

◆ 報 文 ◆

セメント系新堤体材 CSG の材料特性に関する実験的考察

川崎秀明* 平山大輔** 服部 敦*** 佐藤耕治****

1. はじめに

ダム関係において近年急速に施工例が増え、新堤体材料として期待を集めている CSG (Cemented Sand and Gravel) は、基本的にセメント系の弾性構造体であり、無分級無洗浄の河床砂礫や掘削ズリなどの近傍調達材に少量のセメント (60~80kg/m³程度) と水 (80~130kg/m³程度) を混合することで、コンクリートより格段に低いコストを実現している。使用する母材は、採取されたままの粒度、含水状態で使用することから、破碎設備や洗浄設備などを省略できるほか、混合設備も簡易なもので済む。また、主として河床砂礫や掘削ズリを母材として有効に利用できるため、新たに材料山での採掘を必要とせず、採取コスト及び製造コストが縮減でき、さらには自然環境負荷の低減にも大きく寄与することができる。このため最近では、CSG に関する材料及び混合装置などの研究が官民一体となって盛んに進められている。

2. 実験目的

2.1 温度変化と経時変化に関する実験

ダムにおける CSG 施工は、RCD 工法と同様に面状に広く大量の打設を行うことを前提としている。このため、練り混ぜ後から運搬、ブルドーザ敷均し、振動ローラによる締固めまでの時間差 (以下、放置時間) が生じることは避けられない。したがって、放置時間が CSG 施工に与える影響を把握する必要がある。そこで、実際の施工を考慮した温度別における硬化後の CSG 特性の違いを明らかにするための実験を行った。

2.2 減水混合効果に関する実験

CSG 母材は、材料山から採取したままの状態で使用されるため、微粒分含有量が多い CSG 母材を練り混ぜると、微粒分とセメント粒子が吸着し合う現象が発生する。このため、セメント粒子が均一に混ざらず、不均一混合や急速に強い粘りが生じることによる混合困難が発生しやすい。このような問題への有力な解決策として、混合時の水量を減じてワーカビリティを高め、打設時に残りの水量を散布する工夫があり、経験的にかなりの効果が認められている (以下、減水混合と呼ぶ)。ただし、減水混合については、明確な手法

が確立されておらず、混合性、強度、密度、施工性などへの影響も未確認である。そこで、減水混合が CSG 特性に及ぼす影響を把握するための実験を行った。

3. 使用材料

実験では単位セメント量 80kg の超貧配合コンクリートで CSG をモデル化したもの (以下、モデルコンクリート) を用いた。表-1 に使用材料の種類及び物性を示す。

粒径 5mm 以上は、製品骨材を混合使用し、表-2 に示すようにコンクリート標準示方書 (2002 年ダムコンクリート編) の標準粒度内に調整した。

粒径 0~5mm については、図-1 に示すようにコンクリート標準示方書の標準粒度内とする標準粒度砂による A 材と、スクリーニングス (粗骨材製造の際に発生する粒径 2.5mm 以下の微粒分) を用いた B 材の 2 種とした。A 材は無洗浄、無分級のダムコンクリート用骨材を想定した材料であり、B 材は A 材に微粒分を加えて細粒側にずらすことで、平均的な CSG 母材に近づけた材料である。

表-1 使用材料の種類及び物性

使用材料	種類及び物性
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 = 3.21g/cm ³ , 比表面積 = 3,360cm ²
母材 (0~5mm)	岩種: 安山岩 標準粒度砂 密度 = 2.64g/cm ³ , 吸水率 = 1.74%, 粗粒率 = 2.63 スクリーニングス 密度 = 2.71g/cm ³ , 吸水率 = 1.00%, 粗粒率 = 2.17
母材 (mm)	岩種: 安山岩
80~40	密度 = 2.71g/cm ³ , 吸水率 = 0.74%
40~20	密度 = 2.72g/cm ³ , 吸水率 = 0.79%
20~10	密度 = 2.72g/cm ³ , 吸水率 = 1.04%
10~5	密度 = 2.67g/cm ³ , 吸水率 = 1.68%
混和剤	AE 減水剤 遅延形 I 種

