福祉用具用チタン合金の研究開発

池田 勝彦*

1. はじめに

厚生労働省のホームページ⁽¹⁾に、各種統計を表およびグラフで提供するページがある。その中に、年次別に年齢層を3段階に分け、1999年までの統計値および2000年以降の予想値の絶対値およびそれらの百分率表示した表が掲載されている。絶対値による方を図化すると図1のようになる。2020年には、65歳以上の人口が約3000万人、総人口の27%に達し、少子化の影響も受け、2050年には30%となる。同年には、14歳以下の人口は約1000万人となり、労働年齢とされる15歳～64歳の人口も6000万人程度となる。さらに継続的に少子化が進めば、64歳以下の人口はさらに減少することになる。また、2000年以降の予想人口についてはまだ公表されていないが、15歳～64歳の範囲でも各年齢別にその人口を取り、年齢ごとの人口分布を考えると、高齢者側に人口の極大があると容易に予想できる。少子高齢化は介護を必要とする高齢者の増加はもちろん、介護する側(介助者)の高齢化も進むことになる。これを「老老介護」という表現でいろいろなメディアで取り上げられている。介護用具を含む福祉用具は使用者に対して「やさしく」なければならない。つまり、介護用具の場合、介護を受ける人に「やさしい」のは当然であるが、介護する人にとっても「やさしく」なければならない。このように福祉用具に対する認識は、年々高まりつつあり、また福祉用具のマーケットも拡大しつつあると言える。

このような社会状況を踏まえて、経済産業省の中に介護用具を含む福祉用具に対する懇談会が設置され、積極的に検討

図1 年齢3区分による総人口、将来推計人口および構成割合の年次による変化⁽¹⁾。

が行われている⁽²⁾。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の医療・福祉機器関連事業として、福祉用具実用化開発推進事業やウェルフェアテクノシステム関連事業として助成も行っている⁽³⁾。

厚生労働省においても、その監督下にある財団法人テクノエイド協会(1987年(昭和62年)設立)⁽⁴⁾が、福祉用具の研究開発等の推進、福祉用具の試験評価、情報の収集および提供ならびに義肢装具士や福祉用具プランナーの養成等を通じ、障害者および高齢者の福祉増進に寄与することを目的として設立された。この設立目的を達成するために、福祉用具の研究・開発に長寿社会福祉年金を原資として活発な助成活動を行っている⁽⁴⁾。

文部科学省では、理科教育および産業教育審議会の答申を

* 関西大学助教授；工学部材料工学科(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

Development of Titanium Alloys for Welfare Goods; Masahiko Ikeda (Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, Suita)

Keywords: beta titanium alloys, solution treated state, low cost, iron, chromium, ferro-chromium alloys, tensile properties, welfare goods, wheel chair

2002年2月8日受理

受けて専門高校に「福祉」科を設置することを決定⁽⁵⁾し、既存の大学でも「福祉」系学科が数多く創設されている。このように、日本の少子高齢化に向けた福祉用具に関する研究・開発は産官学を問わず活性化しつつある。

2. チタンとその合金

福祉用具に用いる材料の具備すべき特性はその用具の目的や用途によって多岐にわたり、全てをここで掲げることは困難であると思う。そこで、本解説では、チタンとその合金が中心材料であることから、現在チタンとその合金が使用されている福祉用具について、チタンとその合金が持つ特性と関連させて簡単に説明する。これらの詳細については、本特集で、それらを含む福祉用具に対して豊富な知識をお持ちの著者によって述べられているので、その解説を参照していただければ考える。

