

Fig. 4.14. Applying the attached edger in plate rolling. (*J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, 32 (1991), No. 363, p. 406)

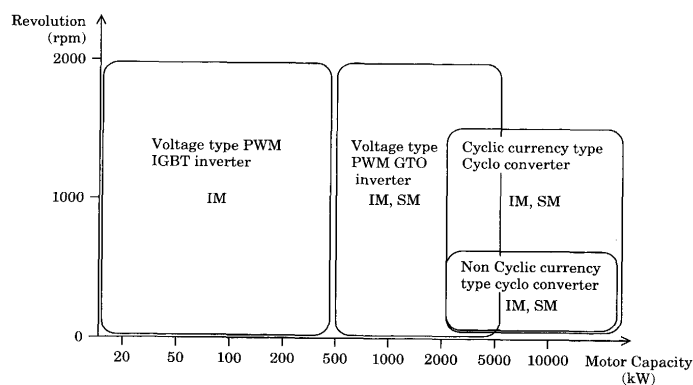


Fig. 4.15. Motor drive applying range. (Memo. Symp. of 100th R.T.C., p. 284)

使われている。また現在も種々の構造が提案され、開発が進められており今後も使用されるデバイスは変わっていくものと考えられる。

現在適用されているサイリスタ、GTO、IGBTの適用範囲の概略を Fig. 4.15 に示す。これにより 500kW 程度までは IGBT インバータ、5000 kW 程度までは GTO インバータを、さらにそれ以上ではサイクロコンバーターが一般的に使われている。パワーデバイスとマイクロプロセッサによって実現されたこれらの交流可変速ドライブシステムの特徴は速度制御応答は 60 rad/s、また制御精度はモータのトップスピードで 0.01% が実現されている。このようなドライブシステムにおける進歩が圧延機の品質改善に寄与しており、例えば概略ではあるが板厚偏差比を直流機を 1 とすると、主機の応答速度が 4 倍速くなっており、板厚偏差比は 0.4 と約 60% 改善されることになる。

4.3.2 加熱・冷却

冶金的、形状的な品質の均一化、操業の安定性、省エネルギー、および設備長短縮を狙って、各々のプロセスに最適な加熱・冷却が選定され、さらに性能向上のための改良や性能予測精度向上のための研究開発が進んだ。

(1) 加熱技術

近年特に進歩の著しい加熱技術として、誘導加熱と直火還元加熱に関して述べる。

誘導加熱は、交番磁界中の導電体内で発生する誘導電流により、導電体が自己発熱することを利用した加熱方法である。したがって、応答性が良く、また、磁界分布を制御することにより、局部加熱と均一加熱のいずれにも適用することができる。磁界を発生させるコイルには、大まかに強磁性体加熱に用いられるソレノイド型コイルと、常磁性体および強磁性体の両方の加熱に用いられるトランスバース型コイルの二つの方式がある。これらの原理と特徴を Table 4.2 に示す。

局部加熱に適用されているものとしてエッジヒータがある。これは、熱間圧延前にスラブ端部温度が低下して圧延時に割れが生じることを防ぐとともに、冶金的品质の均一性を確保するために、スラブ端部を局所的に加熱する装置である。

均一加熱としての適用が将来有望視されるものに、ブリキの連続焼鈍炉がある。ブリキは、食品用缶詰に用いられるので清潔である必要があり、これは雰囲気中で誘導加熱することによって容易に達成される。また、板厚が 0.1~0.3 mm と薄く、ライン速度が 1,000~2,000 m/min と速いため、熱負荷の高応答性が必要となり、誘導加熱が特に有効である。こ

Table 4.2. Comparison of method of steel strips induction heating.

	Solenoid coil	Transverse coil
Principle		
Work piece	Ferromagnetic material	Both ferromagnetic and paramagnetic materials
Frequency	As the strip is thinner, a higher frequency is required.	Low frequency heating is possible even in case of thin strips.
Electromagnetic force	Small	Ferromagnetic strip is attracted toward the cores.