表-2 母材 (5mm 以上) の粒度

【母材 (5mm 以上)】	〔粒徑別百分率〕			
	G10~5	G20~10	G40~20	G80~40
標準粒度上限	15	25	40	40
母材粒度	13	21	33	33
標準粒度下限	10	15	20	20

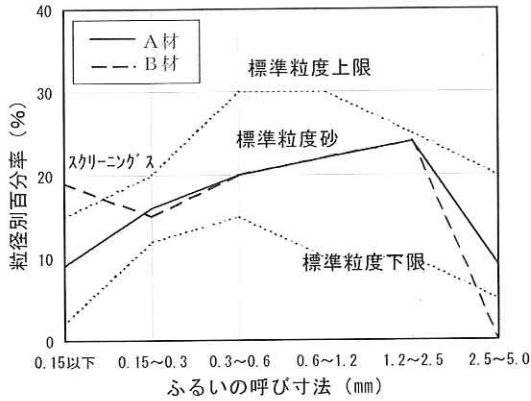


図-1 母材 (0~5mm) の粒子

4. 温度変化と経時変化に関する実験

4.1 実験方法

温度変化及び経時変化の試験フローを図-2に示す。モデルコンクリートの配合を表-3に示す。温度変化試験は、混合及び養生時のモデルコンクリート温度（以下、環境温度）を10℃、20℃、30℃の3段階に設定して、フレッシュ性状や圧縮強度を測定した。経時変化試験は、CSGの施工において、混合後から締固めまでに一定時間を要する場合を想定し、放置時間を60分、120分とした場合におけるフレッシュ性状、圧縮強度を測定した。なお、環境温度は20℃、30℃の2段階である。

モデルコンクリートの混合においては、環境温度を設定通りとするため、事前に恒温恒湿室内（湿度は75%で一定）へ母材や試験器具を入れ、10℃、20℃、30℃とそれぞれ一定になるよう温度管理を行った。混合後のモデルコンクリートは、直ちに所定の環境温度・放置時間を保持できるように、恒温恒湿室に放置した。放置する際の試料は、厚さ10~15cm程度にスコップで広げ、室内の温度調節による風が直接試料に当たって水分が逸散しないよう、写真-1のように木製枠にビニールシートを取り付けたもので試料を囲う処置を施した。

なお、RCDコンクリートでの経時変化試験では山状の形状で周辺をシートで覆った状態で試験を行っている。今回山状ではなく薄層状で放置したのは放置による影響度合いを強調して出すことを

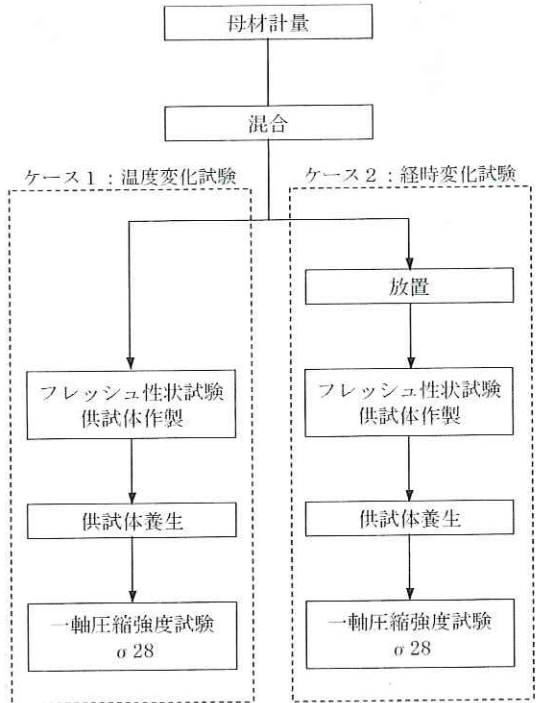


図-2 実験フロー



写真-1 放置状況

考慮したためである。

フレッシュ性状試験として、RCDコンクリートで用いられている標準VC試験を実施した。標準VC試験は、JSCE-F507「RCDコンクリートのコンシステンシー試験方法」に準じ、VC値、沈

表-3 配合表

名称	Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)							
					水	セメント	細骨材	粗骨材 (mm)				混和剤
								80-40	40-20	20-10	10-5	
実験配合	80	1.5	125	32 (スクリーニングス)	100	80	745	523	525	334	203	0.200



