

電気刺激時の M 波の計測手法の検討

Examination of measurement techniques of M-wave evoked by electrical stimulation

○山本 直輔(久留米大) 田川善彦(久留米大) 志波直人(久留米大)

Naosuke YAMAMOTO, Kurume University  
Yoshihiko TAGAWA, Kurume University  
Naoto SHIBA, Kurume University

**Abstract:** Muscular forces elicited by the electrical stimulation decrease easily in the high intensity of the stimulation. This is crucial when functional electrical stimulation (FES) is considered for the treatment of persons with paralyzed limbs. M-wave is myoelectric potentials induced by electric stimulation, and will be applicable to estimate the state of muscular contractions: the magnitude of muscle force exerted, the decrement of the force, and so on. Stimulations using burst wave can give less painful or uncomfortable conditions on the person. The M-wave, however, elicited by the burst wave showed a larger artifact than that by the single biphasic stimulation. Some techniques were examined to reduce the artifacts.

**Key Words:** FES, M-wave, Stimulation artifact

1. 背景

M 波とは、電気的な刺激によって筋収縮が誘発されるときに生じる筋電図であり、誘発筋電図と呼ばれる。誘発筋電図には、他にも H 波や F 波などがある。本論では、M 波に注目した。M 波は、電気的な刺激によって興奮した運動神経が神経筋接合部を通過し筋が収縮するときに現れる。つまり、中枢のからの影響や、H 波のように刺激強度によっては打消が生じることなどが無い。

M 波は、生理学では末梢の回復検査に用いられ、筋疲労の指標としての研究<sup>(1)</sup>もなされている。しかし、それらで用いられる刺激の多くは、シングルパルスの電気刺激である。シングルパルスの刺激は、1 パルスを与える刺激だけで運動神経を興奮させるだけの電荷を与えなければならない。筋は一瞬の収縮を見せるので生体の反応を計測するには十分である。しかし、機能的電気刺激 (Functional Electrical stimulation: FES) の様に刺激によって歩行動作や把持動作を作り出すにはシングルパルスでは十分な収縮力を得ることができず、可能であったとしても非常に強い電気刺激になる。FES では、一般にバースト波 (図 1) を用いる。バースト波を用いることで刺激を連続的に与え、1 パルス毎の与える電荷を低くすることが出来、低い刺激強度で強い筋収縮が得られる利点がある。

しかし、バースト波を用いた場合 M 波を計測するには問題がある。M 波は、刺激から数 ms 後に表れ始める 2 相性の波形である。この数 ms は、刺激により筋収縮がお

き、その筋電図が計測できるまでの時間である。シングルパルスで刺激を行った場合、刺激の強度は強いものの単発であるため刺激 off 後の影響をあまり受けず、M 波の発生前には減衰してしまう。しかし、バースト波で刺激を行った場合、刺激中および M 波の現れるまでの数 ms の間にバースト波の影響による電位変動が生じ、M 波の判別が難しい。本論では、バースト波を用いた場合の M 波を取り込み、FES による運動制御への適用を検討する事前研究である。計測した M 波を絶対値化し、そのピーク値を M 波の評価値として取り込むことを目標としている。

