

.....

心臓リハビリテーション機器 “ ストレングスエルゴ ” の開発動向

.....

木村 雄一 ・ 室谷 樹一郎 ・ 林 卓也

MEE エンジニア 第 67 号 別冊 (2023)

心臓リハビリテーション機器 “ストレングスエルゴ”の開発動向

要 旨

厚生労働省は2040年を展望した“誰もがより長く元気に活躍できる社会の実現”のための三本柱の一つとして“健康寿命延伸プラン”を作成し、2040年までに健康寿命を男女共に3年以上延伸し(2016年比)、75歳以上にすることを目指している。

また、国民の疾病による死亡の原因及び国民が介護を要する状態になる主要な原因は脳卒中、心臓病その他の循環器病であることから、「健康寿命の延伸等を図るための脳卒中、心臓病その他の循環器病に係る対策に関する基本法」が施行(2019年)され、健康寿命の延伸を図る

取組みが進められている状況である。

三菱電機エンジニアリングの“ストレングスエルゴ”シリーズは、サーボ制御技術を応用し、心疾患などで体力が低下した患者(低体力者)に最適、かつ正確な負荷による運動療法を提供するリハビリテーション機器として2000年に発売された。現在3シリーズを展開しており、健康寿命の延伸への更なる貢献を目指して当社の制御技術を活用した新たなリハビリテーション技術の開発を行っている。

StrengthErgo240Plus



ストレングスエルゴ240Plus

- ・幅広い運動機能搭載
- ・アシスト機能あり
- ・累計販売台数：302台



StrengthErgo8^{V2} for Accurate Exercise Testing and Therapy

ストレングスエルゴ8V2

- ・心肺運動負荷試験用
- ・アシスト機能あり
- ・累計販売台数：633台



StrengthErgo.5

ストレングスエルゴ5

- ・普及機種
- ・アシスト機能なし
- ・累計販売台数：129台

ストレングスエルゴシリーズ

ストレングスエルゴシリーズはフラグシップ機のストレングスエルゴ240Plus、心肺運動試験用のストレングスエルゴ8V2、運動療法用普及機種のストレングスエルゴ5(アップライトモデル、リカンベントモデル)の3機種4モデルで構成される。

1. まえがき

2040年、団塊ジュニア世代は高齢者の仲間入りをして、高齢者人口がピークを迎える。一方、現役世代は急激に減少する。このような環境下で社会の活力を維持、向上しつつ、“全世代型社会保障”を実現していくためには、高齢者を始めとする労働意欲のある人々が社会で役割を持って多様な就労・社会参加ができる環境整備を進めることが必要である。このためには、3大疾患であるがん、脳卒中、心臓病からの復帰を促すリハビリテーション推進と疾病に罹患しないための予防・健康づくり推進が求められる。

厚生労働省は、疾病予防と健康づくり推進に関して2016年に男性72.14歳、女性74.79歳であった健康寿命を、2040年までに男女共に3年以上延伸し(2016年比)、75歳以上にすることを目指して健康寿命延伸プランを策定・推進している。

とりわけ、心疾患や脳血管疾患等の循環器病は国民の生命と健康にとって重大な問題になっていることから「健康寿命の延伸等を図るための脳卒中、心臓病その他の循環器病に係る対策に関する基本法」(2019年12月1日施行)を策定し、循環器病対策も強く推進している。

一方、当社ストレングスエルゴはサーボ制御技術を応用し、患者の脚力を測定しながら正確かつ様々な負荷制御(トルク、速度、位置、アシスト)を実現してきた。

脳血管障害等による半身麻痺(まひ)患者や高齢者といった低体力者から健常者まで幅広く適用できる運動療法システム“ストレングスエルゴ(以下“SE”という。)”240”(2000年発売)、術後低体力者の運動耐容能を正確に測定するためのマイナス負荷を実現した“SE8V2”(2022年発売、ベース機種は2006年発売の“SE8”)、より多くの病院が導入を検討できる価格を目指した“SE5”(2015年発売)をラインアップしてきており、2021年度に累計販売1,000台を達成している(図1)。