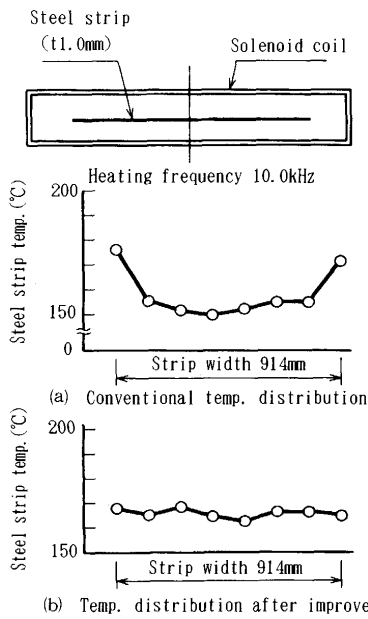


Fig. 4.16. Temperature distribution of solenoid coil. With the same solenoid coil in use, the strip width direction temperature distribution was improved from the conventional value of ± 13.5 to $\pm 3.5^\circ\text{C}$. The temperature distribution and the heat production are proportional to each other. (*Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, 27 (1990), No. 1, p. 50)

ここで、適用が見込まれるソレノイド型コイルに関しては、被加熱材の厚さおよび幅によって、幅方向に均一加熱するための最適なコイル寸法および加熱周波数がある。一方、現実には鋼板の厚さおよび幅の範囲は広いので、Fig. 4.16 に示すように、板端部で磁界が強くなり、過熱される条件があるが、板端部の磁界を制御できる技術なども開発され、広い鋼板条

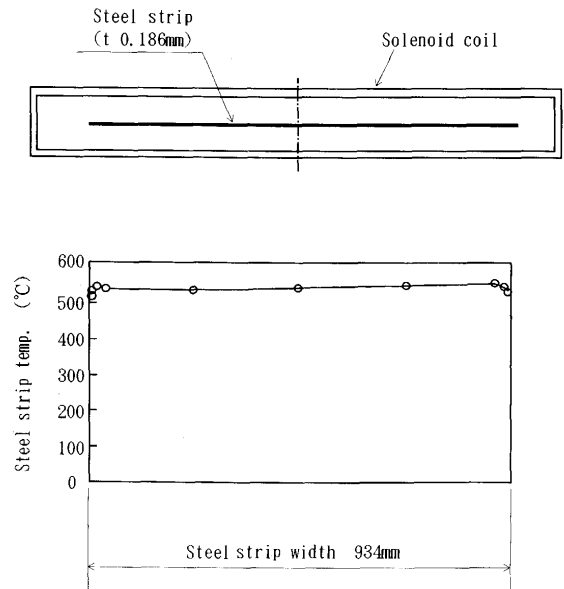


Fig. 4.17. Temperature distribution of steel strip heated by solenoid coil.

件に対して、幅方向均一加熱が可能となった。また、実際にブリキ材 (板厚 0.186 mm) をソレノイドコイルによって加熱した際の幅方向温度分布測定例を Fig. 4.17 に示す。鋼薄板でも十分高効率で均一加熱できることが確認されている。

近年、電力用半導体の大容量化およびスイッチングの高速化が進み、数 10 kHz の高周波で、1,000 kW 程度の大容量のコンパクトなパワートランジスタ電源が開発されており、その適用範囲はさらに拡大しつつある。

連続焼鈍炉および溶融亜鉛めっきラインの前処理炉において、鋼薄板を還元加熱するために、従来、還元ガス雰囲気における管内燃焼のラジエントチューブによる間接放射加熱法が用いられている。この方式は、金属チューブの熱容量が大

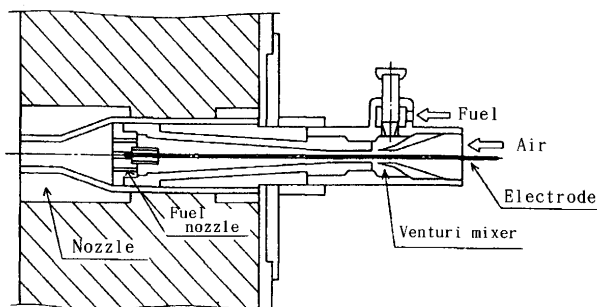


Fig. 4.18. Structure of pre-mix type reduction burner. (Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev., 29 (1992), No. 3, p. 184)