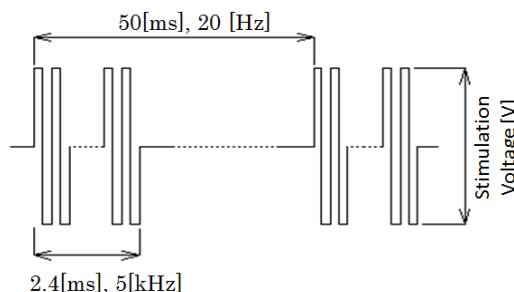


Fig.1 本実験に用いたバースト波

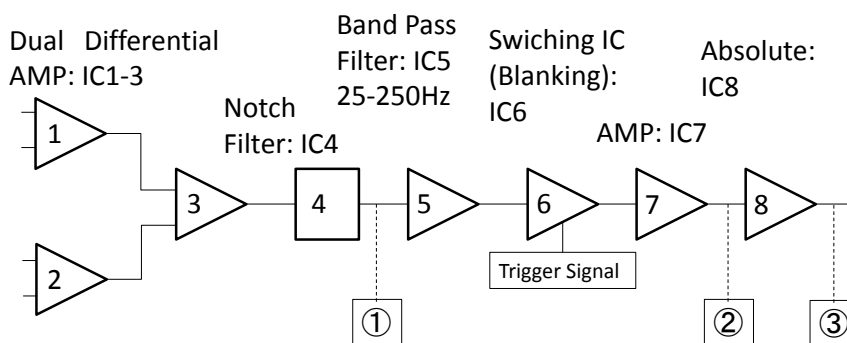


Fig.2 M 波計測用アンプの概要図

2. 実験

被験者は、健常男性1名(30歳)である。対象筋は前頸骨筋(tibialis anterior muscle : TA)を選択した。TAは単関節筋で、表層にあるので計測が容易である。姿勢保持のための随意収縮をさせないため、被験者は椅子に座り脱力した状態で実験を行った。

2-1 実験装置

本実験で使用した刺激装置は、刺激周波数 20 Hz, 搬送

周波数 5 kHz, 0-80 V の定電圧刺激装置を使用した。M 波の計測アンプは、25-250 Hz のバンドパスフィルタ, 20-2000 倍の可変ゲインの双差動アンプを使用した。図 2 は、筋電アンプの信号の流れを示している。筋電アンプには、いくつかの Check Point(CP)を儲けた。図 2 中の①~③は CP である。IC1-3 は双差動アンプである。双差動増幅を行うことで商用周波数などのノイズを抑えることができる。IC4-5 は、Filter 部分でノッチフィルタ(IC4)と 25-250 Hz のバンドパスフィルタ(IC5)である。IC4 の出力に CP1 を設置し、バンドパスフィルタを通す前の波形の確認を行う。IC6 は Blanking 方策のための Switching IC である。刺激装置から、バースト波出力中に 0-5 V の Trigger 信号を出力し筋電アンプ側で Switching を行う。Blanking 方策については後で述べる。IC7 は増幅器で、20~2000 倍の可変増幅を行う。IC7 の出力に CP2 を設けた。IC8 では、IC7 で増幅した値を絶対値化している。IC8 の出力に CP3 を設けた。

刺激電極は、45×50 mm の電極を作成し使用した。刺激を流す際に TA 以外が収縮していないことを触診にて確認し実験を行った。計測電極は、10 mm の皿電極を利用した。波形の計測のサンプリングは、10 kHz で行った。

2-2 実験内容

本論では、バースト波の M 波への干渉を除去する手法を検討している。図 3 は、シングルパルスとバースト波による M 波の出力を比較している。シングルパルスは 80 V, バースト波は 70 V (最大耐用電圧) で刺激を行っている。シングルパルスは、バースト波に比べ運動神経を発火させるのに強い刺激が必要であり、刺激電圧が 80V となった。また、バースト波も 70 V と高い刺激電圧だが、シングルパルスの刺激強度に合わせるためである。しかし、被験者のバースト波での最大耐用電圧が 70V であった。図 3 の下図の 0-2.4 ms が刺激期間である。このとき、CP2 に現れているものがバースト波の影響である。その後、刺激の残存影響が見られた後 M 波が出現している。バースト波の M 波のピーク値は、実線の 7~8 ms の位置に現れている。この回路では、AC 成分を取り除くためのカップリングコンデン