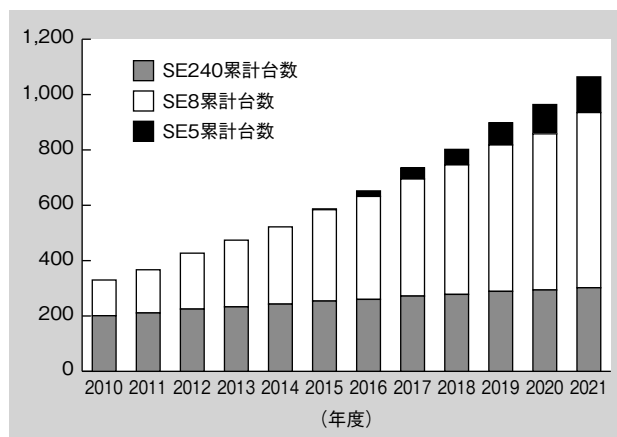


図1. スtrenghエルゴ機種累計販売台数

本稿では、SEの今後の技術開発の動向とその他製品開発状況について述べる。

2. 技術開発動向

人の運動能力は、骨関節-筋-神経系の能力(いかに早く、強く動けるか)と、その筋肉と神経に栄養と酸素を届けて筋肉を動かし続ける循環器系の能力(心肺持久力)で決まる。また、これらの能力は加齢とともに両者とも衰えていく。SEは、前者に対して下肢総合脚伸展筋力という概念を作り、これを計測する方法を提供し加齢とともにどのように脚伸展筋力が衰えるか、どのような運動をしたら維持できるかを追求してきた。

また後者に対しては、心肺運動負荷試験(Cardio-pulmonary Exercise Test: CPX)と呼ばれる検査が開発されていた。運動によるエネルギー代謝は、始めは脂質代謝(消費O₂と排出CO₂が等量の代謝)を利用するが、一定以上の負荷をかけると筋肉細胞内の糖質代謝(O₂を使わずCO₂を排出するエネルギー代謝)も同時に利用し始める。CPXは運動中の血圧、心電図、呼気ガスをモニターし、運動負荷を徐々に上げて、糖質代謝を遂行し始めた仕事率(ATWatts: ATW)を調べる検査である。ATWは、生命予後(あと何年生きられるか)、健康寿命の重要な説明因子で75歳以降は女性の方が高くなる。

2.1 マイナスワットからの心肺運動負荷試験の研究 (University of California, Los Angeles(UCLA)との共同研究)

CPX検査では、以前から運動負荷装置として自転車型エルゴメータが使用されており、ウォーミングアップ時の負荷量は、特定非営利活動法人日本心臓リハビリテーション学会(以下“心リハ学会”という。)では20WUが標準であった。しかし、20WUで、既にATWのしきい値を超える高齢者、術後低体力者が多くおり、このような低ATWの計測は困難であった。当社SE8はサーボ制御によってメカロスキャンセルすることで0W(ゼロワット)から1W単位の負荷調整が可能な機器を開発し、ATWのしきい値が10W前後の患者(体力弱者)の運動耐容能を検出可能にした。この開発によって、心リハ学会のCPX検査ウォーミングアップ時の負荷量はゼロワットになった(図2)。

しかし心不全高齢者が増えるに従って、ATWのしきい値が更に低い患者が増加した。

このような患者のATWのしきい値を調べるために安静時と同等まで下げた負荷、つまりマイナスの負荷からのウォーミングアップ+ランプ負荷によるCPX検査の研究が必要になり、UCLAと共同で実現した。

2.1.1 マイナスワットの定義

自転車型エルゴメータでの負荷の大きさ(→ペダルを漕

(こ)いだときに感じる重さ)は、一般的に仕事率(W)で示される。この仕事率(W)は、運動者がペダルを漕いだ速度(rpm)と、漕ぐために発揮した力(N・m)の積から求められる。SE8(V2)を含む一般的な自転車型エルゴメータでは、運動者が力をかけてペダルを漕ぐ負荷の大きさを、正のワット(W)で示す。ここでいうマイナスワットとは、SE8(V2)に搭載しているサーボモータがアシストトルクを発揮してペダルを回転させ、運動者の足がその回転に任せて動かされている状態を示す。モータで回転するペダルに足を乗せて、負荷量を大きいマイナス値から徐々に0Wに近づけていくと、ある負荷量でモータの力行量と足の自重による負荷量とが釣り合う状態になる。この

