

任意の温度・材齢のセメント
改良土の強度推定が可能な
室内配合試験法の開発

令和7年 10月31日(金)

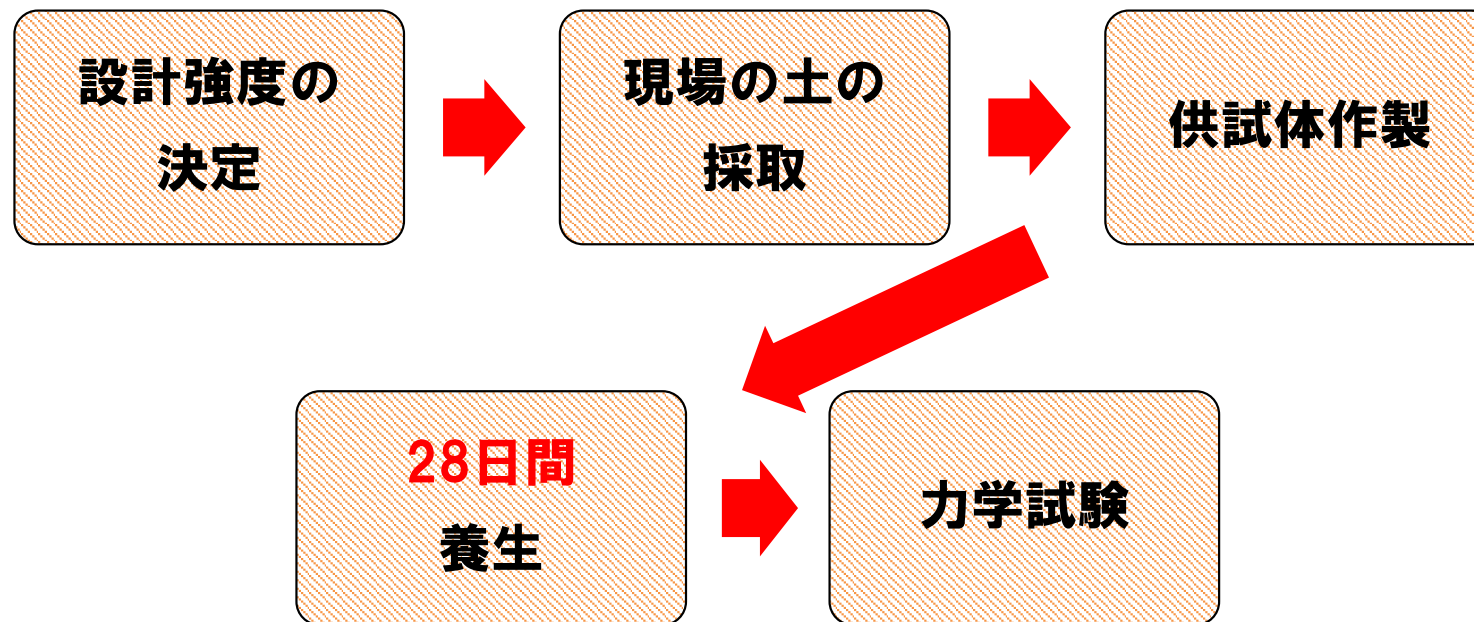
山口大学大学院創成科学研究科
原 弘 行

セメント改良土の室内配合試験の現状

□現場でのセメント改良土の施工

- ① 所要の設計強度を発現させるための固化材の種類・添加量等は、原位置の土を使用した室内配合試験から決定される。
- ② このとき、一般に**養生28日**（温度： $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ）の改良土の強度から設計強度を満足する配合を決定するため、配合試験には28日間が必要となる。

□室内配合試験のフロー

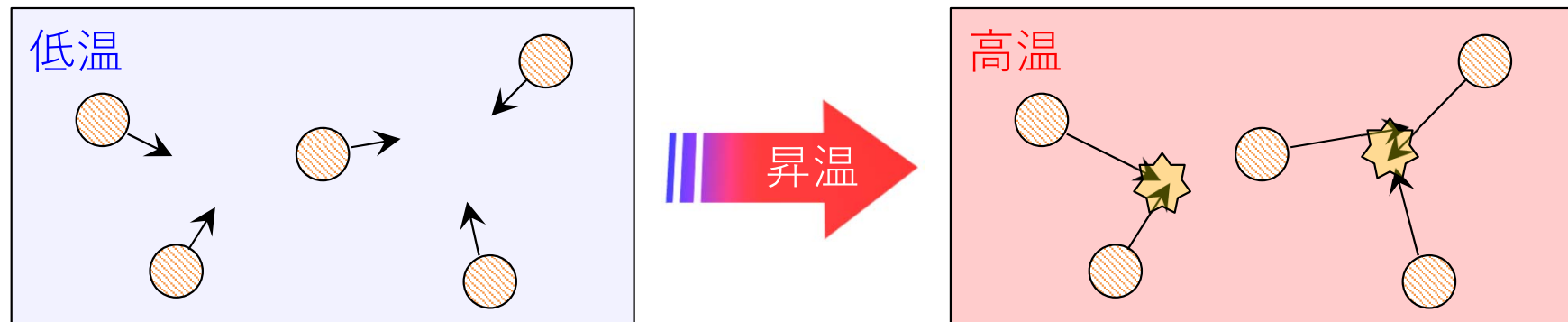


工期短縮のため、室内試験に要する時間を短縮できる技術開発が必要。

目的

- セメント改良土は、長期に亘って進行する水和反応によって強度発現するため、材料の特性は時々刻々と変化する。

セメント改良土は母材である“土”が現場によって異なるため、実験を実施せずに、材料の情報のみから所定材齢の強度を推定することは困難。



化学反応は温度依存性を有するため、高温履歴を付与してセメントの水和反応を促進させることが可能。

本研究の目的

セメント改良土の温度による強度発現の促進効果を定量的に評価し、若材齢時の力学試験結果から室内配合試験における任意材齢の強度推定手法を開発

セメント処理土の温度による強度発 現の促進効果の評価

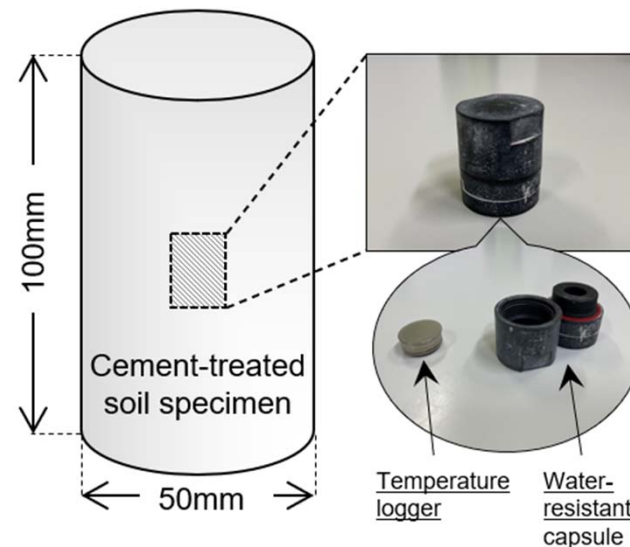
実験概要

試料土の物性

試料土		カオリン	木節粘土	DLシルト
土粒子密度	(g/cm ³)	2.58	2.62	2.62
調整後の含水比(1.5wL)	(%)	122.4	67.1	44.8
固化材添加量	(kg/m ³)	50, 100, 200	100	100
粒度組成	(%)			
砂		0	17.1	0.7
シルト		20.5	80.4	92.8
粘土		79.5	2.5	6.5

養生条件

設定温度 (°C)	養生期間(日)
20	1,3,7,14,21,28,56, 84,112
30	1,3,7,14,21,28
40	1,2,3,7,14,21
55	1,2,3,7,14,21



