

短期間で精度よく  
強度推定できるセメント  
改良土の室内配合試験

令和5年 11月20日(月)

山口大学大学院創成科学研究科

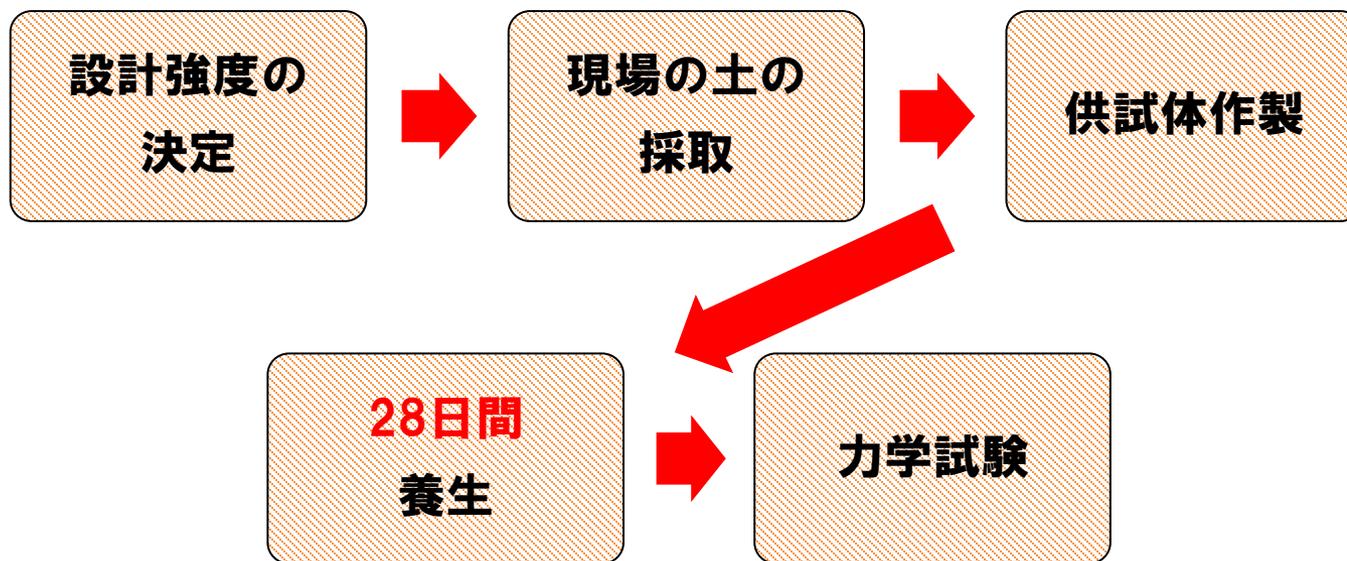
原 弘 行

# 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

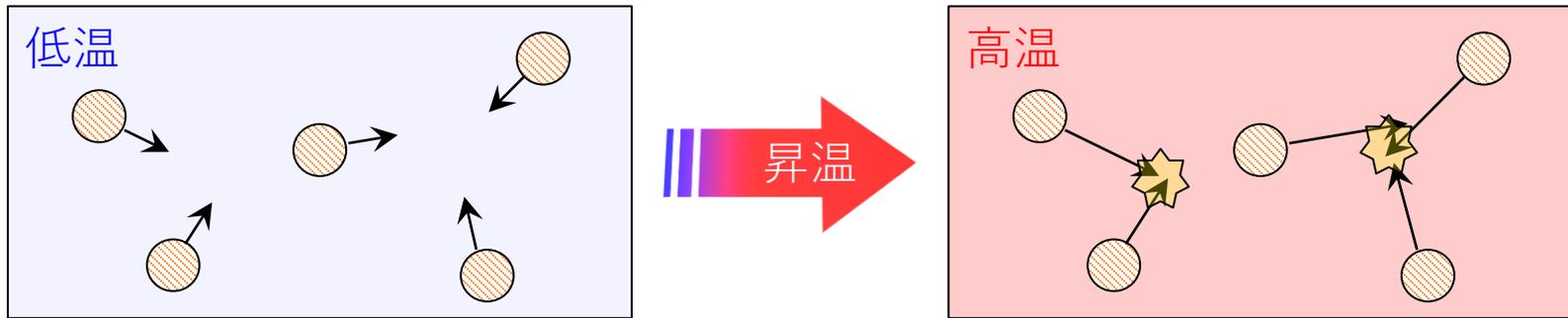


工期短縮のため、室内試験に要する時間を短縮できる技術開発が必要。

# 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長期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

様々な温度履歴を付与し、温度による強度発現の促進効果を定量的に評価し、高温養生の結果を用いた室内配合試験における任意材齢の強度推定手法を開発

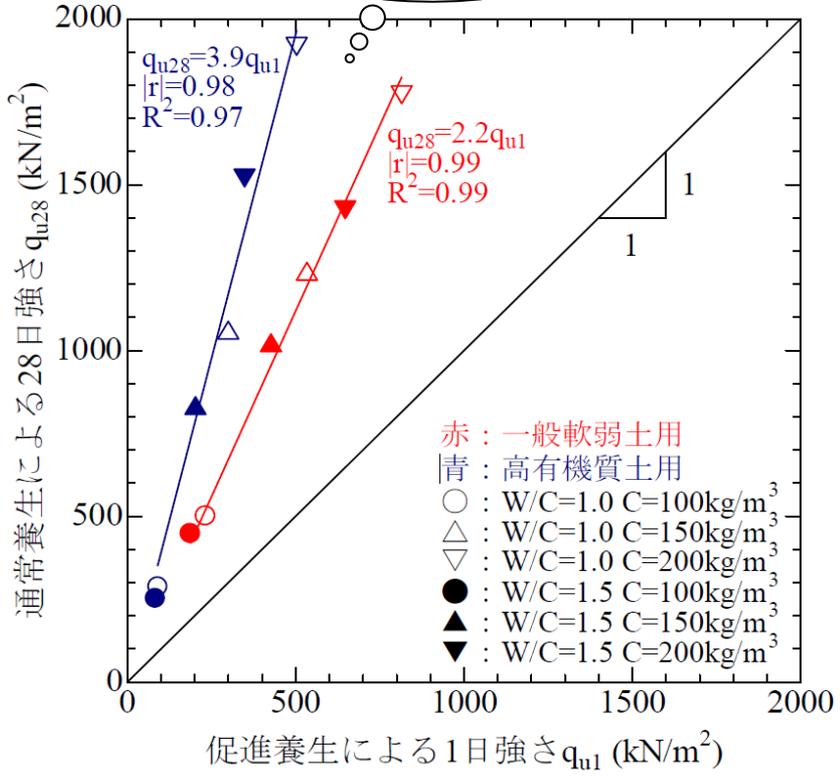
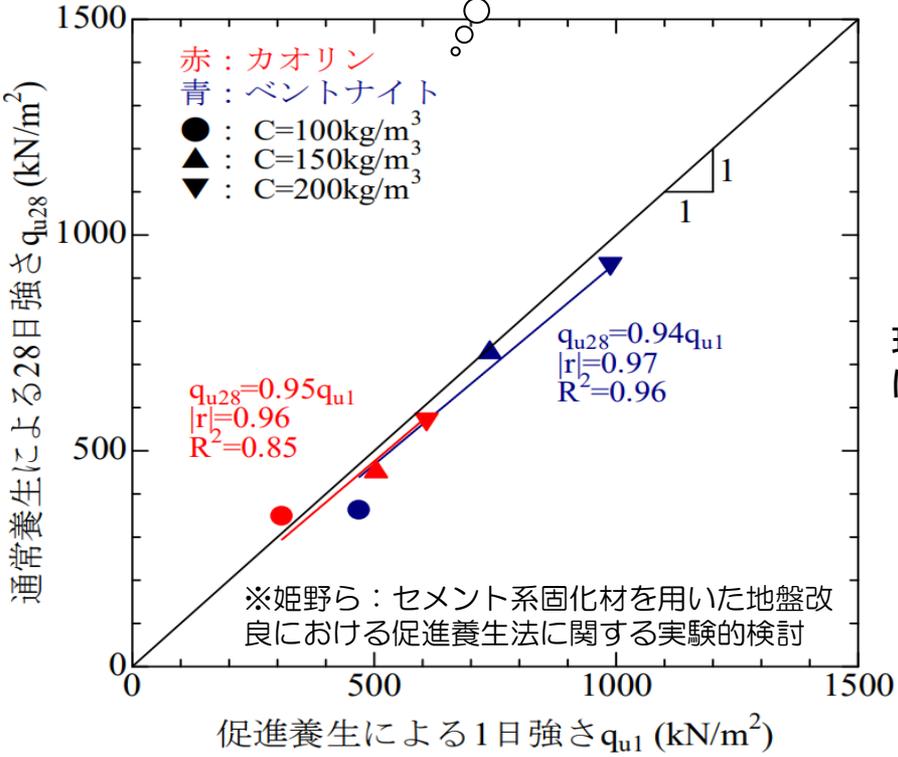
# セメント処理土の強度推定に関する既往の研究

## □55°C養生による強度推定

- 55°Cでの1日養生強度と20°Cでの28日養生強度の相関から強度推定を提案。

標準土(カオリン・ベントナイト)の場合、高い相関性を確認。

現場の土(クリーク底泥)の場合、標準土と促進効果が異なる。



カオリン・ベントナイトでは高い相関性が確認できたが、実際に採取した土を使用した場合、促進効果がまったく異なっており、幅広い改良条件を満足できない。

# 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		カオリン
土粒子密度	(g/cm <sup>3</sup> )	2.58
調整後の含水比(1.5wL)	(%)	122.4
粒度組成	(%)	
砂		0
シルト		20.5
粘土		79.5

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
70	0.5, 1, 1.5, 2, 3, 7, 14

