

ブルーカーボン・ホタテ貝殻微粒分を用いた環境配慮型 3D プリンティング材料の基礎物性評価

DC21003 青木萌奈

1. はじめに

日本政府の 2050 年カーボンニュートラル宣言を受け、建設業界でも CO₂排出量の削減が問題になっている。ホワイトカーボン、グリーンカーボンに次ぐカーボンニュートラル資源として、ブルーカーボンが注目を集めている。図 1 にブルーカーボンの概念図を示す。浅場の海洋生態系に取り込まれた炭素がブルーカーボンとして炭素吸収源と位置付けられており、2009 年の国連環境計画 (UNEP) の報告書「BLUE CARBON」によって定義されている。ホタテ貝殻は海水中に含まれる二酸化炭素であるブルーカーボンを吸収して成長し、炭酸カルシウム (CaCO₃) の殻を形成する。炭酸カルシウムには約 44% の CO₂が含まれるため、仮にホタテ貝殻を 100 kg コンクリートの細骨材とした場合、約 44 kg の CO₂を固定化させることができる。現在、北海道では年間約 34 万トンのホタテが水揚げされているが、それに伴い約 13 万トンの貝殻が廃棄物として発生していることが明らかになっている。また、建設業界では高齢化も問題となっている。建設業就業者のうち 55 歳以上が 36%、29 歳以下は約 12%と次世代への技術継承が課題となっており、高い技術が必要な型枠作成は職人不足が予測される。建設用 3D プリンティング技術を利用することで、工期の短縮と打設時の作業時の人員削減に加えて、残存型枠を利用することで、作業員の練度に関わらず一定の品質のコンクリートが打設可能になる。本研究では、3D プリンティング (以下 3DP) 用ホタテ貝殻微粒粉モルタルの物性について検討を行い、ホタテ貝殻微粒粉モルタルの 3D プリンティングへの応用を目指す。

2. 研究概要

2.1 実験の方針

本研究では、ホタテ貝殻微粒粉モルタルの 3DP 施工への応用を目的として、各調合における基礎性状評価試験と力学性状評価試験を行う。

2.2 使用材料および実験内容

表 1 に各実験の概要を、表 2 に使用材料を、表 3、4、5 に各実験の調合を、表 6 に試験項目と内容を示す。実験 1 では、基本調合 N と図 3a)b) に示す 2 種類のホタテ貝殻微粒粉 SH、SB による調合 H、B に加えて、3DP における実機の連続練り込みを想定して、B のホタテ貝殻微粒粉を絶乾とした BD の 4 種のモルタルのフレッシュ性状と各強度試

験(図 4a)b)c))を行った。実験 2 では、基本調合 N とホタテ貝殻砂微粒粉調合 B について、微粒混和剤 M2 の量をそれぞれ 3 段階に設定し、計 6 種のモルタルについて、15 打フローとベーンせん断試験によるフレッシュ性状の評価、実験 1 と同様の各強度試験を行った。実験 3 では、実験 2 で最も結果が目標に近かった ND1 と BD1 の調合において繊維を F1 から F2 に変更し、実験 2 と同様に 15 打フローとベーンせん断試験によるフレッシュ性状の評価、実験 1 と同様の各強度試験を行った。

2.3 ホタテ貝殻微粒粉の表乾、絶乾によるモルタルのフレッシュ性状(実験 1)

表 7 と図 5a)b) に実験 1 におけるホタテ貝殻砂微粒粉モルタルのフレッシュ性状を示す。基本調合 N と比較して、H、B、BD すべて一定のスランプ範囲内であることから、ホタテ貝殻砂微粒粉の形状特性³⁾により、3D プリントに耐えうる一定の自律安定性を保持しているといえる。また、15 打フローではどの調合においてもモルタルが大きく流下していないことから、基本調合 N と同様のレオロジー特性(粘性、降伏値)を保持していると想定される。一方で、絶乾調合の BD において基本調合 N の 3 倍以上の練り時間を要していることから、練り時間短縮の検討が必要といえる。以上の結果により、ホタテ貝殻砂微粒粉モルタルは、細骨材が絶乾状態からの練りであっても、3DP 用モルタルとして基本調合 N と同等に扱うことができる範囲のフレッシュ性状を有していると考えられる。