チタンの特性としては「軽くて、強くて錆びない」ということが上げられる⁽⁶⁾。事実、これがチタンの持つ特性を言い表しているといえる。さらに、チタンの持つ「生体毒性および金属アレルギーを示さない」⁽⁷⁾という特性は他の金属材料が持ち得ない特性であり、高齢者や障害を持つ方々にとっても非常に重要な特性であるといえる。これらの特性を活かせる福祉用具として、車椅子が上げられる⁽⁸⁾。車椅子は自走⁽⁸⁾（搭乗者が自らの力で移動させること）であれ介護用⁽⁸⁾であれ、それを運搬する必要がある。この運搬は介護（介助）者にとって非常に負担であることは容易に想像でき、これが介護（介助）者の身体に非常に負荷を与えていることも事実であろう⁽⁸⁾。そこで、車椅子の軽量化は非常に重要である。また、実際肌に触れるハンドリムなどは生体にやさしい材料であり、良好な耐食性、特に耐塩水腐食性が高いことが望まれる⁽⁸⁾。これらの特性を全て有している材料としては、チタンとその合金が最適であることは明らかである。しかし、軽量化ではアルミニウム合金も有力な材料あり、事実その価格から一般用車椅子フレームの主要金属材料として使用されている⁽⁴⁾。しかし、スポーツ用（競技用）車椅子の場合は、競技をスムーズに行える等のより高度な特性を要求されることから、さらなる軽量化と高強度化を必要とし、チタンとその合金、特に工業用純チタンが主流であるといえる⁽⁹⁾。障害のある方の社会参加を考えた場合、スポーツ用（競技用）車椅子のコスト低減などを含む更なる研究・開発が重要であろう。また、電動車椅子の場合は、フレームが支えるべき質量が搭乗者はもちろんであるが、駆動部、制御部および電池も含むため、自走用車椅子に比べその質量は大きくなり、高強度化と高靱性化が必要となり、チタン合金の出番であると考えられる。

チタンとその合金が持つ良好な耐食性と無金属アレルギー特性は直接使用者の肌に触れる可能性の高い入浴用品⁽¹⁰⁾、例えばシャワーチェアや入浴装置のフレームなど、さらにトイレ関連用品⁽¹⁰⁾までに応用可能であろう。さらに、良好な冷間加工性と熱処理性を併せ持った β チタン合金は福祉用

具、特に移動機器の性能を飛躍的に向上させる潜在的能力をもった材料であるといえる。

3. チタンとその合金の価格

上述したようにチタンとその合金は、他の金属材料では持ち得ない非常に優れた特性を示すすばらしい金属材料である。しかし、その価格は他の構造用金属材料と比較すると非常に高価である。次に、日本チタン協会から得たデータを元にチタンの価格について以下に簡単に説明する⁽¹¹⁾。

現在、一般的に使用されているスポンジチタンの価格は1000円/kg程度で、これを原料として溶製された純チタン展伸材（工業純度、例えば、板材）のそれは2500～3000円/kg程度である。

チタン合金の代表であるTi-6 mass%Al-4 mass%V合金（合金チタン展伸材）の価格は5000～10000円/kg程度である。

その他のチタン合金（例えば、Ti-15 mass%V-3 mass%Cr-3 mass%Sn-3 mass%Al合金）では、さらに高価で40000～60000円/kg程度となる。

純チタン展伸材の価格は、一般的に使用されているステンレス鋼のその約10倍である⁽¹¹⁾。また、アルミニウム合金（7000系合金、Al-Zn-Mg合金）と比較しても、約2～3倍と予想される。

この高価格が上述したすばらしい諸特性を持つチタンとその合金の用途拡大を阻害す最大の原因であるといえる。国内外のチタン研究者は、この高価格を解消するための研究を積極的に行っている。次に、低コストチタンの研究について、合金設計の面から解説し、現在、著者らが取り組んでいる低コスト化 β チタン合金の研究について説明を行いたいと思う。

4. 低コストチタン合金の研究

低コストチタン合金の研究を全て網羅することは著者の能力と紙面の制限から不可能であるので、著者の知る範囲に留めることをお許し願いたい。

1992年にサン・デイゴで開催された第7回チタン世界会議で、TIMETのBania氏らによって発表された代表的チタンTi-6Al-4V合金に代わる低コストチタン合金⁽¹²⁾としては、高価なVに変えてFeが添加された合金が最初のように思う。これはもちろん $\alpha+\beta$ チタン合金に分類されるチタン合金である。次に、新日本製鐵の藤井氏らによって発表されたTi-6Al-4V $\alpha+\beta$ 合金に代わるものとして、鉄と合金元素として侵入型元素である酸素と窒素を添加したTi-Fe-O-N合金⁽¹³⁾が国内外で発表された。 β チタン合金については、TIMETが開発した合金として、 β 安定化元素としてフェロモリブデンを使用したTi-4.5 mass%Fe-6.8 mass%Mo-1.5 mass%Al合金（TIMETAL®LCB）⁽¹⁴⁾が発表された。また、NKKの大内氏らが開発した合金であるフェロバナジウムを添加したTi-8 mass%V-5 mass%Fe-(1～3) mass%Al合