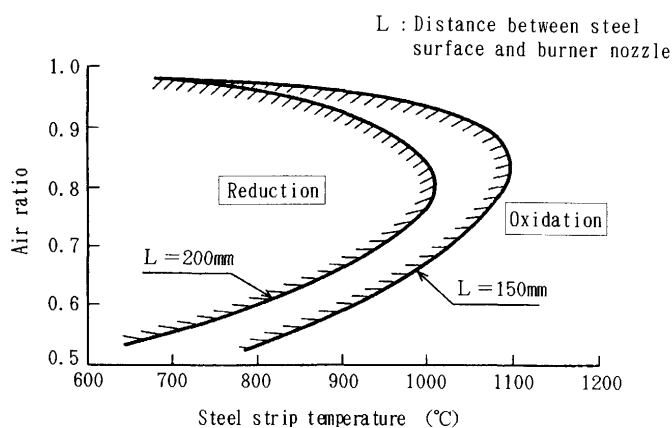


Fig. 4.19. Reduction and oxidation region of steel surface heated by impinging burner. (Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev., 29 (1992), No. 3, p. 184)

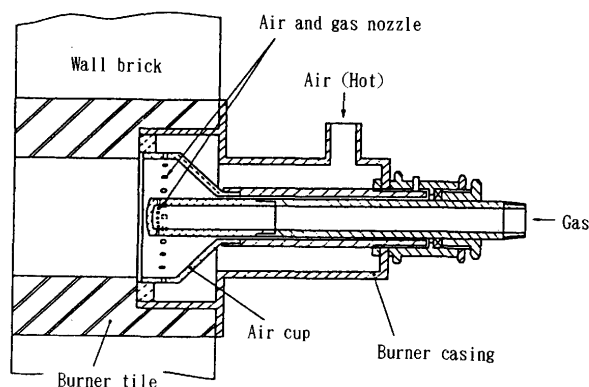


Fig. 4.20. Structure of nozzle-mix type reduction burner. (NKK Tech. Rep., (1989), No. 127, p. 120)

きいために、応答性の良い加熱が困難である。これに対して、直火加熱方式は、高温の火炎を鋼薄板に衝突させ、高温域まで応答性良く加熱しようとするものであり、さらに還元性火炎を用いることにより無酸化あるいは還元状態のもとで鋼板の加熱が可能である。

Fig. 4.18 に示す構造の還元バーナを用いて、燃料と空気を予混合して燃焼し、還元性を測定した例を Fig. 4.19 に示す。空気比 0.85 に対して、1,100°C まで鋼板を無酸化加熱できているが、燃焼ガスと鋼は平衡状態では還元状態になく、

何らかの非平衡反応が寄与していると考えられている。

この還元バーナを千鳥状に配置して、幅方向均一に還元加熱することにより、連続焼鈍炉の加熱帯が従来の約 1/5 に短縮可能となる。

また、Fig. 4.20 に示すノズルミックス燃焼型のバーナで空気流に旋回を与えて還元加熱を可能にしたものも開発された。

(2) 冷却技術

厚板圧延機においては、制御圧延のために、規定温度までの均一冷却が要求される。均一性を確保するために空冷する場合もあったが、設備長を短縮するために、最近では水冷却装置が積極的に用いられており、制御圧延と組合せて、圧延後に調質鋼を急速冷却して、溶接性の優れた高じん性高張力鋼を製造する熱加工制御法 (TMCP) が行われている。また、熱延後の薄板のランナウトテーブルにおいては、鋼板は所定の巻き取り温度まで冷却される。鋼板温度が 900~600°C と高い領域では、鋼板表面に蒸気膜が形成されるために (膜沸騰状態)、熱伝達は悪い。この冷却能力を高めるために、蒸気膜を破って、直接高温の鋼板と水が接触する冷却法として、鋼板上面に対しては管ラミネーおよびスリットラミネーが、下面に対してはスプレーおよび水噴流が、従来から用いられている。

ランナウトテーブルにおいては、冶金的品质を確保するために、鋼板巻き取り温度精度が厳しく、冷却性能の細かい制御が行われている。また、高炭素鋼に対しては、強冷却すると割れが発生する場合があるので、ラミネー冷却帯の固液直接接触による強冷却を緩和した緩冷却法として、スプレー冷却やミスト冷却が実用化されてきている。ミスト冷却は、いわゆる空気と水の二流体ノズルから噴出される噴霧で冷却する方式で、低水量においても、均一な水量密度が得られ、しかも、空気流速の増大とともに熱流束を高くできるという特徴があるので、緩冷却に適している。