2.4 ホタテ貝殻微粒粉の表乾、絶乾によるモルタルの力学性状(実験 1)

図 6a)b)c)d) に各強度試験の結果・密度を示す。圧縮強さは、B、BD が普通調合 N を多少下回ったが、H については N と同等の強度が得られた。せん断強さと曲げ強さは、H、B、BD において全てが N の強度を上回る結果が得られた。これは、ホタテ微粒分の形状が左官砂の微粒分と比較して、扁平で鋭角形状のため、セメント硬化体との機械的かみ合わせが確保されやすいため³⁾といえる。絶乾の微粒粉を使用した BD については、N と同程度の強度が得られたが、いずれにおいても H、B の強度をやや下回っており、骨材表面水量の違いによる力学特性への影響が見られた。加えて、BD は他の調合に比べ大幅に練り時間が伸びており、3D プリンティングへ応用するにあたり、短時間練りで強度を保持するための改善が必要といえる。

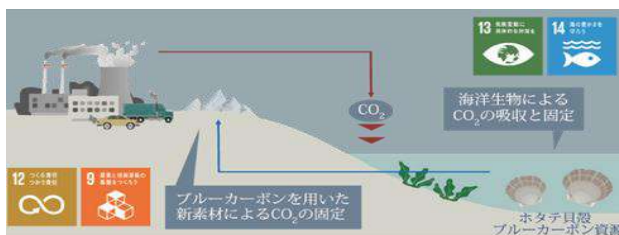


図 1 ブルーカーボン概念図



図 2 ホタテ貝殻砂加工フロー

表 1 実験概要

	概要	試験内容
実験 1	ホタテ貝殻砂微粉の表乾、 絶乾によるモルタルの基礎性状評価	フレッシュ性状、 圧縮、せん断、曲げ
実験 2	粉末分散剤の割合における各調合 モルタルの基礎性状評価	15 打フロー、ベーンせん断試験、 圧縮、せん断、曲げ
実験 3	繊維種の違いによる モルタルの基礎性状評価	15 打フロー、ベーンせん断試験、 圧縮、せん断、曲げ

表 2 使用材料

材料	記号	名称	内容
水	W	上水道水	—
結合材	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
	Ad1	3DP 用無機混和材 1	密度 2.30g/cm ³
	Ad2	3DP 用無機混和材 2	密度 2.20g/cm ³
細骨材	S	3DP 用微粒細骨材	表乾密度 2.63g/cm ³
微粒分	SH	ホタテ貝殻砂微粉 (0.2~0.5 mm)	表乾密度 2.62g/cm ³
	SB	ホタテ貝殻砂微粉 (0.25~0.6 mm)	表乾密度 2.62g/cm ³
繊維	F1	NY 繊維 (A 種 I 類 15 mm 未満)	JIS A 6208 長さ 10 mm
	F2	PVA 繊維 (A 種 I 類 15 mm 未満)	JIS A 6208 長さ 8 mm
化学混和剤	M1	高性能減水剤	—
	M2	微粒混和剤	—

表 3 実験 1 のモルタルの計画調合 (kg/m³)

記号	W	C+Ad1+Ad2	S	SH	SB	F1	F2	M1 (C×%)
N	365	1143	796	—	—	—	2	0.3
H	365	1143	239	557	—	—	2	0.5+0.5
B	365	1143	239	—	557	—	2	0.7+0.2
BD	389	1143	239	—	557	2	—	0.9

表 4 実験 2 のモルタルの計画調合 (kg/m³)

記号	W	C+Ad1+Ad2	S	SB	F1	M2 (C×%)
ND1	372	1143	796	—	2	0.05
ND2						0.10
ND3						0.15
BD1	389	1143	239	557	2	0.10
BD2						0.15
BD3						0.20

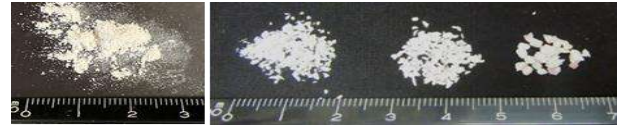
* ND1, ND2, ND3 と段階ごとに混和剤の添加率を 0.05% ずつ増やしている。BD1, BD2, BD3 も同様。

