

建築生産に制約を与える環境下の構法の分析及び要素技術開発

構法計画研究室 新美敦也

1. 序論

1-1. 研究の背景

建築物は、様々な環境において生産される。南極や宇宙のように、材料が乏しく、設計者や施工者等の生産組織が貧弱な環境においても人類は居住空間を欲し、極地基地や宇宙船等の構築物を実現させた(図1)。居住空間を内包する構築物を広義の建築物と捉えた場合、これらにおいては環境的な制約に対して構法的な工夫を施すことで生産が可能になったと考えられる。

本研究では、材料や生産組織など建築生産に必要な要素を欠いた環境においてつくられる建築物を「極限環境下建築」と定義し、研究の対象とする。

極限環境下建築は、その生産上の制約によって利用者による施工を余儀なくされる場合がある。一方で設計は別の主体が異なる場所で行い、利用者は定められたものに従って施工することが多い。そのため、建設地で生じる、長期間滞在に伴う空間拡張など利用者の意思や要求を居住空間の設計に反映させることが困難である。建築生産に制約を与える環境においても、利用者が主体的に設計し、施工することが可能な構法の実現が課題である。

1-2. 既往研究

佐藤ら¹⁾は南極昭和基地の構法の歴史の変遷について明らかにし、菊地ら²⁾は仮設建築における要求に対する構法的対処を明らかにしている。このように極地建築・仮設建築など個々の建築に対する研究や開発記録は存在するが、「生産に制約を与える環境下の建築」を横断的に俯瞰する研究は行われていない。また、このような環境においては利用者による設計は想定されていないため、関係する研究も見受けられない。

1-3. 研究の目的

本研究では以上の背景から、1. 施工技術や技能を有していない利用者の施工を可能とする構法的工夫の横断的分析、2. 生産に制約を与える環境においても利用者による設計を可能にするための構法に用いる要素技術の開発、以上の2点を目的とする。

1-4. 研究の対象と方法

分析対象は、生産に制約を与える環境において利用者が施工を行った建築物とする。施工技術を有していない利用者が施工を行うことに対し、どのような構法的な工夫が行われたのかを文献や製品の調査を通して分析する。

この結果を踏まえて開発を行う。開発するものは、生産に制約を与える環境において利用者が施工可能であり、利用者による設計として空間形態や使用材料の自由な選択を可能にする構法のための部品である。

2. 極限環境下建築

極限環境下建築にはどのような特徴があるのか、どのような要素が生産に制約を与える環境をつくりだすのかを明らかにする。

2-1. 考える・作る・使う

図2に建築生産における考える・作る・使うという3つの行為の分担のされ方と具体的な例を示す。生産に制約を与える環境にあり、使う主体(利用者)が作る主体(施工者)を兼ねる極限環境下建築は②に該当する。本研究の狙いは、ここに現状実現されていない「使う主体(利用者)が考える(設計する)」機会を与え、①の状態を可能にすることである。

2-2. 生産に制約を与える環境

建築生産上の制約は環境によるところが大きいが、そのような環境をつくりだす要素として、「自然に関する要素」と「人と物に関する要素」が考えられる。ここでは、この2つについての詳細を記す。

1) 自然に関する要素

自然に関する要素は、人間の生存や居住快適性を左右する要素で、温度・気圧・重力・放射線などが考えられる。建設地におけるこれらの度合により、人間の作業効率低下や空間に求められる性能上昇等の制約が生じる。

2) 人と物に関する要素

人と物に関する要素は、建築の生産性を左右する要素で、建築の生産に必要な要素として「設計者」「施工技術の保有者」「材料」「施工に必要な情報」「工具」の5つが考えられる。これらが建設地に存在しない場合、建築の生産を阻害するような制約が生じることとなる。



図1 生産に制約を与える環境下の建築物の例
(左: 南極の昭和基地^{*1}, 右: 国際宇宙ステーション^{*2})