これらのオープンスペースでの水冷却においては、水の沸騰現象が冷却能力を支配している。水の沸騰現象は、鋼材表面温度、物性、および表面状態によって異なるため、変形や割れの防止、品質の確保のための冷却速度、および冷却終了温度の制御が困難であるが、この水冷却法は、装置が単純であるため、多く用いられている。

今後も鋼材の熱処理に関する研究がさらに進むと思われるが、水の沸騰現象を制御することもさることながら、水の冷却特性を考慮して、材質設計を行うといったことも必要である。

冷間圧延後の鋼薄板を焼鈍する連続焼鈍炉の冷却帯においては、還元雰囲気中で鋼薄板を急速冷却する必要があり、雰囲気ガスを循環・冷却して衝突させるガスジェット冷却および冷媒を流して低温に保たれたロールに鋼薄板を接触させるロール冷却が行われている。

急速冷却する際に、ガスジェットを高速にすると、気流に

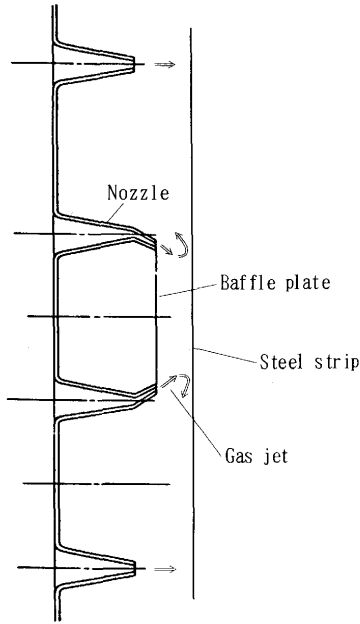


Fig. 4.21. Nozzle for gas cushion. (*Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, 26 (1989), No. 1, p. 34)

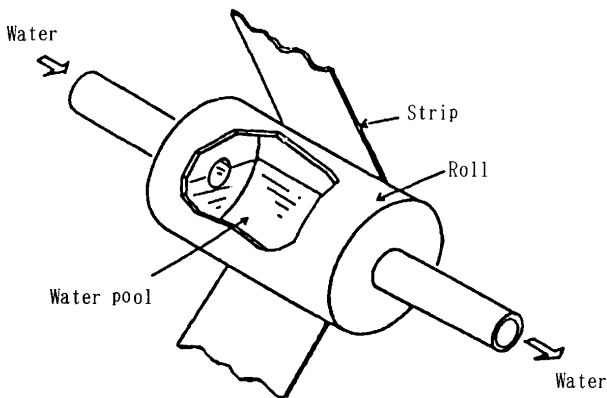


Fig. 4.22. Conventional roll cooling system.

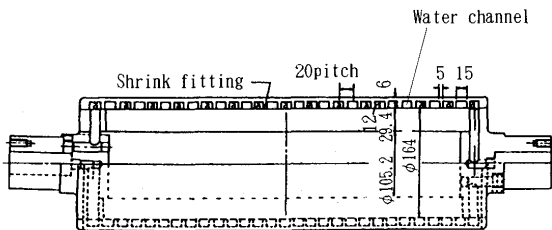


Fig. 4.23. Cooling roll with water channel in shell. (*CAMP-ISIJ*, 4 (1991), p. 596)

よる鋼薄板の振れが発生するので、気流を制御して振れを防止する Fig. 4.21 に示す構造のガスクッションノズルが用いられている。バッフルプレートをはさんだ上下のノズルから鋼板に対して内向きのある角度をもって噴出した流れは、鋼板に衝突すると反転する。この運動量変化分がバッフルプレート前面の圧力を増大する。鋼板がバッフルプレートに近づくと、バッフルプレート前面の圧力は増大するので、鋼板のノズルまたはバッフルプレートへの衝突を防止できる。

また、ロール冷却装置は、Fig. 4.22 に示すように、ロール

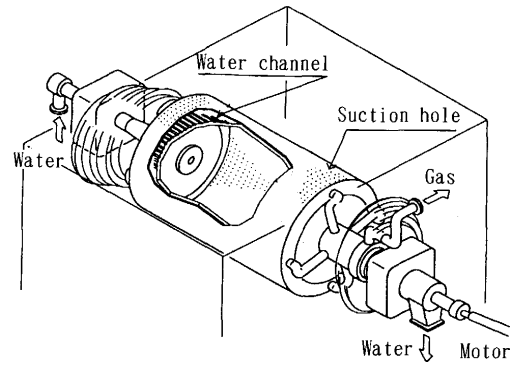


Fig. 4.24. Suction roll cooling system.

