

紙の乾燥過程における温度分布と水分率分布の同時測定*

星 要之介*¹, 久野 広明*¹, 橋本 律男*²
岩 淵 牧男*³, 柳 謙一*², 吉田 駿*⁴Simultaneous Measurements of Temperature and Moisture Content Profiles
of Paper in Drying ProcessYounosuke HOSHI, Hiroaki KUNO, Rituo HASHIMOTO,
Makio IWABUCHI, Kenichi YANAGI and Suguru YOSHIDA

A method of measuring changes not only of the temperature profile, but also of the moisture profile of paper in a drying process is established. Thin electrodes on which is laden high-frequency voltage are inserted between paper sheets, and the impedance between the electrodes is measured in order to evaluate the moisture profile. Also thin thermocouples are inserted between the paper sheets in order to measure the temperature profile. A moist paper to be dried is attached to a hot roll on one side, and a canvas is attached to that on the other side in which hot air flows. The change of temperature profile and that of moisture profile in this drying process are measured at the same time. The temperature of the roll side of the paper increases more rapidly than that of the canvas side and the paper moisture of the roll side decreases more rapidly than that of the canvas side. As a result, it is confirmed that it is necessary to deal with a paper sheet as a porous material to accurately predict its drying process.

Key Words: Drying, Porous Media, Mass Transfer, Moisture Measurement, Temperature Measurement, Hot Surface Drying

1. 緒 言

紙は抄紙機によって工業的に生産される。抄紙機のドライヤにおいては、乾燥速度増大によるライン長の短縮あるいは生産速度の増大、および温度と湿度の変化に対する寸法変化が鈍感な紙の抄造が必要とされている。

紙は木材繊維から構成される異方性を有する多孔質体⁽¹⁾で、乾燥過程においては、蒸発した水蒸気の再凝縮および液状水の毛管移動を伴う複雑な現象である⁽²⁾。

通常、紙は蒸気によって内側から加熱されるロールの外表面に巻き付けて加熱、乾燥されるが、誘電加熱および真空の適用、急速加熱の検討などの新しいプロセスを考える場合には、紙内部での現象、すなわち紙厚み方向の温度分布と水分率分布の時間変化を測定し、熱移動および物質移動を解明しておく必要がある。

る。しかし、紙は薄いので、乾燥中の水分率変化を測定した例はない。

本報では、乾燥過程における紙内部の温度および水分率の変化を同時に測定する方法を開発し、それを用いて紙の乾燥過程を実験的に調べた結果について述べる。

2. 水分率分布の計測方法

湿紙内の温度分布は湿紙の層間に微小径の熱電対を挿入することによって容易に測定できるので、ここでは、同時に水分率を測定する方法を検討した結果について述べる。検討に用いた紙は、絶乾時坪量 0.060 kg/m²、幅 125 mm、長さ 250 mm の手すき紙を 3 枚重ねたものである。湿紙の水分率を式(1)のように定義し、本検討で設定する水分率は直接重量を測定することにより求めた。

$$\text{水分率} = \frac{\text{湿紙重量} - \text{絶乾重量}}{\text{湿紙重量}} \dots\dots\dots (1)$$

なお、絶乾重量は、紙を 110°C にして 2 h 空気中で乾燥させて測定される。

2・1 測定の原理 湿紙中の電極間インピーダンスが水分率依存性を有することを利用して、湿紙の水分率を計測する。この方法は、コンクリートの水分率

* 原稿受付 1996年4月18日。

*¹ 正員、三菱重工業(株)技術本部(☎729-03 三原市糸崎町5007)。*² 正員、三菱重工業(株)技術本部(☎733 広島市西区観音新町4-6-22)。*³ 正員、富山大学工学部(☎930 富山市五福3190)。*⁴ 正員、九州大学工学部(☎812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

分布を測定する際に適用されたもの⁽³⁾と原理は同じであるが、コンクリートと湿紙では、材質、厚さおよび水分率が異なるので、湿紙への適用性について検討した。

2本の電極間のインピーダンス Z は次式で示される。

$$Z = [R^{-2} + (\omega c)^2]^{-0.5} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- Z : インピーダンス Ω
- R : 抵抗成分 Ω
- ω : 角振動数
- c : 容量成分 F

