

IEEE 802.11a の MAC フレーム構成

梅原 大祐

初出: 平成 21 年 9 月 30 日

修正: 平成 22 年 2 月 11 日

1 はじめに

無線 LAN システムを評価する際に、電気的なパケット信号のうち、データ部分と各種制御のためのオーバーヘッド部分を切り分けることは、非常に重要です。本稿では、無線 LAN の標準規格である IEEE 802.11a のパケットの物理的な長さを計算するための方法について述べます。

2 IEEE 802.11a のデータパケット長

IEEE 802.11a の物理的なフレーム構成を述べ、データパケット長の計算式を示します。

PHY 層フレームは PPDU で構成されます。PPDU は PLCP Protocol Data Unit、PLCP は Physical Layer Convergence Protocol の略語です。PLCP プレアンプル長は、 $T_{PP} = 16 \mu s$ です。PLCP ヘッダ信号 (シグナル部) は 6 Mbps モードで 1 OFDM シンボルであり、 $T_{PHSG} = 4 \mu s$ です。PLCP ヘッダ信号 (サービス部) は適応変調され、そのビット長は $L_{PHSR} = 16 \text{ bits}$ です。1 OFDM シンボル長は $T_{OFDM} = 4 \mu s$ であり、1 OFDM シンボルのビット長を L_{OFDM} とします。OFDM は IEEE 802.11 の変調方式で、Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略語です。データ伝送に利用されるサブキャリア数は 48 です。OFDM の伝送レートに伴い、サブキャリア変調方式と誤り訂正符号の符号化率が変更されます。データパケットの伝送レートは OperationalRateSet に定義されます。ここでは、全伝送レート 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps が OperationalRateSet に記述されていると仮定します。例えば、6 Mbps モードではサブキャリア変調方式は BPSK、符号化率 $1/2$ であり、 $L_{OFDM} = 24 \text{ bits}$ となります。伝送レートの各モードに対する 1 OFDM シンボルのビット長 L_{OFDM} 、サブキャリア変調方式、符号化率を表 1 にまとめます。PLCP ヘッダ信号 (サービス部) の後には上位レイヤから受け渡される PSDU が続きます。PSDU は PLCP Service Data Unit の略語です。PHY 層における誤り訂正符号は Bit-Tailing 畳み込み符号が使用されています。そのため、PSDU の後に PHY 層にてテイル・ビット $L_{PT} = 6 \text{ bits}$ が追加されます。また、パケットの最後は OFDM シンボルで終了するので、必要であれば、ビットがパディングされます。なお、IEEE 802.11g では、パディングビットの後に、 $6 \mu s$ の無信号区間が付加されます。図 1 に PHY 層におけるフレーム構成を示します。

表 1: IEEE 802.11a の 1 OFDM シンボルのビット長

RATE	6 Mbps	9 Mbps	12 Mbps	18 Mbps	24 Mbps	36 Mbps	48 Mbps	54 Mbps
T_{OFDM}	24 bits	36 bits	48 bits	72 bits	96 bits	144 bits	192 bits	216 bits
Mapping	BPSK	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	64-QAM	64-QAM
Code rate	$1/2$	$3/4$	$1/2$	$3/4$	$1/2$	$3/4$	$2/3$	$3/4$

