

# 日本国内での発展に向けた欧州での建設用 コンクリート3Dプリンタの実状把握

東北大学 田崎悠斗(M1)・倉品吏玖(M1)・小山顕(M1)

Life  
Cycle  
Engineering  
Laboratory  
Dept. of Arch. & Bldg. Sci.



## はじめに

### ■ 本視察の目的

建設用コンクリート3Dプリンタ（3DCP）に関して、最先端の研究を行う欧州の大学・企業での研究施設や建設現場の見学、ヒアリング調査を通じて、欧州における研究体制、3DCPに関する法整備の現状、実構造物の普及状況などを把握する。

また、訪問先で申請者らの研究内容について発表の機会を設定し、現地研究者とのディスカッションを行うことで、研究成果の共有と今後の日本における3DCP発展のための情報収集を行う。

### ■ 工程

訪問先にはイギリス・オランダの二か国を選択した。表1に示す7か所を訪問し、研究施設の見学や現地研究者とのディスカッションを行った。各訪問先は、申請者自身や申請者らの指導教員と交流のある大学・企業を選択し、指導教員を交えて事前に訪問申請を行った。

表1. 訪問先と訪問日程（左：イギリス 右：オランダ）

| 訪問場所                                                                                                                                                | 日程      | 訪問場所                                                                                                                                          | 日程       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| [1] Cardiff University<br>(カーディフ大学)<br>Dr. Riccardo Maddalena<br><a href="https://www.cardiff.ac.uk/">https://www.cardiff.ac.uk/</a>                | 10/8, 9 | [4] Weber Beamix<br><a href="http://3dweber.com/">http://3dweber.com/</a>                                                                     | 10/14    |
| [2] Loughborough University<br>(ラフバラ大学)<br>Dr. Sergio Cavalaro<br><a href="https://www.lboro.ac.uk/">https://www.lboro.ac.uk/</a>                   | 10/10   | [5] Vertico<br><a href="https://www.vertico.com/">https://www.vertico.com/</a>                                                                | 10/15    |
| [3] The University of Sheffield<br>(シェフィールド大学)<br>Dr. Behzad Nematollahi<br><a href="https://www.sheffield.ac.uk/">https://www.sheffield.ac.uk/</a> | 10/11   | [6] Eindhoven University of Technology<br>(アイントホーフェン工科大学)<br>Dr. Derk H. Bos<br><a href="https://www.tue.nl/en/">https://www.tue.nl/en/</a>   | 10/16    |
|                                                                                                                                                     |         | [7] Delft University of Technology<br>(デルフト工科大学)<br>Dr. Erik Schlangen<br><a href="https://www.tudelft.nl/en/">https://www.tudelft.nl/en/</a> | 10/17,18 |