とき、運動者の各筋群は発火しておらず、代謝が発生していない。SE8ではこの代謝が発生していない状態を実現するため、マイナスワット機能を設けている。

サーボモータがアシストトルクを発揮している状態を“力行”と呼ぶが、この力行モードは駆動機構の機械損をキャンセルするためにも使われる。すなわちアシストトルクが低い領域では機械損のキャンセルで低負荷の正確性を担保し、高い領域ではマイナスワット運動をサポートできることが、サーボモータを搭載するSE8(V2)の大きな特長と言える(図3)。

2.1.2 マイナスワットの必要性

運動者が、ペダルにかかる機械的な負荷がない0Wの負荷設定でペダルを漕いだとしても、運動者自身の足を動かすために必要な負担、すなわち足が持つ重さ分を上下させる負担が人体にはかかっている。健康者であれば意識することはあまりないが、低体力の心疾患患者や足の重い肥満患者では、この足を動かすためにかかる人体への負担の影響によって呼気ガスの初期 $\dot{V}O_2$ (酸素摂取量)が高くなることから、ATW測定が困難になる課題があった。

そのためSE8(V2)では、マイナスワットモードを設けることで、足を動かすためにかかる人体への負担をサーボモータのアシストトルク(マイナスワット)でキャンセルすることを実現した(図4)。