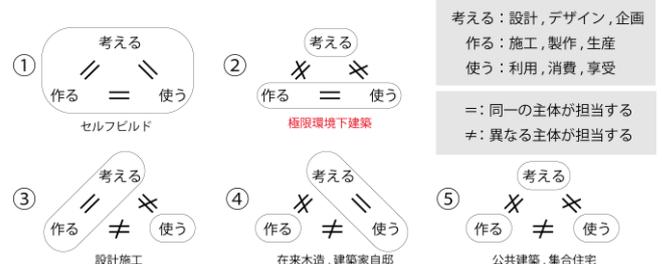


図2 考える・作る・使う主体の分担とその例

表 1 人と物に関する要素および必要な要素が無い場合の対処法

人と物に関する要素 必要な要素が無い場合の対処法	設計者	施工技術の保有者 (職人など)	材料	施工に必要な情報 (図面や説明書など)	工具
1. 外部から同一のものを調達する	設計者を輸送する	技術者を輸送する	プレファブリケート	情報を輸送する	工具を輸送する
2. 他のもので代替する	情報を輸送する	機械を用いて施工する	—	施工者を訓練する	機械を用いて施工する
3. 使用せず済むように工夫する	自身で設計する	自身で施工する	—	情報なしで施工する	素手で施工する

一般的に、建築生産に必要な要素が無い場合の対処法は以下のように整理することができる。

1. 外部から同一のものを調達する
2. 他のもので代替する
3. 使用せずに済むように工夫する

これをもとに、建築の生産に必要な要素が無い場合に有効であると考えられる対処法をまとめた(表1)。「材料」が建設地に存在しない場合には、プレファブリケートして輸送すること以外は成立しないため、対処法の2および3は除外した。対処法の数字が大きくなるほど利用者に求められる行為が増え、その実現のために施さなければならない工夫も高度になる。

3. 分析

3-1. 全体の分析

極限環境下建築の実例として、仮設・極地・宇宙の建築物からそれぞれ代表的なものを2つずつ選択した。ここから、利用者が施工を行うことに関してどのような工夫が施されたかを分析する。

1. 登山用テント, 2. ゲル, 3. 昭和基地(旧娯楽棟)^{注1}, 4. 昭和基地(基本観測棟)^{注2}, 5. ISS, 6. BEAM^{注3}

表2に、それぞれの実例が想定しなければならない自然に関する要素の一部を示す。ただし、登山用テントに関しては地上の広範囲で用いることが可能であるため、特定の環境は想定していないと判断した。表3に、実例と、人と物に関する要素が無い場合の対処法を示す。ゲルや基本観測棟のように、特定の要素が無い場合に複数の対処法を併用している場合があることが判明した。表4に、実例と空間構築の特徴を示す。空間構築の特徴として、材料のプレファブリケーションの程度、およびその材料を用いての施工方法を整理した。ここでは、折り畳んでいたものなどを本来の寸法まで広げることを展開と称している。

以上の3つの表から、各要素と空間構築の特徴を結び付け、利用者が施工を行うことに対する構法的な工夫を明らかにする。例えばISSは、宇宙空間という人間の生命活動にとって非常に不利な環境に存在する。このような環境において施工の技術者ではない宇宙飛行士に施工を任せることは非常にリスクが高い。そのため、機械設備も含む空間全てをプレファブリケートして、機械を用いたドッキングによる拡張を行うことで、利用者による施工でも安全な居住空間の生産を可能にしている。

表 2 極限環境下建築および自然に関する要素

極限環境下建築 の実例	自然に関する要素				
	気温		気圧	その他	
	最高 [°C]	最低 [°C]	外圧 [hPa]	重力 [G]	被曝線量 [mSv/日]
登山用テント	-	-	-	1	0.0067 ※1
ゲル	24	-28	1013	1	0.0067
旧娯楽棟	-7.6	-40	1013	1	0.0067
基本観測棟	-7.6	-40	1013	1	0.0067
ISS	-270	-270	0	0	0.5~1
BEAM	-270	-270	0	0	0.5~1

-: 特定の環境は想定していない

※1 地上における1年の被曝線量を2.4 mSvとして算出

表 3 極限環境下建築および人と物に関する要素の対処法

極限環境下 建築の実例	人と物に関する要素				
	設計者	施工技術の保有者	材料	施工に必要な情報	工具
登山用テント	2	3	1	1	3
ゲル	3(2)	3	1	2	3
旧娯楽棟	2	3	1	2	1
基本観測棟	2	1,3(補助)	1	1,2	1,2
ISS	2	2	1	1	2
BEAM	2	2	1	1	2