金⁽¹⁵⁾が発表された。また、*TIMETAL*®LCBのMoをVでMo当量を基にして置換されたと思われるTi-10 mass%V-4.5 mass%Fe-1.5 mass%Al合金⁽¹⁶⁾がBhattachrjee氏らによって報告されている。これらの報告から、チタン合金の低コストの鍵は β 安定化元素を従来から使用されている高価なVやMoから鉄に変更することであるようである。つまり、鉄が悪影響を起こす不純物であるとするか、積極的に合金元素として捉えるかの違いであると思える。ただし、以上の報告では、 β チタン合金を設計する場合、VやMoの添加は避けられないようにも思える。

著者らのグループでは、タブーとも言うべきものを「無視」した合金設計を行った。つまり、VやMoを鉄と複合添加せず、鉄とクロムを複合添加するという「破天荒」な合金設計を行った。すなわち、Ti-Fe-Cr系合金の設計である。さらに、鉄とクロムを複合添加するのであれば、製鋼用材料であるフェロクロムが使用できるという展開も可能な合金設計であった。

限られた紙面では、Ti-Fe-Cr系合金の開発経緯について、その全てを述べることはできない。それらの内容についてご興味のある読者の方々のために、著者らのグループが公表している論文⁽¹⁷⁾⁻⁽²⁰⁾を参考文献として記載させていただくことにする。ここでは鉄とクロムを複合添加したTi-4.3Fe-7.1Cr合金(各数字は目標組成であり、全てmass%である)について、主に引張特性を中心に説明を加え、上述した他の低コスト β チタン合金のそれらとの比較を試みる。一見奇異に見える目標組成は使用したフェロクロム合金の組成と1原子当たりの平均価電子数(e/a)が4.28になるような目標組成を設定したためである。 e/a を4.28にした理由としてはTi-Fe2元合金で良好な強度-延性バランスを示した合金の組成が8 mass%であったことに由来する⁽²⁰⁾。表1に、用いたフェロクロム合金の組成を示しておく。もちろん主添加元素の鉄とクロム以外にシリコンなどの不純物が含まれるが、これらまたはこれら不純物が起因となる化合物が室温での引張特性に目立った悪影響を与えているという結果は得ていない⁽²⁰⁾。

引張試験は β 単相領域の温度で溶体化処理した試料を用いて、室温で行った。溶体化処理温度は1173 K(900°C)とした。引張試験により得た引張特性と絞りの関係を図2に示す。図中には*TIMETAL*®LCB⁽¹⁴⁾およびTi-10V-4.5Fe-1.5Al合金⁽¹⁶⁾の溶体化処理状態でのデータも示した。破線は、河部氏らによって報告⁽²¹⁾されている実用 β チタン合金の各種処理状態での引張強さと絞りのデータから得られた強度-延性バランスの上限と下限を示している。著者らが開発したTi-4.3Fe-7.1Cr合金のデータはもちろんであるが、他のFe-Mo系、Fe-V系低コスト β 合金のデータも全てこのバンド範囲に入っている。3種類の低コスト β 合金を比較した場合、引張強さはTi-10V-4.5Fe-1.5Al合金⁽¹⁶⁾で980 MPaと若干低い、Ti-4.3Fe-7.1Cr合金と*TIMETAL*®LCB(Ti-4.5Fe-6.8Cr-1.5Al合金)⁽¹⁴⁾ではほぼ1050 MPaである。絞りはFe-Mo系、Fe-V系 β 合金では40%程度であ

表1 使用したフェロクロム合金の組成(mass%)。

C	Si	Fe	P	S	Cr
0.03	0.085	37.7	0.0017	0.004	Bal.