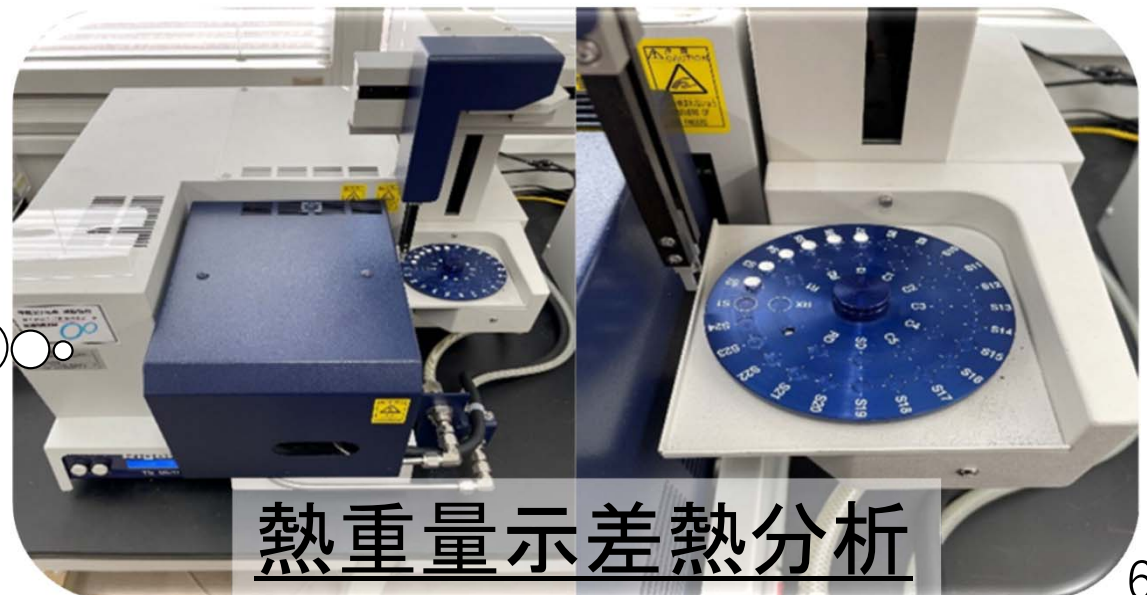
実施した実験



一軸圧縮試験

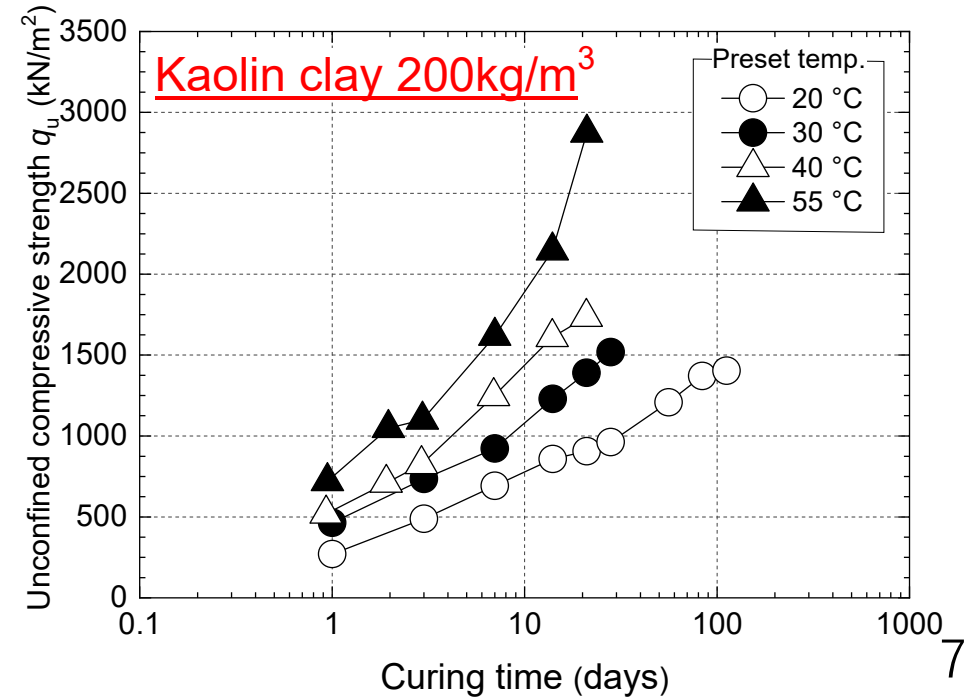
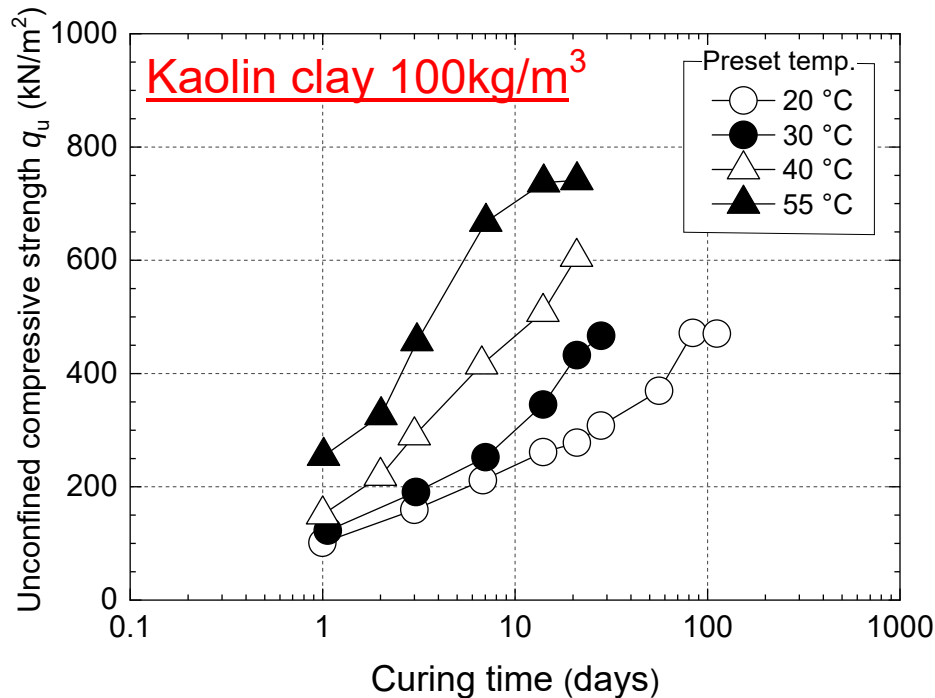
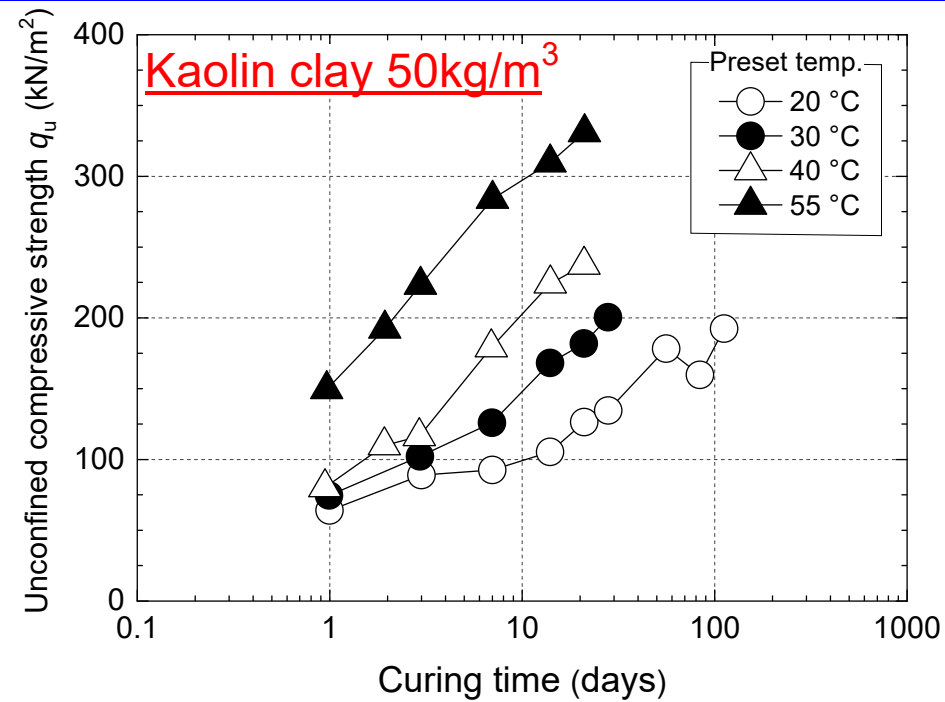
セメント改良土の設計に
一般に用いられる一軸圧
縮試験から強度を評価

昇温時の脱水による質量
変化からセメントの水和
反応の進行程度を調査

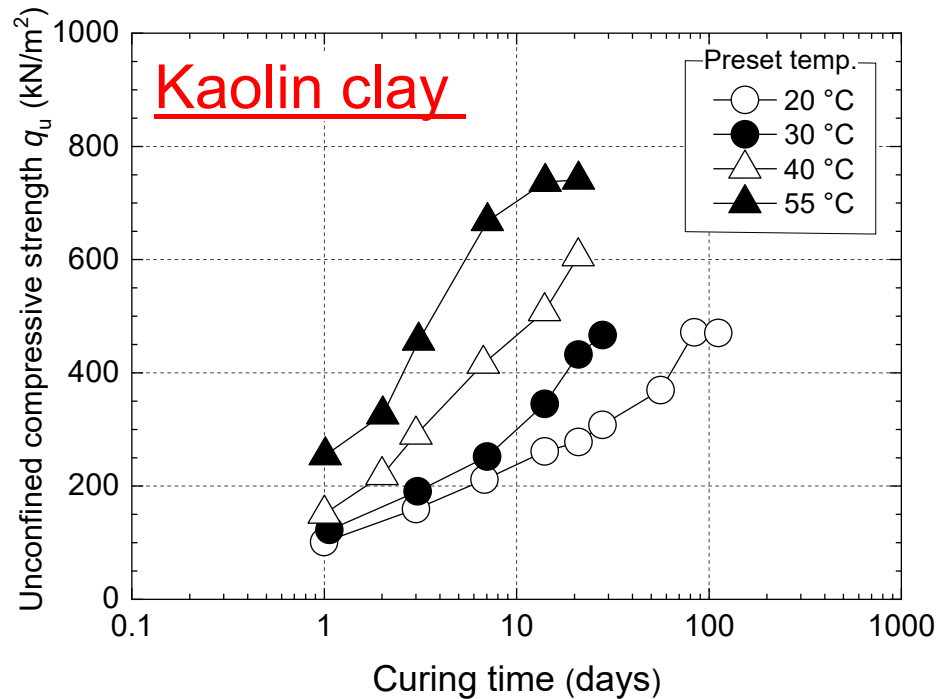


熱重量示差熱分析

一軸圧縮試験結果（異なる固化材添加量）



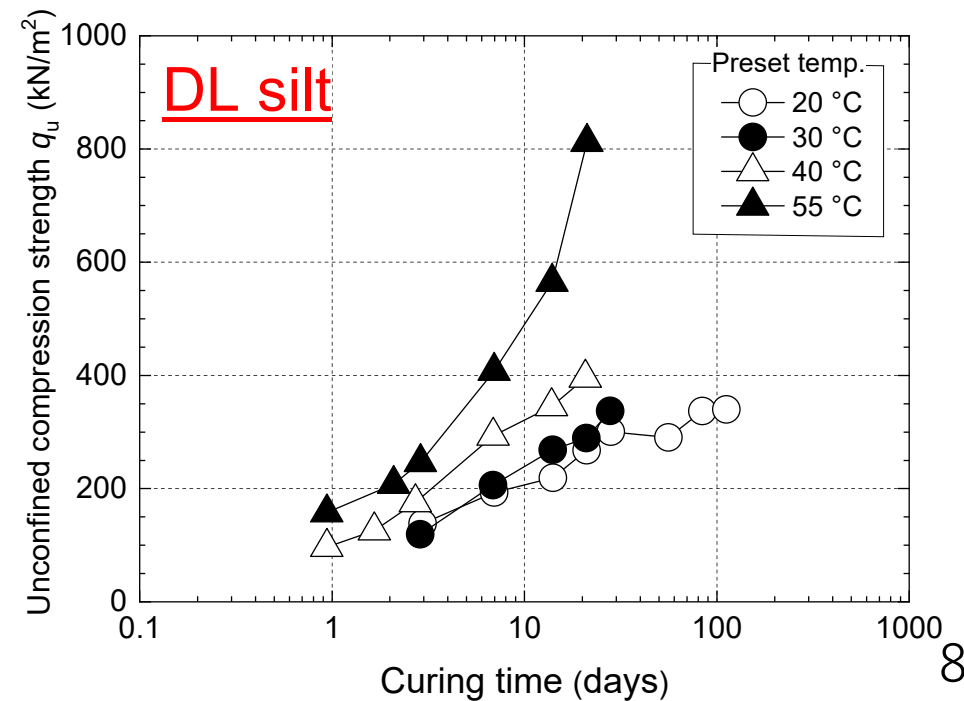
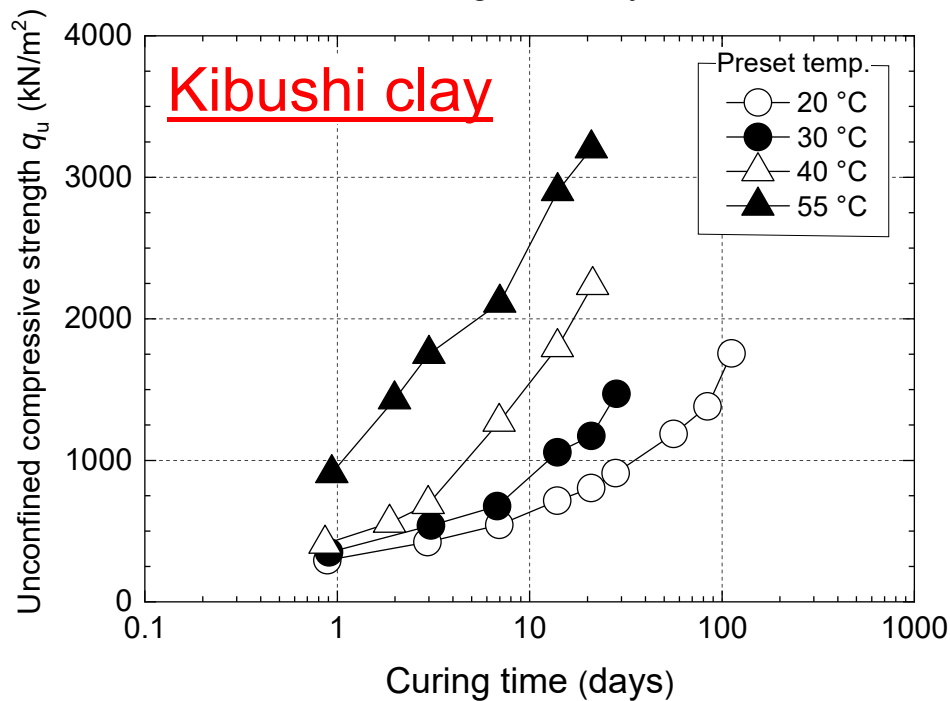
一軸圧縮試験結果（異なる土質）