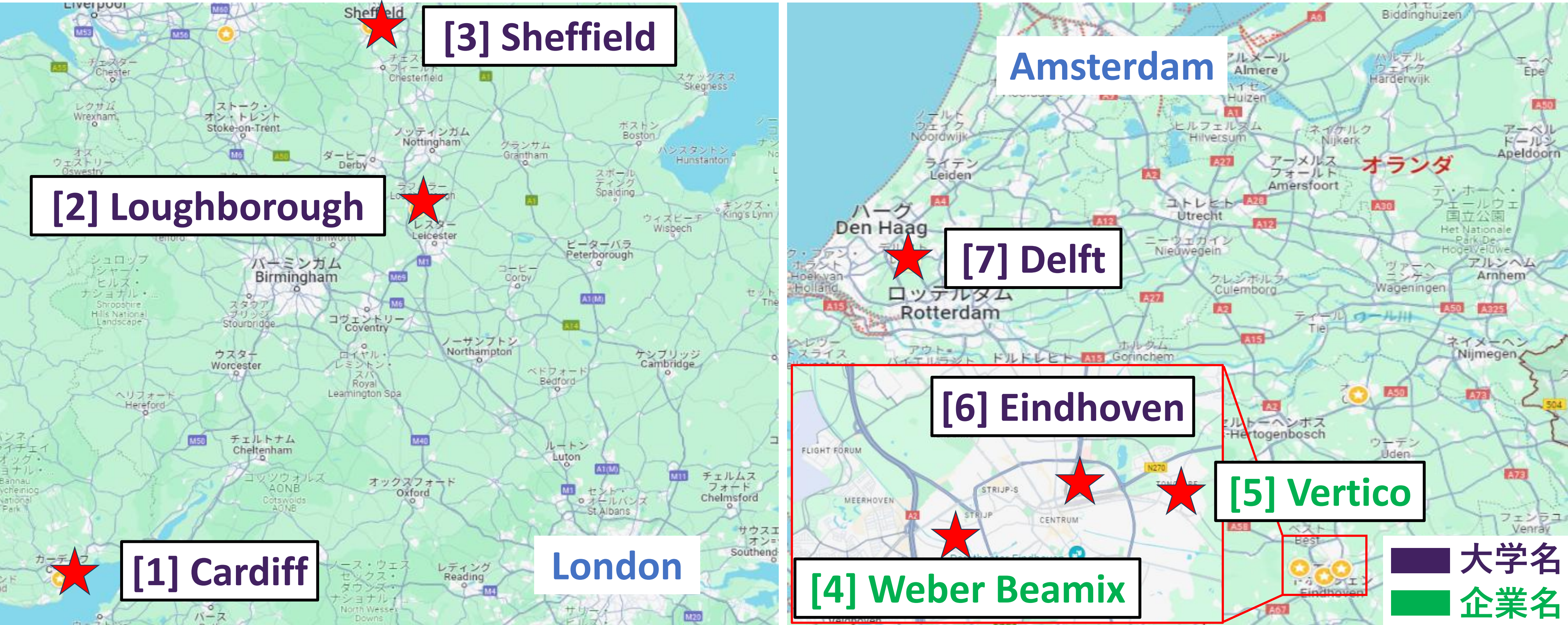


図1. 訪問先の位置（左：イギリス 右：オランダ）



# 日本国内での発展に向けた欧州での建設用 コンクリート3Dプリンタの実状把握

東北大学 田崎悠斗(M1)・倉品吏玖(M1)・小山顕(M1)

Life  
Cycle  
Engineering  
Laboratory  
Dept. of Arch. & Bldg. Sci.



## 1. 3DCPの普及状況

### ■ 大学

今回の視察ではイギリス・オランダにある大学計5か所を訪問した。そして訪問先となった研究室のいずれもが、大学内で自由に使用可能な実機3DCPを所持しており、実用化に向けた先進的な研究を行っていることを確認した。また、各訪問先でのディスカッションで特に印象的であった内容の一つとして、ラフバラ大学のCavalaro教授が「研究においては常に実用化を見据えることが大切になる。また、大学という機関は学生が研究の初期段階を担うことが多く、大学内に実機3DCPがあることは重要になる。」とおっしゃっていたことが挙げられる。

図2は、デルフト工科大学における、実機3DCPを用いた積層体作製の様子を撮影したものである。デルフト工科大学に限らず、今回訪問した研究室はいずれも大学内に自前の実機3DCPを保有しているため、研究室の学生は積層材料の調合や積層体の構造検討を非常に円滑に行うことができるのだと述べていた。実際、私たちが訪問した際にも、学生がモルタルの練混ぜと積層実験を行っており、机上での検討から実験までの流れが1つの研究室内で完結していることは、円滑に研究を進める上で大きな強みであると感じた。

日本の大学では、現状3DCPの普及率は高いとは言えない。そのため、**実験室スケールでは実機を用いない簡易的な評価方法に留まざるを得ないことが大きな問題となっている。**3DCPという手法が特有の造形方式を採用している以上、簡易的な評価方法による検討では結果の正確性が限られることから、本邦においても大学における実機3DCPの普及が必要と考えられる。



図2. デルフト工科大学の実機3DCP

また、一言に「実機3DCP」といっても様々な規模のものがあることを確認した。例えば、シェフィールド大学では数メートル規模の造形が可能な3DCPを導入していたが、カーディフ大学では数十センチ四方の造形に限られた小型のものを導入していた。規模が小さいものは造形サイズが限られる一方で、実験効率の良さが大きなメリットの一つであり、両者は使い分けられることが望ましいと考えられる。訪問した大学の中には、大型・小型両者を導入している大学もあったことから、日本の大学においても、**必ずしも大型3DCPにこだわるのではなく、導入が簡単な小型の3DCPも視野に入れて普及を進めていくことで、国全体としての発展に繋がる**と考えられる。

