
バンドン工科大学（インドネシア） 研修報告書

OM および OES を用いた Al 鋳物の微細構造および機械的特性調査

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 柏木 仁志

1. はじめに

2023年8月23日から9月23日の間、インドネシアのバンドン工科大学において共同研究を行った。その報告を以下に示す。

2. 研修/共同研究課題の決定

本研究室では、実験およびシミュレーションや機械学習を用いた新規材料開発の新手法の提案を行っている。インドネシアのバンドン工科大学はインドネシアにおける最も優れた理工系大学の一つであり、その中でも FTMD と呼ばれる学科では材料学的な研究が盛んに行われている。そこで、本研究では Al に Ti, Zr, Si, Mg の各元素を 2 元系および 3 元系となるように添加し、シミュレーションで得られた降伏応力と実験で得られた硬さを用いて評価を行った。

3. 研修/共同研究スケジュール

8月22日 インドネシア入国
8月23日～9月23日 研究および中間発表
9月25日 インドネシア出国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名: Institut Teknologi Bandung, ITB
所在地: Jl. Ganesha No.10, Lb. Siliwangi, Cobleng, Kota Bandung, Jawa Barat 40132
Indonesia
指導教員: Dr. Asep Ridwan, Dr. Aditianto Ramelan

5. 研修/共同研究の内容

5.1 研究の概要

アルミニウム合金は軽さや高強度、成型性の高さから自動車や航空宇宙の分野において広く用いられている。合金の強化機構としては固溶強化が挙げられ、微細なクラスターが形成されることで、合金元素の種類や添加量によって合金の機械的特性に影響を与えることが知られている。本研究室で開発したシミュレーションソフトを使うことで、このクラスターの形状と降伏応力を予測することができる。そこで、本研究では実験で得られた結果とシミュレーションの結果を比較することでシミュレーションが実験結果を再現できるかどうか検証するために実験的に 6 種類のアルミニウム合金の機械的特性を調査した。

5.2 実験手法

実験合金として二元系の Al-Ti, Al-Zr, Al-Si, Al-Mg, 三元系の Al-Ti-Zr, Al-Si-Mg を作製した。目標添加元素含有量はそれぞれ 0.5 at% である。三元系の場合、2 種類の添加元素それぞれの目標添加元素含有量は 0.25 at% ずつとした。重力鋳造には研究室所有の電気炉を用いた。電気炉の温度を 900°C まで昇温させた後、適切な母合金と高純度アルミニウムの地金をるつぼに入れ、るつぼを電気炉で加熱した。るつぼの中身が完全に溶けたことを確認した後、ステンレス棒を使つてるつぼ内を十分攪拌した。攪拌後しばらく加熱し鋳型に注ぎ入れた。るつぼは $\phi 50$ mm, 高さ 90 mm,

電気炉は $\phi 150$ mm, 鋳型は $23\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ であった. その後試料を空冷させ, 溶体化処理を行った. 溶体化処理においては 600°C で5時間の条件で保持し, 処理後水冷した. 溶体化処理後, 評価用試験片への加工と硬さ試験を行った.

組織観察として光学顕微鏡 (OM) および固体発光分光分析装置 (OES) を用いた. 光学顕微鏡では, はじめに各試料に対して表面研磨およびエッチングを施した. 表面研磨は 600 番, 1200 番, 2400 番の研磨紙で順に研磨し, その後 $3\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$ のダイヤモンドスラリーで順に鏡面研磨を行った. OES は Politeknik Manufaktur Bandung 所有の Applied Research Laboratories 3460 を利用した. 照射直径は直径約 7 mm であった. 測定は各試料 2 回ずつ行った.

また, 溶体化処理後の試料合金の添加元素と硬さの関係を調査するために, 試料合金それぞれに対してマイクロビッカース硬さ試験機を用いた. 硬さ試験の条件は各試験片に対して 0.2 kgf で 10 sec の条件で 7 か所ずつ行った.