図2 Ti-4.3Fe-7.1Cr合金、Ti-4.5Fe-6.8Cr-1.5Al合金(*TIMETAL*®LCB)⁽¹⁴⁾およびTi-10V-4.5Fe-1.5Al合金⁽¹⁶⁾の溶体化処理状態での強度-延性バランス。破線は開発された実用 β チタン合金の各処理状態での強度-延性バランスの上限と下限を示している⁽²¹⁾。

るが、Ti-Fe-Cr系合金は約60%であり、延性の点ではTi-Fe-Cr系低コスト β チタン合金は他のFe-Mo系およびFe-V系低コスト β チタン合金より優れていると言える。

低コストであると言っているが、実際にはどの程度低コストが実現できたかが問題である。Ti-4.3Fe-7.1Cr合金の素材コストはスポンジチタンのそれより7%程度安価になる⁽²²⁾。これが魅力的かどうかは問題であるし、製造コストについては、高鉄含有による偏析等の対策が未解決であるので、明確で無いのが現状である。

5. 最 後 に

福祉・介護用具へのチタンとその合金への応用は被介護者、介護者、用具メーカ、もちろん素材メーカにとっても魅力的であると思う。この非常に魅力的な材料であるチタンとその合金を広く福祉・介護用具や共用品へ応用していただくには、やはりその価格の低減が避けられない問題である。この問題について、全てのチタン研究者が積極的に取り組んでいることも事実である。21世紀には、チタン研究者の弛まぬ努力によって価格革命が実現され、チタンが身近な金属となり、福祉用具(共用品⁽¹⁰⁾)への積極的な応用が勧められていることを確信している。

文 献

- (1) 厚生労働省ホームページ, HP address; www.mhlw.go.jp.

- (2) 経済産業省ホームページ, HP address; www.meti.go.jp/index.html.
- (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), HP address; www.nedo.go.jp.
- (4) 財団法人テクノエイド協会, HP address; www.techno-aids.or.jp.
- (5) 文部科学省, HP address; www.mext.go.jp.
- (6) 日本チタン協会編: チタンの世界, 日本チタン協会, (1995), pp. 4-5.
- (7) 新家光雄: 機能材料, **20**(2000), 36-44.
- (8) 池田勝彦, 加藤浩史: 軽金属, **51**(2001), 290-296.
- (9) 加藤浩史: チタンの民生品への応用—福祉および福祉スポーツへの応用—, シンポジウム「チタンとその金属の新展開」, 日本金属学会, (2000.7), pp. 17-20.
- (10) 福祉用具・製品開発の新展開, 関東レリサーチセンター編, (2000), pp. 228-251.
- (11) 伊藤 均(日本チタン協会): 私信, (2000).
- (12) P. J. Bania, A. J. Hutt, R. E. Adams and W. M. Parris: *Titanium '92 Science and Technology*, ed. by F. H. Froes and I. L. Caplan, TMS, (1993), pp. 2787-2794.
- (13) H. Hujii, S. Soeda, M. Hanaki and H. Okano: Development of High-Performance, Low Alloy Ti-Fe-O-N Series, *Titanium '95*, ed. by P. A. Blenkinsop, W. J. Evans and H. M. Flower, IoM, London, (1995), pp. 2309-2316.
- (14) P. J. Bania: Beta Titanium Alloys and Their Role in the Titanium Alloys, *Beta Titanium Alloys in the 1990's*, ed. by D. Eylon, R. R. Boyer and D. A. Koss, TMS, Materials Park, 1993, pp. 3-14.
- (15) K. Yamada, A. Ogawa, C. Ouchi and D. Eylon: Mater. Trans., JIM, **37**(1996), 855-859.
- (16) A. Bhattacharjee, V. A. Joshi and A. K. Gogia: *Titanium '99 Science and Technology*, ed. by I. V. Gorynin and S. S. Ushkov, CRISM "Prometey", St. Petersburg, (2000), pp. 537-544.
- (17) 小松伸也, 池田勝彦, 杉本隆史, 亀井 清, 井上幸一郎: **55**(1991), 491-496.
- (18) 池田勝彦, 井上幸一郎, 小松伸也, 杉本隆史, 亀井 清: 鉄と鋼, **84**(1998), 206-211.
- (19) 池田勝彦, 小松伸也, 杉本隆史, 亀井 清, 井上幸一郎: 鉄と鋼, **84**(1998), 790-796.
- (20) 池田勝彦, 小松伸也, 井上幸一郎, 塩田博之, 妹背 徹: 日本金属学会誌, **64**(2000), 279-282.
- (21) K. Kawabe and S. Muneki: ISIJ Inter., **31**(1991), 785-791.
- (22) 井上幸一郎(大同特殊鋼): 私信, (2000).