同じ養生期間の時, 養生温度が高い方が一軸圧縮強さが大きい



高温履歴を与えることで, 強度発現を促進させることが可能



等価材齢による評価

□等価材齢

コンクリート分野での長期強度予測への適用事例をセメント処理土に適用
水和反応に及ぼす養生温度の影響を基準温度の場合の水和度と等価になるよう
に換算した材齢 (谷口ら, 2011)

アレニウス
則がベース

$$a_e = (k_{T_c} / k_{T_{rf}}) \times \Delta t$$

a_e : 等価材齢(日)

Δt : 養生期間

k_{T_c} : 養生温度での反応速度定数

$k_{T_{rf}}$: 基準温度での反応速度定数

本研究では20°C

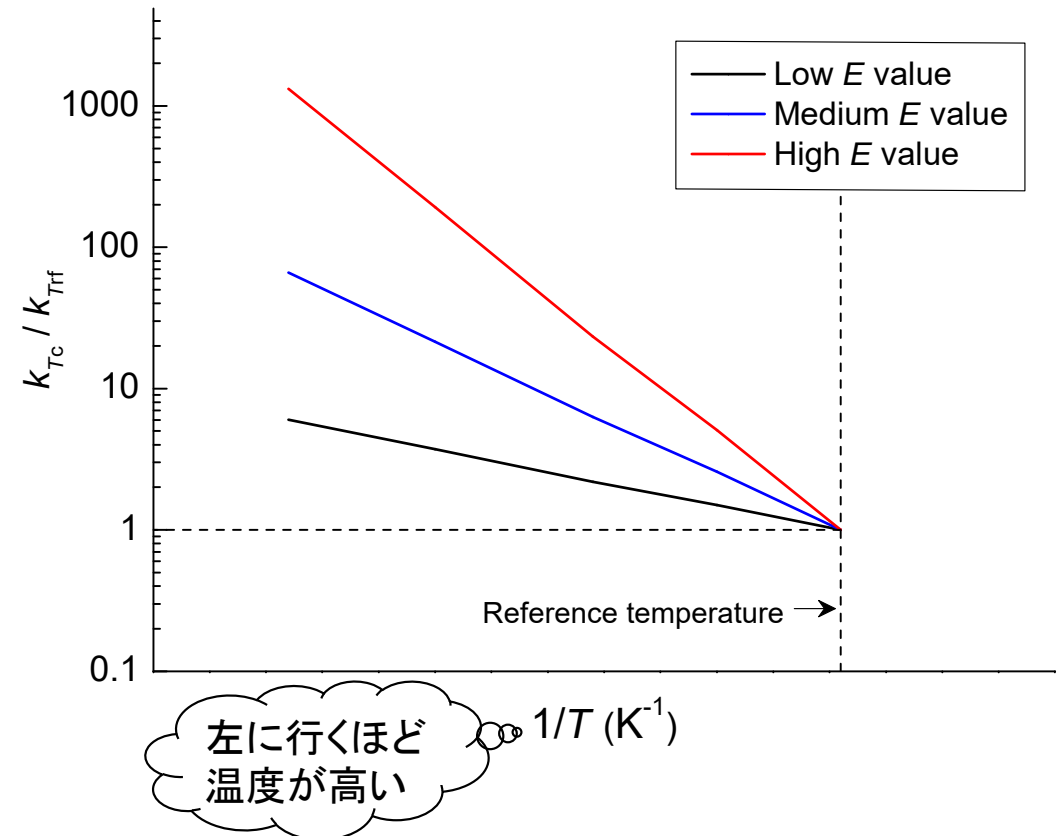
$$k_T = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

温度による強度
発現の促進効果

E : 見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

R : 気体定数(J/mol・K)

T : 温度(K)



活性化エネルギーEは温度に
よる促進効果を表している

等価材齢による評価

□等価材齢

コンクリート分野での長期強度予測への適用事例をセメント処理土に適用
水和反応に及ぼす養生温度の影響を基準温度の場合の水和度と等価になるように
に換算した材齢 (谷口ら, 2011)

アレニウス
則がベース

$$a_e = (k_{T_c} / k_{T_{rf}}) \times \Delta t$$

a_e : 等価材齢(日)

Δt : 養生期間

k_{T_c} : 養生温度での反応速度定数

$k_{T_{rf}}$: 基準温度での反応速度定数

本研究では20°C

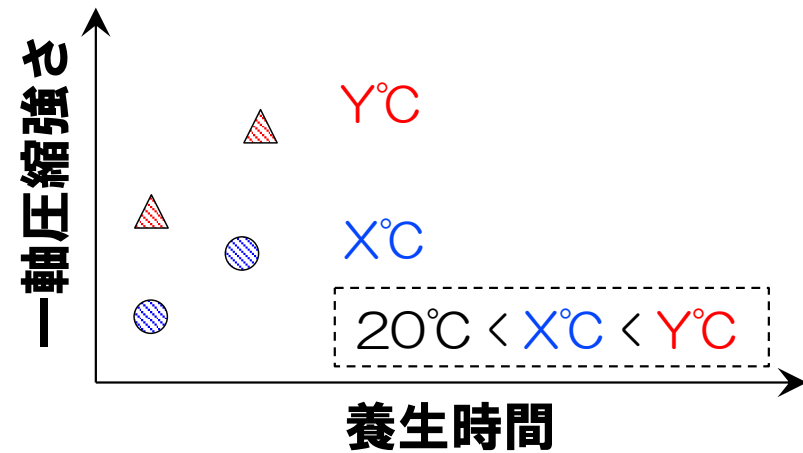
温度による強度
発現の促進効果

$$k_T = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

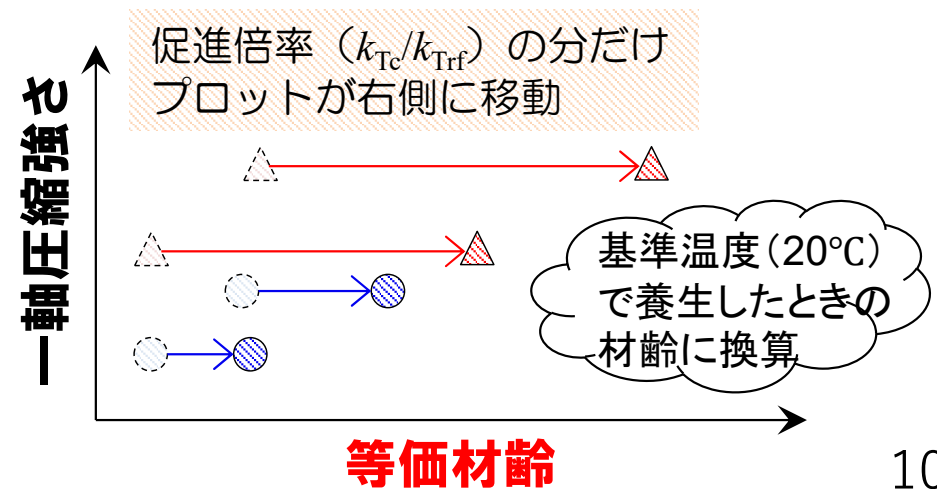
E : 見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

R : 気体定数(J/mol・K)

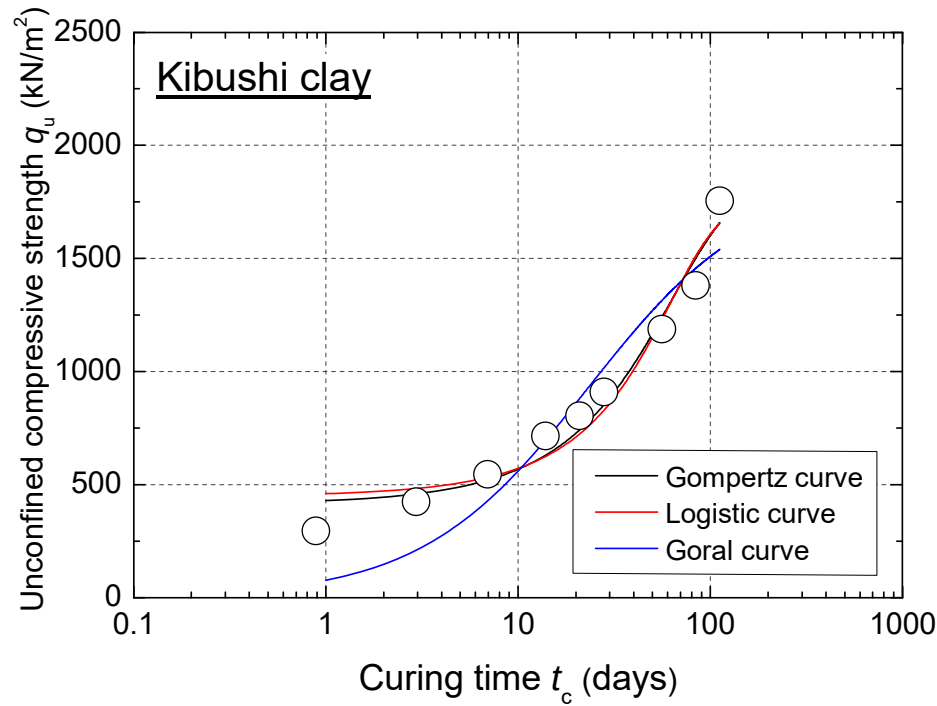
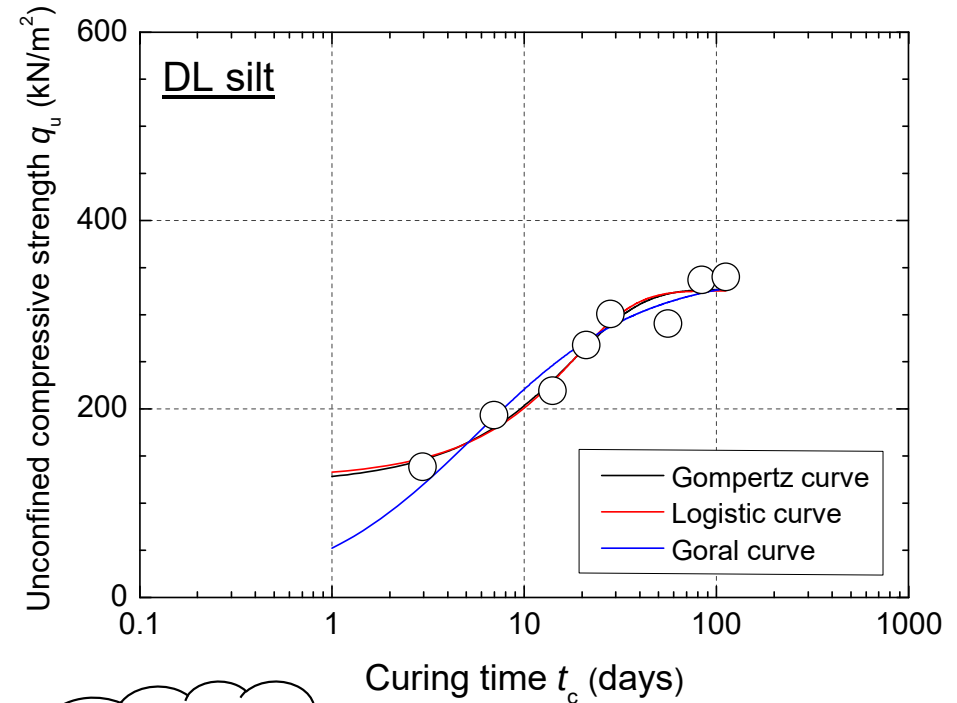
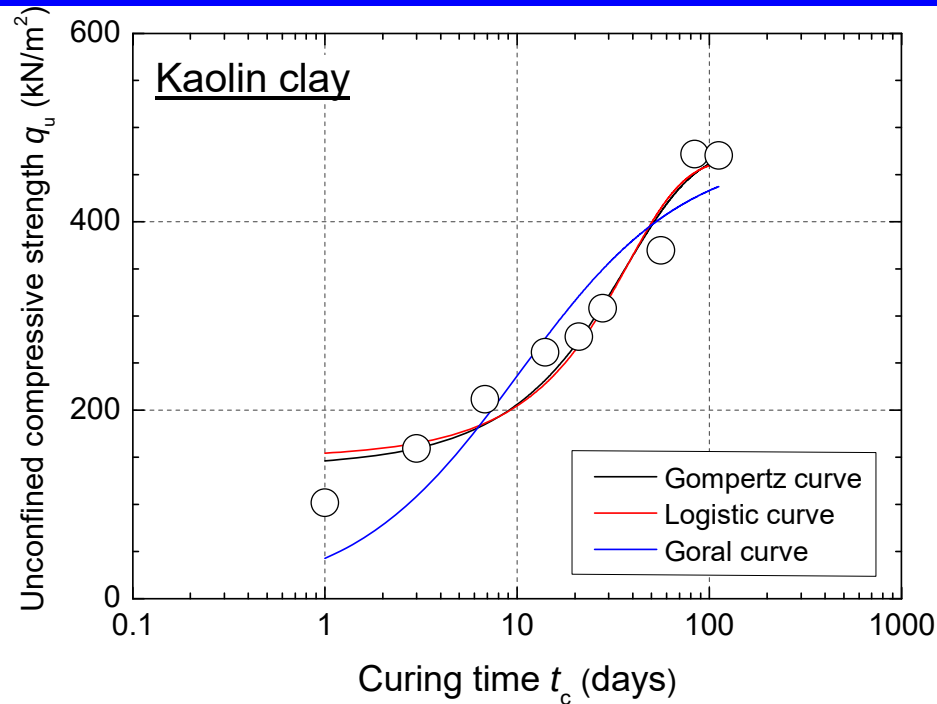
T : 温度(K)



