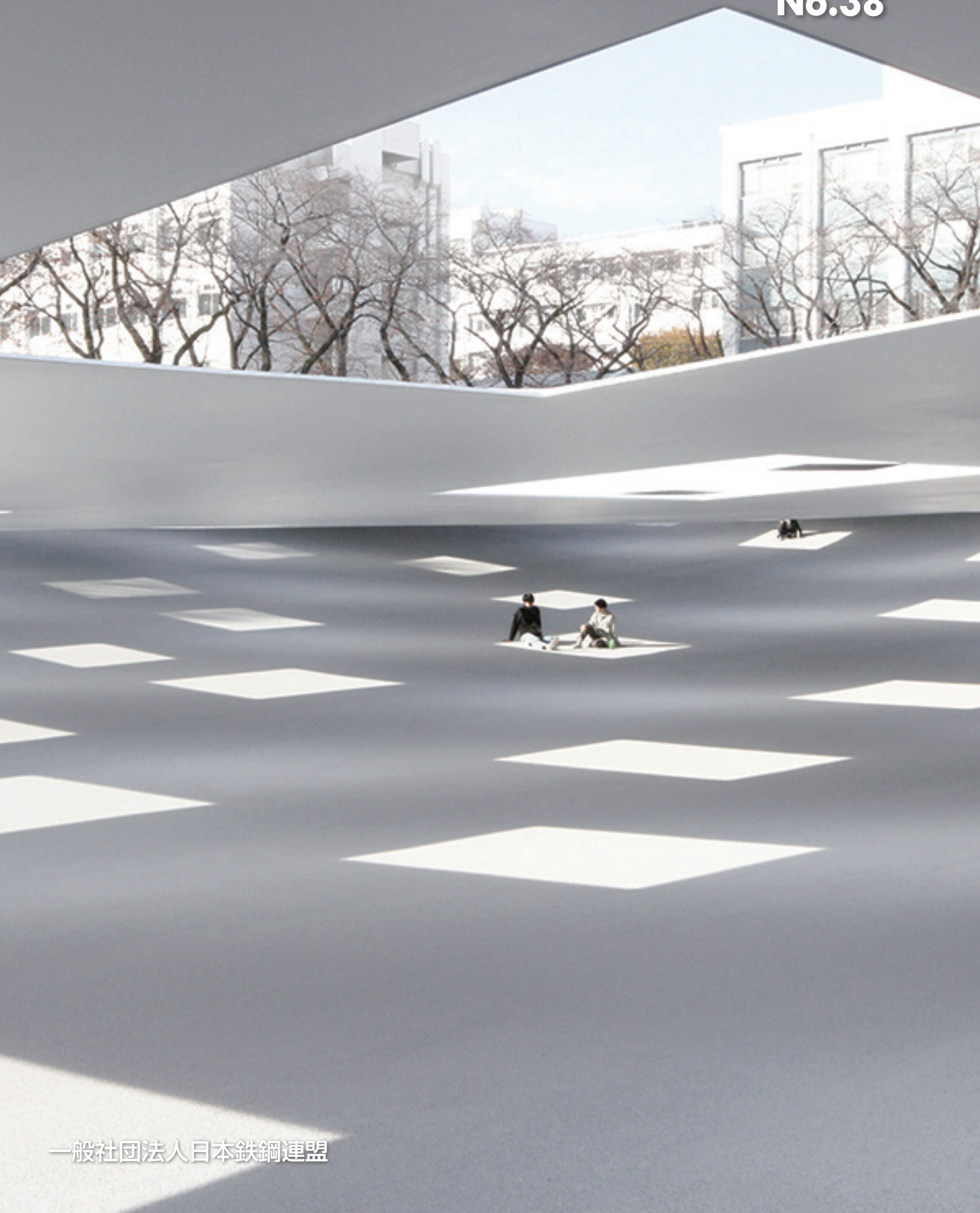


スチールデザイン

No.38



新たな曲面構造への挑戦

本誌『スチールデザイン』(No.12)で紹介された神奈川工科大学KAIT工房(2008年)から12年を経て、すぐ隣の敷地に新たにKAIT広場が姿を現した。先のKAIT工房では305本の極端に細い柱を林立させ、さらに鉛直支持用の四角い柱と水平抵抗用のフラットバーが角度を変えてランダムに配置することにより、広い一室空間に学生たちが自由に対応できるように多様なスケールの場所を効果的につくり出している。それは筆者にとって衝撃的な出来事であった。SANAAと共に追い求めてきたミース以来の身体的スケールの細い鉄骨軸組構造の新たな可能性が見事に表現されていたからだ。

KAIT広場は引き続き同じ建築家・石上純也氏のチームにより2008年に基本計画がスタート。構造基本計画を担当した小西泰孝氏によれば、今度は極限に薄い鉄板の曲面屋根(緩い凹状の引張曲面)で広大な一室空間を実現するという。原理的にはシンプルだが、非線形性が強く構造設計上も施工上も多くの難問を解決する必要がある。実現には紆余曲折もあったようだが、こうして見事に実現できたことは本当に素晴らしいことだ。前作とは対照的だが、薄い鉄板曲面構造の新たな可能性に挑戦し、自然で多様な一室空間を実現しているものと想われる。残念ながらコロナ禍のため実物を見ていない。いずれ拝見したいと考えている。

佐々木睦朗

編集委員

- 委員長：高梨 晃一（東京大学名誉教授）
委 員：隈 研吾（建築家）
委 員：佐々木睦朗（構造家）
委 員：手塚 貴晴（建築家）
委 員：西沢 立衛（建築家）
委 員：臼田 哲男（編集者）
委 員：村上 行夫（JFE スチール）
委 員：窪田 伸（日本製鉄）
委 員：御手洗達也（日本製鉄）
委 員：植戸あや香（JFE スチール）
委 員：寺澤 伸治（神戸製鋼所）