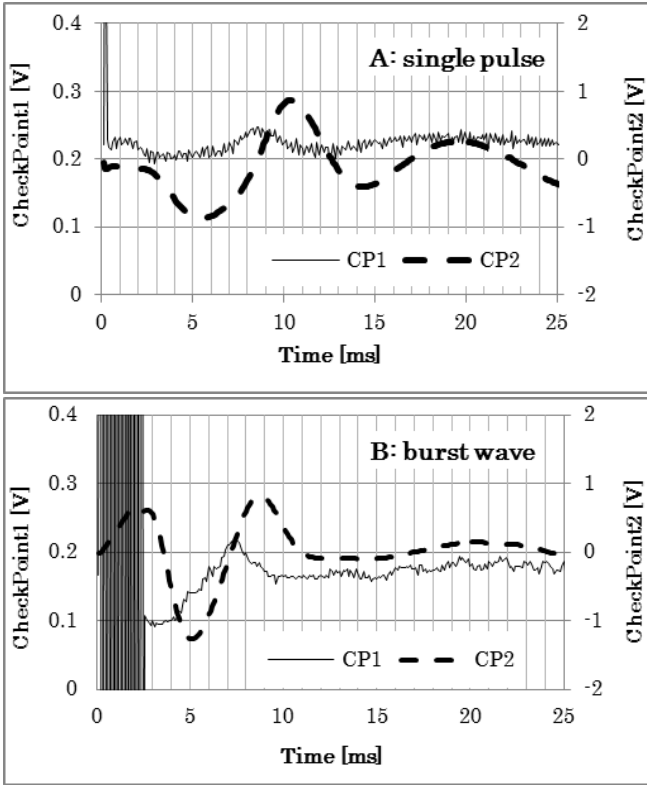


Fig.3 シングルパルスとバースト波の M 波の検討：  
(A：刺激電圧 80 V, B：刺激電圧 70V)