図1に示すように、電極に流れる電流 I を求めるために、基準抵抗 R_0 を回路に直列に挿入すると、

$$I = \frac{E_0}{R_0} = \frac{E_2}{Z} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、

$$Z = R_0 \frac{E_2}{E_0} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

- E_0 : 基準電圧 V
- E_2 : センサ電圧 V
- R_0 : 基準抵抗 Ω
- I : 電流 A

紙層厚み方向の水分率分布を計測する場合、図1に示した回路を有する電極対を紙層間に設置すればよい。本研究では、電極として線径 $25 \mu m$ 、電極部長さ $100 mm$ の K 形熱電対の素線を用い、厚さ約 $200 \mu m$ の1層の紙を挟んで電極を設置し、その上下に1層ずつの紙を重ねて加圧してテスト部を作成した。電極を設置する際、素線を直線に張り、2本の電極が目視で同位置に重なるようにして平行になるように注意した。電極と導線ははんだで接続され、接続部および素線の電極部以外の部分はシリコン接着剤で絶縁された。なお、K 形熱電対の素線のうち、クロメルとアル

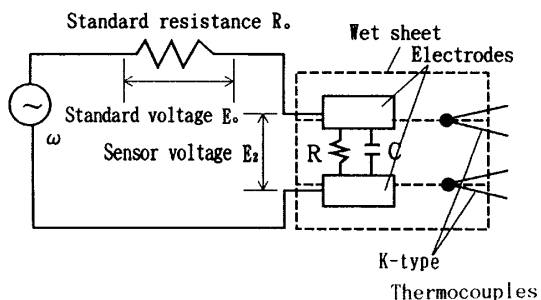


Fig.1 A method of measuring impedance of the wet paper

メルのどちらの素線を電極に用いても、測定値に差がないことを確認した。

さらに、図1に示すように、線径 $25 \mu m$ の K 形熱電対を紙層間に設置して紙温度も測定した。

2.2 電源周波数と基準抵抗値の選定

測定値に及ぼす電源周波数および基準抵抗値の影響を実験により調べた。

電源電圧は、高いほど測定精度が向上するが、電極間の発熱および安全性を考慮して、本研究では $5 V$ とした。また、電極間の分極作用を避けるために交流を用いた。

紙の温度を $30^\circ C$ に保ち、基準抵抗を変えてセンサ電圧を測定した結果を図2に示す。水分率が高くなるにしたがってセンサ電圧は低くなり、その変化量は基準抵抗が高いほど大きい。すなわち、基準抵抗を大きくしたほうが測定精度はよくなるのがわかる。したがって、本実験では基準抵抗を $100 k\Omega$ とする。

温度を $30^\circ C$ に保ち、交流周波数を変えてセンサ電圧を測定した結果を図3に示す。水分率が高くなるにしたがってセンサ電圧は低くなり、その変化量は交流周波数が高いほど大きい。すなわち、交流周波数を高にしたほうが測定精度はよくなるのがわかる。したがって、本実験では交流周波数を $1 kHz$ とする。