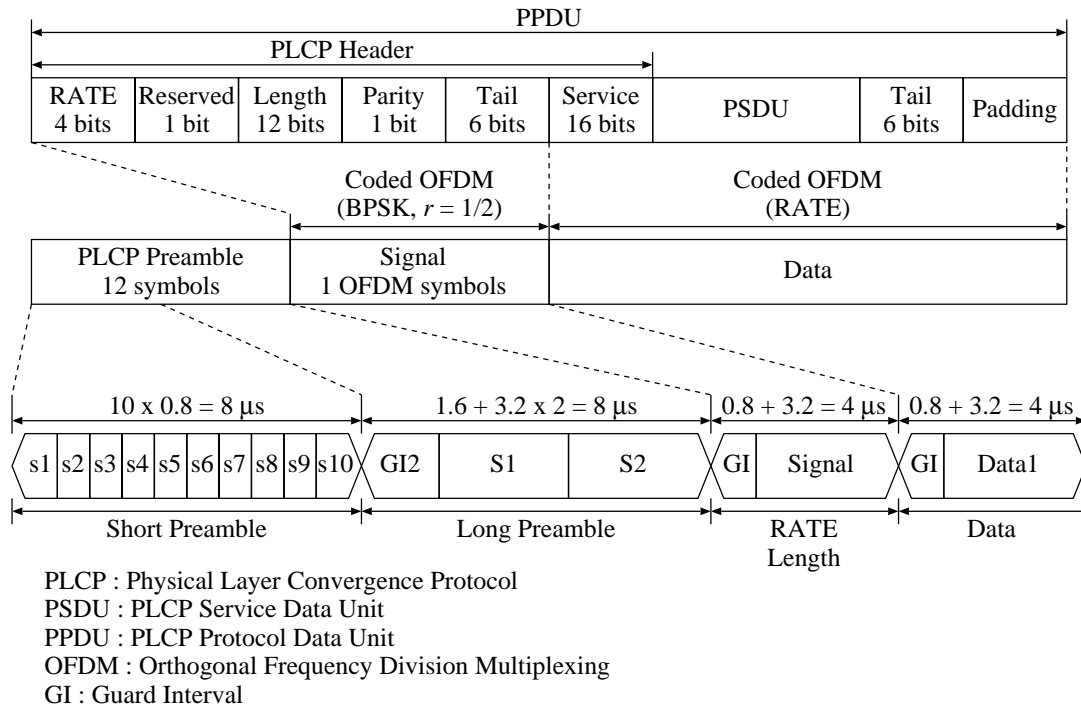


図 1: PHY 層におけるデータフレーム構成

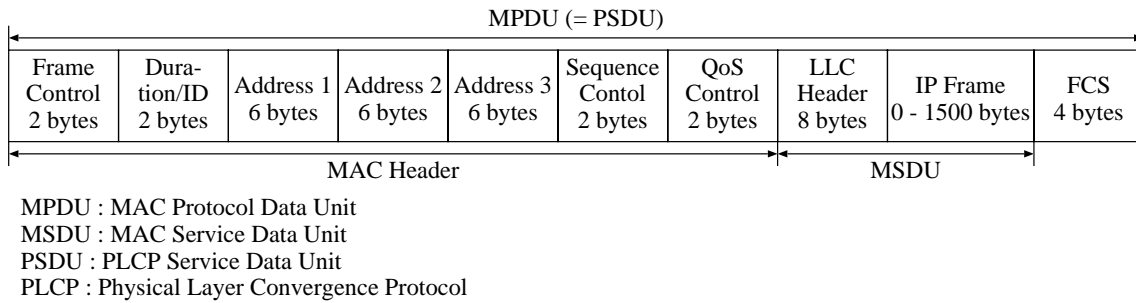


図 2: MAC 副層におけるデータフレーム構成

PHY 層におけるオーバーヘッドは、プレアンプルの $20 \mu\text{s}$ 、6 Mbps モードにおける $4 + 1 + 12 + 1 + 6 = 24$ ビット、適応変調方式における $16 + 6 = 22$ ビット及びパディングビットになります。

次に、MAC 副層におけるフレーム構成、すなわち、MPDU の構成について述べます。MPDU は前述の PSDU に相当し、MAC Protocol Data Unit の略語です。ただし、基地局 (HC, Hybrid Coordinator) と子機 (STA) 間の通信であるインフラストラクチャモード、もしくは STA 間通信のアドホックモードを対象とし、基地局間通信の WDS (Wireless Distribution System) モードは考慮しません。図 2 に MAC 副層におけるフレーム構成を示します。「QoS 制御」フィールドは、2005 年に IEEE 802.11e 規格が標準化されたことにより追加されたことに注意して下さい。現在、IEEE 802.11-2007 の一部に IEEE 802.11a 規格と IEEE 802.11e 規格が含まれています。なお、WDS モードでは、「シーケンス制御」と「QoS 制御」の間に 6 bytes の「アドレス 4」フィールドが入ります。従って、MAC ヘッダのバイト長が $L_{MH} = 26$ bytes、FCS のバイト長が $L_{MF} = 4$ bytes、LLC ヘッダのバイト長が $L_{LH} = 8$ bytes になります。IP データフレーム

表 2: 1508 bytes MSDU フレームの PPDU フレーム長

RATE	T_{DATA}	RATE	T_{DATA}	RATE	T_{DATA}	RATE	T_{DATA}
6 Mbps	2076 μs	12 Mbps	1048 μs	24 Mbps	536 μs	48 Mbps	280 μs
9 Mbps	1392 μs	18 Mbps	708 μs	36 Mbps	364 μs	54 Mbps	252 μs

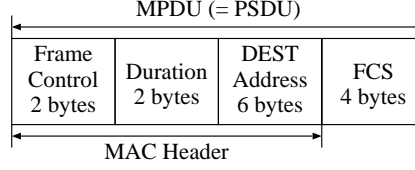


図 3: MAC 副層における ACK フレーム構成

長の MTU は $L_{\text{MTU}} = 1500$ bytes です。MTU は Maximum Transmission Unit の略語です。なお，Linux では，“ifconfig -a” コマンドで MTU を確認することができます。