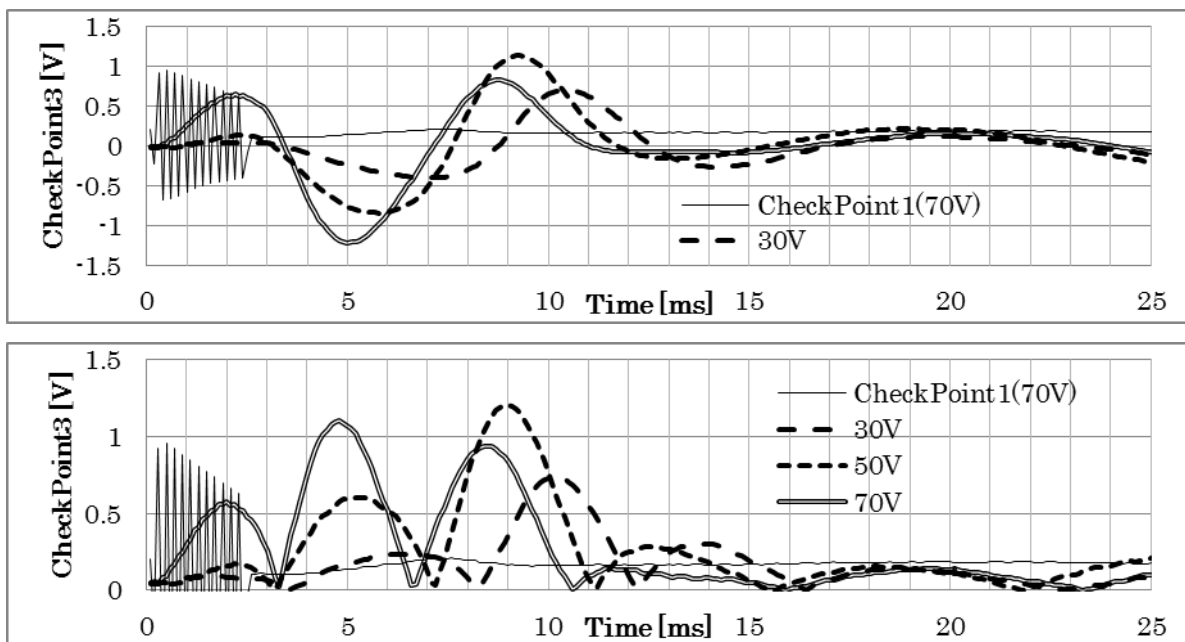


Fig.4 刺激電圧毎の M 波の特性：上図 CP2, 下図 CP3, 細線は、刺激期間を表すために記載した。

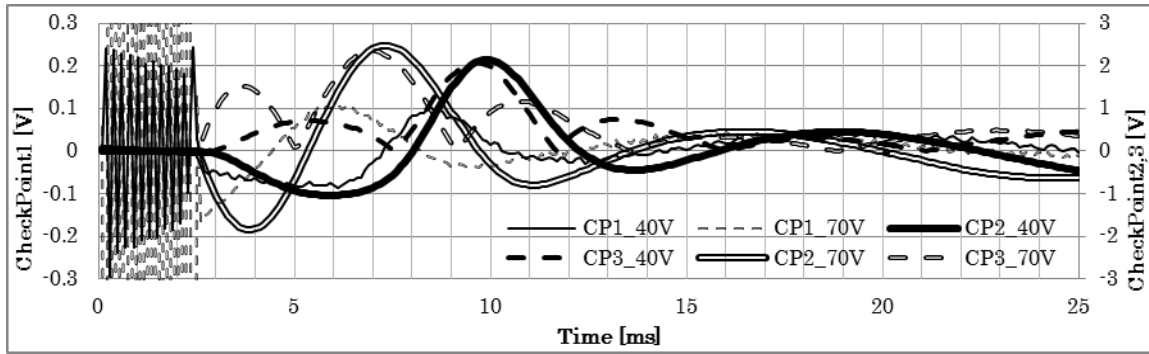


Fig.5 Blanking 方策での M 波の変化

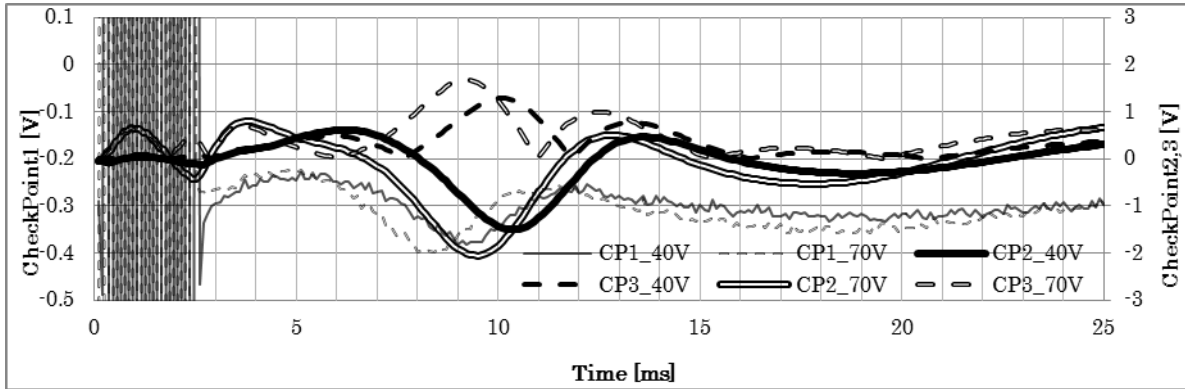


Fig.6 Discharge 方策での M 波の変化

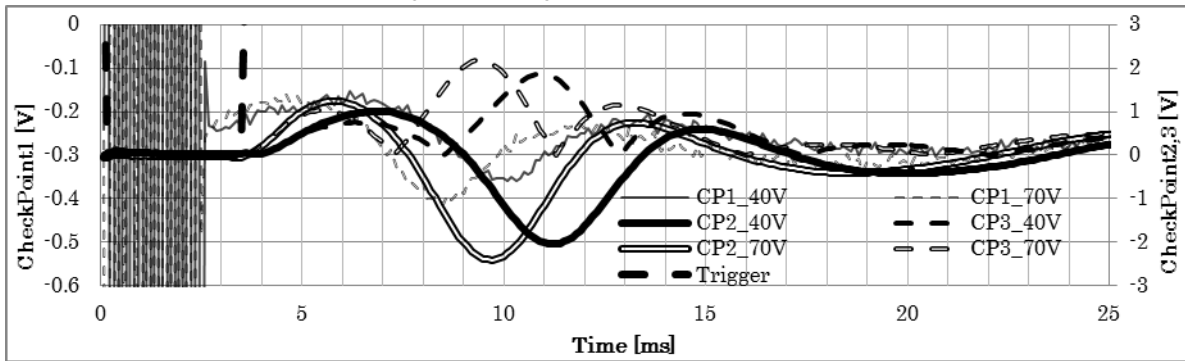


Fig.7 Blanking 方策と Discharge 方策の併用

サや増幅やフィルタのためにオペアンプを使用しているため、CP2では1ms程遅れがある。つまり、M波出現以前の波形は刺激による影響と考えられる。シングルパルスでは、CP1では実線の8~9ms辺りでM波が出現し、刺激中や刺激終了直後に大きな変動は見られない。M波出現後にみられる振幅は、F波やS波と呼ばれるもので誘発筋電位の1つであるがM波の出力後に現れるので本論では検討しない。