写真-2 供試体作成状況



写真-3 封緘養生状況

上がるごとに、圧縮強度は約1割増加する傾向が認められた。しかし、供試体密度については、環境温度が高くなるほど、供試体密度は低くなる傾向が認められた。これは、温度が高いことによる過早凝結の進行によって、締固め時に振動による十分な水分の拡散が行えず、結果として供試体密度を低下させたものと考えられる。

下量、単位容積質量を測定した。

所定の放置時間経過後、直ちに供試体の作製を行った。供試体作製にあたってはウェットスクリーニングし、母材最大寸法40mm以下とした試料を用いた。締固めには、写真-2に示す一定の締固めエネルギー伝達効果のある供試体作製装置を用いた。養生は、写真-3に示すように供試体全体をビニールで密封した封緘養生とし、恒温恒湿室で所定の材齢(σ28)まで養生した。

供試体密度は、所定の供試体養生が完了し、圧縮強度試験の直前に断面寸法及び質量を測定し、硬化後の単位容積質量のデータを基に算出する。一軸圧縮強度はJIS A 1108に準じて実施した。載荷は供試体の破壊状況を確認しながら最大荷重に達した時点で終了した。

4.2 実験結果

温度変化試験における環境温度とVC値の関係を図-3に示す。環境温度10℃ではVC値25秒程度であったが、20℃、30℃と高くなるにつれ、VC値は40秒、60秒と大きくなる傾向が見られた。この傾向は一般のダムコンクリートと同様の現象であり、環境温度上昇に伴い過早凝結が起きやすくなったためと考えられる。

環境温度と圧縮強度・供試体密度の関係を図-4に示す。平均値で見ると、環境温度が10℃

図-5に放置時間とVC値の関係を示す。20℃、30℃のケースとも、放置時間とともにVC値は増加し、20℃では120分経過後、30℃では60分経過後に計測不可(VC値120秒が測定上限)となった。VC値の経時増加は、締固め時におけるワーカビリティの低下を生じる可能性を示唆している。

図-6に放置時間と圧縮強度の経時変化関係を示す。圧縮強度は、放置時間0分に対して、60分経過後では温度20℃で1割、温度30℃で3割の強度低下となり、また120分経過後では温度20℃で3割、30℃で5割の強度低下となった。これは、環境温度が高いかつ放置時間が長いほど締固めの困難さが増したため、強度低下につながったものと考えられる。

以上より、実際の施工にあたっては、VC値の増大を抑制することが重要であり、単位水量の選定、CSG母材の温度管理、混合敷均し後の散水、シート被覆などの放置時養生方法の工夫などが必要と考えられる。なお、放置によるVC値の増大及び強度低下度合いがRCDコンクリートより大きいのは、薄層放置と合せて、CSGの特性上、初期VC値をRCDの20秒よりも硬めである40秒、60秒としたことにある。そのため、今回の試験は実施工と比べて経時変化による悪影響がより強調された結果となっている。