表 5 実験 3 のモルタルの計画調合 (kg/m³)

記号	W	C+Ad1+Ad2	S	SB	F2	M2 (C×%)
ND1f1	372	1143	796	—	2	0.05
BD1f1	389	1143	239	557	2	0.10

表 6 試験項目と内容

	試験項目	方法および内容
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1171 スランプ試験
	空気量試験	JIS A 1128 空気量試験
	15 打フロー (cm)	JIS R 5201 フロー試験 目標条件：10.4 cm (0 打)、12.0 cm (15 打)
	ベーンせん断試験 (N/mm ²)	押し込み法/乱さない土 ベーン：幅 D10 mm/高さ H40 mm 目標条件：5.0 kPa (0-10 分)、 15.0 kPa (60 分)
力学特性	圧縮強さ (N/mm ²)	角柱試験体 (40 mm×40 mm×160 mm) 翌日脱型後、封かん養生 28 日 3 本
	せん断強さ (N/mm ²)	角柱試験体 (40 mm×40 mm×160 mm) 翌日脱型後、封かん養生 28 日 3 本
	曲げ強さ (N/mm ²)	角柱試験体 (40 mm×40 mm×160 mm) 翌日脱型後、封かん養生 28 日 3 本



a) ホタテ貝殻砂微粉 SH、SB の粒径規格

SH	級	粒径	SB	級	粒径
	小粒	1.0~2.0 mm		3 号	1.2~2.5 mm
	グラウンド	0.5~1.0 mm		4 号	0.6~1.2 mm
	微粉	0.2~0.5 mm		5 号	0.25~0.6 mm
	微粉末	0.2 mm 以下		6 号	0.25 mm 以下

b) 粒径別ホタテ貝殻砂微粉 (左: 微粉、右: 砂)

図 3 使用したホタテ貝殻砂微粉詳細



a) 圧縮試験



b) せん断試験

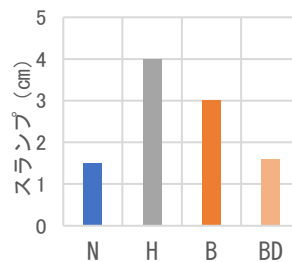


c) 曲げ試験

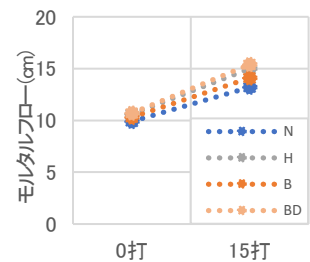
図 4 ホタテ貝殻砂微粉モルタルの各強度試験の様子

表 7 実験 1 フレッシュ性状

記号	スランプ (cm)	0 打 (cm)	15 打 (cm)	単位容積 質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	フリージ ングの有無	温度 (°C)	塩化物 (kg/m ³)	練り 時間 (s)
N	1.5	9.9	13.2	2150	—	無	20	—	60+30
H	4.0	10.6	15.0	2109	1.67	無	20	0.07	60+30
B	3.0	10.3	14.1	2093	2.40	無	20	0.08	120+30
BD	1.6	10.7	15.4	2064	2.57	無	—	0.14	300+30