- 固化材: 普通ポルトランドセメント
- 添加量: 100kg/m<sup>3</sup>
- 供試体寸法:  $\phi=50, H=100$ mm



## 【固化材添加】



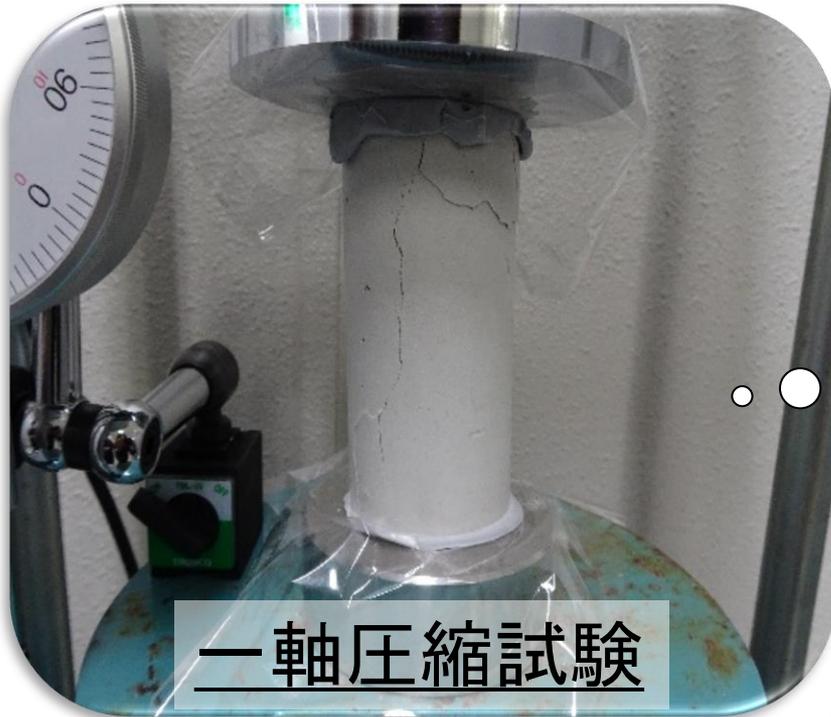
## 【充填】



## 【養生】



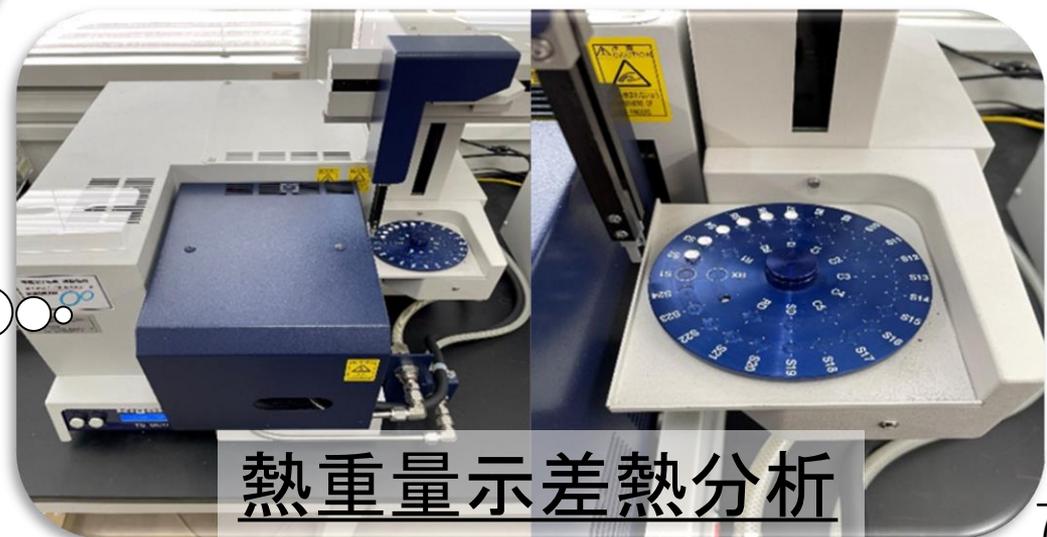
# 実施した実験



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

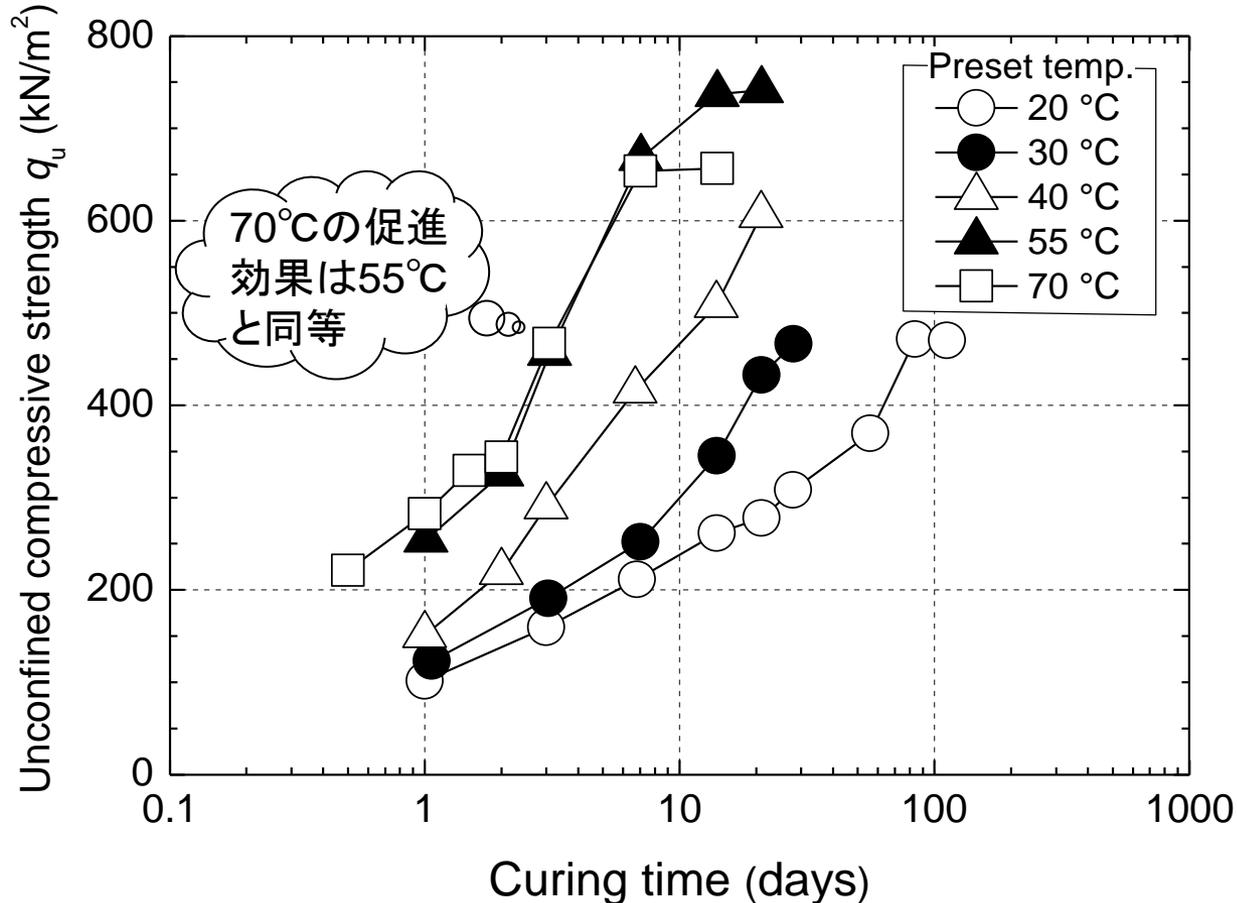


熱重量示差熱分析

# 実験結果

# 一軸圧縮試験結果

## 高温履歴を与えたセメント処理土の強度



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

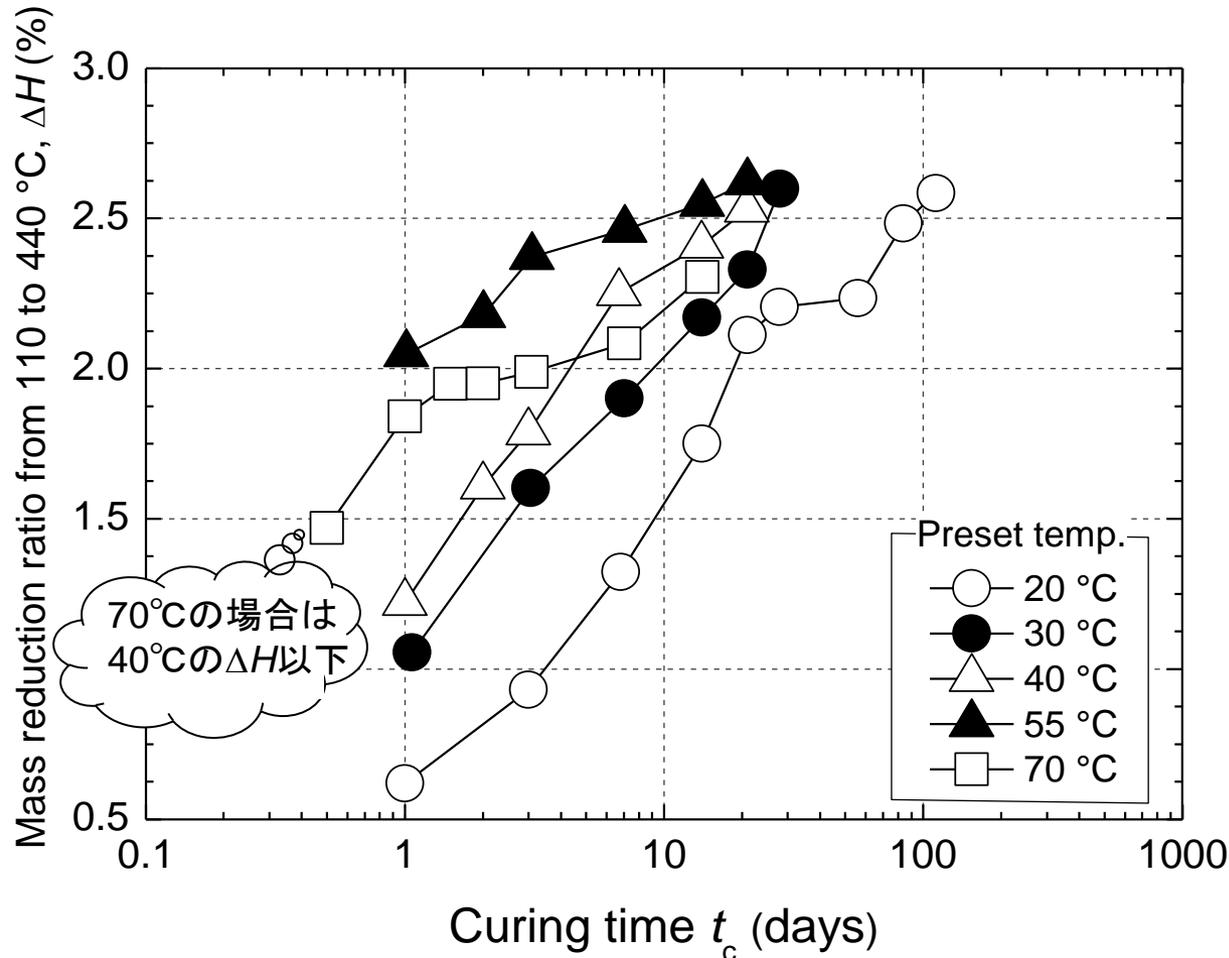


高温履歴を与えることで，強度発現を促進させることが可能

# 温度による水和反応の促進効果

## 高温履歴を与えたセメント処理土の水和反応の進行

セメント水和物は440°C付近までで脱水・分解される (Tabet et al.)