### 大型実機3DCP

- より実構造物に近い大型サイズの積層体を作製可能

アイントホーフェン  
工科大学

ラフバラ  
大学

### 小型実機3DCP

- 簡易的な試験体の作製に適切

カーディフ大学  
シェフィールド大学  
デルフト工科大学



# 日本国内での発展に向けた欧州での建設用 コンクリート3Dプリンタの実状把握

東北大学 田崎悠斗(M1)・倉品吏玖(M1)・小山顕(M1)

Life  
Cycle  
Engineering  
Laboratory  
Dept. of Arch. & Bldg. Sci.



## 1. 3DCPの普及状況

### ■ 企業

今回の視察ではオランダにある企業を2か所訪問し、自社で販売および使用している実機3DCPや、実際に造形した積層体を拝見した。これらの企業では、大規模な3DCPが使用されており、より実用化に近い造形が行われていることを確認した。

図3はWeber Beamix社が所有し、実際に利用している大型3DCPである。この3DCPは、本体部分がサイドレールと連結しており、**水平方向に数十メートルオーダーの大きさを持つ構造物を作製できる**そう。実験所において、積層体を作製している様子を見学させていただいた。



図3. Weber Beamix社の実機3DCP

Weber Beamix社では独自の寸法を持つ傾斜階段のデザインを行っている。図4に示した階段は、実際に使われているものと同形状の展示モデルであり、他にも、3DCPによる造形形状の自由度の高さを存分に生かした積層体が実験室内に多く見られた。

Vertico社でも、3DCPの自動施工による利点を生かし、図5に示すような複雑形状の造形やボートなどといった特殊な製品の作製が積極的に行われている（図中のボートは実際に川を下ったもののこと）。このことから、3DCP技術の可能性は建築分野にとどまらないことも感じさせられた。



図4. 自由寸法の階段  
(Weber Beamix社)



図5. 複雑形状のオブジェとボート  
(Vertico社)

また、2つの企業を訪問する中で、各企業ごとに特に注力している事柄が異なると気づいた。Weber Beamix社では、3DCPという新しい技術が、信頼性を手に入れるための実構造物スケールの造形に注力しているのに対し、Vertico社では、複雑形状の造形に注力しているそう。さらに、企業によっては3DCP実機本体の開発に注力するところもあれば、3DCPは外注し積層体の造形に注力するところもあるそう。

現状3DCPは発展段階であるため、その中の特定の研究の高度化に注力することが必要と考える。しかし、**最終的に技術として確立するためには研究成果を包括的に管理する必要があるため、どこかのタイミングで大学も含め、その成果を極力オープンにしていくなさ**と考える。



## 2. 3DCP関連法案整備の現状と今後の展望

### ■ 欧州における3DCP関連法案の現状

訪問した7つの大学・企業で、欧州における建築に関連した法案整備の状況や、3DCP関連法案の整備について質問をした。各訪問先でのやり取りを通して、**欧州では、3DCPに関する法体制は現状定められていないことが明らかとなった。**加えて、現行の建築に関連した法案では地震に対する制度は国によって異なり、国によっては、地震を考慮すべき大きなファクターとして捉えていない場合があることを知った。（EU圏内では主に「European Standard」を基に各国で指針を定めることになっているが、明確なルールは定まっていない）

前者に関しては現状の日本と同じで、今後明確に定めていく必要があると考える。特に欧州では、3DCPによる構造物の普及率が日本と比較し極めて高いことから、基盤となる法の整備は急務であると考えられる。欧州での3DCP関連法案の基礎が構築されれば、日本においての適用を考える際にも必ず役立つはずだ。また、後者に関連して、日本への導入を考える場合には、地震の発生頻度やその規模が日本と欧米諸国で異なることに留意すべきであることも再確認できた。