等価材齢に換算



成長曲線の選定

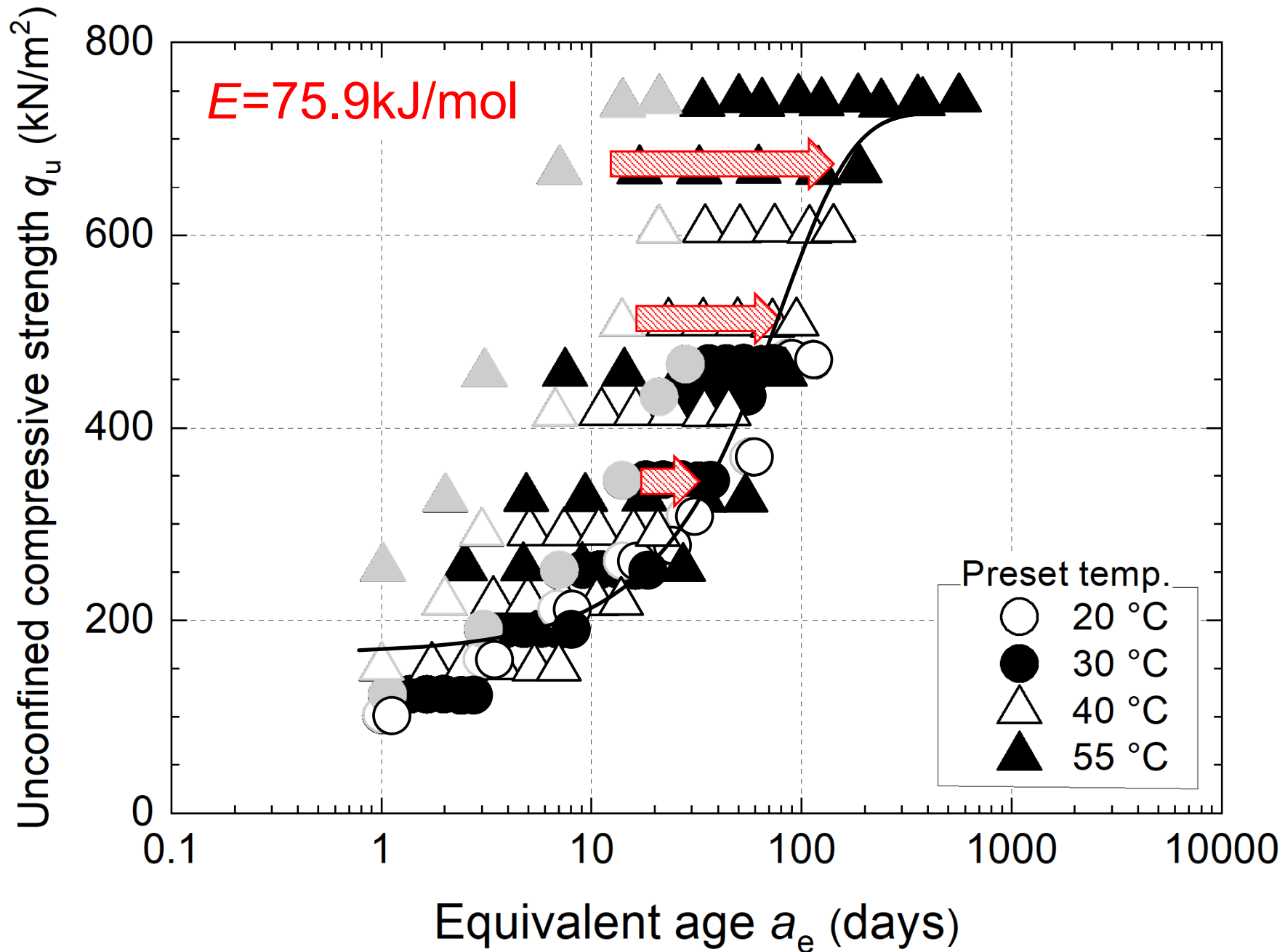


ゴンペルツ
曲線を採用

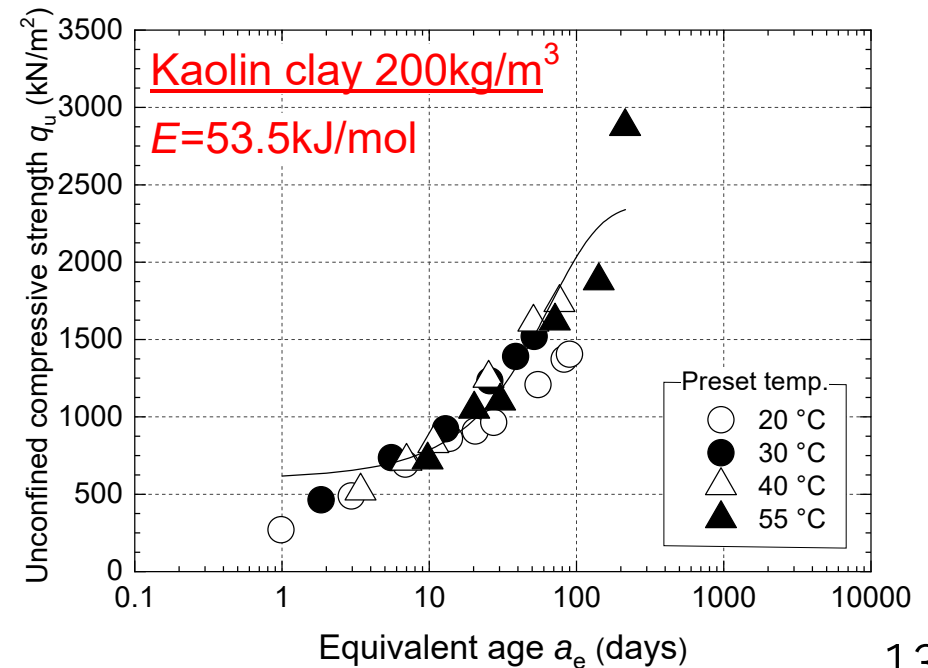
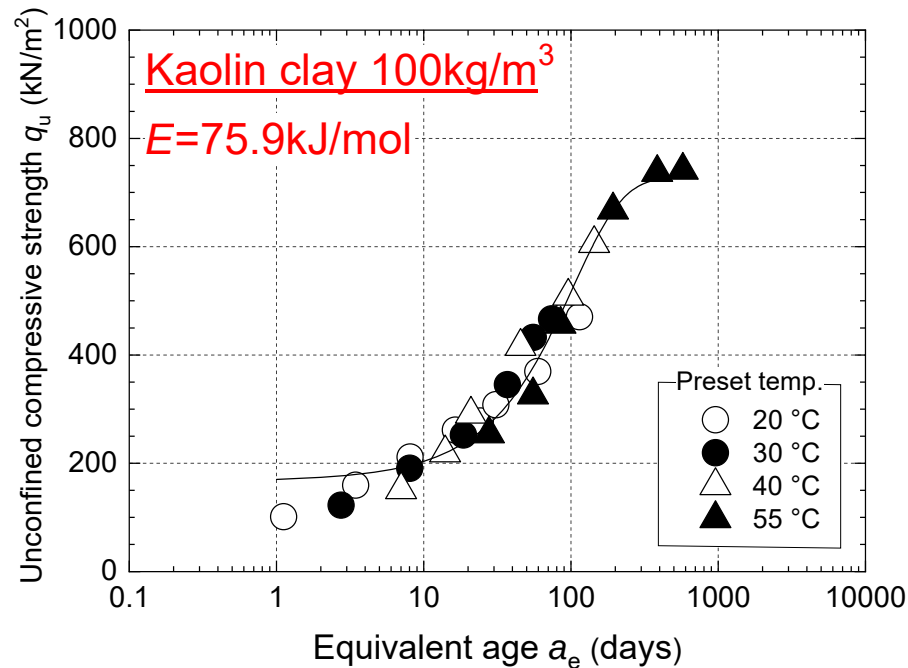
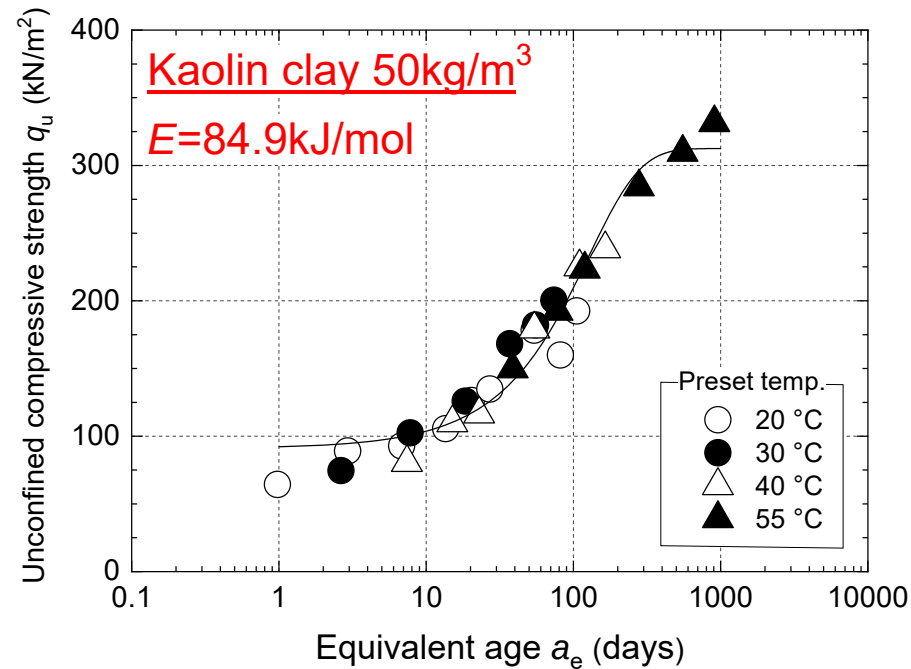
Coefficient of determination R^2