バースト波の影響による波形は、本実験では、バンドパスフィルタ以降にも現れていることから、M波の周波数と近いと推察する。そのため、フィルタ処理以外の信号処理や方策が必要である。本実験では、刺激強度毎にバースト波刺激がM波にどのように影響を与えるかを検討した後、Blanking方策とDischarge方策を検討した。

Blanking方策は、刺激期間(バースト波の出ている期間)にAMP側で刺激の取り込みを止める事で計測アンプから出力する値にバースト波の影響を出力させない機構である。Blanking方策は刺激や生体に対して干渉を与えるものではなく機械的に刺激の影響を取り除こうとする手法である。

Blanking方策に対しDischarge方策は、電気刺激のバース

ト波出力後に刺激電極同士を短絡する事で刺激電極間の電荷を放電させ、刺激の影響を解消しようとする方策である。Discharge方策では、刺激期間2.4msの後に1msの放電期間を設定した。

### 3. 結果

#### 3-1 刺激強度によるM波の出力とバースト波の影響

図4は、刺激電圧毎のM波の出力と刺激による影響を表している。刺激電圧が大きくなると、M波出現は刺激タイミングへ近づいていく(図4)。これは、強い刺激電圧では、バースト波の途中でも運動神経が興奮するのに十分な電荷を与えたことを示している。強い刺激では、バースト波による影響も大きくなっている。刺激電圧が大きくなるにつれ、CP2、CP3でみられる刺激期間での波形の変化が大きくなっている。また、下図は上図を絶対値化した値であるが、70Vでは刺激による影響が非常に大きく、M波のピーク値よりもバースト波刺激による影響が大きい。

#### 3-2 Blanking方策とDischarge方策

Blanking方策の結果を図5に示す。Blanking方策を用い

ることで、刺激期間中の影響は取り除くことが可能であった。しかし、刺激終了後の残存する刺激の影響は取り除くことが出来なかった。Blanking をすることで絶対値化した場合、刺激直後に現れる影響が M 波のピーク値より小さくなった。

Discharge 方策の結果を図 6 に示す。Discharge 方策では、電気刺激の影響が刺激中に見られるが放電期間で放電をすることで、刺激終了直後に一度基線付近へ戻っている。その後の、刺激の影響についても Blanking 方式と比べても減少した。

### 3-3 Blanking 方策と Discharge 方策の併用

Blanking 方策と Discharge 方策、両方ともにバースト波の影響除去に対して効果的であった。しかし、効果が異なった事から両方を採用した方策の検討を行った。

結果を図 7 に示す。Blanking は刺激期間の 2.4ms と Discharge 期間の 1ms を合わせた 3.4ms 行った。太い破線が Blanking の期間を M 波アンプへ伝える Trigger 信号である。

Blanking を方策により、バースト波刺激中の影響は全くみられなかった。また、Discharge 方策によってバースト波後の変化がほとんどみられない。

## 4. 考察

本実験で検討した Blanking 方策と Discharge 方策は、シングルパルスにおいては Merletti ら<sup>(2)</sup>が報告しているが、バースト波での検討はなされていない。Merletti らは、2つ

の方策によって、刺激による影響を取り除くことができると報告している。しかし、シングルパルスでは、運動を発生させるほどの筋発揮力が得られないことからバースト波を用いた電気刺激の誘発筋電位の検討は必要である。

図 9 は、図 3 のシングルパルスの刺激終了タイミングとバースト波での刺激終了タイミングを合わせた図である。刺激が開始され (I) で刺激が終了するまでの区間で、バースト波の CP2 では、刺激の影響が表れている。この影響を取り除くために、Blanking 方策が有効であった (図 5)。