神奈川工科大学 KAIT 広場

設計

石上純也建築設計事務所

構造

佐藤淳構造設計事務所

構造基本計画

小西泰孝建築構造設計

大きな空間に 緩やかに湾曲した 鋼板屋根が架かる

石上純也 （石上純也建築設計事務所）
佐藤 淳 （佐藤淳構造設計事務所／東京大学）
植戸あや香 （編集委員・司会）

神奈川県厚木市にある神奈川工科大学の構内に建設された多目的広場「KAIT広場」。柱も間仕切りもない80m×50mの大きなワンルームに、1枚の鋼板屋根が架かる。屋根のカーブに合わせて床もすり鉢状に窪み、トップライトからの光が内部に多様な環境をつくり出している。この湾曲する大きな鋼板屋根はどのように設計され、どのようにつくられたのか、設計者の石上純也氏と構造家の佐藤淳氏にお話をうかがった。

多様に過ごせる居場所

最初に、この建物の設計に至る経緯とコンセプトをお話いただけますか。

石上●2008年に竣工した神奈川工科大学のKAIT工房の設計を担当し、その後、大学から同じ構内に多目的に使える半屋外広場をつくってほしいと依頼されました。敷地はKAIT工房の東側にある校庭の一角で、もともとテニスコートがありましたがあまり使われていませんでした。

設計は、多目的な広場とはどのよう



石上純也氏



KAIT 工房（左、2008年竣工）とKAIT 広場（右）

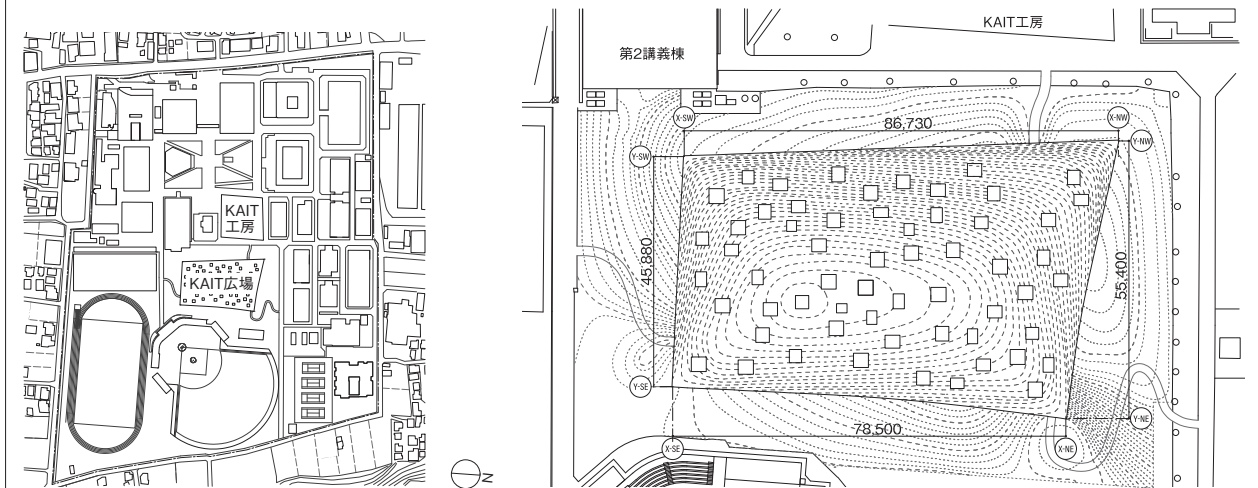
な空間がよいのか、また、この大学にどんな空間が必要なのか考えるところから始まりました。

学内には学生が日常的に集まることができたり、1人でものんびり過ごせる場所があまりなかったため、居場所を見つけられるような場所が必要だと考えました。それから、学内のイベントで使用したり、地域の人に貸し出すことも想定しました。

建物は面積約4,100㎡、平面は約80×50mの少し歪んだ四角形で、柱のない大きなワンルームです。そこに周囲の壁から垂れ下がるように湾曲した鋼板の屋根が架かり、それと平行して床も傾斜しています。大きなスケールの平面や構造に対して、天井高は約2,200～2,800mmと一般的な住宅の高さにし、天井にはガラスの入っていない59個の四角い開口を設けました。



北側から見る ポリュームを抑えた地形と一体化した建物全体に屋根が垂れ下がっている



配置図 1/8000

屋根伏図 1/1500

建物は敷地いっぱいに建てられた背の低い大きな箱型ですが、どのような着想でこの形になったのでしょうか。

石上●敷地は構内の他のレベルより約3m低くなっています。この高低差をどのように生かすか、また、KAIT工房の目の前に建設されるので、KAIT工房からの眺めを想像しながら設計しました。将来的にKAIT広場から新しい正門にまっすぐ延び、KAIT工房の南側に接する道がキャンパスのメイン

ストリートになることが決まっていたし、もともとここは校庭に抜ける気持ちの良い空間だったので、高い建物を建てるのではなく、高さを抑えて地形をつなぐような形のものにしたいと思いました。

KAIT工房は学生の創作意欲を掻き立てるために、ガラス張りにして中のアクティビティが外から見えるようにしたのですが、KAIT広場は学生が日常的に佇んだり、自分の時間をゆっくり過ごせるような場所にしたいので、外に開くのではなく、大学の日常から少し切り離された落ち着いた空間になるようにしました。

大学の周りに公園や河原など、ひと息つくことができる場所があったらいいのですが、この近くにはありません。学生は大学の外にも中にも休むことができる場所がないのです。ですから、大学の中に居ながら大学の外にいるような、気分転換できる居場所を想像しました。イメージは河原の土手です。