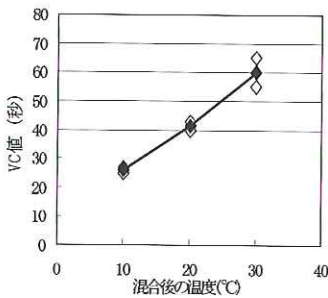


図-3 環境温度と VC 値

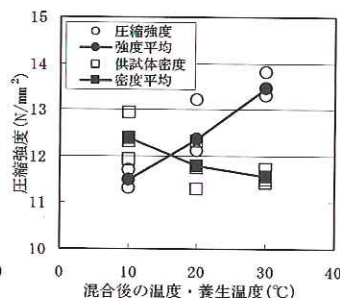


図-4 環境温度と圧縮強度・供試体密度の関係

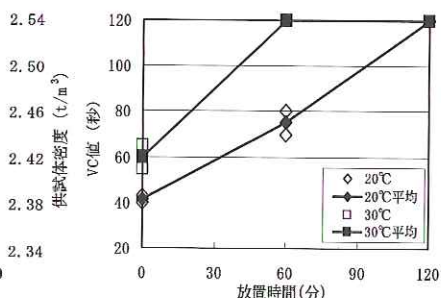


図-5 放置時間と VC 値

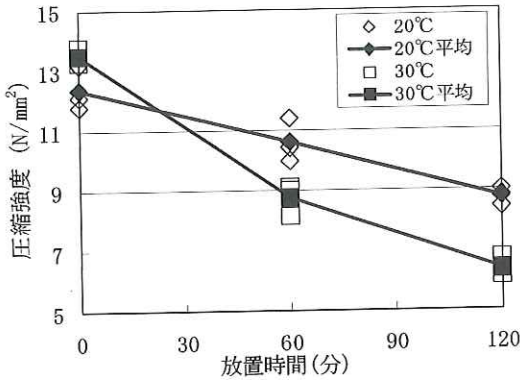


図-6 放置時間と圧縮強度

5. 減水混合効果に関する実験

5.1 実験方法

表-4に実験ケース及び配合を示す。ケース1は基本配合であり、1次混合水率100%のみとした。ケース2は、スクリーニングスを用いて微粒分を増したB材を用いたケースであり、減水混合における1次混合水率を100%、85%、70%、55%と変動させて実験を行った。

図-7に実験フローを示す。実験は混合水を2段階に分けて混合した。1次混合水はミキサによる1次混合前に行い、混合後、モデルコンクリートをパレット上に排出してスコップで均等に広げ、2次混合水として残りの水量をじょうろにて均等に散布した(写真-4)。2次混合水散布後、直ちにスコップにて切り返しによる2次混合を行った。

ミキサによる混合後及び2次混合水の散布後に、モデルコンクリートのフレッシュ性状を評価するため、標準VC試験と単位容積試験を実施した。標準VC試験は、JSCE-F507「RCDコンクリートのコンシステンシー試験方法(案)」に準じて行った。単位容積試験から、理論密度に対する締固め密度として、密度比を求めた。試験はウェットスクリーニングを行うことから、理論密度は示方配合から40mm以上の母材と、その体積比に応じたペースト量を除くものと仮定した。

2次混合水の散布後、直ちにφ500mm×h

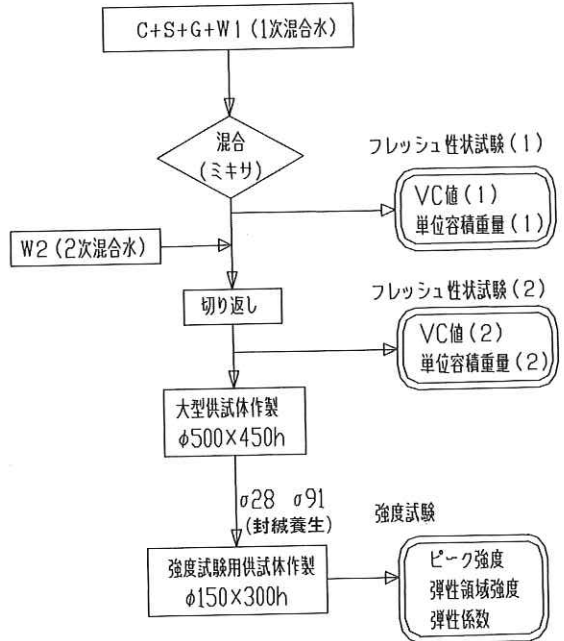


図-7 実験フロー



写真-4 2次混合水散布状況

450mmの大型供試体を作製した。大型供試体作製にあたり、締固め時の人為的なバラツキをできるだけ抑えるため、大型供試体締固め装置を用いた(写真-5)。締固めは15cm×3層仕上げとした。

養生は、実施工を考慮して封緘養生とし、恒温恒湿室(気温20℃湿度75%)で所定の材令(28日、91日)まで養生を行い、この間、表面からの水分発散を防ぐため大型供試体をビニールシートで密封した。

所定の養生期間後、コアボーリングマシンでφ150mmのコアを抜き取り、端部を切断してφ150mm×300mmの強度試験用

表-4 配合表及び実験ケース

No.	母材 (0~5mm)	単位セメント量 (kg/m³)	単位水量 (kg/m³)	1次混合水量 W1 (kg/m³)	2次混合水量 W2 (kg/m³)	1次混合水率 (%)
ケース1	標準粒度砂	80	100	100	0	100
ケース2-1	スクリーニングス			100	0	100
ケース2-2				85	15	85
ケース2-3				70	30	70
ケース2-4				55	45	55