	Gompertz curve	Logistic curve	Goral curve
Kaolin clay	0.957	0.940	0.889
Kibushi clay	0.966	0.956	0.892
DL silt	0.951	0.948	0.940

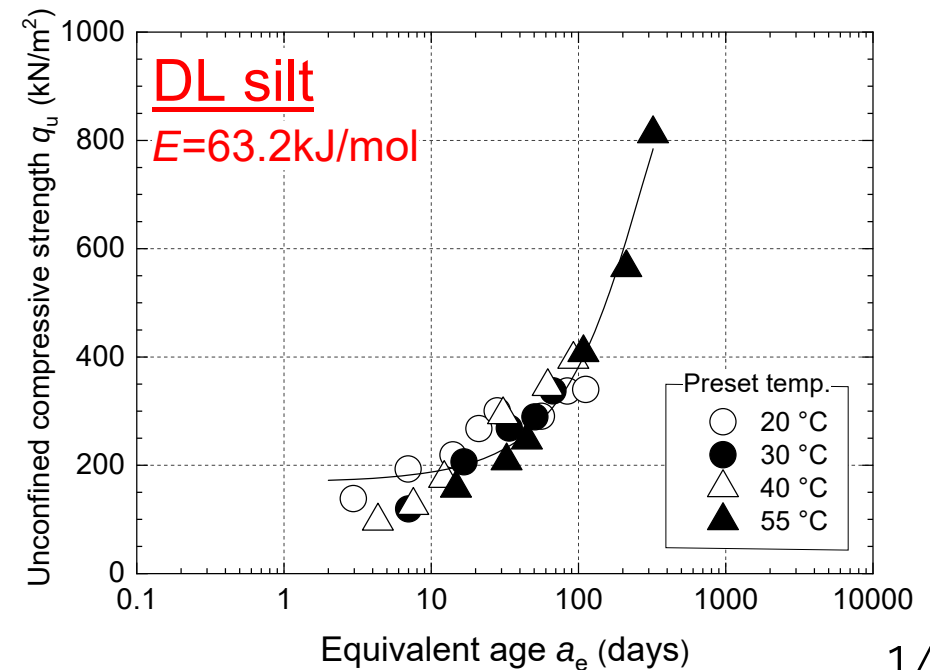
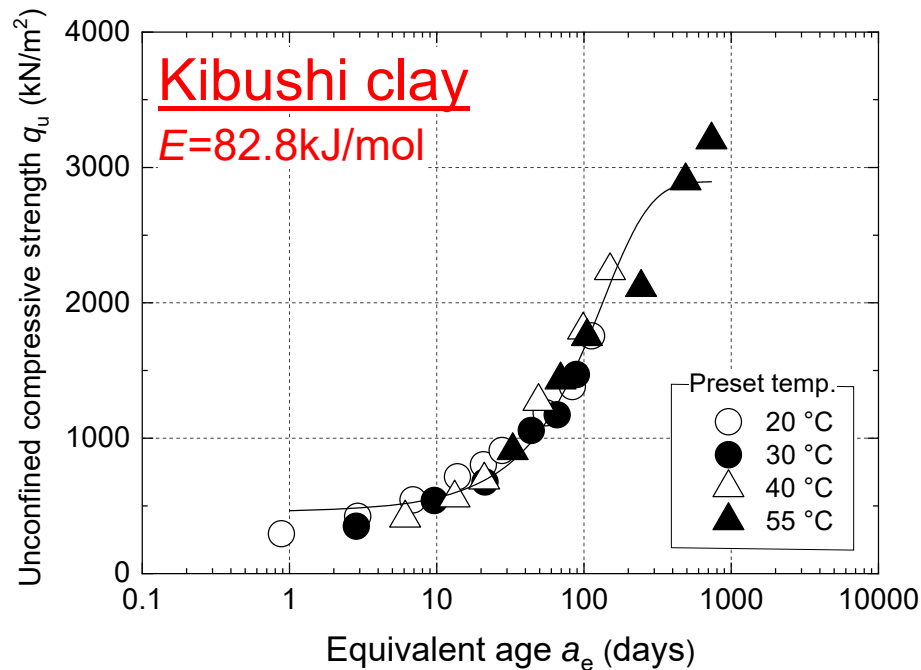
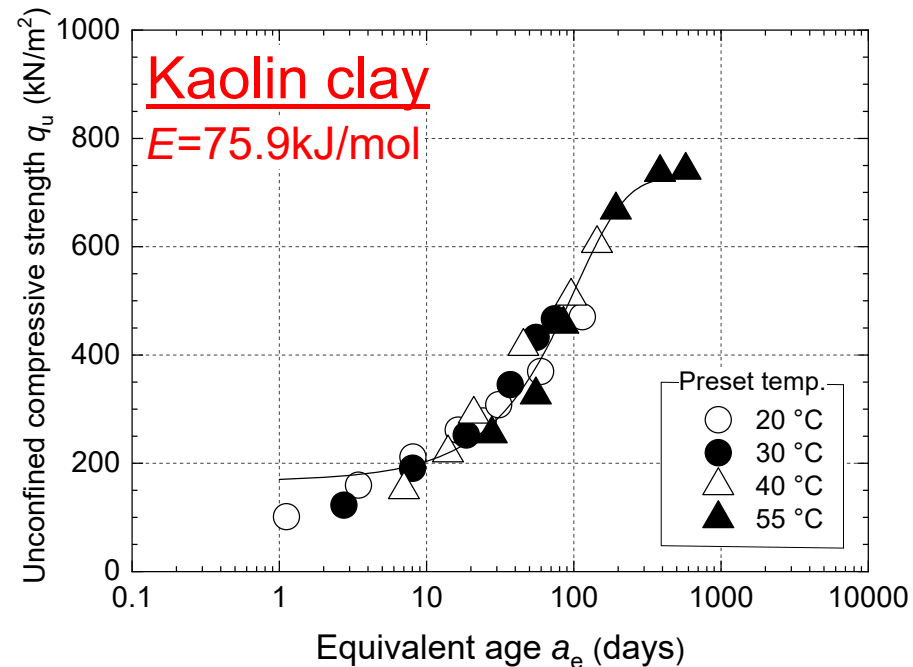
等価材齢による評価（カオリン100kg/m³の例）



等価材齢を用いた評価の適用性 (添加量)



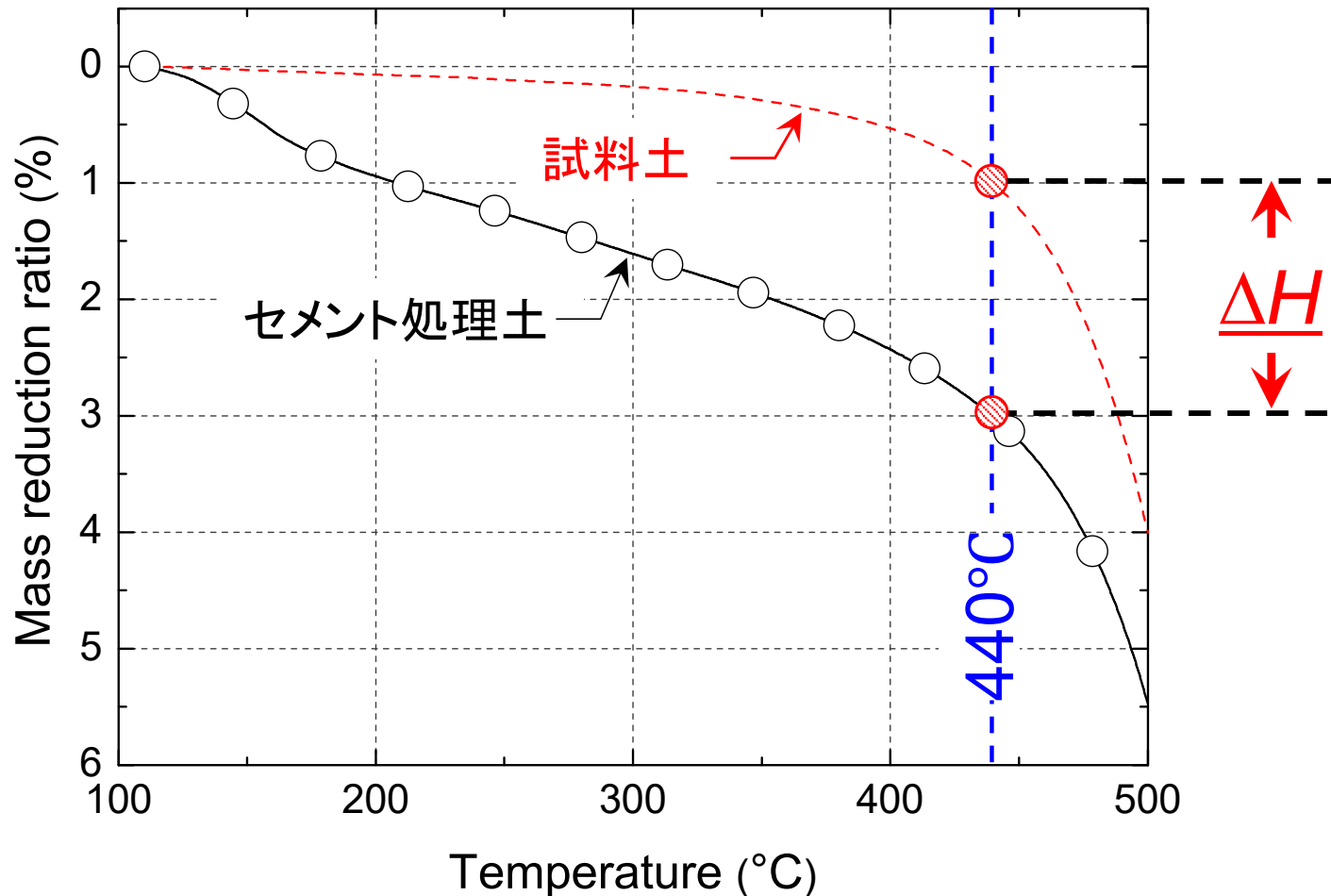
等価材齢を用いた評価の適用性（土質）



水和反応の進行程度の評価

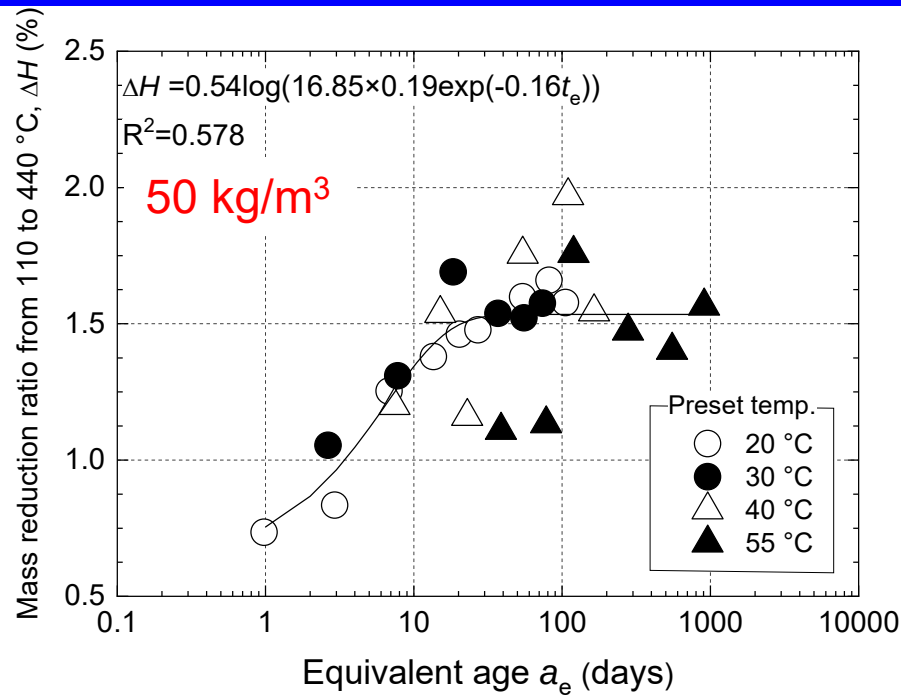
□熱重量分析

セメント等の水和反応によって生成された水和物は440°C付近までで脱水・分解される。(Tabet et al. 2018.)