以上のことから、今後欧州で適用されるであろう3DCP関連法案を軸に考えつつ、地震力の影響を適宜組み込んでいくことで、日本特有の法体制を構築していくことが有効と考えられる。

図6に示したのは、Weber Beamix社において造形された階段である。3DCP製の構造物は不連続層が弱点であることを考慮し、載荷荷重による応力の向きと不連続層の向きが意図的に設計されている。しかし、こちらの階段では、**地震によって発生する応力の影響は、不連続層の向きを決める際に考慮されていないようだ。**

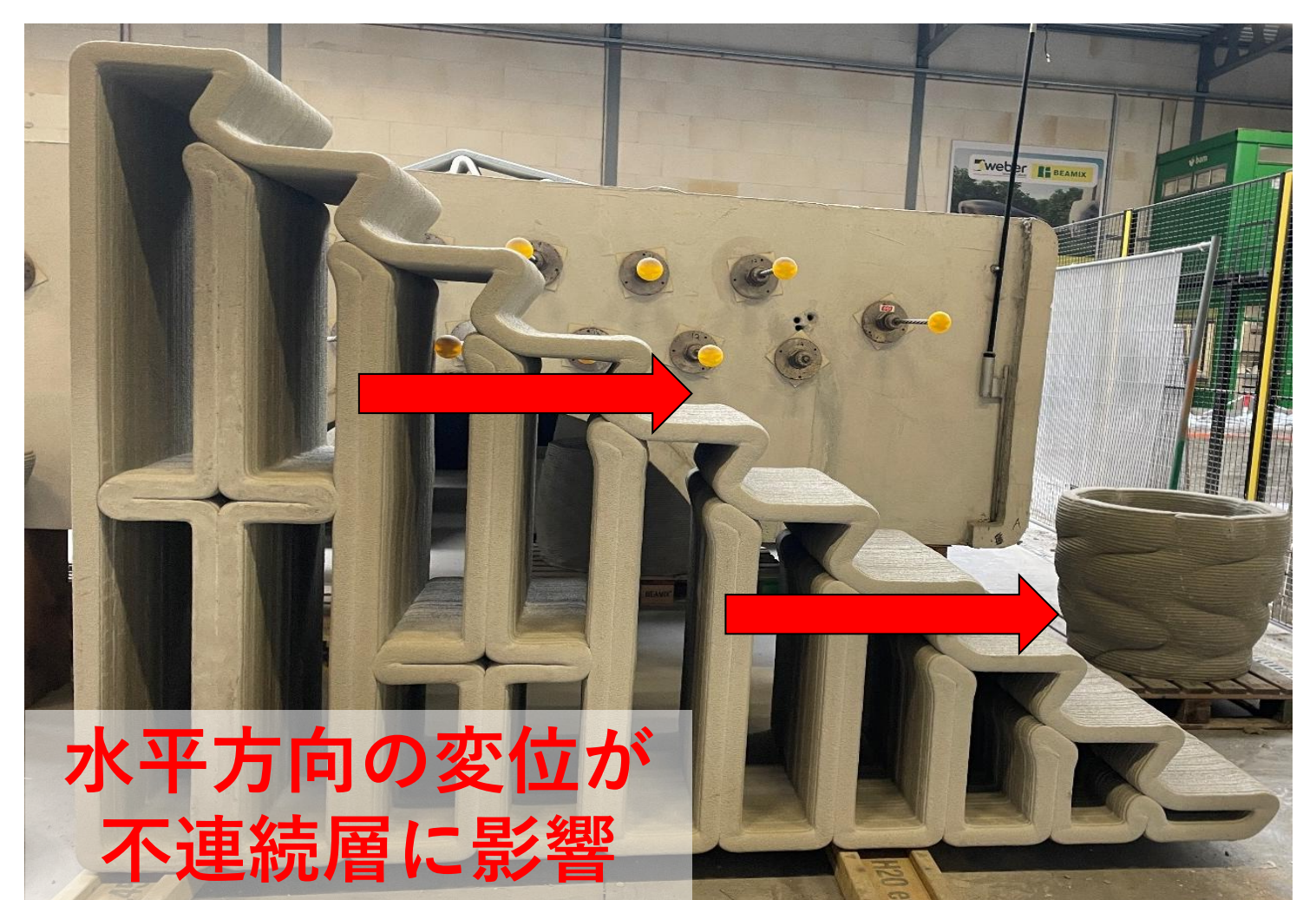
また、不連続層を補うための補強方法に関する研究が世界的に行われている。しかし、現状では設計基準強度が確立されていないため、補強性能の評価が「ある程度強い、もしくは弱い」という大まかな判定に留まってしまふ。また、日本での法整備のためには構造物の強度を予測できる必要があるが、現状多数の不連続層を含む積層体の強度や力学的挙動を予測することは難しく、強度予測モデルの確立には至っていない。