高温履歴を付与することで水和反応が促進されている。

# 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)

$\Delta t$  : 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

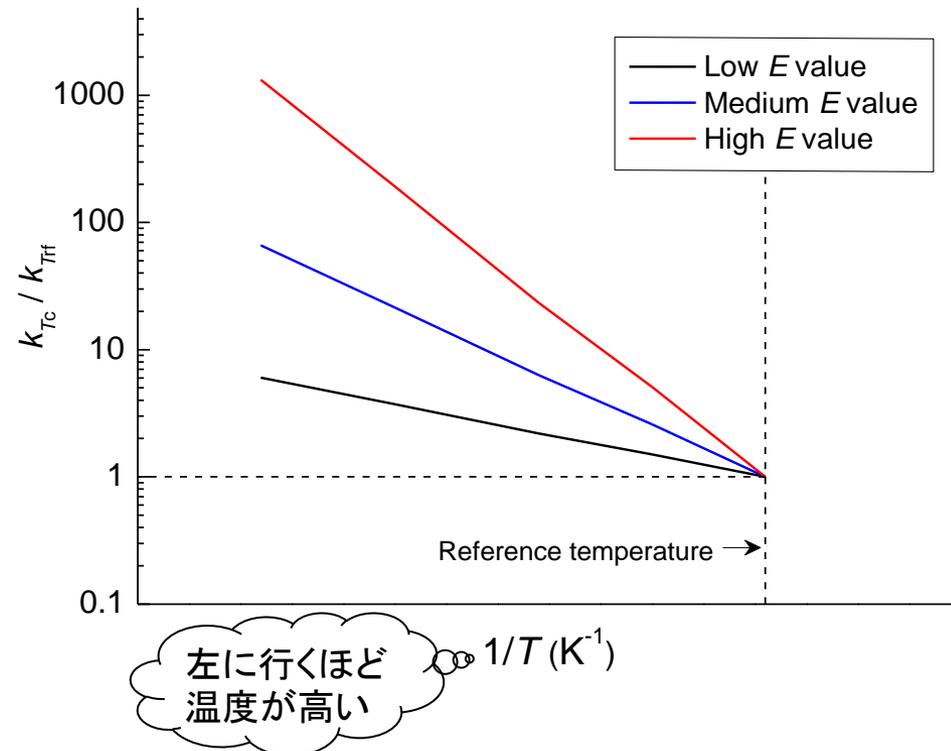
$$k_T = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

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)

$\Delta t$  : 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

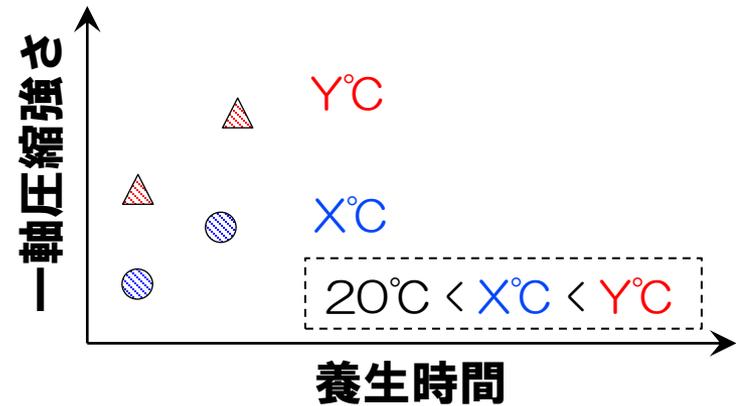
温度による強度  
 発現の促進効果

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

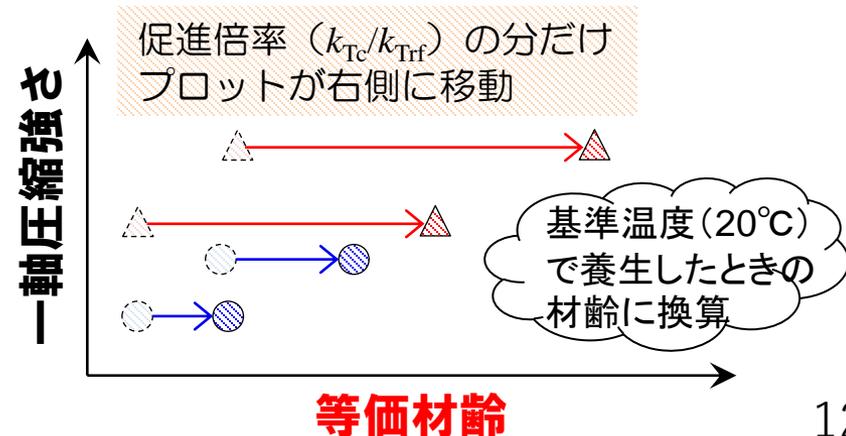
$E$  : 見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

$R$  : 気体定数(J/mol·K)

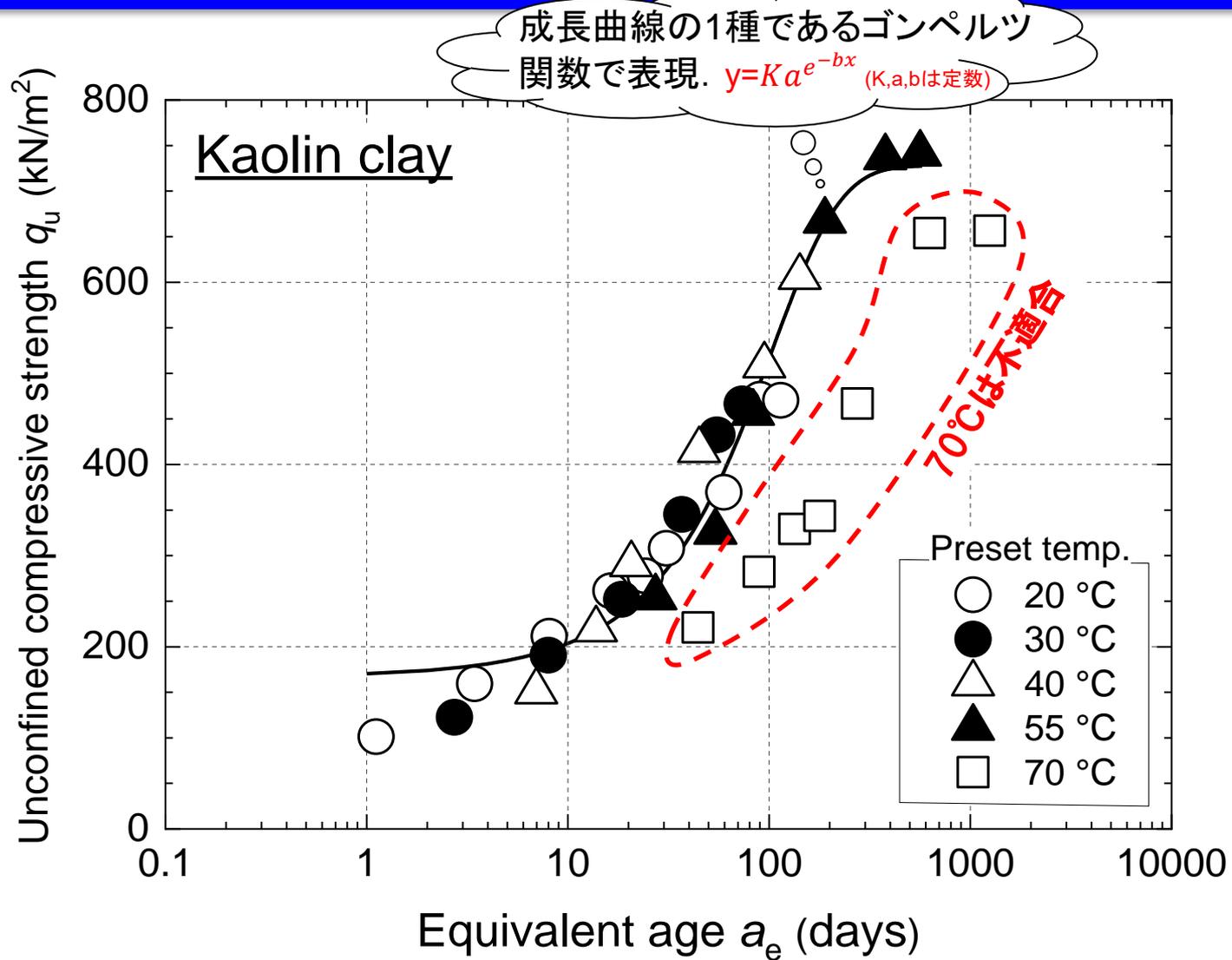
$T$  : 温度(K)