各番号は表1の「必要な要素が無い場合の対処法」に準じる

表 4 極限環境下建築および空間構築の特徴

極限環境下建築 の実例	空間構築の特徴	
	材料のプレファブリケート	施工方法
登山用テント	線材, 面材	展開, 引っ掛ける
ゲル	線材, 面材	展開, ヒモによる固定
旧娯楽棟	面材, 機械設備	特殊コネクタによる接続
基本観測棟	線材, 面材, 機械設備	(利用者は施工の補助を行う)
ISS	空間 (機械設備含む)	ドッキング
BEAM	空間 (機械設備含む)	ドッキング, 展開

対して登山用テントは、地上での使用を想定しており、自然に関する要素の影響が比較的少ない。場所と利用者の技量を問わずに居住空間の生産を可能にするため、線材と面材による構成で居住空間としての展開と解体を容易にし、面材を線材に引っ掛けることで工具を使用しない施工を可能としている。

3-2. 個別の具体的構法

前項では、利用者による施工を可能にするための構法的工夫の概略を明らかにした。本項ではより具体的に、それを可能にするためにどのような製法や機構が用いられているのかを調査して明らかにした。詳細は本論を参照されたい。

pinvise mk.1 - mk.2 (保持力が弱く、対応可能径の幅が小さいため試作中止)

aperture mk.1

mk.2 (保持力が弱く、固定が不可能であるため試作中止)

crack mk.1 - mk.2 - mk.3 - mk.4 - mk.5 - mk.6 - mk.7 - mk.8 - mk.9 - mk.10 - mk.11 - mk.12 (ゴムとの併用は使用環境を限定するため試作中止)

hub mk.1 - mk.2 - mk.3 (材に対する部品の寸法が肥大化するため試作中止)

spring mk.1 - mk.2 (バネの制御が困難であるため試作中止)

screw mk.1 - mk.2 - mk.3 - mk.4 - mk.5 - mk.6 - mk.7 - mk.8 mk.9 mk.10 - mk.11

joint mk.1 - mk.2 - mk.3 - mk.4 - mk.5 - mk.6 - mk.7 - mk.8 (構築可能空間をトラス構造のみに限定してしまうため改良)

plate mk.1 - mk.2 - mk.3 - mk.4 (空間に対する部品の寸法が肥大化するため試作中止)

2019/11/22 11/25 12/1 12/6 12/7 12/9 12/11 12/14 12/16 12/17 12/18 12/22 12/23 12/27 12/29 12/30 2020/1/6 1/8 1/9 1/16 2/9

「5. 実用可能性の検討」にて実験を行った組み合わせ

図 3 部品開発のタイムライン

4. 開発

生産に制約を与える環境下で、利用者による施工と設計が可能な構法の要素技術開発を行う。本研究では、利用者の施工を容易にするため、テントやゲルでの分析でみられたように線材と面材による空間の構築を想定し、線材での構造体の構築を開発の対象とする。また、利用者による設計として、空間形態や使用素材を自由に設定できるようにし、径や素材による制限なしに様々な線材の接続が可能となる部品を開発する。開発にあたっての達成目標を以下に示す。

①施工に関する技術者を必要としない、②施工に携わる人数が少なくても施工が可能、③図面や組立説明書などが不要、④工具を使用して材料を加工したり機械を用いて施工したりしない、⑤施工者が自由に空間形態を決定できる(用途に応じた空間拡張や変更が可能)、⑥保持できる材料の制限を設けない、⑦分解して持ち運ぶことが可能、⑧反復使用が可能、⑨部品自体の素材の変更が可能

①②⑦⑧には登山用テントやゲルでの構法を参考に、線材と面材で空間を構築する方法を採用することで対処する。③には施工方法を単純化して空間を簡易なつくりにすることで対処する。④⑥には材を保持するための機構を参照して対処する。⑤には構造体としての線材を連結させることにより対処する。⑨には 3D プリンターを出力に用いることで対処する。