写真-5 大型供試体締め固め状況

供試体を作製した。一軸圧縮強度は JIS A 1108 に準じて実施した。荷重は供試体のピーク強度を確認した後も、ピーク荷重の 1/2 ~ 1/3 まで荷重が減少するまで行った。一軸圧縮強度試験においては、荷重荷重、供試体全体変位 (30cm) を計測し、応力-ひずみ曲線を描き、弾性体の領域と判断できる境界点を弾性領域強度 (N/mm^2) として求め、またその時の勾配を弾性係数 (N/mm^2) として求めた。

5.2 実験結果

減水混合における 2 次混合水率と 2 次混合後の VC 値 (2) の関係を図-8 に示す。A 材を用いたケース 1 の VC 値 (1) が 20 秒程度であるのに対し、微粒分を多く含む B 材を用いたケース 2-1 では、VC 値 (2) が 40 秒程度とワーカビリティが低下していることがわかる。ケース 2 では 1 次混合水率を減じて行く毎に、VC 値 (2) も減少し、2 次混合水率が 45% では約半分の 25 秒程度となった。減水混合によりモデルコンクリートのワーカビリティが改善された。

2 次混合水率と密度比の関係を図-9 に示す。2 次混合水率が大きくなるほど、1 次混合後においては、所要の水量が足りず密度比が低くなる傾向がみられるが、2 次混合水率が 0% のケース 2-1 の密度比とほぼ同程度まで回復していることがわかる。このことから、減水混合が密度に与える影響は小さいと考えられる。

2 次混合水率とピーク強度の関係を図-10 に示す。ケース 1 とケース 2-1 を比較すると、微粒分の多いケース 2-1 の方が σ_{28} 、 σ_{91} とともに 2 割程度高い強度であった。ケース 2 の各ケースについては、2 次混合水率によらず、 σ_{28} で 13.8 ~ 15.1 N/mm^2 、 σ_{91} で 17.3 ~ 19.1 N/mm^2 とほぼ同程度の値であった。また材令による強度の伸びはそれぞれのケースとも約 2 ~ 3 割程度であった。

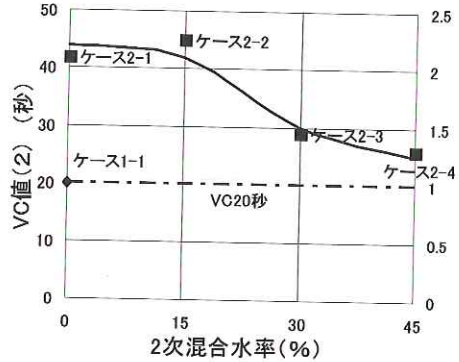


図-8 2次混合水率と VC 値 (2)