等価材齢に換算

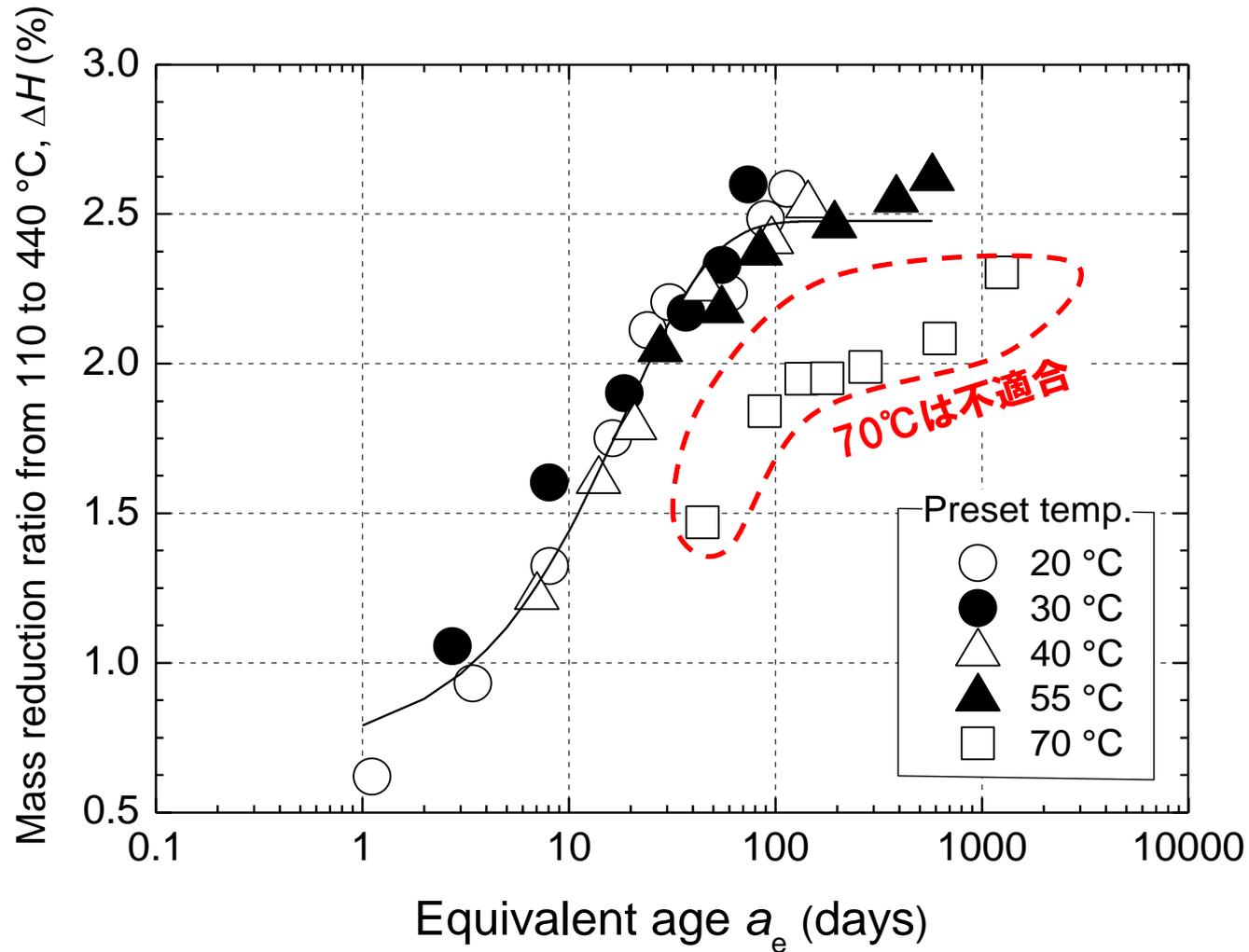


# 等価材齢による評価



養生55°C以下の条件では、**等価材齢が同じであれば、一軸圧縮強さは同程度の値を示しており、セメント処理土の強度増進性状を表現することができた。**

# 水和反応の促進効果の評価

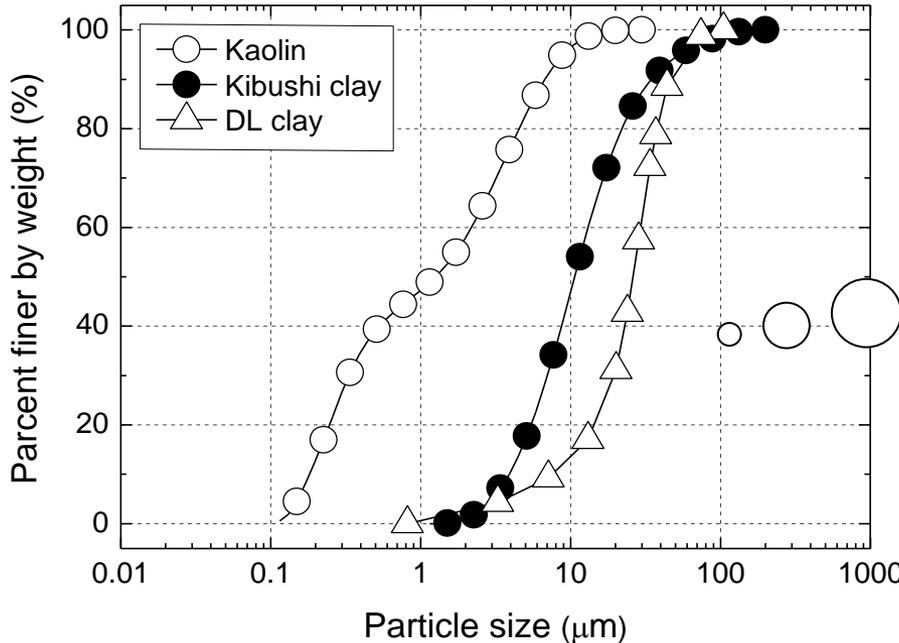


算出された等価材齢が同じであれば、**力学特性だけでなく水和反応の進行度も同等**のセメント処理土供試体が作製できている。

# 高温養生を利用した任意材齢の 強度推定手法の開発

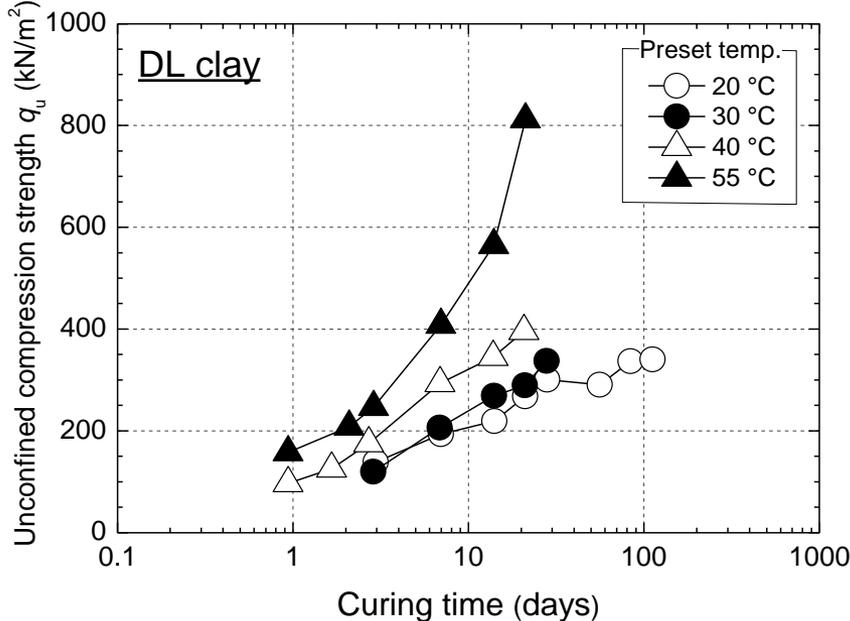
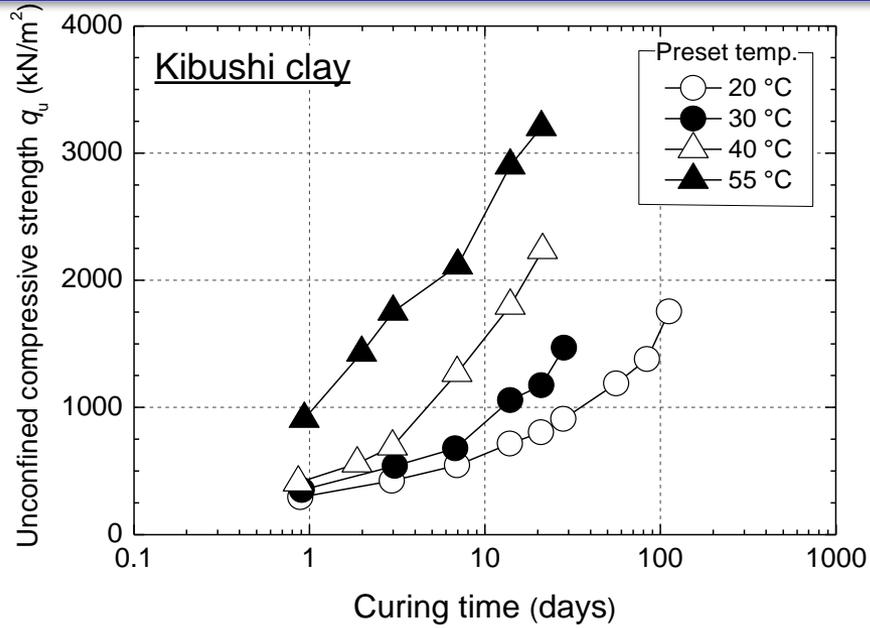
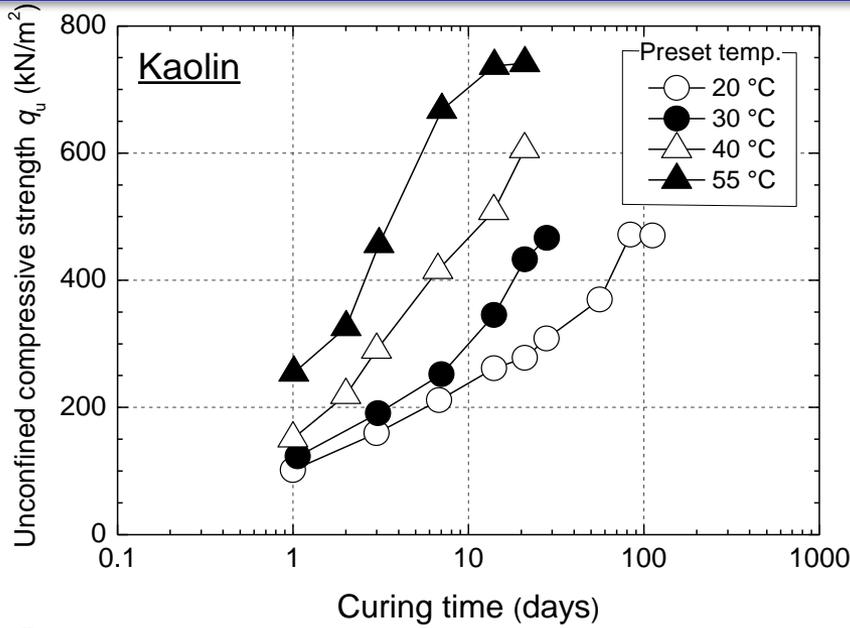
# 異なる母材を使用した等価材齢による評価方法の検証

Properties	Kaolin	Kibushi clay	DL clay
Specific gravity	2.58	2.62	2.62
Liquid limit (%)	81.6	44.7	NP
Plastic limit (%)	32.7	27.4	NP
Plasticity index	48.9	17.3	NP
Grain size distribution (%)			
Sand ( $0.075 \text{ mm} < d$ )	0	17.1	0.7
Silt ( $0.005 < d < 0.075 \text{ mm}$ )	20.5	80.4	92.8
Clay ( $d < 0.005 \text{ mm}$ )	79.5	2.5	6.5