2.3 温度の影響

電極間の水の導電率が温度によって変化するので、電極間抵抗は温度依存性を有す

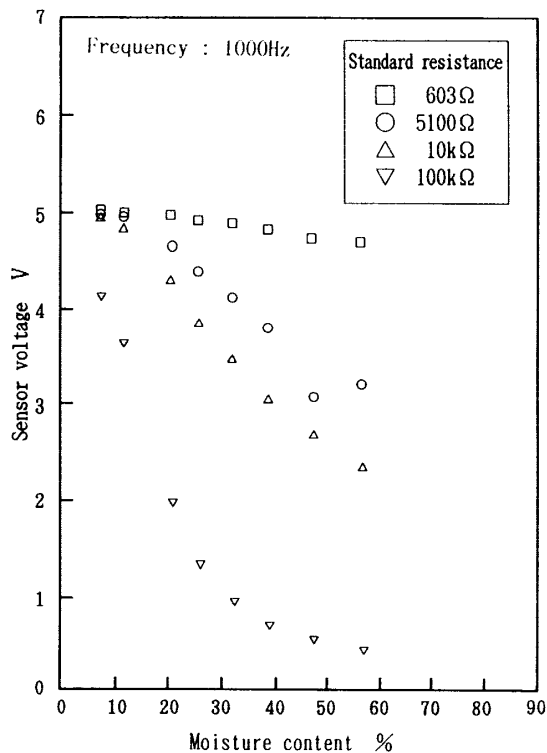


Fig.2 Effect of standard resistance

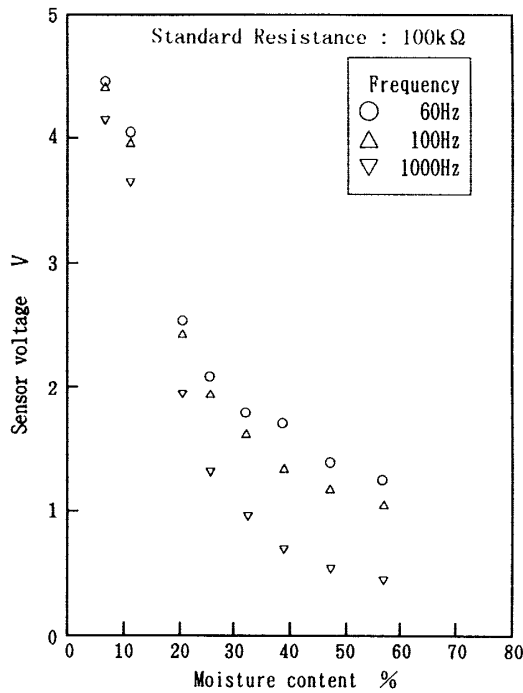


Fig. 3 Effect of alternating current frequency

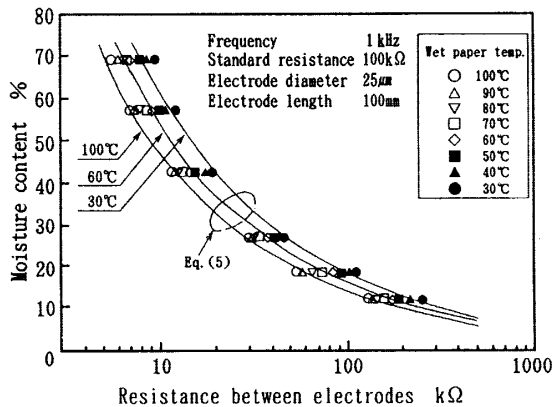


Fig. 4 Effect of wet paper temperature

と考えられ、温度をパラメータとして検定しておく必要がある。そこで、空気を流して紙をゆっくりと乾燥させて水分率を調整した後、ビニールで包み恒温槽内で湿紙温度を調整し、検定を行った。

湿紙温度をパラメータとして水分率と電極間電気抵抗を測定した結果を図4に示す。水分率が等しい場合、温度が高くなるほど電極間抵抗は小さくなっている。図示したように、水分率は、電極間抵抗と湿紙温度の関数として、次式で表されることがわかる。

$$M = (216.1 - 0.617T)R^{-0.510} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

- M : 水分率 %
- T : 湿紙温度 °C
- R : 電極間抵抗 kΩ

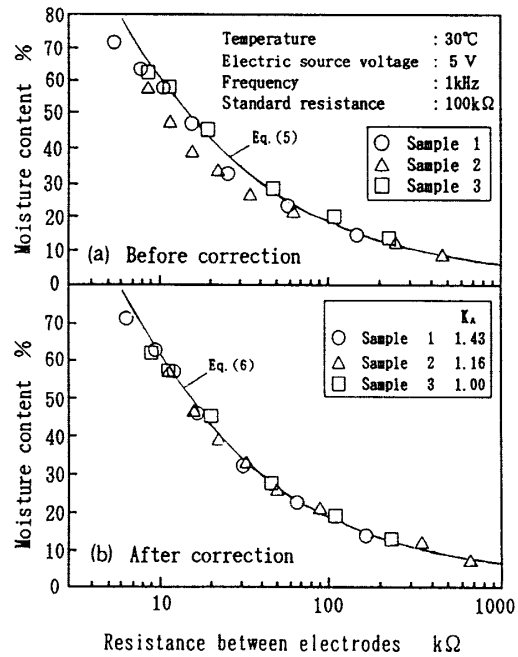


Fig. 5 Experimental results of investigating reappearance

2.4 再現性の確認 実際には実験条件ごとに電極を設置する紙をすく必要があるため、再現性を確認しておく必要がある。そこで、三つのサンプルを作り、電極間抵抗を測定した結果が図5(a)である。図5(a)に示すように、電極間抵抗は同一水分率の場合でも、サンプルによって若干異なる値となった。これは抄紙して電極を設置するごとに電極間距離が異なるためと考えられる。水分率が変化しても紙ごとの電極間距離の比率は一定と考え、初期水分率における電極間抵抗の比率 K_A で、次式で示すように式(5)を補正した。