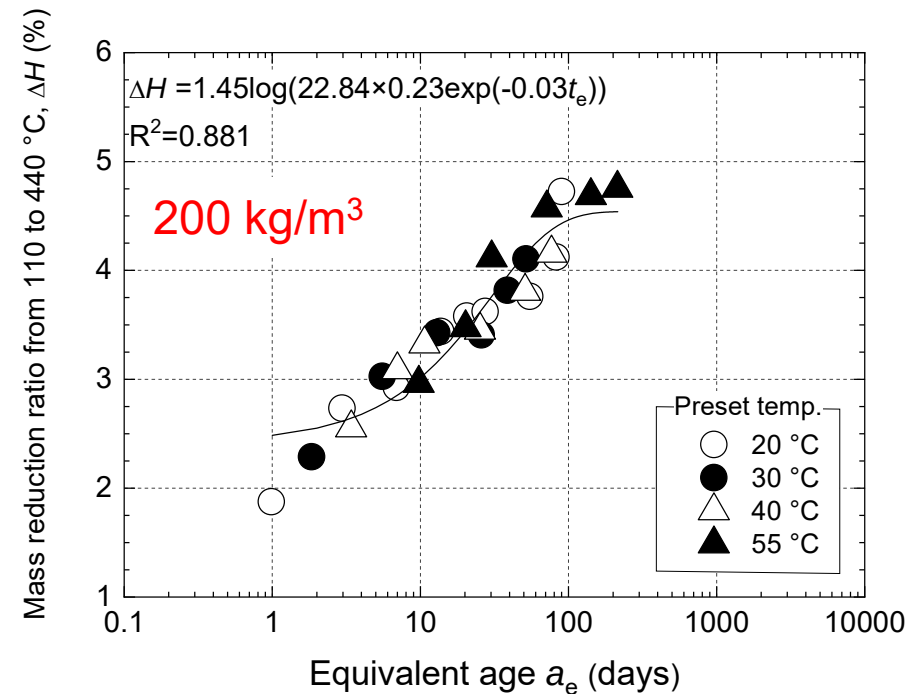
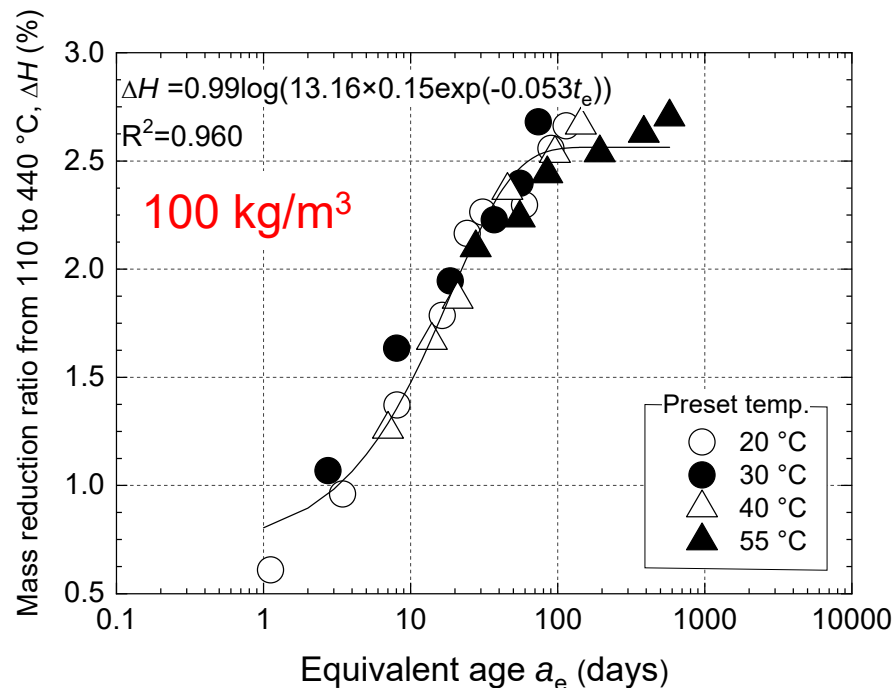


各条件での ΔH を水和反応の進行程度の指標として定量

等価材齢による水和反応の促進効果の評価



算出された等価材齢が同じであれば、**力学特性だけでなく水和反応の進行度も同等**のセメント処理土供試体が作製できている。



高温養生を利用した任意材齢の 強度推定手法

改良条件による促進効果の差異

20℃に対する各
温度の促進倍率

	Cement content C (kg/m ³)	Activation energy E (kJ/mol)	Curing temperature T (°C)	Acceleration rate relative to 20 °C
Kaolin clay	50	84.9	30	3.2
			40	9.3
			55	41.3
	100	75.9	30	2.8
			40	7.3
			55	27.9
	200	53.5	30	2.1
			40	4.1
			55	10.4
Kibushi clay	100	82.8	30	3.1
			40	8.8
			55	37.6
DL silt	100	63.2	30	2.4
			40	5.3
			55	16.0

改良条件によって促進効果が大きく異なっており、「**高温で何日間養生すると20℃の28日強度に相当する**」というような方法では精度良く推定できない。

2種の温度条件を利用した強度推定手法

手順①

- ・ 2種類の温度でセメント処理土を養生(20, 30, 40, 55℃から選択して6種の組み合わせが可能)

手順②

- ・ 短期材齢時の強度を取得

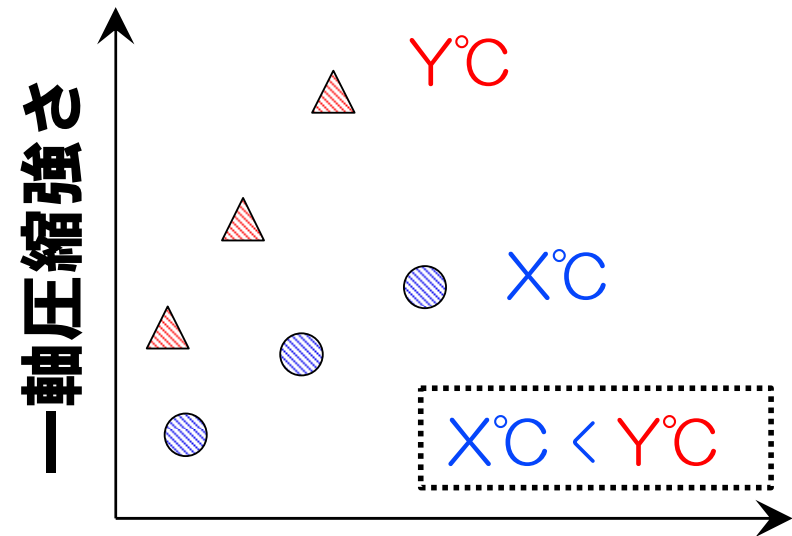
手順③

- ・ 2種類の温度の短期材齢の強度発現挙動から活性化エネルギーを定め、実材齢を等価材齢に換算

手順④

- ・ 得られた回帰式から任意材齢の強度を推定

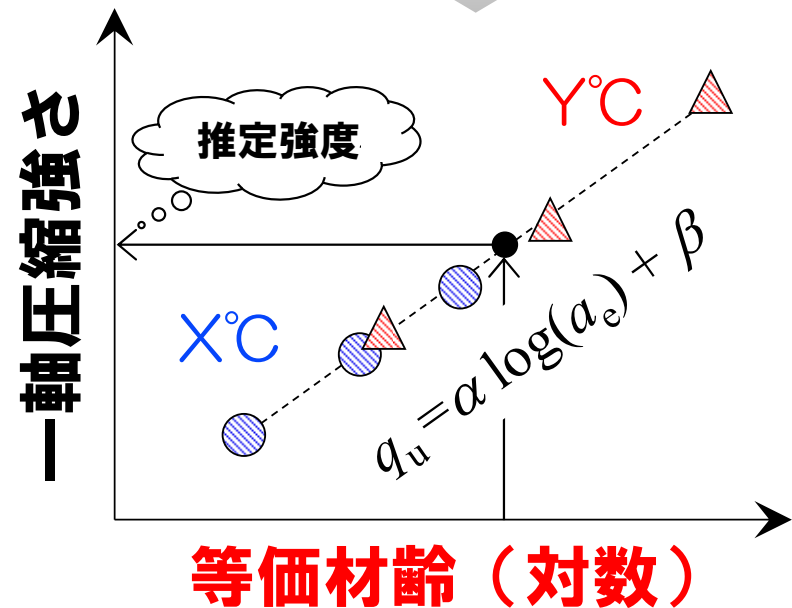
- 推定値と実測値を比較して精度検証
- 28, 56, 84, 112日の強度を推定



