



# Studies on Improvement and Application of TCP with Network Coding in Lossy Networks

著者	Nguyen Viet Ha
その他のタイトル	高パケットロス環境でのネットワーク符号化TCPの改良とその応用に関する研究
学位授与番号	17104甲情工第324号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10228/00006196">http://hdl.handle.net/10228/00006196</a>

氏名	NGUYEN VIET HA (ベトナム)
学位の種類	博士 (情報工学)
学位記番号	情工博甲第324号
学位授与の日付	平成29年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Studies on Improvement and Application of TCP with Network Coding in Lossy Networks (高パケットロス環境でのネットワーク符号化 TCP の改良とその応用に関する研究)
論文審査委員	主査 教授 鶴 正人 " 藤原 暁宏 " 吉田 隆一 " BAROLLI LEONARD 准教授 川原 憲治

## 学位論文内容の要旨

近年、情報通信ネットワークおよびそれを利用できる端末が多様化し、それらに基づく多様なサービスが社会に浸透し、野外を含むあらゆる環境での利活用が進むと期待されている。しかし、その実現には、パケットロスが頻発する環境での高速・高信頼なデータ転送が必要になる。通信技術の進展は、通信リンクのビット誤りの回復やそれに伴うパケットロスの防止を可能にした。しかし、あらゆる環境において通信リンクのビット誤りを無視できるレベルに抑えることはコスト効率が悪く、場合によっては不可能である。また、ある程度のパケットロスを許容するアプリケーションも存在する。よって、各リンクの物理層・データリンク層によるロス抑止だけでは不十分・非効率であり、送受信者間でのパケットロス回復が必要である。一方、高速・高信頼なデータ転送を前提とするアプリケーションにおいて最も広く利用されているトランスポートプロトコル **Transmission Control Protocol (TCP)** は、送受信者間でパケットロスを検知すると、再送による回復を試みるが、遅れが発生するだけでなく、ロスの原因をネットワーク輻輳と考えると送信レートを下げるため、ロスの原因がリンクにある場合は、逆にデータ転送効率を低下させる。そこで、パケットロス環境での高速・高信頼データ転送を目指し、ネットワーク符号 **Network Coding (NC)** を用いた冗長パケット送信を **TCP** に組み込んだ **TCP with Network Coding (TCP/NC)** が 2009 年に提案された。TCP/NC は、 $n$  個の元パケットの代わりに、 $(n+k)$  個の符号化パケットを送信して前方消失回復を試みるもので、ランダム・定常ロス下のフロー競合のないシナリオでの効果が示されている。

が、実用化に関して様々な課題がある。

本研究では、TCP/NC の性能 (TCP Goodput) や実用性の向上のために、(a) ロスのバースト性への未考慮、(b) ロス率の時間変動に未対応、(c) 回復不可能なロス発生時のパケット再送の非効率性、(d) TCP との非互換性 (送受信者共に実装が必要)、(e) 高品質リンク上の冗長パケットの非効率性、の課題を分析し、解決方法を考案し、それらの有効性を Network Simulator 3 上のシミュレーションで示すと共に、残存課題も議論している。

まず、(i)前方消失回復できなかったロスパケットの再送の効率化(課題(c))のために、NC-DATA/ACK のヘッダやプロトコルを改良し、NC 層において再送が必要なパケットを把握し、TCP 層の再送発動時に適切な再送パケットを選択する機能、再送パケットの再ロスを低減する符号化機能、および、受信した符号化パケット間の線形独立性が失われた場合の再送機能を実装し、通常の TCP、無線向け改良 TCP (TCP Westwood+)、そしてオリジナル TCP/NC に対する性能向上を示した。

さらに、(ii)ロスのバースト性も考慮した符号化パラメタ  $n,k$  の決定 (課題(a)) および動的・即時変更 (課題(b)) のために、ロスの発生率だけでなくバースト性を定期的に観測・推定し、推定結果とパケットロスの Gilbert Loss Model に基づき、適切なパラメタ  $n,k$  を導出し、符号化サイクルの途中であっても変更できる仕組みを考案し、ロスのバースト性や時間変動がある時の、オリジナル TCP/NC に対する性能向上を示した。また、ネットワーク輻輳が起きるフロー競合状態での有効範囲を明らかにした。

最後に、(iii)送受信者が通常の TCP を利用できる TCP/NC Tunnel (課題(d) (e)) では、TCP/NC Gateway を設計し、エンド端末間が通常の TCP の場合でも、TCP/NC Tunnel を用いることでエンド端末間が TCP/NC の場合と同程度またはより高い性能を実現できることを示した。

本論文の構成は以下の通りである。1 章は、問題の背景と研究の目的を論じる。2 章は、TCP/NC の概要を紹介し研究課題を論じる。3 章は、パケット再送の効率化手法の提案とそのシミュレーション評価を示す。4 章は、符号化パラメタの最適化および実行中動的変更手法の提案とそのシミュレーション評価を示す。5 章は、エンド端末が通常の TCP を利用できる TCP/NC tunnel 手法の提案とそのシミュレーション評価を示す。最後の 7 章は、全体を総括し、将来課題とその解決方法を議論する。

## 学位論文審査の結果の要旨

本研究では、パケットロスが頻発する劣悪な通信ネットワーク環境で高速かつ高信頼なデータ転送を実現する技術を論じている。TCP にエンド端末間でのネットワーク符号化を組み込む TCP/NC に着目し、パケット再送の効率化、符号化パラメタの最適化と実行中動的変更、エンド端末が通常の TCP を利用できる TCP/NC tunnel、を考案し、

それらの有効性をシミュレーションで示した。これらの研究を通じて TCP/NC の性能や実用性を向上する具体的方法と将来課題を提示し、それにより、パケットロスが頻発する通信リンクを含む多様なネットワーク環境において高速・高信頼なデータ転送を低コストで実現するためには、TCP/NC のアプローチが有望であることを示した。今後ネットワーク環境の更なる多様化に伴い、TCP/NC の重要性は更に高まると考えられるが、本研究はその実用化に関する方向性の明確化に寄与した。

本論文に関し、調査委員から、冗長パケットによる回復目標確率と帯域消費のトレードオフ、シミュレーションモデルの妥当性や十分性、ネットワーク輻輳時の有効性、競合フロー数が少ない場合の TCP/NC Tunnel とエンド端末間 TCP/NC の性能比較、などについて質問がなされたが、いずれも著者から満足（明確）な回答が得られた。また、公聴会においても、多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（情報工学）の学位に十分値するものであると判断した。