

月面でのセメントペーストの流動性予測と“その場”観察による研究

小松隆一(山口大), 吉崎泉(JAXA), 朝倉悦郎, 江上誠一, 田中久順, 下坂健一, 中村俊彦
(宇部三菱セメント研究所) 小澤良太郎, 塚本勝男(東北大)

Research on the prediction of the flow properties of cement paste on the lunar by using in-situ observation technology

Ryuichi Komatsu¹, Izumi Yoshizaki², Etsuro Asakura³, Seiichi Egami³, Hisanobu Tanaka³, Kenichi Shimosaka³, Toshihiko Nakamura³, Ryotaro Ozawa⁴ and Katsuro⁴

¹Yamaguchi University, ²JAXA, ³Ube-Mitsubishi Cement Research Institute, ⁴Tohoku University,

Corresponding e-mail: r-komats@yamaguchi-u.ac.jp

Abstract: The purpose of our WG is to find the simple and easy alumina cement manufacturing process on the moon with the regolith which is in richness on the surface of the lunar, and to establish the fluidity prediction technique of the cement paste on the surface of the lunar in order to predict the flow properties before hardening from setting of the concrete. Furthermore, we investigate to develop the in-situ observation technology to measure minute dimensions change such as the hydration of the cement precisely and in a short time. Based on these results, we can help the establishment of the building technology of the concrete structure on the surface of the lunar.

Key words; regolith, lunar cement, viscous flow, simulation, laser interference, alkali-silica reaction

1. はじめに

月面に構造物を建設する場合、建設資材の大部分は月にある材料を用いる必要がある。セメント及びコンクリートは月面でも重要な構造材料となるが、地球上の様にセメント主要原料である石灰岩が存在しない月では、月の材料を用いた簡便なセメント製造方法の検討が必要となる。また地球と比べ重力が6分の1の月面で固まらないコンクリート(フレッシュコンクリート)の製造開始時から硬化するまでの流動性状を予測する「月面での流動性予測手法の確立」も重要な研究項目となる。さらに月面でのコンクリート構造物建設では、長期間の試験等が困難であるので、セメントの水和等に伴う寸法変化を精密かつ短時間で測定する技術も開発する必要があり、位相シフト干渉による“その場”観察法の開発も検討した。これらセメント製造、コンクリート構造物の建設と構造物の物性変化(主に微視的な長さ変化)を検討することで、月面でのコンクリート構造物の建造技術の確立に必要な広範な基礎的データの蓄積を行った。

本報告では、これら主要な3つの検討結果について報告する。

2. 月面での簡便短時間でのセメント製造法の検討

月には地球の様に石灰岩が存在しないので、Caに富む通常のセメント製造は難しい。しかしCaに富む月の岩石として月の高地に広く存在する斜長岩とこの斜長岩起源レゴリス(regolith)が月でのセメント材料として注目されている。Linらは、この高地斜長岩起源のレゴリスを加熱熔融すると、その組成はアルミナセメント組成に近づくことを示した。[1] その組成をTable 1に示す。

Table 1 Chemical composition of baked lunar regolith (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Temperature
11	49	40	2000K
5	53	43	2200K

しかしこの組成の融液を急冷すると多くの場合はガラスになる。そこで今までのセメントクリンカー製造時の結晶成長促進法として注目される種結晶添加を検討した。[2] これはTable 1組成の融液にアルミナクリンカー鉱物(CaAl₂O₄ (CA) and Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (C₁₂A₇))を極く少量添加し、融液からの結晶成長を促進する方法である[2]。急冷条件でもアルミナセメントが製造できると、簡易的で短時間の製造が達成出来る。添加後のアルミナセメントクリンカーの成長は、その場観察装置で観察を行った。急冷時にガラス化した融液(Fig. 1)に、極く少量のクリンカー粉末を添加すると、結晶生成が

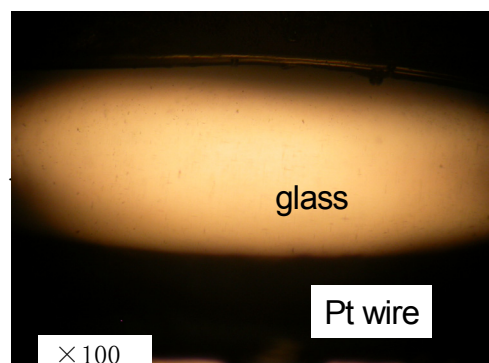


Fig.1 Quenched melt changed to glass.