以上のことから，MSDU (MAC Service Data Unit) $L_{\text{MSDU}} = 1508$ bytes の MAC データフレームを持つ IEEE 802.11 PPDU データフレーム長は，

$$T_{\text{DATA}} = T_{\text{PP}} + T_{\text{PHSG}} + T_{\text{OFDM}} \cdot \left\lceil \frac{L_{\text{PHSR}} + L_{\text{MH}} + L_{\text{LH}} + L_{\text{MTU}} + L_{\text{MF}} + L_{\text{PT}}}{L_{\text{OFDM}}} \right\rceil \quad (1)$$

$$= 20 \mu\text{s} + 4 \mu\text{s} \times \left\lceil \frac{16 + (26 + 8 + 1500 + 4) \times 8 + 6 \text{ bits}}{L_{\text{OFDM}}} \right\rceil = 20 \mu\text{s} + 4 \mu\text{s} \times \left\lceil \frac{12326 \text{ bits}}{L_{\text{OFDM}}} \right\rceil \quad (2)$$

で計算できます。RATE に応じた 1508 bytes MSDU フレームの PPDU フレーム長を表 2 にまとめます。

3 IEEE 802.11a の ACK パケット長

ACK パケットの MAC 副層におけるフレーム構成を図 3 に示します。PHY 層はデータパケットの場合と同様です。MAC ヘッダ長は $L_{\text{MH,A}} = 10$ bytes，FCS 長は $L_{\text{MF,A}} = 4$ bytes であるため，MPDU 長は $L_{\text{MPDU,A}} = 14$ bytes です。ACK パケットなど制御パケットの伝送レートは BSSBasicRateSet に定義されます。本稿では，全伝送レート 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps が BSSBasicRateSet に記述されていると仮定します。ACK パケットの伝送レートはデータパケットの伝送レートと同じとします。例えば，データパケットが 54 Mbps モードであれば，ACK パケットも 54 Mbps モードとします。ACK パケットの PPDU フレーム長は

$$T_{\text{ACK}} = T_{\text{PP}} + T_{\text{PHSG}} + T_{\text{OFDM}} \cdot \left\lceil \frac{L_{\text{PHSR}} + L_{\text{MH,A}} + L_{\text{MF,A}}}{L_{\text{OFDM}}} \right\rceil \quad (3)$$

$$= 20 \mu\text{s} + 4 \mu\text{s} \times \left\lceil \frac{16 + (10 + 4) \times 8 + 6}{L_{\text{OFDM}}} \right\rceil = 20 \mu\text{s} + 4 \mu\text{s} \times \left\lceil \frac{134 \text{ bits}}{L_{\text{OFDM}}} \right\rceil \quad (4)$$

となります。RATE に応じた ACK パケットの PPDU フレーム長を表 3 にまとめます。

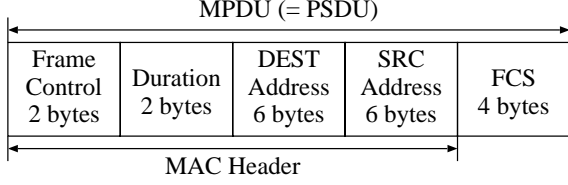
4 IEEE 802.11a の RTS/CTS パケット長

隠れ端末問題対策で用いられる RTS パケットと CTS パケットの MAC 副層におけるフレーム構成を図 4 に示します。RTS は Request to Send，CTS は Clear to Send の略語です。PHY 層はデータパケットの

表 3: ACK パケットの PPDU フレーム長

RATE	T_{ACK}	RATE	T_{ACK}	RATE	T_{ACK}	RATE	T_{ACK}
6 Mbps	44 μs	12 Mbps	32 μs	24 Mbps	28 μs	48 Mbps	24 μs
9 Mbps	36 μs	18 Mbps	28 μs	36 Mbps	24 μs	54 Mbps	24 μs

(a) RTS Frame Format



(b) CTS Frame Format

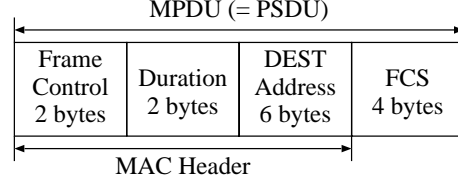


図 4: MAC 副層における RTS/CTS フレーム構成

表 4: RTS パケットの PPDU フレーム長

RATE	T_{RTS}	RATE	T_{RTS}	RATE	T_{RTS}	RATE	T_{RTS}
6 Mbps	52 μs	12 Mbps	36 μs	24 Mbps	28 μs	48 Mbps	24 μs
9 Mbps	44 μs	18 Mbps	32 μs	36 Mbps	28 μs	54 Mbps	24 μs