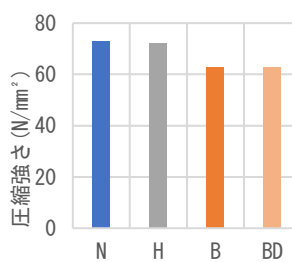


a) スランプ

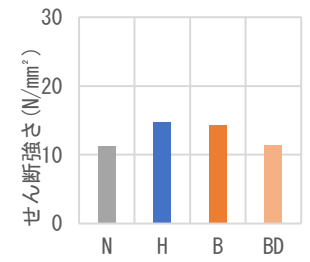


b) 15 打フロー

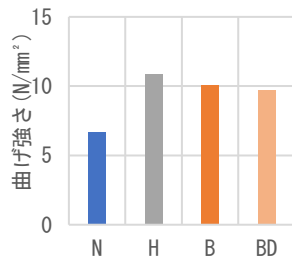
図 5 実験 1 各モルタルのフレッシュ性状



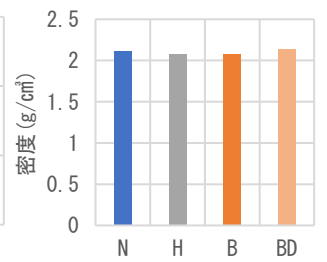
a) 圧縮強さ



b) せん断強さ



c) 曲げ強さ

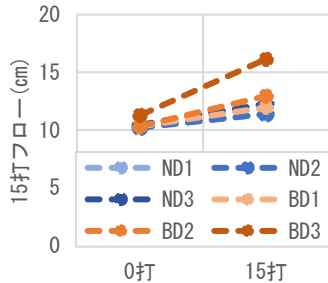


d) 密度

図 6 実験 1 各モルタルの力学特性と密度

表 8 実験 2 フレッシュ性状

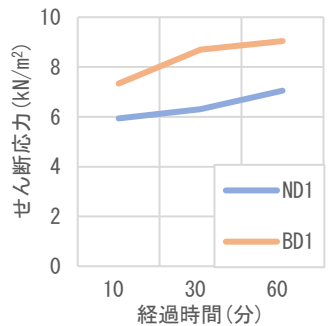
記号	0 打 (cm)	15 打 (cm)	単位容積質量 (kg/m³)	空気量 (%)	ブリー징の有無	温度 (°C)	練り時間 (s)
ND1	10.3	11.4	2086	2.5	無	20	90+30
ND2	10.2	11.4	2064	3.4	無	20	60+30
ND3	10.5	12.3	2049	4.1	無	20	30+30
BD1	10.3	12.0	2042	3.6	無	20	90+30
BD2	10.3	12.9	2037	3.8	無	20	90+30
BD3	11.3	16.1	1996	5.7	無	20	60+30



a) 15 打フロー



b) 15 打フロー試験の様子

c) 最大せん断応力 (ND1, BD1) d) ベーンせん断試験の様子
図 7 実験 2 各モルタルのフレッシュ性状

2.5 微粒混和剤の割合におけるモルタルのフレッシュ性状 (実験 2)

表 8 と図 7a)b)c)d)に各調合モルタルの 15 打フローとベーンせん断試験の結果と試験の様子を示す。15 打フローは、すべての調合において、モルタルが大きく流下していないことから、3DP 用モルタルに必要な一定のレオロジー特性(粘性、降伏値)を保持していると想定される。微粒混和剤の割合別では、割合の大きい ND3、BD3 において他調合に比べてやや流下度合が大きく、割合が中程度の ND2、最も割合が小さい BD1 において流下度合が最小となる結果が得られた。ベーンせん断試験では、調合 ND1 に対し、ホタテ貝殻砂微粉を用いた調合 BD1 の方がせん断抵抗が高く、フレッシュ状態においてもホタテ貝殻砂の機械的かみ合わせによるせん断強さの上昇が見られた。一方、時間経過による最大せん断応力の上昇が想定よりも小さかったが、これは 10 分おきと頻繁に同じ場所で試験を行ったことで流動特性を評価した。結果、練り直後および待機時間がモルタル内に空隙ができたためと考えられる。ベーンせん断応力 τ_v は、得られた最大トルク値 M を、式(1)を変形した式(2)に代入して算出した。

$$\tau_v = (M - M_f) / \pi (D^2 H / 2 + D^3 / 6) \quad \cdots \text{式 (1)}$$

ここに、 M : 測定最大トルク ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

M_f : 試験機の摩擦トルク ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

D : ベーンブレードの幅 (m)

H : ベーンブレードの高さ (m)

加えてベーンブレードの高さ H と幅 D の比が 2.0 の場合、ベーンせん断強さ τ_v (kN/m^2) は式(2)で表される。

$$\tau_v = 6M / 7\pi D^3 \quad \cdots \text{式 (2)}$$

2.6 微粒混和剤の割合におけるモルタルの力学性状 (実験 2)