観察された。(Fig.2) この結果は、アルミナセメント融液でもポルトランドセメントの様に、添加によりクリンカー鉱物の生成が促進されることを示し、本結果は月面でのセメント製造について簡便で高速な手法として有効である推定出来る。今後はアルミナセメントクリンカー生成量を増加させることを目的に、冷却速度、種結晶の添加量等のパラメーターについて検討する。

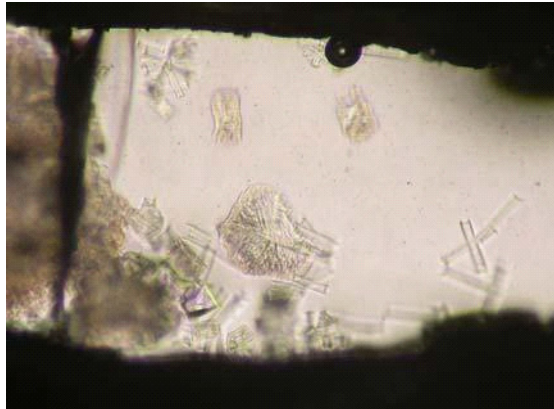


Fig.2 Crystals grown by the addition of clinker powder

3. 月面でのセメントペーストの流動性予測

月面でのコンクリート構造物検討の課題の一つとして、セメント混練物を構造物の型枠に流し終わるまで、所要の流動性を確保し、その流動性状の経時的挙動を把握し、制御できる技術を確認しておくなければならない。そこで、数多くある粘度理論の中で、現在最も先進的な服部・和泉理論(HI理論)を使用して、水とセメントの混練物であるセメントペーストの月面での流動性状を、温度変化と重力の面から検討した。

分散系の粘度は、分子間摩擦粘度 η_1 、液体分子・粒子間摩擦粘度 η_2 および粒子間摩擦粘度 η_3 の3種類の物質間の摩擦粘度からなる。セメントペーストのような濃厚分散系の粘度は、粒子-粒子間の摩擦粘度 η_3 に支配されるので、溶媒の分子-分子間の摩擦粘度 η_1 および溶媒分子-粒子間粘度 η_2 は無視できる。その結果、HI理論の一般粘度式は、次式で示される。[3]

$$\eta_3 = B_3 \cdot n_3^{2/3} \cdot \left\{ \frac{U_0 \cdot (\gamma \cdot H \cdot t^2 + 1) + H \cdot t}{(H \cdot t + 1)(\gamma \cdot t + 1)} \right\}^{2/3}$$

B_3 : 粒子間摩擦係数(N・s)

n_3 : 1次粒子数/単位体積(m^{-3})

U_0 : 結合定数(測定開始時の結合数/一次粒子数)

γ : 剪断速度(s^{-1})

H : 凝集速度定数(s^{-1}) T : 時間(s)

時間とともにセメント粒子は凝集し、その結果粘度は増加していく。そのときの凝集速度定数 $H(s^{-1})$ は、次式で示される。

$$H = \frac{8kT \kappa a \cdot n_3}{3\eta_1 e^{V_{max}/kT}}$$

k : ボルツマン定数 $1.3806503 \times 10^{-23}$ ($J \cdot K^{-1}$)

T : 絶対温度(K)

κ : デバイヒュツケル定数(m^{-1})

η_1 : 溶媒粘度(Pa・s)

V_{max}/kT : DLVO理論曲線の極大値(-)

V_{max}/kT は、DLVO理論(Derjaguin Landau Verwey Overbeek:コロイド分散系における安定性に関する理論)における粒子間相互作用ポテンシャルの極大値で、以下の式の極大値である。

$$V = V_R + V_A$$

V_R : 反発ポテンシャルエネルギー(静電的反発力) V_A : 吸引ポテンシャルエネルギー(van der Waals力)

反発ポテンシャルエネルギー V_R については、服部・和泉の報告¹⁾をSi単位系に換算し次式で示される。

$$V_R = 2\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot a \cdot \zeta^2 \cdot \ln(1 + e^{-\kappa D})$$

D : 粒子表面間距離 (m)

ζ : 粒子の表面電荷(ゼータ電位)(V)

吸引ポテンシャルエネルギー V_A は次式で示される。[4]

$$V_A = -\frac{A}{6} \cdot \left\{ \frac{2}{s^2} + \frac{2}{s^2 - 4} + \ln \frac{s^2 + 4}{s^2} \right\}^{2/3}$$

$$s = 2 + D/a$$

A : Hamaker 定数 (J)