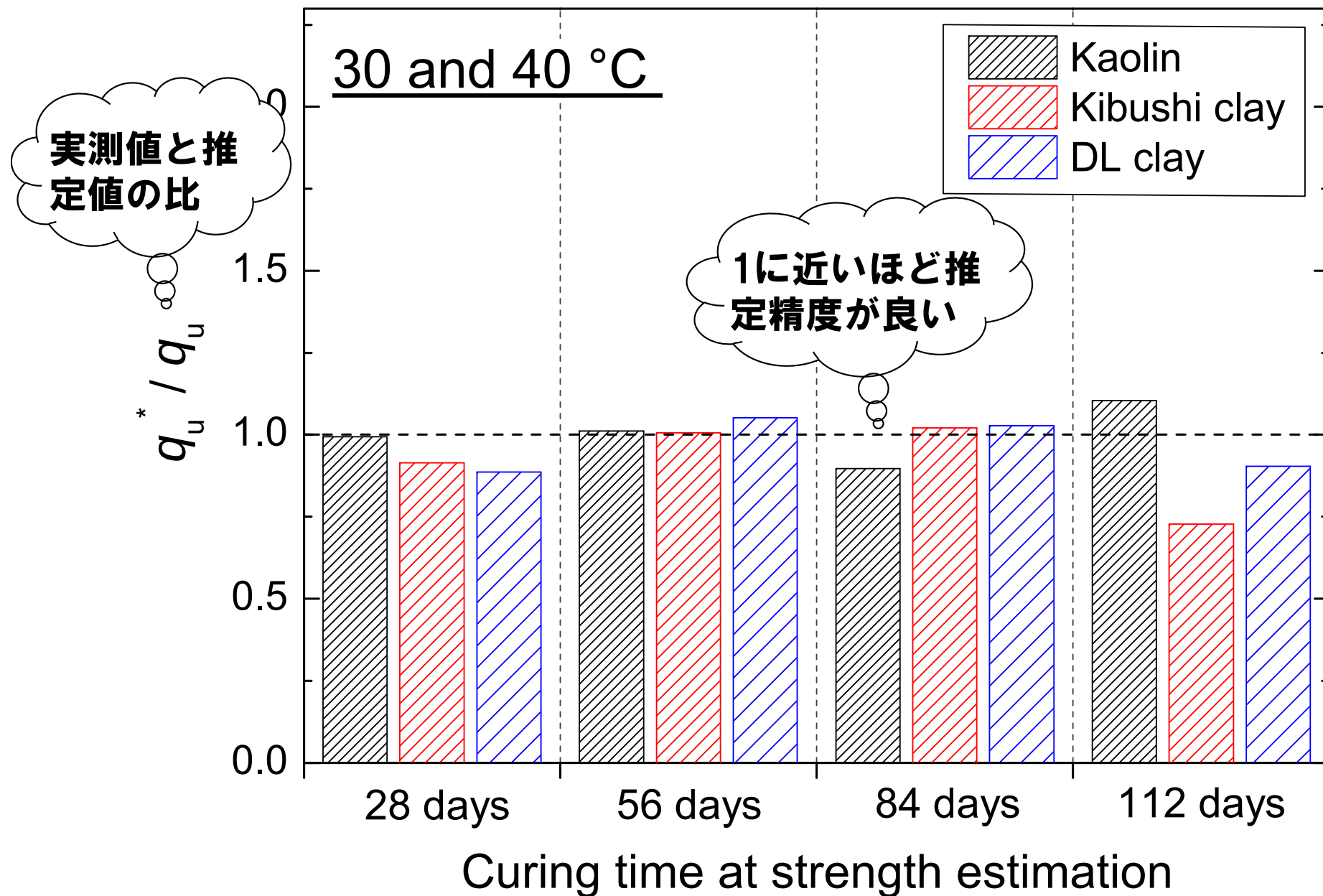
回帰直線の決定係数が最も高くなるように活性化エネルギーを決定

養生時間

等価材齢に換算



推定精度の例 (30, 40°C)



温度の組み合わせが推定精度に及ぼす影響

□推定精度の検証方法

以下の式から，評価指標 I_e を求め，各温度の組み合わせ条件における推定精度を検証

$$I_e = \left| 1 - q_u^* / q_u \right| \times 100$$

q_u : 20℃養生の一軸圧縮強さの実測値

q_u^* : 高温養生によって推定した一軸圧縮強さ

□各温度の組み合わせ条件における評価指標 I_e

青:10%以下
緑:10-25%
赤:25%以上

Cement content		Average value of evaluation index I_e					
C (kg/m ³)		20, 30℃	20, 40℃	20, 55℃	30, 40℃	30, 55℃	40, 55℃
Kaolin clay	50	9.4	9.1	16.7	22.1	8.4	16.9
	100	6.3	8.5	15.1	5.6	10.2	28.5
	200	4.7	10.5	30.5	22.9	32.2	61.7
Kibushi clay	100	2.6	18.2	13.5	9.6	12.2	26.9
DL silt	100	8.5	9.7	66.3	7.2	32.2	46.1

配合試験に要する期間と推定精度にはトレードオフの関係がある。

強度推定に使用する適切な温度条件

実験概要

□検討の趣旨

強度推定に使用する温度の組み合わせ条件次第で、推定精度が大きく異なる傾向がみられた。

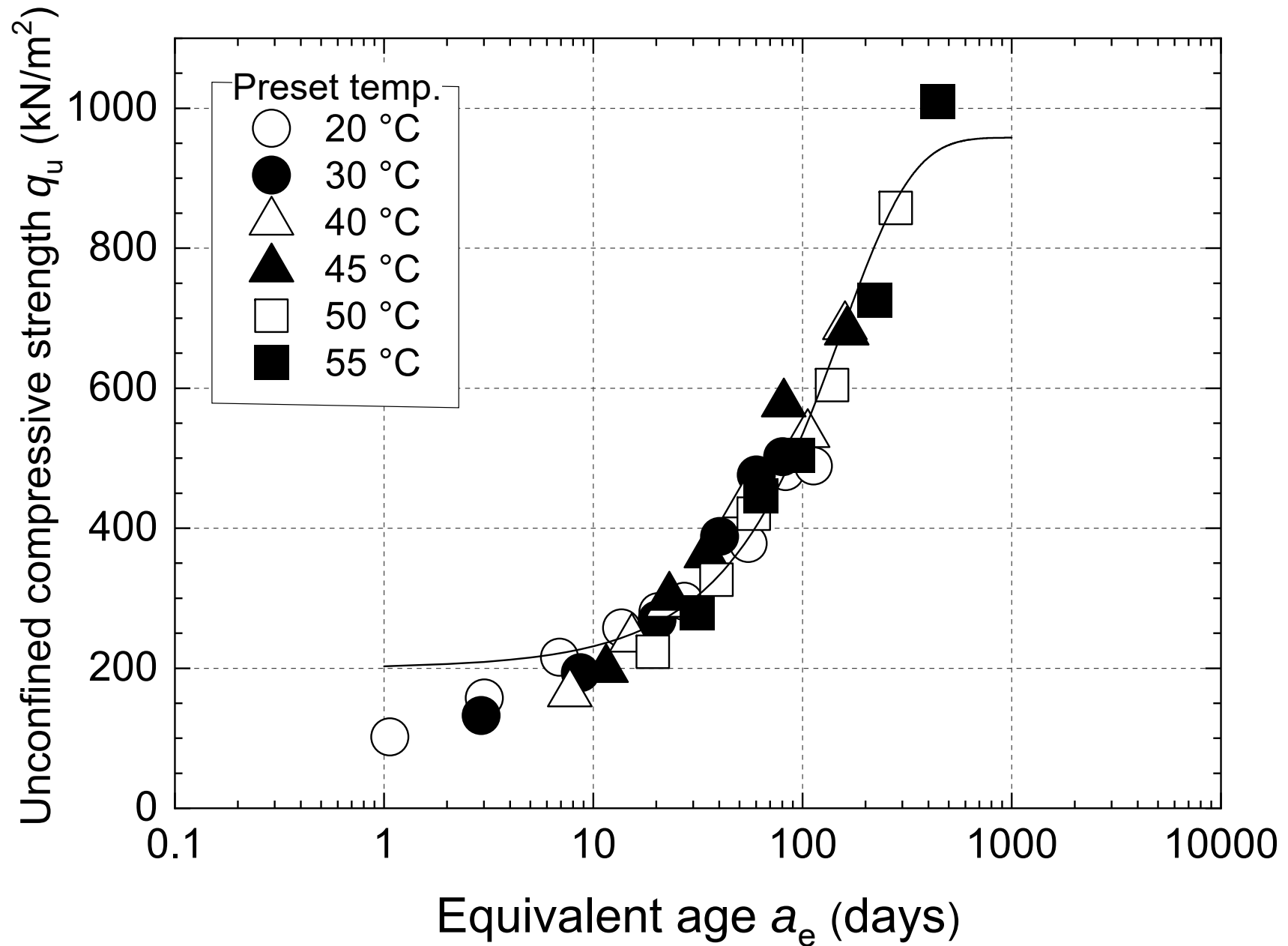


6種類の設定温度で同様な試験を実施（カオリン粘土＋普通ポルトランドセメント100kg/m³）。

設定温度(°C)	養生期間(日)
20	1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 84, 112
30	1, 3, 7, 14, 21, 28
40	1, 2, 3, 7, 14, 21
45	1, 2, 3, 7, 14
50	1, 2, 3, 7, 14
55	1, 2, 3, 7, 14



等価材齢による評価結果



温度の組み合わせによる推定精度の差異

	ゴンペルツ関数 $q_u = AB^{exp(-Ca_e)}$	べき関数 $q_u = Aa_e^B$	指数関数 $q_u = A \log(a_e) + B$
20 and 30°C	25.9	22.3	12.8
20 and 40°C	19.4	56.9	15.7
20 and 45°C	52.2	79.5	36.4
20 and 50°C	49.2	56.6	37.0
20 and 55°C	66.3	54.0	50.1
30 and 40°C	8.8	17.6	7.3
30 and 45°C	28.6	26.8	14.7
30 and 50°C	30.8	24.2	19.7
30 and 55°C	40.8	23.4	29.1
40 and 45°C	9.7	6.4	4.7
40 and 50°C	34.0	51.5	35.1
40 and 55°C	46.6	44.2	38.9
45 and 50°C	63.8	199.3	98.9
45 and 55°C	72.8	116.9	78.5
50 and 55°C	13.0	31.3	27.8

使用する温度は20°C以上45°C以下, 且つその温度差が20°C以下が推奨される。

海成粘土やセメント系固化材への適用性

実験概要

□ 試料土の物性

試料土	カオリン	川崎粘土
土粒子密度 (g/cm ³)	2.58	2.66
含水比 (1.5wL) (%)	122.4	76.5
粒度組成 (%)		
砂	0.0	15.1
シルト	20.5	48.4
粘土	79.5	36.5