5.3 結果と考察

作製した試料に対してエッチングを施し, OM を用いて組織観察を行った. Fig. 1 に (1)Al-Ti, (2)Al-Zr, (3)Al-Ti-Zr, (4)Al-Mg, (5)Al-Si, (6)Al-Mg-Si の 5 倍で観察した結果を示す. いずれの試料からも結晶粒界を確認することができる. 特に Al-Ti-Zr, Al-Mg においては結晶粒のサイズは他の試料に比べて小さかった. Fig. 2 に (1)Al-Ti-Zr (2)Al-Mg の 20 倍で観察した結果を示す. また, OES に用いた試料については Fig. 3 に示す. Table 1 に OES の測定結果を示す. いずれの試料においても測定結果は目標添加元素含有量を満たせていなかった. 特に Zr の添加がほとんど確認できなかった. これは Zr の拡散係数が低いことが原因であると考えられる. また, その他の元素についても熱処理時間をより長くすることや蒸発を防ぐためにるつぼを密閉することが必要だと考えられる. また, Fe の添加も確認された. これは攪拌の際にステンレスの棒で攪拌していたことが原因である. より耐熱温度の高いアルミナなどのセラミックスを利用することでこれらの課題解決に役立つと思われる.

次に, Fig. 4 にビッカース硬さ試験結果のグラフを示す. これは, 計 7 回の平均値を表したものである. 硬さは Al-Ti, Al-Ti-Zr, Al-Zr, Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Si の順で大きくなっていった. グラフには標準誤差を示しており, ばらつきが小さいことからどの箇所でも均一な組成であったことがわかる. シミュレーションにおいて, 降伏応力を算出することができるが本実験では硬さを計測している. 各種 Al 合金においては線形的な相関があることが先行研究で数多く報告されており, シミュレーションの定性的な評価という点で今回は硬さを用いる. 先行研究で得られた添加元素 0.5 at\% , 温度 0 K の時の Al-Si, Al-Ti, Al-Zr, Al-Ti-Zr のシミュレーション結果については Table 2 に示す. この結果より, 硬さは Al-Si, Al-Ti, Al-Ti-Zr, Al-Zr の順で高くなると予測されるが硬さは Al-Ti, Al-Ti-Zr, Al-Zr, Al-Si の順で高くなっていることがわかる. これは Al-Si に比べて Al-Ti, Al-Ti-Zr, Al-Zr の添加元素量が少なかったため硬さに大きく影響したと考えられる. そのため再度 OES 結果をもとにシミュレーションを実行し, 比較することで解決できると考えられる. Al-Ti, Al-Ti-Zr, Al-Zr についてはシミュレーション結果と同じ順序を示しており, Ti および Zr の同族元素においてシミュレーションの定性的な評価はできたと考えられる.