2.1.3 マイナスワットモードでの安全対策

SE8(V2)でマイナスワット負荷を実現する仕組みを述べる。通常、プラスワットで運動を行う際、ペダルを回したときの負荷は、伝達機構を介して接続されたサー

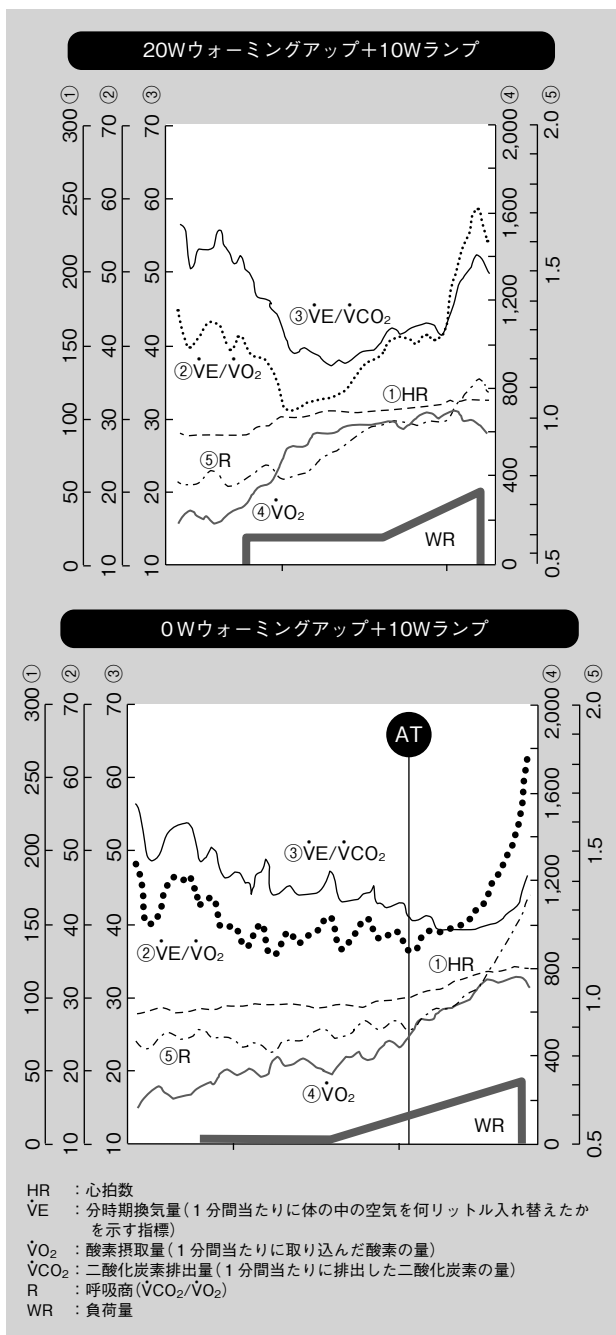


図2. CPX 20Wウォーミングアップと0Wウォーミングアップ比較

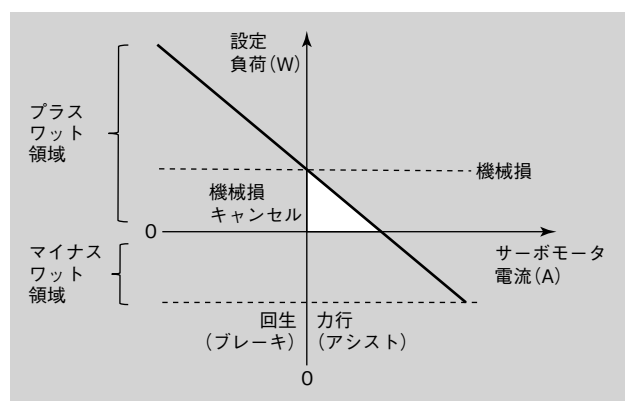


図3. サーボモータ電流と設定ワットの関係

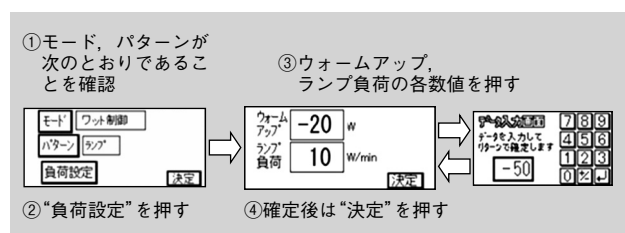


図4. 設定操作画面

ボモータの起電力を回生抵抗で消費し、ブレーキ力とすることで実現している。負荷の大きさは、この回生抵抗で消費する電力で調整している。マイナスワットはこの逆で、サーボモータに電流を流してトルクを発揮し、ペダルを動かすよう制御するモードである。設定負荷のマイナス量を大きくすると、アシストトルクを増やして運動者の足を押す力が大きくなる。このモードでは、運動者の安全確保のため、次に述べる保護動作を設けている。

(1) マイナスワットモード移行制限

運動者がペダルを漕いでいない状態、すなわち速度が0rpmの状態では、設定ワットをマイナスにしても、アシストトルクは発生させていない。設定ワットをマイナスにして、かつ運動者がペダルを漕ぎ始めてから数秒経過すると、SE8(V2)は運動中と判断して設定ワットに応じたアシストトルクの印加を始める。このことによってマイナスワットの安全性を確保している。

(2) 速度上限の制限

運動者の足の重さが軽い場合や、マイナスワット設定値が大きくアシストトルクが大きくかかる場合は、ペダル速度が上昇を続けるおそれがある。そのため、ペダル速度が55rpmを超えそうになると自動的にアシストトルクを下げて、ペダル速度が55rpmを超えないよう制御を行っている。

(3) ペダルの自動停止

運動者がペダルに足を乗せて漕いでいる場合、マイナスワットモードでは設定負荷に応じた適切なアシストトルクを印加しなければならない。一方、運動中に足をペダルから離れた場合は、安全のためにペダルを瞬時に停止させる必要がある。

SE8(V2)では、運動者が漕いでいるか、足を離して自走状態にあるかを検知して、自走状態であると判断するとアシストトルクを落としてペダルを停止させる。この検知は、人が漕いでいるときはペダル一周の間、速度に微妙な揺らぎが発生することに対して、自走状態のときはこの揺らぎがほぼないことを利用して実施している。

2.1.4 UCLAの研究結果

UCLAとの共同研究では、このマイナスワットによる人体への負担のキャンセル効果が、実際に肥満の被験者で得られるか研究を実施した。

研究では、肥満の被験者20人、やせ型の被験者10人を対象に、SE8によるマイナスワット補助あり／なしの2条件でCPXを行い、2条件が呼気ガスに及ぼす影響を検証した。その結果、肥満被験者のCPXでマイナスワット補助を行った場合は、行わない場合と比較して初期 $\dot{V}O_2$ が低く抑えられ、ATWの測定に有効であることが示唆された(図5)。