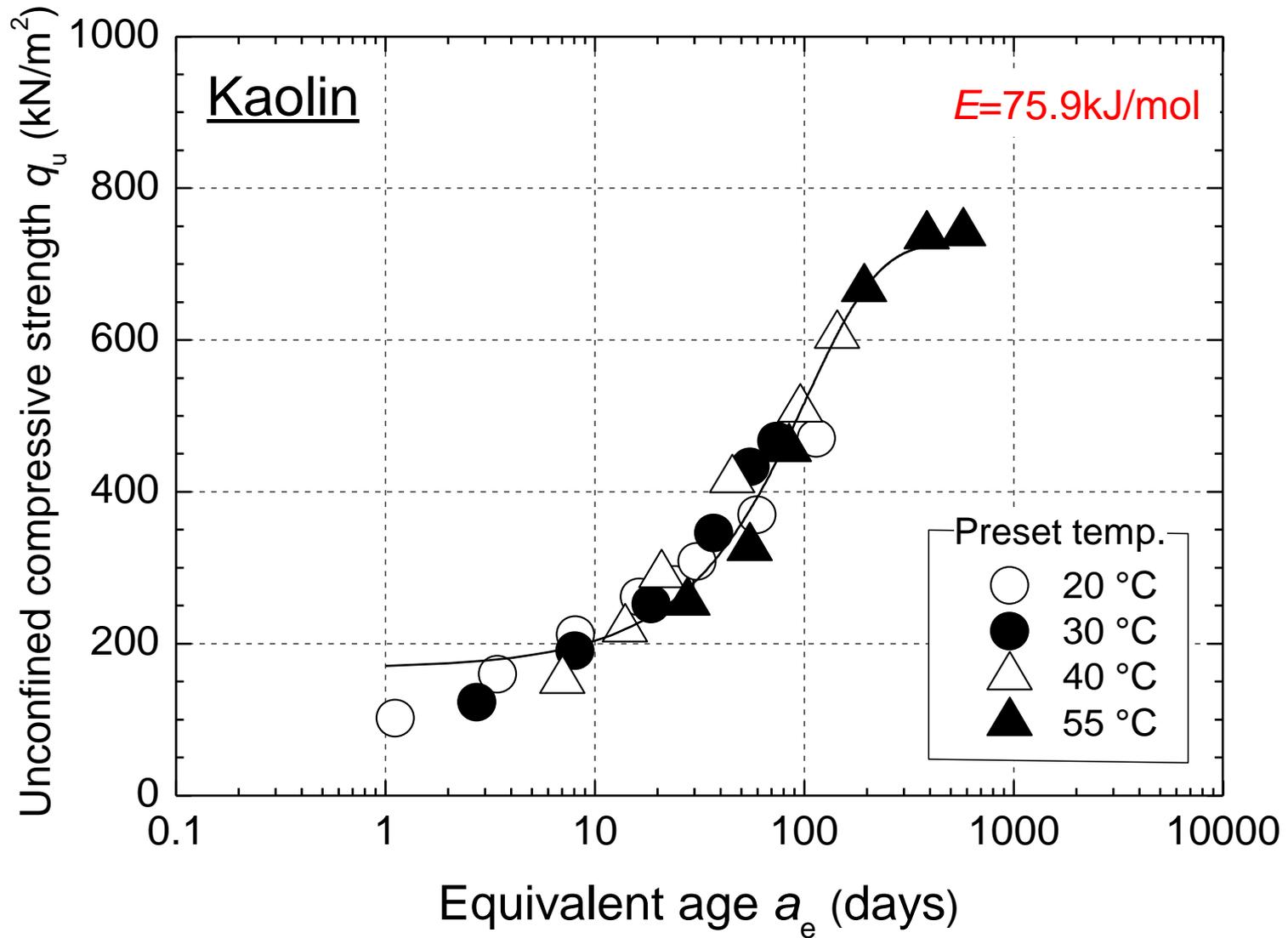
**粒度分布が異なる3種類  
(カオリン, 木節粘土,  
DLクレー)の細粒土に対  
して同様の検討を実施.**

# 一軸圧縮試験結果

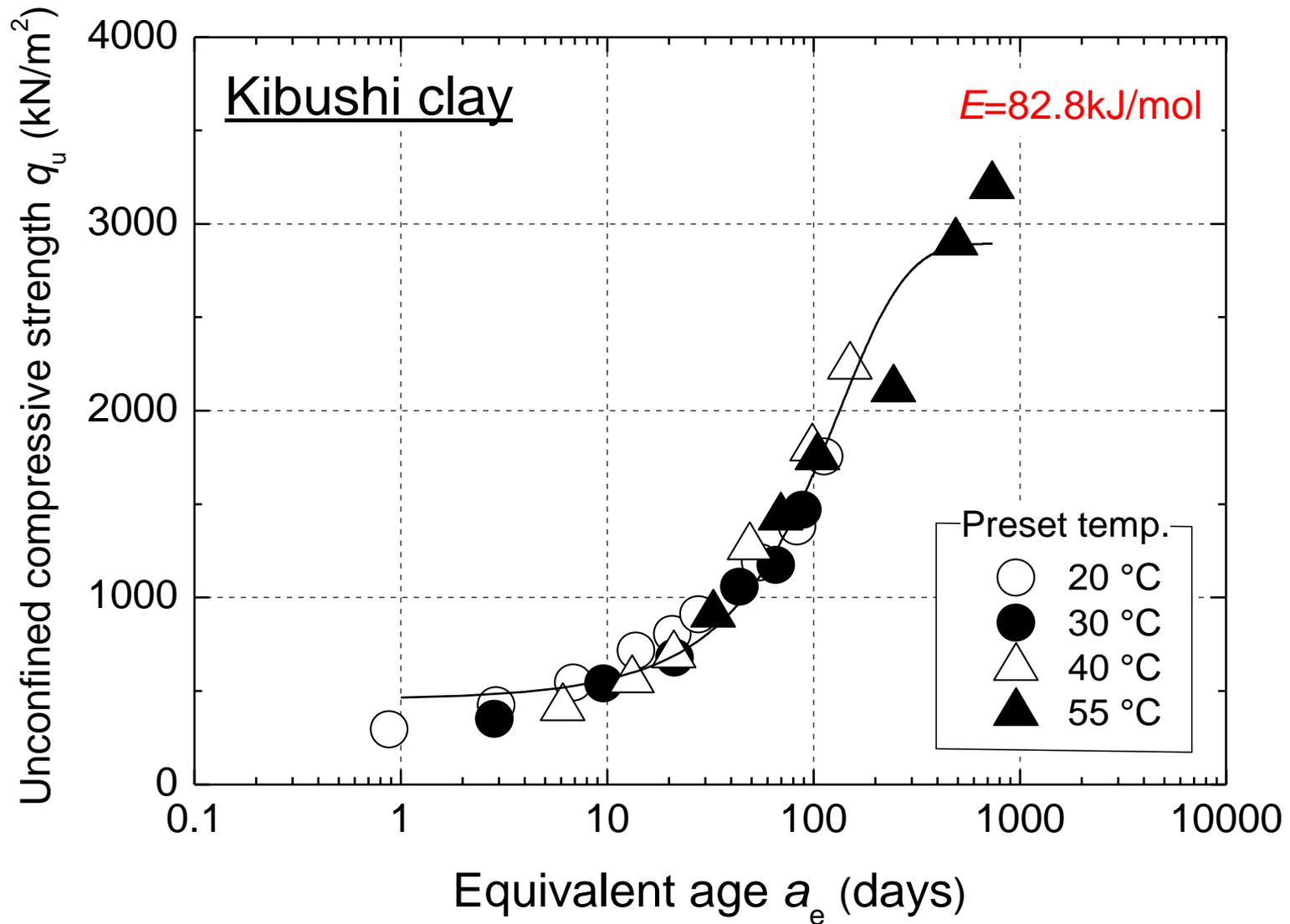


**いずれの土質の場合も温度が高いときほど一軸圧縮強さが大きい。**

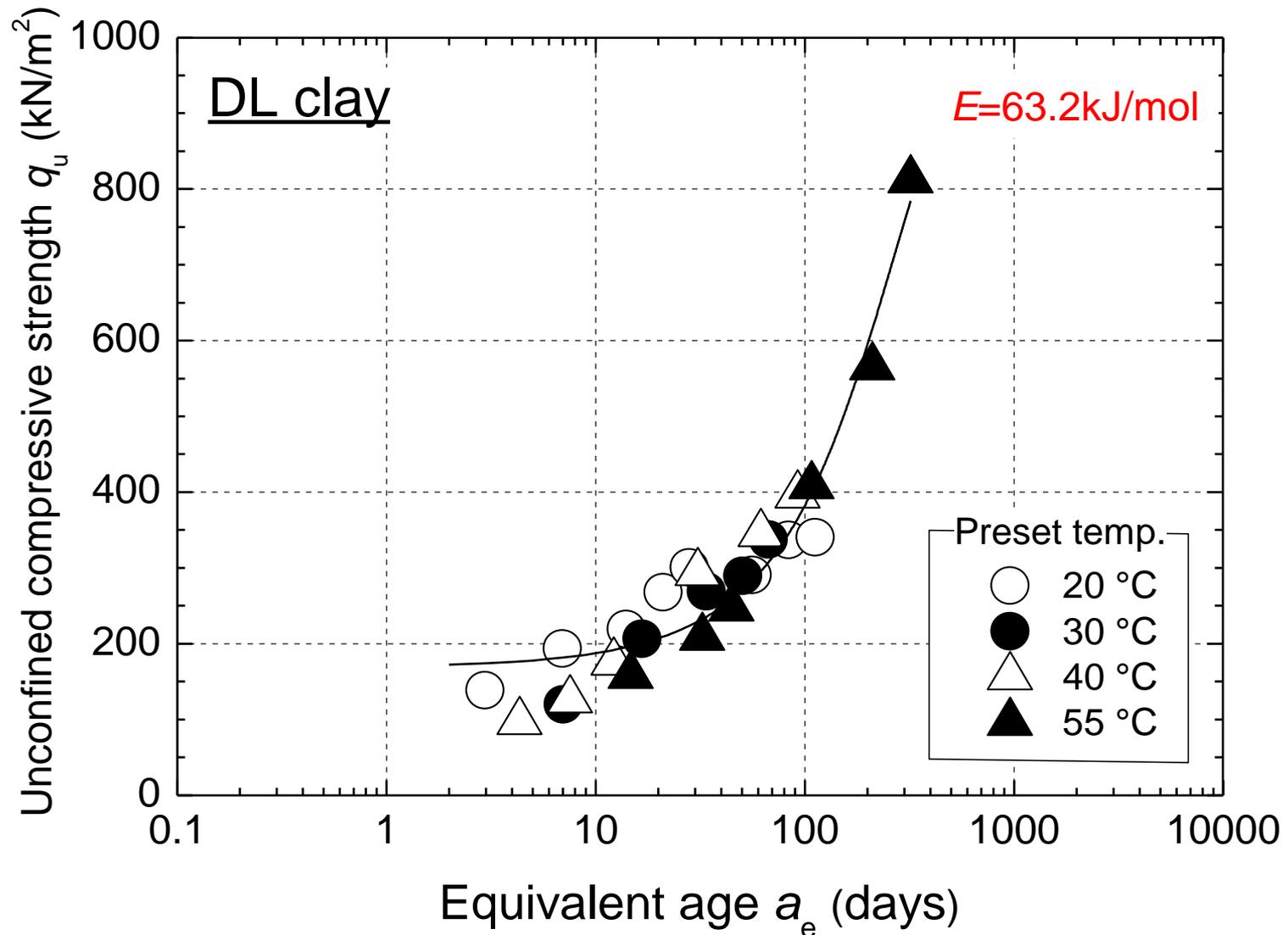
# 等価材齢による評価 (①カオリン)



# 等価材齢による評価 (②木節粘土)



# 等価材齢による評価 (③DLクレー)



母材によらず, 等価材齢によって精度よく評価できる.