図 8a)b)c)d)に各強度試験の結果・密度を示す。圧縮強さ、曲げ強さにおいては微粒混和剤の添加率による特定の傾向は見られない。せん断強さにおいては ND1 が特に低い結果となっているが、実験 1 の全ての結果を上回っており、微粒混和剤は添加率によらず一定の強度が得られると考えられる。

2.7 繊維種の違いによるモルタルのフレッシュ性状 (実験 3)

表 9 と図 9a)b)に各調合モルタルの 15 打フローとベーンせん断試験の結果と試験の様子を示す。フロー、ベーンともに調合 ND1f1 と BD1f1 はどちらも元となった調合と近い結果となっており、繊維種の違いによるフレッシュ性状への影響は小さいと考えられる。

2.8 繊維種の違いによるモルタルの力学性状 (実験 3)

図 10a)b)c)d)に各強度試験の結果・密度を示す。圧縮強度、曲げ強度は実験 3 の調合 ND1f1、BD1f1 の方が元となった調合 ND1 と BD1 よりも低い結果となっている。一方でせん断強度は元となった調合より繊維変更後の ND1f1、BD1f1 の方が高い結果となっており、繊維種による強度への影響が見られる。

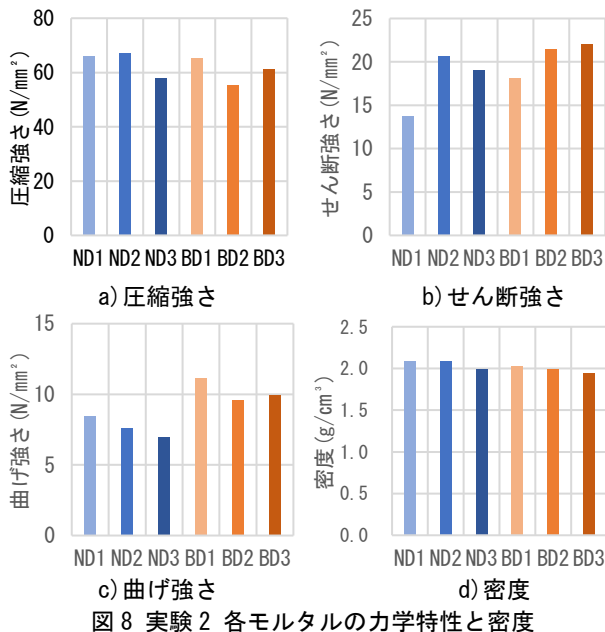


図 8 実験 2 各モルタルの力学特性と密度

表 9 実験 3 フレッシュ性状

記号	0 打 (cm)	15 打 (cm)	単位容積質量 (kg/m³)	空気量 (%)	ブリー징の有無	温度 (°C)	練り時間 (s)
ND1f1	10.2	11.7	2090	2.3	無	20	60+30
BD1f1	10.2	11.7	2046	3.4	無	20	60+30

2.9 3DP 模擬装置による実験

図 11 に模擬装置の概要を、図 12 に作成物の写真を示す。モルタルは BD1f1 を用い、液体混和剤 Ad1 を適量追加し流動性の調整を行った。結果として、小型部材の作成に成功し、流動性と自立保持性が確認できた。プリント時に手動で吐出量の調整を行ったため、吐き出されるモルタルの量にばらつきがあり、今後は装置制御が必要となる。加えて、モルタルそのものの強度試験は行ったが、作成物の強度試験は行っていないため接合部の引張試験を行うことが課題となる。

3. まとめ

- 1) ホタテ貝殻微粒分モルタルは、絶乾状態からの練りであっても微粒分の形状特性がもたらす機械的かみ合わせ³⁾によって、普通調合と同程度の圧縮強さと基本調合を上回るせん断強さと曲げ強さが得られた。
- 2) ホタテ貝殻砂微粒分モルタルは、微粒分の形状特性がもたらす機械的かみ合わせ³⁾によって普通調合と同程度の圧縮強さと基本調合を上回るせん断、曲げ強さが得られることが想定される。
- 3) 微粒混和剤使用モルタルは、混和剤添加率によらず一定の強度が得られる。
- 4) 繊維種の変更によるフレッシュ性状への影響は見られないが、強度への影響は見られる。