Table 2 セメントの物性値

セメントの密度	$\rho_2(kg/m^3)$	3150
比表面積	$S(m^2/kg)$	320
粒子半径	$a(m)$	2.97619×10^{-6}
粒子質量	$M(kg)$	3.47841×10^{-13}
粒子間摩擦係数	$B_3(N \cdot s)$	2.81334×10^{-8}
水/セメント重量比	W/C(-)	0.5
Hamaker 定数	$A(J)$	1.767×10^{-21}
電荷素量	$E(C)$	$1.60217733 \times 10^{-19}$
アボガドロ数	$N(mol^{-1})$	6.0221415×10^{23}
ボルツマン定数	$k(J/K)$	$1.3806503 \times 10^{-23}$
イオン強度	$I(mol/l)$	0.37
真空の誘電率	$\epsilon_0(C^2 \cdot J^{-1} \cdot m^{-1})$	8.854×10^{-12}

これら物性値を用いてまず温度を変化させた場合のシミュレーションを行った。温度を変化させると、誘電

率、水の粘度、密度は明らかに変化を受け、ゼータ電位も影響される。このゼータ電位の変化を色々な条件にして、粘度の時間変化を求めた。計算結果の例をFig.3 に示す。

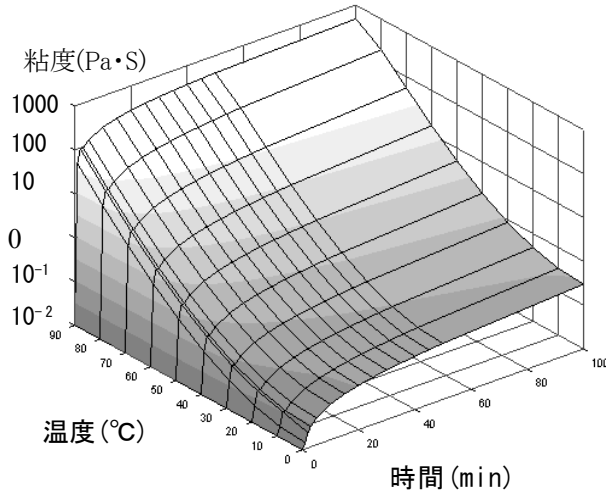


Fig.3 Viscosity changes with temperature and time under the condition of $\zeta=0.5\text{mV}/10^\circ\text{C}$

この計算結果に限らず全ての条件で、温度が上がると粘度は上昇し、また一定温度では時間が経つと粘度は増加する計算結果が得られた。今後はゼータ電位の変化を詳細に調べたいことを考えている。また粘度についての重力の影響についても検討した。重力の影響が粘度に影響するかはまだ議論が必要であるが、粘度式の重力項を全てつき重力に変えて計算すると、月重力下想定で 10 分後及び、100 分後の粘度は、地球表面での粘度の 35.2%となった。地球表面の重力に対する割合が6分の1であるので、重力ほどは影響を受けていない結果となった。この後さらに検討を進めたい。

4. レーザー干渉法によるコンクリート構造物の微小膨張収縮変化の迅速測定

地上、月面上でのコンクリート工学の主要な課題となるアルカリ骨材反応、収縮などのコンクリートの特性に関する研究には長時間の測定を要する。しかし、月面では長時間の測定は困難であると考えられる。そこで我々はレーザー干渉法による微小変化の迅速測定を検討した。地上でも問題になっているコンクリートのアルカリ骨材反応は、骨材中の火山ガラス成分が高アルカリ性のセメント水溶液に溶けて膨張性のゼルを形成する反応であり、コンクリートの亀裂、破壊をもたらす。

造にはアルカリ骨材反応は避けることが出来ない不具合であると考えられる。アルカリ骨材反応はコンクリート作製後数年後にクラック等が発生して明らかになることが多く、反応性の骨材を使用しないことが肝

要である。この反応性の試験には、モルタルに試験骨材を練りこんでその膨張量を測定するモルタルバー法[5]が用いられるが、通常試験期間は半年である。このモルタルバー法に変わる新しい迅速測定法が開発されれば、月面だけでなく地上でのコンクリート工学の進展に大きく寄与すると考えられる。Fig.4 に開発したコンクリートの微小変換測定用装置の概略図を示す。