材料を保持する保持機構およびそれを連結させるジョイントの 2 つに部品を分割し、製作と試用を行った。

4-1. 試作品

試作品は 8 種、総計 53 個に及んだ。図 3 に開発全体のタイムラインと試作の中止に至った主な原因を示す。ここでは 3 つの保持機構 pinvise, crack, screw について記す。

・ pinvise

pinvise (図 4) は、小型手動ドリルであるピンバイスのドリル保持機構を参照して製作したものである。チャックはゴム栓を加工して製作し接着剤で台座に固定する。ネジを回すとカバーにチャックが押されて先端が変形し、中央の穴の径が変化する。対応可能径は $\phi 4 \sim \phi 10$ であった。

試用の結果、ある程度カバーを回すと、接着剤が耐えきれずにチャックが台座から剥離すること、チャックに

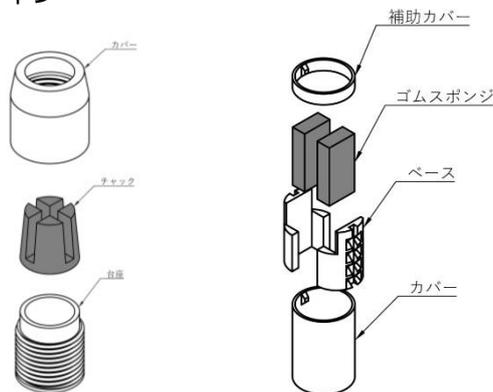


図 4 試作品 pinvise の構成 図 5 試作品 crack の構成

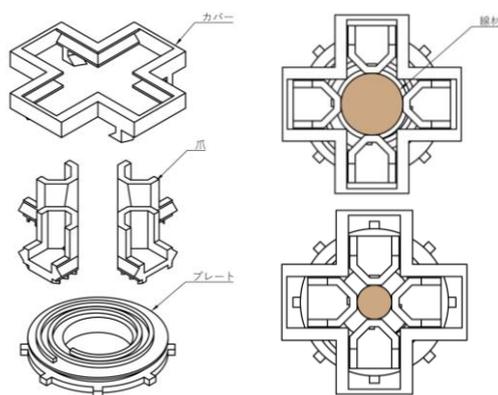


図 6 試作品 screw

(左：構成、右：線材の径を変更したときの様子)

よる保持力は弱く簡単に引き抜けてしまうこと、対応可能径の幅が小さいことが課題であると判明した。

・ crack

crack (図 5) は、接着剤を使用せず、強い摩擦力を得ることが可能で、対応可能な径の幅を広げることが目標に製作したものである。ゴムの弾性により材料を保持し、ベースとカバーで押さえつけて摩擦力を増すことで引張りに抵抗する。対応可能な線材の径は $\phi 5 \sim \phi 25$ であった。

試用の結果、ゴムによる摩擦力を得ることに成功したが、材料の化学的特徴による保持は使用環境を限定することが課題として考えられた(例:温度によるゴムの物性変化)。さらに、対応可能径上限に近い材ではゴムの反発力が強くなり、カバーの装着が困難であることも判明した。

・ screw

screw (図 6) は、使用環境を限定しないために、全てを

3D プリンターで出力することを目標にスクロールチャックの機構を参照して製作したものである。渦巻きレールのついたプレートを回転させることによりレールに沿って爪が中心方向に移動し、レール側面の摩擦力により材料を保持する。線材を保持する際は保持機構の軸と一致させて挟み、面材を保持する際は爪の側面に方向を一致させることで挟む。対応可能な線材の径はφ6~φ30で、面材の厚さは3mm~11mmであった。

試用の結果、接着剤や別素材を使わずに、対応可能径も比較的幅広く確実な保持が可能な部品が完成した。



図 7 crack.mk.12 の実験

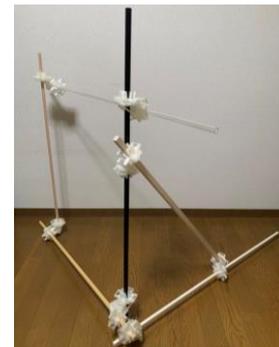


図 8 screw.mk.11 の実験

5. 実用可能性の検討

開発した保持機構とジョイントを用いて、空間構築が可能か否か実験した結果を記す。保持機構は crack.mk.12, screw.mk.10, および screw.mk.11 を用いた。