場合と同様です．RTS パケットの MAC ヘッダ長は $L_{MH,R} = 16$ bytes , FCS 長は $L_{MH,R} = 4$ bytes であるため , MPDU 長は $L_{MPDU,R} = 20$ bytes です . CTS パケットの MAC ヘッダ長は $L_{MH,C} = 10$ bytes , FCS 長は $L_{MH,C} = 4$ bytes であるため , MPDU 長は $L_{MPDU,C} = 14$ bytes です . RTS/CTS パケットの伝送レートは BSSBasicRateSet に定義されます . したがって , RTS パケット長は ,

$$T_{RTS} = T_{PP} + T_{PHSG} + T_{OFDM} \cdot \left\lceil \frac{L_{PHSR} + L_{MH,R} + L_{MF,R}}{L_{OFDM}} \right\rceil \quad (5)$$

$$= 20 \mu s + 4 \mu s \times \left\lceil \frac{16 + (16 + 4) \times 8 + 6}{L_{OFDM}} \right\rceil = 20 \mu s + 4 \mu s \times \left\lceil \frac{182 \text{ bits}}{L_{OFDM}} \right\rceil \quad (6)$$

となります . RATE に応じた RTS パケットの PPDU フレーム長を表 4 にまとめます . CTS パケットの PPDU フレーム長は ACK パケットと同じであり , $T_{CTS} = T_{ACK}$ となります .

5 コンテンションフリー連続パケット送信の MAC-SAP スループット

LLC 副層と MAC 副層の境界は MAC-SAP (MAC-Service Access Point) と定義されます . MAC フレームの伝送速度を議論する場合 , MAC-SAP より上の層のデータに関する伝送速度を対象とし , MAC-SAP スループットと呼びます . 1 つの STA が競合する HC や STA がなく , 自身のバッファ内の MAC フレームを連続的に送信する場合の MAC-SAP スループットを各伝送レートモードにて算出します . また , 伝搬遅延は無視できるくらい小さいと仮定します .

IEEE 802.11a のスロットタイムは $T_{ST} = 9 \mu s$, SIFS 時間は $T_{SIFS} = 16 \mu s$, DIFS 時間は $T_{DIFS} = 34 \mu s$, 最小 CW サイズは $CW_{min} = 15$ です . SIFS は Short Interframe Space , DIFS は DCF Interframe Space , CW は Contention Window , DCF は Distributed Coordination Function の略語で , DCF は自律分散的なアクセス制御は意味します . なお , DIFS 時間は SIFS 時間と 2 つのスロットタイムに相当します .

表 5: IEEE 802.11a の MAC-SAP スループット

RATE	$S_{\text{MAC-SAP}}$	RATE	$S_{\text{MAC-SAP}}$
6 Mbps	5.39 Mbps	24 Mbps	17.70 Mbps
9 Mbps	7.81 Mbps	36 Mbps	23.87 Mbps
12 Mbps	10.07 Mbps	48 Mbps	28.62 Mbps
18 Mbps	14.13 Mbps	54 Mbps	30.66 Mbps

競合する HC や STA がなく，バッファには常に送信すべきパケットがあるため，バックオフ時間の平均は

$$T_{\text{BOT}} = T_{\text{ST}} \times \frac{\text{CW}_{\min}}{2} = 67.5 \mu\text{s} \quad (7)$$

になります．IP フレームのサイズを MTU の $L_{\text{MTU}} = 1500$ bytes とした場合，MSDU のサイズは $L_{\text{MSDU}} = 1508$ bytes です．

以上より，MAC-SAP スループットは

$$S_{\text{MAC-SAP}} = \frac{L_{\text{MSDU}}}{T_{\text{DATA}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{DIFS}} + T_{\text{BOT}}} = \frac{1508 \times 8 \text{ bits}}{T_{\text{DATA}} + T_{\text{ACK}} + 117.5 \mu\text{s}} \quad (8)$$

となります．RATE に対する MAC-SAP スループットを表 5 にまとめます．

6 まとめ

IEEE 802.11a の MAC フレーム構成から，各伝送レートにおける MAC フレーム長を導出しました．導出した MAC フレーム長を用いてコンテンションフリーの場合の連続 1508 bytes の MAC フレーム送信の MAC-SAP スループットを算出しました．