代表者の田崎は主に3DCP積層体の補強方法に関する研究を行っており、現地でのディスカッションにおいて欧州の研究者らから、「日本において補強効果の基準はあるのか」、「基準に対してどの程度の効果が発揮されているのか」という質問を多く受けた。これらのやりとりから、欧州の研究者らも、補強方法や強度の基準を含めた法整備は重要と考えていることが明らかとなった。

以上より、欧州でも日本同様に3DCP関連法案の整備は未完であり、実用化の為には、不連続層や補強効果等を包括的に管理する設計法の確立が必要であることが明らかとなった。また、地震の影響が支配的となる日本においては、上記に加えて、地震力が厳重に考慮される必要があると再認識した。



(a) 外観



(b) 地震が発生した場合

図6. 階段（Weber Beamix社）



# 日本国内での発展に向けた欧州での建設用 コンクリート3Dプリンタの実状把握

東北大学 田崎悠斗(M1)・倉品吏玖(M1)・小山顕(M1)

Life  
Cycle  
Engineering  
Laboratory  
Dept. of Arch. & Bldg. Sci.



## 3. ディスカッションで学んだこと

### ■ 3DCPの発展に向けて

本章では、現地でのディスカッションを通じて、学んだことを述べる。

研究活動を行う上で、実験結果が機械側の条件に左右されるというのは、他の研究テーマには無い3DCP特有の難しさである。例えば、同じ材料を使用して同形状の積層体を作製しても、使用する実機の手押し出しポンプの強さにより積層体の密実さが変化し、積層体の強度が変化してしまう可能性がある。そのため、他者の研究を参照する際には、結果のみならず、実験時に使用した実機の性能などの実験プロセスにも着目する必要がある。実際にシェフィールド大学で実験結果を共有した際、同条件で実験を行っているにも関わらず、我々の実験結果と彼らの実験結果に大きな差異があることが判明した。

また、3DCPという新技術の開発における「持続可能性」も議論の対象となった。最終的な実用化の際には、環境配慮、メンテナンスの容易さ、造形物の耐久性やコストの低さ等は担保される必要がある。例えば、2章で述べた補強効果を追求する研究に関して、現状「強度」を出すために補強材の位置や形状などをコントロールしているが、コスト面や環境面は配慮されていない。今後は、常に「持続可能性」を見据えた研究が重要であると考えられる。

さらに、他分野とタッグを組むことについても議論された。例えば、同行者である倉品が取り組んでいる、「電磁波を用いてコンクリート中の鋼材腐食を非接触で検査する非破壊検査手法」との関連だ。積層体の補強方法については、金属製のピンで積層間を補強する手法や、積層材料に金属繊維を混入させて靱性の向上を図る手法が存在する。これらは3DCP構造物を広く適用させるために重要な研究例であるが、金属を用いた検討では、必ず腐食などの金属特有の劣化性状が問題となる。3DCP構造物の普及とともに、それらの検査手法への需要も大きく高まることから、非接触・非破壊で実施可能な検査手法の開発は3DCPの分野においても期待されているとのことだ。また、同行者である小山が行う「人工知能を適用する分野」についても議論された。3DCP積層体に用いるコンクリートの調合は、一般的に用いられるコンクリートとは異なり、プリンタによる押出性と自立性を兼ね備えた調合が求められる。そのような新たな条件を考慮する際に、人工知能を用いることで、従来にはない性状を持つ調合の開発を加速させる可能性についても言及された。このように、3DCPの普及のために、他分野の先進技術を組み合わせることは有効と考えられる。