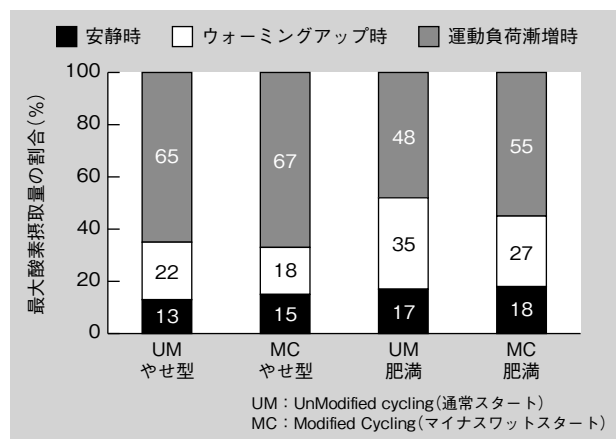


図5. UCLAの研究結果⁽¹⁾

2.1.5 今後の課題と展望

UCLAとの共同研究結果では、マイナスワットからのウォーミングアップとランプ負荷が必要な被験者に対して、SE8のマイナスワット運動機能が有効に作用することが示唆された。マイナスワットからのCPXは、国内ではSE8(V2)が唯一対応している。しかし、CPXは他社製呼気ガス装置、他社製心電計と連動しており、負荷の指示は他社の機器から行う。現状でマイナスワットがSE8(V2)に指示できる機種は1機種だけである。また計測した実ワットを表示できる機種も1機種だけであり、マイナスワットの必要性は、低体力者、肥満患者については検証できているものの、どの程度一般的に有用であるかの検証はできていない。

現在マイナスワットのCPX検査が容易にできる機器SE8V2の出荷台数は2022年4月以降4か月の受注ベースで30台前後であり、機器の普及とともに概念も普及し、他社もマイナスワットの必要性について理解が進むと思われる。

2.2 エキセントリック運動の研究

2.2.1 背景

エキセントリック運動(ECCentric exercise : ECC)とは、筋肉が伸張しながら力を発揮する運動である。それに対して、筋肉が短縮しながら力を発揮する運動はコンセントリック運動(CONcentric exercise : CON)と呼ばれている。例えば、腕でダンベルを持ち上げるときは腕の筋肉を収縮させながら力を発揮するのでCON、ゆっくりと下ろすときは筋肉が力を発揮しながら伸張する状態なのでECCである(図6)。

ECCは、CONと比較して1.2~1.5倍の力を発揮できることから、同じ負荷量であれば、より少ない心拍数と酸素消費量で筋力トレーニングが可能であることが研究で示唆されている。近年欧州ではECCが可能な機器メーカーが増加傾向にあり、2021年度はエルゴメーカー間で年間20件を超える研究論文が発表されている。

このトレーニング方法は、下肢伸展筋力維持・向上に寄与する可能性があり、研究促進が期待されている。

国内でも、ECCの研究にSE240を活用したいとの要望が主に大学等の研究機関から寄せられるようになり、その要望に対応するため、研究用途向けにECC対応機能を実装し、筋力の維持・向上の方法論の研究促進に寄与している。

2.2.2 実現手段

SE240を始めとして、広く普及している自転車型エルゴメータが提供するペダル漕ぎ運動は、足の筋肉を収縮させてペダルを前に押し出すよう力を発揮させる運動なので、CONに該当する。SE240はサーボモータを搭載しているため、このモータでペダルを逆回転方向に駆動させ、運動者はこのペダルに逆らうよう力を発揮すれば、足の筋肉が伸張しながら力を発揮する状態になるためECCとなる。具体的に、SE240でECCを運動者に提供する手段を示す(図7)。