大学の周りの景色から微妙に切り離



ワンルームでありながら、明るさの差によってさまざまな空間が生まれる

されながら、天井の開口からは空が見えたり、光や風を感じられる。屋外と大学の外という2つの意味で外部的な場所をつくりたいと思いました。

湾曲した床と天井が空間を緩やかに分節する

湾曲した屋根と平行して、床も傾斜しているということですが、そこにはどのような意図があるのでしょうか。

石上●親しみがもてる居場所とはどういう空間なのかと考えた時に、イタリア・シエナのカンポ広場が思い浮かびました。カンポ広場は地形を生かした緩やかなスロープのすり鉢状の広場で、みんなそこに座ったりしながら思い思いに過ごしています。今回の敷地も高低差があり、緩やかに傾斜しています。ただ広い空間をつくるのではなく、その場所に座ったり寝転んだり、身体が建築に近づくようなつくり方をした

かったので、斜面を利用して内部の床はすり鉢状に窪んだ形状にしました。

それから、僕は「風景みたいな建物をつくりたい」と話すことがよくあるのですが、風景は漠然としていて捉えにくいと思うのです。例えば、地平線は湾曲した大地と湾曲した空の結び付くところに見えてきます。地平線は一見遠くにありそうですが、人間の視点の高さで見るとだいたい3、4km先なんです。ということは人間のスケールで見ることができる外部空間は半径3kmの円が最大なわけです。そう考えると、風景にもちゃんと、境界線も形もスケールもある。そうであれば建築の中にも風景と呼べるものをつくることのできるのではないかと考えました。

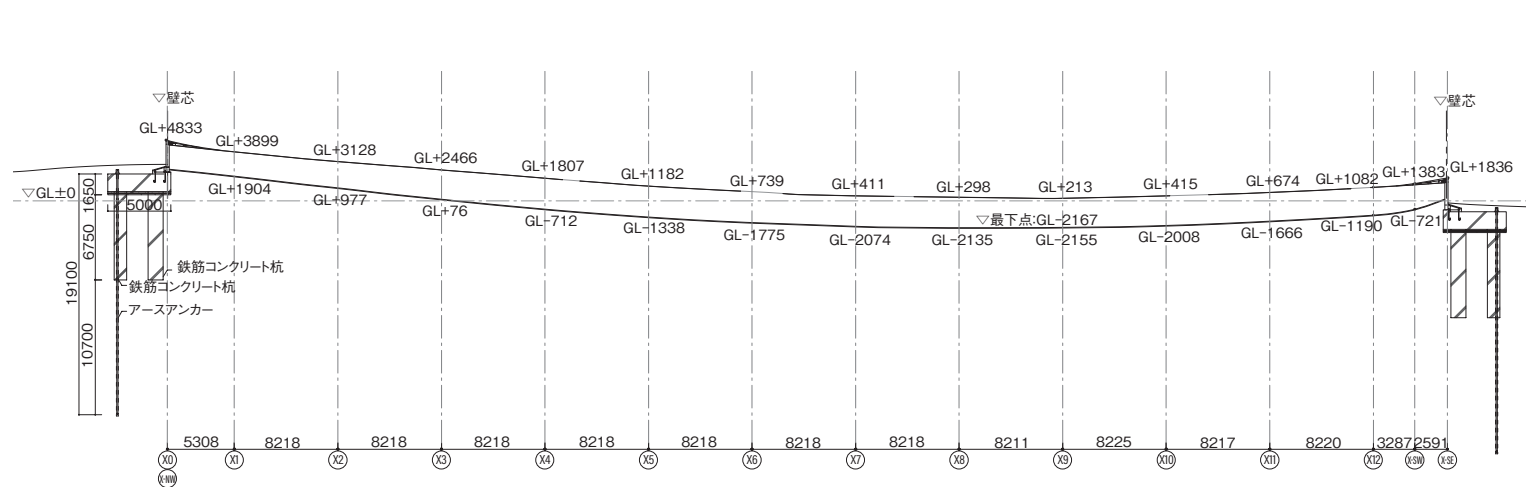
この建物では屋根も床も湾曲させたことにより、地球とは上下が逆ですが、たわんだ空のような天井と窪んだ大地のような床面が遠くで結び付いて地平線のように見えてきます。そうするとワンルームでありながら自分の少し先

にいた人が地平線の先に消えて見えなくなったり、気配は感じるけれど姿は見えないということが起こります。大きな空間ですが、空間の中に緩やかな分節をつくって、自分だけの場所を感じられるようにしたかったのです。

天井には四角い穴がランダムに開いていますね。

石上●天井には1辺1,800～3,000mmの59個の開口を設けました。トップライトのある建物は天井高が高いことが多く、その場合、光が空間全体に回り込み均一な明るさになります。それに対してKAIT広場はいろいろな居場所をつくり出すために、天井高を抑えて、明るさにムラができるようにしました。開口の下には光が入りますが、それ以外のところは少し暗くなる。昼寝をする人は少し暗い方に行くでしょう。