(a) デルフト工科大学



(b) シェフィールド大学



(c) ラフバラ大学



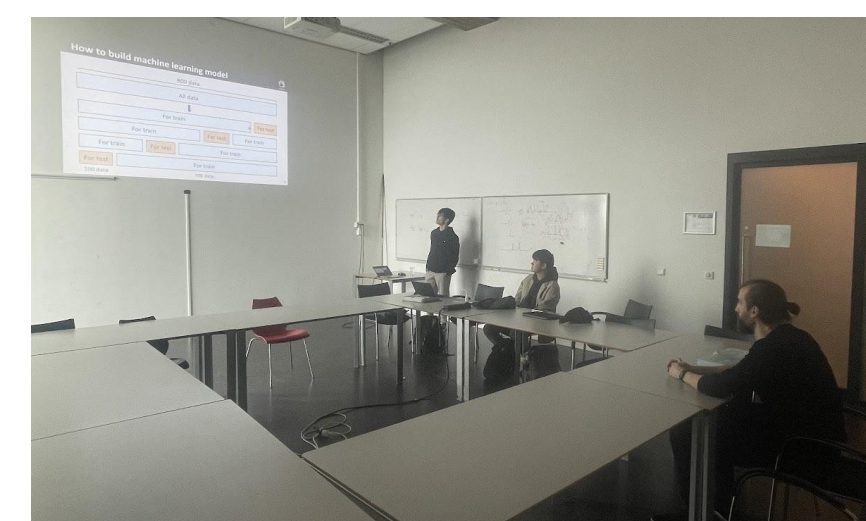
(d) カーディフ大学



(f) Weber Beamix



(e) Vertico



(g) アイントホーフェン  
工科大学

図7. 各大学・企業でのディスカッションの様子



# 日本国内での発展に向けた欧州での建設用 コンクリート3Dプリンタの実状把握

東北大学 田崎悠斗(M1)・倉品吏玖(M1)・小山顕(M1)

Life  
Cycle  
Engineering  
Laboratory  
Dept. of Arch. & Bldg. Sci.



## 4. まとめ

我々の特別研究テーマでは、欧州における3DCPの普及状況を調査し、国内での将来的な発展に必要な知見を得ることを目的とした。本視察において、以下に示す知見が得られた。

- 欧州の大学における実機3DCPの普及は日本よりも進んでおり、より実用化に近い研究が行われている。また、実機3DCPのサイズは大学によって大小様々であり、大型・小型両者を導入しているものもある。日本においても、導入が簡単な小型の3DCPを中心に、大学への普及を進めることで、国全体としての3DCP研究の発展に繋がると考えられる。
- 建築に関連した法案において、欧州と日本の決定的な違いは、地震の考慮の有無であった。現行の法案について、欧州では地震に関する規定が明確には存在せず、現状存在する3DCP構造物も、地震力に対する影響が考慮されていないことが明らかとなった。不連続層による弱点が避けられない3DCP構造物においては、既存のRC構造物以上に地震の影響が大きいことが見込まれるため、国内での3DCP構造物の実用化の為には、不連続層による躯体強度の低減と地震の発生を網羅した法案の整備が必要と考えられる。
- 現状、3DCPの普及状況は発展段階である。また、新技術の開発には持続可能性が求められるため、環境配慮、竣工後の維持管理の方法や低コスト化等の考慮が必要である。円滑な3DCP構造物普及のためには、研究段階から3DCPを他の分野とコラボレーションさせることや、早期に各研究機関が持つ技術をオープンにすることで、各分野・研究機関の知識や成果を集結させ、研究を進めていくことが大変有効なのではないかと考えられる。

## 5. 謝辞

本研究においてこのような大規模な調査を行うことが出来たのは、ひとえに前田記念工業振興財団の関係者の皆様のご助力あってこそと考えております。このような大変貴重な機会をいただき、誠にありがとうございました。参加した学生一同、心より深く感謝申し上げます。