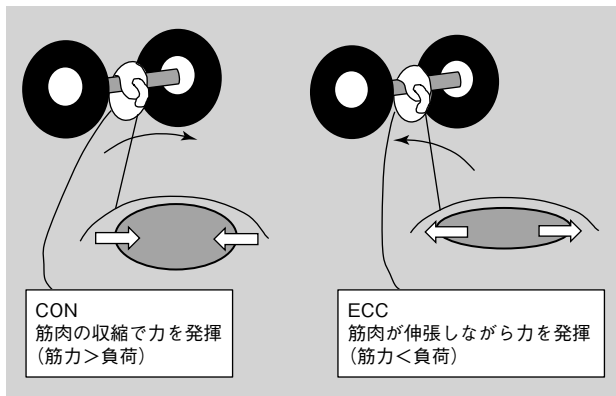


図6. CONとECCの違い

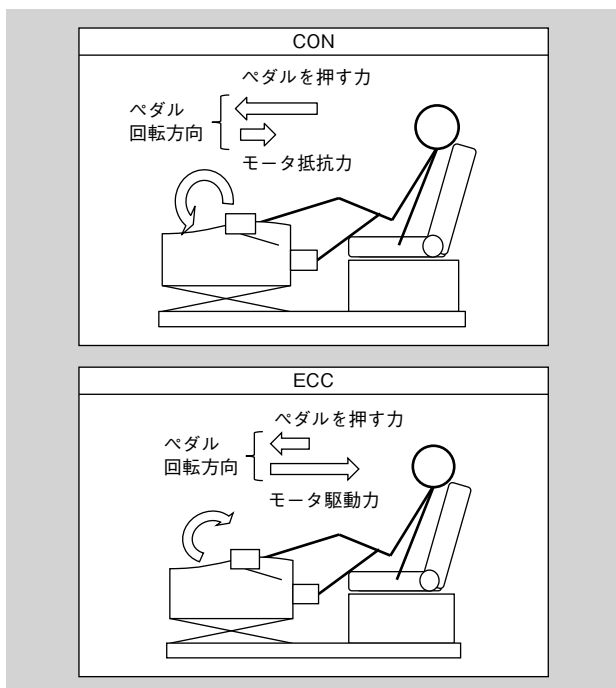


図7. SE240でのCONとECCの違い

(1) 等速度制御によるモータ駆動

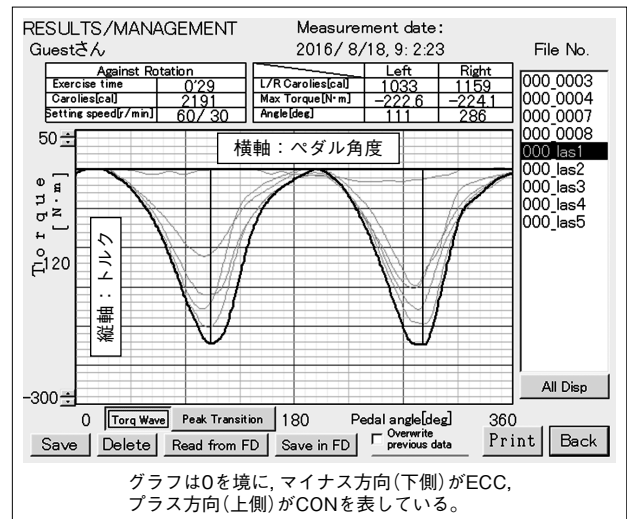
運動者が画面からペダル回転速度を指定して、運動開始操作を行うと、サーボアンプは指定された速度でペダルを等速度回転させる。等速度制御では、摩擦や負荷変動など、モータの回転速度を乱す力が発生しても、駆動トルクを瞬時に増減して速度を一定に保とうとする。この仕組みを利用して、運動者がペダルを止めようと力を発揮した場合は、その力を相殺するトルクをモータが発生させ、速度を維持する。そのため、運動者は力を発揮してもペダルを止めることができず、筋肉が伸張する状態(ECC)になる。

(2) 運動者へのフィードバックと記録

2.2.1項に述べたとおり、ECCはCONと比較して発揮できる力が大きいため、必要以上に力を発揮して筋肉痛を誘発する可能性が高い。そのため、SE240では運動者がどれだけの力を発揮しているかをリアルタイムに運動者にフィードバックする手段を提供し、運動者が発揮する力を調整することを可能にした。また、研究用途では、運動者がどれだけの力を発揮したか詳細に記録する必要がある。そのため、SE240では、横軸にペダル角度、縦軸に運動者が発揮した力(トルク)をリアルタイムに示すとともに、テキストファイルに記録することで、運動中と運動後、それぞれ運動結果を確認可能にした。ここで運動者が発揮したトルクは、サーボモータが速度維持しようとした発生させた電流値から求めることができる。サーボモータの電流値とペダルにかかるトルクは比例関係にあることから、電流値に係数をかけて、機械的な摩擦分を加味したものをペダルトルクとして表示・記録している(図8)。