このように微妙な明るさの差でも空間が分節されているように見せて、多様な環境をつくり出そうとしました。



長手断面図 1/600

垂れ下がる大きな鋼板屋根

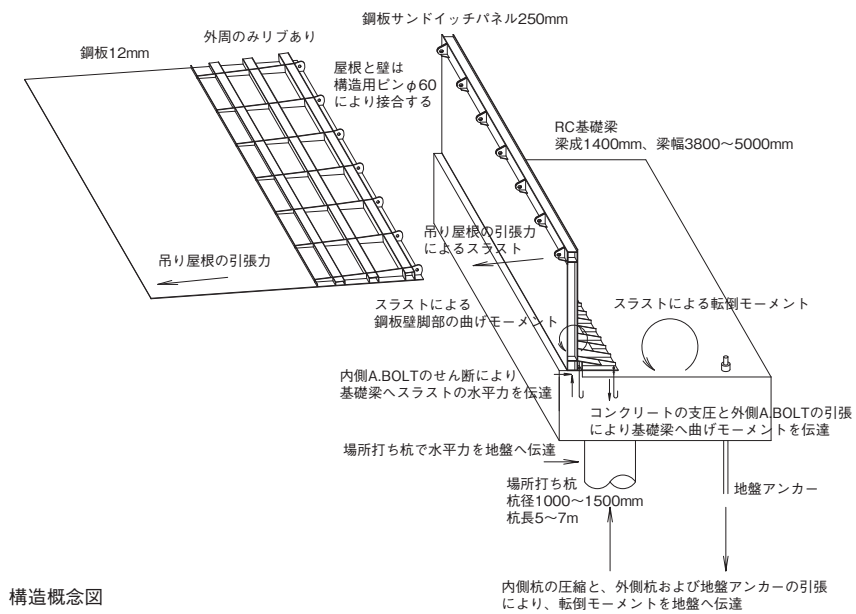
建物全体に緩やかにたわんだ大きな屋根が架かっていますが、この構造について教えてください。

佐藤●大きな鋼板屋根は、鉄筋コンクリートの地中梁基礎(幅3,800～5,000mm、高さ1,400mm)に打たれた83本の場所打ちRC杭を支点に引っ張り上げられ、54本のアースアンカーによって固定されています。初めの設計ではアースアンカーを斜めに打ち、杭に曲げモーメントが発生しないような工夫がありましたが、設計期間や施工性を重視し、アースアンカーを鉛直に打つ方法を採用しました。

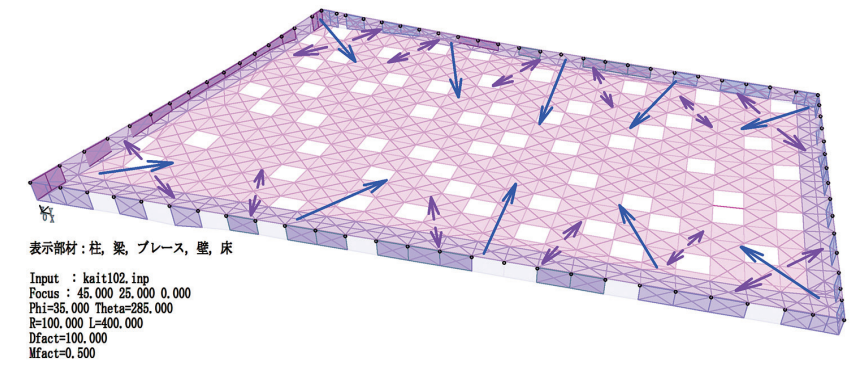
屋根の形状は基本は懸垂曲面なのですが、2辺から吊るだけでしたら単純な懸垂曲面になりますが、この屋根は4辺が拘束されているため、中央部分はほぼ1方向に垂れるのに対し、四隅は2方向に引っ張られて円錐形に垂れるのです。

その状態で完全な引張力のみ懸垂曲面にしようすると、端部の曲率がかなり大きくなり、天井が浅い曲面で垂れ下がってくれません。天井高を2～3mにしようすると、四隅の引張力の直行方向に圧縮力が発生し、それによって屋根が座屈して膨らんでしまうのです。ですから、この座屈に対する補剛として、屋根の外周3mの幅にリブを入れました。

私は小西泰孝さんから構造設計を引



構造概念図



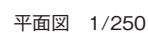
鋼板屋根の構造解析図 青い矢印が引っ張りの方向、紫の矢印が圧縮力

き継いだのですが、このような構造の基本的な考え方は小西さんが設計されたものを踏襲しています。

屋根の鋼板は何mmを採用されたのでしょうか。

佐藤●12mmを採用しました。当初、80×50mの大きさに鋼板を1枚垂ら







施工中の俯瞰 鋼板屋根には59個の開口が開けられ、外周部には座屈を補剛する3m幅のリブが入っている

すのだったら、構造的には板厚9mmで成立できそうでしたが、石上さんは鋼板を溶接した時の歪みを心配されていました。私は、鋼板が薄いと歪むかもしれませんが、熟練したファブリーケーターならバーナーで熱を入れて歪みを補正する技術がありますし、逆に12mmで歪んだ方が直しにくく、滑らかな曲面をつくりにくいのではないかと話しました。しかし、石上さんは最初に歪みにくい方が効果的なのではないかと、12mmを要望されました。

石上●たしかに歪みを熱で補正していく方法もあると思いますが、僕がこの建物で難しいと思っていたのは熱変形なのです。鋼板の屋根は直射による熱で伸び縮みし、この屋根の大きさの場合、夏と冬で天井高が40～50cm変化します。しかし、施工時に熱で補正したところは残留ひずみが発生しますから、その後熱変形した時に連続したきれいな曲面になるとは限りません。なるべく補正しなくてすむ厚さにした方が、熱変形した後もきれいな曲面を

保てるのではないかというイメージがありました。

熱変形に対しては何度もモックアップをつくり、どの程度変形するのか確認しました。その結果、板厚が少し薄いだけで相当歪むことがわかりました。

それから、9mmの鋼板は僕の感覚ではわりとペラペラで薄くて、本当は15mmくらいにしたかったのです。建築の屋根は硬いもので構成されているほうが建った時に力強くて、しかも空間全体がきれいに見えるのではないかなという思いもあり、意匠的に12mmにしました。

きれいな曲面をつくるための工夫

屋根はどのようなパーツで組み立てられているのでしょうか。

石上●7.2×2.4mの鋼板を現場で溶接しています。

屋根は目地割りもいろいろと検討し

ました。施工を担当してくれた鹿島建設が最初に提案してきたものは、等高線に垂直になるように放射状に目地を組んだものだったのですが、それだと形を矯正しすぎてしまうことになり、板厚の話の時と同様、熱変形した時にきれいな曲面にならないのではないかと思います。また、仮に溶接の跡が見えた時に、四角い天井をつくっているのに放射状の目地が見えるのはおかしいのではないかなど、いろいろなことを考えた結果、できるだけ単純にグリッドに配置した割り方を採用しました。