# 母材による促進効果の差異

20℃に対する各  
温度の促進倍率

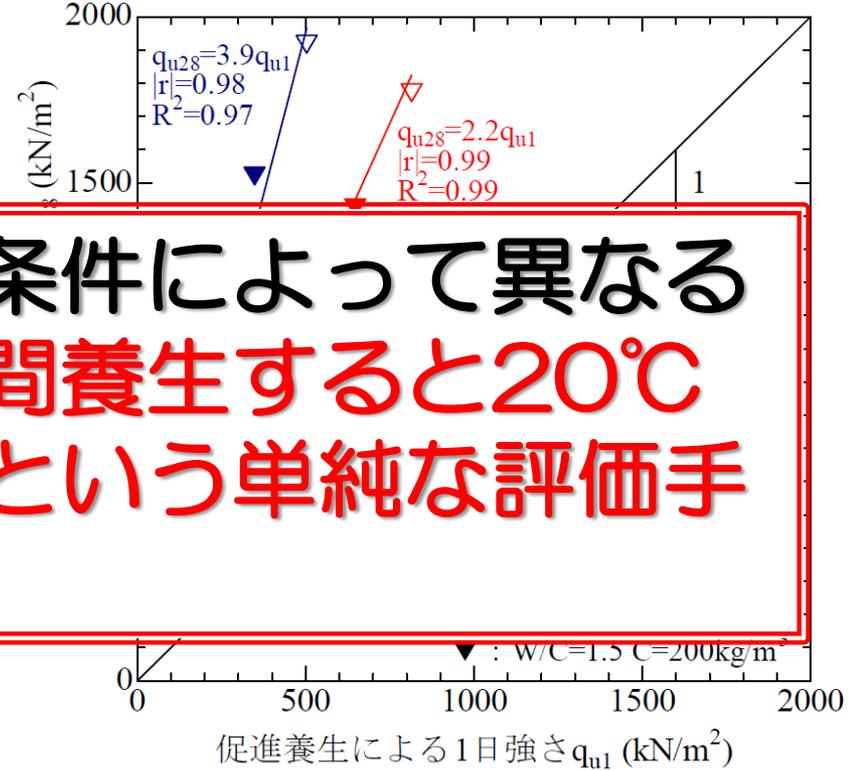
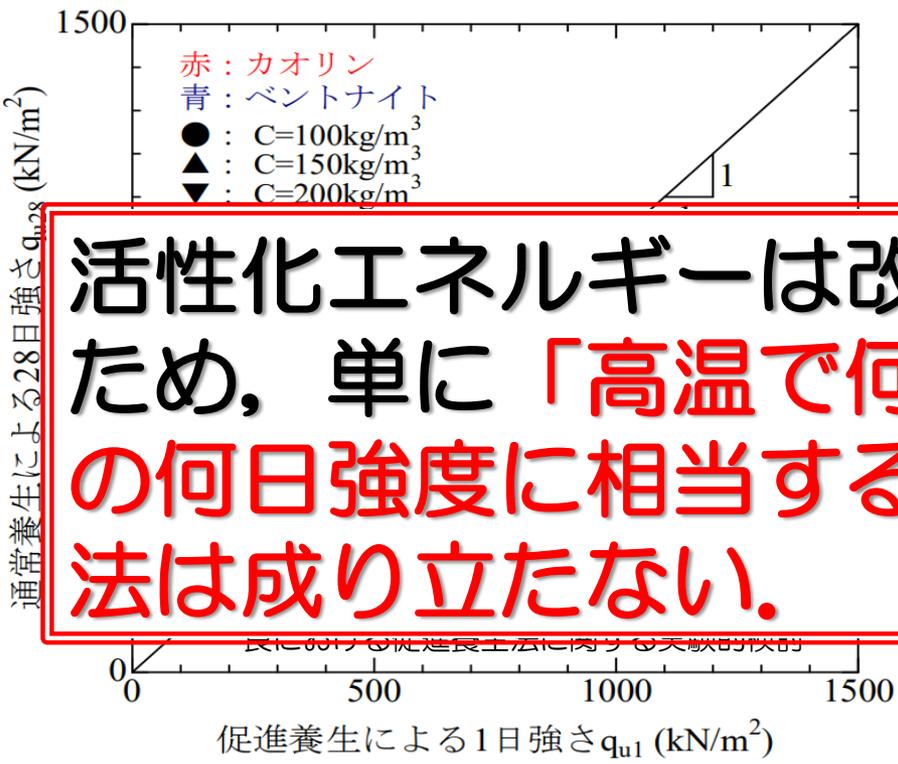
## □活性化エネルギーと促進効果

	Activation energy $E$ (kJ/mol)	Curing temperature $T$ (°C)	Acceleration rate for 20 °C
Kaolin	75.9	30	2.8
		40	7.3
		55	27.9
Kibushi clay	82.8	30	3.1
		40	8.8
		55	37.6
DL clay	63.2	30	2.4
		40	5.3
		55	16.0

母材によって活性化エネルギーの値が異なっている。それに伴って、温度による促進効果も異なっている。

# セメント処理土の強度推定に関する既往の研究

## □55°C 養生による強度推定



活性化エネルギーは改良条件によって異なるため、単に「高温で何日間養生すると20°Cの何日強度に相当する」という単純な評価手法は成り立たない。

	Activation energy $E$ (kJ/mol)	Curing temperature $T$ (°C)	Acceleration rate for 20 °C
Kaolin	75.9	30	2.8
		40	7.3
		55	27.9

既往の研究成果と符合する。

# 2種類の温度条件を利用した強度推定手法

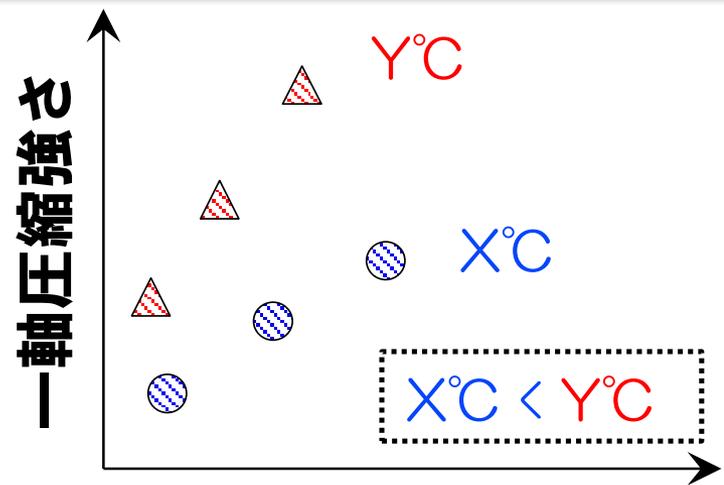
**手順①** 2種類の温度でセメント処理土を養生(20, 30, 40, 55℃から選択して6種の組み合わせが可能)

**手順②** 短期材齢時の強度を取得

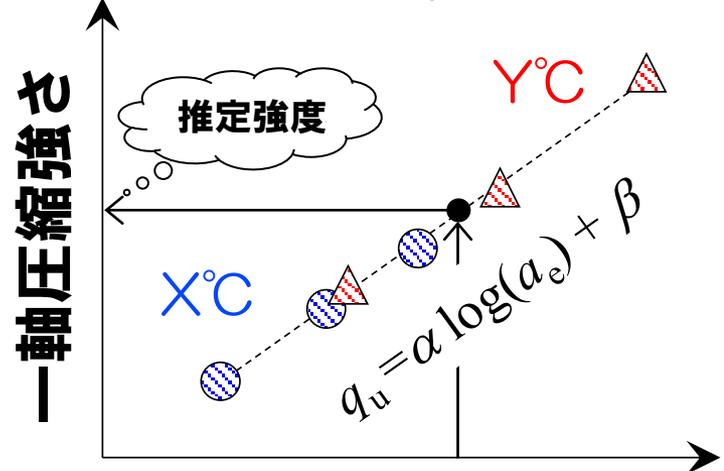
**手順③** 2種類の温度の短期材齢の強度発現挙動から活性化エネルギーを定め、実材齢を等価材齢に換算

**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  
 ⊗ 等価材齢に換算

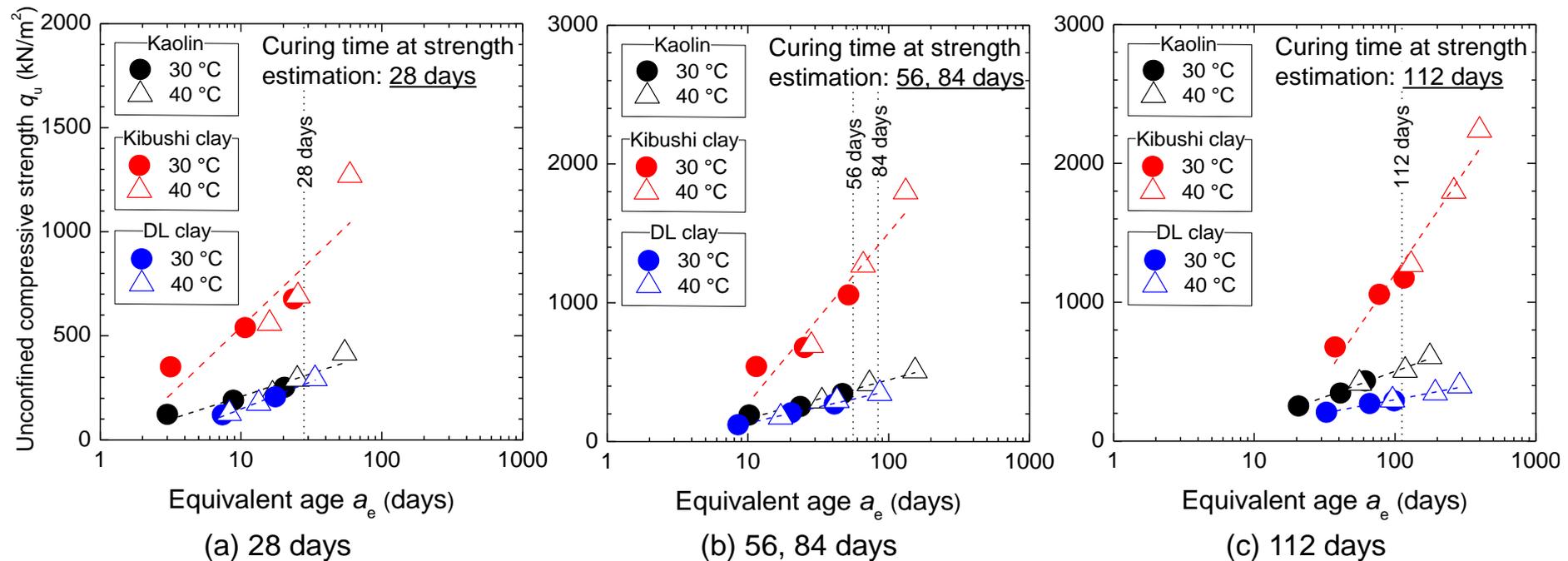


等価材齢 (対数)