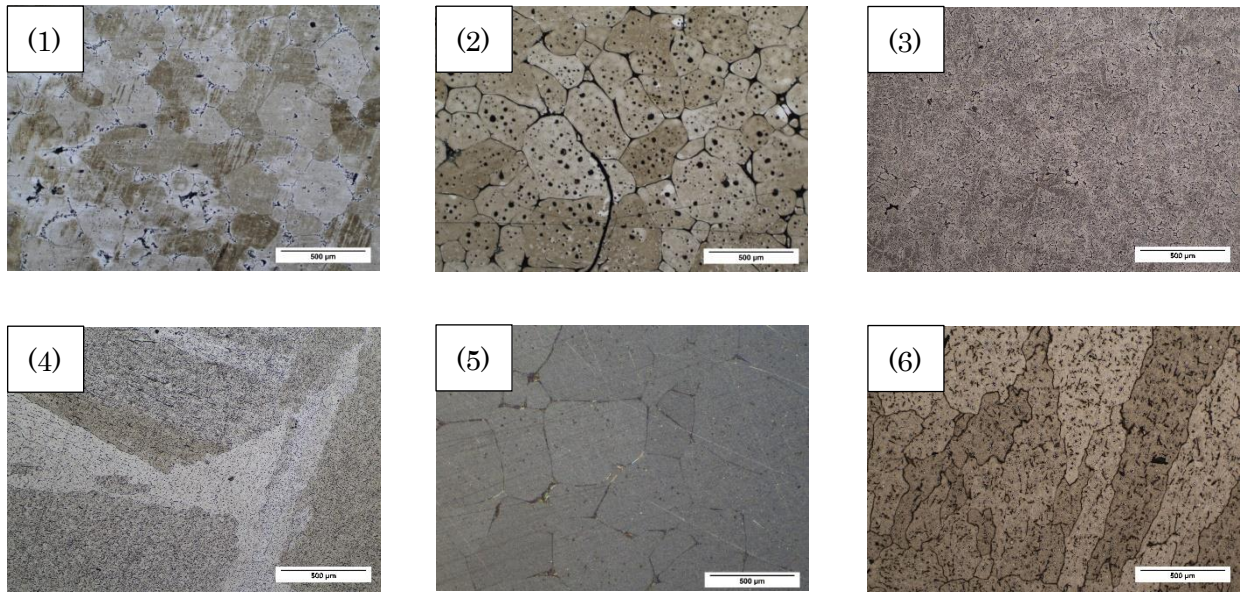


Fig.1 OM による組織観察画像(×5 倍)

(1)Al-Ti, (2)Al-Zr, (3)Al-Ti-Zr, (4)Al-Mg, (5)Al-Si, (6)Al-Mg-Si

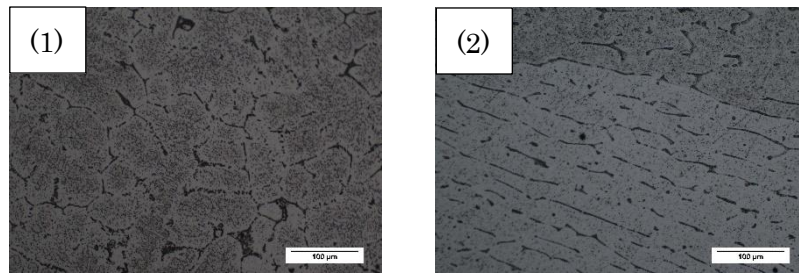


Fig.2 OM による組織観察画像(×20 倍)