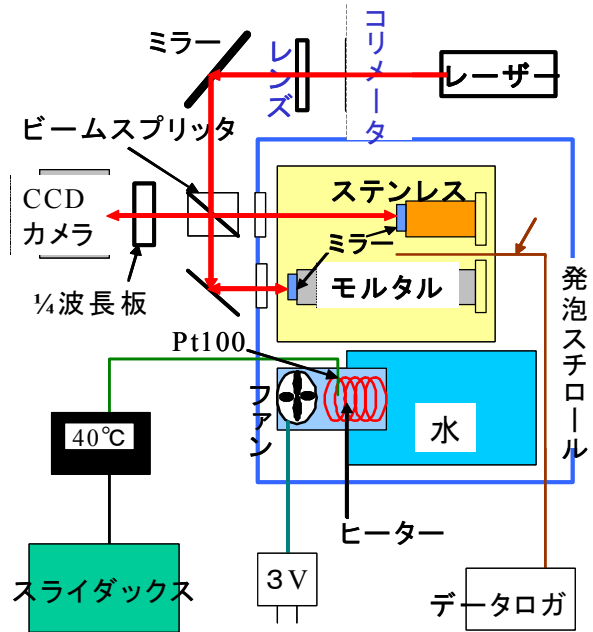


Fig.4 Schematic diagram of laser interference instrument developed for the measurement of expansion due to alkali silica reaction.

この装置はステンレスを基準物質に干渉縞を測定することで、数+nm サイズの迅速な測定が可能である。判定に半年を要するモルタルバー法で判定された膨張性岩石を用いたモルタル片の膨張挙動をこの干渉計で調べてデータベース化を行い、試験岩石のこのレーザー干渉計での膨張挙動と膨張岩石のそれを比較することで、短時間で膨張履歴判定が出来る可能性がある。Fig. 5にレーザー干渉計の測定例を示す。

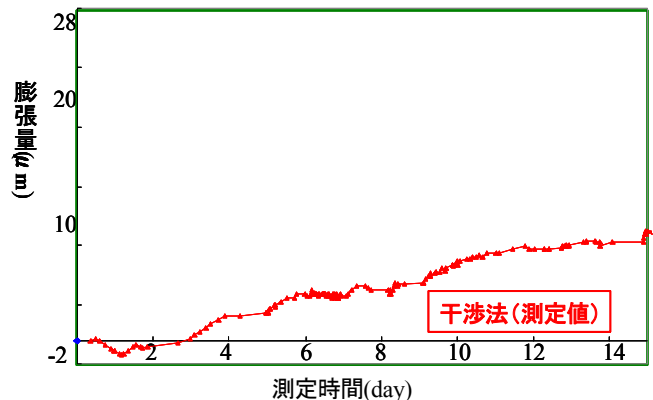


Fig.5 An example of measurement result.

Fig.5 に示すように連続的している測定曲線は、測定は十分な精度で行われたことを示し、また 0-3 時間で見られるように測定開始初期の収縮挙動も測定出来、十分な制度での測定が行われていることを示している。セメントコンクリートの重要な特性の一つである膨張挙動測定に干渉計を用いた検討は本研究が初めてであり、月面での測定に限らず地上での実際のコンクリート特性評価にも用いられる可能性もある。主に装置開発を行っていたので測定例は現状あまり多くないが、今後は多くの試料での測定を行い、反応性岩石、安全(非反応)岩石の膨張挙動を明らかにすることで、この測定法はコンクリートで問題になっているアルカリ骨材反応及び収縮等の研究に於いて、新しい判断基準になり得る手法である。

5. まとめ

月面でのコンクリート構造物の建造について、1)セメント製造(月面での高地レゴリスによるセメントの簡易製造実験)、2)コンクリート固化(セメントペーストの流動性のシミュレーション計算)及び 3)コンクリート特性の径時変化(コンクリートの膨張挙動のレーザー干渉計による迅速測定装置の開発とそれを用いた測定)について、現状の検討結果についてまとめた。

本ワーキンググループは2年目であり、1年目はやや暗中模索の感があったが、実験結果を蓄積することが必要との継続審査結果にもあったように、月面でのコンクリート構造物建設に関わる1)-3)の一連の作業で、今まで報告されたことが無い実験、計算を行うことが出来、月面だけでなく地上でも使用できる装置も開発出来つつある。今後はさらに研究を推進し、有意義な実験データを蓄積したい。

References

- [1] T. D. Lin, Resources of Near-Earth Space: Abstracts p 39 (1991).
- [2] R. Komatsu, K. Izumihara, E. Asakura, Cement Science and Concrete Technology **55** . p.2-8 (2001).
- [3] 服部健一他, セメント・コンクリート論文集 No.50, p.192 (1996).
- [4] 服部健一他, 新理論による濃厚分散系のレオロジー計算, p6(1990)
- [5] JIS A 1146(骨材のアルカリシリカ反応の試験方法(モルタルバー法)).