また、訪問を快諾してくださった大学・企業の関係者の皆様にも心より深く感謝申し上げます。今回のご縁を絶やすことなく大切にしていきたいと思いをします。

*We would like to express our deepest and most sincere thanks to the university and company who kindly agreed to visit us. We will cherish this relationship without ceasing.*

Maddalena博士と共に



Cavalaro教授と共に



Verticoの社員様と共に



Nematollahi博士と共に



Schlangen教授と共に



Bos博士と共に



# 日本国内での発展に向けた欧州での建設用 コンクリート3Dプリンタの実状把握

東北大学 田崎悠斗(M1)・倉品吏玖(M1)・小山顕(M1)

Life  
Cycle  
Engineering  
Laboratory  
Dept. of Arch. & Bldg. Sci.



## 余談

今回の視察では、イギリスとオランダの二か国を訪れた。各所への訪問は、前述したとおり大変有意義で貴重な経験となったが、それ以外の時間においても異国の建築や食文化に触れたり、新たな発見にあふれた日々を過ごすことが出来た。こちらでは本編には載せられなかった写真を一部掲載したいと思う。



カーディフの街並み

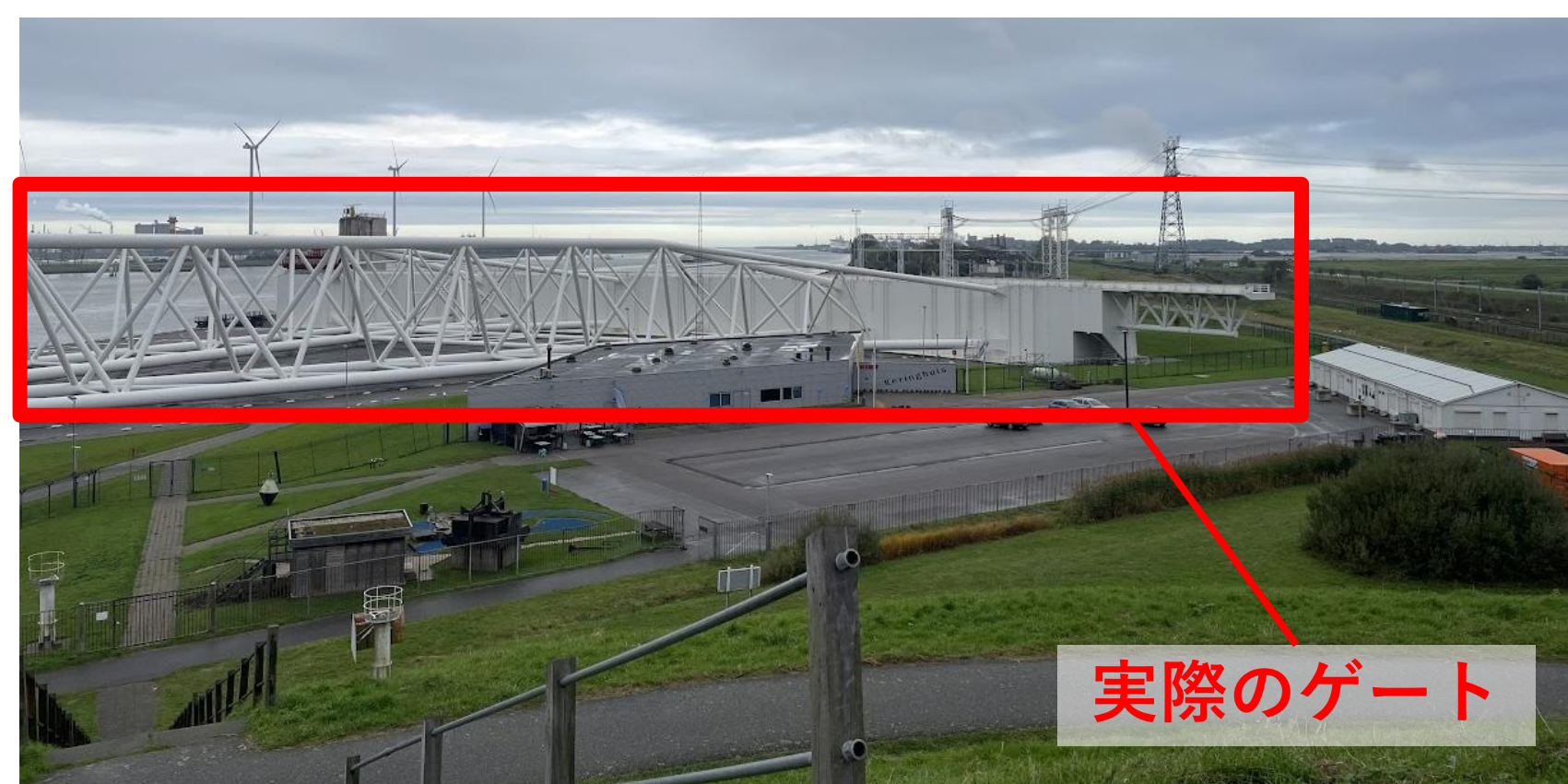


カーディフ城と  
ウェールズの象徴「赤い竜」



ハンバーガーが絶品

カーディフ大学には、申請者らと同研究室で現在留学中の学生が滞在しており、視察の合間にカーディフの街並みを案内していただいた。年季の入った建物が多く立ち並び、歴史を感じる雰囲気がありながらも、人の往来は多く、活気に溢れていた。



実際のゲート



矢印の方向に閉まることで  
河川の水を堰き止める

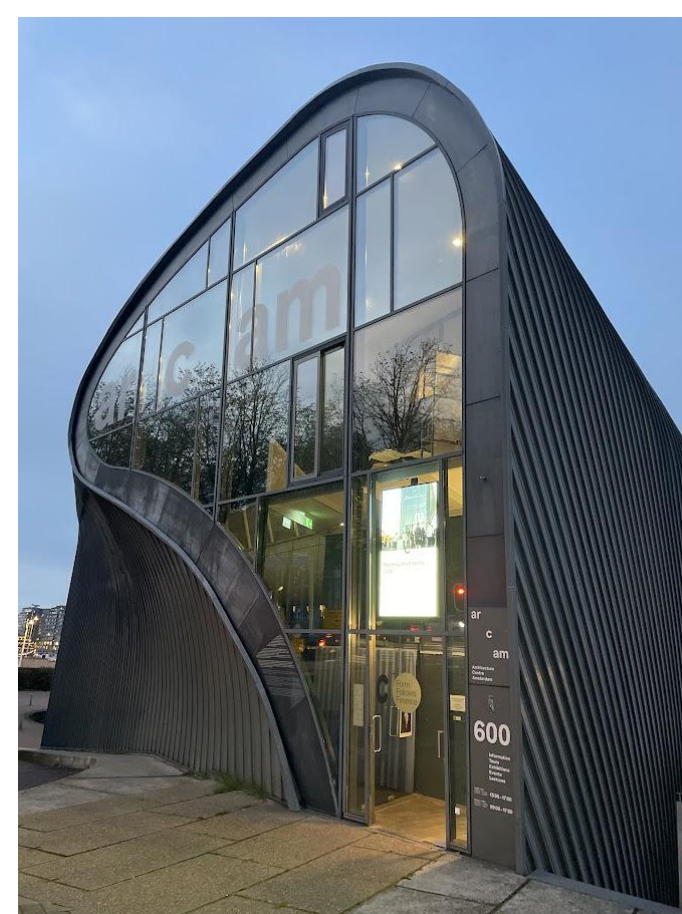
デルフト工科大学のSchlangen教授に、「開閉式の扇状ダム」を案内していただいた。オランダは地形上、洪水に非常に弱いことから、各地に河川を堰き止めるゲートが存在する。また、大型船舶の往来などもあるため、開閉式になっているようだ。



キューブハウス



マルクトハル  
(屋内マーケット)



ARCAM



ハーリング  
(ニシンの塩漬け)

デルフト工科大学への訪問後は、空港のあるアムステルダムまで向かう途中、様々な建築を実際に見に行った。オランダには古き良き石造りの住居が多かったが、比較的新しい建築には積極的に曲面がデザインされており、面白い造形も数多く見られた。こういったデザインの奔放さも、造形の自由度が高い3DCPが好まれ、普及する要因の一つなのかもしれない。