# 等価材齢による近似

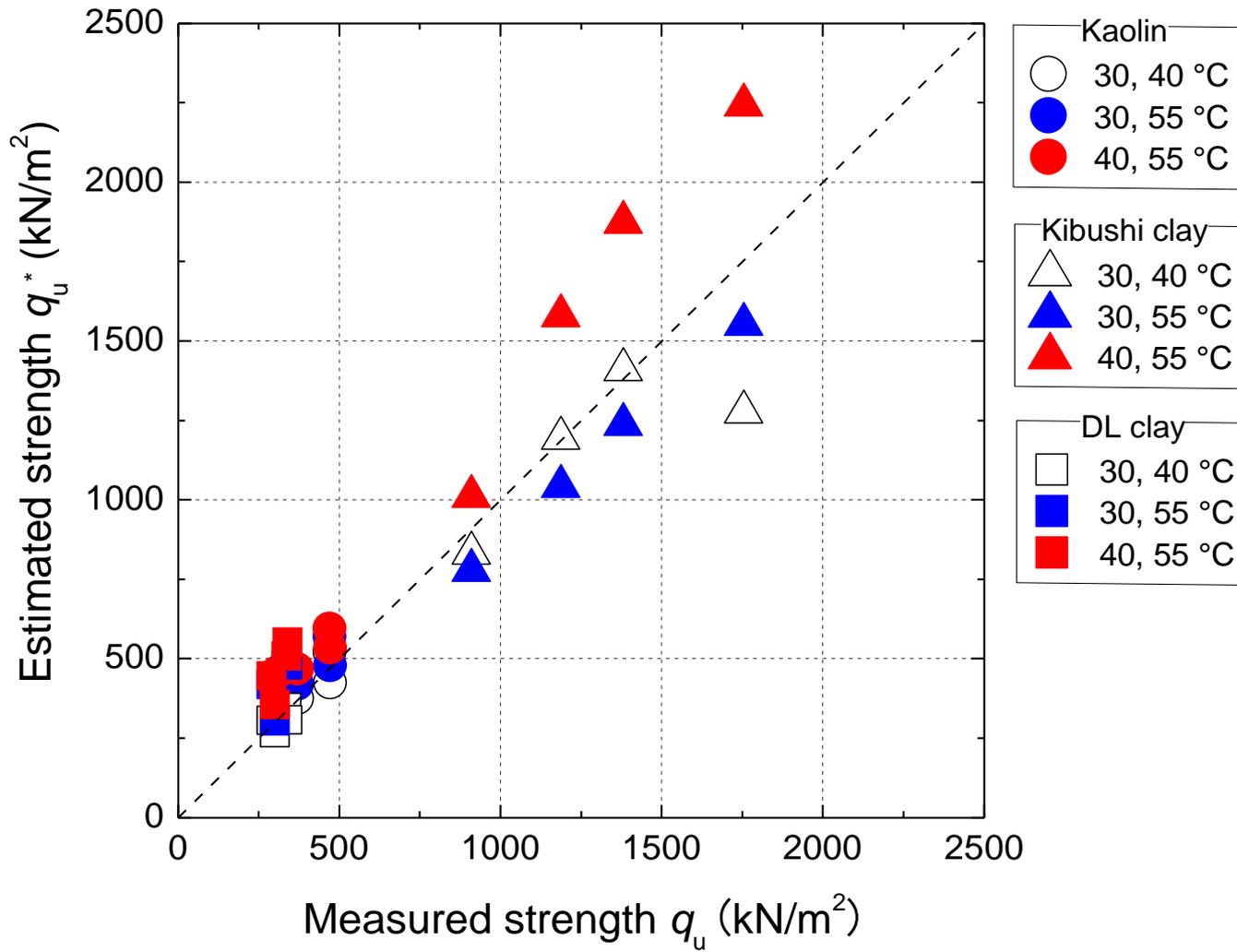
片対数グラフ上で直線となるように最小二乗法で近似し、最も決定係数が大きくなるように活性化エネルギーを定める。