ただ、一直線にきっちりグリッドで割ってしまうと、交差部分で溶接が弱くなってしまうので、グリッドを少しずつ上下方向にずらして、十字形の交点をつくらないようにしています。

建て方の手順を教えてください。

石上●まずは穴を掘ってコンクリートの基礎をつくり、そこに屋根の形状に

合わせた足場を組んで、その上に鋼板を載せて現場で溶接しました。

佐藤●屋根の中央の十字のエリアは、ほぼ平らな板の両端を持ち上げたような状態で曲率も緩やかなため、一方向にきれいに垂れるのですが、四隅の勾配がきつくなる部分はあらかじめ工場で鋼板を曲げて曲面のユニットを製作し、それを現場に持ってきて溶接しています。

石上●それから、鋼板はカットの形がひとつひとつ微妙に異なります。鋼板は平面的に見ると四角ですが、三次元の曲面でつなぎ合わせるので、カットの形は長方形ではなくて、すべて台形になっています。曲面を展開した形を切り出しているということです。

現場でロボット溶接

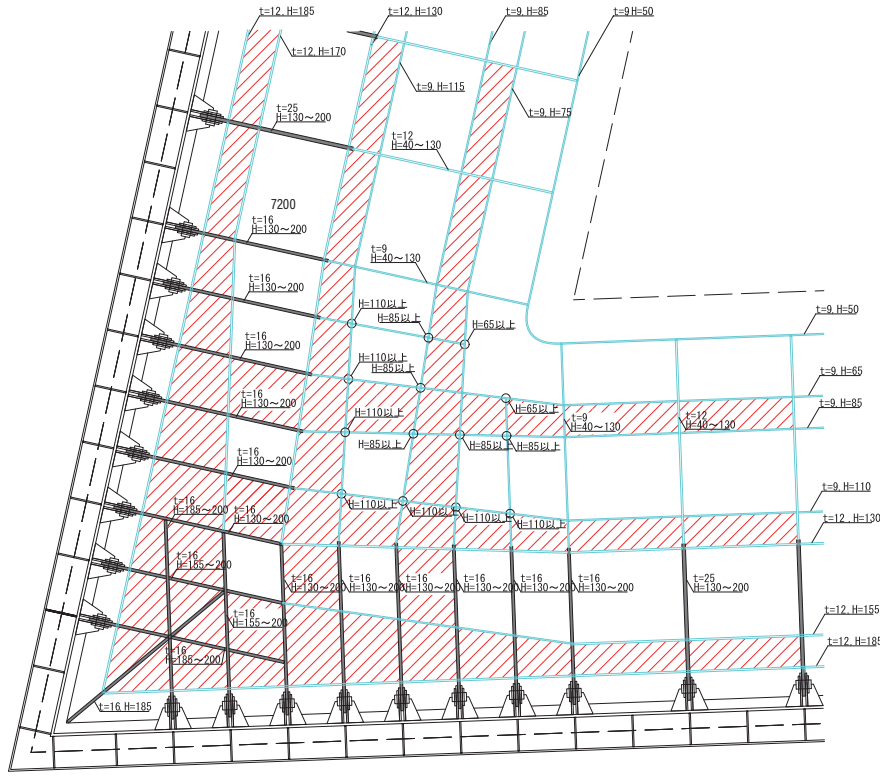
きれいな曲面を実現するためには溶接の精度も求められたと思います。溶接での工夫を教えてください。

石上●はい。人の手だとどうしても距離や熱の強さなどすべて均一に溶接することが難しく、その分歪んでしまうので、再現性があるロボット溶接を採用しました。鹿島建設は現場でロボット溶接を行ったのは今回が初めてだったそうです。

すべてをロボット溶接で行うのは大変ですので、現場に水平な作業場をつ



鋼板を現場で溶接する



屋根角部詳細図 1/50

くり、まず7.2×2.4mの鋼板を3枚並べて7.2m角のユニットにする作業をロボット溶接で行い、それを足場の上に運んで最後は手で溶接していきました。

溶接は裏当てはしていないのでしょうか。

佐藤●セラミックスの裏当てをしてお

いて、あとで取り外す方法にしました。

石上●全部は取れないのですが、できるだけ溶接が見えないように、そしてなるべくフラットになるように研磨しました。

溶接時の歪みにより膨らんでしまったところは、最後に上からガスバーナーで熱を加えて縮めてへこませました。

熱を加える時は、事前に実験をしてこの場所に何度か熱を何秒当てればよいかをきちんと測り、理想の形にしていきました。

佐藤●この補正技術は非常に難しく、ある1点に熱を加えてもすぐに形が直っていくわけではありません。補正箇所すべてに熱が入らないとどのくらい形を戻せたかわからないのです。鋼板を赤くなるほどは炙らないので、今何度になっているかもわかりにくいですが、これは非常に高い技術だと思います。