刺激終了 (I) から M 波ピーク (III, V) までを、バースト波とシングルパルスで比較するとバースト波の変化が大きいことから刺激後にも、刺激の影響が表れていると推察する。これを、除去するための手法として、Discharge 方策を検討した。図 6 の 70V 刺激の CP2 の波形から刺激終了後の 1ms の間に影響が 1 度除去されていることがわかる。CP3 のように CP2 を絶対値化することで刺激終了から M 波の出現まで刺激の影響が顕著に表れるが、Blanking を行った図 5 と比較して小さくなっており、Discharge を行うことで刺激終了後の影響を除去できると推察する。

図 10 は、2 つの方策を同時に行った結果とシングルパルスを比較した。比較しやすいように、信号を反転させた。CP2 で比較すると、M 波の発現までの時間や振幅の大きさに差は見られるが、波形は非常に類似した。この事から、Blanking 方策と Discharge 方策を併用することでバースト波を用いた電気刺激の影響を除去できたと考える。

## 5. まとめ

Blanking 方策と Discharge 方策を併用することで、バースト波の影響を、シングルパルスで計測した M 波程度に抑えることができた。これより、FES で作成した運動の評価や疲労の評価などに M 波を用いることが可能になったと考える。

本論では、最終的に M 波の検討の指標として、絶対値化した M 波のピーク値の使用を念頭に、バースト波の影響の除去を検討した。M 波の評価指標としては、波形の面積や、発現までの時間、peak-to-peak など様々な検討もされており、それらについて本論の方策が適切かは検討する必要もある。

## 謝辞

本研究は、科学研究費 (C26506014) 助成の一部として行われた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- (1) Eduardo H. Estigoni, Che Fornusek, Richard M. Smith, Glen M. Davis, FACSM, Evoked EMG and Muscle Fatigue During Isokinetic FES-Cycling in Individuals With SCI, *Neuromodulation*;14, pp.349-355, 2011.
- (2) Roberto Merletti, Marco Knaflitz, Electrically Evoked Myoelectric Signals, *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 19(4), pp.293-340, 1992.

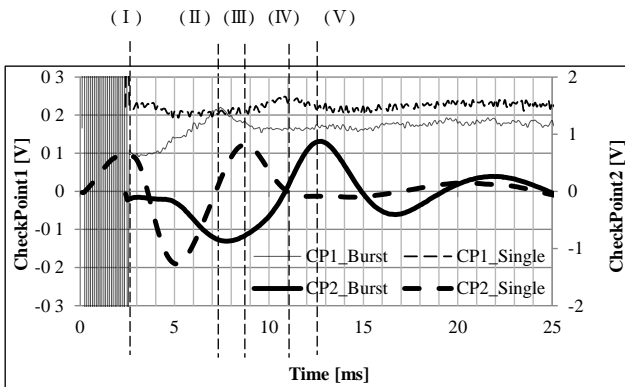


Fig.9 図 3 の上下図を刺激終了点で合わせ比較：(I)刺激終了、(II)バースト波 CP1 での M 波のピーク、(III)バースト波 CP2 の M 波ピーク、(IV)シングルパルス CP1 での M 波のピーク、(V)バースト波 CP2 での M 波ピーク

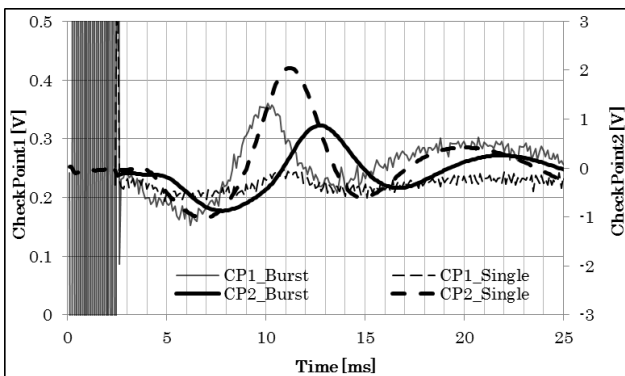


Fig.10 シングルパルスと Blanking-Discharge 方策の比較