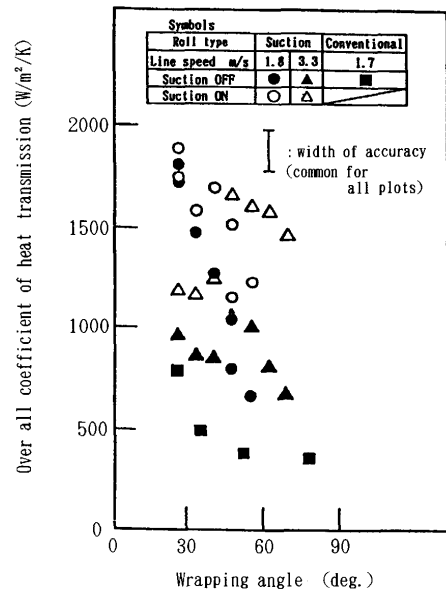


Fig. 4.25. Experimental results of roll cooling system heat transfer. (*Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, 58 (1992), No. 444, p. 3452)

内に冷却水をポンド状に保ち通水する方式である。ロール冷却において、ロールと鋼薄板との接触状態が冷却速度および冷却むらに影響する。条件によっては、ロールシェル内の温度分布による変形（サーマルクラウン）が大きくなり、鋼薄板と接触しない領域が発生したり、走行する鋼薄板に同伴するガス流によって、冷却ロールと鋼薄板の間に薄いガス層が形成されるために、冷却能力が低下することがあったが、ロールシェルに冷却水チャンネルを設けた Fig. 4.23 に示す冷却ロールや、ロールシェルに冷却水チャンネルを設けるとともにガス層を吸引するサクシオン穴を設けたサクシオン冷却ロールにより、これらが大幅に改善された。Fig. 4.24 にサクシオン冷却ロールの構造を、Fig. 4.25 に従来の冷却ロールと比較した伝熱性能を示す。Fig. 4.25 より、サクシオン冷却ロールの場合に、大きい巻付角度でも高い熱通過率が得られることがわかる。

最近では、還元雰囲気中におけるこれらの冷却方法の他に、下工程で軽酸洗することを前提に、ミスト冷却法を用いて鋼板を急速冷却することにより、高張力鋼板を製造することが行われつつある。

(3) 今後の展望

以上に加工・焼鈍工程において、品質向上、設備長短縮および省エネルギーに寄与してきた技術の中で、特に進歩の著しいものを中心に示した。

上流の casting 工程から下流の表面処理工程に至るまで、製鉄プロセスは今後もさまざまな改良や開発が行われ、それに伴って各プロセスに最適な加熱・冷却技術が開発されねばならない。

特に焼鈍後の後処理プロセスは、近年ますます多種多様になってきており、レーザやプラズマ、電子ビームを用いた加熱・表面改質技術が必要になるであろう。

4.3.3 操業プロセス技術

板圧延に関する最近 10 年間の操業プロセス技術の進展について述べる

板圧延技術の最近の進歩を大きく分けると三つに分類できると思う。

第 1 は、製品品質向上を目指した高精度圧延であり、製品の厚み、形状、幅などの精度向上は著しいものがある。

第 2 は、プロセスの連続化技術である。連続 casting とホットストリップミルとの連続化、冷延工程の連続化、CC スラブ利用技術の拡大など連続化技術が追求された。

第 3 は、高機能材圧延技術である。具体的には、圧延と熱処理を組み合わせた制御圧延、制御冷却、クラッド材圧延技術などが開発された。

しかし、これらの圧延技術の多くは 1980 年代の前半までに基本的技術は開発されており、最近の 10 年間は主として、計測機器の整備、制御モデル、制御ロジックの精度向上などによる技術のレベルアップ、ポリッシュアップが図られた。