石上●四隅の部分はもともと歪めたものをつないでユニットにしていることもあり変形しやすく、その結果その周



屋根の鋼板の茶色の点は熱で矯正した箇所



屋根と壁ユニットの接合部



壁ユニットをセッティング 足もとにはアンカーボルトが並ぶ

辺の歪んでしまったところを最低限の熱を入れて補正していきました。

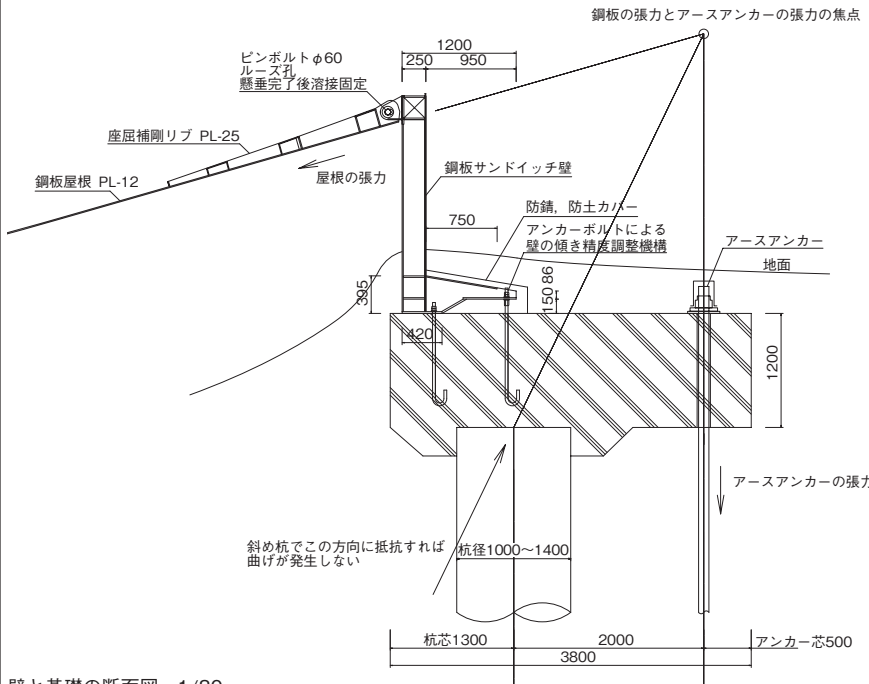
壁と屋根、基礎の接合部

屋根を受ける壁はどのような大きさなのですか。

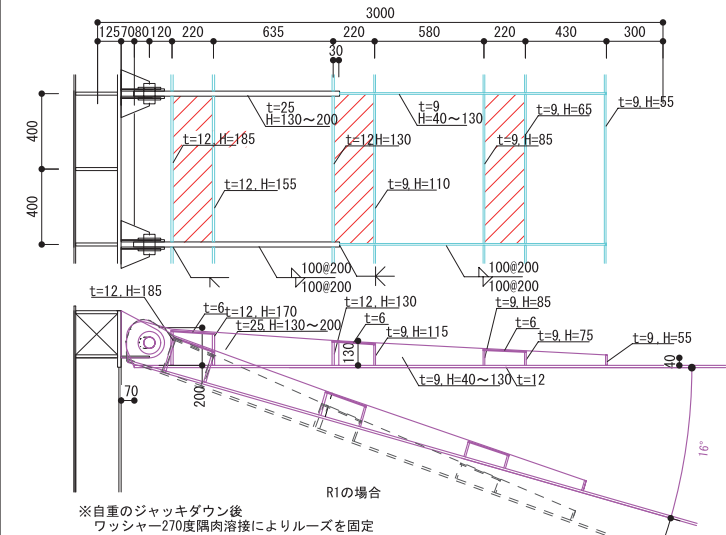
石上●鋼製の壁は、屋根の外周にリブを設けたことで張張力の負担が軽減され、厚さは250mmとあまり大きくならずすみしました。

工場で溶接した壁ユニットを地中梁に固定し、一体化した後に、そこに屋根をピン接合し、リブを取り付けました。精度がなかなか出なくて、現場で変形した壁を直しながら取り付けだったので、結構苦労したと思います。

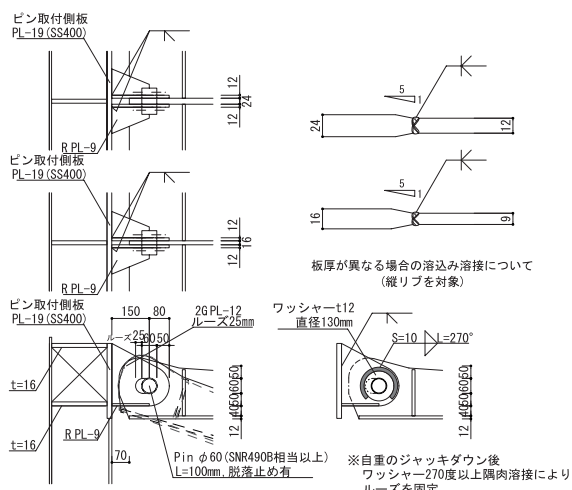
佐藤●壁と基礎との接合部にはアンカーボルトが400本くらいずらっと並んでいます。これくらいの数で押さえないといけないほど、強い力で引っ張られているということです。壁ユニットをセッティングする時、このアンカーボルトを壁ユニットの穴に一度に入れないといけません。基礎に取り付けたアンカーボルトはコンクリートを打設する時にどうしても擦れてしまうのですが、これだけの数のアンカーボルトをほとんど修正することなくセッティングできたのは、すごく精度のいい並べ方をしてくれたからだと思います。