□ 養生条件

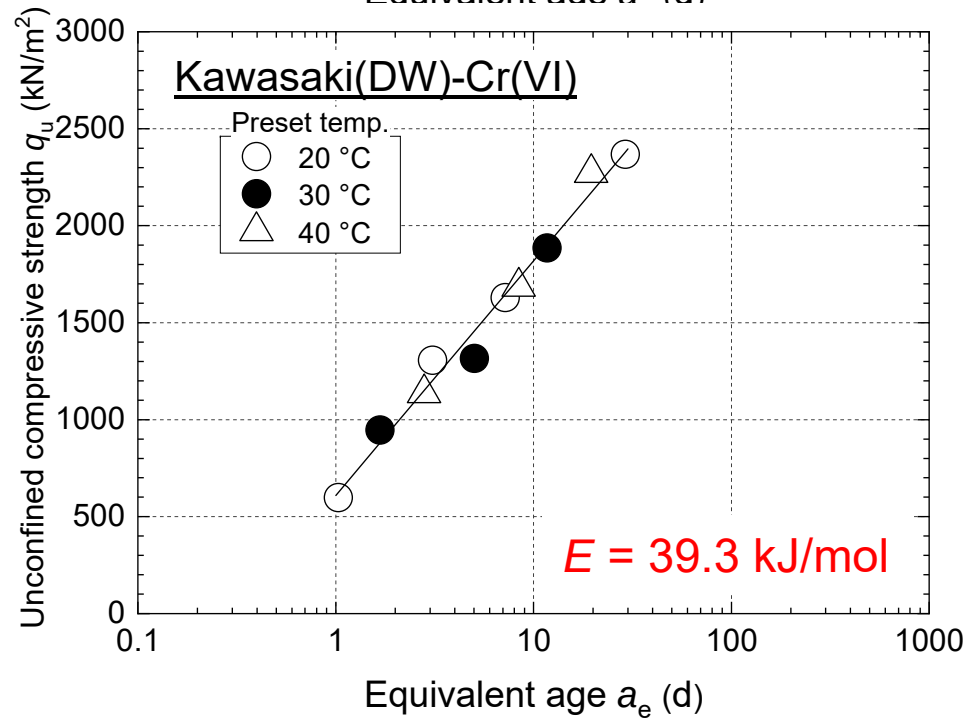
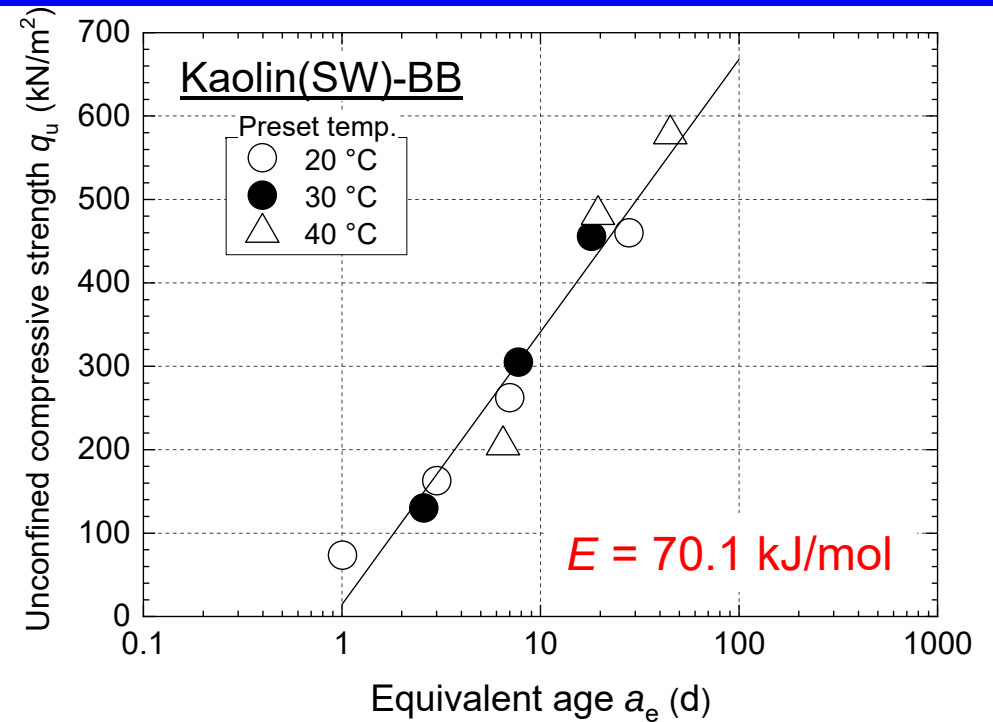
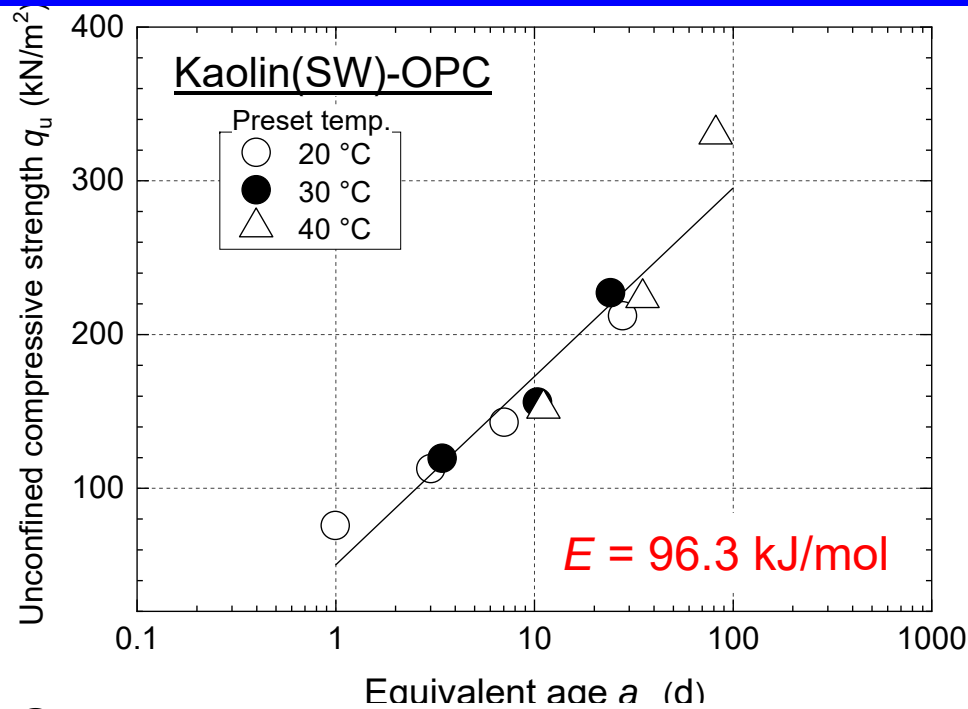
養生温度(°C)	養生期間(日)
20	1,3,7,28
30	1,3,7
40	

□ 改良条件

改良条件	試料土	固化材(添加量100kg/m ³)	○ 混練水
① Kaolin(SW)-OPC	カオリン	普通ポルトランドセメント (OPC)	○ 人工海水 (SW)
② Kaolin(SW)-BB		高炉セメントB種 (BB)	
③ Kawasaki(DW)-Cr(VI)	川崎粘土	特殊土用セメント系固化材 (Cr(VI))	イオン交換水 (DW)

人工海水を
模擬

等価材齢による評価



いずれの改良条件でも
等価材齢により一義的
に評価可能。

強度推定の精度

□推定精度の検証方法

以下の式から、評価指標 I_e を求め、各温度の組み合わせ条件における推定精度を検証

$$I_e = \left| 1 - q_u^* / q_u \right| \times 100$$

q_u : 20℃養生の一軸圧縮強さの実測値

q_u^* : 高温養生によって推定した一軸圧縮強さ

青: 10%以下

緑: 10-25%

赤: 25%以上

□各温度の組み合わせ条件における評価指標 I_e

温度条件	20 and 30℃	20 and 40℃	30 and 40℃
Kaolin(SW)-OPC	0.27	19.4	24.1
Kaolin(SW)-BB	2.5	9.5	27.6
Kawasaki(DW)-Cr(VI)	1.7	3.7	3.4

比較的低温の組み合わせでは、高い推定精度が得られる。

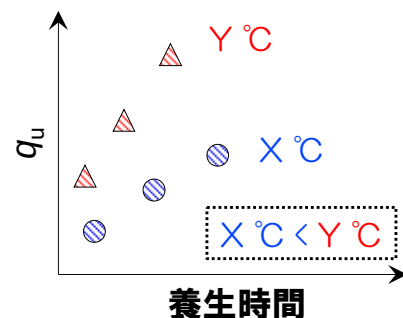
2種の温度を用いた強度推定方法と留意点

強度推定のフローと今後の展望

□ 強度推定のフロー

2種類の温度条件を選択する。このとき、20℃以上45℃以下で、その温度差20℃以下に設定する。

各温度条件の養生時間を選択する際には、試料土や間隙水、固化材添加量などから見かけの活性化エネルギーを予測し、できるだけ等価材齢に換算したときに推定する材齢よりも短い時間と長い時間の両方が含まれるようにする。

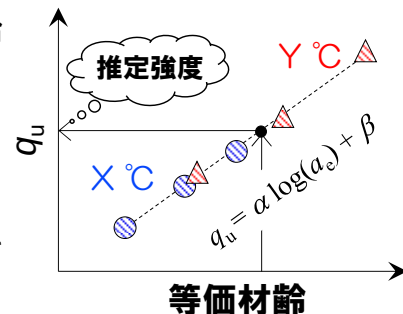


$$k_T = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$
$$a_e = (k_{T_c} / k_{T_{ref}}) \times \Delta t$$

次式を使用して2種の温度の若材齢強度を次式を用いて近似する。

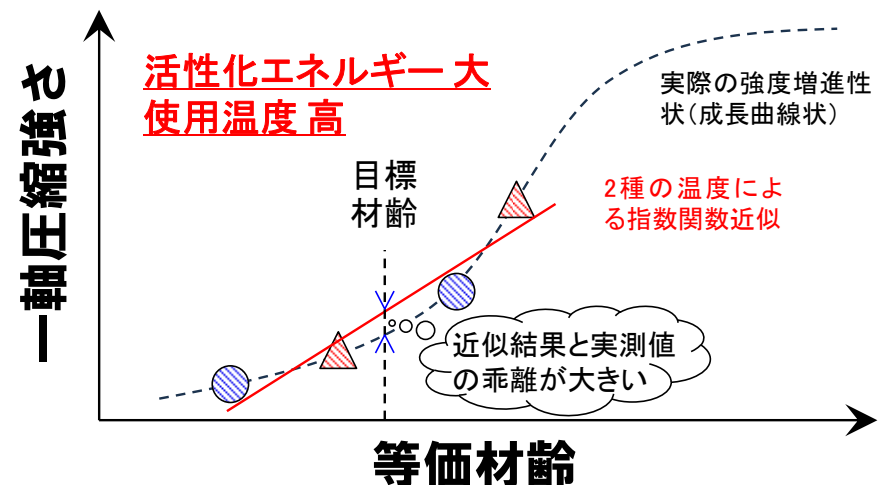
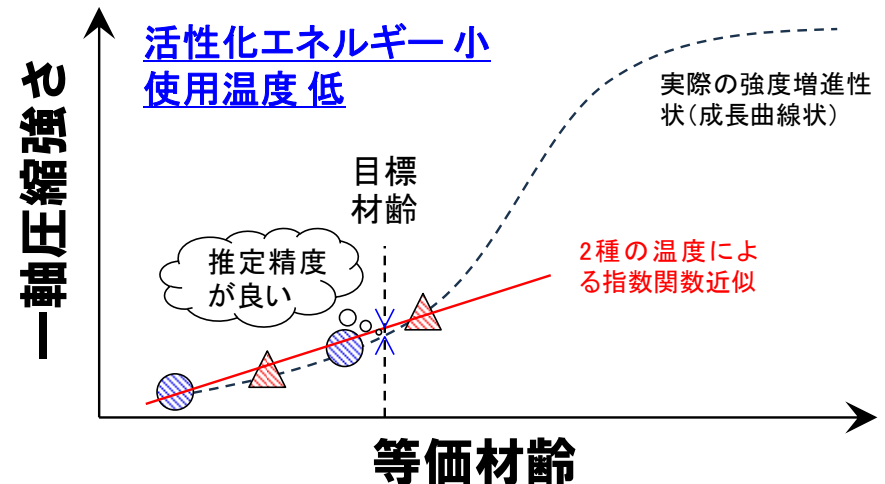
$$q_u = \alpha \log(a_e) + \beta$$

決定係数が最大となる時の見かけの活性化エネルギーを求める。



得られた回帰式に推定したい材齢を代入して、推定強度を求める。

□ 問題点と今後の展望



事前または1日程度で活性化エネルギーを推定できる技術開発が可能になれば、適切な温度・材齢を選択でき、さらなる精度向上が期待できる。

既存の強度推定方法との比較

	①強度の伸び率 (地盤改良マニュアル第5版)	②55℃1日強度 (姫野ら, 2020)	③本強度推定方法
推定概要	28日強度 7日強度 $q_{u28} = A q_{u7}$ $A = 1.2 \sim 1.7$	20℃, 28日強度 55℃, 1日強度 $q_{u28} = q_{u1}(55^\circ\text{C})$	軸圧縮強度 等価材齢 低温 高温
推定可能材齢 (日)	28	28	任意
推定精度	中	低～高	高
所要期間	7日	1日	改良条件(活性化エネルギー)や使用する温度によって異なる
デメリット	試料土やセメントの種類に依存するため、高い精度は得られにくい	特定の改良条件以外では高い推定精度が得られにくい	多くの配合試験が必要