(1)Al-Ti-Zr, (2)Al-Mg

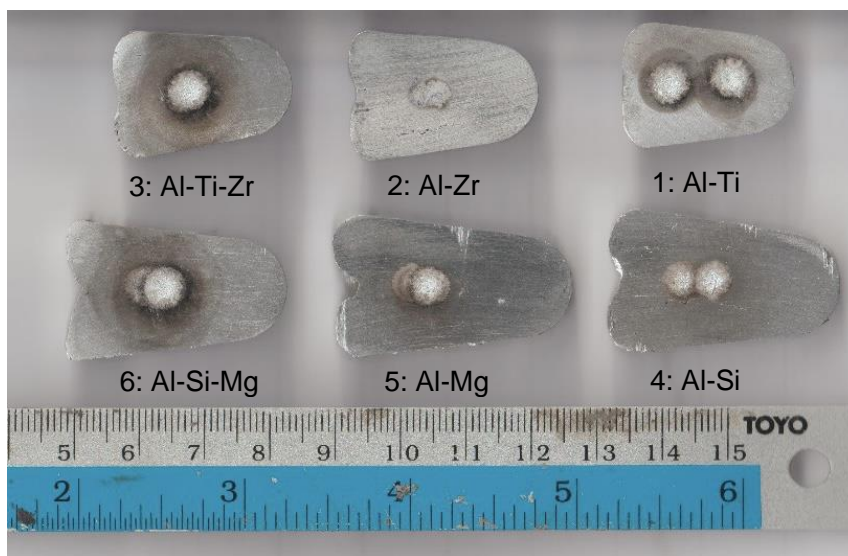


Fig.3 OES に用いた試料

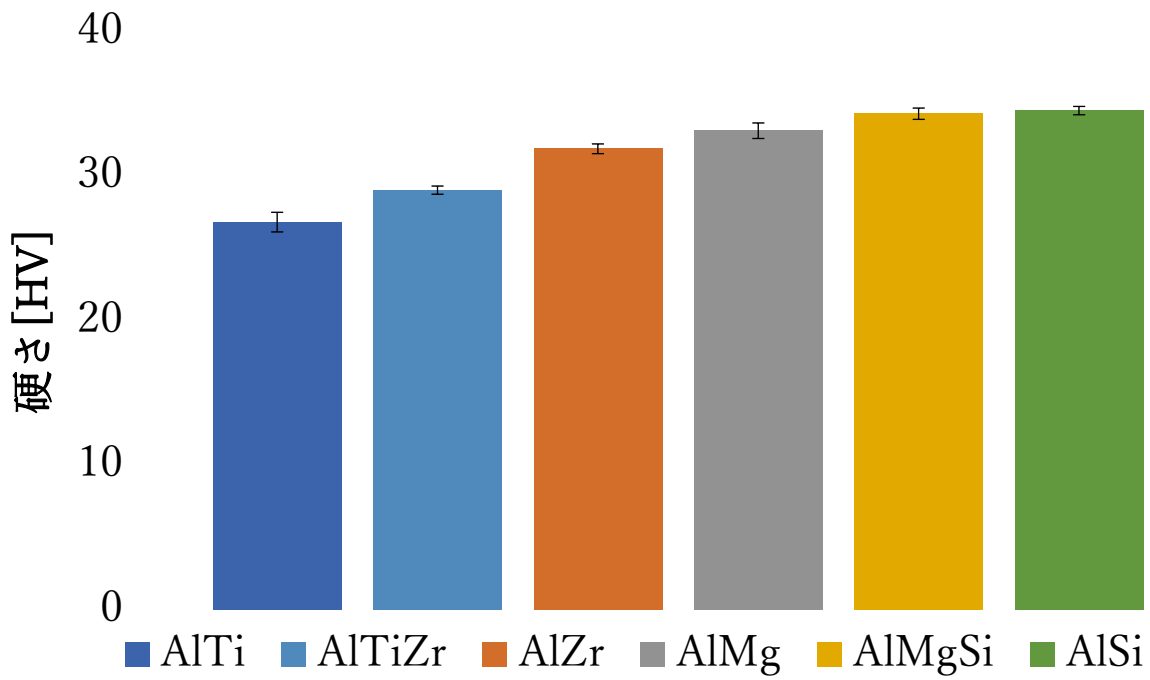


Fig. 4 ビッカース硬さ試験結果

Table 1 OES の測定結果 [at%]

	Ti	Zr	Si	Mg	Fe	Al
Al-Ti	0.322	0.016	0	0.037	0.188	Bal.
Al-Zr	0.019	0.194	0	0.039	0.246	Bal.
Al-Ti-Zr	0.193	0.115	0.010	0.039	0.153	Bal.
Al-Si	0.126	0.057	0.470	0.045	0.137	Bal.
Al-Mg	0.010	0.006	0	0.283	0.129	Bal.
Al-Si-Mg	0.016	0.006	0.229	0.207	0.236	Bal.

Table 2 シミュレーションで求めた降伏応力の計算結果[MPa]

Yield strength	Al-Si	Al-Ti	Al-Zr	Al-Ti-Zr
	63.52	136.2	182.8	158.1

6. まとめ

1ヶ月という短い期間ではありましたが、今回の海外共同研究プログラムを通して海外の研究機関で自身の研究について議論する貴重な機会を頂きました。言語や価値観の全く異なる環境の中での生活では、自ら積極的に学生に話しかけていきコミュニケーションを図ることを意識しました。そのおかげで現地の人々の文化や、特に宗教についての考え方を深く知ることができました。また、常に英語を用いて研究を行ったことで英語に対する羞恥心を取り除くことができ、帰国後も研究室の留学生との会話や英会話サークルに参加するなど、留学生のコミュニティに気軽に入れるようになりました。

7. 謝辞

本研究において、ご指導してくださった Asep Ridwan 先生、Aditianto Ramelan 先生、並びに研究面のみならず現地生活の手助けをしていただいた Ritzmi さん、Aozora さん、Ully さんをはじめとする ITB の学生の方々、また特に研究に際しましてサポートしていただいた Rizky さんをはじめとする技術者の皆様にも厚く御礼申し上げます。また、このような貴重な機会を与えていただいた佐々木元教授、杉尾健次郎准教授に深く感謝申し上げます。

最後に、海外共同研究プログラムをサポートしてくださいました実行委員会の諸先生方および国際事業担当の皆様にも心から御礼申し上げます。