以下、厚板圧延、薄板熱、冷延などの板圧延各プロセスにおける最近の技術進歩について述べる。

(1) 厚板圧延

コンピュータコントロールの導入、油圧圧下と絶対値 AGC の組み合わせによる板厚精度向上、平面形状の矩形化技術(MAS (Mizushima Automatic Plan View Pattern Control System) 圧延法、DBR (Dog Bone Rolling) 圧延法)などは 1980 年代の前半に開発されており、最近 10 年間はこれらの技術のレベルアップに加え、クラウン・形状制御、クラッド材圧延技術などが開発された。厚板圧延の技術進歩の概要を Fig. 4.26 に示す。

イ. 高精度圧延

最近の大きな技術開発は厚板圧延における形状クラウン制御である。厚板圧延機はワークロール径に比して胴長が長いので、ワークロールベンダーの効果があまりない。このため従来は、形状クラウンを目標に向けて制御することと、目標板厚実現という二つの機能をドラフトスケジュールを正確に計算し、クラウン比率一定のパススケジュールをとることで実現してきた。しかしこの方式は目標板厚近傍では圧延

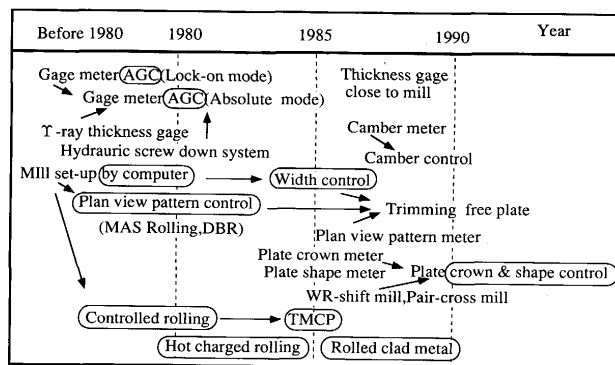


Fig. 4.26. Recent development of rolling technology in plate mill.

荷重を下げなければならないこと、モデル誤差、プロセス外乱などの取り扱いがむずかしいなどの問題があった。

昭和 60 年代に入って NKK 福山厚板工場にワークロールシフト付き圧延機が導入され、シフト量とベンダ圧力を制御することにより、クラウン制御が可能となった。形状クラウン制御機能と圧下機能を分離することにより、従来から行われてきたクラウン比率一定の荷重配分をとる必要がなくなったため、仕上げ付近での圧延荷重が大きくとれるようになり、圧延能率が向上するとともに、薄物圧延の領域が拡大した。また、絶対値 AGC などによって生じる圧延荷重変化による形状クラウン変化をダイナミックに制御することも可能となった。同時に、ワークロールシフト機能を活用した圧延時の幅制約フリー化技術が開発され、工程運用の自由度が増加した。

その後、新日本製鐵(株)君津、大分の各製鉄所にもベアクロスミルなどの形状制御機能が強化された圧延機が導入されている。今後は、厚板圧延機においても、形状クラウン制御機能は不可欠になっていくと思う。

厚板製品の歩留り向上のためには、平面形状の矩形化が重要である。平面形状制御に関しては MAS 圧延法、DBR 圧延などの基本的な技術は 80 年代の前半に開発されたが、最近の技術としては、近接エッジを用いた幅精度向上技術がある。この方法は製品側面のまくれ込みや、バルジングによる側面形状不良によるロスを削減すると同時に、サイドクロップ、TB クロップも減少させるものである。これらの技術を総合したものとして、MAS 圧延法とエッジング技術を組み合わせて、大幅な歩留り向上を達成した川崎製鐵(株)水島厚板工場の TFP (Trimming Free Plate) 技術がある。

板厚制御に関しては、油圧圧下を利用した AGC のポリッシュアップが図られた。例えば、圧延機を中心から 2 m のところに設置された近接板厚計の活用によりゲイジメーター式精度アップ、モニター AGC 制御範囲の拡大などにより板厚精度が大幅に向上した。板厚精度として板長 30 m 以下で $\sigma = 61 \mu\text{m}$ 、板長 30 m 以上で $\sigma = 45 \mu\text{m}$ というような結果も得られている。