・ crack.mk.12

1 軸回転ジョイントを共に用いて正四面体を組み上げた(図 7)。保持された線材はジョイントを介して一枚のプレート上に集まり、これを頂点とする多面体を構築する。

実験の結果、製作したジョイントは角度が自由回転するため、構造としてピン接合となり、構築可能な空間はトラス構造に限定されることが判明した。

・ screw.mk.10

以上を踏まえ、ジョイントは摩擦によりある程度の角度の固定を可能にしたものを製作した。空間構築には、単管パイプとクランプを用いた骨組みのように、クランプ(本研究では screw とジョイントからなるユニット)を材の途中に付加して構築する方法を採用した。

実験の結果、ある程度の角度固定を可能にしても、ピン接合に変わりはなく、不安定な構造となるため、空間の構築は困難であるという結論に至った。

・ screw.mk.11

角度を 90° に固定し、構造として剛接合となるジョイントを製作した。このユニットを直交クランプとして用い、前項のユニットを自在クランプとして用いることで空間構築を行う。ここでは、素材や断面形状の異なる 6 本の線材を使用した。

実験の結果、これまでは不可能であった四角形の骨組みも構築可能となった(図 8)。また、ジョイントによる構造の不安定さも解消された。

表 5 にそれぞれの保持機構とジョイントに対して、開発目標がどの程度達成されたかを比較するものを示す。

6. 結論

生産に制約を与える環境下において、利用者による施工と設計が可能な構法を実現させるために、実例の分析と試験的な部品開発を行った。その成果を以下に示す。

1 分析の結果、各建築物が特有の構法的工夫を施してい

表 5 開発目標の達成状況

開発の目標	crack.mk.12	screw.mk.10	screw.mk.11
①施工に関する技術者を必要としない	○	○	○
②施工に係わる人数が少なくても良い	○	○	○
③図面や組立説明書を必要としない	○	○	○
④工具や機械を使用しない	○	○	○
⑤使用材料を制限しない	○	○	○
⑥分解して持ち運びが可能	○	○	○
⑦自由に空間形態を決定できる	△(トラスのみ)	△(不安定)	○
⑧反復使用が可能	△(劣化の恐れ)	○	○
⑨部品自体の素材変更が可能	×(ゴムの使用)	○	○

ることが明らかになった。

- 異なる環境下の建築物であっても、構法的工夫に共通するものがあることも明らかになった。
 - 開発した保持機構は、様々な寸法の線材や面材を保持することが可能である。
 - 開発した保持機構では、材料の保持に関して特別な工具や技術を要さない。
 - 部品の出力するサイズを変更することにより、さらに大きな径の材料にも対応することが可能である。
 - 角度を固定したジョイントと固定していないジョイントを併用して、自由な空間形態の構築が可能である。
- 今後の展望および課題としては、実例の分析をさらに進めること、部品に関して衝撃や摩耗による耐久性の改善などが考えられる。

参考文献

- 佐藤稔雄・平山善吉：南極昭和基地建物のプレファブリケーションシステムの変遷について、南極資料, No.84, pp.96-106, 1985 年
- 菊地孝司・真鍋恒博：仮設建築の構法に関する各種観点からの分析、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.683-684, 1999 年 9 月
- 村上裕資・池田靖史：建築モジュール論から見た国際宇宙ステーション計画、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.651-652, 2004 年 8 月

注釈

- 注 1) 1957 年に建設された建築物である。
 注 2) 2018 年に建設された建築物である。
 注 3) ISS の空間モジュールの一種である。地上で折紙のようにたたんで小さく収納し、宇宙にて空気を注入して膨脹させる。

画像出典

- ※1 https://www.jepsa.jp/use/building_material.html JEPSA 発泡スチロール協会
 ※2 <https://www.nasa.gov/feature/iss20th-high-flying-construction> NASA, ISS20th: high flying construction