2.2.3 課題と今後の展望

ECC機能を搭載したSE240は、2022年7月現在、10を超える大学・研究機関等への出荷実績がある。実際に



グラフは0を境に、マイナス方向(下側)がECC、プラス方向(上側)がCONを表している。

図8. ECCグラフ表示

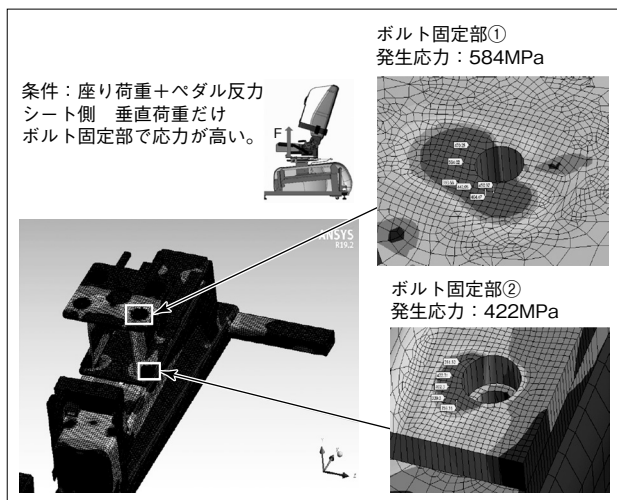


図9. SE5リカンベントモデルフレームの応力解析

SE240を活用したECCの論文も発表され始めている。しかし現状のSE240は、構造上CONの力を基準に設計されており、モータの容量、機械強度が十分に耐えられる構造になっていない。また、運動モードも等速度ECCだけの提供にとどまっている。ソフトウェアでも、ユーザーインターフェースの改善など解決すべき課題がある。

また、日本では研究促進して結果が出るまでに5年がかかると思われる。しかし、欧州での研究は日本よりも5年は進んでおり、またECCの民間応用であるECCトレーニングジムが各国に設立され始めている。

ECCの研究で信頼性が高いとされる内容は、より少ない心拍数、より少ないSpO₂(酸素飽和度)の低下、より少ない酸素消費量でCONと同じ運動強度の運動ができる点であり、高齢者の下肢伸展筋力増強、呼吸器疾患患者のより安全な運動継続、高齢心不全患者の安全な運動療法に寄与する可能性が高いことである。安全性を担保できるECC訓練方法の確立が今後の直近の課題である。

3. その他製品開発状況

(1) 3D-CADデータの活用

SE5の原低のため、三菱電機(株)生産システム本部設計システム技術センターの協力を得て、3D-CADデータを活用した解析によってフレーム構造見直しを実施した(図9)。

SE240とSE8(V2)は古い機種であることから3D-CADデータ活用はこれからである。今後解析への活用を含めて、ECM(Engineering Chain Management)軸・SCM(Supply Chain Management)軸で3Dデータを活用していけるよう整備を進める。

(2) ストレングスエルゴ8V2の発売

当社主力製品であったストレングスエルゴ8(2006年発売)について、当社の特長であるマイナスワット運動を



図10. ストレングスエルゴ8V2

より簡単に設定できる機能を追加し、イメージカラー／ロゴデザインを一新して2022年1月にストレングスエルゴ8V2として発売した(図10)。

4. むすび

これまでサーボ制御を活用した自転車型エルゴメータとして他社とは一線を画す製品としてリハビリテーション技術の発展に貢献してきたが、今後も新たなリハビリテーション技術の開発を行うことで事業の拡大と高齢化社会への貢献を実現していく。

参考文献

- (1) Popoola T., et al. : Mechanical Assistance During Unloaded Pedaling Improves the Dynamic Range of the Metabolic Response in Obesity, MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS AND EXERCISE, 51, No.6, 421(2019)

執筆者紹介



きむら ゆういち
木村 雄一

2004年入社。ストレングスエルゴのソフトウェア設計に従事。現在、名古屋事業所駆動制御技術部ウェルネス課。



むろたに きいちろう
室谷 樹一郎

1998年入社。ストレングスエルゴの機構設計に従事。現在、名古屋事業所駆動制御技術部ウェルネス課。



はやし たくや
林 卓也

1999年入社。ストレングスエルゴの機構／ハードウェア設計に従事。現在、名古屋事業所駆動制御技術部ウェルネス課。



<https://www.mee.co.jp/sales/other/strengthergo/confirm.html>