$$M = (216.1 - 0.617T)(K_A R)^{-0.510} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$K_A = \frac{R_m}{R_s} \dots\dots\dots (7)$$

R_m : 実験に用いる湿紙の初期水分率 M_s における電極間抵抗 kΩ

R_s : 水分率 M_s に対して式(5)から求まる電極間抵抗 kΩ

図5(a)を式(6)のように補正した結果を図5(b)に示す。図5(b)より式(6)の補正が適正であることがわかる。したがって、本実験では式(6)の関係を利用する。

3. 乾燥実験装置

乾燥実験装置の構成を図6に示す。この装置は抄紙

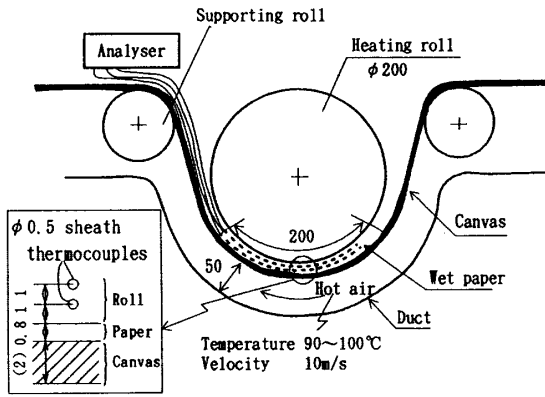


Fig. 6 Experimental apparatus

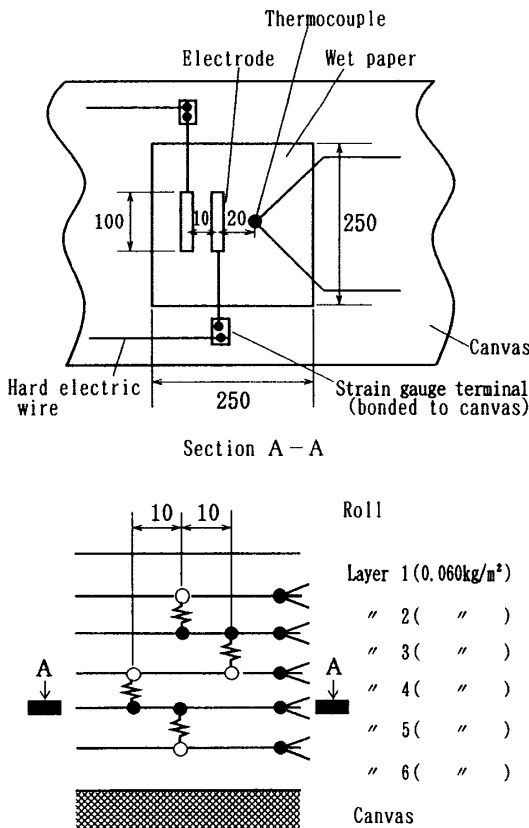


Fig. 7 Arrangement of electrodes and thermocouples

機のドライヤを模擬したものであり、加熱ロール、サポートロール、キャンバスおよび温風流路から構成されている。テストする湿紙の片面は加熱ロールに接触し、他方の面は湿紙の変形を防ぐためにキャンバスで押さえられている。キャンバスに沿って幅 50 mm の温風流路が設けられており、ここに温度と湿度が調整された空気が供給される。湿紙は加熱ロールによって加熱されるとともに、キャンバス表面を流れる温風によって乾燥する。加熱ロールは表面にクロムめっきされた