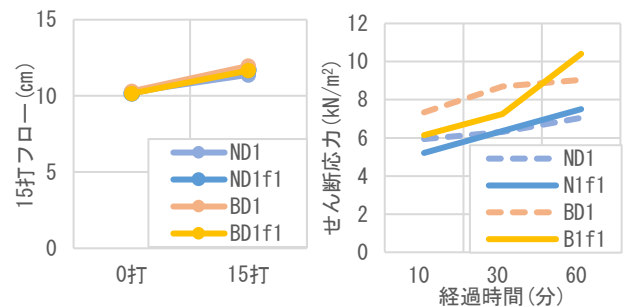
謝辞

本研究は、高橋カーテンウォール工業株式会社との 2024 年工学院大学共同研究であり、また関係各位より多大な協力をいただいた。

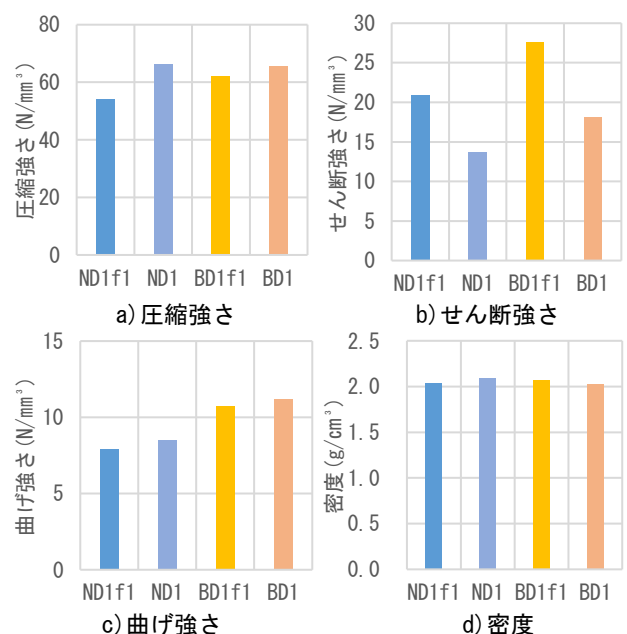
参考文献

- 1) 小室, 田村, 炭素固定性を有する海洋生物殻を用いた鉄筋コンクリート造建築物のカーボンニュートラル性の検討, 日本建築学会技術報告集, 第 40 号, pp. 841-846, 2012, 10
- 2) 細田, 井口, 佐々木ら, ブルーカーボン固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発と仕上げ性状の評価 その 1 ホタテ貝殻砂微粒を用いた 3D プリンター用モルタルの基礎性状, 2023 年度日本建築学会論文報告集, 2023
- 3) 高橋, 田村ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発, その 1 ホタテ貝殻使用モルタルのフレッシュ性状・力学特性, 2021 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2022
- 4) 佐々木, 田村ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発, その 1 ホタテ貝殻使用モルタルのフレッシュ性状・力学特性, 2022 年度日本建築学会学術講演梗概集, 2022
- 5) 尾関, 田村ら炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発, その 3 材料・製品の製造段階の炭素量計量, 2022 年度日本建築学会学術講演梗概集, 2022
- 6) 井口, 田村ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を

用いた PCa コンクリートの部材の開発 その 7: ホタテ貝殻砂使用コンクリートの外観防汚効果の検討, 2023 年度日本建築学会学術講演梗概集, 2023



a) 15 打フロー b) 最大せん断応力
図 9 実験 3 各モルタルのフレッシュ性状



a) 圧縮強さ b) せん断強さ
c) 曲げ強さ d) 密度
図 10 実験 3 各モルタルの力学特性と密度

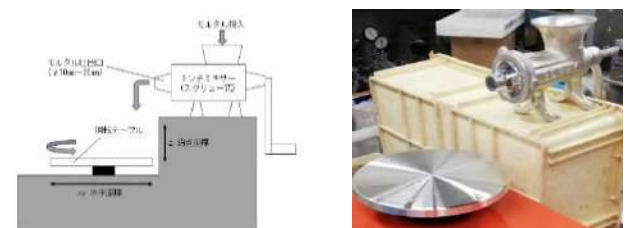


図 11 3DP 模擬装置概要



図 12 3DP 作成物(1 層目、7 層目積層後)