壁と基礎の断面図 1/80



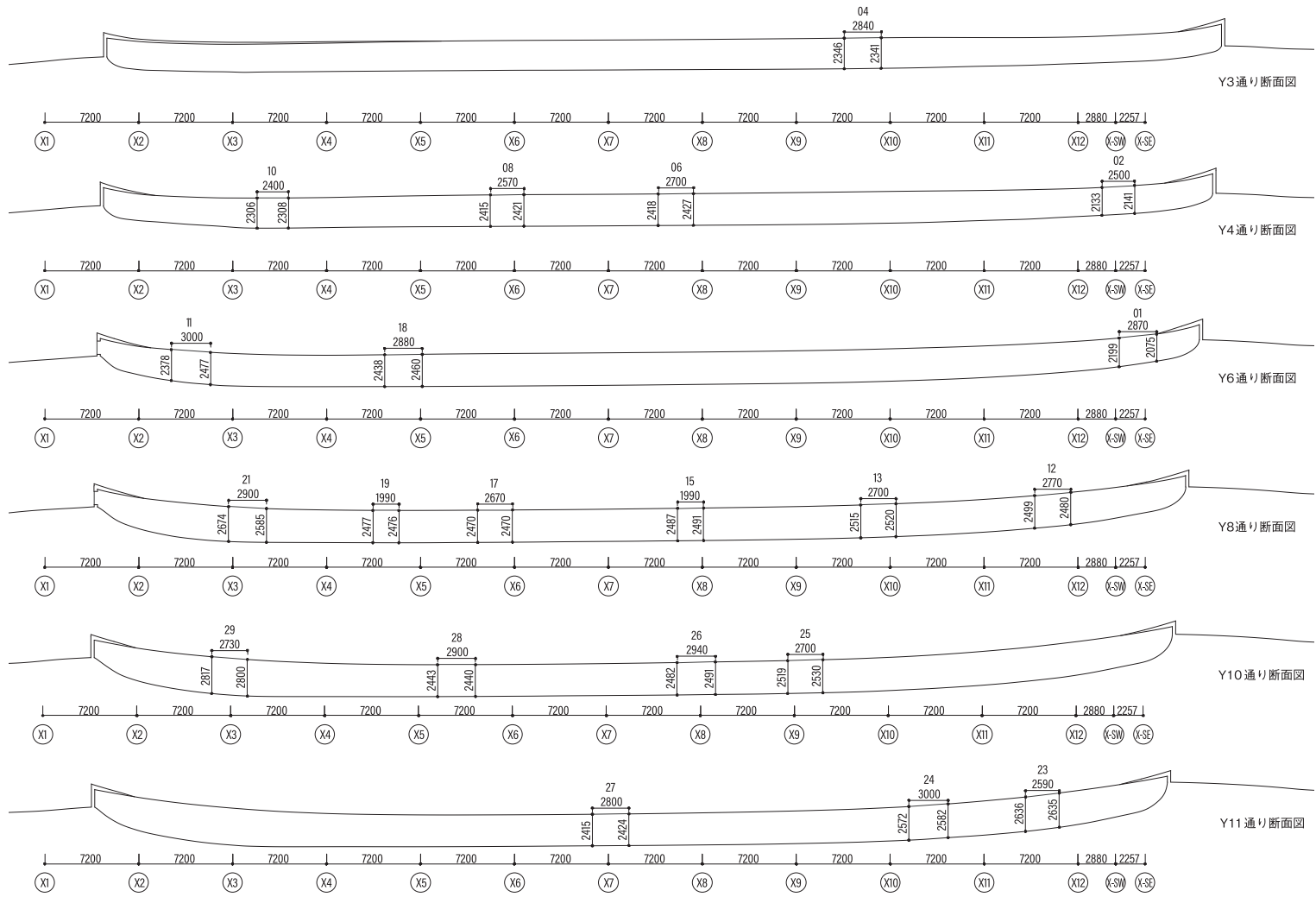
屋根接合部詳細図 1/40



屋根接合部詳細図 1/30



横の窓から内部を見る トップライトと窓から光が差し、内部は全体的に明るい



断面図 1/500



床は透水性アスファルトをライトグレーに塗装

屋根に開口を設ける

屋根の開口についても教えていただけますでしょうか。

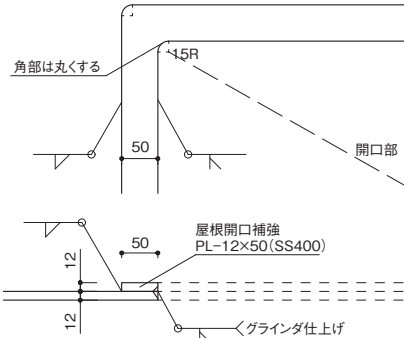
佐藤●開口は、鋼板に切り取り線を設けておき、開いていない状態で溶接して大きな1枚の屋根をつくってから開けました。開口は引っ張られる方向にあまり関係なくバラバラと分散しているのですが、応力集中が起きないように位置を最適化しています。

さらに、穴が四角く開いていると、その角に応力が集中してそこから割れ

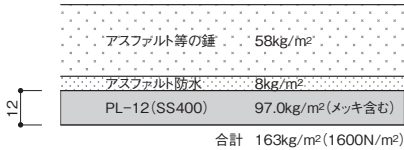
てしまう恐れがあるため、角は半径50mmのRを付けて、さらに12mmのフラットバーの縁取りを付けて補強しています。

見た目からはフラットバーが入っているのが全くわかりません。

石上●それは、鋼板の表面に最後に仕上げ材として透水性アスファルト(t=30mm)が載っているからです。透水性アスファルトなので水がこの下を流れるのですが、流れた水は開口補強のフラットバーでできるだけせき止



屋根開口補強・開口角詳細図 1/10



屋根の構成

めて、内部に落ちないようにしていて、かつ、そのバーを隠すような状態になっています。

このアスファルトは、屋根の吹き上げに対する重りにもなっています。また、屋根の上を水が流れると屋根面がすぐに汚れてしまいますが、透水性アスファルトの場合、水は基本的に下を流れるので、表面はきれいな状態を保つことができます。

それから、夏場は鋼板が熱で大きく伸び縮みしますから、それをできるだけ防ぐために、温度を計測して屋根面全体に水を流す計画になっています。その時に水が仕上げの上を流れてしまうと鋼板の温度が下がりませんから、やはり鋼板と接するところで水を流すことができる透水性のアスファルトが最適だったと思います。アスファルトであれば変形に対する追従性もあります。