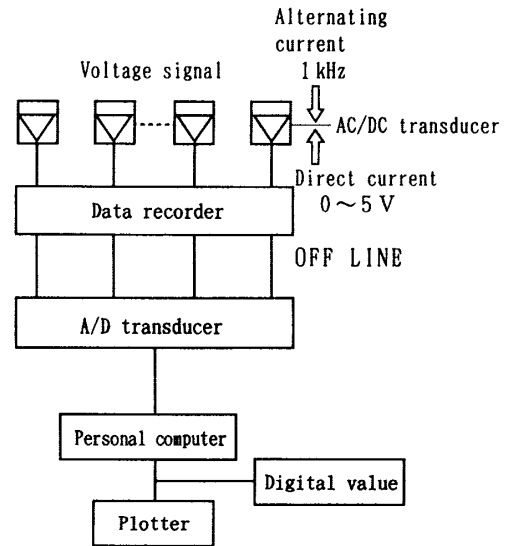


Fig. 8 Measurement system

S45C 製で、外径は 200 mm、奥行きは 350 mm であり、内部に設けた電気ヒータによって加熱される。ロールの外表面から深さ 1 mm と 2 mm の位置に外径 0.5 mm の K 形シース熱電対が埋め込まれている。

湿紙は 6 層から成り、水分率が高い状態で熱電対および水分率センサを図 7 に示すように固定した後、350 kPa の荷重を 5 min 与えて、水分率を約 70% にする(この初期水分率の正確な値は直接重量を測定して求めた)とともに各層を密着させる。その後、湿紙の片面をキャンバスに固定し、他面を加熱ロールに接触させて、乾燥実験を開始する。

図 8 に計測システムを示す。基準電圧および電極間電圧を交流変換器で直流電圧に変換し、データレコーダに収録する。また、各層間に配置した熱電対から層間の算術平均温度を求め、式(6)により水分率を計算する。

4. 乾燥実験結果

4.1 乾燥中の水分率測定 まず、乾燥実験装置で乾燥する途中の水分率分布の測定に対して、センサを用いる前述の方法の適用性を確認する実験を行った。乾燥開始 40 s 後にセンサを用いて水分率を測定するとともに、次のようにして重量法により水分率を測定した。すなわち、乾燥装置から供試湿紙を取り出して速やかに 6 枚に引きはがし、それぞれあらかじめ重量を測定してあるビニール袋に入れて密閉する。次に、ビニール袋ごと精密てんびんで重量を測定する。その後、供試湿紙をビニール袋から取り出し、オープンに入れて絶乾状態まで乾燥させて絶乾時の重量を測

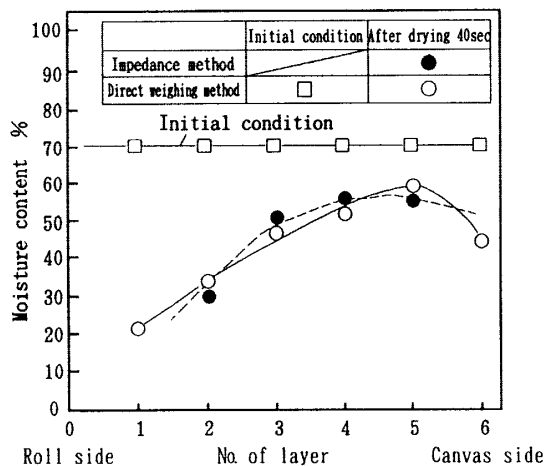


Fig. 9 Comparison between measured moisture content with electrodes and measured moisture content by weighing test sample

定し、式(1)から水分率を求める。

図9に乾燥開始40s後の湿紙の水分率分布をセンサにより測定した結果と重量法により測定した結果を比較して示す。両者はよく一致しており、乾燥中の水分率分布をセンサを用いて測定できることがわかる。

4.2 乾燥中の温度および水分率変化 乾燥中における紙の厚さ方向各位置の温度変化および水分率変化の測定結果をそれぞれ図10および図11に示す。

図10、11の横軸の時間は、測定開始からの時間であるが、ロールと紙が接触開始した時刻は計測開始後2sの時点であり、湿紙は加熱ロール表面に近い部分から急激に温度上昇する。紙の温度上昇は飽和温度100°Cに近づくと次第に緩やかになり、やがて変化しなくなる。一方、加熱ロールは逆に最初の1~2sの間に初期温度130°Cから急激に低下し、その後約5°C温度回復している。これは、湿紙と加熱ロールが接触した瞬間に非常に高い熱流束で加熱ロールが冷却されるのに対し、加熱ロール内部からの熱伝導による熱の補給が遅れるためであると考えられる。その後再びロール温度が若干低下しているが、この原因は今のところ不明であり、今後理論解析によって明らかになると思われる。

