

# 論文の内容の要旨

論文題目      整数剰余環上の誤り訂正符号とその  
デジタル通信系への応用に関する研究

氏名                      中 村 勝 洋

本論文は、筆者が 1970 年代後半から 80 年代後半にかけて研究開発した整数剰余環上の誤り訂正符号に関する理論とその応用に関する技術について、これを再度全体的に見直し、若干の修正と説明の追加および今後の展望を加えてまとめ直したものである。

情報を符号化して通信する際に、通信路（記録媒体も含む）で生じた符号誤りを受信側で訂正できるように、もしくは検出できるように、通常、冗長性を付加した符号化が行なわれる。誤り訂正符号技術は、そのための符号化法や復号法に関する技術である。また、そのような符号化法や復号法あるいは符号の性能評価に関する理論を単に符号理論と呼ぶことも多い。誤り訂正符号技術は、大量のマルチメディア情報を高速に通信し、蓄積し、処理するこれからの高度情報化社会において、信頼性の高い情報通信を行うために必要かつ不可欠な技術である。

さて、従来よく研究されてきた誤り訂正符号の大部分は、理論的にみると一般には有限体  $GF(q)$  の上の符号であり、符号語間の距離は Hamming 距離に基づくものが殆どである。そしてその理論的体系もある程度確立されてきている。しかしながら、符号の構成法としては必ずしも有限体上に限る必要はなく、通信路における符号誤りの発生の仕方にマッチした距離構造を持つ符号が、有限環など他の集合の上に構成できるのであれば、従来とは異なる新たな性能のよい符号の構成法を確立できる可能性がある。

一方、現実の基幹通信システムは近年益々大容量化を迫られ、高密度のデジタル通信

技術を色々と駆使して大容量化を達成する必要性があった。80年代初頭、周波数有効利用の観点から高密度化の進むデジタルマイクロ波無線(DMR)通信システムにおいても、その特性改善のために、変復調技術を含め何がしかの抜本的対策が望まれていた。そこでは必然的に多値信号が採用されており、信号点間の距離に配慮した信号設計が課題となりつつあった。

本論文ではこれらの状況を踏まえて、新たな符号として整数剰余環  $Z_q = Z / (qZ)$  (integer residue ring modulo  $q$ ) 上の符号を提案し、まずその符号の構成法に関する手法・理論を導いている。その際、整数剰余環  $Z_q$  上の線形フィードバックシフトレジスタの性質に関する解析結果をベースとしている。符号語間の距離としては、Lee 距離を採用している。これは、符号の適用対象として高密度の信号空間を考慮してのことである。ついで、この符号を現実の回路としてインプリメントするための手法を述べ、符号器・復号器の構成法を導いている。更に、この符号を大容量の通信基幹回線に適用する際の手法について述べており、高密度の信号点間の距離に配慮した効率的な符号系の構成法を提示している。具体的には差動符号化多値 QAM(Quadrature Amplitude Modulation ; 直交振幅変調)方式を採用している大容量のデジタルマイクロ波無線通信システムへの適用である。そして、その符号系の良好な特性評価結果も示している。以上の結果、有限体に限らず、有限環の上でも実用的でかつメリットのある符号系を構成できることが提示されたことになる。本論文によって、現実のシステムに導入する符号系の選択肢が更に広がったともいえる。

本論文の第1章では、まず符号理論研究の歴史的流れや実用化の状況に簡単に触れた後、本研究が生まれる背景と動機並びに研究の目的について上で述べた事柄を更に詳しく述べている。

第2章では、上記整数剰余環  $Z_q$  上の Lee 距離に基づく誤り訂正符号の具体的な構成法を導いている。まず符号構成上の観点から、整数剰余環  $Z_q$  上の線形フィードバックシフトレジスタの性質について考察し、これを拡大環の表現法につなげて、符号構成上の有用な結果をいくつか導いている。つまり拡大環における剰余類に関するいくつかの性質を導いている。ついで、これらの有用な結果をもとに巡回符号の概念を拡張した形で環  $Z_q$  上の Lee 距離に基づく誤り訂正符号を導き、1重 Lee 誤り訂正符号、準2重 Lee 誤り訂正符号、および2重 Lee 誤り訂正符号について、それぞれの構成法並びに復号法を与えている。更にはその一般化への試みとその展望についても記している。次頁の表1に得られたいくつかの符号パラメータ例を掲げる。