アスファルトの表面は、白系の塗装を施し仕上げました。

開口は、応力集中と意匠的な光のムラをつくる、その両方のせめぎ合いで考えられているんですね。

石上●はい。入り口付近は屋根の曲率が大きいですからトップライトは設け

ていません。ですから、エントランスから入ると光はあるけれどトップライトが見えない状態になっていて、奥に歩いていくとだんだんトップライトが見えてきます。

屋根変位を許容する

空間の形状もユニークですが、その中で風景が変化するのが面白いですね。

佐藤●この建物は中に間仕切りがなく、12mmの鋼板が架かっているだけです。いちばん変形が大きい時は、温度変化や地震、風で屋根が20cmくらい上下します。上下するといってもゆっくりとしか動かないので危険はありません。間仕切り壁やガラスサッシなどがないおかげで、それくらいの変形を許す構造設計ができています。

石上●屋根の変化は空間にも大きく影響すると思っています。天井高は平均2,300mmくらいですが、いちばん下がった時で2,100mm、いちばん上がった時で2,500mmくらいになります。この屋根の大きさが約40cmの差というのは、体感としてとても大きな変化を感じるでしょう。そういう構造の変形が感じられるようなスケールを目指しました。

東京ドームの天井も1日で50～60cmは上下していますが、天井が40～50m上にあるのでその変化はまったく感じません。

このKAIT広場はメガストラクチャーと言える大きな構造の建物です。メガストラクチャーは人間のスケールを超えていますから、通常屋根の変化はわかりませんが、この建物はメガストラクチャーでありながら天井高は人間のスケールでつくっている、大きい構造体の変化を体感することができます。

鋼材に求めること

最後に、今後鉄骨造で挑戦してみたいことや、こういう鋼材がほしいというご要望がありましたら、お聞かせいただけますか。

佐藤●構造設計者として、ここ7、8年で懸垂曲面を使った建物に4、5件携わりましたが、KAIT広場のように2方向に曲率をもつ鋼板の構造は実現させるのが難しいと感じています。2方向に曲率をもつ曲面、または自由曲面を鋼板でもっとつくりやすくなることを期待しています。

それから、鋼材については、バネ鋼が建築の分野でもっと日常的に使えるようになると、より構造デザインの可能性が広がるのではないかと考えています。懸垂構造で端部にバネを仕込むと、温度伸縮しても張力があまり増えないことがわかっています。これまでに端部にバネを仕込みたいと思うことが2、3度あったのですが、バネの設計に苦労しました。建築の一般的な鋼材を使うと全長にわたって板をクランクさせたようなバネを使わなくてはならないのですが、バネ鋼が使えるようになるともう少し簡素にできるようになっています。

石上●鉄は好きなのですが、コンクリートや木、煉瓦など建築材料の中で、鉄だけが塗装しないと使えません。塗装をすると、素材の表情が出てこないところをいつも悩ましく思っています。本当は鉄そのものが錆びずに鉄の素材として使えるといいのですが……。いつも塗装の色で迷います。

鉄をそのままの状態で、そのままの表情で使うことができる鋼材ができたらいいいですね。錆びる前のきれいな鉄面をたまに見ることができたりしますが、あれがそのまま使えたら、また面白い建築ができると思います。

貴重なお話をいただき、ありがとうございました。

(2021年7月30日 石上純也建築設計事務所)

神奈川工科大学KAIT広場	
所在地	神奈川県厚木市下荻野1030
建築主	学校法人幾徳学園
主要用途	多目的広場
面積	敷地面積：129,335.04㎡ 建築面積：4,109.78㎡
構造	主体構造 鉄骨造 杭・基礎 鉄筋コンクリート地中梁、場所打ちコンクリート杭、地盤アンカー
階数	地上1階
最高高	5,794mm
軒高	5,597mm
天井高	2,412mm
意匠設計	石上純也建築設計事務所
構造設計	佐藤淳構造設計事務所
構造基本計画	小西泰孝建築構造設計
施工	建築 鹿島建設 鉄骨 日南鉄構、白石鉄工、イノマタ建設工業 設備 高砂熱学工業 電気 きんでん
設計期間	2008年4月～2019年3月
施工期間	2019年4月～2020年12月
写真提供：	石上純也建築設計事務所 佐藤淳構造設計事務所

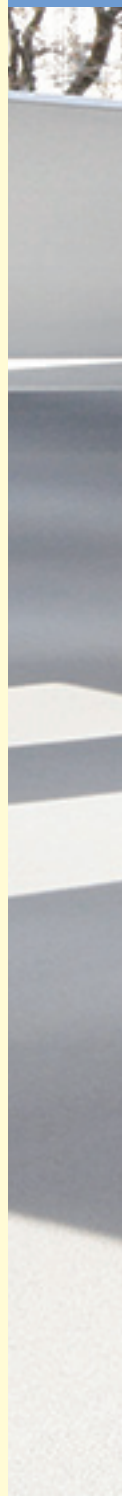
設計者プロフィール

石上純也 (いしがみ じゅんや)

1974年 神奈川県生まれ
2000年 東京藝術大学大学院美術研究科建築専攻修士課程修了
2000～04年 妹島和世建築設計事務所
2004年 石上純也建築設計事務所設立
2010～12年 東北大学大学院特任准教授
2014年 ハーバード大学デザイン大学院局員教授
2015年 プリンストン大学大学院客員教授
2016年 メンドリジオ建築アカデミー客員教授
2017年 オスロ大学大学院客員教授、コロンビア大学大学院客員教授

佐藤 淳 (さとう じゅん)

1970年 愛知県生まれ、滋賀県育ち
1995年 東京大学大学院修了
1995～99年 木村俊彦構造設計事務所
2000年 佐藤淳構造設計事務所設立
2010年～東京大学ACC寄付講座特任准教授
2014年～東京大学新領域創成科学研究科准教授
2016年～スタンフォード大学客員教授



一般社団法人 **日本鉄鋼連盟**
建築委員会

東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10

Tel.03-3669-4815 Fax.03-3667-0245

<https://www.jisf.or.jp>

編集協力：株式会社建報社

2021 年 10 月 20 日発行

本書は著作権法上の保護を受けております。
無断で複写、複製することは禁じられています。