湿紙の温度変化が少ない時間帯(約30s間)においては、加熱ロール厚さ方向の温度差がほぼ一定であることから、熱流束はほぼ一定であると考えられる。このとき、加熱ロール表面温度を加熱ロール内温度分布から外挿して求めると、紙の加熱面に最も近い部分の温度とほぼ等しいことがわかった。したがって、紙と加熱ロールの接触熱抵抗は無視できると推定される。

その後、加熱ロール内の温度差は次第に減少してい

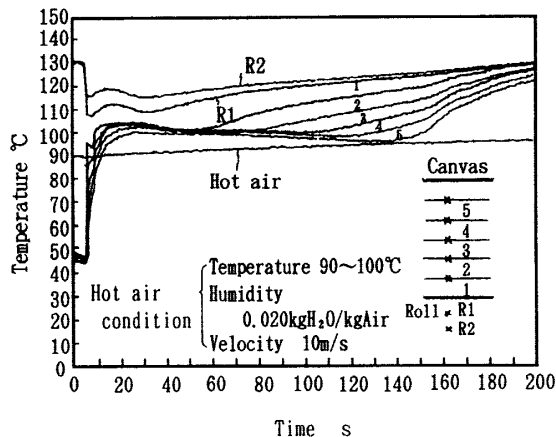


Fig. 10 Temperature transition of the drying paper

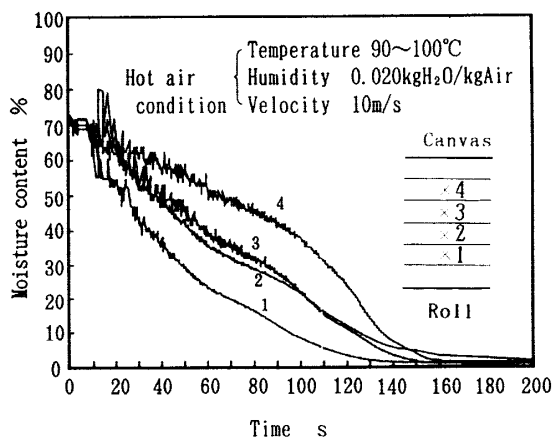


Fig. 11 Moisture content transition of the drying paper

くので、熱流束が減少していることがわかる。この時間帯から紙厚さ方向の各点間の温度差が加熱ロールに近いほうから順に大きくなっていく。乾燥が終了に近づくと、再び紙厚さ方向の温度差は小さくなる。

湿紙の水分率は温度が上がると同時に減少し始め、初めは加熱ロールに近いほうほど減少率は高く早く乾燥する。湿紙が加熱ロール側から乾燥していくことは、紙が多孔質体であることを示している。多孔質体内部においては、全圧差によるガス流動、水蒸気と空気の相互拡散、液状水の毛管移動などの複合現象を解明する必要がある。

5. 結 言

坪量0.060 kg/m²の手すき紙を積層し、各層間に線径25 μmの熱電対のほか、線径25 μm、長さ100 mmの電極を埋込み1 kHzの高周波を印加することによって、湿紙厚さ方向の温度分布のみならず水分率分布の時間変化を測定する手法を確立した。

湿紙の片面を加熱ロールに接触させ、他面に温風を流した場合の紙厚さ方向の温度分布と水分率分布の時間変化を本手法を用いて測定した。湿紙は加熱ロール面に近い部分から温度上昇し、加熱ロールに近い部分から乾燥していくことが明らかになった。

このことから、湿紙の乾燥過程を正確に予測するためには、紙を多孔質体として考える必要があることが

確認された。

文 献

- (1) 門屋卓・角祐一郎・吉野勇, 紙の科学, 中外産業調査会, (1977), 329-332.
- (2) Lee, P. F. and Hinds, J. A., *Tappi*, **64**-12 (1981), 39-44.
- (3) 一瀬賢一・長尾覚博・中根淳, 大林組技術定研所報, **32** (1986), 107-111.