第3章ではこれらの符号をインプリメントするための手法を導き、符号器・復号器の構成法について、例題を用いながら述べている。そこでの構成法は、第2章で述べた環  $Z_q$  上の線形フィードバックシフトレジスタの性質と符号の構成法に基づいており、符号器・復号器が線形フィードバックシフトレジスタを用いた自然な形の手法に従って構成できることを示している。そして BCH 符号など有限体上の符号をインプリメントす

る場合との違いに重点を置いて述べている。また高速化の観点からその並列処理法についても論じている。更に、実際に開発し実用に供した2重 Lee 誤り訂正符号の LSI についても紹介している。表2この2重 Lee 誤り訂正符号 LSI の諸元を示す。回路規模は小さく、符号化率、符号化利得とも高いことが分かる。

第4章では、得られた環  $Z_q$  上の誤り訂正符号を現実の高密度デジタル通信システムに導入する際の技術について述べている。具体的には大容量のデジタルマイクロ波無線 (DMR) 通信システムへの応用について述べている。DMR の世界へ誤り訂正符号を導入するにあたっては、変調系との親和性を保つことによって、符号の持つ能力を最大限

表1 符号パラメータ例

	N	K	K/N
I	30	28	0.933
	84	81	0.964
	90	86	0.956
	120	116	0.967
	252	249	0.988
II	28	22	0.786
	60	52	0.867
	120	112	0.933
	124	114	0.919
	248	238	0.960
	372	362	0.973
	496	486	0.980

N: 符号長    K: 情報ディジット数  
 K/N: 符号化率  
 I: 1重 Lee 誤り訂正符号  
 II: 2重 Lee 誤り訂正符号

表2:  $Z_{2^3}$  上の2重 Lee 誤り訂正符号 LSI 諸元

符号	符号長	496	372	248	124
	情報ディジット数	486	362	238	114
符号化利得		3.2dB	3.4dB	3.6dB	4.0dB
回路規模	符号器	2.5 kGate			
	復号器	4.3 kGate(+ROM:64kb)			
動作速度		50 MHz Typical			
消費電力	符号器	100mW (10MHz)			
	復号器	200mW (10MHz)			

発揮させる必要がある。高密度 DMR での信号の変調方式としては、高密度の点から通常、差動符号化多値 QAM 方式が用いられるが、この方式に誤り訂正符号を導入するには、差動符号化と誤り訂正の位置づけ、符号ビットの割り当て、システム構成、更には、電力有効利用の観点から、信号点配置を原点の周りに円形上にとったときの誤り訂正符号の巧妙な構成法といった様々な手法を導く必要があった。本論文では、これらについて明らかにすると共に、この符号系によって改善された通信システムの実績評価についても解析し、良好な結果を得ていることを示している。図 1 に差動符号化多値 QAM 用誤り訂正符号化システムのブロック図を示す。図で誤り訂正と書いたブロックにおいて、位相の不確定性に対しトランスペアレントな Lee 距離に基づく誤り訂正符号器と復号器を用いる。

最後に第 5 章では、まとめとして、本研究により、整数剰余環  $Z_q$  上の Lee 距離に基づく誤り訂正符号の構成法が導かれたこと、その符号を用いて高密度の信号空間における効率的な符号系の構成法が提示されたこと、およびそのことが有限体に限らず、有限環の上でも実用的でかつメリットのある符号系を構成できることを意味していること、などを結論づけている。そして現実のシステムに導入する符号系の選択肢が本論文によって更に広がったとしている。また、最近の動向を踏まえた今後の展望についても考察している。

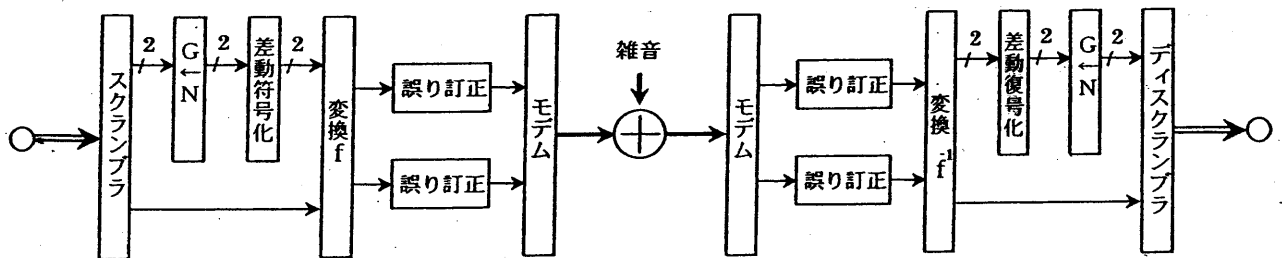


図 1 : 差動符号化多値 QAM 用誤り訂正符号化システム