## □ 30, 40°Cの例



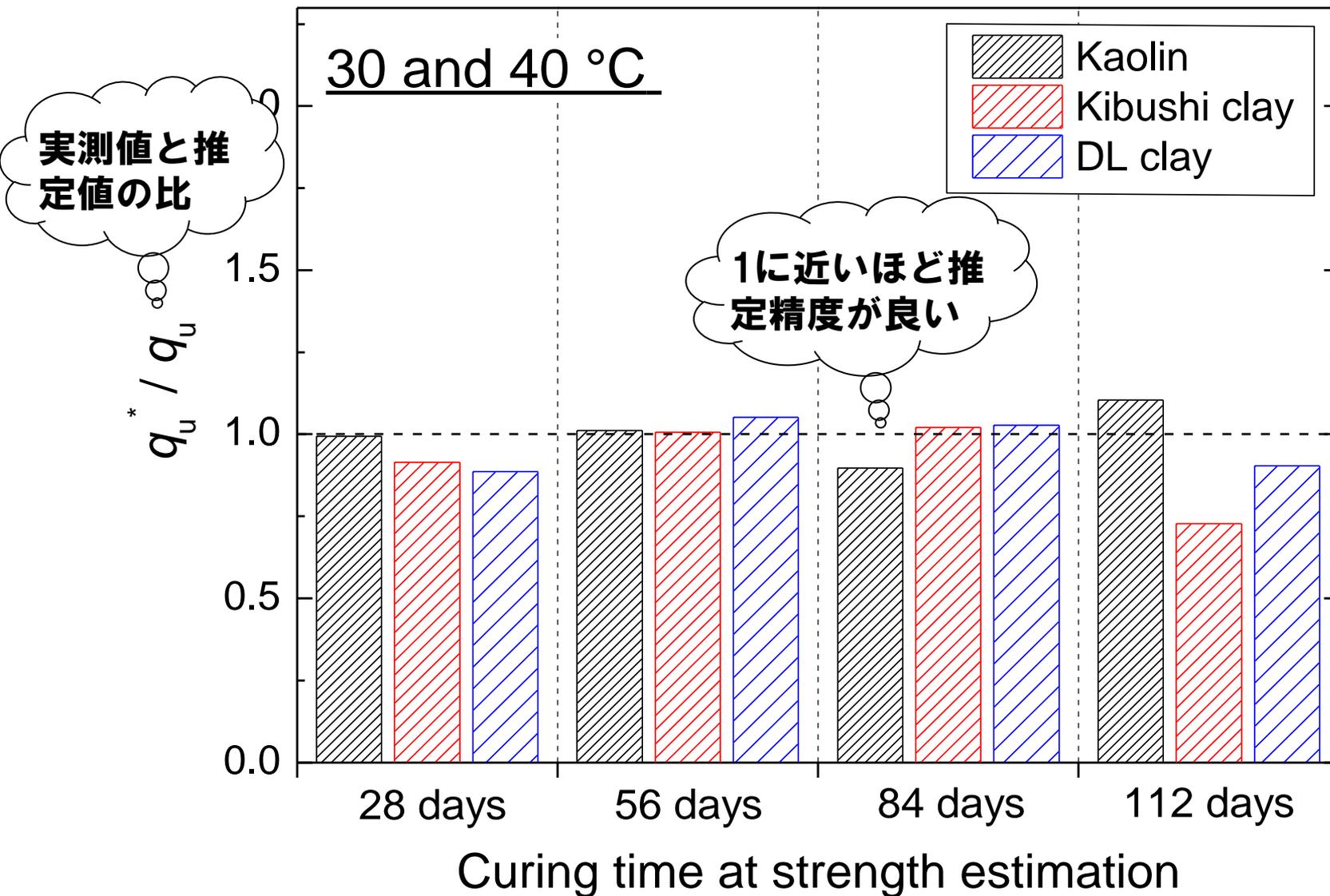
いずれの場合も大きく逸脱することなく、近似することができた。

# 実測値と推定値の関係

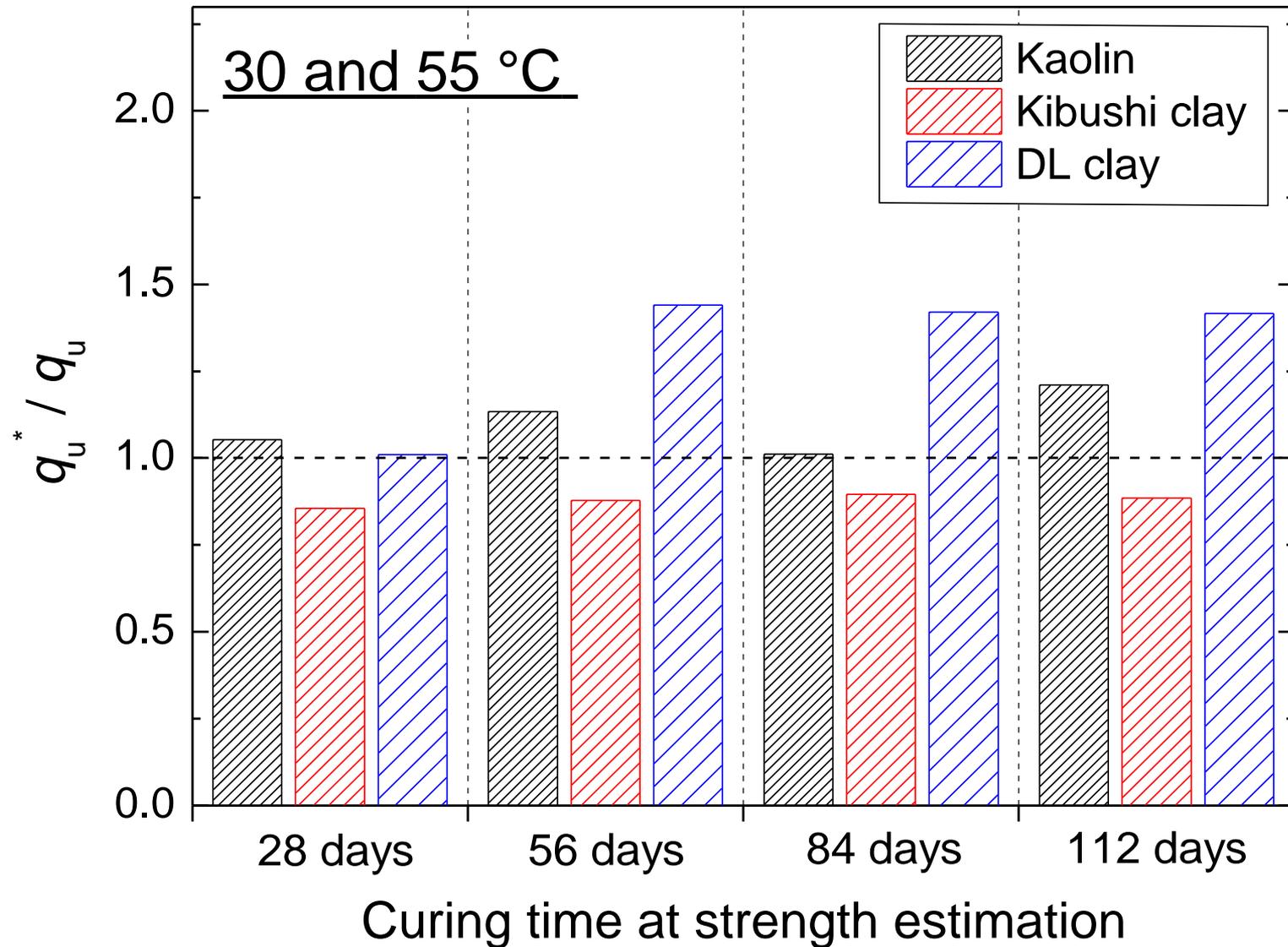


得られた推定強度は実測値と大きな乖離はみられない。ただし、選択する温度によって、推定精度が異なる傾向がみられた。

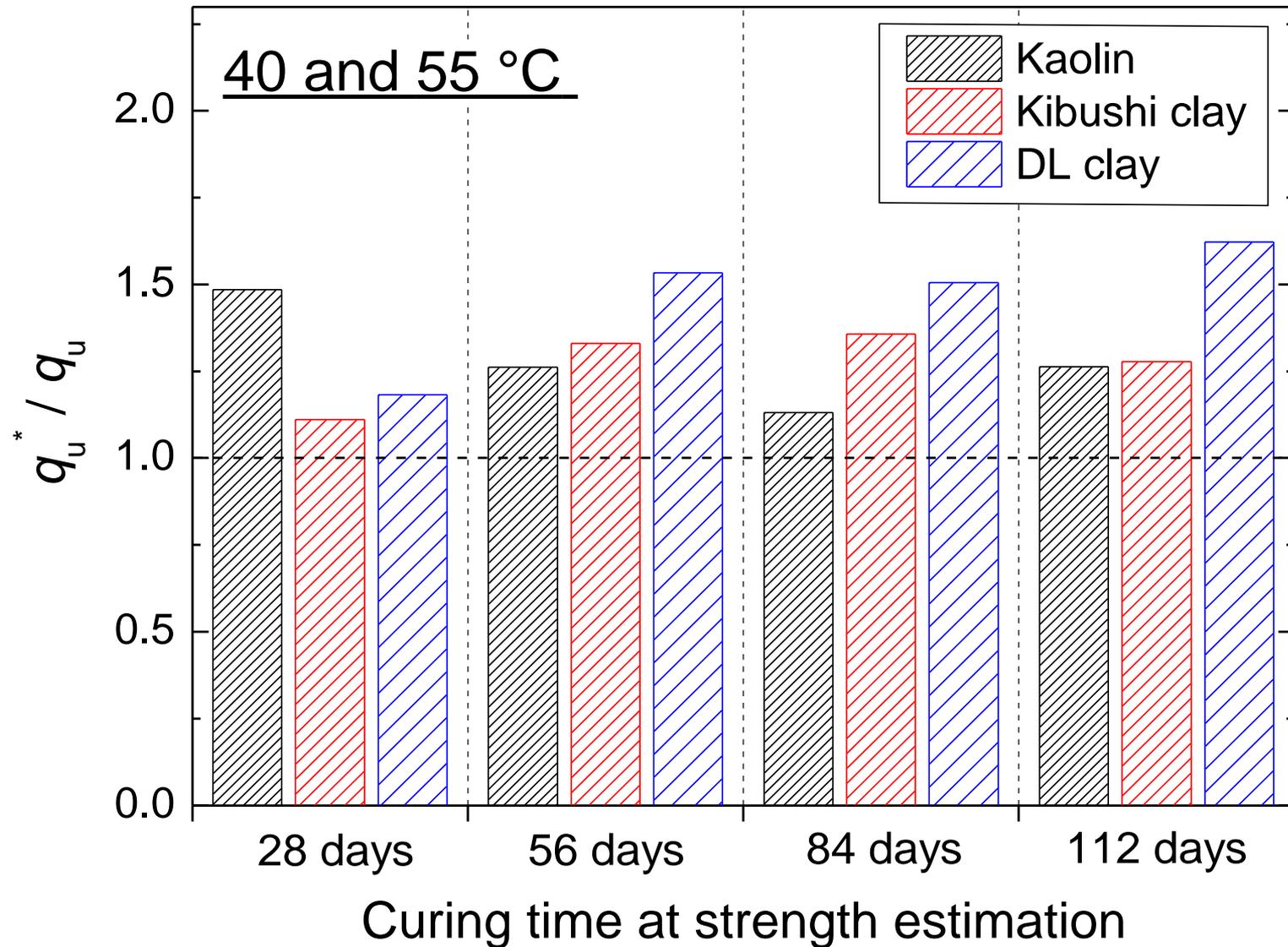
# 推定精度 (30, 40°C)



# 推定精度 (30, 55°C)



# 推定精度 (40, 55°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°C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

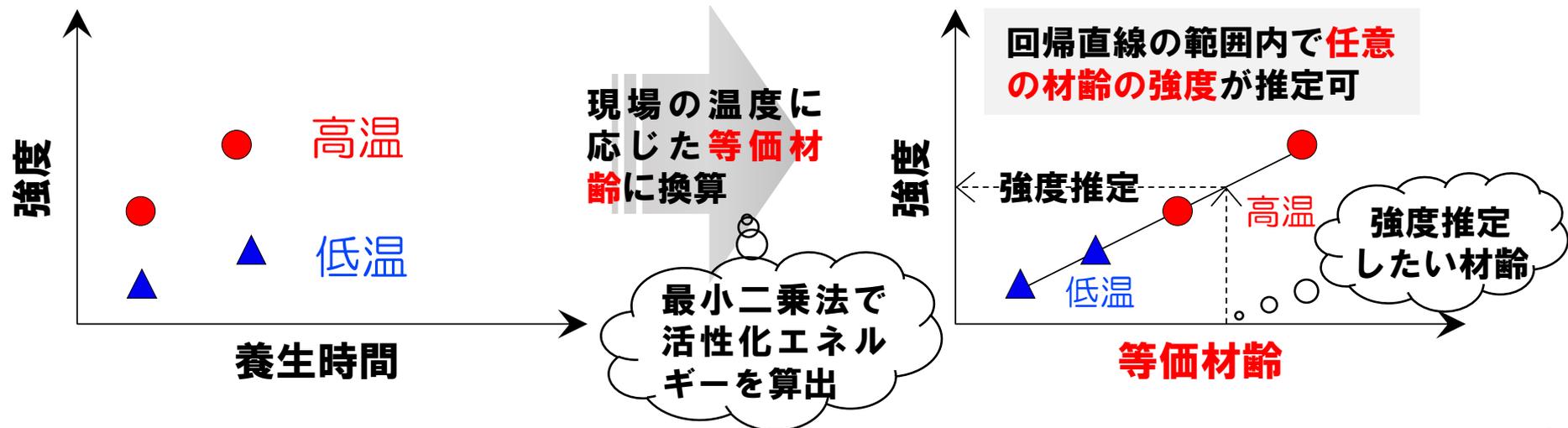
## □各温度の組み合わせ条件における評価指標 $I_e$

	Average value of evaluation index $I_e$		
	30 and 40 °C	30 and 55 °C	40 and 55 °C
Kaolin	5.6	10.2	28.5
Kibushi clay	9.6	12.2	26.9
DL clay	7.2	32.2	46.1

低い温度の組み合わせる条件ほど推定精度が高い傾向がある。30, 40°Cの場合、実測値との差異の平均値は10%未満。

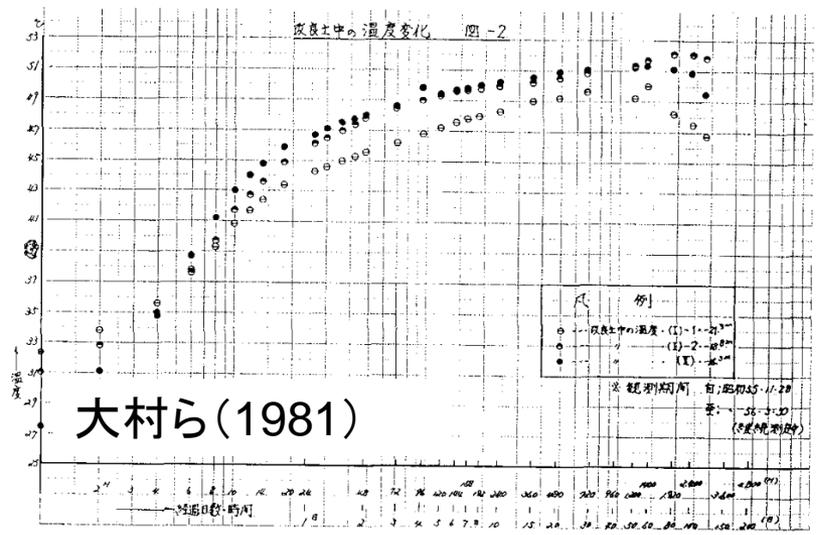
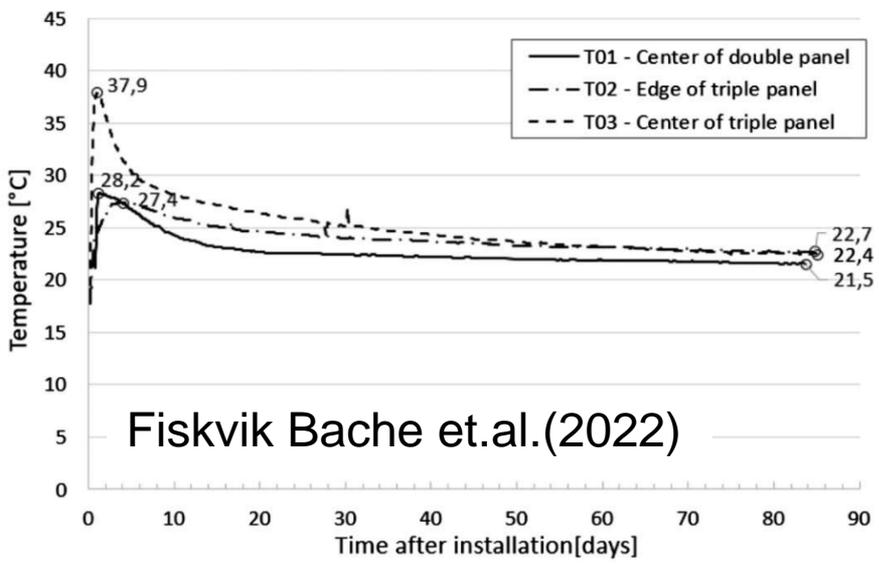
# 本提案手法の特徴

- 複数の温度条件におけるセメント処理土の強度発現挙動から改良条件ごとに“活性化エネルギー”を直接求めることができるため、推定精度が高い。
- 28日強度だけでなく、求めた回帰直線の範囲における“任意材齢の強度”を推定可能。



# 本提案手法の特徴

セメント処理土の温度は地域・季節・工種によって大きく異なる。  
 ● e.g. 深層改良では、改良土内部が高温で長期間維持される。



➤ 本手法は等価材齢を求める際の反応速度定数の基準温度を20°Cだけでなく、自由に設定可能。

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

温度を自由に設定可

現場の温度条件に合わせて、発揮される強度を短期間で且つ正確に推定できる。したがって、深層混合処理工法のように高い温度で維持される場合には、正しく強度推定することで**添加するセメント量や改良率を下げる合理的な施工が可能**となる？

ご清聴ありがとうございました。

ご連絡いただければ強度推定に使用するExcelシートを配布できます。

[hara-h@yamaguchi-u.ac.jp](mailto:hara-h@yamaguchi-u.ac.jp)