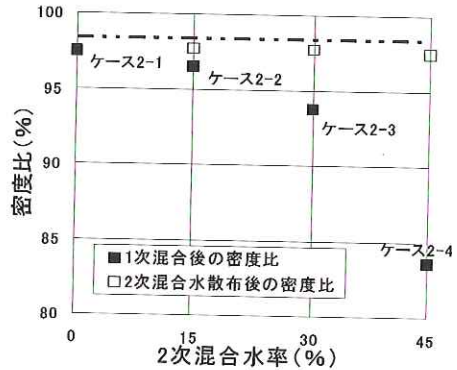


図-9 2次混合水率と密度化

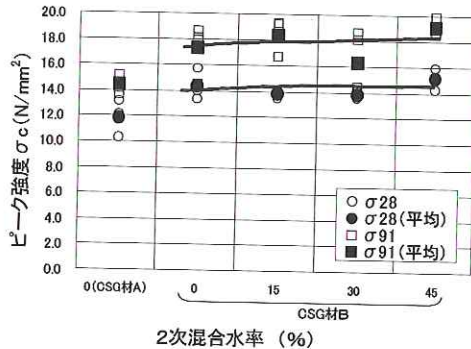


図-10 2次混合水率とピーク強度

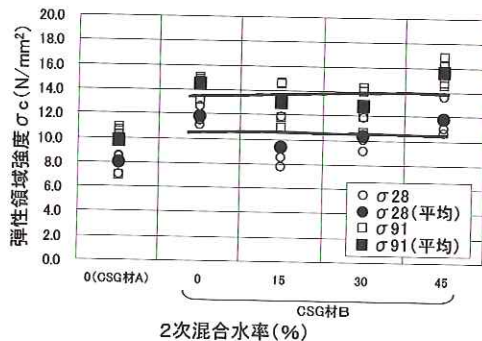


図-11 2次混合水率—弾性係数

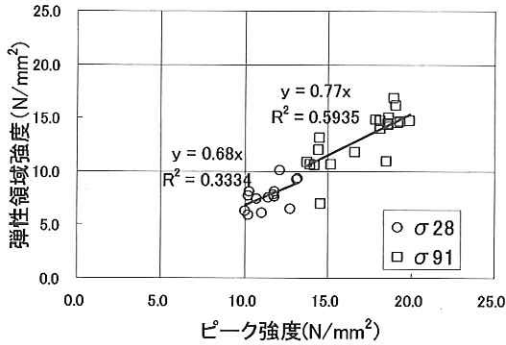


図-12 ピーク強度—弾性領域強度

2次混合水率と弾性領域強度の関係を図-11に示す。弾性領域強度についても、ピーク強度とほぼ同様な傾向がみられた。また、材令による弾性領域強度の伸びは2~3割であり、ピーク強度に比例して弾性領域強度も増加すると考えられる。

ピーク強度と弾性領域強度の関係を図-12に示す。 $\sigma 28$ 、 $\sigma 91$ のピーク強度に対し、共に弾性領域強度はその同帰直線より、約0.7~0.8倍の値であった。

6. 結論

(1) 温度変化と経時変化に関する実験からは、以下のことが確認できた。

- ①モデルコンクリートのフレッシュ性状は、環境温度が高いほど、あるいは放置時間が長いほど、VC値が大きくなりワーカビリティが低下する傾向がある。
- ②モデルコンクリートの28日強度は、環境温度が高いほど高いが、環境温度が高いほど放置時間による影響が大きく強度も低下しやすくなる。

ワーカビリティが低下したことは、環境温度が高いことによって過早凝結が起き易くなり、時間経過とともに凝結が進行したためと推察される。

また、これに伴って締固めの困難さが増大し、強度の低下に繋がったと考えられる。以上のことから、環境温度及び経過時間が、硬化後の品質に大きな影響を与えることがわかった。

(2) 減水混合効果に関する実験からは、以下のことが確認できた。

- ①微粒分の多い配合では、減水混合を行うことでワーカビリティが改善される。
- ②減水混合による締固め密度に与える悪影響はほとんど認められない。
- ③減水混合によるピーク強度及び弾性領域強度に与える悪影響はほとんど認められない。

ワーカビリティが改善されたことについては、減水混合を行うことによって、2次混合水の一部が母材などに吸着されない自由水として働き、見かけの水量が増加するためだと推察される。一方、硬化後の強度については、減水混合を行ってもその影響はほとんど無いことがわかった。以上のことから、微粒分を多く含むCSG母材を使用した場合に適切な減水混合を行うことは、混合時の練り混ぜ性状が良くなり、施工時のワーカビリティが向上するという点でメリットが大きいと言える。

CSGに使用する現地母材の特性は、採取場所によって様々である。CSGでの施工を採用するにあたっては、このことに十分注意し、使用する材料の特性を室内実験及び実機試験で予め確認しておくことが重要である。

参考文献

- 1) 平山大輔、吉田等、川崎秀明：「ペースト量が貧配合セメント結合材料の材料特性に及ぼす影響」、ダム技術 No.201、2003.6
- 2) 川崎秀明、平山大輔、小島伸介、西山浩史：「CSGの減水混合効果に関する実験的考察」、コンクリート工学会年次論文集 vol.26、2004.7

川崎秀明*



財団法人ダム技術センター企画部長 (前国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室室長)、工博
Dr. Hideaki KAWASAKI

平山大輔**



国土交通省北陸地方整備局河川計画課 (前国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室主任研究官)
Daisuke HIRAYAMA

服部 敦***



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室主任研究官
Atsushi HATTORI

佐藤耕治****



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室研究官
Koji SATO